

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การระเหยของโครเมียมจากแผ่นกั้นเซลล์ในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง



T119512



เลขหมู่..... 5
เลขทะเบียน..... 119512
วัน,เดือน,ปี..... - 8 S.A. 2554

b. 100654840
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Chromium Vaporization from Interconnects in Solid Oxide Fuel Cell



**THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2010**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การระเหยของ โครเมียมจากแผ่นกั้นเซลล์ในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง
โดย นายจักรพันธ์ เฟื่องฟูง
นายหฤษฎ์ หิรัญญาภินันท์
นายอดิศักดิ์ กัณธิดา
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร. วลัยรัตน์ จันทระอัมพร
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์

วลัยรัตน์ จันทระอัมพร

ประธานกรรมการ

(ดร. วลัยรัตน์ จันทระอัมพร)

กรรมการ

(รศ.ดร. ประกอบ กิจไชยา)

สันติ วัฒนานุสรณ์

กรรมการ

(ดร. สันติ วัฒนานุสรณ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	การระเหยของโครเมียมจากแผ่นกั้นเซลล์ในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง
โดย	นายจักรพันธ์ เฟื่องฟูง นายหฤษฎ์ หิรัญญาภินันท์ นายอดิศักดิ์ กันธิดา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.วลัยรัตน์ จันทระอัมพร
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา	2553

บทคัดย่อ

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง (Solid oxide fuel cell; SOFC) เป็นเซลล์เชื้อเพลิงชนิดหนึ่งที่มีประสิทธิภาพทางพลังงานสูง และกำลังได้รับการพัฒนาอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน แต่ปัญหาหลักอย่างหนึ่งของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้คือการเสื่อมสภาพของแผ่นกั้นเซลล์ (Interconnect) ในเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งเป็นผลให้เซลล์เชื้อเพลิงมีอายุการใช้งานสั้นลง โดยสาเหตุของการเสื่อมสภาพของแผ่นกั้นเซลล์นั้นเกิดจากการระเหยของโครเมียมจากสเกลโครเมียมบนแผ่นกั้นเซลล์ งานวิจัยนี้ทำการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและความเร็วของแก๊สไหลที่มีต่อการระเหยของโครเมียมจากสเกลโครเมียมบนแผ่นกั้นเซลล์ที่อุณหภูมิสูง โดยใช้อัลลอยเกรด 430 Stainless Steel เป็นแผ่นกั้นเซลล์ตัวอย่าง ในแก๊สออกซิเจนไหลที่มีความชื้น 10% ระยะเวลา 24 ชั่วโมง จากผลการทดลองพบว่าอัตราการระเหยของโครเมียมจะแปรผันตรงต่ออุณหภูมิ ส่วนความเร็วของแก๊สไหลในช่วงแรกจะแปรผันตรงต่ออัตราการระเหยของโครเมียม แต่เมื่อความเร็วของแก๊สไหลถึงจุดหนึ่งอัตราการระเหยของโครเมียมจะเริ่มคงที่ ซึ่งเป็นช่วงที่การระเหยของโครเมียมถูกจำกัดด้วยอัตราการเกิดปฏิกิริยาของการระเหยของโครเมียมจากสเกลโครเมียม

Report Title	Chromium vaporization from interconnects in solid oxide fuel cell
By	Mr. Jakrapan Fuangfung Mr. Harit Hirayaphinant Mr. Adisak Guntida
Advisor	Dr. Walairat Chandra-ambhorn
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Chemical Engineering
Year	2010

Abstract

Solid oxide fuel cell is a kind of high energy efficient fuel cells that has been widely developed. However one of main problems is degradation of interconnect of the fuel cell. This problem causes shorter lifetime of the fuel cell. Primary cause of degradation of interconnect is vaporization of chromium from chromia scale on interconnect. This research focuses on the investigation of the effect of temperature and velocity of flow gas on chromium vaporization from chromia scale on interconnect at high temperatures. 430 Stainless steel was selected to represent interconnects. The experiments were operated in flow oxygen with 10 % water for 24 hours. The results show that the chromium vaporization rates increase 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 vaporization reaction limited range.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ดร. วลัยรัตน์ จันทรัมย์พร อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาโท ที่ช่วยชี้แนะ ให้ความรู้ และคำแนะนำ พร้อมทั้งให้ความช่วยเหลือตลอดการดำเนินงานวิจัยนี้ ทำให้การจัดทำปริญญาโทเล่มนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ให้ความรู้ คำแนะนำ และความช่วยเหลือในการดำเนินงานวิจัยนี้ ให้ลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. สมฤกษ์ จันทรัมย์พร หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและเทคโนโลยีการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ช่วยให้ความรู้ และสาริต การเตรียมชิ้นงานแผ่นโลหะตัวอย่าง เพื่อนำมาใช้ในปริญญาโทนี้

ขอขอบพระคุณ คุณประ โยชน์ ตันกันภัย ที่ช่วยจัดการงานเกี่ยวกับเครื่องแก้ว ทั้งทำเครื่องแก้วซึ่งเป็นรูปทรงที่ออกแบบเฉพาะสำหรับงานวิจัยนี้ และช่วยแก้ปัญหาล่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับเครื่องแก้วและควอทซ์ ทำให้การดำเนินงานวิจัยนี้ให้ผ่านพ้นอุปสรรคไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ บริษัทห้องปฏิบัติการกลาง ประเทศไทย จำกัด ที่ให้คำแนะนำในส่วนของเครื่องมือการวิเคราะห์ และข้อมูลที่เป็นประโยชน์ ตลอดถึงผลการตรวจวัดที่มีความแม่นยำในการดำเนินโครงการวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่เอื้ออำนวยสถานที่ และอุปกรณ์ ในการเตรียมชิ้นงานสำหรับการดำเนินโครงการวิจัยนี้

และสุดท้าย ขอขอบคุณ เพื่อน ๆ และพี่ ๆ สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้กำลังใจ และให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์มาตลอดการดำเนินงานวิจัยนี้

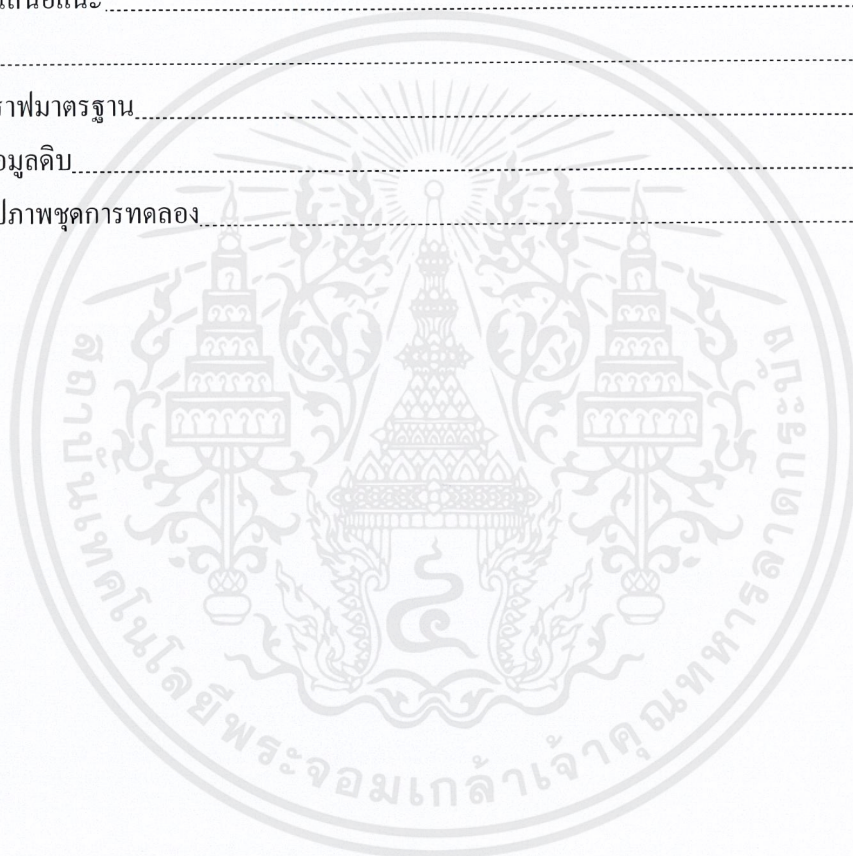
สารบัญ

หัวข้อ	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูปภาพ.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ของงานวิจัย.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cells; FCs).....	3
2.2 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง (Solid Oxide Fuel Cells; SOFCs).....	4
2.3 แผ่นกั้นเซลล์ (Interconnects).....	8
2.4 การระเหยของโครเมียม (Cr Vaporization).....	9
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	15
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย.....	19
3.1 การออกแบบและประกอบชุดการทดลอง.....	19
3.2 การทดลองการระเหยของโครเมียมจาก 430 Stainless Steel ที่อุณหภูมิสูง.....	22
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	25
4.1 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการระเหยของโครเมียม.....	25
4.2 อิทธิพลของอัตราการไหลของแก๊สที่มีผลต่อการระเหยของโครเมียม.....	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หัวข้อ	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....	28
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	28
5.2 วิจารณ์การทดลอง.....	28
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	28
เอกสารอ้างอิง.....	29
ภาคผนวก ก กราฟมาตรฐาน.....	31
ภาคผนวก ข ข้อมูลดิบ.....	32
ภาคผนวก ค รูปภาพชุดการทดลอง.....	33



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

<u>ชื่อตาราง</u>	<u>หน้า</u>
ตารางที่ 1-1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของอัลลอยที่มีโครเมียมเป็นองค์ประกอบหลักและโลหะ เฟอร์ริติกที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma – Optical Emission Spectroscopy (ICP-OES).....	10
ตารางที่ 3-1 รายการอุปกรณ์ใช้ไฟฟ้าสำหรับชุดการทดลอง.....	20
ตารางที่ 3-2 รายการเครื่องมือวัดสำหรับชุดการทดลอง.....	21
ตารางที่ ข-1 แสดงข้อมูลทางกายภาพของแผ่นโลหะตัวอย่าง (430 Stainless Steel) ที่ใช้ในการทดลอง แต่ละครั้ง.....	32
ตารางที่ ข-2 แสดงปริมาณโครเมียมที่ระเหยจากแผ่นโลหะตัวอย่างสำหรับการทดลองที่ปรับเปลี่ยน อุณหภูมิ.....	32
ตารางที่ ข-3 แสดงปริมาณโครเมียมที่ระเหยจากแผ่นโลหะตัวอย่างสำหรับการทดลองที่ปรับเปลี่ยน อัตราการไหล.....	32

สารบัญรูปภาพ

ชื่อรูป	หน้า
รูปที่ 2-1 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง.....	5
รูปที่ 2-2 เซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็งแบบท่อ (Tubular SOFCs).....	6
รูปที่ 2-3 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบระนาบ (Planar SOFCs).....	7
รูปที่ 2-4 ภาพตัดขวางของโลหะเฟอร์ริตกรวดต่าง ๆ จากเครื่อง Scanning Electron Microscope.....	10
รูปที่ 2-5 อัตราการระเหยของโครเมียมจากอัลลอยกรวดต่าง ๆ ที่ออกซิไดซ์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ในอากาศที่มีความชื้น 1.88 %.....	11
รูปที่ 2-6 ความดันย่อยที่สมดุลของแก๊สโครเมียมออกไซด์ (Cr oxides) ในอากาศโดยเป็นฟังก์ชันกับเวลา.....	12
รูปที่ 2-7 ความดันย่อยที่สมดุลของแก๊สโครเมียมไฮดรอกไซด์ (Cr hydroxides) ในอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 60 % (ที่ 25 องศาเซลเซียส) โดยเป็นฟังก์ชันกับเวลา.....	13
รูปที่ 2-8 ความดันย่อยที่สมดุลของแก๊สโครเมียมออกไซด์ไฮดรอกไซด์ (Cr oxyhydroxides) ในอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 60 % (ที่ 25 องศาเซลเซียส) โดยเป็นฟังก์ชันกับเวลา.....	13
รูปที่ 2-9 กราฟระหว่างความดันย่อยของแก๊สจำพวกโครเมียมที่เกิดขึ้นในด้านแคโทดกับความดันย่อยของน้ำที่ 800 องศาเซลเซียส.....	14
รูปที่ 2-10 กราฟระหว่างความดันย่อยของแก๊สจำพวกโครเมียมที่เกิดขึ้นในของผสมระหว่างไฮโดรเจนและน้ำ กับความดันย่อยของน้ำที่ 800 องศาเซลเซียส.....	14
รูปที่ 3-1 Piping and Instrumentation Diagram (P&ID) ของชุดการทดลอง.....	19
รูปที่ 4-1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณโครเมียมที่ระเหยออกมาที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1 ลิตรต่ออนาที ความชื้น 10 % ระยะเวลา 24 ชั่วโมง.....	25
รูปที่ 4-2 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1 ลิตรต่ออนาที ความชื้น 10 % ระยะเวลา 24 ชั่วโมง.....	26
รูปที่ 4-3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของแก๊สไหลกับปริมาณโครเมียมที่ระเหยในแก๊สออกซิเจนชื้น 10 % ที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 24 ชั่วโมง.....	27
รูปที่ ก-1 กราฟมาตรฐานของอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน ที่ความดัน 2.5 บาร์.....	31
รูปที่ ค-1 ชุดการทดลอง.....	33
รูปที่ ค-2 เครื่องวัดอัตราการไหล ส่วนปรับความชื้น และเครื่องบันทึกอุณหภูมิ.....	33

