

การเกิดเซนซีไทเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิม 304
ที่ผ่านกระบวนการความร้อนเชิงกล



นางสาวภทริศา พุ่มพฤษ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-0958-5

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SENSITIZATION OF THERMOMECHANICALLY PROCESSED
304 STAINLESS STEEL



Miss Patrisa Pumpruek

สถาบันวิทยบริการ

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

Department of Nuclear Technology

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2001

ISBN 974-03-0958-5

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเกิดเซนซีไทเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่ผ่านกระบวนการ การความร้อนเชิงกล
โดย	นางสาวภัทริศา พุ่มพฤษ์
สาขาวิชา	นิเวศวิทยเทคโนโลยี
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิศิษฐ์ ทวีปริงษ์พร
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์เดโช ทองอ่วม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์นเรศร์ จันทน์ขาว)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิศิษฐ์ ทวีปริงษ์พร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(อาจารย์เดโช ทองอ่วม)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์อรรถพร ภัทรสุมันต์)

ภทริศา พุ่มพฤษ : การเกิดเซนซีไทเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่ผ่านกระบวนการ ความร้อนเชิงกล. (SENSITIZATION OF THERMOMECHANICALLY PROCESSED 304 STAINLESS STEEL) อ. ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.วิศิษฐ์ ทวีปรังษีพร, อ. ที่ปรึกษาร่วม : อ.เดโช ทองอร่าม, 53 หน้า. ISBN 974-03-0958-5.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์หลักคือ ปรับปรุงเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ให้มีความ ต้านทานต่อการเกิดเซนซีไทเซชันตามขอบเกรนโดยกระบวนการความร้อนเชิงกล สามารถทำได้ โดยผ่านการอบที่อุณหภูมิ 900°C ระยะเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นให้ความเครียดที่ 3% ตาม ด้วยการอบที่อุณหภูมิ 900°C ระยะเวลา 3 นาทีอีกครั้ง ขึ้นงานที่ผ่านกระบวนการความร้อนเชิงกล และถูกเซนซีไทเซชันเป็นเวลา 8 ชั่วโมงที่ 650°C เมื่อนำไปทดสอบในสารละลายเฟอริกซัลเฟต- กรดซัลฟูริก สามารถเพิ่มประสิทธิภาพต้านทานการกัดกร่อนได้ 38% ถึงแม้ว่าสัดส่วนขอบเกรน ชนิด Coincidence Site Lattice ไม่เปลี่ยนแปลง แต่กระบวนการความร้อนเชิงกลอาจส่งผลให้มีการปรับตัวที่บริเวณขอบเกรน โดยการศึกษาจากการแจกแจงการกระจายตัวของมุมการลาดเอียง ของขอบเกรน พบว่าขึ้นงานที่ผ่านกระบวนการความร้อนเชิงกลมีการจัดเรียงตัวที่เปลี่ยนไปโดยอยู่ ในช่วง 20-40 องศา ซึ่งส่งผลให้เกิดการต้านทานการกัดกร่อนของโครเมียมคาร์ไบด์และทนทานต่อ การกัดกร่อนบริเวณขอบเกรนในที่สุด

เมื่อจำลองการผลิตกระบวนการความร้อนเชิงกลเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในเชิงของ ต้นทุน ปริมาณการผลิต และผลกำไร เปรียบเทียบกับกระบวนการผลิตของโรงงาน โดยคิดราคา จากการอ้างอิงประสิทธิภาพอัตราการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดอื่น พบว่าเวลา มาตรฐานการผลิตของกระบวนการความร้อนเชิงกลนานกว่าเป็นผลให้ขาดทุน และเพื่อให้ได้ผล กำไรในปีแรกเท่าเดิมได้ จำเป็นต้องลดเวลามาตรฐานการผลิตลงโดยการลดเวลารวมกระบวนการ ความร้อนเชิงกลลงและเพิ่มกำลังการผลิต

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา นิเวศลิษฐ์เทคโนโลยี
สาขาวิชา นิเวศลิษฐ์เทคโนโลยี
ปีการศึกษา 2544

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

##4170453321 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEY WORD: THERMOMECHANICAL PROCESSING / SENSITIZATION /
INTERGRANULAR CORROSION

PATRISA PUMPRUEK : SENSITIZATION OF THERMOMECHANICALLY
PROCESSED 304 STAINLESS STEEL. THESIS ADVISOR : ASST.PROF.DR.
VISIT THAVEEPRUNGSRIPOORN, THESIS COADVISOR : DECHO THONG-
ARAM, 53 PP. ISBN 974-03-0958-5.

The objective of this thesis was to develop a thermomechanical process, which can improve sensitization in 304 stainless steel. The process consists of heat treating the as-received specimen at 900°C for 1 hr followed by a 3% reduction in thickness, and then heat treated at 900°C for 3 min. After 8 hr of sensitization at 650°C, weight loss measurements in boiling ferric sulfate-sulfuric acid solution indicated that the thermomechanically treated samples show 38% improvement. Although thermomechanical processing did not change its coincidence-site-lattice fraction but investigation on grain boundary inclination distribution indicated that the thermomechanical processing causes a change in its distribution with higher frequency around 20-40° angle and results in a higher resistance in chromium carbide formation, and thus intergranular corrosion resistance.

The thermomechanical processing production was simulated to analyze Cost-Volume-Profit compared with normal production by reference cost to weight loss ratio performance of other stainless steel types. It was found that the standard time of thermomechanical processing production is longer which leads to a loss in the first year. To be competitive the standard time must be decreased in the total thermomechanical processing time and capacity must also be increased to achieve the same level of profit as in the normal process in the first year.

Department	Nuclear Technology	Student's signature.....
Field of study	Nuclear Technology	Advisor's signature.....
Academic year	2001	Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.วิศิษฐ์ ทวีปรังษีพร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และ
อาจารย์เดโช ทองอร่าม อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ซึ่งเป็นผู้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ในการ
วิจัยด้วยดีตลอด

ขอขอบคุณบริษัทไทยน็อคซ์ สตีล จำกัด ที่อนุเคราะห์เหล็กกล้าไร้สนิม 304 และ 316L
เพื่อใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณเพื่อน พี่ และ น้องในภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี ที่ให้ความช่วยเหลือ และ
คำแนะนำที่มีประโยชน์ในงานวิจัย

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือและวิจัยวิทยาศาสตร์ที่ช่วยเหลือในการใช้กล้อง
จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ซึ่งสนับสนุนด้านการเงินและให้กำลังใจด้วยดี
เสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	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.....	3
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2. การกัดกร่อนบริเวณขอบเกรน.....	5
2.1 คำนำ.....	5
2.2 Grain Boundary Chromium Depletion.....	5
2.3 การป้องกันเซนซีไทเซชัน.....	6
2.4 การทดสอบด้วยสารเคมี.....	6
3. กระบวนการความร้อนเชิงกล.....	12
3.1 คำนำ.....	12
3.2 Grain Boundary Geometry.....	12
3.3 กระบวนการความร้อนเชิงกล.....	13
3.4 Cumulative Frequency of Dihedral Angle Distribution	14
3.5 การลาดเอียงของขอบเกรน.....	16
4. การทดลอง.....	18
4.1 คำนำ.....	18
4.2 กระบวนการความร้อนเชิงกล.....	18
4.3 Cumulative Frequency of Dihedral Angle Distribution	19

	หน้า
4.4 Electron Backscatter Diffraction Pattern	20
4.5 การลาดเอียงของขอบเกรน.....	20
4.6 การทดสอบเฟอริกซ์ลเฟต-กรดซัลฟูริก.....	21
5. ผลการทดลองและวิเคราะห์.....	23
5.1 คำนำ.....	23
5.2 กระบวนการความร้อนเชิงกล.....	23
5.3 ทดสอบการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรน	26
5.4 Cumulative Frequency of Dihedral Angle Distribution	33
5.5 Coincidence Site Lattice	34
5.6 การลาดเอียงของขอบเกรน.....	36
5.7 สรุป.....	39
6. ศึกษาความเป็นไปได้โครงการ.....	40
6.1 คำนำ.....	40
6.2 กระบวนการผลิต.....	40
6.3 ประเมินโครงการ 304AR และ 304TT.....	42
6.4 ประเมินโครงการลดเวลากระบวนการความร้อนเชิงกล.....	47
6.5 สรุป.....	49
รายการอ้างอิง.....	50
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	53

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 มาตรฐานการทดสอบการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรนของเหล็กกล้าไร้สนิม	7
ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของ mils per year (MPY) กับหน่วยอื่น.....	11
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิม 304.....	18
ตารางที่ 4.2 สรุปการทดสอบหากระบวนการความร้อนเชิงกล.....	19
ตารางที่ 5.1 สรุปผลของ strain annealing.....	23
ตารางที่ 5.2 ผล strain annealing ที่ 900°C.....	24
ตารางที่ 5.3 ผลการทดสอบการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรนเมื่อเปลี่ยนแปลง ปริมาณเฟอริกซัลเฟตและผ่านเซนซีไทเซชัน 2 ชั่วโมง	26
ตารางที่ 5.4 สรุปผลการทดสอบอัตราการกัดกร่อนที่เปลี่ยนแปลงระยะเวลา เซนซีไทเซชันที่ปริมาณเฟอริกซัลเฟต 50 กรัม.....	29
ตารางที่ 5.5 ผลทางสถิติของการกระจายตัว dihedral angle.....	33
ตารางที่ 6.1 ข้อมูลต้นทุนคงที่ ต้นทุนผันแปรและรอบเวลาการผลิตของแต่ละ กระบวนการผลิต 304AR.....	42
ตารางที่ 6.2 ข้อมูลต้นทุนคงที่โรงงานของกระบวนการผลิต 304AR.....	43
ตารางที่ 6.3 ข้อมูลต้นทุนคงที่ ต้นทุนผันแปรและรอบเวลาการผลิตของแต่ละ กระบวนการผลิต 304TT.....	43
ตารางที่ 6.4 ผลการทดสอบการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรน อัตราการสูญเสียน้ำหนัก กับราคาขาย (บาท/กก.).....	44
ตารางที่ 6.5 ประเมินโครงการกระบวนการผลิต 304AR และ 304TT.....	45
ตารางที่ 6.6 ชั่วโมงการทำงานใน 1 ปี.....	46
ตารางที่ 6.7 ผลการลดเวลากระบวนการความร้อนเชิงกลโดยทดสอบการกัดกร่อนบริเวณ ขอบเกรน อัตราการสูญเสียน้ำหนักกับราคาขาย (บาท/กก.).....	47
ตารางที่ 6.8 ประเมินโครงการกระบวนการผลิต 304TT ที่ลดเวลาลง.....	48

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 1.1 ปริมาณโครเมียมคาร์ไบด์ที่เซนซีไทเซชัน 650°C 2 ชั่วโมง ก) ผ่านกระบวนการความร้อนเชิงกล CSL 57% ข) ขึ้นงานจากโรงงาน CSL 40%.....	2
รูปที่ 2.1 การตกตะกอนของคาร์ไบด์บริเวณขอบเกรน.....	5
รูปที่ 2.2 ผลกระทบของความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของออกซิไดเซอร์ กับ active-passive ของเหล็กกล้าไร้สนิม.....	9
รูปที่ 3.1 การจัดเรียงตัวของ CSL แบบ Σ 5.....	13
รูปที่ 3.2 มุมและพลังงานของขอบเกรนที่เกิดขึ้น ณ Triple junction.....	15
รูปที่ 3.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจาย cumulative frequency of dihedral angle และการกระจายคุณสมบัติของขอบเกรน.....	15
รูปที่ 3.4 ก) ATB และ ข) asymmetrical twist หรือ general boundary.....	16
รูปที่ 4.1 เตาอบอุณหภูมิสูง.....	19
รูปที่ 4.2 อุปกรณ์สำหรับ electroetching และ electropolishing	20
รูปที่ 4.3 อุปกรณ์สำหรับการทดสอบเฟอริกซัลเฟต-กรดซัลฟูริก.....	22
รูปที่ 5.1 ปริมาณโครเมียมคาร์ไบด์ที่ 650°C 8 ชั่วโมง ก) 304AR และ ข) 304TT.....	25
รูปที่ 5.2 โครงสร้างจุลภาคของ ก) 304AR และ ข) 304TT	25
รูปที่ 5.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเฟอริกซัลเฟตกับอัตราการกัดกร่อน ของ 304AR และ 304TT หลังผ่านเซนซีไทเซชัน 2 ชั่วโมง.....	27
รูปที่ 5.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเฟอริกซัลเฟตกับอัตราการสูญเสียน้ำหนัก หลังผ่านเซนซีไทเซชัน 2 ชั่วโมง.....	27
รูปที่ 5.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดกร่อนกับชั่วโมงเซนซีไทเซชัน ปริมาณเฟอริกซัลเฟต 50 กรัม.....	29
รูปที่ 5.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสูญเสียน้ำหนักกับชั่วโมงเซนซีไทเซชัน ปริมาณเฟอริกซัลเฟต 50 กรัม.....	30
รูปที่ 5.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนคาร์ไบด์กับชั่วโมงเซนซีไทเซชัน.....	31
รูปที่ 5.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสูญเสียน้ำหนักกับอัตราส่วนคาร์ไบด์ หลังผ่านเซนซีไทเซชันเท่ากัน.....	31
รูปที่ 5.9 ผลการทดสอบการกัดกร่อนของ ก) 304AR และ ข) 304TT	

สารบัญภาพ (ต่อ)

๗

ภาพประกอบ	หน้า
ที่ผ่านเซนซิไทเซชัน 8 ชั่วโมง ปริมาณเฟอริกซัลเฟต 50 กรัม.....	32
รูปที่ 5.10 กราฟการกระจายตัว dihedral angle ของ 304AR และ 304TT.....	33
รูปที่ 5.11 กราฟการแจกแจงการกระจายตัว CSL ของ 304AR และ 304TT	34
รูปที่ 5.12 กราฟการแจกแจงการกระจายตัวของ misorientation angle ของ 304AR และ 304TT.....	35
รูปที่ 5.13 Inverse pole figure ของ ก) 304AR และ ข) 304TT.....	36
รูปที่ 5.14 กราฟการกระจายตัวของมุมการลาดเอียงของขอบเกรน ของ 304AR และ 304TT.....	37
รูปที่ 5.15 การลาดเอียงของขอบเกรน ก) 304AR ข) 304TT ที่ผ่านเซนซิไทเซชัน 8 ชั่วโมง ปริมาณเฟอริกซัลเฟต 50 กรัม.....	38
รูปที่ 5.16 ก) แจกแจงสัดส่วนขอบเกรนแต่ละประเภทและ ข) การกระจายตัวของ มุมการลาดเอียงของขอบเกรนของชิ้นงาน 700°C และ 800°C.....	39
รูปที่ 6.1 กระบวนการผลิต 304AR และ 304TT.....	41
รูปที่ 6.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสูญเสียน้ำหนักกับราคาของเหล็กกล้าไร้สนิม....	45
รูปที่ 6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังการผลิตและผลกำไรของกระบวนการผลิต 304AR และ 304TT (1000°C / 2นาที่).....	49

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

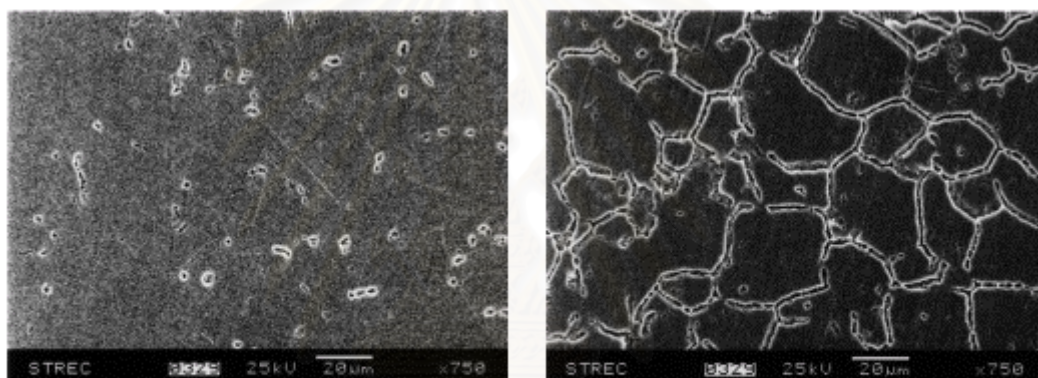
เหล็กกล้าไร้สนิม 304 เป็นวัสดุที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์และโรงงานอุตสาหกรรมทั่ว ๆ ไป เนื่องจากสามารถทนต่อการใช้งานในช่วงอุณหภูมิสูง และทนต่อการกัดกร่อนได้ดีกว่าโลหะประเภทอื่น เช่น ใช้ในงานท่อ หรือเป็นส่วนประกอบในเครื่องผลิตไอน้ำของโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ เป็นต้น แต่เมื่อนำเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ไปใช้งานในช่วงอุณหภูมิ 425-815°C ทำให้เกิดการตกตะกอนโครเมียมคาร์ไบด์บริเวณขอบเกรน โครเมียมที่คอยทำหน้าที่ป้องกันการกัดกร่อนสูญเสียไปเรียกว่าเซนซิไทเซชัน (Sensitization) ทำให้มีความไวต่อการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรน (Intergranular Corrosion; IGC)

ในทางปฏิบัติมีวิธีการป้องกันและแก้ไขการเกิดเซนซิไทเซชันได้ 3 วิธีคือ วิธีที่หนึ่ง ละลายโครเมียมคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นบริเวณขอบเกรนโดยการอบอ่อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 815°C วิธีที่สองเลือกใช้เหล็กกล้าไร้สนิม 347 และ 321 ซึ่งเป็นเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่เพิ่มเติมไททาเนียมและไนโอเบียมลงไปตามลำดับเพื่อจับตัวกับคาร์บอนได้ดีกว่า และสุดท้ายวิธีที่สามลดปริมาณส่วนประกอบของคาร์บอนให้ต่ำกว่า 0.03%[1] แต่อย่างไรก็ตามปัญหาการเกิดเซนซิไทเซชันยังคงปรากฏให้เห็นอยู่เนื่องจากการไม่สามารถกำจัดปริมาณคาร์บอนออกจากระบบได้ทั้งหมด เช่น โรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ชนิดน้ำเดือดของประเทศเยอรมันจำนวน 6 โรง เกิดปัญหาการแตกหักตามขอบเกรนเนื่องจากเซนซิไทเซชันในส่วนของท่อน้ำร้อนของเตาปฏิกรณ์ (reactor hot water pipes) ซึ่งทำมาจากเหล็กกล้าไร้สนิม 321 และอีก 1 โรงเกิดกับแกนปฏิกรณ์ (reactor core) ซึ่งทำมาจากเหล็กกล้าไร้สนิม 347[2]

จากการศึกษาของ P.Lin และคณะ[3] สามารถเพิ่มประสิทธิภาพ alloy 600 ที่นิยมใช้เป็นส่วนประกอบในท่อของเครื่องกำเนิดไอน้ำพลังงานนิวเคลียร์ (nuclear-steam-generator tube) ให้มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนตามขอบเกรนเพื่อยืดอายุการใช้งาน ด้วยกระบวนการความร้อนเชิงกล (Thermomechanical Processing) เป็นผลให้สัดส่วนจำนวน special grain boundary ซึ่งเป็นขอบเกรนประเภท Coincidence Site Lattice Boundary (CSLB) ($\Sigma \leq 29$) จากเดิม 37% เพิ่มมากขึ้นเป็นประมาณ 71% เมื่อทดสอบด้วย ASTM standard G28 ทั้งในสภาวะ solution annealed และเซนซิไทเซชัน ส่วนงานวิจัยของ E.M. Lehockey และคณะ[4] ทำการปรับปรุงคุณสมบัติของอิเลกโตรดในแบตเตอรี่รถยนต์ซึ่งทำจาก

สารประกอบตะกั่วให้มีการต้านทานต่อการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรนและปรากฏการณ์การแตกหักด้วยการคืบโดยกระบวนการความร้อนเชิงกล สามารถเพิ่มจำนวนจาก 10% special grain boundary จนมากกว่า 50% ซึ่งทดสอบการกัดกร่อนแบบขอบเกรนโดยวิธีการวัดการสูญเสียน้ำหนัก (weight loss)

จากงานวิจัยของปิยะพร ลีนโคตร[5] ได้ศึกษาถึงกระบวนการความร้อนเชิงกลของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 โดยนำชิ้นงานผ่านกระบวนการ recrystallization ที่อุณหภูมิ 850°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นผ่าน Iterative strain annealing ที่ความเครียด 3% แล้วนำไปอบให้ความร้อนที่ 950°C เป็นเวลา 10 นาที ซ้ำกัน 3 ครั้ง สามารถเพิ่มจำนวน CSLB ได้มากถึง 54% และลดการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรนลงได้แสดงดังรูปที่ 1.1



ก)

ข)

