



## ใบรับรองปัญหาพิเศษ

เรื่อง

บทบาทของฉนวนต่อการสูญเสียความร้อนโดยการคำนวณ  
ด้วยโปรแกรม EXCEL

(Calculation of Insulation role in Reducing Heat loss via EXCEL software)

จัดทำโดย

1. นางสาว นุศนันท์ ทลิมรัตน์ รหัสสนศ. 44040792
2. นางสาว สุดาวลัย บุญพิรุณ รหัสสนศ. 44040801
3. นางสาว หทัยชนก สรวรรณ รหัสสนศ. 44040806

ได้รับการพิจารณาเห็นชอบจาก

๒๔ / ๕ .ค. / ๒๕๔๘ อาจารย์ที่

ปรึกษาปัญหาพิเศษ

( ผศ.ดร.รุจิรา ตาปราบ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

บทบาทของฉนวนต่อการสูญเสียความร้อนโดยการคำนวณ

ด้วยโปรแกรม EXCEL

(Calculation of Insulation role in Reducing Heat loss via EXCEL software)

จัดทำโดย

1. นางสาว นุศนันท์ ทลิมรัตน์ รหัสสนศ. 44040792
2. นางสาว สุดาวัลย์ บุญพิรุณ รหัสสนศ. 44040801
3. นางสาว หทัยชนก สราวรรณ รหัสสนศ. 44040806

ร/พ.

๗๖๖๒ ๒

2547



T096480

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน.....96480.....

วัน,เดือน,ปี.....

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต

ภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตร โครงการคณะอุตสาหกรรมเกษตร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นางสาว นุศนันท์ หลิมรัตน์, นางสาว สุศาวัลย์ บุญพิรุณ และ นางสาว หทัยชนก สรวารธรรม 2547 :  
บทบาทของฉนวนต่อการสูญเสียความร้อนโดยการคำนวณด้วยโปรแกรม Excel (Calculation of  
Insulation role in Reducing Heat loss via Excel Software). ภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตร โครงการคณะ  
อุตสาหกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. อาจารย์ที่ปรึกษา :  
ผศ.ดร. รุจิรา ตาปราบ

### บทคัดย่อ

การศึกษานี้ต้องการที่จะคำนวณค่าการสูญเสียความร้อนของฉนวนชนิดต่างๆที่มีใช้ใน  
อุตสาหกรรมโดยใช้ Excel Software โดยจะทำการสร้างโปรแกรมเพื่อพร้อมใช้งานในการคำนวณโดย  
แบ่งกลุ่มของชนิดของฉนวนเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่มีการใช้งานในช่วงอุณหภูมิต่ำ (-270 °C ถึง  
100 °C) ซึ่งประกอบด้วย ฉนวนประเภท Aeroflex, Vegetable Cork, Glass Fiber, Polystyrene Foam,  
ขนสัตว์, Elastomeric Foam และ Cellulosic Fiber และกลุ่มที่สองที่มีการใช้งานในช่วงอุณหภูมิสูง (100  
°C ถึง > 500 °C) ประกอบด้วย ฉนวนประเภท Perlite, Calcium Silicate, Mineral Fiber, Vermiculite,  
Cellular Glass, Phenolic Foam และ Polyisocyanurate Foam โดยได้แบ่งกรณีศึกษาเป็น 3 กรณีพบว่า

กรณีที่ 1 การศึกษาผลของความหนาที่ระดับต่างๆ ของฉนวน ( $\Delta x$ , จาก 0.02 m. ถึง 0.11 m.)  
ฉนวนที่ทำให้มีการสูญเสียความร้อนน้อยที่สุดและมากที่สุดในช่วงอุณหภูมิต่ำ ได้แก่ Glass Fiber และ  
ขนสัตว์ ตามลำดับ ส่วนในช่วงอุณหภูมิสูง ได้แก่ Polyisocyanurate Foam และ Vermiculite ตามลำดับ  
และพิจารณาการสูญเสียความร้อนของฉนวนชนิดต่างๆที่ความหนาต่างกันพบว่าได้ความสัมพันธ์ใน  
ลักษณะเป็นกราฟรูปไฮเปอร์โบล่า

กรณีที่ 2 การศึกษาผลของความแตกต่างของอุณหภูมิ ( $\Delta T$ ) ที่ต่างกันของฉนวนทั้ง 2 กลุ่ม  
พบว่าได้ความสัมพันธ์ค่อนข้างเป็นเส้นตรงส่วนกรณีที่ 3 เมื่อเลือกฉนวนชนิด Glass Fiber ที่ความหนา  
เพิ่มขึ้นครั้งละ 0.01 m. เริ่มตั้งแต่ 0.02 m. ถึง 0.11 m. และให้  $\Delta T$  เท่ากับ 40 °C มาทำการคำนวณการ  
สูญเสียความร้อนกับรูปทรงภาชนะที่ต่างกันคือ ทรงกระบอก (Cylinder) และทรงกล่องสี่เหลี่ยม  
(Rectangular) โดยประมาณให้พื้นที่ของทั้งสองภาชนะมีขนาดใกล้เคียงกันพบว่าประสิทธิภาพในการ  
ลดอัตราการสูญเสียความร้อนของอุปกรณ์ทรงกล่องสี่เหลี่ยมจะดีกว่าในอุปกรณ์รูปทรงกระบอก

นอกจากนี้โปรแกรมที่สร้างขึ้นนี้ยังเป็นประโยชน์ในการใช้คำนวณสำหรับผู้สนใจตรวจสอบ  
การสูญเสียความร้อนที่เกี่ยวข้องกับฉนวนได้

สมมติ ๕.

สมมติ ๖.

สมมติ ๗.

ลายมือชื่อผ.ศ.

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

๒๔ / ๕.๕. / ๒๕๖๘

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

วัน/เดือน/ปี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ไม่มีคำกล่าวใดที่สามารถใช้บ่งบอกถึงความกรุณาและความอนุเคราะห์ ของผศ.ดร. รุจิรา ตาปราบ อาจารย์ที่ปรึกษาปัญหาพิเศษในหัวข้อเรื่อง บทบาทของฉนวนต่อการสูญเสียความร้อนโดยการคำนวณ ด้วยโปรแกรม EXCEL ที่กรุณาสละเวลาอันมีค่ามาคอยแนะนำ ให้คำปรึกษาและดูแลเอาใจใส่เป็นอย่างมาก รวมทั้งแก้ไขรายงานปัญหาพิเศษฉบับนี้ให้มีความถูกต้องและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น และกราบขอขอบคุณอาจารย์ทุกท่านที่คอยแนะนำ และช่วยให้ปัญหาพิเศษครั้งนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยดี

ท้ายที่สุดแต่ไม่ใช่น้อยที่สุดสำหรับคำขอขอบคุณอันพิเศษสุดที่ขอมอบให้แก่สมาชิกครอบครัว หลิมรัตน์ บุญพิรุณ และครอบครัวสรารวรรณ ทุกคนที่มอบความรัก ความห่วงใย และขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคนที่คอยให้กำลังใจและให้ความช่วยเหลือ และขอบคุณห้องสมุด KMITL สำหรับหนังสือและแหล่งข้อมูลอันทรงค่าสำหรับปัญหาพิเศษครั้งนี้

นางสาว นุคนันท์ หลิมรัตน์  
นางสาว สุดาวลัย บุญพิรุณ  
นางสาว หทัยชนก สรารวรรณ  
21 มีนาคม 2548

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
- บทนำ	1
- วัตถุประสงค์	2
บทที่ 2 ทฤษฎี	3
- หลักการถ่ายเทความร้อน	3
• การถ่ายเทความร้อนโดยการนำ	3
• หลักการถ่ายเทความร้อนของฉนวนความร้อน	9
• การนำความร้อนผ่านผนังราบ	10
• การนำความร้อนผ่านผนังวัตถุทรงกระบอก	11
• การนำความร้อนผ่านผนังราบหลายชั้น	12
• การนำความร้อนผ่านผนังวัตถุทรงกระบอกหลายชั้น	13
- คุณสมบัติของฉนวน	13
- ชนิดพื้นฐานของฉนวนความร้อน	17
• คุณสมบัติของฉนวนแบบมวลบางชนิดที่เลือกมาศึกษา	18
- การเปรียบเทียบวัสดุฉนวน	28
- การใช้งานฉนวนความร้อนในอุตสาหกรรม	32
• ฉนวนความร้อนในอุตสาหกรรมแช่แข็ง	32
• ฉนวนความร้อนในอุตสาหกรรมการขนส่ง	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
• ฉนวนความร้อนสำหรับอาคารสิ่งก่อสร้าง	35
• ฉนวนความร้อนในอุตสาหกรรมการผลิต	35
บทที่ 3 ชั้นตอนและวิธีการศึกษา	38
- อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่ ( $q/A$ ) กับความหนาของฉนวน ( $\Delta X$ )	39
- อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่ ( $q/A$ ) กับอุณหภูมิ ( $\Delta T$ )	41
- อัตราการถ่ายเทความร้อน ( $q$ ) กับภาชนะรูปทรงต่างกัน	44
บทที่ 4 ผลการศึกษาและวิจารณ์ผลการศึกษา	48
- กรณีที่ 1 กรณีศึกษาการหาค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่ ( $q/A$ ) ที่ระดับความหนาที่แตกต่างกันของฉนวนแต่ละชนิด	48
- กรณีที่ 2 กรณีศึกษาการหาค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่ ( $q/A$ ) ในช่วงอุณหภูมิระหว่างพื้นผิวที่แตกต่างกัน	50
- กรณีที่ 3 กรณีศึกษาประสิทธิภาพของฉนวนเมื่อนำมาใช้หุ้มกับภาชนะ รูปทรงแตกต่างกัน	52
- ข้อเสนอแนะที่ได้จากการศึกษา	53
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา	54
เอกสารอ้างอิง	55
ภาคผนวก	57
- ภาคผนวก ก แสดงกราฟการหาค่าการนำความร้อน ( $k$ ) ณ อุณหภูมิต่าง ๆ ของฉนวนชนิดต่าง ๆ	58
- ภาคผนวก ข ตารางแสดงปริมาณสัมพัทธ์ในการถ่ายเทความร้อนพร้อมด้วยหน่วย	68
- ภาคผนวก ค แสดงตารางเปรียบเทียบความยาว ระยะทาง พื้นที่และสูตร การเปลี่ยนมาตราเซลเซียสและฟาเรนไฮต์ เป็นมาตราเคลวิน	70
- ภาคผนวก ง แสดงคุณสมบัติต่าง ๆ ของฉนวน	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ค่าการนำความร้อน $k$ ของโลหะ อโลหะ ของแข็ง ของเหลว และแก๊สบางชนิด	5
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติโดยทั่วไปและมาตรฐาน ASTM	28
ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบข้อดี ข้อเสีย และข้อจำกัดของฉนวน	30
ตารางที่ 3.1 แสดงตัวอย่างตารางการคำนวณค่า $q/A$ เมื่อค่า $\Delta X$ เพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ	39
ตารางที่ 3.2 แสดงการคำนวณค่า $q/A$ เมื่อค่า $\Delta T$ เพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ	41
ตารางที่ 3.3 แสดงการคำนวณค่า $q$ เมื่อค่า $\Delta X$ เพิ่มขึ้น เมื่อนำฉนวนมาหุ้มภาชนะรูปทรงกระบอก	44
ตารางที่ 3.4 แสดงการคำนวณค่า $q$ เมื่อค่า $\Delta X$ เพิ่มขึ้น เมื่อนำฉนวนมาหุ้มภาชนะรูปทรง สี่เหลี่ยม	46
ตารางที่ 4.1 แสดงการคำนวณค่า $q$ เมื่อค่า $\Delta X$ เพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ	48
ตารางที่ 4.2 แสดงการคำนวณค่า $q/A$ เมื่อค่า $\Delta T$ เพิ่มขึ้น ที่อุณหภูมิต่ำ	50

## สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงเครื่องหมายของค่า $dT/dx$ สำหรับการนำความร้อน และแสดงทิศทางการไหลของความร้อน	4
รูปที่ 2.2 ค่าการนำความร้อน $k$ ของของเหลวและแก๊สที่แปรตามอุณหภูมิ	7
รูปที่ 2.3 ค่าการนำความร้อน $k$ ของโลหะบางชนิดที่แปรตามอุณหภูมิ	8
รูปที่ 2.4 การนำความร้อนผ่านผนังราบชั้นเดียว	10
รูปที่ 2.5 การถ่ายเทความร้อนของวัตถุทรงกระบอก	11
รูปที่ 2.6 การนำความร้อนผ่านผนังราบหลายชั้น	12
รูปที่ 2.7 การถ่ายเทความร้อนของวัตถุทรงกระบอกหลายชั้น	13
รูปที่ 2.8 แสดงการไหลของความร้อนผ่านมวลของฉนวน	14
รูปที่ 2.9 ผลกระทบของความหนาแน่นต่อสภาพนำความร้อนปรากฏ ของฉนวนน้ำหนักเบา	16
รูปที่ 2.10 แสดงตัวอย่างอุปกรณ์ที่ใช้ฉนวนกันความร้อนในกระบวนการผลิต	27
รูปที่ 3.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $q/A$ และ $\Delta X$ ของฉนวน ในกลุ่มช่วงอุณหภูมิต่ำ	40
รูปที่ 3.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $q/A$ และ $\Delta T$ ของฉนวน ในกลุ่มช่วงอุณหภูมิต่ำ	43
รูปที่ 3.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $q$ และ $\Delta X$ ของภาชนะรูปทรงกระบอก	46
รูปที่ 3.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $q$ และ $\Delta X$ ของภาชนะรูปทรงสี่เหลี่ยม	47
รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $q/A$ และค่า $\Delta X$ ของฉนวน ในกลุ่มช่วงอุณหภูมิต่ำ	49
รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $q/A$ และค่า $\Delta X$ ของฉนวน ในกลุ่มช่วงอุณหภูมิสูง	49
รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $q/A$ และ $\Delta T$ ที่ช่วงอุณหภูมิต่ำ	51
รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $q/A$ และ $\Delta T$ ที่ช่วงอุณหภูมิสูง	51

- รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $q$  และ  $\Delta X$   
เมื่อภาวะเป็นรูปทรงกระบอก 53
- รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $q$  และ  $\Delta X$   
เมื่อภาวะเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม 53



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1 บทนำ

### 1.1 บทนำ

ฉนวน หมายถึง วัสดุหรือผลิตภัณฑ์ที่ใช้เพื่อลดการถ่ายเทความร้อนผ่าน โครงสร้างจากที่หนึ่งไป อีกที่หนึ่ง โดยที่อุณหภูมิทั้งสองด้านจะต้องแตกต่างกัน ฉนวนที่ดีจะต้องลดกระแสการพาความร้อนหรือ ความเย็นได้ ดังนั้นควรจะมีค่าการนำความร้อนน้อยๆ ทำให้ไม่เกิดการสูญเสียความร้อนหรือความเย็น ได้มาก

ฉนวนที่นิยมใช้ในปัจจุบันแบ่งตามประเภทของอุตสาหกรรมได้ 4 ประเภท ได้แก่ อุตสาหกรรม อาหารแช่แข็ง, อุตสาหกรรมการขนส่ง, อาคารสิ่งก่อสร้าง และอุตสาหกรรมการผลิต ตัวอย่างเช่นการใช้ ฉนวนลดการสูญเสียความร้อนกับอุปกรณ์ต่างๆ ได้แก่ ท่อไอน้ำ ท่อส่งลมเย็นและลมร้อน ถึง ภาชนะ บรรจุและ เต่า เป็นต้น

ในอุตสาหกรรมอาหาร ไม่ว่าจะเป็นอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับความร้อนหรือความเย็นเช่น อุตสาหกรรมอาหารแช่แข็ง อุตสาหกรรมผลไม้กระป๋อง อุตสาหกรรมนมพาสเจอร์ไรส์ เป็นต้น จำเป็น ที่จะต้องมีการใช้ฉนวนกันความร้อนเพื่อช่วยในการลดการสูญเสียพลังงาน โดยเฉพาะพลังงาน ความร้อน

นอกจากนี้การใช้ฉนวนนอกจากจะช่วยลดการสูญเสียพลังงานให้น้อยลงแล้วยังช่วยลดในเรื่องของ ความเสียหายต่ออุปกรณ์ต่างๆ รวมถึงค่าใช้จ่ายของโรงงานให้น้อยลงอีกด้วย

ดังนั้นฉนวนจึงมีประโยชน์และมีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมต่างๆเป็นอย่างยิ่ง การศึกษาถึง บทบาทของฉนวนต่อการสูญเสียความร้อนของกระบวนการจึงเป็นประโยชน์สำหรับผู้ประกอบการ หรือบุคคลทั่วไปที่ต้องการตรวจสอบการสูญเสียความร้อนของฉนวนจากกระบวนการต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาถึงบทบาทของฉนวนความร้อนชนิดต่างๆ ต่อการสูญเสียความร้อนด้วยโปรแกรมเอกเซล
2. เพื่อเปรียบเทียบคุณภาพของฉนวนชนิดต่างๆ ในการป้องกันการสูญเสียความร้อนจากกระบวนการ
3. เพื่อใช้เป็นแนวทางสำหรับผู้ประกอบการที่ต้องการตรวจสอบการสูญเสียความร้อนของกระบวนการจากฉนวนชนิดต่างๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎี

#### 2.1 หลักการถ่ายเทความร้อน

##### 2.1.1 การถ่ายเทความร้อนโดยการนำ (Conduction Heat Transfer)

การถ่ายเทความร้อนโดยการนำหรือการนำความร้อน เป็นการถ่ายเทความร้อนเพียงวิธีเดียวที่เกิดขึ้นในวัตถุที่เป็นตัวกลางทึบแสงเมื่อมีความลาดชันของอุณหภูมิเกิดขึ้นในวัตถุก่อนนั้น อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำซึ่งใช้  $q_k$  เป็นสัญลักษณ์นี้จะเป็นสัดส่วนกับ  $dT/dx$  ซึ่งเป็นค่าความลาดชันของอุณหภูมิกวกับพื้นที่  $A$  ที่ความร้อนไหลผ่าน (รูปที่ 2.1 ก) ถ้าหากเขียนเป็นสมการแล้วจะได้รูปสมการเป็น

$$q_k \propto A \cdot dT/dx \quad (1)$$

เมื่อ  $q_k$  = อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำหรือการนำความร้อน

$A$  = พื้นที่ที่ความร้อนไหลผ่าน

$T$  = อุณหภูมิ

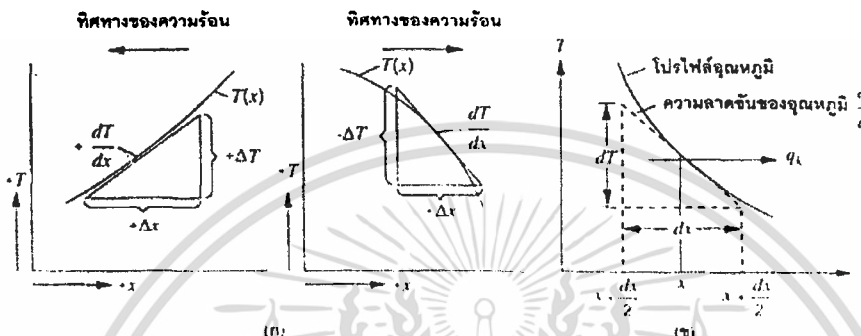
$X$  = ระยะทางการเคลื่อนที่ของความร้อน

สำหรับอัตราการถ่ายเทความร้อนจริงนั้นจะขึ้นอยู่กับค่าการนำความร้อน (thermal conductivity),  $k$  ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวกลางที่ความร้อนเคลื่อนที่ผ่าน ดังนั้นอัตราการนำความร้อนจึงมีค่าเป็น

$$q_k = -kA \cdot dT/dx \quad (2)$$

สมการ (2) นี้มีชื่อเรียกว่า กฎการนำความร้อนของฟูเรียร์ (Fourier's law of conduction) เครื่องหมายลบที่อยู่ทางด้านขวามือของสมการเป็นผลที่เนื่องมาจากกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งกำหนดไว้ว่า ความร้อนจะต้องไหลจากจุดที่มีอุณหภูมิสูงไปยังจุดที่มีอุณหภูมิต่ำ แต่เนื่องจากความ

ลาดชันของอุณหภูมิที่อยู่ในรูปที่ 2.1 ข นั้นมีเครื่องหมายเป็นลบ ทั้งนี้เพราะอุณหภูมิจะลดน้อยลงเมื่อระยะทาง  $x$  เพิ่มมากขึ้น ดังนั้น ถ้าหากต้องการให้อัตราการถ่ายเทความร้อนมีค่าเป็นบวกเมื่อไหลไปในทิศทางที่เป็นบวกแล้ว ก็จะต้องเดิมเครื่องหมายลบไว้ทางด้านขวาของสมการ (2)



รูปที่ 2.1 (ก) แสดงเครื่องหมายของค่า  $dT/dx$  สำหรับการนำความร้อน

(ข) แสดงทิศทางการไหลของความร้อน

สมการ (2) เป็นสมการที่ใช้สำหรับนิยามความหมายของค่าการนำความร้อน  $k$  สำหรับตัวแปรต่างๆ ที่อยู่ในระบบเอสไอ นั่นพื้นที่  $A$  จะมีหน่วยเป็น  $m^2$ , อัตราการถ่ายเทความร้อน  $q_x$  มีหน่วยเป็น Watt ส่วนค่าการนำความร้อน  $k$  จะมีหน่วยเป็น  $W/m.K$

วัตถุเป็นจำนวนมากที่มีค่าการนำความร้อน  $k$  ไม่คงที่ แต่จะแปรค่าไปตามอุณหภูมิ และมีหลายกรณีที่สามารถประเมินว่าค่าการนำความร้อน  $k$  นี้แปรค่าเป็นเส้นตรงกับอุณหภูมิ นั่นก็คือ

$$k = k_0(1 + \beta T) \quad (3)$$

เมื่อ  $k$  = ค่าการนำความร้อนที่อุณหภูมิ  $T$  ใดๆ

$k_0$  = ค่าการนำความร้อนของอุณหภูมิที่อ้างอิงถึง

$\beta$  = ค่าคงที่จากการทดลอง

$T$  = อุณหภูมิใดๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อแทนค่า  $k = k_0 (1 + \beta T)$  ลงในสมการ (2) แล้วทำการอินทิเกรต จะได้อัตราการถ่ายเทความร้อนเป็น

$$q_k = \frac{k_0 A [(T_1 - T_2) + \beta / 2 (T_1^2 - T_2^2)]}{L} \quad (4)$$

หรือ

$$q_k = \frac{k_m A (T_1 - T_2)}{L} \quad (5)$$

เมื่อ  $k_m =$  ค่าการนำความร้อนที่อุณหภูมิเฉลี่ย  $(T_1 + T_2)/2$

**ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity), k**

ค่าการนำความร้อนเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของวัสดุ ให้ความหมายด้วยสมการ (2) ค่าการนำความร้อนที่อุณหภูมิต่ำๆ ของแก๊สนั้นไม่สามารถหาได้จากการวิเคราะห์ ดังนั้น ข้อมูลเกี่ยวกับการนำความร้อนส่วนใหญ่ของวัสดุจึงได้มาจากการวัดและการทดสอบ โดยทั่วไปแล้วค่าการนำความร้อนของวัสดุจะแปรค่าไปตามอุณหภูมิ แต่การใช้งานส่วนใหญ่จะใช้ค่าการนำความร้อนคงที่ที่หาจากอุณหภูมิจเฉลี่ย ซึ่งก็ให้ผลเป็นที่น่าพอใจ ตารางที่ 2.1 เป็นตัวอย่างค่าการนำความร้อนของโลหะ อโลหะ ของเหลว และแก๊สบางชนิด

ตารางที่ 2.1 ค่าการนำความร้อน k ของโลหะ อโลหะ ของแข็ง ของเหลว และแก๊สบางชนิด

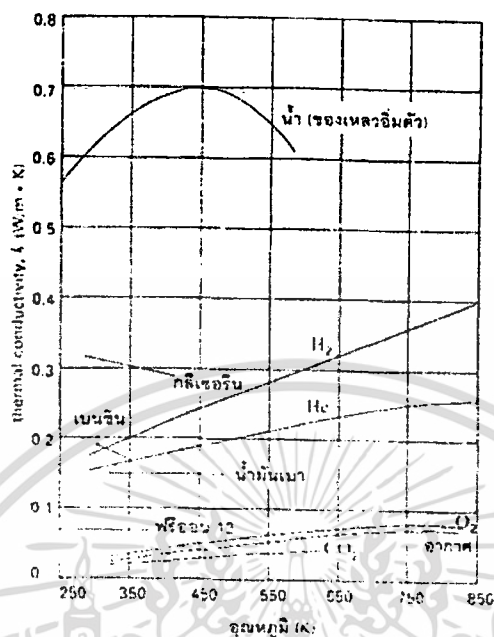
ชนิดของวัสดุ	ค่าการนำความร้อนที่ 300 K (W/m.K)
ทองแดง	386
อะลูมิเนียม	204
เหล็กคาร์บอน	54
แก้ว	0.75
พลาสติก	0.2-0.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

ชนิดของวัสดุ	ค่าการนำความร้อนที่ 300 K (W/m.K)
น้ำ	0.6
เอทิล ไกลคอล ( ethyl glycol )	0.2
น้ำมันเครื่อง	0.15
ฟร็อนเหลว	0.07
ไฮโดรเจน	0.18
อากาศ	0.026

กลไกการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนของแก๊สสามารถอธิบายได้จากทฤษฎีคิเนแมติกว่า เนื่องจากโมเลกุลของแก๊สมีการเคลื่อนที่อิสระ ไม่มีเส้นทางการเคลื่อนที่ที่แน่นอนตายตัว ดังนั้นเมื่อโมเลกุลเหล่านั้นเกิดการชนกันขึ้นก็จะมีการแลกเปลี่ยนพลังงานและ โมเมนตัมซึ่งกันและกันแต่เนื่องจากโมเลกุลที่มีอุณหภูมิสูงนั้นมีพลังงานจลน์มากกว่า ดังนั้นเมื่อโมเลกุลจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงเคลื่อนที่ไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าก็จะพาเอาพลังงานจลน์ไปในบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่านั้นด้วย และเมื่อโมเลกุลที่มีพลังงานจลน์สูงเกิดการชนกับ โมเลกุลที่มีพลังงานจลน์ต่ำกว่าก็จะมีการถ่ายเทพลังงานเกิดขึ้น กลไกการนำความร้อนทางกายภาพภายในของเหลวก็มีลักษณะเช่นเดียวกันแต่เนื่องจากโมเลกุลของของเหลวนั้นมีจำนวนหนาแน่นกว่า และสนามของแรงในของเหลวก็มีบทบาทต่อการถ่ายเทพลังงานมากกว่า ดังนั้นลักษณะการถ่ายเทความร้อนจึงมีความซับซ้อนกว่าของแก๊ส



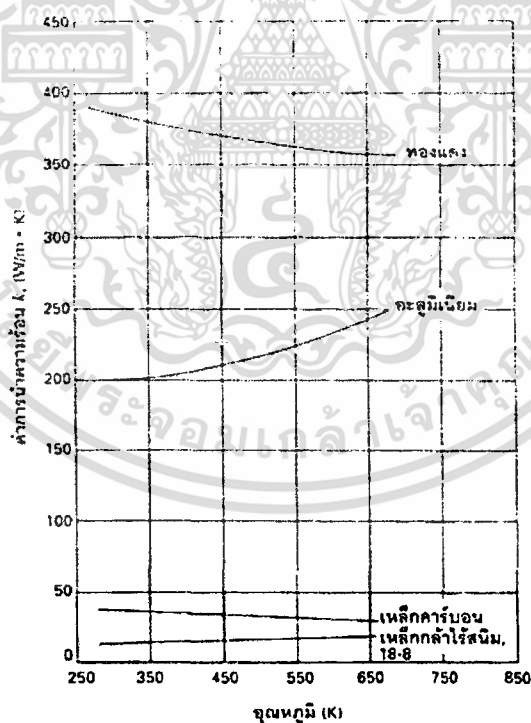
รูปที่ 2.2 ค่าการนำความร้อน  $k$  ของของเหลวและแก๊สที่แปรตามอุณหภูมิ

รูปที่ 2.2 เป็นกราฟที่แสดงให้เห็นค่าการนำความร้อน  $k$  ของของเหลวและแก๊สบางชนิดที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ จะเห็นได้ว่าค่าการนำความร้อน  $k$  ของแก๊สต่างๆ นั้นเกือบจะไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของความดันเลย ยกเว้นในช่วงที่อยู่ใกล้จุดวิกฤติเท่านั้น โดยการวิเคราะห์จากการแลกเปลี่ยนพลังงานจลน์อย่างง่าย ๆ ปรากฏว่าค่าการนำความร้อน  $k$  ของแก๊สที่เพิ่มขึ้นตามกำลังสองของอุณหภูมิสัมบูรณ์

นอกจากนี้ยังเห็นได้จากกราฟรูปที่ 2.2 อีกว่า ค่าการนำความร้อน  $k$  ของของเหลวเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ และจะเห็นได้ว่าค่าการนำความร้อน  $k$  ของของเหลวต่างๆ ยกเว้นค่าการนำความร้อน  $k$  ของน้ำจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ แต่การเปลี่ยนแปลงของค่าการนำความร้อนนั้นมีค่าน้อยมากจนสามารถถือว่ามีความคงที่ที่อุณหภูมิเฉลี่ยค่าหนึ่งของการใช้งานส่วนใหญ่ และก็ไม่ปรากฏว่าค่าการนำความร้อน  $k$  นั้นขึ้นอยู่กับขนาดของความดันเลย

ส่วนรูปที่ 2.3 นั้นเป็นค่าการนำความร้อน  $k$  ของโลหะและอโลหะที่เป็นของแข็งบางชนิด พลังงานความร้อนในวัตถุที่เป็นของแข็งนั้นจะถูกเคลื่อนย้ายโดยอิเล็กตรอนอิสระและการสั่นสะเทือนภายในโครงสร้าง โดยปกติแล้วการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระจะเป็นการเคลื่อนที่ที่มีบทบาทสำคัญ และ

เนื่องจากภายในตัวนำ ไฟฟ้าที่คืนนั้นจะมีจำนวนอิเล็กตรอนอิสระเป็นจำนวนมากที่เคลื่อนที่ไปมาอยู่ภายในโครงสร้างของมัน ดังนั้นตัวนำไฟฟ้าที่ดี (เช่น ทองแดงและอะลูมิเนียม) จึงเป็นตัวนำความร้อนที่ดีด้วย ในทำนองเดียวกันวัสดุที่เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี (เช่น แก้วและพลาสติก) ก็จะเป็นฉนวนความร้อนที่ดีด้วยเช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตามสมรรถนะในการป้องกันความร้อนของฉนวนจะดีหรือเลวเพียงไรนั้นจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการกักอากาศไว้ในรูพรุนของโครงสร้างของวัสดุเหล่านั้น การถ่ายเทความร้อนในวัสดุเหล่านั้นเกิดขึ้นได้หลายวิธีด้วยกัน เช่น การนำความร้อนผ่านโครงสร้างแบบเส้นใยและโครงสร้างที่เป็นรูพรุน การนำและการพาความร้อนผ่านอากาศที่ถูกกักไว้ในโพรงว่างและการแผ่รังสีความร้อนในระหว่างโครงสร้างที่ติดกันต่างๆ ซึ่งมีบทบาทสำคัญสำหรับในกรณีที่มีอุณหภูมิสูงๆ และในบริเวณที่เป็นสุญญากาศ ปัจจุบันได้มีการพัฒนาฉนวนกันความร้อนแบบพิเศษไว้สำหรับการใช้งานในที่ที่มีอุณหภูมิต่ำถึง 25 K ฉนวนพิเศษเหล่านี้ประกอบด้วยชั้นของวัสดุที่สามารถสะท้อนความร้อนได้ดีเป็นจำนวนหลายๆ ชั้น ฉนวนแต่ละชั้นจะถูกคั่นด้วยช่องว่างที่เป็นสุญญากาศเพื่อให้มีการนำและการพาความร้อนน้อยที่สุด ฉนวนพิเศษเหล่านี้จะให้ค่าการนำความร้อนต่ำถึง  $0.02 \text{ W/m}\cdot\text{K}$



รูปที่ 2.3 ค่าการนำความร้อน  $k$  ของโลหะบางชนิดที่แปรตามอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

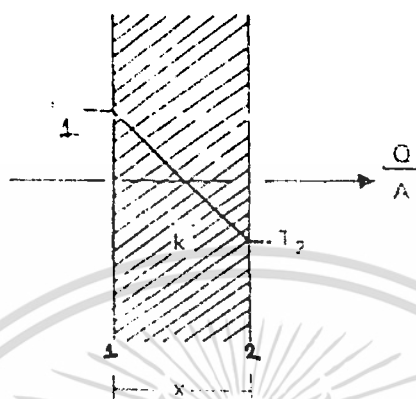
### 2.1.2 หลักการถ่ายเทความร้อนของฉนวนความร้อน

การถ่ายเทความร้อน โดยธรรมชาติจะเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง ไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ เช่นเดียวกับน้ำที่ไหลจากที่สูง ไปยังที่ต่ำ วิธีการถ่ายเทความร้อน แบ่งออกเป็น 3 วิธีหลักๆ คือ การนำความร้อน (Conduction) การพาความร้อน (Convection) และการแผ่รังสีความร้อน (Thermal radiation) การนำความร้อน คือปรากฏการณ์ที่พลังงานความร้อนถ่ายเทภายในวัตถุหนึ่งๆ หรือระหว่างวัตถุที่สัมผัสกัน ส่วนการพาความร้อนคือปรากฏการณ์ที่พลังงานความร้อนถ่ายเทพลังงานโดยอาศัยการเคลื่อนที่ของมวลสารของของไหล หรือก๊าซ ที่มีพลังงานบรรจุอยู่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง สำหรับการแผ่รังสีความร้อน คือ การถ่ายเทความร้อนโดยอาศัยสเปกตรัมการแผ่รังสี คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เปล่งออกมาจากพื้นผิวของวัตถุที่ถูกกระตุ้นทางความร้อน รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้ (ซึ่งรวมแสงที่ตามองเห็น คลื่นวิทยุและรังสีเอ็กซ์) จะกระจายออกทุกทิศทาง และเมื่อรังสีนี้ไปกระทบอีกวัตถุหนึ่ง บางส่วนอาจสะท้อนกลับ บางส่วนอาจส่งผ่านทะลุไป และบางส่วนอาจถูกดูดกลืนไว้ ถัรังสีที่ตกกระทบคือ รังสีความร้อน รังสีที่ถูกดูดกลืนไว้จะปรากฏเป็นความร้อนภายในวัตถุที่ดูดกลืนรังสีนั้นไว้

จากคำจำกัดความข้างต้น จะเห็นว่าการนำความร้อนและการพาความร้อนต้องมีตัวกลางในการส่งถ่ายเทพลังงาน ขณะที่การแผ่รังสีความร้อนไม่จำเป็นต้องมี และในความเป็นจริงหากมีสิ่งใดมากันกลางระหว่างวัตถุ 2 ชิ้นนั้นก็จะเป็นอุปสรรคต่อการแผ่รังสีของวัตถุทั้ง 2 นั้น ตัวอย่างการแผ่รังสีความร้อนที่พบเห็นได้ง่ายคือ การแผ่รังสีความร้อนของดวงอาทิตย์ที่นำความอบอุ่นมาสู่โลก โดยความร้อนของดวงอาทิตย์สามารถส่งผ่านมายังผิวโลกได้ โดยผ่านบริเวณที่ไม่มีอะไรเลยแม้แต่อากาศที่เรียกว่า ภาวะสุญญากาศ เป็นระยะทางถึง 150 ล้านกิโลเมตร (93 ล้าน ไมล์)

อย่างไรก็ตาม ในความเป็นจริง การถ่ายเทความร้อนมักไม่ปรากฏว่าเป็นวิธีใดวิธีหนึ่งโดยเฉพาะ แต่จะเป็นรูปแบบผสมของวิธีดังกล่าวข้างต้นรวมกัน เพียงแต่รูปแบบไหนจะสำคัญมากกว่าเป็นกรณีๆ ไปเท่านั้น ในที่นี้จะขอศึกษาถึงเฉพาะการนำความร้อน

### 2.1.3 การนำความร้อนผ่านผนังราบ (Conduction in Slab) (พงษ์เจตน์, 2534)



รูปที่ 2.4 การนำความร้อนผ่านผนังราบชั้นเดียว

ที่มา : พงษ์เจตน์, 2534

จากการ integrate สมการ

จะได้

$$q = -kA(dT/dX)$$

$$q = \frac{-kA(T_2 - T_1)}{\Delta X} \quad (6)$$

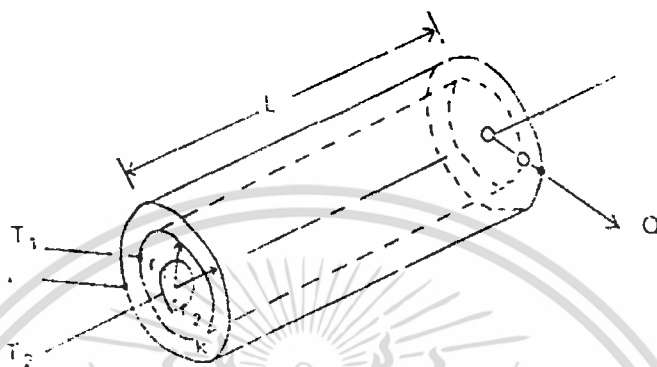
ถ้า  $T_1 > T_2$ , เมื่อ

$q$  = อัตราการถ่ายเทความร้อน (W)

$T_1$  และ  $T_2$  คืออุณหภูมิที่จุด 1 และ 2 ตามลำดับ

$\Delta X$  คือ ความหนาของผนัง

2.1.4 การนำความร้อนผ่านผนังวัสดุทรงกระบอก (Conduction in Cylinder) (พงษ์เจตน์, 2534)



รูปที่ 2.5 การถ่ายเทความร้อนของวัสดุทรงกระบอก  
ที่มา : พงษ์เจตน์, 2534

จากสมการ  $q = -kA(dT/dr), A = 2\pi rL$  (7)

$\therefore q = -k2\pi rL(dT/dr)$  (8)

จากการ integrate สมการ  $q = -k2\pi rL(dT/dr)$

จะได้  $q = \frac{(T_1 - T_2)}{\ln(r_2/r_1) / 2\pi Lk}$  (9)

แต่  $\ln(r_2/r_1) / 2\pi Lk = R_{th}$

จะได้ว่า  $q = \frac{(T_1 - T_2)}{R_{th}}$  (10)

- เมื่อ
- $T_1 =$  อุณหภูมิที่ผิวด้านในวัสดุ
  - $T_2 =$  อุณหภูมิที่ผิวด้านนอกวัสดุ
  - $r_1 =$  รัศมีภายในวัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$r_2$  = รัศมีภายนอกวัตถุ

$L$  = ความยาวของวัตถุ

$R_{th}$  = ความต้านทานความร้อน

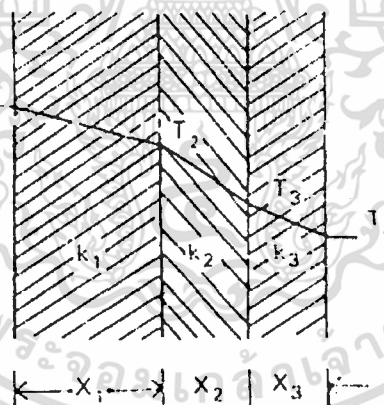
หรือ 
$$q_r = \frac{kA_m (T_1 - T_2)}{(r_2 - r_1)} \quad (11)$$

เมื่อ 
$$A_m = \frac{(r_2 - r_1) 2\pi L}{\ln(r_2/r_1)} \quad (12)$$

โดยที่  $q_r$  = การนำความร้อนในแนวรัศมีผ่านผนังวัตถุทรงกระบอก

$A_m$  = ค่าเฉลี่ยของพื้นที่รูปทรงกระบอก

### 2.1.5 การนำความร้อนผ่านผนังราบหลายชั้น (Conduction in multilayer slab) (พงษ์เจตน์, 2534)



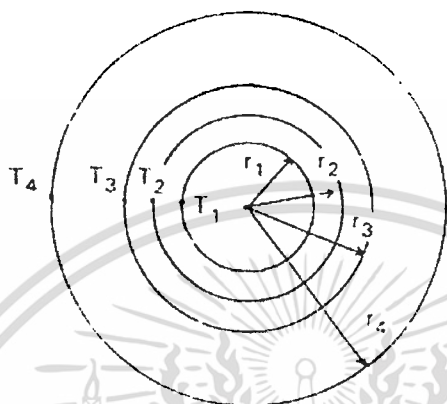
รูปที่ 2.6 การนำความร้อนผ่านผนังราบหลายชั้น

ที่มา: พงษ์เจตน์, 2534

จะได้ว่า 
$$q = \frac{T_1 - T_4}{\frac{X_1}{k_1 A} + \frac{X_2}{k_2 A} + \frac{X_3}{k_3 A}} \quad (13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.6 การนำความร้อนผ่านผนังวัตถุทรงกระบอกหลายชั้น (Conduction in multilayer cylinder)  
(พงษ์เจตน์, 2534)



รูปที่ 2.7 การถ่ายเทความร้อนของวัตถุทรงกระบอกหลายชั้น  
ที่มา : พงษ์เจตน์, 2534

จะได้ว่า

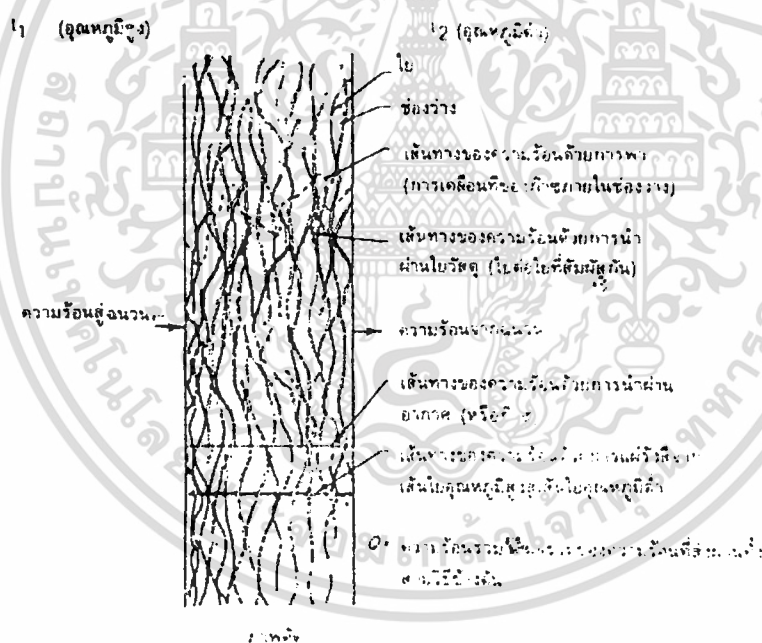
$$q = \frac{T_1 - T_4}{\frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi Lk_1} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi Lk_2} + \frac{\ln(r_4/r_3)}{2\pi Lk_3}} \quad (14)$$

## 2.2 คุณสมบัติของฉนวน

จุดมุ่งหมายในการติดตั้งฉนวนความร้อน คือต้องการเก็บรักษาพลังงานไม่ให้มีการถ่ายเทออกไปหรือเข้ามาภายในบริเวณที่ต้องการ นั่นคือฉนวนความร้อนต้องยับยั้งหรือขัดขวางการถ่ายเทความร้อนให้เกิดขึ้นน้อยที่สุด อย่างไรก็ตามเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนสามารถเกิดขึ้นทั้งสามรูปแบบ ถึงแม้ว่าโดยปกติมักจะพิจารณาว่าฉนวนโดยส่วนใหญ่มีลักษณะรูปร่างเป็นของแข็ง และคาดว่าฉนวนจะถ่ายเทความร้อนด้วยการนำความร้อน และดังนั้นกำหนดคุณสมบัติของฉนวนด้วยสภาพนำความร้อน ซึ่งในความเป็นจริง กลไกการถ่ายเทความร้อนในฉนวนไม่ได้เกิดขึ้นเฉพาะการนำความร้อนเท่านั้น การพา

ความร้อนและการแผ่รังสีก็เกิดขึ้นด้วย ฉะนั้นจึงมักใช้คำว่า “สภาพนำความร้อนปรากฏ” (Apparent thermal conductivity) แทน

พิจารณากลไกการถ่ายเทความร้อนภายในฉนวนตามรูปที่ 2.8 จากรูปทิศทางด้านซ้ายมือของฉนวนมีอุณหภูมิสูงกว่าทางด้านขวามือ ฉะนั้นการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นจะมีความร้อนไหลจากผิวทางซ้ายมือ ไปทางขวา ซึ่งความร้อนที่ไหลผ่านฉนวนที่บรรจุเต็มไปด้วยช่องอากาศหรือก๊าซจากการพอร์มตัวขึ้นตามสภาพเส้นใย หรือเซลล์ของวัสดุฉนวนจะมีอัตราการไหลที่ช้าลง โดยช่องอากาศหรือก๊าซเหล่านี้หาก มีขนาดที่เล็กอย่างพอเหมาะจะทำให้การถ่ายเทความร้อนด้วยการพาจากด้านหนึ่งของเซลล์สู่อีกด้านหนึ่งมีปริมาณน้อยลง และทำให้เส้นทางการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำผ่านส่วนที่เป็นของแข็งต้องเป็นเส้นทางที่ยาวและคดเคี้ยวเพื่อจำกัดการนำความร้อน และวัสดุส่วนที่เป็นของแข็งควรต้องเป็นวัสดุที่บอบบางเพียงพอดียว (หรือมีผิวสะท้อนรังสี) เพื่อลดการถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสี

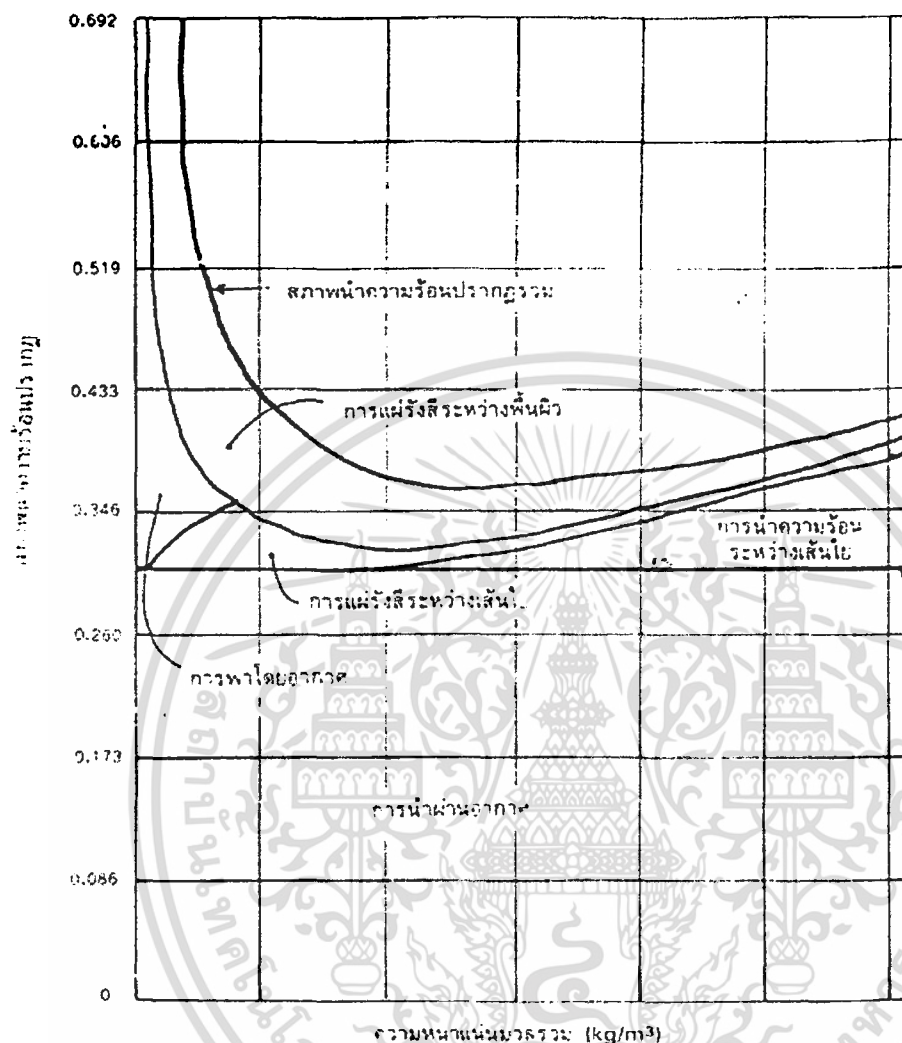


รูปที่ 2.8 แสดงการไหลของความร้อนผ่านมวลของฉนวน

รูปที่ 2.9 แสดงตัวอย่างของการถ่ายเทความร้อนผ่านวัสดุฉนวนที่เป็นเส้นใย มีความหนา 25.4 mm. ในรูปแสดงให้เห็นถึงผลของสภาพนำความร้อนปรากฏที่เปลี่ยนแปลงตามความหนาแน่นของฉนวน จะเห็นว่าในสภาพที่ไม่มีฉนวนหุ้ม (ที่จุดศูนย์) สภาพนำความร้อนปรากฏรวม ตามแนวแกนตั้งจะมีค่ามาก

และเมื่อหุ้มฉนวนที่มีความหนาแน่นน้อยๆ สภาพนำความร้อนปรากฏรวมก็ยังคงมีค่ามากอยู่ จนกระทั่งถึงจุดที่ความหนาแน่นค่าหนึ่ง ประมาณ  $7 \text{ kg/m}^3$  สภาพนำความร้อนปรากฏจะเริ่มลดลง สาเหตุหลักที่สภาพนำความร้อนปรากฏลดลงก็เนื่องจากการพาความร้อนของอากาศภายในฉนวนลดลงจากการซึดกันเข้ามาของเส้นใยหรือเซลล์ของฉนวน ถึงแม้ว่าจะมีบางส่วนถูกแทนที่ด้วยการแผ่รังสีความร้อนระหว่างเส้นใยแต่ละเส้นภายในตัวฉนวนเอง สำหรับการแผ่รังสีระหว่างเส้นใยคู่เส้นใยฉนวน เกิดขึ้นเนื่องจากเส้นใยแต่ละเส้นอันก่อนหน้าตามทิศทางการไหลของความร้อนจะมีอุณหภูมิสูงกว่าเส้นใยถัดมาเล็กน้อย แต่เมื่อเส้นใยซึดกันเข้ามา (ความหนาแน่นฉนวนมากขึ้น) การแผ่รังสีในลักษณะนี้จะลดลงจากผลที่อุณหภูมิของเส้นใยที่ติดกันมีค่าใกล้เคียงกัน พิจารณาการพาความร้อนของอากาศจะเห็นว่าที่ความหนาแน่นของฉนวนประมาณ  $12.8 \text{ kg/m}^3$  การพาความร้อนจะไม่เกิดขึ้น เมื่อเส้นใยของฉนวนซึดกันจนอากาศภายในฉนวนหยุดการเคลื่อนที่ คงเหลือไว้แต่การนำความร้อนของอากาศในฉนวนเท่านั้น

เมื่อความหนาแน่นของฉนวนยังคงเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ การแผ่รังสีระหว่างเส้นใยคู่เส้นใย และการแผ่รังสีระหว่างพื้นผิวคู่พื้นผิวลดลง จึงทำให้สภาพนำความร้อนปรากฏลดลงด้วย จนกระทั่งเมื่อเส้นใยของฉนวนต่อเชื่อมกัน การนำความร้อนภายในฉนวนเริ่มปรากฏ และเมื่อถึงจุดที่การแผ่รังสีที่ลดลงมีค่าน้อยกว่าการนำความร้อนที่เพิ่มขึ้น จากผลของเส้นใยที่ซึดกันมากขึ้น สภาพนำความร้อนปรากฏจึงเริ่มเพิ่มขึ้น ฉะนั้นก่อนที่การนำความร้อนระหว่างเส้นใยจะเพิ่มความสำคัญขึ้น สภาพนำความร้อนปรากฏรวมจะมีค่าน้อยที่สุด ลักษณะการถ่ายเทความร้อนดังกล่าวนี้เป็นลักษณะที่เกิดขึ้นกับวัสดุฉนวนโดยมากที่เรียกว่าฉนวนแบบมวล (Mass insulation) ซึ่งฉนวนที่สมควรเป็นฉนวนที่มีสภาพนำความร้อนปรากฏรวมมีค่าน้อยที่สุด



รูปที่ 2.9 ผลกระทบของความหนาแน่นต่อสภาพน้ำความร้อนปรากฏของฉนวนน้ำหนักเบา (อุณหภูมิด้านร้อน 38 °C ด้านเย็น 10 °C เป็นฉนวนใยแก้วหนา 2.54 cm.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 ชนิดพื้นฐานของฉนวนความร้อน

คุณสมบัติของฉนวนความร้อนหาได้จากองค์ประกอบของฉนวนเป็นหลัก ซึ่งจากองค์ประกอบของฉนวนสามารถแบ่งฉนวนความร้อนออกได้เป็น 6 ชนิดพื้นฐาน ดังนี้

1. ชนิดชั้นอากาศหรือฟิล์มอากาศ
2. ชนิดวัสดุแบบเซลล์ (Cellular material)
3. ชนิดวัสดุแบบเส้นใย (Fibrous material)
4. ชนิดวัสดุแบบเกล็ด (Flake material)
5. ชนิดวัสดุแบบเกรนูลาร์ (Granular material)
6. ชนิดแผ่นบางผิวสะท้อนรังสี (Reflective foils)

อย่างไรก็ตาม ในการประยุกต์ใช้งานจะเป็นการผสมผสานกันของฉนวนดังกล่าวนี้เข้าด้วยกัน

ฉนวนชั้นอากาศหรือฟิล์มอากาศ อาจถูกประกอบเป็นพื้นผิวเดียวอย่างง่าย หรืออาจเป็นพื้นผิวหลายๆ ชั้นซึ่งมีอากาศอยู่ระหว่างชั้นของพื้นผิว ความต้านทานความร้อนจะเกิดจากชั้นของพื้นผิวเอง และชั้นของอากาศ ในลักษณะนำความร้อนหรือพาความร้อนคร่อมระหว่างชั้นอากาศนี้

ฉนวนแบบเซลล์ จะประกอบไปด้วยเซลล์เล็กๆ ที่ผลึกติดกับเซลล์อันอื่นๆ ฉนวนแบบเซลล์ผลิตขึ้นจากแก้ว พลาสติก และยาง ตัวอย่างของฉนวนชนิดนี้ เช่น เซลลูลาร์กลาส (Cellular glass)

โฟมอิเลคโตรเมติกแบบขยายตัว โฟมโพลีสไตรีน โฟมโพลีไอโซไซยานูเรต และ โพลียูรีเทน และ โฟมยูเรียฟอร์มาลดีไฮด์

ฉนวนแบบเส้นใย ประกอบด้วยเส้นใยที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กๆ จำนวนมาก เส้นใยเหล่านี้อาจทำมาจากวัสดุอินทรีย์ อย่างเช่น เส้นผม ใยพืชชนิดต่างๆ หรืออาจทำมาจากวัสดุสังเคราะห์ เช่น ใยแก้ว ใยหิน ใยซีโลส ใยอะลูมินาซิลิกา ใยแร่ใยหิน (Asbestos) หรือใยคาร์บอน

ฉนวนแบบเกล็ด ประกอบด้วยอนุภาคขนาดเล็ก อนุภาคหรือเกล็ดเหล่านี้จะถูกเทเข้าไปในช่องอากาศ หรือทำให้เกาะตัวเข้าด้วยกัน เพื่อทำเป็นรูปทรงฉนวนที่แข็ง ฉนวนแบบเกล็ดที่มีรูปทรงแข็งสามารถใช้งานเป็นฉนวนท่อ หรือการใช้งานด้านอื่นๆ ในลักษณะเป็นบล็อกหรือแผ่นอัด ฉนวนแบบเกล็ดที่รู้จักกันทั่วไป คือ เพอร์โลต์ และเวอร์มิคูไลต์

ฉนวนแบบเกรนูลาร์ ประกอบด้วยอนุภาคขนาดเล็กซึ่งเป็นโพรงหรือกลวง ซึ่งช่องกลวงเหล่านี้สามารถถ่ายเทอากาศระหว่างกันและกันได้ จึงทำให้แตกต่างจากฉนวนแบบเซลล์ วัสดุที่ใช้ทำฉนวน

ชนิดนี้อาจเป็น แมกนีเซียม แคลเซียมซิลิเกต ดินไดอะตอม (Diatomaceous earth) หรือ ไม้ก๊อกพืช (Vegetable cork) วัสดุ 3 ชนิดแรกส่วนใหญ่จะใช้เป็นฉนวนในระบบท่อทางด้านอุตสาหกรรม ส่วนไม้ก๊อกจะใช้งานกับการทำความเย็นที่อุณหภูมิต่ำ

ฉนวนแผ่นบางผิวสะท้อนรังสี ประกอบด้วยแผ่นบางขนานที่มีสภาพการสะท้อนรังสีความร้อนสูงหรือสภาพการแผ่รังสีต่ำ โดยแผ่นบางเหล่านี้จะเป็นช่องเพื่อสะท้อนรังสีความร้อนกลับ เนื่องจากแต่ละแผ่นที่แยกจากกันจะทำให้การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากผลของการนำความร้อน และการพาความร้อนลดลง การประยุกต์ใช้ฉนวนแผ่นบางส่วนใหญ่จะใช้เป็นระบบมากกว่าใช้วัสดุชนิดเดียว โดยจะใช้งานกับวัตถุที่อุณหภูมิสูง เมื่อการถ่ายเทความร้อนชนิดแผ่รังสีความร้อน มีปริมาณมากกว่าการถ่ายเทความร้อนอีก 2 แบบคือ การนำและการพา

เนื่องจากฉนวนแผ่นบางมักจะถูกใช้ผิดที่ หรือใช้งานไม่เหมาะสม จึงทำให้ผลที่ได้ในระบบฉนวนของอาคารจำกัดลงมาก การใช้งานที่จะก่อให้เกิดประสิทธิผลต้องใช้แผ่นบาง ผิวสะท้อนรังสีร่วมกับช่องอากาศที่มีสถานะในลักษณะอากาศอยู่นิ่ง ไม่เคลื่อนที่

การใช้งานด้านอื่นๆ ของแผ่นบางผิวสะท้อนรังสี พบในสถานะอุณหภูมิต่ำมาก (Cryogenic) ซึ่งมักจะเรียกฉนวนที่ใช้งานลักษณะนี้ว่าเป็นฉนวนเยือกแข็ง หรือซูเปอร์ฉนวน

### คุณสมบัติของฉนวนแบบมวลบางชนิดที่เลือกมาศึกษา

1. ฉนวนแคลเซียมซิลิเกต (Calcium Silicate) : ใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงสุดประมาณ  $650^{\circ}\text{C}$  ไม่เป็นวัสดุเป็นพิษ และไม่ปรากฏว่าสมรรถนะทางความร้อนจะลดลงตามอายุ แต่ผลของความชื้นที่ดูดซึมจะทำให้สมรรถนะทางความร้อนลดลงบ้าง นอกจากนี้แคลเซียมซิลิเกตนับว่าเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติด้านทานไฟไหม้ได้เป็นเยี่ยม ทั้งยังไม่ติดไฟอีกด้วย

สำหรับคุณสมบัติเชิงความร้อน สภาพนำความร้อนปรากฏของฉนวนแคลเซียมซิลิเกตที่มีความหนาแน่น  $208.26\text{ kg/m}^3$  ที่อุณหภูมิห้อง คือ  $0.05\text{ W/m.K}$  ซึ่งจะได้สภาพด้านทานความร้อนเท่ากับ  $19.84\text{ m.K/W}$

จากคุณสมบัติทางกายภาพและความร้อนดังกล่าวจึงทำให้แคลเซียมซิลิเกตเป็นที่นิยมนำไปใช้ในการหุ้มฉนวนท่อและภาชนะ ในกระบวนการทางอุตสาหกรรมที่มีอุณหภูมิสูง และจำเป็นต้องใช้วัสดุที่มีความทนแรงอัดสูง สำหรับคุณสมบัติโดยทั่วไปของแคลเซียมซิลิเกตแสดงในภาคผนวก ง ตารางที่ 1

2. ฉนวนเซลลูลาร์กลาส (Cellular Glass) : ฉนวนชนิดนี้มีสภาพนำความร้อนปรากฏเท่ากับ 0.055 W/m.K สำหรับฉนวนที่มีความหนาแน่น 136.17 kg/m<sup>3</sup> ซึ่งจะได้สภาพต้านทานความร้อนเท่ากับ 18.18 m.K/W

เซลลูลาร์กลาสสามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงสุดประมาณ 650 °C นับเป็นฉนวนที่ไม่เป็นพิษ และสมรรถนะทางความร้อนไม่ลดลงตามสภาพแวดล้อม หรือขนาดไม่เปลี่ยนแปลงตามอายุ อย่างไรก็ตาม วัฏจักรที่มีการแข็งตัว และละลายของน้ำที่คงอยู่ระหว่างรอยต่อรอยแตกของฉนวนซ้ำๆ กันจะทำให้เกิดการแตกหักของฉนวนได้

การใช้งานฉนวนชนิดนี้ จะใช้งานได้ทั้งภายนอกและในอาคาร นอกจากนี้ยังสามารถติดตั้งใต้ดินได้ด้วย ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมกับการใช้งานคือ -180 ถึง 650 °C แต่การใช้งานที่อุณหภูมิต่ำกว่า -180 °C ก็ยังสามารถทำได้ ถ้าได้รับการออกแบบเป็นพิเศษ สำหรับการใช้งานกับอาคารอาจเหนือคาน้ำฟ้าอาคาร พื้น และวัสดุด้านข้างของผนัง การใช้งานในอุตสาหกรรมสามารถใช้กับอุณหภูมิที่ต่ำมาก และใช้เป็นฉนวนหุ้มท่อได้

3. ฉนวนใยเซลลูโลส (Cellulosic Fiber) : ผลิตขึ้นมาจากการนำ ไม้หรือกระดาษที่ใช้แล้วนำกลับมาใช้ใหม่ หรือรีไซเคิล (Recycle) ด้วยการแปรรูปและดัดให้กระจายออกทำการย่อยละเอียดจนเป็นปุย จากนั้นทำการประสานเข้าด้วยกันด้วยบอแรกซ์ บอแรกซ์ 5 โมล หรือส่วนผสมของวัสดุทั้ง 2 นี้ ซึ่งจะช่วยให้มีสภาพต้านทานการลุกไหม้ การดูดซับความชื้น และยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราในบางส่วนด้วย

สำหรับการประยุกต์ใช้งานฉนวนใยเซลลูโลส จะใช้งานในลักษณะวัสดุแบบรูสฟิลล์ในโพรงผนัง และห้องเพดานของอาคารที่พักอาศัย แต่อาจจะใช้ในลักษณะแบบเส้นใยอัดเป็นแผ่น (Batts) และแบบคลุม (Blankets) หรือ แบบโฟมฉีดเข้าไปในช่อง ซึ่งลักษณะนี้จะใช้สำหรับเป็นฉนวนใต้คาน้ำฟ้า หลังคา หรือ ถังใต้ดินขนาดใหญ่

ในลักษณะวัสดุแบบรูสฟิลล์ ใยเซลลูโลส มีสภาพนำความร้อนปรากฏอยู่ระหว่างช่วง 0.04-0.045 W/m.K ซึ่งสมนัยกับสภาพต้านทานความร้อนช่วง 22.2-25 m.K/W ที่ความหนาแน่นฉนวนเท่ากับ 41.65-48.06 kg/m<sup>3</sup>

เมื่อนำใยเซลลูโลสมาทดสอบตาม ASTM C739-73 ฉนวนควรจะมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นจากการดูดซึมน้ำไม่เกิน 15 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร อย่างไรก็ตามสำหรับฉนวนใยเซลลูโลสแบบรูสฟิลล์ มีวิธีการซึมผ่านของไอน้ำสูง และจะดูดซึมน้ำถึง 98 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ผลที่ตามมาคือ ทำให้มีปัญหาในการ

ใช้ฉนวนชนิดนี้ในสิ่งแวดล้อมที่มีความชื้นสูง สำหรับคุณสมบัติของใยเซลลูโลสสรุปไว้ในตารางที่ 2 ในภาคผนวก

4. **โฟมชนิดสารยืดหยุ่น (Elastomeric Foam)** : มีอีกชื่อหนึ่งคือ โฟมยางแบบขยาย (Expanded rubber foam) เป็นฉนวนที่ยืดหยุ่นได้ด้วยการพ่นให้ขยายตัวในแบบ (Mold) ฉนวนชนิดนี้มีสภาพการนำความร้อนปรากฏอยู่ระหว่าง  $0.037-0.039 \text{ W/m.K}$  ซึ่งสมนัยกับสภาพต้านทานความร้อนระหว่าง  $27.03-25.72 \text{ m.K/W}$  ที่ความหนาแน่นประมาณ  $64.0 \text{ kg/m}^3$

โฟมชนิดสารยืดหยุ่นเป็นฉนวนที่มีความจุของเซลล์ที่ชิดกันมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ฉะนั้นค่าแทรกซึมความชื้นของไอน้ำจึงต่ำมาก (ระหว่าง  $0.18-0.25 \text{ perm-cm}$ ) และเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำอยู่ระหว่าง 3-6 เปอร์เซ็นต์ สำหรับอุณหภูมิที่เหมาะสมกับการใช้งานจะอยู่ระหว่าง  $-40^\circ\text{C}$  ถึงสูงสุดที่  $104^\circ\text{C}$  อย่างไรก็ตามหากใช้งานที่อุณหภูมิสูงๆ เป็นเวลานานจะเกิดการหดตัว เช่น ใช้งานที่อุณหภูมิ  $93^\circ\text{C}$  เป็นเวลานาน 7 วัน โฟมชนิดสารยืดหยุ่นจะหดตัวลงประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ ฉะนั้นจึงเหมาะกับการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำเป็นส่วนใหญ่

5. **ฉนวนใยแก้ว (Glass Fiber)** : ผลิตขึ้นมาจากการปั่นก้อนแก้วแข็งด้วยการปั่นจนเป็นเส้นเกลียวบาง ฉนวนชนิดนี้ที่ทำออกมามีทั้งลักษณะแบบลูสฟิลล์แบบแผ่นอัด (Boards) และเส้นใยอัดเป็นแผ่นหรือแบบคลุมหรือห่มการประยุกต์ใช้งานฉนวนใยแก้วโดยทั่วไปจะใช้งานเป็นฉนวนหลังคาอาคารผนัง ฝ้าใต้ถุนตึก และกับระบบท่อ นอกจากนี้ยังใช้ในงานด้านอุตสาหกรรมด้วย เช่น เป็นฉนวนหุ้มถังเก็บระบบเชิงกล และท่อส่งลม เป็นต้น สำหรับคุณสมบัติโดยสรุปดังแสดงในตารางที่ 4 ในภาคผนวก

6. **ฉนวนใยแร่ (Mineral Fiber)** : ฉนวนใยแร่หรืออาจเรียกว่าหินแร่ (Mineral rock) หรือฝอยโลหะ (Slag wool) ถูกผลิตขึ้นมาในลักษณะคล้ายคลึงกับฉนวนใยแก้ว โดยทั่วไปวัสดุที่นำมาใช้ในการผลิตใยแร่ คือ ใยโลหะจากการผลิตเหล็กกล้า ทองแดง หรือตะกั่ว

ฉนวนใยแร่จะมีรูปแบบคล้ายคลึงกับฉนวนใยแก้วทั้งการใช้งานก็มีลักษณะที่เหมือนกันทั้งในอาคารบ้านเรือน อาคารพาณิชย์ และอาคารอุตสาหกรรม ใยแร่ผลิตขึ้นมาหลายรูปแบบ ในรูปของแผ่นอัด (Board) จะมีสภาพต้านทานความร้อนประมาณ  $24.8 \text{ m.K/W}$  ที่ความหนาแน่นในช่วง  $144.2$  ถึง  $176.2 \text{ kg/m}^3$  ใยแร่แบบแผ่นอัดจะใช้เป็นฉนวนสำหรับมุงหลังคาในลักษณะวัสดุหุ้มอาคาร และการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอื่นๆ คุณสมบัติโดยสรุปของใยแร่แสดงในตารางที่ 5 ในภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. **ฉนวนเพอร์ไลต์ (Perlite) หรือซิลิกาโฟม (Expanded Silica) :** ฉนวนเพอร์ไลต์แบบลูสฟิลล์มาจากเม็ดแก้วภูเขาไฟแบบทราย ที่ถูกขยายตัวขึ้นจากเดิมในราว 4 ถึง 10 เท่า ทำให้มีโครงสร้างเป็นฟองอากาศเล็กอยู่ภายใน เพอร์ไลต์ที่ผลิตขึ้นมาจะมีความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 32 ถึง 176 kg/m<sup>3</sup> แบบลูสฟิลล์มีสภาพนำความร้อนที่ขึ้นอยู่กับความหนาแน่น ที่ความหนาแน่น 32 kg/m<sup>3</sup> จะมีสภาพนำความร้อนเท่ากับ 0.04 W/m.K และเมื่อความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเป็น 176 kg/m<sup>3</sup> สภาพนำความร้อนจะเพิ่มขึ้นด้วยเป็น 0.058 W/m.K สำหรับเพอร์ไลต์แผ่นอัดจะมีสภาพนำความร้อนประมาณ 0.052 ถึง 0.055 W/m.K ที่ความหนาแน่นประมาณ 160 kg/m<sup>3</sup>

เพอร์ไลต์ถูกใช้งานครั้งแรกในอาคารพาณิชย์และอุตสาหกรรม โดยใช้งานในลักษณะวัสดุแผ่นอัดเป็นฉนวนของหลังคา การใช้งานต่อมานิยมใช้เป็นคอนกรีตฉนวนน้ำหนักเบามากกว่า คอนกรีตฉนวนเพอร์ไลต์ใช้ทั้งแบบหล่อสำเร็จและหล่อในขณะที่ใช้งาน โดยใช้งานเป็นดาดฟ้า หลังคา แผ่นพื้น และระบบผนังอาคาร สำหรับเพอร์ไลต์โฟมที่มีความหนาแน่นต่ำ จะใช้ในลักษณะเป็นฉนวนแบบลูสฟิลล์สำหรับคุณสมบัติโดยสรุปของเพอร์ไลต์ แสดงดังตารางที่ 6 ในภาคผนวก

8. **ฉนวนฟีนอลิกโฟม (Phenolic Foam) :** เป็นฉนวนที่ถูกล่อแข็ง ทำจากวัสดุฟีนอลิกที่เป็นกลางทางเคมี กระบวนการในการผลิตประกอบด้วยการนำเรซินเหลวที่เย็นผสมในแม่พิมพ์ปิด จากนั้นทำให้เป็นสุญญากาศ สุญญากาศนี้จะทำให้สารผสมคงจุดเดือดและเดือดที่อุณหภูมิต่ำ โดยสารผสมคงจุดเดือด (Azetrope) นี้จะใช้เป็นตัวเป่าให้เกิดเป็น โฟมขึ้นมา จากนั้นจะให้ความร้อนกับแม่พิมพ์เพื่อหัวที่จะอัดรีดปฏิกิริยาเชิงความร้อนด้านนอกให้สมบูรณ์

ฟีนอลิกโฟมจะใช้งานได้ดีกับอุณหภูมิสูงสุดในราว 135 °C โดยเป็นฉนวนที่มีสภาพซึมเข้าไปได้ของไอน้ำและการดูดซึมน้ำต่ำมาก นอกจากนี้ยังเป็นวัสดุที่สมรรถนะทางความร้อน ไม่เปลี่ยนแปลงตามอายุ และอุณหภูมิที่เป็นวัฏจักร ทั้งมีค่าความเป็นกรด-ด่างที่เป็นกลางคือ pH อยู่ระหว่าง 6.5 ถึง 7.5 แต่ฟีนอลิกโฟมเป็นวัสดุที่ลุกไหม้ได้ โดยมีระดับการกระจายของเปลวไฟเท่ากับ 25 หรือน้อยกว่า และระดับการเกิดควันเท่ากับ 50 หรือน้อยกว่า

การใช้งานฟีนอลิกโฟมใช้สำหรับควบคุมการหยดของน้ำที่ควบแน่นบนระบบท่อน้ำเย็น และเส้นทางน้ำเย็นในระบบสุญญากาศ และลดทอนการถ่ายเทความร้อนสำหรับท่อทำน้ำร้อนและเส้นทางไอน้ำความดันต่ำที่มีอุณหภูมิไม่เกิน 135 °C สำหรับคุณสมบัติของฟีนอลิกโฟมสรุปไว้ในตารางที่ 7 ในภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ห้องสมุดคณะเทคโนโลยีการเกษตร  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าฯ ลาดกระบัง

9. ฉนวนโพลีสไตรีนโฟม (Polystyrene Foam) : ผลิตขึ้นมา 2 รูปแบบ คือ แบบโฟมอัดรีด (Extruded) และแบบโฟมหล่อ (Molded) โฟมที่ผลิตด้วยกระบวนการอัดรีด จะมีความหนาแน่นบรรจุมากกว่ามีรูปร่างที่คงที่มากกว่าและสามารถทนแรงกดและแรงดึงได้มากกว่าโฟมที่ผลิตด้วยกระบวนการหล่อแบบ โพลีสไตรีนโฟมแบบแผ่นอัด และแบบหุ้มใช้งานทั้งในอาคารที่พัก ทางพาณิชย์ และอุตสาหกรรม เมื่อใช้เป็นแผ่นหุ้มภายนอก อาจใช้หุ้มภายนอกอาคารทั้งหมด ซึ่งจะช่วยลดการสูญเสียความร้อนผ่านโครงสร้างอาคารได้มาก โฟมพลาสติกแบบหุ้มจะช่วยเป็นปราการกันอาคารได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามตัววัสดุโฟมจะไม่ใช่ โครงสร้างที่สามารถยึดตะปูได้สำหรับการใช้งานฉนวนโพลีสไตรีนด้านอื่นๆ สามารถใช้เป็นฉนวนฐานรากอาคาร ฉนวนแผ่นฝ้าผนัง ฉนวนหลังคา และการประยุกต์ใช้งานทางอุตสาหกรรมอื่นๆคุณสมบัติของโพลีสไตรีน โฟมสรุปไว้ในตารางที่ 8 ในภาคผนวก ง

10. ฉนวนโพลียูรีเทน / โพลีไอโซไซยานูเรตโฟม ( Polyurethane / Polyisocyanurate ) : โพลียูรีเทน / โพลีไอโซไซยานูเรตโฟม คือ วัสดุ ฟูลอโรคาร์บอนที่พ่นให้เป็นโฟมโดยการที่จะให้มีโครงสร้างแข็งขึ้นอยู่กับการบ่ม โดยโฟมเหล่านี้มีทั้งการหล่อเป็นรูปแบบมาตรฐานแผ่นแข็งล่วงหน้า ที่อาจจะมีพื้นผิวอัดเป็นแผ่นหรืออาจไม่มี หรือเป็นรูปแบบฉนวนที่ฉีดเป็นฟองในชั้นงานหรือสเปรย์ในชั้นงาน

ฉนวนแบบนี้มีสภาพนำความร้อนประมาณ 0.016 ถึง 0.022 W/m.K ฉ ความหนาแน่นเท่ากับ 32 kg/m<sup>3</sup> แบบสเปรย์ในชั้นงานจะมีความหนาแน่นเมื่อสเปรย์เรียบร้อยแล้วประมาณ 32 – 48 kg/m<sup>3</sup> สำหรับความเซลล์ที่ชิดกันของโฟมแบบแข็งอยู่ราว 90 % เนื่องจากภายในเซลล์เป็นก๊าซฟูลอโรคาร์บอน ( โดยทั่วไปคือ ฟรีออน -11 ) ซึ่งมีสภาพนำความร้อนต่ำกว่าอากาศ จึงเป็นเหตุผลว่าทำไมค่า k ของวัสดุนี้จึงต่ำ อย่างไรก็ตามสภาพนำความร้อนจะเพิ่มขึ้นตามอายุของโฟม และอากาศที่แพร่กระจายเข้าไปในเซลล์ แต่กระบวนการนี้สามารถทำให้ลดลงหรือกำจัดออกไปได้เมื่อใช้เปลือกหุ้มผิวที่มีผิวหน้าต้านทานการซึมผ่านเข้าไปของอากาศฉาบไว้ สำหรับฉนวนเซลล์ยูรีเทนแบบแข็งที่มีค่า k เริ่มแรกเท่ากับ 0.016 W/m.K จะมีค่า k เพิ่มขึ้นเป็น 0.023 W/m.K เมื่อมีอายุมากกว่า 300 วัน คุณสมบัติของโพลียูรีเทน/ โพลีไอโซไซยานูเรตโฟม สรุปไว้ในตาราง 9 ในภาคผนวก ง

11. **ฉนวนเวอร์มิคูไลท์ ( Vermiculite )** : ฉนวนเวอร์มิคูไลท์ ทำจากไมกาซึ่งเป็นแร่ชนิดหนึ่งขนาดเล็กๆคล้ายกระจกเหมือนอนุภาคซิลิเกตที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบ ในกระบวนการผลิต อนุภาคจะได้รับความร้อนอย่างรวดเร็วจนมีอุณหภูมิสูงระหว่าง 370 ถึง 540 °C ลักษณะนี้เป็นสาเหตุให้น้ำถูกปิดกั้นที่จะกลายเป็นไอล้วนก่อนเป็นเกล็ด ชั้น ไมคา

ด้วยการควบคุมทิศทางของการล่อนเป็นเกล็ด ความหนาแน่นของวัสดุที่ขยายตัวจะทำให้อยู่ในช่วง 64 ถึง 160 kg/m<sup>3</sup> โดยวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำจะมีอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 6.5 มิลลิเมตร สำหรับสภาพนำความร้อนปกติจะอยู่ระหว่าง 0.048 ถึง 0.066 W/m.K ณ อุณหภูมิบรรยากาศซึ่งทำให้สภาพต้านทานความร้อนอยู่ในช่วง 21.05 ถึง 15.1 m.K/W

เวอร์มิคูไลท์มีอุณหภูมิใช้งานสูงสุดเท่ากับ 405 °C และไม่เป็นวัสดุที่ติดไฟและเนื่องจากเป็นวัสดุอนินทรีย์จึงไม่ช่วยในการเติบโตของพืชและแบคทีเรีย รวมทั้งไม่เป็นอาหารของสัตว์ต่างๆ นอกจากนี้ยังไม่มีผลกระทบเนื่องจากอายุอุณหภูมิหรือความชื้น ทั้งยังเฉื่อยทางเคมีซึ่งทำให้ไม่เป็นสารกัดกร่อนและไม่ส่งกลิ่นออกมาโดย คุณสมบัติของเวอร์มิคูไลท์สรุปไว้ในตารางที่ 10 ในภาคผนวก

12. **ฉนวนหุ้มท่อ Aeroflex** : แอโรเฟล็กซ์ คือฉนวนชนิดท่อและแผ่นที่ผลิตจากยางอีลาสโตเมอร์แบบพิเศษ ประกอบไปด้วยเซลล์อิสระซึ่งมีผนังกันไม่ทะลุถึงกันเป็นจำนวนมากภายในเซลล์บรรจุด้วยอากาศแห้ง ลักษณะเช่นนี้ทำให้ฉนวนแอโรเฟล็กซ์มีคุณสมบัติเหนือกว่าฉนวนชนิดอื่นๆ ดังนี้

- ค่าการดูดซึมน้ำและค่าการแทรกซึมของไอน้ำหรือความชื้นจากบรรยากาศต่ำมาก
- ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ( K.Value ) ต่ำและคงที่มากตลอดอายุการใช้งาน
- มีความคงทนมากต่อโอโซน , รังสีอัลตราไวโอเลตและสภาวะอากาศต่างๆ
- มีความยืดหยุ่นสูง สามารถโค้งงอไปตามลักษณะท่อได้ง่าย ทำให้การติดตั้งรวดเร็วและสวยงาม

#### การใช้งาน

แอโรเฟล็กซ์ชนิดท่อ ( Aeroflex Tube Insulation )

เนื่องจากมีสภาพยืดหยุ่นสามารถโค้งงอไปตามลักษณะท่อได้ง่าย ประกอบกับรูภายในท่อฉนวนเคลือบด้วยแป้งลีน (Talcum Powder ) ทำให้การติดตั้งสำหรับท่อใหม่เป็นไปได้ง่ายคายเพียงแต่สวมท่อเข้าไปตามความยาวของท่อน้ำเย็นหรือท่อพรีออนและติดรอยต่อฉนวนด้วยแอร์โรซิล

( กาวประเภทนีโอพรีน ) ส่วนท่อที่ติดตั้งอยู่ก่อนแล้วใช้มีดผ่าฉนวนตามแนวยาวแล้วนำไปหุ้มท่อโลหะและใช้กาวทาติดให้แน่นตามรอยผ่าของฉนวนทั้งหมด

#### แอร์เฟล็กซ์ชนิดแผ่นตัดสำเร็จ (Aeroflex Precut Sheet Insulation )

แอร์เฟล็กซ์ชนิดแผ่นตัดสำเร็จนี้ มีความหนาตั้งแต่ 3/8 นิ้ว ถึง 2 นิ้ว มีความยาว 48 นิ้ว และความกว้างตัดได้ขนาดพอดีสำหรับหุ้มท่อเหล็กขนาดตั้งแต่ 5 “ IPS ขึ้นไปแผ่นยางฉนวนชนิดนี้ทำให้การทำงานสะดวกและประหยัดมากขึ้น เนื่องจากไม่ต้องเสียเวลาในการตัดให้ได้ขนาดที่ต้องการและไม่มีเศษที่สูญเปล่า อีกทั้งยังมีผิวหน้าเรียบและหนาทั้งสองด้านเป็นผลให้การป้องกันการดูดซึมน้ำและการแทรกซึมของความชื้นเป็นไปได้ดียิ่งขึ้น

#### แอร์เฟล็กซ์ชนิดแผ่นมาตรฐาน (Aeroflex Standard Sheet Insulation )

แอร์เฟล็กซ์ชนิดตัดแผ่นมาตรฐาน ขนาด 36 \* 48 นิ้ว ความหนาตั้งแต่ 1/8 นิ้วถึง 2 นิ้ว โดยความหนาตั้งแต่ 1/2 นิ้วขึ้นไป จะมีผิวทั้งสองด้านเช่นเดียวกับแผ่นตัดสำเร็จ

#### คุณสมบัติ

##### ช่วงอุณหภูมิใช้งาน

แอร์เฟล็กซ์ฉนวนเซลปิด ใช้หุ้มท่อนำความเย็นลดการสูญเสียความเย็นและป้องกันการเกิดหยดเหงื่อ ( Condensation ) ของท่อที่มีความเย็นต่ำได้ถึง  $-57^{\circ}\text{C}$  (  $-70^{\circ}\text{F}$  ) และยังใช้หุ้มฉนวนน้ำร้อนที่มีอุณหภูมิสูงถึง  $125^{\circ}\text{C}$  (  $257^{\circ}\text{F}$  ) เพื่อลดการสูญเสียความร้อนอย่างมีประสิทธิภาพ

##### ป้องกันการกระแทกซึมของความชื้น

จากลักษณะ โครงสร้างเซลปิดโดยมีผนังเซลที่ทำจากยางสังเคราะห์ชนิดพิเศษและผิวฉนวนที่หนา จึงสามารถป้องกันการแทรกซึมผ่านของความชื้นหรือไอน้ำได้โดยไม่ต้องทาเคลือบหรือหุ้มท่อด้วยวัสดุกันความชื้นอื่นๆ ไม่เป็นเชื้อเพลิงและมีปริมาณควันน้อยเมื่อเผาไหม้

แอร์เฟล็กซ์ มีส่วนผสมสารเคมีที่ทำให้มีคุณสมบัติดับไฟได้เอง (Self Extinguish) ทำให้ปลอดภัยจากการก่อให้เกิดอัคคีภัยและมีปริมาณควันน้อยเมื่อเผาไหม้ ทั้งนี้ไม่ก่อให้เกิดหยดไฟและการลามของไฟ ( Flame Spread )

ติดตั้งสะดวก ลดการสิ้นเปลืองและเสียงก้องในระบบท่อ

ฉนวนแอรโฟล็กซ์ มีความยืดหยุ่นสูงและผิวเรียบทำให้ง่ายต่อการติดตั้งและทำให้ผลงานแลดูเรียบร้อย รวมทั้งมีคุณสมบัติเป็นตัวเก็บเสียงได้ดี ช่วยลดปัญหาการสั่นสะเทือนและลดเสียงก้องที่จะเกิดขึ้นในท่อน้ำเย็นหรือท่อน้ำร้อน ได้ดีในขณะใช้งาน

#### คุณสมบัติอื่นๆ

ฉนวนแอรโฟล็กซ์ไม่ก่อปัญหาแพ้ จนเกิดอาการคันอีกทั้งยังป้องกันปัญหาอันเกิดจากมด ปลวก หรือหนู ซึ่งชอบทำลาย และที่สำคัญฉนวนแอรโฟล็กซ์มีความคงทนต่อสารเคมีต่างๆ โดยเฉพาะกรด และด่างซึ่งสามารถช่วยป้องกันการกัดกร่อนของท่อโลหะในท่ออุตสาหกรรมหรือบริเวณใกล้ทะเลซึ่งมีไอน้ำเค็มในปริมาณสูง

#### ระบบท่อน้ำร้อน

ฉนวนแอรโฟล็กซ์ เหมาะที่สุดสำหรับหุ้มท่อน้ำร้อนทั้งภายในและภายนอกอาคาร ในระบบท่อน้ำร้อนของโรงพยาบาล โรงแรม อาคารที่อยู่อาศัย หรือโรงงานอุตสาหกรรม ในปัจจุบัน แอรโฟล็กซ์ ได้รับการยอมรับอย่างสูงสุด เพื่อใช้หุ้มท่อน้ำร้อนภายนอกอาคารของระบบทำน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ทั้งนี้เนื่องจากแอรโฟล็กซ์ผลิตจากสารโพลีเมอร์พิเศษและโครงสร้างที่เป็นเซลล์ปิด ซึ่งทำให้มีคุณสมบัติที่น่าับประการคือ

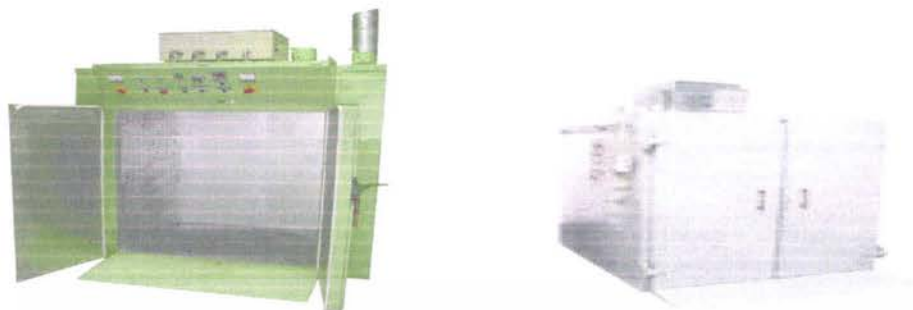
- ใช้งานอย่างต่อเนื่องภายใต้อุณหภูมิสูงถึง 125 °C ( 257 °F )
- ป้องกันรังสีอัลตราไวโอเล็ตจากแสงแดด , ก๊าซ โอโซน , น้ำฝนและสภาวะอากาศอื่นๆ ได้เป็นอย่างดี
- มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำและคงที่มากตลอดเวลา
- มีค่าการดูดซึมน้ำและค่าแทรกซึมความชื้นต่ำ แม้ว่าเมื่อท่อน้ำร้อนเกิดซึมหรือรั่วก็จะไม่ก่อให้เกิดความเสียหาย
- ไม่ต้องใช้วัสดุอื่นห่อหุ้มแม้ใช้หุ้มท่อนอกอาคาร
- มีความยืดหยุ่นสูง สามารถหักงอได้ง่าย ทำให้การติดตั้งสะดวกและรวดเร็ว

## ระบบท่อน้ำเย็น

ภาวะอากาศในเขตร้อนชื้น ปัญหาสำคัญอย่างหนึ่งของอาคารที่ติดตั้งระบบทำความเย็นแบบ ศูนย์กลาง คือ ปัญหาการเกิดหยดน้ำหรือรอบต่อฉนวน ซึ่งสภาวะเช่นนี้ นอกจากหยดน้ำจะทำลายฝ้า, อุปกรณ์ไฟฟ้า, พื้นทางเดินหรือเฟอร์นิเจอร์อื่นๆ เครื่องคอมเพรสเซอร์ต้องทำงานหนักตลอดเวลา เป็นเหตุให้ใช้กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นและอายุการใช้งานสั้นลง

ปัญหาเหล่านี้ ป้องกันได้โดยใช้ฉนวนแอร์โรเฟล็กซ์ ทั้งนี้เนื่องจากมีคุณสมบัติพิเศษคือ

- ◆ ปริมาณการดูดซึมน้ำต่ำ
  - ◆ ค่าการแทรกซึมไอน้ำต่ำมาก
  - ◆ มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำและคงที่ตลอดเวลาการใช้งาน
- สภาพความชื้นสูง การติดตั้งสะดวกและรวดเร็ว



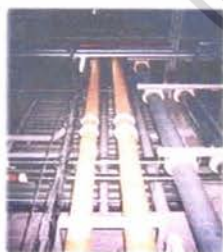
Hot air oven



Cold room



Cold door



Pipe



รูปที่ 2.10 แสดงตัวอย่างอุปกรณ์ที่ใช้ฉนวนกันความร้อนในกระบวนการผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 การเปรียบเทียบวัสดุฉนวน

ตารางที่ 2.2 เป็นการสรุปเปรียบเทียบค่าสภาพต้านทานความร้อน ( ค่า R ) สภาพนำความร้อน ( k ) และความหนาแน่นของฉนวนความร้อนที่กล่าวถึงในหัวข้อก่อนหน้านี้ นอกจากนี้ได้แสดงมาตรฐานของสมาคมทดสอบและวัสดุแห่งอเมริกา ( the American Society for Testing and Materials : ASTM ) ที่ใช้ในการทดสอบฉนวนแต่ละชนิดด้วย รวมทั้งค่าใช้จ่ายเปรียบเทียบในการประยุกต์ใช้งาน

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติโดยทั่วไปและมาตรฐาน ASTM

ลักษณะฉนวน	ค่า R (m.K/W)	k W/m.K	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	มาตรฐาน ASTM	ค่าใช้จ่ายในการใช้งาน		
					อาคาร	อุตสาหกรรม	ระบบท่อ
เส้นใยอัดเป็นแผ่นและ แบบคลุม							
ใยแก้ว	22.4	0.045	9.6-16.0	C 553,C592 C 665,C892	ต่ำ		
ใยแร่	22.4	0.045	24.0-40.0	C 553,C592 C 665,C892	ต่ำ		
ลูสฟิลล์							
เซตลูโลส	22.4-25.7	0.039-0.045	35.2-51.3	C739	ต่ำ- ปานกลาง		
ใยแก้ว	19.8	0.05	9.6-16.0	C764	ต่ำ		
ใยแร่	21.7	0.046	24.0-24.0	C764	ต่ำ		
เทอร์ไลท์	17.4-25.7	0.039-0.058	32.0-176.2 64.1-192.2	C549	ปานกลาง		
เวอร์มิคูไลท์	14.8-15.8	0.063-0.068	32	C516	ปานกลาง		
ฉนวนโฟมในงาน							
โพลียูรีเทนและโพลี ไอโซไซยานูเรตโฟม	40.8-43.4	0.023-0.024			ปานกลาง		
บล็อก,แผ่นอัดและ ฉนวนท่อ		0.054 0.054 0.037	208.3				
แคลเซียมซิลิเกต		0.036	136.2				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เขตอุตสาหกรรม	18.3		72.1	C 656			
โพลีเอทิลีน	18.3	0.04	78.5	C 552		สูง	สูง
โพลีเอทิลีน	26.7			C 534	สูง		
โพลีเอทิลีน	27.8	0.054	144.2-176.2	C 720, C			ต่ำ
โพลีเอทิลีน			160.2	726 ,C892			
โพลีเอทิลีน	24.8	0.033		C610,C726	สูง	ปานกลาง	ต่ำ
โพลีเอทิลีน		โพลีเอทิลีน	32.0-48.1			สูง	
โพลีเอทิลีน	18.3	0.029	โพลีเอทิลีน	C610 ,C728		ปานกลาง	
โพลีเอทิลีน		โพลีเอทิลีน	28.8-41.6			-สูง	
โพลีเอทิลีน	30.2	0.023-0.037	โพลีเอทิลีน		ปานกลาง		
โพลีเอทิลีน		โพลีเอทิลีน	24	C 578	-สูง		
โพลีเอทิลีน	34.7	น้ำ:0.023-					ต่ำ
โพลีเอทิลีน		โพลีเอทิลีน	32		ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง
โพลีเอทิลีน	26.7-30.2	ผิวหน้าน้ำ			-สูง		
โพลีเอทิลีน		ไม่สามารถ					
โพลีเอทิลีน		แทรกซึม		C 591			
โพลีเอทิลีน		ผ่านได้					
โพลีเอทิลีน	43.4	0.019-0.2			ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง
โพลีเอทิลีน		ผิวหน้าน้ำ			-สูง		
โพลีเอทิลีน		ไม่สามารถ					
โพลีเอทิลีน		แทรกซึม					
โพลีเอทิลีน		ผ่านได้					
โพลีเอทิลีน	49.6-53.4						

สำหรับตารางที่ 2.3 เป็นการสรุปเปรียบเทียบ ข้อดี ข้อเสีย และข้อจำกัดของฉนวนแต่ละรูปแบบ ที่กล่าวมาแล้ว เช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบข้อดี ข้อเสีย และข้อจำกัดของฉนวน

ฉนวน	ข้อดี	ข้อเสีย	ข้อจำกัด
แคลเซียมซิลิเกต	ไม่ติดไฟ : อุณหภูมิใช้งานสูงสุด;แห้งแล้วคุณภาพทางกายภาพและความร้อนไม่เปลี่ยน;มีเสถียรภาพเมื่อแห้ง	สภาพนำความร้อนปานกลาง;สภาพการซึมผ่านของไอน้ำและการดูดซึมน้ำสูง;ราคาแพง;ความหนาแน่นสูง	ไม่สามารถใช้ในที่ที่มีน้ำอย่างเช่นฝัก โดยตรง;ใช้ฉนวนไม่ได้ดีเมื่อเปียก
เซตูลาร์กลาส	ไม่ติดไฟ : ความชื้นไม่สามารถแทรกซึมได้;มีเสถียรภาพ ทนแรงกดได้สูง ; ไม่เป็นพิษเมื่อใช้งานที่อุณหภูมิสูง	สภาพนำความร้อนปานกลาง;ราคาแพง	อาจแตกเมื่อเกิดวัฏจักรแข็งตัวแล้วละลายของน้ำที่มีอยู่ในช่องฉนวน
ใยเซลลูโลส	สภาพนำความร้อนต่ำ;ราคาต่ำถึงปานกลาง ; ไม่เป็นพิษ	ติดไฟได้ แต่ความสามารถในการสันดาปลดลงเมื่อใช้สารหน่วงไฟไหม้;สภาพซึมเข้าไปได้ของน้ำและการดูดซึมน้ำสูง; อาจยุบตัวตามอายุ	สารหน่วงไฟไหม้ที่ใช้ อาจเร่งการกัดกร่อนเหล็กกล้า อลูมิเนียม และทองแดง; ไม่เหมาะสมกับการใช้งานในอาคาร
โฟมแบบยืดหยุ่น ( ยาง )	สภาพนำความร้อนต่ำ;ราคาต่ำ; ติดตั้งและผืนง่าย; สภาพซึมเข้าไปได้ของไอน้ำต่ำ;เสถียรภาพ; ไม่เป็นพิษ	ติดไฟได้ ; ระดับการเกิดควันสูงเมื่อถูกไหม้;ไวต่อแสงอุลตราไวโอเลต	อาจเร่งการกัดกร่อนเหล็กกล้า อลูมิเนียม และทองแดง; ไม่เหมาะสมกับการใช้งานในอาคาร
ใยแก้ว	สภาพนำความร้อนต่ำ;	วัสดุสำหรับฉนวนของ	ต้องการเปลือกหุ้มกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<p>ใยแร่</p>	<p>ราคาค่าในรูปของเส้นใยอัดแน่นอัดแผ่นแบบคลุมแบบลูสฟิลล์และสำหรับฉนวนหุ้มท่อ ถ้าไม่มีวัสดุฉนวนจะไม่ติดไฟ; ไม่เป็นพิษ; การดูดซึมน้ำต่ำ; เสถียรภาพดี</p> <p>สภาพนำความร้อนต่ำ; ในรูปของเส้นใยอัดแน่นอัดแผ่นแบบคลุมแบบลูสฟิลล์ถ้าไม่มีวัสดุฉนวนจะไม่ติดไฟ; ไม่เป็นพิษ; เสถียรภาพ</p>	<p>แบบเส้นใยอัดแน่นอาจติดไฟและตัวประสานอาจถูกไหม้; อากาศที่เคลื่อนที่อาจลดสมรรถนะทางความร้อนถ้าไม่ใช้เปลือกหุ้มกันการแทรกซึมของอากาศ; ราคาปานกลางถึงสูงสุดในรูปแบบแผ่นแข็ง</p> <p>วัสดุสำหรับฉนวนของแบบเส้นใยอัดแน่นอาจติดไฟและตัวประสานอาจถูกไหม้; อากาศที่เคลื่อนที่อาจลดสมรรถนะทางความร้อนถ้าไม่ใช้เปลือกหุ้มกันการแทรกซึมของอากาศ; ราคาปานกลางถึงสูงในรูปแบบบล็อกและ</p>	<p>ไอน้ำเนื่องจากสภาพซึมผ่านของไอน้ำสูง; เมื่อใช้กับตัวประสานหรือวัสดุสำหรับฉนวนจำกัดอุณหภูมิเพียงปานกลาง</p> <p>ต้องการเปลือกหุ้มกันไอน้ำเนื่องจากสภาพซึมผ่านของไอน้ำสูง; เมื่อใช้กับตัวประสานหรือวัสดุสำหรับฉนวนจำกัดอุณหภูมิเพียงปานกลาง</p>
<p>เพอร์ไลต์</p>	<p>สภาพนำความร้อนต่ำ; ไม่ติดไฟ; เสถียรภาพ; ไม่ติดไฟ</p>	<p>แผ่นแข็ง</p> <p>สภาพการซึมผ่านของไอน้ำและการดูดซึมน้ำสูง; ราคาปานกลาง</p>	<p>ต้องการเปลือกหุ้มกันไอน้ำและอุปกรณ์บรรจุทางกายภาพในกรณีแบบลูสฟิลล์</p>
<p>พีโนลิกโฟม</p>	<p>สภาพนำความร้อนต่ำ; ไม่ติดไฟ; การดูดซึมน้ำต่ำ</p>	<p>ไวต่อแสงอุลตราไวโอเล็ต สภาพซึมเข้าไปได้</p>	<p>อุณหภูมิใช้งานสูงสุดจำกัดเพียง 135° c</p>

โพลีสไตรีนโฟม	น้ำต่ำ; เสถียรภาพ; ราคาต่ำ สภาพนำความร้อนต่ำ; อาจใช้เป็นตัวผนึกและ กันซึม; สภาพซึมเข้า ไปได้ของน้ำและการ ดูดซึมของน้ำต่ำ;	ของน้ำสูง ราคาปานกลาง; ติดไฟ; อุณหภูมิต่ำ	อุณหภูมิใช้งานสูงสุด จำกัดเพียง 82° c
โพลียูรีเทน/โพลีไอโซ ไซยาเรต โฟม	สภาพนำความร้อนต่ำ; อาจใช้เป็นตัวผนึกและ กันซึม; สภาพซึมเข้า ไปได้ของน้ำและการ ดูดซึมของน้ำต่ำ	ราคาปานกลางถึงสูง; ติดไฟต้องการเปลือก หุ้มกันไฟเมื่อติดตั้งใน อาคารที่บังคับ	จะเกิดควันที่เป็นพิษ ขณะถูกไหม้
เวอร์มิคูไลท์	อุณหภูมิใช้งานสูงสุด; ไม่ติดไฟ; ไม่เป็นพิษ; เสถียรภาพ	สภาพนำความร้อนสูง; การดูดซึมน้ำสูง; ราคา ปานกลาง	ต้องการอุปกรณ์บรรจุ ทางกายภาพ

## 2.5 การใช้งานฉนวนความร้อนในอุตสาหกรรม

### 2.5.1 ฉนวนความร้อนในอุตสาหกรรมแช่แข็ง

อุตสาหกรรมแช่แข็งนับเป็นอุตสาหกรรมที่ขึ้นอยู่กับฉนวนความร้อนเป็นอย่างมาก เริ่มตั้งแต่กระบวนการแช่แข็ง ตู้แช่แข็งอุณหภูมิต่ำจะต้องมีฉนวนอย่างดีหุ้มอยู่โดยรอบ ซึ่งต้องทำให้อาหารที่ต้องการแช่แข็งแข็งตัวอย่างรวดเร็วเร็วภายหลังกระบวนการจัดอาหารมาแล้ว และจากจุดนี้อาหารแช่แข็งจะถูกจัดส่งออกไปอาจโดยรถบรรทุก รถไฟหรือเรือ ซึ่งต้องบรรจุในตู้แช่แข็งที่มีอุณหภูมิต่ำเช่นกัน เพื่อรักษาอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงที่ต้องการโดยใช้พลังงานน้อย ตู้แช่เหล่านี้จึงต้องมีฉนวนความร้อนหุ้มอยู่ด้วย นอกจากนี้ ณ จุดถ่ายสินค้าหรือตามร้านค้าที่จะต้องเก็บรักษาอาหารแช่แข็งเหล่านี้ ก่อนการ

แจกจ่ายหรือขายออกไปในร้านค้าจึงต้องมีตู้แช่แข็งหุ้มฉนวนด้วยเช่นกัน ตู้แช่แข็งที่ตู้แช่แข็งซึ่งตั้งซื้ออาหารแช่แข็งออกไปก็จะต้องมีตู้เย็นหุ้มฉนวนใช้เก็บอาหารก่อนนำมาประกอบอาหารด้วยเหมือนกัน

หากปราศจากฉนวนความร้อน ในทางปฏิบัติจะไม่มีทางเป็นไปได้เลยที่จะรักษาอาหารให้แช่แข็งคงอุณหภูมิให้ต่ำกว่าอุณหภูมิที่อาหารจะเน่าเสีย ซึ่งจะทำให้ผู้ผลิต ผู้บริโภคและผู้ค้าอาหารแช่แข็งเสียผลประโยชน์

### 2.5.2 ฉนวนความร้อนในอุตสาหกรรมขนส่ง

นอกเหนือจากอุตสาหกรรมแช่เย็นและอุตสาหกรรมแช่แข็ง ซึ่งการขนส่งสินค้าต้องกระทำภายใต้ข้อกำหนดของอุณหภูมิที่กำหนดไว้แล้ว อุตสาหกรรมขนส่งอื่นๆ ดังเช่น

- (1) การขนส่งวัสดุหลอมเหลวอุณหภูมิสูง
- (2) การขนส่งก๊าซเหลวอุณหภูมิต่ำ
- (3) การขนส่งวัสดุซึ่งต้องคงสภาพไม่ให้แข็งตัว และ
- (4) การขนส่งผู้โดยสารในสภาพอุณหภูมิที่สะดวกสบาย

ในการขนส่งวัสดุหลอมเหลวอุณหภูมิสูง หากช่วงอุณหภูมิของวัสดุมีค่าสูงมากอาจจำเป็นต้องใช้วัสดุฉนวนที่ทนไฟได้ สำหรับช่วงช่วงอุณหภูมิของวัสดุที่มีค่าต่ำลงมา อาจสามารถใช้วัสดุฉนวนอุณหภูมิสูงธรรมดาที่เพียงพอแล้ว

สำหรับการขนส่งของเหลวที่มีอัตราการระเหยสูงมากก็จำเป็นต้องใช้รถบรรทุกที่หุ้มฉนวนด้วย เพื่อป้องกันการสูญเสียที่มากเกินไปจากผลของการระเหย อย่างไรก็ตาม อาจต้องการเพียงฉนวนอุณหภูมิปานกลางเท่านั้น ก็เพียงพอในช่วงอุณหภูมิอากาศปกติ ส่วนก๊าซเหลวอุณหภูมิต่ำ อาจจำเป็นต้องใช้ฉนวนที่มีประสิทธิภาพชั้นเยี่ยม เพื่อที่จะลดปริมาณความร้อนที่จะทำให้ก๊าซเหลวลดคุณภาพลง ฉนวนความร้อนประเภทนี้ อย่างเช่น ฉนวนความเย็นประสิทธิภาพชั้นเยี่ยม (super-efficient cryogenic insulation) เป็นต้น

ในด้านการขนส่งผู้โดยสาร รถบรรทุกผู้โดยสารที่ทันสมัยจะออกแบบให้มีการหุ้มฉนวนที่ดีและมีการปรับอากาศ เครื่องบินโดยสารก็เช่นกันจะออกแบบให้หุ้มฉนวนและให้ความร้อน เพื่อป้องกันสภาพเย็นจัด ณ ระดับเพดานบินสูงๆ

แนวความคิดเรื่องการขนส่งได้นำไปสู่ปัญหาเชิงเศรษฐศาสตร์ ในการใช้ฉนวนที่น่าสนใจมาก ข้อหนึ่งคือน้ำหนักที่ไม่จำเป็นของฉนวนจะช่วยลดภาระของเครื่องยนต์ ฉะนั้นฉนวนที่มีประสิทธิภาพและน้ำหนักเบาจะเหมาะสมกว่ามาก อย่างไรก็ตาม ฉนวนน้ำหนักเบาอาจมีโดยมาก

มีโครงสร้างที่ไม่แข็งแรง และต้องหุ้มด้วยวัสดุอื่นเพื่อป้องกันความเสียหายเชิงกล ในกรณีที่ใช้ฉนวนในงานด้านการทำความเย็น ฉนวนต้องได้รับการป้องกันด้วยแผ่นกันไอน้ำ ดังนั้นการออกแบบที่ดีต้องคำนึงถึงทั้งด้านวัสดุ และกระบวนการที่ใช้ ซึ่งจะอยู่ระหว่างฉนวนและวิธีการติดตั้งฉนวน เพื่อกำหนดรูปแบบโครงสร้างฉนวนตามสภาพอากาศ และ/หรือแผ่นกันไอน้ำ ซึ่งจะช่วยให้อายุการใช้งานฉนวนทนทาน อย่างไรก็ตาม การที่จะให้ได้รับผลเศรษฐศาสตร์ที่ดีที่สุด ทั้งทางด้านประสิทธิภาพเชิงความร้อน อายุการใช้งานที่มีประสิทธิผล น้ำหนักเบาและราคาที่เหมาะสมเป็นเรื่องที่ค่อนข้างยาก โดยเฉพาะเป็นที่น่าเสียดายที่ผู้ออกแบบทางด้านการขนส่งเป็นจำนวนมากมักจะไม่นำมาตรฐานการออกแบบฉนวน ดังนั้นความผิดพลาดในการเลือกวัสดุฉนวนและการนำมาใช้งานจึงเกิดขึ้นอยู่เสมอๆ นอกจากนี้ช่างเทคนิคในอุตสาหกรรมฉนวนไม่ได้อยู่ตำแหน่งที่จะได้รับข้อเท็จจริงและปัญหาที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรม การขนส่งอีกด้วย ฉะนั้นจึงไม่สามารถช่วยผู้ใช้ได้อย่างเหมาะสมในการเลือกวัสดุที่เหมาะสมกับงาน ในการออกแบบติดตั้งและการนำไปใช้

สำหรับวิธีใช้งานฉนวนในงานด้านขนส่งพอสรุปได้ดังนี้

1. ฉนวนทำให้เป็นไปได้ที่จะสามารถควบคุมอุณหภูมิ ฉะนั้นทำให้การผลิต จัดส่งและการขายสินค้ามีการตอบสนองที่ดี มีการประหยัดพลังงาน หรือมีกำไร
2. ฉนวนช่วยอนุรักษ์พลังงานทั้งด้านความร้อนหรือความเย็น ฉะนั้นช่วยลดค่าใช้จ่ายในการผลิตกำลัง
3. ฉนวนช่วยลดขนาดความต้องการของอุปกรณ์ทำความร้อนหรือความเย็น ฉะนั้นช่วยลดเงินลงทุนในการซื้ออุปกรณ์ที่มีขนาดใหญ่กว่า
4. ฉนวนช่วยเพิ่มความปลอดภัยในการจัดส่งวัสดุหลอมเหลว หรือก๊าซเหลว ซึ่งเป็นไปได้ยากหากมีการจัดส่งวัสดุเหล่านี้ในตู้บรรจุที่ไม่หุ้มฉนวน
5. ในการขนส่งทางเรือ ฉนวนช่วยป้องกันไฟด้วยการลดอันตรายจากไฟไหม้ เป็นผลทำให้อัตราการสูญเสียและค่าประกันต่ำลง

อย่างไรก็ตาม ค่าใช้จ่ายในการซื้อฉนวน ค่าติดตั้งและค่าบำรุงรักษาจะต้องเปรียบเทียบกับจำนวนเงินตราที่ฉนวนประหยัดพลังงานไว้ได้ประกอบด้วยเสมอ ซึ่งมักปรากฏว่าการติดตั้งฉนวนเป็นการลงทุนที่คุ้มค่า ถ้ามีการวิเคราะห์ระบบอย่างถูกต้อง

### 2.5.3 ฉนวนความร้อนสำหรับอาคารสิ่งก่อสร้าง

ฉนวนความร้อนนับว่าเป็นสิ่งที่จำเป็นในอาคารสิ่งก่อสร้างสมัยใหม่ โดยจะทำหน้าที่หลายอย่างด้วยกัน ซึ่งผลกระทบต่อราคาค่าก่อสร้าง และค่าใช้จ่ายในระหว่างการใช้งาน สำหรับคำว่าอาคารสิ่งก่อสร้าง ( Building ) ในที่นี้จะรวมถึงบ้าน โรงแรม โรงเรียน ที่ทำการสำนักงาน อาคารโรงเรียน ห้องทดลอง และอุตสาหกรรมอื่นๆด้วย ในที่นี้ความจำเป็นของฉนวนไม่เพียงแต่กับพื้นห้อง ผนังและเพดานของตัวอาคารแต่จะรวมถึงระบบเชิงกลในอาคารด้วย อย่างเช่น ระบบทำความร้อน ทำความเย็น สุขภัณฑ์ และระบบปรับอากาศ โดยปกติแล้วฉนวนนับเป็นโครงสร้างเดียวเท่านั้นที่สถาปนิกมักละเลย ไม่ตระหนักถึงความสำคัญของฉนวนกันความร้อนว่าจะเป็นส่วนสำคัญที่จะทำให้การใช้งานอาคารสิ่งก่อสร้างนั้นๆมีความประหยัด ใช้พลังงานในการรักษาอุณหภูมิที่น้อยกว่าเดิมมาก

การใช้ฉนวนที่ได้รับการออกแบบอย่างเหมาะสมกับพื้นห้อง ผนังและอาคาร โดยทั่วไปสามารถลดภาระความร้อนและความเย็น ซึ่งมีผลทำให้ลดขนาดของอุปกรณ์ทำความร้อนหรือความเย็น ผลที่ตามมาคือ ลดค่าใช้จ่ายโดยรวม จากราคาที่มากกว่าราคาของฉนวนความร้อน เนื่องจากการใช้กำลังผลิตค่าปฏิบัติงานที่น้อยลง นอกจากนี้จากการที่ฉนวนความร้อนช่วยควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในสภาวะที่ไม่เปลี่ยนแปลงมาก จึงทำให้ผู้อยู่อาศัยในอาคาร มีความสะดวกสบายมากกว่าอีกด้วย

### 2.5.4 ฉนวนความร้อนในอุตสาหกรรมการผลิต

ในอุตสาหกรรมการผลิต ฉนวนความร้อนใช้งานในหลายหน้าที่ :

- (1) ป้องกันไฟไหม้
- (2) รักษาการผลิต
- (3) ควบคุมอุณหภูมิ
- (4) การผลิตผลิตภัณฑ์
- (5) อนุรักษ์พลังงาน

การใช้งานจะใช้ฉนวนในลักษณะสัมผัสโดยตรงเข้าไปในกระบวนการผลิต

การใช้งานในลักษณะการป้องกันไฟ ประการแรกใช้เพื่อป้องกันหรือหน่วงอุบัติเหตุจากไฟไหม้ ประการที่สอง ถ้าเริ่มไฟไหม้ ฉนวนจะช่วยป้องกันท่อและอุปกรณ์จนกระทั่งสามารถดับไฟได้ ใน

ลักษณะนี้ฉนวนป้องกันโรงงานจากไฟไหม้ช่วยลดการหยุดเดินเครื่อง ป้องกันผลิตภัณฑ์ ป้องกันบุคลากร และลดค่าใช้จ่ายในการประกันภัย ซึ่งค่าใช้จ่ายทั้งหมดนับเป็นค่าใช้จ่ายที่สูงมาก

การรักษาผลิตภัณฑ์ นับเป็นการใช้ฉนวนในหน้าที่ที่นิยมเพิ่มขึ้นอย่างมาก วัสดุจำนวนมากจะถูกเก็บคงคลัง, ขนย้าย และใช้จ่ายภายในช่วงอุณหภูมิอาจเปลี่ยนแปลงจากค่าต่ำมากมายถึงสูงมากมายขึ้นอยู่กับผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้อง ตัวอย่างเช่น

1. วัสดุพวกสารระเหย ซึ่งถ้ามีอุณหภูมิเกินกว่าที่กำหนดแล้วจะเริ่มเกิดปฏิกิริยา มีผลให้วัสดุเสื่อมคุณภาพหรืออาจระเบิดได้
2. วัสดุที่มีจุดหลอมเหลวสูง ซึ่งถ้าปล่อยให้แข็งตัวจะเป็นการยากที่จะหลอมละลายใหม่
3. ก๊าซเหลวที่กลายเป็นไอไวมาก และต้องระมัดระวังให้เย็นอยู่เสมอ เพื่อป้องกันความดันเกินและสูญเสียออกไป เป็นต้น

#### การใช้งานฉนวนกับพื้นผิวร้อน

ก๊าซร้อนมีแนวโน้มที่จะขยายตัวและจะพยายามเล็ดลอดออกไปหาบริเวณที่มีความดันต่ำกว่า ฉนวนส่วนมากมีความชื้นอยู่ในตัว ดังนั้นเมื่อฉนวนสัมผัสกับพื้นผิวร้อน ความดันของไอน้ำเพิ่มขึ้นจึงทำให้ไอน้ำในฉนวนพยายามเล็ดลอดออกไปสู่อากาศรอบๆที่มีความดันต่ำกว่า ซึ่งความดันไอน้ำจะสูงขึ้นมากถ้าอุณหภูมิของพื้นผิวร้อนสูง

#### การใช้งานฉนวนกับท่อให้ความร้อน (Heat traced piping)

อีกรูปแบบหนึ่งของการใช้งานฉนวนกับผิวร้อน คือการใช้งานฉนวนกับผิวร้อน คือ การใช้ฉนวนติดตั้งบนท่อเส้นทางกระบวนการผลิตที่มีการให้ความร้อนจากภายนอก ด้วย “ท่อให้ความร้อน (heat tracer)” ท่อให้ความร้อนอาจเป็นท่อที่จ่ายความร้อนจากไอน้ำของเหลวหรือไอร้อนอื่นๆหรือจากแถบ หรือสายทำความร้อนด้วยไฟฟ้า จุดมุ่งหมายคือต้องการรักษาอุณหภูมิไว้ที่ค่าใดค่าหนึ่งในกระบวนการผลิต ระหว่างการทำงานท่อเส้นทางกระบวนการผลิต (Line process) อาจจ่ายความร้อนที่เพียงพอสำหรับใช้ในกระบวนการผลิต หรืออาจทำงาน ณ สภาวะที่อุณหภูมิสูงกว่าที่อุณหภูมิซึ่งท่อให้ความร้อนสามารถผลิตได้มาก จากเหตุผลนี้จึงมีสภาวะอุณหภูมิใช้งาน 2 สภาวะที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบท่อให้ความร้อน สภาวะหนึ่งคือ สภาวะอุณหภูมิระหว่างการทำงาน อีกสภาวะหนึ่งคือ สภาวะ

อุณหภูมิซึ่งทำให้ความร้อนจะสามารถคงอุณหภูมิท่อเส้นทางกระบวนการผลิตระหว่างช่วงเวลาที่มีการไหลต่ำ หรือ ไม่มีการไหลเลยในท่อเส้นทางกระบวนการผลิต

**การใช้งานจนวนกับการเก็บรักษาความร้อนของอุปกรณ์เก็บความร้อน**

จนวนที่ใช้งานด้านการเก็บรักษาความร้อนของวัสดุในภาชนะเก็บรักษาในท่อหรือในการขนส่งเมื่อภาชนะท่อหรือถังเก็บร่วมเข้าไปกับวัสดุที่บรรจุจะพิจารณาเป็นมวลรวมกันไปได้ สามารถใช้วัสดุแบบมวลธรรมดา เป็นจนวนหุ้มและเวลาที่อุณหภูมิลดลง จะสามารถหาได้จากอัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านจนวนสู่บรรยากาศด้านนอก ในความสัมพันธ์กับปริมาณความร้อนที่เก็บไว้ด้วยมวลเดิม การใช้งานจนวนลักษณะนี้จะมีความสัมพันธ์เพิ่มขึ้น เมื่อวัสดุถูกบรรจุลงในรถขนถ่ายและส่งถึงผู้ใช้ โดยเฉพาะกรณีที่ไม่มีการให้ความร้อนเพิ่มอุณหภูมิของวัสดุในถังเมื่อถึงปลายทางอาจลดลงเพียง 3 – 8 °C ขึ้นอยู่กับการออกแบบจนวนและความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่ลดลง

**การใช้งานจนวนกับการควบคุมอุณหภูมิที่ผิว**

จนวนที่ใช้งานกับท่อ อุปกรณ์และภาชนะที่ร้อนจะใช้เพื่อควบคุมอุณหภูมิที่ผิวของอุปกรณ์ทั้งหลายเพื่อป้องกันบุคลากรจากการสัมผัสกับพื้นผิวที่ร้อน ซึ่งเกิดอันตรายได้ด้วยและป้องกันพื้นผิวที่ร้อนมากจนทำให้วัสดุที่ติดไฟได้ง่ายอาจลุกไหม้ขึ้นมาได้ สำหรับลักษณะการทำงานของจนวนใช้งานลักษณะนี้เช่นเดียวกับที่กล่าวไว้ในการใช้งานจนวนกับพื้นผิวร้อน

**การใช้งานจนวนกับพื้นผิวอุณหภูมิต่ำ**

เมื่อจนวนความร้อนถูกนำมาใช้กับอุปกรณ์หรือระบบท่อที่ทำงานที่อุณหภูมิน้อยกว่าอุณหภูมิบรรยากาศ ดังนั้นความชื้นในสถานะไอในบรรยากาศ จะหาทางปรับผลต่างความดันที่มีอยู่ให้เท่ากันด้วยการพยายามที่จะถ่ายเทมาสู่พื้นผิวที่อุณหภูมิต่ำ แต่ถ้ามีเครื่องกีดขวางระหว่างพื้นที่ความดันสูงและต่ำ ใอน้ำจะค้นหาทุกวิธีการที่จะเข้าไปถึงความดันที่ต่ำกว่า ด้วยการทะลุผ่านวัสดุที่กั้นอยู่ด้วยตัวเองผ่านรอยแตก รอยร้าว ข้อต่อ หรือรอยต่อรอบๆซึ่งโดยปกติใอน้ำจะผ่านทะลุวัสดุเกือบทุกชนิด เพียงแต่บางชนิดอาจเร็วมากและบางชนิดอาจช้ามาก

### บทที่ 3 ขั้นตอนและวิธีการศึกษา

ในการศึกษานี้มีขั้นตอนการดำเนินงานดังต่อไปนี้

1. รวบรวมข้อมูลชนิดฉนวนที่นิยมใช้ในกระบวนการต่าง ๆ ในอุตสาหกรรมอาหารและอุตสาหกรรมอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง
2. แบ่งชนิดของฉนวนตามช่วงอุณหภูมิที่ใช้งานเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงที่อุณหภูมิต่ำ ( $-270^{\circ}\text{C}$  ถึง  $100^{\circ}\text{C}$ ) และช่วงอุณหภูมิสูง ( $100^{\circ}\text{C}$  ถึง  $>500^{\circ}\text{C}$ ) ซึ่งช่วงอุณหภูมิต่ำ ได้แก่ฉนวนประเภท Aeroflex, Vegetable Cork, Glass Fiber, Polystyrene Foam, ขนสัตว์, Elastomeric Foam และ Cellulosic Fiber เป็นต้น สำหรับช่วงอุณหภูมิสูงได้แก่ฉนวนประเภท Perlite, Calcium Silicate, Mineral Fiber, Vermiculite, Cellular Glass, Phenolic Foam และ Polyisocyanurate Foam เป็นต้น
3. ใช้โปรแกรม Excel ในการคำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อน ( $q$ ) โดยแบ่งเป็น 3 กรณี
  - 3.1 กรณีที่ 1 ศึกษาการหาอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่ ( $q/A$ ) ที่ระดับความหนาที่แตกต่างกันของฉนวนแต่ละชนิด
  - 3.2 กรณีที่ 2 ศึกษาการหาอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่ ( $q/A$ ) (ที่ช่วงอุณหภูมิระหว่างพื้นผิวที่แตกต่างกัน
  - 3.3 กรณีที่ 3 ศึกษาประสิทธิภาพของฉนวนเมื่อนำมาใช้หุ้มกับภาชนะที่มีรูปทรงแตกต่างกัน ซึ่งในที่นี้ คือ ภาชนะรูปทรงสี่เหลี่ยมและรูปทรงกระบอก
4. สร้างโปรแกรมสำหรับคำนวณและแสดงผลค่าของอัตราการถ่ายเทความร้อนตามกรณีศึกษาดังนี้

#### 4.1 อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่ ( $q/A$ ) กับความหนาของฉนวน ( $\Delta X$ )

ในขั้นตอนนี้โปรแกรม Excel จะถูกสร้างขึ้นเพื่อคำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่ของฉนวนชนิดต่าง ๆ จำนวน 14 ชนิด โดยกำหนดช่วงอุณหภูมิที่จะใช้เป็นช่วงอุณหภูมิต่ำจาก  $-270^{\circ}\text{C}$  ถึง  $100^{\circ}\text{C}$  และช่วงอุณหภูมิสูงจาก  $100^{\circ}\text{C}$  ถึง  $>500^{\circ}\text{C}$  เทียบกับเมื่อความหนาของฉนวนชนิดต่าง ๆ เปลี่ยนไปจาก 0.02 m ถึง 0.11 m ตัวอย่างตารางการคำนวณค่า  $q/A$  ในช่วงอุณหภูมิต่ำจำนวน 7 ชนิดแสดงดังในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงตัวอย่างตารางการคำนวณค่า  $q/A$  เมื่อค่า  $\Delta X$  เพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1																
2	$T_1$	393	$K_{22}$	0.038	$K_{23}$	0.0402	$K_{24}$	0.0324	$K_{25}$	0.0399	$K_{26}$	0.064	$K_{27}$	0.0403	$K_{28}$	0.0500
3	$T_2$	353														
4	$\Delta T$	40		$q_1$	$q_2$	$q_3$	$q_4$	$q_5$	$q_6$	$q_7$				$q_8$		$q_9$
5	$\Delta x_1$	0.02														
6		0.03														
7		0.04														
8		0.05														
9		0.06														
10		0.07														
11		0.08														
12		0.09														
13		0.10														
14		0.11														

ขั้นตอนการ โปรแกรมเวิร์กชีท (worksheet)

1. เปิดเวิร์กชีทใหม่ ขยายให้เต็มหน้าจอ
2. ในเซลล์ A2:A5, C2, E2, G2, I2, K2, M2, O2, D4, F4, H4, J4, L4, N4 และ P4 (แถบสีชมพู) พิมพ์ข้อความดังในตารางที่ 3.1
3. ในเซลล์ B2:B3 และ B5:B14 (แถบสีเหลือง) พิมพ์ข้อมูลตามความเป็นจริง
4. ในเซลล์ D2, F2, H4, J2, L2, N2 และ P2 (แถบสีขาว) ใส่ค่าการนำความร้อนของฉนวน (k) ที่ได้จากการคำนวณจากสมการที่ (3) หรือดูจากกราฟในภาคผนวก ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ในเซลล์ B4 ป้อนสูตรต่อไปนี้

$$=ABS(B3:B2)$$

6. ในเซลล์ D6 ป้อนสูตรต่อไปนี้

$$=((SDS2*SBS4)/B5)$$

ซึ่งได้จากการคำนวณสมการที่ (6)

7. copy สูตรจากเซลล์ D6 ไปวางในเซลล์ D6:D14

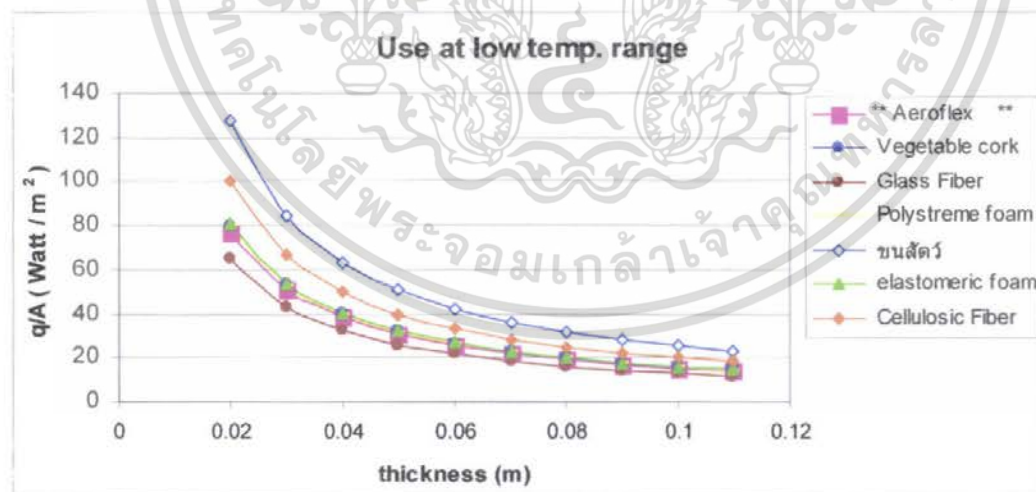
8. ในเซลล์ F5,H5,J5,I5,N5 และ P5 ป้อนสูตรต่อไปนี้

$$=((SFS2*SBS4)/B5)$$

โดยเปลี่ยนจาก F2 เป็น H2,J2,I2,N2 และ P2 ตามลำดับ

9. copy สูตรจากเซลล์ F5,H5,J5,I5,N5 และ P5 ไปวางในเซลล์ F6:F14,H6:H14,J6:J14,I6:I14,N6:N14,P6:P14 ตามลำดับ

10. เลือกแถบคำสั่งบริเวณเซลล์ B5:BI4 แล้วคลิกที่ Chart Wizard บนเมนูบาร์สร้างไว้ เลือกแถบคำสั่งเซลล์ D5:DI4 ,F5:F14 ,H5:H14 ,J5:J14 ,I5:I14 ,N5:N14 และ P5:P14 ขั้นตอนนี้จะเป็นการเลือกคอลัมน์ที่ข้ามคอลัมน์ได้ แล้วคลิกปุ่ม Chart Wizard แล้วสร้างกราฟ XY(Scatter) ดังในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $q/A$  และ  $\Delta X$  ของฉนวนในกลุ่มช่วงอุณหภูมิต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2 อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่ ( $q/A$ ) กับอุณหภูมิ ( $\Delta T$ )

ในขั้นตอนนีโปรแกรม Excel จะถูกสร้างขึ้นเพื่อคำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่ของฉนวนชนิดต่าง ๆ จำนวน 14 ชนิด โดยกำหนดช่วงอุณหภูมิที่จะใช้เป็นช่วงอุณหภูมิต่ำจาก  $-270^{\circ}\text{C}$  ถึง  $100^{\circ}\text{C}$  และช่วงอุณหภูมิสูงจาก  $100^{\circ}\text{C}$  ถึง  $>500^{\circ}\text{C}$  เทียบกับเมื่ออุณหภูมิระหว่างพื้นผิวของฉนวนชนิดต่าง ๆ เพิ่มขึ้นทีละ  $5^{\circ}\text{C}$  ตัวอย่างตารางการคำนวณค่า  $q/A$  ในช่วงอุณหภูมิต่ำแสดงดังในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดงการคำนวณค่า  $q/A$  เมื่อค่า  $\Delta T$  เพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1																	
2	$\Delta x_p$	0.05															
3	$T_2$	333	$\Delta T$	$K_{21}$	$q_1$	$K_{22}$	$q_2$	$K_{23}$	$q_3$	$K_{24}$	$q_4$	$K_{25}$	$q_5$	$K_{26}$	$q_6$	$K_{27}$	$q_7$
4	$T_1$	338	5														
5		343	10														
6		348	15														
7		353	20														
8		358	25														
9		363	30														
10		368	35														
11		373	40														

ขั้นตอนการ โปรแกรมเวิร์กชีท (work sheet)

1. เกิดเวิร์กชีทใหม่ ขยายให้เต็มหน้าจอ
2. ในเขต A2:A4,C3, D3, E3, F3, G3, H3, B, , B, , K3, L3, M3, N3, O3 ,P3 และ Q3 ( แถบสีชมพู )

พิมพ์ข้อความดังในตารางที่ 3.2

3. ในเขต B2:B11 ( แถบสีเหลือง ) พิมพ์ข้อมูลตามความเป็นจริง
4. ในเขต C4 ใส่สูตรต่อไปนี้  

$$=ABS(SBS3-B4)$$
5. copy สูตรจากเขต C4 ไปวางในเขต C5:C11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ในเขต D4 ใส่สูตรต่อไปนี้

$$=(-0.0362+(-0.0362*(-0.0055249)*((\$B\$3+B4)/2)))$$

ซึ่งได้จากการคำนวณจากสมการที่ (3) หรือดูจากกราฟในภาคผนวก ก

7. copy สูตรจากเขต D4 ไปวางในเขต D5 : D11

8. ในเขต F4 ป้อนสูตรต่อไปนี้

$$=(0.023818+(0.023818*(0.00184734)*((\$B\$3+B4)/2)))$$

ซึ่งได้จากการคำนวณจากสมการที่ (3) หรือดูจากกราฟในภาคผนวก ก

9. copy สูตรจากเขต F4 ไปวางในเขต F5 : F11

10. ในเขต H4 ป้อนสูตรต่อไปนี้

$$=(-0.0049+(-0.0049*(-0.0204082)*((\$B\$3+B4)/2)))$$

ซึ่งได้จากการคำนวณจากสมการที่ (3) หรือดูจากกราฟในภาคผนวก ก

11. copy สูตรจากเขต H4 ไปวางในเขต H5 : H11

12. ในเขต J4 ป้อนสูตรต่อไปนี้

$$=(0.0026+(0.0026*0.03846154)*((\$B\$3+B4)/2)))$$

ซึ่งได้จากการคำนวณจากสมการที่ (3) หรือดูจากกราฟในภาคผนวก ก

13. copy สูตรจากเขต J4 ไปวางในเขต J5 : J11

14. ในเขต L4 ป้อนสูตรต่อไปนี้

$$=(-0.0109+(-0.0109*(-0.0183486)*((\$B\$3+B4)/2)))$$

ซึ่งได้จากการคำนวณจากสมการที่ (3) หรือดูจากกราฟในภาคผนวก ก

15. copy สูตรจากเขต L4 ไปวางในเขต L5 : L11

16. ในเขต N4 ป้อนสูตรต่อไปนี้

$$=(0.00299+(0.00299*0.03344482)*((\$B\$3+B4)/2)))$$

ซึ่งได้จากการคำนวณจากสมการที่ (3) หรือดูจากกราฟในภาคผนวก ก

17. copy สูตรจากเขต N4 ไปวางในเขต N5 : N11

18. ในเขต P4 ป้อนสูตรต่อไปนี้

$$=(-0.0246+(-0.0246*(-0.0081301)*((\$B\$3+B4)/2)))$$

ซึ่งได้จากการคำนวณจากสมการที่ (3) หรือดูจากกราฟในภาคผนวก ก

19. copy สูตรจากเขต P4 ไปวางในเขต P5 : P11

20. ในเซลล์ E4 ป้อนสูตรต่อไปนี้

$$=((D4*C4)/SBS2)$$

ซึ่งได้จากการคำนวณจากสมการที่(6)

21. copy สูตรจากเซลล์ E4 ไปวางในเซลล์ E5:E11

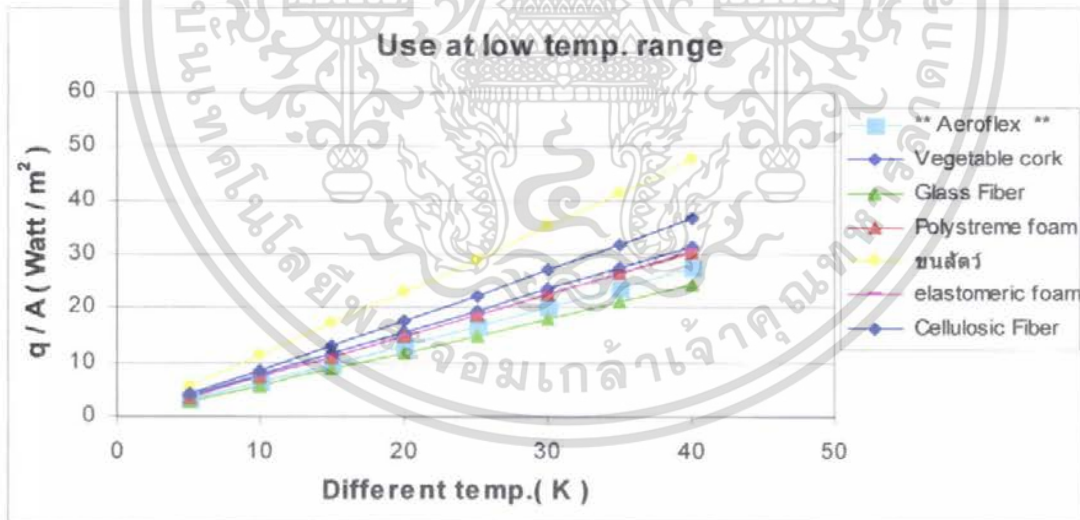
22. ในเซลล์ G4,I4,K4,M4,O4 และ Q4 ป้อนสูตรต่อไปนี้

$$=((F4*C4)/SBS2)$$

โดยเปลี่ยนจาก F4 เป็น H4,J4,L4,N4 และ P4 ตามลำดับ

23. copy สูตรจากเซลล์ G4,I4,K4,M4,O4 และ Q4 ไปวางในเซลล์ G5:G11,I5:I11,K5:K11,M5:M11,O5:O11,Q5:Q11 ตามลำดับ

24. เลือกแถบคำสั่งริเวณเซลล์ C4:C11 แล้วคลิกที่ Cell บนคีย์บอร์ดค้างไว้ เลือกแถบคำสั่ง E4:E11,G4:G11,I4:I11,K4:K11,M4:M11,O4:O11 และ Q4:Q11 ขั้นตอนนี้จะเป็นการเลือกคอลัมน์ข้ามคอลัมน์ได้ แล้วคลิกปุ่ม Chart Wizard แล้วสร้างกราฟ XY (Scatter) ดังในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $q/A$  และ  $\Delta T$  ของฉนวนในกลุ่มช่วงอุณหภูมิต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 อัตราการถ่ายเทความร้อน ( $q$ ) กับภาชนะรูปทรงต่างกัน

เป็นการทดสอบการนำความร้อนมาใช้งานกับภาชนะรูปทรงสี่เหลี่ยมและรูปทรงกระบอก เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของฉนวนในการป้องกันการสูญเสียความร้อน โดยโปรแกรมจะแสดงผลในรูปแบบของกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อน( $q$ ) กับความหนาของฉนวนที่ระดับต่างๆ กัน ( $\Delta X$ )

#### 4.3.1 รูปทรงกระบอก

ตารางที่ 3.3 แสดงการคำนวณค่า  $q$  เมื่อค่า  $\Delta X$  เพิ่มขึ้น เมื่อนำฉนวนมาหุ้มภาชนะรูปทรงกระบอก

	A	B	C	D	E	F
1	T1 (pipe)	483				
2	T2 (S-pipe)	473				
3	T3 (S-ins)	443				
4	T1-T3	40				
5	Thickness of pipe ( $\Delta x_1$ )	0.02				
6	L	1				
7	$K_A$ (aluminum)	204			$K_B$	0.0409
8	$A_{ins}$	0.3098				
9	r1	0.04				
10	r2	0.06				
11				$A_{out}$	$\Delta T$	$q$
12	r3	0.08		0.44	0.02	35.70
13		0.09		0.46	0.05	25.33
14		0.1		0.49	0.04	20.11
15		0.11		0.52	0.05	16.95
16		0.12		0.54	0.06	14.82
17		0.13		0.57	0.07	13.29
18		0.14		0.59	0.08	12.12
19		0.15		0.62	0.09	11.21
20		0.16		0.64	0.10	10.47
21		0.17		0.66	0.11	9.86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ขั้นตอนการโปรแกรมเวิร์กชีท (work sheet)

1. เวิร์กชีทใหม่ ขยายให้เต็มหน้าจอ  
 2. ในเซลล์ A1 :A10, A12, E7, D11, E11 และ F11 ( แถบสีชมพู ) พิมพ์ข้อความดังแสดง  
 ในตารางที่ 3.3

3. ในเซลล์ B1 : B3 , B 5 :B10 , B12 : B21 และ F7 ( แถบสีเหลือง ) พิมพ์ข้อมูลตามความเป็นจริง

4. ในเซลล์ B4 ป้อนสูตรต่อไปนี้

$$=B1-B3$$

5. ในเซลล์ B8 ป้อนสูตรต่อไปนี้

$$=(((B10-B9)*2*3.14*1)/(LN(B10/B9))))$$

ซึ่งได้จากการคำนวณจากสมการที่(12)

6. ในเซลล์ D12 ป้อนสูตรต่อไปนี้

$$=(((B12-\$B\$10)*2*3.14*1)/(LN(B12/\$B\$10))))$$

ซึ่งได้จากการคำนวณจากสมการที่(12)

7. copy สูตรจากเซลล์ D12 ไปวางในเซลล์ D13 : D21

8. ในเซลล์ E12 ป้อนสูตรต่อไปนี้

$$=(B12-\$B\$10)$$

9. copy สูตรจากเซลล์ E12 ไปวางในเซลล์ E13 : E21

10. ในเซลล์ F12 ป้อนสูตรต่อไปนี้

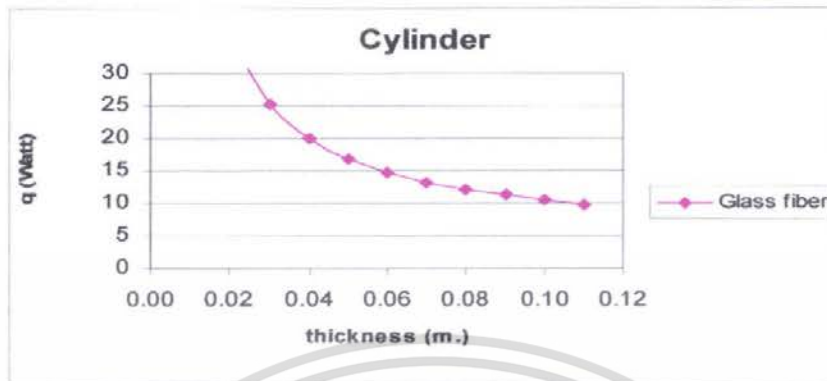
$$=(\$B\$4/((\$B\$5/(\$B\$7*\$B\$8))+((B12-\$B\$10)/(\$F\$7*D12))))$$

ซึ่งได้จากการคำนวณจากสมการที่(11)

11. copy สูตรจากเซลล์ F12 ไปวางในเซลล์ F13 : F21

12. เลือกแถบคำบริเวณเซลล์ E12 : E21 แล้วกดคีย์ Ctrl บนคีย์บอร์ดค้างไว้ เลือกแถบคำเซลล์ F12 : F21 ขั้นตอนนี้จะเป็นการเลือกคอลัมน์ข้ามคอลัมน์ได้ แล้วคลิกปุ่ม Chart Wizard แล้วสร้างกราฟ XY ( Scatter ) ดังในรูปที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $q$  และ  $\Delta X$  ของภาชนะรูปทรงกระบอก

#### 4.3.2 รูปทรงสี่เหลี่ยม

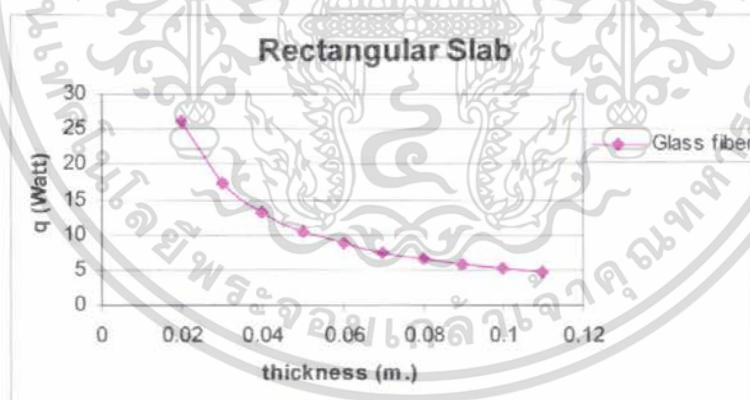
ตารางที่ 3.4 แสดงการคำนวณค่า  $q$  เมื่อค่า  $\Delta X$  เพิ่มขึ้น เมื่อนำจำนวนมาหุ้มภาชนะรูปทรง สี่เหลี่ยม

	A	B	C
1	T1 (pipe)	483	
2	T2(S-pipe)	473	
3	T3 (S-ins)	443	
4	T1-T3	40	
5	Thickness of pipe ( $\Delta x_1$ )	0.02	
6	A	0.32	
7	$K_1$ (aluminium)	204	
8			
9	Glass fiber		
10	$K_2$	0.0409	
11			
12			
13			$q$
14	Thickness of insulate ( $\Delta X_2$ )	0.02	26.1708
15		0.03	17.4484
16		0.04	13.0867
17		0.05	10.4696
18		0.06	8.7248
19		0.07	7.4784
20		0.08	6.5437
21		0.09	5.8166
22		0.1	5.2350
23		0.11	4.7591

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ขั้นตอนการโปรแกรมเวิร์กชีท (worksheet)

1. เปิดเวิร์กชีทใหม่ ขยายให้เต็มหน้าจอ
2. ในเซลล์ A1:A7, A10, A14 และ B13 (แถบสีชมพู) พิมพ์ข้อความดังในตารางที่ 3.4
3. ในเซลล์ B1:B3, B5:B7, B10 และ B14:B23 (แถบสีเหลือง) พิมพ์ข้อมูลตามความเป็นจริง
4. ในเซลล์ B4 ป้อนสูตรต่อไปนี้  
=B1+B3
5. ในเซลล์ C14 ป้อนสูตรต่อไปนี้  
=(B5\*(B6\*(B7\*B8)))+(B14\*(B10\*B8)))  
ซึ่งได้จากการคำนวณจากสมการที่(13)
6. copy สูตรจากเซลล์ C14 ไปวางในเซลล์ C15:C23
7. เลือกแถบคำสั่งบริเวณเซลล์ B14:B23 แล้วคลิกที่ Chart บนทึ่ย์บอร์ดข้างไว้ เลือกแถบคำสั่ง C14:C23 ขั้นตอนนี้จะเป็นการเลือกคอลัมน์ข้ามคอลัมน์ได้ แล้วคลิกปุ่ม Chart Wizard แล้วสร้างกราฟ XY (Scatter) ดังในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $q$  และ  $\Delta X$  ของภาชนะรูปทรงสี่เหลี่ยม

### 5. ทำการสรุปและวิจารณ์ผลการศึกษาที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการศึกษาและวิจารณ์ผลการศึกษา

4.1 กรณีที่ 1 กรณีศึกษาการหาค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่ ( $q/A$ ) ที่ระดับความหนาที่แตกต่างกันของฉนวนแต่ละชนิด

ตารางที่ 4.1 แสดงการคำนวณค่า  $q$  เมื่อค่า  $\Delta X$  เพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ

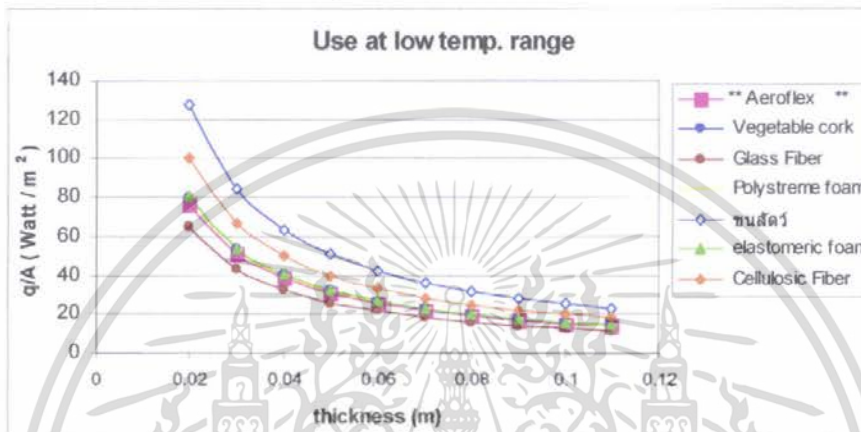
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1																
2	$T_1$	393	$K_{s1}$	0.038	$K_{s2}$	0.0402	$K_{s3}$	0.0324	$K_{s4}$	0.0399	$K_{s5}$	0.064	$K_{s6}$	0.0401	$K_{s7}$	0.0500
3	$T_2$	353														
4	$\Delta T$	40		$q_1$		$q_2$		$q_3$		$q_4$		$q_5$		$q_6$		$q_7$
5	$\Delta X_p$	0.02		76.80		80.46		64.80		79.80		127.80		80.58		100.00
6		0.03		51.70		53.64		43.50		53.20		84.93		53.72		66.67
7		0.04		38.40		40.23		32.40		39.80		63.70		40.29		50.00
8		0.05		30.72		32.18		25.92		31.92		50.96		32.23		40.00
9		0.06		25.60		26.82		21.60		26.60		42.47		26.86		33.33
10		0.07		21.04		22.09		18.51		22.80		36.40		23.02		28.57
11		0.08		19.20		20.11		16.20		19.95		31.85		20.15		25.00
12		0.09		17.07		17.88		14.40		17.73		28.31		17.91		22.22
13		0.10		15.36		16.09		12.96		15.96		25.48		16.12		20.00
14		0.11		13.96		14.63		11.78		14.51		23.16		14.65		18.18

จากการศึกษาวิเคราะห์หาค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่ ( $q/A$ ) ที่มีความสัมพันธ์กับความหนาของฉนวน โดยแบ่งพิจารณาเป็น 2 ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการใช้งานของฉนวน คือ ช่วงอุณหภูมิต่ำ ( $-270^{\circ}\text{C}$  ถึง  $100^{\circ}\text{C}$ ) และช่วงอุณหภูมิสูง ( $100^{\circ}\text{C}$  ถึง  $>500^{\circ}\text{C}$ ) จากนั้นก็ให้ความหนาของฉนวนเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ โดยเริ่มจากให้ฉนวนหนา 0.02 ม. แล้วเพิ่มขึ้นทีละ 0.01 ม. จนฉนวนมีความหนา 0.11ม. และให้อุณหภูมิของอากาศแตกต่างจากอุณหภูมิของฉนวน ( $\Delta T$ )  $40^{\circ}\text{C}$  และค่าการนำความร้อนของฉนวน ( $k_s$ ) ที่ได้จากการคำนวณ ดูจากภาคผนวก ก

จากผลการคำนวณพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่าง  $q/A$  กับ  $\Delta X$  เป็นกราฟรูปไฮเปอร์โบลา โดยค่าของ  $q/A$  จะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงความหนาของฉนวนน้อยๆ จากนั้นค่อนข้างจะคงที่เมื่อความหนาของฉนวนเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2

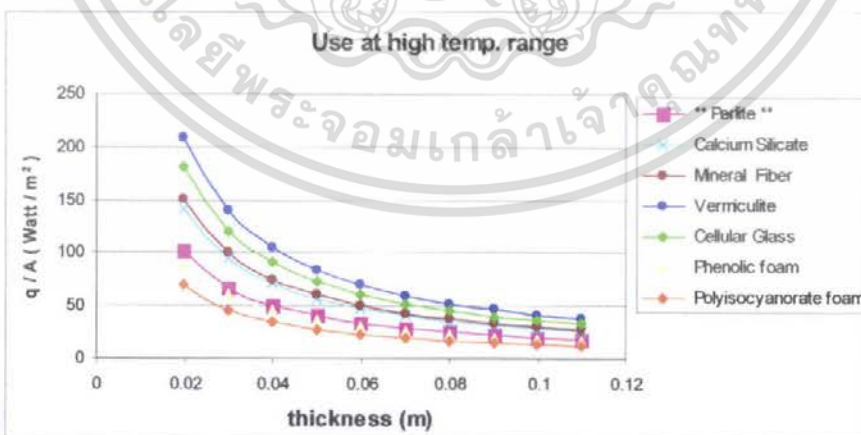
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- จนวนในกลุ่มช่วงอุณหภูมิต่ำ ( $-270^{\circ}\text{C}$  ถึง  $100^{\circ}\text{C}$ ) : จนวนที่ทำจาก Glass Fiber จะมีประสิทธิภาพช่วยลดอัตราการถ่ายเทความร้อนได้ดีที่สุด ส่วนจนวนที่ทำจากขนสัตว์จะมีประสิทธิภาพต่ำสุด ดังรูปที่ 4.1 จะสังเกตได้ว่า จนวนชนิด elastomeric foam และ Vegetable cork มีค่า  $q/A$  ใกล้เคียงกันจึงสามารถเลือกใช้แทนกันได้ โดยเลือกจนวนชนิดที่มีราคาถูกกว่า



รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $q/A$  และค่า  $\Delta X$  ของจนวนในกลุ่มช่วงอุณหภูมิต่ำ

- จนวนในกลุ่มช่วงอุณหภูมิสูง ( $100^{\circ}\text{C}$  ถึง  $>500^{\circ}\text{C}$ ) : จนวนที่ทำจาก Polyisocyanurate Foam จะมีประสิทธิภาพช่วยลดอัตราการถ่ายเทความร้อนได้ดีที่สุด ส่วนจนวนที่ทำจาก Vermiculite จะมีประสิทธิภาพต่ำที่สุด ดังรูปที่ 4.2 จะสังเกตได้ว่า จนวนชนิด Calcium Silicate และ Mineral Fiber มีค่า  $q/A$  ใกล้เคียงกันจึงสามารถเลือกใช้แทนกันได้ โดยเลือกจนวนชนิดที่มีราคาถูกกว่า



รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $q/A$  และค่า  $\Delta X$  ของจนวนในกลุ่มช่วงอุณหภูมิสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ที่ช่วงอุณหภูมิเดียวกัน ( $40^{\circ}\text{C}$ ) พบว่าค่าการนำความร้อนของฉนวน ( $k_B$ ) แต่ละชนิดจะไม่เท่ากัน โดยกลุ่มของฉนวนที่ใช้งานในช่วงอุณหภูมิต่ำ Glass Fiber มีค่า  $k_B$  ต่ำสุด (0.0304) และขนสัตว์ มีค่า  $k_B$  สูงสุด (0.0637)

4.2 กรณีที่ 2 กรณีศึกษาการหาค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่ ( $q/A$ ) ที่ช่วงอุณหภูมิระหว่างพื้นผิวที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 4.2 แสดงการคำนวณค่า  $q/A$  เมื่อค่า  $\Delta T$  เพิ่มขึ้น ที่อุณหภูมิต่ำ

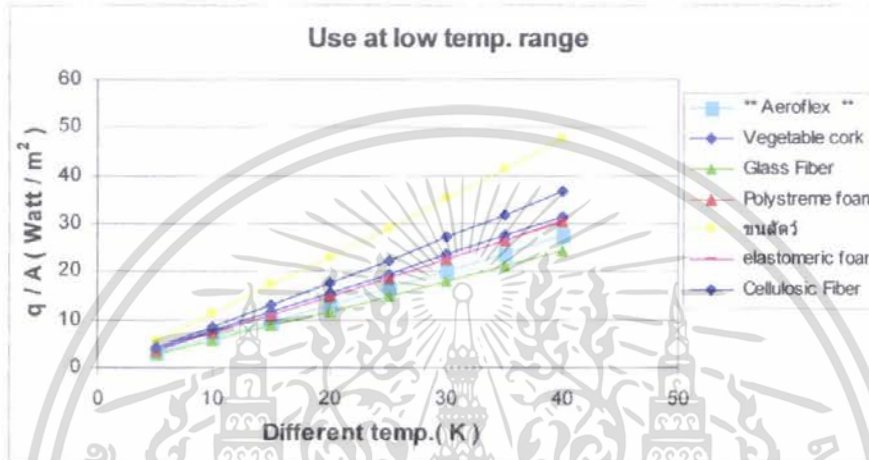
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1																	
2	$\Delta x_a$	0.05															
3	$T_1$	333	$\Delta T$	$k_B$	$q$	$k_B$	$q$	$k_B$	$q$	$k_B$	$q$	$k_B$	$q$	$k_B$	$q$	$k_B$	$q$
4	$T_1$	338	5	0.0309	3.09	0.0306	3.06	0.0257	2.57	0.0362	3.62	0.0562	5.62	0.0365	3.65	0.0425	4.25
5		343	10	0.0314	6.28	0.0387	7.74	0.0280	5.78	0.0364	7.28	0.0367	11.34	0.0368	7.36	0.0430	8.60
6		348	15	0.0319	9.57	0.0352	11.64	0.0292	8.75	0.0367	11.00	0.0372	17.16	0.0370	11.11	0.0435	13.05
7		353	20	0.0324	12.96	0.0389	15.56	0.0294	11.76	0.0372	14.76	0.0377	23.08	0.0373	14.92	0.0440	17.60
8		358	25	0.0329	16.45	0.0390	19.51	0.0297	14.83	0.0372	18.58	0.0383	29.10	0.0375	18.77	0.0445	22.25
9		363	30	0.0334	20.04	0.0391	23.46	0.0299	17.94	0.0374	22.44	0.0387	35.22	0.0378	22.67	0.0450	27.00
10		368	35	0.0339	23.73	0.0392	27.47	0.0302	21.11	0.0377	26.36	0.0392	41.44	0.0380	26.63	0.0455	31.85
11		373	40	0.0344	27.52	0.0393	31.48	0.0304	24.32	0.0379	30.32	0.0397	47.76	0.0383	30.63	0.0460	36.80

จากการศึกษาวิเคราะห์ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่ ( $q/A$ ) ที่มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิของฉนวนที่เปลี่ยนแปลง ( $\Delta T$ ) โดยแบ่งพิจารณาเป็น 2 ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการใช้งานของฉนวน คือ ช่วงอุณหภูมิต่ำ ( $-270^{\circ}\text{C}$  ถึง  $100^{\circ}\text{C}$ ) และช่วงอุณหภูมิสูง ( $100^{\circ}\text{C}$  ถึง  $>500^{\circ}\text{C}$ ) จากนั้นจึงให้อุณหภูมิของฉนวนเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ โดยที่อุณหภูมิต่ำให้ฉนวนมีอุณหภูมิเริ่มจาก 338 K แล้วเพิ่มอุณหภูมิขึ้นทีละ 5 K จนฉนวนมีอุณหภูมิ 373 K และที่อุณหภูมิสูงให้ฉนวนมีอุณหภูมิเริ่มจาก 438 K แล้วเพิ่มอุณหภูมิขึ้นทีละ 5 K จนฉนวนมีอุณหภูมิ 473 K และให้ฉนวนมีความหนา 0.05 ม. และค่าการนำความร้อนของฉนวน ( $k_B$ ) ได้จากการคำนวณ ดูจากภาคผนวก ก

จากผลการคำนวณพบว่า เมื่อให้อุณหภูมิของฉนวนเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ มีผลทำให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่เพิ่มขึ้นด้วย กราฟที่ได้จะมีลักษณะเป็นกราฟเส้นตรง

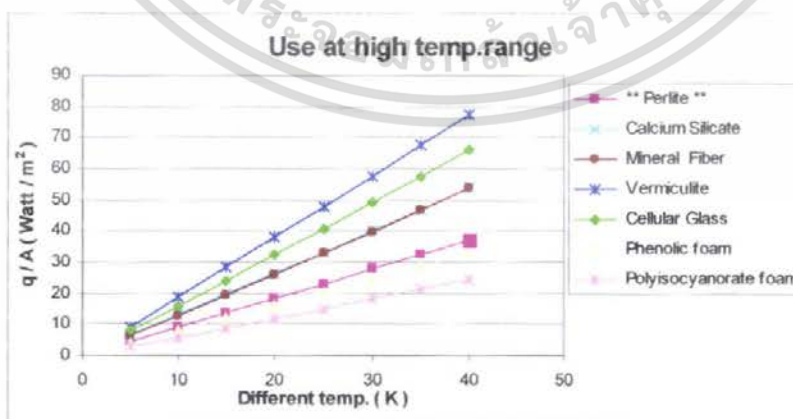
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ฉนวนในกลุ่มช่วงอุณหภูมิต่ำ ( $-270^{\circ}\text{C}$  ถึง  $100^{\circ}\text{C}$ ) : ฉนวนที่ทำจาก Glass Fiber จะมีประสิทธิภาพช่วยลดอัตราการถ่ายเทความร้อนได้ดีที่สุด ส่วนฉนวนที่ทำจากขนสัตว์จะมีประสิทธิภาพต่ำที่สุด ดังแสดงในกราฟที่ 4.3 จะสังเกตได้ว่า ฉนวนชนิด elastomeric foam และ Polystyrene มีค่า  $q/A$  ใกล้เคียงกันจึงสามารถเลือกใช้แทนกันได้ โดยเลือกฉนวนชนิดที่มีราคาถูกกว่า



รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $q/A$  และ  $\Delta T$  ที่ช่วงอุณหภูมิต่ำ

- ฉนวนในกลุ่มช่วงอุณหภูมิสูง ( $100^{\circ}\text{C}$  ถึง  $> 500^{\circ}\text{C}$ ) : ฉนวนที่ทำจาก Polyisocyanurate Foam จะมีประสิทธิภาพช่วยลดอัตราการถ่ายเทความร้อนได้ดีที่สุด ส่วนฉนวนที่ทำจาก Vermiculite จะมีประสิทธิภาพต่ำที่สุด ดังแสดงในกราฟที่ 4.4 จะสังเกตได้ว่า ฉนวนชนิด Calcium Silicate และ Mineral Fiber มีค่า  $q/A$  ใกล้เคียงกันจึงสามารถเลือกใช้แทนกันได้ โดยเลือกฉนวนชนิดที่มีราคาถูกกว่า



รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $q/A$  และ  $\Delta T$  ที่ช่วงอุณหภูมิสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ที่ระดับความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างพื้นผิวที่เพิ่มขึ้นพบว่า ทุก ๆ ค่า  $k_B$  ของฉนวนแต่ละชนิดจะเพิ่มขึ้นด้วย สามารถประเมินได้ว่าค่า  $k_B$  แปรค่าเป็นเส้นตรงกับอุณหภูมิดังสมการที่ (3)

$$k = k_0(1 + \beta T)$$

จากการเปรียบเทียบรูปที่ 4.3 กับ 4.4 จะสังเกตได้ว่าค่าความชันของรูปที่ 4.4 จะมากกว่ารูปที่ 4.3 เนื่องจากอุณหภูมิการใช้งานของฉนวนอยู่ในช่วงอุณหภูมิสูง มีผลทำให้ค่า  $k$  มีค่ามากขึ้น ส่งผลให้ค่า  $q/A$  มีค่ามากขึ้น ไปด้วย

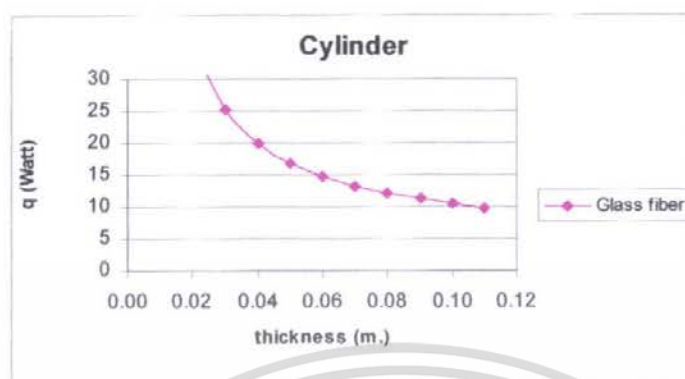
#### 4.3 กรณีที่ 3 กรณีศึกษาประสิทธิภาพของฉนวนเมื่อนำมาใช้หุ้มกับภาชนะรูปทรงแตกต่างกัน

จากการศึกษาโดยใช้ฉนวนที่ทำจาก Glass Fiber ซึ่งควบคุมให้ปัจจัยต่างๆ คือค่า  $k$  ของตัวภาชนะ และฉนวน, อุณหภูมิระหว่างพื้นผิวของฉนวน, ขนาดภาชนะ, ระดับความหนาของฉนวนที่เพิ่มขึ้นมีค่าเท่ากัน มาหุ้มอุปกรณ์หรือภาชนะที่เป็นรูปทรงกระบอก (Cylinder) และรูปทรงสี่เหลี่ยม (Rectangular) โดยให้ความหนาของฉนวนเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดยเริ่มจากให้ฉนวนหนา 0.02 ม. แล้วเพิ่มขึ้นทีละ 0.01 ม. ฉนวนมีความหนา 0.11 ม. และให้อุณหภูมิของภาชนะแตกต่างจากอุณหภูมิจฉนวน ( $\Delta T$ )

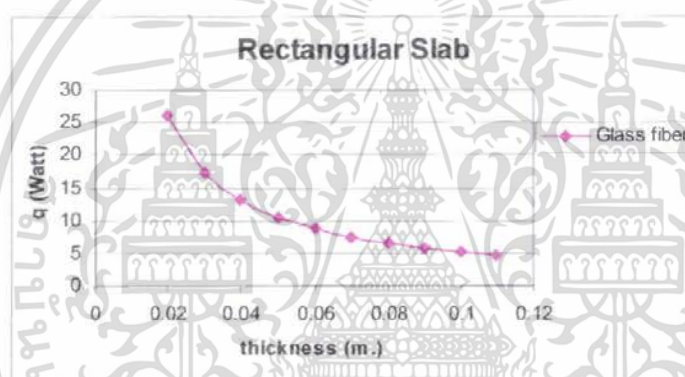
40 °C และค่าการนำความร้อนของฉนวน ( $k_B$ ) ได้จากการคำนวณ ดูจากภาคผนวก ก

จากการคำนวณพบว่า การสูญเสียความร้อนของภาชนะรูปทรงสี่เหลี่ยมจะมีอัตราการสูญเสียความร้อนน้อยกว่าภาชนะที่เป็นรูปทรงกระบอกได้ประมาณ 2 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 4.5 และ 4.6

เนื่องจากพื้นที่ผิวในการถ่ายเทความร้อนของภาชนะรูปทรงสี่เหลี่ยมกับฉนวนด้านนอกมีค่าเท่ากัน และความร้อนมีการเคลื่อนที่ในทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิว ส่วนภาชนะรูปทรงกระบอกมีพื้นที่ผิวในการถ่ายเทความร้อนในแต่ละชั้นไม่เท่ากัน โดยความร้อนมีการเคลื่อนที่ในแนวรัศมีตั้งฉากกับพื้นผิวในลักษณะทรงกรวยตามรัศมีที่เพิ่มขึ้น จึงทำให้พื้นที่ผิวในการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ภาชนะรูปทรงสี่เหลี่ยมมีประสิทธิภาพในการป้องกันการสูญเสียความร้อนได้ดีกว่าภาชนะรูปทรงกระบอก



รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $q$  และ  $\Delta X$  เมื่อภาชนะเป็นรูปทรงกระบอก



รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $q$  และ  $\Delta X$  เมื่อภาชนะเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม

#### 4.4 ข้อเสนอแนะที่ได้จากการศึกษา มีดังต่อไปนี้

1. การเพิ่มความหนาของฉนวนสำหรับภาชนะหรืออุปกรณ์ในกระบวนการผลิต แต่อาจเป็นการเพิ่มต้นทุนการผลิต ดังนั้นต้องควบคุมให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม
2. ควรเลือกใช้ฉนวนที่มีค่าการนำความร้อน ( $k$ ) ต่ำๆ และมีคุณภาพเหมาะสมสำหรับภาชนะหรืออุปกรณ์
3. ควรเลือกใช้ชนิดของฉนวนให้เหมาะสมกับช่วงอุณหภูมิการใช้งาน เพื่อเป็นการควบคุมค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ( $k$ ) ของฉนวนไม่ให้แปรผันมากจนเกินไป
4. ควรคำนึงถึงค่าทางเศรษฐศาสตร์ (ราคาชุดฉนวน) ควบคู่ไปกับประสิทธิภาพของฉนวนแต่ละชนิดด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5  
สรุปผลการศึกษา

1. ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน ( $q$ ) จะลดลงได้ถ้าเพิ่มความหนาให้ฉนวน ( $\Delta x$ ) ที่หุ้มอุปกรณ์ หรือทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างพื้นผิวของฉนวน ( $\Delta T$ ) มีค่าลดลง โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $q$  กับ  $\Delta x$  จะเป็นกราฟรูปไฮเปอร์โบลา ส่วนระหว่างค่า  $q$  กับ  $\Delta T$  จะเป็นกราฟเส้นตรง
2. ค่าการนำความร้อนจะแปรผันเป็นเส้นตรงกับอุณหภูมิและมีผลกับอัตราการถ่ายเทความร้อน ดังนั้นที่ความหนาเดียวกันควรเลือกใช้ฉนวนที่มีค่าการนำความร้อนต่ำๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการลดอัตราการถ่ายเทความร้อนและที่อุณหภูมิเดียวกัน ค่าการนำความร้อนของฉนวนแต่ละชนิดจะไม่เท่ากัน
3. ฉ.ช่วงอุณหภูมิต่ำ (-270 ถึง 100 °C) ฉนวนที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดคือ Glass Fiber และต่ำที่สุดคือ ขนสัตว์ ส่วนช่วงอุณหภูมิสูง (100 ถึง > 500 °C) ฉนวนที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดคือ Polyisocyanurate Foam และต่ำที่สุดคือ Vermiculite
4. ภาชนะหรืออุปกรณ์รูปทรงสี่เหลี่ยมจะมีประสิทธิภาพช่วยลดอัตราการสูญเสียความร้อนได้ดีกว่ารูปทรงกระบอกประมาณ 2 เท่า

## เอกสารอ้างอิง

### ภาษาไทย

1. รัชยาภรณ์ จันทะเดช และ ศรีัญญา ช่วงพิมาย. 2544. ฉนวนความร้อนจากกากสับประรด. ปัญหาพิเศษ (วท.บ. (อุตสาหกรรมเกษตร)). สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. กรุงเทพมหานคร. 34 หน้า
2. พงษ์เจตน์ พรหมวงศ์. 2534. การถ่ายเทความร้อน. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. กรุงเทพมหานคร.
3. นาวาอากาศตรีตระการ ก้าวกลีกรรม. 2537. คู่มือฉนวนกันความร้อน. เอ็มแอนด์อี: กรุงเทพมหานคร. 312 หน้า
4. ผศ. วิจิตร บุญชูโรกุล. 2542. ระบบทำความเย็น ตู้เย็น-ห้องเย็น. คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. กรุงเทพมหานคร.
5. รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต. 2535. วิศวกรรมแปรรูปอาหาร: การถนอมอาหาร. ภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตร คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง. กรุงเทพมหานคร.
6. รศ. สุพันธ์ ศรีณนิคย์. 2545. การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer). สำนักพิมพ์สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น). กรุงเทพมหานคร.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาษาอังกฤษ

1. R.Paul Singh Dennis R.Heldman. 1993. Introduction to Food Engineering . Academic Press. San Diego, california, USA.
2. Frank P. John Wiley & San. 1998. Fundamental of Heat and Mass Transfer. McGraw-Hill, Singapore.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

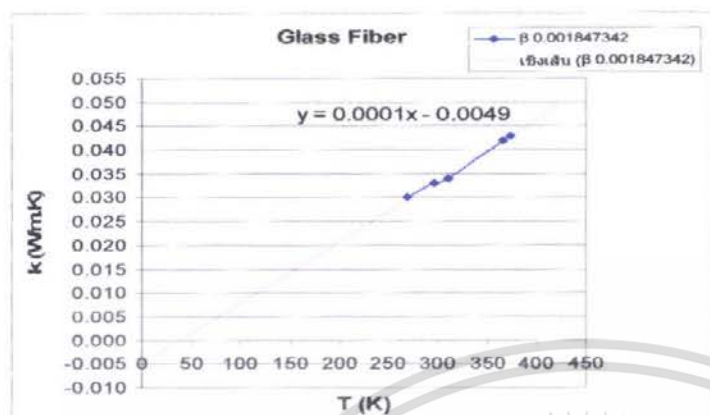
### อุณหภูมิต่ำและอุณหภูมิปานกลาง

Vegetable cork	
T	k
241	0.034
269	0.036
297	0.037
311	0.037
slope	0.000044
ko	0.023818
$\beta$	0.00184734

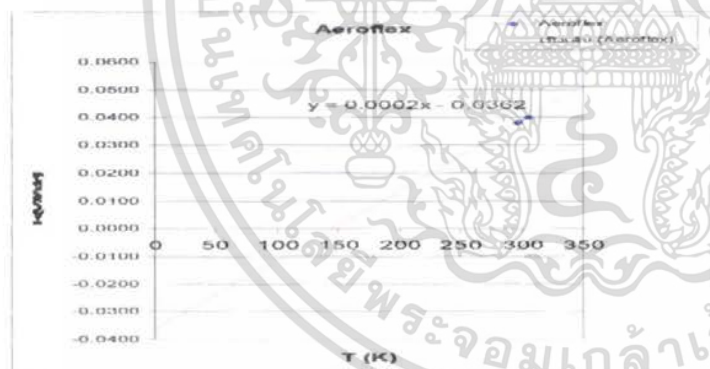


Glass Fiber	
T	k
269	0.03
297	0.033
311	0.034
366	0.042
373	0.043
slope	0.0001
ko	-0.0049
$\beta$	-0.0204082

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

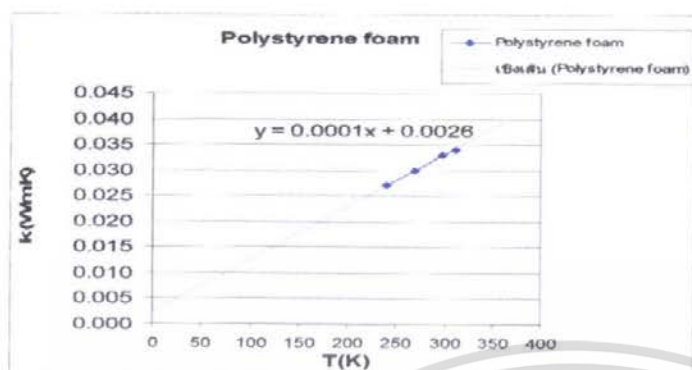


Aeroflex	
T	k
297	0.038
305	0.04
slope	0.0002
ko	-0.0362
$\beta$	-0.0055249

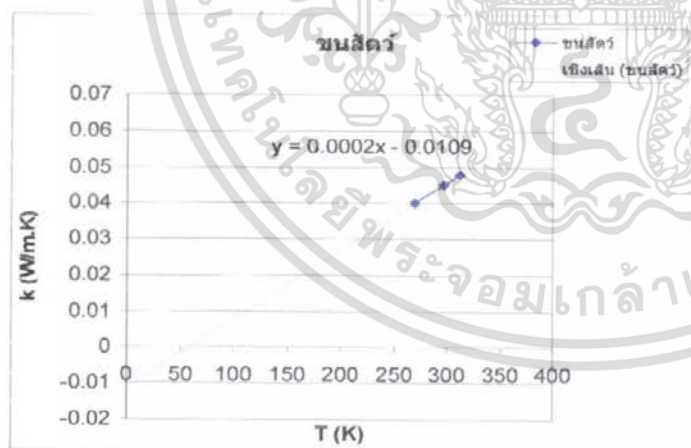


Polystyrene foam	
T	k
241	0.027
269	0.03
297	0.033
311	0.034
slope	0.0001
ko	0.0026
$\beta$	0.03846154

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

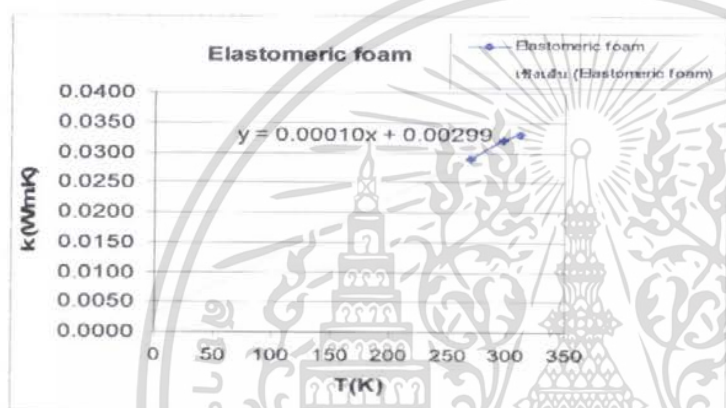


ชนิดวัสดุ	
T	k
269	0.04
297	0.045
311	0.048
slope	0.0002
ko	-0.0109
$\beta$	-0.0183486

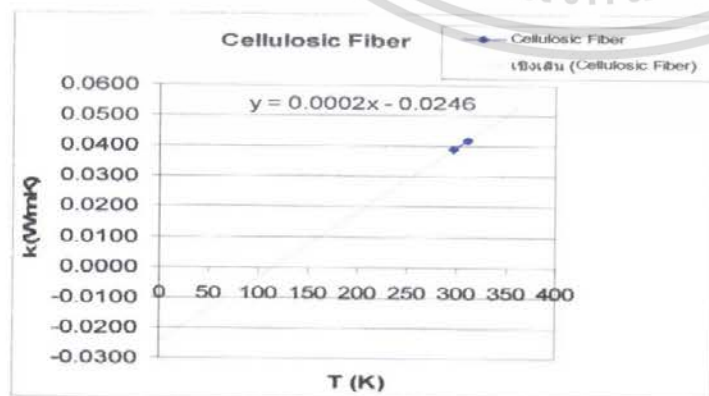


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Elastomeric foam	
T	k
269	0.029
297	0.032
311	0.033
slope	0.0001
ko	0.00299
$\beta$	0.03344482



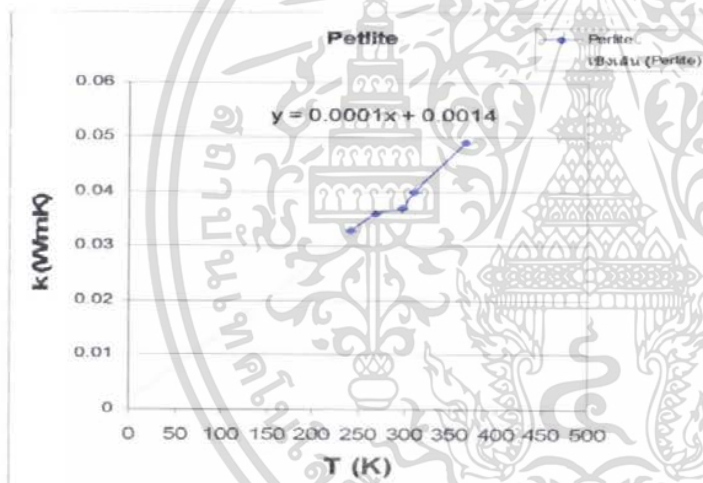
Cellulosic Fiber	
T	k
297	0.039
311	0.042
slope	0.0002
ko	-0.0246
$\beta$	-0.0081301



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

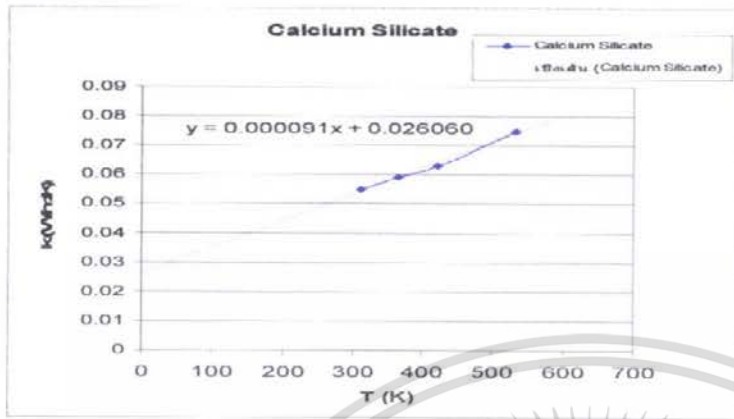
## อุณหภูมิสูง

Perlite	
T	k
241	0.033
269	0.036
297	0.037
311	0.04
366	0.049
slope	0.0001
$k_0$	0.0014
$\beta$	0.07142857

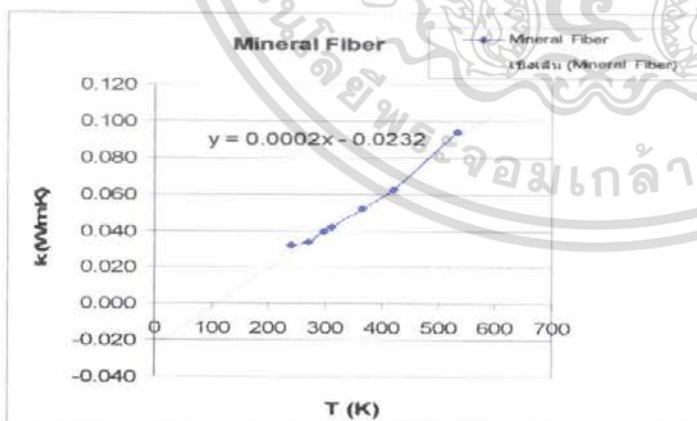


Calcium Silicate	
T	k
311	0.055
366	0.059
422	0.063
533	0.075
slope	0.000091
$k_0$	0.02606
$\beta$	0.00349194

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

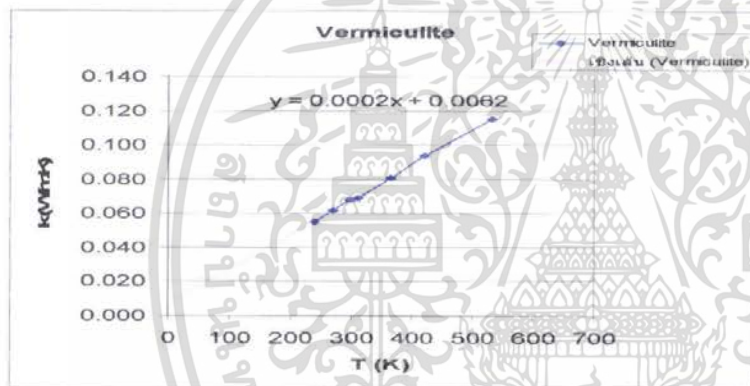


Mineral Fiber	
T	k
241	0.032
269	0.034
297	0.04
311	0.042
366	0.052
422	0.063
533	0.094
slope	0.0002
$k_0$	-0.0232
$\beta$	-0.0086207



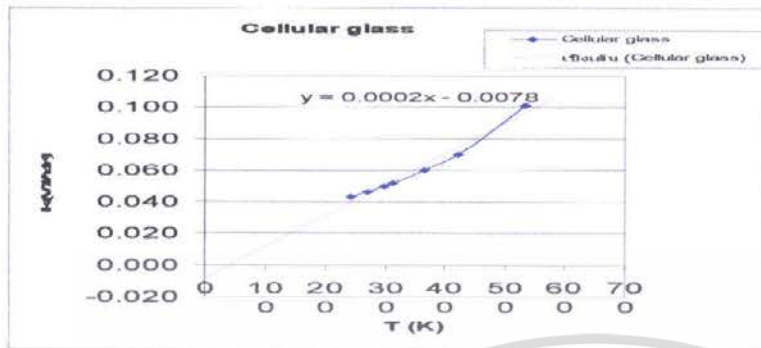
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Vermiculite	
T	k
241	0.055
269	0.062
297	0.068
311	0.069
366	0.081
422	0.094
533	0.115
slope	0.0002
$k_0$	0.0062
$\beta$	0.03225806

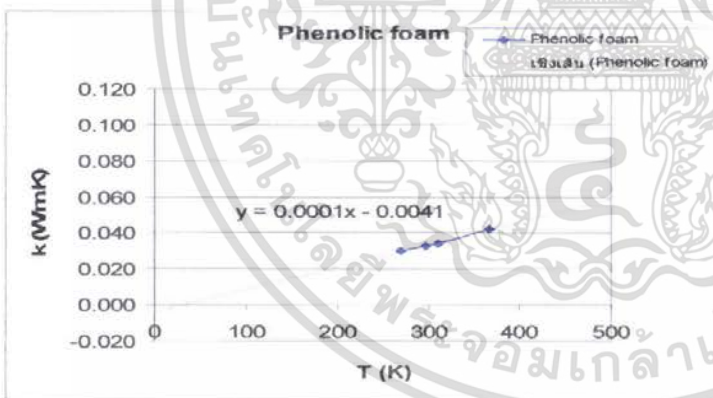


Cellular glass	
T	k
241	0.043
269	0.046
297	0.05
311	0.052
366	0.06
422	0.07
533	0.101
slope	0.0002
$k_0$	-0.0078
$\beta$	-0.025641

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

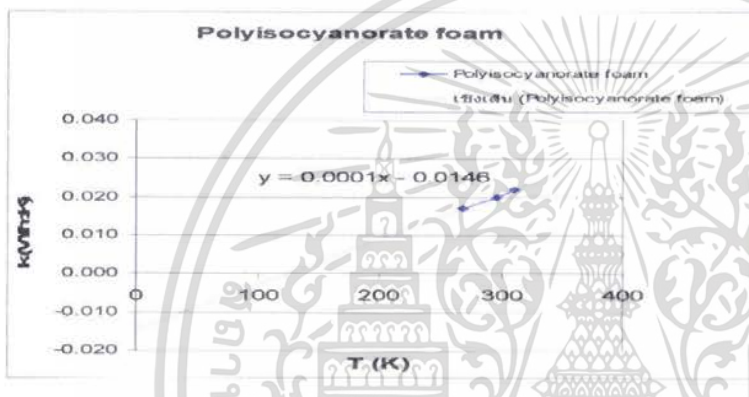


Phenolic foam	
T	k
269	0.03
297	0.033
311	0.034
366	0.042
slope	0.0001
$k_0$	-0.0041
$\beta$	-0.0243902



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Polyisocyanurate foam	
T	k
269	0.017
297	0.02
311	0.022
slope	0.0001
$k_0$	-0.0146
$\beta$	-0.0068493



หมายเหตุ : ตรวจสอบราคามวลชนิดต่างๆ ได้จากบริษัทที่ผลิต เช่น

- หจก. ตะวันออก อิมพอร์ต-เอ็กซ์พอร์ต
- บริษัท ไมโครไฟเบอร์อุตสาหกรรม จำกัด
- บริษัท เกรทวอล (1988) จำกัด
- หจก. เกียรติชนวัฒน์
- บริษัท ฟอสเตอร์ (ประเทศไทย) จำกัด
- บริษัท บางกอกอินซูเลท จำกัด
- บริษัท นครไทย จำกัด
- บริษัท เบย์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 (ข) ปริมาณสำคัญในการถ่ายเทความร้อนพร้อมด้วยหน่วย

ปริมาณ	สัญลักษณ์	หน่วย	
		SI	อังกฤษ
ความร้อน	H	j	Btu
อัตราการถ่ายเทความร้อน	Q	W	Btu / h
ค่าการนำความร้อน	k	W/m.K	Btu/hft <sup>0</sup> F
ความแตกต่างของอุณหภูมิ	T	K	<sup>0</sup> F
ขนาดของวัตถุที่มีหน่วยเป็นความยาว	L	M	ft

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก  
แสดงตารางเปรียบเทียบความยาว ระยะทาง พื้นที่ และสูตรการเปลี่ยนมาตราเซลเซียสและฟาเรนไฮต์  
เป็นมาตราเคลวิน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ตารางเปรียบเทียบ (Conversion Tables)

#### ความยาวและระยะทาง : Lengths & Distances

ซม.	ม.	กม.	นิ้ว	ฟุต	หลา	ไมล์
1	0.01	0.00001	0.3937	0.03281	0.01094	$6.21 \times 10^{-6}$
100	1	0.001	39.37	3.281	1.0936	$6.21 \times 10^{-4}$
100000	1000	1	39370.1	3280.84	1093.61	0.62137
2.54	0.0254	$2.54 \times 10^{-5}$	1	0.0833	0.2778	$1.58 \times 10^{-5}$
30.48	0.3048	$3.05 \times 10^{-4}$	12	1	0.3333	$1.89 \times 10^{-4}$
91.44	0.9144	$9.1 \times 10^{-4}$	36	3	1	$5.68 \times 10^{-4}$
$1.61 \times 10^5$	1.609	1.60934	63360	5280	1760	1

#### พื้นที่ : Areas

ตร.ซม.	ตร.ม.	ตร.กม.	ตร.นิ้ว	ตร.ฟุต	ตร.หลา	ตร.ไมล์
1	0.0001	$1 \times 10^{-10}$	0.155	0.00108	0.000102	$3.86 \times 10^{-6}$
$1 \times 10^4$	1	$1 \times 10^{-6}$	1.550	10.76	1.196	$3.86 \times 10^{-7}$
$1 \times 10^{10}$	$1 \times 10$	1	$1.55 \times 10^9$	$1.08 \times 10^7$	$1.196 \times 10^6$	0.3861
6.452	$6.45 \times 10^{-4}$	$6.45 \times 10^{-10}$	1	0.00694	$7.71 \times 10^{-4}$	$2.49 \times 10^{-10}$
929.0	0.09290	$9.29 \times 10^{-8}$	144	1	0.1111	$3.59 \times 10^{-8}$
8361.27	0.8361	$8.36 \times 10^{-7}$	1296	9	1	$3.23 \times 10^{-7}$
$2.59 \times 10^{10}$	$2.59 \times 10^6$	2.590	$4.01 \times 10^9$	$2.79 \times 10^7$	$3.098 \times 10^6$	1

#### สูตรการเปลี่ยนมาตราเซลเซียสและฟาเรนไฮต์เป็นมาตราเคลวิน

$$\underline{\quad} K = \underline{\quad} ^\circ C + 273.15$$

$$\underline{\quad} K = 5(\underline{\quad} ^\circ F - 32)/9 + 273.15$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของแคลเซียมซิลิเกต

คุณสมบัติ	แคลเซียมซิลิเกต
สภาพนำความร้อนปรากฏ (k), W/m.K	0.05
สภาพต้านทานความร้อนปรากฏ (R), m.K/W	19.84
ความหนาแน่นของวัสดุ $\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	208.26
ความร้อนจำเพาะ (Cp), kJ/kg°C	1.17
สภาพแพร่กระจายความร้อน ( $\infty$ ), m <sup>2</sup> /s	2.06 X 10 <sup>-7</sup>
อุณหภูมิใช้งานสูงสุด ,°C	650
สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน, m/m°C	0
ความจุของเซลล์ที่ซิดกัน, เปอร์เซ็นต์	-
ค่าแทรกซึม ความชื้น, perm-cm <sup>1</sup>	สูงมาก
ค่าดูดซึมน้ำ, เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร	90
การกักความร้อนวัสดุที่ถูกกลั่นนวม	ไม่มี
สภาพการติดไฟ	
ระดับการกระจายของเปลวไฟ	0
ระดับการมีส่วนเป็นเชื้อเพลิง	0
ระดับการเกิดควัน	0
การเสื่อมสภาพลงจากผลของ:	
อุณหภูมิที่เป็นวัฏจักร	ไม่มี
สัตว์จำพวกหนู หมด ไล่เดือนนก ฯลฯ	ไม่มี
ความชื้น	ชั่วคราว
เชื้อรา/แบคทีเรีย	ไม่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของเซลล์ลาร์กลาส

คุณสมบัติ	เซลล์ลาร์กลาส	ใยเซลล์โลส
สภาพนำความร้อนปรากฏ (k), W/m.K	0.055	0.04-0.045
สภาพต้านทานความร้อนปรากฏ (R), m.K/W	18.18	22.22-25
ความหนาแน่นของวัสดุ $\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	136.17	41.65-48.06
ความร้อนจำเพาะ (Cp), kJ/kg°C		
สภาพแพร่กระจายความร้อน ( $\infty$ ), m <sup>2</sup> /s	0.75 5.42 X 10 <sup>-7</sup>	1.38 5.93 X 10 <sup>-7</sup>
อุณหภูมิใช้งานสูงสุด ,°C		
สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน, m/m°C	650 8.28 X 10 <sup>-6</sup>	82
ความขรุขระของเซลล์ที่ชิดกัน, เปอร์เซ็นต์		
ค่าแทรกซึม ความชื้น, perm-cm <sup>1</sup>	100	
ค่าดูดซึมน้ำ, เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร		
การกักความร้อนวัสดุที่ถูกฉนวนหุ้ม	0	สูง
สภาพการติดไฟ	5 (ผิวเท่านั้น)	98 (โดยน้ำหนัก)
ระดับการกระจายของเปลวไฟ	ไม่มี	อาจกักความร้อนเหล็กกล้า อลูมิเนียม ทองแดง
ระดับการมีส่วนเป็นเชื้อเพลิง	5	15-40
ระดับการเกิดควัน	0	0-40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางที่ 2 (ต่อ)

<p>การเสื่อมสภาพจากผลของ: อุณหภูมิที่เป็นวัฏจักร</p> <p>สัตว์จำพวกหนู      หมด</p> <p>ไส้เดือนนก ฯลฯ</p> <p>ความชื้น</p> <p>เชื้อรา/แบคทีเรีย</p>	<p>การแข็งตัวของน้ำที่อยู่ในช่อง ฉนวนอาจทำลายฉนวน</p> <p>ไม่มี</p> <p>ไม่มี</p> <p>ไม่มี</p>	<p>อาจเป็นสาเหตุให้เกิดการยุบตัว</p> <p>ขึ้นอยู่กับการทำงาน</p> <p>สมรรถนะทางความร้อนลดลง</p> <p>อาจเจริญเติบโต</p>
---	--	---



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3 คุณสมบัติของ โฟม (ยางแบบขยาย) ชนิดสารยึดหยุ่น

คุณสมบัติ	โฟมชนิดสารยึดหยุ่น
สภาพนำความร้อนปรากฏ (k), W/m.K	0.037
สภาพต้านทานความร้อนเม็ร้อนบว แกน (K), m.K/W	27.03
ความหนาแน่นของวัสดุ $\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	64.0
ความร้อนจำเพาะ (Cp), kJ/kg°C	0.837
สภาพแพร่กระจายความร้อน ( $\infty$ ), m <sup>2</sup> /s	6.97 X 10 <sup>-7</sup>
อุณหภูมิใช้งานสูงสุด, °C	104
สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน, m/m°C	-
ความจุของเซลล์ที่ซิดกัน, เปอร์เซนต์	> 90
ค่าแทรกซึม ความชื้น, perm-cm	0.18-0.25
ค่าดูดซึมน้ำ, เปอร์เซนต์โดยปริมาตร	3-6
การกักร้อนวัสดุที่ถูกฉนวนหุ้ม	ไม่มี
สภาพการติดไฟ	ชนิด I      ชนิด II
ระดับการกระจายของเปลวไฟ	50-70      25
ระดับการมีส่วนเป็นเชื้อเพลิง	ลูกไหม้      ลูกไหม้
ระดับการมีควัน	340-450      100-150
การเสื่อมสภาพลงจากผลของ:	
อุณหภูมิที่เป็นวัฏจักร	หดตัวลง 5% เมื่อใช้กับอุณหภูมิ 93 °C เป็นเวลา 7 วัน
สัตว์จำพวกหนู หมัด ไล่เดือนนก ฯลฯ	ไม่มี
ความชื้น	ไม่มี
เชื้อรา/แบคทีเรีย	ไม่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4 คุณสมบัติของใยแก้ว

คุณสมบัติ	แบบเส้นใย อัดเป็นแผ่น	แบบลูสฟิลล์	แบบแผ่นหนา
สภาพนำความร้อนปรากฏ (k), W/m.K	0.045	0.05	0.036
สภาพต้านทานความร้อนปรากฏ (R), m.K/W	22.4	20	27.78
ความหนาแน่นของวัสดุ $\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	16.02	16.02	64.0
ความร้อนจำเพาะ (Cp), kJ/kg°C	0.84	0.084	1.256
สภาพแพร่กระจายความร้อน ( $\infty$ ), m <sup>2</sup> /s	0.33 X 10 <sup>-5</sup>	0.38 X 10 <sup>-5</sup>	0.04 X 10 <sup>-5</sup>
อุณหภูมิใช้งานสูงสุด, °C	190	540	205
สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน, m/m°C	-	-	-
ความจุของเซลล์ที่ชิดกัน, เปอร์เซ็นต์	180	180	180
ค่าแทรกซึม ความชื้น, perm-cm	1	1	1
ค่าดูดซึมน้ำ, เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี
การกักความร้อนวัสดุที่ถูกฉนวนหุ้ม			
สภาพการติดไฟ			
ระดับการกระจายของเปลวไฟ	15-20	15-20	15-20
ระดับการมีส่วนเป็นเชื้อเพลิง	5-15	5-15	5-15
ระดับการเกิดควัน	0-20	0-20	0-20
การเสื่อมสภาพลงจากผลของ:			
อุณหภูมิที่เป็นวัฏจักร	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี
สัตว์จำพวกหนู หนัด ไล่เดือนนก ฯลฯ	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี
ความชื้น	ชั่วคราว	ชั่วคราว	ชั่วคราว
เชื้อรา/แบคทีเรีย	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5 คุณสมบัติของใยแร่

คุณสมบัติ	แบบเส้นใย อัดเป็นแผ่น	แบบลูสฟิลล์	แบบแผ่นอัด
สภาพนำความร้อนปรากฏ (k), w/m.K	0.045	0.046	0.04
สภาพต้านทานความร้อนปรากฏ (R), m.K/W	22.4	21.7	24.8
ความหนาแน่นของวัสดุ $\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	32.04	27.23	144.2-176.2
ความร้อนจำเพาะ (Cp), kJ/kg°C	0.837	0.837	0.837
สภาพแพร่กระจายความร้อน ( $\infty$ ), m <sup>2</sup> /s	1.68 X 10 <sup>-6</sup>	2.01 X 10 <sup>-6</sup>	0.77 X 10 <sup>-6</sup>
อุณหภูมิใช้งานสูงสุด, °C	205	650	260
สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน, m/m°C	-	-	-
ความจุของเซลล์ที่ชิดกัน, เปอร์เซนต์	-	-	-
ค่าแทรกซึม ความชื้น, perm-cm	สูง	สูง	สูง
ค่าดูดซึมน้ำ, เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก	2	2	2
การกักความร้อนวัสดุที่ถูกฉนวนหุ้ม	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี
สภาพการติดไฟ			
ระดับการกระจายของเปลวไฟ	15	0	15
ระดับการมีส่วนเป็นเชื้อเพลิง	0	0	0
ระดับการเกิดควัน	0	0	0
การเสื่อมสภาพลงจากผลของ:			
อุณหภูมิที่เป็นวัฏจักร	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี
สัตว์จำพวกหนู หมัด ไล่เดือนนก ฯลฯ	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี
ความชื้น	ชั่วคราว	ชั่วคราว	ชั่วคราว
เชื้อรา/แบคทีเรีย	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6 คุณสมบัติของเพอร์ไลต์

คุณสมบัติ	แบบดูสฟิลด์	แบบแผ่นหลังคา
สภาพนำความร้อนปรากฏ (k), W/m.K	0.04	0.055
สภาพต้านทานความร้อนปรากฏ (R), m.K/W	25	18.275
ความหนาแน่นของวัสดุ $\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	80	160
ความร้อนจำเพาะ (Cp), kJ/kg°C	1.256	1.047
สภาพแพร่กระจายความร้อน ( $\infty$ ), m <sup>2</sup> /s	3.87X10 <sup>-7</sup>	3.35 X10 <sup>-7</sup>
อุณหภูมิใช้งานสูงสุด, °C	980	93
สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน, m/m°C	-	-
ความจุของเซลล์ที่ชิดกัน, เปอร์เซ็นต์	-	-
ค่าแทรกซึม ความชื้น, perm-cm	สูง	45
ค่าดูดซึมน้ำ, เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	สูง	1.5
การกักความร้อนวัสดุที่ถูกฉนวนหุ้ม	ไม่มี	ไม่มี
สภาพการติดไฟ		
ระดับการกระจายของเปลวไฟ	0	0
ระดับการมีส่วนเป็นเชื้อเพลิง	0	0
ระดับการเกิดควัน	0	0
การเสื่อมสภาพลงจากผลของ:		
อุณหภูมิที่เป็นวัฏจักร	ไม่มี	ไม่มี
สัตว์จำพวกหนู หนัด	ไม่มี	ไม่มี
ใส่เคื่อนนก ฯลฯ		
ความชื้น	ชั่วคราว	ชั่วคราว
เชื้อรา/แบคทีเรีย	ไม่มี	ไม่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7 คุณสมบัติของฟีนอลิกโฟม

คุณสมบัติ	ฟีนอลิกโฟม
สภาพนำความร้อนปรากฏ (k), W/m.K	0.033
สมเพดต้านทานความร้อนปรากฏ (R), m.K/W	30.19
ความหนาแน่นของวัสดุ $\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	32-48
ความร้อนจำเพาะ (Cp), kJ/kg°C	ไม่รู้
สภาพแพร่กระจายความร้อน ( $\infty$ ), m <sup>2</sup> /s	ไม่รู้
อุณหภูมิใช้งานสูงสุด, °C	135
สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน, m/m°C	90X10 <sup>-6</sup>
ความจุของเซลล์ที่ชิดกัน, เปอร์เซ็นต์	75
ค่าแทรกซึม ความชื้น, perm-cm	ต่ำมาก
ค่าดูดซึมน้ำ, เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	0.4-0.8
การกักความร้อนวัสดุที่ถูกฉนวนหุ้ม	ไม่มี
สภาพการติดไฟ	
ระดับการกระจายของเปลวไฟ	0-25
ระดับการมีส่วนร่วมเป็นเชื้อเพลิง	สามารถติดไฟได้
ระดับการเกิดควัน	0-50
การเสื่อมสภาพลงจากผลของ:	
อุณหภูมิที่เป็นวัฏจักร	จะหดตัวลง 1.3 % เมื่ออุณหภูมิที่สัมผัสเท่ากับ
สัตว์จำพวกหนู หนัด ไล่เดือนนก ฯลฯ	49°C นาน 7 วัน
ความชื้น	ไม่มี
เชื้อรา/แบคทีเรีย	ไม่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 8 คุณสมบัติของโพลีสไตรีนโฟม

คุณสมบัติ	แบบโฟมอัดรีด	แบบโฟมหล่อ, แผ่นอัด
สภาพนำความร้อนปรากฏ (k), W/m.K	0.029	0.036
สัมประสิทธิ์แทนค่าความร้อนปรากฏ (R), m.K/W	34.48	27.78
ความหนาแน่นของวัสดุ $\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	28.84-41.65	24.03
ความร้อนจำเพาะ (Cp), kJ/kg°C	1.13	1.13
สภาพแพร่กระจายความร้อน ( $\infty$ ), m <sup>2</sup> /s	8.77X10 <sup>-7</sup>	1.34 X10 <sup>-7</sup>
อุณหภูมิใช้งานสูงสุด, °C	80	80
สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน, m/m°C	63X10 <sup>-6</sup>	63 X10 <sup>-6</sup>
ความจุของเซลล์ที่ชิดกัน, เปอร์เซ็นต์	85	85
ค่าแทรกซึม ความชื้น, perm-cm	1.08-1.62	2.16-5.4
ค่าดูดซึมน้ำ, เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	0.5-0.7	3.8-4.0
การกัดกร่อนวัสดุที่ถูกฉนวนหุ้ม	ไม่มี	ไม่มี
สภาพการติดไฟ		
ระดับการกระจายของเปลวไฟ	5-25	5-25
ระดับการมีส่วนเป็นเชื้อเพลิง	5-80	5-28
ระดับการเกิดควัน	10-400	10-400
การเสื่อมสภาพลงจากผลของ:		
อุณหภูมิที่เป็นวัฏจักร	ไม่มี	ไม่มี
สัตว์จำพวกหนู หนัด ไล่เดือนนก ฯลฯ	ไม่มี	ไม่มี
ความชื้น	ไม่มี	ไม่มี
เชื้อรา/แบคทีเรีย	ไม่มี	ไม่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 9 คุณสมบัติของโพลียูรีเทน/ โพลีไอโซไซยานูเรตโฟม

คุณสมบัติ	โพลียูรีเทน	โพลีไอโซไซยานูเรตโฟม
สภาพนำความร้อนปรากฏ ( k ), W/m.K	0.023	0.023
สภาพต้านทานความร้อนปรากฏ(R ), m.K/W	43.48	43.48
ความหนาแน่นของวัสดุ , $\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	32.04	32.04
ความร้อนจำเพาะ(Cp) , kJ/kg °C	1.59	1.59
สภาพแพร่กระจายความร้อน $\alpha$ , m <sup>2</sup> /s	$4.5 \cdot 10^{-7}$	$4.5 \cdot 10^{-7}$
อุณหภูมิใช้งานสูงสุด °C	120	120
สัมประสิทธิ์ของการขยายตัวทางความร้อน m/m °C	$90 \cdot 10^{-7}$	$90 \cdot 10^{-7}$
ความจุของเซลล์ที่ติดกัน ,(%)	90	90
ค่าแทรกซึม ความชื้น, per- cm	3.6-5.4	3.6-5.4
ค่าดูดซึมน้ำ , % โดยน้ำหนัก	1.3	1.3
การกักความร้อนวัสดุที่ถูกฉนวนหุ้ม	ไม่มี	ไม่มี
สภาพการติดไฟ		
ระดับการกระจายของเปลวไฟ	25-75	0-25
ระดับการมีส่วนเป็นเชื้อเพลิง	10-25	0-5
ระดับการเกิดควัน	155-500	55-200
การเสื่อมสภาพลงจากผลของ :		
อุณหภูมิที่เป็นวัฏจักร	ไม่มี	ไม่มี
สัตว์จำพวกหนู หมัด ไล่เดือน นก ฯลฯ	ไม่มี	ไม่มี
ความชื้น	ตัดทิ้งได้	ตัดทิ้งได้
เชื้อรา / แบคทีเรีย	ไม่มี	ไม่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 10 คุณสมบัติของเวอร์มิคูไลท์

คุณสมบัติ	เวอร์มิคูไลท์
สภาพนำความร้อนปรากฏ ( k ), W/m.K	0.066
สภาพต้านทานความร้อนปรากฏ( R ), m.K/W	15
ความหนาแน่นของวัสดุ , $\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	64-160
ความร้อนจำเพาะ( Cp) , kJ/kg °C	1.34
สภาพแพร่กระจายความร้อน $\alpha$ , m <sup>2</sup> /s	$1.0 \cdot 10^{-7}$
อุณหภูมิใช้งานสูงสุด °C	405
สัมประสิทธิ์ของการขยายตัวทางความร้อน m/m°C	-
ความจุของเซลล์ที่ติดกัน ,(%)	-
ค่าแทรกซึม ความชื้น, per- cm	-
ค่าดูดซึมน้ำ, % โดยน้ำหนัก	300
การกัดกร่อนวัสดุที่ถูกฉนวนหุ้ม	ไม่มี
สภาพการติดไฟ	
ระดับการกระจายของเปลวไฟ	0
ระดับการมีส่วนเป็นเชื้อเพลิง	0
ระดับการเกิดควัน	0
การเสื่อมสภาพลงจากผลของ :	
อุณหภูมิที่เป็นวัฏจักร	ไม่มี
สัตว์จำพวกหนู หมด ได้เดือน นก ฯลฯ	ไม่มี
ความชื้น	ไม่มี
เชื้อรา / แบคทีเรีย	ไม่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 11 คุณสมบัติทางกายภาพความร้อนของฉนวนทางอุตสาหกรรม

ประเภทวัสดุ	อุณหภูมิ ที่ใช้งาน สูงสุด	ความ หนาแน่น	สภาพนำความร้อนที่อุณหภูมิเฉลี่ย						
			- 32	-4	24	38	93	149	260
<b>แบบคลุมและอัดเป็นแผ่น</b>									
ใยแก้ว,ตัวประสานอินทรีย์	175	12	0.034	0.039	0.046	0.049	0.069		
ใยแก้ว,ตัวประสานอินทรีย์	175	16	0.033	0.036	0.042	0.046	0.062		
ใยแก้ว,ตัวประสานอินทรีย์	175	24	0.03	0.033	0.039	0.04	0.053		
ใยแก้ว,ตัวประสานอินทรีย์	175	32	0.029	0.032	0.036	0.037	0.048		
ใยแก้ว,ตัวประสานอินทรีย์	175	48	0.027	0.03	0.033	0.034	0.045		
แบบอัดเป็นแผ่น , กึ่งแข็ง ,ตัวประสาน อินทรีย์ผสม , อัดเป็นแผ่น	205	48-128		0.034	0.036	0.037	0.039	0.05	
แบบบดอัด , แผ่นอัดและฉนวนท่อ	80	160		0.037	0.042	0.043			
กระดาษใยหิน, ซ้อนทับกัน	370	480				0.058	0.065	0.072	0.086
	150	176-208			0.078	0.082	0.098		
กระดาษใยหิน, ลูกฟูก&ซ้อนกัน 4 ชั้น	150	240-272				0.073	0.085		
กระดาษใยหิน, ลูกฟูก&ซ้อนกัน 6 ชั้น	150	288-320			0.068	0.07	0.082		
กระดาษใยหิน, ลูกฟูก&ซ้อนกัน 8 ชั้น	650	176-240				0.055	0.059	0.063	0.075
แคลเซียมซิลิเกต	400	136	0.043	0.046	0.05	0.052	0.06	0.07	0.101
เซลลูลาร์กลาส	80	80-96	0.034	0.036	0.037	0.037			
ไม้ก๊อกแผ่นอัด	205	48-160	0.027	0.032	0.036	0.037	0.048	0.058	
ใยแก้ว, แบบบดอัด&แผ่นอัดตัว									
ประสานอินทรีย์	540	48-160				0.037	0.045	0.055	0.075

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใยแก้ว, ตัวประสานอินทรีย์, ตัวยึดชั้นดี	175	48-64		0.03	0.033	0.034	0.042		
ใยแก้ว, จำนวนต่อตัวประสานอินทรีย์	260	48-160		0.032	0.036	0.037	0.048	0.058	
ใยแก้ว, จำนวนต่อตัวประสานอินทรีย์	540	160-240				0.048	0.055	0.065	0.094
ใยแก้ว, แบบบล็อกรัด ตัวประสานอินทรีย์	135	32		0.03	0.0033	0.034	0.042		
ฉนวนท่อพีโนลิตโฟม	75	35	0.023	0.026	0.027	0.029			
โพลิสไตรีน, ผิวเรียบแบบโฟมอัดรีด	75	29	0.029	0.033	0.034	0.036			
โพลิสไตรีน, พื้นผิวเซตต์แบบอัดรีด	75	24	0.027	0.03	0.033	0.034			
โพลิสไตรีน, แบบโฟมหลอ	120	32		0.017	0.02	0.022			
โพลีไอโซไซยานูเรต, R-11 แบบโฟม, ฉาบแผ่นบาง	100	24-40		0.024	0.023	0.024			
โพลีไอโซไซยานูเรต, R-11 แบบโฟม, ไม่ฉาบ	105	72		0.029	0.032	0.033			
ยาง, โฟมแบบยึดหยุ่น	80	320		0.04	0.045	0.048			
ขนสัตว์, อัดเป็นแผ่น, จำนวนต่อ แบบลูสพิลล์	80	40-56		0.039	0.042				
เซลลูโลส	540	26	0.029	0.036	0.045				
ใยแก้ว, ไม่มีตัวประสาน	540	77	0.032	0.034	0.042		0.052	0.063	0.094
ใยแร่, ไม่มีตัวประสาน	650	122	0.033	0.036	0.04		0.049		
เพอร์ไลท์, แบบโฟม	540	64-192	0.055	0.062	0.069		0.081	0.094	0.115
เวอร์มิคูไลท์, แบบโฟม									

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้