สารบัญรูปรภาพ (ต่อ)

ชื่อรูป	หน้า
รูปที่ ค-3 ฝาแก้วครอบควอทซ์ที่ต่อกับเทอร์โมคัปเปิลและท่อแก๊ส.....	34
รูปที่ ค-4 เตาเผา.....	34
รูปที่ ค-5 ตัวควมแน่น.....	34
รูปที่ ค-6 แผ่นโลหะ 430 Stainless Steel ที่ผ่านการทำการทดลองแล้ว.....	34



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันปัญหาวิกฤตทางพลังงานและมลภาวะกำลังเป็นปัญหาที่สำคัญของโลก เนื่องจากแหล่งพลังงานหลักของโลก คือพลังงานที่ได้มาจากปิโตรเลียม ซึ่งการเปลี่ยนเชื้อเพลิงจากปิโตรเลียมเป็นพลังงาน มักจะต้องใช้การสันดาป ซึ่งมลภาวะจากการสันดาปนั้น เป็นสาเหตุหลักของภาวะเรือนกระจก (Green House Effect) ที่กำลังเป็นปัญหาอยู่ในปัจจุบัน อีกทั้งปริมาณสำรองปิโตรเลียมกำลังจะหมดไปในอนาคตอันใกล้ ดังนั้นนักวิจัยจึงต้องเร่งหาพลังงานทดแทนที่มีความเหมาะสมในการใช้งานทั้งในด้านของประสิทธิภาพการทำงาน ด้านเศรษฐศาสตร์ และด้านการใช้งาน ซึ่งเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cells; FCs) เป็นหนึ่งในเทคโนโลยีที่กำลังได้รับความสนใจจากนักวิจัยหลากหลายสาขา เซลล์เชื้อเพลิงเป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานเคมีให้เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยไม่ต้องผ่านการสันดาป จึงแทบไม่ก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพทางพลังงานสูงกว่าเครื่องยนต์สันดาปอีกด้วย ดังนั้นเซลล์เชื้อเพลิงจึงเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีที่น่าสนใจในการใช้แก้ปัญหาทางพลังงาน และสิ่งแวดล้อมในอนาคต

เซลล์เชื้อเพลิงเป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนเชื้อเพลิงให้เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง โดยใช้หลักการทางไฟฟ้าเคมี เซลล์เชื้อเพลิงที่ได้รับการพัฒนาในปัจจุบันมีหลายชนิด และหนึ่งในชนิดที่ได้รับความสนใจมากที่สุด คือเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง (Solid Oxide Fuel Cells; SOFCs) ซึ่งเป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่มีประสิทธิภาพสูง และสามารถใช้เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าสำหรับโรงไฟฟ้าได้ โดยการเพิ่มความต่างศักย์และพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์ให้มากขึ้น ทำได้โดยใช้แผ่นกั้นเซลล์ (Interconnects) เชื่อมเซลล์เชื้อเพลิงเซลล์เดี่ยว (Single Cell) หลาย ๆ เซลล์เข้าด้วยกันเป็นอนุกรม เป็นชุดเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell Stack) ซึ่งมีการออกแบบรูปร่างของชุดเซลล์ (Stack Designs) ที่แตกต่างกันออกไปตามลักษณะการใช้งาน ทำให้เซลล์เชื้อเพลิงที่ได้มีลักษณะที่แตกต่างกันออกไปหลายรูปทรง ตัวอย่างที่เหมาะสมสำหรับใช้ในโรงงานไฟฟ้า คือเซลล์แบบระนาบ (Planar Cells) โดยส่วนประกอบของเซลล์จะมีลักษณะเป็นแผ่นเรียงซ้อนกันเป็นชั้น ๆ ซึ่งผลิตได้ง่ายกว่าและมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่าเซลล์รูปทรงอื่น

ปัญหาหลักที่สำคัญของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบระนาบ (Planar SOFCs) คือในขณะที่เซลล์เชื้อเพลิงทำงาน เซลล์จะมีอุณหภูมิสูง และที่ฝั่งแคโทดจะมีสถานะที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้เกิดการระเหยของโครเมียมจากสเกลโครเมียม (Chromia Scales; Cr_2O_3) บนพื้นผิว

ของแผ่นกั้นเซลล์ที่เป็นอัลลอย ซึ่งชั้นของสเกลนี้เป็นชั้นที่ช่วยป้องกันการกัดกร่อนของแผ่นกั้นเซลล์ ดังนั้นการสูญเสียของค้ประกอบในสเกลบนผิวของแผ่นกั้นเซลล์นั้น ทำให้แผ่นกั้นเซลล์สึกกร่อน ส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าของแผ่นกั้นเซลล์ค่อยลง อีกทั้งยังทำให้ขั้วแคโทด (Cathode) เสื่อมสภาพลงอีกด้วย เซลล์เชื้อเพลิงจึงมีอายุการใช้งานที่สั้นลง ดังนั้นการลดการระเหยของโครเมียมจากสเกลโครเมียมบนแผ่นกั้นเซลล์ คือสิ่งที่จะช่วยยืดอายุการใช้งานของเซลล์เชื้อเพลิงได้ ซึ่งการลดการระเหยของโครเมียม นั้น ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น วัสดุที่ใช้เป็นแผ่นกั้นเซลล์ สภาพที่ขั้วแคโทด และการใช้เทคโนโลยีเคลือบผิว โดยงานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาการระเหยของโครเมียมขั้นพื้นฐาน ซึ่งสามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนางานวิจัยในระดับสูงต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาการระเหยของโครเมียมบนพื้นผิวของแผ่นอัลลอยที่จำลองสถานะให้เหมือนกับด้านแคโทดของแผ่นกั้นเซลล์ในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

วัตถุประสงค์การระเหยของโครเมียม โดยปรับเปลี่ยนตัวแปรคือ อุณหภูมิ และความเร็วของแก๊สไหล โดยใช้อัลลอยเกรด 430 Stainless Steel เป็นตัวอย่างของแผ่นกั้นเซลล์

1.4 ประโยชน์ของงานวิจัย

- ทำให้ทราบถึงหลักการระเหยของโครเมียมบนพื้นผิวของแผ่นกั้นเซลล์
- ทำให้ทราบถึงอัตราการระเหยของโครเมียมบนพื้นผิวของแผ่นกั้นเซลล์ที่สถานะแตกต่างกัน
- เป็นข้อมูลในการปรับปรุงวัสดุที่ใช้ทำแผ่นกั้นเซลล์ในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งให้สามารถใช้งานได้ยาวนาน และมีความทนทานสูงขึ้น
- ช่วยส่งเสริมแนวทางใหม่ของพลังงานทางเลือกที่ไม่ก่อมลภาวะทางอากาศและเสียง

บทที่ 2

ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cells; FCs) ^{[1][2][5]}

เซลล์เชื้อเพลิงเป็นอุปกรณ์ที่ใช้หลักการทางไฟฟ้าเคมีเปลี่ยนพลังงานเคมีไปเป็นพลังงานไฟฟ้า ข้อแตกต่างที่สำคัญของเซลล์เชื้อเพลิงกับเครื่องจักรความร้อน (Heat engine) ชนิดอื่นคือ ไม่ถูกจำกัดด้วยวัฏจักรคาร์โนต์ (Carnot cycle) ซึ่งเซลล์เชื้อเพลิงสามารถเปลี่ยนพลังงานเคมีให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง โดยไม่ต้องผ่านการเปลี่ยนเป็นพลังงานกลก่อน จึงมีการสูญเสียพลังงานระหว่างการทำงานน้อยกว่าเครื่องจักรความร้อนทั่วไป

ข้อดีของเซลล์เชื้อเพลิงคือ ไม่สร้างผลิตภัณฑ์ข้างเคียงที่ทำลายสิ่งแวดล้อม ในขณะที่ทำงานไม่มีชิ้นส่วนที่ต้องเคลื่อนไหว จึงไม่ก่อให้เกิดเสียงรบกวน และมีประสิทธิภาพทางไฟฟ้าสูงกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้การเผาไหม้ ทั้งยังสามารถนำความร้อนจากเซลล์เชื้อเพลิงไปใช้ประโยชน์กับอุปกรณ์อื่นได้อีกด้วย

การจำแนกประเภทเซลล์เชื้อเพลิง

การจำแนกประเภทเซลล์เชื้อเพลิงใช้เกณฑ์ในการจำแนก 3 ลักษณะ ดังนี้

1) ชนิดของสารเคมี สารที่ใช้ทำปฏิกิริยาในเซลล์เชื้อเพลิงคือ สารรีดิวซ์ (Reducing agent) หรือเชื้อเพลิง และสารออกซิไดซ์ (Oxidizing agent) คู่สารรีดิวซ์ และออกซิไดซ์ที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิง เช่น ไฮโดรเจน-ออกซิเจน (อากาศ) ไฮโดรเจน-ไฮดรอกซีน โพรเพน-ออกซิเจน เป็นต้น ตัวอย่างของเซลล์เชื้อเพลิงที่จำแนกตามสารเคมีที่ใช้ เช่น เซลล์เชื้อเพลิงชนิดที่ใช้เมทานอลโดยตรง (Direct Methanol Fuel Cells; DMFCs) เซลล์เชื้อเพลิงชนิดที่ใช้เอทานอลโดยตรง (Direct Ethanol Fuel Cells; DEFCs) เซลล์เชื้อเพลิงชนิดที่ใช้โบโรไฮไดรด์โดยตรง (Direct Borohydride Fuel Cells; DBFCs) เซลล์เชื้อเพลิงชนิดที่ใช้กรดฟอร์มิกโดยตรง (Direct Formic Acid Fuel Cells; DFAFCs) และเซลล์เชื้อเพลิงแบคทีเรีย (Microbial Fuel Cells; MFCs) เป็นต้น

2) อุณหภูมิทำงาน สามารถแบ่งประเภทเซลล์เชื้อเพลิงจากอุณหภูมิทำงานได้เป็น 3 ประเภท คือ เซลล์เชื้อเพลิงอุณหภูมิต่ำ (Low-Temperature Fuel Cells; LTFCs) มีอุณหภูมิทำงานไม่เกิน 150 องศาเซลเซียส เซลล์เชื้อเพลิงอุณหภูมิปานกลาง (Intermediate-Temperature Fuel Cells; ITFCs) มีอุณหภูมิทำงานอยู่ในช่วง 200 ถึง 650 องศาเซลเซียส และเซลล์เชื้อเพลิงอุณหภูมิสูง (High-Temperature Fuel Cells; HTFCs) มีอุณหภูมิทำงานสูงกว่า 650 องศาเซลเซียส

3) ชนิดของอิเล็กโทรไลต์ เป็นเกณฑ์ที่นิยมใช้มากที่สุดในการกล่าวถึงเซลล์เชื้อเพลิง อิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงมีทั้งชนิดที่เป็นของเหลว และของแข็ง ตัวอย่างของเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้อิเล็กโทรไลต์ต่างชนิดกัน เช่น เซลล์เชื้อเพลิงชนิดด่าง (Alkaline Fuel Cells; AFC) เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน หรือเซลล์เชื้อเพลิงชนิดพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ (Proton Exchange Membrane or Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells; PEMFCs) เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง (Solid Oxide Fuel Cells; SOFCs) เซลล์เชื้อเพลิงชนิดคาร์บอเนตหลอม (Molten Carbonate Fuel Cells; MCFCs) และเซลล์เชื้อเพลิงชนิดกรดฟอสฟอริก (Phosphoric Acid Fuel Cells; PAFC) เป็นต้น

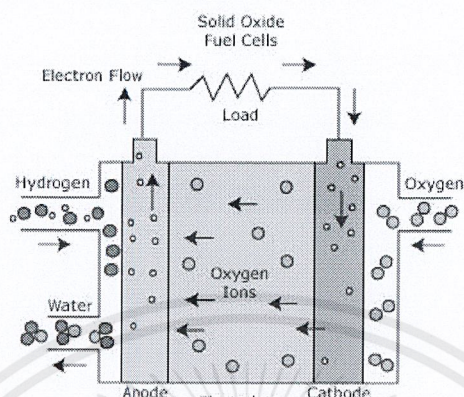
2.2 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง (Solid Oxide Fuel Cells; SOFCs) ^{[2][3][5][6]}

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งเป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้รับการพัฒนาอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ถือเป็นอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานเคมีให้เป็นพลังงานไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุด เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งเป็นเซลล์เชื้อเพลิงอุณหภูมิสูง ซึ่งมีอุณหภูมิทำงานอยู่ในช่วง 600 ถึง 1,000 องศาเซลเซียส อิเล็กโทรไลต์ที่ใช้เป็นวัสดุประเภทเซรามิก ซึ่งโดยทั่วไปคือ Ytria-Stabilized Zirconia (YSZ) การใช้อิเล็กโทรไลต์เป็นของแข็งนี้ ช่วยแก้ปัญหาการรั่วซึมของอิเล็กโทรไลต์เหลว ออกจากเซลล์เชื้อเพลิง อีกทั้งยังจัดปัญหาการกัดกร่อนซึ่งเป็นปัญหาใหญ่ที่เกิดกับเซลล์เชื้อเพลิงแบบอิเล็กโทรไลต์เหลว ส่วนวัสดุที่ใช้เป็นขั้วแอโนด มักเป็นเซอร์เมท (Cermets) ที่เป็นวัสดุผสมระหว่างโลหะจำพวกโคบอลต์ หรือนิกเกิล กับเซรามิกจำพวกเซอร์โคเนียมออกไซด์ (Co-ZrO_2 , Ni-ZrO_2) ซึ่งโคบอลต์ และนิกเกิลจะช่วยให้วัสดุนำไฟฟ้าได้ดี ส่วนขั้วแคโทดนั้น มักเป็นเซรามิกที่สามารถนำอิเล็กตรอนได้ ซึ่งโดยทั่วไปคือ Strontium-doped lanthanum manganite (Sr-doped LaMnO_3)

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งสามารถใช้เชื้อเพลิง และตัวออกซิไดซ์ได้หลายชนิด เช่น ไฮโดรเจน-ออกซิเจน และคาร์บอนมอนอกไซด์-ออกซิเจน เป็นต้น แต่โดยทั่วไป นิยมใช้ ไฮโดรเจน-ออกซิเจน

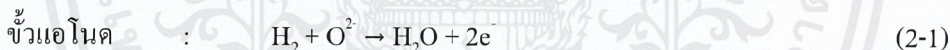
หลักการการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง

รูปที่ 2-1 แสดงถึงหลักการการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง



รูปที่ 2-1 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง [14]

ป้อนอากาศ หรือออกซิเจนเข้าไปยังขั้วแคโทด และป้อนเชื้อเพลิง (ไฮโดรเจน) เข้าไปยังขั้วแอโนด ซึ่งออกซิเจนจะได้รับอิเล็กตรอนที่ขั้วแคโทด กลายเป็นไอออนออกซิเจน จากนั้นไอออนออกซิเจนก็จะเคลื่อนผ่านอิเล็กโทรไลต์ไปยังขั้วแอโนด ทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนได้อิเล็กตรอน ซึ่งอิเล็กตรอนก็จะวิ่งผ่านอุปกรณ์ใช้ไฟฟ้าได้เป็นพลังงานไฟฟ้า และจะได้น้ำออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียงที่ขั้วแอโนด ดังแสดงในรูปที่ 2-1 โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในเซลล์มีดังนี้



การประยุกต์ใช้งานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งมักนำไปใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่อยู่กับที่ ซึ่งถือเป็นการใช้งานที่ก่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดของระบบเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้ได้ ในหลายระดับ ดังนี้

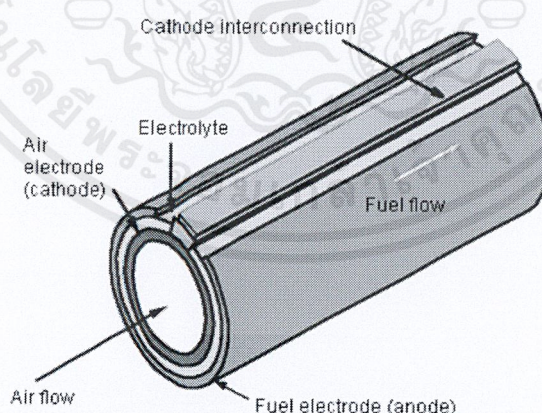
- ระดับครัวเรือน เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งสามารถใช้ได้ในระดับครัวเรือน โดยมีกำลังไฟฟ้าอยู่ในช่วง 1 ถึง 10 กิโลวัตต์ (kW) ซึ่งจะได้ความร้อนออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียง และสามารถนำความร้อนทิ้งจากเซลล์เชื้อเพลิงไปใช้ประโยชน์ในการให้ความร้อนแก่เครื่องทำความร้อน หรือเครื่องทำความเย็นได้อีกด้วย ประสิทธิภาพของไฟฟ้ากระแสสลับที่ได้ควรมากกว่า 35 %

- ระดับอุตสาหกรรม เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งสามารถใช้ผลิตกำลังไฟฟ้าให้กับหน่วยงานขนาดเล็กที่ไม่สามารถขาดไฟฟ้าได้ในอุตสาหกรรม เช่น ศูนย์กลางประมวลข้อมูลบัตรเครดิต หรือโรงพยาบาล เป็นต้น โดยมีกำลังไฟฟ้าอยู่ในช่วง 100 ถึง 1,000 กิโลวัตต์ ซึ่งจะได้ความร้อนที่มีคุณภาพออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียงอีกเช่นกัน ประสิทธิภาพของไฟฟ้ากระแสสลับที่ได้ควรมากกว่า 45 %
- ระดับที่ขยายใหญ่ขึ้น เมื่อมีความต้องการผลิตกระแสไฟฟ้าในอุตสาหกรรมที่ใหญ่ขึ้น หรือในชุมชนขนาดเล็ก ก็สามารถใส่เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งได้เช่นกัน โดยมีกำลังไฟฟ้าอยู่ในช่วง 2 ถึง 10 เมกะวัตต์ ประสิทธิภาพของไฟฟ้ากระแสสลับที่ได้ควรมากกว่า 48 %
- ระดับศูนย์กลาง ระบบผลิตกำลังไฟฟ้าด้วยเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งที่ใหญ่ที่สุด มีกำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 100 เมกะวัตต์ ประสิทธิภาพของไฟฟ้ากระแสสลับที่ได้ควรมากกว่า 60 %

การออกแบบเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งมีอยู่ 2 ลักษณะ คือ เซลล์แบบท่อ (Tubular Cells) และเซลล์แบบระนาบ (Planar Cells) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2-2 และ 2-3 ตามลำดับ

2.2.1 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบท่อ (Tubular SOFCs)

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบท่อมีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกยาว ดังรูปที่ 2-2

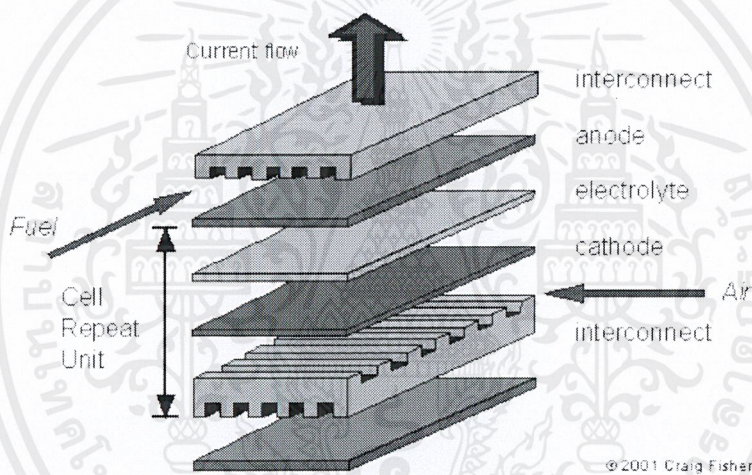


รูปที่ 2-2 เซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็งแบบท่อ (Tubular SOFCs) ^[15]

ข้อเสียของเซลล์แบบท่อ คือ การไหลของกระแสมีความต้านทานสูง เนื่องจากต้องไหลไปตามท่อในระยะยาว จึงต้องมีการกำหนดค่าจีดจำกัดขอบบนของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อขึ้นมา และการใช้เซลล์แบบท่อจะให้ความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าเชิงปริมาตรต่ำ แต่อย่างไรก็ตาม เซลล์แบบท่อนี้มีข้อดีที่สามารถหักล้างกับข้อเสียเหล่านั้นไปได้ คือ การจัดการกับการอุดรอยต่อนั้นทำได้ง่าย (Sealing arrangement) เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบท่อนี้จึงได้รับการพัฒนาจนมีการนำไปใช้จริงในหลายบริษัท เช่น Siemens (U.S.) Acemetrics (U.S.) Mitsubishi (Japan) และ RollsRoyce (UK)

2.2.2 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบระนาบ (Planar SOFCs)

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบระนาบ มีลักษณะเป็นแผ่นซ้อนกันเป็นชั้น ดังรูปที่ 2-3



รูปที่ 2-3 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบระนาบ (Planar SOFCs) ^[16]

เซลล์แบบระนาบนี้ได้รับการพัฒนาขึ้นมาหลังจากเซลล์แบบท่อ ซึ่งสามารถแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในกรณีของเซลล์แบบท่อได้ คือ กระแสที่ไหลเข้าเซลล์แบบระนาบมีเส้นทางที่สั้นกว่าเซลล์แบบท่อ ทำให้มีความต้านทานต่ำกว่า จึงได้กำลังไฟฟ้าต่อหน่วยมวล และหน่วยปริมาตรสูงกว่าแบบท่อ อีกทั้งเซลล์แบบระนาบนี้ยังมีกระบวนการผลิตที่ง่ายกว่า และต้นทุนต่ำกว่า ซึ่งเทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิตเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบระนาบนี้ สามารถยืดหยุ่นได้กว่าแบบท่อ ทั้งยังสามารถเลือกวัสดุที่จะนำมาใช้เป็นขั้ว อิเล็กโทรไลต์ และแผ่นกั้นเซลล์ได้หลากหลายอีกด้วย และด้วยเหตุผลนี้ ทำให้เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งรุ่นใหม่ ๆ สามารถทำงานที่อุณหภูมิปานกลางได้

แม้ว่าในปัจจุบันนี้เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบท่อจะได้รับการติดตั้ง และใช้งานจริงในระดับอุตสาหกรรมมากกว่าเซลล์แบบระนาบ แต่ด้วยข้อดีของเซลล์แบบระนาบตามที่ได้กล่าวในข้างต้น ทำให้เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบระนาบได้รับความสนใจจากนักวิจัยหลากหลายสาขา ในการพัฒนา และแก้ไขปัญหาที่ยังมีอยู่ในเซลล์ชนิดนี้ เพื่อให้เซลล์มีความเหมาะสมในการใช้งานมากที่สุด ซึ่งปัญหาหลักของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบระนาบที่กำลังได้รับการพัฒนาอยู่ในปัจจุบัน มีดังนี้

- การพัฒนาเกี่ยวกับวัสดุที่ใช้เป็นตัวประสาน (Sealing)
- การปรับปรุงความเค้นเชิงกลภายในเซลล์
- การแก้ปัญหาคัดกร่อนของแผ่นกั้นเซลล์ที่เป็น โลหะ (Metallic Interconnect)

2.3 แผ่นกั้นเซลล์ (Interconnects) ^{[3][4]}

แผ่นกั้นเซลล์ คือ วัสดุที่เชื่อมระหว่างเซลล์เดี่ยวแต่ละเซลล์ให้เป็นอนุกรม โดยแผ่นกั้นเซลล์มีหน้าที่ ดังนี้

- นำกระแสไฟฟ้าจากเซลล์เดี่ยวแต่ละเซลล์ไปสู่วงจรภายนอกเซลล์
- แยกกระแสการไหลเชื้อเพลิงและอากาศระหว่างเซลล์

แผ่นกั้นเซลล์เป็นตัวเชื่อมระหว่างขั้วแคโทดของเซลล์หนึ่งกับขั้วแอโนดของอีกเซลล์หนึ่งเข้าด้วยกัน นั่นคือ แผ่นกั้นเซลล์จะต้องสัมผัสกับทั้งด้านที่เป็นสภาวะออกซิไดซ์ และด้านที่เป็นสภาวะรีดิวซ์ ดังนั้นจึงมีปัจจัยหลายปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของแผ่นกั้นเซลล์ การเลือกวัสดุเพื่อใช้เป็นแผ่นกั้นเซลล์จึงเป็นประเด็นที่ต้องให้ความสำคัญอย่างมากในการผลิตเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งมีประสิทธิภาพในการใช้งานสูง และมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน โดยคุณสมบัติของวัสดุที่นำมาใช้เป็นแผ่นกั้นเซลล์ที่ดี สามารถสรุปได้ดังนี้

- มีค่าการนำอิเล็กตรอนสูง แต่ค่าการนำไอออนต่ำ
- มีความเสถียรทางเคมีทั้งในเชื้อเพลิง และในอากาศ
- การขยายตัวทางความร้อนสอดคล้องกับส่วนประกอบอื่นภายในเซลล์
- มีความแข็งแรงเชิงกลสูง
- มีค่าการนำความร้อนสูง
- มีความเสถียรทางเคมีกับส่วนประกอบอื่นภายในเซลล์
- แก๊สไม่สามารถซึมผ่านได้

การออกแบบเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งในระยะแรก มีอุณหภูมิทำงานสูงประมาณ 900 ถึง 1,000 องศาเซลเซียส จึงต้องใช้แผ่นกั้นเซลล์เป็นวัสดุเซรามิก เช่น LaCrO_3 และ YCrO_3 เป็นต้น แต่ในระยะหลัง การออกแบบเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งสามารถลดอุณหภูมิทำงานลงได้เหลือประมาณ 600 ถึง 850 องศาเซลเซียส จึงทำให้สามารถนำวัสดุประเภทโลหะมาเป็นแผ่นกั้นเซลล์ได้ ซึ่งข้อดีของแผ่นกั้นเซลล์ที่เป็นโลหะที่เหนือกว่าวัสดุประเภทเซรามิก คือ

- มีค่าการนำไฟฟ้า และค่าการนำความร้อนสูงกว่า
- ต้นทุนของวัสดุ และต้นทุนในการขึ้นรูปต่ำกว่า
- กระบวนการในการขึ้นรูปง่ายกว่า และสามารถทำให้มีรูปร่างที่ซับซ้อนได้

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

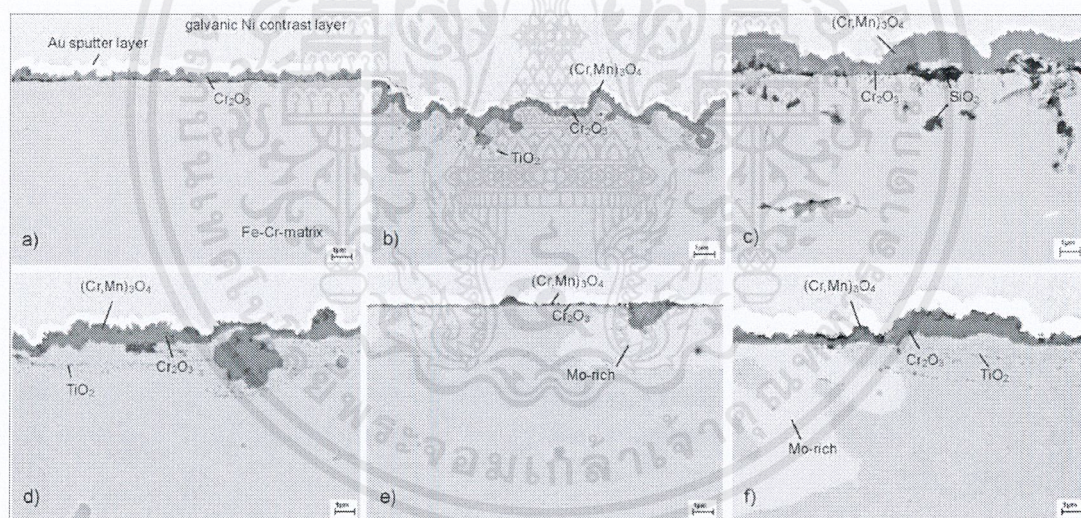
2.4 การระเหยของโครเมียม (Cr Vaporization)^{[2][6][7]}

การเกิดสเกลโครเมีย (Chromia Scale; $\text{Cr}_2\text{O}_3(\text{s})$) จะช่วยป้องกันไม่ให้อากาศสัมผัสกับผิวโลหะได้โดยตรง จึงช่วยลดการสึกกร่อนของผิวโลหะได้ แต่ในขณะเดียวกันด้านที่สัมผัสกับขั้วแคโทดก็จะเกิดการระเหยของโครเมียออกจากสเกลที่อุณหภูมิสูงเช่นกัน 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 1 จากงานวิจัยของ M.Stanislawski และคณะ^[7] ที่ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการระเหยของโครเมียจากสเกลของอัลลอยเหล่านี้ พบว่าเมื่อทำการออกซิเดชันอัลลอยเหล่านี้ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ในอากาศชื้นแล้ว Ducrolloy และ E-Brite มีเกิดสเกลโครเมียขึ้นที่ผิวของแผ่นโลหะ ส่วนอัลลอยชนิดที่เหลือ จะเกิดสเกลโครเมียที่ผิวของแผ่น และเกิดชั้นของโครเมียแมงกานีสสปีเนล (Cr-Mn-spinel layer) เคลือบอยู่บนสเกลโครเมียอีกชั้น (รูปที่ 2-4) และเมื่อวัดอัตราการระเหยของโครเมีย จากอัลลอยเหล่านี้ พบว่า Ducrolloy และ E-Brite ซึ่งเป็นอัลลอยที่ไม่สามารถเกิดชั้นของโครเมียแมงกานีสสปีเนลได้นั้น มีอัตราการระเหยของโครเมียสูงกว่าอัลลอยชนิดอื่นอย่างเห็นได้ชัด (รูปที่ 2-5)

ตารางที่ 1-1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของอัลลอยที่มีโครเมียมเป็นองค์ประกอบหลัก และโลหะเฟอร์-
ริติกที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma - Optical Emission Spectroscopy
(ICP-OES)^[7]

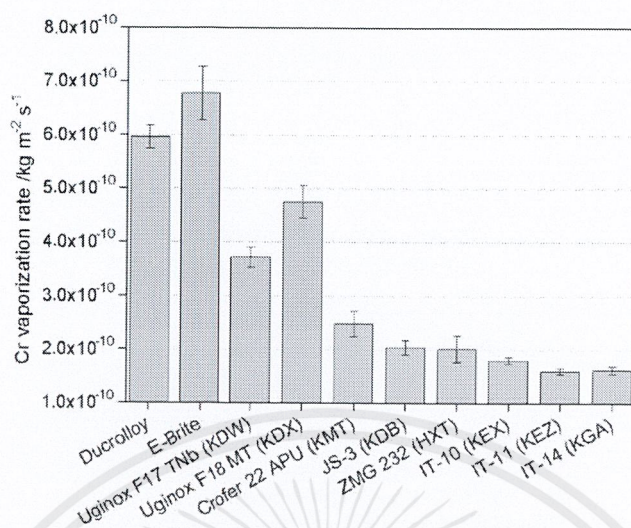
Grade	Fe	Cr	Ni	Al	Si	Mn	Ti	Y	Co	C	N	Others
Ducrolloy	5.5	92.9	-	-	-	-	-	0.48	-	0.010	0.014	Zr 0.02
Crofer 22 APU	76.5	22.7	0.02	0.02	0.02	0.38	0.07	-	-	0.002	0.004	La 0.06
JS-3	76.1	22.7	-	0.02	-	0.40	0.05	-	-	0.016	-	La 0.09
ZMG 232	76.9	22.0	0.29	0.18	0.40	0.45	-	-	-	0.024	0.005	Zr 0.13
E-Brite	73.2	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 2-4 ภาพตัดขวางของโลหะเฟอร์ริติกเกรดต่าง ๆ จากเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

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

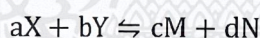
หลังผ่านการออกซิเดชันที่ 800 องศาเซลเซียส ในอากาศชื้น เป็นเวลา 100 ชั่วโมง^[7]



รูปที่ 2-5 อัตราการระเหยของโครเมียมจากอัลลอยเกรดต่าง ๆ ที่ออกซิไดซ์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสในอากาศที่มีความชื้น 1.88 %^[7]

การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบบส์ (Gibb free energy)

พิจารณาปฏิกิริยาเคมีที่อุณหภูมิ และความดันคงที่



(2-4)

เมื่อ X และ Y เป็นสารตั้งต้น

M และ N เป็นผลิตภัณฑ์

a b c และ d เป็น Stoichiometric coefficients

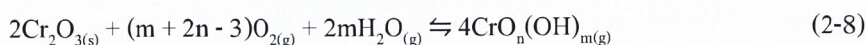
จะได้รับการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบบส์ (Gibbs free energy) ของปฏิกิริยา คือ

$$\Delta G = G_p - G_R = cG_M + dG_N - aG_X - bG_Y \quad (2-5)$$

หากปฏิกิริยาใดที่มี ΔG น้อยที่สุดในสภาวะนั้น ปฏิกิริยานั้นก็จะเกิดขึ้นก่อน ซึ่งปฏิกิริยาการเกิดสเกลโครเมียม ($Cr_2O_{3(s)}$) มี ΔG น้อยที่สุดในปฏิกิริยาการเกิดสเกลของโลหะทั้งหมดบนผิวของอัลลอย ดังนั้นสเกลโครเมียมจึงเกิดเป็นชั้นฟิล์มเคลือบผิวของอัลลอย จึงมีการระเหยของโครเมียมจากอัลลอยที่อุณหภูมิสูงเกิดขึ้น

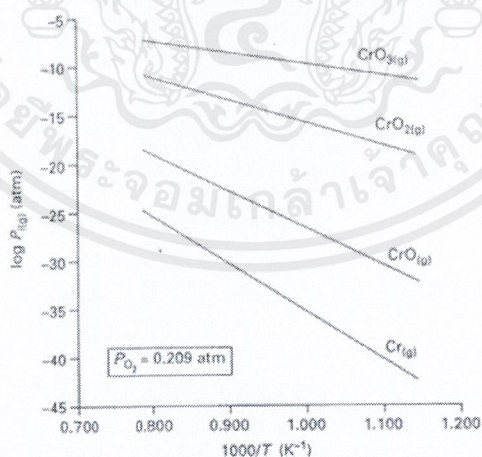
เทอร์โมไดนามิกส์ของระบบ Cr-O-H

แผ่นกั้นเซลล์ในด้านที่สัมผัสกับขั้วแคโทด ซึ่งมีอุณหภูมิทำงานสูง และมีกระแสของอากาศไหลผ่าน ทำให้เกิดปฏิกิริยาการระเหยของโครเมียม จึงเกิดแก๊สของสารจำพวกโครเมียมขึ้น โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีดังนี้

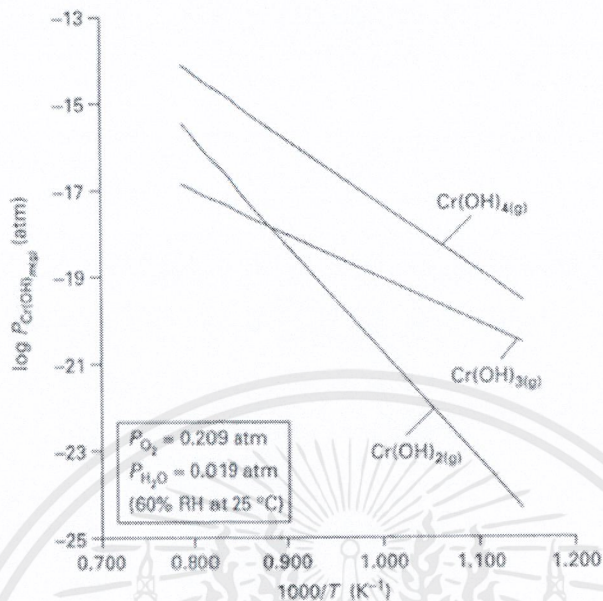


ความเสถียรทางเทอร์โมไดนามิกส์ของแก๊สเหล่านี้บนสเกลโครเมีย ภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิ 600 ถึง 1,000 องศาเซลเซียส แสดงในรูปที่ 2-6 ถึง 2-8 จะเห็นว่า $\text{CrO}_3(\text{g})$, $\text{Cr}(\text{OH})_4(\text{g})$, $\text{CrO}_2(\text{OH})_2(\text{g})$ และ $\text{CrO}_2(\text{OH})_2(\text{g})$ เป็นแก๊สที่มีความดันย่อยที่สมดุลสูงสุด ซึ่งจากสมการที่ (2-6) จะได้ว่า แก๊สเหล่านี้เป็นแก๊สที่เกิดมากที่สุด โดยแก๊สหลักที่เกิดขึ้นในอากาศแห้งคือ $\text{CrO}_3(\text{g})$ ส่วนแก๊สหลักที่เกิดขึ้นในอากาศชื้นคือ $\text{CrO}_2(\text{OH})_2(\text{g})$ ตามมาด้วย $\text{CrO}_2(\text{OH})_2(\text{g})$

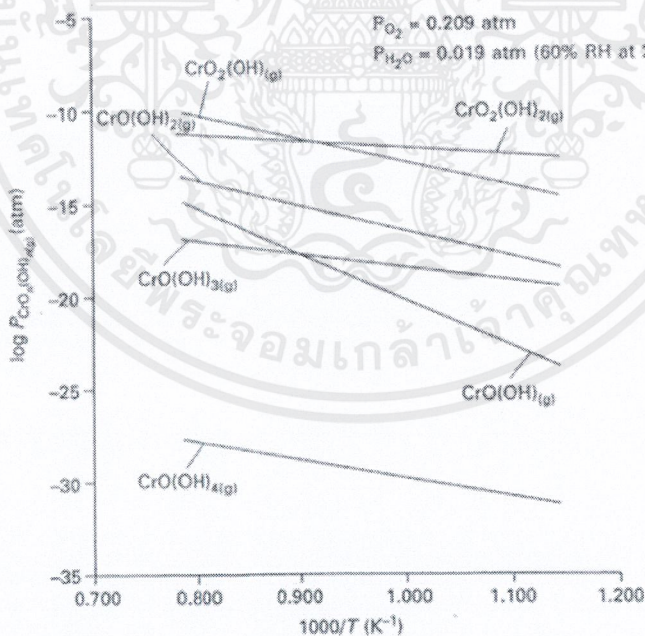
ผลจาก $\text{H}_2\text{O}(\text{g})$ ที่มีต่อการเกิดแก๊ส $\text{CrO}_2(\text{OH})_2(\text{g})$ และ $\text{CrO}_3(\text{g})$ แสดงให้เห็นในรูปที่ 2-9 จะเห็นว่า $\text{CrO}_2(\text{OH})_2(\text{g})$ จะเกิดขึ้นมากขึ้นตาม $P_{\text{H}_2\text{O}}$ ที่เพิ่มขึ้น รูปที่ 2-10 แสดงความดันย่อยของ $\text{CrO}_2(\text{OH})_2(\text{g})$ ที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนด ที่ P_{O_2} ต่ำมาก แต่ $P_{\text{H}_2\text{O}}$ สูง ซึ่งจะเห็นได้ชัดว่า $P_{\text{CrO}_2(\text{OH})_2(\text{g})}$ จะเพิ่มขึ้นตาม $P_{\text{H}_2\text{O}}$ ที่เพิ่มขึ้น แต่ก็ยังต่ำกว่าที่เกิดที่ขั้วแคโทดมาก ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่า การเกิดแก๊สของสารจำพวกโครเมียมที่ขั้วแอโนดซึ่งมีกระแสของเชื้อเพลิงไหลผ่านนั้น เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย



รูปที่ 2-6 ความดันย่อยที่สมดุลของแก๊สโครเมียมออกไซด์ (Cr oxides) ในอากาศแห้ง โดยเป็นฟังก์ชันกับเวลา^[6]

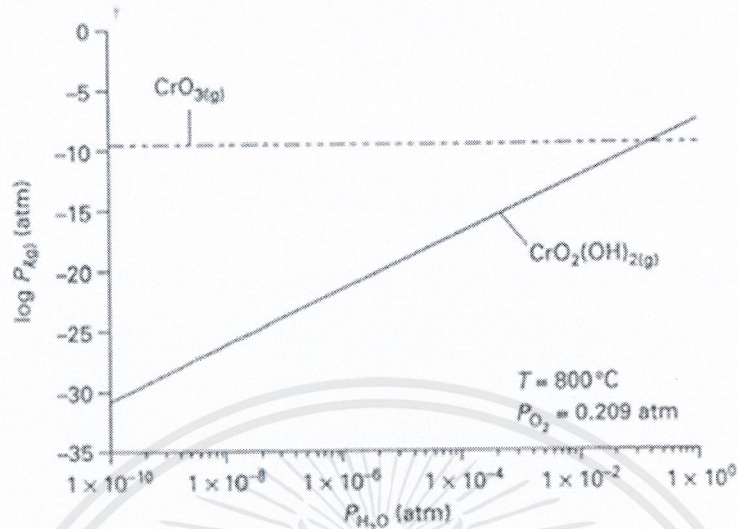


รูปที่ 2-7 ความดันย่อยที่สมดุลของแก๊ส โครเมียมไฮดรอกไซด์ (Cr hydroxides) ในอากาศ ที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 60 % (ที่ 25 องศาเซลเซียส) โดยเป็นฟังก์ชันกับเวลา^[6]

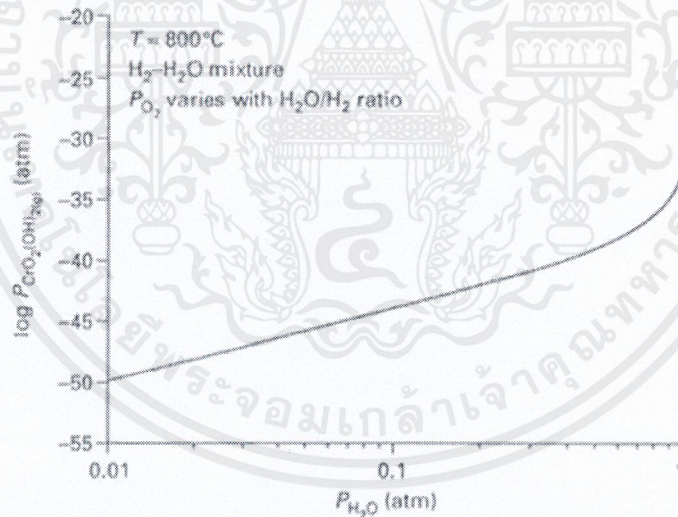


รูปที่ 2-8 ความดันย่อยที่สมดุลของแก๊สโครเมียมออกซีไฮดรอกไซด์ (Cr oxyhydroxides) ในอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 60 % (ที่ 25 องศาเซลเซียส) โดยเป็นฟังก์ชันกับเวลา^[6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-9 กราฟระหว่างความดันย่อยของแก๊สจำพวกโครเมียมที่เกิดขึ้นในด้านแคโทด กับความดันย่อยของน้ำ ที่ 800 องศาเซลเซียส^[6]



รูปที่ 2-10 กราฟระหว่างความดันย่อยของแก๊สจำพวกโครเมียมที่เกิดขึ้นในของผสม ระหว่างไฮโดรเจนและน้ำ กับความดันย่อยของน้ำที่ 800 องศาเซลเซียส^[6]

การระเหยของโครเมียมนั้นทำให้เกิดผลเสียต่อเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง 2 ประการ คือ

- ทำให้แผ่นกั้นเซลล์สึกกร่อน และนำไฟฟ้าได้แย่งลง
- ทำให้เกิดโครเมีย (Cr_2O_3) ที่ขั้วแคโทด ซึ่งทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าของขั้วเสื่อมลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.5.1 การระเหยของโครเมียมที่อุณหภูมิสูง^[7]

M. Stanislawski และคณะได้ทำการศึกษาการระเหยของสารจำพวกโครเมียมจากสเกลโครเมียมที่อุณหภูมิสูง ทำให้โลหะที่สามารถเกิดสเกลโครเมียมได้ (Chromia-forming steels) มีข้อจำกัดในการใช้งานมากขึ้น และเป็นสาเหตุหลักของการสึกกร่อนของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบระนาบ (Planar Solid Oxide Fuel Cell) อีกด้วย Cr(IV) ระเหยออกจากแผ่นกั้นเซลล์ (Interconnects) แล้วสะสมอยู่ในรูปของ Cr(III)-oxide แข็ง โดยแผ่นโลหะที่ใช้ทดสอบคืออัลลอยที่มีโครเมียม เหล็ก นิกเกิล และโคบอลต์เป็นองค์ประกอบหลัก ในอากาศ และในไฮโดรเจนที่อุณหภูมิสูง และยังได้ทำการศึกษาอิทธิพลของชั้นออกไซด์ของ $(Cr,Mn)_3O_4$ $(Fe,Cr)_3O_4$ TiO_2 และ Al_2O_3 ที่มีต่อการระเหยของโครเมียมอีกด้วย จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าเมื่อทำวัสดุให้เป็นอัลลอยแล้วการระเหยของโครเมียมจากโลหะที่สามารถเกิดสเกลโครเมียมได้ จะลดลงกว่า 90% การประเมินการสึกกร่อนของแผ่นกั้นเซลล์แบบไม่ได้เคลือบในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งแบบระนาบนั้นประเมินเพื่อนำผลการประเมินไปใช้ในการทำให้เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งสามารถใช้งานได้ถึงอายุการใช้งานที่สมควร

2.5.2 การระเหยของโครเมียมจากอัลลอยเหล็ก-โครเมียมที่ไม่ได้เคลือบและเคลือบ ที่อุณหภูมิ 1,073

องศาเซลเซียส^[8]

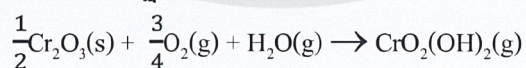
Hideto Kurokawa และคณะ ได้ทำการศึกษาการระเหยของโครเมียมที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันบน Ferritic stainless steel ซึ่งจะทำให้เซลล์มีการเสื่อมลง ในการศึกษาจะศึกษาการระเหยของโครเมียมโดยไม่มีเคลือบผิวและมีการเคลือบผิวโลหะอัลลอยที่อุณหภูมิ 1073 องศาเซลเซียส การเคลือบผิวอัลลอยจะเคลือบด้วยวิธีการสเปรย์ และการจุ่มเคลือบ การเคลือบด้วย Lanthanum strontium manganese oxide (LSM: $La_{0.65}Sr_{0.3}MnO_3$) Lanthanum strontium cobalt iron oxide (LSCF; $La_{0.6}Sr_{0.4}Co_{0.8}Fe_{0.2}O_3$) และ Manganese cobalt oxide (MCO; $MnCo_2O_4$) ที่เตรียมจากผงขนาดเล็กกว่าไมครอน สามารถลดการระเหยของโครเมียมได้ โดยมีแฟกเตอร์เท่ากับ 21 ถึง 40 การเคลือบด้วย Manganese cobalt oxide และ Lanthanum strontium chromium oxide ($La_{0.7}Sr_{0.3}CrO_3$) ที่เตรียมโดยการสังเคราะห์จากปฏิกิริยาการเผาไหม้ของ Glycine nitrate สามารถลดการระเหยของโครเมียมได้ โดยมีแฟกเตอร์เท่ากับ 2 ถึง 3 เท่านั้นเนื่องจากชั้นเคลือบมีรูพรุน ชั้นเคลือบแต่ละชนิดอาจจะมีแฟกเตอร์ที่แตกต่างกันไปแต่ก็สามารถลดการระเหยของโครเมียมได้

2.5.3 การระเหยของโครเมียมบนแผ่นกั้นเซลล์สแตนเลส ทั้งชนิดเคลือบผิวและไม่เคลือบผิว ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง^[9]

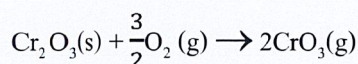
C.Collins และคณะ ได้ทำการศึกษาการระเหยของโครเมียมบนแผ่นกั้นเซลล์สแตนเลสชนิด Crofer 22 APU และ 430 Stainless Steel โดยทำการศึกษาและเปรียบเทียบ ผลการระเหยของโครเมียมบนแผ่นกั้นเซลล์ที่ทำจากวัสดุทั้งสองชนิดโดยวิธีการวิเคราะห์การระเหยของโครเมียมในเชิงปริมาณ ด้วยกระบวนการ Rutherford Backscattering Spectroscopy (RBS) ร่วมกับโปรแกรม SIMNRA โดยจำลองสถานะของแผ่นกั้นเซลล์ให้เหมือนกับสถานะของการทำงานภายในเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง โดยการสร้างชุดทดลองเพื่อทำการศึกษาผลกระทบจากการทำงานของเซลล์ชนิดนี้ต่อการระเหยของโครเมียมบนแผ่นกั้นเซลล์ของสแตนเลสทั้งสองชนิด ซึ่งจากการทดลอง พบว่าสแตนเลสชนิด 430 Stainless Steel มีอัตราการระเหยที่สูงกว่า Crofer 22 APU นอกจากนี้ยังได้ทำการเปรียบเทียบการระเหยของโครเมียมบนสแตนเลสชนิด 430 Stainless Steel ที่ผ่านกระบวนการเคลือบพื้นผิวด้วย CoMnO ซึ่งจากการศึกษาพบว่าการเคลือบพื้นผิวบนวัสดุดังกล่าวช่วยลดอัตราการระเหยของโครเมียมลงได้

2.5.4 การระเหยของ Cr_2O_3 ในบรรยากาศที่มีความชื้น^[11]

A.Yamauchi K.Kurokawa และ H.Takahashi ได้ทำการศึกษาการระเหยของโครเมียมจาก Cr_2O_3 โดยการเตรียมการทดลองนั้น ใช้การเผาผง Cr_2O_3 ด้วยวิธี Spark plasma sintering ที่อุณหภูมิ 1,673 องศาเซลเซียส (อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อวินาที) และนำไปทดสอบปฏิกิริยาออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1,173 1,273 1,323 1,373 1,473 องศาเซลเซียส ใน $\text{N}_2\text{-O}_2$ และ $(\text{N}_2\text{-O}_2)\text{-H}_2\text{O}$ และ $\text{N}_2\text{-H}_2\text{O}$ ที่ความดันบรรยากาศ เพื่อศึกษากลไกการระเหยของสเกล Cr_2O_3 ในบรรยากาศที่มีความชื้น (บรรยากาศที่มีความชื้น หมายถึง $\text{N}_2\text{-O}_2\text{-H}_2\text{O}$ ที่ความดันบรรยากาศ) รวมถึงมวลที่หายไป ซึ่งพบว่าในบรรยากาศที่มีความชื้นจะสูญเสียมวลมากกว่า ใน N_2 กับ O_2 และ N_2 กับ H_2O ที่ความดันบรรยากาศ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการเสื่อมสภาพของ Cr_2O_3 นั้นจะเกิดในบรรยากาศที่มี O_2 และ ไอน้ำ เป็นส่วนประกอบ โดยที่การระเหยของ Cr_2O_3 จะเป็นไปตามปฏิกิริยา



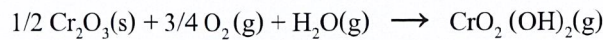
และปฏิกิริยา



จึงสรุปได้ว่าเมื่อสเกล Cr_2O_3 เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน จะเกิดการระเหยของ Cr_2O_3 ซึ่งทำให้ Cr_2O_3 นั้นเสื่อมสภาพลงไปตามเวลา

2.5.5 อัตราการระเหยของโครเมียมจากสเกลโครเมียมออกไซด์เข้าไปยังแก๊สขึ้น ^[12]

D. J. Young และ B. A. Pint ได้ศึกษาสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสำหรับการระเหยของ $\text{CrO}_2(\text{OH})_2$ และผลการทดลองได้นำไปคำนวณทางทฤษฎีเทอร์โมไดนามิกจากปฏิกิริยา



เพื่อทำนายฟลักซ์การระเหยของโครเมียมในช่วงอุณหภูมิ 650 – 800 °C จากแผ่นโลหะตัวอย่าง Fe-20Cr-25Ni+ Nb (alloy 709) ทดลองด้วยไอน้ำบริสุทธิ์ความดัน 240 atm ที่อุณหภูมิ 650 °C ซึ่งได้สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเท่ากับ 0.04 cm/s จำนวนฟลักซ์การระเหยของโครเมียมได้เท่ากับ $1.1 \times 10^{-12} \text{ g/cm}^2\text{s}$ ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเท่ากับ 0.04 cm/s จำนวนฟลักซ์การระเหยของโครเมียมได้เท่ากับ $9.9 \times 10^{-12} \text{ g/cm}^2\text{s}$ และที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเท่ากับ 0.045 cm/s จำนวนฟลักซ์การระเหยของโครเมียมได้เท่ากับ $2.5 \times 10^{-11} \text{ g/cm}^2\text{s}$ จากการคำนวณพบว่าอัตราการระเหยของโครเมียมในไอน้ำบริสุทธิ์จะต่ำกว่าในอากาศชั้น 10 % จากการทดลองพบว่ารูปแบบการระเหยของโครเมียมสามารถอธิบายมวลที่หายไปในระหว่างที่ตัวอย่างถูกเปิดสู่อากาศไหลจึงเป็นข้อเสนอแนะว่าการพิจารณาสมดุลระหว่างการระเหยของโครเมียมและการเกิดสเกลโครเมียมบนพื้นผิวโลหะผสมสามารถอธิบายการลดลงของโครเมียมได้ และสามารถคาดการณ์การเริ่มและการหยุดของปฏิกิริยาออกซิเดชันได้

2.5.6 ผลของอุณหภูมิและอัตราการไหลที่มีต่อการระเหยของโครเมียมจากโลหะ 304L ^[10]

H. Asteman J.-E. Svensson และ L.-G. Johansson ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและอัตราการไหลที่มีต่อการออกซิเดชันของโลหะ 304L ขนาด $15 \times 15 \times 2$ มิลลิเมตร แขนงบนแผ่นโลหะอลูมินาในท่อแก้ว SiO_2 ที่อยู่ในเตาเผาแนวอน โดยใช้แก๊สออกซิเจนแห้ง (Dry O_2) และแก๊สออกซิเจนชื้น ($\text{O}_2 + 40\% \text{H}_2\text{O}$) ที่อุณหภูมิ 500 ถึง 800 °C ที่ความเร็ว 0.02 ถึง 13 เซนติเมตรต่อวินาที เป็นเวลา 168 ชั่วโมง และนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ด้วยวิธี Gravimetry และเครื่อง X-Ray Diffraction (GI-XRD) Analytical Environmental Scanning Electron Microscopy (ESEM/EDX) และ Auger Electron Spectroscopy (AES) เพื่อศึกษาการกัดกร่อนของโลหะตัวอย่าง

จากงานวิจัยที่ได้เคยศึกษามา พบว่าการสูญเสียสเกลโครเมียมที่สามารถปกป้องการออกซิเดชันที่ผิวของโลหะมีขั้นตอนการเกิดดังนี้

- 1) การระเหยอย่างต่อเนื่องของโครเมียมจากสเกลออกไซด์ที่ช่วยปกป้องผิวโลหะ
- 2) การเปลี่ยนจากออกไซด์ในรูปของ $\alpha\text{-(Cr,Fe)}_2\text{O}_3$ เป็น $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$
- 3) สเกลออกไซด์เกิดการสูญเสียสมบัติที่ช่วยปกป้องผิวโลหะไป

ปฏิกิริยาออกซิเดชันของโลหะ 304L ในออกซิเจนและน้ำที่อุณหภูมิ 500 ถึง 800 °C นั้นได้รับอิทธิพลจากการระเหยของโครเมียมอย่างมาก ซึ่งการสูญหายของโครเมียมนั้นทำให้สเกล $\alpha\text{-(Cr,Fe)}_2\text{O}_3$ ที่ช่วยปกป้องผิวโลหะ เปลี่ยนเป็นสเกล $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ พบว่าออกไซด์ที่ช่วยปกป้องผิวโลหะจะสูญหายรวดเร็วที่สุดที่อุณหภูมิสูงสุด (800 °C) และอัตราการไหลสูงสุด (4000 ml/min) ที่ทำการทดลอง และพบว่าออกไซด์ที่เกิดขึ้นที่ขอบเกรน (Grain boundary) นั้นสามารถปกป้องผิวโลหะได้ดีกว่าการเกิดที่ส่วนอื่น ๆ

จากผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าการระเหยของโครเมียมเป็นกระบวนการหลักที่ส่งผลต่อความต้านทานการออกซิเดชันของโลหะที่สามารถเกิดโครเมียมได้ในออกซิเจนขึ้น



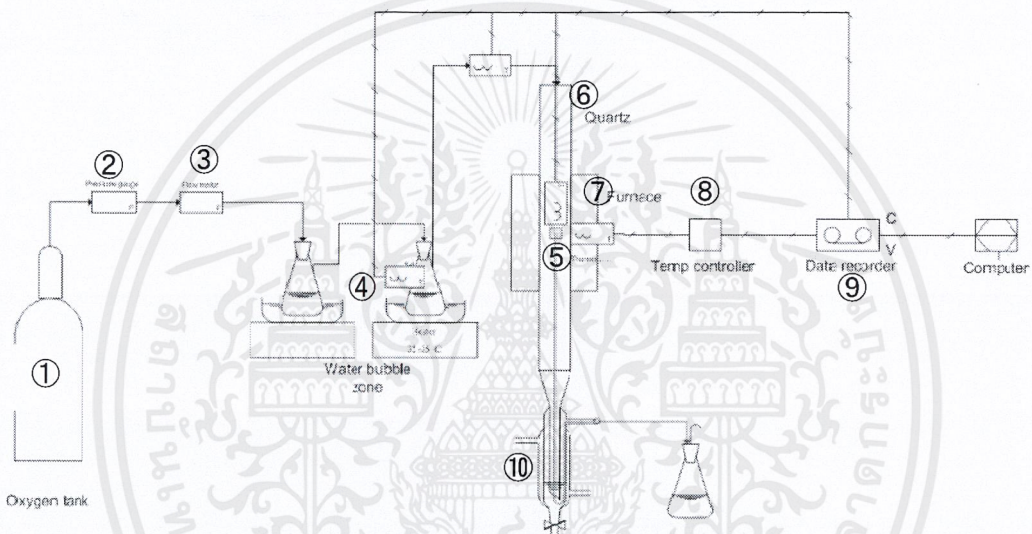
บทที่ 3

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 และส่งสัญญาณไปยังบันทึกที่เครื่องบันทึกข้อมูล (Data recorder; ⑨) โครเมียมที่ระเหยออกจากแผ่นโลหะตัวอย่างจะถูกควบแน่นในน้ำกลั่นที่บรรจุอยู่ในตัวควบแน่น (Condenser; ⑩) และโครเมียมที่ยังเหลืออยู่ก็จะถูกควบแน่นอีกครั้งในน้ำกลั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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) หม้อต้ม (Boiler)	Yellow MAG HS 7	1

3.1.2.2 กวอartz และเครื่องแก้ว

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

3.1.2.3 ท่อ วาล์ว และข้อต่อ

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

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 สายสแตนเลสชนิดดีดัก 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 สายสแตนเลสชนิดดีดัก 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 สายสแตนเลสชนิดดีดัก 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)

3.1.3 ประกอบ และติดตั้งชุดการทดลอง

นำอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่จัดหามา ประกอบเป็นชุดการทดลองตามรูปที่ 3-1

3.2 การทดลองการระเหยของโครเมียมจาก 430 Stainless Steel ที่อุณหภูมิสูง

3.2.1 อุปกรณ์

- 1) ชุดการทดลองการระเหยของโครเมียมที่อุณหภูมิสูง (รูปที่ 3-1)
- 2) แผ่นโลหะ 430 Stainless Steel
- 3) ทรายทรายน้ำ หมายเลข 320 ถึง 1,200
- 4) เครื่องล้างความถี่สูง (Ultrasonic Cleaner)
- 5) เครื่องชั่งน้ำหนัก
- 6) เวอร์เนีย คาลิเปอร์ (Vernier Caliper)
- 7) หลอดหยด
- 8) ขวดแก้วสีชา (Amber Glass Bottle)
- 9) ปิเปตต์แบบใช้ดวง (Graduated Pipette)
- 10) ขวดวัดปริมาตร (Volumetric Flask) ขนาด 250 และ 1,000 มิลลิลิตร
- 11) โยเซรามิกกันความร้อน (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) ที่ได้รับการตัดและตะไบเรียบร้อมแล้ว ด้วย ทรายทรายน้ำขนาดหยาบมาก (หมายเลข 320) ไปจนถึงขนาดละเอียด (หมายเลข 1,200) จนผิวหน้าของชิ้นงานเรียบ

2) นำแผ่นโลหะตัวอย่างไปล้างโดยการแช่ในเอทานอลด้วยเครื่องล้างความถี่สูงเป็นเวลา 10 นาที

- 3) นำแผ่นโลหะตัวอย่างที่ล้างแล้ว ไปชั่งด้วยเครื่องชั่งน้ำหนัก และบันทึกน้ำหนักของแผ่นโลหะตัวอย่างก่อนทำการทดลอง
- 4) วัดขนาดอย่างละเอียดของแผ่นโลหะตัวอย่างด้วยเวอร์เนียสคาลิเปอร์ และบันทึกขนาด
- 5) ใส่น้ำกลั่นลงไปในตัวควบแน่น และในขวดแก้วที่ต่อท่อออกมาจากตัวควบแน่น
- 6) ใส่น้ำขุ่นตัวอย่างเข้าไปในชุดการทดลองการระเหยของโครเมียมที่อุณหภูมิสูง โดยเชื่อมต่อแก้วและควอทซ์ทุกข้อต้องทาด้วยจาระบีสุญญากาศ เพื่อป้องกันการรั่วซึมของแก๊ส
- 7) ใส่น้ำมันก๊าดความร้อนไว้บนเตาเผา เพื่อป้องกันการพาความร้อนจากเตาขึ้นมาสู่ฝาแก้วครอบควอทซ์ซึ่งทนความร้อนได้ต่ำกว่าควอทซ์
- 8) ตั้งโปรแกรมในตัวควบคุมอุณหภูมิ โดยกำหนดให้ทำอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 9) เปิดแก๊สออกซิเจน โดยปรับอัตราการไหลของแก๊สให้เป็น 1 ลิตรต่อนาที
- 10) สั่งให้ตัวควบคุมอุณหภูมิทำงาน พร้อมทั้งสั่งให้เครื่องบันทึกอุณหภูมิเริ่มทำงาน
- 11) ปิดแก๊สออกซิเจนเมื่อครบตัวควบคุมอุณหภูมิทำงานครบตามเวลาที่กำหนด จากนั้นรอให้ชุดอุปกรณ์การทดลองเย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิห้อง
- 12) เมื่อชุดอุปกรณ์การทดลองเย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิห้อง เก็บสารตัวอย่างที่อยู่ในตัวควบแน่น (“ตัวอย่างที่ 1”) และเก็บสารตัวอย่างจากขวดแก้วที่ต่อท่อมาจากตัวควบแน่น (“ตัวอย่าง 2”) ถอดฝาแก้วครอบควอทซ์ออก
- 13) นำแผ่นโลหะตัวอย่างออกมา ชั่งน้ำหนัก และบันทึกน้ำหนักของแผ่นโลหะหลังทำการทดลอง
- 14) ใช้กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ปริมาตร 200 มิลลิลิตรล้างภายในท่อควอทซ์ ข้อต่อแก้ว และตัวควบแน่น เก็บเป็นสารตัวอย่าง (“น้ำล้างครั้งที่ 1”)
- 15) ทำเช่นเดียวกับข้อ 14) อีกสามครั้ง เก็บเป็นสารตัวอย่าง (“น้ำล้างครั้งที่ 2” “น้ำล้างครั้งที่ 3” และ “น้ำล้างครั้งที่ 4” ตามลำดับ)
- 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

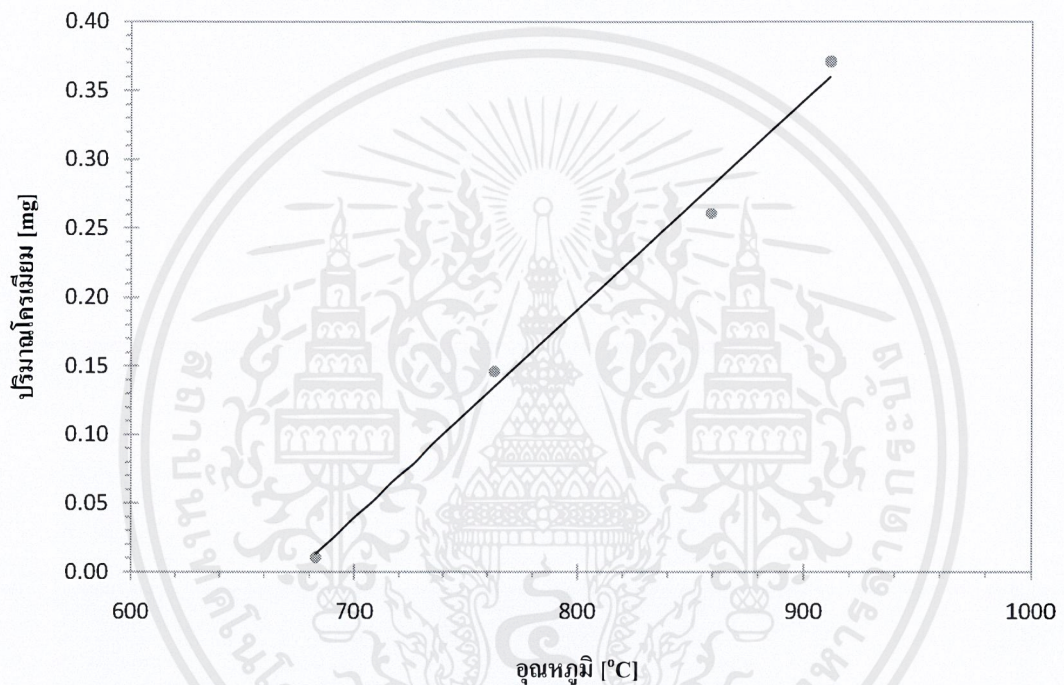


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการระเหยของโครเมียม



รูปที่ 4-1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณโครเมียมที่ระเหยออกมา
ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1 ลิตรต่อนาที ความชื้น 10 % ระยะเวลา 24 ชั่วโมง

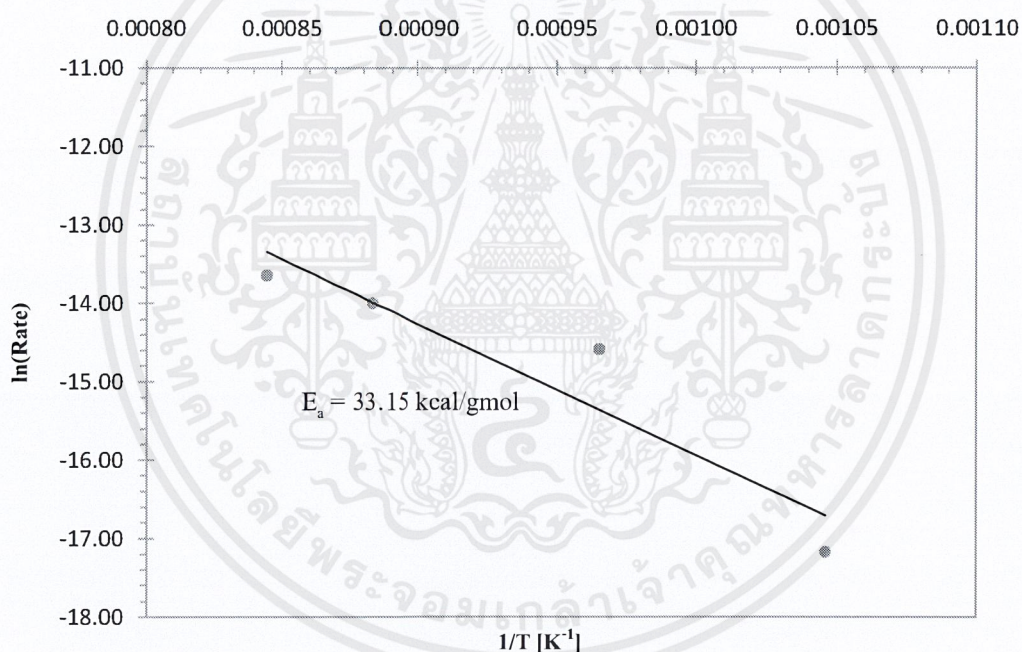
จากรูปที่ 4-1 จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ปริมาณโครเมียมที่ระเหยจะเพิ่มขึ้น แสดงว่า
อุณหภูมิมิมีผลต่อการระเหยของโครเมียมจากสเกลโครเมียม

สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการระเหยของโครเมียมกับส่วนกลับของอุณหภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 4-2 จะได้สมการเส้นตรงดังนี้

$$\text{Rate} = k \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$$

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

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



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

จากรูปที่ 4-2 จะได้

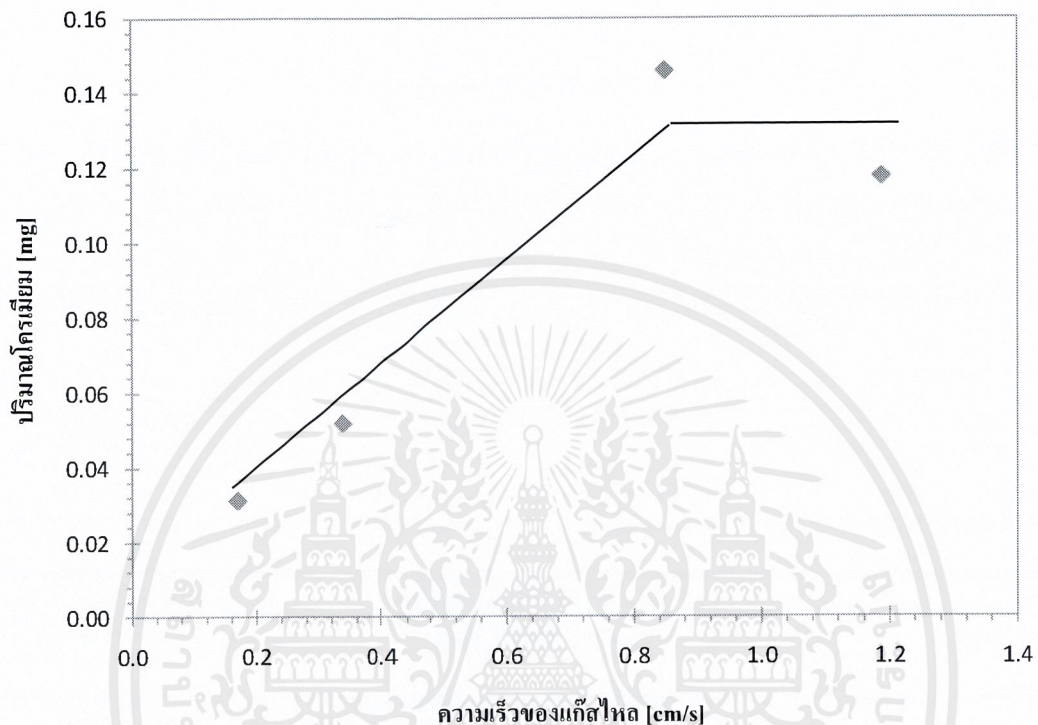
$$\text{slope} = -\frac{E_a}{R} = -16,684 \text{ K}$$

นั่นคือ

$$E_a = 33.15 \text{ kcal/gmol}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 อิทธิพลของอัตราการไหลของแก๊สที่มีผลต่อการระเหยของโครเมียม



รูปที่ 4-3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของแก๊สไหลกับปริมาณโครเมียมที่ระเหยในแก๊สออกซิเจนขึ้น 10% ที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 24 ชั่วโมง

จากรูปที่ 4-3 จะเห็นได้ว่าเมื่อความเร็วของแก๊สไหลเพิ่มขึ้น ปริมาณโครเมียมที่ระเหยจะเพิ่มขึ้นไปจนถึงค่าหนึ่ง จากนั้นมีแนวโน้มที่จะคงที่ แสดงให้เห็นว่าความเร็วของแก๊สไหล จะมีผลต่อการระเหยของโครเมียมจากสเกลโครเมียม แต่เมื่อความเร็วถึงค่าหนึ่ง จะไม่มีผลต่อการระเหยของโครเมียมจากสเกลโครเมียม

ในช่วงที่ปริมาณของโครเมียมที่ระเหยเพิ่มขึ้นตามความเร็วของแก๊สไหล เกิดขึ้นเนื่องจากอัตราการระเหยของโครเมียมยังถูกจำกัดด้วยการแพร่ ความเร็วของแก๊สไหลจึงยังมีผลต่อปริมาณของโครเมียมที่ระเหย แต่เมื่อความเร็วของแก๊สไหลถึงค่าหนึ่ง ปริมาณการระเหยของโครเมียมจะคงที่ ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากอัตราการระเหยของโครเมียมถูกจำกัดด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันของโครเมียมความเร็วของแก๊สไหลจึงไม่มีผลต่อปริมาณโครเมียมที่ระเหย ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยเรื่องอิทธิพลของอัตราการไหลที่มีต่ออัตราการระเหยโครเมียมของ Hideto Kurokawa และคณะ^[8]

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

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 เซนติเมตรต่อนาที พบว่าอุณหภูมิมีผลต่ออัตราการระเหยของโครเมียม เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ปริมาณโครเมียมที่ระเหยก็จะเพิ่มขึ้นตาม และมีพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาเท่ากับ 33.15 กิโลแคลอรีต่อกรัมโมล และพบว่าความเร็วของแก๊สไหลจะมีผลต่ออัตราการระเหยของโครเมียม ในช่วงที่การระเหยยังถูกจำกัดด้วยการแพร่ แต่เมื่อความเร็วของแก๊สไหลสูงถึงค่าหนึ่ง อัตราการระเหยของโครเมียมจะคงที่ เนื่องจากการระเหยของโครเมียมในช่วงนั้นถูกจำกัดด้วยอัตราการเกิดปฏิกิริยาของการระเหยของโครเมียมจากสเกลโครเมีย

5.2 วิจารณ์การทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการดำเนินการทดลองในขั้นแรก คือตั้งแต่การออกแบบ และประกอบชุดการทดลอง ระบบจึงยังไม่เสถียร อันเนื่องมาจากอุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ เช่น เตาเผาเกิดปัญหาบ่อยครั้ง ซึ่งต้องใช้เวลาในการดำเนินการซ่อมแซม และเครื่องบันทึกอุณหภูมิแสดงค่าผิดพลาดจากค่าที่ควรเป็นค่อนข้างมาก จึงต้องส่งเครื่องบันทึกอุณหภูมิไปทำการสอบเทียบในห้องปฏิบัติการ และดำเนินการซ่อมแซม เป็นต้น ซึ่งสาเหตุเหล่านี้ทำให้ไม่สามารถดำเนินงานตามแผนการดำเนินงานที่วางเอาไว้ การดำเนินการทดลองจึงเกิดความล่าช้า

5.3 ข้อเสนอแนะ

สำหรับการศึกษาเพิ่มเติม ควรทำการทดลองเพิ่มเติมโดยปรับเปลี่ยนความเร็วของแก๊สไหล ในช่วงจุดเปลี่ยนจากช่วงการถูกจำกัดด้วยการแพร่เป็นช่วงการถูกจำกัดด้วยอัตราการเกิดปฏิกิริยาการระเหยของโครเมียมจากสเกลโครเมีย เพื่อหาความเร็วของจุดเปลี่ยนที่แน่ชัด

เอกสารอ้างอิง

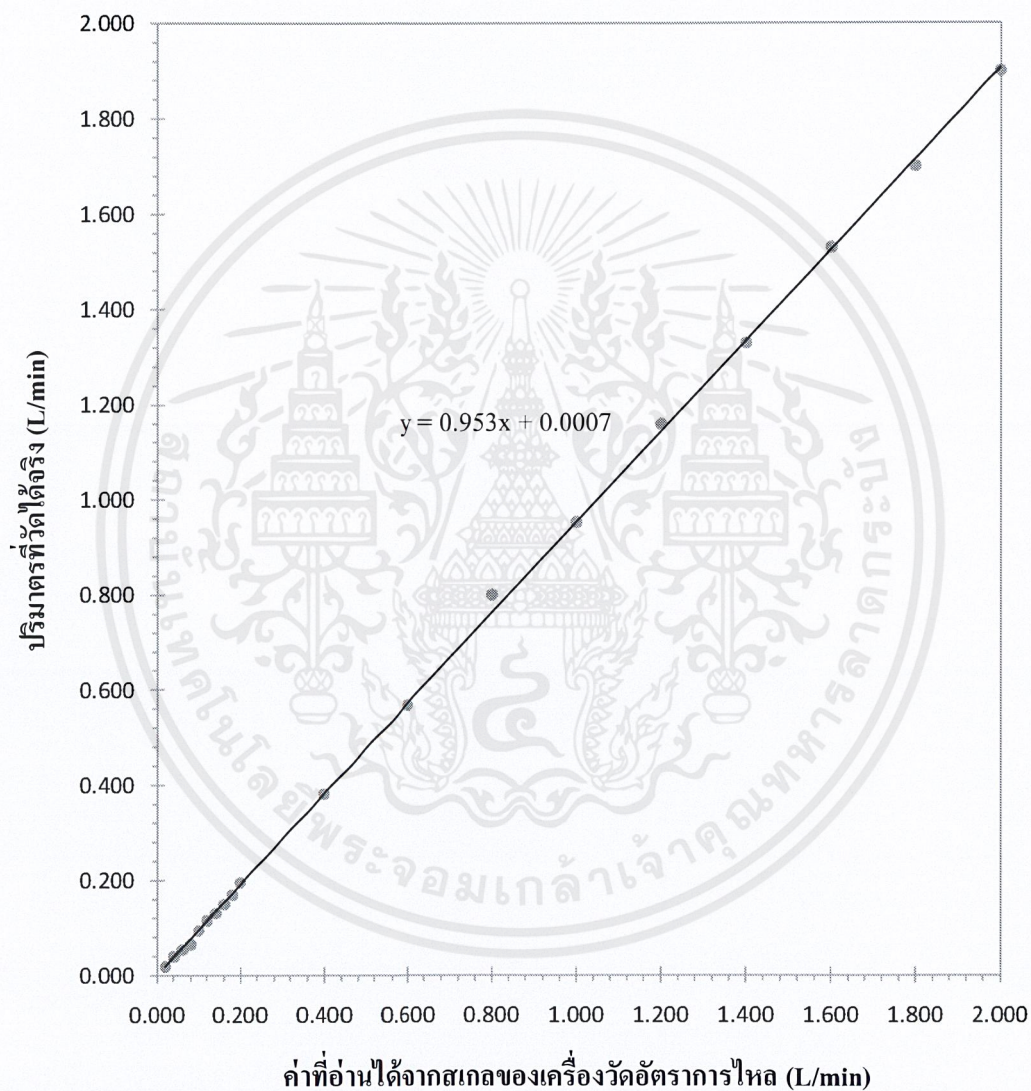
- [1] Bei Gou, Woon Ki Na, Bill Diong, FUEL CELLS Modeling, Control, and Applications, CRC Press, Boca Raton, FL, 2010.
- [2] M. Hashem Nehrir, Caisheng Wang, MODELING AND CONTROL OF FUELS CELL Distributed Generation Applications, IEEE Press, John Wiley & Sons, Inc., Publication, Hoboken, New Jersey, 2009.
- [3] Subhash C Singhal, Kevin Kendall, High Temperature Solid Oxide Fuel Cells: Fundamentals, Design and Applications, MPG Books Ltd, Bodmin, Cornwall, Great Britain, 2003.
- [4] Jeffrey W. Fergus, Rob Hui, Xianguo Li, David P. Wilkinson, Jiujun Zhang, SOLID OXIDE FUEL CELLS Materials Properties and Performance, CRC Press, Boca Raton, FL, 2009.
- [5] Vladimir S. Bagotsky, FUEL CELLS Problems and Solutions, John Wiley & Sons, Inc., USA, 2009.
- [6] Kevin Huang, John B. Goodenough, Solid oxide fuel cell technology Principles, performance and operations, Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC, India and USA, 2009.
- [7] M. Stanislowski, z E. Wessel, K. Hilpert, T. Markus,* and L. Singheiser, Chromium Vaporization from High-Temperature Alloys, Journal of The Electrochemical Society, 154, A295-A306 (2007).
- [8] Hideto Kurokawa*, Craig P. Jacobson, Lutgard C. DeJonghe, Steven J. Visco, Chromium vaporization of bare and of coated iron–chromium alloys at 1073 K, Solid State Ionics, 178, 287–296 (2007).
- [9] C. Collins , J. Lucas ,T.L. Buchanan , M. Kopczyk , A. Kayani , P.E. Gannon ,M.C. Deibert, R.J. Smith, D.-S. Choi , V.I. Gorokhovskiy, Chromium volatility of coated and uncoated steel interconnects for SOFCs, Surface & Coatings Technology, 201, 4467-4470, (2006).
- [10] H.Asteman, J.-E.Svensson, L.-G.Johansson, Evidence for Chromium Evaporation Influencing the Oxidation of 304 L: The Effect of Temperature and flow rate, Oxidation of Metals, Vol.57, 193-216, 2002.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [11] A.Yamauchi, K.Kurokawa, H.Takahashi, Evaporation of Cr_2O_3 in Atmospheres containing H_2O . Oxidation of Metals, Vol.59, 517-527, 2003.
- [12] D.J.Young, B.A.Pint, Chromium Volatilization Rates from Cr_2O_3 Flowing Gases Containing Water Vapor, Oxidation of Metals, SpringerScience and BusinessMedia Inc., Vol.66, 137-153, 2006.
- [13] Carl A. Stearns, Fred J. Kohl, and George C. Fryburg, Oxidative Vaporization Kinetics of Cr_2O_3 in Oxygen from 1000 to 1300°C, the National Aeronautics and Space Administration, NASA Lewis Research Center, Cleveland, Ohio, 945-951, 1974.
- [14] Online http://www.fctec.com/fctec_types_softc.asp. 09/2010
- [15] Online <http://www.energy.siemens.com/fi/en/power-generation/fuel-cells/principle-behind-technology.htm>. 09/2010
- [16] Online <http://people.bath.ac.uk/cf233/softc.html>. 09/2010

ภาคผนวก ก

กราฟมาตรฐาน



รูปที่ ก-1 กราฟมาตรฐานของอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน ที่ความดัน 2.5 บาร์

ภาคผนวก ข

ข้อมูลดิบ

ตารางที่ ข-1 แสดงข้อมูลทางกายภาพของแผ่นโลหะตัวอย่าง (430 Stainless Steel) ที่ใช้ในการทดลอง

การทดลอง	พื้นที่ผิวของชิ้นงานตัวอย่าง (ตารางเซนติเมตร)	น้ำหนักก่อนการทดลอง (มิลลิกรัม)	น้ำหนักหลังการทดลอง (มิลลิกรัม)
1	12.89	5741.80	5742.97
2	13.10	5787.56	5787.99
3	13.06	5915.26	5916.40
4	12.98	5709.70	6053.69
5	13.13	6057.09	6058.25
6	13.10	5986.12	5986.09
7	12.80	5919.10	5921.37

ตารางที่ ข-2 ข้อมูลสำหรับการทดลองที่ปรับเปลี่ยนอุณหภูมิ

การทดลอง	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อัตราการไหล (ลิตรต่อนาที)	เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณโครเมียม (มิลลิกรัม)
1	682.88	1	24	0.010812
2	762.86	1	24	0.146000
3	859.06	1	24	0.261025
4	911.40	1	24	0.370950

ตารางที่ ข-3 ข้อมูลสำหรับการทดลองที่ปรับเปลี่ยนอัตราการไหล

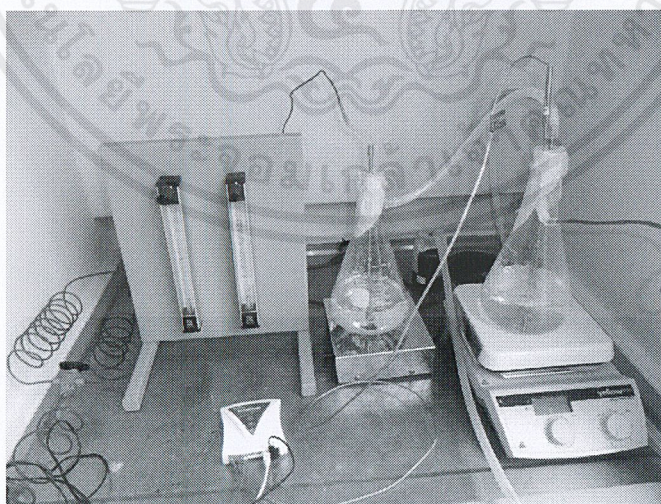
การทดลอง	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อัตราการไหล (ลิตรต่อนาที)	เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณโครเมียม (มิลลิกรัม)
5	780.55	0.2	24	0.031315
6	727.43	0.4	24	0.052000
7	763.64	1.4	24	0.117750

ภาคผนวก ค

รูปภาพชุดการทดลอง

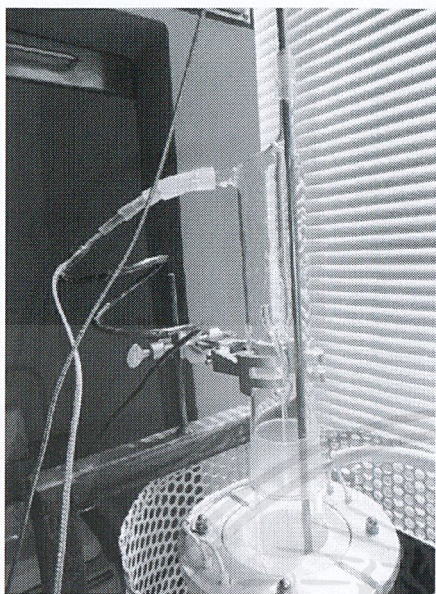


รูปที่ ค-1 ชุดการทดลอง

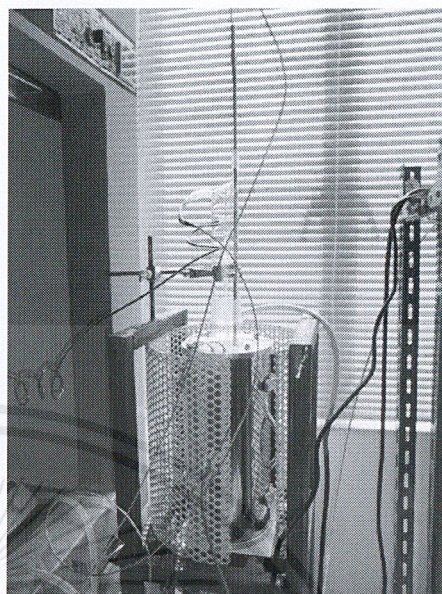


รูปที่ ค-2 เครื่องวัดอัตราการไหล ส่วนปรับความชื้น และเครื่องบันทึกอุณหภูมิ

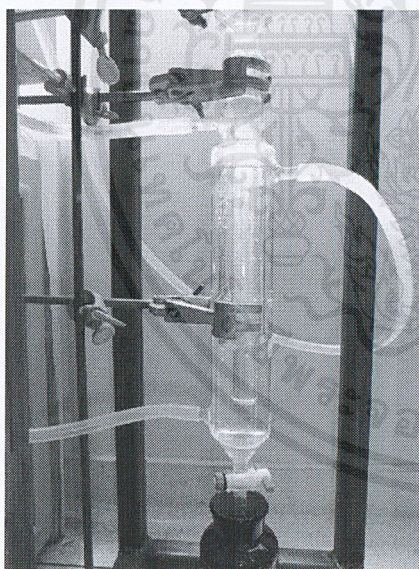
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



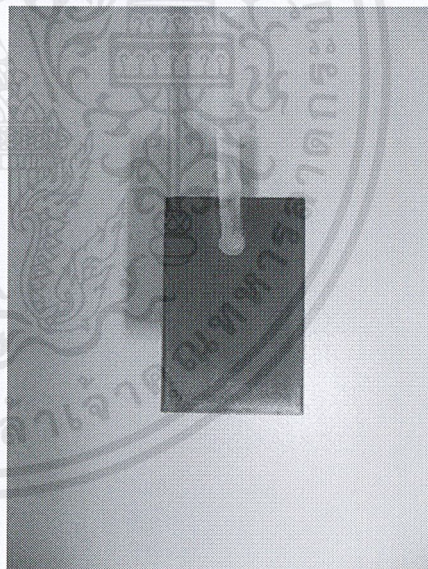
รูปที่ ค-3 ฝาแก้วครอบคอทอซซ์ที่ต่อกับเทอร์โม-
คัปเปิลและท่อแก๊ส



รูปที่ ค-4 เต้าเผา



รูปที่ ค-5 ตัวควบแน่น



รูปที่ ค-6 แผ่น โลหะ 430 Stainless Steel
ที่ผ่านการทำการทดลองแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้