รูปที่ 1.1 ปริมาณโครเมียมคาร์ไบด์ที่เซนซิไทเซชัน 650°C 2 ชั่วโมง

ก) ผ่านกระบวนการความร้อนเชิงกล CSL 57% ข) ชิ้นงานจากโรงงาน CSL 40%

จากกระบวนการดังกล่าวมีหลายขั้นตอนและใช้เวลานานในการเพิ่มประสิทธิภาพของขอบเกรนของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ต่อระบบอุตสาหกรรมการผลิต ดังนั้นจึงทำการวิจัยเพื่อลดขั้นตอนและเวลาของกระบวนการความร้อนเชิงกลลงเพื่อปรับเปลี่ยนโครงข่ายผลึก โดยวิเคราะห์และทดสอบประสิทธิภาพคุณสมบัติของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ต่อการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรนโดยอ้างอิง ASTM A262-98 วิธี B เฟอริกซัลเฟต-กรดซัลฟูริก (Ferric sulfate-Sulfuric acid) พร้อมทั้งศึกษาความเป็นไปได้ของโครงการทางกระบวนการความร้อนเชิงกลในเชิงความสัมพัทธ์ของต้นทุน ปริมาณการผลิต และผลกำไร

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อทดลองปรับปรุงเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ให้มีความต้านทานต่อการเกิดเซนซีไทเซชันตามขอบเกรนโดยกระบวนการความร้อนเชิงกล

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ทดสอบผลกระทบจากความร้อนเชิงกลต่อเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ในกระบวนการปรับเปลี่ยนโครงสร้างจุลภาค
2. ทดสอบเซนซีไทเซชันที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ ในเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่ผ่านกระบวนการความร้อนเชิงกลโดยวิธี Streicher test (ASTM A-262-55T)
3. ตรวจสอบและเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคทั้งชนิดและการกระจายตัวของขอบเกรนในเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่มีการเซนซีไทเซชันที่ต่างกันโดยเทคนิค Electron Backscatter Diffraction Pattern (EBSP)

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาค้นคว้าเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ทดสอบผลกระทบจากการให้ความร้อนเชิงกลต่อเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ในกระบวนการปรับเปลี่ยนโครงสร้างจุลภาค
3. การทดสอบเซนซีไทเซชันด้วยวิธี Streicher test ในเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่ผ่านกระบวนการความร้อนเชิงกลที่ต่างกัน
4. ตรวจสอบและเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคทั้งชนิดและการกระจายตัวของขอบเกรนในเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่มีการเซนซีไทเซชันที่ต่างกันโดยเทคนิค EBSP
5. สรุปและวิเคราะห์ผลการวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้เป็นแนวทางในการใช้กระบวนการความร้อนเชิงกลเพื่อการปรับปรุงเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ให้มีความต้านทานต่อการเกิดเซนซีไทเซชันบริเวณขอบเกรน เพื่อให้มีอายุการใช้งานยาวนานขึ้นเมื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ

1.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. ปี 2538 P.Lin และคณะ[3] ทำการศึกษาวิจัย alloy 600 ที่ผ่านกระบวนการ ความร้อนเชิงกลสามารถเพิ่มสัดส่วนจำนวนของ special grain boundary ($\Sigma \leq 29$) จากเดิม 37% ไปถึง 71% ซึ่งสามารถลดความไวต่อกร่อนบริเวณขอบเกรน เมื่อทดสอบทั้งในสภาพ solution annealed และเซนซีไทเซชัน เนื่องจาก low Σ grain boundary สามารถปรับปรุง คุณสมบัติของวัสดุให้ต้านทานการกัดกร่อนและต้านทานการสลายแยกตัวและตกตะกอนบริเวณ ขอบเกรนได้

2. ปี 2538 Hongwei Liu และคณะ[6] สังเกตคุณสมบัติของขอบเกรนที่มีความ สัมพันธ์ต่อคาร์ไบด์ใน Ni-18Cr-18Fe ternary alloy พบว่าคาร์ไบด์สามารถก่อตัวได้ยากบริเวณ ขอบเกรน ทั้งขนาดและระยะของคาร์ไบด์ตามขอบเกรนนั้นขึ้นอยู่กับ Σ grain boundary ขนาด คาร์ไบด์จะมีขนาดเล็กและใกล้เคียงกันใน $\Sigma 1, \Sigma 9$ และ $\Sigma 29$ แต่ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ใน $\Sigma 3$ coherent twin boundary เนื่องจากพลังงานที่ขอบเกรนต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับขอบเกรนชนิด อื่น ๆ

3. ปี 2541 Adam J. Schwartz และ Wayne E. King[7] ศึกษาสัดส่วนจำนวน special grain boundary ในโลหะทองแดง (99.99% ทองแดง) เพิ่มขึ้นเมื่อผ่านกระบวนการ stain annealing (กระบวนการความร้อนเชิงกล) พบว่า special grain boundary นั้นเพิ่มขึ้นจากเดิม 15% ไปถึง 70% ซึ่งพบว่าตัวแปรในการควบคุม grain boundary character distribution (GBCD) อาจจะประกอบไปด้วยขนาดเกรนเริ่มต้น การจัดเรียงตัว เวลาและอุณหภูมิของการอบ อ่อน เป็นต้น

บทที่ 2

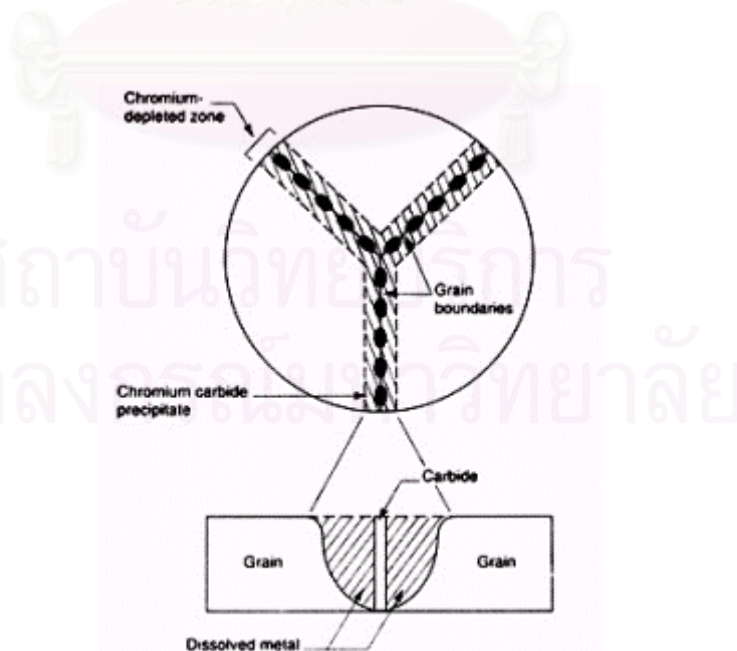
การกัดกร่อนบริเวณขอบเกรน

2.1 คำนำ

การกัดกร่อนบริเวณขอบเกรนเป็นพฤติกรรมอย่างหนึ่ง ที่มักเกิดขึ้นกับเหล็กกล้าไร้สนิม ดังนั้นในบทนี้จึงได้กล่าวถึงหลักการและการตรวจสอบอย่างง่ายของการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรนที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

2.2 Grain Boundary Chromium Depletion

ขอบเกรนเป็นบริเวณที่ง่ายต่อการเกิดปรากฏการณ์ต่าง ๆ กว่าบริเวณเนื้อเกรน อาจเกิดการกัดกร่อนหรือเกิดปฏิกิริยาได้ง่ายหากขอบเกรนมีอนุภาคมาตกตะกอนสะสมอยู่หรือมีธาตุหนึ่ง มากหรือน้อยเกินไป เหล็กกล้าไร้สนิมซึ่งปกติแล้วทนต่อการกัดกร่อนได้ดี หากเมื่อนำไปใช้งานในช่วงอุณหภูมิสูง 425°C ถึง 815°C เป็นระยะเวลาานพอ จะทำให้เกิดอนุภาคของโครเมียมคาร์ไบด์ (Cr_{23}C_6) เกิดขึ้นบริเวณขอบเกรน เนื่องจากเกิดการแพร่ของคาร์บอนไปยังขอบเกรน ทำให้โครเมียมอิสระที่เดิมเคยอยู่ในเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมและคอยป้องกันการกัดกร่อนจับตัวกับคาร์บอน เป็นเหตุให้โครเมียมมีปริมาณต่ำลงบริเวณขอบเกรน (chromium-depleted zone) เราเรียกระบวนการที่ทำให้เกิดการสูญเสียโครเมียมอิสระว่า เซนซิไทเซชัน ซึ่งนำไปสู่การกัดกร่อนบริเวณขอบเกรน



รูปที่ 2.1 การตกตะกอนของคาร์ไบด์บริเวณขอบเกรน

2.3 การป้องกันเซนซีไทเซชัน

โดยทั่ว ๆ ไปแล้วเหล็กกล้าไร้สนิมนิยมนำไปใช้ในสภาวะที่มีการกัดกร่อนสูงหรือในสภาวะที่มีออกซิไดเซชันที่เข้มข้น (strong oxidized) ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรน เราสามารถลดอัตราการกัดกร่อนลงได้เมื่อลดสภาวะการทำงาน ซึ่งในความเป็นจริงสภาพการทำงานนั้นเราไม่สามารถปรับเปลี่ยนได้ แต่เราสามารถลดอัตราการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรนลงได้โดย

การอบอ่อน (Solution annealing) ซึ่งเป็นการอบที่อุณหภูมิสูงกว่า 815°C แล้วทำให้เย็นลงอย่างรวดเร็ว จะมีผลทำให้โครเมียมคาร์ไบด์ละลายหายไป เมื่อไม่มีโครเมียมคาร์ไบด์แล้ว การกัดกร่อนบริเวณขอบเกรนก็จะไม่เกิดขึ้น

ส่วนประกอบปริมาณคาร์บอนต่ำ ซึ่งจะทำให้ไม่สามารถเกิดเซนซีไทเซชันได้เนื่องจากปริมาณคาร์บอนต่ำเกินไปไม่เพียงพอต่อการตกตะกอนของโครเมียมคาร์ไบด์บริเวณขอบเกรนได้ ซึ่งเหล็กกล้าไร้สนิม 304L นั้นมีปริมาณคาร์บอนอยู่ $<0.03\%$ ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นใช้ในงานบางประเภทแต่ไม่เป็นที่นิยมนำไปในงานอุตสาหกรรม

เติมธาตุ stabilizer ได้แก่ ไนโอเบียมและไทเทเนียมถูกเพิ่มเติมลงไปในเหล็กกล้าไร้สนิม 304 จนกลายเป็นเหล็กกล้าไร้สนิม 347 และ 321 ตามลำดับ เมื่อนำเหล็กกล้าไร้สนิมทั้งสองประเภทนี้ไปใช้งานในช่วงอุณหภูมิสูง ธาตุทั้งสองจะไปตกตะกอนรวมกับคาร์บอนก่อนอย่างรวดเร็ว ทำให้คาร์บอนที่เนื้อเกรนหายไปและไม่สามารถตกตะกอนร่วมกับโครเมียมอิสระที่ขอบเกรนได้

2.4 การทดสอบด้วยสารเคมี

การทดสอบด้วยสารเคมีเป็นวิธีการหนึ่งในการวัดอัตราการกัดกร่อน (Corrosion Rate) บริเวณขอบเกรนของเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผ่านเซนซีไทเซชันแล้ว สามารถบ่งบอกออกมาเป็นค่าตัวเลขให้สามารถเปรียบเทียบกันได้ ซึ่งเป็นการจำลองวิธีการมาจากสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ แต่จะถูกเร่งปฏิกิริยาให้เร็วขึ้นเพื่อความสะดวกและสะดวกต่อการใช้งาน ดังตารางที่ 2.1 เป็นการรวบรวมกระบวนการทดสอบมาตรฐานที่นิยมใช้ในการวัดการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรนของเหล็กกล้าไร้สนิมซึ่งมาจาก ASTM Standards A 262-98

จาก ASTM standards A 262-98 มีหลายวิธีให้เลือก เนื่องจากวัตถุประสงค์ของการทดสอบสารเคมีแตกต่างกันออกไป อาจขึ้นอยู่กับชนิดของเหล็กกล้าไร้สนิมที่ทำการทดสอบ สาร

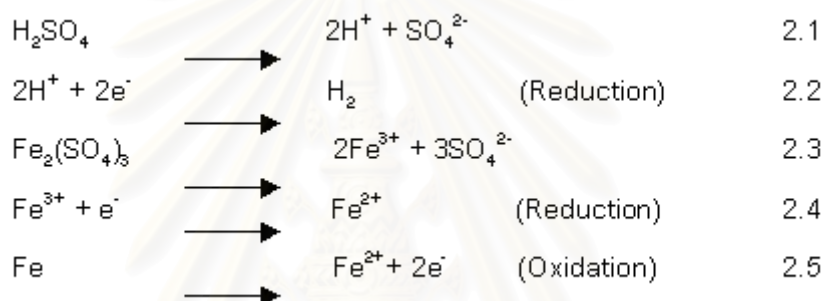
เคมี ระยะเวลาการทดสอบและสิ่งที่ต้องการศึกษา แต่ในการวิจัยครั้งนี้เลือกใช้ A262-98 วิธี A และ B

ตารางที่ 2.1 มาตรฐานการทดสอบการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรนของเหล็กกล้าไร้สนิม[8]

ASTM Standard(Common Name)	Environment	Exposure	Evaluation	Attacked
A 262-98 Practice A (Oxalic Etch)	10% $H_2C_2O_4$.	1.5 min. Anodic at 1 A/cm ² . Ambient temp.	Microscopic type of attack.	Various carbides.
A 262-98 Practice B	$Fe_2(SO_4)_3$ +50% H_2SO_4 . Boiling.	One 120 hour period.	Weight loss per unit area.	Chromium-depleted area.
A 262-98 Practice C	65% HNO_3 . Boiling.	Five 48 hour periods. Fresh solution each period.	Average weight loss per unit area.	Chromium-depleted area, sigma phase and carbides.
A 262-98 Practice E	$CuSO_4$ + 16% H_2SO_4 . Boiling. Specimen in contact with copper metal	One 24 hour period.	Macroscopic appearance after bending.	Chromium-depleted area.
A 262-98 Practice F	$CuSO_4$ + 50% H_2SO_4 . Boiling. Solid copper in solution. Not in contact with specimen	One 120-hour period	Weight loss per unit area	Chromium-depleted area

A 262-98 วิธี A หรือ Oxalic Acid Etch Test เป็นการทดสอบที่รวดเร็วเพื่อเป็นขั้นแรกของการตรวจสอบ โดยให้ชิ้นงานเป็นแอโนดที่กระแส 1 A/cm² เป็นเวลา 1.5 นาทีในสารละลาย 10% กรดออกซาลิก (oxalic acid) ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งสามารถแบ่งประเภทโครงสร้างของเหล็กกล้าไร้สนิม แบ่งได้เป็น step (free of carbide), dual (intermediate) และ ditch (continuous carbide)

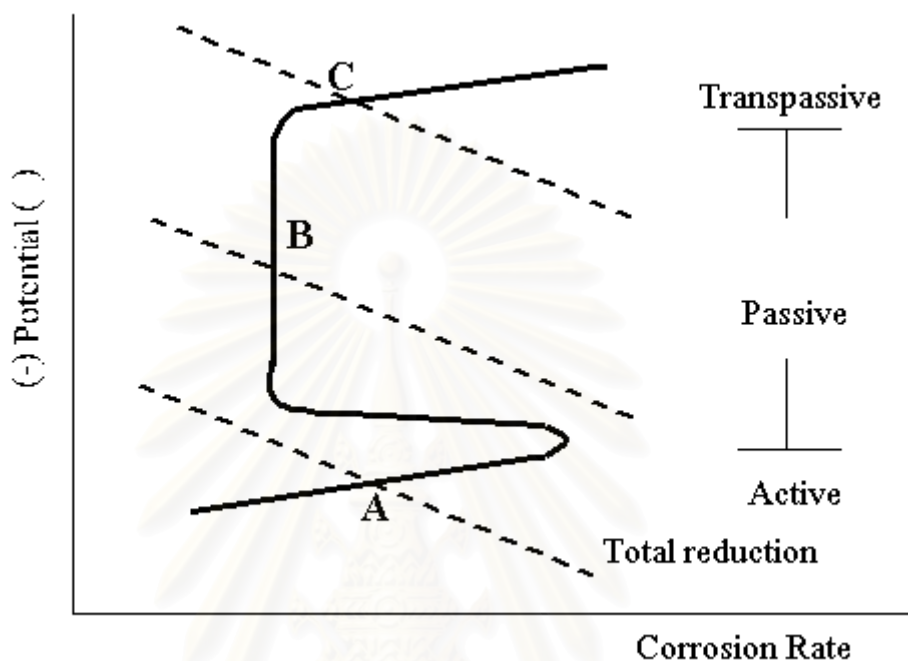
A 292-98 วิธี B เป็นการทดสอบในสารละลายของเฟอริกซัลเฟต-50%กรดซัลฟูริกที่เดือด เป็นระยะเวลา 120 ชั่วโมงกับเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผ่านเซนซิไทเซชัน โดยวิธีการหาความแตกต่างของน้ำหนักเหล็กกล้าไร้สนิมก่อนและหลังการทดสอบ (weight loss) ซึ่งในสารละลายและระบบจะมีส่วนประกอบของ



ซึ่ง H^+ และ Fe^{3+} ในสมการที่ 2.2 และ 2.3 ทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดเซอร์ในระบบคอยรับอิเล็กตรอนที่สูญเสียมาจาก Fe ในเหล็กกล้าไร้สนิมตรงบริเวณ chromium-depleted zone ในสมการที่ 2.5 ทำให้เกิดการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรน

ในการทดสอบสามารถเปลี่ยนแปลงปริมาณสารเฟอริกซัลเฟต ซึ่งมี Fe^{3+} เป็นตัวออกซิไดเซอร์ที่เข้มแข็งได้ เนื่องจากคุณสมบัติของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 สามารถแบ่งได้ 3 สถานะคือ active, passive และ tranpassive ดังรูปที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตัวออกซิไดเซอร์กับอัตราการกัดกร่อนที่เกิดขึ้น ในการทดสอบต้องการให้เกิดการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรนซึ่งอยู่ในช่วง passive ที่มีอัตราการกัดกร่อนต่ำที่สุด (จุด B) ดังนั้นปริมาณของเฟอริกซัลเฟตต้องมีมากพอ แต่ถ้าปริมาณของเฟอริกซัลเฟตต่ำเกินไปจะทำให้เกิดการกัดกร่อนในช่วง active ซึ่งเป็นการกัดกร่อนแบบ general corrosion (จุด A) และถ้าปริมาณเฟอริกซัลเฟตมีมากเกินไปจะทำให้เกิดการกัดกร่อนแบบ pitting ซึ่งเกิดในช่วง tranpassive (จุด C) มีผลให้ค่าอัตราการกัดกร่อนเพิ่มขึ้นสูงมาก

ส่วน A 262-98 วิธี C, E และ F นั้นใช้หลักการเดียวกับ วิธี B เพื่อให้เกิดการกัดกร่อน บริเวณขอบเกรนเพียงเปลี่ยนแปลงแค่ตัวสารเคมีและวิธีการทดสอบ



รูปที่ 2.2 ผลกระทบของความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของออกซิไดเซอร์กับ active-passive ของเหล็กกล้าไร้สนิม

จากหลายงานวิจัยของ E.M.Lehockey และคณะ[4,9] รวมทั้งงานวิจัยของ P.Lin และคณะ[3] นิยมใช้หลักการของการสูญเสียน้ำหนักในการวิเคราะห์เปรียบเทียบและทดสอบคุณสมบัติของวัสดุก่อนและหลังปรับปรุงคุณสมบัติของขอบเกรนโดยผ่านกระบวนการความร้อนเชิงกลต่อการต้านทานการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรน ซึ่งสามารถบอกได้ว่าหลังจากผ่านกระบวนการความร้อนเชิงกลแล้วทำให้วัสดุนั้นมีสัดส่วนจำนวน special grain boundary ($\Sigma \leq 29$) เพิ่มขึ้นจากเดิม เป็นผลให้อัตราการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรนของวัสดุมีค่าน้อยลงหรือขอบเกรนของวัสดุนั้นมีคุณสมบัติที่ดีขึ้นกว่าเดิม

อัตราการกัดกร่อนสามารถคำนวณได้จากค่าการสูญเสียน้ำหนักของการทดสอบดังสมการ

$$\text{Millimeter per month} = (7290 \times W) / (A \times t \times d)$$

2.6

t = time of exposure, h

A = area, cm^2

W = weight loss, g

d = density, g/cm^3

สำหรับ chromium-nickel steel, $d = 7.9 \text{ g/cm}^3$

สำหรับ chromium-nickel-molybdenum, $d = 8.0 \text{ g/cm}^3$

จากสมการที่ 2.6 สามารถเปลี่ยนหน่วยอัตราการกัดกร่อนเป็นหน่วยอื่นได้โดย

Millimeter per month $\times 0.04 =$ inches per month

Millimeter per month $\times 0.47 =$ inches per year

Millimeter per month $\times 12 =$ millimeters per year

Millimeter per month $\times 472 =$ mils per year

Millimeter per month $\times \text{density}/3 =$ milligram per square decimeter per day

Millimeter per month $\times 1.39 \times \text{density} =$ grams per square meter per hours

จากหน่วยของอัตราการกัดกร่อนข้างต้นมีค่าแตกต่างกันมาก บางหน่วยเล็กมากเมื่อเปรียบเทียบกับอีกหน่วยหนึ่ง ดังตารางที่ 2.2 เป็นการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ในหน่วยอัตราการกัดกร่อนแบบต่าง ๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของ mils per year (mpy) กับหน่วยอื่น[10]

Approximate metric equivalent					
Relative corrosion resistance	mpy	<i>mm / yr</i>	<i>μm / yr</i>	<i>nm / hr</i>	<i>pm / sec</i>
Outstanding	<1	<0.02	<25	<2	<1
Excellent	1-5	0.02-0.1	25-100	2-10	1-5
Good	5-20	0.1-0.5	100-500	10-50	5-20
Fair	20-50	0.5-1	500-1000	50-150	20-50
Poor	50-200	1-5	1000-5000	150-500	50-200
Unacceptable	200+	5+	5000+	500+	200+

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

กระบวนการความร้อนเชิงกล

3.1 คำนำ

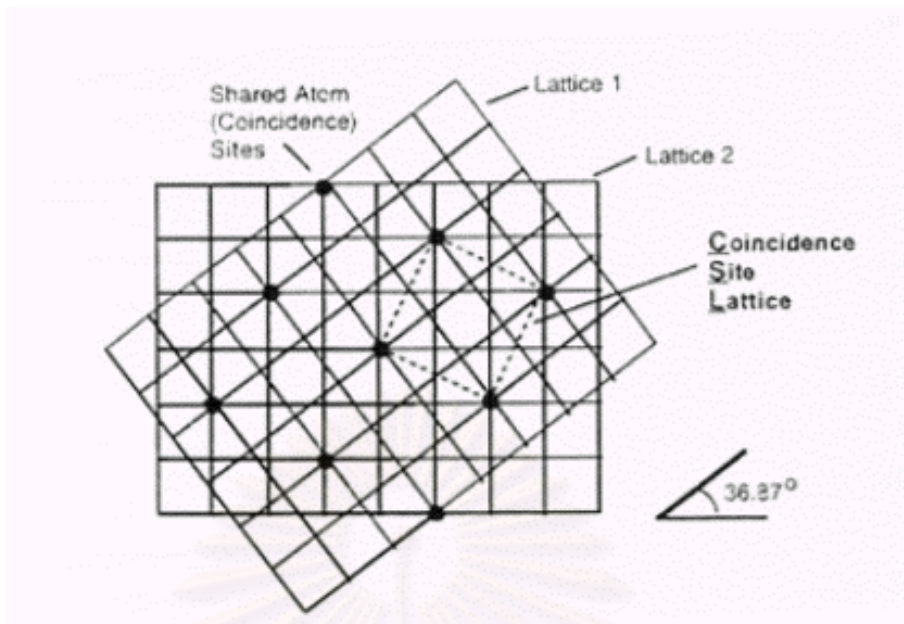
จากการศึกษาโครงสร้างวัสดุที่ผ่านกระบวนการความร้อนเชิงกล ขอบเกรนเป็นสิ่งหนึ่งที่ถูกพิจารณาเป็นอย่างมากว่ามีความสำคัญต่อการปรับปรุงคุณภาพของวัสดุ หลักการโดยทั่ว ๆ ไป และสิ่งที่ใช้ในการวิเคราะห์จึงถูกกล่าวไว้ในบทนี้

3.2 Grain Boundary Geometry

ขอบเกรน (Grain Boundary) เป็นบริเวณที่บ่งบอกถึงความแตกต่างของการจัดเรียงตัวของโครงสร้างผลึกที่มาเชื่อมติดกันของเกรน เมื่อพิจารณาตามแกนและมุมของการจัดเรียงตัวแล้วสามารถแบ่งได้ 2 กลุ่มใหญ่คือ Low angle boundary (LAB) ซึ่งมีทิศทางการจัดเรียงตัวผลึกที่ทำมุมแตกต่างกันน้อยกว่า 15 องศาและ High angle boundary (HAB) การจัดเรียงตัวผลึกที่ทำมุมแตกต่างกันมากกว่า 15 องศา แต่จะมีขอบเกรนบางชนิดที่มีการจัดเรียงตัวผลึกที่ทำมุมกันเฉพาะบนแกนบางแกนที่นำไปสู่ coincidence point ในกลุ่มของ HAB ซึ่งกลุ่มนี้ถูกเรียกว่า Coincidence site lattice boundary (CSLB) แต่จาก Brandon's Criterion มุมการจัดเรียงตัวของ CSL สามารถเบี่ยงเบนองศาไปจากเดิมได้เล็กน้อยตามสมการ

$$\Delta\theta = 15^\circ \times \Sigma^{-1/2} \quad 3.1$$

โดยที่ $\Delta\theta$ เป็นมุมที่สามารถเบี่ยงเบนได้จากองศาของ CSL และ Σ บ่งบอกถึงความหนาแน่นของอะตอมที่อยู่ร่วมกันของสองผลึก เช่น $\Sigma 5$ บ่งบอกถึง อะตอมของผลึก 2 ผลึกที่อยู่ติดกันมีอะตอมอยู่ในตำแหน่งเดียวกัน 1 อะตอมสำหรับทุก 5 อะตอมดังรูปที่ 3.1 ซึ่งบาง CSL ที่มีค่า $\Sigma \leq 29$ จะเรียกว่า special grain boundary ซึ่งมีผลต่อการปรับปรุงคุณสมบัติขอบเกรนทางด้านกายภาพและทางเคมี เช่น พลังงานที่ต่ำลง ลดความไวต่อ solute segregation การแพร่ลดลง ต้านทานการ sliding cavitation การกัดกร่อน และ การแตกร้าว[11]



รูปที่ 3.1 การจัดเรียงตัวของ CSL แบบ $\Sigma 5$

3.3 กระบวนการความร้อนเชิงกล

คุณสมบัติของ special grain boundary หรือ CSLB นั้นสามารถทำให้วัสดุสามารถต้านทานต่อการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรน การแตกหักเนื่องจากการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรนและการคืบ[12] ได้เมื่อเพิ่มสัดส่วนจำนวนมากขึ้น ซึ่งทำได้โดยที่วัสดุนั้นผ่านกระบวนการความร้อนเชิงกล ดังนั้นจึงจำแนกกระบวนการความร้อนเชิงกลออกเป็น[13,14]

- Iterative recrystallization เป็นกระบวนการที่ทำให้เกิด recrystallization ซ้ำหลายครั้ง แต่ยังคงทำให้เกรนมีขนาดเล็ก ดังเช่นใน nickel-based alloy (Ni-16Cr-9Fe) ผ่านการรีดเย็น 20% แล้วอบที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 3 นาที ทำซ้ำกัน 3 ครั้ง เป็นผลให้จำนวน $\Sigma 3$ และ $\Sigma 9$ เพิ่มขึ้น 2 เท่าจากเดิมเป็น 47% และ 10% ตามลำดับ ซึ่งเหมือนกับในทองแดงที่ผ่านการ strain-recrystallization treatment โดยการกด 30% แล้วอบที่อุณหภูมิ 375°C เป็นเวลา 10 นาที ทำซ้ำกัน 3 ครั้ง ทำให้ $\Sigma 3$ เพิ่มขึ้นเป็น 58%[7]

- One-Step recrystallization เป็นกระบวนการที่ผ่านการอบอุณหภูมิสูงเป็นระยะเวลาสั้นหลังจากผ่านการให้ความเครียดระดับกลาง เป็นผลทำให้เพิ่มความหนาแน่นของ twin และเกรนยังมีขนาดเล็ก เช่นในทองแดงที่ผ่านการให้ความเครียด 50% แล้วอบที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 1 นาที เป็นผลให้จำนวน twin สูงมากขึ้นกว่ากระบวนการ multi-step treatment[15]

- Iterative strain annealing เป็นกระบวนการที่ผ่านการให้ความเครียดเพียงเล็กน้อยไม่เกิน 6% หลังจากผ่านการอบแล้วมีผลทำให้ $\Sigma 3^{\text{rd}}$ เพิ่มมากขึ้นโดยไม่ผ่านการเกิด recrystallization เช่นใน alloy 600 (Ni-16Cr-9Fe) ผ่านการให้ความเครียด 2-5% ตามด้วยการอบที่ 890-940°C เป็นเวลา 1-20 ชั่วโมง เป็นผลทำให้เพิ่มจำนวน $\Sigma 3$ และ $\Sigma 9$ จากเดิม 6% และ 5% เป็น 12% ตามลำดับ[12] ส่วนในทองแดงผ่านการกด 6% ตามด้วยการอบที่ 275°C เป็นระยะเวลา 14 ชั่วโมงและที่ 375°C เป็นระยะเวลา 7 ชั่วโมง เป็นผลให้จำนวน $\Sigma 3$ และ $\Sigma 9$ เพิ่มขึ้นเป็น 67% และ 9% ตามลำดับ ถึงแม้ว่าสัดส่วนจำนวน twin อาจลดลงเล็กน้อยระหว่างการอบครั้งแรกก็ตาม[16]

- One-step strain annealing เป็นกระบวนการที่ผ่านการอบเพียงครั้งเดียวหลังจากการให้ความเครียดเล็กน้อย เช่นในนิกเกิลหลังจากให้ความเครียด 6% และการอบอ่อน $\Sigma 3^{\text{rd}}$ มีแนวโน้มของมุมการจัดเรียงตัวเบี่ยงเบนไปน้อยลงเมื่อเพิ่มระยะเวลาการอบ ซึ่งเป็นผลในการปรับปรุงทั้ง grain boundary plane[17]

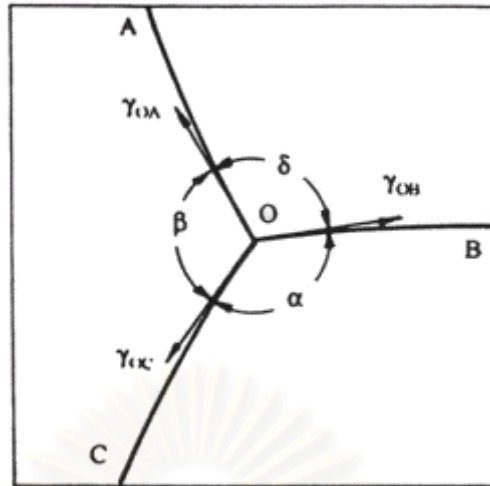
เพื่อจุดประสงค์ในการควบคุมขนาดเกรนจากชิ้นงานที่ได้รับมาจากโรงงาน ดังนั้นกระบวนการความร้อนเชิงกลที่ใช้ในการปรับปรุงโครงสร้างผลึกของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ในงานวิจัยครั้งนี้จึงเป็นแบบ strain annealing ซึ่งเป็นกระบวนการที่ไม่ซับซ้อนและขนาดเกรนยังคงไม่เปลี่ยนแปลง

3.4 Cumulative Frequency of Dihedral Angle Distribution

ขอบเกรนแต่ละประเภทมีพลังงานอิสระต่างกัน แต่พลังงานอิสระของขอบเกรนเหล่านั้นมีความสัมพันธ์เกี่ยวเนื่องกับมุมที่มาบรรจบกันของขอบเกรนนั้น ๆ ณ triple junction ซึ่งสามารถบอกความสัมพันธ์ดังกล่าวในรูป 2 มิติของ dihedral angle กับสามขอบเกรนดังสมการ[18]

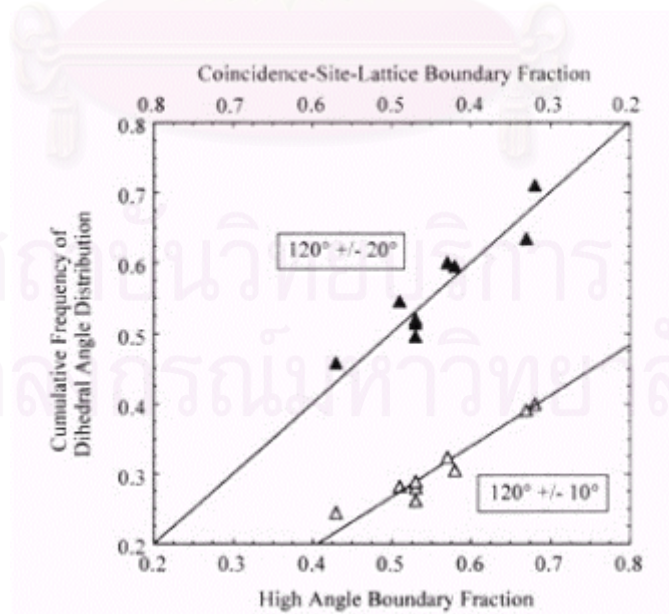
$$\gamma_a / \sin\alpha = \gamma_b / \sin\beta = \gamma_c / \sin\delta \quad 3.2$$

ซึ่ง γ_a , γ_b และ γ_c เป็นพลังงานของแต่ละขอบเกรนที่มาวมกันที่ triple junction และ α , β และ δ เป็นมุมที่เกิดขึ้น แสดงว่า dihedral angle สามารถใช้ในการวัดพลังงานของขอบเกรนได้ ถ้ามุมทั้งสาม α , β และ δ ทำมุมเท่ากัน (120 องศา) นั้น สามารถบอกได้ว่าพลังงานของขอบเกรนเข้าสู่สภาวะสมดุลแสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 มุมและพลังงานของขอบเกรนที่เกิดขึ้น ณ Triple junction

จากการศึกษาวิจัยของ V. Thaveprungsriporn และคณะ[19] ได้นำความสัมพันธ์ดังกล่าวมาใช้ในการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์กับจำนวนสัดส่วนของ CSLB ของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่ผ่านกระบวนการความร้อนเชิงกลแบบ Iterative strain annealing โดยการวัดการกระจายตัวของมุม dihedral angle ที่เกิดขึ้นของขอบเกรนที่จุด triple junction และแสดงผลออกมาเป็นการกระจาย cumulative frequency of dihedral angle (CFDA) รอบมุม 120° ดังรูปที่ 3.3 แสดงความสัมพันธ์โดยตรงของสัดส่วนจำนวนของขอบเกรนทั้ง CSL และ HAB รอบมุม $120^\circ \pm 10^\circ$ และ $120^\circ \pm 20^\circ$ ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจาย cumulative frequency of dihedral angle และการกระจายคุณสมบัติของขอบเกรน

อาจกล่าวได้ว่า CFDA สามารถบอกทั้งสัดส่วนจำนวนของ CSL และ HAB ได้โดยตรง คือค่า CFDA ลดลงเมื่อสัดส่วนจำนวน HAB ลดลงหรือสัดส่วนจำนวน CSL เพิ่มขึ้น

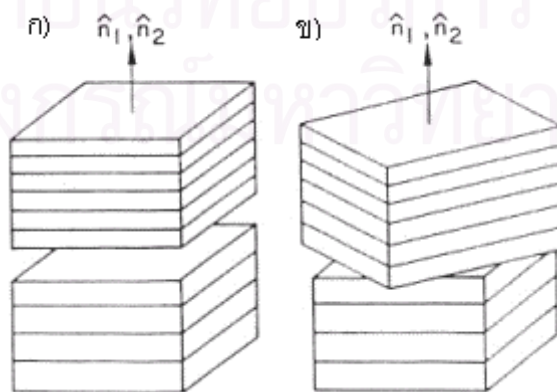
จากหลักการดังกล่าวเป็นวิธีการแบบง่ายในการตรวจสอบหาสัดส่วนจำนวนของ CSLB ขึ้นต้นก่อนการใช้เทคนิควิเคราะห์ Electron Backscatter Diffraction Pattern โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy ; SEM) ซึ่งใช้เวลานานและยุ่งยากในการใช้เครื่องมือ

3.5 การลาดเอียงของขอบเกรน

ถึงแม้ว่าขอบเกรนประเภท CSLB สามารถบอกประสิทธิภาพหลายด้านของวัสดุได้ก็ตาม แต่เป็นเพียงแค่การอธิบายของ 3 degrees of freedom ของ grain boundary model เท่านั้น ส่วนอีก 2 degrees of freedom ที่เหลือสามารถอธิบายได้ในเชิง grain boundary plane ซึ่งสามารถจำแนกออกเป็น[20]

- Symmetrical tilt boundary (STB); $\{h_1k_1l_1\} = \{h_2k_2l_2\}$ และ $\phi = 0$
- Asymmetrical tilt boundary (ATB); $\{h_1k_1l_1\} \neq \{h_2k_2l_2\}$ และ $\phi = 0$
- Twist boundary (TWB); $\{h_1k_1l_1\} = \{h_2k_2l_2\}$ และ $\phi \neq 0$
- General หรือ random boundary; $\{h_1k_1l_1\} \neq \{h_2k_2l_2\}$ และ $\phi \neq 0$

ซึ่ง $h_1k_1l_1$ และ $h_2k_2l_2$ เป็น index ของ grain boundary plane ในแต่ละเกรน และ ϕ เป็นมุมที่เกิดขึ้นระหว่าง plane ทั้งสอง



รูปที่ 3.4 ก) ATB และ ข) asymmetrical twist หรือ general boundary

งานวิจัยของ Mark Caul และคณะ[21] ได้ใช้หลักการดังกล่าวศึกษาถึงมุมการลาดเอียงของขอบเกรนของ austenitic stainless steel ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 700° และ 800° C ซึ่งทั้งสองมีสัดส่วนจำนวน CSL ในรูปของ $\Sigma 3^n$ ใกล้เคียงกันมาก แต่เมื่อศึกษาถึงการลาดเอียงของขอบเกรนโดยใช้เทคนิค serial sectioning technique ของทั้งสองชิ้นงานพบว่ามีความแตกต่างกัน ซึ่งมุมการลาดเอียงของขอบเกรนของ 800°C ใกล้เคียงกับผิวหน้าบนสุดมากกว่า 700°C เนื่องจากขอบเกรนเคลื่อนตัวสูงที่อุณหภูมิสูงและเป็นผลให้พลังงานขอบเกรนต่ำลงด้วย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

การทดลอง

4.1 คำนำ

ในบทนี้แสดงขั้นตอนในการทดลองหากระบวนการความร้อนเชิงกล ขั้นตอนในการทดสอบการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรน และขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานเพื่อใช้ในกระบวนการวิเคราะห์

4.2 กระบวนการความร้อนเชิงกล

ขั้นตอนแรกเป็นการหาสภาวะของกระบวนการความร้อนเชิงกล (304TT) โดยนำเหล็กกล้าไร้สนิม 304 (D189) แผ่น มีขนาด 1219.2 มม. x 2438.4 มม. หนา 1.2 มม. ที่มาจากโรงงานของบริษัทไทยน็อคซ์ สตีล จำกัด (304AR) ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีดังตารางที่ 4.1 และขนาดเกรน ประมาณ 10 μm ตัดเป็นขนาด 2 ซม. x 7 ซม. นำชิ้นงานผ่านเครื่องรีดเย็นหรือให้ความเครียด 3%, 7% หรือ 9% ของความหนาชิ้นงาน แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิใน 900 °C, 925 °C หรือ 950 °C เป็นระยะเวลา 5 หรือ 3 นาที ที่เตาอบอุณหภูมิสูง (High Temperature Furnace) ซึ่งมีการไหลของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ (99.99%) แล้วทำให้เย็นอย่างรวดเร็วในน้ำที่อุณหภูมิห้องทำซ้ำกัน 3 ครั้งดังตารางที่ 4.2

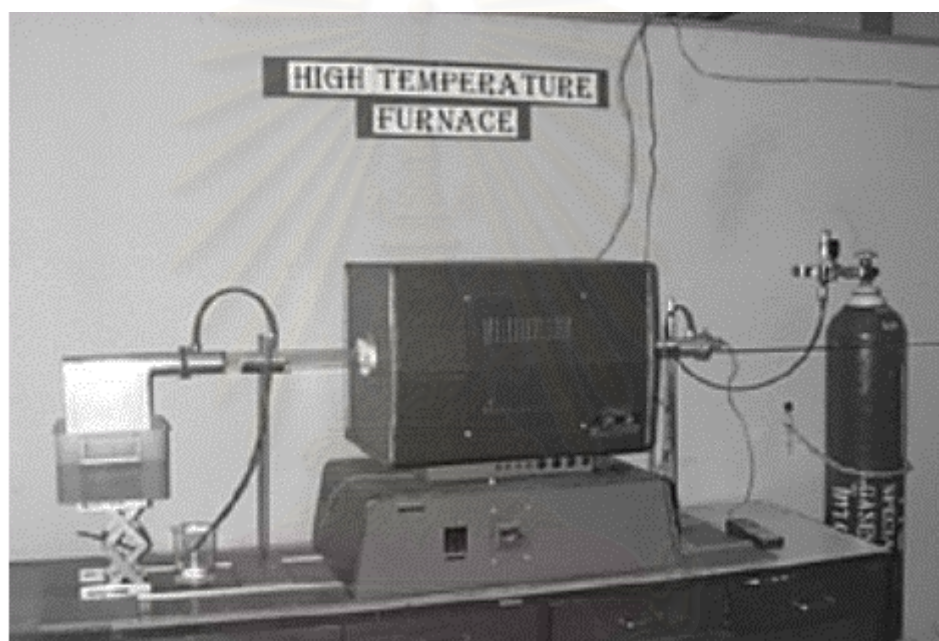
ขั้นตอนที่สองตรวจสอบชิ้นงานเปรียบเทียบปริมาณโครเมียมคาร์ไบด์และขนาดเกรน กับ 304AR โดยตัดชิ้นงานเป็นขนาด 2 ซม. X 1 ซม. ผ่านเซนซีไทเซชันที่อุณหภูมิ 650 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยเตาอบอุณหภูมิสูงซึ่งมีการไหลของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ แล้วทำให้เย็นอย่างรวดเร็วในน้ำที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นขัดผิวหน้าชิ้นงานทั้งสองด้วยเครื่องขัด (mechanical polished) จากกระดาษทรายหมายเลข 360 จนถึงผงขัดเพชร (diamond paste) ขนาด 1 μm แล้วนำไป electroetching โดยใช้แพลทตินัมเป็นแคโทด ในสารละลาย 10% กรดออกซาลิกที่ 6 โวลต์ เป็นเวลา 50 วินาที

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิม 304

Elements	Fe	C	Cr	Ni	Mn
Weight (%)	Bal	0.044	19	8.9	1.65

ตารางที่ 4.2 สรุปการทดสอบหากระบวนการความร้อนเชิงกล

Temp & Time	Step 1			Step 2			Step 3		
	3%	7%	9%	3%	7%	9%	3%	7%	9%
950°C / 5mim	X	—	—	X	—	—	X	—	—
950°C / 3mim	X	—	—	X	—	—	X	—	—
925°C / 3mim	X	—	—	X	—	—	X	—	—
900°C / 3mim	X	X	X	X	X	X	X	X	X



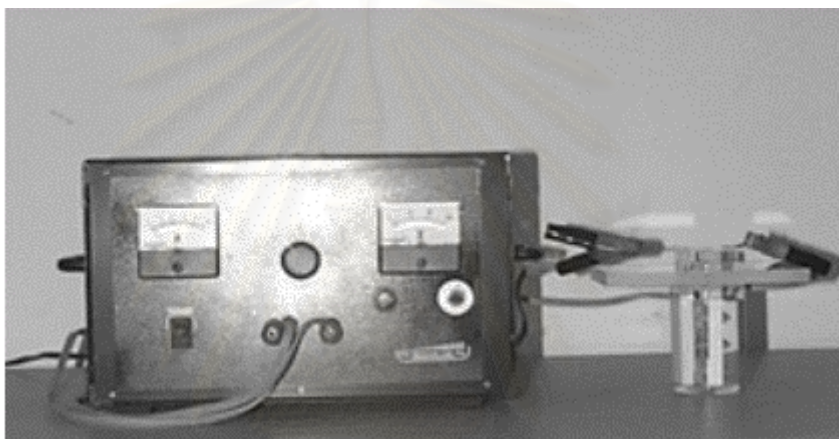
รูปที่ 4.1 เตาอบอุณหภูมิสูง

4.3 Cumulative Frequency of Dihedral Angle Distribution

นำ 304TT ที่ได้จากกระบวนการความร้อนเชิงกลและ 304AR มาวิเคราะห์หาค่า CFDA โดยตัดชิ้นงานทั้งสองขนาด 2 ซม. X 1 ซม. ขัดผิวหน้าชิ้นงานทั้งสองด้วยเครื่องขัดจากกระดาษทรายหมายเลข 360 จนถึงผงขัดเพชรขนาด 1 μm แล้วนำไป electroetching ในสารละลาย 60% กรดไนตริก (nitric acid) กับ 40% น้ำ (H_2O) โดยใช้เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นแคโทดที่ 1 โวลต์เป็นเวลา 60 วินาที หลังจากนั้นถ่ายภาพโดยอิเล็กตรอนกำลังขยายสูงด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเพื่อนำมาวัดมุม dihedral angle ที่จุด triple junction แล้ววิเคราะห์หา CFDA โดยกระบวนการทางสถิติ

4.4 Electron Backscatter Diffraction Pattern

นำ 304TT ที่ได้จากกระบวนการความร้อนเชิงกลและ 304AR ตัดชิ้นงานทั้งสองขนาด 2 ซม. X 1 ซม. ขัดผิวหน้าชิ้นงานทั้งสองด้วยเครื่องขัดจากกระดาษทรายหมายเลข 360 จนถึงผิวด้านหน้าขนาด 1 μm แล้วนำไป electropolishing ในสารละลาย 60% กรดอซิฟอสฟอริก (H_3PO_4) กับ 40% กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ที่ 20 โวลต์ เป็นเวลา 3 นาที ต่อด้วย electroetching ในสารละลาย 10% กรดออกซาลิกที่ 6 โวลต์เป็นเวลา 10 วินาที โดยใช้แพลตตินัมเป็นแคโทด นำชิ้นงานไปวิเคราะห์หาสัดส่วนจำนวน CSL และ texture ของวัสดุโดยเทคนิค EBSP จาก North Campus Electron Microbeam Analysis Laboratory ที่ University of Michigan (Ann Arbor)



รูปที่ 4.2 อุปกรณ์สำหรับ electroetching และ electropolishing

4.5 มุมการลาดเอียงของขอบเกรน

ตัดชิ้นงานทั้ง 304AR และ 304TT ขนาด 1 ซม. X 1 ซม. ผ่านกระบวนการขัดผิวหน้าชิ้นงานทั้งสองด้วยเครื่องขัดจากกระดาษทรายหมายเลข 360 จนถึงผิวด้านหน้าขนาด 1 μm ทางด้านภาคตัดขวางของชิ้นงาน แล้วนำไป electroetching ในสารละลาย 60% กรดไนตริกกับ 40% น้ำ โดยใช้เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นแคโทดที่ 1 โวลต์ เป็นเวลา 60 วินาที หลังจากนั้นถ่ายภาพโดยอิเล็กตรอนกำลังขยายสูงด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด วัดมุมของขอบเกรนที่เบี่ยงเบนไปจากแนวตั้งฉากกับผิวหน้าบนสุดของชิ้นงาน เพื่อศึกษาดูการลาดเอียงของขอบเกรน โดยกระบวนการทางสถิติ

4.6 การทดสอบเฟอริกซัลเฟต - กรดซัลฟูริก

เป็นการประยุกต์การทดสอบการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรนตามมาตรฐาน ASTM A262-98 วิธี B ของชิ้นงานทั้ง 304AR และ 304TT ที่ผ่านการอบเซชันไทเทเนียมที่อุณหภูมิ 650°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงด้วยเตาอบอุณหภูมิสูงซึ่งมีการไหลของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ แล้วทำให้เย็นอย่างรวดเร็วในน้ำที่อุณหภูมิห้องในสารละลายเฟอริกซัลเฟต - กรดซัลฟูริกที่แปรเปลี่ยนปริมาณเฟอริกซัลเฟตที่ 25, 35, 45, 50, 55, 60, 65, 70 และ 80 กรัม และทดสอบการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรนที่ปริมาณเฟอริกซัลเฟต 50 กรัม แต่แปรเปลี่ยนเวลาในเซชันไทเทเนียมที่อุณหภูมิ 650°C เป็น 2, 4, 6, 8 และ 12 ชั่วโมง

ทดสอบการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรนกับเหล็กกล้าไร้สนิม 316L และ 321 ที่ผ่านการอบเซชันไทเทเนียมที่อุณหภูมิ 650°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมงด้วยเตาอบอุณหภูมิสูงซึ่งมีการไหลของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ในสารละลายเฟอริกซัลเฟต - กรดซัลฟูริกที่ปริมาณเฟอริกซัลเฟต 50 กรัม

ทดสอบการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรนกับเหล็กกล้าไร้สนิม 304TT ที่เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและเวลาของกระบวนการความร้อนเชิงกล โดยผ่านการอบเซชันไทเทเนียมที่อุณหภูมิ 650°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมงด้วยเตาอบอุณหภูมิสูงซึ่งมีการไหลของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ในสารละลายเฟอริกซัลเฟต - กรดซัลฟูริกที่ปริมาณเฟอริกซัลเฟต 50 กรัม

ขั้นตอนในการทดสอบ

1. เตรียมชิ้นงานขนาด 2 ซม. X 1 ซม. และเจาะรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 มม. เพื่อแขวนชิ้นงานกับ glass hook
2. ขัดทุกขัดผิวหน้าชิ้นงานทั้งสองด้วยเครื่องขัดจากกระดาษทรายหมายเลข 360 จนถึงผงขัดเพชรขนาด 1 μm
3. ชั่งชิ้นงานกับ analytical balance ที่มีทศนิยมใกล้ 0.001 กรัมก่อนและหลังการทดสอบ
4. ตวงน้ำกลั่น 400 มล. ใส่ลงใน Erlenmeyer flask ขนาด 1000 มล.
5. เติมกรดซัลฟูริก 236 มล. ลงในน้ำกลั่นใน Erlenmeyer flask หลีกเลียงไม่ให้เกิดการเดือด

6. ใส่เฟอริกซัลเฟต ลงไปในข้อ 5 ตามปริมาณที่ต้องการทดสอบ
7. ใส่ boiling chip ลงใน flask เพื่อป้องกันการกระแทกจากการเดือดของสารละลาย
8. ต้มจนสารละลายละลายหมดด้วย hot plate
9. ใส่ชิ้นงานไม่เกิน 4 ชิ้นที่แขวนอยู่กับ glass hook ลงใน flask
10. ปิด flask ด้วยหอกกลั่น (condenser) ที่ทา silicone grease ตรงบริเวณ ground glass joint และมีการไหลเวียนของน้ำอยู่ตลอดเวลา
11. นำชิ้นงานออกมาล้างด้วยน้ำและแอซิโตน (acetone) หลังจากระยะเวลาการทดสอบ 48 ชั่วโมง
12. นำผลของากรสูญเสียน้ำหนักที่ได้มาคำนวณหาอัตราการกัดกร่อนตามสมการที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 ในหน่วยของ mm/yr



รูปที่ 4.3 อุปกรณ์สำหรับการทดสอบเฟอริกซัลเฟต-กรดซัลฟูริก

บทที่ 5

ผลการทดลองและวิเคราะห์

5.1 คำนำ

ในบทนี้กล่าวถึงกรรมวิธีกระบวนการความร้อนเชิงกลในการปรับปรุงเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่ได้จากการทดลอง พร้อมผลการทดสอบการต้านทานการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรนและวิเคราะห์ขอบเกรนที่ผ่านกระบวนการความร้อนเชิงกลในด้านสัดส่วนจำนวน CSL, CFDA และการเรียงตัวของขอบเกรน

5.2 กระบวนการความร้อนเชิงกล

ผลของการนำชิ้นงาน 304AR ผ่านขั้นตอน strain annealing ที่อุณหภูมิ และเวลาต่าง ๆ ซึ่งเริ่มต้นด้วยการให้ความเครียดที่ 3 % ของความหนาชิ้นงานตามด้วยการอบที่อุณหภูมิ 950°C ซึ่งอ้างอิงจากงานวิจัยของปิยะพร[5] แต่ลดเวลากระบวนการลงเป็น 5 นาทีเท่านั้น แสดงดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 สรุปผลของ strain annealing

Temp & Time	Strain percentage								
	Step 1			Step 2			Step 3		
	3%	7%	9%	3%	7%	9%	3%	7%	9%
950°C / 5min	G,A	—	—	G,A	—	—	G,A	—	—
950°C / 3min	G,A	—	—	G,A	—	—	G,A	—	—
925°C / 3min	G,A	—	—	G,A	—	—	G,A	—	—
900°C / 3min	A	A	A	A	A	A	A	A	A

หมายเหตุ G = grain growth, A = chromium carbide attacked

ผลของการให้ความเครียด 3% ที่อุณหภูมิที่ 950°C เป็นเวลา 5 นาที เกรนมีขนาดใหญ่ และมีการตกตะกอนของโครเมียมคาร์ไบด์มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ 304AR โดยทดสอบจากผ่านเซนซิไทเซชันที่อุณหภูมิ 650°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้ว electroetching ในสารละลาย 10% กรดออกซาลิก จึงลองลดเวลาลงมาเป็น 3 นาทีแต่ยังคงไว้ที่อุณหภูมิ 950°C และความเครียด 3%

ผลยังคงเหมือนเดิมคือเกรนมีขนาดใหญ่และมีการตกตะกอนของโครเมียมคาร์ไบด์มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ 304AR เมื่อที่อุณหภูมิ 950°C มีผลต่อขนาดเกรนและส่งผลต่อการตกตะกอนของโครเมียมคาร์ไบด์แล้ว จึงทดลองให้ความเครียด 3% แต่ลดอุณหภูมิลงเป็น 925°C เวลา 3 นาที ก็ไม่เป็นผลอีกคือเกรนมีขนาดใหญ่และมีการตกตะกอนของโครเมียมคาร์ไบด์มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ 304AR สุดท้ายให้ความเครียด 3% ที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 3 นาที ขนาดเกรนไม่เปลี่ยนแปลงแต่ยังคงมีการตกตะกอนของโครเมียมคาร์ไบด์มากอยู่ ถึงแม้ว่าจะแปรเปลี่ยน % ความเครียดไปเป็น 7% และ 9% ในแต่ละ step แล้วก็ตาม จึงสรุปได้ว่าทั้งอุณหภูมิ 950°C และ 925°C มีผลต่อการตกตะกอนของโครเมียมคาร์ไบด์และขนาดเกรนยกเว้น 900°C มีผลต่อการตกตะกอนของโครเมียมคาร์ไบด์เพียงอย่างเดียว

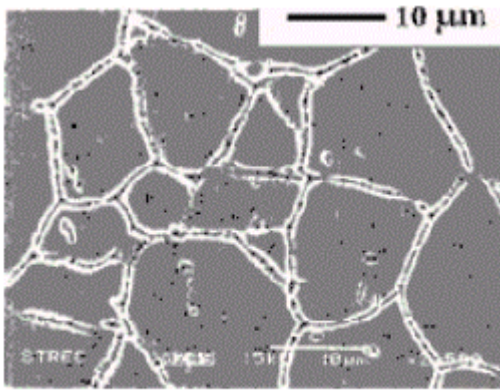
เมื่ออุณหภูมิ 900°C ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดเกรน จึงทดลองอบชิ้นงานที่อุณหภูมินี้ก่อนเป็นเวลา 1 ชั่วโมงแล้วค่อยให้ด้วยความเครียด 3% แล้วตามด้วย 900°C เป็นเวลา 3 นาที ทำซ้ำ 3 ครั้งผลดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.2 ผล strain annealing ที่ 900°C

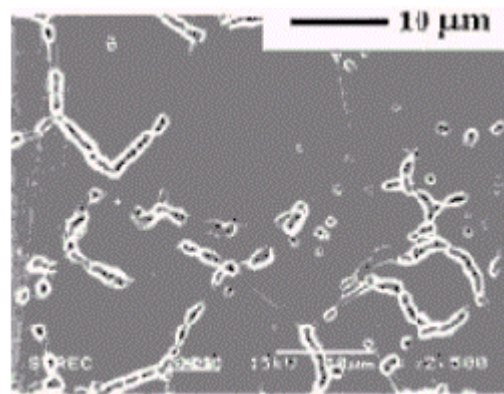
900°C / 1 hr			
Temp & Time	Strain 3 %		
	Step 1	Step 2	Step 3
900°C / 3 min	*	A	A

หมายเหตุ A = chromium carbide attacked

ผลที่ได้เพียงแค่ step1 เท่านั้นที่มีการตกตะกอนของโครเมียมคาร์ไบด์น้อยกว่า 304AR ดังรูปที่ 5.1 แสดงผลของการเปรียบเทียบปริมาณโครเมียมคาร์ไบด์ของ 304AR และ 304TT ที่ผ่านเซนซิไทเซชันที่ 650°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง



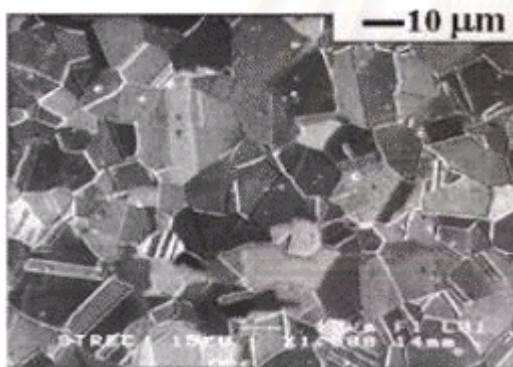
ก) 304AR



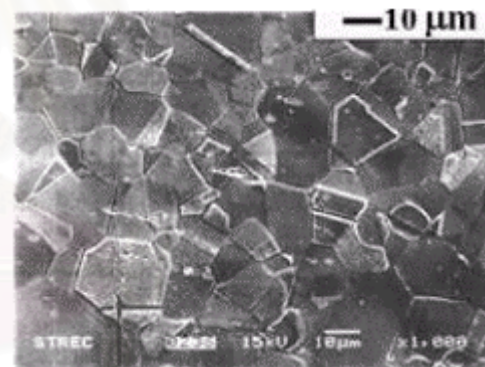
ข) 304TT

รูปที่ 5.1 ปริมาณโครเมียมคาร์ไบด์ที่ 650°C 8 ชั่วโมง ก) 304AR และ ข) 304TT

ดังนั้นกระบวนการความร้อนเชิงกลที่ได้ (304TT) คือ นำ 304AR ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงก่อน แล้วให้ความเครียด 3% ของความหนาขึ้นงานตามด้วยการอบที่อุณหภูมิ 900°C เพียง 3 นาทีครั้งเดียวเท่านั้น ซึ่งโครงสร้างจุลภาคของ 304AR และ 304TT แสดงดังรูปที่ 5.2



ก) 304AR



ข) 304TT

รูปที่ 5.2 โครงสร้างจุลภาคของ ก) 304AR และ ข) 304TT

สภามหาวิทยาลัย
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

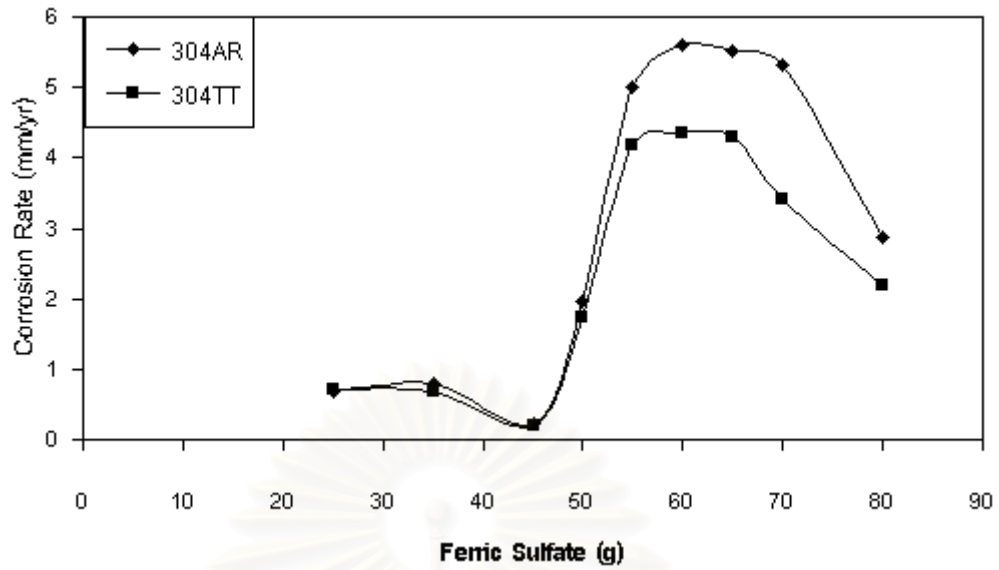
5.3 ทดสอบการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรน

นำชิ้นงาน 304AR และ 304TT ทดสอบการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรนในสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต-กรดซัลฟูริกโดยไม่ผ่านเซนซีไทเซชัน ซึ่งใช้ปริมาณเฟอร์ริกซัลเฟต 50 กรัม ระยะเวลาทดสอบ 120 ชั่วโมงเนื่องจากเป็นระยะเวลาที่นานพอจนสามารถวัดนำหนักความแตกต่างของชิ้นงานก่อนและหลังการทดสอบได้ ซึ่งผลอัตราการกัดกร่อนของทั้งสองไม่แตกต่างกัน ประมาณ 0.161 mm/yr และ 0.195 mm/yr ของ 304AR และ 304TT ตามลำดับ

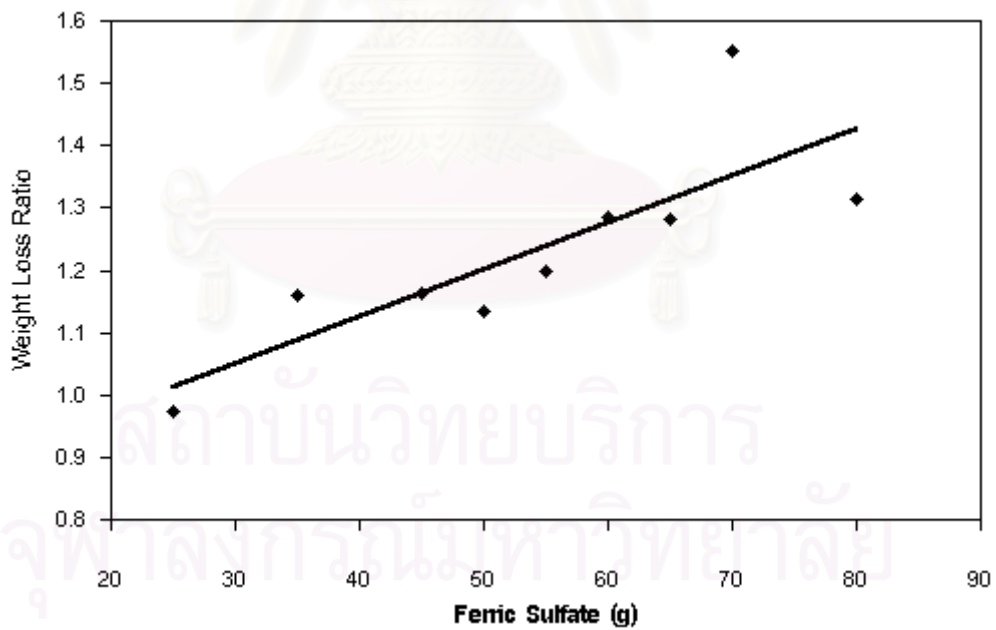
นำชิ้นงาน 304AR และ 304TT ผ่านเซนซีไทเซชัน 2 ชั่วโมง ทดสอบการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรนในสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต-กรดซัลฟูริกโดยเปลี่ยนแปลงปริมาณเฟอร์ริกซัลเฟต แสดงผลดังตารางที่ 5.3 รูปที่ 5.2 และรูปที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ผลการทดสอบการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรนเมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณเฟอร์ริกซัลเฟต และผ่านเซนซีไทเซชัน 2 ชั่วโมง

Ferric sulfate (g)	Corrosion rate (mm/yr)		Weight loss ratio
	304AR	304TT	
25	0.694	0.714	0.972
35	0.792	0.682	1.161
45	0.235	0.202	1.163
50	1.959	1.725	1.136
55	5.004	4.170	1.200
60	5.605	4.358	1.286
65	5.503	4.297	1.281
70	5.321	3.426	1.553
80	2.881	2.194	1.313



รูปที่ 5.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเฟอริกซัลเฟตกับอัตราการกัดกร่อนของ 304AR และ 304TT หลังผ่านเซนซีไทเซชัน 2 ชั่วโมง



รูปที่ 5.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเฟอริกซัลเฟตกับอัตราการสูญเสียน้ำหนัก หลังผ่านเซนซีไทเซชัน 2 ชั่วโมง

จากรูปที่ 5.3 อัตราการกักก่อนบริเวณขอบเกรนในช่วงปริมาณเฟอริกซัลเฟต เริ่มแรกของการทดสอบ 304AR และ 304TT มีค่าต่ำและใกล้เคียงกันไม่สามารถเห็นความแตกต่างได้เป็นเพราะปริมาณเฟอริกซัลเฟตที่น้อยเกินไปจึงไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาอย่างรุนแรงและความสามารถวัดความละเอียดของเครื่องชั่ง แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเฟอริกซัลเฟตซึ่งเป็นตัวออกซิไดเซอร์ อัตราการกักก่อนเริ่มมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อปริมาณเฟอริกซัลเฟตที่ 55 กรัมเป็นช่วงที่เห็นความแตกต่างอัตราการกักก่อนของ 304AR มากกว่า 304TT ได้อย่างชัดเจนเป็นเพราะปริมาณเฟอริกซัลเฟตมีมากเพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาอย่างรุนแรง แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเฟอริกซัลเฟต มากจนถึง 70 กรัม อัตราการกักก่อนกลับลดลงซึ่งตามหลักการแล้วอัตราการกักก่อนควรเพิ่มสูงขึ้น เป็นผลเนื่องจากปฏิกิริยาเกิดการอิมิตัว ดังนั้นจึงไม่สามารถทดสอบในปริมาณเฟอริกซัลเฟตให้สูงไปกว่านี้ได้

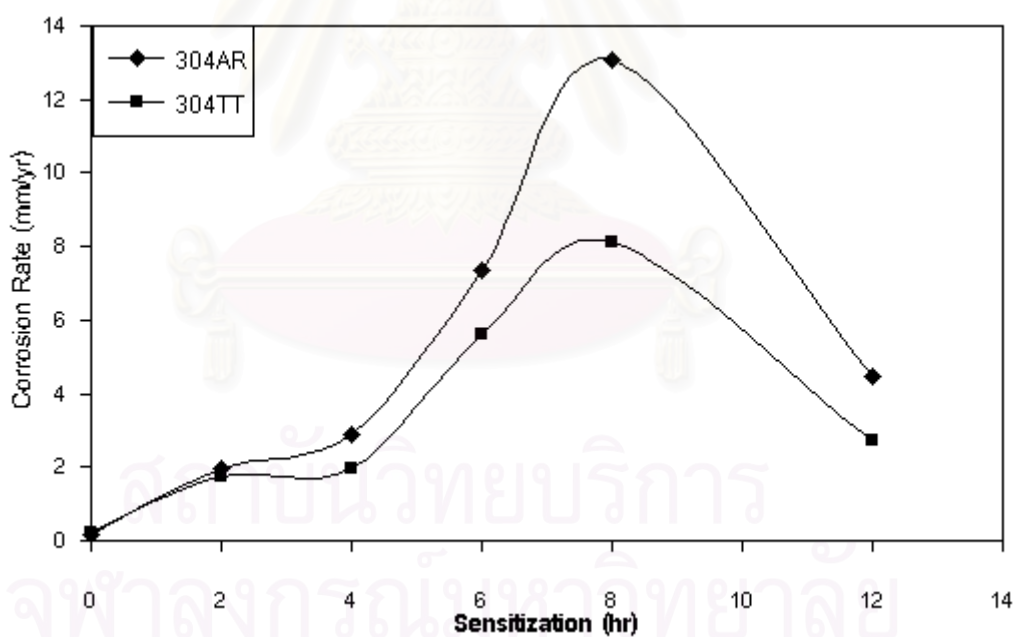
แต่เมื่อวิเคราะห์อัตราการกักก่อนในเชิงอัตราสูญเสียน้ำหนักระหว่างอัตราการกักก่อนของ 304AR กับ 304TT (weight loss ratio) แสดงดังรูปที่ 5.4 จะเห็นค่าความแตกต่างระหว่าง 304AR และ 304TT สูงขึ้นได้อย่างชัดเจนเมื่อปริมาณเฟอริกซัลเฟตเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างในเชิงการกักก่อนระหว่าง 304AR และ 304TT

จากการทดสอบข้างต้น เมื่อต้องการเปรียบเทียบความต้านทานต่อการเกิดเซนซิไทเซชันในระยะเวลาต่าง ๆ ระหว่าง 304AR และ 304TT จึงตัดสินใจเลือกใช้ปริมาณเฟอริกซัลเฟตที่ 50 กรัมในการทดสอบเพราะเป็นจุดเริ่มต้นของปฏิกิริยาที่รุนแรงและจุดเริ่มต้นที่เห็นความแตกต่างได้ชัดเจน และเมื่อเพิ่มชั่วโมงเซนซิไทเซชันมากขึ้นอัตราการกักก่อนที่เพิ่มขึ้นจะไม่ส่งผลต่อปัญหาปฏิกิริยาอิมิตัวเข้ามาเกี่ยวข้อง ผลการทดสอบดังตารางที่ 5.4 รูปที่ 5.5 และ รูปที่ 5.6

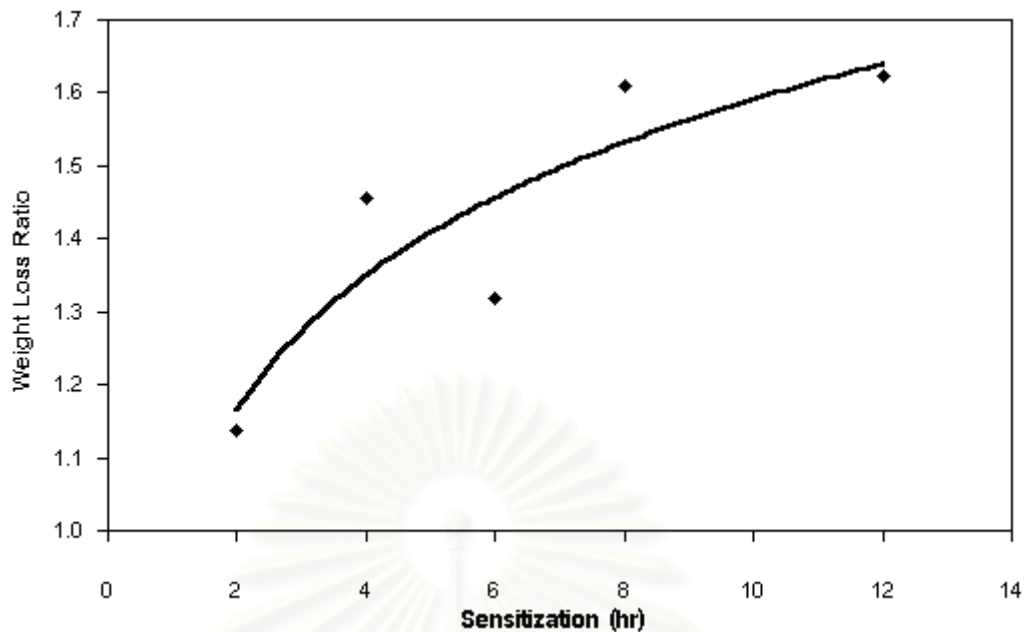
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.4 สรุปผลทดสอบอัตราการกัดกร่อนที่เปลี่ยนแปลงระยะเวลาเซนซีไทเซชันที่ปริมาณเฟอริกซัลเฟต 50 กรัม

Sensitization (hr)	Corrosion rate (mm/yr)		Weight loss Ratio
	304AR	304TT	
2	1.959	1.724	1.136
4	2.869	1.971	1.456
6	7.365	5.586	1.318
8	13.048	8.110	1.609
12	4.459	2.749	1.622



รูปที่ 5.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดกร่อนกับชั่วโมงเซนซีไทเซชัน ปริมาณเฟอริกซัลเฟต 50 กรัม

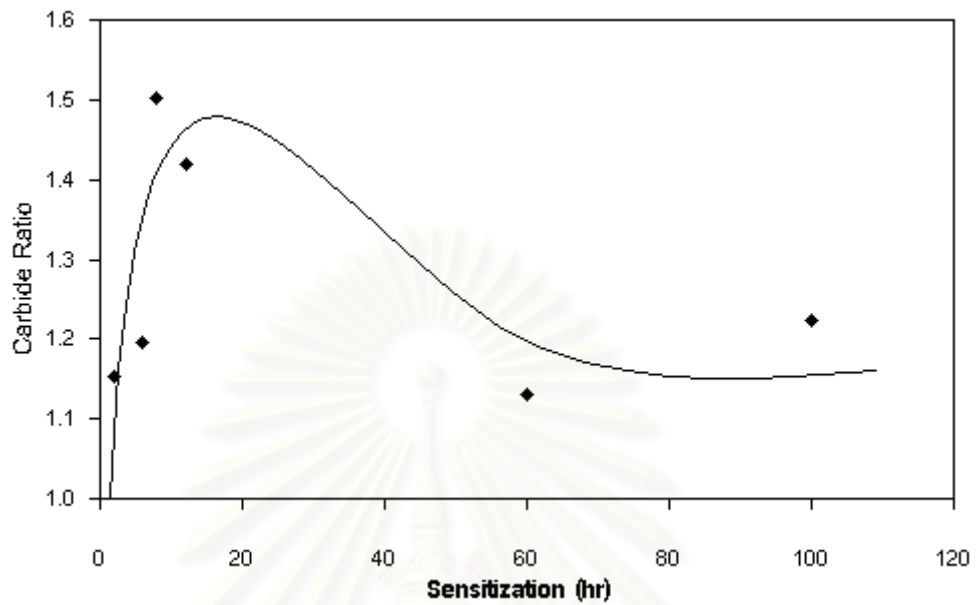


รูปที่ 5.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสูญเสียน้ำหนักกับชั่วโมงเซนซีไทเซชัน ปริมาณเฟอร์ริกซัลเฟต 50 กรัม

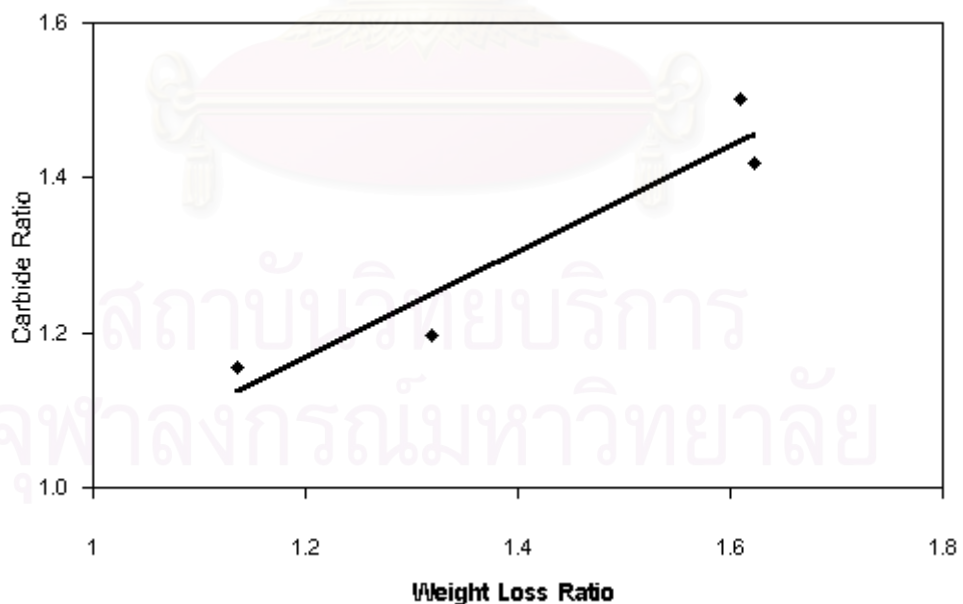
จากรูปที่ 5.5 เมื่อเพิ่มชั่วโมงเซนซีไทเซชันสูงขึ้น อัตราการกัดกร่อนของ 304AR และ 304TT มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย และค่อย ๆ เห็นความแตกต่างอัตราการกัดกร่อนของ 304AR และ 304TT ได้อย่างชัดเจน ซึ่งอัตราการกัดกร่อนของ 304AR มากกว่า 304TT ถึงแม้ว่าเซนซีไทเซชัน 10 ชั่วโมงจะไม่ได้ทำการทดสอบก็ตาม ผลของแนวโน้มอัตราการกัดกร่อนทั้ง 304AR และ 304TT ควรตกลงเหมือนที่เซนซีไทเซชัน 12 ชั่วโมงเป็นผลเนื่องจากปฏิกิริยาอิมิตตัวเอง ดังนั้นจึงไม่สามารถทดสอบในชั่วโมงเซนซีไทเซชันให้มากไปกว่านี้ได้

เมื่อพิจารณาในเชิงอัตราการสูญเสียน้ำหนักดังรูปที่ 5.6 จะเห็นแนวโน้มความแตกต่างของอัตราการกัดกร่อนระหว่าง 304AR และ 304TT สูงขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเพิ่มชั่วโมงเซนซีไทเซชันสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้มอัตราส่วนคาร์ไบด์ระหว่างเปอร์เซนต์ปริมาณโครเมียมคาร์ไบด์ที่เชื่อมต่อกันบริเวณขอบเกรนของ 304AR กับ 304TT (carbide ratio)[22] ในรูปที่ 5.7 การเกิดโครเมียมคาร์ไบด์ของทั้ง 304AR และ 304TT ในช่วงแรกจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่เปอร์เซนต์โครเมียมคาร์ไบด์ของ 304TT ต่ำกว่า และจะเริ่มเห็นความแตกต่างได้อย่างชัดเจนขึ้นเมื่อชั่วโมงเซนซีไทเซชันสูง จนถึงชั่วโมงที่ 12 ของเซนซีไทเซชันอัตราส่วนคาร์ไบด์จะสูงสุด เนื่องจากการเกิดโครเมียมคาร์ไบด์ของ 304AR ถึงระดับคงที่ประมาณ 80-90 %[23] แต่โครเมียมคาร์ไบด์ของ 304TT ประมาณ 60% และยังคงสามารถเพิ่มขึ้นได้อีกเพื่อเข้าสู่ระดับคงที่ ทำให้อัตราส่วนคาร์ไบด์ลดลงจนเรื่อย ๆ จนคงที่ประมาณ 100 ชั่วโมงเซนซีไทเซชัน ดังนั้นปริมาณของโครเมียมคาร์ไบด์

มีผลต่ออัตราการกัดกร่อนที่แตกต่างกันระหว่าง 304AR และ 304TT ซึ่งแนวโน้มของอัตราการสูญเสียน้ำหนักหลังจากเซนซิไทเซชันที่ 12 ชั่วโมงควรเหมือนกับอัตราส่วนคาร์ไบด์ด้วย



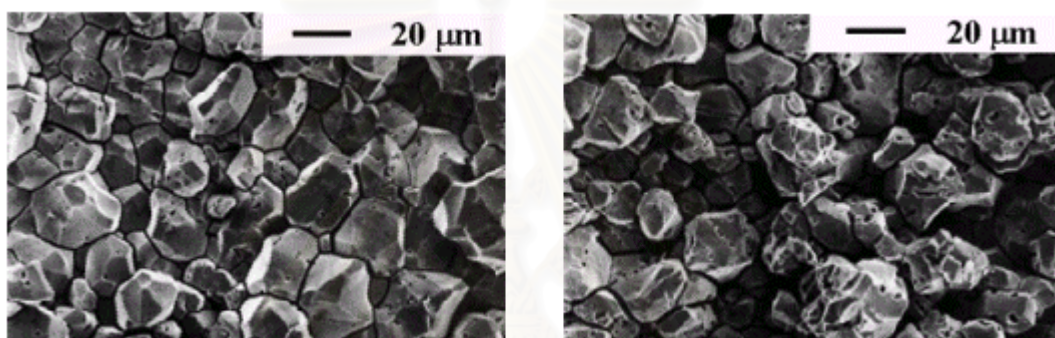
รูปที่ 5.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนคาร์ไบด์กับชั่วโมงเซนซิไทเซชัน



รูปที่ 5.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสูญเสียน้ำหนักกับอัตราส่วนคาร์ไบด์
หลังผ่านเซนซิไทเซชันเท่ากัน

เมื่อพิจารณาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสูญเสียน้ำหนักกับอัตราส่วนคาร์ไบด์ที่ระยะเวลาเซนซิไทเซชันเท่ากันแสดงดังรูปที่ 5.8 เมื่อค่าของอัตราการสูญเสียน้ำหนักสูงขึ้นค่าของอัตราส่วนคาร์ไบด์สูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งสามารถบอกได้ว่าอัตราการกัดกร่อนสูงขึ้นเป็นผลเนื่องจากปริมาณโครเมียมคาร์ไบด์ที่สูงขึ้นนั่นเอง

จากรูปที่ 5.9 แสดงผลการทดสอบการกัดกร่อนของ 304AR และ 304TT ที่ผ่านเซนซิไทเซชัน 8 ชั่วโมง ปริมาณเฟอริกซัลเฟต 50 กรัม ซึ่งผลการกัดกร่อนของ 304AR มีความรุนแรงมากกว่า 304TT อย่างมาก เนื่องจากระยะเวลาเซนซิไทเซชันที่ 8 ชั่วโมงปริมาณโครเมียมคาร์ไบด์ที่เชื่อมต่อกันบริเวณขอบเกรนของ 304AR มีมากถึง 85% ในขณะที่ 304TT มีประมาณแค่ 56%



ก) 304AR

ข) 304TT

รูปที่ 5.9 ผลการทดสอบการกัดกร่อนของ ก) 304AR และ ข) 304TT

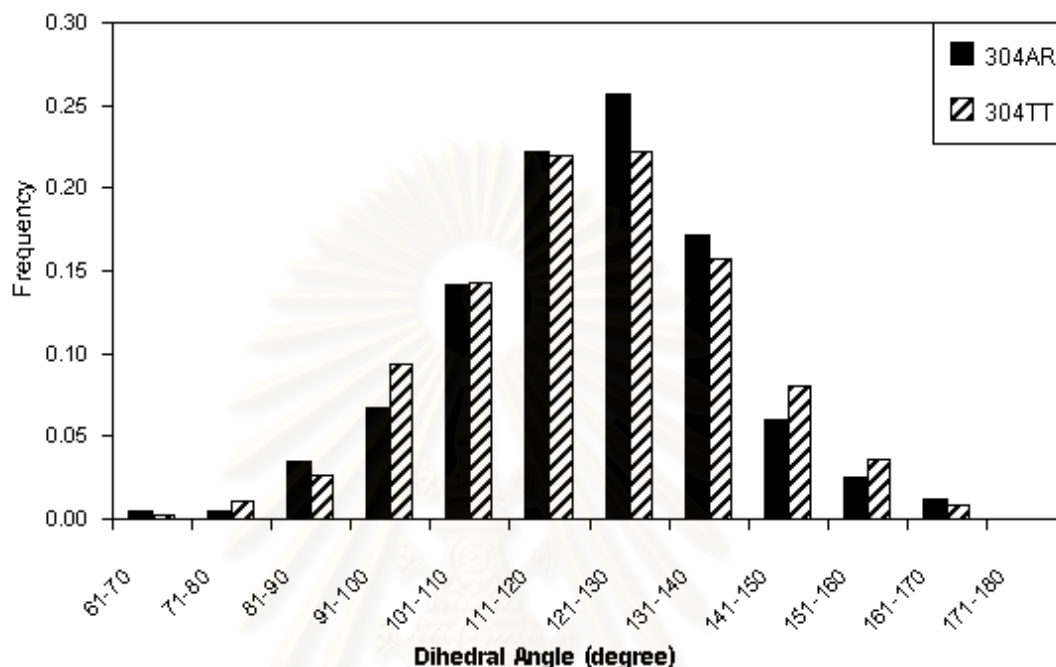
ที่ผ่านเซนซิไทเซชัน 8 ชั่วโมง ปริมาณเฟอริกซัลเฟต 50 กรัม

ดังนั้นจากการทดสอบทั้งหมดสามารถบอกได้ว่า ที่ระยะเวลาเซนซิไทเซชันเท่ากัน 304TT มีปริมาณโครเมียมคาร์ไบด์ที่เชื่อมต่อกันบริเวณขอบเกรนน้อยกว่า 304AR หรืออาจกล่าวได้ว่าขอบเกรนของ 304TT มีความต้านทานต่อการการตกตะกอนของโครเมียมคาร์ไบด์ดีกว่า 304AR เป็นผลให้สามารถต้านทานการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรนได้ดีกว่า 304AR นั่นเอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.4 Cumulative Frequency of Dihedral Angle Distribution

เมื่อนำ 304AR และ 304TT ผ่านการวัดมุม dihedral angle ที่ triple junction แล้วนำมาหาความถี่ของการกระจายตัวของมุมแสดงดังรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.10 กราฟการกระจายตัวของ dihedral angle ของ 304AR และ 304TT

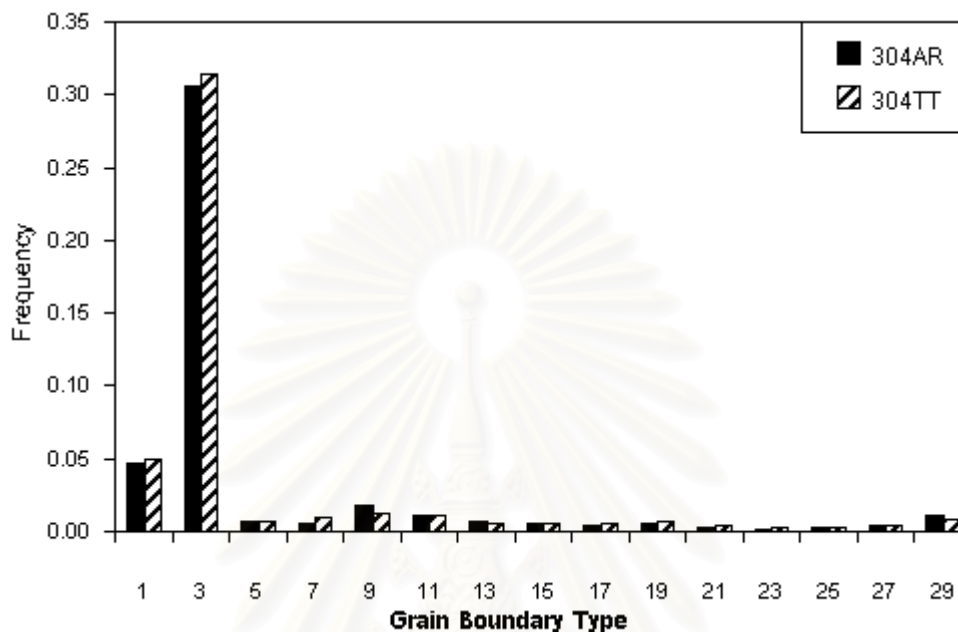
จากรูปที่ 5.10 ลักษณะการกระจายตัวของ dihedral angle ของทั้ง 304AR และ 304TT มีลักษณะใกล้เคียงกันมาก เมื่อนำมาวิเคราะห์หาค่าทางสถิติผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 5.5 ค่า CFDA ของทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ค่า CFDA ของ 304TT มากกว่าของ 304AR เล็กน้อยและเมื่อนำมาเปรียบเทียบหาสัดส่วนจำนวน CSL ในรูปที่ 3.3 สามารถบอกได้ว่าสัดส่วนจำนวน CSL ของ 304AR และ 304TT น่าจะอยู่ในช่วง 20-30% และสัดส่วนจำนวน CSL ของ 304TT และ 304AR ไม่แตกต่างกันมากในเชิงสถิติ

ตารางที่ 5.5 ผลทางสถิติของการกระจายตัวของ dihedral angle

Sample	# Triple junction	SD	CFDA
304AR	144	16.577	0.792
304TT	150	17.296	0.742

5.5 Coincidence Site Lattice

เมื่อนำ 304AR และ 304TT วิเคราะห์ด้วยเทคนิค Electron Backscatter Diffraction Pattern โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงผลดังต่อไปนี้

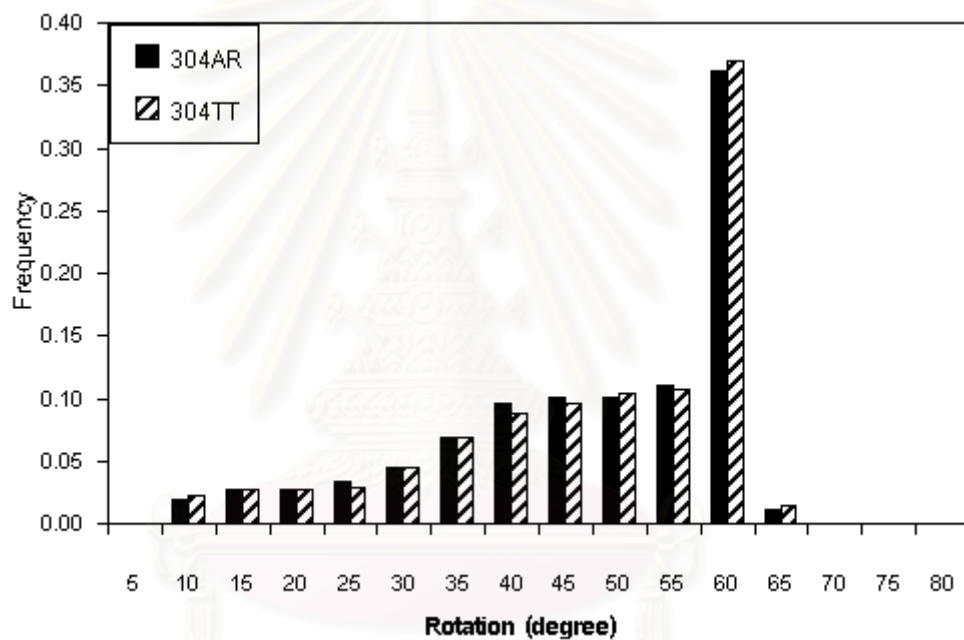


รูปที่ 5.11 กราฟการแจกแจงการกระจายตัว CSL ของ 304AR และ 304TT

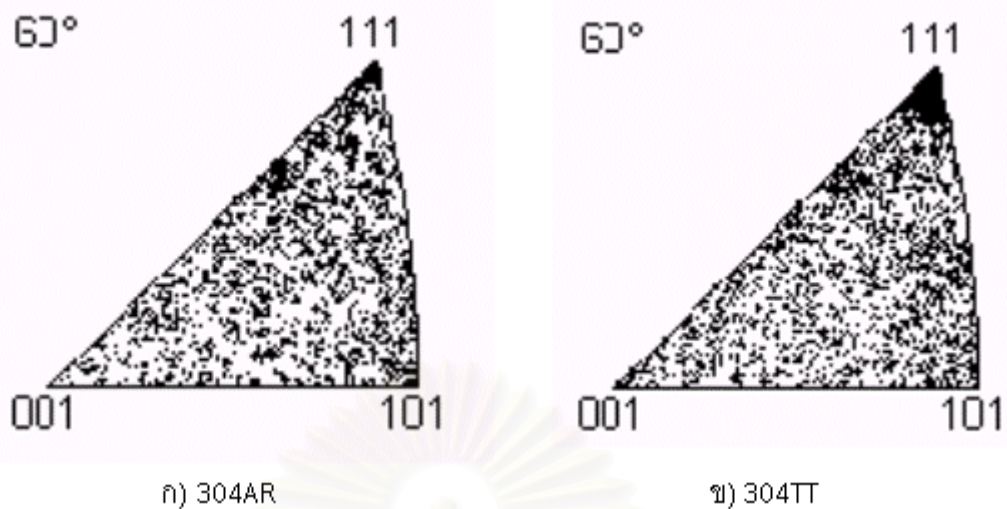
จากรูปที่ 5.11 แสดงการจำแนกแจกแจงการกระจายตัว CSL ในแต่ละประเภทขอบเกรนตั้งแต่ $\Sigma 1-29$ ของทั้ง 304AR และ 304TT มีค่าใกล้เคียงไม่แตกต่างกัน แต่ที่ $\Sigma 3$ มีค่ามากที่สุดคือประมาณ 0.31 ของทั้ง 304AR และ 304TT และเมื่อรวมค่าสัดส่วนจำนวน CSL ทั้งหมดแล้วของ 304AR และ 304TT คือ 0.39 และ 0.40 ตามลำดับ มีค่าใกล้เคียงกันมากจนถือว่าไม่แตกต่าง ซึ่งสอดคล้องกับค่า CFDA ที่หาได้ข้างต้น สามารถยืนยันได้ว่าขอบเกรนประเภท CSL มีความสัมพันธ์เนื่องกับการกระจายตัวของ dihedral angle อย่างแน่นอน

จากการศึกษาของ P. Lin และคณะ[3] อัตราการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรนของ alloy 600 สามารถลดลงได้เมื่อสัดส่วนจำนวน special grain boundary เพิ่มขึ้นและไม่สามารถเกิดการกัดกร่อนได้เลยที่สัดส่วนจำนวน special grain boundary ประมาณ 100% แต่จากข้อมูลข้างต้น อัตราการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรนของ 304TT ต่ำกว่า 304AR อย่างมาก ในขณะที่สัดส่วนจำนวน CSL ของทั้งสองชิ้นงานมีค่าประมาณ 0.40 และไม่แตกต่างกัน ซึ่งไม่สามารถนำมาอธิบายถึงสาเหตุในการเพิ่มประสิทธิภาพขอบเกรนของ 304TT ได้

จากการศึกษาของ C. B. Thomson และ V. Randle[24] ต่อขอบเกรนหลังจากผ่านกระบวนการให้ความเครียดเพียงเล็กน้อยแล้วตามด้วยการอบที่อุณหภูมิ (strain annealing) ของ superpure nickel ซึ่งไม่เป็นผลต่อการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนจำนวน CSL แต่มีผลต่อมุมที่เบี่ยงเบนไปจากการจัดเรียงตัว (Brandon criterion; $v_m = 15 \Sigma^{-1/2}$) ของขอบเกรน $\Sigma 3^n$ ตัวอย่างเช่น $\Sigma 3$ มีมุมการจัดเรียงตัว 60 องศาและมุมที่สามารถเบี่ยงเบนไปได้คือ 8.7 องศา (v_m) แต่ถ้าขอบเกรนเบี่ยงเบนไป 2 องศา ดังนั้น v/v_m คือ 0.23 เป็นต้น ซึ่ง strain annealing จะทำให้เกิดการหมุนของ local lattice บริเวณใกล้ขอบเกรนและส่งผลต่อ boundary plane reorientation ทำให้ v/v_m ลดน้อยลง จากการศึกษานี้ของ Hiroyuki Kokawa และคณะ[25] เมื่อขอบเกรนมีค่าการเบี่ยงเบน v/v_m ลดน้อยลง ส่งผลต่อการตกตะกอนของโครเมียมคาร์ไบด์บริเวณนั้นต่ำลงด้วย



รูปที่ 5.12 กราฟการแจกแจงการกระจายตัวของ misorientation angle ของ 304AR และ 304TT

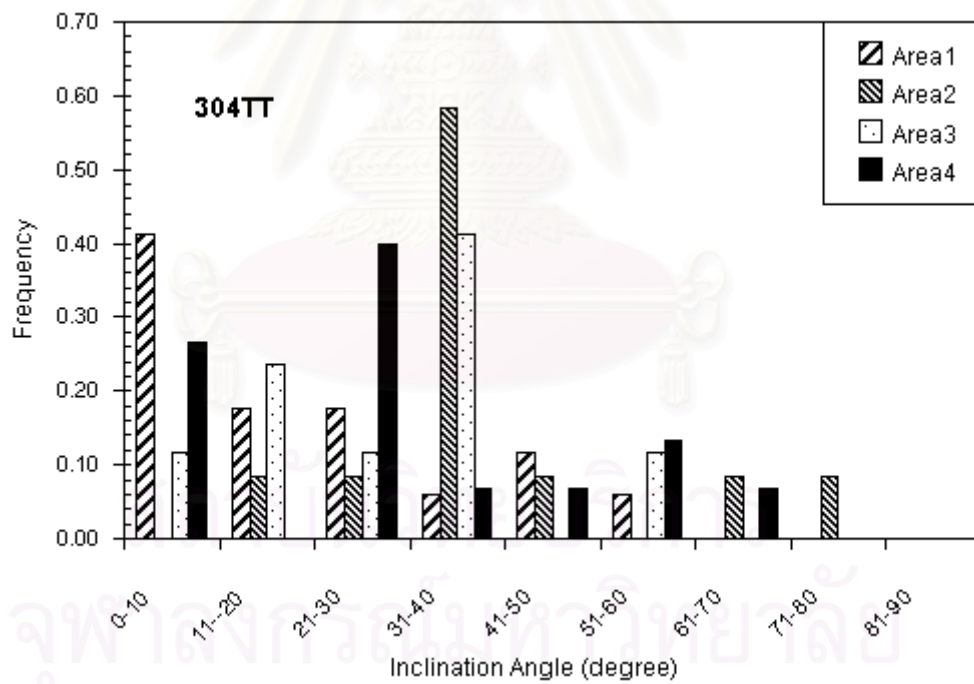
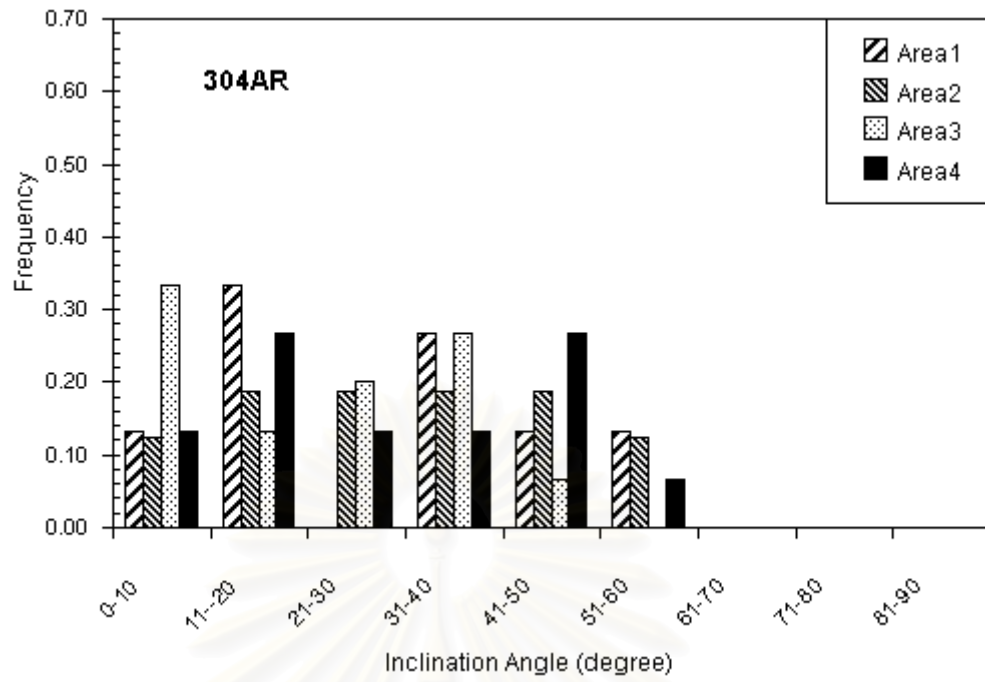


รูปที่ 5.13 Inverse pole figure ของ ก) 304AR และ ข) 304TT

เมื่อพิจารณาถึงการแจกแจงกระจายตัวของมุม misorientation angle ในทุก ๆ 5 องศา ของทั้ง 304AR และ 304TT ดังรูปที่ 5.12 ซึ่งที่มุม 60 องศาเป็นมุมของการจัดเรียงตัวของ $\Sigma 3$ และที่มุม 55 และ 65 องศาถือว่าเป็นมุมที่เบี่ยงเบนออกไปจากมุม 60 องศา (60 ± 5 องศา) มีลักษณะใกล้เคียงไม่แตกต่างกัน แต่เมื่อพิจารณา inverse pole figure ที่มุม 60 องศา ดังรูปที่ 5.13 304TT มีการกระจายตัวของ misorientation angle อย่างหนาแน่นที่บริเวณ (111) มากกว่า 304AR แต่สัดส่วนจำนวนจำนวน $\Sigma 3$ ของทั้งสองชิ้นงานมีค่าไม่ต่างกัน อาจกล่าวได้ว่าที่ $\Sigma 3$ ของ grain boundary plane (111) ของ 304TT มีมุมที่เบี่ยงเบนไปต่ำกว่า $\Sigma 3$ ของ 304AR จึงเป็นสาเหตุหนึ่งของการเพิ่มประสิทธิภาพของเกรนของ 304TT ต่อการต้านทานการตกตะกอน ไครเมียมคาร์ไบด์

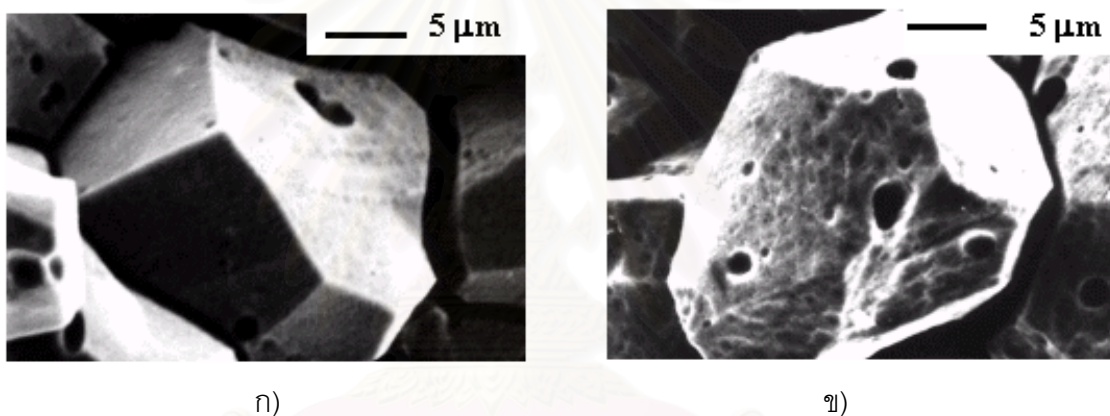
5.6 การเอียงตัวของขอบเกรน

หลักการของ strain annealing ส่งผลต่อการปรับเปลี่ยนขอบเกรนในด้าน boundary plane reorientation ซึ่งมีหลายทิศทางในการศึกษาถึงลักษณะของ grain boundary plane ของวัสดุด้วยกัน ซึ่งในที่นี้ใช้หลักการของมุมการเอียงตัวของขอบเกรนในการวิเคราะห์เนื่องจากมีข้อจำกัดด้านขนาดเกรนที่เล็กมาก ($10\mu\text{m}$)



