

เอกสารผลงานที่เสนอประเมิน
เพื่อแต่งตั้งให้ดำรงตำแหน่ง นักวิทยาศาสตร์ 7 ว.

เรื่องที่ 2

การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพ
การต้านทานความร้อนและลดค่าใช้จ่ายจากการใช้วัสดุฉนวนกันความร้อน

ของ

นายภักคณัย ทองทีอัมพร
ตำแหน่งนักวิทยาศาสตร์ 6 ว

กลุ่มฟิสิกส์และวิศวกรรมทั่วไป 1.
กองฟิสิกส์และวิศวกรรม
กรมวิทยาศาสตร์บริการ

เอกสารผลงานที่เสนอประเมิน
เพื่อแต่งตั้งให้ดำรงตำแหน่ง นักวิทยาศาสตร์ 7 ว.

เรื่องที่ 2

การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพ
การต้านทานความร้อนและลดค่าใช้จ่ายจากการใช้วัสดุฉนวนกันความร้อน

๓๕

เลขที่	ทพ
ชว	๒๐
เลขทะเบียน	๙๙๑๕
วันที่	๑๖๐.๗๔๔

ของ

นายภคณัย ทองทิอัมพร
ตำแหน่งนักวิทยาศาสตร์ 6 ว

ด้วยฉันทนาการ
จาก
๑๗.

กลุ่มฟิสิกส์และวิศวกรรมทั่วไป ๑.

กองฟิสิกส์และวิศวกรรม
กรมวิทยาศาสตร์บริการ

การศึกษาการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ
การต้านทานความร้อนและการลดค่าใช้จ่ายจากการใช้วัสดุทนกันความร้อน

นายภักดิ์ ทงทิ้มพร

กลุ่มฟิสิกส์และวิศวกรรมทั่วไป |
กองฟิสิกส์และวิศวกรรม
กรมวิทยาศาสตร์บริการ
พ.ศ. 2539

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
รายการรูปประกอบ	ข
รายการตารางประกอบ	ค
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	
1.2 วัตถุประสงค์ในการวิเคราะห์	
1.3 แนวทางการเก็บข้อมูล	
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 ระยะเวลาดำเนินการ	
2. ทฤษฎีของการถ่ายเทความร้อน	3
2.1 สภาพนำความร้อน	
2.2 การนำความร้อน	
2.3 ความต้านทานความร้อน	
2.4 ความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศ	
2.5 ความต้านทานความร้อนรวม	
3. ผลการทดลอง	6
3.1 อุปกรณ์การทดลอง	
3.2 ขั้นตอนการดำเนินการ	
3.3 การหาค่าความต้านทานความร้อนรวมและค่าสัมประสิทธิ์ การถ่ายเทความร้อน	7
4. การวิเคราะห์	10
5. วิจารณ์	12
5.1 วิจารณ์ผล	
5.2 สรุป	
กิตติกรรมประกาศ	13
เอกสารอ้างอิง	14
ภาคผนวก ก.	15
ภาคผนวก ข.	17

บทคัดย่อ

การศึกษาค้นคว้าทดลองนี้ จะประกอบด้วย 2 ส่วน ส่วนหนึ่งจะศึกษาหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากวัสดุที่เป็นฉนวนกันความร้อน โดยจะนำมากันความร้อนบนหลังคาอาคาร โดยเริ่มพิจารณาจากฉนวนกันความร้อน คือ ฉนวนใยแก้ว , โพลีสไตรีน , กระจก และ ยิบซัมบอร์ด นำมาหาค่าสภาพนำความร้อน และความต้านทานความร้อน จากเครื่องมือทดสอบซึ่งค่าสภาพนำความร้อนที่ทดลองได้ของฉนวนใยแก้ว 0.036 W/m.K , โพลีสไตรีน 0.031 W/m.K , กระจก 0.836 W/m.K และ ยิบซัมบอร์ด 0.191 W/m.K จะเห็นได้ว่า ฉนวนกันความร้อนของฉนวนใยแก้ว และ ฉนวนโพลีสไตรีน มีค่าความเป็นฉนวนกันความร้อนได้ดีใกล้เคียงกัน ซึ่งเหมาะที่จะนำมาใช้เป็นฉนวนกันความร้อนบนหลังคาอาคาร 3 แบบ ดังนี้

1. หลังคาอาคารที่ไม่ใช้ฉนวน
2. หลังคาอาคารที่ใช้ฉนวนกันความร้อนชนิดใยแก้ว
3. หลังคาอาคารที่ใช้ฉนวนโพลีสไตรีน

จากผลการศึกษาค้นคว้าหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาอาคารแบบที่ 1 , 2 และ 3 ได้ค่า $0.3618 \text{ W/m}^2.\text{K}$, $0.3347 \text{ W/m}^2.\text{K}$ และ $0.7273 \text{ W/m}^2.\text{K}$ ตามลำดับ และในส่วนที่ สอง จะได้คำนวณหาค่าการลดความเย็นของระบบเครื่องปรับอากาศ ได้กัต้นทุนความเย็น พร้อมทั้งเปรียบเทียบการประหยัดค่าใช้จ่ายต่อปี ในแต่ละแบบของหลังคาอาคาร

ผลการศึกษาค้นคว้าทดลองในส่วนที่สอง พบว่าหลังคาอาคารที่ใช้ฉนวนโพลีสไตรีนประหยัดค่าใช้จ่ายประมาณ 2,415.00 บาท ต่อปี เมื่อเทียบกับหลังคาอาคารที่ใช้ฉนวนใยแก้ว ส่วนหลังคาอาคารที่ใช้ฉนวนใยแก้ว จะประหยัดค่าใช้จ่ายได้ 25,116.00 บาท ต่อปี เมื่อเทียบกับหลังคาอาคารที่ไม่ใช้ฉนวน และ หลังคาอาคารที่ใช้ฉนวนโพลีสไตรีน จะประหยัดค่าใช้จ่ายถึง 27,370.00 บาท ต่อปี เมื่อเทียบกับหลังคาอาคารที่ไม่ใช้ฉนวน

จากตัวเลขการประหยัดค่าใช้จ่ายดังกล่าวข้างต้นแสดงให้เห็นว่าฉนวนโพลีสไตรีนจะประหยัดค่าใช้จ่ายมากที่สุด รองลงเป็นฉนวนใยแก้ว แต่ถ้าพิจารณาถึงสมบัติด้านอื่นๆประกอบด้วย จะพบว่าฉนวนโพลีสไตรีนเสื่อมสภาพได้ง่าย ติดไฟง่าย และหากติดไฟจะเกิดก๊าซพิษ แต่ถ้ารับฉนวนใยแก้วจะทนต่อความร้อน ทนกรด-ด่างได้ดี และใช้ช่วยในการดูดกลืนเสียง ไม่ติดไฟ และไม่มีพิษต่อมนุษย์ ดังนั้นการติดตั้งฉนวนกันความร้อนบนหลังคาอาคารควรที่จะใช้ฉนวนใยแก้ว จะดีที่สุด

รายการรูปประกอบ

รูปที่	หน้า
1. แสดงถึงโครงสร้างที่ประกอบขึ้นจากวัสดุแตกต่างกัน	4
2. แสดงถึงผนังอาคาร หรือหลังคาที่มีช่องว่างอากาศ ที่ประกอบด้วยวัสดุแต่ละชนิด	5
3. อุปกรณ์ทดลองหาค่าสภาพนำความร้อน (Thermal Conductivity)	6
4. แสดงถึงลักษณะหลังคาอาคารที่ไม่ใช้ฉนวน.....	7
5. แสดงลักษณะหลังคาอาคารที่ใช้ฉนวนใยแก้ว.....	8
6. แสดงลักษณะหลังคาอาคารที่ใช้ฉนวน โพลีสไตรีน (โฟมแผ่น)	8

รายการตารางประกอบ

ตารางที่	หน้า
1. ข้อมูลในการหาค่าสภาพนำความร้อนของวัสดุต่างๆ	15
2. แสดงค่าความต้านทานความร้อนของฉนวนกันความร้อนชนิดต่างๆ	15
3. แสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ตามโครงสร้างหลังคาอาคารทั้ง 3 แบบ	16
4. แสดงถึงการถ่ายเทความร้อนลดลง , ลดความชื้นของระบบปรับอากาศ และทำให้มีการประหยัดค่าใช้จ่ายต่อปี	16

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ปกติประเทศไทยอยู่ในเขตร้อน อาคารบ้านเรือนต่างๆตลอดจนอาคารสำนักงานใหญ่ๆ จะได้รับพลังงานความร้อนจากดวงอาทิตย์ จะทำให้อาคารบ้านเรือนดังกล่าวมีระดับความร้อนสูงขึ้น ซึ่งโดยปกติแล้ว ความร้อนที่เข้าสู่อาคารสามารถที่จะส่งผ่านเข้ามาสู่ภายในอาคารได้ 3 ทาง

1. การนำความร้อน (Conduction Of Heat) ซึ่งเป็นการส่งผ่านความร้อนกระจายผ่านมวลของวัตถุ จากโมเลกุลที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่อีกโมเลกุลหนึ่งซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยที่โมเลกุลของสารนั้นไม่ได้เคลื่อนที่ไปด้วย

2. การพาความร้อน (Convection Of Heat) เป็นการที่ความร้อนถูกพาเคลื่อนที่ติดไปกับโมเลกุลพร้อมกับการเคลื่อนที่ของโมเลกุล

3. การแผ่รังสีความร้อน (Radiation Of Heat) เป็นการที่พลังงานความร้อนเคลื่อนที่ออกไปเป็นคลื่น ผ่านอากาศไปยังวัตถุใดวัตถุหนึ่งแล้วทำให้วัตถุนั้นร้อนขึ้น

จากการส่งผ่านความร้อนเข้าสู่อาคารทั้ง 3 แบบดังกล่าวนี้ ซึ่งทำให้อาคารบ้านเรือน อาคารสำนักงานใหญ่ ๆ มีอุณหภูมิภายในอาคารสูงขึ้น ทำให้ต้องมีการติดตั้งเครื่องปรับอากาศภายในตัวอาคาร ซึ่งจะมีผลทำให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงขึ้น จึงจำเป็นที่ต้องลดอุณหภูมิของความร้อนภายในตัวอาคารให้ต่ำลง เพื่อจะเป็นการประหยัดพลังงาน จึงจำเป็นต้องมีฉนวนมาป้องกันการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคาร

1.2 วัตถุประสงค์ในการวิเคราะห์

จากปัญหาดังได้กล่าวมาแล้ว ทำให้ต้องทำการศึกษาถึงฉนวนกันความร้อนแต่ละชนิดที่ให้ค่าสภาพนำความร้อน ความต้านทานความร้อนออกมาเพื่อที่จะนำมาเปรียบเทียบและนำไปสู่การศึกษาว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall Heat Tranmission Coefficient)⁽¹⁾ เมื่อนำไปติดตั้งในตัวอาคารต่างๆแล้ว จะมีค่าความแตกต่างกันอย่างไร และอย่างไรหนที่ทำให้มีการประหยัดพลังงานไฟฟ้า และประหยัดค่าใช้จ่ายมากที่สุด ซึ่งฉนวนกันความร้อนนี้ได้มาจากตัวอย่างที่ส่งมาจากบริษัทต่างๆ ที่ส่งมาให้วิเคราะห์สภาพนำความร้อน ตลอดจนบางตัวอย่างได้ซื้อมาจากห้องตลาด

1.3 แนวทางการเก็บข้อมูล

ทำการรวบรวมวัสดุที่เป็นฉนวนกันความร้อนต่างๆโดยมีขนาด 1 ตารางฟุต ทั้งนี้เพื่อให้ได้ขนาดเท่ากับเครื่องมือทดสอบที่ได้จัดสร้างตามมาตรฐาน ASTM C-177⁽²⁾ จากฉนวนกันความร้อน จะทำการวัดความหนา ความหนาแน่นของฉนวน จากนั้นทำการหาค่าสภาพนำความร้อน (Thermal Conductivity) จากเครื่องมือที่สร้างขึ้น หาค่าการนำความร้อน (Thermal Conductance) ความต้านทานความร้อน (Thermal Resistance) ความต้านทานความร้อนรวม และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall Heat Transmission Coefficient) จากนั้น จะทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการป้องกันความร้อนระหว่างฉนวนใยแก้ว โพลีสไตรีนโฟม ในรูปของอาคารที่ติดตั้งฉนวนต่างๆ และกับอาคารที่ไม่ได้ติดตั้งฉนวนของหลังคาอาคาร ทั้งนี้โดยกำหนดพื้นที่ของหลังคา 1,000 ตารางเมตร และการศึกษาผลของการประหยัดค่าใช้จ่ายของกระแสไฟฟ้า ต่อปี โดยการเปรียบเทียบ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

จะทำให้เราสามารถจะใช้วัสดุที่เป็นฉนวนกันความร้อน ได้ถูกต้องเพื่อประหยัดค่าใช้จ่าย ตลอดจนการประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้มากขึ้น

1.5 ระยะเวลาดำเนินการ

ได้ศึกษาทฤษฎีการหาประสิทธิภาพการต้านทานความร้อน ประมาณเดือน มกราคม 2538 จากนั้นศึกษาหาค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุฉนวนกันความร้อนจากเครื่องมือการทดสอบหาค่าสภาพนำความร้อน ในเดือน กุมภาพันธ์ 2538 ถึง เมษายน 2538 และนำผลของค่าสภาพการนำความร้อนจากวัสดุทำการทดสอบได้ไปหาประสิทธิภาพของการต้านทานความร้อนในรูปแบบของหลังคาอาคาร 3 แบบแตกต่างกัน ในช่วงเดือน พฤษภาคม 2538 ถึง เดือน มิถุนายน 2538 ในขั้นตอนนี้ทำการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการต้านทานความร้อนในรูปแบบหลังคาอาคารทั้ง 3 แบบ ในเดือน กรกฎาคม 2538

บทที่ 2

ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน

ดังได้กล่าวมาแล้ว การนำความร้อน คือการเคลื่อนที่ของความร้อน จากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่ที่มีอุณหภูมิต่ำในวัตถุ โดยไม่มีการเคลื่อนไหวของโมเลกุลในวัตถุ แม้ว่า การนำความร้อนจะเกิดขึ้นได้ ทั้งในตัวกลางที่เป็นของแข็ง ของเหลว และ ก๊าซ ความร้อนถูกส่งผ่าน ตัวกลางที่เป็นของแข็ง ได้ดีที่สุด

2.1 สภาพนำความร้อน (Thermal Conductivity) คือ ปริมาณความร้อนภายใต้สภาวะคงที่ ที่ไหลผ่านวัตถุซึ่งมีพื้นที่ที่ได้รับความร้อน 1 หน่วยพื้นที่ ความหนา 1 หน่วย เมื่อมีอุณหภูมิของพื้นที่ ทั้งสองข้างต่างกัน 1 หน่วยองศา ในเวลา 1 หน่วย

$$Q = \frac{-kA(t_1 - t_2)T}{X} \dots\dots\dots(1)$$

- เมื่อ Q เป็นปริมาณความร้อน (แคลอรี)
- T เป็นเวลา (วินาที)
- Q/T เป็นอัตราการไหลของปริมาณความร้อนในทิศทางตั้งฉากกับพื้นที่ (วัตต์)
- k เป็นค่าสภาพนำความร้อนของวัตถุ (วัตต์ / เมตร . เคลวิน)
- A เป็นพื้นที่ที่ความร้อนเคลื่อนที่ผ่าน (เมตร²)
- t₁ - t₂ เป็นผลต่างของอุณหภูมิของพื้นที่ที่ความร้อนเคลื่อนที่ (เคลวิน)
- X เป็นความหนาของวัตถุ (เมตร)

2.2 การนำความร้อน (Thermal Conductance = C) เป็นค่าการนำความร้อนของวัตถุใดๆ เป็น อัตราส่วนระหว่าง ค่าสภาพนำความร้อน ต่อ ความหนาของวัตถุ ดังสมการ

$$C = \frac{k}{X} \dots\dots\dots(2)$$

- เมื่อ X เป็นค่าความหนาของวัตถุ (เมตร)
- C ค่าการนำความร้อน (วัตต์ / เมตร² - เคลวิน)
- k เป็นค่าสภาพนำความร้อน (วัตต์ / เมตร - เคลวิน)

2.3 ความต้านทานความร้อน (Thermal Resistance = R) ค่าความต้านทานความร้อนของวัตถุใดๆ คือ ส่วนกลับของค่าการนำความร้อน ซึ่งแสดงได้ดังสมการ

$$R = \frac{1}{C} \dots\dots\dots(3)$$

เมื่อ R เป็นค่าความต้านทานความร้อน (เมตร² - เคลวิน/ วัตต์)

2.4 ความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศ

ความสามารถในการส่งผ่านความร้อน ระหว่าง ผิววัตถุใดๆ กับ อากาศที่อยู่รอบๆขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศหนึ่งที่ผิวของวัตถุนั้น ในกรณีของผนังหรือหลังคาของอาคาร ความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศมี 3 ประเภท คือ

1. ความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศที่ผิวด้านนอกของอาคาร (R₀)
2. ความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศที่ผิวด้านในของอาคาร (R₁)
3. ความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศที่อยู่ภายในช่องว่างอากาศของผนัง หรือหลังคา (R₂)

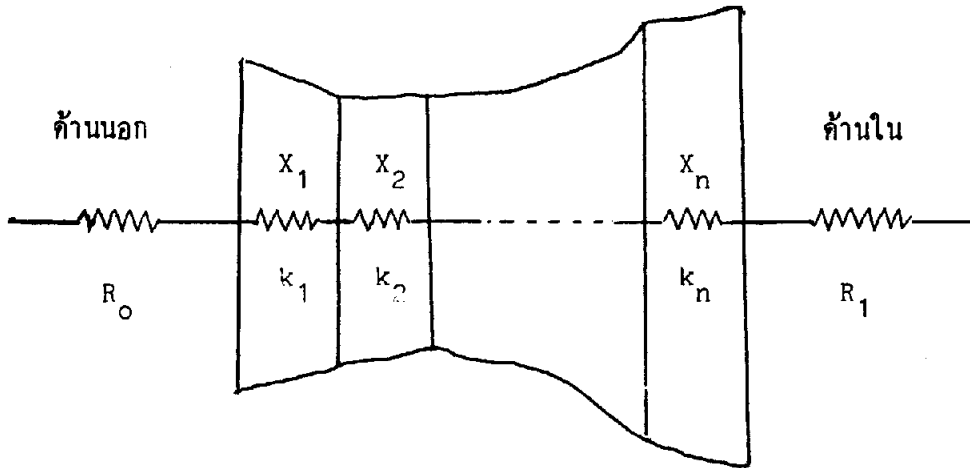
2.5 ความต้านทานความร้อนรวม

ในการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังอาคาร ซึ่งมีโครงสร้างประกอบขึ้นจากวัสดุแตกต่างกัน n ชนิด ดังรูปที่ 1 ความสามารถในการถ่ายเทความร้อน สามารถคำนวณได้จากค่าความต้านทานความร้อน ดังนี้

$$R_T = R_0 + \frac{\Delta X_1}{k_1} + \frac{\Delta X_2}{k_2} + \frac{\Delta X_3}{k_3} + \dots\dots\dots\frac{\Delta X_n}{k_n} + R_1 \dots\dots\dots(4)$$

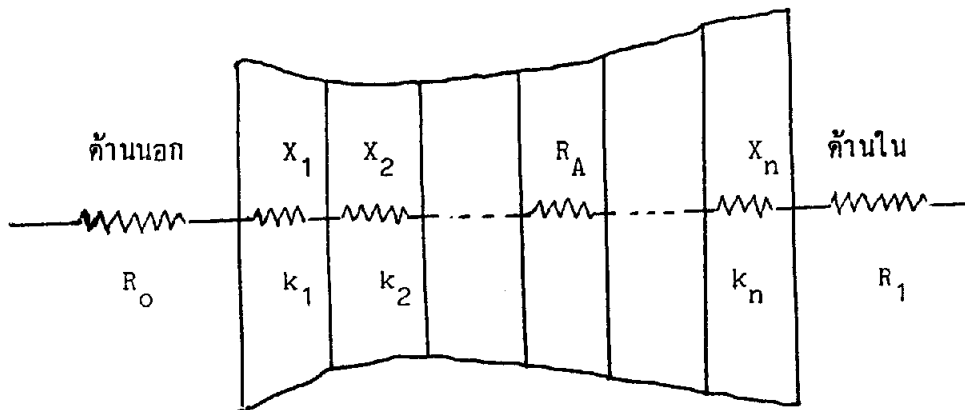
ซึ่ง $\Delta X_1, \Delta X_2, \Delta X_3, \dots\dots\dots, \Delta X_n$ เป็นความหนาของวัสดุที่ประกอบขึ้นเป็นผนังอาคารชนิดที่ 1, 2, 3, , n ตามลำดับ

และ $k_1, k_2, k_3, \dots\dots\dots, k_n$ เป็นค่าสภาพนำความร้อนของวัสดุชนิดที่ 1, 2, 3, , n ตามลำดับ



รูปที่ 1 แสดงถึงโครงสร้างที่ประกอบขึ้นจากวัสดุแตกต่างกัน ที่มีค่าสภาพนำความร้อนต่าง ๆ กัน และจะสามารถหาค่าความต้านทานความร้อนรวม (R_T) ได้

สำหรับผนังอาคาร หรือหลังคาที่มีช่องว่างอากาศด้วย ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงถึงผนังอาคารหรือหลังคาที่มีช่องว่างอากาศที่ประกอบด้วยวัสดุแต่ละชนิด

ถ้า R_T สามารถคำนวณได้จาก

$$R_T = R_o + \frac{\Delta X_1}{k_1} + \frac{\Delta X_2}{k_2} + \dots + R_A + \dots + \frac{\Delta X_n}{k_n} + R_1 \dots (5)$$

2.6 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Overall heat transmission coefficient = U) เป็น
สัดส่วนผกผันของค่าความต้านทานรวม

$$U = \frac{1}{R_T} \dots\dots\dots(6)$$

และอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพา (Heat transfer = Q)

$$Q = UA \Delta t \dots\dots\dots(7)$$

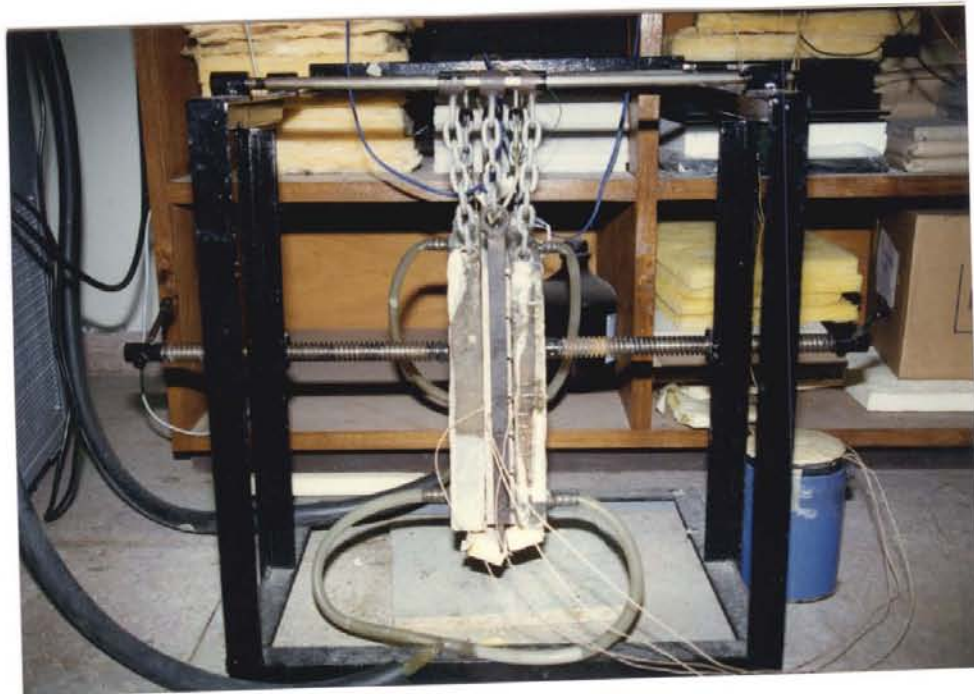
- เมื่อ U = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน
- A = พื้นที่ผิวที่รับความร้อน
- Δt = เป็นผลต่างของอุณหภูมิด้านนอกกับด้านในของอาคาร

บทที่ 3

ผลการทดลอง

3.1 อุปกรณ์การทดลอง

ตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์จะเป็นฉนวนกันความร้อนหลายชนิดมาทำการหาค่าสภาพนำความร้อน (Thermal conductivity) จากเครื่องมือดังรูปที่ 3 ซึ่งเครื่องมือนี้จะเป็นการหาค่าสภาพนำความร้อน ที่ได้จัดสร้างขึ้นตามมาตรฐาน ASTM C-177⁽²⁾



รูปที่ 3 อุปกรณ์การทดลองหาค่าสภาพการนำความร้อน (Thermal conductivity)

3.2 ขั้นตอนการดำเนินการ

จากฉนวนกันความร้อนชนิดต่างๆ ที่จะนำมาหาค่าสภาพการนำความร้อนนั้น จัดให้มีขนาด 1 ตารางฟุต จากนั้นนำมาวัดหาค่าความหนาและความหนาแน่น และนำมาเข้าเครื่องวัดดังรูปที่ 3 เพื่อหาค่าสภาพนำความร้อน (Thermal conductivity) และเมื่ออยู่ในสภาวะที่เรียกว่า สภาวะสม่ำเสมอ (Steady state) (หมายถึง สภาวะที่อุณหภูมิที่จุดหนึ่งจุดใดในตัวอย่างที่ความร้อนเคลื่อนที่ผ่าน ไม่เปลี่ยนแปลงกับเวลา นั่นคือ อัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนที่จุดใดๆ ในทิศทางของการเคลื่อนที่จะมีค่าเท่ากัน) จะทำการวัดค่าตัวแปรต่างๆ และนำไปแทนค่าในสมการที่ 1

$$Q = \frac{-kA (t_1 - t_2) T}{X}$$

- เมื่อ Q เป็นปริมาณความร้อน (แคลลอรี่)
T เป็นเวลา (วินาที)
Q/T เป็นอัตราการไหลของปริมาณความร้อนในทิศทางตั้งฉากกับพื้นที่ (วัตต์)
k เป็นค่าสภาพนำความร้อนของวัตถุ (วัตต์/ เมตร. เคลวิน)
A เป็นพื้นที่ที่ความร้อนเคลื่อนที่ผ่าน (เมตร²)
 $t_1 - t_2$ เป็นผลต่างของอุณหภูมิของพื้นที่ที่ความร้อนเคลื่อนที่ (เคลวิน)
X เป็นความหนาของวัตถุ (เมตร)

เพื่อที่จะหาค่าสภาพนำความร้อน จะทำการวัดกับฉนวนกันความร้อนที่เตรียมมาแบบเดียวกันหมด จากนั้น จะทำการคำนวณหาค่าความต้านทานความร้อนของฉนวนกันความร้อนจากสมการ

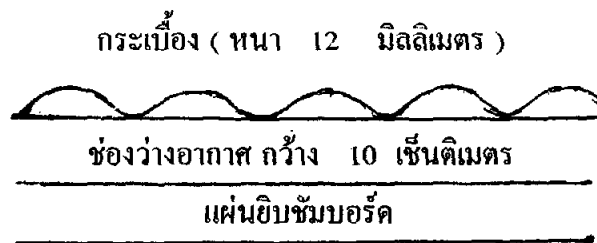
$$R = \frac{X}{k}$$

- เมื่อ R เป็นค่าความต้านทานความร้อน (Thermal resistance) (เมตร² . เคลวิน/วัตต์)
X เป็นความหนาของฉนวนกันความร้อน (เมตร)
k เป็นค่าสภาพนำความร้อน (วัตต์ / เมตร . เคลวิน)

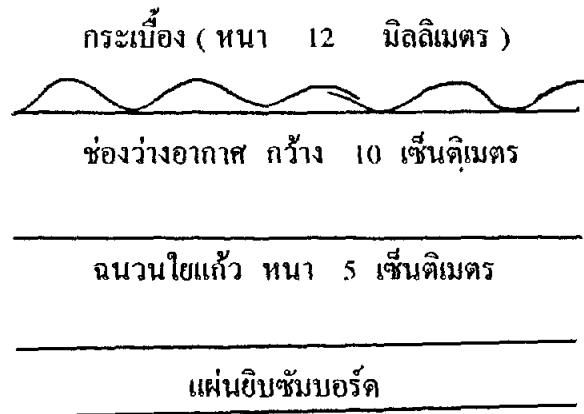
ดังผลที่แสดงในตารางที่ 1 และ 2 ในภาคผนวก ก.

3.3 การหาค่าความต้านทานความร้อนรวม (R_T) และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U)

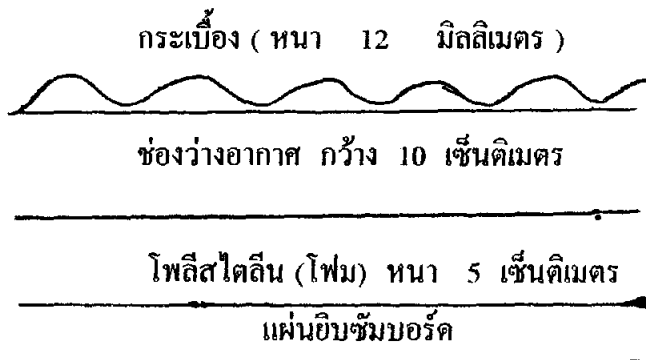
การที่ความร้อนจากดวงอาทิตย์แผ่รังสีลงมา ก่อนที่จะเข้าสู่อาคารจนถึงพื้นที่ทำงาน จะมีความต้านทานความร้อนจากวัสดุชนิดต่างๆ โดยที่วัสดุแต่ละชั้นจะมีค่าความต้านทานความร้อน ทั้งนี้เราจะทำการแยกการพิจารณาถึงหลังคาอาคารแบบเดียวกัน แต่จะมีฉนวนที่ต้านทานความร้อนต่างชนิดกัน และกับหลังคาอาคารที่ไม่ใช่ฉนวนกันความร้อน ดังรูปที่ 4 , 5 , 6



รูปที่ 4 หลังคาอาคารที่ไม่ใช่ฉนวนที่ประกอบด้วยกระเบื้องและแผ่นยิบซัมบอร์ด โดยมีช่องว่างอากาศกว้าง 10 เซ็นติเมตร



รูปที่ 5 หลังคาอาคารที่ใช้ฉนวนใยแก้ว หนา 5 เซ็นติเมตร ที่ประกอบด้วย กระเบื้อง ฉนวนใยแก้ว แผ่นยิปซัมบอร์ด ที่มีช่องว่างอากาศ กว้าง 10 เซ็นติเมตร



รูปที่ 6 หลังคาอาคารที่ใช้ฉนวนโพลีสไตรีน (โฟมแผ่น) หนา 5 เซ็นติเมตร ที่ประกอบด้วย กระเบื้อง โพลีสไตรีน แผ่นยิปซัมบอร์ด และ ช่องว่างอากาศ กว้าง 10 เซ็นติเมตร

จากรูป แบบหลังคาอาคารทั้ง 3 แบบ ซึ่งใช้ฉนวนกันความร้อนที่ต่างชนิดกัน โดยที่ หลังคาอาคารแต่ละแบบจะมีช่องว่างอากาศ กว้าง 10 เซ็นติเมตร และ อากาศที่ผิวด้านนอกของ หลังคา กับ อากาศที่ผิวด้านในของหลังคา ต่างก็มีค่าความต้านทานความร้อนดังนี้

ค่าความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศที่ผิวด้านในของหลังคา $0.120 \text{ m}^2\text{-K/W}$

ค่าความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศที่ผิวด้านนอกของหลังคา $0.55 \text{ m}^2\text{-K/W}$

ค่าความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศในช่องว่างหลังคา(หนา 10 ซม.) $1.095 \text{ m}^2\text{-K/W}$

ซึ่งค่าทั้ง 3 นี้ เป็นค่าที่อ้างอิงจาก cooling and freezing load calculating manual ของ ASHRAE⁽³⁾

หลังคาอาคารทั้ง 3 แบบ จะทำให้สามารถหาค่าความต้านทานรวม (R_T) ในแต่ละแบบได้ แล้วค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U) จะหาได้จากสมการ

$$U = \frac{1}{R_T}$$

ซึ่ง R_T เป็นค่าความต้านทานรวม

U เป็นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม

สุดท้ายค่าที่ได้คือ การหาอัตราการเคลื่อนที่ความร้อน (Q) จากสมการ

$$Q = UA \Delta t$$

เมื่อ U เป็นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (วัตต์/เมตร².เคลวิน)

A เป็นพื้นที่ผิวที่รับความร้อน (ตารางเมตร)

Δt เป็นค่าความแตกต่างของอุณหภูมิภายนอกกับภายในหลังคา (องศาเซลเซียส)

จากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาอาคารทั้ง 3 แบบนี้ จะมี

ค่าต่างกัน อันจะส่งผลให้ความร้อนที่เข้าสู่อาคารต่างกัน และความแตกต่างของอุณหภูมิภายนอกอาคารกับภายในอาคารที่ใช้ฉนวนใยแก้ว เป็น 3.5°C อาคารที่ใช้ฉนวนโพลีสไตรีน เป็น 3.0°C และอาคารที่ไม่ใช้ฉนวนเลย จะมีค่าเป็น 5.5°C ซึ่งค่าความแตกต่างของอุณหภูมิที่นำมาใช้ในการคำนวณเป็นค่าประมาณการ โดยอ้างอิงตาม *cooling load temperature different for calculating cooling load from flat roof* ⁽³⁾ และกำหนดพื้นที่หลังคาอาคารที่จะรับความร้อน 1,000 ตารางเมตร เท่ากันทั้ง 3 อาคาร ดังนั้น อัตราการเคลื่อนที่ความร้อนที่ผ่านเข้ามาในแต่ละอาคาร (Q) มีค่าที่แตกต่างกัน

เมื่อเปรียบเทียบอาคารแต่ละหลังที่ติดตั้งด้วยฉนวน กับอาคารที่ไม่ติดตั้งด้วยฉนวนกันความร้อนจะเห็นได้ดังนี้ มีการถ่ายเทน้อยลงไป และยังลดความเย็นของระบบปรับอากาศลงได้อีก พร้อมกับประหยัดเงินได้อีกในหนึ่งปี ดังตารางที่ 4 ในภาคผนวก ก. และการลดความเย็นของระบบปรับอากาศลงได้ จะสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายได้ 2 ทาง

1. ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งเครื่องปรับอากาศ โดยที่คิดค่าเครื่องปรับอากาศ ประมาณ 25,000 บาท ต่อตัน
2. ค่าใช้จ่ายในการทำงานของเครื่องปรับอากาศลดลง โดยปกติเครื่องปรับอากาศ 1 ตัน จะใช้ค่าพลังงานไฟฟ้าประมาณ 1.25 KW และเสียค่าใช้จ่าย KW. hr. ละ 2 บาท โดยที่ 1 วัน จะใช้เครื่องปรับอากาศ 8 ชั่วโมง

หมายเหตุ ในที่นี้ 1 ตันความเย็น เท่ากับ 12,000 BTU/hr

บทที่ 4
การวิเคราะห์

4.1 ผลการวิเคราะห์

จากการทดลองเก็บข้อมูลและหาค่าสภาพนำความร้อนของฉนวนกันความร้อนทั้ง 4 ชนิด จะให้ค่าที่แตกต่างกันไป อันจะชี้ให้เห็นถึงความแตกต่างของวัสดุแต่ละชนิดนั้นมีการนำความร้อนได้ดีมากน้อยอย่างไร และถ้าจะมองในรูปทดลองของการต้านทานความร้อนของวัสดุแต่ละชนิด ก็จะเห็นได้ว่า วัสดุใดที่มีค่าความต้านทานความร้อนสูง ก็จะเป็นตัวป้องกันความร้อนได้ดี ดังจะเห็นได้จาก ตารางที่ 1 และ ตารางที่ 2 และเมื่อนำฉนวนกันความร้อนเหล่านี้เข้าไปติดตั้งบนหลังคาอาคาร ก็จะพบอีกว่า ความต้านทานความร้อนรวมของแต่ละหลัง จะมีค่าการส่งผ่านความร้อนเข้าสู่อาคารที่ต่างกัน ดังตารางที่ 3

สำหรับอัตราการเคลื่อนที่ความร้อนที่เข้าสู่อาคารของแต่ละหลังที่มีการใช้ฉนวนกันความร้อนที่ต่างกัน จะต้องทราบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ก็จะมีค่าที่แตกต่างกัน โดยการคำนวณนี้จะรู้ได้จากภาคผนวก และผลที่ได้จะเป็นไปตามตารางที่ 3

และอาคารแต่ละหลังที่ใช้ฉนวนกันความร้อนที่แตกต่างกัน เมื่อนำมาเปรียบเทียบกันและกันจะพบว่า การถ่ายเทความร้อนจะลดลงต่างกัน ลดความเย็นของระบบอากาศลงต่างกัน และการประหยัดค่าใช้จ่ายที่ต่างกันด้วย ดังตารางข้างล่าง

ตาราง แสดงการถ่ายเทความร้อนลดลง ลดความเย็นของระบบปรับอากาศ และการประหยัดค่าใช้จ่ายต่อปี

เปรียบเทียบลักษณะอาคาร	การถ่ายเทความร้อนลดลง (BTU/hr)	ลดความเย็นของระบบปรับอากาศลง(ตันความเย็น)	ประหยัดค่าใช้จ่าย (บาท/ ปี)
อาคารที่ใช้ฉนวนใยแก้ว กับอาคารที่ไม่ใช้ฉนวนกันความร้อน	9327.85	0.78	25116.00
อาคารที่ใช้ฉนวนโฟลีสไตลีน(โฟม) กับอาคารที่ไม่ใช้ฉนวนกันความร้อน	10222.52	0.85	27370.00
อาคารที่ใช้โฟลีสไตลีน(โฟม) กับอาคารที่ใช้ฉนวนใยแก้ว	894.67	0.075	2415.00

คำนวณกันความร้อนที่ให้ค่าสภาพนำความร้อน(หรือค่าความต้านทานความร้อน)ของโพลีสไตรีน(โฟม) ที่ความหนา 5.00 ซม. ความหนาแน่น 24 kg/m^3 จะให้ค่าเป็น 0.031 W/m.k ($1.613 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$) ได้ดีกว่าฉนวนใยแก้ว ที่ความหนา 5.00 ซม. ความหนาแน่น 32 kg/m^3 ซึ่งให้ค่าสภาพนำความร้อน (หรือค่าความต้านทานความร้อน) 0.036 W/m.k ($1.389 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$)

และเมื่อนำฉนวนกันความร้อนโพลีสไตรีน(โฟม) และฉนวนกันความร้อนใยแก้ว ไปติดตั้งของหลังคาอาคารจะพบว่า

1. ค่าความต้านทานความร้อนรวมของหลังคาอาคารที่ใช้ฉนวนโพลีสไตรีน(โฟม) ดีกว่าหลังคาอาคารที่ใช้ฉนวนใยแก้ว คือ $2.988 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ และ $2.764 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ ตามลำดับ
2. ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาอาคารที่ใช้โพลีสไตรีน(โฟม) ก็ดีกว่าหลังคาอาคารที่ใช้ฉนวนใยแก้ว คือ $0.3347 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ และ $0.3168 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ตามลำดับ
3. สำหรับปริมาณความร้อนที่เข้าอาคารในหนึ่งหน่วยเวลาของอาคารแต่ละหลังที่ใช้ฉนวนกันความร้อนนั้น จะเป็นค่าประมาณ ทั้งนี้ เราได้ใช้ค่าประมาณของความแตกต่างของอุณหภูมิภายนอกและภายใน ซึ่งพบว่า หลังคาอาคารที่ใช้ฉนวนโพลีสไตรีน(โฟม) มีอัตราการเคลื่อนที่ความร้อน $1,004.10 \text{ Watt}$ ก็จะน้อยกว่าหลังคาอาคารที่ใช้ฉนวนใยแก้ว ก็มีค่า $1,266.30 \text{ Watt}$
4. เมื่อทำการเปรียบเทียบอาคารที่ใช้ฉนวนใยแก้ว กับอาคารที่ไม่ใช้ฉนวน จะพบว่า การถ่ายเทความร้อนลดลง $9,327.89 \text{ BTU/hr}$ ประหยัดค่าใช้จ่ายด้านระบบปรับอากาศลงได้ คิดเป็นเงิน $25,116.00$ บาท ต่อปี
5. เมื่อทำการเปรียบเทียบอาคารที่ใช้ฉนวนโพลีสไตรีน(โฟม) กับอาคารที่ไม่ใช้ฉนวน จะพบว่า การถ่ายเทความร้อนลดลง $10,222.53 \text{ BTU/hr}$ และประหยัดค่าใช้จ่ายด้านระบบปรับอากาศลงได้ คิดเป็นเงิน $27,370.00$ บาท ต่อปี
6. เมื่อทำการเปรียบเทียบ อาคารที่ใช้ฉนวนโพลีสไตรีน(โฟม) กับ อาคารที่ใช้ฉนวนใยแก้ว จะพบว่า การถ่ายเทความร้อนลดลง 894.63 BTU/hr และประหยัดค่าใช้จ่ายด้านระบบปรับอากาศลงได้ คิดเป็นเงิน $2,415.00$ บาท ต่อปี
7. การใช้ฉนวนโพลีสไตรีน(โฟม) กับหลังคาอาคาร จะทำให้ช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายได้ดีกว่า การใช้ฉนวนใยแก้ว แต่ไม่เหมาะที่จะนำมาเป็นฉนวนในบ้านที่อยู่อาศัย เพราะเป็นฉนวนกันความร้อนที่เสื่อมสภาพได้ง่าย ติดไฟง่าย และหากติดไฟจะเกิดก๊าซพิษ

บทที่ 5 วิจารณ์

5.1 วิจารณ์ผล

จากผลการวิเคราะห์ที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 4 เราอาจกล่าวได้ว่า สำหรับอาคารที่พักอาศัยที่มีการติดตั้งเครื่องปรับอากาศ ถ้าจะมีการประหยัดพลังงานและลดค่าใช้จ่ายแล้วควรมีการติดตั้งฉนวนกันความร้อน ทั้งนี้เพื่อที่จะลดปริมาณความร้อนที่จะเข้าสู่ภายในอาคาร ทั้งนี้เพื่อที่จะลดกระแสไฟฟ้า สำหรับฉนวนกันความร้อนที่ได้ติดตั้ง จะมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด ซึ่งแต่ละชนิดจะมีค่าสภาพนำความร้อนที่แตกต่างกัน ก็ควรที่จะเลือกวัสดุที่มีค่าสภาพนำความร้อนต่ำ ซึ่งวัสดุที่เราใช้ทดสอบ ก็จะพบว่า โพลีสไตรีนเป็นฉนวนกันความร้อนที่มีค่าสภาพนำความร้อนต่ำกว่าวัสดุฉนวนกันความร้อนชนิดใยแก้ว จึงเห็นควรที่จะใช้ฉนวนกันความร้อนชนิดโพลีสไตรีน แต่วัสดุทั้ง 2 อย่างที่กล่าวแล้ว ยังมีองค์ประกอบอื่นที่จะต้องพิจารณา คือ สมบัติในด้านการติดไฟ ซึ่งจะพบว่า ฉนวนกันความร้อนชนิดโพลีสไตรีนนี้เป็นวัสดุที่ติดไฟง่าย และเมื่อติดไฟแล้วจะทำให้เกิดควันที่เป็นพิษ ส่วนฉนวนกันความร้อนชนิดใยแก้วนั้น ถึงแม้ว่าจะมีค่าสภาพนำความร้อนที่สูงกว่าฉนวนกันความร้อนชนิดโพลีสไตรีน แต่ก็เป็วัสดุที่ไม่ติดไฟ ทนต่อ กรด-ด่าง ทนต่ออุณหภูมิสูง ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงการเลือกใช้ฉนวนกันความร้อนประเภทโพลีสไตรีนจะช่วยประหยัดพลังงานและลดค่าใช้จ่ายได้ แต่ก็ไม่มากมายเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ฉนวนกันความร้อนใยแก้ว แต่ถ้ามองคุณสมบัติในด้านอื่นคือ ความปลอดภัยต่อการติดไฟ ทนต่อกรด-ด่าง และการดูดกลืนเสียงได้ดีกว่า นับว่าการใช้ฉนวนกันความร้อนชนิดใยแก้วจะดีกว่า และเหมาะสมกว่า

5.2 สรุป

วัสดุฉนวนกันความร้อนที่จะใช้ในการติดตั้งกับหลังคาอาคารเพื่อป้องกันความร้อนในการเข้าสู่อาคาร และช่วยประหยัดพลังงานไฟฟ้า นั้น พบว่าฉนวนกันความร้อนชนิดใยแก้วจะเหมาะสมกว่าฉนวนกันความร้อนชนิดโพลีสไตรีน เพราะช่วยประหยัดค่าใช้จ่าย ลดการใช้พลังงานไฟฟ้า แม้ทั้งสมบัติทางด้านอื่นๆ เช่น ความทนต่อความร้อน ทนกรด-ด่างได้ดี และช่วยในการดูดกลืนเสียง ไม่ติดไฟ และ ไม่เป็นพิษต่อมนุษย์

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ คุณวิศญา สาครินทร์ราชย์ จากบริษัท สยามเวลล์
อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด ที่ได้จัดส่งตัวอย่าง จนวนใยแก้ว และ โพลีสไตรีน มาให้

เอกสารอ้างอิง

1. J.P Hotman , Heat Transfer , Megraw - Hill Book Co. , New York , 1981
2. American Society For Testing and Materials. “ Standard Method of Test for Thermal Conductivity of Materials by means of the Guarded Hot plate , ASTM C 177-63 , 1964 Book of ASTM Standard part 14. : 15-26
3. ASHRAE.ASHARE Guide And Data Book 1963 Fundamental and Equipment. American and Society of Heating , Refrigerating and Air-Conditioning Engineer , Inc. , 1963

ภาคผนวก ก.

วัสดุ	ความหนา cm.	ความหนาแน่น kg/m ³	ปริมาณไฟฟ้า Watt	อุณหภูมิแผ่นให้ความร้อน (°C)	อุณหภูมิแผ่นระบายความร้อน (°C)	ค่าสภาพนำความร้อน W/m.k.
โพลีสไตรีน	5.00	24	1.960	135.00	9.00	0.031
ยิบซัมบอร์ด	1.20	980	10.802	53.25	23.75	0.191
กระเบื้อง	1.20	1,890	16.030	32.0	22.0	0.836
ฉนวนใยแก้ว	5.00	32	2.349	139.75	9.75	0.036

ตารางที่ 1 ข้อมูลในการหาค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุต่างๆ

วัสดุ	ความหนา (ซม.)	ค่าความต้านทานความร้อน(m.K/W)
โพลีสไตรีน	5.00	1.613
แผ่นยิบซัมบอร์ด	1.20	0.063
กระเบื้อง	1.20	0.014
ฉนวนใยแก้ว	5.00	1.329

ตารางที่ 2 แสดงค่าความต้านทานความร้อนของฉนวนกันความร้อนชนิดต่างๆ

โครงสร้าง	ความต้านทาน ความร้อนแต่ละชนิด		
	หลังคาอาคารที่ใช้ ฉนวนใยแก้ว (R)	หลังคาอาคารที่ใช้ฉนวน โพลีสไตรีน โฟม (R)	หลังคาอาคารที่ไม่ใช้ ฉนวนกันความร้อน(R)
ฟิล์มอากาศด้านนอก	0.035	0.055	0.055
แผ่นกระเบื้อง	0.014	0.014	0.014
ช่องว่างอากาศกว้าง10ซม. ฉนวนใยแก้ว	1.095	1.095	0.095
โพลีสไตรีน โฟม	-	1.613	-
แผ่นยิบซัมบอร์ด	0.063	0.063	0.063
ฟิล์มอากาศด้านใน	0.148	0.148	0.148
ความต้านทานความร้อน รวม (R_T)	2.764	2.988	1.375
ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเท ความร้อนรวม (U)	0.3618	.03347	0.7273
อัตราการเคลื่อนที่ความ ร้อน (Q)	1268.32	1004.10	4000.15

ตารางที่ 3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ตามโครงสร้างของหลังคาอาคารทั้ง 3 แบบ

เปรียบเทียบลักษณะอาคาร	การถ่ายเทความร้อน ลดลง (BTU/hr)	ลดความเย็นของระบบปรับ อากาศลง (ตันความเย็น)	ประหยัดค่าใช้จ่าย บาท/ปี
อาคารที่ใช้ฉนวนใยแก้ว กับ อาคารที่ไม่ใช้ฉนวนกัน ความร้อน	9327.85	0.78	25116.00
อาคารที่ใช้ฉนวนโพลีสไต รีนโฟม กับอาคารที่ไม่ใช้ ฉนวนกันความร้อน	10222.52	0.85	27370.00
อาคารที่ใช้โพลีสไตรีนโฟม กับอาคารที่ใช้ฉนวนใยแก้ว	894.67	0.075	2415.00

ตารางที่ 4 แสดงถึงการถ่ายเทความร้อนลดลง ลดความเย็นของระบบปรับอากาศ และทำให้มีการ
ประหยัดค่าใช้จ่ายต่อปี

ภาคผนวก ข
ตัวอย่างการคำนวณ

ในการคำนวณหาค่า สภาพนำความร้อน (Thermal conductivity) ของฉนวนใยแก้ว และ โพลีสไตรีน ที่ความหนา 5 ซม. และทำการวัดค่าต่างๆ ในสภาวะคงที่

สำหรับฉนวนใยแก้ว

$$\text{ค่าสภาพนำความร้อน , k} = \frac{Q \cdot X}{T \cdot A \cdot (t_1 - t_2)}$$

$$\text{ปริมาณความร้อน } Q = 2.349 \text{ Watt}$$

$$A = 2.3 \times 10^{-2} \text{ m}^2$$

$$X = 5.0 \text{ cm.} = 0.05 \text{ m}$$

$$t_1 - t_2 = 139.75 - 9.75 = 130 \text{ องศาเซลเซียส} \\ = 130 \text{ เคลวิน}$$

$$\therefore k = \frac{2.349 \times 0.05}{2.3 \times 10^{-2} \times 130} \\ = 0.0361 \text{ W/m.k.}$$

สำหรับฉนวนโพลีสไตรีน

$$\text{ปริมาณความร้อน } Q = 1.960 \text{ Watt}$$

$$A = 2.3 \times 10^{-2} \text{ m}^2$$

$$X = 5.0 \text{ cm.} = 0.05 \text{ m.}$$

$$t_1 - t_2 = 135 - 9.0 = 126 \text{ องศาเซลเซียส} \\ = 126 \text{ เคลวิน}$$

$$\therefore k = \frac{1.960 \times 0.05}{2.3 \times 10^{-2} \times 126} \\ = 0.0311 \text{ W./m.k.}$$

$$\text{และค่าความต้านทานความร้อน } R = \frac{X}{k}$$

สำหรับฉนวนใยแก้ว

$$\begin{aligned} R &= \frac{5.0 \times 10^{-2}}{0.036} \\ &= 1.389 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} \end{aligned}$$

และ สำหรับโพลีสไตรีน

$$\begin{aligned} R &= \frac{5.0 \times 10^{-2}}{0.031} \\ &= 1.613 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} \end{aligned}$$

การคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ความร้อนโดยการพา (Q) ดังตารางที่ 4 เมื่อ

$$Q = UA \Delta t$$

สำหรับหลังคาอาคารที่ใช้ฉนวนใยแก้ว

$$\begin{aligned} U &= \text{ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม เท่ากับ } 0.3618 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \\ A &= \text{พื้นที่ผิวที่รับความร้อน } 1,000 \text{ ตารางเมตร} \\ \Delta t &= \text{ความแตกต่างของอุณหภูมิภายนอก กับ ภายในหลังคา} \\ &= 3.5 \text{ องศาเซลเซียส} \\ \therefore Q &= 0.3618 \times 1,000 \times 3.5 \\ &= 1,266.30 \text{ วัตต์} \\ &= 4,320.66 \text{ บี.ที.ยู ต่อ ชั่วโมง} \end{aligned}$$

สำหรับหลังคาอาคารที่ใช้ฉนวนโพลีสไตรีน

$$\begin{aligned} U &= 0.3347 \text{ วัตต์/ตารางเมตร } \cdot \text{เคลวิน} \\ A &= 1,000 \text{ ตารางเมตร} \\ \Delta t &= 3.0 \text{ องศาเซลเซียส} \\ \therefore Q &= 0.3347 \times 1,000 \times 3.0 \\ &= 1,004.10 \text{ วัตต์} \\ &= 3,425.99 \text{ บี.ที.ยู. ต่อ ชั่วโมง} \end{aligned}$$

และสำหรับหลังคาอาคารที่ไม่ใช้ฉนวนกันความร้อน

$$U = 0.7273 \text{ วัตต์ต่อตารางเมตร . เคลวิน}$$

$$A = 1,000 \text{ ตารางเมตร}$$

$$\Delta t = 5.5 \text{ องศาเซลเซียส}$$

$$\begin{aligned} \therefore Q &= 0.7273 \times 1,000 \times 5.5 \\ &= 4,000.15 \text{ วัตต์} \\ &= 13,648.51 \text{ บี.ที.ยู ต่อชั่วโมง} \end{aligned}$$