

ผลของบรรยากาศในกระบวนการอบอ่อนแบบกะต่อสเกลออกไซด์และการกัดผิวด้วยกรดของเหล็กกล้า
ไร้สนิมเฟอร์ไรต์แผ่นรีดร้อนเกรด AISI 430



นายณัฐพจน์ เกษมโกเมศ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการและวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Effect of Batch Annealing Atmosphere on Oxide Scale and Pickling Behavior of Hot
Rolled AISI 430 Stainless Steel

Mr. Nattapoj Kasemkomase



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Metallurgical and Materials

Engineering

Department of Metallurgical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2016

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลของบรรยากาศในกระบวนการอบอ่อนแบบกะต่อสเกล
ออกไซด์และการกัดผิวด้วยกรดของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์
ไรต์แผ่นรีดร้อนเกรด AISI 430

โดย

นายณัฐพจน์ เกษมโกเมศ

สาขาวิชา

วิศวกรรมโลหการและวัสดุ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ปฐมา วิสุทธิพิทักษ์กุล)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ปัญญวิชร์ ว่างยาว)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร.เอกรัตน์ ไวยนิตย์)

ณัฐพจน์ เกษมโกเมศ : ผลของบรรยากาศในกระบวนการอบอ่อนแบบกะต่อสเกลออกไซด์ และการกัดผิวด้วยกรดของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอไรต์แผ่นรีดร้อนเกรด AISI 430 (Effect of Batch Annealing Atmosphere on Oxide Scale and Pickling Behavior of Hot Rolled AISI 430 Stainless Steel) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ, หน้า.

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ การศึกษาผลของบรรยากาศการอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศปกติ ไฮโดรเจน และไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 850°C เป็นเวลา 20, 25 และ 30 ชั่วโมง ต่อการเกิดออกไซด์ และการกัดกรดของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอไรต์รีดร้อนเกรด 430 ใช้เทคนิค Grazing incidence x-ray diffraction (GIXRD) และ energy dispersive X-ray (EDX) ในการตรวจสอบชนิดของสเกลออกไซด์ที่เกิดขึ้นที่ผิวชิ้นงาน ใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงตรวจสอบความหนาของชั้นออกไซด์ ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดศึกษาลักษณะออกไซด์ ใช้โปรแกรมวิเคราะห์ภาพ PANASIS ในการวิเคราะห์ปริมาณสเกลออกไซด์เหลือค้างที่ผิว ผลวิเคราะห์ด้วยเทคนิค GIXRD และ EDX พบสเกลออกไซด์ชั้นนอกที่เป็นรูปพูนชนิด Fe_3O_4 และออกไซด์ชั้นในที่หนาแน่นชนิด $FeCr_2O_4$ บนชิ้นงานก่อนนำไปอบอ่อนแบบกะ ชิ้นงานที่อบอ่อนแบบกะในบรรยากาศปกติ พบสเกลออกไซด์ชั้นนอกที่เป็นรูปพูนชนิด Fe_2O_3 และออกไซด์ชั้นในที่หนาแน่นชนิด $(Fe,Cr)_2O_3$ ชิ้นงานที่อบอ่อนแบบกะในบรรยากาศไฮโดรเจน พบสเกลออกไซด์ชั้นนอกที่เป็นรูปพูนชนิด Fe_3O_4 และออกไซด์ชั้นในที่หนาแน่นชนิด $FeCr_2O_4$ ชิ้นงานที่อบอ่อนแบบกะในบรรยากาศไนโตรเจน พบสเกลออกไซด์ชั้นนอกที่เป็นรูปพูนชนิด Fe_3O_4 และออกไซด์ชั้นในที่หนาแน่นชนิด $(Fe,Cr)_2O_3$, $FeCr_2O_4$ หลังจากการอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศไนโตรเจนพบความหนาของชั้นสเกลออกไซด์ที่เป็นรูปพูนมีค่ามากที่สุดรองลงมาคือหลังอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศปกติ และไฮโดรเจนตามลำดับ หลังจากการอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศปกติความหนาของชั้นสเกลออกไซด์ที่หนาแน่นมีค่ามากที่สุดรองลงมาคือหลังอบอ่อนแบบกะในไนโตรเจน และไฮโดรเจนตามลำดับ ภายหลังจากการกัดกรดพบออกไซด์เหลือค้างมากที่สุดชิ้นงานที่อบอ่อนแบบกะในบรรยากาศปกติ รองลงมาคือ ชิ้นงานที่อบอ่อนแบบกะในไนโตรเจน และไฮโดรเจนตามลำดับ หลังกัดกรदन้าหนักที่เปลี่ยนแปลงไปของชิ้นงานที่อบอ่อนแบบกะในบรรยากาศไฮโดรเจนมีค่ามากที่สุดรองลงมาคือ ชิ้นงานที่อบอ่อนแบบกะในบรรยากาศปกติ และไนโตรเจนตามลำดับ ตรวจพบการกัดกร่อนตามขอบเกรนหลังการกัดกรดชิ้นงานที่อบอ่อนแบบกะในบรรยากาศปกติ และไนโตรเจน

ภาควิชา วิศวกรรมโลหการ ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการและวัสดุ ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2559

5770169021 : MAJOR METALLURGICAL AND MATERIALS ENGINEERING

KEYWORDS: BATCH ANNEALING / OXIDE SCALE / HOT ROLLING / AISI 430 / PICKLING

NATTAPOJ KASEMKOMASE: Effect of Batch Annealing Atmosphere on Oxide Scale and Pickling Behavior of Hot Rolled AISI 430 Stainless Steel. ADVISOR: ASSOC. PROF. GOBBOON LOTHONGKUM, Ph.D., pp.

The main purpose is to study the effects of batch annealing in air, hydrogen and nitrogen at 850°C for 20, 25 and 30 hr. on oxide scale formation and pickling of the AISI 430 hot-rolled stainless steel. Grazing incidence x-ray diffraction (GIXRD) and energy dispersive X-ray (EDX) were used to characterize oxide scales after batch annealing process. The oxide scale thickness was observed by optical microscope. The oxide scale morphologies of the studied specimens were investigated by scanning electron microscopy (SEM). After pickling, the remaining oxide was determined by using image PANASIS program. Results from GIXRD and EDX showed the outer porous Fe_3O_4 oxide and the inner compact FeCr_2O_4 oxide on the as-received specimens and after batch annealing in hydrogen specimens. After batch annealing in air, the outer porous Fe_2O_3 and inner compact $(\text{Fe,Cr})_2\text{O}_3$ oxides were found. After batch annealing in nitrogen, the outer porous Fe_3O_4 oxide, and inner compact $(\text{Fe,Cr})_2\text{O}_3$ and FeCr_2O_4 oxides were found. The outer porous oxide scale after batch annealing in nitrogen is thicker than that after batch annealing in air and hydrogen, respectively. The inner compact oxide scale after batch annealing in air is thicker than that after batch annealing in nitrogen and hydrogen, respectively. Weight change after batch annealing in air is higher than that after batch annealing in nitrogen and hydrogen, respectively. The remaining oxide scales after pickling of batch annealing in air is higher than that batch annealing in nitrogen and hydrogen, respectively. After pickling, weight change of batch annealing in hydrogen is higher than that batch annealing in air and nitrogen, respectively. After pickling, intergranular corrosion was observed in specimens after batch annealing in air and nitrogen.

Department: Metallurgical Engineering Student's Signature

Field of Study: Metallurgical and Materials Engineering Advisor's Signature

Materials Engineering

Academic Year: 2016

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดีจากความช่วยเหลือของทั้งองค์กร และบุคคลต่างๆ ทางผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางการแก้ไขปัญหาต่างๆ รวมถึงคำแนะนำจากรองศาสตราจารย์ ดร.ปฐมมา วิสุทธิพิทักษ์กุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปัญญาวัชร ว่างยาว และดร.เอกรัตน์ ไวยนิตย์ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) ของสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ให้เงินทุนสนับสนุนในการทำวิจัยตามสัญญาเลขที่ MSD 5710005 และบริษัทโพสโค-ไทยน็อคซ์ จำกัด สำหรับการเข้าร่วมสนับสนุนโครงการทุนวิจัยอนุเคราะห์สถานที่ เครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย และขอขอบคุณ คุณคุณวิฑูรย์ พรศิริ ประเสริฐ คุณเกียรติศักดิ์ ลีลาพงศ์อนันต์ คุณอรนันต์ อินตาพรหม คุณนิภา ประเวชไพโร คุณณัฐฉล อุดมปณิธิ และคุณศิรินันท์ วิทยาสกุลชัย สำหรับการช่วยเหลือในด้านต่างๆ พร้อมทั้งให้คำแนะนำในงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ คุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งกรุณาสละเวลาให้ความรู้ คำแนะนำ ความช่วยเหลือ การแก้ปัญหา ตลอดจนเงินเอื้อเพื่อเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ตลอดการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่สำนักงาน (ธุรการ) ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการใช้งานสถานที่ และอุปกรณ์ต่างๆ ของภาควิชาฯ และช่วยเหลือในการติดต่อประสานงานต่างๆ

ขอขอบพระคุณ นิสิตปริญญาโทและเอก ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งกรุณาสละเวลา ให้ความรู้ คำแนะนำ และความช่วยเหลือตลอดการทำวิจัย

ท้ายที่สุด ขอขอบคุณครอบครัวผู้เป็นที่รักและผู้ให้กำลังใจตลอดการทำงานวิจัยด้วยดีมาตลอด

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 จุดประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 บริหารศน์วรรณกรรม.....	4
2.1 กระบวนการผลิตเหล็กกล้าไร้สนิม.....	4
2.2 โลหะวิทยาของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟร์ไรต์เกรด AISI 430.....	4
2.3 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟร์ไรต์เกรด AISI 430 หลังจากผ่านกระบวนการ รีดร้อน.....	5
2.4 การอบอ่อนแบบกะ Batch Annealing.....	5
2.5 การเกิดออกซิเดชันของโลหะ.....	6
2.6 เทอร์โมไดนามิกส์ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดสเกลออกไซด์.....	6
2.7 ออกซิเดชันของโลหะผสม Fe-Cr.....	8
2.8 สเกลออกไซด์ของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟร์ไรต์เกรด AISI 430.....	10
2.9 การกำจัดสเกลออกไซด์.....	11
2.9.1. การกำจัดสเกลออกไซด์ด้วยแรงกล (mechanical descaling).....	11
2.9.2. การกัตกรด (pickling).....	12
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	13

บทที่ 3 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการทดลอง.....	18
3.1 วัตถุประสงค์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	18
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์	18
3.3 เครื่องมือวิเคราะห์การทดลอง.....	18
3.4 ขั้นตอนการทดลอง	19
3.4.1 การเตรียมชิ้นงานก่อนการอบอ่อนแบบกะ.....	19
3.4.2 การจำลองการอบอ่อนแบบกะ.....	19
3.4.3 การกำจัดสเกลออกไซด์ออกด้วยกระบวนการยิงเม็ดเหล็ก (Shot blasting).....	21
3.4.4 การเตรียมชิ้นงานก่อนกัดกรด (Pickling).....	21
3.4.5 การขจัดสเกลออกไซด์ออกด้วยการกัดกรด.....	21
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	23
4.1 ผลการวิเคราะห์สเกลออกไซด์บนชิ้นที่ผ่านการรีดร้อนก่อนอบอ่อนแบบกะ.....	23
4.2 ผลการวิเคราะห์สเกลออกไซด์ของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะใน บรรยากาศไฮโดรเจนจากกระบวนการของบริษัท.....	26
4.3 ผลการวิเคราะห์สเกลออกไซด์ของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะใน บรรยากาศต่างๆ.....	28
4.4 ผลการวิเคราะห์พื้นผิวหลังกัดกรดของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะใน บรรยากาศต่างๆ.....	38
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	45
.....	46
รายการอ้างอิง	46
ภาคผนวก ก.....	50
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	127

สารบัญรูป

บทที่ 2	
รูปที่ 2.1 แผนภูมิสมดุลของเหล็กกับคาร์บอนที่มีโครเมียม 17 เปอร์เซ็นต์โดยมวล	5
รูปที่ 2.2 แผนภูมิ Ellingham แสดงการเปลี่ยนแปลงของพลังงานอิสระกิบส์เทียบกับอุณหภูมิ สำหรับออกไซด์ต่างๆ	8
รูปที่ 2.3 อัตราการเกิดออกซิเดชันกับปริมาณโครเมียมในโลหะผสมเหล็กกับโครเมียม.....	9
รูปที่ 2.4 ออกซิเดชันของโลหะผสมเหล็กกับโครเมียม	10
รูปที่ 2.5 ก.ผลวิเคราะห์ด้วย EDX line scan ของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 430 หลังจากอบที่อุณหภูมิ 800°C 1000 ชั่วโมง ในบรรยากาศ 100 เปอร์เซ็นต์ H ₂ O	10
รูปที่ 2.5 ข.ผลวิเคราะห์ด้วย EDX line scan ของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 430 หลังจากอบที่อุณหภูมิ 800°C 1000 ชั่วโมง ในบรรยากาศ 100 เปอร์เซ็นต์ H ₂ O.....	10
รูปที่ 2.6 การตัดให้สเกลแตก	12
รูปที่ 2.7 การกัดกรดโดยใช้กระแสไฟฟ้า (Electrolytic pickling)	13
รูปที่ 2.8 โครงสร้างจุลภาคตัดขวางของโลหะผสมระหว่างเหล็กกับโครเมียม 20 เปอร์เซ็นต์โดย มวล อบที่อุณหภูมิ 1000 °C ในบรรยากาศที่มี H ₂ O 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรเป็นเวลา 20 ชั่วโมง.....	14
รูปที่ 2.9 กลไกการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูงของโลหะผสมเหล็กกับโครเมียมในบรรยากาศ ออกซิเจนที่มีความชื้น.....	15
รูปที่ 2.10 น้ำหนักที่หายไปของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟร์ไรต์เกรด 430 หลังกัดกรดด้วยออกซิแดนต์ ต่างๆ.....	16
รูปที่ 2.11 ภาพถ่ายพื้นผิวชิ้นงานของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟร์ไรต์เกรด 430 หลังกัดกรดด้วย ออกซิ แดนต์ต่างๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	17
บทที่ 3	
รูปที่ 3.1 ชิ้นงานคอยล์ดำเหล็กกล้าไร้สนิมเฟร์ไรต์	19
รูปที่ 3.2 กราฟอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการอบอ่อนแบบกะ	20
รูปที่ 3.3 เครื่องยิงเม็ดเหล็ก	21

บทที่ 4

รูปที่ 4.1 พื้นผิวของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนก่อนอบอ่อนแบบกะถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	23
รูปที่ 4.2 รูปภาคตัดขวางของสเกลออกไซด์ที่ผิวที่ผ่านการรีดร้อนก่อนอบอ่อนแบบกะถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง	24
รูปที่ 4.3 ผลวิเคราะห์ GIXRD ของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนก่อนอบอ่อนแบบกะ	25
รูปที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ชั้นออกไซด์ด้วย EDS line scan ของชิ้นที่ผ่านการรีดร้อนก่อนอบอ่อนแบบกะ	25
รูปที่ 4.5 พื้นผิวของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศไฮโดรเจนจากกระบวนการของบริษัทถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	26
รูปที่ 4.6 รูปภาคตัดขวางของสเกลออกไซด์ของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศไฮโดรเจนจากกระบวนการของบริษัทถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง	27
รูปที่ 4.7 ผลวิเคราะห์ GIXRD ของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนในแล้วอบอ่อนแบบกะบรรยากาศไฮโดรเจนจากกระบวนการของบริษัท	28
รูปที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์ชั้นออกไซด์ด้วย EDS line scan ของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศไฮโดรเจนจากกระบวนการของบริษัท	28
รูปที่ 4.9 ชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศปกติ, ไนโตรเจน และไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิ 850°C เป็นระยะเวลา 20, 25 และ 30 ชั่วโมง	29
รูปที่ 4.10 พื้นผิวของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะ ในบรรยากาศปกติ, ไนโตรเจน และไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิ 850°C เป็นระยะเวลา 20, 25 และ 30 ชั่วโมง ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	30
รูปที่ 4.11 ภาคตัดขวางของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะ ในบรรยากาศปกติ, ไนโตรเจน และไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิ 850°C เป็นระยะเวลา 20, 25 และ 30 ชั่วโมง ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง	31
รูปที่ 4.12 ผลวิเคราะห์ GIXRD ของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศปกติที่อุณหภูมิ 850°C เวลา 20, 25 และ 30 ชั่วโมง	31

รูปที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์ชั้นออกไซด์ด้วย EDS line scan ของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศปกติ 30 ชั่วโมง.....	32
รูปที่ 4.14 ผลวิเคราะห์ GIXRD ของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศไฮโดรเจนที่อุณหภูมิ 850°C เวลา 20, 25 และ 30 ชั่วโมง	33
รูปที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์ชั้นออกไซด์ด้วย EDS line scan ของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะในไฮโดรเจน 30 ชั่วโมง.....	33
รูปที่ 4.16 ผลวิเคราะห์ GIXRD ของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 850°C เวลา 20, 25 และ 30 ชั่วโมง.....	34
รูปที่ 4.17 ผลการวิเคราะห์ชั้นออกไซด์ด้วย EDS line scan ของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะในไนโตรเจน 30 ชั่วโมง.....	34
รูปที่ 4.18 น้ำหนักที่เปลี่ยนไประหว่างหลังและก่อนอบอ่อนแบบกะ ในบรรยากาศปกติ, ไนโตรเจน และไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิ 850°C เป็นระยะเวลา 20, 25 และ 30 ชั่วโมง	36
รูปที่ 4.19 ภาพพื้นผิวชิ้นงานหลังจากกัดกรดของชิ้นงานผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศปกติ, ไฮโดรเจน และไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 850°C เป็นระยะเวลา 20, 25 และ 30 ชั่วโมง ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง.....	41
รูปที่ 4.20 น้ำหนักที่เปลี่ยนไประหว่างหลังและก่อนกัดกรดของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศปกติ, ไนโตรเจน และไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิ 850°C เป็นระยะเวลา 20, 25 และ 30 ชั่วโมง	42
รูปที่ 4.21 พื้นผิวของชิ้นงานหลังกัดกรดของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศปกติ, ไนโตรเจน และไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิ 850°C เป็นระยะเวลา 20, 25 และ 30 ชั่วโมง ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	43

สารบัญตาราง

บทที่ 2	
ตารางที่ 2.1	ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 430 4
บทที่ 3	
ตารางที่ 3.1	พารามิเตอร์ที่ใช้ในการอบอ่อนแบบกะ..... 20
ตารางที่ 3.2	สภาวะการกัดกรด..... 22
บทที่ 4	
ตารางที่ 4.1	ความหนาของชั้นออกไซด์ที่ผ่านการรีดร้อนก่อนและหลังการอบอ่อนแบบกะ..... 37
ตารางที่ 4.2	เปอร์เซ็นต์พื้นที่ของสเกลออกไซด์เหลือค้างที่ผิวต่อพื้นที่ผิวหลังจากนำชิ้นงานผ่าน การรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศต่างๆ ไปกัดกรด 42

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของงานวิจัย

การผลิตเหล็กกล้าไร้สนิมเพอร์ไรต์แผ่นรีดเย็นจากเหล็กกล้าไร้สนิมเพอร์ไรต์แผ่นรีดร้อน หรือ คอยล์ดำ ก่อนการรีดเย็นต้องอบอ่อนคอยล์ดำเพื่อปรับโครงสร้างจุลภาคให้เหมาะสมต่อ กระบวนการรีดเย็น และลดข้อด้อยของสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิมเพอร์ไรต์แผ่นรีดเย็น โดยเฉพาะการขึ้นรูป [1, 3, 4]

ในกระบวนการอบอ่อนคอยล์ดำเหล็กกล้าไร้สนิมเพอร์ไรต์เกรด AISI 430 จะใช้การอบอ่อนแบบกะที่อุณหภูมิ 850°C เป็นเวลา 23 – 30 ชั่วโมง ขึ้นอยู่กับน้ำหนักของคอยล์ดำ บรรยากาศในการอบอ่อนมี 3 แบบคือ อากาศปกติ แก๊สไนโตรเจน และแก๊สไฮโดรเจน บรรยากาศแต่ละชนิดมีจุดเด่นและด้อยแตกต่างกัน เช่น อากาศปกติไม่สิ้นเปลืองค่าแก๊ส บรรยากาศแก๊สไนโตรเจนมีราคาถูก แต่มีประสิทธิภาพในการพาความร้อนด้อยกว่าบรรยากาศแก๊สไฮโดรเจน ดังนั้นบรรยากาศแก๊สไนโตรเจนจึงต้องใช้เวลาในการอบอ่อนนานกว่าการใช้บรรยากาศแก๊สไฮโดรเจน จากผลการศึกษาเบื้องต้นในเชิงสถิติ [5] พบว่า ชนิดของบรรยากาศมีผลต่อคุณภาพผิวของผลิตภัณฑ์ภายหลังการขจัดสเกลออกไซด์ออกด้วยกระบวนการทางกลและการกัดกรด (Mechanical descaling and pickling) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาผลของบรรยากาศที่ใช้ในการอบอ่อนแบบกะของคอยล์ดำเหล็กกล้าไร้สนิมเพอร์ไรต์เกรด AISI 430 ต่อสเกลออกไซด์ และการกัดกรด เพื่อหาบรรยากาศการอบอ่อนแบบกะที่เหมาะสมทั้งในการกัดกรด และราคาต้นทุนของกระบวนการอบอ่อนแบบกะ

การศึกษาการเกิดสเกลออกไซด์หรือลักษณะการเกิดออกซิเดชันบนผิวเหล็กกล้าไร้สนิมมีมานาน โดยปกติจะศึกษาในอากาศซึ่งมีออกซิเจน 21 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เพราะเป็นสภาพแวดล้อมทั่วไป หรือศึกษาผลของปริมาณออกซิเจนที่น้อยกว่า 21 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และมีไอน้ำผสมในบรรยากาศแก๊สเฉื่อยอาร์กอนหรือไนโตรเจน [1, 6-10] สเกลออกไซด์บนผิวเหล็กกล้าไร้สนิมเพอร์ไรต์เกรด 430 อาจประกอบด้วย Cr_2O_3 , Fe_2O_3 และ spinel ของ $FeO \cdot Fe_{2-x}Cr_xO_3$ ($0 < x < 2$) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของบรรยากาศ เช่น ปริมาณออกซิเจน ไอน้ำ อุณหภูมิ และอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ [1, 7-12] องค์ประกอบสเกลออกไซด์ที่แตกต่างกัน

จะมีผลต่อการขจัดออก โดยเฉพาะการกัดกรดที่อาจต้องใช้ชนิดของกรด ปริมาณของกรด เวลา และอุณหภูมิที่ต่างกัน เพื่อขจัดสเกลออกไซด์ออกได้หมด

สำหรับผลของแก๊สไนโตรเจนโดยส่วนใหญ่จะศึกษาผลของการผสมของธาตุไนโตรเจนในเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมต่อสมบัติกลและการกัดกร่อน [13-17] จากการค้นคว้าเอกสารทางวิชาการ ยังไม่พบการศึกษาผลของแก๊สไนโตรเจนและแก๊สไฮโดรเจนต่อการเกิดสเกลออกไซด์โดยตรง แก๊สทั้งสองน่าจะมผลทางอ้อมมากกว่า เช่น มีผลต่อการลดปริมาณออกซิเจนในบรรยากาศ ทำให้ปริมาณออกซิเจนในสเกลออกไซด์ลดลง การกัดกรดจึงอาจทำได้ง่ายขึ้น

โครงการนี้จะศึกษาผลของบรรยากาศปกติ แก๊สไนโตรเจน และแก๊สไฮโดรเจน ในการอบอ่อนแบบกะเหล็กกล้าไร้สนิมเพอร์ไรต์เกรด AISI 430 ที่อุณหภูมิประมาณ 850°C ต่อการกัดกรดสเกลออกไซด์ของคอยล์ดำเหล็กกล้าไร้สนิมเพอร์ไรต์เกรด AISI 430 ที่สภาวะเดียวกันกับการกัดกรดที่บริษัทใช้

1.2 จุดประสงค์ของงานวิจัย

ศึกษาผลของบรรยากาศปกติ แก๊สไนโตรเจน และแก๊สไฮโดรเจน ในกระบวนการอบอ่อนแบบกะต่อสเกลออกไซด์ของเหล็กกล้าไร้สนิมเพอร์ไรต์เกรด AISI 430 และการกัดกรด

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. จำลองการอบอ่อนแบบกะของเหล็กกล้าไร้สนิมเพอร์ไรต์แผ่นรีดร้อนเกรด AISI 430 ที่อุณหภูมิประมาณ 850°C ภายใต้บรรยากาศต่างๆ ได้แก่ อากาศปกติ แก๊สไนโตรเจน และแก๊สไฮโดรเจน โดยใช้ระยะเวลาในการอบอ่อนแบบกะ 20, 25 และ 30 ชั่วโมงด้วยเตานอนทรงท่อ (horizontal tube furnace)

2. จากข้อ 1. ศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาคของสเกลออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

3. จากข้อ 1. ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของสเกลออกไซด์ด้วย Grazing incidence x-ray diffractometer (GIXRD) และ Energy Dispersive Spectroscopy (EDS)

4. จากข้อ 1. ศึกษาพฤติกรรมการถูกกัดด้วยกรด (Pickling behavior) ของสเกลออกไซด์ที่เกิดขึ้น ตามสภาวะที่ บริษัทใช้อยู่ในกระบวนการผลิต

5. จากข้อ 3. ศึกษาคุณภาพของผิวเหล็กกล้าไร้สนิมเพอร์ไรต์เกรด AISI 430 ภายหลังจากขจัดสเกลออกไซด์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบลักษณะของสเกลออกไซด์ของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอโรไครด AISI 430 ภายใต้บรรยากาศอากาศปกติ แก๊สไนโตรเจน และแก๊สไฮโดรเจน ของกระบวนการอบอ่อนแบบกะ
2. ทราบผลของอากาศปกติ แก๊สไนโตรเจน และแก๊สไฮโดรเจน ในกระบวนการอบอ่อนแบบกะ ที่มีต่อพฤติกรรมการกัดกรวดของสเกลออกไซด์ที่เกิดขึ้น ตลอดจนคุณภาพผิวหลังการขัดสเกลออกไซด์
3. ได้ข้อมูลการเลือกบรรยากาศที่เหมาะสมทั้งในแง่การกัดกรวด และต้นทุนของกระบวนการอบอ่อนแบบกะเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอโรไครด AISI 430



บทที่ 2

ปริทรรศน์วรรณกรรม

2.1 กระบวนการผลิตเหล็กกล้าไร้สนิม

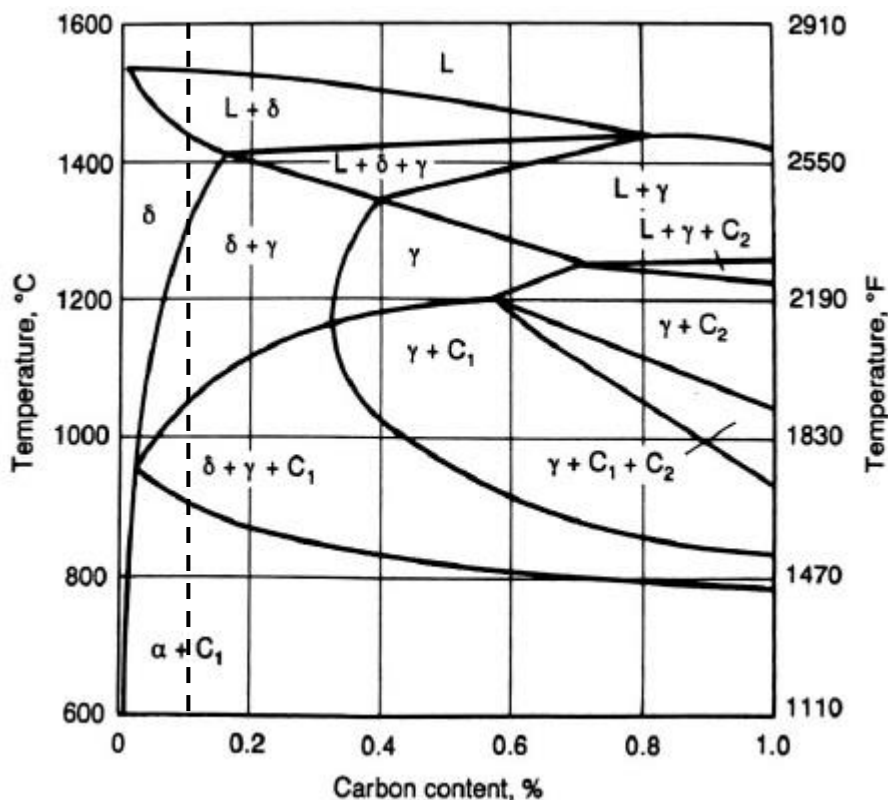
กระบวนการผลิตเหล็กกล้าไร้สนิมโดยทั่วไปจะเริ่มจากหลอมเศษเหล็กด้วย Electric arc furnace แล้วทำการ Decarburization ด้วยวิธี AOD (Argon-Oxygen decarburization) หลังจากนั้นทำ Ladle refining คือการปรับปรุงส่วนผสมทางเคมีขณะที่น้ำโลหะที่หลอมเหลวอยู่ใน Ladle ให้มีส่วนผสมเป็นไปตามมาตรฐานกำหนด โดยมีการฉีดแก๊สเฉื่อยเข้าไปใน ladle พร้อมกับทำการ Stirring เพื่อให้ส่วนผสมสม่ำเสมอ หลังจากนั้นจึงไปทำการหล่อแบบต่อเนื่อง จากนั้นนำ Slab ไปรีดร้อนด้วย Hot strip mill เพื่อให้ได้ Flat products หรือ Long products (bar/rod) สำหรับผลิตภัณฑ์ Flat products จะถูกรีดให้บางลงเหลือประมาณ 3-6 mm. แล้วทำการม้วนเก็บอยู่ในรูปคอยล์ซึ่งจะเรียกว่า คอยล์ดำ (Black coil, คอยล์ที่ผ่านการรีดร้อนแล้ว) หลังจากนั้นจึงเข้าสู่ Cold processing คือ ทำการอบอ่อน (Annealing) กัดกรด (Pickling) รีดเย็นด้วย Sendzimir mill ให้ได้ขนาดที่ต้องการ ทำการอบอ่อนอีกครั้ง และอาจมี กัดกรดอีกรอบ จึงจะได้ผลิตภัณฑ์สุดท้าย (Final products) [4]

2.2 โลหะวิทยาของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟร์ไรต์เกรด AISI 430

ตารางที่ 2.1 แสดงส่วนผสมทางเคมีของ AISI 430 และรูปที่ 2.1 แสดง Phase diagram ของเหล็กกับคาร์บอนที่มีโครเมียม 17 เปอร์เซ็นต์โดยมวล เส้นประในรูปที่ 2.1 คือที่คาร์บอนประมาณ 0.12 เปอร์เซ็นต์โดยมวล ซึ่งคือปริมาณคาร์บอนในเหล็กกล้าไร้สนิมเฟร์ไรต์เกรด AISI 430 จะเห็นว่าที่อุณหภูมิประมาณ 1050 – 1300°C เป็นช่วงที่เกิดเฟส 2 เฟสคือ เฟร์ไรต์กับ ออสเตนไนท์ ซึ่งอุณหภูมิช่วงนี้เป็นช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการรีดร้อนและเนื่องจากธาตุผสมที่สูงทำให้อัตราการเย็นตัววิกฤตของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟร์ไรต์เกรด AISI 430 ต่ำ การเย็นตัวในอากาศก็สามารถทำให้ออสเตนไนท์กลายเป็นมาร์เทนไซต์ได้

ตารางที่ 2.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 430

		ส่วนผสมทางเคมี (wt%)					
ธาตุ		C	Mn	P	S	Si	Cr
UNS	AISI 430	ต่ำสุด	-	-	-	-	16
S43000		สูงสุด	0.12	1	0.04	0.03	18



รูปที่ 2.1 แผนภูมิสมดุลของเหล็กกับคาร์บอนที่มีโครเมียม 17 เปอร์เซ็นต์โดยมวล [1]

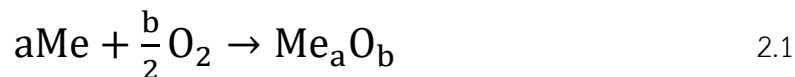
2.3 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอไรต์เกรด AISI 430 หลังจากผ่านกระบวนการรีดร้อน

ในการรีดร้อนนั้นตัว slab จะถูกอบขึ้นไปที่อุณหภูมิประมาณ 1200°C จากนั้นจึงรีดให้มีขนาดเล็กลงเรื่อยๆ เมื่อไปถึงลูกรีดสุดท้ายที่ Finishing Mill อุณหภูมิ Slab จะลดลงมาเหลือประมาณ $900 - 950^{\circ}\text{C}$ จากนั้นจึงม้วนเก็บเป็นคอยล์ซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ $800-850^{\circ}\text{C}$ ซึ่งโครงสร้างที่ได้ของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอไรต์เกรด AISI 430 ระหว่างการรีดร้อนจึงเป็นโครงสร้างแถบเฟอไรต์สลับกับแถบออสเทนไนท์ และเมื่อรีดเสร็จถ้าเย็นตัวเร็วแถบออสเทนไนท์จะกลายเป็นมาร์เทนไซต์

2.4 การอบอ่อนแบบกะ Batch Annealing

วัตถุประสงค์ในการอบอ่อนแบบกะนั้นเพื่อสลายมาร์เทนไซต์ที่อยู่ภายในเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอไรต์ที่เกิดขึ้นหลังจากกระบวนการรีดร้อน ให้กลายเป็นเฟอไรต์กับคาร์ไบด์ และทำให้เกิดโครงสร้าง Recrystallization ที่สมบูรณ์ ให้ความแข็งแรงลดลงและรีดเย็นได้ง่ายขึ้นไม่เกิดการแตกหักขณะรีด

2.5 การเกิดออกซิเดชันของโลหะ



สมการที่ 2.1 เป็นสมการเคมีรูปทั่วไปของปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างโลหะกับออกซิเจน ซึ่งจะเห็นว่าเป็นปฏิกิริยาที่ไม่ซับซ้อนและเข้าใจได้ง่าย แต่อย่างไรก็ตามในความเป็นจริงขณะที่เกิดปฏิกิริยานั้นลักษณะของออกซิเดชันที่เกิดขึ้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายตัว และกลไกของการเกิดปฏิกิริยาจากการทดลองจะเห็นว่าค่อนข้างซับซ้อน

ถ้าเริ่มจากโลหะที่เตรียมผิวมาแล้ว ในขั้นแรกของการเกิดปฏิกิริยาระหว่างโลหะกับออกซิเจน จะเกี่ยวข้องกับการ Adsorption ของแก๊สที่ผิวของโลหะ ขณะที่ปฏิกิริยาดำเนินไป ออกซิเจนจะละลายเข้าไปในเนื้อของโลหะ จากนั้นจึงเริ่มเกิดสเกลออกไซด์ที่ผิวของโลหะโดยอาจจะเป็นลักษณะแบบฟิล์ม หรือ Separate oxide nuclei ก็ได้ ทั้งการ Adsorption และการเกิดสเกลออกไซด์ในช่วงแรกนั้นขึ้นกับทิศทางการเรียงตัวของผลึกที่ผิวโลหะ, ตำแหน่งในผลึกที่ผิว, การเตรียมผิว และความบริสุทธิ์ของโลหะและแก๊ส

ผิวสเกลออกไซด์ที่เกิดขึ้นในกรณีที่เป็นชั้นหนาแน่น (Compact oxide) จะเป็นตัวกั้นระหว่างเนื้อโลหะกับแก๊ส ทำให้เมื่อเกิดปฏิกิริยาจะดำเนินไปได้ด้วยการแพร่ในสถานะของแข็งผ่าน สเกลออกไซด์ชั้นหนาแน่น เท่านั้น โดยสามารถแบ่งได้เป็น 2 กรณี กรณีแรกคือ ชั้นสเกลออกไซด์ที่หนาแน่นไม่หนามากนั้น Driving force สำหรับการแพร่ของสารตั้งต้นปฏิกิริยาอาจจะเป็นสนามไฟฟ้าภายในหรือที่ผ่านฟิล์มก็ได้ กรณีที่สองคือ ชั้นสเกลออกไซด์ที่หนาแน่นที่มีความหนามากนั้น driving force สำหรับการแพร่ของสารตั้งต้นปฏิกิริยา คือ Chemical potential gradient ที่ข้ามผ่านชั้นสเกลออกไซด์

โลหะยังสามารถเกิดสเกลออกไซด์ที่มีรูพรุน (Porous oxide) ได้เนื่องจากปฏิกิริยาไม่ได้ถูกจำกัดด้วยการแพร่ในสถานะของแข็ง แต่ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอาจถูกจำกัดโดยกระบวนการที่เกิดขึ้นที่ Phase boundaries ที่อุณหภูมิสูงสเกลออกไซด์ยังสามารถกลายเป็นของเหลว หรือระเหยได้ง่ายอีกด้วย

ในโลหะกลไกของการเกิดปฏิกิริยาจะขึ้นกับ Pretreatment และการเตรียมผิว, อุณหภูมิ, ส่วนผสมของแก๊สและความดัน, และระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา [18]

2.6 เทอร์โมไดนามิกส์ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดสเกลออกไซด์

ในการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาการเกิดสเกลออกไซด์ว่าจะเกิดหรือไม่เกิดขึ้นนั้น สามารถใช้ความรู้ทางเทอร์โมไดนามิกส์บอกได้ โดยพิจารณาจากพลังงานอิสระกิบส์ (Gibbs free energy)

ทั้งหมดระหว่างปฏิกิริยาโลหะกับออกซิเจน ที่เปลี่ยนไปซึ่งเกี่ยวข้องกับการเกิดสเกลออกไซด์จากสารตั้งต้นของปฏิกิริยาถ้ามีค่าน้อยกว่า 0 แสดงว่าปฏิกิริยานั้นดำเนินไปข้างหน้า หรือในอีกความหมายหนึ่งจากสมการที่ 2.1 ปฏิกิริยานั้นดำเนินไปข้างหน้าได้เมื่อความดันของออกซิเจนในบรรยากาศมีค่ามากกว่าความดันไอของสเกลออกไซด์ในสมดุลกับโลหะ ถ้ามีค่าเท่ากับ 0 คือปฏิกิริยานั้นอยู่ที่สมดุล หรือในอีกความหมายหนึ่งความดันของออกซิเจนในบรรยากาศมีค่าเท่ากับความดันไอของสเกลออกไซด์ในสมดุลกับโลหะ ถ้ามากกว่า 0 คือปฏิกิริยาย้อนกลับ หรือในอีกความหมายหนึ่งความดันของออกซิเจนในบรรยากาศมีค่าน้อยกว่าความดันไอของสเกลออกไซด์ในสมดุลกับโลหะ

ความรู้เรื่องสมดุลเคมีระหว่างโลหะและ Phase diagrams ใช้ในการอธิบายกลไกการเกิดออกซิเดชัน โดยข้อมูลเหล่านี้ทำให้สามารถคาดการณ์ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นของปฏิกิริยาได้ [18] ตัวอย่างการนำเทอร์โมไดนามิกส์ไปใช้งานเช่น การสร้างแผนภูมิของ Ellingham ดังรูปที่ 2.2 แสดงแผนภูมิ Ellingham แสดงการเปลี่ยนแปลงของพลังงานอิสระเทียบกับอุณหภูมิสำหรับสเกลออกไซด์ต่างๆ โดยจากสมการที่ 2.1 จะได้ว่า

$$\mu_{\text{Me}_a\text{O}_b} - a\mu_{\text{Me}} - \frac{b}{2}\mu^\circ_{\text{O}_2} - \frac{b}{2}RT\log p_{\text{O}_2} = 0 \quad 2.2$$

โดย $\mu_{\text{Me}_a\text{O}_b}$ คือ Chemical potential ของ Me_aO_b

μ_{Me} คือ Chemical potential ของ Me

$\mu^\circ_{\text{O}_2}$ คือ Standard chemical potential ของ O_2

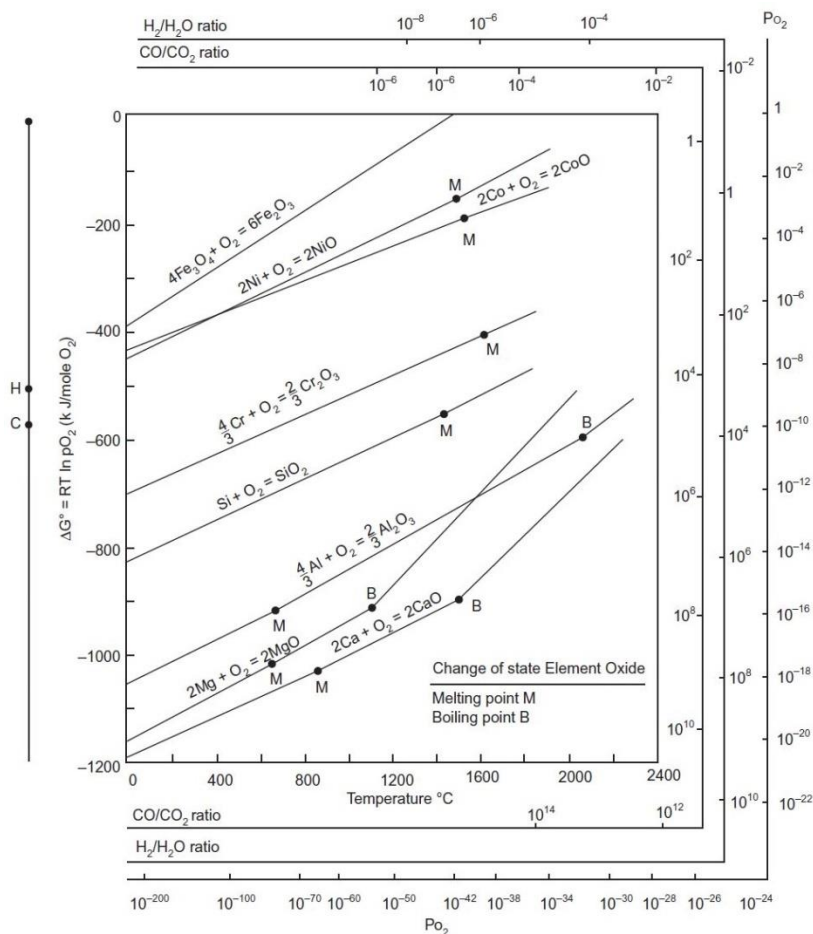
p_{O_2} คือ ความดันย่อยของ O_2

ถ้าโลหะและสเกลออกไซด์ของโลหะบริสุทธิ์ มีสถานะเป็นของแข็งที่ผสมเข้ากันไม่ได้จะได้ว่า chemical potential ของโลหะและสเกลออกไซด์ของโลหะนั้นไม่ขึ้นกับระบบจากสมการที่ 2.2 จึงได้

$$\mu^\circ_{\text{Me}_a\text{O}_b} - a\mu^\circ_{\text{Me}} - \frac{b}{2}\mu^\circ_{\text{O}_2} = \frac{b}{2}RT\log p_{\text{O}_2} \quad 2.3$$

$$\Delta G^\circ = \frac{b}{2}RT\log p_{\text{O}_2} \quad 2.4$$

จากสมการที่ 2.4 เมื่อแทนค่าพลังงานอิสระกิบส์ จึงได้ความสัมพันธ์ระหว่างความดันย่อยภายในระบบเทียบกับอุณหภูมิและนำไปสร้างแผนภูมิ Ellingham ได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แผนภูมิ Ellingham แสดงการเปลี่ยนแปลงของพลังงานอิสระกิบส์ เทียบกับอุณหภูมิสำหรับออกไซด์ต่างๆ

2.7 ออกซิเดชันของโลหะผสม Fe-Cr

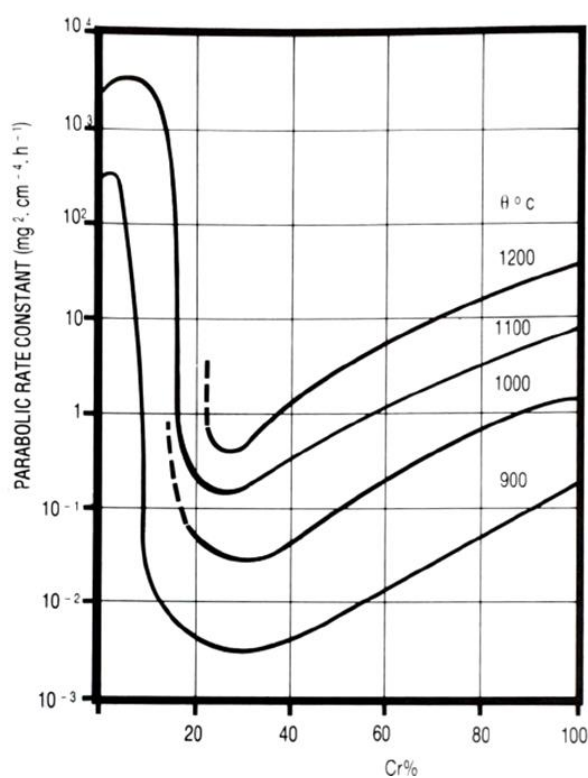
ความสามารถในการต้านทานการเกิดออกซิเดชันของโลหะผสม Fe-Cr นั้นขึ้นกับปริมาณ Cr ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.3 และสเกลออกไซด์ที่เกิดขึ้นนั้นแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งจะมีบางส่วนที่เป็น Nonstoichiometry คือ Spinel $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_{2-x}\text{Cr}_x\text{O}_3$ ($0 < x < 2$)

สำหรับที่ส่วนผสม Cr ≈ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยมวล พบชั้นสเกลออกไซด์ 3 ชั้น เรียงลำดับจากด้านนอกเข้ามา ได้แก่ Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , FeO และ spinel $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_{2-x}\text{Cr}_x\text{O}_3$ เล็กน้อย

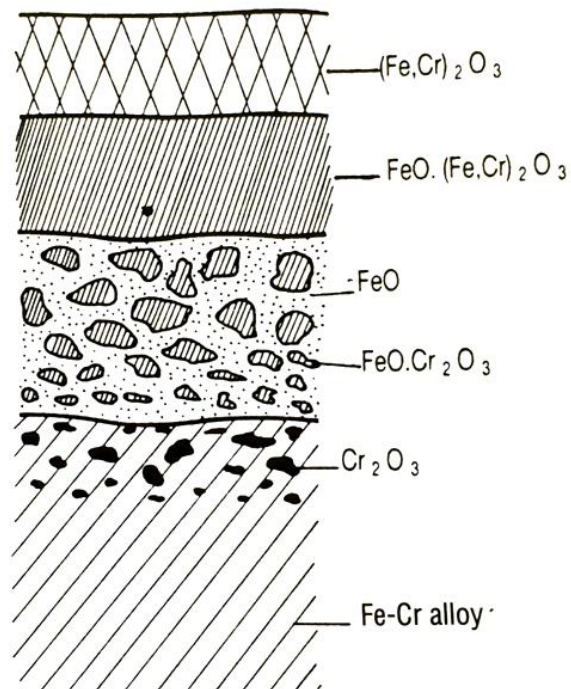
สำหรับที่ส่วนผสม Cr ≈ 2 เปอร์เซ็นต์โดยมวล ไม่พบ FeO และเมื่อ Cr สูงถึง 10 เปอร์เซ็นต์โดยมวล จะไม่พบ Fe_3O_4 และสเกลออกไซด์ที่พบจะมีแค่ 2 ชั้นคือ Fe_2O_3 ที่ชั้นนอก ชั้นในเป็น Cr_2O_3 นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิโดยสเกลออกไซด์ 2 ชั้นนี้อาจจะทำปฏิกิริยากัน

ได้เป็นชั้นของ spinel (ที่อุณหภูมิ <math> < 950^{\circ}\text{C}</math>) หรือสเกลออกไซด์ผสม $(\text{Fe,Cr})_2\text{O}_3$ ก็ได้เป็นอย่างดีอย่างหนึ่ง

สำหรับที่ส่วนผสมโครเมียมประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยมวล จะพบฟิล์มแบบต่อเนื่อง (Continuous film) ของ Cr_2O_3 และจะมีความหนาของชั้นฟิล์มมากที่ขอบเกรน อย่างไรก็ตามฟิล์มที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มที่จะแตกเป็นเศษ และต้องการส่วนผสมโครเมียมประมาณ 18 เปอร์เซ็นต์โดยมวล เพื่อให้เกิดการ Repassivation ได้ ต่อมาเมื่อส่วนผสมโครเมียมสูงขึ้นพบรูพรุนที่รอยต่อระหว่างโลหะและสเกลออกไซด์ซึ่งเพิ่มความเสี่ยงต่อการแตกเป็นเศษระหว่าง Thermal cycling [4]



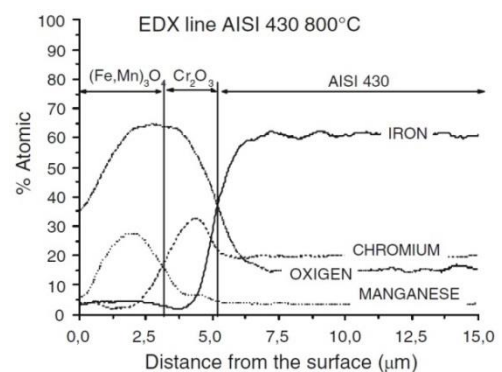
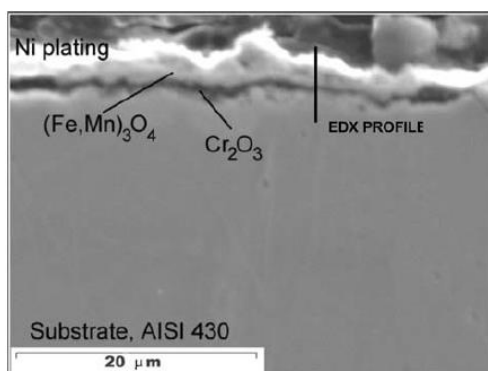
รูปที่ 2.3 อัตราการเกิดออกซิเดชันกับปริมาณโครเมียมในโลหะผสมเหล็กกับโครเมียม [4]



รูปที่ 2.4 ออกซิเดชันของโลหะผสมเหล็กกับโครเมียม [4]

2.8 สเกลออกไซด์ของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอไรต์เกรด AISI 430

L. Sánchez และคณะได้ศึกษาสเกลออกไซด์ของ AISI 430 ที่อุณหภูมิ 800°C ภายใต้บรรยากาศ 100 เปอร์เซ็นต์ H_2O เป็นระยะเวลา 1000 ชั่วโมง สเกลออกไซด์ที่ได้ประกอบด้วยสเกลออกไซด์ 2 ชั้น ชั้นนอกคือ $(Fe,Mn)_3O_4$ ชั้นในคือ Cr_2O_3 ดังรูปที่ 2.5ก. แสดงโครงสร้างตัดขวางของชิ้นงาน และรูปที่ 2.5ข. แสดงผลวิเคราะห์ด้วย EDX [2]



รูปที่ 2.5 ก. ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด และ ข.ผลวิเคราะห์ด้วย EDX line scan ของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 430 หลังจากอบที่อุณหภูมิ 800°C 1000 ชั่วโมง ในบรรยากาศ 100 เปอร์เซ็นต์ H_2O [2]

ที่อุณหภูมิสูง Cr_2O_3 และ $(\text{Fe,Cr})_2\text{O}_3$ สามารถทำปฏิกิริยากับไอน้ำและเกิดเป็น $\text{Cr}_2\text{OH}_{(g)}$, $\text{CrO}_{3(g)}$, และ $\text{CrO}_2(\text{OH})_{2(g)}$ ซึ่งทำให้เกิดการสูญเสีย Cr ที่ผิวและเกิด Fe_2O_3 นอกจากนี้ในบรรยากาศที่มี H_2 สนับสนุนให้เกิดสเกลออกไซด์ของเหล็กมากกว่าโครเมียม [2, 19]

I. Saeki และคณะ [8, 20, 21] ศึกษาการเกิดออกซิเดชันของเหล็กกล้าไร้สนิมเพอร์ไรต์เกรด 430 ที่ผ่านการรีดเย็นในบรรยากาศผสม $\text{O}_2 - \text{H}_2\text{O} - \text{N}_2$ และ $\text{O}_2 - \text{N}_2$ ที่อุณหภูมิ 1000°C พวกเขาพบสเกลออกไซด์ชนิด $(\text{Fe,Cr})_2\text{O}_3$, MnCr_2O_3 และ MnFe_2O_3 C. Carvalho และคณะ [22] ศึกษาการเกิดออกซิเดชันของเหล็กกล้าไร้สนิมรีดเย็นเกรด 304 และ 430 ที่อุณหภูมิ $1100 - 1200^\circ\text{C}$ พวกเขาพบสเกลออกไซด์ชนิด Fe_2O_3 and Fe_3O_4 ในเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 430

2.9 การกำจัดสเกลออกไซด์

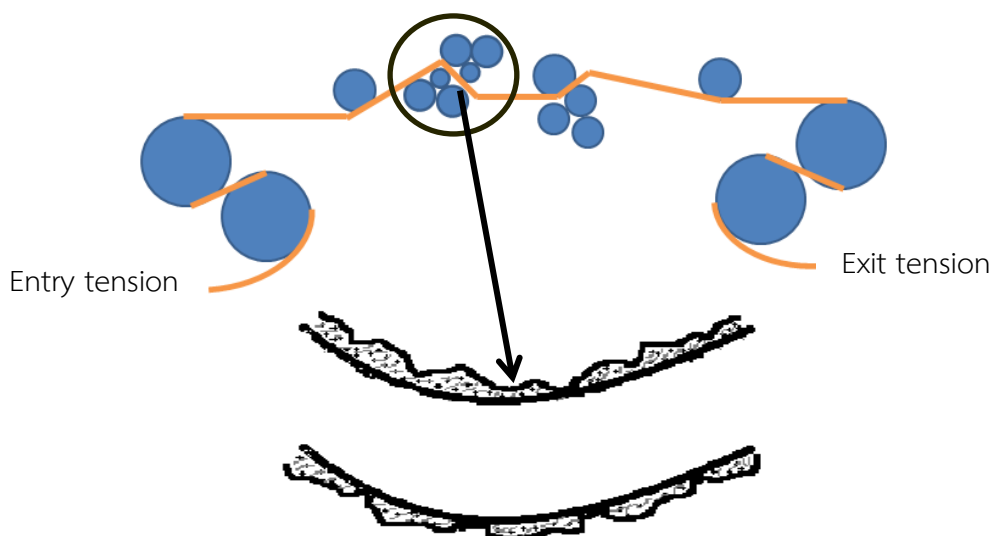
จุดประสงค์ของการกำจัดสเกลออกไซด์ นั้นเพื่อกำจัดชั้นสเกลออกไซด์ที่ผิว และชั้นที่โครเมียมพร่อง เพื่อให้ได้ผิวที่เรียบและสะอาด การกำจัดสเกลออกไซด์โดยทั่วไปแล้วจะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน [4, 23, 24]

1. การกำจัดสเกลออกไซด์ด้วยแรงกล (mechanical descaling) โดยใช้การตัดให้สเกลแตก (scale breaking) และการยิงด้วยเม็ดเหล็ก (shot blasting)
2. การกัดกรดโดยใช้กระแสไฟฟ้า (electrolytic pickling) หรือการกัดกรดด้วยสารเคมี (chemical pickling)

2.9.1. การกำจัดสเกลออกไซด์ด้วยแรงกล (mechanical descaling)

1. การตัดให้สเกลแตก (scale breaking)

โดยให้แผ่นบาง (Strip) ผ่านเข้าไปยังลูกรีด แผ่นบางจะเกิดการดัดงอส่งผลให้สเกลออกไซด์ที่ผิวเกิดการแตกร้าวและมีสเกลออกไซด์บางส่วนหลุดออกไป ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ในขั้นตอนการตัดให้สเกลออกไซด์แตกนี้จะส่งผลให้ประสิทธิภาพของการกำจัดสเกลออกไซด์โดยใช้สารเคมี (Chemical pickling) มากขึ้นเพราะกรดแทรกซึมไปตามรอยแตก [25]



รูปที่ 2.6 การตัดให้สเกลแตก

2. การยิงด้วยเม็ดเหล็ก (shot blasting)

การยิงเม็ดเหล็กลงบนผิวของแผ่นบางจุดประสงค์เพื่อให้สเกลออกไซด์ที่ติดอยู่กับผิวเหล็กกล้าไร้สนิมหลุด แต่ก็ยังคงมีสเกลออกไซด์บางส่วนเหลือค้างอยู่ที่ผิวจึงต้องนำไปเข้าสู่กระบวนการกำจัดสเกลออกไซด์โดยใช้สารเคมี (Chemical pickling) เพื่อกำจัดสเกลออกไซด์ที่เหลือค้างให้หมด [25]

2.9.2. การกัดกรด (pickling)

การกัดกรดเริ่มต้นใช้ในปี 1924 โดยใช้กับโลหะผสมเหล็กและโครเมียม ต่อมาได้มีการประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมเหล็กกล้าไร้สนิมโดยใช้กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) โซเดียมไนเตรต ($NaNO_3$) และคอปเปอร์ซัลเฟต ($CuSO_4$) [5]

1. การกัดกรดโดยใช้กระแสไฟฟ้า (electrolytic pickling)

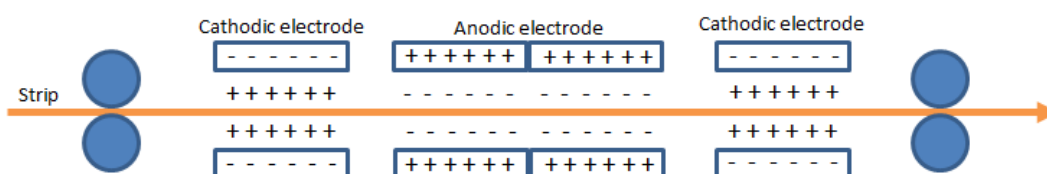
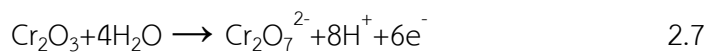
ในขั้นตอนนี้จะเคลื่อนที่แผ่นบาง (strip) ผ่านคู่ของขั้วแอโนดิกอิเล็กโทรด และคู่ของขั้วแคโทดิกอิเล็กโทรด ดังรูปที่ 2.7 โดยช่วงที่แผ่นบางมีประจุบวกหรือที่ขั้วแคโทดิก (Cathodic electrode) จะเกิดฟองแก๊สไฮโดรเจนตามสมการที่ 2.5 ซึ่งช่วยให้สเกลออกไซด์บางส่วนหลุดออก [26]



ช่วงที่แผ่นบางมีประจุลบหรือที่ขั้วแอโนดิก (Anodic electrode) จะเกิดแก๊สออกซิเจนขึ้น ดังสมการที่ 2.6 [26]



นอกจากนี้ยังเกิดการสลายตัวของสเกลออกไซด์ และอาจมีการสูญเสียเนื้อโลหะบางส่วนดังปฏิกิริยาที่ 2.7 และ 2.8 ตามลำดับ [5, 26]



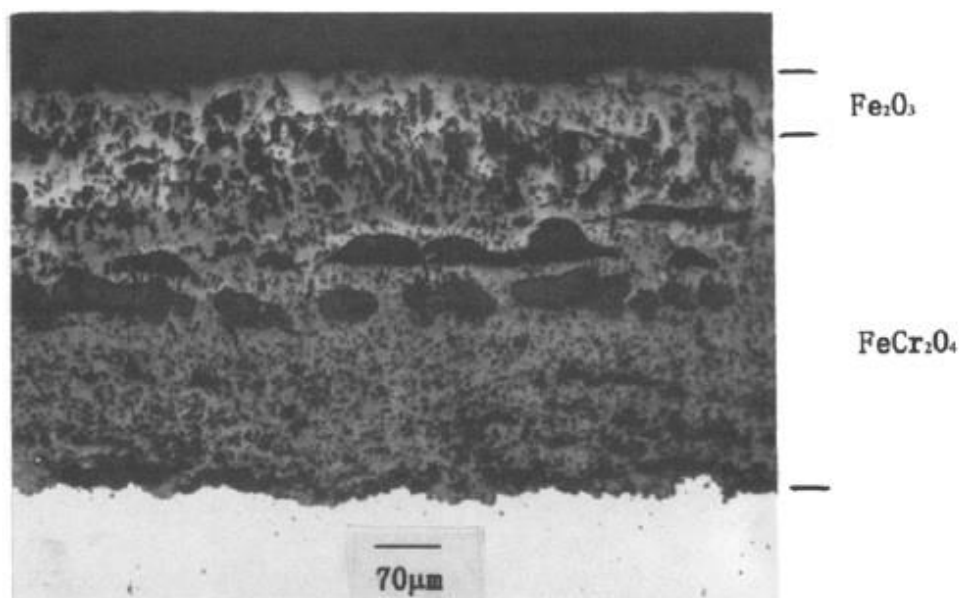
รูปที่ 2.7 การกัดกรวดโดยใช้กระแสไฟฟ้า (Electrolytic pickling)

2. การกัดกรวดโดยใช้สารเคมี (chemical pickling)

ในขั้นตอนนี้นิยมทำพร้อมกับการกัดกรวดโดยใช้กระแสไฟฟ้าโดยใช้กรดเป็น electrolyte จุดประสงค์เพื่อกำจัดชั้นซิลิกอนออกไซด์และชั้นที่มีโครเมียมต่ำ [4]

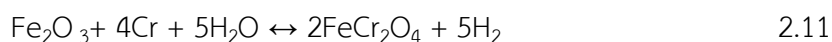
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

S. Jianian และคณะได้ศึกษาการเกิดออกซิเดชันของโลหะผสม Fe-20Cr ภายใต้บรรยากาศออกซิเจนที่มีความชื้น (wet oxygen) ที่อุณหภูมิ 900-1000°C รูปที่ 2.8 แสดงโครงสร้างจุลภาคตัดขวางของ Fe-20Cr ที่อบที่อุณหภูมิ 1000°C ในบรรยากาศที่มี H₂O 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เป็นเวลา 20 ชั่วโมง ซึ่งมีลักษณะเป็นชั้นหลายชั้นซ้อนกัน (multilayered) และ สเกลออกไซด์ที่มีรูพรุน



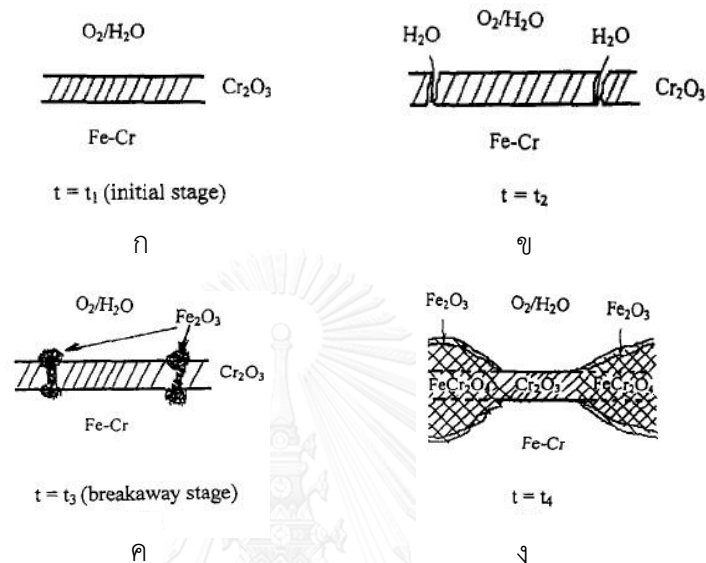
รูปที่ 2.8 โครงสร้างจุลภาคตัดขวางของโลหะผสมระหว่างเหล็กกับโครเมียม 20 เปอร์เซ็นต์โดยมวล อบที่อุณหภูมิ 1000°C ในบรรยากาศที่มี H₂O 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรเป็นเวลา 20 ชั่วโมง [27]

จากการศึกษาพบว่าไฮโดรเจนในไอน้ำที่อุณหภูมิสูงนั้นสามารถทำให้เกิดออกซิเดชันกับ Cr ภายในชั้นสเกลออกไซด์ได้ซึ่งส่งผลให้เกิดชั้นสเกลออกไซด์ที่มี Fe (Fe-rich oxide) อยู่สูงโดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังสมการที่ 2.9, 2.10 และ 2.11



โดยกลไกการเกิดคือ ขณะที่เกิดออกซิเดชันที่ผิวทำให้ Cr จากภายในเนื้อชิ้นงานแพร่ไปที่ผิวทำให้เกิด ช่องว่าง (voids) และ รูพรุน (porous) หรือ microcrack ที่สเกลออกไซด์ นอกจากนี้ผลจากการที่เกรนโตขึ้นและ plastic deformation ของสเกลยังทำให้เกิดช่องขนาดเล็ก (microchannels) อีกด้วย ผลจากที่กล่าวมาทำให้โมเลกุลของแก๊สสามารถแทรกซึมลงไปที่รอยต่อระหว่างเนื้อโลหะผสมและสเกลออกไซด์ได้ ทำให้เกิดปฏิกิริยากับเนื้อโลหะผสม โดยเมื่อโมเลกุลของน้ำเคลื่อนที่ไปที่ช่องขนาดใหญ่ (large channels) และทำปฏิกิริยากับผิวของโลหะผสม บริเวณที่มี Cr พร่องดังสมการที่ 2.9, รูปที่ 2.9ข. และ 2.9ค. H₂ ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาที่

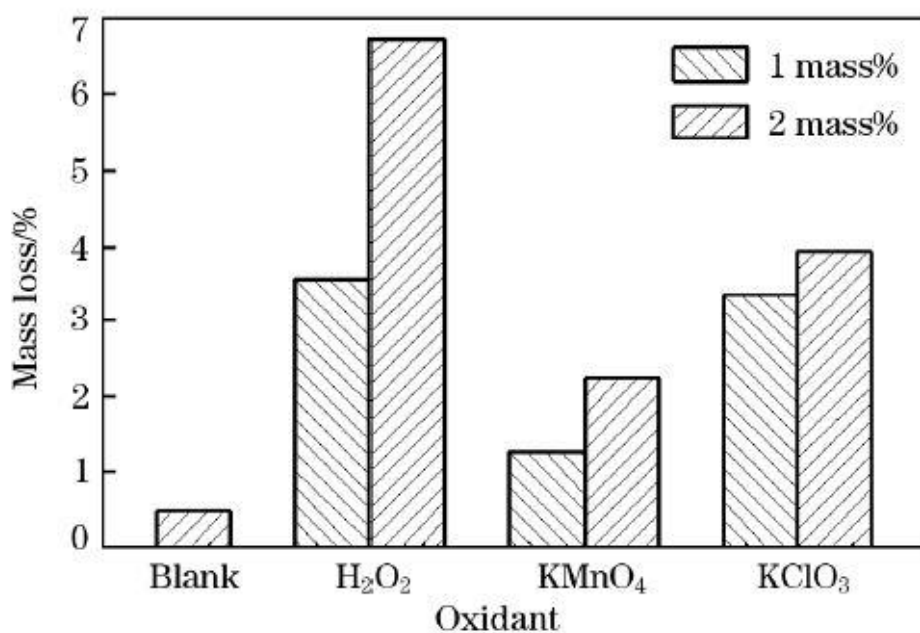
2.9 ทำปฏิกิริยากับ Cr_2O_3 เกิดเป็นปฏิกิริยาที่ 2.10 H_2O ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาที่ 2.10 ช่วยให้ปฏิกิริยาที่ 2.9 ดำเนินไปข้างหน้า Fe_2O_3 จากปฏิกิริยาที่ 2.9 ทำปฏิกิริยากับ Cr จากปฏิกิริยาที่ 2.10 และ H_2O เกิดปฏิกิริยาที่ 2.11 ดังรูปที่ 2.9ง. เกิดเป็น spinel FeCr_2O_4 และ H_2 ช่วยให้ปฏิกิริยาที่ 2.10 ดำเนินไปข้างหน้า [27]



รูปที่ 2.9 กลไกการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูงของโลหะผสมเหล็กกับโครเมียมในบรรยากาศออกซิเจนที่มีความชื้น [27]

X. Qiong และคณะได้ศึกษาผลของออกซิเดนต์ต่อกระบวนการกัดกรดใน HCl ของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟร์ไรต์แผ่นรีดร้อนเกรด 430 เพื่อลดระยะเวลาในการบวนการกัดกรดและปรับปรุงคุณภาพของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟร์ไรต์เกรด 430 โดยออกซิเดนต์ที่ใช้คือ H_2O_2 , KMnO_4 และ KClO_3 เติมลงไปนในสารละลาย HCl ที่อุณหภูมิ 40-60 °C เป็นเวลา 50 วินาที การทดลองแบ่งเป็น 4 กลุ่มคือ กลุ่มที่ไม่ใส่ออกซิเดนต์, กลุ่มที่ใส่ H_2O_2 , กลุ่มที่ใส่ KMnO_4 และ กลุ่มที่ใส่ KClO_3 นอกจากนี้ในกลุ่มที่ใส่ออกซิเดนต์ก็จะแบ่งย่อยอีก 2 กลุ่มคือใส่ 1 เปอร์เซ็นต์โดยมวล กับ 2 เปอร์เซ็นต์โดยมวล การเปรียบเทียบความแตกต่างในแต่ละกลุ่มนั้นใช้น้ำหนักที่หายไป, ลักษณะการกัดกร่อนภายหลังการกัดกรด, และความหยาบผิว สำหรับน้ำหนักที่หายไปจากน้ำหนักก่อนกัดกรดลบน้ำหนักหลังกัดกรดเทียบกับน้ำหนักก่อนกัดกรด รูปที่ 2.10 แสดงน้ำหนักที่หายไปของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟร์ไรต์เกรด 430 หลังกัดกรดด้วยออกซิเดนต์ จะเห็นว่าเมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานที่ใส่ออกซิเดนต์ H_2O_2 1 เปอร์เซ็นต์โดยมวลกับชิ้นงานที่ไม่ใส่ออกซิเดนต์พบว่าน้ำหนักที่หายไปมีค่ามากกว่า 6.29 เท่า และเมื่อเพิ่มความเข้มข้น H_2O_2 เป็น 2 เปอร์เซ็นต์

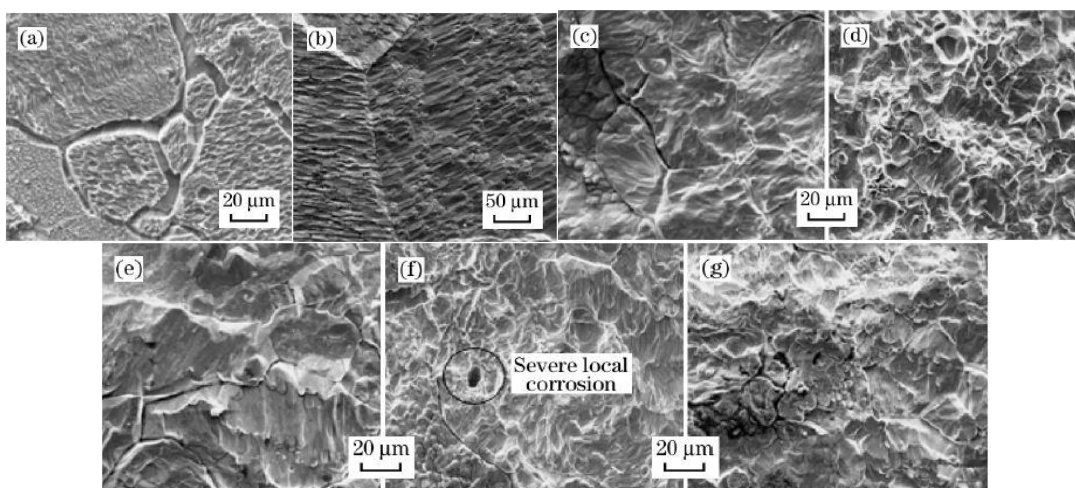
โดยมวลน้ำหนักที่หายไปมีค่ามากกว่าชิ้นงานที่ไม่ใส่ออกซิแดนต์ถึง 12.80 เท่า และจากกราฟจะเห็นว่าความสามารถในการปรับปรุงการกัดกรวดของออกซิแดนต์ที่ความเข้มข้นเท่ากันเรียงลำดับจากมากไปน้อยได้ดังนี้ $\text{H}_2\text{O}_2 > \text{KClO}_3 > \text{KMnO}_4$



รูปที่ 2.10 น้ำหนักที่หายไปของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟร์ไรต์เกรด 430 หลังกัดกรวดด้วยออกซิแดนต์ต่างๆ [24]

เมื่อพิจารณาพื้นผิวภายหลังการกัดกรวดดังรูปที่ 2.11 แสดงภาพถ่ายพื้นผิวชิ้นงานของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟร์ไรต์เกรด 430 หลังกัดกรวดด้วยออกซิแดนต์ต่างๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (pitting corrosion) และการกัดกร่อนตามขอบเกรน (intergranular corrosion) ในชิ้นงานที่ไม่ได้ใส่ออกซิแดนต์ (รูป 2.11a) พบผิวที่เรียบกว่าและไม่มีสเกลออกไซด์เหลือค้าง ในชิ้นงานที่ใส่ออกซิแดนต์ H_2O_2 1 เปอร์เซ็นต์โดยมวลดังรูป 2.11b อย่างไรก็ตามเมื่อใส่ ออกซิแดนต์ H_2O_2 2 เปอร์เซ็นต์โดยมวลเริ่มพบการกัดกร่อนตามขอบเกรนดังรูป 2.11c ไม่พบสเกลออกไซด์เหลือค้างที่ผิว ในชิ้นงานที่ใส่ออกซิแดนต์ KMnO_4 1 เปอร์เซ็นต์ และ 2 เปอร์เซ็นต์โดยมวลดังรูป 2.11d และ 2.11e แต่พบการกัดกร่อนตามขอบเกรนมากกว่า และผิวที่หยาบกว่าเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ใส่ออกซิแดนต์ H_2O_2 สำหรับชิ้นงานที่ใส่ออกซิแดนต์ KClO_3 1 เปอร์เซ็นต์โดยมวลพบสเกลออกไซด์เหลือค้างที่ผิวและการกัดกร่อนเฉพาะบริเวณ (localized corrosion) ดังรูป 2.11f เมื่อเพิ่มปริมาณออกซิแดนต์ KClO_3 เป็น 2 เปอร์เซ็นต์โดยมวล ไม่พบสเกลออกไซด์เหลือค้างที่ผิว แต่พบการกัดกร่อนเฉพาะบริเวณ

เพิ่มขึ้นอย่างมากดังรูป 2.11g จากผลการทดลองจึงสรุปได้ว่าการเติมออกซิแดนต์ H_2O_2 ในกระบวนการกัดกรดที่มีสารละลาย HCl สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมเฟร์ไรต์เกรด 430 ให้ประสิทธิภาพดีกว่า $KMnO_4$ และ $KClO_3$ เนื่องจากสภาพผิวภายหลังการกัดกรดที่เรียกว่า ไม่พบปัญหาการกัดกร่อนเฉพาะบริเวณ เกิดการกัดกร่อนตามขอบเกรนที่น้อยกว่า และน้ำหนักที่หายไปภายหลังกัดกรดมากที่สุด



(a) ไม่ใส่ออกซิแดนต์; (b) ใส่ H_2O_2 1 เปอร์เซ็นต์โดยมวล; (c) ใส่ H_2O_2 2 เปอร์เซ็นต์โดยมวล;
 (d) ใส่ $KMnO_4$ 1 เปอร์เซ็นต์โดยมวล; (e) ใส่ $KMnO_4$ 2 เปอร์เซ็นต์โดยมวล;
 (f) ใส่ $KClO_3$ 1 เปอร์เซ็นต์โดยมวล; (g) ใส่ $KClO_3$ 2 เปอร์เซ็นต์โดยมวล

รูปที่ 2.11 ภาพถ่ายพื้นผิวชิ้นงานของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟร์ไรต์เกรด 430 หลังกัดกรดด้วยออกซิแดนต์ต่างๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [24]

บทที่ 3

ขั้นตอนและวิธีดำเนินการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาการอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศ (อากาศปกติ ไฮโดรเจน และไนโตรเจน) และจำลองการกัดกรวดในกระบวนการผลิตจริง เพื่อศึกษาผลของบรรยากาศ ระยะเวลาในการอบอ่อนแบบกะต่อสเกลออกไซด์และการกัดกรวดของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟร์ไรต์เกรด AISI 430

3.1 วัสดุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. สารละลายกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4)
2. สารละลายกรดไนตริก (HNO_3)
3. สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (HF)
4. แอลกอฮอล์
5. แก๊สไฮโดรเจนความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์
6. แก๊สไนโตรเจนความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์
7. เหล็กกล้าไร้สนิมเฟร์ไรต์เกรด AISI 430

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เตาเผาแบบ tube furnace
2. Thermocouple
3. สี (สารอีพ็อกซี่)
4. เวอร์เนียร์คาลิเปอร์
5. เครื่อง shot blasting รุ่น THC-90 ของบริษัทสยามโตซู
6. อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath)
7. เทอร์โมมิเตอร์
8. เครื่องช่างน้ำหนักทศนิยม 5 ตำแหน่ง

3.3 เครื่องมือวิเคราะห์การทดลอง

1. กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope, OM)
2. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscopy)

3. Energy Dispersive Spectroscopy (EDS)
4. Grazing Incidence X-ray Diffraction (GIXRD)

3.4 ขั้นตอนการทดลอง

3.4.1 การเตรียมชิ้นงานก่อนการอบอ่อนแบบกะ

1. ตัดชิ้นงานขนาด 20x100x3 ลูกบาศก์มิลลิเมตร จากคอยล์ดำหรือคอยล์ที่ผ่านการรีดร้อนของ เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอไรต์เกรด AISI 430 ดังรูปที่ 3.1

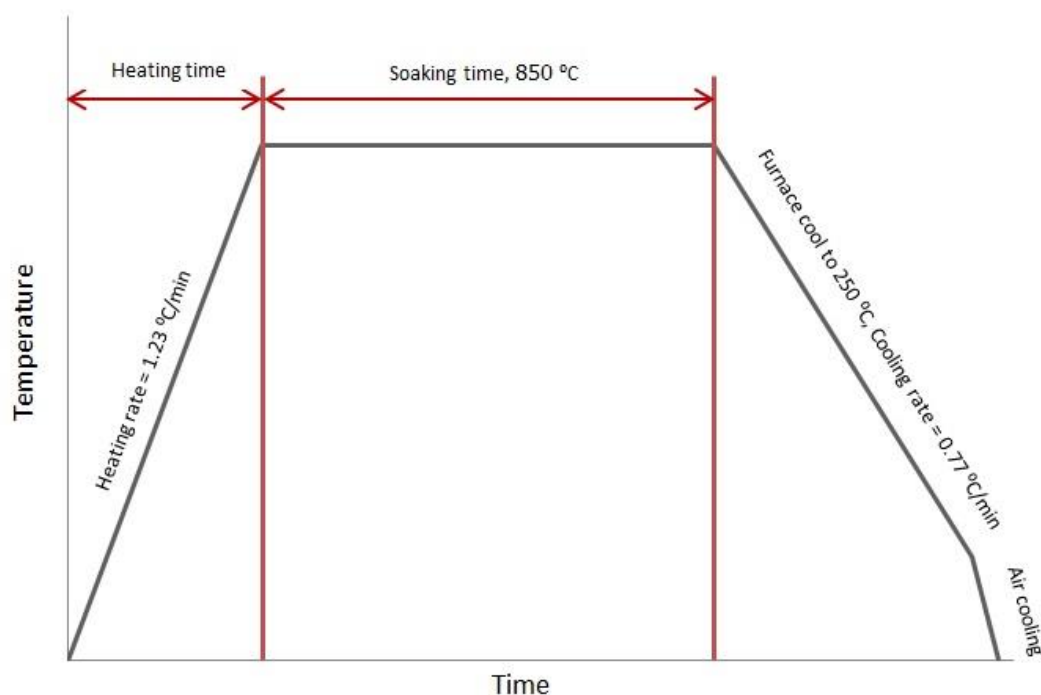


รูปที่ 3.1 ชิ้นงานคอยล์ดำเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอไรต์

2. ชั่งน้ำหนักชิ้นงานก่อนทดลอง ด้วยเครื่องชั่งตวงวัด 5 ตำแหน่ง พร้อมบันทึกค่า

3.4.2 การจำลองการอบอ่อนแบบกะ

1. นำชิ้นงานจากข้อ 3.4.1 เข้าเตาอบที่อุณหภูมิที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านในท่อ 6.5 ซม. เส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอกท่อ 7.5 ซม. และมีช่วงอุณหภูมิคงที่ตรงกลางเตาขนาดประมาณ 10 ซม. โดยมีค่าอุณหภูมิกับเวลา (heat thermal cycle) ดังรูปที่ 3.2 และตัวแปรที่ใช้ในการอบอ่อนแบบกะแสดงตามตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.2 กราฟอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการอบอ่อนแบบกะ

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการอบอ่อนแบบกะ

บรรยากาศ	ระยะเวลาในการอบอ่อนแบบกะ (ชั่วโมง)		
	20	25	30
บรรยากาศปกติ	สภาวะ 1	สภาวะ 2	สภาวะ 3
ไฮโดรเจน*	สภาวะ 4	สภาวะ 5	สภาวะ 6
ไนโตรเจน*	สภาวะ 7	สภาวะ 8	สภาวะ 9

*อัตราการไหลเชิงปริมาตรของแก๊ส 20 ลบ.ซม.ต่อนาที

2. หลังจากอบอ่อนแบบกะ ชั่งน้ำหนักชิ้นงาน ด้วยเครื่องชั่งตวงวัด 5 ตำแหน่ง พร้อมบันทึกค่า
3. ทำการทดลองข้อ 1. - 2. ซ้ำทั้งหมด 8 ครั้ง ตามสภาวะ 2 – 9
4. นำผลจากข้อ 3. มาวิเคราะห์และตรวจสอบสเกลออกไซด์ที่ผิวชิ้นงาน ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง เครื่อง GIXRD, กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่ติดตั้งการวิเคราะห์ด้วยรังสีเอ็กซ์ (EDS)

3.4.3 การกำจัดสเกลออกไซด์ออกด้วยกระบวนการยิงเม็ดเหล็ก (Shot blasting)

1. นำชิ้นงานข้อ 3.4.2 ไปยิงเม็ดเหล็ก (Shot blasting) เป็นระยะเวลา 60 วินาที



รูปที่ 3.3 เครื่องยิงเม็ดเหล็ก

3.4.4 การเตรียมชิ้นงานก่อนกัดกรด (Pickling)

1. นำชิ้นงานจากข้อ 3.4.3 เคลือบด้วย Epigen บริเวณที่ขอบและด้านหลังชิ้นงาน ต่อมาทิ้งไว้ให้ Epigen แห้งสนิทประมาณ 24 ชั่วโมง
2. วัดพื้นที่ผิวชิ้นงานด้านที่จะศึกษา
3. ทำความสะอาดชิ้นงานด้วยอะซิโตน
4. ชั่งน้ำหนักชิ้นงานก่อนการทดลอง ด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 5 ตำแหน่ง

3.4.5 การขจัดสเกลออกไซด์ออกด้วยการกัดกรด

1. นำชิ้นงานจากข้อ 3.4.4 มากัดกรดจากอ่างที่ 1 - 4 ซึ่งใช้สารละลายที่มีความเข้มข้น 1 ใน 4 ของที่ใช้ในสภาวะกระบวนการผลิตจริง ดังแสดงในตารางที่ 3.2 เนื่องจากสารละลายที่มีความเข้มข้นตามสภาวะกระบวนการผลิตจริง เมื่อนำชิ้นงานไปกัดกรดแล้วไม่สามารถเปรียบเทียบความแตกต่างได้ เนื่องจากไม่พบสเกลออกไซด์เหลือค้างที่ผิวในแต่ละตัวอย่าง

ตารางที่ 3.2 สภาวะการกัดกรอด

	อ่างที่ 1	อ่างที่ 2	อ่างที่ 3	อ่างที่ 4
สารละลาย (M)	H ₂ O	H ₂ SO ₄ 0.7125	H ₂ NO ₃ 0.125 HF 0.125	H ₂ NO ₃ 0.125 HF 0.125
ความหนาแน่น กระแส (A/cm ²)	0	2x10 ⁻³	0	0
อุณหภูมิ (°C)	25	85	33	33
ระยะเวลา (s)	42	42	36	40

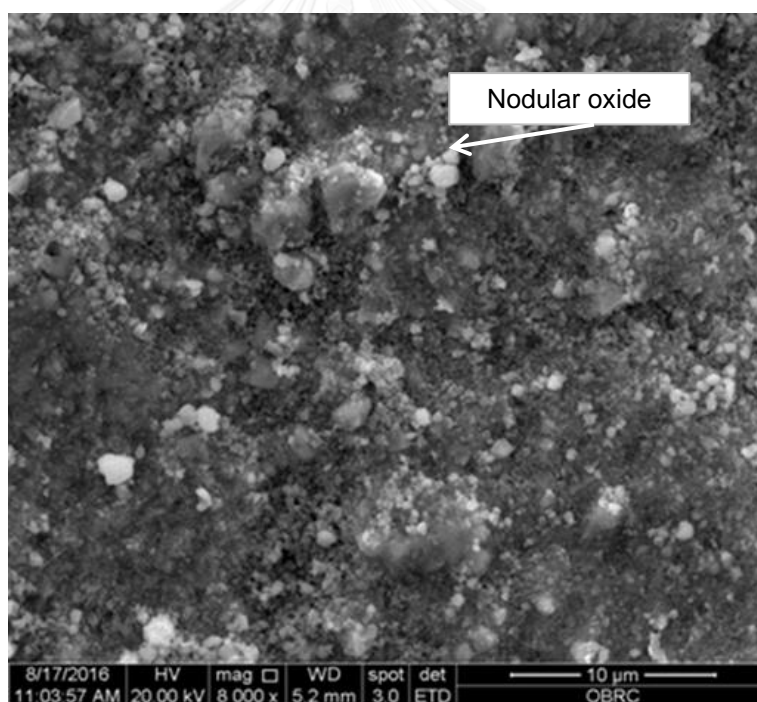
2. ชั่งน้ำหนักชิ้นงานจากข้อ 1 ด้วยเครื่องชั่งตวงวัด 5 ตำแหน่ง
3. มาวิเคราะห์และตรวจสอบสเกลออกไซด์ที่ผิวชิ้นงานจากข้อ 1. ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่มีโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ (PANASIS) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด
4. เปรียบเทียบผลวิเคราะห์การทดลอง พร้อมสรุปผล

บทที่ 4

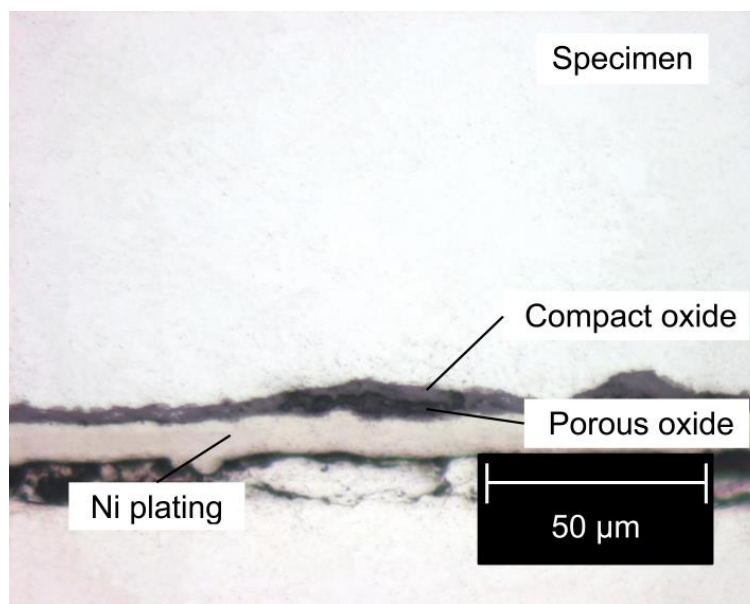
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลการวิเคราะห์สเกลออกไซด์บนชั้นที่ผ่านการรีดร้อนก่อนอบอ่อนแบบกะ

ภาพผิวชิ้นงานก่อนการอบอ่อนแบบกะถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดดังแสดงในรูปที่ 4.1 พบสเกลออกไซด์ลักษณะตุ่ม (Nodular oxide) ที่ผิวซึ่งตรงกับงานวิจัยของ A. Yamauchi และคณะ [19, 28] และงานวิจัยของ Y. Zhang และคณะ [29] รูปที่ 4.2 แสดงภาคตัดขวางของชิ้นงานก่อนอบอ่อนแบบกะ พบสเกลออกไซด์ชั้นนอกเป็นสเกลออกไซด์ที่มีรูพรุน (Porous oxide) และด้านในเป็นสเกลออกไซด์ที่หนาแน่น (Compact oxide) ซึ่งมีความหนาทั้งหมดประมาณ 5.79 ไมโครเมตร โดยแบ่งเป็นชั้นสเกลออกไซด์ที่หนาแน่น 2.20 ไมโครเมตร และชั้นที่มีรูพรุน 3.59 ไมโครเมตร

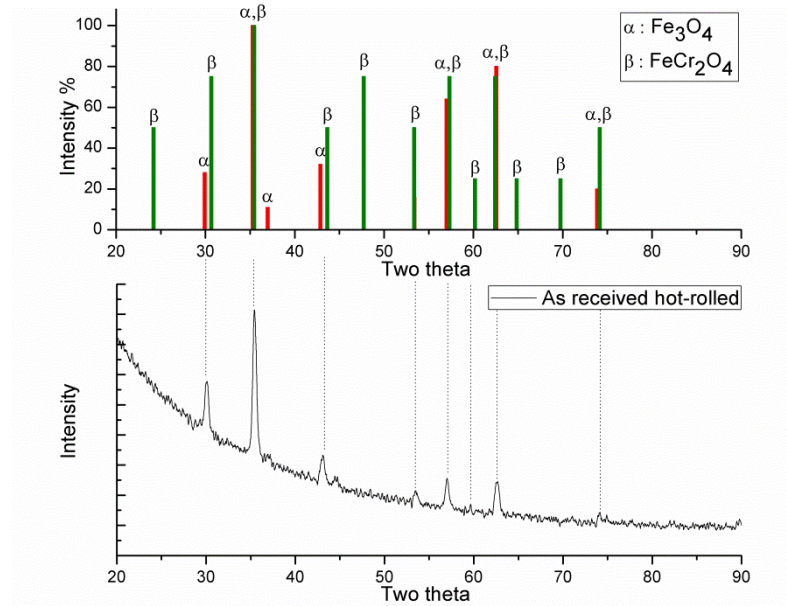


รูปที่ 4.1 พื้นผิวของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนก่อนอบอ่อนแบบกะถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

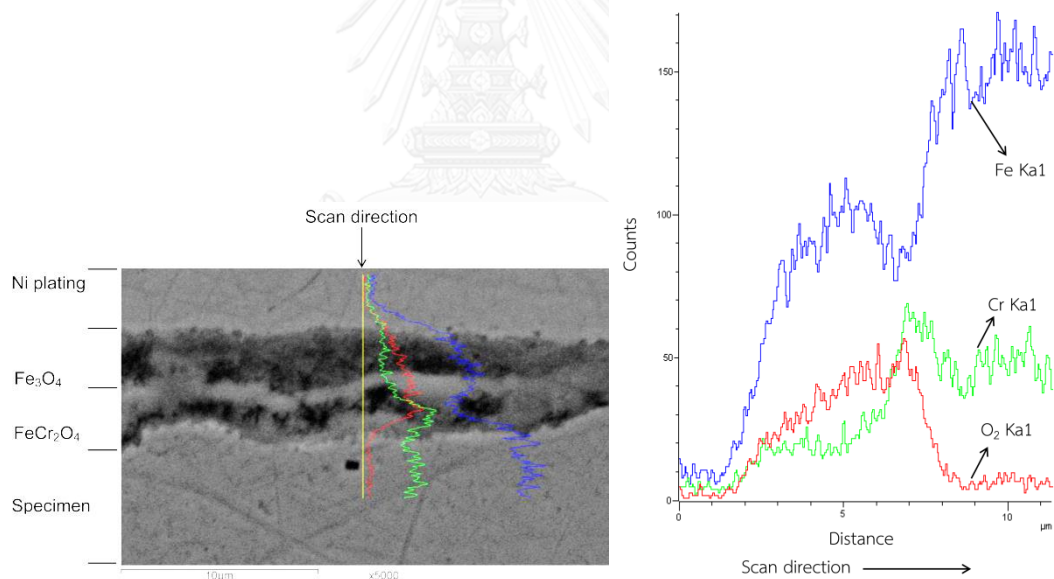


รูปที่ 4.2 รูปภาคตัดขวางของสเกลออกไซด์ที่ผิวที่ผ่านการรีดร้อนก่อน
อบอ่อนแบบกะถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค GIXRD พบ Fe_3O_4 และ spinel FeCr_2O_4 ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.3 แต่ยังไม่สามารถระบุได้ว่าสเกลออกไซด์ชั้นนอกหรือชั้นในที่เป็น Fe_3O_4 หรือ spinel FeCr_2O_4 จึงใช้เทคนิค EDS line scan ซึ่งจากผลการวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 4.4 พบว่าสเกลออกไซด์ชั้นนอกที่มีรูพรุนมีปริมาณ Cr ต่ำกว่าชั้นในที่สเกลออกไซด์หนาแน่น ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าสเกลออกไซด์ชั้นนอกที่มีรูพรุนเป็น Fe_3O_4 และชั้นในที่หนาแน่นเป็น spinel FeCr_2O_4 และจากรูปที่ 4.1 สเกลออกไซด์ลักษณะเป็นตุ่มคือ Fe_3O_4 ซึ่งตรงกับงานวิจัยของ A. Yamauchi และคณะ [19, 28] และงานวิจัยของ Y. Zhang และคณะ [29]



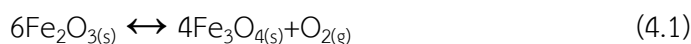
รูปที่ 4.3 ผลวิเคราะห์ GIXRD ของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนก่อนอบอ่อนแบบกะ



รูปที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ชั้นสเกลออกไซด์ด้วย EDS line scan ของชิ้นที่ผ่านการรีดร้อนก่อนอบอ่อนแบบกะ

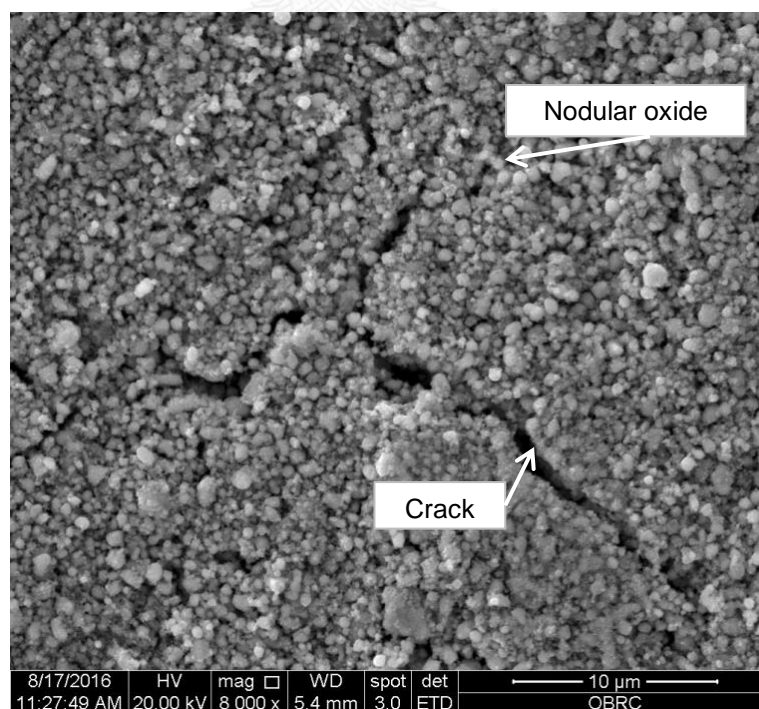
ได้มีการศึกษาสเกลออกไซด์บนชิ้นงานจากการรีดเย็นหลังผ่านการจำลองการรีดร้อนก่อนนำไปอบอ่อนแบบกะพบว่าเป็นสเกลออกไซด์ชนิด Fe_2O_3 , Fe_3O_4 และ spinel FeCr_2O_4 [30, 31] ในงานวิจัยที่ศึกษาพบ Fe_3O_4 และ spinel FeCr_2O_4 บนคอยล์ที่ผ่านการรีดร้อนของเหล็กกล้าไร้สนิมเพอร์ไรต์เกรด 430 ซึ่งคล้ายกับกรณีการออกซิเดชันในไอน้ำบนคอยล์ที่ผ่านการรีดเย็นของเหล็กกล้าเพอร์ไรต์ที่มี Cr 9 – 12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิระหว่าง 550 ถึง 650 °C [32] ทั้งนี้อาจเป็น

เพราะหลังขั้นตอนการรีดร้อนแล้วแผ่นเหล็กถูกม้วน และค่อยๆเย็นตัวอย่างช้าๆในอากาศ ส่งผลให้มีระยะเวลาเพียงพอที่จะเกิดปฏิกิริยา (4.1) [7] โดย Fe_2O_3 สลายตัวเป็น Fe_3O_4 เพราะพลังงานอิสระกิบส์ของ Fe_3O_4 ต่ำกว่าของ Fe_2O_3

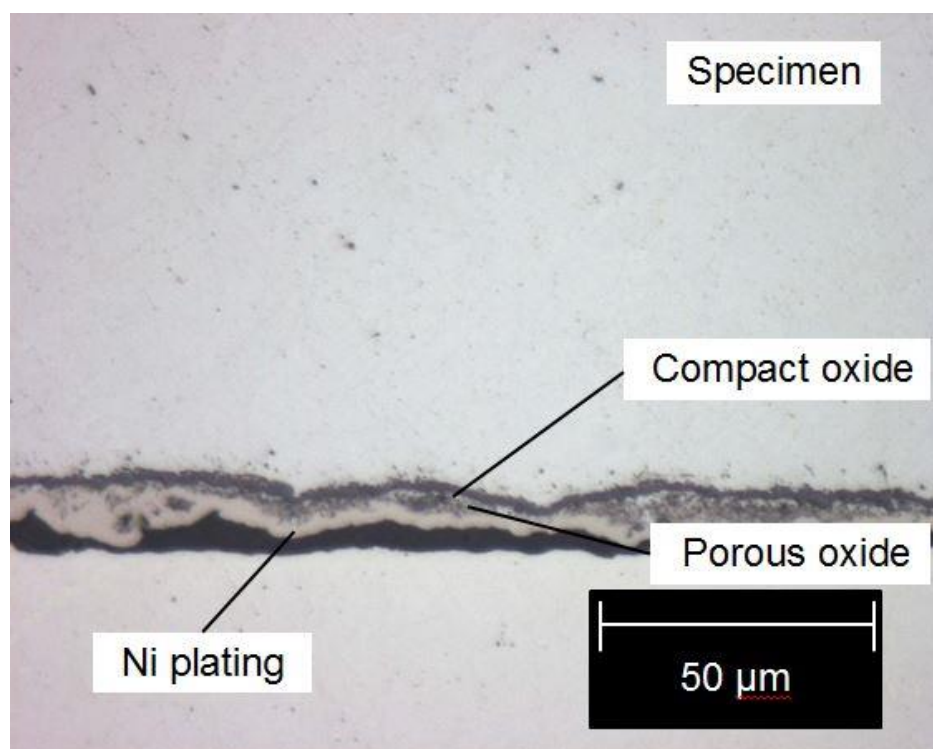


4.2 ผลการวิเคราะห์สเกลออกไซด์ของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศไฮโดรเจนจากกระบวนการของบริษัท

ภาพผิวชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศไฮโดรเจนจากกระบวนการของบริษัทถ่ายด้วยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบสเกลออกไซด์ลักษณะตุ่มเล็กๆที่ผิว และรอยแตกที่ชั้นสเกลออกไซด์ดังรูปที่ 4.5 รูปที่ 4.6 แสดงภาคตัดขวางของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศไฮโดรเจนจากกระบวนการของบริษัท พบสเกลออกไซด์ชั้นนอกเป็นสเกลออกไซด์ที่มีรูพรุน (Porous oxide) และด้านในเป็นสเกลออกไซด์หนาแน่น (Compact oxide) ซึ่งมีความหนาทั้งหมดประมาณ 6.38 ไมโครเมตร โดยแบ่งเป็นชั้นสเกลออกไซด์ที่หนาแน่น 2.62 ไมโครเมตร และชั้นที่มีรูพรุน 3.76 ไมโครเมตร



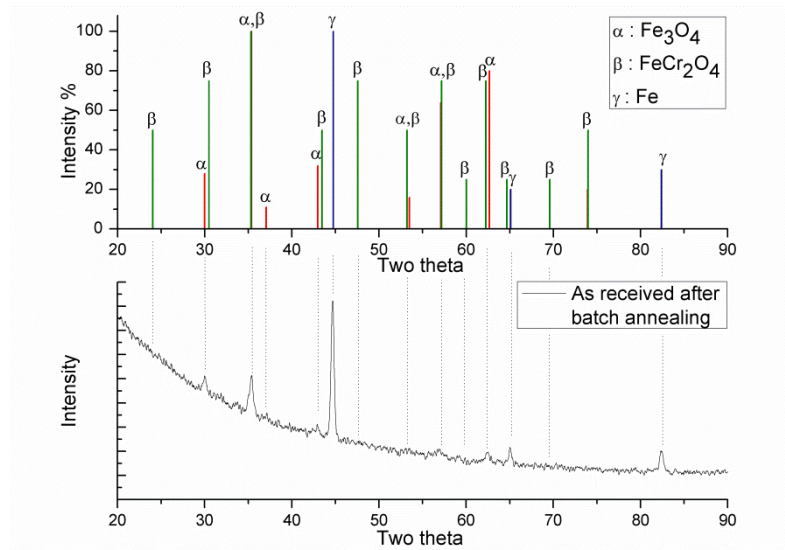
รูปที่ 4.5 พื้นผิวของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศไฮโดรเจนจากกระบวนการของบริษัทถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



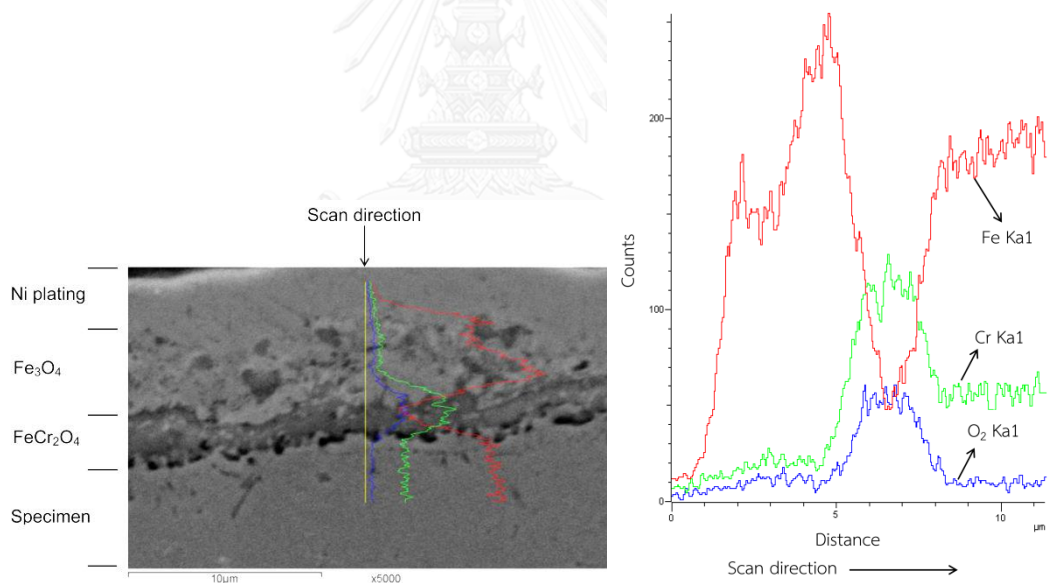
รูปที่ 4.6 รูปภาคตัดขวางของสเกลออกไซด์ของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศไฮโดรเจนจากกระบวนการของบริษัทถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

ผลวิเคราะห์ด้วยเทคนิค GIXRD พบ Fe_3O_4 , spinel FeCr_2O_4 และ Fe ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.7 สาเหตุที่พบ Fe ด้วยเนื่องจากการอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศไฮโดรเจนทำให้สเกลออกไซด์มีความบาง และมีรอยแตกที่ชั้นสเกลออกไซด์ ทำให้รังสีที่ตกกระทบจาก GIXRD ลงไปถึงเนื้อชิ้นงานได้ชั้นสเกลออกไซด์และสะท้อนกลับออกมา ต่อมาจึงใช้เทคนิค EDS line scan เพื่อหาว่าสเกลออกไซด์ชนิดไหนเป็นชั้นนอกและชั้นใน ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 4.8 พบว่าสเกลออกไซด์ชั้นนอกที่มีรูพรุนมีปริมาณ Cr ต่ำกว่าชั้นในที่หนาแน่น ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าสเกลออกไซด์ชั้นนอกที่รูพรุนเป็น Fe_3O_4 และชั้นในที่หนาแน่นเป็น spinel FeCr_2O_4 และจากรูปที่ 4.5 สเกลออกไซด์ลักษณะตุ่มคือ Fe_3O_4 ซึ่งตรงกับงานวิจัยของ A. Yamauchi และคณะ [19, 28] และงานวิจัยของ Y. Zhang และคณะ [29]

กลไกการเกิดสเกลออกไซด์ของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อน แล้วอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศไฮโดรเจนจากกระบวนการของบริษัทนั้นคล้ายกับชิ้นงานในการศึกษานี้ที่อบอ่อนแบบกะในบรรยากาศไฮโดรเจน ซึ่งจะอธิบายในภายหลัง



รูปที่ 4.7 ผลวิเคราะห์ GIXRD ของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนในแล้วอบอ่อนแบบกะบรยากาศไฮโดรเจนจากกระบวนการของบริษัท

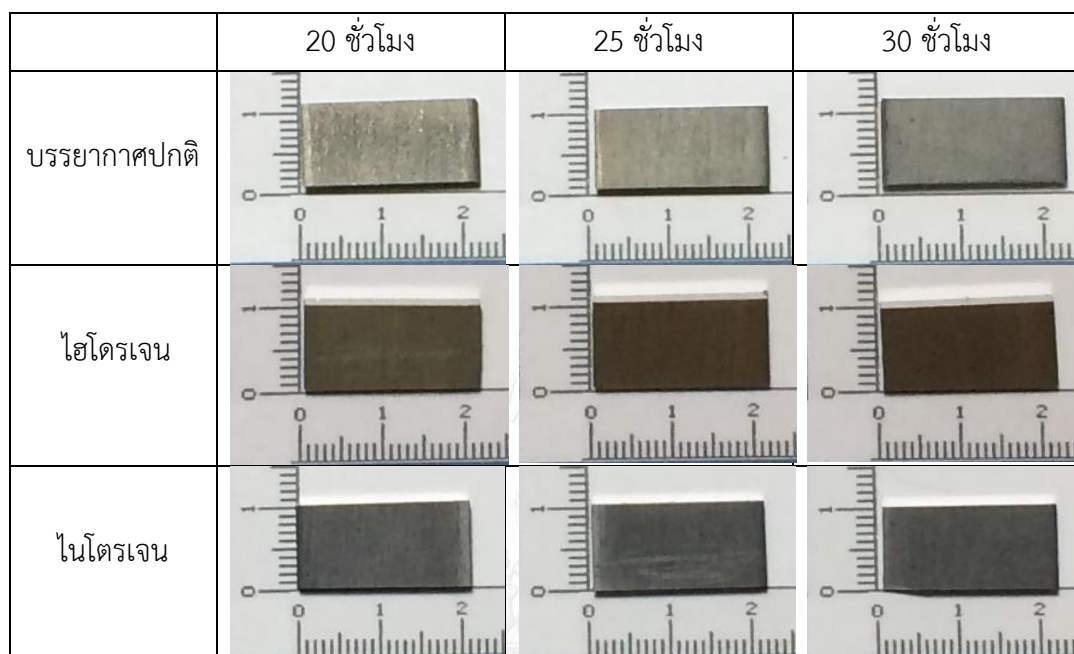


รูปที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์ชั้นสเกลออกไซด์ด้วย EDS line scan ของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศไฮโดรเจนจากกระบวนการของบริษัท

4.3 ผลการวิเคราะห์สเกลออกไซด์ของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศต่างๆ

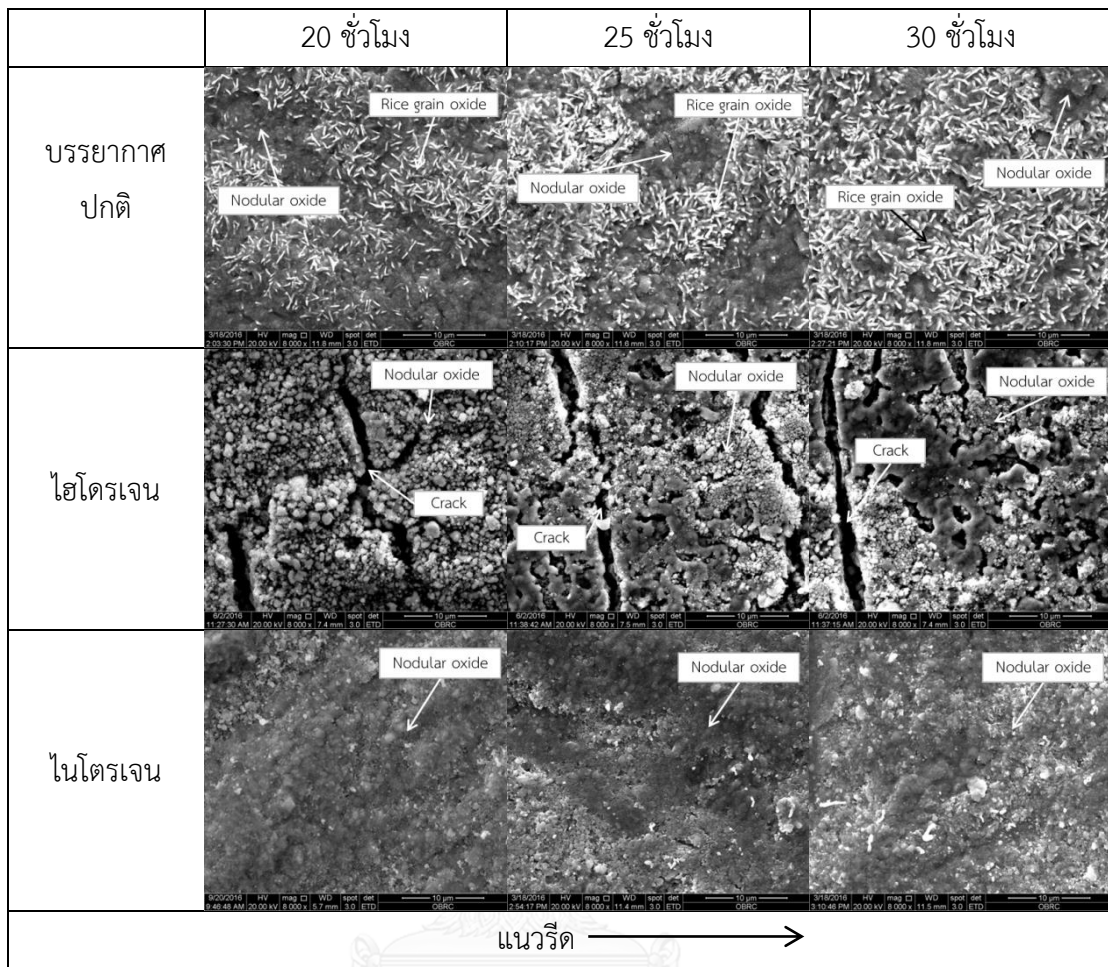
ลักษณะของสเกลออกไซด์ของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศต่างๆ ที่อุณหภูมิ 850°C เป็นระยะเวลา 20, 25 และ 30 ชั่วโมงแสดงดังรูปที่ 4.9 โดยหลังจากการอบ

อ่อนแบบกะในบรรยากาศปกติสเกลออกไซด์มีสีเทาอ่อน ในบรรยากาศไฮโดรเจนสเกลออกไซด์มีสีทอง และในบรรยากาศไนโตรเจนมีสีเทาเข้ม



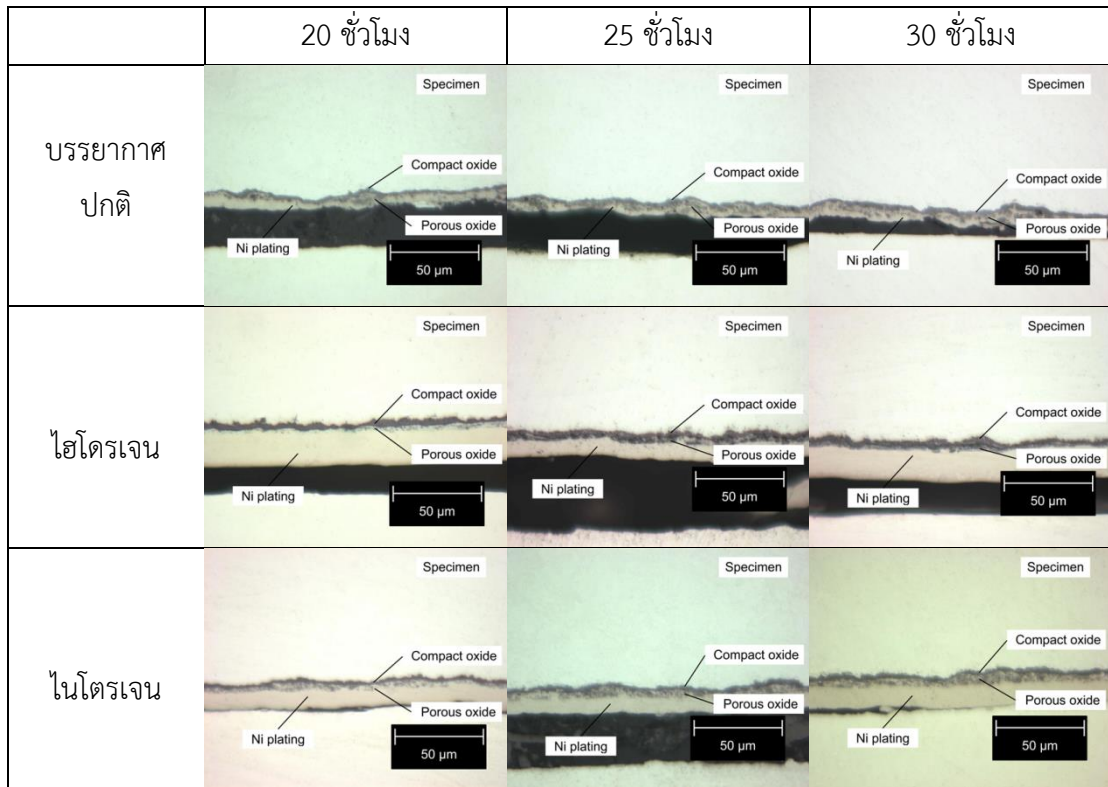
รูปที่ 4.9 ชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศปกติ, ไนโตรเจน และไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิ 850°C เป็นระยะเวลา 20, 25 และ 30 ชั่วโมง

ภาพชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศต่างๆ ที่อุณหภูมิ 850°C เป็นระยะเวลา 20, 25 และ 30 ชั่วโมงถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงดังรูปที่ 4.10 ในบรรยากาศปกติพบสเกลออกไซด์ 2 แบบคือลักษณะเปลือกข้าว (Rice grain oxide) อยู่ด้านบน และลักษณะ Nodular oxide อยู่ด้านล่าง เมื่อเวลาในการอบอ่อนแบบกะเพิ่มขึ้นปริมาณสเกลออกไซด์ลักษณะเปลือกข้าวก็เพิ่มมากขึ้นและมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยสเกลออกไซด์ลักษณะเปลือกข้าวที่พบนั้นคล้ายกับที่พบในออกซิเดชันของเหล็กกล้าโรสนิมเฟอร์ไรต์ในบรรยากาศปกติที่ 800°C [33] ในบรรยากาศไฮโดรเจนพบ Nodular oxide และรอยแตกตั้งฉากกับแนวรีด เมื่อระยะเวลาในการอบอ่อนแบบกะเพิ่มขึ้นพบว่า Nodular oxide บางส่วนรวมตัวกัน ในบรรยากาศไนโตรเจนพบ Nodular oxide เมื่อระยะเวลาในการอบอ่อนแบบกะเพิ่มขึ้นสเกลออกไซด์มีความหนาแน่นขึ้น

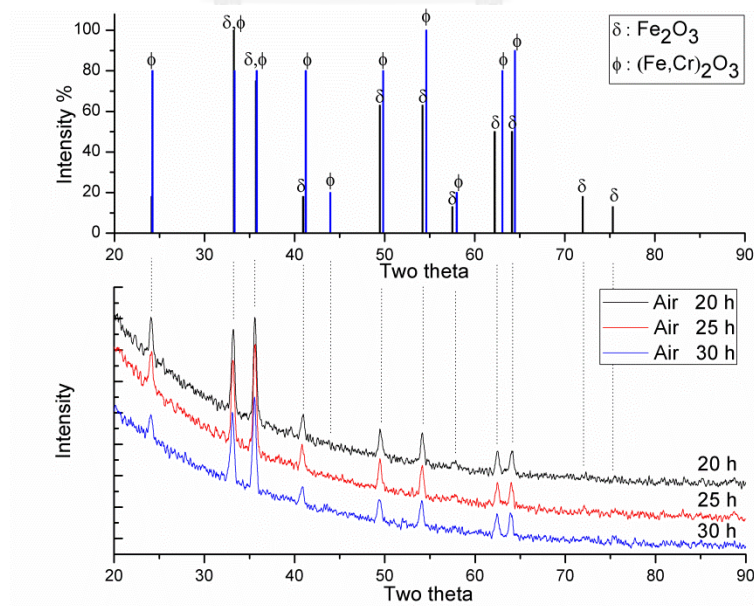


รูปที่ 4.10 พื้นผิวของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะ ในบรรยากาศปกติ, ไนโตรเจน และไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิ 850°C เป็นระยะเวลา 20, 25 และ 30 ชั่วโมง ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

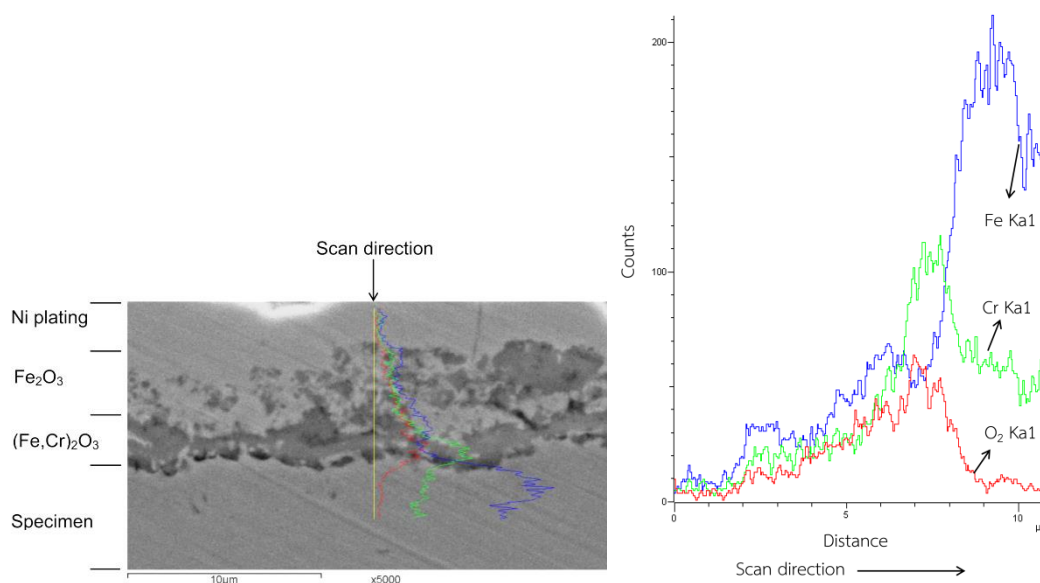
รูปที่ 4.11 แสดงภาคตัดขวางของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศต่างๆและเวลาต่างๆ ที่อุณหภูมิ 850°C เป็นระยะเวลา 20, 25 และ 30 ชั่วโมง พบว่าการอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศปกติสเกลออกไซด์มี 2 ชั้นคือชั้นนอกเป็นสเกลออกไซด์ที่มีรูพรุน และชั้นในเป็นสเกลออกไซด์ที่หนาแน่น ต่อมาจึงวิเคราะห์ด้วย GIXRD พบ $(\text{Fe,Cr})_2\text{O}_3$ และ Fe_2O_3 ดังรูปที่ 4.12 เมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS line scan ดังรูปที่ 4.13 พบว่าปริมาณ Cr ที่ชั้นสเกลออกไซด์รูพรุนมีค่าต่ำกว่าชั้นสเกลออกไซด์หนาแน่นและจากรูปที่ 4.10 จึงได้ว่า Fe_2O_3 เป็นสเกลออกไซด์ชั้นนอกที่มีรูพรุนมีลักษณะเปลือกข้าวซึ่งตรงกับงานวิจัยของ C. Somrerk และคณะ [33] และ $(\text{Fe,Cr})_2\text{O}_3$ เป็นสเกลออกไซด์ชั้นในที่หนาแน่นและมีลักษณะเป็นตุ่ม



รูปที่ 4.11 ภาคตัดขวางของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะ ในบรรยากาศปกติ, ไนโตรเจน และไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิ 850°C เป็นระยะเวลา 20, 25 และ 30 ชั่วโมง ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

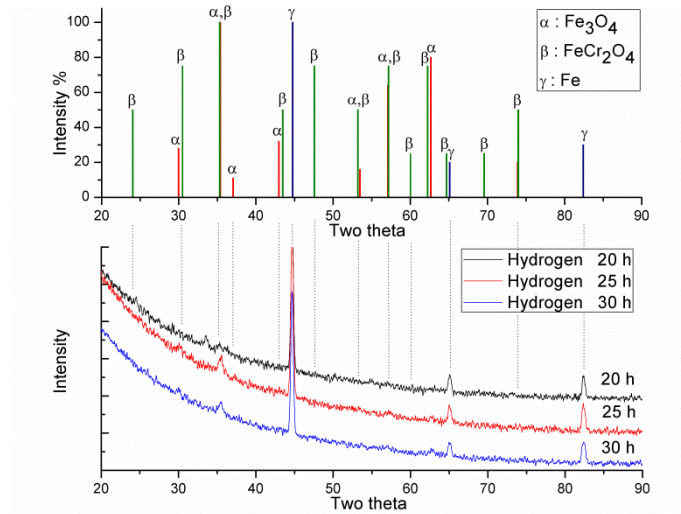


รูปที่ 4.12 ผลวิเคราะห์ GIXRD ของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะ ในบรรยากาศปกติที่อุณหภูมิ 850°C เวลา 20, 25 และ 30 ชั่วโมง

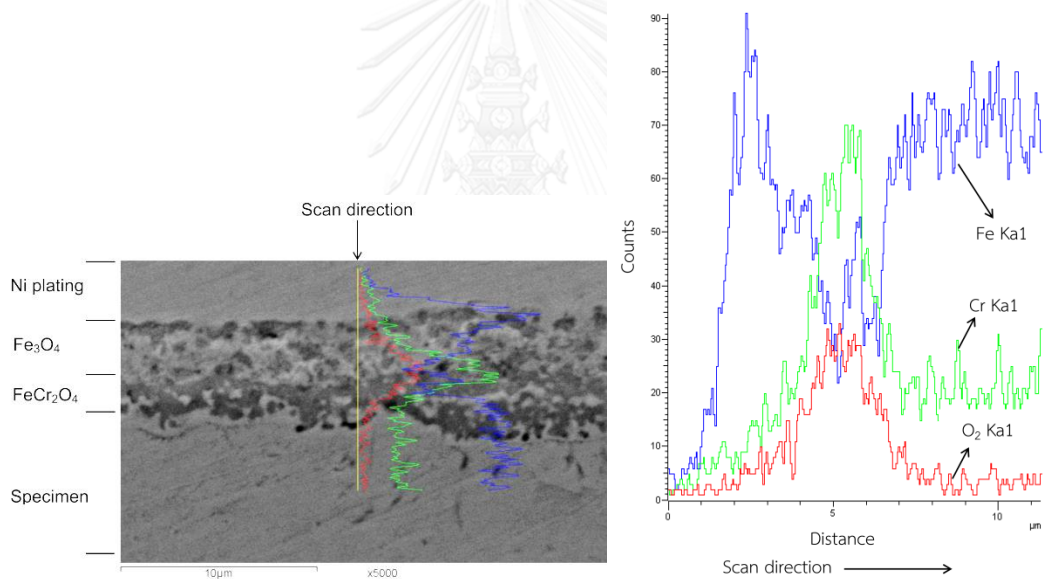


รูปที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์ชั้นสเกลออกไซด์ด้วย EDS line scan ของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อน แล้วอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศปกติ 30 ชั่วโมง

สำหรับชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศไฮโดรเจนพบสเกลออกไซด์ แบ่งเป็น 2 ชั้น โดยชั้นนอกเป็นสเกลออกไซด์ที่มีรูพรุน และชั้นในเป็นสเกลออกไซด์ที่มีความหนาแน่น ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ต่อมาวิเคราะห์ด้วย GIXRD พบ Fe₃O₄, spinel FeCr₂O₄ และ Fe ดังรูปที่ 4.14 สาเหตุที่พบ Fe ด้วย เนื่องจากสเกลออกไซด์หลังจากอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศไฮโดรเจน บางมาก และมีรอยแตกตั้งฉากกับแนวรีด ทำให้รังสีที่ตกกระทบจาก GIXRD ลงไปถึงเนื้อชิ้นงานได้ชั้น สเกลออกไซด์ และสะท้อนกลับออกมา จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS line scan ดังรูปที่ 4.15 พบว่าสเกลออกไซด์ชั้นในที่หนาแน่นมีปริมาณ Cr มากกว่า แต่มีปริมาณ Fe น้อยกว่า เมื่อเทียบกับ สเกลออกไซด์ชั้นนอกที่มีรูพรุนจึงสรุปได้ว่า Fe₃O₄ เป็นสเกลออกไซด์ชั้นนอกที่มีรูพรุน และ spinel FeCr₂O₄ เป็นสเกลออกไซด์ชั้นในที่หนาแน่น และจากรูปที่ 4.10 สเกลออกไซด์ลักษณะตุ่มคือ Fe₃O₄ ซึ่งตรงกับงานวิจัยของ A. Yamauchi และคณะ [19, 28] และงานวิจัยของ Y. Zhang และคณะ [29]



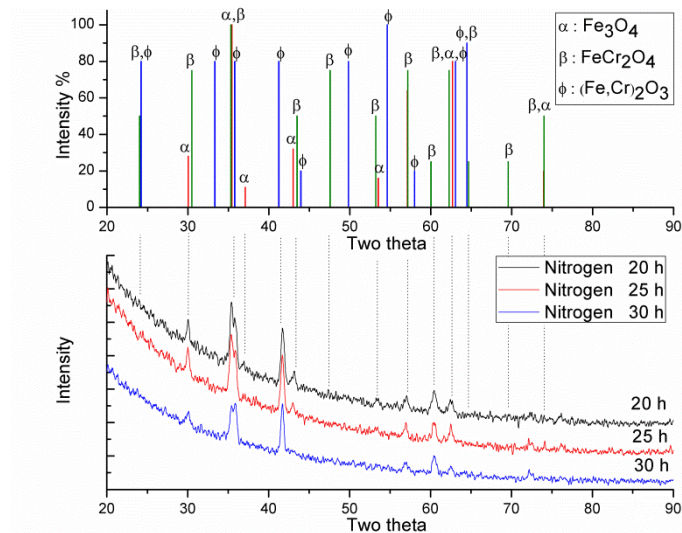
รูปที่ 4.14 ผลวิเคราะห์ GIXRD ของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วบอบอ่อนแบบกะไน
บรรยากาศไฮโดรเจนที่อุณหภูมิ 850°C เวลา 20, 25 และ 30 ชั่วโมง



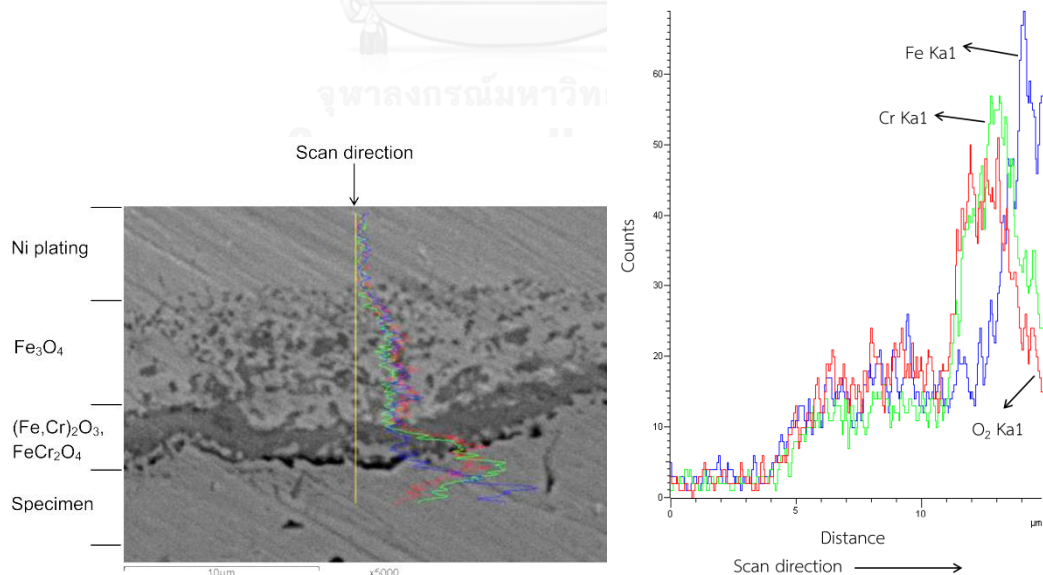
รูปที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์ชั้นสเกลออกไซด์ด้วย EDS line scan ของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อน
แล้วบอบอ่อนแบบกะไนไฮโดรเจน 30 ชั่วโมง

ชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วบอบอ่อนแบบกะไนบรรยากาศไนโตรเจนจากรูปที่ 4.11 สเกลออกไซด์แบ่งเป็น 2 ชั้น โดยชั้นนอกเป็นสเกลออกไซด์ที่มีรูพรุน และชั้นในเป็นสเกลออกไซด์ที่มีความหนาแน่น จากรูปที่ 4.16 แสดงผลการวิเคราะห์ชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วบอบอ่อนแบบกะไนบรรยากาศไนโตรเจนด้วยเทคนิค GIXRD พบสเกลออกไซด์ประกอบด้วย Fe_3O_4 , spinel FeCr_2O_4 และ $(\text{Fe,Cr})_2\text{O}_3$ เทคนิค EDS line scan ถูกใช้เพื่อตรวจสอบส่วนผสมของสเกลออกไซด์ชั้นนอกและชั้นในดังแสดงในรูปที่ 4.17 ซึ่งผลที่ได้พบว่าสเกลออกไซด์ชั้นในที่หนาแน่นมีปริมาณ Cr สูงกว่า ดังนั้น

Fe_3O_4 จึงเป็นสเกลออกไซด์ชั้นนอกที่มีรูพรุน และสเกลออกไซด์ชั้นในที่มีความหนาแน่นคือ spinel FeCr_2O_4 และ $(\text{Fe,Cr})_2\text{O}_3$ และจากรูปที่ 4.10 สเกลออกไซด์ลักษณะตุ่มคือ Fe_3O_4 ซึ่งตรงกับงานวิจัยของ A. Yamauchi และคณะ [19, 28] และงานวิจัยของ Y. Zhang และคณะ [29]



รูปที่ 4.16 ผลวิเคราะห์ GIXRD ของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะไนบรรยากาศไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 850°C เวลา 20, 25 และ 30 ชั่วโมง



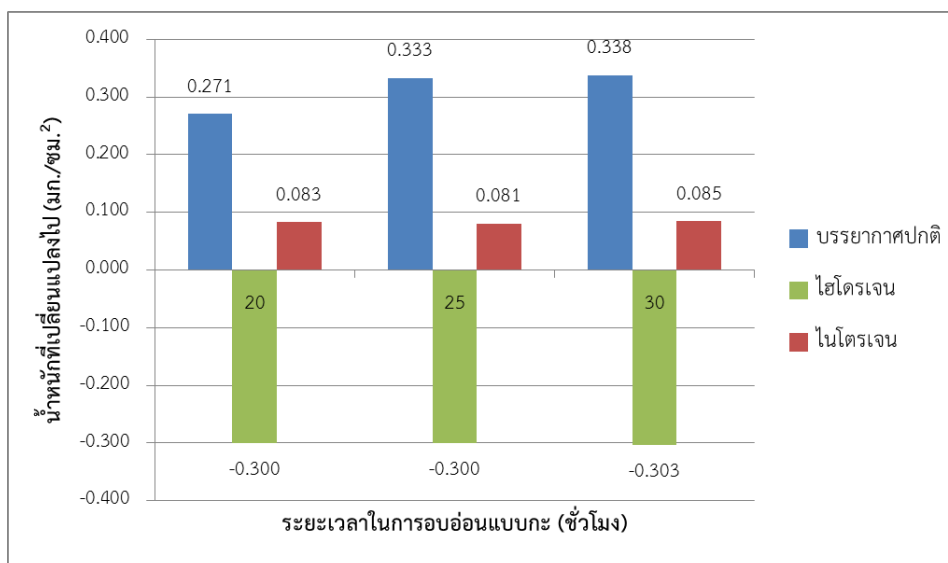
รูปที่ 4.17 ผลการวิเคราะห์ชั้นสเกลออกไซด์ด้วย EDS line scan ของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะไนไนโตรเจน 30 ชั่วโมง

ความหนาของสเกลออกไซด์นั้นแสดงในตารางที่ 4.1 โดยความหนาทั้งหมดของสเกลออกไซด์ที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอุ่นแบบกะในบรรยากาศปกติ มีค่ามากกว่าหลังการอบอุ่นแบบกะในบรรยากาศไฮโดรเจน และมีค่าใกล้เคียงกับหลังการอบอุ่นแบบกะในบรรยากาศไนโตรเจน สำหรับสเกลออกไซด์ชั้นหนาแน่นหลังจากอบอุ่นแบบกะในบรรยากาศปกติ มีค่ามากกว่าหลังการอบอุ่นแบบกะในบรรยากาศไนโตรเจน และไฮโดรเจนตามลำดับ อย่างไรก็ตามสำหรับสเกลออกไซด์ชั้นรูพรุนหลังจากอบอุ่นแบบกะในบรรยากาศไนโตรเจน มีค่ามากกว่าหลังการอบอุ่นแบบกะในบรรยากาศปกติ และไฮโดรเจนตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานก่อนอบอุ่นแบบกะกับชิ้นงานหลังจากอบอุ่นแบบกะในบรรยากาศปกติพบว่าสเกลออกไซด์ชั้นรูพรุนมีความหนาเพิ่มขึ้น และสเกลออกไซด์ชั้นหนาแน่นมีความหนาเพิ่มขึ้นจาก 2.20 เป็น 2.64-2.66 ไมโครเมตร เมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานก่อนอบอุ่นแบบกะกับชิ้นงานหลังจากอบอุ่นแบบกะในบรรยากาศไฮโดรเจนทั้งสเกลออกไซด์ชั้นรูพรุน และหนาแน่นมีความหนาใกล้เคียงกัน สำหรับชิ้นงานหลังอบอุ่นแบบกะในบรรยากาศไนโตรเจนเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานก่อนอบอุ่นแบบกะทั้งสเกลออกไซด์ที่พรุน และหนาแน่นมีความหนาขึ้น

ตารางที่ 4.1 ความหนาของชั้นสเกลออกไซด์ที่ผ่านการรีดร้อนก่อนและหลังการอบอุ่นแบบกะ

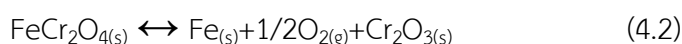
ตัวอย่าง	รูพรุน (ไมโครเมตร) / SD	หนาแน่น (ไมโครเมตร) SD	ทั้งหมด (ไมโครเมตร) / SD
ก่อนอบอุ่นแบบกะ	3.59/0.16	2.20/0.16	5.79/0.19
บรรยากาศปกติ 20 ชั่วโมง	3.87/0.08	2.66/0.03	6.53/0.08
บรรยากาศปกติ 25 ชั่วโมง	4.13/0.03	2.64/0.04	6.77/0.04
บรรยากาศปกติ 30 ชั่วโมง	4.38/0.08	2.69/0.08	7.07/0.13
ไฮโดรเจน 20 ชั่วโมง	3.65/0.06	2.12/0.03	5.77/0.08
ไฮโดรเจน 25 ชั่วโมง	3.68/0.06	2.11/0.05	5.79/0.07
ไฮโดรเจน 30 ชั่วโมง	3.65/0.03	2.13/0.04	5.78/0.06
ไนโตรเจน 20 ชั่วโมง	4.07/0.03	2.41/0.04	6.48/0.05
ไนโตรเจน 25 ชั่วโมง	4.55/0.06	2.49/0.05	7.04/0.09
ไนโตรเจน 30 ชั่วโมง	4.57/0.05	2.60/0.02	7.18/0.06

SD = Standard deviation



รูปที่ 4.18 น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไประหว่างหลังและก่อนอบอ่อนแบบกะ ในบรรยากาศปกติ, ไนโตรเจน และไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิ 850°C เป็นระยะเวลา 20, 25 และ 30 ชั่วโมง

น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปของสเกลออกไซด์หลังอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศปกติเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่อบอ่อนแบบกะดังรูปที่ 4.18 สเกลออกไซด์หลังอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศปกติคือ Fe_2O_3 และ $(\text{Fe,Cr})_2\text{O}_3$ เนื่องจากสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ของปฏิกิริยาที่ 4.1 ที่อุณหภูมิ 850°C มีค่าความดันย่อยของออกซิเจนเท่ากับ 1.01 mPa สำหรับในการอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศปกติความดันย่อยของออกซิเจนมีค่าสูงกว่า 1.01 mPa ดังนั้น Fe_3O_4 สเกลออกไซด์จึงทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในบรรยากาศเกิดเป็น Fe_2O_3 ซึ่งเป็นปฏิกิริยาย้อนกลับของปฏิกิริยาที่ 4.1 spinel FeCr_2O_4 สามารถสลายตัวเป็น Cr_2O_3 ดังแสดงในปฏิกิริยาที่ 4.2 [34]

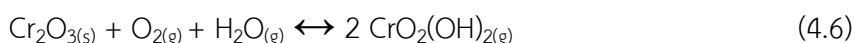
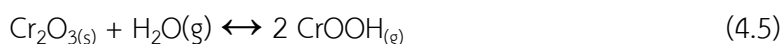
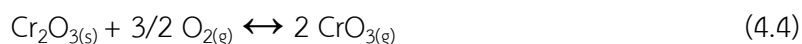


Fe จากปฏิกิริยาที่ 4.2 สามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในบรรยากาศ และจากปฏิกิริยาที่ 4.2 เกิดเป็นปฏิกิริยาที่ 4.3

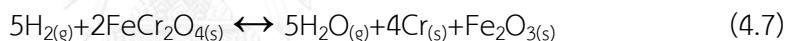


Cr_2O_3 จากปฏิกิริยาที่ 4.2 และ Fe_2O_3 จากปฏิกิริยาที่ 4.3 สามารถละลายเข้ากันได้เป็นสารละลายของแข็งเกิดเป็น $(\text{Fe,Cr})_2\text{O}_3$ เนื่องจากขนาดอะตอมใกล้เคียงกัน, อิเล็กโตรเนกาติวิตีใกล้เคียงกัน, โครงสร้างผลึกเหมือนกัน และมีเวเลนซ์อิเล็กตรอนเท่ากัน [35]

จากการศึกษาเพิ่มเติมพบว่า Cr_2O_3 สามารถทำปฏิกิริยากับ O_2 หรือ H_2O กลายเป็น $\text{CrO}_3(\text{g})$, $\text{CrOOH}(\text{g})$ และ $\text{CrO}_2(\text{OH})_2(\text{g})$ ดังปฏิกิริยาที่ 4.4-4.6 [4, 19, 36] ส่งผลให้ชิ้นงานหลังจากอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศปกติ และชิ้นงานหลังจากอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศไฮโดรเจนมีการสูญเสีย Cr_2O_3 บางส่วน



ซึ่งน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปของสเกลออกไซด์หลังอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศไฮโดรเจนเป็นเวลา 20, 25 และ 30 ชั่วโมงนั้นมีค่าประมาณ -0.301 มก./ cm^2 ดังรูปที่ 4.18 อาจเนื่องมาจากเนื่องมาจากการระเหยของ Cr_2O_3 โดยปฏิกิริยาดังต่อไปนี้ [19] เริ่มต้นไฮโดรเจนทำปฏิกิริยากับ spinel FeCr_2O_4 ตามปฏิกิริยา 4.7 [27]



ต่อมา Fe_2O_3 จากปฏิกิริยาที่ 4.7 สลายตัวให้ Fe_3O_4 โดยปฏิกิริยาที่ 4.1 เนื่องมาจากความดันย่อยของออกซิเจนในบรรยากาศต่ำกว่า 1.01 MPa หลังจากนั้นออกซิเจนจากปฏิกิริยาที่ 4.1 ทำปฏิกิริยากับ Cr จากปฏิกิริยา 4.7 ได้ปฏิกิริยาที่ 4.8



ปฏิกิริยาสุดท้าย Cr_2O_3 จากปฏิกิริยาที่ 4.8 ทำปฏิกิริยากับ H_2O จากปฏิกิริยาที่ 4.7 เกิดเป็น CrOOH ตามสมการที่ 4.5

จากรูปที่ 4.14 GIXRD พบพีคเล็กๆของ spinel FeCr_2O_4 ซึ่งหมายถึงปริมาณ Cr_2O_3 ที่ต่ำและยืนยันการเกิดการระเหยของ Cr_2O_3 นอกจากนี้ในชิ้นงานที่อบอ่อนแบบกะในบรรยากาศไฮโดรเจนสาเหตุที่พบรอยแตกตั้งฉากกับแนวรีด อธิบายได้ดังนี้ สาเหตุแรกไฮโดรเจนละลายใน Cr_2O_3 สเกล ทำให้สเกล Cr_2O_3 มีคุณสมบัติเปราะ [18, 27, 28, 36-38] สาเหตุต่อมาหลังจากการรีดร้อน เหล็กกล้าไร้สนิมจะมีความเค้นเหลือค้างในแนวรีดมากกว่าแนวตั้งฉากแนวรีด [39-41] และสาเหตุสุดท้าย มีความแตกต่างระหว่างการขยายตัวทางความร้อนของสเกลออกไซด์และตัวเนื้อเหล็กกล้าไร้

สนิมระหว่างที่เย็นตัว สเกลออกไซด์หลังจากอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศไฮโดรเจนคือ Fe_3O_4 และ spinel FeCr_2O_4 แต่ปริมาณ spinel FeCr_2O_4 มีน้อยเนื่องจากการทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนในบรรยากาศกลายเป็น $\text{CrOOH}_{(g)}$ ตามปฏิกิริยาที่ 4.5

น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปของสเกลออกไซด์หลังอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศไฮโดรเจนนั้นไม่ควรจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการอบอ่อนแบบกะ เนื่องจากอาจมีออกซิเจนหลงเหลือในบรรยากาศไฮโดรเจนปริมาณน้อยมาก การเกิดสเกลออกไซด์จึงน้อยมากทำให้น้ำหนักเปลี่ยนแปลงน้อยมาก แต่อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ ชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนก่อนการอบอ่อนแบบกะมีสเกลออกไซด์ที่มีรูพรุนทำให้อาจมีออกซิเจนบางส่วนอาจเหลือค้างอยู่ภายในสเกลออกไซด์ ปฏิกิริยาออกซิเดชันสามารถเกิดได้บางส่วน ส่งผลให้น้ำหนักหลังการอบอ่อนแบบกะเพิ่มขึ้นแต่มีค่าคงที่ประมาณ 0.083 มก./ซม.² ที่ระยะเวลาในการอบอ่อน 20, 25 และ 30 ชั่วโมง จากรูปที่ 4.16 สเกลออกไซด์หลังอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศไฮโดรเจนคือ Fe_3O_4 , $(\text{Fe,Cr})_2\text{O}_3$ และ spinel FeCr_2O_4 สำหรับสเกล Fe_3O_4 และ spinel FeCr_2O_4 มีมาตั้งแต่ชิ้นงานก่อนการอบอ่อนแบบกะ อย่างไรก็ตามเนื่องจากอาจมีออกซิเจนบางส่วนเหลือค้างในสเกลออกไซด์ ทำให้สเกลออกไซด์บางส่วนสลายตัวจาก spinel FeCr_2O_4 เกิดเป็น Fe_2O_3 และ Cr_2O_3 ดังปฏิกิริยาที่ 4.2 ถึง 4.3 ต่อมา Fe_2O_3 และ Cr_2O_3 รวมตัวกันเป็นสารละลายของแข็งเนื่องจากขนาดอะตอมใกล้เคียงกัน, อิเล็กโตรเนกาติวิตีใกล้เคียงกัน, โครงสร้างผลึกเหมือนกัน และมีเวเลนซ์อิเล็กตรอนเท่ากัน [35]

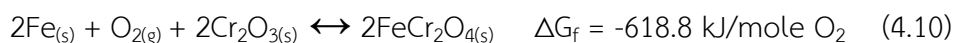
4.4 ผลการวิเคราะห์พื้นผิวหลังกัดกรดของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศต่างๆ

หลังจากนำชิ้นงานผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศต่างๆ ไปกัดกรดที่สภาวะความเข้มข้นของสารละลาย 1 ใน 4 ของกระบวนการผลิตจริง เนื่องจากที่ความเข้มข้นเดียวกับสภาวะของกระบวนการผลิตจริง ไม่พบสเกลออกไซด์เหลือค้างที่ผิว และใช้โปรแกรมวิเคราะห์ภาพ (PANASIS) ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.19 ตารางที่ 4.2 แสดงเปอร์เซ็นต์พื้นที่ของสเกลออกไซด์เหลือค้างที่ผิวหลังจากนำชิ้นงานผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศต่างๆ ไปกัดกรด กรณีชิ้นงานผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศปกติพบว่า เมื่อระยะเวลาการอบอ่อนแบบกะเพิ่มขึ้น ปริมาณสเกลออกไซด์เหลือค้างที่ผิวก็เพิ่มขึ้นด้วยดังแสดงในตารางที่ 4.2 เมื่อระยะเวลาในการอบเพิ่มขึ้นจาก 20 ชั่วโมงเป็น 25 ชั่วโมง ปริมาณสเกลออกไซด์เหลือค้างที่ผิวเพิ่มขึ้นอย่างมากจาก 0.0444 เปอร์เซ็นต์ เป็น 0.0507 เปอร์เซ็นต์ หลังจาก 25 ชั่วโมงเป็น 30 ชั่วโมงเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเป็น 0.0522 เปอร์เซ็นต์ สาเหตุเนื่องมาจากเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณสเกล

ออกไซด์เพิ่มมากขึ้น และอัตราการเกิดออกซิเดชันที่ลดลง [21] สามารถพิจารณาจากรูปที่ 4.18 จะเห็นว่าในช่วง 20 ชั่วโมงไป 25 ชั่วโมงนั้นน้ำหนักที่เปลี่ยนไประหว่างหลังและก่อนอบอ่อนแบบกะมีค่าเพิ่มขึ้นมาก และมีค่าเพิ่มขึ้นน้อยลงในช่วง 25 - 30 ชั่วโมง สำหรับชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศไฮโดรเจน มีปริมาณสเกลออกไซด์เหลือค้ำที่ผิวเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อระยะเวลาในการอบอ่อนแบบกะเพิ่มขึ้น โดยที่ระยะเวลาในการอบอ่อนแบบกะ 20, 25 และ 30 ชั่วโมง มีปริมาณสเกลออกไซด์เหลือค้ำที่ผิวคือ 0.0143 เปอร์เซ็นต์, 0.0161 เปอร์เซ็นต์ และ 0.0165 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สาเหตุที่เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการอบอ่อนแบบกะแล้วมีปริมาณสเกลออกไซด์เหลือค้ำที่ผิวเพิ่มมากขึ้นเนื่องมาจาก Nodular oxide บางส่วนรวมตัวกันดังแสดงในรูปที่ 4.10 ทำให้กำจัดสเกลออกไซด์เหลือค้ำที่ผิวได้ยากขึ้น สำหรับชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศไนโตรเจน มีปริมาณสเกลออกไซด์เหลือค้ำที่ผิวเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการอบอ่อนแบบกะเพิ่มขึ้น โดยที่ระยะเวลาในการอบอ่อนแบบกะ 20, 25 และ 30 ชั่วโมง มีปริมาณสเกลออกไซด์เหลือค้ำที่ผิวคือ 0.0251 เปอร์เซ็นต์, 0.0284 เปอร์เซ็นต์ และ 0.0318 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สาเหตุเพราะความหนาของชั้นสเกลออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในตารางที่ 4.1 เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการอบอ่อนแบบกะ

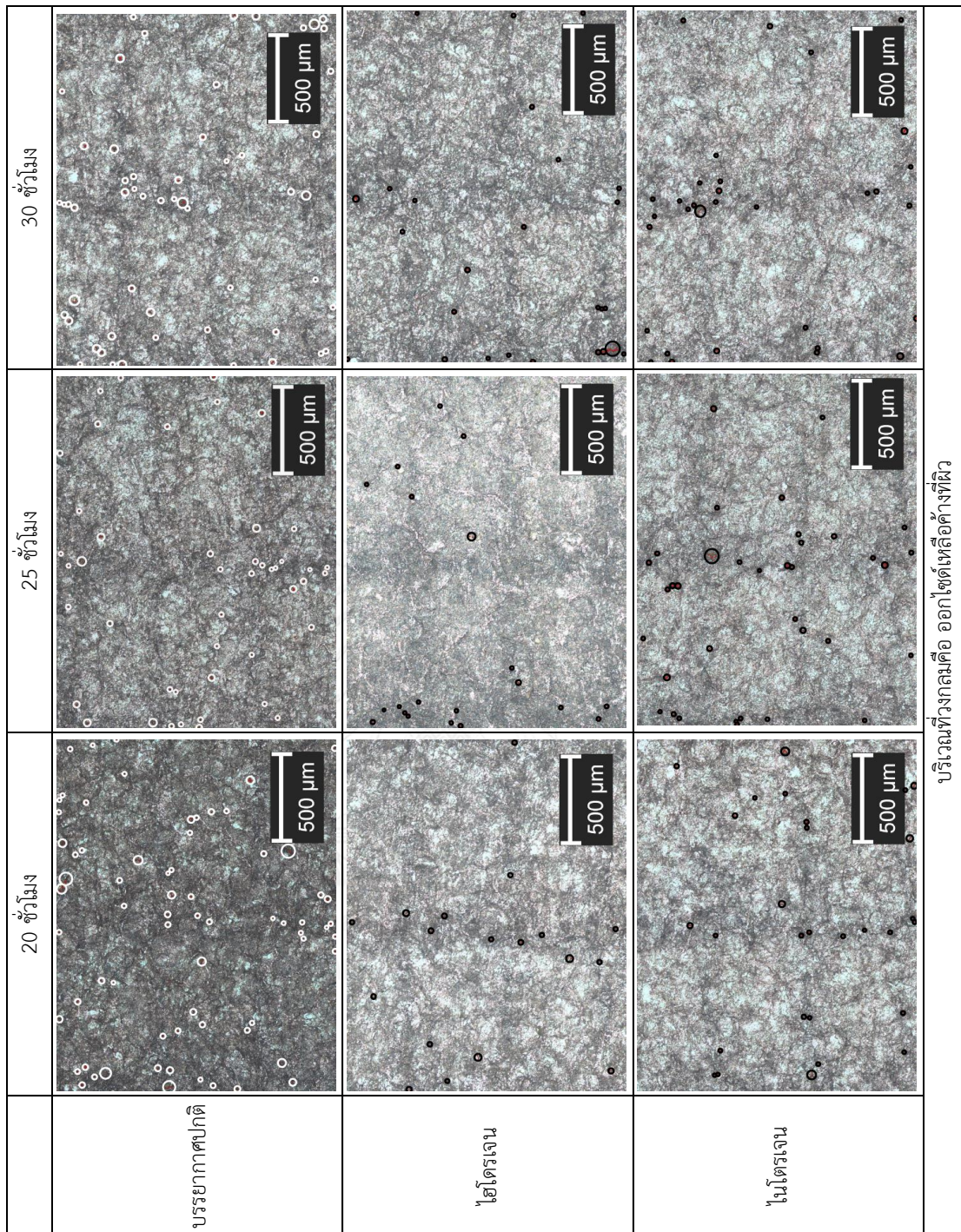
เมื่อนำชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะทั้ง 3 บรรยากาศที่ผ่านการกัดกรดสถานะความเข้มข้นของสารละลาย 1 ใน 4 ของกระบวนการผลิตจริง มาเปรียบเทียบกับพบว่าการอบอ่อนในบรรยากาศปกติมีปริมาณสเกลออกไซด์เหลือค้ำที่ผิวมากที่สุดรองลงมาคือ ไนโตรเจน และไฮโดรเจน ตามลำดับ สาเหตุที่สเกลออกไซด์จากการอบอ่อนในบรรยากาศปกติ เมื่อผ่านการกัดกรดแล้วมีปริมาณสเกลออกไซด์เหลือค้ำที่ผิวมากที่สุด เพราะการอบอ่อนในบรรยากาศปกติเกิดการออกซิเดชันมากดังที่แสดงในรูปที่ 4.18 ที่แสดงค่าน้ำหนักที่เปลี่ยนไประหว่างหลังและก่อนการอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศปกติมีค่ามากที่สุดและหมายถึงชั้นสเกลออกไซด์มีปริมาณหรือความหนามาก การกัดกรดจึงยากลำบากกว่า นอกจากนี้จากตารางที่ 4.1 ที่แสดงความหนาชั้นสเกลออกไซด์กับผลวิเคราะห์ GIXRD และ EDX (รูปที่ 4.12 และ 4.13) พบว่าชั้นสเกลออกไซด์ชั้นหนาแน่นมีความหนาที่สุดและเป็นสเกลออกไซด์ชนิด $(\text{Fe,Cr})_2\text{O}_3$ ที่มีโครเมียมมาก (Cr rich) คาดว่าทำให้สมบัติเข้าใกล้ Cr_2O_3 ส่งผลให้มีความเสถียรกว่าสเกลออกไซด์ชั้นหนาแน่นที่เป็นสเกลออกไซด์ชนิด spinel FeCr_2O_4 (จากรูปที่ 4.14 - 4.17) ที่พบจากการอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศไนโตรเจน และไฮโดรเจน โดยจากการพิจารณาพลังงานอิสระกิบส์ที่อุณหภูมิ 25 °C ของสเกลออกไซด์ชนิด Cr_2O_3 และ spinel FeCr_2O_4 ที่แสดงในปฏิกิริยาที่ 4.10 และ 4.11 ตามลำดับ [42]





กรณีการอบอ่อนในบรรยากาศไนโตรเจนที่มีปริมาณสเกลออกไซด์ชั้นรูปุนมากที่สุดดังแสดงในตารางที่ 4.1 และมีสเกลออกไซด์ชั้นหนาแน่นเป็นสเกลออกไซด์ชนิด spinel FeCr_2O_4 และ $(\text{Fe,Cr})_2\text{O}_3$ เล็กน้อย คำน้้าหนักที่เปลี่ยนไประหว่างหลังและก่อนอบอ่อนแบบกะมีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศปกติ การกัดกรดจึงง่ายกว่า จึงมีปริมาณสเกลออกไซด์เหลือค้ำงที่ผิวรองลงมา

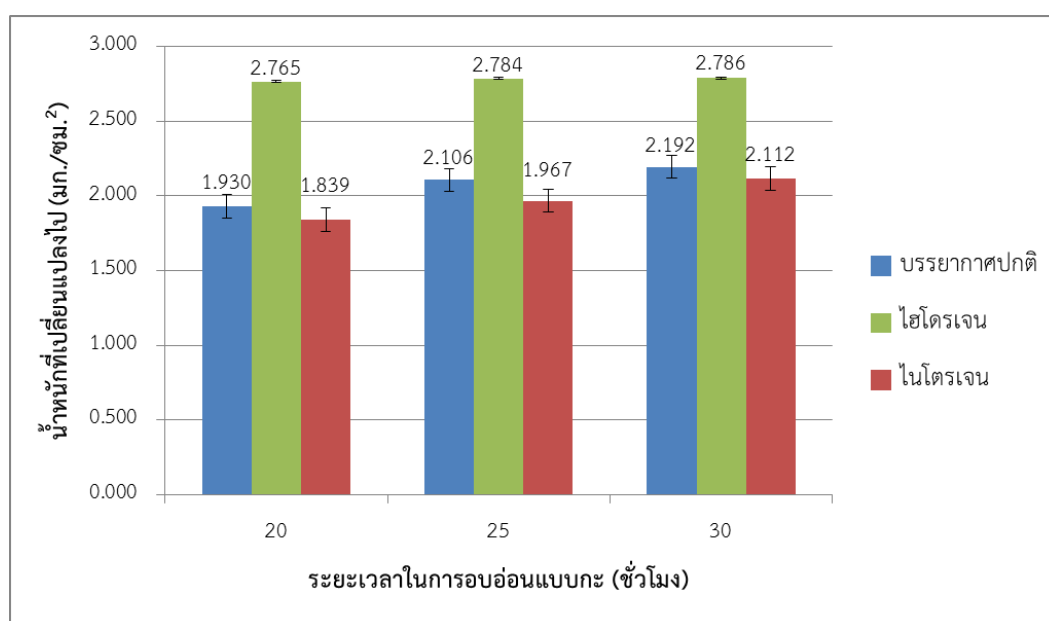
กรณีการอบอ่อนในบรรยากาศไฮโดรเจน มีค่าน้ำหนักที่เปลี่ยนไประหว่างหลังและก่อนอบอ่อนแบบกะมีค่าเป็นลบ หมายถึง สเกลออกไซด์อาจหลุดร่อนได้ง่าย มีรอยแตกต้งฉากกับแนวรีดที่ผิว สเกลออกไซด์ทำให้สารละลายกรดสามารถแทรกซึมเข้าไปในชั้นสเกลออกไซด์ได้ง่าย ชั้นสเกลออกไซด์มีความบางที่สุด และสเกลออกไซด์ชั้นหนาแน่นเป็นสเกลออกไซด์ชนิด spinel FeCr_2O_4 การกัดกรดจึงง่ายที่สุดเทียบกับกรณีการอบอ่อนในบรรยากาศปกติและในบรรยากาศไนโตรเจน หลังการกัดกรดจึงมีปริมาณสเกลออกไซด์เหลือค้ำงที่ผิวน้อยที่สุด



รูปที่ 4.19 ภาพพื้นผิวชิ้นงานหลังจากกัดกรดของชิ้นงานผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะโนบรรยากาศปกติ, ไฮโดรเจน และไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 850°C เป็นระยะเวลา 20, 25 และ 30 ชั่วโมง ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

ตารางที่ 4.2 เปอร์เซ็นต์พื้นที่ของสเกลออกไซด์เหลือค้างที่ผิวต่อพื้นที่ผิวหลังจากนำชิ้นงานผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศต่างๆ ไปกัดกรด

เปอร์เซ็นต์พื้นที่ของสเกลออกไซด์ เหลือค้างที่ผิวต่อพื้นที่ผิว	20 ชั่วโมง	25 ชั่วโมง	30 ชั่วโมง
บรรยากาศปกติ	0.0444	0.0507	0.0522
ไฮโดรเจน	0.0143	0.0161	0.0165
ไนโตรเจน	0.0251	0.0284	0.0318

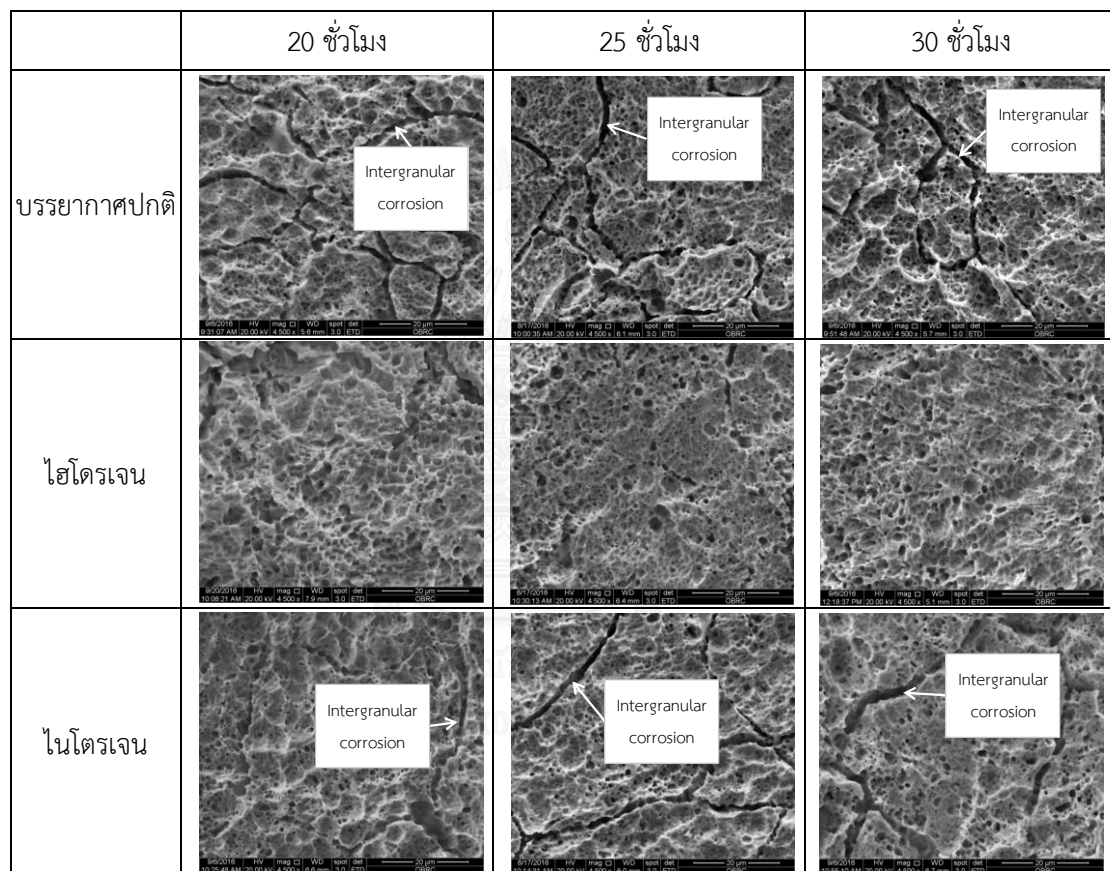


รูปที่ 4.20 น้ำหนักที่เปลี่ยนไประหว่างหลังและก่อนกัดกรดของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศปกติ, ไนโตรเจน และไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิ 850°C เป็นระยะเวลา 20, 25 และ 30 ชั่วโมง

รูปที่ 4.20 แสดงน้ำหนักที่เปลี่ยนไประหว่างหลังและก่อนกัดกรดของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศและเวลาต่างๆ โดยชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศปกติมีน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปเพิ่มขึ้น ตามระยะเวลาในการอบอ่อนแบบกะ สาเหตุเพราะปริมาณสเกลออกไซด์ที่ผิวที่เพิ่มมากขึ้น และหนาขึ้นทำให้ปริมาณสเกลออกไซด์ที่โดนกัดกรดที่ผิวเยอะขึ้น และปริมาณสเกลออกไซด์เหลือค้างที่ผิวก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย สำหรับชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศไฮโดรเจนมีน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปค่อนข้างคงที่อยู่ที่ 2.778 มก./ซม.² สาเหตุอาจเป็นเพราะความหนาและปริมาณสเกลออกไซด์ไม่ขึ้นกับระยะเวลาในการอบอ่อนแบบกะ กรณีชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศไนโตรเจนมีน้ำหนักที่

เปลี่ยนแปลงไปเพิ่มขึ้น ตามระยะเวลาในการอบอ่อนแบบกะ สาเหตุเพราะปริมาณสเกลออกไซด์ที่ผิวหนาขึ้นเมื่อระยะเวลาการอบอ่อนแบบกะมากขึ้น

เมื่อนำชิ้นงานหลังอบอ่อนแบบกะทั้ง 3 บรรยากาศมาเปรียบเทียบกับพบว่าการอบอ่อนในบรรยากาศไฮโดรเจนมีน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปภายหลังกระบวนการกัดกรดมากที่สุด และมีความหนาของชั้นสเกลออกไซด์น้อยที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลปริมาณสเกลออกไซด์เหลือค้างที่ผิวน้อยที่สุด รองลงมาคือการอบอ่อนในบรรยากาศบรรยากาศปกติ และไนโตรเจนตามลำดับ



รูปที่ 4.21 พื้นผิวของชิ้นงานหลังกัดกรดของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศปกติ, ไนโตรเจน และไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิ 850°C เป็นระยะเวลา 20, 25 และ 30 ชั่วโมง ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เมื่อนำชิ้นงานที่กัดกรดแล้วไปถ่ายภาพดูพื้นผิวหลังการกัดกรดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดดังแสดงในรูปที่ 4.21 พบว่าชิ้นงานที่อบอ่อนแบบกะในบรรยากาศปกติ เกิดการกัดกร่อนตามขอบเกรน (Intergranular corrosion) มากที่สุด กรณีชิ้นงานที่อบอ่อนแบบกะในบรรยากาศไฮโดรเจนเกิดการกัดกร่อนตามขอบเกรนเล็กน้อย กรณีชิ้นงานที่อบอ่อนแบบกะใน

บรรยากาศไนโตรเจนเกิดการกัดกร่อนตามขอบเกรนปานกลาง ซึ่งลักษณะการกัดกร่อนนั้นมีผลต่อกระบวนการรีดเย็นโดยขึ้นงานที่เกิดการกัดกร่อนตามขอบเกรน มีแนวโน้มที่รีดแล้วความหยาบผิวจะสูงกว่าขึ้นงานที่เกิดการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ

สาเหตุที่พบการกัดกร่อนตามขอบเกรนอาจเป็นเพราะ สเกลออกไซด์ชนิด $(Fe,Cr)_2O_3$ ที่มีโครเมียมมาก ทำให้มีคุณสมบัติเข้าใกล้ Cr_2O_3 ที่มีความเสถียรสูง (จากสมการที่ 4.9) ทำให้ขณะกัดกรดขอบเกรนซึ่งมีดิสโลเคชันอยู่เยอะจึงถูกกัดกร่อนได้ง่ายกว่าบริเวณที่มีสเกลออกไซด์ชนิด $(Fe,Cr)_2O_3$ ซึ่งจากรูปที่ 4.12 และ 4.13 ขึ้นงานที่อบอ่อนแบบกะในบรรยากาศปกติมีสเกลออกไซด์ชั้นในที่หนาแน่นเป็นสเกลออกไซด์ชนิด $(Fe,Cr)_2O_3$ ที่มีโครเมียมมาก จึงพบการกัดกร่อนตามขอบเกรนมากที่สุด กรณีขึ้นงานที่อบอ่อนแบบกะในบรรยากาศไนโตรเจน จากรูปที่ 4.16 และ 4.17 สเกลออกไซด์ชั้นในที่หนาแน่นเป็นสเกลออกไซด์สเกลออกไซด์ชนิด $FeCr_2O_4$ และชนิด $(Fe,Cr)_2O_3$ ที่มีโครเมียมมาก ปกกันอยู่ทำให้เกิดการกัดกร่อนตามขอบเกรนรองลงมา กรณีขึ้นงานที่อบอ่อนแบบกะในบรรยากาศไฮโดรเจน จากรูปที่ 4.14 และ 4.15 สเกลออกไซด์ชั้นในที่หนาแน่นเป็นสเกลออกไซด์สเกลออกไซด์ชนิด $FeCr_2O_4$ เท่านั้นทำให้เกิดการกัดกร่อนตามขอบเกรนน้อยที่สุด

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

ผลการศึกษาการอบอ่อนแบบกะของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอโรไซด์แผ่นรีดร้อนเกรด 430 ในบรรยากาศปกติ, ไฮโดรเจน และไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 850°C เป็นเวลา 20, 25 และ 30 ชั่วโมงแล้วนำไปกัดกรดเพื่อกำจัดสเกลออกไซด์ที่เกิดขึ้นสามารถสรุปได้ดังนี้

1. หลังจากอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศปกติสเกลออกไซด์ชั้นนอกที่มีรูพรุนคือ ออกไซด์ชนิด Fe_2O_3 และชั้นในที่หนาแน่นคือ ออกไซด์ชนิด $(\text{Fe,Cr})_2\text{O}_3$ หลังจากอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศไฮโดรเจนสเกลออกไซด์ชั้นนอกที่มีรูพรุนคือ ออกไซด์ชนิด Fe_3O_4 และชั้นในที่หนาแน่นคือ ออกไซด์ชนิด spinel FeCr_2O_4 หลังจากอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศไนโตรเจนสเกลออกไซด์ชั้นนอกที่มีรูพรุนคือ ออกไซด์ชนิด Fe_3O_4 และชั้นในที่หนาแน่นคือ ออกไซด์ชนิด $(\text{Fe,Cr})_2\text{O}_3$, FeCr_2O_4
2. หลังจากอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศไฮโดรเจนแล้วพบรอยแตกที่ชั้นสเกลออกไซด์ตั้งฉากกับแนวรีด
3. น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปหลังจากอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศไนโตรเจนและไฮโดรเจนไม่ขึ้นกับระยะเวลาในการอบอ่อนแบบกะ แต่ในบรรยากาศปกติน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปหลังจากอบอ่อนแบบกะขึ้นกับระยะเวลาในการอบอ่อนแบบกะ
4. หลังจากกระบวนการกัดกรดการอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศไฮโดรเจน มีปริมาณสเกลออกไซด์เหลือค้างที่ผิววน้อยที่สุด รองลงมาคือการอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศไนโตรเจน และบรรยากาศปกติตามลำดับ
5. น้ำหนักที่เปลี่ยนไปภายหลังการกัดกรดชิ้นงานที่อบอ่อนแบบกะในบรรยากาศไฮโดรเจนมีค่ามากที่สุดรองลงมาคือชิ้นงานที่อบอ่อนแบบกะในบรรยากาศปกติ และไนโตรเจนตามลำดับ
6. สภาพพื้นผิวภายหลังการกัดกรด กรณีชิ้นงานที่อบอ่อนแบบกะในบรรยากาศปกติมีการกัดกร่อนตามขอบเกรนมากที่สุด รองลงมาคือชิ้นงานที่อบอ่อนแบบกะในบรรยากาศไนโตรเจน และบรรยากาศไฮโดรเจนตามลำดับ
7. เมื่อพิจารณาจากปริมาณสเกลออกไซด์เหลือค้างที่ผิว และลักษณะการกัดกร่อนแล้วบรรยากาศในการอบอ่อนแบบกะที่เหมาะสมคือ บรรยากาศไฮโดรเจน รองลงมาคือบรรยากาศไนโตรเจน และบรรยากาศปกติ

รายการอ้างอิง

1. J.R. Davis, *Stainless Steels*. ASM Specialty Handbook. 1996.
2. L. Sa´nchez, M.P. Hierro, F. J. Pe´rez, *Effect of Chromium Content on the Oxidation Behaviour of Ferritic Steels for Applications in Steam Atmospheres at High Temperatures*. *Oxidation of Metals*, 2009. **71**(3-4): p. 173-186.
3. G.E. Totten, *Steel Heat Treatment: Metallurgy and Technologies*, ed. 2. 2007, Portland, Oregon, U.S.A.: Taylor&Francis. 695-735.
4. B. Baroux, P. Lacombe, G. Beranger, *The 17%Cr Stainless Steels*. *Stainless Steels*. Vol. 2. 1993, France: Les ´ditions de physique.
5. *The in-house technical report*, in *Posco-Thainox Co., Ltd. Unpublished*.
6. D. Peckner, I.M. Bernstein, *Handbook of stainless steels*. 1977, New York: McGraw-Hill Company.
7. D.J. Young, *High temperature oxidation and corrosion of metals*, ed. 1. 2008, Oxford, UK: Elsevier Science.
8. I. Saeki, H. Konno, R. Furuichi, T. Nakamura, K. Mabuchi, M. Itoh, *THE EFFECT OF THE OXIDATION ATMOSPHERE ON THE INITIAL OXIDATION OF TYPE 430 STAINLESS STEEL AT 1273 K*. *Corrosion Science*, 1998. **40**(2/3): p. 191-200.
9. Pattama Naewkanya, Ura Panchareon, Pornchai Labcharoenwongsa, Gobboon Lothongkum, *Effects of Annealing Temperature, Time and Oxygen Content on Secondary Oxide Formation of AISI 304 Stainless Steel*. *Materials and Minerals*, 2010. **20**(3): p. 19-23.
10. I. Saeki, et al., *In situ X-ray diffraction of surface oxide on type 430 stainless steel in breakaway condition using synchrotron radiation*. *Corrosion Science*, 2012. **55**: p. 219-225.
11. I. Saeki, et al., *Effect of heating rate on properties of initially formed oxides on type 430 stainless steels at 1273K*. *Zairyo-to-Kankyo-Corrosion-Engineering*, 1997. **46**(12): p. 789-796.

12. P. Shi, Y. Wang, C Liu, M. Jiang, *Effect of oxidation agent on pickling of 430 stainless steel*. *Advanced Materials Research*, 2011(233-235): p. 938-941.
13. *High Nitrogen Steels*, J. Foct, A. Hendry (Eds.). in Proc. of 1st International Conference High Nitrogen Steels, Inst. Met. 1989. London, UK.
14. *High Nitrogen Steels*, G. Stein, H. Witulski (Eds.). in Proc. of 2nd Intl. Conf. High Nitrogen Steels, Stahl & Eisen. 1990. Duesseldorf, Germany.
15. *High Nitrogen Steels*, V.G. Gavriljuk, V.M. Nadutov (Eds.). in Proc. of 3rd Intl. Conf. High Nitrogen Steels, Inst. Met. Phys. 1993. Kiev, Ukraine.
16. *High Nitrogen Steels*, M. Kikuchi, Y. Mishima (Eds.). in ISIJ International, 36 (7). 1996.
17. *High Nitrogen Steels*, H. Hänninen, S. Hertzman, J. Romu (Eds.). in Proc. of 5th Intl. Conf. High Nitrogen Steels. 1998. Espoo, Finland and Stockholm, Sweden.
18. P.K. Kofstad, *High-Temperature Oxidation of Metals*. 1 ed. 1966, New York, USA: John Wiley and Sons.
19. A. Yamauchi, K. Kurokawa, H. Takahashi, *Evaporation of Cr₂O₃ in Atmospheres Containing H₂O*. *Oxidation of Metals*, 2003. **59**(5): p. 517-527.
20. I. Saeki, H. Konno, R. Furuichi, *THE INITIAL OXIDATION OF TYPE 430 STAINLESS STEEL IN O₂-H₂O-N₂ ATMOSPHERES AT 1273 K*. *Corrosion Science*, 1996. **Vol. 38**(1): p. 19-31.
21. I. Saeki, et al., *GROWTH PROCESS OF PROTECTIVE OXIDES FORMED ON TYPE 304 AND 430 STAINLESS STEELS AT 1273 K*. *Corrosion Science*, 1998. **40**(8): p. 1295-1302.
22. C. Carvalho, G. Costa, A. Cota, E. Rossi, *High Temperature Oxidation Behavior of AISI 304 and AISI 430 Stainless Steels*. *Materials Research*, 2006. **9**(4): p. 393-397.
23. L.F. Li, P. Caenen, M.F. Jiang, *Electrolytic pickling of the oxide layer on hot-rolled 304 stainless steel in sodium sulphate*. *Corrosion Science*, 2008. **50**(10): p. 2824-2830.
24. X. Qiong, S. Pei-yang, L. Cheng-jun, J. Mao-fa, *Effects of Different Oxidants on HCl-based Pickling Process of 430 Stainless Steel*. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2016. **23**(8): p. 778-783.

25. L.F. Li, *Pickling of Austenitic Stainless Steels*, in *Internal review report Alz-Arcelor, Unpublished*. 2002: France.
26. N. Ipek, N. Lior, A. Eklund, *Improvement of the electrolytic metal pickling process by inter-electrode insulation*. *Ironmaking & Steelmaking*, 2005. **32**(1): p. 87-96.
27. S. Jianian, Z. Longjiang, L. Tiefan, *High-Temperature Oxidation of Fe-Cr Alloys in Wet Oxygen*. *Oxidation of Metals*, 1997. **48**(3/4).
28. A. Yamauchi, et al., *TDS Measurement of Hydrogen Released from Stainless Steel Oxidized in H₂O-Containing Atmospheres*. *Materials Science Forum*, 2006. **522**(523): p. 163-170.
29. Y. Zhanga, et al., *Electrochemical performance of carbon-encapsulated Fe₃O₄ nanoparticles in lithium-ion batteries: morphology and particle size effects*. *Electrochimica Acta*, 2016. **216**: p. 475-483.
30. C. Xiawei, et al., *Oxide scale characterization of ferritic stainless steel and its deformation and friction in hot rolling*. *Tribology International*, 2015. **84**: p. 61-70.
31. H. Dae Jin , et al., *Effects of Alloying Elements on Sticking Behavior Occurring during Hot Rolling of Modified Ferritic STS430J1L Stainless Steels*. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2009. **40**(5): p. 1080.
32. J. Zurek, et al., *Effect of Alloying Additions in Ferritic 9-12%Cr Steels on the Temperature Dependence of the Steam Oxidation Resistance*. *Materials Science Forum*, 2004. **461-464**: p. 791-798.
33. C. Somrerck, et al., *Application of the Micro-Tensile Testing to Investigate the Adhesion of Thermal Oxide Scales Grown on AISI 441 Stainless Steel Sheet Oxidised in Air and Water Vapour*. *Key Engineering Materials*, 2009. **410-411**: p. 187-193.
34. S.E. Ziemniak, L.M. Anovitz, R.A. Castelli, W.D. Porter, *Thermodynamics of Cr₂O₃, FeCr₂O₄, ZnCr₂O₄, and CoCr₂O₄*. *The Journal of Chemical Thermodynamics*, 2007. **39**(11): p. 1474-1492.

35. K. A. Hay, F. G. Hicks, D. R. Holmes, *The Transport Properties and Defect Structure of the Oxide (Fe, Cr)₂O₃ formed on Fe-Cr alloys*. Materials and Corrosion, 1970. **21**(11): p. 917-924.
36. I. Kvernes, M. Oliveira, P.K. Kofstad, *High temperature oxidation of Fe-13Cr-xAl alloys in air H₂O vapour mixtures*. Corrosion Science, 1977. **17**(3): p. 237-252.
37. P.K. Kofstad, *High-Temperature Corrosion*. Elsevier Applied Science. 1988.
38. H. Gunnar, T. Bent, H. Erik, *Hydrogen in Chromium: Influence on the High-Temperature Oxidation Kinetics in H₂O, Oxide-Growth Mechanisms and Scale Adherence*. Oxidation of Metals, 2000. **54**(1): p. 1-10.
39. Z. Zhou, P.F. Thomson, Y. Lam, D.D.W. Yuen, *Numerical analysis of residual stress in hot-rolled steel strip on the run-out table*. Journal of Materials Processing Technology, 2003. **132**(1-3): p. 184-197.
40. M. De Giorgi, *Residual stress evolution in cold-rolled steels*. International Journal of Fatigue, 2011. **33**(3): p. 507-512.
41. B.P. Michael, R.H. Michael *Residual Stress, Stress Relief, and Inhomogeneity in Aluminum Plate*. Scripta Materialia, 2002. **46**(1): p. 77-82.
42. M. Krivilyov, et al., *Thermodynamic Assessment of Chrome-Spinel Formation in Laser-Sintered Coatings with Cr₂O₃ Particles*. Metallurgical and Materials Transactions B, 2016. **47**(3): p. 1573-1582.

ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก-1 ถึง ก-11 แสดงผลการวัดความหนาชั้นออกไซด์จากภาพภาคตัดขวางของชิ้นงาน โดยวัดความหนาของชั้นสเกลออกไซด์ที่หนาแน่น และที่มีรูพรุนรูปละ 6 จุด จำนวน 10 รูป

ตารางที่ ก-1 ผลการวัดความหนาชั้นออกไซด์จากภาพภาคตัดขวางของชิ้นงานที่รีดร้อนก่อนอบอ่อนแบบกะ ที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

รูปที่	1	2	3	4	5
Oxide scale thickness (μm)					
compact-1	2.54	2.54	2.14	2.54	2.01
porous 1	3.74	3.88	4.01	3.74	3.88
compact-2	2.01	2.27	2.27	2.67	2.94
porous 2	3.48	4.01	2.54	3.34	4.28
compact-3	1.87	2.54	1.74	2.01	2.01
porous 3	3.61	3.61	4.14	4.01	3.74
compact-4	2.14	1.87	2.01	2.14	1.87
porous 4	3.48	3.48	4.01	2.81	2.67
compact-5	4.01	2.54	2.01	2.41	2.01
porous 5	2.14	4.01	4.01	3.74	3.07
compact-6	2.27	2.14	1.87	1.47	1.88
porous 6	3.48	4.01	3.48	3.88	3.61
total layer	5.80	6.15	5.71	5.79	5.66
compact	2.47	2.32	2.01	2.21	2.12
porous	3.32	3.83	3.70	3.59	3.54

6	7	8	9	10	Total	SD
Oxide scale thickness (μm)						
1.87	2.14	1.87	2.01	2.14	-	-
3.74	3.74	3.88	3.74	3.74	-	-
2.14	1.87	2.01	2.41	2.01	-	-
3.74	3.48	4.28	3.74	4.14	-	-
2.01	2.41	2.01	4.14	2.27	-	-
3.61	3.21	4.41	3.61	3.21	-	-
2.27	2.14	2.14	2.67	2.67	-	-
3.48	3.74	2.67	4.01	3.74	-	-
2.14	2.67	1.74	1.47	2.54	-	-
2.67	4.01	3.07	2.67	4.41	-	-
1.87	2.27	2.14	1.07	2.27	-	-
3.88	2.54	3.61	3.21	3.48	-	-
5.57	5.70	5.64	5.79	6.10	5.79	0.19
2.05	2.25	1.99	2.30	2.32	2.20	0.16
3.52	3.45	3.65	3.50	3.79	3.59	0.16

SD = Standard deviation

ตารางที่ ก-2 ผลการวัดความหนาชั้นออกไซด์จากภาพภาคตัดขวางของชิ้นงานที่รีดร้อนแล้วอบอ่อน
แบบกะในบรรยากาศไฮโดรเจนจากกระบวนการของบริษัทที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบ
ใช้แสง

รูปที่	1	2	3	4	5
Oxide scale thickness (μm)					
compact-1	1.34	2.41	2.14	2.81	2.27
porous 1	3.21	3.21	3.88	2.81	2.41
compact-2	2.81	1.87	2.01	2.67	1.34
porous 2	3.61	5.08	2.01	2.01	4.01
compact-3	2.14	1.74	1.60	4.14	2.14
porous 3	6.02	2.27	2.14	5.21	3.61
compact-4	2.27	2.67	3.34	2.14	4.95
porous 4	2.27	4.41	2.12	4.68	1.6
compact-5	2.67	2.14	3.54	4.14	1.6
porous 5	5.08	4.41	4.41	4.41	4.14
compact-6	2.14	1.60	2.67	4.28	3.34
porous 6	3.34	3.48	4.68	4.28	4.41
total layer	6.15	5.88	5.76	7.26	5.97
compact	2.23	2.07	2.55	3.36	2.61
porous	3.92	3.81	3.21	3.90	3.36

6	7	8	9	10	Total	SD
Oxide scale thickness (μm)						
2.94	2.54	2.41	2.27	2.67	-	-
5.48	3.21	3.61	4.14	3.34	-	-
2.81	3.74	2.81	2.81	2.14	-	-
2.27	3.88	3.61	5.21	4.41	-	-
2.27	3.21	2.67	2.94	2.41	-	-
4.95	3.07	5.48	3.61	2.14	-	-
1.6	3.07	3.34	2.54	2.44	-	-
3.07	3.88	4.68	5.21	4.14	-	-
1.74	3.61	2.54	2.67	2.67	-	-
3.61	2.81	3.34	5.08	5.08	-	-
2.67	3.21	2.41	2.67	2.54	-	-
2.41	4.41	4.41	2.27	3.61	-	-
5.97	6.77	6.89	6.90	6.27	6.38	0.55
2.34	3.23	2.70	2.65	2.48	2.62	0.49
3.63	3.54	4.19	4.25	3.79	3.76	0.27

SD = Standard deviation

ตารางที่ ก-3 ผลการวัดความหนาชั้นออกไซด์จากภาพภาคตัดขวางของชิ้นงานที่รีดร้อนแล้วอบอ่อน
แบบกะในบรรยากาศปกติ 20 ชั่วโมง ที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

รูปที่	1	2	3	4	5
Oxide scale thickness (μm)					
compact-1	2.54	2.67	2.67	2.67	2.81
porous 1	3.74	3.74	3.74	3.74	3.61
compact-2	2.54	2.81	2.54	2.67	2.67
porous 2	4.01	3.61	3.74	3.74	4.01
compact-3	2.67	2.94	2.67	2.81	2.81
porous 3	4.14	3.61	4.14	4.14	3.74
compact-4	2.54	2.54	2.67	2.81	2.41
porous 4	3.74	3.74	3.74	4.14	4.01
compact-5	2.54	2.51	2.54	2.41	2.67
porous 5	3.74	3.74	3.74	4.01	3.88
compact-6	2.81	2.81	2.81	2.81	2.54
porous 6	3.74	4.14	4.14	3.88	3.64
total layer	6.46	6.48	6.52	6.64	6.47
compact	2.61	2.71	2.65	2.70	2.65
porous	3.85	3.76	3.87	3.94	3.82

6	7	8	9	10	Total	SD
Oxide scale thickness (μm)						
2.54	2.81	2.54	2.54	2.54	-	-
3.88	3.88	3.88	3.88	4.14	-	-
2.41	2.81	2.54	2.81	2.81	-	-
3.74	3.74	4.14	3.88	4.28	-	-
2.67	2.81	2.81	2.54	2.81	-	-
4.01	3.88	3.74	4.01	3.88	-	-
2.67	2.41	2.54	2.81	2.54	-	-
3.74	3.74	3.74	3.74	4.01	-	-
2.81	2.81	2.81	2.54	2.67	-	-
4.01	4.14	3.88	3.61	4.01	-	-
2.54	2.41	2.67	2.81	2.54	-	-
3.61	3.88	4.01	3.74	3.88	-	-
6.44	6.55	6.55	6.49	6.69	6.53	0.08
2.61	2.68	2.65	2.68	2.65	2.66	0.03
3.83	3.88	3.90	3.81	4.03	3.87	0.08

SD = Standard deviation

ตารางที่ ก-4 ผลการวัดความหนาชั้นออกไซด์จากภาพภาคตัดขวางของชิ้นงานที่รีดร้อนแล้วอบอ่อน
แบบกะในบรรยากาศปกติ 25 ชั่วโมง ที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

รูปที่	1	2	3	4	5
Oxide scale thickness (μm)					
compact-1	2.67	2.54	2.94	2.67	2.67
porous 1	4.01	4.01	4.01	4.01	4.14
compact-2	2.67	2.67	2.67	2.67	2.54
porous 2	4.14	4.14	4.14	4.28	4.14
compact-3	2.94	2.54	2.54	2.54	2.67
porous 3	4.28	4.14	4.14	4.01	4.01
compact-4	2.67	2.81	2.54	2.67	2.54
porous 4	4.28	4.28	4.01	4.28	4.14
compact-5	2.54	2.81	2.67	2.81	2.67
porous 5	4.01	4.01	4.14	4.14	4.28
compact-6	2.67	2.67	2.67	2.54	2.67
porous 6	4.14	4.14	4.54	3.88	3.88
total layer	6.84	6.79	6.84	6.75	6.73
compact	2.69	2.67	2.67	2.65	2.63
porous	4.14	4.12	4.16	4.10	4.10

6	7	8	9	10	Total	SD
Oxide scale thickness (μm)						
2.54	2.81	2.54	2.41	2.67	-	-
4.14	3.88	4.01	4.01	4.28	-	-
2.67	2.41	2.54	2.81	2.41	-	-
4.14	4.14	4.14	4.01	4.01	-	-
2.67	2.67	2.81	2.67	2.54	-	-
4.28	4.28	4.01	4.01	4.28	-	-
2.81	2.67	2.67	2.54	2.41	-	-
4.01	4.14	4.01	4.41	4.01	-	-
2.67	2.67	2.67	2.41	2.67	-	-
4.01	4.14	4.28	4.28	4.28	-	-
2.41	2.41	2.41	2.81	2.81	-	-
4.01	4.14	4.28	4.28	4.28	-	-
6.73	6.73	6.73	6.78	6.78	6.77	0.04
2.63	2.61	2.61	2.61	2.59	2.64	0.04
4.10	4.12	4.12	4.17	4.19	4.13	0.03

SD = Standard deviation

ตารางที่ ก- 5 ผลการวัดความหนาชั้นออกไซด์จากภาพภาคตัดขวางของชิ้นงานที่รีดร้อนแล้วอบอ่อน
แบบกะในบรรยากาศปกติ 30 ชั่วโมง ที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

รูปที่	1	2	3	4	5
Oxide scale thickness (μm)					
compact-1	3.07	2.54	2.81	2.81	2.67
porous 1	4.14	4.54	4.54	4.54	4.41
compact-2	2.67	2.81	2.54	2.67	2.54
porous 2	4.01	3.88	4.41	4.14	4.68
compact-3	2.94	2.81	2.67	2.81	2.81
porous 3	4.41	4.41	4.41	4.01	4.54
compact-4	2.67	2.81	2.67	2.54	2.67
porous 4	4.68	4.41	4.41	4.81	4.68
compact-5	2.94	2.81	2.94	2.54	2.54
porous 5	4.54	4.68	4.28	4.68	4.01
compact-6	3.07	2.54	2.67	2.81	2.67
porous 6	4.95	4.01	4.41	4.81	3.88
total layer	7.35	7.04	7.13	7.20	7.02
compact	2.89	2.72	2.72	2.70	2.65
porous	4.46	4.32	4.41	4.50	4.37

6	7	8	9	10	Total	SD
Oxide scale thickness (μm)						
2.67	2.67	2.67	2.67	2.67	-	-
4.41	4.54	4.41	4.28	4.68	-	-
2.67	2.54	2.81	2.54	2.54	-	-
4.41	4.14	4.41	4.41	4.01	-	-
2.54	2.54	2.54	2.67	2.54	-	-
4.14	4.54	4.01	4.41	4.54	-	-
2.67	2.67	2.54	2.67	2.67	-	-
4.54	4.14	4.54	4.14	4.41	-	-
2.81	2.94	2.67	2.54	2.54	-	-
4.14	4.14	4.68	4.28	4.14	-	-
2.81	2.54	2.54	2.67	2.67	-	-
4.14	4.01	4.81	4.54	4.41	-	-
6.99	6.90	7.11	6.97	6.97	7.07	0.13
2.70	2.65	2.63	2.63	2.61	2.69	0.08
4.30	4.25	4.48	4.34	4.37	4.38	0.08

SD = Standard deviation

ตารางที่ ก-6 ผลการวัดความหนาชั้นออกไซด์จากภาพภาคตัดขวางของชิ้นงานที่รีดร้อนแล้วอบอ่อน
แบบกะในบรรยากาศไฮโดรเจน 20 ชั่วโมง ที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

รูปที่	1	2	3	4	5
Oxide scale thickness (μm)					
compact-1	2.01	2.01	2.01	2.27	2.14
porous 1	3.61	3.74	3.48	3.74	3.34
compact-2	2.27	2.01	2.01	2.01	2.01
porous 2	3.74	3.88	3.74	4.01	3.74
compact-3	2.01	2.27	2.14	2.14	2.14
porous 3	3.48	3.61	4.01	3.74	3.74
compact-4	2.14	2.27	2.27	2.14	2.01
porous 4	3.61	3.61	3.48	3.74	3.74
compact-5	2.27	2.14	2.14	2.01	2.14
porous 5	3.48	3.61	3.74	3.74	3.48
compact-6	2.14	2.14	2.14	2.14	2.01
porous 6	3.88	3.88	3.74	3.61	3.74
total layer	5.77	5.86	5.82	5.88	5.71
compact	2.14	2.14	2.12	2.12	2.08
porous	3.63	3.72	3.70	3.76	3.63

6	7	8	9	10	Total	SD
Oxide scale thickness (μm)						
1.87	2.01	2.14	2.27	2.14	-	-
3.61	3.88	3.88	3.61	3.61	-	-
2.14	2.01	2.14	2.01	2.01	-	-
3.61	3.74	3.21	3.61	3.61	-	-
2.01	2.27	2.01	2.14	2.14	-	-
3.48	3.48	3.34	3.74	3.74	-	-
2.01	2.14	2.01	1.87	2.27	-	-
3.48	3.34	3.61	3.48	3.34	-	-
2.27	2.14	2.14	2.41	2.14	-	-
3.74	3.74	3.74	3.61	3.48	-	-
2.27	2.14	2.01	2.27	2.27	-	-
3.74	3.61	3.48	3.74	3.88	-	-
5.71	5.75	5.62	5.79	5.77	5.77	0.08
2.10	2.12	2.08	2.16	2.16	2.12	0.03
3.61	3.63	3.54	3.63	3.61	3.65	0.06

SD = Standard deviation

ตารางที่ ก-7 ผลการวัดความหนาชั้นออกไซด์จากภาพภาคตัดขวางของชิ้นงานที่รีดร้อนแล้วอบอ่อน
แบบกะในบรรยากาศไฮโดรเจน 25 ชั่วโมง ที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

รูปที่	1	2	3	4	5
Oxide scale thickness (μm)					
compact-1	1.87	2.14	2.14	2.27	2.27
porous 1	3.48	3.48	3.74	4.01	3.48
compact-2	2.01	1.87	2.27	2.14	2.14
porous 2	3.74	4.01	3.61	3.48	3.61
compact-3	2.14	2.14	2.14	2.27	2.01
porous 3	3.88	3.61	3.74	3.88	3.61
compact-4	2.14	2.01	2.27	2.01	2.01
porous 4	3.48	3.88	3.61	4.01	4.01
compact-5	2.01	2.01	2.14	1.87	2.01
porous 5	3.88	4.01	3.61	3.48	3.61
compact-6	2.14	2.01	2.27	1.87	2.14
porous 6	4.14	3.48	3.88	3.61	3.61
total layer	5.82	5.78	5.90	5.82	5.75
compact	2.05	2.03	2.21	2.07	2.10
porous	3.77	3.75	3.70	3.75	3.66

6	7	8	9	10	Total	SD
Oxide scale thickness (μm)						
2.41	2.01	2.14	2.14	2.01	-	-
3.48	3.61	3.61	3.88	3.61	-	-
2.14	2.14	2.14	2.27	2.27	-	-
3.88	3.61	3.74	3.61	3.61	-	-
2.14	2.27	2.14	2.27	2.14	-	-
3.88	3.74	3.61	3.74	3.48	-	-
2.01	2.01	2.14	2.01	2.14	-	-
3.88	3.74	3.74	3.34	3.48	-	-
2.14	2.14	2.01	2.14	2.01	-	-
3.88	3.74	3.48	3.48	3.61	-	-
2.01	2.27	1.87	2.14	2.01	-	-
3.48	3.48	3.48	3.74	3.74	-	-
5.89	5.79	5.68	5.79	5.69	5.79	0.07
2.14	2.14	2.07	2.16	2.10	2.11	0.05
3.75	3.65	3.61	3.63	3.59	3.68	0.06

SD = Standard deviation

ตารางที่ ก-8 ผลการวัดความหนาชั้นออกไซด์จากภาพภาคตัดขวางของชิ้นงานที่รีดร้อนแล้วอบอ่อน
แบบกะในบรรยากาศไฮโดรเจน 30 ชั่วโมง ที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

รูปที่	1	2	3	4	5
Oxide scale thickness (μm)					
compact-1	2.27	2.01	1.74	2.14	2.14
porous 1	3.74	3.48	3.74	3.61	3.74
compact-2	1.87	2.14	2.27	2.01	2.01
porous 2	3.61	3.61	3.48	3.74	3.74
compact-3	1.87	2.14	2.01	2.14	2.01
porous 3	3.74	3.74	3.61	3.74	3.61
compact-4	2.27	2.14	2.14	2.14	2.14
porous 4	3.74	3.61	3.74	3.61	3.88
compact-5	2.27	2.14	2.27	2.14	2.14
porous 5	3.61	3.61	3.61	3.61	3.61
compact-6	2.14	2.27	1.87	2.27	2.27
porous 6	3.61	3.74	3.61	3.61	3.61
total layer	5.79	5.77	5.68	5.79	5.82
compact	2.12	2.14	2.05	2.14	2.12
porous	3.68	3.63	3.63	3.65	3.70

6	7	8	9	10	Total	SD
Oxide scale thickness (μm)						
2.41	2.27	2.27	2.14	2.27	-	-
3.21	3.74	3.61	3.74	3.74	-	-
2.01	1.87	2.14	2.27	2.14	-	-
3.88	3.61	3.74	3.61	3.74	-	-
1.87	2.01	2.14	2.01	2.27	-	-
3.88	3.48	3.61	3.74	3.61	-	-
1.87	2.54	2.27	1.87	2.27	-	-
3.74	3.74	3.61	3.48	3.74	-	-
2.27	2.14	2.01	2.01	1.87	-	-
3.61	3.61	3.61	3.61	3.61	-	-
2.27	2.14	2.27	2.14	2.27	-	-
3.61	3.61	3.61	3.61	3.74	-	-
5.77	5.79	5.82	5.71	5.88	5.78	0.06
2.12	2.16	2.18	2.07	2.18	2.13	0.04
3.66	3.63	3.63	3.63	3.70	3.65	0.03

SD = Standard deviation

ตารางที่ ก-9 ผลการวัดความหนาชั้นออกไซด์จากภาพภาคตัดขวางของชิ้นงานที่รีดร้อนแล้วอบอ่อน
แบบกะในบรรยากาศไนโตรเจน 20 ชั่วโมง ที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

รูปที่	1	2	3	4	5
Oxide scale thickness (μm)					
compact-1	2.41	2.41	2.41	2.41	2.67
porous 1	3.61	4.28	4.01	4.01	3.74
compact-2	2.67	2.14	2.27	2.27	2.41
porous 2	4.41	4.01	4.01	4.41	4.14
compact-3	2.14	2.41	2.41	2.41	2.54
porous 3	3.74	3.88	4.41	4.01	4.14
compact-4	2.41	2.27	2.27	2.67	2.41
porous 4	3.88	4.14	4.28	3.88	4.14
compact-5	2.41	2.41	2.27	2.41	2.41
porous 5	4.14	4.14	3.88	4.01	3.74
compact-6	2.67	2.27	2.54	2.41	2.27
porous 6	4.28	3.88	3.88	4.28	4.41
total layer	6.46	6.37	6.44	6.53	6.50
compact	2.45	2.32	2.36	2.43	2.45
porous	4.01	4.06	4.08	4.10	4.05

6	7	8	9	10	Total	SD
Oxide scale thickness (μm)						
2.27	2.41	2.54	2.41	2.54	-	-
4.28	4.41	3.88	3.88	4.01	-	-
2.27	2.41	2.41	2.27	2.41	-	-
4.14	4.28	4.54	4.14	4.01	-	-
2.41	2.27	2.41	2.41	2.54	-	-
3.61	3.61	4.41	4.14	3.88	-	-
2.54	2.54	2.41	2.41	2.41	-	-
3.61	3.61	3.74	4.14	4.28	-	-
2.54	2.27	2.27	2.54	2.41	-	-
4.54	4.41	3.74	3.74	4.41	-	-
2.54	2.54	2.41	2.41	2.41	-	-
4.28	4.41	4.14	4.14	3.88	-	-
6.51	6.53	6.48	6.44	6.53	6.48	0.05
2.43	2.41	2.41	2.41	2.45	2.41	0.04
4.08	4.12	4.08	4.03	4.08	4.07	0.03

SD = Standard deviation

ตารางที่ ก-10 ผลการวัดความหนาชั้นออกไซด์จากภาพภาคตัดขวางของชิ้นงานที่รีดร้อนแล้วอบอ่อน
แบบกะในบรรยากาศไนโตรเจน 25 ชั่วโมง ที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

รูปที่	1	2	3	4	5
Oxide scale thickness (μm)					
compact-1	2.54	2.67	2.41	2.67	2.67
porous 1	4.68	4.28	4.81	4.54	4.81
compact-2	2.81	2.54	2.41	2.41	2.54
porous 2	4.41	4.68	4.95	4.41	4.54
compact-3	2.41	2.41	2.41	2.41	2.41
porous 3	4.68	4.41	4.14	4.68	4.54
compact-4	2.67	2.41	2.27	2.54	2.41
porous 4	4.54	4.95	4.68	5.21	4.28
compact-5	2.41	2.41	2.54	2.67	2.67
porous 5	4.54	4.14	4.41	4.14	4.81
compact-6	2.54	2.81	2.54	2.41	2.54
porous 6	4.54	5.08	4.54	4.41	4.41
total layer	7.13	7.13	7.02	7.08	7.11
compact	2.56	2.54	2.43	2.52	2.54
porous	4.57	4.59	4.59	4.57	4.57

6	7	8	9	10	Total	SD
Oxide scale thickness (μm)						
2.41	2.41	2.67	2.67	2.54	-	-
4.14	4.68	4.14	4.54	4.54	-	-
2.54	2.27	2.27	2.41	2.41	-	-
4.41	4.54	4.28	4.41	4.68	-	-
2.54	2.27	2.67	2.54	2.67	-	-
4.68	4.41	4.54	4.54	4.41	-	-
2.27	2.41	2.41	2.54	2.41	-	-
5.08	4.81	4.41	4.81	4.41	-	-
2.41	2.67	2.41	2.41	2.54	-	-
4.14	4.28	4.28	4.54	4.81	-	-
2.41	2.54	2.27	2.41	2.41	-	-
4.68	4.81	4.68	4.68	4.68	-	-
6.95	7.02	6.84	7.08	7.09	7.04	0.09
2.43	2.43	2.45	2.50	2.50	2.49	0.05
4.52	4.59	4.39	4.59	4.59	4.55	0.06

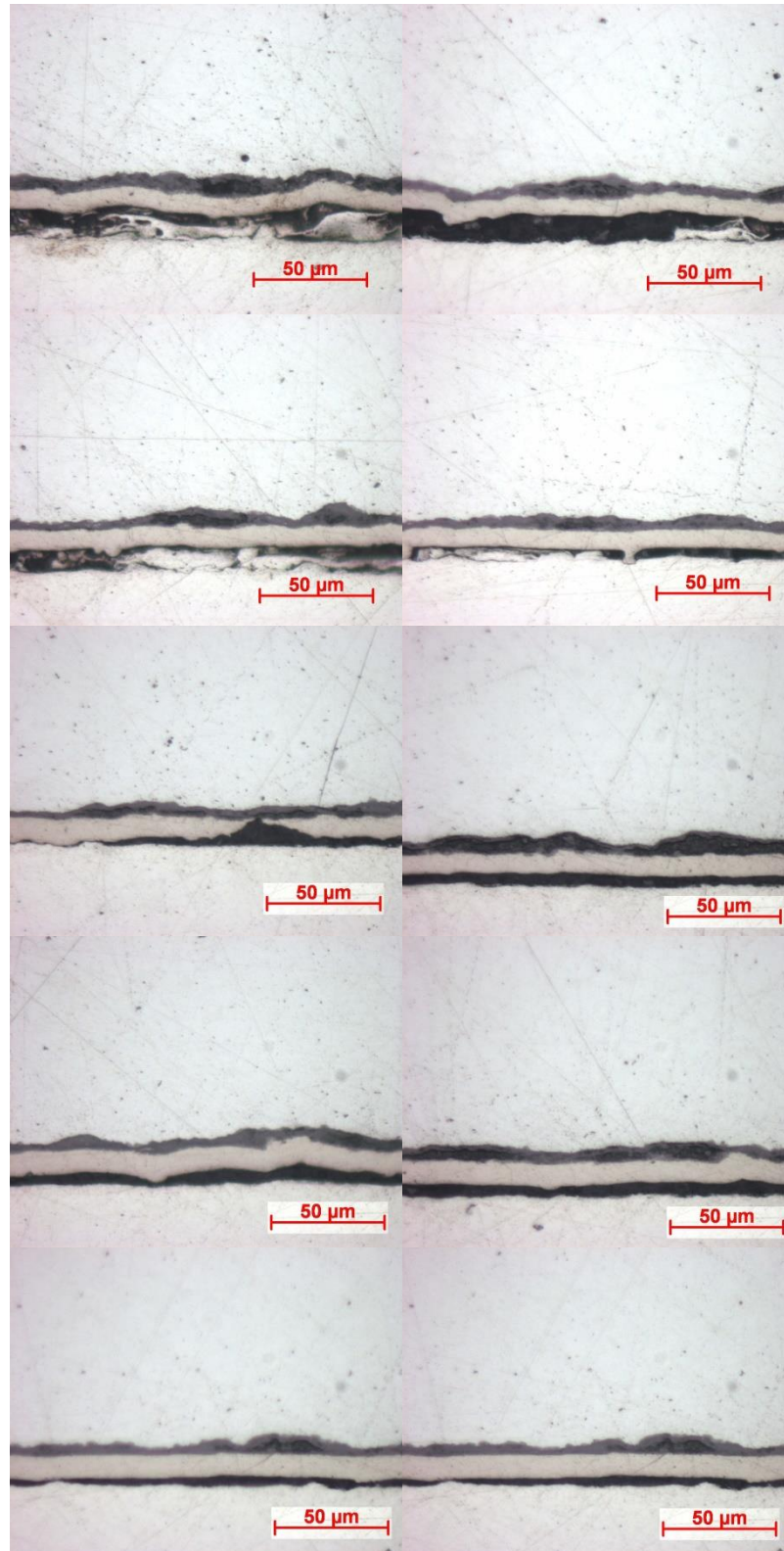
SD = Standard deviation

ตารางที่ ก-11 ผลการวัดความหนาชั้นออกไซด์จากภาพภาคตัดขวางของชิ้นงานที่รีดร้อนแล้วอบอ่อน
แบบกะในบรรยากาศไนโตรเจน 30 ชั่วโมง ที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

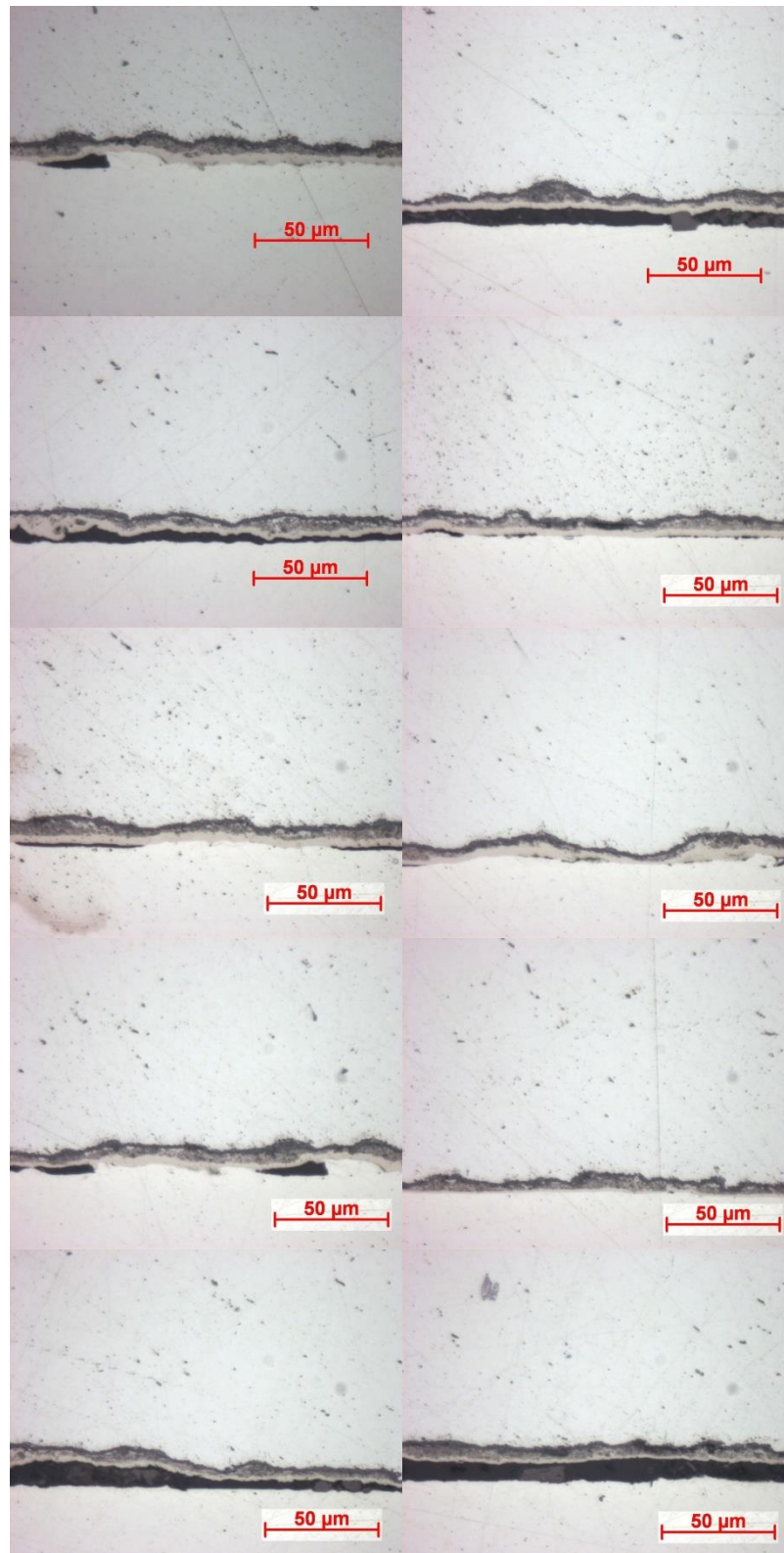
รูปที่	1	2	3	4	5
Oxide scale thickness (μm)					
compact-1	2.54	2.41	2.54	2.54	2.54
porous 1	4.14	4.54	4.41	4.81	4.41
compact-2	2.54	2.67	2.54	2.54	2.27
porous 2	4.68	4.81	4.81	4.68	4.68
compact-3	2.81	2.54	2.67	2.41	2.67
porous 3	4.68	4.81	4.14	4.14	4.88
compact-4	2.41	2.67	2.81	2.67	2.94
porous 4	4.68	4.41	4.54	4.54	4.54
compact-5	2.67	2.41	2.67	2.67	2.67
porous 5	4.68	4.14	4.81	4.68	4.54
compact-6	2.54	2.67	2.54	2.94	2.54
porous 6	4.54	4.54	4.41	4.68	4.68
total layer	7.15	7.10	7.15	7.22	7.23
compact	2.59	2.56	2.63	2.63	2.61
porous	4.57	4.54	4.52	4.59	4.62

6	7	8	9	10	Total	SD
Oxide scale thickness (μm)						
2.54	2.54	2.54	2.81	2.67	-	-
4.54	4.88	4.68	4.95	4.54	-	-
2.67	2.81	2.54	2.54	2.27	-	-
4.68	4.68	4.54	4.14	4.68	-	-
2.54	2.41	2.67	2.54	2.67	-	-
4.54	4.54	4.28	4.68	4.54	-	-
2.41	2.67	2.54	2.94	2.67	-	-
4.68	4.54	4.01	4.28	4.54	-	-
2.67	2.67	2.41	2.67	2.54	-	-
4.81	4.81	4.81	4.28	4.88	-	-
2.84	2.41	2.94	2.27	2.81	-	-
4.54	4.14	4.54	4.88	4.68	-	-
7.24	7.18	7.08	7.16	7.25	7.18	0.06
2.61	2.59	2.61	2.63	2.61	2.60	0.02
4.63	4.60	4.48	4.54	4.64	4.57	0.05

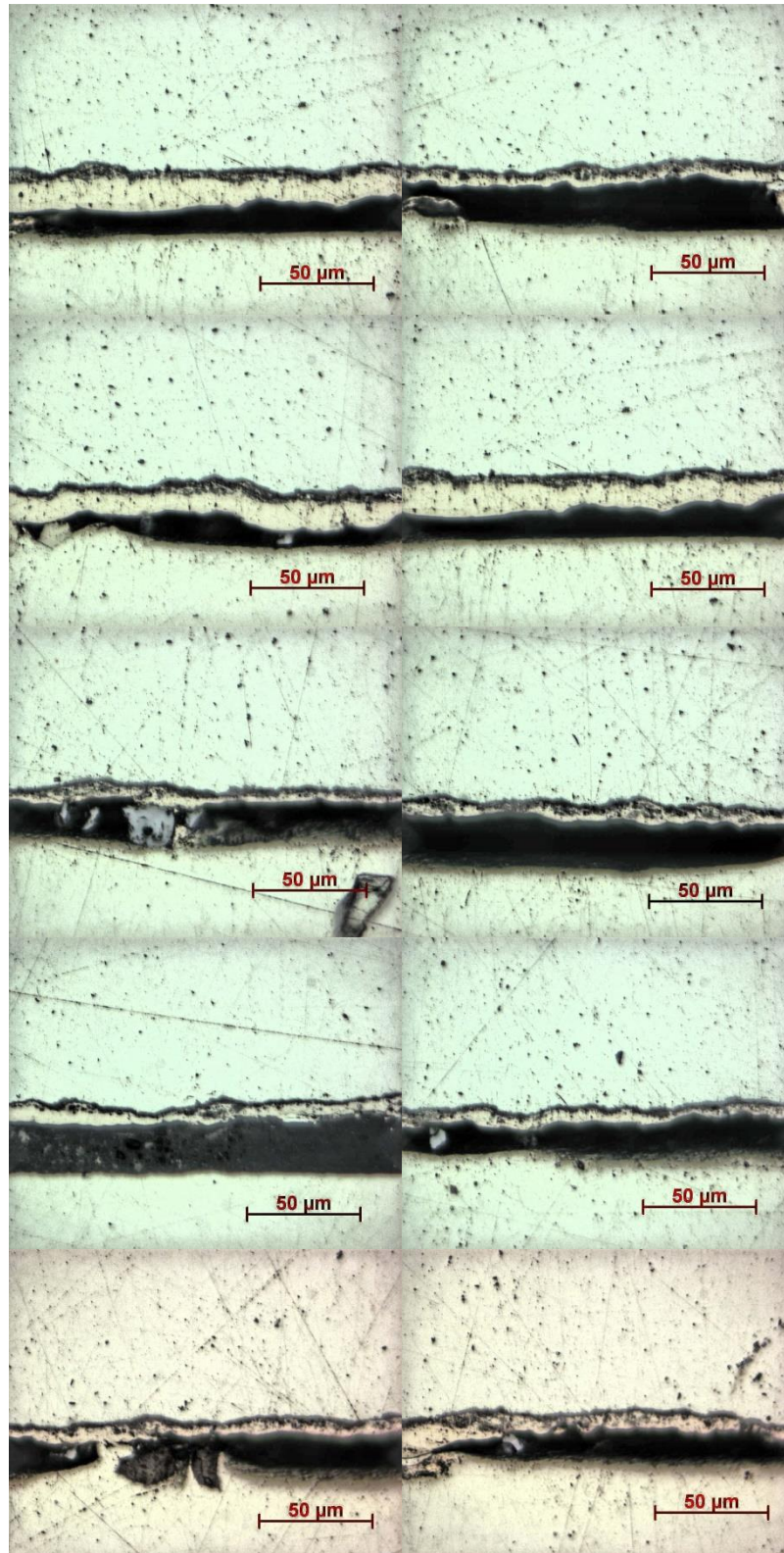
SD = Standard deviation



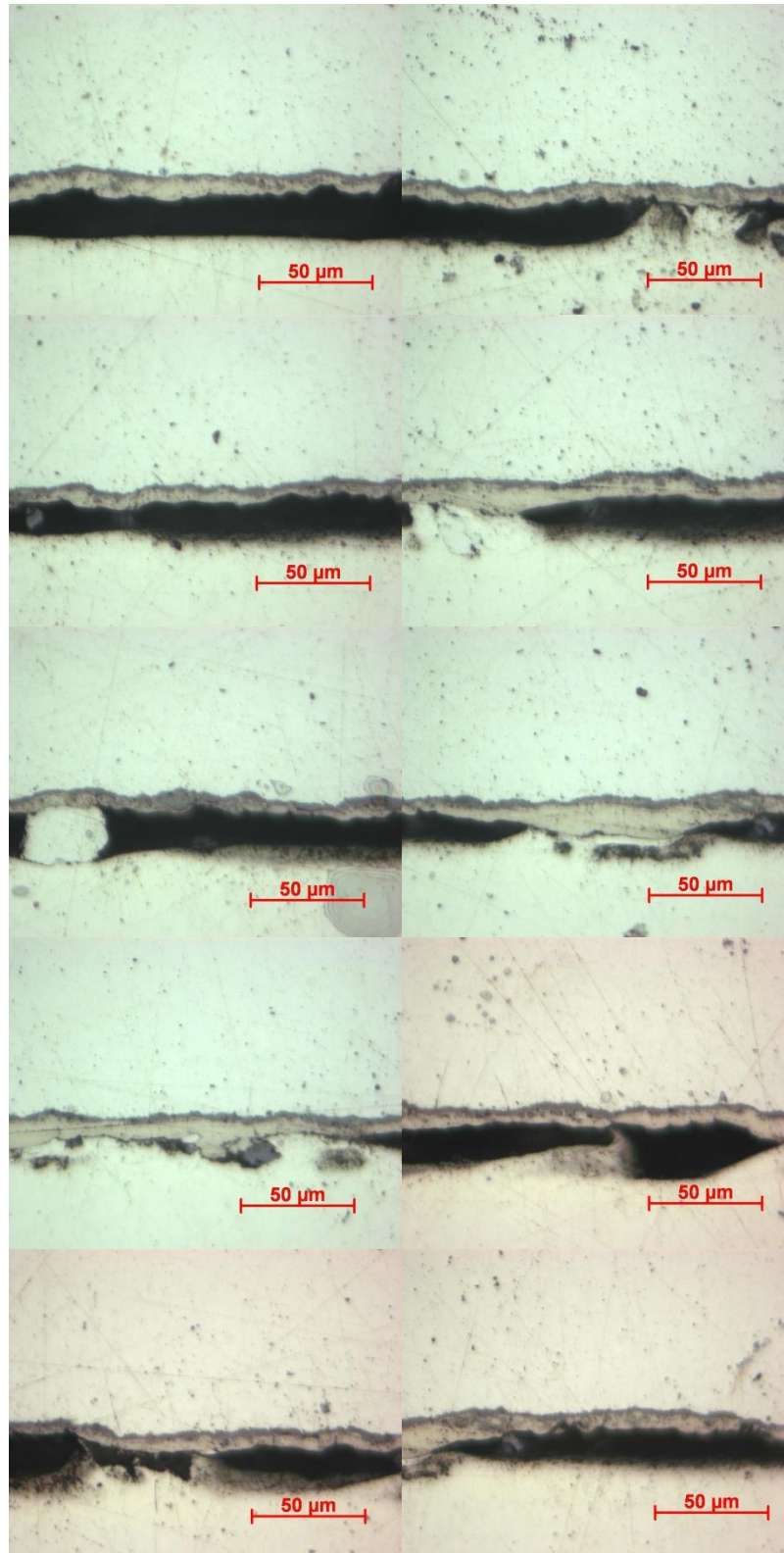
รูปที่ ก-1 ภาคตัดขวางของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนก่อนอบอ่อนแบบกะ ที่ใช้ในการวัดความหนาของสเกลออกไซด์ ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง



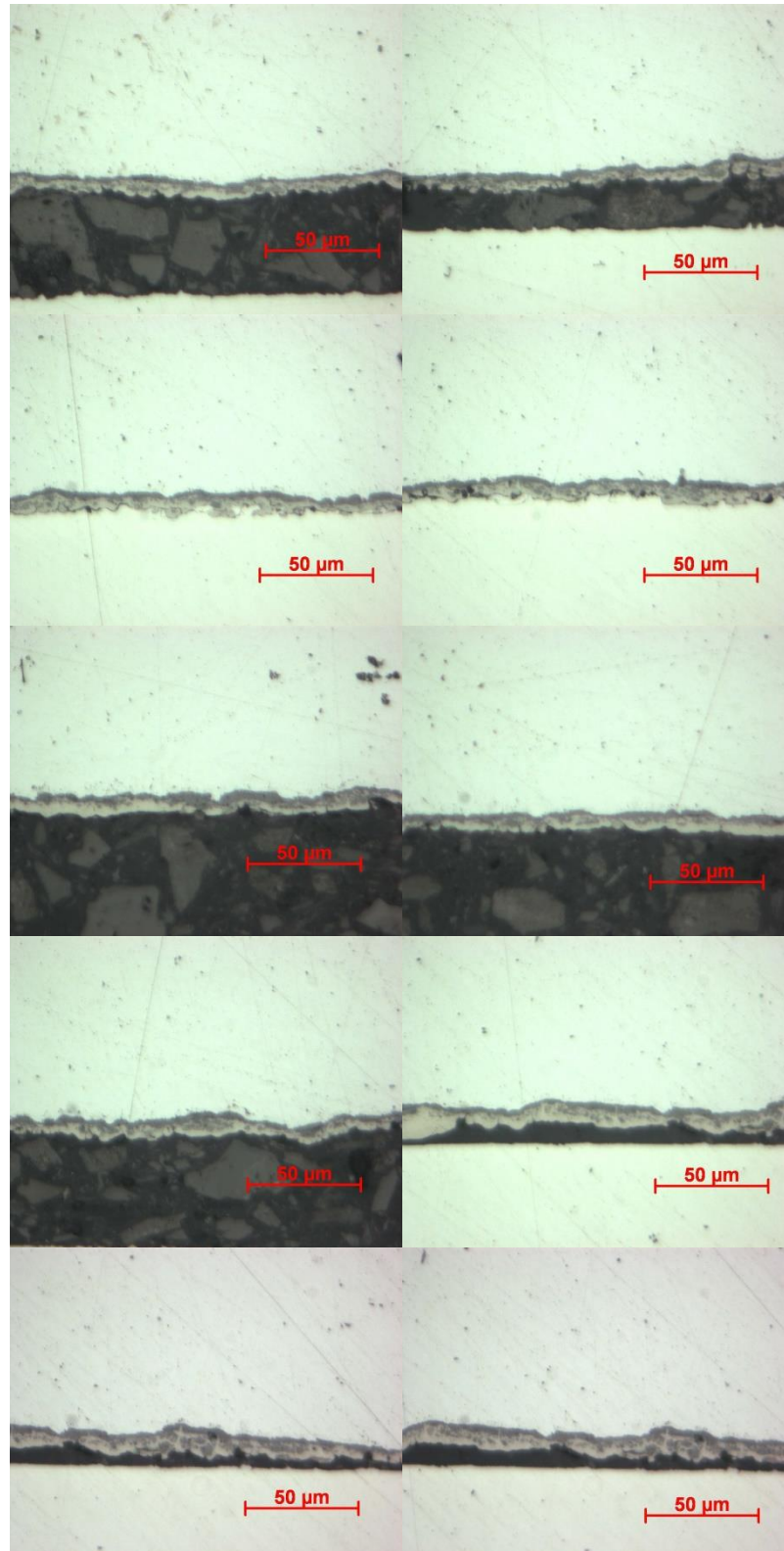
รูปที่ ก-2 ภาคตัดขวางของสเกลออกไซด์ของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศไฮโดรเจนจากกระบวนการของบริษัท ที่ใช้ในการวัดความหนาของสเกลออกไซด์ ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง



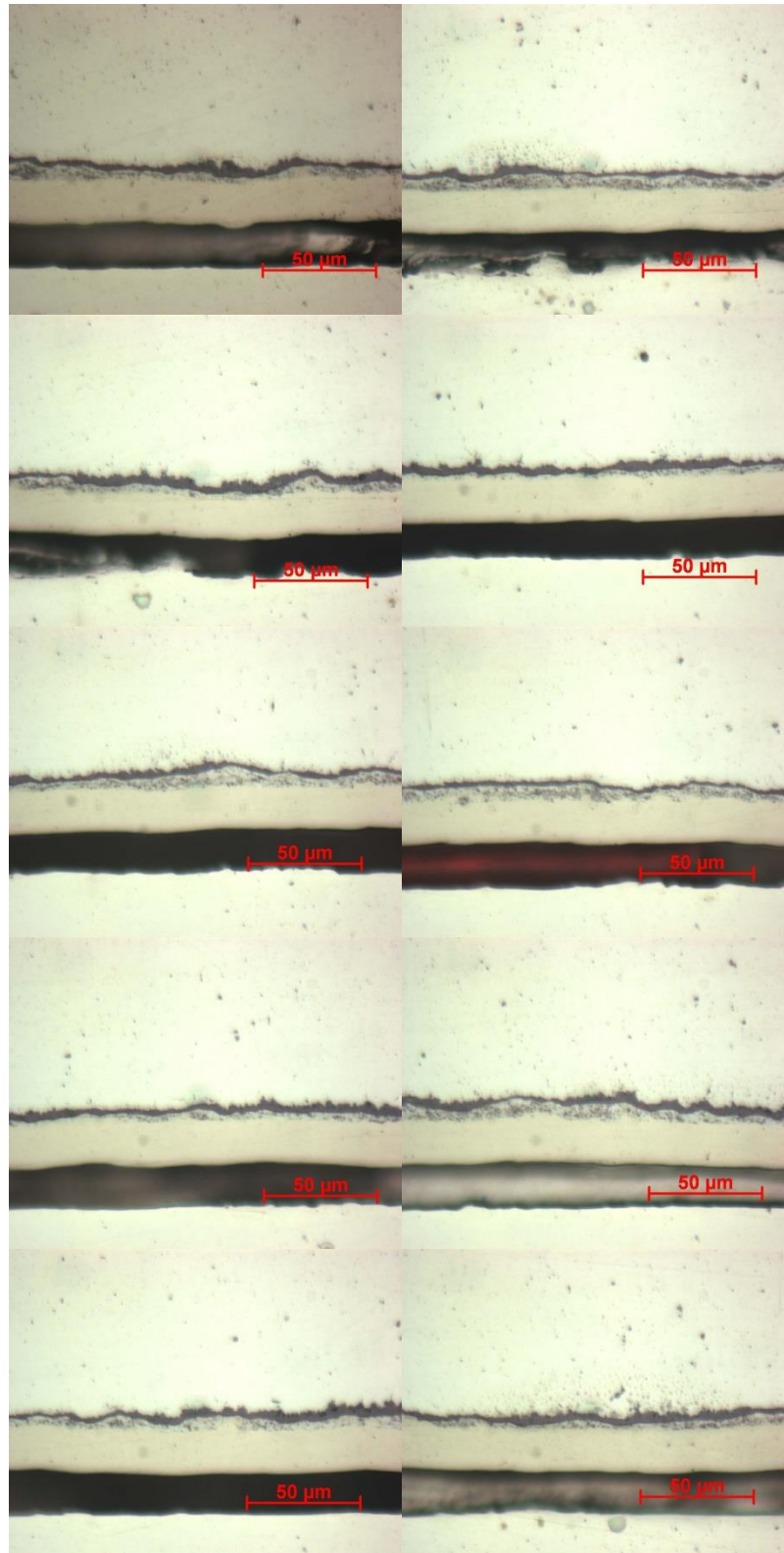
รูปที่ ก-3 ภาคตัดขวางของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศปกติ ที่อุณหภูมิ 850°C เป็นระยะเวลา 20 ชั่วโมง ที่ใช้ในการวัดความหนาของสเกลออกไซด์ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง



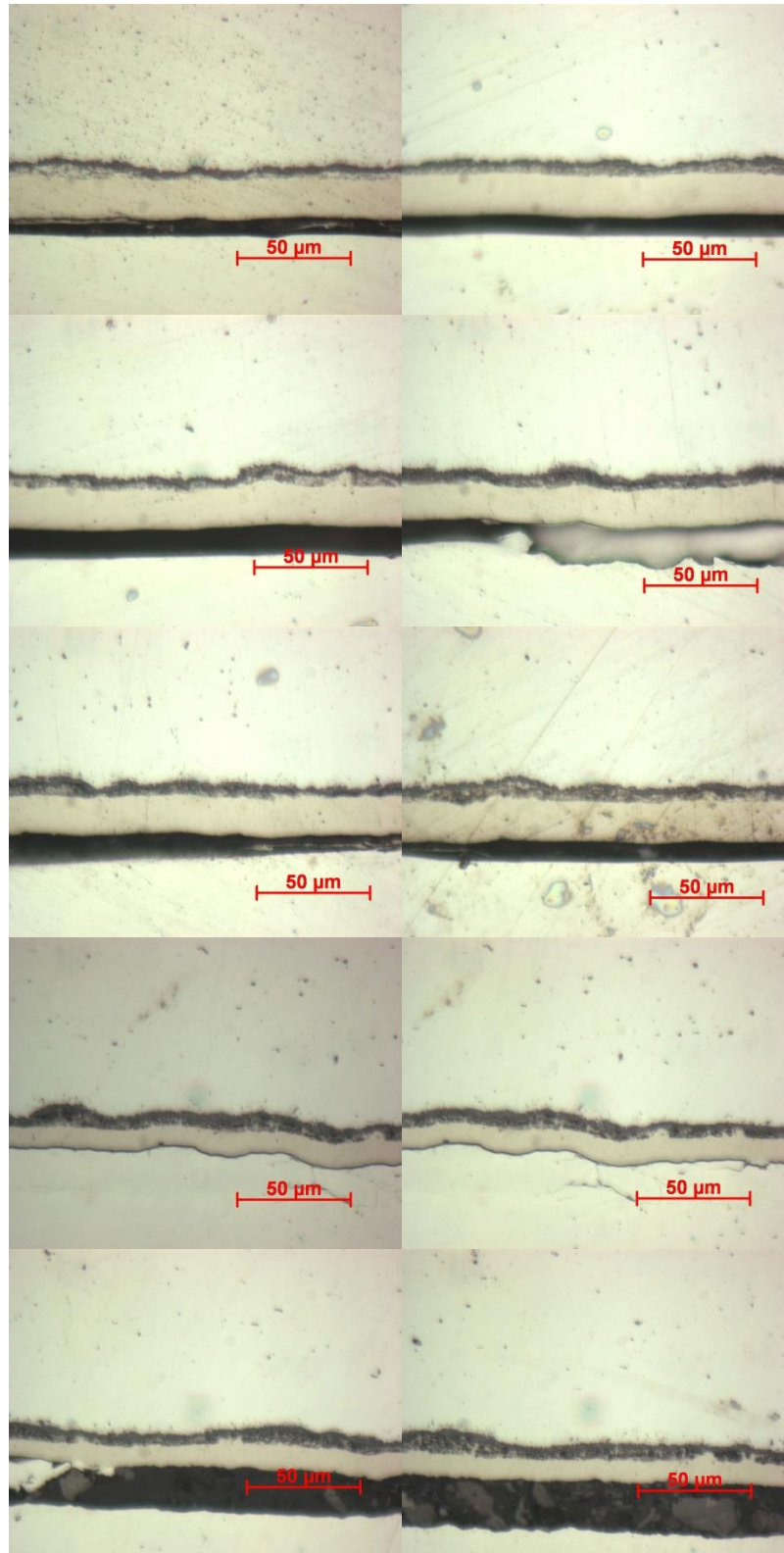
รูปที่ ก-4 ภาคตัดขวางของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศปกติ ที่อุณหภูมิ 850°C เป็นระยะเวลา 25 ชั่วโมง ที่ใช้ในการวัดความหนาของสเกลออกไซด์ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง



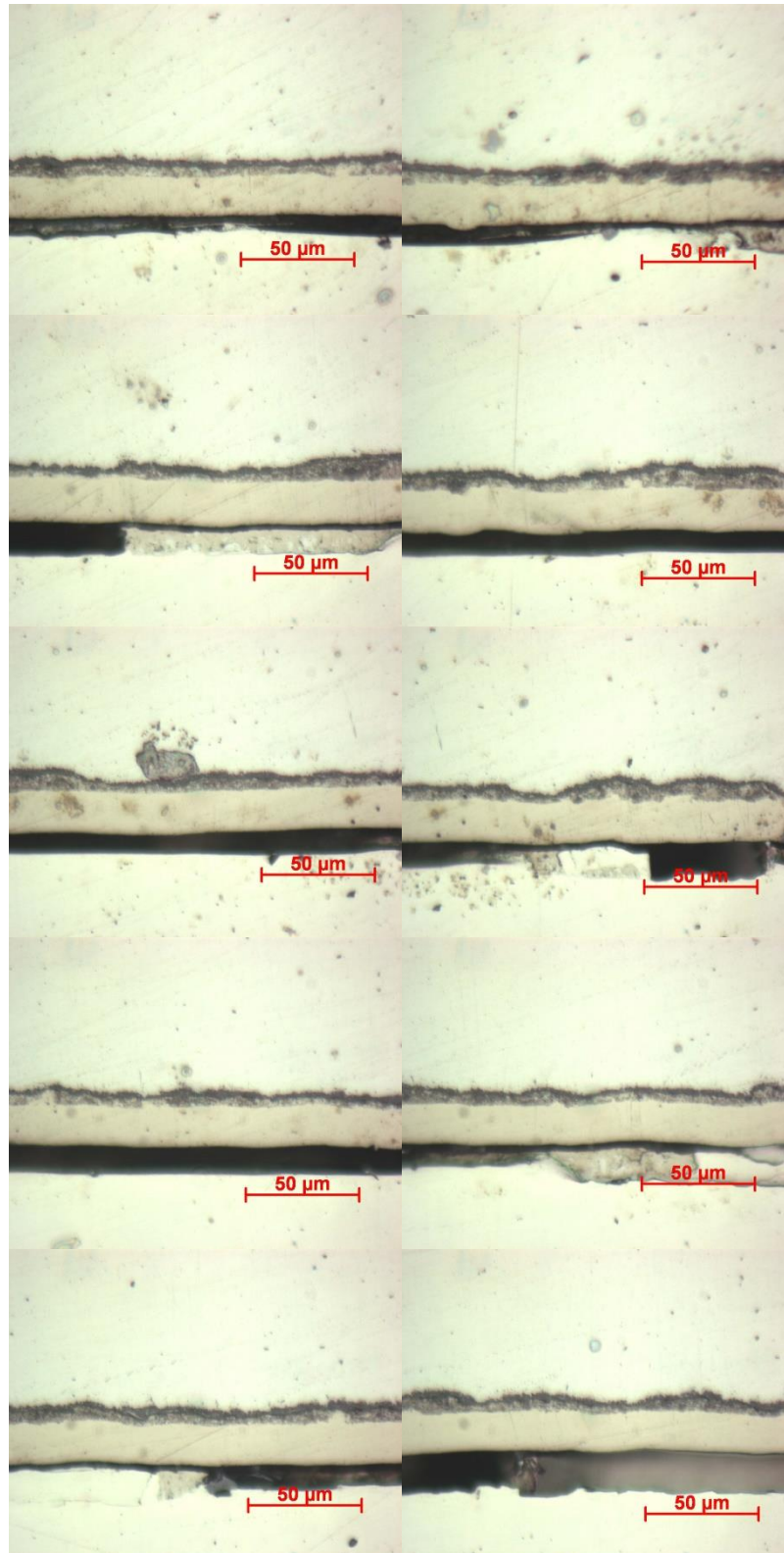
รูปที่ ก-5 ภาคตัดขวางของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศปกติ ที่อุณหภูมิ 850°C เป็นระยะเวลา 30 ชั่วโมง ที่ใช้ในการวัดความหนาของสเกลออกไซด์ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง



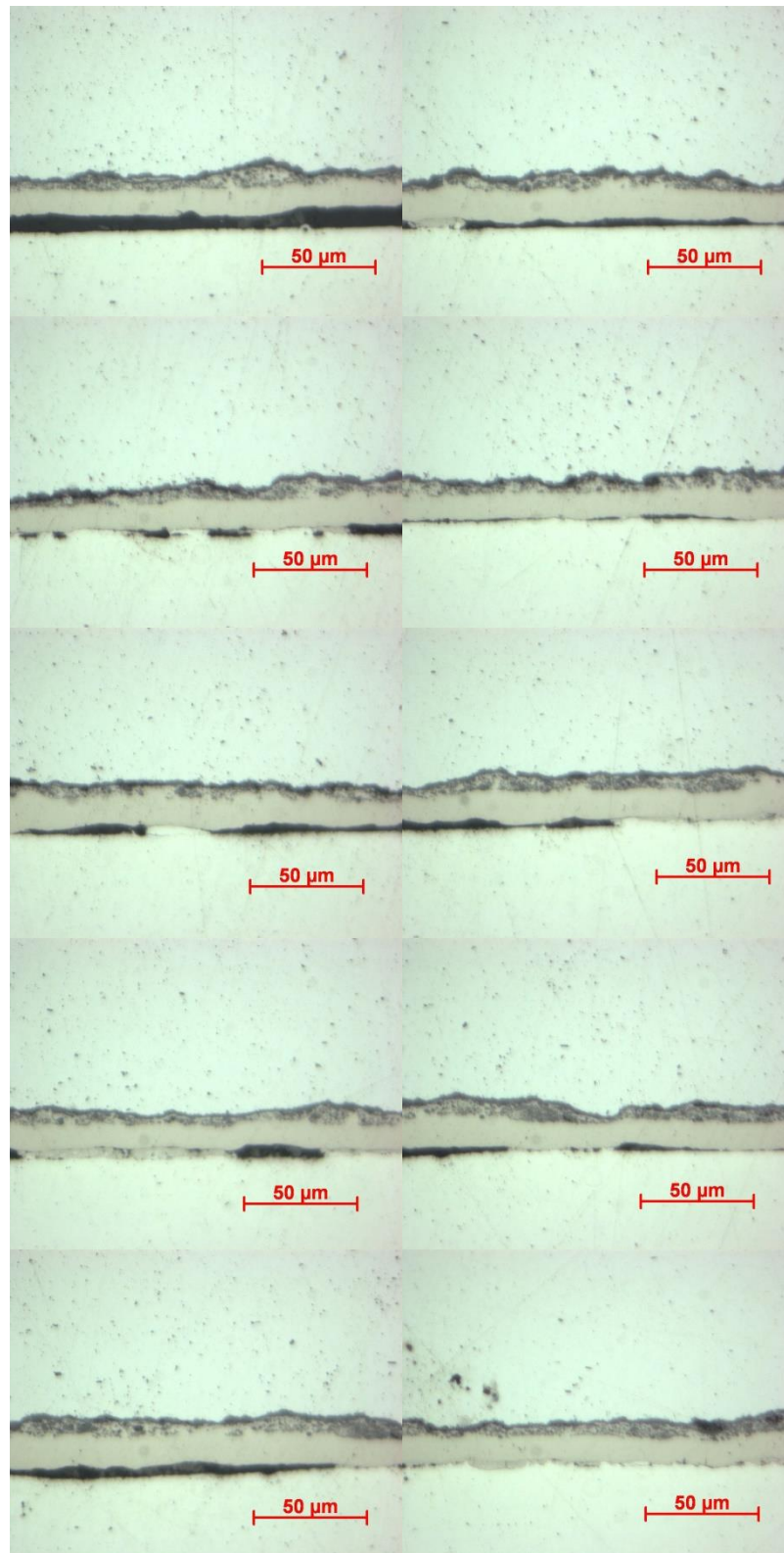
รูปที่ ก-6 ภาคตัดขวางของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิ 850 °C เป็นระยะเวลา 20 ชั่วโมง ที่ใช้ในการวัดความหนาของสเกลออกไซด์ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง



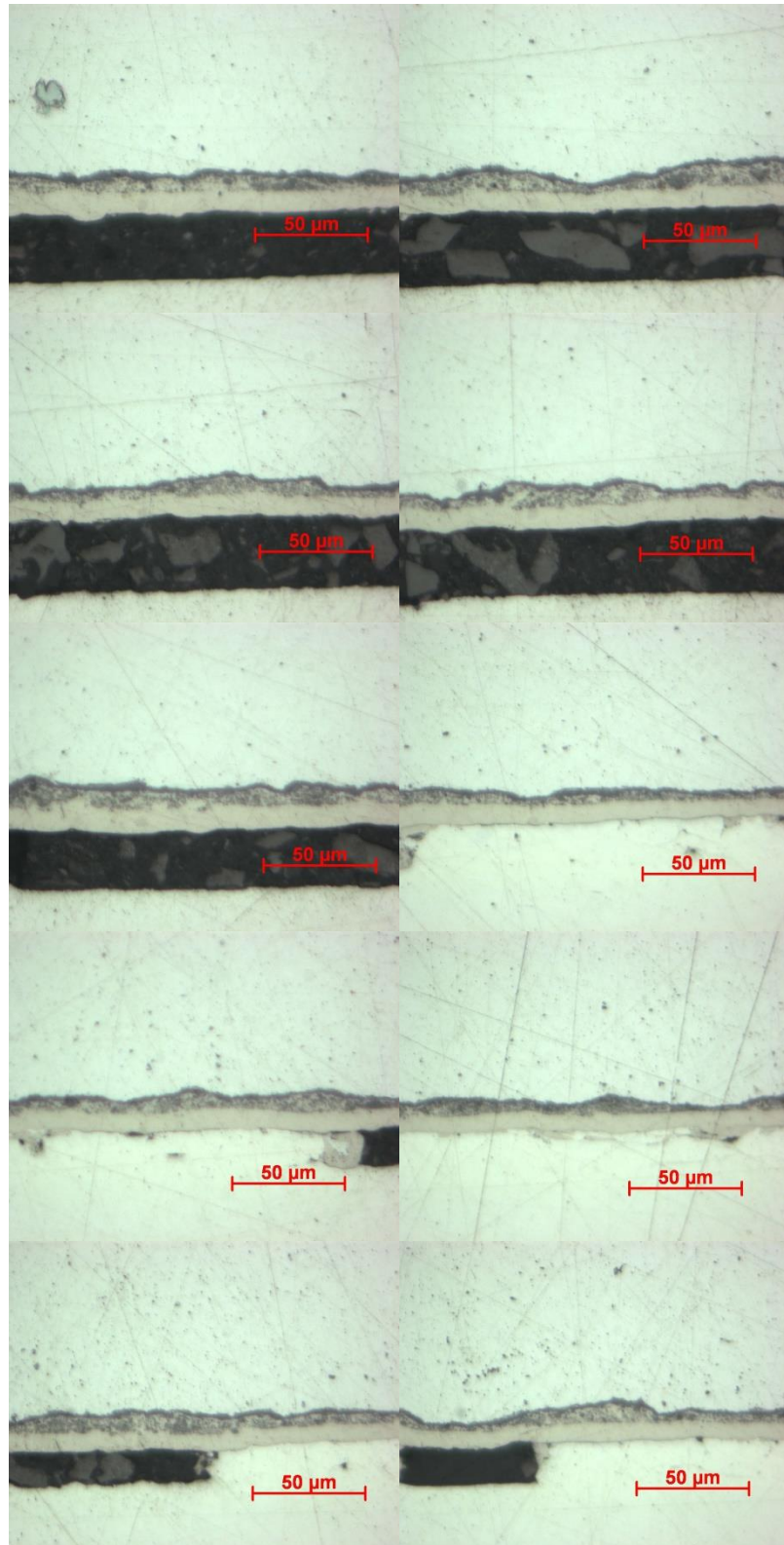
รูปที่ ก-7 ภาคตัดขวางของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิ 850°C เป็นระยะเวลา 25 ชั่วโมง ที่ใช้ในการวัดความหนาของสเกลออกไซด์ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง



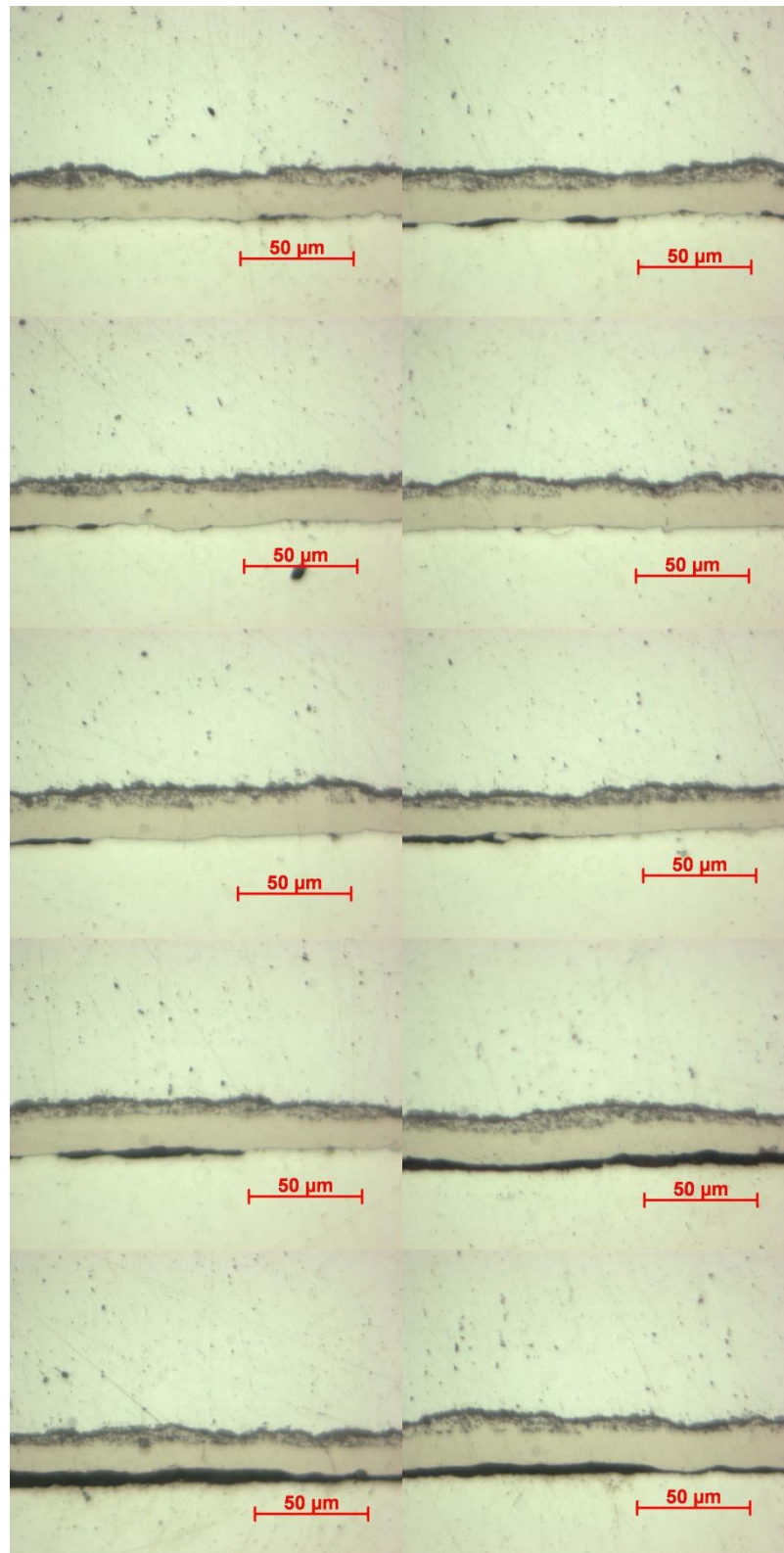
รูปที่ ก-8 ภาคตัดขวางของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิ 850°C เป็นระยะเวลา 30 ชั่วโมง ที่ใช้ในการวัดความหนาของสเกลออกไซด์ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง



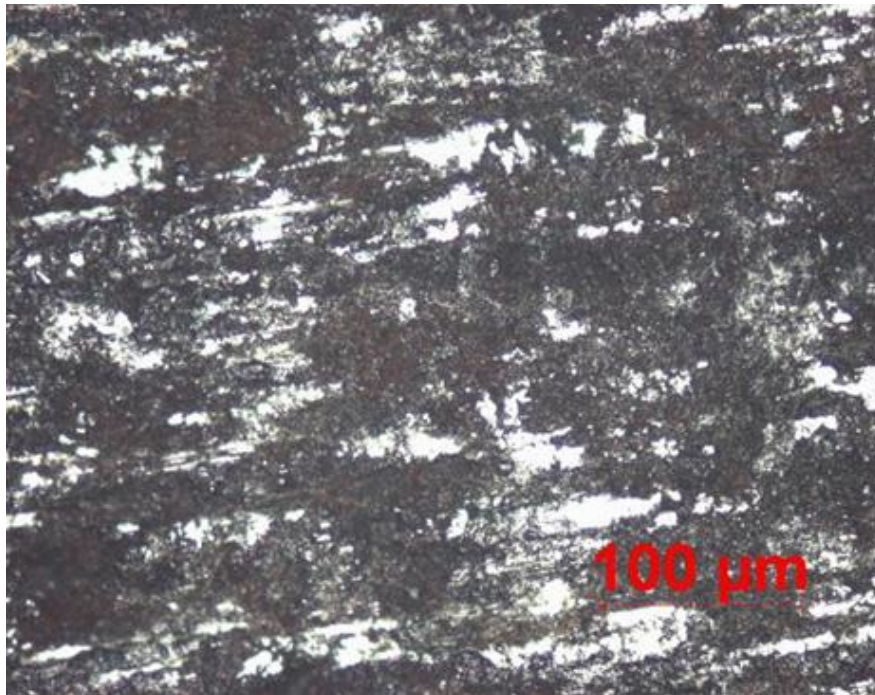
รูปที่ ก-9 ภาคตัดขวางของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 850 °C เป็นระยะเวลา 20 ชั่วโมง ที่ใช้ในการวัดความหนาของสเกลออกไซด์ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง



รูปที่ ก-10 ภาคตัดขวางของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 850°C เป็นระยะเวลา 25 ชั่วโมง ที่ใช้ในการวัดความหนาของสเกลออกไซด์ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง



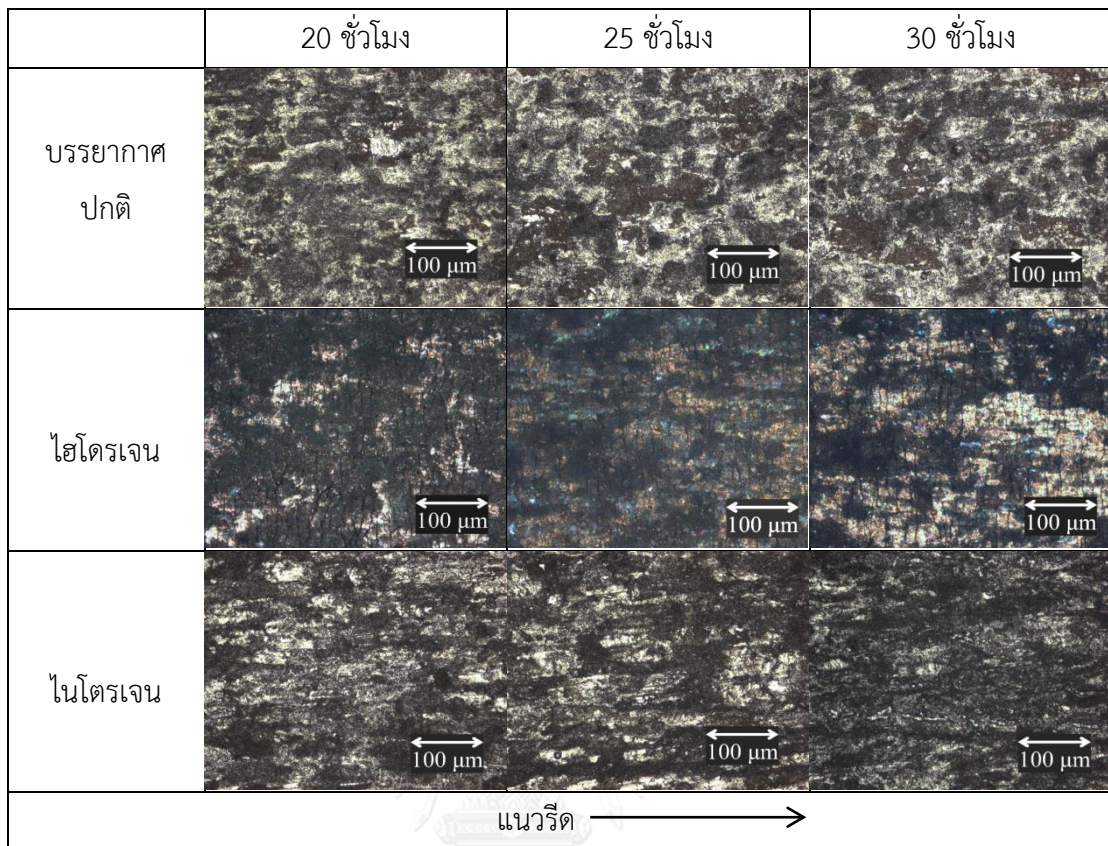
รูปที่ ก-11 ภาคตัดขวางของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 850°C เป็นระยะเวลา 30 ชั่วโมง ที่ใช้ในการวัดความหนาของสเกลออกไซด์ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง



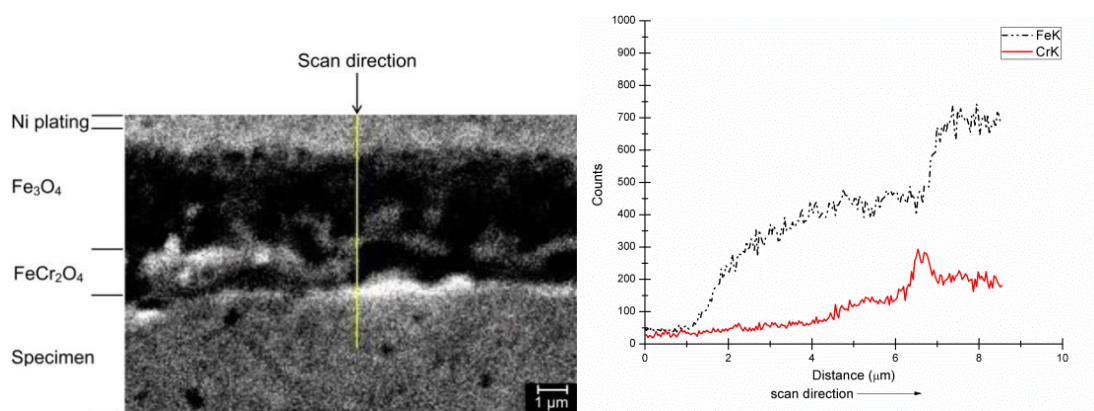
รูปที่ ก-12 สเตลออกไซด์ที่ผิวผ่านการรีดร้อนก่อนอบอ่อนแบบกะถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง



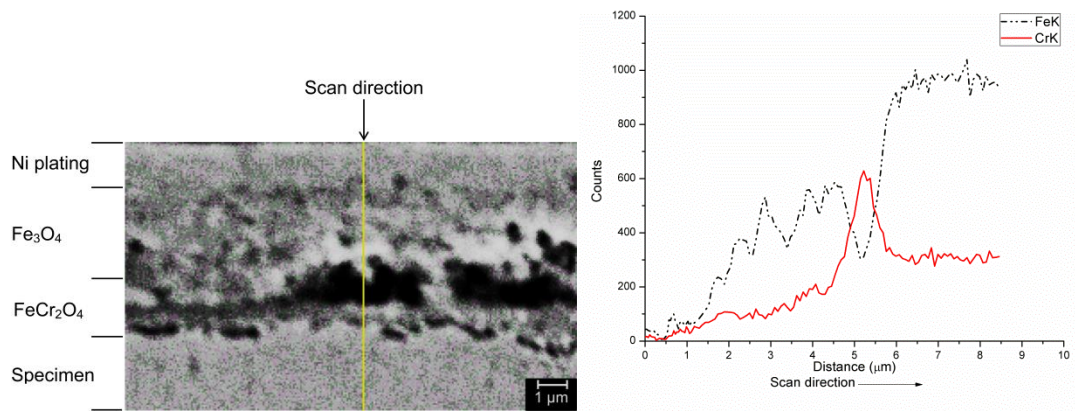
รูปที่ ก-13 สเตลออกไซด์ที่ผิวของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศไฮโดรเจนจากกระบวนการของบริษัทถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง



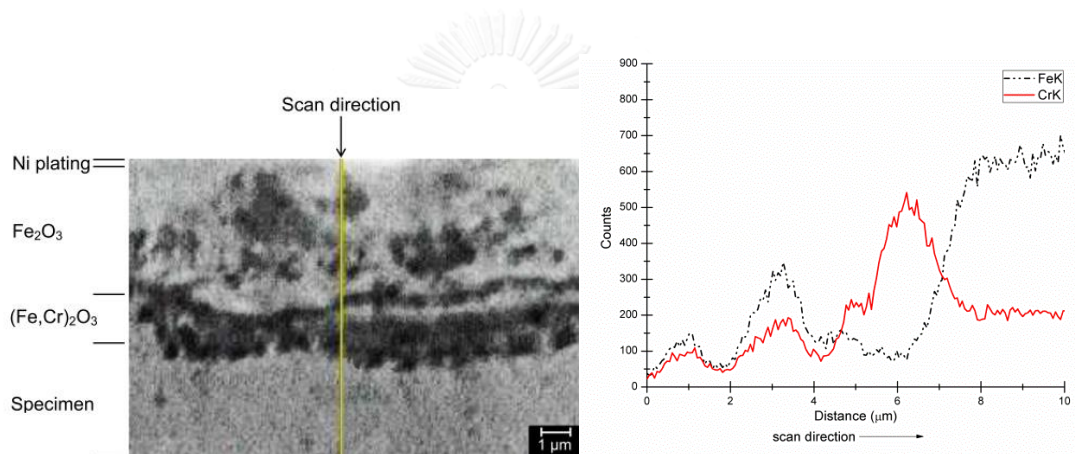
รูปที่ ก-14 สเกลออกไซด์ที่ผิวของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะ ในบรรยากาศปกติ, ไนโตรเจน และไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิ 850°C เป็นระยะเวลา 20, 25 และ 30 ชั่วโมง ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง



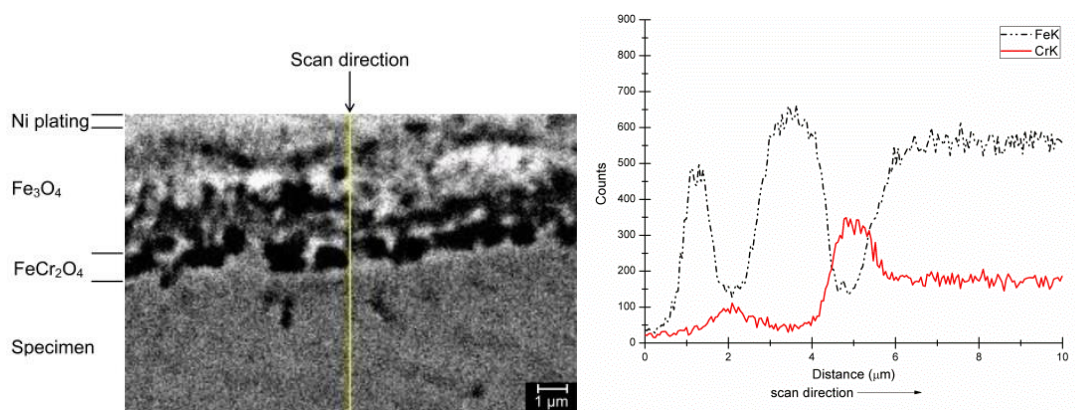
รูปที่ ก-15 ผลการวิเคราะห์ชั้นออกไซด์ด้วย EDS line scan ของชิ้นที่ผ่านการรีดร้อนก่อนอบอ่อนแบบกะ



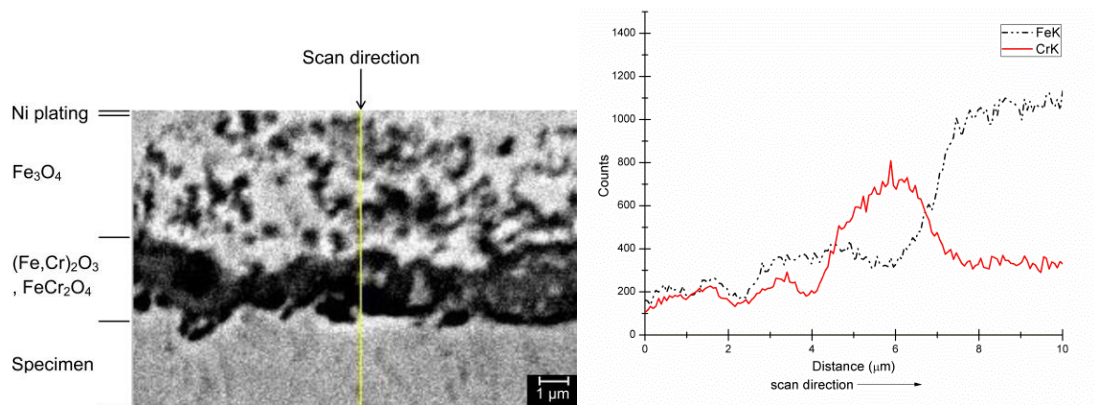
รูปที่ ก-16 ผลการวิเคราะห์ชั้นออกไซด์ด้วย EDS line scan ของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อน แล้วอบอ่อนแบบกะโนบรยากาศไฮโดรเจนจากกระบวนการของบริษัท



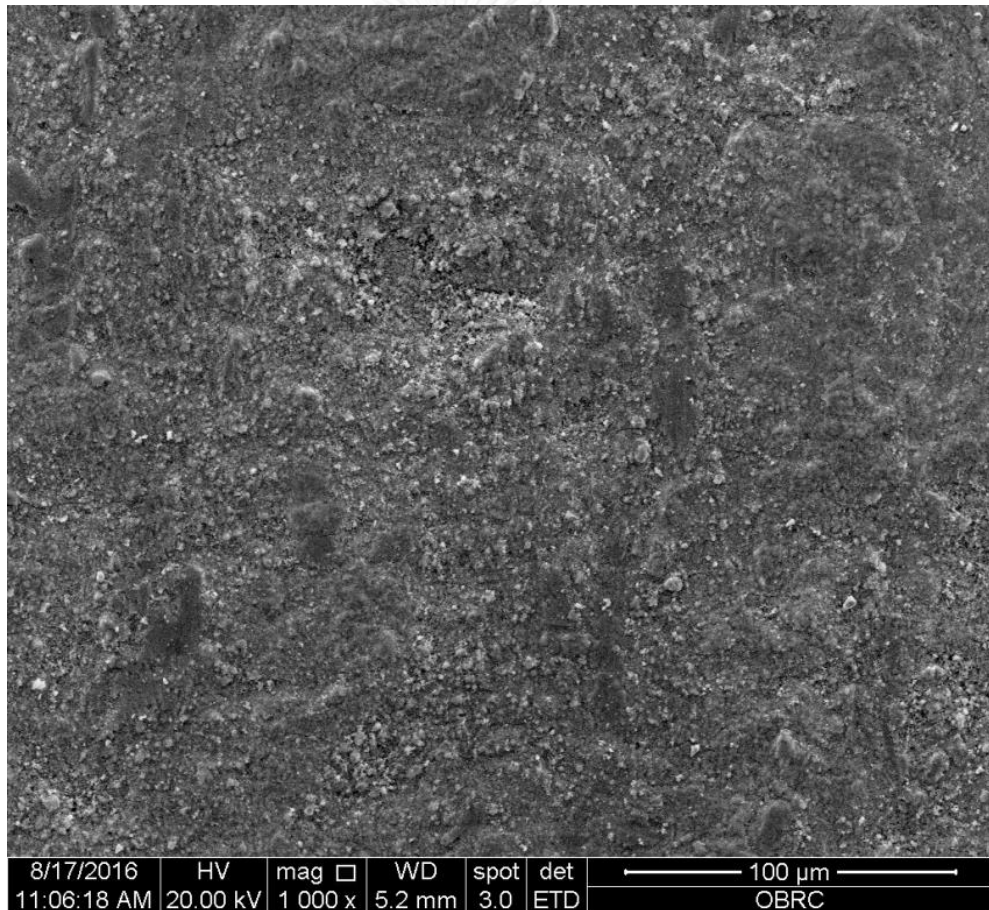
รูปที่ ก-17 ผลการวิเคราะห์ชั้นออกไซด์ด้วย EDS line scan ของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อน แล้วอบอ่อนแบบกะโนบรยากาศปกติ 30 ชั่วโมง



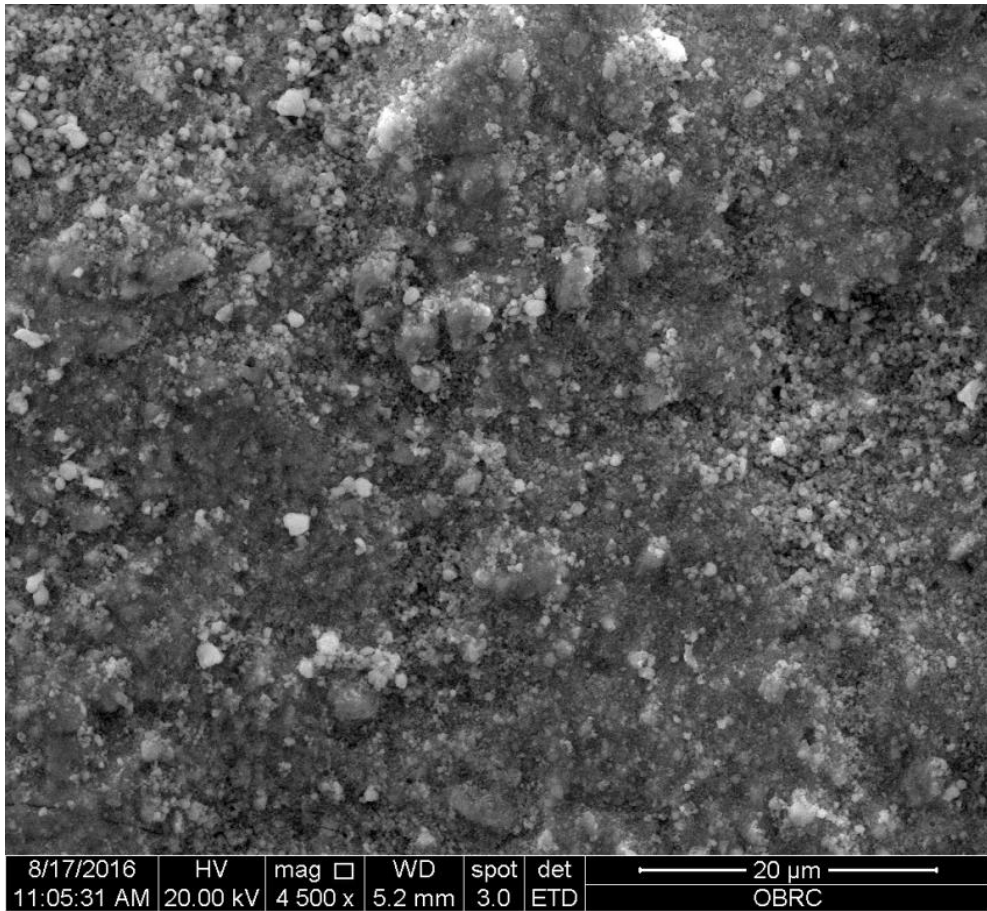
รูปที่ ก-18 ผลการวิเคราะห์ชั้นออกไซด์ด้วย EDS line scan ของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อน แล้วอบอ่อนแบบกะโนไฮโดรเจน 30 ชั่วโมง



รูปที่ ก-19 ผลการวิเคราะห์ชั้นออกไซด์ด้วย EDS line scan ของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อน แล้วอบอ่อนแบบกะไนไนโตรเจน 30 ชั่วโมง

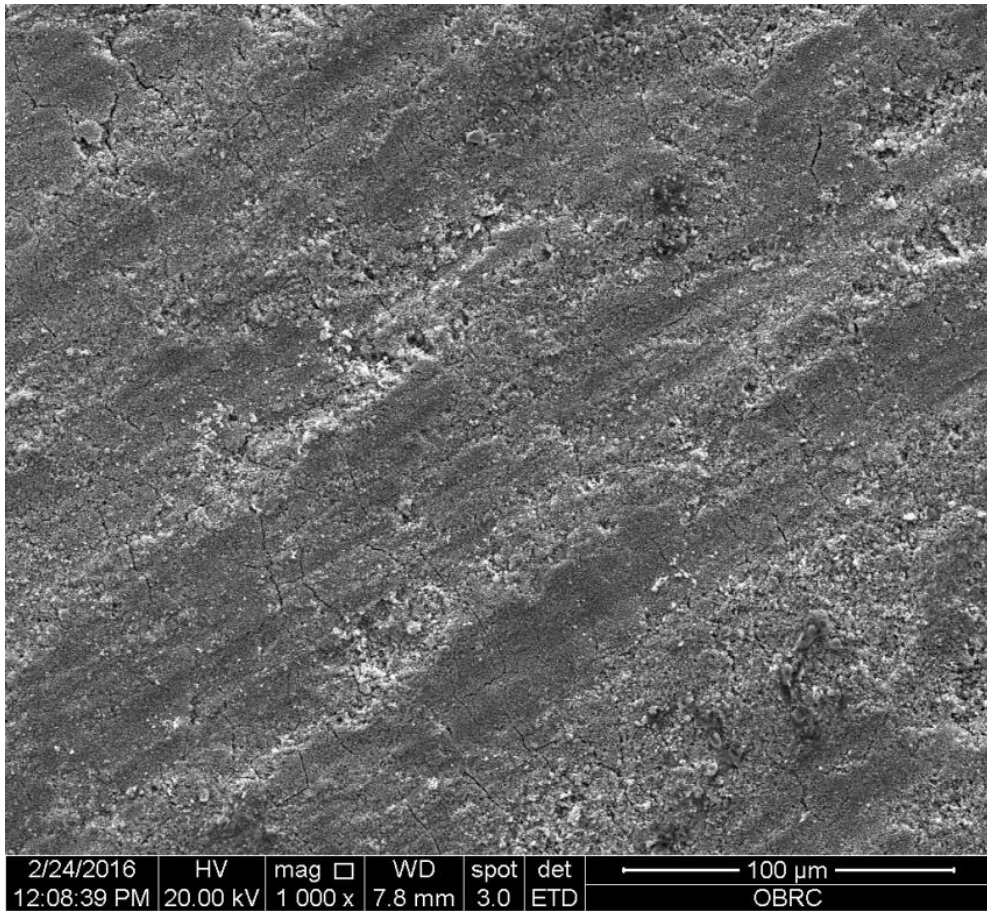


รูปที่ ก-20 พื้นผิวของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนก่อนอบอ่อนแบบกะไนไนโตรเจน 30 ชั่วโมง ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



รูปที่ ก-21 พื้นผิวของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนก่อนอบอ่อนแบบกะถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์

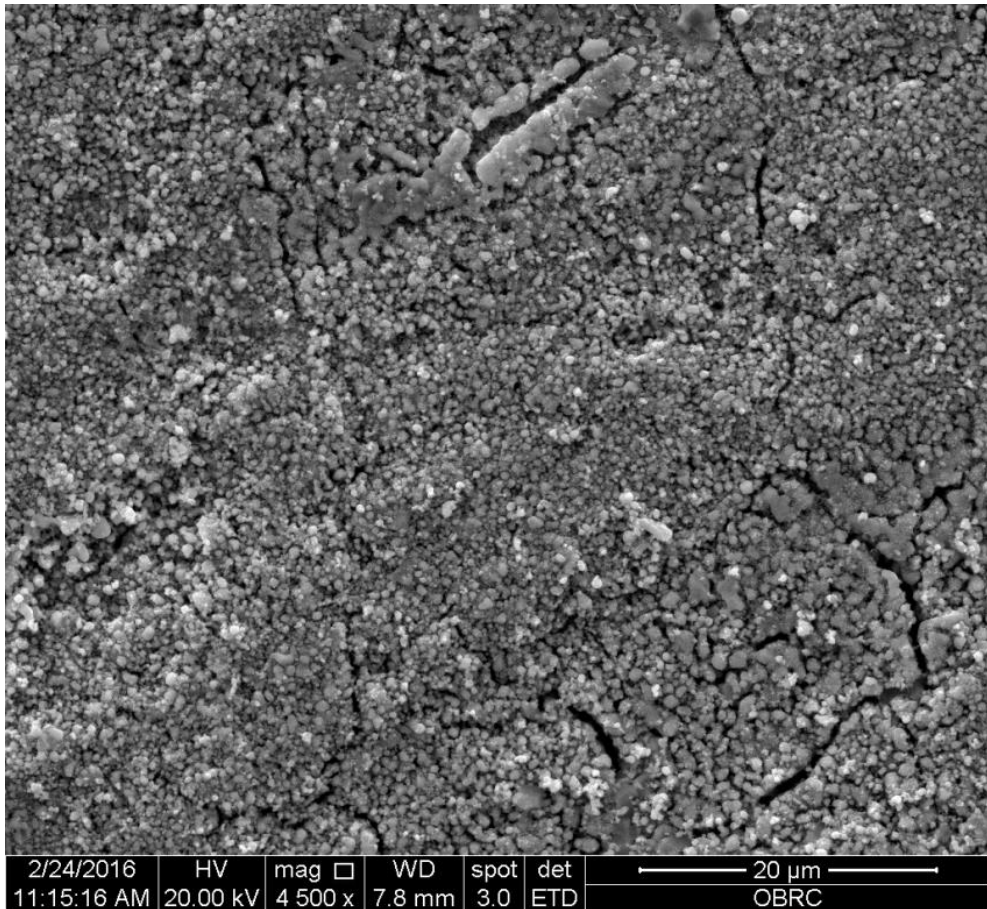
อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



รูปที่ ก-22 พื้นผิวของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศไฮโดรเจน

จากกระบวนการของบริษัทถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

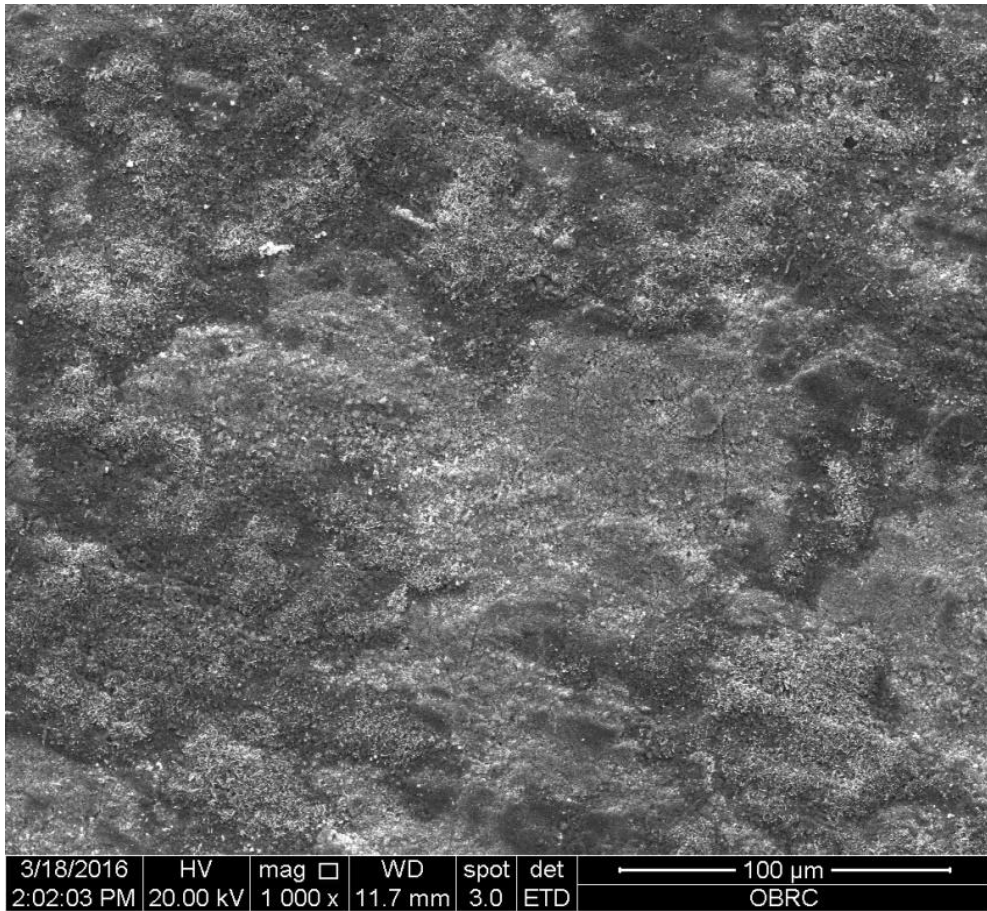
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 CHULALONGKORN UNIVERSITY



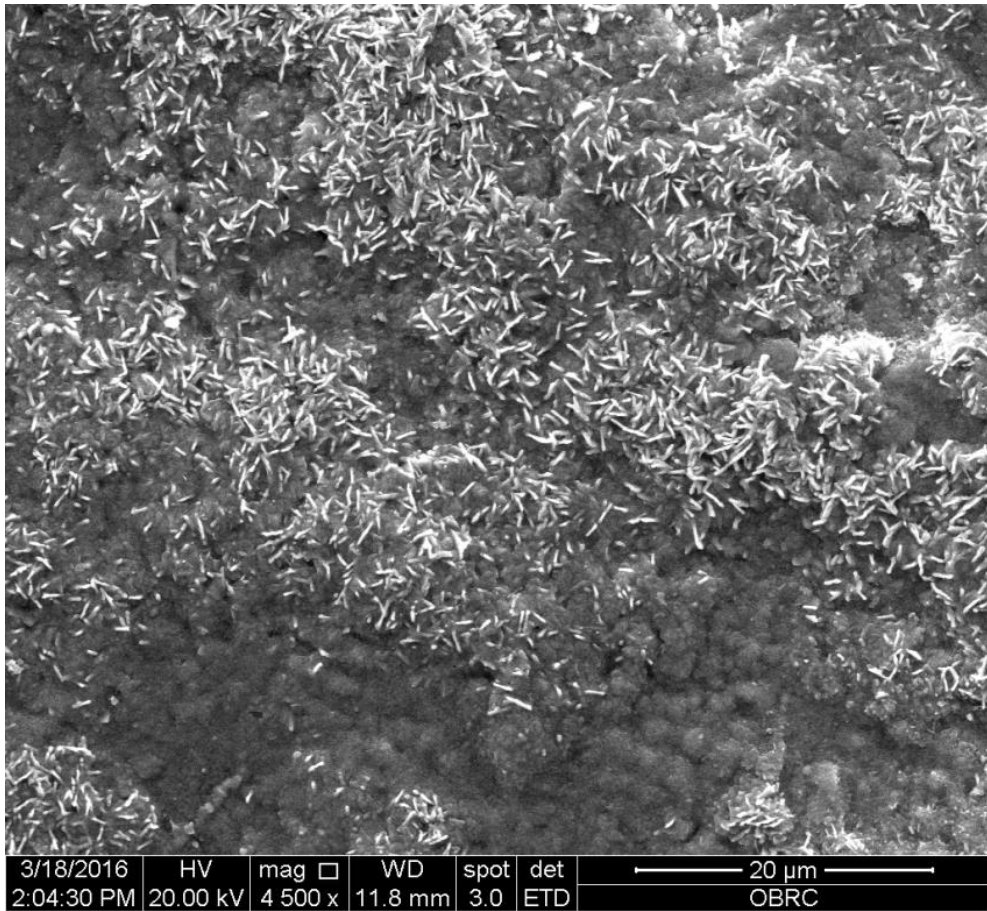
รูปที่ ก-23 พื้นผิวของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศไฮโดรเจน

จากกระบวนการของบริษัทถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

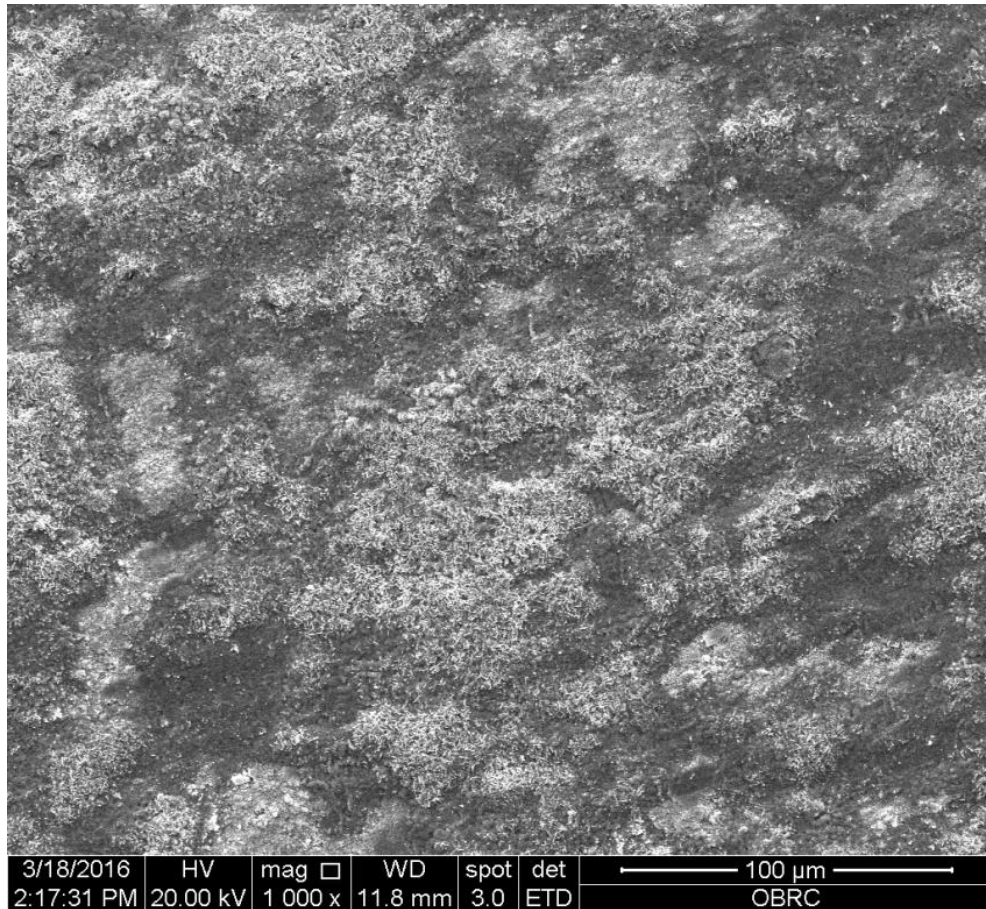
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



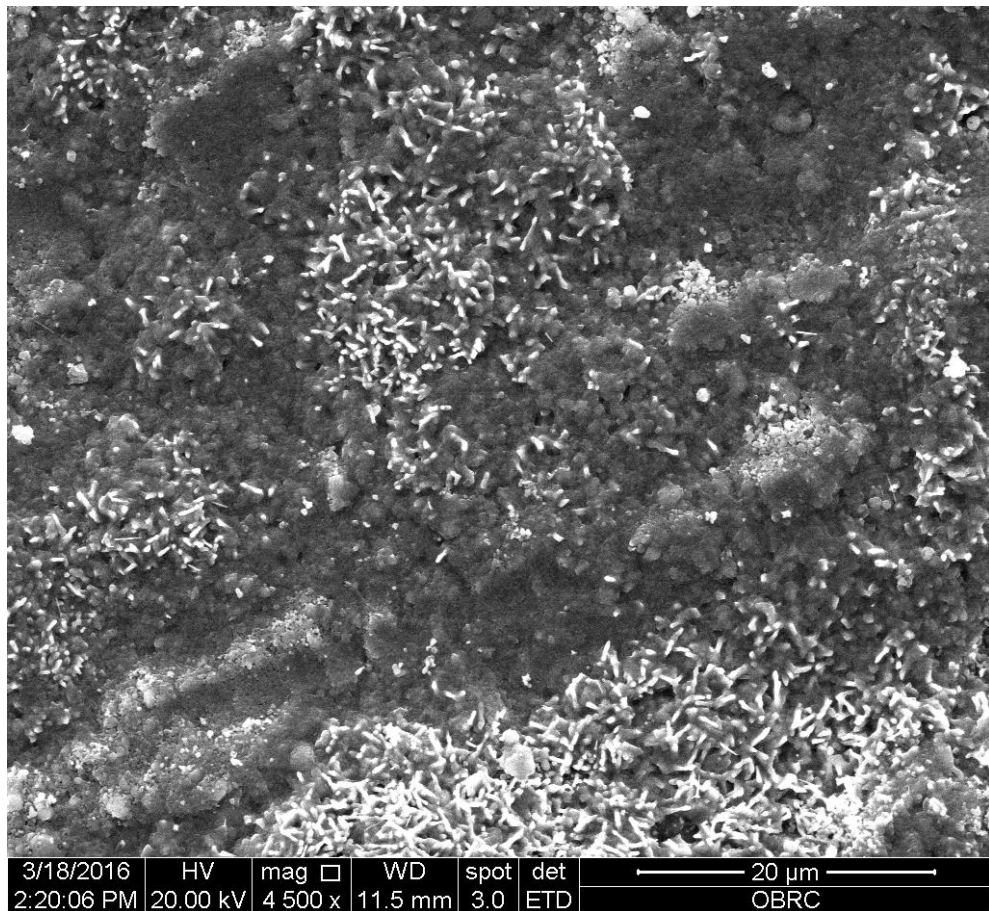
รูปที่ ก-24 พื้นผิวของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะ ในบรรยากาศปกติที่อุณหภูมิ 850°C เป็นระยะเวลา 20 ชั่วโมง ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



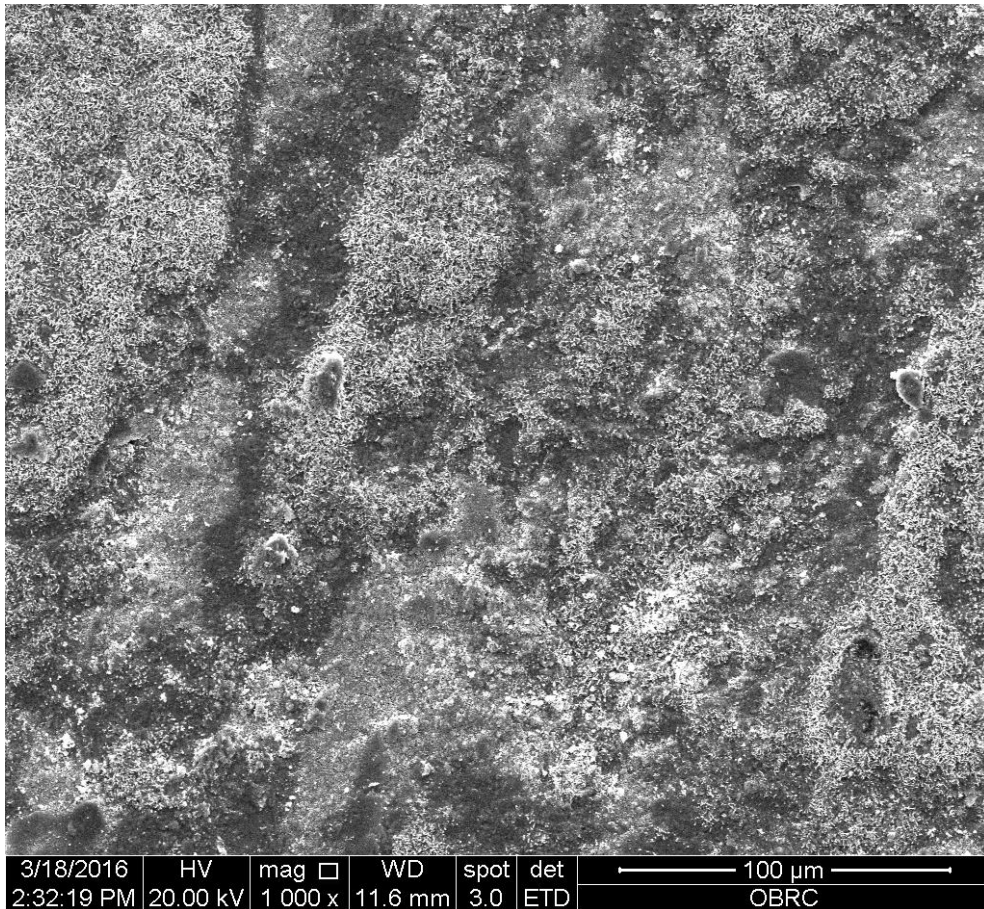
รูปที่ ก-25 พื้นผิวของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะ ในบรรยากาศปกติที่อุณหภูมิ 850°C เป็นระยะเวลา 20 ชั่วโมง ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



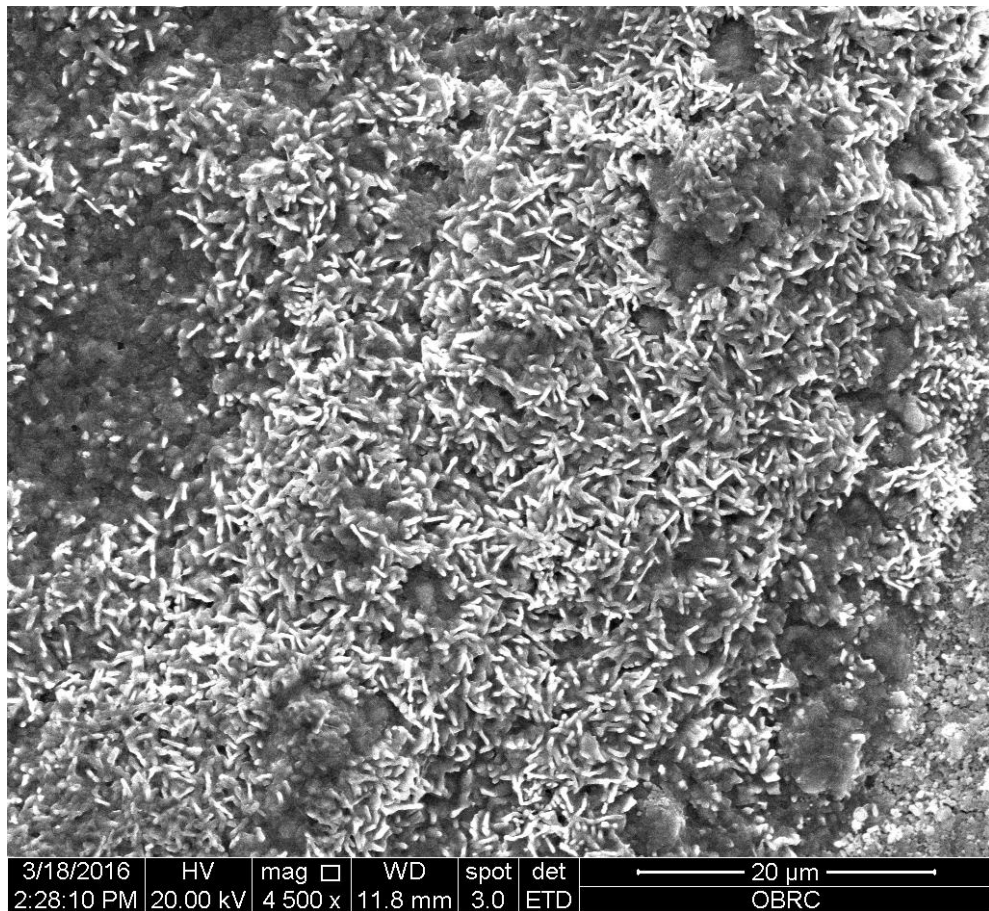
รูปที่ ก-26 พื้นผิวของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะ ในบรรยากาศปกติที่อุณหภูมิ 850°C เป็นระยะเวลา 25 ชั่วโมง ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



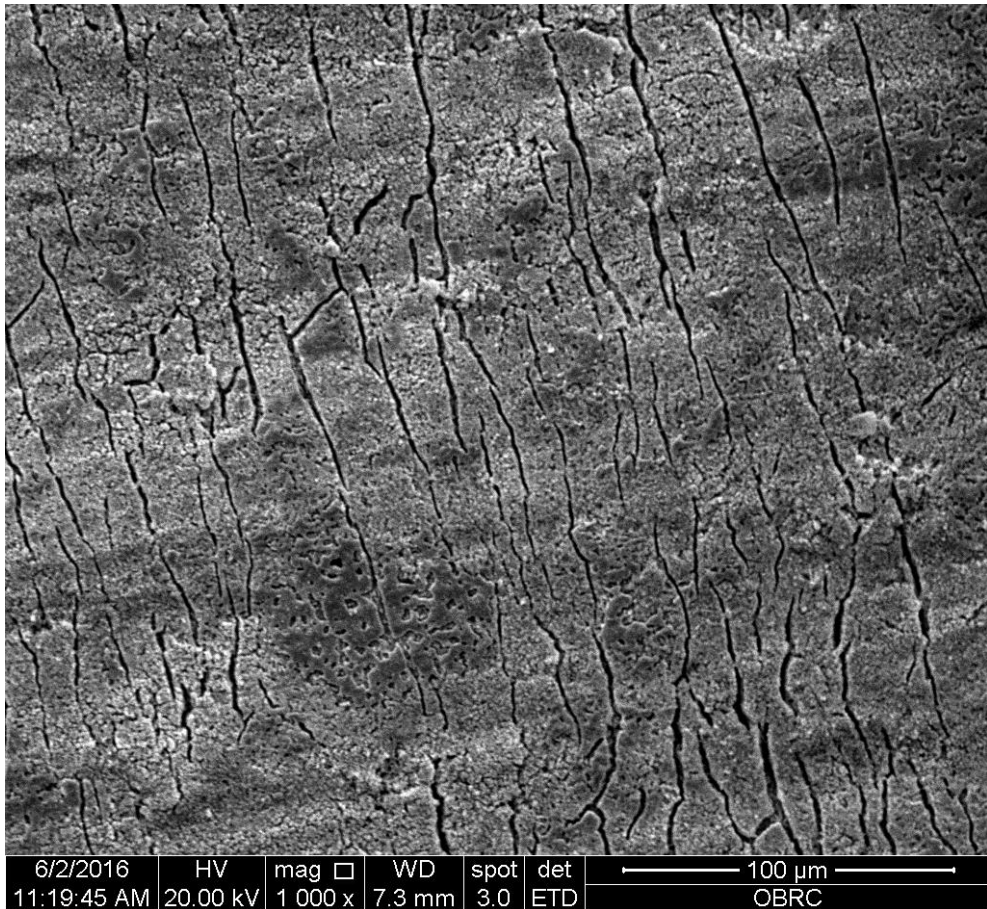
รูปที่ ก-27 พื้นผิวของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะ ในบรรยากาศปกติที่อุณหภูมิ 850°C เป็นระยะเวลา 25 ชั่วโมง ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



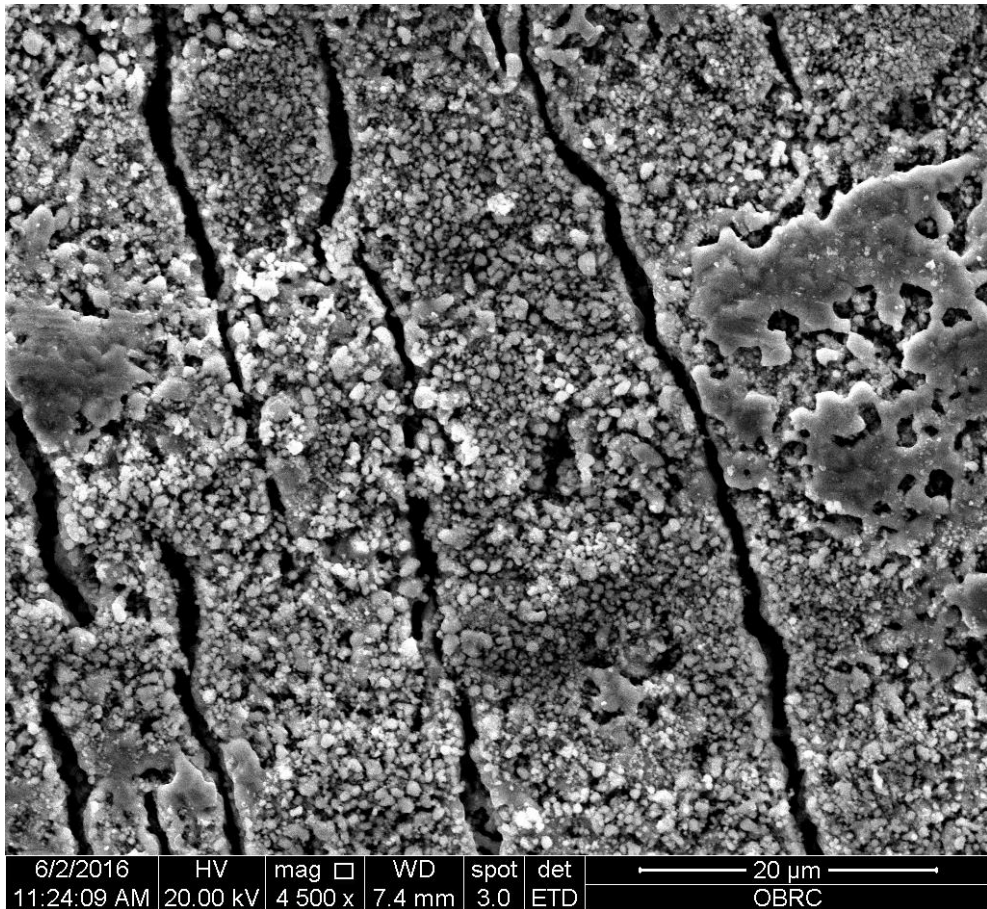
รูปที่ ก-28 พื้นผิวของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะ ในบรรยากาศปกติที่อุณหภูมิ 850°C เป็นระยะเวลา 30 ชั่วโมง ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



รูปที่ ก-29 พื้นผิวของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะ ในบรรยากาศปกติที่อุณหภูมิ 850 °C เป็นระยะเวลา 30 ชั่วโมง ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

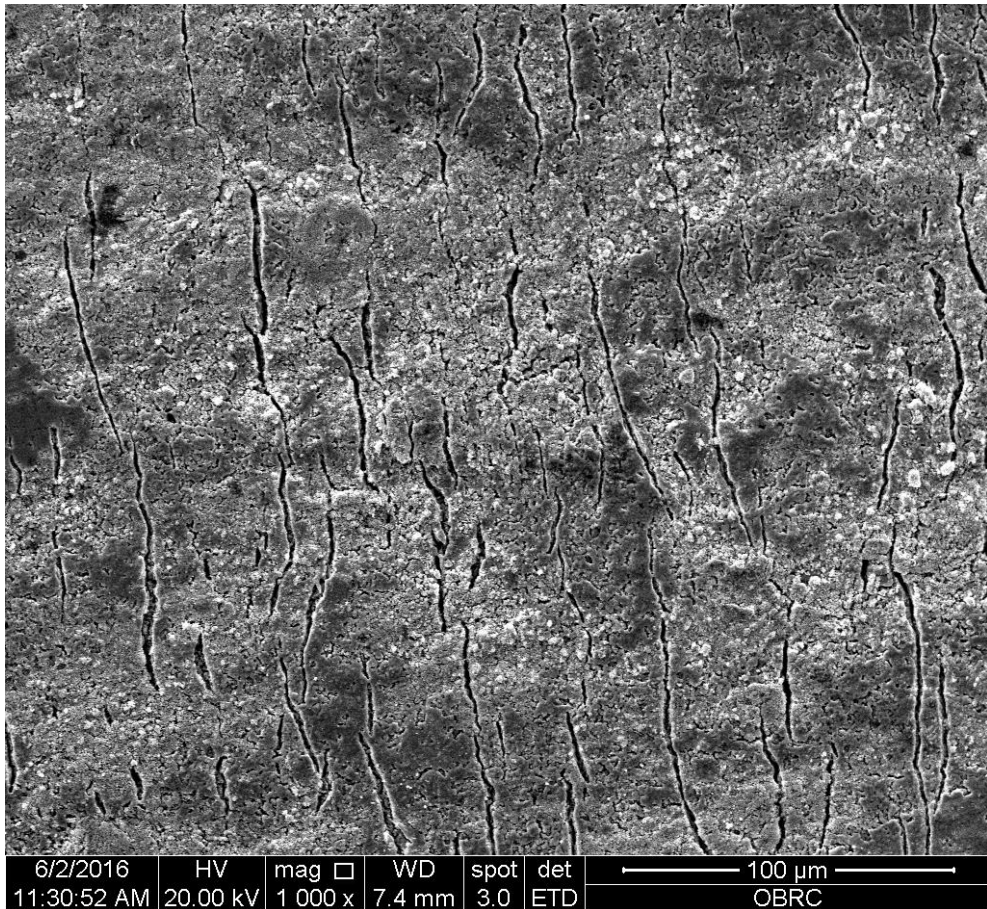


รูปที่ ก-30 พื้นผิวของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะ ในบรรยากาศไฮโดรเจนที่อุณหภูมิ 850°C เป็นระยะเวลา 20 ชั่วโมง ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



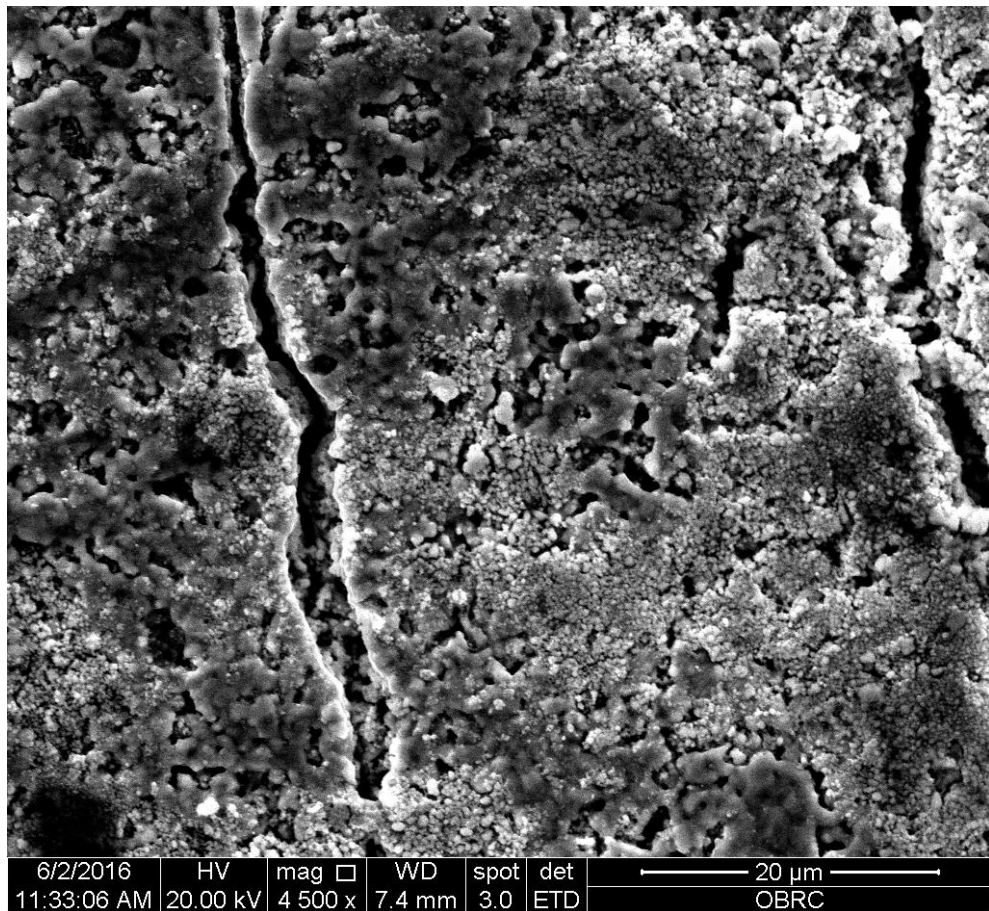
รูปที่ ก-31 พื้นผิวของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะ ในบรรยากาศไฮโดรเจนที่อุณหภูมิ

850°C เป็นระยะเวลา 20 ชั่วโมง ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



รูปที่ ก-32 พื้นผิวของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะ ในบรรยากาศไฮโดรเจนที่อุณหภูมิ

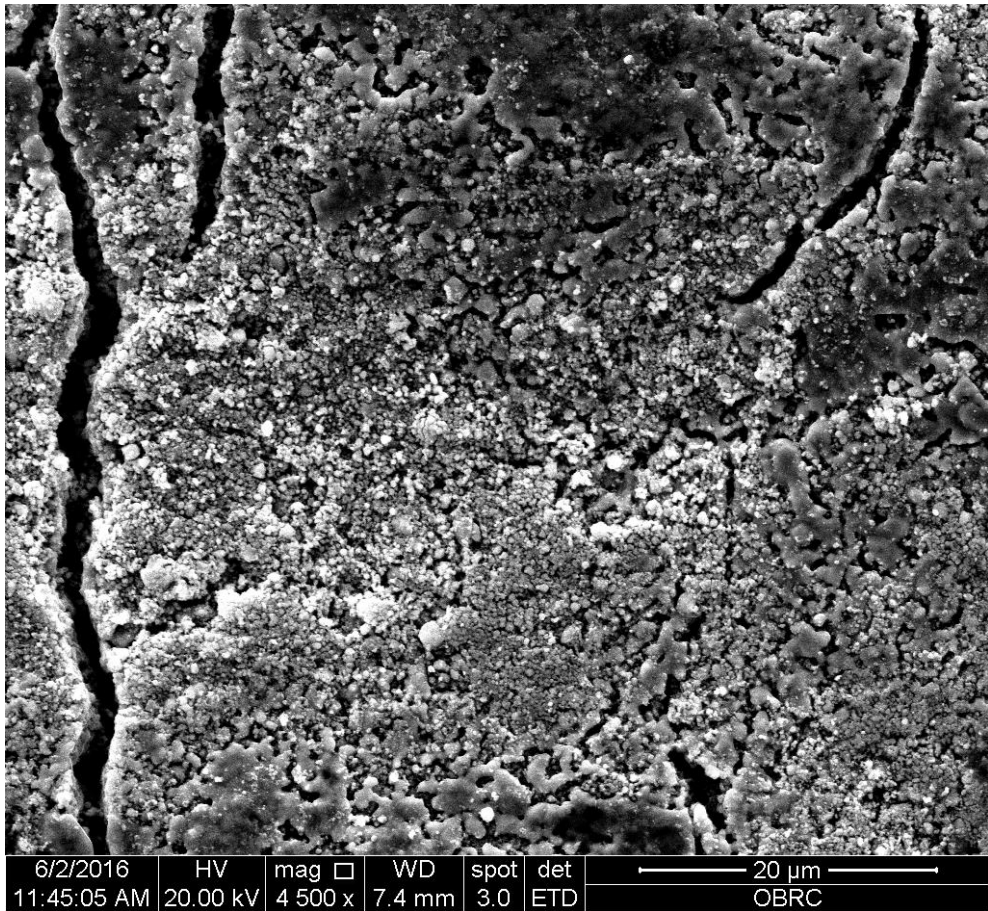
850°C เป็นระยะเวลา 25 ชั่วโมง ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



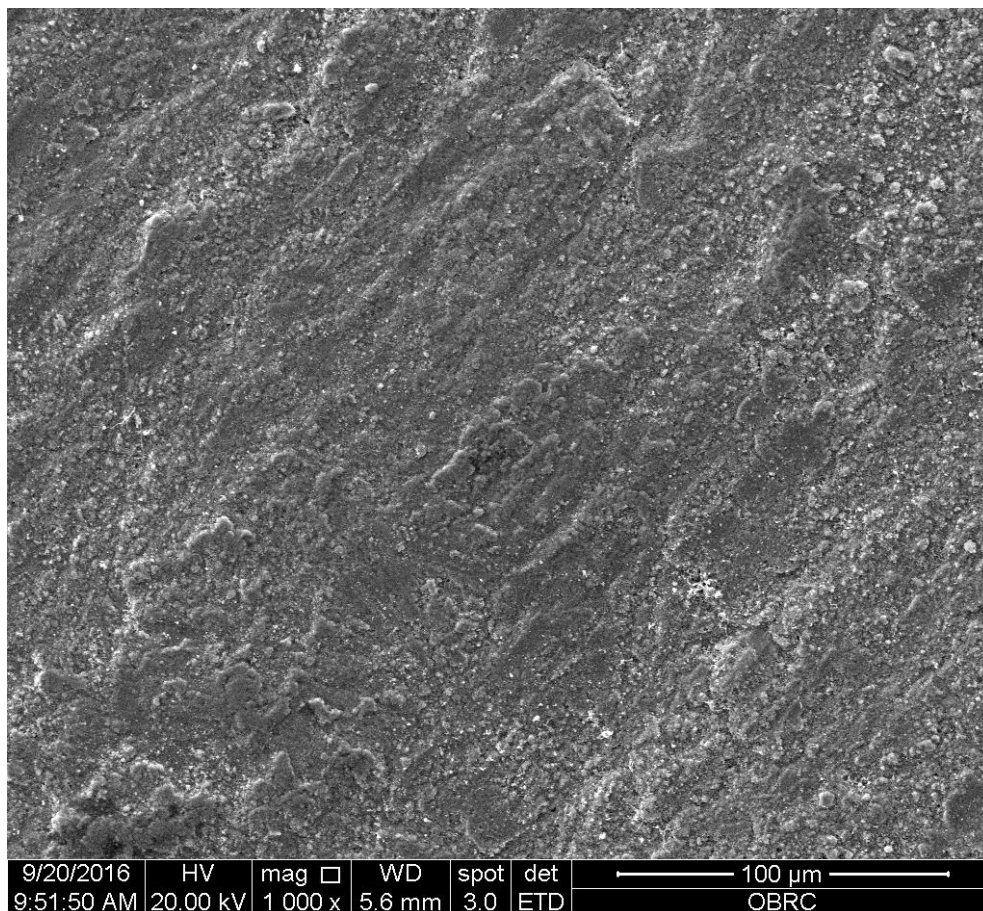
รูปที่ ก-33 พื้นผิวของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะ ในบรรยากาศไฮโดรเจนที่อุณหภูมิ 850°C เป็นระยะเวลา 25 ชั่วโมง ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



รูปที่ ก-34 พื้นผิวของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะ ในบรรยากาศไฮโดรเจนที่อุณหภูมิ 850°C เป็นระยะเวลา 30 ชั่วโมง ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

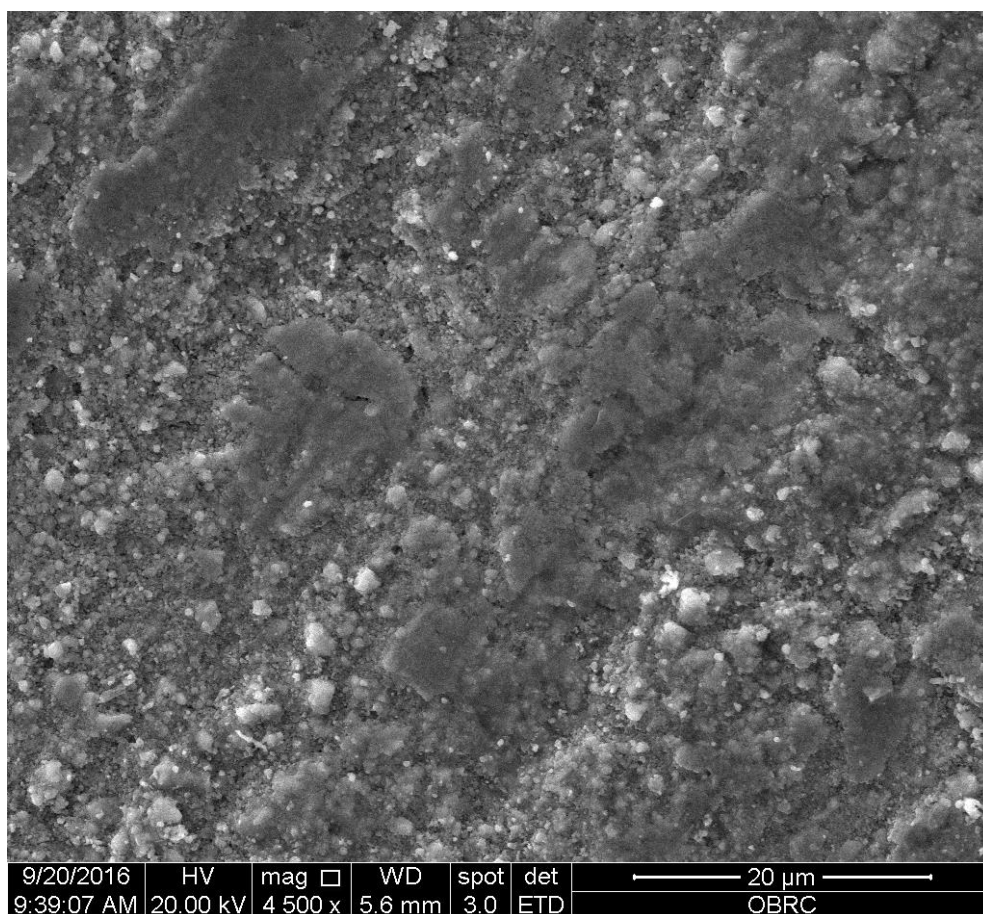


รูปที่ ก-35 พื้นผิวของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะ ในบรรยากาศไฮโดรเจนที่อุณหภูมิ 850°C เป็นระยะเวลา 30 ชั่วโมง ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



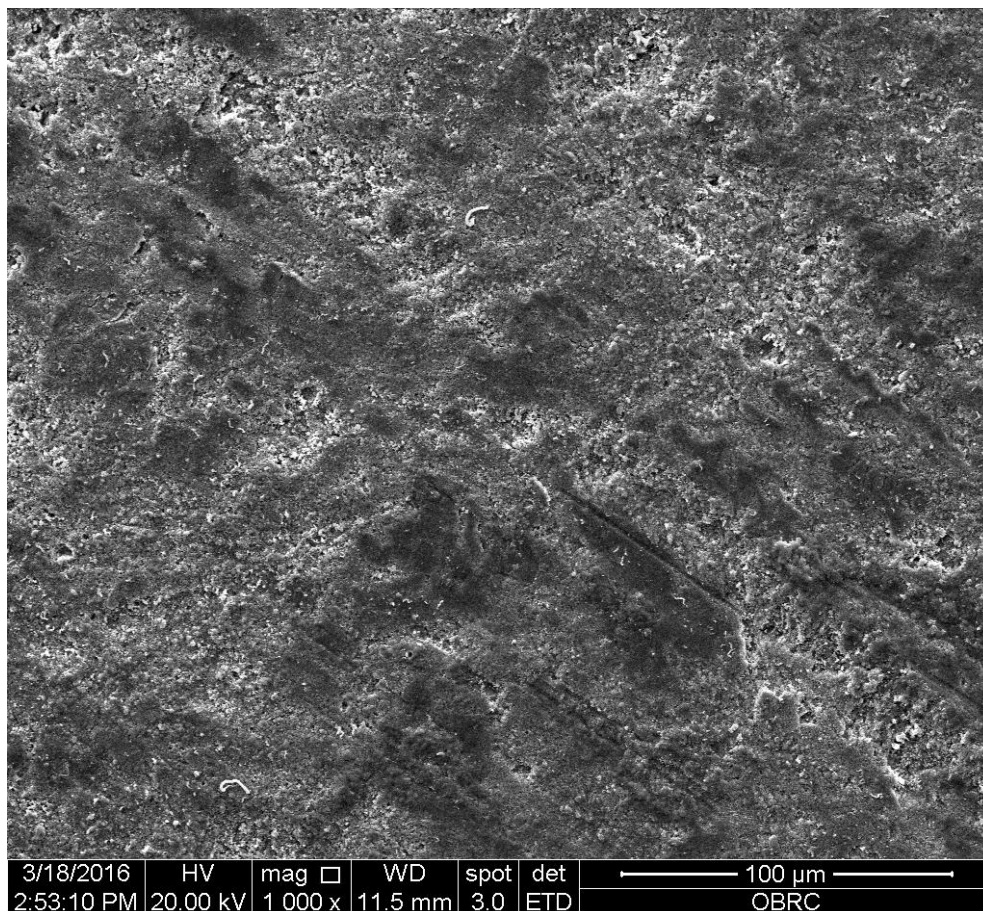
รูปที่ ก-36 พื้นผิวของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะ ในบรรยากาศไนโตรเจนที่อุณหภูมิ

850°C เป็นระยะเวลา 20 ชั่วโมง ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

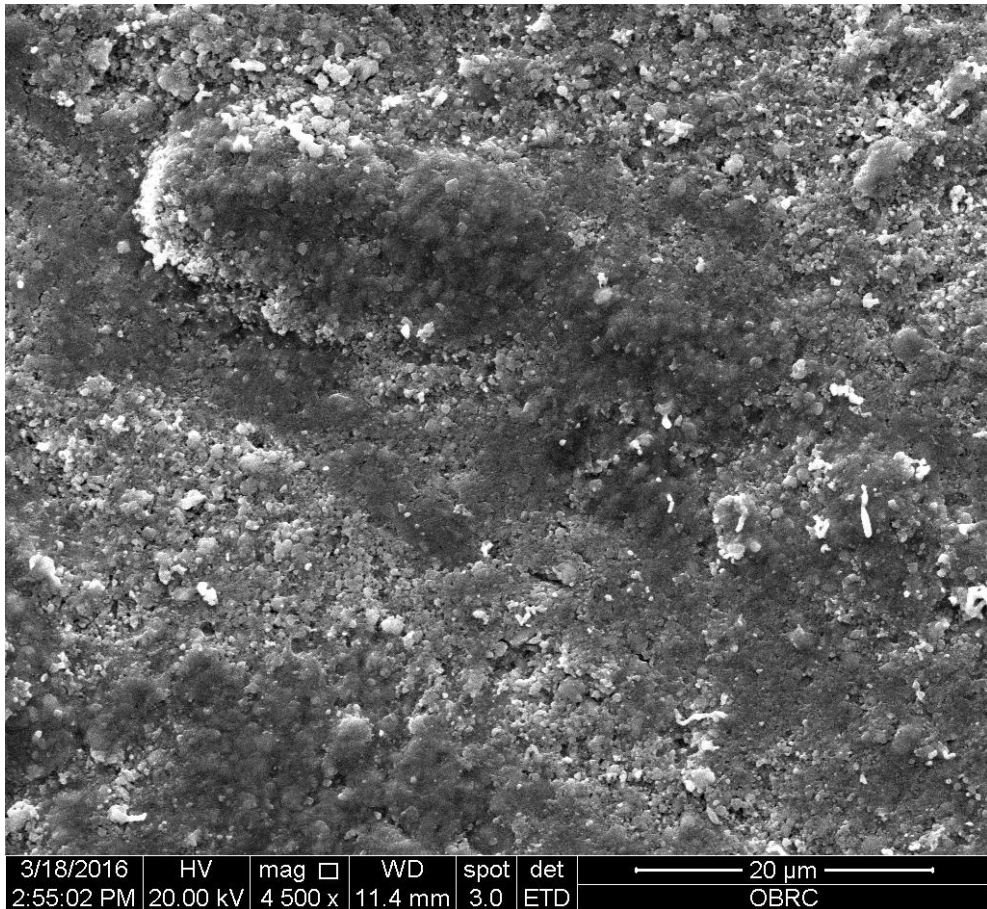


รูปที่ ก-37 พื้นผิวของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะ ในบรรยากาศไนโตรเจนที่อุณหภูมิ

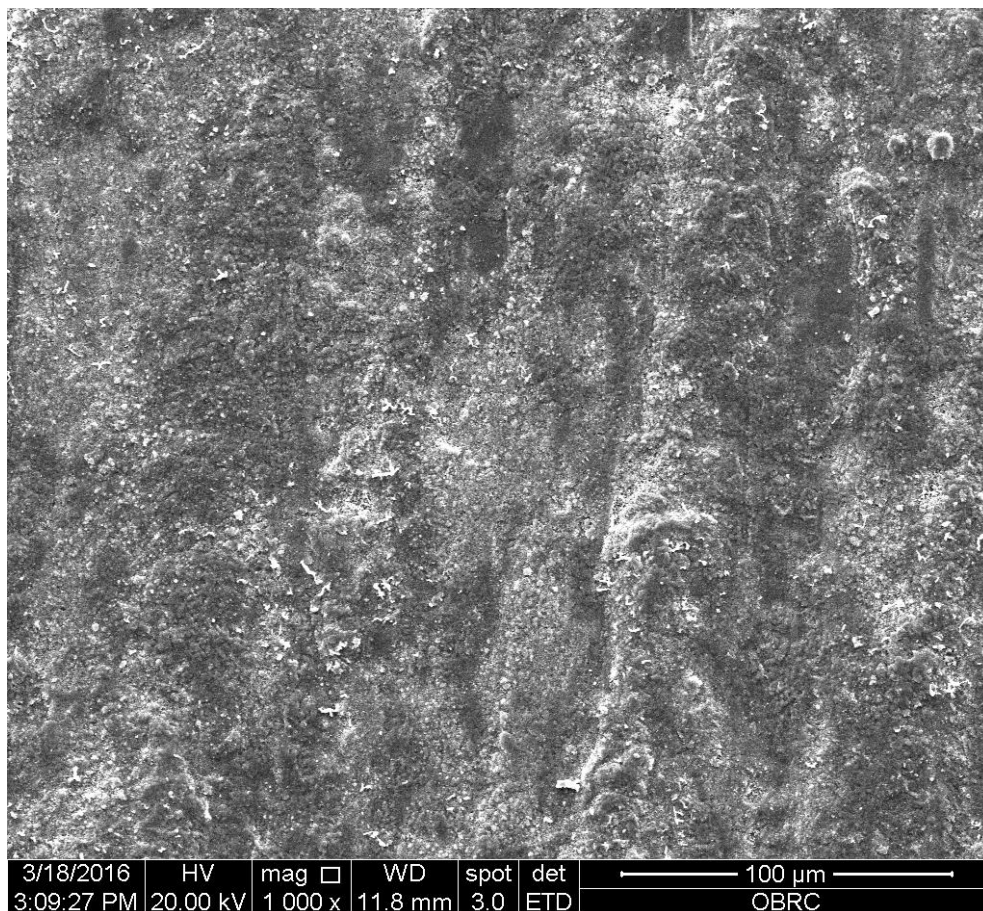
850°C เป็นระยะเวลา 20 ชั่วโมง ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



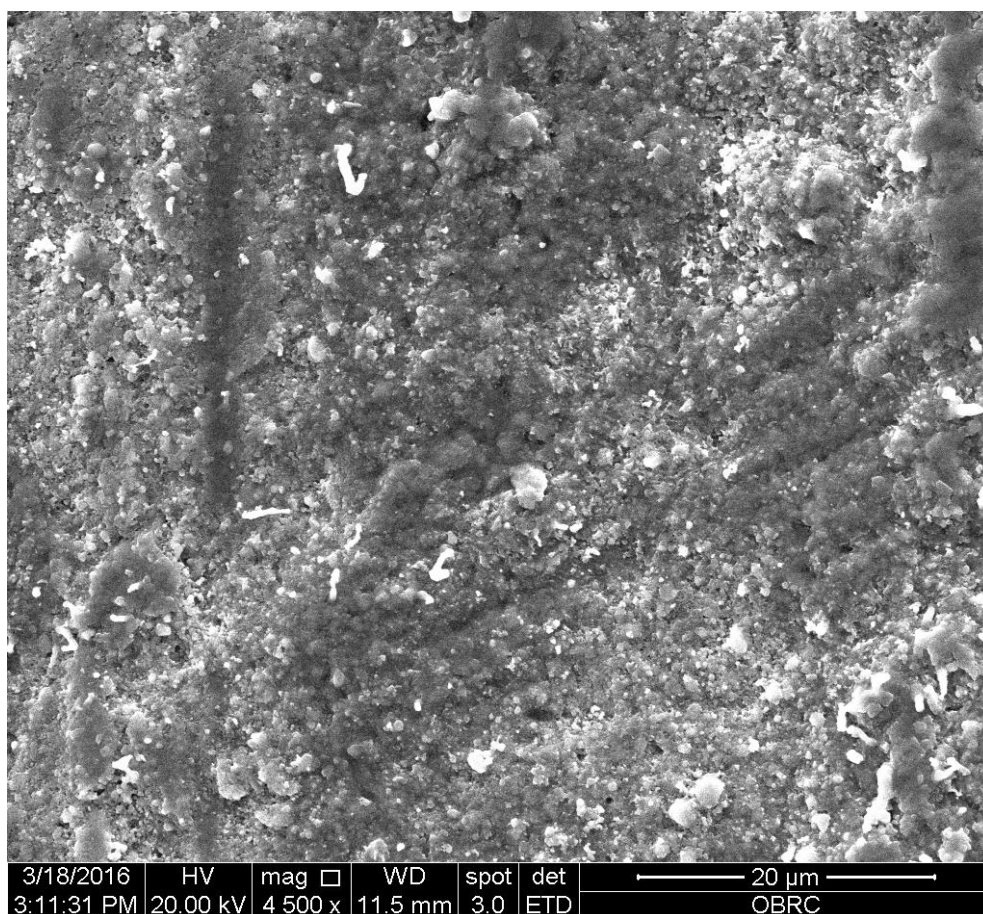
รูปที่ ก-38 พื้นผิวของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะ ในบรรยากาศไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 850°C เป็นระยะเวลา 25 ชั่วโมง ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



รูปที่ ก-39 พื้นผิวของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะ ในบรรยากาศไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 850°C เป็นระยะเวลา 25 ชั่วโมง ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

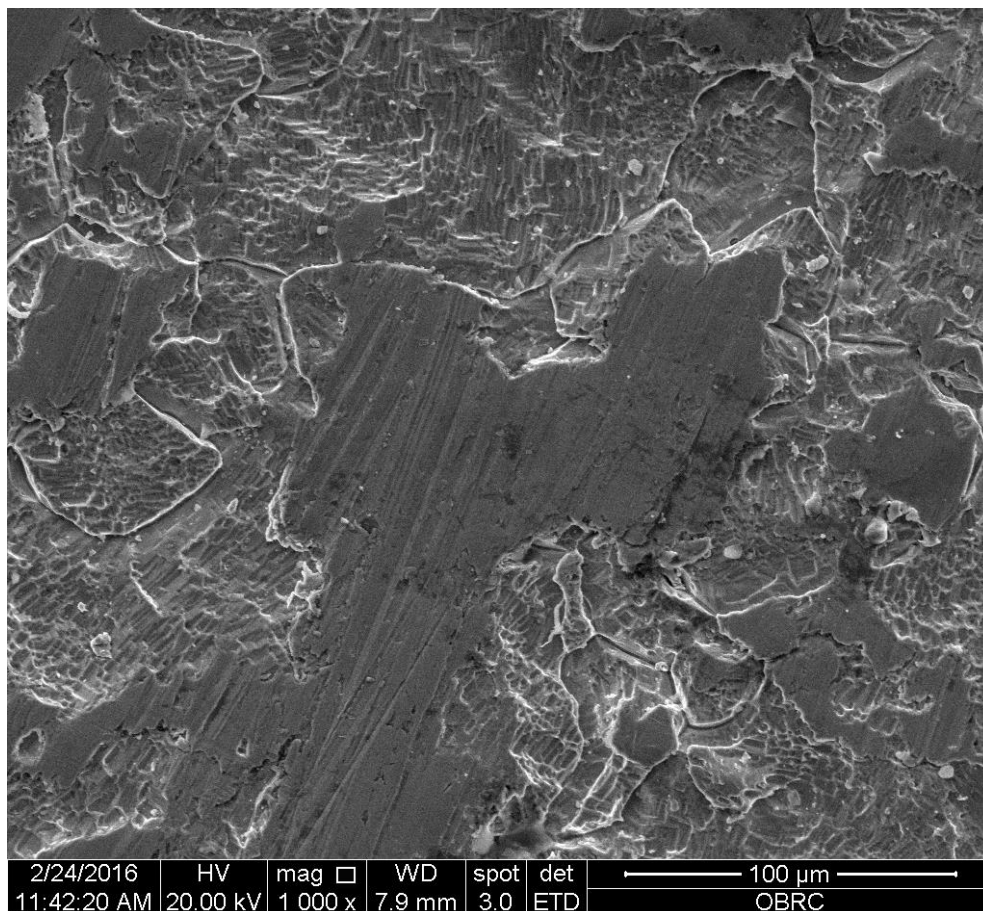


รูปที่ ก-40 พื้นผิวของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะ ในบรรยากาศไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 850°C เป็นระยะเวลา 30 ชั่วโมง ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

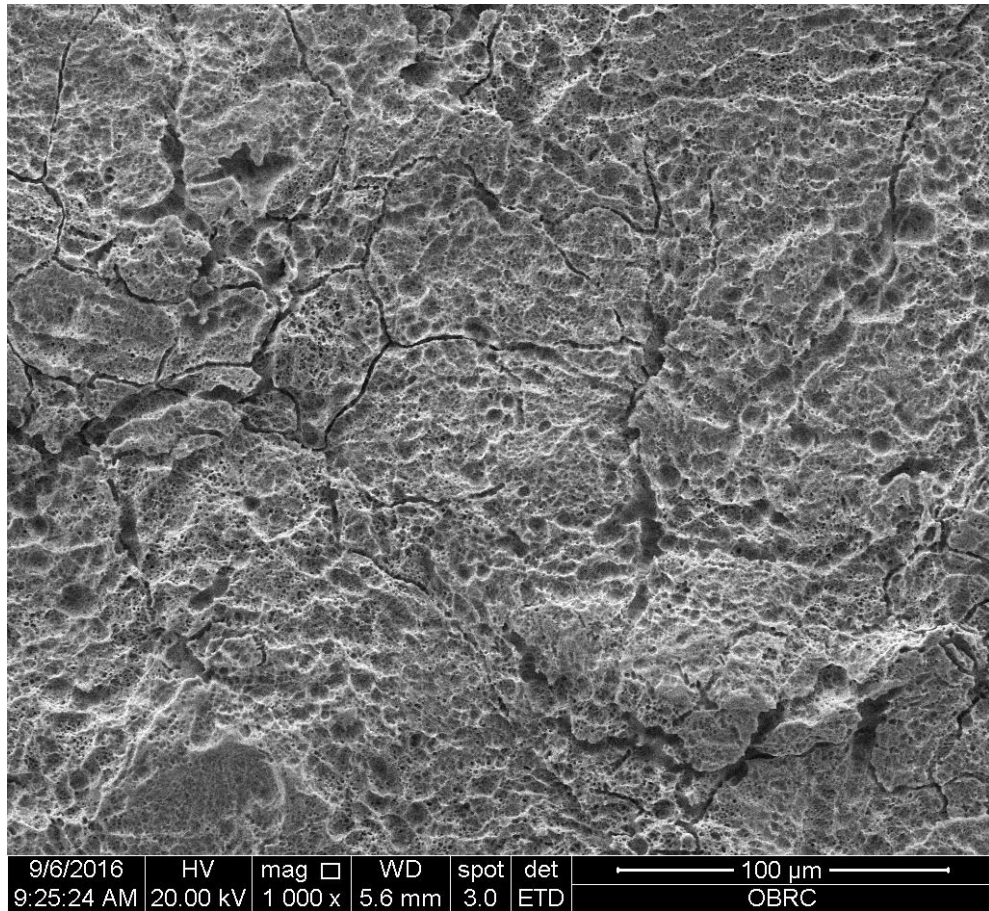


รูปที่ ก-41 พื้นผิวของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะ ในบรรยากาศไนโตรเจนที่อุณหภูมิ

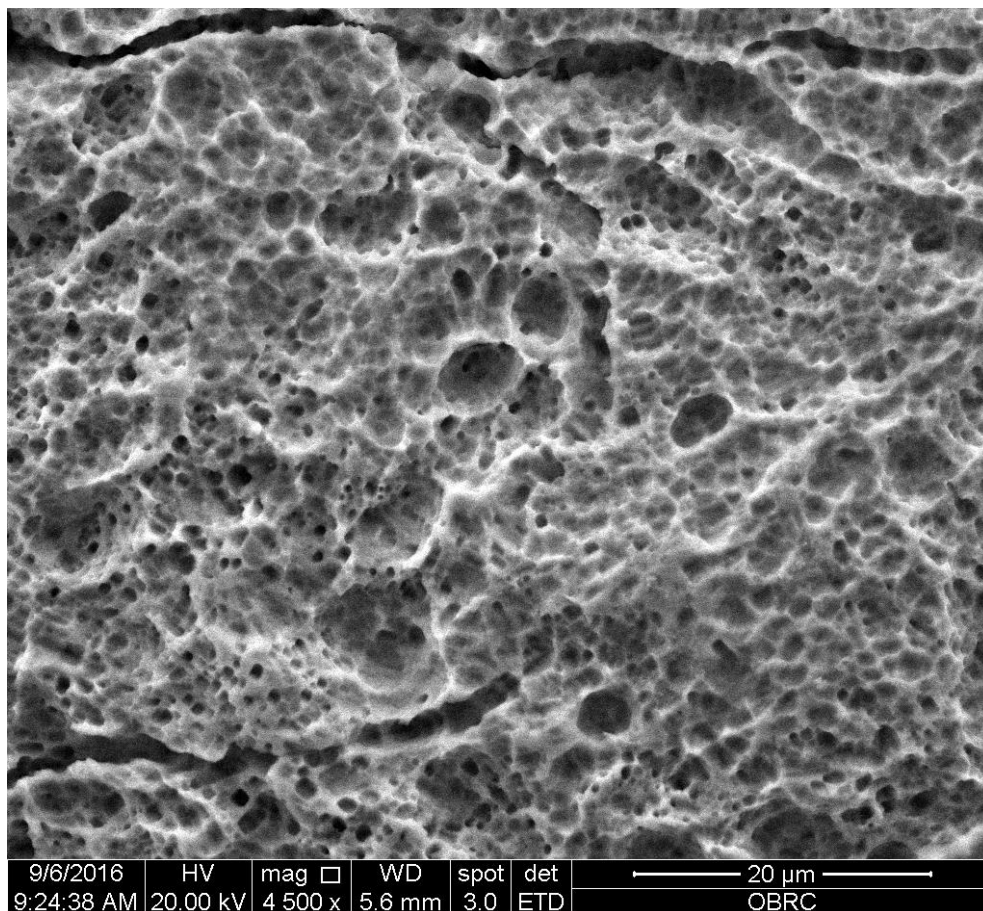
850°C เป็นระยะเวลา 30 ชั่วโมง ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



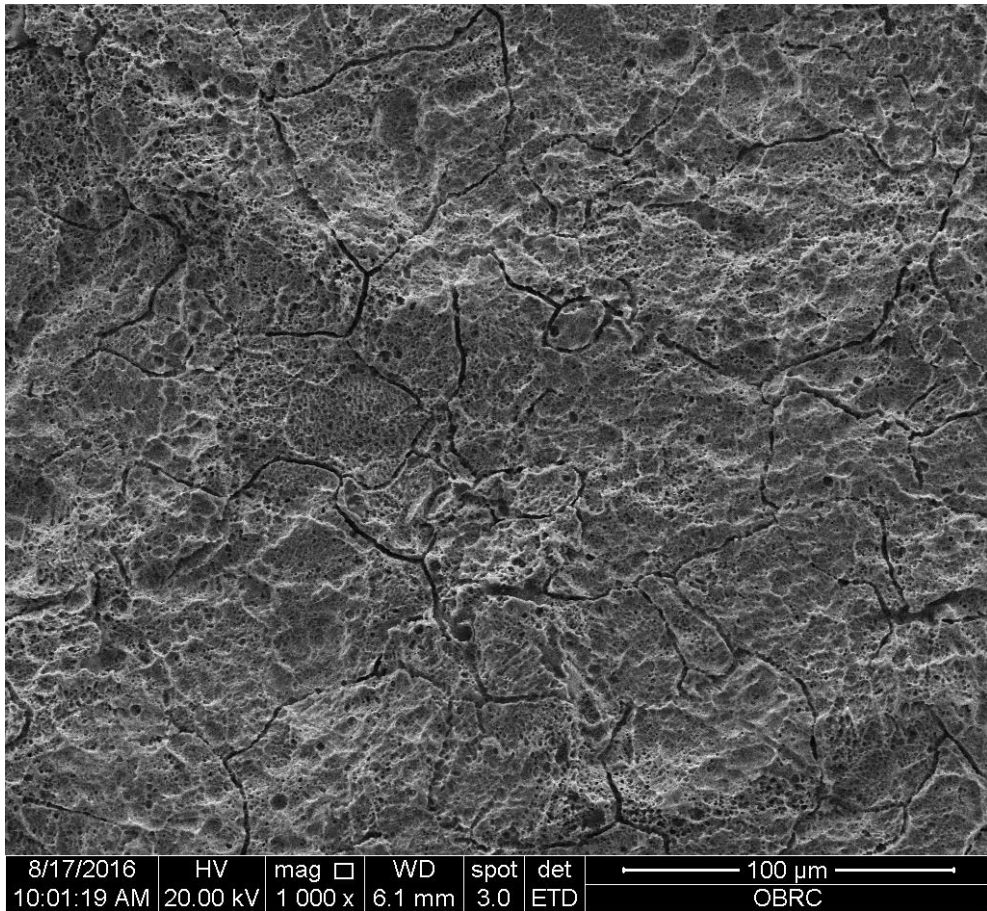
รูปที่ ก-42 พื้นผิวของชิ้นงานที่กัดกรดจากกระบวนการของบริษัทหลังจากผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะในบรรยากาศไฮโดรเจนจากกระบวนการของบริษัทถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



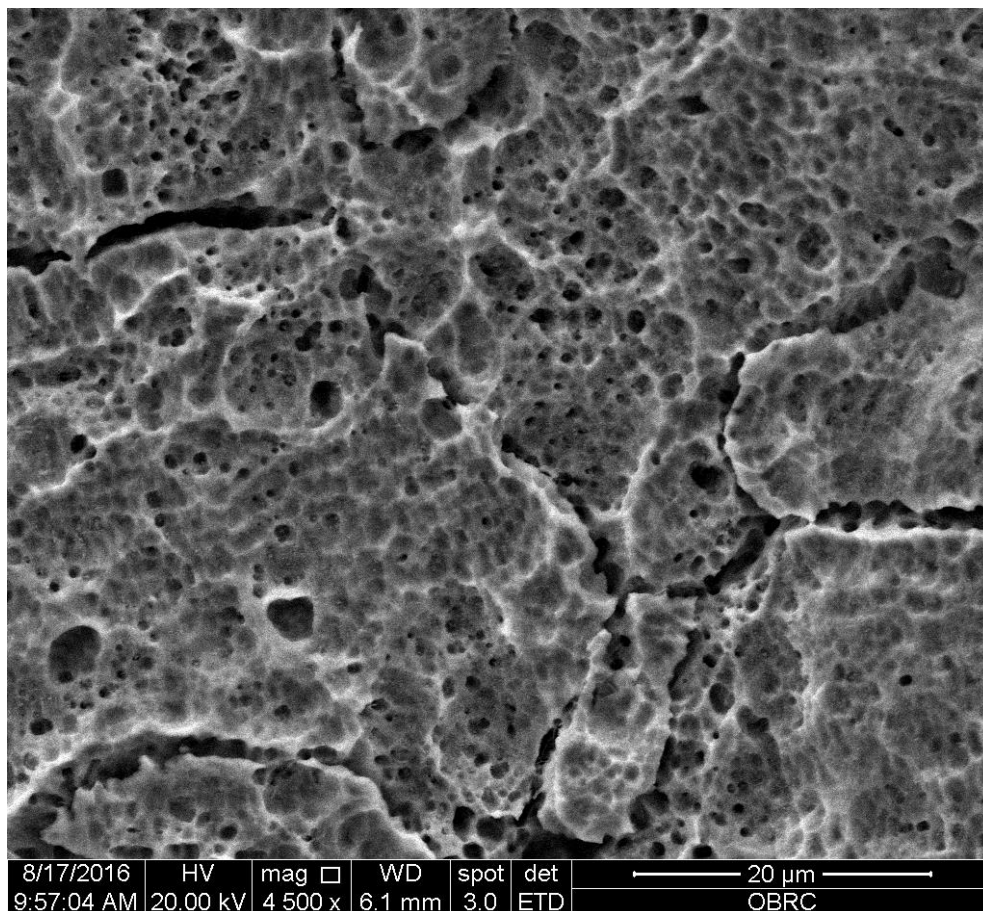
รูปที่ ก-43 พื้นผิวของชิ้นงานหลังกัดกรดของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะโน
 บรรยากาศปกติที่อุณหภูมิ 850°C เป็นระยะเวลา 20 ชั่วโมง ถ่ายด้วยกล้อง
 จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



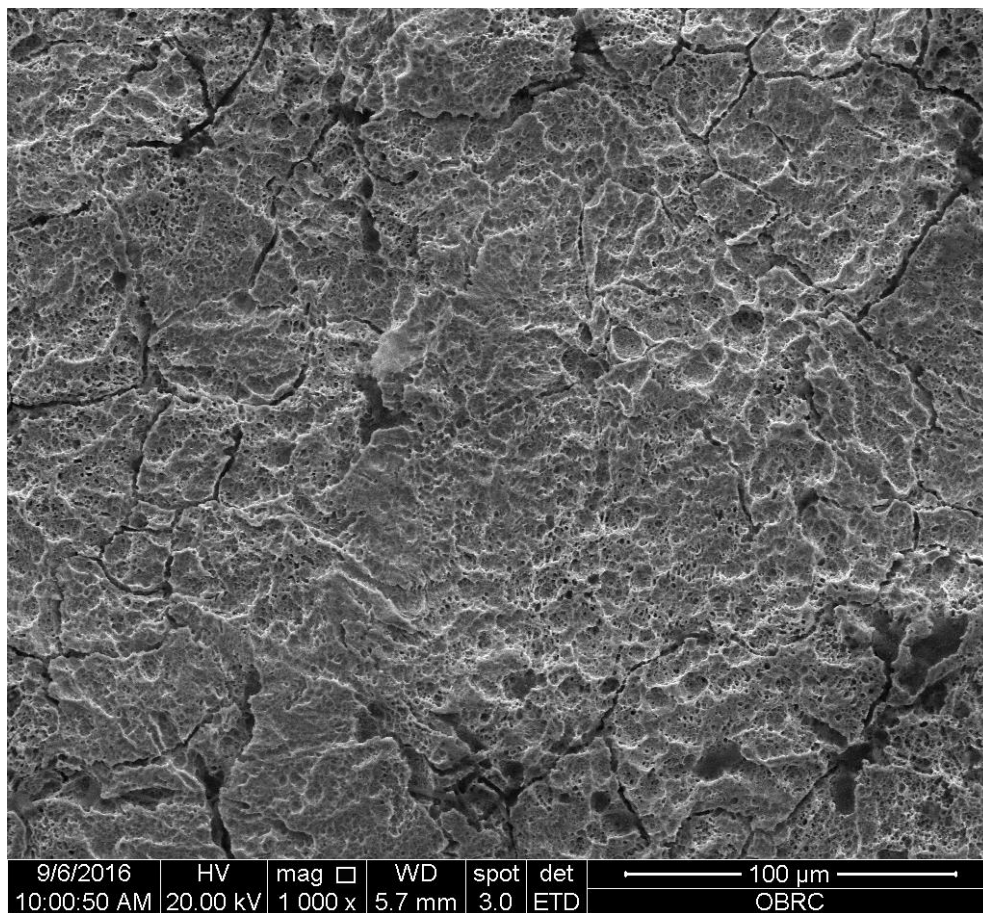
รูปที่ ก-44 พื้นผิวของชิ้นงานหลังกักกรดของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะโน
บรรยากาศปกติที่อุณหภูมิ 850°C เป็นระยะเวลา 20 ชั่วโมง ถ่ายด้วยกล้อง
จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



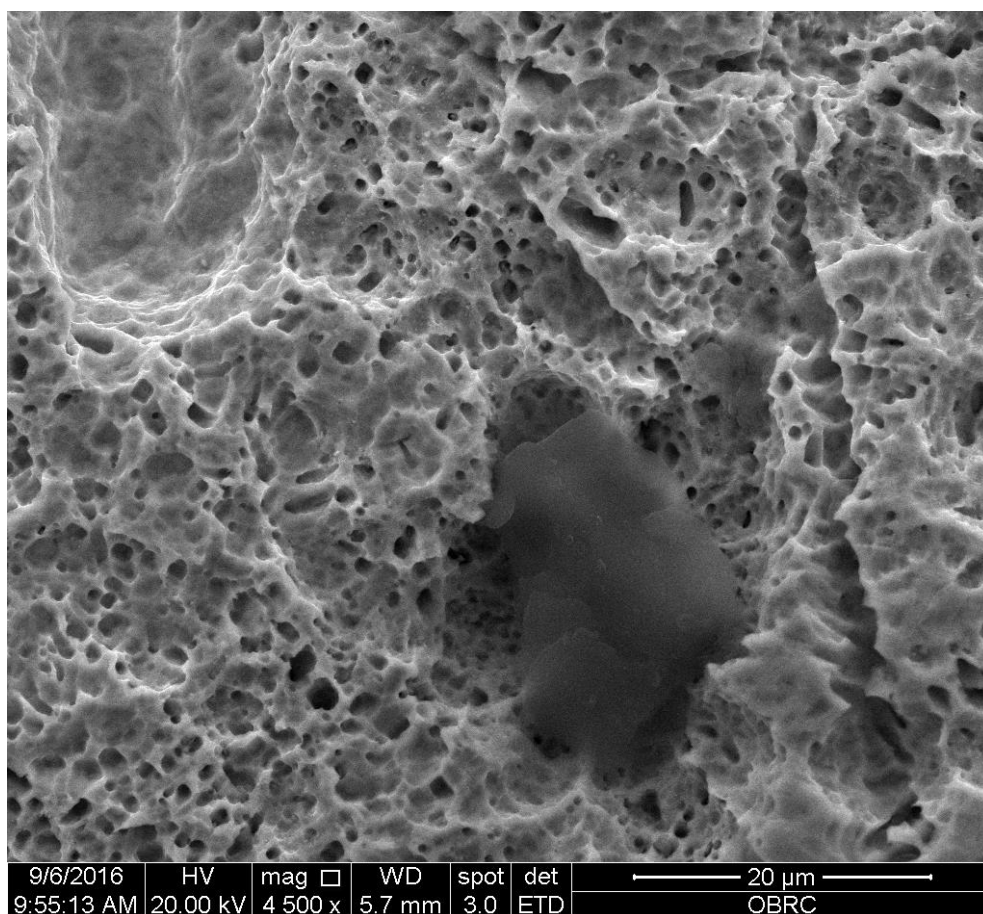
รูปที่ ก-45 พื้นผิวของชิ้นงานหลังกัดกรดของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะโน
 บรรยากาศปกติที่อุณหภูมิ 850°C เป็นระยะเวลา 25 ชั่วโมง ถ่ายด้วยกล้อง
 จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



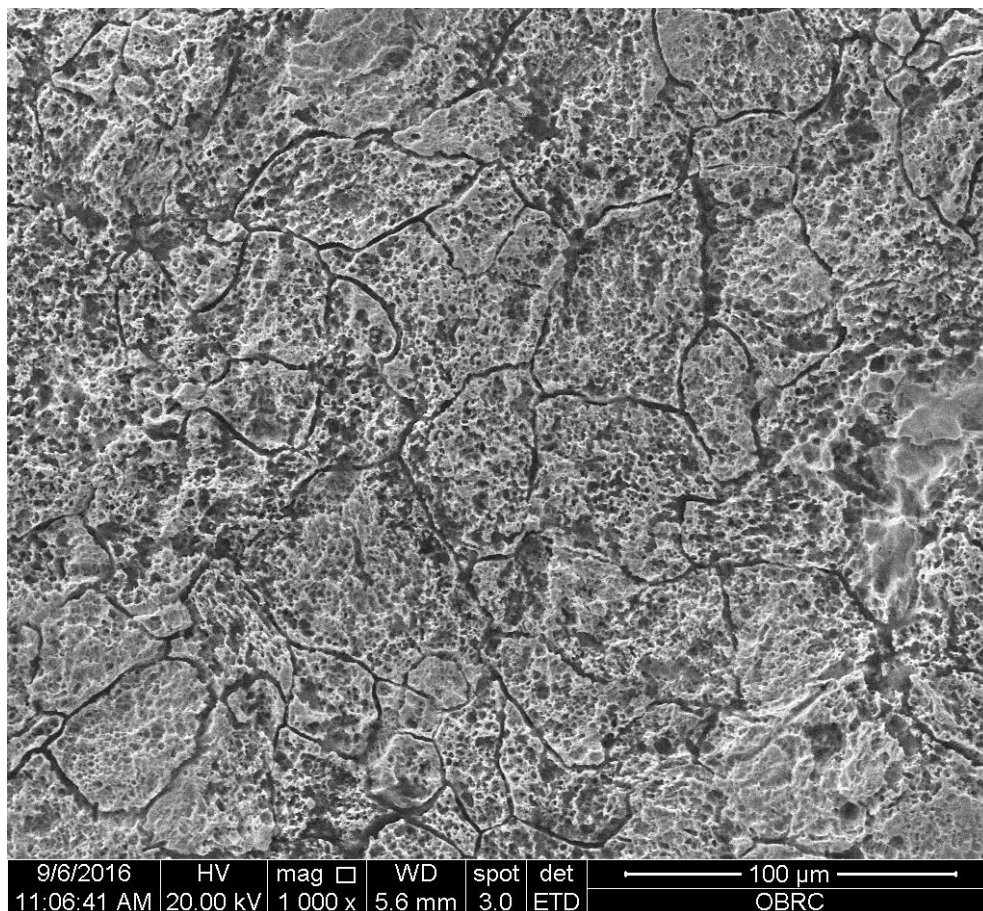
รูปที่ ก-46 พื้นผิวของชิ้นงานหลังกัดกรดของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะโน
บรรยากาศปกติที่อุณหภูมิ 850°C เป็นระยะเวลา 25 ชั่วโมง ถ่ายด้วยกล้อง
จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



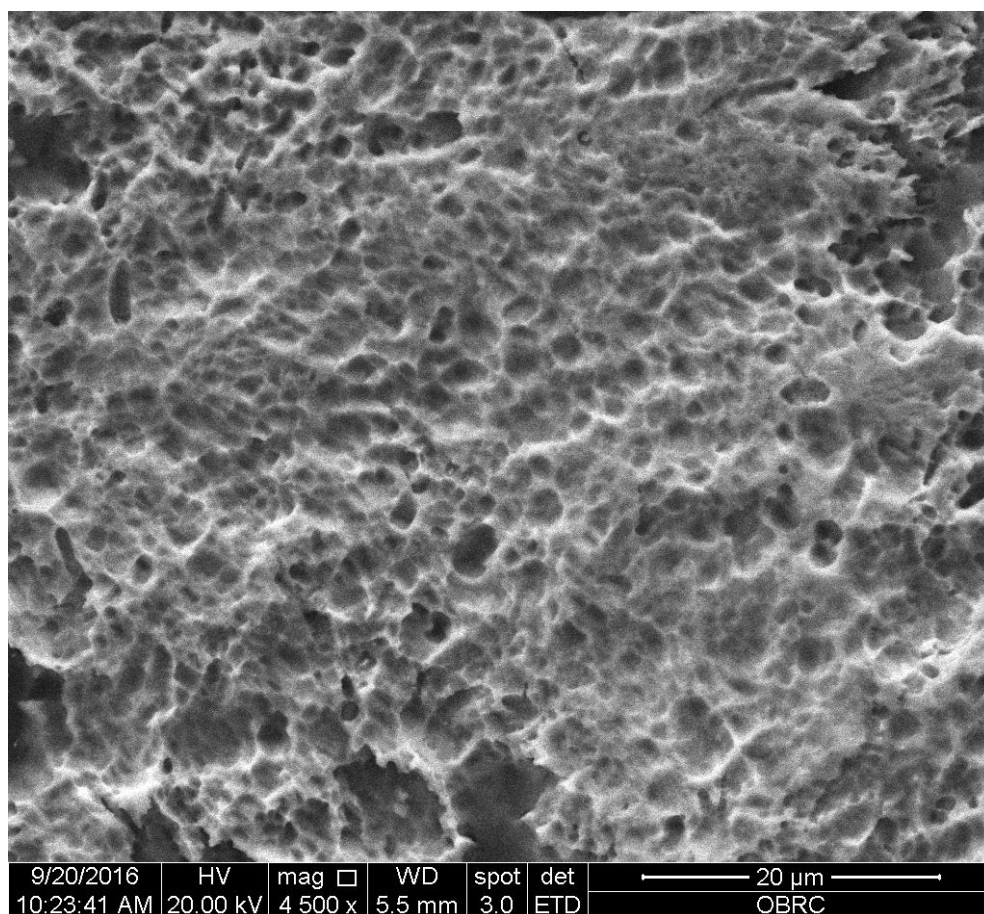
รูปที่ ก-47 พื้นผิวของชิ้นงานหลังกัดกรดของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะโน
บรรยากาศปกติที่อุณหภูมิ 850°C เป็นระยะเวลา 30 ชั่วโมง ถ่ายด้วยกล้อง
จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



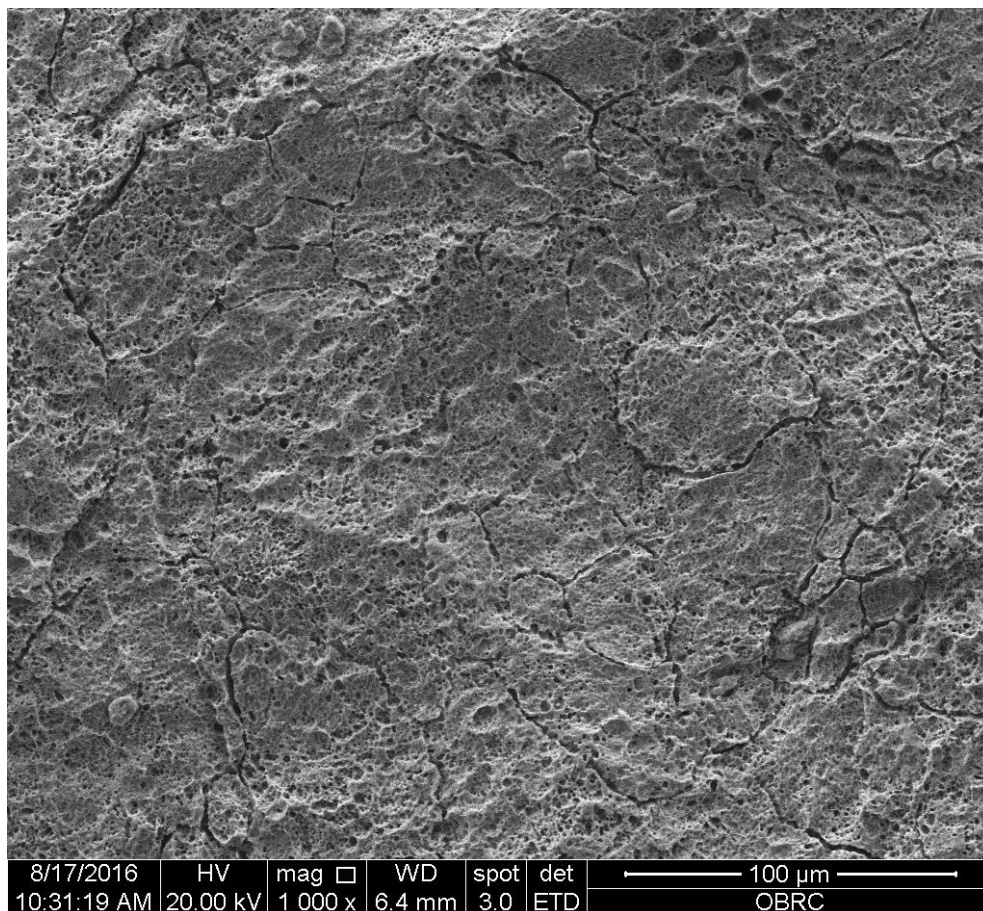
รูปที่ ก-48 พื้นผิวของชิ้นงานหลังกัดกรดของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะโน
 บรรยากาศปกติที่อุณหภูมิ 850°C เป็นระยะเวลา 30 ชั่วโมง ถ่ายด้วยกล้อง
 จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



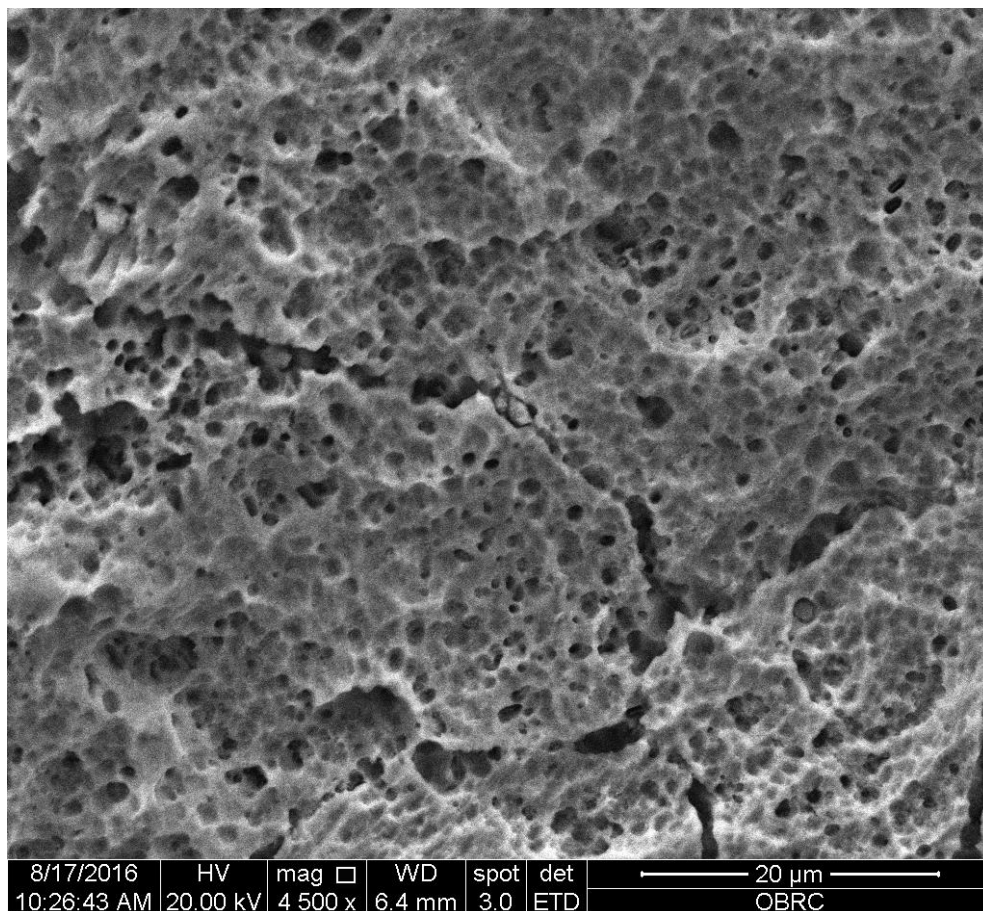
รูปที่ ก-49 พื้นผิวของชิ้นงานหลังกัดกรดของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะโน
บรรยากาศไฮโดรเจนที่อุณหภูมิ 850°C เป็นระยะเวลา 20 ชั่วโมง ถ่ายด้วยกล้อง
จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



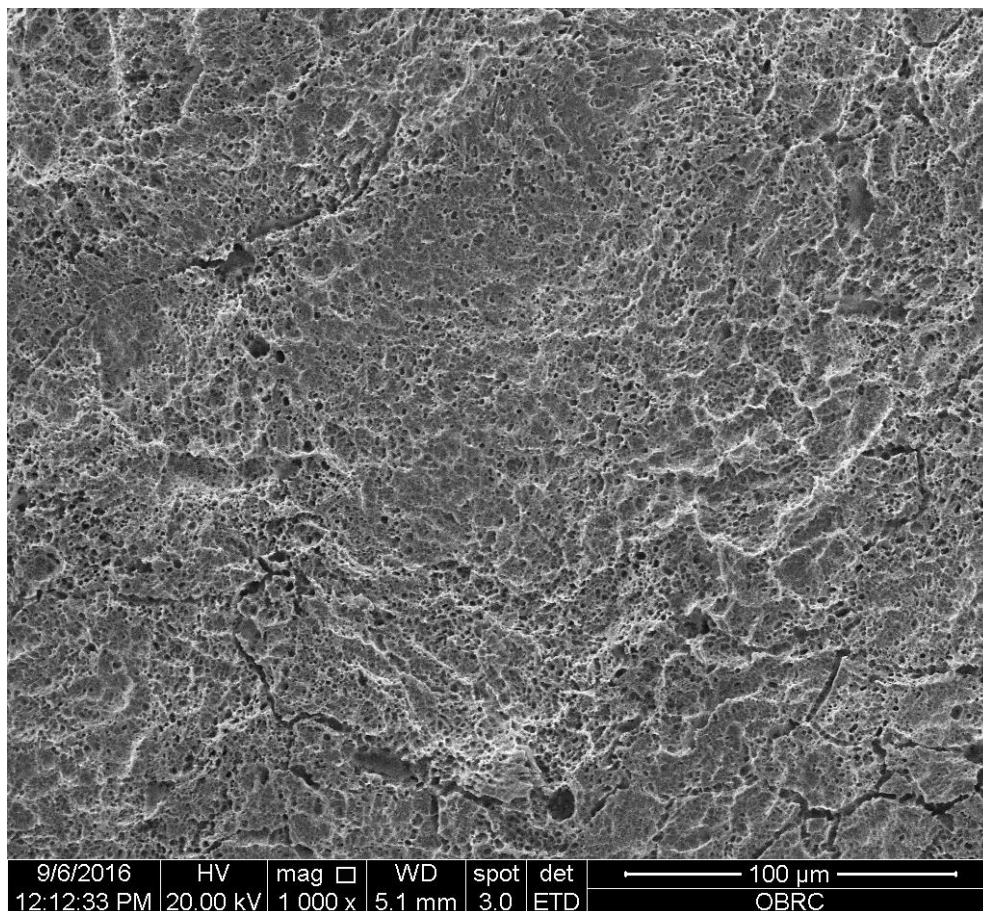
รูปที่ ก-50 พื้นผิวของชิ้นงานหลังกััดกรดของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะใน
บรรยากาศไฮโดรเจนที่อุณหภูมิ 850°C เป็นระยะเวลา 20 ชั่วโมง ถ่ายด้วยกล้อง
จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



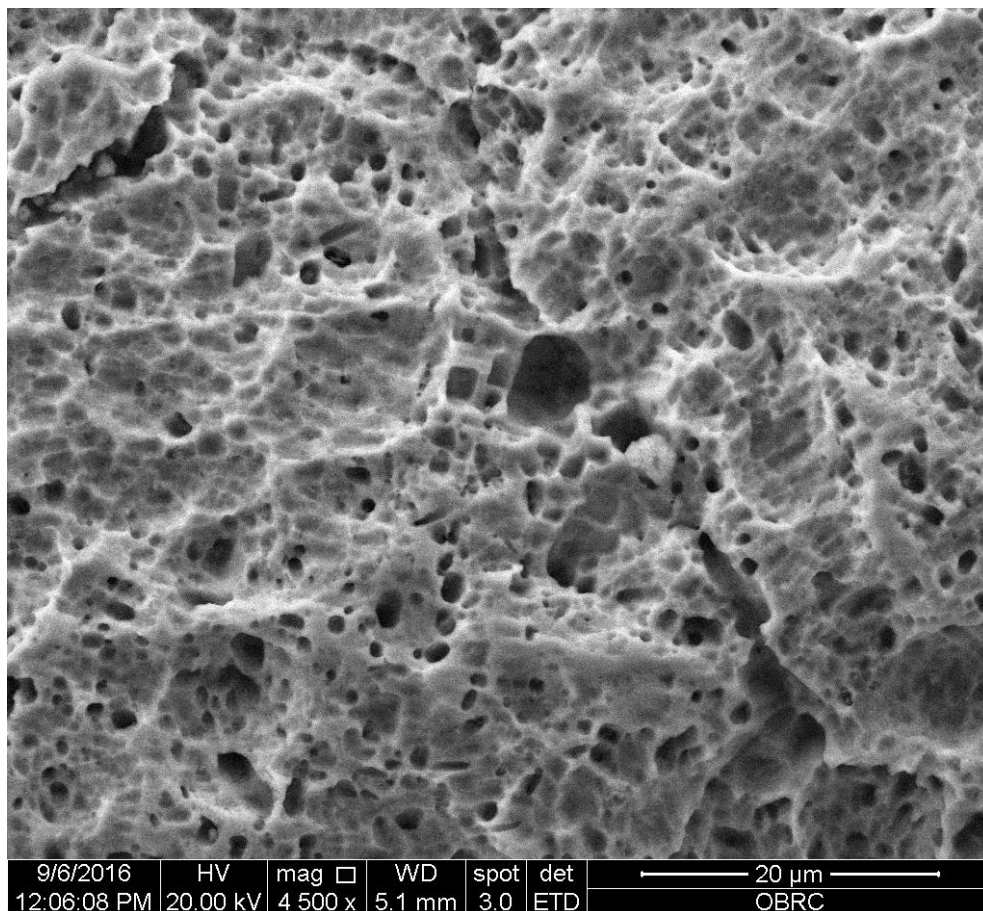
รูปที่ ก-51 พื้นผิวของชิ้นงานหลังกััดกรตของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะโน
บรรยากาศไฮโดรเจนที่อุณหภูมิ 850°C เป็นระยะเวลา 25 ชั่วโมง ถ่ายด้วยกล้อง
จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



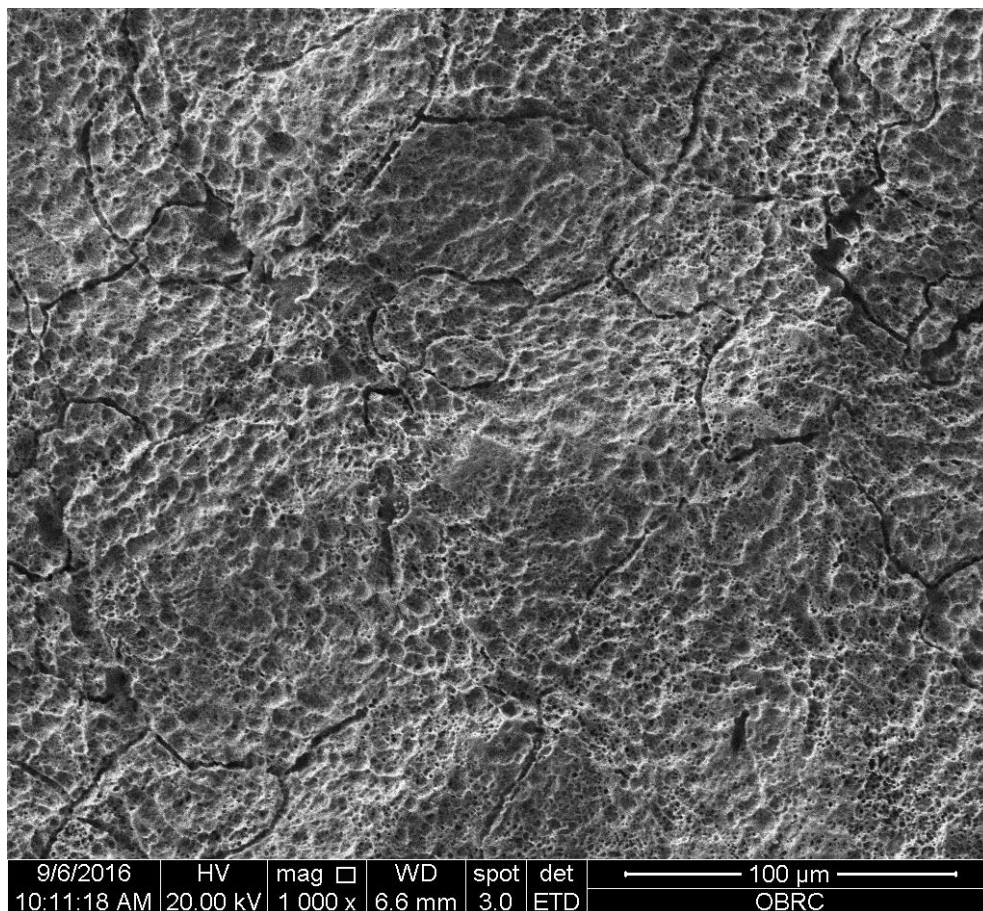
รูปที่ ก-52 พื้นผิวของชิ้นงานหลังกััดกรดของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะไน
บรรยากาศไฮโดรเจนที่อุณหภูมิ 850°C เป็นระยะเวลา 25 ชั่วโมง ถ่ายด้วยกล้อง
จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



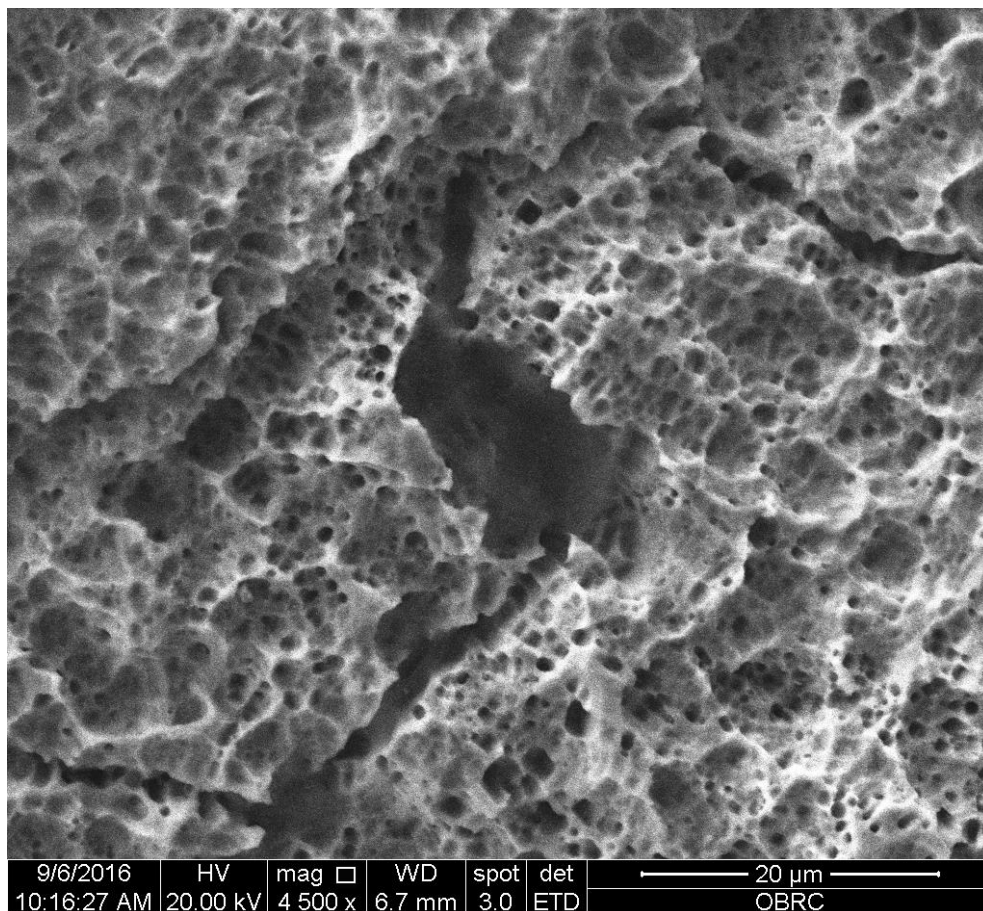
รูปที่ ก-53 พื้นผิวของชิ้นงานหลังกัดกรดของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะโน
บรรยากาศไฮโดรเจนที่อุณหภูมิ 850°C เป็นระยะเวลา 30 ชั่วโมง ถ่ายด้วยกล้อง
จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



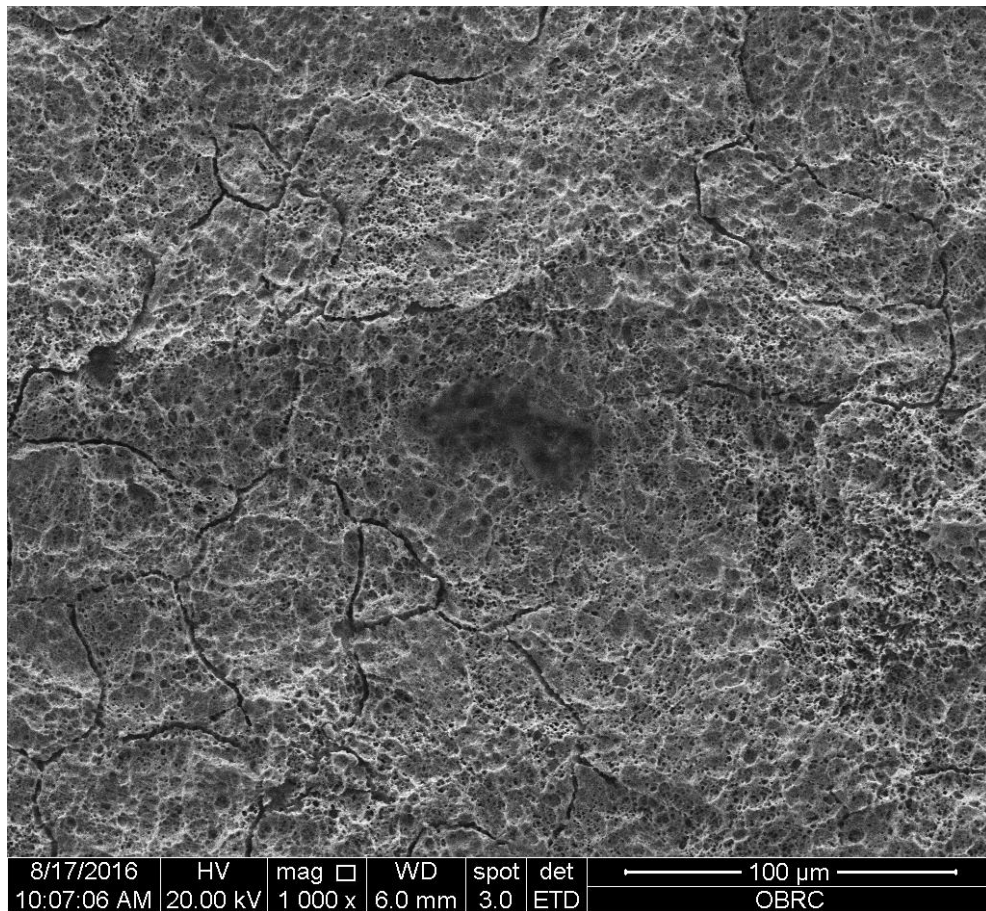
รูปที่ ก-54 พื้นผิวของชิ้นงานหลังกััดกรดของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะโน
บรรยากาศไฮโดรเจนที่อุณหภูมิ 850°C เป็นระยะเวลา 30 ชั่วโมง ถ่ายด้วยกล้อง
จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



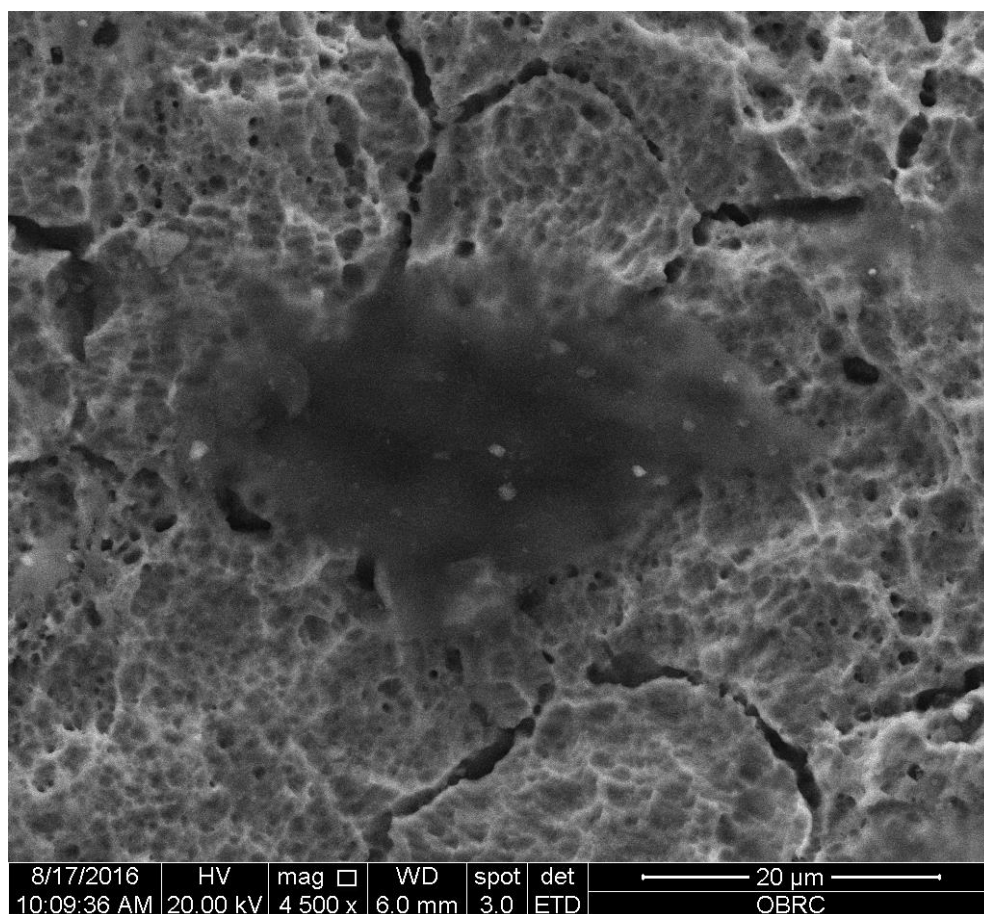
รูปที่ ก-55 พื้นผิวของชิ้นงานหลังกััดกรตของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะไน
บรรยากาศไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 850°C เป็นระยะเวลา 20 ชั่วโมง ถ่ายด้วยกล้อง
จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



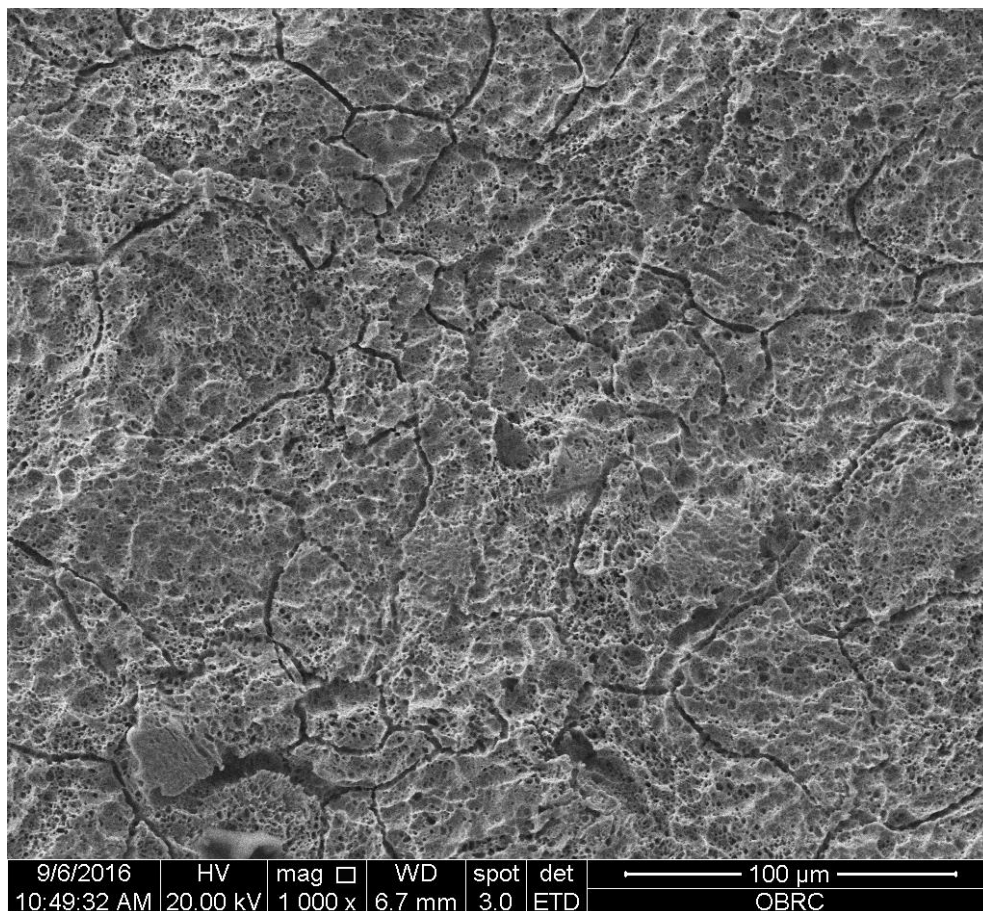
รูปที่ ก-56 พื้นผิวของชิ้นงานหลังกัดกรดของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะไน
 บรรยากาศไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 850°C เป็นระยะเวลา 20 ชั่วโมง ถ่ายด้วยกล้อง
 จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



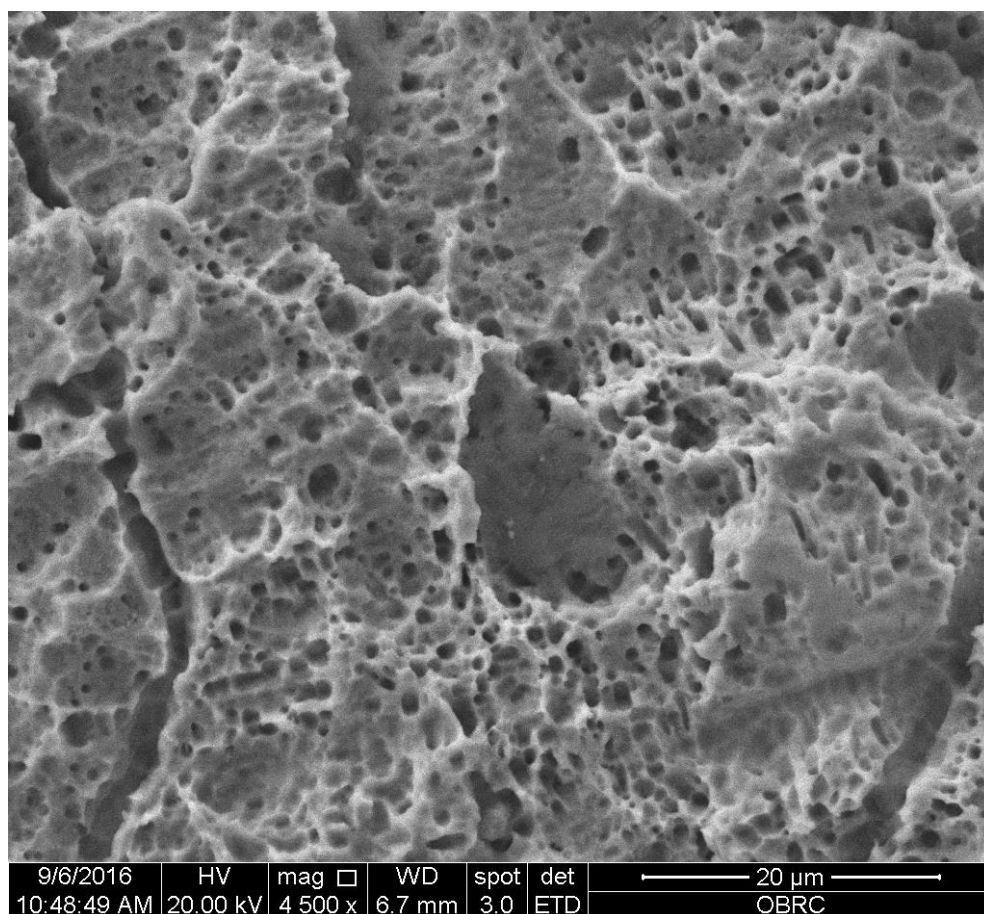
รูปที่ ก-57 พื้นผิวของชิ้นงานหลังกััดกรตของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะไน
 บรรยากาศไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 850°C เป็นระยะเวลา 25 ชั่วโมง ถ่ายด้วยกล้อง
 จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



รูปที่ ก-58 พื้นผิวของชิ้นงานหลังกัดกรดของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะไน
บรรยากาศไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 850°C เป็นระยะเวลา 25 ชั่วโมง ถ่ายด้วยกล้อง
จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



รูปที่ ก-59 พื้นผิวของชิ้นงานหลังกัดกรดของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะโน
บรรยากาศไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 850°C เป็นระยะเวลา 30 ชั่วโมง ถ่ายด้วยกล้อง
จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



รูปที่ ก-60 พื้นผิวของชิ้นงานหลังกัดกรดของชิ้นงานที่ผ่านการรีดร้อนแล้วอบอ่อนแบบกะโน
บรรยากาศไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 850°C เป็นระยะเวลา 30 ชั่วโมง ถ่ายด้วยกล้อง
จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายณัฐพจน์ เกษมโกเมศ เกิดเมื่อวันที่ 12 สิงหาคม 2534 ที่จังหวัดกรุงเทพฯ เป็นบุตรคนโตของนายชัยพล เกษมโกเมศและนางญานิศ เกษมโกเมศ ได้รับการศึกษาปริญญาตรีจากภาควิชาโลหการและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และได้รับการศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตที่ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเมื่อปี 2557