รูปที่ 5.14 กราฟการกระจายตัวของมุมการเอียงตัวของขอบเกรนของ 304AR และ 304TT

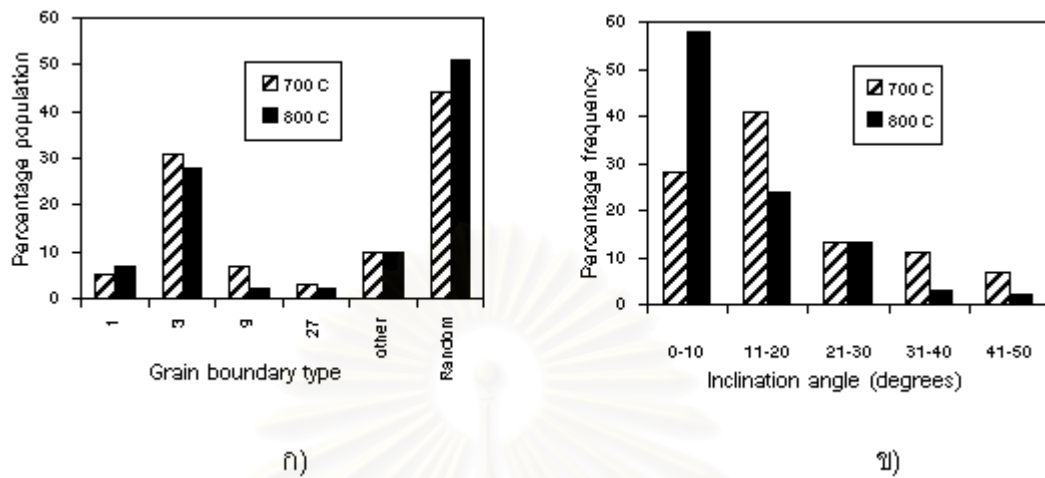
จากรูปที่ 5.14 แสดงลักษณะแจ่มแจ้งการกระจายตัวของมุมการเอียงตัวของขอบเกรนของ 304AR และ 304TT ใน 4 พื้นที่ด้วยกัน เมื่อพิจารณาที่ 304AR มุมการเอียงตัวของขอบเกรนมีลักษณะการกระจายตัวที่กระจุกกระจายทั่วทุกช่วงองศา แต่ของ 304TT มีการกระจายตัวของมุมอยู่ในช่วง 20-40 องศาอย่างมากกว่าช่วงอื่น และสามารถเห็นความแตกต่างของมุมการเอียงตัวของขอบเกรนของ 304AR และ 304TT ได้อย่างชัดเจนเมื่อพิจารณาลักษณะเหลี่ยมเกรนจากรูปที่ 5.15 เหลี่ยมเกรนของ 304AR มีลักษณะของมุมและการเอียงตัวอย่างเด่นชัด และในแต่ละระนาบของ grain boundary plane มีลักษณะเรียบ แตกต่างจาก 304TT ที่มีลักษณะเกรนกลมเหลี่ยมเกรนไม่คมชัดเท่า 304AR และในแต่ละ grain boundary plane ไม่เรียบเป็นระนาบ ซึ่งเป็นสาเหตุให้การกระจายตัวของมุมการเอียงตัวของขอบเกรนของ 304AR และ 304TT แตกต่างกัน



รูปที่ 5.15 การเอียงตัวของขอบเกรน ก) 304AR ข) 304TT
ที่ผ่านเซนซิไทเซชัน 8 ชั่วโมง ปริมาณเฟอริกซัลเฟต 50 กรัม

จากงานวิจัยของ Mark Caul และคณะ[21] ศึกษาคุณสมบัติของ austenitic stainless steel ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 700° และ 800° C แต่ทั้งสองชิ้นงานมีสัดส่วนจำนวน CSL ในรูปของ $\Sigma 3$ ใกล้เคียงกันมาก เมื่อศึกษาถึงมุมการเอียงตัวของขอบเกรนของทั้งสองชิ้นงานพบว่ามีความแตกต่างกัน ซึ่งมุมการเอียงตัวของขอบเกรน 800°C ใกล้เคียงกับผิวหน้าบนสุดมากกว่า 700°C เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงขอบเกรนเคลื่อนตัวได้ดีกว่าและเป็นผลให้พลังงานขอบเกรนต่ำลงดังรูปที่ 5.16 ดังนั้นจึงเป็นอีกสาเหตุหนึ่งของการเพิ่มประสิทธิภาพขอบเกรนของ 304TT ที่มีการกระจายตัวของมุมการเอียงตัวของขอบเกรนใกล้เคียงกับผิวหน้าบนสุดมากกว่า 304AR ทำให้ขอบเกรนมีพลังงานต่ำและส่งผลต่ออัตราการแพร่บริเวณขอบเกรน (grain

boundary diffusion) ที่ต่ำเช่นกัน จึงทำให้ขอบเกรน 304TT ด้านทานการตกตะกอนโครเมียมคาร์ไบด์ได้ดีกว่า 304AR



รูปที่ 5.16 ก) แจกแจงสัดส่วนขอบเกรนแต่ละประเภทและ

ข) การกระจายตัวของมุมการเอียงตัวของขอบเกรนของชิ้นงาน 700°C และ 800°C

5.7 สรุป

การเพิ่มประสิทธิภาพของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ให้ด้านทานการกัดกร่อนบริเวณ โดยกระบวนการความร้อนเชิงกลสามารถทำได้โดยการนำเหล็กกล้าไร้สนิม 304AR ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 900°C เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมงแล้วจึงนำไปให้ความเครียด 3% ตามด้วยการอบที่อุณหภูมิ 900°C อีก 3 นาที และทดสอบในสารละลายเฟอริกซัลเฟต-กรดซัลฟูริกที่ปริมาณเฟอริกซัลเฟต 50 กรัมและเซนซิไทเซชัน 8 ชั่วโมง 304TT สามารถด้านทานการกัดกร่อนได้มากกว่า 304AR ถึง 38% ถึงแม้ว่า strain annealing ไม่สามารถเปลี่ยนสัดส่วนจำนวน CSL ได้ แต่อาจทำให้เกิดการหมุนของ local lattice บริเวณใกล้ขอบเกรนซึ่งส่งผลต่อ boundary plane reorientation ทำให้ $\Sigma 3$ ของ grain boundary plane (111) ของ 304TT ซึ่งแสดงจากมุมที่เบี่ยงเบนไปจากการจัดเรียงตัวที่ 60 องศาต่ำกว่า $\Sigma 3$ ของ 304AR และมุมการเอียงตัวของขอบเกรนของ 304TT มีการกระจายตัวของมุมอยู่ในช่วง 20-40 องศาซึ่งใกล้เคียงกับผิวหน้าบนสุดมากกว่า 304AR ที่กระจายตัวทุกช่วงองศา เป็นผลให้พลังงานขอบเกรนของ 304TT ต่ำ ดังนั้นขอบเกรน 304TT จึงด้านทานการตกตะกอนของโครเมียมคาร์ไบด์ได้ดีกว่า 304AR

บทที่ 6

ศึกษาความเป็นไปได้โครงการ

6.1 คำนำ

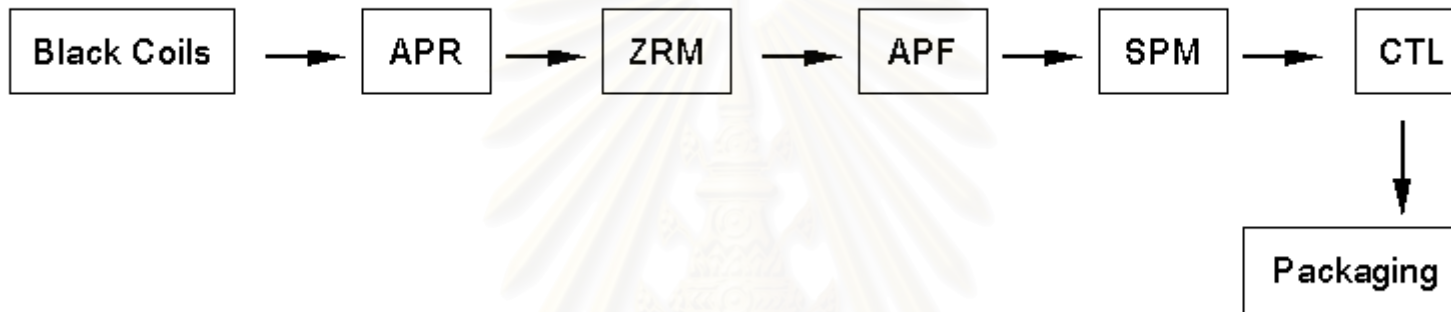
ในบทนี้กล่าวถึงการวิเคราะห์ประเมินโครงการของกระบวนการผลิตเหล็กกล้าไร้สนิม 304AR (ที่มาจากโรงงาน) เปรียบเทียบกับ 304TT (ผ่านกระบวนการความร้อนเชิงกล) ในเรื่อง ต้นทุนการผลิตและกำลังการผลิตเป็นต้น เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการจัดตั้งกระบวนการผลิต 304TT ซึ่งข้อมูลทั้งหมดที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นข้อมูลของโรงงานหนึ่งซึ่งขอสงวนนามไว้เพื่อผลประโยชน์ทางการค้า

6.2 กระบวนการผลิต

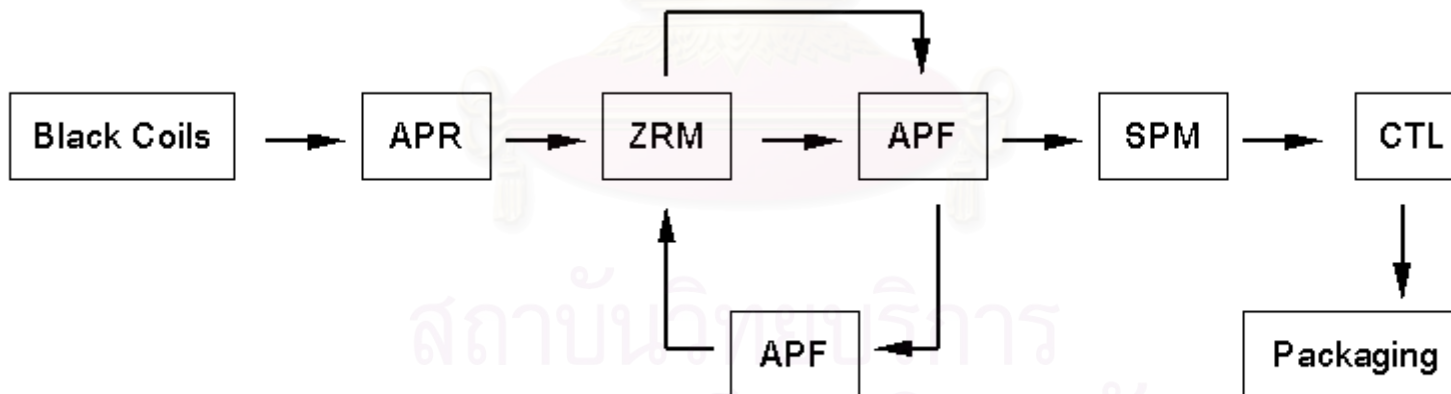
กระบวนการผลิตเหล็กกล้าไร้สนิม 304AR แสดงดังรูปที่ 6.1 เริ่มต้นจากการนำวัตถุดิบ ม้วนเหล็กรีดร้อน (Black Coils) ที่สั่งซื้อจากบริษัทอื่น นำมาผ่านขั้นตอนการอบอ่อนที่อุณหภูมิสูง และขจัดออกไซด์ที่ผิวหน้าเหล็กด้วยสารเคมีก่อน (First Annealing and Pickling; APR) แล้วจึงผ่านกระบวนการรีดเย็น (Sendzimir Mill; ZRM) เพื่อปรับความหนาให้ได้ตามต้องการ ตามด้วย กระบวนการอบอ่อนที่อุณหภูมิสูงและผ่านการขจัดออกไซด์อีกครั้งด้วยสารเคมีสำหรับผิวมันเงา (Final Annealing and Pickling; APF) แล้วจึงผ่านขั้นตอนการปรับความเรียบผิวหน้าเหล็ก (Skin Pass Mill; SPM) ก่อนการตัดเป็นแผ่น (Cut-to-Length Line; CTL) ขนาดตามความต้องการของลูกค้า สุดท้ายเป็นการบรรจุหีบห่อ (Packaging) และจัดส่งให้ลูกค้า

ส่วนกระบวนการผลิต 304TT (900°C / 1 ชั่วโมง + ความเครียด 3% + 900°C / 3 นาที) เป็นการสมมติเพิ่มเติมกระบวนการบางส่วนจากกระบวนการผลิต 304AR ข้างต้น คือหลังจากผ่านกระบวนการ APR ให้ผ่านกระบวนการนี้ซ้ำอีกครั้งที่อุณหภูมิ 900°C ระยะเวลา 1 ชั่วโมง จึงให้ความเครียด 3% ตรงกระบวนการ ZRM แล้วจึงนำไปผ่านกระบวนการ APR ที่อุณหภูมิ 900°C ระยะเวลา 3 นาที ก่อนจะกลับไปยังกระบวนการ SPM ตามเดิม

กระบวนการผลิต 304AR



กระบวนการผลิต 304TT



รูปที่ 6.1 กระบวนการผลิต 304AR และ 304TT

6.3 ประเมินโครงการ 304AR และ 304TT

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของต้นทุน ปริมาณการผลิต และผลกำไร (Cost-Volume-Profit Analysis) เป็นเครื่องมือที่ช่วยในการตัดสินใจด้านการควบคุมต้นทุน การวางแผนกำไร การตัดสินใจการผลิต การตลาด และการเงิน ซึ่งเป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์อย่างมากในการวางแผนและควบคุมการดำเนินการ

ตารางที่ 6.1 ข้อมูลต้นทุนคงที่ ต้นทุนผันแปรและรอบเวลาการผลิตของแต่ละกระบวนการผลิต 304AR

กระบวนการ	304AR		
	ต้นทุนคงที่ (พันบาท)	ต้นทุนผันแปร (บาท/ตัน)	รอบเวลาการผลิต (นาที/ตัน)
APR	7,881	1,405	1.43
ZRM	8,473	110	4.98
APF	4,737	1,647	3.39
SPM	2,319	226	2.72
CTL	1,005	392	2.69
Packaging	7,457	145	-
รวม	31,872	3,925	-

จากตารางที่ 6.1 แสดงข้อมูลกระบวนการผลิต 304AR ต้นทุนคงที่ (Fix Cost) ในแต่ละกระบวนการ ซึ่งเป็นต้นทุนที่เกิดจากค่าซ่อมบำรุง ค่าใช้จ่ายผู้เชี่ยวชาญ ค่าการจัดการหรือบริหาร ค่าการสื่อสาร ค่าอุปกรณ์สำนักงาน ค่าจ้างผู้รับเหมาและค่าสิ่งบันเทิง ซึ่งแตกต่างกันออกไปในแต่ละกระบวนการ ดังนั้นต้นทุนคงที่รวมทุกกระบวนการคือ 31,872 พันบาท/ปี ส่วนต้นทุนผันแปร (Variable Cost) ในแต่ละกระบวนการเกิดจากค่าสารเคมีและค่า interleaving paper & plastic จะเป็นต้นทุนที่แปรเปลี่ยนไปตามปริมาณการผลิต ดังนั้นต้นทุนผันแปรรวมทุกกระบวนการคือ 3,925 บาท/ตัน และยังแสดงข้อมูลรอบเวลาการผลิต (Cycle Time) ในแต่ละกระบวนการ ซึ่งหมายถึงระยะเวลาที่ผลิตภัณฑ์ผลิตได้ในแต่ละกระบวนการจากสายการผลิต เพื่อนำไปหาเวลามาตรฐาน (Standard Time) ซึ่งเป็นเวลาที่ยาวนานที่สุดของรอบเวลาการผลิตทั้งหมด จะเป็นตัวกำหนดกำลังการผลิต แต่จากข้อมูลรอบเวลาการผลิตของ packaging ไม่สามารถบอกได้เนื่องจากเป็นการจ้างผู้รับเหมาทำแทนจึงคิดเพียงค่าต้นทุนเท่านั้น ในที่นี้เวลามาตรฐานของการผลิต 304AR คือ 4.98 นาที/ตัน

ตารางที่ 6.2 ข้อมูลต้นทุนคงที่โรงงานของการกระบวนการผลิต 304AR

ต้นทุนคงที่	จำนวน (พันบาท)
Maintenance	125,730
Engineering Dep.	40,108
Project Dep.	19,449
Indirect Dep.	96,890
รวม	282,177

ตารางที่ 6.2 แสดงข้อมูลต้นทุนคงที่โรงงานของการกระบวนการผลิตของ 304AR ที่เพิ่มเติมจากต้นทุนคงที่กระบวนการในตารางที่ 6.1 จำแนกเป็น ค่า Maintenance คือค่าซ่อมบำรุงเครื่องจักร ค่า Engineering Dep. คือค่าจ้างวิศวกร ค่า Project Dep. คือค่าสร้างโครงการเพิ่มเติมเพื่อความสะดวกในการทำงาน และสุดท้าย Indirect Dep. คือค่าใช้จ่ายอื่น ๆ นอกเหนือออกไป ซึ่งรวมเป็น 282,177 พันบาท/ปี

ตารางที่ 6.3 ข้อมูลต้นทุนคงที่ ต้นทุนผันแปรและรอบเวลาการผลิตของแต่ละกระบวนการผลิต 304TT

กระบวนการ	304TT		
	ต้นทุนคงที่ (พันบาท)	ต้นทุนผันแปร (บาท/ตัน)	รอบเวลาการผลิต (นาที/ตัน)
APR	7,881	1,405	1.43
ZRM*	16,946	220	5.22
APF*	14,211	4,941	66.39
SPM	2,319	226	2.72
CTL	1,005	392	2.69
Packaging	7,457	145	-
รวม	49,819	7,329	-

หมายเหตุ * คือ กระบวนการที่ถูกเพิ่ม

จากตารางที่ 6.3 แสดงข้อมูลกระบวนการผลิต 304TT ซึ่งแตกต่างจาก 304AR โดยเพิ่มเติมกระบวนการ ZRM และ APF เข้าไปอีกดังแสดงในรูปที่ 6.1 ที่กระบวนการ ZRM ต้องเพิ่มการรีด 3% อีกครั้ง ดังนั้นต้นทุนคงที่และต้นทุนผันแปรจึงเพิ่มขึ้นอีกเท่าตัวเป็น 16,946 พันบาทและ

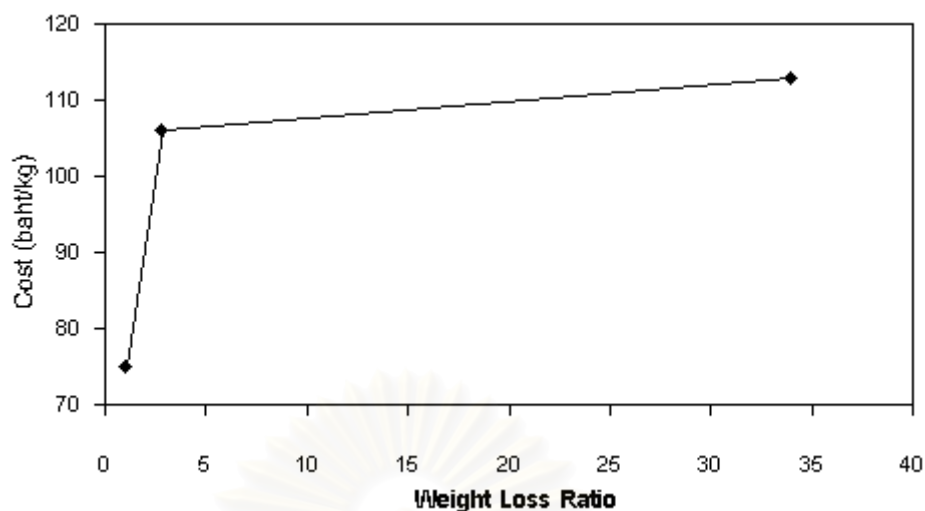
220 บาท/ตันตามลำดับ แต่รอบเวลาการผลิตของ 304AR นั้นเป็นการเฉลี่ยจากการรีดที่ 63 % ดังนั้นรอบเวลาการผลิตของ 304TT จึงเพิ่มเป็น 5.22 นาที/ตัน ส่วนกระบวนการ APF ต้องเพิ่มการอบที่อุณหภูมิ 900°C 1 ชั่วโมงและ 3 นาที ดังนั้นต้นทุนคงที่และต้นทุนผันแปรจึงเพิ่มขึ้นอีก สอง เท่าเป็น 14,211 พันบาทและ 4,941 บาท/ตันตามลำดับ รอบเวลาการผลิตเพิ่มขึ้นเป็น 66.39 นาที/ตัน จากข้อมูลทั้งหมดต้นทุนคงที่และต้นทุนผันแปรรวมทุกกระบวนการของ 304TT เป็น 49,819 พันบาทปีและ 7,329 บาท/ตัน และเวลามาตรฐานของการผลิตคือ 66.39 นาที/ตัน แต่ต้นทุนคงที่โรงงานของกระบวนการผลิตของ 304TT ไม่เปลี่ยนแปลงไปจาก 304AR เพราะเป็นต้นทุนที่ไม่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิต คือ 282,177 พันบาท/ปี

เมื่อพิจารณาจากข้อมูลข้างต้นเป็นเพียงข้อมูลที่ใช้วิเคราะห์ต้นทุนการผลิตเท่านั้น เมื่อต้องการวิเคราะห์ถึงรายได้จึงจำเป็นต้องมีข้อมูลราคาขายของ 304TT ซึ่งสามารถหาได้โดยนำเหล็กกล้าไร้สนิมที่จำหน่ายในประเทศไทย (321 และ 316L) มาทดสอบการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรนในสารละลายเฟอริกซัลเฟต-กรดซัลฟูริก โดยใช้ปริมาณเฟอริกซัลเฟต 50 กรัมและผ่านเซนซิไทเซชัน 8 ชั่วโมง เพื่อเปรียบเทียบหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสูญเสียน้ำหนัก(อัตราส่วนระหว่างอัตราการกัดกร่อนของ 304AR กับตัวอย่างเหล็กกล้าไร้สนิม) กับราคาของเหล็กกล้าไร้สนิมแสดงผลดังตารางที่ 6.3

ตารางที่ 6.4 ผลการทดสอบการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรน อัตราการสูญเสียน้ำหนักกับราคาขาย (บาท/กก.)

Sample	Weight loss Ratio	ราคา (บาท/กก.)
304AR	1	75
304TT	1.609	X
321	2.827	106
316L	33.979	113

หมายเหตุ x คือราคาขายของ 304TT ที่ต้องการทราบ



รูปที่ 6.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสูญเสียน้ำหนักกับราคาของเหล็กกล้าไร้สนิม

จากความสัมพันธ์ในรูปที่ 6.2 สามารถหารราคาขายของ 304TT โดยการ interpolate ระหว่างข้อมูล 304AR และ 321 เนื่องจากจำนวนจำกัดของข้อมูลที่มี ดังนั้นราคาขายของ 304 TT มีค่าประมาณ 85.3 บาท/กก.

จากข้อมูลต้นทุนคงที่กระบวนการ ต้นทุนผันแปร ต้นทุนโรงงาน เวลามาตรฐานและราคาสามารถนำมาวิเคราะห์หากำลังการผลิต จุดคุ้มทุนและกำไรได้ดังตารางที่ 6.4

ตารางที่ 6.5 ประเมินโครงการกระบวนการผลิต 304AR และ 304TT

	304AR	304TT
ต้นทุนคงที่รวม (พันบาท)	314,049	331,996
ต้นทุนผันแปร (บาท/ตัน)	3,925	7,329
เวลามาตรฐาน (นาที/ตัน)	4.98	66.39
ราคา (บาท/กก.)	75	85.3
กำลังการผลิต (ตัน/ปี)	47,951.81	3,596.93
ปริมาณคุ้มทุน (ตัน)	4,418.56	4,257.94
ระยะเวลาคุ้มทุน (ปี)	0.09	1.18
กำไรปีแรก (บาท)	3,094,125,698.08	-51,539,985.54

จากตารางที่ 6.4 กำลังการผลิตของ 304AR และ 304TT สามารถหาได้ดังสมการ

$$\text{กำลังการผลิต} = \text{เวลาการผลิต} / \text{เวลามาตรฐาน} \quad 6.1$$

ตารางที่ 6.6 ชั่วโมงการทำงานใน 1 ปี

ชั่วโมงทำงาน	ชั่วโมง
Running Hour	3,980
Breaking Hour	2,948
รวม	6,928

จากตารางที่ 6.5 ชั่วโมงการทำงานของเครื่องจักร (Running Hour) 3,980 ชั่วโมง จะเป็นเวลาในการผลิต แต่กำลังการผลิตของ 304AR มากกว่า 304TT มากเนื่องจากเวลามาตรฐานเป็นตัวกำหนด ซึ่งของ 304AR น้อยกว่า 304TT อย่างมาก

ปริมาณคุ้มทุน คือจุดที่รายได้และรายจ่ายหรือต้นทุนเท่ากัน หรือเป็นจุดที่กำไรเท่ากับ ศูนย์ดังสมการ

$$N^* = F / (p - v) \quad 6.2$$

ซึ่ง N^* คือปริมาณคุ้มทุน F คือต้นทุนคงที่รวม p คือราคาขายต่อหน่วยและ v คือต้นทุนผันแปรต่อหน่วย ซึ่งปริมาณคุ้มทุนของ 304AR จะมีปริมาณสูงกว่า 304 TT ถึงแม้ว่าต้นทุนการผลิตจะน้อยกว่าก็ตาม แต่ขึ้นอยู่กับราคาขายของ 304AR ที่น้อยกว่า 304TT เมื่อนำมาพิจารณาพร้อมกับกำลังการผลิตต่อปีแล้ว พบว่าระยะเวลาคุ้มทุนของ 304AR อยู่เพียงที่ 0.09 ปีเท่านั้นแต่ของ 304TT อยู่ที่ 1.18 ปี เพราะ 304AR มีปริมาณการผลิตที่สูงกว่า 304TT นั้นเองจึงทำให้สามารถถึงปริมาณคุ้มทุนได้เร็วกว่า 304TT

ดังนั้นจึงส่งผลยังกำไรที่จะได้รับต่อปี ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ

$$P = p.N - (F + v.N) \quad 6.3$$

ซึ่ง P คือผลกำไรและ N คือกำลังการผลิตหรือปริมาณการผลิต จะเห็นได้ว่า 304AR สามารถทำกำไรได้อย่างมากในขณะที่ 304TT ขาดทุนเมื่อพิจารณาที่ปีแรกของการผลิต ดังนั้นจากการประเมินโครงการ 304AR และ 304TT สามารถบอกได้ว่าโครงการการผลิต 304TT ไม่เป็นผลที่กำลัการผลิตระดับนี้ ซึ่งสาเหตุมาจากต้นทุนการผลิตสูงขึ้นทั้งต้นทุนคงที่และต้นทุนผันแปร เวลามาตรฐานการผลิตเพิ่มขึ้น กำลังการผลิตลดลง แต่สาเหตุหลักที่สามารถแก้ไขได้ก็คือการลด

เวลามาตรฐานการผลิตเพื่อให้กำลังการผลิตสูงขึ้น โดยการลดเวลากระบวนการความร้อนเชิงกลลงแต่ประสิทธิภาพของ 304TT ไม่แตกต่างกัน

6.4 ประเมินโครงการลดเวลากระบวนการความร้อนเชิงกล

การลดเวลากระบวนการความร้อนลงสามารถทำได้โดยลดเวลาการอบที่ 900°C ระยะเวลา 1 ชั่วโมงซึ่งเป็นระยะที่ยาวนานลง แต่อาจจำเป็นต้องเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นแสดงดังตารางที่ 6.6 แล้วทดสอบการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรนในสารละลายเฟอริกซัลเฟต - กรดซัลฟูริกโดยใช้ปริมาณเฟอริกซัลเฟต 50 กรัมและผ่านเซนซิไทเซชัน 8 ชั่วโมง เพื่อเปรียบเทียบหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสูญเสียน้ำหนัก กับราคาในรูปที่ 6.2

ตารางที่ 6.7 ผลการลดเวลากระบวนการความร้อนเชิงกลโดยทดสอบการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรน อัตราการสูญเสียน้ำหนักกับราคาขาย (บาท/กก.)

304TT	Weight loss ratio	ราคา(บาท/กก.)
$900^{\circ}\text{C}/ 15$ นาที + $3\%+900^{\circ}\text{C}/ 3$ นาที	1.316	80.4
$950^{\circ}\text{C}/ 5$ นาที + $3\%+900^{\circ}\text{C}/ 3$ นาที	1.227	78.9
$1000^{\circ}\text{C}/ 2$ นาที + $3\%+900^{\circ}\text{C}/ 3$ นาที	1.370	81.3

เมื่อสามารถลดเวลาของกระบวนการความร้อนเชิงกลลงได้โดยที่ประสิทธิภาพไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ซึ่งทำให้รอบเวลาการผลิตกระบวนการ APF ของ $900^{\circ}\text{C} / 15$ นาที $950^{\circ}\text{C} / 5$ นาทีและ $1000^{\circ}\text{C} / 2$ นาที ลดลงเป็น 21.39 11.39 และ 8.39 นาที/ตันตามลำดับ ซึ่งก็หมายถึงเวลามาตรฐานลดลงด้วยนั่นเอง แต่ถึงจะลดเวลามาตรฐานลงแล้วก็ตาม แต่ต้นทุนคงที่รวมและต้นทุนผันแปรยังคงเท่า 304TT เดิมแสดงดังตารางที่ 6.7

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

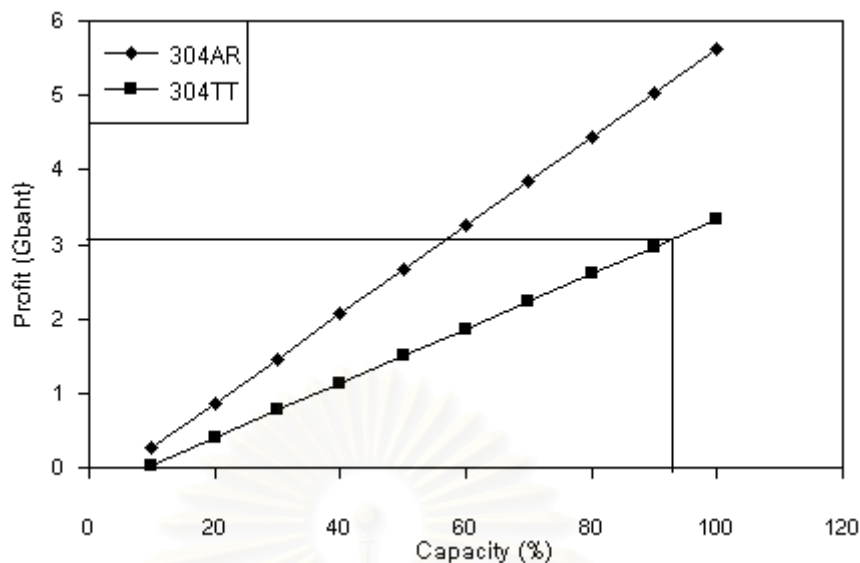
ตารางที่ 6.8 ประเมินโครงการกระบวนการผลิต 304TT ที่ลดเวลาดลง

	304TT		
	900°C / 15 นาที	950°C / 5 นาที	1000°C / 2 นาที
ต้นทุนคงที่รวม (พันบาท)	331,996	331,996	331,996
ต้นทุนผันแปร (บาท/ตัน)	7,329	7,329	7,329
เวลามาตรฐาน (นาที/ตัน)	21.39	11.39	8.39
ราคา (บาท/กก.)	80.4	78.9	81.3
กำลังการผลิต (ตัน/ปี)	11,164.10	20,965.76	28,462.46
ปริมาณคัมทูน (ตัน)	4,543.47	4,638.69	4,488.19
ระยะเวลาคัมทูน (ปี)	0.41	0.22	0.16
กำไรปีแรก (บาท)	483,775,612.90	1,168,544,368.74	1,773,400,281.29

เมื่อลดเวลามาตรฐานลง ส่งผลยังกำลังการผลิตสูงขึ้น ระยะเวลาคัมทูนน้อยลงและผลกำไรปีแรกสูงขึ้น แต่เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการผลิต 304AR แล้วยังต่ำอยู่มากถึงแม้ว่าเวลามาตรฐานลดลงมาเป็น 8.39 นาที/ตัน (1000°C / 2 นาที) แล้วก็ตาม ซึ่งไม่สามารถทดสอบลดเวลากระบวนการความร้อนให้ลดน้อยลงไปกว่านี้ได้เนื่องจากประสิทธิภาพของเครื่องมือ

เมื่อพิจารณาที่กำลังการผลิต ชั่วโมงการทำงานเครื่องจักรเป็นเพียง 57.45% ของชั่วโมงการทำงานทั้งหมด ชั่วโมงที่เหลือเป็นชั่วโมงเครื่องจักรหยุดทำงาน (breaking hour) เนื่องจากการซ่อมบำรุงมากอยู่ถึง 42.55% ดังนั้นเราสามารถเพิ่มกำลังการผลิตของ 304TT (1000°C / 2 นาที) ให้เป็น 93.49% เพื่อเพิ่มผลกำไรต่อปีให้เท่ากับกระบวนการผลิต 304AR ได้ โดยเพิ่มประสิทธิภาพชั่วโมงการทำงานเครื่องจักรให้มากขึ้นหรือขจัดเวลาที่เสียไปจากชั่วโมงเครื่องจักรหยุดทำงาน ดังรูปที่ 6.3 เป็นการเพิ่มกำลังการผลิตของ 304TT (1000°C / 2 นาที) และ 304AR เปรียบเทียบกับกำไรที่เกิดขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังการผลิตและผลกำไรของกระบวนการผลิต 304AR และ 304TT (1000°C / 2 นาที)

เมื่อเปรียบเทียบกำลังการผลิตของกระบวนการ 304AR และ 304TT (1000°C / 2 นาที) กับผลกำไรที่เกิดขึ้น ถึงแม้ว่าเมื่อเพิ่มกำลังการผลิต 304AR จะทำให้ได้ผลกำไรที่สูงกว่า 304TT อย่างมากก็ตาม แต่ต้องขึ้นอยู่กับความต้องการทางการตลาดและผู้บริโภคด้วย ซึ่งในปัจจุบันการแข่งขันทางการตลาดของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 สูงมาก จึงจำเป็นต้องเพิ่มคุณค่าผลิตภัณฑ์ให้สูงขึ้นและราคาขายปรับตัวไม่มาก (304TT) เพื่อเป็นกลยุทธ์ในการแข่งขันทางการตลาด และเป็นทางเลือกใหม่ของผู้บริโภค โดยเฉพาะเป็นตัวเชื่อมราคาที่แตกต่างกันมากระหว่าง 304AR และ 321 หรือ 316L

6.5 สรุป

การประเมินโครงการกระบวนการผลิตระหว่าง 304AR และ 304TT (900°C/ 1 ชั่วโมง+ 3%+900°C/ 3 นาที) ด้วยการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของต้นทุน ปริมาณการผลิต และผลกำไร กระบวนการผลิต 304AR สามารถทำผลกำไรในปีแรกได้ถึง 3,094,125,698.08 บาท แต่กระบวนการผลิต 304TT กับขาดทุน 51,539,985.54 บาท เพราะเวลามาตรฐานการผลิตของ 304AR มีเพียง 4.98 นาที/ตันแต่ของ 304T สูงถึง 66.39 นาที/ตัน ทำให้ปริมาณการผลิตแตกต่างกันมาก แต่เมื่อลดเวลากระบวนการผลิต 304TT ด้วยวิธีการเพิ่มอุณหภูมิการอบ (1000°C/ 2 นาที + 3%+ 900°C/ 3 นาที) ทำให้ลดเวลามาตรฐานลดลงเป็น 8.39 นาที/ตัน พร้อมกับเพิ่มกำลังการผลิตเป็น 93.49% สามารถเพิ่มผลกำไรให้เท่ากับกระบวนการผลิต 304AR ได้

รายการอ้างอิง

1. M.G. Fontana. Corrosion Engineering. 3rd ed. Singapore : McGraw-Hill, 1987.
2. O. Wachter and G. Brummer. Experienced with Austenitic Steels in boiling Water Reactors. Nuclear Engineering and Design 168(1997) : 35-52.
3. P. Lin, G. Palumbo, U. Erb and K.T. Aust . Influence of Grain Boundary Character Distribution on Sensitization and Intergranular Corrosion of Alloy 600. Scripta Metallurgica et Materialia 33(1995) : 1387-1392.
4. E.M. Lehockey, G. Palumbo, P. Lin and A. Brennenstuhl. Mitigating Intergranular Attack and Growth in Lead-Acid Battery Electrodes for Extended Cycle and Operating Life. Metallurgical and materials Transaction A 29A(1998) : 387-396.
5. Piyaporn Sinsrok. Effects of Recrystallization and Grain Growth on the Formation of Annealing Twin in the 304 Stainless Steel. Master's Degree of Science in Nuclear Technology Department of Nuclear Technology Faculty of Engineering Chulalongkorn University, 1999.
6. Hongwei Lui, Ming Gao, David G. Harlow and Robert P. Wei. Grain Boundary Character and Carbide Size and Spatial Distribution in a Ternary Nickel Alloy. Scripta Metallurgica et Materialia 32(1995) : 1807-1812.
7. Adam J. Schwartz and Wayne E. King. The Potential Engineering of Grain Boundaries though Thermomechanical Processing. JOM 50(1998) : 50-55.
8. ASTM A 262-98. Annual Book of Standards 3.01(1998) : 49-64.
9. E.M. Lehockey, G. Palumbo and P. Lin. Improving the Weldability and Service Performance of Nickel-and Iron-Based Superalloys by Grain Boundary Engineering. Metallurgical and materials Transaction A 29A(1998) : 3069-3079.
10. Denny A. Jones. Principles and Prevention of Corrosion. 2nd ed. United States of America : Prentice-Hall, 1996.

11. V. Thaveeprungsriporn, A. Janyuyen and W. Ratanachai. On the Relation Between Grain Boundary Misorientation and Intergranular Carbides in Stainless Steel Using Selected Area Channeling Patterns. Journal of Electron Microscopy Society of Thailand 11(1996) : 24-29.
12. Gary S. Was, Visit Thaveeprungsriporn and Douglas C. Crawford. Grain Boundary Misorientation Effects on Creep and Cracking in Ni-Based Alloys. JOM 50(1998) : 44-49.
13. V. Randle. Mechanism of Twinning-Induced Grain Boundary Engineering in Low Stacking-Fault Energy Materials. Acta Mater 47(1999) : 4187-4196.
14. V. Randle. The Effects of Thermomechanical Processing on Interfacial Crystallography in Metals. Materials Science Forum 294-296(1999) : 51-58.
15. P.Davies and V. Randle, work in progress.
16. W.E. King and A.J. Schwartz. Scripta Metallurgica et Materialia 38(1998) : 449.
17. C. B. Thomson and V. Randle. Fine Tuning at $\Sigma 3^n$ Boundaries in Nickel. Acta Mater 45(1997) : 4909-4916.
18. Vladimir Novikov. Grain Growth and Control of Microstructure and Texture in Polycrystalline Materials. United States of america : CRC Press, 1997.
19. V. thaveeprungsriporn, P. Sinsork and D. Thong-Aram. Effect of Iterative Stain Annealing on Grain Boundary Network of 304 Stainless Steel. Scripta Metallurgica et Materialia 44(2001) : 67-71.
20. Valerie Randle and Olaf Engler. Introduction to Texture Analysis Macrotecture, Microtexture and Orientation Mapping. The Netherlands : Gordon and Breach Science Publishers, 2000.

21. Mark Caul, Jorn Fiedler and Valerie Randle. Grain Boundary Plane Crystallography and Energy in Austenitic Steel. Scripta Metallurgica et Materialia 35(1996) : 831-836.
22. Kittisuk Kosolwanthana. Effects of Thermomechanical Processing on Stress Corrosion Cracking Susceptibility of 304 Stainless Steels. Master's Degree of Science in Nuclear Technology Department of Nuclear Technology Faculty of Engineering Chulalongkron University, 2002.
23. D.B. Wells, J. Stewart, A.W. Herbert, P.M. Scott and D.E. Williams. The Use of Percolation Theory to Predict the Probability of Failure of Sensitized, Austenitic Stainless Steel by Intergranular Stress Corrosion Cracking. Corrosion 45(1989) : 649-660.
24. Hiroyuki Kokawa, Masayuki Shimada and Yutaka S. Sato. Grain-Boundary Structure and Precipitation in Sensitized Austenitic Stainless Steel. JOM (2000) : 34-37.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวภัทริศา พุ่มพฤษ์ เกิดวันที่ 25 สิงหาคม พ.ศ. 2519 ที่อำเภอบางคนที จังหวัดสมุทรสงคราม สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ในปีการศึกษา 2540 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขานิเคลียร์เทคโนโลยี ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2541



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย