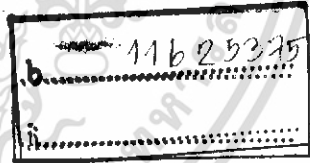


**สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง**

การผลิตฉนวนกันความร้อนจากน้ำยางธรรมชาติ: ผลของสารลดแรงตึงผิว  
ที่มีต่อค่าการนำความร้อน

นางสาวเบญจมาภรณ์ ศรีละบุตร  
นายพงศกร พยัคฆ์กุล

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน...62444...  
วัน,เดือน,ปี...18 ส.ค. 2548



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**PRODUCTION OF THERMAL INSULATOR FROM RUBBER LATEX : EFFECT  
OF SURFACTANT ON THERMAL CONDUCTIVITY**



**A Report Submitted in Partial Fulfillment of The Requirements**

**For The Degree of Bachelor of Chemical Engineering**

**Faculty of Engineering**

**King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang**

**2005**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การผลิตจนวนก้นความร้อนจากน้ำยางธรรมชาติ: ผลของสารลดแรงตึงผิวที่มีต่อ  
ค่าการนำความร้อน

ชื่อนักศึกษา นางสาวเบญจมาภรณ์ ศรีละบุตร

นายพงศกร พยัคฆ์กุล

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร. อภินันท์ นัมคณิสสรณ์

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(ดร. อภินันท์ นัมคณิสสรณ์)

กรรมการ

(อาจารย์บุญชัย โชติวิริยวาณิชย์)

กรรมการ

(ดร.สุรัตน์ อาริรัตน์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์เรื่อง	การผลิตฉนวนกันความร้อนจากน้ำยางธรรมชาติ:ผลของสารลดแรงตึงผิวที่มีต่อค่าการนำความร้อน
นักศึกษา	นางสาวเบญจมาภรณ์ ศรีละบุตร นายพงศกร พยัคฆ์กุล
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ดร.อภิรักษ์ นัมคณิศรณ

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการผลิตโฟมจากน้ำยางขึ้นเพื่อประยุกต์ใช้เป็นฉนวนกันความร้อน โดยขึ้นรูปขนาด ความกว้าง 8 นิ้ว ยาว 8 นิ้วและหนา 1 นิ้ว ใช้อัตราส่วนของน้ำยางขึ้นต่อสารลดแรงตึงผิว เท่ากับ 100:0, 100:6, 100:10, 100:14 และ 100:22 phr จากนั้นทำการศึกษาพื้นผิวของโฟมด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายต่ำและนำฉนวนโฟมยางธรรมชาติมาวัดค่าการนำความร้อน พบว่า ฉนวนโฟมยางทุกอัตราส่วนการผสมกับสารลดแรงตึงผิว มีลักษณะเนื้อเป็นแบบเซลล์เปิดมีความหนาแน่นในช่วง 140.1-577.9 kg/m<sup>3</sup> มีค่าการนำความร้อนที่ใกล้เคียงกันที่ความหนาเท่ากัน คือ ประมาณ 0.04 W/m.K ซึ่งต่างจากยางที่ไม่มีการผสมสารลดแรงตึงผิว ที่มีค่าการนำความร้อน 0.1415 W/m.K การเพิ่มปริมาณสารลดแรงตึงผิว จะมีผลต่อค่าการนำความร้อนและคุณสมบัติทางกายภาพ โดยฉนวนโฟมจะมีปริมาณของฟองอากาศมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นมีค่าลดลงและค่าการนำความร้อนจะมีแนวโน้มลดลง อย่างไรก็ตามปริมาณสารลดแรงตึงผิวที่มากจนเกินไปจะทำให้ฉนวนโฟมยางธรรมชาติมีค่าการนำความร้อนค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากฉนวนโฟมมีรูพรุนกว้างเป็นเซลล์เปิดทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้ดีเนื่องจากอากาศสามารถที่จะไหลผ่านได้สะดวกขึ้น จากการทดลองที่พบว่าที่ปริมาณสารลดแรงตึงผิว 10 phr จะมีค่าเหมาะสมในการนำไปเป็นฉนวนมากที่สุด คือ มีค่าความหนาแน่น 351.5 kg/m<sup>3</sup> และค่าการนำความร้อน 0.0447 W/m.K ฉนวนโฟมที่ผลิตได้จากงานวิจัยนี้มีแนวโน้มที่จะสามารถผลิตเป็นฉนวนกันความร้อนในเชิงพาณิชย์ได้ เพราะมีค่าการนำความร้อนต่ำกว่าฉนวนกันความร้อนในเชิงพาณิชย์อยู่เล็กน้อย และต้นทุนในการผลิตต่ำ แต่ควรพิจารณาแนวทางในการผลิตให้ฉนวนแบบโฟมยางธรรมชาตินี้ให้มีลักษณะเป็นแบบเซลล์ปิดและมีค่าความหนาแน่นลดลงกว่าเดิม

Report Title                    PRODUCTION OF THERMAL INSULATOR FROM RUBBER  
LATEX: EFFECT OF SURFACTANT ON THERMAL  
CONDUCTIVITY

By                                    Miss Benjamaporn            Srilaboot  
    Mr. Pongsakorn                Payukkool

Advisor                            Dr. Apinan                        Namkanisorn

Report for                        Bachelor Degree of Chemical Engineering  
    Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering  
    King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

### ABSTRACT

This project aims to produce thermal insulator from natural rubber latex. The foam insulator was molded to produce a sheet with dimensions of 8 inches wide, 8 inches long and 1 inch thick. Various ratios between rubber latex and surfactant were used; they ranged from 100:0, 100:6, 100:10, 100:14 and 100:22 phr. Surface morphology of the resulting foam was studied using a low magnification optical microscope whereas the thermal property of the foam was characterized in terms of thermal conductivity. As the latex/surfactant ratio increased the density of the resulting foam decreased. The density of the foam was found to vary from 140.1 – 577.9 kg/m<sup>3</sup>. On the other hand, thermal conductivity of foam with the same thickness did not differ significantly for each latex/surfactant ratio and it has an average of 0.04 W/m.K. This value is, however, much lower than the thermal conductivity of a virgin rubber foam (0.1415 W/m.K) in which no surfactant has been added. Surfactant added into the foam acted as foaming agent which increases the content of bubble dispersed in the foam matrix. This resulted in lower density and thermal conductivity. However, it was evident that at large surfactant ratio, the thermal conductivity began to increase because the structure of the foam changed from closed cell to open cell. Hence, heat transfer by convection occurred more readily. The optimum latex/surfactant ratio for production of thermal insulator was found to be at 10 phr because the resulting foam had the lowest thermal conductivity of 0.0447 W/m.K, which is slightly lower than the thermal insulator that is commercially available, and the foam density of 351.5 kg/m<sup>3</sup>. The thermal insulator produced by the methods described in this work has a potential for commercial production with some advantages in terms of lower thermal conductivity and lower production cost. However, making the structure of the foam a closed cell with lower density certainly deserves a further study.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือจากคณาจารย์และบุคคลหลายฝ่าย คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณ

1. คร. อภินันท์ นัมภณิศรณ ที่ได้ให้คำแนะนำในการทำโครงการและการปรับปรุงโครงการ รวมทั้งเป็นผู้ให้คำปรึกษาและแนะแนวทางในการแก้ปัญหาต่าง ๆ
2. อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเคมีทุกท่าน ที่ได้ให้ความรู้ในแต่ละวิชา อบรมสั่งสอนและให้คำแนะนำตลอดระยะเวลาที่ศึกษาในภาควิชาวิศวกรรมเคมี
3. กรมวิทยาศาสตร์ที่ติดต่อประสานงานในการทดสอบคุณสมบัติของฉนวน
4. สถาบันวิจัยยางที่ให้คำปรึกษาเกี่ยวกับวิธีการการขึ้นรูปยาง
5. ครอบครัวของคณะผู้จัดทำ ที่ให้กำลังใจและให้ความสนับสนุนมาโดยตลอด

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญภาพ	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์	1
1.3 สมมติฐานของการศึกษา	2
1.4 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ยางธรรมชาติ (Natural rubber)	3
2.1.1 น้ำยางสด	3
2.1.2 น้ำยางข้น	3
2.2 โฟมยางธรรมชาติหรือยางฟองน้ำ	5
2.3 กระบวนการผลิตโฟมยางธรรมชาติ	6
2.3.1 สารเคมีที่ใช้ผลิตโฟมธรรมชาติ	6
2.3.2 หลักการสำคัญของการผลิตโฟมยางธรรมชาติ	8
2.3.3 ขั้นตอนการทำโฟมยางธรรมชาติ	9
2.4 การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer)	10
2.4.1 การนำความร้อน(Conduction)	10
2.4.2 การพาความร้อน (Convection)	11
2.4.3 การแผ่รังสีความร้อน (Radiation)	11
2.4.4 คุณสมบัติความเป็นฉนวน	12
2.5 ฉนวนกันความร้อนแบบโฟม	13
2.5.1 หลักการพื้นฐานของการเกิดโฟม	13
2.5.2 ค่าการนำความร้อนของโฟมพอลิเมอร์	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.3 ผลของตัวแปรที่มีต่อค่าการนำความร้อน	18
2.6 ชนิดของฉนวนกันความร้อนในเชิงพาณิชย์	18
2.6.1 ยิปซัมบอร์ด ชนิดกันความร้อน (Gypsum Board)	18
2.6.2 ไยแก้ว (Fiber Glass)	19
2.6.3 ฉนวนโฟม (Foam insulator)	21
2.6.3.1 ฉนวนโพลีสไตรีนโฟม (Polystyrene, PS- Foam)	21
2.6.3.2 ฉนวนโพลียูรีเทนโฟม ( Polyurethane, PU-Foam)	22
2.6.3.3 ฉนวนโพลีเอทิลีนโฟม (Polyethylene, PE-Foam)	22
2.7 แนวทางการเลือกใช้วัสดุกันความร้อนและการนำไปใช้	24
2.7.1 คุณสมบัติความเป็นฉนวน	24
2.7.2 ผลต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม	24
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	24
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	27
3.1 รูปแบบของงานวิจัย	27
3.2 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	27
3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	27
3.2.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	27
3.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	28
3.4 การทดสอบคุณสมบัติของโฟมยางธรรมชาติ	29
3.4.1 หาความหนาแน่น	29
3.4.2 การศึกษาสัณฐานวิทยาของโฟมยางธรรมชาติ	29
3.4.3 การทดสอบสมบัติการดัดยัด	29
3.4.4 การวัดค่าการนำความร้อน	30
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง	31
4.1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโฟมยางธรรมชาติ	31
4.2 ความหนาแน่นและ อัตราส่วนช่องว่าง ของโฟมยางธรรมชาติ	32
4.3 ค่าต้านทานแรงดึง (Tensile strength)	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4 ค่าร้อยละการยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด (Percent Elongation at break)	35
4.5 ค่าการนำความร้อน	36
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	40
5.1 สรุปผลการวิจัย	40
5.2 ข้อเสนอแนะ	41
เอกสารอ้างอิง	41



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สารเคมีที่ใช้ทำผลิตภัณฑ์โฟมจากยางธรรมชาติ	8
ตารางที่ 2.2 แสดงคุณสมบัติของใยแก้ว	20
ตารางที่ 2.3 ข้อดีและข้อเสียของฉนวนกันความร้อนแบบโฟม	22
ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของฉนวนโฟมชนิดต่าง ๆ	23
ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนของน้ำยางชั้นและสารเคมีในการผลิตโฟมยางธรรมชาติ	28
ตารางที่ 4.1 ค่าการนำความร้อนของโฟมยางธรรมชาติกับฉนวนกันความร้อน ในเชิงพาณิชย์	39



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ

	หน้าที่
รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างยางธรรมชาติ	4
รูปที่ 2.2 แสดงขั้นตอนการทำโฟมยางและผลิตภัณฑ์จากโฟมยาง	9
รูปที่ 2.3 ค่าการนำความร้อนของ $\text{CFCl}_3$ -พอลิยูรีเทนโฟม กับค่า Aspect ratio	16
รูปที่ 2.4 ค่าการนำความร้อนกับน้ำหนักโมเลกุลของก๊าซ	17
รูปที่ 2.5 ค่าการนำความร้อนกับอัตราส่วนของเซลล์ที่ปิด ( $\phi_c$ )	17
รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนกับความหนาแน่นของโฟม	18
รูปที่ 2.7 แผนยิปซัม	19
รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะฉนวนของใยแก้ว	19
รูปที่ 3.1 กล้องจุลทรรศน์กำลังขยายต่ำ	29
รูปที่ 3.2 เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile Testing Machine) และ ชิ้นงานที่ทดสอบรูปดัมเบลล์	29
รูปที่ 4.1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโฟมยางธรรมชาติที่อัตราส่วนของ โพแทสเซียม โอลิเอท 2, 10, 14 และ 22 phr ตามลำดับ	31
รูปที่ 4.2 ความหนาแน่นของโฟมยางธรรมชาติที่ปริมาณ โพแทสเซียม โอลิเอท 0, 2, 6, 10, 14 และ 22 phr	32
รูปที่ 4.3 อัตราส่วนช่องว่างของโฟมยางที่ปริมาณ โพแทสเซียม โอลิเอท 0, 2, 6, 10, 14 และ 22 phr	33
รูปที่ 4.4 ค่าต้านทานแรงดึงของโฟมยางธรรมชาติที่ปริมาณ โพแทสเซียม โอลิเอท 0, 2, 6, 10, 14 และ 22 phr	34
รูปที่ 4.5 ค่าความต้านแรงดึงของโฟมยางธรรมชาติที่ปริมาณ โพแทสเซียม โอลิเอทต่างกัน	35
รูปที่ 4.6 ค่าร้อยละการยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดของโฟมยางธรรมชาติที่ปริมาณ โพแทสเซียม โอลิเอท 0, 2, 6, 10, 14 และ 22 phr	36
รูปที่ 4.7 ความแตกต่างของค่าการนำความร้อนของโฟมยางธรรมชาติ ที่ปริมาณ โพแทสเซียม โอลิเอท 0, 6, 10, 14 และ 22 phr	37
รูปที่ 4.8 ค่าความหนาแน่นที่มีผลต่อค่าการนำความร้อนของโฟมยางธรรมชาติ	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ยางธรรมชาติที่ผลิตได้ในประเทศไทยไม่มีการพัฒนาอุตสาหกรรมมารองรับมากนัก ผลผลิตจากยางธรรมชาติจึงปรากฏอยู่ในรูปของวัตถุดิบที่ส่งต่อไปให้ประเทศอุตสาหกรรมและก็เป็นวัตถุดิบที่มีราคาถูกลงเพราะประเทศไทยไม่มีเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพสูงที่จะพัฒนาอุตสาหกรรม การทำการวิจัยเกี่ยวกับเรื่องยางธรรมชาติจึงมีความสำคัญในแง่ของการเพิ่มมูลค่าของน้ำยางธรรมชาติขึ้นแม้ว่าคุณสมบัติของยางธรรมชาติจะไม่ดีเท่ากับยางสังเคราะห์ต่าง ๆ แต่ถ้าปีโตรเลียมมีน้อยลงหรือหมดไปวัตถุดิบที่จะนำมาผลิตยางสังเคราะห์หรือพลาสติกก็จะหมดไป ถึงตอนนั้นถ้าเรามีการวิจัยที่ดีพอที่จะสามารถนำยางธรรมชาติมาใช้แทนยางสังเคราะห์ได้ก็จะเป็นเรื่องที่ดีมาก และสามารถเป็นไปได้เพราะยางธรรมชาติสามารถปลูกทดแทนได้เรื่อย ๆ หากประเทศไทยมีอุตสาหกรรมที่จะมารองรับน้ำยางธรรมชาติที่ผลิตออกมาจะทำให้ประเทศไทยมีรายได้จากยางธรรมชาติเพิ่มสูงขึ้น

ด้วยเหตุนี้เองทางคณะผู้วิจัยต้องการนำเสนอการใช้ประโยชน์จากน้ำยางธรรมชาติ โดยนำมาพัฒนาเพื่อ ผลิตเป็นฉนวนกันความร้อนประเภทโฟม แล้วนำฉนวน โฟมยางธรรมชาติที่ได้มาทดสอบคุณสมบัติทั้งเชิงกลและเชิงความร้อน

### 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อผลิตฉนวนกันความร้อนจากน้ำยางธรรมชาติในรูปของฉนวน โฟมและประยุกต์ใช้เป็นฉนวนกันความร้อนภายในอาคารบ้านเรือน เครื่องเก็บความร้อนต่าง ๆ
2. เป็นการเพิ่มมูลค่าของน้ำยางธรรมชาติและเป็นทางเลือกอีกทางหนึ่งในการพัฒนาอุตสาหกรรมที่จะมารองรับน้ำยางธรรมชาติจากเกษตรกร
3. เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตฉนวนกันความร้อน
4. เพื่อศึกษาคุณสมบัติของฉนวนกันความร้อนที่ผลิตขึ้นได้ เช่น สมบัติความเป็นฉนวน ความร้อน ลักษณะสัมประสิทธิ์การนำความร้อน การเปรียบเทียบกับฉนวนกันความร้อนที่ผลิตและจำหน่ายในเชิงพาณิชย์

### 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

1. โฟมยางธรรมชาติที่มีปริมาณโพแทสเซียมโอเลอิตต่างกัน จะมีค่าความหนาแน่นต่างกัน
2. โฟมยางธรรมชาติที่ผลิตโดยมีความหนาแน่นต่างกันจะมีค่าการนำความร้อนแตกต่างกัน
3. ลักษณะทางสัณฐานของโฟมยางธรรมชาติที่มีปริมาณโพแทสเซียมโอเลอิตต่างกันจะมีลักษณะที่แตกต่างกัน
4. ค่าความต้านแรงดึงและค่าร้อยละการยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด จะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณของโพแทสเซียมโอเลอิตที่มีปริมาณสูงขึ้น

### 1.4 ขอบเขตของปริญญาพันธ

1. การหาส่วนผสมที่เหมาะสมของโฟม ทำโดยการผสมน้ำยางธรรมชาติขึ้น กำมะถัน สารหน่วงไฟ Zinc Oxide, Zinc-N-diethyl dithiocarbamate (ZDEC), Zinc salt of-2-Mercaptobenzothiazole (ZMBT), Diphenylguanidine (DPG), Potassium oleate soap solution, Titanium dioxide ( $\text{TiO}_2$ ) และ Sodium silicone fluoride (SSF) สารลดแรงดึงผิว ทดสอบคุณสมบัติ และเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากลักษณะสัณฐานวิทยาและความหนาแน่นของโฟมยางธรรมชาติ
2. ปรับปรุงคุณสมบัติของโฟมยางธรรมชาติ โดยการเติมสารเติมแต่งเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติ เหนือกลและเชิงความร้อนของโฟมยางธรรมชาติ
3. ทำการผลิตและทดสอบคุณสมบัติเชิงกลและเชิงความร้อนของโฟมยางธรรมชาติแล้วเปรียบเทียบผลผลิตกันที่ได้จากการวิจัยกับผลิตภัณฑ์อื่น ๆ จำนวนกันความร้อนที่มีจำหน่ายอยู่ตามท้องตลาด

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber)

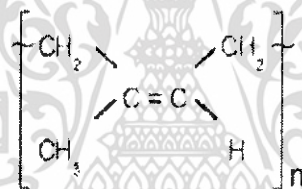
ยางธรรมชาติส่วนมากเป็นยางที่ได้มาจากต้นยาง *Hevea Brazilliensis* ซึ่งมีต้นกำเนิดจากกลุ่มแม่น้ำแอมะซอนในทวีปอเมริกาใต้ น้ำยางสดที่กรีดยได้จากต้นยางมีลักษณะสีขาวขุ่นและมีเนื้อยางแห้ง ประมาณ 30 % แขนงลอยอยู่ในน้ำ ถ้านำน้ำยางที่ได้นี้ไปผ่านกระบวนการปั่นเหวี่ยงจนกระทั่งได้น้ำยางที่มีปริมาณยางแห้งเพิ่มขึ้นเป็น 60 % เรียกว่า น้ำยางข้น (concentrated latex) การเติมสารแอมโมเนียลงไปจะช่วยรักษาสภาพของน้ำยางข้นให้เก็บไว้ได้นาน น้ำยางธรรมชาติแบ่งเป็น 2 ลักษณะ คือ น้ำยางสดและน้ำยางข้น [1]

2.1.1 น้ำยางสด [2] เป็นสารที่มีชีวิตจะประกอบด้วย เนื้อยาง โปรตีน คาร์โบไฮเดรต ไขมัน เกลือแร่ และเป็นน้ำส่วนใหญ่ น้ำยางสดมักเก็บไว้ได้ไม่นานก็จะเกิดการบูดซึ่งคล้ายๆกับน้ำนม เนื่องจากจุลินทรีย์ที่ปะปนในน้ำยางจะย่อยสลายสารอาหารเกิดเป็นกรดและจะบูดเน่าในที่สุด ปกติแล้วน้ำยางสดจะมีปริมาณเนื้อยางแห้งเพียงร้อยละ 30-35 เท่านั้นจึงไม่แนะนำให้มาทำเป็นผลิตภัณฑ์ เพราะความไม่สะดวกหลาย ๆ ประการ ดังนั้น น้ำยางสดจึงมักนำไปแปรรูปเป็นวัตถุดิบยางขุ่นข้น เช่น น้ำยางข้น ยางแผ่นรมควัน ยางแผ่นผึ่งแห้งยางแห้ง STR XL และยางแห้ง STR 5L เป็นต้น แล้วนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่อไป

2.1.2 น้ำยางข้น ได้จากการนำน้ำยางสดมาเข้าเครื่องปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกเนื้อยางและหางน้ำยางออกจากกัน ก็ได้น้ำยางข้นที่มีปริมาณเนื้อยางแห้งโดยเฉลี่ยร้อยละ 60 ดังนั้น น้ำยางข้นจึงเป็นวัตถุดิบที่สำคัญในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ไม่ค่อยไปกว่ายางแห้ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งมีปริมาณการส่งออกในรูปน้ำยางข้น เป็นอันดับ 3 รองจากยางแผ่นรมควันและยางแห้งตามลำดับ และจากสถิติยางประเทศไทยปี 2546 พบว่า การนำน้ำยางข้นมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อใช้ภายใน ประเทศมีเพียงร้อยละ 19 เท่านั้น ทั้งนี้ ผลิตภัณฑ์ดังกล่าวได้แก่ ถุงมือยาง ยางพองน้ำ ยางยืด ตุ๊กตายาง ถุงยางอนามัย หัวนมยาง ลูกโป่ง เครื่องมือทางการแพทย์/วิทยาศาสตร์ เป็นต้น ชนิดของน้ำยางข้น ที่ผลิตในประเทศไทย เป็นน้ำยางข้นจากกรรมวิธีการใช้เครื่องปั่น (Centrifuge – concentrated latex) ซึ่งมีอยู่ 2 ชนิดคือ

2.1.2.1. **น้ำยางชั้นชนิดแอมโมเนียสูง (High Ammonia, HA)** เป็นน้ำยางชั้นที่ใช้สารรักษา สภาพน้ำยางชนิดแอมโมเนีย 0.7% ร่วมกับกรดคลอริก 0.035% น้ำยางชนิดนี้มีข้อดีคือมีอายุการเก็บ น้ำยางได้นานเป็นปี ไม่เสียน้ำง่ายจึงมักนำไปผลิตถุงมือยาง กาวยาง ถุงยางอนามัย เป็นต้น ยกเว้นยาง ฟองน้ำ เนื่องจากแอมโมเนียที่อยู่ในน้ำยางจะไปยับยั้งปฏิกิริยาการเกิดเจลหรือเกิดฟองในน้ำยางทำให้ได้ฟองน้ำที่ด้อยคุณภาพ

2.1.2.2 **น้ำยางชั้นชนิดแอมโมเนียต่ำ (Low Ammonia, LA)** เป็นน้ำยางชั้นที่ใช้สารรักษา สภาพน้ำยางชนิดแอมโมเนีย 0.2% ร่วมกับทีเอ็มทีดี 0.013% ร่วมกับ ซิงค์ออกไซด์ 0.013% ร่วมกับ กรดคลอริก 0.035% ศัพท์วิชาการทางธรรมชาติใช้กันว่า LA – TZ ย่อมาจาก Low Ammonia – Tetra methyl – thiuram disulphide/Zinc oxide สำหรับน้ำยางชนิดที่ใช้ปริมาณแอมโมเนียน้อยรักษา สภาพ นอกจากการใช้สารช่วยกลุ่มทีเอ็มทีดี ซิงค์ออกไซด์ และกรดคลอริกดังกล่าวข้างต้นแล้ว ผู้ผลิตน้ำยางชั้นประเภทอื่น ๆ ได้มีการใช้สารช่วยกลุ่มอื่น ๆ เช่น แซคทีซี ร่วมกับกรดคลอริก หรือ กรดบอริกร่วมกับกรดคลอริก เป็นต้น น้ำยางชนิดแอมโมเนียต่ำ ส่วนใหญ่นำไปใช้ในกระบวนการ ผลิตยางฟองน้ำ แต่ทั้งนี้อายุการเก็บของน้ำยางชนิดนี้จะสั้นกว่าน้ำยางชนิดแอมโมเนียสูง



รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างยางธรรมชาติ [2]

ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมี คือ cis-1,4-polyisoprene กล่าวคือ มี isoprene ( $\text{C}_5\text{H}_8$ ) โดยที่ n มีค่า ตั้งแต่ 15-20,000 เนื่องจากส่วนประกอบของยางธรรมชาติเป็นไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นยางจึง ละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เฮกเซน เป็นต้น โดยทั่วไปยางธรรมชาติโครงสร้าง การจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐาน แต่ในบางสภาวะโมเลกุลของยางสามารถจัดเรียงตัว ก่อนข้างเป็นระเบียบที่อุณหภูมิต่ำหรือเมื่อถูกยืดมัน จึงสามารถตกผลึกได้ การตกผลึกเนื่องจาก อุณหภูมิต่ำ (Low Temperature Crystallization) จะทำให้ยางแข็งมากขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น ยางก็ จะอ่อนลงและกลับสู่สภาพเดิม ในขณะที่การเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัว (Strain Induced Crystallization) ทำใหยางมีสมบัติเชิงกลดี นั่นคือยางจะมีความต้านแรงดึง (Tensile Strength) ความ ต้านทานแรงฉีก (Tear Resistance) และความต้านทานการขัดถู (Abrasion resistance) สูง ลักษณะ เคนอีกอย่างของธรรมชาติคือ สภาพยืดหยุ่น (Elasticity) ยางธรรมชาติมีสภาพยืดหยุ่นสูง เมื่อแรง ภายนอกที่มากระทำกับมันหมดไป ยางก็จะกลับคืนสู่รูปร่างและขนาดเดิม (หรือใกล้เคียง) อย่าง

รวดเร็ว ยางธรรมชาติยังมีสมบัติที่ยึดเหนี่ยวด้านความเหนียวเหนียว (Tack) ซึ่งเป็นสมบัติสำคัญของการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการประกอบ ชิ้นส่วนต่างๆ เข้าด้วยกัน เช่น ยางรถยนต์ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ยางดิบตามลำพังจะมีขีดจำกัดในการทำงาน เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลต่ำ และลักษณะทางกายภาพจะไม่เสถียรขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงแปลงอุณหภูมิมาก กล่าวคือยางจะอ่อนนุ่มและเหนียวเหนอะหนะเมื่อร้อน แต่จะแข็งเปราะเมื่ออุณหภูมิต่ำ ด้วยเหตุนี้การใช้ประโยชน์จากยางจำเป็นต้องมีการผสมยางกับสารเคมีต่างๆ เช่น กำมะถัน ผงเขม่าดำ และสารตัวเร่งต่างๆ เป็นต้น หลังจากการบดผสม ยางผสมหรือยางคอมพาวด์ (Rubber Compound) ที่ได้จะถูกนำไปขึ้นรูปในแม่พิมพ์ภายใต้ความร้อนและความดัน กระบวนการนี้เรียกว่าวัลคาไนเซชัน (Vulcanization) ยางที่ผ่านการขึ้นรูปนี้ เราเรียกว่า “ยางสุกหรือยางคงรูป” (Vulcanizate) ซึ่งสมบัติของยางคงรูปที่ได้นี้จะเสถียร ไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมากนัก และมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น ยางธรรมชาติถูกนำไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ มากมาย เนื่องจาก

- ยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงพลวัต (Dynamic Properties) ที่ดี มีความยืดหยุ่น (Elasticity) สูง ในขณะที่ความร้อนภายใน (Heat build-up) ที่เกิดขึ้นขณะใช้งานมีค่าต่ำ และมีสมบัติการเหนียวติดกันที่ดี จึงเหมาะในการผลิตยางรถยนต์ เป็นต้น

- ยางธรรมชาติมีสมบัติทนต่อการฉีกขาด (Tear Resistance) สูง ทั้งที่อุณหภูมิต่ำและสูง จึงเหมาะสำหรับการผลิตกระเปาะน้ำร้อน

แม้ว่ายางธรรมชาติจะมีสมบัติที่ดีเหมาะสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ มากมาย แต่ยางธรรมชาติก็มีข้อเสียหลักคือ การเสื่อมสภาพเร็วภายใต้แสงแดด ออกซิเจน โอโซน และความร้อน เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีพันธะคู่ อยู่มาก ทำให้ยางว่องไวต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและโอโซน โดยมีแสงแดดและความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นในระหว่างการผลิตผลิตภัณฑ์จึงต้องมีการเติมสารเคมีบางชนิด (สารในกลุ่มของ antidegradants) เพื่อป้องกันการใช้นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังมีประสิทธิภาพการทนต่อสารละลายไม่มีขี้ น้ำมันและสารเคมีต่ำ จึงไม่สามารถใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องสัมผัสกับต่างๆ ดังกล่าว [2]

## 2.2 โฟมยางธรรมชาติหรือยางฟองน้ำ

โฟมยางธรรมชาติ หรือยางฟองน้ำที่ทำจากยางธรรมชาติมีลักษณะเป็นรูพรุนใช้ทำผลิตภัณฑ์จำพวก เบาะนั่ง ที่นอน หมอน เสื้อการนอน ตุ๊กตาและของชำร่วยต่างๆ หลักการสำคัญของการผลิตยางฟองน้ำคือ การทำให้น้ำยางเกิดฟองของอากาศหรือของแก๊สต่างๆ ขึ้นภายในแล้วทำให้ฟองยางคงรูป (หรือวัลคาไนซ์) ด้วยสารเคมีและอาศัยความร้อนเป็นตัวช่วย [3]

## 2.3 กระบวนการผลิตโฟมยางธรรมชาติ

ในระหว่างทศวรรษที่ 20 ในศตวรรษที่ 19 นี้ การผลิตสินค้าจากยางธรรมชาติได้มีการพัฒนาทางด้าน การเก็บรักษาน้ำยางและในด้านอื่น ๆ อีกหลายอย่าง อย่างไรก็ตามความพยายามหลายอย่างก็ง่ายขึ้นเมื่อ Schidrowitz และ Goldsbrough โดยทั้งคู่ได้ทำการผลิตฟองน้ำยางธรรมชาติโดยใช้น้ำยางธรรมชาติที่ความเข้มข้นต่ำ ในการผลิตใช้กรดแอซติกเป็นตัวทำให้น้ำยางเกิดการตกตะกอน และใช้ก๊าซแอมโมเนียมคาร์บอเนตในการทำให้เกิดฟอง ในขณะที่นั้นใช้โซเดียมโพลีซัลไฟด์ในการทำให้เกิดกระบวนการวัลคาไนเซชัน(Vulcanization) ผลิตภัณฑ์บางส่วนถูกขายออกไปและหลังจากสิ้นสงครามโลกครั้งที่ 1 การผลิตผลิตภัณฑ์จากน้ำยางธรรมชาติก็สิ้นสุดลงเช่นกัน ในปี ค.ศ. 1927 F.H. Untiedt ได้จดสิทธิบัตรของกระบวนการผลิตโฟมโดยการผ่านก๊าซเข้าสู่แผ่นที่เป็นรูพรุนแล้วบั่นเพื่อให้ก๊าซเข้าไปในน้ำยางธรรมชาติที่พร้อมจะอยู่ตัวแล้ว กระบวนการของ F.H. Untiedt นี้ต่างจากกระบวนการของ Schidrowitz และ Goldsbrough เพราะใช้น้ำยางธรรมชาติที่มีความเข้มข้น กระบวนการของ F.H. Untiedt ได้นำมาใช้ในการผลิตสีค้า ย่างไรก็ตามใน ค.ศ. 1929 บริษัท Dunlop Rubber ของประเทศอังกฤษได้ประยุกต์ใช้ทั้งสองกระบวนการในการผลิตโฟมจากน้ำยางธรรมชาติซึ่งแต่ดั้งเดิมผลิตโดยใช้น้ำยางธรรมชาติแต่ในปัจจุบันใช้ยางสังเคราะห์ในการผลิต

### 2.3.1 สารเคมีที่ใช้ผลิตโฟมยางธรรมชาติ

2.3.1.1. สารละลายโพแทสเซียมโอเลอเทอเข้มข้น 20 % (Potassium Olliate) เป็นสารที่ทำให้เกิดฟองและเพิ่มปริมาตรของยางฟองน้ำโดยไม่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมี ถ้าใช้สารละลายโพแทสเซียมโอเลอเทอในปริมาณมากจะทำให้ยางฟองน้ำมีความหนาแน่นน้อยลง แต่มีความพรุนในยางฟองน้ำมากขึ้น

2.3.1.2 สารทำให้ยางคงรูป (Vulcanizing Agent) หรือ สารวัลคาไนซ์ ที่ใช้ในการผลิตยางฟองน้ำ คือ กำมะถัน ช่วยทำให้น้ำยางขึ้นเปลี่ยนสถานะจากความไม่คงรูปไปอยู่ในสถานะที่คงรูปได้ในลักษณะยึดหยุ่นหรือแข็ง ทำให้เกิดการเชื่อมโยงของโมเลกุลแบบร่างแหตรงตำแหน่งที่วงไว่ต่อปฏิกิริยา ในการผลิตยางฟองน้ำนั้นต้องใช้กำมะถันเป็นสารทำให้ยางคงรูปประมาณ 2.5 phr (phr = 1 ส่วนต่อ 100 ส่วนของยางแห้ง)

2.3.1.3 ตัวเร่งให้ยางคงรูป (Accelerators) เมื่อนำมาใช้ร่วมกับกำมะถัน พบว่าสารตัวเร่งจะช่วยลดเวลาและอุณหภูมิในการวัลคาไนซ์ลงอย่างมาก ตัวเร่งทำให้ยางคงรูปที่ใช้ในยางฟองน้ำที่ใช้

คือ Zinc-N-Diethyl Dithiocarbamate (ZDEC) และ Zinc salt of-2-Mercaptobenzothiazole (ZMBT) ในอัตราส่วนของ ZDEC ต่อ ZMBT 1 ต่อ 1

2.3.1.4 สารกระตุ้นตัวเร่งให้ยางคงที่ (Activator) เป็นตัวช่วยให้ตัวเร่งทำงานได้ดีขึ้น สารกระตุ้นตัวเร่งที่ใช้ในน้ำยาง คือ ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide) มีคุณสมบัติที่สำคัญ คือ เมื่อใส่เข้าไปในยางจะทำให้ยางมีค่าโมดูลัสสูงขึ้น และบางครั้งถ้าไม่เติมสารกระตุ้นตัวเร่งนี้ก็จะไม่ทำให้เกิดการวัลคาไนซ์

2.3.1.5 สารป้องกันยางเสื่อมสภาพ (Antioxidant) ทำหน้าที่ยืดอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์จากน้ำยางขึ้น โดยป้องกันการเสื่อมสภาพเนื่องจากการกระทำปฏิกิริยาของออกซิเจนและโอโซน (O<sub>3</sub>) ในขณะการใช้งาน สามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิด คือ

- สารประกอบเอมีนและอนุพันธ์ สารนี้ทำให้ยางมีสีคล้ำ
- สารประกอบฟีนอลและอนุพันธ์ สารนี้ไม่ทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดการเสียหาย
- สารประกอบ Imidazyl และอนุพันธ์ สามารถทำงานเป็นแอนติออกซิแดนท์เพิ่มประสิทธิภาพให้กับแอนติออกซิแดนท์ชนิดฟีนอลหรือเอมีนได้

2.3.1.6 สารทำให้เกิดเจล (Gelling Agent) ซึ่งจะมีคุณสมบัติทำให้ยางจับตัวกันเป็นเจล สารที่ทำให้เกิดเป็นเจลที่ใช้ในการทำฟองน้ำ คือ Sodium Silicofluoride (SSF) และเติม Diphenyl guanidine (DPG) เพื่อทำหน้าที่เป็นสารก่อให้เกิดเจล และเป็นการช่วยลดความเสี่ยงของการยุบตัวของฟองยางก่อนเกิดเจล

2.3.1.7 การทำให้ยางคงรูป (Vulcanizing) เมื่อฟองยางเกิดเจลแล้วและนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ประมาณ 3 ชั่วโมง เพื่อให้ยางคงรูป การอบให้ยางฟองน้ำเกิดการคงรูปต้องทำทันทีที่ฟองยางเกิดเจล เพื่อลดการหดตัวของยางฟองน้ำ

2.3.1.8 อื่น ๆ เช่น น้ำมันคาสเตอร์ (Caster Oil) ทำให้เกิดการหล่อลื่นในเนื้อของโฟม เพื่อลดความเสียหายที่เกิดจากการตัดหรือลดการนิ่มของผนังเซลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 สารเคมีที่ใช้ทำผลิตภัณฑ์โฟมจากยางธรรมชาติ [5]

สารเคมี-ดีสเฟสชัน	หน้าที่
10% แอมโมเนียมโอเลต (Ammonium oleate)	สารช่วยให้เกิดฟอง
50% กำมะถัน (sulfur)	สารทำให้ยางคงรูป (แข็ง)
50% แซคคิโนอีซี (ZDEC)	สารตัวเร่งให้ยางสุก
50% แซคเซมบีที (ZMBT)	สารตัวเร่งให้ยางสุก
50% วิงสเตย์แอล (Wingstay L)	สารกันยางเสื่อม
50% ซิงค์ออกไซด์ (ZnO)	สารกระตุ้นตัวเร่ง
33% ดีพีจี (DPG)	สารตัวเร่งให้ยางสุก
12.5% เอสเอสเอฟ (SSF)	สารช่วยให้ฟองจับตัว

2.3.2 หลักการสำคัญของการผลิตโฟมยางธรรมชาติ ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ดังนี้

2.3.2.1 การทำให้น้ำยางเกิดฟอง ซึ่งเป็นฟองจากอากาศหรือฟองของก๊าซต่าง ๆ การทำน้ำยางขึ้นเกิดฟอง เป็นการผสมอากาศเข้าไปในน้ำยางขึ้นเพื่อทำให้เกิดเป็นฟองทำได้ 2 วิธี คือ

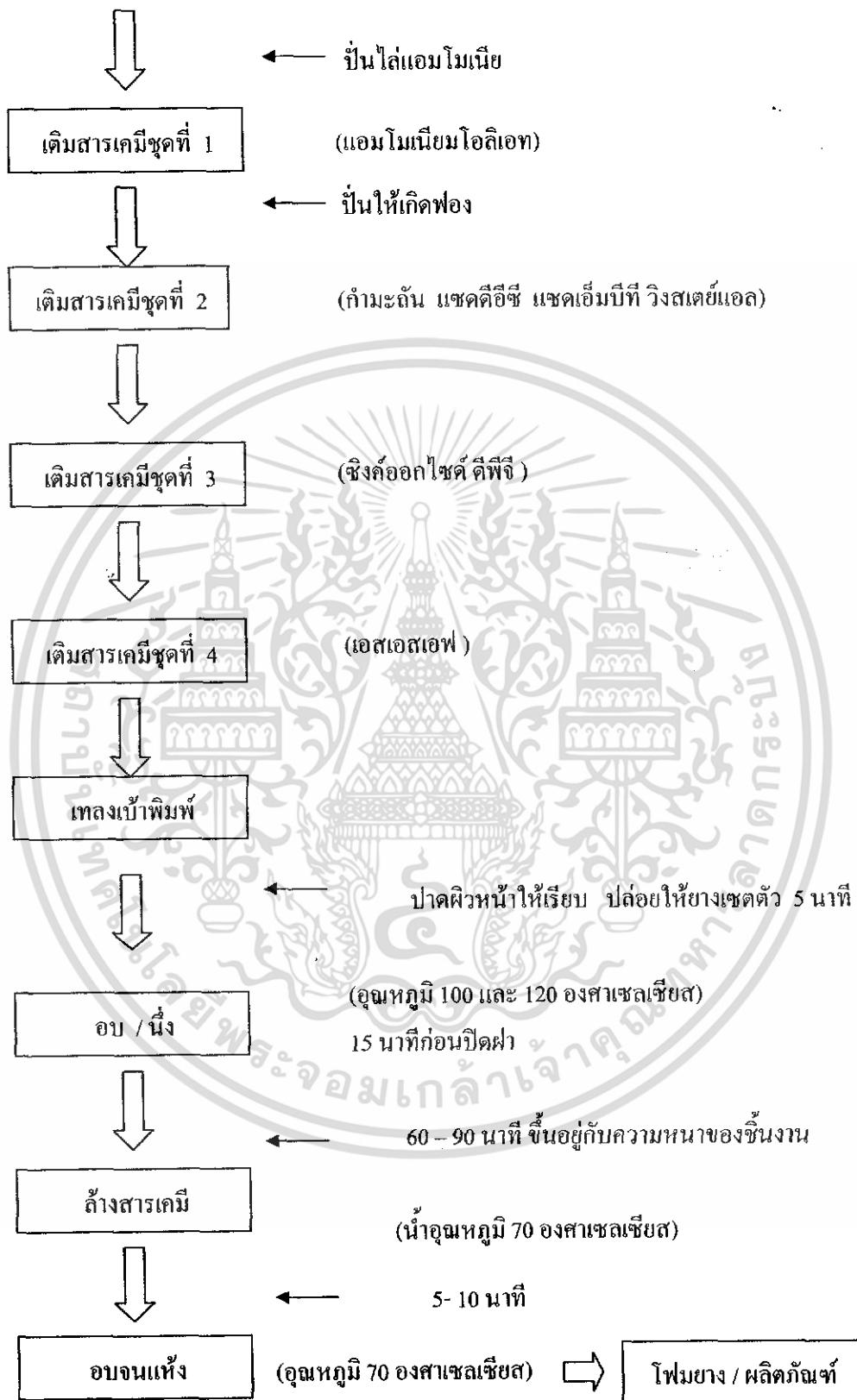
1. การตีฟองทีละชุด (Batch Foaming) เหมาะกับการผลิตผลิตภัณฑ์ชิ้นเล็ก ๆ ซึ่งจะใช้เครื่องปั่นเช่นเดียวกับเครื่องตีขนมเค้ก

2. การตีฟองแบบทำต่อเนื่อง (Continuous Foaming) วิธีนี้เหมาะกับการผลิตที่ต้องการความรวดเร็ว และการผลิตฟองน้ำขึ้นใหญ่ ๆ มีความหนาแน่นที่แน่นอน

2.3.2.2 เติมสารเคมีที่ช่วยให้ฟองจับตัวเป็นรูปร่าง (Gel) เช่น Sodiumsilicofluoride(SSF)

2.3.2.3 ทำให้ฟองยางคงตัวโดยการนำไปอบ [4]

2.3.3 ขั้นตอนการทำโคมยางธรรมชาติ



รูปที่ 2.2 แสดงขั้นตอนการทำโคมยางและผลิตภัณฑ์จากโคมยาง[5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer)

การถ่ายเทความร้อน สามารถเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่ออุณหภูมิของวัตถุทั้งสอง มีความแตกต่างกัน ซึ่งโดยปกติแล้วความร้อนจะถ่ายเทจากที่มีอุณหภูมิสูง ไปยังที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าเสมอลักษณะการถ่ายเทความร้อนมี 3 วิธีคือการนำความร้อน (Conduction) การพาความร้อน (convection) และการแผ่รังสีความร้อน (Radiation) โดยอาจจะเกิดขึ้นจากวิธีใดวิธีหนึ่ง หรือหลายๆ วิธีพร้อมกันได้ อย่างไรก็ตามกระบวนการถ่ายเทความร้อนจะดำเนินไปจนกระทั่งเข้าสู่สมดุลทางความร้อน (Thermal Equilibrium) และเมื่อเข้าสู่สมดุลทางความร้อนแล้ว กระบวนการถ่ายเทความร้อนจะไม่เกิดขึ้นอีกต่อไป เนื่องจากไม่มีความแตกต่างของอุณหภูมิแล้วนั่นเอง

**2.4.1 การนำความร้อน (Conduction)** คือ ปรากฏการณ์ที่พลังงานความร้อนถ่ายเทภายในวัตถุหนึ่ง ๆ หรือระหว่างวัตถุสองชิ้นที่สัมผัสกัน โดยมีทิศทางของการเคลื่อนที่ของพลังงานความร้อน จากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง ไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า การนำความร้อนเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นบนชั้นอะตอมของอนุภาค ในโลหะการนำความร้อนเป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระ(คล้ายการนำไฟฟ้า) ในของเหลวและของแข็งที่มีสภาพการนำความร้อนต่ำเป็นผลมาจากการสั่นของโมเลกุลข้างเคียง ในก๊าซการนำความร้อนเกิดขึ้นผ่านการสั่นสะท้อนระหว่างโมเลกุลหรือกล่าวคือการนำความร้อนเป็นลักษณะการถ่ายเทความร้อนผ่าน โดยตรงจากวัตถุหนึ่งไปยังอีกวัตถุหนึ่ง โดยการสัมผัสกัน เช่น การเอามือไปจับกาน้ำร้อน จะทำให้ความร้อนจากกาน้ำถ่ายเทไปยังมือ จึงทำให้รู้สึกร้อน เป็นต้น หลักการเกี่ยวกับการนำความร้อนถูกตั้งขึ้นโดย โจเซฟ โฟริเออร์ (Joseph Fourier) นักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศส โฟริเออร์ได้นำเสนอสมการที่ใช้ในการคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการนำ ในปี ค.ศ. 1822 โดยอาศัยข้อมูลจากการทดลองไว้ดังนี้คือ

$$Q_x = -kA \left( \frac{dT}{dx} \right) \quad (2.1)$$

โดยที่  $k$  คือค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ของสารที่ความร้อนเคลื่อนที่ผ่านมีหน่วยเป็น  $W/m.K$  ในระบบ SI และ  $Btu/ft.hr.^{\circ}F$  ในหน่วยอังกฤษ  $A$  คือพื้นที่ตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของความร้อน และ  $dT/dx$  เป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับระยะทาง สมการนี้เรียกว่า Fourier equation ซึ่งเป็นสมการที่ได้มาจากการทดลอง จากสมการนี้เราสามารถหาสมการอื่น ๆ เพื่อใช้ให้เป็นประโยชน์ในการคำนวณเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการนำได้

**2.4.2 การพาความร้อน (Convection)** เป็นกระบวนการถ่ายเทพลังงานความร้อนที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของมวลของของไหล เช่น อากาศ น้ำหรือ ไขมัน เมื่อมีของไหล (Fluid) สัมผัสกับพื้นที่ผิวของวัตถุใดๆ ที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน จะเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนขึ้น ในสภาพธรรมชาติเมื่อของไหลถูกทำให้ร้อนจะสามารถเคลื่อนที่จากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งได้ ทำให้เกิดการไหลเวียนพาความร้อนพา เพราะ โมเลกุลที่เย็นและหนักกว่าจะตกลงข้างล่าง ส่วนโมเลกุลที่ร้อนและเบากว่าจะลอยตัวขึ้นหรืออาจกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า การพาความร้อนเป็นลักษณะการถ่ายเทความร้อน โดยมีอากาศหรือลมเป็นสื่อกลาง ในการพาความร้อนจากวัตถุ หนึ่งไปยังอีกวัตถุหนึ่งเช่น พัดลมเป่าผม จะใช้ลมเป่าผ่านเครื่องทำความร้อนให้ลมพาความร้อนไปให้เส้นผม เป็นต้น ลักษณะของการพาความร้อนที่เกิดขึ้นอาจขึ้นแบ่งออกได้ตามแรงที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของความร้อนในโมเลกุลของของไหลได้เป็น 2 ประเภท คือ

**2.4.2.1 การพาความร้อนแบบอิสระ หรือโดยธรรมชาติ (Free or Natural Convection)** เป็นการถ่ายเทความร้อนโดยอาศัยความแตกต่างของความหนาแน่นของของไหลเนื่องจากของไหลเมื่อได้รับความร้อน (อุณหภูมิสูงขึ้น) จะมีความหนาแน่นลดลงกว่าอากาศโดยรอบ ทำให้เกิดการลอยตัวสูงขึ้นเช่นควันที่ลอยขึ้นจากปล่องไฟ

**2.4.2.2 การพาความร้อนแบบบังคับ** เป็นการถ่ายเทความร้อนโดยใช้แรงภายนอกมาทำให้ของไหลเคลื่อนที่ผ่านพื้นผิวของแข็งที่มีอุณหภูมิต่างกันไปในทิศทางที่กำหนดไว้ เช่น แรงจากปั๊มหรือพัดลม การคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของการพาความร้อนนั้นเป็นเรื่องที่ยุ่งยาก เมื่อพิจารณาแล้วมีสิ่งหลายอย่างที่มีผลต่อเคลื่อนที่ความร้อนแบบการพานี้ เป็นต้นว่า เมื่อสมบัติต่างๆ ของของไหล เช่นความหนาแน่น ความร้อนจำเพาะ ความหนืด ฯลฯ ความเร็วของการไหล ความแตกต่างของอุณหภูมิของพื้นผิวของของแข็งและของไหล เป็นต้น นิวตัน (Newton) ได้ตัดปัญหาความยุ่งยากเหล่านี้โดยเสนอสมการสำหรับคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อน โดยการพาครั้งนี้ คือ

$$q = h(T_H - T_C) \quad (2.2)$$

โดยที่  $h$  คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Heat transfer coefficient) ซึ่งได้รวมเอาความยุ่งยากทั้งหมดไว้  $h$  มีหน่วยเป็น  $W/m^2.K$  ในระบบ SI และ  $Btu/ft^2.hr. ^\circ F$  คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ของของแข็งที่มีการสัมผัสกับของไหล  $T_H$  คือ อุณหภูมิที่ร้อนกว่า  $T_C$  คืออุณหภูมิที่เย็นกว่า

**2.4.3 การแผ่รังสีความร้อน (Radiation)** เป็นการถ่ายเทพลังงานความร้อนทะลุผ่านช่องว่างใดๆ (Through Space) ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Waves) จากพื้นผิวของวัตถุที่มี

อุณหภูมิสูงกว่าไปยังพื้นผิวของวัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าในทุกทิศทางในความเป็นจริงแล้วการเกิด การแผ่รังสีเกิดการแผ่รังสีอย่างแท้จริงของความร้อนระหว่างวัตถุใดๆ จะไม่ทำให้อุณหภูมิตัวกลางที่ความร้อนนั้นผ่านเพิ่มสูงขึ้น เมื่อรังสีนี้ไปตกกระทบวัตถุใด ๆ บางส่วนอาจสะท้อน บางส่วนอาจจะ ส่งผ่านทะลุไป บางส่วนอาจ ถูกดูดกลืนไว้และถ้ารังสีตกกระทบคือ รังสีความร้อน รังสีที่ถูกดูดกลืนไว้จะปรากฏเป็นความร้อนภายในวัตถุนั้น

**2.4.4 คุณสมบัติความเป็นฉนวน** เมื่อก้าวถึงคุณสมบัติความเป็นฉนวน หรือวัสดุที่ถือว่ามี ความเป็นฉนวนที่ดีนั้น ระดับของความเป็นฉนวนจะต้องพิจารณาจากคุณสมบัติในทางทฤษฎี 3 ข้อหลัก ดังนี้

- ความสามารถในการต้านทานความร้อน (Resistivity)
- ความสามารถในการนำความร้อน (Conductivity)
- ความจุความร้อน (Thermal Capacity)

ค่าการต้านทานความร้อน (Resistivity) หรือค่า “ R-Value” จะเป็นค่าที่บอกถึงอัตราส่วนระหว่าง ความหนาของวัสดุตามแนวที่ความร้อนไหลผ่านกับความสามารถในการนำความร้อนของวัสดุ กรณีที่วัสดุซ้อนกันหลายชั้น ค่าการนำความร้อนรวมจะเท่ากับผลบวกของค่าการต้านทานความร้อนของวัสดุที่กำหนดแต่ละชั้นรวมกัน ค่าการต้านทานความร้อนจะมีความสัมพันธ์กับค่าการนำ ความร้อนแบบเป็นส่วนกลับกัน กล่าวคือ ถ้าค่าการนำความร้อนสูง วัสดุนั้นก็จะมีการนำ ความร้อนต่ำ ค่าการต้านทานความร้อน หรือ ค่า “ R-Value” สามารถหาคำนวณได้จาก [6]

$$R = 1/C = \Delta X / K \quad (2.3)$$

เมื่อ R = ค่าการต้านทานความร้อน ( Resistivity -  $m^2K / Watt$  )

C = ค่าความจุความร้อน (Thermal Capacity –  $W / m^2K$  or  $J / kg.K$  )

$\Delta X$  = ความหนาของชั้นวัสดุที่นำมาพิจารณา

K = ค่าการนำความร้อน (Conductivity –  $W / mK$  )

## 2.5 ฉนวนกันความร้อนแบบโฟม

เป็นที่รู้โดยทั่วไปว่าการผลิตโฟมพอลิเมอร์นั้นมีความสัมพันธ์กับการกระจายตัวของก๊าซในของเหลวพอลิเมอร์แล้วทำให้พอลิเมอร์มีความเสถียรและอยู่ตัวกลายเป็นโฟม การทำให้โฟมมีขนาดใหญ่โดยการทำให้ฟองอากาศมีขนาดใหญ่และมีปริมาณมากขึ้นวัตถุดิบที่นำมาทำโฟมเช่น

- เทอร์โมพลาสติก
- เทอร์โมเซท
- น้ำยางขึ้น

ก๊าซที่นำมาทำโฟมนั้นได้มาจากแหล่งต่าง ๆ เช่นการตีฟองขนาดแรงทำให้อากาศเกิดการแพร่เข้าสู่ของเหลวพอลิเมอร์กลายเป็นฟองอากาศ การเติมของเหลวที่มีจุดเดือดต่ำเช่น เพนเทนหรือสารฟลูออโรคาร์บอน เมื่อให้ความร้อนเข้าไปจะทำให้สารเกิดการสลายตัวกลายเป็นก๊าซ หรือโดยการเติมสารที่เมื่อเกิดปฏิกิริยาแล้วให้ก๊าซเช่น ไอโซไซยานเนทกับน้ำ การสลายตัวของเอโซไดคาร์ไบเนนไนด์ ฟองที่เกิดขึ้นในช่วงแรกจะมีการขยายตัวโดยการแพร่ของก๊าซจากสารละลายเข้าสู่ฟอง การทำให้ฟองเกิดการขยายตัวทำได้โดยการเพิ่มความร้อนหรือโดยการลดความดันให้แก่ของเหลวพอลิเมอร์ ถ้าผนังของฟองไม่ได้รับการกระทบกระเทือนหรือเสียหายจะทำให้โฟมที่ได้เป็นโฟมแบบเซลล์ปิดแต่ถ้าผนังของฟองเกิดการแตกแล้วรวมเข้ากับฟองอื่น ๆ จะทำให้โฟมที่ได้มีลักษณะเป็นแบบเซลล์เปิด

### 2.5.1 หลักการพื้นฐานของการเกิดโฟม

2.5.1.1 การเกิดฟอง ขั้นแรกของการผลิตโฟมคือ การทำให้เกิดฟองก๊าซภายในของเหลวพอลิเมอร์ ถ้าฟองที่เกิดขึ้นอยู่ในของเหลวที่เป็นชนิดเฟสเดียวกันเราจะเรียกการเกิดโฟมชนิดนี้ว่า Self-nucleation ถ้ามีการผสมกันตั้งแต่ 2 เฟสขึ้นไปเช่นมีอนุภาคของแข็งอยู่ในของเหลวพอลิเมอร์ เราจะเรียกการเกิดฟองชนิดนี้ว่า nucleation process ของแข็งที่ผสมอยู่เราจะเรียกว่า nucleating process โดยการเกิดฟองจะเกิดที่บริเวณรอยต่อระหว่างของเหลวและของแข็งได้ง่าย ในหลาย ๆ กระบวนการที่ไม่มี nucleating agent ในของเหลวจะประกอบไปด้วยฟองขนาดเล็กจำนวนมากเมื่อฟองเหล่านั้นรวมกันจะได้ฟองที่มีขนาดใหญ่ขึ้นบางครั้งก็มีความจำเป็นที่จะต้องการให้เกิดฟองใหม่ขึ้น การเกิดฟองในของเหลวต้องการพลังงานอิสระในระบบดังสมการ

$$\Delta F = \gamma \cdot A \quad (2.4)$$

เมื่อ  $\gamma$  คือค่าแรงตึงผิวของของเหลวและ  $A$  คือค่าพื้นที่ผิวทั้งหมดตั้งนั้นการลดค่าแรงตึงผิวให้ต่ำลงจะทำให้เกิดฟองง่ายขึ้น สารที่ใช้ในการลดค่าแรงตึงผิวเช่น สารอิมัลซิฟายเออร์ สารลดแรงตึงผิวน้ำมันซิลิโคนบางชนิด เป็นต้น

**2.5.1.2 การโตของขนาดฟอง** การโตของฟองขึ้นอยู่กับปริมาณการแพร่ของก๊าซจากสารละลายเข้าสู่ฟองระบบจะเสถียรมากกว่าถ้ามีฟองขนาดใหญ่มากกว่าฟองขนาดเล็ก สมการที่แสดงดังต่อไปนี้นี้จะบอกว่าการรวมกันของฟองที่สภาวะสมดุลค่าความดันของก๊าซภายในฟองจะมีค่าสูงกว่าค่าความดันของของเหลว

$$\Delta p = \frac{2\gamma}{r} \quad (2.5)$$

ค่า  $r$  คือรัศมีของฟองซึ่งฟองที่มีขนาดเล็กจะมีค่าความดันสูงกว่าฟองที่มีขนาดใหญ่

$$\Delta p_1^2 = 2\gamma \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (2.6)$$

จากสมการที่ 2.6 เมื่อค่า  $\Delta p_1^2$  คือค่าแตกต่างระหว่างค่าความดันของฟองสองฟองที่อยู่ติดกันที่มีรัศมี  $r_1$  และ  $r_2$  ดังนั้นก๊าซจะแพร่จากฟองที่มีขนาดเล็กเข้าสู่ฟองที่มีขนาดใหญ่กว่าเพราะว่าฟองที่มีขนาดเล็กจะมีความดันที่สูงกว่า ถ้าฟองที่เกิดขึ้นไม่อยู่ตัวเมื่อเวลาผ่านไปจะเกิดการรวมตัวได้ฟองที่มีขนาดใหญ่กว่าฟองที่มีขนาดเล็ก

**2.5.1.3 ความเสถียรของฟอง** ในการพิจารณาถึงค่าความเสถียรของโฟมตัวแปรแรกที่เราจะต้องพิจารณาคือตัวแปรที่ส่งผลต่อความเสถียรของของเหลวพอลิเมอร์ โฟมเหล่านี้มีค่าความไม่เสถียรทางเทอร์โมไดนามิคดังสมการที่ 1 การเกิดช่องว่างภายในโฟมทำให้เกิดการยุบตัวลดขนาดลงของโฟม ของเหลวเพียงอย่างเดียวไม่สามารถทำให้โฟมมีความเสถียรได้ถ้าไม่มีการเติมสารที่จะทำให้ฟองของโฟมเกิดความเสถียรลงไป เช่นสารที่มีความสามารถดูดซับที่ผิวของฟอง ค่าแรงตึงผิวจะขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณความเข้มข้นของสารชนิดนี้

$$d\gamma = - \sum \Gamma d\mu \quad (2.7)$$

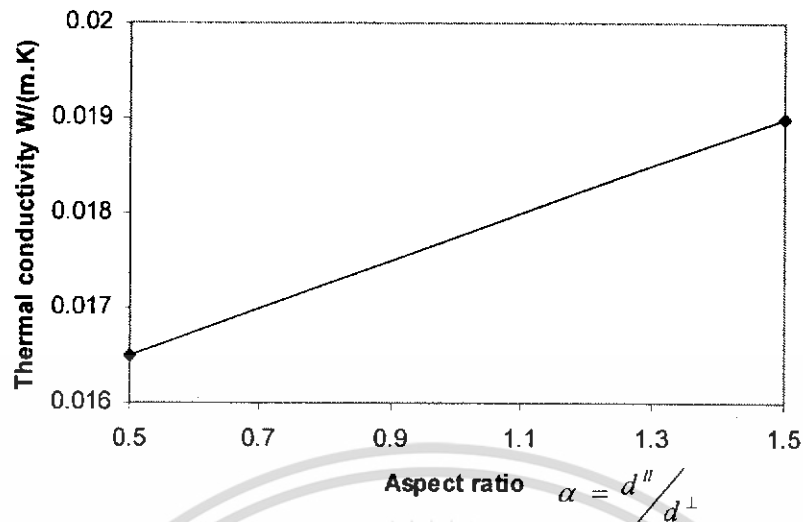
เมื่อ  $\Gamma$  คือค่าพื้นผิวส่วนเกินของตัวที่ดูดซับ  $\mu$  คือค่าพลังงานศักย์ทางเคมี ถ้ามีการจำกัดจำนวนของตัวถูกละลายหลังจากนั้นการเพิ่มขึ้นในพื้นที่ผิวจะเป็นการเพิ่มค่า  $\Gamma$  ทำให้ค่า  $\gamma$  มีค่าเพิ่มขึ้นและเป็นการต่อต้านการขยายตัวของพื้นผิว ผลกระทบของการต่อต้านการเกิดผิวของฟองที่มีความบางนี้ทำให้ฟองมีความเสถียรเมื่อฟองมีการขยายขนาดจะทำให้ค่าความเข้มข้นของตัวดูดซับ (เช่น อิมัลซิฟายเออร์) มีค่าลดลง ค่าความเข้มข้นที่ลดลงนี้สามารถทำให้กลับมาเหมือนเดิมได้โดยการกระบวนการดังต่อไปนี้ ชั้นของพื้นผิวสามารถที่จะไหลจากบริเวณที่มีค่าแรงดึงผิวต่ำไปสู่บริเวณที่มีค่าแรงดึงผิวสูง (ความเข้มข้นของอิมัลซิฟายเออร์ต่ำ) อุณหภูมิของโฟมจะส่งผลกระทบต่อค่าความเสถียรของฟองเพราะการเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ค่าความหนืดและค่าแรงดึงผิวมีค่าลดลง ทำให้ผิวของฟองมีความบางและง่ายต่อการเกิดแตก ในทางกลับกันการเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้เพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน การที่ฟองของโฟมจะเป็นแบบเซลล์ปิดได้ ผนังของฟองต้องมีความยืดหยุ่นมีค่ามอดูลัสต่ำเพื่อป้องกันผนังของฟองไม่ให้เกิดความเสียหายเพราะเมื่อผนังของฟองแตกแล้วจะทำให้เกิดช่องว่างและเกิดการยุบตัวของโฟม

2.5.2 ค่าการนำความร้อนของโฟมพอลิเมอริ์ ค่าการนำความร้อน ( $k$ ) ของโฟมคือผลรวมของค่าการนำความร้อนของเฟสของแข็ง ( $k_s$ ) และของก๊าซ ( $k_g$ ) รวมกับค่าการพาความร้อน ( $k_c$ ) และค่าการแผ่รังสีขององค์ประกอบ ( $k_r$ ) แสดงดังสมการต่อไปนี้

$$k = k_s + k_g + k_c + k_r \quad (2.8)$$

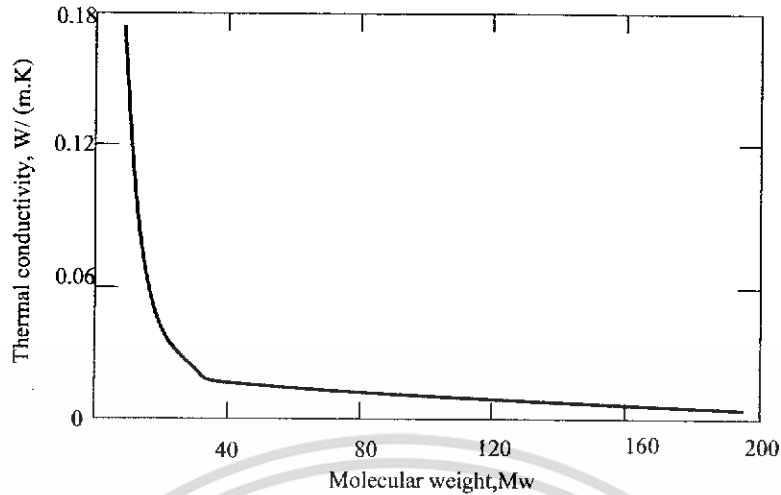
โฟมพอลิเมอริ์ที่จะนำมาใช้เป็นฉนวนค่าการนำความร้อนต้องมีค่าน้อยที่สุด

2.5.2.1 ค่าการนำความร้อนของของแข็ง( $k_s$ ) จะมีค่าน้อยด้วยเหตุผลสองประการด้วยกัน คือข้อแรกค่าการนำความร้อนของพอลิเมอริ์มีค่าไม่สูง คือ อยู่ในช่วงประมาณ 0.12-0.35W/(m.K) ข้อที่สองเพราะว่าในโฟมพอลิเมอริ์จะมีปริมาณพอลิเมอริ์น้อยคือส่วนใหญ่จะเป็นฟองอากาศแต่ในความเป็นจริงการที่พอลิเมอริ์ที่มีความหนาแน่นต่ำนั้นทำให้ค่าการนำความร้อนมีค่าต่ำก็จริงแต่จะทำให้ค่าความแข็งแรงลดลงและพอลิเมอริ์บางชนิดไม่สามารถที่จะทำให้อยู่ในรูปของความเข้มข้นต่ำ ๆ ได้ จากรูป 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Cell Aspect ratio กับค่าการนำความร้อนซึ่งจะเห็นว่าขนาดของฟองที่ใหญ่จะทำให้ค่าการนำความร้อนมีค่าสูงขึ้น

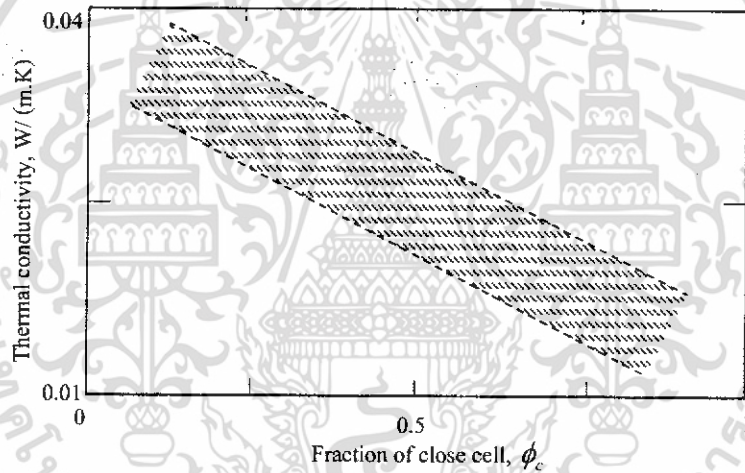


รูปที่ 2.3 ค่าการนำความร้อนของ  $CFCl_3$ -พอลิยูรีเทนโฟม กับค่า Aspect ratio ( $\alpha = d''/d^\perp$  เมื่อ  $d''$  และ  $d^\perp$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของฟองในแนวนอนและตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของความร้อนตามลำดับ [5])

2.5.2.2 ค่าการนำความร้อนของก๊าซ ( $k_g$ ) ก๊าซที่อยู่ในฟองจะมีการตอบสนองต่อค่าการถ่ายเทความร้อน เพราะโฟมประกอบไปด้วยก๊าซ 90 % หรือมากกว่าโดยปริมาตร ค่าการนำความร้อนของก๊าซจะขึ้นอยู่กับค่ามวลโมเลกุล ยิ่งค่ามวลโมเลกุลสูงค่าการนำความร้อนของก๊าซ ( $k_g$ ) จะมียค่าลดลง หลังจากผ่านกระบวนการทำโฟม สารที่ทำให้เกิดฟองจะถูกแทนที่โดยอากาศที่แพร่ผ่านเข้ามา จากการทดลองพบว่าขนาดของฟองจะมีผลต่อค่าการนำความร้อน โดย ฟองที่มีขนาดเล็กเป็นจำนวนมากจะสามารถต้านทานการแลกเปลี่ยนของก๊าซได้ดีกว่าฟองที่มีขนาดใหญ่ทำให้มีค่าการนำความร้อนที่ลดลงแสดงจากรูปที่ 2.4 ส่วนฟองที่มีลักษณะเป็นแบบเซลล์ปิดจะมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำกว่าฟองที่เป็นเซลล์เปิดแสดงดังรูป 2.5



รูปที่ 2.4 ค่าการนำความร้อนกับน้ำหนักโมเลกุลของก๊าซ [5]



รูปที่ 2.5 ค่าการนำความร้อนกับอัตราส่วนของเซลล์ที่เปิด ( $\phi_c$ ) [5]

2.5.2.3 ค่าการนำความร้อนที่เกิดจากการพาความร้อน ( $k_c$ ) เป็นผลมาจากก๊าซที่บรรจุอยู่ในช่องของโฟม ค่าการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากการพาความร้อนจะส่งผลต่อค่าการนำความร้อนรวมน้อยมาก

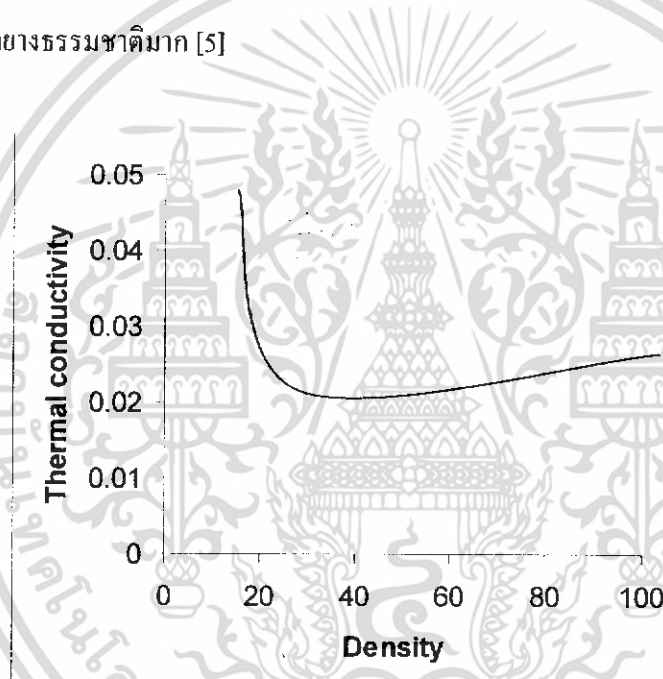
2.5.2.4 ค่าการนำความร้อนที่เกิดจากการแผ่รังสีความร้อน ( $k_r$ ) กระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนที่เกิดจากการแผ่รังสีขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสี และค่าความแตกต่างของอุณหภูมิของแผ่นโฟม จากการทดลองจะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของการนำถ่ายเทความร้อนในรูปแบบต่าง ๆ พบว่าการนำความร้อนที่เกิดจากก๊าซมีค่าที่สูงที่สุด ส่วนถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากการพาความร้อนมีค่าที่ต่ำที่สุด

### 2.5.3 ผลของตัวแปรที่มีต่อค่าการนำความร้อน

ค่าที่ต่ำที่สุดของการนำความร้อนที่เป็นฟังก์ชันกับความหนาแน่น

$$k = f(\rho) \quad (2.9)$$

อาจจะเป็นผลมาจากความแตกต่างของกลไกที่มีอิทธิพลต่อค่าการนำความร้อนที่ขึ้นอยู่กับขนาดฟองของโฟม ดังนั้นเมื่อโฟมที่มีขนาดความหนาแน่นต่ำและของแข็งที่อยู่ภายในพอลิเมอร์จะไม่มีผลใด ๆ ขนาดของเซลล์ที่ใหญ่จะส่งผลต่อค่าการแผ่รังสีความร้อน ส่วนโฟมที่มีค่าความหนาแน่นสูง ๆ องค์ประกอบที่มีความสามารถในการแผ่รังสีจะมีความสำคัญน้อย โฟมที่มีค่าความหนาแน่นสูงจะมีค่าการนำความร้อนที่เกิดจากค่าการนำความร้อนของของแข็งพอลิเมอร์มากเพราะมีส่วนที่เป็นเนื้อของยางธรรมชาติมาก [5]



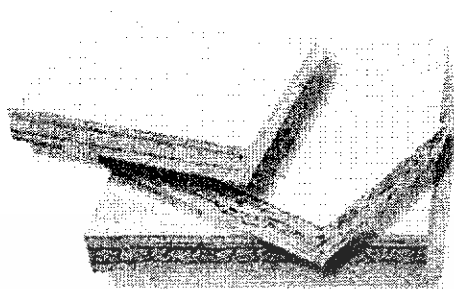
รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนกับความหนาแน่นของโฟม [5]

## 2.6 ชนิดของฉนวนกันความร้อนในเชิงพาณิชย์ [7]

ฉนวนกันความร้อน (Thermal Insulator) คือ วัสดุที่ใช้ในการป้องกันความร้อนและชะลอการถ่ายเทความร้อน ฉนวนกันความร้อนที่ใช้กันอยู่แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ฉนวนแบบมีมวลและฉนวนแบบสะท้อนความร้อน

**2.6.1 ยิปซัมบอร์ด ชนิดกันความร้อน (Gypsum Board)** เป็นวัสดุแผ่นเรียบที่ผลิตขึ้นจากแรยิปซัมซึ่งเผาไฟไม่ติด มาประกอบเป็นแกนกลางของแผ่น ชิดประกบด้วยกระดาษเหนียวชนิดพิเศษทั้ง 2 ด้านทำให้มีผิวหน้าเรียบสม่ำเสมอ มีคุณสมบัติในการป้องกันความร้อนและเสียง นอกจากนี้แผ่นยิปซัมยังไม่เป็นพิษ

และอันตรายต่อสุขภาพ อีกทั้งการติดตั้งก็ง่าย สะดวก รวดเร็ว ไม่เลอะ ครรณีใช้เป็นผนังอาคารจะช่วยประหยัดโครงสร้างอาคาร เนื่องจากมีน้ำหนักเบา



รูปที่ 2.7 แผ่นยิปซัม [8]

**2.6.2 โยแก้ว (Fiber Glass)** เป็นฉนวนที่ผลิตจากการหลอมแก้วแล้วปั่นออกมาเป็นใยสีขาว จัดอยู่ในกลุ่มฉนวนเซรามิก ดังรูปที่ 2.8 โยแก้วมีความหนาแน่นต่างกันตั้งแต่  $10 \text{ kg/m}^3$  ไปถึงมากกว่า  $64 \text{ kg/m}^3$  อาจผลิตในรูปแผ่นแข็ง แบบม้วนหรือขึ้นเป็นรูปทรงต่างๆกัน ตัวเส้นใยจะถูกเคลือบไว้ด้วยตัวประสาน (Binder) เช่น ฟีนอลิกรีซิน ซึ่งทำหน้าที่เชื่อมระหว่างเส้นใย ที่พบมากจะเป็นฟีนอลฟอร์มอัลดีไฮด์ ซึ่งจะทำให้สีเหลืองหลังการผลิต



รูป 2.8 ลักษณะโครงสร้างของเส้นใยแก้วและแผ่นฉนวนใยแก้ว [9]

ตัวใยแก้วเป็นสารอนินทรีย์จึงไม่ติดไฟ แต่ตัวประสานจะติดไฟได้ จึงควรพิจารณาอุณหภูมิในการใช้งาน และการดูดซับความชื้น จะทำให้ความสามารถในการต้านทานความร้อนลดลง จึงต้องมีแผ่นมาประกบเพื่อช่วยต้านทานไอน้ำ เช่นแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์ หรือฟิล์มพลาสติกห่อหุ้มขณะใช้งานจริง ซึ่งต้องพิจารณาคุณภาพและสมบัติการติดไฟในการเลือกใช้งานด้วยและจากการที่ขนาดของเส้นใยแก้วที่เล็กและยาวทำให้มีคุณสมบัติในการคืนรูปหรือคืนความหนาได้ดี คุณสมบัตินี้จะช่วยในการคืนสภาพของฉนวนจากการบรจุหรือการขนส่งที่มักจะมีการบีบอัดและสุดท้าย เรื่องของกลิ่นที่มาจากตัวประสานจึงควรจัดเก็บใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พื้นที่เปิดโล่ง คุณสมบัติของเส้นใยแก้ว การใช้งาน โดยทั่วไป จะวางฉนวนใยแก้วที่มีการห่อหุ้มด้วยแผ่นอะลูมิเนียมพอลิเอทเธนหรือผ้าพลาสติก ซึ่งเป็นพื้นที่การใช้งาน โดยตรง ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงคุณสมบัติของใยแก้ว [7]

รูปแบบกายภาพ	หุ้ม ปิดบุได้หลังคา ปูเหนือฝ้าแผ่นพื้น	การทนไฟ	ใยแก้วไม่ติดไฟแต่ตัว ประสานติดไฟได้
ราคา/หน่วย (บาท)	180	การปลอดภัย	ไม่มีกลิ่น
ราคารวม/ตร.ม.(บาท)	75	การทนต่อการกัดกร่อน	ไม่กัดกร่อนโลหะ
วัสดุ+ค่าแรง+ติดตั้ง/ตร.ม.(บาท)	95	ความต้านทานแมลง เชื้อรา และความปลอดภัยต่อธรรมชาติ	ไม่ขึ้นรา
ขนาด (volume)(cm <sup>3</sup> ) หนา×กว้าง×ยาว (cm×cm×cm)	5×60×400 >50 มม. (หุ้ม) >50 มม. (ปู) >75 มม. (ปู) >50 มม.(แผ่น)	การขีดหีดตัวของวัสดุ (มม./ม.)	คืนรูปดีไม่หดตัวแต่เมื่อขึ้นหรือหมดอายุใช้งานจะยุบตัวกลายเป็นฝุ่นเล็กๆ
น้ำหนัก/ตร.ม. (kg/m <sup>2</sup> )	0.5-0.8	อัตราการซึมน้ำ (%)	<3%
ค่าอุณหภูมิใช้งานที่เหมาะสม (C)	-51 ถึง204	จำนวนผู้ผลิต	มาก
ค่าความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )	16 >64 มม. (หุ้ม) >24 มม. (ปู) >16 มม. (ปู) >32 มม. (แผ่น)	ปริมาณการผลิตเทียบกับความต้องการใช้	เพียงพอ
วัสดุปิดผิว	อะลูมิเนียมพอลิเอทเธน	ขั้นตอนการก่อสร้าง	ง่าย
ค่าการสะท้อนความร้อน (%)	95	การบำรุงรักษา	-
ค่าการดูดกลืนความร้อน (%)	5	อายุการใช้งาน (ปี)	ประมาณ 5-8 ปี
ค่าการถ่ายเทความร้อนรวม (Thermal Transfer) "Q" (Watt/m <sup>2</sup> )	1.451 (ปู) 0.696 (ปู) 1.539 (แผ่น)	ข้อดี - มีคุณสมบัติฉนวนที่ดี - หาซื้อง่าย - ติดตั้งง่าย - มีรูปแบบให้เลือกใช้มาก ข้อเสีย - น้ำหนักมาก - เป็นสารก่ออันตรายต่อร่างกายและสภาพแวดล้อม	
ค่าการนำความร้อน (Conductivity-K value)(W/m.K)	0.0365 0.035(ปู) 0.0365(ปู) 0.033(แผ่น)		
ค่าการต้านทานความร้อน (Resistivity-R value)(m <sup>2</sup> K/W)	1.392		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

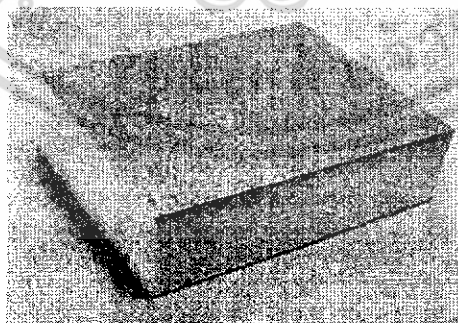
**2.6.3 ฉนวนโฟม (Foam insulator)** มีด้วยกันหลายชนิด ขึ้นอยู่กับสารเคมีที่นำมาใช้ รูปแบบที่นำมาใช้มีทั้งแบบพ่น และแบบสำเร็จรูปใช้ได้ทั้งภายในและภายนอกอาคาร น้ำหนักเบาไม่ก่อให้เกิดปัญหาภัยกับโครงสร้าง และไม่เป็นมลภาวะหรือเป็นพิษต่อแวดล้อม สามารถป้องกันความร้อนได้ดี มีความยืดหยุ่นในการใช้งานสูง โดยเฉพาะแบบฉีกพ่นเพราะจะใช้กับส่วนใดของอาคารก็ได้ และประหยัดเวลาในการใช้งานสูง โดยเฉพาะแบบฉีกพ่นเพราะจะใช้กับส่วนใดของอาคารก็ได้ และประหยัดเวลาในการติดตั้ง โดยชนิดของฉนวนโฟมที่นิยมใช้กันมากมีดังนี้

**2.6.3.1 ฉนวนโพลีสไตรีนโฟม (Polystyrene, PS- Foam)** จัดอยู่ในกลุ่มฉนวนแบบกึ่งเซลล์ปิด มี 2 ลักษณะ คือ

#### 1. ฉนวนโพลีสไตรีนแบบอัดรีด (Extruded Polystyrene)

ผลิตโดยขบวนการอัดรีด ทำให้มีเซลล์ที่ละเอียดซึ่งมีอากาศผสมกับก๊าซฟลูออโรคาร์บอน (ปัจจุบันมีการใช้ก๊าซประเภทอื่นเพื่อหลีกเลี่ยงปรากฏการณ์เรือนกระจก) อยู่ภายในทำให้สภาพในการนำความร้อนที่ต่ำกว่าโพลีสไตรีนแบบหลอ มีโครงสร้างและรูปร่างที่แข็งแรงคงที่มากกว่า ทำให้สามารถทนต่อแรงกดทับและต้านทานไอน้ำได้ดี แต่ข้อเสียคือ ติดไฟได้ และหากสัมผัสกับรังสีอัลตราไวโอเลต (UV) ในบรรยากาศจะมีเสื่อมสภาพได้ จึงควรมีวัสดุปิดผิวในการใช้งาน ปัจจุบันยังคงต้องนำเข้าจากต่างประเทศจึงมีราคาค่อนข้างสูง

2. ฉนวนโพลีสไตรีนแบบหลอหรือขยายตัว ผลก็คือเซลล์จะหยาบกว่า และมีอากาศบรรจุอยู่ภายใน เมื่อเทียบกับแบบอัดรีดแล้วจะมีสภาพการนำความร้อนสูงกว่า ความหนาแน่นต่ำกว่า ต้านทานไอน้ำได้พอใช้ ติดไฟและก่อให้เกิดคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) แต่มีราคาถูกกว่า มีการเสื่อมสภาพจากการสัมผัสรังสียูวีในบรรยากาศได้เช่นกัน จึงควรเลือกใช้ในโครงเคร่าปิดหรือมีแผ่นปิดผิว โดยมีการขึ้นรูปประกอบเป็นผนังมีแผ่นปิด 2 ด้านเพื่อป้องกันรังสียูวีและใช้งานได้สะดวก ปัจจุบันการผลิตจำหน่ายในประเทศไทยแล้ว



รูปที่ 2.9 ฉนวนพอลีสไตรีนโฟม [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2.6.3.2 ฉนวนโพลียูรีเทนโฟม (Polyurethane, PU-Foam)** เป็นพลาสติกโพลีเมอร์ประเภทหนึ่ง ฟันให้เกิดเป็นโฟมมีลักษณะแข็ง อาทิ การฟันเพื่อป้องกันความร้อนได้หลังคา ดังรูปที่ 2.9 จัดอยู่ในกลุ่มฉนวนแบบกึ่งเซลล์ปิด เซลล์ภายในจะบรรจุด้วยก๊าซฟลูออโรคาร์บอน ซึ่งเป็นก๊าซที่ค่าการนำความร้อน(k) ต่ำกว่าอากาศ ทำให้ฉนวนประเภทนี้มีสภาพการนำความร้อนต่ำ อย่างไรก็ตามการนำความร้อนของฉนวนประเภทนี้จะเพิ่มขึ้นหรือค่าการต้านทานความร้อน (R-Value) จะลดลงตามอายุการใช้งานเนื่องมาจากการแพร่กระจายของอากาศเข้าไปในเซลล์ โดยเฉพาะกรณีที่สัมผัสกับรังสียูวี จะทำให้สีของฉนวนเปลี่ยนเป็นสีเหลืองและเสื่อมสภาพลง โดยเฉพาะโฟมที่ไม่ได้ปิดผิว การดูดซับน้ำจะมีบ้างเนื่องจากไม่ใช่เซลล์ปิดทั้งหมด และในกรณีเกิดเพลิงไหม้แม้ว่าจะมีการผสมสารป้องกันการติดไฟแล้ว แต่ก็ยังก่อให้เกิดก๊าซที่มีองค์ประกอบของไซยาไนด์ซึ่งเป็นอันตราย เนื่องจากฉนวนมีการขยายและหดตัวจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ หากใช้โครงเคร่าปิด เช่น ผนังห้องเย็น หรือมีวัสดุปิดผิวที่แข็งแรงพอก็จะเป็นฉนวนที่ดีมาเป็นฉนวนที่ดีมา

**2.6.3.3 ฉนวนโพลีเอทิลีนโฟม (Polyethylene, PE-Foam)** เป็นเอทิลีนโพลีเมอร์รีดขึ้นรูปเป็นแผ่นมีฟองละเอียดของก๊าซอยู่ด้านใน จัดอยู่ในกลุ่มของฉนวนแบบเซลล์ปิด มีลักษณะอ่อนนุ่ม จึงไม่ควรใช้กับงานที่มีการกดทับ การต้านทานไอน้ำอยู่ในเกณฑ์สูง มีการเสื่อมสภาพได้จากรังสียูวี จึงควรมีแผ่นปิดผิวขณะใช้งาน หรือไม่สัมผัสกับรังสียูวีโดยตรง และเนื่องจากเป็นโพลีเมอร์พลาสติกประเภทหนึ่งจึงก่อให้เกิดควันปริมาณมากและก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ที่เป็นอันตรายเมื่อเกิดเพลิงไหม้

ตารางที่ 2.3 ข้อดีและข้อเสียของฉนวนกันความร้อนแบบ โฟม [7]

ข้อดี	<ul style="list-style-type: none"> <li>-ไม่ติดไฟ</li> <li>-ปรับรูปได้</li> <li>-เบา</li> <li>-ยึดติดง่าย</li> <li>-การนำความร้อนต่ำสุด</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ส่งผ่านความร้อนต่ำ</li> <li>- ไม่ลามไฟ</li> <li>- ประหยัดพลังงาน</li> <li>- ติดตั้งง่ายสะดวก</li> <li>- ไม่เป็นที่อยู่ของแมลง</li> <li>- เป็นเนื้อเดียวกันป้องกันความชื้น</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- นำความร้อนต่ำ</li> <li>- ใช้เป็นตัวฉนวนหรือกันซึม</li> <li>- การแทรกซึมของไอน้ำและการดูดกลืนความร้อน ต่ำ</li> <li>- น้ำหนักเบา</li> <li>- ผสมสีต่างๆได้</li> </ul>
ข้อเสีย	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เป็นที่อยู่อาศัยของแมลงหากไม่มีการป้องกัน</li> <li>- ถ้าชื้นมากๆจะทำให้เสื่อมสภาพไป</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เป็นที่อยู่อาศัยของแมลง</li> <li>- ถ้าชื้นมากทำให้เสื่อมสภาพ</li> <li>- หากเกิดไฟไหม้จะมีควันมากและเกิดไฮโดรไซยาไนด์ (HCN) ซึ่งเป็นก๊าซที่มีอันตราย</li> <li>- ความต้านทานขูดขีดต่ำ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ติดไฟได้</li> <li>- ขณะลุกไหม้เกิดควันที่เป็นพิษแก่ด้วยการเติมสารกันไฟ</li> <li>- ไม่ทนน้ำมันเบนซิน ทินเนอร์ น้ำมันสน</li> <li>- ไม่ทนแสงแดด</li> </ul>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของฉนวนโฟมชนิดต่าง ๆ [7]

ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติของฉนวน			
คุณสมบัติ	ฉนวน P.E.FOAM	ฉนวน P.U.FOAM	ฉนวนใยแก้ว
1. โครงสร้างเซลล์	เซลล์ปิด	เซลล์กึ่งปิด-เปิด	เซลล์เปิด
2. ความหนาแน่น	33-34 kg/m <sup>3</sup>	32-35 kg/m <sup>3</sup>	16-32 kg/m <sup>3</sup>
3. ค่าการนำความร้อน	0.030 W/m.K ที่ 25 °C	0.028 W/m.K	0.042 W/m.K ที่ 20 °C
4. อุณหภูมิใช้งาน	- 80 °C ถึง + 85 °C	- 118 °C ถึง + 82 °C	+ 200 °C
5. ความทนทานต่อสารเคมี	ดีเยี่ยม	ไม่มี	ดี
6. ค่าการดูดซึมน้ำ	ต่ำมาก	สูง	สูงมาก
7. การติดไฟ	ไม่ลามไฟ	ลามไฟ	ไม่ติดไฟ
8. การเกิดควันพิษเมื่อติดไฟและปริมาณควัน	ไม่มีพิษ ควันน้อย	ปริมาณควันมากเป็นพิษ	N/A
9. ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของวัสดุ	ไม่เป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม สภาพการเป็นเซลล์ปิดและมีความเป็นฉนวนตลอดอายุการใช้งานกรณีอยู่ในที่โล่งแจ้งควรทาสีทับผิววัสดุ	เมื่อใช้งานไประยะหนึ่ง โฟมจะแตกตัวเป็นรอยทำให้ซึมเข้าไปสะสมและเมื่อฉนวนจะเสื่อมสภาพ หลุดร่อนทำให้คุณสมบัติการเป็นฉนวน ลดลงไปตามระยะเวลาใช้งาน	เมื่อใช้งานระยะหนึ่งเส้นใยจะเริ่มหลุดร่วงเป็นฝุ่นละอองฟุ้งกระจายเมื่อสัมผัสผิวหนังจะระคายเคืองเมื่อสูดดมเข้าไปจะเกิดอันตรายต่อระบบทางเดินหายใจคุณสมบัติการเป็น ฉนวนจะลดลงด้วย
10. อายุการใช้งาน	ระยะเวลานาน 7-10 ปี คຸ້ມคຳกັບการพิจารณาใช้สินค้าไม่สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในระยะเวลา	ภายในเวลา 2-3 ปีไม่คุ้มค่า และอาจต้องเพิ่มค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงในระยะต่อไป	ภายในเวลา 2-3 ปีไม่คุ้มค่าและอาจต้องเพิ่มค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงในระยะต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7 แนวทางการเลือกวัสดุกันความร้อนและการนำไปใช้

ในการเลือกใช้นั้นก็จะมีวิธีเลือกและนำไปใช้ต่างกันออกไปตามความต้องการของผู้ใช้ที่หลากหลาย และมีวัตถุประสงค์ในการใช้งานที่ต่างกัน ซึ่งสามารถแบ่งเป็นกลุ่มตามวัตถุประสงค์หรือการเน้นความสำคัญในการเลือกใช้ ได้ดังนี้

**2.7.1 คุณสมบัติความเป็นฉนวน** กรณีที่ให้ความสำคัญกับความสามารถในการเป็นฉนวนของวัสดุนั้น ก่อนที่จะทราบถึงแนวทางการเลือกใช้ ควรมีความเข้าใจกับความหมายของคำว่า “วัสดุฉนวน” ก่อน ซึ่งวัสดุฉนวนในความหมายที่เข้าใจง่ายก็คือเลือกวัสดุที่มีความสามารถในการป้องกันความร้อนหรือความเย็นไม่ให้ผ่านจากด้านหนึ่งสู่อีกด้านหนึ่งของวัสดุได้โดยง่าย ซึ่งการที่ความร้อนจะผ่านเข้ามาได้มากหรือน้อยก็จะขึ้นกับวัสดุชนิดนั้นว่ามีคุณสมบัติในการเป็นฉนวนเพียงใด ซึ่งคุณสมบัติของฉนวนที่ดีสามารถพิจารณาได้จากความสามารถในด้านต่างๆ

- ความสามารถในการต้านทานความร้อนสูง (Resistivity)
- ความสามารถในการนำความร้อนต่ำ (Conductivity)
- ความจุความร้อนต่ำ (Thermal Capacity)

โดยค่าต่างๆเหล่านี้สามารถสอบถามหรือดูจากข้อมูลจากผู้ผลิตให้มา การเลือกวัสดุฉนวนที่ดีจะช่วยลดปริมาณความร้อนที่เข้ามาภายในอาคารให้น้อยลงได้ ทำให้สามารถลดการใช้พลังงานในการทำความเย็นให้กับอาคาร โดยเฉพาะกับบริเวณที่มีการปรับอากาศที่จะต้องสูญเสียพลังงานในการทำความเย็นห้องเป็นจำนวนมาก แต่ถ้ามีการใช้วัสดุที่มีความเป็นฉนวนที่ดีก็จะเป็นการช่วยในการทำงานของระบบปรับอากาศได้มาก ซึ่งจะเป็นผลให้เสียค่าใช้จ่ายในเรื่องของค่าไฟลดลง

**2.7.2 ผลต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม** โดยตัววัสดุเอง ไม่มีวัสดุใดที่ก่อให้เกิดอันตรายโดยตรงกับมนุษย์ แต่จะมีวัสดุชนิด ที่มีผลทางอ้อม กล่าวคือ ฉนวนไฟเบอร์กลาสหรือรู้จักในชื่อของฉนวนใยแก้วนั้น มีใยแก้วเป็นส่วนประกอบหลักที่ไม่เป็นอันตรายใดๆแต่สารประกอบที่ใช้ยึดใยแก้วเข้าด้วยกันจะมีกลิ่นและมีผลกระทบต่อร่างกาย อีกทั้งใยแก้วที่เสื่อมสภาพแล้วจะกลายเป็นฝุ่นฟุ้งกระจาย ซึ่งไม่เป็นผลดีต่อผู้อยู่

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Jhy-wen wu, Wen- Fa Sung, Hsin- Sen Chu [11] ทำงานวิจัยนี้เป็นการเปรียบเทียบค่าการนำความร้อนของ พอลิยูรีเทน โฟม ที่ทดลองที่ความดันก้ำระหว่าง 760 torr และ 0.014 torr จะเปรียบเทียบผลที่ได้กับทฤษฎี งานนี้จะใช้ พอลิยูรีเทน โฟม ทำเป็นฉนวนกันความร้อน ซึ่ง พอลิยูรีเทน โฟม ที่ใช้จะมีขนาดของเซลล์ต่างกัน คือขนาดตั้งแต่ 150 ไมโครเมตร ถึง 350 ไมโครเมตรจากการทดลองจะ

ได้ค่า Spectral extinction coefficient โดยใช้เครื่อง Fourier transform infrared spectrometer ในการหา และนำค่าที่ได้มาหาการนำความร้อนของพอลิยูรีเทนโฟม โดยนำพอลิยูรีเทนโฟมที่มีขนาดของเซลล์ต่างกันคือจาก 33.3 mW/mK ถึง 34.5 mW/mK ทำที่ความดันก๊าซ 760 torr และที่ความดันก๊าซ 0.014 torr ทำการลดค่าขนาดของเซลล์จาก 6.82 mW/mK ถึง 9.15 mW/mK ผลที่ได้คือ ถ้าเซลล์มีขนาดเล็กการนำความร้อนก็จะลดลง และที่ความดันก๊าซ 0.014 torr จะมีการแผ่รังสีความร้อนผ่านแค่เพียง 20 เปอร์เซ็นต์ โดยประมาณ จากความร้อนที่ให้แก่ พอลิยูรีเทน โฟม ทั้งหมด ขณะที่ตัวน้ำที่เป็นของแข็งอื่นๆทั้งไปรังสีความร้อนผ่านถึง 80 เปอร์เซ็นต์

Chung-jen Tseng และ Kuang-te Kuo [12] ทำการศึกษาการใช้ ฟีนอลิกโฟม ทำฉนวนกันความร้อน ที่ใช้ ฟีนอลิกโฟม ก็เพราะสมบัติของฟีนอลิกโฟม จะทำให้การแผ่ความร้อนช้าลงเพราะฉนวนมีคุณสมบัติในการลดการถ่ายเทความร้อนระหว่างระบบกับสิ่งแวดล้อมจึงใช้ ฟีนอลิกโฟมทำเป็นฉนวนได้ซึ่งฉนวนนั้นก็ยังมีหลายชนิดทั้งฉนวนแบบผงฉนวนแบบเส้นใยฉนวนแบบโฟมฟีนอลิกโฟม เป็นฉนวนแบบ โฟมฉนวนแบบผงและ ฉนวนแบบเส้นใยก็ใช้ได้แต่มีราคาสูงและถ้ามันเกาะกันเป็นอนุภาคใหญ่ จะทำให้มันดูดความชื้นและประสิทธิภาพการเป็นฉนวนน้อยลง ส่วนฉนวนแบบโฟม จะมีราคาค่อนข้างต่ำผลิตง่ายและดูแลรักษาง่าย พอลิยูรีเทนโฟมเป็นตัวที่นิยมใช้กันมากที่สุดและอาจจะมีฉนวน โฟมแบบอื่นๆอีก เช่น พอลิเอทิลีน โฟม และพอลิสไตรีนโฟมฉนวนเหล่านี้จะนำความร้อนต่ำและยึดหยุ่นดีแต่พวกมันติดไฟได้ง่ายฟีนอลิกโฟมจะแตกต่างจากฉนวนโฟมพวกนี้ที่มันไม่ติดไฟง่าย จึงเป็นคุณสมบัติที่ดีที่จะทำให้เลือกใช้ฟีนอลิกโฟมเป็นฉนวน

Z.H. Kodah, M.A. Jarrah, N.S. Shanshal [13] ทำเพื่อหาคุณลักษณะของฉนวนกันความร้อนที่ได้จากการนำวัสดุทางธรรมชาติที่มีต้นทุนต่ำ แต่ช่วยส่งเสริมคุณสมบัติให้แก่ฉนวนงานนี้ใช้ฉนวนชนิดพอลิยูรีเทนโฟม โดยการหาค่าการถ่ายเทความร้อน จากฉนวนที่มีองค์ประกอบต่างกัน คือ ฉนวนที่มีพอลิยูรีเทน โฟมอย่างเดียวฉนวนพอลิยูรีเทนโฟมร่วมกับฟางแห้งและฉนวนพอลิยูรีเทนโฟมร่วมกับขานอ้อย เมื่อนำไปหาค่าการถ่ายเทความร้อน ฉนวนพอลิยูรีเทนโฟมร่วมกับฟางแห้ง จะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนน้อยที่สุด จึงมีสมบัติเป็นฉนวนดีที่สุด

T.Soubdham, T. Feuillard and F.Bade[14] ทำงานวิจัยนี้เพื่อ คู่อธิพลของตัวป้องกันการแผ่รังสีความร้อน (Radiant Barrier) ว่ามีผลอย่างไรเมื่อนำมาติดที่หลังคาตึก และทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของฉนวนแต่ละตัว นอกจากนี้ยังศึกษาว่าวัสดุและวิธีการของฉนวนชนิดใดที่จะลดการแผ่รังสีความร้อนผ่านหลังคาได้ดีที่สุดในงานวิจัยจะใช้ตัวอย่างทดสอบ 4 ตัวเป็นฉนวนติดตั้งที่หลังคา ได้แก่

พอลิस्टาโรน โฟม ตัวป้องกันการแผ่รังสีความร้อน ไฟเบอร์กลาส และไม้ติดตั้งฉนวน ได้มีการทดสอบตัวแปรหลายอย่างที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน เช่น วัสดุความสามารถในการดูดความร้อนของหลังคา การระบายอากาศของหลังคา ค่าการนำความร้อนจะถูกคำนวณจากอุณหภูมิที่วัดได้ ในหลังคาที่ใช้แผ่นสังกะสีสีขาว เมื่อคิด ตัวป้องกันการแผ่รังสีความร้อนจะลดการถ่ายเทความร้อนได้ 67 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่สังกะสีสีดำสามารถลดการถ่ายเทความร้อนได้ 33 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่า ค่าการดูดความร้อนก็มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน และดูการระบายอากาศ หากไม่มีการระบายอากาศตัวป้องกันการแผ่รังสีความร้อน ก็จะมีประสิทธิภาพเหมือนกับพวก พอลิस्टาโรน โฟม และไฟเบอร์กลาส แต่หากมีการระบายอากาศตัวป้องกันการแผ่รังสีความร้อน จะเป็นฉนวนได้ดีกว่า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 รูปแบบของงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการผลิตโฟมจากน้ำยางธรรมชาติชั้นเพื่อประยุกต์ใช้เป็นฉนวนกันความร้อน ใช้ โฟแทสเซียมโอเลอเทเป็นสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) แล้วทำการปั่นจนทำให้เกิดฟอง โดย อัตราส่วนของน้ำยางธรรมชาติชั้นต่อโฟแทสเซียมโอเลอเท เท่ากับ 100:0, 100:6, 100:10, 100:14, และ 100:22 phr จากนั้นทดสอบค่าการนำความร้อน สมบัติเชิงกายภาพและเชิงกลของโฟมยาง ธรรมชาติ เช่น ค่าความต้านแรงดึง (Tensile Strength) ร้อยละการยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด(Percent Elongation at break)

#### 3.2 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

##### 3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1. เครื่องตีฟอง
2. เตาอบ
3. เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียดทศนิยม 3 ตำแหน่ง
4. แม่พิมพ์สแตนเลสขนาด 8x8x1 นิ้ว
5. กล้องวัดโอจุลทรรศน์กำลังขยายต่ำ

##### 3.2.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1. น้ำยางชั้นชนิดที่มีปริมาณเนื้อยาง 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
2. สารละลายโฟแทสเซียมโอเลอเท 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
3. สารแขวนลอยซิลเฟอร์ร้อยละ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
4. สารแขวนลอย Zinc diethyl dithiocarbamate (ZDEC) 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
5. สารแขวนลอย Zinc- 2- mercaptobenzthiazole (ZMBT) 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
6. สารแขวนลอย Wingstay- L 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
7. สารแขวนลอย Diphenyl guanidine (DPG) 33 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
8. สารแขวนลอย Sodium silicofluoride (SSF) 12.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
9. สารแขวนลอยททาเนียมไดออกไซด์ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 วิธีการทดลอง

การผลิตโฟมยางธรรมชาติมีส่วนผสมที่สำคัญอยู่ 3 ส่วนด้วยกันคือ น้ำยางธรรมชาติชั้น สารเคมีที่ทำให้น้ำยางเกิดฟองและสารเคมีที่ทำให้ยางคงรูป ในการวิจัยนี้ใช้สารละลายโพแทสเซียม โอลิเอทเป็นสารลดแรงตึงผิว ขั้นตอนการสังเคราะห์โฟมยางธรรมชาติมีดังต่อไปนี้

1. นำน้ำยางชั้นกับสารละลายโพแทสเซียมโอลิเอท มาตีเพื่อทำให้เกิดฟองผสมในเครื่องตี ฟองประมาณ 2 นาที

2. ใส่ Sulfur ZDEC ZMBT และ Wingstay-L ในอัตราส่วนดังตารางที่ 3.1 ผสมให้เข้ากัน

3. ใส่ Zinc oxide และ DPG ในอัตราส่วนดังตารางที่ 3.1 ผสมให้เข้ากัน

4. ใส่ SSF ในอัตราส่วนดังตารางที่ 3.1 ผสมให้เข้ากัน

5. เทฟองยางใส่แม่พิมพ์ปากหน้าให้เรียบ ปิดฝาแม่พิมพ์แล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 10-15 นาทีเพื่อให้ยางอยู่ตัว

6. นำไปอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสเป็นเวลาประมาณ 3 ชั่วโมง

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนของน้ำยางชั้นและสารเคมีในการผลิตโฟมยางธรรมชาติ

สารเคมี	น้ำหนัก (g)
น้ำยางธรรมชาติชั้น	167
50% Sulfur	4
50% Zinc diethyl dithiocarbamate(ZDEC)	3
50% Zinc-2-mercaptobenzthiazole(ZMBT)	3
33% Diphenyl guanidine (DPG)	3
50% Zinc oxide	10
10% Potassium oliate	0, 6, 10, 14, 22
50% Wingstay - L	2
12.5% Sodium silicofluoride (SSF)	8
50% Titanium dioxide	5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 การทดสอบคุณสมบัติของโฟมยางธรรมชาติ

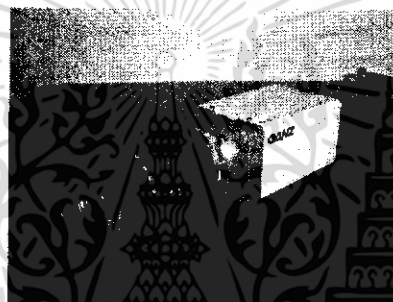
#### 3.4.1 หาค่าความหนาแน่น

นำโฟมยางธรรมชาติมาชั่งน้ำหนักและวัดขนาด จากนั้นนำมาคำนวณหาค่าความหนาแน่น จากสมการที่ 3.1

$$\text{ความหนาแน่น (kg/m}^3\text{)} = \frac{\text{น้ำหนักของตัวอย่าง (kg)}}{\text{ปริมาตรของตัวอย่าง (m}^3\text{)}} \quad (3.1)$$

#### 3.4.2 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโฟมยางธรรมชาติ (Morphology)

นำโฟมยางธรรมชาติมาทำการดูสภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายต่ำประมาณ 5 เท่า เพื่อดูลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโฟมยางธรรมชาติเมื่อมีปริมาณ โฟแทสเซียมโอเลิเอทที่แตกต่างกัน



รูปที่ 3.1 กล้องจุลทรรศน์กำลังขยายต่ำ

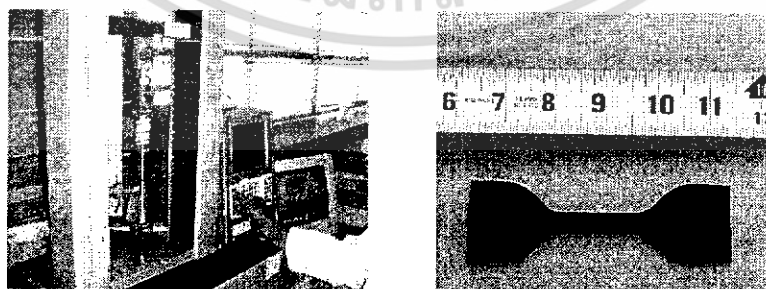
#### 3.4.3 การทดสอบสมบัติการดึงยืด

ตัดโฟมยางธรรมชาติเป็นรูปดัมเบลล์ตามมาตรฐาน JIS K 6301(Pattern No. 3) และทดสอบด้วยเครื่อง ทดสอบแรงดึง (Instron รุ่น 4466) ภายใต้สภาวะการทดสอบดังนี้

Load cell = 300 KGF

Test speed = 500 มิลลิเมตร/นาที

Gauge length = 50 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.2 เครื่องทดสอบแรงดึงและ ชิ้นงานที่ทดสอบรูปดัมเบลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องทดสอบแรงดึง(Tensile Testing Machine) ตัวเครื่องประกอบด้วยส่วนจับตัวอย่าง (Grip) สองข้าง ข้างหนึ่งยึดกับที่ อีกข้างหนึ่งติดกับส่วนให้แรงที่สามารถเคลื่อนที่ขึ้นให้แรงดึง หรือเคลื่อนที่ลงให้แรงกดอัด ในอัตราเร็ว (Crosshead Speed) ที่สามารถควบคุมได้ โดยมีเครื่องวัดแรง (Load cell) ต่ออยู่ ทำหน้าที่วัดแรงที่ใช้ดึงหรือกดอัดตัวอย่าง ส่วนจับตัวอย่าง (Grip) มีหลายชนิด จะต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับตัวอย่าง สามารถจับตัวอย่างดี ไม่เกิดการลื่นหลุด หรือทำให้ตัวอย่าง บิดเบี้ยว

ค่าที่ได้จากการทดสอบสมบัติการดึงยึด ได้แก่

### 1. ความต้านแรงดึง (Tensile Strength) คำนวณ ค่าความต้านแรงดึงจากสมการ ที่ 3.2

$$\text{ความต้านแรงดึง} \quad \sigma = \frac{F}{A} \quad 3.2$$

เมื่อ  $\sigma$  = ค่าความต้านแรงดึง (เมกะปาสกาล หรือ นิวตันต่อตารางเมตร)

$F$  = แรงที่ใช้ดึง (นิวตัน)

$A$  = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานทดสอบก่อนถูกดึงยึด (ตารางมิลลิเมตร)

### 2. ร้อยละการยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด (Percent Elongation at Break) คำนวณจากสมการ

ที่ 3.3

$$\text{ร้อยละการยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด} = \frac{l - l_0}{l_0} \times 100 \quad 3.3$$

เมื่อ  $l_0$  = ความยาวของชิ้นงานทดสอบที่ยังไม่ได้รับแรงดึงมีค่าเท่ากับ Gauge length (มิลลิเมตร)

$l$  = ความยาวของชิ้นงานทดสอบหลังได้รับแรงดึง (มิลลิเมตร)

#### 3.4.4 วัดค่าการนำความร้อน

วัดค่าการนำความร้อน โดยส่งตัวอย่างของโพรพอกซินไปทดสอบที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีตามมาตรฐาน ASTM C-177 ขนาดของตัวอย่างที่ใช้ทดสอบมีขนาด กว้าง 8 นิ้ว ยาว 8 นิ้ว และหนา 1 นิ้ว

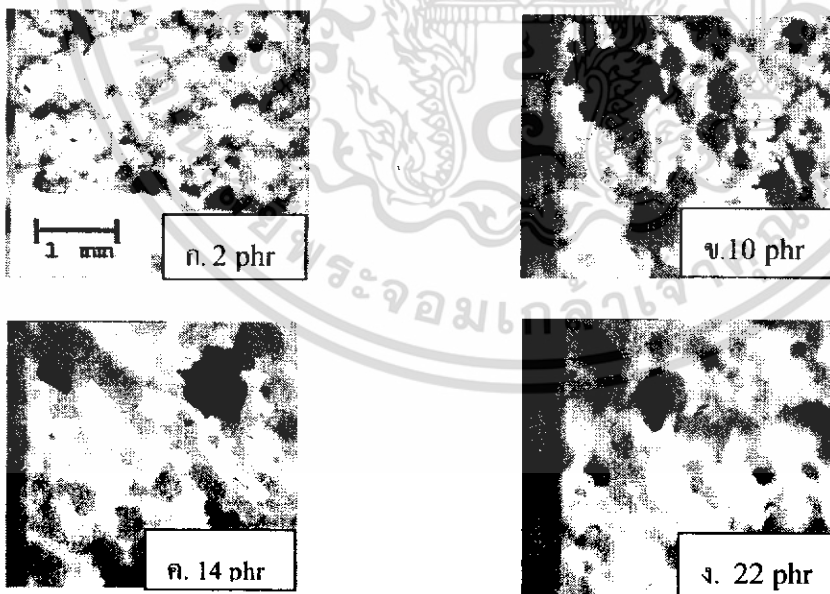
## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทดลองเพื่อทำการศึกษาผลของสารลดแรงตึงผิวที่มีต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยา คุณสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกล จากนั้นจึงนำฉนวนโพนที่ได้มาทำการทดสอบค่าการนำความร้อน เพื่อใช้พิจารณาว่ามีความเป็นไปได้หรือไม่ที่จะสามารถปรับปรุงและพัฒนา นำมาใช้เป็นฉนวนกันความร้อนในเชิงพาณิชย์

#### 4.1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโพนยางธรรมชาติ

เมื่อปรับเปลี่ยนปริมาณของโพแทสเซียมโอเลอัทซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิว โดยเริ่มการใส่โพแทสเซียมโอเลอัทในปริมาณ 0, 2, 10, 14 และ 22 phr ตามลำดับ พบว่าลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโพนยางธรรมชาติที่ได้มีลักษณะแตกต่างกัน รูปที่ 4.1 (ก) ที่ปริมาณโพแทสเซียมโอเลอัท 2 phr พบว่าลักษณะโครงสร้างของเซลล์เป็นแบบกึ่งปิด - เปิด ขนาดของเซลล์มีขนาดประมาณ 0.5 มิลลิเมตร รูป ข ที่ปริมาณโพแทสเซียมโอเลอัท 10 phr เนื้อของโพนยางธรรมชาติจะมีขนาดเซลล์ใหญ่ขึ้นมีลักษณะเป็นเซลล์เปิด ส่วนรูป ค และ ง ที่ปริมาณโพแทสเซียมโอเลอัท 14 และ 22 phr ตามลำดับ ลักษณะของเนื้อโพนยางธรรมชาติจะมีความพรุนมากกว่าที่ปริมาณโพแทสเซียมโอเลอัท 2 และ 10 phr



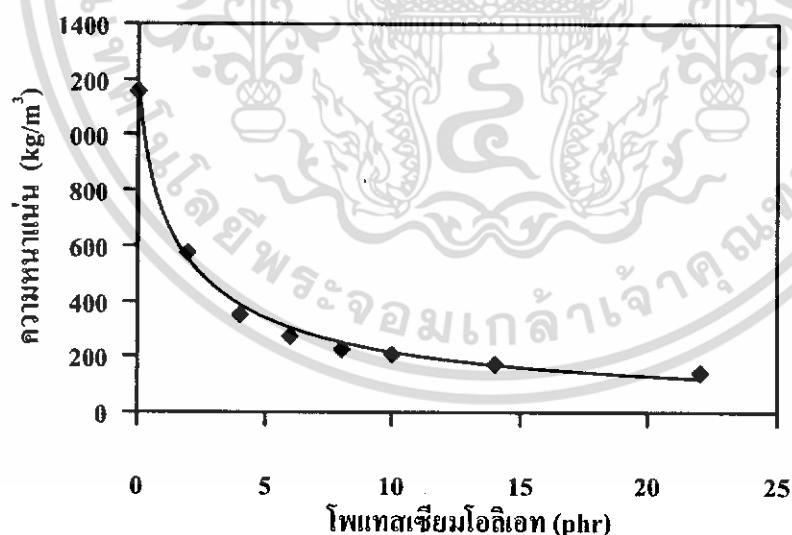
รูปที่ 4.1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโพนยางธรรมชาติที่อัตราส่วนของโพแทสเซียมโอเลอัท 2, 10, 14 และ 22 phr ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองพบว่า ที่ปริมาณโพแทสเซียมโอเลตสูงกว่า 22 phr จะไม่สามารถขึ้นรูปโฟมยางธรรมชาติได้เนื่องจากที่ปริมาณโพแทสเซียมโอเลตสูง ค่าแรงดึงผิวของน้ำยางธรรมชาติจะมีค่าต่ำทำให้ผนังของฟองที่เกิดจากการตีฟองมีความบางไม่แข็งแรงต่อแรงที่มากระทำ ทำให้ฟองเกิดการแตกก่อนที่ยางธรรมชาติจะอยู่ตัว เมื่อนำไปอบทำให้โฟมที่ได้ออกมาไม่มีฟองอากาศเหลืออยู่เลย ดังนั้นในการทดลองจึงใช้ปริมาณ โพแทสเซียม โอเลตสูงสุดที่ 22 phr

#### 4.2 ความหนาแน่นและอัตราส่วนช่องว่างของโฟมยางธรรมชาติ

ในการทดลองนี้ต้องการศึกษาถึงผลของปริมาณโพแทสเซียมโอเลตที่เติมลงไปในน้ำยางธรรมชาติ เนื่องจากค่าความหนาแน่นจะมีผลต่อค่าการนำความร้อนของโฟมยางธรรมชาติ ความหนาแน่นของโฟมยางธรรมชาติจะมีค่าแปรผกผันกับปริมาณโพแทสเซียมโอเลตที่เติมลงในน้ำยางธรรมชาติ จากรูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของโฟมยางธรรมชาติกับปริมาณโพแทสเซียมโอเลต พบว่ายางธรรมชาติที่ไม่ได้เติมโพแทสเซียมโอเลตหรือยางธรรมชาติที่ไม่ได้อยู่ในรูปของโฟมจะมีค่าความหนาแน่น  $1,154.7 \text{ kg/m}^3$  ซึ่งเมื่อเติมโพแทสเซียมโอเลต 2 phr จะพบว่าทำให้ค่าความหนาแน่นมีค่าลดลงเหลือ  $577.9 \text{ kg/m}^3$  เมื่อปริมาณโพแทสเซียมโอเลตมีค่าสูงขึ้นค่าความหนาแน่นของโฟมยางธรรมชาติจะมีค่าลดลงและมีค่าที่ต่ำที่สุดที่ปริมาณโพแทสเซียมโอเลต 22 phr คือ  $140.1 \text{ kg/m}^3$

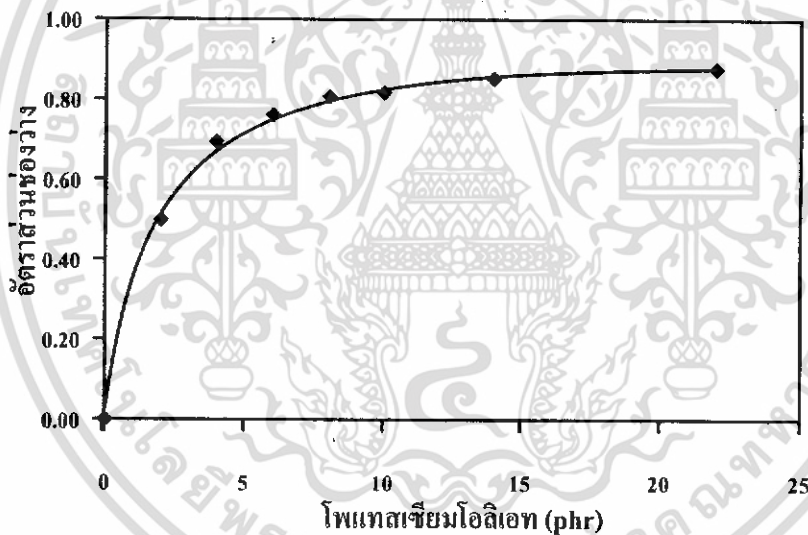


รูปที่ 4.2 ความหนาแน่นของโฟมยางธรรมชาติที่ปริมาณ โพแทสเซียม โอเลต 0, 2, 6, 10, 14 และ 22 phr

ค่าความหนาแน่นที่ลดลงเนื่องมาจากเมื่อปริมาณ โพลีเอทิลีน โพลีเอทิลีนที่เพิ่มขึ้นทำให้แรงดึงผิวของน้ำยางมีค่าจึงเกิดฟองขึ้นขณะทำการตีฟอง เพราะอากาศสามารถแทรกตัวเข้าสู่เนื้อยางได้มากขึ้น

จากรูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างกับปริมาณ โพลีเอทิลีน โพลีเอทิลีนที่ต่างกัน โดยคิดเปรียบเทียบกับยางที่ไม่มีการเติม โพลีเอทิลีน โพลีเอทิลีนที่ไม่มีช่องว่างอยู่ในเนื้อยางเลยหรืออัตราช่องว่างเป็นศูนย์ จะพบว่าค่าอัตราส่วนช่องว่างจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ โพลีเอทิลีน โพลีเอทิลีนที่มีค่าเพิ่มขึ้น โดยอัตราส่วนช่องว่างของโพลีเอทิลีน โพลีเอทิลีนที่มีค่าสูงสุด คือ ที่ปริมาณ โพลีเอทิลีน โพลีเอทิลีน 22 phr มีค่า 87.9 % หมายความว่าที่ปริมาตรของโพลีเอทิลีน โพลีเอทิลีน 100 หน่วยจะมีช่องว่างในเนื้อยาง 87.9 หน่วย ส่วนที่เหลือจะเป็นเนื้อยางธรรมชาติ 12.1 หน่วย

จากรูปที่ 4.3 ลักษณะของเส้นกราฟจะมีค่าความชันมากในช่วงปริมาณ โพลีเอทิลีน โพลีเอทิลีน 0 - 5 phr หลังจากนั้นจะมีค่าคงที่ ซึ่งสามารถทำนายได้ว่าโพลีเอทิลีน โพลีเอทิลีนสามารถขึ้นรูปได้โดยมีอัตราส่วนช่องว่างไม่เกินประมาณช่วง 88 % เพราะจากการทดลองพบว่าปริมาณ โพลีเอทิลีน โพลีเอทิลีนที่สูงกว่า 22 phr ไม่สามารถขึ้นรูปโพลีเอทิลีน โพลีเอทิลีนได้



รูปที่ 4.3 อัตราส่วนช่องว่างของโพลีเอทิลีน โพลีเอทิลีนที่ปริมาณ โพลีเอทิลีน โพลีเอทิลีน 0, 2, 6, 10, 14 และ 22 phr

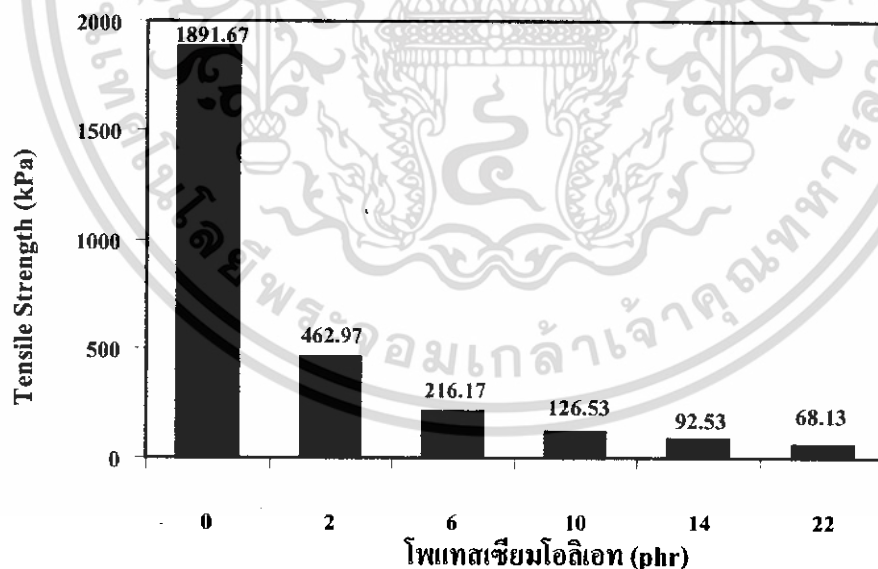
#### 4.3 ค่าความต้านแรงดึง (Tensile strength)

ฉนวนกันความร้อนที่คืนออกจากจะมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำแล้ว ต้องมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีด้วย ค่าความต้านแรงดึงจึงเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งที่น่ามาทดสอบเพื่อให้รู้ว่าโพลีเอทิลีน โพลีเอทิลีนที่ผลิตขึ้นนั้นมีความแข็งแรงคงทนเพียงใด ซึ่งค่าความต้านแรงดึง คือ อัตราส่วนระหว่างแรงที่ใช้ดึงจนวัตถุที่นำมาทดสอบขาดออกจากกันส่วนด้วยพื้นที่หน้าตัดของวัตถุนั้น

ผลของค่าความต้านแรงดึงจากการทดสอบด้วยเครื่อง Instron รุ่น 4466 โดยตัดชิ้นส่วนของโฝมยางธรรมชาติเพื่อใช้ทดสอบตามมาตรฐาน JIS K 6301 (Pattern No. 3) โดยดึงตัวอย่างที่อัตราเร็ว 500 มิลลิเมตร/นาที

ผลการทดสอบค่าความต้านแรงดึงแสดงในรูปที่ 4.4 ขางธรรมชาติที่ไม่มีการเติมโพแทสเซียมโอเลอเทจะมีค่าความต้านแรงดึง 1,891.67 kPa เมื่อมีการเติมโพแทสเซียมโอเลอเทเพียง 2 phr จะพบว่าค่าความต้านแรงดึงจะมีค่าลดลงเหลือ 462.97 kPa ซึ่งต่ำกว่ายางธรรมชาติอยู่มาก และเมื่อมีการเพิ่มปริมาณโพแทสเซียมโอเลอเทขึ้น คือ ที่ 6, 10, 14 และ 22 phr ค่าความต้านแรงดึงจะมีค่าลดลง คือ 216.17, 126.53, 92.53 และ 68.13 ตามลำดับ

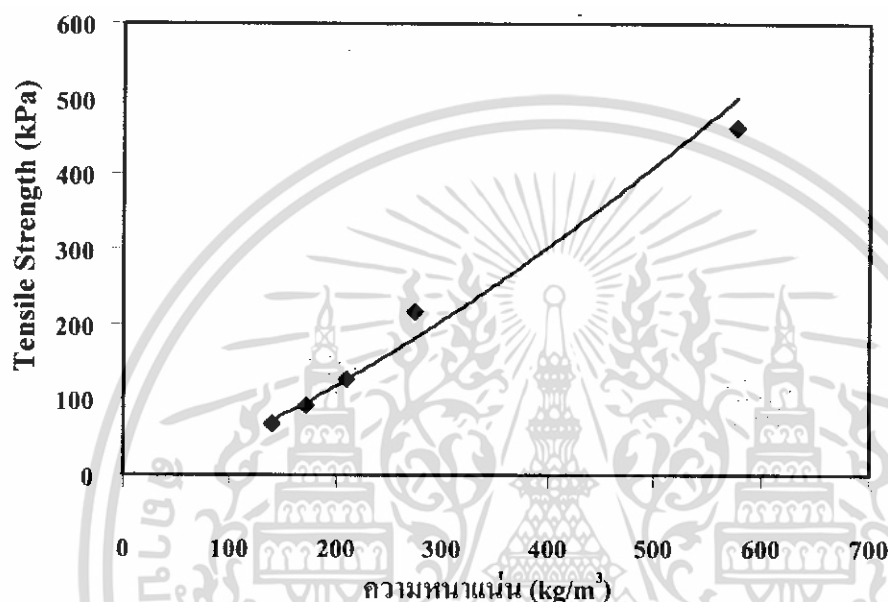
ค่าความหนาแน่นที่ลดลงเนื่องจากปริมาณโพแทสเซียมโอเลอเทที่สูงขึ้น ปริมาตรของเนื้อยางธรรมชาติจะมีค่าลดลง ขณะที่เกิดขึ้นจึงมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติที่ไม่มีการเติมโพแทสเซียมโอเลอเท แรงที่ใช้ดึงเพื่อทำให้โฝมยางธรรมชาติขาดออกจากกันจึงมีค่าลดลง ถึงแม้ค่าความต้านแรงดึงของโฝมยางธรรมชาติจะมีค่าต่ำกว่ายางธรรมชาติ แต่พบว่าโฝมยางธรรมชาติที่ปริมาณโพแทสเซียมโอเลอเท 2 - 14 phr มีความต้านแรงดึงพอสมควรแต่ที่ปริมาณโพแทสเซียมโอเลอเท 22 phr โฝมยางธรรมชาติจะมีความพรุนสูงและทนต่อแรงดึงจึงไม่เหมาะในการนำมาเป็นฉนวนกันความร้อน



รูปที่ 4.4 ค่าต้านทานแรงดึงของโฝมยางธรรมชาติที่ปริมาณโพแทสเซียมโอเลอเท 0, 2, 6, 10, 14 และ 22 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านแรงดึงของโพลีเอทิลีนกับค่าความหนาแน่น พบว่าเมื่อโพลีเอทิลีนมีค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นแนวโน้มของค่าความต้านแรงดึงของโพลีเอทิลีนจะมีค่าสูงขึ้น จากรูปที่ 4.5 ลักษณะของเส้นกราฟจะมีความชันประมาณ  $45^\circ$  นั้นหมายความว่าค่าการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นจะมีค่าเท่ากับค่าการเปลี่ยนแปลงของค่าต้านแรง ซึ่งค่าความหนาแน่นจะสัมพันธ์กับปริมาณโพแทสเซียมโอเลอเทตที่กล่าวมาข้างต้น

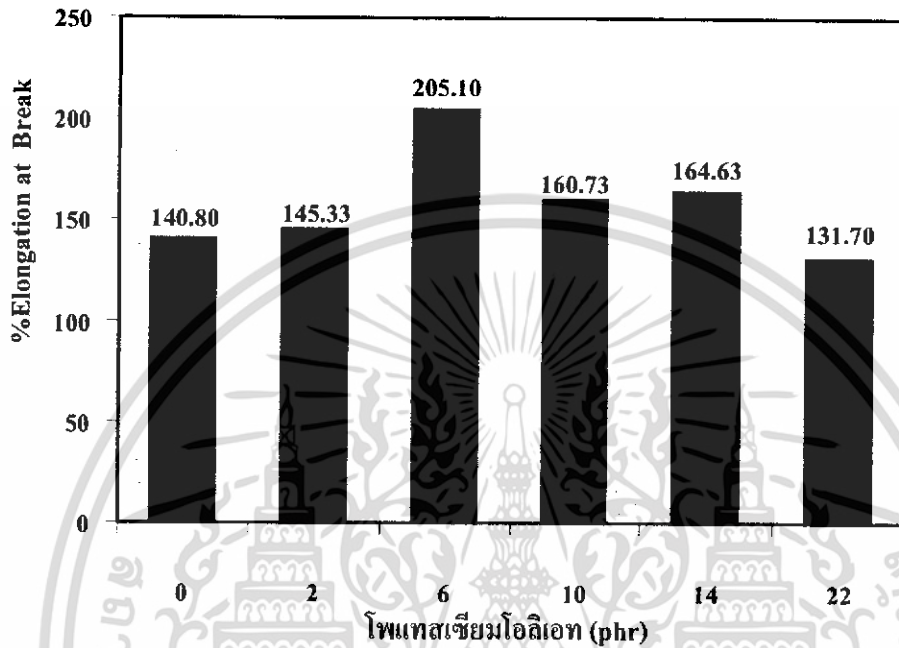


รูปที่ 4.5 แนวโน้มของค่าความต้านแรงดึงที่ความหนาแน่นของโพลีเอทิลีนแตกต่างกัน

#### 4.4 ร้อยละการยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด (Percent Elongation at break)

ผลของร้อยละการยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด ดังรูปที่ 4.6 เมื่อพิจารณาจากยางธรรมชาติที่ยังไม่เติมโพแทสเซียมโอเลอเทต และที่ทำการเติมโพแทสเซียมโอเลอเทตที่ 2 และ 6 phr พบว่าร้อยละการยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดมีค่าเพิ่มขึ้นคือจากที่ไม่เติมมีค่าร้อยละการยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดเท่ากับ 140.80 และเพิ่มเป็น 145.33 เมื่อเติมโพแทสเซียมโอเลอเทตที่ 2 phr และสูงที่สุดที่เติมโพแทสเซียมโอเลอเทตที่ 6 phr คือ มีค่าร้อยละการยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดเท่ากับ 205.10 แต่หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณโพแทสเซียมโอเลอเทตขึ้นคือที่ 10, 14 และ 22 phr พบว่าค่าร้อยละการยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดกลับมีแนวโน้มลดลง ที่เป็นเช่นนี้ก็เนื่องจากปริมาณโพแทสเซียมโอเลอเทตจะมีผลต่อค่าความหนาแน่นโพลีเอทิลีนที่มีความหนาแน่นสูงจะมีความแข็งทำให้ระยะที่ดึงสูงสุดก่อนที่จะขาดจะมีค่าที่ความหนาแน่นต่ำจนเกินไปเนื้อของโพลีเอทิลีนจะมีความพรุนสูงไม่ทนต่อแรงดึงและ

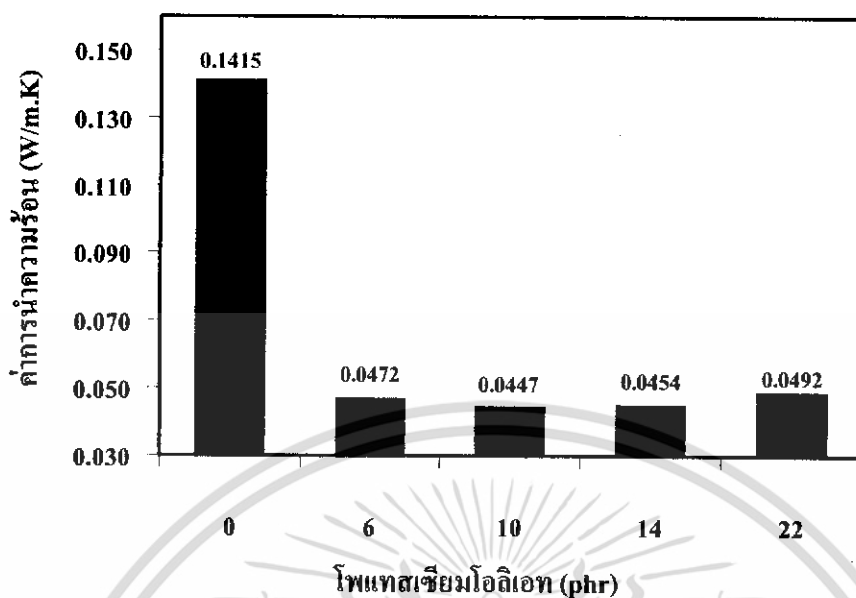
ระยะดึงสูงสุดก่อนที่จะขาดจะมีค่าต่ำ ดังนั้นค่าความหนาแน่นที่เหมาะสมจึงจะทำให้ค่าร้อยละการยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดมีค่าสูงที่สุด



รูปที่ 4.6 ค่าร้อยละการยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดของโฟมยางธรรมชาติที่ปริมาณ โฟแทสเซียมโอไลเอท 0, 2, 6, 10, 14 และ 22 phr

#### 4.5 ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity)

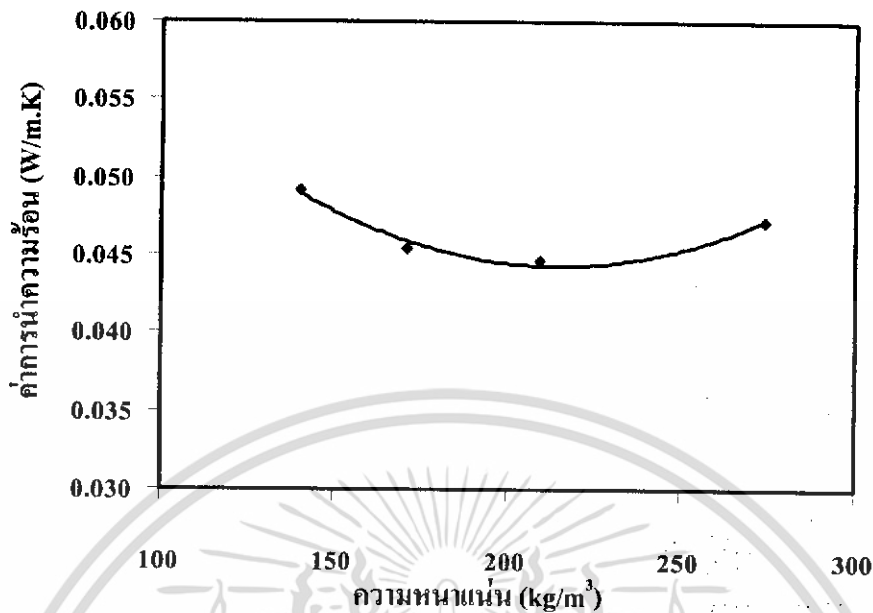
ค่าการนำความร้อน คือ คุณสมบัติที่สำคัญของฉนวนกันความร้อน เพราะฉนวนกันความร้อนที่ดีจะต้องมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำ สำหรับฉนวนกันความร้อนแบบโฟมใช้หลักการกักเก็บความร้อนโดยฟองขนาดเล็กที่กระจายตัวอยู่ในเนื้อของยางธรรมชาติ ดังนั้นค่าความหนาแน่นจึงมีผลต่อค่าการนำความร้อนจากการทดลองเราพบว่าปริมาณ โฟแทสเซียมโอไลเอทมีผลต่อค่าความหนาแน่นของโฟมยางธรรมชาติ ปริมาณ โฟแทสเซียมโอไลเอทจึงมีผลต่อค่าการนำความร้อนของโฟมยางธรรมชาติ



รูปที่ 4.7 ความแตกต่างของค่าการนำความร้อนของโพลีเอทิลีนไกลคอลที่ปริมาณ โพลีเอทิลีนไกลคอล 0, 6, 10, 14 และ 22 phr

จากรูปที่ 4.7 จะพบความแตกต่างของค่าการนำความร้อนอย่างชัดเจนระหว่างโพลีเอทิลีนไกลคอลและโพลีเอทิลีนไกลคอลที่ปริมาณ 0, 6, 10, 14 และ 22 phr จะพบความแตกต่างของค่าการนำความร้อนเท่ากับ 0.1415 W/m.K ซึ่งมีค่าสูงกว่าโพลีเอทิลีนไกลคอลที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากว่าโพลีเอทิลีนไกลคอลมีความหนาแน่นน้อยกว่าโพลีเอทิลีนไกลคอลค่าเฉลี่ยของค่าการนำความร้อนของโพลีเอทิลีนไกลคอลที่มีปริมาณ โพลีเอทิลีนไกลคอล 6, 10, 14 และ 22 phr เท่ากับ 0.0466 W/m.K

จากรูปที่ 4.7 จะเห็นค่าความแตกต่างของค่าการนำความร้อนระหว่างโพลีเอทิลีนไกลคอลและโพลีเอทิลีนไกลคอลอย่างชัดเจนจากรูปที่ 4.8 แสดงแนวโน้มของค่าการนำความร้อนของโพลีเอทิลีนไกลคอลที่ค่าความหนาแน่นแตกต่างกัน จากทฤษฎีพบว่าค่าความหนาแน่นที่เหมาะสมจะทำให้ค่าการนำความร้อนมีค่าต่ำที่สุดซึ่งเป็นสิ่งที่ต้องการในฉนวนกันความร้อน ความหนาแน่นต้องไม่สูงหรือต่ำเกินไป จากการทดลองจะได้กราฟดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ค่าความหนาแน่นที่มีผลต่อค่าการนำความร้อนของโฟมยางธรรมชาติ

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนกับค่าความหนาแน่นของโฟมยางธรรมชาติมีแนวโน้มดังรูปที่ 4.8 จากการทดลองพบว่าค่าความหนาแน่นที่อยู่ในช่วงประมาณ 200 – 230 kg/m<sup>3</sup> ทำให้ค่าการนำความร้อนมีค่าต่ำที่สุดและพบว่าที่ปริมาณ โฟแทสเซียมโอเลอเทอ 10 phr มีค่าการนำความร้อนต่ำที่สุด คือ 0.0447 W/m.K ซึ่งมีค่าความหนาแน่น 209.8 kg/m<sup>3</sup>

นอกจากค่าความหนาแน่นที่มีผลต่อค่าการนำความร้อนแล้วลักษณะ โครงสร้างของโฟมยางธรรมชาติก็มีผลเช่นกัน โฟมที่มีลักษณะฟองเป็นแบบเซลล์ปิดจะมีค่าการนำความร้อนต่ำกว่าแบบเซลล์เปิด แต่จากการทดลองพบว่าโฟมยางธรรมชาติมีลักษณะของฟองเป็นแบบเซลล์เปิด และเมื่อขึ้นรูปที่ปริมาณ โฟแทสเซียมโอเลอเทอสูงจะมีการแตกของฟองรวม ทำให้โฟมยางธรรมชาติที่ได้มีลักษณะของฟองที่ไม่สม่ำเสมอ คือ โครงบริเวณกันของแม่พิมพ์จะไม่มีฟองอากาศอยู่เลย จากการทดลองพบว่าถ้าใช้ปริมาณ โฟแทสเซียมโอเลอเทอมากกว่า 22 phr จะไม่สามารถขึ้นรูปโฟมได้เนื่องจากฟองจะแตกจนหมดก่อนที่ยางจะอยู่ตัว

เมื่อนำค่าการนำความร้อนของโฟมยางธรรมชาติที่ได้จากการทดลองที่ปริมาณ โฟแทสเซียมโอเลอเทอ 10 phr (ค่าการนำความร้อนต่ำที่สุด) มาเปรียบเทียบกับจนวนกันความร้อนในเชิงพาณิชย์ ดังตารางที่ 4.1 พบว่าโฟมยางธรรมชาติมีค่าการนำความร้อนสูงกว่าจนวนกันความร้อนในเชิงพาณิชย์ที่มีค่าการนำความร้อนอยู่ในช่วง 0.028 – 0.042 W/m.K เมื่อพิจารณาคูณสมบัติต่าง ๆ พบว่าจนวนกันความร้อนในเชิงพาณิชย์ เช่น พอลิเอทรีนโฟมและพอลิยูรีเทนโฟมพบว่าลักษณะโครงสร้างเป็นแบบ

เซลล์ปิดและยังมีค่าความหนาแน่นต่ำกว่า คือ ความหนาแน่นอยู่ในช่วง  $32 - 35 \text{ kg/m}^3$  แต่เนื่องจากค่าการนำความร้อนของโฟมยางธรรมชาติและฉนวนพอลิเอทิลีนโฟมทดสอบที่อุณหภูมิอ้างอิงต่างกัน คือ  $20$  และ  $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ ทำให้ค่าการนำความร้อนมีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากที่อุณหภูมิต่างกันค่าความหนาแน่นของอากาศในเซลล์ของโฟมมีค่าต่างกันจึงส่งผลให้ค่าการนำความร้อนมีค่าต่างกัน แต่ที่นำมาเปรียบเทียบกันเพื่อดูแนวโน้มและคุณสมบัติเชิงกายภาพ เช่น ความหนาแน่นและลักษณะโครงสร้างของเซลล์

ตารางที่ 4.1 ค่าการนำความร้อนของโฟมยางธรรมชาติกับฉนวนกันความร้อนในเชิงพาณิชย์

คุณสมบัติ	โฟมยางธรรมชาติ (10 phr)	PE Foam	PU Foam	ใยแก้ว
โครงสร้างเซลล์	เปิด	ปิด	กึ่งปิด-เปิด	เปิด
ความหนาแน่น ( $\text{kg/m}^3$ )	200.8	33-34	32-35	16-32
ค่าการนำความร้อน ( $\text{W/m.K}$ )	0.0447 ที่ $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$	0.0300 ที่ $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$	0.028	0.042 ที่ $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองเพื่อทำการผลิตฉนวนกันความร้อนจากน้ำยางธรรมชาติ โดยทำการขึ้นรูปให้อยู่ในรูปของโฟมโดยใช้โพแทสเซียมโอเลอเทเป็นสารลดแรงตึงผิว ที่ปริมาณ 0, 6, 10, 14, และ 22 phr แล้วนำตัวอย่างของโฟมยางธรรมชาติมาทดสอบคุณสมบัติเชิงกายภาพ เหนียวและทดสอบค่าการนำความร้อน เพื่อวิเคราะห์ว่าปริมาณของโพแทสเซียมโอเลอเทมีผลอย่างไรต่อคุณสมบัติของโฟมยางธรรมชาติ จากนั้นจึงนำค่าที่ได้จากผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับฉนวนกันความร้อนในเชิงพาณิชย์

##### 5.1.1 คุณสมบัติเชิงกายภาพ

5.1.1.1 ลักษณะ โครงสร้างเป็นแบบเซลล์เปิดมีอัตราส่วนช่องว่างสูงขึ้นเมื่อปริมาณโพแทสเซียมโอเลอเทสูงขึ้น

5.1.1.2 ค่าความหนาแน่นของโฟมยางธรรมชาติจากการทดลองมีค่าอยู่ในช่วง  $140.1 - 577.9 \text{ kg/m}^3$

##### 5.1.2 คุณสมบัติเชิงกล

5.1.2.1 ค่าความต้านแรงดึง (Tensile Strength) ของโฟมยางธรรมชาติมีค่าอยู่ในช่วง  $68.13 - 462.97 \text{ kPa}$  ปริมาณโพแทสเซียมโอเลอเทที่สูงขึ้นทำให้ค่าความต้านแรงดึงมีค่าต่ำลง

5.1.2.2 ร้อยละการยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด (Percent Elongation at Break) ของโฟมยางธรรมชาติมีค่าอยู่ในช่วง  $131.70 - 205.10 \%$  ที่ปริมาณโพแทสเซียมโอเลอเท 6 phr และ 22 phr จะมีค่าร้อยละการยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดสูงสุดและต่ำที่สุดตามลำดับ

5.1.3 ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ของโฟมยางธรรมชาติมีค่าอยู่ในช่วง  $0.0447 - 0.0492 \text{ W/m.K}$  ซึ่งมีค่าต่ำกว่ายางธรรมชาติและพบว่าที่ปริมาณโพแทสเซียมโอเลอเท 10 phr มีค่าการนำความร้อนมีค่าต่ำที่สุด คือ  $0.0447 \text{ W/m.K}$

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรมีการปรับปรุงและพัฒนาเพื่อลดค่าการนำความร้อน โดยการลดค่าความหนาแน่นของโฟมยางธรรมชาติลงเพราะจากการทดลองนี้สามารถขึ้นรูปโฟมยางธรรมชาติโดยมีค่าความหนาแน่นต่ำสุดที่  $140.1 \text{ kg/m}^3$  และโครงสร้างของเซลล์เปิด แต่จนวนกันความร้อนที่ต้องการคือ มีค่าความหนาแน่นต่ำและโครงสร้างของเซลล์เป็นแบบเซลล์ปิด นอกจากนี้ควรมีการศึกษาคุณสมบัติทางด้านอื่น ๆ เพิ่มเติมเช่น การติดไฟ ปริมาณสารเคมีที่ตกค้างในโฟมยางธรรมชาติและกลิ่นจากโฟมยางธรรมชาติ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] <http://southnfe.go.th/WBI/para%20produc%20act001.htm> , Sep.2005
- [2] [http://rubber.sc.mahidol.ac.th/RTU/information3\\_1.htm](http://rubber.sc.mahidol.ac.th/RTU/information3_1.htm) ,Sep.2005
- [3] <http://www.pr-trf.net/%3Fitemid%3D21+ZMBT&hl=th&gl=th&ct=clnk&cd=11>
- [4] Klempner ,D. and Frisch, K.C. *Polymeric Foam*. New York. : Hanser. 1991.
- [5] <http://www.trfrubber.com/Upload/abstract%20rubber%20foam.txt.do>, Oct.2005
- [6] นักสิทธิ์ คูวัฒนาชัย. การถ่ายเทความร้อน *Heat Transfer*. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ ฟิสิกส์เซ็นเตอร์. 2526.
- [7] เอกสารเผยแพร่ แนวทางการเลือกใช้วัสดุก่อสร้างและฉนวนเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน
- [8] <http://www.nudo.com/Panel%2520Systems/ FiberLitePrelam/fiberl1.jpg&imgrefurl>,Feb.2006
- [9] [www.miccell.co.th/cqisect/cellstructure.htm](http://www.miccell.co.th/cqisect/cellstructure.htm) &[http://www.microfiber.co.th/product\\_industry\\_03.php](http://www.microfiber.co.th/product_industry_03.php)
- [10] <http://www.fao.org/DOCREP/004/Y1873E/y1873e0y.jpg> , Feb.2006
- [11] Wu, J.Sung,W. Chu *Thermal conductivity of polyurethane foams*, 1998
- [12] Tseng, C. Kuo, K. *Thermal radiative properties of phenolic foam insulation*, 2001
- [13] Kodah, Z.H. Jarrah, M.A. Shanshal, N.S. *Thermal characterization of foam-cane*, 1998
- [14] Soubdham,T. Feuillard, T. Bade, F. *Experimental evaluation of insulation material*, 2004

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้