

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การประมาณค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย
ความร้อนของวัสดุด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน

ESTIMATION OF THERMAL CONDUCTIVITY AND THERMAL DIFFUSIVITY OF
MATERIALS USING THERMOGRAPHIC CAMERA



T138517



จพ.

๑/๗๓๗๗

๒๕๕๘

เลขหมู่

เลขทะเบียน 138517

วันเดือนปี ๘ ต.ค. ๒๕๕๘

b.....
i.....

12714987

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. ๒๕๕๘

KMITL-2015-EN-M-060-088

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ESTIMATION OF THERMAL CONDUCTIVITY AND THERMAL DIFFUSIVITY OF
MATERIALS USING THERMOGRAPHIC CAMERA



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN INSTRUMENTATION ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KMITL-2015-EN-M-060-088



COPYRIGHT 2015

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประมาณค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายความร้อนของวัสดุด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน
นักศึกษา	นางสาวเมธินี สงไทย
รหัสประจำตัว	56601299
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมการวัดคุม
พ.ศ.	2558
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ. ดร.ทวีพล ชื้อสัตย์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ (ร่วม)	รศ. ดร.นวกัษรา หนูนาคน

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและการกระจายความร้อนของวัสดุ โดยชุดทดสอบประกอบด้วยอุปกรณ์สำคัญ คือ เทอร์โมอิเล็กทริกและกล้องถ่ายภาพความร้อน วัสดุที่ใช้ทดสอบ ได้แก่ แผ่นออลิติก มันฝรั่ง แอ๊ปเปิ้ล ฉนวนความร้อนพอลิเอทีลีนชนิดโครสลิงค์แบบเซลล์ปิด (PEX) และฉนวนความร้อนโพลีสไตรีนแบบอัดรีด (EPS) จากการทดลอง พบว่า ชุดทดสอบที่นำเสนอนี้เหมาะสำหรับการวัดค่าสมบัติทางความร้อนของวัสดุในช่วงต่ำ มีค่าความไม่แน่นอนของการวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและการกระจายความร้อนของออลิติกภายใต้สภาวะคงตัว เท่ากับ 0.069 W/m.K และ $4.695 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ ตามลำดับ และสำหรับการวัดฉนวน EPS ภายใต้สภาวะไม่คงตัวมีค่าเท่ากับ 0.00635 W/m.K และ $1.514 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ ตามลำดับ โดยค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนที่ได้จากการทดสอบสอดคล้องกับข้อมูลจากแหล่งอ้างอิง

Thesis Title	Estimation of Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity of Materials using Thermographic Camera
Student	Miss Maethinee Songthai
Student ID.	56601299
Degree	Master of Engineering
Program	Instrumentation Engineering
Year	2015
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Taweepol Suesut
Co-Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Navaphattra Nunak

ABSTRACT

This study proposes a method to estimate thermal conductivity and thermal diffusivity of materials using a thermoelectric device and a thermographic camera. The samples including acrylic sheet, potato slab, apple slab, Crosslink Polyethylene close cell insulator (PEX) and Extruded Polystyrene insulator (EPS) were tested. From results, it can be concluded that the proposed method can be a useful tool for determining thermal properties of materials with low thermal conductivity and diffusivity values. The uncertainty of an acrylic sheet testing under steady state condition and an EPS insulator testing under unsteady state condition were 0.069 W/m.K and 0.00635 W/m.K for the thermal conductivity measurement and $4.695 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ and $1.514 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ for the thermal diffusivity measurement. The experimental results for all selected materials are in comparable range with literature values.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานนโยบายและแผนงาน (สนพ.) ที่ให้ทุนอุดหนุนวิจัยปี 2557 จากกองทุน เพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน แผนเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน เพื่อนำมาใช้เป็นค่าใช้จ่ายในการสร้างระบบวัด ค่าวัสดุและอุปกรณ์ ค่าตัวอย่างทดลอง และค่าใช้จ่ายในส่วนต่างของงานวิจัยนี้

ขอกราบขอบพระคุณ รศ. ดร.ทวีพล ชื่อสัตย์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม และ รศ. ดร.นวกัทธา หนูนาถ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอาหาร สำหรับทุนการศึกษาตลอดหลักสูตรและคอยช่วยเหลือแนะนำตลอดจนให้คำปรึกษาในการทำวิทยานิพนธ์นี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมทั้งอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุมและวิศวกรรมอาหารทุกท่านที่ได้ให้ความรู้ในการศึกษา

ขอขอบคุณ ดร.ภาณุพล โชนกระโทก และ คุณศิวกร สุขประเสริฐชัย สำหรับการให้คำปรึกษา ในส่วนของโปรแกรมและเนื้อหาในส่วนต่าง ๆ ที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และญาติพี่น้อง รวมทั้งเพื่อน พี่ และน้อง ทุกคนที่คอยให้กำลังใจ และให้การสนับสนุนช่วยเหลือในทุก ๆ ด้านทั้งเรื่องการเรียน และเรื่องต่าง ๆ ทำให้ผู้เขียนผ่านทุก ๆ อย่างจนมาถึงทุกวันนี้ได้

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับ บิดา มารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า และขอให้ทุก ๆ ท่านจงมีแต่ความสุขตลอดไป

เมธินี สงไทย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูป	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ	3
1.6 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์	3
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 สมบัติทางความร้อน	4
2.2 สมบัติทางกายภาพของวัสดุ	15
2.3 เทอร์โมอิเล็กทริก.....	15
2.4 การถ่ายเทความร้อนของวัสดุ	17
2.5 กล้องถ่ายภาพความร้อน	19
2.6 การประเมินความไม่แน่นอนในการวัด	21
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	24
บทที่ 3 การออกแบบและการดำเนินงาน	27
3.1 ชุดอุปกรณ์และตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง	27
3.2 การวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและค่าสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อน	30
3.3 การประเมินความไม่แน่นอนในการวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและสัม- ประสิทธิ์การแพร่กระจายความร้อน	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 การทดลองและการวิเคราะห์การทดลอง	37
4.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวัสดุในระหว่างกระบวนการ.....	37
4.2 การประมาณค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน	40
4.3 การประมาณค่าสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อน	42
4.4 ความไม่แน่นอนของการวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายความร้อน	44
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	58
5.1 สรุปผลการวิจัย	58
5.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัยต่อ	60
เอกสารอ้างอิง	61
ภาคผนวก ก ตาราง t distribution critical values และ Gaussian Error Function.....	66
ภาคผนวก ข ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์	69
ประวัติผู้เขียน	76

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 วิธีวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน	5
2.2 ตัวอย่างสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ	11
2.3 ตัวอย่างสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนของวัสดุ.....	13
2.4 ตัวอย่างความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุ.....	14
2.5 ตัวอย่างสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของวัสดุ	14
2.6 ตัวอย่างความหนาแน่นของวัสดุ	15
4.1 สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุในสภาวะอุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา.....	41
4.2 สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุในสภาวะอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงตามเวลา.....	42
4.3 สัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนของวัสดุในสภาวะอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงตามเวลา.....	43
4.4 สัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนของวัสดุในสภาวะอุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา.....	44
4.5 องค์ประกอบความไม่แน่นอนระบบวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเมื่ออุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา.....	48
4.6 องค์ประกอบความไม่แน่นอนระบบวัดสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนเมื่ออุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา.....	51
4.7 องค์ประกอบความไม่แน่นอนระบบวัดสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงตามเวลา.....	54
4.8 องค์ประกอบความไม่แน่นอนระบบวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงตามเวลา.....	57

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ชุดทดลองและการทำงานของวิธี Guard hot plate.....	8
2.2 ชุดทดสอบด้วยวิธี Cylinder	9
2.3 หลักการวัดด้วยวิธีลวดความร้อน	10
2.4 เซนเซอร์ในวิธี TSP	11
2.5 แผนภาพของเทอร์โมอิเล็กทริก	16
2.6 การกระจายอุณหภูมิแบบไม่ทรงตัวในของแข็งประเภท Semi-infinite solid	18
2.7 การวัดอุณหภูมิโดยอาศัยการแผ่รังสีอินฟราเรดของวัสดุ.....	20
2.8 ขอบเขตการมองเห็นของกล้อง TI: FOV และ IFOV	20
2.9 ชุดการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน	25
2.10 ชุดอุปกรณ์การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายความร้อนของวัสดุ	26
3.1 ชุดอุปกรณ์ทดลอง	27
3.2 เทอร์โมอิเล็กทริก รุ่น CP 08,127,06,L1,W4.5	28
3.3 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิดปรับได้.....	28
3.4 มัลติมิเตอร์ รุ่น Agilent 34401A	28
3.5 เครื่องมือวัดอุณหภูมิ	29
3.6 แผนภาพตัวแทนของการวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและการกระจายความร้อน.....	31
3.7 ภาพถ่ายทางความร้อนเมื่อวัสดุถ่ายเทความร้อนในสภาวะอุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา	32
3.8 ภาพถ่ายทางความร้อนเมื่อวัสดุถ่ายเทความร้อนในสภาวะอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงตามเวลา	33
3.9 แผนภูมิแกงปลาการประเมินความไม่แน่นอนในการวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเมื่อวัสดุถ่ายเทความร้อนในสภาวะอุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา.....	33
3.10 แผนภูมิแกงปลาการประเมินความไม่แน่นอนในการวัดสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนเมื่อวัสดุถ่ายเทความร้อนในสภาวะอุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา	34
3.11 แผนภูมิแกงปลาการประเมินความไม่แน่นอนในการวัดสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนเมื่อวัสดุถ่ายเทความร้อนในสภาวะอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงตามเวลา	34
3.12 แผนภูมิแกงปลาการประเมินความไม่แน่นอนในการวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเมื่อวัสดุถ่ายเทความร้อนในสภาวะอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงตามเวลา	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก พลังงานของเทอร์โมอิเล็กทริกด้านเย็น และเวลา	38
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก อุณหภูมิของตัวอย่าง และเวลา.....	39
4.3 ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์มาตรฐานของระบบวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเมื่ออุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของตัวอย่างอซิลิค.....	47
4.4 ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์มาตรฐานของระบบวัดสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนเมื่ออุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของตัวอย่างอซิลิค.....	50
4.5 ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์มาตรฐานของระบบวัดสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงตามเวลาของตัวอย่างฉนวน EPS.....	55
4.6 ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์มาตรฐานของระบบวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงตามเวลาของตัวอย่างฉนวน EPS.....	57

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สมบัติทางความร้อนของวัสดุเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในงานต่าง ๆ ได้แก่ กระบวนการผลิต กระบวนการให้ความร้อน ระบบฉนวนความร้อน รวมถึงงานด้านพลังงาน เป็นต้น [1] การทราบอัตราการถ่ายเทความร้อนและสมบัติทางความร้อนต่าง ๆ เช่น สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal conductivity; k , W/m·K) สัมประสิทธิ์การกระจายความร้อน (Thermal diffusivity; α , m²/s) ความจุความร้อนจำเพาะ (Specific heat; c_p , J/kg·K) สามารถนำมาออกแบบในระบบติดตั้ง ระบบควบคุมการผลิต และระบบซ่อมบำรุงในงานทางวิศวกรรม รวมถึงการประเมินการประหยัดพลังงานของการใช้วัสดุดังกล่าวได้ ในปัจจุบันมีวิธีการวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนหลายวิธีแบ่งได้ 2 กลุ่ม [2] คือ กลุ่มการวัดเมื่ออุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Steady state) ได้แก่ วิธี Guard hot plate [3] วิธี Concentric cylinder และ วิธี Concentric sphere เป็นต้น และกลุ่มการวัดเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Unsteady state) ได้แก่ วิธี Fitch [4] วิธี Laser flash [5] วิธี Line or plane heat source [6-10] และ วิธี Thermistor probe [11-13] เป็นต้น ในส่วนของวิธีการวัดสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนสามารถหาได้จาก วิธีวัดแบบทางตรง ได้แก่ วิธีการวิเคราะห์จากผลของอุณหภูมิ และวิธีวัดทางอ้อม ได้แก่ วิธีการใช้โพรบวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อน วิธี Dickerson เป็นต้น โดยในการวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและการกระจายความร้อนขึ้นกับความเหมาะสมของวิธีและวัสดุที่ทำการวัด ซึ่งในปัจจุบันมีการใช้เครื่องมือวัดเพื่อวัดสัมประสิทธิ์ทั้งสอง แต่เนื่องจากมีราคาค่อนข้างสูง จึงมีงานวิจัยต่าง ๆ ได้ออกแบบและคิดค้นระบบการวัดขึ้น

งานวิจัยส่วนใหญ่ใช้เทอร์โมคัปเปิลแบบสัมผัสในการวัดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิระหว่างแผ่นให้ความร้อนกับตัวอย่างในขณะที่ให้ความร้อน ซึ่งการใช้งานเครื่องมือวัดอุณหภูมิชนิดนี้ยากต่อการวัดค่าอุณหภูมิที่ผิวของตัวอย่างให้ถูกต้อง González et al. [14] ประมาณสัมประสิทธิ์การนำความร้อนในช่วงเปลี่ยนแปลงตามเวลาและไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยใช้แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกเป็นแผ่นให้ความร้อนแก่วัสดุ และติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลแบบสัมผัสในการวัดอุณหภูมิที่แตกต่างระหว่างแผ่นให้ความร้อนและวัสดุที่นำมาทดสอบ และมีงานวิจัยเปลี่ยนจากวิธีการวัดแบบสัมผัสเป็นวิธีการตรวจวัดอุณหภูมิแบบไม่สัมผัสโดยใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนเช่นงานวิจัยของ Chudzik [15] พัฒนาวิธีการหาสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนของวัสดุประเภทฉนวน โดยใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนในการวัดค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงบริเวณที่ผิวของวัสดุ ซึ่งการใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนวัดค่าอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุซึ่งเป็นการวัดแบบไม่สัมผัสและไม่ทำลายวัสดุตัวอย่างที่นำมาวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในระบบแหล่งจ่ายความร้อนให้กับตัวอย่างเพื่อวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำและการกระจายความร้อน ทัวไปใช้ลวดความร้อนหรือแผ่นความร้อนเพื่อกำเนิดความร้อนให้แก่วัสดุ เช่นวิธี Guard hot plate และวิธีลวดความร้อน เป็นต้น และในงานวิจัยของ *Moreira et al.* [16] ใช้แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก วัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุอีพอกซีนาโนคอมโพสิตซึ่งผสมกับโลหะอนุภาคนาโน และแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถใช้ได้ทั้งในโหมดความร้อนและความเย็นและให้พลังงานเท่ากับตลอดพื้นที่

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงออกแบบและสร้างระบบการวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนของวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำ โดยใช้แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกเป็นแหล่งให้พลังงานแก่วัสดุ และใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนวัดค่าอุณหภูมิที่ผิว โดยแบ่งวิธีการวัด 2 ลักษณะ คือ ในสภาวะที่อุณหภูมิของวัสดุไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาและเปลี่ยนแปลงตามเวลา จากนั้นทำการวิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อนของสัมประสิทธิ์ดังกล่าว และประมาณค่าความไม่แน่นอนของระบบการวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อน

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อนำเสนอวิธีวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนของวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่อยู่ในช่วงต่ำด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ออกแบบวิธีการประมาณสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนของวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่อยู่ในช่วงต่ำ โดยใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนวัดอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงของวัสดุ
2. สร้างชุดทดลองการประมาณสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและการกระจายความร้อนของวัสดุ
3. วิเคราะห์ความไม่แน่นอนของระบบการวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อน

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาการวัดและการประมาณสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนของวัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ศึกษาวิธีใช้เครื่องมือวัดอุณหภูมิชนิดต่าง ๆ ได้แก่ ดิจิตอลเทอร์โมมิเตอร์ เทอร์โมคัปเปิล และกล้องถ่ายภาพความร้อน
3. ออกแบบและสร้างระบบการวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนของวัสดุ
4. วิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อนของการวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนของวัสดุ
5. วิเคราะห์ความไม่แน่นอนของระบบการวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนของวัสดุ

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

ได้วิธีวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนของวัสดุทางวิศวกรรมและวัสดุทางชีวภาพที่มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนอยู่ในช่วงต่ำ โดยประยุกต์ใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนวัดอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุและใช้เทอร์โมอิเล็กทริกเป็นแหล่งให้ความร้อนหรือความเย็นแก่วัสดุที่ทำการวัด

1.6 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาทั้งหมดออกเป็น 5 บทคือ โดยเนื้อหาแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ ทฤษฎี และแนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย ขอบเขตของการวิจัย และรายละเอียดของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ สมบัติทางความร้อนและทางกายภาพของวัสดุ เทอร์โมอิเล็กทริก กล้องถ่ายภาพความร้อน การประเมินความไม่แน่นอนของการวัด และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 กล่าวถึงขั้นตอนการทดลอง การวิเคราะห์ผลสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อน องค์ประกอบของความไม่แน่นอนในการวัดสัมประสิทธิ์ดังกล่าว

บทที่ 4 กล่าวถึงการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองการวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนของวัสดุ และค่าความไม่แน่นอนของระบบการวัด

บทที่ 5 กล่าวถึงบทสรุปผลการวิจัย ข้อเสนอแนะ และแนวทางการนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 สมบัติทางความร้อนของวัสดุ

2.1.1 สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal conductivity; k)

สัมประสิทธิ์การนำความร้อน คือ ค่าที่แสดงถึงความสามารถของวัสดุในการถ่ายเทความร้อน ซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิ ชนิดของวัสดุ ความหนาแน่น และความพรุนของวัสดุ เป็นต้น การนำความร้อนของวัสดุอาศัยหลักการถ่ายเทความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ โดยการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในช่วงแรกจะเปลี่ยนแปลงตามเวลาหลังจากนั้นจะเป็นการถ่ายเทความร้อนแบบคงที่ ซึ่งทิศทางการถ่ายเทความร้อนมีทิศเดียวกับเดียวกับอัตราการนำความร้อนผ่านวัสดุต่อพื้นที่หรือค่าการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่ (Heat flux; q'' , W/m^2) โดยเป็นสัดส่วนกับความลาดชันของอุณหภูมิ (Temperature gradient; $\frac{\partial T}{\partial z}$, K/m) และสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ (k , $W/m\cdot K$) ซึ่งเป็นไปตามกฎของการถ่ายเทความร้อนหรือกฎของฟูรีเยร์ (Fourier's law) แสดงดังสมการที่ 2.1 [17]

$$q'' = -k \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (2.1)$$

การวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต้องอาศัยปัจจัยต่าง ๆ เพื่อออกแบบเครื่องมือวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ได้แก่ ช่วงอุณหภูมิที่ต้องการวัด ขนาดของกลุ่มตัวอย่าง ความถูกต้องและช่วงการนำความร้อน เป็นต้น วิธีการวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อน สามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ การวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนในสภาวะอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงตามเวลาหรือสภาวะคงตัว (Steady state) เป็นการวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเมื่ออุณหภูมิแต่ละตำแหน่งของตัวอย่างคงที่ และการวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนในสภาวะอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงตามเวลาหรือสภาวะไม่คงตัว (Unsteady state) คือ การวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนในช่วงที่อุณหภูมิของตัวอย่างมีการเปลี่ยนแปลง หรือการวัดในขณะที่ดำเนินการให้ความร้อนหรือการลดความร้อนของวัสดุซึ่งวิธีใช้เวลาในการวัดที่รวดเร็วกว่าวิธีการวัดในสภาวะอุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยเทคนิคการวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและมาตรฐานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 วิธีวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อน [18]

เทคนิคการวัด	ข้อได้เปรียบ	ข้อจำกัด	ช่วงอุณหภูมิ (K)	วัสดุที่ใช้ทดสอบ	ช่วงสัมประสิทธิ์การ		ความไม่ แน่นอนของ การวัด (%)
					นำความร้อน (W/m.K)	มาตรฐานอ้างอิง	
Guarded hot plate [19]	- ใช้ได้กับวัสดุหลายประเภท - มีความถูกต้องสูง	- ใช้เวลานาน - ใช้ตัวอย่างขนาดใหญ่ - ใช้ได้เฉพาะตัวอย่างที่มีค่าการนำความร้อนต่ำ	80-1500	- วัสดุประเภทพลาสติก เซรามิกซ์ และ แก้ว	< 1.0	- EN 12667 - ISO 8302 - ASTM C177	2-5
Axial heat flow [19]	- วัดค่าความต้านทานความร้อนได้ - มีช่วงทดสอบกว้าง - มีความถูกต้องสูง	- ควบคุมการสูญเสียความร้อนบริเวณแกนรัศมีได้ถึง 500 K	90-1300	- วัสดุประเภทโลหะและอัลลอยที่บรรจุอยู่ในรูปทรงกระบอก	10-500	- ASTM E 1225 - ASTM C335	0.5-2
Cylinder method [19]	- มีช่วงทดสอบกว้าง - มีความถูกต้องสูง	- ใช้เวลานาน - ใช้ตัวอย่างขนาดใหญ่	4-2600	- วัสดุประเภทของแข็งและผงที่บรรจุอยู่ในรูปทรงกระบอก	0.01-200	- ISO 8497	3-15
Heat flow meter [19, 20]	- ง่ายต่อการสร้างและการทำงาน	- วัดได้ไม่แน่นอน	173-473	- วัสดุประเภทพลาสติก เซรามิกซ์ แก้ว และ ฉนวน	<5	- EN 12667 - ASTM C518 - ASTM E 1530	3-10

ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

เทคนิคการวัด	ข้อดี	ข้อจำกัด	ช่วงอุณหภูมิ (K)	วัสดุที่ใช้ทดสอบ	ช่วงสัมประสิทธิ์การ		ความไม่ แน่นอนของ การวัด (%)
					นำความร้อน (W/m.K)	มาตรฐานอ้างอิง	
Hot wire method [21]	- สูญเสียความร้อนน้อย - มีความเสถียร	- ใช้ได้เฉพาะตัวอย่างที่มี ค่าการนำความร้อนต่ำ - เส้นลวดเปราะบาง	293-1800	- วัสดุทนความร้อน รวมทั้งแข็งและที่ไม่มี การยึดตัว	0.02-2	- ISO8894-1 - ISO8894-2 - ASTM C 1113	5-15
Needle Probe Method	- มีช่วงทดสอบกว้าง - มีความเสถียร	- มีความแม่นยำของ ข้อมูล	130-670	- วัสดุประเภทพลาสติก	0.08-2	- ASTM D 5930	-
Transient planar source [24]	- มีช่วงทดสอบกว้าง - มีความเสถียร - มีช่วงครอบคลุมวิธีการทั้งหมด	- ต้องการวัสดุทดสอบ 2 ชั้น - ใช้เครื่องมือชั้นสูง	50-1000	- วัสดุประเภทพลาสติก เซรามิกซ์ และฉนวน	0.01-500	- ISO 22007-2	2-7

2.1.1.1 การวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนในสภาวะอุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

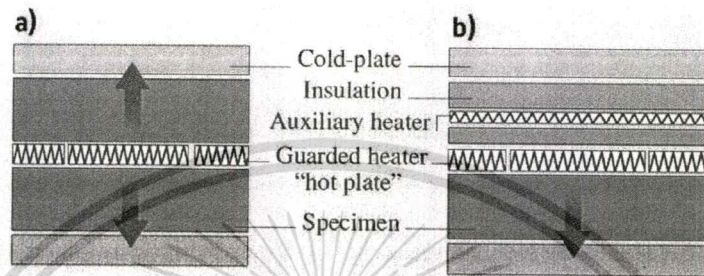
การวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนแบบในสภาวะอุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาสามารถวัดโดยปล่อยให้อุณหภูมิของตัวอย่างเพิ่มขึ้นหรือลดลงจนอุณหภูมิคงที่ ซึ่งเป็นวิธีที่มีความถูกต้อง มีผลที่เชื่อถือได้ แต่อย่างไรก็ตามวิธีนี้มีข้อจำกัดคือใช้เวลาค่อนข้างนาน ในกรณีที่วัสดุที่มีความชื้นสูงจะมีการเปลี่ยนแปลงความชื้นซึ่งส่งผลต่อค่าความถูกต้องของการวัด จึงทำให้วิธีการวัดในสภาวะอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงตามเวลาเหมาะสมสำหรับการวัดวัสดุประเภทอาหารและวัสดุทางชีวภาพ ซึ่งปกติแล้ววัสดุประเภทดังกล่าวมีน้ำเป็นส่วนประกอบหลัก [2] การวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนด้วยวิธีนี้ ต้องมีแหล่งให้ความร้อนภายในวัสดุเพื่อการรักษาอุณหภูมิของสภาวะให้คงที่ และอาศัยความแตกต่างของอุณหภูมิภายในตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ 2 ตำแหน่งที่มีระยะห่างกัน X หน่วย ซึ่งสามารถใช้ได้ทั้งในระบบพิกัดฉากเชิงเรขาคณิต (Geometry) และยังสามารถใช้ในระบบแกนรัศมี (Radial systems) วิธีการวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนในสภาวะอุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ได้แก่ วิธี Guard hot plate [3] วิธี Axial flow วิธี Cylinder วิธี heat flow meter วิธี Concentric cylinder และ วิธี Concentric sphere โดยวิธี Axial flow เป็นวิธีที่กำหนดขึ้นมานานและมีความถูกต้อง (Accuracy) มากที่สุด วิธีที่เข้มงวดที่สุดในระบบพิกัดฉากคือ วิธี Parallel plate apparatus หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าวิธี Guard hot plate ในขณะที่วิธี Concentric cylinder นิยมใช้กับระบบแกนรัศมี

1) วิธี Guard hot plate

วิธี Guard hot plate นิยมใช้วัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุประเภทอโลหะ (Nonmetal) เช่น แก้ว เซรามิก โพลีเมอร์ และวัสดุประเภทฉนวน เนื่องจากมีช่วงอุณหภูมิที่สามารถใช้งานได้ตั้งแต่ 80-800 K และมีค่าความไม่แน่นอนของการวัดเท่ากับ 2 % วิธี Guard hot plate แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ Single-specimen และ Two-specimen โดย ชุดการทดลองวิธี Guard hot plate ประกอบด้วย แผ่นให้ความร้อน ระบบให้ความร้อนแบบ Guard และ ฉนวนความร้อน และแผ่นให้ความเย็นแสดงดังรูปที่ 2.1 โดยบริเวณแผ่นให้ความร้อนล้อมรอบด้วยตัวให้ความร้อน และฉนวนความร้อน ในการวัดต้องทำให้ความร้อนจากแผ่นให้ความร้อนทะลุผ่านวัสดุที่นำมาทดสอบเท่านั้น เพื่อนำปริมาณความร้อนดังกล่าวมาประมาณสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่เกิดขึ้น โดยวิธีนี้เป็นวิธี การวัดแบบผลรวม (Absolute) ความถูกต้องของการวัดที่เกิดขึ้นจากตัวแปรที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ปริมาณความร้อนในแกนที่ใช้วัด ความหนาของวัสดุ และ อุณหภูมิที่บริเวณด้านเย็นและด้านร้อน

ข้อดีของการใช้ชุดทดลองแบบ Two-specimen คือ สามารถควบคุมการสูญเสียความร้อนและมีการจัดเรียงชิ้นงานที่สมมาตร ถึงแม้ว่าวิธี Guard hot plate สามารถนำมาทดสอบหาสัมประสิทธิ์การนำความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพแต่ยังเป็นเรื่องยากในการทดสอบ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับวัสดุที่มีลักษณะเป็นผง (Powders) เนื่องจากในการบรรจุวัสดุที่มีลักษณะเป็นผงลงในชุดทดสอบค่อนข้างยากเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุประเภทของแข็ง และหากเกิดความร้อนรั่วไหลไปยังภาชนะที่บรรจุวัสดุประเภทผงจะทำให้การวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนยากขึ้น โดยรายละเอียดของวิธีการวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนแบบ Guard hot plate สามารถหาข้อมูลได้จากมาตรฐาน European Standard EN 12667 International Standard ISO 8302 และ ASTM C177



รูปที่ 2.1 ชุดทดลองและการทำงานของวิธี Guard hot plate [18]

2) วิธี Axial Flow

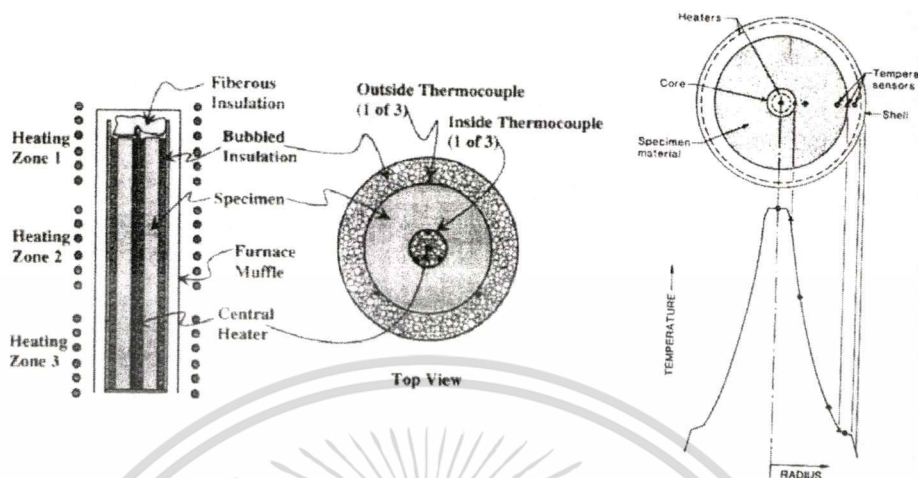
วิธี Axial Flow เป็นวิธีที่กำหนดขึ้นมานานและมีค่าความถูกต้องมากที่สุดที่แสดงในแหล่งอ้างอิง โดยวิธีนี้นิยมใช้วัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า 1000 K เนื่องจากวิธีการนี้มีการสูญเสียความร้อนน้อยที่สุดที่อุณหภูมิต่ำ วิธีการหาสัมประสิทธิ์การนำความร้อนด้วยวิธีนี้ เหมาะสำหรับตัวอย่างขนาดเล็กและมีสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมากกว่า 1 W/m.K โดยข้อจำกัดของวิธีการนี้ คือ ปัญหาเรื่องการสูญเสียความร้อนในรัศมีที่พิจารณา [19] โดยช่วงของอุณหภูมิทดสอบ คือ 90-1300 K และความถูกต้องของการวัดเท่ากับ 0.5-2% [19] โดยรายละเอียดต่าง ๆ ของการทดสอบด้วยวิธี Axial flow สามารถอ่านรายละเอียดเพิ่มเติมได้จากมาตรฐาน ASTM E 1225 และ ASTM C335

3) วิธี Cylinder

วิธี Cylinder เป็นวิธีที่อ้างถึงการไหลของความร้อนในแนวรัศมี หลักการของวิธีนี้คือให้ความร้อนตามแนวแกนรัศมีจากแหล่งจ่ายความร้อน (กึ่งกลาง) ไปยังตัวระบายความร้อนและวัดค่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในระบบ โดยชุดการทดลองจะมีลักษณะเป็นทรงกระบอก 2 ชั้นเพื่อบรรจุตัวอย่าง ติดตั้งลวดความร้อนบริเวณแกนกลางของตัวอย่าง และติดตั้งเทอร์โมมิเตอร์บริเวณลวดความร้อนและบริเวณภายในตัวอย่าง แสดงดังรูปที่ 2.2 การวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสามารถเริ่มวัดได้ตั้งแต่ค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้ลวดความร้อนคงที่ ข้อได้เปรียบของวิธีนี้คือ วัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนตั้งแต่ช่วงต่ำถึงสูง มีความถูกต้องของการวัดมาก และวัดชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ได้ แต่วิธีนี้มีข้อจำกัดคือ มีค่าใช้จ่ายที่สูง และใช้เวลานาน [19,20] วิธี Cylinder สามารถวัดได้ตั้งแต่ช่วงอุณหภูมิ 4-1000 K และมีค่าความไม่แน่นอนของการวัดเท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2% [19,20] การเปลี่ยนแปลงรูปแบบของอุณหภูมิของบริเวณพื้นที่หน้าตัดแสดงดังรูปที่ 2.2 โดยวิธีวัดนี้ยังไม่มีมาตรฐานรองรับแต่สามารถรายละเอียดได้จากมาตรฐานสากล ISO 8497



รูปที่ 2.2 ชุดทดสอบด้วยวิธี Cylinder และเปลี่ยนแปลงรูปแบบของอุณหภูมิของบริเวณพื้นที่หน้าตัด [18]

4) วิธีการวัดค่าความไหลของความร้อน

วิธีการวัดค่าการไหลของความร้อน (Heat flow meter method) อาศัยหลักการวัดความแตกต่างของอุณหภูมิที่ไหลผ่านตัวต้านทานความร้อนในสถานะที่อุณหภูมิไม่มีการเปลี่ยนแปลง ชุดทดลองจะมีลักษณะคล้ายกับวิธี Guard hot plate แบบตัวอย่างชิ้นเดียว แต่แตกต่างกันที่แหล่งจากความร้อน ซึ่งเปลี่ยนจากฮีตเตอร์เป็น Heat flux sensor ทำหน้าที่เป็นตัวต้านทานความร้อนที่ติดกับเทอร์โมคัปเปิล ในบางกรณี Heat flux sensor จะวางอยู่บนแผ่นเย็น (Cold Plate) เพื่อตรวจสอบการสูญเสียความร้อนในแนวแกนรัศมีและลดเวลาที่ใช้ในการวัด โดยวิธีการวัดนี้ นิยมใช้กับวัสดุประเภทโพลีเมอร์และวัสดุประเภทฉนวนที่มีสัมประสิทธิ์การนำความร้อนน้อยกว่า 0.3 W/m.K และมีค่าความไม่แน่นอนของการวัดที่ 3 % [21] แต่อย่างไรก็ตามถ้ามีการสูญเสียตามแนวแกนจะทำให้ค่าความไม่แน่นอนของการวัดมีค่ามากขึ้น โดยการทดสอบด้วยวิธีการวัดการไหลของความร้อนสามารถรายละเอียดเพิ่มเติมได้จากมาตรฐาน EN 12667 ASTM E 1530 และ ASTM C518

2.1.1.2 การวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนในสถานะอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงตามเวลา

วิธีการวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนแบบวิธีเปลี่ยนแปลงตามเวลาเป็นการวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ตั้งแต่เริ่มให้ความร้อนแก่วัสดุ โดยในสถานะเริ่มต้นวัสดุจะมีการสมดุลความร้อน (Thermal equilibrium) กับสิ่งแวดล้อม จากนั้นเริ่มให้ความร้อนแก่วัสดุที่ใช้ทดสอบและวัด

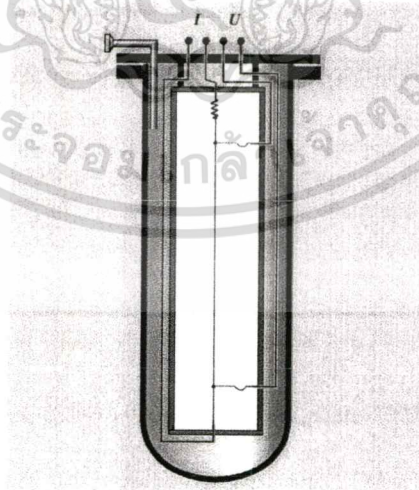
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าอุณหภูมิของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาและใช้ค่าดังกล่าวมาประมาณหาสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุที่นำมาทดสอบ [22]

ข้อได้เปรียบของวิธีนี้คือ ใช้เวลาน้อยกว่าวิธีวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนในสถานะไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ไม่จำเป็นต้องมีความแม่นยำของตำแหน่งในการวัด เนื่องจากต้องการความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาเพื่อมาประมาณสัมประสิทธิ์การนำความร้อน แต่อย่างไรก็ตามวิธีการนี้มีข้อจำกัด คือ เครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่ใช้ต้องทันสมัย และมีความซับซ้อนของวิธีการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

1) วิธีการใช้ลวดความร้อน

วิธีนี้ประยุกต์มาวิธี Cylinder ที่มีการไหลของความร้อนในแกนรัศมีซึ่งพิจารณาในสถานะที่อุณหภูมิตัวอย่างไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยความต้านทานความร้อนจะเปลี่ยนตามค่าความถูกต้องของช่วงเวลาน้อยกว่าหนึ่งวินาที ซึ่งอยู่บนพื้นฐานที่ลวดให้ความร้อนมีความยาวมาก (Infinite length) มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กและฝังอยู่ในชิ้นงานที่ใช้ทดสอบ โดยลวดความร้อนทำหน้าที่ให้พลังงานความร้อนอย่างคงที่กับวัสดุและใช้เทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิ 2 ตำแหน่งระหว่างความยาวของลวดความร้อนแสดงดังรูปที่ 2.3 ซึ่งสามารถวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนจากค่าความชันของความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปกับเวลาที่ได้จากเครื่องมือวัด [23] วิธีนี้มีข้อได้เปรียบ คือ มีความเรียบง่าย วัดวัสดุที่มีขนาดบางได้ ให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงได้ในระยะเวลาสั้น ๆ มีความถูกต้องสูง วัดได้ทั้งของแข็งและของเหลว และนิยมใช้ในการทดสอบเชิงพาณิชย์ [23] โดยสามารถอ่านรายละเอียดเพิ่มเติมได้จากมาตรฐาน ISO 8894-1 ISO 8894-2 และ ASTM C 1113



รูปที่ 2.3 หลักการวัดด้วยวิธีลวดความร้อน [18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) วิธี Needle probe

วิธี Needle probe หรือวิธี Line-Source เป็นวิธีที่ดัดแปลงมาจากวิธีลวดความร้อน และมีประสิทธิภาพในการวัดที่รวดเร็ว วิธีนี้เหมาะสำหรับการวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุที่ในสถานะของแข็งหรือวัสดุที่มีความสามารถในการละลายได้ อย่างไรก็ตามวิธีนี้ไม่เหมาะสำหรับวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุที่มีสมบัติภายในแตกต่างกัน สามารถวัดได้ในช่วงอุณหภูมิ 233-673 K และในช่วงสัมประสิทธิ์ความร้อนที่ 0.08-2 W/m.K สามารถอ่านรายละเอียดเพิ่มเติมได้จากมาตรฐาน ASTM D 5930

3) วิธี Transient plane source

วิธี Transient plane source (TPS) สามารถใช้ได้กับการวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุประเภทของเหลว และของแข็งที่มีขนาดบางและจนถึงฟิล์มบาง (Thin film) ในช่วง 0.01-500 W/m.K. ตั้งแต่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic) จนถึง 500 K ตัววัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวิธีนี้ทำหน้าที่เป็นตัววัดอุณหภูมิและแหล่งให้ความร้อนแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งในการตรวจสอบทั่ว ๆ ไปจะวัดในช่วงอุณหภูมิต่ำ โดยความถูกต้องของสัมประสิทธิ์การนำความร้อนประมาณ 2-5% และเมื่อวัดที่อุณหภูมิสูง ๆ ค่าความถูกต้องเพิ่มขึ้นและอยู่ในช่วง 5-7% [24] และสามารถอ่านรายละเอียดของการออกแบบและการวัดได้จากมาตรฐานสากล ISO 22007-2.



รูปที่ 2.4 เซนเซอร์ในวิธี TSP [18]

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ

ชนิดของวัสดุ	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W/m.K)	อ้างอิง
ฉนวนโพลีสไตรีนโฟม		[25]
- แบบอัดเรียบ	0.027	
- แบบโฟมหล่อ, แผ่นอัด	0.036	
ฉนวนโพลีเอทีลิน	0.0315-0.0383	[26]
แผ่นอคริลิก	0.19	[27]
แอสเบสตอส	0.342-0.513	[6,16,28]
มันฝรั่ง	0.52 - 0.57	[29-31]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 สัมประสิทธิ์การกระจายความร้อน

สัมประสิทธิ์การกระจายความร้อน เป็นสมบัติเฉพาะของวัสดุสำหรับการนำความร้อนแบบไม่คงที่ อธิบายถึงความสามารถในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวัสดุ มีหน่วยในระบบเอสไอ (SI Unit) คือ m^2/s ซึ่งเป็นการวัดความสามารถในการนำความร้อนที่สัมพันธ์กับความสามารถในการเก็บความร้อน โดยวัสดุที่มีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงจะมีการตอบสนองอย่างรวดเร็วในการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมทางความร้อน (Thermal environment) นั้น ๆ แต่ในทางกลับกันวัสดุที่มีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนต่ำจะมีการตอบสนองช้าซึ่งใช้เวลานานเพื่อเข้าสู่สมดุลทางความร้อน แสดงให้เห็นว่าอัตราการให้ความร้อนเมื่อวัสดุมีความหนาเท่ากันจะแปรผกผันกับสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนแสดงดังสมการที่ 2.2

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1} \quad (2.2)$$

สัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนสามารถหาจากการถ่ายเทความร้อนผ่านวัสดุตามความหนาของวัสดุที่กำหนดและนำมาเปรียบเทียบกับค่าอัตราการให้ความร้อนแก่วัสดุทำให้ทราบสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายความร้อนได้ที่มีความหนาของวัสดุเดียวกัน โดยวิธีการวัดสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนของวัสดุสามารถหาได้หลายวิธี ได้แก่ วิธีการวัดค่าสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนทางอ้อมและทางตรง

2.1.2.1 วิธีการวัดสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนทางอ้อม

ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนสามารถคำนวณทางอ้อมได้จากการวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ความหนาแน่น และค่าความจุความร้อนจำเพาะ ดังสมการที่ 2.3

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (2.3)$$

2.1.2.2 วิธีการวัดสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนทางตรง

วิธีการวัดสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนโดยตรงประมาณค่าจากสมการถ่ายเทความร้อนแบบเปลี่ยนแปลงตามเวลาแบบหนึ่งมิติ (One-dimensional unsteady-state heat transfer equation) โดยวิธีที่นิยมมากที่สุด คือ วิธีการหาสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนด้วยวิธีการวิเคราะห์จากข้อมูลอุณหภูมิ (Temperature history method) วิธีโพรบวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal conductivity Probe method) และวิธี Dickerson (Dickerson method)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) วิธีการวิเคราะห์จากข้อมูลอุณหภูมิ

สามารถวัดค่าสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนได้จากการทดลองให้ความเย็นหรือความร้อน จากนั้นนำกราฟความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาจะให้ตัวเลขฟูเรียร์ (Fourier number) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างอัตราของค่าอุณหภูมิกับตัวเลข Biot ซึ่งค่าเหล่านั้นสามารถนำมาหาสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนได้

2) วิธีการใช้โพรบวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

วิธีการนี้ประยุกต์ใช้โพรบวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อน เพิ่มเทอร์โมคัปเปิลเพื่อเพิ่มจุดวัดอุณหภูมิจำนวน 2 จุด ลงไปในตำแหน่งที่ติดกับโพรบวัดและต้องทราบตำแหน่งของเทอร์โมคัปเปิลดังกล่าว เพื่อนำมาประมาณสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อน วิธีการนี้เหมาะสำหรับการหาสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนของวัสดุทางชีวภาพ เนื่องจากใช้เวลาในการทดสอบสั้น (ประมาณ 300 วินาที) และมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของตัวอย่างน้อย โดยในการทดสอบด้วยวิธีนี้ต้องมีการกำหนดตำแหน่งในการวางเทอร์โมคัปเปิลทั้ง 2 ตำแหน่งที่แน่นอนเนื่องจากจุดดังกล่าวเป็นส่งผลต่อความถูกต้องของค่าที่วัดได้ และอาจจะต้องทำการตรวจวัด (Calibration) ระบบที่ทำการทดลอง

3) วิธี Dickerson

Dickerson ได้สร้างชุดทดลองวัดค่าการนำความร้อน โดยใช้บรรจุภัณฑ์ทรงกระบอกที่มีรัศมี R และมีสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูง หลังจากนั้นใส่ตัวอย่างที่ต้องการทดสอบลงไป และควบคุมอุณหภูมิคงที่ด้วยอ่างควบคุมอุณหภูมิ (Water bath) และบริเวณที่ปลายของทั้ง 2 ด้านมียางคอร์ค (Rubber cork) ทำหน้าที่เป็นฉนวนความร้อนและทำให้การถ่ายเทอุณหภูมิเพิ่มขึ้นภายในแกนรัศมี โดยอุณหภูมิของบริเวณตรงกลางและที่ผิวมีการวัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิล บันทึกค่าเวลาและอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปจนกระทั่งมีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิคงที่ทั้งด้านในและด้านนอกของตัวอย่างจากนั้นนำข้อมูลดังกล่าวมาประมาณค่าสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อน

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนของวัสดุ

ชนิดของวัสดุ	สัมประสิทธิ์การกระจายความร้อน (m^2/s)	อ้างอิง
ฉนวนโพลีสไตรีนโฟม		
- แบบอัดเรียบ	8.77×10^{-7}	[25]
- แบบโฟมหล่อ, แผ่นอัด	1.34×10^{-8}	
ฉนวนโพลีเอทีลีน	5.782×10^{-7}	-
แผ่นอติลิด	$1.11-1.15 \times 10^{-7}$	[27]
แฉับเปิล	1.10×10^{-7}	[6,16,28]
มันฝรั่ง	$1.30-1.44 \times 10^{-7}$	[29-31]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในชั้นเรียนด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 ความจุความร้อนจำเพาะ (Specific heat)

ความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat, C_p) มีหน่วยเป็น (kJ/kg·K) เป็นปริมาณความร้อนที่ทำให้วัสดุมวล 1 หน่วย มีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป 1 องศา โดยวัสดุไม่มีการเปลี่ยนสถานะ ปัจจัยที่มีผลต่อความจุความร้อนจำเพาะขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของวัสดุนั้น ๆ และอุณหภูมิ โดยตัวอย่างความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุ

ชนิดของวัสดุ	ความจุความร้อนจำเพาะ; C_p (J/kg°C)	อ้างอิง
ฉนวนโพลิสไตรีนโฟม	1,130	[25]
ฉนวนโพลีเอทีลิน	1,884	[32]
แผ่นอลูมิเนียม	1,470	[25]
แอสเบสท์	3,724-4,017	[8]
มันฝรั่ง	3,550-3,700	[2, 8]

2.1.4 สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน

สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของวัสดุ (Emissivity, ϵ) คือ ค่าสมบัติที่แสดงความสามารถของวัตถุในการแผ่รังสีความร้อน มีค่าเท่ากับอัตราส่วนของรังสีที่แผ่ออกมาจากวัตถุใด ๆ กับรังสีที่แผ่ออกมาจากวัตถุดำ (Black body) ณ อุณหภูมิเดียวกัน มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 ซึ่งวัตถุดำมีค่า ϵ เท่ากับ 1 เสมอ เนื่องจากรังสีความร้อนที่แผ่ออกมาจากวัตถุดำเป็นความร้อนที่เกิดจากพื้นผิวของตัวมันเองและมีความเข้มเท่ากันทุกทิศทาง ในส่วนของวัตถุจริงมีค่า ϵ ไม่คงที่ และมีค่าต่ำกว่า 1 ซึ่งค่า ϵ ของวัตถุจริงจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุ ลักษณะพื้นผิวของวัตถุ และอุณหภูมิที่ผิวของวัตถุ [34] ตัวอย่างสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของวัสดุแสดงดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ตัวอย่างสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของวัสดุ

ชนิดของวัสดุ	ความยาวคลื่น (λ : μm)	สัมประสิทธิ์การแผ่ รังสีความร้อน	อ้างอิง
Paints, lacquers, Varnishes Flat Black lacquers	-	0.96-0.98	[35]
คอนกรีต	8-14	0.92-0.97	[35,36]
น้ำกลั่น	8-14	0.98	[38]

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต [37] โยชนด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 สมบัติทางกายภาพของวัสดุ

2.2.1 ความหนาแน่น

ความหนาแน่น (Density, ρ) เป็นสมบัติทางกายภาพที่สำคัญของวัสดุ ซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะของวัสดุแต่ละชนิด โดยค่าความหนาแน่นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนระหว่างมวล (m) ต่อปริมาตรของวัสดุ (V) ดังสมการที่ 2.4

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.4)$$

โดยหน่วยของความหนาแน่นในระบบ SI คือ (kg/m^3) โดยตัวอย่างความหนาแน่นของวัสดุ แสดงดังตารางที่ 2.6

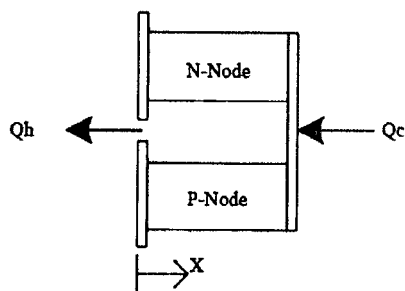
ตารางที่ 2.6 ตัวอย่างความหนาแน่นของวัสดุ

ชนิดของวัสดุ	ความหนาแน่น (kg/m^3)	อ้างอิง
ฉนวนโพลีสไตรีนโฟม		[25]
- แบบอัดเรียบ	28.84-41.65	
- แบบโฟมหล่อ, แผ่นอัด	24.03	
ฉนวนโพลีเอทีลีน	32.04	[33]
แผ่นอลูมิเนียม	1,180	[25]
แอสเบสท์	1,051-1,227	[8]
มันฝรั่ง	1,077	[8]

2.3 เทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric)

เทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric; TEC) หรือเพลเทียร์ (Peltier) ทำจากสารกึ่งตัวนำชนิด 2 ชนิด คือ ชนิด P และ ชนิด N แสดงดังรูปที่ 2.5 หลักการทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริกอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงทางฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำ 4 ปรากฏการณ์ [14,39] ได้แก่ ปรากฏการณ์ซีเบ็ค (Seebeck effect) ปรากฏการณ์ทอมสัน (Thomson effect) ปรากฏการณ์ของจูล (Joule effect) และปรากฏการณ์เพลเทียร์ (Peltier effect) โดยเทอร์โมอิเล็กทริกอาศัยปรากฏการณ์เพลเทียร์เพื่อทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนขึ้นระหว่างสารกึ่งตัวนำสองชนิดที่แตกต่างกัน ซึ่งเทอร์โมอิเล็กทริกมีหลักการทำงานคล้าย ปั๊มความร้อน (Heat pump) โดยนำความร้อนจากด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งของอุปกรณ์เมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้า โดยมีทิศทางการไหลของความร้อนขึ้นกับทิศทางกระแสไฟฟ้า

เอกสารนี้ รวบรวมขึ้นกับทิศทางกระแสไฟฟ้า การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 แผนภาพของเทอร์โมอิเล็กทริก [14]

สมการการถ่ายเทความร้อนทางด้านฝั่งเย็นของสารกึ่งตัวนำ P และ N ในเทอร์โมอิเล็กทริก แสดงดังสมการที่ 2.5

$$q_c = \alpha T_c I + \frac{1}{2} \bar{r} I \Delta T - \frac{1}{2} I^2 \bar{R} - \bar{K} \Delta T \quad (2.5)$$

โดย q_c คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนบริเวณด้านเย็นของสารกึ่งตัวนำ P และ N (W/m^2)

α คือ สัมประสิทธิ์ซีแบ็ค (Seebeck coefficient)

\bar{R} คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ P และ N (Electrical resistance)

\bar{K} คือ ค่าการนำความร้อนของสารกึ่งตัวนำ P และ N (Thermal conductance)

\bar{r} คือ สัมประสิทธิ์ของทอมสัน (Thomson coefficient)

T_h คือ อุณหภูมิด้านร้อน (Hot junction temperature)

T_c คือ อุณหภูมิด้านเย็น (Cold junction temperature)

ΔT คือ ผลต่างของอุณหภูมิด้านร้อนและเย็น

โดยค่า \bar{K} \bar{R} และ \bar{r} สามารถประมาณค่าได้จากคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำ P และ N ภายในเทอร์โมอิเล็กทริก จากนั้นสามารถคำนวณหาค่าพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นทั้งหมดที่บริเวณฝั่งด้านเย็นของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกได้จากสมการที่ 2.6 [14]

$$Q_c = n q_c = \alpha_m T_c I - \frac{1}{2} I^2 R_m - K_m \Delta T \quad (2.6)$$

ซึ่ง n คือ จำนวนคู่ทั้งหมดของสารกึ่งตัวนำ P และ N ในแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก และ α_m R_m K_m คือ ค่าคุณสมบัติของเทอร์โมอิเล็กทริก และเมื่อต้องการทราบปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทออกบริเวณด้านร้อนสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$Q_h = Q_c + P_m \quad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ $P_m = IV$ เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (2.8) การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- โดยที่ Q_h คือ พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทออกจากบริเวณด้านร้อน (W)
 Q_c คือ พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทออกจากบริเวณด้านเย็น (W)
 R_{th} คือ พลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก (W)
 I คือ กระแสที่ป้อนให้แก่แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก (Amp)
 V คือ แรงดันที่ป้อนให้แก่แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก (V)

2.4 การถ่ายเทความร้อนของวัสดุ

ในการถ่ายเทความร้อนของวัสดุ อาศัยหลักการนำความร้อนจากแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก ผ่านบริเวณผิวด้านล่างและถ่ายเทยังผิวด้านบนของวัสดุ โดยแบ่งเป็น 2 ลักษณะ คือ การถ่ายเทความร้อนแบบมิติเดียว และการถ่ายเทความร้อนแบบ Semi-infinite solid

2.4.1 การถ่ายเทความร้อนแบบมิติเดียว

รูปแบบการถ่ายเทความร้อนแบบมิติเดียว เป็นการพิจารณากฎทรงพลังงาน (Conservation of energy) โดยกำหนดให้เป็นการถ่ายเทความร้อนเพียงทิศทางเดียว (แกน Z) โดยการถ่ายเทความร้อนแบบนี้จะพิจารณาในตัวอย่างที่มีความหนาน้อยมากเมื่อเทียบกับความกว้างและความยาวของวัสดุ โดยความสัมพันธ์แสดงดังสมการที่ 2.9

$$qh'' + k \left(\frac{\partial T}{\partial Z} \right) = \rho C_p (\Delta z) \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) \quad (2.9)$$

- โดยที่ qh'' คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน (W/m^2)
 ρ คือ ค่าความหนาแน่นของวัสดุ (kg/m^3)
 C_p คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุ ($J/kg \cdot K$)
 ∂Z คือ ความหนาของวัสดุ (m)
 ∂T คือ ผลต่างของอุณหภูมิตามแกน Z (K)
 ∂t คือ เวลาที่ใช้ในการทดสอบ (s)

2.4.2 การถ่ายเทความร้อนแบบ Semi-infinite solid

การถ่ายเทความร้อนแบบ Semi-infinite solid เป็นการคำนวณการนำความร้อน ภายใต้การนำความร้อนแบบไม่คงตัว โดยลักษณะของตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ต้องมีความยาวมาก ยกเว้นด้านที่สามารถกำหนดเป็นพื้นผิว และถ้ามีการเปลี่ยนแปลงสภาพความร้อนที่บริเวณพื้นผิวจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความร้อนภายในวัสดุ โดยการถ่ายเทความร้อนแบบ Semi-

infinite แบ่งเป็น 3 ประเภทคือ อุณหภูมิที่ผิวถูกทำให้เปลี่ยนแปลงและคงไว้ที่ค่า T_s การส่งผ่าน
 เอกสารนี้ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความร้อนให้บริเวณที่ผิวโดยมีกระแสความร้อน (Heat flux) คงที่ และมีการถ่ายเทความร้อนบริเวณที่ผิว แสดงดังรูปที่ 2.6 โดยทั้งสามกรณีเป็นการนำความร้อนแบบมิติเดียวในสภาวะไม่คงตัว ซึ่งสามารถเขียนสมการ Differential ดังแสดงในสมการที่ 2.10 โดยมีเงื่อนไขเริ่มต้นแสดงดังสมการที่ 2.11

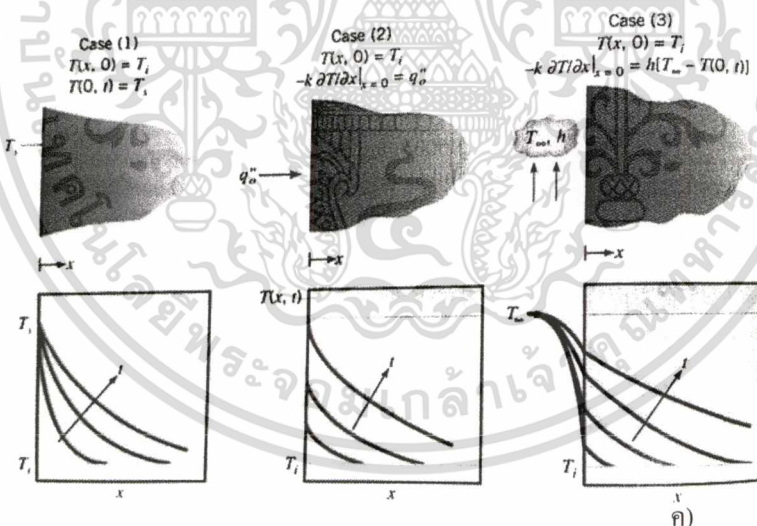
$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.10)$$

$$T(X, 0) = T_i \quad (2.11)$$

และทั้ง 3 กรณีมีเงื่อนไขที่ขอบเขตด้าน $x \rightarrow \infty$ เหมือนกัน ซึ่งเป็นด้านที่ไม่ได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงพื้นผิว เพราะอยู่ไกลมากแสดงดังสมการที่ 2.12

$$T(\infty, t) = T_s \quad (2.12)$$

ส่วนเงื่อนไขที่ขอบเขตด้าน $X=0$ ของแต่ละกรณีจะแตกต่างกันออกไปดังแสดงในรูปที่ 2.5



- อุณหภูมิที่ผิวถูกทำให้เปลี่ยนแปลงและคงไว้ที่ค่า T_s
- การส่งผ่านความร้อนให้บริเวณที่ผิวโดย Heat flux คงที่
- มีการถ่ายเทความร้อนบริเวณที่ผิว

รูปที่ 2.6 การกระจายอุณหภูมิแบบไม่ทรงตัวในของแข็งประเภท Semi-infinite solid [40]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในงานวิจัยนี้มีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงความร้อนแบบ Semi-infinite ตามแบบกรณี ก) โดยรูปแบบดังกล่าวมีเงื่อนไขที่ขอบเขตแสดงดังสมการที่ 2.13 และการกระจายอุณหภูมิแสดงดังสมการที่ 2.14

$$T(0,t) = T_s \quad (2.13)$$

$$\frac{T(x,t) - T_s}{T_i - T_s} = \text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right) \quad (2.14)$$

โดยค่า Heat flux ณ เวลาใด ๆ แสดงดังสมการที่ 2.15

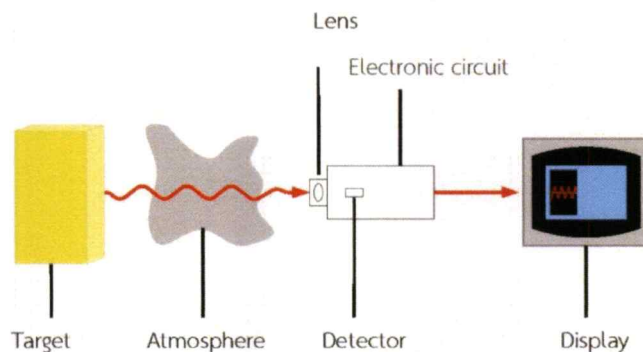
$$q_s''(t) = -k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{k(T_s - T_i)}{\sqrt{\pi \alpha t}} \quad (2.15)$$

เมื่อปริมาณ erf (w) คือ ปริมาณ Gaussian error function สามารถประมาณค่าได้จากภาคผนวก ก ตารางที่ 1 และปริมาณ erfc (w) คือ Complementary error function ความสัมพันธ์ของค่าทั้งสองแสดงดังสมการที่ 2.16

$$\text{erfc}(w) = 1 - \text{erf}(w) \quad (2.16)$$

2.5 กล้องถ่ายภาพความร้อน

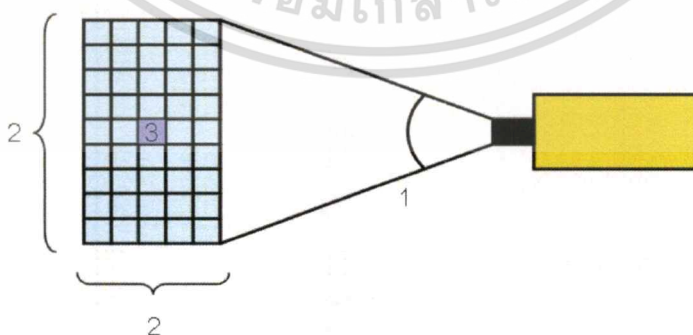
กล้องถ่ายภาพความร้อน เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุแบบไม่สัมผัสและไม่ทำลายวัตถุ โดยวัดรังสีอินฟราเรดที่แผ่ออกจากวัตถุ และปรับค่าอินฟราเรดที่วัดได้เป็นอุณหภูมิอาศัยกฎของพลังค์ (Planck's Law) และกฎของสเตฟานโบลท์ซมานน์ (Stefan-Boltzmann's Law) [34] กล้องถ่ายภาพความร้อนมีส่วนประกอบหลักได้แก่ เลนส์ ตัวตรวจจับ และส่วนแสดงผล โดยจะแสดงผลออกมาในรูปแบบเฉดสีและตัวเลข โดยเฉดสีโทนสว่างจะมีอุณหภูมิสูงและโทนเข้มจะมีอุณหภูมิต่ำ [34] โดยลักษณะการทำงานของกล้องถ่ายภาพความร้อนแสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การวัดอุณหภูมิโดยอาศัยการแผ่รังสีอินฟราเรดของวัสดุ [34]

ในการวัดอุณหภูมิด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนคุณสมบัติที่สำคัญเกี่ยวกับพื้นที่ของการวัดอุณหภูมิ คือ ค่าขอบเขตการมองเห็น (Field Of View, FOV) เป็นค่าสมบัติที่แสดงถึงพื้นที่การมองเห็นของกล้องถ่ายภาพความร้อน (รูปที่ 2.8) แสดงค่าเป็นมุมของกล้องมีหน่วยเป็นองศา ภายในขอบเขตการมองเห็นจะประกอบไปด้วย IFOV (Instantaneous Field Of View) เป็นพื้นที่ที่เล็กที่สุดของ FOV โดยค่า IFOV มีความสัมพันธ์กับค่าความละเอียดของกล้องถ่ายภาพความร้อน ซึ่งค่า FOV และ IFOV จะเปลี่ยนแปลงตามระยะทางระหว่างวัตถุกับกล้องถ่ายภาพความร้อนมีการเปลี่ยนแปลง [34] โดยสามารถประมาณค่าขนาดของจุดวัดบนภาพถ่ายความร้อน (Spot size) ได้จากสมการที่ 2.17 [41] และ จุดวัดบนวัตถุ (Measurement Field Of View, MFOV) คือ ขนาดของจุดวัดบนวัสดุของกล้องถ่ายภาพความร้อน โดยปกติแล้วจะมีขนาดใหญ่กว่า IFOV 2 ถึง 3 เท่า

$$\text{Spot size} = \text{Distance to target} \times \text{IFOV} \quad (2.17)$$



หมายเลข 1 FOV

หมายเลข 2 พื้นที่หรือบริเวณการมองเห็นจากกล้อง TI

หมายเลข 3 IFOV

รูปที่ 2.8 ขอบเขตการมองเห็นของกล้อง TI: FOV และ IFOV [34]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 การประเมินความไม่แน่นอนในการวัด

ความไม่แน่นอนในการวัดแบ่งออกเป็นสองประเภท คือ การวัดเพื่อทดสอบและการวัดเพื่อการสอบเทียบเครื่องมือวัด [42] ความไม่แน่นอนในการวัดนั้นเป็นข้อมูลที่ใช้ประกอบกับผลจากการวัด เพื่อแสดงความคาดเคลื่อนของค่าจริง (True value) ของปริมาณที่ทำการวัด (Measurand) นั้น ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อต้องการนำผลการวัดไปประกอบการตัดสินใจ คุณภาพต่าง ๆ ว่าปริมาณที่ทำการวัดนั้นมีคุณภาพตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้หรือไม่ โดยเอกสารที่ยอมรับกันโดยสากลว่าเป็นต้นแบบของการคำนวณค่าความไม่แน่นอนในการวัดคือเอกสาร “Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement” ซึ่งจัดทำโดย Technical Advisor Group 4 (ISO/TAG 4) แต่ต่อมาหน่วยงาน United Kingdom Accreditation Service : UKAS จึงจัดทำเอกสาร UKAS M3003 “The Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement” เนื่องจากเอกสารเดิมมีรายละเอียดเชิงวิชาการ ซึ่งยากที่นำมาประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติ

ในการพิจารณาแหล่งความไม่แน่นอนของการวัด (Uncertainty source) พบว่ามีแหล่งของความไม่แน่นอนต่างกันไปตามปริมาณที่ทำการวัดและวิธีการวัด โดยแบ่งเป็นสองกลุ่มใหญ่ ๆ ได้แก่ ความคลาดเคลื่อนแบบสุ่ม (Random error) และความคลาดเคลื่อนเชิงระบบ (Systematic error) โดยความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มเป็นแหล่งความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นจากความแตกต่างกันของค่าที่ได้จากการวัดแต่ละครั้ง โดยไม่สามารถอธิบายเหตุผลได้ชัดเจนอีกทั้งยังไม่สามารถคาดการณ์แนวโน้มของความแตกต่างของผลการวัดแต่ละครั้ง และความคลาดเคลื่อนเชิงระบบ เป็นแหล่งความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นจากความไม่สมบูรณ์ในการวัดภายใต้ระบบใดระบบหนึ่ง ที่ได้รับการจัดการให้คงที่มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ ซึ่งผู้มีประสบการณ์ในการวัดสามารถคาดการณ์ความไม่สมบูรณ์ต่างๆ จากแหล่งของความไม่แน่นอนนี้ได้ โดยอ้างอิงจากเอกสารหรือข้อมูลทางวิชาการ

2.6.1 การประมาณค่า Type A Standard Uncertainty

การประมาณค่า Type A Standard Uncertainty เป็นการประมาณโดยใช้หลักทางสถิติเพื่อพิจารณาถึงความสามารถในการซ้ำหรือในทางกลับกันคือพิจารณาการกระจายของค่าเฉลี่ยที่ได้จากแต่ละชุดของการวัด มีขั้นตอนดังนี้

หาค่าเฉลี่ยเลขคณิต (Arithmetic mean, \bar{x}) คือ ค่ากลางที่อ่านได้จากการวัด สามารถคำนวณได้จากการรวมค่าที่อ่านได้จากการวัดปริมาณที่เป็นอิสระต่อกันจำนวน n แสดงดังสมการที่ 2.18

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย \bar{x} คือ ค่าเฉลี่ย

x_i คือ ค่าที่ได้จากการวัดในแต่ละครั้ง

n คือ จำนวนครั้งที่วัด

หาการกระจายข้อมูลโดยประมาณจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation, S)

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2.19)$$

หาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย: $S(\bar{x})$ สามารถหาได้จากสมการที่ 2.20

$$S(\bar{x}) = \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (2.20)$$

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ยที่ประมาณได้ Type A Standard Uncertainty : $U_A(x)$

$$U_A(x) = S(\bar{x}) \quad (2.21)$$

โดยที่ Type A Standard Uncertainty เป็นข้อมูลที่ได้มาจากสภาวะการวัดภายใต้เงื่อนไขของความสามารถในการซ้ำค่าเดิม ค่านี้จึงมักถูกเรียกว่า ความสามารถในการทำซ้ำ (Repeatability)

2.6.2 การประมาณค่า Type B Standard Uncertainty

การประมาณค่า Type B Standard Uncertainty เป็นการประมาณโดยใช้ข้อมูลจากแหล่งต่าง ๆ ทางวิชาการมาพิจารณาประกอบการประเมิน และค่าความคลาดเคลื่อนเชิงระบบถูกนำมาประมาณค่าเป็น Type B Standard Uncertainty ดังนั้น ผู้ทำการประเมินจึงต้องมีความรู้และความเข้าใจกับระบบการวัดนั้น ๆ เพื่อสามารถระบุแหล่งของความไม่แน่นอนที่มาจากความคลาดเคลื่อนเชิงระบบได้อย่างครบถ้วน เช่น ความผิดพลาดของมาตรฐาน ความไม่แน่นอนที่มาจาก การสอบเทียบมาตรฐาน ความละเอียดในการวัด วิธีการสอบเทียบ สภาวะแวดล้อมในการสอบเทียบ เป็นต้น ซึ่งในการประเมินผู้ปฏิบัติงานต้องมีข้อมูลขนาดของความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นและประเมินลักษณะการกระจายของค่าความคลาดเคลื่อนนั้น โดย UKAS M3003 ได้ให้ข้อมูลการประมาณค่า Type B Standard Uncertainty ที่เกิดขึ้นดังนี้

แหล่งความไม่แน่นอนของข้อมูลที่มีลักษณะการกระจายแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular Probability Distribution) สามารถคำนวณค่า Type B Standard Uncertainty จากสมการที่ 2.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$u = a / \sqrt{3} \quad (2.22)$$

เมื่อ a ค่าความละเอียดของเครื่องมือวัด

แหล่งความไม่แน่นอนของข้อมูลที่มีลักษณะการกระจายเป็นแบบสามเหลี่ยม (Triangular Probability Distribution) สามารถคำนวณค่า Type B Standard Uncertainty จากสมการที่ 2.23

$$u = a / \sqrt{6} \quad (2.23)$$

แหล่งความไม่แน่นอนของข้อมูลที่มีลักษณะการกระจายเป็นรูปตัวยู (U-Shape Probability Distribution) สามารถคำนวณค่า Type B Standard Uncertainty จากสมการที่ 2.24

$$u = a / \sqrt{2} \quad (2.24)$$

2.6.3 Combined Standard Uncertainty : $U_c(y)$

ในการประมาณค่า Type A Standard Uncertainty และ Type B Standard Uncertainty ล้วนเป็นส่วนประกอบของ Combined Standard Uncertainty แสดงดังสมการที่ 2.25

$$U_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N C_i^2 u^2(x_i)} \equiv \sqrt{\sum_{i=1}^N u^2(y)} \quad (2.25)$$

โดยที่

C_i คือ Sensitivity coefficient อัตราการเปลี่ยนแปลงของอินพุตซึ่งส่งผลต่อเอาต์พุต

$u(x_i)$ คือ ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจาก Input ต่าง ๆ

$u(y)$ คือ ค่าความไม่แน่นอนของ Output ย่อย ๆ แต่ละตัว

2.6.4 Expanded Uncertainty

เมื่อความไม่แน่นอนแบบ Combined standard uncertainty ยังมีความเชื่อมั่นไม่เพียงพอที่จะใช้ในภาคปฏิบัติซึ่งสำหรับเครื่องมือวัดแล้วควรมีค่าเป็น 95% ดังนั้นความไม่แน่นอนแบบ Combined standard uncertainty ต้องมาดำเนินการต่อโดยนำค่าคงที่ที่เหมาะสมมาคูณเพื่อให้มีระดับความเชื่อมั่นมากขึ้น ซึ่งตัวคูณที่เหมาะสมสามารถเลือกได้จากตาราง

เอกสารนี้ใช้เพื่ออธิบายวิธีการคำนวณความไม่แน่นอนแบบ Combined standard uncertainty เพื่อกำหนดข้อมูลเบื้องต้นสองตัว คือ ค่า Confidence level โดยทั่วไปผู้ทำการคำนวณไม่ควรนิ่งนอนใจๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัดต้องเลือกให้เหมาะสมกับการใช้งานโดยสามารถเลือกได้จากตาราง t-Distribution เช่น 95% 95.45% 97% และค่า Effective Degree of Freedom องศาความเป็นอิสระของการวัดในการวัดนั้นมีค่าเท่ากับจำนวนครั้งที่ทำการวัดลบออกด้วย 1 สำหรับการวัดที่มีตัวแปรอินพุตเพียงค่าเดียว แต่ในทางปฏิบัตินั้นมี อินพุตเกี่ยวข้องหลายตัว ดังนั้นจึงต้องประเมินค่าองศาความเป็นอิสระรวมทั้งระบบ ซึ่ง ISO เรียกค่านี้อีกว่า Effective Degree of Freedom สามารถคำนวณได้จาก

$$V_{eff} = \frac{U_c^4(y)}{\sum_{i=1}^n \frac{U_i^4(y)}{v_i}} \quad (2.26)$$

โดยที่ V_{eff} คือ Effective Degree of freedom
 $U_c(y)$ คือ Combination Standard Uncertainty
 $U_i(y)$ คือ Uncertainty ของ Output แต่ละตัว
 v_i คือ Degree of Freedom ของแต่ละตัว
 n คือ จำนวนครั้งที่ทำการวัด

Expanded Uncertainty สามารถคำนวณได้จากสมการ

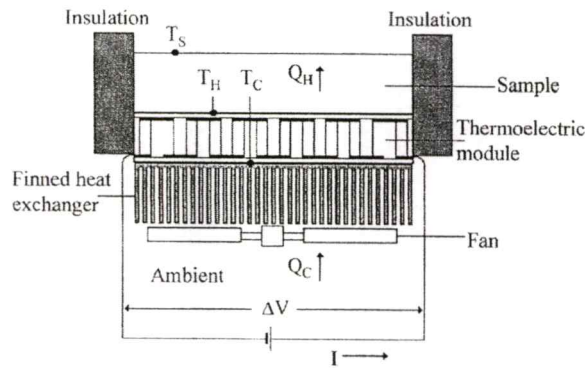
$$U = tU_c \quad (2.27)$$

โดยที่ U คือ Expanded Uncertainty
 t คือ Coverage Factor ที่ได้จากการเปิดตาราง t-Distribution
 U_c คือ Combination Standard Uncertainty

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Gonza'lez-Medizabal et al. [14] ทดลองวัดประสิทธิภาพการนำความร้อนของวัสดุที่ในช่วงมีสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำและอาหารในเขตร้อน ได้แก่ แผ่นกระจกทนความร้อน (Plexiglass) แบลคคาไลท์ (Bakelite) แครอท ยัคคา (Yucca) และหัวบีท (Sugarbeet) โดยวิเคราะห์ค่าการนำความร้อนเมื่อมีการถ่ายเทความร้อนในสภาวะที่อุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งเป็นวิธีที่อยู่ภายใต้กฎฟูเรียร์ โดยหลักการหาค่าการนำความร้อนในลักษณะนี้ต้องการค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิสองตำแหน่งในทิศทางการไหลของความร้อน ดังแสดงดังรูปที่ 2.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 ชุดการทดลองหาสัมประสิทธิ์การนำความร้อน[14]

ชุดทดลองนี้ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกเป็นแหล่งให้ความร้อนแก่วัสดุ ซึ่งมีข้อดี คือ สามารถใช้เป็นแหล่งให้ความร้อนหรือให้ความเย็นแก่ตัวอย่างที่ใช้ทดลอง และสามารถคำนวณพลังงานที่จ่ายให้แก่ระบบได้อย่างถูกต้องจากสมการที่ 2.28 และ 2.29 เมื่อใช้เป็นแหล่งความร้อนและความเย็นตามลำดับ

$$Q_c = nq_c = \alpha_m T_c I - \frac{1}{2} I^2 R_m - K_m \Delta T \quad (2.28)$$

$$Q_H = nq_H = \alpha_m T_c I + \frac{1}{2} I^2 R_m - K_m \Delta T \quad (2.29)$$

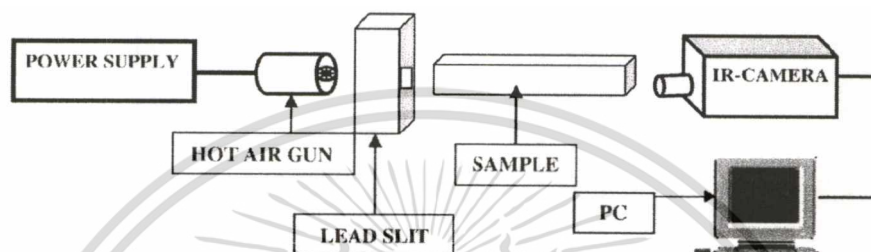
เมื่อ α_m , R_m และ K_m คือ ค่ากลางของการเปลี่ยนแปลงของค่าคุณสมบัติของโมดูลเมื่อช่วงอุณหภูมิ $T_c < T < T_H$

สามารถคำนวณสัมประสิทธิ์การนำความร้อนได้จากสมการที่ 2.1 และพบว่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากแหล่งอ้างอิง โดยข้อได้เปรียบของวิธีการนี้ คือ สามารถเลือกให้ความร้อนหรือความเย็นแก่ตัวอย่างที่ใช้ในการวัด มีค่าใช้จ่ายน้อย ใช้งานง่าย และมีประสิทธิภาพสูง

Chudzik [15] พัฒนาวิธีการวัดสมบัติทางความร้อน ได้แก่ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน และสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนของวัสดุประเภทนวน โดยใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนในการวัดค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงบริเวณผิวของวัสดุ ใช้วิธีการแก้ปัญหาแบบ Coefficient inverse และ Artificial neural network โดยอาศัยการถ่ายเทความร้อนภายในวัสดุแบบ 3 มิติ จากงานวิจัยพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ทั้งสองของโพลีโพรพิลีนที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกับสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ได้จากวิธีการวัดแบบ Roengen และสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนที่ได้จากวิธีการวัดแบบ Flash method

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่วารณใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Laskar et al. [43] วัดสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนของวัสดุที่เป็นของแข็ง ได้แก่ อลูมิเนียม ทองแดง และทองเหลือง โดยอาศัยหลักการให้ความร้อนแบบต่อเนื่องที่ผิวด้านหน้าของวัสดุ และใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนวัดอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาบริเวณด้านหลังของตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 2.10 พบว่าได้ค่าที่ถูกต้องและมีค่าใกล้เคียงกับแหล่งอ้างอิง โดยข้อได้เปรียบของวิธีการนี้ คือ ไม่จำเป็นต้องใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนที่มีความละเอียดสูงและมีราคาแพง



รูปที่ 2.10 ชุดอุปกรณ์การหาสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนของวัสดุ [40]

Moreira et al. [16] ประมาณค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุอีพอกซีนาโนคอมโพสิตซึ่งผสมกับโลหะอนุภาคนาโน โดยใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนวัดอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงและใช้แหล่งให้ความร้อนด้วยเทอร์โมอิเล็กทริก พบว่าวิธีดังกล่าวสามารถใช้หาสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุนาโนพาร์ทิเคิลที่เป็นพอลิเมอร์ได้

Kwon and Lee [44] ประมาณค่าความไม่แน่นอนของระบบการวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของเหลวที่สร้างขึ้นเปรียบเทียบกับวิธี Hot-wire ในงานวิจัยได้ใช้โทลูอินเป็นตัวอย่างทดสอบซึ่งได้ผลความไม่แน่นอนเท่ากับ $\pm 0.50\%$ เมื่อทดสอบที่อุณหภูมิต่ำกว่า $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $\pm 0.96\%$ ที่อุณหภูมิเท่ากับ $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งค่าความไม่แน่นอนดังกล่าวอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้

บทที่ 3

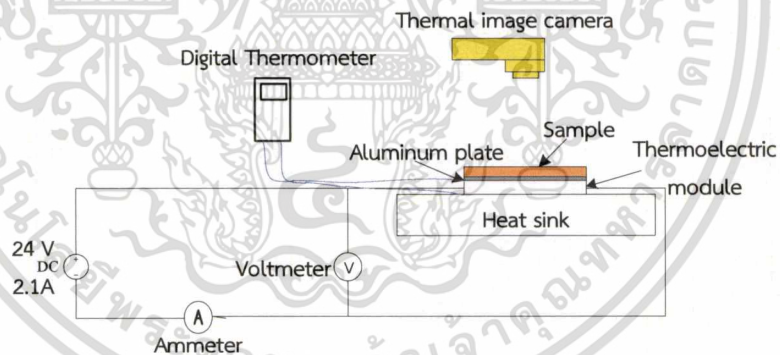
การออกแบบและการดำเนินงาน

ในบทนี้กล่าวถึงขั้นตอนการศึกษาวิจัยและการออกแบบชุดทดลองวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อน เนื้อหาประกอบด้วย ชุดอุปกรณ์และตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง การประมาณสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อน และการประเมินค่าความไม่แน่นอนของระบบวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อน

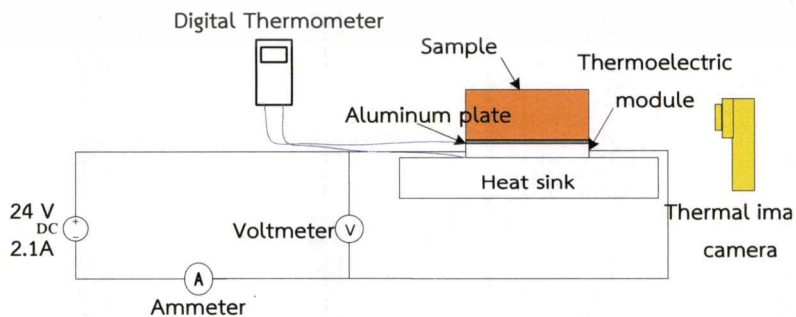
3.1 ชุดอุปกรณ์และตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 ชุดอุปกรณ์

ระบบการสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อน ประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก 2 ส่วน คือ ชุดกำเนิดความร้อนพร้อมระบบควบคุม และเครื่องมือวัด อุณหภูมิ แสดงดังรูปที่ 3.1



(ก) ชุดอุปกรณ์ทดลองภายใต้สภาวะคงตัว



(ข) ชุดอุปกรณ์ทดลองภายใต้สภาวะไม่คงตัว

รูปที่ 3.1 ชุดอุปกรณ์ทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1.1 ชุดกำเนิดความร้อนพร้อมระบบควบคุม

แหล่งควบคุมและจ่ายความร้อนประกอบด้วยแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก รุ่น CP 08, 127, 06, L1, W 4.5 (รูปที่ 3.2) โดยค่ากระแสสูงสุด คือ 2.1 A โวลต์สูงสุด คือ 15.4 V พลังงานสูงสุด คือ 18.1 W ค่าอุณหภูมิแตกต่างกันสูงสุด คือ 67 °C เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานความร้อนหรือความเย็นสามารถให้พลังงานได้ทั้งสภาวะการทำความร้อนและความเย็น แหล่งให้ความร้อนชนิดนี้มีข้อได้เปรียบ คือ ให้ความร้อนเท่ากันตลอดทั้งแผ่น สามารถควบคุมอุณหภูมิของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิดปรับได้ (Adjust DC power supply) รุ่น BAKU BK1502DD (รูปที่ 3.3) โดยจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ 0.6-2.1 A และจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ 0-15 V ใช้มัลติมิเตอร์ รุ่น Agilent 34401 A (รูปที่ 3.4) วัดค่ากระแสและแรงดันที่ป้อนให้กับแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก และติดตั้งระบายความร้อนอลูมิเนียมเพื่อช่วยระบายความร้อนจากความร้อนสะสมและกระจายความร้อนบริเวณผิวบริเวณด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริก

รูปที่ 3.2 เทอร์โมอิเล็กทริก รุ่น CP 08,127,06,L1,W4.5



รูปที่ 3.3 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิดปรับได้



รูปที่ 3.4 มัลติมิเตอร์ รุ่น Agilent 34401A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1.2 เครื่องมือวัดอุณหภูมิ

เครื่องมือวัดอุณหภูมิ ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ดิจิตอลเทอร์โมมิเตอร์และกล้องถ่ายภาพความร้อน โดยในการทดลองใช้ดิจิตอลเทอร์โมมิเตอร์แบบสัมผัส FLUKE รุ่น 52 II (รูปที่ 3.5 ก)) รับสัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิลแบบสัมผัสชนิดเค (K-type) (รูปที่ 3.5 ข)) ใช้วัดอุณหภูมิบริเวณผิวบริเวณด้านบน (ด้านเย็น) ผิวบริเวณด้านล่าง (ด้านร้อน) ของเทอร์โมอิเล็กทริก และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม โดยมีระดับความแม่นยำที่ $\pm(0.05\%+0.3^{\circ}\text{C})$ และประยุกต์การวัดอุณหภูมิของวัสดุแบบไม่สัมผัสโดยนำกล้องถ่ายภาพความร้อน FLUKE รุ่น TI 400 (รูปที่ 3.5 ค)) ซึ่งมีความละเอียด 320×240 พิกเซล รับรังสีอินฟราเรดในช่วงความยาวคลื่น $7.5\text{-}14 \mu\text{m}$ ช่วงการวัดอุณหภูมิ -20°C ถึง $1,200^{\circ}\text{C}$ ความไวต่ออุณหภูมิ (Thermal sensitivity) เท่ากับ 0.05 K ค่า FOV เท่ากับ $24^{\circ}\text{H} \times 17^{\circ}\text{V}$ ค่า IFOV เท่ากับ 1.31 mRad และความถูกต้องของการวัดเท่ากับ $\pm 2^{\circ}\text{C}$ โดยในการใช้งานควรกำหนดค่าอุณหภูมิพื้นหลัง (Background temperature) และสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีให้ถูกต้องตามคุณสมบัติของวัสดุนั้น ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.5



ก) ดิจิตอลเทอร์โมมิเตอร์ ข) เทอร์โมคัปเปิล Type k ค) กล้องถ่ายภาพความร้อน
รูปที่ 3.5 เครื่องมือวัดอุณหภูมิ

3.1.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง (Sample)

ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ วัสดุทางวิศวกรรมและวัสดุทางชีวภาพ

3.1.2.1 วัสดุทางวิศวกรรม

วัสดุทางวิศวกรรมที่ใช้ในการทดลองเป็นวัสดุที่มีสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำ ได้แก่ แผ่นออลิติก ฉนวนความร้อนพอลิเอทิลีนชนิดครอสลิงค์แบบเซลล์ปิด (PEX) และฉนวนความร้อนโพลีสไตรีนแบบอัดรีด (Extruded Polystyrene; EPS) มีความหนา 0.2 0.8 และ 3 เซนติเมตร

เอกสารที่มีลำดับที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2.2 วัสดุชีวภาพ

ในการทดลองได้ทดสอบกับวัสดุทางชีวภาพ ได้แก่ มันฝรั่ง และแอปเปิล ซึ่งแอปเปิลและมันฝรั่งที่นำมาทดลองมีความชื้นฐานเปียก 87 % (WD) และ 75 % (WD) ตามลำดับ โดยตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีความหนา 2 มิลลิเมตร

3.2 การวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อน

เตรียมตัวอย่างให้มีขนาด 2.5×2.5 เซนติเมตร โดยมีพื้นที่ 6.25 ตารางเซนติเมตร และติดตั้งระบบการดั่งแสดงในรูปที่ 3.1 กำหนดให้อุณหภูมิห้องมีค่าเท่ากับ 25 ± 2 °C จากนั้นจ่ายกระแสจากแหล่งจ่ายกระแสตรงให้แก่แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก จนผิวด้านเย็นของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกมีพลังงานคงที่ (อุณหภูมิบริเวณผิวด้านเย็นคงที่) วางวัสดุทดลองลงบนแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก บันทึกอุณหภูมิของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน และบันทึกอุณหภูมิห้อง อุณหภูมิของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกด้านร้อนและด้านเย็นด้วยดิจิตอลเทอร์โมมิเตอร์ โดยในการทดลองได้บันทึกค่าอุณหภูมิของตัวอย่างและแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกทุก ๆ 10 วินาที ตั้งแต่เริ่มวางตัวอย่าง จนกระทั่งอุณหภูมิของตัวอย่างมีค่าคงที่หรือเข้าสู่ช่วงการถ่ายเทความร้อนในสภาวะอุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

3.2.1 การวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อน เมื่อวัสดุถ่ายเทความร้อนในสภาวะอุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

การนำความร้อนของวัสดุเมื่อเป็นการถ่ายเทความร้อนในสภาวะอุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา อาศัยหลักการถ่ายเทความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ มีทิศทางเดียวกับอัตราการนำความร้อนผ่านวัสดุต่อพื้นที่หรือค่าการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่ซึ่งเป็นสัดส่วนกับความลาดชันของอุณหภูมิ และสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ ซึ่งเป็นไปตามกฎของการถ่ายเทความร้อนหรือกฎของฟูเรียร์แสดงดังสมการที่ 2.1 [2]

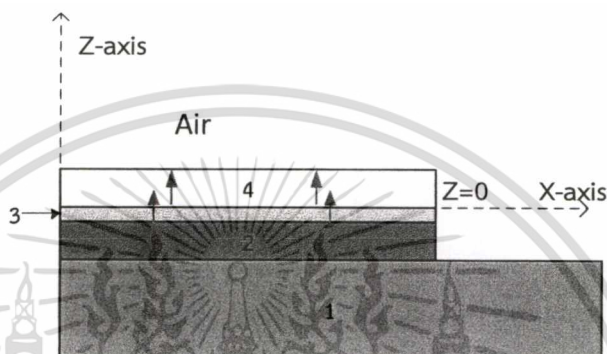
โดยการถ่ายเทความร้อนของวัสดุที่มาทดสอบมีการถ่ายเทความร้อนแบบมิติเดียวแสดงในรูปที่ 3.6

โดยมีสมมติฐานการทดลองสำหรับการวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและการกระจายความร้อนของวัสดุ ดังนี้

- 1) แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกให้อัตราความร้อนคงที่และมีค่าเท่ากันตลอดทั้งแผ่น
- 2) อุณหภูมิของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกมีค่าเท่ากับอุณหภูมิของแผ่นส่งผ่านความร้อนและมีค่าเท่ากับอุณหภูมิด้านล่างของวัสดุ
- 3) การคำนวณการถ่ายเทความร้อนของวัสดุเป็นการถ่ายเทความร้อนแบบมิติเดียว (แกน Z)
- 4) ค่าคุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุมีค่าคงที่ตลอดการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

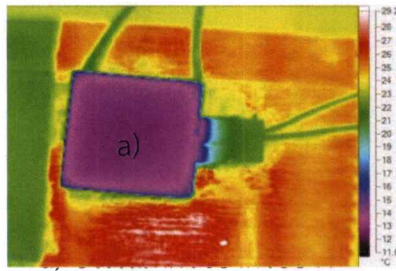
- 5) บริเวณผิวด้านบนของแผ่นส่งผ่านความร้อนและวัสดุที่ใช้ทดลองไม่มีการสูญเสียพลังงานจากการพาความร้อนของสิ่งแวดล้อมและการสูญเสียความร้อนจากการแผ่รังสีของวัสดุ เนื่องจากมีอุณหภูมิต่ำ
- 6) ค่าพลังงานความร้อนจากแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกขึ้นกับอุณหภูมิด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก
- 7) วัดอุณหภูมิในช่วงที่พลังงานที่ให้แก่ตัวอย่างคงที่



- (1) แผงระบายความร้อน (Heat sink) (2) แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก (3) แผ่นฉนวนนิยม
(4) วัสดุตัวอย่าง

รูปที่ 3.6 แผนภาพตัวแทนของการวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและการกระจายความร้อน

เมื่อพิจารณาสมมติฐานดังกล่าวร่วมกับกฎทรงพลังงาน (Conservation of energy) และกำหนดให้เป็นการถ่ายเทความร้อนแบบมิติเดียว (แกน Z) เนื่องจากวัสดุที่นำมาทดสอบมีอัตราส่วนของความหนาแน่นน้อยมากเมื่อเทียบกับพื้นที่หน้าตัดของวัสดุ ดังนั้นจึงสามารถหาสัมประสิทธิ์การนำความร้อนจากสมการที่ 2.1 โดยค่าพลังงานที่ถ่ายเทให้กับวัสดุสามารถคำนวณได้จากสมการถ่ายเทความร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกแสดงดังสมการที่ 2.6 หรือ 2.7 ค่าอุณหภูมิที่แตกต่างระหว่างเทอร์โมอิเล็กทริกและผิวของตัวของวัสดุสามารถวัดได้จากดิจิตอลเทอร์โมมิเตอร์และกล้องถ่ายภาพความร้อนตามลำดับ ในการวัดอุณหภูมิของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกไม่สามารถใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนจากบริเวณด้านข้างได้เนื่องจากภาพถ่ายความร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกมีพื้นที่การวัดน้อยกว่าค่า IFOV ของกล้อง ซึ่งพื้นที่ IFOV สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.17 แต่ในการทดลองสามารถวัดอุณหภูมิที่ผิวของตัวอย่างด้วยภาพถ่ายความร้อนจากมุมบน แสดงดังรูปที่ 3.7 และเมื่อได้สัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่เกิดขึ้น สามารถนำมาประมาณสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนของวัสดุด้วยวิธีการตรวจสอบทางอ้อม จากความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.3



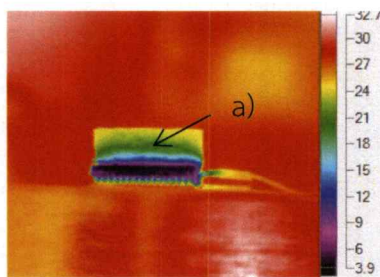
รูปที่ 3.7 ภาพถ่ายทางความร้อนเมื่อวัสดุถ่ายเทความร้อนในสภาวะอุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

3.2.2 การวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนเมื่อวัสดุถ่ายเทความร้อนในสภาวะอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงตามเวลา

การวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนของวัสดุในสภาวะอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงตามเวลา อาศัยการถ่ายเทความร้อนของวัสดุแบบ Semi-infinite solid ในกรณีที่อุณหภูมิที่ผิวถูกทำให้เปลี่ยนแปลงและคงไว้ที่ค่า T_s แสดงดังสมการที่ 2.15 โดยมีสมมติฐานดังนี้

- 1) แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกให้อัตราความร้อนคงที่และมีค่าเท่ากันตลอดทั้งแผ่น
- 2) อุณหภูมิของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกมีค่าเท่ากับอุณหภูมิของแผ่นส่งผ่านความร้อนและมีค่าเท่ากับอุณหภูมิด้านล่างของวัสดุ
- 3) ค่าคุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุมีค่าคงที่ตลอดการทดลอง
- 4) บริเวณผิวด้านบนของแผ่นส่งผ่านความร้อนและวัสดุที่ใช้ทดลองไม่มีการสูญเสียพลังงานจากการพาความร้อนของสิ่งแวดล้อมและการสูญเสียความร้อนจากการแผ่รังสีของวัสดุ เนื่องจากมีอุณหภูมิต่ำ
- 5) ค่าพลังงานความร้อนจากแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกขึ้นกับอุณหภูมิด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก
- 6) บันทึกข้อมูลในช่วงอุณหภูมิด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกคงที่

เมื่อพิจารณาสมมติฐานดังกล่าวร่วมกับการถ่ายเทความร้อนในสภาวะ Semi-infinite solid แสดงดังสมการที่ 2.15 โดยใช้เครื่องมือวัดอุณหภูมิวัดอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงภายในวัสดุด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนแสดงดังรูปที่ 3.8 เนื่องจากบริเวณการวัดอุณหภูมิของวัสดุที่นำมาทดสอบมีพื้นที่การวัดมากกว่าค่า IFOV ของกล้องจึงทำให้สามารถใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนวัดอุณหภูมิได้ และวัดอุณหภูมิของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกด้วยดิจิตอลเทอร์โมมิเตอร์เนื่องจากภาพถ่ายความร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกมีพื้นที่การวัดน้อยกว่าค่า IFOV จากนั้นนำค่าสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนดังกล่าวมาประมาณค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุจากความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.3 โดยกำหนดให้ค่าความจุความร้อนจำเพาะและค่าความหนาแน่นของวัสดุมีค่าคงที่ตลอดการทดลองแสดงดังตารางที่ 2.4 และตารางที่ 2.6 ตามลำดับ



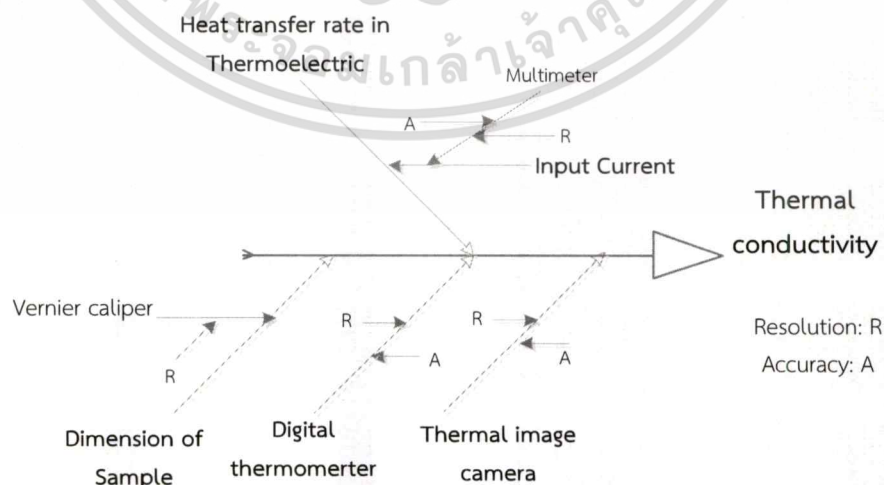
a) บริเวณที่ผิวของตัวอย่าง

รูปที่ 3.8 ภาพถ่ายทางความร้อนการถ่ายเทความร้อนเมื่อวัสดุถ่ายเทความร้อนในสภาวะอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงตามเวลา

3.3 การประเมินความไม่แน่นอนในการวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อน

3.3.1 การประเมินความไม่แน่นอนของระบบวัดสัมประสิทธิ์นำความร้อนและกระจายความร้อนเมื่อวัสดุถ่ายเทความร้อนในสภาวะอุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

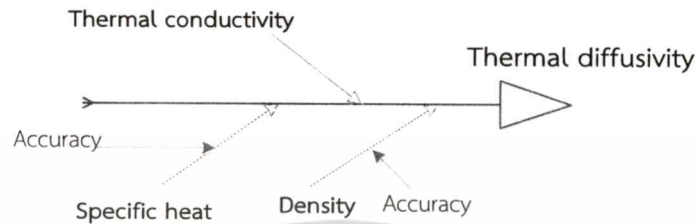
การประมาณสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสามารถประมาณค่าได้จากสมการที่ 2.1 โดยพารามิเตอร์ต่าง ๆ ส่งผลทำให้ค่าความไม่แน่นอนระบบเกิดขึ้นประกอบด้วย ค่าพลังงานที่จ่ายให้กับเทอร์โมอิเล็กทริก ความหนาของวัสดุ และอุณหภูมิ โดยค่าพลังงานที่จ่ายให้กับเทอร์โมอิเล็กทริกเกิดจากค่ากระแสที่จ่ายให้กับเทอร์โมอิเล็กทริก ค่าอุณหภูมิ และค่าคุณสมบัติของเทอร์โมอิเล็กทริก นั้น ๆ ในส่วนของความหนาวัสดุที่นำมาทดสอบถูกวัดด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ และค่าอุณหภูมิที่แตกต่างระหว่างผิวด้านบนและด้านล่างของวัสดุวัดด้วยดิจิตอลเทอร์มิสเตอร์และกล้องถ่ายภาพความร้อน ดังแสดงในแผนภูมิแกงปลาที่รูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แผนภูมิแกงปลาการประเมินความไม่แน่นอนในการวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเมื่อวัสดุถ่ายเทความร้อนในสภาวะอุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารของกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์ อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

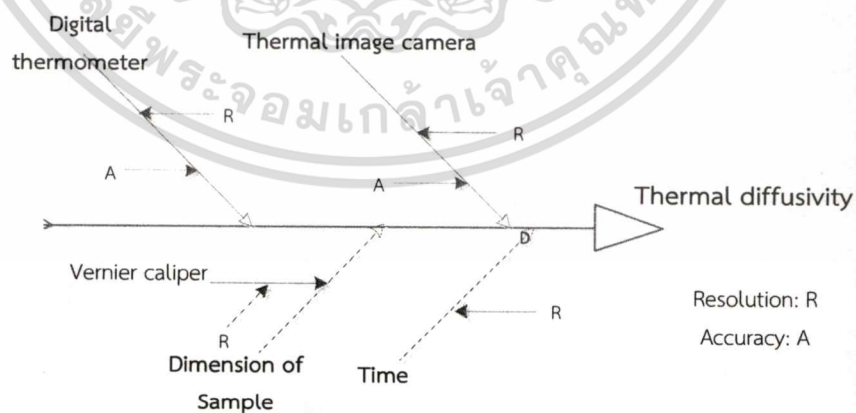
จากนั้นนำสัมประสิทธิ์การนำความร้อนดังกล่าวมาประมาณสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนในสมการที่ 2.3 ซึ่งความถูกต้องของความจุความร้อนจำเพาะและความหนาแน่นของวัสดุที่นำมาทดสอบจะส่งผลต่อค่าความไม่แน่นอนของระบบการวัดสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนแสดงดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แผนภูมิแกงปลาการประเมินความไม่แน่นอนในการวัดสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนเมื่อวัสดุถ่ายเทความร้อนในสภาวะอุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

3.3.2 การประเมินความไม่แน่นอนของระบบวัดสัมประสิทธิ์นำความร้อนและกระจายความร้อนเมื่อวัสดุถ่ายเทความร้อนในสภาวะอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงตามเวลา

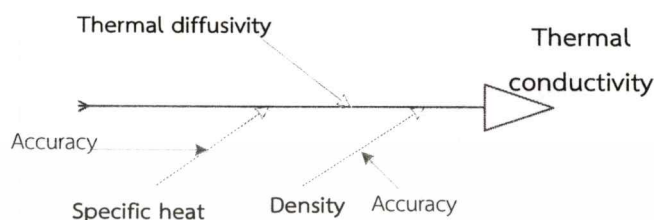
การประมาณสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนสามารถประมาณค่าได้จากสมการที่ 2.15 ซึ่งประกอบไปด้วยพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ อุณหภูมิ เวลา และตำแหน่งของจุดที่ทำกรวัด โดยค่าอุณหภูมิของเทอร์โมอิเล็กทริกบริเวณด้านบนวัดด้วยดิจิตอลเทอร์โมมิเตอร์ และใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนวัดอุณหภูมิในตำแหน่งที่กำหนด ซึ่งตำแหน่งดังกล่าววัดระยะด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ ความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นแสดงในแผนภูมิแกงปลาดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 แผนภูมิแกงปลาการประเมินความไม่แน่นอนในการวัดสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนเมื่อวัสดุถ่ายเทความร้อนในสภาวะอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงตามเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นสามารถนำสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนดังกล่าวมาประมาณค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนจากสมการที่ 2.3 ซึ่งความไม่แน่นอนในการวัดของสัมประสิทธิ์การนำความร้อนแสดงดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 แผนภูมิกำงปลากการประเมินความไม่แน่นอนในการวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเมื่อวัสดุถ่ายเทความร้อนในสภาวะอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงตามเวลา

3.3.3 ประเภทความไม่แน่นอนของระบบวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและกระจายความร้อนของวัสดุ

ค่าความไม่แน่นอนของระบบการวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนของวัสดุประกอบไปด้วย ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นจากเครื่องมือวัดอุณหภูมิด้วยดิจิตอลเทอร์โมมิเตอร์และกล้องถ่ายภาพความร้อน มัลติมิเตอร์วัดกระแสที่จ่ายให้เทอร์โมอิเล็กทริก การวัดขนาดของวัสดุ เวลา ค่าความถูกต้องของค่าความจุความร้อนจำเพาะและค่าความหนาแน่น

1) ความไม่แน่นอนจากการวัดอุณหภูมิบริเวณเทอร์โมอิเล็กทริก

การวัดอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงของเทอร์โมอิเล็กทริกทั้งด้านเย็นและด้านร้อนใช้ดิจิตอลเทอร์โมมิเตอร์ที่รับค่าสัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิล Type k โดยมีความละเอียดของเครื่องมือวัด คือ 0.1 ตำแหน่ง และความถูกต้อง คือ $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ในงานวิจัยนี้จึงวิเคราะห์ความไม่แน่นอนของการวัดจากความละเอียดและค่าความถูกต้องของเครื่องมือวัด ซึ่งเป็นค่าความไม่แน่นอนชนิด B มีการกระจายของข้อมูลแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าดังสมการที่ 2.22

2) ความไม่แน่นอนจากการวัดอุณหภูมิบริเวณตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ

การวัดอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงของวัสดุที่นำมาทดสอบในการทดลองใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนมีความละเอียดของเครื่องมือวัด คือ 0.01 ตำแหน่ง และมีความถูกต้องของเครื่องมือวัด คือ $\pm 2^{\circ}\text{C}$ จึงวิเคราะห์ความไม่แน่นอนของการวัดจากความละเอียดและค่าความถูกต้องของเครื่องมือวัดเป็นค่าความไม่แน่นอนชนิด B มีการกระจายของข้อมูลแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าดังสมการที่ 2.22

3) ความไม่แน่นอนจากการค่ากระแสไฟฟ้า

ค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเทอร์โมอิเล็กทริกเป็นปัจจัยที่ส่งผลโดยตรงกับค่าพลังงานความร้อน โดยใช้มัลติมิเตอร์สำหรับวัดค่าแรงดันของไฟฟ้า โดยมีความละเอียดเท่ากับ 0.000001 ตำแหน่ง และมีความถูกต้องของเครื่องวัดกระแสไฟฟ้าเท่ากับ ± 0.006 A จึงวิเคราะห์ความไม่แน่นอนของการวัดจากความละเอียดของเครื่องมือวัดและค่าความถูกต้องจากเครื่องมือวัดเป็นค่าความไม่แน่นอนชนิด B มีการกระจายของข้อมูลแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าดังสมการที่ 2.22

4) ความไม่แน่นอนจากการวัดระยะเวลาที่ทำการทดสอบ

ค่าความไม่แน่นอนจากการวัดระยะเวลา เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความถูกต้องของการประมาณสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุที่มีความหนา ใช้เครื่องจับเวลาที่มีค่าความละเอียดที่ 1 วินาที โดยค่าความไม่แน่นอนจากการวัดระยะเวลาเป็นค่าความไม่แน่นอนชนิด B มีการกระจายของข้อมูลแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าดังสมการที่ 2.22

5) ความไม่แน่นอนจากการวัดระยะของตัวอย่างที่นำมาทดสอบ

ค่าความไม่แน่นอนจากการวัดขนาดของตัวอย่างที่นำมาทดสอบ เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อตัวแปรพื้นที่ และความหนาของตัวอย่าง ซึ่งในการทดลองได้ใช้เวอร์เนียคาลิเปอร์เพื่อวัดขนาดของวัสดุ โดยเครื่องมือดังกล่าวมีความละเอียดเท่ากับ 0.05 ตำแหน่ง โดยค่าความไม่แน่นอนจากการวัดขนาดเป็นค่าความไม่แน่นอนชนิด B มีการกระจายของข้อมูลแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าดังสมการที่ 2.22

6) ความไม่แน่นอนจากการการแทนค่าความหนาแน่นของวัสดุ

การประมาณสัมประสิทธิ์การนำความร้อนหรือการกระจายความร้อนของวัสดุ จำเป็นต้องทราบค่าความหนาแน่นของวัสดุเพื่อนำมาใช้ในการคำนวณ โดยในงานวิจัยนี้ได้อ้างอิงค่าความหนาแน่นของวัสดุต่าง ๆ จากงานวิจัยอื่น ดังนั้นความไม่แน่นอนเกิดจากความถูกต้องของข้อมูล ดังนั้นจึงสามารถประเมินความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นจากความหนาแน่นของวัสดุได้ดังสมการที่ 2.22 ซึ่งเป็นค่าความไม่แน่นอนชนิด B และมีการกระจายของข้อมูลแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า

7) ความไม่แน่นอนจากการการแทนค่าความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุ

ความไม่แน่นอนจากการแทนค่าความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุเกิดจากความถูกต้องของการแทนค่าความจุความร้อนจำเพาะของตัวอย่างที่นำมาทดสอบ ดังนั้นจึงสามารถวิเคราะห์ความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นจากสมการที่ 2.22 ซึ่งเป็นค่าความไม่แน่นอนชนิด B และมีการกระจายของข้อมูลแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า

การประเมินความไม่แน่นอนของระบบการวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและการกระจายความร้อนในสถานะที่อุณหภูมิของวัสดุไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาและเปลี่ยนแปลงตามเวลา แสดงในหัวข้อ 3.3.1 และ 3.3.2 ตามลำดับซึ่งเกิดจากปัจจัยต่างๆ ดังหัวข้อที่ 3.3.3 และจะแสดงค่าความไม่แน่นอนของระบบการวัดต่อไปในบทที่ 4

บทที่ 4

การทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในบทนี้กล่าวถึงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิตัวอย่างของวัสดุระหว่างกระบวนการวิเคราะห์ การวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนของวัสดุทางวิศวกรรมและวัสดุทางชีวภาพ และความไม่แน่นอนของระบบการวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อน

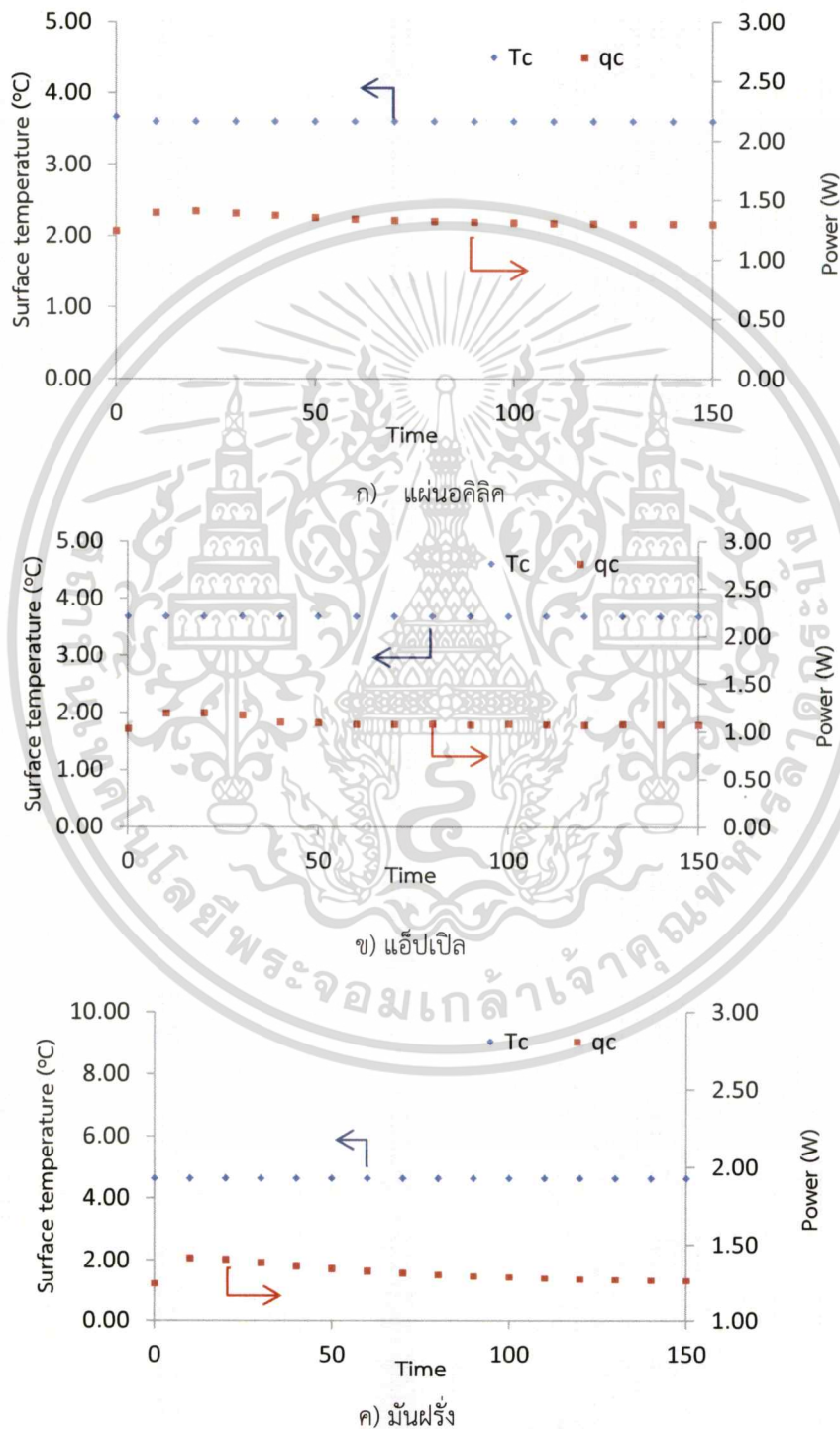
4.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวัสดุในระหว่างกระบวนการ

จากการวิเคราะห์กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก (T_c) และพลังงานจากเทอร์โมอิเล็กทริก (q_c) ที่ให้กับวัสดุที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ แผ่นออกไซด์ ฉนวนความร้อน พอลิเอทีลีนชนิดครอสลิงค์แบบเซลล์ปิด (PEX) และฉนวนความร้อนโพลีสไตรีนแบบอัดรีด (EPS) แอ็ปปิเปิล และมันฝรั่ง แสดงดังรูปที่ 4.1 พบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิของเทอร์โมอิเล็กทริกด้านเย็นและพลังงานที่เทอร์โมอิเล็กทริกให้กับตัวอย่างของตัวอย่าง แผ่นออกไซด์ แอ็ปปิเปิล และมันฝรั่ง มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่เหมือนกัน โดยอุณหภูมิและพลังงานจากเทอร์โมอิเล็กทริกของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นตั้งแต่วางวัสดุลงบนแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก เนื่องจากเกิดการสูญเสียพลังงานให้กับตัวอย่างในตอนเริ่มวางวัสดุลงบนแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก หลังจากนั้นค่าพลังงานและอุณหภูมิด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกจะเริ่มถ่ายเทพลังงานจะเข้าสู่ช่วงคงที่ (Steady state) หลังจาก 60 40 และ 70 วินาที ตามลำดับ ซึ่งเป็นการถ่ายเทพลังงานให้กับตัวอย่าง

เมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก (T_c) และอุณหภูมิออกไซด์ที่ใช้ในการทดลองพบว่า เมื่อเริ่มวางแผ่นออกไซด์ แอ็ปปิเปิล และมันฝรั่ง บนแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกอุณหภูมิของตัวอย่างมีอุณหภูมิลดลงและส่งผลให้แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นในช่วงแรกเนื่องจากสูญเสียพลังงานให้กับตัวอย่าง แสดงรูปที่ 4.2 และหลังจากเวลา 70 90 และ 110 วินาที ตามลำดับ อุณหภูมิทั้งสองจะเริ่มมีอุณหภูมิคงที่เนื่องจากเป็นจุดที่เริ่มเข้าสู่การถ่ายเทความร้อนภายใต้สภาวะคงตัว ดังนั้นในการวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของแผ่นออกไซด์ แอ็ปปิเปิล และมันฝรั่ง สามารถใช้วิธีการหาค่าการนำความร้อนภายใต้สภาวะคงตัว แต่ในตัวอย่าง ฉนวน PEX และฉนวน EPS พบว่าอุณหภูมิของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกด้านเย็นมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากและเมื่อวางวัสดุบนเทอร์โมอิเล็กทริกอุณหภูมิของด้านเย็นของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกมีอุณหภูมิลดลงเนื่องจากฉนวนความร้อนมีคุณสมบัติการนำความร้อนต่ำ จึงส่งผลให้เกิดการสูญเสียอุณหภูมิที่บริเวณแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกน้อย และในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของตัวอย่าง ฉนวน PEX และ ฉนวน EPS ที่ตำแหน่ง 4 และ 6 มม. ตามลำดับ พบว่ามีอุณหภูมิด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกค่อนข้างคงที่ และ

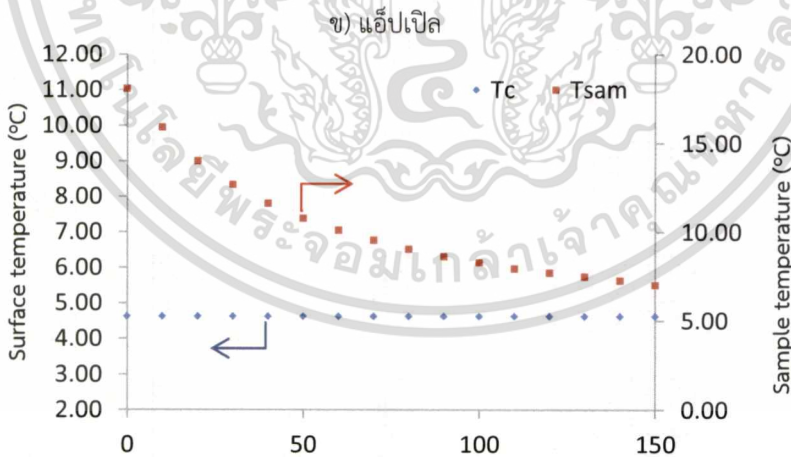
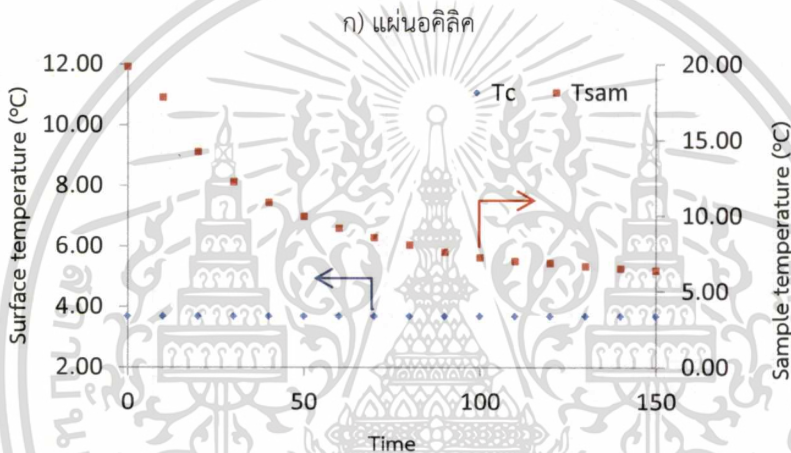
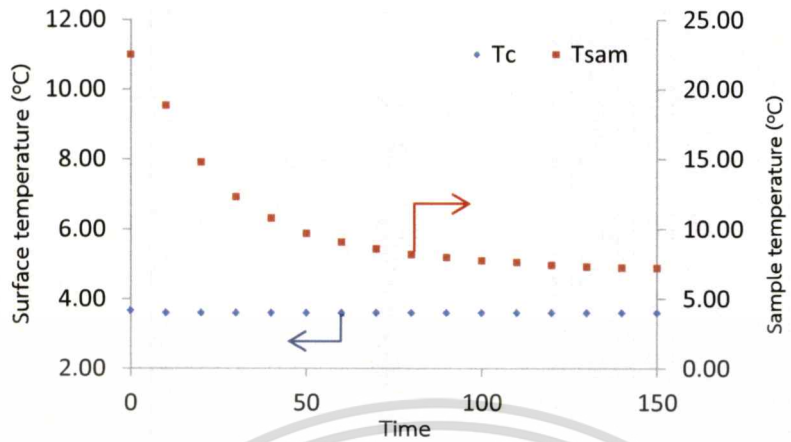
เอกสารนี้เผยแพร่โดยมูลนิธิวิจัยและพัฒนาเพื่อส่งเสริมการนำเทคโนโลยีการวิจัยและพัฒนาไปใช้
ไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งสามารถประมาณค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุโดยวิธีการถ่ายเทความร้อนในสภาวะไม่คงตัวภายใต้การถ่ายเทความร้อนแบบ Semi-infinite solid ซึ่งวัสดุทั้งสองมีความหนาของวัสดุมากจึงทำให้ด้านบนของวัสดุที่นำมาทดสอบไม่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจึงไม่สามารถประมาณค่าภายใต้วิธีการถ่ายเทความร้อนแบบคงตัวได้



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก (T_c ; °C), พลังงานของเทอร์-

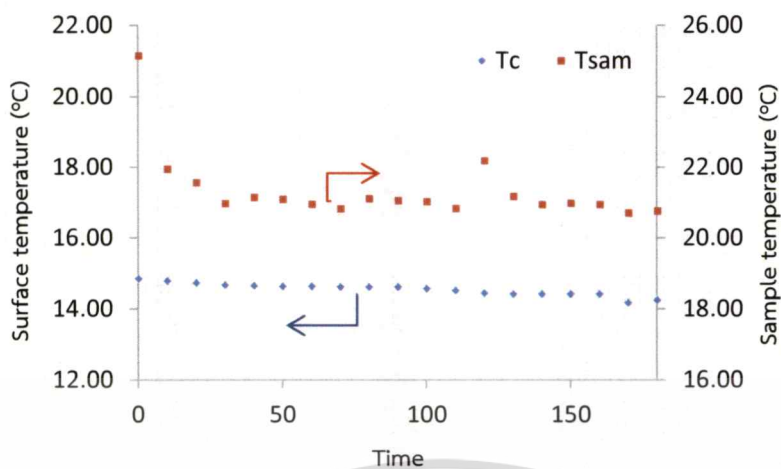
โมอิเล็กทริกด้านเย็น (q_c ; watts) และเวลา (Time; s) เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



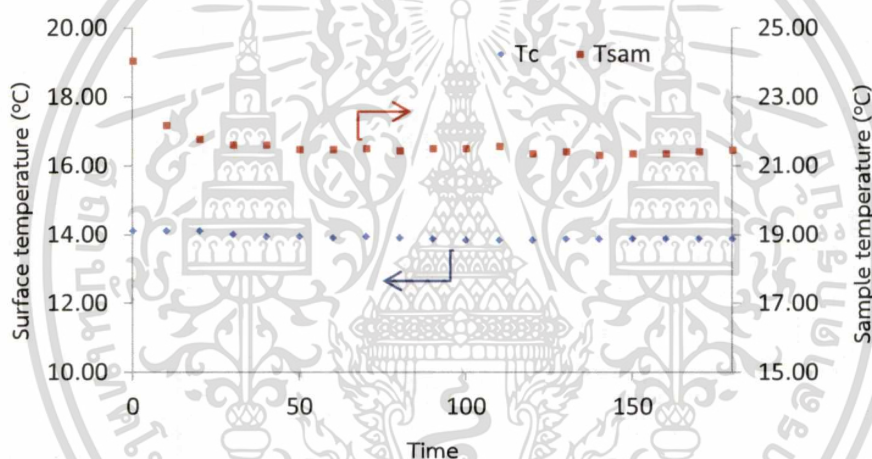
ค) มันฝรั่ง

รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก (T_c ; °C), อุณหภูมิของตัวอย่าง (T_{sam} ; °C) และเวลา (Time; s)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ง) ฉนวนความร้อน PEX



ด) ฉนวนความร้อน EPS

รูปที่ 4.2 (ต่อ) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิพื้นเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก (T_c ; °C), อุณหภูมิของตัวอย่าง (T_{sam} ; °C) และเวลา (Time; s)

4.2 การวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวัสดุที่นำมาทดสอบแต่ละชนิดพบว่าสามารถวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนได้ 2 ลักษณะ คือ การวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเมื่อวัสดุถ่ายเทความร้อนในสภาวะอุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาและเปลี่ยนแปลงตามเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1 การวัดประมาณสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเมื่อวัสดุถ่ายเทความร้อนในสภาวะอุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

ในการประมาณสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ ได้แก่ แผ่นออลิติก แอ็ปเปิล และมันฝรั่ง เป็นการวัดในสภาวะอุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยขั้นตอนแรกได้ทำการวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุทางวิศวกรรมเพื่อทดสอบระบบการวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อน โดยได้นำสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมาเปรียบเทียบกับสัมประสิทธิ์การนำความร้อนจากเอกสารอ้างอิง พบว่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของออลิติกที่มีความหนา 2 มิลลิเมตร จากการทดลองมีค่าเท่ากับ 0.195 ± 0.0208 W/m.K และสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของออลิติกจากแหล่งอ้างอิง [26] เท่ากับ 0.19 W/m.K ซึ่งพบว่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของออลิติกที่ได้จากการทดลองมีค่าความคลาดเคลื่อน 0.00572 W/m.K หรือ 3.01%

จากนั้นทำการทดลองวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุทางชีวภาพ ได้แก่ มันฝรั่ง และแอ็ปเปิล ความหนา 2 มิลลิเมตร พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของแอ็ปเปิลจากการทดลองเท่ากับ 0.425 ± 0.0141 W/m.K และค่าจากแหล่งอ้างอิง [6, 17, 27] เท่ากับ $0.342-0.513$ W/m.K ซึ่งพบว่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของแอ็ปเปิลที่ได้จากการทดลองมีค่าอยู่ในช่วงของผลการทดลองจากแหล่งอ้างอิงและมีค่าความคลาดเคลื่อน 0.0022 W/m.K หรือ 0.5146% และได้ทำการทดลองกับมันฝรั่งที่มีความหนา 2 มิลลิเมตร พบว่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีค่าเท่ากับ 0.537 ± 0.0199 W/m.K โดยสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของมันฝรั่งจากแหล่งอ้างอิง [28-30] เท่ากับ $0.52-0.57$ W/m.K พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อน 0.008 W/m.K หรือ 1.46% และมีค่าอยู่ในช่วงของข้อมูลจากแหล่งอ้างอิง โดยสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุในสภาวะอุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

วัสดุ	ความหนา (mm)	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W/m.K.)		อ้างอิง
		การทดลอง	งานวิจัยอื่น	
แผ่นออลิติก	2	0.195 ± 0.0208	0.19	[26]
แอ็ปเปิล	2	0.425 ± 0.0141	0.342-0.513	[6, 16, 27]
มันฝรั่ง	2	0.537 ± 0.0199	0.52-0.57	[28-30]

4.2.2 การประมาณสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเมื่อวัสดุถ่ายเทความร้อนในสภาวะอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงตามเวลา

ในการประมาณสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุฉนวน PEX และฉนวน EPS ถูกประมาณค่าต่อมาจากการวัดค่าสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนจากสมการที่ 2.3 พบว่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของฉนวน PEX ที่มีความหนา 0.8 เซนติเมตร มีค่าเท่ากับ 0.0352 ± 0.0015 W/m.K โดยสัมประสิทธิ์การนำความร้อนจากแหล่งอ้างอิง [42] เท่ากับ 0.0315-0.0383 W/m.K มีความคลาดเคลื่อน 0.0038 W/m.K หรือ 1.08% และสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของฉนวน EPS ที่มีความหนา 3 เซนติเมตร มีค่าเท่ากับ 0.0288 ± 0.00146 W/m.K โดยค่าจากแหล่งอ้างอิง [25] เท่ากับ 0.027 W/m.K ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.00185 W/m.K หรือ 6.85% โดยสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุแสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุในสภาวะอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงตามเวลา

วัสดุ	ความหนา (cm)	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W/m.K)		อ้างอิง
		การทดลอง		
		การทดลอง	งานวิจัยอื่น	
ฉนวน PEX	0.8	0.0329 ± 0.00094	0.0315-0.0383	[26]
ฉนวน EPS	3	0.0329 ± 0.00094	0.027	[25]

จากผลการทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุทั้ง 5 ชนิด ได้แก่ แผ่นอติลิก แอ็ปเปิล มันฝรั่ง ฉนวน EP และ ฉนวน EPS พบว่า มีค่าความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น เนื่องจากแอ็ปเปิลและมันฝรั่ง เป็นวัสดุทางชีวภาพทำให้มีปัจจัยอื่น เช่น ความชื้นของวัสดุ และระยะเวลาการเก็บรักษา เป็นต้น มีผลต่อค่าการนำความร้อนดังกล่าวและอาจมีการสูญเสียความชื้นของวัสดุขณะทำการทดลอง และอาจมีการสูญเสียความชื้นของวัสดุในขณะทำการทดลองในตัวอย่าง จึงส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนของค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเกิดขึ้น

4.3 การวัดสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อน

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวัสดุที่นำมาทดสอบแต่ละชนิดพบว่าสามารถวัดสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนได้ 2 ลักษณะ คือ การวัดสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนเมื่อวัสดุถ่ายเทความร้อนในสภาวะอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงตามเวลาและไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

4.3.1 การประมาณสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนของวัสดุในสภาวะอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงตามเวลา

สัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนของวัสดุสามารถหาวัดได้จากการถ่ายเทความร้อนภายใต้การถ่ายเทความร้อนแบบ Semi-infinite solid ซึ่งสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนของฉนวน PEX เท่ากับ $5.84 \times 10^{-7} \pm 0.26 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ เมื่อสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนจากแหล่งอ้างอิงมีค่าเท่ากับ $5.782 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ มีความคลาดเคลื่อน $0.062 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ หรือ 1.06% และสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนของฉนวนความร้อน EPS เท่ากับ $7.55 \times 10^{-7} \pm 0.09 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ โดยสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนจากแหล่งอ้างอิงเท่ากับ $7.2 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ ซึ่งพบว่ามีค่าความผิดพลาดเท่ากับ $0.352 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ หรือ 4.88% แสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 สัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนในสภาวะอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงตามเวลา

วัสดุ	ความหนา (cm)	สัมประสิทธิ์การกระจายความร้อน (m^2/s)		อ้างอิง
		การทดลอง	งานวิจัยอื่น	
ฉนวน PEX	0.8	$5.84 \times 10^{-7} \pm 0.26 \times 10^{-7}$	5.78×10^{-7}	-
ฉนวน EPS	3	$7.55 \times 10^{-7} \pm 0.09 \times 10^{-7}$	7.2×10^{-7}	[25]

4.3.2 การประมาณสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนของวัสดุในสภาวะอุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

สัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนของวัสดุในสภาวะนี้ สามารถหาคำนวณได้จากสัมประสิทธิ์การนำความร้อนจากผลการทดลอง ความหนาแน่น และความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุจากสมการที่ 2.3 โดยสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนของแผ่นอคิลิคที่วัดได้มีค่าเท่ากับ $1.12 \times 10^{-7} \pm 0.126 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ และค่าจากเอกสารอ้างอิง [27] เท่ากับ $1.11-1.15 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ มีความคลาดเคลื่อน $0.0075 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ หรือ 0.66% ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนของวัสดุทางชีวภาพ ได้แก่ แอ๊ปเปิลและมันฝรั่งที่มีความหนา 2 มิลลิเมตร โดยแอ๊ปเปิลมีค่าเท่ากับ $1.15 \times 10^{-7} \pm 0.044 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ และ ซึ่งค่าที่ได้จากเอกสารอ้างอิง [6, 17, 27] เท่ากับ $1.10 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ มีความคลาดเคลื่อน $0.0525 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ หรือ 4.77% ในตัวอย่างมันฝรั่งวัดค่าได้เท่ากับ $1.322 \times 10^{-7} \pm 0.126 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ และสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนที่ได้จากเอกสารอ้างอิง [28-30] เท่ากับ $1.30-1.44 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ มีความคลาดเคลื่อน $0.048 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ หรือ 3.50% ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนของวัสดุแสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 สัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนของวัสดุในสภาวะอุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

วัสดุ	ความหนา (mm)	สัมประสิทธิ์การกระจายความร้อน (m^2/s)		อ้างอิง
		การทดลอง	งานวิจัยอื่น	
แผ่นอลูมิเนียม	2	$1.122 \times 10^{-7} \pm 0.0126 \times 10^{-7}$	$1.11-1.15 \times 10^{-7}$	[26]
แอสบีสต์	2	$1.152 \times 10^{-7} \pm 0.0044 \times 10^{-7}$	1.10×10^{-7}	[6,16,27]
มันฝรั่ง	2	$1.322 \times 10^{-7} \pm 0.0126 \times 10^{-7}$	$1.30-1.44 \times 10^{-7}$	[28-30]

จากผลการทดลองพบว่าสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนของแอสบีสต์และมันฝรั่งมีค่าความเคลื่อนที่ค่อนข้างมาก เนื่องจากเป็นวัสดุทางชีวภาพซึ่งมีปัจจัยหลายอย่างส่งผลต่อการผิดพลาดของข้อมูลได้แก่ ค่าความชื้น อายุการเก็บรักษา เป็นต้น และยังมีปัจจัยการสูญเสียพลังงานที่ให้กับตัวอย่างในขณะทำการทดลองจึงทำให้เกิดค่าคลาดเคลื่อนดังกล่าวเกิดขึ้น แต่อย่างไรก็ตามค่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าวอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้เนื่องจากค่าผลการทดลองอยู่ในช่วงของค่าที่ได้จากแหล่งอ้างอิง

4.4 ความไม่แน่นอนของการวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อน

ในการพิจารณาความไม่แน่นอนของระบบวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนของวัสดุที่นำมาทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ ระบบวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและกระจายความร้อนเมื่อวัสดุถ่ายเทความร้อนในสภาวะอุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาและเปลี่ยนแปลงตามเวลา

4.4.1 ระบบวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและกระจายความร้อนเมื่อวัสดุถ่ายเทความร้อนในสภาวะอุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

ระบบการวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุในสภาวะนี้ มีองค์ประกอบที่ทำให้เกิดความไม่แน่นอนของการวัดประกอบไปด้วย ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากเทอร์โมอิเล็กทริก การวัดขนาดของตัวอย่าง อุณหภูมิของวัสดุและแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการประมาณสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุแสดงดังตารางที่ 4.5

1) ค่าความไม่แน่นอนจากอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากเทอร์โมอิเล็กทริก

ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากอัตราการถ่ายเทความร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริก มีองค์ประกอบจากค่าความละเอียดและความถูกต้องของเครื่องมือวัดกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเทอร์โมอิเล็กทริก (มัลติมิเตอร์) ซึ่งค่าความไม่แน่นอนของปัจจัยทั้งสองเป็นค่าความไม่แน่นอนชนิด B

ไม่จำกัดใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีการกระจายอุณหภูมิแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า สามารถประมาณค่าได้จากสมการที่ 2.22 และมีความสัมพันธ์ของความไม่แน่นอนของอัตราการถ่ายเทความร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกแสดงดังสมการที่ 4.1

$$u_{qc} = \sqrt{u_{(Res)}^2 + u_{(Acc)}^2} \quad (4.1)$$

เมื่อ $u_{(Res)}$ คือ ความไม่แน่นอนจากความละเอียดของมัลติมิเตอร์

$u_{(Acc)}$ คือ ความไม่แน่นอนจากความถูกต้องของมัลติมิเตอร์

เมื่อแทนค่าในสมการที่ 4.1 จะได้

$$u_{qc} = \sqrt{(0.00001/\sqrt{3})^2 + (0.006/\sqrt{3})^2}$$

$$u_{qc} = 0.00346 \text{ A}$$

2) ค่าความไม่แน่นอนจากการวัดขนาดของตัวอย่าง

ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการวัดขนาดตัวอย่าง เกิดจากค่าความละเอียดของเวอร์เนียคาลิเปอร์ที่ใช้วัด ซึ่งค่าความไม่แน่นอนของปัจจัยทั้งสองเป็นค่าความไม่แน่นอนชนิด B มีการกระจายอุณหภูมิแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า สามารถประมาณค่าได้จากสมการที่ 2.22 จะได้

$$u_D = (0.05/\sqrt{3}) = 0.02886 \text{ mm}$$

3) ค่าความไม่แน่นอนจากอุณหภูมิเทอร์โมอิเล็กทริก

ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากอุณหภูมิเทอร์โมอิเล็กทริก มีองค์ประกอบจากค่าความละเอียดและความถูกต้องของเครื่องมือวัดดิจิตอลเทอร์โมมิเตอร์ที่ใช้วัดค่าอุณหภูมิบริเวณเทอร์โมอิเล็กทริก ซึ่งค่าความไม่แน่นอนของปัจจัยทั้งสองเป็นค่าความไม่แน่นอนชนิด B มีการกระจายอุณหภูมิแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า สามารถประมาณค่าได้จากสมการที่ 2.22 และมีความสัมพันธ์ของความไม่แน่นอนแสดงดังสมการที่ 4.2

$$u_T = \sqrt{u_{(Res)}^2 + u_{(Acc)}^2} \quad (4.2)$$

เมื่อ $u_{(Res)}$ คือ ความไม่แน่นอนจากความละเอียดของดิจิตอลเทอร์โมมิเตอร์

$u_{(Acc)}$ คือ ความไม่แน่นอนจากความถูกต้องของดิจิตอลเทอร์โมมิเตอร์

เมื่อแทนค่าในสมการที่ 4.2 จะได้

$$u_T = \sqrt{(0.1/\sqrt{3})^2 + (2/\sqrt{3})^2}$$

$$u_T = 1.1561^\circ\text{C}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) ค่าความไม่แน่นอนจากการวัดอุณหภูมิด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน

ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการวัดอุณหภูมิของวัสดุด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน มีองค์ประกอบจากค่าความละเอียดและความถูกต้องจากกล้องถ่ายภาพความร้อน ซึ่งค่าความไม่แน่นอนของปัจจัยทั้งสองเป็นค่าความไม่แน่นอนชนิด B มีการกระจายอุณหภูมิแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า สามารถประมาณค่าได้จากสมการที่ 2.22 และมีความสัมพันธ์ของความไม่แน่นอนแสดงดังสมการที่ 4.2

$$u_{TI} = \sqrt{u_{(TRes)}^2 + u_{(TAcc)}^2} \quad (4.2)$$

เมื่อ $u_{(TRes)}$ คือ ความไม่แน่นอนจากความละเอียดของกล้องถ่ายภาพความร้อน

$u_{(TAcc)}$ คือ ความไม่แน่นอนจากความถูกต้องของกล้องถ่ายภาพความร้อน

เมื่อแทนค่าในสมการที่ 4.2 จะได้

$$u_{TI} = \sqrt{(0.01/\sqrt{3})^2 + (2/\sqrt{3})^2}$$

$$u_{TI} = 1.1547 \text{ } ^\circ\text{C}$$

5) ค่าความไม่แน่นอนของการวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ

ในการทดลองได้ทำการวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนจำนวน 5 ครั้ง จากนั้นนำมาประมาณค่าความไม่แน่นอนจากความคลาดเคลื่อนสุ่ม (u_{Rpt}) ซึ่งเป็นค่าความไม่แน่นอนชนิด A มีค่าเท่ากับ $\pm 0.02081 \text{ W/m.K}$

ปัจจัยที่ส่งผลต่อความไม่แน่นอนในการวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนถูกแสดงไว้ในรูปที่ 3.9 โดยกำหนดให้ตัวอย่างอซิลิคเป็นตัวแทนของการหาความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นในระบบวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเมื่อวัสดุถ่ายเทความร้อนในสภาวะอุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา แสดงผลประเมินดังตารางที่ 4.5 โดยอุณหภูมิของเทอร์โมอิเล็กทริกด้านเย็นและด้านร้อนมีค่าเท่ากับ 3.5 และ 22.2 $^\circ\text{C}$ ตามลำดับ อุณหภูมิด้านบนของอซิลิคจากกล้องถ่ายภาพความร้อนเท่ากับ 14.76 $^\circ\text{C}$ ค่ากระแสที่จ่ายให้แก่เทอร์โมอิเล็กทริก 0.36750 A ความหนาของตัวอย่างเท่ากับ 2 มิลลิเมตร โดยสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอซิลิคที่วัดได้เท่ากับ 0.195 W/m.K จากนั้นทำการคำนวณรวมจากการวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนจากระบบการโดยมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4.3

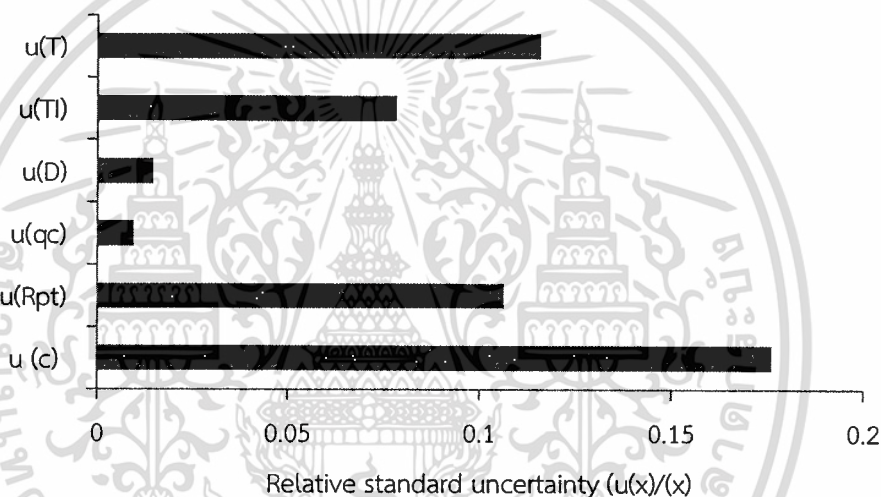
$$U_{combined} = k \times \sqrt{\left(\frac{u_{qc}}{q_c}\right)^2 + \left(\frac{u_D}{Sample_{Thickness}}\right)^2 + \left(\frac{u_T}{T}\right)^2 + \left(\frac{u_{TI}}{TI}\right)^2 + \left(\frac{u_{Rpt}}{Rpt}\right)^2} \quad (4.3)$$

$$= 0.195 \times \sqrt{\left(\frac{0.00346}{0.32}\right)^2 + \left(\frac{0.02886}{2}\right)^2 + \left(\frac{1.1561}{3.5}\right)^2 + \left(\frac{1.1547}{14.76}\right)^2 + \left(\frac{0.02081}{0.195}\right)^2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความไม่แน่นอนของการวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของคลิลิค 0.195 W/m.K มีค่าเท่ากับ 0.0345 W/m.K และเมื่อขยายความเชื่อมั่นเป็น 95.45 เปอร์เซ็นต์ โดยการเปิดตาราง t-distribution ดังภาคผนวก ก ตารางที่ 2 จากการหาค่า V_{eff} ดังสมการที่ 2.25 จะได้ค่า Coverage factor เป็น 2 แล้วนำคูณกับค่าความไม่แน่นอนรวมดังสมการที่ 2.27 จะได้ความไม่แน่นอนขยาย คือ 0.069 W/m.K คิดเป็น 35.26%

จากผลการทดลองพบว่าค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์มาตรฐานของตัวอย่างคลิลิค มีปัจจัยหลักมาจากค่าความไม่แน่นอนของดิจิตอลเทอร์โมมิเตอร์ กล้องถ่ายภาพความร้อน ความไม่แน่นอนจากความคลาดเคลื่อนสุ่ม ($u(\text{Rpt})$) เวอร์เนียคาลิปเปอร์ และมัลติมิเตอร์ ตามลำดับแสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์มาตรฐานของระบบวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเมื่ออุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของตัวอย่างคลิลิค

ตารางที่ 4.5 องค์ประกอบความไม่แน่นอนระบบวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเมื่ออุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

Uncertainty Source	Uncertainty component	Estimate value Standard uncertainty	Probability distribution
Heat Transfer rate in Thermoelectric (u_{qc})	Input Current Resolution u(IRes)	0.000001 A 3.33×10^{-13} A	Rectangular
	Input Current Accuracy u(IAcc)	± 0.006 A 1.2×10^{-5} A	
	Dimension of Sample (u_D)	Vernier caliper Resolution	0.05 mm
u(VerRes)		0.00083 mm	
Thermal image camera (u_T)	Thermal image camera Resolution u(TIRes)	0.01 °C 3.33×10^{-5} °C	Rectangular
	Thermal image camera Accuracy u(TIAcc)	± 2 °C 1.33333 °C	
	Digital thermometer (u_r)	Digital thermometer Resolution u(therRes)	0.1 °C 0.00333 °C
Digital thermometer Accuracy u(TherAcc)		± 2 °C 1.33333 °C	Rectangular
Repeatability (u_{Rpt})		Thermal conductivity measurement u(Rpt)	0.19 W/m.K 0.02081 W/m.K
	Summarize		
Combined uncertainty	0.0345	t=1	68.20%
Expanded uncertainty	0.069	t=2	95.45%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนของวัสดุ พบว่ามีองค์ประกอบที่ทำให้เกิดความไม่แน่นอนของการวัดประกอบไปด้วย ค่าความไม่แน่นอนจากการวัดสัมประสิทธิ์ความร้อน ความถูกต้องของค่าความหนาแน่น ค่าความถูกต้องของความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุ และค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการประมาณสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนของวัสดุ แสดงดังตารางที่ 4.6

1) ค่าความไม่แน่นอนจากสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของตัวอย่าง

ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของตัวอย่าง เกิดจากปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.0345 W/m.K

2) ค่าความไม่แน่นอนจากความถูกต้องของค่าความหนาแน่นของวัสดุ

ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากค่าความหนาแน่นของวัสดุเกิดจากค่าความถูกต้องของค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวที่นำมาประมาณค่า ซึ่งค่าความไม่แน่นอนของปัจจัยดังกล่าวเป็นค่าความไม่แน่นอนชนิด B มีการกระจายอุณหภูมิตัวแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า สามารถประมาณค่าได้จากสมการที่ 2.22 โดยค่าความถูกต้องของอคลิคที่นำมาใช้มีค่าเท่ากับ 0 เนื่องจากนำค่าความหนาแน่นมาจากเอกสารแสดงรายละเอียดของวัสดุ (Datasheet) และมีความสัมพันธ์ของความไม่แน่นอนจะได้

$$u_{\rho} = (0/\sqrt{3}) = 0 \text{ kg/m}^3$$

เมื่อ $u_{(\rho)}$ คือ ความไม่แน่นอนจากความถูกต้องของค่าความหนาแน่น

3) ค่าความไม่แน่นอนจากความถูกต้องของค่าความจุความร้อนของวัสดุ

ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากค่าความจุความร้อนวัสดุเกิดจากค่าความถูกต้องของค่าพารามิเตอร์ดังกล่าว ซึ่งเป็นความไม่แน่นอนชนิด B มีการกระจายอุณหภูมิตัวแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า สามารถประมาณค่าได้จากสมการที่ 2.22 และมีความสัมพันธ์ของความไม่แน่นอนดังนี้

$$u_{c_p} = (5/\sqrt{3}) = 8.333 \text{ J/kg}^{\circ}\text{C}$$

เมื่อ $u_{(c_p)}$ คือ ความไม่แน่นอนจากความถูกต้องของค่าความจุความร้อนจำเพาะ

4) ค่าความไม่แน่นอนของการวัดสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนของวัสดุ

ในการทดลองได้ทำการประมาณสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนจำนวน 5 ครั้ง จากนั้นนำมาประมาณค่าความไม่แน่นอนจากความคลาดเคลื่อนสุ่ม (u_{Rpt}) ซึ่งเป็นความไม่แน่นอนชนิด A มีค่าเท่ากับ $\pm 0.126 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

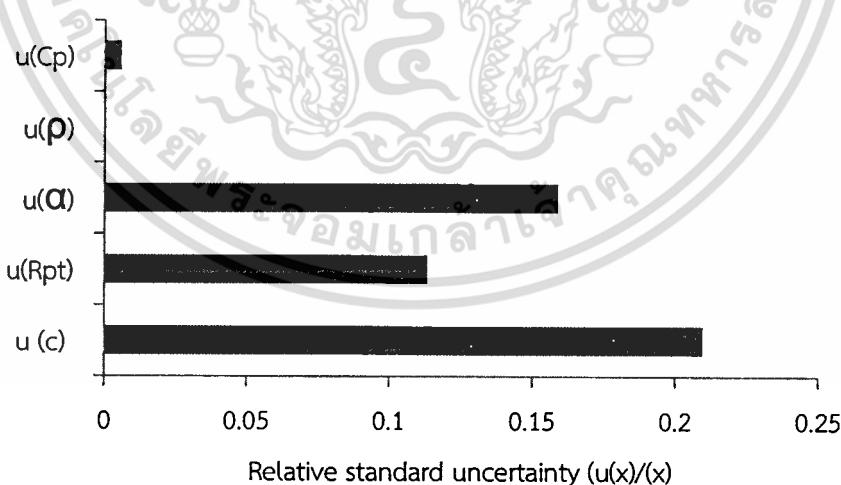
ปัจจัยที่ส่งผลต่อความไม่แน่นอนในการวัดสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนของคลิลิค แสดงดังรูปที่ 3.10 มีผลประเมินดังตารางที่ 4.6 โดยมีสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเท่ากับ 0.1957 W/m.K ค่าความหนาแน่น 0.00118 kg/m³ และค่าความจุความร้อนเท่ากับ 1475 J/kg·°C โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4.4

$$U_{combined} = \alpha \times \sqrt{\left(\frac{u_k}{k}\right)^2 + \left(\frac{u_p}{\rho}\right)^2 + \left(\frac{u_{c_p}}{c_p}\right)^2 + \left(\frac{u_{Rpt}}{Rpt}\right)^2} \quad (4.4)$$

$$= 1.1 \times 10^{-7} \times \sqrt{\left(\frac{0.0345}{0.1957}\right)^2 + \left(\frac{0}{0.00118}\right)^2 + \left(\frac{8.333}{1475}\right)^2 + \left(\frac{0.1268 \times 10^{-7}}{1.1 \times 10^{-7}}\right)^2}$$

ความไม่แน่นอนของการวัดสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนของคลิลิค มีค่าเท่ากับ 2.347×10⁻⁸ m²/s และเมื่อขยายความเชื่อมั่นเป็น 95.45 เปอร์เซ็นต์สามารถคำนวณความไม่แน่นอนรวมดังสมการที่ 2.27 จะได้ความไม่แน่นอนขยายคือ 4.695×10⁻⁸ m²/s

จากผลการทดลองพบว่าค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์มาตรฐานของการวัดสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนในตัวอย่างคลิลิค มีปัจจัยหลักมาจากค่าความไม่แน่นอนของค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของคลิลิค ค่าความไม่แน่นอนจากความคลาดเคลื่อนสุ่ม และค่าความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุ ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์มาตรฐานของระบบวัดสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนเมื่ออุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของตัวอย่างคลิลิค

ตารางที่ 4.6 องค์ประกอบความไม่แน่นอนระบบวัดสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนเมื่ออุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

Uncertainty Source	Uncertainty component	Estimate value Standard uncertainty	Probability distribution
thermal Conductivity (u_k)	thermal conductivity	0.1957 W/m.K 0.0345 W/m.K	Normal
Specific heat (u_{c_p})	Specific heat Accuracy	5 J/Kg.°C 8.333 J/Kg.°C	Rectangular
Density (u_ρ)	Density Accuracy	0 kg/m ³ 0 kg/m ³	Rectangular
Repeatability (u_{Rpt})	Thermal diffusivity measurement	$1.12 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ $0.1268 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$	Normal
Summarize			
Combined uncertainty	2.347×10^{-8}	t=1	68.20%
Expanded uncertainty	4.695×10^{-8}	t=2	95.45%

4.4.2 ระบบวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและกระจายความร้อนเมื่อวัสดุถ่ายเทความร้อนในสภาวะอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงตามเวลา

ในการประมาณสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนของวัสดุ เมื่อวัสดุมีการถ่ายเทความร้อนแบบ Semi-infinite solid พบว่ามีองค์ประกอบที่ทำให้เกิดความไม่แน่นอนของการวัดประกอบด้วย ค่าอุณหภูมิของตัวอย่างและอุณหภูมิของเทอร์โมอิเล็กตริก ความหนาของตัวอย่าง เวลา และค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการวัดสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนของวัสดุแสดงดังตารางที่ 4.7

1) ค่าความไม่แน่นอนจากอุณหภูมิเทอร์โมอิเล็กตริก

ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการวัดอุณหภูมิของเทอร์โมอิเล็กตริกมีองค์ประกอบจาก ค่าความละเอียดและความถูกต้องของดิจิตอลเทอร์โมมิเตอร์ที่ใช้วัดค่าอุณหภูมิบริเวณเทอร์โมอิเล็กตริก และกล้องถ่ายภาพความร้อน ซึ่งเป็นค่าความไม่แน่นอนชนิด B มีการกระจายอุณหภูมิแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า สามารถประมาณค่าได้จากสมการที่ 2.22 และมีความสัมพันธ์ของความไม่แน่นอนแสดงดังสมการที่ 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$u_T = \sqrt{u_{(TRes)}^2 + u_{(TAcc)}^2} \quad (4.5)$$

เมื่อแทนค่าในสมการที่ 4.5 จะได้

$$u_T = \sqrt{(0.1/\sqrt{3})^2 + (2/\sqrt{3})^2}$$

$$u_T = 1.1561 \text{ } ^\circ\text{C}$$

เมื่อ $u_{(TRes)}$ คือ ความไม่แน่นอนจากความละเอียดของดิจิตอลเทอร์โมมิเตอร์

$u_{(TAcc)}$ คือ ความไม่แน่นอนจากความถูกต้องของดิจิตอลเทอร์โมมิเตอร์

u_T คือ ความไม่แน่นอนจากดิจิตอลเทอร์โมมิเตอร์

2) ค่าความไม่แน่นอนจากเครื่องมือวัดอุณหภูมิของวัสดุทดสอบ

ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากค่าอุณหภูมิของตัวอย่างเกิดจากองค์ประกอบของค่าความละเอียดและความถูกต้องของกล้องถ่ายภาพความร้อน ซึ่งเป็นค่าความไม่แน่นอนชนิด B มีการกระจายอุณหภูมิแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า สามารถประมาณค่าได้จากสมการที่ 2.22 และมีความสัมพันธ์ของความไม่แน่นอนแสดงดังสมการที่ 4.6

$$u_{TI} = \sqrt{u_{(TRes)}^2 + u_{(TAcc)}^2} \quad (4.6)$$

เมื่อแทนค่าในสมการที่ 4.6 จะได้

$$u_{TI} = \sqrt{(0.01/\sqrt{3})^2 + (2/\sqrt{3})^2}$$

$$u_{TI} = 1.1547 \text{ } ^\circ\text{C}$$

เมื่อ $u_{(TRes)}$ คือ ความไม่แน่นอนจากความละเอียดของกล้องถ่ายภาพความร้อน

$u_{(TAcc)}$ คือ ความไม่แน่นอนจากความถูกต้องของกล้องถ่ายภาพความร้อน

u_{TI} คือ ความไม่แน่นอนจากกล้องถ่ายภาพความร้อน

3) ค่าความไม่แน่นอนจากอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากการวัดขนาดของตัวอย่าง

ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการวัดขนาดตัวอย่างเกิดจากค่าความละเอียดของเวอร์เนียคาลิปเปอร์ที่ใช้วัด ซึ่งค่าความไม่แน่นอนของปัจจัยทั้งสองเป็นค่าความไม่แน่นอนชนิด B มีการกระจายอุณหภูมิแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า สามารถประมาณค่าได้จากสมการที่ 2.22 จะได้

$$u_D = (0.05 / \sqrt{3}) = 0.0288 \text{ mm}$$

4) ค่าความไม่แน่นอนจากการจับเวลาระหว่างการถ่ายเทความร้อน

ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากเวลาที่ให้ความร้อนแก่ตัวอย่าง เกิดจากค่าความละเอียดของเครื่องจับเวลา ซึ่งค่าความไม่แน่นอนของปัจจัยทั้งสองเป็นค่าความไม่แน่นอนชนิด B มีการกระจายอุณหภูมิตัวแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า สามารถประมาณค่าได้จากสมการที่ 2.22 จะได้

$$u_{Time} = (1 / \sqrt{3}) = 0.57735 \text{ s}$$

5) ค่าความไม่แน่นอนของการวัดสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนของวัสดุ

ในการทดลองได้ทำการวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนจำนวน 5 ครั้ง จากนั้นนำมาประมาณค่าความไม่แน่นอนจากความคลาดเคลื่อนสุ่ม (u_{Rpt}) ซึ่งเป็นค่าความไม่แน่นอนชนิด A มีค่าเท่ากับ $9.66 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$

ปัจจัยที่ส่งผลต่อความไม่แน่นอนในการวัดสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนถูกแสดงไว้ในรูปที่ 3.11 โดยได้กำหนดให้ตัวอย่างฉนวนความร้อน EPS เป็นตัวแทนในการหาความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นจากการวัดสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อนของวัสดุ เมื่อวัสดุมีการถ่ายเทความร้อนแบบ Semi-infinite solid โดยในการทดลองทำการวัดจำนวน 5 ครั้ง โดยอุณหภูมิของเทอร์โมอิเล็กทริกด้านเย็นเท่ากับ $13.93 \text{ }^\circ\text{C}$ อุณหภูมิของตัวอย่างที่วัดได้จากกล้องถ่ายภาพความร้อน $21.90 \text{ }^\circ\text{C}$ ตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิของตัวอย่างเท่ากับ 6 มิลลิเมตร เวลาที่ให้ความเย็นแก่ตัวอย่างเท่ากับ 40 วินาที โดยสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนของฉนวนความร้อนที่วัดได้เท่ากับ $7.55 \times 10^{-7} \pm 0.0966 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ จากนั้นทำการคำนวณค่าความไม่แน่นอนรวมที่เกิดขึ้นจากระบบการวัด โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4.6

$$U_{combined} = \alpha \times \sqrt{\left(\frac{u_T}{T_c}\right)^2 + \left(\frac{u_{TI}}{T_{sam}}\right)^2 + \left(\frac{u_D}{Sample_{Thickness}}\right)^2 + \left(\frac{u_{Time}}{Time}\right)^2 + \left(\frac{u_{Rpt}}{Rpt}\right)^2} \quad (4.6)$$

$$= 7.55 \times 10^{-7} \times \sqrt{\left(\frac{1.1547}{21.90}\right)^2 + \left(\frac{1.1561}{13.93}\right)^2 + \left(\frac{0.0288}{6}\right)^2 + \left(\frac{0.57730}{40}\right)^2 + \left(\frac{7.55 \times 10^{-7}}{9.66 \times 10^{-9}}\right)^2}$$

ความไม่แน่นอนของการวัดสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนของฉนวน EPS ที่อุณหภูมิ $25 \text{ }^\circ\text{C}$ มีค่าเท่ากับ $7.57 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ และเมื่อขยายความเชื่อมั่นเป็น 95.45 เปอร์เซ็นต์ โดยการเปิดตาราง t-distribution จะได้ค่า Coverage factor เป็น 2 แล้วนำไปคูณกับค่าความไม่แน่นอนรวมดังสมการที่ 2.27 จะได้ค่าความไม่แน่นอนขยายคือ $1.514 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ ซึ่งคิดเป็น 20.06 %

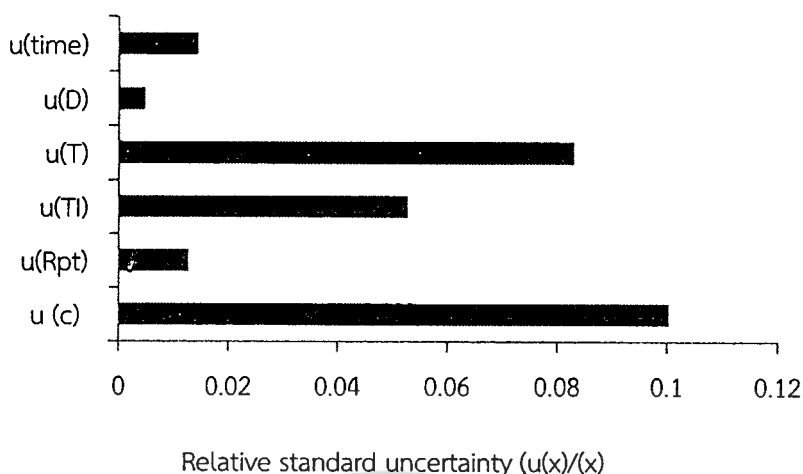
เอกสารนี้เป็นเอกสารของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี หากมีการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากมหาวิทยาลัยฯ ถือว่าผิดกฎหมาย และต้องแจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองพบว่าค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์มาตรฐานของการวัดสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนของฉนวน EPS มีปัจจัยหลักที่ส่งผลมาจากค่าความไม่แน่นอนของดิจิตอลเทอร์โมมิเตอร์ กล้องถ่ายภาพความร้อน เครื่องจับเวลา ความไม่แน่นอนจากความคลาดเคลื่อนสุ่ม ($u(Rpt)$) เวอร์เนียคาลิปเปอร์ ตามลำดับแสดงดังรูปที่ 4.5

ตารางที่ 4.7 องค์ประกอบความไม่แน่นอนระบบวัดสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงตามเวลา

Uncertainty Source	Uncertainty component	Estimate value	
		Standard uncertainty	Probability distribution
Sample temperature (u_T)	Thermal image camera Resolution	0.01 °C	Rectangular
	$u(TIRes)$	0.005773 °C	
	Thermal image camera Accuracy	± 2 °C	Rectangular
	$u(TherAcc)$	1.1547 °C	
Thermoelectric temperature (u_T)	Digital thermometer Resolution	0.1 °C	Rectangular
	$u(therRes)$	0.05773 °C	
	Digital thermometer Accuracy	± 2 °C	Rectangular
	$u(IAcc)$	1.1547 °C	
Dimension of Sample (u_D)	Vernier caliper Resolution	0.05 mm	Rectangular
	$u(VerRes)$	0.02886 mm	
Time (u_{Time})	Time Resolution	1 s	Rectangular
		0.5773 s	
Repeatability (u_{Rpt})	Thermal diffusivity measurement	$7.55 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$	Normal
		$9.66 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$	
Summarize			
Combined uncertainty	7.574×10^{-8}	t=1	68.20%
Expanded uncertainty	1.514×10^{-7}	t=2	95.45%

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ซึ่งสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์มาตรฐานของระบบวัดสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงตามเวลาของตัวอย่างฉนวน EPS

เมื่อพิจารณาค่าความไม่แน่นอนจากการวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ พบว่ามีองค์ประกอบที่ทำให้เกิดความไม่แน่นอนของการวัด ประกอบไปด้วย ค่าความไม่แน่นอนจากการวัดสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อน ความถูกต้องของค่าความหนาแน่นของวัสดุและความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุ และค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการประมาณสัมประสิทธิ์นำความร้อนของวัสดุ แสดงดังตารางที่ 4.8

1) ค่าความไม่แน่นอนจากสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนของตัวอย่าง

ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการวัดสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนของตัวอย่าง เกิดจากปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการวัดสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนในหัวข้อที่ผ่านมา มีค่าเท่ากับ $7.574 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$

2) ค่าความไม่แน่นอนจากความถูกต้องของค่าความหนาแน่นของวัสดุ

ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากค่าความหนาแน่นของวัสดุเกิดจากความถูกต้องของค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวที่นำมาประมาณค่า ซึ่งเป็นค่าความไม่แน่นอนชนิด B มีการกระจายอุณหภูมิตามสี่เหลี่ยมผืนผ้า สามารถประมาณค่าได้จากสมการที่ 2.22 แต่เนื่องจากค่าความหนาแน่นที่ใช้นำมาจากแผ่นข้อมูลของฉนวน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 25 kg/m^3 จึงทำให้ค่าความถูกต้องของข้อมูล คือ 100% ดังนั้นจึงทำให้ค่าความผิดพลาดเท่ากับ 0

$$u_p = (0/\sqrt{3}) = 0 \text{ kg/m}^3$$

เมื่อ $u_{(p)}$ คือ ความไม่แน่นอนจากความถูกต้องของค่าความหนาแน่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) ค่าความไม่แน่นอนจากความถูกต้องของค่าความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุ

ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากค่าความจุความร้อนวัสดุเกิดจากค่าความถูกต้องของค่าพารามิเตอร์ดังกล่าว ซึ่งเป็นความไม่แน่นอนชนิด B มีการกระจายอุณหภูมิมอบส์เหลี่ยมผืนผ้า แต่เนื่องจากค่าความจุความร้อนของวัสดุนำมาจากแผ่นข้อมูลของฉนวน ซึ่งมีค่าเท่ากับ $1500 \text{ J/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$ จึงทำให้ค่าความถูกต้องของข้อมูล คือ 100 % ดังนั้นจึงทำให้ค่าความผิดพลาดเท่ากับ 0

$$u_{c_p} = (0/\sqrt{3}) = 0 \text{ kJ/Kg}\cdot^{\circ}\text{C}$$

เมื่อ $u_{(c_p)}$ คือ ความไม่แน่นอนจากความถูกต้องของค่าความจุความร้อนจำเพาะ

4) ค่าความไม่แน่นอนของการวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ

ในการทดลองได้ทำการประมาณสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนจำนวน 5 ครั้ง จากนั้นนำมาประมาณค่าความไม่แน่นอนจากความคลาดเคลื่อนสุ่ม (u_{Rpt}) ซึ่งเป็นความไม่แน่นอนชนิด A มีค่าเท่ากับ $0.00146 \text{ W/m}\cdot\text{K}$

ปัจจัยที่ส่งผลต่อความไม่แน่นอนในการวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนถูกแสดงไว้ในรูปที่ 3.12 โดยได้กำหนดให้ตัวอย่างฉนวน EPS เป็นตัวแทนในการหาความไม่แน่นอนที่มีผลประเมิณดังตารางที่ 4.8 โดยในการทดลองทำการวัดจำนวน 5 ครั้ง โดยมีค่าความไม่แน่นอนของสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนเท่ากับ $7.574 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ ค่าความหนาแน่น 25 kg/m^3 และค่าความจุความร้อนเท่ากับ $1500 \text{ J/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$ จากนั้นทำการคำนวณรวมจากการวัดสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนของระบบวัดจากสมการที่ 2.22 โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4.7

$$U_{combined} = k \times \sqrt{\left(\frac{u_{\alpha}}{\alpha}\right)^2 + \left(\frac{u_{\rho}}{\rho}\right)^2 + \left(\frac{u_{c_p}}{c_p}\right)^2 + \left(\frac{u_{Rpt}}{Rpt}\right)^2} \quad (4.7)$$

$$= 0.02813 \times \sqrt{\left(\frac{7.574 \times 10^{-8}}{7.55 \times 10^{-7}}\right)^2 + \left(\frac{0}{25}\right)^2 + \left(\frac{0}{1500}\right)^2 + \left(\frac{0.00146}{0.02813}\right)^2}$$

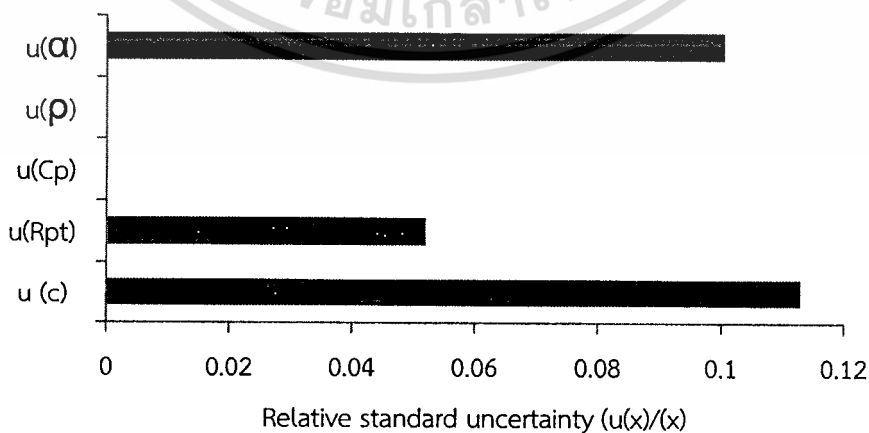
ความไม่แน่นอนของการวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของฉนวน EPS เท่ากับ $0.00317 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ และเมื่อขยายความเชื่อมั่นเป็น 95.45 เปอร์เซ็นต์สามารถคำนวณความไม่แน่นอนรวมดังสมการที่ 2.27 จะได้ความไม่แน่นอนขยายคือ $0.00635 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ซึ่งคิดเป็น 22.59% จากค่าความไม่แน่นอนของเครื่องมือวัดที่เกิดขึ้น พบว่าปัจจัยหลักที่ส่งผล คือ ค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและค่าความไม่แน่นอนของการแพร่กระจายความร้อนตามลำดับ

จากผลการทดลองพบว่าค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์มาตรฐานของการวัดสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนของฉนวน EPS มีปัจจัยหลักมาจากค่าความไม่แน่นอนของค่าสัมประสิทธิ์การ

นำความร้อนของฉนวน EPS และค่าความไม่แน่นอนจากความคลาดเคลื่อนตามลำดับแสดงดังรูปที่ 4.6

ตารางที่ 4.8 องค์ประกอบความไม่แน่นอนระบบวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงตามเวลา

Uncertainty Source	Uncertainty component	Estimate value Standard uncertainty	Probability distribution
thermal diffusivity (u_{α})	thermal diffusivity	$7.574 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$	Normal
		$7.55 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$	
Specific heat (u_{Cp})	Specific heat Accuracy	0 J/Kg $^{\circ}$ C 0 J/Kg $^{\circ}$ C	Rectangular
Density (u_{ρ})	Density Accuracy	0 kg/m 3 0 kg/m 3	Rectangular
Repeatability (u_{Rpt})	Thermal conductivity measurement	0.02813 W/m.K	Normal
		0.00146 W/m.K	
Summarize			
Combined uncertainty	0.00317	t=1	68.20%
Expanded uncertainty	0.00635	t=2	95.45%



รูปที่ 4.6 ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์มาตรฐานของระบบวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเมื่ออุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 เปลี่ยนแปลงตามเวลาของตัวอย่างฉนวน EPS เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลอง พบว่า สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุที่ทำการวัดได้แก่ ฉนวน PEX ฉนวน EPS แผ่นอคลิก แอ๊ปเปิล และมันฝรั่ง เท่ากับ 0.0329 0.0329 0.195 0.425 และ 0.537 W/m.K ตามลำดับ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นเท่ากับ 1.08% 6.85% 3.01% 0.5146% และ 1.46% ตามลำดับ และสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนของวัสดุที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 5.84×10^{-7} 7.55×10^{-7} 1.122×10^{-7} 1.152×10^{-7} และ 1.322×10^{-7} m^2/s ตามลำดับ มีค่าความคลาดเคลื่อนจากแหล่งอ้างอิง เท่ากับ 1.06% 4.88% 0.66% 4.77% และ 3.50% จากนั้นประเมินค่าความไม่แน่นอนของระบบการวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนของตัวอย่างอคลิกมีค่าเท่ากับ 0.069 W/m.K และ 4.695×10^{-8} m^2/s ตามลำดับ และในตัวอย่างฉนวน EPS มีค่าเท่ากับ 0.00635 W/m.K และ 1.514×10^{-7} m^2/s ตามลำดับ โดยค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นของค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและกระจายความร้อน เกิดจากในการทดลองได้กำหนดให้สมบัติทางกายภาพและทางความร้อนของวัสดุทางชีวภาพ พลังงานที่ให้แก่ตัวอย่างในการทดลอง และการสูญเสียอุณหภูมิแก่สิ่งแวดล้อมมีค่าคงที่ ซึ่งในความเป็นจริงค่าปัจจัยดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ และการการประมาณค่าความไม่แน่นอนของตัวอย่างพบว่าขึ้นอยู่กับค่าความละเอียดและความถูกต้องของเครื่องมือที่ใช้ ค่าความคลาดเคลื่อนสุ่ม ค่าความถูกต้องของตัวแปรที่นำมาใช้ ได้แก่ ค่าความจุความร้อนจำเพาะและค่าความหนาแน่นของวัสดุ และค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากตัวแปรต้น (ในกรณีของการวัดค่าสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนเกิดจากการประมาณค่ามาจกสัมประสิทธิ์การนำความร้อน) เป็นต้น ซึ่งค่าความไม่แน่นอนของระบบวัดที่เกิดขึ้นสามารถบอกค่าความสามารถในการวัดค่าดังกล่าวด้วย

ในระบบวัดที่สร้างขึ้นมีรูปแบบของชุดอุปกรณ์คล้ายกับวิธี Guard hot plate ซึ่งเหมาะสำหรับการวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่อยู่ในช่วงต่ำเหมือนกัน แต่มีลักษณะที่แตกต่างกัน 2 ส่วน คือ อุปกรณ์ให้ความร้อนแก่วัสดุและเครื่องมือวัดอุณหภูมิบริเวณที่ผิวของวัสดุ ในส่วนของอุปกรณ์ให้ความร้อน วิธี Guard hot plate ให้ความร้อนแก่ตัวอย่างด้วย Guarded heater ซึ่งความร้อนที่ได้จะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของตัวให้ความร้อนที่กระจายอยู่ และข้อจำกัดของการวัดด้วยวิธีนี้ คือ ในการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุเป็นการให้ความร้อนกับวัสดุตัวอย่าง สำหรับการวัดในตัวอย่างที่มีความชื้น อาจทำให้น้ำในตัวอย่างเกิดการระเหย และส่งผลต่อความถูกต้องของค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน แต่ในระบบการวัดที่สร้างขึ้นใช้เทอร์โมอิเล็กทริกเป็นแหล่งให้หรือลดพลังงานแก่วัสดุ ซึ่งข้อดีของอุปกรณ์ คือ ให้พลังงานเท่ากันตลอดพื้นที่ และสามารถเพิ่มพลังงานเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์อื่นใดโดยไม่แจ้งการนำใบไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ให้ความร้อน) หรือลดพลังงานของวัสดุ ดังนั้น จึงสามารถเปลี่ยนจากการเพิ่มพลังงานให้แก่ตัวอย่าง เป็นการลดพลังงานแทนเพื่อรักษาความชื้นของตัวอย่าง และในส่วนของเครื่องมือวัดอุณหภูมิที่ผิววัสดุ ในระบบการวัดของ Guard hot plate ใช้เทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิ ซึ่งเครื่องมือวัดชนิดนี้เป็นการวัดแบบสัมผัส จึงทำให้การวัดอุณหภูมิบริเวณที่ผิวด้วยเทอร์โมคัปเปิลมีความคลาดเคลื่อนเนื่องจาก อุณหภูมิที่วัดได้เป็นอุณหภูมิเฉลี่ยที่เกิดจากอุณหภูมิที่ตำแหน่งที่ทำการวัดและอุณหภูมิของอากาศ หรืออุณหภูมิความร้อนในบริเวณดังกล่าว และยังเป็นกรวัดแบบจุด ซึ่งในการวัดถ้าผู้วัดติดตั้งเครื่องมือ วัดผิดตำแหน่งอาจทำให้เกิดความผิดพลาดของอุณหภูมิได้อีกด้วย แต่เครื่องมือวัดอุณหภูมิที่ผิวของ ระบบวัดที่สร้างขึ้นประยุกต์ใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนในการวัดอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุ ซึ่งกล้อง ถ่ายภาพความร้อนเป็นเครื่องมือวัดแบบไม่สัมผัส และเป็นการวัดแบบพื้นที่ จึงสามารถเห็นรูปแบบ การกระจายอุณหภูมิของตัวอย่าง เพื่อนำมาวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของตัวอย่างได้ อย่างไรก็ตาม ค่าความถูกต้องที่เกิดขึ้นยังขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของเครื่องมือวัด ซึ่งหากต้องการให้ ระบบวัดมีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำ ควรเลือกเครื่องมือวัดอุณหภูมิที่มีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำด้วย

สำหรับรูปแบบการติดตั้งกล้องถ่ายภาพความร้อน เพื่อวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน วัสดุที่มีความหนามากกว่าขนาดจุดวัด (Spot size) ของกล้องถ่ายภาพความร้อนสามารถวัดอุณหภูมิ ที่ผิวของวัสดุได้จากทางด้านข้างของตัวอย่าง (รูป 3.1 ข) โดยข้อดีของการวัดในลักษณะนี้ คือ สามารถเห็นรูปแบบการกระจายอุณหภูมิของตัวอย่างที่ทำการทดลอง เพื่อนำไปคำนวณในรูปแบบ สมการของสมการนั้น ๆ สำหรับตัวอย่างที่มีความหนาน้อยกว่าจุดวัดของกล้องถ่ายภาพความร้อนต้อง เปลี่ยนตำแหน่งการวัดของกล้องถ่ายภาพความร้อนเป็นทางด้านบนของตัวอย่าง (รูป 3.1 ก)

การพิจารณาสมการความร้อนสำหรับวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การนำความร้อนและการ แพร่กระจายความร้อน สามารถพิจารณาได้จากรูปแบบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในวัสดุที่ใช้ใน การทดลองเมื่อเพิ่มหรือลดพลังงานที่ให้กับวัสดุ ซึ่งขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและรูปทรง ของวัสดุทดสอบ โดยวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูงมาก และวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การ นำความร้อนค่อนข้างต่ำแต่มีรูปทรงเป็นแผ่นบาง (Plane sheet) สามารถใช้สมการที่มีลักษณะการ ถ่ายทอดความร้อนในสภาวะคงตัวได้ เนื่องจากระยะเวลาของการถ่ายเทความร้อนในช่วงสภาวะไม่คงตัว เกิดขึ้นค่อนข้างเร็ว ในขณะที่วัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำและมีความหนา การถ่ายเท ความร้อนภายในวัสดุจะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ ทำให้มีรูปแบบการกระจายอุณหภูมิภายในวัสดุในลักษณะ สภาวะไม่คงตัว สมการที่ใช้ในการวิเคราะห์จึงพิจารณาจากสมการความร้อนในสภาวะไม่คงตัว

5.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัยต่อ

จากการวิจัยพบค่าความคลาดเคลื่อนของสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนของวัสดุ เนื่องจากงานวิจัยนี้กำหนดให้สมบัติทางกายภาพและทางความร้อนของวัสดุมีค่าคงที่ อย่างไรก็ตามในงานวิจัยต่อไปควรกำหนดให้ค่าสมบัติดังกล่าวเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ควรมีการตรวจสอบผลกระทบของความร้อนที่ให้แก่ตัวอย่าง และเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนเมื่อวัสดุถ่ายเทความร้อนในสภาวะอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงตามเวลาและไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา และเพิ่มความแม่นยำของระบบการวัดให้มากยิ่งขึ้น

สามารถนำระบบการวัดสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและกระจายความร้อนที่สร้างขึ้นมาประยุกต์ใช้กับวัสดุที่มีสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำ ได้แก่ วัสดุทางชีวภาพ วัสดุฉนวน วัสดุอาคาร เป็นต้น และในงานทางด้านพลังงานยังสามารถนำสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและการกระจายความร้อนของวัสดุที่วัดได้มาประเมินค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องได้ เช่น ค่าความต้านทานความร้อน เป็นต้น การสูญเสียความร้อนหรือการประหยัดพลังงานของวัสดุดังกล่าวได้อีกด้วย



เอกสารอ้างอิง

- [1] G. Betta, M. Rinaldi, D. Barbanti & R. Massini, A quick method for thermal diffusivity estimation: Application to several foods. *Journal of Food Engineering*, 91, 2009, 34-41.
- [2] N. N. Mohsenin, *Thermal properties of foods and agricultural materials* (New York: Gordon and Breach Science Publishers, 1980).
- [3] C. Lentz, Thermal conductivity of meats, fats, gelatin gels, and ice. *Food Technology*, 15, 1961, 243-247.
- [4] D. L. Fitch, A new thermal conductivity apparatus. *American Physics Teacher*, 3, 1935, 135-136.
- [5] W. N. Santos, Thermal properties of polymers by non-steady-state techniques, *Polymer Testing*, 26(4), 2007, 556-566.
- [6] V. E. Sweat, Experimental Values of thermal conductivity of selected fruits and vegetable, *J. Food Sci.*, 39, 1974, 1080-1083.
- [7] V. E. Sweat, & C. Haugh, A thermal conductivity probe for small food samples, *Trans. ASAE* 17, 1974, 56-58.
- [8] M. Rahman, & P. Potluri, Thermal conductivity of fresh and dried quid meat by line source thermal conductivity probe, *Journal of food Science*, 56(2), 1991, 582-583.
- [9] M. Balaban, & G. Pigott, Thermal conductivity, heat capacity and moisture isotherm of ocean perch at different, moisture levels and temperatures, *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 1(2), 1992, 57-74.
- [10] L. Kurozawa, A. El-Aouar, M. Simoes, P. Azoubel, & F. Murr, determination of thermal conductivity and thermal diffusivity of papaya (*Carica papaya* L.) as a function of temperature, In: 4th Mercosur Congress on process Systems Engineering, Rio de Janeiro, 2005.
- [11] J. Valvano, J. Cochran, & K. Diller, Thermal conductivity and diffusivity of biomaterials measured with self-heated thermistors, *International Journal of Thermophysics*, 6, 1985, 301-311.
- [12] R. Kravets, *Determination of thermal Conductivity of food materials*. (Ph.D. Thesis, Virginia Tech. 1988).
- [13] M. van Gelder, K. Diehl, *A Thermistor Based Method for Measuring Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity of Moist Materials at High Temperatures*, *Thermal Conductivity* (London: Academic Press, 1996)

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [14] D. González-Mendizabal, P. Bortot, & A. L. López de Ramos, A thermal Conductivity Experimental Method based on the Peltier effect. **International Journal of Thermophysics**, 19(4), 1998, 1229-1238
- [15] S. Chudzik, 2012 Thermal diffusivity measurement of insulating material using infrared thermography. **Infrared Physicas & Technology**, 55(1), 73-83.
- [16] D. C. Moreira, M. C. O. Telles, L. A. Sphaier, and L. C. S. Nunes, Infrared thermography for estimating the thermal conductivity augmentation of polymeric nanocomposites, **The International Journal of Thermophysical Properties**, 44, 2014, 3-23
- [17] S. Rahman, **Food properties Handbook** (Boca Roton, FL: CRC press, 1995).
- [18] C. F. Eithun. 2012. "Development of a thermal conductivity apparatus: Analysis and design." Master Thesis Of Norwegian University of Science and Technology
- [19] K. D Maglic, A.C., V.E. Peletsky, *Compendium of Thermophysical Property Measurement Methods, Vol.1: Survey of Measurement Techniques* Vol. 1. 1984, New York: Plenum Press. 789 pp.
- [20] N. K. Mahanta, and A.R. Abramson, The dual-mode heat flow meter technique: Aversatile method for characterizing thermal conductivity. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 2010. 53(23–24): p. 5581-5586.
- [21] W. Buck, and S. Rudtsch, "8.Thermal Properties" **Springer Handbook of Materials Measurement Methods**, H. Czichos, T. Saito, and L. Smith, Editors. 2006, Springer Berlin Heidelberg. p. 399-429
- [22] F. Alessandro, An apparatus for the routine measurement of thermal conductivity of materials for building application based on a transient hot-wire method. **Applied Thermal Engineering**, 2007. 27(14–15): p. 2495-2504.
- [23] W. William, and A. Marc, Thermal Conductivity Measurement, in **The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook on CD-ROM**1999, CRC Press.
- [24] International_Standard, *ISO 22007-2: Plastics - Determination of thermal conductivity and thermal diffusivity - Part 2: Transient plane heat source (hot disk) method*, 2008.
- [25] ตระการ ก้าวไกลกรรม. (2537). **คู่มือฉนวนความร้อน**. กรุงเทพฯ : เอ็มแอนด์อี

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [26] National Commercial Corporation. Thermal Insulation Crosslinked Polyethylene foam. Retrieved June 1, 2015, from <http://nathanibiz.com/ncc/thermal-insulation-cross-linked-polyethylene-foam.php>
- [27] C. Boué, & S. Holé, Infrared thermography protocol for simple measurements of thermal diffusivity and conductivity, *Infrared Physics & Technology*, 55, 2012, 376-379.
- [28] A. H. Bennett, W. G. Chace, Jr., & R. H. Cubbedge, Heat transfer Properties and Characteristics of Appalachian Area 'Red Delicious' Apple. *ASHRAE Transactions* 75, 1969, 133-142.
- [29] D. Chen, *A New Method for HTST Sterilization of Particulate Foods* (Ph.D. Thesis, W. Lafayette India: Purdue University, 1988)
- [30] A. N. Califano & A. Calvelo, Thermal Conductivity of Potato between 50 and 100°C, *Journal of Food Science*, 56(2), 1991, 586-587.
- [31] T. R. A. Magee & T. Bransburg, Measurement of thermal diffusivity of potato, malt bread and wheat flour, *Journal of Food Engineering*, 25(2), 1995, 223-232.
- [32] The Engineering ToolBox. "Thermoplastics - Physical Properties". [Online]. Available : http://www.engineeringtoolbox.com/physical-properties-thermoplastics-d_808.html. (2558)
- [33] Cross Linked Polyethylene Physical Data Sheet Foam Factory. "Cross Linked Polyethylene Physical Data Sheet". [Online]. Available : <http://www.foambymail.com/cross-linked-polyethylene-2lb-sheet.html>. (2558)
- [34] นวภัทรา หนูขนาด และ ทวีพล ชื้อสตัย. (2555). การวัดและเครื่องมือวัด (Measurement and Instrumentation). กรุงเทพฯ : มิน เซอร์วิส ซัพพลาย
- [35] Amanda J. King. "Advance studies in conduction technology" [Online]. Available : <http://www.arch.ttu.edu/courses/2013/fall/5334/Students/King/10/Default.htm>. 2556 (2558)
- [36] Fluke Company. "Emissivity Values for Common Materials & Non-Metals" [Online]. Available : <http://www.raytek.com/Raytek/enr/IREducation/EmissivityNonMetals.htm>. (2558)
- [37] S. Geyer and K. Gottschalk, Infrared Thermography to Monitor Natural Ventilation during Storage of Potatoes., *CIGR Journal*, 10, 2008, 7-20.
- [38] "Emissivity values for common materials" [Online]. Available : <http://www.infrared-thermography.com/material-1.htm>. (2558)
- [39] D. M. Rowe & G. Min, Evaluation of thermoelectric modules for power generation, *Journal of Power Sources*, 73(2), 1998, 193-198.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [40] F. P. Incropera, D. D. DeWitt, T. L. Bergman, and A. S. Lavine. (2007). **Fundamentals of heat and mass transfer**. (6th ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- [41] J. Snell. “IFOV Calculation Question”. [Online]. Available : <http://www.thesnellgroup.com/community/ir-talk/f/9/p/1402/5433.aspx>. 2553. (2558)
- [42] Fluke Corporation, 1994 “Calibration: philosophy in practice”, Everett, WA: Fluke Corporation
- [43] J. M. Laskar, S. Bagavathiappan, M. Sardar, T. Jayakumar, John Philip and Baldev Raj, Measurement of thermal diffusivity of solids using infrared thermography, **Materials Letter**, 62, 2008, 2740-2742
- [44] K. Su Yong and L. Sanghyun, Precise measurement of thermal conductivity of liquid over a wide temperature range using a transient hot-wire technique by uncertainty analysis, **Thermochimica Acta**, 542, 2012, 18-23
- [45] Kingspan. “Air-cell Insulbreak properties” [Online]. Available : <http://www.kingspaninsulation.com.au/Products/Kingspan-Air-Cell/AIR-CELL-Insul-break/Overview.aspx>. (2558)



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 Gaussian Error Function

x	$\text{erf } x$	x	$\text{erf } x$	x	$\text{erf } x$	x	$\text{erf } x$
0.00	0.000000	0.40	0.428392	0.80	0.742101	1.20	0.910314
0.01	0.011283	0.41	0.437969	0.81	0.748003	1.21	0.912956
0.02	0.022565	0.42	0.447468	0.82	0.753811	1.22	0.915534
0.03	0.033841	0.43	0.456887	0.83	0.759524	1.23	0.918050
0.04	0.045111	0.44	0.466225	0.84	0.765143	1.24	0.920505
0.05	0.056372	0.45	0.475482	0.85	0.770668	1.25	0.922900
0.06	0.067622	0.46	0.484655	0.86	0.776100	1.26	0.925236
0.07	0.078858	0.47	0.493745	0.87	0.781440	1.27	0.927514
0.08	0.090078	0.48	0.502750	0.88	0.786687	1.28	0.929734
0.09	0.101282	0.49	0.511668	0.89	0.791843	1.29	0.931899
0.10	0.112463	0.50	0.520500	0.90	0.796908	1.30	0.934008
0.11	0.123623	0.51	0.529244	0.91	0.801883	1.31	0.936063
0.12	0.134758	0.52	0.537899	0.92	0.806768	1.32	0.938065
0.13	0.145867	0.53	0.546464	0.93	0.811564	1.33	0.940015
0.14	0.156947	0.54	0.554939	0.94	0.816271	1.34	0.941914
0.15	0.167996	0.55	0.563323	0.95	0.820891	1.35	0.943762
0.16	0.179012	0.56	0.571616	0.96	0.825424	1.36	0.945561
0.17	0.189992	0.57	0.579816	0.97	0.829870	1.37	0.947312
0.18	0.200936	0.58	0.587923	0.98	0.834232	1.38	0.949016
0.19	0.211840	0.59	0.595936	0.99	0.838508	1.39	0.950673
0.20	0.222703	0.60	0.603856	1.00	0.842701	1.40	0.952285
0.21	0.233522	0.61	0.611681	1.01	0.846810	1.41	0.953852
0.22	0.244296	0.62	0.619411	1.02	0.850838	1.42	0.955376
0.23	0.255023	0.63	0.627046	1.03	0.854784	1.43	0.956857
0.24	0.265700	0.64	0.634586	1.04	0.858650	1.44	0.958297
0.25	0.276326	0.65	0.642029	1.05	0.862436	1.45	0.959695
0.26	0.286900	0.66	0.649377	1.06	0.866144	1.46	0.961054
0.27	0.297418	0.67	0.656628	1.07	0.869773	1.47	0.962373
0.28	0.307880	0.68	0.663782	1.08	0.873326	1.48	0.963654
0.29	0.318283	0.69	0.670840	1.09	0.876803	1.49	0.964898
0.30	0.328627	0.70	0.677801	1.10	0.880205	1.50	0.966105
0.31	0.338908	0.71	0.684666	1.11	0.883533	1.51	0.967277
0.32	0.349126	0.72	0.691433	1.12	0.886788	1.52	0.968413
0.33	0.359279	0.73	0.698104	1.13	0.889971	1.53	0.969516
0.34	0.369365	0.74	0.704678	1.14	0.893082	1.54	0.970586
0.35	0.379382	0.75	0.711156	1.15	0.896124	1.55	0.971623
0.36	0.389330	0.76	0.717537	1.16	0.899096	1.56	0.972628
0.37	0.399206	0.77	0.723822	1.17	0.902000	1.57	0.973603
0.38	0.409009	0.78	0.730010	1.18	0.904837	1.58	0.974547
0.39	0.418739	0.79	0.736103	1.19	0.907608	1.59	0.975462

(ที่มา: *Incropera et al.* [37])

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2 t distribution critical values

Degrees of freedom (γ)	Values of t_p (γ) from the t-distribution for degrees of freedom γ that define an interval that encompasses specified fractions p of the corresponding distribution					
	68.27%	90.00%	95.00%	95.45%	99.00%	99.73%
	1	1.84	6.31	12.71	13.97	63.66
2	1.32	2.92	4.30	4.53	9.92	19.21
3	1.20	2.35	3.18	3.31	5.84	9.22
4	1.14	2.13	2.78	2.87	4.60	6.62
5	1.11	2.02	2.57	2.65	4.03	5.51
6	1.09	1.94	2.45	2.52	3.71	4.90
7	1.08	1.89	2.36	2.43	3.50	4.53
8	1.07	1.86	2.31	2.37	3.36	4.28
9	1.06	1.83	2.26	2.32	3.25	4.09
10	1.05	1.81	2.23	2.28	3.17	3.96
11	1.05	1.80	2.20	2.25	3.11	3.85
12	1.04	1.78	2.18	2.23	3.05	3.76
13	1.04	1.77	2.16	2.21	3.01	3.69
14	1.04	1.76	2.14	2.20	2.98	3.64
15	1.03	1.75	2.13	2.18	2.95	3.59
16	1.03	1.75	2.12	2.17	2.92	3.54
17	1.03	1.74	2.11	2.16	2.90	3.51
18	1.03	1.73	2.10	2.15	2.88	3.48
19	1.03	1.73	2.09	2.14	2.86	3.45
20	1.03	1.72	2.09	2.13	2.85	3.42
25	1.02	1.71	2.06	2.11	2.79	3.33
30	1.01	1.70	2.04	2.09	2.75	3.27
35	1.01	1.70	2.03	2.07	2.72	3.23
40	1.01	1.68	2.02	2.06	2.70	3.20
45	1.01	1.68	2.01	2.06	2.69	3.18
50	1.01	1.68	2.01	2.05	2.68	3.16
100	1.01	1.66	1.98	2.03	2.63	3.08
∞	1.00	1.65	1.96	2.00	2.58	3.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข

(ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Modelling, Identification and Control



A Publication of the International Association of Science and Technology for Development

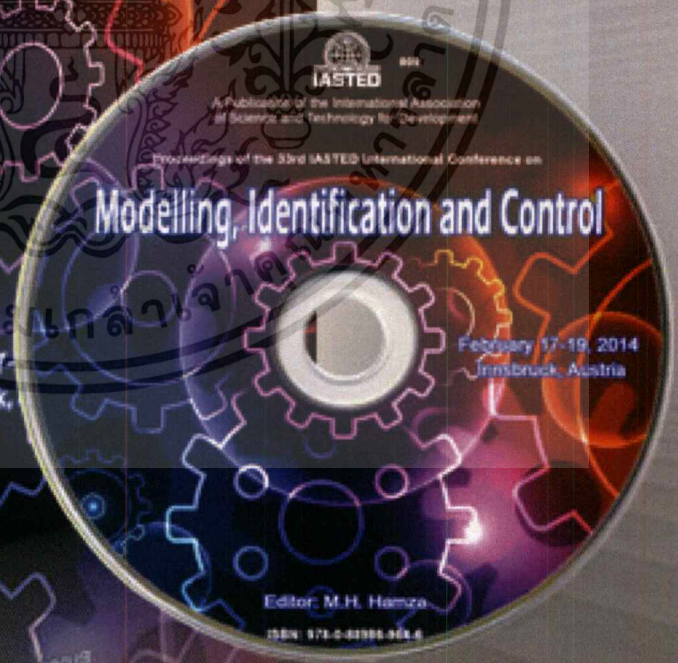
Proceedings of the 33rd IASTED International Conference on

Modelling, Identification and Control

Editor: M.H. Hamza

February 17-19, 2014
Innsbruck, Austria

ISBN: 978-0-88996-964-6



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า เสนอแนะต่อนานาชาติเพื่อประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ESTIMATION OF THERMAL CONDUCTIVITY AND THERMAL DIFFUSIVITY OF BIOLOGICAL MATERIALS USING THERMOGRAPHIC CAMERA

Navaphattra Nunak¹, Eakasit Sritham¹, Maethinee Songthai², and Taweepol Suesut²

¹ Department of Food Engineering

² Department of Instrumentation and Control Engineering

Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand 10520

E-mail: kbnavaph@kmitl.ac.th

ABSTRACT

This study proposes a method to estimate thermal conductivity and thermal diffusivity using a thermoelectric device and a thermographic camera. The experimental results were compared with others literatures. Three different materials including acrylic, apple, and potato were tested. The proposed method has proved to be effective. The experimental results for all selected materials are in comparable range with literature values. The proposed method can be a useful tool for determining thermal properties of solid biological materials with low thermal conductivity and diffusivity values.

KEY WORDS

Thermographic camera, Thermal conductivity, Thermal diffusivity, Thermoelectric

1. Introduction

A large number of food processing techniques involve the transfer of heat, for instance, heating, cooling, freezing, and frying [1]. Knowing the rate and amount of heat transfer is fundamentally important for the design and control of food processes. The estimation of the rate and the amount of heat requires some basic thermo-physical properties of food materials including thermal conductivity (k), thermal diffusivity (α), specific heat (c_p), and mass density (ρ). These material properties are intercorrelated in the following form [2]:

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (1)$$

Thermal diffusivity and conductivity are non-independent thermo-physical parameters which are difficult to measure. The diffusivity is defined as the rate of heat diffuses by conduction through a material and can be estimated from Eq. 1 [2, 3]. Thermal conductivity is defined as the ability of a material to conduct heat. It depends on various factors such as density, temperature, composition, and porosity of the material. There are

several measurement techniques that can be used to determine thermal conductivity. These techniques could be classified into two categories [4]: (a) steady-state methods, such as guarded hot plate method [5], concentric cylinder, and concentric sphere method, and (b) transient-state methods, such as Fitch method [6], laser flash method [7], line or plane heat source method [8-12], and thermistor probe method [13-15]. González et al. [16] have used the thermoelectric modules as the plane heat source to heat sample material for measuring thermal conductivity in both steady- and transient states.

In steady-state method, thermal conductivity is measured after a sample has reached the steady-state condition which may take considerably long time. For high moisture materials, the accuracy of measurement might be affected due to moisture migration from the tested specimen during the lengthy measurement period. As a result, the transient-state method seems to be more appropriate for food and biological materials which generally contain a large amount of water [4].

Many researches practically rely on a contact thermocouple to measure temperature changes of a sample during heating which could be relatively difficult to achieve the accurate values particularly when measuring surface temperature. Therefore, the thermal imaging camera or thermographic camera, a device for non-invasive and non-contact temperature measurement [17], has been proposed for measuring thermal properties of different types of materials [3, 18].

This study proposes the application of transient state method that uses a thermoelectric module, also known as a thermoelectric cooler (TEC), as a heat source and a thermographic camera as a surface temperature measurement device for determining the thermal conductivity and thermal diffusivity of food materials.

2. Mathematical Modeling

2.1 Conductive thermal transfer

Heat conduction is the transfer of heat through the structure of a material from high to low temperatures. The steady-state unidirectional heat conduction rate through a

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

material per unit area or heat flux (q'' , W/m^2) is proportional to temperature gradient ((dT/dz) , K/m) and the thermal conductivity (k , $W/m\cdot K$) of a material, known as Fourier's law of conduction (Eq. 2) [2].

$$q'' = -k \left(\frac{dT}{dz} \right) \quad (2)$$

In the present work, samples were heated on the thermoelectric module where heat is conducted through the material in one direction. This can be schematically represented in Fig. 1. The following assumptions were made when developing the transient-state model: (a) the heat flux generated from the thermoelectric module is constant and uniform; (b) the temperature of the thermoelectric plate and the bottom surface of the sample are equal; (c) only heatflow in z-direction is considered; (d) thermo-physical properties of the tested materials used in the model are constant; and (e) heat loss from the surface of thermoelectric plate and specimen to the surrounding air via convection is neglected because the surface temperature is considerably low.

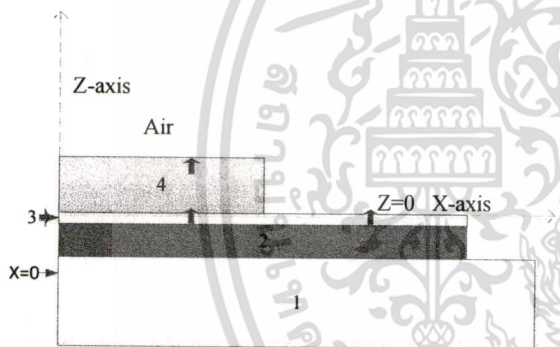


Figure 1. A schematic diagram representing the measurement of thermal conductivity and diffusivity; domain 1 is an aluminium heat sink, domain 2 is the thermoelectric module, domain 3 is an aluminum plate, and domain 4 is the specimen.

According to the law of energy conservation, the governing equation for unidirectional heat conduction can be written as follows:

$$Q_h'' + k \left(\frac{dT}{dz} \right) = \rho c_p (\Delta z) \left(\frac{dT}{dt} \right) \quad (3)$$

where Q_h'' is heat flux on the hot surface of the thermoelectric, ρ is a mass density of material (kg/m^3), c_p is the specific heat ($J/kg\cdot K$), and Δz is the material thickness (m).

The model equations were solved in MATLAB using the Finite difference method.

2.2 Thermoelectric cooler

Thermoelectric cooler (TEC) is fabricated from two unique semiconductors, one N-type and one P-type (Fig. 2). There are four physical phenomena of semiconductor involve with this device [16]: Seebeck effect, Thomson effect, Joule effect and Peltier effect. Thermoelectric cooling uses the Peltier effect to create heat flux between the junction of two different types of materials. A Peltier cooler, heater, or thermoelectric heat pump is a solid-state active heat pump which transfers heat from one side of the device to the other when electrical energy is supplied. The direction of heat flow is dependent on the direction of electric current.

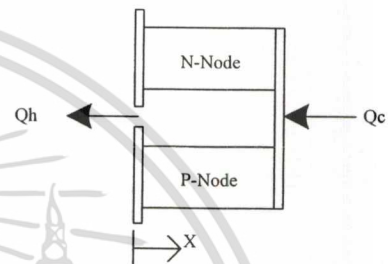


Figure 2. Schematic diagram of a thermoelectric device

The heat flow at the cold side of thermoelectric cell can be obtained using the following equation:

$$q_c = \alpha T_c I + \frac{1}{2} \bar{\tau} I \Delta T - \frac{1}{2} I^2 \bar{R} - \bar{K} \Delta T \quad (4)$$

where q_c is heat flow on the cold surface of P- and N-node, α is Seebeck coefficient, \bar{R} is electrical resistance, \bar{K} is thermal conductance, $\bar{\tau}$ is Thomson coefficient, T_h is a hot surface temperature, T_c is a cold surface temperature, and ΔT is a temperature difference between hot and cold surfaces. The values of \bar{K} , \bar{R} , and $\bar{\tau}$ can be estimated from properties of semiconductor in the thermoelectric cell. We can calculate the heat flow at cold surface by Eq. 5 [19].

$$Q_c = n q_c = \alpha_m T_c I - \frac{1}{2} I^2 R_m - K_m \Delta T \quad (5)$$

where n is the number of cell in thermoelectric device and α_m , R_m and K_m are properties of thermoelectric cell. Heat flow on the hot side can be calculated using the following equations:

$$P_m = IV \quad (6)$$

$$Q_h = Q_c + P_{in} \quad (7)$$

where Q_h is heat flow on the hot surface (W), Q_c is heat flow on the cold surface (W), P_{in} is electric power

supplying to the thermoelectric device (W), I is electric current (A) and V is voltage supply (V).

3. Measurements and Results

3.1 Experimental setup

The thermoelectric (Model TEC 12706) was used as a heat source since this device could provide a uniform heat flux. Heating rate was controlled using a DC power supply (24 V 2.1 A) with a current regulator circuit. The current regulator circuit consists of an IC Regulator (LM 338), a ceramic resistor (1Ω 5W) and a capacitor (2200 μ F) as shown in Fig. 3.

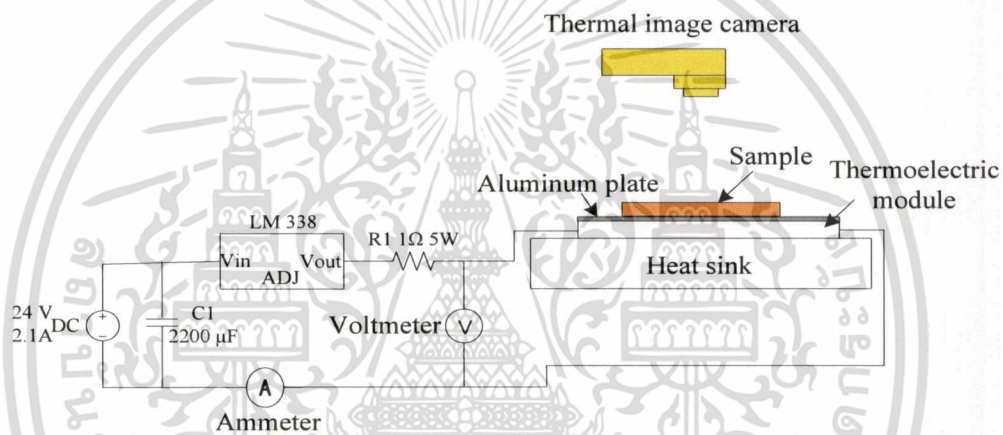


Figure 3. Experimental set-up

Fluke digital multi-meters were used to measure the voltage and current supplying to the thermoelectric device. An aluminium heat sink was attached to the cool surface of the thermoelectric device to help cooling the surface. Fluke thermal image camera (Model TI 32, 8 to 24 μ m, detector size of 320 x 240 pixels, measuring temperature range of 20°C to 600°C, thermal sensitivity of 0.05 K) was used to measure the surface temperature.

3.2 Measurement of thermal conductivity and thermal diffusivity

Experiments involved measuring the thermal conductivity of all selected materials samples with area of 4 cm² at room temperature (25±2°C). The first part of measurements was carried out on acrylic plate having a thickness of 3 mm to examine the experimented results with that from literatures. The second part of the experiments was carried out on typical biological materials, potato and apple, purchased from the local

supermarket. The average moisture content was 87% (wb) for fresh apple and 75% (wb) for potato. Samples were cross-sectionally cut with 3 mm and 6 mm thickness for doing the experiments. The measurements were repeated three times for each sample.

Samples were sufficiently flatted to ensure thermal contact between the thermoelectric device and the samples. Each sample was placed on the thermoelectric plate and heated until reaching the steady-state condition. Temperature rise, as a result of the applied heat flux, was monitored using the thermographic camera. A sample of thermal images captured during the experiment is given in Fig. 4 which shows both of the heating surface and the tested sample.

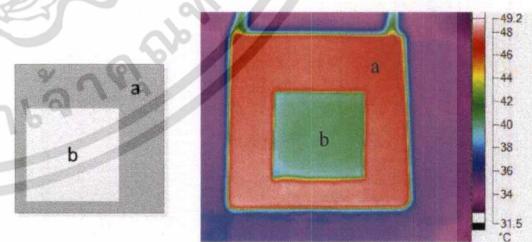


Figure 4. Thermal image of the thermoelectric module surface (a) and of the tested sample (b)

After obtaining the amount of heat applied to the sample and the transient-state temperature profile across the tested sample, the thermal conductivity of sample was estimated using the unidirectional heat transfer model in Eq. 3. The thermal diffusivity was then calculated with Eq. 1. The parameters used in the calculation and the estimated values of thermal conductivity and diffusivity along with literature values are given in Table 1.

Table 1
Thermo-physical properties of various materials

Type of material	Thickness (mm)	Density (kg/m ³)	Specific heat (J/kg·K)	Thermal conductivity (W/m·K.)		Thermal diffusivity (m ² /s)		References
				Experiments	Literatures	Experiments	Literatures	
Acrylic sheet	3	1,180	1,470	0.16-0.23	0.18	0.92-1.32x10 ⁻⁷	1.11-1.15x10 ⁻⁷	[3]
Apple	3	840	3,720-4,020	0.41-0.56	0.342-0.513	0.448-1.79x10 ⁻⁷	1.10x10 ⁻⁷	[2,8,20]
	6			0.45-0.55		1.44-1.76x10 ⁻⁷		
Potato	3	1,070	3,520	0.47-0.51	0.52 - 0.57	1.24-1.35x10 ⁻⁷	1.30-1.44x10 ⁻⁷	[21-23]
	6			0.41-0.47		1.08-1.24x10 ⁻⁷		

It could be seen that the estimated values of thermal conductivity and diffusivity obtained in this experiment are comparable to literature values. The results have proved the applicability of the proposed technique with the transient-states model. Due to moisture loss which could be a significant issue, the brief measuring period of the transient-state method makes it suitable for measuring thermal properties of materials with high moisture content such as food and biological materials [4]. According to Eq. 2, if heat flux is fixed, then the measurable range of thermal conductivity is dependent on the sensitivity of temperature measuring device. In this technique, the heat generated from thermoelectric device is quite low. Accordingly the technique is only suitable for measuring thermal conductivity of materials with low conductivity. However, the advantage of the proposed technique is that they are inexpensive and simple.

4. Conclusion

The thermal conductivity and thermal diffusivity of the selected food materials (apple and potato) estimated from the proposed transient-state model are in comparable ranges literature values. The experimental set-up consists of a thermoelectric device and a thermographic camera as a surface temperature measuring device. This technique is inexpensive and simple. It is suitable for materials having low conductivity. However, further research is still needed to investigate the effect of the heat applied to the sample and to compare the results between steady- and transient-state methods.

References

- [1] G. Betta, M. Rinaldi, D. Barbanti & R. Massini, A quick method for thermal diffusivity estimation: Application to several foods. *Journal of Food Engineering*, 91, 2009, 34-41.
 [2] S. Rahman, *Food properties Handbook* (Boca Roton, FL: CRC press, 1995).

- [3] C. Boué, & S. Holé, Infrared thermography protocol for simple measurements of thermal diffusivity and conductivity, *Infrared Physics & Technology*, 55, 2012, 376-379.
 [4] N.N. Mohsenin, *Thermal properties of foods and agricultural materials* (New York: Gordon and breach science publishers, 1980).
 [5] C. Lentz, Thermal conductivity of meats, fats, gelatin gels, and ice. *Food Technology*, 15, 1961, 243-247.
 [6] D. L. Fictch, A new thermal conductivity apparatus. *American Physics Teacher*, 3, 1935, 135-136.
 [7] W. N. Santos, Thermal properties of polymers by non-steady-state techniques, *Polymer Testing*, 26(4), 2007, 556-566.
 [8] V. E. Sweat, Experimental Values of thermal conductivity of selected fruits and vegetable, *J. Food Sci.*, 39, 1974, 1080-1083.
 [9] V. E. Sweat, & C. Haugh, A thermal conductivity probe for small food samples, *Trans. ASAE* 17, 1974, 56-58.
 [10] M. Rahman, & P. Potluri, Thermal conductivity of fresh and dried quid meat by line source thermal conductivity probe, *Journal of food Science*, 56(2), 1991, 582-583.
 [11] M. Balaban, & G. Pigott, Thermal conductivity, heat capacity and moisture isotherm of ocean perch at different, moisture levels and temperatures, *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 1(2), 1992, 57-74.
 [12] L. Kurozawa, A. El-Aouar, M. Simoes, P. Azoubel, & F. Murr, determination of thermal conductivity and thermal diffusivity of papaya (*Carica papaya* L.) as a function of temperature, In: *4th Mercosur Congress on process Systems Engineering*, Rio de Janeiro, 2005.
 [13] J. Valvano, J. Cochran, & K. Diller, Thermal conductivity and diffusivity of biomaterials measured with self-heated thermistors, *International Journal of Thermophysics*, 6, 1985, 301-311.
 [14] R. Kravets, Determination of thermal Conductivity of food materials. (Ph.D. Thesis, Virginia Tech. 1988).
 [15] M. van Gelder, K. Diehl, *A Thermistor Based Method for Measuring Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity of Moist Materials at High*

Temperatures, Thermal Conductivity (London: Academic Press, 1996)

[16] D. González-Mendizabal, P. Bortot, & A. L. López de Ramos, A thermal Conductivity Experimental Method based on the Peltier effect. *International Journal of Thermophysics*, 19(4), 1998, 1229-1238.

[17] A. A. Gowan, B. K. Tiwari, P. J. Cullen, K. McDonnell & C. Donnell, Application of thermal imaging in food quality and safety assessment, *Trends in food science & technology*, 21, 2010, 190-200.

[18] S.Chudzik, 2012 Thermal diffusivity measurement of insulating material using infrared thermography. *Infrared Physicas & Technology*, 55(1), 73-83.

[19] D. M. Rowe & G. Min, Evaluation of thermoelectric modules for power generation, *Journal of Powe Sources*, 73(2), 1998, 193-198.

[20] A. H. Bennett, W. G. Chace, Jr., & R. H. Cubbedge, Heat transfer Properties and Characteristics of Appalachian Area 'Red Delicious' Apple. *ASHRAE Transactions* 75, 1969, 133-142.

[21] D. Chen, *A New Method for HTST Sterilization of Particulate Foods* (Ph.D. Thesis, W. Lafayette India: Purdue University, 1988)

[22] A. N. Califano & A. Calvelo, Thermal Conductivity of Potato between 50 and 100°C, *Journal of Food Science*, 56(2), 1991, 586-587.

[23] T. R. A. Magee & T. Bransburg, Measurement of thermal diffusivity of potato, malt bread and wheat flour, *Journal of Food Engineering*, 25(2), 1995, 223-232.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 29 ละต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวเมธินี สงไทย
วัน เดือน ปี เกิด	5 มีนาคม 2534
ที่อยู่	357/37 หมู่ 4 แขวงคลองสองต้นนุ่น เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
ประวัติการศึกษา	
ระดับปริญญาตรี	(วศบ.) สาขาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2552 - 2555
ความชำนาญ	- การใช้กล้องถ่ายภาพความร้อน - การใช้เครื่องมือวัดในกระบวนการต่าง ๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้