

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24
20-22 ตุลาคม 2553 จังหวัดอุบลราชธานี

อิทธิพลของความกว้างของจุดเชื่อมต่อของอินเตอร์คอนเน็กเตอร์สำหรับเซลล์เชื้อเพลิง ออกไซด์ของแข็งแบบแผ่น

Effect of the U-groove Width at the Interconnector Joint of Nitrogen Leakage Rate for a Planar Solid Oxide Fuel Cell

นิตินัย ปัญญาบุศยกุล¹, กฤษฎา บุญศิริ¹, วิทยา วงษ์กลาง², สุมิตรา จรัสโรจน์กุล² และ จารุวัตร เจริญสุข³

¹ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Mahanakorn University of Technology, Bangkok, Thailand 10530

² National Metal and Materials Technology Center, Pathumthani, Thailand 12120

³ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's
Institute of Technology Ladkrabang Bangkok, Thailand.

* Corresponding Author: E-mail: nitinai_oak1@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความแสดงการศึกษาอิทธิพลของความกว้างบริเวณจุดเชื่อมต่อของอินเตอร์คอนเน็กเตอร์กับเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็ง ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการรั่วของเชื้อเพลิงและอากาศทำให้ประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าลดลง พร้อมทั้งยังทำให้เกิดความร้อนสูงที่บริเวณที่เกิดการรั่ว (hotspot) ดังนั้นปัญหาของการป้องกันการรั่วที่บริเวณจุดเชื่อมต่อจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญ งานวิจัยนี้ได้ทำการปรับเปลี่ยนค่าความกว้างบริเวณจุดเชื่อมต่อคือ 2, 4, 6 และ 8 mm บนพื้นฐานของ uniform load 0-2500 N กระทำกับอินเตอร์คอนเน็กเตอร์ วัสดุที่ใช้ทำคือเหล็กกล้าไร้สนิม 316 (Stainless Steel 316) อุณหภูมิที่ใช้ทดสอบ 30-800 องศาเซลเซียส ร่องป้องกันการรั่วเป็นรูปตัว U ขนาดความลึก 2 mm วัสดุที่ใช้ฉนวนคือ ไมก้า (mica) ผลการออกแบบการวัดการรั่วถูกวัดด้วยมาโนมิเตอร์ ตามมาตรฐานของ (ASTM F 37-89) จากผลการทดลองพบว่าที่ Uniform load 2500 N ความกว้าง 2 mm มีอัตราการรั่วมากที่สุดคือ 44 cm³/min และ ความกว้าง 8 mm มีอัตราการรั่วน้อยที่สุด เท่ากับ 23 cm³/min ซึ่งจะพบว่าการใช้ร่องฉนวนที่กว้างทำให้อัตราการรั่วต่ำ ซึ่งเหมาะกับการนำไปใช้ที่บริเวณจุดเชื่อมต่อของอินเตอร์คอนเน็กเตอร์กับเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็งแบบแผ่น

คำหลัก: การรั่ว, ความกว้างของจุดเชื่อมต่อของอินเตอร์คอนเน็กเตอร์, เซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็ง, วัสดุฉนวน ด้วยแรงกด

Abstract

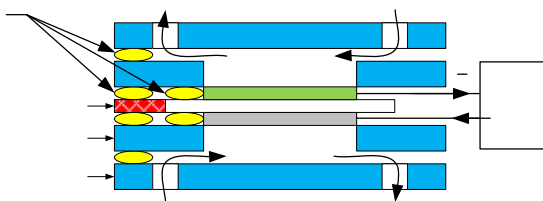
This paper has studied the influence of the width at the interconnector joint with solid oxide fuel cell. It has a significant impact on the stack utilization efficiency and the combustion of leak gas with air leads to uneven temperature rise (hot spot). This study was changed the width of interconnector joint which are 2, 4, 6 and 8 mm based on uniform load 0-2500 N which did on interconnector. Material is 316 stainless steel. Temperatures use on the test are between 30-800°C. Leakage prevention groove is U

shape depth 2 mm Sealing material is mica. Result of leakage design measure by manometer following standard (ASTM F 37-89). The results show that uniform load 2500 N, 2 mm widths has the highest leakage rate at $44 \text{ cm}^3/\text{min}$ and 8 mm widths has the lowest leakage rate at $23 \text{ cm}^3/\text{min}$. When use the groove seal leakage wider, the leakage rate is lower. This condition is appropriate to use at the junction of the interconnector of planar solid oxide fuel cell (SOFC).

Keywords: Compressive seal, Leakage, SOFC, U-Groove Width

1.บทนำ

อินเตอร์คอนเนกเตอร์ทำหน้าที่จัดเรียงการไหลของเชื้อเพลิงและอากาศ รวมทั้งทำหน้าที่ในการดึงกระแสไฟฟ้าที่ได้จากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของ SOFC ดังนั้นถ้าเกิดการรั่วของเชื้อเพลิงจากขั้วไฟฟ้าแอโนดไปยังขั้วไฟฟ้าแคโทดจะส่งผลให้ประสิทธิภาพจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าลดลง รวมทั้งทำให้เกิดการทำปฏิกิริยาระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศก่อให้เกิดความร้อนสูงบริเวณที่เกิดการรั่ว จะเห็นได้ว่าการป้องกันการรั่วที่จุดเชื่อมต่อจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญในการการพัฒนาอินเตอร์คอนเนกเตอร์ ทั้งนี้ตำแหน่งของการผนึกเซลล์มีด้วยกันสามตำแหน่งคือ ระหว่างท่อนำการไหลหลัก (Manifold) กับ อินเตอร์คอนเนกเตอร์ ระหว่างอุปกรณ์เพิ่มความหนา (Spacer) กับ อินเตอร์คอนเนกเตอร์ และ ระหว่างอินเตอร์คอนเนกเตอร์กับเซลล์ (Single cell ประกอบด้วย แอโนด อิเล็กโทรไลต์ และ แคโทด) สามารถดูได้จากรูปที่ 1



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

จากรูปที่ 1 เมื่อเชื้อเพลิงไฮโดรเจนถูกป้อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิง ไฮโดรเจนจะแตกตัวเป็นไฮโดรเจนไอออน กับอิเล็กตรอนที่ขั้วแอโนด และออกซิเจนจากอากาศจะจับไฮโดรเจนไอออนที่ผ่านอิเล็กโทรไลต์

มายังแคโทด ทำให้เกิดน้ำ และอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะไหลเวียนในระบบ (External circuit)

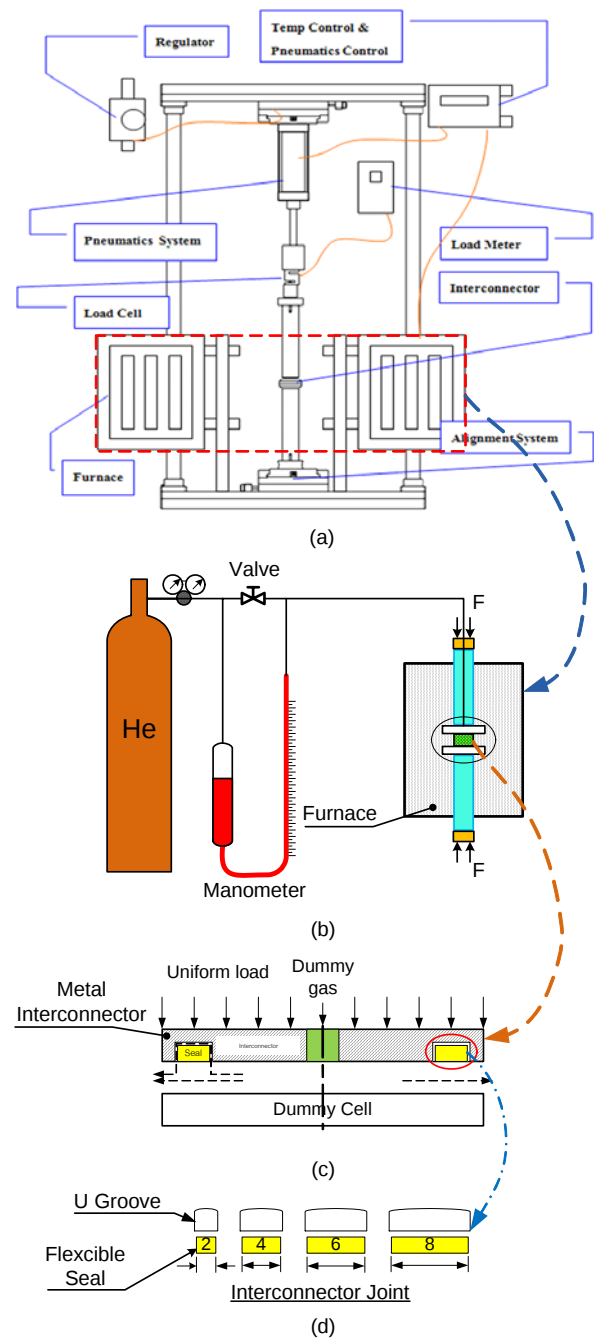
จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการพัฒนาวัสดุกันรั่วในหลายรูปแบบ โดยทั่วไปแล้วในการวิจัยใช้แก้วโบโรซิลิเกต และ แก้วอลูมิโนซิลิเกตเป็นวัสดุกันรั่วเนื่องจากยึดติดได้ดีที่อุณหภูมิสูง แต่มีข้อเสีย คือใช้งานภายใต้ วัฏจักรทางความร้อนได้เพียงครั้งเดียว [1-3, 6,7,14] ขณะเดียวกันได้มีการศึกษาการป้องกันการรั่วรูปลี่เหลียม สามเหลียม และ ตัว U ขนาดความกว้าง 2 mm ลึก 2 mm วัสดุผนึกคือ Mica ผลการทดลองพบว่าร่องผนึก U ทำให้อัตราการรั่วต่ำ [8] และได้มีการศึกษาอิทธิพลของรูปแบบการกระจายตัวของแรงที่กระทำกับอินเตอร์คอนเนกเตอร์ พบว่าขนาดของ Uniform Load และการเพิ่มของอุณหภูมิทำให้อินเตอร์คอนเนกเตอร์ dummy cell (ใช้ 316 Stainless steel แทนเซลล์, Single cell) และ วัสดุผนึก ซึ่งไม่มีคุณสมบัติเป็น rigid body เกิดการเสียรูป [9] รวมทั้งอิทธิพลของความหยาบของผิวต่ออัตราการรั่ว ทั้งนี้ได้ทำการปรับเปลี่ยนค่าความหยาบผิวคือ $Ra = 0.9-25 \mu\text{m}$ ร่องผนึกเป็นร่องสี่เหลียม ความกว้าง 6 มม. ลึก 2 มม. วัสดุผนึกคือ Mica พบว่าเมื่อค่าความหยาบผิวลดลงทำให้อัตราการรั่วลดลงจนอาจจะไม่เกิดการรั่วได้ [10,13]

งานวิจัยนี้กล่าวถึงการออกแบบและพัฒนาจุดเชื่อมต่อที่อินเตอร์คอนเนกเตอร์เพื่อป้องกันการรั่วภายใต้ Compressive load 0-2500 N ทั้งนี้ได้ทำการปรับเปลี่ยนค่าความกว้างบริเวณจุดเชื่อมต่อคือ 2, 4, 6 และ 8 mm อุณหภูมิที่ใช้ทดสอบ 30-800 องศาเซลเซียส ร่องป้องกันการรั่วเป็นรูปตัว U ขนาดความ

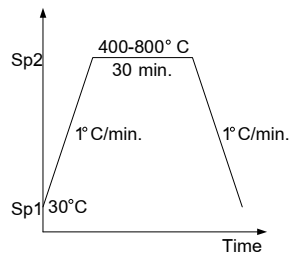
เล็ก 2 mm วัสดุฝึกคือ Mica อัตราการรั่วถูกวัดด้วย
มานอมิเตอร์ตามมาตรฐาน ASTM F 37-89

2. การทดลอง

อุปกรณ์อินเทอร์คอนเน็กเตอร์ และ Dummy cell
ดังรูปที่ 3 (c) ที่ประกอบสมบูรณ์แล้วจะถูกลงในเตา
อบไฟฟ้ารูปทรงกระบอกแนวตั้ง โดยมีการส่งผ่านแรง
สำหรับการฝึกด้วยระบบนิวเมติก (Pneumatics
system) การควบคุมแรงของระบบนิวเมติกถูกควบคุม
ด้วยอุปกรณ์ปรับความดัน (Regulator) การวัดแรง
สำหรับการฝึกถูกวัดด้วยอุปกรณ์วัดแรง (Load cell)
และแสดงผลด้วยอุปกรณ์แสดงผล (Load Meter) โดย
แรงที่ควบคุมจะอยู่จะเป็นแรงแบบแรงกระจายที่ 0-
2500 N การควบคุมการสัมผัสของหน้าสัมผัสระหว่าง
อินเทอร์คอนเน็กเตอร์ และ Dummy cell ถูกควบคุม
ด้วยอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนแนวแกน (Alignment
system) ซึ่งจะทำให้เกิดการสัมผัสกันระหว่าง
หน้าสัมผัสของอินเทอร์คอนเน็กเตอร์และ Dummy cell
อย่างสม่ำเสมอ ซึ่งสามารถปรับได้ทั้งด้านบนและ
ด้านล่าง แสดงดังรูปที่ 2 (a) ชุดวัดอัตราการรั่วถูก
สร้างตามมาตรฐาน ASTM F 37-89 ดังรูปที่ 2 (b)
การควบคุมอุณหภูมิกระทำได้ดังรูปที่ 3 ซึ่งเป็นเงื่อนไข
ทางด้านการขยายตัวเชิงความร้อนของวัสดุที่
เหมาะสมต่อรูปร่างของวัสดุ ซึ่งจะไม่ทำให้วัสดุเกิด
การแตกเสียหายจากความร้อน [6-10, 14] ร่องฝึกมี
ID 46 mm ดังรูปที่ 2 (c) อัตราการรั่วถูกวัดที่ 30-
800°C โดยคงอุณหภูมิไว้ 30 นาที และทำการวัดการ
รั่วเป็นเวลา 30 นาที ในขณะเดียวกันจะทำการป้อน
dummy gas (Nitrogen gas, 2 bar) เข้าไปในเตา ไป
ยังชุดอินเทอร์คอนเน็กเตอร์ และ Dummy cell
ขณะนั้นวาล์วจะต้องถูกปิดลง และยอมให้ dummy
gas ไหลผ่านไปยังมานอมิเตอร์



รูปที่ 2 อุปกรณ์การทดลอง (a) โครงสร้างชุดป้อนแรง
เตาอบไฟฟ้าแนวตั้ง (b) ชุดทดสอบการรั่วด้วยมาโน
มิเตอร์ (ASTM F 37-89) (c) อินเทอร์คอนเน็กเตอร์
และ Dummy cell (d) การปรับเปลี่ยนความกว้างของ
จุดเชื่อมต่อของอินเทอร์คอนเน็กเตอร์แบบร่อง U ที่ 2,
4, 6 และ 8 mm

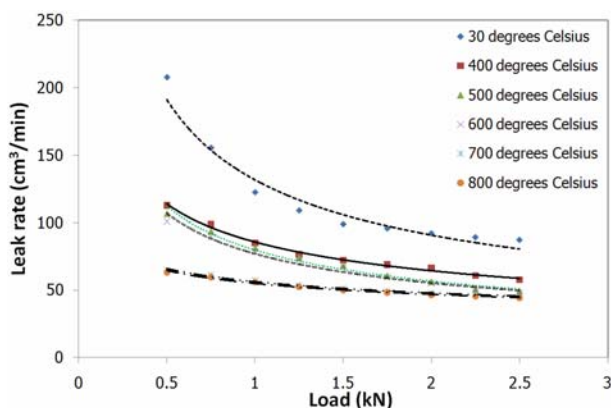


รูปที่ 3 การควบคุมอุณหภูมิภายในเตาอบไฟฟ้า

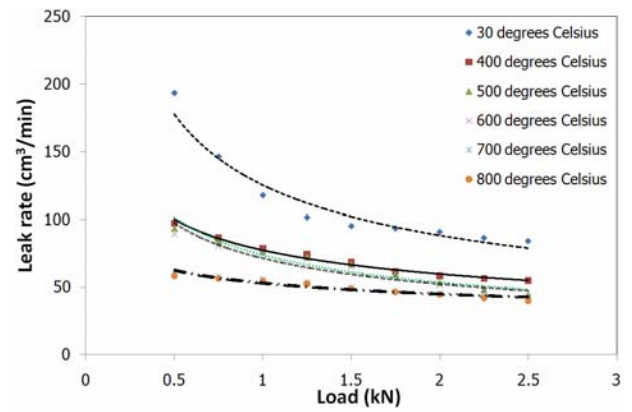
3. ผลการทดลองและการอภิปราย

3.1. ผลกระทบของอุณหภูมิ

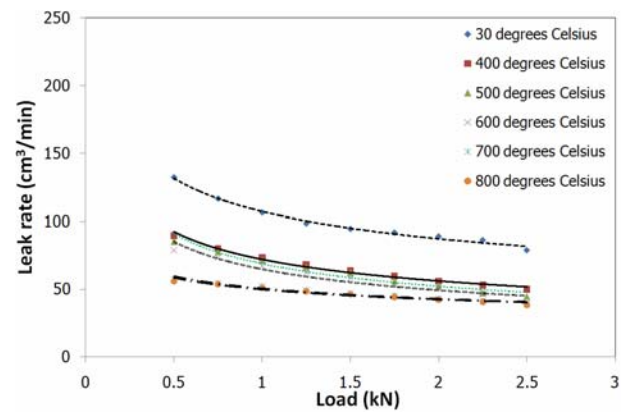
การทดลองอยู่ภายใต้การใช้วัสดุผกเป็นไมก้า ที่อุณหภูมิ 30-800°C ซึ่งแต่ละอุณหภูมิจะทำการทดสอบที่แรงกดแบบ Uniform Load ขนาด 0.5–2.5 kN โดยเพิ่มครั้งละ 0.25 kN ตามลำดับ จากรูปที่ 4 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าทุกเงื่อนไขของการทดลองอัตราการรั่วจะมีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มขนาดของ Uniform Load และตามการเพิ่มของอุณหภูมิ อัตราการรั่วที่ความกว้าง 2, 4, 6, และ 8 mm (2.5 kN, 800 °C) คือ 44, 39, 38 และ 23 cm³/min ตามลำดับ จากการทดลองจะเห็นได้ว่าค่าความกว้างสูงทำให้มีอัตราการรั่วลดลง



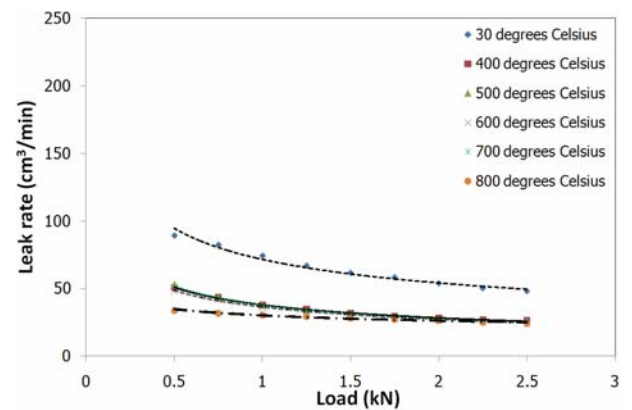
5 (a) ความกว้าง 2 mm



(b) ความกว้าง 4 mm



(c) ความกว้าง 6 mm



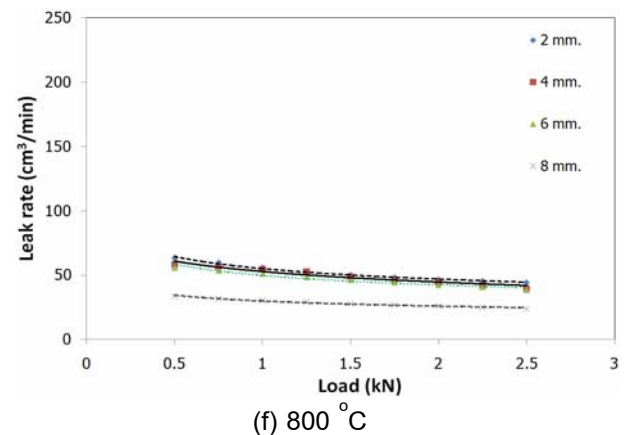
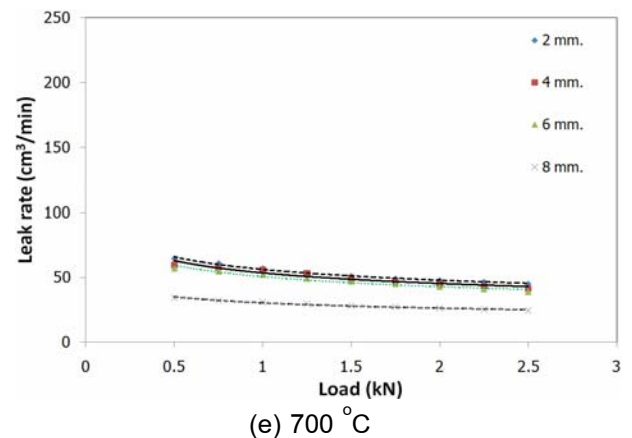
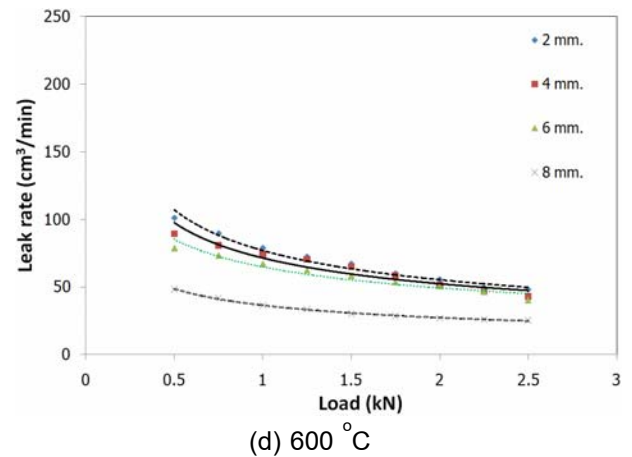
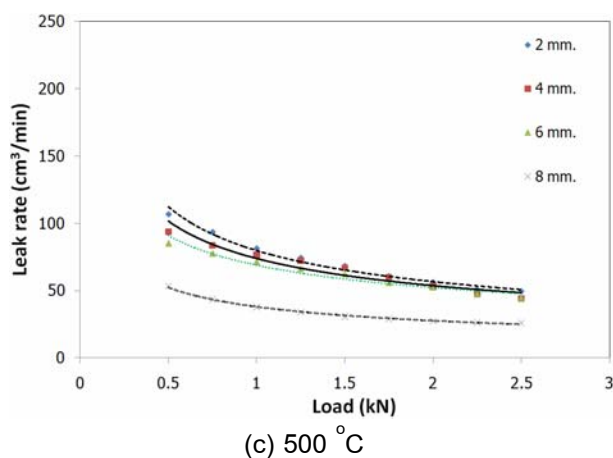
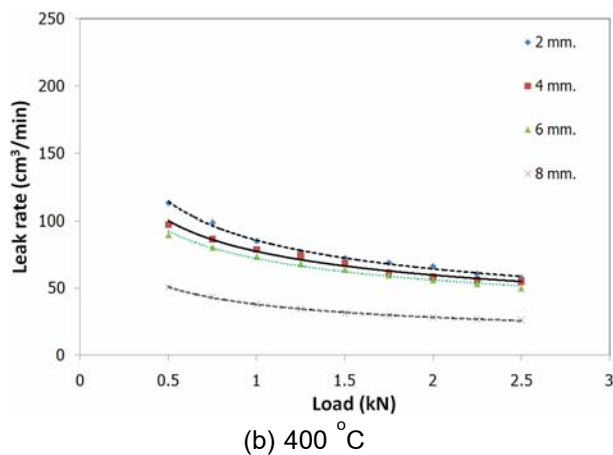
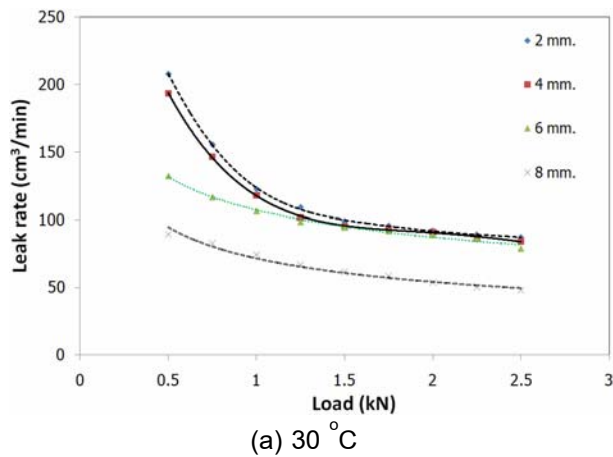
(d) ความกว้าง 8 mm

รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการรั่วกับแรง
ด้วยการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิที่ค่าความกว้าง 2 4
6 และ 8 mm

3.2 ผลกระทบของความกว้างของจุดเชื่อมต่อ ของอินเตอร์คอนเนกเตอร์

จากรูปที่ 5 อัตราการรั่วลดลงอย่างรวดเร็วในรูปแบบของเอ็กซ์โพเนนเชียล เมื่อมีการเพิ่มแรงกดที่อุณหภูมิ 30 °C ที่ค่าความกว้างของจุดเชื่อมต่อ

ของอินเตอร์คอนเน็กเตอร์ที่ 2, และ 4 mm (0.5-1 kN) อัตราการรั่วลดลงอย่างช้าๆ เมื่อเพิ่มแรงกดที่อุณหภูมิ 400-800 °C (1-2.5 kN). โดยอัตราการรั่วเมื่อร่องผิวนอกของอินเตอร์คอนเน็กเตอร์มีความกว้าง 2 mm จะสูงกว่าความกว้าง 8 mm ซึ่งอยู่ในช่วง 57-23 cm³/min.

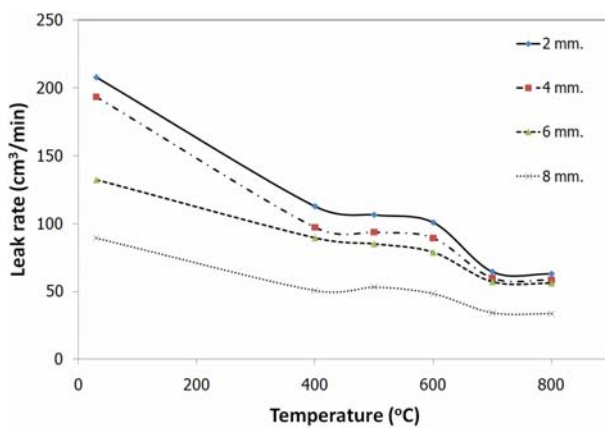


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการรั่วกับแรงด้วยการปรับเปลี่ยนค่าความกว้าง 2 4 6 และ 8 mm ที่อุณหภูมิ 30-800 °C

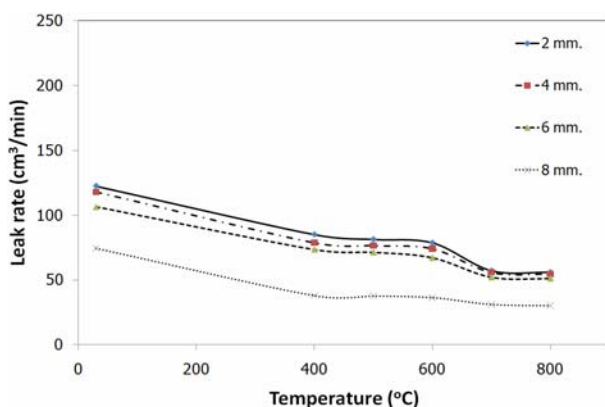
3.3. ผลกระทบอุณหภูมิจาก 30 °C ไปที่ 800 °C

การทดลองนี้ทำการศึกษาอัตราการรั่วช่วงเปิดเครื่องเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็ง จากอุณหภูมิห้องไปที่อุณหภูมิทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงและทำให้ทราบอัตราการรั่วระหว่างปิดการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็งได้ ซึ่งจะเป็นประโยชน์

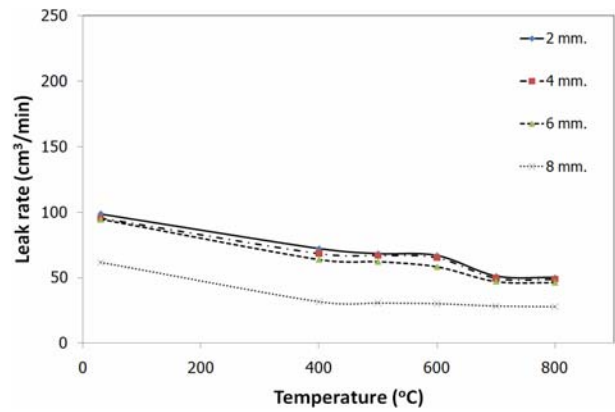
ต่อการพัฒนาทางด้านวิศวกรรมทางความร้อน โดยจากผลการทดลองดังรูปที่ 6 แสดงอัตราการรั่วเมื่อมีการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิจาก 30 °C (SP₁) ไปที่ 800 °C (SP₂) ที่แรงกด 500 - 2500 N พบว่าอัตราการรั่วเมื่อความกว้างต่างๆ จะเหมือนกันทุกเงื่อนไข นั่นคือที่แรงกด และอุณหภูมิ 30-400 °C อัตราการรั่วจะลดลงอย่างรวดเร็ว ต่อจากนั้นอัตราการรั่วจะคงที่หรือลดลงเล็กน้อยที่ 400-600 °C. ซึ่งคาดว่าอินเตอร์คอนเน็กเตอร์ dummy cell และวัสดุที่ใช้เป็นวัสดุฉนวนกำลังอยู่ในช่วงของการปรับเปลี่ยนให้เกิดภาวะสมดุลจากผลของความเค้นเนื่องจากความร้อน และการขยายตัวเชิงความร้อนของวัสดุ จากนั้นอัตราการรั่วจะเริ่มลดลงอย่างรวดเร็วอีกครั้งที่อุณหภูมิ 700 °C และเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ที่ 800 °C



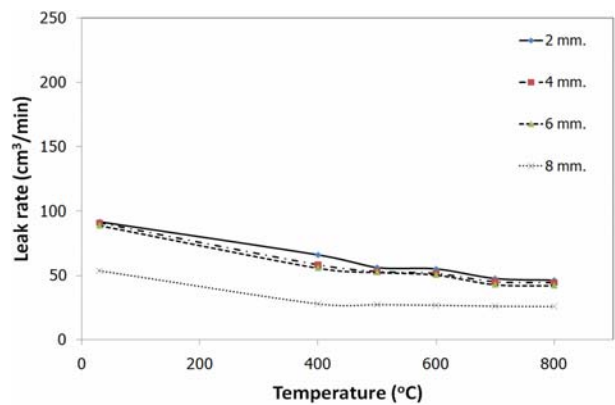
(a) 500 N



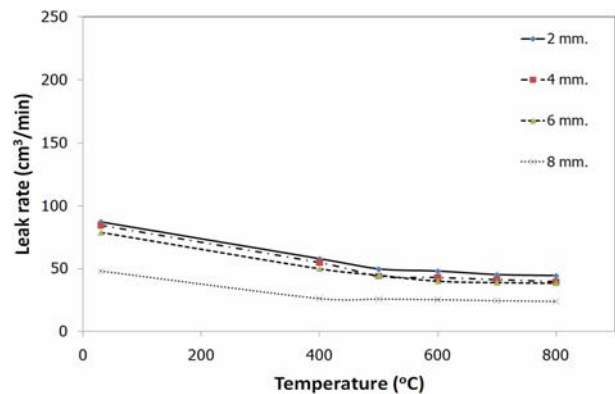
(b) 1000 N



(c) 1500 N



(d) 2000 N



(e) 2500 N

รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการรั่วกับแรงด้วยการปรับเปลี่ยนค่าความกว้าง ที่แรงต่างๆกัน

4. สรุปผลการทดลอง

จากผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองพบว่าอัตราการรั่วจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการเพิ่มขนาดของ Uniform Load และเพิ่มของอุณหภูมิ โดยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้อินเตอร์คอนเน็กเตอร์ dummy cell (เซลล์เทียม) และ วัสดุฉนวน เกิดการเสียรูป รวมทั้งจะพบว่าเมื่อความกว้างเพิ่มขึ้นจะทำให้ความเป็นไปได้ของการ

เชื่อมโยงของโครงข่ายของช่องว่างของพื้นผิวของ Dummy cell กับวัสดุผนึก และช่องว่างระหว่างพื้นผิวของอินเตอร์คอนเน็กเตอร์ที่จุดเชื่อมต่อกับวัสดุผนึกที่เกิดขึ้นลดลง ทำให้อัตราการรั่วลดลงจนอาจจะไม่เกิดการรั่ว รวมทั้งโครงข่ายของช่องว่างภายในตัววัสดุผนึก (ไม่ก้ำ) ถูกตัดขาดจากกัน ดังนั้นการรั่วจึงลดลง ซึ่งค่าความกว้างของจุดเชื่อมต่อนี้จะเหมาะสมกับเงื่อนไขการทำงานของ SOFC โดยในอนาคตจำเป็นต้องมีการปรับปรุงการทดลองให้อัตราการรั่วลดลงหรือไม่เกิดการรั่ว

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณหน่วยงานที่สนับสนุนตั้งนี้คือ สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน และ ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ที่ให้การสนับสนุนด้านทุนวิจัย

6. 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] Martin Bram, Stephan Reckers, Pere Drinovac, Josef M'önch, Rolf W. Steinbrech, Hans Peter Buchkremer and Detlev St'over, (2004). Deformation behavior and leakage tests of alternate sealing materials for SOFC stacks, *Journal of Power Sources*, vol.145, August 2005, pp. 111 - 119.
- [5] Montross C.S, Yokokawa H, and Dokiya M, (2002). Thermal stresses in planar solid oxide fuel cells due to thermal expansion differences, *British Ceramic Transactions*, vol.101(3), June 2002, pp. 85-93(9).
- [6] 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
- [7] 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.
- [8] 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
- [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, paper presented in *International Conference on Green and Sustainable Innovation 2009*, December 2-4, 2009, Chiang Rai, THAILAND
- [10] 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

- [11] Sassoulas H, Morice L, Caplain P, Rouaudb C, Mirabel L and Beal F. (2006). Ageing of metallic gaskets for spent fuel casks: Century-long life forecast from 25,000-h-long experiments, *Nuclear Engineering and Design*, vol.236, February 2006, pp. 2411-2417.
- [12] Yeong-Shyung C, Stevenson J.W, Hard J, and Singh P. (2009). Long-term ageing and materials degradation of hybrid mica compressive seals for solid oxide fuel cells, *Journal of Power Sources*, vol. 191, August 2009, pp. 384–389.
- [13] Yutaka Yamanoi¹, Keizo Agari¹, Hiroaki Watanabe¹, Tetsuro Nakamura². (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.
- [14] สุมิตรา จรสโรจน์กุล และ ร.อ.อภิชาติ จินแพทย (2549). การศึกษาการใช้งานของวัสดุกันรั่วในเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง, *การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย, ครั้งที่ 2, 22-29 กรกฎาคม 2549 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา*