

การออกแบบและพัฒนาจุดเชื่อมต่อของอินเตอร์คอนเน็กเตอร์สำหรับเซลล์เชื้อเพลิง ออกไซด์ของแข็งแบบแผ่น

Design and Development the Interconnector Joint of Planar Solid Oxide Fuel Cell

นิตินัย ปัญญบุศยกุล^{1*}, วิทยา วงษ์กลาง³, สุมิตรา จรสโรจน์สกุล³, จารุวัตร เจริญสุข² และ บัณฑิต พึ่งธรรมสาร⁴

¹ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Mahanakorn University of Technology, 51 Cheum-Sampan Rd.,
Nong Chok, Bangkok 10530 Thailand.

E-mail: nitinai_oak1@hotmail.com

² Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's
Institute of Technology Ladkrabang Bangkok, Thailand.

E-mail: kcjaruw@kmitl.ac.th

³ National Metal and Materials Technology Center, Pathumthani 12120, Thailand

E-mail: wittayaw@mtec.or.th, sumittrc@mtec.or.th

⁴ The Joint Graduate School of Energy and Environment, King Mongkut's
University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand

E-mail: bundit_f@jgsee.kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

จากการวิจัยที่ผ่านมาปัญหาการรั่วซึมของแก๊สและอากาศที่บริเวณจุดเชื่อมต่อระหว่างอินเตอร์คอนเน็กเตอร์กับเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง (Solid Oxide Fuel cell, SOFC) ส่งผลให้ประสิทธิภาพโดยรวมที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าลดลง และยังทำให้เกิดความร้อนสูงที่บริเวณที่เกิดการรั่ว (hotspot) ดังนั้นปัญหาของการป้องกันการรั่วที่บริเวณจุดเชื่อมต่อจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญในการวิจัย บทความนี้ได้กล่าวถึงการออกแบบการป้องกันการรั่วซึมบริเวณจุดเชื่อมต่อระหว่างอินเตอร์คอนเน็กเตอร์กับเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง โดยอยู่บนพื้นฐานของ point load และ uniform load 0-2500 N กระทำกับอินเตอร์คอนเน็กเตอร์ วัสดุที่ใช้ทำคือเหล็กกล้าไร้สนิม 316 (Stainless Steel 316) อุณหภูมิที่ใช้ทดสอบ 30-800 องศาเซลเซียส ร่องป้องกันการรั่วเป็นรูปสี่เหลี่ยมสามเหลี่ยม และ ตัว U ขนาดความกว้าง 2 mm. ลึก 2 mm. วัสดุที่ใช้ฉนวนคือ ไมก้า (mica) โดยผลการออกแบบการกระจายแรงกดที่บริเวณจุดเชื่อมต่อจะถูกอธิบายโดยเทคนิค Pressure Indicating films และผลการออกแบบการวัดการรั่วด้วย manometer ตามมาตรฐานของ (ASTM F 37-89) จากผลการทดลองพบว่าแรงแบบ Uniform มีการกระจายแรงที่ดี รวมทั้งเมื่อใช้ร่องฉนวน U ทำให้อัตราการรั่วต่ำ ซึ่งเหมาะกับการฝึกใน SOFC

คำหลัก: Leakage, Compressive seal, Interconnector joint, SOFC

Abstract

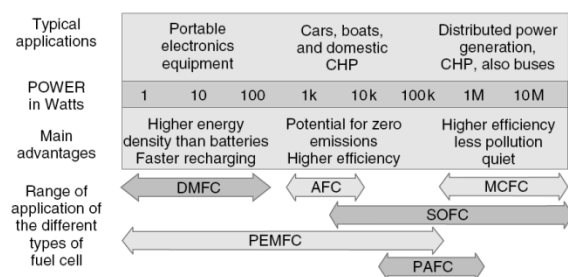
Experiment had suggested that problem of gas leakage at the connecting point of the cell stack between the interconnecting zone and Solid Oxide fuel cell (SOFC) is one of the major issues in SOFC development. The gas leak leads to a deficit in overall efficiency, and temperature rise (hot spot). This

paper focuses on the design of the connection at the part of fuel cell stack in order to prevent leakage of fuel gas. The design concept is based on point load and uniform load 0-2000 N. The interconnector is stainless steel 316. Operate temperature is 30-800 Degrees Celsius. The groove was made in order to prevent leakage which is a having a width of 2 mm and a depth of 2mm (square, triangular and U shape). Mica was used for preventing leakage. Compressive force distribution at contact plate will be explained by the Pressure Indicating Films and measurement leakage by manometer follow to base of ASTM F 37-89. The results show that stress distribution on interconnector surface is good for uniform prattle. U shape groove is found to be a good candidate for SOFC applications.

Keywords: Leakage, Compressive seal, Interconnector joint, SOFC

1. บทนำ

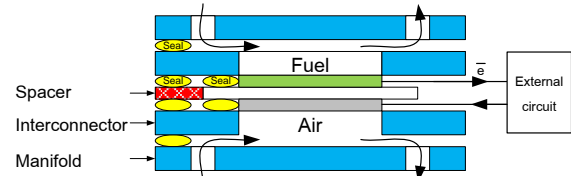
ปัจจุบันมีการศึกษาและวิจัยเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทน เนื่องจากเป็นพลังงานทางเลือกใหม่ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยการนำพลังงานไฮโดรเจนที่มีจำนวนมากมหาศาลมาใช้เป็นพลังงาน ทั้งนี้ไฮโดรเจนต้องอยู่ภายใต้พลังงานสะอาด เช่น พลังงานลม หรือ แสงอาทิตย์ โดยเซลล์เชื้อเพลิงมีหลายแบบด้วยกัน ซึ่งจะแบ่งตามชนิดของอิเล็กโทรไลต์ โดย Solid oxide fuel cell (SOFC) มีอุณหภูมิทำงานประมาณ 600-1000 °C ($\eta_{th} \sim 45-65\%LHV$) ถ้า SOFC รวมกับระบบ cogeneration จะทำให้ประสิทธิภาพของระบบสูงขึ้น ซึ่งจะเห็นได้ว่า SOFC มีขนาดกำลังไฟฟ้าและประสิทธิภาพสูง โดยการประยุกต์ใช้เซลล์เชื้อเพลิงแต่ละชนิดแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ข้อดีหลักๆ ของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดต่างๆ และการประยุกต์

การออกแบบ SOFC มีปัจจัยหลายอย่างเช่น Fuel processing, Power electronics, Stack/Systems performance & Modeling และ Cell/Stack Materials & Manufacturing โดยส่วนหนึ่งของการพัฒนา

Cell/Stack Materials & Manufacturing คือ การผนึกเชื้อเพลิงเพื่อป้องกันการรั่วระหว่างอินเตอร์คอนเนกเตอร์กับเซลล์ ซึ่งการรั่วจะส่งผลให้ประสิทธิภาพจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าลดลง ดังนั้นการป้องกันการรั่วที่จุดเชื่อมต่อจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญในการการพัฒนาอินเตอร์คอนเนกเตอร์ ทั้งนี้ตำแหน่งของการผนึกเซลล์สามารถดูได้จากรูปที่ 2 ทั้งนี้มีการพัฒนาวัสดุกันรั่วในหลายรูปแบบ โดยทั่วไปแล้วในการวิจัยใช้แก้วโบโรซิลิเกต และ แก้วอลูมิเนียมซิลิเกตเป็นวัสดุกันรั่วเนื่องจากยึดติดได้ดีที่อุณหภูมิสูง แต่มีข้อเสีย คือใช้งานภายใต้วัฏจักรทางความร้อนได้เพียงครั้งเดียว



รูปที่ 2 ภาพประกอบของ single cell, Interconnector, Spacer and Manifold และ seal

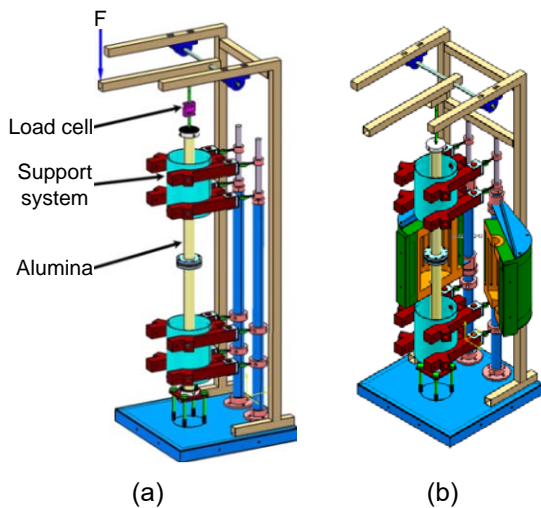
งานวิจัย นี้กล่าวถึงการออกแบบและพัฒนาจุดเชื่อมต่อที่อินเตอร์คอนเนกเตอร์เพื่อป้องกันการรั่ว โดยการออกแบบอยู่บนพื้นฐานของ Compressive load ซึ่งสามารถพัฒนาให้อยู่ภายใต้วัฏจักรทางความร้อนได้ โดยรูปแบบของการกระจายแรงคือ point และ uniform load อุณหภูมิ 30-800 °C ร่องผนึกเป็นร่องสี่เหลี่ยม สามเหลี่ยม และ ตัว U ความกว้าง 2 มม. ลึก 2 มม. วัสดุผนึกคือ Mica ผลการกระจายแรงบริเวณจุดเชื่อมต่อถูกอธิบายโดย Pressure Indicating films

และ อัตราการรั่วถูกวัดด้วยมานอมิเตอร์ตามมาตรฐาน ASTM F 37-89

2. อุปกรณ์การทดลอง

2.1 ชุดป้อนแรงและเตาอบไฟฟ้า

เตาอบไฟฟ้าเป็นรูปทรงกระบอกในแนวตั้ง โดยคำนึงถึงการวางท่อเซลล์เชื้อเพลิงในแนวตั้ง เนื่องจากวัสดุการฉนวนบางชนิดจำเป็นต้องหลอมเหลวก่อน จึงจะสามารถฉนวนเซลล์ได้ ทั้งยังช่วยให้ง่ายต่อการควบคุมแรงกดที่อุณหภูมิสูง โดยมีชุดประคองให้ท่ออลูมินาให้อยู่ในแนวตั้งเพื่อให้หน้าสัมผัสของอินเตอร์คอนเนกเตอร์สัมผัสกันอย่างสม่ำเสมอ แสดงดังรูปที่ 3

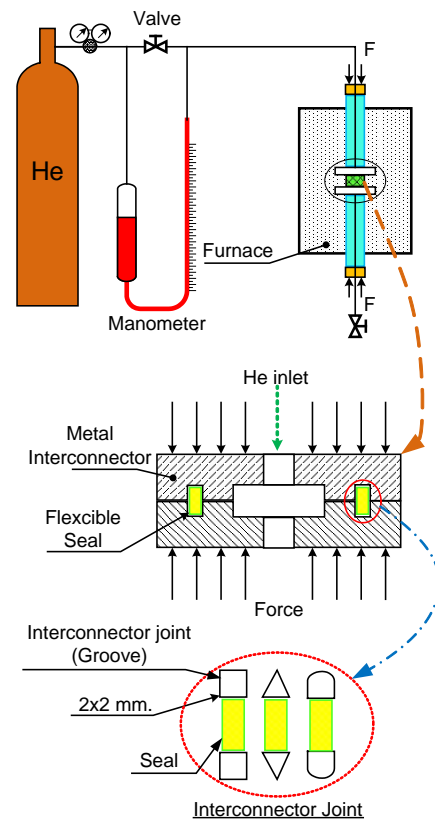


รูปที่ 3 (a) ภาพการประกอบชุดประคอง โครงสร้างชุดป้อนแรง และฐานเตาอบไฟฟ้า (b) ภาพประกอบเตาอบไฟฟ้าและอุปกรณ์ทั้งหมด

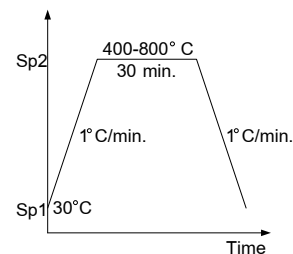
2.2 ชุดทดสอบการรั่วด้วย Manometer

ชุดวัดอัตราการรั่วถูกสร้างตามมาตรฐาน ASTM F 37-89 ดังรูปที่ 4 การควบคุมอุณหภูมิกระทำดังรูปที่ 5 ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมกับปัจจัยที่มีผลต่อรูปร่างของวัสดุ ร่องฉนวนมี OD 50 mm และ ID 46 mm วัสดุฉนวน Mica จะถูกวางระหว่างผิวหน้าสัมผัสของอินเตอร์คอนเนกเตอร์ที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม 316 อุปกรณ์ที่ประกอบสมบูรณ์แล้วจะถูกวางในเตาอบ อัตราการรั่วถูกวัดที่ 30-800°C โดยคงอุณหภูมิไว้ 30 นาที และทำการวัดการรั่วเป็นเวลา 30 นาที ระหว่างนั้นจะทำการป้อน He (2 bar) เข้าไปในเตา ขณะนั้น

วาล์วจะต้องถูกปิดลง และยอมให้ He ไหลผ่านไปยัง มานอมิเตอร์ การทดลองจะอยู่ภายใต้ภาวะที่ 0-2500



รูปที่ 4 Leak rate measurement setup



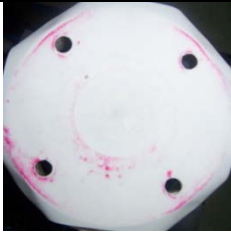

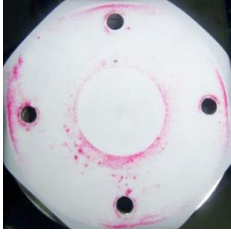


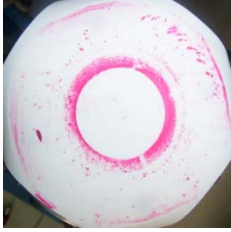


รูปที่ 5 การควบคุมอุณหภูมิภายในเตาอบไฟฟ้า

3. ผลการทดลองและการอภิปราย

3.1 ผลการกระจายตัวของแรงกด

การกระจายตัวของแรงกด กระทำได้ที่อุณหภูมิ 30 °C เท่านั้น ด้วยรูปแบบ point 4 ตัว และ uniform ที่ 0-2500 N กระทำกับอินเตอร์คอนเนกเตอร์สำหรับ Pressure Indicating films ที่ใช้เป็นแบบ Ultra low pressure film (2-6 kg/cm², 0-1.5 color correlation chart) (T_{db}=30 °C, T_{wb}=28.5 °C, RH=60-70%) ผลการกระจายตัวของแรงกดบนหน้าสัมผัสของอินเตอร์คอนเนกเตอร์ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การกระจายตัวของแรงบน หน้าสัมผัสของ อินเทอร์เน็ตเตอร์ Point และ Uniform

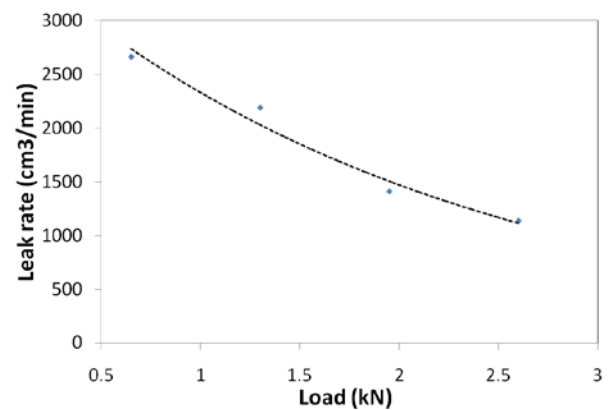
| 4-Point load | Uniform load | Color Correlation Chart |
|---|---|-------------------------|
|  |  | 1.5 |
| 0.123 (kN) | 0.123 (kN) | 1.3 |
|  |  | 1.1 |
| 0.650 (kN) | 0.608 (kN) | .9 |
|  |  | .7 |
| 1.295 (kN) | 1.300 (kN) | .5 |
|  |  | .3 |
| 1.950 (kN) | 1.982 (kN) | .1 |

จากตารางที่ 1 พบว่าการกระจายตัวของแรงจะสัมพันธ์ถ้า Pressure films มีสีขาวแสดงว่าแรงเป็นศูนย์ แต่ถ้า Pressure films มีสีแดงอ่อนถึงสีแดงเข้ม จะสัมพันธ์กับแรงขนาด 2-6 kg/cm² ซึ่งสามารถดูได้จาก color correlation chart โดยแรงกดแบบ Uniform พบว่าแรงสูงสุดอยู่บริเวณศูนย์กลางของอินเทอร์เน็ตเตอร์ ซึ่งมีความหนาประมาณ 6 kg/cm² และค่อยๆ ลดลงตามแนวรัศมีของอินเทอร์เน็ตเตอร์ และมีการกระจายของแรงที่สม่ำเสมอ สำหรับแบบ point จะมีแรงที่กระทำเพิ่มขึ้น บริเวณรอบสลักเกลียว 4 ตัว และบริเวณศูนย์กลางของอินเทอร์เน็ตเตอร์ แต่

บริเวณส่วนอื่นๆ กับพบว่าเป็นสีขาวนั่นคือแรงเป็นศูนย์

3.2 ผลการทดลองการรั่ว ด้วยรูปแบบ Point Load ที่ อุณหภูมิห้อง

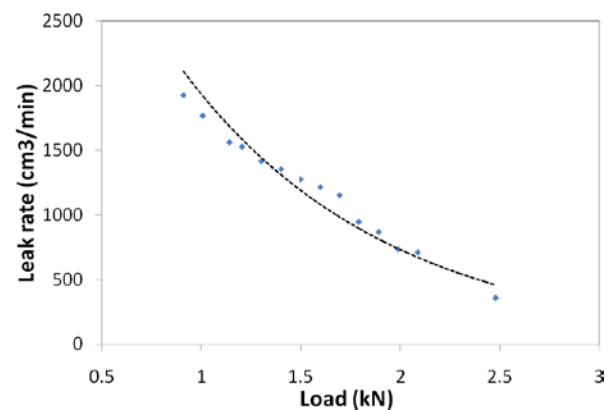
การทดสอบใช้สลักเกลียวที่ทำจาก เหล็กกล้า ไร้สนิม 304 ขนาด M6x1.0 ทั้งหมด 4 ตัว ใช้ Mica เป็นวัสดุผนึก ร่องการผนึก แบบสี่เหลี่ยม อัตราการรั่ว ถูกแสดงดังรูปที่ 6 พบว่าอัตราการรั่วมีแนวโน้มลดลง เมื่อเพิ่มแรงจาก 0.65 เป็น 2.5 kN อัตราการรั่วที่วัด ได้ประมาณ 1100 cm³/min



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการรั่วกับแรงกดแบบ Point Load

3.3 ผลการทดลองอัตราการรั่ว ด้วยรูปแบบ Uniform Load ที่อุณหภูมิห้อง

แรงกดแบบ Uniform ขนาด 0-2.5 N ถูกส่งผ่านท่ออลูมิเนียมไปยัง อินเทอร์เน็ตเตอร์ ภายในเตา ที่มี Mica เป็นวัสดุผนึก และมีร่องผนึกแบบสี่เหลี่ยม



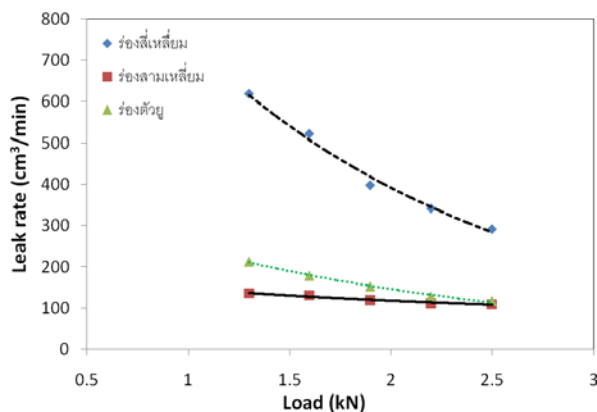
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการรั่วกับแรงกดแบบ uniform load

พบว่า อัตราการรั่วมีแนวโน้มเหมือนกับแบบ Point load โดยที่ 2.5 kN อัตราการรั่วลดลงเหลือ 350 cm³/min แสดงให้เห็นว่าความชันของอัตราการรั่วลดลงมากกว่า Point load ดังรูปที่ 7

3.4 ผลการทดลองอัตราการรั่ว ด้วยแรงแบบ Uniform ที่อุณหภูมิ 30 °C และ 800 °C ภายใต้การเปลี่ยนร่องหัวข้อที่ผ่านมาอัตราการรั่วน้อย เมื่อแรงเป็นแบบ Uniform ดังนั้นหัวข้อถัดไปจะอยู่ภายใต้เงื่อนไข

3.4.1 กรณีอุณหภูมิ 30 °C

การทดลองอยู่ภายใต้ ลักษณะร่องสี่เหลี่ยม สามเหลี่ยม และ U ที่ขนาดแรง 1300–2500 N กรณีร่องรูปสี่เหลี่ยมมีค่าอัตราการรั่วสูงที่สุดอย่างเห็นได้ชัด (รูปที่ 8) คือ 300–610 cm³/min กรณีร่องสามเหลี่ยม อัตราการรั่วต่ำที่สุดคือ 110–130 cm³/min



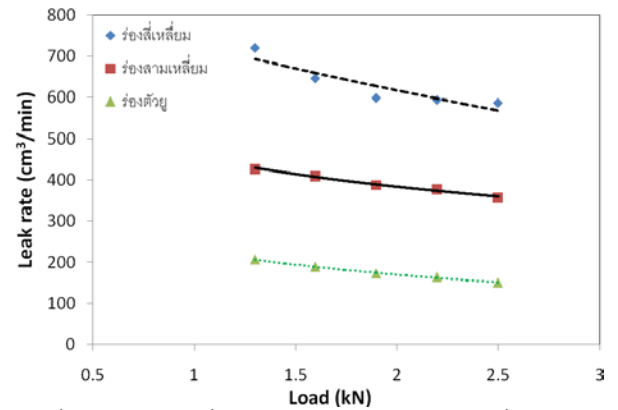
รูปที่ 8 อัตราการรั่วด้วยแรง Uniform Load ที่อุณหภูมิ 30 °C ภายใต้การปรับเปลี่ยนลักษณะร่องพนัก

เหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเมื่อเปลี่ยนลักษณะร่องทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของร่องที่พนัก Mica โดยปริมาตรร่องสี่เหลี่ยมเท่ากับ 2260.8 mm³ ปริมาตรร่อง U เท่ากับ 2034.1 mm³ และปริมาตรร่องสามเหลี่ยมคือ 1130.4 mm³ แต่ปริมาตร Mica ที่ใช้เท่ากันทุกเงื่อนไข ทำให้กรณีร่องสามเหลี่ยมเกิดความเค้นที่กระทำกับ Mica มากกว่า

3.4.2 กรณีอุณหภูมิ 800 °C

รูปที่ 9 แสดงอัตราการรั่วที่อุณหภูมิ 800 °C เมื่อเปลี่ยนร่องเป็นสี่เหลี่ยม สามเหลี่ยม และ U ที่แรง 1300–2500 N จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่ากรณีร่องสี่เหลี่ยมมีค่าอัตราการรั่วสูงที่สุด คือ 590–720

cm³/min กรณีร่อง U มีค่าอัตราการรั่วต่ำที่สุด คือ 150–210 cm³/min ซึ่งแตกต่างกับการทดลองที่อุณหภูมิ 30 °C

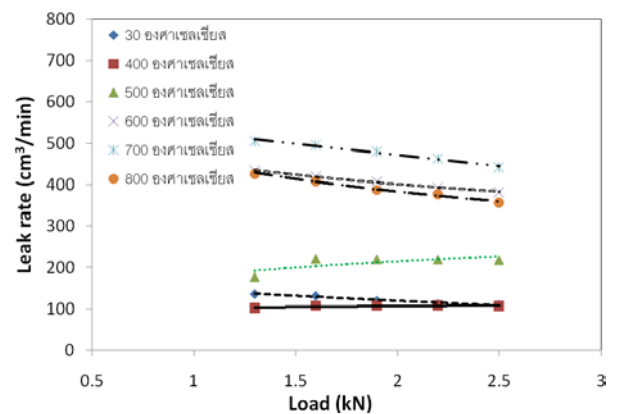


รูปที่ 9 อัตราการรั่วด้วยแรง Uniform Load ที่อุณหภูมิ 800 °C ภายใต้การปรับเปลี่ยนลักษณะร่องพนัก

3.5. ผลการทดลองการรั่ว ด้วยแรงกด Uniform แบบร่อง U และร่องสามเหลี่ยม ที่ 30-800 °C

3.5.1 ลักษณะร่องสามเหลี่ยม

เนื่องจากอัตราการรั่วของ ร่องสามเหลี่ยม และ U มีค่าต่ำกว่าร่องสี่เหลี่ยม เพราะฉะนั้นจะทำการเปรียบเทียบระหว่างร่องสามเหลี่ยม และ U

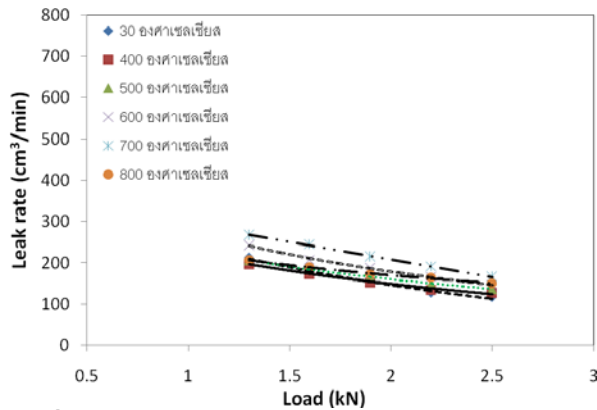


รูปที่ 10 อัตราการรั่วด้วยแรงกด Uniform Loads ที่อุณหภูมิต่างๆ แบบร่องสามเหลี่ยม

จากรูปที่ 10 แสดงการเปรียบเทียบอัตราการรั่วที่ 1300–2500 N พบว่าที่อุณหภูมิ 30 600 700 และ 800 °C อัตราการรั่วมีค่าลดลงตามการเพิ่ม ขนาดของ uniform load แต่กรณี 400 และ 500 °C อัตราการรั่วมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามการเพิ่ม แรง โดยอัตราการรั่วสูงที่สุดเท่ากับ 500 cm³/min (1300 N, 700 °C) และต่ำสุดคือ 100 cm³/min (1300 N, 400 °C)

3.5.2 ลักษณะร่อง U

รูปที่ 11 แสดงการเปรียบเทียบอัตราการรั่วร่อง U ที่ 1300–2500 N และ 30, 400-800 °C อัตราการรั่วมีค่าสูงสุดคือ 260 cm³/min (1300 N, 700 °C) และต่ำสุดคือ 120 cm³/min (2500 N, 30 °C) ซึ่งสอดคล้องกับการกระจายตัวของแรง ตามตารางที่ 1 คือการกระจายตัวของแรงที่ดีที่สุดทำให้อัตราการรั่วลดลง

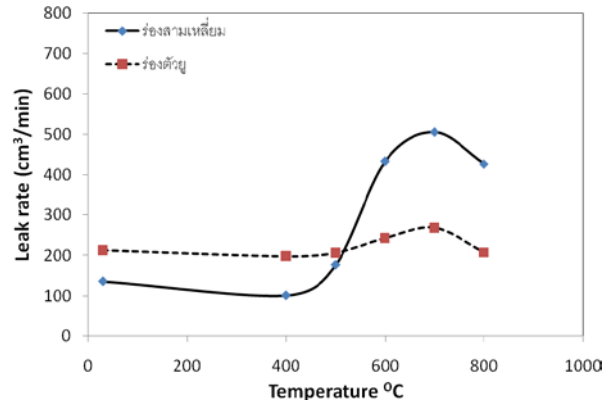


รูปที่ 11 แสดงอัตราการรั่วด้วยแรงกด Uniform Loads ที่อุณหภูมิต่างๆ แบบร่องตัวยู

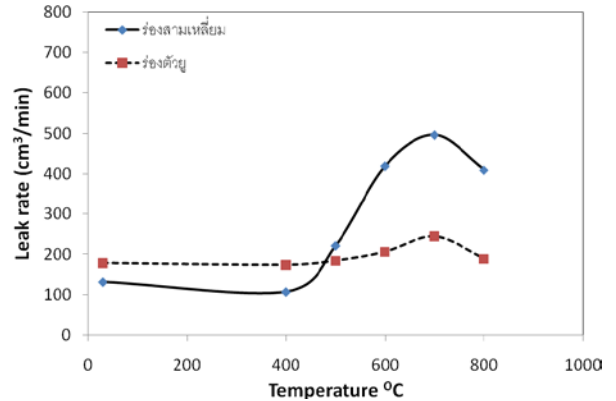
3.6. ผลการทดลองอัตราการรั่วเมื่อทำการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิ และ uniform load

3.5.2 ผลการทดลองการ เมื่อทำการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิภายใต้แรง uniform

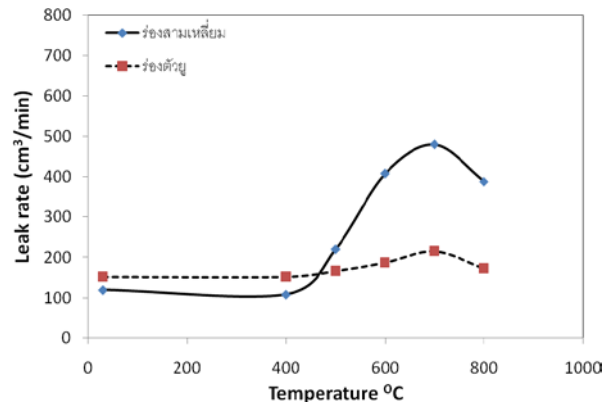
รูปที่ 12 (a-e) แสดงอัตราการรั่วเมื่อทำการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิ และแรง 1300–2500 N จะเห็นได้ว่าอัตราการรั่วในทุกเงื่อนไขมีแนวโน้มเดียวกัน คืออัตราการรั่วจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิตั้งแต่ 500 °C เป็นต้นไป ทั้งกรณีร่อง U และร่องสามเหลี่ยม คาดว่า เกิดจากการขยายตัวของชุดอินเตอร์คอนเนคเตอร์ กับวัสดุฉนวน Mica โดยอัตราการรั่วของร่องสามเหลี่ยมมีค่าสูงขึ้นไปประมาณ 400-500 cm³/min สำหรับร่องตัวยูพบว่ามีอัตราการรั่วต่ำกว่าร่องชนิดรูปสามเหลี่ยม โดยอัตราการรั่วกรณี ร่อง U อยู่ในช่วง 120-270 cm³/min ขณะที่ร่องชนิดรูปสามเหลี่ยมจะต่ำกว่าร่องชนิดตัวยูเล็กน้อย ในช่วงอุณหภูมิ 30-400 °C แต่ที่อุณหภูมิ 500 °C อัตราการรั่วจะมีค่าเพิ่มขึ้นมาก



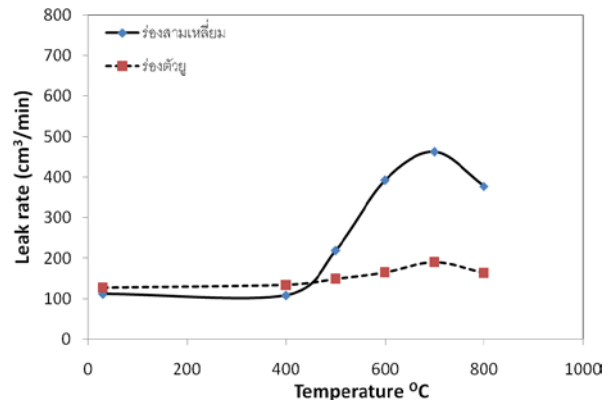
12 (a) Uniform load ขนาด 1.3 kN



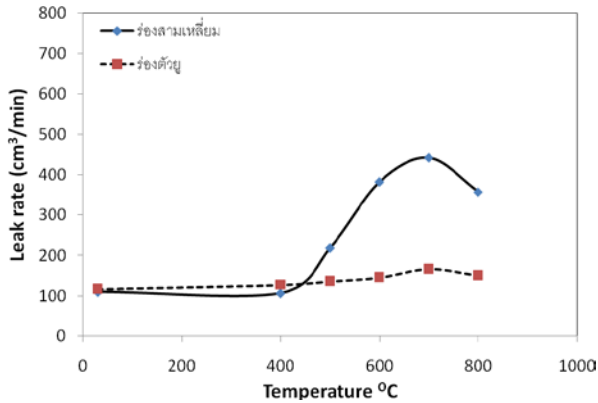
12 (b) Uniform load ขนาด 1.6 kN



12 (c) Uniform load ขนาด 1.9 kN



12 (d) Uniform load ขนาด 2.2 kN



12 (e) Uniform load ขนาด 2.5 kN

รูปที่ 12 แสดงอัตราการรั่วเมื่อทำการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิภายใต้แรง Uniform

4. สรุปผลการทดลอง

ภายใต้ชุดทดสอบนี้ พบว่าแรงแบบ Uniform มีการกระจายแรงที่ดี กว่าแบบ Point ทำให้อัตราการรั่ว น้อยกว่า การปรับเปลี่ยนร่องจากร่องสี่เหลี่ยม สามเหลี่ยม และ U สามารถสรุปได้ว่าร่องผนังรูป สามเหลี่ยมเหมาะสำหรับการผนึกเฉพาะย่านอุณหภูมิ การทำงานที่มีค่าต่ำๆ แต่จะไม่เหมาะกับย่านอุณหภูมิ การทำงานที่มีค่าสูงๆ ตั้งแต่ 500 °C เป็นต้นไป ส่วน ร่องผนังรูปตัวยูเหมาะสมกับการผนึกในระบบของ SOFC เนื่องจากมีอัตราการรั่วต่ำในทุกๆ ย่านของ อุณหภูมิทำงาน ของ SOFC

ผลการทดลองที่ได้ก่อให้เกิดองค์ความรู้ในการ พัฒนารูปแบบของการกันรั่ว ซึ่งเป็นอุปสรรคสำคัญ อย่างยิ่งในการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้สู่การใช้งาน จริงในเชิงพาณิชย์ ซึ่งต้องอยู่ภายใต้การผลิตที่ง่ายและ ราคาถูก ซึ่งมีความจำเป็นต้องพัฒนาต่อในอนาคต เพื่อให้อัตราการรั่วที่น้อยที่สุด

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณหน่วยงานที่สนับสนุน ดังนี้คือ สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา ที่ให้การ สนับสนุนด้านทุนวิจัย สำนักงานนโยบายและแผน พลังงาน และ ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ (MTEC)

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Azra Selimovic *, Miriam Kemm, Tord Torisson, Mohsen Assadi, Steady state and transient thermal stress analysis in planar solid oxide fuel cells, *Journal of Power Sources* 145 (2005)
- [2] Martin Bram*, Stephan Reckers, Pere Drinovac, Josef M'onch, Rolf W. Steinbrech, Hans Peter Buchkremer, Detlev St'over, Deformation behavior and leakage tests of alternate sealing materials for SOFC stacks, *Journal of Power Sources* (2004)
- [3] Montross C.S.; Yokokawa H.; Dokiya M. ,Thermal stresses in planar solid oxide fuel cells due to thermal expansion differences, *British Ceramic Transactions* (2002)
- [4] Punbusayakul, N., Wongklang, W., Wongtida, K., Charoensuk, J., and Charojrochkul S. (2008). Behaviour of Various Glass Seal for Planar Solid Oxide Fuel Cell, *SmartMat08 & IWOFM-2*, 22-25 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*, April 2008
- [6] Jinnapat, A., Sirithan Jiamsirilert and Charojrochkul S. (2007). Study of Ceramic Seal for Solid Oxide Fuel Cells, *AZojomo*, Vol 3, June, 2007
- [7] สุमितรา จรสโรจน์กุล และ ร.อ.อภิชาติ จิณแพทย (2549). การศึกษาการใช้งานของวัสดุกันรั่วในเซลล์ เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง , *การประชุมวิชาการ เครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย*, ครั้งที่ 2, 22-29 กรกฎาคม 2549 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา