

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญรูปประกอบ	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
ขอบเขตและวิธีดำเนินการวิจัยโดยสังเขป	2
ประโยชน์ที่จะได้รับ	3
2 เอกสารที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย	4
ลักษณะทั่วไปและประเภทของเซลล์เชื้อเพลิง	4
องค์ประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงแบบ SOFC	14
อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte)	15
แอโนด (Anode)	17
แคโทด (Cathode)	18
วิธีการเตรียมฟิล์มเซรามิก	19
Chemical vapor deposition technique (CVD)	19
Electro-chemical vapor deposition technique (EVD)	20
Sol-gel technique	21
Spray pyrolysis method	23
Thermal spray	24
Pulsed laser deposition (PLD)	24
Laser spray	25
RF- sputtering	26
Screen- printing	27
Tape-casting	27

บทที่	หน้า
Slurry coating technique	28
Electrophoretic deposition (EPD)	28
ตัวอย่างงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ	28
3 วิธีการทดลอง	35
อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	35
สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	35
การเตรียมสารละลายตั้งต้น	36
การเตรียมอุปกรณ์พ่นฝอยด้วยไฟฟ้า	36
วิธีปฏิบัติและข้อแนะนำต่าง ๆ เพื่อความปลอดภัยในการทำงานของ เครื่องพ่นฝอยด้วยไฟฟ้า	37
4 ผลการทดลอง	38
ศึกษาอิทธิพลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อการเตรียมฟิล์มบาง	38
ผลการทดสอบด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric analysis)	45
ผลการทดสอบค่าการนำไฟฟ้าและแรงดึงผิวของสารละลาย	46
ผลการทดสอบด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray spectroscopy	47
ผลการทดสอบด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy	48
ศึกษาอิทธิพลระยะทางระหว่างปลายเข็มและซับสเตรต	48
ศึกษาอิทธิพลของแรงดันไฟฟ้าและความเข้มข้นของสารละลาย	50
ศึกษาอิทธิพลของอัตราไหลของสารละลายผสม	55
ศึกษาอิทธิพลของเวลาในการพ่น	58
การศึกษากาตักขวางของฟิล์มบางโดยเทคนิค Scanning Electron Microscopy	60
ผลการทดสอบโดยเครื่อง X-Ray Diffractometer	60
5 สรุปผลการทดลอง	63
บรรณานุกรม	64
ภาคผนวก	69
ภาคผนวก ก ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลัง ขยายต่าง ๆ	69

บทที่	หน้า
ภาคผนวก ข เบอร์เชนซ์ของเซอร์โคเนียม และสแกนเดียม จากการวัด โดยเทคนิค Energy Dispersive X-ray spectroscopy	97
ภาคผนวก ค ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์จากงานวิจัยฉบับนี้	99
ประวัติผู้วิจัย	104

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ประเภทของเซลล์เชื้อเพลิงและสมบัติของเซลล์เชื้อเพลิง	
	ชนิดต่าง ๆ	7
4.1	พื้นที่การกระจายตัวของการพ่น	41
4.2	ค่าการทดสอบแรงดึงผิวของสารละลาย	47
4.3	ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลาย	47
4.4	อัตราส่วนโดยอะตอมของสแกนเดียม และ เซอร์โคเนียม จากการวัดโดยเทคนิค	
	Energy Dispersive X-ray spectroscopy	48

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

สารบัญรูปประกอบ

รูปที่	หน้า
2.1 ประสิทธิภาพการให้พลังงานของเซลล์เชื้อเพลิงเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ผลิตพลังงานแบบอื่น	4
2.2 มลพิษที่ถูกปล่อยออกมาจากกระบวนการผลิตพลังงานแบบต่าง ๆ	5
2.3 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงประกอบไปด้วย อิเล็กโทรไลต์ แอโนด และ แคโทด และการเกิดปฏิกิริยาเคมีของแอโนดและแคโทด โดยที่สมการปฏิกิริยาเคมีรวมคือ $1/2O_2 + H_2 \rightarrow H_2O$ โดยที่อิเล็กโทรไลต์สามารถนำประจุของออกซิเจนได้.....	6
2.4 โครงสร้างของ Perfluorinated sulfonic acid polymer	8
2.5 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบ Proton exchange membrane	9
2.6 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบ Phosphoric acid	11
2.7 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบ Molten carbonate	12
2.8 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบ Solid oxide	14
2.9 เซลล์เชื้อเพลิงแบบ SOFC ที่มีรูปทรงเป็นท่อ	15
2.10 ภาคตัดขวางของเซลล์เชื้อเพลิงแบบ SOFC ผลิตโดย Siemens Westinghouse	18
2.11 ลักษณะอุปกรณ์ของเทคนิค CVD	20
2.12 (a) หลักการของกระบวนการ CVD/EVD (b) ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาของเทคนิค CVD/EVD	21
2.13 (a) ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) (b)ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization)	22
2.14 องค์ประกอบและตำแหน่งการวางอุปกรณ์ของกระบวนการ Spray pyrolysis.....	24
2.15 องค์ประกอบของอุปกรณ์เทคนิค PLD	25
2.16 เครื่อง RF- sputtering	27
3.1 องค์ประกอบและการจัดวางอุปกรณ์เครื่องฟั่นฝอยด้วยไฟฟ้า	37
4.1 ลักษณะการวางแม่เหล็ก	39
4.2 ลักษณะการกระจายตัวของฟั่นฝอยที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส (a) ไม่มีสนามแม่เหล็ก (b) สนามแม่เหล็กขั้วเดียวกัน (c) สนามแม่เหล็กกลับขั้ว	40

รูปที่	หน้า
4.3 ลักษณะความเข้มของสนามแม่เหล็กที่บริเวณขั้วสเตรต	
(a) สนามแม่เหล็กแบบขั้วเดียวกัน (b) สนามแม่เหล็กแบบกลับขั้ว	42
4.4 ภาพ SEM ของฟิล์มที่สภาวะต่าง ๆ (a) ไม่มีสนามแม่เหล็ก	
(b) สนามแม่เหล็กขั้วเดียวกัน (c) สนามแม่เหล็กกลับขั้ว	43
4.5 ภาพ AFM ของฟิล์มพ่นโดยที่มีสนามแม่เหล็กต่างกัน (a) ไม่มีสนามแม่เหล็ก	
(b) สนามแม่เหล็กขั้วเดียวกัน (c) สนามแม่เหล็กกลับขั้ว	44
4.6 เทอร์โมแกรม TGA ของสารละลายผสมตั้งต้นในตัวทำละลาย	
ผสมระหว่างเอทานอล 80 % และ บิวทิลคาร์บิโพล 20 %	46
4.7 ภาพถ่าย SEM จากการพ่นสารละลายผสมตั้งต้นที่มีความเข้มข้น	
ของสารละลาย 0.05 โมลาร์ อัตราการไหลของสารละลาย 1.5 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง	
แรงดันไฟฟ้า 14 กิโลโวลต์ อุณหภูมิขั้วสเตรต 500 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง	
ที่ระยะทางแตกต่างกัน (a) 4 เซนติเมตร กำลังขยาย 100 เท่า, (b) 4 เซนติเมตร	
กำลังขยาย 2000 เท่า, (c) 4 เซนติเมตร กำลังขยาย 10000 เท่า, (d) 5 เซนติเมตร	
กำลังขยาย 100 เท่า, (e) 5 เซนติเมตร กำลังขยาย 2000 เท่า, (f) 5 เซนติเมตร	
กำลังขยาย 10000 เท่า, (g) 6 เซนติเมตร กำลังขยาย 100 เท่า, (h) 6 เซนติเมตร	
กำลังขยาย 2000 เท่า และ (i) 6 เซนติเมตร กำลังขยาย 10000 เท่า	49
4.8 ภาพถ่าย SEM จากการพ่นสารละลายผสมตั้งต้นที่มีความเข้มข้น 0.01 โมลาร์	
ระยะการพ่น 5 เซนติเมตร อัตราการไหล 0.5 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง	
อุณหภูมิขั้วสเตรตที่ 500 องศาเซลเซียส ที่แรงดันทางไฟฟ้าแตกต่างกัน	
(a) 8 กิโลโวลต์ กำลังขยาย 100 เท่า, (b) 8 กิโลโวลต์ กำลังขยาย 2000 เท่า,	
(c) 10 กิโลโวลต์ กำลังขยาย 100 เท่า, (d) 10 กิโลโวลต์ กำลังขยาย 2000 เท่า,	
(e) 12 กิโลโวลต์ กำลังขยาย 100 เท่า, (f) 12 กิโลโวลต์ กำลังขยาย 2000 เท่า,	
(g) 14 กิโลโวลต์ กำลังขยาย 100 เท่า และ	
(h) 14 กิโลโวลต์ กำลังขยาย 2000 เท่า	51
4.9 ภาพถ่าย SEM จากการพ่นสารละลายผสมตั้งต้นที่มีความเข้มข้น 0.05 โมลาร์	
ระยะการพ่น 5 เซนติเมตร อัตราการไหล 0.5 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง	
อุณหภูมิขั้วสเตรตที่ 500 องศาเซลเซียส ที่แรงดันทางไฟฟ้าแตกต่างกัน	
(a) 8 กิโลโวลต์ กำลังขยาย 100 เท่า, (b) 8 กิโลโวลต์ กำลังขยาย 2000 เท่า,	
(c) 10 กิโลโวลต์ กำลังขยาย 100 เท่า, (d) 10 กิโลโวลต์ กำลังขยาย 2000 เท่า,	

รูปที่	หน้า
4.9	(e) 12 กิโลโวลต์ กำลังขยาย 100 เท่า, (f) 12 กิโลโวลต์ กำลังขยาย 2000 เท่า, (g) 14 กิโลโวลต์ กำลังขยาย 100 เท่า และ (h) 14 กิโลโวลต์ กำลังขยาย 2000 เท่า 52
4.10	ภาพถ่าย SEM จากการพ่นสารละลายผสมตั้งต้นที่มีความเข้มข้น 0.075 โมลาร์ ระยะการพ่น 5 เซนติเมตร อัตราการไหล 0.5 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง อุณหภูมิขับเคลื่อนที่ 500 องศาเซลเซียส ที่แรงดันทางไฟฟ้าแตกต่างกัน (a) 8 กิโลโวลต์ กำลังขยาย 100 เท่า, (b) 8 กิโลโวลต์ กำลังขยาย 2000 เท่า, (c) 10 กิโลโวลต์ กำลังขยาย 100 เท่า, (d) 10 กิโลโวลต์ กำลังขยาย 2000 เท่า, (e) 12 กิโลโวลต์ กำลังขยาย 100 เท่า, (f) 12 กิโลโวลต์ กำลังขยาย 2000 เท่า, (g) 14 กิโลโวลต์ กำลังขยาย 100 เท่า และ (h) 14 กิโลโวลต์ กำลังขยาย 2000 เท่า 53
4.11	ภาพถ่าย SEM จากการพ่นสารละลายผสมตั้งต้นที่มีความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ระยะการพ่น 5 เซนติเมตร อัตราการไหล 0.5 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง อุณหภูมิขับเคลื่อนที่ 500 องศาเซลเซียส ที่แรงดันทางไฟฟ้าแตกต่างกัน (a) 10 กิโลโวลต์ กำลังขยาย 100 เท่า, (b) 10 กิโลโวลต์ กำลังขยาย 2000 เท่า, (c) 12 กิโลโวลต์ กำลังขยาย 100 เท่า, (d) 12 กิโลโวลต์ กำลังขยาย 2000 เท่า, (e) 14 กิโลโวลต์ กำลังขยาย 100 เท่า และ (f) 14 กิโลโวลต์ กำลังขยาย 2000 เท่า 54
4.12	ภาพถ่าย SEM จากการพ่นสารละลายผสมตั้งต้นที่มีความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ ระยะการพ่น 5 เซนติเมตร แรงดันทางไฟฟ้า 14 กิโลโวลต์ อุณหภูมิขับเคลื่อนที่ 500 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการพ่น 1 ชั่วโมง ที่อัตราการไหลของสารละลายที่แตกต่างกัน (a) 0.5 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง กำลังขยาย 100 เท่า, (b) 0.5 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง กำลังขยาย 2000 เท่า, (c) 1.0 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงกำลังขยาย 100 เท่า, (d) 1.0 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง กำลังขยาย 2000 เท่า, (e) 1.5 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงกำลังขยาย 100 เท่า, (f) 1.5 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง กำลังขยาย 2000 เท่า, (g) 2.0 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง กำลังขยาย 100 เท่า และ (h) 2.0 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง กำลังขยาย 2000 เท่า 56

- 4.13 ภาพถ่าย SEM จากการพ่นสารละลายผสมตั้งต้นที่มีความเข้มข้น 0.05 โมลาร์
 ระยะการพ่น 5 เซนติเมตร แรงดันทางไฟฟ้า 14 กิโลโวลต์
 อุณหภูมิห้องที่ 500 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการพ่น 1 ชั่วโมง
 ที่อัตราการไหลของสารละลายที่แตกต่างกัน (a) 0.5 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง
 กำลังขยาย 100 เท่า, (b) 0.5 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง กำลังขยาย 2000 เท่า,
 (c) 1.0 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงกำลังขยาย 100 เท่า, (d) 1.0 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง
 กำลังขยาย 2000 เท่า, (e) 1.5 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงกำลังขยาย 100 เท่า,
 (f) 1.5 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง กำลังขยาย 2000 เท่า, (g) 2.0 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง
 กำลังขยาย 100 เท่า และ (h) 2.0 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง กำลังขยาย 2000 เท่า 57
- 4.14 ภาพถ่าย SEM จากการพ่นที่มีความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ ระยะการพ่น 5 เซนติเมตร
 แรงดันทางไฟฟ้า 14 กิโลโวลต์ อุณหภูมิห้องที่ 500 องศาเซลเซียส
 ที่อัตราการไหลของสารละลายสารละลายผสมตั้งต้น 1.5 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง
 เวลาที่ใช้ในการพ่นแตกต่างกัน (a) 1 ชั่วโมง กำลังขยาย 100 เท่า,
 (b) 1 ชั่วโมง กำลังขยาย 2000 เท่า, (c) 2 ชั่วโมง กำลังขยาย 100 เท่า,
 (d) 2 ชั่วโมง กำลังขยาย 2000 เท่า, (e) 3 ชั่วโมง กำลังขยาย 100 เท่า และ
 (f) 3 ชั่วโมง กำลังขยาย 2000 เท่า 59
- 4.15 ภาพถ่าย SEM ด้านข้างที่ ระยะการพ่น 5 เซนติเมตร แรงดันทางไฟฟ้า 14 กิโลโวลต์
 อุณหภูมิห้องที่ 500 องศาเซลเซียส และเวลาในการพ่น 1 ชั่วโมง
 โดยผันแปรความเข้มข้นกับอัตราการไหลของสารละลาย
 (a) ความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ อัตราการไหล 1.5 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง,
 (b) ความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ อัตราการไหล 1.5 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง,
 (c) ความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ อัตราการไหล 0.5 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง 61
- 4.16 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มที่ได้จากการพ่นที่
 ความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ ณ อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส
 อัตราการไหล 0.5 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง เวลาที่ใช้ในการพ่น 1 ชั่วโมง
 ระยะการพ่น 5 เซนติเมตร แรงดันทางไฟฟ้า 14 กิโลโวลต์..... 62