



**ใบรับรองวิทยานิพนธ์**  
**บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์**

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (มาตรวิทยา)

**ปริญญา**

มาตรวิทยา ..... ฟิสิกส์  
สาขา ..... ภาควิชา

**เรื่อง** การวัดค่าสภาพการนำความร้อนของฉนวนกันความร้อนจากเส้นใยสับปะรด  
ด้วยวิธีการสอบกลับทางตรง

Measuring Thermal Conductivity of Thermal Insulation from Cellulose Fiber  
of Pineapple by The Direct Traceability Method

**นามผู้วิจัย** นางสาวกนกอร หั่นเจริญ

**ได้พิจารณาเห็นชอบโดย**

**อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก** .....

( ..... อาจารย์สุธารัตน์ โชติกประคัลภ์, Dr.rer.nat. .... )

**หัวหน้าภาควิชา** .....

( ..... อาจารย์วิวัฒน์ วงศ์ก่อเกื้อ, Ph.D. .... )

**บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว**

.....  
( ..... รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr. .... )

**คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย**

วันที่ ..... เดือน ..... พ.ศ. ....

**สิงสิงห์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์**

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การวัดค่าสภาพการนำความร้อนของฉนวนกันความร้อน  
จากเส้นใยสับปะรดด้วยวิธีการสอบกลับทางตรง

Measuring Thermal Conductivity of Thermal Insulation from Cellulose Fiber  
of Pineapple by The Direct Traceability Method

โดย

นางสาวกนกอร หั่นเจริญ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์  
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (มาตรวิทยา)  
พ.ศ. 2556

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กนกอร หันเจริญ 2556: การวัดค่าสภาพการนำความร้อนของฉนวนกันความร้อน  
จากเส้นใยสับปะรดด้วยวิธีการสอบกลับทางตรง ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
(มาตรวิทยา) สาขามาตรวิทยา ภาควิชาฟิสิกส์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:  
อาจารย์สุธารัตน์ โชติกประคัลภ์, Dr.rer.nat. 61 หน้า

ค่าสภาพการนำความร้อนนับเป็นตัวแปรหลักในการตัดสินใจเลือกชนิดของฉนวนกันความร้อนให้เหมาะสมกับการใช้งาน ค่าสภาพนำความร้อนที่น่าเชื่อถือ นั้น ต้องได้จากเครื่องมือที่มีวิธีการวัดตามมาตรฐาน ASTM C-518 และได้รับการเทียบมาตรฐานอย่างสม่ำเสมอ เครื่องมือวัดค่าสภาพการนำความร้อนแบบสถานะคงที่โดยทั่วไป จะใช้วัสดุอ้างอิงมาตรฐานในการเทียบมาตรฐาน และจำเป็นที่จะต้องส่งวัสดุอ้างอิงนี้กลับไปยังหน่วยงานผู้ผลิตในต่างประเทศตามระยะเวลาที่กำหนดเพื่อทำการรับรองมาตรฐาน ทำให้มีค่าใช้จ่ายที่สูงและสิ้นเปลืองเวลาในการจัดส่ง งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอวิธีการเทียบมาตรฐานเครื่องมือวัดโดยใช้ตัวรับรู้อุณหภูมิแพลททินัม ชนิด PT100 ซึ่งเป็นวิธีการสอบกลับแบบตรง โดยการวัดอุณหภูมิของเพลทร้อนและเพลทเย็นของเครื่องมือวัด แทนการวัดค่าสภาพนำความร้อนของวัสดุอ้างอิง จากการทดลองพบว่า ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการเทียบมาตรฐานด้วยวิธีสอบกลับแบบตรงมีค่า 0.0002 วัตต์ต่อเมตร.เคลวิน ในขณะที่สภาพการนำความร้อนของวัสดุอ้างอิงมีค่าความผิดพลาดเท่ากับ 0.005 วัตต์ต่อเมตร.เคลวิน วิธีการนี้นอกจากช่วยลดค่าใช้จ่ายแล้ว ยังสามารถทำได้ในห้องปฏิบัติการที่ได้รับมาตรฐาน ISO17025 ที่มีอยู่เป็นจำนวนมากในประเทศไทย จากการทดสอบวัดค่าฉนวนกันความร้อนจากเส้นใยสับปะรด พบว่าค่าสภาพการนำความร้อนของฉนวนกันความร้อนจากแกน ชั่ว และเปลือกสับปะรด มีค่า 0.0402, 0.0320 และ 0.0713 วัตต์ต่อเมตร.เคลวิน ตามลำดับ โดยฉนวนที่เกิดจากการผสมเส้นใยทั้งสามชนิดจะให้ค่าสภาพการนำความร้อนต่ำสุดเท่ากับ 0.0291 วัตต์ต่อเมตร.เคลวิน ผลการทดสอบที่ได้จึงเป็นแนวทางหนึ่งในการพัฒนาวัสดุเหลือทิ้งจากสับปะรดให้เกิดประโยชน์ได้ต่อไป

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

\_\_\_ / \_\_\_ / \_\_\_

Kanokon Hancharoen 2013: Measuring Thermal Conductivity of Thermal Insulation from Cellulose Fiber of Pineapple by The Direct Traceability Method. Master of Science (Metrology), Major Field: Metrology, Department of Physics. Thesis Advisor: Miss Sutharat Chotikaprakan, Dr.rer.nat. 61 pages

Thermal conductivity is the main parameter to consider in order to make decision to choose the suitable type of thermal insulation in any application. The reliable thermal conductivity can get from the instrument which is approved by the ASTM C-518 and is calibrated constantly. Generally the heat flux meter is calibrated by the standard reference material. It is necessary to send the reference material to the foreign manufacturer periodically for certifying which is high cost and time-consuming. This research introduces the instrument calibration procedure by the direct traceability method. Instead of applying the reference material, the platinum sensor PT100 is used and the temperatures of hot plate and cold plate of heat flux meter are measured directly. From the results, the uncertainty budget from the direct traceability method at confidence of 95% is 0.0002 W/m.K while the accuracy of the reference material is 0.005 W/m.K. The direct traceability method gives less spending and is able to test in the ISO17025 laboratory which plenty founds in Thailand. For the thermal insulation from cellulose fiber of pineapple, the measurements show that the thermal insulations from core, pore and shell give the thermal conductivity of 0.0402, 0.0320 and 0.0713 W/m.K respectively. The thermal insulation with mixing all three types of fiber gives the least thermal conductivity of 0.0291 W/m.K. These results show an approach to make a profit from the agriculture waste of pineapple.

---

Student's Signature

---

Thesis Advisor's Signature

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.สุธารัตน์ โชติกประคัลภ์ อาจารย์มีปริญญาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ได้ให้คำปรึกษาในการเรียน การค้นคว้าวิจัย ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ และขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. วิวัฒน์ วงศ์ก่อเกื้อ ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะนำงานวิจัยสำเร็จลุล่วงด้วยดี รวมถึงขอกราบขอบพระคุณอาจารย์สาขาวิชามาตรวิทยา ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนและมอบความรู้อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.โสภา วิศิษฐ์ศักดิ์ ประธานสาขาวิชาเทคโนโลยีทางอาคาร คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ใช้ห้องปฏิบัติการทดสอบค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุ ของศูนย์นวัตกรรมและเทคโนโลยีทางอาคาร (Center of Building Innovation and Technology, CBIT) คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแต่คุณพ่อ คุณแม่ ที่ได้อบรม สอนสั่งสอนและให้กำลังใจผู้วิจัยมาตลอดในทุกเรื่อง

กนกอร หั่นเจริญ  
พฤษภาคม 2556

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	20
อุปกรณ์	20
วิธีการ	21
ผลการทดสอบและวิจารณ์	35
สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ	45
สรุปผลการทดสอบ	45
ข้อเสนอแนะ	45
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	47
ภาคผนวก	49
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	61

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ผลผลิตสับปะรด ปี 2550 – 2555	8
2	การส่งออกสับปะรดและผลิตภัณฑ์สับปะรด	9
3	ส่วนประกอบในใบและเปลือกสับปะรด	10
4	ส่วนประกอบทางเคมีแยกวิเคราะห์ตามแต่ละส่วนของผลสับปะรด	11
5	ค่าสภาพการนำความร้อนของแผ่นฉนวนกันความร้อน	32
6	ตารางแสดงคุณสมบัติทางเทคนิคของเครื่องวัดค่าสภาพการนำความร้อนตามมาตรฐาน ASTM C518	33
7	ผลการทดสอบค่าสภาพการนำความร้อนของฉนวนกันความร้อน	35
8	แสดงค่าสภาพการนำความร้อนของฉนวนกันความร้อนในเชิงพาณิชย์	36
9	ผลการทดสอบค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุอ้างอิงมาตรฐาน	37
10	คุณลักษณะทางเทคนิค (specification) ของหัววัดอุณหภูมิชนิด PT100	38
11	ผลการทดสอบค่าอุณหภูมิของอุณหภูมิเพลทร้อน และอุณหภูมิเพลทเย็น	41
12	ค่าสภาพการนำความร้อนของแผ่นฉนวนกันความร้อนพร้อมค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย $S(q)$	42
13	ตารางแสดง Uncertainty Budget	43
14	ค่าสภาพการนำความร้อนของแผ่นฉนวนกันความร้อนที่ระดับความเชื่อมั่น 95%	44

## สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 ต้นสับปะรด พร้อมส่วนต่างๆ	6
2 ภาพแสดง (ก) ผลสับปะรด (ข) ผลิตภัณฑ์จากสับปะรด สับปะรดกระป๋อง และน้ำสับปะรด	9
3 วัสดุเหลือทิ้งจากสับปะรด (ก) ส่วนของแกนและขั้วสับปะรด (ข) เปลือกสับปะรด	10
4 ชนิดของการถ่ายเทความร้อน การนำความร้อน การพาความร้อนและการแผ่รังสี	12
5 ภาพแสดง (ก) เครื่องวัดค่าสภาพการนำความร้อน และ (ข) หลักการทำงานของเครื่อง	17
6 วัสดุอ้างอิงมาตรฐาน (EPS)	18
7 ภาพแสดง (ก) เครื่องทดสอบค่าสภาพการนำความร้อนพร้อมอ่างน้ำเย็นควบคุมอุณหภูมิ 18 °C (ข) กล้องจุลทรรศน์ดิจิทัล (ค) เครื่องวัดและบันทึกอุณหภูมิชนิด 4 ช่องสัญญาณ (ง) เครื่องวัดและบันทึกอุณหภูมิชนิด 4 ช่องสัญญาณ และหัววัดอุณหภูมิชนิด PT100	21
8 กระบวนการผลิตฉนวนกันความร้อนจากแกน ขั้ว และเปลือกสับปะรด และทำการทดสอบค่าสภาพการนำความร้อน มีหน่วยเป็น วัตต์ต่อเมตร เคลวิน (W/m.K)	23
9 ภาพแสดง (ก) บริเวณแกน ขั้ว และเปลือกสับปะรด (ข) แกนสับปะรดที่มีส่วนขั้วติดอยู่ (ค) เปลือกสับปะรด (ง) เส้นใยจากการบิดและตีแกนสับปะรดให้เป็นเส้น (จ) ส่วนขั้วที่แกะออกจากแกน (ฉ) ส่วนแกนที่เหลือ	24
10 กระบวนการเตรียมแกนสับปะรด (ก) เส้นใยแกนสับปะรดหลังตากแดด (ข) เส้นใยแกนสับปะรดปั่นกวนในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 20 % โดยน้ำหนัก (ค) เส้นใยแกนสับปะรดล้างในน้ำสะอาด (ง) เส้นใยแกนสับปะรดหลังล้างในน้ำสะอาด (จ) เส้นใยแกนสับปะรดผ่านสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และล้างน้ำสะอาดหลังตากแดด	25
11 กระบวนการเตรียมขั้วสับปะรด (ก) ขั้วสับปะรด (ข) ขั้วสับปะรดตากแดดบนแผ่นสังกะสี (ค) ขั้วสับปะรดหลังตากแดด (ง) ขั้วสับปะรดปั่นกวนในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 20%wt (จ) ขั้วสับปะรดผ่านสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และล้างด้วยน้ำสะอาด	26

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
12	
(ก) กระบวนการเตรียมเปลือกสับปะรด	
(ข) เปลือกสับปะรดตากแดดบนแผ่นสังกะสี	
(ค) เปลือกสับปะรดปั่นกวนในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 20%wt	
(ง) เปลือกสับปะรดหลังผ่านสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และล้างด้วยน้ำสะอาด	
(จ) เปลือกสับปะรดหลังตากแดด	27
13	
การขึ้นรูปแผ่นฉนวนกันความร้อนจากเส้นใยสับปะรด	
(ก) วางเส้นใยจากแกนสับปะรดลงในบล็อกที่ละชั้นสลับกับการพ่นกาวน้ำเพื่อให้เกิดการยึดเกาะกัน	
(ข) หลังตากแดดแผ่นฉนวนให้กาวน้ำแห้งเป็นเวลา 3 วัน	28
14	
การขึ้นรูปแผ่นฉนวนกันความร้อนจากข้าวสับปะรด	
(ก) วางข้าวสับปะรดลงในบล็อกที่แน่นที่ละชั้นสลับกับการพ่นกาวน้ำเพื่อให้เกิดการยึดเกาะกัน	
(ข) หลังตากแดดแผ่นฉนวนให้กาวน้ำแห้งเป็นเวลา 3 วัน	29
15	
การขึ้นรูปแผ่นฉนวนกันความร้อนจากเปลือกสับปะรด	
(ก) วางเปลือกสับปะรดลงในบล็อกที่ละชั้นสลับกับการพ่นกาวน้ำเพื่อให้เกิดการยึดเกาะกัน	
(ข) หลังตากแดดแผ่นฉนวนให้กาวน้ำแห้งเป็นเวลา 3 วัน	29
16	
ภาพแสดงลักษณะเส้นใย	
(ก) เส้นใยจากแกนสับปะรดก่อนการปั่นกวนในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 20%wt	
(ข) เส้นใยจากแกนสับปะรดหลังการปั่นกวน	
(ค) เส้นใยจากข้าวสับปะรดหลังการปั่นกวนในสารละลายและถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์ดิจิตอล Dino –Lite ที่กำลังขยาย 500 เท่า	
(ง) เส้นใยจากเปลือกสับปะรดหลังการปั่นกวนในสารละลายและถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์ดิจิตอล Dino –Lite ที่กำลังขยาย 500 เท่า	30
17	
ภาพแสดง	
(ก) ช่องใส่วัสดุตัวอย่างเพลทบนอุณหภูมิ 20 <sup>o</sup> C และเพลทล่างอุณหภูมิ 50 <sup>o</sup> C	
(ข) ลักษณะการเปิดเพื่อใส่ตัวอย่าง	
(ค) ใส่ตัวอย่างทดสอบ	
(ง) การควบคุมอุณหภูมิระหว่างการทดสอบ	31
18	
ภาพแสดง	
(ก) การติดตั้งหัววัดอุณหภูมิบนผิวเพลทร้อนและเพลทเย็น	
(ข) ทดสอบและบันทึกค่าอุณหภูมิผิวเพลทร้อนและเย็นขณะทำการทดสอบค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุอ้างอิง	34
19	
ภาพแสดงกราฟการเปรียบเทียบของอุณหภูมิของตัวรับรู้อุณหภูมิทั้ง 4 ตัวในการวัดอุณหภูมิอากาศ	40

## การวัดค่าสภาพการนำความร้อนของฉนวนกันความร้อน จากเส้นใยสับปะรดด้วยวิธีการสอบกลับทางตรง

### Measuring Thermal Conductivity of Thermal Insulation from Cellulose Fiber of Pineapple by The Direct Traceability Method

#### คำนำ

ปัจจุบันมีการใช้เครื่องวัดค่าสภาพการนำความร้อนของฉนวนกันความร้อนเพื่อทดสอบว่าฉนวนกันความร้อนชนิดนั้นๆมีสมบัติในการกันความร้อนเข้าสู่อาคารได้มากน้อยต่างกันอย่างไร เครื่องวัดค่าสภาพการนำความร้อนนั้นมีอยู่หลายชนิด โดยแบ่งตามเทคนิคการวัด วิธีการที่นิยมใช้คือแบบสภาวะคงที่ (steady state) เครื่องมือวัดที่ใช้วิธีการนี้ ได้แก่ guard hot plate, heat flux meter ตามมาตรฐาน ASTM C-518 โดยใช้วัสดุอ้างอิง (standard reference material) ในการเทียบมาตรฐาน (calibrate) ซึ่งวัสดุอ้างอิงเหล่านี้มีราคาแพง และต้องส่งกลับไปยังหน่วยงานผู้ผลิตในต่างประเทศ เพื่อทำการเทียบมาตรฐานใหม่ตามระยะเวลาที่กำหนด (re-calibrated) ทำให้สิ้นเปลืองเวลาและค่าใช้จ่ายเป็นจำนวนมาก งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการเทียบมาตรฐานเครื่องวัดสภาพการนำความร้อนโดยใช้ตัวรับรู้อุณหภูมิชนิดแพลททินัม ชนิด PT100 และใช้วัสดุอ้างอิงแทนตัวอย่างที่ทราบค่าสภาพการนำความร้อน (known material standard) และที่สามารถหาได้จากแหล่งในประเทศไทย เพื่อเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายในการสอบเทียบ เพราะการสอบเทียบตัวรับรู้อุณหภูมิสามารถทำได้สะดวกโดยห้องปฏิบัติการที่ได้มาตรฐาน ISO 17025 ที่มีอยู่เป็นจำนวนมากในประเทศไทยและมีราคาถูกกว่ามาก

นอกจากการเทียบมาตรฐานเครื่องวัดแล้ว งานวิจัยนี้ได้มีการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรคือ แขน ขั้ว และเปลือกสับปะรด มาผลิตเป็นฉนวนกันความร้อนแต่ละชนิด และฉนวนกันความร้อนแบบผสมทั้ง 3 ชนิด เพื่อใช้เป็นวัสดุในการทดสอบค่าสภาพการนำความร้อนตามวิธีการดังกล่าวด้วย เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ประชากรส่วนใหญ่ของประเทศมีอาชีพเกษตรกร ดังนั้นในแต่ละปีจึงมีวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเป็นจำนวนมาก และเนื่องจากการเติบโตของภาคอุตสาหกรรมมากขึ้นในแต่ละปี จึงทำให้มีการคิดค้นและนำวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรเหล่านี้มาพัฒนาให้เกิดประโยชน์ในภาคอุตสาหกรรมเพิ่มขึ้นเพื่อสนองความต้องการใช้งานได้มากขึ้น ฉนวนกันความร้อนนับเป็นหนึ่งในวัสดุประกอบอาคารซึ่งมีการใช้อยู่ในปัจจุบันเป็นจำนวนมาก เพราะเป็นส่วนที่ป้องกันความร้อนเข้าสู่อาคารได้ นอกจากจะเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้งจากสับปะรดแล้วยังเป็นการส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงานและสิ่งแวดล้อม รวมถึงสามารถลดการนำเข้าฉนวนเส้นใยสังเคราะห์จากต่างประเทศอีกทางหนึ่ง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วยรายละเอียดและข้อมูลในการศึกษาและค้นคว้าตั้งแต่ บทที่ 1 การตรวจสอบเอกสารทั้งในด้านแหล่งที่มาของวัสดุเหลือทิ้งจากสับปรดในการผลิตฉนวนกันความร้อน ขั้นตอนการเตรียมและผลิตฉนวนกันความร้อน ตลอดจนถึงวิธีการทดสอบค่าสภาพการนำความร้อน แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ รวมทั้งสมการความไม่แน่นอน และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ บทที่ 2 กล่าวถึงอุปกรณ์และวิธีการ โดยแบ่งเป็น 2 ส่วน คือส่วนที่หนึ่งกล่าวถึงอุปกรณ์และวิธีการในการผลิตฉนวนกันความร้อนจากแกน ไข่ และเปลือกสับปรด และส่วนที่สองกล่าวถึงอุปกรณ์และวิธีการในการทดสอบค่าสภาพการนำความร้อนของฉนวน รวมทั้งการประเมินค่าความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นจากผลการทดสอบทั้งชนิด Type A และ Type B และรายงานผลการวัดพร้อมค่าความไม่แน่นอนได้ บทที่ 3 ผลและวิจารณ์ โดยแสดงผลการวัดค่าสภาพการนำความร้อนของฉนวนกันความร้อนแต่ละชนิดที่ได้จากการทดลอง ค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่เกิดขึ้น รวมทั้งการเปรียบเทียบค่าที่เกิดขึ้นจากการทดลองกับค่าที่เป็นข้อกำหนดรายละเอียดของเครื่องวัดค่าสภาพการนำความร้อน และข้อมูลของผลการทดลองที่ได้มา นำมาวิเคราะห์และวิจารณ์ในการศึกษา และบทสุดท้ายบทที่ 4 สรุปและข้อเสนอแนะ คือ สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะในความเป็นไปได้ของงานวิจัยฉบับนี้ รวมทั้งรายละเอียดในส่วนของเอกสารอ้างอิงและสิ่งอ้างอิงที่ได้นำมาใช้ประกอบการศึกษาและวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้อีกด้วย

## วัตถุประสงค์

1. เพื่อทำการเทียบมาตรฐานเครื่องวัดสภาพการนำความร้อนของฉนวนกันความร้อนด้วยวัสดุอ้างอิงมาตรฐาน
2. เพื่อทำการเปรียบเทียบวิธีการเทียบมาตรฐานเครื่องวัดสภาพการนำความร้อนโดยใช้ตัวรับรู้อุณหภูมิชนิดแพลททินัม และใช้วัสดุอ้างอิงแทนตัวอย่างที่ทราบค่า
3. เพื่อเปรียบเทียบค่าความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นของทั้งสองวิธีการ
4. เพื่อศึกษาและผลิตฉนวนกันความร้อนจากแกน ใย และเปลือกสับปะรด และฉนวนกันความร้อนแบบผสมของแกน ใย และเปลือกสับปะรด ในอัตราส่วน 1 : 1 : 2
5. เพื่อศึกษาสมบัติในการลดความร้อนเข้าสู่อาคารของฉนวนกันความร้อนที่ผลิตจากแกน ใย และเปลือกสับปะรด โดยเปรียบเทียบกับฉนวนกันความร้อนที่ผลิตจากเส้นใยสังเคราะห์

## ขอบเขตของงานวิจัย

1. ทำการเทียบมาตรฐานเครื่องทดสอบค่าสภาพการนำความร้อน ของฉนวนกันความร้อน ด้วยวัสดุอ้างอิงมาตรฐาน
2. ทำการเปรียบเทียบวิธีการเทียบมาตรฐานเครื่องวัดสภาพการนำความร้อนโดยใช้ตัวรับรู้อุณหภูมิชนิดแพลททินัม และใช้วัสดุอ้างอิงแทนตัวอย่างที่ทราบค่า
3. สับปะรดที่ใช้ในการศึกษาเป็นสับปะรดพันธุ์ปัตตาเวีย ซึ่งเป็นพันธุ์ที่นิยมปลูกกันทั่วไปในประเทศไทย
4. ผลิตฉนวนกันความร้อนจากแกนสับปะรด ใยสับปะรด และเปลือกสับปะรด แต่ละชนิด และฉนวนกันความร้อนของส่วนประกอบทั้งสามรวมกัน ในอัตราส่วนของ แกน : ใย : เปลือกสับปะรด 1:1:2 โดยมีความหนาแน่นที่ 75 : 75 : 150 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีขนาดกว้าง 20 เซนติเมตร ยาว 20 เซนติเมตร หนา 2 เซนติเมตร ในการทดสอบ
5. ทดสอบค่าสภาพการนำความร้อนของฉนวนกันความร้อนที่ผลิตขึ้นพร้อมรายงานผลการทดสอบ พร้อมค่าความไม่แน่นอนของการทดสอบ

## การตรวจเอกสาร

ประเทศไทยมีที่ตั้งอยู่ในเขตร้อนใกล้เส้นศูนย์สูตร ทำให้ภูมิอากาศของประเทศไทยมีลักษณะเป็นแบบร้อนชื้นหรือแบบสะวันนา (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2537) ดังนั้นความร้อนและความชื้นจากอากาศภายนอกจึงถูกถ่ายเทเข้าสู่อากาศภายในอาคารทั้งแบบการนำ การพา หรือการแผ่รังสี (Kreider and Rabl., 1994) มีผลให้อากาศภายในอาคารมีอุณหภูมิสูงขึ้นจากความร้อนที่สะสม ฉนวนกันความร้อนคือวัสดุที่ใช้เป็นส่วนช่วยในการป้องกันความร้อนจากอากาศภายนอกเข้าสู่ตัวอาคารได้ โดยการเลือกชนิดของฉนวนกันความร้อนนั้น สิ่งสำคัญที่พิจารณาในการเลือกใช้คือ ค่าสภาพการนำความร้อนของฉนวนกันความร้อนชนิดนั้นๆ ว่าเหมาะสมในการป้องกันความร้อนมากน้อยเพียงใด ปัจจุบันฉนวนกันความร้อนที่นิยมใช้กันมากในประเทศไทยมีมากมายหลายชนิด เช่น ฉนวนกันความร้อนชนิดพอลิเอทิลีน ฉนวนกันความร้อนชนิดใยแร่ เป็นต้น โดยหลักการและวิธีการในการทดสอบสภาพการนำความร้อนของวัสดุนั้นมีอยู่หลายวิธีการด้วยกันคือ เทคนิคการวัดแบบสภาวะคงตัว ตามมาตรฐาน ASTM C518 ซึ่งจะเป็นวิธีการที่ใช้ในงานวิจัยฉบับนี้ และเทคนิคการวัดแบบสภาวะไม่คงตัว ตามมาตรฐาน ASTM D5334 (ทัศนัย บุญเกิดรัตนสกุล และคณะ, 2550) โดยวิธีการวัดแบบสภาวะคงตัวนั้น จะมีค่าความแม่นยำ และความถูกต้องสูงกว่า

วิธีการทดสอบค่าสภาพการนำความร้อนตามมาตรฐาน ASTM C518 นั้น ค่าที่ได้จากการทดสอบจะมีความน่าเชื่อถือเพียงใดนั้น สิ่งสำคัญที่ต้องปฏิบัติคือ การสอบเทียบเครื่องวัดค่าสภาพการนำความร้อน ด้วยวัสดุอ้างอิงมาตรฐานที่ได้รับการรับรองจากหน่วยงานที่ได้รับมาตรฐานจาก NIST หรือ National Institute of Standards and Technology มาทำการสอบเทียบเครื่องวัดดังกล่าว และวัสดุอ้างอิงมาตรฐานนี้จะต้องทำการสอบเทียบใหม่ตามระยะเวลาที่กำหนด ซึ่งไม่สามารถทำได้ในประเทศไทยจำเป็นต้องส่งกลับไปยังหน่วยงานต่างประเทศเท่านั้น ทำให้สิ้นเปลืองทั้งเวลาและค่าใช้จ่ายในการส่งกลับไปยังต่างประเทศ แต่เนื่องจากการทดสอบตามวิธีการนี้ในห้องปฏิบัติการทดสอบค่าสภาพการนำความร้อนของฉนวน ได้ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส และ 50 องศาเซลเซียสเท่านั้น ทั้งวิธีการสอบเทียบและวิธีการทดสอบค่า งานวิจัยนี้จึงเป็นการนำเสนอการใช้ตัวรับรู้อุณหภูมิชนิดแพลททินัมเพื่อทำการวัดอุณหภูมิที่ผิวของฉนวนกันความร้อนทั้งด้านเพลทร้อนและเพลทเย็น และนำไปหาค่าสภาพการนำความร้อนของฉนวนกันความร้อนจากสับปะรด โดยการนำวัสดุอ้างอิงมาตรฐานมาช่วยในการหาค่าความร้อน เพราะการสอบเทียบตัวรับรู้อุณหภูมิชนิดแพลททินัม สามารถทำได้ในประเทศไทย และมีค่าใช้จ่ายถูกกว่า การส่งวัสดุอ้างอิงมาตรฐานกลับไปสอบเทียบ

นอกจากนี้งานวิจัยฉบับนี้ยังได้ทำการผลิตฉนวนกันความร้อนจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรคือ แขน ขี้ และเปลือกสับปะรด เพื่อใช้เป็นวัสดุฉนวนตัวอย่างในการทดสอบค่าสภาพการนำความร้อนของฉนวนกันความร้อนจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร โดยจะขอกกล่าวถึงวิธีการในการผลิตฉนวนกันความร้อนจาก แขนสับปะรด ขี้สับปะรด เปลือกสับปะรด และแบบผสมทั้ง 3 ชนิด ก่อนในข้างต้น

เพราะในแต่ละปีประเทศไทยมีวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเป็นจำนวนมาก และจากการ ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาและผลิตฉนวนกันความร้อนจากวัสดุเหลือทิ้งทาง การเกษตรที่ผ่านมา พบว่ามีความสำเร็จในการผลิตฉนวนกันความร้อนจากวัสดุเหลือทิ้งทางธรรมาชาติ หลายชนิด เช่น ฟางข้าว แกลบ กากมะพร้าว ชานอ้อย ชังข้าวโพด เปลือกทุเรียน (กิตติศักดิ์, 2544, ประยูร, 2544, ขวัญเรือน และคณะ, 2545, Panyakaew and Fotios, 2009) เส้นใยหญ้าแฝกและ น้ำยางธรรมชาติ (สมเจตน์ และคณะ, 2546) ไบยางพารา (จักรกริษฐ์, 2555) เป็นต้น แต่ยังไม่ ปรากฏงานวิจัยที่นำวัสดุเหลือทิ้งจากสับประรดมาใช้เป็นวัตถุดิบในการทำฉนวนกันความร้อนแต่อย่าง ใด ประเทศไทยมีผลผลิตสับประรดรวมทั้งประเทศประมาณ 2.60 ล้านตัน ในปี พ.ศ. 2555 (สำนักงาน ส่งเสริมและจัดการสินค้าเกษตร, 2555) มีวัสดุเหลือทิ้งคิดเป็น 40% โดยน้ำหนัก (%wt) ปัจจุบันวัสดุ เหลือทิ้ง เช่น เปลือก ถูกจำหน่ายในราคา 400 บาทต่อตัน เพื่อนำไปใช้เป็นอาหารสัตว์ ส่วนแกนและ ชั่วสับประรดถูกนำไปใช้ทำปุ๋ย หรือ พลังงานชีวมวล ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและผลิตฉนวนกันความ ร้อนจากแกน ชั่ว และเปลือกสับประรด โดยศึกษาสมบัติในด้านการเป็นฉนวนกันความร้อน โดยการ ทดสอบสภาพการนำความร้อนของฉนวนกันความร้อนเหล่านี้ ตามมาตรฐาน ASTM C518 ซึ่งเป็น มาตรฐานอุตสาหกรรมที่เป็นข้อกำหนดของฉนวนกันความร้อนที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ ตลอดจน ความสามารถในการลดความร้อนเข้าสู่อาคารได้ โดยมีเอกสารงานวิจัย และรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับ การผลิตฉนวนกันความร้อนจากแกน ชั่ว และเปลือกสับประรด เช่น พันธุ์สับประรด วิธีการผลิต อัตราส่วนในการผลิต ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน วิธีการทดสอบ อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการ ทดสอบ รวมถึงการค้นคว้าข้อมูลอื่นๆที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

## 1. สับประรด

สับประรด เป็นพืชล้มลุกชนิดหนึ่งที่มีต้นกำเนิดมาจากบริเวณทวีปอเมริกาใต้ ลำต้นมีขนาดสูง ประมาณ 80-100 เซนติเมตร สามารถปลูกได้ง่ายโดยการฝังกลบหน่อหรือส่วนยอดของผลที่เรียกว่า จุก เปลือกของผลสับประรดภายนอกมีลักษณะคล้ายตาล้อมรอบผล เป็นที่นิยมปลูกกันทั่วไปในประเทศ ไทย

ชื่อสามัญ (Common name) : pineapple

ชื่อวิทยาศาสตร์ (Scientific name) : *Ananas comosus*(L.) Merr.

อาณาจักร (Kingdom) : Plantae

ส่วน (Division) : Magnoliophyta

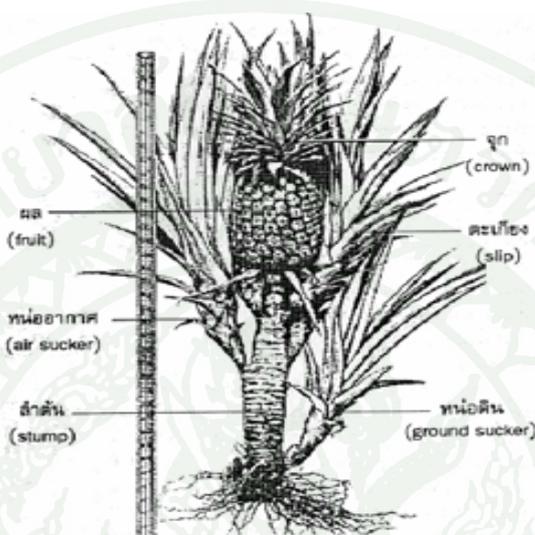
ชั้น (Class) : Liliopsida

อันดับ (Order) : Poales

วงศ์ (Family) : Bromeliaceae,

สกุล (Genus) : Ananas

สปีชีส์ (Species) : A. comosus



ภาพที่ 1 ต้นสับปะรด พร้อมส่วนต่างๆ

โดยสับปะรดที่ปลูกมากในประเทศไทย แบ่งออกได้เป็น 5 พันธุ์ โดยถือตามลักษณะของต้น ที่ได้ขนาดโตเต็มที่ และแข็งแรงสมบูรณ์ ดังนี้คือ

1. พันธุ์ปัตตาเวีย พันธุ์นี้รู้จักแพร่หลายในนามสับปะรดศรีราชา และชื่ออื่น ๆ เช่น ปรานบุรี, สามร้อยยอด ปลูกกันมากเพื่อโรงงานอุตสาหกรรม แหล่งปลูกที่สำคัญคือ ประจวบคีรีขันธ์ ชลบุรี เพชรบุรี ลำปาง และสามารถปลูกกันทั่ว ๆ ไป เพื่อขายผลสด เพราะมีรสหวานฉ่ำมีน้ำมาก ลักษณะทั่ว ๆ ไป คือ มีใบสีเขียวเข้ม และเป็นร่องตรงกลางผิวใบด้านบนเป็นมันเงา ส่วนใต้ใบ จะมีสีออกเทาเงิน ตรงบริเวณกลางใบ มักมีสีแดงอมน้ำตาล ขอบใบเรียบมีหนามเล็กน้อย บริเวณปลายใบ กลีบดอกสีม่วงอมน้ำเงิน ผลมีขนาดและรูปร่างต่างกันไป มีน้ำหนักผล อยู่ระหว่าง 2-6 กิโลกรัม แต่โดยปกติทั่วไปประมาณ 2.5 กิโลกรัม เปลือกผลเมื่อดิบสีเขียวคล้ำ เมื่อแก่จัดจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองอมส้ม ทางด้านล่างของผลประมาณครึ่งผล ก้านผลสั้นมีไส้ใหญ่ เนื้อเหลืองอ่อนแต่จะเปลี่ยนเป็นสีเข้มในฤดูร้อนรสชาติดี เป็นที่นิยมสำหรับการบริโภค

2. พันธุ์อินทรีชิต เป็นพันธุ์พื้นเมืองที่เก่าแก่ที่สุดในประเทศไทย ปลูกกันกระจัดกระจายทั่วไป แหล่งปลูกที่สำคัญ ได้แก่จังหวัดฉะเชิงเทรา ลักษณะทั่ว ๆ ไป คือขอบใบจะมีหนามแหลมร่างโค้งงอสีน้ำตาลอมแดง ใบสีเขียวอ่อนไม่เป็นมัน ขอบใบทั้ง 2 ข้างมีแถบสีแดงอมน้ำตาลตามแนวยาว ใต้ใบจะมีสีเขียวออกขาว และมีวาวออกสีน้ำเงิน กลีบดอกสีม่วงเข้ม ผลมีขนาดเล็กกว่าพันธุ์ปัตตาเวีย รสหวานอ่อน เปลือกผลเหนียวแน่น ทนทานต่อการขนส่ง เหมาะสำหรับบริโภค รสชาติดี

3. พันธุ์ขาว เป็นพันธุ์พื้นเมือง เกษตรกรนิยมปลูกพันธุ์นี้ร่วมกับพันธุ์อินทรีชิต เข้าใจว่าจะกลายเป็นพันธุ์มาจากพันธุ์อินทรีชิต แหล่งปลูกที่สำคัญคือ ฉะเชิงเทรา ลักษณะทั่ว ๆ ไป มีใบสีเขียวอมเหลืองหรือเขียวใบไม้ ทรงพุ่มเตี้ยใบแคบและสั้นกว่าพันธุ์อินทรีชิต ขอบใบมีหนามโค้งงอเข้าสู่ปลายใบ โคนกลีบดอกสีม่วงอ่อน ปลายกลีบสีม่วงอมชมพู เนื้อผลสีเหลืองทอง รสหวานอ่อน ผลมักมีหลายจุดคุณภาพของเนื้อไม่ค่อยดีนัก ผลมีขนาดปานกลาง น้ำหนักเฉลี่ย 0.85 กิโลกรัม มีลักษณะเป็นทรงกระบอก มีตาเล็ก

4. พันธุ์ภูเก็ตหรือสวี ปลูกกันมากในสวนยางจังหวัดภูเก็ต ชุมพร นครศรีธรรมราช และตราด โดยปลูกระหว่างแถวยาว รุ่นที่ยังมีอายุน้อยเพื่อเก็บผลขายก่อนกรีดยาง มีชื่ออื่น ๆ อีกเช่น พันธุ์ชุมพร พันธุ์สวี พันธุ์ตราดสีทอง ลักษณะทั่ว ๆ ไป ใบสีเขียวอ่อนและมีแถบสีแดงในตอนกลางและปลายในขอบใบมีหนามสีแดงแคบและยาวกว่าพันธุ์อินทรีชิต และพันธุ์ขาวกลีบดอก สีม่วงอ่อน ผลมีขนาดเล็กกว่าทุกพันธุ์ที่กล่าวมา ตาเล็ก เปลือกหนา เนื้อหวานกรอบสีเหลืองเข้ม เยื่อใยน้อย มีกลิ่นหอม เหมาะสำหรับบริโภคสด เป็นที่นิยมมากในภาคใต้

5. พันธุ์นางแลหรือน้ำผึ้ง ปลูกมากในจังหวัดเชียงราย ลักษณะทั่ว ๆ ไป คล้ายคลึงกับพันธุ์ปัตตาเวีย แต่มีรูปร่างของผลทรงกลมกว่าพันธุ์ปัตตาเวีย ตาหนา เปลือกบางกว่า และรสหวานจัดกว่าพันธุ์ปัตตาเวีย ผลแก่มีเนื้อในสีเหลืองเข้ม มีเยื่อใยน้อยเหมาะสำหรับบริโภคสด เป็นที่นิยมมากในภาคเหนือ ผลมีเปลือกบางมากขนส่งทางไกลไม่ดีนัก

จากผลผลิตสับปะรดภายในประเทศพบว่า ร้อยละ 70-80% สับปะรดถูกส่งเข้าโรงงานแปรรูป ส่วนที่เหลือ 20-30% ใช้บริโภคสดภายในประเทศ โดยสถานการณ์การผลิตในแต่ละปีพิจารณาจากผลผลิตภายใน 5 ปีล่าสุด ตั้งแต่ปี 2550 ถึงปี 2551 ดังตารางที่ 1 พบว่ามีอัตราการขยายตัวเพิ่มขึ้น และในปี 2552 ผลผลิตมีอัตราการขยายตัวต่ำลง เนื่องจากเกษตรกรประสบปัญหาาราคาของสับปะรดตกต่ำ หลังจากได้รับการช่วยเหลือจากรัฐบาลทำให้มีอัตราการขยายตัวเพิ่มขึ้นอีกในปีต่อมา โดยล่าสุดในปี 2555 เนื้อที่เก็บเกี่ยวรวมทั้งประเทศ 649,000 ไร่ เพิ่มขึ้นจากปี 2554 ประมาณ 47,992 ไร่ หรือ ประมาณร้อยละ 7.99 ผลผลิตรวมทั้งประเทศเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 29.61 และผลผลิตต่อไร่ทั้งประเทศเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 19.74 เนื่องจากราคาผลผลิตที่ผ่านมามีอยู่ในเกณฑ์ดีจึงเป็นแรงจูงใจให้เกษตรกรขยายพื้นที่ปลูกเพิ่มขึ้นโดยปลูกเพิ่มในพื้นที่ว่างเชิงเขา ปรับเปลี่ยนอีกในปีต่อๆมา จากพื้นที่ปลูกมันสำปะหลัง ปลูกแทนข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ หรือปลูกแซมในพื้นที่สวนยางใหม่ เป็นต้น

ตารางที่ 1 ผลผลิตสับปะรด ปี 2550 – 2555

	ปี 2550	ปี 2551	ปี 2552	ปี 2553	ปี 2554	ปี 2555
1. เนื้อที่เก็บเกี่ยว (ไร่)	597,467	581,972	566,599	583,200	601,008	649,000
2. ผลผลิต (ล้านตัน)	2.30	2.27	1.89	1.92	2.06	2.67
3. ผลผลิตต่อไร่ (กิโลกรัม)	3,858	3,915	3,427	3,300	3,429	4,106

ที่มา: สำนักบริหารการค้าสินค้าทั่วไป (2554), สำนักเศรษฐกิจการเกษตร (2555)

ประเทศไทยมีการส่งออกสับปะรดหรือผลิตภัณฑ์สับปะรด ได้แก่ สับปะรดสด สับปะรดแช่เย็น สับปะรดแช่แข็ง สับปะรดแห้ง สับปะรดกวน สับปะรดกระป๋อง และน้ำสับปะรดเข้มข้น โดยมีปริมาณการส่งออกสับปะรด ดังตารางที่ 2 ซึ่งพบว่าสองอันดับแรกคือ สับปะรดกระป๋อง และน้ำสับปะรดเข้มข้น โดยคิดเป็นร้อยละ 65.80 และ 23.64 ของมูลค่าการส่งออกสับปะรดและผลิตภัณฑ์ตามลำดับ หากพิจารณามูลค่าการส่งออกในกลุ่มของสินค้าประเภทผักและผลไม้ พบว่าสับปะรดกระป๋องมีมูลค่าการส่งออกคิดเป็นร้อยละ 35 ของปริมาณการส่งออกผลไม้กระป๋องและแปรรูปของสินค้าในกลุ่มนี้ทั้งหมด สำหรับตลาดส่งออกที่สำคัญ คือ สหภาพยุโรปมีสัดส่วนร้อยละ 32 สหรัฐอเมริการ้อยละ 29 ญี่ปุ่นร้อยละ 7 รัสเซียร้อยละ 6.3 และ แคนาดาร้อยละ 4.2 (สำนักเศรษฐกิจอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2555)

ตารางที่ 2 การส่งออกสับปะรดและผลิตภัณฑ์สับปะรด

ปริมาณ: ตัน/ มูลค่า: ล้านบาท

ประเภท	2552		2553		2554 (ม.ค.-มี.ค.)	
	ปริมาณ	มูลค่า	ปริมาณ	มูลค่า	ปริมาณ	มูลค่า
สับปะรดกระป๋อง	508,970.3	15,013.2	518,974.0	14,684.2	166,435.4	5,017.6
น้ำสับปะรด	151,414.3	6,523.7	139,876.5	6,614.0	37,912.1	1,802.1
สับปะรดกวน	26,556.1	1,518.9	27,232.5	1,738.9	6,480.0	434.1
สับปะรดแช่เย็น	2,740.1	31.2	2,149.6	27.9	442.7	7.1
สับปะรดแช่แข็ง	646.0	34.3	1,145.3	47.9	322.0	24.6
สับปะรดแห้ง	273.4	25.2	516.8	62.9	80.8	13.6

ที่มา: ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร สำนักปลัดกระทรวงพาณิชย์ และกรมศุลกากร (2554)

จากการที่ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีการส่งออกของสับปะรดกระป๋องและน้ำสับปะรดสดอยู่ในระดับแนวหน้าของโลก ในขณะเดียวกันก็มีวัสดุเหลือทิ้งจากสับปะรดจำนวนมากเช่นกัน ไม่ว่าจะเป็นขี้สับปะรด แกนสับปะรด และเปลือกสับปะรด เพราะผลิตภัณฑ์ดังกล่าวเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้ทำการแปรรูป หรือได้ปอกเปลือก ตัดชิ้นและคว้านแกนสับปะรดทิ้งเรียบร้อยแล้ว ก่อนที่จะบรรจุเพื่อจำหน่าย ดังภาพที่ 2 ดังนั้น จึงมีวัสดุเหลือทิ้งจากสับปะรดเป็นจำนวนมากเหลือเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ดังภาพที่ 3



(ก)



(ข)

ภาพที่ 2 ภาพแสดง (ก) ผลสับปะรด (ข) ผลิตภัณ์จากสับปะรด สับปะรดกระป๋อง และน้ำสับปะรด



(ก)



(ข)

**ภาพที่ 3** วัสดุเหลือทิ้งจากสับปะรด (ก) ส่วนของแกนและข้าวสับปะรด (ข) เปลือกสับปะรด

โดยหากคิดเปอร์เซ็นต์ของวัสดุเหลือทิ้งจากสับปะรดนี้ พบว่าคิดเป็น 40%wt ของน้ำหนัก รวมทั้งผลสับปะรด ปัจจุบันวัสดุเหลือทิ้งจากสับปะรดนี้ถูกจำหน่ายในราคา 400 บาทต่อตัน เพื่อนำไปใช้เป็นอาหารสัตว์ ส่วนแกนและข้าวสับปะรดถูกนำไปใช้ทำปุ๋ย น้ำหมักชีวภาพ หรือ พลังงานชีวมวล ซึ่งเมื่อพิจารณามูลค่าแล้วจะเห็นว่ามียุทธศาสตร์น้อย ด้วยเหตุนี้งานวิจัยฉบับนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะเพิ่มมูลค่าของวัสดุเหลือทิ้งของสับปะรด อันได้แก่ แกน ข้าว และเปลือก โดยการศึกษาความเป็นไปได้ในการพัฒนาและผลิตเป็นฉนวนกันความร้อนจากเส้นใยธรรมชาติ เพื่อลดการนำเข้าสู่เส้นใยสังเคราะห์จากต่างประเทศให้ได้ในอนาคต วัสดุเหลือทิ้งจากสับปะรดที่นำมาศึกษาและผลิตเป็นฉนวนกันความร้อนจากแกน ข้าว และเปลือกสับปะรดนั้น เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากสับปะรดพันธุ์ปัตตาเวีย ที่เกษตรกรนิยมปลูกในตำบลบ้านคา อำเภอสวนผึ้ง จังหวัดราชบุรี สำหรับป้อนเป็นวัตถุดิบให้แก่โรงงานอุตสาหกรรมและจำหน่ายเป็นสินค้าหนึ่งตำบลหนึ่งผลิตภัณฑ์ จากส่วนประกอบทางเคมี ในใบ และเปลือกสับปะรด ดังตารางที่ 3 พบว่ามีส่วนประกอบของสารประเภทเส้นใยในปริมาณที่เทียบเท่ากับหญ้าสด และหญ้าแห้งโดยสามารถที่จะพัฒนาสารประเภทเส้นใยธรรมชาติในการผลิตเป็นฉนวนกันความร้อนได้

**ตารางที่ 3** ส่วนประกอบในใบ และเปลือกสับปะรด

ส่วนประกอบ(%)	ใบสับปะรด	เปลือกสับปะรด	หญ้าสด	หญ้าแห้ง	อาหารผสมเสร็จ	อาหารชั้น
วัตถุแห้ง (DM)	93.97	10.02	20.21	95.41	91.68	89.68
โปรตีน (CP)	7.10	6.37	6.61	6.52	13.12	17.64
ไขมัน (EE)	1.58	1.13	0.69	0.53	2.97	3.76

ตารางที่ 3 (ต่อ)

ส่วนประกอบ(%)	ใบสับปะรด	เปลือกสับปะรด	หญ้าสด	หญ้าแห้ง	อาหารผสมเสร็จ	อาหารชั้น
เยื่อใย (CF)	21.51	20.60	29.06	32.34	15.68	6.01
เถ้า (Ash)	8.60	6.62	8.03	8.41	8.51	9.00
NFE	61.21	65.28	55.61	52.20	59.72	63.59
Calcium	0.60	0.33	0.38	0.30	0.76	0.56

ที่มา: กรมปศุสัตว์ (2547)

นอกจากนี้ วรพงษ์ และวิภา (2528) ยังพบว่าผลพลอยได้จากสับปะรดหลังจากเข้าไปแปรรูปในโรงงานอุตสาหกรรมแล้วสามารถนำมาวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีของผลสับปะรดได้ปริมาณเส้นใยเซลลูโลสประกอบอยู่ในทุกๆส่วน ดังตารางที่ 4 ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำเส้นใยดังกล่าวมาทำการศึกษาและพัฒนาเพื่อเป็นฉนวนกันความร้อนจากเส้นใยธรรมชาติได้

ตารางที่ 4 ส่วนประกอบทางเคมีแยกวิเคราะห์ตามแต่ละส่วนของผลสับปะรด

ส่วนประกอบ	เปลือกด้านข้าง	ส่วนหัว	ส่วนล่าง	แกน	เศษ
ความชื้น	85.8	84.9	85.9	88.6	84.5
โปรตีน	4.4	4.1	5.4	3.2	3.6
ไขมัน	1.5	1.2	1.4	1.3	1.2
เยื่อใย (CF)	8.1	11.6	13.4	8.9	4.7
เถ้า	4.9	5.4	7.6	3.8	4.2
NFE	81.1	77.7	72.2	82.8	86.3
NDF	27.1	38.8	46.9	26.3	14.5
NDS	72.9	61.2	53.1	73.1	85.5
ADF	12.1	17.1	20.4	12.2	5.8
ADL	1.7	1.9	2.8	0.7	0.6
Cellulose	10.4	15.2	17.6	11.5	5.2
Hemicellulose	15.0	21.7	26.5	14.1	8.7

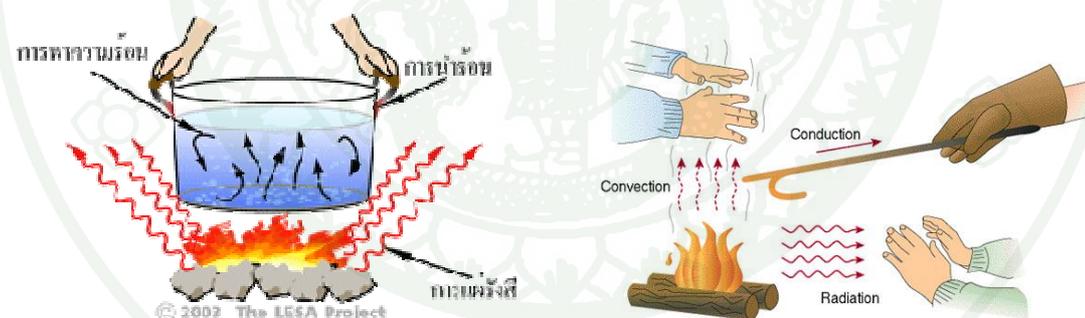
ที่มา: วรพงษ์และวิภา (2528)

## 2. ฉนวนกันความร้อน

2.1 ความหมายของฉนวนกันความร้อน คือ วัตถุหรือวัสดุที่มีความสามารถในการสกัดกั้นความร้อนไม่ให้ส่งผ่านจากด้านใดด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งได้ง่าย การส่งผ่านความร้อนจากด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งของวัสดุใดๆ หรือการถ่ายเทความร้อน (heat transfer) ระหว่างวัตถุ สามารถเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่ออุณหภูมิของวัตถุทั้งสองมีความแตกต่างกัน ซึ่งลักษณะการถ่ายเทความร้อนนั้นมี 3 วิธี โดยอาจเกิดขึ้นจากวิธีใดวิธีหนึ่งหรือหลายๆวิธีพร้อมกัน โดย Kreider and Rabl (1994) ได้อธิบายถึงหลักการถ่ายเทความร้อนไว้ว่า การถ่ายเทความร้อนแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสี ดังภาพที่ 4

2.1.1 การนำความร้อน (conduction) คือ ปรากฏการณ์ที่พลังงานความร้อนถ่ายเทภายในวัตถุหนึ่งๆ หรือระหว่างวัตถุสองชิ้นที่สัมผัสกัน จากโมเลกุลหนึ่งไปยังโมเลกุลหนึ่ง โดยมีทิศทางของการเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าโดยที่ตัวกลางไม่มีการเคลื่อนที่

2.1.2 การพาความร้อน (convection) คือการถ่ายเทความร้อนด้วยการเคลื่อนที่ของอะตอมและโมเลกุลของสสารซึ่งมีสถานะเป็นของเหลวและก๊าซ ส่วนของแข็งนั้นจะมีการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำความร้อน และการแผ่รังสีเท่านั้น การพาความร้อนจึงมักเกิดขึ้นในบรรยากาศ และมหาสมุทร รวมทั้งภายในโลกและดวงอาทิตย์



ภาพที่ 4 ชนิดของการถ่ายเทความร้อน การนำความร้อน การพาความร้อน และ การแผ่รังสี

2.1.3 การแผ่รังสีความร้อน (radiation) คือ การถ่ายเทความร้อนที่ออรอบตัวทุกทิศทุกทาง โดยไม่ต้องอาศัยตัวกลางในการส่งถ่ายพลังงาน ดังเช่น การนำความร้อน หรือ การพาความร้อน การแผ่รังสีสามารถถ่ายเทความร้อนผ่านสุญญากาศได้ วัตถุทุกชนิดที่มีอุณหภูมิสูงกว่า  $-273.15^{\circ}\text{C}$  หรือ  $0\text{ K}$  ย่อมมีการแผ่รังสี วัตถุที่มีอุณหภูมิสูงแผ่รังสีคลื่นสั้น วัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำแผ่รังสีคลื่นยาว

## 2.2 ชนิดของฉนวนกันความร้อน

ในการจำแนกประเภทของฉนวนกันความร้อน สามารถทำได้หลายวิธี ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการใช้งานหรือข้อกำหนด แต่วิธีการที่นิยมใช้คือแบ่งประเภทของฉนวนกันความร้อนมีอยู่ 2 แบบ คือ แบ่งตามชนิดของวัสดุพื้นฐาน (basic materials) ที่ใช้ในการผลิต และ แบ่งตามลักษณะสมบัติ (characteristics) ของส่วนประกอบหลักที่ใช้เป็นวัสดุที่มีหน้าที่กันความร้อน

2.2.1 แบ่งตามชนิดของวัสดุพื้นฐานที่ใช้ในการผลิต โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท คือ

(ก) วัสดุประเภทใยแร่ (mineral fibrous material) ได้แก่ ใยหิน (rock wool) ใยโลหะที่ได้จากการถลุงโลหะ (slag) ใยแก้ว (fibre glass or glass wool)

(ข) วัสดุประเภทเส้นใยธรรมชาติ (organic fibrous material) เช่น ไม้ (wood) ชานอ้อย (cane) ฝ้าย (cotton) ขนสัตว์ (hair) เส้นใยเซลลูโลส (cellulose) ใยสังเคราะห์ (synthetic fiber)

(ค) วัสดุประเภทเซลล์ธรรมชาติ (organic cellular material) เช่น ไม้ก๊อก (cork) โฟมยาง (foamed rubber) โพลีสไตรีน (polystyrene) โพลียูรีเทน (polyurethane)

(ง) วัสดุประเภทเซลล์แร่ (mineral cellular material) เช่น แคลเซียมซิลิเกต (calcium silicate) พอร์ไลท์ (perlite) เวอร์มิคูไลท์ (vermiculite) โฟมคอนกรีต (foamed concrete)

2.2.2 แบ่งตามลักษณะสมบัติของส่วนประกอบหลักที่ใช้เป็นวัสดุที่มีหน้าที่กันความร้อน โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ประเภทคือ

(ก) ประเภทที่เป็นเส้นใย (fiber) ประกอบด้วยเส้นใยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กจำนวนมาก วัสดุเส้นใยเหล่านี้อาจเป็นเส้นใยของพืชชนิดต่างๆ หรือเส้นใยสังเคราะห์ เช่น ใยแก้ว

(ข) ประเภทเป็นช่อง หรือ เซลล์ (cell) โดยแต่ละช่องเซลล์จะฉนวนแยกออกจากกัน ฉนวนประเภทนี้ประกอบด้วยเซลล์ที่ผนังของแต่ละเซลล์จะฉนวนติดกัน ผลิตจากวัสดุจำพวก แก้ว พลาสติก หรือยาง ตัวอย่างของฉนวนประเภทนี้ได้แก่ โฟมชนิดยืดหยุ่น โฟมโพลีสไตรีน โฟมโพลีเอโซไซยานูเรต โฟมโพลียูรีเทน เป็นต้น

(ค) ประเภทที่เป็นโพรง หรือ ช่อกกลม (granule) ซึ่งอากาศสามารถถ่ายเทระหว่างช่อกกลมได้ ฉนวนประเภทนี้ประกอบด้วยอนุภาคขนาดเล็กซึ่งเป็นโพรง โพรงเหล่านี้ติดต่อกันโดยโพรงอากาศนี้ได้

(ง) ประเภทที่เป็นเกล็ดเล็กๆ (flake) ประกอบด้วยอนุภาคขนาดเล็ก อนุภาคเหล่านี้ อาจถูกเทเข้าไปในโพรงอากาศ หรือทำให้เกาะตัวกันเข้าเป็นรูปทรงฉนวนที่แข็ง ลักษณะเป็นบล็อกหรือแผ่นอัด ฉนวนแบบเกล็ดที่รู้จักกันทั่วไปคือ เพอร์ไลต์และเวอร์มิคูไลท์

(จ) ประเภทที่เป็นแผ่นบาง (sheet) ทำจากวัสดุที่มีสภาพการสะท้อนรังสีความร้อนสูงหรือมีสภาพการแผ่รังสีต่ำ การใช้งานฉนวนแบบแผ่นบางนี้ ส่วนใหญ่จะใช้วัสดุหลายๆชนิด ประกอบกันเป็นระบบมากกว่าใช้วัสดุเพียงชนิดเดียว การใช้ฉนวนกันความร้อนแบบแผ่นบางให้มีประสิทธิภาพ จะต้องใช้ร่วมกับฉนวนแบบที่มีช่องว่างอากาศ ที่มีสภาวะของอากาศอยู่นิ่ง เพื่อลดการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนและการพาความร้อน

### 2.3 ค่าสภาพการนำความร้อน

ค่าสภาพการนำความร้อน (thermal conductivity) มีหน่วยเป็น วัตต์ต่อเมตรเคลวิน, W/m.K หรือ W/m.°C คือ ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทผ่านวัสดุขนาด 1 ตารางเมตร ที่ความหนา 1 เมตร เมื่ออุณหภูมิแตกต่างกัน 1 องศาเคลวิน หรือ 1 องศาเซลเซียส

เมื่อวัสดุมีความหนาเท่ากัน สภาพนำความร้อนวัสดุที่มีค่าต่ำ จะมีสมบัติของความเป็นฉนวนมากกว่าวัสดุที่มีค่าสภาพนำความร้อนสูงกว่า โดยวิธีการที่ใช้ในการทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM-C518

2.3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับการทดสอบค่าสภาพการนำความร้อน ตามสมการการหาค่าความร้อน คือ

$$\text{จากสมการ} \quad Q = \lambda \frac{dT}{dX} \quad (1)$$

$$\text{เมื่อ} \quad \lambda = \frac{Q_U + Q_L}{2} \times \frac{L}{\Delta T}$$

โดยสมการค่าความไม่แน่นอน จาก ASTM C518 (A2.2) คือ

$$\left(\frac{\delta\lambda}{\lambda}\right)^2 = \left(\frac{\delta S}{S}\right)^2 + \left(\frac{\delta E}{E}\right)^2 + \left(\frac{\delta L}{L}\right)^2 + \left(\frac{\delta T}{T}\right)^2 \quad (2)$$

เมื่อ  $S$  คือ calibration factor of the heat flux transducer  
มีหน่วยเป็น วัตต์ต่อตารางเมตรต่อโวลต์ ( $W/m^2/V$ )

$E$  คือ heat flux transducer output มีหน่วยเป็น โวลต์ (V)

$L$  คือ ระยะห่างระหว่างเพลทร้อนและเพลทเย็นขณะทดสอบ  
มีหน่วยเป็น เมตร (m)

$T$  คือ อุณหภูมิระหว่างตัวอย่างที่ทดสอบ มีหน่วยเป็น K (เคลวิน)

จากสมการ (2) พบว่าความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับค่าความไม่แน่นอนของการวัดค่าสภาพนำความร้อนตามมาตรฐาน ASTM C518 มีค่า  $S$ ,  $E$ ,  $L$  และ  $T$  โดยสามารถทำการสอบกลับทางตรงของค่าเหล่านี้ได้ทุกค่า คือ

ค่า  $S$  และ  $E$  มีความสัมพันธ์กัน หรือไม่เป็นอิสระต่อกันระหว่าง ค่าความร้อนกับแรงดันไฟฟ้าในการคำนวณหาค่า  $Q$  ได้ และสามารถทำการสอบกลับทางตรงใน หน่วยของกระแสไฟฟ้าได้ มีหน่วยเป็น แอมแปร์ (ampere)

ค่า  $L$  สามารถทำการสอบกลับทางตรงใน หน่วยวัดความยาวได้ มีหน่วยเป็น เมตร (metre)

ค่า  $T$  สามารถทำการสอบกลับทางตรงใน หน่วยวัดอุณหภูมิ มีหน่วยเป็น องศาเซลเซียส ( $^{\circ}C$ ) หรือ เคลวิน (K) ได้

ในส่วนของงานวิจัยนี้พิจารณาในส่วนของค่า  $Q$  โดยไม่ได้แยกการประเมินค่าความไม่แน่นอนจาก  $S$  และ  $E$  โดยจะคิดเฉพาะในส่วนของความสัมพันธ์ที่เป็นอิสระต่อกันเท่านั้น และในส่วนของ ค่า  $L$  ได้กำหนด ขนาดของตัวอย่างฉนวนทดสอบให้มีขนาดเท่ากับ วัสดุอ้างอิงมาตรฐาน จึงประเมินค่าความไม่แน่นอนของ  $L$  ในส่วนของความละเอียดของเครื่องมือทดสอบ

ดังนั้นในงานวิจัยฉบับนี้จึงมุ่งเน้นการสอบกลับทางตรงของอุณหภูมิ  $T$  ของเครื่องวัดค่าสภาพการนำความร้อน เท่านั้น

จากสมการ (1) สามารถนำมาประเมินความสัมพันธ์ของสมการความไม่แน่นอน ที่เป็นอิสระต่อกัน

$$\text{ดังนั้น หาค่าสภาพการนำความร้อนจากสมการ, } \lambda = \frac{Q_U + Q_L}{2} \times \frac{L}{\Delta T} \quad (3)$$

ประเมินสมการความไม่แน่นอนจาก law of propagation of uncertainty for independent

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N u_i^2(y)$$

$$u_\lambda = \sqrt{\left(\frac{\delta\lambda}{\delta Q_U}\right)^2 u_{Q_U}^2 + \left(\frac{\delta\lambda}{\delta Q_L}\right)^2 u_{Q_L}^2 + \left(\frac{\delta\lambda}{\delta L}\right)^2 u_L^2 + \left(\frac{\delta\lambda}{\delta T_L}\right)^2 u_{T_L}^2 + \left(\frac{\delta\lambda}{\delta T_U}\right)^2 u_{T_U}^2}$$

Relative Uncertainty;

$$u_\lambda = \lambda \sqrt{\frac{\left(\frac{\delta\lambda}{\delta Q_U}\right)^2 u_{Q_U}^2 + \left(\frac{\delta\lambda}{\delta Q_L}\right)^2 u_{Q_L}^2 + \left(\frac{\delta\lambda}{\delta L}\right)^2 u_L^2 + \left(\frac{\delta\lambda}{\delta T_L}\right)^2 u_{T_L}^2 + \left(\frac{\delta\lambda}{\delta T_U}\right)^2 u_{T_U}^2}{\lambda^2}}$$

$$\frac{u_\lambda}{\lambda} = \sqrt{\frac{\left(\frac{\delta\lambda}{\delta Q_U}\right)^2 u_{Q_U}^2 + \left(\frac{\delta\lambda}{\delta Q_L}\right)^2 u_{Q_L}^2 + \left(\frac{\delta\lambda}{\delta L}\right)^2 u_L^2 + \left(\frac{\delta\lambda}{\delta T_L}\right)^2 u_{T_L}^2 + \left(\frac{\delta\lambda}{\delta T_U}\right)^2 u_{T_U}^2}{\lambda^2}}$$

$$\frac{u_\lambda}{\lambda} = \sqrt{\frac{\left(\frac{\delta\lambda}{\delta Q_U}\right)^2 u_{Q_U}^2 + \left(\frac{\delta\lambda}{\delta Q_L}\right)^2 u_{Q_L}^2 + \left(\frac{\delta\lambda}{\delta L}\right)^2 u_L^2 + \left(\frac{\delta\lambda}{\delta T_L}\right)^2 u_{T_L}^2 + \left(\frac{\delta\lambda}{\delta T_U}\right)^2 u_{T_U}^2}{\left(\frac{Q_U+Q_L}{2} \times \left(\frac{L}{(T_L-T_U)}\right)\right)^2}}$$

$$\frac{u_\lambda}{\lambda} = \sqrt{\left(\frac{u_{Q_U}}{(Q_U+Q_L)}\right)^2 + \left(\frac{u_{Q_L}}{(Q_U+Q_L)}\right)^2 + \left(\frac{u_L}{L}\right)^2 + \left(-\frac{u_{T_L}}{(T_L-T_U)}\right)^2 + \left(\frac{u_{T_U}}{(T_L-T_U)}\right)^2}$$

โดยที่  $\lambda$  คือ สภาพนำความร้อนของวัสดุ (the thermal conductivity of a specimen) มีหน่วยเป็น วัตต์ต่อเมตรเคลวิน (W/m.K)

$Q_U$  คือ ปริมาณความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงกว่า (the output of the upper heat flux transducer) มีหน่วยเป็นวัตต์ต่อตารางเมตร (W/m<sup>2</sup>)

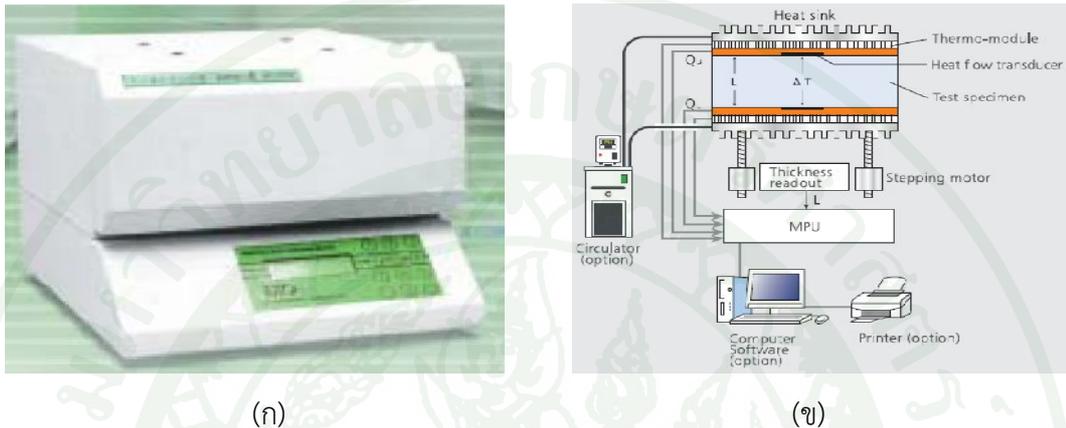
$Q_L$  คือ ปริมาณความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า (the output of the lower heat flux transducer) มีหน่วยเป็นวัตต์ต่อตารางเมตร (W/m<sup>2</sup>)

$L$  คือ ค่าความหนาของวัสดุ (the thickness of the specimen) มีหน่วยเป็นเมตร

$\Delta T$  คือ ค่าความต่างของอุณหภูมิระหว่างผิววัสดุทั้งสองด้าน,  $T_U - T_L$  โดย  $T_U > T_L$

(the temperature difference between two surfaces of the specimen) มีหน่วยเป็น เคลวิน (K) หรือองศาเซลเซียส ( $^{\circ}\text{C}$ )

2.3.2 เครื่องวัดค่าสภาพการนำความร้อน (thermal conductivity tester) วิธีการอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C-518



ภาพที่ 5 ภาพแสดง (ก) เครื่องวัดค่าสภาพการนำความร้อน และ (ข) หลักการทำงานของเครื่อง

วิธีการวัดค่าสภาพการนำความร้อนของแผ่นฉนวน โดยอ้างอิงจากมาตรฐาน ASTM C-518 ด้วยเครื่องวัดค่าสภาพการนำความร้อน HC-074 ของ EKO INSTRUMENTS ดังภาพที่ 5 (ก) ซึ่งมีหลักการทำงาน ดังภาพที่ 5 (ข) โดยเครื่องวัดค่าสภาพการนำความร้อนจะมีระบบควบคุมอุณหภูมิทั้ง 2 ด้าน ที่สภาวะคงตัว 50 และ 20 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ความร้อนจากแหล่งที่มีอุณหภูมิสูงกว่า จะถูกส่งผ่านไปยังแหล่งที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยแทรกวัสดุฉนวนที่ต้องการวัดไว้ระหว่างแหล่งให้ความร้อนทั้งสอง ปริมาณความร้อนที่ส่งผ่านจะถูกตรวจจับด้วยเซ็นเซอร์วัดค่าฟลักซ์ความร้อน (heat flux sensor) ที่สัมผัสอยู่ที่ผิวของฉนวนทั้งสองด้าน แล้วคำนวณหาค่าสภาพนำความร้อนด้วยสมการ (1)

2.3.3 สมการความไม่แน่นอน ของการวัดค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุฉนวน

$$\left| \frac{u_\lambda}{\lambda} \right| = \sqrt{\left( \frac{u_{Q_U}}{Q_U + Q_L} \right)^2 + \left( \frac{u_{Q_L}}{Q_U + Q_L} \right)^2 + \left( \frac{u_L}{L} \right)^2 + \left( \frac{u_{T_U}}{T_U - T_L} \right)^2 + \left( \frac{u_{T_L}}{T_U - T_L} \right)^2}$$

โดยที่  $\frac{u_{Q_U}}{Q_U + Q_L}$  คือ ความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ของ  $Q_U$  (the relative uncertainty of the upper heat flux)

$\frac{u_{Q_L}}{Q_U + Q_L}$  คือ ความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ของ  $Q_L$  (the relative uncertainty of the lower heat flux)

$\frac{u_L}{L}$  คือ ความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ของ  $L$  (the relative uncertainty of the specimen thickness)

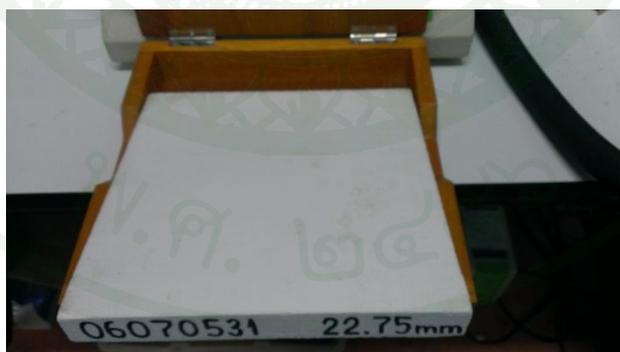
$\frac{u_{T_U}}{T_U - T_L}$  คือ ความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ของ  $T_U$  (the relative uncertainty of the upper surface temperature)

$\frac{u_{T_L}}{T_U - T_L}$  คือ ความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ของ  $T_L$  (the relative uncertainty of the lower surface temperature)

#### 2.3.4 วัสดุอ้างอิง (standard reference material)

วัสดุอ้างอิงมาตรฐาน คือ วัสดุ หรือ สาร ที่มีค่าสมบัติอย่างหนึ่ง หรือมากกว่า ที่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน และถูกจัดเตรียมมาอย่างดี สำหรับใช้สอบเทียบอุปกรณ์สำเร็จ ใช้ประเมินวิธีการวัด หรือกำหนดค่าวัสดุ โดยวัสดุอ้างอิงอาจอยู่ในรูปของก๊าซบริสุทธิ์ หรือก๊าซผสม ของเหลว หรือของแข็ง (สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2551)

วัสดุอ้างอิงสำหรับการเทียบมาตรฐานเครื่องวัดค่าสภาพการนำความร้อน ที่ใช้ก่อนการทดสอบ คือ Expanded Poly-Styrene (EPS) ซึ่งมีค่าสภาพการนำความร้อนอยู่ที่ 0.038 W/m.K, ค่าความผิดพลาด (accuracy) 0.005 W/m.K (EKO, 2012)



ภาพที่ 6 วัสดุอ้างอิงมาตรฐาน (EPS)

EPS Foam คือ พอลิสไตรีน (polystyrene, PS) เป็นพลาสติกที่ผลิตขึ้นมาจาก สไตรีนมอนอเมอร์ ซึ่งเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่ได้จากปิโตรเลียม เป็นชนิดที่ได้จากการผสมพอลิสไตรีน ร้อยละ 90-95 กับสารทำให้ขยายตัว ที่ใช้กันมากคือ เพนเทน (pentane,  $C_5H_{12}$ ) ซึ่งเป็นตระกูลเดียวกับก๊าซหุงต้ม หรือ บิวเทน (butane,  $C_4H_{10}$ ) เป็นสารที่ทำให้ขยายตัว (blowing agent) ในระหว่างกระบวนการผลิต วัตถุดิบที่เรียกว่า polymerization เนื้อพลาสติก PS จะทำปฏิกิริยากับก๊าซ เพนเทน เอาไว้ภายในเมื่อนำมาผลิต โฟม EPS วัตถุดิบจะขยายตัว และเมื่อได้รับความร้อนจาก ไอน้ำ (steam) ก็จะกลายเป็นเม็ดโฟมขาวๆ จากนั้นจึงนำไปขึ้นรูป (molding)

พอลิสไตรีนเป็นพลาสติกชนิดเทอร์โมพลาสติก คือหลอมเป็นของเหลวได้ โดยที่ อุณหภูมิห้องจะอยู่ในสถานะของแข็ง แต่จะหลอมละลายเมื่อทำให้ร้อน และแข็งตัวเมื่อเย็นลง พอลิสไตรีนแข็งที่บริสุทธิ์จะไม่มีสีใส แต่สามารถทำเป็นสีต่างๆได้ และยืดหยุ่นได้จำกัด สมบัติเด่นคือ มีน้ำหนักเบา และมีสมบัติการเป็นฉนวนมากกว่าวัสดุชนิดอื่น และไม่มีสารพิษ จึงถูกนำมาใช้ในการ เป็นวัสดุอ้างอิงในการเทียบมาตรฐานของเครื่องวัดค่าสภาพการนำความร้อน ดังภาพที่ 6

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะผลิตฉนวนกันความร้อนจากแกน ขั้ว เปลือกของสับปะรด และฉนวนกันความร้อนแบบผสมทั้ง 3 ชนิด โดยใช้อัตราส่วนของแกน ขั้ว และเปลือกสับปะรด 1:1:2 ที่ความหนาแน่น 75:75:150 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ และทดสอบค่าสภาพการนำความร้อนของฉนวนตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) โดยอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C-518 ด้วยเครื่องวัดค่าสภาพการนำความร้อน โดยมีวัสดุอ้างอิงมาตรฐานที่ 0.038 W/m.K ที่มีค่าความ ผิดพลาด 0.005 W/m.K

## อุปกรณ์และวิธีการ

### อุปกรณ์

งานวิจัยเรื่องการผลิตฉนวนกันความร้อนจากแกน ไข่ และเปลือก สับปะรดนี้ ได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การศึกษากระบวนการผลิตฉนวนกันความร้อนจากแกน ไข่ และเปลือก สับปะรด และการวัดค่าสภาพนำความร้อนของฉนวนที่ผลิตได้ โดยในแต่ละกระบวนการจะต้องใช้วัสดุ และอุปกรณ์ในการวิจัย ตามรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. วัสดุและอุปกรณ์เพื่อการผลิตฉนวนกันความร้อนจากแกน ไข่ และเปลือกสับปะรด
  - 1.1 แกนสับปะรด
  - 1.2 ไข่สับปะรด
  - 1.3 เปลือกสับปะรด
  - 1.4 ถังน้ำ
  - 1.5 กระจาดสะเด็ดน้ำ
  - 1.6 แผ่นสังกะสีสำหรับตากแดด
  - 1.7 ถุงมือยาง
  - 1.8 ท่อนไม้ที่มีลักษณะเป็นทรงกลม
  - 1.9 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือ โซดาไฟที่ความเข้มข้น 20% โดยน้ำหนัก
  - 1.10 ไม้พายขนาดความยาว 1 เมตร
  - 1.11 บล็อกแบบพีวีซี ขนาด 20 x 20 x 2 ลูกบาศก์เซนติเมตร
  - 1.12 เครื่องชั่งน้ำหนักละเอียด ช่วง 0.001 – 10 กิโลกรัม ค่าความคลาดเคลื่อน  $\pm 1\%$
  - 1.13 กาวน้ำ
2. วัสดุและอุปกรณ์เพื่อใช้ในการทดสอบค่าสภาพการนำความร้อน
  - 2.1 เครื่องทดสอบค่าสภาพการนำความร้อน heat flow meter รุ่น HC-074 ตามมาตรฐาน ASTM – C518 ค่าความคลาดเคลื่อน 1% or 0.01 W/m.K ดังภาพที่ 7 (ก)
  - 2.2 วัสดุอ้างอิงมาตรฐาน EPS ซึ่งมีค่าสภาพการนำความร้อนอยู่ที่ 0.038 W/m.K, ค่าความผิดพลาด 0.005 W/m.K
  - 2.3 อ่างน้ำเย็นควบคุมอุณหภูมิ 18°C รุ่น WNB14 ค่าความคลาดเคลื่อน 0.5°C ดังภาพที่ 7 (ก)

2.4 กล้องจุลทรรศน์ดิจิทัล (digital microscope) กำลังขยาย 500 เท่า  
 ดังภาพที่ 7 (ข)

2.5 เครื่องวัดและบันทึกอุณหภูมิชนิด 4 ช่องสัญญาณ ดังภาพที่ 7 (ค)

2.6 ตัวรับรู้อุณหภูมิชนิด PT100 ช่วงการวัด  $-40^{\circ}\text{C}$  to  $100^{\circ}\text{C}$  ดังภาพที่ 7 (ง)



(ก)



(ข)



(ค)



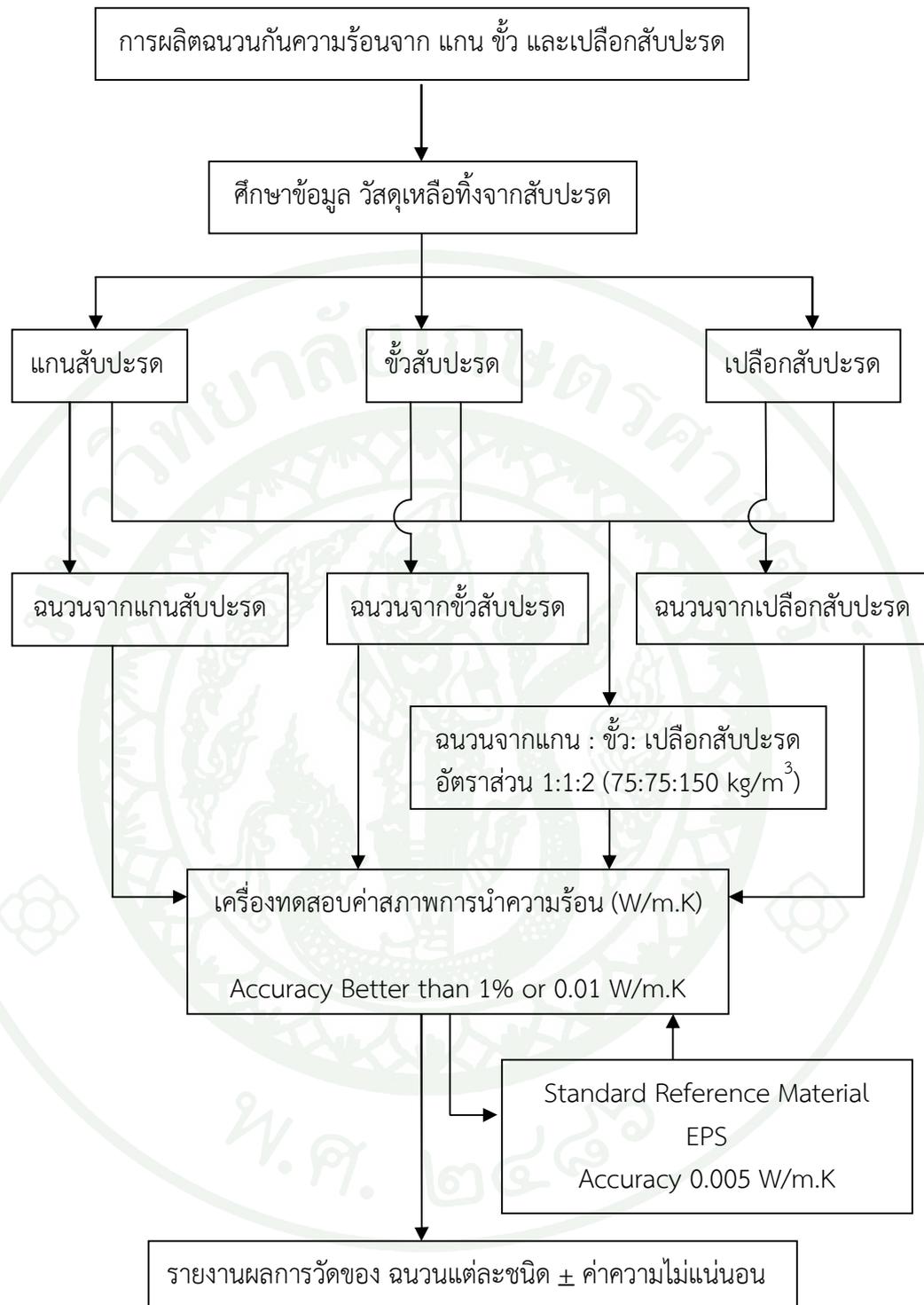
(ง)

ภาพที่ 7 ภาพแสดง (ก) เครื่องทดสอบค่าสภาพการนำความร้อนพร้อม อ่างน้ำเย็นควบคุมอุณหภูมิ  $18^{\circ}\text{C}$  (ข) กล้องจุลทรรศน์ดิจิทัล (ค) เครื่องวัดและบันทึกอุณหภูมิชนิด 4 ช่องสัญญาณ (ง) เครื่องวัดและบันทึกอุณหภูมิชนิด 4 ช่องสัญญาณและหัววัดอุณหภูมิชนิด PT100

### วิธีการ

การผลิตนวนกั้นความร้อนจากแกน ไข้ว และเปลือกสับปรดนั้น สามารถแบ่งวิธีการและขั้นตอนได้ออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ ดังแสดงในภาพที่ 8 คือ

1. ขั้นตอนการผลิตฉนวนกันความร้อนจากแกน ไข่ และเปลือกสับปะรด ประกอบด้วย
  - 1.1 การเตรียมวัตถุดิบ คือวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร แกน ไข่ และเปลือกสับปะรด
  - 1.2 การขึ้นรูปเป็นแผ่นตามแม่แบบขนาด 20 x 20 x 2.2 ลูกบาศก์เซนติเมตร
2. ขั้นตอนการทดสอบค่าสภาพการนำความร้อนของฉนวน
  - 2.1 ฉนวนกันความร้อนจากแกนสับปะรด
  - 2.2 ฉนวนกันความร้อนจากไข่สับปะรด
  - 2.3 ฉนวนกันความร้อนจากเปลือกสับปะรด
  - 2.4 ฉนวนกันความร้อนแบบผสมจากแกน : ไข่ : เปลือกสับปะรด ในอัตราส่วน 1:1:2 ตามลำดับ
  - 2.5 รายงานผลพร้อมค่าความไม่แน่นอนจากการทดสอบ

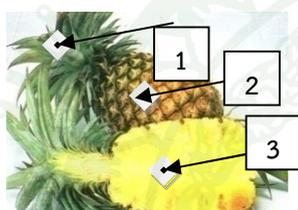


ภาพที่ 8 กระบวนการผลิตฉนวนกันความร้อนจากแกน ขี้ และเปลือกสับปะรด และทำการทดสอบค่าสภาพการนำความร้อน (W/m.K)

## 1. ขั้นตอนการผลิตฉนวนกันความร้อนจากแกน ขั้ว และเปลือกสับปะรด

### 1.1 การเตรียมวัตถุดิบ คือวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร แกน ขั้ว และเปลือกสับปะรด

วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรจากสับปะรด ซึ่งอาจจะได้มาจากโรงงานอุตสาหกรรมแปรรูปสับปะรด หรือจากการค้า จากการบริโภค จะมีเศษผง เศษฝู่น หรือส่วนประกอบอื่นๆอีกเป็นจำนวนมาก จึงเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องทำความสะอาดเพื่อชำระล้างสิ่งปนเปื้อนเหล่านั้น โดยการล้างด้วยน้ำสะอาดเพื่อชำระสิ่งสกปรก ฝู่น และผงที่ติดมากับวัสดุ แล้วใช้กระดาษตักขึ้นจากน้ำ แล้วทิ้งให้สะเด็ดน้ำ หลังจากนั้นทำการแยกส่วนประกอบทั้ง 3 ส่วน ออกเป็น แกนสับปะรด ขั้วสับปะรด และเปลือกสับปะรด เพราะส่วนประกอบทั้งสามนี้จะมีวิธีการในการทำความสะอาดที่แตกต่างกัน ดังภาพที่ 9 (ก) (ข) และ (ค)



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)

ภาพที่ 9 ภาพแสดง (ก) บริเวณ (1) ขั้ว (2) เปลือก (3) แกนสับปะรด (ข) แกนสับปะรดที่มีส่วนขั้วติดอยู่ (ค) เปลือกสับปะรด (ง) เส้นใยจากการบดและตีแกนสับปะรดให้เป็นเส้น (จ) ส่วนขั้วที่แกะออกจากแกน (ฉ) ส่วนแกนที่เหลือ

#### 1.1.1 แกนสับปะรด (core of pineapple)

นำแกนสับปะรดหลังจากที่ทำความสะอาดโดยการล้างด้วยน้ำสะอาดและรอให้สะเด็ดน้ำแล้ว ไปตากแดดเพื่อลดความชื้นบางส่วนเป็นเวลาประมาณ 7 วัน เนื่องจากส่วนของแกนสับปะรดจะเป็นส่วนที่มีความชื้นสูง ดังนั้นหลังตากแดดแล้ว จะนำมาบดและตีให้เป็นเส้นๆด้วยท่อนไม้

เพื่อที่จะได้เส้นใยจากแกนสับปะรดซึ่งเป็นเส้นใยที่มีความชื้นมาก ดังนั้นจึงต้องนำไปตากแดดต่ออีกครั้งเป็นเวลาประมาณ 3 วัน จะได้เส้นใยจากแกนสับปะรดที่มีความแห้ง และแข็งกระด้าง ดังภาพที่ 9 (ง)

ผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ในอัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1000 กรัม ต่อ น้ำ 5 ลิตร ลงในถังน้ำพลาสติก คนจนเกล็ดของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ละลายในน้ำจนหมด ทั้งไว้สักพักจนฟองที่เกิดขึ้นในสารละลายหายไปจนหมดจะได้สารละลายที่มีลักษณะใส ไม่มีสี หลังจากนั้นนำเส้นใยจากแกนสับปะรดที่ได้ตากแดดจนครบเวลาแล้วมาทำการกวนในสารละลายดังกล่าวเป็นเวลา 30 นาที โดยใช้ไม้พายในการกวนตลอดระยะเวลา 30 นาที จนครบเวลา แล้วตัดเส้นใยแกนสับปะรดขึ้นด้วยกระดาษแล้วรอให้สะเด็ดน้ำ หลังจากนั้นนำไปล้างสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อยู่กับเส้นใยออกด้วยน้ำสะอาดอีกเป็นจำนวน 2 ครั้ง เพื่อให้เส้นใยสะอาด รอให้สะเด็ดน้ำแล้วนำไปตากแดดอีกเป็นเวลา 3 วัน จนครบเวลาเพื่อรอขึ้นรูปเป็นแผ่น ดังภาพที่ 10



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

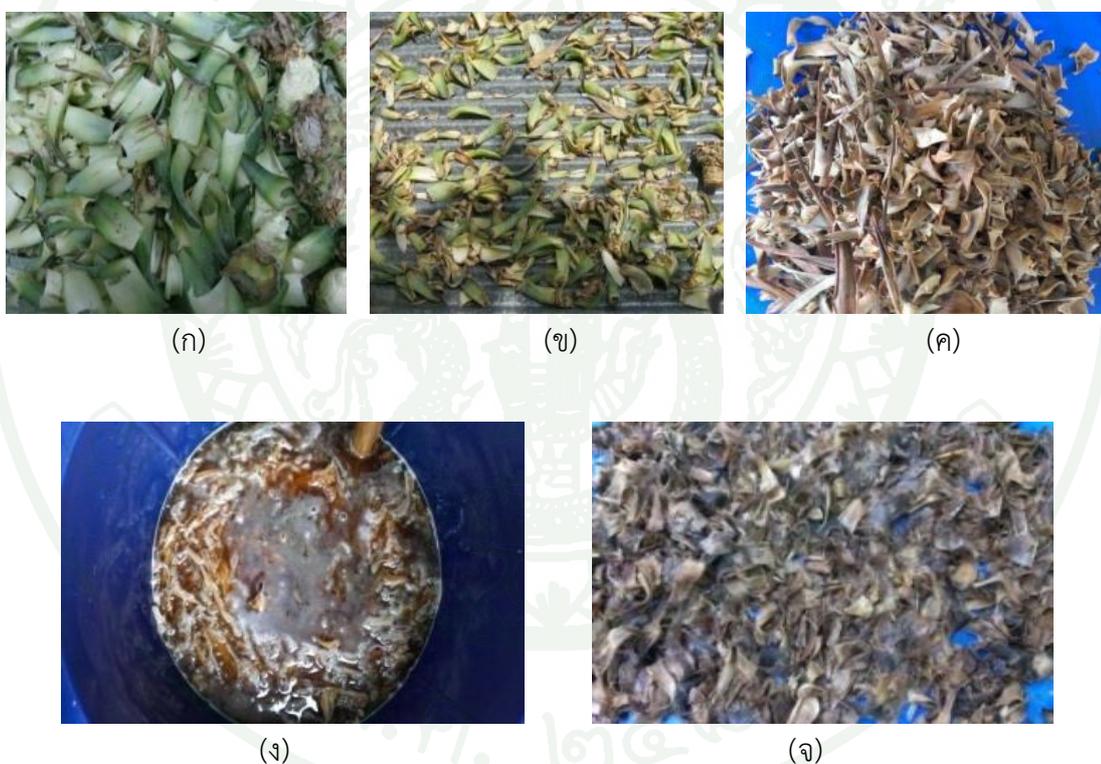


(จ)

**ภาพที่ 10** กระบวนการเตรียมแกนสับปะรด (ก) เส้นใยแกนสับปะรดหลังตากแดด (ข) เส้นใยแกนสับปะรดปั่นกวนในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 20%wt (ค) เส้นใยแกนสับปะรดล้างในน้ำสะอาด (ง) เส้นใยแกนสับปะรดหลังล้างในน้ำสะอาด (จ) เส้นใยแกนสับปะรดผ่านสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และล้างน้ำสะอาดหลังตากแดด

### 1.1.2 ขี้สับปะรด (pore of pineapple)

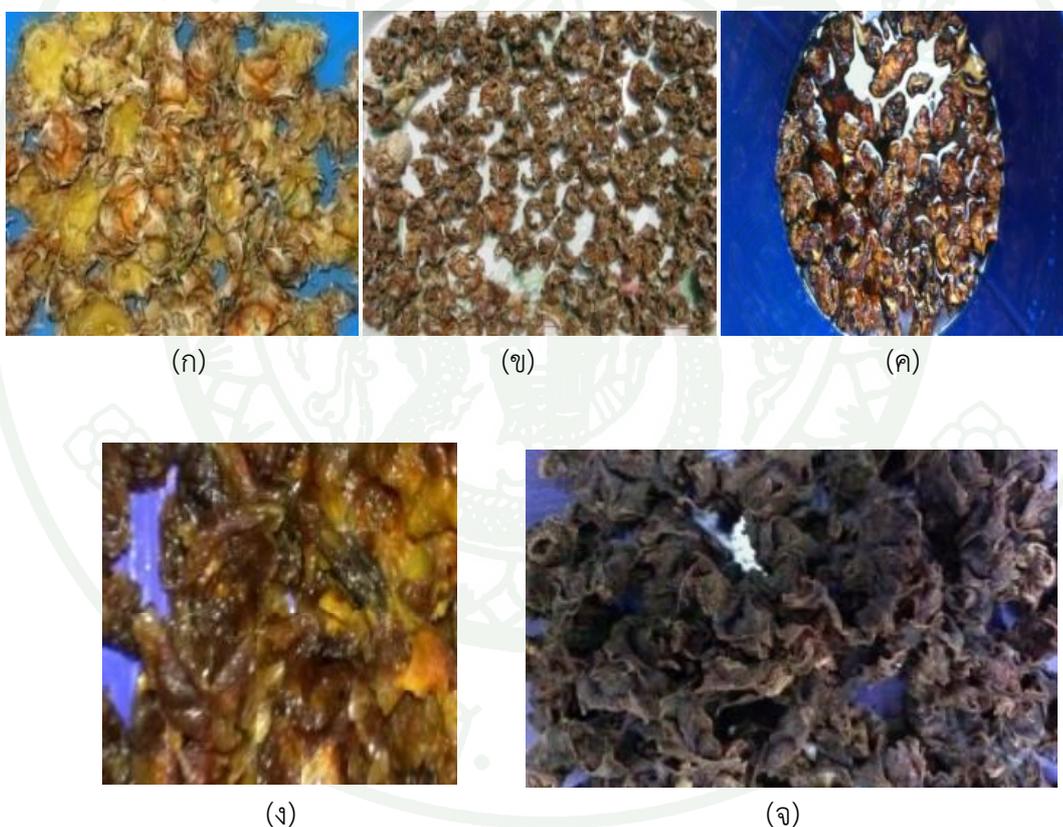
นำส่วนของขี้สับปะรดหลังจากที่ทำความสะอาดโดยการล้างด้วยน้ำสะอาดและรอให้สะเด็ดน้ำ แยกขี้สับปะรดออกจากแกน ดังภาพที่ 9(จ) ซึ่งส่วนของขี้จะมีลักษณะเป็นแผ่นสีเขียว หลังจากนั้น นำไปตากแดดเพื่อลดความชื้นบางส่วนเป็นเวลาประมาณ 7 วันบนแผ่นสังกะสี แล้วนำขี้สับปะรดที่ได้หลังการตากแห้งมาถนอมในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้น 20%wt เป็นเวลา 30 นาที โดยใช้ไม้พายในการกวนตลอดระยะเวลา 30 นาที จนครบเวลา แล้วตักส่วนขี้สับปะรดขึ้นด้วยกระจาดแล้วรอให้สะเด็ดน้ำ หลังจากนั้นนำไปล้างสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อยู่กับส่วนขี้สับปะรดออกด้วยน้ำสะอาดอีกเป็นจำนวน 2 ครั้ง เพื่อเป็นการชำระล้างสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่หลงเหลืออยู่บนขี้สับปะรดออก หลังจากนั้นรอให้สะเด็ดน้ำแล้วนำไปตากแดดบนแผ่นสังกะสีจนแห้ง อีกเป็นเวลา 3 วัน เพื่อรอขึ้นรูปเป็นแผ่น ดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 กระบวนการเตรียมขี้สับปะรด (ก) ขี้สับปะรด (ข) ขี้สับปะรดตากแดดบนแผ่นสังกะสี (ค) ขี้สับปะรดหลังตากแดด (ง) ขี้สับปะรดปั่นกวนในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 20%wt (จ) ขี้สับปะรดผ่านสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และล้างด้วยน้ำสะอาด

### 1.1.3 เปลือกสับประรด (shell of pineapple)

นำส่วนของเปลือกสับประรดที่ได้หลังจากที่ทำความสะอาดโดยการล้างด้วยน้ำสะอาดเพื่อล้างฝุ่นและเศษผงที่ติดอยู่ออกให้หมด และรอให้สะเด็ดน้ำแล้ว ไปตากแดดบนแผ่นสังกะสีเพื่อลดความชื้นในเปลือก เนื่องจากส่วนของเปลือกสับประรดมีส่วนประกอบของน้ำอยู่เป็นจำนวนมาก โดยใช้เวลาในการตากแดดเป็นเวลาประมาณ 7 วัน แล้วนำเปลือกสับประรดที่ได้หลังจากตากแดดแล้วมาปั่นกวนในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้น 20%wt เป็นเวลา 30 นาที โดยใช้ไม้พายในการกวนตลอดระยะเวลา 30 นาที จนครบเวลา แล้วตักส่วนเปลือกสับประรดขึ้นด้วยกระจาดแล้วรอให้สะเด็ดน้ำ หลังจากนั้นนำไปล้างสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อยู่กับเปลือกออกด้วยน้ำสะอาดอีกเป็นจำนวน 2 ครั้ง เพื่อทำความสะอาดเป็นการชำระล้างสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ออก หลังจากนั้นรอให้สะเด็ดน้ำแล้วนำไปตากแดดอีกเป็นเวลา 3 วัน เพื่อรอขึ้นรูปเป็นแผ่น ดังภาพที่ 12



**ภาพที่ 12** กระบวนการเตรียมเปลือกสับประรด (ก) เปลือกสับประรด (ข) เปลือกสับประรดตากแดดบนแผ่นสังกะสี (ค) เปลือกสับประรดปั่นกวนในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 20%wt (ง) เปลือกสับประรดหลังจากผ่านสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และล้างด้วยน้ำสะอาด (จ) เปลือกสับประรดหลังตากแดด

## 1.2 การขึ้นรูปเป็นแผ่นตามแม่แบบขนาด 20 x 20 x 2.2 ลูกบาศก์เซนติเมตร

หลังจากได้ทำการเตรียมวัตถุดิบ แแกนสับปะรด ข้าวสับปะรด และเปลือกสับปะรดแล้ว วิธีการลำดับต่อมาคือการขึ้นรูปเป็นแผ่นของวัสดุทั้ง 3 ชนิดแบบแยกชนิด และแบบรวมกันเป็นแผ่นเดียวกันในอัตราส่วน 1:1:2 หรือ 75:75:150 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

### 1.2.1 การขึ้นรูปเป็นแผ่น ขนาด 20 x 20 x 2.2 ลูกบาศก์เซนติเมตร แบบแยกชนิด

นำเส้นใยจากแกนสับปะรด ข้าวสับปะรด และเปลือกสับปะรด หลังจากผ่านกระบวนการเตรียมวัตถุดิบมาแล้ว ชั่งน้ำหนัก จำนวน 264 กรัม เพื่อขึ้นแผ่นตามแบบของขนาดพีวีซี โดยวางเส้นใยที่ละชั้นและทำการพันประสานด้วยการนำสลับกันไปทีละชั้นจนหมด หลังจากนั้นนำไปตากแดดเพื่อให้มีการเกาะตัวกันของเส้นใยกับน้ำกาวเป็นเวลาประมาณ 3 วัน โดยใช้ปริมาณกาวน้ำ 150 มิลลิลิตร ต่อการขึ้นรูปแผ่นจำนวน 1 แผ่น ดังภาพที่ 13 - 15



**ภาพที่ 13** การขึ้นรูปแผ่นฉนวนกันความร้อนจากเส้นใยสับปะรด (ก) วางเส้นใยจากแกนสับปะรดลงในบล็อกทีละชั้นสลับกับการพันกาวน้ำเพื่อให้เกิดการยึดเกาะกัน (ข) หลังตากแดดแผ่นฉนวนให้กาวน้ำแห้งเป็นเวลา 3 วัน



**ภาพที่ 14** การขึ้นรูปแผ่นฉนวนกันความร้อนจากข้าวสับปะรด (ก) วางข้าวสับปะรดลงในบล็อกให้แน่น ที่ละชั้นสลับกับการพ่นกาวน้ำเพื่อให้เกิดการยึดเกาะกัน (ข) หลังตากแดดแผ่นฉนวนให้ กาวน้ำแห้งเป็นเวลา 3 วัน

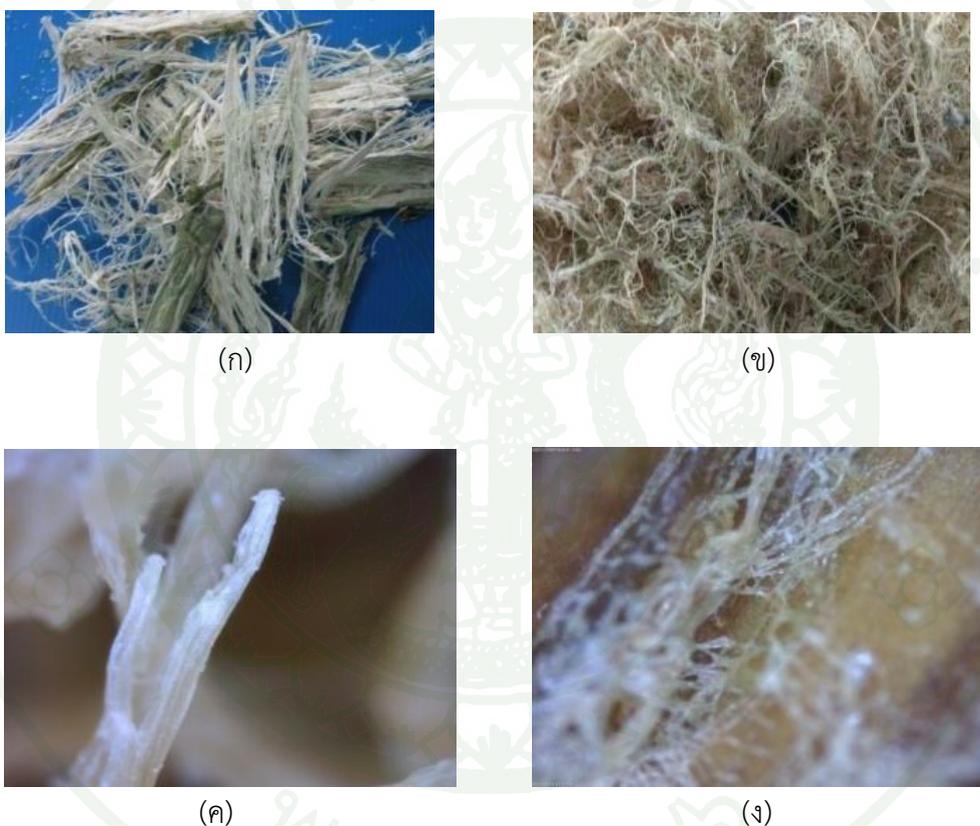


**ภาพที่ 15** การขึ้นรูปแผ่นฉนวนกันความร้อนจากเปลือกสับปะรด (ก) วางเปลือกสับปะรดลงใน บล็อกที่ละชั้นสลับกับการพ่นกาวน้ำเพื่อให้เกิดการยึดเกาะกัน (ข) หลังตากแดดแผ่นฉนวน ให้กาวน้ำแห้งเป็นเวลา 3 วัน

1.2.2 การขึ้นรูปเป็นแผ่นของวัสดุผสมทั้ง 3 ชนิด ขนาด 20 x 20 x 2.2 ลูกบาศก์ เซนติเมตร

นำวัสดุทั้ง 3 ชนิด เส้นใยจากแกนสับปะรด ข้าวสับปะรด และเปลือกสับปะรด หลังจากผ่านกระบวนการเตรียมวัตถุดิบมาแล้ว ชั่งน้ำหนักในอัตราส่วน 1:1:2 ใช้ปริมาณ 66 : 66 : 132 กรัม เพื่อขึ้นแผ่นตามแบบของขนาดพีวีซี โดยวางเปลือกสับปะรดไว้ชั้นล่างจนหมด ชั้นต่อมาคือ ข้าวสับปะรด และชั้นสุดท้ายคือเส้นใยจากแกนสับปะรด เวลาจัดเรียงแต่ละชั้นจะต้องจัดให้แน่น และทำการพ่นประสานด้วยกาวน้ำสลับกันไปทีละชั้น หลังจากนั้นนำไปตากแดดเพื่อให้กาวแห้งเกาะตัวกับ วัสดุฉนวนสับปะรดเป็นเวลาประมาณ 3 วัน โดยใช้ปริมาณกาวน้ำ 150 มิลลิลิตรต่อการขึ้นรูปฉนวน 1 แผ่น

จากกระบวนการเตรียมวัตถุดิบพบว่าสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ได้ทำปฏิกิริยาละลายสารเพคติน (pectin) และสารเจือปนอื่นๆ (สุชาติดา, 2555) ให้ลดน้อยลงเส้นใยจึงมีความบริสุทธิ์มากขึ้น และลักษณะของเส้นใยบริเวณแกนสับประรดก่อนกวนในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ยังคงยึดเกาะกันแน่นเป็นแผ่น เนื่องจากสารเพคติน แต่ภายหลังการกวนในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เส้นใยจะมีขนาดเล็กกลง อ่อนตัวมากขึ้น และแยกออกจากกันอย่างเห็นได้ชัด ดังภาพที่ 16 (ก) และ (ข) สำหรับลักษณะการแยกตัวของเส้นใยในบริเวณข้อและเปลือกนั้น ไม่สามารถเห็นได้ชัดด้วยตาเปล่า จึงนำไปส่องขยายด้วยกล้องจุลทรรศน์ดิจิตอล Dino – Lite ที่กำลังขยาย 500 เท่า พบว่า เส้นใยแยกตัวออกจากกันได้ดีขึ้น ดังภาพที่ 16 (ค) และ (ง)



**ภาพที่ 16** ภาพแสดงลักษณะเส้นใย (ก) เส้นใยจากแกนสับประรดก่อนการปั่นกวนในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 20%wt (ข) เส้นใยจากแกนสับประรดหลังการปั่นกวน (ค) เส้นใยจากข้อสับประรดหลังการปั่นกวนในสารละลายและถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์ดิจิตอล Dino –Lite ที่กำลังขยาย 500 เท่า (ง) เส้นใยจากเปลือกสับประรดหลังการปั่นกวนในสารละลายและถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์ดิจิตอล Dino –Lite ที่กำลังขยาย 500 เท่า

## 2. ขั้นตอนการทดสอบค่าสภาพการนำความร้อนของฉนวนกันความร้อนที่ทำการผลิตขึ้น

นำแผ่นฉนวนกันความร้อนจากแกนสับปะรด จากข้าวสับปะรด จากเปลือกสับปะรด และแบบผสมทั้ง 3 ชนิด ซึ่งมีขนาดที่ใช้ทดสอบ  $20 \times 20 \times 2.2$  ลูกบาศก์เซนติเมตร มาทำการทดสอบค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุมาทดสอบด้วยเครื่องทดสอบค่าสภาพการนำความร้อนตามมาตรฐาน ASTM-C518 ค่าความเคลื่อน  $\pm 1\%$  หรือ  $0.01 \text{ W/m.K}$  โดยกำหนดให้อุณหภูมิเพลทร้อน (hot surface temperature หรือ hot surface assembly ตาม ASTM C518) ที่อุณหภูมิ  $50^{\circ}\text{C}$  และอุณหภูมิเพลทเย็น (cold surface temperatures หรือ cold surface assembly ตาม ASTM C518) ที่  $20^{\circ}\text{C}$  (ภาพที่ 17) โดยทำการทดสอบและบันทึกค่าสภาพการนำความร้อนของฉนวนกันความร้อน ทั้ง 4 ชนิด ทุกๆ 10 นาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยทำการทดสอบที่ห้องปฏิบัติการทดสอบค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุ ของศูนย์นวัตกรรมและเทคโนโลยีทางอาคาร (Center of Building Innovation and Technology, CBIT) สาขาเทคโนโลยีทางอาคาร คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



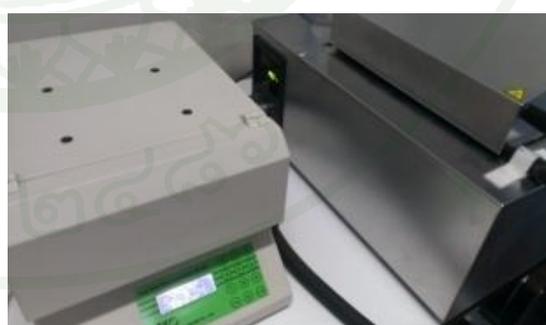
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

ภาพที่ 17 ภาพแสดง (ก) ช่องใส่วัสดุตัวอย่างเพลทบนอุณหภูมิ  $20^{\circ}\text{C}$  และเพลทล่างอุณหภูมิ  $50^{\circ}\text{C}$  (ข) ลักษณะการเปิดเพื่อใส่ตัวอย่าง (ค) ใส่ตัวอย่างทดสอบ (ง) การควบคุมอุณหภูมิระหว่างการทดสอบ

ตารางที่ 5 ค่าสภาพการนำความร้อนของแผ่นฉนวนกันความร้อน

ชนิดของฉนวนกันความร้อน	ค่าสภาพการนำความร้อน (W/m.K)	
	ค่าเฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	ค่าเบี่ยงเบน (SD)
ฉนวนกันความร้อนจากแกนสับปะรด	0.0402	0.0004
ฉนวนกันความร้อนจากขี้สับปะรด	0.0320	0.0002
ฉนวนกันความร้อนจากเปลือกสับปะรด	0.0713	0.0002
ฉนวนกันความร้อนแบบผสมทั้ง 3 ชนิด	0.0291	0.0002

จากตารางที่ 5 ค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุฉนวนกันความร้อนแบบผสมทั้ง 3 ชนิด มีค่าต่ำที่สุดคือ  $0.0291 \pm 0.0002$  วัดต่อเมตรเคลวิน รองลงมาคือฉนวนกันความร้อนจากขี้สับปะรด  $0.0320 \pm 0.0002$  วัดต่อเมตรเคลวิน ฉนวนกันความร้อนจากแกน  $0.0402 \pm 0.0004$  วัดต่อเมตรเคลวิน และฉนวนกันความร้อนจากเปลือกสับปะรด  $0.0713 \pm 0.0002$  วัดต่อเมตรเคลวิน ตามลำดับ

## 2.5 รายงานผลการวัดพร้อมค่าความไม่แน่นอนจากการทดสอบ

2.5.1 การประเมินค่าความไม่แน่นอนของผลการวัด โดยแบ่งค่าความไม่แน่นอนของผลการวัดออกเป็น 2 ชนิดคือ

(ก) ค่าความไม่แน่นอนชนิด Type A คือ ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นจากการทดลองจากการวัดซ้ำๆ (repeatability) รายงานในรูปของค่า  $S(\bar{q})$  (standard deviation of mean) โดยสมการ

$$S(\bar{q}) = \frac{S(q_i)}{\sqrt{N}}$$

โดยที่  $S(\bar{q})$  คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย (standard deviation of mean)

$S(q_i)$  คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการวัด (standard deviation, SD)

$N$  คือ จำนวนข้อมูลที่ทำการวัด (number)

(ข) ค่าความไม่แน่นอนชนิด Type B คือ ค่าความไม่แน่นอนที่ไม่ได้เกิดขึ้นจากการทดลอง ประกอบด้วย

1. ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นจากผลการเทียบมาตรฐาน (certificated of calibration) ของวัสดุอ้างอิง มีระดับความเชื่อมั่น 95% ในที่นี้ไม่ได้ระบุการกระจายตัวจึงถือว่าเป็นการกระจายตัวแบบปกติ (normal distribution) โดยใช้ตัวหารเท่ากับ 2

2. ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นจากค่าความผิดพลาดของเครื่องมือ ดังตารางที่ 6 ซึ่งมีค่าดีกว่า 1% หรือ ดีกว่า 0.01 W/m.K ในที่นี้ไม่ได้ระบุการกระจายตัวจึงถือว่าการกระจายตัวแบบสี่เหลี่ยม (rectangular distribution) ใช้ตัวหารเท่ากับ  $2\sqrt{3}$

3. ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นจากค่าการวัดซ้ำ ของเครื่องมือซึ่ง มีค่า 0.2% หรือ เท่ากับ 0.002 W/m.K ซึ่งถือว่าการกระจายตัวแบบสี่เหลี่ยม ใช้ตัวหารเท่ากับ  $2\sqrt{3}$

4. ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นจากค่าการผลิตซ้ำ (reproducibility) ของเครื่องมือซึ่ง มีค่า 0.5% หรือ เท่ากับ 0.005 W/m.K ซึ่งถือว่าการกระจายตัวแบบสี่เหลี่ยม ใช้ตัวหารเท่ากับ  $2\sqrt{3}$

5. ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นจากค่าความละเอียดของการควบคุมอุณหภูมิ (temperature control and resolution) ของเครื่องมือซึ่ง มีค่า  $0.01^{\circ}\text{C}$  ซึ่งถือว่าการกระจายตัวแบบสี่เหลี่ยม ใช้ตัวหารเท่ากับ  $2\sqrt{3}$

**ตารางที่ 6** ตารางแสดงสมบัติทางเทคนิคของเครื่องวัดค่าสภาพการนำความร้อนตามมาตรฐาน ASTM C518

คุณลักษณะทางเทคนิค	รายละเอียด
วิธีการวัด (measuring method)	ตามมาตรฐาน ASTM C518, ISO-8301 และ JIS A1412
ช่วงการวัด (thermal conductivity range)	0.005 ถึง 0.8 W/m.K
ค่าความผิดพลาด (accuracy)	ดีกว่า 1 %
ค่าการวัดซ้ำ (repeatability)	0.2 %
ค่าการผลิตซ้ำ (reproducibility)	0.5 %
ค่าความละเอียดของการควบคุมอุณหภูมิ (temperature control and resolution)	$0.01^{\circ}\text{C}$

**ที่มา:** EKO INSTRUMENTS CO., LTD. (2012)

การประเมินค่าความไม่แน่นอนของผลการวัด ทั้งชนิด Type A และ Type B มีวิธีการดังต่อไปนี้ คือ

1. การเทียบมาตรฐานการทำงานของเครื่อง (calibration) โดยการใช้อุณหภูมิเพลทร้อน ที่อุณหภูมิ  $50^{\circ}\text{C}$  และใช้อุณหภูมิเพลทเย็น ที่อุณหภูมิ  $20^{\circ}\text{C}$  ด้วยวัสดุอ้างอิงมาตรฐาน EPS ซึ่งมีค่าสภาพการนำความร้อนอยู่ที่  $0.038\text{ W/m.K}$  ค่าความผิดพลาด  $0.005\text{ W/m.K}$

2. นำวัสดุอ้างอิงมาตรฐาน EPS มาทำการทดสอบค่าสภาพการนำความร้อนทุกๆ 10 นาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง พร้อมบันทึกค่าจากการทดสอบโดยการใช้อุณหภูมิเพลทร้อน ที่อุณหภูมิ 50° C และใช้อุณหภูมิเพลทเย็น ที่อุณหภูมิ 20° C เพื่อประเมินค่าความไม่แน่นอน ที่เกิดขึ้นจากค่าความผิดพลาดของเครื่องมือ และประเมินค่าความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นจากค่าการวัดซ้ำของเครื่องมือ

3. ทำการทดสอบและบันทึกค่าอุณหภูมิของอุณหภูมิเพลทร้อน ที่อุณหภูมิ 50° C และอุณหภูมิเพลทเย็น ที่อุณหภูมิ 20° C ด้วยเครื่องวัดและบันทึกค่าอุณหภูมิแบบ 4 ช่องสัญญาณ ด้วยตัวรับรู้อุณหภูมิชนิด PT100 โดยการติดตั้งตัวรับรู้อุณหภูมิที่ผิวของเพลทร้อน จำนวน 2 จุด และ ที่ผิวของเพลทเย็น จำนวน 2 จุด เพื่อประเมินค่าความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นจากค่าความละเอียดของการควบคุมอุณหภูมิ (temperature control and resolution) ของเครื่องมือ ขณะทดสอบวัสดุอ้างอิงมาตรฐาน โดยทำการบันทึกค่าอุณหภูมิทุกๆ 1 วินาที ดังภาพที่ 18



ภาพที่ 18 ภาพแสดง (ก) การติดตั้งหัววัดอุณหภูมิบนผิวเพลทร้อนและเพลทเย็น (ข) ทดสอบและบันทึกค่าอุณหภูมิผิวเพลทร้อนและเย็นขณะทำการทดสอบค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุอ้างอิง

## ผลการทดสอบและวิจารณ์

### 1. ผลการทดสอบค่าสภาพการนำความร้อนจากฉนวนกันความร้อน

ผลการทดสอบค่าของฉนวนกันความร้อนที่ผลิตจากแกนสับปะรด ขั้วสับปะรด เปลือกสับปะรด และแบบผสมทั้ง 3 ชนิด ที่อุณหภูมิเพลทร้อน ที่อุณหภูมิ 50 °C และอุณหภูมิเพลทเย็น ที่ 20 °C โดยทำการทดสอบและบันทึกค่าสภาพการนำความร้อนของฉนวนกันความร้อน ทั้ง 4 ชนิด ทุกๆ 10 นาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมงพร้อมประเมินค่าความไม่แน่นอนชนิด Type A

#### ตารางที่ 7 ผลการทดสอบค่าสภาพการนำความร้อนของฉนวนกันความร้อน

จำนวนครั้ง	ค่าสภาพการนำความร้อนของฉนวนกันความร้อน (W/m.K)			
	แกนสับปะรด	ขั้วสับปะรด	เปลือกสับปะรด	แบบผสม
1	0.0415	0.0321	0.0712	0.0289
2	0.0402	0.0321	0.0716	0.0292
3	0.0399	0.0322	0.0711	0.0290
4	0.0401	0.0321	0.0713	0.0292
5	0.0399	0.0322	0.0715	0.0294
6	0.0402	0.0322	0.0713	0.0294
7	0.0400	0.0322	0.0712	0.0290
8	0.0402	0.0325	0.0710	0.0292
9	0.0402	0.0322	0.0712	0.0294
10	0.0400	0.0322	0.0711	0.0290
11	0.0402	0.0325	0.0711	0.0289
12	0.0403	0.0324	0.0711	0.0290
13	0.0399	0.0322	0.0710	0.0292
14	0.0399	0.0325	0.0710	0.0289
15	0.0402	0.0325	0.0715	0.0292
16	0.0399	0.0325	0.0715	0.0292
17	0.0402	0.0322	0.0715	0.0289
18	0.0402	0.0325	0.0715	0.0289
Average ( $\bar{X}$ )	0.0402	0.0320	0.0713	0.0291
Standard deviation (Sq)	0.0004	0.0002	0.0002	0.0002
Standard deviation of mean	0.00009	0.00005	0.00005	0.00005

จากผลการทดสอบในตารางที่ 7 พบว่า ค่าสภาพการนำความร้อนของฉนวนกันความร้อนแบบผสม 3 ชนิด มีค่าน้อยที่สุด รองลงมาคือ ฉนวนกันความร้อนจากขี้สับปะรด ฉนวนกันความร้อนจากแกนสับปะรด และฉนวนกันความร้อนจากเปลือกสับปะรดตามลำดับ โดยค่าความไม่แน่นอนชนิด Type A ที่ประเมินได้จากผลการวัดมีค่าแตกต่างกันโดยสามารถรายงานผลการวัดได้ดังนี้คือ  $0.0291 \pm 0.00005$  W/m.K,  $0.0320 \pm 0.00005$  W/m.K,  $0.0402 \pm 0.00009$  W/m.K และ  $0.0713 \pm 0.00005$  W/m.K เนื่องจากฉนวนแบบผสม 3 ชนิด มีการวางเรียงเป็นชั้น โดยวางเปลือกสับปะรดเป็นชั้นแรก รองลงมาคือขี้สับปะรด และชั้นสุดท้ายคือ แกนสับปะรด ทำให้โครงสร้างในการสกัดกั้นความร้อนมีความซับซ้อนมากขึ้น ซึ่งเปลือกสับปะรดมีความแข็งแรง และมีเส้นใยขนาดเล็กประสานบนผิวทำให้ความร้อนที่ผ่านจะถูกสกัดกั้นในชั้นแรก แต่เนื่องจากเปลือกสับปะรดไม่สามารถอัดกันแน่นเพราะโครงสร้างแข็งจึงทำให้เกิดช่องอากาศขนาดใหญ่ ความร้อนที่ผ่านมาได้จะผ่านมาตามช่องอากาศเหล่านี้และผ่านมาที่ชั้นของขี้สับปะรด ซึ่งมีความสามารถสกัดกั้นความร้อนได้มากกว่าเปลือก เนื่องจากมีความอ่อนนุ่มและมีการประสานกันของเส้นใยเป็นร่างแหซึ่งมีช่องอากาศขนาดเล็กกว่ามาก และความร้อนจะถูกสกัดกั้นได้มากกว่าเปลือก แต่ก็ยังมีความร้อนบางส่วนผ่านไปยังชั้นของเส้นใยจากสมบัติทางกายภาพดังที่กล่าวมานี้ ทำให้ฉนวนกันความร้อนแบบผสม มีสมบัติการเป็นฉนวนได้ดีที่สุด ผลการทดสอบที่ได้เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าสภาพการนำความร้อนของฉนวนที่มีจำหน่ายอยู่ในเชิงพาณิชย์ ดังตารางที่ 8 พบว่าฉนวนกันความร้อนจากแกน ขี้สับปะรด และแบบผสมนั้น มีค่าใกล้เคียงกับฉนวนที่มีจำหน่ายอยู่ในเชิงพาณิชย์ ดังนั้นจึงเป็นแนวทางในการที่จะพัฒนาคุณภาพของฉนวนกันความร้อนจากสับปะรดได้ต่อไปในอนาคต และยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรจากสับปะรด

**ตารางที่ 8** แสดงค่าสภาพการนำความร้อนของฉนวนกันความร้อน

Type of insulation	Thermal conductivity (W/m.K)
Thermaxflex rubber insulation	0.035 – 0.038
Polyurethane insulation	0.019
Fiberglass insulation	0.032
Polyethylene insulation	0.032
Synthetic fiber insulation	0.0328

## 2. ผลการทดสอบค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุอ้างอิงมาตรฐาน

ผลการทดสอบค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุอ้างอิงมาตรฐาน EPS ทุกๆ 10 นาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิเพลทร้อน ที่อุณหภูมิ 50°C และอุณหภูมิเพลทเย็น ที่ 20°C

ตารางที่ 9 ผลการทดสอบค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุอ้างอิงมาตรฐาน

การทดสอบ ครั้งที่	ผลของค่าทดสอบวัสดุอ้างอิงมาตรฐาน					
	$Q_U$ (W)	$Q_L$ (W)	L (m)	$T_1$ (°C)	$T_2$ (°C)	$\lambda$ (W/m.K)
1	-1,434	1,538	0.0220	20.00	50.00	0.03923
2	-1,435	1,538	0.0220	20.00	50.00	0.03777
3	-1,430	1,538	0.0220	20.00	50.00	0.03959
4	-1,427	1,532	0.0220	20.00	50.00	0.03776
5	-1,431	1,532	0.0220	20.00	50.00	0.03703
6	-1,426	1,535	0.0220	20.00	50.00	0.03995
7	-1,429	1,535	0.0220	20.00	50.00	0.03879
8	-1,435	1,538	0.0220	20.00	50.00	0.03776
9	-1,430	1,536	0.0220	20.00	50.00	0.03886
10	-1,428	1,534	0.0220	20.00	50.00	0.03886
11	-1,432	1,535	0.0220	20.00	50.00	0.03776
12	-1,429	1,534	0.0220	20.00	50.00	0.03849
13	-1,431	1,532	0.0220	20.00	50.00	0.03703
14	-1,426	1,534	0.0220	20.00	50.00	0.03959
15	-1,435	1,538	0.0220	20.00	50.00	0.03776
16	-1,429	1,532	0.0220	20.00	50.00	0.03776
17	-1,426	1,534	0.0220	20.00	50.00	0.03959
18	-1,434	1,536	0.0220	20.00	50.00	0.03739
ค่าเฉลี่ย	-1,434	1,536	0.0220	20.00	50.00	0.03839
SD						0.000944

จากผลการทดลองในตารางที่ 9 ผลการทดสอบค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุอ้างอิงมาตรฐาน เพื่อประเมินค่าความไม่แน่นอนชนิด Type B ของเครื่องทดสอบค่าสภาพการนำความร้อน พบว่า ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในการวัดซ้ำ มีค่าน้อยกว่า สมบัติทางเทคนิคที่กำหนดจากโรงงานผู้ผลิต (ตารางที่ 6) ดังนั้นจึงประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัดซ้ำ ตามรายละเอียดสมบัติทางเทคนิค จึงใช้ค่า 0.2% หรือ 0.002 W/m.K ซึ่งถือว่ามี การกระจายตัวแบบสี่เหลี่ยม จึงใช้ตัวหารเท่ากับ  $2\sqrt{3}$

$$\text{ดังนั้น ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ของการวัดซ้ำ, } \frac{u_{Re}}{Re} = \frac{\left(\frac{0.002}{2\sqrt{3}}\right)}{0.03839} = 0.01504$$

จากผลการทดลองการทดสอบของวัสดุอ้างอิงมาตรฐาน ค่าเฉลี่ย (average) ของการทดสอบ มีค่าเท่ากับ 0.03839 W/m.K ซึ่งมีค่าต่างจากค่าอ้างอิง 0.038 W/m.K เท่ากับ 0.00039 W/m.K แต่ สมบัติทางเทคนิคที่กำหนดจากโรงงานผู้ผลิต (ตารางที่ 6) กำหนดค่าความผิดพลาดไว้ที่ 1% หรือ 0.01 W/m.K ซึ่งมีค่ากว้างกว่าข้อมูลจากการวัด ดังนั้นจึงประเมินค่าความไม่แน่นอนของค่าความผิดพลาด ตามสมบัติทางเทคนิค ซึ่งถือว่ามี การกระจายตัวแบบสี่เหลี่ยม จึงใช้ตัวหารเท่ากับ  $2\sqrt{3}$

$$\text{ดังนั้น ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ของค่าความผิดพลาด, } \frac{u_{Ac}}{Ac} = \frac{\left(\frac{0.01}{2\sqrt{3}}\right)}{0.03839} = 0.07520$$

### 3. ผลการทดสอบและบันทึกค่าอุณหภูมิของอุณหภูมิเพลทร้อน และอุณหภูมิเพลทเย็น

ตารางที่ 10 ลักษณะทางเทคนิค (specification) ของตัวรับรู้อุณหภูมิชนิด PT100

Measurement Range	-40 to 100 °C
Accuracy (with U12 datalogger)	± 0.25 °C from 0 – 50 °C

ที่มา: [www.onset.com](http://www.onset.com), U.S.A (2012)

ก่อนการทดสอบและบันทึกค่าอุณหภูมิเพลทร้อน และอุณหภูมิเพลทเย็น ขณะทำการทดสอบค่าสภาพการนำความร้อนของฉนวนกันความร้อน ต้องทำการเปรียบเทียบตัวรับรู้อุณหภูมิทั้ง 4 ตัว เพื่อเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของอุณหภูมิแต่ละตัว กับค่าเฉลี่ยแต่ละจุด โดยทำการบันทึกค่าทุกๆ 1 นาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ดังภาพที่ 19

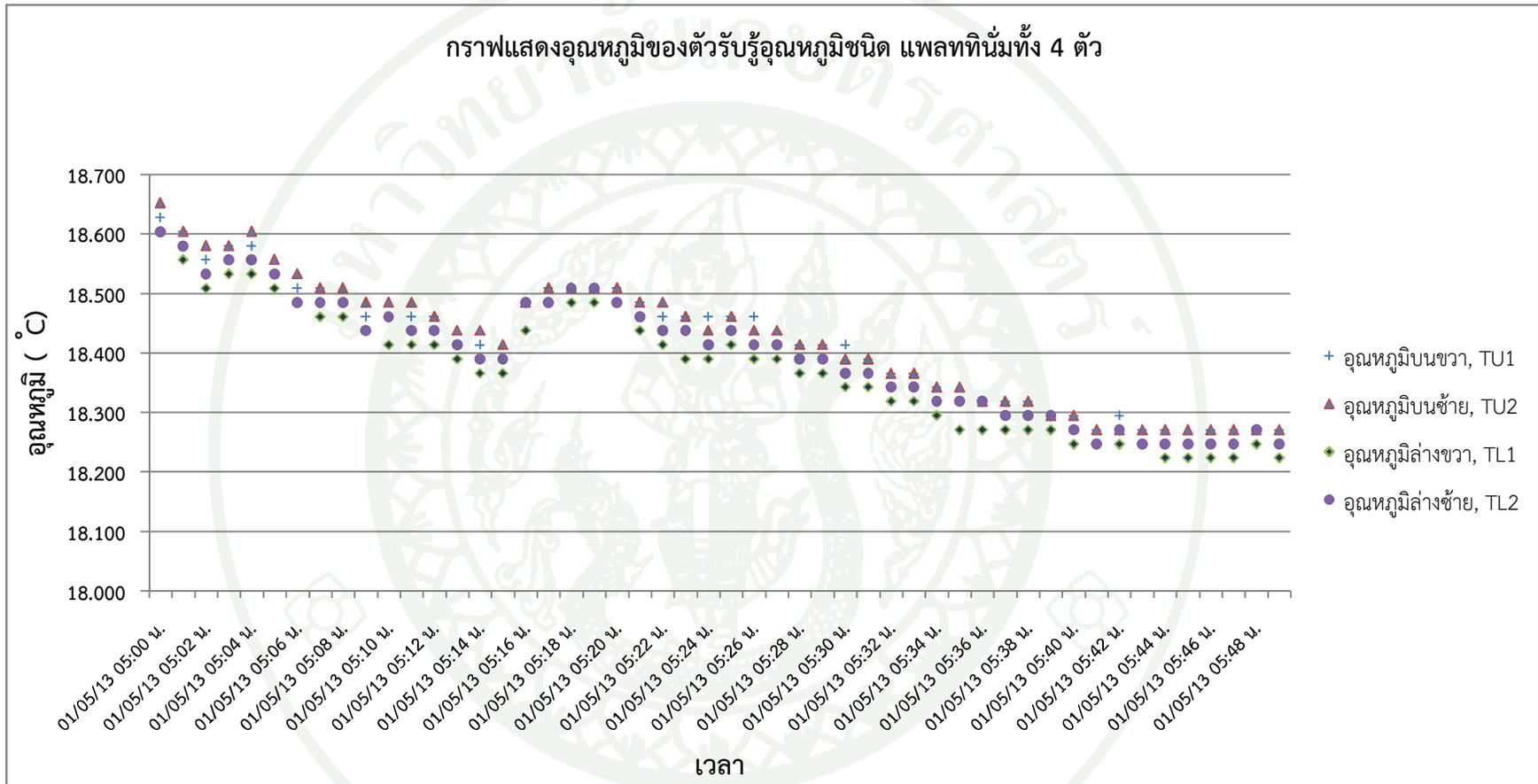
จากผลการทดลองเปรียบเทียบอุณหภูมิทั้ง 4 ตัว พบว่าตัวรับรู้อุณหภูมิแต่ละตัวมีความแตกต่างกันน้อยกว่าสมบัติทางเทคนิคที่กำหนดไว้คือ  $\pm 0.25$  °C ช่วงอุณหภูมิ 0 – 50 °C ดังนั้นเมื่อนำผลการทดสอบอุณหภูมิทั้ง 4 ตัวมาแสดงในกราฟเดียวกัน พบว่าค่าของอุณหภูมิทั้ง 4 ตัวมีค่า

เทียบเท่ากัน จนเป็นกราฟเส้นเดียวกัน จากผลการทดสอบอุณหภูมิดังกล่าว จึงประเมินค่าความไม่แน่นอนชนิด Type B ของตัวรับรู้อุณหภูมิ โดยใช้สมบัติทางเทคนิคของตัวรับรู้อุณหภูมิชนิด PT100 ที่กำหนดจากโรงงานผู้ผลิต (ตารางที่ 10) จึงใช้ค่า  $0.25^{\circ}\text{C}$  ซึ่งถือว่ามีกระจายตัวแบบสี่เหลี่ยม จึงใช้ตัวหารเท่ากับ  $2\sqrt{3}$

$$\text{ดังนั้น ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ของหัววัดอุณหภูมิ, } \frac{u_{Tc}}{Tc} = \frac{0.25}{\frac{2\sqrt{3}}{1}} = 0.07217$$

ทำการบันทึกค่าอุณหภูมิในช่องใส่ตัวอย่างวิเคราะห์ค่าสภาพการนำความร้อนโดยวัดอุณหภูมิเพลทร้อนและเพลทเย็น อย่างละ 2 จุด รวมเป็น 4 จุด เก็บบันทึกทุกๆ 1 วินาที เพื่อประเมินค่าความไม่แน่นอนจากผลกระทบจากสิ่งแวดล้อม โดยบันทึกค่าอุณหภูมิอากาศภายนอกเพื่อเปรียบเทียบ

จากผลการทดสอบอุณหภูมิในช่องใส่ตัวอย่าง พบว่าอุณหภูมิของสภาพแวดล้อมไม่มีผลต่ออุณหภูมิในช่องใส่ตัวอย่าง เนื่องจากมาตรฐานในการผลิตตาม ASTM C1043 Guarded Hotplate Design ซึ่งเป็นส่วนป้องกันอุณหภูมิจากสิ่งแวดล้อมซึ่งมีผลกระทบต่ออุณหภูมิในการวิเคราะห์ ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนชนิด Type B จากสิ่งแวดล้อมจึงไม่นำมาคิด



ภาพที่ 19 ภาพแสดงกราฟการเปรียบเทียบของอุณหภูมิของตัวรับรู้อุณหภูมิทั้ง 4 ตัว ในการวัดอุณหภูมิอากาศ

ตารางที่ 11 ผลการทดสอบค่าอุณหภูมิของอุณหภูมิเพลทร้อน และอุณหภูมิเพลทเย็น

จำนวนครั้ง ทุก 10 นาที	อุณหภูมิ (°C)					
	upper plate temp.	T <sub>U1</sub>	T <sub>U2</sub>	lower plate temp.	T <sub>L1</sub>	T <sub>L2</sub>
1	20.00	20.007	20.198	50.00	49.411	49.107
2	20.00	20.007	20.198	50.00	49.411	49.107
3	20.00	20.007	20.198	50.00	49.411	49.107
4	20.00	20.007	20.174	50.00	49.411	49.107
5	20.00	19.984	20.174	50.00	49.411	49.107
6	20.00	19.984	20.174	50.00	49.411	49.107
7	20.00	19.984	20.055	50.00	49.411	49.107
8	20.00	19.984	20.055	50.00	49.411	49.107
9	20.00	19.960	20.031	50.00	49.411	49.107
10	20.00	19.960	20.031	50.00	49.411	49.107
11	20.00	19.960	20.031	50.00	49.411	49.107
12	20.00	19.936	20.007	50.00	49.411	49.107
13	20.00	19.936	20.007	50.00	49.411	49.107
14	20.00	19.936	20.007	50.00	49.411	49.107
15	20.00	19.936	20.007	50.00	49.411	49.107
16	20.00	19.912	20.198	50.00	49.411	49.107
17	20.00	19.912	20.198	50.00	49.411	49.107
18	20.00	19.912	20.198	50.00	49.411	49.107
ค่าเฉลี่ย	20.00	19.962	20.108	50.00	49.411	49.107

จากการทดสอบอุณหภูมิขณะทำการทดสอบวัสดุอ้างอิงทั้งอุณหภูมิเพลทร้อนและอุณหภูมิเพลทเย็น พบว่ามีค่าความเบี่ยงเบนจากค่าของเครื่องทดสอบทางด้านเพลทร้อน เท่ากับ  $-0.0860^{\circ}\text{C}$  และด้านเพลทเย็น เท่ากับ  $+0.0345^{\circ}\text{C}$  ซึ่งมีผลต่อค่าการวัดค่าสภาพการนำความร้อนของฉนวนกันความร้อน

จาก Fourier's Law,  $q \propto \frac{dT}{dx} A = \lambda A \frac{(T_2 - T_1)}{\Delta L}$

สมการการนำความร้อน

$$\text{Heat Flux, } Q (\text{W/m}^2) = \frac{q}{A} = \lambda \frac{(T_2 - T_1)}{\Delta L}$$

$$Q = (0.03839 \pm 0.000944 \text{ W/m.K}) (29.2245 \text{ K}) / (0.022 \text{ m})$$

$$= 50.9968 \pm 0.0009 \text{ W/m}^2$$

สรุปการรายงานผลการวัดพร้อมประเมินค่าความไม่แน่นอน

1. Type A, ค่าความไม่แน่นอนจากการวัดซ้ำ รายงานในรูปแบบของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย  $S(q)$ ,  $S(q) = S(q_i) / \sqrt{N}$  โดยมีค่าสภาพการนำความร้อนที่ทดสอบได้ดังนี้

**ตารางที่ 12** ค่าสภาพการนำความร้อนของแผ่นฉนวนกันความร้อนพร้อมค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย  $S(q)$

ชนิดของฉนวนกันความร้อน	ค่าสภาพการนำความร้อน (W/m.K)	
	ค่าเฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย $S(q)$
ฉนวนกันความร้อนจากแกนสับปะรด	0.0402	0.00009
ฉนวนกันความร้อนจากข้าวสับปะรด	0.0320	0.00005
ฉนวนกันความร้อนจากเปลือกสับปะรด	0.0713	0.00005
ฉนวนกันความร้อนแบบผสมทั้ง 3 ชนิด	0.0291	0.00005

ตารางที่ 13 ตารางแสดง Uncertainty Budget

Variable (type)	Source of uncertainty	Distribution	Degree Of Freedom	Divisor	Ci	Value	Relative Uncertainty
$U_{R_f}(B)$	Reference Material	Normal	Inf.	2	1	0.002500	0.06500
$U_{R_e}(B)$	Repeatability of Instrument	Rectangular	Inf.	1.732	1	0.000577	0.01504
$U_{A_c}(B)$	Accuracy of Instrument	Rectangular	Inf.	1.732	1	0.002887	0.07520
$U_{T_c}(B)$	Accuracy of temperature sensor	Rectangular	Inf.	1.732	1	0.012500	0.00722
$U_{R_p}(B)$	Reproductivity of Instrument	Rectangular	inf.	1.732	1	0.002500	0.00144
$U_{T_r}(B)$	Resolution of Temp. Control	Rectangular	inf.	1.732	1	0.005000	0.00289
$U(95\%)$	Expand Uncertainty	Normal	k = 2				0.000104

2. การประเมินค่าความไม่แน่นอนรวม (combined uncertainty),  $U_c$

$$\begin{aligned}
 U_c &= \sqrt{U_{R_R}(A)^2 + U_{R_f}(B)^2 + U_{R_e}(B)^2 + U_{A_c}(B)^2 + U_{T_c}(B)^2 + U_{R_p}(B)^2 + U_{T_r}(B)^2} \\
 &= 0.000104 \text{ W/m}^2
 \end{aligned}$$

3. หาค่าองศาความอิสระยังผล (effective degree of freedom :  $V_{\text{eff}}$ )

$$V_{\text{eff}} = \frac{U_c^4}{\sum_{i=1}^4 \frac{C_i U_i^4}{V_i}} = 2.86$$

4. หาดั้วประกอบครอบคลุม (coverage factor: k) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

คำนวณ expanded uncertainty (U) ในที่นี้ใช้ k = 2 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

$$\begin{aligned}
 U &= 2 \times 0.000104 \text{ W/m}^2 = 0.000208 \text{ W/m}^2 \\
 &= 0.0002 \text{ W/m}^2
 \end{aligned}$$

5. รายงานค่าฉนวนกันความร้อนชนิดต่างๆ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ได้ดังนี้

ตารางที่ 14 ค่าสภาพการนำความร้อนของแผ่นฉนวนกันความร้อนที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ชนิดของฉนวนกันความร้อน	ค่าสภาพการนำความร้อน (W/m.K)	
	ค่าเฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	ค่าความไม่แน่นอน
ฉนวนกันความร้อนจากแกนสับปะรด	0.0402	0.0002
ฉนวนกันความร้อนจากขี้สับปะรด	0.0320	0.0002
ฉนวนกันความร้อนจากเปลือกสับปะรด	0.0713	0.0002
ฉนวนกันความร้อนแบบผสมทั้ง 3 ชนิด	0.0291	0.0002

## สรุปผลการทดสอบ

1. การเทียบมาตรฐานเครื่องวัดค่าสภาพการนำความร้อนของฉนวนกันความร้อนด้วยวัสดุอ้างอิงมาตรฐาน เปรียบเทียบกับวิธีการเทียบมาตรฐานเครื่องวัดค่าสภาพการนำความร้อนของฉนวนกันความร้อนโดยใช้ตัวรับรู้อุณหภูมิชนิดแพลททินัม ชนิด PT100 ซึ่งเป็นวิธีการสอบกลับแบบตรง โดยการวัดอุณหภูมิของเพลทร้อนและเพลทเย็นของเครื่องมือวัด พบว่า ค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุอ้างอิงมีความผิดพลาดเท่ากับ 0.005 วัตต์ต่อเมตร.เคลวิน โดยรายงานด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานได้ 0.0004 วัตต์ต่อเมตร.เคลวิน ของฉนวนกันความร้อนของแกนสับปะรด และ 0.0002 วัตต์ต่อเมตร.เคลวิน ของฉนวนกันความร้อนจากข้าวสับปะรด เปลือกสับปะรด และแบบผสม โดยในขณะที่ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการสอบเทียบด้วยวิธีสอบกลับแบบตรง ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% มีค่า 0.0002 วัตต์ต่อเมตร.เคลวิน ซึ่งจะเห็นว่าวิธีการสอบเทียบเครื่องวัดค่าสภาพการนำความร้อนด้วยวิธีสอบกลับแบบตรงนั้น มีค่าใกล้เคียงกับ วิธีการสอบเทียบด้วยวัสดุอ้างอิงมาตรฐาน ดังนั้นวิธีการนี้จึงเป็นวิธีการที่จะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการส่งวัสดุอ้างอิงนี้กลับไปยังหน่วยงานผู้ผลิตในต่างประเทศตามระยะเวลาที่กำหนดเพื่อทำการรับรองมาตรฐาน ที่มีค่าใช้จ่ายที่สูงและสิ้นเปลืองเวลาในการจัดส่ง เพราะการสอบเทียบตัวรับรู้อุณหภูมิชนิดแพลททินัม ชนิด PT100 สามารถทำได้ในห้องปฏิบัติการที่ได้รับมาตรฐาน ISO17025 ที่มีอยู่เป็นจำนวนมากในประเทศไทย ใช้เวลาน้อยกว่าและมีค่าใช้จ่ายที่ถูกลงกว่ามาก

2. การศึกษาและผลิตฉนวนกันความร้อนจากแกนสับปะรด ข้าวสับปะรด เปลือกสับปะรด และแบบผสมทั้ง 3 ชนิดในอัตราส่วน 1:1:2 พบว่าค่าสภาพการนำความร้อน คือ  $0.0402 \pm 0.0002$ ,  $0.0320 \pm 0.0002$ ,  $0.0713 \pm 0.0002$  และ  $0.0291 \pm 0.0002$  วัตต์ต่อเมตร.เคลวิน ตามลำดับ โดยฉนวนที่เกิดจากการผสมเส้นใยทั้งสามชนิดจะให้ค่าสภาพการนำความร้อนต่ำสุด รองลงมาคือฉนวนจากข้าวสับปะรด ฉนวนจากแกนสับปะรด และฉนวนจากเปลือกสับปะรด ตามลำดับ และมีค่าใกล้เคียงกับฉนวนที่มีจำหน่ายอยู่ในเชิงพาณิชย์ จากผลการทดสอบที่ได้จึงเป็นแนวทางหนึ่งในการพัฒนาวัสดุเหลือทิ้งจากสับปะรดให้เกิดประโยชน์ และเพิ่มมูลค่าได้ต่อไป

## ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยฉบับนี้มีแนวทางในการศึกษาวิธีการวัดค่าสภาพการนำความร้อนของฉนวนจากเส้นใยสับปะรดด้วยวิธีสอบกลับทางตรงโดยใช้ตัวรับรู้อุณหภูมิชนิดแพลททินัม เพื่อให้เกิดแนวทางในการประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการสอบเทียบเครื่องมือโดยสามารถทำได้ในประเทศไทย และได้ศึกษาคูณสมบัติการนำความร้อนของฉนวนตัวอย่าง คือฉนวนกันความร้อนที่ผลิตจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร คือ แกน ข้าว เปลือกสับปะรด และฉนวนกันความร้อนจากการผสมวัสดุทั้ง 3 ชนิดด้วย โดยผลจากการศึกษาได้มีข้อเสนอแนะดังต่อไปนี้

1. ในการสอบเทียบเครื่องวัดค่าสภาพการนำความร้อนนั้น นอกจากสามารถสอบเทียบโดยใช้ตัวรับรู้อุณหภูมิชนิดแพลททินัมในการสอบกลับทางตรงแล้ว ยังสามารถทำการสอบเทียบค่าอื่นๆที่นำมาประเมินสมการความไม่แน่นอนได้อีก เช่น ค่าความหนาของวัสดุทดสอบ โดยใช้เวอร์เนียคาลิเปอร์ (vernier caliper) ในการสอบกลับทางตรง

2. ในงานวิจัยนี้ได้การศึกษาและพิจารณาเฉพาะในส่วนความสัมพันธ์ที่เป็นอิสระต่อกัน แต่ยังคงมีความสัมพันธ์ของค่าอื่นๆอีก ที่อาจจะไม่เป็นอิสระต่อกัน ดังนั้นอาจต้องใช้เครื่องมือที่มีความละเอียดมากๆ ในการศึกษาถึงวิธีการสอบเทียบเครื่องมือโดยวิธีสอบกลับทางตรงในด้านอื่นๆอีก

3. ฉนวนกันความร้อนตัวอย่างที่นำมาทดสอบโดยใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรคือ แขน ขั้วเปลือกสับปะรด รวมถึงฉนวนกันความร้อนแบบผสมทั้ง 3 ชนิด มีค่าสภาพการนำความร้อนใกล้เคียงกับฉนวนกันความร้อนในเชิงพาณิชย์ ดังนั้นอาจจะมีแนวทางในการศึกษาความเป็นไปได้ ที่จะผลิตให้เป็นฉนวนกันความร้อนที่ได้มาตรฐาน มีการศึกษาคุณสมบัติด้านอื่นๆเพิ่มเติม เช่น ความคงทน การลามไฟ การสะสมของเชื้อโรค เป็นต้น

4. จากการศึกษาค่าสภาพการนำความร้อนพบว่าฉนวนกันความร้อนจากวัสดุผสมทั้ง 3 ชนิด มีค่าความเป็นฉนวนที่ดีที่สุด ดังนั้นอาจเป็นแนวทางศึกษาต่อเนื่องในแง่โครงสร้าง การจัดเรียงตัว การป้องกันความร้อน การระบายความร้อน หรือสมบัติด้านอื่นๆได้อีกด้วย

## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมส่งเสริมการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2552. การผลิตเส้นใยสับปะรดและงานสิ่งทอ. แหล่งที่มา: [http://www.rdi.ku.ac.th/kasetfair49/Plant/p\\_02/02.htm](http://www.rdi.ku.ac.th/kasetfair49/Plant/p_02/02.htm), 29 กันยายน 2555

กิตติศักดิ์ บัวศรี. 2544. การผลิตแผ่นฉนวนความร้อนจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ขวัญเรือน กันทะวัง, พงศ์พันธ์ ตั้งไพบูลย์วรรณ และ สุชาติ บุญดำรงธรรม. 2545. ฉนวนใยเซลลูโลสที่อัดโดยเครื่องอัดแผ่นแบบไฮดรอลิกส์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยแม่โจ้

จักรกริศน์ พิสุตรเสียง. 2555. ประสิทธิภาพการป้องกันความร้อนของฉนวนใยพารา. วารสารกรมโยธาธิการและผังเมือง 34: 40 – 46.

นิรนาม. เพคติน (pectin). 2550. บทความทางวิทยาศาสตร์. แหล่งที่มา: <http://www.foodnetworksolution.com/vocab/word/430/pectin>. 29 กันยายน 2555

นิรนาม. เส้นใยธรรมชาติ (Natural Science). 2548. บทความทางวิทยาศาสตร์. แหล่งที่มา: <http://www.neutron.rmutphysics.com/science-news>. 25 กันยายน 2555

ประยูร สุรินทร์. 2544. การผลิตแผ่นฉนวนความร้อนจากขาน้อย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

สมเจตน์ พืชพันธ์, พัฒนะ รักความสุข, ณรงค์ฤทธิ สมบัติสมภพ, วรธรรม อุ้นจิตติชัย, ชลาธร จันทร์ทัด, ศกุนตี สมบูรณ์วิทย์ และ รุ่งอรุณ ประเสริฐศักดิ์. 2546. การผลิตฉนวนความร้อนจากเส้นใยหญ้าแฝกและน้ำยางธรรมชาติ. น. 525-531. ใน รายงานการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 41: สาขาวิศวกรรมศาสตร์และสาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ

สุชาดา อูซชิน รังสิมา ชลคุป วิบูลย์ น้อยใจบุญ สงคราม เสนาธรรม<sup>1</sup> พรชัย ตูลพิจิตร วณิดา ผาสุขดี จันทร์รา สวัสดิบุตร และ วิชัย หฤทัยชนาสนันดี. 2544. สถาบันผลิตผลเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ วิทยาเขตเทคนิคกรุงเทพ.

สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น). **การสอบเทียบเครื่องมือวัด**. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น). 2551. หน้า 43

สำนักส่งเสริมและจัดการสินค้าเกษตร. **สับปะรด ปี 2555**. บทความ (ระบบออนไลน์)  
[http://www.agriman.doae.go.th/home/news/Year%202012/011\\_Pineapple.pdf](http://www.agriman.doae.go.th/home/news/Year%202012/011_Pineapple.pdf).  
28 กันยายน 2555

American Society for Testing and Materials. 2010. **ASTM C518-10 Standard test method for steady-state thermal transmission properties by means of the heat flow apparatus**. Philadelphia, Pennsylvania.

European co-operation for Accreditation. 1990. **Expression of Uncertainty of Measurement in Calibration (EA-4/02)**.

Kreider, J.F. and A. Rabl. 1994. **Heating and Cooling of Building: Design for Efficiency**. McGraw-Hill Inc., New York.

International Bureau of Weights and Measures (BIPM). 2008. **International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM)**.

Panyakaew, S. and S. Fotio. 2009. **Agriculture waste materials as wall insulation for residences in Thailand: results from a preliminary study**. Article P-092. The Eighth International Conference on Ecobalance. Japan.

Singapore Institute of Standards and Industrial Research. 1995. **Guidelines on The Evaluation and Expression of The Measurement Uncertainty**. Singapore.

United Kingdom Accreditation Service. 2007. **M3003 The Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement**. Middlesex., United Kingdom.



## 1. เครื่องทดสอบค่าสภาพการนำความร้อน heat flow meter รุ่น HC-074

โดย EKO INSTRUMENTS CO., LTD. ประเทศญี่ปุ่น ตามมาตรฐาน ASTM – C518

EKO
THERMAL CONDUCTIVITY TESTER

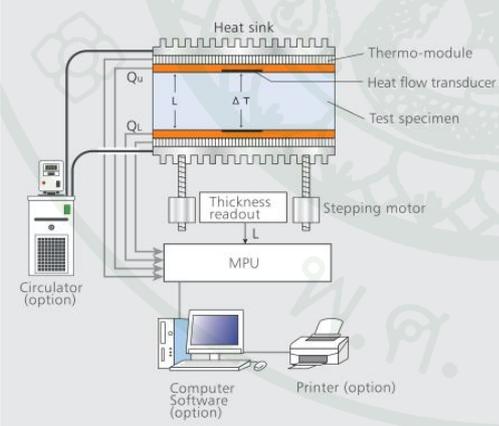



### HC-074-200

Conforms ASTM-C518  
ISO-8301  
JIS-A1412

## EKO INSTRUMENTS Co., Ltd.

**STRUCTURE AND PRINCIPLE**



The thermal conductivity of a specimen ( $\lambda$ ) is determined by the following the equation;

$$\lambda = \frac{Q_u + Q_l}{2} \times \frac{L}{\Delta T}$$

Where  $Q_u$  is the output of the upper heat flux transducer,  $Q_l$  is the output of the lower heat flux transducer,  $L$  is the thickness of the specimen and  $\Delta T$  is the temperature difference between the surfaces of the specimen.

The upper and lower surface temperature of both transducers are provided on the instrument LCD at the end of the test.

In each component of the conductivity equation, heat flux, thickness of the specimen and temperature of specimen surfaces, the HC-074 provides extremely precise readings.

## SPECIFICATIONS

HC-074-200

Measuring method	Heat flow method, According to ASTM-C518, ISO-8301 and JIS A 1412
Thermal conductivity range	0.005 to 0.8W/m·K
Accuracy	Better than 1%
Repeatability	0.2%
Reproducibility	0.5%
Maximum temperature of hot plate	+75°C
Minimum temperature of cold plate	-20°C
Temperature control and resolution	0.01°C
Sample size	200mm square



Designation: C518 – 10

### Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus<sup>1</sup>

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 ( $\epsilon$ ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

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

#### 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

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  $\mu$ m 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

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

#### 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.

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.

A1.4.2 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

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).

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  $\Delta T$ '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

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  $\pm 0.5\%$  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

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

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

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.

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.

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

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

The uncertainties in  $S$ ,  $E$ ,  $L$ , and  $\Delta T$  ( $\delta S$ ,  $\delta E$ ,  $\delta L$ , 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.

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

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  $\Delta T$ ,  $\delta T$ , 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

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).

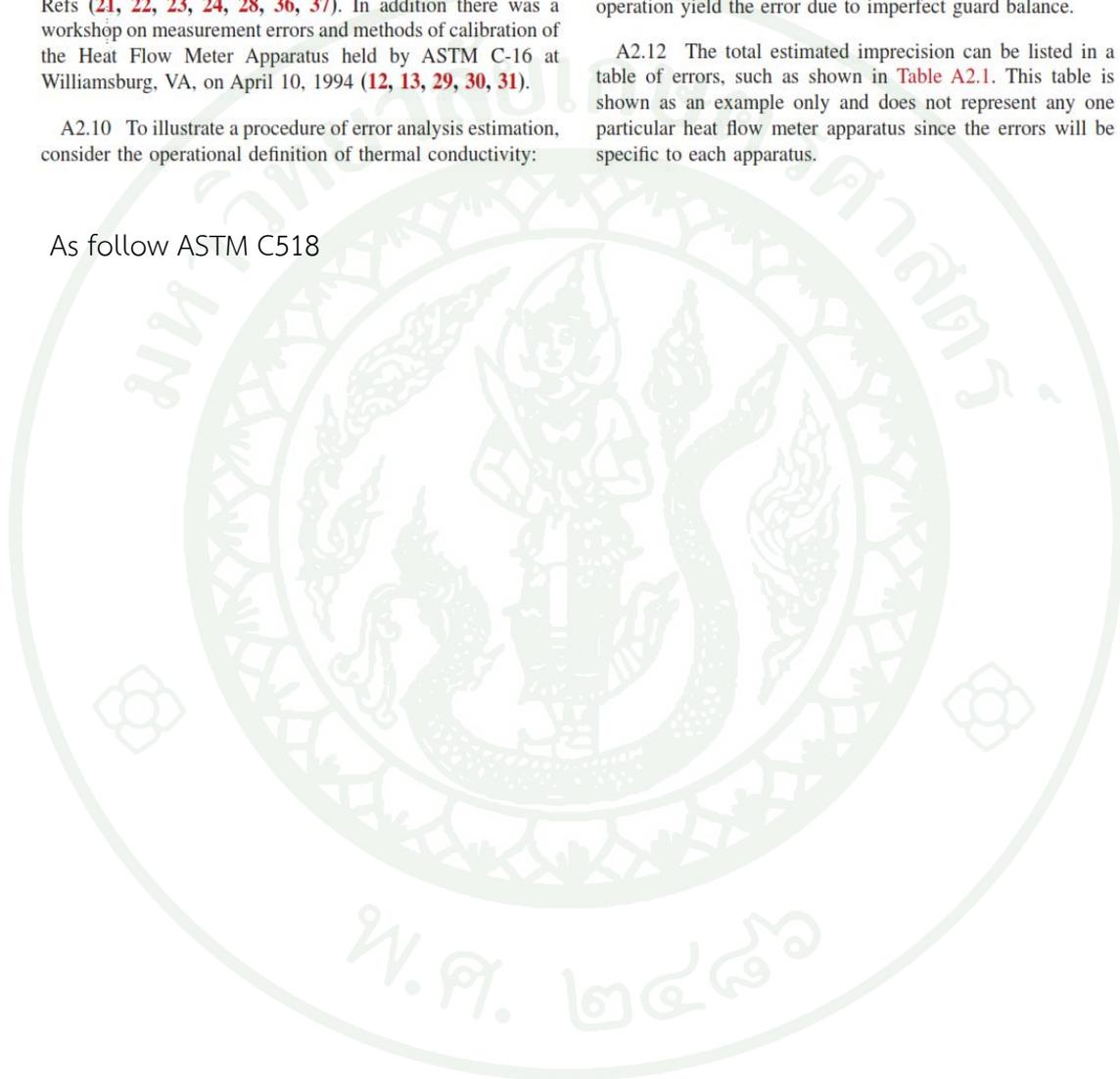
A2.10 To illustrate a procedure of error analysis estimation, consider the operational definition of thermal conductivity:

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  $\Delta T$  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.

As follow ASTM C518



## 2. เครื่องวัดและบันทึกอุณหภูมิชนิด 4 ช่องสัญญาณ และ ตัวรับรู้อุณหภูมิชนิด PT100

โดย Onset Computer Corporation ประเทศสหรัฐอเมริกา

HOBO U12 data loggers provide high-accuracy monitoring of temperature, humidity, and other parameters. They provide 12-bit resolution measurements for detecting greater variability in recorded data, direct USB connectivity for convenient, high-speed data offload, and a 43K measurement capacity. They also feature rugged enclosures for enhanced product durability.

**Supported Measurements:** Temperature, Relative Humidity, Dew Point, 4-20mA, AC Current, AC Voltage, Air Velocity, Carbon Dioxide, Compressed Air Flow, DC Current, DC Voltage, Gauge Pressure, Kilowatts, Volatile Organic Compound (some sensors sold separately)

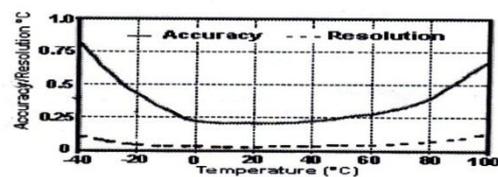


### TMCx-HE Temperature Sensor

For use with HOBO® U12 series data loggers and ZW data nodes

#### Specifications

Measurement Range	-40° to 100°C (-40° to 212°F)
Accuracy with U12	±0.25°C from 0° to 50°C (±0.45°F from 32° to 122°F), insert probe 2.3 cm (0.9 inches) minimum; see Plot A
Accuracy with ZW	±0.21°C from 0° to 50°C (±0.38°F from 32° to 122°F); see Plot B
Resolution with U12	0.03° at 20°C (0.05° at 68°F); see Plot A
Resolution with ZW	0.02°C at 25°C (0.04°F at 77°F); see Plot B
Drift	<0.1°C (<0.2°F) per year
Response time in air	2 min. typical to 90% in air moving 1 m/sec (2.2 mph)
Response time on a pipe	Typically 2 times faster than the TMCX-HD. Typically less than 1 minute to 90%.
Housing	Copper-plated sensor tip
Dimensions	0.9 x 5.8 cm (0.38 x 2.30 inches)
Weight	34 g (1.1 oz)



Plot A

onset  
HOBO Data Loggers

13099-E MAN-TMC6-HE

### 3. กล้องจุลทรรศน์ดิจิทัล (digital microscope) กำลังขยาย 500 เท่า

โดย Dino-Lite ประเทศไต้หวัน



The digital microscope was designed for professional users who need sharp picture quality as well as measurement function as professional tool. The measurement capability allows the user to input the magnification rate reading from the microscope and then take measurement on line and circle. Further measurement related functions are kept been developing and the software will be able to be

updated automatically through the internet without further charge.

General Features:

- “Micro-Touch” (trigger button)
- USB 2.0 Output, 1.3M / Resolution 1280x1024
- Magnification: 500X Fixed
- Measurement with calibration features (not available on Mac OS)

Technical Specifications:

- “Micro-Touch” (trigger button)
- USB 2.0 Output, 1.3M / Resolution 1280x1024
- Magnification: 500X Fixed
- Sensor: 1/3” Color CMOS
- Video frame Rate: up to 30 frame-per-second
- Illumination: built-in 8 white LEDs
- LED on/off controlled by software
- Save File format: BMP, JPG, AVI
- Compatible Windows 2000/XP, Vista and most MAC OS (please verify MAC

OS)

- Measurement with calibration features (not available on Mac OS)

Regulatory Approvals: CE, FCC, ROHS

#### 4. อ่างน้ำเย็นควบคุมอุณหภูมิ 18°C รุ่น WNB14

โดย MEMMERT GmbH + Co. ประเทศเยอรมัน



The waterbath provides state-of-art comfort and the safety in the laboratory.

Control:

- microprocess PID-temperature controller with integrated autodiagnostic system with fault indicator.
- solid state switching unit one PT100 sensor class A in 4-wire-circuit integrated digital timer from 1 min. to 99.59 hours for: ON continuous.
- operation WAIT (delayed on for continuous and limited timed operation)

Textured Stainless Steel Casing:

- l x w x h: 578 x 436 x 238 mm.
- material 1.4301 (ASTM 304), corrosion resistant.

Interior – Heating Concept:

- l x w x h: 350 x 290 x 140 mm, 14 liters.
- stainless steel, reinforced by deep drawn ribbing, material no. 1.4301 (ASTM 304), laser-welded corrosion-proof large-area heating on three sides.

Temperature Range:

- min. 5°C up to +95°C with addition boiling mode (+100°C)

## 5. ผลการทดสอบค่าสภาพการนำความร้อนของฉนวนจากสับปะรด



## TEST REPORT

Date : 13 August 2012

Report Number : 1208-002

## THIS TEST IS SPECIFIC FOR :

"โครงการ การศึกษาสภาพนำความร้อนของฉนวนกันความร้อนที่ผลิตจากเส้นใยของแกน และขั้วสับปะรด"  
สาขาวิชามาตรวิทยา ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Sample Type	Thermal Conductivity (W/mK)				
	Thicknes (cm)	Test Temp 1 °C	Test Temp °C	K-Value	Remark
1. ฉนวนกันความร้อน จากแกนสับปะรด	2.270 ± 0.0003	20.000	50.000	0.0402 ± 0.0004	Follow Up
2. ฉนวนกันความร้อน จากขั้วสับปะรด	2.250 ± 0.0003	20.000	50.000	0.0320 ± 0.0002	ASTM-C518
3. ฉนวนกันความร้อน จากเปลือกสับปะรด	2.270 ± 0.0003	20.000	50.000	0.0713 ± 0.0002	
4. ฉนวนกันความร้อน แบบผสม	2.250 ± 0.0003	20.000	50.000	0.0291 ± 0.0002	

Reference Methode : ASTM C518

Test By : Kanokon Hancharoen  
(Kanokon Hancharoen)  
Metrologist



Approved By : พ.ศ.ดร.พญ. พัสณี สุนากรณ์  
Associate Professor Pasinee Sunakorn  
Director of CBIT  
Center of Building Innovation & Technology

ศูนย์เทคโนโลยีและนวัตกรรมทางอาคาร

50 ถนนพหลโยธิน เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900 โทรศัพท์ 02-942-8960-3 โทรสาร 02-942-8960-3 ต่อ202

6. ใบรับรองการนำเสนอผลงานวิจัยในการประชุมวิชาการของ  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 51 ระหว่างวันที่ 5 - 7 กุมภาพันธ์ 2556



มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ขอรับรองว่าผลงานวิจัย

เรื่อง

การศึกษาสภาพนำความร้อนของฉนวนกันความร้อนที่ผลิตจากเส้นใยของแกน  
และข้าวสับปะรด

โดย

กนกอร หั้นเจริญ และสุรารัตน์ โชติกประคัลภ์

ได้ผ่านการพิจารณาจากคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ

สาขาวิทยาศาสตร์

และได้นำเสนอในการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 51  
ระหว่างวันที่ 5 - 7 กุมภาพันธ์ 2556

(รองศาสตราจารย์ ดร.สิรี ชัยเสรี)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

ประธานคณะกรรมการดำเนินงานจัดประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 51

## ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ	นางสาวกนกอร หิ้นเจริญ
เกิดวันที่	17 กรกฎาคม 2515
สถานที่เกิด	อำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (ชีววิทยา)
ตำแหน่งปัจจุบัน	ผู้ช่วยวิจัย
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	ศูนย์นวัตกรรมและเทคโนโลยีทางอาคาร คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

