



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (ฟิสิกส์)

ปริญญา

ฟิสิกส์ สาขา ฟิสิกส์
สาขา ภาควิชา

เรื่อง การศึกษาสมบัติเชิงกายภาพ สมบัติเชิงกล และสมบัติเชิงความร้อน
ของฉนวนกันความร้อนจากเส้นใยกกช้าง

A Study of Physical, Mechanical and Thermal Properties for Thermal Insulation from
Narrow-leaved Cattail Fibers

นามผู้วิจัย นางสาวฐิติวัลคุ์ เลื่อมกาญจนพันธ์
ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์สุรารัตน์ โชติกประคัลภ์, Dr.rer.nat.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์ทรงกลด จารุสมบัติ, วท.ม.)

หัวหน้าภาควิชา

(อาจารย์วิวัฒน์ วงศ์ก่อเกื้อ, วท.ค.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาสมบัติเชิงกายภาพ สมบัติเชิงกล และสมบัติเชิงความร้อน
ของฉนวนกันความร้อนจากเส้นใยกกช้าง

A Study of Physical, Mechanical and Thermal Properties for Thermal Insulation
from Narrow-leaved Cattail Fibers

โดย

นางสาวฐิติวัลก์ เลื่อมกาญจนพันธ์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์)

พ.ศ. 2555

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ฐิติวัลค์ เลื่อมกาญจนพันธ์ 2555: การศึกษาสมบัติเชิงกายภาพ สมบัติเชิงกล และสมบัติเชิงความร้อนของฉนวนกันความร้อนจากเส้นใยกช้าง ปรินญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (ฟิสิกส์) สาขาฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
อาจารย์สุรารัตน์ โชติกประคัลภ์, Dr.rer.nat. 114 หน้า

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกายภาพ สมบัติเชิงกล และสมบัติเชิงความร้อนของฉนวนกันความร้อนจากเส้นใยกช้าง โดยใช้กาวโพลีเมอริคเมทิลีนไดฟีนิลไดไอโซไซยานเนต เป็นสารยึดติด ผ่านกระบวนการอัดร้อน แผ่นที่ผลิตได้มีลักษณะเป็นแผ่นเรียบแบบชั้นเดียว ขนาด $350 \times 350 \times 10$ mm จากผลทดสอบตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม แผ่นขึ้นไม้อัดชนิดอัดราบ มอก.876-2547 พบว่า สมบัติเชิงกายภาพ คือ ปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้น เมื่อความหนาแน่นเพิ่มขึ้น สมบัติเชิงกล คือ ความต้านทานแรงดัด โมดูลัสยืดหยุ่น และความต้านแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้าเพิ่มขึ้น เมื่อความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ส่วนผลทดสอบสมบัติเชิงความร้อนตามมาตรฐาน ASTM C 518-10 พบว่า เมื่อความหนาแน่นของแผ่นเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าการนำความร้อนของแผ่นเพิ่มขึ้นด้วย โดยแผ่นฉนวนกันความร้อนที่มีความหนาแน่น $200-400 \text{ kg/m}^3$ มีค่าการนำความร้อนอยู่ในช่วง $0.0438-0.0606 \text{ W/m K}$ เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับแผ่นฉนวนกันความร้อนที่ใช้วัสดุชนิดต่างชนิดกัน เช่น ฟางข้าว เส้นใยก้านฝ้าย เวอร์มิคูไลท์ โดยพิจารณาที่ความหนาแน่นเดียวกัน พบว่า แผ่นฉนวนกันความร้อนจากเส้นใยของต้นกช้างนี้มีค่าการนำความร้อนที่ต่ำกว่า แสดงให้เห็นว่าแผ่นฉนวนกันความร้อนที่ผลิตได้มีสมบัติเหมาะที่จะนำไปประยุกต์ใช้เป็น ส่วนประกอบภายในอาคารเพื่อกันความร้อน ทั้งยังช่วยอนุรักษ์พลังงานและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

Thitiwan Luemkanchanaphan 2012: A Study of Physical, Mechanical and Thermal Properties for Thermal Insulation from Narrow-leaved Cattail Fibers. Master of Science (Physics), Major Field: Physics, Department of Physics. Thesis Advisor: Miss. Sutharat Chotikaprakhan, Dr.rer.nat. 114 pages.

The objective of this research was to study physical, mechanical and thermal properties of insulation boards prepared from narrow-leaved cattail fibers by using Polymeric Methylene Diphenyl Diisocyanate as a binder. Hot pressing was employed to produce single layered plain thermal insulation boards with the size 350×350×10 mm. The test results according to the standard of TIS. 876-2547 showed that the moisture content of the boards increased as the density increased. Modulus of Rupture, Modulus of Elasticity and tensile strength perpendicular to surface of the board increased as the density increased. Thermal conductivity measured in accordance with the ASTM C 518-10 revealed that the board with a density of 200-400 kg/m³ had the thermal conductivity values ranging from 0.0438-0.0606 W/m K, which was less than that of fibrous materials and cellular materials such as wheat straw, cotton stalk fibers, vermiculite with the same density range. According to the test results, it can be concluded that this insulation boards from narrow-leaved cattail fibers were an excellent insulating component for energy saving and environmentally friendly.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาจาก ดร. สุรรัตน์ โชติกปิระคัลภ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และ รศ. ทรงกลด จารุสมบัติ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้ข้อคิด แนวทาง คำปรึกษาและความรู้ในด้านการค้นคว้าวิจัย ตลอดจนตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ จนวิทยานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์ ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ดร. วิวัฒน์ วงศ์ก่อเกื้อ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ รศ. ศิวาพร สหวิวัฒน์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ข้อเสนอแนะรวมทั้งความรู้ที่เป็นประโยชน์ และกรุณาสละเวลามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ และบัณฑิตวิทยาลัย ที่ได้ให้ทุนอุดหนุนในการทำวิทยานิพนธ์เพื่อการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ และทุนสนับสนุนในการไปประชุมวิชาการระดับนานาชาติ International Conference on Environmental Science and Development (ICESD 2012) ณ เขตปกครองพิเศษฮ่องกง แห่งสาธารณรัฐประชาชนจีน และตรวจสอบวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ นายคมสันต์ กล้ายุกู และนายเสกสรรค์ คมสัน ที่ได้ให้คำแนะนำ คำปรึกษา ตอบข้อซักถามและฝึกทักษะในการทำการทดลองครั้งนี้

ขอขอบคุณ นายภักคณัย ทองทิอัมพร เจ้าหน้าที่โครงการฟิสิกส์และวิศวกรรม กรมวิทยาศาสตร์บริการ ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือเพื่อทดสอบสมบัติเชิงความร้อน

ท้ายที่สุดนี้ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้ความช่วยเหลือในทุกๆ ด้าน และเป็นกำลังใจสำคัญเสมอมา

จิตติวัฒน์ ภิเษมกาญจนพันธ์

พฤษภาคม 2555

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำอธิบายอักษรย่อ	(7)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	41
ผลและวิจารณ์	59
สรุปและข้อเสนอแนะ	81
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	82
ภาคผนวก	87
ภาคผนวก ก Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus ASTM C 518-10	88
ภาคผนวก ข รายงานการทดสอบค่าการนำความร้อน โดยกรมวิทยาศาสตร์บริการ	104
ภาคผนวก ค ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ ครั้งที่ 3 International Conference on Environmental Science and Development (ICESD 2012)	107
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	114

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	กลุ่มของแผ่นซีเมนต์อัดที่ใช้ไม้ซีเมนต์หรือแผ่นไม้แปรรูปเล็กๆ มาประสานกัน พร้อมภาพประกอบ	26
2	กลุ่มของแผ่นซีเมนต์อัดที่ใช้ซีเมนต์สับเป็นวัตถุดิบ พร้อมภาพประกอบ	27
3	กลุ่มของแผ่นซีเมนต์อัดที่ใช้เส้นใยจากพืชเป็นวัตถุดิบ พร้อมภาพประกอบ	30
4	ค่าความหนาแน่นของแผ่น น้ำหนักเส้นใย และกาว ก่อนอัดขึ้นรูป และ น้ำหนักของเส้นใยที่ผสมกาวแล้วต่อการผลิตแผ่นฉนวนกันความร้อน 1 แผ่น	44
5	อุณหภูมิ ระยะเวลาและแรงดันที่ใช้ในการอัดแผ่นฉนวนกันความร้อน	46
6	ขนาดและจำนวนของชั้นทดสอบที่ใช้ตามมาตรฐาน มอก. 876-2547	48
7	ปริมาณความชื้นของชั้นทดสอบที่มีความหนาแน่น 200 kg/m^3	59
8	ปริมาณความชื้นของชั้นทดสอบที่มีความหนาแน่น 300 kg/m^3	60
9	ปริมาณความชื้นของชั้นทดสอบที่มีความหนาแน่น 400 kg/m^3	61
10	ค่าความต้านแรงคัดและ โมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นทดสอบที่มีความหนาแน่น 200 kg/m^3	66
11	ค่าความต้านแรงคัดและ โมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นทดสอบที่มีความหนาแน่น 300 kg/m^3	67
12	ค่าความต้านแรงคัดและ โมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นทดสอบที่มีความหนาแน่น 400 kg/m^3	68
13	ค่าความต้านแรงค้ำตั้งฉากกับผิวหน้าของชั้นทดสอบที่มีความหนาแน่น 200 kg/m^3	70
14	ค่าความต้านแรงค้ำตั้งฉากกับผิวหน้าของชั้นทดสอบที่มีความหนาแน่น 300 kg/m^3	71
15	ค่าความต้านแรงค้ำตั้งฉากกับผิวหน้าของชั้นทดสอบที่มีความหนาแน่น 400 kg/m^3	72

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
16	อุณหภูมิเมื่อความร้อนถ่ายเทเข้าสู่แผ่นทดสอบและอุณหภูมิเมื่อความร้อนถ่ายเทออกจากแผ่นทดสอบ เมื่อแผ่นทดสอบมีค่าการนำความร้อนต่างกัน	77
17	ค่าการนำความร้อนของฉนวนกันความร้อนที่ใช้วัสดุชนิดต่างกัน และฉนวนกันความร้อนที่นิยมใช้ในท้องตลาด	78

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แสดงค่าความชื้นของอุณหภูมิตั้งแต่ค่าคิดลบ เมื่อความร้อนถ่ายเทจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ	9
2	การนำความร้อนเข้าและออกจากรูปลูกบาศก์ขนาดเล็กทั้ง 3 ทิศทาง เพื่อวิเคราะห์ในพิกัดฉาก	10
3	การนำความร้อนผ่านแผ่นราบ	15
4	ภาพตัดขวางแสดงการถ่ายเทความร้อนภายในฉนวน	17
5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนกับความหนาแน่นของฉนวนประเภทใยและผง	18
6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนกับค่าการนำความร้อนของฉนวนทั่วไป	19
7	ต้นกกข้าง และรายละเอียดในส่วนต่างๆ	24
8	ความเค้นในวัตถุ (ก) ตัดวัตถุที่หน้าตัด 1-1 (ข) เมื่อมีแรงกระทำกับวัตถุ	36
9	ความเค้นดึง	36
10	ความเค้นอัด	37
11	ความเค้นเฉือน	37
12	ความเครียดดึงตามแนวแกน	38
13	ความเครียดอัดตามแนวแกน	39
14	ความเครียดเฉือนเกิดการเปลี่ยนรูปร่าง	40
15	ขั้นตอนการเตรียมเส้นใยจากใบกกข้าง (ก) ใบกกข้าง (ข) ใบกกข้างตากแห้ง	41
16	ขั้นตอนการเตรียมเส้นใยจากใบกกข้าง (ก) เครื่องย่อยชนิดหยาบ (ข) นำใบกกข้างใส่ใน เครื่องย่อย (ค) ลักษณะของใบกกข้างที่ผ่านการบดจนเป็นเส้นใย	42
17	(ก) ปั่นพ่นกาว (ข) เครื่องผสมกาว	42
18	(ก) กล่องขึ้นรูป (ข) แผ่นรองอัดสแตนเลส (ค) แผ่นเทปลอนผิวมัน	45
19	(ก) ใยเส้นใยลงในกล่อง (ข) เคลือบเส้นใยให้สม่ำเสมอ (ค) ใช้แผ่นฝักกดทับเพื่อขึ้นรูป	46
20	(ก) นำกล่องขึ้นรูปออก (ข) ปิดทับด้วยแผ่นเทปลอน (ค) แผ่นเตรียมอัด	46

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
21	(ก) วางแผ่นเตรียมอัดบนแท่นรับ (ข) แท่นอัดบีบอัดแผ่นจนถึงความหนาที่กำหนด	47
22	(ก) วางแผ่นทดสอบที่ผ่านการอัดร้อนแล้วบนตะแกรง (ข) ห้องปรับสภาพแผ่นทดสอบ	48
23	(ก) แผ่นทดสอบที่ถูกตัดขอบแล้ว (ข) การตัดแผ่นทดสอบด้วยเครื่องเลื่อย	49
24	ชิ้นทดสอบทั้งหมดที่ถูกตัดให้มีขนาดต่างๆ กัน	49
25	(ก) อบชิ้นทดสอบในตู้อบ (ข) เก็บชิ้นทดสอบที่อบแล้วในเดซิกเคเตอร์	50
26	(ก) เครื่องวัดอเนกประสงค์ (ข) ตำแหน่งการวางชิ้นทดสอบบนแท่งรองรับ	51
27	(ก) ก่อนให้แรงกระทำกับชิ้นทดสอบ (ข) หลังให้แรงกระทำกับชิ้นทดสอบ	51
28	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับการแอ่นตัว	52
29	ส่วนประกอบของเครื่องทดสอบแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า	53
30	(ก) วางแท่งเหล็กลงบนแท่นรับของเครื่องอัดร้อน (ข) กาวหลอมเหลวร้อน	54
31	(ก) กาวเริ่มละลาย (ข) แซ่ชิ้นทดสอบในน้ำ (ค) ชิ้นทดสอบที่ถูกประกบด้วยแท่งเหล็ก 2 แท่ง	54
32	(ก) ให้แรงดึงกับชิ้นทดสอบ (ข) ชิ้นทดสอบแยกออกจากกัน	55
33	กราฟเปรียบเทียบผลการทดสอบค่าการนำความร้อนสำหรับตัวอย่างที่วัดด้วยเครื่องมือ 3 ชนิด คือ HFM 1 HFM 2 และ GHP	56
34	แสดงเครื่องวัดค่าการนำความร้อนแบบวัดการถ่ายเทของความร้อนของ NETZSCH รุ่น 436 ขณะใส่แผ่นทดสอบเพื่อหาค่าการนำความร้อน	57
35	หลักการทำงานของเครื่องมือวัดแบบการวัดการถ่ายเทของความร้อน	58
36	(ก) ไบกกข้างตากแห้ง (ข) ไบกกข้างที่ผ่านการบดย่อยแล้ว	59
37	แผ่นทดสอบ (ก) ความหนาแน่น 200 kg/m^3 (ข) ความหนาแน่น 300 kg/m^3 (ค) ความหนาแน่น 400 kg/m^3	59
38	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของแผ่นต่อปริมาณความชื้น	63
39	แสดงค่าต่างๆ ที่กำหนดไว้ ของเครื่องวัดอเนกประสงค์	64

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
40	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับการแอ่นตัวของชิ้นทดสอบ ที่มีความหนาแน่น 200 kg/m^3	65
41	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับการแอ่นตัว	65
42	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับการแอ่นตัวของชิ้นทดสอบ ที่มีความหนาแน่น $200, 300$ และ 400 kg/m^3	66
43	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของแผ่นต่อค่าความต้านแรง ดัด และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น	70
44	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของแผ่นต่อความต้านแรงดึง ตั้งฉากกับผิวหน้า	74
45	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของแผ่นต่อค่าการนำความร้อน	75
46	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของแผ่นทดสอบกับอุณหภูมิ	78

คำอธิบายอักษรย่อ

TIS	=	Thailand Industrial Standard
ASTM	=	American Society for Testing and Materials
ISO	=	International Standardization and Organization
GHP	=	guard hot plate
HFM	=	heat flow meter



การศึกษาสมบัติเชิงกายภาพ สมบัติเชิงกล และสมบัติเชิงความร้อน
ของฉนวนกันความร้อนจากเส้นใยของต้นกกช้าง

A Study of Physical, Mechanical and Thermal Properties for
Thermal Insulation from Narrow-leaved Cattail Fibers

คำนำ

ฉนวนกันความร้อนถือเป็นวัสดุที่สำคัญในการสร้างอาคาร บ้านพักอาศัยและโรงงานอุตสาหกรรม หลักการทำงานของฉนวนกันความร้อน คือช่วยลดการเคลื่อนที่ของความร้อนและรักษาอุณหภูมิให้คงสภาพตามที่ต้องการ ฉนวนกันความร้อนที่นิยมใช้แพร่หลายส่วนใหญ่ผลิตมาจากวัสดุสังเคราะห์ประเภทใยแก้ว ในปี พ.ศ. 2539 กองอนามัยสิ่งแวดล้อมรายงานว่า เส้นใยแก้วส่งผลกระทบต่อสุขภาพและร่างกายของผู้ใช้เมื่อมีการสัมผัสหรือหายใจเอาฝุ่นของเส้นใยเข้าไป ซึ่งอาจทำให้เกิดโรคถุงลมโป่งพองหรือโรคมะเร็งหลอดลมได้ ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะเลือกใช้พืชที่มีเส้นใยเซลลูโลสมาผลิตเป็นฉนวนกันความร้อน เนื่องจากเส้นใยเซลลูโลสเป็นเส้นใยที่ย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ และไม่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์

ธูปฤาษี *Typha angustifolia L.* หรือกกช้าง จัดเป็นวัชพืชในกลุ่มวัชพืชชายตลิ่ง (marginal weeds) มีถิ่นกำเนิดอยู่ในทวีปยุโรปและอเมริกา แพร่กระจายทั่วไปในเขตร้อน เช่น ไทย มาเลเซีย ฟิลิปปินส์ และยังพบได้ในอเมริกาเหนือและแถบชายฝั่งแปซิฟิก สำหรับประเทศไทยนั้นพบขึ้นทั่วทุกภาคของประเทศ เช่น บริเวณหนองน้ำ บึง นาข้าว ร่องน้ำข้างถนน และอ่างเก็บน้ำ เป็นต้น ต้นกกช้างที่อยู่ในเขตที่ลุ่มจะมีการเจริญเติบโตได้ตลอดทั้งปี ขยายพันธุ์โดยเหง้า และเมล็ด ออกดอกตั้งแต่เดือนสิงหาคมเป็นต้นไป ช่อดอกมีลักษณะคล้ายกำนรูปขนาดใหญ่สีน้ำตาล มีเมล็ดประมาณ 20,000–700,000 เมล็ด เมื่อเมล็ดแก่จัดจะเริ่มแตกเป็นปุยสีขาวคล้ายปุยขนุนและปลิวกระจายไปทั่ว ในสภาพที่มีแสงแดดจัด เมล็ดสามารถงอกและเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วจนมีจำนวนหนาแน่นทำให้ปริมาณแสงที่ส่องลงมาด้านล่างไม่เพียงพอ เป็นการขัดขวางการเจริญเติบโตของพืชชนิดอื่น นอกจากนี้ยังทำให้เกิดความเสียหายต่อสภาวะแวดล้อม และการใช้ประโยชน์จากแหล่งน้ำ เช่น กีดขวางทางไหลของน้ำ ทำให้แหล่งน้ำตื้นเขิน ความจุน้ำลดลง น้ำมีกลิ่นเหม็น หรือน้ำที่เก็บกักไว้ใช้มีสีผิดปกติเป็นอุปสรรคต่อการใช้น้ำและการพักผ่อนหย่อนใจ

การควบคุมและกำจัดวัชพืชชนิดนี้ทำได้หลายวิธี เช่น ตัด เผา ควบคุมระดับน้ำ ใช้เครื่องจักรกล ใช้สิ่งมีชีวิต และใช้สารเคมี อย่างไรก็ตามการควบคุมและกำจัดด้วยวิธีการดังกล่าวไม่สามารถทำให้ต้นกกช้ำหมดไปจากพื้นที่ได้ เนื่องจากกำจัดได้เฉพาะส่วนที่อยู่เหนือน้ำเท่านั้นและการใช้สารเคมียังก่อให้เกิดผลกระทบต่อระบบนิเวศน์แหล่งน้ำ และการใช้ประโยชน์จากแหล่งน้ำอีกด้วย

ปัจจุบันนักวิจัยส่วนใหญ่หันมาสนใจศึกษา และหาวิธีการจัดการกับต้นกกช้ำให้เกิดประโยชน์สูงสุด โดยนำไปผลิตเป็นแผ่นผนังภายในอาคาร ผลิตเป็นถ่านอัดแท่งจากต้นกกช้ำ หรือใช้ในการบำบัดน้ำเสีย นอกจากนี้ต้นกกช้ำยังสามารถอัดขึ้นรูปเป็นแผ่นไม้อัดและประยุกต์ใช้เป็นเครื่องประดับตกแต่งบ้าน หรือส่วนประกอบของเฟอร์นิเจอร์ต่างๆ ได้ ดังนั้นการนำเส้นใยจากต้นกกช้ำนี้มาผลิตเป็นแผ่นฉนวนกันความร้อน จึงเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจ นอกจากเป็นการช่วยเพิ่มมูลค่าของเส้นใยที่ได้จากธรรมชาติแล้ว แผ่นฉนวนกันความร้อนที่ได้ยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ อีกทั้งยังเป็นการลดการนำเข้าวัตถุดิบจากต่างประเทศ และช่วยประหยัดพลังงานในการผลิตวัสดุสังเคราะห์อีกด้วย

วัตถุประสงค์

1. ศึกษากระบวนการเตรียมเส้นใยจากใบของต้นกกช้าง และกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนของแผ่นฉนวนกันความร้อน ที่ผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม แผ่นฉนวนใยอัดชนิดอัดราบ (มอก. 876-2547) และมาตรฐานของแผ่นใยฉนวน (insulation board)
2. ศึกษาสมบัติเชิงกายภาพ สมบัติเชิงกล และสมบัติเชิงความร้อนของแผ่นฉนวนกันความร้อนที่เตรียมขึ้นจากเส้นใยของต้นกกช้าง
3. เป็นการเพิ่มมูลค่าของเส้นใยจากธรรมชาติ โดยนำมาผลิตเป็นแผ่นฉนวนกันความร้อนทดแทนวัสดุอื่นที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ
4. ช่วยลดปริมาณวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร

ขอบเขตการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาสมบัติเชิงกายภาพ สมบัติเชิงกล และสมบัติเชิงความร้อนของฉนวนกันความร้อนจากเส้นใยของต้นกกช้าง โดยแผ่นฉนวนกันความร้อนที่ผ่านกระบวนการอัดร้อนแล้วจะถูกนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ ตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ เพื่อนำผลการทดลองที่ได้ไปวิเคราะห์ เปรียบเทียบ และศึกษาความเป็นไปได้ในการนำแผ่นฉนวนกันความร้อนชนิดนี้ไปใช้งาน

การตรวจเอกสาร

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาสมบัติเชิงกายภาพ สมบัติเชิงกล และสมบัติเชิงความร้อนของฉนวนกันความร้อนจากเส้นใยของต้นกกช้าง ผู้วิจัยได้ค้นคว้าหาที่มา ประโยชน์ และงานวิจัยที่เกี่ยวกับฉนวนกันความร้อนตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ซึ่งฉนวนกันความร้อนในยุคแรกส่วนใหญ่ประกอบไปด้วย ใยแร่ ใยหิน ใยแก้ว ไม้คอร์ก (Bynum, 2001) นักเขียนชาวโรมันกล่าวไว้ว่า ชาวพื้นเมืองในแอฟริกาเหนือใช้ไม้คอร์กผสมกับดินเหนียวมาทำเป็นวัสดุกันความร้อนสำหรับหลังคา และกำแพงที่พักอาศัย ชาวพื้นเมืองในหมู่เกาะฮาวายนำใยแร่ซึ่งได้จากการสลายตัวของหินภูเขาไฟมาทำเป็นฉนวนกันความร้อน ส่วนชาวพื้นเมืองที่อาศัยติดกับทะเล นำหญ้าทะเลที่แห้งแล้ว มาสร้างเป็นกระท่อม ซึ่งโครงสร้างภายในของเส้นใยจากหญ้าทะเลนี้มีลักษณะเป็นช่องกลวง ทำให้ต้านทานความร้อนได้ดี

ในปี พ.ศ. 2383 มีการผลิตท่อฉนวนกันความร้อนจากใยแร่เป็นครั้งแรกที่แคว้นเวลส์ ประเทศอังกฤษ ต่อมาในปี พ.ศ. 2434 การประยุกต์ใช้ฉนวนกันความร้อนเพื่อการค้าได้กลายมาเป็นสิ่งสำคัญมากขึ้น ผลิตภัณฑ์อย่างหนึ่งที่เป็นที่รู้จักกันดีก็คือ คาบอท ควิลท์ (Cabot's Quilt) โดยนาย ซามูเอล คาบอท (Samuel Cabot) วัสดุนี้ทำมาจากหญ้าทะเลชนิดหญ้าปลาไหล (*Zostera marina*) ซึ่งเป็นพืชน้ำเค็มชนิดหนึ่ง

ในปี พ.ศ. 2457 รัฐมินนิโซตา (Minnesota) ประเทศสหรัฐอเมริกา มีการผลิตฉนวนกันความร้อนกึ่งของแข็งจากป่าน เรียกว่า แฟล็กซ์ลินัม (Flaxlinum) และไฟโบรเฟลท์ (Fibrofelt) ต่อมาในปี พ.ศ. 2463 บริษัทเซลเท็กซ์ (Celotex Company) ได้ผลิตแผ่นฉนวนกันความร้อนที่ทำจากชานอ้อย ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากการทำน้ำอ้อย แผ่นฉนวนนี้มีราคาต่ำ และมีความต้านทานไฟ เนื่องจากที่พื้นผิวมีการเคลือบด้วยใยหิน

ใยแก้วถูกพบครั้งแรกในสมัยอียิปต์โบราณและในปี พ.ศ. 2474 มนุษย์ได้ทดลองผลิตฉนวนใยแก้วขึ้น ต่อมาในช่วงต้นปี พ.ศ. 2483 ฉนวนกันความร้อนโพลีสไตรีนแบบอัดรีด หรือ สไตโรโฟม (styrofoam) ได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยบริษัทดาวเคมีคัล (Dow Chemical Company) ในประเทศสหรัฐอเมริกา และในปีเดียวกัน โรงงานอุตสาหกรรมกระดาษในประเทศสหรัฐอเมริกาได้ใช้กระดาษซึ่งมีส่วนประกอบของเซลลูโลสมาผลิตเป็นฉนวนกันความร้อน ซึ่งในขณะนั้นฉนวนกันความร้อนจากเซลลูโลสยังไม่เป็นที่นิยมมากนัก จนกระทั่งในปี พ.ศ. 2513 เกิดภาวะวิกฤตเกี่ยวกับพลังงาน ทำให้ความต้องการในการผลิตฉนวนกันความร้อนจากเซลลูโลสที่ประหยัด

พลังงานมีเพิ่มมากขึ้น และหลายปีที่ผ่านมา มีนักวิจัยหลายคณะที่ประสบความสำเร็จในการผลิต ฉนวนกันความร้อนจากเส้นใยธรรมชาติที่มีเซลลูโลสเป็นส่วนประกอบ เช่น Sampathrajan *et al.* (1992) ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงความร้อนของแผ่นไม้อัดที่ทำจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร 5 ชนิด ได้แก่ เปลือกข้าวโพด ชังข้าวโพด เปลือกถั่วลิสง เปลือกด้านในของมะพร้าว และฟางข้าวแห้งโดยใช้การอัดร้อนและใช้กาวยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์ทำหน้าที่เป็นสารยึดติด พบว่า แผ่นไม้อัดที่ผลิตจากชังข้าวโพดมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูงสุด ในขณะที่แผ่นไม้อัดที่ผลิตจากฟางข้าวแห้งมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นต่ำสุด ค่าความต้านแรงดัดของแผ่นไม้อัดจากชังข้าวโพดมีค่าสูงใกล้เคียงกับแผ่นไม้อัดจากเปลือกถั่วลิสง นอกจากนี้ยังพบว่า แผ่นไม้อัดจากฟางข้าวแห้งมีการนำความร้อนต่ำที่สุด ในขณะที่แผ่นไม้อัดจากเปลือกถั่วลิสงมีการนำความร้อนสูงที่สุด

กิตติศักดิ์ (2544) ได้ศึกษากระบวนการผลิต และสมบัติของแผ่นฉนวนความร้อน ซึ่งใช้กาวยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์เหมือนกันแต่ต่างกันที่ใช้ฟางข้าวเป็นวัตถุดิบ จากการศึกษา พบว่า อุณหภูมิในการอัดร้อนที่ 150-160 °C ความดันในการอัด 105 kg/cm² ใช้เวลา 4 นาที เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแผ่นฉนวนความร้อนที่มีความหนาแน่นระหว่าง 400-800 kg/m³ ที่ปริมาณกาวสังเคราะห์ 4, 8, 12, 16 และ 20 % โดยน้ำหนักของชิ้นฟางข้าวแห้ง เพื่อศึกษาสมบัติเชิงความร้อนตามมาตรฐาน ASTM C 177 สมบัติเชิงกายภาพและเชิงกล ตามมาตรฐาน มอก. 876-2532 และ ASTM D 256 ตามลำดับ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า แผ่นฉนวนความร้อนจากฟางข้าวจัดเป็นฉนวนความร้อนที่ดี พิจารณาได้จากค่าการนำความร้อนที่มีค่าอยู่ระหว่าง 0.0564 และ 0.0957 W/m K ซึ่งขึ้นอยู่กับความหนาแน่น และปริมาณกาวสังเคราะห์ด้วย โดยค่าการนำความร้อนของแผ่นฉนวนมีแนวโน้มลดลงเมื่อความหนาแน่น และปริมาณกาวสังเคราะห์ลดลง นอกจากนี้ผลการทดสอบ ปริมาณความชื้น ค่าความต้านแรงดัด ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และค่าความต้านทานแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้าชี้ให้เห็นว่า แผ่นฉนวนความร้อนที่ผลิตโดยใช้ปริมาณกาวสังเคราะห์ 12 และ 16 % ที่ความหนาแน่นระหว่าง 600-700 kg/m³ นอกจากสามารถใช้เป็นฉนวนความร้อนที่ดีแล้ว ยังสามารถใช้เป็นแผ่นฉนวนไม้อัดความหนาแน่นปานกลาง ที่มีสมบัติตามมาตรฐาน มอก. 876-2532

เช่นเดียวกับ นิสากร (2544) ได้ผลิตแผ่นฉนวนไม้อัดจากผักตบชวาเพื่อศึกษาสมบัติเชิงกายภาพ และสมบัติเชิงกล โดยใช้สารยึดติด คือ กาวยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์ 10 % และเพิ่มการทดสอบโดยใช้กาวฟีนอลฟอร์มัลดีไฮด์ 5 % ด้วย แผ่นฉนวนไม้อัดมีความหนาแน่น 700 และ 800 kg/m³ ใช้สารกันซึม คือ สารพาราฟินอิมัลชันที่ 1 % และ 2 % รวมทั้งหมด 8 ชนิด ผลการวิจัย พบว่า ผักตบชวาสามารถ

นำมาอัดเป็นแผ่นขึ้นไม้อัดได้ ซึ่งมีสมบัติเชิงกายภาพ และสมบัติเชิงกลใกล้เคียงกับมาตรฐาน มอก. 876-2532

ในปีเดียวกัน ประยูร (2544) ได้ศึกษาสมบัติของแผ่นฉนวนความร้อนจากชานอ้อย พบว่าการนำความร้อนมีค่าอยู่ระหว่าง 0.0724 ถึง 0.0925 W/m K ซึ่งขึ้นอยู่กับความหนาแน่นและปริมาณกาวที่ใช้ ค่าการนำความร้อน ค่าความต้านแรงดัด ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และค่าความต้านแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อความหนาแน่นและปริมาณกาวเพิ่มขึ้น แผ่นฉนวนความร้อนที่ผลิตได้ใช้ปริมาณกาว 25 และ 33 % มีความหนาแน่นระหว่าง 600 ถึง 700 kg/m³ สามารถใช้เป็นฉนวนความร้อนที่ดีได้

ต่อมาในปี 2545 ขวัญเรือน และคณะ (2545) ได้ศึกษาและเปรียบเทียบฉนวนกันความร้อนที่ผลิตมาจากวัสดุต่างชนิดกัน ได้แก่ ชงข้าวโพด ผักตบชวา และชานอ้อย ซึ่งใช้ส่วนผสมในการผลิตที่อัตราส่วนต่างๆ กัน โดยหาค่าการนำความร้อน เพื่อเป็นค่าบ่งชี้การเป็นฉนวนที่ดี พบว่าส่วนผสมของผักตบชวา : น้ำ : กาวยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์ : พาราฟิน เท่ากับ 2 : 3 : 2 : 1 มีสมบัติการเป็นฉนวนที่ดีที่สุด โดยค่าการนำความร้อนที่ได้ เทียบกับมาตรฐาน ISO 8301 และ ASTM C 177 มีค่าเท่ากับ 0.0142 W/m K

Khedari *et al.* (2003) ได้ทดลองผลิตแผ่นไม้อัดจากเปลือกทุเรียนและใยมะพร้าวที่มีค่าการนำความร้อนต่ำ จากการศึกษาพบว่า สมบัติเชิงกลของแผ่นไม้อัด เช่น ค่าความต้านแรงดัด และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาแน่นของแผ่นเพิ่มขึ้น ในขณะที่การนำความร้อนมีค่าลดลงเมื่อความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ซึ่งให้ผลทดสอบสมบัติเชิงกลเหมือนกับงานวิจัยของ Zheng *et al.* (2007) ที่ได้ศึกษาสมบัติของแผ่นไม้อัดจากพืชทนเค็ม งานวิจัยของ Guntekin and Karakus (2008) ศึกษาแผ่นไม้อัดจากต้นมะเขือม่วง พบว่า เมื่อความหนาแน่นของแผ่นเพิ่มขึ้น ค่าความต้านแรงดัดเพิ่มขึ้นด้วย และงานวิจัยของ Zhou *et al.* (2010) ที่ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลของฉนวนกันความร้อนที่เตรียมจากเส้นใยก้านฝ้าย พบว่า ค่าความต้านแรงดัด และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาแน่นของแผ่นเพิ่มขึ้น ซึ่งฉนวนกันความร้อนจากเส้นใยธรรมชาติเหล่านี้ นอกจากจะมีสมบัติความเป็นฉนวนที่ดีแล้ว ยังช่วยประหยัดพลังงานและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

หลักการทํางานของฉนวนกั้นความร้อน

ฉนวนกั้นความร้อน เป็นวัสดุที่มีความสามารถในการสกัดกั้นความร้อนไม่ให้ส่งผ่านจากด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งได้ง่าย ซึ่งการส่งผ่านความร้อนจากด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งของวัตถุหรือการถ่ายเทความร้อน (heat transfer) ระหว่างวัตถุนั้น สามารถเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่ออุณหภูมิของวัตถุทั้งสองด้านมีความแตกต่างกัน โดยธรรมชาติแล้วการถ่ายเทความร้อนจะเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ เช่นเดียวกับน้ำที่ไหลจากที่สูงไปยังที่ต่ำ วิธีการถ่ายเทความร้อน แบ่งออกเป็น 3 วิธีหลักๆ คือ การนำความร้อน (conduction) การพาความร้อน (convection) และการแผ่รังสีความร้อน (radiation)

1. การนำความร้อน

การนำความร้อน คือ การที่ความร้อนเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ ความร้อนจะเคลื่อนที่ผ่านโมเลกุลของสาร โดยที่โมเลกุลไม่เคลื่อนที่ การนำความร้อนจะเกิดขึ้นได้ในตัวกลางที่เป็นของแข็ง ของเหลว และก๊าซ

2. การพาความร้อน

เกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสของของไหลกับวัตถุ กลไกที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการพาได้นั้น เกิดจากผลรวมของการนำความร้อน การสะสมพลังงาน และการเคลื่อนที่ของของไหล การพา แบ่งเป็น การพาความร้อนแบบอิสระ (free convection) และการพาความร้อนแบบบังคับ (forced convection)

การพาความร้อนแบบอิสระ คือ การเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของของแข็งและของไหล โดยที่ไม่มีกลไกใดๆ ที่ทำให้ของไหลเคลื่อนที่ แต่ของไหลที่อยู่ใกล้กับผิวของของแข็งอาจเคลื่อนที่ได้โดยแรงลอยตัวของของไหลเอง แรงลอยตัวนี้เกิดจากความแตกต่างของความหนาแน่นของของไหล เมื่อเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิในชั้นของของไหลขึ้น

การพาความร้อนแบบบังคับ คือ การเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของของแข็งและของไหล โดยที่ของไหลถูกบังคับให้เคลื่อนที่ไปสัมผัสกับผิวของของแข็ง โดยกลไกภายนอก เช่น พัดลม หรือ เครื่องสูบน้ำ

3. การแผ่รังสีความร้อน

เกิดขึ้นโดยไม่อาศัยตัวกลาง พลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีจะถ่ายเทในแบบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความเร็วเท่ากับความเร็วแสง

ในการศึกษาสมบัติเชิงความร้อนของแผ่นฉนวนกันความร้อนจากเส้นใยของดันทกซ้าง จะเน้นศึกษาเฉพาะการถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อนเท่านั้น

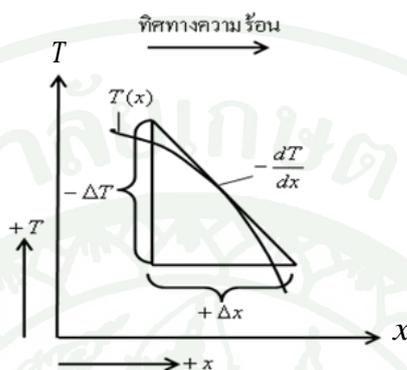
การนำความร้อน

การนำความร้อนเป็นการเคลื่อนที่ของความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ เกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลของระบบสั่นเนื่องจากได้รับความร้อน โดยที่โมเลกุลของตัวกลางมีการสัมผัสกันโดยตรง ดังนั้นระบบที่เกิดการถ่ายเทความร้อนแบบนี้ต้องเป็นระบบของของแข็ง อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำแปรผันตรงกับค่าการนำความร้อน พื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศการไหล และอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับระยะทาง (temperature gradient) กรณีที่ค่าการนำความร้อนมีค่าคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิ จะได้สมการที่ใช้ในการคำนวณอัตราการนำความร้อน ซึ่งเรียกว่า สมการของฟูเรียร์ (Fourier rate equation) ดังนี้

$$Q_x = -kA (dT / dx) \quad (1)$$

โดย Q_x คือ อัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนในทิศทางของ x และ k คือ ค่าการนำความร้อน A คือ พื้นที่ที่ความร้อนเคลื่อนที่ผ่านและตั้งฉากกับทิศทางของ x และ (dT / dx) คือ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับระยะทาง

เครื่องหมายลบ แสดงว่า ความร้อนเคลื่อนที่ไปในทิศทางที่อุณหภูมิลดลงเสมอ ดังภาพที่ 1 แสดงค่าความชันของอุณหภูมิที่มีค่าติดลบ เนื่องจากอุณหภูมิจจะมีค่าผกผันกับระยะทางที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นถ้าหากต้องการให้ติดเครื่องหมายบวก จึงจำเป็นต้องใส่เครื่องหมายลบไว้ข้างหน้า



ภาพที่ 1 แสดงค่าความชันของอุณหภูมิที่มีค่าติดลบ เมื่อความร้อนถ่ายเทจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ

สมการของฟูเรียร์ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ได้ดังนี้ คือ

$$q_x = Q_x / A = -k (dT / dx) \quad (2)$$

สมการ $Q_x = -kA (dT / dx)$ แสดงว่า ความร้อนเคลื่อนที่ในทิศทางของ x เท่านั้น โดยทั่วไป อุณหภูมิจะเปลี่ยนแปลงทั้งสามทิศทาง คือ เปลี่ยนแปลงในทิศทาง x , y และ z เขียนได้ ดังสมการที่ (3) ถึง (5) ตามลำดับ

$$q_x = -k (\partial T / \partial x) \quad (3)$$

$$q_y = -k (\partial T / \partial y) \quad (4)$$

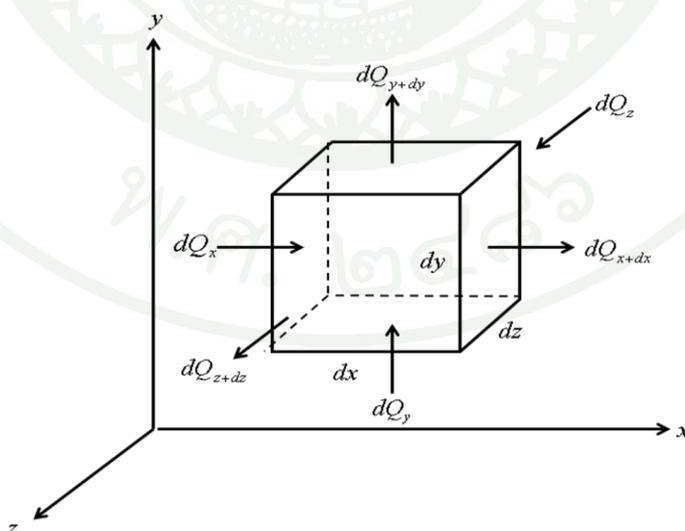
$$q_z = -k (\partial T / \partial z) \quad (5)$$

สมการการนำความร้อน

สมการการนำความร้อนเป็นสมการคณิตศาสตร์ที่ได้มาจากการอนุรักษ์พลังงานภายในก้อนวัตถุ สมการดังกล่าวนี้ได้มาจกสมดุลพลังงานของก้อนวัตถุชิ้นเล็กๆ ที่ความร้อนกำลังไหลผ่าน โดยการนำ สำหรับการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนในก้อนวัตถุนั้น ถือว่ามีค่าน้อยมากจนสามารถตัดทิ้งได้ อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำมีความสัมพันธ์กับการกระจายอุณหภูมิภายในก้อนวัตถุตามกฎของฟูเรียร์ สมการการนำความร้อนต่างๆ ไปนั้น จะรวมพลังงานที่เก็บไว้ภายในก้อนวัตถุเข้าไปด้วย จากวิชาเทอร์โมไดนามิกส์นั้นทำให้ทราบว่า ถ้าหากอุณหภูมิของวัตถุก้อนใดเพิ่มขึ้น พลังงานภายในของวัตถุก้อนนั้นก็เพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นพลังงานสุทธิที่เก็บสะสมไว้ภายในก้อนวัตถุก็จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นตามเวลา และจะลดลงตามอุณหภูมิที่ลดลงตามเวลา แต่ถ้าหากอุณหภูมิของวัตถุคงที่แล้วก็จะไม่มีการเก็บพลังงานเพิ่มเติมเข้าไปในวัตถุ และจะเรียกวัตถุที่อยู่ในสภาวะดังกล่าวว่าอยู่ในสภาวะที่ค่าต่างๆ คงที่หรือไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (steady state)

สมการในพิกัดฉาก

พิจารณาปริมาตรขนาดเล็กมาก ความยาวของด้าน dx , dy และ dz ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 การนำความร้อนเข้าและออกจากรูปลูกบาศก์ขนาดเล็กทั้ง 3 ทิศทาง เพื่อวิเคราะห์ในพิกัดฉาก

พิจารณาแกนในระบบของวัตถุภาพสี่เหลี่ยมมุมฉาก (rectangular coordinate) ของวัตถุชิ้นเล็กๆ ที่ทำหน้าที่เป็นระบบควบคุมปริมาตรที่อยู่ภายในก้อนวัตถุที่มีเนื้อสม่ำเสมอ เป็นตัวกลางไอโซทรอปิก มีค่าความหนาแน่นของตัวกลาง (density of medium; ρ) ความจุความร้อนจำเพาะ (specific heat capacity; c_p) และ ค่าการนำความร้อนคงที่ เมื่อนำกฎการอนุรักษ์พลังงานมาใช้กับระบบควบคุมปริมาตรที่เป็นวัตถุชิ้นเล็กๆ แล้ว จะได้รับความสัมพันธ์ว่า อัตราการเพิ่มขึ้นของความร้อนของปริมาตร เนื่องมาจากการนำความร้อนรวมกับอัตราการเกิดของความร้อนภายในปริมาตร มีค่าเท่ากับ อัตราการเพิ่มขึ้นของพลังงานของปริมาตร

พิจารณาในทิศทาง x เขียนสมการฟูเรียร์ได้ ดังนี้ คือ

$$dQ_x = -kdA \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (6)$$

ดังนั้น อัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนเข้าสู่ปลุกบาศก์ในทิศทาง x คือ

$$dQ_x = -kdydz \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_x \quad (7)$$

อัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนออกจากรูปปลุกบาศก์ในทิศทาง x คือ

$$dQ_{x+dx} = -kdydz \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x+dx} \quad (8)$$

อัตราของความร้อนที่เพิ่มขึ้นในรูปปลุกบาศก์จากการเคลื่อนที่ในทิศทาง x คือ

$$\begin{aligned} dQ_x - dQ_{x+dx} &= -kdydz \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_x - \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x+dx} \right] \\ &= -kdydz \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_x - \left\{ \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_x + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) dx \right\} \right] \end{aligned}$$

$$= k dx dy dz \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) \quad (9)$$

ในทำนองเดียวกัน สามารถเขียนอัตราของความร้อนที่เพิ่มขึ้นในรูปลูกบาศก์จากการเคลื่อนที่ในทิศทาง y และ z ได้ดังนี้

$$dQ_y - dQ_{y+dy} = k dx dy dz \left(\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (10)$$

$$dQ_z - dQ_{z+dz} = k dx dy dz \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (11)$$

อัตราการเพิ่มขึ้นของความร้อนจากการนำความร้อนมีค่า

$$dQ_n = k dx dy dz \left[\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \right] \quad (12)$$

สมมติว่า ภายในปริมาตรมีแหล่งความร้อนซึ่งผลิตความร้อนได้ในอัตราการผลิต q_g ต่อหน่วยปริมาตร (W/m^3) ดังนั้น อัตราการเกิดขึ้นของความร้อนจากภายใน (thermal energy generation) จะมีค่า

$$dQ_g = q_g dx dy dz \quad (13)$$

อัตราการเพิ่มขึ้นของพลังงานความร้อนของปริมาตรนี้ เขียนให้อยู่ในรูปของปริมาตร ($dx dy dz$) ความหนาแน่น (ρ) ความร้อนจำเพาะ (c_p) และอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับเวลา ($\partial T / \partial t$) ได้ ดังนี้ คือ

$$dQ_s = \rho dx dy dz c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) \quad (14)$$

จากกฎการอนุรักษ์พลังงาน

$$dQ_n + dQ_g = dQ_s \quad (15)$$

แทนค่าปริมาณต่างๆ จะได้

$$k dx dy dz \left[\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \right] + q_g dx dy dz = \rho dx dy dz c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)$$

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \left(\frac{q_g}{k} \right) = \left(\frac{c_p \rho}{k} \right) \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) \quad (16)$$

สมการนี้ เรียกว่า ฟูเรียร์ฟิลด์อีควชัน (Fourier field equation) เป็นสมการแบบดิฟเฟอเรนเชียล (differential equation) ที่ใช้สำหรับแก้ปัญหาการเคลื่อนที่ของความร้อนแบบการนำได้ ในกรณีที่คุณสมบัติของตัวกลางมีค่าคงที่

ถ้าค่าการนำความร้อนไม่เปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิ และระยะทาง จะเขียนสมการที่ (16) ได้ดังนี้

$$\nabla^2 T + \left(\frac{q_g}{k} \right) = \left(\frac{c_p \rho}{k} \right) \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)$$

$$\text{หรือ } \nabla^2 T + \left(\frac{q_g}{k} \right) = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) \quad (17)$$

โดย ลาปลาเซียน โอเปอเรเตอร์ (laplacian operator; $\nabla^2 T$) มีค่า

$$\nabla^2 T = \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (18)$$

และ α คือ ค่าการแพร่กระจายความร้อน (thermal diffusivity) โดย

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (19)$$

ในกรณีที่ไม่มีแหล่งพลังงานความร้อนในตัวกลาง สมการดิฟเฟอเรนเชียลที่ใช้ คือ

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\right) + \left(\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) + \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{\partial T}{\partial t}\right) \quad (20)$$

ในกรณีที่ไม่มีแหล่งพลังงานความร้อนในตัวกลาง และอุณหภูมิของตัวกลางไม่เปลี่ยนแปลงกับเวลา หรือ $(\partial T / \partial t) = 0$ สมการดิฟเฟอเรนเชียล จะมีรูป ดังนี้ คือ

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\right) + \left(\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) + \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) = 0 \quad (21)$$

ในกรณีที่ไม่มีแหล่งพลังงานความร้อนในตัวกลาง และเป็นการนำความร้อนในมิติเดียว หรือความร้อนถ่ายเทในทิศทางของ x อย่างเดียว สมการดิฟเฟอเรนเชียล จะมีรูป ดังนี้ คือ

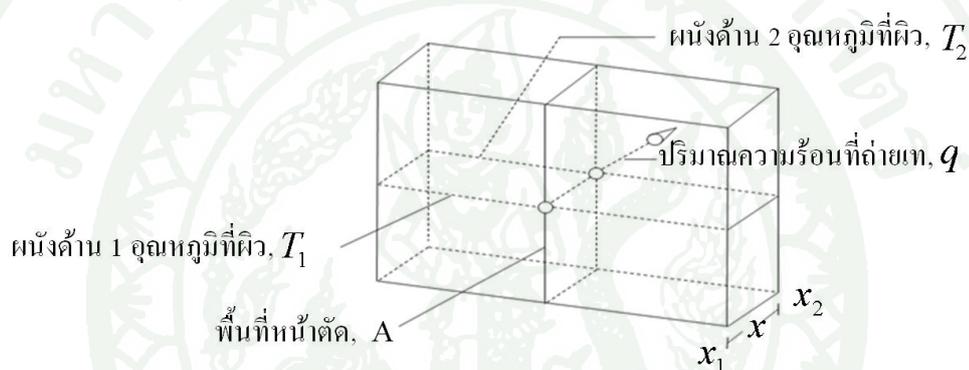
$$\partial^2 T / \partial x^2 = (1 / \alpha)(\partial T / \partial t) \quad (22)$$

ในกรณีของการนำความร้อนในมิติเดียวในตัวกลางที่ไม่มีพลังงานความร้อนในตัวเอง และอุณหภูมิของตัวกลางไม่เปลี่ยนแปลงกับเวลา สมการดิฟเฟอเรนเชียล จะมีรูป ดังนี้ คือ

$$\partial^2 T / \partial x^2 = 0 \quad (23)$$

การนำความร้อนผ่านแผ่นราบ

การนำความร้อนของแผ่นฉนวนกันความร้อนเป็นการนำความร้อนผ่านแผ่นราบ พิจารณาจากภาพที่ 3 ผนังด้าน 1 มีอุณหภูมิ T_1 ส่วนผนังทางด้าน 2 มีอุณหภูมิ T_2 โดยระยะทางระหว่างด้าน 1 ไปยังด้าน 2 คือความหนาของวัตถุ ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากกฎการนำความร้อนของฟูเรียร์จะได้ว่า อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนแปรผันตรงกับผลต่างของอุณหภูมิคร่อมผิววัตถุ และพื้นที่ผิวที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของความร้อน แต่จะผกผันกับความหนาของวัตถุนั้น ซึ่งเป็นระยะทางที่ความร้อนถ่ายเท



ภาพที่ 3 การนำความร้อนผ่านแผ่นราบ

ที่มา: ตระการ (2537)

สำหรับการนำความร้อนในแผ่นราบ สามารถคำนวณได้ โดยใช้สมการ (1) ดังนี้

$$Q = -kA \frac{dT}{dx}$$

การถ่ายโอนความร้อนแบบนำความร้อนจะเป็นในลักษณะ ให้ $x = x_1$ เมื่อ $T = T_1$ และ $x = x_2$ เมื่อ $T = T_2$ ทำการอินทิเกรตด้วยเทคนิคแยกตัวแปร dx และ dt ตามเงื่อนไขที่ขอบเขตด้วยการกำหนดอุณหภูมิที่ผิวด้าน 1 และด้าน 2 ของภาพที่ 3 แล้วแทนค่าลงไปตามลำดับ จะได้

$$\frac{Q}{A} dx = -k dT$$

$$\int_{x_1}^{x_2} \frac{Q}{A} dx = -\int_{T_1}^{T_2} k dT$$

$$\int_{x_1}^{x_2} \frac{Q}{A} dx = -k \int_{T_1}^{T_2} dT$$

$$\frac{Q}{A} (x_2 - x_1) = k(T_1 - T_2)$$

$$Q = kA \frac{(T_1 - T_2)}{(x_2 - x_1)}$$

$$Q = \frac{kA(T_1 - T_2)}{x} \quad (24)$$

โดย Q คือ ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเท มีหน่วยเป็น วัตต์ (W)

k คือ ค่าการนำความร้อน มีหน่วยเป็น วัตต์/เมตร เคลวิน (W/m K)

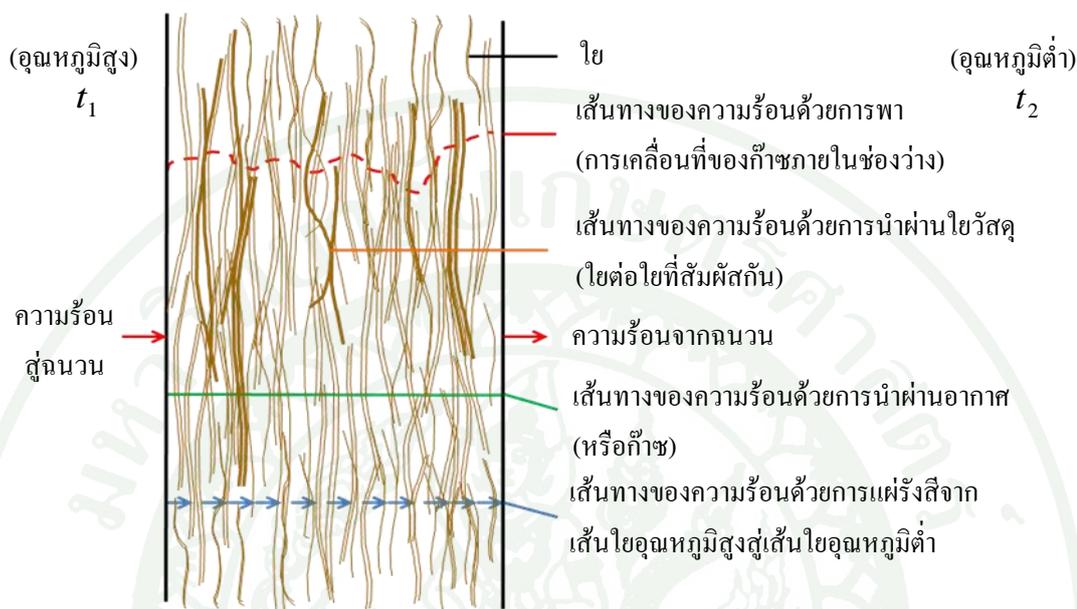
A คือ พื้นที่หน้าตัดที่ความร้อนไหลผ่าน มีหน่วยเป็น ตารางเมตร (m^2)

T_1, T_2 คือ อุณหภูมิสูงและต่ำที่ผิวแต่ละด้านตามลำดับ มีหน่วยเป็น เคลวิน (K)

x คือ ความหนาของแผ่นราบ มีหน่วยเป็น เมตร (m)

ถึงแม้ว่าโดยปกติมักจะพิจารณาว่าฉนวนกันความร้อน โดยส่วนใหญ่มีการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำความร้อน จึงกำหนดสมบัติของฉนวนกันความร้อนด้วยค่าการนำความร้อน แต่ในความเป็นจริงแล้ว กลไกการถ่ายเทความร้อนในฉนวนไม่ได้เกิดขึ้นเฉพาะการนำความร้อนเท่านั้น การพาความร้อนและการแผ่รังสีก็เกิดขึ้นด้วย ดังจะเห็นได้จาก เมื่อพิจารณาพื้นผิวที่มีอุณหภูมิสูงกว่าสภาพแวดล้อมอันหนึ่ง ซึ่งวางไว้กลางแจ้ง การสูญเสียพลังงานจะเกิดขึ้นทั้ง 3 รูปแบบ แต่ถ้านำแผ่นกันแผ่นหนึ่งมาวางใกล้ๆ กับพื้นผิวที่ร้อน ก็จะช่วยลดการแผ่รังสีความร้อนได้ นอกจากนี้ การพาความร้อนจะถูกจำกัดลงโดยอากาศบริเวณนั้น ดังนั้นหากวางแผ่นกันเพิ่มใกล้กับพื้นผิวร้อน แผ่นกันเหล่านี้จะทำให้เกิดเป็นช่องเล็กๆ ขึ้น ซึ่งช่วยขัดขวางการเกิดการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน ดังนั้นหากจัดและกระจายแผ่นกันอย่างเหมาะสม การสูญเสียความร้อนจากพื้นผิวร้อนจะลดลงถึงจุดซึ่งมีผลเกือบจะเท่ากับการนำความร้อนสุทธิผ่านช่องอากาศนี้อย่างสมบูรณ์

เนื่องจากอากาศเป็นตัวนำความร้อนที่เลว หรือเป็นฉนวนที่ดี ซึ่งทำให้การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยลงกว่าเดิมมาก และจากสภาพอากาศหนึ่งจะทำให้การพาความร้อนไม่เกิดขึ้นด้วย



ภาพที่ 4 ภาพตัดขวางแสดงการถ่ายเทความร้อนภายในฉนวน

จากภาพที่ 4 พิจารณาการถ่ายเทความร้อนภายในฉนวน (William and John, 1981) ผิวทางด้านซ้ายมือของฉนวนมีอุณหภูมิสูงกว่าผิวทางด้านขวามือ ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นจะมีความร้อนไหลจากผิวทางซ้ายมือไปทางขวามือ ซึ่งความร้อนที่ไหลผ่านฉนวนที่บรรจุเต็มไปด้วยช่องอากาศหรือก๊าซจากการก่อตัวขึ้นตามสภาพเส้นใย หรือเซลล์ของวัสดุฉนวนจะมีอัตราการไหลที่ช้าลง หากช่องอากาศหรือก๊าซเหล่านี้มีขนาดที่เล็กอย่างพอเหมาะจะทำให้การถ่ายเทความร้อนด้วยการพาจากด้านหนึ่งของเซลล์สู่อีกด้านหนึ่งมีปริมาณน้อยลง และทำให้เส้นทางการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำผ่านส่วนที่เป็นของแข็งต้องเป็นเส้นทางที่ยาวและคดเคี้ยวเพื่อจำกัดการนำความร้อน และวัสดุส่วนที่เป็นของแข็งควรเป็นวัสดุทึบ หรือมีผิวสะท้อนรังสี เพื่อลดการถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสี

งานวิจัยนี้ศึกษาเฉพาะการนำความร้อน เนื่องจากการพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อนมีปริมาณที่น้อยมาก จึงไม่นำมาพิจารณา เช่น ในการศึกษา ออกแบบ และทำนายค่าการนำความร้อนใน โฟมที่มีรูพรุนแบบเซลล์เปิด (Wang and Pan, 2008) ได้ทำนายค่าการนำความร้อนของโฟมที่มีรูพรุน โดยแก้สมการพลังงาน (energy equation) และไม่คำนึงถึงการพาความร้อน และการแผ่รังสี

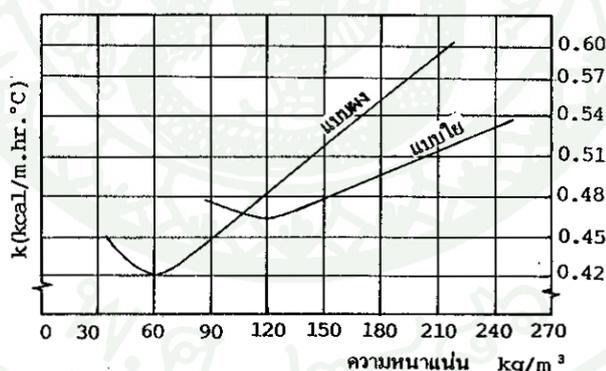
ความร้อน พบว่า โฟมแบบเซลล์เปิดมีค่าการนำความร้อนสูงกว่าวัสดุชนิดอื่นที่มีเซลล์แบบแกรนูลา (granular) หรือมีลักษณะของเซลล์เป็นเม็ดเล็ก ๆ

เมื่อทราบหลักการทำงานของฉนวนกันความร้อนแล้ว สิ่งหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงในการเลือกใช้วัสดุสำหรับทำเป็นฉนวนกันความร้อน คือ ความสามารถในการลดการถ่ายเทความร้อนให้น้อยลง พิจารณาได้จากค่าการนำความร้อนของวัสดุ ซึ่งเป็นตัวบ่งบอกสมบัติของวัสดุที่ใช้เป็นฉนวนได้

ปัจจัยที่มีผลต่อค่าการนำความร้อนของวัสดุ

1. โครงสร้างของวัสดุ

โดยทั่วไปวัสดุที่มีความหนาแน่นสูงจะมีค่าการนำความร้อนสูงด้วย หากพิจารณาโครงสร้างฉนวนประเภทใยและผง ซึ่งจะมีค่าการนำความร้อนต่ำสุดที่ความหนาแน่นค่าหนึ่ง ดังภาพที่ 5 เป็นกราฟแสดงค่าการนำความร้อนของฉนวนประเภทใยและผงที่ความหนาแน่นต่างๆ



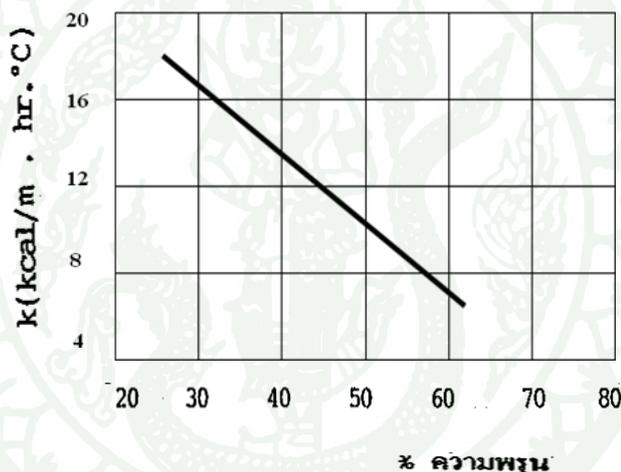
ภาพที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนกับความหนาแน่นของฉนวนประเภทใยและผง

ที่มา: มนตรี (2530)

จะเห็นว่า ฉนวนประเภทผงมีค่าการนำความร้อนต่ำสุดประมาณ 0.42 กิโลแคลอรี/เมตร ชั่วโมง องศาเซลเซียส (kcal/m hr °C) หรือ 0.4872 W/m K ที่ความหนาแน่น 60 kg/m³ ส่วนฉนวน

ประเภทใยมีค่าการนำความร้อนต่ำสุดประมาณ $0.465 \text{ kcal/m hr } ^\circ\text{C}$ หรือ 0.5394 W/m K ที่ความหนาแน่น 120 kg/m^3 โดย $1 \text{ kcal/m hr } ^\circ\text{C}$ มีค่า 1.16 W/m K พิจารณาที่ความหนาแน่นตั้งแต่ 120 kg/m^3 ขึ้นไป ฉนวนประเภทใยจะมีแนวโน้มของค่าการนำความร้อนต่ำกว่าฉนวนประเภทผงอยู่มาก งานวิจัยนี้จึงนำไปกักข้างมาด้อยให้เป็นเส้นใย ก่อนใช้เป็นวัตถุดิบในการอัดขึ้นรูปแผ่นฉนวนกันความร้อน เพื่อให้แผ่นฉนวนกันความร้อนที่ผลิตได้ มีค่าการนำความร้อนต่ำ

ค่าความหนาแน่นของฉนวนแปรผกผันกับความพรุน (porosity) ของวัสดุที่ใช้ทำฉนวน โดยเมื่อความหนาแน่นลดลง ความพรุนก็จะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าการนำความร้อนลดลงด้วย ดังภาพที่ 6 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนกับค่าการนำความร้อนของฉนวนทั่วไป



ภาพที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนกับค่าการนำความร้อนของฉนวนทั่วไป

จะเห็นได้ว่า แผ่นฉนวนที่มีความพรุนมาก จะมีค่าการนำความร้อนต่ำ ในงานวิจัยนี้จึงผลิตแผ่นฉนวนกันความร้อนที่มีความหนาแน่นต่ำ เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดี

2. อุณหภูมิของวัสดุ

ค่าการนำความร้อนของฉนวนแปรผันตรงกับอุณหภูมิของวัสดุ โดยจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิของวัสดุเพิ่มขึ้น

3. ทิศทางการถ่ายเทความร้อน

โดยทั่วไปไม่มีผลต่อค่าการนำความร้อน ยกเว้นฉนวนที่เป็นไม้ กริฟฟิธส์ (Griffiths) พบว่า ค่าการนำความร้อนของไม้ในแนวนานกับเส้น (grain) ของไม้ จะมีค่ามากกว่าค่าการนำความร้อนของไม้ในแนวตั้งฉากกับเกรนของไม้อยู่ประมาณ 60-80 %

4. ความชื้นในวัสดุ

น้ำมีค่าการนำความร้อนสูงกว่าค่าการนำความร้อนของฉนวนทั่วไปประมาณ 10 เท่า ซึ่งการใช้ฉนวนต้องเผชิญกับความชื้นในบรรยากาศอยู่เสมอ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องป้องกันปัญหาความชื้นในตัวฉนวนไม่ให้เกิดขึ้น

การเลือกใช้นวนกันความร้อนภายในอาคาร

การเลือกใช้นวนกันความร้อนที่สามารถกันความร้อนถ่ายเทเข้าสู่อาคารได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุดนั้น (Pratt, 1981) มีข้อพิจารณา ดังนี้

1. รูปแบบทางกายภาพ (physical forms)

การเลือกใช้นวนต้องคำนึงถึงลักษณะการใช้งาน ตำแหน่งที่ตั้ง ค่าใช้จ่าย และความแข็งแรงคงทน ซึ่งฉนวนมีหลายรูปแบบให้เลือกใช้งาน เช่น ฉนวนแบบคลุม แบบแผ่น แบบพ่นแบบฉีด เป็นต้น

2. ความหนาแน่นและความจุความร้อน (density and heat capacity)

การผลิตฉนวนที่มีคุณภาพดีจะมีค่าความหนาแน่น และความจุความร้อนที่เหมาะสมที่สุดเพียงค่าเดียวเท่านั้น แตกต่างกันไปตามชนิดของฉนวน

3. อุณหภูมิของการใช้งานที่เหมาะสม (suitability for service temperature)

เนื่องจากฉนวนแต่ละชนิดจะมีข้อจำกัดด้านอุณหภูมิในการใช้งาน หากเลือกใช้ไม่เหมาะสม อาจทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพได้ สามารถแบ่งระดับของอุณหภูมิในการใช้งานของฉนวนได้ดังนี้

3.1 ฉนวนสำหรับช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ -270 ถึง 100 °C ได้แก่ กลาสโฟม (glass foam) โฟมเซลลูโลส (cellulose foam) เป็นต้น

3.2 ฉนวนสำหรับช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 100 ถึง 500 °C ได้แก่ แคลเซียมซิลิเกต กลาสโฟม ไบร่ ฟอยล์ (foil) เป็นต้น

3.3 ฉนวนสำหรับช่วงอุณหภูมิมากกว่า 500 °C ได้แก่ ฉนวนสารพวกอนินทรีย์ประเภทคาร์บอนหรือโลหะ เช่น ฟอยล์ ไบคาร์บอน (carbon fiber) เป็นต้น

4. การขยายตัวเมื่อได้รับความร้อน (thermal expansion)

เนื่องจากฉนวนจะขยายตัวเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจึงควรเลือกใช้ฉนวนที่มีช่วงอุณหภูมิใช้งานตรงตามความต้องการ เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด มีอายุการใช้งานยาวนาน และไม่เสื่อมสภาพ

5. ความสามารถในการต้านทานความร้อน (thermal resistivity)

พิจารณาจากค่าความต้านทานความร้อน (thermal resistance; R-value) โดยฉนวนที่มีค่าความต้านทานความร้อนสูงจะกันความร้อนได้ดี เช่น โฟมพอลีสไตรีน (polystyrene foam) และ โฟมพอลิยูรีเทน (polyurethane foam)

6. ความต้านทานต่อความชื้น (resistance to water penetration)

เป็นสมบัติที่สำคัญ โดยเฉพาะในอาคารที่มีเครื่องปรับอากาศ เพราะหากฉนวนเกิดความชื้นขึ้นจะทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพหรือสูญเสียสมบัติการเป็นฉนวนได้ จึงควรป้องกัน โดยเลือกใช้วัสดุสำหรับกันความชื้น เช่น แผ่นอลูมิเนียมฟอยล์ แผ่นพอลิเอทิลีน แผ่นพีวีซี เป็นต้น

7. ความต้านทานต่อแรงอัด (resistance to compaction)

เป็นสมบัติที่ใช้พิจารณาในการเลือกใช้ฉนวนเพื่อให้เกิดความคงทนแข็งแรง และมีอายุการใช้งานยาวนาน โดยเฉพาะฉนวนในส่วนที่ต้องรับแรงอัดสูง เช่น ฉนวนที่หน้าต่าง ฉนวนที่มีสมบัติต้านทานต่อแรงอัดสูง ได้แก่ ฉนวนประเภทโฟม และพอลิเมอร์บางชนิด เป็นต้น

8. ความแข็งแรงทางกล (mechanical strength)

หมายถึง ความสามารถของฉนวนในการทนทานต่อแรงต่างๆ คือ การรับน้ำหนัก และแรงอัด ความต้านทานต่อแรงดึง และแรงเฉือน ทนต่อการกระแทก และการสั่นสะเทือน ทนต่อแรงบิด ความสามารถของฉนวนจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ ความหนาแน่น ขนาดและการจัดเรียงตัวของเส้นใยของฉนวน ชนิดและปริมาณของสารยึดติด นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและสภาพแวดล้อมในการใช้งานด้วย

9. อันตรายจากไฟไหม้ (fire hazard)

ฉนวนที่กันความร้อนได้ดี จะมีสมบัติการกันไฟไหม้ได้ดี จึงเหมาะสำหรับใช้ในอาคารบริเวณที่มีอุปกรณ์ความร้อน

10. ความต้านทานต่อแมลงและเชื้อรา (resistance to vermin and fungus)

สภาพความชื้นสูงจะทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพได้ง่าย และเชื้อราจะเจริญเติบโตได้ดี โดยเฉพาะฉนวนพวกสารอินทรีย์ เช่น เส้นใยเซลลูโลส เป็นแหล่งอาหารและที่อยู่ของแมลงบางชนิด

11. การกั้นเสียง (acoustical resistance)

สำหรับบางส่วนของอาคารที่ต้องการลดการรบกวนจากเสียง จำเป็นต้องเลือกใช้ฉนวนที่มีสมบัติการกั้นเสียงที่ดี เช่น ฉนวนที่มีความเป็นรูพรุน หรือฉนวนที่มีช่องว่างอากาศมาก

12. การปลอดจากกลิ่น (freedom from odour)

โดยเฉพาะการใช้งานฉนวนที่ติดตั้งภายในอาคาร ฉนวนที่มีสารเคมีเป็นส่วนประกอบ หากเกิดการเสื่อมสภาพ หรือเกิดการเผาไหม้จะทำให้เกิดอันตรายต่อร่างกายเนื่องจากการสูดดมไอของสารเคมีได้

13. ความต้านทานต่อการกัดกร่อนและสารเคมี (corrosion and chemical resistance)

เป็นสมบัติหนึ่งที่ต้องพิจารณาในการใช้งาน การเสื่อมสภาพของฉนวนด้วยสารเคมีหรือสภาพอากาศ จะทำให้ฉนวนมีประสิทธิภาพต่ำลง

14. การบำรุงรักษา (maintenance)

เป็นสิ่งที่แสดงถึงค่าใช้จ่ายภายหลังการติดตั้งฉนวน ซึ่งจะต้องพิจารณาอย่างรอบคอบ เพื่อให้เกิดความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์มากที่สุด

เมื่อได้ศึกษา ค้นคว้า ข้อมูลเกี่ยวกับงานวิจัยฉนวนกันความร้อนจากเส้นใยธรรมชาติ หลักการทำงานของฉนวนกันความร้อน และการนำไปใช้งานแล้ว ผู้วิจัยได้เสาะหาวัตถุดิบที่จะนำมาผลิตเป็นแผ่นฉนวนกันความร้อน ซึ่งวัตถุดิบที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้คือ ต้นกกช้าง

ต้นกกช้าง

ต้นกกช้าง หรือเรียกอีกอย่างว่า ต้นธูปฤาษี หรือ ต้นหญ้าสลาบสลง มีชื่อสามัญว่า Lesser reedmace หรือ Cat-tail ชื่อวงศ์ คือ TYPHACEAE ชื่อวิทยาศาสตร์ คือ *Typha angustifolia* L. คำว่า *Typha* นี้มาจากภาษากรีก คือ คำว่า Typhos แปลว่า marsh หมายถึงถิ่นที่อยู่ที่เป็นที่ชื้นแฉะ และ สกุลของธูปฤาษี มีทั้งหมด 16 สกุล แต่ในประเทศไทยพบเพียงชนิดเดียว คือ กกช้าง



ภาพที่ 7 ต้นกกช้าง และรายละเอียดในส่วนต่างๆ

กกช้างเป็นไม้ล้มลุกอายุหลายปี แสดงดังภาพที่ 7 ตั้งตรง สูง 1.5–3 m ใบมีกาบใบ เรียงสลับในระนาบเดียวกัน รูปแถบ ยาว 50–120 cm เว้าใกล้เส้นกลางใบ ช่อดอกเป็นช่อเชิงลดรูปทรงกระบอก ช่วงดอกเพศผู้ยาว 8–40 cm เส้นผ่านศูนย์กลางช่อ 0.2–0.7 cm มีใบประดับ 1–3 ใบ หลุดร่วง ช่วงดอกเพศเมียยาว 5–30 cm เส้นผ่านศูนย์กลางช่อ 0.6–2 cm มักแยกออกจากส่วนดอกเพศผู้ด้วย ส่วนก้านช่อดอกที่เป็นหมันที่ยาว 2.5–7 cm ดอกมีขนาดเล็ก ไม่มีกลีบดอกและกลีบเลี้ยง เกสรเพศผู้ส่วนมากมี 3 อัน มีขนล้อมรอบ ก้านเกสรเพศผู้สั้น อับเรณูยาว 1.5–2 mm ดอกเพศเมียมีใบประดับย่อยรูปเส้นด้าย รังไข่รูปกระสวย ก้านรังไข่เรียว ยาวประมาณ 5 mm มีขนยาว ก้านเกสรเพศเมียยาว 1–1.5 mm มีขนแต่สั้นกว่าบนก้านรังไข่ ยอดเกสรรูปแถบหรือรูปใบหอก ผลมีขนาดเล็ก รูปรี กกช้างมีเขตการกระจายพันธุ์ทั่วโลกในเขตร้อนและเขตอบอุ่น ในประเทศไทยพบทุกภูมิภาค ขึ้นตามหนองน้ำ ริมคลอง หรือตามที่โล่งทั่วไป ประโยชน์ คือ ใบใช้สานเสื่อ ช่อดอกแห้งใช้เป็นไม้ประดับ อับเรณูใช้รักษาโรคทางเดินปัสสาวะ ลำต้นใช้เพิ่มน้ำนมในสตรีหลังคลอดบุตร

งานวิจัยนี้เลือกเส้นใยที่ได้จากต้นกกช้าง เนื่องจากเส้นใยนี้มีลักษณะที่ยืดหยุ่นตัวได้ดี ตัดโค้งได้ง่าย แข็งแรง มีสมบัติในการป้องกันความร้อนในช่วงอุณหภูมิการใช้งานและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างน้อยเมื่อได้รับความร้อน

ส่วนประกอบทางเคมีของเส้นใย

1. ความชื้น ร้อยละ 8.9
2. เซลลูโลส (cellulose) ร้อยละ 63 เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ของผนังเซลล์ มีลักษณะเป็นเส้นใยขนาดเล็กที่เรียกว่า ไมโครไฟเบอร์ (microfiber) เกิดจากการควบแน่นของอนุกรม (polymerization) ของหน่วยพื้นฐานของน้ำตาลกลูโคส เซลลูโลสมีความเหนียว และน้ำหนักโมเลกุลสูง
3. เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) ร้อยละ 8.7 ประกอบด้วยโมเลกุลรวมของน้ำตาลหลายชนิดมีโครงสร้างซับซ้อนและเป็นผลึกมากกว่าเซลลูโลส
4. ลิกนิน (lignin) ร้อยละ 9.6 เป็นสารชนิดหนึ่งที่มีอยู่ระหว่างและในผนังเซลล์ชั้นนอกของเส้นใย ทำหน้าที่คล้ายกาวเชื่อมเส้นใยเข้าด้วยกัน ลักษณะไม่เป็นผลึก มีความสามารถในการดูดซึมสูงและเมื่อถูกความร้อนจะอ่อนตัวลง
5. ไข (wax) ร้อยละ 1.4 เป็นไขมันที่พบในพืช ทำหน้าที่เป็นสารเคลือบที่ผิวเพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำ
6. เถ้า (ash) ร้อยละ 2 เป็นสารอนินทรีย์ที่อยู่ในพืช จำพวกแร่ธาตุต่างๆ เช่น แคลเซียม (Ca) ฟอสฟอรัส (P) โพแทสเซียม (K) และซิลิกา (Si)

เส้นใยจากพืชทุกชนิดเป็นเส้นใยเซลลูโลสซึ่งสามารถทนต่อการเนาเปื่อย ทนต่อแรงบดทนต่อสารเคมีที่เป็นด่างหรือกรดอ่อนๆ และทนต่อความร้อนที่อุณหภูมิจุดเดือดของน้ำ จึงเป็นที่นิยมนำมาพัฒนาเป็นวัสดุก่อสร้าง โดยมีข้อดี ดังนี้

1. ไม่เป็นสารพิษ และไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ในขณะที่เส้นใยหิน (asbestos) ที่ใช้ผลิตกระเบื้องมุงหลังคา กระเบื้องแผ่นเรียบและไม้ฝาเทียบเป็นวัสดุที่มีพิษต่อระบบทางเดินหายใจของมนุษย์ เมื่อมีการใช้งานเป็นเวลานานๆ

2. สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ปัจจุบันมีการนำกระดาษที่ใช้แล้ว ซึ่งเยื่อกระดาษก็คือเซลลูโลสของต้นไม้ที่นำมาผลิตนำกลับมาผลิตเป็นวัสดุก่อสร้าง เช่น วัสดุผิวพื้นและแผ่นไฟเบอร์อัดแน่น

3. ช่วยแก้ปัญหาสถานะแวดล้อมของโลก โดยลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการเผาส่วนที่เหลือใช้จากการเกษตรช่วงหลังการเก็บเกี่ยว

4. น้ำหนักเบาและความหนาแน่นต่ำ แม้เส้นใยธรรมชาติจะมีความแข็งแรงไม่สูงมากนักเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยสังเคราะห์ แต่เมื่อนำมาผลิตเป็นวัสดุผสม (composite) ก็จะได้วัสดุที่มีความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง เนื่องจากมีสมบัติด้านความหนาแน่นต่ำ

5. ไม่ขัดสีและสร้างความสึกหรอให้เครื่องมือที่ใช้ในการแปรรูป และใช้พลังงานในการผลิตน้อยกว่าการผลิตเส้นใยสังเคราะห์

ผู้วิจัยได้ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับอุตสาหกรรมแผ่นจีนไม้อัด เพื่อเป็นแนวทางในการผลิตแผ่นฉนวนกันความร้อน ดังนี้

แผ่นจีนไม้อัด

แผ่นจีนไม้อัด แบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่ม คือ

1. กลุ่มที่ใช้ไม้ชั้นหรือแผ่นไม้แปรรูปเล็กๆ มาประสานกัน หรือ ลามิเนทบอร์ด (laminated board)

โดยทั่วไปประกอบด้วยวัตถุดิบที่ทำจากแผ่นไม้บาง (veneer) ซึ่งได้จากการลอกหรือฝานด้วยเครื่องจักรแล้วนำมาอัดซ้อนกัน แผ่นวัสดุดังกล่าวนี้อาจจะทำด้วยการนำเอาแผ่นไม้บางเล็กๆ มาซ้อนกันจนมีความหนาตามต้องการ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงกลุ่มของแผ่นจีนไม้อัดที่ใช้ไม้จีนหรือแผ่นไม้แปรรูปเล็กๆ มาประสานกัน พร้อมภาพประกอบ

ประเภทแผ่นไม้	ภาพประกอบ	ที่มา
1. ไม้อัด (plywood)		Yawen (2011)
2. แผ่นไม้อัดใส่ประกบตั้งหรือลามิเนตบอร์ด (lamin board)		Chiang Leng Hup Plywood Industries Pte Ltd. (2004)
3. แผ่นไม้อัดใส่ไม้ระแนงหรือบล็อกบอร์ด (block board)		Pizhou Hengxing International Trade Co., Ltd. (2012)

แผ่นไม้ในกลุ่มนี้ประกอบด้วย

1.1 ไม้อัด ผลิตได้โดยใช้ไม้บางที่ปอกหรือฝานจากไม้ซุงนานาชนิด ความหนาของแผ่นไม้บางที่ใช้ รวมทั้งการจัดทิศทางในการวางแผ่นไม้บางซ้อนกัน จะทำให้ความแข็งแรงและสมบัติของไม้อัดที่ผลิตได้นั้นเปลี่ยนแปลงไป

1.2 แผ่นไม้อัดใส่ไม้ประกบตั้ง เป็นไม้อัดที่มีไม้ใส่ทำมาจากไม้แปรรูปจีนยาวๆ หรือจากชิ้นส่วนของแผ่นวัสดุที่ใช้ไม้เป็นวัตถุดิบมาอัดติดกันด้วยกาวให้เป็นแผ่น จีนไม้หรือจีนวัสดุนั้นจะกว้างไม่เกิน 7 mm แผ่นไม้อัดใส่ไม้ประกบตั้งนี้มักจะนำไปใช้เป็นแผ่นปูหน้าโต๊ะหรือชั้นวางของที่ต้องรับน้ำหนักมากๆ

1.3 แผ่นไม้อัดไส้ไม้ระแนง คือไม้อัดประเภทหนึ่งที่มีไส้ทำจากไม้แปรรูปชิ้นเล็กๆ ขาวมาเรียงต่อกัน หรือมีไส้ทำจากแผ่นวัสดุที่ใช้ไม้เป็นวัตถุดิบอื่นๆ โดยเป็นชิ้นไม้นำมาเรียงต่อกันเป็นไส้ ชิ้นไม้นั้นจะเรียงให้แต่ละด้านชิดกันโดยไม่ใช้กาว จะให้คงรูปอยู่ได้โดยใช้แผ่นไม้บางหรือแผ่นไม้อัดทากาวปิดทับทางด้านล่างทั้งสองด้าน แต่ในปัจจุบันวงการผลิตเครื่องเรือนใช้แผ่นไม้ประเภทนี้น้อยลงกว่าเดิม

2. กลุ่มที่ใช้ชิ้นไม้สับเป็นวัตถุดิบ (particle board)

อาจใช้วัตถุดิบจำพวกที่มีเซลลูโลสแต่ละชนิดต่างกันไป เช่น ไม้ ป่านลินิน และจากชานอ้อย เป็นต้น วัตถุดิบเหล่านี้จะนำมาผ่านเข้ากระบวนการต่างๆ โดยการตัดเป็นชิ้นเล็กๆ และนำมารวมกันเป็นแผ่น โดยใช้ตัวประสานอินทรีย์หรือกาวสังเคราะห์ร่วมกับแรงอัดความร้อน ความชื้น สารเร่งแข็งของกาว และสารต้านทานความชื้น ซึ่งเป็นชนิดเดียวกับสารกันน้ำ แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงกลุ่มของแผ่นชิ้นไม้อัดที่ใช้ชิ้นไม้สับเป็นวัตถุดิบ พร้อมภาพประกอบ

ประเภทแผ่นไม้	ภาพประกอบ	ที่มา
1. แผ่นไม้บางสับอัด (wood chip board)		Dongying Dyne Wood Co.,Ltd. (2010)
2. แผ่นชานอ้อยอัด (bagasse board)		Ycplywood (2012)

ตารางที่ 2 (ต่อ)

ประเภทแผ่นไม้	ภาพประกอบ	ที่มา
3. แผ่นเส้นใยป่านลินินอัด (flax board)		CarbonPro Ltd. (2011)
4. แผ่นเกล็ดไม้อัด (flake board)		Xavier Borràs (2011)
5. แผ่นเกล็ดไม้อัดเรียงชั้น (oriented strand board) หรือ แผ่น OSB		Baan natura (2007)
6. แผ่นไม้เอกพันธ์ (homogeneous board)		Talas (2011)

ผลิตภัณฑ์แผ่นจีน ไม้อัดกลุ่มนี้ประกอบด้วย

2.1 แผ่นไม้บางสับอัด เป็นการนำเอาวัตถุดิบจากไม้ท่อน ต้นไม้ที่ตัดสางออกจากสวนป่า เศษไม้ต่างๆ มาสับย่อยเป็นชิ้นเล็กๆ และแยกขนาดโดยตะแกรงหรือการใช้ลมเป่าให้ลอยตัว จากวิธีดังกล่าวทำให้สามารถเรียงชั้นไม้สับนั้นให้เป็นแผ่น โดยแยกออกเป็นชั้นตามขนาดของชิ้นไม้ที่

ต้องการ ชี้นไม้หยาบจะถูกเรียงแผ่นให้เป็นไส้ในของแผ่น ส่วนชี้นไม้ละเอียดก็จะถูกเรียงเป็นผิวของแผ่นทั้งสองด้าน ทำให้การตกแต่ง และการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องเรือนและอุตสาหกรรมตกแต่งอื่นๆ ทำได้ง่ายขึ้น แผ่นไม้สับอัดแบ่งออกได้เป็นหลายชั้นคุณภาพ ขึ้นอยู่กับขนาดของวัตถุดิบที่สับเป็นชี้นเล็กๆ การแผ่กระจายตัวของชี้นไม้ในขณะที่สร้างแผ่น คุณสมบัติกาที่ใช้ในการประสาน และคุณภาพของการอัด

2.2 แผ่นซานอ้อยอัด ทำจากชี้นส่วนซานอ้อยที่เหลือจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาล

2.3 แผ่นเส้นใยปานลินินอัด ทำจากเศษปานลินินที่เหลือจากโรงงานทอผ้า แผ่นเส้นใยปานลินินอัดส่วนใหญ่จะมีผิวเรียบ แต่มีความแข็งแรงน้อยกว่าแผ่นไม้สับอัด

2.4 แผ่นเกล็ดไม้อัด ทำจากไม้ที่ไสหรือผ่านออกมาเป็นเกล็ดต่างๆ แล้วนำเกล็ดไม้นั้นมาอัดติดกันทางด้านแบนด้วยกาวหรือวัตถุประสาน ดังนั้นทางด้านราบหรือด้านแบนของเกล็ดไม้จึงขนานกับผิวของแผ่น

2.5 แผ่นเกล็ดไม้อัดเรียงชี้น เป็นแผ่นชี้นไม้อัดชนิดพิเศษ ผลิตจากชี้นไม้ที่มีลักษณะแบนบาง และมีความยาวมาก ชี้นไม้นี้เรียกว่า สเตรนด์ (strand) ขนาดโดยประมาณ คือ กว้าง 40 mm ยาว 60 mm และหนา 0.4 mm แผ่น OSB มักผลิตแบบโครงสร้าง 3 ชั้น โดยใช้เทคนิคพิเศษ ทำให้ชี้นสเตรนด์ที่ใช้เป็นผิวชั้นบนและชั้นล่างของแผ่นถูกเรียงตัวตามความยาวของแผ่น ส่วนชี้นสเตรนด์ส่วนกลาง (core layer) จะถูกทำให้เรียงตัวตามความกว้างของแผ่นทำให้เกิดโครงสร้างที่สมบูรณ์ในแผ่น ทำนองเดียวกับลักษณะของโครงสร้างของแผ่นไม้อัด

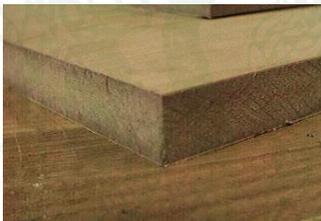
2.6 แผ่นไม้เอกพันธ์ หรือปาร์ติเคิลบอร์ดที่ทำจากชี้นไม้ที่สับย่อยจนมีขนาดเล็ก แล้วนำมาอัดให้เป็นแผ่นด้วยเครื่องอัดกำลังสูง

3. กลุ่มที่ใช้เส้นใยจากพืชเป็นวัตถุดิบ (fiber board)

ได้จากการย่อยชี้นไม้สับโดยผ่านกระบวนการที่ใช้ความร้อนสูงให้เป็นเส้นใย แล้วนำเส้นใยนั้นมาเรียงเป็นแผ่นโปร่งๆ หลังจากนั้นเข้าเครื่องอัดให้เป็นแผ่นตามขนาดที่ต้องการ แผ่นเส้นใยไม้อัดที่ผลิตออกมามีหลายแบบแตกต่างกันตามสภาพความเปียกแห้งของเส้นใยขณะทำแผ่น และชนิดของกาวที่นำมาใช้ รวมทั้งปริมาณกาวที่ใช้เป็นตัวประสานด้วย ความแน่นของแผ่นเส้นใยไม้อัดจะแตกต่างกันไปตามกำลังของเครื่องจักรที่ใช้ แผ่นเส้นใยไม้อัดทุกแผ่นที่ผลิตออกมาจะมีคุณภาพสม่ำเสมอตลอดทั่วทั้งแผ่น ทั้งนี้เนื่องจากการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอครอบคลุมทั่วความหนาของเส้นใยในขณะที่ประกอบเป็นรูปแผ่น ซึ่งในระหว่างการผลิตอาจผสมสารอื่นๆ ลงไปด้วย

เพื่อให้แผ่นใยไม้อัดมีความแข็งแรง มีความต้านทานความชื้น ต้านทานไฟ ต้านทานแมลงหรือการ
 ศู ซึ่งแบ่งออกเป็นชนิดย่อยๆ ได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงกลุ่มของแผ่นใยไม้อัดที่ใช้เส้นใยจากพืชเป็นวัตถุดิบ พร้อมภาพประกอบ

ประเภทแผ่นไม้	ภาพประกอบ	ที่มา
1. แผ่นใยไม้อัดอ่อน (soft board)		Indiamart (2012)
2. แผ่นใยไม้อัดความหนาแน่นปานกลาง (medium density fiber board; MDF)		Louis Lung (2008)
3. แผ่นใยไม้อัดแข็ง (hard board)		Meredith Corporation (2012)

3.1 แผ่นใยไม้อัดอ่อน ผลิตโดยกรรมวิธีเปียก มีน้ำหนักเบา มีความหนาแน่นต่ำ คือ 40–400 kg/m³ เป็นแผ่นใยไม้อัดที่ไม่มีการอัดร้อน แต่ใช้วิธีอบแผ่นใยให้แห้งแทน แผ่นใยไม้อัดอ่อนที่ผลิตเป็นการค้าส่วนมากมีความหนาแน่นประมาณ 235–275 kg/m³ ใช้เพื่อเป็นฉนวนป้องกันอากาศร้อนหนาว เนื่องจากการประสานตัวของเส้นใยในแผ่นใยไม้อัดอ่อนส่วนใหญ่จะอยู่ในเกณฑ์ต่ำ จึงไม่เหมาะที่จะนำไปใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องเรือน

3.2 แผ่นใยไม้อัดความหนาแน่นปานกลาง เป็นแผ่นใยไม้อัดที่มีความหนาแน่น 500-800 kg/m³ ระดับความหนาแน่นที่ผลิตส่วนมากอยู่ระหว่าง 700-750 kg/m³ แผ่น MDF ส่วนใหญ่เป็นผลิตภัณฑ์แผ่นไม้วิทยาศาสตร์ที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงไม้ธรรมชาติมากที่สุด

3.3 แผ่นใยไม้อัดแข็ง มีความหนาแน่นสูง 800-1,200 kg/m³ คุณภาพของแผ่นใยไม้อัดแข็งนั้นอยู่ในระดับสูงมาก เนื่องจากการอัดด้วยเครื่องจักรที่มีกำลังอัดสูง และเกิดการเชื่อมตัวระหว่างเส้นใยที่ประสานซึ่งกันและกันโดยกาธรรมชาติที่เกิดจากไม้ที่ใช้เป็นวัตถุดิบ

ในกระบวนการการผลิตจะใช้กาววิทยาศาสตร์ เพื่อเพิ่มคุณสมบัติความแข็งแรงให้สูงขึ้น ระดับความหนาแน่นที่ใช้ในอุตสาหกรรมอยู่ในช่วง 900-1,100 kg/m³ ซึ่งแผ่นใยไม้อัดความหนาแน่นปานกลางเป็นผลิตภัณฑ์ที่อยู่กึ่งกลางระหว่างแผ่นใยไม้อัดแข็งกับแผ่นไม้สับอัด เพราะในกระบวนการผลิตนั้นแผ่นใยไม้อัดความหนาแน่นปานกลางผลิตจากเส้นใยเช่นเดียวกับแผ่นใยไม้อัดแข็ง แต่การยึดประสานระหว่างเส้นใยภายในแผ่นเกิดจากกาววิทยาศาสตร์ที่ใช้ผสม เช่นเดียวกับกระบวนการการผลิตไม้สับอัด แสดงให้เห็นว่าแผ่นใยไม้อัดความหนาแน่นปานกลางเป็นผลิตภัณฑ์กลางๆ ที่มีสมบัติและประโยชน์ผสมผสานระหว่างแผ่นใยไม้อัดแข็งกับแผ่นไม้สับอัด จึงมีสมบัติใกล้เคียงกับไม้ธรรมชาติมากที่สุด จึงสามารถนำไปใช้ได้ดีในงานหลายประเภท

จากการศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับอุตสาหกรรมแผ่นขึ้นไม้อัด ทำให้ทราบว่า การผลิตแผ่นไม้อัดนั้น มีหลายประเภท หลายวิธีการ แตกต่างกันตามวัสดุที่เลือกใช้ และประเภทการใช้งาน ซึ่งการนำเส้นใยจากต้นกกข้างมาอัดขึ้นรูปให้เป็นแผ่น สามารถทำได้หลายวิธี แต่เนื่องจากผู้วิจัยต้องการให้แผ่นฉนวนกันความร้อนที่ผลิตได้ สามารถนำไปใช้งานได้จริง มีกระบวนการผลิตที่ผ่านมาตรฐาน จึงได้ศึกษามาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแผ่นขึ้นไม้อัดชนิดอัดราบ ตาม มอก. 867-2547 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2547) และใช้กระบวนการอัดร้อนเพื่อขึ้นรูปเป็นแผ่นฉนวนกันความร้อน

กระบวนการอัดร้อน

กระบวนการอัดร้อนเป็นขั้นตอนที่สำคัญขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตต่างๆ หากแผ่นเตรียมอัดที่ทำขึ้นมีคุณภาพไม่ดี เมื่อนำไปอัดก็จะได้แผ่นฉนวนกันความร้อนที่คุณภาพไม่ดีเช่นกัน ขั้นตอนการอัดเป็นขั้นตอนที่ใช้เครื่องมือที่แพงที่สุด คือ เครื่องอัดร้อน เป็นเครื่องจักรที่มีหน้าที่สำคัญในการผลิตแผ่นฉนวนกันความร้อน แบ่งเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ได้แก่ เครื่องอัดร้อนแบบ

แผ่น และเครื่องอัดรีดแบบต่อเนื่อง สำหรับเครื่องอัดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นเครื่องอัดแบบแผ่นที่มีช่องอัดเดี่ยว โดยมีชุดเครื่องอัดไฮดรอลิกที่ใช้เป็นเครื่องอัดในการขึ้นรูป

การเตรียมแผ่นเตรียมอัดก่อนเข้าเครื่องอัดรีด ทำได้โดยการ โรยเส้นใยที่ผสมกับกาวแล้ว ในกล่องขึ้นรูปให้มีการกระจายสม่ำเสมอ เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นในขณะอัดรีด เช่น แผ่นฉนวนกันความร้อนที่อัดได้มีความหนาแน่นไม่เท่ากัน และเกิดการคืบตัวทางความหนาที่มากเกินไปในบริเวณที่มีความหนาแน่นสูงกว่า นอกจากนี้ยังทำให้เกิดการโค้งงอ หรือบิดตัวของแผ่น ผิวหน้าของแผ่นไม่สวย และลักษณะของขอบแผ่นไม่ราบเรียบ ปริมาณความชื้นของแผ่นที่จะเข้าทำการอัดรีดเป็นสิ่งสำคัญต่อการอัดอย่างมาก ความชื้นที่มากเกินไปจะขัดขวางการยึดเหนี่ยวของเส้นใยให้ซ้าลง

ปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงเพื่อหาสภาวะในการอัดที่เหมาะสม ได้แก่ อุณหภูมิในการอัด ชนิด และรูปร่างของเส้นใย ระดับความชื้นและการกระจายความชื้นของแผ่นเตรียมอัด การถ่ายเทความร้อนภายในแผ่นระหว่างอัด ระยะเวลาในการอัด แรงดันในการอัดและลักษณะการกระจายความหนาแน่นของแผ่นทางด้านหน้าตัด และการแข็งตัวก่อนหรือหลังการอัดของกาว

ในการอัดเพื่อให้ได้ขนาดความหนาของแผ่นตามต้องการ ต้องใช้แท่งโลหะขนาดความหนาตามที่กำหนดวางไว้ที่ขอบสองด้านของช่องอัด ให้แทนอัดขณะที่อัดอยู่สัมผัสแท่งโลหะพอดี จึงหยุดการอัด ซึ่งการควบคุมการอัดรีดและการใช้ระยะเวลาอัดที่ช้า (Teeboonma, 2001) ในช่วงที่แทนอัดบีบแผ่นจนถึงความหนาที่กำหนด จะสามารถปรับปรุงสมบัติแรงยึดเหนี่ยวภายในที่สูงขึ้นได้ และส่งผลให้ความหนาแน่นมีการกระจายตัวได้สม่ำเสมอกว่าการใช้ระยะเวลาปิดแทนอัดที่เร็ว การใช้ระยะเวลาในการอัด สภาวะในการอัดที่เหมาะสม มีประสิทธิภาพและใช้ระยะเวลาในการอัดที่สั้นที่สุด ย่อมส่งผลดีต่อคุณภาพของแผ่น

กาว

กาวเป็นวัสดุประสานที่มีความจำเป็นอย่างยิ่งในกระบวนการอัดรีด (ปรีชา, 2531) ในอดีตกาวมีทั้งที่ผลิตมาจากวัสดุธรรมชาติ เช่น กาวยางไม้ หรืออาจเป็นวัสดุสังเคราะห์ทางวิทยาศาสตร์ เช่น อีพอกซี มนุษย์รู้จักใช้กาวมาตั้งแต่ก่อนสมัยประวัติศาสตร์ ครั้งแรกที่ใช้เป็นยางไม้ธรรมชาติ เช่น จี๊ฝิ่ง กาวที่เก่าแก่ที่สุดเป็นกาวหนังสัตว์และกาวยาง ใช้ในการทำเครื่องเรือนไม้

ติดลายไม้ประดับกับผิวไม้ และปัจจุบันกาวยุคนี้ยังเป็นสินค้าออกที่นิยมใช้ในงานอุตสาหกรรมช่างไม้ ปลายปี พ.ศ. 2473 กาวที่ใช้ทั่วไป เป็นกาวหนังสัตว์ กาวยาง และยางจากพืชผักบางชนิด และยางธรรมชาติ เช่น กาวแป้ง ซึ่งใช้มากกับเครื่องเรือนไม้และอุตสาหกรรมกระดาษ ต่อมาเมื่ออย่างซินเทติก (synthetic) พลาสติกได้ถูกค้นพบในปี พ.ศ. 2478 จึงขยายการใช้ไปยังวงการอุตสาหกรรม รวมทั้งอุตสาหกรรมรถยนต์ เครื่องบิน เครื่องอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ และงานอื่นๆ อีกมาก แต่การใช้กาวสังเคราะห์อัดร้อนได้เริ่มมาเพียงศตวรรษนี้เท่านั้น กาวฟีนอลฟอร์มัลดีไฮด์ และกาวยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์ได้รับการพัฒนามาในระยะใกล้เคียงกัน การนิยมใช้กาวสังเคราะห์นั้นเนื่องจากการใช้งานสะดวกเร็ว คุณภาพดีและสม่ำเสมอ วัตถุดิบหลักที่ใช้ในการผลิตกาวสังเคราะห์ ได้แก่ ฟอร์มัลดีไฮด์ ยูเรียและฟีนอล แหล่งของวัตถุดิบเหล่านี้มาจากก๊าซธรรมชาติ ถ่านหินและน้ำมันดิบ ยูเรียและฟอร์มัลดีไฮด์เป็นสารที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นมาจากก๊าซธรรมชาติ ส่วนฟีนอลสังเคราะห์มาจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี หรือจากอุตสาหกรรมถ่านหิน

กาวสังเคราะห์ แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

1. กาวเรซินชนิดแข็งตัวเมื่อร้อน (thermo-setting resins)

เป็นกาวเรซินที่แข็งตัวโดยการทำปฏิกิริยาเคมี เกิดเป็นโมเลกุลที่มีโครงสร้าง 3 มิติกลายเป็นของแข็งในเวลาเดียวกันกับที่เกิดการยึดติดกับไม้ และไม่สามารถหลอมละลายได้อีก ยกตัวอย่างเช่น โพลีเมอริคเมทิลีนไดฟีนิลไดไอโซไซยาเนต (polymeric methylene diphenyl diisocyanate) หรือ pMDI กาวชนิดนี้ใช้ในการผลิตโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็ง ตัวอย่างการนำไปใช้งานเช่น ฉนวนกันความร้อนในตู้เย็น ตู้แช่ หรือในอาคาร เป็นต้น และชนิดยึดหยุ่น ตัวอย่างการนำไปใช้งานเช่น ฟองน้ำ ในเบาะรถยนต์ เบาะมอเตอร์ไซค์ พื้นรองเท้า ลูกบอล เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีกาวนำ pMDI ไปใช้เพื่อผลิตสารเคลือบผิว กาว และอีลาสโตเมอร์ (elastomer)

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้กาว pMDI เพราะต้องการแผ่นฉนวนกันความร้อนที่มีความทนทาน โดยกาวนี้จะเกิดการยึดเหนี่ยวทางเคมีกับลิกนิน และเซลลูโลสในเส้นใย กาวชนิดนี้มีราคาสูง แต่เนื่องจากการยึดเหนี่ยวแบบธรรมชาตินี้ทำให้แผ่นฉนวนกันความร้อนที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่ดี สอดคล้องกับงานวิจัยของ X. Mo *et al.* (2001) ได้ทดสอบความต้านแรงดึงของปาร์ติเคิลบอร์ด ความหนาแน่นต่ำที่ทำจากโปรตีนฟางข้าว โดยเปรียบเทียบระหว่างกาว pMDI และกาวจากโปรตีน

ถั่วเหลืองที่ผ่านการดัดแปลงทางเคมี (modified soy protein adhesives) พบว่า ในปาร์ติเคิลบอร์ดที่ใช้กาว pMDI จะให้สมบัติเชิงกลคือ ความแข็งแรงของการยึดเหนี่ยวภายในที่ดีกว่า เนื่องจากโมเลกุลของกาวนี้เล็ก และมีความสามารถในการเกาะเกี่ยวของพันธะดี

เช่นเดียวกับ X. Mo *et al.* (2003) ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลของปาร์ติเคิลบอร์ดจากฟางข้าวที่ใช้กาวต่างชนิดกัน คือ pMDI กาวยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์ (urea formaldehyde) โปรตีนสกัดจากถั่วเหลือง (soybean protein isolate) และแป้งถั่วเหลือง (soy bean flour) พบว่า แผ่นปาร์ติเคิลบอร์ดที่ใช้กาว MDI ให้สมบัติเชิงกลคือ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และค่าความต้านแรงดัดสูงที่สุด

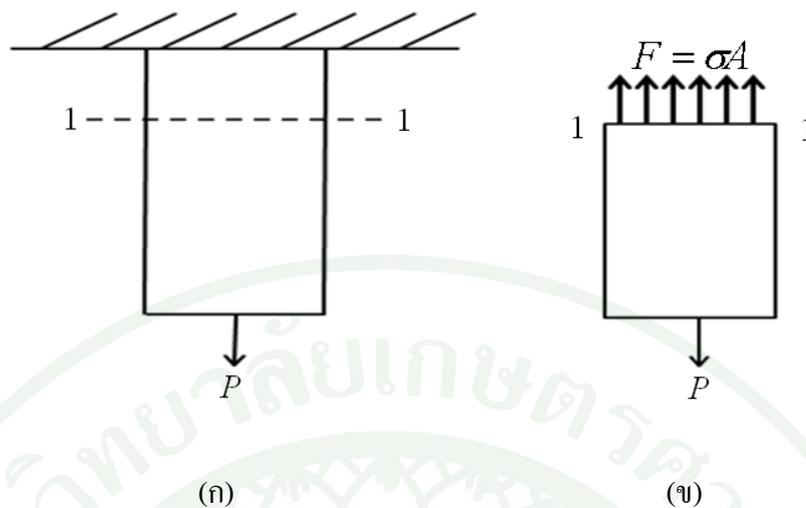
2. กาวเรซินชนิดอ่อนตัวเมื่อร้อน (thermo-plastic resins) หรือกาวร้อนเหลว (hot melt)

โดยปกติแล้วจะอยู่ในรูปของแข็งสามารถใช้งานได้โดยต้องให้ความร้อนถึงระดับสูงกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของกาว จึงจะกลายเป็นสารยึดติดเมื่อเย็น นิยมใช้ในอุตสาหกรรมที่ต้องการให้กระบวนการผลิตนั้นรวดเร็ว กาวประเภทนี้เป็นกาวแท้ 100 % ไม่มีตัวทำละลาย มีการหดตัวของแผ่นฟิล์มน้อยกว่ากาวที่ใช้ตัวทำละลาย แต่จะมีช่วงระยะเวลาการปฏิบัติงานที่สั้น หลังจากทำให้กาวเย็นตัวหรือปล่อยให้เย็นตัวเอง ก็จะเกิดการแข็งตัวกลับทันที ในงานวิจัยนี้ใช้ในขั้นตอนการทดสอบหาค่าความต้านแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า เพื่อทดสอบแรงยึดระหว่างกาวกับเส้นใย โดยพิจารณาจากสมบัติเชิงกลของวัตถุ

สมบัติเชิงกลของวัตถุ

1. ความเค้น (stress)

ความเค้น คือ แรงกระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ การหาค่าความเค้นนั้นจะพิจารณาจากวัตถุอันหนึ่งที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ A อยู่ภายใต้แรงดึง P ถ้าแรง P มีค่าไม่มากนัก วัตถุจะยืดออกเล็กน้อยแล้วไม่ยืดต่อไปอีก ถ้าตัดวัตถุที่หน้าตัด 1-1 วัตถุจะอยู่ในสภาวะสมดุลได้ ดังภาพที่ 8 (ก) จะต้องมีแรงต้านแรง P เอาไว้ แรงสมดุล F นี้กระทำภายในเนื้อวัสดุ เรียกว่า แรงภายใน และจะกระจายไปตลอดพื้นที่หน้าตัด ดังภาพที่ 8 (ข)



ภาพที่ 8 ความเค้นในวัตถุ (ก) ตัดวัตถุที่หน้าตัด 1-1 (ข) เมื่อมีแรงกระทำกับวัตถุ

$$F = \sigma A = P$$

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

(25)

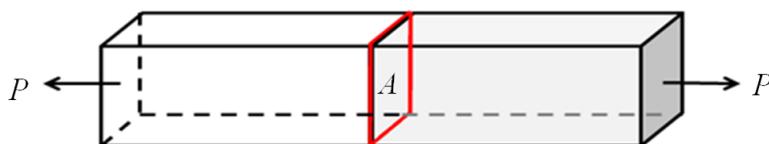
โดยที่ σ คือ ความเค้นที่เกิดขึ้น มีหน่วยเป็น นิวตัน/ตารางเมตร (N/m^2)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของวัตถุ มีหน่วยเป็น ตารางเมตร (m^2)

P คือ แรงที่มากระทำกับวัตถุ มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

ความเค้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ

1.1 ความเค้นดึง (tensile stress; σ_t) จะเกิดขึ้นเมื่อวัตถุอยู่ภายใต้แรงดึง โดยแรงดึงจะต้องตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดที่กระทำ ดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 ความเค้นดึง

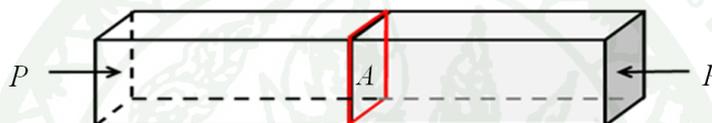
$$\sigma_t = \frac{P}{A} \quad (26)$$

โดย σ_t คือ ความเค้นดึงที่เกิดขึ้น มีหน่วยเป็น N/m^2

A คือ พื้นที่หน้าตัดของวัตถุ มีหน่วยเป็น m^2

P คือ แรงดึงที่กระทำกับวัตถุ มีหน่วยเป็น N

1.2 ความเค้นอัด (compressive stress; σ_c) จะเกิดขึ้นเมื่อวัตถุอยู่ภายใต้แรงอัด โดยแรงอัด จะต้องกระทำตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดของวัตถุที่กระทำ ดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 ความเค้นอัด

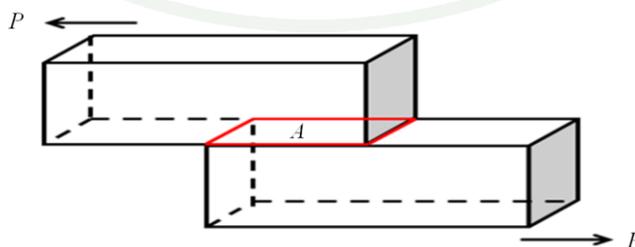
$$\sigma_c = \frac{P}{A} \quad (27)$$

โดย σ_c คือ ความเค้นอัดที่เกิดขึ้น มีหน่วยเป็น N/m^2

A คือ พื้นที่หน้าตัดของวัตถุ มีหน่วยเป็น m^2

P คือ แรงอัดที่กระทำกับวัตถุ มีหน่วยเป็น N

1.3 ความเค้นเฉือน (shear stress; τ) เกิดขึ้นเมื่อวัตถุอยู่ภายใต้แรงเฉือน ดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 ความเค้นเฉือน

$$\tau = \frac{P}{A} \quad (28)$$

โดย τ คือ ความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้น มีหน่วยเป็น N/m^2

A คือ พื้นที่หน้าตัดที่ขนานกับแรง มีหน่วยเป็น m^2

P คือ แรงเฉือนที่กระทำกับวัตถุ มีหน่วยเป็น N

2. ความเครียด (strain)

ความเครียด คือ ความยาวที่เปลี่ยนไปต่อความยาวเดิม

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L} \quad (29)$$

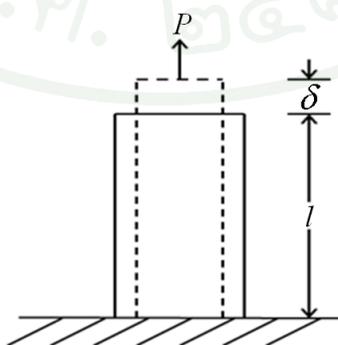
โดย ε คือ ความเครียด

δ คือ ความยาวของวัตถุที่เปลี่ยนไป m

L คือ ความยาวเดิม มีหน่วยเป็น m

ความเครียดแบ่งการพิจารณาออกได้เป็น 3 ชนิด คือ

2.1 ความเครียดดึง (tensile strain; ε_t) เมื่อวัตถุถูกกระทำด้วยแรงดึง P วัตถุนี้ก็จะเกิดการยืดออกทีละน้อยระยะ δ ดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 ความเครียดดึงตามแนวแกน

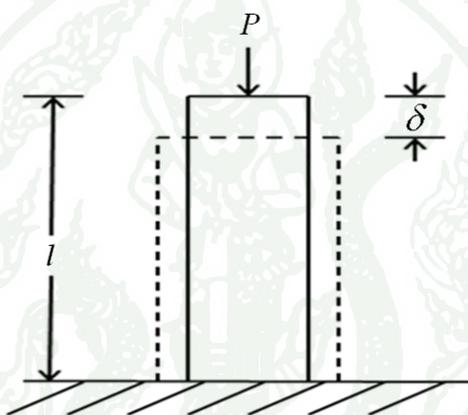
$$\varepsilon_t = \frac{\delta}{l} \quad (30)$$

โดย ε_t คือ ความเครียดดึงที่เกิดขึ้น

δ คือ ส่วนที่ยืดออกของวัตถุ มีหน่วยเป็น m

l คือ ความยาวเดิมของวัตถุนั้น มีหน่วยเป็น m

2.2 ความเครียดอัด (compressive strain; ε_c) เมื่อวัตถุถูกกระทำด้วยแรงกด P วัตถุจะหดตัวลงเป็นระยะ δ ดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 ความเครียดอัดตามแนวแกน

$$\varepsilon_c = \frac{\delta}{L} \quad (31)$$

โดย ε_c คือ ความเครียดกดที่เกิดขึ้น

δ คือ ส่วนที่หดตัวของวัตถุ มีหน่วยเป็น m

L คือ ความยาวเดิมของวัตถุนั้น มีหน่วยเป็น เมตร m

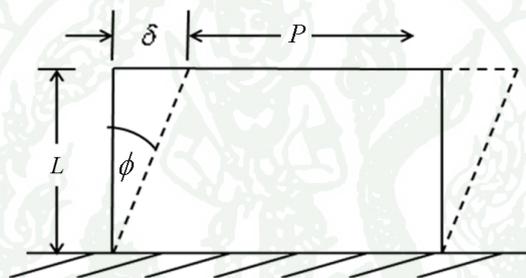
ความเครียดดึงและความเครียดอัดเป็นปริมาณที่ไม่มีหน่วย เนื่องจากหน่วยของความยาวที่เปลี่ยนไปต่อความยาวเดิมเป็นหน่วยเดียวกัน

2.3 ความเครียดเฉือน (shear strain, γ) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงเฉือนกระทำต่อวัตถุจนทำให้วัตถุเปลี่ยนรูปร่างจากเดิม

$$\gamma = \frac{\delta}{L} \quad (32)$$

เนื่องจาก $\tan \phi = \frac{\delta}{L}$ ดังนั้น $\gamma = \tan \phi$ (33)

เมื่อ ϕ เป็นมุมที่เปลี่ยนไป แต่มุม ϕ นี้จะเล็กมาก ทำให้ $\tan \phi \approx \phi$ เรเดียน (rad) ดังนั้นความเครียดเฉือนจึงเป็นการวัดมุมที่เปลี่ยนไป มีหน่วยเป็น rad ดังภาพที่ 14



ภาพที่ 14 ความเครียดเฉือนเกิดการเปลี่ยนรูปร่าง

อุปกรณ์และวิธีการ

ในการศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยได้เลือกเส้นใยธรรมชาติที่ได้จากต้นกกช้างมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตแผ่นฉนวนกันความร้อน เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกายภาพ สมบัติเชิงกล และสมบัติเชิงความร้อน การผลิตแผ่นฉนวนกันความร้อนจากเส้นใยของต้นกกช้างนี้ทำได้โดยผ่านกระบวนการอัดร้อน และใช้กาว pMDI เป็นสารยึดติด แผ่นฉนวนกันความร้อนจากเส้นใยของต้นกกช้างที่ผลิต มีอัตราส่วนของเส้นใยจากต้นกกช้าง คิดเป็นน้ำหนักแห้ง 95 % และกาว pMDI 5 % จากนั้นนำมาทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติเชิงกายภาพ และสมบัติเชิงความร้อน โดยแผ่นทดสอบที่ผลิตมีความหนาแน่น 200, 300 และ 400 kg/m³ อย่างละ 5 แผ่น รวมเป็น 15 แผ่น มีขั้นตอน ดังนี้

1. การเตรียมเส้นใยจากต้นกกช้าง

นำใบกกช้าง ดังภาพที่ 15 จำนวน 80–90 kg มาตัดให้เหลือเฉพาะส่วนที่เป็นใบ แล้วนำไปตากจนแห้งสนิท



(ก)



(ข)

ภาพที่ 15 ขั้นตอนการเตรียมเส้นใยจากใบกกช้าง (ก) ใบกกช้าง (ข) ใบกกช้างตากแห้ง

จากนั้นนำไปตัดย่อยด้วยเครื่องย่อยชนิดหยาบที่มีใบมีดสำหรับตัดเฉือนและหมุนด้วยกำลังมอเตอร์ สามารถบดย่อยใบกอกที่มีขนาดใหญ่ให้เล็กลงเหมาะกับการนำไปใช้ หลังจากบดย่อยแล้วจะได้เส้นใยกอกช้ำยาวประมาณ 2–3 cm ดังภาพที่ 16



(ก)

(ข)

(ค)

ภาพที่ 16 ขั้นตอนการเตรียมเส้นใยจากใบกอกช้ำ (ก) เครื่องย่อยชนิดหยาบ (ข) นำใบกอกช้ำใส่ในเครื่องย่อย (ค) ลักษณะของใบกอกช้ำที่ผ่านการบดจนเป็นเส้นใย

2. การผสมกาว

เป็นการผสมคลุกเคล้าโดยการฉีดพ่นกาว pMDI ด้วยปืนพ่นกาว ลงบนเส้นใยกอกช้ำที่อยู่ในเครื่องผสมกาว ดังภาพที่ 17



(ก)



(ข)

ภาพที่ 17 (ก) ปืนพ่นกาว (ข) เครื่องผสมกาว

เครื่องผสมกาวนี้ทำด้วยโลหะแผ่นเป็นรูปกลมแบน มีช่องตรงกลางสำหรับพันกาว pMDI ขณะทำงานเครื่องจะหมุน เพื่อให้เกิดการกระจายตัวของกาวได้อย่างสม่ำเสมอทั่วเส้นใย ซึ่งมีวิธีหาปริมาณส่วนผสมของกาวและเส้นใย อ้างอิงได้จาก มาตรฐาน มอก. 867-2547 ดังสมการที่ (34)

$$M = \rho V \quad (34)$$

โดย ρ คือ ความหนาแน่น มีหน่วยเป็น kg/m^3

M คือ มวล มีหน่วยเป็น kg

V คือ ปริมาตร มีหน่วยเป็น m^3

ในการผลิตแผ่นฉนวนกันความร้อน ขนาด $35 \times 35 \text{ cm}$ ความหนา 1 cm แต่ละครั้ง ให้มีความหนาแน่นของแผ่น $200, 300$ และ 400 kg/m^3 ต้องชั่งน้ำหนักวัสดุและกาว โดยใช้ปริมาณน้ำหนักกาวในการยึดติดเส้นใย 5% ของน้ำหนักเส้นใยแห้ง ซึ่งเส้นใยมีความชื้นที่หลงเหลืออยู่ 6% หมายความว่า

เส้นใยแห้งมวล 100 g มีความชื้นหลงเหลืออยู่ 6%

ถ้าเส้นใยมวล 1 g จะมีความชื้นหลงเหลืออยู่ $= \frac{6}{100} \times 1 = 0.06 \text{ g}$

ดังนั้น มวลรวมทั้งหมดของเส้นใยแห้งที่มีความชื้นอยู่ด้วย $= 1 + 0.06 = 1.06 \text{ g}$

วิธีคำนวณหามวลของวัสดุและกาวในการผลิตแผ่นฉนวนกันความร้อนแต่ละแผ่น มีดังนี้

1. คำนวณหาปริมาณมวลของเส้นใยแห้งและปริมาณกาวที่ต้องใช้ จากสมการที่ (32) จะได้

$$\text{มวล (เส้นใย+กาว)} = \text{ความหนาแน่นของแผ่น} \times \text{ปริมาตรของแผ่น}$$

$$\text{โดยปริมาตรของแผ่น} = \text{กว้าง} \times \text{ยาว} \times \text{หนา}$$

$$= 35 \times 35 \times 1 = 1,225 \text{ cm}^3$$

ถ้าต้องการผลิตแผ่นฉนวนกันความร้อนความหนาแน่น 200 kg/m^3 หรือ 0.2 g/cm^3 ที่มีปริมาตร $1,225 \text{ cm}^3$ จะมีมวล (เส้นใยแห้ง+กาว) $= 0.2 \times (35 \times 35 \times 1) = 245 \text{ g}$

2. เนื่องจากการเตรียมกาวต้องใช้ปริมาณน้ำหนักรวมในการยึดติดวัสดุ 5 % ของน้ำหนักเส้นใยแห้ง ดังนั้น น้ำหนักของเส้นใยแห้ง คือ 95 % ต้องคำนวณหามวลของเส้นใยและมวลของกาวที่ใช้จริงก่อนนำไปผสมกับกาว ซึ่งมีวิธีดังนี้

2.1 คำนวณหามวลของเส้นใยที่ใช้

การผลิตแผ่นฉนวนให้มีมวล 100 g ต้องใช้เส้นใยแห้ง 95 g

ถ้าผลิตแผ่นฉนวนมวล 245 g ต้องใช้เส้นใยแห้ง $= \frac{95 \times 245}{100} = 232.75 \text{ g}$

ซึ่งในเส้นใย 1 กรัม จะมีมวลของเส้นใยรวมกับความชื้นที่หลงเหลือในเส้นใย 1.06 เพราะฉะนั้น มวลของเส้นใยที่ใช้ $= 232.75 \times 1.06 = 246.72 \text{ g}$

2.2 คำนวณหามวลของกาวที่ใช้

การผลิตแผ่นฉนวนให้มีมวล 100 g ต้องใช้กาว 5 g

ถ้าผลิตแผ่นฉนวนมวล 245 g ต้องใช้กาว $= \frac{5 \times 245}{100} = 12.25 \text{ g}$

ดังนั้นก่อนอัดต้องใช้อัดวัสดุที่ผสมกาวแล้วต่อแผ่น $= 246.72 + 12.25 = 258.97 \text{ g}$

3. ในขั้นตอนการผสมกาว ขณะที่เครื่องปั่นกวนเส้นใย อาจมีเส้นใยและกาวหลงเหลืออยู่เมื่อผ่านกระบวนการอัดรีด แผ่นทดสอบที่ผลิตได้จะมีความหนาแน่นต่ำกว่าที่ต้องการ จึงต้องเตรียมเส้นใยและกาวให้มีปริมาณมากกว่าที่คำนวณไว้ประมาณ 10 % มีวิธีคำนวณ ดังนี้

คำนวณหามวลของเส้นใยและกาวที่ต้องใช้จริงขณะปั่นกวนเส้นใย

ปริมาณเส้นใยที่ต้องใช้จริงในขณะปั่นกวนเส้นใย $= \frac{110 \times 246.72}{100} = 271.39 \text{ g}$

ปริมาณกาวที่ต้องใช้จริง $= \frac{110 \times 12.25}{100} = 13.48 \text{ g}$

การอัดแผ่นฉนวนแต่ละครั้ง ต้องผสมกาวเข้ากับเส้นใยของต้นกกข้างตามปริมาณที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 แสดงค่าความหนาแน่นของแผ่น น้ำหนักเส้นใย และกาว ก่อนอัดขึ้นรูป และน้ำหนักของเส้นใยกกข้างที่ผสมกาวแล้วต่อการผลิตแผ่นฉนวนกันความร้อน 1 แผ่น

ความหนาแน่นของแผ่น (kg/m ³)	น้ำหนักเส้นใย (g)	น้ำหนักกาว (g)	น้ำหนักของเส้นใยที่ผสมกาว (g)
200	246.72	12.25	258.97
300	370.08	18.38	388.46
400	493.43	24.50	517.93

3. การเตรียมแผ่นก่อนอัดร้อน

อุปกรณ์สำคัญในการเตรียมแผ่นก่อนอัดร้อน คือ กล่องขึ้นรูปแผ่น ทำจากแผ่นไม้อัด มีลักษณะเป็นกล่องสี่เหลี่ยมจัตุรัสทาสองข้าง และมีแผ่นฝาสำหรับกดอัดขึ้นงานให้แน่นและเรียงดังภาพที่ 18 (ก) ใช้เป็นแบบเพื่อให้ได้แผ่นเตรียมอัดที่มีขนาดที่ต้องการตามรูปแบบของกล่องขึ้นตอนแรกนำแผ่นรองอัดสแตนเลส ในภาพที่ 18 (ข) มาวางไว้บนโต๊ะ และนำแผ่นเทปลอนผิวมัน ในภาพที่ 18 (ค) มาปิดทับไว้ แผ่นเทปลอนนี้จะช่วยให้แผ่นเตรียมอัดไม่ติดกับแผ่นรองอัดสแตนเลสในขณะอัดร้อน



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 18 (ก) กล่องขึ้นรูป (ข) แผ่นรองอัดสแตนเลส (ค) แผ่นเทปลอนผิวมัน

จากนั้นนำกล่องขึ้นรูปที่เตรียมไว้มาวางทับบนแผ่นรองอัดสแตนเลส นำเส้นใยกช้างที่ผสมกาวแล้ว โรยลงไปในกลุ่มขึ้นรูป เกลี่ยให้สม่ำเสมอ และมีความสูงระดับเดียวกันทั้งแผ่น ปิดทับด้วยแผ่นเทปลอนอีกครั้งหนึ่ง แล้วกดแผ่นฝาขึ้นรูปลงเพื่อให้มวลของเส้นใยกช้างยุบตัว และอัดแน่นกัน มีความคงสภาพดีขึ้นก่อนการอัด ดังภาพที่ 19



ภาพที่ 19 (ก) โรยเส้นใยลงในกล่อง (ข) เกลี่ยเส้นใยให้สม่ำเสมอ (ค) ใช้แผ่นฝาปิดทับเพื่อขึ้นรูป

จากภาพที่ 20 จะเห็นว่าเมื่อนำกล่องขึ้นรูปออก เส้นใยกช้างยังคงรูปร่างตามลักษณะของกล่องขึ้นรูป นำแผ่นรองอัดสแตนเลสมาปิดทับอีกครั้ง จะได้เป็นแผ่นเตรียมอัด จากนั้นใช้แท่งเหล็กหนา 10 mm จำนวน 1 คู่วางขนานข้างแผ่น เพื่อใช้เป็นตัวกำหนดความหนาของแผ่นจนวนกันความร้อน



ภาพที่ 20 (ก) นำกล่องขึ้นรูปออก (ข) ปิดทับด้วยแผ่นเทปลอน (ค) แผ่นเตรียมอัด

4. การอัดแผ่นฉนวนกันความร้อนด้วยวิธีอัดร้อน

นำแผ่นเตรียมอัดวางบนแท่นรับของเครื่องอัดร้อน ดังภาพที่ 21 (ก) โดยตั้งค่าอุณหภูมิในการอัด ระยะเวลาในการอัด และแรงดันในการอัด ของเครื่องอัดร้อน ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 อุณหภูมิ ระยะเวลาและแรงดันที่ใช้ในการอัดแผ่นฉนวนกันความร้อน

ความหนาแน่นของแผ่น (kg/m ³)	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (min)	แรงดัน (kg/cm ²)
200	140	3	40
300	140	3	40
400	140	3	50

การอัดร้อนช่วยให้เส้นใยกักซ้างที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยกลองขึ้นรูปแข็งตัวขึ้น ความร้อนและแรงดันจะทำให้เกิดการหลอมละลายแทรกซึมเข้าไปในเนื้อเยื่อของเส้นใย และเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยขึ้น ขณะเดียวกันแผ่นฉนวนก็จะเริ่มแข็งตัว ในการอัดร้อนต้องควบคุมระยะเวลาที่แท่นอัดจะบีบอัดแผ่นจนถึงความหนาที่กำหนด ดังภาพที่ 21 (ข)



(ก)



(ข)

ภาพที่ 21 (ก) วางแผ่นเตรียมอัดบนแท่นรับ (ข) แท่นอัดบีบอัดแผ่นจนถึงความหนาที่กำหนด

5. การปรับสภาพแผ่นทดสอบ

นำแผ่นทดสอบที่อัดรีดแล้ว มาผึ่งในตะแกรงเพื่อให้เย็นตัวลง ดังภาพที่ 22 (ก) แล้วนำไปเก็บไว้ในห้องปรับสภาพที่อุณหภูมิ 20 ± 2 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 65 ± 5 % เป็นเวลา 1 อาทิตย์ ดังภาพที่ 22 (ข) ก่อนนำไปตัดเป็นชิ้นทดสอบขนาดต่างๆ



(ก)



(ข)

ภาพที่ 22 (ก) วางแผ่นทดสอบที่ผ่านการอัดรีดแล้วบนตะแกรง (ข) ห้องปรับสภาพแผ่นทดสอบ

การปรับสภาพแผ่นทดสอบนี้จะช่วยให้แผ่นทดสอบเกิดการดูดซึมน้ำได้น้อยลง ช่วยลดความเครียดภายในแผ่นที่อาจทำให้แผ่นบิดงอได้ ข้อเสียคือ อาจทำให้แรงยึดของสารยึดติดแตกแยกลงได้ หากมีความชื้นและใช้อุณหภูมิสูงเกินไปจะทำให้สมบัติความแข็งแรงของแผ่นลดน้อยลง (Teeboonma, 2001)

6. การตัดขนาดของแผ่นทดสอบให้ได้มาตรฐานตาม มอก. 876-2547

กำหนดขนาดและจำนวนของชิ้นทดสอบที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกายภาพ สมบัติเชิงกล และสมบัติเชิงความร้อน ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ขนาดและจำนวนของชิ้นทดสอบที่ใช้ตามมาตรฐาน มอก. 876-2547

ค่าที่ใช้ทดสอบ	ขนาดของชิ้นทดสอบ กว้าง × ยาว (mm)	จำนวน (ชิ้น)
ความชื้น	50 × 50	45
ความต้านแรงคัดและ โมดูลัสยืดหยุ่น	50 × 200	27
ความต้านแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า	50 × 50	45
ค่าการนำความร้อน	300 × 300	6

นำแผ่นทดสอบที่ปรับสภาพแล้วไปตัดขอบทั้งด้วยเครื่องเลื่อย ดังภาพที่ 23 (ก) และ (ข)



(ก)

(ข)

ภาพที่ 23 (ก) แผ่นทดสอบที่ถูกตัดขอบแล้ว (ข) การตัดแผ่นทดสอบด้วยเครื่องเลื่อย

จะได้ชิ้นทดสอบทั้งหมด ดังภาพที่ 24 เพื่อนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ ต่อไป



ภาพที่ 24 ชิ้นทดสอบทั้งหมดที่ถูกตัดให้มีขนาดต่างๆ กัน

7. การทดสอบสมบัติเชิงกายภาพ

อ้างอิงตามมาตรฐาน มอก. 876-2547 ลักษณะของซันทอดอบต้องมีความหนาและเรียบสม่ำเสมอ โดยทดสอบหาค่าปริมาณความชื้น (moisture content) เทียบกับน้ำหนักอบแห้งของซันทอดอบ ซึ่งค่าความชื้นเฉลี่ยต้องอยู่ในช่วง 4-13 % เมื่อเตรียมซันทอดอบให้ได้ขนาดตามที่ต้องการแล้ว จะต้องชั่งซันทอดอบด้วยเครื่องชั่งดิจิทัลให้ได้มวลที่แน่นอน บันทึกเป็นมวลของซันทอดอบก่อนอบ แล้วนำซันทอดอบเหล่านี้ไปทำการอบแห้งเสียก่อน เพื่อไล่ความชื้นในตู้อบไฟฟ้า (Memmert Universal Oven) ที่อุณหภูมิ 103 ± 2 °C จนได้มวลคงที่ ดังภาพที่ 25 (ก) ใช้เวลาในการอบ 24 hr ไม่ใช่อุณหภูมิในการอบสูงเกินไป เพราะจะทำให้ซันทอดอบกรอบหรืออาจไหม้ได้ จากนั้นนำซันทอดอบออกจากเตาอบมาใส่ในเดซิเคเตอร์ (desiccator) เพื่อให้ซันทอดอบเย็นตัวลง และไม่ดูดความชื้นเข้าไป ดังภาพที่ 25 (ข)



(ก)



(ข)

ภาพที่ 25 (ก) อบซันทอดอบในตู้อบ (ข) เก็บซันทอดอบที่อบแล้วในเดซิเคเตอร์

ชั่งน้ำหนักอีกครั้ง บันทึกค่าที่ได้เป็นน้ำหนักหลังอบแห้งของซันทอดอบ และนำค่าที่ได้ทั้งหมดมาคำนวณหาปริมาณความชื้น ตามสมการที่ (35)

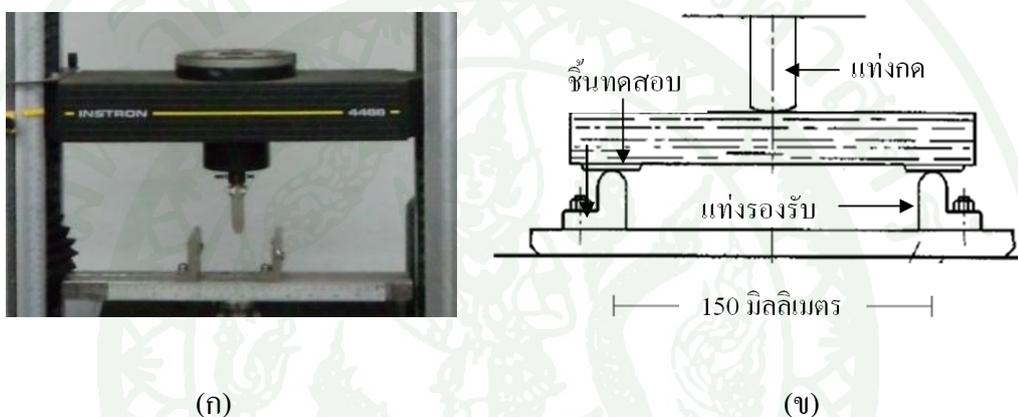
$$\text{ปริมาณความชื้น (\%)} = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100 \quad (35)$$

โดย m_1 คือ มวลของซันทอดอบก่อนอบ มีหน่วยเป็น g

m_2 คือ มวลของซันทอดอบหลังอบแห้ง มีหน่วยเป็น g

8. การทดสอบสมบัติเชิงกล

8.1 การทดสอบความต้านแรงดัด (modulus of rupture, MOR) และ โมดูลัสยืดหยุ่น (modulus of elasticity, MOE) เป็นการทดสอบความสามารถในการต้านทานแรง หรือความแข็งแรงของแผ่นฉนวนกันความร้อนที่ผลิตได้ ทดสอบด้วยเครื่องวัดอเนกประสงค์ (universal testing machine, UTM) รุ่น Instron 4466 ดังภาพที่ 26 (ก) โดยวัดความหนาและความกว้างของชิ้นทดสอบ และวางชิ้นทดสอบลงบนแท่งรองรับ ให้ระยะห่างระหว่างแท่งรองรับเป็น 150 mm ดังภาพที่ 26 (ข)



ภาพที่ 26 (ก) เครื่องวัดอเนกประสงค์ (ข) ตำแหน่งการวางชิ้นทดสอบบนแท่งรองรับ

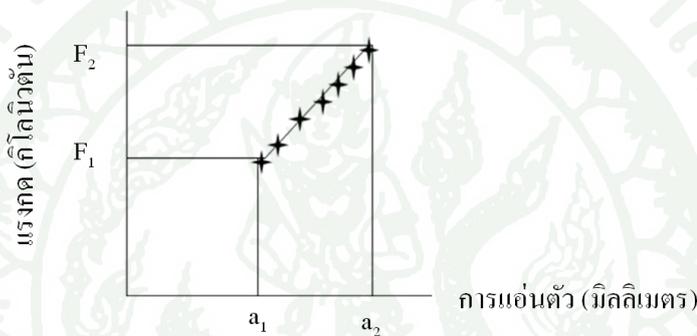


(ก)

(ข)

ภาพที่ 27 (ก) ก่อนให้แรงกระทำกับชิ้นทดสอบ (ข) หลังให้แรงกระทำกับชิ้นทดสอบ

จากภาพที่ 27 (ก) ให้แรงกดลงบนจุดกึ่งกลางของชิ้นทดสอบ โดยมีอัตราการเพิ่มแรงกดอย่างสม่ำเสมอ จนกระทั่งชิ้นทดสอบหัก ดังภาพที่ 27 (ข) เวลาที่ใช้ตั้งแต่เริ่มกดจนกระทั่งชิ้นทดสอบหักต้องไม่น้อยกว่า 30 s แต่ไม่เกิน 90 s ความเร็วในการกดประมาณ 10 mm/min เครื่องกดสามารถวัดแรงกดได้ละเอียดถึง 5 N หรือร้อยละ 5 ของแรงกดสูงสุดที่ชิ้นทดสอบรับได้ แท่งกดต้องมีปลายส่วนที่ใช้กดเป็นรูปครึ่งวงกลม มีรัศมีประมาณ 10 mm และมีความยาวของแท่งกดไม่น้อยกว่าความกว้างของชิ้นทดสอบ แท่งรองรับต้องมีลักษณะหน้าตัดเป็นรูปวงกลมหรือรูปครึ่งวงกลม มีรัศมีประมาณ 10 mm ความยาวไม่น้อยกว่าความกว้างของชิ้นทดสอบ ได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับการแอ่นตัว ดังภาพที่ 28



ภาพที่ 28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับการแอ่นตัว

จากนั้นนำค่าที่ได้ทั้งหมดมาคำนวณหาความต้านแรงดัดและโมดูลัสยืดหยุ่น ดังสมการที่ (36) และ (37)

$$MOR = \frac{3F_{\max} l_1}{2bt^2} \quad (36)$$

โดย MOR คือ ความต้านแรงดัด มีหน่วยเป็น เมกะพาสคัล (MPa)

F_{\max} คือ แรงกดสูงสุดที่ชิ้นทดสอบรับได้ มีหน่วยเป็น N

l_1 คือ ระยะห่างของแท่งรองรับ มีหน่วยเป็น mm

b คือ ความกว้างที่จุดกึ่งกลางด้านยาวของชิ้นทดสอบ มีหน่วยเป็น mm

t คือ ความหนาที่จุดกึ่งกลางของชิ้นทดสอบ มีหน่วยเป็น mm

$$MOE = \frac{l_1^3(F_2 - F_1)}{4bt^3(a_2 - a_1)} \quad (37)$$

โดย MOE คือ โมดูลัสยืดหยุ่น มีหน่วยเป็น MPa

l_1 คือ ระยะห่างของแท่งรองรับ มีหน่วยเป็น mm

$F_2 - F_1$ คือ แรงกดที่เพิ่มขึ้นในช่วงที่กราฟเป็นเส้นตรงตามภาพที่ 28
มีหน่วยเป็น N

b คือ ความกว้างที่จุดกึ่งกลางด้านยาวของชิ้นทดสอบ
มีหน่วยเป็น mm

t คือ ความหนาที่จุดกึ่งกลางของชิ้นทดสอบ มีหน่วยเป็น mm

$a_2 - a_1$ คือ ระยะแอนตัวที่เพิ่มขึ้นในช่วงที่กราฟเป็นเส้นตรงตามภาพที่ 28
มีหน่วยเป็น mm

8.2 การทดสอบความต้านแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า (tensile strength perpendicular to surface) ใช้เครื่องดึง ของ Wolpert ดังภาพที่ 29 ประกอบด้วย เกจวัดแรง ใช้วัดค่าแรงดึงสูงสุดที่ทำให้ชิ้นทดสอบแยกออกจากกัน และแท่งยึด ใช้สำหรับยึดติดกับชิ้นทดสอบด้วยกาว



ภาพที่ 29 ส่วนประกอบของเครื่องทดสอบแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า

เริ่มต้นทดสอบโดยวางแท่งเหล็กสำหรับทดสอบความต้านแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้าบนแท่นรับของเครื่องอัดรีด ดังภาพที่ 30 (ก) จากนั้นใส่กาวหลอมเหลวร้อน ตามภาพที่ 30 (ข) ลงไปบนแท่งเหล็ก ปรับอุณหภูมิเครื่องอัดรีดที่ 180 °C เพื่อให้กาวละลาย



(ก)



(ข)

ภาพที่ 30 (ก) วางแท่งเหล็กบนแท่นรับของเครื่องอัดรีด (ข) กาวหลอมเหลวร้อน

จากภาพที่ 31 (ก) เมื่อกาวละลายให้นำชิ้นทดสอบวางทับลงไป จากนั้นนำมาแช่ในน้ำ เพื่อให้กาวเย็นตัว ดังภาพที่ 31 (ข) ทิ้งไว้สักครู่ ใช้แท่งเหล็กอีกชุดหนึ่งมาทำซ้ำอีกครั้งให้เหมือนแท่งเหล็กชุดแรก เพื่อใช้ประกบปิดอีกด้านหนึ่งของชิ้นทดสอบ ดังภาพที่ 31 (ค)



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 31 (ก) กาวเริ่มละลาย (ข) แช่ชิ้นทดสอบในน้ำ (ค) ชิ้นทดสอบที่ถูกประกบด้วยแท่งเหล็ก 2 แท่ง

นำชิ้นทดสอบที่เตรียมได้ไปเข้าเครื่องดึง ดึงให้ชิ้นทดสอบแยกออกจากกัน ให้แรงดึงกับชิ้นทดสอบเพื่อแยกชิ้นทดสอบออกในเวลาไม่น้อยกว่า 30 s แต่ไม่มากกว่า 90 s ความเร็วในการดึง

ประมาณ 2 mm/min อัตราการเพิ่มแรงดึงต้องเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ แผ่นดิ่งทำด้วยโลหะ ขนาดไม่น้อยกว่า 50×50 mm ความหนาตามความเหมาะสม ดังภาพที่ 32



(ก)



(ข)

ภาพที่ 32 (ก) ให้แรงดึงกับชิ้นทดสอบ (ข) ชิ้นทดสอบแยกออกจากกัน

เมื่อทดสอบความต้านแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้าแล้ว ให้นำค่าที่ได้ทั้งหมดมาคำนวณหาความต้านแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า ดังสมการที่ (38)

$$\text{Tensile strength perpendicular to surface} = \frac{F}{W \times L} \quad (38)$$

โดย F คือ แรงดึงสูงสุด มีหน่วยเป็น N

W คือ ความกว้างของชิ้นทดสอบ มีหน่วยเป็น mm

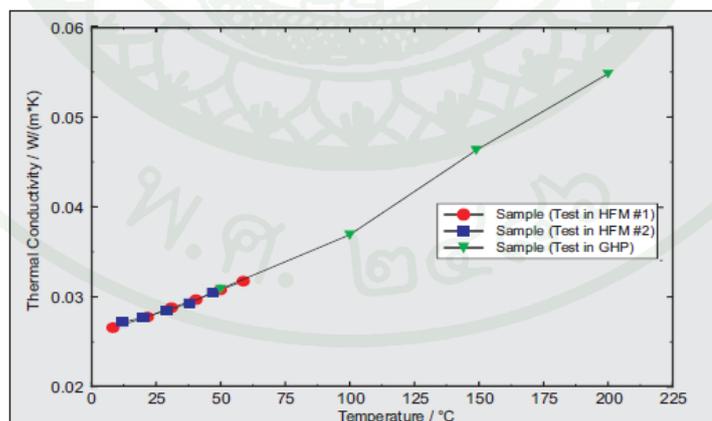
L คือ ความยาวของชิ้นทดสอบ มีหน่วยเป็น mm

ในการตรวจสอบมาตรฐานเชิงกลของแผ่นฉนวนกันความร้อน อ้างอิงตามมาตรฐานของแผ่นใยฉนวน (Hoadley, 2005)

9. การทดสอบสมบัติเชิงความร้อน

เป็นการทดสอบที่สำคัญที่สุดของการผลิตแผ่นฉนวนกันความร้อน ซึ่งมาตรฐานการทดสอบหาค่าการนำความร้อนของฉนวนกันความร้อนสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธีหลักๆ คือ ใช้เครื่องวัดค่าการนำความร้อนแบบคุมแผ่นให้ความร้อน (guarded hot plate; GHP) และใช้เครื่องวัดค่าการนำความร้อนแบบวัดการถ่ายเทของความร้อน (heat flow meter; HFM) หลายปีที่ผ่านมาวิธีการวัดค่าการนำความร้อนนิยมใช้การวัดแบบคุมแผ่นให้ความร้อน ซึ่งเป็นการวัดตามมาตรฐาน ASTM C 177 (American Society for Testing and Materials, 2010) และ ISO 8302 ข้อดีของการวัดแบบนี้ คือ มีช่วงอุณหภูมิของการวัดกว้าง โดยอยู่ในช่วง 160-700 °C และมีความแม่นยำสูง แต่ข้อเสียคือ ใช้เวลาในการทดสอบต่อหนึ่งชิ้นตัวอย่างนาน ดังนั้นปัจจุบันเทคนิคการวัดค่าการถ่ายเทของความร้อนจึงได้เข้ามามีบทบาทมากขึ้น (กรองทิพย์, 2555)

ผู้วิจัยได้เลือกใช้เทคนิคการวัดค่าการถ่ายเทความร้อน ซึ่งให้ความถูกต้องและแม่นยำ และสามารถยืนยันผลได้จากการเปรียบเทียบค่าการนำความร้อนของฉนวนกันความร้อนแบบโฟมสีดำชนิดยืดหยุ่น (black elastomer foam) โดยวัดจากเครื่องมือที่แตกต่างกัน 3 เครื่อง คือ เครื่องวัดค่าการนำความร้อนแบบวัดการถ่ายเทของความร้อน 2 เครื่อง (HFM 1 และ HFM 2) และเครื่องวัดค่าการนำความร้อนแบบคุมแผ่นให้ความร้อน ดังภาพที่ 33



ภาพที่ 33 กราฟเปรียบเทียบผลการทดสอบค่าการนำความร้อนสำหรับตัวอย่างที่วัดด้วยเครื่องมือ 3 ชนิด คือ HFM 1 HFM 2 และ GHP

ที่มา: กรองทิพย์ (2555)

พิจารณาภาพที่ 33 จะเห็นว่าค่าการนำความร้อนที่ได้จากทั้ง 3 เครื่อง มีความใกล้เคียง สอดคล้องกัน แสดงให้เห็นว่า เครื่องวัดค่าการนำความร้อนแบบวัดการถ่ายเทของความร้อน มีความถูกต้อง แม่นยำเทียบเท่ากับเครื่องวัดค่าการนำความร้อนแบบคุมแผ่นให้ความร้อน

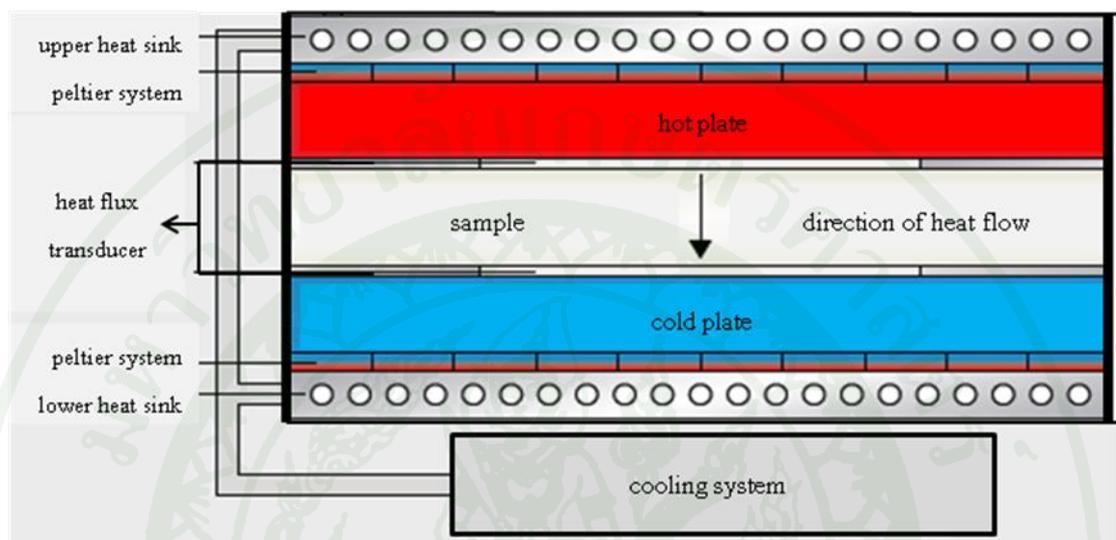
เครื่องวัดค่าการนำความร้อนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นเครื่องวัดค่าการนำความร้อนแบบวัดการ ถ่ายเทของความร้อน ของ NETZSCH รุ่น 436 ดังภาพที่ 34 วัดค่าการนำความร้อนอ้างอิงตาม มาตรฐาน ASTM C 518-10 Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of The Heat Flow Meter Apparatus โดยภาพที่ 34 แสดงการใส่แผ่นทดสอบ เข้าไปในเครื่องวัดค่าการนำความร้อน



ภาพที่ 34 แสดงเครื่องวัดค่าการนำความร้อนแบบวัดการถ่ายเทของความร้อน ของ NETZSCH รุ่น 436 ขณะใส่แผ่นทดสอบเพื่อหาค่าการนำความร้อน

เครื่องมือนี้ใช้หลักการความร้อนถ่ายเทจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง ไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ดังภาพที่ 35 แผ่นทดสอบจะถูกวางอยู่ระหว่างแผ่นความร้อน (hot plate) และแผ่นความเย็น (cold plate) มีตัวระบายความร้อน (heat sink) ซึ่งได้รับความเย็นจากระบบให้ความเย็น (cooling system) และทำงานในระบบเพลเทีย (peltier system) ระบบเพลเทียนี้เป็นระบบระบายความร้อน โดยจะมีด้านหนึ่งที่ยื่นและอีกด้านหนึ่งที่ร้อน มีประสิทธิภาพในการทำให้อุณหภูมิของแผ่นทดสอบลดลงและเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ระบบจะถูกตั้งค่าอุณหภูมิที่แตกต่างกันระหว่างแผ่นอุณหภูมิทั้งสอง โดยมีฉนวนล้อมรอบตลอดแนวความหนาของแผ่นอุณหภูมิและแผ่นทดสอบ เพื่อให้ระบบเกิดสภาวะคงที่ (steady-state condition) เครื่องจะวัดแรงดันไฟฟ้าที่ออกมาจากฟลักซ์ความร้อนทรานสดิวเซอร์ (heat flux transducer) ที่ติดอยู่กับผิวของแผ่นอุณหภูมิทั้งสอง ซึ่งฟลักซ์ความร้อน

ทรานสดิวเซอร์นี้เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับแปลงพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยการวัดการไหลของความร้อนและอุณหภูมิที่ต่างกันระหว่างแผ่นทั้งสอง เมื่อระบบอยู่ในสภาวะคงตัว เครื่องจะวัดค่าการนำความร้อนของแผ่นทดสอบนั้น



ภาพที่ 35 หลักการทำงานของเครื่องมือวัดแบบการวัดการถ่ายเทของความร้อน

ที่มา: กรองทิพย์ (2555)

ค่าการนำความร้อนของแผ่นทดสอบหาได้จาก สมการที่ (39)

$$k = \dot{Q} \frac{\Delta x}{\Delta T} \quad (39)$$

โดย \dot{Q} คือ ความร้อนที่ไหลผ่านต่อพื้นที่ผิวตัวอย่าง มีหน่วยเป็น W/m^2

Δx คือ ความหนาของแผ่นทดสอบ มีหน่วยเป็น m

ΔT คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างแผ่นทดสอบ มีหน่วยเป็น K

ผลและวิจารณ์

จากการทดลองผลิตแผ่นฉนวนกันความร้อน และทดสอบสมบัติต่างๆ ตามมาตรฐานแล้ว ผลที่ได้ในขั้นตอนการเตรียมเส้นใยจากต้นกกช้าง คือ เมื่อนำใบของต้นกกช้างไปตากจนแห้งสนิท ดังภาพที่ 36 (ก) แล้วนำไปบดย่อยด้วยเครื่องย่อยชนิดหยาบให้มีขนาดเล็กลง เส้นใยกกช้างที่ผ่านการบดย่อยจะมีความยาวประมาณ 2-3 cm เหมาะกับการนำไปขึ้นรูป ดังภาพที่ 36 (ข)



(ก)



(ข)

ภาพที่ 36 (ก) ใบกกช้างตากแห้ง (ข) ใบกกช้างที่ผ่านการบดย่อยแล้ว



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 37 แผ่นทดสอบ (ก) ความหนาแน่น 200 kg/m^3 (ข) ความหนาแน่น 300 kg/m^3 (ค) ความหนาแน่น 400 kg/m^3

พิจารณาภาพที่ 37 แสดงลักษณะพื้นผิวและความเป็นรูพรุนของแผ่นทดสอบที่มีความหนาแน่นแตกต่างกัน พบว่าลักษณะของแผ่นฉนวนกันความร้อนจากเส้นใยกกช้างที่อัดได้ มีความ

เป็นรูปทรงมากน้อยตามค่าความหนาแน่น โดยแผ่นทดสอบที่มีความหนาแน่นต่ำ ปริมาณเส้นใย และกาวน้อย จะมีความเป็นรูปทรงมากกว่า และมีพื้นผิวหยาบกว่าแผ่นทดสอบที่มีความหนาแน่นสูงขึ้น

หลังจากตัดแผ่นทดสอบให้มีขนาดและจำนวนตามมาตรฐาน มอก. 876-2547 แล้ว ผู้วิจัย ได้ศึกษาสมบัติเชิงกายภาพ โดยพิจารณาผลของความหนาแน่นของแผ่นต่อปริมาณความชื้นในชั้นทดสอบทั้งหมด 45 ชั้น ผลการทดสอบ แสดงดังตารางที่ 7-9

ตารางที่ 7 ปริมาณความชื้นของชั้นทดสอบที่มีความหนาแน่น 200 kg/m^3

ชั้นทดสอบ	ขนาด (mm)			น้ำหนัก (g)		ความชื้น (%)
	กว้าง	หนา	ยาว	ก่อนอบ	หลังอบ	
1	50.50	9.45	50.10	5.21	4.72	10.38
2	50.40	9.55	50.15	4.98	4.48	11.16
3	50.40	9.65	50.00	5.13	4.62	11.04
4	50.45	9.65	50.20	5.65	5.08	11.22
5	50.40	9.45	50.00	4.64	4.16	11.54
6	50.45	9.60	50.15	4.75	4.26	11.50
7	50.40	9.15	50.35	4.91	4.38	12.10
8	50.40	9.30	50.10	5.41	4.84	11.78
9	50.10	9.20	49.90	4.24	3.81	11.29
10	50.00	9.30	50.40	5.12	4.59	11.55
11	49.65	9.80	50.40	5.17	4.68	10.47
12	50.45	9.60	50.20	5.29	4.77	10.90
13	50.30	9.80	50.10	5.38	4.82	11.62
14	50.35	9.65	50.20	5.08	4.57	11.16
15	50.35	9.55	50.15	4.16	3.76	10.64

จากตารางที่ 7 ชั้นทดสอบที่มีความหนาแน่น 200 kg/m^3 มีปริมาณความชื้นเฉลี่ย 11.22 %

ตารางที่ 8 ปริมาณความชื้นของชั้นทดสอบที่มีความหนาแน่น 300 kg/m^3

ชั้นทดสอบ	ขนาด (mm)			น้ำหนัก (g)		ความชื้น (%)
	กว้าง	หนา	ยาว	ก่อนอบ	หลังอบ	
1	50.50	9.60	50.55	7.49	6.68	12.13
2	50.50	9.70	50.35	7.29	6.53	11.64
3	50.25	9.60	50.65	6.78	6.04	12.25
4	50.25	9.55	50.60	7.62	6.77	12.56
5	50.30	9.50	50.60	8.06	7.17	12.41
6	50.55	9.55	50.25	6.92	6.19	11.79
7	50.55	9.65	50.45	7.27	6.48	12.19
8	50.50	9.75	50.45	7.80	6.96	12.07
9	50.50	9.80	50.35	7.58	6.75	12.30
10	50.55	9.80	50.35	7.24	6.46	12.07
11	50.45	9.60	50.10	6.90	6.16	12.01
12	50.45	9.65	50.20	7.45	6.69	11.36
13	50.50	9.55	50.45	7.38	6.61	11.65
14	50.15	9.70	50.55	7.14	6.42	11.21
15	50.45	9.60	50.60	7.80	7.00	11.43

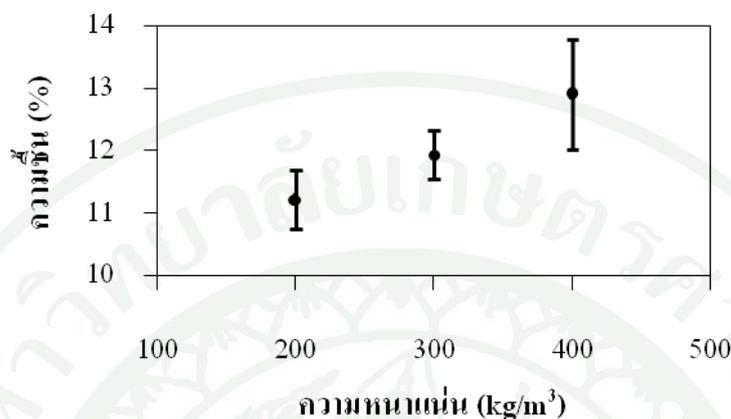
จากตารางที่ 8 ชั้นทดสอบที่มีความหนาแน่น 300 kg/m^3 มีปริมาณความชื้นเฉลี่ย 11.94 %

ตารางที่ 9 ปริมาณความชื้นของหินทดสอบที่มีความหนาแน่น 400 kg/m^3

หินทดสอบ	ขนาด (mm)			น้ำหนัก (g)		ความชื้น (%)
	กว้าง	หนา	ยาว	ก่อนอบ	หลังอบ	
1	50.45	9.45	50.50	9.56	8.57	11.55
2	50.50	9.55	50.55	9.29	8.30	11.93
3	50.50	9.55	50.40	9.55	8.52	12.09
4	50.45	9.65	50.55	8.98	8.02	11.97
5	50.50	9.65	50.25	9.05	8.09	11.87
6	50.55	9.65	50.45	9.14	8.13	12.42
7	50.55	9.65	50.10	9.20	8.15	12.88
8	50.45	9.60	50.55	9.10	8.05	13.04
9	50.40	9.65	50.60	8.84	7.82	13.04
10	50.50	9.65	50.20	8.53	7.55	12.98
11	50.60	9.70	50.40	8.99	7.91	13.65
12	50.55	9.60	50.30	8.74	7.67	13.95
13	50.50	9.85	50.10	8.64	7.59	13.83
14	50.55	9.60	50.45	8.66	7.58	14.25
15	50.50	9.70	50.15	9.54	8.35	14.25

จากตารางที่ 9 หินทดสอบที่มีความหนาแน่น 400 kg/m^3 มีปริมาณความชื้นเฉลี่ย 12.91 %

จากนั้นนำค่าปริมาณความชื้นเฉลี่ยที่ได้มาสร้างเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของแผ่นต่อปริมาณความชื้น



ภาพที่ 38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของแผ่นต่อปริมาณความชื้น

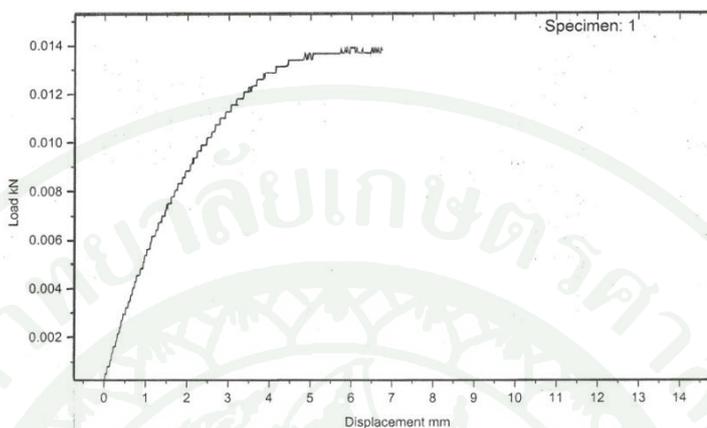
จากภาพที่ 38 แสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นแผ่นมีผลต่อสมบัติของแผ่น โดยแผ่นที่มีความหนาแน่นสูง จะมีปริมาณความชื้นสูง เนื่องจากแผ่นที่มีความหนาแน่นสูง จะมีปริมาณเส้นใยกกข้างสูง ทำให้มีสมบัติในการสะสมความชื้นไว้ได้มากกว่าแผ่นที่มีความหนาแน่นต่ำ ดังนั้นเมื่อนำเส้นใยกกข้างผสมกับกาว ส่งผลให้แผ่นมีปริมาณความชื้นที่สูงขึ้นอีก โดยทดสอบตามมาตรฐาน มอก. 876-2547 ความชื้นเฉลี่ยต้องอยู่ในช่วง 4 % ถึง 13 %

ผลการทดสอบได้ว่า แผ่นจนวนกันความร้อนที่มีความหนาแน่น 200, 300 และ 400 kg/m³ มีค่าความชื้นเฉลี่ย 11.22, 11.94 และ 12.91 % ตามลำดับ ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด

ต่อมาทดสอบสมบัติเชิงกลของแผ่น โดยทดสอบทั้งหมด 3 ค่า คือ ค่าความต้านแรงดัด ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และค่าความต้านแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า

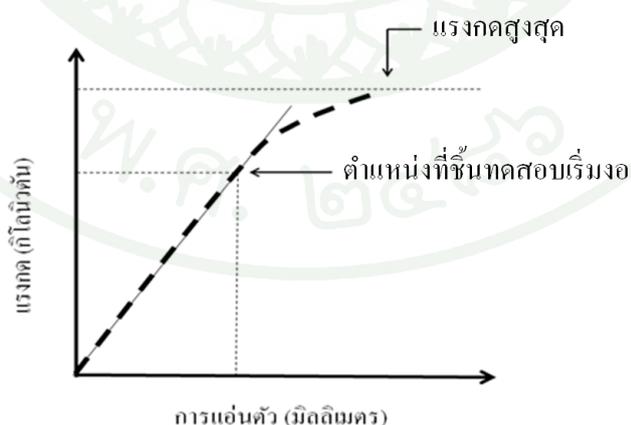
การทดสอบหาความต้านแรงดัดและโมดูลัสยืดหยุ่น โดยใช้เครื่องวัดอเนกประสงค์ เพื่อศึกษาผลของความหนาแน่นของแผ่นต่อความต้านแรงดัดและ โมดูลัสยืดหยุ่น ค่าเฉลี่ยของชิ้นทดสอบที่ได้มีหน่วยเป็น MPa จากนั้นนำไปตรวจสอบกับมาตรฐานของแผ่นใยจนวนแล้ว ค่าความ

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกด (load) กับการแอ่นตัว (displacement) ของชิ้นทดสอบที่มีความหนาแน่น 200 kg/m^3



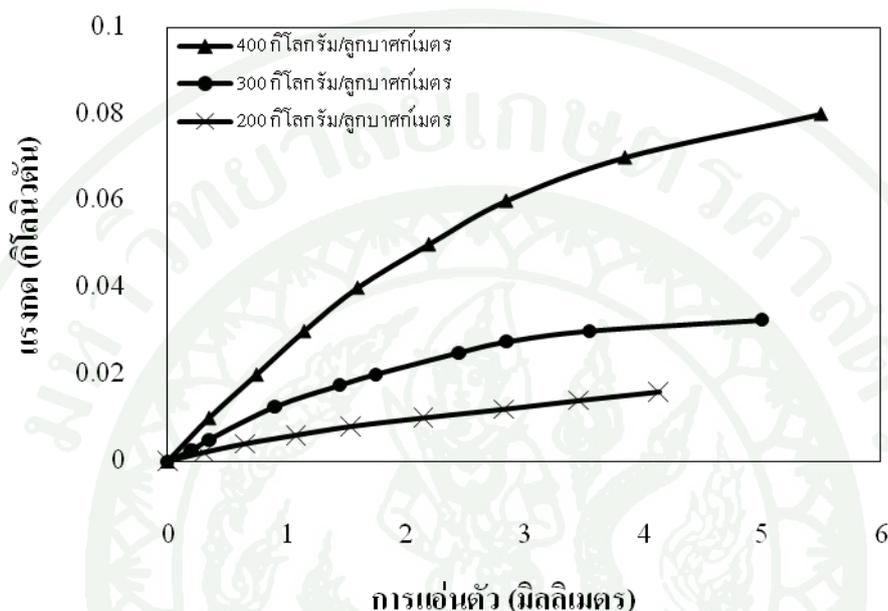
ภาพที่ 40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับการแอ่นตัวของชิ้นทดสอบที่มีความหนาแน่น 200 kg/m^3

เมื่อให้แรงกดกับชิ้นทดสอบเป็นระยะๆ ค่าการแอ่นตัวของชิ้นทดสอบจะเพิ่มขึ้น จากนั้นลากเส้นตรงให้ขนานไปกับแนวของแรงกด จุดสุดท้ายที่เส้นตรงและแนวของแรงขนานกัน คือตำแหน่งที่ชิ้นทดสอบเริ่มงอ และเมื่อให้แรงกดเรื่อยๆ จนถึงค่าๆ หนึ่งที่เป็นค่าแรงกดสูงสุดของชิ้นทดสอบนั้น จะทำให้ชิ้นทดสอบหัก อธิบายได้ ดังภาพที่ 41



ภาพที่ 41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับการแอ่นตัว

นำผลการวัดค่าความต้านแรงดัดและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของชิ้นทดสอบทั้งหมด มาสร้างเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับการแอ่นตัวของชิ้นทดสอบที่มีความหนาแน่น 200, 300 และ 400 kg/m³ ได้ดังภาพที่ 42



ภาพที่ 42 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับการแอ่นตัวของชิ้นทดสอบที่มีความหนาแน่น 200, 300 และ 400 kg/m³

จะเห็นว่าชิ้นทดสอบที่มีความหนาแน่นต่ำสุด คือ 200 kg/m³ จะมีค่าแรงกดและการแอ่นตัวน้อย ชิ้นทดสอบทนต่อแรงกดที่มากกระทำได้น้อยและเกิดการหักได้ง่าย ส่วนชิ้นทดสอบที่มีความหนาแน่นมาก จะมีความแข็งแรง สามารถทนต่อแรงกดที่มากกระทำได้นานกว่า ส่งผลให้ค่าแรงกดและค่าการแอ่นตัวของชิ้นทดสอบมีค่ามากตามไปด้วย

จากนั้นเครื่องจะบันทึกค่าความต้านแรงดัดและโมดูลัสยืดหยุ่นเฉลี่ยของชิ้นทดสอบ ในแต่ละความหนาแน่น ดังตารางที่ 10-12

ตารางที่ 10 ค่าความต้านแรงค้ำและ โมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นทดสอบที่มีความหนาแน่น 200 kg/m³

ชั้นทดสอบ	แรงกด (kN)	การแอ่นตัว (mm)	ความต้านแรงค้ำ (Mpa)	ความต้านแรงค้ำ (psi)	โมดูลัสยืดหยุ่น (Mpa)	โมดูลัสยืดหยุ่น (10 ³ psi)
t01	0.014	6.798	0.713	103.348	71.116	10.31
t02	0.017	5.459	0.796	115.406	77.593	11.24
t03	0.013	4.900	0.604	87.478	63.337	9.18
t04	0.016	5.139	0.813	117.783	89.513	12.97
t05	0.016	6.810	0.834	120.870	75.295	10.91
t06	0.017	6.440	0.916	132.739	93.213	13.51
t07	0.014	4.182	0.676	97.942	87.078	12.62
t08	0.012	4.739	0.558	80.826	68.080	9.87
t09	0.015	4.487	0.729	105.670	82.879	12.01

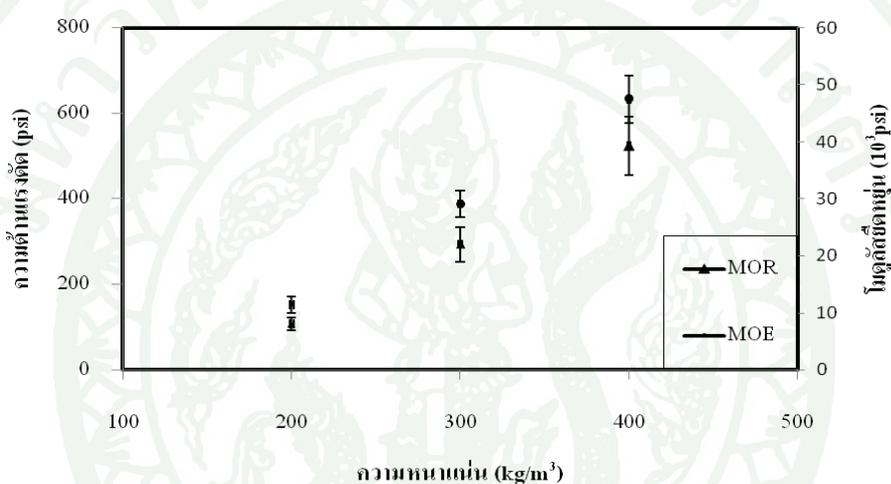
ตารางที่ 11 ค่าความต้านแรงค้ำและ โมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นทดสอบที่มีความหนาแน่น 300 kg/m³

ชั้นทดสอบ	แรงกด (kN)	การแอ่นตัว (mm)	ความต้านแรงค้ำ (Mpa)	ความต้านแรงค้ำ (psi)	โมดูลัสยืดหยุ่น (Mpa)	โมดูลัสยืดหยุ่น (10 ³ psi)
t10	0.039	5.578	1.974	286.087	348.964	29.55
t 11	0.050	7.169	2.454	355.652	263.205	28.30
t 12	0.034	4.837	1.742	252.464	336.030	30.81
t 13	0.040	6.601	2.041	295.797	323.963	26.75
t 14	0.032	5.157	1.594	231.014	315.715	25.54
t 15	0.039	4.614	1.912	277.101	370.717	30.77
t 16	0.038	5.541	1.955	283.333	327.981	28.89
t 17	0.040	7.290	2.031	294.348	354.984	27.41
t 18	0.049	6.182	2.514	364.348	370.770	33.77

ตารางที่ 12 ค่าความต้านแรงคัดและโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นทดสอบที่มีความหนาแน่น 400 kg/m³

ชั้นทดสอบ	แรงกด (kN)	การแอ่นตัว (mm)	ความต้านแรงคัด (Mpa)	ความต้านแรงคัด (psi)	โมดูลัสยืดหยุ่น (Mpa)	โมดูลัสยืดหยุ่น (10 ³ psi)
t19	0.062	4.912	3.000	434.783	323.272	46.86
t20	0.067	4.977	3.235	468.841	347.783	50.41
t21	0.069	6.931	3.266	473.333	307.011	44.49
t 22	0.082	6.908	3.987	577.826	345.463	50.07
t 23	0.095	7.401	4.613	668.551	389.921	56.51
t 24	0.074	7.247	3.577	518.406	292.671	42.42
t 25	0.079	6.491	3.738	541.739	318.233	46.12
t 26	0.068	6.412	3.225	467.391	292.077	42.33
t 27	0.080	7.131	3.904	565.797	330.601	47.91

จากตารางที่ 10-12 ชั้นทดสอบที่มีความหนาแน่น 200 kg/m^3 มีค่าความต้านแรงดัดเฉลี่ย 106.896 psi และ โมดูลัสยืดหยุ่นเฉลี่ย $11.40 \times 10^3 \text{ psi}$ ชั้นทดสอบที่มีความหนาแน่น 300 kg/m^3 มีความต้านแรงดัดเฉลี่ย 293.349 psi และ โมดูลัสยืดหยุ่นเฉลี่ย $29.09 \times 10^3 \text{ psi}$ ชั้นทดสอบที่มีความหนาแน่น 400 kg/m^3 มีความต้านแรงดัดเฉลี่ย 524.074 psi และ โมดูลัสยืดหยุ่นเฉลี่ย $47.46 \times 10^3 \text{ psi}$ นำค่าความต้านแรงดัดและ โมดูลัสยืดหยุ่นทั้งหมด มาสร้างเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของแผ่นต่อค่าความต้านแรงดัดและ โมดูลัสยืดหยุ่น และตรวจสอบโดยใช้เกณฑ์มาตรฐานของแผ่นใยฉนวน



ภาพที่ 43 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของแผ่นต่อค่าความต้านแรงดัดและค่าโมดูลัสยืดหยุ่น

จากการทดสอบความต้านแรงดัด ในภาพที่ 43 พบว่า เมื่อแผ่นมีความหนาแน่นสูงขึ้น ค่าความต้านแรงดัดจะสูงขึ้น แสดงว่าแผ่นที่มีความหนาแน่นสูงจะมีคุณสมบัติในการต้านทานต่อแรงดัดที่มากกระทำต่อแผ่นได้มากกว่า โดยมาตรฐานของแผ่นใยฉนวน กำหนดให้ความต้านแรงดัดเฉลี่ยต้องมีค่าอยู่ในช่วง $200\text{--}800 \text{ psi}$ ผลการทดสอบได้ว่า แผ่นฉนวนกันความร้อนที่มีความหนาแน่น $200, 300$ และ 400 kg/m^3 มีค่าความต้านแรงดัดเฉลี่ย $106.896, 293.349$ และ 524.074 psi ตามลำดับ ซึ่งแผ่นที่มีความหนาแน่นต่ำสุด คือ 200 kg/m^3 ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด

ในการทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่น พบว่า เมื่อแผ่นมีความหนาแน่นสูงขึ้น ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจะสูงขึ้น แสดงว่าแผ่นที่มีความหนาแน่นสูง จะมีคุณสมบัติในการต้านทานต่อการดงอได้มากกว่า โดยมาตรฐานของแผ่นใยฉนวน กำหนดให้โมดูลัสยืดหยุ่นเฉลี่ยต้องมีค่าอยู่ในช่วง $25\text{--}125 (10^3 \text{ psi})$

พบว่า แผ่นที่มีความหนาแน่น 200, 300 และ 400 kg/m³ มีค่าความต้านแรงดัดเฉลี่ย 11.40×10^3 , 29.09×10^3 และ 47.46×10^3 psi ตามลำดับ ซึ่งแผ่นที่มีความหนาแน่น 200 kg/m³ ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด

สมบัติเชิงกลอีกอย่างที่สำคัญ คือ ความต้านแรงดัดตั้งฉากกับผิวหน้า ทำให้ทราบว่าแผ่นจนวนกันความร้อนที่ผลิตได้ มีการยึดเหนี่ยวภายในของกาวและเส้นใยดีหรือไม่ โดยศึกษาผลของความหนาแน่นของแผ่นต่อความต้านแรงดัดตั้งฉากกับผิวหน้า ใช้ชิ้นทดสอบทั้งหมด 45 ชิ้น ผลการทดสอบ แสดงดังตารางที่ 13-15

ตารางที่ 13 ค่าความต้านแรงดัดตั้งฉากกับผิวหน้าของชิ้นทดสอบที่มีความหนาแน่น 200 kg/m³

ชิ้นทดสอบ	ขนาดของชิ้นทดสอบ (mm)		แรงดัดสูงสุด (N)	ความต้านแรงดัดตั้งฉากกับผิวหน้า	
	กว้าง	ยาว		(MPa)	(psi)
1	50	50	68.6	0.027	3.913
2	50	50	88.2	0.035	5.072
3	50	50	88.2	0.035	5.072
4	50	50	68.6	0.027	3.913
5	50	50	78.4	0.031	4.493
6	50	50	78.4	0.031	4.493
7	50	50	68.6	0.027	3.913
8	50	50	78.4	0.031	4.493
9	50	50	68.6	0.027	3.913
10	50	50	107.8	0.043	6.232
11	50	50	78.4	0.031	4.493
12	50	50	88.2	0.035	5.072
13	50	50	78.4	0.031	4.493
14	50	50	78.4	0.031	4.493
15	50	50	58.8	0.023	3.333

จากตารางที่ 13 ชั้นทดสอบที่มีความหนาแน่น 200 kg/m^3 จำนวน 15 ชั้น มีค่าความต้านแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้าเฉลี่ย 4.49 psi

ตารางที่ 14 ค่าความต้านแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้าของชั้นทดสอบที่มีความหนาแน่น 300 kg/m^3

ชั้นทดสอบ	ขนาดของชั้นทดสอบ		แรงดึงสูงสุด (N)	ความต้านแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า	
	(mm)			(MPa)	(psi)
	กว้าง	ยาว			
1	50	50	284.2	0.114	16.522
2	50	50	166.6	0.067	9.710
3	50	50	264.6	0.106	15.362
4	50	50	264.6	0.106	15.362
5	50	50	274.4	0.110	15.942
6	50	50	362.6	0.145	21.014
7	50	50	284.2	0.114	16.522
8	50	50	303.8	0.121	17.536
9	50	50	245	0.098	13.913
10	50	50	205.8	0.082	11.884
11	50	50	235.2	0.094	13.623
12	50	50	235.2	0.094	13.623
13	50	50	196	0.078	11.304
14	50	50	225.4	0.090	13.043
15	50	50	225.4	0.090	13.043

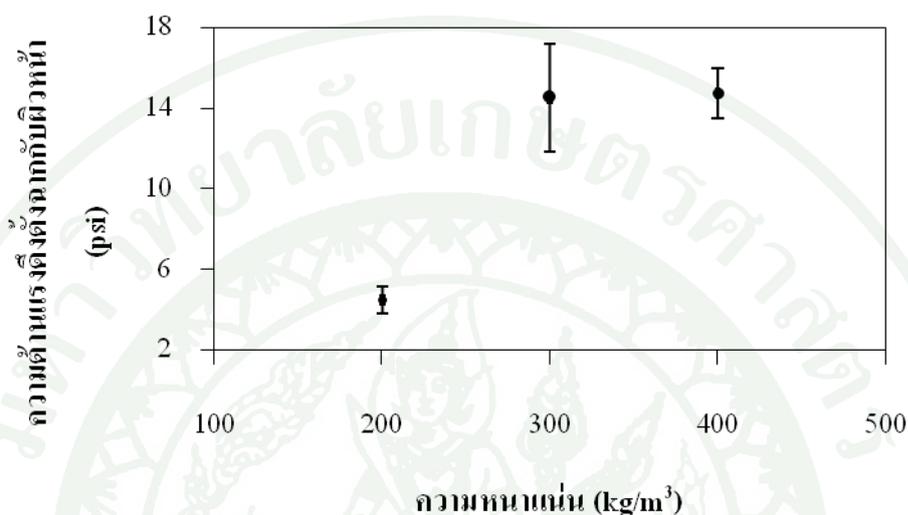
จากตารางที่ 14 ชั้นทดสอบที่มีความหนาแน่น 300 kg/m^3 จำนวน 15 ชั้น มีค่าความต้านแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้าเฉลี่ย 14.56 psi

ตารางที่ 15 ค่าความต้านแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้าของชั้นทดสอบที่มีความหนาแน่น 400 kg/m³

ชั้นทดสอบ	ขนาดของชั้นทดสอบ		แรงดึงสูงสุด (N)	ความต้านแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า	
	(mm)			(MPa)	(psi)
	กว้าง	ยาว			
1	50	50	294	0.118	17.101
2	50	50	274.4	0.110	15.942
3	50	50	274.4	0.110	15.942
4	50	50	274.4	0.110	15.942
5	50	50	264.4	0.106	15.362
6	50	50	254.8	0.102	14.783
7	50	50	264.6	0.106	15.362
8	50	50	254.8	0.102	14.783
9	50	50	245	0.098	14.203
10	50	50	215.6	0.086	12.464
11	50	50	245	0.098	14.203
12	50	50	235.2	0.094	13.623
13	50	50	215.6	0.086	12.464
14	50	50	245	0.098	14.203
15	50	50	264.6	0.106	15.362

จากตารางที่ 15 ชั้นทดสอบที่มีความหนาแน่น 400 kg/m³ จำนวน 15 ชั้น มีค่าความต้านแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้าเฉลี่ย 14.78 psi

จากนั้นนำค่าความต้านแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้าของชิ้นทดสอบในแต่ละความหนาแน่นมาหาค่าเฉลี่ย แล้วสร้างเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของแผ่นต่อความต้านแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า และตรวจสอบโดยใช้เกณฑ์มาตรฐานของแผ่นใยฉนวน



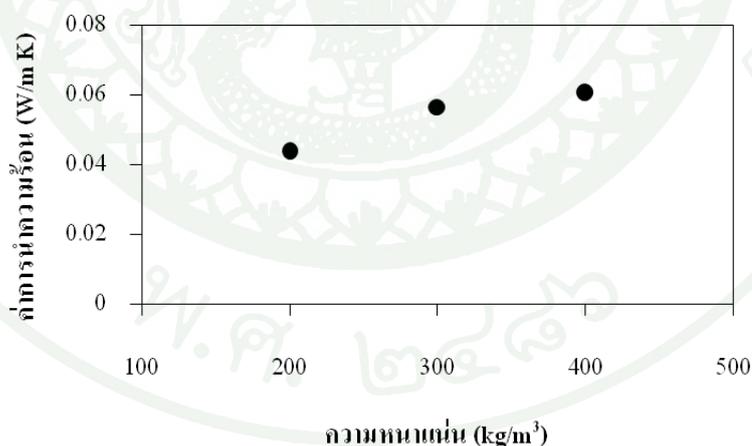
ภาพที่ 44 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของแผ่นต่อความต้านแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า

จากภาพที่ 44 แผ่นที่มีความหนาแน่นสูง จะมีความต้านแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้าสูง เนื่องจากแผ่นที่ผลิตทุกแผ่นมีความหนาเท่ากัน แผ่นที่มีความหนาแน่นสูงกว่าจะมีปริมาณเส้นใยกักซ้างสูงกว่า ช่องว่างภายในแผ่นน้อย จึงถูกอัดและเกิดการถ่ายเทของกาวจากชั้นหนึ่งไปอีกชั้นหนึ่งได้มากกว่า สามารถกระจายความเค้นได้ทั่วตลอดทั้งแผ่น ส่งผลให้เกิดการยึดติดของเส้นใยเพิ่มขึ้น ซึ่งการยึดติดระหว่างเส้นใยกับเส้นใย ทำให้ความต้านแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้าสูงขึ้น โดยค่าความต้านแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้าเฉลี่ยต้องอยู่ในช่วง 10–25 psi ผลการทดสอบได้ว่าแผ่นฉนวนกันความร้อนที่มีความหนาแน่น 200, 300 และ 400 kg/m³ มีค่าความต้านแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้าเฉลี่ย 4.49, 14.56 และ 14.78 psi ตามลำดับ ซึ่งแผ่นฉนวนกันความร้อนที่มีความหนาแน่น 200 kg/m³ ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด

จากผลของความหนาแน่นของแผ่นต่อความต้านแรงดึง โมดูลัสยืดหยุ่น และความต้านแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า จะเห็นว่าความหนาแน่นของแผ่นมีผลต่อสมบัติเชิงกลของแผ่น เมื่อเพิ่มความหนาแน่นของแผ่นให้สูงขึ้น จะสามารถปรับปรุงสมบัติความแข็งแรงทางกลให้ดีขึ้นได้ ส่งผลให้

เส้นใยที่ผสมกาวแล้วเกิดการยึดเกาะระหว่างเส้นใยได้มากยิ่งขึ้น ความแข็งแรงของแผ่นจึงมากขึ้น (Teeboonma, 2001) ยกตัวอย่างเช่น ในการศึกษาและพัฒนาต้นแบบแผ่นไม้อัดจากเปลือกทุเรียน และกาบมะพร้าวที่มีค่าการนำความร้อนต่ำ (Charoenvai, 2000) ได้ศึกษาปัจจัยของกาว คือ ยูเรีย ฟอรัลดีไฮด์ 12 % ฟีนอลฟอรัลดีไฮด์ 6 % และไอโซไซยานเนต 3 % พบว่า ชนิดของกาวไม่มีผลแตกต่างกันมากนักต่อสมบัติของแผ่นไม้อัด แต่ความหนาแน่นส่งผลอย่างมากต่อสมบัติเชิงกลของแผ่น

การทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของแผ่นเป็นสิ่งที่สำคัญ เพราะทำให้ทราบว่า แผ่นฉนวนกันความร้อนที่ผลิตขึ้นมานั้น มีสมบัติในการเป็นฉนวนความร้อนที่ดีหรือไม่ โดยทดสอบหาค่าการนำความร้อน ที่โครงการฟิสิกส์และวิศวกรรม กรมวิทยาศาสตร์บริการ โดยใช้เครื่องวัดการนำความร้อนแบบวัดการถ่ายเทของความร้อน และศึกษาผลของความหนาแน่นของแผ่นต่อค่าการนำความร้อน โดยใช้แผ่นทดสอบที่มีความหนาแน่น 200 kg/m^3 จำนวน 2 แผ่น แผ่นทดสอบที่มีความหนาแน่น 300 kg/m^3 จำนวน 2 แผ่น และแผ่นทดสอบที่มีความหนาแน่น 400 kg/m^3 จำนวน 2 แผ่น แล้วนำค่าการนำความร้อนเฉลี่ยของแผ่นทดสอบแต่ละความหนาแน่น มาสร้างเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของแผ่นต่อค่าการนำความร้อน ดังภาพที่ 45



ภาพที่ 45 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของแผ่นต่อค่าการนำความร้อน

ผลการทดสอบได้ว่า แผ่นฉนวนกันความร้อนที่มีความหนาแน่นสูง ค่าการนำความร้อนของแผ่นก็สูง โดยแผ่นที่มีความหนาแน่น 200, 300 และ 400 kg/m^3 มีค่าการนำความร้อน 0.0438,

0.0567 และ 0.0606 W/m K ตามลำดับ ซึ่งแผ่นที่มีความหนาแน่น 300 และ 400 kg/m³ มีค่าการนำความร้อนต่างกันไม่มากนัก

แม้ว่าโครงสร้างของแผ่นฉนวนกันความร้อนจะเป็นของแข็ง แต่ภายในเต็มไปด้วยรูพรุนระหว่างเส้นใยมากมาย ซึ่งภายในรูพรุนนี้จะมีอากาศแทรกอยู่ อากาศถือได้ว่าเป็นตัวนำความร้อนที่ไม่ดี คือ มีค่าการนำความร้อนต่ำมาก ประมาณ 0.02 W/m K เมื่อแผ่นฉนวนกันความร้อนมีความหนาแน่นน้อย รูพรุนระหว่างเส้นใยภายในแผ่นจึงมีมาก ทำให้เมื่อเกิดการถ่ายเทความร้อนเข้ามาในแผ่น แผ่นที่มีความหนาแน่นต่ำจะสามารถลดความร้อนที่จะเข้าสู่ภายในแผ่นได้ดีกว่า

ศึกษาการถ่ายเทของความร้อนผ่านแผ่นทดสอบที่มีค่าการนำความร้อนต่างกัน 3 ค่า ด้วยโปรแกรมเมเปิล โดยสมมติให้แผ่นทดสอบเป็นวัสดุเนื้อเดียว (homogeneous materials) ไม่มีช่องว่างอากาศ และมีเฉพาะการนำความร้อนเท่านั้น ที่เกิดขึ้นภายในแผ่นทดสอบ พิจารณาจากสมการที่ (24)

$$q = \frac{kA(T_1 - T_2)}{x}$$

$$\frac{qx}{kA} = T_1 - T_2$$

ดังนั้น

$$T_2 = T_1 - \frac{qx}{kA} \quad (40)$$

จากความสัมพันธ์ของสมการที่ (40) กำหนดให้

ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทเข้าสู่แผ่นทดสอบมีค่า 1 W

พื้นที่หน้าตัดของแผ่นทดสอบที่ความร้อนไหลผ่าน = กว้าง × ยาว

$$= 0.3 \times 0.3 = 0.09 \text{ m}^2$$

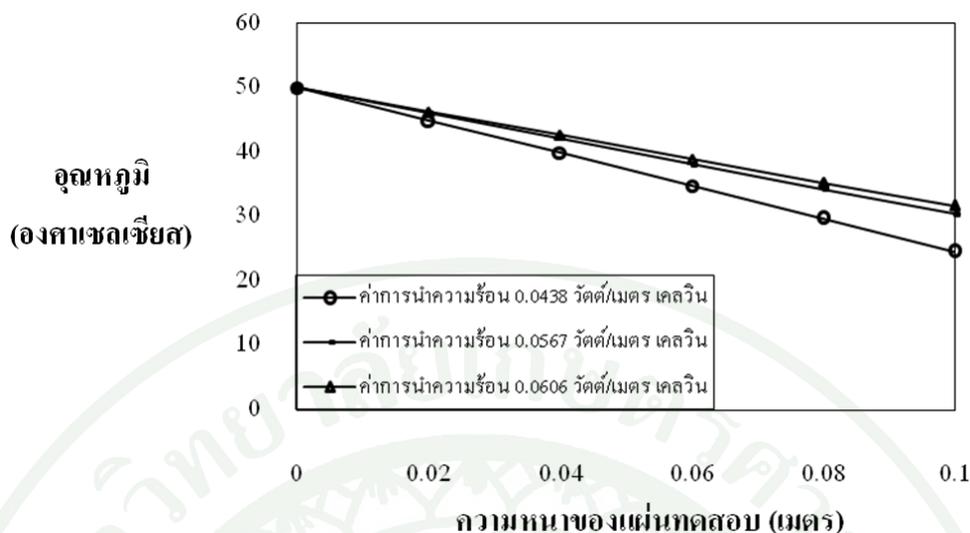
แผ่นทดสอบหนา = 10 cm หรือ 0.1 m

อุณหภูมิเริ่มต้นเมื่อความร้อนถ่ายเทเข้าสู่แผ่น มีค่า $50\text{ }^{\circ}\text{C}$

สร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของแผ่นทดสอบกับอุณหภูมิ โดยป้อนคำสั่งในโปรแกรมเมเปิล ดังนี้

```
> restart;
> k := array(1..3);
                                k := array(1..3, [ ])
> k[1] := 0.0438;
                                k1 := 0.0438
> k[2] := 0.0567;
                                k2 := 0.0567
> k[3] := 0.0606;
                                k3 := 0.0606
> T1 := 50;
                                T1 := 50
> q := 1;
                                q := 1
> A := 0.3 × 0.3;
                                A := 0.09
> T2 := (k, x) → T1 -  $\frac{q \cdot x}{k \cdot A}$ ;
                                T2 := (k, x) → T1 -  $\frac{q \cdot x}{k \cdot A}$ 
> with(plots) :
> plot([T2(k[1], x), T2(k[2], x), T2(k[3], x)], x = 0..0.1);
```

โปรแกรมจะประมวลผลเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของแผ่นทดสอบกับอุณหภูมิ



ภาพที่ 46 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของแผ่นทดสอบกับอุณหภูมิ

จากภาพที่ 46 เมื่อปริมาณความร้อน 1 W ถ่ายเทผ่านแผ่นทดสอบที่มีค่าการนำความร้อนต่างกัน 3 ค่า คือ 0.0438, 0.0567 และ 0.0606 W/m K โดยสมมติให้อุณหภูมิเริ่มต้นทางด้านที่ความร้อนเข้าสู่แผ่นทดสอบ มีค่า 50 °C จะเห็นว่า เมื่อความร้อนผ่านแผ่นทดสอบที่ค่าความหนาต่างๆ อุณหภูมิจะลดลงเรื่อยๆ จนเมื่อความหนามีค่าเท่ากับ 0.1 m อุณหภูมิของแผ่นทดสอบจะลดลงต่ำสุด แสดงดังตารางที่ 16

ตารางที่ 16 แสดงอุณหภูมิเมื่อความร้อนถ่ายเทเข้าสู่แผ่นทดสอบและอุณหภูมิเมื่อความร้อนถ่ายเทออกจากแผ่นทดสอบเมื่อแผ่นทดสอบมีค่าการนำความร้อนต่างกัน

ค่าการนำความร้อน (W/m K)	อุณหภูมิเมื่อความร้อนถ่ายเท	อุณหภูมิเมื่อความร้อนถ่ายเท
	เข้าสู่แผ่น (°C)	ออกจากแผ่น (°C)
0.0438	50	24.6
0.0567	50	30.4
0.0606	50	31.7

จากตารางที่ 16 แสดงให้เห็นว่า แผ่นทดสอบที่มีค่าการนำความร้อนต่ำสุด จะสามารถลดอุณหภูมิเมื่อความร้อนถ่ายเทออกจากแผ่นได้มากกว่าแผ่นทดสอบที่มีค่าการนำความร้อนสูงกว่า

โดยแผ่นทดสอบที่มีค่าการนำความร้อน 0.0438, 0.0567 และ 0.0606 W/m K มีอุณหภูมิเมื่อความร้อนถ่ายเทออกจากแผ่น 24.6, 30.4 และ 31.7 °C ตามลำดับ

จากนั้นนำค่าการนำความร้อนของฉนวนกันความร้อนจากเส้นใยกักซ้างที่ผลิตได้ไปเปรียบเทียบกับค่าการนำความร้อนของฉนวนกันความร้อนอื่นๆ ที่ใช้วัสดุฉนวนต่างชนิดกัน ดังแสดงในตารางที่ 17 เพื่อเปรียบเทียบว่ามีประสิทธิภาพในการเป็นฉนวนกันความร้อนแตกต่างกันอย่างไร

ตารางที่ 17 ค่าการนำความร้อนของฉนวนกันความร้อนที่ใช้วัสดุฉนวนต่างชนิดกัน และฉนวนกันความร้อนที่นิยมใช้ในท้องตลาด

ชนิดของวัสดุฉนวน	ความหนาแน่น (kg/m ³)	ค่าการนำความร้อน (W/m K)	ที่มา
เส้นใยจากต้นกกซ้าง	200-400	0.0438-0.0606	งานวิจัยนี้
ฟางข้าว	150-250	0.0481-0.0521	Zhou <i>et al.</i> (2010)
เส้นใยจากก้านฝ้าย	150-450	0.0585-0.0815	Zhou <i>et al.</i> (2010)
เปลือกทุเรียน และกาบมะพร้าว	311-611	0.0728-0.1117	Khedari <i>et al.</i> (2004)
ซานอ้อย	150-200	0.051-0.058	Xu <i>et al.</i> (2004)
เพอร์ไลต์ที่ขยายตัวแล้ว	78-224	0.0477-0.0616	Zhou <i>et al.</i> (2010)
เวอร์มิคูไลท์	80-200	0.047-0.07	Zhou <i>et al.</i> (2010)
แคลเซียมซิลิเกต	208.3	0.054	โครงการฉนวนเขียว (2540)
คอนกรีตเพอร์ไลต์	320-640	0.073-0.288	ตระการ (2537)
คอนกรีตเวอร์มิคูไลท์	304-560	0.092-0.114	ตระการ (2537)

เมื่อนำค่าการนำความร้อนที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าการนำความร้อนของฉนวนกันความร้อนที่ใช้วัสดุฉนวนต่างชนิดกัน และฉนวนกันความร้อนที่นิยมใช้ในท้องตลาด ดังตารางที่ 17 แสดงให้เห็นว่า แผ่นฉนวนกันความร้อนจากเส้นใยของต้นกกซ้าง ที่มีความหนาแน่น 200-400 kg/m³ มีค่าการนำความร้อนในช่วง 0.0438-0.0606 W/m K ซึ่งน้อยกว่าฉนวนกันความร้อนชนิดอื่น เมื่อพิจารณาความหนาแน่นในช่วงเดียวกัน

เมื่อเปรียบเทียบค่าการนำความร้อนของแผ่นฉนวนกันความร้อนที่ผลิตได้จากเส้นใยของต้นกกช้างกับฉนวนกันความร้อนจากฟางข้าวที่มีความหนาแน่นต่ำ แผ่นฉนวนกันความร้อนจากเส้นใยก้านฝ้าย และฉนวนท่อแคลเซียมซิลิเกต ที่นิยมใช้ในท้องตลาด ที่ความหนาแน่น 200 kg/m^3 พบว่าแผ่นฉนวนกันความร้อนจากเส้นใยกกช้างมีค่าการนำความร้อนต่ำกว่าแผ่นฉนวนกันความร้อนจากฟางข้าวและแผ่นฉนวนกันความร้อนจากเส้นใยก้านฝ้าย

เมื่อเปรียบเทียบค่าการนำความร้อนของแผ่นฉนวนกันความร้อนจากเส้นใยกกช้าง กับฉนวนคอนกรีตเพอร์ไลต์ ฉนวนคอนกรีตเวอร์มิคูไลต์ และแผ่นฉนวนกันความร้อนจากส่วนผสมของเปลือกทุเรียนและกาบมะพร้าวที่ความหนาแน่น 300 kg/m^3 พบว่า แผ่นฉนวนกันความร้อนจากเส้นใยของต้นกกช้างมีค่าการนำความร้อนต่ำกว่าฉนวนคอนกรีตเพอร์ไลต์ ฉนวนคอนกรีตเวอร์มิคูไลต์ และแผ่นฉนวนกันความร้อนจากส่วนผสมของเปลือกทุเรียนและกาบมะพร้าว ประมาณ 0.02 W/m K

และเมื่อเปรียบเทียบกับเพอร์ไลต์ที่ขยายตัวแล้วกับเวอร์มิคูไลต์ที่ความหนาแน่น 200 kg/m^3 พบว่า ค่าการนำความร้อนของแผ่นฉนวนกันความร้อนจากเส้นใยกกช้างมีค่าต่ำกว่าเพอร์ไลต์ที่ขยายตัวแล้วและเวอร์มิคูไลต์ประมาณ 0.02 และ 0.03 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าแผ่นฉนวนกันความร้อนจากเส้นใยกกช้างที่ผลิตได้นี้ มีสมบัติในการเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดี

สรุปและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ผลิตแผ่นฉนวนกันความร้อนจากเส้นใยกักซ้างที่มีความหนาแน่น 200, 300 และ 400 kg/m³ หนา 10 mm ยึดเหนี่ยวด้วยกาว pMDI ผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนตามมาตรฐาน มอก. 876-2547 ผลการทดลองพบว่า แผ่นฉนวนกันความร้อนจากเส้นใยกักซ้างนี้มีสมบัติเชิงกายภาพ คือ ความชื้น 11.22, 11.94 และ 12.91 % ตามลำดับ ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด และมีสมบัติเชิงกล คือ ค่าความต้านแรงดัด 106.896, 293.349 และ 524.074 psi ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น 11.40×10^3 , 29.09×10^3 และ 47.46×10^3 psi และค่าความต้านแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า 4.49, 14.56 และ 14.78 psi ตามลำดับ โดยแผ่นฉนวนกันความร้อนที่มีความหนาแน่น 200 kg/m³ เท่านั้นที่ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด นอกจากนี้ได้ทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของแผ่นฉนวนกันความร้อนจากเส้นใยกักซ้างตามมาตรฐาน ASTM C 518-10 พบว่า มีค่าการนำความร้อนอยู่ในช่วง 0.0438-0.0606 W/m K ซึ่งมีค่าต่ำกว่าแผ่นฉนวนกันความร้อนที่ใช้วัสดุชนิดอื่น ได้แก่ ฟางซ้าง เส้นใยจากก้านฝ้าย ชานอ้อย เพอร์ไลต์ที่ขยายตัวแล้ว เวอร์มิคูไลต์ ฉนวนท่อเคลเซียมซิลิเกต คอนกรีตเพอร์ไลต์ คอนกรีตเวอร์มิคูไลต์ เปลือกทุเรียนและกาบมะพร้าว จึงเหมาะสำหรับนำไปประยุกต์เป็นส่วนประกอบภายในอาคาร เช่น ฝ้า เพดาน เพื่อกันความร้อน แต่ในทางอุตสาหกรรม การผลิตแผ่นฉนวนกันความร้อนจากเส้นใยของต้นกักซ้างนี้ ต้องเพิ่มกระบวนการในระหว่างการผลิต เพื่อให้แผ่นฉนวนกันความร้อนที่ผลิตได้นั้นมีประสิทธิภาพและความปลอดภัยเพิ่มมากขึ้น เช่น การใส่สารเคมีป้องกันเชื้อรา และสารหน่วงไฟ เป็นต้น นอกจากนี้เป็นการกำจัดวัชพืชที่มีอยู่ในท้องถิ่นอีกทางหนึ่งแล้ว ยังช่วยประหยัดพลังงาน และแผ่นฉนวนกันความร้อนนี้ยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- กิตติศักดิ์ บัวศรี. 2544. การผลิตแผ่นฉนวนความร้อนจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- กรองทิพย์ เต็มเกาะ. 2555. การทดสอบคุณสมบัติทางด้านความร้อนของฉนวนกันความร้อน. โครงการฟิสิกส์และวิศวกรรม กรมวิทยาศาสตร์บริการ, กรุงเทพฯ.
- ขวัญเรือน กันทวัง, พงศ์พันธ์ ตั้งไพบุลย์วรรณ และสุชาติ บุญดำรงธรรม. 2545. ฉนวนใยเซลลูโลสที่อัดโดยเครื่องอัดแผ่นแบบไฮดรอลิกส์. วิทยานิพนธ์ปริญญาตรี, มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- คณะกรรมการโครงการฉลากเขียว. 2540. ข้อกำหนดของฉนวนกันความร้อน, สำนักงานเลขานุการโครงการฉลากเขียว
- ตระการ ก้าวกลีกรรม. 2537. คู่มือฉนวนความร้อน. พิมพ์ครั้งที่ 1. บริษัท เอ็มแอนด์อี จำกัด, กรุงเทพฯ.
- นิตสาร เจริญดี. 2544. การผลิตแผ่นขึ้นไม้อัดจากผักตบชวา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยมหิดล.
- ประยูร สุรินทร์. 2544. การผลิตแผ่นฉนวนความร้อนจากขานอ้อย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ปรีชา เกียรติกระจาย. 2531. โครงการเผยแพร่ความรู้ทางวนผลิตภัณฑ์ กาวและการยึดติดไม้. คณะวนศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน, กรุงเทพฯ.
- วรรณม อุจน์จิตติชัย. 2541. อุตสาหกรรมผลิตแผ่นปาร์ติเคิลบอร์ด (แผ่นขึ้นไม้อัดและกระบวนกร). กลุ่มพัฒนาอุตสาหกรรมแผ่นไม้ ส่วนวิจัยและพัฒนาผลิตผลป่าไม้. สำนักวิชาการป่าไม้ กรมป่าไม้, กรุงเทพฯ.

มนตรี อึ้งเจริญ. 2530. เอกสารประกอบการสอนวิชา ME 151 การนำความร้อน. ภาควิชา
วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน, กรุงเทพฯ.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2547. แผ่นซีเมนต์อัดชนิดอัดราบ. มอก. 876-2547.
เล่ม 121-2547

American Society of Testing and Materials. 2010. **Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus (C 518-10, 2010)**. West Conshohocken, United Stated.

Baan natura. 2007. **Oriented Strand Board**. Available Source:
<http://www.baannatura.com/th/baan/content/detail/27.html>, March 24, 2012.

Bynum, R.T., Jr. 2001. **Insulation Handbook**. McGraw-Hill. United Stated.

Carbonpro Ltd. 2011. **Flax Board**. Available Source:
<http://www.carbonpro.eu/page2/page2.php>, March 24, 2012.

Charoenvai, S. 2000. **Development of New Particleboards from Durian Peel and Coconut Coir with Low Thermal Conductivity**. M.E. Thesis, King Mongkut's University of Technology Thonburi.

Chiang Leng Hup Plywood Industries Pte Ltd. 2004. **Lamin board**.
Available Source: <http://www.chianglenghup.com/eCate/ProdDetail.aspx?ID=84>, March 24, 2012.

Dongying Dyne Wood Co.,Ltd. 2010. **Wood Chip Board**. Available Source:
<http://www.dyne-wood.com/>, March 24, 2012.

Guntekin, E. and B. Karakus. 2008. Feasibility of using eggplant (*Solanum melongena*) stalks in the production of experimental particleboard. **Ind Crop Prod.** 27: 354-358.

Hoadley, R.B. 2005. **Understanding Wood: A Craftmann's Guide to Wood Technology.** Taunton Press. United Stated.

Indiamart. 2012. **Soft Board.** Available Source: <http://www.indiamart.com/midlamboards/plain-softboard.html>, March 24, 2012.

Khedari, J., S. Charoenvai and J. Hirunlabh. 2003. New insulating particleboards from durian peel and coconut coir. **Building and Environment.** 38: 435-441.

Khedari, J., N. Noppanun., H. Jongjit and C. Sarocha. 2004. New low cost insulating particleboards from mixture of durian peel and coconut coir. **Building and Environment.** 39: 59-65.

Louis Lung. 2008. **Medium Density Fiberboard.** Available Source: <http://www.lungster.com/l/speakers/mdffaq/mdf.shtml>, March 24, 2012.

Meredith Corporation. 2012. **Hard Board.** Available Source: <http://www.lungster.com/l/speakers/mdffaq/mdf.shtml>, March 24, 2012.

Netzschthermalanalysis. 2012. **Thermophysical properties characterization insulating materials.** Available Source: http://www.netzsch-thermal-analysis.com/download/Poster_HFM_72.pdf, January 31, 2012.

Pizhou Hengxing International Trade Co., Ltd. 2012. **Block Board.** Available Source: <http://www.xzhengxing.com/En/ShowProducts.asp?id=250&mnid=1364&classname=Block%20Board>, March 24, 2012.

Pratt, A.W. 1981. **Heat Transmission in Buildings**. John Wiley and Sons Inc. United States.

Sampathrajan, A., N.C. Vijayaraghavan and K.R. Swaminathan. 1992. Mechanical and thermal properties of particle boards made from farm residues. **Bioresource Technology**. 40: 249-251.

Talas. 2011. **Homogeneous Board**. Available Source:
http://apps.webcreate.com/ecom/catalog/product_specific.cfm?ClientID=15&ProductID=31537, March 24, 2012.

Teeboonma, U., S. Soponronnarit., J. Tiansuwan., W. Tia and W. Kaewassadorn. 2001. Heat Pump Dryers Using HCFC22 and HFC134a as Refrigerants. **International Energy Journal**. 2: 67-73.

William C. Turner, E.E., M.E., P.E. and John F. Malloy, M.E., P.E. 1981. **Thermal Insulation Handbook**. Florida; Robert E. Krieger Publishing Company, Inc. United States.

Mo, X., J. Hu., X. Susan Sun and Jo A.R. 2001. Compression and tensile strength of low-density straw-protein particleboard. **Industrial Crops and Products**. 14: 1-9.

Mo, X., C. Enzhi., W. Donghai and Xiuzhi S.S. 2003. Physical properties of medium-density wheat straw particleboard using different adhesives. **Industrial Crops and Products**. 18: 47-53.

Wang, M. and Ning P. 2008. Modeling and prediction of the effective thermal conductivity of random open-cell porous foams. **International Journal of Heat and Mass Transfer**. 51: 1325-1331.

Xavier Borràs. 2011. **Flake Board**. Available Source:

<http://www.interempresas.net/Wood/Articles/50901-OSB-best-suited-for-building-boards.html>, March 24, 2012.

Xu, J. Y., R. Sugawara, R. Widyorini, G. P. Han and Kawai S. 2004. Manufacture and properties of low-density binderless particleboard from kenaf core. **Journal of Wood Science**. 50: 62-67.

Yawen Hsiao. 2011. **Plywood**. Available Source:

http://www.taiwantrade.com.tw/MAIN/en_front/searchserv.do?method=listProductProductDetail&locale=2&MEMBER_TYPE=4&WEB_OPEN=0&DOMAIN_NAME=&DOMAIN_NAME_FLAG=0&company_id=51143&catalog_id=356739&come_soon=0, March 24, 2012.

Ycplywood. 2012. **Bagasse Board**. Available Source:

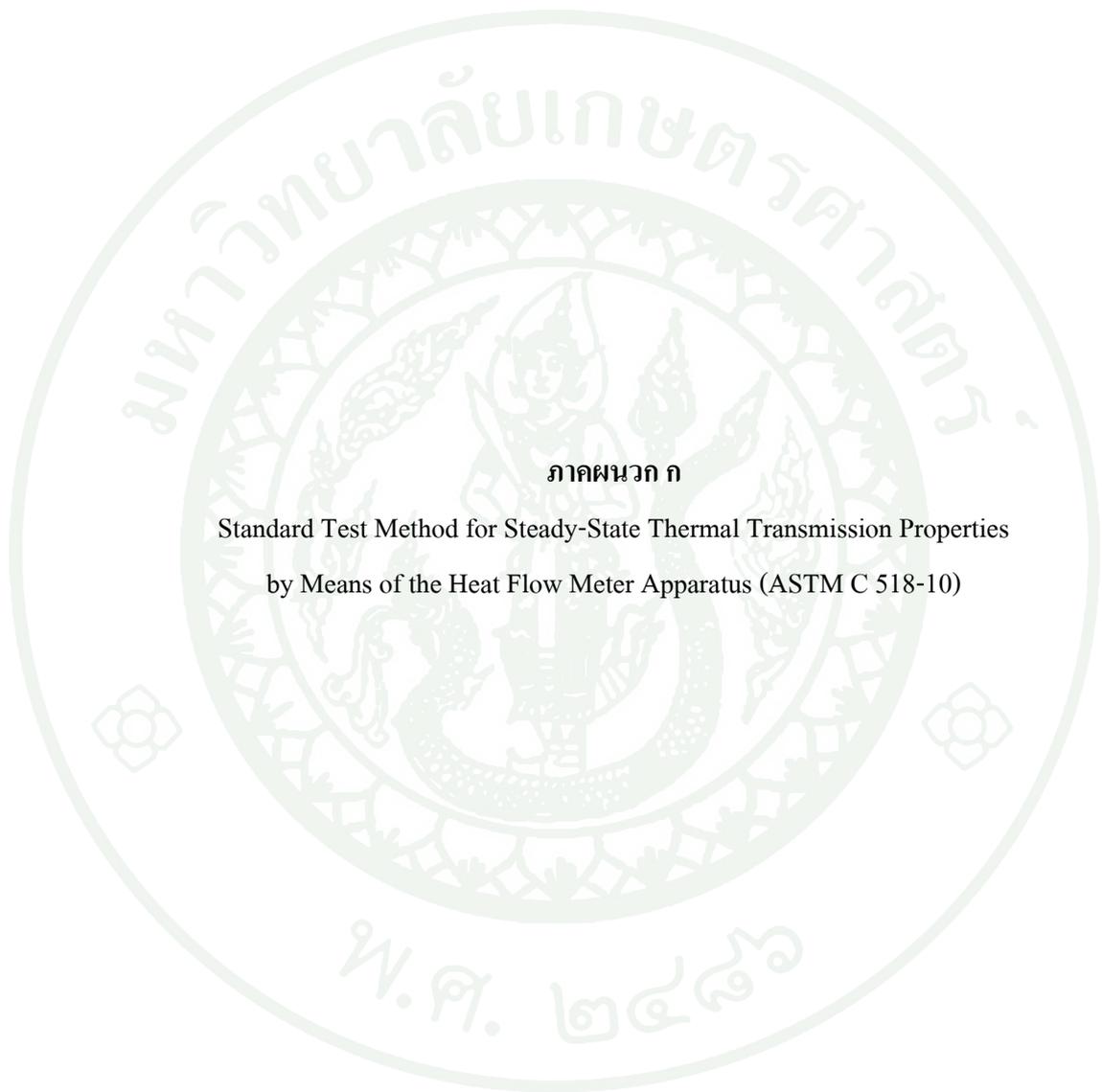
<http://www.ycplywood.com/Products/109-.aspx>, March 24, 2012.

Zheng, Y., Z. Pan., R. Zhang. and B.M. Jerkins. 2007. Particleboard quality characteristics of saline jost tall wheatgrass and chemical treatment effect. **Bioresource Technology**. 98: 1304-1310.

Zhou, X.Y., F. Zheng., H.G. Li and C.L. Lu. 2010. An environment-friendly thermal insulation material from cotton stalk fibers. **Energy and Buildings**. 42: 1070-1074.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties
by Means of the Heat Flow Meter Apparatus (ASTM C 518-10)



Designation: C518 – 10

Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus¹

This standard is issued under the fixed designation C518; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope

1.1 This test method covers the measurement of steady state thermal transmission through flat slab specimens using a heat flow meter apparatus. ^(equipment)

1.2 The heat flow meter apparatus is used widely because it is relatively simple in concept, rapid, and applicable to a wide range of test specimens. The precision and bias of the heat flow meter apparatus can be excellent provided calibration is carried out within the range of heat flows expected. This means calibration shall be carried out with similar types of materials, of similar thermal conductances, at similar thicknesses, mean temperatures, and temperature gradients, as expected for the test specimens.

1.3 This a comparative, or secondary, method of measurement since specimens of known thermal transmission properties shall be used to calibrate the apparatus. Properties of the calibration specimens must be ^{traceable to} an absolute measurement method. The calibration specimens should be obtained from a recognized national standards laboratory.

1.4 The heat flow meter apparatus establishes steady state one-dimensional heat flux through a test specimen between two parallel plates at constant but different temperatures. By appropriate calibration of the heat flux transducer(s), with calibration standards and by measurement of the plate temperatures and plate separation, Fourier's law of heat conduction is used to calculate thermal conductivity, and thermal resistivity or thermal resistance and thermal conductance.

1.5 This test method shall be used in conjunction with Practice C1045. Many advances have been made in thermal technology, both in measurement techniques and in improved understanding of the principles of heat flow through materials. These advances have prompted revisions in the conceptual

approaches to the measurement of the thermal transmission properties (1-4).² All users of this test method should be aware of these concepts.

1.6 This test method is applicable to the measurement of thermal transmission through a wide range of specimen properties and environmental conditions. The method has been used at ambient conditions of 10 to 40°C with thicknesses up to approximately 250 mm, and with plate temperatures from -195°C to 540°C at 25-mm thickness (5, 6).

1.7 This test method may be used to characterize material properties, which may or may not be representative of actual conditions of use. Other test methods, such as Test Methods C236 or C976 should be used if needed.

1.8 To meet the requirements of this test method the thermal resistance of the test specimen shall be greater than 0.10 m²-K/W in the direction of the heat flow and edge heat losses shall be controlled, using edge insulation, or a guard heater, or both.

1.9 It is not practical in a test method of this type to try to establish details of construction and procedures to cover all contingencies that might offer difficulties to a person without pertinent technical knowledge. Thus users of this test method shall have sufficient knowledge to satisfactorily fulfill their needs. For example, knowledge of heat transfer principles, low level electrical measurements, and general test procedures is required.

1.10 The user of this method must be familiar with and understand the Annex. The Annex is critically important in addressing equipment design and error analysis.

1.11 Standardization of this test method is not intended to restrict in any way the future development of improved or new methods or procedures by research workers.

1.12 Since the design of a heat flow meter apparatus is not a simple matter, a procedure for proving the performance of an apparatus is given in Appendix X3.

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee C16 on Thermal Insulation and is the direct responsibility of Subcommittee C16.30 on Thermal Measurement.

Current edition approved May 1, 2010. Published June 2010. Originally approved in 1963. Last previous edition approved in 2004 as C518 – 04. DOI: 10.1520/C0518-10.

² The boldface numbers in parentheses refer to the list of references at the end of this test method.

1.13 The values stated in SI units are to be regarded as standard. No other units of measurement are included in this standard.

1.14 This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to consult and establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:³

- C167 Test Methods for Thickness and Density of Blanket or Batt Thermal Insulations
- C168 Terminology Relating to Thermal Insulation
- C177 Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus
- C236 Test Method for Steady-State Thermal Performance of Building Assemblies by Means of a Guarded Hot Box⁴
- C687 Practice for Determination of Thermal Resistance of Loose-Fill Building Insulation
- C976 Test Method for Thermal Performance of Building Assemblies by Means of a Calibrated Hot Box⁴
- C1045 Practice for Calculating Thermal Transmission Properties Under Steady-State Conditions
- C1046 Practice for In-Situ Measurement of Heat Flux and Temperature on Building Envelope Components
- C1058 Practice for Selecting Temperatures for Evaluating and Reporting Thermal Properties of Thermal Insulation
- C1114 Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Thin-Heater Apparatus
- C1363 Test Method for Thermal Performance of Building Materials and Envelope Assemblies by Means of a Hot Box Apparatus
- E230 Specification and Temperature-Electromotive Force (EMF) Tables for Standardized Thermocouples
- E178 Practice for Dealing With Outlying Observations
- E691 Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method

2.2 ISO Standard:

ISO 8301:1991 Thermal Insulation—Determination of Steady-State Thermal Resistance and Related Properties—Heat Flow Meter Apparatus⁵

3. Terminology

3.1 *Definitions*—For definitions of terms and symbols used in this test method, refer to Terminology C168 and to the following subsections.

3.2 *Definitions of Terms Specific to This Standard:*

3.2.1 *calibration, n*—the process of establishing the calibration factor for a particular apparatus using calibration specimens having known thermal transmission properties.

3.2.2 *calibration transfer specimen, n*—(CTS) a thermal calibration specimen that has been measured by a national standards laboratory (26).

3.2.3 *cold surface assembly, n*—the plate that provides an isothermal boundary at the cold surface of the test specimen(s).

3.2.4 *controlled environment, n*—an environment sometimes employed in the apparatus to limit lateral heat flows.

3.2.5 *edge insulation, n*—auxiliary insulation used to limit lateral heat flows, these are sometimes permanently mounted in the apparatus.

3.2.6 *guard, n*—promotes one-dimensional heat flow. Primary guards are planar, additional coplanar guards can be used and secondary or edge guards are axial.

3.2.7 *heat flow meter apparatus, n*—the complete assemblage of the instrument, including hot and cold isothermal surfaces, the heat flux transducer(s), and the controlled environment if used, and instrumentation to indicate hot and cold surface temperatures, specimen thickness, and heat flux.

3.2.8 *hot surface assembly, n*—the plate that provides an isothermal boundary at the hot surface of the test specimen(s).

3.2.9 *heat flux transducer, n*—a device containing a thermopile, or an equivalent, that produces an output which is a function of the heat flux passing through it. The metering area usually consists of a number of differently connected temperature sensors placed on each face of a core and surface sheets to protect the assembly. A properly designed transducer will have a sensitivity that is essentially independent of the thermal properties of the specimen.

3.2.10 *metering area, n*—the area of the specimen(s) in contact with the sensor area of the heat flux transducer.

3.2.11 *secondary transfer standard, n*—a specimen, which has been measured in a heat flow meter apparatus, which has been calibrated with primary standards, used to calibrate additional apparatuses.

3.2.12 *sensitivity, n*—the ratio of the heat flux passing through the transducer to the electrical output of the heat flux transducer.

3.2.13 *standard reference material (SRM), n*—a lot of material that has been characterized by a national standards laboratory (26).

3.2.14 *thermal transmission properties, n*—those properties of a material or system that define the ability of the material or system to transfer heat. Properties, such as thermal resistance, thermal conductance, thermal conductivity, and thermal resistivity would be included, as defined in Terminology C168.

3.3 *Symbols and Units*—The symbols used in this test method have the following significance:

3.3.1 λ —thermal conductivity, $W/(m \cdot K)$.

3.3.2 C —thermal conductance, $W/(m^2 \cdot K)$.

3.3.3 R —thermal resistance, $(m^2 \cdot K)/W$.

3.3.4 q —heat flux (heat flow rate, Q , through area A), W/m^2 .

3.3.5 Q —heat flow rate in the metered area, W .

3.3.6 A —metering area, m^2 .

3.3.7 L —separation between the hot and cold plate assemblies during testing, m .

³ For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For *Annual Book of ASTM Standards* volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

⁴ Withdrawn. The last approved version of this historical standard is referenced on www.astm.org.

⁵ Available from American National Standards Institute (ANSI), 25 W. 43rd St., 4th Floor, New York, NY 10036.

- 3.3.8 T_m —mean temperature, $(T_h + T_c)/2$, K.
 3.3.9 ΔT —temperature difference across the specimen, K.
 3.3.10 ρ —(bulk) density of the material tested, kg/m^3 .
 3.3.11 S —calibration factor of the heat flux transducer, $(\text{W}/\text{m}^2)/V$.
 3.3.12 E —heat flux transducer output, V.
 3.3.13 T_h —temperature of the hot plate surface, K.
 3.3.14 T_c —temperature of the cold plate surface, K.
 3.4 *Subscripts:*
 3.4.1 h —hot.
 3.4.2 c —cold
 3.4.3 a, b —first and second specimen.
 3.4.4 m —mean.
 3.4.5 α —statistical term used to define significance level.

4. Significance and Use

4.1 This test method provides a rapid means of determining the steady-state thermal transmission properties of thermal insulations and other materials with a high level of accuracy when the apparatus has been calibrated appropriately.

4.2 Proper calibration of the heat flow meter apparatus requires that it be calibrated using specimen(s) having thermal transmission properties determined previously by Test Methods C177, or C1114.

NOTE 1—Calibration of the apparatus typically requires specimens that are similar to the types of materials, thermal conductances, thicknesses, mean temperatures, and temperature gradients as expected for the test specimens.

4.3 The thermal transmission properties of specimens of a given material or product may vary due to variability of the composition of the material; be affected by moisture or other conditions; change with time; change with mean temperature and temperature difference; and depend upon the prior thermal history. It must be recognized, therefore, that the selection of typical values of thermal transmission properties representative of a material in a particular application should be based on a consideration of these factors and will not apply necessarily without modification to all service conditions.

4.3.1 As an example, this test method provides that the thermal properties shall be obtained on specimens that do not contain any free moisture although in service such conditions may not be realized. Even more basic is the dependence of the thermal properties on variables, such as mean temperature and temperature difference. These dependencies should be measured or the test made at conditions typical of use.

4.4 Special care shall be taken in the measurement procedure for specimens exhibiting appreciable inhomogeneities, anisotropies, rigidity, or especially high or low resistance to heat flow (see Practice C1045). The use of a heat flow meter apparatus when there are thermal bridges present in the specimen may yield very unreliable results. If the thermal bridge is present and parallel to the heat flow the results obtained may well have no meaning. Special considerations also are necessary when the measurements are conducted at either high or low temperatures, in ambient pressures above or below atmospheric pressure, or in special ambient gases that are inert or hazardous.

4.5 The determination of the accuracy of the method for any given test is a function of the apparatus design, of the related instrumentation, and of the type of specimens under test (see Section 10), but this test method is capable of determining thermal transmission properties within $\pm 2\%$ of those determined by Test Method C177 when the ambient temperature is near the mean temperature of the test ($T(\text{ambient}) = T(\text{mean}) \pm 1^\circ\text{C}$), and in the range of 10 to 40°C . In all cases the accuracy of the heat flow meter apparatus can never be better than the accuracy of the primary standards used to calibrate the apparatus.

4.5.1 When this test method is to be used for certification testing of products, the apparatus shall have the capabilities required in A1.7 and one of the following procedures shall be followed:

4.5.1.1 The apparatus shall have its calibration checked within 24 h before or after a certification test using either secondary transfer standards traceable to, or calibration standards whose values have been established by, a recognized national standards laboratory not more than five years prior to the certification date. The average of two calibrations shall be used as the calibration factor and the specimen(s) certified with this average value. When the change in calibration factor is greater than 1%, the standard specimen shall be retested and a new average calculated. If the change in calibration factor is still greater than 1% the apparatus shall be calibrated using the procedure in Section 6.

4.5.1.2 Where both the short and long term stability of the apparatus have been proven to be better than 1% of the reading (see Section 10), the apparatus may be calibrated at less frequent intervals, not exceeding 30 days. The specimens so tested cannot be certified until after the calibration test following the test and then only if the change in calibration factor from the previous calibration test is less than 1%. When the change in calibration is greater than 1%, test results from this interval shall be considered void and the tests repeated in accordance with 4.5.1.1.

4.5.2 The precision (repeatability) of measurements made by the heat flow meter apparatus calibrated as in Section 6.6 normally are much better than $\pm 1\%$ of the mean value. This precision is required to identify changes in calibration and is desirable in quality control applications.

5. Apparatus

5.1 The construction guidelines given in this section should be understood by the user of this test method. While it is mandatory that these details be followed carefully when constructing an apparatus, it behooves the user to verify that the equipment is built as specified. Serious errors of measurement may result from this oversight.

5.2 General:

5.2.1 The general features of a heat flow meter apparatus with the specimen or the specimens installed are described in Section 6 and shown in Figs. 1-3. A heat flow meter apparatus consists of two isothermal plate assemblies, one or more heat flux transducers and equipment to control the environmental conditions when needed. Each configuration will yield equivalent results if used within the limitations stated in this test

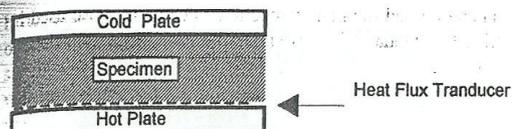


FIG. 1 Apparatus with One Heat Flux Transducer and One Specimen

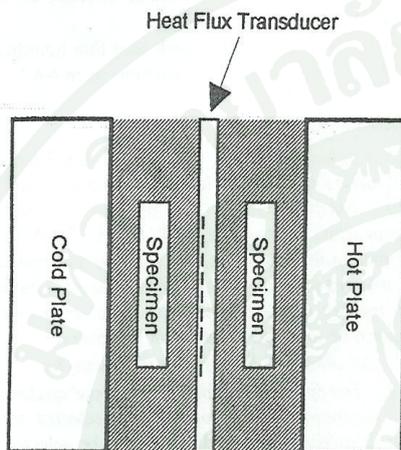


FIG. 2 Apparatus with One Heat Flux Transducer and Two Specimens

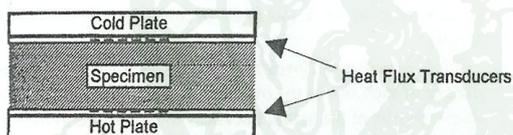


FIG. 3 Apparatus with Two Heat Flux Transducers and One Specimen

method. There are distinct advantages for each configuration in practice and these are discussed in Appendix X2.

NOTE 2—Further information can be found in ISO 8301:1991, which is the equivalent ISO standard for the Heat Flow Meter Apparatus.

5.2.2 Further design considerations such as plate surface treatment, flatness and parallelism, temperature requirements and measuring system requirements can be found in Annex A1.

6. Calibration

6.1 The calibration of a heat flow meter apparatus is a very critical operation. Since lateral heat losses or gains of heat are not controlled or eliminated automatically, but only lessened by increasing the size of the guard area and edge insulation, there is no guarantee that the heat losses or gains are negligible under all testing conditions. To ensure that the equipment is performing properly with specimens of different thermal resistances, the apparatus shall be calibrated with materials having similar thermal characteristics and thicknesses as the materials to be evaluated. The apparatus shall be calibrated with the specimen in the same orientation and the heat flux in the same

direction under which the primary, CTS or SRM, or secondary transfer standards were characterized, if known. The material selected for the calibration standard shall have properties that are not affected by convection over the range of calibration parameters (temperature difference, thickness, density, and so forth) of interest. The apparatus shall be calibrated as a unit, with the heat flux transducer(s) installed in the apparatus.

6.2 This procedure applies to the calibration of a heat flow meter apparatus over a wide range of heat flow rates and temperatures, which permits the testing of a wide variety of insulation materials over an extended temperature range.

6.3 The following calibration procedure is used to compute the calibration factor, S for a heat flow meter apparatus, and must be used by anyone who desires to produce meaningful heat flux measurements from a heat flow apparatus.

6.4 Calibration Standards:

6.4.1 Calibration standards may be good for many years if handled carefully but shall be checked periodically to confirm lack of change.

6.4.2 It is recommended that the primary standards obtained from a national standards laboratory should not be used on a daily basis, but secondary or working standards should be produced. Create a record on the secondary standards with the following information.

6.4.2.1 Name of national laboratory to which it is traceable.

6.4.2.2 Date the secondary standard is produced.

6.4.2.3 Date the secondary standard is last tested.

6.4.2.4 Direction of heat flux during calibration.

6.4.2.5 Thermal value of the secondary standard.

6.4.2.6 Range of parameters for which it is valid.

6.4.2.7 Estimate of bias of the primary and secondary standards.

6.5 Calibration Procedure:

6.5.1 Calibrate the heat flow meter apparatus under the same conditions of plate temperatures, temperature gradient, specimen thickness, heat flow direction, and apparatus orientation as those for which data are available for the standard.

6.5.2 *Single Temperature Point*—If the calibration standard is tested at a single mean temperature, conduct the calibration and subsequent tests near the same mean temperature. Use engineering judgment or an error analysis to determine how closely the mean temperature must be maintained. As assessment of the sensitivity of the calibration standard to test conditions should be determined by the user of the transfer standard to determine its limitations of use.

6.5.3 *Multiple Temperature Points*—If the calibration standard is tested at three or more mean temperatures, calibrate the heat flow meter apparatus at the same temperatures using the same temperature gradients (11). A smooth curve can be fitted to the points such that a calibration factor can be interpolated for any given mean temperature. It is not permissible to extrapolate above or below the mean temperature range of the calibration standard measurements. Changing the plate temperature of a heat flow meter apparatus has the potential of changing apparatus calibration. When changing plate temperatures, take steps to determine if the heat flux transducer calibration factor has changed.

 C518 - 10

6.5.4 *Single Thickness Point*—If the original calibration standard is tested at only one thickness, the heat flow meter apparatus can be calibrated for that thickness without an exhaustive thickness study. If tests are to be conducted at thicknesses other than the calibrated thickness, make a thorough study of the error of the heat flow meter apparatus at other thicknesses. Several references on this subject are listed at the end of this test method (4, 11-15, 17, 26, 27).

6.5.5 *Multiple Thickness Points*—If the original standard is tested at three or more thicknesses, the heat flow meter apparatus can be calibrated over the same thickness range. A smooth curve can be fitted to the points such that a calibration factor can be interpolated for any given thickness. If tests are to be conducted at thicknesses above or below the calibrated thicknesses, make a thorough study of the error of the heat flow meter apparatus at these thicknesses.

6.6 Calibration of Various Designs:

6.6.1 There are several configurations of heat flow meter apparatuses that use one or two heat flux transducers and one or two specimens in the apparatus. While it is not practical to list all of the possible combinations of apparatus and specimen configurations, this section contains the equations for calculating the calibration factor of three common apparatuses. The calibration and testing configuration should be identical. The calibration factor of a heat flow meter apparatus is determined by running the same standard specimens a number of times, not consecutively, but over a period of time with the standard removed each time.

6.6.2 *One Calibration Standard*—Apparatus with one heat flux transducer and one standard (see Fig. 1).

$$S = C(T_h - T_c)/E \quad (1)$$

6.6.3 *Two Calibration Standards*—Apparatus with one heat flux transducer and one specimen configuration (same as that for 6.6.2).

6.6.3.1 The two calibration standards need to be the same thickness and of similar material but need not be identical. With the following equation, it is not necessary to know the thermal conductance of each calibration standard, but it is necessary to know the average thermal conductance of the two standards:

$$S = \frac{C_a + C_b}{\left(\frac{E_a}{(T_{ha} - T_{ca})} + \frac{E_b}{(T_{hb} - T_{cb})} \right)} \quad (2)$$

6.6.3.2 *Two Calibration Standards*—Apparatus with one heat flux transducer and two specimens (see Fig. 2).

6.6.3.3 Again, the standards need to be the same thickness and of similar material but not necessarily identical.

$$S = \frac{C_a + C_b}{E \left(\frac{1}{(T_{ha} - T_{ca})} + \frac{1}{(T_{hb} - T_{cb})} \right)} \quad (3)$$

6.6.4 *One Calibration Standard*—Apparatus with two heat flux transducers and one specimen (see Fig. 3).

6.6.4.1 Assuming the two transducers physically are identical and have similar outputs, one can sum the outputs of the two transducers and then calibrate as a single transducer apparatus. In this case, it is very important to keep the mean

temperature and the plate temperatures equal to those used in testing the standard. It is essential that each of the transducers be at steady state.

$$S = \frac{C(T_h - T_c)}{(E1 + E2)} \quad (4)$$

6.6.4.2 In the case where multiple transducers are used, a similar calculation can be utilized to calculate the calibration factor.

6.6.4.3 As an alternative, each heat flux transducer can be calibrated as an independent apparatus as in 6.6.1.

7. Test Procedures

7.1 *Foreword on Testing Procedures*—The relative simplicity of this test method may lead one to overlook very important factors, which may affect the results. To ensure accurate measurement, the operator shall be instructed fully in the operation of the equipment. Furthermore, the equipment shall be calibrated properly with reference materials having similar heat transfer characteristics. Also it is necessary that the specimen be prepared properly for evaluation.

7.2 Sampling and Preparation of Specimens:

7.2.1 *Test Specimens*—One- or two-piece specimens may be used, depending on the configuration selected for the test. Where two pieces are used, they shall be selected from the same material to be essentially identical in construction, thickness, and density. For loose fill materials, the method specified in the material specification or in Practice C687 shall be used to produce a specimen or specimens of the desired density.

7.2.2 *Selection of Specimens*—The specimen or specimens shall be of such size as to cover the plate assembly surfaces and shall either be of the actual thickness to be applied in use or of sufficient thickness to give a true average representation of the material to be tested. If sufficient material is not available, the specimen shall at least cover the metering area, and the rest of the plate surfaces must be covered with a mask with a thermal conductivity as close to that of the specimen as possible.

7.3 *Specimen Conditioning*—Details of the specimen selection and conditioning preferably are given in the material specification. Where such specifications are not given, the specimen preparation shall be conducted in accordance with the requirement that materials shall not be exposed to temperatures that will change the specimens in an irreversible manner. Typically, the material specifications call for specimen conditioning at 22°C and 50 % R.H. for a period of time until less than a 1 % mass change is observed over a 24-h period. For some materials, such as cellulose, considerably longer times may be required for both conditioning and testing.

7.4 Specimen Preparation:

7.4.1 Use the following guidelines when the material specification is unavailable. In general, the surfaces of the specimen should be prepared to ensure that they are parallel with and have uniform thermal contact with the hot and cold plates.

7.4.2 *Compressible Specimens*—The surfaces of the uncompressed specimens may be comparatively uneven so long as surface undulations are removed under test compression. It may be necessary to smooth the specimen surfaces to achieve

better plate-to-specimen contact. If the apparent thermal conductivity of the contact void is greater than that of the specimen, compressible or otherwise, the measured heat flux will be greater than the heat flux that would be obtained if the voids were absent. This may often be the case at higher temperatures where radiant heat transfer predominates in the void. For the measurement of compressible specimens, the temperature sensors are often mounted directly in the plate surfaces. Also, plate spacers may be required for the measurement of compressible specimens.

7.4.3 Rigid and High Conductance Specimens—The measurement of rigid specimens or high conductance specimens requires careful surface preparation. First, the surfaces should be made flat and parallel to the same degree as the heat-flow-meter. If the specimen has a thermal resistance that is sufficiently high compared to the specimen-to-plate interface resistance, temperature sensors mounted in the plates may be adequate.

7.5 Measurements on Specimens:

7.5.1 Blanket and Batt-Type Materials—When specified, the test thickness of blankets and batt-type materials shall be determined before testing in accordance with Test Methods C167, provided that good contact is maintained between the specimen and the isothermal plates. Also, it is recommended highly that the thickness during the actual test be measured. At the conclusion of the test, the density in the metering area should be determined.

7.5.2 Loose-fill Materials—These materials generally are tested in open test frames as spelled out in Practice C687. The requirement to measure the density in the metering area is again critical.

7.6 Limitations on Specimen Thickness:

7.6.1 General—The combined thickness of the specimen or specimens, the heat flux transducer and any damping material, which in total equals the distance between the cold and hot plates, must be restricted in order to limit the effect of edge losses on the measurements. In addition edge losses are affected by the edge insulation and the ambient temperature, so the requirements on both of these parameters must be met.

7.6.2 Maximum Spacing Between Hot and Cold Plates—The maximum allowable distance between the hot and cold plates during a test, is related to the dimensions of the heat flux transducer, the metering area, the size of the plate assembly, the construction of the heat meter apparatus, and the properties of the specimen. No suitable theoretical analysis is available to predict the maximum allowable thickness of specimens. It is possible to use the results of an analysis for a similarly sized guarded hot plate as a guide (10, 16-18).

7.7 Procedure of Measurement:

7.7.1 Temperature Difference—For any test, make the temperature difference across the specimen not less than 10 K. For specimens that are expected to have a large thermal resistance, a larger temperature difference in the specimen is recommended (see Practice C1058 for the selection of the plate temperatures). The actual temperature difference or gradient is best specified in the material specifications or by agreement of the parties concerned.

7.7.2 Edge Insulation—Enclose the edges of the specimens with thermal insulation to reduce edge heat losses to an acceptable level if this edge insulation is not built into the apparatus (see A1.6).

7.7.3 Settling Time and Measurement Interval—Verify the existence of thermal equilibrium by observing and recording, the emf output of the heat flux transducer, the mean temperature of the specimens, the temperature drop across the specimen, and a calculated λ value. Make observations at time intervals of at least 10 min until five successive observations yield values of thermal conductivity, which fall within ½ % of the mean value for these five readings. If the five readings show a monotonically increasing or decreasing trend, equilibrium has not been attained. In this case, additional sets of readings shall be taken. If experience has shown that a shorter time interval may be used, follow the same criteria for stability. For high density specimens ($\rho > 40 \text{ kg/m}^3$) or for low conductance specimens ($C < 0.05 \text{ W/K}\cdot\text{m}^2$) the time between readings may have to be increased to 30 min or longer (19).

8. Calculation

8.1 Density and Change in Mass—When required, calculate the density of the dry specimen as tested, ρ , the mass change due to conditioning of the material, and the mass change of the specimen during test.

8.1.1 Density of Batt and Blanket Specimens—It has been found that it is important to measure the mass of the specimens in contact with the metering area. The area of the specimen directly measured shall be cut out and its mass determined after testing, unless the specimen must be retained for further testing.

8.2 Thermal Properties for One Specimen—When only one specimen is used, calculate the thermal conductance of the specimen as follows:

$$C = S \cdot E / \Delta T \quad (5)$$

and where applicable, calculate the thermal conductivity, as follows:

$$\lambda = S \cdot E \cdot (L / \Delta T) \quad (6)$$

8.3 Thermal Properties for Two Specimens—When two specimens are used, calculate the total thermal conductance, C , as follows:

$$C = S \cdot E / (\Delta T_a + \Delta T_b) \quad (7)$$

The λ factor, that is, the average thermal conductivity of the specimen is calculated as follows:

$$\lambda_{\text{ave}} = (S \cdot E / 2) \cdot (L_a + L_b) / (\Delta T_a + \Delta T_b) \quad (8)$$

where the subscripts refer to the two specimens.

8.4 Other derived thermal properties may be calculated but only under the provisions given in Practice C1045.

8.5 Thermal Properties for Two Transducers—All pertinent equations of 8.2 and 8.3 apply to this configuration, provided $S \cdot E$ will be replaced by $(S' \cdot E' + S'' \cdot E'') / 2$, where the subscripts ' and '' refer to the first and second heat flux transducer, respectively.

9: Report

9.1 The report of the results of each test shall include the following information with all data to be reported in both SI and inch-pound units unless specified otherwise.

9.1.1 The report shall be identified with a unique numbering system to allow traceability back to the individual measurements taken during the test performed.

9.1.2 Name and any other pertinent identification of the material including a physical description.

9.1.3 Description of the specimen and its relationship to the sample, including a brief history of the specimen, if known.

9.1.4 Thickness of the specimen as received and as tested.

9.1.5 Method and environment used for conditioning, if used.

9.1.6 Density of the conditioned specimen as tested, kg/m^3 .

9.1.7 Mass loss of the specimen during conditioning and testing, in percentage of conditioned mass, if measured.

9.1.8 Mass regain of the specimen during test, in percentage of conditioned mass, if measured.

9.1.9 Average temperature gradient in the specimen during test as computed from the temperatures of the hot and cold surfaces, K/m .

9.1.10 Mean temperature of the test, K or $^{\circ}\text{C}$.

9.1.11 Heat flux amount and direction through the specimen, W/m^2 .

9.1.12 Thermal conductance, $W/m^2 \cdot K$.

9.1.13 Duration of the measurement portion of the test, min or h.

9.1.14 For loose-fill materials, report the specimen preparation followed.

9.1.15 Date of test, the date of the last heat meter calibration, and the type or types of materials used.

9.1.16 Estimated or calculated uncertainty in reported values. It is optional as to which of the error analysis methods given in Annex A2 is used by the laboratory.

9.1.17 Orientation and position of the heat meter apparatus during test (vertical, horizontal, etc.), and whether the meter was against the hot or cold surface of the specimen and whether the edges of the specimen(s) were sealed or open to the ambient.

9.1.18 For direct reading apparatus, the results of the calibration of electronic circuitry and equipment or a statement of compliance including date, and a statement of compliance on linearity requirements.

9.2 In many cases a laboratory is requested to provide only the thermal conductivity at a specified mean temperature and a few pertinent physical properties, such as density, and test thickness. An abridged test report shall state "Abridged ASTM C518 Test Report" and shall include the thermal transmission property of interest, mean temperature, test thickness, and bulk density. It is mandated that an uncertainty statement shall be transmitted with the thermal transmission property. Compliance to Test Method C518 requires that the other test parameters specified in 9.1.1-9.4 to be recorded in the laboratory records.

9.3 For certification testing only, the specimens used in calibration shall be identified as to the type, thermal resistance, date of specimen certification, source of certification, expira-

tion date of calibration, and the certification test number. Where applicable include a statement of the laboratory accreditation of the test facility, including the date of the latest inspection.

9.4 Statement of compliance, or where circumstances or requirements preclude complete compliance with the procedures of the test, agreed exceptions. A suggested wording is "This test conformed with all requirements of ASTM C518- with the exception of (a complete list of exceptions follows)."

10. Precision and Bias

10.1 This section on precision and bias for the guarded hot plate apparatus includes a discussion of; general statistical terms; statistical control; factors affecting test results; ruggedness tests; interlaboratory comparisons conducted by ASTM Committee C-16; proficiency testing conducted under the auspices of the National Voluntary Laboratory Accreditation Program (NVLAP); and error propagation formulae.

10.2 The accuracy of a test result refers to the closeness of agreement between the observed value and an accepted reference value. When applied to a set of observed values, the accuracy includes a random component (imprecision) and a systematic component (bias). The variability associated with the set of observed values is an indication of the uncertainty of the test result. Additional information on statistical terminology is available in Terminology E456.

10.3 The user of the heat-flow-meter apparatus shall demonstrate that the apparatus is capable of performing in a consistent manner over time (29, 35). The use of control charts (see Manual 7 (34)) to monitor the operation of the heat-flow-meter is one recommended way to monitor the control stability of the apparatus. When possible, it is recommended that a reference material traceable to a national standards laboratory be used as the control specimen. Ideally, the long-term variation should be no greater than the short-term variability.

10.4 A series of three round robins was conducted between 1976 and 1983, as reported by Hust and Pelanne (21), and employed low density fiberglass specimens from 2.54 to 10.2 cm. thick with densities ranging from 10 to 33 kg/m^3 . A total of twelve laboratories were involved in these studies. The interlaboratory imprecision, at the two standard deviation level when analyzed using Practice E691, was found to vary from 1.92 to 3.54 % between 2.54 and 10.2 cm.

10.5 A round robin conducted in 1987, as reported by Adams and Hust, included eleven participating laboratories testing a fiberglass blanket and several types of loose-fill insulations (24). The blanket insulation had an interlaboratory imprecision of 3.7 % at the two standard deviation level. The loose-fill interlaboratory imprecision was found to be > 10 % for different materials at the two standard deviation level. It has been suggested that the principal cause for the significant differences observed is the various specimen preparation techniques used by the various laboratories.

10.6 A round robin conducted in 1990, as reported by McCaa and Smith, et. al., included ten participating laboratories testing a fiberglass blanket and several type of loose-fill insulation (25). The blanket insulation had an interlaboratory imprecision of 2.8 % at the two standard deviation level. The


C518 - 10

loose-fill interlaboratory imprecision was found to be 5.0 % for perlite, 5.8 % for cellulose, 9.4 % for unbonded fiberglass, and 10.5 % for mineral wool at the two standard deviation level. This represented a significant improvement over the 1987 results and is attributed to a more concise specimen preparation procedure in Practice C687.

10.7 An Interlaboratory "Pilot Run" of Small Heat-Flow-Meter Apparatus for ASTM C518 was reported in 1999 (32). A precision statement was prepared in accordance with Practice E691. The precision statement is provisional because an insufficient number of materials were involved. Within 5 years additional data will be obtained and processed that meet the requirements of Practice E691. A bias statement was prepared following Test Method C177. Bias as compared to results from

the Test Method C177 apparatus was found to be statistically insignificant at the $\alpha = 5\%$ level (95 % confidence interval) for the materials studied.

10.8 *Proficiency Tests*—Interlaboratory testing carried out between nine laboratories under the National Voluntary Laboratory Accreditation Program currently is showing an interlaboratory imprecision of 2.12 % at the two standard deviation level based on testing of similar but not identical specimens (22, 23).

11. Keywords

11.1 calibration; error analysis; heat flow meter apparatus, thermal resistance; heat flux; instrument verification; thermal conductivity; thermal testing

ANNEXES

(Mandatory Information)

A1. EQUIPMENT DESIGN

A1.1 The exposed surfaces of the plates and the heat flux transducer, that is, the surfaces making contact with the specimens, shall be painted or otherwise treated to have a total hemispherical emittance of greater than 0.8 at their operating temperatures (see Note A1.1).

NOTE A1.1—Hard anodizing of aluminum produces a surface with a total hemispherical emittance of approximately 0.85. Several paints are available, which when applied as directed, produce a total hemispherical emittance of approximately 0.86.

A1.2 *Plate Assemblies, Hot and Cold*—The two plate assemblies should provide isothermal surfaces in contact with either side of the test specimen. The assemblies consist of heat source or sink, a high conductivity surface, means to measure surface temperature, and means of support. A heat flux transducer may be attached to one, both, or neither plate assembly, depending upon the design, (see Section 6). In all cases, the area defined by the sensor of the heat flux transducer is called the metering area and the remainder of the plate is the guard area.

A1.2.1 A means shall be provided to maintain the temperature of the plate assemblies at the desired level. Examples are fluid baths, electrical heaters, or thermoelectric coolers, or a combination thereof (7-9).

A1.2.2 If a heat flux transducer is located at the midplane of the specimens (see Fig. 2), then means shall be provided to determine the average temperature of the transducer in order to apply temperature corrections to the calibration, except when the test temperatures are equal to those used in calibration, in which case no correction is required. If a matched pair of specimens is tested, the temperature of the transducer can be computed from the temperatures of the plate assemblies.

A1.2.3 The plate assemblies shall be sufficiently rigid to maintain flatness and parallelism. For an apparatus designed to be used over wide ranges of conductivity and thickness (thermal resistances) the flatness and parallelism of the plates

should be 0.02 % of the maximum linear dimensions of the plates (see Note A1.2). One way to check this is to use standard gauge blocks to generate a map over the metering area (10).

NOTE A1.2—The planeness of the surface can be checked with a straightedge, of a length greater than the width or diameter of the unit, held against the surface and viewed with a light behind the straightedge. Departures as small as 25 μm are readily visible, and larger departures can be measured using shimstock or thin paper.

A1.2.3.1 It is important to maintain the parallelism of the plates for several reasons. In most cases it is the plate separation, which is measured in order to determine specimen thickness. Furthermore, the plate parallelism is important in maintaining consistent surface contact with specimens in repeat testing, such as calibration, and is required to maintain a uniform temperature difference across the specimen(s). If the plate temperatures are cycled continuously during testing, the flatness needs to be checked periodically.

A1.2.4 Plate flatness may become critical when measuring specimens with less thermal resistance than the calibration standards, irrespective of the thickness or rigidity of the calibration standard. For rigid thin specimens the criteria given in A1.2.3 may not be sufficient.

A1.2.5 The rigidity, flatness, and parallelism of the plates may impede the testing of rigid specimens where it is not possible to obtain good surface contact. In such cases, the use of a thin sheet of suitable homogeneous material may be interposed between the specimen and the plates surfaces. This thin sheet should have a low thermal resistance relative to the specimen. The resistance of the thin sheet should be determined using a Test Method C177 apparatus. The resistance of the composite sandwich (sheet-rigid specimen-sheet) then is determined and the value of the sheet resistance subtracted from the total resistance. Caution should be exercised when using such a practice as it is prone to adding more uncertainty to this method.

A1.3 Temperature Measuring and Control Systems:

A1.3.1 The surfaces of the plate assemblies in contact with the specimen(s) shall be instrumented with precision temperature sensors such as thermocouples, platinum resistance thermometers (RTD), and thermistors. Temperature sensors shall be mounted in grooves so as to be flush with the surface in contact with the specimen(s).

A1.3.2 No strict specification is given as the number of temperature sensors that shall be used for each surface; however, the user shall report the uncertainty of the temperature measurement, including the component due to temperature nonuniformity across the surface. In some cases where temperature mapping of the plate surfaces has indicated high uniformity under all conditions of use, one thermal sensor per surface has been used satisfactorily.

A1.3.2.1 Special precautions should be taken to ensure that the temperature sensors are anchored thermally to the surface to be measured and that the temperature gradients along the wires leading to the sensors are minimized. If thermocouples on opposing surfaces are connected differentially, they shall be electrically insulated from the plates with a resistance of 1 megaohm or greater (5, 6).

A1.3.2.2 Thermocouples mounted in the surfaces of the plates or set into the surfaces of specimens should be made of wire no longer than 0.25 mm in diameter (No. 30 B and S gage). For highest accuracy only "special limit" thermocouples should be used. In addition, even these "special limit" thermocouples should be checked for nonhomogeneities in the wire. For information concerning voltage output and accuracy of thermocouples in the cryogenic temperature range, and installation, see Refs (7, 8).

A1.3.2.3 Temperature sensors should be calibrated to an accuracy equivalent to that for thermocouples conforming to Tables E230. The precision of the temperature measuring system may need to be better than this to detect the effect of drift on the results discussed in Appendix X3. The accuracy required by a heat flow meter apparatus can best be determined by carrying out an error analysis (see Annex A2), and then calibrating the temperature sensors to the degree required.

A1.3.2.4 In the special case where the heat flow meter apparatus is used only for repetitive tests on one material and the same plate temperatures are used for calibration, (and where the standards are tested at the same temperatures) the accuracy of the calibration of the temperature sensors will not be as critical since any errors will remain constant and be included in the calibration.

A1.4 Heat Flux Transducer:

A1.4.1 *Types of Heat Flux Transducer*—The types of heat flux transducers are described in Practice C1046. The gradient type, often used in the heat flow meter apparatus, consists of a slab of material, the "core," across which the temperature gradient is measured, normally with a thermopile. The main transducer surfaces are assumed to be isothermal, so the heat flow will be normal to them. Precautions shall be taken to limit the effect of heat flow through the leads on the output of the thermopile. Often the heat flux transducer also is instrumented to measure one of the surface temperatures of the specimen(s).

A1.4.2 *Surface Sheets*—Both surfaces of the transducer should be covered with a layer of material as thin as is compatible with protection from thermal shunting of the thermopile. The exposed surfaces of the heat flux transducer shall be finished smoothly to conform to the desired geometric shape to within the limits of A1.2.4.

A1.5 *Plate Separation, Specimen Thickness*—A means shall be provided to determine the average separation between the heating and cooling plate surfaces during operation. Rigid specimens generally act as the spacers themselves, and plate separation is determined by their thickness at operating temperature. In this case, a small constant force generally is applied to hold the plates against the specimen. It is unlikely that a pressure greater than 2.5 kPa will be required. For easily compressible specimens, small stops interposed between the corners of the hot and cold plates, or some other positive means shall be used to limit the compression of the specimens (see Note A1.3). Provision shall be made for checking the linearity of any thickness measuring system.

NOTE A1.3—Because of the changes of specimen thickness possible as a result of temperature or compression by the plates, it is recommended that specimen thickness be measured in the apparatus, at the existing test temperature and compression conditions whenever possible.

A1.6 *Edge Insulation*—Heat loss from the outer edges of the heat flow meter apparatus and specimens shall be restricted by edge insulation or by governing the surrounding air temperature or by both methods. The three different configurations differ in their susceptibility to edge heat losses as is discussed in Appendix X2 (2, 4, 9, 10).

A1.6.1 For all three configurations, the susceptibility to edge heat losses is related strongly to the sensitivity of the transducer to temperature differences along its main surfaces, and therefore, only experimental checks while changing environmental conditions can confirm, for each operating condition, the magnitude of the effect of edge heat losses on measured heat flux. This error should be smaller than 0.5 %.

A1.7 *Measuring System Requirements*—The apparatus measuring system shall have the following capabilities:

A1.7.1 The uncertainty of the measurement of the temperature difference across the specimens shall be within ± 0.5 % of the actual temperature difference.

A1.7.2 A voltage accuracy of better than 0.2 % of the minimum output (from the transducer) to be measured.

A1.7.3 Sufficient linearity so that the system contributes less than 0.2 % error at all outputs.

A1.7.4 Sufficient input impedance so that the system contributes less than 0.1 % error for all readings.

A1.7.5 Sufficient stability so that the system contributes less than 0.2 % error during the period between calibrations, or 30 days, whichever is greater.

A1.7.6 Adequate noise immunity so that less than 0.2 % rms noise occurs in the readings.

A1.8 *Proven Performance*—The test results obtained by this test method only can be assured if the limitations of the apparatus are known. See Appendix X3 for further details. To



establish these limitations, one must prove the performance by comparing the results with materials of similar thermal properties previously tested on a guarded hot plate apparatus as those to be evaluated.

A1.8.1 A single point of reference may lead to serious errors. Select a range of transfer standards having known thermal transmission properties, which cover the range of values to be tested, in both resistance and thickness. If a range of standards is not available running tests on a single standard at different ΔT 's will provide verification of linearity. On equipment with fixed plate temperatures provision shall be made for calibration of electronic circuitry independent of the remainder of the apparatus.

A1.8.2 If the apparatus is to be used at thicknesses greater than that of the available reference materials, a series of calibration measurements shall be performed to insure that the equipment does not introduce additional errors, which may be due to lateral heat losses or gains brought about by insufficient guarding (4, 10). One means of checking for these errors is to

use multiple thicknesses of the calibration standards. If these are stacked with a radiation blocking septum between each of the standards, the first approximation is that the total thermal resistance is the sum of the individual thermal resistances.

A1.9 *Environmental Control*—In many applications, it is desirable to control the environment surrounding the test specimen to reduce edge heat losses, and it is especially important when the mean test temperature is below the ambient temperature, in order to avoid condensation on the cold plate. A cabinet or enclosure surrounding the isothermal plates and the specimens to maintain the ambient temperature at the mean temperature of the specimen also may be used as a means to maintain the dew point temperature at least 5 K lower than the temperature on the cold plates, in order to prevent condensation and moisture pickup by the specimen. Any environmental control system employed in conjunction with a heat flow meter apparatus shall be capable of maintaining its set point condition within $\pm 1^\circ\text{C}$ in temperature.

A2. EQUIPMENT ERROR ANALYSIS

A2.1 A complete error analysis is complex; however, some form of error analysis is mandated for compliance with this test method. Such an error analysis is useful for estimating which parameters may contribute to the overall uncertainty in the measurements. It is the option of the manufacturer or user of the apparatus to follow the guidelines given in A2.9 or A2.10 to determine the uncertainties. It is mandated, however, that any result shall be accompanied with its uncertainty.

A2.2 For any one given apparatus, a careful error analysis as outlined here, in most cases, will show up any major difficulties, which may need correcting in order to improve the measurement accuracy of the heat flow meter apparatus. The performance of this analysis involves consideration of the following points.

A2.3 Estimates of errors in each individual measurement procedure and propagation of these errors to the final result.

A2.4 Measurements to determine apparatus variability to intentional deviations from normal operations.

A2.5 Measurements on reference materials and participation in round-robin programs.

A2.6 For a more complete discussion of error analysis the reader is directed to the ISO "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurements" (20).

A2.7 *Calibration Errors:*

A2.7.1 Heat flux transducer calibration is temperature dependent and must be considered if the transducer temperature is changed.

A2.7.2 Specimen temperature gradient may affect the calibration factor.

A2.7.3 Heat flow meter apparatus calibration may be dependent on heat flux.

A2.7.4 Temperature sensor inaccuracy may result in the standard being tested at inappropriate temperature conditions.

A2.7.5 Hot and cold plate surface emittance shall be similar to the primary apparatus on which the standard was measured.

A2.7.6 Heat loss from specimen edges may be significant under some conditions. Factors to be considered when evaluating edge losses are thickness of specimen, conductivity of specimen, width of guard, amount of external insulation, and edge ambient temperature.

A2.7.7 Plate separation and parallelism inaccuracies can produce errors.

A2.7.8 Check the voltage output of the heat flux transducer to be sure that when the heat flux is zero there is no voltage output by the heat flux transducer. If there is a voltage output with no temperature gradient, analyze the problem and make corrections before proceeding with testing. The state of zero heat flux is usually accomplished by leaving the apparatus completely turned off in a constant temperature room for a sufficient length of time such that the entire apparatus is at the same temperature.

A2.7.9 Some heat flux transducers may be pressure sensitive.

A2.7.10 Decisions on outlying calibration points should have statistical basis, including input from documents such as Practice E178.

A2.7.11 Lackey et al (30) studied the impact of material, thickness, mean temperature and temperature difference and on calibration. The study involved 91 individual measurements and 6 transfer standards. Testing was carried out over a period of six months. Specimen thickness varied between 26 to 158 mm, mean temperatures between 0 to 40°C, temperature differences between 10 and 40°K and two types of insulating



material. Results showed that all these factors did not significantly influence the calibration procedure adopted for the apparatus used. The calibration method was also successfully applied to two other heat flow meter apparatus.

A2.8 Error and Uncertainty Estimates:

A2.8.1 The uncertainties in measurements on the heat flow meter apparatus can be divided into the three general categories of (1) uncertainty of the precision of the calibrating specimen, (2) uncertainty in the precision of the apparatus, and (3) uncertainty due to the fact that the calibrating specimen and test specimen are not identical.

A2.8.2 National standards laboratories generally express the expanded uncertainty of a measurement artifact (that is, calibration specimen) as defined by current international guidelines (20, 33). The user must evaluate their measurement uncertainty by proper inclusion of the uncertainty of the calibration specimen reported by the national standards laboratory.

A2.8.3 The repeatability of a heat flow meter apparatus can be determined by making independent replicate measurements on the same specimen by the same operator in the shortest practical time. Independent measurements require the removal, re-conditioning, and subsequent installation of the specimen.

NOTE A2.1—With the application of proper laboratory procedures, the user could realize a repeatability coefficient of variation (CV %) of 0.5 % or less. By conducting replicate measurements at regular time intervals, the user can demonstrate that the apparatus is capable of performing in a consistent manner over time. The use of control charts is recommended to monitor the control stability of the heat flow meter apparatus.

A2.8.4 The third category of uncertainties is much more difficult to evaluate. This involves the uncertainties due to errors associated with the calibration standard and unknown test specimen not having identical heat transfer properties. A list of potential uncertainties is given in 8.1. An example of this is a laboratory having standards at 25.4 mm, 76.2 mm, and 152.4 mm and running a test at 127 mm. While it is possible to reduce the uncertainty by following good laboratory procedures, there is always a small but real uncertainty.

A2.9 Interlaboratory comparison results can be found in Refs (21, 22, 23, 24, 28, 36, 37). In addition there was a workshop on measurement errors and methods of calibration of the Heat Flow Meter Apparatus held by ASTM C-16 at Williamsburg, VA, on April 10, 1994 (12, 13, 29, 30, 31).

A2.10 To illustrate a procedure of error analysis estimation, consider the operational definition of thermal conductivity:

$$\lambda = S \cdot E \cdot L / \Delta T \quad (\text{A2.1})$$

The uncertainties in S , E , L , and ΔT (δS , δE , δL , and $\delta \Delta T$) can be used to form the uncertainty $\delta \lambda$ by the usual error propagation formula where the total uncertainty is calculated from the square root of the sums of the squares of the individual standard deviations.

$$(\delta \lambda)^2 = (\delta S/S)^2 + (\delta E/E)^2 + (\delta L/L)^2 + (\delta \Delta T / \Delta T)^2 \quad (\text{A2.2})$$

This equation assumes that the errors in S , E , etc., are random and independent of each other since the covariance terms are omitted. This is valid here if different instrumentation is used for measurements on each of the variables (20). In order to use Eq A2.2, the operator must estimate the maximum uncertainty for each variable and examine the sources of error to determine which can occur randomly and which can occur simultaneously.

A2.10.1 Care shall be taken to evaluate properly all of the uncertainties in the variables S , E , L , etc. For example, obvious sources of error in E are those caused by extraneous transverse heat flow along leads and deviations from one dimensional heat flow; however, an often neglected but important heat leak is that caused by a temperature drift of the transducer itself. This can be estimated readily from the heat capacity of the transducer assembly and the drift detection limit of the measurement system. The error in ΔT , δT , can be caused by calibration errors and measurement errors, but also by incorrect placement, incorrect thermal anchoring, and disturbances introduced by the thermocouple itself.

A2.11 Experiments should be performed to determine the variability of the test results to deviations from normal operating conditions. This variability combined with the estimated control stability under normal operating conditions can be used to estimate the error from this source. As one example, the effect of an imperfect guard balance control can be determined by purposely offsetting the guard, if this is possible, by a sufficient ΔT in both directions and measuring the differences in the measured output.

A2.11.1 Care should be taken to not use such large offsets that nonlinear effects occur in the specimens. These results combined with the probable value of the offset during normal operation yield the error due to imperfect guard balance.

A2.12 The total estimated imprecision can be listed in a table of errors, such as shown in Table A2.1. This table is shown as an example only and does not represent any one particular heat flow meter apparatus since the errors will be specific to each apparatus.

TABLE A2.1 Estimation of Random and Systematic Errors at Room Temperature

Variable	Absolute Variations		Percent Variations	
	Random	Systematic	Random	Systematic
ΔT	0.01 K	0.02 K	0.04	0.40
L	0	0.1 mm	0	0.40
E	0	0.01 V	0	0.01
S	0	2 mW	0	0.2
Temperature drift	0.05 K	0.05 K	0.01	0.01
calibration	0	0.1 K	0	0.4
Heat flow drift	1 mW/m ²	1 mW/m ²	0.2	0.2
lateral	1 mW/m ²	2 mW/m ²	0.2	0.2
λ	0.2 mW/m ² ·K	0.3 mW/m ² ·K	0.8	1.2

APPENDIXES

(Nonmandatory Information)

X1. (SEE FIGURES)

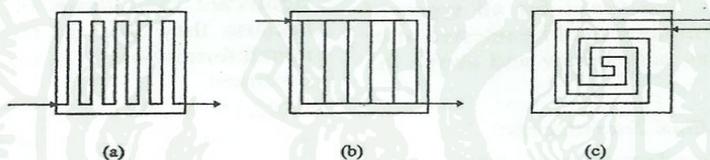


FIG. X1.1 Some Layouts of the Liquid Paths in Heating or Cooling Plates

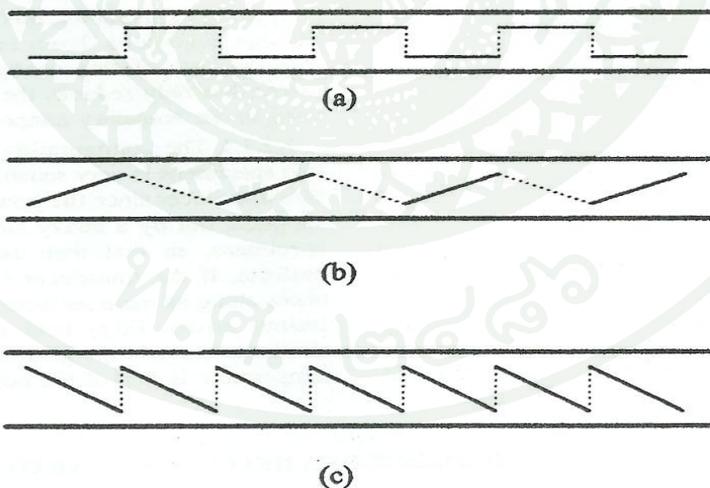
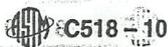


FIG. X1.2 Schematic Designs of Transducers



X2. RESPONSE OF HEAT FLUX TRANSDUCERS

X2.1 Configurations—The general features of a heat flow meter apparatus with the specimen or the specimens installed are shown in Section 6. A heat flow meter apparatus consists of two isothermal plate assemblies, one or more heat flux transducers, equipment to measure and control temperatures, thickness, and measure the output of the heat flux transducers and equipment to control the environmental conditions when needed. Each configuration will yield equivalent results if used within the limitations stated in this test method (24). For a particular heat flux transducer, the test configuration that has the fastest response, that is the shortest settling time, is best determined by experiment. Four specimens of different materials, such as an urethane foam, ceramic fiber board, a rubber, and a high conductivity, low-thermal capacity material, should be tested in each configuration. A study of these results will allow either the selections of the proper configuration for each type of material or the selection of a reasonable configuration for all types.

X2.1.1 In order to predict settling times for all types of specimens, each of the above specimens shall be retested after being conditioned to temperatures both below and above the mean temperature of the test.

X2.2 Time Response of Heat Flux Transducers:

X2.2.1 High Thermal Resistance Transducer—A transducer with a high thermal resistance generally is used when the transducer is attached to one or both of the isothermal plates. When the specimens are preconditioned to the mean temperature of the test and when the plates are capable of both heating and cooling the specimens, the time response of a high resistance transducer will be more rapid than a comparable guarded hot plate apparatus. If the heat flux transducer has appreciable mass, the response will not be rapid.

X2.2.1.1 When two transducers are used and attached to the isothermal plates, these can be used to obtain a very rapid response times if both plates are capable of heating and cooling and if the outputs of both transducers are summed (25).

X2.2.2 Low Thermal Resistance Transducers—The low-thermal resistance, gradient-type heat flux transducer is better suited to the configuration where the transducer is not attached to either plate. The temperature drop across the low-resistance transducer is small enough that the two specimens can be considered as halves of a single specimen. When the specimens are first conditioned to the mean temperature of the test and

when the specimens are identical, the response is sufficiently rapid to be used for quality control work.

X2.2.2.1 Where half thicknesses of the normal specimen can be used, it can be more rapid than the single transducer configuration, especially when each of the specimens is first conditioned to the mean temperature at which it will be tested.

X2.3 Sensitivity of Configurations to Edge Losses:

X2.3.1 Heat loss from specimen edges may be significant under some conditions. Factors to be considered when evaluating edge losses are thickness of specimen, conductivity of specimens, width of the guard, amount of external insulation, and edge ambient temperature.

X2.3.2 The configuration with the transducer mounted on one isothermal plate is similar to the guarded hot plate apparatus regarding edge heat losses through the specimen. The edge heat losses in the transducer may be much more significant than those in the guarded hot plate apparatus because they may produce errors due to the temperature nonuniformity on the side of the transducer in contact with the specimen.

X2.3.3 The configuration with two transducers mounted on the isothermal plates is the most insensitive to edge conditions if the average of the readings of the two meters is assumed to be the measured heat flux per unit area through the specimen. If the plates are perfectly uniform in temperature, if the two transducers are exactly equal in the layout of the thermopile junctions, and if the specimen has thermal conductivity independent of temperature, this configuration is nearly insensitive to edge conditions. Even under these ideal conditions, however, the use of this configuration does not eliminate edge losses, but only reduces the apparatus susceptibility to variations in the boundary temperatures.

X2.3.4 The configuration with the transducer between the two specimens is very sensitive to edge heat losses on the heat flux transducer since the power that flows through the edges is supplied, not by a heavy isothermal metal plates, but by the specimens, so that their surface temperatures may not be uniform. If the transducer is sensitive to temperature differences along its main surfaces, edge heat losses may now create serious errors. Edge heat losses within the specimens are similar to those in the guarded hot plate when the surrounding temperature is that of the hot or cold plate.

X3. PROVEN PERFORMANCE OF A HEAT FLOW APPARATUS

X3.1 Proven Performance—Any heat flow meter apparatus that is new or has been modified shall be tested for the following characteristics and corrections shall be made where a change of greater than one percent occurs in the transducer

output due to the effects of X3.1.1-X3.2 over the range of operation and are recommended for changes of 0.3 % over the range of operation.

X3.1.1.1 *Zero Offset*—This condition can be achieved by assuring that both plate assemblies are at the same temperature. If there is any output from the transducer for zero heat flux, this may be due to any or all of the following:

X3.1.1.1.1 Electrical contact resistance on a transducer with low output. This may be corrected if one can improve the connections to eliminate the problem. This type of output may be temperature dependent.

X3.1.1.1.2 Also, check grounding circuits because such a signal may be due to AC pickup in the leads from the transducer.

X3.1.1.1.3 If after checking X3.1.1.1 and X3.1.1.2 there is still a zero off-set, it may be possible to correct for this by assuring that the calibration curve of output versus heat flux is linear over the range of operating conditions.

X3.1.1.1.4 Susceptibility to warm or cold plate temperature nonuniformity. Check for temperature nonuniformity under all operating conditions and over a range of specimen thermal resistances.

X3.1.1.1.5 Drift in the transducer due to material aging of delamination. If such a change is noted, this should be used to determine the required calibration frequency.

X3.1.1.1.6 Temperature coefficient of the transducer sensitivity. This depends on the type of temperature detectors used in the transducer (thermocouple materials used in the thermopile) and the type of material used for the transducer core. If it is

found that the sensitivity is temperature dependent, a curve of sensitivity versus temperature shall be developed and used to correct measurement data.

X3.1.1.1.7 Heat flow down the transducer leads. One possible way to check for this is to move one's hand across the surface of the transducer between the metering area and the point where the leads exit the plate assembly, while observing the transducer output. In a well designed plate or transducer assembly there should be no observable output from the transducer except in the metering area.

X3.1.1.1.8 Effect of the thermal conductivity of the specimen on the sensitivity of the transducer. A "thermal shorting" effect between elements caused by low thermal resistance between the sensors of the thermopile or a funneling of heat through the sensors can change the sensitivity of the transducer. This can best be tested by running specimens with widely different thermal resistances.

X3.1.1.1.9 Effect of loading pressure on the transducer sensitivity. This should only be a problem if the transducer core is flexible.

X3.2 Finally, measurements shall be performed on transfer standards or accepted reference materials, to prove the performance of the apparatus. Care should be taken to ensure that the reference materials have characteristics similar to the specimens to be tested, and that the uncertainties of the standards themselves are known.

REFERENCES

- (1) Tye, R.P., Ed., *Thermal Conductivity Vols I and II*, Academic Press, London and New York, 1969.
- (2) Degenne, M., Klarsfeld, S., Barthe, P., "Measurement of the Thermal Resistance of Thick Low-Density Mineral Fiber Insulation," *Thermal Transmission Measurements of Insulation, ASTM STP 660*, ASTM, 1978, p.130.
- (3) Pelanne, C.M., "Does the Insulation Have a Thermal Conductivity? The Revised ASTM Test Standards Require an Answer," *Thermal Transmission Measurements of Insulation, ASTM STP 660*, ASTM 1978, pp. 69-70.
- (4) Pelanne, C.M., "Discussion on Experiments to Separate the Effect of Thickness from the Systematic Equipment Errors in Thermal Transmission Measurements," DOE/ASTM C 16.00 Thermal Insulation Conference October 22-25, 1978. Tampa, FL, *ASTM STP 718*, ASTM, 1980, pp. 322-334.
- (5) Zabawsky, Z., "Construction and Calibration of a Heat Flow Meter for Thermal Conductivity Measurements," *Paper No. 68-520, ISA*, 1968, pp. 1-6.
- (6) Hollingsworth, M., Jr., "An Apparatus for Thermal Conductivity at Cryogenic Temperatures Using a Heat Flow Meter," *Symposium of Thermal Conductivity Measurements of Insulating Materials at Cryogenic Temperatures, ASTM STP 411*, 1967, p. 43.
- (7) Pelanne, C. M., and Bradley, C. B., "A Rapid Heat Flow Meter Thermal-Conductivity Apparatus," *Materials Research and Standards*, Vol 2, No 7, July, 1962, p. 549.
- (8) DePonte, F., and Di Filipo, P., "Design Criteria for Guarded Hot Plate Apparatus," *Heat Transmission Measurements in Thermal Insulations, ASTM STP 544*, R. P. Tye, Ed., 1974, p. 97.
- (9) DePonte, F., and Di Filipo, P., "Some Remarks on the Design of Isothermal Plates," *Quaderno No. 37, Istituto di Fisica Tecnica, Universita di Padova*, 1972.
- (10) Rennex, B., "Error Analysis for the National Bureau of Standards 1016 mm Guarded Hot Plate," *NBSIR 83-2674*, Washington, DC, 1983.
- (11) Tye, R.P., Coumou, K.G., Desjarlais, A.O. and Haines, D.M., "Historical Development of Large Heat Flow Meter Apparatus for Measurement of Thermal Resistance of Insulations," *ASTM STP 922*, ASTM, 1987, pp. 651-664.
- (12) Bomberg, M., "A Workshop on Measurement Errors and Methods of Calibration of a Heat Flow Meter Apparatus," *Journal of Thermal Insulation*, Vol 18, October, 1994, pp. 100-114.
- (13) Scott, J. A., and Bell, R. W., "Discussion of Heat Flow Meter Apparatus Calibration and Traceability Issues for Thermal Conductivity Measurements," *Journal of Thermal Insulation*, Vol 18, October, 1994, pp. 146-162.
- (14) Albers, M.A., and Pelanne, C.M., "Experimental and Mathematical Study of the Effect of Thickness in Low-Density Glass-Fiber Insulation," *Thermal Conductivity 17*, Plenum Press, New York and London, J.G. Hust, Ed., 1983, pp. 471-482.
- (15) Bomberg, M., Pelanne, C.M., and Newton, W.S., "Analysis of Uncertainties in Calibration of a Heat-Flow Meter Apparatus," *Thermal Conductivity 18*, Plenum Press, New York and London, T. Ashworth and D.R. Smith, Eds., 1985, pp. 254-272.
- (16) De Ponte, F. and Maccato, W., "The Calibration of Heat Flow Meters," *Thermal Insulation Performance, ASTM STP 718*, ASTM 1980, pp. 237-254.
- (17) Hollingsworth, M., "Experimental Determination of the Thickness Effect in Glass Fiber Building Insulation," *ASTM STP 718*, ASTM 1980, pp. 255-271.
- (18) Bode, K-H., "Thermal Conductivity Measurements with the Plate Apparatus: Influence of the Guard Ring Width on the Accuracy of Measurement," *ASTM STP 879*, ASTM, 1985, pp. 29-48.


C518 - 10

- (19) Shirliffe, C.J., "Establishing Steady-State Thermal Conditions in Flat Slab Specimens," *Heat Transmission Measurement in Thermal Insulations*, ASTM STP 544, ASTM, 1974, p. 13.
- (20) Guide to the Expression of Uncertainty in Measurements, ISBN 92-67-10188-9, 1st Ed. ISO, Geneva, Switzerland, 1993.
- (21) Hust, J.G. and Pelanne, C.M., "Round Robins on the Apparent Thermal Conductivity of Low-Density Glass Fiber Insulations Using Guarded Hot Plate and Heat-Flow-Meter Apparatus," NBSIR 85-3026, May 1985.
- (22) Horlick, J. and Berger, H.W., "NVLAP and the Thermal Insulation Proficiency Testing Program," *Journal of Thermal Insulations*, Vol 8, April 1985, pp. 278-297.
- (23) Horlick, J., "National Voluntary Laboratory Accreditation Program Proficiency Testing for Thermal Insulation Materials, Laboratory Accreditation Program Round 9—August 1983," National Institute of Standards and Technology Publication NBSIR 84-2890, May 1980.
- (24) Adams, R.D. and Hust, J.G., "A Round Robin on Apparent Thermal Conductivity of Several Loose-Fill Insulations," *Insulation Materials, Testing and Applications*, ASTM STP 1030, McElroy and Kimpfen, Eds., ASTM, June 1990, p. 263.
- (25) McCaa, D.J., Smith, D.R., et al., "Interlaboratory Comparison of the Apparent Thermal Conductivity of a Fibrous Batt and Four Loose-Fill Insulations," *Insulation Materials: Testing and Applications*, 2nd Volume, ASTM STP 1116, ASTM 1991, pp. 534-557.
- (26) Hust, J. G., "Status of Thermal Conductivity Standard Reference Materials at the National Bureau of Standards," *Thermal Conductivity 18*, Plenum Press, New York and London, Edited by T. Ashworth and David R. Smith, 1985, pp. 317-326.
- (27) Pelanne, C. M., "Discussion on Experiments to Separate the 'Effect of Thickness' from Systematic Equipment Errors in Thermal Transmission Measurements," ASTM STP 718, D. L. McElroy, R. P. Tye, Eds., ASTM, 1978, pp. 322-334.
- (28) Tye, R. P., and Baker, C. F., "Development of Experimental Data on Cellular Plastic Insulations Under Simulated Winter Conditions," *Thermal Insulation: Materials and Systems*, ASTM STP 922, F. J. Powell, S. M. Matthews, Eds., 1987, pp. 518-537.
- (29) Zarr, R. R., "Control Stability of a Heat-Flow-Meter-Apparatus," *Journal of Thermal Insulation and Building Envelopes*, Vol 18, October 1994, pp. 116-127.
- (30) Lackey, J., Normandin, N., Marchand, R., and Kumaran, K., "Calibration of a Heat Flow Meter Apparatus," *Journal of Thermal Insulation and Building Envelopes*, Vol 18, October 1994, pp. 128-144.
- (31) Albers, M. A., "Calibration of Heat Flow Meters in Vacuum Cryogenic, and High Temperature Conditions," *Journal of Thermal Insulation and Building Envelopes*, Vol 18, April 1995, pp. 399-410.
- (32) Zarr, R. R., Lagergren, E. S., "Interlaboratory 'Pilot Run' Study of Small Heat-Flow-Meter Apparatus for ASTM C518," *Journal of Testing and Evaluation*, JTEVA, Vol 27, No.6, November 1999, pp. 357-367.
- (33) American National Standard for Expressing Uncertainty, U.S. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, ANSI/NCSL Z540-2-1997.
- (34) ASTM, Manual on Presentation of Data and Control Chart Analysis Manual 7, 6th Edition, 1991, Available from ASTM Headquarters, Request PCN:28-0070899-34.
- (35) Eisenhart, C., "Realistic Evaluation of the Precision and Accuracy of Instrument Calibration Systems," *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, Vol. 67C, No. 2, April-June 1963, pp. 161-187.
- (36) Smith S. A., Lynch J. J., Moore M. L., and Galbraith C. J., "A Round Robin Testing Program to Estimate the Precision of ASTM C518 for Measuring the k-Factor of Rigid Foam Product," *Journal of Thermal Insulation*, 14, January 1991, pp. 184-194.
- (37) Graves R. S., McElroy D. L., Miller R. G., Yarborough D. W., and Zarr R. R., "Technical Note: A Comparison of Heat-Flow-Meter Tests for Four Laboratories," *Journal of Thermal Insulation*, 15, April 1992, pp. 354-358.

ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org). Permission rights to photocopy the standard may also be secured from the ASTM website (www.astm.org/COPYRIGHT).



ภาคผนวก ข
รายงานการทดสอบค่าการนำความร้อน โดยกรมวิทยาศาสตร์บริการ)



No. 0307/ **11563**

To Ms. Thitiwan Leumkanchanaphan

The Department of Science Service presents the test report for the sample named “Thermal insulation board from narrow leaved cattail fiber 200, 300 and 400 kg/m³” Laboratory No.L54/04506.1- L54/04506.3 as the total of 3 samples with reference to the request No.L54/04506 dated 26 May 2011

Enclosed herewith the following result avails for your acknowledgement.

Department of Science Service



Physics and Engineering Program

Tel. 0 2201 7130

Fax 0 2201 7127

E-mail: physics@dss.go.th

แบบ ทศ.7



Department of Science Service

TEST REPORT

Sample's name	Mark / Brand	Laboratory No.
Thermal insulation board from narrow leaved cattail fiber		
200 kg/m ³		L54/04506.1
300 kg/m ³		L54/04506.2
400 kg/m ³		L54/04506.3

Test Result

Thermal Conductivity, W/m.K

L54/04506.1	0.0438
L54/04506.2	0.0567
L54/04506.3	0.0606

Customer's name	Ms. Thitiwan Leumkanchanaphan
Customer's address	Department of Physics Faculty of Science Kasetsart University 50 Phaholyothin Rd. Lad yao Chatuck Bangkok 10900
Sample's description	Fiber sheet size: 1x1 ft, (two sheets.)
Test date	5 July 2011
Test method	ASTM C518

Approved by

(Mr. Surin Athakitkarnka)

Reported by

(Mr. Puckanai Thongthiumporn)

Scientist, Senior Professional Level

Scientist, Senior Professional Level

This report is only valid for the sample received. The above statement is not intended for advertising purposes and shall not be reproduced or shall not manifest partially without the written permission of the Department of Science Service.

Department of Science Service, Ministry of Science and Technology
Rama VI Road, Ratchathewi, Bangkok 10400, Thailand

Page 2/2





Available online at www.sciencedirect.com



APCBEEES Procedia 00 (2011) 000–000

**APCBEEES
Procedia**

www.elsevier.com/locate/procedia

ICESD 2012: 5-7 January 2012, Hong Kong

A Study of Physical, Mechanical and Thermal Properties for Thermal Insulation from Narrow-leaved Cattail Fibers

Thitiwan Luamkanchanaphan^a, Sutharat Chotikaprakhan^{1*},
Songklod Jarusombati^b

^aDepartment of Physics, Faculty of Science, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

^bDepartment of Forest Products, Faculty of Forestry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

Abstract

The objective of this research was to study physical, mechanical and thermal properties of insulation boards prepared from narrow-leaved cattail fibers by using Polymeric Methylene Diphenyl Diisocyanate (pMDI) as a binder. Hot pressing was employed to produce single layered plain thermal insulation boards with the size 350x350x10 mm. The physical, mechanical and thermal properties of the boards were investigated. The test results showed that the insulation boards from narrow-leaved cattail fibers had good physical and mechanical properties tested according to the standard of TIS. 876-2547. Thermal conductivity measured in accordance with the ASTM C518 revealed that the board with a density of 200-400 kg/m³ had the thermal conductivity values ranging from 0.0438-0.0606 W/m K, which was less than that of fibrous materials and cellular materials, such as low-density wheat straw board, particleboard from mixture of durian peel and coconut coir, expanded perlite and vermiculite with the same density range. According to the test results, it can be concluded that this insulation boards from narrow-leaved cattail fibers were an excellent insulating component for energy saving and environmentally friendly. Additionally, these insulation boards could be used to produce furniture with an advantage to help, and get rid of weeds.

© 2011 Published by Elsevier Ltd. Selection and/or peer-review under responsibility of ICESD 2012

Keywords: thermal insulation; narrow-leaved cattail fibers; physical property; mechanical property; thermal conductivity

* Corresponding author. Tel.: +66-2-562-5555 ext. 3028; fax: +66-2-942-5029.
E-mail address: sutharat.c@ku.ac.th

1.Introduction

Since the energy consumption and global warming problem is getting more and more of an issue. Researchers presented many processes in order to save energy in accommodations and building. As the largest building, heat from the sun affects on air conditioning. For these reasons, the use of thermal insulation in building is the key tool to protect heat through the building, control the interior temperatures at comfortable levels and maintain the building temperature appropriate for a long time without having to run air conditioning for long periods of time.

One of the most examples of commercial thermal insulation is an inorganic materials especially fiberglass. Until 1996 Bureau of Environmental Health of Thailand reported that fiberglass has an effect on human health when fiberglass is handled, cut or otherwise disturbed, people can be exposed by skin and eye contact or by breathing in fibers that have become airborne. Additionally, fiberglass can cause Emphysema and lung cancer. Therefore many studies have been done on the development of thermal insulation materials from natural fibers used as environmental-friendly and renewable materials such as maize husk, maize cob, groundnut shell, coconut pith and paddy straw [1], cotton seed hulls [2], durian peel and coconut coir [3], saline jost tall wheatgrass [4], eggplant stalks [5], tamarind hulls [6] and cotton stalk fibers [7].

Narrow-leaved cattail (*Typha angustifolia L.*) is marginal weeds which originated in Europe and America. Overspreading in tropical area such as Thailand, Malaysia, Philippines, North America and Pacific coast. For Thailand they can even be found in ponds, marsh, paddy, watercourse and lake. Narrow-leaved cattail in marsh is growing through the year and flower from May to July. In early fall, the brown flower head pops open, letting its fluffy seeds emerge. These seeds are carried by wind or water to new places. However, cattails rapidly spread via seeds and roots. In just a few short years without management, cattails take over water areas. It is not unusual to see ponds that are completely surrounded by cattails.

Narrow-leaved cattail is weeds that have an effect on irrigation in Thailand. Naturally, narrow-leaved cattails can rapidly spreading over the areas. Thus the other crops are severely damage and not growing. Many researchers attend to study and find best ways to manage narrow-leaved cattail by production of interior partition, charcoal bars, and use for waste-water treatment. Therefore manufacturing the insulation boards from narrow-leave cattail fibers is the interesting way to be low cost raw materials and preserve energy. The aim of this work is to study the possibility to apply narrow-leaved cattail, in the thermal insulation. The physical, mechanical and thermal properties of the insulation boards were investigated and confirmed generally as competitive with the other studies.

2.Materials and methods

2.1 Raw materials preparation

Raw materials for this study were Narrow-leaved cattails which were collected from Chanthaburi Province in the east of Thailand. First, their dried leaf was cut into chip about 10 cm. in length by hand and then fiberized using wood grinder machine. The moisture content of fiber was 6%.

2.2 Board preparation and evaluation

The boards were prepared with a target density of 200, 300 and 400 kg/m³. The weight of fiber was measured according to their target board densities before the

fibers were sprayed a binder of pMDI. The fibers were shaped using a forming box with 350 mm. in length, 350 mm. in width and 10 mm. thickness. After forming, the boards were prepared in a hot pressing machine with the pressure of 40 kg/cm², the temperature of 140 °C and the pressing time of 3 min. The target board thickness was controlled by distance bar. After pressing, the boards were stored in conditioning room for one week and then they were cut into various test samples following the Thai Industrial Standard (TIS 876-2547) [8].

2.3 Physical property

The physical property of boards were carried out in accordance with the TIS. 876-2547. Forty-five samples were prepared for moisture content (MC) test. The moisture content of samples are determined by the following the equation (1),

$$MC (\%) = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100 \quad (1)$$

where m_1 is mass of sample before drying (g) and m_2 is mass of sample after drying (g).

2.4 Mechanical Properties

The mechanical properties were evaluated following the TIS. 876-2547. Twenty-seven samples were prepared for the Modulus of Rupture (MOR) and Modulus of Elasticity (MOE) test and forty-five samples were prepared for tensile strength perpendicular to surface test. All properties were calculated from the equations (2), (3) and (4) respectively. Each sample's results were compared with the standard of insulation board [9].

$$MOR = \frac{3F_{max}l_1}{2bt^2} \quad (2)$$

where F_{max} is the maximum load (N), l_1 is the span (mm), b is the width of the test sample (mm) and t is the thickness of the test sample (mm).

$$MOE = \frac{l_1^3(F_2 - F_1)}{4bt^3(a_2 - a_1)} \quad (3)$$

where $F_2 - F_1$ is the increasing load in the range of linear line of graph (N) and $a_2 - a_1$ is the increasing bending distance in the range of linear line of graph (mm).

$$Tensile\ strength = \frac{F_{max}}{W \times L} \quad (4)$$

where W is the width of the test sample (mm), and L is the length of the test sample (mm).

2.5 Thermal Property

In order to determine the thermal conductivity (k) of the samples, the measuring was based on the American Society for Testing Material (ASTM C518) [10] by using a heat flow meter (NETZSCH HFM 436). The thermal conductivity of a sample is determined by following the equation (5)

$$k = \dot{Q} \frac{\Delta x}{\Delta T} \quad (5)$$

where \dot{Q} is the rate of heat transfer per surface area (W/m^2), D is the thickness of the sample (m) and ΔT is the temperature difference between the surfaces of the sample (K).

3 Results and discussions

3.1 Effect of board density on the moisture content

The results of the moisture content tests are shown in Fig.1.

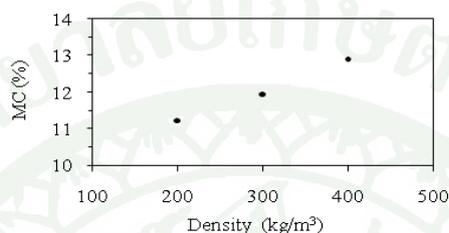


Fig. 1. Effect of board density on the moisture content.

The moisture content trends to increase with an increasing of board density. Due to the fact that the higher density board has more condense fibers and resin content. After blending MDI, the moisture content in high density board is higher than low density board. According to the standard of TIS. 876-2547, the average of moisture content values must be range from 4 to 13%. The experiment indicated that the moisture content of the board with a density of 200, 300 and 400 kg/m^3 are 11.22, 11.94 and 12.91% respectively, that are agreed with TIS. 876-2547.

3.2 Effect of board density on MOR and MOE

According to the TIS. 876-2547 and the standard of insulation board, the MOR and MOE were measured [10]. The results are shown on Fig.2.

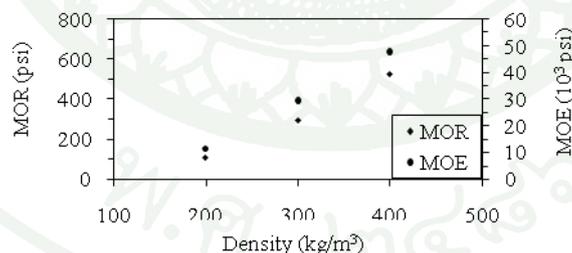


Fig. 2. Effect of board density on the Modulus of Rupture (MOR) and the Modulus of Elasticity (MOE).

The higher density boards were stronger than the lower density boards. The average of MOR of the board with a density of 200, 300 and 400 kg/m^3 are 106.896, 293.349 and 524.074 psi respectively ($1 \text{ psi} = 6.894 \times 10^3 \text{ Pa}$). The MOE has the same trending as the MOR. The MOE increased when the density of the board increased. The averages of MOE of the board with a density of 200, 300 and 400 kg/m^3 are 11.40, 29.09 and 47.46 (10^3 psi) respectively. According to the standard of insulation board, the average of MOR values ranging from 200 to 800 psi and the average of MOE values ranging from 25 to 125 (10^3 psi). From Fig.2 it was found that only the lowest density board did not pass in the standard of insulation board.

3.3 Effect of board density on tensile strength

Tensile strength of the boards increased as the density increased. In order to produce a lower density boards, the less mass of the fiber and resin content was used. This results the lower tensile strength as shown in Fig.3.

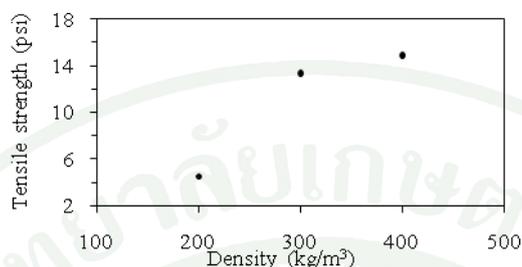


Fig. 3. Effect of board density on the tensile strength.

Since the thickness of all the boards are equal to 10 mm. The voids in the boards with the higher density are less. This results the stronger adhesive between fibers. According to the standard of insulation board, the average of tensile strength values is between 10 to 25 psi. The experiment shows that the averages of tensile strength of the board with a density of 200, 300 and 400 kg/m³ are 4.49, 14.56 and 14.78 psi respectively. Only the board with density 200 kg/m³ is not agreed with the standard of insulation board.

3.4 Effect of board density on thermal conductivity

The thermal conductivity of all boards was tested in accordance with the American Society for Testing Materials (ASTM C 518). The measured thermal conductivity is plotted as a function of board density shown in Fig.4.

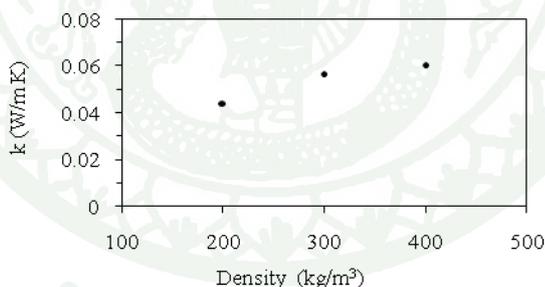


Fig. 4. Effect of board density on thermal conductivity.

Thermal conductivity testing confirmed that the thermal conductivity is directly related to the board density, where the higher board density, the higher thermal conductivity. Although the thermal insulation boards are solids, their structure contains a lot of voids. The available voids between fibers in board are increased with decreasing board density. The air within the voids leads to a lower thermal conductivity of the whole board.

Table 1 shows the comparison between the measured thermal conductivity of thermal insulation board from narrow-leaved cattail fibers to published data. It revealed that this thermal insulation board with a density of 200-400 kg/m³ had the thermal conductivity values ranging from 0.0438-0.0606 W/m K, which was lower than that of fibrous materials and cellular materials, such as low-density wheat straw board, particleboard from mixture of durian peel and coconut coir, expanded perlite and vermiculite with the same density range.

Table 1. Thermal conductivity of various materials.

Board type	Density (kg/m ³)	k (W/m K)	Source
Narrow-leaved cattail fiber	200-400	0.0438-0.0606	Present study
Wheat straw board	150-250	0.0481-0.0521	Zhou <i>et al.</i>
Cotton stalk fiber	150-450	0.0585-0.0815	Zhou <i>et al.</i>
Durian peel and coconut coir	311-611	0.0728-0.1117	Khedari <i>et al.</i>
Expanded perlite	78-224	0.0477-0.0616	Zhou <i>et al.</i>
Vermiculite	80-200	0.047-0.07	Zhou <i>et al.</i>

4 Conclusions

The results indicated that the thermal insulation from narrow-leaved cattail fibers with a density of 200, 300 and 400 kg/m³ and a thickness 10 mm. which bonded by pMDI during hot pressing process have a good physical, mechanical and thermal properties according to TIS. 876-2547, the standard of insulation board and ASTM C 518. It can be seen that the board of Narrow-leaved cattail fibers has the thermal conductivity with the range of 0.0438-0.0606 W/m K which is lower than the board of other insulation materials. This shows the Narrow-leaved cattail is a candidate raw material for an insulator of wall, ceiling and building materials for energy saving.

Acknowledgements

The author would like to thank Department of Physics, Faculty of Science, and Graduate School, Kasetsart University for the financial support under the Oversea Academic Conference program. This research was supported by KURDI (Kasetsart University Research and Development Institute).

References

- [1] Sampathrajan A, Vijayaraghavan NC, Swaminathan KR. Mechanical and thermal properties of particle boards made from farm residues. *Bioresource Technology* 1992;**40**:249-251.
- [2] Gurjar RM. Effect of different binders on properties of particle board from cotton seed hulls with emphasis on water repellency. *Bioresource Technology* 1995;**43**:177-178.
- [3] Khedari J, Noppanun N, Jongjit H, Sarocha C. New low cost insulating particleboards from mixture of durian peel and coconut coir. *Building and Environment* 2004;**39**:59-65.
- [4] Zheng Y, Pan Z, Zhang R, Jerkins BM. Particleboard quality characteristics of saline jost tall wheatgrass and chemical treatment effect. *Bioresource Technology* 2007;**98**:1304-1310.
- [5] Guntekin E, Karakus B. Feasibility of using eggplant (*Solanum melongena*) stalks in the production of experimental particleboard. *Ind Crop Prod* 2008;**27**:354-358.
- [6] Rachtanapun P, Loiloes K, Jaikeankeaw D. Effects of blended starch adhesive contents and particle size of tamarind hulls on properties of particleboard. *Proceedings of 48th Kasetsart University Annual Conference: Agro-industry, February 3-5, 2010, Bangkok, Thailand.* 117-123.
- [7] Zhou XY, Zheng F, Li HG, Lu CL. An environmental-friendly thermal insulation material from cotton stalk fibers. *Energy and Buildings* 2010;**42**:1070-1074.
- [8] Thai Industrial Standard for Flat Pressed Particleboards (TIS. 876-2547).
- [9] Bruce Hoadley R. *Understanding Wood : A Craftmann's Guide to Wood Technology*. United States: Taunton Press; 2005.
- [10] American Society of Testing and Materials. Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus (C 518), West Conshohocken, PA

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาวฐิติวัลลค์ เลื่อมกาญจนพันธ์
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 3 เดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2528
สถานที่เกิด	เพชรบูรณ์
ประวัติการศึกษา	1. วท.บ. (ฟิสิกส์) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 2. หลักสูตรประกาศนียบัตรบัณฑิต สาขาวิชาชีพครู
ประวัติการทำงาน	ครูอัตราจ้าง โรงเรียนกาญจนาภิเษกวิทยาลัย เพชรบูรณ์ ตั้งแต่ พ.ศ. 2550-2551
ทุนวิจัยที่ได้รับ	1. ทุนสนับสนุนในการไปประชุมวิชาการนานาชาติ ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (พ.ศ. 2554) 2. ทุนสนับสนุนในการไปประชุมวิชาการนานาชาติ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (พ.ศ. 2554) 3. ทุนสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์ เพื่อการตีพิมพ์ใน วารสารวิชาการระดับนานาชาติ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (พ.ศ. 2554) 4. ทุนสนับสนุนในการไปประชุมวิชาการนานาชาติ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (พ.ศ. 2554)