

# การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของ ฉนวนกันความร้อนแบบสุญญากาศที่มีแคลเซียมซิลิเกตเป็นแกน Study of Factors Affecting Thermal Conductivity of Vacuum Insulation Panel with Calcium Silicate Core

ภิญญาพัชญ์ ปรีนทรากิบาล อภินันท์ นัมภคิสรณ์

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาฉนวนกันความร้อนแบบสุญญากาศ (VIP) ที่มีแคลเซียมซิลิเกตเป็นแกนหุ้มด้วยชั้นเคลือบหนา 175, 200 และ 300  $\mu\text{m}$  ของฟุ้งซิลิกาใน โพลียูรีเทนที่ความเข้มข้นของฟุ้งซิลิกา 0, 2.5 และ 5 % โดยน้ำหนัก และปิดผนึกด้วยถุงสุญญากาศทำจากโพลีเอทิลีนเสริมแรงด้วยเส้นใย ไนลอน 6 เพื่อรักษาระดับความดันภายในฉนวนที่ 1000 mbar, 100 mbar, 10 mbar และที่ความดันภายในเป็นสุญญากาศ วัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของแผ่นฉนวนโดยใช้ชุดทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนแบบ Metal Surface Guarded Hot Plate ที่สร้างขึ้นตามมาตรฐาน ASTM C177 โดยความคลาดเคลื่อนของค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่วัดได้อยู่ในช่วง  $\pm 5\%$  เมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานที่ทำการวัดในสภาวะเดียวกัน ปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ อุณหภูมิ ความดันภายในแกนฉนวน และความเข้มข้นของฟุ้งซิลิกาในตัวประสานโพลียูรีเทน เมื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองและค่าจากการคำนวณ โดยใช้ทฤษฎีหลักการนำความร้อนมิติเดียวของฟูเรียร์พบว่ามีความใกล้เคียงกัน

**คำสำคัญ :** ฉนวนกันความร้อนแบบสุญญากาศ (VIP); ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน; แคลเซียมซิลิเกต; ชุดทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

## Abstract

This paper studied vacuum insulation panel (VIP) with its core made from calcium silicate. The core was coated with a layer of fumed silica suspended in polyurethane. By varying the concentration of fumed silica at 0, 2.5 and 5% by wt., the resulting coating thicknesses were 175, 200 and 300  $\mu\text{m}$ , respectively. Vacuum bag made from polyethylene reinforced with nylon 6 was used to maintain internal pressure of the panel at 1000 mbar, 100 mbar, 10 mbar and at vacuum conditions. Subsequently, thermal conductivity of the insulation panel was measured using Metal Surface Guarded Hot Plate - ASTM C177. The values of thermal conductivity coefficient obtained from the above equipment contained  $\pm 5\%$  errors as compared to reference values. Studied parameters included effects of temperature, internal pressure of insulation panel and concentration of fumed silica in polyurethane. The experimental results were in good agreement with the values calculated from one-dimensional heat conduction of Fourier.

**Keywords :** vacuum insulation panel (VIP), thermal conduction coefficient; calcium silicate;

Metal Surface Guarded Hot Plate

## 1. บทนำ

ฉนวนกันความร้อนทำหน้าที่ป้องกันการถ่ายเทความร้อนจากภายนอกเข้าสู่ตัวอาคาร ฉนวนกันความร้อนที่มีประสิทธิภาพสามารถช่วยลดการใช้พลังงานได้สูงถึง 50 % ฉนวนกันความร้อนประสิทธิภาพสูงที่มีการใช้งานเพิ่มมากขึ้นในปัจจุบัน ได้แก่ ฉนวนกันความร้อนแบบสุญญากาศ (Vacuum Insulation Panel, VIP) โดยมีความสามารถในการต้านทานความร้อนสูง 5 ถึง 8 เท่าเมื่อเทียบกับฉนวนกันความร้อนแบบธรรมดา [1] โดยทั่วไป ฉนวนกันความร้อนแบบสุญญากาศมีแกนที่ทำจากวัสดุที่มีรูพรุน เช่น ฟุ้งซิลิกา และห่อหุ้มด้วยชั้นฟิล์มโลหะ และพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ ซึ่งทำหน้าที่รักษาระดับความดันภายในของแผ่นฉนวนกันความร้อน ดังนั้นประสิทธิภาพของฉนวนกันความร้อนจึงขึ้นอยู่กับแกนวัสดุที่นำมาใช้ ชั้นของวัสดุหุ้มเคลือบ และความดันภายในตัววัสดุ

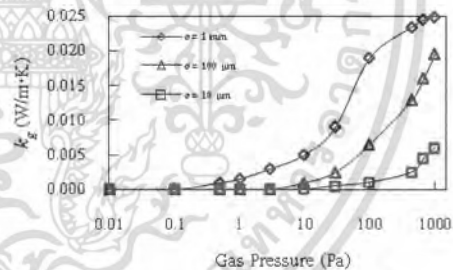
งานวิจัยนี้ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของฉนวนกันความร้อน โดยเลือกใช้แคลเซียมซิลิเกตเป็นแกน เนื่องจากแคลเซียมซิลิเกตมีความแข็งแรงทนทาน มีความเสถียรที่อุณหภูมิสูง มีความต้านทานไฟฟ้าดี ไม่ติดไฟและมีความแข็งแรงเชิงกลสูงในระดับที่สามารถใช้เป็นฝ้าเพดานได้โดยตรง แต่อย่างไรก็ตามสภาพการนำความร้อนของแคลเซียมซิลิเกตอยู่ในระดับปานกลางจึงเป็นฉนวนกันความร้อนที่ไม่ดีนัก [2] งานวิจัยนี้ศึกษาแนวทางเพื่อลดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของแคลเซียมซิลิเกตโดยใช้วิธีห่อหุ้มแกนของแคลเซียมซิลิเกตด้วยวัสดุชนิดต่างๆ และลดความดันภายในของแผ่นฉนวนที่ถูกปิดผนึกไว้ จากนั้นทำการวัดและทดสอบฉนวนกันความร้อนที่ได้เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนโดยใช้ชุดทดสอบ Metal Surface Guarded Hot Plate ตามมาตรฐาน ASTM C177 [3] ตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วย 1) ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของแคลเซียมซิลิเกตซึ่งใช้เป็นแกนฉนวนที่อุณหภูมิต่างๆ กัน ที่ความดันบรรยากาศ 2) ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของแคลเซียมซิลิเกตที่ห่อหุ้มด้วยชั้นพอลิเมอร์ เพื่อให้มีความดันภายในต่างๆ กัน 3) ผลของวัสดุห่อหุ้มที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

## 2. กลไกการทำงานของฉนวนกันความร้อนแบบ

### สุญญากาศ (VIP)

#### 2.1 ส่วนประกอบ

ฉนวนกันความร้อนแบบสุญญากาศมีองค์ประกอบหลักสองส่วน คือ วัสดุที่ใช้เป็นแกนและวัสดุห่อหุ้มเพื่อรักษาระดับความดันภายในฉนวน วัสดุที่ใช้เป็นแกนจะต้องมีคุณสมบัติต่างๆ ดังต่อไปนี้ คือ 1) เส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนของวัสดุจะต้องมีขนาดเล็กในระดับไมโครเมตร เพื่อลดการพาความร้อนของอากาศในฉนวน 2) มีโครงสร้างเป็นเซลล์เปิดเพื่อให้สามารถดึงอากาศออกจากวัสดุได้ รูปที่ 1 [4] แสดงอิทธิพลของขนาดรูพรุนและความดันที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอากาศ กล่าวคือเมื่อขนาดรูพรุนและความดันลดลงค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนจะลดลง 3) ทนทานต่อแรงกดอัดได้ดี เพื่อให้แน่ใจว่าโครงสร้างรูพรุนของแกนวัสดุจะไม่ถูกทำลายเมื่อแผ่นฉนวนถูกดึงความดันออก และ 4) ด้านทานการแผ่รังสีอินฟราเรดได้ดี



รูปที่ 1 ค่าการนำความร้อนของอากาศ ( $k_g$ ) เมื่อแกนฉนวนมีขนาดรูพรุนและความดันต่างๆ [4]

วัสดุห่อหุ้มซึ่งทำหน้าที่รักษาระดับความดันภายในแผ่นฉนวนเป็นอีกส่วนประกอบหนึ่งที่มีความสำคัญ วัสดุที่นิยมใช้ ได้แก่ วัสดุจำพวกฟิล์มพอลิเมอร์ วัสดุที่ใช้ห่อหุ้มควรมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำ และควรป้องกันการไหลผ่านเข้าออกของอากาศได้อย่างสมบูรณ์

#### 2.2 กลไกการถ่ายเทความร้อน

เมื่อพิจารณาการถ่ายเทความร้อนแบบมิตติเดียว การถ่ายเทความร้อนภายในฉนวนกันความร้อนแบบสุญญากาศเป็นผลรวมของการพาความร้อน โดยแก๊ส ( $k_g$ )

การนำความร้อนผ่านของแข็ง ( $k_s$ ) และเฟสแก๊ส ( $k_g$ ) และการแผ่รังสี ( $k_r$ ) ดังแสดงในสมการที่ 1 [5]

$$k_e = k_c + k_s + k_g + k_r \quad (1)$$

สำหรับแกนวัสดุที่มีขนาดรูพรุนเล็กกว่า  $1 \mu\text{m}$  จะมีการถ่ายเทความร้อน โดยการพาความร้อนเกิดขึ้นน้อยมาก [6] อย่างไรก็ตามที่ความดันบรรยากาศวัสดุซิลิกาที่มีรูพรุนก็ยังคงมีการนำความร้อนผ่านของแข็ง ( $k_s$ ) และเฟสแก๊ส ( $k_g$ ) และการแผ่รังสี ( $k_r$ ) อยู่ แต่ถ้าวัสดุหลวมออกแบบในลักษณะมีผิวสะท้อนรังสีหรือตัวฉนวนมีความหนาแน่นสูงก็จะช่วยลดการถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสีได้ [2]

ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของแข็ง ( $k_s$ ) แปรผันโดยตรงกับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุทั้งก้อน (bulk material) ตามสมการที่ 2 [6]

$$k_s = G(\rho)k_b \quad (2)$$

เมื่อ  $k_b$  คือค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุทั้งก้อน ( $\text{W/m}\cdot\text{K}$ ) และ  $G(\rho)$  คือค่าสัมประสิทธิ์ทางเรขาคณิตซึ่งขึ้นกับลักษณะโครงสร้างโมเลกุลของของแข็งและความหนาแน่นของวัสดุที่มีรูพรุน สำหรับแคลเซียมซิลิเกตที่มีความหนาแน่นราว  $800 \text{ kg/m}^3$  จะมีค่า  $G(\rho) = 0.8$  [7]

ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของเฟสแก๊สสามารถอธิบายได้ดังสมการที่ 3 [7]

$$k_g = \frac{k_{g0}}{1 + \frac{P_{1/2}}{P}} \quad (3)$$

โดย  $k_{g0}$  คือค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของแก๊ส ( $\text{W/m}\cdot\text{K}$ ),  $P_{1/2}$  คือความดันแก๊ส (mbar) ณ จุดที่ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของแก๊สเท่ากับ  $k_{g0}/2$  สำหรับอากาศจะมีค่า  $P_{1/2} \approx 230 \text{ mbar}$  [7]

ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนโดยการแผ่รังสีแสดงในสมการที่ 4 [6]

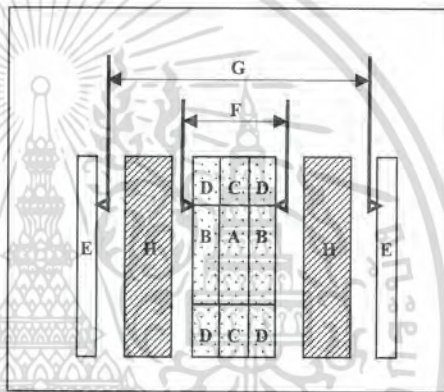
$$k_r = \frac{16 n^2 \sigma T^3}{3 \rho e_R^*} \quad (4)$$

โดย  $e_R^*$  คือค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์เอมิสซิวิตีของโรสแลนด์ ( $\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$ ) ซึ่ง  $e_R^* = 23.6 \text{ m}^2 \text{kg}^{-1}$  ที่อุณหภูมิ  $300 \text{ K}$  [6],  $\sigma$  คือค่าคงที่ Stefan-Boltzman  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{K}^4)$  และ

$n$  คือดัชนีหักเหของแสงซึ่งมีค่า  $\approx 1$  สำหรับซิลิกาความหนาแน่นต่ำ [7]

### 3. ชุดทดสอบการนำความร้อนแบบ Metal Surface Guarded Hot Plate

Metal Surface Guarded Hot Plate ใช้วัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุที่มีลักษณะเป็นฉนวนกันความร้อน โดยมีหลักการทำงานตามมาตรฐาน ASTM C177 ช่วงอุณหภูมิใช้งานที่เหมาะสมประมาณ  $200 - 400 \text{ K}$  ส่วนประกอบหลักแสดงในรูปที่ 2 [8]



รูปที่ 2 ส่วนประกอบของ Metal Surface Guarded Hot Plate โดย A-ชุดให้ความร้อนส่วนกลาง, B-ผิวหน้าชุดให้ความร้อนส่วนกลาง, C-ชุดให้ความร้อนส่วนนอก, D-ผิวหน้าชุดให้ความร้อนส่วนนอก, E-แผ่นระบายความร้อน, F และ G-เทอร์โมคัปเปิล, H- วัสดุทดสอบ

ชุดให้ความร้อนส่วนกลางและชุดให้ความร้อนส่วนนอกทำด้วยขดลวดความต้านทานพันอย่างสม่ำเสมอ บนแผ่นเบกาไลต์ (Bakelite) ประกอบด้วยแผ่นอะลูมิเนียมผิวเรียบทั้งสองด้าน ระหว่างขดลวดความต้านทานกับแผ่นอะลูมิเนียมจะคั่นด้วยแผ่นฉนวนไมก้า แผ่นอะลูมิเนียมควรมีความหนาอย่างน้อย  $6.0 \text{ mm}$  และมีขนาด  $320 \times 320 \text{ mm}^2$  และฝังเทอร์โมคัปเปิลเอาไว้

ส่วนชุดระบายความร้อนใช้แผ่นอะลูมิเนียมขนาด  $320 \times 320 \text{ mm}^2$  สองแผ่นมาประกบกัน ภายในแผ่นระบายความร้อนจะถูกเจาะร่องขนาด  $3.2 \text{ mm}$  เพื่อให้น้ำไหลวนบริเวณกึ่งกลางของแผ่นระบายความร้อนทั้งสองเจาะร่องเพื่อฝังเทอร์โมคัปเปิล

ชิ้นงานที่ต้องการทดสอบ(H) จะถูกประกบอยู่ระหว่างชุดให้ความร้อน (A-D) กับชุดระบายความร้อน (E) ซึ่งใช้น้ำในการหล่อเย็น ชุดทดสอบจะสามารถควบคุมได้ด้วยการปรับกำลังไฟฟ้า (Watt) ที่จ่ายให้กับชุดให้ความร้อนส่วนกลาง โดยอุณหภูมิของชุดให้ความร้อนส่วนนอกจะถูกควบคุมให้เท่ากับชุดให้ความร้อนส่วนกลาง เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนในแนวรัศมี ในระหว่างการทดสอบจะวัดค่ากำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่ชุดให้ความร้อนส่วนกลาง และอุณหภูมิที่ผิวหน้าของด้านร้อนและด้านเย็น ที่สภาวะอุณหภูมิคงตัว ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) หาได้จากสมการฟูเรียร์ ดังสมการที่ 5 [2]

$$k = \frac{Qx}{A(T_h - T_c)} \quad (5)$$

โดย Q คือปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทต่อหนึ่งวินาที (W), x คือความหนาของชิ้นงานทดสอบ (m), A คือพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานทดสอบที่ความร้อนไหลผ่าน (m<sup>2</sup>), T<sub>h</sub> และ T<sub>c</sub> คืออุณหภูมิของผิววัสดุทดสอบด้านที่สัมผัสกับแผ่นให้ความร้อนและแผ่นระบายความร้อน (K)

#### 4. การทดลอง

วัสดุที่จะนำมาทดสอบต้องมีรูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัส หนาระหว่าง 5-51 mm และต้องมีผิวหน้าที่เรียบสนิท เพื่อให้สามารถรับและถ่ายเทความร้อนได้อย่างสมบูรณ์ ในการทดลองนี้ใช้แผ่นแคลเซียมซิลิเกตหนา 6.0 mm ขนาด 200×200 mm<sup>2</sup> เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิจะปรับกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่ชุดให้ความร้อนส่วนกลางแล้วรอจนอุณหภูมิเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ 55, 65, 75, 84 และ 95 °C ตามลำดับ เพื่อศึกษาผลของความดันภายใน ห้องแกน แคลเซียมซิลิเกตด้วยสูญญากาศและใช้ปั๊มสูญญากาศดึงความดันภายในออกจนมีความดันภายในเท่ากับ 1000 mbar, 100 mbar, 10 mbar และความดันภายในเป็นสูญญากาศ จากนั้นนำไปวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ในการศึกษาผลของชั้นหุ้มเคลือบนำแผ่นแคลเซียมซิลิเกตมาหุ้มเคลือบด้วยชั้นบางของฟุ้งซิลิกาที่มีโพสิทีวแทนเป็นตัวประสาน ความเข้มข้นของฟุ้งซิลิกาที่ศึกษา คือ 0, 2.5 และ 5.0 % wt.

ตารางที่ 1 สมบัติพื้นฐานของแคลเซียมซิลิเกตที่ศึกษา [10]

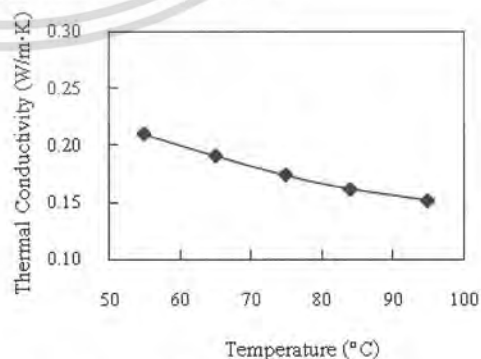
คุณสมบัติ	แคลเซียมซิลิเกต
ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k), W/m·K	0.16
ความหนาแน่น (ρ), kg/m <sup>3</sup>	800
ปริมาณการดูดซึมน้ำ, % wt.	65
ขนาดรูพรุนเฉลี่ย, μm	1

#### 5. ผลการทดลอง

##### 5.1 ผลของอุณหภูมิ

ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของแกนแคลเซียมซิลิเกตที่คำนวณได้จากสมการที่ 5 มีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ทดสอบเพิ่มขึ้น (รูปที่ 3) ที่อุณหภูมิ 55 °C ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีค่าเท่ากับ 0.210 W/m·K และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 95 °C ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนลดลงเหลือ 0.152 W/m·K ซึ่งแนวโน้มที่พบสอดคล้องกับผลงานวิจัยที่ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุน เช่น เซรามิก [9] และอาหาร

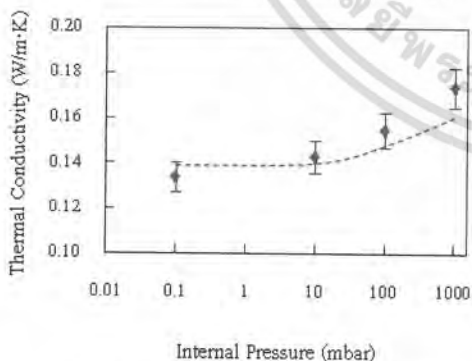
ที่อุณหภูมิกงตัว 84 °C พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของแกนแคลเซียมซิลิเกตที่วัดได้จากเครื่องมือที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้มีค่าเท่ากับ 0.162 W/m·K ซึ่งเท่ากับค่าที่ได้จากการสอบเทียบ (Calibration) โดยใช้เครื่องวัดแบบ Guarded Hot Plate ตามมาตรฐาน ASTM C177 ที่เป็นเครื่องมือเชิงพาณิชย์ และมีค่าใกล้เคียงกับค่าอ้างอิง ข้อมูลคุณสมบัติทางเทคนิคจากบริษัทผู้ผลิต [10] โดยมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง ±5%



รูปที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของแกนแคลเซียมซิลิเกตในช่วงอุณหภูมิทดสอบ 55-95 °C

## 5.2 ผลของความดันภายใน

รูปที่ 4 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ได้จากการทดลองและการคำนวณ ซึ่งแสดงให้เห็นผลของความดันภายในแผ่นฉนวนที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของแคลเซียมซilikเกตที่อุณหภูมิทดสอบ 84 °C ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเพิ่มจาก 0.134 W/m·K ที่ความดันภายในเป็นสุญญากาศ ไปเป็น 0.174 W/m·K ที่ความดันบรรยากาศ ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนจากสมการที่ 1 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนรวมทั้งหมด ( $k_c$ ) สามารถหาได้จากผลรวมของค่าสัมประสิทธิ์นำความร้อนผ่านของแข็ง ( $k_s$ ) และเฟสแก๊ส ( $k_g$ ) และการแผ่รังสี ( $k_r$ ) โดยถือว่าค่าการพาความร้อนโดยแก๊ส ( $k_c$ ) มีค่าน้อยมากในฉนวนกันความร้อนแบบสุญญากาศ สำหรับแคลเซียมซilikเกตที่ศึกษา  $k_s = 0.139$  W/m·K และ  $k_r = 7.29 \times 10^{-4}$  W/m·K เมื่อความดันภายในเปลี่ยนจาก 10 mbar เป็น 1000 mbar ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน  $k_c$  เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจาก  $1.08 \times 10^{-3}$  W/m·K เป็น 0.021 W/m·K ตามลำดับ แต่ในช่วงความดันภายในระหว่าง 0.1-10 mbar ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของฉนวนค่อนข้างคงที่ ระดับความดันภายในฉนวนกันความร้อนแบบสุญญากาศที่เหมาะสมจึงไม่ควรสูงกว่า 10 mbar



◆ ค่าที่ได้จากการทดลอง ----- ค่าที่ได้จากการคำนวณ

รูปที่ 4 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของฉนวนที่มีความดันภายในแกนแคลเซียมซilikเกตระดับต่างๆ

## 5.3 ผลของชั้นวัสดุห่อหุ้ม

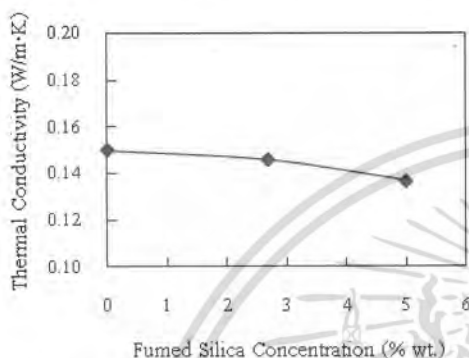
จากตารางที่ 2 เมื่อหุ้มแกนแคลเซียมซilikเกตด้วยฉนวนสุญญากาศ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเพิ่มจาก 0.162 W/m·K เป็น 0.174 W/m·K เนื่องจากฉนวนสุญญากาศซึ่งทำจากโพลีเอทิลีนเสริมแรงด้วยเส้นใยไพลอน 6 มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน 0.29 W/m·K ซึ่งสูงกว่าแคลเซียมซilikเกตจึงส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของแคลเซียมซilikเกตที่หุ้มด้วยฉนวนสุญญากาศมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่เดียวกันเมื่อหุ้มเคลือบแกนแคลเซียมซilikเกตด้วยโพลียูรีเทนซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน 0.03 W/m·K ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของแกนแคลเซียมซilikเกตที่เคลือบด้วยโพลียูรีเทนจะมีค่าลดลงเป็น 0.150 W/m·K ดังนั้นวัสดุหุ้มเคลือบที่เหมาะสมจึงควรมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนในตัวองต่ำและเคลือบลงไปบนแกนแคลเซียมซilikเกตโดยตรงเพื่อไม่ให้เกิดช่องอากาศระหว่างชั้นเคลือบและแกน

ตารางที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของฉนวนกันความร้อนที่มีแคลเซียมซilikเกตเป็นแกนและหุ้มด้วยวัสดุต่างชนิดกัน ที่ความดันบรรยากาศ

วัสดุ	อุณหภูมิที่แผ่นให้ความร้อนส่วนกลาง (°C)		อุณหภูมิที่แผ่นระบายความร้อน (°C)		$k$ (W/m·K)
	ด้านที่ 1	ด้านที่ 2	ด้านที่ 1	ด้านที่ 2	
แคลเซียมซilikเกต	84	82	30	29	0.162
แคลเซียมซilikเกต + ฉนวนสุญญากาศ	84	82	30	32	0.174
แคลเซียมซilikเกต + โพลียูรีเทน	84	82	36	34	0.150

การเคลือบแกนแคลเซียมซilikเกตด้วยวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำมากๆ เช่น ฟูมซilikกา ( $k \approx 0.004$  W/m·K) ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของฉนวนแคลเซียมซilikเกตที่ถูกหุ้มเคลือบลดลงดังแสดงในรูปที่ 5 เมื่อความเข้มข้นของฟูมซilikกาในโพลียูรีเทนมีค่า 0, 2.5 และ 5 % โดยน้ำหนัก ทำให้เกิดชั้นเคลือบที่มีความหนา 175, 200 และ 300  $\mu\text{m}$  ตามลำดับ เมื่อความหนาของชั้นเคลือบเพิ่มขึ้นแกนแคลเซียมซilikเกตมีคุณสมบัติการเป็นฉนวนกันความร้อนดีขึ้นด้วย แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อความ

เพิ่มขึ้นของฟุ้งซิลิกาสูงกว่า 5 % wt. จะปรากฏรอยแตกขนาดเล็กที่ผิวของชั้นเคลือบซึ่งอาจเกิดจากการที่โพลียูรีเทนไม่สามารถประสานอนุภาคของฟุ้งซิลิกาได้ดีพอ ชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้นจึงไม่เรียบเป็นเนื้อเดียว และส่งผลให้ไม่สามารถวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของฉนวนได้



รูปที่ 5 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของฉนวนกันความร้อนที่หุ้มเคลือบแทนแคลเซียมซิลิเกตด้วยชั้นบางของฟุ้งซิลิกาและมีโพลียูรีเทนเป็นตัวประสาน

## 6. สรุป

ปัจจัยที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของฉนวนกันความร้อนแบบสูญญากาศที่มีแคลเซียมซิลิเกตเป็นแกนได้แก่ อุณหภูมิ ความดันภายในแกนฉนวน และความหนาของชั้นเคลือบ ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนแปรผกผันกับอุณหภูมิซึ่งเป็นแนวโน้มที่พบในวัสดุที่มีความพรุนสูง ระดับความดันภายในแผ่นฉนวนที่เหมาะสมไม่ควรสูงกว่า 10 mbar และความหนาของชั้นเคลือบฟุ้งซิลิกาประมาณ 300  $\mu\text{m}$  จะให้ฟิล์มชั้นเคลือบที่มีความต่อเนื่องและเป็นฉนวนกันความร้อนได้ดี การเพิ่มความเข้มข้นของฟุ้งซิลิกาในโพลียูรีเทนสามารถลดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของฉนวนได้อย่างมีนัยสำคัญ แต่ควรศึกษาชนิดของตัวประสานที่จะนำมาใช้แทนโพลียูรีเทนเพื่อให้เกิดชั้นฟิล์มเคลือบที่ปราศจากรอยแตก

## 7. เอกสารอ้างอิง

[1] H. Simmler and S. Brunner, "Vacuum insulation panels for building applications: Basic properties,

aging mechanisms and service life," *Energy and Buildings*, Vol.37, pp.1122-1131, 2005.

- [2] ตระการ ก้าวถึกรม, "คู่มือฉนวนความร้อน," กรุงเทพฯ, บ.เอ็ม แอนด์ อี จำกัด, 2537.
- [3] ASTM C177, "Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus," *Annual Book of ASTM Standards*, Vol.04, No.06., pp.22-44, 2010.
- [4] Jae-Sung Kwon, Choong Hyo Jang, Haeyong Jung and Tae-Ho Song, "Effective thermal conductivity of various filling materials for vacuum insulation panels," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.52, pp.5525 - 5532, 2009.
- [5] IEA/ECBCS Annex39, "High Performance Thermal Insulation: Vacuum insulation panels," Sept., 2005.
- [6] H.-P. Ebert and F.k Hemberger, "Intercomparison of thermal conductivity measurements on a calcium silicate insulation material," *International Journal of Thermal Sciences*, Vol.50, pp.1838 - 1844, 2011.
- [7] J. Fricke, U. Heinemann and H.P. Ebert, "Vacuum insulation panels: From research to market," *Vacuum*, Vol.82, pp.680 - 690, 2008.
- [8] เท็ดดี้ พรวัดนกุล, "การศึกษา ออกแบบ และสร้างชุดทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนด้วยวิธี Metal Surface Guarded Hot Plate," *วิทยานิพนธ์คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, 2538.
- [9] K. W. Schlichting, N. P. Padture and P. G. Klemens, "Thermal conductivity of dense and porous yttria-stabilized zirconia," *Journal of Materials Science*, Vol.36, pp.3003 - 3010, 2001.
- [10] ข้อมูลคุณสมบัติทางเทคนิค, ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของฉนวนแคลเซียมซิลิเกต, บริษัท ซีลนูรี สตีล เทคคิง จำกัด