

**การศึกษาการผนึกด้วยแรงกดด้วยคอนดักทีฟซิลเวอร์เพนต์และไมก้าสำหรับเซลล์  
เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็งแบบแผ่น**  
**Study of Compressive Seals Based on Conductive Silver Paint and Mica for a  
Planar Solid Oxide Fuel Cell**

นิตินัย ปัญญาบุศยกุล<sup>1\*</sup>, กฤษฎา บุญศิริ<sup>1</sup>, จารุวัตร เจริญสุข<sup>2</sup> และ สุมิตรา จรสโรจน์กุล<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร จ.กรุงเทพฯ 10530

<sup>2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

<sup>3</sup>ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย จ.ปทุมธานี 12120

\* ติดต่อ: E-mail: nitinai\_oak1@hotmail.com

**บทคัดย่อ**

การวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับ การผนึกด้วยแรงกดโดยใช้คอนดักทีฟเพนต์ (Conductive metal paint) ร่วมกับวัสดุผนึกไมก้า (mica) ภายใต้เงื่อนไขการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็งแบบแผ่น (SOFC) ปัญหาที่เป็นอุปสรรคต่อการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็งแบบแผ่นเกิดขึ้นจากปัญหาของการรั่วของก๊าซที่จุดเชื่อมต่อระหว่างอินเตอร์คอนเนกเตอร์กับห่อเซลล์ และแต่ละเซลล์ บทความนี้ได้มีการศึกษาอัตราการรั่วของก๊าซที่ผ่านวัสดุผนึกที่มีการจัดเรียงแบบซ้อนกัน (Sandwich) ระหว่างวัสดุผนึกไมก้า และคอนดักทีฟซิลเวอร์เพนต์ (Conductive silver paint) การทดลองจะทำที่อุณหภูมิห้อง จนถึง 800°C (อุณหภูมิทำงานของ SOFC) และการวัดการรั่วถูกวัดด้วยมาโนมิเตอร์ ตามมาตรฐานของ ASTM F 37-89 โดยอินเตอร์คอนเนกเตอร์ที่ใช้ในการทดลองทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม 316 (Stainless Steel 316) แรงกดที่กระทำกับอินเตอร์คอนเนกเตอร์อยู่ที่ 500-2500 N ร่องป้องกันการรั่วเป็นรูปสี่เหลี่ยม ขนาดความกว้าง 2, 4, 6 และ 8 mm ขนาดความลึก 2 mm จากผลการทดลองพบว่าอัตราการรั่วน้อยกว่า 17 cm<sup>3</sup>/min ภายใต้แรงกดที่ 2500 N และอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้อง จนถึง 800°C โดยพบว่าพฤติกรรมของวัสดุผนึกในช่วง elastic จะส่งผลกระทบต่อ การผนึกของวัสดุผนึก ขณะที่โครงสร้างจุลภาคของวัสดุผนึกภายใต้แรงกดจะถูกทำการศึกษาด้วย SEM (Scanning Electron Microscope)

**คำหลัก:** การผนึกด้วยแรงกด, คอนดักทีฟซิลเวอร์เพนต์, เซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็ง, ไมก้า, อัตราการรั่ว

**Abstract**

Compressive seals based on a conductive metal paint and mica composites have been investigated under operating conditions of a planar solid oxide fuel cell (SOFC). A problem of gas leakage at the connecting point between the interconnector of the cell stack and each single cell is one of major issues in developing an SOFC. This paper has studied the leak rate by using a sandwich arrangement of mica paper and conductive silver paint applying onto the interconnector joint. This experiment was carried

out at ambient temperature and the leak rate was measured using ASTM F37-89 guideline. The interconnector used in this experiment was made of 316 stainless steel. The normalized compressive load was applied up to 2500 N. The square groove of 2, 4, 6, and 8 mm. wide and 2 mm deep was used to prevent any gas leakage of the seal. The leak rate of this seal was shown to be as low as  $17 \text{ cm}^3/\text{min}$  under applying normalized compressive load of 2500 N and ambient temperature up to  $800^\circ\text{C}$ . The leak rate is also influenced by the elastic response of the seal. The microstructure of this compressive seal was examined using a scanning electron microscope.

**Keywords:** Compressive seal, Conductive silver paint, Gas leakage, Mica, SOFC

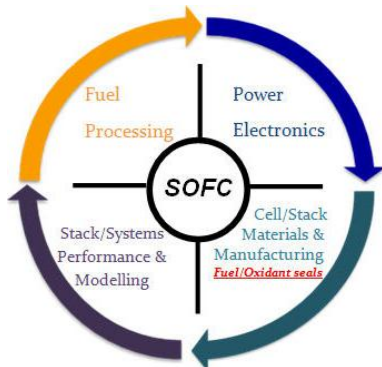
## 1. คำนำ

การพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็งแบบแผ่น (Solid Oxide Fuel cell, SOFC) มีองค์ประกอบหลักคือ กระบวนการผลิตเชื้อเพลิง (Fuel processing), การควบคุมแปลงผันพลังงานไฟฟ้า (Power electronics), สมรรถนะของระบบและหอคเซลล์ รวมทั้งแบบจำลองและวัสดุ (Stack/Systems performance & Modeling), สำหรับเซลล์และหอคเซลล์ รวมทั้งกรรมวิธีการผลิต (Cell/Stack Materials & Manufacturing) [1] ดังแสดงในรูปที่ 1 งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่การศึกษาวัสดุฉนวนกั้นเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็งเพื่อป้องกันการรั่วระหว่างจุดเชื่อมต่อของอินเตอร์คอนเนกเตอร์กับเซลล์ การรั่วของเชื้อเพลิงจะทำให้ประสิทธิภาพลดลง [1-3,7-9,15] ดังนั้นการป้องกันการรั่วจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญในการพัฒนาหอคเซลล์

ปัจจุบันมีนักวิจัยจำนวนมากให้ความสนใจในการศึกษาและพัฒนาวัสดุฉนวนกั้นให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับสภาวะการทำงานของ SOFC เพื่อผลักดัน SOFC ให้ประสบความสำเร็จและสามารถนำไปใช้งานได้จริงในเชิงพาณิชย์ จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็น rigid body จำพวกแก้วกับเซรามิก [4-9] สามารถป้องกันการรั่วได้ดี แต่มีความยุ่งยากในการหาวัสดุฉนวนกั้นที่มีความเข้ากันได้ของสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงความร้อนระหว่างวัสดุฉนวนกั้นกับเซลล์ และอินเตอร์คอนเนกเตอร์ ขณะเดียวกันคณะวิจัย [10,11] ได้ออกแบบเซลล์และหอคเซลล์ให้มีรูปแบบเซลล์แยกส่วนจากกันและแต่ละเซลล์ต่อกันแบบอนุกรม (Segmented-Cell-in-Series) ทำให้

สามารถนำวัสดุฉนวนกั้นชนิดโลหะที่มีความยืดหยุ่นสูงมาประยุกต์ใช้กับการป้องกันการรั่วของ SOFC เพื่อลดผลกระทบจากสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงความร้อนโดยวัสดุที่เลือกใช้คือเงิน จากงานวิจัยของ Stevenson [12] พบว่าเงินมีความเสถียรภายใต้การสัมผัสกับอากาศที่  $700^\circ\text{C}$  ขณะที่ Yeong-Shyung Chou และ Jeffrey W. Stevenson [13, 14] มีการศึกษาพฤติกรรมของการรั่วโดยใช้เงินร่วมกับไมก้า โดยพบว่าสามารถลดอัตราการรั่วลงได้ 60% เมื่อเทียบกับไมก้า ที่  $800^\circ\text{C}$  หลังจากผ่านไป 18 วัฏจักรความร้อน นอกจากนั้นยังมีการศึกษาศักยภาพของวัสดุเงิน (99.99%) ในการป้องกันการรั่วสำหรับ SOFC ซึ่งพบว่ามีความสามารถในการป้องกันการรั่วที่ดี โดยอัตราการรั่วต่ำสุดอยู่ที่  $0.75 \text{ cm}^3/\text{min}$  ( $800^\circ\text{C}$ , 2500N, ความกว้าง 6 mm, ร่องฉนวนกั้นสี่เหลี่ยม) [15] แต่เนื่องจากเงินเป็นวัสดุที่นำไฟฟ้า เพราะฉะนั้นจึงจำเป็นต้องหาวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าเช่นไมก้าเพื่อประกอบเป็นวัสดุผสม (Hybrid material) แต่ไมก้ามีลักษณะโครงสร้างเป็นแผ่นเรียงทับซ้อนกันจึงทำให้อัตราการรั่วสูงกว่าวัสดุเงิน โดยมีอัตราการรั่วต่ำสุดอยู่ที่  $67 \text{ cm}^3/\text{min}$  ( $800^\circ\text{C}$ , 2500N, ความกว้าง 6 mm, ร่องฉนวนกั้นสี่เหลี่ยม) [1] ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะนำคอนดักซ์ทรีเพนทาลเฟนท์ (Conductive metal paint) ที่มีส่วนผสมหลักคือวัสดุเงิน และมีข้อดีที่มีสถานะเป็นของเหลวทำให้สามารถแทรกเข้าไปในแผ่นของวัสดุไมก้าเพื่อลดปัญหาของการรั่วพร้อมทั้งยังคงคุณสมบัติของการเป็นฉนวนไฟฟ้าอยู่

