

ผลของอุณหภูมิ เวลา และ ออกซิเจน ของการอบอ่อนต่อการเกิดผิวออกไซด์ทุติยภูมิและพฤติกรรม
การกัดผิวด้วยกรดของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304



นางสาวปัทมา แนวกันยา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

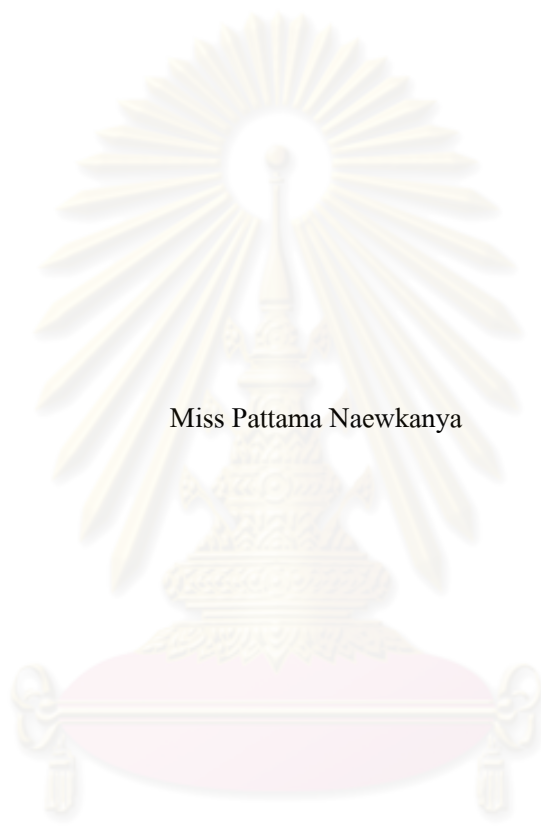
สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF ANNEALING TEMPERATURE, TIME AND OXYGEN ON SECONDARY
OXIDE FORMATION AND PICKLING BEHAVIOR OF AISI 304 STAINLESS STEEL



Miss Pattama Naewkanya

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของอุณหภูมิ เวลา และ ออกซิเจน ของการอบอ่อนต่อการเกิดผิวออกไซด์ทุติยภูมิและพฤติกรรมการกัดผิวด้วยกรดของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304
โดย	นางสาวปัทมา แนวกันษา
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. อูรา ปานเจริญ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

.....
 (รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....
 (รองศาสตราจารย์ ดร. ไพศาล กิตติสุภกร)

.....
 (รองศาสตราจารย์ ดร. อูรา ปานเจริญ)

.....
 (รองศาสตราจารย์ ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ)

.....
 (รองศาสตราจารย์ ดร. อาทิวรรณ โชติพิชญ์)

.....
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมฤกษ์ จันทอัมพร)

ปีทมา แนวกันยา : ผลของอุณหภูมิ เวลา และ ออกซิเจน ของการอบอ่อนต่อการเกิดสเกล ออกไซด์ทุติยภูมิและลักษณะการกัดด้วยกรดของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 (EFFECTS OF ANNEALING TEMPERATURE, TIME AND OXYGEN ON SECONDARY OXIDE FORMATION AND PICKLING BEHAVIOR OF AISI 304 STAINLESS STEEL) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ดร.อุรา ปานเจริญ, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : รศ.ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ, 85 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของอุณหภูมิการอบอ่อนที่ 1000 และ 1100 °ซ เวลา 90 วินาที และ 150 วินาที ในบรรยากาศจำลองที่มีออกซิเจนร้อยละ 1.01, 4.63 และ 7.08 ต่อการเกิดออกไซด์ทุติยภูมิของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 กอขี้ด้าที่ผ่านการรีดแบบต่อเนื่องและการกัดด้วยสารละลายกรด 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกใช้สารละลาย 4 M HCl + 15 g/L H₂O₂ อุณหภูมิ 60°ซ ขั้นตอนสองใช้สารละลาย 1 M H₂NO₃ + 1 M HF อุณหภูมิ 45°ซ การศึกษาออกไซด์ใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด และวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีของออกไซด์ด้วยเครื่องวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (x-ray diffraction) ผลการทดลองพบว่าออกไซด์ปฐมภูมิมีความหนาประมาณ 5-6 ไมโครเมตร องค์ประกอบเคมีเป็น FeCr₂O₄ และ Fe₂O₃ หลังการอบอ่อนและจุ่มชิ้นงานลงน้ำพบว่าน้ำหนักของชิ้นงานจะลดลงเพราะออกไซด์ทุติยภูมิที่มีรูพรุนหลุดออก การอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1100°ซ มีปริมาณออกไซด์ทุติยภูมิที่เหลือน้อยกว่าการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1000°ซ ผลของอุณหภูมิและเวลาจะมากกว่าผลของออกซิเจน ส่วนใหญ่ออกไซด์ทุติยภูมิมีองค์ประกอบเป็น Fe₂O₃ และ FeCr₂O₄ ยกเว้นการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1100°ซ เวลา 150 วินาที พบองค์ประกอบออกไซด์เป็น Fe₂O₃, FeCr₂O₄ และ Cr₂O₃ ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่เพิ่มกับการอบอ่อนเป็นสมการเส้นตรง อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 1100°ซ ในบรรยากาศจำลองที่มีออกซิเจนร้อยละ 1.01 มากกว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 1000°ซ ในบรรยากาศจำลองที่มีออกซิเจนร้อยละ 7.08 การอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1000°ซ เวลา 90 วินาที ในบรรยากาศจำลองที่มีออกซิเจนร้อยละ 7.08 เป็นสภาวะที่ออกไซด์ทุติยภูมิถูกกำจัดออกได้หมดด้วยสารละลายกรดในขั้นตอนแรก การอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1100°ซ เวลา 150 วินาที บรรยากาศจำลองที่มีออกซิเจนร้อยละ 1.01 และ 4.63 เป็นสภาวะที่ไม่สามารถกำจัดออกไซด์ด้วยการกัดกรดทั้งสองขั้นตอน

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่อนิสิต ปีทมา แนวกันยา
 สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
 ปีการศึกษา 2553 ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ปานเจริญ-ค

5070584021 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS: SECONDARY OXIDE/ HIGH TEMPERATURE/ STAINLESS STEELS

PATTAMA NAEWKANYA: EFFECTS OF ANNEALING TEMPERATURE, TIME AND OXYGEN ON SECONDARY OXIDE FORMATION AND PICKLING BEHAVIOR OF AISI 304 STAINLESS STEEL. THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF. Dr. URA PARNCHAROEN, THESIS CO-ADVISOR: ASSOC. PROF. Dr.-Ing. GOBBOON LOTHONGKUM, 85 pp.

This work studied the effects of annealing temperatures, at 1000°C and 1100°C, times of 90 s, 150 s, and oxygen of 1.01%, 4.63% and 7.08% and acid pickling behavior of AISI 304 stainless steel black coil. The first acid pickling condition was solution of 4-M HCl + 15 g/L H₂O₂ at 60°C. The second acid pickling condition was solution of 1-M H₂NO₃ + 1-M HF at 45°C. The primary (as-received state) and secondary oxides were investigated by Optical microscope (OM), Scanning electron microscopy (SEM) and x-ray diffraction (XRD). The results showed that the thickness of primary oxide consisting of FeCr₂O₄, and Fe₂O₃ were about 5-6 μm. After annealing and water quenching, the sample weight decreased because the porous secondary oxide was spalled. Annealing at 1100°C resulted in less remaining secondary oxide on sample than annealing at 1000°C. The effects of temperature and time were more than that of oxygen. Mostly secondary oxide consisted of Fe₂O₃ and FeCr₂O₄. However, by annealing at 1100°C, time of 150 s, secondary oxide consisted of Fe₂O₃, FeCr₂O₄ and Cr₂O₃. The weight gain was directly proportional to annealing time. Reaction rate at annealing temperature of 1100°C in the oxygen of 1.01% was higher than that of 1000°C in the oxygen of 7.08%. For annealing at 1000°C, 90 s in the oxygen of 7.08%, the secondary oxide was easily removed in the first acid pickling. For annealing at 1100°C, 150 s in the oxygen of 1.01%, 4.63% the secondary oxide was difficultly removed in the both steps of acid pickling.

Department : ..Chemical Engineering.....

Student's Signature พัทธมา นวัญญา

Field of Study : ..Chemical Engineering.....

Advisor's Signature

Academic Year : 2010.....

Co-Advisor's Signature

Gobboon Lothongkum

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากความอนุเคราะห์ของ รองศาสตราจารย์ ดร.อุรา ปานเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษา และ รองศาสตราจารย์ ดร.กอบนุญ หล่อทองคำ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ และให้คำปรึกษาทั้งทางด้านวิชาการ หลักการทำงานและหลักการใช้ชีวิต ผู้วิจัยต้องขอกราบ ขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย นอกจากนี้ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล กิตติสุขภกร รองศาสตราจารย์ ดร.อาทิวรรณ โชติพิฤกษ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมฤกษ์ จันทอัมพร คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำแก้ไขวิทยานิพนธ์ ขอขอบพระคุณ บริษัทไทยน็อกซ์ สเตนเลส จำกัด (มหาชน) ที่เอื้อเฟื้อชิ้นงาน ขอขอบพระคุณ คุณเสนีย์ มณีเพชร ที่ช่วยเหลือในการออกแบบและผลิต อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ฟั้นองห้องวิจัยวิศวกรรมการแยกและฟั้นองห้องวิจัยวิศวกรรมการกั้คร่อน สำหรับ มิตรไมตรี ความอบอุ่นและความช่วยเหลือจนงานสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ โครงการทุนวิจัยมหาบัณฑิต สำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย (สกว.) สาขา วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีและสำนักส่งเสริมอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดย่อม ที่อนุเคราะห์สนับสนุนทุนวิจัยตามสัญญาเลขที่ MRG-OSMEP505E035

สุดท้ายขอขอบพระคุณ บิดา มารดา เพื่อน ฟั้นอง และเครือญาติ ที่คอยสนับสนุนในด้านต่าง ๆ รวมทั้งเป็นกำลังใจที่ดีให้ผู้วิจัยมีความพยายามจนประสบความสำเร็จ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีเบื้องต้นและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก.....	4
2.2 การอบอ่อน.....	4
2.3 การเกิดออกซิเดชันของโลหะในบรรยากาศที่อุณหภูมิสูง.....	5
2.4 สเกลออกไซด์ของเหล็กกล้าไร้สนิมที่อุณหภูมิสูง.....	6
2.5 ลักษณะและสมบัติของสเกลออกไซด์ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 แผ่นม้วนรีดร้อน.....	7
2.6 การกำจัดสเกลออกไซด์ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 แผ่นม้วนรีดร้อน.....	9
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	12
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	25
3.1 วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือการทดลอง.....	25
3.2 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย.....	26
3.3 ชิ้นงานที่ใช้ทดลองและขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน.....	26
3.4 วิธีการวัดขนาดชิ้นงาน.....	27
3.5 ขั้นตอนการเตรียมแก๊สที่ใช้ในการทดลอง.....	27
3.6 ขั้นตอนการอบอ่อน.....	28
3.7 ขั้นตอนการกำจัดออกไซด์ทางกล.....	29
3.8 ขั้นตอนการเตรียมสารละลาย.....	29
3.9 ขั้นตอนการทดสอบการกัดกร่อนแบบจุ่ม.....	30

บทที่	หน้า
3.10 คำนำน้หนักที่หายไป.....	31
3.11 วิธีวิเคราะห์ผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 แผ่นม้วนรีดร้อน.....	31
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....	32
4.1 ลักษณะสเกลออกไซด์ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 แผ่นม้วนรีดร้อน.....	32
4.2 ผลการอบอ่อน.....	33
4.2.1 ผลของเวลา.....	36
4.2.2 ผลของอุณหภูมิ.....	36
4.2.3 ผลของออกซิเจน.....	36
4.2.4 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิควิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	37
4.3 ผลการกำจัดสเกลออกไซด์ด้วยแรงกล.....	38
4.4 ผลการกำจัดสเกลออกไซด์ด้วยการกัดกรด.....	39
4.4.1 ผลการกำจัดสเกลออกไซด์ด้วยการกัดกรดในขั้นตอนที่ 1.....	45
4.4.2 ผลการกำจัดสเกลออกไซด์ด้วยการกัดกรดในขั้นตอนที่ 2.....	45
4.5 ภาพรวมการกำจัดสเกลออกไซด์.....	46
4.6 อัตราการเกิดออกซิเดชัน.....	46
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	49
เอกสารอ้างอิง.....	50
ภาคผนวก.....	52
ภาคผนวก ก.....	53
ภาคผนวก ข.....	58
ภาคผนวก ค.....	61
ภาคผนวก ง.....	65
ภาคผนวก จ.....	67
ภาคผนวก ฉ.....	75
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	85

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ใช้ในการทดลองของแคททีรียา ทวีทรัพย์.....	12
ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ใช้ในการทดลองของฤกษ์รัช คุณากร โยธิน.....	14
ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ใช้ในการทดลองของ A.M. Huntz และคณะ.....	18
ตารางที่ 2.4 ความดันย่อยของแก๊สต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองของ A.M. Huntz และคณะ.....	18
ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ใช้ในการทดลองของ Bahri Ozturk และ R. Matway.....	22
ตารางที่ 2.6 อัตราส่วนของแก๊สที่ได้จากการคำนวณตามสมการการเผาไหม้แก๊สมีเทนที่ อัตราส่วนอากาศต่อแก๊สมีเทนต่าง ๆ.....	22
ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก AISI 304 (ร้อยละโดยมวล).....	27
ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนของแก๊สที่ใช้ในการทดลอง.....	27
ตารางที่ 3.3 แสดงตัวแปรที่ใช้ในการกักกรด.....	30
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบเคมีของสเกลออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการอบอ่อนสถานะอื่น ๆ วิเคราะห์ด้วยเทคนิควิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	38
ตารางที่ 4.2 ลักษณะผิวหลังการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1000°ซ เวลา 90 วินาที และกำจัด สเกลออกไซด์ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ปริมาณออกซิเจนต่าง ๆ.....	41
ตารางที่ 4.3 ลักษณะผิวหลังการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1000°ซ เวลา 150 วินาที และกำจัด สเกลออกไซด์ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ปริมาณออกซิเจนต่าง ๆ.....	42
ตารางที่ 4.4 ลักษณะผิวหลังการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1100°ซ เวลา 90 วินาที และกำจัด สเกลออกไซด์ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ปริมาณออกซิเจนต่าง ๆ.....	43
ตารางที่ 4.5 ลักษณะผิวหลังการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1100°ซ เวลา 150 วินาที และกำจัด สเกลออกไซด์ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ปริมาณออกซิเจนต่าง ๆ.....	44
ตารางที่ ก-1 อัตราส่วนของแก๊สที่ใช้ในการทดลอง.....	55
ตารางที่ ก-2 อัตราส่วนของแก๊สที่ไม่มีไอน้ำ.....	56
ตารางที่ ก-3 ร้อยละของแก๊สที่ได้จากการคำนวณ การวัดด้วยฟองสบู่และ แก๊สโครมาโทกราฟี.....	57

สารบัญรูป

ภาพที่	หน้า
รูปที่ 1.1 กระบวนการรีดลดขนาดแบบต่อเนื่อง (Tandem mill) และการรีดลดขนาดแบบ กลับไปมา (Steckel mill).....	1
รูปที่ 1.2 กระบวนการอบอ่อน (Annealing) การกำจัดผิวสเกลออกไซด์ด้วยวิธีทางกลและ การกัดกรด (Pickling) ก่อนการเข้าสู่กระบวนการรีดเย็น.....	2
รูปที่ 2.1 ลำดับการเกิดสเกลออกไซด์ที่ผิวโลหะที่อุณหภูมิสูง.....	5
รูปที่ 2.2 การเกิดออกซิเดชันของโลหะผสมนิกเกิลและโครเมียมที่โครเมียมน้อยกว่าร้อยละ 25....	6
รูปที่ 2.3 การเกิดออกซิเดชันของโลหะผสมเหล็กและโครเมียมที่โครเมียมมากกว่าร้อยละ 15.....	7
รูปที่ 2.4 ลักษณะสเกลออกไซด์ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 แผ่นม้วนรีดร้อนที่ผ่าน การรีดร้อนแบบต่อเนื่อง (Tandem mill).....	8
รูปที่ 2.5 ลักษณะสเกลออกไซด์ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 แผ่นม้วนรีดร้อนที่ผ่าน การอบอ่อน.....	9
รูปที่ 2.6 ปริมาณธาตุของสารประกอบออกไซด์ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ความลึกต่าง ๆ หลังจากอบอ่อนที่ อุณหภูมิ 1,140°C เวลา 2.5 นาที ในบรรยากาศมีออกซิเจนร้อยละ 6 วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Glow discharge optical emission spectroscopy (GDOES).....	9
รูปที่ 2.7 การตัดให้สเกลออกไซด์แตก (Scale breaking).....	10
รูปที่ 2.8 ผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ก่อน (ก) และหลัง (ข) การกำจัดสเกลออกไซด์ด้วยเม็ด เหล็ก (Shot blasting).....	11
รูปที่ 2.9 ลักษณะสเกลออกไซด์ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 แผ่นม้วนรีดร้อนที่ผ่าน การอบอ่อนและการยิงด้วยเม็ดเหล็ก.....	11
รูปที่ 2.10 การกัดกรดโดยใช้กระแสไฟฟ้า (Electrolytic pickling).....	12
รูปที่ 2.11 ภาพตัดขวางแสดงความหนาและลักษณะผิวสเกลออกไซด์คอยล์ดำ (ก) และผิวสเกล ออกไซด์ที่ผ่านการอบอ่อน (ข) ของแผ่นม้วนรีดร้อนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304.....	13
รูปที่ 2.12 ภาพตัดขวางแสดงความหนาและลักษณะผิวสเกลออกไซด์ที่ผ่านการกำจัดทางกล (ก) และลักษณะของสเกลออกไซด์ที่ผ่านการกัดกรด (ข) ของแผ่นม้วนรีดร้อน เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304.....	14
รูปที่ 2.13 ผิวแผ่นม้วนรีดร้อนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 หลังผ่านการกำจัดสเกลออกไซด์ ทางกลและการกัดกรด.....	14

ภาพที่	หน้า
รูปที่ 2.14 ภาพตัดขวางแสดงความหนาของสเกลออกไซด์ (ก) และภาพแสดงการหลุดลอกของ ชั้นสเกลออกไซด์ (ข) ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 คอยล์ดำ ที่ผ่านการรีดอย่าง ต่อเนื่อง (Tandem).....	15
รูปที่ 2.15 ออกไซด์ทุติยภูมิเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1100 °ซ และ เวลา 900 วินาที.....	16
รูปที่ 2.16 XRD สเปกตรัมของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านการออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1100 °ซ เวลาต่าง ๆ.....	16
รูปที่ 2.17 ผิวออกไซด์ทุติยภูมิเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 หลังจากผ่านการอบอ่อน.....	17
รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นกับเวลาที่ใช้ในการอบอ่อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	17
รูปที่ 2.19 กราฟแสดงน้ำหนักต่อเวลาของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่ทดลองการเกิดออกซิเดชัน ในบรรยากาศต่าง ๆ.....	19
รูปที่ 2.20 การเกิดของสเกลออกไซด์ที่ผิวที่อุณหภูมิ 850 °ซ ในบรรยากาศที่มีไอน้ำของ เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304.....	20
รูปที่ 2.21 การเกิดของสเกลออกไซด์ที่ผิวที่อุณหภูมิ 950 °ซ ในบรรยากาศของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304.....	20
รูปที่ 2.22 XPS สเปกตรัมที่บริเวณมีสเกลออกไซด์หลุดบนผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 หลัง ผ่านการออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 950 °ซ ในบรรยากาศ.....	21
รูปที่ 2.23 XPS สเปกตรัมของเหล็กตรวจพบที่บริเวณ ไม่มีสเกลออกไซด์หลุดบนผิว เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิและสภาวะต่าง ๆ.....	21
รูปที่ 2.24 กราฟแสดงน้ำหนักต่อเวลาของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่ทดลองการเกิดออกซิเดชัน ในบรรยากาศที่คำนวณจากการเผาไหม้แก๊สมีเทนอัตราส่วนอัตราส่วนอากาศต่อ แก๊สมีเทนต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 1373 เคลวิน.....	23
รูปที่ 2.25 กราฟแสดงน้ำหนักต่อเวลาของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่ทดลองการเกิดออกซิเดชัน ในบรรยากาศที่อัตราส่วนของอากาศต่อมีเทนเท่ากับ 9.53 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	24
รูปที่ 3.1 แผนภูมิแสดงขั้นตอนดำเนินงาน.....	26
รูปที่ 3.2 จุดที่ใช้วัดขนาดชิ้นงาน.....	27
รูปที่ 3.3 แผนภูมิแสดงการไหลของแก๊สเพื่อควบคุมบรรยากาศในการอบอ่อน.....	28
รูปที่ 3.4 ตัวกดที่ใช้ในการทดลอง.....	29
รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายลักษณะผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 แผ่นม้วนรีดร้อนด้วย กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (ก) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวด (ข)	32

ภาพที่	หน้า
รูปที่ 4.2 XRD สเปกตรัมแสดงองค์ประกอบเคมีของสเกลออกไซด์บนผิวของ เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 แผ่นม้วนรีดร้อน.....	32
รูปที่ 4.3 สีผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านการอบอ่อนอุณหภูมิ 1100 ^o ซ ออกซิเจน ร้อยละ 4.00 (อากาศต่อมีเทนเท่ากับ 12) เวลา 150 วินาที (ก) และ 90 วินาที (ข).....	33
รูปที่ 4.4 ลักษณะความแตกต่างบนผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านการอบอ่อนอุณหภูมิ 1100 ^o ซ เวลา 90 วินาที และออกซิเจนร้อยละ 0.91 (อากาศต่อมีเทนเท่ากับ 10).....	34
รูปที่ 4.5 บริเวณผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านการอบอ่อนอุณหภูมิ 1100 ^o ซ เวลา 90 วินาที และออกซิเจนร้อยละ 0.91 (อากาศต่อมีเทนเท่ากับ 10) พื้นผิวเรียบ (ก) และพื้นผิวขรุขระ (ข).....	34
รูปที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์บนผิวเรียบ (ก) และ ขรุขระ (ข) (รูปที่ 4.5) ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านการอบอ่อนอุณหภูมิ 1100 ^o ซ เวลา 90 วินาที และ ออกซิเจนร้อยละ 0.91 (อากาศต่อมีเทนเท่ากับ 10).....	35
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักที่หายไป ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 หลัง การอบอ่อนกับปริมาณของออกซิเจนในบรรยากาศการอบอ่อน.....	36
รูปที่ 4.8 XRD สเปกตรัมแสดงองค์ประกอบเคมีของสเกลออกไซด์บนผิวของ เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 แผ่นม้วนรีดร้อนที่ผ่านการอบอ่อน.....	37
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักที่หายไปของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 หลัง การกำจัดสเกลออกไซด์ด้วยแรงกลกับปริมาณของออกซิเจนในบรรยากาศการ อบอ่อนสภาวะต่าง ๆ.....	38
รูปที่ 4.10 ลักษณะผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 หลังผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1100 ^o ซ เวลา 150 วินาทีและออกซิเจนร้อยละ 0.91 (อากาศต่อมีเทนเท่ากับ 10) เมื่อผ่าน การกำจัดสเกลออกไซด์ด้วยแรงกล.....	39
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักที่หายไปของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 หลัง การกำจัดสเกลออกไซด์ด้วยการกัดกรดในขั้นตอนที่ 1 กับปริมาณของออกซิเจนที่ สภาวะต่าง ๆ.....	40
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักที่หายไป ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 หลัง การกำจัดสเกลออกไซด์ด้วยการกัดกรด ในขั้นตอนที่ 3 – 4 กับปริมาณของออกซิเจน ที่สภาวะต่าง ๆ.....	40
รูปที่ 4.13 สรุปผลการกำจัดสเกลออกไซด์.....	46

ภาพที่

หน้า

รูปที่ 4.14 กราฟแสดงน้ำหนักต่อเวลาของการเกิดออกซิเดชันเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่ทดลอง ในบรรยากาศต่าง ๆ และเปรียบเทียบกับผลที่มีการรายงานวิจัย.....	47
รูปที่ ก-1 อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนต่อระดับสเกลของเครื่องควบคุมอัตราการไหล ขนาด 2 ลิตรต่อนาที.....	54
รูปที่ ก-2 อัตราการไหลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อระดับสเกลของเครื่องควบคุมอัตรา การไหลขนาด 3.5 ลิตรต่อนาที.....	54
รูปที่ ก-3 อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนต่อระดับสเกลของเครื่องควบคุมอัตราการไหล ขนาด 30 ลิตรต่อนาที.....	55
รูปที่ ก-4 ผลการฉีดแก๊สโครมาโทกราฟฟีที่อัตราส่วนอากาศต่อมีเทนเท่ากับ 12 ของแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์.....	56
รูปที่ ก-5 ผลการฉีดแก๊สโครมาโทกราฟฟีที่อัตราส่วนอากาศต่อมีเทนเท่ากับ 12 ของแก๊ส ออกซิเจน.....	56
รูปที่ ข-1 แผนภูมิแสดงการไหลของแก๊สเพื่อควบคุมบรรยากาศในการอบอ่อน.....	59
รูปที่ ข-2 Psychrometric chart.....	60
รูปที่ ค-1 ผลการวัดความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก.....	63
รูปที่ ค-2 ผลการวัดความเข้มข้นของกรดไฮโดรฟลูออริกผสมกับกรดไนตริก.....	64
รูปที่ จ-1 ผิวชิ้นงานคอยด์ดำที่ได้รับมา.....	68
รูปที่ จ-2 ลักษณะผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านการอบอ่อนอุณหภูมิ 1000°ซ เวลา 90 วินาที และออกซิเจนร้อยละ 0.91 (อากาศต่อมีเทนเท่ากับ 10).....	68
รูปที่ จ-3 ลักษณะผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านการอบอ่อนอุณหภูมิ 1000°ซ เวลา 90 วินาที และออกซิเจนร้อยละ 4 (อากาศต่อมีเทนเท่ากับ 12).....	69
รูปที่ จ-4 ลักษณะผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านการอบอ่อนอุณหภูมิ 1000°ซ เวลา 90 วินาที และออกซิเจนร้อยละ 6.27 (อากาศต่อมีเทนเท่ากับ 14).....	69
รูปที่ จ-5 ลักษณะผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านการอบอ่อนอุณหภูมิ 1000°ซ เวลา 150 วินาที และออกซิเจนร้อยละ 0.91 (อากาศต่อมีเทนเท่ากับ 10).....	70
รูปที่ จ-6 ลักษณะผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านการอบอ่อนอุณหภูมิ 1000°ซ เวลา 150 วินาที และออกซิเจนร้อยละ 4 (อากาศต่อมีเทนเท่ากับ 12).....	70
รูปที่ จ-7 ลักษณะผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านการอบอ่อนอุณหภูมิ 1000°ซ เวลา 150 วินาที และออกซิเจนร้อยละ 6.27 (อากาศต่อมีเทนเท่ากับ 14).....	71

ภาพที่

รูปที่ จ-18 XRD สเปกตรัมของ เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 แผ่นม้วนรีดร้อนที่ผ่านการอบอ่อน
อุณหภูมิ 1100°ซ เวลา 150 วินาที และ ออกซิเจนร้อยละ 6.27
(อากาศต่อมีเทนเท่ากับ 14).....84



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

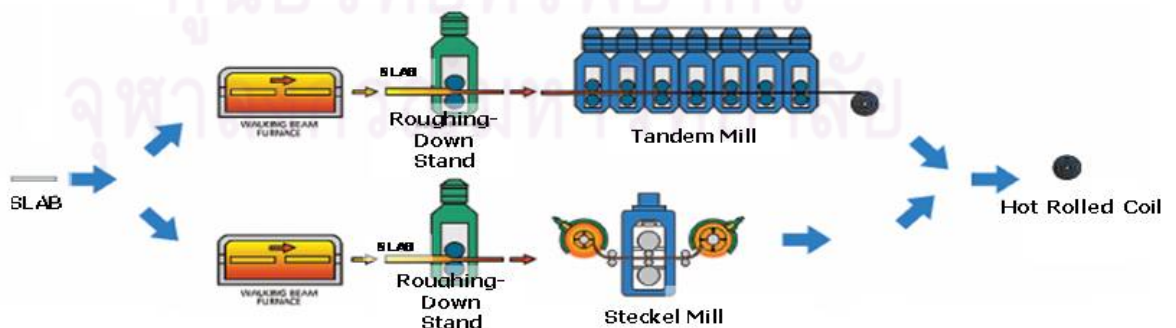
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

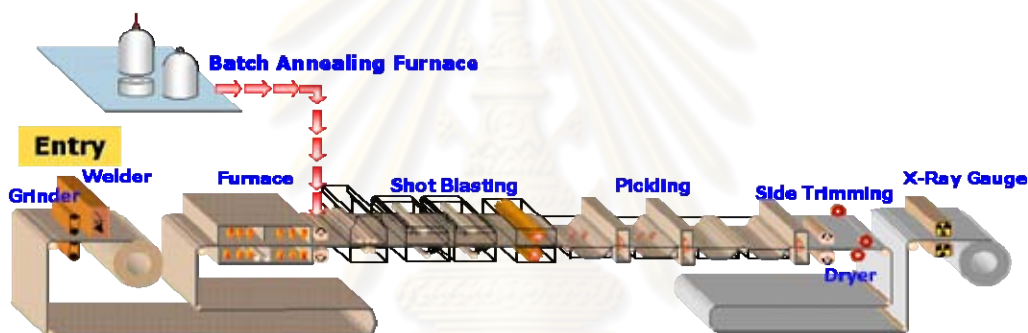
ในปัจจุบันเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมที่ใช้งานกันอย่างกว้างขวางในหลายอุตสาหกรรม เนื่องจากมีโครงสร้างพื้นฐานเป็นออสเทนไนต์ (Austenite) และมีองค์ประกอบของโครเมียมผสมอยู่ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 10.5 ของน้ำหนักทั้งหมด จึงมีคุณสมบัติทั้งทางกลและความต้านทานการกัดกร่อนที่ดี [1] ทั้งนี้เนื่องจากเหล็กกล้าไร้สนิมได้สร้างชั้นฟิล์มโครเมียมออกไซด์ (Chromium oxide, Cr_2O_3) ขึ้นมาป้องกันการกัดกร่อน หรือที่เรียกว่า “ชั้นพาสซีฟฟิล์ม (Passive film)” ชั้นนี้จะเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติหรือจากกระบวนการกัดกรด (Pickling process) ก็ได้ [2] จากคุณสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนที่ดีทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกถูกนำมาใช้สร้างอุปกรณ์ทนการกัดกร่อนในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมยา อุตสาหกรรมเคมี และอุตสาหกรรมปิโตรเคมี

ในกระบวนการผลิต เริ่มต้นจากการนำวัตถุดิบประกอบไปด้วยเศษเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel scrap) เศษเหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon steel scrap) และเหล็กผสม (Ferro alloy) มาหลอมรวมกันในเตาไฟฟ้า (Electric furnace) ก่อนนำเหล็กที่ได้มาหล่อแบบต่อเนื่อง (Continuous casting) จนได้เป็นแท่งเหล็กกล้าไร้สนิม (Slabs) ขนาดใหญ่ หลังจากนั้นแท่งเหล็กกล้าไร้สนิมจะถูกผ่านกระบวนการรีดร้อน (Hot rolling) ดังรูปที่ 1.1 [3] ซึ่งสามารถแบ่งรูปแบบการผลิตออกเป็น 2 แบบ คือ การรีดลดขนาดแบบต่อเนื่อง (Tandem mill) และการรีดลดขนาดแบบกลับไปมา (Steckel mill) จนได้ขนาดความหนาตามที่ต้องการ หลังจากผ่านการรีดร้อนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมจะถูกม้วนเก็บเพื่อการผลิตขั้นต่อไป เรียกแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมม้วนรีดร้อนนี้ว่า คอยล์ดำ (Black coils) เพราะมีสเกลออกไซด์สีดำ (ออกไซด์ปฐมภูมิ (Primary oxide)) ติดอยู่ที่ผิว



รูปที่ 1.1 กระบวนการรีดลดขนาดแบบต่อเนื่อง (Tandem mill) และการรีดลดขนาดแบบกลับไปมา (Steckel mill) [4]

เมื่อผ่านการรีดร้อนแล้วจะนำมารีดลดขนาดอีกครั้งด้วยการรีดเย็น ก่อนจะรีดเย็นต้องมีการอบอ่อน เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติต่าง ๆ ให้ดีขึ้น เช่น ความเหนียว (Ductility) และความแข็งแรง (Strength) เป็นต้น [5] การอบอ่อน ยังช่วยให้เหล็กกล้าไร้สนิมสามารถรีดลดขนาดได้ง่าย การอบอ่อนจะอบที่อุณหภูมิ 1,075 – 1,110 °ซ ใช้เวลาประมาณ 120-140 วินาที จากนั้นจะทำการเป่าลมร้อน และสเปรย์น้ำจนอุณหภูมิตกลงอย่างรวดเร็วเพื่อให้ได้โครงสร้างออสเทนไนต์ (Austenite) เมื่ออบอ่อนเสร็จจะเกิดออกไซด์เพิ่มขึ้นอีก (ออกไซด์ทุติยภูมิ (Secondary oxide)) จึงต้องกำจัดออกไซด์ด้วยแรงกล (Mechanical descaling) โดยการใช้ลูกรีดตัดงอขึ้นเหล็ก (Scale breaking) ทำให้สเกลออกไซด์บริเวณผิวเกิดการแตกและหลุดออก จากนั้นจึงยิงด้วยเม็ดเหล็ก (Shot blasting) แล้วตามด้วยการกำจัดออกไซด์ด้วยการกัดกรด (Pickling) [4] รูปที่ 1.2 แสดงกระบวนการอบอ่อน (Annealing) การกำจัดผิวสเกลออกไซด์ด้วยวิธีทางกล และด้วยการกัดกรด ก่อนการเข้าสู่กระบวนการรีดเย็น



รูปที่ 1.2 กระบวนการอบอ่อน (Annealing) การกำจัดผิวสเกลออกไซด์ด้วยวิธีทางกล และการกัดกรด (Pickling) ก่อนการเข้าสู่กระบวนการรีดเย็น [4]

การอบอ่อนในรูปที่ 1.2 จะใช้เตาที่ใช้แก๊สธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ ในแก๊สธรรมชาติจะมีแก๊สมีเทนเป็นองค์ประกอบถึงร้อยละ 94 ทำปฏิกิริยากับอากาศในเตาเผาได้ผลิตภัณฑ์ คือ พลังงานที่อยู่ในรูปความร้อน ออกซิเจน คาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ และไนโตรเจน สารเหล่านี้บางตัวทำปฏิกิริยากับเหล็กกล้าไร้สนิมทำให้เกิดสเกลออกไซด์ทุติยภูมิ ออกซิเจนน่าจะมีผลต่อการเกิดสเกลออกไซด์ทุติยภูมิมากที่สุด ในขั้นตอนการอบอ่อนต้องใช้เวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสม งานวิจัยนี้ต้องการศึกษาองค์ประกอบออกไซด์ทุติยภูมิที่อุณหภูมิ เวลาและออกซิเจนต่างกัน โดยจำลองบรรยากาศการอบอ่อนที่มีออกซิเจนร้อยละ 1.01, 4.63 และ 7.08 ศึกษาสัณฐานการเกิดของสเกลออกไซด์ทุติยภูมิ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning electron microscopy) วิเคราะห์องค์ประกอบเคมีด้วยเครื่องวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction) จากนั้นจะกำจัดสเกล

ออกไซด์ทางกล ตามด้วยการกัดกรด เพื่อศึกษาผลการอบอ่อนที่สภาวะต่าง ๆ ซึ่งครอบคลุมสภาพการผลิตรจริงของผู้ประกอบการต่อการกำจัดสเกลออกไซด์

1.2 วัตถุประสงค์

ศึกษาผลของอุณหภูมิ เวลา และ ปริมาณออกซิเจน ในขั้นตอนการอบอ่อนต่อการเกิดสัณฐานและองค์ประกอบเคมีของสเกลออกไซด์ทุติยภูมิของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 และการกำจัดสเกลออกไซด์ด้วยการกัดกรด

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาผลของอุณหภูมิที่ 1000 และ 1100°C เวลา 90 วินาที และ 150 วินาที และออกซิเจนร้อยละ 1.01, 4.63 และ 7.08 ในขั้นตอนการอบอ่อนต่อการกำจัดผิวสเกลออกไซด์ทุติยภูมิของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ด้วยการกัดกรด

1.3.2 ศึกษาสัณฐานและองค์ประกอบเคมีออกไซด์ทุติยภูมิของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการอบอ่อนที่อุณหภูมิ เวลา และปริมาณออกซิเจนที่ดีที่สุด ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning electron microscopy) วิเคราะห์องค์ประกอบเคมีด้วยเทคนิคการวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction)

1.3.3 เสนอแนะสมการแสดงอัตราการเกิดออกไซด์ชั้น

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ทราบผลของสภาวะการอบอ่อนต่อการเกิดสเกลออกไซด์ทุติยภูมิและการกัดผิวสเกลออกไซด์ด้วยการกัดกรด เพื่อเป็นประโยชน์สำหรับการปรับสภาวะกระบวนการผลิตรจริงของผู้ประกอบการ

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎีเบื้องต้นและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก (Austenitic) [6]

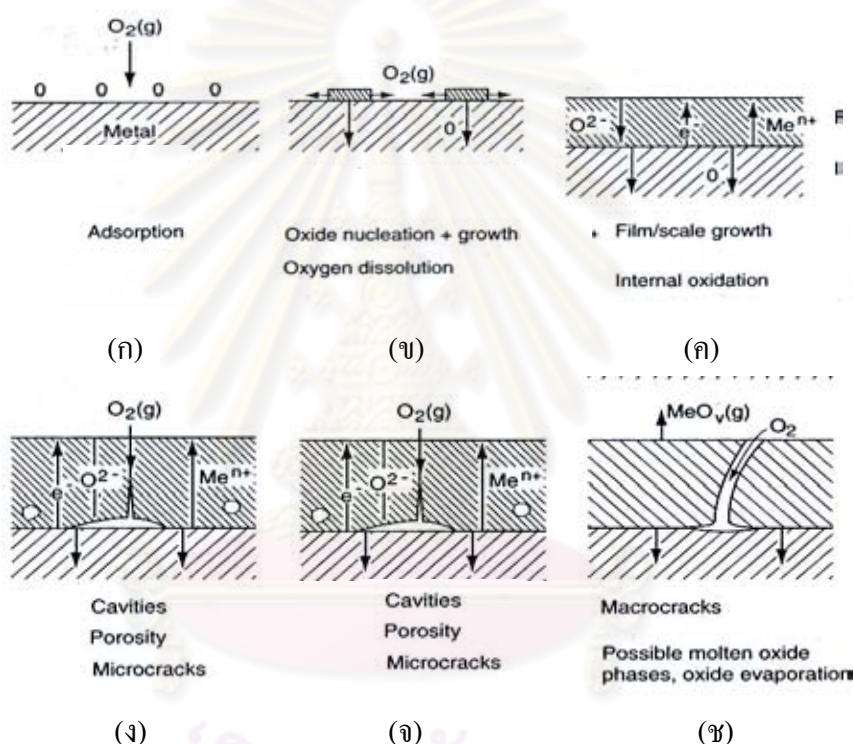
เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกมีหลายเกรดและถูกนำมาใช้งานในหลายรูปแบบ มีโครงสร้างจุลภาคหลักเป็นออสเทนิต (Austenite) ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบ Face Centered Cubic (F.C.C.) เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้จะมีโครเมียม นิกเกิลและแมงกานีสเป็นส่วนผสมที่สำคัญ โดยเหล็กยังมีปริมาณของโครเมียมมากยิ่งต้องมีนิกเกิลและแมงกานีสผสมอยู่มากเพื่อให้โครงสร้างจุลภาคเป็นออสเทนิต (Austenite) นอกจากนี้โครเมียม นิกเกิลและแมงกานีสแล้วยังอาจมีธาตุอื่น ๆ หลายชนิดที่เป็นส่วนผสมของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้ ธาตุต่าง ๆ เหล่านี้จะทำหน้าที่ในการปรับปรุงคุณสมบัติของเหล็กให้ดีขึ้น โดยแต่ละธาตุก็จะทำหน้าที่แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น กำมะถันและเซเลเนียมในเกรด 303 และ 303 Se จะช่วยให้เหล็กสามารถนำไปกลึงได้ง่ายขึ้น โมลิบดีนัมจะเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อน ไนโตรเจนจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงและความต้านทานการกัดกร่อน โดยทั่วไปแล้วเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีความต้านทานการกัดกร่อนสูง โดยที่เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้มีปริมาณของนิกเกิลผสมอยู่ค่อนข้างสูงประกอบกับมีโครงสร้างจุลภาคเป็นออสเทนิต (Austenite) ทำให้มีคุณสมบัติที่สามารถนำไปใช้งานได้ในภาวะแวดล้อมหลายอย่างทั้งที่อุณหภูมิปกติ อุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำ

2.2 การอบอ่อน [7, 8]

การอบอ่อน คือ การนำชิ้นงานไปอบที่อุณหภูมิสูงเป็นระยะเวลาหนึ่งแล้วทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว มีวัตถุประสงค์เพื่อลดความเค้นเหลือค้าง เพิ่มความอ่อนนิ่ม ความเหนียว และความแกร่ง กระบวนการอบอ่อนแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน คือ 1) การให้ความร้อนถึงอุณหภูมิที่ต้องการ 2) ทิ้งไว้ที่อุณหภูมินั้นเป็นระยะเวลาหนึ่ง 3) การเย็นตัวถึงอุณหภูมิห้อง โดยมีเวลาเป็นตัวแปรที่สำคัญ ระหว่างการให้ความร้อนหรือการเย็นตัวจะมีความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างเนื้อในและผิวด้านนอกของชิ้นงาน ความแตกต่างของอุณหภูมินี้ขึ้นอยู่กับรูปร่างขนาดชิ้นงาน ถ้าอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสูงมากเกินไป จะเกิดความแตกต่างอุณหภูมิและความเค้นภายในชิ้นงาน ทำให้แตกร้าวได้ การอบอ่อนต้องใช้เวลานานเพียงพอที่จะให้เกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคอย่างสมบูรณ์ อุณหภูมิการอบอ่อนจึงมีความสำคัญ การอบอ่อนอาจเร็วขึ้นด้วยการเพิ่มอุณหภูมิ เพราะเกิดการแพร่ของอะตอมเร็วขึ้น

2.3 การเกิดออกซิเดชันของโลหะในบรรยากาศที่อุณหภูมิสูง [8, 9]

โลหะที่อยู่ในที่อุณหภูมิสูง มีออกซิเจนและก๊าซอื่น ๆ จะเกิดปฏิกิริยาที่ผิวของโลหะ ชั้นแรกจะมีการดูดซับออกซิเจนไว้ที่ผิวแล้วเกิดปฏิกิริยาได้สารประกอบออกไซด์ของโลหะที่ผิว หรือเรียกว่าเกิดสเกลออกไซด์จากนั้นปฏิกิริยาจะดำเนินต่อไป สเกลออกไซด์จะเกิดเพิ่มมากขึ้นจนเป็นฟิล์มหุ้มทั่วผิวและป้องกันโลหะ ฟิล์มที่เกิดจะหนามากขึ้นเรื่อย ๆ จนในที่สุดจะไม่มีสมบัติปกป้อง เพราะฟิล์มที่หนาจะมีรูพรุนและมีโอกาสแตกเกิดเป็นรอยแยกหรือเป็นช่องว่างขนาดเล็ก ๆ แล้วทำให้ปฏิกิริยาเกิดต่อไปได้ โดยทั่วไปเข้าใจว่าเมื่อออกไซด์ที่หนาและมีรอยแตก คือ สเกลออกไซด์รูปที่ 2.1 แสดงลำดับการเกิดสเกลออกไซด์ที่ผิวโลหะที่อุณหภูมิสูง

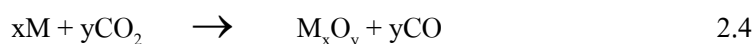
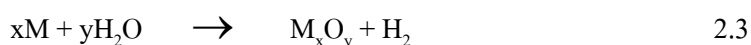


รูปที่ 2.1 ลำดับการเกิดสเกลออกไซด์ที่ผิวโลหะที่อุณหภูมิสูง [9]

ปฏิกิริยาการเกิดออกซิเดชันของโลหะในอากาศที่อุณหภูมิสูงมีดังนี้ [9]



ปฏิกิริยาของโลหะกับไอน้ำ หรือคาร์บอนไดออกไซด์ มีดังนี้ [9]

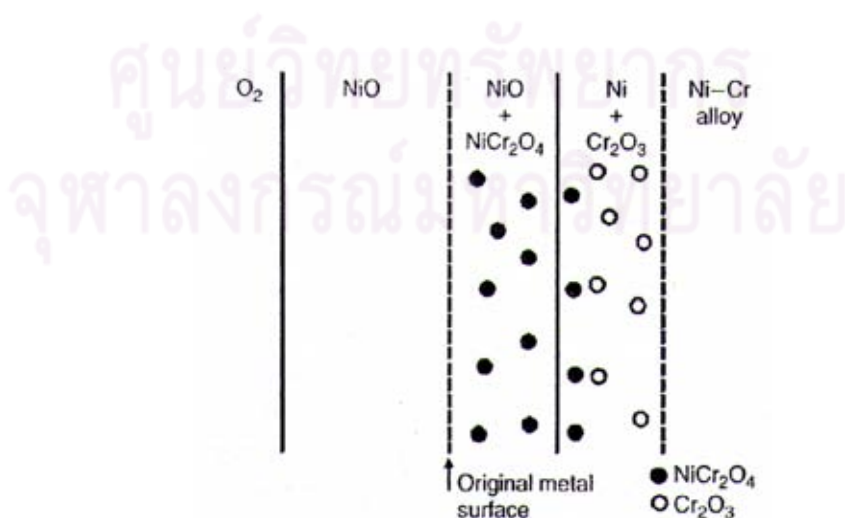


สเกลออกไซด์ที่เกิดขึ้นบนผิวโลหะคือ M_xO_y จะกั้นกลางระหว่างผิวโลหะไม่ให้สัมผัสกับบรรยากาศสิ่งแวดล้อม สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของชั้นสเกลออกไซด์เป็นปัจจัยสำคัญต่ออัตราการเกิดออกซิเดชันและอายุการใช้งานของโลหะในสิ่งแวดล้อมที่มีฤทธิ์กัดกร่อนหรือออกซิไดซ์โดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูง

2.4 สเกลออกไซด์ของเหล็กกล้าไร้สนิมที่อุณหภูมิสูง [10, 11]

ลักษณะสเกลออกไซด์ของเหล็กกล้าไร้สนิมที่อุณหภูมิสูงยังไม่มีการสรุปที่แน่ชัด เนื่องจากขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น บรรยากาศ อุณหภูมิ และเวลาในการเกิดออกซิเดชัน เป็นต้น แต่สามารถศึกษาความน่าจะเป็นของลักษณะการเกิดออกซิเดชันได้จากองค์ประกอบเคมีหลักของเหล็กกล้าไร้สนิม โดยมากประกอบไปด้วย เหล็ก โครเมียม และนิกเกิล ในที่นี้จะแสดงตัวอย่างการเกิดออกซิเดชันของธาตุทั้งสาม การศึกษาสเกลออกไซด์ของโลหะผสมนิกเกิลและโครเมียมมีดังต่อไปนี้

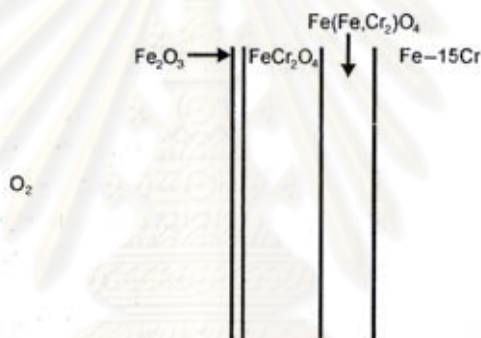
การเกิดออกซิเดชันของโลหะผสมนิกเกิลและโครเมียมขึ้นอยู่กับปริมาณของโครเมียมในโลหะผสมโดยจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วง [10] คือ ปริมาณโครเมียมน้อยกว่าร้อยละ 25 และ ปริมาณโครเมียมมากกว่าร้อยละ 25 ที่ปริมาณโครเมียมน้อยกว่าร้อยละ 25 จะเกิดสเกลโครเมียมออกไซด์ในรูปของ Cr_2O_3 ขณะที่เกิดสเกลนิกเกิลออกไซด์ในรูปของ NiO เมื่อสเกลออกไซด์ทั้งสองทำปฏิกิริยากันจะเกิดสเกลนิกเกิลโครเมียมออกไซด์ในรูปของ $NiCr_2O_4$ รูปที่ 2.2 แสดงการเกิดออกซิเดชันของโลหะผสมนิกเกิลและโครเมียมที่โครเมียมน้อยกว่าร้อยละ 25 เมื่อปริมาณโครเมียมมากกว่าร้อยละ 25 ผิวโลหะจะถูกปกคลุมด้วยชั้นออกไซด์ของ Cr_2O_3 อย่างต่อเนื่อง ลึกลงไปชั้นในจะเป็นชั้น NiO และ $NiCr_2O_4$ แสดงว่าอัตราการแพร่ของโครเมียมทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ดีกว่านิกเกิล



รูปที่ 2.2 การเกิดออกซิเดชันของโลหะผสมนิกเกิลและโครเมียมที่โครเมียมน้อยกว่าร้อยละ 25 [11]

องค์ประกอบเคมีของเหล็กกล้าเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 จะประกอบด้วย เหล็กร้อยละ 73 โครเมียมร้อยละ 18 นิกเกิลร้อยละ 8 เมื่อนิกเกิลมีปริมาณน้อยกว่าเหล็กและโครเมียม โดยส่วนใหญ่จึงเป็นเหล็กออกไซด์และโครเมียมออกไซด์

การเกิดออกซิเดชันของโลหะผสมเหล็กและโครเมียม ที่ปริมาณโครเมียมมากกว่าร้อยละ 15 การเกิดออกซิเดชันของโลหะผสมเหล็กและโครเมียมจะคล้ายกับการเกิดออกซิเดชันของโลหะผสมนิกเกิลและโครเมียม แต่โลหะผสมเหล็กและโครเมียมมีความสามารถแพร่ร่วมกัน (Co - diffusion) ได้ดีกว่า โครเมียมจะเกิดสเกลออกไซด์ในรูปของโครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) ขณะที่เหล็กจะเกิดสเกลออกไซด์ในรูปของฮีมาไทต์ (Fe_2O_3) เมื่อสเกลออกไซด์ทั้งสองทำปฏิกิริยากันจะเกิดเป็นโครไมต์ (FeCr_2O_4) เหล็กโครเมียมออกไซด์จะขวางการแพร่ของออกซิเจนที่เข้าไปทำปฏิกิริยาทำให้ออกไซด์ที่ติดกับเนื้อวัสดุเกิดในรูปของการผสมกันมีโครงสร้างสปีคเนลหรือมีโครงสร้างไม่แน่นอนเป็นออกไซด์ในรูป $\text{Fe}(\text{Fe},\text{Cr})_2\text{O}_4$ [11] แต่ที่อุณหภูมิมากกว่า 950°C จะไม่พบชั้นนี้จะพบชั้นโครเมียมออกไซด์แทน [10]

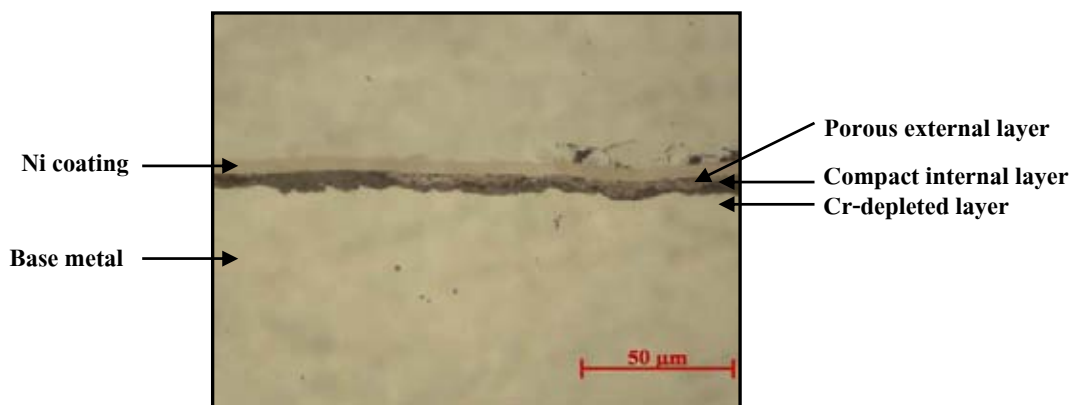


รูปที่ 2.3 การเกิดออกซิเดชันของโลหะผสมเหล็กและโครเมียมที่โครเมียมมากกว่าร้อยละ 15 [11]

2.5 ลักษณะและสมบัติของสเกลออกไซด์ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 แผ่นม้วนรีดร้อน [12]

ลักษณะของสเกลออกไซด์คอยล์ประกอบด้วย 2 ชั้น ชั้นที่อยู่นอกสุดติดกับอากาศเป็นชั้นที่มีลักษณะพรุน (Porous oxide) มีความหนาแน่นน้อย และก๊าซออกซิเจนสามารถแพร่เข้าไปในชั้นนี้ได้ง่าย ส่วนชั้นที่สองมีลักษณะหนาแน่น (Compact oxide) อยู่ด้านในติดกับเนื้อโลหะมีสีเข้ม ดังแสดงในรูปที่ 2.4

เมื่อเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 แผ่นม้วนรีดร้อนผ่านการอบอ่อน ลักษณะสเกลออกไซด์เกิดการเปลี่ยนแปลงโดยสเกลออกไซด์ที่มีลักษณะพรุนจะหลุดออก และเหลือส่วนที่มีลักษณะหนาแน่น โดยชั้นที่มีลักษณะหนาแน่นจะมีสีเข้มขึ้นและความหนาแน่น (Density) จะมากขึ้น รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะสเกลออกไซด์ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 แผ่นม้วนรีดร้อนที่ผ่านการอบอ่อน

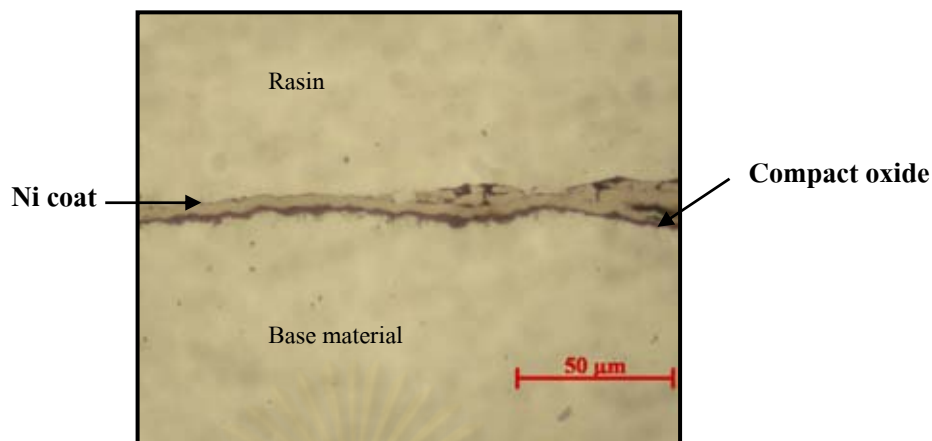


รูปที่ 2.4 ลักษณะสเกลออกไซด์ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 แผ่นม้วนรีดร้อนที่ผ่านการรีดร้อนแบบต่อเนื่อง (Tandem mill) [13]

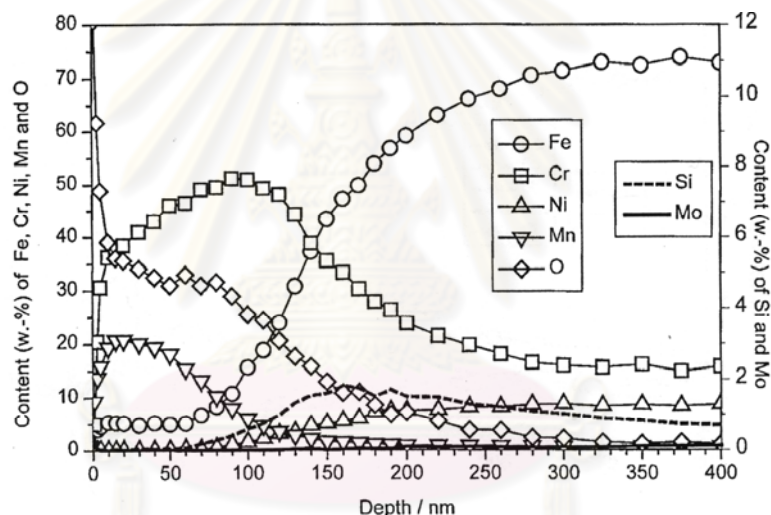
จากการศึกษาองค์ประกอบ และโครงสร้าง ของสเกลออกไซด์เหล็กกล้าไร้สนิม ออสเทนิติก พบว่าสเกลออกไซด์จะมีลักษณะเป็นชั้น ๆ ประกอบไปด้วยโครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) ฮีมาไทต์ (Fe_2O_3) และเหล็กโครเมียมออกไซด์สปิเนล ($(\text{FeCr})_3\text{O}_4$ spinel) โดยเหล็กโครเมียมออกไซด์สปิเนล จะเป็นสารประกอบที่ไม่เป็นไปตามสูตรเคมี (Non-stoichiometric compound) มีโครงสร้างไม่แน่นอน [12]

โครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) เป็นชั้นฟิล์มที่ป้องกันการเกิดออกซิเดชันกับอากาศเพราะมีความหนาแน่นสูงมากและไม่มีรูพรุน ส่วนเหล็กออกไซด์จะไม่มีสมบัติปกป้อง เพราะมีความหนาแน่นต่ำและรูพรุน [12, 14]

เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก AISI 304 ที่ผ่านการอบอ่อนที่ $1,140^\circ\text{C}$ เวลา 6 ชั่วโมง ในบรรยากาศมีออกซิเจนร้อยละ 6 [15] พบว่ามีปริมาณโครเมียมสูงที่สุดที่บริเวณผิว ชั้นในจะพบเหล็กออกไซด์ และซิลิกอนออกไซด์ (SiO_2) ซึ่งมีปริมาณน้อยมากอยู่ระหว่างสเกลออกไซด์กับเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิม [15] รูปที่ 2.6 แสดงปริมาณธาตุของสารประกอบออกไซด์ของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก AISI 304 ที่ความลึกต่าง ๆ จากผิวหลังจากอบอ่อนที่ อุณหภูมิ $1,140^\circ\text{C}$ เวลา 2.5 นาที ในบรรยากาศมีออกซิเจนร้อยละ 6 วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Glow discharge optical emission spectroscopy (GDOES)



รูปที่ 2.5 ลักษณะสเกลออกไซด์ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 แผ่นม้วนรีดร้อนที่ผ่านการอบอ่อน [13]



รูปที่ 2.6 ปริมาณธาตุในสารประกอบออกไซด์ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ความลึกต่าง ๆ หลังการอบอ่อนที่ อุณหภูมิ 1,140°C เวลา 2.5 นาที ในบรรยากาศมีออกซิเจนร้อยละ 6 วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Glow discharge optical emission spectroscopy (GDOES) [15]

2.6 การกำจัดสเกลออกไซด์ของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก AISI 304 แผ่นม้วนรีดร้อน [9]

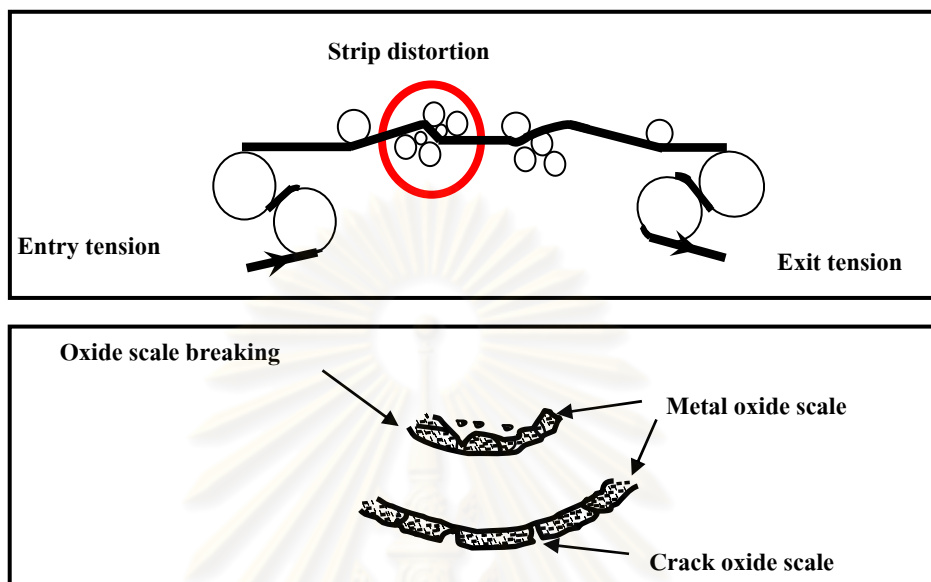
โดยทั่วไปการกำจัดสเกลออกไซด์จะแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ การกำจัดสเกลออกไซด์ด้วยแรงกล (Mechanical descaling) และการกัดกรด (Pickling)

2.6.1 การกำจัดสเกลออกไซด์ด้วยแรงกล [12]

คือ การตัดให้สเกลออกไซด์แตก (Scale breaking) และการยิงด้วยเม็ดเหล็ก (Shot blasting)

2.6.1.1 การตัดให้สเกลออกไซด์แตก (Scale breaking) แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมจะถูกผ่านเข้าไปยังลูกรีด และตั้งองจนสเกลออกไซด์ที่ผิวเกิดการแตกร้าว สเกลออกไซด์บางส่วนหลุด

ออกไป รูปที่ 2.7 แสดงการตัดให้สเกลออกไซด์แตก ส่งผลให้ประสิทธิภาพของการกำจัดสเกลออกไซด์โดยใช้สารเคมี (Chemical pickling) ในขั้นตอนต่อไปเพิ่มขึ้น เพราะสารละลายกรดสามารถแทรกซึมผ่านเข้าไปยังบริเวณรอยแตก



รูปที่ 2.7 การตัดให้สเกลออกไซด์แตก (Scale breaking) [16]

2.6.1.2 การยิงสเกลออกไซด์ด้วยเม็ดเหล็ก (Shot blasting) [12] จุดประสงค์เพื่อให้สเกลออกไซด์ที่ติดอยู่กับผิวเหล็กกล้าไร้สนิมหลุด รูปที่ 2.8 แสดงผิวเหล็กกล้าไร้สนิมเมื่อยิงสเกลออกไซด์ด้วยเม็ดเหล็ก ความหยาบของผิวเหล็กกล้าไร้สนิมจะเพิ่มขึ้น จึงไม่ควรยิงสเกลออกไซด์ด้วยเม็ดเหล็กเป็นเวลานาน เพราะจะทำให้ผิวหยาบมากเกินไป สเกลออกไซด์ที่ผิวจะยังคงเหลือค้างต้องเข้าสู่กระบวนการกำจัดสเกลออกไซด์ด้วยการกัดกรด (Pickling) เพื่อกำจัดสเกลออกไซด์ที่ยังคงติดค้างอยู่ให้หมดไป รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะสเกลออกไซด์ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 แผ่นม้วนรีดร้อนที่ผ่านการอบอ่อนและการยิงด้วยเม็ดเหล็ก จะเห็นว่ายังคงมีปริมาณสเกลออกไซด์เหลือค้างอยู่ไม่มากนัก

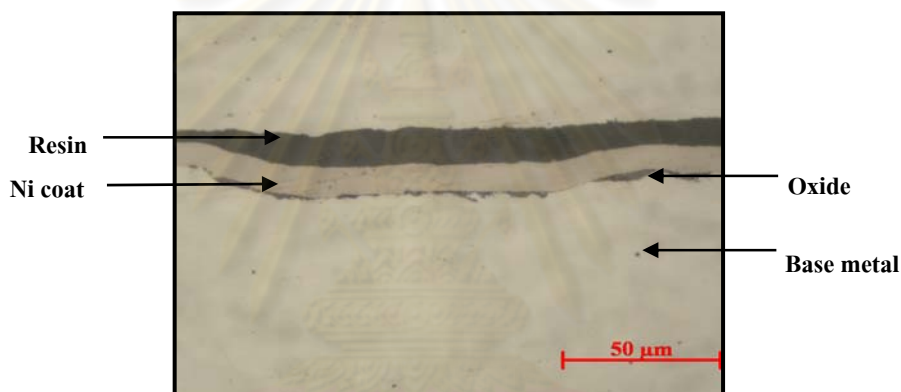
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก)

(ข)

รูปที่ 2.8 ผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ก่อน (ก) และหลัง (ข) การกำจัดสเกลออกไซด์ด้วยเม็ดเหล็ก (Shot blasting) [17]



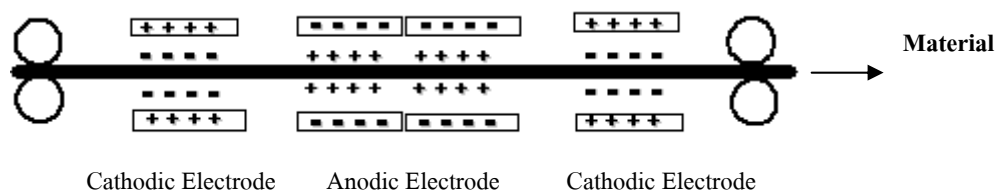
รูปที่ 2.9 ลักษณะสเกลออกไซด์ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 แผ่นม้วนรีดร้อนที่ผ่านการอบอ่อนและการยิงด้วยเม็ดเหล็ก [13]

2.6.2 การกัดกรด [12]

แบ่งเป็น 2 แบบหลัก คือ การกัดกรดรวมกับการใช้กระแสไฟฟ้า (Electrolytic pickling) และ การกัดกรดโดยใช้สารเคมี (Chemical pickling)

2.6.2.1 การกัดกรดรวมกับการใช้กระแสไฟฟ้า ใช้ขั้วแอโนดหรือขั้วบวก (Anode electrode) และขั้วแคโทดหรือขั้วลบ (Cathode electrode) ทำให้แผ่นเหล็กมีประจุไฟฟ้าตรงกันข้าม รูปที่ 2.10 แสดงการกัดกรดรวมกับการใช้กระแสไฟฟ้า จะให้แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมอยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้า วางขั้วไฟฟ้าแอโนด และขั้วแคโทดสลับกัน แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมจะถูกกระตุ้นให้มีความประจุไฟฟ้าตรงกันข้าม ในช่วงที่แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมมีประจุบวกจะมีก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้นและช่วยให้สเกลออกไซด์หลุดออก ส่วนช่วงที่แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมมีประจุลบจะมีก๊าซออกซิเจน

เกิดขึ้น ขั้นตอนการกำจัดสเกลออกไซด์ในขั้นตอนนี้จะเป็นการกำจัดโครเมียมออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์



รูปที่ 2.10 การกัดกรวดร่วมกับใช้กระแสไฟฟ้า (Electrolytic pickling) [12]

2.6.2.2 การกัดกรวดโดยใช้สารเคมี ส่วนมากจะใช้กรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric acid, HF) และ กรดไนตริก (Nitric acid, HNO₃) ผสมกับใช้กรดไฮโดรฟลูออริก จะช่วยกำจัดซิลิกอนออกไซด์ และกำจัดชั้นโครเมียมออกไซด์ที่มีปริมาณโครเมียมต่ำ (Chromium-Depleted layer) ออกไป ส่วนกรดไนตริกจะเป็นตัวเร่งทำให้เกิดชั้นพาสซีฟฟิล์ม (Passive film) [13] ปัจจัยที่สำคัญของการกำจัดสเกลออกไซด์ด้วยสารละลายกรด คือ ชนิดของสารละลาย อุณหภูมิ เวลา ความเข้มข้น และการกวน

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

แคททีรียา ทวีทรัพย์ [13] ได้ศึกษาลักษณะสเกลออกไซด์ของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด ออสเทนิติก AISI 304 แผ่นม้วนรีดร้อนที่ผ่านการรีดอย่างต่อเนื่อง ซึ่งมีองค์ประกอบเคมีดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ใช้ในการทดลอง ของแคททีรียา ทวีทรัพย์ [13]

เกรด	ร้อยละโดยมวล				
	C	Mn	Si	Cr	Ni
304	0.055	1.034	0.516	18.36	8.1

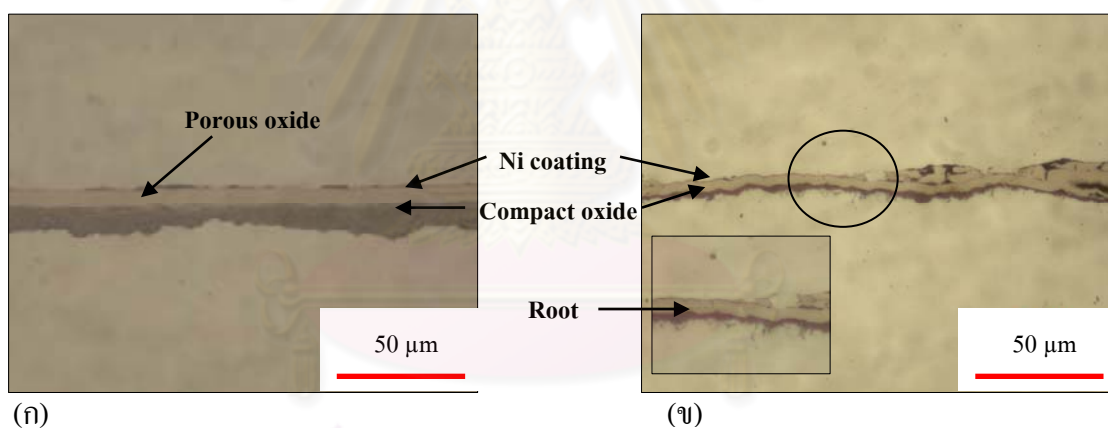
ผลการทดลองพบว่า ลักษณะสเกลออกไซด์จะแบ่งออกเป็นสองชั้น คือ ชั้นที่มีลักษณะหนาแน่น (Compact oxide) และชั้นที่มีลักษณะพรุน (Porous oxide) ตำแหน่งของสเกลออกไซด์ที่เป็นชั้นที่มีลักษณะหนาแน่น จะอยู่ติดกับเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิม มีสีเข้ม และมีความหนาแน่น (Density) มากกว่าชั้นที่มีลักษณะพรุน ส่วนชั้นที่มีลักษณะพรุน จะอยู่ที่ผิวบนสุดมีความหนาแน่น

น้อย ออกซิเจนจะสามารถแพร่เข้ามาในชั้นนี้ได้ง่าย รูปที่ 2.11 (ก) แสดงภาพตัดขวางความหนาและลักษณะผิวสเกลออกไซด์คอยล์ดำ ของแผ่นม้วนรีดร้อนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304

เมื่อผ่านการอบอ่อนผิวสเกลออกไซด์จะเป็นดังรูปที่ 2.11 (ข) ลักษณะสเกลออกไซด์เกิดการเปลี่ยนแปลงโดยสเกลออกไซด์ที่พอรุนจะหลุดออกไป เหลือส่วนที่เป็นชั้นหนาแน่น ชั้นหนาแน่นจะมีสีเข้มขึ้น มีความหนาและความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยังเกิดลักษณะคล้ายรากไม้ (Root) ลงไปในเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิม

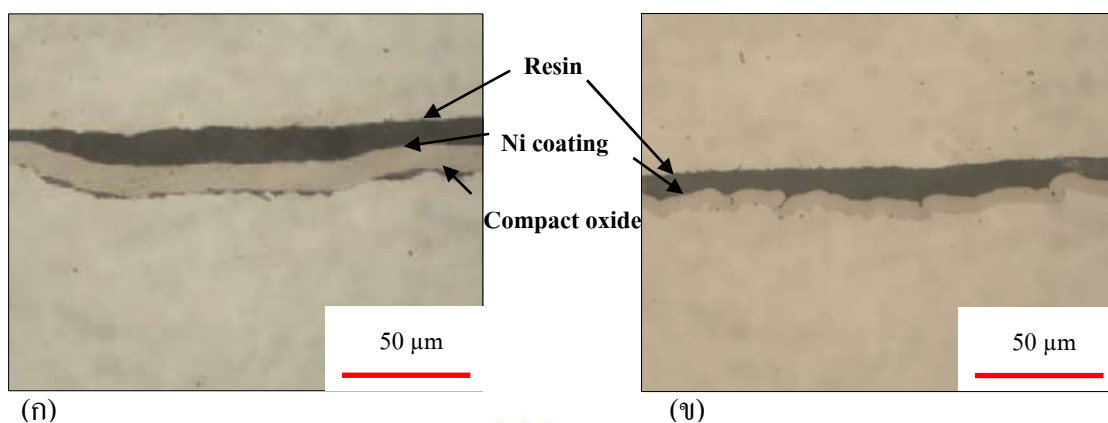
เมื่อชิ้นงานผ่านกระบวนการยิงเม็ดเหล็ก จะพบว่าบางส่วนของสเกลออกไซด์หลุดออกจากผิวเหล็กกล้าไร้สนิมและบางส่วนยังคงติดอยู่ เมื่อพิจารณาจากภาคตัดขวางก็พบว่าความหนาของชั้นหนาแน่นลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.12 (ก)

เมื่อผ่านการกัดกรดทุกขั้นตอน พบว่าผิวของชิ้นงานจะถูกกัดกัดเป็นชั้นๆ ลึกลงไปในแต่ละชั้นก็จะมีหลุมเล็กๆ ที่อาจเกิดจากการถูกกัดกัด ลักษณะของผิวคล้ายกับจะถูกทำลายรุนแรง แต่ยังคงมีสเกลออกไซด์เหลือค้างอยู่บนผิวบางส่วนดังรูปที่ 2.12 (ข) รูปที่ 2.13 แสดงผิวแผ่นม้วนรีดร้อนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 หลังผ่านการกำจัดสเกลออกไซด์ทางกลและการกัดกรด

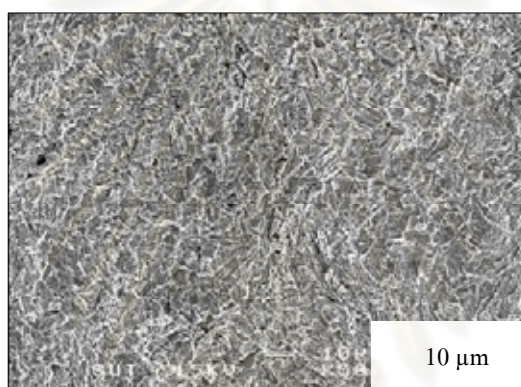


รูปที่ 2.11 ภาพตัดขวางแสดงความหนาและลักษณะผิวสเกลออกไซด์คอยล์ดำ (ก) และผิวสเกลออกไซด์ที่ผ่านการอบอ่อน (ข) ของแผ่นม้วนรีดร้อนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 [13]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.12 ภาพตัดขวางแสดงความหนาและลักษณะผิวสเกลออกไซด์ที่ผ่านการกำจัดทางกล (ก) และลักษณะของสเกลออกไซด์ที่ผ่านการกัดกรด (ข) ของแผ่นม้วนรีดร้อนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 [13]



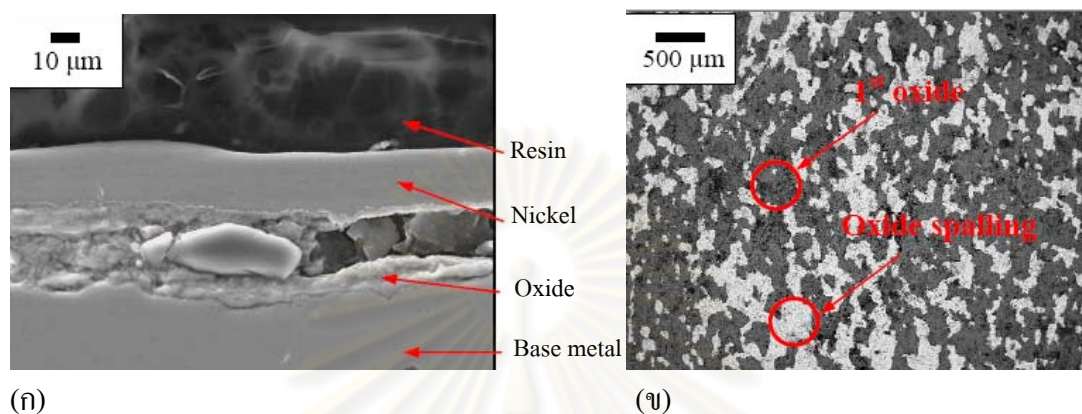
รูปที่ 2.13 ผิวแผ่นม้วนรีดร้อนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 หลังผ่านการกำจัดสเกลออกไซด์ทางกล และการกัดกรด

ฤกษ์รัช คุณากรโยธิน [14] ได้ศึกษาการเกิดออกซิเดชันของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 แผ่นม้วนรีดร้อนที่ผ่านการรีดอย่างต่อเนื่องมีองค์ประกอบเคมีดังตารางที่ 2.2 โดยจะอบตัวอย่างที่ อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ใช้ในการทดลองของฤกษ์รัช คุณากรโยธิน [14]

เกรด	ร้อยละโดยมวล								
	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Co	N
304	0.048	1.340	0.027	0.004	0.520	18.07	8.020	0.13	0.054

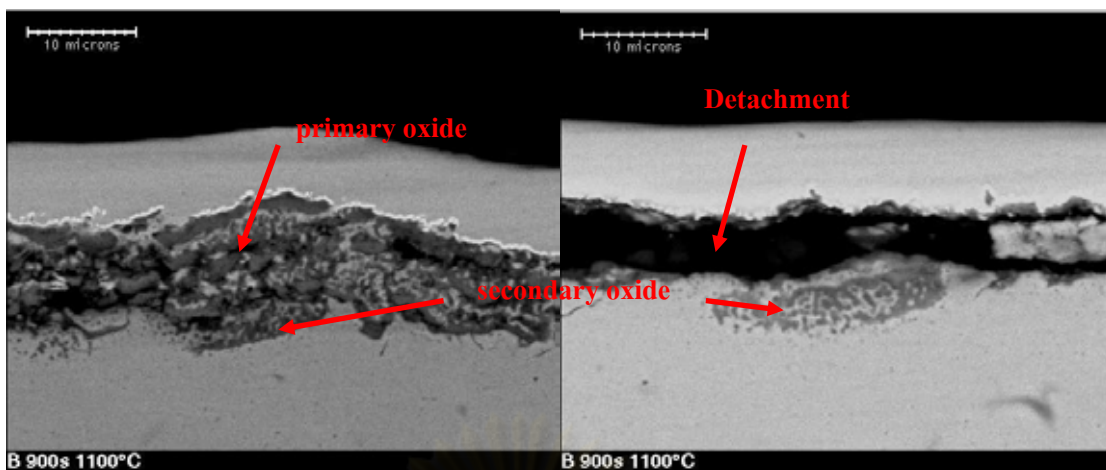
ผลการทดลอง (รูปที่ 2.14) พบว่า ความหนาของชั้นสเกลออกไซด์ก่อนการอบมีค่าประมาณ 5 - 6 ไมโครเมตร และมีการหลุดลอกของผิวสเกลออกไซด์เป็นจำนวนมาก ออกไซด์ปฐมภูมิ (Primary oxide) ประกอบด้วยออกไซด์สามชนิดคือ เหล็กโครเมียมออกไซด์ ($(\text{Fe,Cr})_2\text{O}_3$) โครไมต์ (FeCr_2O_4) และฮีมาไทต์ (Fe_2O_3)



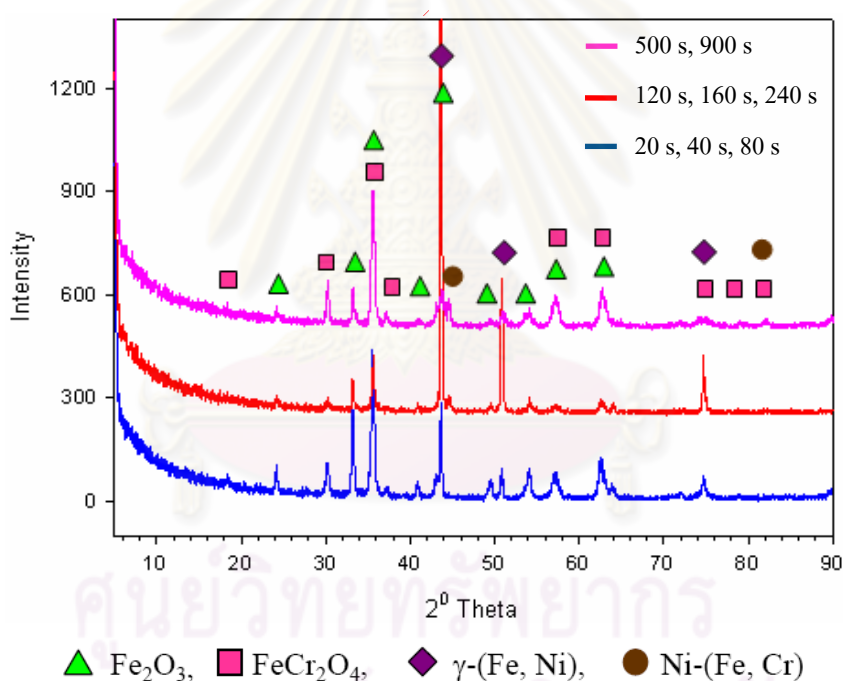
รูปที่ 2.14 ภาพตัดขวางแสดงความหนาของสเกลออกไซด์ (ก) และภาพแสดงการหลุดลอกของชั้นสเกลออกไซด์ (ข) ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 คอยล์ดำ ที่ผ่านการรีดอย่างต่อเนื่อง (Tandem) [14]

หลังจากการเกิดออกซิเดชัน พบว่าออกไซด์ทุติยภูมิ (Secondary oxide) จะเกิดขึ้นด้านล่างออกไซด์ปฐมภูมิ (รูปที่ 2.15 ก) และ/หรือ บริเวณที่ออกไซด์ปฐมภูมิหลุดลอกออก (รูปที่ 2.15 ข) ออกไซด์ทุติยภูมิ (Secondary oxide) ประกอบด้วยออกไซด์หลัก 2 ชนิด คือ โครไมต์ (FeCr_2O_4) และฮีมาไทต์ (Fe_2O_3) (รูปที่ 2.16) เมื่อออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูงและเวลานานสเกลออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะมากขึ้นตามไปด้วย รูปที่ 2.17 แสดงผิวออกไซด์ทุติยภูมิเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 หลังจากผ่านการอบอ่อน เมื่อเขียนกราฟสมการระหว่างน้ำหนักสเกลออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นกับเวลาการเกิดออกซิเดชัน พบว่ามีสมการเป็นแบบเส้นตรงทุกอุณหภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 2.18

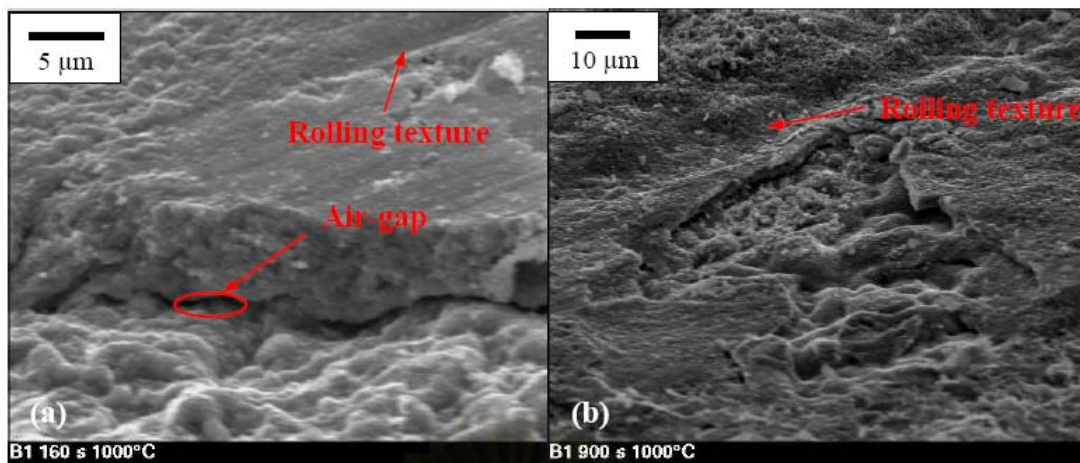
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



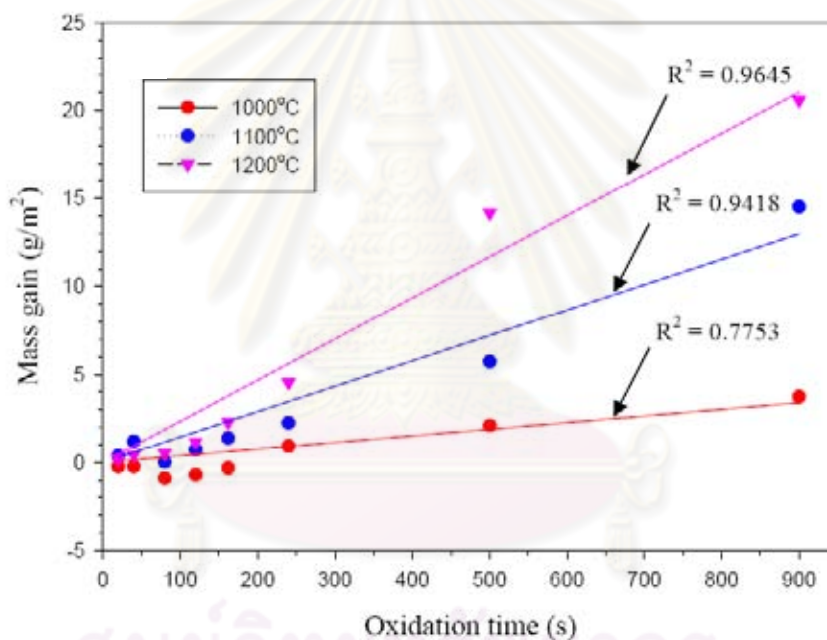
(ก) บริเวณด้านล่างออกไซด์ปฐมภูมิ (ข) บริเวณที่ออกไซด์ปฐมภูมิหลุดลอกออก
รูปที่ 2.15 ออกไซด์ทุติยภูมิเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1100°ซ และ
เวลา 900 วินาที [14]



รูปที่ 2.16 XRD สเปกตรัมของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านการออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1100°ซ
เวลาต่าง ๆ [14]



(ก) อุณหภูมิ 1000^oซ และเวลา 160 วินาที (ข) อุณหภูมิ 1000^oซ และเวลา 900 วินาที
รูปที่ 2.17 ผิวออกไซด์ทุติยภูมิเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 หลังจากผ่านการอบอ่อน [14]



รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นกับเวลาที่ใช้ในการอบอ่อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ [14]

A.M. Huntz และ คณะ [18] ได้ศึกษาสเกลออกไซด์ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 โดยใช้ตัวอย่างขนาดกว้าง 10 มิลลิเมตร ยาว 10 มิลลิเมตร หนา 0.6 มิลลิเมตร และมีองค์ประกอบเคมีดังแสดงในตารางที่ 2.3 โดยอบตัวอย่างที่อุณหภูมิ 850^oซ, 900^oซ และ 950^oซ เป็นเวลา 50 ชั่วโมง ภายใต้ความดัน 1 บรรยากาศ และให้ความดันย่อยของแก๊สต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.4

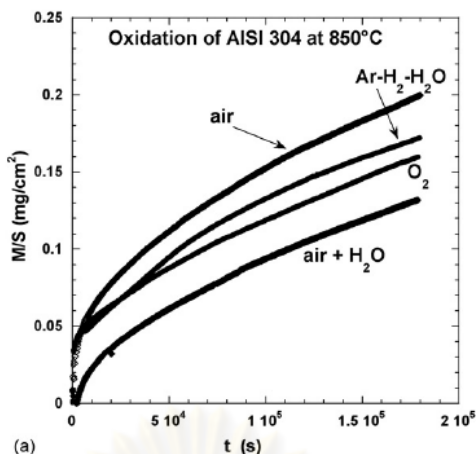
ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ใช้ในการทดลองของ A.M. Huntz และคณะ [18]

เกรด	ร้อยละโดยมวล							N (ppm)
	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	
304	0.0466	1.37	0.028	0.0006	0.46	18.07	8.11	322

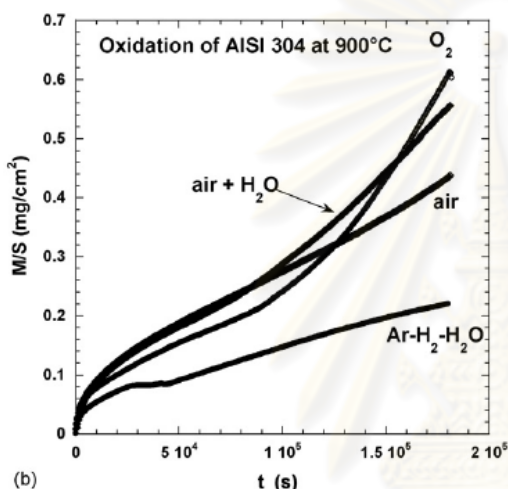
ตารางที่ 2.4 ความดันย่อยของแก๊สต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองของ A.M. Huntz และคณะ (ความดันรวม 1 บรรยากาศ) [18]

T (°C)	P (atm)			
	P _{O₂}	P _{H₂O}	P _{H₂}	P _{H₂O} /P _{O₂}
850				
O ₂	1	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶
Air	0.21	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶	4.76 x 10 ⁻⁶
Air + H ₂ O	0.1932	10 ⁻⁶	0.0168	8.7 x 10 ⁻²
Ar + H ₂ + H ₂ O	1.34 x 10 ⁻²⁰	10 ⁻⁴	5.26 x 10 ⁻⁶	3.92 x 10 ¹⁴
900				
O ₂	1	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶
Air	0.21	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶	4.76 x 10 ⁻⁶
Air + H ₂ O	0.1932	10 ⁻⁶	0.0168	8.7 x 10 ⁻²
Ar + H ₂ + H ₂ O	1.34 x 10 ⁻¹⁹	10 ⁻⁴	5.26 x 10 ⁻⁶	3.92 x 10 ¹³
950				
O ₂	1	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶
Air	0.21	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶	4.76 x 10 ⁻⁶
Air + H ₂ O	0.1932	10 ⁻⁶	0.0168	8.7 x 10 ⁻²
Ar + H ₂ + H ₂ O	1.34 x 10 ⁻¹⁸	10 ⁻⁴	5.26 x 10 ⁻⁶	3.92 x 10 ¹²

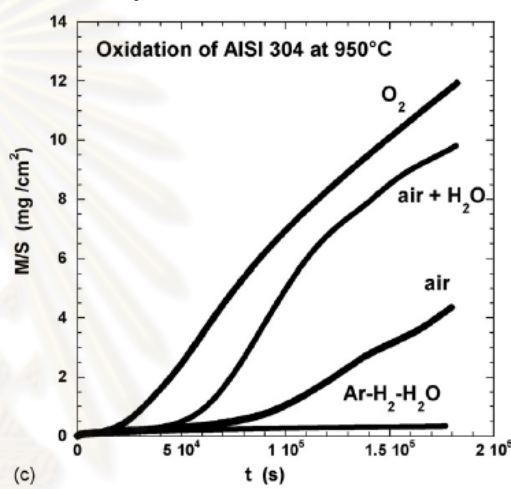
หลังการออกซิเดชันพบว่า สเกลออกไซด์มีปริมาณที่เพิ่มขึ้นตามเวลาการอบที่เพิ่มขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 850 °C ภายใต้ความดันบรรยากาศมีสเกลออกไซด์เกิดมากที่สุด และในบรรยากาศที่มีไอน้ำมีสเกลออกไซด์เกิดน้อยที่สุด ดังรูปที่ 2.19 (ก) แต่ที่อุณหภูมิ 900 °C และ 950 °C ภายใต้บรรยากาศที่มีออกซิเจนพบว่า มีสเกลออกไซด์เกิดมากที่สุด และภายใต้บรรยากาศที่มีอาร์กอน ไฮโดรเจน และไอน้ำ จะพบสเกลออกไซด์เกิดน้อยที่สุด ดังรูปที่ 2.19 (ข) และ 2.19 (ค) ตามลำดับ



(ก) การเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 850 °ซ



(ข) การเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 900 °ซ

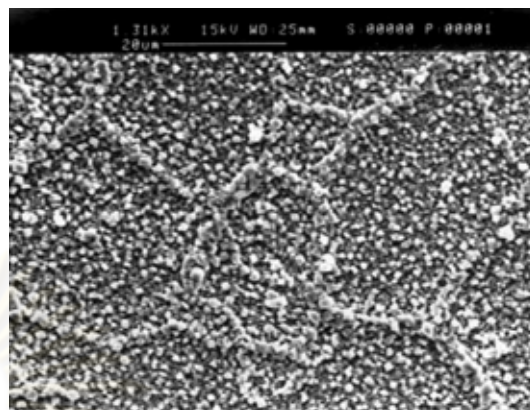
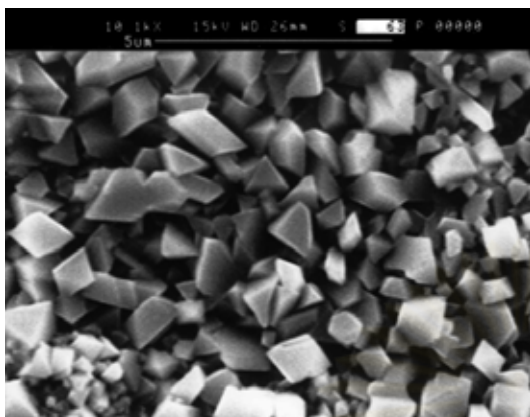


(ค) การเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 950 °ซ

รูปที่ 2.19 กราฟแสดงน้ำหนักต่อเวลาของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่ทดลองการเกิดออกซิเดชัน ในบรรยากาศต่าง ๆ [18]

เมื่อนำไปตรวจดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ผิว พบว่าสเกลออกไซด์ที่เกิดที่อุณหภูมิ 850 °ซ และ 900 °ซ เหมือนกันทุกบรรยากาศ โดยจะเกิดผลึกของสเกลออกไซด์ขนาดเล็ก (รูปที่ 2.20 (ก)) และบริเวณขอบเกรนจะมีสเกลออกไซด์เกิดขึ้นมาก (รูปที่ 2.20 (ข)) ที่อุณหภูมิ 950 °ซ เมื่อนำไปตรวจดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ผิวพบว่า มีพื้นผิวอยู่ 2 ลักษณะ พื้นผิวที่มีสเกลออกไซด์หลุดออก (รูปที่ 2.21 (ก)) และพื้นผิวที่ไม่มีการหลุดของสเกลออกไซด์ (รูปที่ 2.21 (ข)) เมื่อนำไปวิเคราะห์พบว่า พื้นผิวที่มีสเกลออกไซด์หลุดจะพบผลึกของโครเมียม ส่วนพื้นผิวที่ไม่มีการหลุดของสเกลออกไซด์จะพบผลึกของเหล็ก เมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์โฟโตอิเล็กตรอน (X-ray photoelectron spectroscopy, XPS) ที่ผิวที่มีสเกลออกไซด์หลุดพบว่ามีส่วนประกอบของโครเมียม ซึ่งอาจจะเป็น Cr_2O_3 และ/หรือ $(Cr,Fe)_2O_3$ (รูปที่ 2.22 (ก)) พบสเปกตรัมของแมงกานีส ซึ่งน่าจะเป็น $Mn_{1.5}Cr_{1.5}O_4$ (รูปที่ 2.22 (ข)) ส่วนพื้นผิวที่ไม่มีการหลุดของ

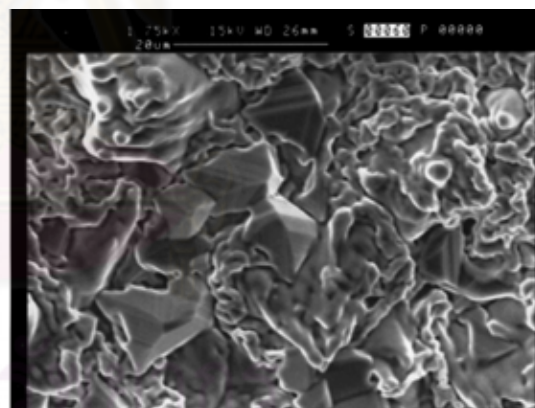
สเกลออกไซด์ที่พบสเปกตรัมของเหล็ก โดยสเปกตรัมของเหล็ก จะมีปริมาณมากขึ้นเมื่อไอน้ำในบรรยากาศมากขึ้น (รูปที่ 2.23)



(ก) สเกลออกไซด์เกิดเป็นผลึกขนาดเล็ก

(ข) บริเวณขอบเกรนจะมีสเกลออกไซด์เกิดมากขึ้น

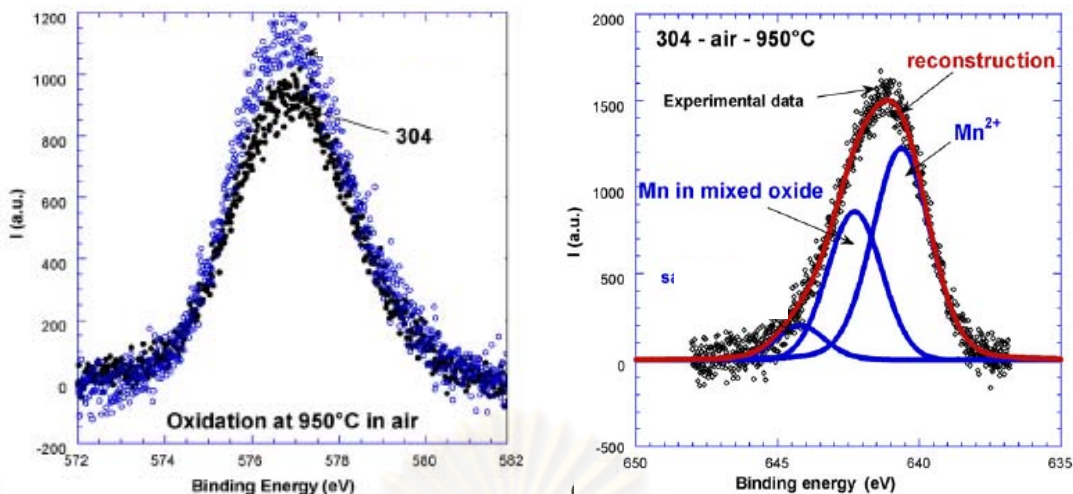
รูปที่ 2.20 การเกิดของสเกลออกไซด์ที่ผิวที่อุณหภูมิ 850 °ซ ในบรรยากาศที่มีไอน้ำของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 [18]



(ก) พื้นผิวที่มีสเกลออกไซด์หลุดออก

(ข) พื้นผิวที่ไม่มีสเกลออกไซด์หลุดออก

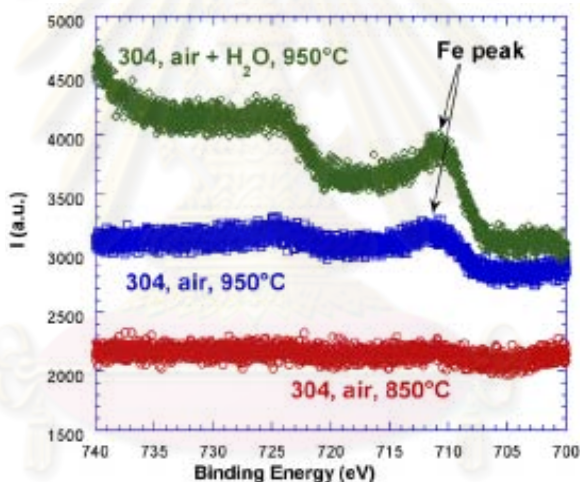
รูปที่ 2.21 การเกิดของสเกลออกไซด์ที่ผิวที่อุณหภูมิ 950 °ซ ในบรรยากาศของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 [18]



ก) สเปกตรัมของโครเมียม

(ข) สเปกตรัมของแมงกานีส

รูปที่ 2.22 XPS สเปกตรัมที่บริเวณมีสเกลออกไซด์หลุดบนผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 หลังผ่านการออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 950°C ในบรรยากาศ [18]



รูปที่ 2.23 XPS สเปกตรัมของเหล็กตรวจพบที่บริเวณไม่มีสเกลออกไซด์หลุดบนผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิและสภาวะต่าง ๆ [18]

Bahri Ozturk และ R. Matway [19] ได้ศึกษาการเกิดออกซิเดชันของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 มีองค์ประกอบเคมีดังแสดงในตารางที่ 2.5 นำมาอบในบรรยากาศที่มีส่วนผสมของแก๊สตามสมการการคำนวณการเผาไหม้แก๊สมีเทนที่อัตราส่วนอากาศต่อมีเทนต่าง ๆ ผลการคำนวณบรรยากาศของแก๊สแสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ใช้ในการทดลองของ Bahri Ozturk และ R. Matway [19]

เกรด	mass%										
	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	Co	N
304	0.052	1.50	0.036	0.002	0.59	18.30	8.13	0.32	0.28	0.13	0.06

ตารางที่ 2.6 อัตราส่วนของแก๊สที่ได้จากการคำนวณตามสมการการเผาไหม้แก๊สมีเทนที่อัตราส่วนอากาศต่อแก๊สมีเทนต่าง ๆ [19]

Air/CH ₄	4	8	9.53	11	13	18
%O ₂	Low	Low	Low	2.56	5.19	9.33
%H ₂ O	8.88	14.99	19.04	16.66	14.28	10.52
%CO ₂	2.16	7.31	9.52	8.33	7.14	5.26
%N ₂	51.30	61.24	71.44	72.40	73.32	74.80
%CO	14.07	3.42	0.0	0.0	0.0	0.0
%H ₂	23.59	10.85	0.0	0.0	0.0	0.0

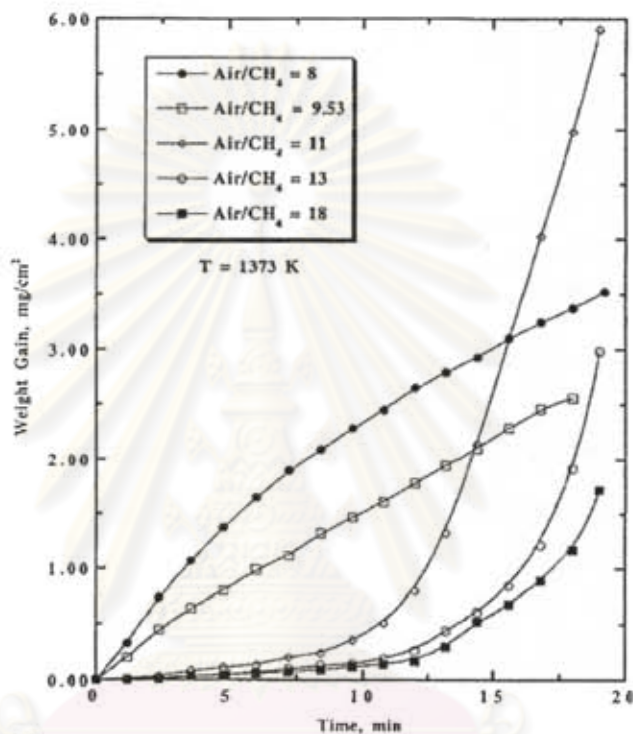
จากการศึกษาพบว่า เมื่อในบรรยากาศที่ได้จากการคำนวณการเผาไหม้แก๊สมีเทนอัตราส่วนอากาศต่อแก๊สมีเทนมากกว่าหรือเท่ากับ 11 ที่อุณหภูมิ 1373 เคลวิน (รูปที่ 2.24) ในช่วงเวลา 12 นาทีแรกเกิดสเกลออกไซด์เพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่หลังจากเวลา 12 นาที ชั้นฟิล์มที่ผิวจะแตกออกทำให้สเกลออกไซด์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและเกิดเหล็กออกไซด์บนผิว หลังการออกซิเดชันพบว่าสเกลออกไซด์ชั้นในเป็นเหล็กโครเมียมออกไซด์ ((Fe,Cr)₃O₄) และชั้นนอกเป็นของฮีมาไทต์ (Fe₂O₃) และ แมกนีไทต์ (Fe₃O₄) เมื่อนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักสเกลออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นกับเวลาการเกิดออกซิเดชันพบว่า เป็นแบบพาราโบลา

ในบรรยากาศที่ได้จากการคำนวณการเผาไหม้แก๊สมีเทนอัตราส่วนอากาศต่อแก๊สมีเทนน้อยกว่าหรือเท่ากับ 9.53 ที่อุณหภูมิ 1373 เคลวิน (รูปที่ 2.24) จะไม่เกิดชั้นฟิล์มปกป้อง เพราะเมื่อเริ่มการทดลองก็จะเกิดชั้นสเกลออกไซด์ขึ้นอย่างรวดเร็ว ออกไซด์ประกอบไปด้วย 2 ชั้น ส่วนมากชั้นนอกจะเกิดวูสไทต์ (FeO) และชั้นในจะเป็นสปิเนล (Spinel)

จากรูปที่ 2.25 ในบรรยากาศที่ได้จากการคำนวณการเผาไหม้แก๊สมีเทนอัตราส่วนอากาศต่อแก๊สมีเทนเท่ากับ 9.53 ที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะเกิดสเกลออกไซด์ที่ผิวเพิ่มมากขึ้น ทำให้ปริมาณน้ำหนัก

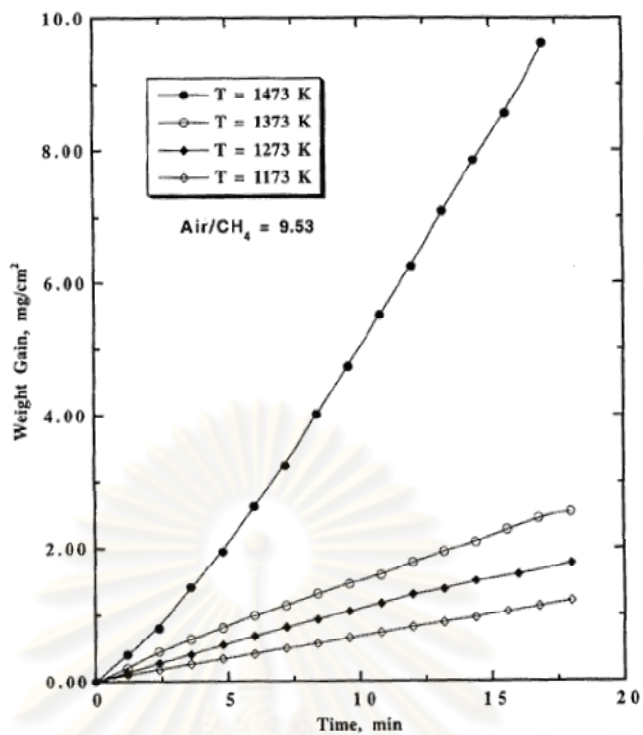
ต่อหน่วยพื้นที่เพิ่มขึ้น เมื่อนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักสเกลออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นกับเวลาการเกิดออกซิเดชันพบว่า เป็นแบบเส้นตรงทุกอุณหภูมิ

การเกิดออกซิเดชันจะเกิดจากแก๊สไปสู่สเกลออกไซด์ และเกิดจากสเกลออกไซด์ไปสู่เนื้อวัสดุ ในการเกิดออกซิเดชันจะขึ้นกับอัตราการแพร่ของเหล็กและของธาตุที่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนผ่านรอยแตกและช่องขนาดเล็ก



รูปที่ 2.24 กราฟแสดงน้ำหนักต่อเวลาของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่ทดลองการเกิดออกซิเดชันในบรรยากาศที่คำนวณจากการเผาไหม้แก๊สมีเทนอัตราส่วนอากาศต่อแก๊สมีเทนต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 1373 เคลวิน [19]

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.25 กราฟแสดงน้ำหนักต่อเวลาของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่ทดลองการเกิดออกซิเดชัน ในบรรยากาศที่อัตราส่วนของอากาศต่อมีเทนเท่ากับ 9.53 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ [19]

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.1 วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือการทดลอง

3.1.1 วัสดุคิบและสารเคมี

- 3.1.1.1 เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก 304 แผ่นม้วนรีดร้อนที่ผ่านการรีดแบบต่อเนื่อง ได้รับ
ความอนุเคราะห์จากบริษัท ไทยน็อกซ์ สเตนเลส จำกัด (มหาชน)
- 3.1.1.2 สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid, HCl)
- 3.1.1.3 สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric acid, HF)
- 3.1.1.4 สารละลายกรดไนตริก (Nitric acid, HNO₃)
- 3.1.1.5 สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide, H₂O₂)
- 3.1.1.6 อะซิโตน (Acetone, CH₃COCH₃)
- 3.1.1.7 น้ำที่ผ่านการกำจัดไอออน (Deionization water)
- 3.1.1.8 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 96
- 3.1.1.9 ก๊าซออกซิเจนร้อยละ 99.95
- 3.1.1.10 ก๊าซไนโตรเจนร้อยละ 99.95
- 3.1.1.11 สี EPIGEN XD005

3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

- 3.1.2.1 เครื่องยิงสเกลออกไซด์ด้วยเม็ดเหล็ก (Shot blasting)
- 3.1.2.2 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath)
- 3.1.2.3 เวอร์เนียคาร์ลิปเปอร์
- 3.1.2.4 เครื่องตัด Secotom 10 (Struers)
- 3.1.2.5 แปรงขัด
- 3.1.2.6 เครื่องแก้ว
- 3.1.2.7 เครื่องเป่าลมร้อน
- 3.1.2.8 เตาอบ
- 3.1.2.9 ตู้ปิดความชื้น (Desiccators)
- 3.1.2.10 เครื่องชั่งน้ำหนัก 2 และ 4 ตำแหน่ง

3.1.3 เครื่องมือวิเคราะห์การทดลอง

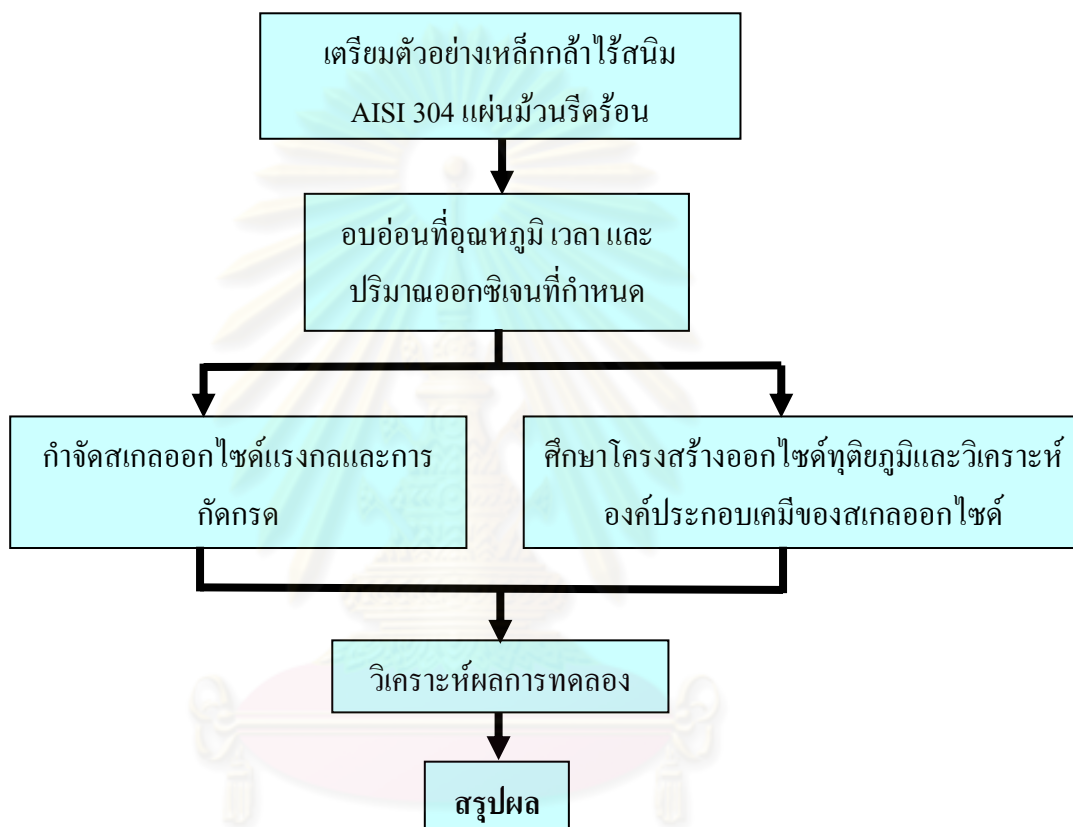
- 3.1.3.1 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope)

3.1.3.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, TSM-5800LV)

3.1.3.3 เครื่องวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction, XRD)

3.2 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย

การทดลองมีขั้นตอนดำเนินการดังแผนผังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนดำเนินงาน

3.3 ชิ้นงานที่ใช้ทดลองและขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน

การทดลองใช้เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิค AISI 304 ได้รับอนุเคราะห์จากบริษัท ไทยน็อกซ์ สเตนเลส จำกัด (มหาชน) มีองค์ประกอบดังแสดงในตารางที่ 3.1 นำชิ้นงานที่ได้รับมา ตัดให้ได้ขนาด กว้าง 25 มิลลิเมตร และยาว 50 มิลลิเมตรหนา 3 มิลลิเมตร ก่อนทดลองจะทำสัญลักษณ์บนชิ้นงาน และเจาะรูด้วยสว่านขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตรด้านบนชิ้นงาน วัดขนาดชิ้นงานด้วยเครื่องวัดขนาดเวอร์เนียคาร์ลิปเปอร์เพื่อใช้ในการคำนวณพื้นที่ผิว เก็บในตู้ปลอดความชื้น ก่อนทำการทดลองล้างชิ้นงานด้วยอะซิโตน ชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก AISI 304 (ร้อยละโดยมวล)

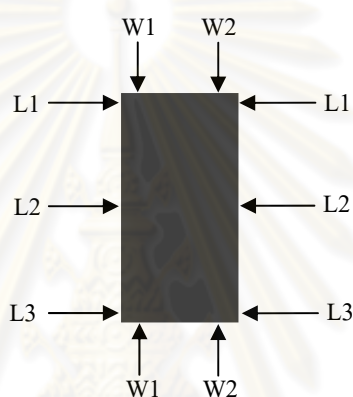
C	Cr	Ni	Mn	Si	P	S	N	Fe
0.049	18.45	8.10	1.17	0.48	0.027	0.007	≤ 0.10	balanced

3.4 วิธีการวัดขนาดชิ้นงาน

การวัดขนาดชิ้นงานจะทำการวัดความกว้าง 3 จุด และความยาว 2 จุดแล้วหาค่าเฉลี่ย โดยใช้เวอร์เนียคาร์ลิปเปอร์ ดังรูปที่ 3.2

กำหนดให้: W = ความกว้าง

L = ความยาว



รูปที่ 3.2 จุดที่ใช้วัดขนาดชิ้นงาน

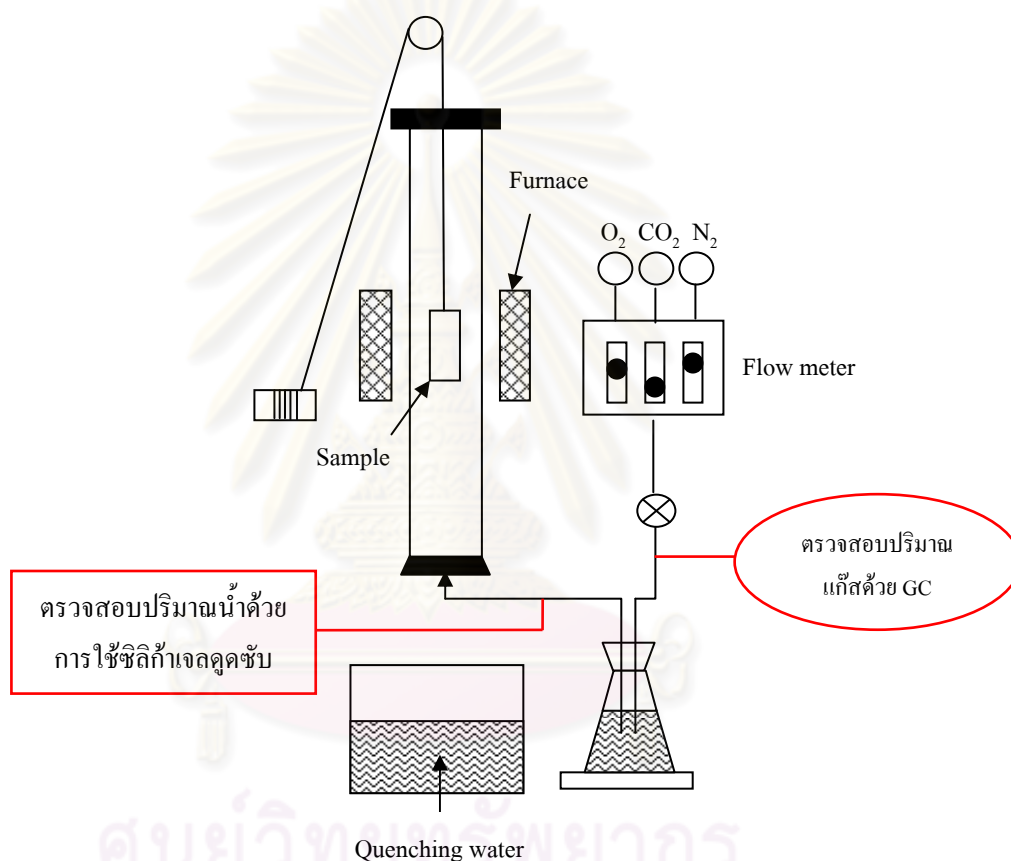
3.5 ขั้นตอนการเตรียมแก๊สที่ใช้ในการทดลอง

การทดลองใช้เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก AISI 304 แผ่นม้วนรีดร้อนที่ผ่านการรีดอย่าง ต่อเนื่อง มาบอบอ่อนในบรรยากาศที่มีองค์ประกอบดังตารางที่ 3.2 แสดงอัตราส่วนของแก๊สที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนของแก๊สที่ใช้ในการทดลอง

แก๊ส	องค์ประกอบของแก๊ส (v/v%)		
	1	2	3
CO ₂	10.12	8.90	7.54
H ₂ O	8.92	2.12	2.07
O ₂	1.01	4.63	7.08
N ₂	79.95	84.36	83.31

การทดลองจะปล่อยแก๊สเข้าสู่แผงควบคุมอัตราการไหล (Flow meter) โดยใช้อัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 15 ลิตรต่อนาที ปรับอัตราการไหลของแต่ละแก๊สให้ได้ตามแต่ละสภาวะที่ใช้ในการทดลอง วัดอัตราส่วนของแก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี (Gas Chromatography, GC) (แสดงผลการวิเคราะห์ในภาคผนวก ก) แก๊สผสมจะผ่านน้ำโดยในสภาวะที่ 1 ในตารางที่ 3.2 จะให้อุณหภูมิที่ 40°C ส่วนสภาวะที่ 2 และ 3 จะใช้อุณหภูมิห้อง (การคำนวณแสดงในภาคผนวก ข) ก่อนส่งแก๊สเข้าสู่เตา รูปที่ 3.3 แสดงแผนภูมิการไหลของแก๊สเพื่อควบคุมบรรยากาศในการอบอ่อน และจุดที่วิเคราะห์ปริมาณแก๊สและไอน้ำ



รูปที่ 3.3 แผนภูมิแสดงการไหลของแก๊สเพื่อควบคุมบรรยากาศในการอบอ่อน

3.6 ขั้นตอนการอบอ่อน

- 3.5.1 ปรับอุณหภูมิเตาอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1000 °ซ และ 1100 °ซ
- 3.5.2 นำชิ้นงานเข้าภายในเตาอบห่างจากปากเตาด้านล่าง 10 เซนติเมตร
- 3.5.3 ปล่อยแก๊สผสมที่ผ่านไอน้ำเข้าเตาเป็นเวลา 5 นาที
- 3.5.4 นำชิ้นงานเข้าภายในเตาห่างจากปากเตาด้านล่าง 30 เซนติเมตร เพื่ออุ่นร้อนชิ้นงานเป็นเวลา 30 วินาที
- 3.5.5 นำชิ้นงานเข้าสู่กลางเตา (Hot zone) จับเวลาในการทดลองเป็นเวลา 90 วินาที และ

150 วินาที

- 3.5.6 นำชิ้นงานลงมาจากกลางเตาห่างจากปากเตาด้านล่าง 30 เซนติเมตร เพื่อให้อุณหภูมิชิ้นงานลดลงคล้ายกับสภาวะจริงเป็นเวลา 40 วินาที
- 3.5.7 จุ่มชิ้นงานลงในน้ำเพื่อลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว และเป่าให้แห้ง
- 3.5.8 เก็บชิ้นงานในตู้ปลอดความชื้น (Desiccators) เพื่อรอการนำไปกำจัดสเกลต่อไป
- 3.5.9 ทำซ้ำข้อ 1-8 แต่เปลี่ยนเป็นอุณหภูมิ เวลา และปริมาณออกซิเจนที่กำหนด

3.7 ขั้นตอนการกำจัดสเกลออกไซด์ทางกล

ขั้นตอนการกำจัดสเกลออกไซด์ทางกลเป็นขั้นตอนแรกในการกำจัดสเกลออกไซด์ ในการทดลองนี้จะทำการกำจัดสเกลออกไซด์ทางกล 2 ขั้นตอน ขั้นแรกจะใช้หัวกด (รูปที่ 3.4) รัศมีความโค้ง 77 เซนติเมตร กดลงไปให้มีความดัน 500 psi ทั้งสองด้านแล้วปรับตรง ขั้นที่สองจะยิงด้วยเม็ดเหล็กทรงกลมขนาด 1 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการยิงเม็ดเหล็ก 15 วินาที ทั้งสองด้านของชิ้นงาน



รูปที่ 3.4 หัวกดที่ใช้ในการทดลอง

3.8 ขั้นตอนการเตรียมสารละลาย

การกำจัดสเกลออกไซด์ด้วยการกัดกรดแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน (ตารางที่ 3.3) ขั้นตอนแรกใช้สารละลาย 4 M HCl + 15 g/L H₂O₂ อุณหภูมิ 60^oซ ขั้นตอนสองใช้สารละลาย 1 M H₂NO₃ + 1 M HF อุณหภูมิ 45^oซ สารละลาย ความเข้มข้น และเวลาการกัดกรด มาจากงานวิจัยของ วรณา หอมจะบก เพราะมีความใกล้เคียงกับสภาวะจริงของบริษัทและสามารถนำมาใช้ทดลองได้ง่าย ขั้นตอนการเตรียมสารละลายมีดังต่อไปนี้

- 3.8.1 เตรียมสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid, HCl) ความเข้มข้น 4 โมลาร์

ผสมกับสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide, H_2O_2) 15 กรัมต่อลิตร

3.8.2 เตรียมสารละลายกรดไนตริกความเข้มข้น 1 โมลาร์ ผสมกับกรดไฮโดรฟลูออริกความเข้มข้น 1 โมลาร์

3.8.3 ตรวจสอบความเข้มข้นโดยการไตเตรตด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (ผลการวัดความเข้มข้นแสดงในภาคผนวก ค)

3.8.4 ใช้ปิเปตเจอร์ขนาด 80 มล. ใส่สารละลายที่เตรียมไว้

3.8.5 ควบคุมอุณหภูมิของสารละลายกรดด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิด้วยน้ำ (Water bath)

3.9 ขั้นตอนการทดสอบการกัดกรวดแบบจุ่ม

3.9.1 นำชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนและกำจัดสเกลออกไซด์ทางกลมาเคลือบสี EPIGEN XD005 (วิธีการใช้แสดงในภาคผนวก ง) ที่ขอบเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการกัดกร่อน

3.9.2 วัดขนาดชิ้นงานด้วยเครื่องวัดขนาดเวอร์เนียคาร์ลิปเปอร์เพื่อคำนวณพื้นที่ผิว

3.9.3 ล้างชิ้นงานด้วยอะซิโตน (Acetone)

3.9.4 ชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง

3.9.5 กัดผิวสเกลออกไซด์ด้วยสารละลายกรดตามขั้นตอนและสภาวะแสดงในตารางที่ 3.3

3.9.6 หลังการกัดกรวดแต่ละขั้นตอน ล้างด้วยน้ำและขัดชิ้นงานด้วยแปรงขัด

3.9.7 เป่าให้แห้งแล้วชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง

3.9.8 เก็บชิ้นงานในตู้ปลอดความชื้น

3.9.9 ตรวจสอบพื้นผิวชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรที่ใช้ในการกัดกรวด

ขั้นตอน	กรดที่ใช้	อุณหภูมิ (°ซ)	เวลา (วินาที)*
1	4 M HCl + 15 g/l H_2O_2 **	60	40
	4 M HCl + 15 g/l H_2O_2 **	60	40
2	1 M HNO_3 + 1 M HF	45	34
	1 M HNO_3 + 1 M HF	45	38

*เวลาตามสภาวะจริงในการผลิต ** [3]

3.10 คำนวณน้ำหนักที่หายไป (Weight loss)

สมการที่ 3.2 ใช้หาคำนวณน้ำหนักที่หายไปในช่วงการอบอ่อน การกำจัดสเกลออกไซด์ทางกล และการกัดกรอด

$$\text{ค่าน้ำหนักที่หายไป} = \frac{\text{น้ำหนักก่อน} - \text{น้ำหนักหลัง}}{\text{พื้นที่ผิวที่สัมผัสกับสารละลาย}} \quad 3.2$$

ค่าน้ำหนักที่หายไป (Weight loss) ของชิ้นงานหลังผ่านแต่ละขั้นตอนใช้ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการกำจัดสเกลออกไซด์ในแต่ละการขึ้นตอน

3.11 วิธีวิเคราะห์ผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 แผ่นม้วนรีดร้อน

3.11.1 ศึกษาองค์ประกอบของสเกลออกไซด์หลังการอบอ่อน ด้วยเทคนิควิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction, XRD)

3.11.2 ศึกษาลักษณะของพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ที่กำลังขยาย 250 และ 5000 เท่า โดยใช้วิเคราะห์ลักษณะสเกลออกไซด์

3.11.3 ศึกษาผิวของชิ้นงานหลังการกัดกรอดด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 200 เท่า เพื่อตรวจสอบสเกลออกไซด์ที่เหลือค้างอยู่โดยทำการสุ่มวิเคราะห์ผิวบนชิ้นงาน

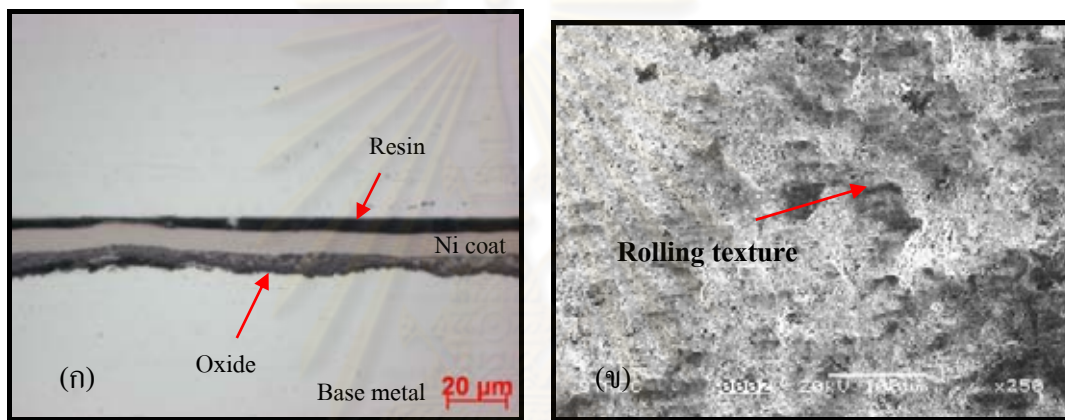
บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

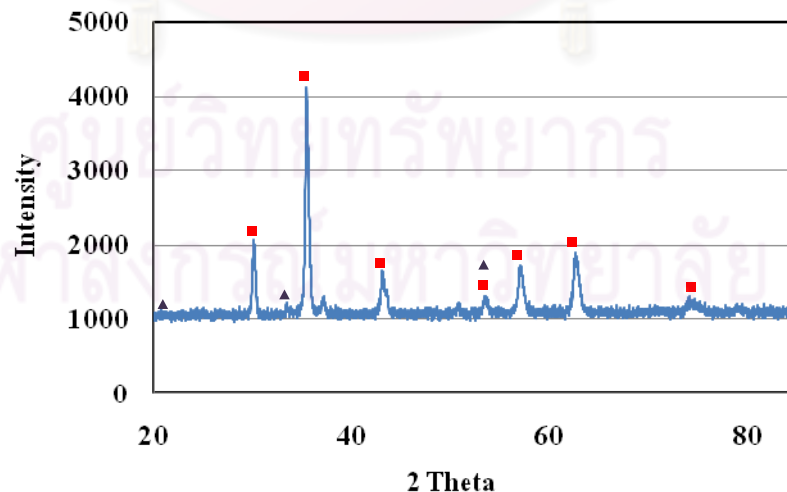
4.1 ลักษณะสเกลออกไซด์ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 แผ่นม้วนรีดร้อน

ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก AISI 304 แผ่นม้วนรีดร้อนที่ผ่านการรีดแบบต่อเนื่องหรือเรียกว่า “คอยล์ดำ (Black coil)” มีผิวชิ้นงานเป็นสีเทาเข้ม สเกลออกไซด์ที่ผิวสามารถหลุดออกได้ง่าย สเกลออกไซด์มีความหนาประมาณ 5-6 ไมโครเมตร ดังรูปที่

4.1 (ก)



รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายลักษณะผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 แผ่นม้วนรีดร้อนด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (ก) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (ข)

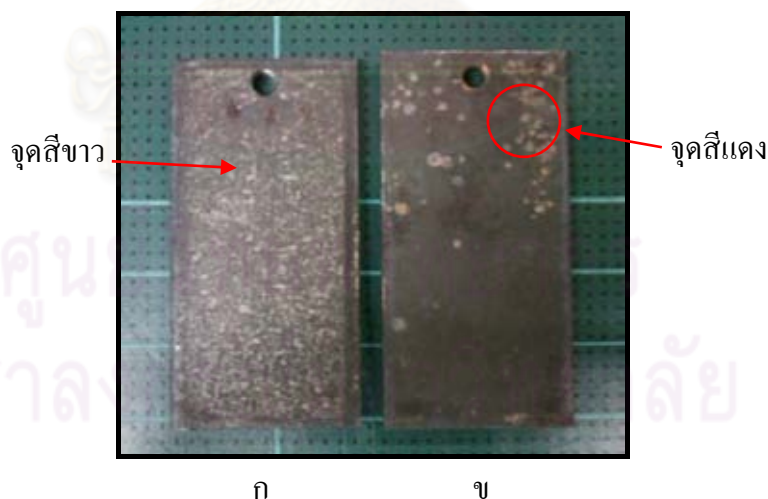


รูปที่ 4.2 XRD สเปกตรัมแสดงองค์ประกอบเคมีของสเกลออกไซด์บนผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 แผ่นม้วนรีดร้อน; ■ FeCr₂O₄, ▲ Fe₂O₃

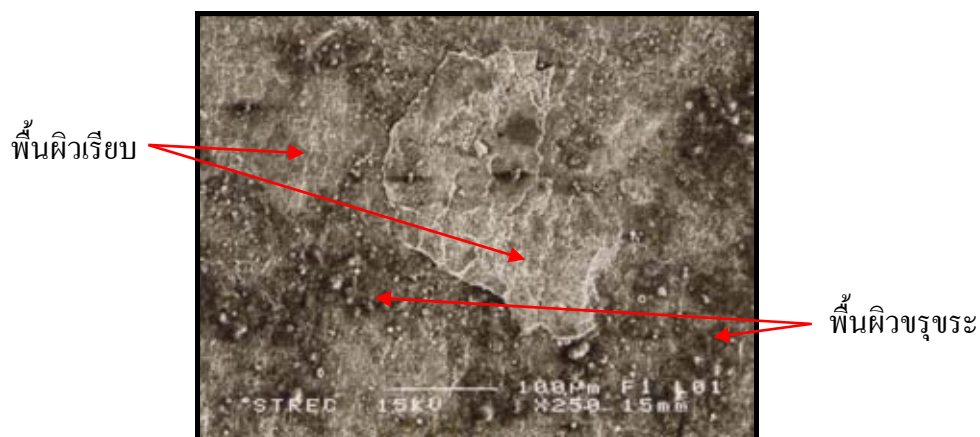
เมื่อตรวจดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดพบว่าผิวชิ้นงานยังคงมีรอยรีดจากการรีดร้อนแบบต่อเนื่อง ดังรูปที่ 4.1 (ข) เมื่อนำไปวิเคราะห์ห้องค้ำประกอบเคมีด้วยเทคนิควิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction, XRD) ได้ผลดังรูปที่ 4.2 พบว่ามีออกไซด์อยู่ 2 ชนิด คือ โครไมต์ (FeCr_2O_4) และฮีมาไทต์ (Fe_2O_3)

4.2 ผลการอบอ่อน

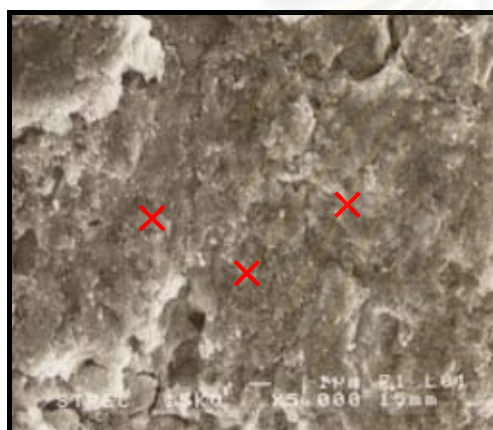
หลังการอบอ่อนและจุ่มชิ้นงานลงในน้ำอย่างรวดเร็ว (Quenching) จากการตรวจผิวชิ้นงานดังในรูปที่ 4.3 พบว่าชิ้นงานจะมีสีขาวเป็นจุด ๆ ทั่วทั้งชิ้นงาน บางที่จะเกิดจุดสีแดง (รูปที่ 4.3) มีการหลุดของสเกลออกไซด์จากชิ้นงานทำให้น้ำหนักของชิ้นงานลดลง การจุ่มชิ้นงานลงในน้ำอย่างรวดเร็ว มีผลทำให้สเกลออกไซด์ที่เกิดขึ้นมีการหลุดออกจำนวนมาก การหลุดออกของสเกลออกไซด์ไม่เท่ากันอาจขึ้นกับอุณหภูมิ เวลา และปริมาณออกซิเจนที่ใช้ในการทดลอง เมื่อนำชิ้นงานทุกชิ้นงานไปตรวจดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ดังตัวอย่างในรูปที่ 4.4 (รูปผิวชิ้นงานหลังการอบอ่อนในสถานะอื่นแสดงในภาคผนวก จ) พบว่าพื้นผิว มี 2 ลักษณะ คือ พื้นผิวเรียบและพื้นผิวขรุขระ เมื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ (EDX) ในบริเวณพื้นผิวเรียบและพื้นผิวขรุขระดังในรูปที่ 4.5 พบว่าบริเวณพื้นผิวขรุขระมีปริมาณของโครเมียมมากกว่าพื้นผิวเรียบอย่างชัดเจน ผลการวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 4.6 จากภาพตรวจดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดพบว่า มีรูพรุนจำนวนมากในบริเวณพื้นผิวขรุขระ



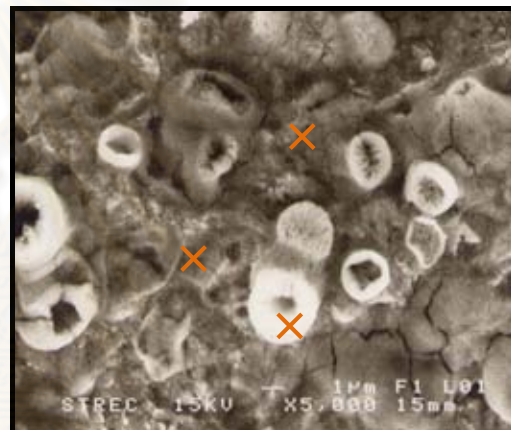
รูปที่ 4.3 สีผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านการอบอ่อนอุณหภูมิ 1100°C ออกซิเจนร้อยละ 4.63 เวลา 150 วินาที (ก) และ 90 วินาที (ข)



รูปที่ 4.4 ลักษณะความแตกต่างบนผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านการอบอ่อน อุณหภูมิ 1100°ซ เวลา 90 วินาที และออกซิเจนร้อยละ 1.01%



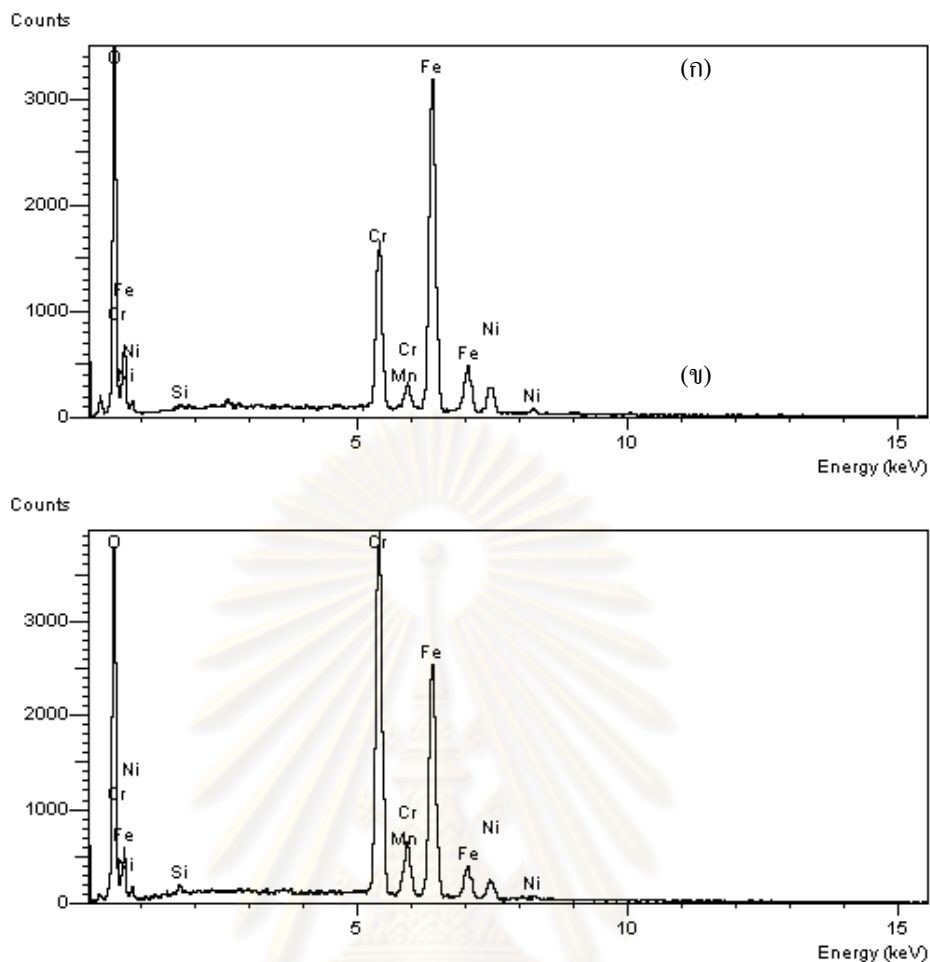
(ก) x บริเวณที่วิเคราะห์ด้วย EDX



(ข) x บริเวณที่วิเคราะห์ด้วย EDX

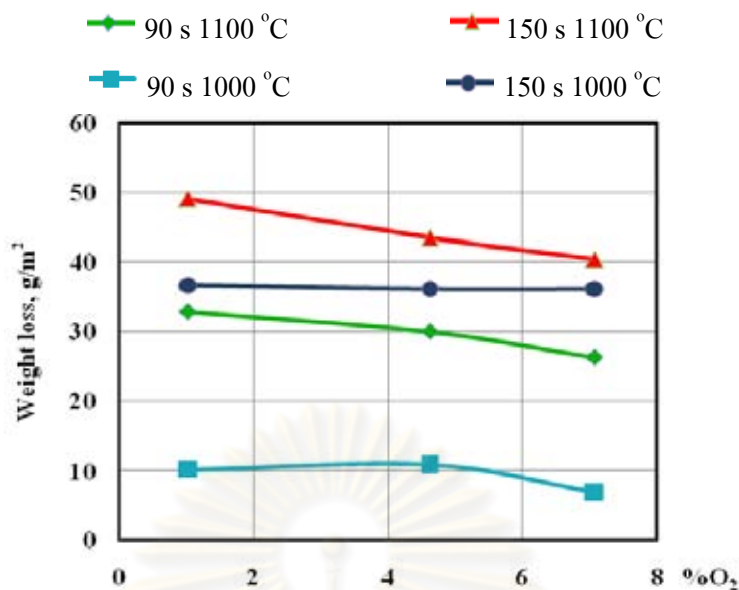
รูปที่ 4.5 บริเวณผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านการอบอ่อนอุณหภูมิ 1100°ซ เวลา 90 วินาที และออกซิเจนร้อยละ 1.01% พื้นผิวเรียบ (ก) และพื้นผิวขรุขระ (ข)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์บนผิวเรียบ (ก) และ ขรุขระ (ข) (รูปที่ 4.5) ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านการอบอ่อนอุณหภูมิ 1100°C เวลา 90 วินาที และ ออกซิเจนร้อยละ 1.01%

ในการทดลองนี้จะวัดน้ำหนักชิ้นงานหลังการอบอ่อนและจุ่มชิ้นลงน้ำซึ่งมีสเกลออกไซด์หลุดออกบางส่วนทำให้น้ำหนักที่หายไป ทั้งนี้ให้เหมือนกับกระบวนการในการผลิตจริง คือ แผ่นเหล็กจะผ่านการอบอ่อน ผ่านลมร้อน และการสเปรย์น้ำ ทำให้ออกไซด์ที่ผิวหลุดออก ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่หายไปกับปริมาณออกซิเจนแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักที่หายไป ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 หลังการอบอ่อนกับปริมาณของออกซิเจนในบรรยากาศการอบอ่อน

4.2.1 ผลของเวลา

จากรูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักที่หายไป ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 หลังการอบอ่อนกับปริมาณของออกซิเจนในบรรยากาศการอบอ่อน เมื่ออบอ่อนที่เวลา 150 วินาที สเตลออกไซด์จะหลุดออกมากกว่าที่เวลา 90 วินาที เพราะในช่วงที่มีการอบอ่อนชิ้นงานยังอบไม่เต็มที่ ดังนั้นชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนเวลานานกว่าจะมีการขยายตัวมากกว่า เมื่อลดอุณหภูมิชิ้นงานอย่างรวดเร็วจะเกิดการหดตัวลงอย่างรวดเร็ว สเตลออกไซด์ที่ผิวไม่สามารถหดตัวลงได้ทันจึงหลุดออก

4.2.2 ผลของอุณหภูมิ

จากรูปที่ 4.7 แสดงผลของอุณหภูมิพบว่าชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1100°ซ มีปริมาณสเตลออกไซด์ที่เหลืออยู่น้อยกว่าชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1000°ซ เพราะที่อุณหภูมิสูงกว่าผิวชิ้นงานเกิดปฏิกิริยาเป็นสเตลออกไซด์มากกว่าและการแพร่ของออกซิเจนคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำอาจมากกว่า หลังการอบอ่อนเมื่อลดอุณหภูมิชิ้นงานลงอย่างรวดเร็วทำให้สเตลออกไซด์ที่มีคุณสมบัติเปราะเกิดการหลุดออกปริมาณที่มากกว่าด้วย

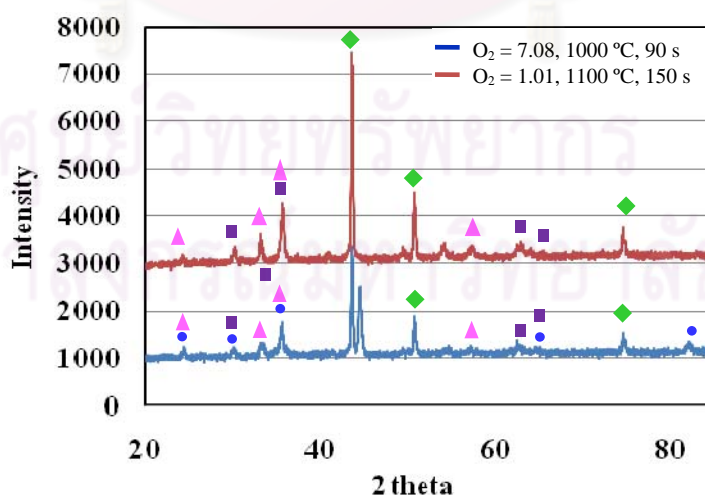
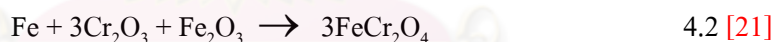
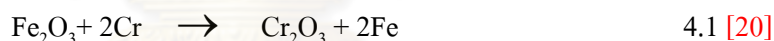
4.2.3 ผลของออกซิเจน

จากรูปที่ 4.7 แสดงผลของออกซิเจนว่าการอบอ่อนในบรรยากาศมีออกซิเจนร้อยละ 1.01 มีการหลุดของสเตลออกไซด์หลังการจุ่มชิ้นงานลงน้ำอย่างรวดเร็วมากกว่าการอบอ่อนในบรรยากาศมีออกซิเจนร้อยละ 4.63 และ 7.08 ตามลำดับ เพราะในบรรยากาศการอบอ่อนที่ออกซิเจนต่ำจะมีไอน้ำสูง ไอน้ำจะทำให้เกิดออกไซด์มีรูพรุนมาก เมื่อจุ่มชิ้นงานลงน้ำอย่างรวดเร็วสเตลออกไซด์จึงปริแตก

และหลุดออกมากกเว้นในการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1000°ซ มีปริมาณการหลุดของสเกลออกไซด์ที่ใกล้เคียงกันทุกปริมาณออกซิเจน อาจเป็นเพราะอุณหภูมิมีผลมากกว่าเวลาและออกซิเจนในสภาวะการอบอ่อนนี้

4.2.4 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิควิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

เมื่อนำชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนทุกสภาวะไปวิเคราะห์ด้วยรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์พบว่าจะมีสเกลออกไซด์อยู่ 2 ชนิด คือฮีมาไทต์ (Fe_2O_3) และ โครไมต์ (FeCr_2O_4) ยกเว้นการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1100°ซ เวลา 150 วินาที พบสเกลออกไซด์อยู่ 3 ชนิด คือ ฮีมาไทต์ (Fe_2O_3) โครไมต์ (FeCr_2O_4) และ โครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) ผลการวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 4.8 (ผลการวิเคราะห์สเกลออกไซด์บนชิ้นงานที่อบอ่อนสภาวะอื่นด้วยเทคนิควิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์แสดงในภาคผนวก ข) และสรุปผลเป็นภาพรวมขององค์ประกอบเคมีสเกลออกไซด์ที่สภาวะการอบอ่อนต่าง ๆ ได้ดังในตารางที่ 4.1 การอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1100°ซ เวลา 150 วินาที พบโครเมียมออกไซด์ อาจเป็นเพราะเกิดโครเมียมออกไซด์ตามสมการที่ 4.1 ขึ้นมามาก โดยที่สมการ 4.2 เกิดซ้ำกว่าจึงมีชั้นโครเมียมออกไซด์ เหลืออยู่มากพอที่สามารถวิเคราะห์พบด้วยเทคนิควิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ในความเป็นจริงอาจมีการเกิดของโครเมียมออกไซด์อยู่ทุกชั้นทั้งที่อุณหภูมิ 1000°ซ และ 1100°ซ แต่ปริมาณน้อยมากจนไม่สามารถวิเคราะห์พบด้วยเทคนิควิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ [18]



รูปที่ 4.8 XRD สเปกตรัมแสดงองค์ประกอบเคมีของสเกลออกไซด์บนผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม

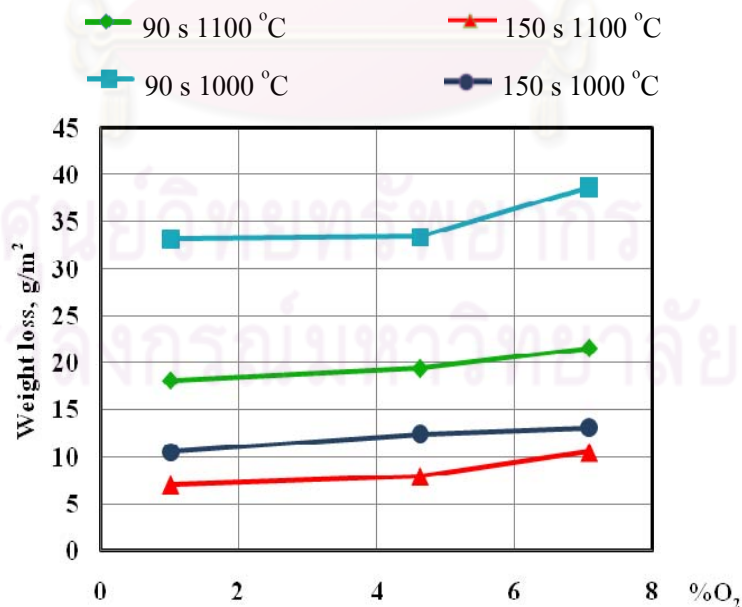
AISI 304 แผ่นม้วนรีดร้อนที่ผ่านการอบอ่อน; ■ FeCr_2O_4 , ▲ Fe_2O_3 , ● Cr_2O_3 , ◆ Fe, Ni

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบเคมีของสเกลออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการอบอ่อนสภาวะอื่น ๆ วิเคราะห์ด้วยเทคนิควิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

อุณหภูมิ (°C)	เวลา (วินาที)	ออกซิเจน	ออกไซด์ที่พบ
1000	90	1.01	Fe ₂ O ₃ , FeCr ₂ O ₄
		4.63	Fe ₂ O ₃ , FeCr ₂ O ₄
		7.08	Fe ₂ O ₃ , FeCr ₂ O ₄
	150	1.01	Fe ₂ O ₃ , FeCr ₂ O ₄ *
		4.63	Fe ₂ O ₃ , FeCr ₂ O ₄
		7.08	Fe ₂ O ₃ , FeCr ₂ O ₄
1100	90	1.01	Fe ₂ O ₃ , FeCr ₂ O ₄ *
		4.63	Fe ₂ O ₃ , FeCr ₂ O ₄
		7.08	Fe ₂ O ₃ , FeCr ₂ O ₄
	150	1.01	Fe ₂ O ₃ , FeCr ₂ O ₄ , Cr ₂ O ₃ *
		4.63	Fe ₂ O ₃ , FeCr ₂ O ₄ , Cr ₂ O ₃ *
		7.08	Fe ₂ O ₃ , FeCr ₂ O ₄ , Cr ₂ O ₃ *

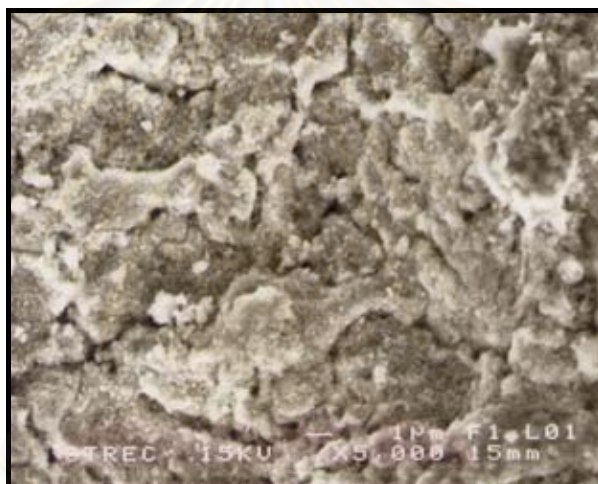
* ทำการวิเคราะห์ซ้ำแล้ว

4.3 ผลการกำจัดสเกลออกไซด์ด้วยแรงกล



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักที่หายไปของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 หลังการกำจัดสเกลออกไซด์ด้วยแรงกลกับปริมาณของออกซิเจนในบรรยากาศการอบอ่อนสภาวะต่าง ๆ

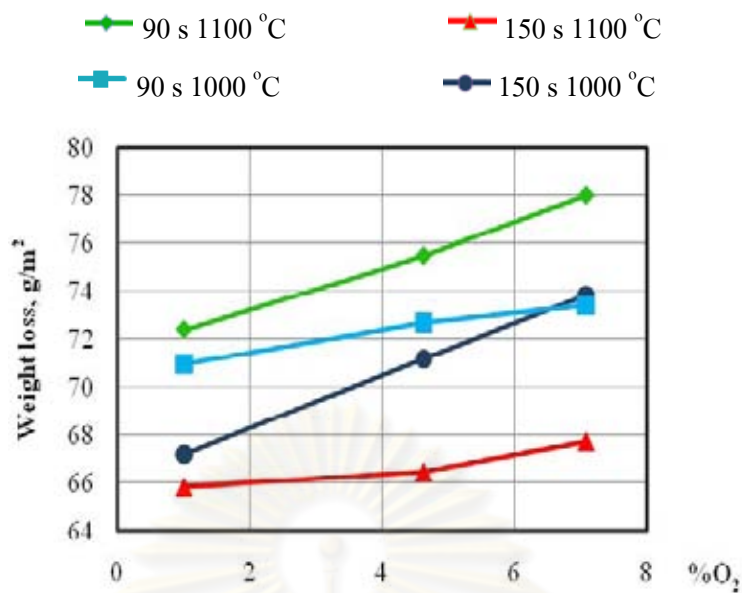
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักที่หายไปของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 หลังการกำจัดสเกลออกไซด์ด้วยแรงกลกับปริมาณของออกซิเจนในบรรยากาศการอบอ่อนสภาวะต่าง ๆ พบว่าชิ้นงานทุกชิ้นเมื่อผ่านการกำจัดสเกลออกไซด์ด้วยแรงกลแล้วจะมีน้ำหนักลดลง การลดลงของน้ำหนักแต่ละชิ้นงานไม่เท่ากัน โดยชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนแล้วพบว่ามีการลดลงของน้ำหนักน้อย (รูปที่ 4.7) จะมีน้ำหนักลดลงมากเมื่อผ่านการกำจัดสเกลออกไซด์ด้วยแรงกล เพราะชิ้นงานมีลักษณะสเกลออกไซด์ที่มีรูพรุนจำนวนมาก เมื่อกำจัดสเกลออกไซด์ด้วยแรงกลก็สามารถหลุดออกได้ง่าย เมื่อตรวจสอบชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด พบว่ามีรอยแตกขนาดเล็กอยู่ทั่วทั้งผิวชิ้นงานดังตัวอย่างรูปที่ 4.10 ลักษณะเช่นนี้จะส่งผลให้ประสิทธิภาพของการกำจัดสเกลออกไซด์ด้วยการกัดกรด ในขั้นตอนต่อไปเพิ่มขึ้น เพราะสารละลายกรดสามารถแทรกซึมผ่านเข้าไปยังบริเวณรอยแตกทำให้สามารถกำจัดสเกลออกไซด์ออกได้ง่าย [11]



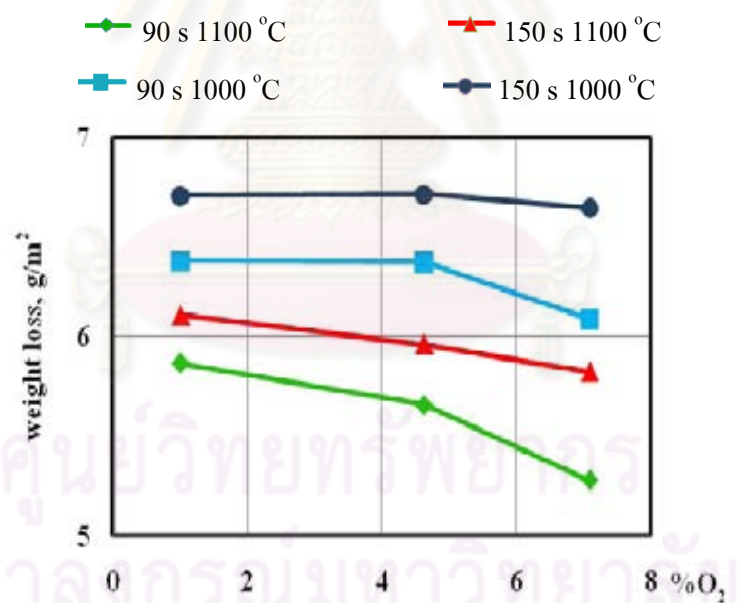
รูปที่ 4.10 ลักษณะผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 หลังผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1100°ซ เวลา 150 วินาทีและออกซิเจนร้อยละ 1.01 เมื่อผ่านการกำจัดสเกลออกไซด์ด้วยแรงกล

4.4 ผลการกำจัดสเกลออกไซด์ด้วยการกัดกรด

การกำจัดสเกลออกไซด์ด้วยการกัดกรดแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกกัดด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกผสมกับสารละลายกรดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ขั้นตอนที่สองกัดด้วยสารละลายกรดไนตริกผสมกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก [3] ในที่นี้จะวิเคราะห์ผลการกัดด้วยกรดแต่ละขั้นตอน โดยจะพิจารณาน้ำหนักที่ลดลงหลังการกัดกรดแต่ละขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 4.11 และ 4.12 และพิจารณาผิวของชิ้นงานในแต่ละขั้นตอนไปพร้อมกับดังแสดงในตารางที่ 4.2 4.3 4.4 และ 4.5 เพราะผิวของชิ้นงานมีความสำคัญในการนำไปใช้งาน










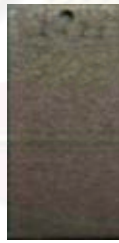






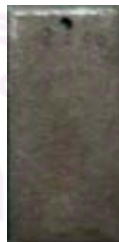


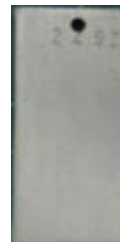



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักที่หายไปของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 หลังการกำจัดสเกลออกไซด์ด้วยการกัดกรดในขั้นตอนที่ 1 กับปริมาณของออกซิเจนที่สภาวะการอบอ่อนต่าง ๆ



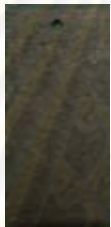





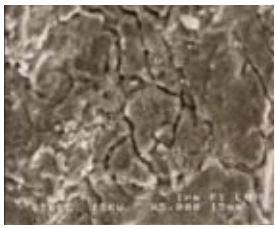
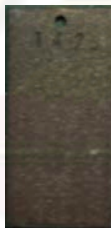













รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักที่หายไป ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 หลังการกำจัดสเกลออกไซด์ด้วยการกัดกรด ในขั้นตอนที่ 3 – 4 กับปริมาณของออกซิเจนที่สภาวะการอบอ่อนต่าง ๆ













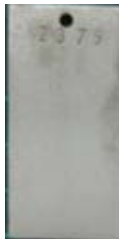
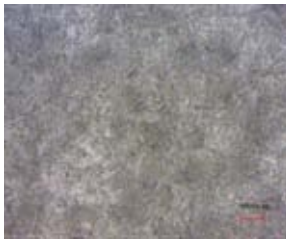






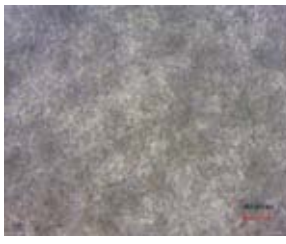
ตารางที่ 4.2 ลักษณะผิวหลังการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1000^oซ เวลา 90 วินาที และกำจัดสเกลออกไซด์ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ปริมาณออกซิเจนต่าง ๆ

สภาวะที่ใช้อบอ่อน			หลังอบอ่อน		หลังกำจัดสเกลออกไซด์ด้วยแรงกล	หลังกำจัดสเกลออกไซด์ด้วยการกัดกรดขั้นตอนแรก		หลังกำจัดสเกลออกไซด์ด้วยการกัดกรดขั้นตอนที่สอง	
อุณหภูมิ (ซ)	เวลา (วินาที)	ออกซิเจน ร้อยละ							
1000	90	1.01							
		4.63							
		7.08							

ตารางที่ 4.3 ลักษณะผิวหลังการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1000°C เวลา 150 วินาที และกำจัดสเกลออกไซด์ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ปริมาณออกซิเจนต่าง ๆ

สภาวะที่ใช้อบอ่อน			หลังอบอ่อน		หลังกำจัด	หลังกำจัดสเกลออกไซด์ด้วยการกัด		หลังกำจัดสเกลออกไซด์ด้วยการกัดกรด	
อุณหภูมิ (°C)	เวลา (วินาที)	ออกซิเจน ร้อยละ			สเกล ออกไซด์ ด้วยแรงกล	กรดขั้นตอนแรก		ขั้นตอนที่สอง	
1000	150	1.01							
		4.63							
		7.08							

ตารางที่ 4.4 ลักษณะผิวหลังการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1100^oซ เวลา 90 วินาที และกำจัดสเกลออกไซด์ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ปริมาณออกซิเจนต่าง ๆ

สภาวะที่ใช้อบอ่อน			หลังอบอ่อน		หลังกำจัด สเกล ออกไซด์ ด้วยแรงกล	หลังกำจัดสเกลออกไซด์ด้วยการกัด กรดขั้นตอนที่แรก		หลังกำจัดสเกลออกไซด์ด้วยการกัด กรดขั้นตอนที่สอง	
อุณหภูมิ (^o ซ)	เวลา (วินาที)	ออกซิเจน ร้อยละ							
1100	90	1.01							
		4.63							
		7.08							

ตารางที่ 4.5 ลักษณะผิวหลังการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1100°C เวลา 150 วินาที และกำจัดสเกลออกไซด์ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ปริมาณออกซิเจนต่าง ๆ

สภาวะที่ใช้อบอ่อน			หลังอบอ่อน		หลังกำจัดสเกลออกไซด์ด้วยแรงกล	หลังกำจัดสเกลออกไซด์ด้วยการกัดกรดขั้นตอนแรก		หลังกำจัดสเกลออกไซด์ด้วยการกัดกรดขั้นตอนที่สอง	
อุณหภูมิ (°C)	เวลา (วินาที)	ออกซิเจนร้อยละ							
1100	150	1.01							
		4.63							
		7.08							

4.4.1 ผลการกำจัดสเกลออกไซด์ด้วยการกัดกรดในขั้นตอนที่ 1

จากรูปที่ 4.11 แสดงผลการกำจัดสเกลออกไซด์ด้วยการกัดกรดในขั้นตอนที่ 1 พบว่าชิ้นงานทุกชิ้นมีน้ำหนักลดลง และสีผิวของชิ้นงานจะขาวขึ้นโดยการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1100°ซ และเวลา 150 วินาที มีน้ำหนักลดลงน้อยที่สุด เนื่องจากการอบอ่อนสภาวะนี้พบโครเมียมออกไซด์ในชั้นสเกลออกไซด์มีปริมาณสูง ซึ่งทำให้กำจัดสเกลออกไซด์ออกได้ยาก ส่วนการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1100°ซ และเวลา 90 วินาที มีน้ำหนักลดลงมากที่สุดในขั้นตอนที่ 1 แต่ยังคงมีปริมาณออกไซด์เหลืออยู่

เมื่อตรวจดูชิ้นงานที่ผ่านการกัดกรดในขั้นตอนแรกด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงพบว่าชิ้นงานที่อบอ่อนเวลา 150 วินาที (ตารางที่ 4.3 และ 4.5) มีปริมาณสเกลออกไซด์ที่เหลืออยู่หลังการกำจัดสเกลออกไซด์ด้วยการกัดกรดในขั้นตอนแรกมากกว่าที่อบอ่อนเวลา 90 วินาที (ตารางที่ 4.2 และ 4.4) เมื่ออบอ่อนที่อุณหภูมิ 1100°ซ (ตารางที่ 4.4 และ 4.5) มีปริมาณสเกลออกไซด์ที่เหลืออยู่หลังการกำจัดสเกลออกไซด์ด้วยการกัดกรดในขั้นตอนที่ 1 มากกว่าที่อบอ่อนที่อุณหภูมิ 1000°ซ (ตารางที่ 4.2 และ 4.3) และ เมื่ออบอ่อนที่ออกซิเจนร้อยละ 1.01 มีปริมาณสเกลออกไซด์ที่เหลืออยู่หลังการกำจัดสเกลออกไซด์ด้วยการกัดกรดในขั้นตอนที่ 1 มากกว่าที่ออกซิเจนร้อยละ 4.63 และ 7.08 ตามลำดับ ยกเว้นอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1000°ซ เวลา 90 วินาที และออกซิเจนร้อยละ 7.08 ไม่มีสเกลออกไซด์เหลืออยู่หลังการกำจัดสเกลออกไซด์ด้วยการกัดกรดในขั้นตอนแรก แสดงว่าในสภาวะนี้สามารถกำจัดสเกลออกไซด์ออกได้ง่ายที่สุด

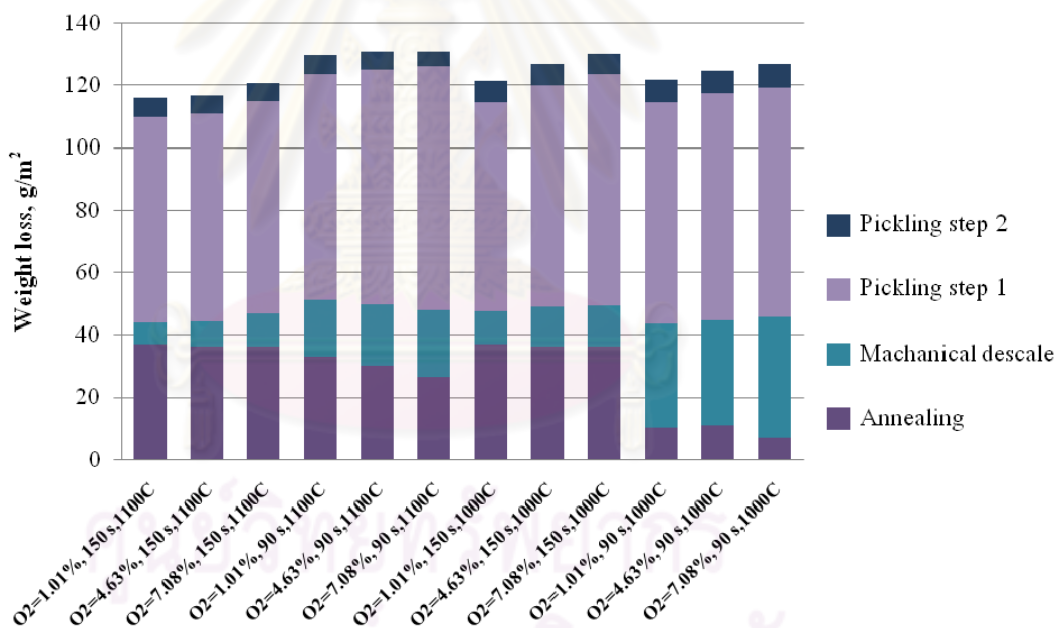
4.4.1 ผลการกำจัดสเกลออกไซด์ด้วยการกัดกรดในขั้นตอนที่ 2

จากรูปที่ 4.12 แสดงผลการกำจัดสเกลออกไซด์ด้วยการกัดกรดในขั้นตอนที่ 2 พบว่าชิ้นงานทุกชิ้นมีน้ำหนักลดลงใกล้เคียงกันประมาณ 5-7 กรัมต่อตารางเมตร โดยการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1100°ซ และเวลา 90 วินาที มีน้ำหนักลดลงน้อยที่สุดอาจเป็นเพราะมีน้ำหนักลดลงมากในการกำจัดสเกลออกไซด์ด้วยการกัดกรดในขั้นตอนที่ 1 ส่วนการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1000°ซ และเวลา 150 วินาทีมีน้ำหนักลดลงมากที่สุดอาจเป็นเพราะมีน้ำหนักลดลงน้อยในการกำจัดสเกลออกไซด์ด้วยการกัดกรดในขั้นตอนที่ 1 และการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1100°ซ และเวลา 150 วินาทียังคงมีน้ำหนักลดลงน้อยทั้งขั้นตอนที่ 1 และ 2

จกตารางที่ 4.5 แสดงลักษณะผิวหลังการอบอ่อนและกำจัดสเกลออกไซด์ของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก AISI 304 อุณหภูมิ 1100°ซ เวลา 150 วินาที และ ออกซิเจนร้อยละ 1.01 และ 4.63 ยังคงพบสเกลออกไซด์ เพราะชิ้นงานอบที่อุณหภูมิสูง เวลานาน ส่วนในสภาวะการอบอ่อนอื่น สเกลออกไซด์ถูกกำจัดหมด

4.5 ภาพรวมการกำจัดสเกลออกไซด์

เพื่อให้เกิดความเข้าใจในภาพรวมในที่นี้จึงแสดงผลการกำจัดสเกลออกไซด์รูปที่ 4.13 แสดงสรุปผลการกำจัดสเกลออกไซด์แต่ละขั้นตอน พบว่าการกำจัดสเกลออกไซด์ด้วยกรด สามารถกำจัดสเกลออกไซด์ออกได้มากกว่าการกำจัดสเกลออกไซด์ด้วยแรงกล การกำจัดสเกลออกไซด์ด้วยกรดในขั้นตอนที่ 1 สามารถกำจัดสเกลออกไซด์ออกได้มากกว่าในขั้นตอนที่ 2 เพราะการกำจัดสเกลออกไซด์ด้วยกรดในขั้นตอนที่ 1 ใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริกผสมกับสารละลายกรดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงและกรดชนิดนี้ช่วยกำจัดเหล็กออกไซด์และโครเมียมออกไซด์จึงสามารถกำจัดออกไซด์ออกได้เกือบทั้งหมด ยกเว้นกำจัดซิลิกอนออกไซด์ และกำจัดชั้นโครเมียมออกไซด์ที่มีปริมาณโครเมียมต่ำซึ่งจะถูกกำจัดในขั้นตอนที่ 2 [13] จึงทำให้การกำจัดสเกลออกไซด์ด้วยกรดในขั้นตอนที่ 1 สามารถกำจัดสเกลออกไซด์ออกได้มากกว่าในขั้นตอนที่ 2 และเมื่อสภาวะอบอุ่นในบรรยากาศที่มีออกซิเจนมากจะสามารถกำจัดสเกลออกไซด์ออกได้มากกว่าสภาวะที่มีออกซิเจนน้อย

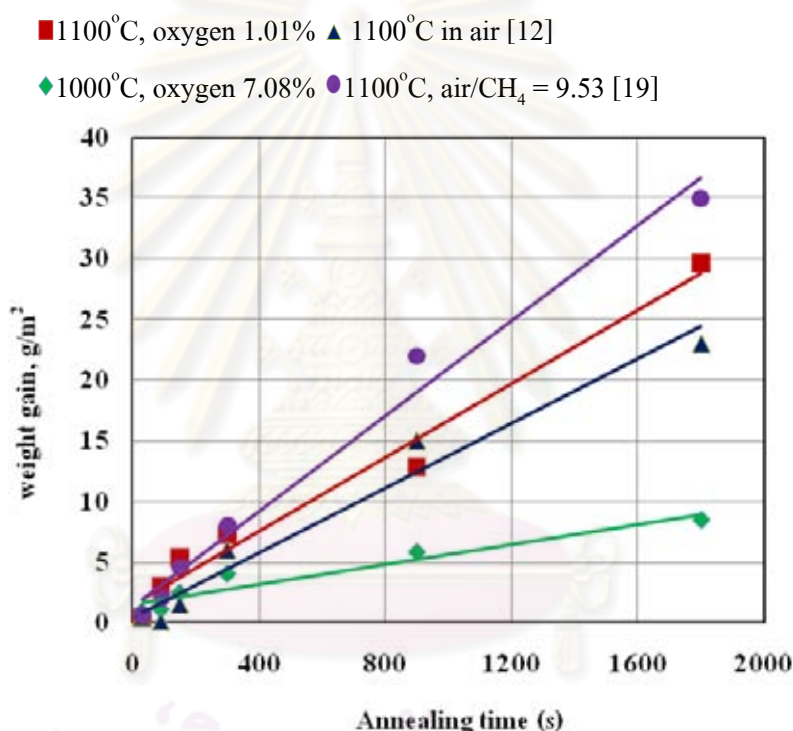


รูปที่ 4.13 สรุปผลการกำจัดสเกลออกไซด์แต่ละขั้นตอน

4.6 อัตราการเกิดออกซิเดชัน

การเกิดออกซิเดชันของโลหะจะทำให้น้ำหนักเพิ่มขึ้นตามเวลาการเกิดออกซิเดชัน น้ำหนักรวมเท่ากับน้ำหนักเกลออกไซด์จากชิ้นงานหลังการอบอุ่นร่วมกับน้ำหนักสเกลออกไซด์ที่หลุดเมื่อจุ่มน้ำอย่างรวดเร็ว รูปที่ 4.14 แสดงกราฟน้ำหนักของชิ้นงานที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาของการเกิดออกซิเดชันเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่ทดลองในบรรยากาศต่าง ๆ พบว่าน้ำหนักจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการอบอุ่นที่นานขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 1100 °ซ ออกซิเจนร้อยละ 1.01 ที่เวลาต่าง ๆ มีค่าน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น

มากกว่าที่อุณหภูมิ 1000 °ซ ออกซิเจนร้อยละ 7.08 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักสเกลออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นกับเวลาการเกิดออกซิเดชันเป็นสมการเส้นตรง เขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ เพราะหลังจากการเกิดออกซิเดชันออกไซด์ทุติยภูมิจะเกิดขึ้นด้านล่างออกไซด์ปฐมภูมิเข้าไปด้านในเนื้อวัสดุจึงทำให้มีการเกิดออกซิเดชันได้คงที่ตลอดเวลา [9,12,22] ซึ่งผลการทดลองคล้ายกับผลการทดลองของฤกษ์รัช คุณากร โยธิน [12] ที่ทดลองโดยใช้เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านการรีดอย่างต่อเนื่อง อบอ่อนที่อุณหภูมิ 1100°ซ ในบรรยากาศ และ Ozturk, B. และ Matway, R. [19] ที่ทดลองโดยใช้เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 อบอ่อนที่อุณหภูมิ 1100°ซ ในอัตราส่วนอากาศต่อมีเทนเท่ากับ 9.53 ดังผลการเปรียบเทียบการแสดงในรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงน้ำหนักต่อเวลาของการเกิดออกซิเดชันเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ทดลองในบรรยากาศต่าง ๆ และเปรียบเทียบกับผลที่มีการรายงานวิจัย

ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นและเวลาการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1100°ซ ออกซิเจนร้อยละ 1.01 คือ

$$y = 0.015t + 1.449 \tag{4.3}$$

ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นและเวลาการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1000°ซ ออกซิเจนร้อยละ 7.08 คือ

$$y = 0.004t + 1.578 \quad 4.4$$

y = weight change per unit area (g/m^2) t = annealing time (s)

อัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นแบบเส้นตรงสามารถเขียนปฏิกิริยาได้ดังสมการที่ 4.5 จากสมการนี้สามารถหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาได้ [22, 23]

$$dy/dt = K_r \quad 4.5$$

K_r = the rate constant of the reaction

ในการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1100°C ออกซิเจนร้อยละ 1.01 มีค่าคงที่ของปฏิกิริยาเท่ากับ 0.015 และการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1000°C ออกซิเจนร้อยละ 7.08 มีค่าคงที่ของปฏิกิริยาเท่ากับ 0.004



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองผลของอุณหภูมิการอบอ่อน เวลา และปริมาณออกซิเจน ต่อการเกิดออกไซด์ ทุติยภูมิและการกำจัดด้วยกรด 2 ขั้นตอน ของสเกลออกไซด์เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิค AISI 304 สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 น้ำหนักของชิ้นงานเมื่อผ่านการอบอ่อนและทำให้ชิ้นงานเย็นลงอย่างรวดเร็วในน้ำลดลง เพราะสเกลออกไซด์ที่มีรูพรุนจะหลุดออก พื้นผิวที่พบมี 2 ลักษณะ คือ พื้นผิวเรียบและพื้นผิวขรุขระ ที่พื้นผิวขรุขระพบปริมาณของโครเมียมมากกว่าพื้นผิวเรียบและมีรูพรุนจำนวนมาก

5.2 เมื่ออบอ่อนและทำให้ชิ้นงานเย็นลงอย่างรวดเร็วในน้ำที่เวลา 150 วินาที สเกลออกไซด์จะหลุดออกมากกว่าที่เวลา 90 วินาที และที่อุณหภูมิ 1100°ซ มีปริมาณสเกลออกไซด์ที่เหลืออยู่น้อยกว่าชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1000°ซ

5.3 ที่อุณหภูมิ 1100°ซ การอบอ่อนในบรรยากาศมีออกซิเจนร้อยละ 1.01% มีการหลุดของสเกลออกไซด์หลังการจุ่มชิ้นงานลงในน้ำอย่างรวดเร็วมากกว่าการอบอ่อนในบรรยากาศมีออกซิเจนร้อยละ 4.63 และ 7.08 ตามลำดับ ส่วนที่อุณหภูมิ 1000°ซ การอบอ่อนในบรรยากาศทุกสภาวะออกซิเจนมีน้ำหนักที่ลดลงใกล้เคียงกัน

5.4 สเกลออกไซด์ที่พบหลังการอบอ่อนมีอยู่ 2 ชนิด คือ ฮีมาไทต์ (Fe_2O_3) และ โครไมต์ ($FeCr_2O_4$) ยกเว้นอบอ่อนที่สภาวะอุณหภูมิ 1100°ซ เวลา 150 นาที พบสเกลออกไซด์อยู่ 3 ชนิด คือ ฮีมาไทต์ (Fe_2O_3) โครไมต์ ($FeCr_2O_4$) และ โครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3)

5.5 อุณหภูมิ 1100°ซ ออกซิเจนร้อยละ 1.01 และอุณหภูมิ 1000°ซ ออกซิเจนร้อยละ 7.08 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นกับเวลาการอบอ่อนเป็นแบบสมการเส้นตรง

5.6 ชิ้นงานทุกชิ้นเมื่อผ่านการกำจัดสเกลออกไซด์ด้วยแรงกลแล้วจะมีน้ำหนักลดลง สเกลออกไซด์ที่หลุดง่ายหลุดออกไปทำให้เหลือแต่สเกลออกไซด์ที่หลุดยาก และพบรอยแตกขนาดเล็กทั่วทั้งผิว

5.7 ชิ้นงานที่ผ่านการกำจัดสเกลออกไซด์ด้วยการกัดกรดจะมีสีผิวที่ขาวขึ้น ชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนอุณหภูมิ 1000°ซ เวลา 90 วินาที และออกซิเจนร้อยละ 7.08 สามารถกำจัดสเกลออกไซด์ออกได้ตั้งแต่ขั้นตอนแรกของการกำจัดสเกลออกไซด์ด้วยการกัดกรด ชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1100°ซ เวลา 150 วินาที และออกซิเจนร้อยละ 1.01 ไม่สามารถกำจัดสเกลออกไซด์ด้วยการกัดกรดทั้งสองขั้นตอน

รายการอ้างอิง

- [1] Jacobs, James A. and Kilduff, Thomas F. Engineering Materials Technology.5th ed. New Jersey : Prentice Hall, 2001.
- [2] Waanders, F. B., Vorster, S.W., and Engelbrecht, A. Mössbauer and SEM characterization of the scale on type 304 stainless steel. Scripta Materialia. 42 (2000) : 997-1000.
- [3] วรณา หอมจะบก. พฤติกรรมการกัดผิวสเกลออกไซด์ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 และ AISI 430 ในกรดไฮโดรคลอริก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551
- [4] เอกสารประชาสัมพันธ์บริษัท ไทยน็อกซ์ สเตนเลส จำกัด (มหาชน)
- [5] นายนิพนธ์ ผดุงศิลป์ไพโรจน์. การส่งเสริมอุตสาหกรรมเหล็กแผ่นรีดร้อน / รีดเย็นในประเทศไทย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโลหการ คณะรัฐประศาสนศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง, 2549
- [6] นายประสาธ อินอ่อน. การทำความสะอาดผิวเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก AISI 304 ที่ผ่านการรีดร้อนด้วยกรรมวิธีทางเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2549
- [7] W.F. Smith, Principle of Material Science and Engineering. 3rd.ed. McGraw-Hill. NewYork,1996
- [8] ศิริลักษณ์ นิวิฐจรรยาภัก. การกัดกร่อนและการเลือกวัสดุ (พิมพ์ครั้งที่1). สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2545. หน้า 34-76
- [9] P. Pacombe, B. Baroux, G. Beranger. Stainless Steels Scientific Editors, Vol.1-2, Les Editions de Physique. France, 1993.
- [10] H.J. Davidson and J. B. Lindquist. Stainless steel, 1957, p.483-446
- [11] N. Birks, G.H. Meier, and F.S. Pettit. Introduction to the high temperature oxidation of metal. 2nd.ed. Cambridge,United Kingdom, 2006, p.115-121
- [12] Lian-Fu Li. Pickling of Austenitic Stainless Steels. Internal review report Alz-Arcelor. France, 2002.
- [13] แคททรีชา ทวีทรัพย์. อิทธิพลจากกระบวนการรีดร้อนที่มีผลต่อคุณภาพผิว White coils ของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดออสเทนนิติกเกรด AISI 304. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2548.
- [14] L. khunakronyothin. A study of the secondary oxidation of black coil stainless steel AISI 304. Master's Thesis chemical engineering King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok. 2007

- [15] J. Hildén, J. Virtanen, O. Forsén and J. Aromaa. Electrolytic pickling of stainless steel studied by electrochemical polarization and DC resistance measurements combined with surface analysis. *Electrochimica Acta* 46 (2001) : 3859-3866.
- [16] S. gonzales. Cold rolling process. Presentation, Research center of U&A, 2004.
- [17] Shot blasting. [Online]. Available from URL: <http://www.shotblasting.co.nz> [1994, June 31]
- [18] A.M. Huntz , A. Reckmann, C. Haut, C. Severac , M. Herbst, F.C.T. Resende, and A.C.S. Sabioni. Oxidation of AISI 304 and AISI 439 stainless steels. *Materials Science and Engineering A* 447 (2007) : 266–276.
- [19] Bahri Ozturk and R. Matway. Oxidation of type 304 stainless steels under simulated annealing conditions. *ISIJ International*. (1997) : 169-175.
- [20] S.R. Robert, N. Taki and L.P. Cook. Phase Diagrams for Ceramists. The American Ceramic Society. Inc. (1981) : 31-32.
- [21] I. Saeki, T. Saito, R. Furuichi, H. Konno, T. Nakamura, K. Mabuchi and M. Itoh. Growth process of protective oxides formed on type 304 and 430 stainless steel at 1273 K. *Corrosion Science*. (1998) : 1295-1302.
- [22] Khanna, A. S. Introduction to High Temperature Oxidation and corrosion. USA : ASM International, 2002
- [23] Birks, N. and Meier, G. H. Introduction to High Temperature Oxidation of Metals. London : Edward Arnold, 1983

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

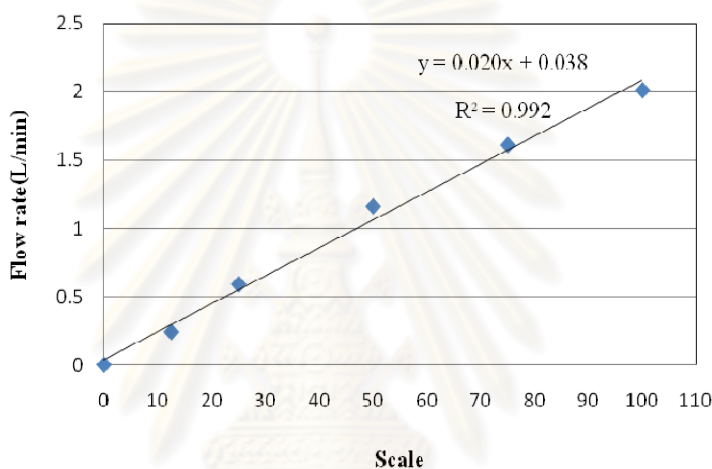


ภาคผนวก ก

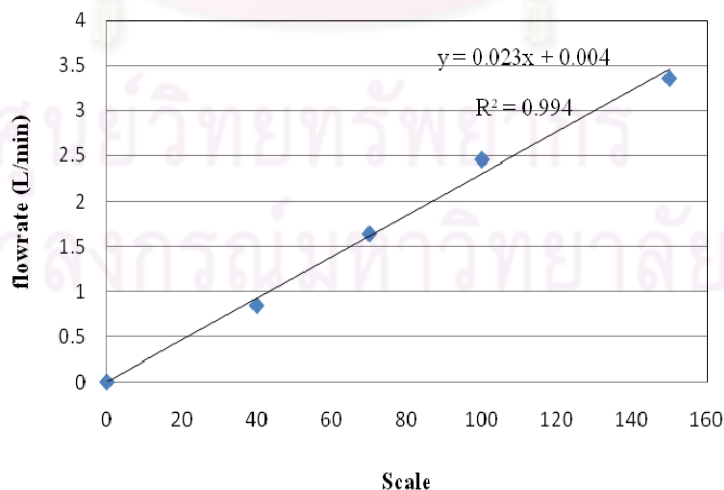
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การวัดอัตราส่วนของแก๊ส

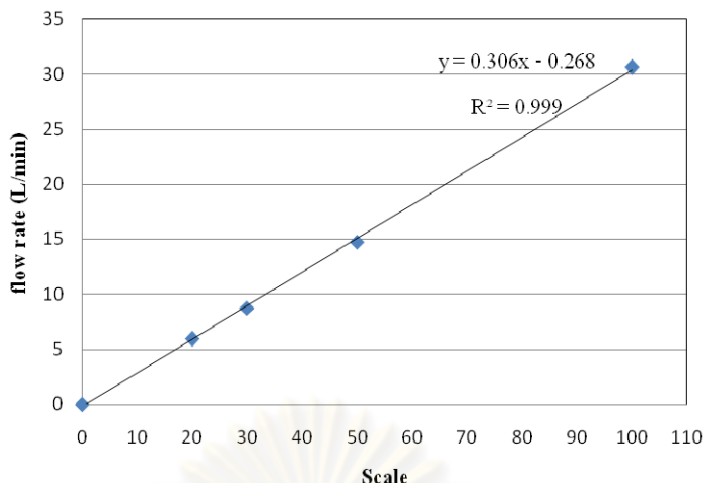
ในการทดลองจะใช้เครื่องควบคุมอัตราการไหล (Rotameter) 3 เครื่อง ที่มีขนาดอัตราการไหลที่แตกต่างกัน เพื่อการตรวจสอบอัตราการไหลของแก๊สที่ควบคุมด้วยเครื่องควบคุมอัตราการไหลจะใช้วิธีการวัดอัตราการไหลโดยใช้ฟองสบู่ (Bubble flow) รูปที่ ก-1 อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนต่อระดับสเกลของเครื่องควบคุมอัตราการไหลขนาด 2 ลิตรต่อนาที รูปที่ ก-2 อัตราการไหลแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อระดับสเกลของเครื่องควบคุมอัตราการไหลขนาด 3.5 ลิตรต่อนาที และรูปที่ ก-3 อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนต่อระดับสเกลของเครื่องควบคุมอัตราการไหลขนาด 30 ลิตรต่อนาที



รูปที่ ก-1 อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนต่อระดับสเกลของเครื่องควบคุมอัตราการไหลขนาด 2 ลิตรต่อนาที



รูปที่ ก-2 อัตราการไหลแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อระดับสเกลของเครื่องควบคุมอัตราการไหลขนาด 3.5 ลิตรต่อนาที



รูปที่ ก-3 อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนต่อระดับสเกลของเครื่องควบคุมอัตราการไหลขนาด 30 ลิตรต่อนาที

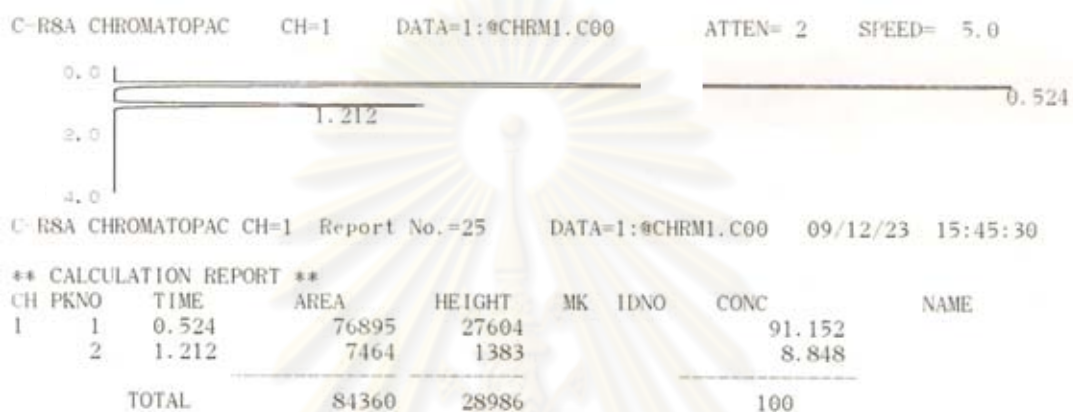
จากกราฟสามารถนำไปปรับอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน คาร์บอนไดออกไซด์ และไนโตรเจน ด้วยเครื่องควบคุมอัตราการไหลให้มีสัดส่วนตามที่ต้องการได้ แต่เพื่อตรวจสอบความถูกต้องจึงนำแก๊สผสมที่ผ่านเครื่องควบคุมอัตราการไหลไปวัดด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography, GC) อีกครั้ง ในการวัดตัวอย่างด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจะต้องวัดในบรรยากาศแห้ง จึงต้องมีการปรับอัตราส่วนของแก๊สจากตารางที่ ก-1 เป็นไม่มีไอน้ำ (ตารางที่ ก-2) ผลการวัดอัตราการไหลของแก๊สดังตัวอย่างสเปกตรัมจากเครื่องโครมาโทกราฟีแสดงผลการวัดดังตัวอย่างรูปที่ ก-4 และ ก-5 ออกซิเจนร้อยละ 4.38 และคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 8.85 ซึ่งมีความใกล้เคียงกับที่อัตราส่วนอากาศต่อแก๊สมีเทนเท่ากับ 12 ตารางที่ ก-3 แสดงร้อยละของแก๊สที่ได้จากการคำนวณ การวัดด้วยฟองสบู่และแก๊สโครมาโทกราฟี

ตารางที่ ก-1 อัตราส่วนของแก๊สที่ใช้ในการทดลอง

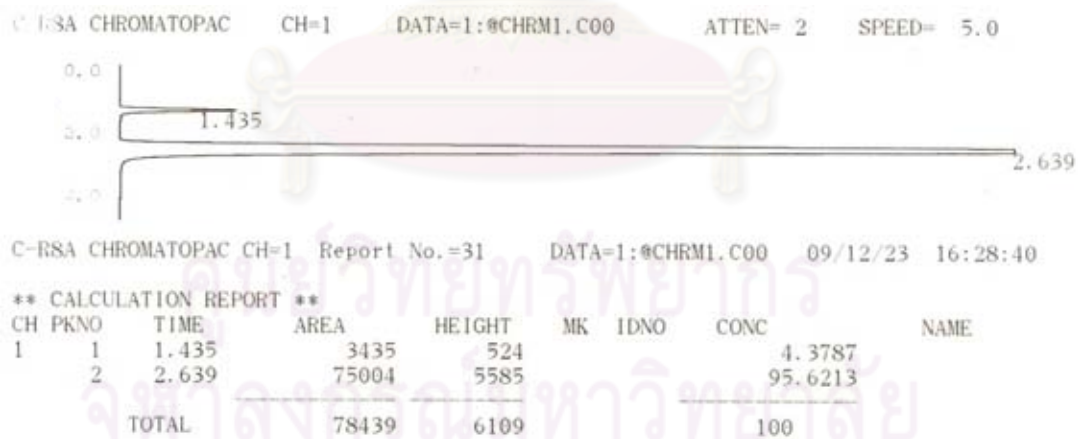
แก๊ส	องค์ประกอบของแก๊ส (v/v%)		
	1	2	3
CO ₂	10.12	8.90	7.54
H ₂ O	8.92	2.12	2.07
O ₂	1.01	4.63	7.08
N ₂	79.95	84.36	83.31

ตารางที่ ก-2 อัตราส่วนของแก๊สที่ไม่มีไอน้ำ

แก๊ส	องค์ประกอบของแก๊ส (v/v%)		
	1	2	3
%CO ₂	11.11	9.09	7.69
%O ₂	1.11	4.73	7.23
%N ₂	87.78	86.18	85.08



รูปที่ ก-4 ผลการฉีดแก๊สโครมาโตกราฟฟีที่อัตราส่วนอากาศต่อมีเทนเท่ากับ 12 ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์



รูปที่ ก-5 ผลการฉีดแก๊สโครมาโตกราฟฟีที่อัตราส่วนอากาศต่อมีเทนเท่ากับ 12 ของแก๊สออกซิเจน

ตารางที่ ก-3 ร้อยละของแก๊สที่ได้จากการคำนวณ การวัดด้วยฟองสบู่และแก๊สโครมาโทกราฟี

% gas	Air/CH ₄ = 10			Air/CH ₄ = 12			Air/CH ₄ = 14		
	Cal.	Bubble flow	GC	Cal.	Bubble flow	GC	Cal.	Bubble flow	GC
%CO ₂	11.11	10.87	-	9.09	9.06	8.85	7.69	7.67	8.62
%O ₂	1.11	1.03	-	4.73	4.40	4.38	7.23	6.73	6.50
%N ₂	87.78	88.10	-	86.18	86.54	86.77	85.08	85.59	84.88



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

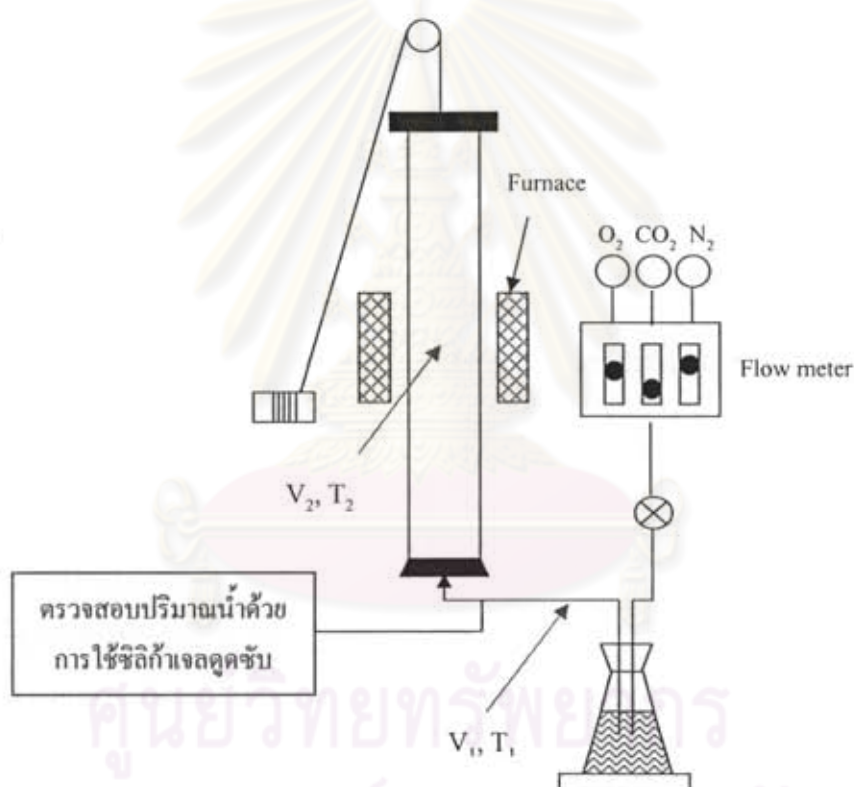


ภาคผนวก ข

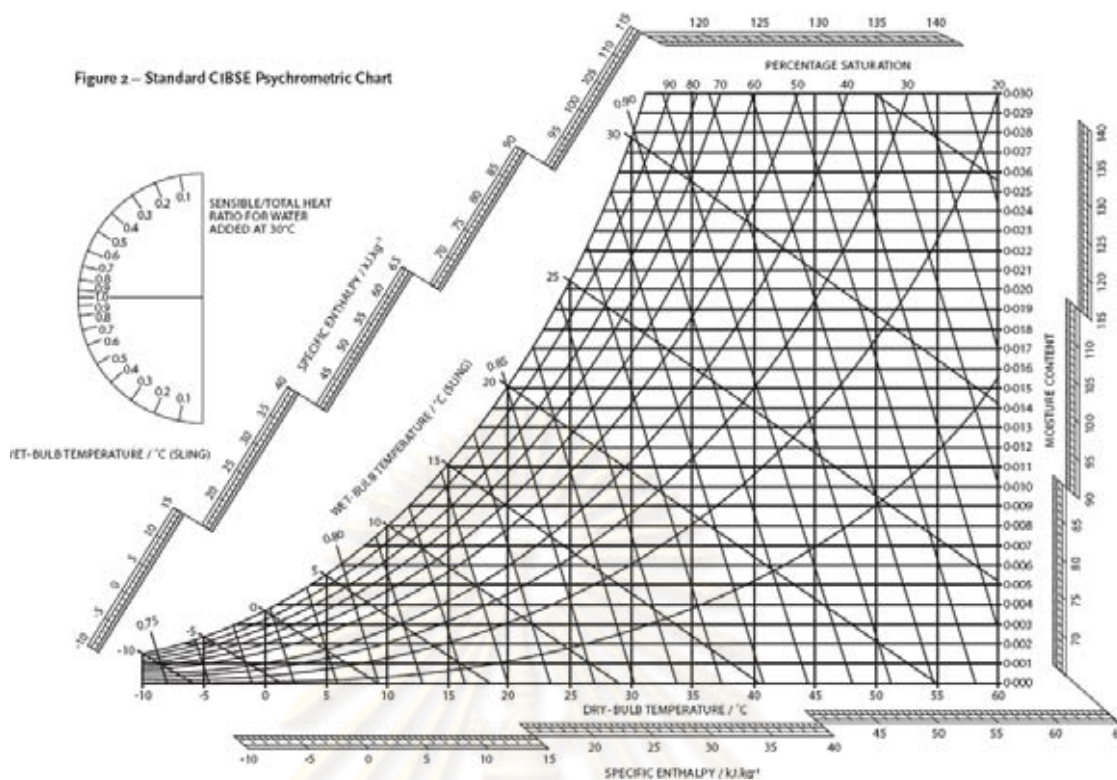
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การคำนวณปริมาณไอน้ำ

ในการทดลองจะนำแก๊สที่ผสมแล้วผ่านน้ำในขวดรูปชมพู่ ให้แก๊สน้ำไอน้ำผ่านเข้าสู่เตาทดลองดังรูปที่ ข-1 ในการคำนวณหาปริมาณไอน้ำจะวัดอุณหภูมิของน้ำและอุณหภูมิของอากาศเมื่อได้แล้วจะใช้ตาราง Psychrometric chart (รูปที่ ข-2) เทียบหาปริมาณไอน้ำที่อุณหภูมิน้ำเท่ากับ 25°C และอุณหภูมิอากาศ 30°C ได้ไอน้ำเท่ากับ 0.0183 กรัม น้ำต่อกรัมอากาศแห้ง หรือร้อยละ 1.83 ส่วนที่อุณหภูมิน้ำเท่ากับ 40°C และอุณหภูมิอากาศ 30°C ได้ไอน้ำเท่ากับ เท่ากับ 0.0801 กรัม น้ำต่อกรัมอากาศแห้ง หรือร้อยละ 8.01 ส่วนนี้คำนวณจากสมการของคลอเซียส- คลาเปียร์อง [Lupis (1993)] โดยใช้สมการที่ ข-1.



รูปที่ ข-1 แผนภูมิแสดงการไหลของแก๊สเพื่อควบคุมบรรยากาศในการอบอ่อน



รูปที่ ข-2 Psychrometric chart [1]

สมการการคำนวณหาปริมาณไอน้ำของคลอเซ็ส- คลาเปร์รอง

$$\ln \left(\frac{P_{H_2O(g), T_{room}}}{P_{H_2O(g), 373.15K}} \right) = - \frac{\Delta H^{l \rightarrow v}}{R} \left(\frac{1}{T_{room}} - \frac{1}{373.15} \right) \quad (\text{ข-1})$$

จากสมการ

$P_{H_2O(g), T_{room}}$ คือ ความดันย่อยของไอน้ำที่อุณหภูมิห้อง (T_{room})

$P_{H_2O(g), 373.15K}$ คือ ความดันย่อยของไอน้ำที่อุณหภูมิ 100 °ซ (1 atm)

$\Delta H^{l \rightarrow v}$ คือ เอนโทรปีของการเปลี่ยนของเหลวเป็นไอของน้ำ ($J.mol^{-1}$)

R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส ($8.314 J.mol^{-1}.K^{-1}$)

T_{room} คือ อุณหภูมิห้อง

$\Delta H^{l \rightarrow v}$ ที่ 100 °ซ คือ 40,893 $J.mol^{-1}$ [Barin (1989)].



ภาคผนวก ค

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการวิเคราะห์จากสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

ในการทดลองจะมีการกำจัดสเกลออกไซด์ด้วยการกัดกรด ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน
ขั้นตอนแรกใช้สารละลาย 4 M HCl + 15 g/L H₂O₂ ขั้นตอนสองใช้สารละลาย 1 M H₂NO₃ + 1 M
HF จึงมีการวัดความเข้มข้นของสารละลายโดยส่งวัดความเข้มข้นที่สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และ
เทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ได้ผลการวัดความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกเป็น 3.91 M (ดังรูปที่ ก-1)
และผลการวัดความเข้มข้นกรดไนตริกผสมกับกรดไฮโดรฟลูออริกเป็น 1.8 M (ดังรูปที่ ก-2)



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



วว.

คำขอบริการที่ บป.ก. 365 / 53 ศทท. ทป. กน. 794-1 / 53

รายงานผลการทดสอบและวิเคราะห์

ให้แก่
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การทดสอบ / วิเคราะห์ : HCL 4 M
 วิธีทดสอบ / วิเคราะห์ : Titration method
 ภาวะการทดสอบ / วิเคราะห์ : อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ %
 ผลการทดสอบ / วิเคราะห์

HCL 4 M

ความเข้มข้นของกรด = 3.91 โมลาร์

ผู้ทดสอบ/วิเคราะห์ ผู้รับรอง

1  

2

3

(นายคณัย ศรีทองคำ)
 นักวิชาการ 8
 ปฏิบัติงานแทน

รักษาราชการผู้อำนวยการห้องปฏิบัติการเคมีวิเคราะห์

วันที่ 22 กรกฎาคม 2553 Ref. 2125253071401871001/1

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) FM.BLMTC.001 Rev.2

ผลการทดสอบวิเคราะห์/ทดสอบเทียบ นี้ รับรองเฉพาะตัวอย่างรายการที่ได้รับให้เท่านั้น
 การนำรายงานผลไปรับรองอื่นใดโดยฉพาะและการคัดถ่ายหรือการนำผลบางส่วนไปเผยแพร่ต่อสาธารณะต้องได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจากผู้ว่าการ วว.

๑๙๖ ถนนพลโยธิน จตุจักร กรุงเทพมหานคร ๑๐๑๐๐
 โทรศัพท์ (๖๖) ๐ ๒๕๖๙ ๕๑๕๕-๓๐, ๐ ๒๕๖๙ ๕๕๕๕, ๐ ๒๕๖๙ ๐๕๖๐
 โทรสาร (๖๖) ๐ ๒๕๖๕ ๔๗๗๕, ๐ ๒๕๖๙ ๔๕๖๕
 E-mail : listr@listr.or.th www.listr.or.th

ศูนย์ทดสอบและมาตรวิทยา
 นิคมอุตสาหกรรมบางปู ซอย ๕ ถนนสุขุมวิท
 อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรปราการ ๑๐๒๔๐
 โทรศัพท์ (๖๖) ๐ ๒๖๒๓ ๕๖๙๕ - ๔๐ โทรสาร (๖๖) ๐ ๒๖๒๓ ๙๖๕๕
 E-mail : mtc@listr.or.th www.listr.or.th/mtc

รูปที่ ค-1 ผลการวัดความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก



วว.

คำขอรับการที่ บป.ค. 365 / 53 สทม. ทบ. คม. 794-2 / 53

รายงานผลการทดสอบและวิเคราะห์

ให้แก่
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การทดสอบ / วิเคราะห์ : 1MHF+HNO₃ 1 M
 วิธีทดสอบ / วิเคราะห์ : Titration method
 ภาวะการทดสอบ / วิเคราะห์ : อุณหภูมิ-..... ความชื้นสัมพัทธ์-.....%

ผลการทดสอบ / วิเคราะห์

1MHF+HNO₃ 1 M

ความเข้มข้นของกรด = 1.83 โมลาร์

ผู้ทดสอบ/วิเคราะห์ ผู้รับรอง

1 จิ่งฉวี (นายคณัย ศรีทองคำ)
 2
 3

นักวิชาการ 8
 ปฏิบัติบนแท่น

รักษาการผู้อำนวยการห้องปฏิบัติการเคมีวิเคราะห์

วันที่ 22 กรกฎาคม 2553 Ref. 2125253071401871001/2

ผลการทดสอบวิเคราะห์ทดสอบเทียบ นี้ รับรองเฉพาะตัวอย่างรายการที่ได้ระบุไว้เท่านั้น
 การนำรายงานผลไปใช้ประโยชน์และเพื่อการคัดถ่ายหรือการนำผลบางส่วนไปเผยแพร่ต่อสาธารณะต้องได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจากผู้ว่าการ วว.

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) FMBL/MTC.001 Rev.2

๑๙๖ ถนนพหลโยธิน จตุจักร กรุงเทพมหานคร ๑๐๑๐๐
 โทรศัพท์ (๖๖) ๐ ๒๕๒๙ ๕๑๕๑-๓๐, ๐ ๒๕๒๙ ๕๕๕๕, ๐ ๒๕๒๙ ๐๑๖๐
 โทรสาร (๖๖) ๐ ๒๕๒๖ ๕๗๗๕, ๐ ๒๕๒๙ ๙๕๖๒
 E-mail : tistr@tistr.or.th www.tistr.or.th

ศูนย์ทดสอบและมาตรวิทยา
 นิคมอุตสาหกรรมบางปู ซอย ๑ ถนนสุขุมวิท
 อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรปราการ ๑๐๒๔๐
 โทรศัพท์ (๖๖) ๐ ๒๕๒๓ ๕๖๗๒ - ๔๐ โทรสาร (๖๖) ๐ ๒๕๒๓ ๙๖๖๕
 E-mail : mtc@tistr.or.th www.tistr.or.th/mtc

รูปที่ ค-2 ผลการวัดความเข้มข้นของกรดไฮโดรฟลูออริกผสมกับกรดไนตริก



ภาคผนวก ง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การใช้งาน EPIGEN XD 005

คุณสมบัติ : EPIGEN XD 005 เป็นสารอีพ็อกซีเซรามิกชนิดสองส่วนผสมกัน ใช้เคลือบผิวโลหะเพื่อป้องกันการกัดกร่อนจากสนิม ความชื้น เป็นเรซินซึ่งไม่ชอบน้ำ

อัตราส่วนการผสม : A (ขาว) : B (ดำ) = 5 : 1 ส่วน โดยน้ำหนัก

ส่วนผสมหลักของ A (Resin) :

Epoxy Resin	< 45%
Alkyl Glycidyl Ether	< 10%

ส่วนผสมหลักของ B (Hardener) :

Formaldehyde Polymer with TETA	> 50%
Triethylenetetramine	> 10%

วิธีเตรียม :

1. ชั่งน้ำหนักตามอัตราส่วนข้างต้น เช่น A 500 กรัม B 100 กรัม
2. ผสม A และ B ให้เป็นเนื้อเดียวกัน จะได้เป็นสีเทาอ่อน
3. ใช้แปรงทา 2-3 เที่ยวตามความเหมาะสม
4. ล้างภาชนะที่บรรจุสีด้วยทินเนอร์

ข้อแนะนำการเตรียมผิวก่อนทาสาร

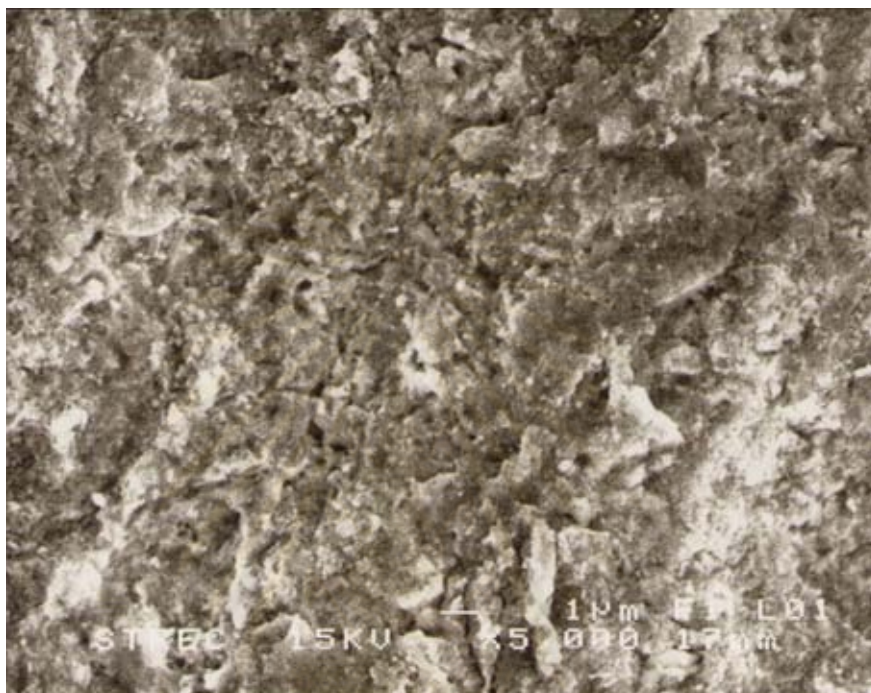
1. สีที่ผสมแล้วควรใช้ภายในเวลา 10 นาที (ไม่ควรเกิน 15 นาที) เพราะสีจะเหนียวมากขึ้นทำให้ทาได้ยาก
2. เพื่อให้เกิดการยึดติดสูงสุด ควรเตรียมผิวให้ได้มาตรฐานความหยาบและความสะอาดไม่ต่ำกว่า Sa.2.5 เช่น การพ่นทราย ถ้าใช้การเจียรหรือขัดด้วยแปรงลวดการขัดเกาจะลดลง ควรทำความสะอาดภาชนะที่บรรจุสารและผิวชิ้นงาน



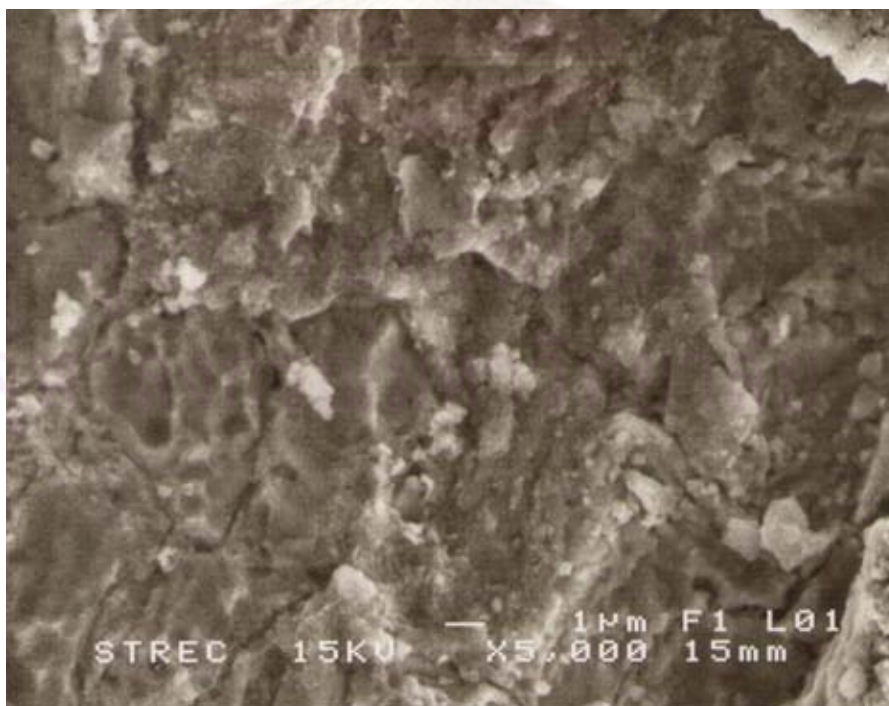
ภาคผนวก จ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

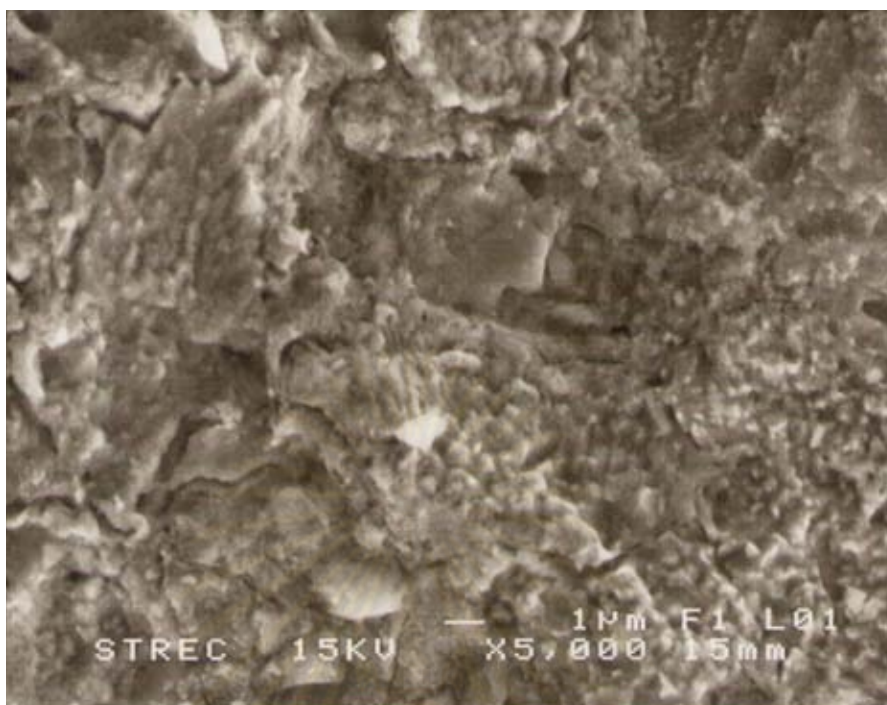
ผิวชิ้นงานเมื่อใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดที่กำลังขยาย 5000 เท่า ในการทดลองจะนำชิ้นงานที่ได้รับมาและชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนไปถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดที่กำลังขยาย 5000 เท่า เพื่อศึกษาลักษณะสเกลออกไซด์ได้ผลดังต่อไปนี้



รูปที่ จ-1 ผิวชิ้นงานคอยด์ดำที่ได้รับมา



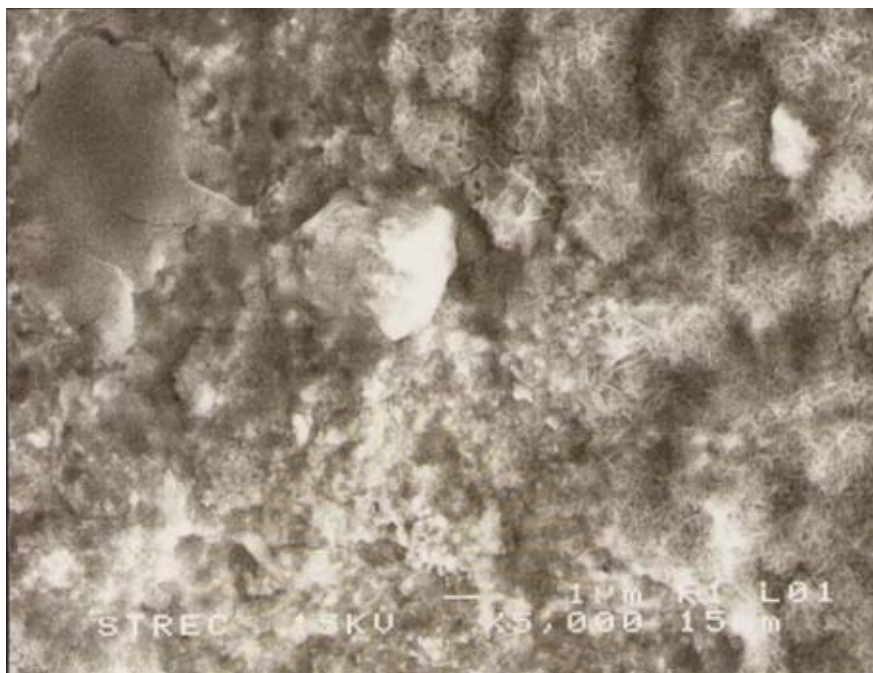
รูปที่ จ-2 ลักษณะผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านการอบอ่อนอุณหภูมิ 1000°ซ เวลา 90 วินาที และออกซิเจนร้อยละ 1.01



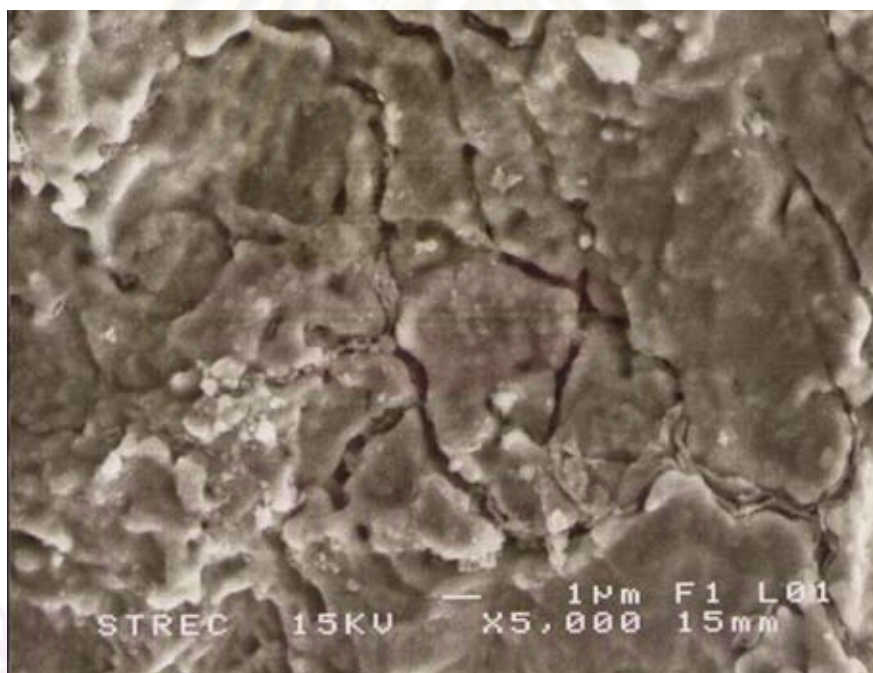
รูปที่ จ-3 ลักษณะผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านการอบอ่อนอุณหภูมิ 1000°ซ เวลา 90 วินาที และออกซิเจนร้อยละ 4.63



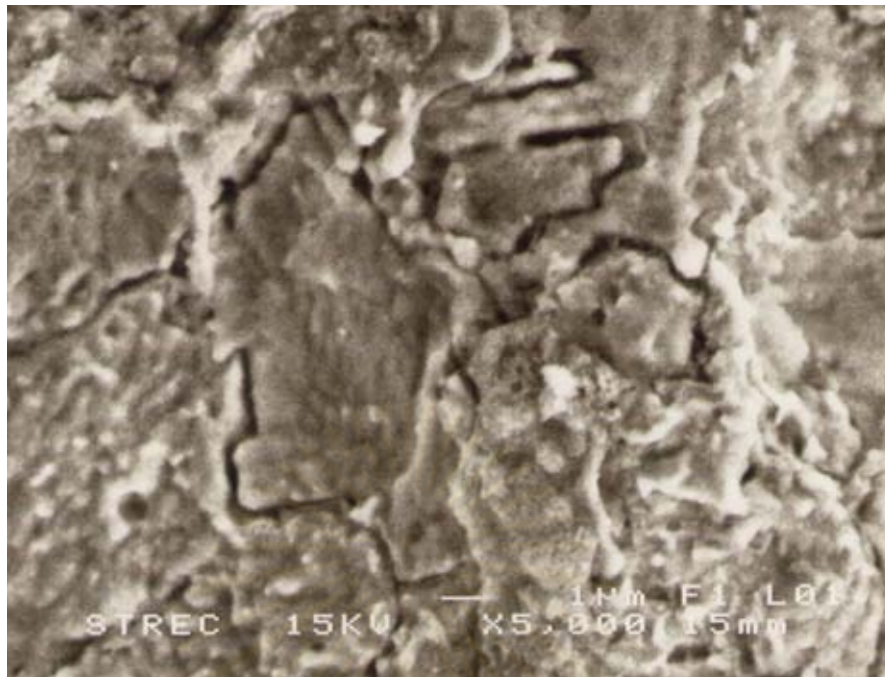
รูปที่ จ-4 ลักษณะผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านการอบอ่อนอุณหภูมิ 1000°ซ เวลา 90 วินาที และออกซิเจนร้อยละ 7.08



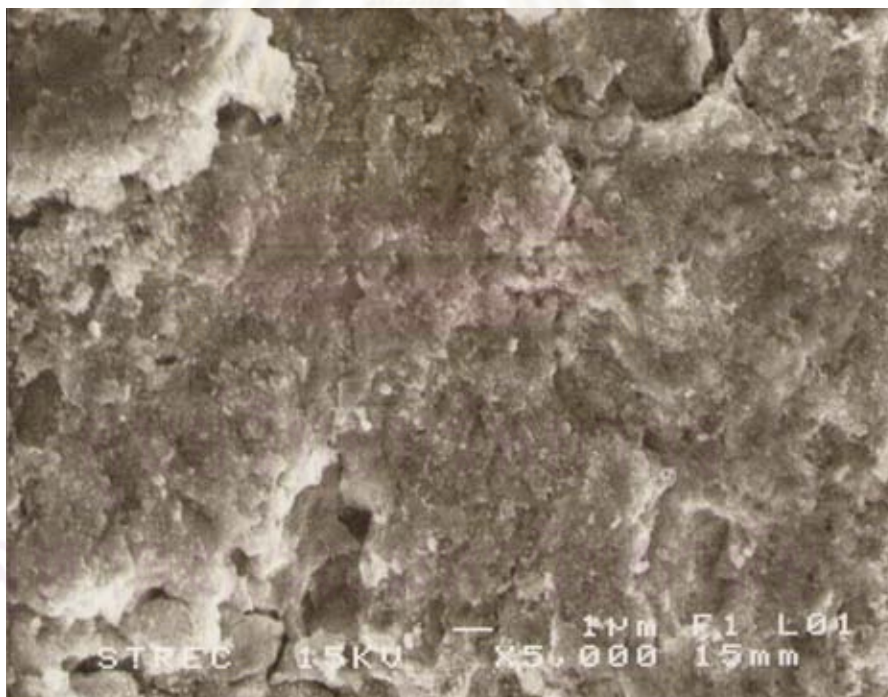
รูปที่ จ-5 ลักษณะผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านการอบอ่อนอุณหภูมิ 1000°ซ เวลา 150 วินาที และออกซิเจนร้อยละ 1.01



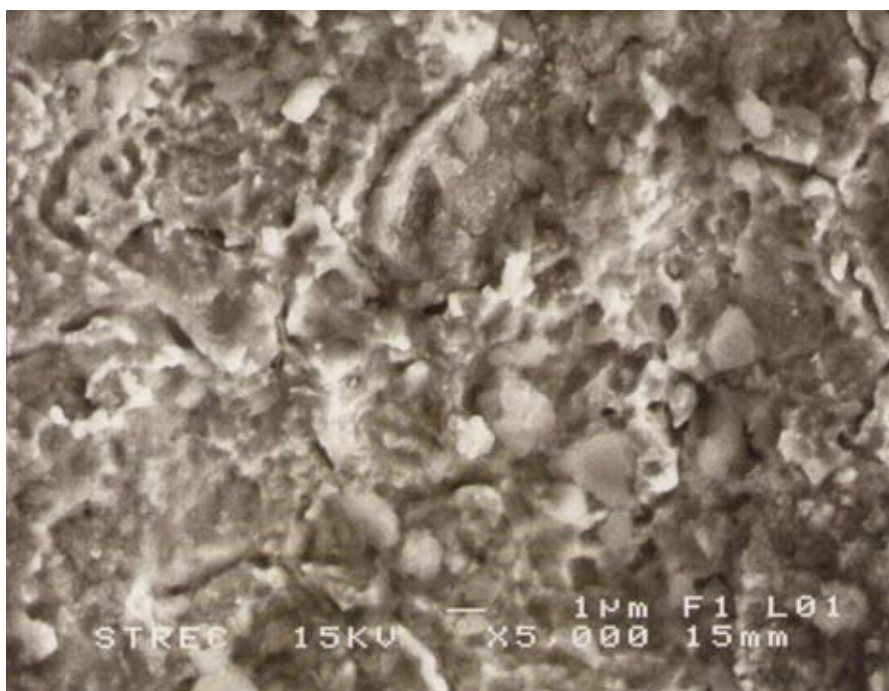
รูปที่ จ-6 ลักษณะผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านการอบอ่อนอุณหภูมิ 1000°ซ เวลา 150 วินาที และออกซิเจนร้อยละ 4.63



รูปที่ จ-7 ลักษณะผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านการอบอ่อนอุณหภูมิ 1000°ซ เวลา 150 วินาที และออกซิเจนร้อยละ 7.08



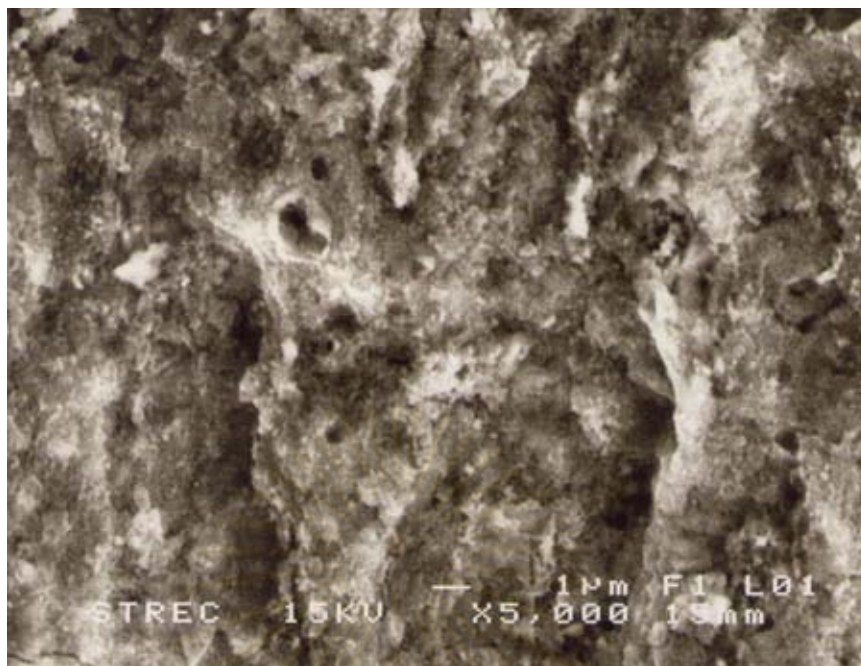
รูปที่ จ-8 ลักษณะผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านการอบอ่อนอุณหภูมิ 1100°ซ เวลา 90 วินาที และออกซิเจนร้อยละ 1.01



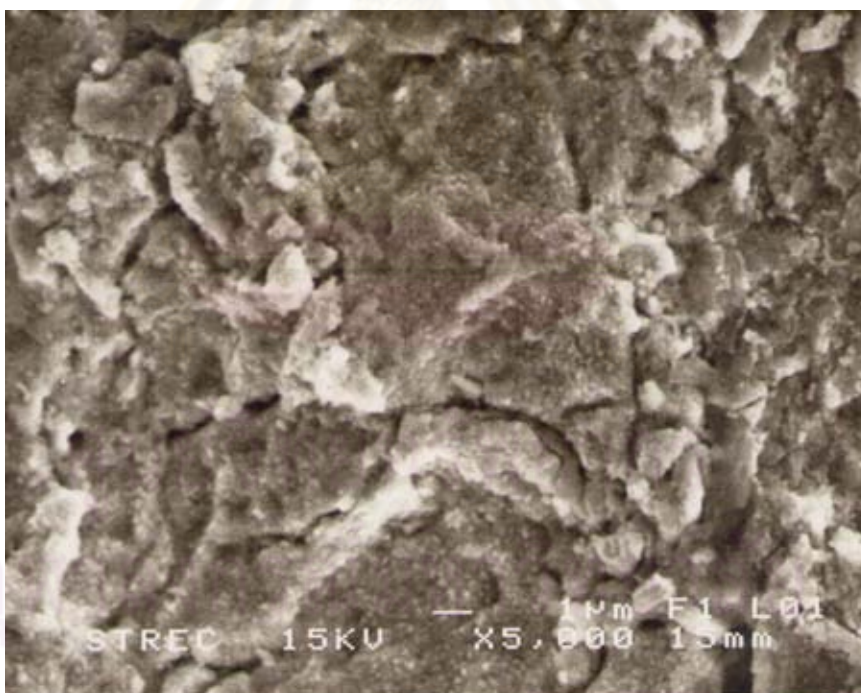
รูปที่ จ-9 ลักษณะผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านการอบอ่อนอุณหภูมิ 1100°ซ เวลา 90 วินาที และออกซิเจนร้อยละ 4.63



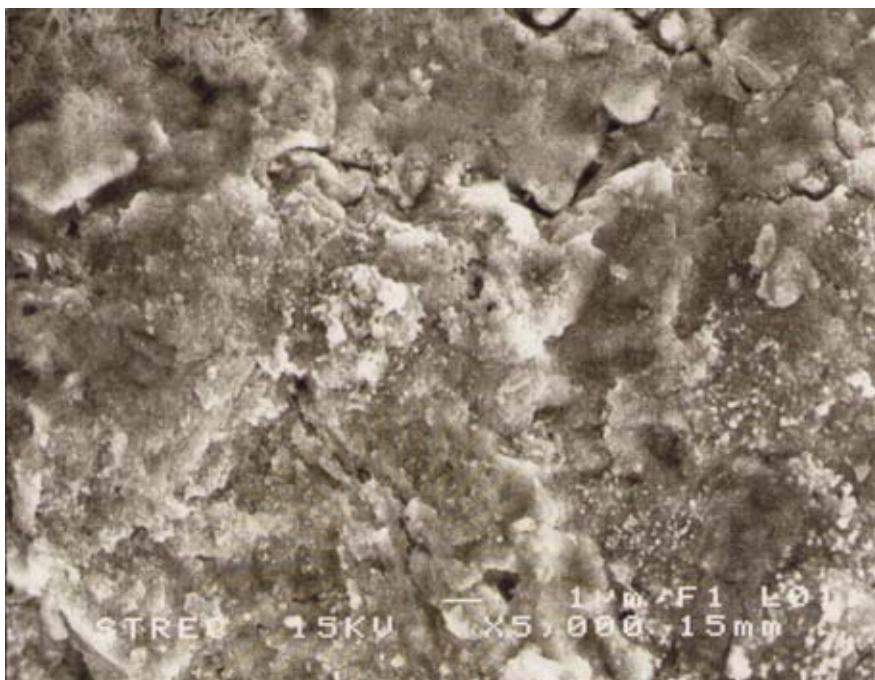
รูปที่ จ-10 ลักษณะผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านการอบอ่อนอุณหภูมิ 1100°ซ เวลา 90 วินาที และออกซิเจนร้อยละ 7.08



รูปที่ จ-11 ลักษณะผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านการอบอ่อนอุณหภูมิ 1100°ซ เวลา 150 วินาที และออกซิเจนร้อยละ 1.01



รูปที่ จ-12 ลักษณะผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านการอบอ่อนอุณหภูมิ 1100°ซ เวลา 150 วินาที และออกซิเจนร้อยละ 4.63



รูปที่ จ-13 ลักษณะผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ผ่านการอบอ่อนอุณหภูมิ 1100°ซ เวลา 150 วินาที และออกซิเจนร้อยละ 7.08

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

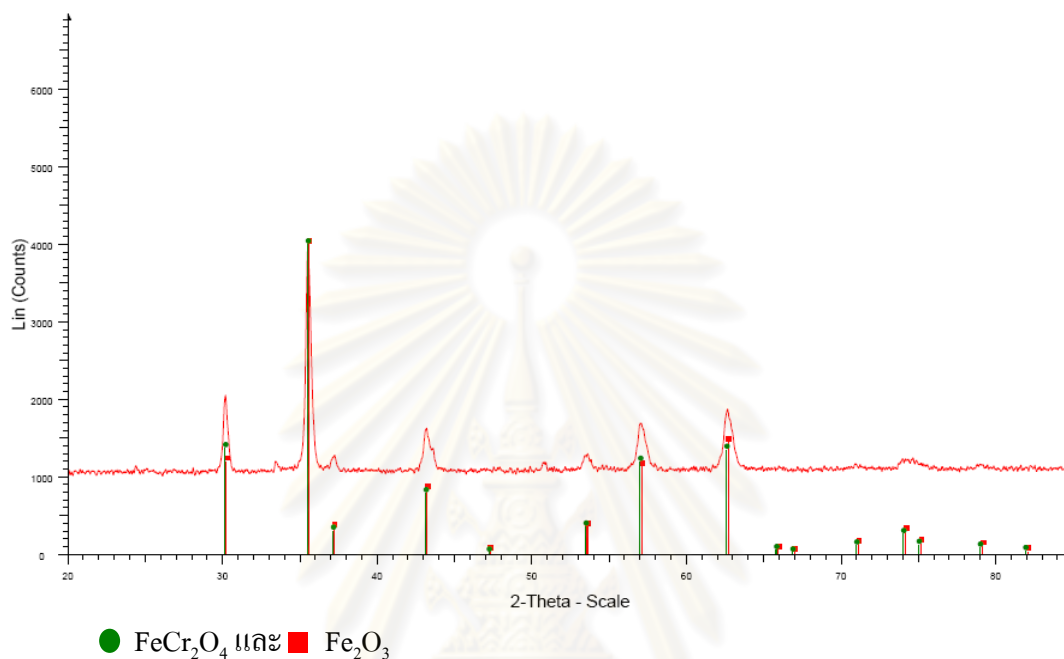


ภาคผนวก ฉ

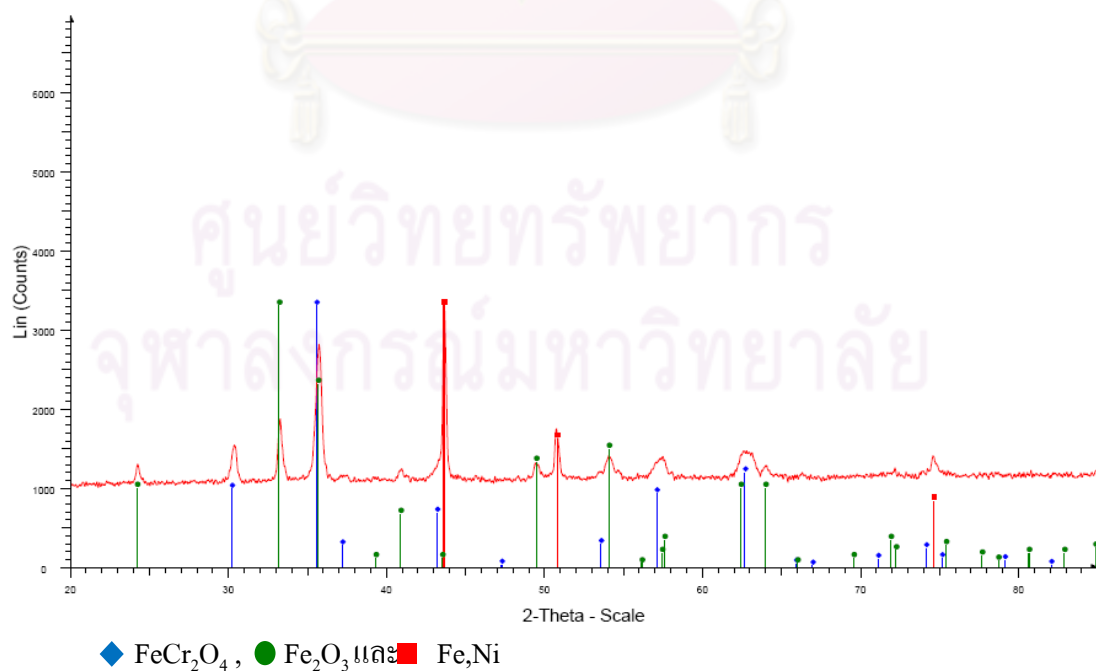
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิควิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

ในการทดลองจะนำชิ้นงานที่ได้รับมาและชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนไปวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยเทคนิควิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เพื่อศึกษาชนิดของสเกลออกไซด์ ซึ่งในบางสภาวะการอบอ่อนได้มีการนำไปวิเคราะห์ซ้ำเพื่อความแม่นยำ ได้ผลดังต่อไปนี้

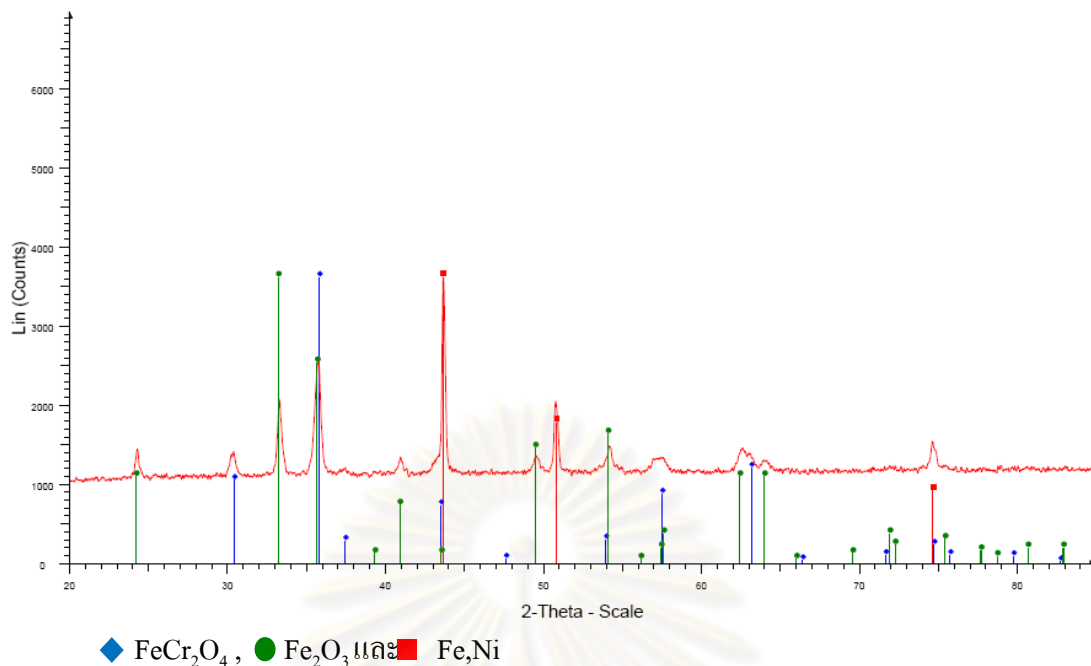


รูปที่ จ-1 XRD สเปกตรัมของคอยล์ดำที่ได้รับมา

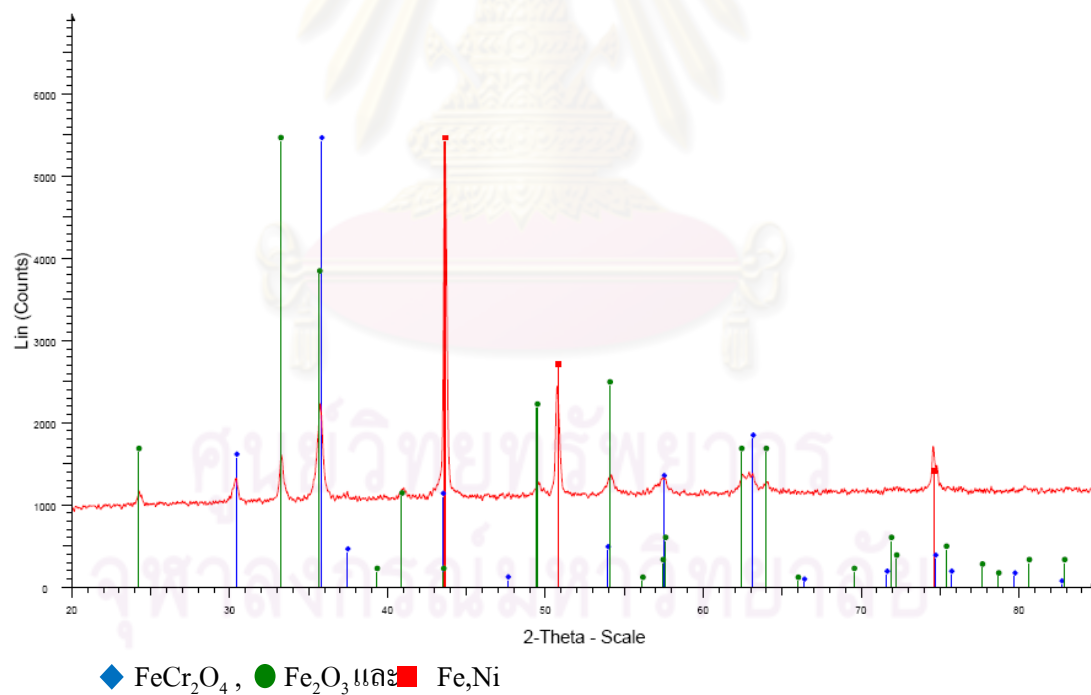


รูปที่ จ-2 XRD สเปกตรัมของ เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 แผ่นม้วนรีดร้อนที่ผ่านการอบอ่อน

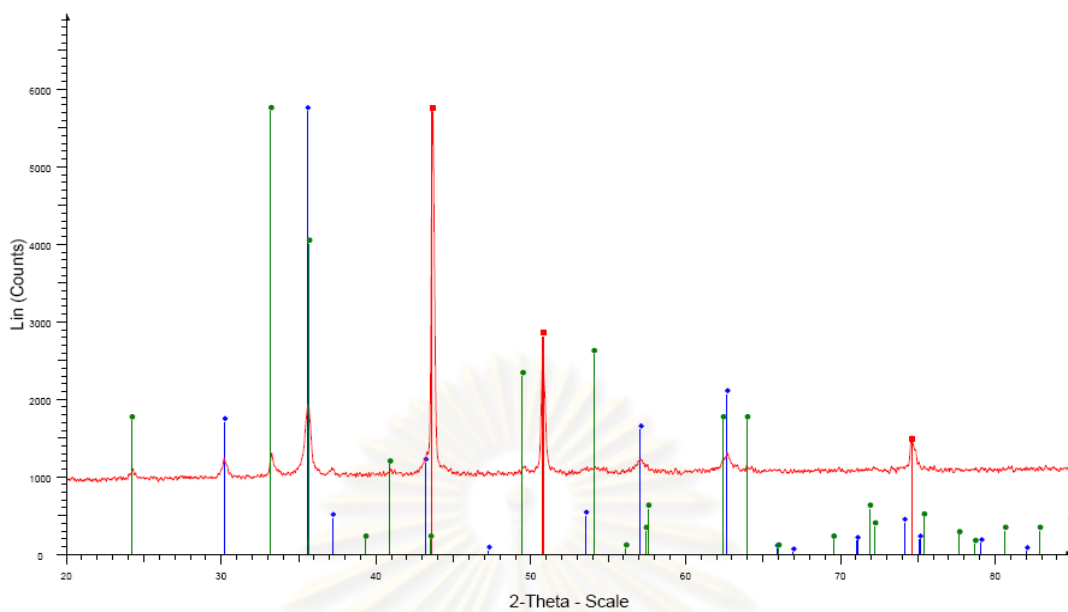
อุณหภูมิ 1000°C เวลา 90 วินาที และ ออกซิเจนร้อยละ 1.01



รูปที่ จ-3 XRD สเปกตรัมของ เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 แผ่นม้วนรีดร้อนที่ผ่านการอบอ่อน อุณหภูมิ 1000°C เวลา 90 วินาที และ 1.01

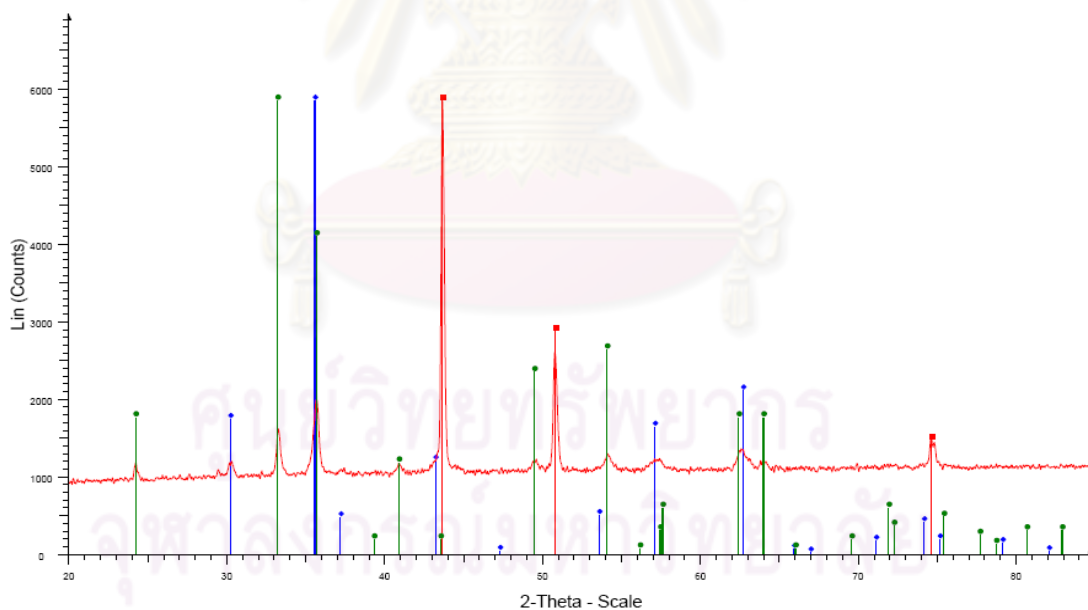


รูปที่ จ-4 XRD สเปกตรัมของ เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 แผ่นม้วนรีดร้อนที่ผ่านการอบอ่อน อุณหภูมิ 1000°C เวลา 90 วินาที และ ออกซิเจนร้อยละ 7.08



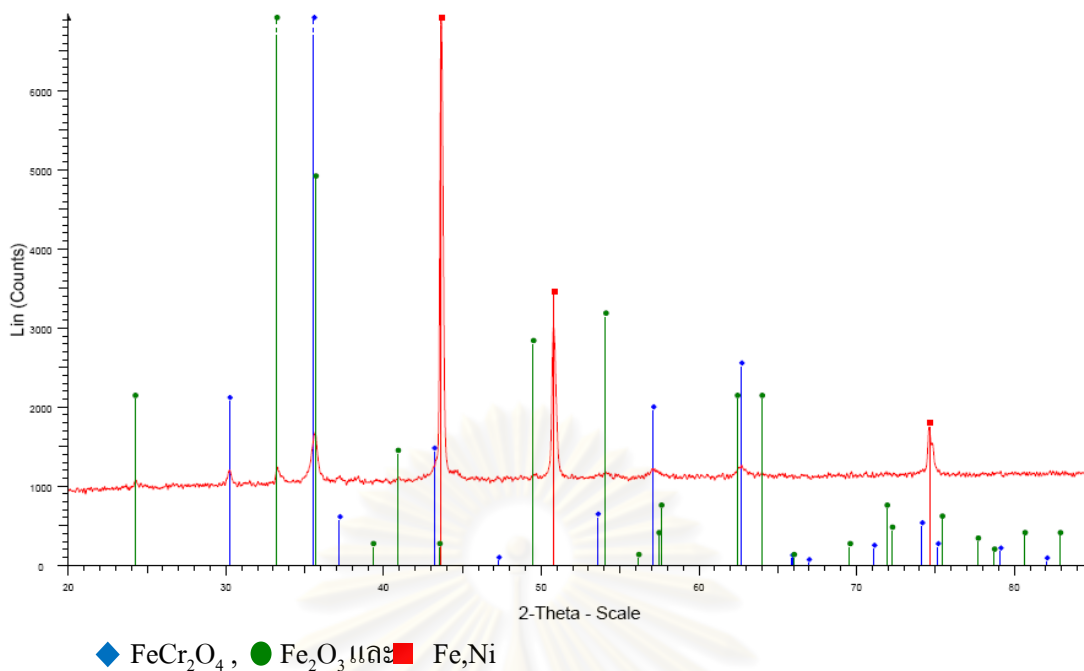
◆ FeCr_2O_4 , ● Fe_2O_3 และ ■ Fe,Ni

รูปที่ ๕-5 XRD สเปกตรัมของ เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 แผ่นม้วนรีดร้อนที่ผ่านการอบอ่อน อุณหภูมิ 1000^๐ซ เวลา 150 วินาที และ ออกซิเจนร้อยละ 1.01

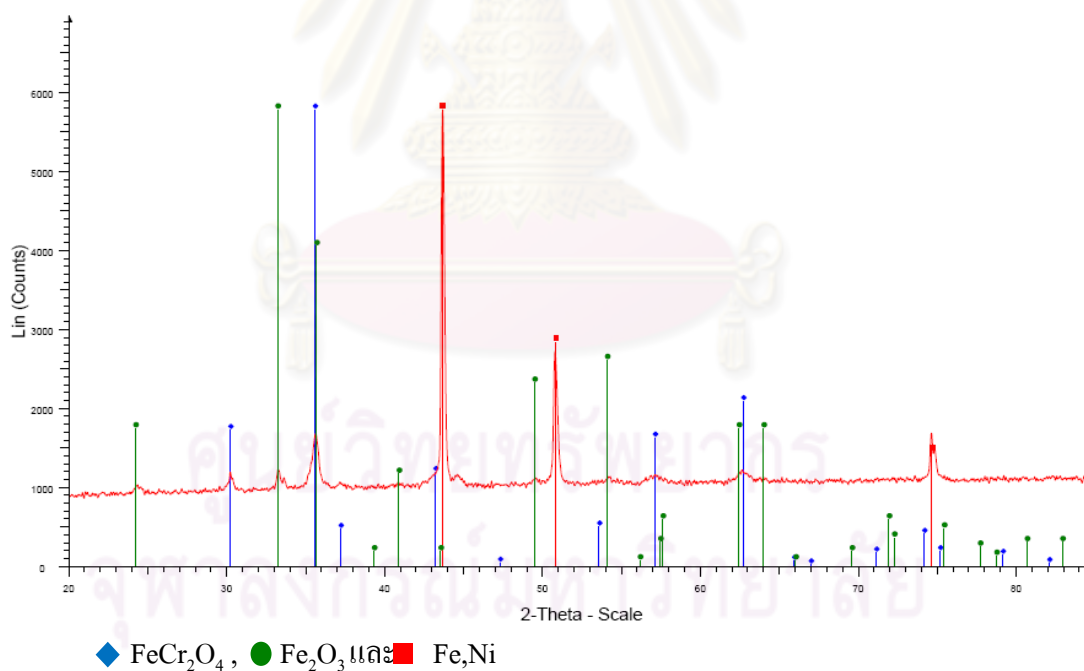


◆ FeCr_2O_4 , ● Fe_2O_3 และ ■ Fe,Ni

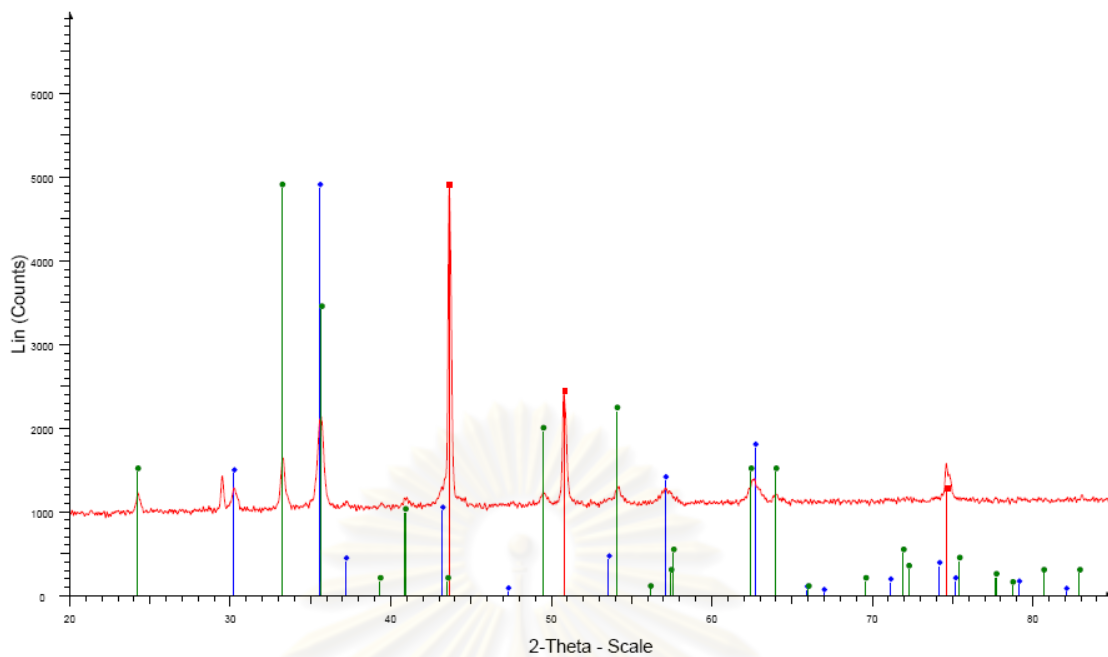
รูปที่ ๕-6 XRD สเปกตรัมของ เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 แผ่นม้วนรีดร้อนที่ผ่านการอบอ่อน อุณหภูมิ 1000^๐ซ เวลา 150 วินาที และ ออกซิเจนร้อยละ 4.63



รูปที่ ๗-7 XRD สเปกตรัมของ เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 แผ่นม้วนรีดร้อนที่ผ่านการอบอ่อน อุณหภูมิ 1000°C เวลา 150 วินาที และ ออกซิเจนร้อยละ 7.08

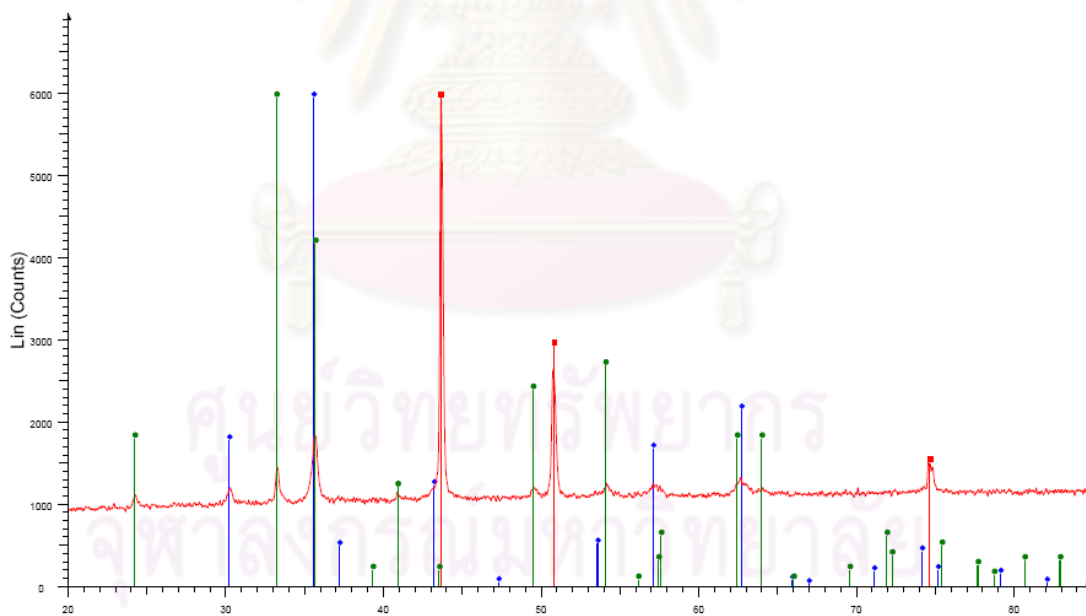


รูปที่ ๗-8 XRD สเปกตรัมของ เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 แผ่นม้วนรีดร้อนที่ผ่านการอบอ่อน อุณหภูมิ 1100°C เวลา 90 วินาที และ ออกซิเจนร้อยละ 1.01



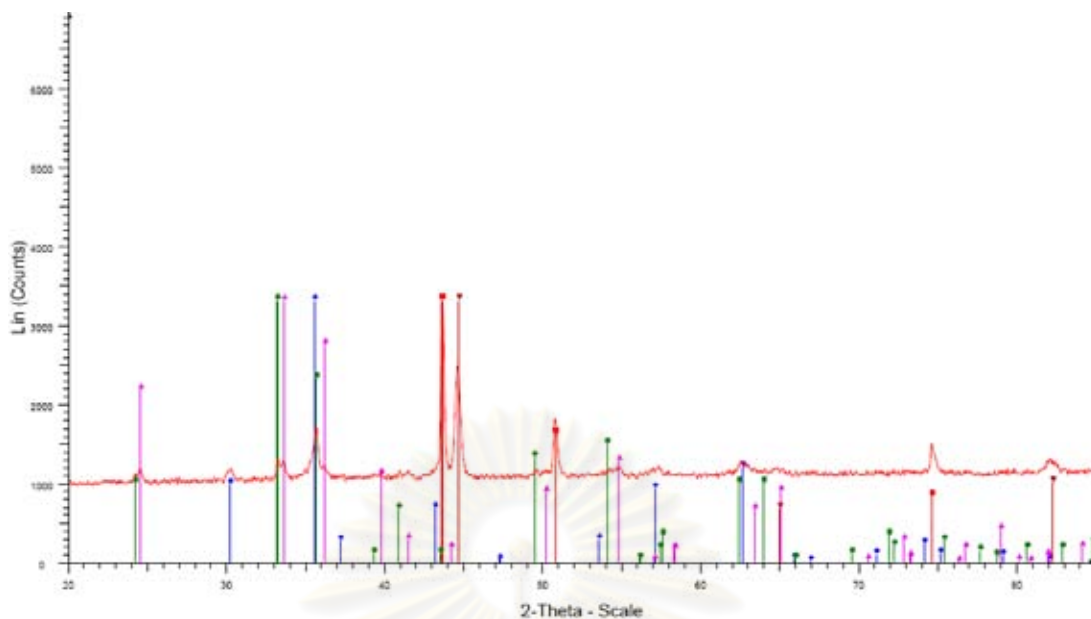
◆ FeCr_2O_4 , ● Fe_2O_3 และ ■ Fe,Ni

รูปที่ จ-9 XRD สเปกตรัมของ เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 แผ่นม้วนรีดร้อนที่ผ่านการอบอ่อน อุณหภูมิ 1100°ซ เวลา 90 วินาที และ ออกซิเจนร้อยละ 4.63



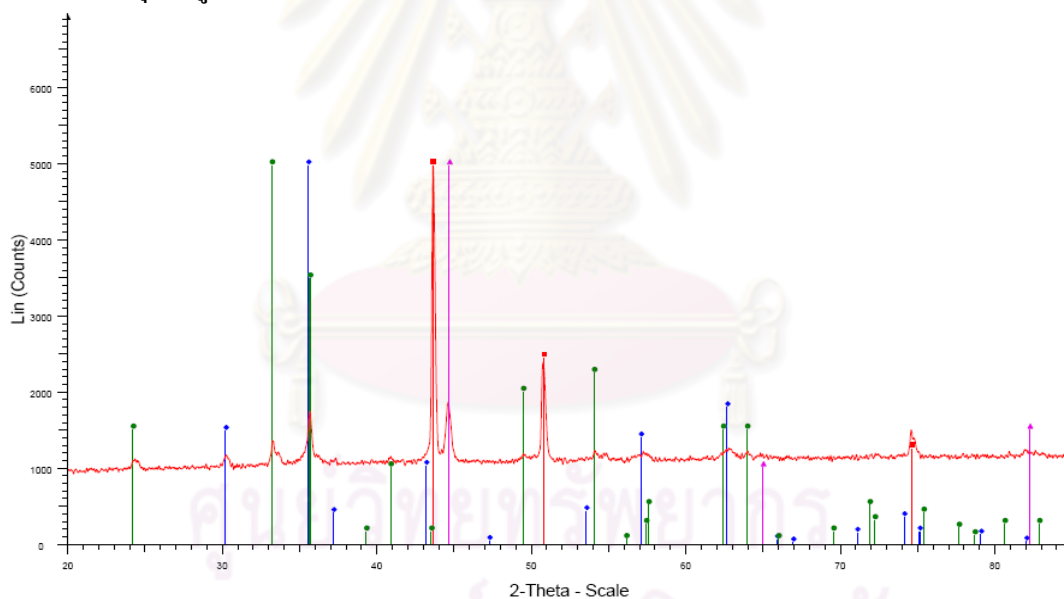
◆ FeCr_2O_4 , ● Fe_2O_3 และ ■ Fe,Ni

รูปที่ จ-10 XRD สเปกตรัมของ เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 แผ่นม้วนรีดร้อนที่ผ่านการอบอ่อน อุณหภูมิ 1100°ซ เวลา 90 วินาที และ ออกซิเจนร้อยละ 7.08



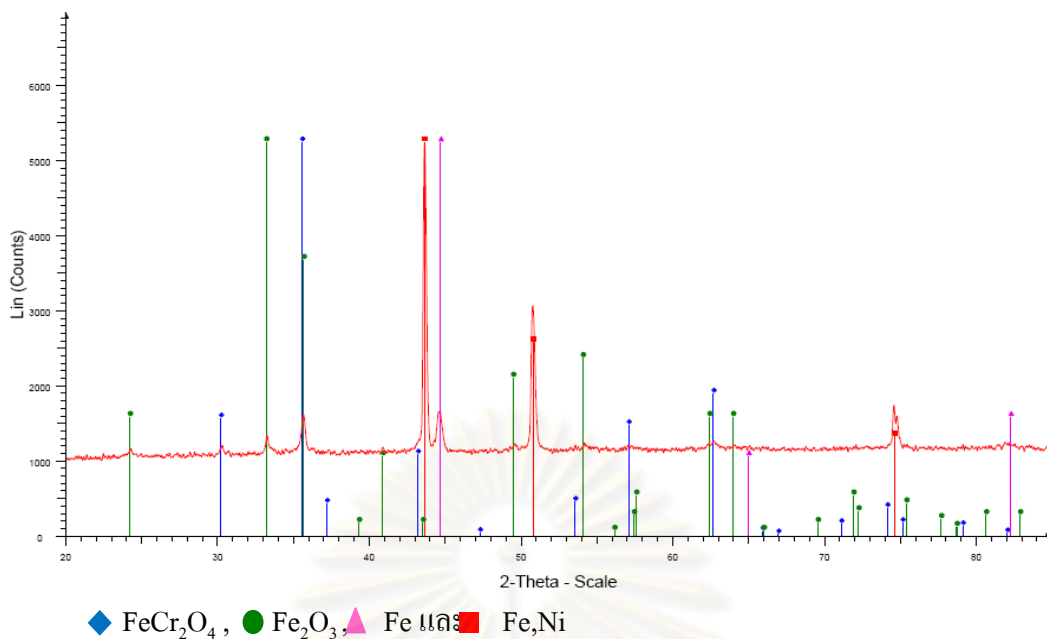
◆ FeCr_2O_4 , ● Fe_2O_3 , ▲ Cr_2O_3 และ ■ Fe, Ni

รูปที่ ๑-11 XRD สเปกตรัมของ เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 แผ่นม้วนรีดร้อนที่ผ่านการอบอ่อน อุณหภูมิ 1100°ซ เวลา 150 วินาที และ ออกซิเจนร้อยละ 1.01



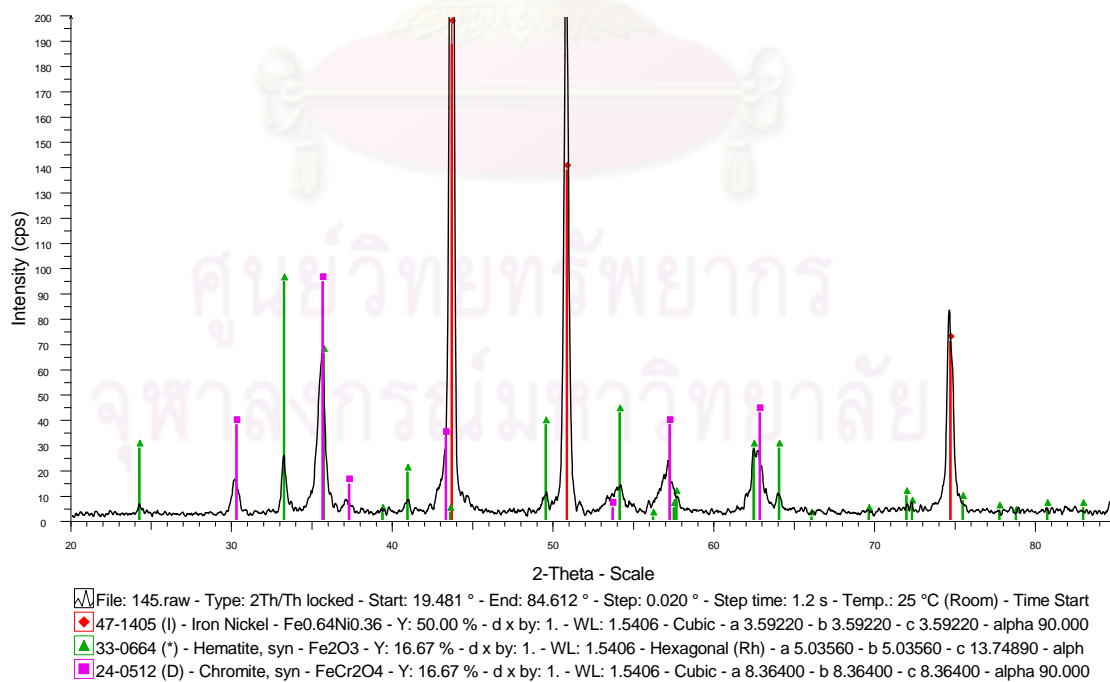
◆ FeCr_2O_4 , ● Fe_2O_3 , ▲ Fe และ ■ Fe, Ni

รูปที่ ๑-12 XRD สเปกตรัมของ เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 แผ่นม้วนรีดร้อนที่ผ่านการอบอ่อน อุณหภูมิ 1100°ซ เวลา 150 วินาที และ ออกซิเจนร้อยละ 4.63

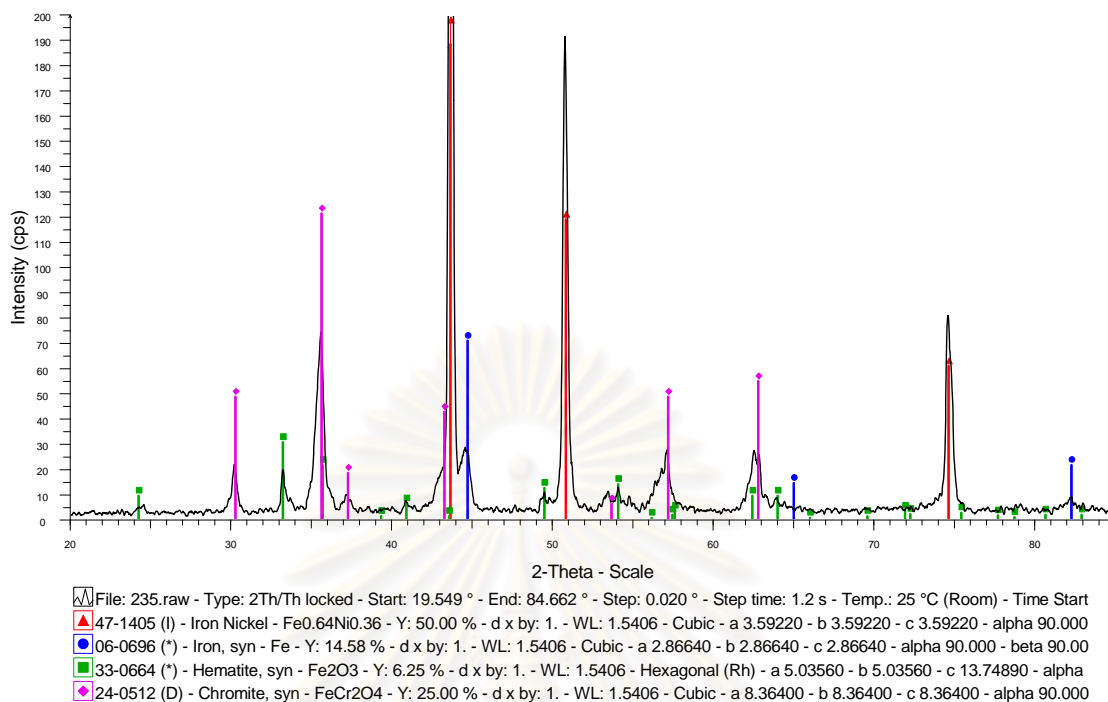


รูปที่ ๑-13 XRD สเปกตรัมของ เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 แผ่นม้วนรีดร้อนที่ผ่านการอบอ่อน อุณหภูมิ 1100^๐ซ เวลา 150 วินาที และ ออกซิเจนร้อยละ 7.08

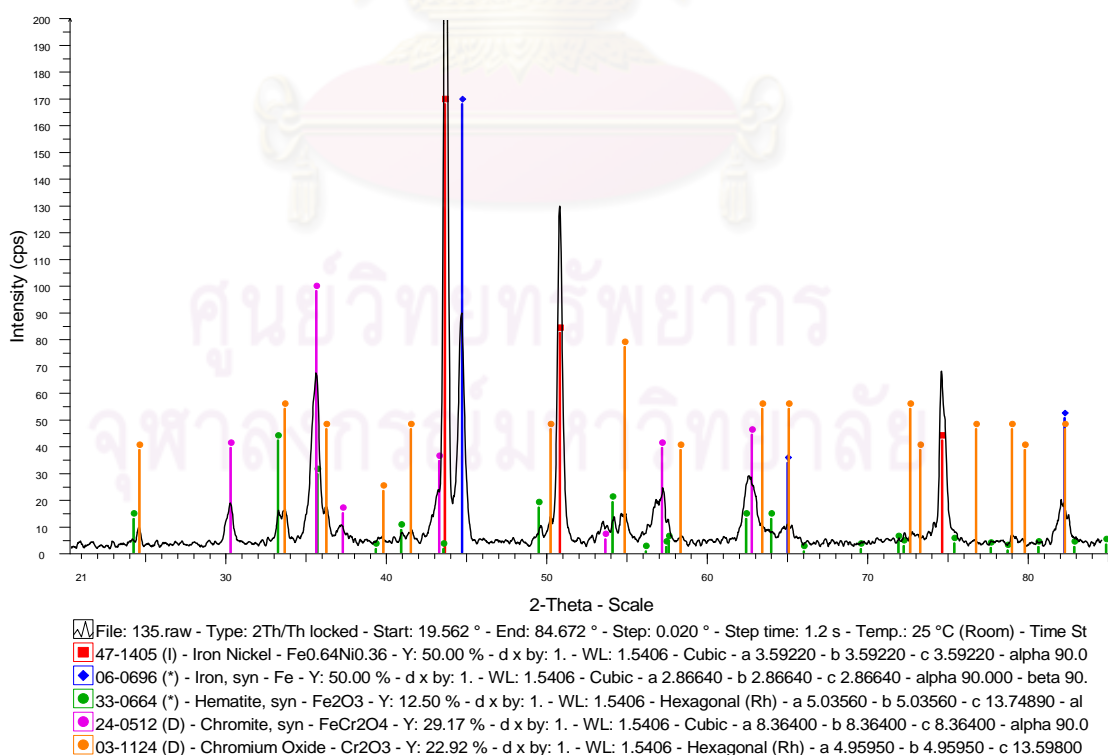
ผลการทดลองซ้ำ



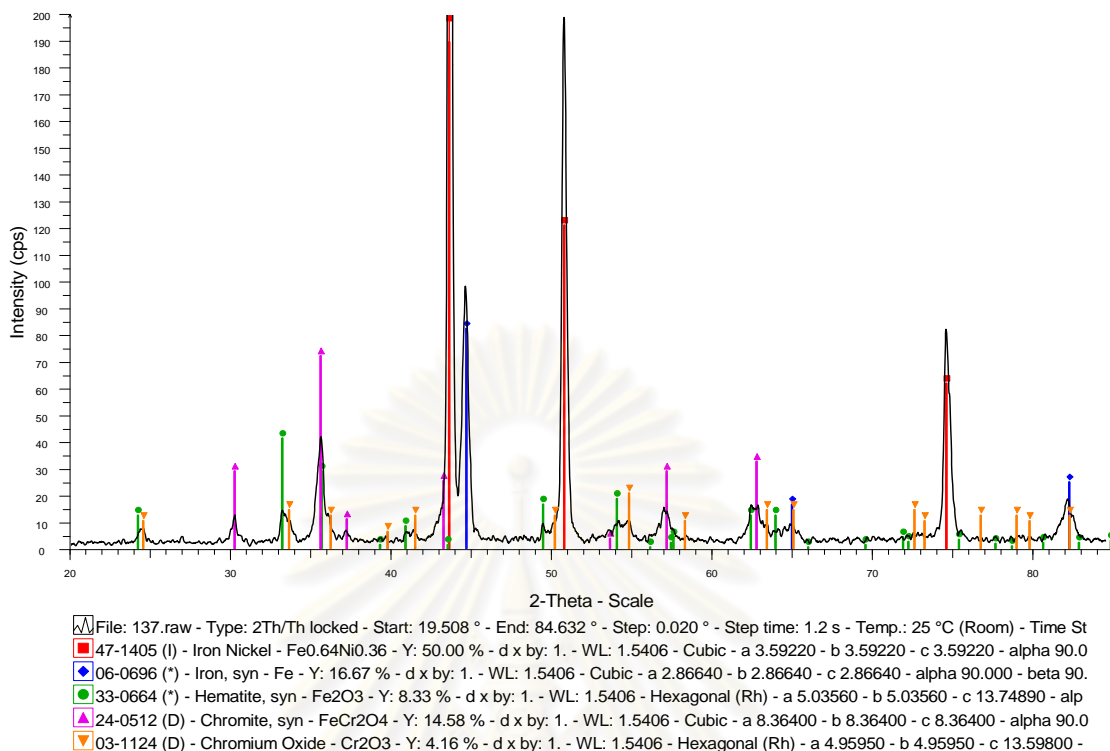
รูปที่ ๑-14 XRD สเปกตรัมของ เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 แผ่นม้วนรีดร้อนที่ผ่านการอบอ่อน อุณหภูมิ 1000^๐ซ เวลา 90 วินาที และ ออกซิเจนร้อยละ 1.01



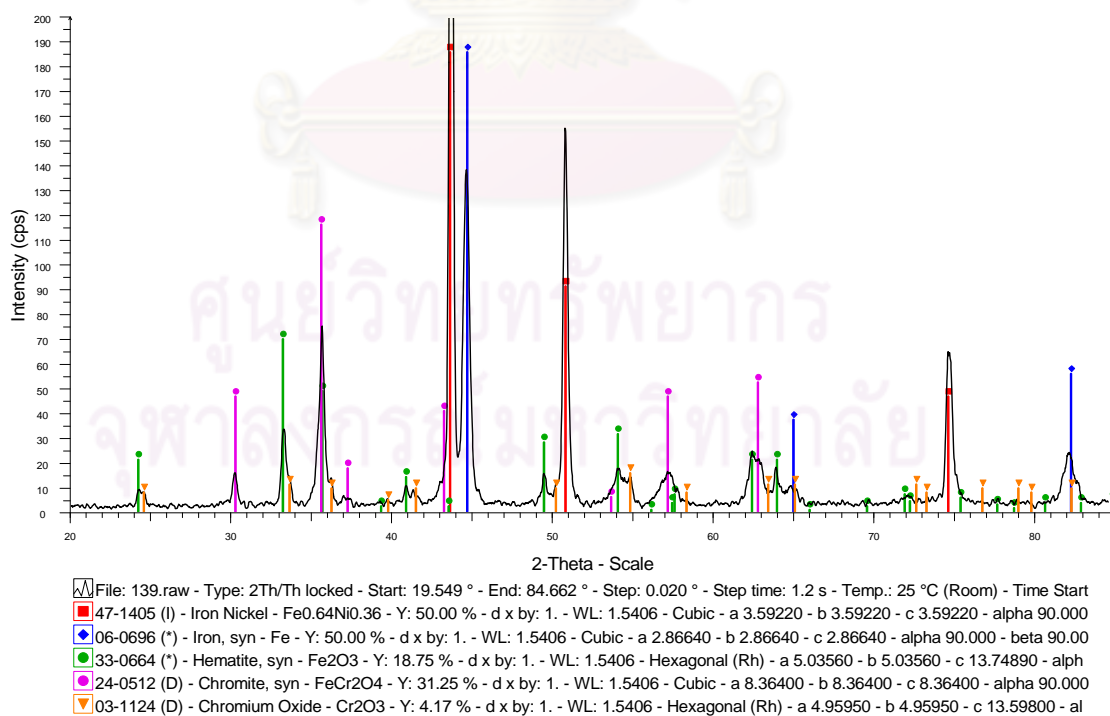
รูปที่ จ-15 XRD สเปกตรัมของ เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 แผ่นม้วนรีดร้อนที่ผ่านการอบอ่อน อุณหภูมิ 1000^oซ เวลา 150 วินาที และ ออกซิเจนร้อยละ 1.01



รูปที่ จ-16 XRD สเปกตรัมของ เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 แผ่นม้วนรีดร้อนที่ผ่านการอบอ่อน อุณหภูมิ 1100^oซ เวลา 150 วินาที และ ออกซิเจนร้อยละ 1.01



รูปที่ ๑-17 XRD สเปกตรัมของ เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 แผ่นม้วนรีดร้อนที่ผ่านการอบอ่อน อุณหภูมิ 1100^๐ซ เวลา 150 วินาที และ ออกซิเจนร้อยละ 4.63



รูปที่ ๑-18 XRD สเปกตรัมของ เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 แผ่นม้วนรีดร้อนที่ผ่านการอบอ่อน อุณหภูมิ 1100^๐ซ เวลา 150 วินาที และ ออกซิเจนร้อยละ 7.08

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ-นามสกุล	ปีพมา แนวกันยา
วัน-เดือน-ปีเกิด	วันที่ 1 เมษายน 2528
ที่อยู่	25/3 ถ.มงคลบูรพา ต.ในเมือง อ.เมือง จ.ยโสธร 35000
สถานที่เกิด	ยโสธร
วุฒิการศึกษา	สำเร็จหลักสูตรมัธยมศึกษา ปีการศึกษา 2546 จากโรงเรียนยโสธรพิทยาคม สำเร็จหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) ปีการศึกษา พ.ศ. 2550 สาขาวิชาวิศวกรรมเคมีและชีวภาพ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี เข้าศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) ภาคการศึกษาตอนต้น ปีการศึกษา พ.ศ. 2550 ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุน ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2550-2551 โครงการทุนวิจัยมหาบัณฑิต สกว.สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 2551

ศูนย์วิทยพัชร์พยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย