

อิทธิพลของพรีออกซิเดชันภายใต้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อการ
ออกซิเดชันเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 430 ที่อุณหภูมิสูง

INFLUENCE OF PREOXIDATION IN CARBON DIOXIDE ON HIGH
TEMPERATURE OXIDATION OF AISI 430 STAINLESS STEEL



นรภัทร งามลิขิตเลิศ

ประจักษ์ แสนสุขเหลือ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2566

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิทธิพลของพรีออกซิเดชันภายใต้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อการ
ออกซิเดชันเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 430 ที่อุณหภูมิสูง



นรภัทร งามลิขิตเลิศ

ประจักษ์ แสนสุขเหลือ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2566

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INFLUENCE OF PREOXIDATION IN CARBON DIOXIDE ON HIGH
TEMPERATURE OXIDATION OF AISI 430 STAINLESS STEEL



A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING
SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการ **ACADEMIC YEAR 2023** ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	อิทธิพลของพรีออกซิเดชันภายใต้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อการออกซิเดชันเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 430 ที่อุณหภูมิสูง		
นักศึกษา	นายรภัทร งามลิขิตเลิศ	รหัสนักศึกษา	63010497
	นายประจักษ์ แสนสุขเหลือ	รหัสนักศึกษา	63010566
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต		
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี		
ปีการศึกษา	2566		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ภัทรานิษฐ์ วงศ์พร้อมรัตน์		

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(ผศ.ดร.ภัทรานิษฐ์ วงศ์พร้อมรัตน์)



กรรมการ

(ผศ.ดร.ณัฐนนท์ ไพบูลย์ศิลป์)



กรรมการ

(รศ.ดร.พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	อิทธิพลของพรีออกซิเดชันภายใต้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อการออกซิเดชันเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 430 ที่อุณหภูมิสูง		
นักศึกษา	นายนรภัทร งามลิขิตเลิศ	รหัสนักศึกษา	63010497
	นายประจักษ์ แสนสุขเหลือ	รหัสนักศึกษา	63010566
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต		
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี		
ปีการศึกษา	2566		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ภัทรานิษฐ์ วงศ์พร้อมรัตน์		

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของการพรีออกซิเดชันเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 430 ภายใต้บรรยากาศของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตามด้วยก๊าซอาร์กอนตามลำดับ ก่อนนำไปออกซิไดซ์ภายใต้บรรยากาศของก๊าซออกซิเจน และศึกษาโครงสร้างและองค์ประกอบที่เกิดขึ้นของเหล็กกล้าไร้สนิมหลังการพรีออกซิเดชันภายใต้บรรยากาศทั้งสองโดยใช้เครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์เพื่อวิเคราะห์สารประกอบที่เกิดขึ้นของโลหะออกไซด์หลังการพรีออกซิเดชัน

ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ของตัวอย่างด้วยเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์พบว่าสารประกอบที่ผ่านการพรีออกซิเดชันด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ พบสารประกอบที่เกิดขึ้นคือ สารประกอบโครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) ส่วนการพรีออกซิเดชันด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ตามด้วยอาร์กอน พบสารประกอบที่เกิดขึ้นคือสารประกอบโครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) และสารประกอบเหล็ก (II,III) ออกไซด์ (Fe_3O_4) หรือเรียกอีกชื่อว่าแมกนีไทต์ (Magnetite) และเมื่อนำชิ้นงานออกซิเดชันภายใต้ออกซิเจนความบริสุทธิ์ 99.95 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายใต้อุณหภูมิ 800 และ 900 องศาเซลเซียส สังเกตค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบพาราโบลิกพบว่าชิ้นงานที่ถูกพรีออกซิเดชันภายใต้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตามด้วยก๊าซอาร์กอน มีประสิทธิภาพในการลดอัตราการออกซิเดชันดีกว่าการพรีออกซิเดชันภายใต้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพียงอย่างเดียว

คำสำคัญ: เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 430, การกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูง, เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง, แผ่นกั้นเซลล์, การระเหยของโครเมียม, การพรีออกซิเดชันด้วยคาร์บอนไดออกไซด์, การพรีออกซิเดชันด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ตามด้วยก๊าซอาร์กอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Influence of preoxidation in carbon dioxide on high temperature oxidation of AISI 430 stainless steel		
Student	Noraphat Ngamlikitlert	Student ID	63010497
	Prajak Saensuklua	Student ID	63010566
Degree	Bachelor of Engineering		
Program	Chemical Engineering		
Year	2023		
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Patthranit Wongpromrat		

ABSTRACT

This research studies the influence of preoxidation of AISI 430 stainless steel under an atmosphere of carbon dioxide and carbon dioxide followed by argon gas, respectively. Before being oxidized under an atmosphere of oxygen gas and study the structure and composition of stainless steel after preoxidation under both atmospheres using X-ray diffraction to analyze the compounds formed of metal oxides after preoxidation.

Results from the analysis of the sample with X-ray diffraction were found that the compounds formed when preoxidation with carbon dioxide gas were chromium oxide compound (Cr_2O_3) and the compounds formed when preoxidation with carbon dioxide followed by argon gas were chromium oxide compound (Cr_2O_3) and iron (II,III) oxide (Fe_3O_4) compound also known as magnetite. The samples are oxidized under oxygen purity 99.95 percent by volume under temperatures of 800 and 900 degrees Celsius. When the parabolic oxidation constant was observed, it was found that the samples that were preoxidized under carbon dioxide gas followed by argon gas were more effective in reducing the oxidation rate than preoxidation under carbon dioxide gas.

Keywords: Stainless steel AISI 430, High temperature corrosion, Solid oxide fuel cells, Interconnect, Chromium volatile, Preoxidation in carbon dioxide, Preoxidation in carbon dioxide followed by argon gas

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลงด้วยดี เนื่องด้วยการได้รับความกรุณาอย่างสูงจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภัทรานิษฐ์ วงศ์พร้อมรัตน์ ที่เสียสละเวลาอันมีค่ายิ่ง มาชี้แนะแนวทางและให้คำแนะนำต่าง ๆ เพื่อให้งานวิจัยฉบับนี้สามารถดำเนินต่อไปได้ อีกทั้งคอยช่วยเหลือเรื่องต่าง ๆ เพื่อให้งานวิจัยนี้สมบูรณ์ ดังนั้น พวกเราจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และมหาวิทยาลัยจอมเกล้าพระนครเหนือที่สนับสนุนเรื่องเงินทุนและเครื่องมือเพื่อให้งานวิจัยในครั้งนี้สามารถดำเนินต่อไปได้อย่างไม่ติดขัด

ขอขอบพระคุณ ครอบครัว และมิตรสหายที่คอยสนับสนุนด้านต่าง ๆ ให้กำลังใจ เพื่อให้ผู้วิจัยสามารถทำงานวิจัยนี้ได้สำเร็จลุล่วงตามเป้าหมายที่ตั้งไว้

ท้ายที่สุด พวกเราหวังว่างานวิจัยฉบับนี้สามารถเป็นประโยชน์ต่อบุคคลหรือหน่วยงานที่ให้ความสนใจงานวิจัยฉบับนี้ และสามารถนำงานวิจัยของเราไปต่อยอดเกิดเป็นสิ่งใหม่ ที่เป็นประโยชน์ต่อสังคม

นรภัทร งามลิขิตเลิศ

ประจักษ์ แสนสุขเหลือ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการทำโครงการนี้	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง	4
2.1.1 ใช้เลนทาทันโมโครไมท์เป็นแผ่นกั้นเซลล์	4
2.1.2 ใช้โลหะผสมเป็นแผ่นกั้นเซลล์	4
2.2 เหล็กกล้าไร้สนิม.....	5
2.2.1 เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก (Austenitic stainless steels)	5
2.2.2 เหล็กกล้าไร้สนิมมาเทนซิติก (Martensitic stainless steels)	6
2.2.3 เหล็กกล้าไร้สนิมชนิดดูเพล็กซ์ (Duplex stainless steels)	6
2.2.4 เหล็กกล้าไร้สนิมอบชุบแข็งด้วยการตกผลึก (Precipitation hardened stainless steels)	7
2.2.5 เหล็กกล้าไร้สนิมชนิดเฟอร์ริติก (Ferritic stainless steels).....	7
2.3 ทฤษฎีบทเกี่ยวกับการออกซิเดชัน	7

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.1 กลไกการเกิดออกไซด์ที่ผิวของโลหะ	8
2.3.1 จลนพลศาสตร์การเกิดออกซิเดชัน	10
2.4 การระเหยของโลหะออกไซด์	12
2.5 ความบกพร่องในโลหะออกไซด์	13
2.6 เทคนิคการวิเคราะห์ตัวอย่าง	14
2.6.1 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer)	14
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการ	16
3.1 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดลอง	16
3.2 การทดลองการพรีออกซิเดชัน	16
3.3 การทดลองการออกซิเดชัน	17
3.4 การวิเคราะห์ตัวอย่างที่พรีออกซิเดชัน	18
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	19
4.1 การพรีออกซิเดชัน	19
4.1.1 ผลจากการวิเคราะห์หลังการพรีออกซิเดชันด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	19
4.2 การทดลองการออกซิเดชัน	20
4.2.1 ข้อมูลของน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นหลังจากการออกซิเดชัน	20
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	29
5.1 สรุปผลการศึกษา	29
5.1.1 ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบพาราโบลิก (k_p)	29
5.1.2 สารประกอบที่พบหลังการพรีออกซิเดชันโดยการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD	29
5.2 ข้อเสนอแนะ	30
บรรณานุกรม	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก.....	33
ภาคผนวก ก. ผลการทดลอง	34
ภาคผนวก ข. การคำนวณหาความดันย่อยของออกซิเจนในบรรยากาศ.....	39
ภาคผนวก ค. การเตรียมสำหรับการออกซิเดชัน	42



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 430 ในหน่วยเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (wt%)...16	
ตารางที่ 3.2 วิธีการเตรียมตัวอย่างและสภาวะเป็้งต้น.....17	
ตารางที่ 3.3 สภาวะของการออกซิเดชัน.....17	
ตารางที่ 4.1 สรุปค่าคงที่ทั้งหมดของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน.....28	
ตารางที่ ก.1 น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด AISI 430 ผ่านการพรีออกซิเดชัน ด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....35	
ตารางที่ ก.2 ข้อมูลน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อผ่านการพรีออกซิเดชันเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด AISI 430 ด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ตามด้วยก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....36	
ตารางที่ ก.3 ผลน้ำหนักการออกซิเดชันที่ อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสของชิ้นงานที่ถูกพรีออกซิเดชัน ด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....37	
ตารางที่ ก.4 ผลน้ำหนักหลังการออกซิเดชันที่ อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสของชิ้นงานที่ถูกพรี ออกซิเดชันภายใต้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตามด้วยก๊าซอาร์กอน.....37	
ตารางที่ ก.5 ผลน้ำหนักหลังการออกซิเดชันที่ อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสของชิ้นงานที่ถูกพรี ออกซิเดชันภายใต้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....38	
ตารางที่ ก.6 ผลน้ำหนักหลังการออกซิเดชันที่ อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสของชิ้นงานที่ถูกพรี ออกซิเดชันภายใต้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตามด้วยก๊าซอาร์กอน.....38	

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 กระบวนการออกซิเดชันของโลหะและก๊าซออกซิเจน [8].....	8
รูปที่ 2.2 Ellingham diagram [8].....	10
รูปที่ 2.3 มวลที่เปลี่ยนแปลงไปเทียบกับเวลาการออกซิเดชัน [12].....	11
รูปที่ 2.4 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ภายในโครงสร้างผลึกที่มุ่มตกระหอบต่างๆ [18].....	15
รูปที่ 4.1 เทียบผลวิเคราะห์ X-ray diffraction ของชิ้นงานที่ผ่านการพรีออกซิเดชันใน คาร์บอนไดออกไซด์กับชิ้นงานที่ผ่านการพรีออกซิเดชันในก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตามด้วย ก๊าซอาร์กอน	19
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นต่อพื้นที่ผิวของชิ้นงานกับเวลาในการออกซิเดชันที่ อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ของการพรีออกซิเดชันด้วย CO ₂	20
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นต่อพื้นที่ผิวของชิ้นงานยกกำลังสองกับเวลาในการ ออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ของการพรีออกซิเดชันด้วย CO ₂	21
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นต่อพื้นที่ผิวของชิ้นงานกับเวลาในการออกซิเดชันที่ อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ของการพรีออกซิเดชันด้วย CO ₂ ตามด้วย Ar	21
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นต่อพื้นที่ผิวของชิ้นงานยกกำลังสองกับเวลาในการ ออกซิเดชัน ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ของการพรีออกซิเดชันด้วย CO ₂ ตามด้วย Ar	22
รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นต่อพื้นที่ผิวของชิ้นงานกับเวลาในการ ออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส	23
รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นต่อพื้นที่ผิวของชิ้นงานยกกำลังสองกับ เวลาในการออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส	23
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นต่อพื้นที่ผิวของชิ้นงานกับเวลาในการออกซิเดชันที่ อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ของการพรีออกซิเดชันด้วย CO ₂	24
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นต่อพื้นที่ผิวของชิ้นงานยกกำลังสองกับเวลาในการ ออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ของการพรีออกซิเดชันด้วย CO ₂	25
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นต่อพื้นที่ผิวของชิ้นงานกับเวลาในการออกซิเดชันที่ อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ของการพรีออกซิเดชันด้วย CO ₂ ตามด้วย Ar	25
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นต่อพื้นที่ผิวของชิ้นงานยกกำลังสองกับเวลาในการ ออกซิเดชัน ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ของการพรีออกซิเดชันด้วย CO ₂ ตามด้วย Ar	26

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นต่อพื้นที่ผิวของชิ้นงานกับเวลาในการออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส	27
รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นต่อพื้นที่ผิวของชิ้นงานยกกำลังสองกับเวลาในการออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส	27
รูปที่ ค.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของเครื่องวัดอัตราการไหล (lpm) กับ อัตราการไหลของก๊าซที่อุณหภูมิห้อง	43
รูปที่ ค.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของเครื่องวัดอัตราการไหลกับความเร็วของก๊าซออกซิเจนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส	44
รูปที่ ค.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของเครื่องวัดอัตราการไหลกับความเร็วของก๊าซออกซิเจนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส	44

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมถูกให้ความสำคัญอย่างมาก ทำให้การศึกษาเทคโนโลยีสะอาด จึงเป็นประเด็นหลักที่ถูกพูดถึง และหนึ่งในนั้นคือ เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell) ซึ่งเป็นอุปกรณ์เคมีไฟฟ้าที่แปลงพลังงานทางเคมีเป็นพลังงานทางไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพและไม่มีการปล่อยมลพิษเหมือนอุปกรณ์ผลิตกระแสไฟฟ้าชนิดอื่น เซลล์เชื้อเพลิงมีหลากหลายชนิดแต่ที่กำลังได้รับความสนใจคือ เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง (Solid oxide fuel cell) โดยทั่วไปเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งจะดำเนินการที่อุณหภูมิสูงกว่า 1,000 องศาเซลเซียส ปัจจุบันอุณหภูมิในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งลดลงอยู่ที่ประมาณ 600 - 800 องศาเซลเซียส ส่งผลให้สามารถเปลี่ยนแผ่นกั้นเซลล์ของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง (SOFC interconnect) จากแผ่นกั้นเซลล์ชนิดเซรามิก (Ceramic interconnect) มาเป็นแผ่นกั้นเซลล์ชนิดโลหะ (Metallic interconnect) เนื่องจากแผ่นกั้นเซลล์ชนิดโลหะมีสมบัติทางไฟฟ้าและสภาพการนำความร้อนที่สูงกว่า มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่า เช่น ความเหนียว (Toughness) แผ่นกั้นเซลล์ชนิดโลหะมีหลากหลายชนิด เช่น แผ่นกั้นเซลล์ที่วัสดุทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มเฟอร์ริติก (Ferritic stainless steel) แผ่นกั้นเซลล์ที่วัสดุทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติก (Austenitic stainless steel) เป็นต้น จากการศึกษาพบว่าโลหะกลุ่มเฟอร์ริติกมีค่าการขยายตัวทางความร้อน (Thermal expansion coefficient) เท่ากับ $11.5 - 14 \times 10^{-6}$ เคลวิน⁻¹ มีค่าใกล้เคียงกับองค์ประกอบอื่นๆ ภายในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่มีค่าการขยายตัวทางความร้อนอยู่ที่ $10.5 - 12.5 \times 10^{-6}$ เคลวิน⁻¹ แต่ปัญหาของการใช้เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มเฟอร์ริติก คือในโลหะกลุ่มนี้มีองค์ประกอบของโครเมียมอยู่ประมาณ 16 - 23 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำให้สามารถเกิดชั้นโครเมียม (Chromia scale) บนพื้นผิวของแผ่นกั้นเซลล์ส่งผลทำให้ความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์ลดลง เมื่อมีการเกิดชั้นของโครเมียมสะสมกันมากอาจทำให้เกิดการแตกออก และชั้นโครเมียมออกไซด์สามารถทำปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อม เช่น ไอน้ำหรือออกซิเจน เป็นต้น เกิดเป็นสารประกอบที่มีสถานะเป็นไอ และสารประกอบเหล่านี้ สามารถทำปฏิกิริยากับขั้วแคโทด ส่งผลให้ขั้วแคโทดเกิดการเสื่อมสภาพได้ หรือเรียกว่า การเป็นพิษที่ขั้วแคโทด (Cathode poisoning) มีงานวิจัยมากมายที่ทำการเกี่ยวกับการเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อน (Corrosion resistance) ตัวอย่างวิธีการเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ได้รับความนิยมเช่น กระบวนการเคลือบฟิล์มบาง (Thin-film deposition techniques) มี 2 ประเภทคือ กระบวนการเคลือบโดยไอเชิงฟิสิกส์ (PVD) หรือกระบวนการเคลือบโดยไอเชิงเคมี (CVD) กระบวนการนี้จะสะสมฟิล์มบางของวัสดุที่ทนต่อการกัดกร่อนลงบนพื้นผิวของการเชื่อมต่อระหว่างกันของเหล็กกล้าไร้สนิม การเคลือบกั้นการแพร่กระจาย (Diffusion barrier coating) จะช่วยระงับการแพร่กระจายระหว่างโลหะหรือโลหะผสม และยังมีส่วนช่วยในการยับยั้งการเติบโตของออกไซด์ที่อุณหภูมิสูง การพรีออกซิเดชัน (Preoxidation) คือกระบวนการที่วัสดุซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นโลหะหรือโลหะผสม ถูกควบคุมการสัมผัสกับอุณหภูมิที่สูงขึ้นเมื่อมีออกซิเจนหรือสารออกซิไดซ์อื่นๆ ก่อนที่จะนำไปใช้งานตามวัตถุประสงค์ โดยทั่วไปจะใช้การพรีออกซิเดชันเพื่อส่งเสริมการก่อตัวของชั้นออกไซด์บนพื้นผิว โดยชั้นออกไซด์บนพื้นผิวนี้อาจทำหน้าที่เป็นเกราะป้องกัน ปกป้องวัสดุจากการเกิดออกซิเดชันหรือการกัดกร่อนเพิ่มเติมในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ทางด้านผู้วิจัยเลือกที่จะทำการศึกษาอิทธิพลของการพรีออกซิเดชัน โดยการนำเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 430 ซึ่งเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มเฟอร์ริติกมาพรีออกซิเดชันที่ 2 สภาวะบรรยากาศประกอบไปด้วย 1.พรีออกซิเดชันด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 2.พรีออกซิเดชันด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตามด้วยก๊าซอาร์กอน โดยใช้อุณหภูมิในการพรีออกซิเดชันที่แตกต่างกัน

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูง
2. ศึกษาว่าผลของการพรีออกซิเดชันด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ และการพรีออกซิเดชันด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ตามด้วยอาร์กอนต่อการออกซิเดชันของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 430

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. เปรียบเทียบการพรีออกซิเดชันของเหล็กกล้าไร้สนิม ที่บรรยากาศคาร์บอนไดออกไซด์และที่บรรยากาศคาร์บอนไดออกไซด์ตามด้วยบรรยากาศอาร์กอน
2. เปรียบเทียบการเกิดออกซิเดชันของเหล็กกล้าไร้สนิม ที่อุณหภูมิ 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 48 72 และ 96 ชั่วโมง และนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการทำโครงการนี้

1. สามารถนำไปประยุกต์สำหรับปรับปรุงแผ่นกั้นเซลล์ของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น และลดการระเหยของสารประกอบโครเมียมออกไซด์
2. ทราบอิทธิพลของการพรีออกซิเดชันด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และการพรีออกซิเดชันด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และตามด้วยก๊าซอาร์กอนของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 430 ก่อนนำไปออกซิเดชัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง คืออุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนพลังงานทางเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้า ดำเนินการในอุณหภูมิสูงอยู่ที่ประมาณ 600 ถึง 1000 องศาเซลเซียส รองรับเชื้อเพลิงได้หลากหลายประเภท เช่น ไฮโดรเจน, ก๊าซธรรมชาติ และมวลชีวภาพ เป็นต้น เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง ประกอบด้วย 4 ส่วนหลักในอุปกรณ์ คือ 1.แอโนด เป็นส่วนที่เกิดการออกซิเดชันของเชื้อเพลิงวัสดุในการผลิตเป็นองค์ประกอบของนิเกิลและวัสดุอิเล็กโทรไลต์ เช่น นิเกิล-เซอร์โคเนีย (Nickel – zirconia) 2. อิเล็กโทรไลต์เป็นของแข็ง และวัสดุที่ใช้ในการผลิตคือ อิตเทรีย-สแตบิลไลซ์เซอร์โคเนีย (YSZ) สาเหตุที่ใช้ YSZ เพราะยอมให้อไอออนของออกซิเจนเคลื่อนที่จากแคโทดไปแอโนดได้แต่ไม่อนุญาตให้อิเล็กตรอนผ่านได้ 3. แคโทดเป็นส่วนที่เกิดปฏิกิริยารีดักชัน วัสดุที่ใช้ในการผลิต เช่น แลนทานัม สโตรเทียม แมนกาไนต์ (LSM) 4. แผ่นกั้นเซลล์ ต้องมีความสามารถในการให้อิเล็กตรอนผ่านได้ดีแต่มีความสามารถในการนำไอออนที่ต่ำ [7]

2.1.1 ใช้แลนทานัมโครไมท์เป็นแผ่นกั้นเซลล์

แลนทานัมโครไมท์ (LaCrO_3) เป็นวัสดุแรกเริ่มสำหรับแผ่นกั้นเซลล์ของเซลล์เชื้อเพลิงชนิด ออกไซด์แข็ง ใช้งานได้ในอุณหภูมิประมาณ 1,000 องศาเซลเซียส ข้อดีของแผ่นกั้นเซลล์ชนิดนี้คือ มีค่าการนำไฟฟ้าดีกว่าเซรามิกชนิดอื่นเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะของการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง และมีค่าขยายตัวทางความร้อน 9.5×10^{-6} เคลวิน⁻¹ ซึ่งมีค่าการขยายตัวทางความร้อนใกล้เคียงกับอิตเทรีย-สแตบิลไลซ์เซอร์โคเนีย (YSZ) ที่มีค่าการขยายตัวทางความร้อนที่ 10.5×10^{-6} เคลวิน⁻¹ [18]

2.1.2 ใช้โลหะผสมเป็นแผ่นกั้นเซลล์

ด้วยการพัฒนาของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งในปัจจุบันทำให้อุณหภูมิการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งอยู่ที่ 600 ถึง 800 องศาเซลเซียส ทำให้สามารถใช้วัสดุแผ่นกั้นเซลล์เป็นโลหะผสมแทนแลนทานัมโครไมท์ ข้อดีของการใช้งานกลุ่มนี้คือ 1. มีค่าความแข็งแรงเชิงกลที่สูง บางครั้งจำเป็นต้องออกแบบแผ่นกั้นเซลล์ให้มีช่องพิเศษเพื่อแจกจ่ายก๊าซในแบบต่าง ๆ แผ่นกั้นเซลล์ชนิดนี้สามารถทำได้ 2. เนื่องจากวัสดุเป็นโลหะทำให้มีค่าการนำความร้อนที่สูง จึงลดการเกิดผลต่างความร้อน (Thermal gradient)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่างแผ่นกั้นเซลล์และองค์ประกอบอื่น ๆ 3. วัสดุชนิดโลหะมีค่าการนำไฟฟ้าที่สูงทำให้สามารถลดความต้านทานไฟฟ้าลงได้เมื่อเทียบกับเซรามิกที่ขาคอกของเซลล์ โลหะผสมที่นำมาใช้เป็นแผ่นกั้นเซลล์มีหลายประเภท เช่น โลหะผสมที่เนื้อพื้นเป็นโครเมียม โลหะผสมที่เนื้อพื้นเป็นเหล็กและโครเมียม และโลหะผสมที่เนื้อพื้นเป็นนิกเกิลและโครเมียม เป็นต้น ในครั้งนี้จะทำการศึกษา โลหะผสมที่เนื้อพื้นเป็นเหล็กและโครเมียม คือเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 430 [16]

2.2 เหล็กกล้าไร้สนิม

เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นโลหะผสม หรือเรียกว่า เหล็กสแตนเลส (Stainless steel) เกิดจากการผสมโลหะชนิดอื่นเข้าไปผสมกับเนื้อเหล็ก โลหะที่นิยมนำมาผสม คือ โครเมียม นิกเกิล คาร์บอน เป็นต้น การผสมโครเมียมเข้าไปอย่างน้อย 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเพื่อช่วยในการต้านทานการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูง เพราะเกิดการสร้างขึ้นของโครเมียมออกไซด์ที่พื้นผิวของเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมสำหรับปกป้องเหล็กกล้าไร้สนิมจากบรรยากาศภายนอก เหล็กกล้าไร้สนิมสามารถแบ่งตามลักษณะโครงสร้างได้เป็น 5 กลุ่ม ดังนี้ 1. เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก (Austenitic stainless steels) 2. เหล็กกล้าไร้สนิมมาเทนสิติก (Martensitic stainless steels) 3. เหล็กกล้าไร้สนิมชนิดดูเพล็กซ์ (Duplex stainless steels) 4. เหล็กกล้าไร้สนิมอบชุบแข็งด้วยการตกผลึก (Precipitation hardened stainless steels) 5. เหล็กกล้าไร้สนิมชนิดเฟอร์ริติก (Ferritic stainless steels) สามารถอธิบายได้ดังนี้ [5]

2.2.1 เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก (Austenitic stainless steels)

เหล็กกล้าไร้สนิมชนิดออสเทนนิติกมีโครงสร้างผลึกแบบ face-centered-cubic หรือ เอฟซีซี (FCC) คือมีอะตอมอยู่ตรงมุมของ 1 หน่วยเซลล์โครงสร้างผลึก และมีอะตอมอยู่ตรงกลางแต่ละด้านของ 1 หน่วยเซลล์โครงสร้าง ด้วยเนื้อพื้นเป็นเหล็กและมีโลหะผสมเป็นโครเมียม 16 ถึง 26 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และนิกเกิล 6 ถึง 22 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สมบัติเฉพาะตัวของเหล็กชนิดนี้คือ แม่เหล็กไม่สามารถดูดติดได้ การเตรียมเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดนี้สามารถทำได้หลากหลายวิธีขึ้นกับวัตถุประสงค์ที่จะนำไปใช้งาน เช่น การรีดเย็น (Cold rolling) หรือการรีดร้อน (Hot rolling) เป็นต้น เมื่ออุณหภูมิสูงจะมีค่าความแข็งแรงสูง

ค่าขยายตัวทางความร้อนอยู่ที่ 14.4×10^{-6} ถึง 17.3×10^{-6} เคลวิน⁻¹ ตัวอย่างเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดนี้ คือ เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 310 และ 316 เป็นต้น [17]

2.2.2 เหล็กกล้าไร้สนิมมาเทนสติก (Martensitic stainless steels)

เหล็กกล้าไร้สนิมชนิดมาเทนสติกมีโครงสร้างผลึกแบบ body-centered-cubic หรือ บีบีซี (BBC) คือ อะตอมอยู่แต่ละมุมของ 1 หน่วยเซลล์โครงสร้างผลึกและอะตอมอยู่ตรงกลางของ 1 หน่วยเซลล์โครงสร้างผลึก เหล็กกล้าไร้สนิมชนิดนี้มีลักษณะคล้ายกับเหล็กกล้าประสมต่ำ (Low alloy steel) มีการเพิ่มคาร์บอนลงไปเนื้อเหล็ก เมื่อผ่านการอบชุบด้วยความร้อน (Heat treatment) จะทำให้มีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเหมือนเหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon steel) องค์ประกอบของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดนี้คือ โครเมียม 12 ถึง 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โมลิบดีนัม 0.2 ถึง 1 เปอร์เซ็นต์ และ คาร์บอน 0.1 ถึง 1.2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ไม่มีนิกเกิลเป็นองค์ประกอบ มีค่าจุดครากของเหล็กกล้าไร้สนิม 275 เมกะปาสคาล ค่าการขยายตัวทางความร้อนมีค่าเท่ากับ 9.9 ถึง 11.7 เคลวิน⁻¹ ตัวอย่างเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดนี้ คือ 410 416 และ 420 เป็นต้น [14]

2.2.3 เหล็กกล้าไร้สนิมชนิดดูเพล็กซ์ (Duplex stainless steels)

เหล็กกล้าไร้สนิมชนิดดูเพล็กซ์ ประกอบไปด้วย 2 เฟสระหว่างเฟอร์ไรท์ (Ferrite) และออสเทนไนท์ (Austenite) ประมาณเท่ากัน องค์ประกอบของโลหะผสมของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดนี้คือ โครเมียม 18 ถึง 28 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นิกเกิล 5 ถึง 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ด้วยการผสมกันระหว่าง 2 เฟสทำให้เพิ่มค่าความแข็ง ค่าความเหนียวและค่าความต้านทานการกัดกร่อนและเนื่องจากมีปริมาณนิกเกิลต่ำทำให้มีราคาต่ำกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดออสเทนนิติก มีค่าจุดครากอยู่ที่ 400 ถึง 550 เมกะปาสคาล ตัวอย่างเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดนี้คือ เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 2101 LDX DX2202 และ 2205 เป็นต้น และค่าขยายตัวทางความร้อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดนี้อยู่ที่ 12 ถึง 14 เคลวิน⁻¹ [8]

2.2.4 เหล็กกล้าไร้สนิมอบชุบแข็งด้วยการตกผลึก (Precipitation hardened stainless steels)

เหล็กกล้าไร้สนิมชนิดนี้มีโครงสร้างผลึกแบบมาเทนสติกคือ body-centered-cubic หรือ บีบีซี (BBC) แม่เหล็กสามารถดูดติดได้ มีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนใกล้เคียงกับชนิดออสเทนนิติกแต่ด้วยกระบวนการชุบแข็งทำให้เกิดการตกผลึกของสารประกอบขนาดเล็ก ค่าความแข็งแรงของเหล็กจึงสูงกว่าชนิดมาเทนไซต์สามารถแบ่งได้ 3 กลุ่มเล็ก คือ 1. มาเทนสติก (17 – 4 PH) 2. กึ่งออสเทนนิติก (17 – 7 PH) และ 3. กลุ่มออสเทนนิติก (A286) มีค่าขยายตัวทางความร้อนอยู่ที่ประมาณ 10.8 ถึง 16 เคลวิน⁻¹ [9]

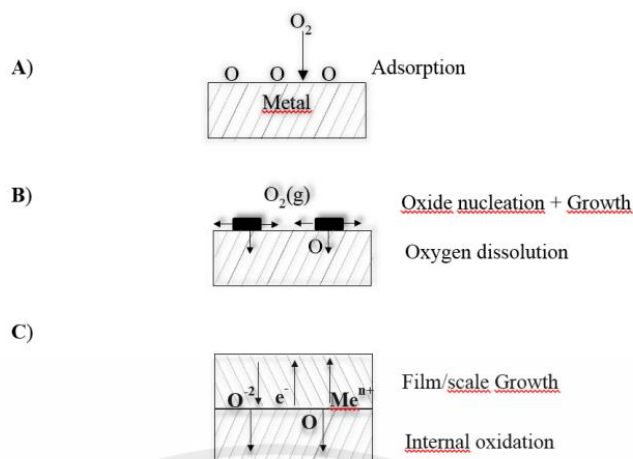
2.2.5 เหล็กกล้าไร้สนิมชนิดเฟอร์ริติก (Ferritic stainless steels)

เหล็กกล้าไร้สนิมชนิดเฟอร์ริติกมีโครงสร้างผลึกแบบ body-centered-cubic หรือ บีบีซี (BBC) มีเนื้อพื้นเป็นเหล็กและโลหะผสมหลัก คือ โครเมียม ซึ่งประกอบไปด้วย 12 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และมีปริมาณคาร์บอนผสมน้อย ทำให้ไม่สามารถนำไปอบชุบด้วยความร้อนและอบอ่อน (Annealed) ค่าจุดครากของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดนี้จึงมีค่าอยู่ที่ 275 ถึง 350 เมกะปาสคาล เหล็กกล้าชนิดนี้มีค่าขยายตัวทางความร้อนอยู่ที่ 11.5×10^{-6} ถึง 14×10^{-6} เคลวิน⁻¹ ตัวอย่างเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดนี้ คือ AISI 430 441 และ 447 เป็นต้น และเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดนี้แม่เหล็กสามารถดูดติดได้ [2]

2.3 ทฤษฎีบทเกี่ยวกับการออกซิเดชัน

เมื่ออยู่ภายใต้อุณหภูมิสูงโลหะสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนในสิ่งแวดล้อม โดยกระบวนการเกิดออกซิเดชันจะเป็นไปตามรูปที่ 2.1 คือกระบวนการแรกเกิดการดูดซับออกซิเจนที่ผิวของโลหะ กระบวนการต่อมาเมื่อออกซิเจนถูกดูดซับที่ผิวของโลหะจะเกิดการแลกเปลี่ยนระหว่างประจุของโลหะและก๊าซออกซิเจนเกิดเป็นพันธะไอออนิก และกลายเป็นชั้นออกไซด์ที่ผิวของโลหะ เรียกว่า สเกล (Scale) และเมื่อชั้นออกไซด์เกิดต่อเนื่องกันจะกลายเป็นชั้นฟิล์มโลหะออกไซด์ (Continuous oxide film) ปกคลุมผิวของโลหะ โดยกระบวนการเหล่านี้ขึ้นกับลักษณะพื้นผิวของโลหะ ลักษณะของคริสตัลของโลหะ ส่วนผสมของโลหะและก๊าซที่นำมาออกซิเดชัน ชั้นฟิล์มโลหะออกไซด์ที่ปกคลุมผิวโลหะจะแยกโลหะออกจากก๊าซและการเกิดโลหะออกไซด์ในกระบวนการที่สามเนื่องจากเกิดการแพร่ของไอออนโลหะและไอออนของออกซิเจนระหว่างโลหะและชั้นฟิล์มโลหะออกไซด์ ตัวแปรที่สำคัญสำหรับการเกิดออกซิเดชันคือ ค่าความเสถียรทางอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamic stability) สภาพแวดล้อม เช่น ความชื้น หรือองค์ประกอบของโลหะ เป็นต้น [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 กระบวนการออกซิเดชันของโลหะและก๊าซออกซิเจน [4]

2.3.1 กลไกการเกิดออกไซด์ที่ผิวของโลหะ

กระบวนการจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อค่าความดันย่อยของออกซิเจนในสิ่งแวดล้อมมีค่ามากกว่าค่าความดันย่อยของออกซิเจนที่สภาวะสมดุล การเกิดออกซิเดชันของโลหะเป็นไปตามสมการที่ 2.1



โดยที่ M คืออะตอมของโลหะ O_2 คือ ก๊าซออกซิเจนจะเกิดอยู่บนผิวของโลหะ x คือจำนวนอะตอมของโลหะ y คือจำนวนอะตอมของก๊าซออกซิเจนและ M_xO_y คือ ออกไซด์ของโลหะทำหน้าที่ป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างโลหะกับสิ่งแวดล้อม

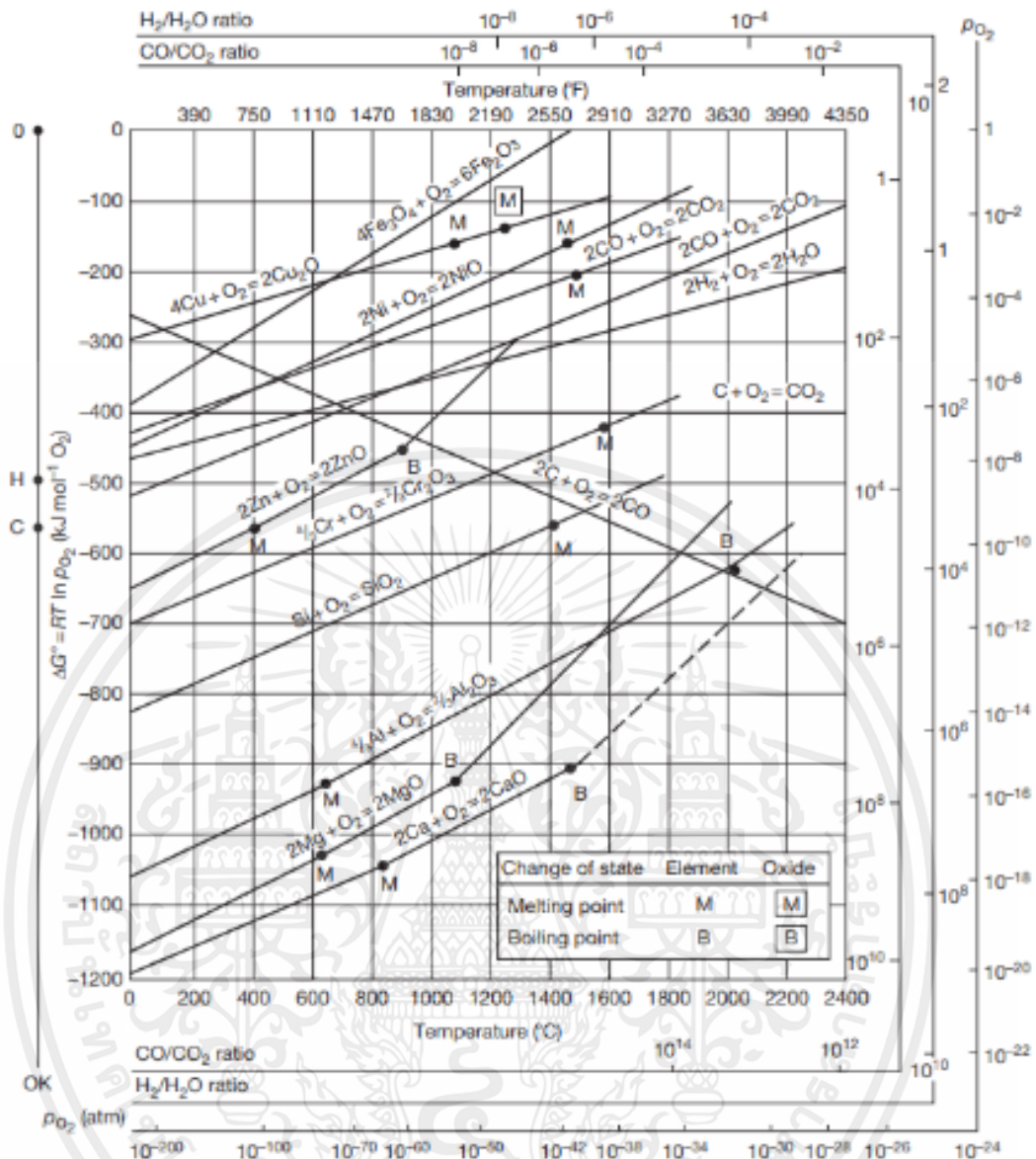
การเกิดผลึกจะมีความเกี่ยวข้องกับค่าความดันย่อยของออกไซด์ และให้นิยามพลังงานก่อก่อตัวอิสระมาตรฐานในสภาวะสมดุล (The standard free energy of formation, G°) เป็นพลังงานสำหรับก่อก่อตัวของออกไซด์ ความสัมพันธ์เป็นไปตามสมการที่ 2.2 [4]

$$\Delta G^\circ = -RT \ln \left(\frac{a_{M_xO_y}(s)}{a_M^x(s) a_{O_2}^2(g)} \right) \quad (2.2)$$

โดยที่ $a_{M_xO_y}$ คือค่าแอกติวิตีของโลหะออกไซด์ a_M คือค่าแอกติวิตีของโลหะ a_{O_2} คือค่าแอกติวิตีของก๊าซออกซิเจน T คือ อุณหภูมิที่เกิดออกซิเดชัน และ R คือค่าคงที่ของก๊าซ ค่าแอกติวิตีขององค์ประกอบในโลหะผสมจะถูกนิยามตามสมการที่ 2.3

$$a_M = \gamma_M x_M \quad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



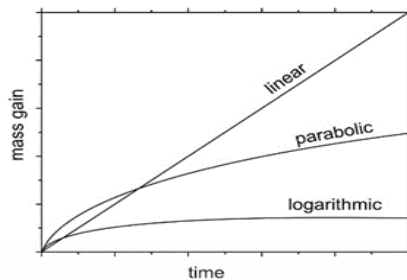
รูปที่ 2.2 Ellingham diagram [4]

2.3.1 จลนพลศาสตร์การเกิดออกซิเดชัน

จลนพลศาสตร์ของการเกิดออกซิเดชัน พิจารณาจากการเกิดขึ้นของชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้นเทียบกับเวลา ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการเกิดจลนพลศาสตร์ของการเกิดออกซิเดชันคือ อุณหภูมิของการเกิดออกซิเดชัน ความดันย่อยของออกซิเจน การเตรียมผิวโลหะ และเวลาในการออกซิเดชัน ในการศึกษาจลนศาสตร์ออกซิเดชันจะดูจากมวลที่เปลี่ยนแปลงของโลหะเทียบกับเวลา เพราะมวลของโลหะจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากเกิดการดูดซับออกซิเจนจากบรรยากาศที่พื้นผิวโลหะ และเกิดเป็นชั้นออกไซด์โลหะ แต่วิธีดังกล่าวไม่สามารถแสดงจลนพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นเมื่อมีการแตกหักของชั้นออกไซด์หรือชั้นออกไซด์เกิดการระเหยได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จลนพลศาสตร์สามารถแสดงได้ 3 รูปแบบคือ แบบเชิงเส้น (Linear) แบบพาราโบลา (Parabolic) และแบบลอการิทึม (Logarithmic) [4]



รูปที่ 2.3 มวลที่เปลี่ยนแปลงไปเทียบกับเวลาการออกซิเดชัน [4]

2.3.1.1 อัตราการเกิดออกซิเดชันเชิงเส้น (Linear rate law)

สำหรับอัตราการเกิดออกซิเดชันเชิงเส้น จะเกิดขึ้นกับอัตราการเกิดออกซิเดชันของโลหะที่มีค่าคงที่ ซึ่งแสดงว่าชั้นออกไซด์ไม่สามารถป้องกันเนื้อโลหะจากการเกิดออกซิเดชันได้ ปริมาณของโลหะและก๊าซที่ใช้ไม่ส่งผลต่ออัตราการเกิดออกซิเดชัน มวลที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นสัดส่วนโดยตรงกับเวลาสามารถอธิบายได้ตามสมการที่ 2.6

$$\Delta m = kt + C \quad (2.6)$$

โดยที่ Δm คือมวลที่เปลี่ยนแปลงไปหลังการออกซิเดชัน k คือค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบเชิงเส้น t คือเวลาในการเกิดออกซิเดชัน และค่า C คือค่าคงที่จากการอินทิเกรต

2.3.1.2 อัตราการเกิดออกซิเดชันแบบพาราโบลา (Parabolic rate law)

การเกิดจลนพลศาสตร์แบบพาราโบลาเป็นลักษณะที่เกิดขึ้นกับเหล็กโดยทั่วไปที่อุณหภูมิสูงซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีที่ถูกพัฒนาโดย Wagner สมมติฐานที่สำคัญสำหรับทฤษฎีดังกล่าว คือ 1. ชั้นออกไซด์เกิดขึ้นอย่างหนาแน่นและไม่หลุดร่อนออกจากผิวโลหะ 2. อัตราการเกิดปฏิกิริยาหาจากขั้นตอนการแพร่ของไอออนผ่านชั้นออกไซด์ 3. การเกิดออกซิเดชันของโลหะและเกิดอยู่ภายใต้สภาวะสมดุลอุณหพลศาสตร์ และ 4. สามารถละลายการละลายของออกซิเจนในเนื้อเหล็กได้ หากอัตราการเกิดออกซิเดชันแบบพาราโบลาลดลงจะแสดงถึงความหนาของชั้นออกไซด์ลดลง สามารถอธิบายได้ตามสมการที่ 2.7

$$\Delta m^2 = k_p t + C \quad (2.7)$$

โดยที่ Δm คือมวลที่เปลี่ยนแปลงไปหลังการออกซิเดชัน k_p คือค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบพาราโบลิก t คือเวลาในการเกิดออกซิเดชัน และค่า C คือค่าคงที่จากการอินทิเกรต

2.3.1.3 อัตราการเกิดออกซิเดชันแบบลอการิทึม (Logarithmic rate law)

เกิดขึ้นกับโลหะจำนวนมาก ในช่วงอุณหภูมิ 300 ถึง 400 องศาเซลเซียส เมื่อชั้นของออกไซด์โลหะมีความหนาน้อยมากมีหลายวิธีสำหรับหาอัตราการเกิดออกซิเดชัน เช่น ทฤษฎีการดูดซับแบบเคมี (Chemisorption), การถ่ายโอนอิเล็กตรอนและไอออนในสนามแม่เหล็ก แต่ไม่มีการสรุปทฤษฎีที่แน่ชัดสำหรับอธิบายการเกิดอัตราการเกิดออกซิเดชันแบบดังกล่าว การเกิดออกซิเดชันจะมีลักษณะที่ปฏิกิริยาในช่วงแรกเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว จากนั้นเริ่มคงที่จนแทบไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง สามารถอธิบายได้ตามสมการที่ 2.8

$$\Delta m^2 = k_{\log} \log(t+t_0) + C \quad (2.8)$$

โดยที่ Δm คือมวลที่เปลี่ยนแปลงไปหลังการออกซิเดชัน k_{\log} คือค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาแบบลอการิทึม C คือค่าคงที่ของการอินทิเกรต และ t คือเวลาในการเกิดออกซิเดชัน

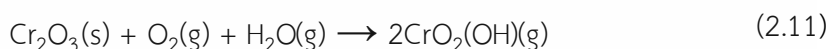
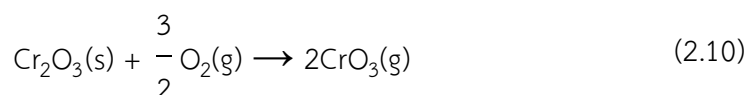
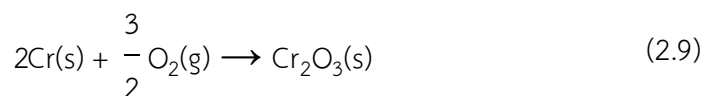
2.3.1.4 การเกิดออกซิเดชันแบบแยกออก (Breakaway oxidation)

ลักษณะที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันช่วงแรกเป็นแบบพาราโบลิก และเมื่อระยะเวลาผ่านไปลักษณะการเกิดออกซิเดชันเปลี่ยนเป็นแบบเชิงเส้นเกิดขึ้นเนื่องจากความผิดปกติบางอย่าง เช่น ชั้นออกไซด์อาจเกิดการแตกหรือชั้นที่เกิดขึ้นของออกไซด์โลหะไม่ครอบคลุมทำให้มีช่องว่างในการเกิดออกซิเดชันที่เนื้อโลหะ

2.4 การระเหยของโลหะออกไซด์

โลหะออกไซด์บางชนิดสามารถทำปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อม เช่น ความชื้น และก๊าซออกซิเจน แล้วเกิดการระเหยได้ เช่น Cr_2O_3 , WO_3 และ MoO_3 เป็นต้น แต่การระเหยจะเกิดขึ้นเมื่อค่าพลังงานกระตุ้นสูงมากๆ ดังนั้นกระบวนการดังกล่าวจะเกิดขึ้นเมื่ออยู่ภายใต้อุณหภูมิสูง และสำหรับโลหะผสมที่มีองค์ประกอบหลักเป็นโครเมียมเมื่อผ่านการออกซิเดชันจะทำให้เกิดชั้น Cr_2O_3 ชั้นดังกล่าวสามารถ

ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในสิ่งแวดล้อม [15] เกิดเป็นสารประกอบ CrO_3 และทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็น $\text{CrO}_2(\text{OH})$ สมการปฏิกิริยาออกซิเดชันเป็นดังสมการที่ 2.9 ถึงสมการที่ 2.12



2.5 ความบกพร่องในโลหะออกไซด์

ในความเป็นจริงอะตอมในผลึกโลหะออกไซด์จะมีความบกพร่องเกิดขึ้นเสมอ เช่น การเกิดจุดว่าง (Vacancy) คือ การที่อะตอมบางตัวในโครงสร้างหายไป และการแทรกตัวด้วยตัวเอง (Self-interstitial) คือ การที่มีการแทรกตัวภายในโครงสร้าง ความบกพร่องเหล่านี้เรียกว่า ความบกพร่องแบบจุด (Point defect) เป็นสิ่งที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติเชิงไฟฟ้าและเชิงแสงของผลึกโลหะออกไซด์อย่างมาก

กลไกการเกิดออกซิเดชันอาจเริ่มต้นจากการดูดซับโมเลกุลก๊าซจากบรรยากาศบนพื้นผิวของโลหะแสดงตามสมการที่ 2.13 โดยที่ O-S แทนการดูดซับออกซิเจนที่ผิวของโลหะ กระบวนการแพร่เกิดจากการเคลื่อนที่ของช่องว่างของออกซิเจน (Oxygen vacancy) และตำแหน่งการแทรกที่ของออกซิเจน (Oxygen interstitial)



ช่องว่างของออกซิเจน คือการเกิดจุดว่างเนื่องจากอะตอมของออกซิเจนหายไป นิยามเป็น V_{O} โดยทั่วไปอิเล็กตรอนอยู่กับที่ทางฝั่งช่องว่างจึงออกซิเจนจะมีประจุเป็น -2 ซึ่งเป็นประจุของออกซิเจน ทำให้ผลึกสมบูรณ์มีประจุของออกซิเจนเท่ากับ 0 แต่เมื่อเกิดออกซิเจนวาแคนซีเกิดขึ้นทำให้อิเล็กตรอนสูญเสียไป 1 ตัวทำให้ประจุสุทธิเป็น $+1$ จะทำการแสดงในสัญลักษณ์ V_{O}^{\bullet} ส่วนออกซิเจนตีเฟคจะแทนด้วยสัญลักษณ์ $V_{\text{O}}^{z\bullet}$ ($0 \leq z \leq 2$) z คือ ปริมาณไอออนของออกซิเจน $\langle M \rangle$ คือ เนื้อของ

โลหะ ออกซิเจนที่เกิดการแทรกที่แทนด้วย $O_i^{z'}$ การเกิดช่องว่างของโลหะ แทนด้วย V_M^z ($0 \leq z \leq$ สูงกว่าสถานะออกซิเดชันของโลหะ) และการแทรกตัวของอะตอมโลหะแทนด้วย $M_i^{z'}$ [13]

ตารางที่ 2.1 การเกิดออกไซด์ [13]

กรณี	สัญลักษณ์	ลักษณะกลไกการเกิดออกไซด์
1	V_O^z	
2	$O_i^{z'}$	
3	V_M^z	
4	$M_i^{z'}$	

2.6 เทคนิคการวิเคราะห์ตัวอย่าง

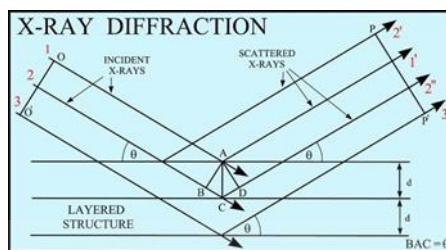
2.6.1 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer)

เป็นเครื่องมือสำหรับวิเคราะห์โดยไม่ทำลายตัวอย่างหรือชิ้นงาน ใช้ในการระบุสารประกอบของของแข็งที่เป็นผลึก เช่น สารประกอบของออกไซด์ เมื่อรังสีเอกซ์ผ่านโครงสร้างผลึกของชิ้นงานจะเกิดรูปแบบการเลี้ยวเบนขึ้น และจะถูกบันทึกไว้เพื่อหาองค์ประกอบนั้น รังสีเอกซ์ปฐมภูมิจะเคลื่อนเข้าไปผ่านอะตอมแล้วทำปฏิกิริยากับอิเล็กตรอนในอะตอมทำให้อิทธิพลของแสงบางตัวของรังสีเอกซ์เกิดการเลี้ยวเบนในทิศทางตกกระทบ [12] สามารถดูได้จากรูปที่ 2.4 และปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้ตามสมการ “Bragg’s Law” ตามสมการที่ 2.14

$$n\lambda = 2d \sin \theta \tag{2.14}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ n คือจำนวนเต็มใดๆ (1, 2, 3,...) λ คือความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ θ คือ มุมตกกระทบของรังสีเอกซ์บนพื้นผิวชั้นงานและ d คือ พื้นที่ว่างของผลึก



รูปที่ 2.4 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ภายในโครงสร้างผลึกที่มุมตกกระทบต่างๆ [12]

เนื่องด้วยลักษณะและพื้นที่ว่างของผลึกในแต่ละพันธะของสารประกอบจะมีลักษณะเฉพาะตัวทำให้เราสามารถนำข้อมูลที่วิเคราะห์ได้เทียบกับฐานข้อมูลเพื่อทราบว่า ภายในโครงสร้างมีพันธะหรือสารประกอบใดเกิดขึ้นบ้าง สังเกตได้จากความเข้มข้นของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในแต่ละมุม ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์จะแสดงด้วยความสูงของสัญญาณที่วัดได้ในแต่ละมุมของ 2θ เมื่อนำผลไปเทียบกับข้อมูลพีคที่มีก็จะทำให้ทราบถึงองค์ประกอบที่เกิดขึ้น

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการ

3.1 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดลอง

แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 430 มีองค์ประกอบทางเคมีแสดงในตารางที่ 1 ถูกตัดให้มีขนาดประมาณ 15 x 20 x 1 ลูกบาศก์มิลลิเมตร ด้วยเครื่องตัดไฮดรอลิก และถูกเจาะรูให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร ตัวอย่างถูกขัดด้วยกระดาษทราย (SiC) ด้วยเบอร์ 240 600 800 และ 1200 แล้วใช้แอลกอฮอล์ทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิค ชั้่นละ 10 นาที ก่อนนำไปทำการพรีออกซิเดชัน

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 430 ในหน่วยเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (wt%)

wt.%	Cr	Mn	C	Si	Fe	อ้างอิง
AISI 430	16 - 18	1	<0.08	<1	เนื้อพื้นหลัก	[12]

3.2 การทดลองการพรีออกซิเดชัน

น้ำหนักและขนาดของตัวอย่างก่อนนำไปพรีออกซิเดชันด้วยเตาเผาอุณหภูมิสูงแบบท่อ (High temperature tube furnace) ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศตามตารางที่ 2 ประกอบด้วย 2 บรรยากาศ คือ สภาวะที่ 1 การพรีออกซิเดชันภายใต้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีความบริสุทธิ์ 99.95 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ด้วยอัตราการไหล 1 เซนติเมตรต่อวินาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ไม่รวมเวลาในการให้ความร้อนถึง 850 องศาเซลเซียสและเวลาในการปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวลง สภาวะที่ 2 การพรีออกซิเดชันภายใต้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ความบริสุทธิ์ 99.95 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ด้วยอัตราการไหล 1 เซนติเมตรต่อวินาทีเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ตามด้วยก๊าซอาร์กอนความบริสุทธิ์ 99.90 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ด้วยอัตราการไหล 1 เซนติเมตรต่อวินาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เวลาในการพรีออกซิเดชันไม่รวมเวลาในการเพิ่มอุณหภูมิให้ถึง 850 องศาเซลเซียสและเวลาปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวลง เมื่อพรีออกซิเดชันจากทั้ง 2 บรรยากาศ นำมาชั่งน้ำหนักและวัดขนาดชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไป

ตารางที่ 3.2 วิธีการเตรียมตัวอย่างและสภาวะเบื้องต้น

บรรยากาศของการพร้ออกซิเดชัน	อุณหภูมิของการพร้ออกซิเดชัน (องศาเซลเซียส)	เวลาในการพร้ออกซิเดชัน (ชั่วโมง)	ความดันย่อยของออกซิเจน (บาร์)
CO ₂	850	2 ชั่วโมง	1.07×10 ⁻⁶
CO ₂ /Ar	850	2 ชั่วโมงสำหรับก๊าซ CO ₂ และ 2 ชั่วโมงสำหรับก๊าซ Ar	1.00×10 ⁻⁶

3.3 การทดลองการออกซิเดชัน

ออกซิเดชันชิ้นงานที่ถูกพร้ออกซิไดซ์ที่อุณหภูมิ 800 และ 900 องศาเซลเซียส ด้วยก๊าซออกซิเจนความบริสุทธิ์ 99.95 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายในเตาเผาอุณหภูมิสูงที่มีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิเป็น 15 องศาเซลเซียสต่อนาที เป็นเวลา 24 48 72 และ 96 ชั่วโมง เพื่อสังเกตอิทธิพลของการพร้ออกซิเดชันทั้ง 2 สภาวะบรรยากาศ โดยการออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสด้วยความเร็วก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 3.3610 เซนติเมตรต่อวินาที และอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสด้วยความเร็วก๊าซออกซิเจน 3.6742 เซนติเมตรต่อวินาที หลังการออกซิเดชันนำชิ้นงานมาทำการชั่งน้ำหนักเพื่อหาน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง

ตารางที่ 3.3 สภาวะของการออกซิเดชัน

บรรยากาศของการพร้ออกซิเดชัน	อุณหภูมิที่ใช้ในการออกซิเดชัน (องศาเซลเซียส)	เวลาในการออกซิเดชัน (ชั่วโมง)	ความเร็วของก๊าซออกซิเจน (เซนติเมตรต่อวินาที)
CO ₂	800	24 48 72 96	3.36
CO ₂ /Ar	800	24 48 72 96	3.67
CO ₂	900	24 48 72 96	3.36
CO ₂ /Ar	900	24 48 72 96	3.67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การวิเคราะห์ตัวอย่างที่พรีออกซิเดชัน

ชิ้นงานที่พรีออกซิเดชันจะถูกนำไปวิเคราะห์โดยใช้เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) เพื่อวิเคราะห์สารประกอบที่เกิดขึ้นหลังการพรีออกซิเดชันภายใต้บรรยากาศทั้งสอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

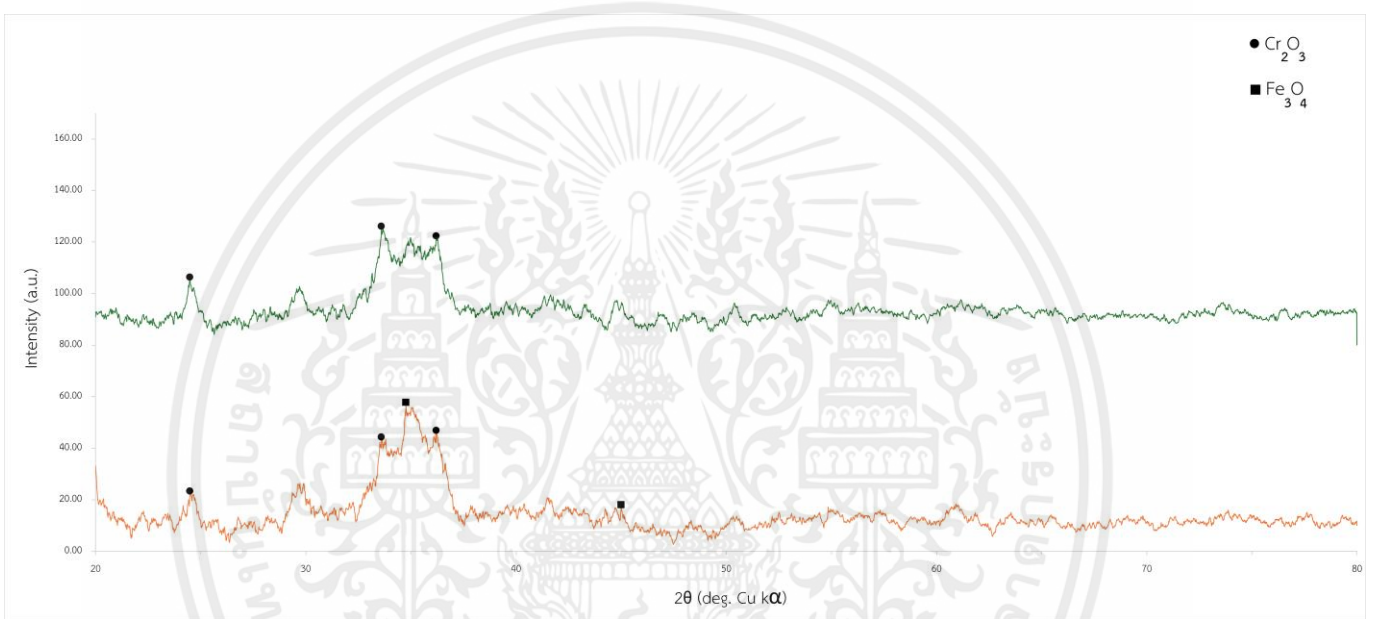
บทที่ 4

ผลการดำเนินงาน

4.1 การพรีออกซิเดชัน

4.1.1 ผลจากการวิเคราะห์หลังการพรีออกซิเดชันด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

เอกซ์



รูปที่ 4.1 เทียบผลวิเคราะห์ X-ray diffraction ของชิ้นงานที่ผ่านการพรีออกซิเดชันในคาร์บอนไดออกไซด์กับชิ้นงานที่ผ่านการพรีออกซิเดชันในก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตามด้วยก๊าซอาร์กอน

รูปที่ 4.1 แสดงผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 430 หลังผ่านการพรีออกซิเดชันภายใต้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (ผลด้านบน) เทียบกับการพรีออกซิเดชันด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และตามด้วยก๊าซอาร์กอน บรรยากาศละ 2 ชั่วโมง (ผลด้านล่าง) ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียสทั้ง 2 สภาวะ เมื่อสังเกตผลจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD ซึ่งเมื่อเทียบกับพีคอ้างอิง เหล็กกล้าไร้สนิมที่ผ่านการพรีออกซิเดชันภายใต้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์พบสารประกอบโครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) ส่วนเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผ่านการพรีออกซิเดชันภายใต้

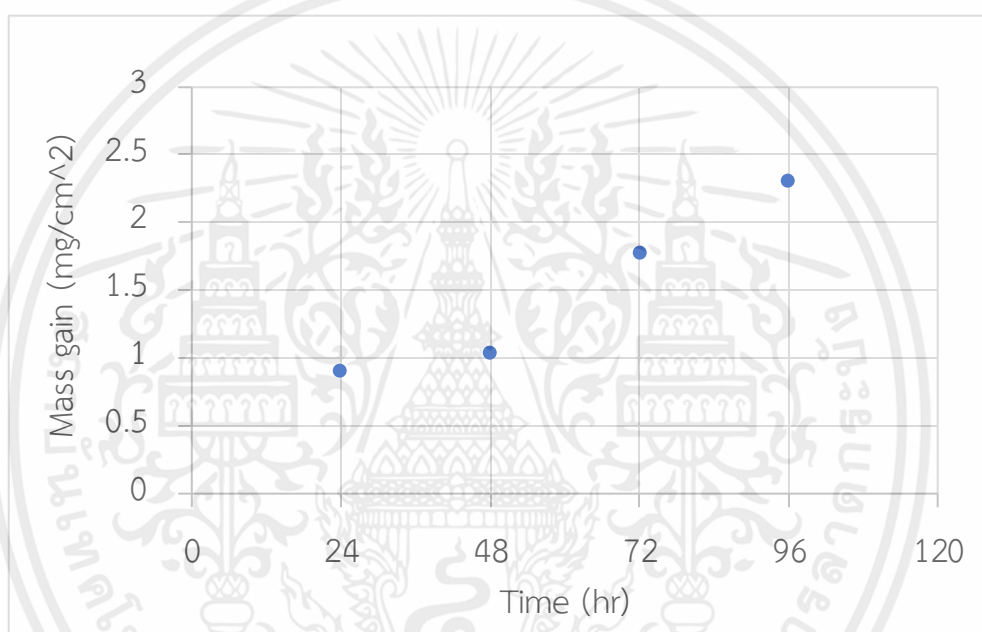
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตามด้วยก๊าซอาร์กอนพบสารประกอบโครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) และสารประกอบเหล็ก (II,III) ออกไซด์ (Fe_3O_4) หรือแมกนีไทต์

4.2 การทดลองการออกซิเดชัน

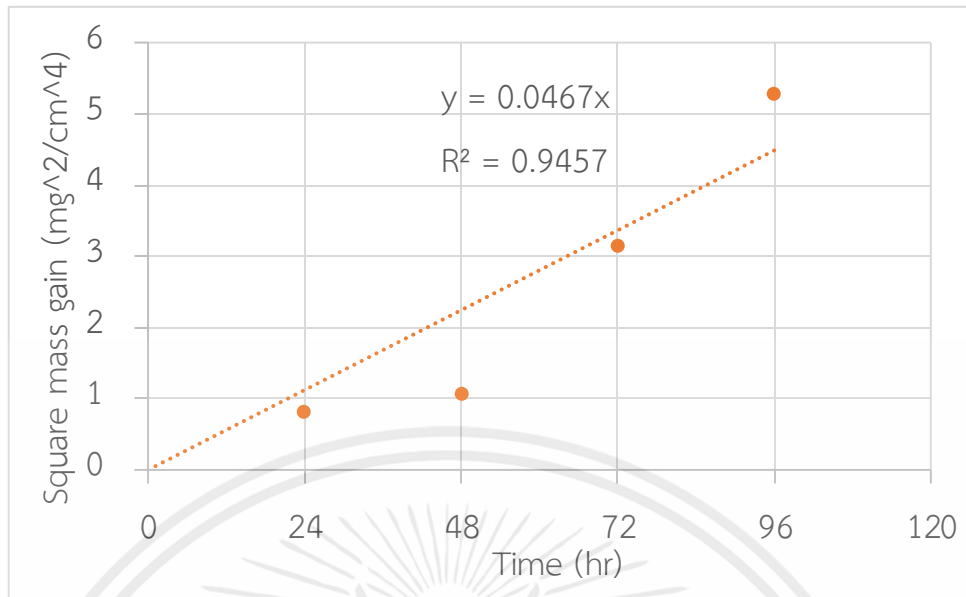
4.2.1 ข้อมูลของน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นหลังจากการออกซิเดชัน

4.2.1.1 ผลน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นหลังการออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสของชิ้นงานที่ถูกพรีออกซิเดชันภายใต้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นต่อพื้นที่ผิวของชิ้นงานกับเวลาในการออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ของการพรีออกซิเดชันด้วย CO_2

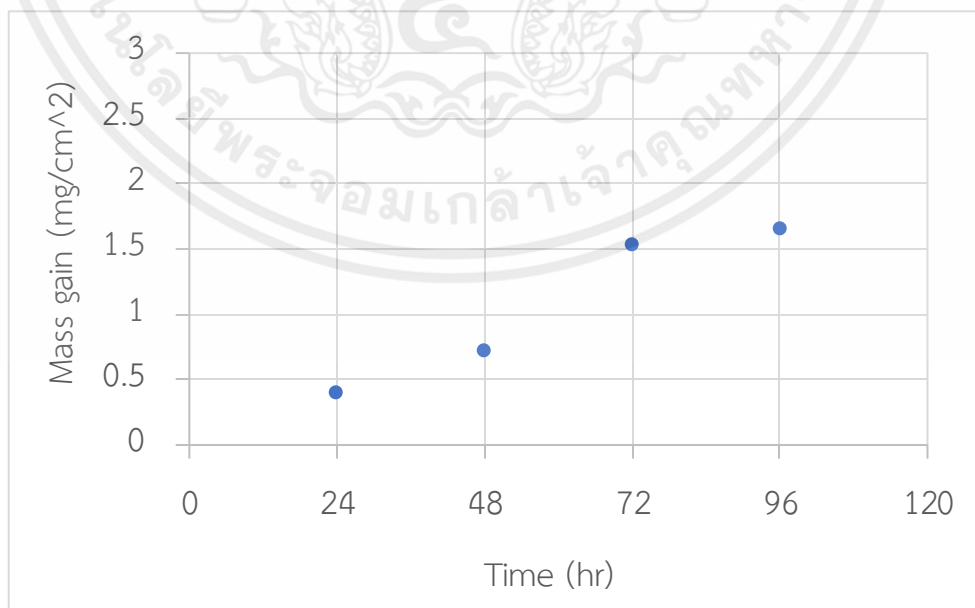
กราฟความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.2 แสดงค่ามวลที่เพิ่มขึ้นเทียบกับพื้นที่ผิวของชิ้นงานหลังการออกซิเดชันภายใต้ก๊าซออกซิเจน 99.95% ภายใต้อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสเทียบกับระยะเวลา 24 48 72 และ 96 ชั่วโมงของชิ้นงานที่ถูกพรีออกซิเดชันภายใต้คาร์บอนไดออกไซด์ โดยอ้างอิงจากทฤษฎีของ Wagner เมื่อนำค่าดังกล่าวไปกำลังสองจะสามารถนำไปทำนายการเกิดออกซิเดชันตามอัตราการเกิดปฏิกิริยาแบบพาราโบลิกได้สามารถนำมาพล็อตกราฟได้ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นต่อพื้นที่ผิวของชิ้นงานยกกำลังสองกับเวลาในการออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ของการพรีออกซิเดชันด้วย CO₂

เมื่อนำค่ามวลที่เพิ่มขึ้นเทียบกับพื้นที่ผิวของชิ้นงานยกกำลังที่ 2 แล้วเทียบกับเวลา ดังรูปที่ 4.3 ทำให้เราทราบค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงพาราโบลามีค่าเท่ากับ $1.2972 \times 10^{-5} \text{ mg}^2\text{cm}^{-4}\text{s}^{-1}$

4.2.1.2 ผลการการออกซิเดชันของการพรีออกซิเดชันด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ตามด้วยก๊าซอาร์กอน ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

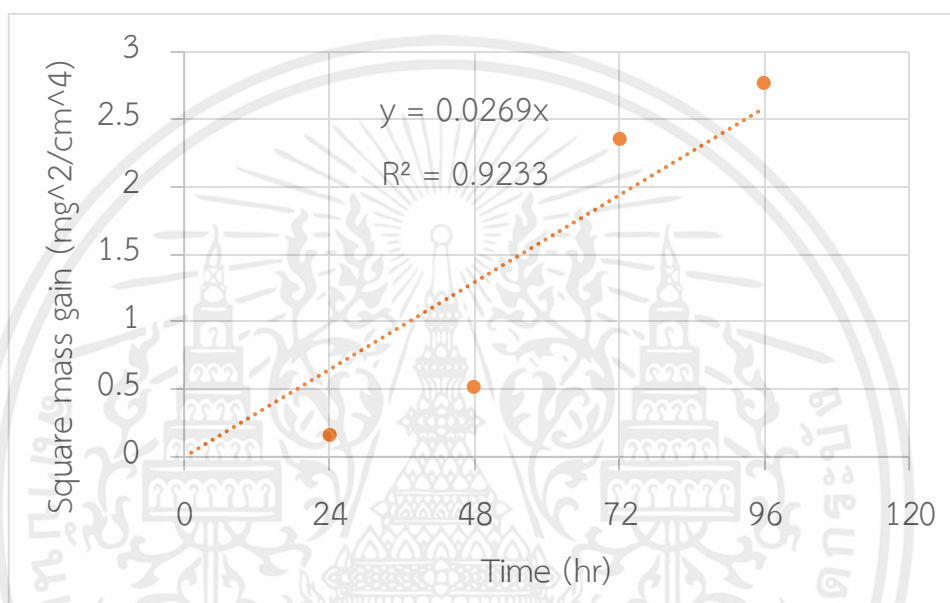


รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นต่อพื้นที่ผิวของชิ้นงานกับเวลาในการออกซิเดชันที่

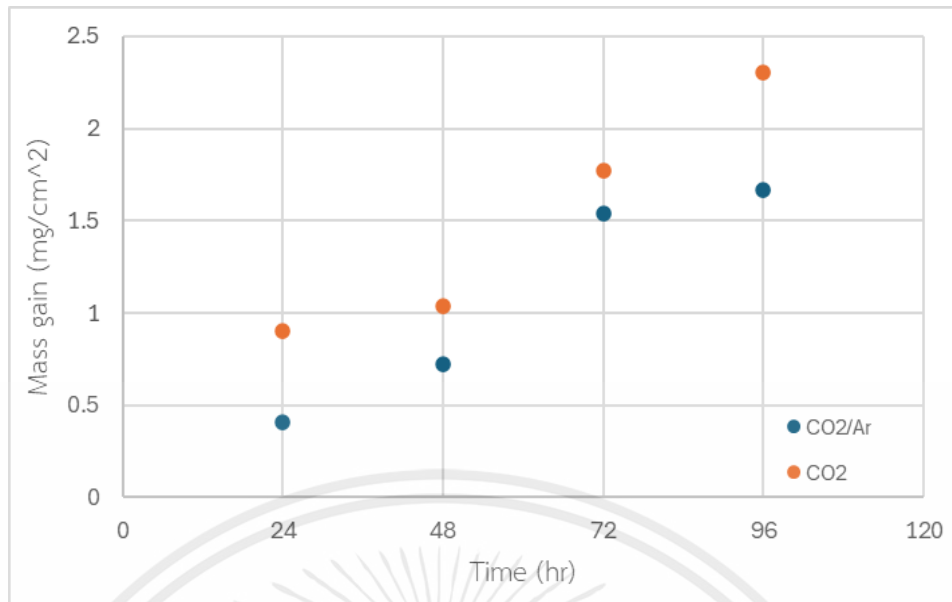
อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ของการพรีออกซิเดชันด้วย CO₂ ตามด้วย Ar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

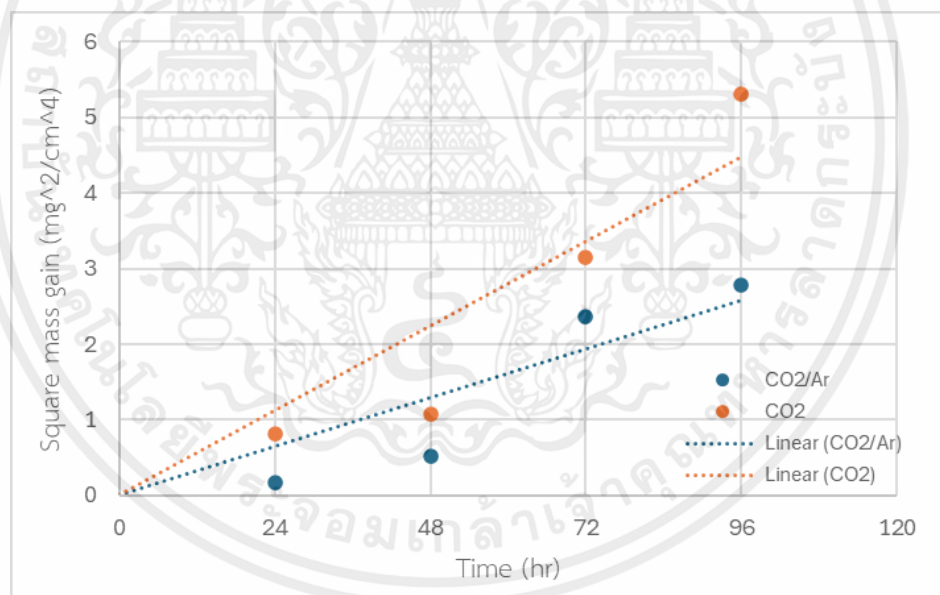
กราฟรูปที่ 4.4 แสดงค่ามวลที่เพิ่มขึ้นเทียบกับพื้นที่ผิวของชิ้นงาน หลังการออกซิเดชันภายใต้ก๊าซออกซิเจน 99.95% ภายใต้อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 24 48 72 และ 96 ชั่วโมงของชิ้นงานที่ถูกพรีออกซิเดชันภายใต้คาร์บอนไดออกไซด์ตามด้วยก๊าซอาร์กอน และเมื่อนำค่าดังกล่าวไปกำลังสองสามารถนำมาพล็อตกราฟได้ดังรูปที่ 4.5 ทำให้ได้ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงพาราโบลามีค่าเท่ากับ $7.4722 \times 10^{-6} \text{ mg}^2\text{cm}^{-4}\text{s}^{-1}$



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นต่อพื้นที่ผิวของชิ้นงานยกกำลังสองกับเวลาในการออกซิเดชัน ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ของการพรีออกซิเดชันด้วย CO₂ ตามด้วย Ar



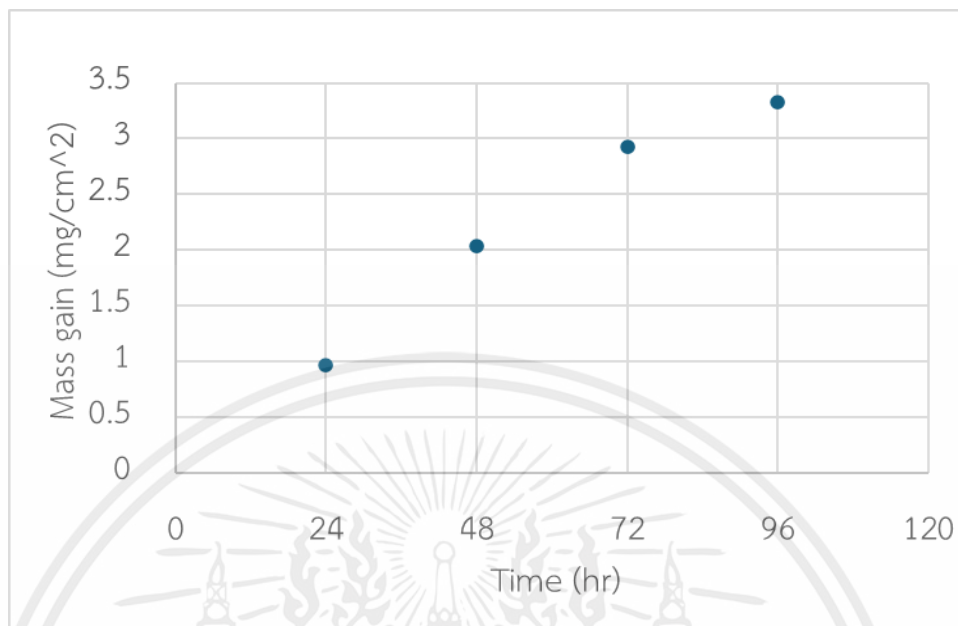
รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นต่อพื้นที่ผิวของชิ้นงานกับเวลา ในการออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นต่อพื้นที่ผิวของชิ้นงานยกกำลังสองกับเวลา ในการออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

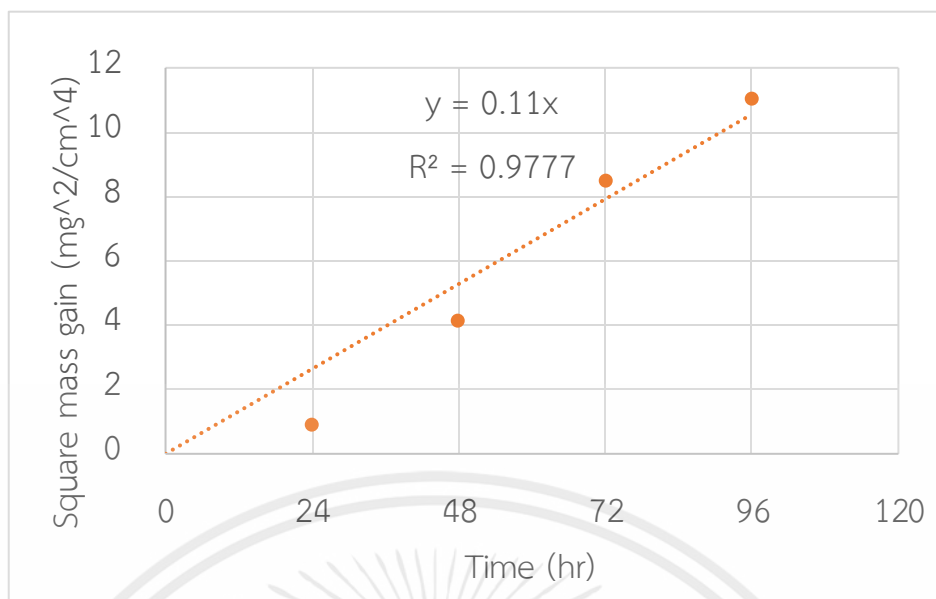
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1.3 ผลการการออกซิเดชันของการพรีออกซิเดชันด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่
อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส



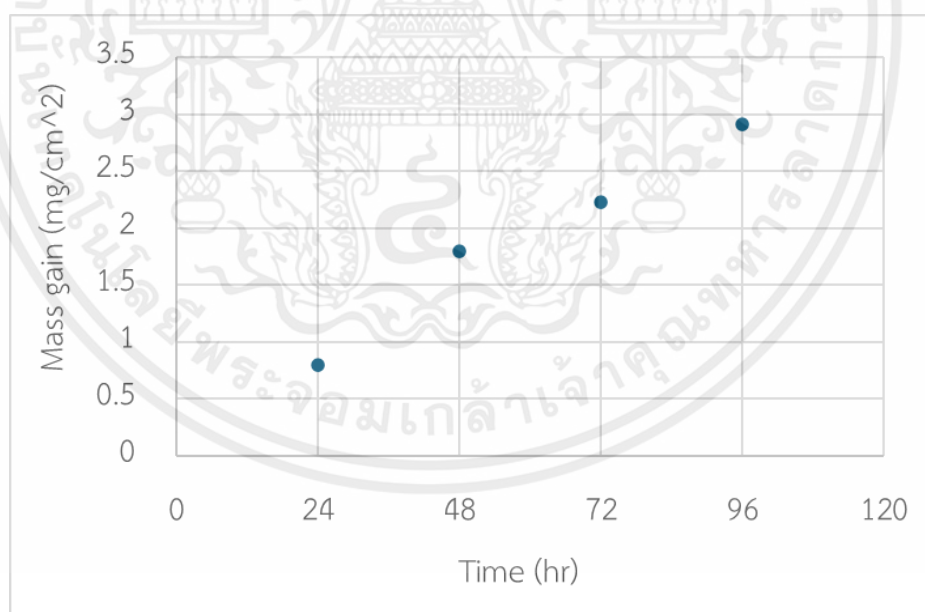
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นต่อพื้นที่ผิวของชิ้นงานกับเวลาในการออกซิเดชันที่
อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ของการพรีออกซิเดชันด้วย CO₂

กราฟรูปที่ 4.8 แสดงค่ามวลที่เพิ่มขึ้นเทียบกับพื้นที่ผิวของชิ้นงาน หลังการออกซิเดชันภายใต้ก๊าซออกซิเจน 99.95% ภายใต้อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 24 48 72 และ 96 ชั่วโมงของชิ้นงานที่ถูกพรีออกซิเดชันภายใต้คาร์บอนไดออกไซด์ และเมื่อนำค่าดังกล่าวไปกำลังสองสามารถนำมาพล็อตกราฟได้ดังรูปที่ 4.9 ทำให้ได้ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงพาราโบลิกมีค่าเท่ากับ $3.05 \times 10^{-5} \text{ mg}^2 \text{ cm}^{-4} \text{ s}^{-1}$



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นต่อพื้นที่ผิวของชิ้นงานยกกำลังสองกับเวลาในการออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ของการพรีออกซิเดชันด้วย CO₂

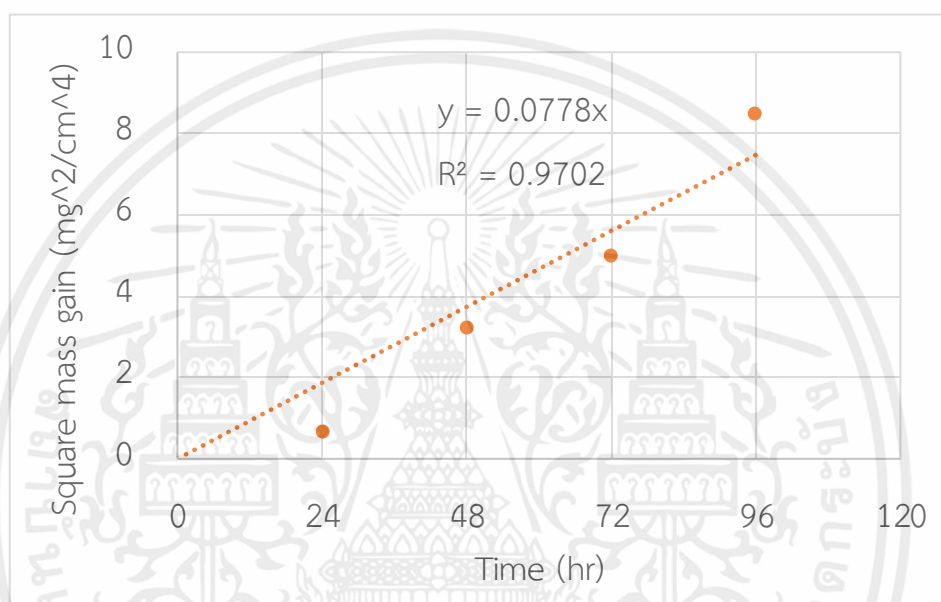
4.2.1.4 ผลการการออกซิเดชันของการพรีออกซิเดชันด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตามด้วยก๊าซอาร์กอน ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส



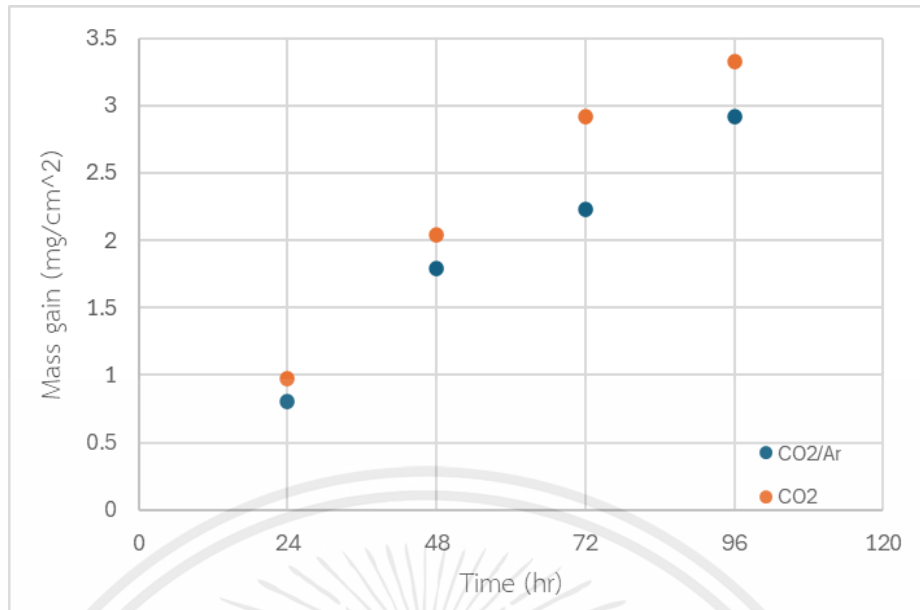
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นต่อพื้นที่ผิวของชิ้นงานกับเวลาในการออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ของการพรีออกซิเดชันด้วย CO₂ ตามด้วย Ar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

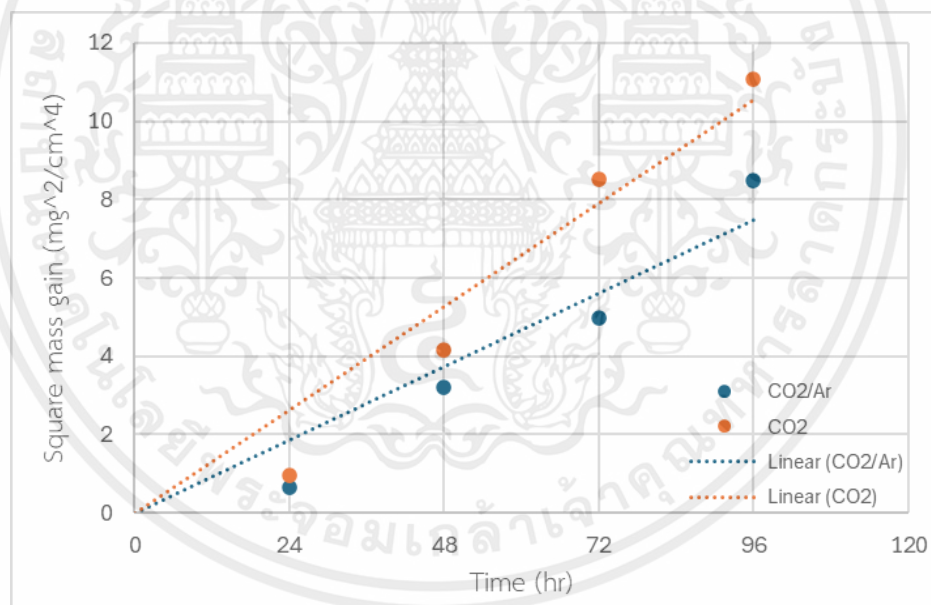
จากกราฟรูปที่ 4.10 แสดงค่ามวลที่เพิ่มขึ้นเทียบกับพื้นที่ผิวของชิ้นงานหลังการออกซิเดชันภายใต้ก๊าซออกซิเจน 99.95% ภายใต้อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 24 48 72 และ 96 ชั่วโมงของชิ้นงานที่ถูกพรีออกซิเดชันภายใต้คาร์บอนไดออกไซด์ตามด้วยก๊าซอาร์กอน และเมื่อนำค่าดังกล่าวไปกำลังสองสามารถนำมาพล็อตกราฟได้ดังรูปที่ 4.11 ทำให้ได้ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงพาราโบลามีค่าเท่ากับ $2.1611 \times 10^{-5} \text{ mg}^2\text{cm}^{-4}\text{s}^{-1}$



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นต่อพื้นที่ผิวของชิ้นงานยกกำลังสองกับเวลาในการออกซิเดชัน ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ของการพรีออกซิเดชันด้วย CO₂ ตามด้วย Ar



รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นต่อพื้นที่ผิวของชิ้นงานกับเวลา ในการออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นต่อพื้นที่ผิวของชิ้นงานยกกำลังสองกับเวลา ในการออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 สรุปค่าคงที่ทั้งหมดของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน

อุณหภูมิที่ออกซิเดชัน (องศาเซลเซียส)	บรรยากาศที่พรีออกซิเดชัน	ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา ออกซิเดชันแบบพาราโบลิก ($\text{mg}^2\text{cm}^{-4}\text{s}^{-1}$)
800	คาร์บอนไดออกไซด์	1.30×10^{-5}
	คาร์บอนไดออกไซด์ตามด้วย ก๊าซอาร์กอน	7.47×10^{-6}
900	คาร์บอนไดออกไซด์	3.05×10^{-5}
	คาร์บอนไดออกไซด์ตามด้วย ก๊าซอาร์กอน	2.16×10^{-5}

ก๊าซอาร์กอนมีส่วนช่วยในการหยุดยั้งจลนพลศาสตร์ออกซิเดชันของโลหะและโลหะผสม โดยการถ่ายโอนโมเลกุลของออกซิเจนจากก๊าซหรือโดยการดูดซับไปยังออกไซด์ที่ก่อตัว อีกทั้งยังพบว่า องค์ประกอบพื้นผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มเฟอร์ริติกไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญหลังการพรีออกซิเดชันในก๊าซอาร์กอนเมื่อเปรียบเทียบกับพรีออกซิเดชันในก๊าซออกซิเจนหรืออากาศบริสุทธิ์ [1] และจากผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของชิ้นงานที่ถูกพรีออกซิเดชันด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตามด้วยก๊าซอาร์กอนพบสารประกอบเพิ่มเติมมาจากการพรีออกซิเดชันด้วยก๊าซคาร์บอนเพียงอย่างเดียวคือ สารประกอบเหล็ก (II,III) ออกไซด์ (Fe_3O_4) หรือ แมกนีไทต์ (Magnetite) ที่มีคุณสมบัติทางเคมีไฟฟ้า โดยมีเวเลนซ์แบบผสมทั้งไอออนเหล็ก (II) และเหล็ก (III) ทำให้กระบวนการถ่ายโอนอิเล็กตรอนที่ชั้นออกไซด์มีความเสถียร และยังส่งผลให้แนวโน้มที่จะเกิดการกัดกร่อนน้อยลง

จากผลการทดลองการออกซิเดชัน ค่าคงที่การเกิดออกซิเดชันของชิ้นงานภายใต้ก๊าซออกซิเจนความบริสุทธิ์ 99.95 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ชิ้นงานที่ถูกพรีออกซิเดชันด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตามด้วยก๊าซอาร์กอนให้ค่าคงที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบพาราโบลิกที่ต่ำกว่า ชิ้นงานที่ถูกพรีออกซิเดชันด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพียงอย่างเดียวทั้งที่อุณหภูมิออกซิเดชันที่ 800 และ 900 องศาเซลเซียส แสดงว่าการพรีออกซิเดชันภายใต้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตามด้วยก๊าซอาร์กอนมีส่วนช่วยลดอัตราการออกซิเดชันของเหล็กกล้าไร้สนิมได้มากกว่า เนื่องจากค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแสดงการเกิดออกซิเดชันเทียบกับเวลา ถ้ามีค่าที่สูงแสดงว่าเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันมากกว่าที่เวลาเดียวกัน

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

การทดสอบการเกิดออกซิเดชันของเหล็กกล้า AISI 430 ที่ทำการพรีออกซิเดชันในก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตามด้วยก๊าซอาร์กอนเป็นเวลาอย่างละ 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 48 72 และ 96 ชั่วโมง สรุปผลดังนี้

5.1.1 ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบพาราโบลิก (k_p)

ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบพาราโบลิกของชิ้นงานที่ทำการพรีออกซิเดชันภายใต้บรรยากาศก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 2 ชั่วโมงตามด้วยก๊าซอาร์กอน 2 ชั่วโมง เมื่อนำไปพรีออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 48 72 และ 96 มีค่าเท่ากับ 1.30×10^{-5} และ $7.47 \times 10^{-6} \text{ mg}^2 \text{ cm}^{-4} \text{ s}^{-1}$ ตามลำดับ สำหรับชิ้นงานที่พรีออกซิเดชันภายใต้บรรยากาศก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 2 ชั่วโมงตามด้วยก๊าซอาร์กอน 2 ชั่วโมง เมื่อนำไปพรีออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 48 72 และ 96 มีค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบพาราโบลิกมีค่าเท่ากับ 3.05×10^{-5} และ $2.16 \times 10^{-5} \text{ mg}^2 \text{ cm}^{-4} \text{ s}^{-1}$ ตามลำดับ การพรีออกซิเดชันภายใต้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตามด้วยก๊าซอาร์กอนมีความสามารถในการป้องกันการเกิดออกซิเดชันได้ดีกว่าการพรีออกซิเดชันด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาเชิงพาราโบลิกที่ต่ำกว่า แสดงว่าชั้นออกไซด์ของโลหะที่เกิดขึ้นป้องกันการเกิดออกซิเดชันทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่น้อยกว่า

5.1.2 สารประกอบที่พบหลังการพรีออกซิเดชันโดยการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD

เมื่อทำการตรวจสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์หรือ X-ray diffractometer (XRD) สารประกอบที่พบหลังการพรีออกซิเดชันภายใต้บรรยากาศก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมงและภายใต้บรรยากาศก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตามด้วยก๊าซอาร์กอน ก๊าซละ 2 ชั่วโมง ตามลำดับพบสารประกอบที่เกิดขึ้นเหมือนกันคือ

สารประกอบโครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) ที่มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ มีประสิทธิภาพในการเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนเมื่อสัมผัสกับออกซิเจนที่อุณหภูมิสูง ป้องกันการเกิดออกซิเดชัน และมีค่าการนำไฟฟ้าเพียงพอสำหรับการใช้งานเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง ส่วนสารประกอบเหล็ก (II,III) ออกไซด์ (Fe_3O_4) หรือแมกนีไทต์ ซึ่งพบได้ในเฉพาะสภาวะการพรีออกซิเดชันภายใต้บรรยากาศก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตามด้วยก๊าซอาร์กอน มีคุณสมบัติทางเคมีไฟฟ้า โดยมีเวเลนซ์แบบผสมทั้งไอออนเหล็ก (II) และเหล็ก (III) ทำให้กระบวนการถ่ายโอนอิเล็กตรอนที่ชั้นออกไซด์มีความเสถียรและยังส่งผลให้การกัดกร่อนเกิดลดลง

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรเลือกวิธีตัดชิ้นงานด้วยวิธีการอื่น เพราะการตัดด้วยเครื่องตัดไฮดรอลิกสำหรับชิ้นงานที่มีขนาดเล็กจะทำให้ชิ้นงานมีการบิดเสียรูปไม่สม่ำเสมอ อีกทั้งการเจาะรูสามารถทำให้ชิ้นงานเสียรูปได้เช่นกันเนื่องจากชิ้นงานมีความบางและขนาดเล็ก ดังนั้นควรหลีกเลี่ยงการเจาะรูบนชิ้นงาน

5.2.2 เพิ่มเวลาในการพรีออกซิเดชันและออกซิเดชัน เพื่อให้ได้เห็นชั้นของออกไซด์มากขึ้น

5.2.3 ระยะเวลาในการพรีออกซิเดชันควรจำกัดให้เท่ากัน เพราะอาจส่งผลต่อปฏิกิริยาเกิดออกซิเดชันได้

บรรณานุกรม

- [1] A. Claret, S. Sabioni, A.-M. Huntz, E. Conceic , ão, M. Mantel, C. Haut, Comparative study of high temperature oxidation behaviour in AISI 304 and AISI 439 stainless steels, Mater. Res. 6 (2) (2003) 179–185.
- [2] A. John Sedriks. (1996). Corrosion of Stainless Steels, second ed. USA, John Wiley & Sons
- [3] British stainless steel association. (2023). Ferritic stainless steels [ออนไลน์]. https://www.bssa.org.uk/bssa_articles/ferritic-stainless-steels
- [4] Hamed Hooshyar. (2016). High Temperature Corrosion of stainless steels in low oxygen activity environments.
- [5] Khanna. A.S. (2002). Introduction to high temperature oxidation and corrosion.
- [6] L. Antoni & A. Galerie, La corrosion sèche des métaux: cas industriels (M4 229), Techniques de l'Ingénieur, France.
- [7] Mareddy Jayanth Reddy. (2021). Metallic materials in Solid Oxide Fuel Cells: Oxidation and chromium evaporation properties.
- [8] Matmatch. (2023). Duplex Stainless Steel: Properties, Standards, and Applications [ออนไลน์]. <http://matmatch.com/learn/material/duplex-stainless-steel>
- [9] Naichangmashare. (2022). เหล็กกล้าไร้สนิม. [ออนไลน์]. <http://naichangmashare.com/2022/09/02/stainless-steel-principle>
- [10] N. Birks, G.H. Meier and F. S. Pettit. (2006). Introduction to the high temperature oxidation of metal.
- [11] Panya Wiman et al. (2023). Oxidation and Scale Adhesion of a Type 430 Stainless Steel in Ar–CO₂ Gas Mixtures at 800 °C. <http://dx.doi.org/10.1007/s11085-023-10155-5>

- [12] PhysicsOpenlab. (2018). BRAGG DIFFRACTION [ออนไลน์]. <http://www.physicsopenlab.org/2018/01/18/bragg-diffraction/>
- [13] Somrerker Chandra-ambhorn et al. (2020). High Temperature Corrosion of stainless steels: An Alain Galerie Festschrift. Trans Tech Publications.
- [14] The Engineering ToolBox. (2003). Thermal Expansion – Linear Expansion Coefficients [ออนไลน์]. www.linear-expansion-coefficients.com
- [15] Wongpromrat, W. (2016). Reduction of chromium volatilisation from stainless steel interconnector of solid oxide electrochemical devices by controlled preoxidation. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2016.02.002>
- [16] Wu, J., & Liu, X. (2010). Recent Development of SOFC Metallic Interconnect. Journal of Materials Science & Technology. [http://dx.doi.org/10.1016/S1005-0302\(10\)60049-7](http://dx.doi.org/10.1016/S1005-0302(10)60049-7)
- [17] Xometry. (2023). Austenitic Stainless Steel: Definition, Composition, Types, Grades, Properties, and Applications [ออนไลน์]. www.xometry.com
- [18] Zhu, W.Z., & Zhu, S.C. (2003). Development of interconnect materials for solid oxide fuel cells. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(02\)00736-0](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(02)00736-0)

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก.
ผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.1 ข้อมูลของน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปหลังการพรีออกซิเดชัน

1. ข้อมูลมวลที่เปลี่ยนแปลงไปหลังการพรีออกซิเดชันด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ตารางที่ ก.1 น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด AISI 430 ผ่านการพรีออกซิเดชันด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ตัวอย่าง	น้ำหนักชิ้นงานที่เพิ่มขึ้น (กรัม)	พื้นที่ผิวของชิ้นงาน (ตารางเซนติเมตร)	น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นต่อพื้นที่ผิวของชิ้นงาน (มิลลิกรัม/ตารางเซนติเมตร)
1	0.5833	3.0298	0.1925
2	0.4563	3.2995	0.1383
3	0.4500	3.1379	0.1434
4	0.5300	3.1562	0.1679
5	0.3133	3.0034	0.1043
6	0.3600	3.6355	0.0990
7	0.4733	3.4545	0.1370
8	0.0567	3.3350	0.0170
9	0.3567	3.0709	0.1161
10	0.3167	3.1324	0.1011

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ข้อมูลมวลที่เปลี่ยนแปลงไปหลังการพรีออกซิเดชันด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตามด้วย
ก๊าซอาร์กอน

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อผ่านการพรีออกซิเดชันเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด AISI
430 ด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ตามด้วยก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ตัวอย่าง	น้ำหนักชิ้นงานที่ เพิ่มขึ้น (กรัม)	พื้นที่ผิวของชิ้นงาน (ตารางเซนติเมตร)	น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นต่อพื้นที่ ผิวของชิ้นงาน (มิลลิกรัม/ตาราง เซนติเมตร)
1	0.7833	3.0942	0.2532
2	0.7667	3.3627	0.2280
3	0.8100	3.0350	0.2669
4	0.6900	3.3096	0.2085
5	0.7067	3.2321	0.2186
6	0.7667	3.2659	0.2348
7	0.4333	3.3952	0.1276
8	0.7333	3.3592	0.2183
9	0.5333	3.3491	0.1592
10	0.5333	3.2085	0.1662

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.2 ข้อมูลของน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นหลังจากการออกซิเดชัน

1. ผลน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นหลังการออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสของชิ้นงานที่ถูกพรีออกซิเดชันภายใต้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ตารางที่ ก.3 ผลน้ำหนักการออกซิเดชันที่ อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสของชิ้นงานที่ถูกพรีออกซิเดชันด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

เวลาที่ใช้ในการออกซิเดชัน (ชั่วโมง)	พื้นที่ผิวของชิ้นงาน (ตารางเซนติเมตร)	น้ำหนักชิ้นงานที่เพิ่มขึ้น (มิลลิกรัม)	น้ำหนักชิ้นงานที่เพิ่มขึ้นต่อพื้นที่ผิวของชิ้นงาน (มิลลิกรัม/ตารางเซนติเมตร)	น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นต่อพื้นที่ผิวของชิ้นงาน ² (มิลลิกรัม ² /ตารางเซนติเมตร ²)
24	3.0298	2.70	0.90	0.81
48	3.2083	3.30	1.04	1.08
72	3.2690	5.80	1.77	3.15
96	3.2995	7.60	2.30	5.31

2. ผลน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นหลังการออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสของชิ้นงานที่ถูกพรีออกซิเดชันภายใต้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตามด้วยก๊าซอาร์กอน

ตารางที่ ก.4 ผลน้ำหนักหลังการออกซิเดชันที่ อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสของชิ้นงานที่ถูกพรีออกซิเดชันภายใต้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตามด้วยก๊าซอาร์กอน

เวลาที่ใช้ในการออกซิเดชัน (ชั่วโมง)	พื้นที่ผิวของชิ้นงาน (ตารางเซนติเมตร)	น้ำหนักชิ้นงานที่เพิ่มขึ้น (มิลลิกรัม)	น้ำหนักชิ้นงานที่เพิ่มขึ้นต่อพื้นที่ผิวของชิ้นงาน (มิลลิกรัม/ตารางเซนติเมตร)	น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นต่อพื้นที่ผิวของชิ้นงาน ² (มิลลิกรัม ² /ตารางเซนติเมตร ²)
24	3.3510	1.40	0.41	0.17
48	3.0970	2.20	0.72	0.52
72	3.0378	4.70	1.54	2.36
96	3.2812	5.50	1.67	2.78

3.ผลน้ำหนักรที่เพิ่มขึ้นหลังการออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสของชิ้นงานที่ถูกพร้อออกซิเดชันภายใต้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ตารางที่ ก.5 ผลน้ำหนักรหลังการออกซิเดชันที่ อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสของชิ้นงานที่ถูกพร้อออกซิเดชันภายใต้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

เวลาที่ใช้ใน การ ออกซิเดชัน (ชั่วโมง)	พื้นที่ผิวของ ชิ้นงาน (ตาราง เซนติเมตร)	น้ำหนักชิ้นงาน ที่เพิ่มขึ้น (มิลลิกรัม)	น้ำหนักชิ้นงานที่ เพิ่มขึ้นต่อพื้นที่ผิวของ ชิ้นงาน(มิลลิกรัม/ ตารางเซนติเมตร)	น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นต่อ พื้นที่ผิวของชิ้นงาน ² (มิลลิกรัม ² /ตาราง เซนติเมตร ²)
24	3.2867	3.20	0.97	0.95
48	3.1379	6.40	2.04	4.16
72	3.0118	8.80	2.92	8.54
96	3.0653	10.20	3.33	11.07

4.ผลน้ำหนักรที่เพิ่มขึ้นหลังการออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสของชิ้นงานที่ถูกพร้อออกซิเดชันภายใต้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตามด้วยก๊าซอาร์กอน

ตารางที่ ก.6 ผลน้ำหนักรหลังการออกซิเดชันที่ อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสของชิ้นงานที่ถูกพร้อออกซิเดชันภายใต้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตามด้วยก๊าซอาร์กอน

เวลาที่ใช้ใน การ ออกซิเดชัน (ชั่วโมง)	พื้นที่ผิวของ ชิ้นงาน (ตาราง เซนติเมตร)	น้ำหนักชิ้นงาน ที่เพิ่มขึ้น (มิลลิกรัม)	น้ำหนักชิ้นงานที่ เพิ่มขึ้นต่อพื้นที่ผิวของ ชิ้นงาน(มิลลิกรัม/ ตารางเซนติเมตร)	น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นต่อ พื้นที่ผิวของชิ้นงาน ² (มิลลิกรัม ² /ตาราง เซนติเมตร ²)
24	3.3667	2.7	0.80	0.64
48	3.2335	5.8	1.79	3.22
72	3.3592	7.5	2.23	4.98
96	3.3952	9.9	2.92	8.50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข.
การคำนวณหาความดันย่อยของออกซิเจนใน
บรรยากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.1 คำนวณหาความดันย่อยของออกซิเจนในบรรยากาศ



- กำหนดให้
1. ความดันทั้งหมดมีค่า 1 bar
 2. ให้ p แทนความดันย่อยของก๊าซแต่ละชนิด
 3. ให้ λ_1 แทนขนาดของการเกิดปฏิกิริยา
 3. ให้ค่าคงที่ของก๊าซ (R) มีค่าเท่ากับ 8.314 จูล์นต่อโมลเคลวิน
 4. อุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 1123 เคลวิน

ความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ($p_{\text{CO}_2(\text{g})}$)

$$p_{\text{CO}_2(\text{g})} = \frac{1 - \lambda_1}{1 + 0.5\lambda_1} \quad (\text{ข.2})$$

ความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ($p_{\text{CO}(\text{g})}$)

$$p_{\text{CO}(\text{g})} = \frac{\lambda_1}{1 + 0.5\lambda_1} \quad (\text{ข.3})$$

ความดันย่อยของก๊าซออกซิเจน ($p_{\text{O}_2(\text{g})}$)

$$p_{\text{O}_2(\text{g})} = \frac{0.5\lambda_1}{1 + 0.5\lambda_1} \quad (\text{ข.4})$$

การหาค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยา (K)

นำสมการที่ (ข.2) ถึง (ข.4) แทนลงในสมการ (ข.5) และจัดรูปได้เป็นสมการที่ (ข.6)

$$K = \frac{p_{\text{product}}}{p_{\text{reactant}}} \quad (\text{ข.5})$$

$$= \frac{p_{\text{CO}} \cdot (p_{\text{O}_2})^{0.5}}{p_{\text{CO}_2}} \quad (\text{ข.6})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \frac{\lambda_1}{1-\lambda_1} \sqrt{\frac{0.5\lambda_1}{1+0.5\lambda_1}} \quad (\text{ข.7})$$

จากสมการหาพลังงานอิสระกิบส์ (Gibb free energy) ของปฏิกิริยา

$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ + T\Delta S^\circ \text{ (J)} \quad (\text{ข.8})$$

$$\Delta G^\circ = 283000 - 86.35T \text{ (J)} \quad (\text{ข.9})$$

ค่าคงที่สมดุลสามารถหาได้จากสมการที่ ก.10

$$\Delta G = \Delta G^\circ + RT \ln(K) \text{ (J)} \quad (\text{ข.10})$$

ที่สภาวะสมดุลค่าพลังงานกิบส์ (ΔG) มีค่าเท่ากับ 0 ดังนั้นสามารถจัดรูปสมการที่ ข.10 ได้ดังนี้

$$K = \exp\left(\frac{-\Delta G^\circ}{RT}\right) \quad (\text{ข.11})$$

เมื่อนำค่าสมการที่ ข.9 แทนค่าอุณหภูมิที่พรีออกซิเดชันซึ่งมีค่าเท่ากับ 850 องศาเซลเซียส และนำค่าที่ได้แทนลงสมการที่ ข.11 จะได้ค่าคงที่สมดุลเท่ากับ 2.22×10^{-9} และนำค่าคงที่สมดุลที่ได้แทนลงสมการที่ ข.7 จะได้ค่าขนาดของปฏิกิริยาเท่ากับ 2.15×10^{-6} และนำค่าขนาดของปฏิกิริยาแทนลงสมการที่ ข.4 จะได้ค่าความดันย่อยของออกซิเจนมีค่าเท่ากับ 1.07×10^{-6} บาร์

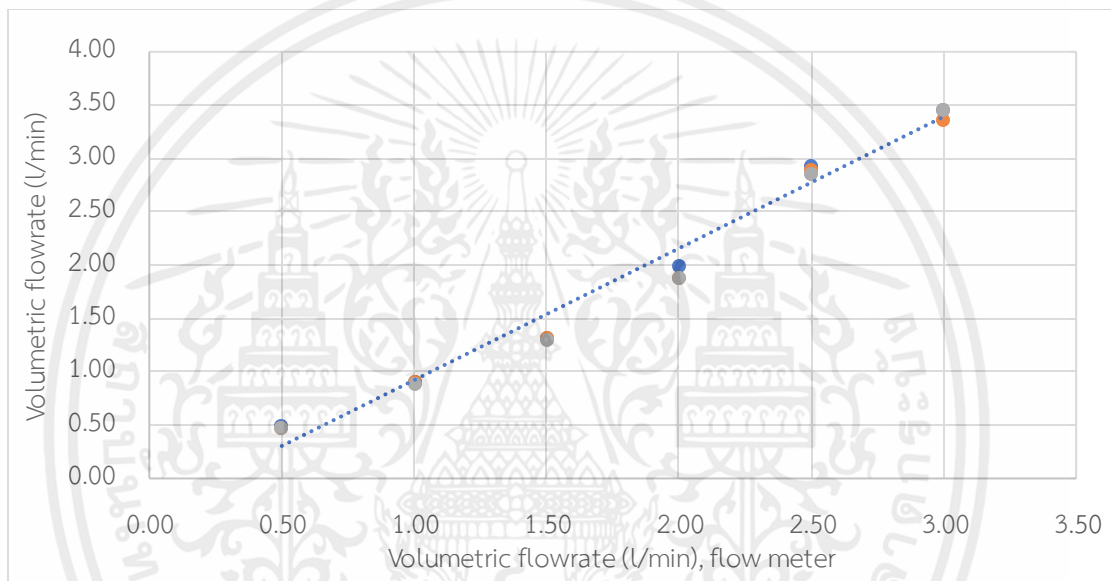


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเตรียมสำหรับการออกซิเดชัน

1. การปรับเทียบอัตราการไหล

สาเหตุของการปรับเทียบมิเตอร์วัดอัตราการไหลก่อนการทดลอง เนื่องจากอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนที่อุณหภูมิสูงนั้นไม่สามารถวัดได้ เราจึงต้องทำการวัดอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนที่อุณหภูมิห้อง ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของเครื่องวัดอัตราการไหล (ลิตรต่อนาที) และอัตราการไหลตามปริมาตรของก๊าซที่อาศัยหลักการแทนที่น้ำ (ลิตรต่อนาที) เป็นไปตามรูปที่ ค.1



รูปที่ ค.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของเครื่องวัดอัตราการไหล (lpm) กับ อัตราการไหลของก๊าซที่อุณหภูมิห้อง

สามารถคำนวณอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน (V) ที่อุณหภูมิสูงจากกฎของก๊าซอุดมคติได้ตามสมการ ที่ ค.1

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \quad (\text{ค.1})$$

เมื่อ $P_1 = P_2$

$V_1 =$ อัตราการไหลที่อุณหภูมิห้อง

$T_1 =$ อุณหภูมิห้อง (308 K)

$V_2 =$ อัตราการไหลที่อุณหภูมิสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

T1 = อุณหภูมิสูง (1073 K และ 1173 K)

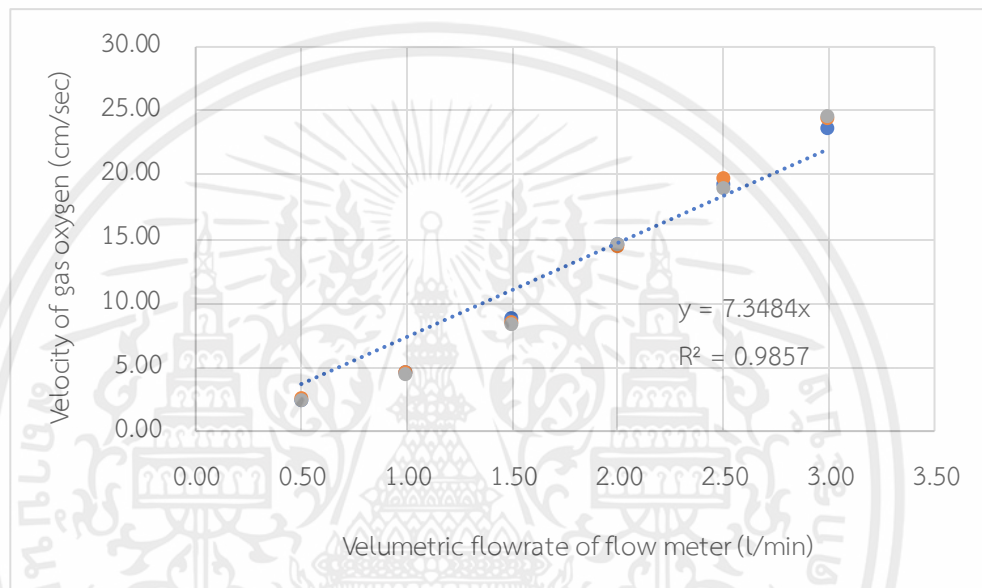
$$v = \frac{V}{A} \quad (\text{ค.2})$$

เมื่อ

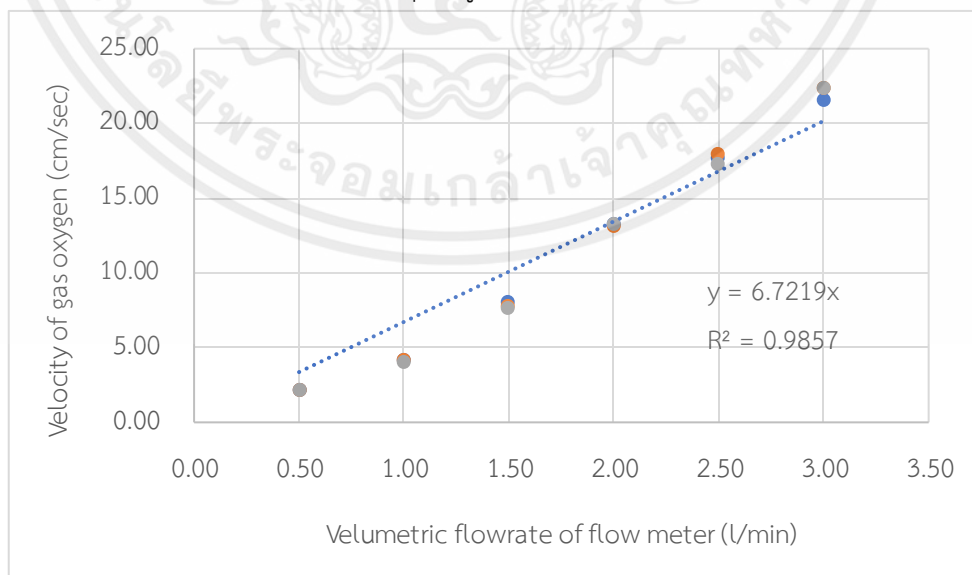
v = ความเร็วของก๊าซ หน่วยเมตรต่อวินาที

V = อัตราการไหล หน่วยลิตรต่อนาที

A = พื้นที่หน้าตัดของแก้วควอตซ์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 12.57 ตารางเซนติเมตร



รูปที่ ค.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของเครื่องวัดอัตราการไหลกับความเร็วของก๊าซออกซิเจนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส



รูปที่ ค.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของเครื่องวัดอัตราการไหลกับความเร็วของก๊าซออกซิเจนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ ค.2 และ ค.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของเครื่องวัดอัตราการไหล กับความเร็วในการไหลของก๊าซที่อุณหภูมิ 800 และ 900 องศาเซลเซียส ทำให้ได้สมการความสัมพันธ์ ดังนี้

ความเร็วของก๊าซออกซิเจนสำหรับอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

$$y = 6.7219x \quad (\text{ค.3})$$

ความเร็วของก๊าซออกซิเจนสำหรับอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส

$$y = 7.3484x \quad (\text{ค.4})$$

เมื่อ x คือ อัตราการไหลจากเครื่องวัดอัตราการไหล หน่วยลิตรต่อนาที

y คือ ความเร็วของก๊าซออกซิเจน หน่วย เซนติเมตรต่อวินาที

ซึ่งในการทดลองตั้งเครื่องวัดอัตราการไหลไว้ที่ 0.5 ลิตรต่อนาทีทำให้เมื่อคำนวณโดยใช้กราฟความสัมพันธ์ ค.3 และ ค.4 จะได้ความเร็วการไหลของก๊าซออกซิเจนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสเท่ากับ 3.3610 เซนติเมตรต่อวินาทีและที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเท่ากับ 3.6742 เซนติเมตรต่อวินาที ตามลำดับ

การคำนวณน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป

$$\text{น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น} = \frac{\Delta M}{A}$$

โดยที่ ΔM คือ น้ำหนักหลังออกซิเดชัน - น้ำหนักก่อนออกซิเดชัน

A คือ พื้นที่ผิวของชิ้นงาน