

รายงานการวิจัย

เรื่อง

การศึกษาการเกิดการระเหยของโครเมียมจากพื้นผิวของอัลลอยที่มีโลหะโครเมียมเป็นส่วนประกอบซึ่งใช้เป็นวัสดุทำแผ่นกั้นเซลล์ในเซลล์ไฟฟ้าเคมีชนิดออกไซด์แข็ง



นางวลัยรัตน์ จันทระอำพร

RC4

271

C5

03547

เลขหมู่.....131104

เลขทะเบียน.....

วัน,เดือน,ปี.2.2.11ค.2557

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้ประจำปีงบประมาณ 2554

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

.b.1260365x

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ต่อผู้อื่น  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการวิจัย (ภาษาไทย) การศึกษาการเกิดการระเหยของโครเมียมจากพื้นผิวของอัลลอยที่มีโลหะโครเมียมเป็นส่วนประกอบซึ่งใช้เป็นวัสดุทำแผ่นกั้นเซลล์ในเซลล์ไฟฟ้าเคมีชนิดออกไซด์แข็ง

ชื่อโครงการวิจัย (ภาษาอังกฤษ) The study of chromium evaporation from the surface of chromia-forming alloy used as an interconnector in a solid oxide electrolytic cell

แหล่งเงิน งบประมาณเงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ประจำปีงบประมาณ 2554

จำนวนเงิน 64,900 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2553 – 30 กันยายน 2554

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการและผู้ร่วมโครงการวิจัย พร้อมระบุหน่วยงานต้นสังกัดและอีเมล

ชื่อ-สกุล (ภาษาไทย) นางวลัยรัตน์ จันทระอมพร

ชื่อ-สกุล (ภาษาอังกฤษ) Mrs. Walairat Chandra-ambhorn

สัดส่วนการวิจัย 100 เปอร์เซ็นต์

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

โทรศัพท์ 02-3298360-3 ต่อ 161

โทรสาร 02-3298360-3 กด 4

อีเมล [kswalair@kmitl.ac.th](mailto:kswalair@kmitl.ac.th)

คำสำคัญ (Keywords) เซลล์ไฟฟ้าเคมีชนิดออกไซด์แข็ง แผ่นกั้นเซลล์ สเกลโครเมียม การระเหยของโครเมียม

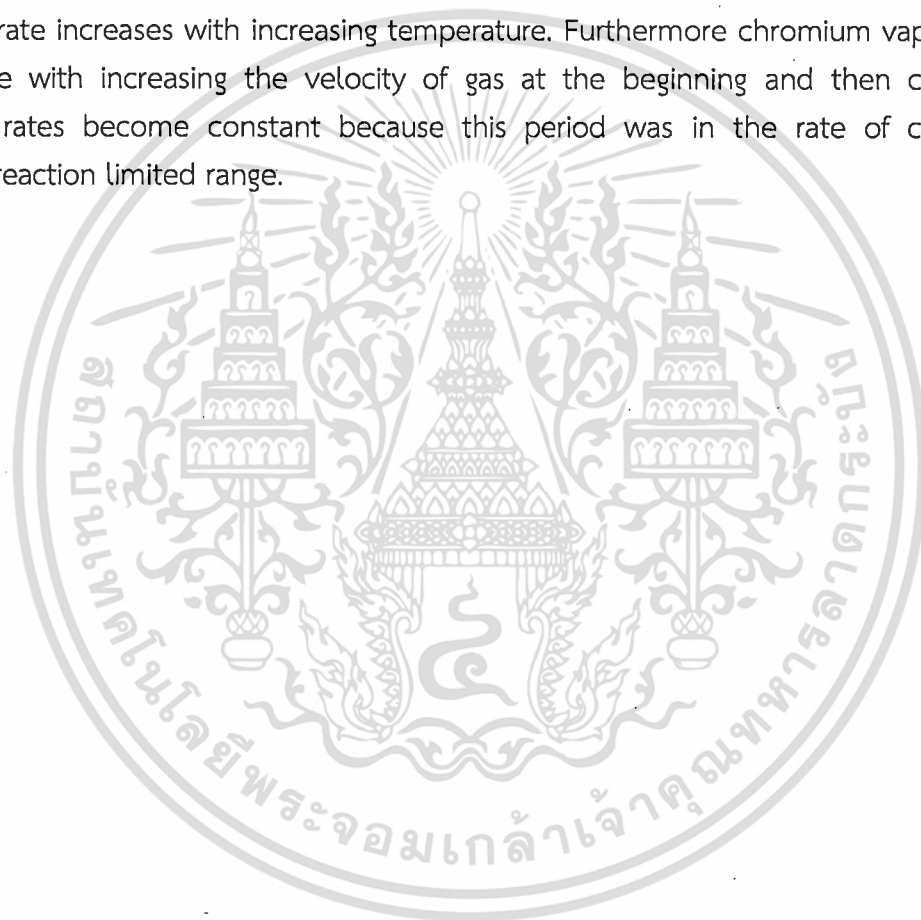
#### บทคัดย่อ

เซลล์ไฟฟ้าเคมีชนิดออกไซด์แข็ง (Solid Oxide Electrolytic Cell; SOEC) เป็นเซลล์ไฟฟ้าเคมีชนิดหนึ่งที่มีประสิทธิภาพการผลิตไฮโดรเจนสูงและกำลังได้รับการพัฒนาอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน แต่ปัญหาหลักอย่างหนึ่งของเซลล์ไฟฟ้าเคมีชนิดนี้คือการเสื่อมสภาพของแผ่นกั้นเซลล์ (Interconnect) ซึ่งเป็นผลให้เซลล์ไฟฟ้าเคมีมีอายุการใช้งานสั้นลง โดยสาเหตุของการเสื่อมสภาพของแผ่นกั้นเซลล์นั้นเกิดจากการระเหยของโครเมียมจากสเกลโครเมียมบนแผ่นกั้นเซลล์ งานวิจัยนี้ทำการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและความเร็วของแก๊สไหลที่มีต่อการระเหยของโครเมียมจากสเกลโครเมียมบนแผ่นกั้นเซลล์ที่อุณหภูมิสูง โดยใช้อัลลอยเกรด AISI430 เป็นแผ่นกั้นเซลล์ตัวอย่าง ในแก๊สออกซิเจนไหลที่มีความชื้น 10 % ระยะเวลา 24 ชั่วโมง จากผลการทดลองพบว่าอัตราการระเหยของโครเมียมจะแปรผันตรงต่ออุณหภูมิ ส่วนความเร็วของแก๊สไหลในช่วงแรกจะแปรผันตรงต่ออัตราการระเหยของโครเมียม แต่เมื่อความเร็วของแก๊สไหลถึงจุดหนึ่ง อัตราการระเหยของโครเมียมจะเริ่มคงที่ ซึ่งเป็นช่วงที่การระเหยของโครเมียมถูกจำกัดด้วยอัตราการเกิดปฏิกิริยาของการระเหยของโครเมียมจากสเกลโครเมียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Abstract

Solid oxide electrolytic cell is a kind of high efficient electrolytic cell that has been widely developed. However one of main problems is degradation of interconnect of the cell. This problem causes shorter lifetime of the cell. Primary cause of degradation of interconnect is vaporisation of chromium from chromia scale on the interconnect. This research focuses on the investigation of the effect of temperature and velocity of flow gas on chromium vaporisation from chromia scale on interconnect at high temperatures. AISI430 Stainless steel was selected to represent the interconnect. The experiment was conducted in flow oxygen with 10 % water vapour for 24 hours. The results show that chromium vaporization rate increases with increasing temperature. Furthermore chromium vaporization rates increase with increasing the velocity of gas at the beginning and then chromium vaporization rates become constant because this period was in the rate of chromium vaporisation reaction limited range.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	II
Abstract	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VI
สารบัญตาราง	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ของงานวิจัย	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 เซลล์ไฟฟ้าเคมีชนิดออกไซด์แข็ง	3
2.2 แผ่นกั้นเซลล์	3
2.3 การระเหยของโครเมียม	4
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย	9
3.1 การออกแบบและประกอบชุดการทดลอง	9
3.1.1 การออกแบบชุดการทดลอง	9
3.1.2 การประกอบชุดการทดลอง	10
3.1.2.1 อุปกรณ์ใช้ไฟฟ้า	10
3.1.2.2 ควอทซ์และเครื่องแก้ว	10
3.1.2.3 ท่อ วาล์ว และข้อต่อ	10
3.1.2.4 เครื่องมือวัด	11
3.1.2.5 อุปกรณ์อื่นๆ	11
3.2 การทดลองการระเหยของโครเมียมจากเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 430 ที่อุณหภูมิสูง	11
3.2.1 อุปกรณ์	11
3.2.2 สารเคมี	12
3.2.3 การทดลอง	12
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง	14
4.1 อิทธิพลของอัตราการไหลของแก๊สที่มีต่อการระเหยของโครเมียม	14
4.2 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อการระเหยของโครเมียม	15
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	17
5.1 สรุปผลการวิจัย	17
5.2 ข้อเสนอแนะ	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง	18
ภาคผนวก	19
ภาคผนวก ก กราฟมาตรฐาน	20
ภาคผนวก ข ข้อมูลดิบ	21
ภาคผนวก ค รูปภาพชุดการทดลอง	22



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

	หน้า	
รูปที่ 2-1	หลักการทํางานของเซลล์ไฟฟ้าเคมีชนิดออกไซด์แข็ง	3
รูปที่ 2-2	ภาพตัดขวางของโลหะเฟอร์ริติกเกรดต่างๆ จากเครื่อง Scanning Electron Microscope (a).E-Brite b) JS-3 c) ZMG 232..d) IT-10 e) IT-11 และ f) IT-14 หลังผ่านการออกซิเดชันที่ 800 องศาเซลเซียส ในอากาศชื้น เป็นเวลา 100 ชั่วโมง	5
รูปที่ 2-3	อัตราการระเหยของโครเมียมจากอัลลอยเกรดต่าง ๆ ที่ออกซิไดซ์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสในอากาศที่มีความชื้น 1.88 %	6
รูปที่ 2-4	ความดันย่อยที่สมดุลของแก๊สโครเมียมออกไซด์ (Cr oxides) ในอากาศแห้งโดยเป็นฟังก์ชันกับเวลา	7
รูปที่ 2-5	ความดันย่อยที่สมดุลของแก๊สโครเมียมไฮดรอกไซด์ (Cr hydroxides) ในอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 60 % (ที่ 25 องศาเซลเซียส) โดยเป็นฟังก์ชันกับเวลา	7
รูปที่ 2-6	ความดันย่อยที่สมดุลของแก๊สโครเมียมออกไซด์ไฮดรอกไซด์ (Cr oxyhydroxides) ในอากาศ ที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 60 % (ที่ 25 องศาเซลเซียส) โดยเป็นฟังก์ชันกับเวลา	8
รูปที่ 3-1	Pipe and Instruments Diagram (P&ID) ของชุดการทดลอง	9
รูปที่ 4-1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของแก๊สไหลกับปริมาณโครเมียมที่ระเหยในแก๊สออกซิเจนชื้น 10 % ที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 24 ชั่วโมง	14
รูปที่ 4-2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณโครเมียมที่ระเหยออกมาที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1 ลิตรต่อนาที ความชื้น 10 % ระยะเวลา 24 ชั่วโมง	15
รูปที่ 4-3	กราฟแสดงผลของอุณหภูมิต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาการระเหยของโครเมียมที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1 ลิตรต่อนาที ความชื้น 10 % ระยะเวลา 24 ชั่วโมง	16
รูปที่ ก-1	กราฟมาตรฐานของอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน ที่ความดัน 2.5 บาร์	20
รูปที่ ค-1	ชุดการทดลอง	22
รูปที่ ค-2	เครื่องวัดอัตราการไหล ส่วนปรับความชื้น และเครื่องบันทึกอุณหภูมิ	22
รูปที่ ค-3	ฝาแก้วครอบควอทซ์ที่ต่อกับเทอร์โมคัปเปิลและท่อแก๊ส	23
รูปที่ ค-4	เตาเผา	23
รูปที่ ค-5	เครื่องควบแน่น	23
รูปที่ ค-6	ชิ้นงานที่ผ่านการทดลองแล้ว	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2-1 องค์ประกอบทางเคมีของอัลลอยที่มีโครเมียมเป็นองค์ประกอบหลักและโลหะเฟอร์- ริติกที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma - Optical Emission Spectroscopy (ICP-OES)	5
ตารางที่ 3-1 รายการอุปกรณ์ใช้ไฟฟ้าสำหรับชุดทดลอง	10
ตารางที่ 3-2 รายการเครื่องมือวัดสำหรับชุดการทดลอง	11
ตารางที่ ข-1 ข้อมูลทางกายภาพของแผ่นโลหะตัวอย่าง (430 Stainless Steel) ที่ใช้ในการทดลอง	21
ตารางที่ ข-2 ข้อมูลสำหรับการทดลองที่ปรับเปลี่ยนอุณหภูมิ	21
ตารางที่ ข-3 ข้อมูลสำหรับการทดลองที่ปรับเปลี่ยนอัตราการไหล	21



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบันวิกฤตการณ์น้ำมันแพงและภาวะโลกร้อนรวมถึงภัยพิบัติต่างๆ ทางธรรมชาติซึ่งทวีความรุนแรงขึ้นเนื่องจากสิ่งแวดล้อมถูกทำลายเป็นปัญหาที่ทั่วโลกกำลังตระหนักและหาทางแก้ไข ไฮโดรเจนจัดเป็นเชื้อเพลิงทางเลือกที่สามารถผลิตได้จากวัตถุดิบทั้งจากแหล่งที่ใช้แล้วหมดไป เช่น ไฮโดรคาร์บอน และพลังงานยั่งยืน เช่น น้ำ หรือ ก๊าซชีวภาพ ไฮโดรเจนสามารถนำไปใช้ทั้งเป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้โดยตรง และเป็นเชื้อเพลิงสำหรับเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell) ซึ่งเป็นเครื่องมือในการเปลี่ยนพลังงานเคมีไปเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จากทั้งสองกระบวนการนี้ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม จึงอาจกล่าวได้ว่า ไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงอุดมคติที่สามารถแก้ปัญหาทั้งวิกฤตการณ์น้ำมันแพง ภาวะโลกร้อน และปัญหาสิ่งแวดล้อมได้ ไฮโดรเจนสามารถสังเคราะห์ขึ้นได้จากหลายกระบวนการ อาทิเช่น ไฮโดรคาร์บอนรีฟอร์มมิง (Hydrocarbon reforming) ปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันของชีวมวล (Biomass gasification) และการแยกน้ำด้วยไฟฟ้า (Electrolysis of water) เป็นต้น ในบรรดากระบวนการสังเคราะห์ไฮโดรเจนดังกล่าว การแตกน้ำด้วยไฟฟ้าถือเป็นทางเลือกที่เหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับอนาคตซึ่งเชื้อเพลิงฟอสซิลเริ่มขาดแคลน เนื่องจากวิธีการดังกล่าวใช้เพียงน้ำเป็นสารตั้งต้น กระบวนการแยกน้ำด้วยไฟฟ้าเป็นกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีซึ่งจะใช้กระแสไฟฟ้าป้อนเข้าสู่เซลล์ไฟฟ้าเคมีเพื่อเป็นพลังงานในการแยกน้ำออกเป็นไฮโดรเจนและออกซิเจน แต่ข้อด้อยหลักของกระบวนการแยกน้ำด้วยไฟฟ้านี้คือ เราจำเป็นต้องใช้กระแสไฟฟ้าเป็นแหล่งพลังงานในการดำเนินปฏิกิริยา อย่างไรก็ตาม ปัจจุบัน มนุษย์ได้พัฒนาเทคโนโลยีต่างๆ เช่น เทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานนิวเคลียร์ พลังงานแสงอาทิตย์ หรือพลังงานลม เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานยั่งยืน ซึ่งการพัฒนาเทคโนโลยีดังกล่าวจะนำไปสู่การผลิตกระแสไฟฟ้าที่มีราคาถูกลงในอนาคต

ในบรรดาเครื่องแยกน้ำด้วยไฟฟ้าชนิดต่างๆ เซลล์ไฟฟ้าเคมีชนิดออกไซด์แข็ง (Solid oxide electrolytic cell, SOEC) เป็นเครื่องมือที่ผลิตไฮโดรเจนจากการแตกน้ำด้วยไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่นักวิจัยจำนวนมากกำลังสนใจพัฒนาอยู่ในขณะนี้ ข้อดีของเซลล์ไฟฟ้าเคมีชนิดออกไซด์แข็งก็คือ เนื่องจากเป็นเครื่องมือที่ทำงานที่อุณหภูมิค่อนข้างสูงคือ ระหว่าง 700 - 900 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงมีประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าสูงกว่าเซลล์ไฟฟ้าเคมีชนิดอื่นๆ ที่ทำงานที่อุณหภูมิต่ำกว่า นอกจากนี้ เนื่องจากใช้อิเล็กโทรไลต์ที่มีสถานะเป็นของแข็งจึงไม่เกิดปัญหาการกัดกร่อนขึ้นในเซลล์ไฟฟ้าเคมีดังกล่าว อย่างไรก็ตาม ปัญหาใหญ่อย่างหนึ่งในการใช้เซลล์ไฟฟ้าเคมีชนิดออกไซด์แข็งเป็นเครื่องผลิตไฮโดรเจนก็คือ ปัญหาการระเหยของโครเมียมออกจากสเกลโครเมียมบนแผ่นกั้นเซลล์ (Interconnector) ซึ่งมักผลิตจากอัลลอยที่มีโครเมียมเป็นองค์ประกอบ ส่งผลให้เซลล์ไฟฟ้าเคมีชนิดนี้เกิดการเสื่อมสภาพก่อนเวลาอันควร ดังนั้นการลดการระเหยของโครเมียมจากสเกลโครเมียมบนแผ่นกั้นเซลล์ คือสิ่งที่จะช่วยยืดอายุการใช้งานของเซลล์ไฟฟ้าเคมีได้ ซึ่งการลดการระเหยของโครเมียม นั้น ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น วัสดุที่ใช้เป็นแผ่นกั้นเซลล์ สภาวะที่ชั่วแคโทด และการใช้เทคโนโลยีเคลือบผิว โดยงานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาการระเหยของโครเมียมขั้นพื้นฐาน ซึ่งสามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนา งานวิจัยในระดับสูงต่อไป

### 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาปรากฏการณ์การระเหยของโครเมียมออกจากพื้นผิวของโครเมียมอัลลอยที่มักใช้เป็นวัสดุทำแผ่นกั้นเซลล์ไฟฟ้าเคมีชนิดออกไซด์แข็งซึ่งใช้เป็นเครื่องมือในการผลิตไฮโดรเจนโดยการแยกน้ำด้วยไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาผลของอุณหภูมิและอัตราการไหลของออกซิเจนต่ออัตราการระเหยของโครเมียมออกจากพื้นผิวของโครเมียมอัลลอย

2. ศึกษากลไกการเกิดการระเหยของโครเมียมออกจากพื้นผิวของโครเมียมอัลลอย รวมถึงการพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในระหว่างการระเหยของโครเมียม

### 1.4 ประโยชน์ของงานวิจัย

- ทำให้ทราบถึงหลักการระเหยของโครเมียมบนพื้นผิวของแผ่นกั้นเซลล์
- ทำให้ทราบถึงอัตราการระเหยของโครเมียมบนพื้นผิวของแผ่นกั้นเซลล์ที่สภาวะแตกต่างกัน
- เป็นข้อมูลในการปรับปรุงวัสดุที่ใช้ทำแผ่นกั้นเซลล์ในเซลล์ไฟฟ้าเคมีชนิดออกไซด์แข็งให้สามารถใช้งานได้ยาวนาน และมีความทนทานสูงขึ้น
- ช่วยส่งเสริมแนวทางใหม่ของพลังงานทางเลือกที่ไม่ก่อมลภาวะทางอากาศและเสียง

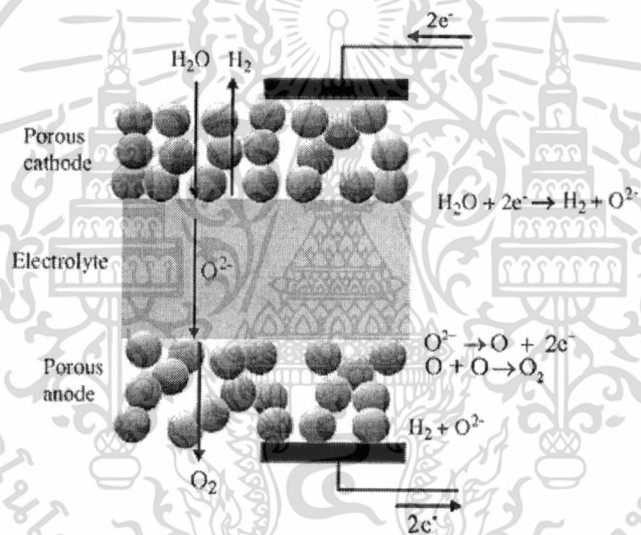


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 เซลล์ไฟฟ้าเคมีชนิดออกไซด์แข็ง (Solid Oxide Electrolytic Cell; SOEC)

เซลล์ไฟฟ้าเคมีเป็นอุปกรณ์ที่ใช้หลักการทางไฟฟ้าเคมีในการผลิตไฮโดรเจนด้วยวิธีการแยกน้ำด้วยไฟฟ้า (Electrolysis) เซลล์ไฟฟ้าเคมีชนิดออกไซด์แข็งเป็นเซลล์ไฟฟ้าเคมีชนิดหนึ่งที่อิเล็กโทรไลต์เป็นของแข็งประเภทเซรามิก ซึ่งโดยทั่วไปคือ Yttria-Stabilized Zirconia (YSZ) การใช้อิเล็กโทรไลต์เป็นของแข็งนี้ ช่วยแก้ปัญหาการรั่วซึมของอิเล็กโทรไลต์เหลวออกจากเซลล์ไฟฟ้าเคมี อีกทั้งยังจัดปัญหาการกัดกร่อนซึ่งเป็นปัญหาใหญ่ที่เกิดกับเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบอิเล็กโทรไลต์เหลว ส่วนวัสดุที่ใช้เป็นขั้วแอโนด มักเป็นเซอร์เมท (Cermet) ที่เป็นวัสดุผสมระหว่างโลหะจำพวกโคบอลต์ หรือนิกเกิล กับเซรามิกจำพวกเซอร์โคเนียออกไซด์ ( $\text{Co-ZrO}_2$ ,  $\text{Ni-Zr-O}_2$ ) ซึ่งโคบอลต์ และนิกเกิลจะช่วยให้อุณหภูมิไฟฟ้าได้ดี ส่วนขั้วแคโทดนั้น มักเป็นเซรามิกที่สามารถนำอิเล็กตรอนได้ ซึ่งโดยทั่วไปคือ Strontium-doped lanthanum manganite ( $\text{Sr-doped LaMnO}_3$ ) การทำงานของเซลล์ไฟฟ้าเคมีชนิดนี้แสดงดังรูปที่ 2-1



รูปที่ 2-1 หลักการทำงานของเซลล์ไฟฟ้าเคมีชนิดออกไซด์แข็ง [1]

จากรูป ใอน้ำจะถูกป้อนเข้าสู่แคโทดเพื่อทำปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีกับอิเล็กตรอนได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนไอออน ด้วยคุณสมบัติการนำประจุของอิเล็กโทรไลต์ทำให้ออกซิเจนไอออนถูกเหนี่ยวนำจากฝั่งแคโทดผ่านอิเล็กโทรไลต์ไปยังฝั่งแอโนด ทำให้แก๊สที่ไหลออกจากฝั่งแคโทดเป็นแก๊สไฮโดรเจนขึ้น เมื่อนำไปกำจัดความชื้นก็จะสามารถนำไฮโดรเจนไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ต่อไป

### 2.2 แผ่นกั้นเซลล์ (Interconnector) [2,3]

แผ่นกั้นเซลล์ คือ วัสดุที่เชื่อมระหว่างเซลล์เดี่ยวแต่ละเซลล์ให้เป็นอนุกรม โดยแผ่นกั้นเซลล์มีหน้าที่ดังนี้

- นำกระแสไฟฟ้าเข้าสู่เซลล์เดี่ยว
- แยกกระแสการไหลระหว่างแคโทดกับแอโนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผ่นกั้นเซลล์เป็นตัวเชื่อมระหว่างขั้วแคโทดของเซลล์หนึ่งกับขั้วแอโนดของอีกเซลล์หนึ่งเข้าด้วยกัน นั่นคือ แผ่นกั้นเซลล์จะต้องสัมผัสกับทั้งด้านที่เป็นสภาวะออกซิไดซ์ และด้านที่เป็นสภาวะรีดิวซ์ ดังนั้นจึงมีปัจจัยหลายปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของแผ่นกั้นเซลล์ การเลือกวัสดุเพื่อใช้เป็นแผ่นกั้นเซลล์จึงเป็นประเด็นที่ต้องให้ความสำคัญอย่างมากในการผลิตเซลล์ไฟฟ้าเคมีชนิดออกไซด์แข็งมีประสิทธิภาพในการทำงานสูง และมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน โดยคุณสมบัติของวัสดุที่นำมาใช้เป็นแผ่นกั้นเซลล์ที่ดี สามารถสรุปได้ดังนี้

- มีค่าการนำอิเล็กตรอนสูง แต่ค่าการนำไอออนต่ำ
- มีความเสถียรทางเคมี
- การขยายตัวทางความร้อนสอดคล้องกับส่วนประกอบอื่นภายในเซลล์
- มีความแข็งแรงเชิงกลสูง
- มีค่าการนำความร้อนสูง
- มีความเสถียรทางเคมีกับส่วนประกอบอื่นภายในเซลล์
- แก๊สไม่สามารถซึมผ่านได้

การออกแบบเซลล์ไฟฟ้าเคมีชนิดออกไซด์แข็งในระยะแรก มีอุณหภูมิทำงานสูงประมาณ 900 ถึง 1,000 องศาเซลเซียส จึงต้องใช้แผ่นกั้นเซลล์เป็นวัสดุเซรามิก เช่น  $\text{LaCrO}_3$  และ  $\text{YCrO}_3$  เป็นต้น แต่ในระยะหลัง การออกแบบเซลล์ไฟฟ้าเคมีชนิดออกไซด์แข็งสามารถลดอุณหภูมิทำงานลงได้เหลือประมาณ 600 ถึง 850 องศาเซลเซียส จึงทำให้สามารถนำวัสดุประเภทโลหะมาเป็นแผ่นกั้นเซลล์ได้ ซึ่งข้อดีของแผ่นกั้นเซลล์ที่เป็นโลหะที่เหนือกว่าวัสดุประเภทเซรามิก คือ

- มีค่าการนำไฟฟ้า และค่าการนำความร้อนสูงกว่า
- ต้นทุนของวัสดุ และต้นทุนในการขึ้นรูปต่ำกว่า
- กระบวนการในการขึ้นรูปง่ายกว่า และสามารถทำให้มีรูปร่างที่ซับซ้อนได้

สำหรับแผ่นกั้นเซลล์ที่เป็นโลหะ เมื่อเวลาผ่านไป แผ่นกั้นเซลล์ก็จะค่อย ๆ เสื่อมสภาพลง ซึ่งพบว่าการเกิดจากการสูญเสียโครเมียมจากอัลลอย โดยการใช้อัลลอยที่สามารถเกิดสเกลโครเมีย (Chromia-forming alloys) จะช่วยลดปัญหานี้ได้ แต่ในขณะเดียวกันก็จะเกิดการระเหยของโครเมียมออกจากสเกลโครเมียด้วย

### 2.3 การระเหยของโครเมียม (Cr Vaporization) [4-6]

การเกิดสเกลโครเมีย (Chromia Scale;  $\text{Cr}_2\text{O}_3(s)$ ) จะช่วยป้องกันไม่ให้อากาศสัมผัสกับผิวโลหะได้โดยตรง จึงช่วยลดการสึกกร่อนของผิวโลหะได้ แต่ในขณะเดียวกันด้านที่สัมผัสกับขั้วแคโทดก็จะเกิดการระเหยของโครเมียมออกจากสเกลที่อุณหภูมิสูงเช่นกัน ตัวอย่างของอัลลอยที่สามารถเกิดสเกลโครเมียได้ เช่น อัลลอยที่มีโครเมียมเป็นองค์ประกอบหลัก (Cr-based alloys) และโลหะเฟอร์ริติก (Ferritic steels) เป็นต้น

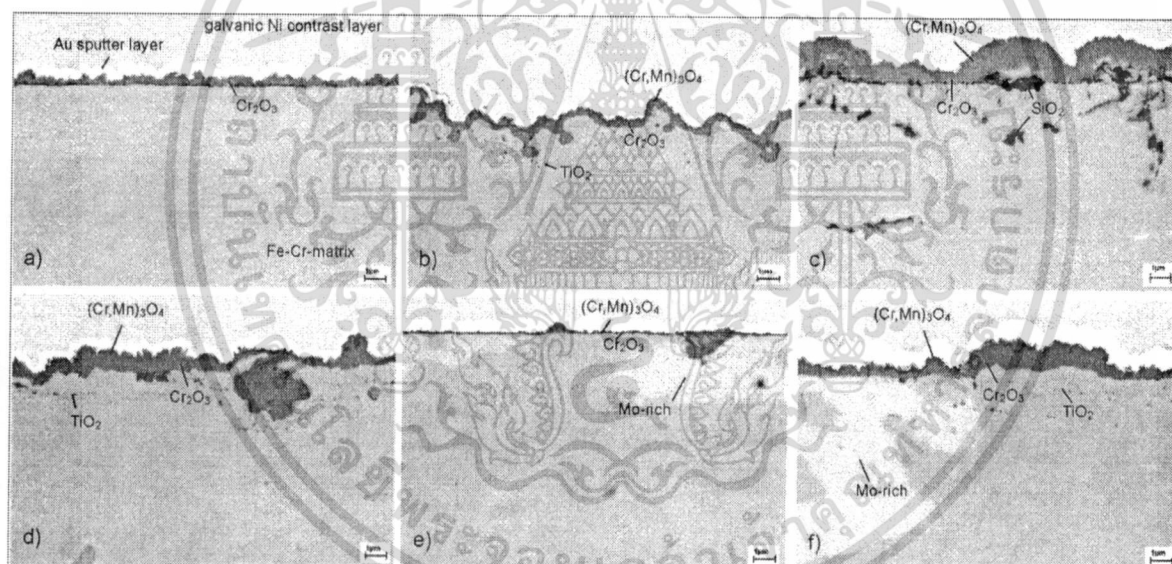
Ducrolloy เป็นอัลลอยเกรดหนึ่งที่มีโครเมียมเป็นองค์ประกอบหลัก ส่วน E-Brite, Uginox F17, TNb, Uginox F18 MT, Crofer 22 APU, JS-3, ZMG 232, IT-10 และ IT-14 เป็นอัลลอยเกรดต่าง ๆ ของโลหะเฟอร์ริติก โดยองค์ประกอบของอัลลอยเหล่านี้แสดงไว้ในตารางที่ 2-1 จากงานวิจัยของ M.Stanislawski และคณะ[6] ที่ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการระเหยของโครเมียมจากสเกลของอัลลอยเหล่านี้ พบว่าเมื่อทำการออกซิเดชันอัลลอยเหล่านี้ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ในอากาศชื้นแล้ว Ducrolloy และ E-Brite มีเกิดสเกลโครเมียขึ้นที่ผิวของแผ่นโลหะ ส่วนอัลลอยชนิด ที่เหลือ จะเกิดสเกลโครเมียที่ผิวของแผ่น และเกิดชั้นของโครเมียมแมงกานีสสปินเนล (Cr-Mn-spinel layer) เคลือบอยู่บนสเกลโครเมียอีกชั้น (รูปที่ 2-2) และเมื่อวัดอัตราการระเหยของโครเมียม จากอัลลอยเหล่านี้ พบว่า Ducrolloy และ E-Brite ซึ่งเป็นอัลลอยที่ไม่สามารถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดขึ้นของโครเมียมแมงกานีสสปีเนลได้นั้น มีอัตราการระเหยของโครเมียมสูงกว่าอัลลอยชนิดอื่นอย่างเห็นได้ชัด (รูปที่ 2-3)

ตารางที่ 2-1 องค์ประกอบทางเคมีของอัลลอยที่มีโครเมียมเป็นองค์ประกอบหลัก และโลหะเฟอร์ริติกที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma - Optical Emission Spectroscopy (ICP-OES) [6]

Grade	Fe	Cr	Ni	Al	Si	Mn	Ti	Y	Co	C	N	Others
Ducrolloy	5.5	92.9	-	-	-	-	-	0.48	-	0.010	0.014	Zr 0.02
Crofer 22 APU	76.5	22.7	0.02	0.02	0.02	0.38	0.07	-	-	0.002	0.004	La 0.06
JS-3	76.1	22.7	-	0.02	-	0.40	0.05	-	-	0.016	-	La 0.09
ZMG 232	76.9	22.0	0.29	0.18	0.40	0.45	-	-	-	0.024	0.005	Zr 0.13
E-Brite	73.2	24.1	0.11	0.02	0.19	0.04	0.01	-	-	0.010	0.004	Mo 0.96
F 17 TNb	77.8	19.9	0.01	-	0.60	0.22	0.12	-	-	0.009	0.015	Nb 0.53
F 18 MT	78.0	19.4	0.20	0.02	0.46	0.12	0.12	-	-	0.011	0.009	Mo 1.7 Nb 0.17
IT-10	73.4	25.5	0.03	-	0.02	N/A	N/A	0.07	-	0.008	0.031	Mo N/A
IT-11	71.8	26.4	0.03	0.02	0.01	N/A	N/A	0.08	-	0.009	0.020	Mo N/A
IT-14	70.4	26.3	0.17	0.02	0.02	N/A	N/A	0.06	-	0.005	0.019	Mo N/A

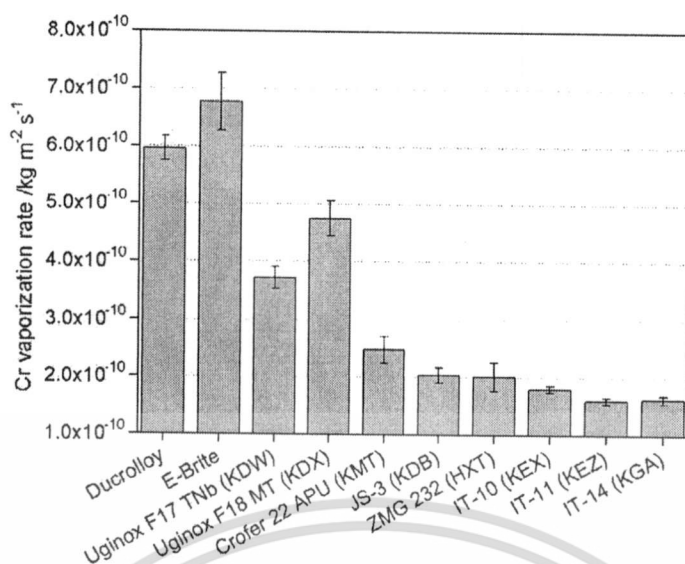


รูปที่ 2-2 ภาพตัดขวางของโลหะเฟอร์ริติกเกรดต่าง ๆ จากเครื่อง Scanning Electron Microscope

a) E-Brite b) JS-3 c) ZMG 232 d) IT-10 e) IT-11 และ f) IT-14

หลังผ่านการออกซิเดชันที่ 800 องศาเซลเซียส ในอากาศชื้น เป็นเวลา 100 ชั่วโมง [6]

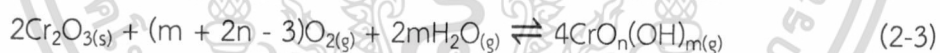
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-3 อัตราการระเหยของโครเมียมจากอัลลอยเกรดต่าง ๆ ที่ออกซิไดซ์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสในอากาศที่มีความชื้น 1.88 % [6]

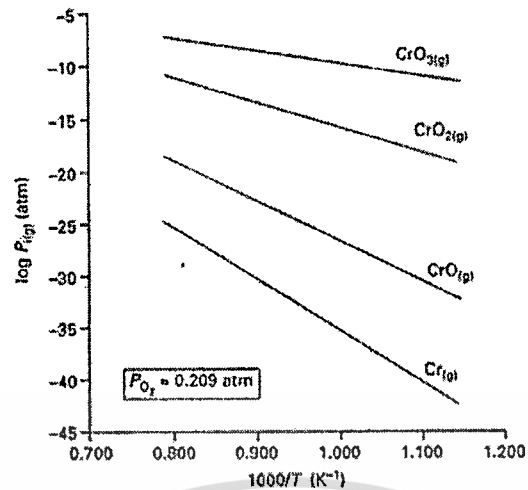
#### เทอร์โมไดนามิกส์ของระบบ Cr-O-H

แผ่นกันเซลล์ในด้านที่สัมผัสกับขั้วแคโทด ซึ่งมีอุณหภูมิทำงานสูง และมีกระแสของออกซิเจนไหลผ่านทำให้เกิดปฏิกิริยาการระเหยของโครเมียม จึงเกิดแก๊สของสารจำพวกโครเมียมขึ้น โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีดังนี้

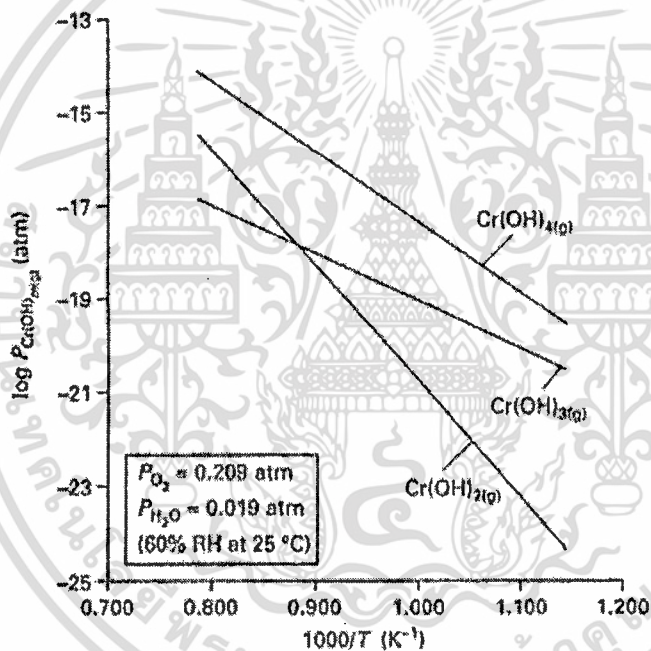


ความเสถียรทางเทอร์โมไดนามิกส์ของแก๊สเหล่านี้บนสเกลโครเมียม ภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิ 600 ถึง 1,000 องศาเซลเซียส แสดงในรูปที่ 2-4 ถึง 2-6 จะเห็นว่า  $\text{CrO}_3(\text{g})$ ,  $\text{Cr}(\text{OH})_4(\text{g})$ ,  $\text{CrO}_2(\text{OH})_2(\text{g})$  และ  $\text{CrO}_2(\text{OH})(\text{g})$  เป็นแก๊สที่มีความดันย่อยที่สมดุลสูงสุด ซึ่งจากสมการที่ (2-6) จะได้ว่า แก๊สเหล่านี้เป็นแก๊สที่เกิดมากที่สุด โดยแก๊สหลักที่เกิดขึ้นในออกซิเจนแห้งคือ  $\text{CrO}_3(\text{g})$  ส่วนแก๊สหลักที่เกิดขึ้นในออกซิเจนชื้นคือ  $\text{CrO}_2(\text{OH})_2(\text{g})$  ตามมาด้วย  $\text{CrO}_2(\text{OH})(\text{g})$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

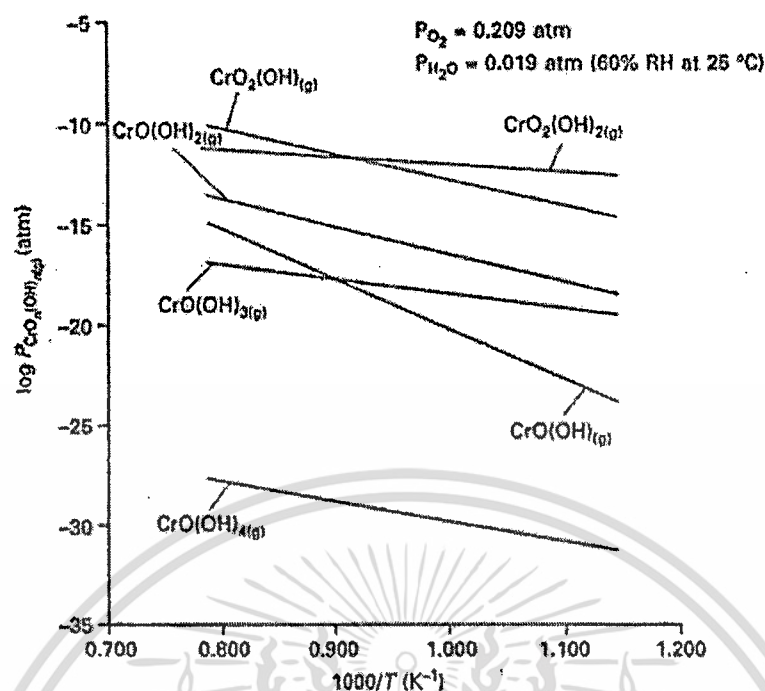


รูปที่ 2-4 ความดันย่อยที่สมดุลของแก๊สโครเมียมออกไซด์ (Cr oxides) ในอากาศแห้ง โดยเป็นฟังก์ชันกับเวลา [5]



รูปที่ 2-5 ความดันย่อยที่สมดุลของแก๊สโครเมียมไฮดรอกไซด์ (Cr hydroxides) ในอากาศ ที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 60 % (ที่ 25 องศาเซลเซียส) โดยเป็นฟังก์ชันกับเวลา [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-6 ความดันย่อยที่สมดุลของแก๊สโครเมียมออกซีไฮดรอกไซด์ (Cr oxyhydroxides) ในอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 60 % (ที่ 25 องศาเซลเซียส) โดยเป็นฟังก์ชันกับเวลา [5]

การระเหยของโครเมียมนั้นทำให้เกิดผลเสียต่อเซลล์ไฟฟ้าเคมีชนิดออกไซด์แข็ง 2 ประการ คือ

- ทำให้แผ่นกั้นเซลล์สึกกร่อน และนำไฟฟ้าได้แยลง
- ทำให้เกิดการสูญเสียชั้นโครเมีย ( $Cr_2O_{3(s)}$ ) ที่ขั้วแอโนดและแคโทด ซึ่งทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าของขั้วเสื่อมลง

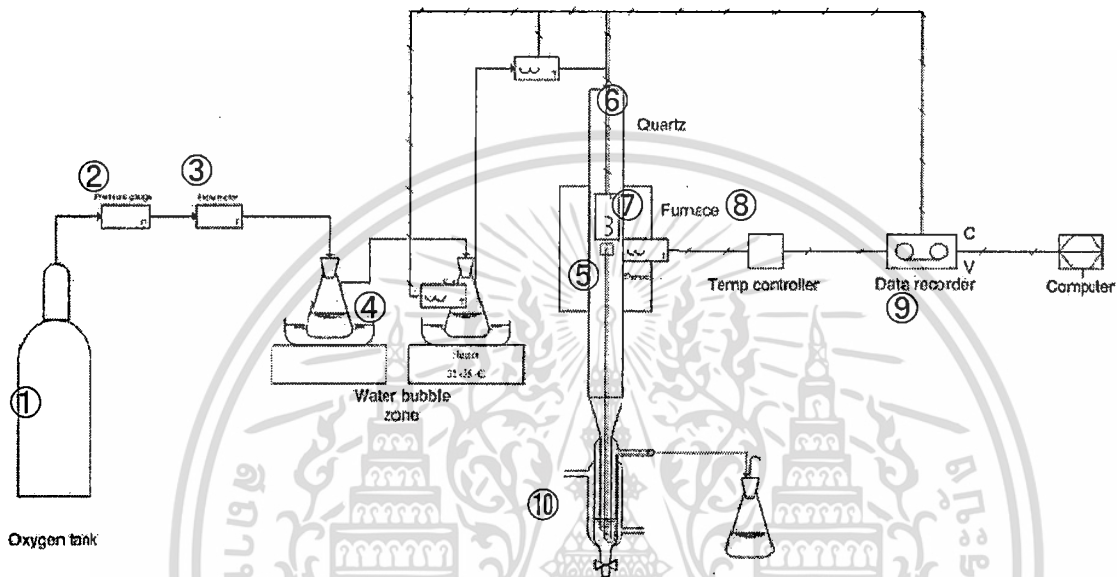
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 การออกแบบและประกอบชุดการทดลอง

##### 3.1.1 การออกแบบชุดการทดลอง

รูปที่ 3-1 แสดงชุดการทดลองที่ใช้ในการศึกษาการระเหยของโครเมียมที่อุณหภูมิสูง



รูปที่ 3-1 Pipe and Instruments Diagram (P&ID) ของชุดการทดลอง

แก๊สออกซิเจนจากถังบรรจุแก๊สออกซิเจน ( $O_2$  tank; ①) จะไหลผ่านอุปกรณ์วัดความดัน (Regulator; ②) และอุปกรณ์วัดอัตราการไหล (Flow meter; ③) เพื่อควบคุมอัตราการไหลตามที่กำหนด จากนั้นแก๊สออกซิเจนจะผ่านเข้าสู่ส่วนปรับความชื้น (Water Bubble Zone; ④) เพื่อทำให้เป็นแก๊สออกซิเจนชื้น โดยควบคุมอุณหภูมิของอุปกรณ์ทำความร้อน (Heater) ที่ 40 – 50 องศาเซลเซียส แก๊สออกซิเจนชื้นที่ได้จะไหลผ่านแผ่นโลหะตัวอย่าง (430 Stainless steel; ⑤) ที่แขวนไว้ในท่อควอตซ์ (Quartz tube; ⑥) โดยจะมีเตาเผาท่อ (Split Tube Furnace; ⑦) ให้ความร้อนแก่แผ่นโลหะตัวอย่าง (430 Stainless steel) เหมือนสภาวะการทำงานจริงที่มีอุณหภูมิสูง โดยมีตัวควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller; ⑧) ควบคุมอุณหภูมิตามที่กำหนด และส่งสัญญาณไปบันทึกที่เครื่องบันทึกข้อมูล (Data recorder; ⑨) โครเมียมที่ระเหยออกจากแผ่นโลหะตัวอย่างจะถูกควบแน่นในน้ำกลั่นที่บรรจุอยู่ในตัวควบแน่น (Condenser; ⑩) และโครเมียมที่ยังเหลืออยู่ก็จะถูกควบแน่นอีกครั้งในน้ำกลั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2 การประกอบชุดการทดลอง

จัดซื้ออุปกรณ์เพื่อจะนำมาใช้ประกอบชุดการทดลอง ดังนี้

#### 3.1.2.1 อุปกรณ์ใช้ไฟฟ้า

ตารางที่ 3-1 รายการอุปกรณ์ใช้ไฟฟ้าสำหรับชุดการทดลอง

อุปกรณ์	รายละเอียด	จำนวน
1) เตาเผา (Vertical split tube furnace)	Chamber - Operating Temperature 100 – 1,000 °C - Chamber Size 60 mm (Dia) x 300 mm - Heating element 2000 W - Power 220 V, 50 Hz	1
2) ตัวควบคุม (Controller)	Step Controller - Digital PID Control	1
3) เครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Data logger)	4 ช่องบันทึก บันทึกอุณหภูมิช่วง 25 - 1,000 °C Model : DBSA710 + DQL-PCSUITE	1
4) แผ่นให้ความร้อน (Hotplate)	Yellow MAG HS 7	1

#### 3.1.2.2 ท่อพท์และเครื่องแก้ว

- ขวดปริมาตร (Flask) ขนาด 1000 มิลลิลิตร จำนวน 2 ชุด
- ท่อควอตซ์ (Cone Quartz) เส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิลิตร หนา 2 มิลลิเมตร ยาว 60 เซนติเมตร จำนวน 1 ชุด
- ตัวควบแน่น (Condenser) จำนวน 1 ชุด
- ข้อต่อระหว่างควอตซ์กับตัวควบแน่น จำนวน 1 ชุด

#### 3.1.2.3 ท่อ วาล์ว และข้อต่อ

- ท่อทองแดงเส้นตรง มาตรฐาน ASTM B88
- วาล์วทองเหลืองสามทาง Switch (3-way) Valves Swagelok B-41XS2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.1.2.4 เครื่องมือวัด

ตารางที่ 3-2 รายการเครื่องมือวัดสำหรับชุดการทดลอง

อุปกรณ์	รายละเอียด	จำนวน
1) เครื่องวัดอุณหภูมิ (Thermocouple) ชนิด K	สายยาว 1.5 m Model : TC-CA-H(SOS)1/0.65 + Spot สายสแตนเลสซิลด์ถัก 1.5 m (Spot)	1
2) เครื่องวัดอุณหภูมิ (Thermocouple) ชนิด K	ท่อ SUS304 สายยาว 1.5 m Model : BKK-101-3.2X250 + 1.5 m ท่อ SUS304 ขนาด : 3.2X250 mm สายสแตนเลสซิลด์ถัก 1.5 m	1
3) เครื่องวัดอุณหภูมิ (Thermocouple) ชนิด K	ท่อ Inconel สายยาว 1.5 m Model : BKK-101-6X700 + 1.5 m ท่อ Sheath Inconel ขนาด : 6X700 mm สายสแตนเลสซิลด์ถัก 1.5 m	1
4) เครื่องวัดอัตราการไหล (Flow meter)	Flow rate : 20-200 ml/min Model : RK1250-B	1
5) เครื่องวัดอัตราการไหล (Flow meter)	Flow rate : 200-2,000 ml/min Model : RK1250-B	1
6) อุปกรณ์ควบคุมแรงดัน (Regulator)	HARRIS	1

## 3.1.2.5 อุปกรณ์อื่น ๆ

- เส้นใยเซรามิกกันความร้อน (Ceramic Fiber Blanket)
- อุปกรณ์ครอบเตาป้องกันการสัมผัสเตา (Safeguard)
- ท่อซิลิโคน (Silicone Tubing)
- จุกซิลิโคน (Stopper Silicone)

## 3.2 การทดลองการระเหยของโครเมียมจากเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI430 ที่อุณหภูมิสูง

## 3.2.1 อุปกรณ์

- 1) ชุดการทดลองการระเหยของโครเมียมที่อุณหภูมิสูง (รูปที่ 3-1)
- 2) แผ่นโลหะ 430 Stainless Steel
- 3) กระดาษทรายน้ำ หมายเลข 320 ถึง 1,200
- 4) เครื่องล้างความถี่สูง (Ultrasonic Cleaner)
- 5) เครื่องชั่งน้ำหนัก
- 6) เวอร์เนียร์ คาลิเปอร์ (Vernier Caliper)
- 7) หลอดหยด
- 8) ขวดแก้วสีชา (Amber Glass Bottle)
- 9) ปิเปตต์แบบใช้ตวง (Graduated Pipette)
- 10) ขวดวัดปริมาตร (Volumetric Flask) ขนาด 250 และ 1,000 มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูง และขอสงวนสิทธิ์ในการนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 11) ไยเซรามิกกันความร้อน (Ceramic Fiber Blanket)
- 12) จาระบีสูญญากาศ (Vacuum Grease)

### 3.2.2 สารเคมี

- 1) แก๊สออกซิเจน ความบริสุทธิ์ 99.98 %
- 2) น้ำกลั่น
- 3) กรดไฮโดรคลอริก 37 % w/v
- 4) เอทานอล

### 3.2.3 การทดลอง

ตอนที่ 1 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการระเหยของโครเมียม

- 1) ขัดแผ่นโลหะตัวอย่าง (430 Stainless Steel) ที่ได้รับการตัดและตะไบเรียบร้อยแล้ว ด้วยกระดาษทรายน้ำขนาดหยาบมาก (หมายเลข 320) ไปจนถึงขนาดละเอียด (หมายเลข 1,200) จนผิวหน้าของชิ้นงานเรียบ
- 2) นำแผ่นโลหะตัวอย่างไปล้างโดยการแช่ในเอทานอลด้วยเครื่องล้างความถี่สูงเป็นเวลา 10 นาที
- 3) นำแผ่นโลหะตัวอย่างที่ล้างแล้ว ไปซังด้วยเครื่องซังน้ำหนัก และบันทึกน้ำหนักของแผ่นโลหะตัวอย่างก่อนทำการทดลอง
- 4) วัดขนาดอย่างละเอียดของแผ่นโลหะตัวอย่างด้วยเวอร์เนียร์คาลิเปอร์ และบันทึกขนาด
- 5) ใส่ น้ำกลั่น ลงไปในตัวควบคุม และในขวดแก้วที่ต่อท่อออกมาจากตัวควบคุม
- 6) ใส่ชิ้นงานตัวอย่างเข้าไปในชุดการทดลองการระเหยของโครเมียมที่อุณหภูมิสูง โดยเชื่อมต่อแก้วและควอทซ์ทุกข้อต่อให้ด้วยจาระบีสูญญากาศ เพื่อป้องกันการรั่วซึมของแก๊ส
- 7) ใส่ใยเซรามิกกันความร้อนไว้บนเตาเผา เพื่อป้องกันการพาความร้อนจากเตาขึ้นมาสู่ฝาแก้วครอบควอทซ์ซึ่งทนความร้อนได้ต่ำกว่าควอทซ์
- 8) ตั้งโปรแกรมในตัวควบคุมอุณหภูมิ โดยกำหนดให้ทำอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 9) เปิดแก๊สออกซิเจน โดยปรับอัตราการไหลของแก๊สให้เป็น 1 ลิตรต่อนาที
- 10) สั่งให้ตัวควบคุมอุณหภูมิทำงาน พร้อมทั้งสั่งให้เครื่องบันทึกอุณหภูมิเริ่มทำงาน
- 11) ปิดแก๊สออกซิเจนเมื่อครบตัวควบคุมอุณหภูมิทำงานครบตามเวลาที่กำหนด จากนั้นรอให้ชุดอุปกรณ์การทดลองเย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิห้อง
- 12) เมื่อชุดอุปกรณ์การทดลองเย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิห้อง เก็บสารตัวอย่างที่อยู่ในตัวควบคุม (“ตัวอย่างที่ 1”) และเก็บสารตัวอย่างจากขวดแก้วที่ต่อท่อมาจากตัวควบคุม (“ตัวอย่าง 2”) ถอดฝาแก้วครอบควอทซ์ออก
- 13) นำแผ่นโลหะตัวอย่างออกมา ซังน้ำหนัก และบันทึกน้ำหนักของแผ่นโลหะหลังทำการทดลอง
- 14) ใช้กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ปริมาตร 200 มิลลิลิตรล้างภายในท่อควอทซ์ ข้อต่อแก้ว และตัวควบคุม เก็บเป็นสารตัวอย่าง (“น้ำล้างครั้งที่ 1”)
- 15) ทำเช่นเดียวกับข้อ 14) อีกสามครั้ง เก็บเป็นสารตัวอย่าง (“น้ำล้างครั้งที่ 2” “น้ำล้างครั้งที่ 3” และ “น้ำล้างครั้งที่ 4” ตามลำดับ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

16) นำสารตัวอย่าง “น้ำล้างครั้งที่ 1” ปรับปริมาตรด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ให้เป็น 250 มิลลิลิตร

17) นำสารตัวอย่าง “ตัวอย่าง 1” และ “ตัวอย่าง 2” มารวมกัน และปรับให้เป็นสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.1 โมลาร์

18) นำสารตัวอย่างในข้อ 17) รวมกับสารตัวอย่างที่เหลือ คือ “น้ำล้างครั้งที่ 2” “น้ำล้างครั้งที่ 3” และ “น้ำล้างครั้งที่ 4” รวมกัน และปรับปริมาตรให้เป็น 1,000 มิลลิลิตร

19) เก็บสารตัวอย่างที่ปรับปริมาตรแล้วในข้อที่ 16) และ 18) ใส่ขวดแก้วสีชา

20) นำสารตัวอย่างในข้อ 19) ส่งไปยังหน่วยงานภายนอก เพื่อตรวจหาความเข้มข้นของโครเมียมในสารตัวอย่างด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma (ICP)

21) ทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 1) ถึง 20) แต่ในข้อที่ 8) เปลี่ยนอุณหภูมิให้เป็น 600 800 และ 900 องศาเซลเซียสตามลำดับ

ตอนที่ 2 อิทธิพลของอัตราการไหลของแก๊สที่มีผลต่อการระเหยของโครเมียม

ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อที่ 1) ถึง 20) ในตอนที่ 1 แต่ในข้อที่ 9) เปลี่ยนอัตราการไหลของแก๊สให้เป็น 0.2 0.4 1.4 และ 1.6 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ



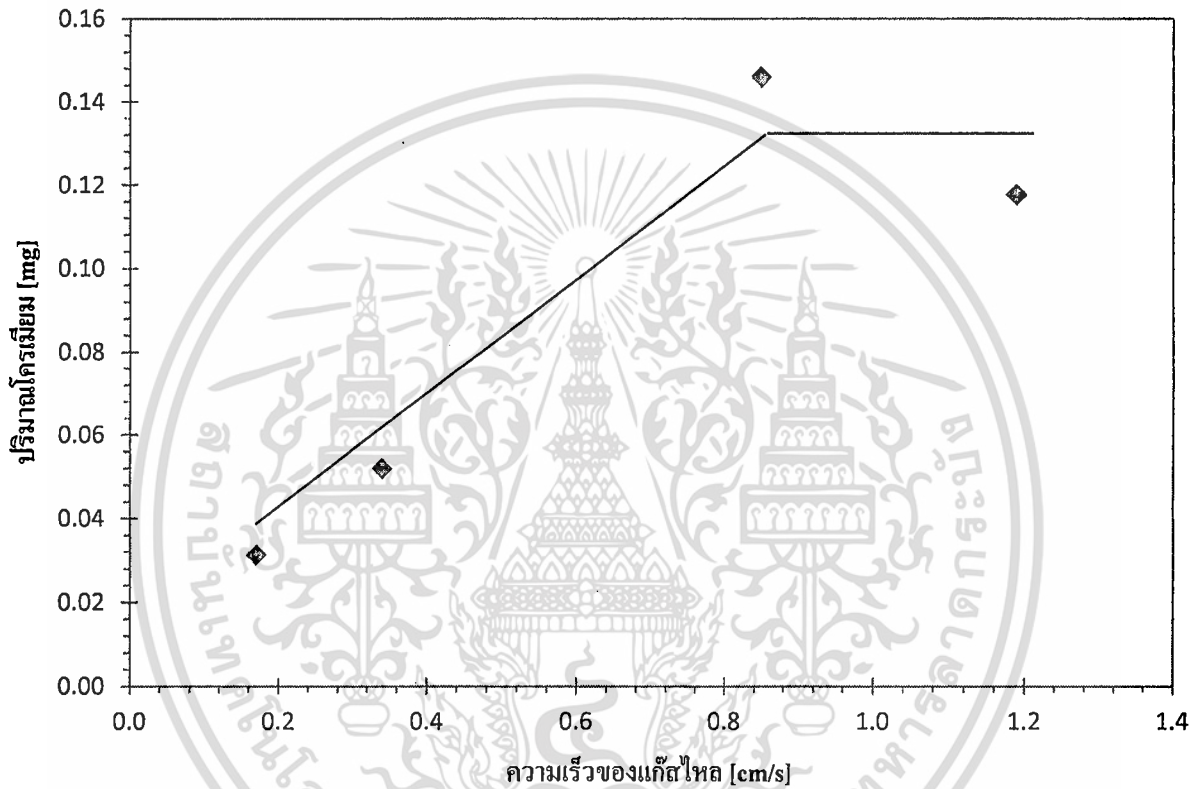
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 4.1 อิทธิพลของอัตราการไหลของแก๊สที่มีผลต่อการระเหยของโครเมียม

รูปที่ 4-1 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการไหลเชิงเส้นของแก๊สออกซิเจนชั้นกับปริมาณโครเมียม ที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ 4-1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของแก๊สไหลกับปริมาณโครเมียมที่ระเหยในแก๊สออกซิเจนชั้น 10 % ที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 24 ชั่วโมง

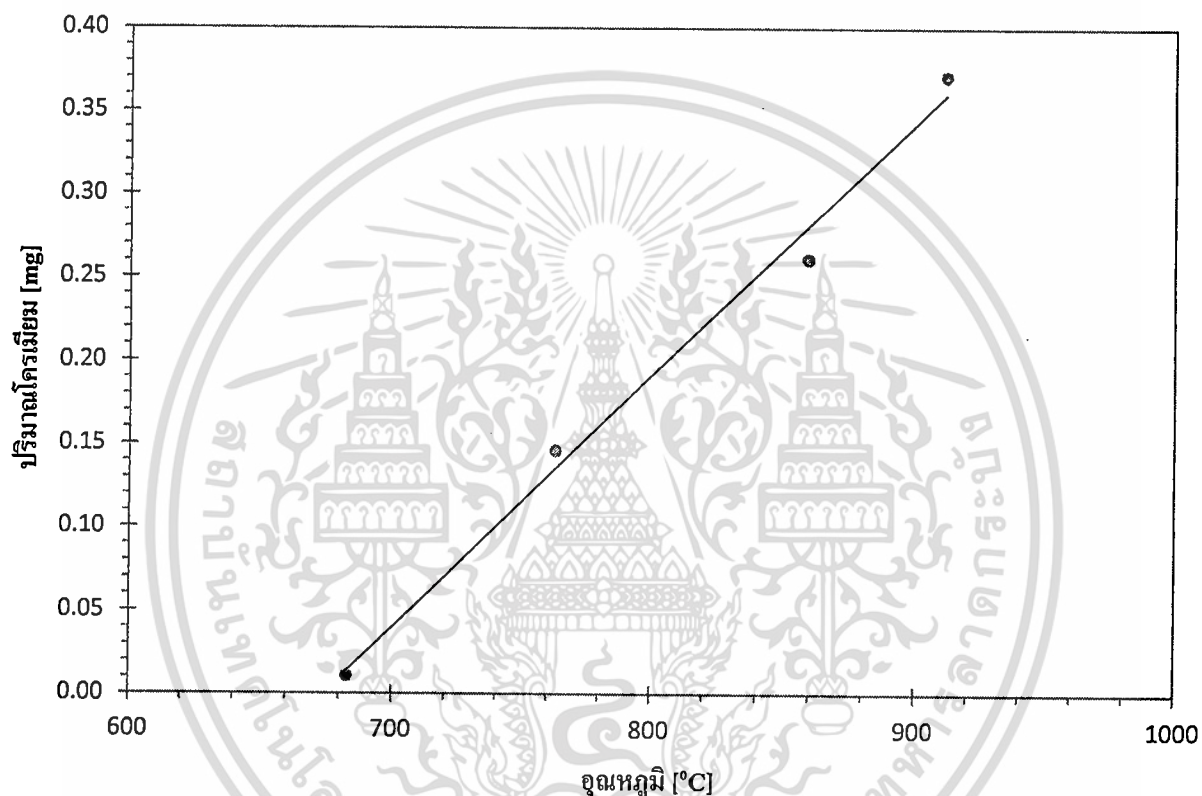
จากรูปที่ 4-1 จะเห็นได้ว่าเมื่อความเร็วของแก๊สไหลเพิ่มขึ้น ปริมาณโครเมียมที่ระเหยจะเพิ่มขึ้นไปจนถึงค่าหนึ่ง จากนั้นมีแนวโน้มที่จะคงที่ แสดงให้เห็นว่าความเร็วของแก๊สไหล จะมีผลต่อการระเหยของโครเมียมจากสเกลโครเมียม แต่เมื่อความเร็วถึงค่าหนึ่ง จะไม่มีผลต่อการระเหยของโครเมียมจากสเกลโครเมียม

ในช่วงที่ปริมาณของโครเมียมที่ระเหยเพิ่มขึ้นตามความเร็วของแก๊สไหล เกิดขึ้นเนื่องจากอัตราการระเหยของโครเมียมยังถูกจำกัดด้วยการแพร่กล่าวคือ อัตราการแพร่ระหว่างแก๊สออกซิเจนจากกระแสผ่านชั้นฟิล์มบนพื้นผิวของโลหะสูงกว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยา ความเร็วของแก๊สไหลจึงยังมีผลต่อปริมาณของโครเมียมที่ระเหย แต่เมื่อความเร็วของแก๊สไหลถึงค่าหนึ่ง ปริมาณการระเหยของโครเมียมจะคงที่ ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากอัตราการระเหยของโครเมียมถูกจำกัดด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันของโครเมียม กล่าวคืออัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงกว่าอัตราการแพร่ระหว่างแก๊สออกซิเจนจากกระแสผ่านชั้นฟิล์มบนพื้นผิวของโลหะ ความเร็วของแก๊สไหลจึงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่มีผลต่อปริมาณโครเมียมที่ระเหย ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยเรื่องอิทธิพลของอัตราการไหลที่มีต่ออัตราการระเหยโครเมียมของ Hideto Kurokawa และคณะ [7]

#### 4.2 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการระเหยของโครเมียม

รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณโครเมียมที่ระเหยออกมาที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1 ลิตรต่อนาที ซึ่งเป็นช่วงที่อัตราการระเหยของโครเมียมอยู่ในช่วงที่จำกัดด้วยจลนพลศาสตร์ โดยความชื้นของแก๊สออกซิเจนคือ 10 % ระยะเวลา 24 ชั่วโมง

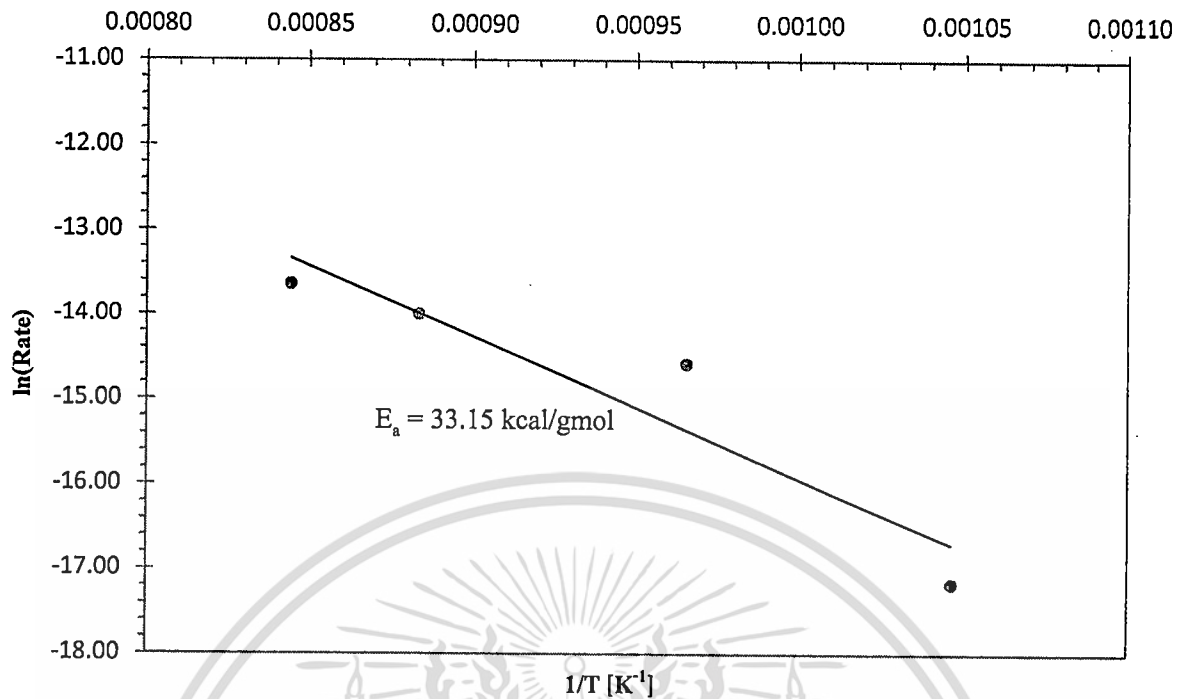


รูปที่ 4-2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณโครเมียมที่ระเหยออกมาที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1 ลิตรต่อนาที ความชื้น 10 % ระยะเวลา 24 ชั่วโมง

จากรูปที่ 4-2 จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ปริมาณโครเมียมที่ระเหยจะเพิ่มขึ้น แสดงว่าอุณหภูมิมิมีผลต่อการระเหยของโครเมียมจากสเกล โครเมียมและเป็นไปตามกฎทางเทอร์โมไดนามิกส์

สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการระเหยของโครเมียมกับส่วนกลับของอุณหภูมิดังแสดงในรูปที่ 4-3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-3 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาการระเหยของโครเมียมที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1 ลิตรต่อนาที ความชื้น 10 % ระยะเวลา 24 ชั่วโมง

กราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 4-3 เป็นกราฟเส้นตรงซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ของกราฟได้ดังสมการที่ (4.1)

$$\ln(\text{Rate}) = \ln k - \frac{E_a}{RT} \quad (4-1)$$

เมื่อ  $E_a$  คือ พลังงานกระตุ้น (Activation Energy)  
 $R$  คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (Gas Constant) เท่ากับ 8.3144 J/gmol·K  
 $T$  คือ อุณหภูมิ (Temperature)

ค่าความชันของกราฟเราสามารถคำนวณค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยารวมของการระเหยของโครเมียมได้ดังสมการ

$$\text{slope} = -\frac{E_a}{R} = -16,684 \text{ K} \quad (4-2)$$

นั่นคือพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาการระเหยของโครเมียม ( $E_a$ ) มีค่าประมาณ 33.15 กิโลแคลอรีต่อกรัมโมลนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองหาปริมาณโครเมียมที่ระเหยจากแผ่นโลหะตัวอย่าง (430 Stainless Steel) ที่อุณหภูมิสูง ในแก๊สออกซิเจนไหล ที่มีความชื้น 10 % ระยะเวลา 24 ชั่วโมง โดยปรับเปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 683 763 859 และ 911 องศาเซลเซียส และปรับเปลี่ยนความเร็วของแก๊สไหลเป็น 0.17 0.34 0.85 และ 1.19 เซนติเมตรต่อวินาที พบว่าอุณหภูมิมีผลต่ออัตราการระเหยของโครเมียม เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ปริมาณโครเมียมที่ระเหยก็จะเพิ่มขึ้นตาม และมีพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาเท่ากับ 33.15 กิโลแคลอรีต่อกรัมโมล และพบว่าความเร็วของแก๊สไหลจะมีผลต่ออัตราการระเหยของโครเมียมในช่วงที่การระเหยยังถูกจำกัดด้วยการแพร่ แต่เมื่อความเร็วของแก๊สไหลสูงถึงค่าหนึ่ง อัตราการระเหยของโครเมียมจะคงที่ เนื่องจากการระเหยของโครเมียมในช่วงนั้นถูกจำกัดด้วยอัตราการเกิดปฏิกิริยาของการระเหยของโครเมียมจากสเกลโครเมียม

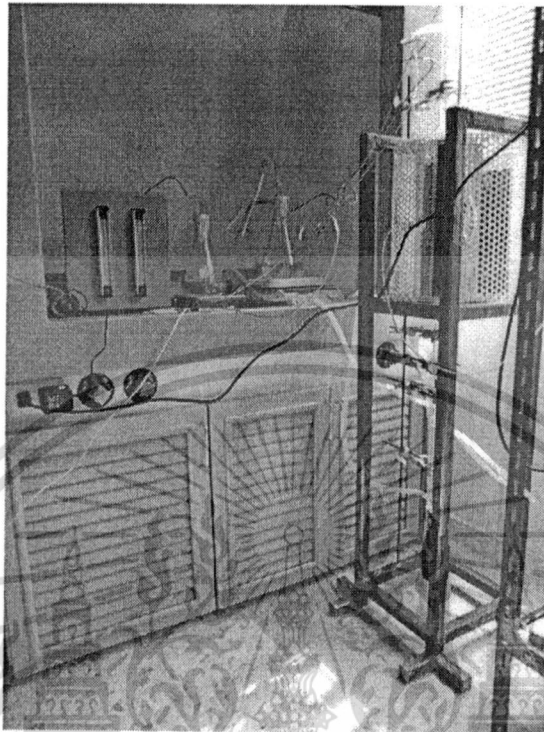
5.2 ข้อเสนอแนะ

สำหรับการศึกษาเพิ่มเติม ควรทำการทดลองเพิ่มเติมโดยปรับเปลี่ยนความเร็วของแก๊สไหลในช่วงจุดเปลี่ยนจากการถูกจำกัดด้วยการแพร่เป็นช่วงการถูกจำกัดด้วยอัตราการเกิดปฏิกิริยาการระเหยของโครเมียมจากสเกลโครเมียม เพื่อหาความเร็วของจุดเปลี่ยนที่แน่ชัด

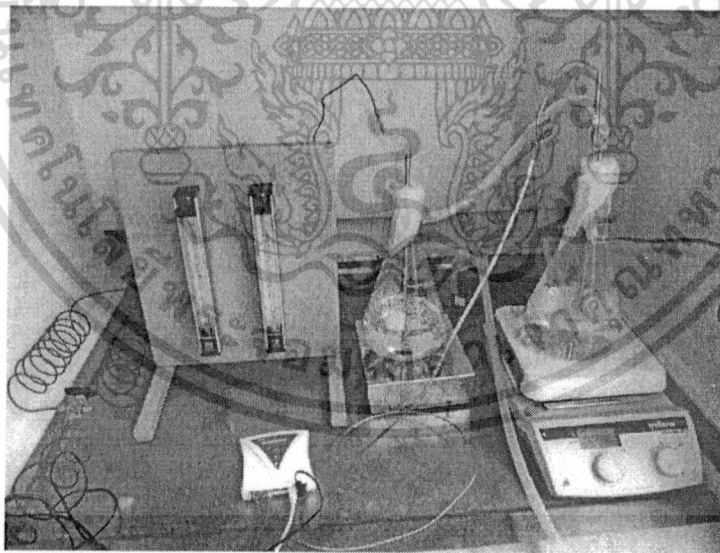


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค  
รูปภาพชุดการทดลอง

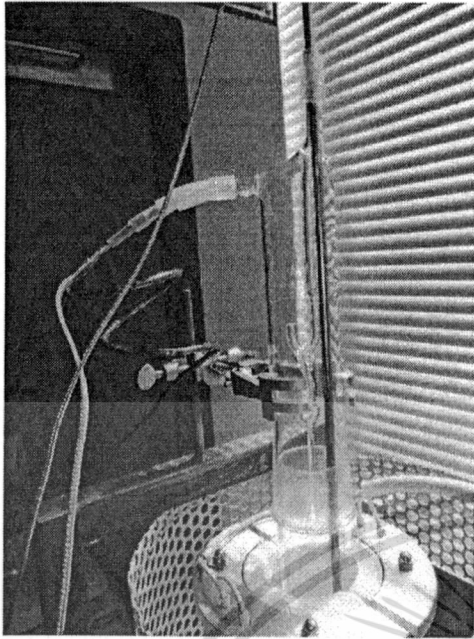


รูปที่ ค-1 ชุดการทดลอง

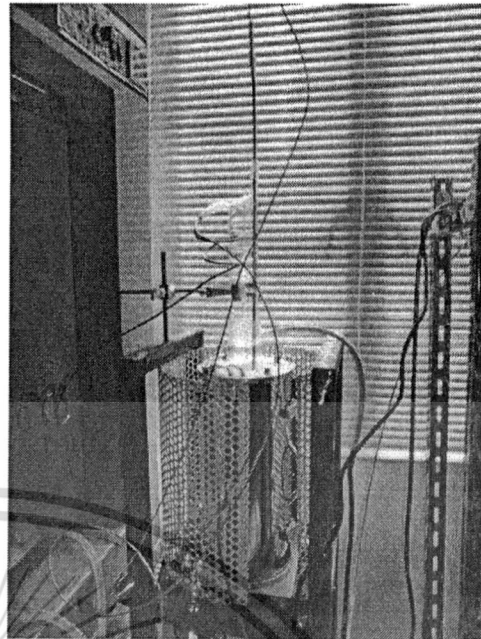


รูปที่ ค-2 เครื่องวัดอัตราการไหล ส่วนปรับความชื้น และเครื่องบันทึกอุณหภูมิ

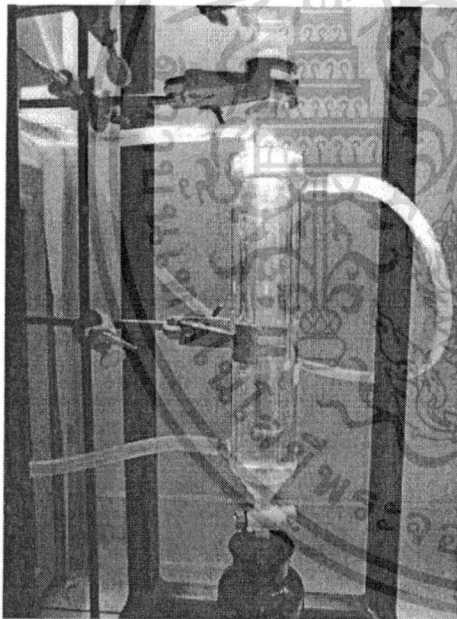
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



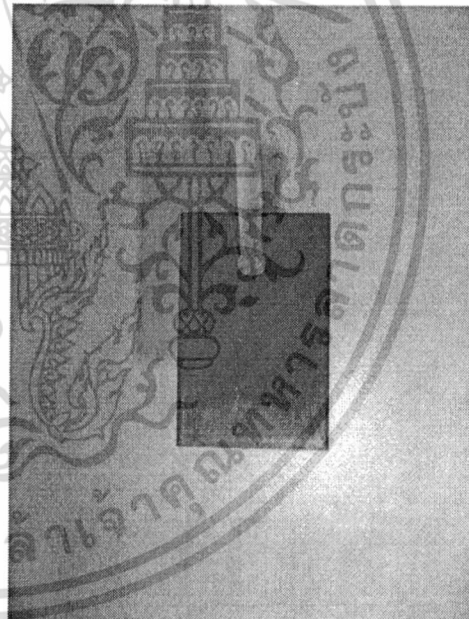
รูปที่ ค-3 ฝาแก้วครอบควอทซ์ที่ต่อกับเทอร์โม-  
คัปเปิลและท่อแก๊ส



รูปที่ ค-4 เต้าเผา



รูปที่ ค-5 เครื่องควบคุมแรงดัน



รูปที่ ค-6 ชิ้นงานที่ผ่านการทดลองแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้