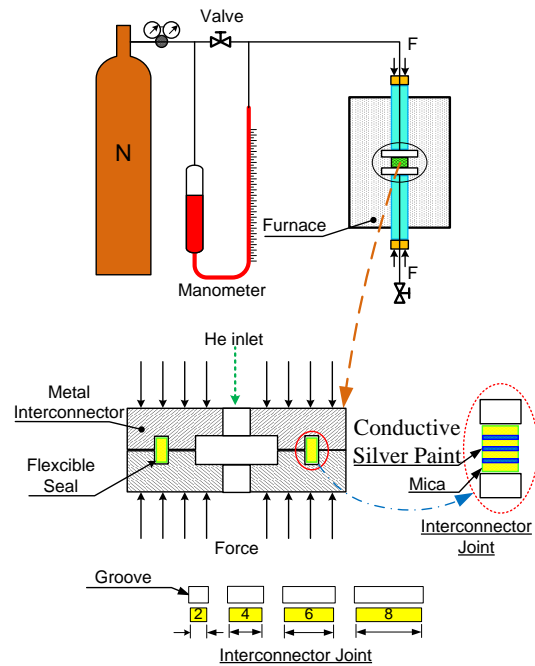
งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาการป้องกันการรั่วที่จุดเชื่อมต่อกับอินเตอร์คอนเนกเตอร์ของ SOFC โดยใช้วัสดุฉนวนที่มีการจัดเรียงแบบซ้อนกัน (Sandwich) ระหว่างไมก้ากับคอนดักทีฟซิลเวอร์เพนต์ (Conductive silver paint) ที่อุณหภูมิ 30-800 °C ภายใต้แรงกดแบบ uniform load 500-2500 N กระทำกับอินเตอร์คอนเนกเตอร์ ร่องป้องกันการรั่วเป็นรูปสี่เหลี่ยมขนาดความกว้าง 2, 4, 6 และ 8 mm ลึก 2 mm ตามลำดับ



รูปที่ 1 องค์ประกอบการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็งแบบแผ่น

## 2. การทดลอง

อุปกรณ์อินเตอร์คอนเนกเตอร์ และเซลล์เทียม ดังแสดงในรูปที่ 2 ที่ประกอบสมบูรณ์แล้วจะถูกวางในเตาอบ โดยมีการส่งผ่านแรงที่ 500-2500 N การควบคุมอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นด้วยอัตรา 1°C/min ซึ่งเป็นเงื่อนไขทางด้านการขยายตัวเชิงความร้อนของวัสดุที่เหมาะสมต่อรูปร่างของวัสดุ ซึ่งจะไม่ทำให้วัสดุเกิดการแตกเสียหายจากความร้อน [7-10] ร่องฉนวนเป็นรูปสี่เหลี่ยมขนาดความกว้าง 2, 4, 6 และ 8 mm ลึก 2 mm อัตราการรั่วที่อุณหภูมิ 30-800°C โดยคงอุณหภูมิไว้ 30 นาที ในขณะเดียวกันจะทำการป้องกันก๊าซที่ใช้ทดแทนก๊าซไฮโดรเจน (Nitrogen gas, 2 bar) เข้าไปยังชุดอินเตอร์คอนเนกเตอร์ และเซลล์เทียม ขณะนั้นวาล์วจะต้องถูกปิดลง และยอมให้ก๊าซไนโตรเจนไหลผ่านไปยังมานอมิเตอร์ที่ใช้สำหรับวัดอัตราการรั่วตามมาตรฐาน ASTM F 37-89 ดังรูปที่ 2 โดยจัดเรียงคอนดักทีฟเมทัลเพนต์ ร่วมกับวัสดุฉนวนไมก้า (8 ชั้น) แบบซ้อนกัน

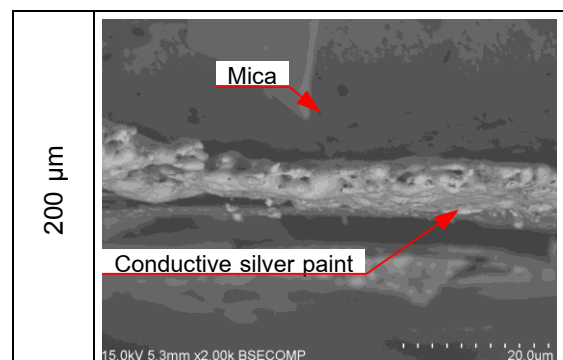


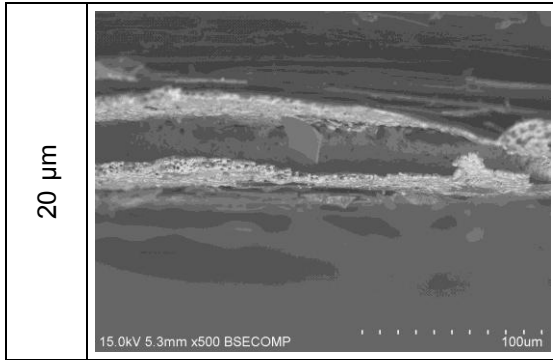
รูปที่ 2 อุปกรณ์การทดลอง

## 3. ผลการทดลองและการอภิปราย

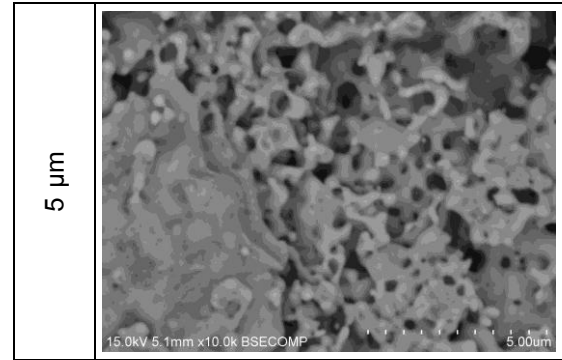
### 3.1 โครงสร้างจุลภาค

ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของหน้าตัดและพื้นผิววัสดุฉนวนระหว่างไมก้ากับคอนดักทีฟซิลเวอร์เพนต์ หลังการใช้งานที่ 800 °C ภายใต้แรงกด ดังแสดงในรูปที่ 3-4 จากผลการทดลองจะสังเกตเห็นว่าคอนดักทีฟซิลเวอร์เพนต์สามารถแทรกเข้าไประหว่างชั้นของวัสดุไมก้าได้ดังแสดงในรูปที่ 3 การตรวจสอบรูพรุน และตำแหน่งในโครงสร้างจุลภาคของพื้นผิวของวัสดุฉนวนที่กำลังขยายต่างๆ (200→5 μm) พบว่าโครงสร้างพื้นผิวของคอนดักทีฟซิลเวอร์เพนต์ มีปริมาณรูพรุนขนาดประมาณ 0.5 μm กระจายเต็มพื้นที่ผิว

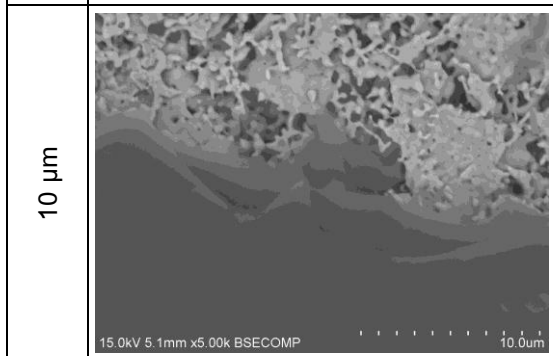
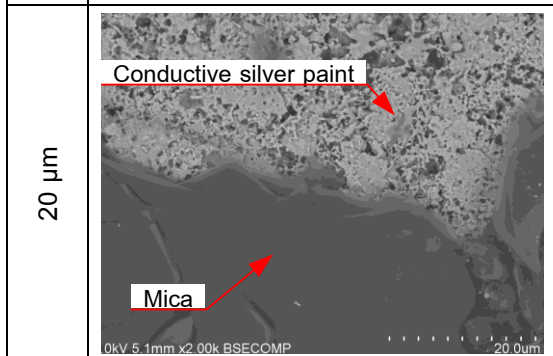
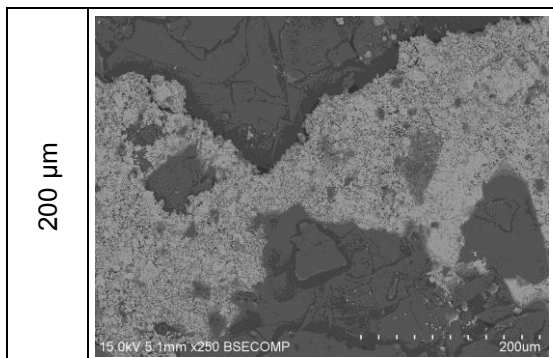




รูปที่ 3 โครงสร้างจุลภาคของหน้าตัดวัสดุฉนวนระหว่างไมก้ากับคอนดักซ์ทรีฟซิลเวอร์เพนต์

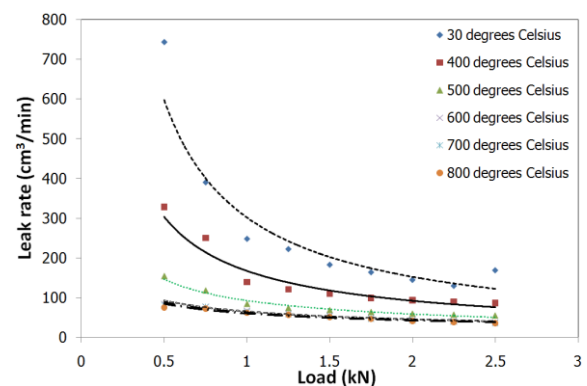


รูปที่ 4 โครงสร้างจุลภาคของพื้นผิววัสดุฉนวนไมก้าระหว่างกับคอนดักซ์ทรีฟซิลเวอร์เพนต์

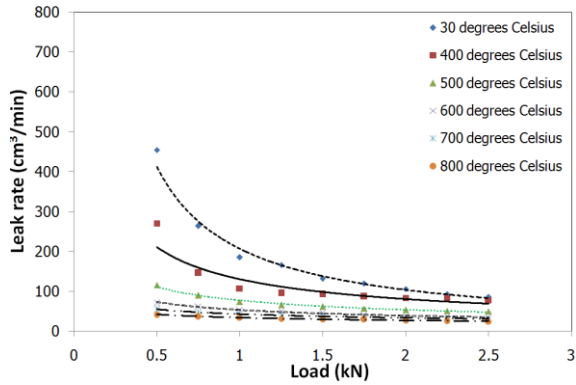


### 3.2 ผลกระทบของอุณหภูมิที่แรงกด 500–2500 N

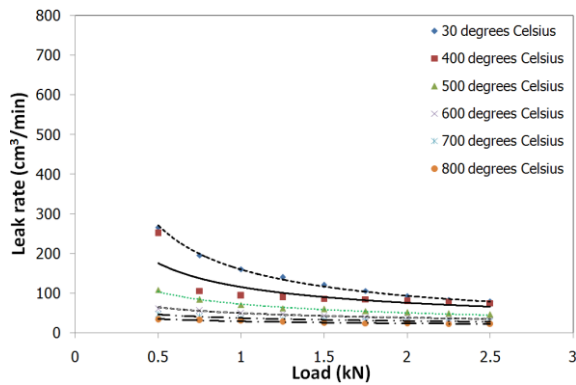
ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการรั่วกับแรงด้วยการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิ ด้วยวัสดุฉนวนไมก้า(Mica) และวัสดุ Conductive silver paint ภายใต้ร่องฉนวนแบบตัวสี่เหลี่ยมขนาดความกว้างของร่องที่ 2, 4, 6 และ 8 mm ที่อุณหภูมิ 30, 400, 500, 600, 700 และ 800°C แต่ละอุณหภูมิจะทำการทดสอบที่แรงกดแบบ Uniform Load ขนาด 500 – 2500 N จากรูปที่ 5 ผลการทดลองจะเห็นได้ว่าทุกเงื่อนไขของการทดลองอัตราการรั่วจะมีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มขนาดของ Uniform load และลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ อัตราการรั่วที่ความกว้าง 2, 4, 6, และ 8 mm (2500 N, 800°C) คือ 35, 24, 22 และ 17 cm<sup>3</sup>/min ตามลำดับ จากรูป 5(a-d) พบว่าการเพิ่มความกว้างทำให้มีอัตราการรั่วลดลง



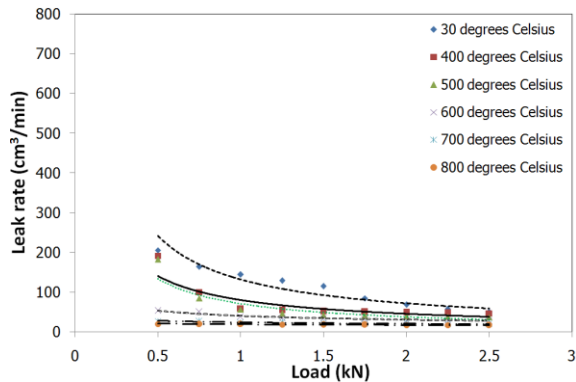
(a) ความกว้าง 2 mm



(b) ความกว้าง 4 mm



(c) ความกว้าง 6 mm



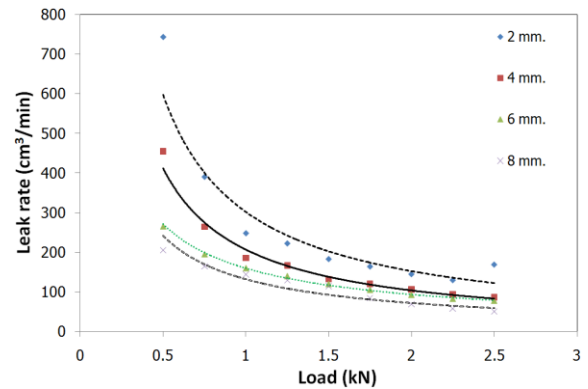
(d) ความกว้าง 8 mm

รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการรั่วกับแรงที่ อุณหภูมิและความกว้างต่างๆ

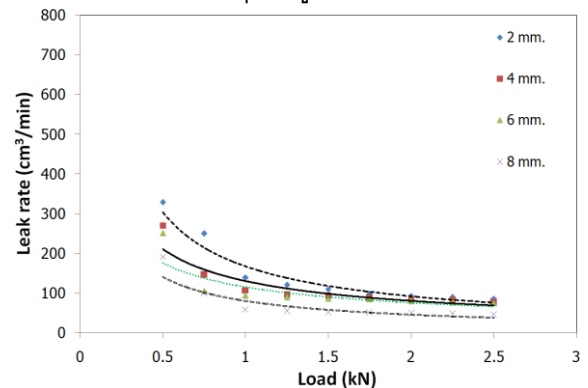
### 3.3 ผลกระทบของความกว้างจุดเชื่อมต่อของ อินเทอร์เน็ตคอนแทกเตอร์ที่แรงกด 500–2500 N

ผลกระทบของการปรับเปลี่ยนความกว้างของ ร่องผนึกตัวสี่เหลี่ยมที่ความกว้าง 2 mm อัตราการรั่ว อยู่ในช่วง 35 cm<sup>3</sup>/min. ( 2500 N, 800 °C) ดังแสดงใน รูปที่ 6(f) เมื่อเพิ่มความกว้างเป็น 4, 6, และ 8 mm อัตราการรั่วจะลดลงเหลือ 68, 62 และ 48% ตามลำดับ การเพิ่มแรงกดจาก 500 N ถึง 2500 N พบว่าอัตราการรั่วลดลงอย่างรวดเร็ว ที่อุณหภูมิ 30 °C

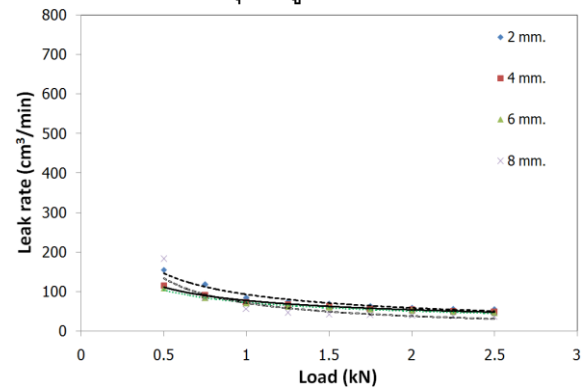
ดังแสดงในรูปที่ 6(a) และจะลดลงน้อยมากเมื่อเพิ่ม แรงที่ 800 °C



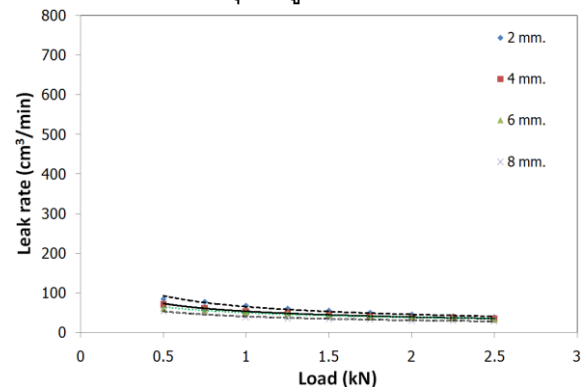
(a) อุณหภูมิ 30 °C



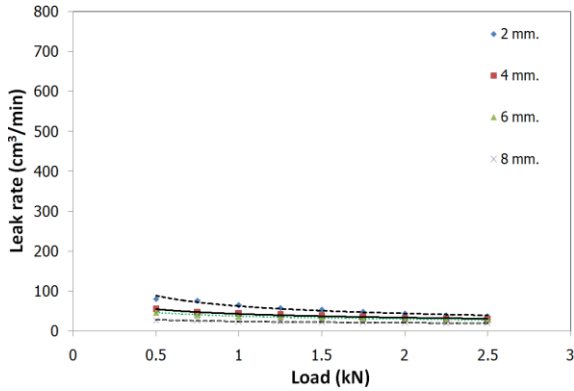
(b) อุณหภูมิ 400 °C



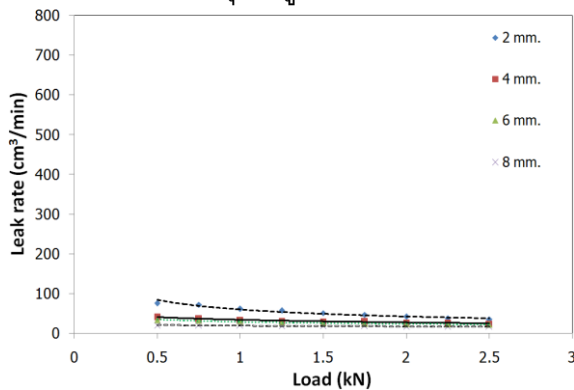
(c) อุณหภูมิ 500 °C



(d) อุณหภูมิ 600 °C



(e) อุณหภูมิ 700 °C

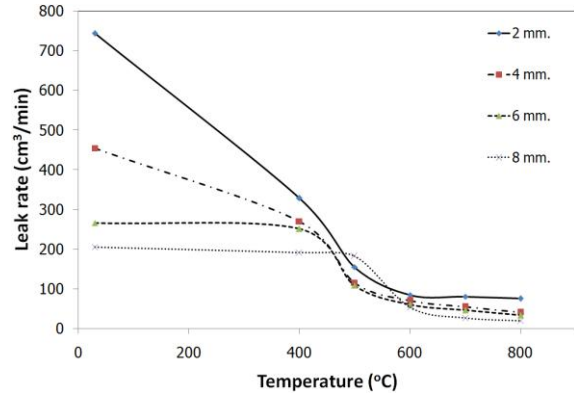


(f) อุณหภูมิ 800 °C

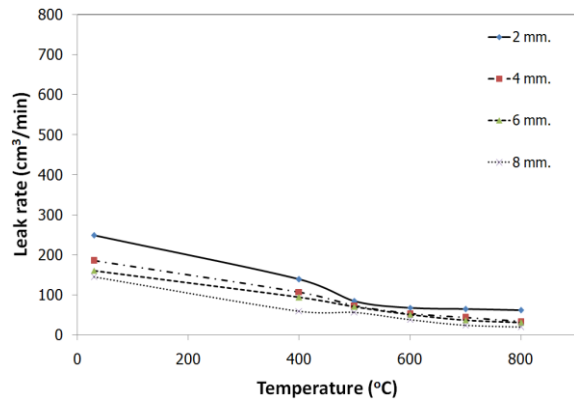
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการรั่วกับแรงที่ด้วยการปรับเปลี่ยนค่าความกว้าง 2 4 6 และ 8 mm ที่อุณหภูมิต่างๆ

### 3.3 ผลกระทบของความกว้างจุดเชื่อมต่อของอินเตอร์คอนเน็กเตอร์ที่อุณหภูมิ 30- 800 °C

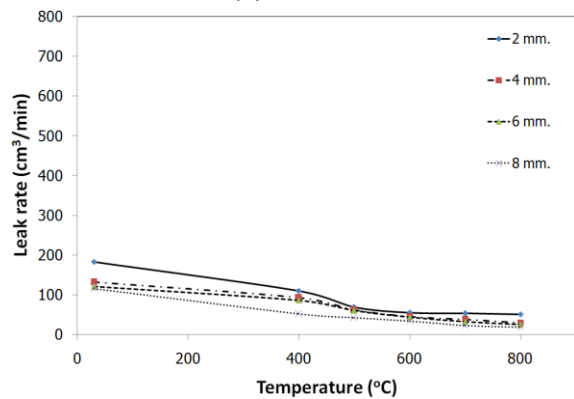
จากผลการทดลองที่แรงกด 500 - 2500 N พบว่าอัตราการรั่วเมื่อความกว้างต่างๆ จะมีลักษณะการรั่วที่เหมือนกันทุกเงื่อนไข โดยสามารถแบ่งเกรดเอียร์ (slope) ของอัตราการลดลงของการรั่วได้สามช่วง นั่นคือ ช่วงที่ 1 ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 30-400 °C ช่วงที่ 2 ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 400-500 °C และ ช่วงที่ 3 ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 500-600 °C โดยอัตราการรั่วจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงที่ 1 และ 2 แต่อัตราการรั่วจะลดลงอย่างช้าๆ ในช่วงที่ 3 อัตราการรั่วที่ลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงที่ 2 คาดว่าเกิดจากวัสดุที่ใช้เป็นวัสดุผนึกกำลังอยู่ในช่วงของการปรับเปลี่ยนรูปร่างให้เกิดสถานะสมดุลจากผลของความเค้นเนื่องจากความร้อนแสดงดังรูปที่ 7



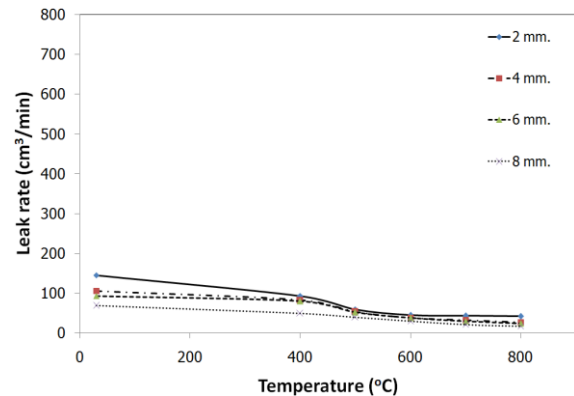
(a) 500 N



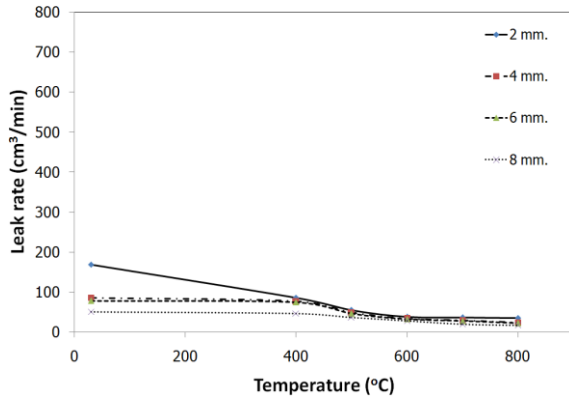
(b) 1000 N



(c) 1500 N



(d) 2000 N



(e) 2500 N

รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการรั่วกับแรงด้วยการปรับเปลี่ยนค่าความกว้าง ที่แรงต่างๆกัน

#### 4. สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่าอัตราการรั่วสำหรับการผนึกด้วยแรงกดโดยใช้คอนดัคทีฟซิลเวอร์เพนท์ (Conductive silver paint) ร่วมกับวัสดุฉนวนไมก้า (mica) ที่มีการจัดเรียงแบบซ้อนกัน (Sandwich) จะมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการเพิ่มความกว้าง อุณหภูมิ และแรงกด แต่แรงกดจะมีผลกระทบต่ออัตราการรั่วน้อยมาก เมื่อมีอุณหภูมิมากกว่า 500 °C โดยมีอัตราการรั่วต่ำสุดเท่ากับ 17 cm<sup>3</sup>/min (800°C, 2500N, ความกว้าง 8 mm) ซึ่งต่ำกว่า ซึ่งอัตราการรั่วจะน้อยกว่ากรณีการใช้วัสดุไมก้าเพียงอย่างเดียว ซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้ค่ายังโมดูลัสของวัสดุฉนวนที่มีส่วนผสมของวัสดุเงินเป็นหลักลดลง โดยสังเกตได้จากโครงสร้างจุลภาคของวัสดุฉนวนภายใต้แรงกดที่คอนดัคทีฟซิลเวอร์เพนท์มีการแทรกอยู่ระหว่างแผ่นวัสดุไมก้า ส่งผลให้ช่องว่างและการเชื่อมโยงของช่องว่างระหว่างพื้นผิวลดลง

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณหน่วยงานที่สนับสนุนดังนี้คือ สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน และ ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย

#### 6. เอกสารอ้างอิง

[1] 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

- [2] 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 23<sup>rd</sup> Conference of the Mechanical Engineering Net of Thailand, November 4–7, 2009, Chiang Mai, Thailand
- [3] 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
- [4] 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.
- [5] 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
- [6] 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.

- [7] 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
- [8] 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.
- [9] Charojrochkul S (2005). Operation Study of Sealing Materials for Solid Oxide Fuel Cells, Energy Technology Network of Thailand, July 22-29 Nakhonratchasima, Thailand
- [10] Suksam N, Charojrochkul S and Charojrochkul J (2009). Numerical Simulation of a Segmented-Cell-in-Series Planar SOFC, International Conference on Green and Sustainable Innovation Dec.2-4 Chiang Rai Thailand
- [11] Suksam N, (2010). Numerical Simulation of a Segmented-Cell-in-Series Planar SOFC. King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
- [12] J. Stevenson, SOFC Seal Material Status, (2003), PNNL Presentation at SECA Core Technology Program SOFC Seal Meeting, July 8 sandia National Laboratory Albuquerque, NM
- [13] Yeong-Shyung C, Stevenson (2003). Novel silver/mica multilayer compressive seals for solid-oxide fuel cells: The effect of thermal cycling and material degradation on leak behavior, *J. Mater. Res.*, Vol. 18, No. 9, Sep 2003
- [14] 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.
- [15] Phira A, Punbusayakul N, Boonsiri K, Charojrochkul S, and Charoensuk J. (2011). A Study on the Sealing Performance of Silver Material for Solid Oxide Fuel Cell, Energy Technology Network of Thailand, May 3–5, 2011, Phuket, Thailand