

วัสดุกันแก๊สรั่วในเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง



ร.อ.อภิชาติ จิณแพทย์

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์

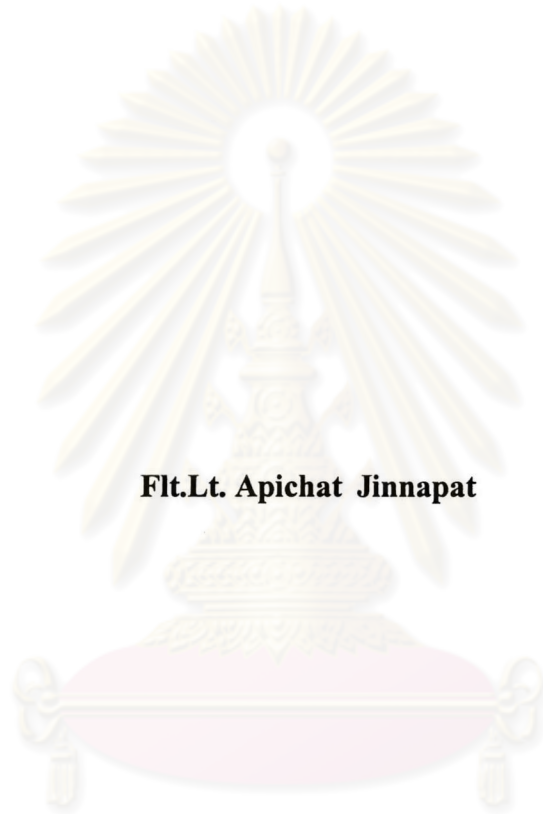
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974 – 17 – 5563 – 5

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**GAS – SEALING MATERIALS FOR SOLID OXIDE FUEL CELLS**



**Flt.Lt. Apichat Jinnapat**

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements  
for the Degree of Master of Science in Ceramic Technology**

**Department of Materials Science**

**Faculty of Science**

**Chulalongkorn University**

**ISBN 974 – 17 – 5563 – 5**

**Academic Year 2003**

หัวข้อวิทยานิพนธ์

วัสดุกันแก๊สรั่วในเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง

โดย

ร.อ.อภิชาติ จินแพทย

สาขาวิชา

เทคโนโลยีเซรามิก

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ ดร.ศิริชนวี เจียมศิริเลิศ

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

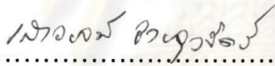
ดร.สุมิตรา จรสโรจน์กุล

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

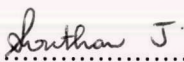


.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.เปี่ยมศักดิ์ เมนะเสวต)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์




.....ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร)



.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
(อาจารย์ ดร.ศิริชนวี เจียมศิริเลิศ)



.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(ดร.สุมิตรา จรสโรจน์กุล)



.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพัตรา จินาววัฒน์)



.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ไพพรรณ สันติสุข)

อภิชาติ จินแพทย์ : วัสดุกันแก๊สรั่วในเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง ( SEALING FOR SOLID OXIDE FUEL CELL ) อ.ที่ปรึกษา อ.ดร.ศิริชนวี เจียมศิริเลิศ ,  
อ.ที่ปรึกษาร่วม ดร.สุมิตรา จรสโรจน์กุล , 149 หน้า. ISBN 974-17-5563-5

จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อ ต้องการหาวัสดุที่มีความสามารถในการป้องกันการรั่วของแก๊สได้ดี โดยทำการศึกษากาวเซรามิกทางการค้าที่มีการขยายตัวทางความร้อนใกล้เคียงกับส่วนต่างๆ ของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง เช่นกาวเซรามิกชนิด 516 569 571 575 584 586 645N 685 835 และ 3062 วัสดุป้องกันแก๊สรั่วแบบวัสดุเชิงประกอบของผงแก้วไพเรกซ์ผสมกับผง YSZ อิเล็กโทรไลต์ และสารเติมแต่งโซเดียมอะลูมิเนต และวัสดุป้องกันแก๊สรั่วแบบวัสดุเชิงประกอบ โดยนำวัสดุป้องกันแก๊สรั่วแบบวัสดุเชิงประกอบของผงแก้วไพเรกซ์ผสมกับผง YSZ อิเล็กโทรไลต์ มาใช้ร่วมกับเส้นใยเซรามิก 650 ทำการศึกษาสมบัติการยึดติด การเข้ากันได้ทางเคมีกับส่วนต่างๆ ของเซลล์เชื้อเพลิง ความพรุนปรากฏ ค่าการขยายตัวทางความร้อน การยึดติดเมื่อผ่านวัฏจักรความร้อน และวัดอัตราการรั่วของแก๊สที่อุณหภูมิ 800 °C โดยใช้แก๊สฮีเลียมที่ความดัน 2 psig และใช้แรงอัดลดลงบนหน้าแปลน 25 psi

ผลปรากฏว่ากาวเซรามิกที่มีส่วนผสมหลักเป็นอะลูมินาเข้ากันได้ทางเคมีกับส่วนต่างๆ ของเซลล์ได้ดี แต่มีอัตราการรั่วของแก๊สสูง ประมาณ 0.5 cm<sup>3</sup> / min . cm เนื่องจากกาวเซรามิกมีความรูพรุนมาก ส่วนวัสดุป้องกันแก๊สรั่วแบบวัสดุเชิงประกอบทำปฏิกิริยากับส่วนต่างๆ ของเซลล์และเกิดเฟสคริสโตบาลิต ซึ่งมีการขยายตัวสูงในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 30 – 200 °C ทำให้เซลล์เชื้อเพลิงเกิดความเสียหาย แต่ป้องกันการรั่วของแก๊สได้ดี โดยมีอัตราการรั่วประมาณ 10<sup>-4</sup> cm<sup>3</sup> / min . cm เมื่อทดสอบที่วัฏจักรความร้อนที่ 3 เป็นเวลา 36 ชั่วโมง นอกจากนั้นเมื่อนำวัสดุป้องกันแก๊สรั่วแบบวัสดุเชิงประกอบมาใช้ร่วมกับเส้นใยเซรามิก 650 พบว่าอัตราการรั่วต่ำประมาณ 10<sup>-4</sup> cm<sup>3</sup> / min . cm เมื่อทดสอบที่วัฏจักรความร้อนที่ 3 โดยไม่ทำให้เซลล์เชื้อเพลิงเกิดความเสียหาย

ภาควิชา วัสดุศาสตร์  
สาขาวิชา เทคโนโลยีเซรามิก  
ปีการศึกษา 2543

ลายมือชื่อนิติ..... อภิชาติ จินแพทย์  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... Sathar J.  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....



# # 4372475723 : MAJOR CERAMIC TECHNOLOGY

KEYWORD : SOLID OXIDE FUEL CELL / SEALING / GLASS CERAMIC / SLIDING SEAL  
/ MICA / LEAK RATE

APICHAT JINNAPHAT : GAS - SEALING MATERIALS FOR SOLID  
OXIDE FUEL CELLS. THESIS ADVISOR : SIRITHAN JIAMSIRILERS, Ph.D.,  
THESIS CO – ADVISOR : SUMITTRA CHAROJROCHKUL, Ph.D. 149 pp.  
ISBN 974-17-5563-5.

The purpose of this study was to investigate suitable sealing materials that prevent gas leakage in solid oxide fuel stack. Ceramic adhesives such as cerabond 516, 571, 569, 575, 584, 586, 645N, 685, 835 and 3062 that have the coefficients of thermal expansion close to that of solid oxide fuel cells component, ceramic – glass composite seals (consisting of Pyrex glass, ceramic powder of YSZ electrolyte and sodium aluminate additive) and composite seal using ceramic – glass composites with ceramic fiber 650 were selected in this paper. This study was concentrated on bonding between ferritic stainless steel and YSZ pellet, chemical compatibility in both oxidizing and reducing atmospheres, apparent porosity, coefficient of thermal expansion, thermal cycles, and gas leakage at 800 °C using He gradient pressure at 2 psig and dead load at 25 psi. It was found that the selected ceramic adhesives were not suitable as sealing because they had high leakage rate  $\approx 0.5 \text{ cm}^3 / \text{min} \cdot \text{cm}$  corresponding to the high apparent porosity. The ceramic - glass composites had detrimental phase cristobalite after the first thermal cycle (12 hrs) contributed to crack in seal although the gas leakage rate was low  $\approx 10^{-4} \text{ cm}^3 / \text{min} \cdot \text{cm}$  after the third thermal cycle (36 hrs). A composite seal containing ceramic fiber seemed promising from the low gas leakage rate  $\approx 10^{-4} \text{ cm}^3 / \text{min} \cdot \text{cm}$  after the third thermal cycle without deteriorating the cell components.

Department Materials Science

Field of study Ceramic Technology

Academic year 2003

Student's signature..... Apichat Jinnapat

Advisor's signature..... Sirithan J.

Co-Advisor's signature..... Sumittra Charojrochkul

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยได้รับคำแนะนำปรึกษาทางด้านวิชาการ และความเอื้อเฟื้อสถานที่ เครื่องมือและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย ตลอดจนได้รับความช่วยเหลือ และแนวทางในด้านต่างๆ ดังนี้

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.ศิริชนวี เจียมศิริเลิศ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.สุมิตรา จรสโรจน์กุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม คณาจารย์ภาควิทยาศาสตร์ทุกท่าน ที่กรุณาให้คำแนะนำปรึกษาทางด้านวิชาการ และช่วยแก้ไขปัญหามาต่างๆ ตลอดจนให้กำลังใจในงานวิจัยสำเร็จไปด้วยดี

ขอขอบคุณโรงเรียนนายเรืออากาศ กองบัญชาการฝึกศึกษาทหารอากาศ ผู้บังคับบัญชาทุกท่าน ที่สนับสนุนให้รับทุน ทอ. จนสำเร็จการศึกษา

ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ที่จัดสรรเงินทุนจากโครงการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็งเพื่อเป็นเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้า เอื้อเฟื้อสถานที่และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ได้อบรมเลี้ยงดู และส่งเสริมการศึกษามาอย่างดีและเต็มความสามารถ ญาติพี่น้องที่ให้กำลังใจ และให้การสนับสนุนจนสำเร็จการศึกษา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ง
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป.....	ฏ

### บทที่

1. บทนำ.....	1
1.1 วัตถุประสงค์และขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.2 ความสำคัญหรือประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2. วารสารปริทัศน์.....	4
2.1 วัสดุที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง.....	5
2.1.1 อิเล็กโทรไลต์.....	5
2.1.2 แอโนด.....	5
2.1.3 แคโทด.....	5
2.1.4 อินเตอร์คอนเนค.....	5
2.1.5 วัสดุป้องกันแก๊สรั่ว.....	5
2.1.5.1 วัสดุป้องกันแก๊สรั่วใช้ระบบยึดติด.....	6
2.1.5.2 วัสดุป้องกันแก๊สรั่วแบบใช้แรงอัด.....	8
2.2 สมบัติของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วในเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง.....	8
2.2.1 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน.....	8
2.2.2 การมีเสถียรภาพ.....	9
2.2.3 การเข้ากันได้ทางเคมี กับส่วนต่างๆของเซลล์เชื้อเพลิง.....	11
2.2.4 ค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้า.....	15
2.2.5 ค่าความหนืด.....	15
2.2.6 สมบัติการเปียก (wetting).....	16
2.2.7 อัตราการรั่วของแก๊ส.....	16



3. ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย.....	20
3.1 อุปกรณ์การทดลอง.....	20
3.2 วัสดุคืบและสารเคมี .....	21
3.2.1 กาวเซรามิก.....	22
3.2.2 แก้ว.....	24
3.2.3 เหล็กกล้าไร้สนิม.....	24
3.2.4 เส้นใยเซรามิก .....	25
3.2.5 แคลโทด.....	26
3.2.6 อิเล็กโทรไลต์.....	26
3.2.7 แอนโอด.....	26
3.2.8 สารเติมแต่ง.....	26
3.3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	26
3.3.1 กาวเซรามิก.....	26
3.3.1.1 การเลือกใช้กาวเซรามิกทำการทดลอง.....	27
3.3.1.2 การทดสอบการยึดติดของกาวเซรามิกกับเหล็กกล้าไร้สนิม ชนิดพิเศษที่ใช้สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ ของแข็ง และกับเพลตเสีตของอิเล็กโทรไลต์ (8YSZ).....	27
3.3.1.3 การทดสอบการเข้ากันได้ทางเคมีของกาวเซรามิก กับอิเล็กโทรไลต์ อิเล็กโทรด และอินเตอร์คอนเนค.....	28
3.3.1.4 การทดสอบค่าความเค้นแรงเฉือนของกาวเซรามิกกับ เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 430.....	29
3.3.1.5 ทดสอบความพรุนปรากฏ (apparent porosity, %) .....	30
3.3.1.6 การทดสอบการรั่วของระบบชุดทดสอบการรั่ว ที่อุณหภูมิ 800 °C.....	31
3.3.1.7 การทดสอบการรั่วของกาวเซรามิกกับ เหล็กกล้าไร้สนิมเกรดพิเศษที่ใช้สำหรับ เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง ที่อุณหภูมิ 800 °C.....	33
3.3.2 วัสดุป้องกันแก๊สรั่วแบบวัสดุเชิงประกอบ (composite seal).....	35
3.3.2.1 การออกแบบการทดลอง.....	36
3.3.2.2 ทดสอบการยึดติดของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วแบบวัสดุเชิงประกอบ กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดพิเศษ.....	36



3.3.2.3 การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน.....	37
3.3.2.4 ทดสอบหาค่าความเค้นแรงเฉือน.....	38
3.3.2.5 ทดสอบการเข้ากันได้ทางเคมีของวัสดุป้องกันแก๊สรั่ว แบบวัสดุเชิงประกอบกับ แอโนด แคโทด อิเล็กโทรไลต์ และอินเตอร์คอนเนค ในภาวะออกซิไดซิง และรีดิวซิง.....	38
3.3.2.6 ทดสอบการยึดติดและการแพร่ของธาตุของวัสดุป้องกันแก๊สรั่ว แบบวัสดุเชิงประกอบกับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดพิเศษ เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อน.....	39
3.3.2.7 ทดสอบความพรุนปรากฏ.....	40
3.3.2.8 ทดสอบการรั่วของแก๊สกับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดพิเศษ และเพลตเต็ของอิเล็กโทรไลต์ ที่อุณหภูมิ 800 °C โดยผ่านวัฏจักรความร้อน.....	41
3.3.2.9 การทดสอบการรั่วกับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดพิเศษ ที่อุณหภูมิ 800 °C เมื่อนำเซรามิกไฟเบอร์ 650 มาใช้ร่วมกับวัสดุป้องกันแก๊สรั่วแบบวัสดุเชิงประกอบ .....	43
4. การสร้างอุปกรณ์และเครื่องมือในการทดสอบการรั่วของแก๊ส.....	46
4.1 หน้าแปลน (Flange).....	46
4.1.1 แบบที่ 1 ประกอบต่อเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316 กับหน้าแปลนด้วยการขันเกลียว.....	46
4.1.2 แบบที่ 2 ประกอบต่อเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316 กับหน้าแปลน ด้วยข้อต่อเชื่อมต่อ (fitting).....	47
4.1.3 แบบที่ 3 เชื่อมต่อเหล็กกล้าไร้สนิม 316 กับหน้าแปลนเหล็กกล้าไร้สนิม 316.....	48
4.1.4 แบบที่ 4 เชื่อมแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 430 เข้ากับหน้าแปลนเหล็กกล้าไร้สนิม 316.....	48
4.1.5 แบบที่ 5 เหล็กกล้าไร้สนิมเกรดพิเศษ (ferritic stainless steel) ที่ใช้สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง .....	49
4.2 หน้าแปลนทดสอบการรั่วของระบบทดสอบการรั่ว.....	50
4.3 ชูคน้ำหนักกดทับ (load) บนหน้าแปลน.....	50
4.4 ระบบทดสอบการรั่วของแก๊ส.....	52
4.4.1 แบบที่ 1.....	52

4.4.2 แบบที่ 2.....	53
5. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	55
5.1 กาวเซรามิก.....	55
5.1.1 การทดสอบการยึดติดของกาวเซรามิกกับเหล็กกล้าไร้สนิม เกรดพิเศษที่ใช้สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง และกับเพลตของอิเล็กโทรไลต์.....	55
5.1.2. ค่าความเค้นแรงเฉือน.....	60
5.1.3 การทดสอบการเข้ากันได้ทางเคมี.....	60
5.1.3.1 กาวเซรามิก 569.....	60
5.1.3.2 กาวเซรามิก 575.....	63
5.1.3.3 กาวเซรามิก 586.....	66
5.1.4 ความพรุนปรากฏ.....	69
5.1.5 การรั่วของแก๊สที่อุณหภูมิ 800 °C.....	70
5.1.5.1 ทดสอบการรั่วของระบบชุดทดสอบการรั่ว.....	70
5.1.5.2 หน้าแปลนทดสอบการรั่ว.....	71
5.1.5.3 ทดสอบการรั่วของแก๊สของระบบทดสอบการรั่วแบบใช้แรงอัด...73	
5.1.5.4 การวัดอัตราการรั่วของกาวเซรามิก.....	75
5.2 ผลการทดลองวัสดุป้องกันแก๊สรั่วแบบวัสดุเชิงประกอบ.....	75
5.2.1 วัสดุป้องกันแก๊สรั่วแบบวัสดุเชิงประกอบ.....	75
5.2.1.1 การออกแบบการทดลอง.....	75
5.2.1.2 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน.....	79
5.2.1.3 ค่าความเค้นแรงเฉือน.....	82
5.2.1.4 การทดสอบการเข้ากันได้ทางเคมี.....	82
5.2.1.5 ความพรุนปรากฏ.....	89
5.2.1.6 การทดสอบการยึดติดเมื่อผ่านวัฏจักรความร้อน.....	89
5.2.1.7 การทดสอบการรั่วของวัสดุป้องกันการรั่วแบบ วัสดุเชิงประกอบโดยใช้วัสดุป้องกันการรั่วสูตรที่ 1 กับเส้นใยเซรามิก 650 ที่อุณหภูมิ 800 °C.....	126
6. สรุป.....	130
6.1 อุปกรณ์และเครื่องมือในการทดสอบการรั่ว.....	130
6.1.1 หน้าแปลนทดสอบการรั่ว.....	130

6.1.2 ชุดทดสอบการรื้อ.....	130
6.1.3 ชุดน้ำหนักรัดทึบหน้าแปลนทดสอบการรื้อ.....	130
6.2 กาวเซรามิก.....	131
6.3 วัสดุป้องกันแก๊สรื้อแบบวัสดุเชิงประกอบ.....	131
6.4 ข้อเสนอแนะในอนาคต.....	131
รายการอ้างอิง.....	132
ภาคผนวก ก.....	136
ภาคผนวก ข.....	139
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	149



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## สารบัญญัตินี้

ตารางที่	หน้า
2.1 ระบบของแก้ว และค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของโครงสร้างผลึก.....	6
2.2 สมบัติของแก้วเซรามิก.....	7
2.3 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของแก้ว และแก้วเซรามิก.....	8
2.4 ระบบของแก้วที่ทำการทดสอบการเข้ากันได้ทางเคมีกับเหล็กกล้าไร้สนิม YSZ และกับ Ni.....	12
2.5 การเกิดปฏิกิริยาเคมีของแก้วอะลูมิโนซิลิเกตกับ Ni , YSZ และเหล็กกล้าไร้สนิมทั้งภาวะออกซิไดซิง และรีดิวซิง ที่อุณหภูมิ 1000 °C เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง.....	13
2.6 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของแก้วเซรามิก.....	15
2.7 ค่าความหนืดของแก้วเซรามิกที่อุณหภูมิสูง.....	15
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	20
3.2 วัตถุประสงค์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	21
3.3 สมบัติทั่วไปของแก้วเซรามิก.....	22
3.4 สมบัติทั่วไปของแก้วไพเร็กซ์.....	24
3.5 สมบัติทั่วไปของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดเฟอร์ริติก อีเล็ก โทรด และ อีเล็ก โทรไลต์.....	24
3.6 สมบัติทั่วไปของเส้นใยเซรามิก Nextel™ 650.....	25
3.7 การออกแบบการทดลองเพื่อหาส่วนผสมที่สามารถป้องกันการรั่วของแก๊สได้ดีที่สุด.....	36
5.1 ผลการทดสอบการยึดติดของแก้วเซรามิกกับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดพิเศษ และเพลตเหล็กของอีเล็ก โทรไลต์ (YSZ).....	55
5.2 ค่าความเค้นแรงเฉือนของแก้วเซรามิก.....	60
5.3 เฟสที่เกิดจากการผสมแก้วเซรามิก กับ ผงของ LSM, Ni / YSZ, YSZ และเหล็กกล้าไร้สนิม เผาที่อุณหภูมิ 1000 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ในบรรยากาศออกซิไดซิง และรีดิวซิง .....	69
5.4 ความพรุนปรากฏของแก้วเซรามิก.....	69
5.5 อัตราการรั่วของแก้วเซรามิก.....	75
5.6 ส่วนผสมของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วแบบวัสดุเชิงประกอบและอัตราการรั่วของแก๊ส.....	75
5.7 ค่าการขยายตัวทางความร้อนของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วแบบวัสดุเชิงประกอบ.....	81
5.8 ค่าความเค้นแรงเฉือนของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วแบบวัสดุเชิงประกอบสูตรที่ 1 และ 5.....	82



5.9 เฟสที่เกิดจากการผสมผงของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 1 และ 5 กับ ผงของ LSM, Ni / YSZ, YSZ และเหล็กกล้าไร้สนิม เผาที่อุณหภูมิ 1000 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ในบรรยากาศออกซิไดซิง และรีดิวซิง.....	88
5.10 แสดงค่าความพรุนปรากฏของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วแบบวัสดุเชิงประกอบสูตรที่ 1 และ 5.....	89
5.11 สรุปผลรวมการยึดติด ลักษณะโครงสร้าง และการแพร่ของธาตุ เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนของ วัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 1 และ 5 กับเหล็กกล้าไร้สนิม และแผ่นเทป YSZ .....	125
5.12 การรั่วของแก๊สของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วแบบวัสดุเชิงประกอบแบบที่ 2 ที่อุณหภูมิ 800 °C เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อน.....	128

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ส่วนประกอบและการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง.....	4
2.2 รูปแบบการจัดวัสดุป้องกันแก๊สรั่วแบบ D .....	18
3.1 แผนภูมิแสดงขั้นตอนและวิธีการทดลองของกาวเซรามิก.....	26
3.2 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (XRD).....	29
3.3 เครื่องทดสอบกำลังอัดประลัย.....	30
3.4 ชุดทดสอบการรั่วของระบบ.....	32
3.5 ชุดทดสอบการรั่วของวัสดุป้องกันแก๊สรั่ว.....	34
3.6 แผนภูมิแสดงขั้นตอนและวิธีการทดลองของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วแบบวัสดุเชิงประกอบ.....	35
3.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	40
4.1 หน้าแปลนทดสอบการรั่วของแก๊สแบบที่ 1.....	47
4.2 หน้าแปลนทดสอบการรั่วของแก๊สแบบที่ 2.....	47
4.3 หน้าแปลนทดสอบการรั่วของแก๊สแบบที่ 3.....	48
4.4 หน้าแปลนทดสอบการรั่วของแก๊สแบบที่ 4.....	49
4.5 หน้าแปลนทดสอบการรั่วของแก๊สแบบที่ 5.....	49
4.6 หน้าแปลนทดสอบการรั่วของแก๊สของระบบทดสอบการรั่ว.....	50
4.7 แท่งเหล็กสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ใช้เป็นน้ำหนักรัดทาบ.....	51
4.8 ท่อเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316 ที่ใช้เป็นตัวส่งถ่ายน้ำหนัก.....	51
4.9 ลักษณะของชุดน้ำหนักกดทับที่กระทำบนหน้าแปลน.....	52
4.10 ชุดทดสอบการรั่วของแก๊สแบบที่ 1.....	53
4.11 ชุดทดสอบการรั่วของแก๊สแบบที่ 2.....	54
5.1 ร่องรอยการไม่ยึดติดของกาวเซรามิก 516 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดพิเศษ ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง .....	56
5.2 ร่องรอยการไม่ยึดติดของกาวเซรามิก 569 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดพิเศษ ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง .....	57
5.3 ร่องรอยการไม่ยึดติดของกาวเซรามิก 835 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดพิเศษ ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	57
5.4 ร่องรอยการไม่ยึดติดของกาวเซรามิก 3062 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดพิเศษ ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	57

5.5 การยึติดิจของกาวเซรามิก 569 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดพิเศษ ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	58
5.6 ร่องรอยการยึติดิจของกาวเซรามิก 569 กับเพลลิตของ YSZ ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	58
5.7 ร่องรอยการยึติดิจของกาวเซรามิก 571 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดพิเศษ ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	58
5.8 ร่องรอยการยึติดิจของกาวเซรามิก 575 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดพิเศษ ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	59
5.9 ร่องรอยการยึติดิจของกาวเซรามิก 575 กับเพลลิตของ YSZ ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	59
5.10 ร่องรอยการยึติดิจของกาวเซรามิก 586 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดพิเศษ ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	59
5.11 ร่องรอยการยึติดิจของกาวเซรามิก 586 กับเพลลิตของ YSZ ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	60
5.12 ผลการวิเคราะห์ XRD ในการเผาเพลลิตของผงกาวเซรามิก 569 ผสมกับผง LSM ที่อุณหภูมิ 1000 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ในอากาศ และในแก๊สไฮโดรเจน 7 เปอร์เซ็นต์ ในแก๊สอาร์กอน.....	61
5.13 ผลการวิเคราะห์ XRD ในการเผาเพลลิตของผงกาวเซรามิก 569 ผสมกับผง Ni / YSZ ที่อุณหภูมิ 1000 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ในอากาศ และในแก๊สไฮโดรเจน 7 เปอร์เซ็นต์ ในแก๊สอาร์กอน.....	62
5.14 ผลการวิเคราะห์ XRD ในการเผาเพลลิตของผงกาวเซรามิก 569 ผสมกับผง ของเหล็กกล้าไร้สนิม ที่อุณหภูมิ 1000 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ในอากาศ และในแก๊สไฮโดรเจน 7 เปอร์เซ็นต์ ในแก๊สอาร์กอน.....	63
5.15 ผลการวิเคราะห์ XRD ในการเผาเพลลิตของผงกาวเซรามิก 575 ผสมกับผง LSM ที่อุณหภูมิ 1000 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ในอากาศ และในแก๊สไฮโดรเจน 7 เปอร์เซ็นต์ ในแก๊สอาร์กอน.....	64
5.16 ผลการวิเคราะห์ XRD ในการเผาเพลลิตของผงกาวเซรามิก 575 ผสมกับผง Ni / YSZ ที่อุณหภูมิ 1000 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ในอากาศ และในแก๊สไฮโดรเจน 7 เปอร์เซ็นต์ ในแก๊สอาร์กอน.....	64



5.17 ผลการวิเคราะห์ XRD ในการเผาเพลลิตของผงกาวเซรามิก 575 ผสมกับผง  
ของเหล็กกล้าไร้สนิม ที่อุณหภูมิ 1000 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ในอากาศ  
และในแก๊สไฮโดรเจน 7 เปอร์เซ็นต์ ในแก๊สอาร์กอน.....65

5.18 ผลการวิเคราะห์ XRD ในการเผาเพลลิตของผงกาวเซรามิก 586 ผสมกับผง LSM  
ที่อุณหภูมิ 1000 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ในอากาศ และในแก๊สไฮโดรเจน  
7 เปอร์เซ็นต์ ในแก๊สอาร์กอน.....66

5.19 ผลการวิเคราะห์ XRD ในการเผาเพลลิตของผงกาวเซรามิก 586 ผสมกับผง Ni / YSZ  
ที่อุณหภูมิ 1000 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ในอากาศ และในแก๊สไฮโดรเจน  
7 เปอร์เซ็นต์ ในแก๊สอาร์กอน.....67

5.20 ผลการวิเคราะห์ XRD ในการเผาเพลลิตของผงกาวเซรามิก 586  
ผสมกับผงของเหล็กกล้าไร้สนิม ที่อุณหภูมิ 1000 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง  
ในอากาศ และในแก๊สไฮโดรเจน 7 เปอร์เซ็นต์ ในแก๊สอาร์กอน.....68

5.21 การทดสอบการรั่วของกาวเซรามิก 569 กับหน้าแปลนเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316.....72

5.22 การโค้งตัวของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 430  
ออกจากหน้าแปลนเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316.....72

5.23 การทดสอบการรั่วของระบบ.....73

5.24 แสดงชุดทดสอบการรั่วแบบใช้แรงอัดของระบบป้องกันการรั่วแบบไฮบริด.....74

5.24 การยึดติดของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 1 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดพิเศษ  
ที่ผ่านการเผาผืนที่ ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง .....74

5.25 การยึดติดของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 5 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดพิเศษ  
ที่ผ่านการเผาผืนที่ ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง .....77

5.27 การยึดติดของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตร 1 กับเพลลิตของ YSZ ที่ผ่านการเผาผืนที่  
ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง .....78

5.28 การไม่ยึดติดของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 5 กับเพลลิตของ YSZ  
ที่ผ่านการเผาผืนที่ ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....78

5.29 การเป็ยกของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 1 กับผิวเพลลิต YSZ  
ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....78

5.30 การไม่เป็ยกของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 5 กับผิวเพลลิต YSZ  
ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....79

5.31 การขยายตัวทางความร้อนของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วแบบวัสดุเชิงประกอบ  
ที่ผ่านการเผาผืนที่ ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง.....80



5.32 เฟสที่เกิดขึ้นในวัสดุป้องกันแก๊สรั่วแบบวัสดุเชิงประกอบทั้ง 5 สูตร ที่ผ่านการเผาผนึก ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง.....	81
5.33 แสดงผลการวิเคราะห์ XRD ในการเผาเพลลิตของผงวัสดุป้องกันแก๊สรั่ว แบบวัสดุเชิงประกอบสูตรที่ 1 ผสมกับผง LSM ที่อุณหภูมิ 1000 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ในอากาศ และบรรยากาศแก๊สไฮโดรเจน 7 เปอร์เซ็นต์ ในแก๊สอาร์กอน.....	83
5.34 ผลการวิเคราะห์ XRD ในการเผาเพลลิตของผงวัสดุป้องกันแก๊สรั่ว แบบวัสดุเชิงประกอบสูตรที่ 1 ผสมกับผง Ni / YSZ ที่อุณหภูมิ 1000 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ในอากาศ และบรรยากาศแก๊สไฮโดรเจน 7 เปอร์เซ็นต์ ในแก๊สอาร์กอน.....	84
5.35 แสดงผลการวิเคราะห์ XRD ในการเผาเพลลิตของผงวัสดุป้องกันแก๊สรั่ว แบบวัสดุเชิงประกอบสูตรที่ 1 ผสมกับผงของเหล็กกล้าไร้สนิม ที่อุณหภูมิ 1000 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ในอากาศ และแก๊สไฮโดรเจน 7 เปอร์เซ็นต์ ในแก๊สอาร์กอน.....	85
5.36 ผลการวิเคราะห์ XRD ในการเผาเพลลิตของผงวัสดุป้องกันแก๊สรั่วแบบวัสดุเชิงประกอบ สูตรที่ 5 ผสมกับผง LSM ที่อุณหภูมิ 1000 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ในอากาศ และแก๊สไฮโดรเจน 7 เปอร์เซ็นต์ ในแก๊สอาร์กอน.....	86
5.37 ผลการวิเคราะห์ XRD ในการเผาเพลลิตของผงวัสดุป้องกันแก๊สรั่วแบบวัสดุเชิงประกอบ สูตรที่ 5 ผสมกับผง Ni / YSZ ที่อุณหภูมิ 1000 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ในอากาศ และแก๊สไฮโดรเจน 7 เปอร์เซ็นต์ ในแก๊สอาร์กอน.....	87
5.38 ผลการวิเคราะห์ XRD ในการเผาเพลลิตของผงวัสดุป้องกันแก๊สรั่ว แบบวัสดุเชิงประกอบ สูตรที่ 5 ผสมกับผงเหล็กกล้าไร้สนิม ที่อุณหภูมิ 1000 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ในอากาศ และบรรยากาศแก๊สไฮโดรเจน 7 เปอร์เซ็นต์ ในแก๊สอาร์กอน.....	88
5.39 ภาพถ่าย SEM ของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 1 กับเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อผ่าน วัฏจักรความร้อนที่หนึ่ง เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800 °C ในอากาศ.....	90
5.40 ภาพถ่าย SEM รอยแตกที่เกิดขึ้นในวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 1 ที่ประกอบอยู่กับ เหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่หนึ่งเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800 °C ในอากาศ.....	91

5.41 ผลการวิเคราะห์ Linear EDX ที่เกิดขึ้นที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุ ป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 1 กับเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อน ที่หนึ่งเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800 °C ในอากาศ.....	91
5.42 ภาพถ่าย SEM การยึดติดของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 1 กับแผ่นเทป YSZ เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่หนึ่ง เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800 °C ในอากาศ.....	92
5.43 ภาพถ่าย SEM รอยแตกของแผ่นเทป YSZ ที่ประกบอยู่กับวัสดุป้องกันแก๊สรั่ว สูตรที่ 1 เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่หนึ่งเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800 °C ในอากาศ.....	93
5.44 ผลการวิเคราะห์ Linear EDX ที่เกิดขึ้นที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุ ป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 1 กับแผ่นเทป YSZ เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อน ที่หนึ่งเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800 °C ในอากาศ.....	93
5.45 ภาพถ่าย SEM การยึดติดของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 5 กับเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่หนึ่ง เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800 °C ในอากาศ.....	94
5.46 ภาพถ่าย SEM รอยแตกที่เกิดขึ้นในวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 5 ที่ประกบกับเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่หนึ่งเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800 °C ในอากาศ.....	94
5.47 ผลการวิเคราะห์ Linear EDX ที่เกิดขึ้นที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุ ป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 5 กับเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อน ที่หนึ่งเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800 °C ในอากาศ.....	95
5.48 ภาพถ่าย SEM การยึดติดของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 5 กับแผ่นเทป YSZ เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่หนึ่งเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800 °C ในอากาศ.....	96
5.49 ภาพถ่าย SEM รอยแตกของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 5 ที่ประกบกับแผ่นเทป YSZ เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่หนึ่งเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800 °C ในอากาศ.....	96
5.50 ผลการวิเคราะห์ Linear EDX ที่เกิดขึ้นที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุ ป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 5 กับแผ่นเทป YSZ เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่หนึ่ง เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800 °C ในอากาศ.....	97
5.51 ภาพถ่าย SEM การยึดติดของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 1 กับเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่สอง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800 °C ในอากาศ.....	98
5.52 ภาพถ่าย SEM รอยแตกที่เกิดขึ้นในวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 1 ที่ประกบอยู่กับ เหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่สอง 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800 °C ในอากาศ.....	98



- 5.53 ผลการวิเคราะห์ Linear EDX ที่เกิดขึ้นที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุ  
ป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 1 กับเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่สอง  
เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800 °C ในอากาศ..... 99
- 5.54 ภาพถ่าย SEM การยึดติดของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 1 กับแผ่นเทพ YSZ  
เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่สอง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800 °C ในอากาศ.....99
- 5.55 ภาพถ่าย SEM รอยแตกของแผ่นเทพ YSZ และวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 1  
ที่ประกบอยู่ด้วยกัน เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่สองเป็นเวลา 24 ชั่วโมง  
ที่อุณหภูมิ 800 °C ในอากาศ.....100
- 5.56 ผลการวิเคราะห์ Linear EDX ที่เกิดขึ้นที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุ  
ป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 1 กับแผ่นเทพ YSZ เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่สอง  
เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800 °C ในอากาศ.....100
- 5.57 ภาพถ่าย SEM การยึดติดของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 5 กับเหล็กกล้าไร้สนิม  
เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่สองเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800 °C ในอากาศ.....101
- 5.58 ภาพถ่าย SEM รอยแตกที่เกิดขึ้นในวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 5  
ที่ประกบอยู่กับเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่สอง  
เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800 °C ในอากาศ.....102
- 5.59 ผลการวิเคราะห์ Linear EDX ที่เกิดขึ้นที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุ  
ป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 5 กับเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อน  
ที่สองเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800 °C ในอากาศ.....102
- 5.60 ภาพถ่าย SEM การยึดติดของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 5 กับแผ่นเทพ YSZ  
เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่สองเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800 °C ในอากาศ.....103
- 5.61 ภาพถ่าย SEM รอยแตกของแผ่นเทพ YSZ และวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 5  
ที่ประกบอยู่ด้วยกัน เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่สองเป็นเวลา 24 ชั่วโมง  
ที่อุณหภูมิ 800 °C ในอากาศ.....103
- 5.62 ผลการวิเคราะห์ Linear EDX ที่เกิดขึ้นที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุ  
ป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 5 กับแผ่นเทพ YSZ เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่สอง  
เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800 °C ในอากาศ.....104
- 5.63 ภาพถ่าย SEM การยึดติดของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 1 กับเหล็กกล้าไร้สนิม  
เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่สาม เป็นเวลา 36 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800 °C ในอากาศ.....105

- 5.64 ภาพถ่าย SEM รอยแตกที่เกิดขึ้นในวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสุตรที่ 1 ที่ประกอบอยู่  
กับเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่สามเป็นเวลา 36 ชั่วโมง  
ที่อุณหภูมิ 800 °C ในอากาศ.....105
- 5.65 ผลการวิเคราะห์ Linear EDX ที่เกิดขึ้นที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุ  
ป้องกันแก๊สรั่วสุตรที่ 1 กับเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อน  
ที่สามเป็นเวลา 36 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800 °C ในอากาศ.....106
- 5.66 ภาพถ่าย SEM การยึดติดของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสุตรที่ 1 กับแผ่นเทพ YSZ  
เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่สาม เป็นเวลา 36 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800 °C ในอากาศ.....106
- 5.67 ภาพถ่าย SEM รอยแตกของแผ่นเทพ YSZ และวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสุตรที่ 1  
ที่ประกอบอยู่ด้วยกัน เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่สามเป็นเวลา 36 ชั่วโมง  
ที่อุณหภูมิ 800 °C ในอากาศ.....107
- 5.68 ผลการวิเคราะห์ Linear EDX ที่เกิดขึ้นที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุ  
ป้องกันแก๊สรั่วสุตรที่ 1 กับแผ่นเทพ YSZ เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่สาม  
เป็นเวลา 36 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800 °C ในอากาศ.....107
- 5.69 ภาพถ่าย SEM การยึดติดของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสุตรที่ 5 กับเหล็กกล้าไร้สนิม  
เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่สาม เป็นเวลา 36 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800 °C ในอากาศ.....108
- 5.70 ภาพถ่าย SEM รอยแตกที่เกิดขึ้นในวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสุตรที่ 5 ที่ประกอบ  
อยู่กับเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่สามเป็นเวลา 36 ชั่วโมง  
ที่อุณหภูมิ 800 °C ในอากาศ.....109
- 5.71 ผลการวิเคราะห์ Linear EDX ที่เกิดขึ้นที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุ  
ป้องกันแก๊สรั่วสุตรที่ 5 กับเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่สาม  
เป็นเวลา 36 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800 °C ในอากาศ.....109
- 5.72 ภาพถ่าย SEM การยึดติดของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสุตรที่ 5 กับแผ่นเทพ YSZ  
เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่สาม เป็นเวลา 36 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800 °C ในอากาศ.....110
- 5.73 ภาพถ่าย SEM รอยแตกของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสุตรที่ 5 ที่ประกอบอยู่กับแผ่นเทพ YSZ  
เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่สามเป็นเวลา 36 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800 °C ในอากาศ.....110
- 5.74 ผลการวิเคราะห์ Linear EDX ที่เกิดขึ้นที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุ  
ป้องกันแก๊สรั่วสุตรที่ 5 กับแผ่นเทพ YSZ เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่สาม  
เป็นเวลา 36 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800 °C ในอากาศ.....111
- 5.75 ภาพถ่าย SEM การยึดติดของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสุตรที่ 1 กับเหล็กกล้าไร้สนิม  
เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่สี่ เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800 °C ในอากาศ..... 112





5.88 ภาพถ่าย SEM รอยแตกที่เกิดขึ้นในวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 1 ที่ประกบอยู่กับเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่ห้าเป็นเวลา 60 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800 °C ในอากาศ.....	119
5.89 ผลการวิเคราะห์ Linear EDX ที่เกิดขึ้นที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 1 กับเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่ห้าเป็นเวลา 60 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800 °C ในอากาศ.....	120
5.90 ภาพถ่าย SEM การยึดติดของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 1 กับแผ่นเทพ YSZ เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่ห้า เป็นเวลา 60 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800 °C ในอากาศ.....	120
5.91 ภาพถ่าย SEM รอยแตกของแผ่นเทพ YSZ ที่ประกบอยู่กับวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 1 เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่ห้าเป็นเวลา 60 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800 °C ในอากาศ.....	121
5.92 ผลการวิเคราะห์ Linear EDX ที่เกิดขึ้นที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 1 กับแผ่นเทพ YSZ เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่ห้าเป็นเวลา 60 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800 °C ในอากาศ.....	121
5.93 ภาพถ่าย SEM การยึดติดของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 5 กับเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อผ่านวัฏจักร ความร้อนที่ห้าเป็นเวลา 60 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800 °C ในอากาศ.....	122
5.94 ภาพถ่าย SEM รอยแตกที่เกิดขึ้นในวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 5 ที่ประกบอยู่กับเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่ห้าเป็นเวลา 60 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800 °C ในอากาศ.....	123
5.95 ผลการวิเคราะห์ Linear EDX ที่เกิดขึ้นที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 5 กับเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่ห้าเป็นเวลา 60 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800 °C ในอากาศ.....	123
5.96 ภาพถ่าย SEM การยึดติดของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 5 กับแผ่นเทพ YSZ เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่ห้า เป็นเวลา 60 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800 °C ในอากาศ.....	124
5.97 ภาพถ่าย SEM รอยแตกของวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 5 และแผ่นเทพ YSZ ที่ประกบอยู่ด้วยกัน เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่ห้าเป็นเวลา 60 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800 °C ในอากาศ.....	124
5.98 ผลการวิเคราะห์ Linear EDX ที่เกิดขึ้นที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุป้องกันแก๊สรั่วสูตรที่ 5 กับแผ่นเทพ YSZ เมื่อผ่านวัฏจักรความร้อนที่ห้าเป็นเวลา 60 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 800 °C ในอากาศ.....	125

5.99 ลักษณะของวัสดุป้องกันการรั่วแบบวัสดุผสมโดยใช้วัสดุป้องกันการรั่วสูตรที่ 1  
 กับเส้นใยเซรามิก 650 แบบที่ 1.....127

5.99 ภาพถ่าย SEM ด้านบนแสดงการรั่วของแก๊สผ่านทางเส้นใยเซรามิก  
 ขณะทำการทดสอบการรั่วของ แก๊สที่อุณหภูมิ 800 °C ในอากาศ.....127

5.101 ลักษณะของวัสดุป้องกันการรั่วแบบวัสดุผสมโดยใช้วัสดุป้องกันการรั่วสูตรที่ 1  
 กับเส้นใยเซรามิก 650 แบบที่ 2.....128

5.102 ภาพถ่าย SEM ลักษณะด้านบนของวัสดุป้องกันการรั่วของแก๊สสูตรที่ 1  
 เข้าไปอุดช่องว่างระหว่างเส้นใยเซรามิกขณะทำการทดสอบการรั่วของแก๊ส  
 ที่อุณหภูมิ 800 °C ในอากาศ.....129



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย