

การศึกษาพฤติกรรมของวัสดุฉนวนกึ่งประกอบแก้วแบบเสริมเส้นใยสำหรับเซลล์ เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง

Study Behavior of fabric-reinforced Solid Oxide Fuel cell seal glass composite

กฤษฎา บุญศิริ¹, นิตินัย ปัญญ์บุศยกุล^{1*}, จารุวัตร เจริญสุข² และ สุมิตรา จรสโรจน์กุล³

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร จ.กรุงเทพฯ 10530

²ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

³ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย จ.ปทุมธานี 12120

* ติดต่อ: E-mail: nitinai_oak1@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการพัฒนาวัสดุป้องกันการรั่วที่จุดเชื่อมต่อระหว่างอินเตอร์คอนเนกเตอร์กับเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็งแบบแผ่น(SOFC) โดยใช้เส้นใยเสริมแรง (Fabric Reinforce) ร่วมกับวัสดุเชิงประกอบแก้วซึ่งประกอบด้วย Pyrex, Soda-lime และ Polymer blend ตามอัตราส่วนต่างๆดังนี้ กรณีที่ 1 อัตราส่วน Pyrex:Polymer blend (Py:Po) เท่ากับ 25:75, 50:50, 85:15, 90:10 และ 95:5 Wt% ตามลำดับ กรณีที่ 2 อัตราส่วน Pyrex:Soda-lime:Polymer blend (Py:So:Po) ที่ 18.75:56.25:25, 37.5:37.5:25 และ 56.25:18.75:25 Wt% ร่วมกับเส้นใย 4.36%, 8.72% และ 13.08% ของพื้นที่หน้าตัดวัสดุฉนวนนี้ โดยการทดลองอยู่ภายใต้แรงกดแบบกระจาย 100 N กระทำกับอินเตอร์คอนเนกเตอร์เหล็กกล้าไร้สนิม 316 (Stainless Steel 316) ณ อุณหภูมิ 800°C จากผลการทดลองพบว่าวัสดุเชิงประกอบแก้วที่อัตราส่วน Py:So:Po 56.25:18.75:25 การยึดติดกับเหล็กกล้าไร้สนิมไม่ดี โดยมีอัตราการรั่วกรณีไม่เสริมเส้นใยเท่ากับ $3.49 \text{ cm}^3/\text{min-cm}$ และที่อัตราส่วน Py:So:Po 37.5:37.5:25 สามารถยึดติดได้ดีกับเหล็กกล้าไร้สนิม โดยกรณีไม่เสริมเส้นใยมีอัตราการรั่วเท่ากับ $0.0130 \text{ cm}^3/\text{min-cm}$ และเมื่อมีการเสริมเส้นใยเพิ่มขึ้นเป็น 13.08% จะทำให้อัตราการรั่วมีแนวโน้มลดลงเหลือ $0.0015 \text{ cm}^3/\text{min-cm}$ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าวัสดุเชิงประกอบแก้ว Py:So:Po 37.5:37.5:25 เสริมเส้นใยเซรามิคไฟเบอร์ 312 เหมาะกับการนำไปใช้เป็นวัสดุฉนวนที่จุดเชื่อมต่ออินเตอร์คอนเนกเตอร์ของ SOFC ที่อุณหภูมิสูง

คำหลัก: เซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็ง: วัสดุเชิงประกอบแก้ว: วัสดุฉนวน: เส้นใยเสริมแรง

Abstract

This research describes the development of materials to hermetically seal at the connection between interconnector and planar SOFC using fabric reinforce with glass composite that consists of Pyrex, Polymer blend and Soda-lime that's the ratio as following. Case1 the ratio of Pyrex:Polymer blend (Py:Po) as 25:75, 50:50, 85:15, 90:10 and 95:5 respectively. Case2 the ratio of Pyrex:Soda-lime:Polymer blend (Py:So:Po) as 18.75:56.25:25, 37.5:37.5:25 and 56.25:18.75:25 with 4.36%, 8.72% and 13.08% of

fabric of seal material's cross section area. This experiment under the pressure 100 N/m^2 exerted on the interconnector at 800°C . The results showed that the glass composites at the ratio of Py:So:Po as 56.25:18.75:25 cannot mount with stainless steel as well as it should and if non-fabric, the maximum leak rate was $3.49 \text{ cm}^3/\text{min-cm}$ and at the ratio of Py:So:Po as 37.5:37.5:25 can stretch to well with stainless steel by non-fabric that has the leak rate was $0.0130 \text{ cm}^3/\text{min-cm}$ but if has 13.08% of fabric, which has the leak rate decreased to $0.0015 \text{ cm}^3/\text{min-cm}$. Concluded that the glass composites of Py:So:Po as 37.5:37.5:5.25 with ceramic fiber 312 is used as a seal material at the interconnector joint of SOFC at high temperature.

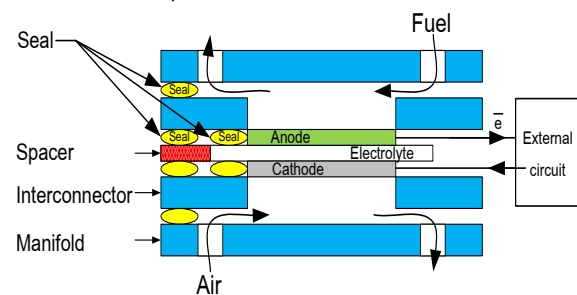
Keywords: Fabric: Glass composite: Seal: SOFC

1. บทนำ

เซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็งแบบแผ่น (Solid Oxide Fuel cell, SOFC) เป็นแหล่งพลังงานทางเลือกหนึ่งของอนาคต ซึ่งเป็นพลังงานที่ยืดหยุ่นและปราศจากมลพิษ จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า SOFC แบบแผ่นจะให้พลังงานออกมาสูงสุด[12,13] และหนึ่งในความท้าทายและเป็นหัวใจหลักในการพัฒนา SOFC คือการพัฒนาวัสดุผนึกเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็ง ซึ่งทำหน้าที่ป้องกันการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเชื้อเพลิงและออกซิเจนที่เกิดจากการรั่วระหว่างอินเตอร์คอนเนกเตอร์กับเซลล์ [12] ซึ่งเมื่อเกิดการรั่วจะส่งผลให้ประสิทธิภาพทางปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าลดลง และยังก่อให้เกิดความร้อนสูงบริเวณที่เกิดการรั่วด้วย ซึ่งจะทำให้เซลล์เชื้อเพลิงเกิดความเสียหาย [1-3] แต่ก็มีปัจจัยทางกายภาพอื่นๆที่ส่งผลต่อการรั่วเช่น รูปร่างร่องเพื่อป้องกันการรั่ว [7,8] ชนิดและรูปแบบการกระจายตัวของแรง [9] และความหยาบของผิว [8,10,11] ดังนั้นอุปสรรคที่เกิดขึ้นบริเวณจุดเชื่อมต่อของอินเตอร์คอนเนกเตอร์กับเซลล์จึงเป็นสาระสำคัญในการพัฒนาห่อเซลล์ให้ประสบความสำเร็จต่อไป

จากงานวิจัยที่ผ่านมาสามารถแบ่งวัสดุผนึกที่ใช้ในงานภายใต้อุณหภูมิสูงออกเป็นชนิดต่างๆ ดังนี้ วัสดุแก้ว (Glass Seals)[13], วัสดุแก้ว-เซรามิก (Glass-Ceramic Seals)[12], วัสดุแบบแรงกด (Compressive Seals), วัสดุแบบโลหะ (Metal Seals), วัสดุเชิงประกอบเซรามิก (Ceramic-Composite Seals)[12] และ วัสดุที่ประกอบด้วยโลหะที่ยืดหยุ่นและแก้วที่มี

ความหนืด (Compliant Seals) [4] ซึ่งวัสดุผนึกที่มักพบเห็นได้ทั่วไปคือจำพวกแก้ว เนื่องจากมีต้นทุนที่ต่ำ ง่ายต่อการขึ้นรูป และอายุการใช้งานยาวนาน เนื่องจากยากต่อการย่อยสลาย และเหมาะกับการทำงานที่อุณหภูมิสูงของ SOFC ที่มีช่วงอุณหภูมิทำงานที่ $700\text{-}1000^\circ\text{C}$ [13] ข้อดีอีกอย่างคือสามารถป้องกันการรั่วได้ดี แต่ก็มีข้อจำกัดทางด้านารรับความเค้นดัดระหว่างวัสดุผนึกกับชุดอินเตอร์คอนเนกเตอร์และเซลล์ ที่เกิดจากการขยายตัวทางความร้อน ดังนั้นเทคนิคการใส่เส้นใยเสริมแรงในเนื้อวัสดุจึงเป็นอีกแนวทางที่จะแก้ไขจุดบกพร่องนี้ลงได้ เพื่อให้การทำงานของวัสดุผนึกเป็นไปอย่างเต็มประสิทธิภาพ



รูปที่ 1 ภาพประกอบของ single cell, Interconnector, Spacer Manifold และ seal

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นในการพัฒนาวัสดุผนึกบริเวณจุดเชื่อมต่อระหว่างอินเตอร์คอนเนกเตอร์กับ SOFC ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยหยิบยกการใช้วัสดุเชิงประกอบแก้วร่วมกับเส้นใยเสริมแรง (Fabric Reinforce) มาเป็นกรณีศึกษา ภายใต้แรงกดแบบกระจาย 100 N กระทำกับอินเตอร์คอนเนกเตอร์ที่ใช้เหล็กกล้าไร้สนิม 316 (Stainless Steel 316) ณ อุณหภูมิ 800°C ร่อง

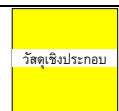
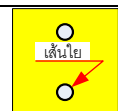
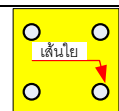
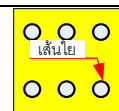
ป้องกันการรั่วเป็นรูสี่เหลี่ยมขนาด 2x2 mm โดยอัตราการรั่วถูกวัดด้วยมานอมิเตอร์ตามมาตรฐาน ASTM F 37-89

2. การทดลอง

2.1 เส้นใยเสริมแรง (Fabric Reinforce)

เส้นใยเซรามิกไฟเบอร์ของ 3M-312 ถูกใช้เป็นเส้นใยเสริมแรง และช่วยเสริมการป้องกันการเชื่อมโยงของรูพรุนเพื่อป้องกันการรั่ว โดยจะมีลักษณะการเสริมเส้นใยดังตารางที่ 1 โดยมีการเสริมเส้นใยเป็น 4.36%, 8.72% และ 13.08% (อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดของเส้นใยต่อพื้นที่หน้าตัดวัสดุผนัง) โดยเส้นใยเซรามิกไฟเบอร์ 312 มีส่วนประกอบของ Al_2O_3 , SiO_2 และ B_2O_3 ที่อัตราส่วน 62.5:24.5:13 Wt% โดยมีคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 2 ภายใต้อุณหภูมิที่ทอเป็นเส้นขนาด 25.4 mm การหาขนาดของเส้นใย (Filament Diameter) จะหาโดยใช้เครื่อง Optical Microscope การเตรียมตัวอย่างทำโดยการหล่อเรซินให้เส้นใยอยู่ตรงกลาง โดยขึ้นงานตัวอย่างมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 20 mm สูง ประมาณ 10 mm ทำการขัดเงาชิ้นงานตัวอย่าง และนำไปเข้าเครื่อง Optical Microscope

ตารางที่ 1 ลักษณะการเสริมเส้นใยเซรามิกไฟเบอร์ 312 ที่อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดของเส้นใยต่อพื้นที่หน้าตัดวัสดุผนัง

ลักษณะการเสริมเส้นใย (Fabric Reinforce)			
เส้นใย	เส้นใย	เส้นใย	เส้นใย
0%	4.36%,	8.72%	13.08%
			

การใช้เส้นใยเซรามิกไฟเบอร์ ร่วมกับวัสดุเชิงประกอบแก้วจะใช้เส้นใยที่ทอเป็นเส้นไม่ได้ นั่นคือต้องใช้เส้นใยเส้นเดียวมารวมกัน และแทรกเข้าไปในวัสดุเชิงประกอบ ทั้งนี้การแยกเส้นใยออกจากผนังจะทำให้ความเค้นลดลง ดังนั้นจึงต้องมีการเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบหาความเค้นแรงดึงของเส้นใย โดยจะนำเส้น

ใยมารวมกันให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ~ 1 mm ความยาวประมาณ 100 mm พร้อมทั้งทำหัวจับด้วยเรซินโดยให้เส้นใยอยู่ตรงกลาง ขนาดของหัวจับมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm ยาว 50 mm หลังจากนั้นนำไปเข้าทดสอบด้วย Universal Testing Machine

ตารางที่ 2 คุณสมบัติเส้นใยเซรามิกไฟเบอร์ 312

Properties	Fabric 3M-312	Unit
Modulus of Elasticity	150	GPa
Ultimate Tensile Stress	1700	MPa
coefficient of thermal expansion	3.00	$\mu\text{m/m-}^\circ\text{C}$
Melting point	1800	$^\circ\text{C}$

2.2 วัสดุเชิงประกอบแก้ว

วัสดุเชิงประกอบแก้วที่ใช้ในงานวิจัยประกอบด้วย Pyrex (Py), Soda-lime (So) และ Polymer blend (Po) ตามอัตราส่วนต่างๆ โดยแบ่งเป็นกรณีที่ 1 และ กรณีที่ 2 ดังตารางที่ 3 และ 4 ตามลำดับ คุณสมบัติของ Py, So ดังแสดงในตารางที่ 5 ขณะที่สถานะของ Polymer blend จะมีสถานะเป็นของเหลว ซึ่งประกอบไปด้วยสารละลาย (solution) หรือสารหลอมเหลว (molten) มาผสมให้อยู่ในเนื้อเดียวกัน (blending) โดยมีส่วนประกอบหลักๆ คือ น้ำ, Alcohol, Xanthan Gum, Hydrogenated Polyisobutene และ Poloxamer 331

การหาอัตราส่วนของ Pyrex และ Polymer blend เพื่อให้ได้คุณสมบัติที่ต้องการในเบื้องต้นคือสถานะของวัสดุเชิงประกอบแก้วที่อุณหภูมิห้องควรมีลักษณะเป็นของเหลวข้นเหนียว (gel) โดยคุณสมบัตินี้จะช่วยทำให้การประกอบห่อเซลล์ง่ายขึ้น การเตรียมจะทำโดยการผสมสารและกวนให้เข้ากันเป็นเวลา 30 นาที สารที่ได้จะถูกนำไปใส่แบบ (Mold) เพื่อให้ได้ชิ้นงานตัวอย่าง ที่มีขนาด 5x5x30 mm โดยสารที่อยู่ในแบบจะถูกนำไปเข้าเตาอบไฟฟ้า โดยกระบวนการให้ความร้อนกับชิ้นงาน (Sintering) จะกระทำที่อุณหภูมิห้องจนถึง 1000 $^\circ\text{C}$ ที่อัตราการให้ความร้อนที่ 3 $^\circ\text{C} / \text{min}$ โดยคงอุณหภูมิไว้ 30 นาที หลังจากนั้นทำ

การลดอุณหภูมิลง และทำการตรวจสอบรูปทรงโดยดูจากขนาดที่หดตัวลง และรูปพูน ซึ่งการหดตัวและรูปพูนจะมีผลต่อช่องว่างที่เกิดขึ้นที่จุดเชื่อมต่อระหว่างอินเตอร์คอนเน็กเตอร์กับเซลล์ ชิ้นงานที่ได้จะถูกนำไปตรวจสอบด้วยเครื่อง Optical Microscope เพื่อดูการยึดติด และทดสอบด้วย Universal Testing Machine เพื่อทดสอบความเค้นดัด แบบ 3-Point bending

ตารางที่ 3 อัตราส่วนวัสดุเชิงประกอบแก้วกรณีที่ 1

ลำดับที่	Py (Wt%)	Po (Wt%)
1	25	75
2	50	50
3	75	25
4	85	15
5	90	10
6	95	5

ตารางที่ 4 อัตราส่วนวัสดุเชิงประกอบแก้วกรณีที่ 2

ลำดับที่	Py (Wt%)	So (Wt%)	Po (Wt%)
1	18.75	56.25	25
2	37.5	37.5	25
3	56.25	18.75	25

ตารางที่ 5 คุณสมบัติของ Pyrex และ Soda-lime

Properties	Py	So	Unit
Modulus of Elasticity	64	72	GPa
coefficient of thermal expansion	3.25	8.6	$\mu\text{m}/\text{m}^{\circ}\text{C}$

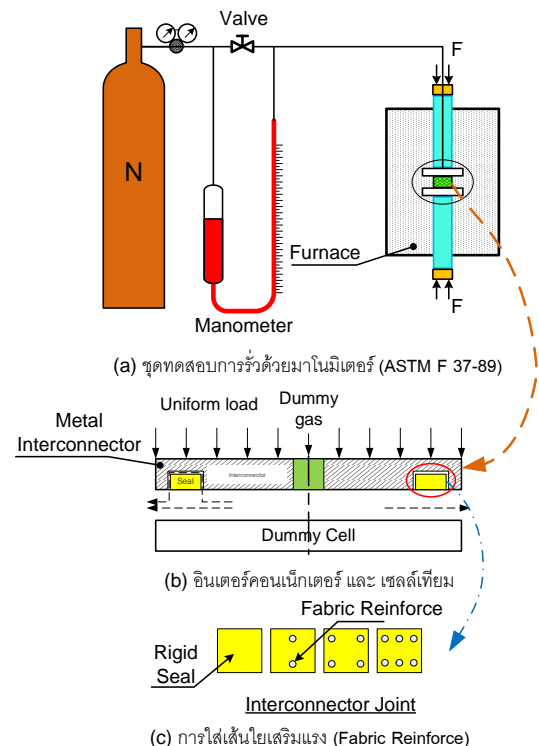
2.3 การทดสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของวัสดุเมื่อได้รับความร้อน

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของวัสดุ เมื่อได้รับความร้อนภายใต้บรรยากาศ มีวัตถุประสงค์ที่จะหาน้ำหนักของวัสดุที่เหลือหลังการระเหยของ Polymer blend และ วัสดุแก้ว ที่ใช้ทำเป็นวัสดุผสมเชิงประกอบแก้ว การวัดน้ำหนักและการวิเคราะห์การ

ระเหย และอัตราของการระเหยจะใช้การวิเคราะห์ด้วย Thermogravimetric analysis (TGA) การศึกษาจะทำการที่อุณหภูมิห้องจนถึง 1000°C ที่อัตราการให้ความร้อนที่ 20°C /min.

2.4 การทดสอบการรั่ว

อินเตอร์คอนเน็กเตอร์ และ Dummy cell ดังรูปที่ 2 (b) ที่ประกอบสมบูรณ์แล้วจะถูกวางในเตาอบไฟฟ้า โดยแรงกดที่กระทำกับอินเตอร์คอนเน็กเตอร์มีขนาด 100 N การควบคุมการสัมผัสของหน้าสัมผัสระหว่างอินเตอร์คอนเน็กเตอร์ และ Dummy cell ถูกควบคุมด้วยอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนแนวแกน (Alignment system) ซึ่งจะทำให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างหน้าสัมผัสของอินเตอร์คอนเน็กเตอร์และ Dummy cell อย่างสม่ำเสมอ ชุดวัดอัตราการรั่วถูกสร้างตามมาตรฐาน ASTM F 37-89 ดังแสดงในรูปที่ 2 (a)



รูปที่ 2 อุปกรณ์การทดลอง

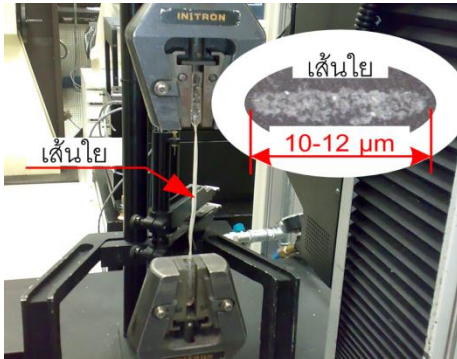
การควบคุมอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นด้วยอัตรา 1°C/min [4-9] ร่องผนังมีโดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 40 mm และภายนอกเท่ากับ 58 mm โดยจะทำการเพิ่มอุณหภูมิไปที่ 900°C โดยคง

อุณหภูมิไว้ 30 นาที และลดอุณหภูมิลงมาเพื่อวัดอัตราการรั่วที่อุณหภูมิ 800°C โดยคงอุณหภูมิไว้ 30 นาที แล้วทำการป้อนก๊าซที่ใช้ทดแทนก๊าซไฮโดรเจน (Nitrogen, 2 bar) เข้าไปยังชุดอินเตอร์คอนเน็กเตอร์ และ Dummy cell เพื่อให้ dummy gas ไหลผ่านไปยังมานอมิเตอร์จากนั้นทำการวัดการรั่วเมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที

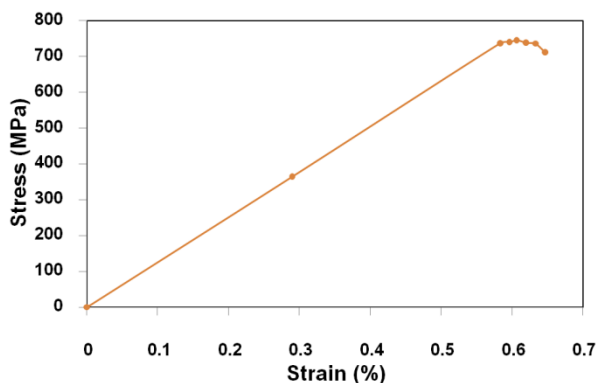
3. ผลการทดลองและการอภิปราย

3.1 ผลของความเค้นแรงดึงของเส้นใยเสริมแรงแบบไม่ทอเป็นผืน

เส้นใยที่ใช้ในการทดสอบจะมีขนาด 10-12 μm (Filament Diameter, ถ่ายภาพด้วยเครื่อง Optical Microscope) การทดสอบด้วย Universal Testing Machine ดังแสดงในรูปที่ 3 ภายใต้อัตรา 10 μm การทดสอบพบว่าค่าความเค้นครากเฉลี่ยเท่ากับ 733.6 MPa ค่าความเค้นสูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 745.7 MPa และค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นเฉลี่ยเท่ากับ 12.63 GPa ดังแสดงในรูปที่ 4



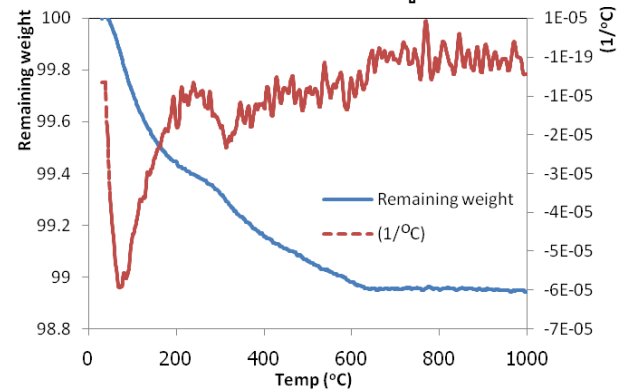
รูปที่ 3 การทดสอบความเค้นดึงของเส้นใยเซรามิคไฟเบอร์ 312



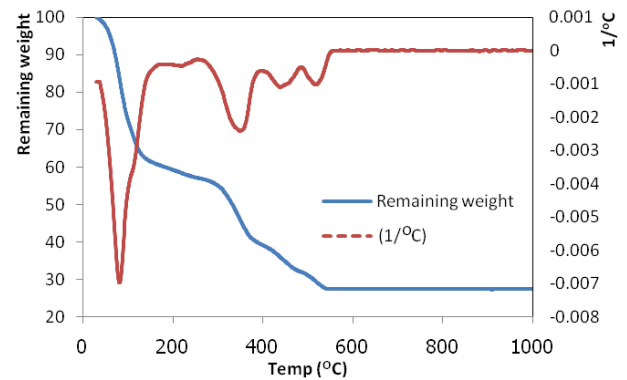
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเส้นใยเซรามิคไฟเบอร์ 312

3.2 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของวัสดุเมื่อได้รับความร้อน

จากผลการทดลองพบว่า น้ำหนักของ Soda-lime ที่หายไปจะอยู่ที่ประมาณ 1.05% (650°C) สำหรับ Pyrex น้ำหนักจะหายไปใกล้เคียงกับ Soda-lime [4-5] และ น้ำหนักที่หายไปของ Polymer blend จะอยู่ที่ประมาณ 72% (550°C) ดังแสดงในรูปที่ 5



(a)





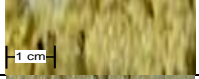

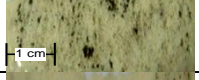

(b)

รูปที่ 5 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของวัสดุ เมื่อได้รับความร้อน (a) Soda-lime (b) Polymer blend

3.3 ผลกระทบของอัตราส่วนวัสดุเชิงประกอบแก้วกรณีนี้ 1

จากการทดลองดังแสดงในตารางที่ 6 พบว่าเมื่อ Polymer blend มีอัตราส่วนที่สูงจะทำให้เกิดรูพรุนสูง แต่จะไม่พบการหดตัวของวัสดุ ขณะที่เมื่อ Pyrex มีปริมาณสูงการหดตัวจะอยู่ที่ 20 % แต่รูพรุนจะน้อย โดยอัตราส่วนที่เหมาะสมจะนำไปทดลองต่อคือ Py:Po เท่ากับ 75:25 สำหรับอัตราส่วนของ Soda-lime และ Polymer blend จะอยู่ที่ 75:25 [4-5]



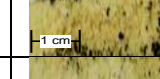

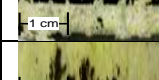
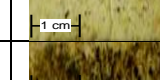

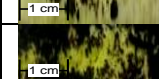

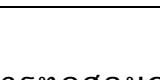
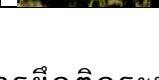

ตารางที่ 6 ผลกระทบของอัตราส่วน ของวัสดุเชิงประกอบแก้ว Pyrex และ Polymer blend

Py	Po	Gel	ภาพชิ้นงานหลัง กระบวนการ Sintering	การ หดตัว %	รูพรุน
25	75	✓		0	✗
50	50	✓		0	✗
75	25	✓		6	✓
85	15	✗		20	✓
90	10	✗		20	✓
95	5	✗		20	✓

3.4 ผลกระทบของอัตราส่วนวัสดุเชิงประกอบแก้วกรณีที่ 2

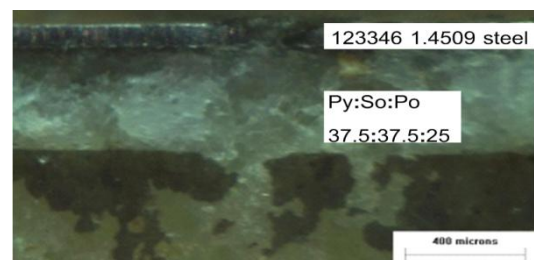
การทดลองนี้เป็นการปรับปรุงวัสดุเชิงประกอบแก้วจากการทดลองที่ใช้ Soda-lime และ Polymer blend [4-5] โดยการเติม Pyrex ซึ่งจะทำให้วัสดุเชิงประกอบแก้วมีจุดหลอมเหลวสูงขึ้น และมีความเสถียรภายใต้อุณหภูมิสูง อัตราส่วนที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย Pyrex:Soda-lime:Polymer blend, (Py:So,Po) เท่ากับ 18.75:56.25:25, 37.5:37.5:25 และ 56.25:18.75:25 Wt% ที่อัตราส่วนการเสริมเส้นใย 4.36%, 8.72% และ 13.08% ของพื้นที่หน้าตัดวัสดุผืนิก จากการทดลองดังแสดงในตารางที่ 7 พบว่าที่อัตราส่วน Py:So:Po ที่ 18.75:56.25:25 เมื่อนำชิ้นงานออกจากแบบ (Mold) ชิ้นงานมีลักษณะแตกกระจายเป็นชิ้นเล็กๆ ไม่สามารถใช้งานได้ สำหรับที่อัตราส่วน 37.5:37.5:25 และ 56.25:18.75:25 ที่อัตราส่วนการเสริมเส้นใย 4.36%, 8.72% และ 13.08% สามารถขึ้นรูปได้และมีลักษณะของเนื้อชิ้นงานที่ดี ดังนั้นทั้งสองอัตราส่วนจึงถูกนำไปทดสอบต่อไป

ตารางที่ 7 ผลกระทบของอัตราส่วนของวัสดุเชิงประกอบแก้ว Pyrex:Soda-lime:Polymer blend ร่วมกับการเสริมเส้นใย

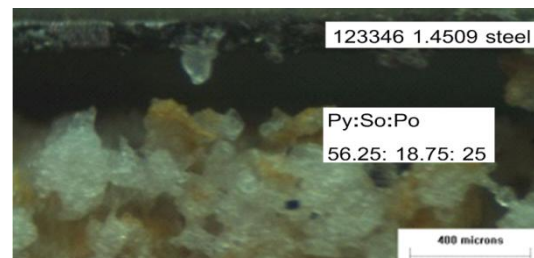
เส้นใย (%)	Py:So:Po (18.75:56.25:25)	Py:So:Po (37.5:37.5:25)	Py:So:Po (56.25:18.75:25)
0			
4.36			
8.72			
13.08			

3.5 การทดสอบการยึดติดระหว่างวัสดุเชิงประกอบแก้วกับเหล็กกล้าไร้สนิม

การทดสอบการยึดติดของวัสดุเชิงประกอบแก้วกับเหล็กกล้าไร้สนิม (123346 1.4509, วัสดุอินเตอร์คอนเน็กเตอร์) จากการถ่ายภาพด้วยเครื่อง Optical Microscope ดังแสดงในรูปที่ 6 โดยที่อัตราส่วน Py:So:Po ที่ 37.5:37.5:25 มีการยึดติดกับเหล็กกล้าไร้สนิมได้ดี แต่สำหรับอัตราส่วน Py:So:Po ที่ 56.25:18.75:25 จะพบการแยกตัวออกของวัสดุเชิงประกอบแก้วกับเหล็กกล้าไร้สนิม



(a)



(b)

รูปที่ 6 การยึดติดของวัสดุกันรั่วกับเหล็กกล้าไร้สนิม

(a) Py:So:Po ที่ 37.5:37.5:25, (b) Py:So:Po ที่

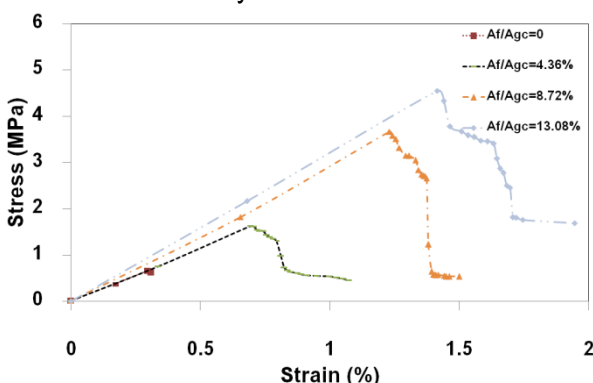
56.25:18.75:25

3.6 การทดสอบหาความเค้นดัด

การทดสอบวัสดุเชิงประกอบ Py:So:Po ที่ 37.5:37.5:25 เนื่องจากการยึดติดกับเหล็กกล้าไร้สนิมได้ดี การทดสอบความเค้นดัด แบบ 3-Point bending ดังแสดงในรูปที่ 7 ผลการทดลองอยู่ภายใต้ตัวอย่าง 10 ชิ้น จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 8 และ ตารางที่ 8 พบว่าค่าความเค้นดัด และโมดูลัสความยืดหยุ่นกรณีไม่เสริมเส้นใยจะอยู่ที่ 0.65 และ 22.15 MPa ตามลำดับ ขณะที่การเสริมเส้นใยเพิ่มขึ้น พบว่าค่าความเค้นดัด และโมดูลัสความยืดหยุ่นมีแนวโน้มสูงขึ้น โดยเมื่อเสริมเส้นใยเพิ่มเป็น 13.08% ค่าความเค้นดัด และโมดูลัสความยืดหยุ่นจะอยู่ที่ 4.55 และ 32.18 MPa ตามลำดับ



รูปที่ 7 การทดสอบความเค้นดัดของวัสดุเชิงประกอบที่อัตราส่วน Py:So:Po ที่ 37.5:37.5:25



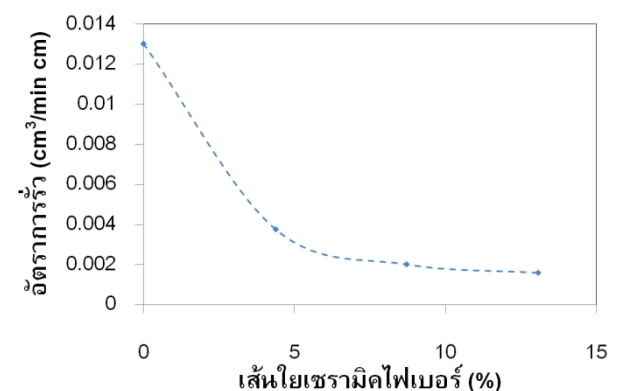
รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุเชิงประกอบแก้ว Py:So:Po ที่ 37.5:37.5:25

ตารางที่ 8 คุณสมบัติของวัสดุเชิงประกอบแก้วที่อัตราส่วน Py:So:Po ที่ 37.5:37.5:25 ร่วมกับการเสริมเส้นใย

เส้นใย (%)	Flexure Stress (MPa)	Modulus of Elasticity (MPa)
0	0.65	22.15
4.36	1.63	23.51
8.72	3.66	29.81
13.08	4.55	32.18

3.7 การทดสอบอัตราการรั่วที่อุณหภูมิ 800 °C

จากการทดสอบอัตราการรั่วของวัสดุเชิงประกอบแก้วที่อุณหภูมิ 800°C ผลที่ได้พบว่าอัตราการรั่วที่อัตราส่วน Py:So:Po ที่ 56.25:18.75:25 แบบไม่เสริมเส้นใยมีอัตราการรั่วสูงสุดเท่ากับ 3.49 cm³/min-cm ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ผ่านมาเรื่องการยึดติดของวัสดุเชิงประกอบแก้วกับเหล็กกล้าไร้สนิมจะพบการแยกตัวของวัสดุเชิงประกอบแก้วซึ่งทำให้อัตราการรั่วสูง จากการทดลองการรั่วที่อัตราส่วน Py:So:Po ที่ 37.5:37.5:25 มีแนวโน้มลดลงตามอัตราส่วนของการเสริมเส้นใย โดยมีอัตราการรั่วต่ำสุดเท่ากับ 0.0015 cm³/min-cm ที่ Py:So:Po 37.5: 37.5: 25 เสริมเส้นใย 13.08% ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการรั่วของวัสดุเชิงประกอบแก้ว Py:So:Po ที่ 37.5:37.5:25 ร่วมกับการเสริมเส้นใยเซรามิคไฟเบอร์ 312

4. สรุปผลการทดลอง

การวิจัยนี้เป็นการพัฒนาวัสดุป้องกันการรั่วที่จุดเชื่อมต่อระหว่างอินเตอร์คอนเน็กเตอร์กับ SOFC บนพื้นฐานของ rigid seal ภายใต้สภาวะการทำงาน ของ SOFC จากการทดลองพบว่าวัสดุเชิงประกอบ แก้วที่อัตราส่วนของ (Py:So:Po) 37.5:37.5:25 สามารถยึดติดได้ดีกับเหล็กกล้าไร้สนิมได้ดี ขณะที่การเสริมเส้นใยทำให้เพิ่มความสามารถในการรับความเค้นดัด และโมดูลัสความยืดหยุ่น รวมทั้งมีความเหมาะสมกับการนำไปใช้ป้องกันการรั่วของ SOFC โดยอัตราการรั่วต่ำสุดเท่ากับ $0.0015 \text{ cm}^3/\text{min-cm}$ ที่กรณีเสริมเส้นใย 13.08% ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าวัสดุเชิงประกอบแก้ว Py:So:Po 37.5:37.5:25 เสริมเส้นใยเซรามิกไฟเบอร์ 312 เหมาะกับการนำไปใช้เป็นวัสดุฉนวนที่จุดเชื่อมต่ออินเตอร์คอนเน็กเตอร์ของ SOFC ที่อุณหภูมิสูง

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณหน่วยงานที่สนับสนุนดังนี้คือ สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน และ ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Azra Selimovic, Miriam Kemm, Tord Torisson, and Mohsen Assadi, (2005). Steady state and transient thermal stress analysis in planar solid oxide fuel cells, Journal of Power Sources, vol.145, April 2005, pp 463 - 469.
- [2] Jinnapat A, Jiamsirilert S and Charojrochkul S. (2007). Study of Ceramic Seal for Solid Oxide Fuel Cells, Journal of materials Online AZojomo, vol 3, June 2007
- [3] K. Scott Weil, Christopher A. Coyle, Jens T. Darsell, Gordon G. Xia and John S. Hardy. (2005). Effects of thermal cycling and thermal aging on the hermeticity and strength of silver-copper oxide air-brazed seals, Journal of Power Sources, vol.152, March 2005, pp. 97-104.
- [4] Punbusayakul N, Wongklang W, Wongtida K, Charoensuk J, and Charojrochkul S. (2008). Behavior of Various Glass Seal for Planar Solid Oxide Fuel Cell, paper presented in SmartMat08 & IWOFM-2, April 2008, Chiang Mai, THAILAND
- [5] Punbusayakul N, Wongklang W, Wongtida K, Charoensuk J, and Charojrochkul S. (2008). Behaviour of Various Glass Seal for Planar Solid Oxide Fuel Cell, Advanced Materials Research, vol. 55-57, April 2008, pp. 817-820.
- [6] Charojrochkul S (2005). Operation Study of Sealing Materials for Solid Oxide Fuel Cells, Energy Technology Network of Thailand, July 22-29 Nakhonratchasima, Thailand
- [7] Punbusayakul N, Wongklang W, Charojrochkul S, Charoensuk J, and Fungtammasan B (2009). Design and Development the Interconnector Joint of Planar Solid Oxide Fuel Cell, paper presented in The 23rd Conference of the Mechanical Engineering Net of Thailand, November 4-7, 2009, Chiang Mai, Thailand
- [8] Punbusayakul N, Boonsiri K, Charojrochkul S, and Charoensuk J (2010). Effect of Surface Roughness for Leak rate on Interconnector Joint Under Operating Condition of Planar Solid Oxide Fuel Cell, Energy Technology Network of Thailand, May 5-7, 2010, Cha-Am Phetchburi, Thailand
- [9] Punbusayakul N, Charojrochkul S, Charoensuk J, and Fungtammasan B.(2009) Effect of Load Distribution Patterns on a

Non-Rigid-Body Interconnector Under Loading Condition of Planar Solid Oxide Fuel Cell, International Conference on Green and Sustainable Innovation

- [10] B.N.J. Persson, E Tosatti (2001). The effect of surface roughness on the adhesion of elastic solids, *Journal of chemical physics*, vol.115, September 2001, pp 5597- 5610.
- [11] Yutaka Yamanoi^{1,A}), Keizo Agari^A), Hiroaki Watanabe^A), Tetsuro Nakamura^B). (2007). Effect of surface roughness on leak tightness of pillow seal, The 4th annual meeting of particle accelerator society of japan and the 32nd linear accelerator meeting in Japan, vol. 191, August 2007, pp. 826–828.
- [12] J. Milhans, D. Li, M. Khaleel, X. Sun, H. Garmestani. (2010). Statistical continuum mechanics analysis of effective elastic properties in solid oxide fuel cell glass–ceramic seal material, *Journal of Power Sources*, vol. 195, March 2010, pp. 5726–5730
- [13] Manoj K. Mahapatra, Kathy Lu (2010). Seal glass compatibility with bare and (Mn,Co) 3O4 coated AISI 441 alloy in solid oxide fuel/electrolyzer cell atmospheres, *International journal of hydrogen energy*, August 2010.