

การหาสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของวัสดุชีวภาพด้วย
กล้องถ่ายภาพความร้อน

EMISSIVITY ESTIMATION OF BIOLOGICAL MATERIALS USING
INFRARED THERMOGRAPHY



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2559
KMITL-2016-EN-M-270-091

การหาสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของวัสดุชีวภาพด้วย
กล้องถ่ายภาพความร้อน

EMISSIVITY ESTIMATION OF BIOLOGICAL MATERIALS USING
INFRARED THERMOGRAPHY



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

KMITL-2016-EN-M-270-091

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EMISSION ESTIMATION OF BIOLOGICAL MATERIALS USING
INFRARED THERMOGRAPHY



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN FOOD ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2016
KMUTL-2016-EN-M-270-091

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2016

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การหาสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของวัสดุชีวภาพด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน
Thesis Title Emissivity Estimation of Biological Materials using Infrared Thermography
นักศึกษา นายกันต์ รักเรืองเดช
รหัสประจำตัว 58601299
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมอาหาร
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.นวกัทธา หนูนา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ (ร่วม) รศ.ดร.ทวีพล ชื้อสัตย์
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2016-EN-M-270-091

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ดร.เจษฎา	ชัยโฉม	
รศ.ดร.วิทยา	ทิพย์สุวรรณพร	
ดร.ยุทธพงศ์	ทัพผดุง	
รศ.ดร.ทวีพล	ชื้อสัตย์	
รศ.ดร.นวกัทธา	หนูนา	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 6 กรกฎาคม พ.ศ. 2559 เวลา 8.00-10.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น คณะวิศวกรรมศาสตร์ ขอสงวนสิทธิ์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงวันที่ 6 กรกฎาคม พ.ศ. 2559

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การหาสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของวัสดุชีวภาพ ด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน
นักศึกษา	นายกันต์ รักเรืองเดช
รหัสประจำตัว	58601299
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมอาหาร
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ. ดร.นวกัษรา หนูนาคน
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ (ร่วม)	รศ. ดร.ทวีพล ชื้อสตัย

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการหาสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน ($\epsilon_{7.5-13 \mu m}$) ของวัสดุชีวภาพที่อยู่ในสถานะของแข็ง ของแข็งขนาดเล็กมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน (ผง) ได้แก่ เม็ดแมงลัก ลูกเดือย และแป้งมัน และของเหลว ได้แก่ น้ำและซอสมะเขือเทศ และวัสดุทางวิศวกรรม ได้แก่ แผ่นอลูมิเนียม แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมแบบเรียบและแบบหยาบ แผ่นทองแดง และแผ่นอะคริลิก โดยใช้กล้องถ่ายภาพความร้อน ชุดการทดลองประกอบด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนที่รับรังสีย่านอินฟราเรด เทอร์โมคัปเปิลแบบสัมผัสชนิด K ขาตั้งกล้อง อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ แผ่นอลูมิเนียมใช้สำหรับนำความร้อนสู่ตัวอย่างทดสอบ วัสดุอ้างอิง และกล่องควบคุมสภาวะแวดล้อมที่พื้นผิวภายในบุด้วยวัสดุที่มีสมบัติการสะท้อนรังสีสูงโดยใช้อลูมิเนียมพอลีและสมบัติการสะท้อนรังสีต่ำโดยใช้กระดาษสีดำด้าน จากการทดลอง พบว่า ค่า ϵ ที่วัดได้จากกล้องถ่ายภาพความร้อนและจากวิธีการคำนวณเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงจากงานวิจัยอื่น ๆ มีผลที่สอดคล้องกัน โดยกลุ่มวัสดุที่มีสมบัติการสะท้อนต่ำสามารถใช้กล่องควบคุมสภาวะแวดล้อมที่ภายในบุด้วยวัสดุที่มีสมบัติการสะท้อนสูงกว่าหรือต่ำกว่าก็ได้ สำหรับกลุ่มวัสดุที่มีสมบัติการสะท้อนสูงควรใช้กล่องควบคุมสภาวะแวดล้อมที่ภายในบุด้วยวัสดุที่มีสมบัติการสะท้อนสูงกว่าวัสดุทดลอง หรืออาจใช้วิธีการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน

Thesis Title	Emissivity Estimation of Biological Materials using Infrared Thermography
Student	Mr.Kun Rukreangdach
Student ID.	58601299
Degree	Master of Engineering
Program	Food Engineering
Year	2016
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr.Navapattra Nunak
Co – Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr.Taweepol Suesut

ABSTRACT

This thesis proposes the technique to measure the band emissivity of sweet basil seed, job's-tears, flour, water, tomato sauce, aluminium plate, rough and smooth stainless steel plates, copper plate, and acrylic plate using the infrared thermography with a band pass filter from 7.5 μm to 13 μm . The experimental setup consists of an infrared camera, K-type contact thermocouples, a tripod, a water bath, aluminium plate as a heat conduction material to the tested sample, a reference material, and the environmental control chamber with two types of lining materials, i.e. aluminium foil as a high reflective material and black paper as a low reflective material. Results were found that ϵ values measured from infrared thermography and calculated from theory of radiation were in agreement of the findings from other literatures. The group of low reflective materials could be tested in the environmental control chamber with any types of materials lining in the internal surface. Whereas, the group of high reflective materials should be tested in the environmental control chamber with having a higher reflectivity value than the tested sample. The calculation of emissivity with the theory of radiation was more suitable method for the ϵ estimation of high reflective materials

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. นวภัทรา หนูนาท อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำที่ดีเสมอมา และขอขอบคุณ รศ.ดร.ทวีพล ชื่อสัตย์ อาจารย์ที่ปรึกษารวมวิทยานิพนธ์ ที่ช่วยทำให้วิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงด้วยดี และที่ขาดไม่ได้คือคณาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมอาหารทุกท่าน ที่ให้ความรู้และสนับสนุนการทำวิจัยในครั้งนี้

ขอกราบขอบพระคุณพ่อ คุณแม่ พี่น้องและเพื่อน ๆ ที่คอยให้กำลังใจ และขอบคุณพี่ ๆ ในห้องปฏิบัติการ เช่น คุณเมธินี สงไทย และคุณธีระวัฒน์ หนูนาท และทุก ๆ คนที่เกี่ยวข้องสำหรับการความสนับสนุนช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ

สุดท้ายนี้คุณค่าและคุณประโยชน์ที่ได้จากการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ ผู้เขียนขอบอบแต่ผู้มีพระคุณทุกๆ ท่าน และขอให้ทุกๆ ท่านจงมีแต่ความสุขความเจริญตลอดไป

กันต์ รักเรืองเดช

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	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	3
1.6 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 นิยามของวัสดุชีวภาพ.....	5
2.2 การแผ่รังสีความร้อนและสมบัติที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.2.1 กลไกการแผ่รังสีความร้อน	5
2.2.2 การแผ่รังสีความร้อนของวัตถุทางอุดมคติ	7
2.2.3 สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน.....	8
2.2.4 รังสีที่แผ่ออกจากพื้นผิววัตถุ	12
2.3 การแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนระหว่างพื้นผิว.....	12
2.3.1 สัดส่วนพื้นที่การมองเห็นอัตราการแผ่รังสีความร้อน.....	12
2.3.2 อัตราการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนสุทธิ.....	14
2.4 กล้องถ่ายภาพความร้อน.....	14
2.4.1 หลักการทำงานของกล้องถ่ายภาพความร้อน.....	14
2.4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อความถูกต้องการวัดอุณหภูมิด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน....	15
2.4.3 คุณลักษณะสถิติของกล้องถ่ายภาพความร้อน.....	17
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการทดลอง	26
3.1 วัสดุทดลอง.....	26
3.1.1 วัสดุวิศวกรรม	26
3.1.2 วัสดุชีวภาพ.....	26
3.2 การออกแบบชุดทดลอง.....	27
3.2.1 ชุดให้ความร้อน.....	28
3.2.2 อุปกรณ์เสริม.....	30
3.2.3 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ.....	31
3.3 การทดลอง	33
3.3.1 การทดลองเบื้องต้น.....	33
3.3.2 การวัดสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน.....	35
3.4 การคำนวณสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน.....	36
3.4.1 กรณีพื้นที่ผิวภายในกล่องควบคุมสภาวะแวดล้อมมีค่าสมบัติการสะท้อนสูง..	37
3.4.2 กรณีพื้นที่ผิวภายในกล่องควบคุมสภาวะแวดล้อมมีค่าสมบัติการสะท้อนต่ำ..	40
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	43
4.1 การแปลผลภาพถ่ายความร้อน.....	43
4.1.1 กล่องควบคุมสภาวะแวดล้อมมีสมบัติการสะท้อนสูง.....	43
4.1.2 กล่องควบคุมสภาวะแวดล้อมมีสมบัติการสะท้อนต่ำ.....	46
4.2 ผลของสภาวะแวดล้อมที่มีต่อการหาสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน.....	48
4.2.1 ผลการทดลองหาสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน.....	48
4.2.2 การวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนจากกราฟ	50
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	55
5.1 สรุปผลการวิจัย	55
5.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัย	56
เอกสารอ้างอิง	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และดัดแปลงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก	61
ภาคผนวก ก ข้อมูลการทดลองและตัวอย่างการคำนวณการหาสัมประสิทธิ์แผ่รังสีความร้อน	62
ภาคผนวก ข ภาคผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์	68
ประวัติผู้เขียน	74



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของวัสดุชนิดต่าง ๆ.....	10
3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ประกอบชุดทดลองสำหรับการหาสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน	28
3.2 ถาดรองรับวัสดุทดลองที่มีลักษณะเป็นของแข็งขนาดเล็กและของเหลว.....	30
3.3 สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของวัสดุที่มีสมบัติการสะท้อนสูง.....	34
4.1 ผลการทดลองหาสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนที่มุม θ เท่ากับ 0°	54



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 สเปกตรัมของย่านการแผ่รังสีความร้อน.....	6
2.2 ทิศทางและปริมาณการแผ่รังสีความร้อน (EDX).....	7
2.3 การพิจารณาเกี่ยวกับ View factor และการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนระหว่างพื้นผิวเล็กๆ dA_i และ dA_j	13
2.4 FOV และ IFOV และบริเวณการมองเห็นจากกล้อง TI	16
2.5 ชุดทดลองของ Shi <i>et al.</i> [4].....	19
2.6 ชุดทดลองของ Marinetti and Cearatto [5].....	20
2.7 ชุดทดลองของ Nunak <i>et al.</i> [8].....	22
2.8 ชุดทดลองของ Suesut <i>et al.</i> [10].....	23
2.9 ชุดทดลองของ Lo'pez <i>et al.</i> [7].....	24
2.10 ชุดทดลองของ Yu <i>et al.</i> [9].....	25
3.1 วัสดุวิศวกรรม.....	26
3.2 วัสดุทางชีวภาพ.....	27
3.3 การออกแบบชุดทดลอง.....	27
3.4 อ่างควบคุมอุณหภูมิ.....	29
3.5 แผ่นอลูมิเนียม.....	29
3.6 ถาดรองรับวัสดุชีวภาพที่เป็นเมล็ด ผง และของเหลว.....	30
3.7 แผ่นวัสดุอ้างอิงและกล้องควบคุมสภาวะแวดล้อม.....	31
3.8 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ.....	32
3.9 การหาระยะตั้งกล้องถ่ายภาพความร้อนจากการคำนวณด้วยค่า FOV และพิจารณาขนาด วัสดุทดลอง.....	32
3.10 การหาสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของวัสดุตัวอย่างด้วยการวิเคราะห์ภาพถ่ายความ ร้อน.....	34
3.11 การวางวัสดุทดลอง.....	35
3.12 พลังงานการแผ่รังสีความร้อนและอัตราแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนสุทธิแต่ละพื้นผิว.....	36
4.1 ภาพถ่ายความร้อนของวัสดุทดลองกรณีกล้องควบคุมสภาวะแวดล้อมมีสมบัติการสะท้อนสูง	44
4.2 ภาพถ่ายความร้อนของวัสดุทดลองกรณีกล้องควบคุมสภาวะแวดล้อมมีสมบัติการสะท้อนต่ำ	46
4.3 สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนกับอุณหภูมิที่ผิววัสดุทดลองซึ่งอ่านจากกล้องถ่ายภาพ ความร้อนกรณีกล้องควบคุมสภาวะแวดล้อมมีสมบัติการสะท้อนต่ำ.....	51

สารบัญรูปรภาพ (ต่อ)

รูปที่

หน้า

- 4.4 สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนกับอุณหภูมิที่ผิววัสดุทดลองซึ่งอ่านจากกล้องถ่ายภาพ
ความร้อนกรณีกล่องควบคุมสภาวะแวดล้อมมีสมบัติการสะท้อนสูง..... 52



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุณหภูมิเป็นตัวแปรทางฟิสิกส์ที่มีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมอาหาร โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับกระบวนการแปรรูปอาหารที่ต้องใช้ความร้อนหรือความเย็นเพื่อการฆ่าเชื้อหรือยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ เช่น การวัดอุณหภูมิในระหว่างกระบวนการ การวัดอุณหภูมิของการจัดเก็บรักษาวัตถุดิบหรือผลิตภัณฑ์ เป็นต้น เพื่อการตรวจสอบและควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหาร โดยการวัดอุณหภูมิของอาหารหรืออุณหภูมิพื้นผิวของวัสดุที่สัมผัสอาหารสามารถใช้อุปกรณ์วัดอุณหภูมิได้ทั้งแบบสัมผัส ได้แก่ เทอร์โมคัปเปิล เทอร์มิสเตอร์ และอาร์ทีดี เป็นต้น และอุปกรณ์วัดอุณหภูมิแบบไม่สัมผัส ได้แก่ กลุ่มไพโรมิเตอร์ เช่น ไพโรมิเตอร์ชนิดเชิงแสง ชนิดความร้อน และชนิดอินฟราเรด ซึ่งมีลักษณะเด่น คือ สามารถใช้วัดอุณหภูมิได้ในระยะไกลโดยไม่ต้องสัมผัสและไม่ทำลายวัตถุ ซึ่งจัดเป็นกลุ่มอุปกรณ์วัดอุณหภูมิที่ถูกต้องตามหลักสุลักษณะของการผลิตอาหาร โดยไพโรมิเตอร์ชนิดอินฟราเรดประเภทกล้องถ่ายภาพความร้อน (Thermal Image camera , TI) เป็นเครื่องมือวัดที่นิยมใช้งาน เนื่องจากสามารถบ่งชี้จุดร้อนหรือเย็นที่ปรากฏบนภาพความร้อนได้อย่างรวดเร็วและมีงานการวัดอุณหภูมิที่กว้าง [1] ความถูกต้องของอุณหภูมิที่วัดได้จากการใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนในเชิงปริมาณ ขึ้นอยู่กับการป้อนค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของวัตถุ (Emissivity, ϵ) และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมโดยรอบ (Surrounding Temperature: T_{sur}) ให้กับอุปกรณ์ โดยค่า ϵ เป็นสมบัติเชิงความร้อนที่แสดงถึงความสามารถในการแผ่รังสีความร้อนของวัตถุ ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ผิววัตถุลักษณะเชิงพื้นผิวของวัตถุ มุมและทิศทางการแผ่รังสีความร้อน ช่วงความยาวคลื่น และค่าการสะท้อนรังสีของผิววัตถุ (Reflection: R) เป็นต้น [2 - 6, 8, 10 - 12]

มีนักวิจัยหลายท่านศึกษาการหา ϵ ด้วยวิธีการที่ต่างกันไป ซึ่งงานวิจัยที่นำผลของอุณหภูมิสะท้อนจากสิ่งแวดล้อมโดยรอบมาพิจารณาร่วมด้วยให้ค่าที่ถูกต้องใกล้เคียงความจริง แต่ชุดทดลองที่ออกแบบค่อนข้างซับซ้อน [2, 4 - 6, 8, 10, 11] และมีบางงานวิจัยที่ไม่ได้นำผลของอุณหภูมิสะท้อนจากสิ่งแวดล้อมโดยรอบมาพิจารณาร่วมด้วย ส่งผลให้ค่าที่ได้คลาดเคลื่อนจากค่าจริง [5] นอกจากนี้ความแตกต่างด้านอุณหภูมิสะท้อนแล้ววิธีการให้ความร้อนกับวัสดุตัวอย่างในงานวิจัยต่าง ๆ ยังแตกต่างกันด้วย เช่น การเปลี่ยนรูปแบบพลังงานไฟฟ้าเป็นความร้อน [4] การถ่ายเทความร้อนโดยอาศัยกลไกการนำความร้อนด้วยการสัมผัสกันโดยตรงระหว่างแหล่งความร้อนกับวัสดุตัวอย่าง เช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุวิศวกรรม วัสดุไฟฟ้า และวัสดุการเกษตรหรือวัสดุชีวภาพ [2, 3, 5, 6, 8, 9] ซึ่งวิธีการดังกล่าวมีข้อจำกัด คือ ขนาดวัสดุต้องมีขนาดเล็กและบางเพื่อให้เกิดการนำความร้อนมิติเดียวแล้วเข้าสู่สภาวะคงตัว และไม่สามารถนำวิธีดังกล่าวใช้กับวัสดุชีวภาพได้เนื่องจากจะทำให้ตัวอย่างเสียหายได้ จึงมีนักวิจัยบางท่าน เช่น Lo'pez *et al* [7] ได้ทดลองหา ϵ ของใบไม้โดยใช้น้ำร้อนเป็นตัวกลาง ซึ่งวิธีนี้มีข้อจำกัด คือ การให้ความร้อนด้วยวิธีนี้วัสดุต้องเบาหรือลอยบนผิวน้ำได้ สำหรับการให้ความร้อนตัวอย่างด้วยกลไกการพาความร้อน Suesut *et al.* [10], Nunak *et al.* [11] และ ดาวสวัสดิ์และคณะ [12] ได้ให้ความร้อนกับวัสดุตัวอย่างโดยใช้ลมร้อนจากตู้อบร่วมกับการแผ่รังสีความร้อนจากผนังเตาอบบางส่วน ซึ่งวิธีนี้มีข้อจำกัด คือ ขึ้นตัวอย่างควรวางในตำแหน่งที่ลมร้อนสัมผัสได้อย่างทั่วถึงและการออกแบบตู้ควบคุมสภาวะแวดล้อมต้องพิจารณาวัสดุที่เหมาะสม และอาจจำเป็นต้องติดตั้งหน้าต่างอินฟราเรด (IR-window) เพิ่มที่ตู้เพื่อควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ รวมถึงวิธีการทั้งหมดที่กล่าวถึงยังไม่สามารถใช้กับตัวอย่างที่เป็นของเหลวได้ และสุดท้ายการให้ความร้อนด้วยการแผ่รังสีความร้อนมีข้อจำกัดเกี่ยวกับสมบัติด้านการแผ่รังสีความร้อนและอุณหภูมิผิวของวัสดุที่เลือกใช้เป็นแหล่งให้ความร้อน โดยหากต้องการพลังงานการแผ่รังสีความร้อนจากผนังตู้ที่มากต้องเลือกใช้วัสดุทำผนังที่มีค่า ϵ สูงและมีอุณหภูมิสูง ซึ่งส่งผลกระทบต่อวัสดุที่พื้นผิวมันวาว เนื่องจากพลังงานส่วนใหญ่ที่แผ่ออกจากตัววัตถุจะเป็นพลังงานสะท้อน [13]

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงนำเสนอวิธีการหา ϵ แบบช่วงความยาวคลื่น (Band emissivity) ของวัสดุชีวภาพที่อยู่ในสถานะของแข็ง ของแข็งขนาดเล็กมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน (ผง) และของเหลว โดยการให้ความร้อนแก่วัสดุตัวอย่างด้วยกลไกการนำความร้อนผ่านน้ำร้อนในอ่างควบคุมอุณหภูมิผ่านภาชนะหรือตัวกลางที่มีสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูงไปยังวัสดุตัวอย่าง และเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้กับผลที่ได้จากการคำนวณด้วยหลักการแผ่รังสีความร้อน โดยเริ่มทำการทดลองจากการหาค่า ϵ ของวัสดุทางวิศวกรรมที่พื้นผิวมีความมันวาว เพื่อหาวิธีที่เหมาะสมสำหรับวัสดุที่มีความมันวาวและเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของวิธีการทดลองที่นำเสนอและเปรียบเทียบผลที่ได้กับค่าอ้างอิงจากงานวิจัยอื่น ๆ

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาวิธีการหาสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของวัสดุวิศวกรรมที่มีลักษณะพื้นผิวมันวาวและวัสดุชีวภาพ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1) วัสดุที่ใช้ทดลอง ประกอบด้วย วัสดุวิศวกรรมที่ส่วนใหญ่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร ได้แก่ แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด ASTM 304 แบ่งเป็นแบบเรียบที่มีค่าความขรุขระ $0.4 \mu\text{m}$ และแบบหยาบที่มีค่าความขรุขระ $3.2 \mu\text{m}$ แผ่นอะคริลิก แผ่นทองแดง และแผ่นอลูมิเนียม และวัสดุชีวภาพ แบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มของแข็ง ได้แก่ ลูกเต๋อย แมงลัก และผงแป้ง และกลุ่มของเหลว ได้แก่ น้ำและซอสมะเขือเทศ

2) การให้ความร้อนแก่วัสดุตัวอย่าง ใช้กลไกการนำความร้อนจากน้ำร้อนอุณหภูมิไม่เกิน 85°C ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ ผ่านภาชนะหรือตัวกลางที่มีสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูงไปยังวัสดุทดลอง

4) วัสดุทางชีวภาพที่เลือกใช้ต้องไม่มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะพื้นผิวที่ส่งผลต่อค่า ϵ ระหว่างการให้ความร้อน

5) การวิเคราะห์และแปลผลภาพถ่ายความร้อนทำโดยใช้โปรแกรม Smart view ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์สำเร็จรูปของกล้องถ่ายภาพความร้อนยี่ห้อ FLUKE

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1) ศึกษาทฤษฎีการแผ่รังสีความร้อน การแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนระหว่างพื้นผิว และหลักการประยุกต์ใช้กล้องถ่ายภาพความร้อน

2) ศึกษาวิธีใช้เครื่องมือวัดอุณหภูมิชนิดต่าง ๆ ได้แก่ ดิจิตอลเทอร์โมมิเตอร์ เทอร์โมคัปเปิล และกล้องถ่ายภาพความร้อน

3) ศึกษาการวิเคราะห์ภาพถ่ายความร้อน

4) ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาวิธีการหา ϵ ของวัสดุแต่ละประเภท

5) ออกแบบชุดทดลองวัดค่า ϵ ของวัสดุวิศวกรรมและวัสดุชีวภาพ เพื่อให้ได้สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทดลอง

6) คำนวณค่าพลังงานการแผ่รังสีความร้อนและอัตราแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนสุทธิ ในแต่ละสภาวะหรือสมมติฐานที่เกี่ยวข้อง

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

ได้วิธีการหา ϵ ของวัสดุชีวภาพที่อยู่ในสถานะของแข็งและของเหลวในชุดทดลองเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาทั้งหมดออกเป็น 5 บทคือ โดยเนื้อหาแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ ขอบเขตของการวิจัย ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย ประโยชน์ที่ได้รับ และรายละเอียดของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ นิยามของวัสดุชีวภาพ การแผ่รังสีความร้อนและการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนระหว่างพื้นผิว กล้องถ่ายภาพความร้อน คุณลักษณะสถิติของกล้องถ่ายภาพความร้อน และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 กล่าวถึงวัสดุอุปกรณ์ การออกแบบชุดทดลอง ขั้นตอนการทดลอง การทดลองเบื้องต้น การวิเคราะห์การแผ่รังสีความร้อน การคำนวณค่า ε และปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการวัดค่า ε

บทที่ 4 กล่าวถึงการวิเคราะห์และการแปลผลภาพถ่ายความร้อน การประมาณค่า ε ของวัสดุทดลอง และการคำนวณค่า ε โดยอาศัยทฤษฎีการแผ่รังสีความร้อน

บทที่ 5 กล่าวถึงบทสรุปผลการวิจัย ข้อเสนอแนะ และแนวทางการนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ

บทที่ 2

ตรวจเอกสาร

2.1 นิยามของวัสดุชีวภาพ

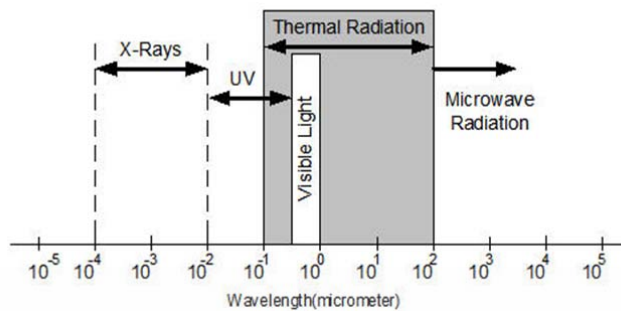
วัสดุชีวภาพ (Biological material) คือ วัสดุที่พบได้ตามธรรมชาติและได้จากสิ่งมีชีวิต ได้แก่ วัสดุอาหาร ผลผลิตทางการเกษตร และวัสดุทางชีวการแพทย์ เป็นต้น [30, 31] สำหรับวัสดุอาหาร เป็นกลุ่มของวัสดุชีวภาพที่มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกายภาพ รูปร่าง ลักษณะพื้นผิว และสมบัติเชิงเคมีเมื่อได้รับความร้อน เช่น กลุ่มเมล็ดพืช เช่น เมล็ดแมงลัก ลูกเดือย จะเสียรูปและไหม้ได้ที่อุณหภูมิสูง แต่การอบแห้งเมล็ดพืชที่อุณหภูมิ 105-133°C ที่ระยะเวลาเหมาะสมตามหลักการทำให้แห้ง เมล็ดพืชยังไม่มีการเสียรูปเนื่องจากความร้อนทำให้น้ำในเมล็ดพืชระเหยเท่านั้น [32] สำหรับกลุ่มของแป้งประกอบอาหารเมื่อมีการผสมน้ำแล้วให้ความร้อนจะเกิดการเปลี่ยนรูปด้วยกระบวนการเจลาติไนเซชัน (Gelatinization) ซึ่งมีอุณหภูมิเริ่มต้นที่ทำให้แป้งกับน้ำเกิดการเจลาติไนเซชันตั้งแต่ 65 – 85°C และกลุ่มของวัสดุอาหารประเภทของเหลว เช่น น้ำจะมีการระเหยกลายเป็นไอที่อุณหภูมิตั้งแต่ 100 °C แต่สำหรับอาหารเหลวที่เป็นของผสมหรือเป็นสารละลายเนื้อเดียวจะมีจุดเดือดที่สูงกว่าน้ำบริสุทธิ์ตามสมบัติคอลลิเกทีฟ (colligative properties)

2.2 การแผ่รังสีความร้อนและสมบัติที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 กลไกการแผ่รังสีความร้อน

การแผ่รังสีความร้อน (Radiation) คือ การถ่ายเทความร้อนจากวัตถุโดยไม่ต้องอาศัยตัวกลางเกิดขึ้นเมื่อวัตถุมีอุณหภูมิมากกว่า 0 องศาสัมบูรณ์ (-273.15°C หรือ 0 K) ทำให้เกิดการสั่น (Oscillations) และการเคลื่อนที่ (Transition) ของอิเล็กตรอนซึ่งประกอบกันเป็นสสาร โดยการแผ่รังสีความร้อนของวัตถุอยู่ในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าย่านคลื่นความร้อน (Thermal radiation) ซึ่งมีความยาวคลื่น (λ) ตั้งแต่ 10^{-1} - 10^2 μm ประกอบด้วย ย่านรังสีอินฟราเรด (IR) ซึ่งมีความยาวคลื่นตั้งแต่ 0.75 - 100 μm ย่านแสงซึ่งมีความยาวคลื่นตั้งแต่ 0.3 - 0.75 μm และย่านรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV) บางส่วน ซึ่งมีความยาวคลื่นตั้งแต่ 0.1 - 0.3 μm [1, 13] สเปกตรัมของย่านการแผ่รังสีความร้อนแสดงดังรูปที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

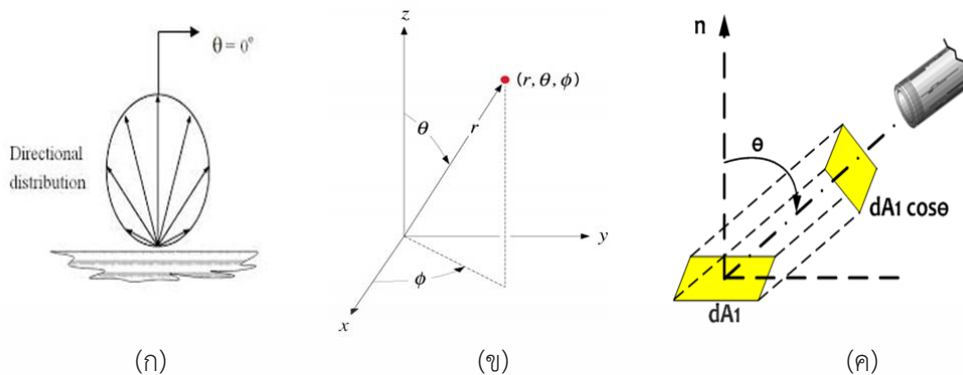


รูปที่ 2.1 สเปกตรัมของย่านการแผ่รังสีความร้อน [15]

ปริมาณการแผ่รังสีความร้อนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของวัตถุ ช่วงความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ออกจากวัตถุ และทิศทางการแผ่รังสีความร้อน โดยปริมาณการแผ่รังสีความร้อนออกจากวัตถุเกิดขึ้นในทุกทิศทางแบบพิกัดทรงกลมและในแต่ละทิศทางมีปริมาณที่ไม่เท่ากันดังแสดงในรูป 2.2 โดย r คือตำแหน่งที่พิจารณาความเข้มของการแผ่รังสีความร้อน θ คือ มุมที่วัดเทียบกับแนวตั้ง (แกน Z) หรือเรียกว่า Polar angle และ ϕ คือ มุมที่วัดโดยกวาดบนพื้นราบบนฐานระนาบของครึ่งทรงกลม (Azimuth angle) หรือบนระนาบ XY จากรูปจะเห็นได้ว่าทิศทางทำมุม 0 องศา กับแนวตั้งมีปริมาณความเข้มการแผ่รังสีความร้อนมากที่สุด กรณีที่วัตถุมีปริมาณการแผ่รังสีความร้อนออกมาเท่ากันทุกทิศทางเรียกว่า “Diffuse emitter”

โดยความเข้มของรังสีที่แผ่ออกมาจะพิจารณาจากอัตราการแผ่รังสีที่ออกจากพื้นที่ย่อย dA_1 แผ่ลงบนพื้นที่ย่อย dA_n ในลักษณะของมุมตันรูปกรวย (Solid angle) ปริมาณดังกล่าวสามารถเขียนในรูปของความเข้มการแผ่รังสีเชิงสเปกตรัม (Spectral intensity : $I_{\lambda, \phi}$) ซึ่งมีนิยาม คือ เป็นพลังงานความร้อน (dq) ที่ถูกปลดปล่อยออกมาที่ความยาวคลื่น λ ในทิศทาง (θ, ϕ) ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิวที่แผ่รังสี (ในทิศทางที่ตั้งฉากกับการแผ่รังสี) ดังรูปที่ 2.3 (ค) ต่อหน่วย solid angle (หน่วยเป็นสเตอเรเดียน : sr) และต่อช่วงความยาวคลื่น $d\lambda$ ความเข้มของการแผ่รังสีมักใช้แนวคิดของค่าการแผ่รังสี (Emissive power) ซึ่งมีนิยามคือ กำลังการแผ่รังสีของพื้นผิวหรือปริมาณการแผ่รังสีต่อหน่วยพื้นที่ โดยอัตราการแผ่รังสีจากหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิวในช่วงความยาวคลื่นหนึ่งตลอดทุกทิศทางเรียกว่า Spectral emissive power (E_λ : $W/m^2 \cdot \mu m$) และอัตราการแผ่รังสีจากพื้นที่หนึ่งหน่วยในทุกความยาวคลื่นและทุกทิศทางเรียกว่า Total emissive power (E : $W/m^2 \cdot \mu m$) หากวัตถุมีพื้นผิวเป็นแบบ Diffuse emitter หรืออัตราการแผ่รังสีความร้อนขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นและอุณหภูมิแต่ไม่ขึ้นอยู่กับทิศทาง จะได้ว่า $E_\lambda(\lambda) = I_{\lambda, \phi}(\lambda)$ จึงสรุปได้ว่าพลังงานความร้อนที่แผ่ออกมาจากพื้นผิววัตถุ คือ ความเข้มการแผ่รังสีความร้อนนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 (ก) การแผ่รังสีจากพื้นผิวแปรผันตามทิศทาง และ (ข) ปริมาณการแผ่รังสีความร้อนในทิศทางต่าง ๆ (ค) ภาพฉายพื้นผิวที่เล็กที่สุด (dA_1) ในทิศทางการแผ่รังสีความร้อน [13]

2.2.2 การแผ่รังสีความร้อนของวัตถุทางอุดมคติ

วัตถุทางอุดมคติ (blackbody) เป็นวัตถุทางอุดมคติด้านการแผ่รังสีความร้อนที่ใช้สำหรับเปรียบเทียบปริมาณการแผ่รังสีที่ออกจากพื้นผิวจริงใด ๆ มีสมบัติดังนี้

- 1) มีความสามารถดูดซับรังสีความร้อนที่มาจากกระหอบนวัตถุทั้งหมดทุกความยาวคลื่นและทุกทิศทาง
- 2) มีความสามารถแผ่รังสีความร้อนได้สูงสุดเมื่อเทียบกับวัตถุใด ๆ ณ ความยาวคลื่นและอุณหภูมิเดียวกัน
- 3) เป็น “Diffuse emitter”

แม้ว่าจะมีพื้นผิวบางชนิดที่สามารถประมาณได้ว่ามีลักษณะเป็น blackbody แต่ในความเป็นจริงแล้วไม่มีพื้นผิวใดที่มีลักษณะเป็น blackbody อย่างแท้จริง นักฟิสิกส์ชาวเยอรมัน Mr. Planck ได้อธิบายสมการการคำนวณพลังงานการแผ่รังสีความร้อนของวัตถุอุดมคติ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดย T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K) ของวัตถุอุดมคติเนื่องจากวัตถุอุดมคติเป็น diffuse emitter จะได้รับความสัมพันธ์ดังสมการ 2.1

$$E_{\lambda,b}(\lambda, T) = \pi I_{\lambda,b}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(\frac{C_2}{\lambda T}) - 1]} \quad (2.1)$$

โดยมีค่าคงที่ $C_1 = 2\pi hc^2 = 3.742 \times 10^4 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4 / \text{m}^2$ และ $C_2 = hc/k = 1.439 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$
 T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K) และ c คือ ความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสุญญากาศ $3 \times 10^8 \text{ m/s}$
 k คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ (W/mK) และ h คือ ค่าคงที่ของพลังค์มีค่าเท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.63×10^{-34} J.s และต่อมา Stefan-Boltzmann นักวิทยาศาสตร์ชาวออสเตรีย ได้ศึกษาการแผ่รังสีความร้อนของวัตถุดำตลอดทุกความยาวคลื่นได้ค่ากำลังการแผ่รังสีความร้อนแบบเฉลี่ยค่าทุกความยาวคลื่นและทุกทิศทาง (Total emissive power, E_b) ดังสมการที่ 2.2 เรียกว่า Stefan-Boltzmann Law

$$E_b = \sigma T^4 \quad (2.2)$$

โดยที่ σ คือค่าคงที่ของสเตฟานโบลท์ที่มีค่าเท่ากับ $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$

2.2.3 สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน

สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน (Emissivity: ϵ) ซึ่งเป็นคุณสมบัติเชิงความร้อนของวัตถุเกี่ยวกับการแผ่รังสีความร้อน โดยมีนิยาม คือ อัตราส่วนของกำลังการแผ่รังสีความร้อนจากพื้นผิววัตถุใด ๆ ต่อกำลังการแผ่รังสีความร้อนจากพื้นผิว blackbody ณ อุณหภูมิและความยาวคลื่นเดียวกัน ซึ่งค่า ϵ ของวัตถุจะสัมพันธ์กับทิศทางและความยาวคลื่นที่ถูกแผ่ออกมา [1, 4 - 6, 12-14] โดยค่า ϵ ของวัตถุสามารถแบ่งประเภทตามความยาวคลื่นและทิศทางได้ 6 ประเภท ดังนี้

1) Spectral directional emissivity ($\epsilon_{\lambda,\theta}$) หรือ $\epsilon_{\lambda,\theta,\phi}(\lambda, \theta, \phi, T)$ เป็นสัดส่วนของความเข้มในการแผ่รังสีจากพื้นผิวจริงที่มีอุณหภูมิ T ในช่วงความยาวคลื่นหนึ่ง ในทิศทาง θ และ ϕ ต่อความเข้มในการแผ่รังสีจาก blackbody ที่อุณหภูมิและความยาวคลื่นเดียวกัน และพื้นผิวมีการแผ่รังสีด้วยความเข้มสม่ำเสมอที่ $\theta \leq 15^\circ$

2) Total directional emissivity (ϵ_θ) หรือ $\epsilon_{\theta,\phi}(\theta, \phi, T)$ เป็นสัดส่วนของความเข้มในการแผ่รังสีจากพื้นผิวจริงที่มีอุณหภูมิ T ตลอดทุกความยาวคลื่น และในทิศทาง θ และ ϕ ต่อความเข้มในการแผ่รังสีจาก blackbody ที่อุณหภูมิและความยาวคลื่นเดียวกัน หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นค่าเฉลี่ยของ $\epsilon_{\lambda,\theta}$ ตลอดความยาวคลื่น

3) Spectral hemispherical emissivity ($\epsilon_\lambda(\lambda, T)$) คือ สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนที่พิจารณาโดยเฉลี่ยบนพื้นผิว ซึ่งกระจายเท่ากันตลอดทั้งพื้นผิวอุณหภูมิใด ๆ เมื่อพิจารณาจากความเข้มการแผ่รังสีความร้อนที่ความยาวคลื่นใดความยาวคลื่นหนึ่ง λ ดังนั้น จึงเป็นค่า ϵ ของวัตถุจริงที่มีอุณหภูมิ T ที่ความยาวคลื่นหนึ่งตลอดทุกทิศทางและมีกำลังการแผ่รังสีความร้อนเป็น $E_{\lambda,e}(\lambda, T)$ ซึ่งเทียบกับกำลังการแผ่รังสีความร้อนของ blackbody ($E_{\lambda,b}(\lambda, T)$) จากคำจำกัดความดังกล่าวสามารถเขียนแทนได้ด้วยดังสมการ 2.3

$$\varepsilon_{\lambda}(\lambda, T) = \frac{E_{\lambda,e}(\lambda, T)}{E_{\lambda,b}(\lambda, T)} \quad (2.3)$$

4) Total hemispherical emissivity ($\varepsilon(T)$) เป็นค่าเฉลี่ยของ Emissivity ตลอดทุกทิศทาง และทุกความยาวคลื่น ดังสมการที่ 2.4

$$\varepsilon(T) = \frac{E(T)}{E_b(T)} \quad (2.4)$$

(สามารถใช้คำว่า Total emissivity แทน Total hemispherical emissivity ได้)

นอกจากนั้นยังมีนิยามของค่า emissivity อื่น ๆ ที่มองในมุมมองการใช้งานในย่านความยาวคลื่นต่างๆ (Band) และนิยามของค่า emissivity ในมุมมองด้านการใช้เซนเซอร์ตรวจจับรังสีอินฟราเรด ได้แก่ Band emissivity และ Effective emissivity

5) Band emissivity $\varepsilon_b(\lambda_1, \lambda_2, T)$ เป็นสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนที่พิจารณาโดยการเฉลี่ยค่าพลังงานที่เปล่งรังสีตั้งแต่ความยาวคลื่นค่าแรกถึงความยาวคลื่นค่าสุดท้ายในช่วงความยาวคลื่นนั้น ๆ ที่อุณหภูมิพื้นผิวและช่วงความยาวคลื่นเดียวกัน การหาสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนทำได้โดยอินทิเกรตตลอดความยาวคลื่นแรก λ_1 ถึงความยาวคลื่นสุดท้าย λ_2 ในช่วงนั้น ๆ และการแผ่รังสีความร้อนเกิดทุกทิศทาง

6) Effective emissivity $\varepsilon_{\text{eff}}(\lambda_1, \lambda_2, T, S_{\lambda})$ เป็นสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนที่หาโดยใช้เซนเซอร์ตรวจจับอินฟราเรดในรูปสัญญาณทางไฟฟ้าที่ตอบสนองด้านความยาวคลื่น S_{λ} ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยตลอดช่วงความยาวคลื่นนั้น ๆ

สำหรับการคำนวณทางวิศวกรรมส่วนใหญ่มักใช้ค่าเฉลี่ยตามทิศทางโดยตั้งสมมุติฐานว่าพื้นผิวของวัตถุเป็นแบบ diffuse emitter แต่ความจริงแล้วพื้นผิวที่แท้จริงจะไม่เป็นแบบ diffuse emitter โดยมีค่าการเปลี่ยนแปลงของ ε_{θ} ตาม θ สำหรับทั้งวัสดุที่เป็นตัวนำไฟฟ้าและไม่เป็นตัวนำไฟฟ้า ซึ่งโดยส่วนใหญ่ตัวนำไฟฟ้า ε_{θ} ประมาณได้ว่าเป็นค่าคงที่สำหรับย่าน $\theta \leq 40^\circ$ หลังจากนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ θ มากขึ้นและในที่สุดจะลดลงจนเป็นศูนย์ ส่วนวัสดุที่ไม่เป็นตัวนำไฟฟ้า ε_{θ} ประมาณได้ว่าคงที่ในช่วง $\theta \leq 70^\circ$ และหลังจากนั้นจะลดลงอย่างฉับพลัน โดยค่า “hemispherical emissivity” นั้นจะไม่แตกต่างจากค่า “Total normal emissivity”

นอกจากค่า ε ขึ้นอยู่กับชนิดและลักษณะของพื้นผิวแล้วยังขึ้นอยู่กับสภาวะการทดลอง ซึ่งได้แก่ ความยาวคลื่น และอุณหภูมิ ดังแสดงตัวอย่างในตารางที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของวัสดุชนิดต่าง ๆ

วัสดุทดลอง	ความยาวคลื่น (μm)	ช่วงอุณหภูมิ ทดลอง (K)	ค่า ϵ	อ้างอิง
Aluminum; Oxidized	-	273-373	0.11	[16]
Aluminum; Oxidized		550	0.63	[19]
Aluminum; Polished		273-373	0.05	[16]
Aluminum; Polished	Total	323-375	0.04-0.06	[18]
Aluminum; Polished	3-5	263-328	0.022	[5]
Aluminum; Polished	1.5	725-1025	0.03-0.63	[4]
Aluminum; Rough		273-373	0.06- 0.07	[16]
Aluminum; Plate	8-14	323-473	0.39-0.51	[11]
Acrylic		300	0.90	[13]
Black PVC tape	3-5	263-328	0.902	[5]
Brass; Oxidized	9.3		0.61	[20]
Brass; Oxidized		300	0.60	[22]
Brass; Polished	5.4 – 9.3		0.10	[20]
Brass; Polished		300-500	0.10	[22]
Brass		303-473	0.40-0.65	[10]
Copper; Oxidized		273-373	0.60-0.70	[16]
Copper; Polished		300-1600	0.04-0.17	[22]
Copper	3-21	523-1173	0.012-0.040	[24]
Copper	8-14	303-473	0.81-0.88	[10]
Copper	8-14	323-473	0.20-0.25	[11]
Steel 304 Oxidized	1.5	850-1100	0.60-0.78	[4]
Stainless Steel	8-14	303-473	0.34-0.52	[10]
Stainless Steel	8-14	323-473	0.40-0.52	[11]
Teflon		523-1173	0.85-0.92	[13]
Bread	10		> 0.80	[23]
Beef fat		294-308	0.77-0.78	[25]
Beef Lean	1-1000		0.74	[17]
Beef: freeze-dried		294-308	0.75-0.77	[25]
Chocolate	10		0.85	[23]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 (ต่อ) ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของวัสดุชนิดต่าง ๆ

วัสดุทดลอง	ความยาวคลื่น (μm)	ช่วงอุณหภูมิ ทดลอง (K)	ค่า ϵ	อ้างอิง
Coke	8-13		0.95	[23]
Canola seeds	0.75-3	313-363	0.93-0.99	[9]
Dough	1-1000		0.85	[17]
Powder	3-5		0.75-0.80	[17]
Ice		273	0.95-0.98	[13]
Leaves	7.3-13	233-393	0.98	[7]
Vegetation		300	0.92-0.96	[13]
Water		300	0.96	[13]
Water	9.3		0.96	[20]
Black paper	Total		0.90	[18]
Black paper	3-5	263-328	0.901	[5]
Black paper	8-9	263-328	0.910	[5]
White paper	3-5	263-328	0.719	[5]
White paper	8-9	263-328	0.908	[5]

โดยทั่วไปการกระจายของรังสีความร้อนตามความยาวคลื่น (Spectral distribution) ของรังสีความร้อนที่แผ่ออกจากพื้นผิวจริงนั้นแตกต่างจาก Planck distribution ซึ่งแสดงถึงรังสีความร้อนที่แผ่ออกจาก blackbody และเนื่องจากการแผ่รังสีจากพื้นผิวจริงขึ้นอยู่กับทิศทางด้วย ดังนั้น ϵ ที่ความยาวคลื่นและทิศทางต่าง ๆ จึงอาจมีค่าต่างกันออกไป [13]

จากกฎของ Stefan-Boltzmann $E_b(T) = \sigma T^4$ (W/m^2) เป็นการหาค่าอัตราการแผ่รังสีความร้อนของวัตถุดูดมคติเท่านั้น ดังนั้นหากวัตถุเป็นวัตถุจริงใดๆ สามารถคำนวณอัตราการแผ่รังสีความร้อนดังสมการ 2.5

$$E(T) = \epsilon \sigma T^4 \quad (2.5)$$

ซึ่ง ϵ เป็นสมบัติการแผ่รังสีความร้อนของวัตถุ โดยมีค่าเท่ากับอัตราส่วนของรังสีที่แผ่ออกจากวัตถุจริงกับรังสีที่แผ่ออกจาก blackbody ณ อุณหภูมิเดียวกัน โดยมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 ซึ่ง blackbody จะมีค่า ϵ เท่ากับ 1 เสมอ เนื่องจากรังสีความร้อนที่แผ่ออกมาจาก blackbody เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความร้อนที่เกิดจากพื้นผิวตัวมันเองทั้งหมดและมีความเข้มเท่ากันทุกทิศทุกทาง แต่วัตถุจริงจะมีปริมาณการแผ่รังสีความร้อนไม่ถึง 100% จึงทำให้ค่า ϵ ต่ำกว่า 1 [1, 13] และจากสมการที่ 2.5 พบว่าหากอุณหภูมิที่ผิววัตถุสูงขึ้นทำให้ค่า ϵ ลดลง

2.2.4 รังสีที่แผ่ออกจากพื้นผิววัตถุ

รังสีความร้อนที่แผ่ออกจากพื้นผิววัตถุใด ๆ (Radiosity: J) (W/m^2) ประกอบด้วยรังสีความร้อนที่แผ่ของวัตถุเองและรังสีความร้อนที่แผ่จากสิ่งแวดล้อมมากระทบวัตถุ (Irradiation, G) (W/m^2) โดย Irradiation ที่มาตกกระทบวัตถุบางส่วนจะถูกวัตถุดูดซับไว้ (Absorption: A) บางส่วนจะสะท้อนออกจากวัตถุ (Reflection: R) และบางส่วนจะทะลุผ่านวัตถุไป (Transmission: T) โดยปริมาณการดูดซับรังสี การสะท้อนรังสี และการยอมให้รังสีทะลุผ่านวัตถุ ขึ้นอยู่กับความสามารถในการดูดซับรังสีความร้อน (α) ความสามารถในการสะท้อนรังสีความร้อน (ρ) และความสามารถในการส่งผ่านรังสีความร้อน (τ) ตามลำดับ

กรณีวัตถุจริงเป็นวัตถุแบบพื้นผิวเทา (gray surface) ความสามารถในการดูดซับรังสีของวัตถุ (α) จะเท่ากับความสามารถในการแผ่รังสี (ϵ) หรือ $\alpha = \epsilon$ และหากวัตถุเป็นวัตถุทึบ (Opaque) วัตถุจะไม่มีคุณสมบัติการส่งผ่าน ($\tau = 0$) จะได้ว่าคุณสมบัติการสะท้อนรังสีมีค่าเท่ากับ $1 - \epsilon$ สำหรับกรณีพื้นผิวใด ๆ รังสีความร้อนทั้งหมดที่แผ่ออกจากพื้นผิว (J) จะประกอบด้วยรังสีที่แผ่จากวัตถุเอง (E) และ รังสีความร้อนที่แผ่มาจากสิ่งแวดล้อมและสะท้อนออกจากวัตถุ (R) ดังแสดงความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.6

$$J = E + R \quad (2.6)$$

2.3 การแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนระหว่างพื้นผิว

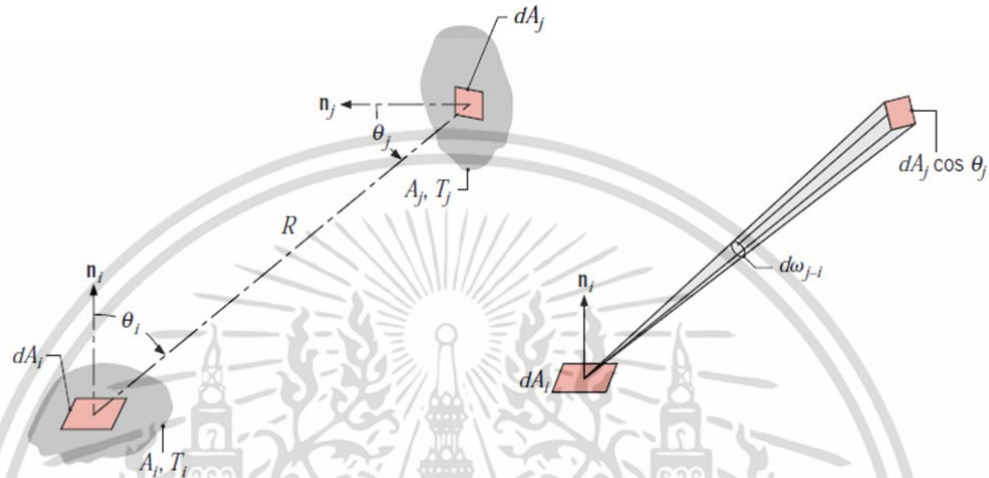
การแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนระหว่างพื้นผิว (Radiation Exchange between Surfaces) ขึ้นอยู่กับรูปร่างทางเรขาคณิตของพื้นผิววัตถุ สมบัติด้านการแผ่รังสีความร้อน และอุณหภูมิพื้นผิวของวัตถุ โดยสมมติว่าพื้นผิววัตถุแยกออกจากกันและตัวกลางไม่มีผลต่อการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อน โดยตัวแปรสำคัญของการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อน คือ สัดส่วนพื้นที่การมองเห็นอัตราการแผ่รังสีความร้อน

2.3.1 สัดส่วนพื้นที่การมองเห็นอัตราการแผ่รังสีความร้อน

พิจารณารูป 2.3 View factor คือ สัดส่วนพื้นที่การมองเห็นอัตราการแผ่รังสีความร้อนซึ่งแผ่ออกจากพื้นผิว i แล้วไปตกบนพื้นผิว j ($q_{i \rightarrow j}$ มีหน่วยเป็น W) เทียบกับปริมาณรังสีความร้อนทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่แผ่ออกจากพื้นผิว i (Radiosity : $J_i A_i$ มีหน่วยเป็น W) เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ F_{ij} หรือทำนองเดียวกันหมายถึง สัดส่วนของรังสีความร้อนที่แผ่ออกจากพื้นผิว j แล้วไปตกบนพื้นผิว i ($q_{j \rightarrow i}$ มีหน่วยเป็น W) เทียบกับรังสีความร้อนทั้งหมดที่แผ่ออกจากพื้นผิว j (Radiosity : $J_j A_j$ มีหน่วยเป็น W) ซึ่งเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์คือ F_{ji} ซึ่งเขียนความสัมพันธ์ให้อยู่ในรูปของสมการที่ 2.7



รูปที่ 2.3 การพิจารณาเกี่ยวกับ View factor และการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนระหว่างพื้นผิวเล็ก dA_i และ dA_j [13]

$$F_{ij} = \frac{q_{i \rightarrow j}}{J_i A_i} \quad \text{หรือ} \quad F_{ji} = \frac{q_{j \rightarrow i}}{J_j A_j} \quad (2.7)$$

โดย A_i และ A_j คือ พื้นที่ผิวของวัตถุ i และวัตถุ j ที่มีการแผ่รังสีความร้อนออกมา (m^2)

$A_i F_{ij} = A_j F_{ji}$ ค่า View factor เป็นตัวแปรที่ขึ้นกับรูปทรงและการหันเหของพื้นผิววัตถุ กรณีมีพื้นผิวที่แลกเปลี่ยนรังสีความร้อนเป็นพื้นผิวปิดมากกว่าสองพื้นผิว รังสีความร้อนที่แผ่ออกมาจากแต่ละพื้นผิวจะมีการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนกัน ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างค่า View factor ของแต่ละพื้นผิว ซึ่งประกอบด้วย N พื้นผิว ได้ตั้งความสัมพันธ์ $\sum_{j=1}^N F_{ij}$ นอกจากนี้ หากต้องมีการแบ่งพื้นที่ผิวใด ๆ เป็นพื้นที่ย่อย ๆ เพื่อพิจารณาการหาค่า View factor (F_{ij}) เนื่องจากการวางตัว การหันเห และขนาดพื้นที่ผิวที่แลกเปลี่ยนรังสีความร้อน ซึ่งหมายความว่าพื้นที่ผิว j ถูกแบ่งเป็นพื้นที่ผิวย่อย ๆ เป็น n พื้นผิวโดยเริ่มจากการแบ่งย่อยจากพื้นที่ k เริ่มจาก $k=1$ ถึง n และหากต้องการหาค่า View factor จะต้องอาศัยสมการความสัมพันธ์ $F_{i(j)} = \sum_{k=1}^n F_{ik}$ และ $A_j F_{(j)i} = \sum_{k=1}^n A_k F_{ki}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 อัตราการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนสุทธิ

เมื่อระบบมีพื้นผิววัตถุมากกว่าหนึ่งพื้นผิวและมีการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนกัน ต้องคิดอัตราการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนสุทธิแต่ละพื้นผิวนั้นเอง สำหรับการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนระหว่างพื้นผิวใด ๆ สามารถคิดอัตราการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนสุทธิที่พื้นผิว i (q_i) ได้จากสมการที่ 2.8

$$q_i = (J_i - G_i)A_i = q_{i1} + q_{i2} + q_{i3} + \dots + q_{iN} \quad (2.8)$$

โดยที่ J_i คือ รังสีความร้อนทั้งหมดที่แผ่ออกมาจากพื้นผิว i G_i คือ รังสีความร้อนที่แผ่ออกจากวัตถุอื่นหรือสิ่งแวดล้อมโดยรอบมาตกที่พื้นผิว i และ N คือ จำนวนพื้นผิวทั้งหมดที่มีการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนกัน และสามารถคำนวณอัตราการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนสุทธิที่พื้นผิวใด ๆ เมื่อพิจารณาอัตราการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนสุทธิที่พื้นผิว i กับพื้นผิว j (q_{ij}) ได้ดังสมการที่ 2.9

$$q_{ij} = q_{i \rightarrow j} - q_{j \rightarrow i} \quad (2.9)$$

โดยถ้ามีพื้นผิว i ใด ๆ เป็น blackbody จะได้ความสัมพันธ์ $J_i = E_{b_i}$ และหากมีพื้นผิววัตถุใด ๆ แลกเปลี่ยนรังสีความร้อนกับสิ่งแวดล้อม พื้นผิวที่เป็นสิ่งแวดล้อมจะตั้งสมมติฐานให้เป็น blackbody

2.4 กล้องถ่ายภาพความร้อน

2.4.1 หลักการทำงานของกล้องถ่ายภาพความร้อน

กล้องถ่ายภาพความร้อน (Thermal image camera: TI - camera) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดอุณหภูมิที่ผิวของวัตถุ ซึ่งใช้เทคนิคการตรวจสอบหรือวิเคราะห์อุณหภูมิวัดโดยไม่มีการสัมผัสและทำลายวัตถุ โดยกล้องถ่ายภาพความร้อนจะทำการวัดอัตราการแผ่รังสีความร้อนในย่านรังสีอินฟราเรดที่วัตถุแผ่รังสีออกมาผ่านเลนส์ไปยังตัวตรวจจับ จากนั้นอิเล็กทรอนิกส์เซนเซอร์ จะทำการแปลงข้อมูลที่ได้รับมาจากตัวตรวจจับ และแสดงผลบนจอภาพ โดยอาจจะแสดงผลออกมาเป็นตัวเลข แสดงอุณหภูมิ เคนสี หรือกราฟ ซึ่งวัตถุที่ร้อนกว่าจะแสดงสีสว่างและวัตถุที่เย็นกว่าจะแสดงสีมืดกว่า ซึ่งทำให้กล้องแปลงรังสีอินฟราเรดที่วัดได้เป็นอุณหภูมิออกมาโดยอาศัยกฎหรือทฤษฎีการแผ่รังสีความร้อนของ Stefan-Boltzmann ลักษณะการประยุกต์ใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนแบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่ การใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนเชิงคุณภาพ (Qualitative Thermography) ซึ่งเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์ภาพถ่ายความร้อนโดยการพิจารณาความแตกต่างของภาพถ่ายความร้อน เหมาะกับงานวิจัยด้านการตรวจสอบเชิงกล การตรวจสอบเชิงไฟฟ้า และการประมวลผลภาพถ่ายความร้อนในขั้นตอนต่อไป และการใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนเชิงปริมาณ (Quantitative Thermography) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ภาพถ่ายความร้อนโดยการวัดอุณหภูมิบนตัวชิ้นงาน ณ จุดที่สนใจด้วยภาพถ่ายความร้อน ซึ่งเหมาะกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง การทำนายอุณหภูมิแต่ละตำแหน่ง การหาสมบัติเชิงความร้อนต่างๆ เช่น สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน สัมประสิทธิ์การนำความร้อน เป็นต้น และการหาพลังงานความร้อนจะอยู่ในรูปแบบของรังสีความร้อนทั้งหมดที่แผ่ออกจากพื้นผิววัตถุใด ๆ

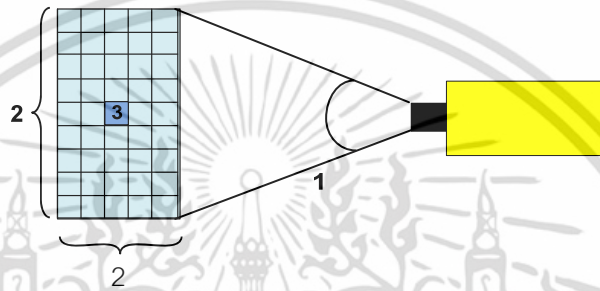
2.4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อความถูกต้องของการวัดอุณหภูมิด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน

ปัจจัยที่มีผลต่อความถูกต้องของการวัดอุณหภูมิด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน ได้แก่ ค่า Emissivity ค่าการสะท้อนรังสีของผิววัตถุ ระยะห่างระหว่างวัตถุกับกล้องถ่ายภาพความร้อน ขอบเขตการมองเห็นหรือ FOV (Field Of View) และขนาดจุดวัดอุณหภูมิ (Measurement Field of View, MFOV)

- 1) ค่า Emissivity (ϵ) การแปลงผลของอัตราการแผ่รังสีอินฟราเรด (E) ให้เป็นค่าอุณหภูมิที่ถูกต้อง จำเป็นต้องทำการกำหนดค่า ϵ ของผิววัตถุที่เหมาะสมสำหรับวัตถุนั้นๆ
- 2) ค่าการสะท้อนรังสีของผิววัตถุ (Reflection: R) รังสีอินฟราเรดที่แผ่ออกจากผิววัตถุไม่ได้มีเพียงรังสีที่เกิดจากตัววัตถุเท่านั้น แต่ยังมีรังสีที่เกิดจากการสะท้อนรังสีที่แผ่มาจากแหล่งอื่นด้วย ซึ่งกล้อง TI จะรับ Radiosity ดังกล่าวทั้งหมดไป ดังนั้น เพื่อให้รังสีความร้อนที่กล้อง TI ได้รับเป็นรังสีที่เกิดจากวัตถุจริง จึงต้องมีการกำหนดอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมหรือวัตถุอื่นที่แผ่รังสีมากระทบกับวัตถุให้กับกล้อง TI ด้วย ซึ่งกล้องจะนำอุณหภูมิดังกล่าวไปใช้ในการชดเชยค่าการสะท้อน ทำให้อุณหภูมิที่อ่านได้จากกล้องเป็นอุณหภูมิที่แท้จริงของวัตถุ
- 3) ระยะห่างระหว่างวัตถุกับกล้องถ่ายภาพความร้อน หากจุดวัดของวัตถุมีขนาดเล็กมาก ๆ หรือเล็กกว่าพื้นที่ของการวัด (Measurement Field of View , MFOV) จะทำให้วัตถุอุณหภูมิถูกต้อง และหากวัตถุมีระยะห่างจากเครื่องมือวัดมาก ๆ จะทำให้พื้นที่การวัดที่ไม่เกี่ยวข้องกับจุดที่ต้องการวัดค่าอุณหภูมิ เข้าไปในพื้นที่ของการวัดด้วย ซึ่งมีผลต่อการวัดอุณหภูมิ
- 4) ขอบเขตการมองเห็นหรือ FOV (Field Of View) คือ ค่ามุมมองของกล้องถ่ายภาพความร้อน ซึ่งมองไปยังวัตถุขณะถ่ายภาพความร้อนเพื่อวัดอุณหภูมิ ยิ่งมีระยะห่างระหว่างกล้อง TI กับวัตถุมากทำให้ขนาดมุมมองเพิ่มมากขึ้นซึ่งมีผลต่อความละเอียด (Resolution) โดย FOV มีผลต่อพื้นที่การมองเห็นวัตถุของกล้อง จึงมีผลโดยตรงกับการรับค่าอุณหภูมิของวัตถุด้วย โดยขนาดมุมมองของ FOV จะมีหน่วยเป็นหน่วยองศาหรือเรเดียน ภายใน FOV มีค่า IFOV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Instantaneous Field of View) เป็นหน่วยย่อยของ FOV มีผลต่อความละเอียด เช่นเดียวกับ FOV ซึ่งขนาด 1 ช่องของ IFOV เปรียบเสมือนค่าความละเอียดของภาพถ่ายความร้อนที่มีความละเอียด 1 พิกเซล โดยค่าสมบัติเฉพาะตัวของกล้อง TI จะบอกค่า FOV และ IFOV ที่วัดในแนวตั้งเรียกว่า Vertical และวัดในแนวนอนเรียกว่า Horizontal ระยะห่างระหว่างกล้อง TI กับวัตถุจะแปรผันตรงกับขนาดมุมมองกล้อง FOV หรือ IFOV นั่นเอง IFOV อาจเรียกว่าเป็นสมบัติของกล้องถ่ายภาพความร้อนด้าน Thermal image resolution เช่นกัน



หมายเหตุ: หมายเลข 1 คือ FOV หมายเลข 2 คือพื้นที่หรือบริเวณการมองเห็นจากกล้อง TI
หมายเลข 3 คือ IFOV

รูปที่ 2.4 FOV และ IFOV และบริเวณการมองเห็นจากกล้อง TI [1]

โดยโครงสร้างภายในกล้องถ่ายภาพความร้อนทำหน้าที่จำกัดขอบเขตของมุมมองการมองเห็น เรียกว่า Field stop ($D_{F.S.}$) และความกว้างของม่านเปิด - ปิดเลนส์ถ่ายภาพความร้อน (ชัตเตอร์) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ชัตเตอร์ของระนาบโฟกัส (Focal plane: d) และ f คือระยะโฟกัสของเลนส์ ซึ่งองค์ประกอบที่กล่าวมาสามารถแสดงการคำนวณ IFOV และ FOV ได้จากสมการ 2.10 และ 2.11

$$IFOV = 2 \tan^{-1} \left(\frac{d}{2f} \right) \quad (2.10)$$

$$FOV = 2 \tan^{-1} \left(\frac{D_{F.S.}}{2f} \right) \quad (2.11)$$

หรืออาจคำนวณ FOV ในรูปแบบของขนาดพื้นที่ภาพถ่ายความร้อนที่มองเห็นจากกล้องถ่ายภาพความร้อน โดยทราบสมบัติเฉพาะ ได้แก่ ขนาดมุมมองที่วัดในแนวนอน (Horizontal Field of View, HFOV) และขนาดมุมมองที่วัดในแนวตั้ง (Vertical Field of View, VFOV) และระยะห่างจากวัตถุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับกล้องถ่ายภาพความร้อน โดยคำนวณขนาดความกว้าง ความยาวของขอบภาพถ่ายภาพความร้อนได้จากอัตราส่วนตรีโกณมิติ

5) ขนาดจุดวัดอุณหภูมิ (Measurement Field of View, MFOV) คือ จุดที่มีขนาดเล็ก ๆ ซึ่งอยู่บนหน้าจอของกล้องถ่ายภาพความร้อนทำหน้าที่เป็นจุดแสดงตำแหน่งที่ต้องการวัดอุณหภูมิของชิ้นงาน ซึ่งขนาดของ MFOV ขึ้นอยู่กับสมบัติเฉพาะตัวของกล้องถ่ายภาพความร้อนแต่ละรุ่น ส่วนใหญ่ขนาดของ MFOV มีค่าประมาณ 2-3 เท่าของขนาด IFOV โดยขนาดของ MFOV ต้องเล็กกว่าตัวชิ้นงานที่ต้องการวัดอุณหภูมิจึงสามารถวัดอุณหภูมิได้ภายในจุดที่สนใจพอดี

2.4.3 คุณลักษณะสถิติของกล้องถ่ายภาพความร้อน

คุณลักษณะสถิติของกล้องถ่ายภาพความร้อน คือ สมบัติเฉพาะของกล้องถ่ายภาพความร้อนแต่ละรุ่นที่ผู้ใช้งานต้องทราบเพื่อการวัดอุณหภูมิหรือวิเคราะห์ภาพถ่ายความร้อน สมบัติดังกล่าว ได้แก่ ความไวในการตอบสนองต่อการวัดอุณหภูมิ ความถูกต้องหรือความแม่นยำ ความเที่ยงตรง ความละเอียด และสมบัติเกี่ยวกับไฟกัสทางความร้อน ได้แก่ ย่านอุณหภูมิ และระดับของอุณหภูมิ

1) ความไวในการตอบสนองต่อการวัดอุณหภูมิ (Thermal sensitivity) หมายถึง อัตราส่วนของการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิเทียบกับการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีจากวัตถุที่กล้องถ่ายภาพความร้อนได้รับ

2) ความถูกต้อง/ความแม่นยำ (Accuracy) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถของเครื่องมือวัดในการอ่านค่าหรือแสดงค่าได้เข้าใกล้ค่าจริง ซึ่งค่าความถูกต้องหรือความแม่นยำจะคำนวณในรูปของร้อยละ (%Accuracy) ดังสมการที่ 2.12 และได้จากร้อยละของความคลาดเคลื่อน (%Error) ที่เกิดขึ้นจริงซึ่งคำนวณจากสมการที่ 2.13

$$\%Error = \frac{|X_{meas} - X_i|}{X_i} \times 100 \quad (2.12)$$

$$\%Accuracy = 100 - \%Error \quad (2.13)$$

จากสมการ X_{meas} คือ ค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัด (Measure Value) และ X_i คือ ค่าจริง (True Value)

3) ค่าความเที่ยงตรง (Precision) คือ ค่าที่แสดงถึงความสามารถของเครื่องมือวัดในการอ่านค่าค่าความเที่ยงตรง สามารถหาได้จากสมการที่ 2.14 และอาจหาในรูปของร้อยละดังสมการที่ 2.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Precision = \left| \frac{X_{meas} - X_m}{X_m} \right| \quad (2.14)$$

$$\%Precision = \left| \frac{X_{meas} - X_m}{X_m} \right| \times 100 \quad (2.15)$$

จากสมการ X_m คือ ค่าเฉลี่ยเลขคณิตที่ได้จากการวัด (Mean value) และ X_{meas} คือ ค่าที่ได้จากการวัดในแต่ละครั้ง (Measure value)

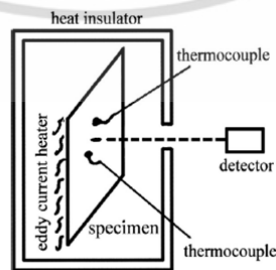
4) ความละเอียด (Resolution) เป็นค่าการเพิ่มขึ้นของอินพุตที่น้อยที่สุดที่ทำให้ค่าเอาต์พุตมีการเปลี่ยนแปลง หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ค่าความสามารถในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลง ปริมาณอินพุตของเครื่องมือวัด สำหรับสมบัติของกล้องถ่ายภาพความร้อนในเรื่องความละเอียด ได้แก่ มุมมองเชิงพื้นที่ที่ภาพถ่ายความร้อน FOV หรือ IFOV เป็นค่าความละเอียดที่เรียกว่า Thermal image resolution และ Temperature resolution คือความละเอียดในการวัดอุณหภูมิแต่ละย่านการวัด โดย FOV เป็นมุมของกล้องที่มองไปยังวัตถุ ซึ่งถ้าระยะในการวัดแตกต่างกันจะส่งผลต่อการรับพื้นที่ คือถ้าระยะห่างระหว่างกล้องกับวัตถุห่างกันน้อยจะสามารถรับรายละเอียดของพื้นที่หรือบริเวณการมองเห็นของวัตถุได้แคบกว่าระยะห่างมาก จึงทำให้ส่งผลต่อความละเอียดของภาพ IFOV ซึ่งเป็นพื้นที่ที่เล็กที่สุดของ FOV และ MFOV คือ ขนาดของจุดวัดอุณหภูมิของชิ้นงานบนหน้าจอกของกล้องถ่ายภาพความร้อน โดยขนาดของ MFOV ต้องเล็กกว่าตัวชิ้นงานที่ต้องการวัดอุณหภูมิจึงสามารถวัดอุณหภูมิได้ใกล้เคียงความจริง

5) สมบัติเกี่ยวกับโพกัสทางความร้อน สามารถอธิบายได้ด้วยย่านอุณหภูมิ (Span) และระดับของอุณหภูมิ (Level) โดยย่านอุณหภูมิ คือการปรับค่าช่วงอุณหภูมิสูงสุดหรือต่ำสุด ถือเป็นคุณลักษณะที่เกี่ยวข้องกับโพกัสทางความร้อนของภาพถ่ายความร้อน ความกว้างของย่านอุณหภูมิจะแปรผันตามปริมาณของเฉดสีที่แสดงในภาพถ่ายความร้อน การปรับเฉดสีให้อยู่ในช่วงอุณหภูมิที่สนใจทำให้มองเห็นการกระจายอุณหภูมิแต่ละจุดบนภาพถ่ายความร้อนอย่างชัดเจน สำหรับระดับของอุณหภูมิ เป็นการปรับระดับของอุณหภูมิ โดยการเลื่อนย่านอุณหภูมิไปทั้งหมด ถ้าในมุมมองของภาพถ่ายความร้อนถือว่าเป็นการปรับความสว่างของภาพนั่นเอง

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนมีหลายวิธีซึ่งบางวิธีนำอุณหภูมิสะท้อนมาพิจารณา ร่วมด้วย เช่น Schurer [2] ทดลองวัดสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีอินฟราเรดในช่วงความยาวคลื่นสองย่าน และคิดการสะท้อนอุณหภูมิที่ผิวโดยใช้ตัวครอบสีดำที่ทราบอุณหภูมิคลุ่มที่วัดดู Datcu *et al.* [3] ใช้แผ่นอลูมิเนียมที่มีค่าการสะท้อนรังสีสูง ๆ เพื่อพิจารณาพลังงานที่แผ่รังสีความร้อนจากสิ่งแวดล้อม โดยรอบเพื่อให้การวัดอุณหภูมิถูกต้องแม่นยำมากขึ้น นอกจากนี้ ยังมีนักวิจัยหลายคนศึกษาผลของความขรุขระของพื้นผิววัตถุที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน เช่น Wen and Mudawar [26] เสนอแบบจำลองสำหรับทำนายสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนจากความขรุขระของพื้นผิว พบว่า สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของอลูมิเนียมอัลลอยด์และความขรุขระมีการแปรผันโดยตรงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งขอบเขตการศึกษาของนักวิจัยแต่ละท่านมีความแตกต่างกัน รวมถึงมีข้อดีและข้อจำกัดต่างกันอย่าง

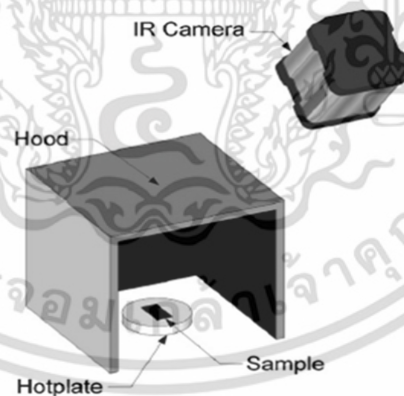
Shi *et al.* [4] ได้ศึกษาหาค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนจากการเกิดสนิมของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด ASTM 304 ในกระบวนการให้ความร้อน โดยทำการทดลองและติดตั้งอุปกรณ์ดังรูปที่ 2.5 ให้ความร้อนด้วยการใช้กระแสเหนี่ยวนำขดลวดแม่เหล็กหลายรอบจนเกิดกระแสสวน (eddy current) ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ลแบบ Pt-Rh type R เป็นตัวเทียบอุณหภูมิที่ผิวของแผ่นเหล็กกล้าโดยเชื่อมแบบสมมาตรทั้งสองข้าง ใช้ตัวตรวจจับรังสีอินฟราเรดประเภท InGaAs ที่ความยาวคลื่นอินฟราเรด 1.5 μm มีฉนวนกันรบกวนเพื่อลดผลการสะท้อนรังสีจากวัตถุอื่นและสิ่งแวดล้อม และมีช่องว่างสำหรับการตรวจจับรังสี ทำการทดลองภายใต้ระบบควบคุมแบบ PID-Control จากการทดลอง พบว่า ค่า ε เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและระยะเวลาให้ความร้อน เนื่องจากระยะเวลาที่นานขึ้นจะส่งผลทำให้พื้นผิวมีความขรุขระเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณสนิมที่เกิดขึ้น และหลังจากการให้ความร้อน ทำให้ชั้นสนิมหนาขึ้น มีการกระจายตัวสม่ำเสมอทำให้สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนค่อนข้างคงที่



รูปที่ 2.5 ชุดทดลองของ Shi *et al.* [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Marinetti and Cearatto [5] นำเสนอชุดอุปกรณ์ทดสอบหาสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน ดังรูปที่ 2.6 ซึ่งประกอบด้วย กล้องอินฟราเรด FLIR SC6000 รับรังสีในช่วงความยาวคลื่นอินฟราเรด 3-5 μm ตัวตรวจจับรังสีชนิด Insb sensor ความละเอียด 640x512 pixel อุปกรณ์วัดอุณหภูมิที่ผิวแบบสัมผัสใช้ RTD Pt100 เป็นตัวสอบเทียบอุณหภูมิที่วัดได้จริงบนพื้นผิวชิ้นตัวอย่าง แผ่นให้ความร้อนแก่ชิ้นตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ และกล่องครอบแผ่นให้ความร้อนและชิ้นตัวอย่างทดสอบ (Hood) ภายในกล่องทาสีดำเพื่อควบคุมการแผ่รังสีจากสิ่งแวดล้อมให้คงที่และให้มีผลการสะท้อนรังสีน้อยที่สุด ทิศทางการวางกล้องทำมุม 30° กับแนวราบ ชิ้นตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ ได้แก่ กระจกดำ กระจกขาว เทป PVC สีดำ และแผ่นอลูมิเนียมขนาดเล็ก ให้ความร้อนกับชิ้นตัวอย่างจนมีอุณหภูมิสูงขึ้น 20°C จากอุณหภูมิห้องด้วยกลไกการนำความร้อนจากแผ่นให้ความร้อน (Hot plate) จากการทดลอง พบว่า ค่า ε ที่ได้มีความคลาดเคลื่อนจากค่าอ้างอิงในงานวิจัยอื่นเนื่องจากช่วงอุณหภูมิและความยาวคลื่นต่างกัน และเมื่อนำผลที่ได้ไปใช้สำหรับการวัดอุณหภูมิผนังตึกแบบภายในอาคารและภายนอกอาคาร พบว่า ค่าอุณหภูมิผิวที่วัดได้บริเวณภายนอกอาคาร มีความคลาดเคลื่อนมากกว่าการวัดอุณหภูมิภายในอาคาร เนื่องจากมีผลการเกิดรังสีสะท้อนจากสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะรังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์มากกว่าภายในอาคาร จึงควรนำผลการสะท้อนอุณหภูมิมาคิดด้วยเมื่อหา ε ภายนอกอาคาร



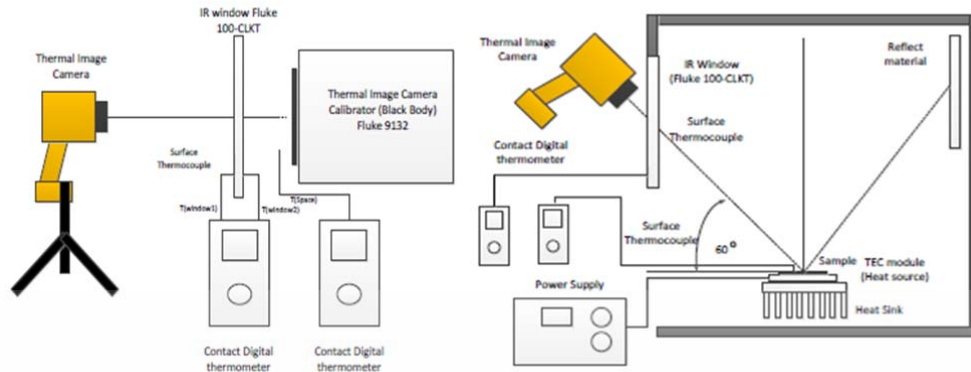
รูปที่ 2.6 ชุดทดลองของ Marinetti and Cearatto [5]

Nunak *et al.* [6] ศึกษาผลของมุม (Polar angle, θ) และขอบเขตการมองเห็นของภาพถ่ายความร้อน (FOV และ IFOV) โดยใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนที่ทำงานที่ความยาวคลื่นอินฟราเรด 7.5-13 μm . การทดลองนี้ใช้ตัวอย่าง คือ แผ่นโลหะทาสีดำ และแผ่น galvanized ให้ความร้อนแก่ตัวอย่างด้วยการวางตัวอย่างโดยใช้ Thermoelectric peltear จนตัวอย่างมีอุณหภูมิประมาณ 50°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นรอรจอุณหภูมิหนึ่ง พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนมีค่าคงที่เมื่อมุมเอียงของกล้อง จากแนวตั้งไม่เกิน 45° ($\theta \leq 45^\circ$) โดยค่า ϵ เชิงมุมที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันสำหรับแผ่นโลหะทาสีดำ เนื่องจากมีค่า ϵ สูง กรณีตัวอย่างเป็นแผ่นเหล็กกล้าไนซ์จะมีค่าค่อนข้างแตกต่างกัน เนื่องจากมีค่า ϵ ต่ำ พื้นผิวมีการสะท้อนสูง เมื่อเปลี่ยนมุมมองอาจส่งผลต่อค่า ϵ ที่วัดได้ กรณีการใช้เลนส์ระยะไกล ผลลัพธ์ที่ได้จากการวัดอุณหภูมิและการหาค่า ϵ มีค่าไม่ต่างกันมากอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากในการทดลองนี้ขนาดของจุดวัดอุณหภูมิของกล้อง (MFOV) มีขนาดเล็กกว่าวัตถุเสมอ

Nunak *et al.* [8] ศึกษาเกี่ยวกับผลของสภาวะสิ่งแวดล้อมโดยรอบที่ส่งผลต่อการหาค่า ϵ และการวัดอุณหภูมิวัตถุด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน การทดลองนี้ศึกษาผลของการวัดอุณหภูมิวัตถุอุดมคติ (Blackbody model 9132, HART Scientific, USA) ซึ่งมีค่า ϵ เท่ากับ 0.95 ผ่านหน้าต่างอินฟราเรด โดยใช้กล้องถ่ายภาพความร้อน (Fluke) ซึ่งรับความยาวคลื่นรังสีอินฟราเรด 7.5 - 13 μm และใช้เทอร์โมคัปเปิล Type K เพื่อวัดอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุตัวอย่าง อุณหภูมิหน้าต่างอินฟราเรด และอุณหภูมิภายในพื้นผิวตู้ควบคุมสภาวะจากสิ่งแวดล้อมโดยรอบ จาก การ ท ด ล อ ง พบว่า รังสีความร้อนที่แผ่ผ่านหน้าต่างอินฟราเรดทำให้พลังงานที่ส่งมาที่ตัวตรวจจับอินฟราเรดลดลง โดยนักวิจัยกลุ่มนี้ พบว่า ค่าร้อยละการส่งผ่านรังสีผ่านหน้าต่างอินฟราเรดที่ทดสอบมีค่า เท่ากับ 50 จากนั้นทำการทดลองเพื่อศึกษาผลของสภาวะแวดล้อมที่มีต่อค่า ϵ ของตัวอย่างทดสอบ โดยการให้ความร้อนกับแผ่นโลหะทาสีดำและแผ่นเหล็กกล้าไนซ์ด้วย Thermoelectric peltier และติดตั้งวัสดุตัวอย่างอยู่ภายในตู้ควบคุมสภาวะแวดล้อม มุมการวางตัวกล้องทำมุม 45° กับผิววัสดุตัวอย่าง ภายในพื้นผิวตู้ด้วยวัสดุที่มีค่าสมบัติการสะท้อนสูงและต่ำ เพื่อเปรียบเทียบการทดลองเกี่ยวกับผลของรังสีสะท้อน จากการทดลอง พบว่า วัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนต่ำ (แผ่นกล้าไนล์) จะได้รับผลกระทบจากการแผ่รังสีความร้อนของสิ่งแวดล้อมโดยรอบ แต่หากวัสดุมีค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนสูง รังสีสะท้อนที่เกิดจากการแผ่รังสีความร้อนจากสิ่งแวดล้อมโดยรอบจะไม่มีผลหรือมีผลน้อยมากต่อการวัดค่า ϵ และการวัดอุณหภูมิที่ถูกต้อง โดยหากต้องการลดผลกระทบจากสภาวะแวดล้อมให้น้อยที่สุด ควรออกแบบให้ตู้ควบคุมสภาวะแวดล้อมมีอุณหภูมิและมีค่า ϵ ที่ต่ำกว่าตัวอย่างทดสอบ



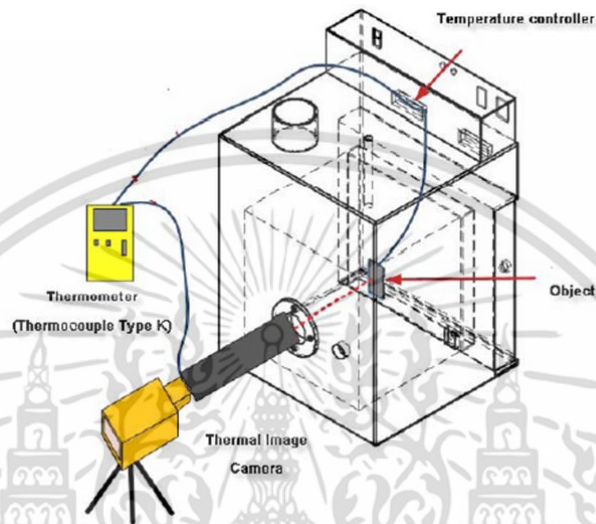
รูปที่ 2.7 ชุดทดลองของ Nunak *et al.* [8]

Muniz *et al.* [28] ศึกษาอิทธิพลของมุมมองและขอบเขตการมองเห็นภาพถ่ายความร้อน (FOV) กับการวัดอุณหภูมิเชิงมุมด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนชนิดอินฟราเรด โดยการทดลองนี้สร้างแบบจำลองซึ่งอยู่บนพื้นฐานของการใช้โครงข่ายประสาทเทียมและการสร้างสมการถดถอยเพื่อศึกษา ค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดอุณหภูมิจากการเอียงท่ามุมของกล้องถ่ายภาพความร้อนกับพื้นผิว ตัวอย่าง (Polar angle , θ) ตั้งแต่ $0^\circ - 75^\circ$ ทั้งทางซ้ายและทางขวาของการหันเหกล้อง ($-75^\circ - 75^\circ$) โดยการขยับมุมทีละ 5° จนสูงสุด 75° เพื่อให้อยู่ในช่วงอุณหภูมิและสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนที่วัดได้คงที่ จากการทดลอง พบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดอุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ FOV มากขึ้น เนื่องจากพื้นที่การมองเห็นภาพถ่ายความร้อนส่วนใหญ่ อาจไม่ใช่จุดที่ต้องการวัดจริง

Suesut *et al.* [10, 11] ศึกษาการหาสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของวัสดุทางไฟฟ้าและชิ้นส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน (Fluke) ที่ช่วงความยาวคลื่น $8-14 \mu\text{m}$ โดยนำผลของอุณหภูมิสะท้อนมาพิจารณาร่วมด้วยและให้มีค่าคงที่ระหว่างการทดลอง ใช้การให้ความร้อนแก่ตัวอย่างโดยตู้อบลมร้อน และตู้อบทำหน้าที่ในการควบคุมพลังงานสะท้อนด้วย โดยจัดวางตัวอย่างให้สามารถสัมผัสลมร้อนได้อย่างทั่วถึงภายในตู้อบลมร้อน และติดตั้งกล้องถ่ายภาพความร้อนเพื่อวัดอุณหภูมิดังรูปที่ 2.8 และวัดอุณหภูมิที่แท้จริงของวัตถุโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล Type K ตัวอย่างวัสดุที่ใช้ทดสอบ ได้แก่ แผ่นเหล็ก แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม วัตถุทองเหลือง แผ่นทองแดง และแผ่นอลูมิเนียม รวมถึงได้ทำการทดสอบกับอุปกรณ์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าโดยเป็นอุปกรณ์ที่ยังไม่ผ่านการใช้งานและอุปกรณ์ที่ใช้งานแล้วประมาณ 3 ปี ได้แก่ cable lug, P.G. connector, some part of fuse holder และ disconnecting switch โดยให้ความร้อนจากตู้อบลมร้อนตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนตัวอย่างมีอุณหภูมิประมาณ 200°C ซึ่งผนังตู้อบลมร้อนทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม ขั้นตอนการหา ϵ เริ่มจากการหาอุณหภูมิพื้นหลัง (background temperature) ด้วยวิธีการหาอุณหภูมิเฉลี่ยโดยป้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของผนังตู้ให้กับกล้องถ่ายภาพความร้อนตั้งแต่ 0.1 - 0.95 และทำการหา ε ของตัวอย่างโดยป้อนค่าอุณหภูมิพื้นหลังที่ได้ให้กับกล้องถ่ายภาพความร้อน แล้วปรับค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนในกล้องให้มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิที่อ่านได้จากเทอร์โมคัปเปิล จึงได้ค่า ε ของตัวอย่าง



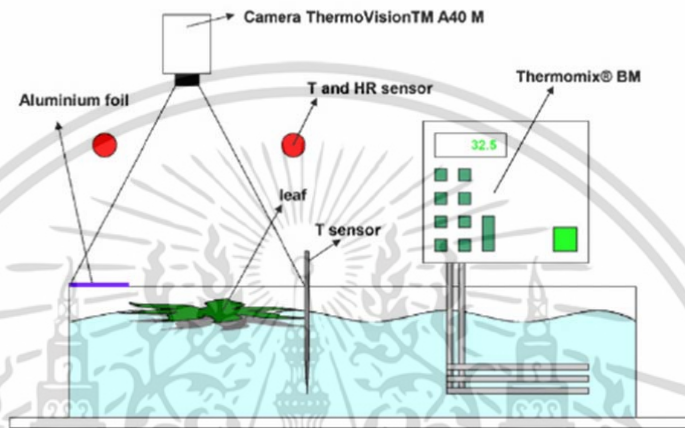
รูปที่ 2.8 ชุดทดลองของ Suesut *et al.* [10]

จากการทดลอง พบว่า วิธีการหา ε สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนด้วยวิธีการดังกล่าวใช้ได้กับวัสดุวิศวกรรมและชิ้นส่วนของอุปกรณ์ไฟฟ้าได้ โดยผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยอื่นๆ และพบว่า อุปกรณ์ที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว มีลักษณะพื้นผิวที่ไม่เรียบมีค่าความขรุขระสูงขึ้น ส่งผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของวัสดุตัวอย่างสูงขึ้นด้วย

Lo'pez *et al.* [7] ศึกษาหา ε ของใบไม้ 9 ชนิด ได้แก่ ใบมะเขือเทศ ใบพริกไทยเขียว ใบบวบ ใบแมลงวัน ใบแตงโม ใบถั่วเขียว ใบถั่วแดง ใบแตงกวา และมะเขือม่วง การทดลองนี้ใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนในช่วงความยาวคลื่น 8-14 μm มีค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดอุณหภูมิอยู่ในช่วง 0.1 - 0.3°C และใช้เทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิแบบสัมผัสที่พื้นผิวของใบไม้ น้ำร้อน และแผ่นอลูมิเนียมฟรอยด์ ให้ความร้อนแก่ใบไม้โดยอาศัยการนำความร้อนจากน้ำร้อนในอ่างควบคุมอุณหภูมิตู้ใบไม้ ซึ่งใบไม้วางลอยอยู่บนที่ผิวน้ำ มีแผ่นอลูมิเนียมฟรอยด์วางอยู่บนผิวน้ำเพื่อไว้หาอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมสำหรับป้อนให้กล้องถ่ายภาพความร้อนด้วย ชุดทดลองแสดงดังรูปที่ 2.9 จากการทดลองพบว่า ค่า ε ของใบไม้ทั้ง 9 ชนิดมีค่าเข้าใกล้ 0.98 และผิวด้านบนและด้านล่างมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 0.003 อย่างไรก็ตามการหาสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนด้วยวิธีดังกล่าวมีข้อจำกัดว่า ขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

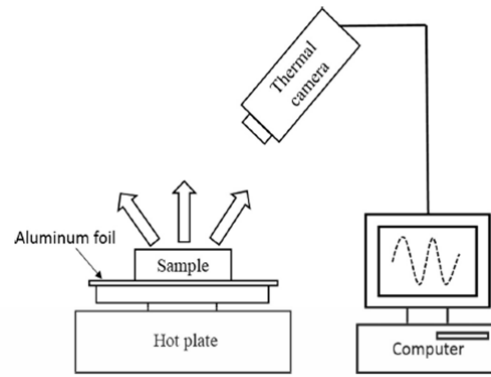
ตัวอย่างต้องเป็นของแข็งที่ลอยบนผิวของเหลวได้ ซึ่งความหนาแน่นขึ้นตัวอย่างต่อน้อยกว่าความหนาแน่นของของเหลวเสมอ และตัวอย่างต้องไม่มีการดูดซับของเหลวไว้ และวิธีการดังกล่าวไม่เหมาะสมหากวัสดุตัวอย่างมีสถานะเป็นของเหลว เพราะของเหลวอาจจะละลายปนกับน้ำร้อน ทำให้ไม่สามารถหาสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของของเหลวอย่างแท้จริงได้



รูปที่ 2.9 ชุดทดลองของ Lo'pez *et al.* [7]

Yu *et al.* [9] ศึกษาวิธีการหาค่า ϵ ของเมล็ดคาโนล่า (Canola seed) โดยให้ความร้อนด้วยกลไกการนำความร้อนจากแผ่นให้ความร้อนผ่านแผ่นเหล็กกล้าที่ห่อด้วยแผ่นอลูมิเนียมพรอยด์สู่แผ่นเทพที่สัมผัสกับผิวตัวอย่างโดยแผ่นเทพมีค่า ϵ เท่ากับ 0.97 ทำการให้ความร้อนจนสูงกว่าอุณหภูมิห้อง และติดตั้งกล้องถ่ายภาพความร้อนกับระบบคอมพิวเตอร์สำหรับแสดงผลของภาพถ่ายความร้อนดังรูปที่ 2.10 โดยการทดลองนี้ใช้กล้องถ่ายภาพความร้อน (FLIR Thermo Vision A20) รับรังสีอินฟราเรดในช่วงความยาวคลื่นของรังสีอินฟราเรด $0.75 - 3 \mu\text{m}$ โดยพิจารณาผลของอุณหภูมิสะท้อนจากสิ่งแวดล้อม โดยใช้พื้นผิวของแผ่นอลูมิเนียมพรอยด์ที่ห่อแผ่นเหล็กกล้าและตั้งค่า ϵ ในกล้องถ่ายภาพความร้อนให้มีค่าเท่ากับ 1 จากการทดลอง พบว่า ค่า ϵ ของเมล็ดคาโนล่า มีค่าลดลงตามอุณหภูมิที่สูงขึ้นจากการให้ความร้อน ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของเมล็ด Canola ที่ได้มีค่าอยู่ที่ 0.93 - 0.99

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 ชุดทดลองของ Yu et al. [9]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

ในบทนี้กล่าวถึงขั้นตอนการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการเตรียมวัสดุทดลอง การออกแบบชุดทดลอง สำหรับการวัดสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน (ϵ) วิธีการทดลองวัดค่า ϵ ด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน วิธีการวัดอุณหภูมิเพื่อคำนวณ ϵ และการคำนวณค่า ϵ โดยใช้ทฤษฎีการแผ่รังสีความร้อน

3.1 วัสดุทดลอง

3.1.1 วัสดุวิศวกรรม

วัสดุวิศวกรรมที่ใช้ในการทดลองเป็นกลุ่มวัสดุที่มีลักษณะพื้นผิวมันวาวและมีสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนต่ำ [2-6, 8, 10-13, 26-27] ได้แก่ แผ่นทองแดง แผ่นอลูมิเนียม แผ่นอะคริลิก และแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด ASTM 304 แบ่งเป็นแบบเรียบที่มีค่าความขรุขระ $0.4 \mu\text{m}$ และแบบหยาบที่มีค่าความขรุขระ $3.2 \mu\text{m}$ ดังรูปที่ 3.1 โดยตัดตัวอย่างทดสอบเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 92×77 มิลลิเมตร



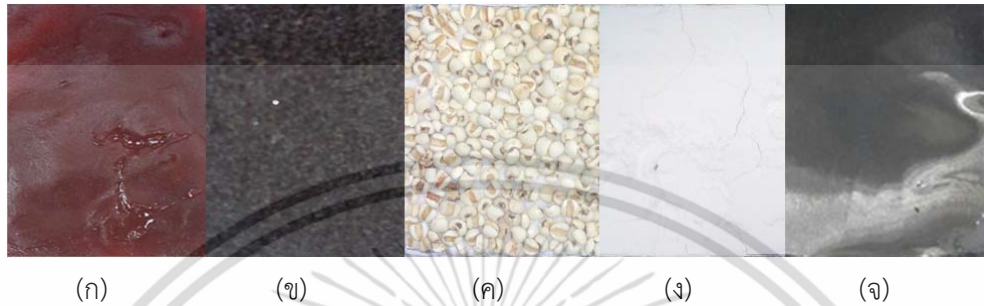
รูปที่ 3.1 วัสดุวิศวกรรม ได้แก่ (ก) แผ่นทองแดง (ข) แผ่นอลูมิเนียม (ค) แผ่นอะคริลิก (ง) แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมแบบหยาบ และ (จ) แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมแบบเรียบ

3.1.2 วัสดุชีวภาพ

วัสดุชีวภาพที่ใช้ในการทดลองเป็นกลุ่มวัสดุที่มีสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนสูง [7, 9, 12-13, 20, 25] แบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มของแข็ง ได้แก่ ลูกเต๋อย เม็ดแมงลัก และแป้งมัน และกลุ่มของเหลว ได้แก่ น้ำเปล่าและซอสมะเขือเทศ โดยในการทดลองใช้วิธีบรรจุวัสดุอาหารใส่ถาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

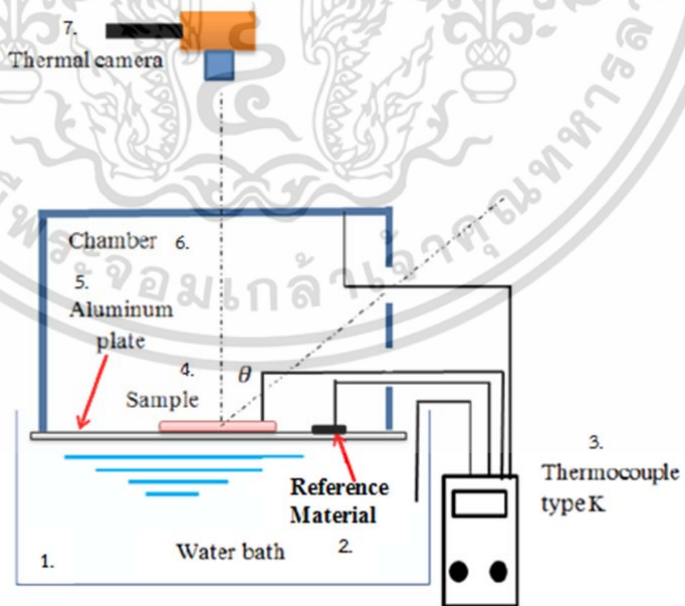
อลูมิเนียมให้เต็มพื้นที่สภาพพอดี ดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยสภาพที่บรรจุเป็นภาชนะรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีขนาด $92 \times 77 \times 5$ มิลลิเมตร และในกรณีที่ตัวอย่างมีขนาดใหญ่ทำให้มีพื้นที่ว่างเกิดขึ้นจะใช้วิธีการเติมเกลือป่นลงในช่องว่างดังกล่าว และเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสำหรับถ่ายเทความร้อน



รูปที่ 3.2 วัสดุทางชีวภาพ ได้แก่ (ก) ขอสมะเขือเทศ (ข) เม็ดแมงลัก (ค) ลูกเดือย (ง) แป้งมัน (จ) น้ำ

3.2 การออกแบบชุดทดลอง

ชุดทดลองสำหรับหาสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน ประกอบด้วย ส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน คือ ชุดให้ความร้อนกับวัสดุทดลอง อุปกรณ์เสริม และอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ ดังรูปที่ 3.3 และแสดงรายละเอียดในตารางที่ 3.1



(ก)

รูปที่ 3.3 การออกแบบชุดทดลอง (ก) ภาพ drawing (ข) ภาพชุดทดลองจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

รูปที่ 3.3 (ต่อ) การออกแบบชุดทดลอง (ก) ภาพ drawing (ข) ภาพชุดทดลองจริง

ตารางที่ 3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ประกอบชุดทดลองสำหรับการหาสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน

หมายเลข	วัสดุหรืออุปกรณ์
1	อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (รุ่น, spec)
2	แผ่นวัสดุอ้างอิง
3	ชุดเทอร์โมคัปเปิ้ล Type K พร้อมสายวัดอุณหภูมิ
4	วัสดุทดลอง
5	แผ่นอลูมิเนียม
6	กล่องควบคุมสภาวะแวดล้อม (Chamber)
7	กล้องถ่ายภาพความร้อนพร้อมขาตั้ง

3.2.1 ชุดให้ความร้อน

ชุดให้ความร้อนกับวัสดุทดลอง ประกอบด้วย อ่างน้ำร้อนควบคุมอุณหภูมิ (ยี่ห้อ Schutzart DIN 400500 มาตรฐาน IP 20) ดังแสดงในรูปที่ 3.4 และแผ่นอลูมิเนียมขนาด 137×100 มิลลิเมตร (รูปที่ 3.5) สำหรับวางวัสดุทดลอง โดยแผ่นอลูมิเนียมจะถ่ายเทความร้อนจากน้ำร้อนในอ่างควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิมายังวัสดุทดลองด้วยกลไกการนำความร้อนเนื่องจากแผ่นอลูมิเนียมเป็นวัสดุโลหะที่มีสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูง [13]



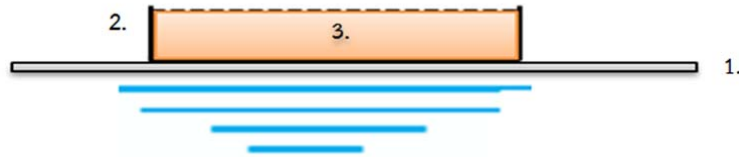
รูปที่ 3.4 อ่างควบคุมอุณหภูมิ



รูปที่ 3.5 แผ่นอลูมิเนียม

สำหรับการให้ความร้อนกับวัสดุทดลองที่เป็นวัสดุชีวภาพ จำเป็นต้องออกแบบภาตรองรับวัสดุ ดังรูปที่ 3.6 และตารางที่ 3.2 เพื่อให้ความร้อนกับวัสดุทดลองด้วยกลไกการนำความร้อนจากน้ำร้อน ในอ่างควบคุมอุณหภูมิผ่านตัวกลาง คือ แผ่นอลูมิเนียม และส่งผ่านความร้อนต่อไปยังพื้นผิวด้านล่างของภาตอลูมิเนียมบรรจุวัสดุทดลอง โดยในกรณีวัสดุทดลองมีขนาดค่อนข้างใหญ่อาจมีช่องว่างอากาศเกิดขึ้นระหว่างวัสดุทดลอง เช่น ลูกเต๋อย ควรเพิ่มพื้นที่ผิวสำหรับการถ่ายเทความร้อนโดยอัดผงเกลือ โซเดียมคลอไรด์ในภาชนะด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 ถาดรองรับวัสดุชีวภาพที่เป็นเมล็ด ผง และของเหลว

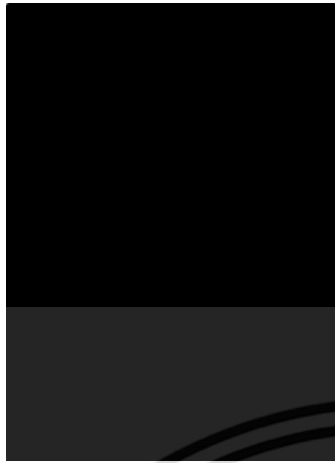
ตารางที่ 3.2 ถาดรองรับวัสดุทดลองที่มีลักษณะเป็นของแข็งขนาดเล็กและของเหลว

หมายเลข	วัสดุหรืออุปกรณ์
1	แผ่นอลูมิเนียม
2	ภาชนะใส่วัสดุทดลอง (ถาดอลูมิเนียม) ขนาด 92×77×5 มิลลิเมตร
3	วัสดุชีวภาพ

3.2.2 อุปกรณ์เสริม

อุปกรณ์เสริมที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย แผ่นวัสดุอ้างอิงหรือวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนสูง (ใกล้เคียง 1) โดยในการทดลองนี้เลือกใช้แผ่นอลูมิเนียมขนาด 60×92 มิลลิเมตร พ่นสเปรย์สีดำด้าน (Matt Black Spray) (ยี่ห้อ Leyland, F-14 Flat Black) ซึ่งเป็นสีทึบร้อน โดยไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะพื้นผิวภายใต้สภาวะการทดลองในงานวิจัยนี้ และใช้กล่องควบคุมสภาวะแวดล้อม (chamber) ที่มีขนาด 300 × 300 × 263 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.7 เพื่อใช้ควบคุมรังสีความร้อนที่แผ่รังสีจากสิ่งแวดล้อมโดยรอบวัตถุทดสอบแล้วสะท้อนออกจากพื้นผิว

ในงานวิจัยนี้ ออกแบบให้กล่องควบคุมสภาวะแวดล้อมมีพื้นผิวด้านในต่างกัน 2 แบบ คือ ภายในกล่องบุด้วยวัสดุที่มีสมบัติการสะท้อนสูง นั่นคือ การติดแผ่นอลูมิเนียมพอยล์ตลอดพื้นผิวเพื่อเพิ่มความสามารถในการสะท้อนรังสีความร้อน และกล่องควบคุมสภาวะแวดล้อมที่พื้นผิวภายในกล่องติดด้วยวัสดุที่มีสมบัติการสะท้อนต่ำ นั่นคือ การติดด้วยกระดาษสีดำ เพื่อเพิ่มสมบัติการดูดซับรังสีความร้อนและสมบัติการแผ่รังสีความร้อนทำให้มีสมบัติการสะท้อนต่ำลง



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.7 (ก) แผ่นวัสดุอ้างอิง และ (ข) กล่องควบคุมสภาวะแวดล้อม

3.2.3 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ

งานวิจัยนี้ใช้อุปกรณ์วัดอุณหภูมิหลัก 2 ชนิด คือ ดิจิตอลเทอร์โมมิเตอร์ซึ่งเชื่อมต่อกับเทอร์โมคัปเปิลแบบสัมผัสและกล้องถ่ายภาพความร้อน โดยในชุดการทดลองใช้ดิจิตอลเทอร์โมมิเตอร์แบบสัมผัสยี่ห้อ FLUKE รุ่น 52 II (รูปที่ 3.8 ก) รับสัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิลแบบสัมผัสชนิดเค (K-type) (รูปที่ 3.8 ข) โดยใช้เทอร์โมคัปเปิลสำหรับวัดอุณหภูมิบริเวณพื้นผิวด้านบนของวัสดุทดลอง แผ่นวัสดุอ้างอิง แผ่นอุมิเนียม น้ำร้อนในอ่างควบคุมอุณหภูมิ และอุณหภูมิภายในกล่องครอบ จำนวน 2 ตำแหน่ง และการวัดอุณหภูมิของวัสดุแบบไม่สัมผัสโดยใช้กล้องถ่ายภาพความร้อน (FLUKE รุ่น TI 400) (รูปที่ 3.8 ค) ซึ่งมีความละเอียด 320 x 240 พิกเซล รับรังสีอินฟราเรดในช่วงความยาวคลื่น 7.5-14 μm ช่วงการวัดอุณหภูมิ -20°C ถึง $1,200^{\circ}\text{C}$ ค่าความไวต่ออุณหภูมิ (Thermal sensitivity) เท่ากับ 0.05 K ที่อุณหภูมิ 30°C สมบัติเกี่ยวกับค่าความละเอียดของภาพความร้อนด้านขอบเขตมุมมองที่เห็นภาพ (field of view, FOV) คือ 24° (แนวราบ, $^{\circ}\text{H}$) x 17° (แนวตั้ง, $^{\circ}\text{V}$) และค่าความละเอียดภาพความร้อนเมื่อพิจารณาที่ความละเอียดของภาพความร้อนขนาด 1 พิกเซล (spatial resolution, IFOV) คือ 1.31 mRad ระยะโฟกัส 15 cm ค่าความถูกต้องในการวัดอุณหภูมิคือ $\pm 2^{\circ}\text{C}$ หรือ 2% โดยคิดค่าความคลาดเคลื่อนที่มีค่ามาก ในการใช้งานควรกำหนดค่าอุณหภูมิพื้นหลัง (Background temperature, หรือ Surrounding Temperature) ให้ถูกต้องและใช้ซอฟต์แวร์ของ Fluke หรือโปรแกรม Smart Views สำหรับการวิเคราะห์ภาพถ่ายความร้อน และขนาดจุดวัดอุณหภูมิ (Measurement Field of View, MFOV) โดยทั่วไปมีขนาดเป็น 2-3 เท่าของ IFOV ดังนั้นขนาดของ MFOV ในกล้องถ่ายภาพความร้อนที่ใช้มีขนาดตั้งแต่ 2.62-3.93 mRad

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 3.8 (ก) อุปกรณ์วัดอุณหภูมิดิจิทัลเทอร์โมมิเตอร์ (ข) เทอร์โมคัปเปิ้ล Type k และ (ค) กล้องถ่ายภาพความร้อน

ระยะติดตั้งกล้องถ่ายภาพความร้อนสูงจากพื้นผิววัสดุทดลองในแนวตั้งฉาก (d) คำนวณจากค่า FOV ตามคุณลักษณะสถิติของกล้องถ่ายภาพความร้อนและพิจารณาจากขนาดวัสดุทดลองที่มีความกว้าง (X) และความยาว (Y) ดังรูปที่ 3.9 ซึ่งในงานวิจัยนี้คำนวณระยะติดตั้งกล้องถ่ายภาพความร้อนได้ประมาณ 30 cm ซึ่งมีค่าความสูงของกล้องถ่ายภาพความร้อนจากพื้นผิววัสดุทดลองเท่ากับค่าความสูงของกล้องควบคุมสภาวะแวดล้อมโดยประมาณ



รูปที่ 3.9 การหาระยะติดตั้งกล้องถ่ายภาพความร้อนจากการคำนวณด้วยค่า FOV และพิจารณาขนาดวัสดุทดลอง

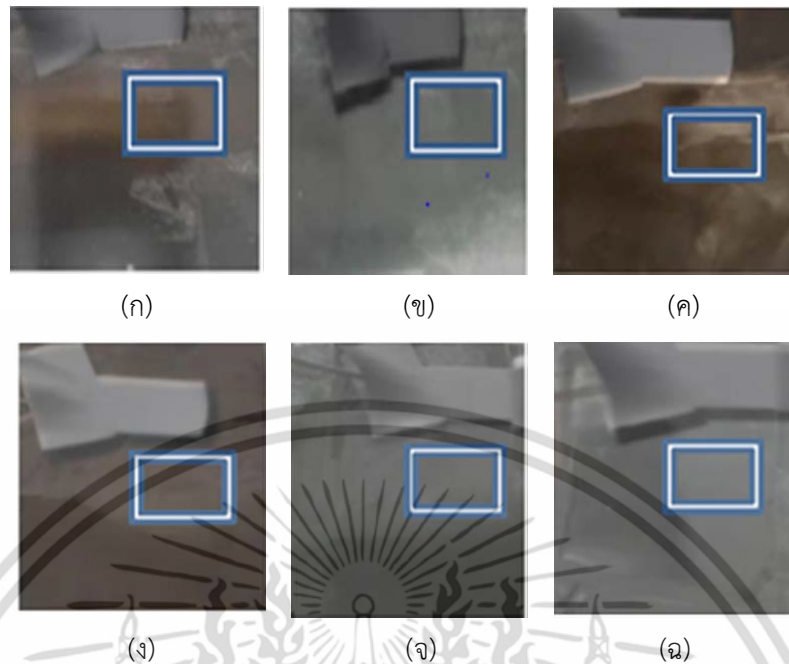
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การทดลอง

3.3.1 การทดลองเบื้องต้น

การทดลองเบื้องต้นมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้สำหรับวิธีการออกแบบชุดทดลองเพื่อวัด ϵ วัสดุที่มีพื้นผิวมันวาวหรือมีสมบัติการสะท้อนสูง โดยใช้ชุดทดลองที่ออกแบบดังอธิบายในหัวข้อที่ 3.2 และทดสอบผลกระทบของมุมมอง (θ) ที่มีต่อการวัด ϵ ด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนที่มุม 0° และ 30° ตามลำดับ ตัวอย่างวัสดุทดลองที่มีสมบัติการสะท้อนสูง ได้แก่ แผ่นอลูมิเนียม แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม และแผ่นทองแดง เนื่องจากวัสดุเหล่านี้ทำสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนได้ค่อนข้างยากเพราะปัจจัยของรังสีความร้อนที่สะท้อนเข้ากล้องถ่ายภาพความร้อนมีค่าสูง

การทดลองเริ่มจากนำวัสดุเหล่านี้วางบนแผ่นอลูมิเนียม จากนั้นให้ความร้อนกับวัสดุทดลองด้วยกลไกการนำความร้อนจากน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 80°C มายังวัสดุทดลองแล้วรอจนอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุทดลองเข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady-state) จากนั้นวัดอุณหภูมิตัวอย่างทดสอบด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนและในขณะเดียวกันวัดอุณหภูมิที่แท้จริงของวัสดุด้วยอุปกรณ์วัดแบบสัมผัส นั่นคือ เทอร์โมคัปเปิล และใช้เทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิที่ผิวของผนังด้านในกล่องครอบสองด้านที่มีขนาดเท่ากัน และนำอุณหภูมิที่ได้มาเฉลี่ยคิดเป็นอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมภายในกล่องครอบ ซึ่งวัดได้ 36.2°C กำหนดค่าสมบัติการส่งผ่านรังสีความร้อนในอากาศเท่ากับ 100% หาค่า ϵ อย่างง่ายโดยใช้กล้องถ่ายภาพความร้อน โดยการเปรียบเทียบอุณหภูมิของวัสดุอ้างอิง ซึ่งในที่นี้ใช้เทปพีวีซีสีดำ ปรับค่า ϵ ในกล้องถ่ายภาพความร้อนจนอุณหภูมิที่อ่านได้มีค่าใกล้เคียงอุณหภูมิที่วัดได้จากเทอร์โมคัปเปิลแบบสัมผัส ทำการทดลองตัวอย่างละ 3 ซ้ำหาค่าเฉลี่ยและแต่ละการทดลอง โดยบริเวณที่เลือกสำหรับการพิจารณาจุดวัดอุณหภูมิต้องไม่ได้รับอิทธิพลจากการสะท้อนของพื้นผิวหน้ากล้องถ่ายภาพความร้อน และช่องเปิดที่รังสีความร้อนจากภายนอกจะเข้ามาได้ ดังแสดงตำแหน่งการวัดในรูปที่ 3.10 สังเกตได้จากสัญลักษณ์กรอบสี่เหลี่ยมสีขาวซึ่งมีขนาดประมาณ $1 \times 2 \text{ cm}$ ผลการทดลองที่ได้แสดงในตารางที่ 3.3



รูปที่ 3.10 การหาสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของวัสดุตัวอย่างด้วยการวิเคราะห์ภาพถ่ายความร้อน (ก) แผ่นอลูมิเนียมที่ 0° และ (ข) 30° (ค) แผ่นทองแดงที่ 0° และ (ง) 30° และ (จ) แผ่นสแตนเลสที่ 0° และ (ฉ) 30°

ตารางที่ 3.3 สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของวัสดุที่มีสมบัติการสะท้อนสูง

ชนิดวัสดุ	ϵ จากการทดลอง		ϵ อ้างอิง
	$\theta = 0^{\circ}$	$\theta = 30^{\circ}$	
แผ่นสแตนเลส	0.39 ± 0.026	0.42 ± 0.060	0.34-0.52, [10]
แผ่นอลูมิเนียม	0.26 ± 0.042	0.26 ± 0.042	0.39-0.51, [11]
แผ่นทองแดง	0.27 ± 0.023	0.27 ± 0.038	0.20-0.25, [11]

จากตารางที่ 3.3 พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงจากงานวิจัยอื่น และมุม θ เท่ากับ 0° และ 30° ไม่มีความแตกต่างกัน เนื่องจากในการทดลองนี้เลือกใช้พื้นที่การวัดอุณหภูมิบนภาพถ่ายความร้อนในบริเวณที่มีอุณหภูมิคงตัวและมีลักษณะของเฉดสีแสดงการกระจายอุณหภูมิบนภาพความร้อนที่มีความสม่ำเสมอ และเป็นบริเวณที่ไม่ได้รับผลเกี่ยวกับรังสีสะท้อน ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับทฤษฎีที่ว่า หากมุม θ มีค่าไม่เกิน 45° ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของวัสดุค่อนข้างคงที่หรือมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก [6,13] ดังนั้น จึงสามารถสรุปใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เบื้องต้นได้ว่า ชุดการทดลองที่ออกแบบนี้สามารถใช้วัด ϵ ของวัสดุที่มีสมบัติการสะท้อนสูงได้ จึงนำชุดทดลองนี้ไปใช้สำหรับการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวข้องกับวัสดุวิศวกรรมอื่น ๆ และวัสดุชีวภาพ รวมถึงศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับลักษณะพื้นผิวของกล่องควบคุมสถานะแวดล้อมกรณีที่พื้นผิวภายในมีค่าสมบัติการสะท้อนสูงและต่ำ

3.3.2 การวัดสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน

การวัดสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของวัสดุวิศวกรรม เริ่มจากการให้ความร้อนกับตัวอย่างทดสอบโดยการจัดวางบนแผ่นอลูมิเนียมหรือภาชนะรองรับตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 3.3 และรูปที่ 3.6 ตามลำดับ โดยจัดวางตัวอย่างทดสอบคู่กับแผ่นวัสดุอ้างอิงต่ำ (รูปที่ 3.11) ภายในกล่องควบคุมสถานะแวดล้อมที่มีสมบัติการสะท้อนสูง กำหนดมุมเอียงของกล่องถ่ายภาพความร้อนที่ θ เท่ากับ 0°



รูปที่ 3.11 การวางวัสดุทดลอง

การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การทดลองเพื่อวัดค่า ϵ ด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนโดยใช้วิธีเดียวกับหัวข้อ 3.3.1 และการทดลองวัดค่าตัวแปรอื่น ๆ เพื่อนำไปใช้สำหรับการคำนวณค่า ϵ โดยอาศัยทฤษฎีการแผ่รังสีความร้อน เริ่มต้นการทดลอง ด้วยการวิเคราะห์หาค่า ϵ ของวัสดุอ้างอิง จากนั้นวัดอุณหภูมิวัสดุอ้างอิงโดยปรับค่า ϵ เท่ากับค่าที่วิเคราะห์ได้ บันทึกค่าอุณหภูมิวัสดุอ้างอิงที่อ่านได้ จากนั้นวัดอุณหภูมิตัวอย่างทดสอบด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนโดยปรับค่า ϵ ของตัวอย่างให้เท่ากับ 0.95 (อาจกำหนดค่าอื่นได้เช่นกัน) บันทึกค่า ϵ ที่กำหนดและค่าอุณหภูมิที่อ่านได้จากกล้องถ่ายภาพความร้อน เลือกจุดวัดอุณหภูมิบนภาพถ่ายความร้อนในบริเวณที่ไม่ได้รับผลกระทบจากรังสีสะท้อน และปรับค่า ϵ ในกล้องถ่ายภาพความร้อนจนค่าอุณหภูมิที่อ่านได้ใกล้เคียงหรือเท่ากับค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

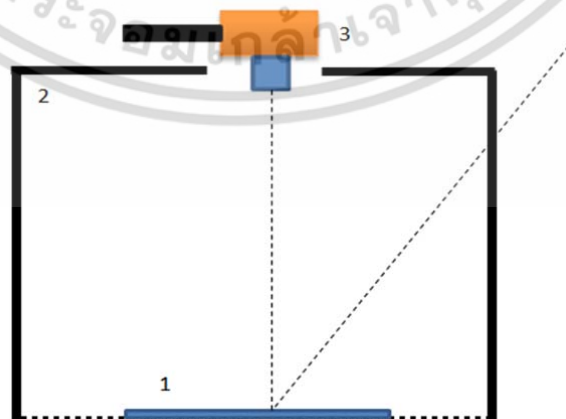
อุณหภูมิที่วัดได้จากเทอร์โมคัปเปิลแบบสัมผัสและอุณหภูมิของวัสดุอ้างอิง ทำการทดลองตัวอย่างละ 3 ซ้ำ และคำนวณความถูกต้องแม่นยำ (%Accuracy) และความเที่ยงตรงของการวัด (%Precision) และหากมีกรณีที่ไม่สามารถใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนเพื่อปรับค่า ϵ ได้จะใช้วิธีพลอตกราฟระหว่างอุณหภูมิพื้นผิววัตถุที่อ่านได้จากกล้องถ่ายภาพความร้อนและค่า ϵ โดยป้อนค่า ϵ ตั้งแต่ 0-1 ทำทั้งกล่องควบคุมสภาวะแวดล้อมที่มีสมบัติการสะท้อนสูงและต่ำ ทำการทดลองตัวอย่างละ 3 ซ้ำ

3.4 การคำนวณสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน

การคำนวณค่า ϵ โดยใช้ทฤษฎีการแผ่รังสีความร้อนและอัตราแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนสุทธิแต่ละพื้นผิว เพื่อใช้เปรียบเทียบกับค่า ϵ ด้วยวิธีการวัดด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน แบ่งการคำนวณเป็น 2 กรณี คือ

- 1) การคำนวณหาสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนสำหรับกรณีพื้นที่ผิวภายในกล่องควบคุมสภาวะแวดล้อมมีค่าสมบัติการสะท้อนสูง
- 2) การคำนวณหาสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนสำหรับกรณีพื้นที่ผิวภายในกล่องควบคุมสภาวะแวดล้อมมีค่าสมบัติการสะท้อนต่ำ

ซึ่งการคำนวณจะพิจารณาพื้นผิวที่มีการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนสุทธิ จำนวน 3 พื้นผิว ดังรูปที่ 3.12 โดยพื้นผิวที่ 1 คือ พื้นผิวด้านบนของวัสดุทดลอง พื้นผิวที่ 2 คือ พื้นผิวภายในกล่องควบคุมสภาวะแวดล้อมที่มีค่าสมบัติการสะท้อนสูง (High reflection) และสมบัติการสะท้อนต่ำ (Low reflection) และพื้นผิวที่ 3 คือ พื้นที่บริเวณช่องเปิดให้ตัวตรวจจรับรังสีอินฟราเรดของกล้องถ่ายภาพความร้อนสามารถตรวจจรับรังสีอินฟราเรดที่วัตถุทดสอบแผ่ออกมาได้



รูปที่ 3.12 การพิจารณาพลังงานการแผ่รังสีความร้อนและอัตราแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนสุทธิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.1 กรณีพื้นที่ผิวภายในกล่องควบคุมสถานะแวดล้อมมีค่าสมบัติการสะท้อนสูง

การคำนวณหาสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนสำหรับกรณีพื้นที่ผิวภายในกล่องควบคุมสถานะแวดล้อมมีค่าสมบัติการสะท้อนสูง มีสมมติฐานทางความร้อน ดังนี้

- 1) ให้ความร้อนกับวัสดุตัวอย่างจนเข้าสู่สภาวะคงตัว
- 2) วัสดุทดลองเป็นวัสดุทึบและเป็นวัตถุเทา
- 3) ให้ผนังด้านในของกล่องกล่องควบคุมสถานะแวดล้อมมีสมบัติการสะท้อนสูงมาก ๆ จึงประมาณได้ว่ามีรังสีสะท้อน 100% จึงให้สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนและสมบัติการส่งผ่านรังสีความร้อนเป็น 0
- 4) ไม่คิดการแผ่รังสีความร้อนของบริเวณพื้นที่อื่นนอกเหนือจากที่กำหนดในรูปที่ 3.12 และไม่คิดพื้นที่ผิวภายในกล่องควบคุมสถานะแวดล้อมด้านเดียวกับวัสดุทดลอง
- 5) ให้กล้องถ่ายภาพความร้อนไม่ใช่วัตถุทึบและไม่ใช่วัตถุเทา แต่เป็นวัตถุที่มีสมบัติการส่งผ่านรังสีความร้อนสูงมาก ๆ ประมาณได้ว่ามีรังสีความร้อนที่ส่งผ่านเข้าไปในกล้องถ่ายภาพความร้อน 100% จึงให้สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนและสมบัติการสะท้อนรังสีความร้อนที่กล้องถ่ายภาพความร้อนเป็น 0
- 6) คิดการนำความร้อนจากน้ำร้อนผ่านตัวกลางที่มีสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูงไปยังวัสดุทดลองเป็นการนำความร้อนมิติเดียวเนื่องจากวัสดุทดสอบเตรียมให้มีขนาดที่บางมาก (2 มิลลิเมตร)
- 7) สมบัติเชิงความร้อนต่าง ๆ ของวัสดุทดลองและอุปกรณ์อื่น ๆ คงที่
- 8) ไม่มีการกำเนิดพลังงานภายในชิ้นวัสดุทดลอง
- 9) การให้ความร้อนกับวัสดุทดลองไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะเชิงพื้นผิว
- 10) ตัวกลางที่ใช้นำความร้อนจากน้ำร้อนไปยังวัสดุทดลองมีสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูง การคำนวณพลังงานการแผ่รังสีความร้อนและอัตราแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนสุทธิแต่ละพื้นผิวมีความแตกต่างกันตามสมมติฐานที่ตั้งไว้และมีการคำนวณดังนี้

พื้นผิวที่ 1 เป็นพื้นผิวตัวอย่างทดสอบที่ต้องการหาค่า ε มีสมการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อน คือ

$$q_1 = (J_1 - G_1)A_1 = q_{12} + q_{13} \quad (3.1)$$

$$q_1 = ((E_1 + R_1) - (J_2 + J_3))A_1 = (q_{1 \rightarrow 2} - q_{2 \rightarrow 1}) + (q_{1 \rightarrow 3} - q_{3 \rightarrow 1}) \quad (3.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามสมมติฐานที่ตั้งไว้สามารถคำนวณ $q_{3 \rightarrow 1} = J_3 A_3 F_{31}$ เนื่องจากว่า $J_3 = 0$ ทำให้ $q_{3 \rightarrow 1} = 0$ สำหรับพื้นที่ผิวภายในกล่องควบคุมสภาวะแวดล้อม (พื้นผิวที่ 2) จะได้ว่า $E_2 = 0$ จากสมมติฐานและไม่มีรังสีความร้อนจากกล้องถ่ายภาพความร้อน (พื้นผิวที่ 3) แผ่รังสีความร้อนมายังพื้นผิวที่ 2 และจากสมมติฐาน R_2 เท่ากับ J_1 แสดงว่ารังสีความร้อนที่แผ่ออกจากพื้นผิวที่ 1 ถูกสะท้อนกลับหมดจากพื้นผิวที่ 2

ดังนั้นจะได้ว่า

$$q_1 = q_{1 \rightarrow 3} + q_{1 \rightarrow 2} \quad (3.3)$$

$$q_1 = J_1 A_1 F_{13} + J_1 A_1 F_{12} \quad (3.4)$$

จากสมมติฐานที่กำหนดไว้สามารถจัดรูปสมการได้เป็น

$$q_1 = (F_{13} + F_{12})(E_1 + R_1) \quad (3.5)$$

โดยที่ $R_1 = \rho_1 G_1$ ซึ่ง $G_1 = J_2 + J_3$ และ $J_3 = 0$ จึงได้ว่า $G_1 = J_2$ โดยที่ $E_2 = 0$ จึงได้ว่า $G_1 = R_2$ โดยที่ $R_2 = \rho_2 G_2$ ดังนั้น $R_1 = \rho_1 (\rho_2 G_2)$ เนื่องจากค่า ρ เป็นสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีความร้อนซึ่งมีค่าไม่ถึง 1 ทำให้เทอมของ R_1 มีค่าน้อยมาก จึงประมาณว่า $R_1 = 0$ จะได้สมการดังนี้

$$q_1 = (F_{13} + F_{12})(E_1) \quad (3.6)$$

และเมื่อ $F_{11} = 0$ จะได้ว่า $F_{13} + F_{12} = 1$

ดังนั้น สมการที่ได้จากการคิดอัตราการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนสุทธิที่พื้นผิววัสดุทดลอง คือ

$$q_1 = E_1 \quad (3.7)$$

$$q_1 = \varepsilon_1 \sigma T_1^4 \quad (3.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พื้นผิวที่ 2 เป็นพื้นผิวภายในกล่องควบคุมสภาวะแวดล้อม มีสมการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนคือ

$$q_2 = (J_2 - G_2)A_2 = q_{21} + q_{23} \quad (3.9)$$

$$q_2 = ((E_2 + R_2) - (J_1 + J_3))A_2 = (q_{2 \rightarrow 1} - q_{1 \rightarrow 2}) + (q_{2 \rightarrow 3} - q_{3 \rightarrow 2}) \quad (3.10)$$

จากสมมติฐานที่กำหนดไว้สำหรับพื้นที่ผิวภายในพื้นผิวที่ 2 จะได้ว่า $E_2 = 0$ และมี R_2 เท่ากับ J_1 และ $q_{1 \rightarrow 2} = q_{2 \rightarrow 1}$ จากสมมติฐานเกี่ยวกับกล้องถ่ายภาพความร้อน (พื้นผิวที่ 3) ทำให้ $J_3 = 0$ เนื่องจากว่า $E_3 = 0$ และ $R_3 = 0$ โดยที่ $q_{3 \rightarrow 2} = J_3 A_3 F_{32}$ จึงทำให้ $q_{3 \rightarrow 2} = 0$ และประมาณได้ว่า $q_{2 \rightarrow 3} = 0$ เนื่องจากไม่มีรังสีความร้อนจากกล้องถ่ายภาพความร้อนเข้ามายังกล่องควบคุมสภาวะแวดล้อมรวมถึงค่า View factor (F_{23}) มีค่าน้อยมาก ดังนั้นอัตราการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนสุทธิที่พื้นผิวที่ 2 คือ $q_2 = 0$ และจากสมมติฐานรังสีความร้อนแผ่จากพื้นผิวที่ 2 น้อยมากเพราะว่านอกจากพื้นผิวที่ 2 ถูกคิดว่ามีสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนเป็น 0 แล้ว พื้นผิวที่ 2 ยังมีอุณหภูมิที่ผิวต่ำกว่าพื้นผิวที่ 1 ด้วย

พื้นผิวที่ 3 เป็นพื้นผิวบริเวณหน้ากล้องถ่ายภาพความร้อนและพื้นที่เปิดของกล่องควบคุมบริเวณด้านบนที่เปิดให้ตัวตรวจจับรังสีสามารถรับรังสีที่แผ่ออกจากวัตถุตัวอย่างได้ มีสมการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อน คือ

$$q_3 = (J_3 - G_3)A_3 = q_{31} + q_{32} \quad (3.11)$$

จากสมมติฐานที่กำหนดไว้สามารถคำนวณ $q_3 = -q_{1 \rightarrow 3}$ ซึ่งหมายความว่า พื้นผิวหน้ากล้องถ่ายภาพความร้อนรับรังสีความร้อนจากพื้นผิวตัวอย่างเพียงอย่างเดียว และรับรังสีความร้อนจากพื้นผิวกล่องควบคุมสภาวะแวดล้อมน้อยมากเพราะประมาณว่า $q_{2 \rightarrow 3} = 0$

สมมติฐานดังกล่าวทำให้การแผ่รังสีความร้อนจากวัสดุตัวอย่างไม่เกิดการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนกับพื้นผิวของกล่องควบคุมสภาวะแวดล้อมและกล้องถ่ายภาพความร้อน เนื่องจากการแผ่รังสีความร้อนจากวัสดุตัวอย่างไปยังกล่องควบคุมสภาวะแวดล้อมถูกสะท้อนกลับหมด จึงทำให้อัตราการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนสุทธิที่พื้นผิวกล่องควบคุมสภาวะแวดล้อมด้านในเป็น 0 W/m^2 และการแผ่รังสีความร้อนจากวัสดุตัวอย่างไปยังกล้องถ่ายภาพความร้อนถูกส่งผ่านเข้าไปในกล้อง

ทั้งหมด ทำให้พลังงานที่แผ่รังสีความร้อนจากตัวอย่างไปยังกล้องถ่ายภาพความร้อนจะถูกส่งผ่านเข้าไปในกล้องเกือบทั้งหมด ดังนั้น พลังงานที่แผ่รังสีความร้อนจากตัวอย่างจึงต้องคำนวณได้จากสมการที่ 3.12

$$E = \epsilon \sigma A T_s^4 \quad (3.12)$$

จากสมการที่ 3.12 สามารถใช้หาพลังงานการแผ่รังสีความร้อน (E) จากวัสดุทดลอง เมื่อ T_s คือ อุณหภูมิที่ผิวของวัสดุทดลอง และใช้กฎทรงพลังงานคำนวณการถ่ายเทความร้อนจากแหล่งความร้อนกับวัสดุทดลองแล้วใช้แผ่นวัสดุอ้างอิง ซึ่งเป็นวัสดุที่ทราบสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนเพื่อหาอัตราการแผ่รังสีความร้อนที่เกิดขึ้นมากที่สุด เมื่อวัสดุทดลองและแผ่นวัสดุอ้างอิงได้รับพลังงานความร้อนจากแหล่งความร้อนเดียวกัน โดยการคำนวณเริ่มจากปรับสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของวัสดุทดลองที่กล้องถ่ายภาพความร้อนแล้วอ่านค่าอุณหภูมิของวัสดุทดลอง จากนั้นนำอุณหภูมิที่อ่านได้ไปหาพลังงานที่มีการแผ่รังสีความร้อนจากวัสดุทดลอง (Emission) เพื่อหาสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของวัสดุทดลองได้ดังสมการที่ 3.13. โดยคิดอุณหภูมิที่ผิวซึ่งวัดด้วยเทอร์โมคัปเปิ้ลหรือคิดจากอุณหภูมิที่ผิวของแผ่นวัสดุอ้างอิง

$$\epsilon_{set} T_{Ti}^4 = \epsilon_s T_s^4 \quad (3.13)$$

จากสมการ ϵ_{set} คือ สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนที่ตั้งไว้กับกล้องถ่ายภาพความร้อน , ϵ_s คือ สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของวัสดุทดลอง, T_{Ti} คือ อุณหภูมิที่ผิววัสดุทดลองอ่านได้จากกล้องถ่ายภาพความร้อน และ T_s คือ อุณหภูมิที่ผิววัสดุทดลองอ่านได้จากเทอร์โมคัปเปิ้ลหรืออุณหภูมิที่ผิวของแผ่นวัสดุอ้างอิง

3.4.2 กรณีพื้นที่ผิวภายในกล่องควบคุมสภาวะแวดล้อมมีค่าสมบัติการสะท้อนต่ำ

การคำนวณหาสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนสำหรับกรณีพื้นที่ผิวภายในกล่องควบคุมสภาวะแวดล้อมมีค่าสมบัติการสะท้อนต่ำ ค่าความยาวใต้สมมติฐานที่กำหนดไว้เช่นเดียวกับกรณีพื้นที่ผิวภายในกล่องควบคุมสภาวะแวดล้อมมีค่าสมบัติการสะท้อนสูง ยกเว้นผนังด้านในของกล่องควบคุมสภาวะแวดล้อมมีสมบัติการสะท้อนต่ำมาก ๆ จึงประมาณได้ว่ามีรังสีความร้อนที่แผ่ออกจากพื้นผิววัสดุทดลอง คือ 100% จึงให้สัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีความร้อนและสมบัติการส่งผ่านรังสีความร้อน

ร้อนมีค่าเป็น 0 จึงคิดว่าพื้นผิวที่สองมีสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนเป็น 1 จึงมีขั้นตอนการคำนวณดังนี้

พื้นผิวที่ 1 เป็นพื้นผิวตัวอย่างทดสอบที่ต้องการหาค่า ε มีสมการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อน คือ

$$q_1 = (J_1 - G_1)A_1 = q_{12} + q_{13} \quad (3.14)$$

$$q_1 = (J_1 - G_1)A_1 = (q_{1 \rightarrow 2} - q_{2 \rightarrow 1}) + (q_{1 \rightarrow 3} - q_{3 \rightarrow 1}) \quad (3.15)$$

โดยที่ $R_1 = \rho_1 G_1$ และ $G_1 = J_2 + J_3$ จากสมมติฐาน $J_3 = 0$ และจากกฎของความสัมพันธ์ของ View Factor ดังสมการที่ 2.14 จะได้ว่า $A_1 F_{12} = A_2 F_{21}$ ดังนั้น $G_1 = J_2$ และตามสมมติฐานผนังภายในกล่องควบคุมสภาวะแวดล้อมมีสมบัติการสะท้อนน้อยมากจึงกำหนดให้ $R_2 = 0$ จะได้ว่า $J_2 = E_2$ และ $\rho_1 = 1 - \varepsilon_1$ เมื่อจัดรูปสมการสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 3.16

$$q_1 = E_1 - \varepsilon_1 E_2 = J_1 F_{12} - J_2 F_{12} + J_1 F_{13} \quad (3.16)$$

ดังนั้น หากพิจารณาสมการทางซ้ายมือสามารถนำสมการดังกล่าวไปใช้ในการหาสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนได้ โดย $E_1 = \varepsilon_1 \sigma T_1^4$ และ $E_2 = \varepsilon_2 \sigma T_2^4$ จากสมมติฐานจะได้ว่า $\varepsilon_2 = 1$ จึงจัดรูปได้ดังสมการที่ 3.17

$$\varepsilon_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (3.17)$$

จากสมการที่ 3.17 เป็นสมการอัตราการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนสุทธิระหว่างพื้นผิววัสดุทดลองกับพื้นผิวของผนังด้านในกล่องควบคุมสภาวะแวดล้อมนั่นเอง ดังนั้น กรณีนี้จึงจำเป็นต้องคิดรังสีความร้อนที่เข้ากล้องถ่ายภาพความร้อนในเทอมของรังสีความร้อนทั้งหมดที่แผ่ออกจากพื้นผิวของวัสดุทดลอง (Radiosity, J) โดยใช้วัสดุอ้างอิงเป็นตัวสอบเทียบชุดทดลองและการวัดอุณหภูมิด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนเช่นเดียวกับการหาสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนด้วยวิธีการวัดด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน ซึ่งสามารถเขียนสมการในเทอมของการสมดุลพลังงานได้ดังสมการที่ 3.18 เนื่องจากวัสดุอ้างอิงทาสีดำจึงมีสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนสูง ดังนั้น อุณหภูมิที่อ่านได้จาก

กล้องถ่ายภาพความร้อนจึงประมาณได้เท่ากับอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุอ้างอิงและเท่ากับอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุทดลองเมื่อวัสดุทดลองถูกให้ความร้อนจนเข้าสู่สภาวะคงตัว

$$\varepsilon_{set} T_{Ti}^4 + (1 - \varepsilon_{set}) T_{cham}^4 = \varepsilon_s T_{ref}^4 + (1 - \varepsilon_s) T_{cham}^4 \quad (3.18)$$

จากสมการ ε_{set} คือ สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนที่ตั้งไว้กับกล้องถ่ายภาพความร้อน , ε_s คือ สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของวัสดุทดลอง, T_{Ti} คือ อุณหภูมิที่ผิววัสดุทดลองอ่านได้จากกล้องถ่ายภาพความร้อน, T_{cham} คือ อุณหภูมิที่ผิวของผนังด้านในกล่องควบคุมสภาวะแวดล้อม และ T_{ref} คือ อุณหภูมิที่ผิวของแผ่นวัสดุอ้างอิงหรืออุณหภูมิที่ผิววัสดุทดลองอ่านได้จากเทอร์โมคัปเปิ้ล หลังจากนั้นเมื่อคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของวัสดุทดลองทั้งสองกรณี

สุดท้ายนำค่า ε ที่ได้จากการวัดด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนและค่าที่ได้จากการคำนวณไปเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงจากงานวิจัยอื่น โดยค่าอ้างอิงนั้นคิดว่าเป็นค่า ε จริงๆ โดยนำค่าอ้างอิงที่เป็นช่วงนำมาคิดเป็นค่าเฉลี่ย

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

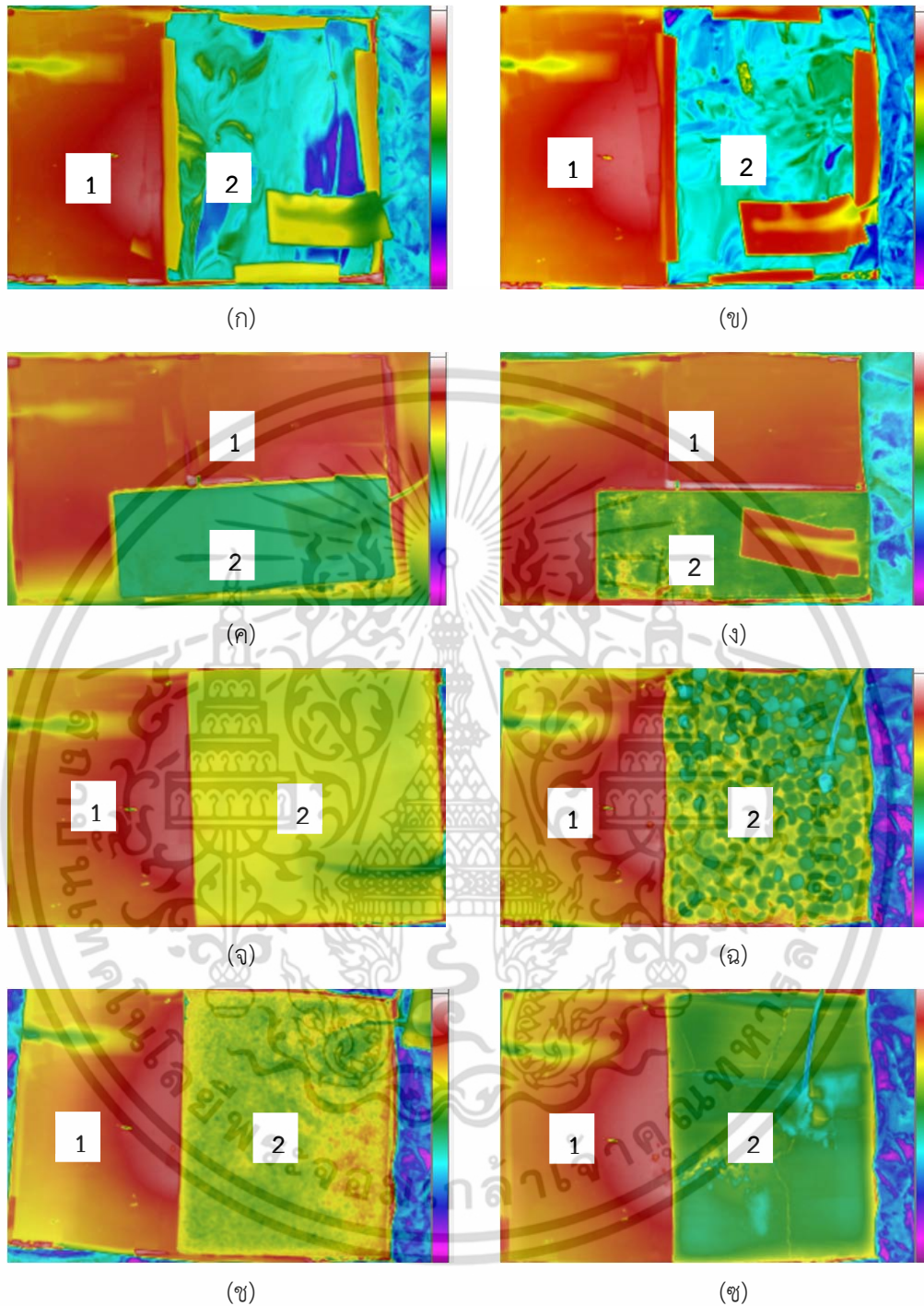
ในบทนี้กล่าวถึง การแปลผลภาพถ่ายความร้อน และผลของสภาวะแวดล้อมที่มีต่อการหาค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน (ϵ) ของวัสดุวิศวกรรม ได้แก่ แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด ASTM 304 แบ่งเป็นแบบเรียบที่มีค่าความขรุขระ $0.4 \mu\text{m}$ และแบบหยาบที่มีค่าความขรุขระ $3.2 \mu\text{m}$ แผ่นทองแดง แผ่นอลูมิเนียม และแผ่นอะคริลิก และวัสดุชีวภาพ ได้แก่ เม็ดแมงลัก ลูกเดือย ผงแป้ง ซอสมะเขือเทศ และน้ำ โดยศึกษาสภาวะแวดล้อมที่มีสมบัติการสะท้อนสูงด้วยการติดอลูมิเนียมฟอยล์ภายในกล่องควบคุมสภาวะแวดล้อม และสภาวะแวดล้อมที่มีสมบัติการสะท้อนต่ำโดยใช้วิธีการบูด้วยกระดาษสีดำด้าน

4.1 การแปลผลภาพถ่ายความร้อน

การแปลผลภาพถ่ายความร้อนสำหรับการหาสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน คือ การอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นบนภาพถ่ายความร้อน ซึ่งมีปัจจัยสำคัญและส่งผลกระทบต่อความถูกต้องในการหาค่า ϵ ของวัสดุทดลอง จากการทดลองได้มีการควบคุมสภาวะแวดล้อมด้วยกล่องควบคุม (Chamber) 2 แบบ คือ กล่องครอบที่มีสมบัติการสะท้อนสูง และกล่องครอบที่มีสมบัติการสะท้อนต่ำ ซึ่งสภาวะแวดล้อมทั้งสองแบบมีปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นบนภาพถ่ายความร้อนแตกต่างกัน และเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการหาสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของวัสดุทดลองด้วย

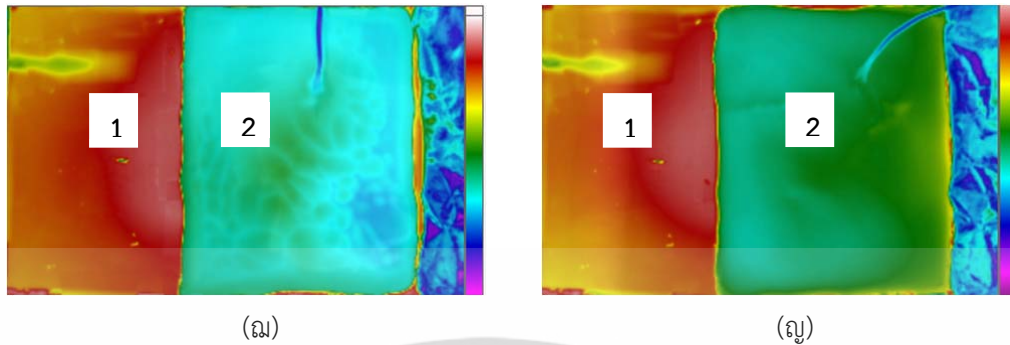
4.1.1 กล่องควบคุมสภาวะแวดล้อมมีสมบัติการสะท้อนสูง

ภาพถ่ายความร้อนกรณีกล่องควบคุมสภาวะแวดล้อมมีสมบัติการสะท้อนสูงมีลักษณะของภาพถ่ายความร้อน ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายความร้อน (ก) แผ่นอลูมิเนียม, (ข) แผ่นทองแดง, (ค) แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด ASTM 304 แบบเรียบ, (ง) แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด ASTM 304 แบบหยาบ, (จ) แผ่นอะคริลิก, (ฉ) ลูกเต๋อย, (ช) แมงลัก, (ซ) แป้งมัน, (ฅ) น้ำ และ (ญ) ซอสมะเขือเทศ กรณีกล่องควบคุมสภาวะแวดล้อมมีสมบัติการสะท้อนสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



หมายเหตุ ; หมายเลข 1 คือ วัสดุอ้างอิง หมายเลข 2 คือ วัสดุทดลอง

รูปที่ 4.1 (ต่อ) ภาพถ่ายความร้อน (ก) แผ่นอลูมิเนียม, (ข) แผ่นทองแดง, (ค) แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด ASTM 304 แบบเรียบ, (ง) แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด ASTM 304 แบบหยาบ, (จ) แผ่นอะคริลิก, (ฉ) ลูกเต๋อย, (ช) แมงลัก, (ซ) แป้งมัน, (ณ) น้ำ และ (ญ) ซอสมะเขือเทศ กรณีกล่องควบคุมสภาวะแวดล้อมมีสมบัติการสะท้อนสูง

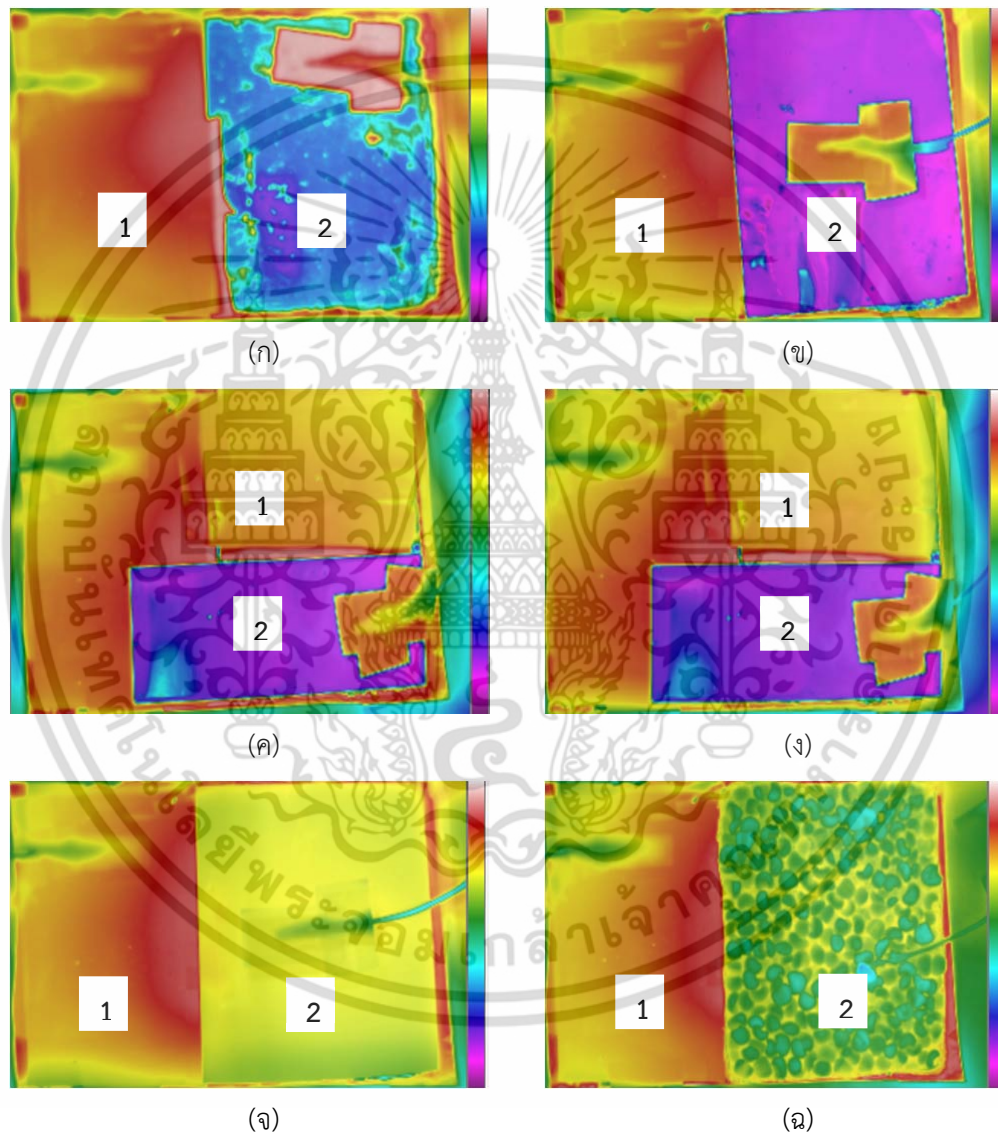
จากภาพถ่ายความร้อนรูปที่ 4.1 (ก), (ข), (ค) และ (ง) พบว่า การกระจายของเฉดสีแสดงอุณหภูมิบนภาพถ่ายความร้อนของวัสดุวิศวกรรมไม่สม่ำเสมอและมีเฉดสีอุณหภูมิของบริเวณอื่นโดยรอบปรากฏบนภาพถ่ายความร้อนของวัสดุด้วย เช่น รังสีสะท้อนจากบริเวณพื้นผิวของผนังด้านในกล่องควบคุมสภาวะแวดล้อม ซึ่งถือว่าเป็นรังสีที่สะท้อนจากสิ่งแวดล้อมโดยรอบวัสดุทดลองและรังสีสะท้อนจากหน้ากล้องถ่ายภาพความร้อน ในกรณีนี้วัสดุทดลองเป็นวัสดุทางวิศวกรรมซึ่งมีสมบัติการสะท้อนรังสีสะท้อนสูง จึงส่งผลให้วัสดุนี้มีค่า ϵ ต่ำ ซึ่งปรากฏการณ์การแผ่รังสีความร้อนนี้เกิดขึ้นกับแผ่นทองแดง แผ่นอลูมิเนียม และแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมแบบเรียบและแบบหยาบ โดยแม้ว่าแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมแบบหยาบจะมีความขรุขระเฉลี่ยที่มากกว่าแบบเรียบ แต่ก็ยังจัดอยู่ในกลุ่มของวัสดุที่มีรังสีสะท้อนสูงเช่นกัน อย่างไรก็ตาม จะเห็นได้ว่า เฉดสีที่แสดงบนภาพถ่ายความร้อนของวัสดุทดลองเป็นเฉดสีที่แสดงถึงอุณหภูมิสูงกว่าบริเวณอื่น ๆ เนื่องจากพลังงานที่แผ่จากสิ่งแวดล้อมมายังวัสดุมีน้อยกว่าพลังงานที่วัสดุทดลองได้รับมาจากแหล่งให้ความร้อนโดยตรง เมื่อพิจารณาภาพถ่ายความร้อนของแผ่นอะคริลิกรูปที่ 4.1 (จ) และวัสดุชีวภาพดังรูปที่ 4.1 (ฉ), (ช), (ซ), (ณ) และ (ญ) พบว่า มีการกระจายของเฉดสีแสดงอุณหภูมิบนภาพถ่ายความร้อนที่มีความสม่ำเสมอมากกว่าภาพถ่ายความร้อนกรณีของวัสดุวิศวกรรม และมีเฉดสีอุณหภูมิของบริเวณอื่นโดยรอบปรากฏบนภาพถ่ายความร้อนของวัสดุทดลองน้อยมากแสดงว่าวัสดุทดลองดังกล่าวมีสมบัติการสะท้อนต่ำ ซึ่งเป็นลักษณะของภาพความร้อนที่แสดงถึงวัสดุทดลองมีสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยลักษณะภาพถ่ายความร้อนนี้เกิดขึ้นกับวัสดุทดลองได้แก่ แผ่นอะคริลิก และกลุ่มวัสดุชีวภาพ ได้แก่ ลูกเต๋อย เม็ดแมงลัก แป้งมัน น้ำ และซอสมะเขือเทศ

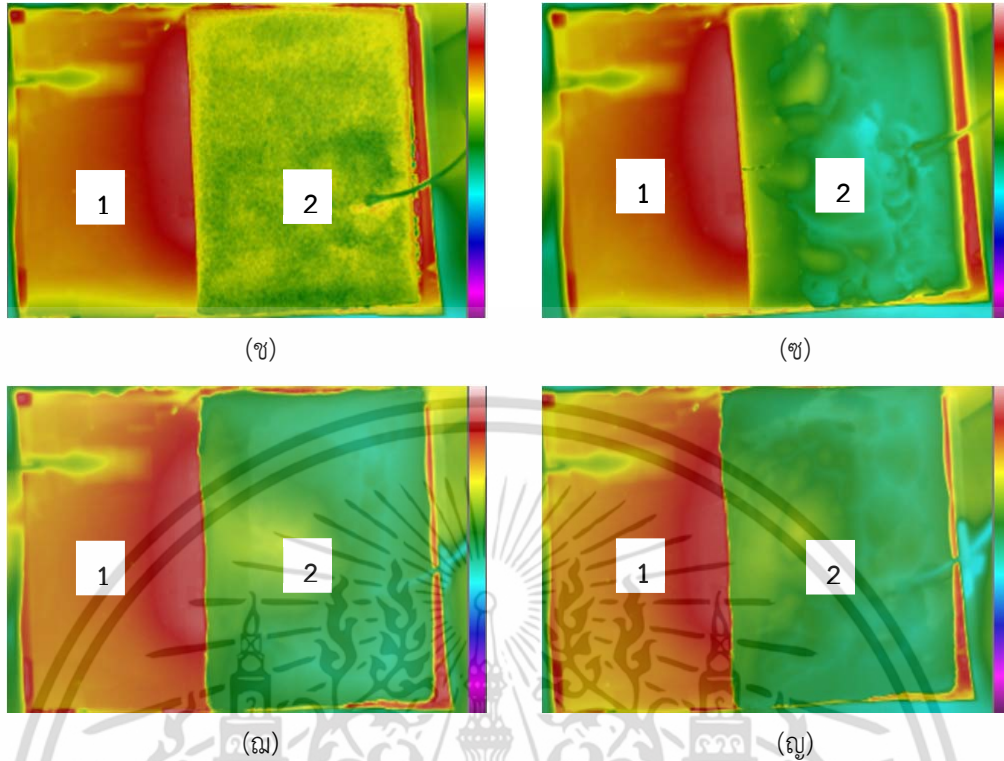
4.1.2 กล้องควบคุมสภาวะแวดล้อมมีสมบัติการสะท้อนต่ำ

ภาพถ่ายความร้อนกรณีกล้องควบคุมสภาวะแวดล้อมมีสมบัติการสะท้อนต่ำจะมีลักษณะของภาพถ่ายความร้อน ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายความร้อน (ก) แผ่นอลูมิเนียม, (ข) แผ่นทองแดง, (ค) แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด ASTM 304 แบบเรียบ, (ง) แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด ASTM 304 แบบหยาบ, (จ) แผ่นอะคริลิก, (ฉ) ลูกเต๋อย, (ช) แมงลัก, (ซ) แป้งมัน, (ฌ) น้ำ และ (ญ) ซอสมะเขือเทศ กรณีกล้องควบคุมสภาวะแวดล้อมมีสมบัติการสะท้อนต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



หมายเหตุ ; หมายเลข 1 คือ วัสดุอ้างอิง หมายเลข 2 คือ แผ่นวัสดุทดลอง
 รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายความร้อน (ก) แผ่นอลูมิเนียม, (ข) แผ่นทองแดง, (ค) แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด
 ASTM 304 แบบเรียบ, (ง) แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด ASTM 304 แบบหยาบ, (จ) แผ่น
 อะคริลิก, (ฉ) ลูกเต๋อย, (ช) แมงลัก, (ซ) แป้งมัน, (ฅ) น้ำ และ (ญ) ซอสมะเขือเทศ กรณี
 กล้องควบคุมสภาวะแวดล้อมมีสมบัติการสะท้อนต่ำ

จากภาพถ่ายความร้อนดังรูปที่ 4.2 (ก), (ข), (ค) และ (ง) พบว่า การกระจายของเฉดสีแสดง
 อุณหภูมิบนภาพถ่ายความร้อนของวัสดุทดลองไม่สม่ำเสมอและมีเฉดสีอุณหภูมิของบริเวณอื่นโดยรอบ
 ปรากฏบนภาพถ่ายความร้อนด้วย เช่น รังสีสะท้อนจากหน้ากล้องถ่ายภาพความร้อนและรังสีสะท้อน
 จากบริเวณพื้นผิวของผนังด้านในกล้องควบคุมสภาวะแวดล้อมซึ่งมี ϵ สูง พลังงานความร้อนส่วนมาก
 ที่แผ่รังสีออกจากพื้นผิววัสดุทดลองจึงเป็นผลมาจากกล้องควบคุมสภาวะแวดล้อมเป็นส่วนใหญ่
 ปรากฏการณ์การแผ่รังสีความร้อนลักษณะนี้เกิดขึ้นกับวัสดุทดลองวัสดุที่มี ϵ ต่ำ ได้แก่ แผ่นทองแดง
 แผ่นอลูมิเนียม และแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมแบบเรียบและแบบหยาบ กรณีภาพถ่ายความร้อน
 รูปที่ 4.2 (จ), (ฉ), (ช), (ซ), (ฅ) และ (ญ) พบการกระจายของเฉดสีแสดงอุณหภูมิบนภาพถ่ายความ
 ร้อนที่มีความสม่ำเสมอและมีเฉดสีอุณหภูมิของบริเวณอื่นโดยรอบปรากฏบนภาพถ่ายความร้อนของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุทดลองน้อยมากแสดงว่าวัสดุทดลองดังกล่าวมีสมบัติการสะท้อนต่ำหรือเป็นกลุ่มวัสดุทดลองที่มี ϵ สูงนั่นเอง ได้แก่ แผ่นอะคริลิก และกลุ่มวัสดุชีวภาพ ได้แก่ ลูกเต๋อย เม็ดแมงลัก แป้งมัน น้ำ และ ซอสมะเขือเทศ นอกจากนี้เฉดสีที่แสดงถึงอุณหภูมิสูงกว่าบริเวณอื่นยังแสดงว่าวัสดุที่มี ϵ สูงและมี อุณหภูมิที่ผิวสูงกว่าอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมทำให้รังสีสะท้อนจากวัสดุทดลองมีผลน้อยมาก

เมื่อแปลผลภาพถ่ายความร้อนกรณีเป็นวัสดุทดลองกลุ่มเดียวกันแต่มีกล่องควบคุมสภาวะแวดล้อมต่างกันโดยพิจารณาจาก ϵ พบว่า

- 1) วัสดุทดลองกลุ่มที่มี ϵ ต่ำแต่อยู่ในกล่องควบคุมสภาวะแวดล้อมที่มีสมบัติการสะท้อนรังสีความร้อนสูง จะมีเฉดสีที่แสดงอุณหภูมิของวัสดุทดลองที่สูงกว่าเฉดสีแสดงอุณหภูมิของกล่องควบคุมสภาวะแวดล้อม และหากวัสดุทดลองดังกล่าวอยู่ในกล่องควบคุมสภาวะแวดล้อมที่มีสมบัติการสะท้อนรังสีความร้อนต่ำจะมีเฉดสีแสดงอุณหภูมิต่ำกว่าวัสดุทดลองเป็นเฉดสีอุณหภูมิของกล่องควบคุมสภาวะแวดล้อมนั่นเอง
- 2) วัสดุทดลองเป็นกลุ่มที่มี ϵ สูงแต่อยู่ในกล่องควบคุมสภาวะแวดล้อมที่มีสมบัติการสะท้อนรังสีความร้อนสูงจะมีเฉดสีที่แสดงอุณหภูมิของวัสดุทดลองที่สูงกว่าเฉดสีแสดงอุณหภูมิของกล่องควบคุมสภาวะแวดล้อมอย่างชัดเจน และหากวัสดุทดลองดังกล่าวอยู่ในกล่องควบคุมสภาวะแวดล้อมที่มีสมบัติการสะท้อนรังสีต่ำ จะมีเฉดสีแสดงอุณหภูมิต่ำกว่าวัสดุทดลองที่สูงและมีสีของภาพถ่ายความร้อนชัดเจน เนื่องจากวัสดุทดลองมีพลังงานการแผ่รังสีความร้อนที่สูงกว่าพลังงานที่แผ่จากกล่องควบคุมสภาวะแวดล้อม

โดยภาพถ่ายความร้อนของวัสดุทดลองในทุกกรณีมีเฉดสีแสดงอุณหภูมิที่ต่ำกว่าวัสดุอ้างอิง เนื่องจากวัสดุอ้างอิงมีค่า ϵ ที่สูงกว่าตัวอย่างทดสอบนั่นเอง [5,6,13] และสุดท้ายการแปลผลของภาพถ่ายความร้อนพบว่า อุณหภูมิที่อยู่ในช่วงเดียวกันแต่เฉดสีแสดงอุณหภูมิแตกต่างกันอย่างชัดเจน เนื่องจากสมบัติของกล่องถ่ายภาพความร้อนที่ใช้งานมีค่าความไวในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Thermal sensitivity) สูงถึง 0.05 K ดังนั้น เมื่อวัสดุได้รับพลังงานก็จะมีเฉดสีแสดงอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงอย่างมาก

4.2 ผลของสภาวะแวดล้อมที่มีต่อการหาสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน

4.2.1 ผลการทดลองหาสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดลองหาสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนที่มุม θ เท่ากับ 0° ซึ่งประกอบด้วยวัสดุทดลองชนิดต่าง ๆ สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนที่ได้จากการวัดด้วยกล้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ่ายภาพความร้อน (ε_{Ti}) สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนที่ได้จากการคำนวณ (ε_{cal}) ซึ่งกรณี
 กล้องควบคุมสภาวะแวดล้อมมีสมบัตการสะท้อนสูงคำนวณจากสมการ ($\varepsilon_{set}T_{Ti}^4 = \varepsilon_s T_s^4$) และกรณี
 กล้องควบคุมสภาวะแวดล้อมมีสมบัตการสะท้อนต่ำคำนวณจากสมการ
 ($\varepsilon_{set}T_{Ti}^4 + (1 - \varepsilon_{set})T_{cham}^4 = \varepsilon_s T_{ref}^4 + (1 - \varepsilon_s)T_{cham}^4$) ดังแสดงที่มาของสมการในบทที่ 3
 นอกจากนั้นยังมี ค่าความถูกต้องในการวัด (%Accuracy) ความสามารถในการวัดค่าซ้ำ
 (%Precision) โดยเปรียบเทียบผลที่วัดได้จากค่าอ้างอิงงานวิจัยอื่น ๆ (ε_{ref}) โดยทำการทดลอง
 ภายใต้ควบคุมสภาวะแวดล้อม 2 กรณี คือ กล้องควบคุมสภาวะแวดล้อม (Chamber) ที่มีสมบัตการ
 สะท้อนรังสีความร้อนสูงและต่ำ

จากการทดลอง พบว่า ค่าความถูกต้องในการวัด ε ด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนมีค่าตั้งแต่
 60% ขึ้นไปทั้งกรณีกล้องควบคุมสภาวะแวดล้อมมีสมบัตการสะท้อนสูงและต่ำและมีค่าความเที่ยงตรง
 หรือค่าแสดงความสามารถในการอ่านค่าซ้ำตั้งแต่ 0.6 ถึง 11% ทั้งกรณีกล้องควบคุมสภาวะแวดล้อม
 มีสมบัตการสะท้อนสูงและต่ำซึ่งถือว่าค่าที่วัดได้มีการเบี่ยงเบนจากค่าเฉลี่ยน้อย จากข้อมูลในตาราง
 สังเกตได้ว่า วัสดุชีวภาพทั้งหมดและแผ่นอะคริลิกเป็นกลุ่มวัสดุที่มี ε สูงและค่าที่วัดด้วยกล้อง
 ถ่ายภาพความร้อนมีค่าใกล้เคียงกับค่าอ้างอิงจากงานวิจัยอื่น ๆ ทั้งกรณีกล้องควบคุมสภาวะแวดล้อม
 ที่มีสมบัตการสะท้อนรังสีความร้อนสูงและต่ำ ซึ่งมีค่าความถูกต้องในการวัดอยู่ในช่วงประมาณ
 73-97% โดยค่า ε ของวัสดุชีวภาพและแผ่นอะคริลิกกรณีกล้องควบคุมสภาวะแวดล้อมที่มีสมบัตการ
 สะท้อนรังสีความร้อนสูง ที่วัดได้จากด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการ
 คำนวณ เนื่องจากกล้องควบคุมสภาวะแวดล้อมที่มีสมบัตการสะท้อนรังสีความร้อนสูงจะมีสัมประสิทธิ์
 การแผ่รังสีความร้อนต่ำ จึงทำให้ผลของรังสีสะท้อนจากวัสดุทดลองมีค่าน้อยมาก แต่หากเป็นกล้อง
 ควบคุมสภาวะแวดล้อมที่มีสมบัตการสะท้อนรังสีความร้อนต่ำ ค่า ε ของ วัสดุชีวภาพและแผ่น
 อะคริลิกที่วัดด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนจะแตกต่างกับค่าที่ได้จากการคำนวณอย่างชัดเจน
 เนื่องจากมีผลของรังสีสะท้อนจากพื้นผิววัสดุซึ่งมาจากรังสีความร้อนที่แผ่รังสีจากกล้องควบคุมสภาวะ
 แวดล้อม

กรณีวัสดุทดลองที่มีลักษณะพื้นผิวมันวาว เช่น แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด ASTM 304
 แบบเรียบและแบบหยาบ แผ่นทองแดง และแผ่นอลูมิเนียม ซึ่งเป็นกลุ่มวัสดุที่มีสัมประสิทธิ์การ
 แผ่รังสีความร้อนต่ำแต่มีสมบัตการสะท้อนสูงจะไม่สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนได้
 จากการใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนด้วยการปรับค่าเพียงอย่างเดียว เนื่องจากพลังงานความร้อนที่เข้า
 กล้องถ่ายภาพความร้อนส่วนใหญ่มาจากการแผ่รังสีความร้อนจากผนังด้านในของกล้องควบคุมสภาวะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แวดล้อม แต่อย่างไรก็ตามสามารถใช้วิธีการคำนวณได้เพียงแต่มีความคลาดเคลื่อนจากค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนที่อ้างอิงจากงานวิจัยอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญโดยเฉพาะกลุ่มวัสดุที่มีสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนต่ำ ๆ ดังนั้น ในการหา ϵ สำหรับกลุ่มวัสดุที่ ϵ ต่ำ ควรควบคุมสภาวะสิ่งแวดล้อมให้ได้รับผลเนื่องจากรังสีสะท้อนน้อยที่สุด จึงควรควบคุมสภาวะสิ่งแวดล้อมโดยเลือกใช้วัสดุภายในที่มีสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนต่ำกว่าวัสดุทดลอง แต่หากเป็นกลุ่มวัสดุที่มีสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนสูงจะควบคุมสภาวะสิ่งแวดล้อมให้มีสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนต่ำกว่าหรือสูงกว่าวัสดุทดลองก็ได้ เพียงแต่อาจจะมีค่าความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น แต่ถ้าหากอุณหภูมิของวัสดุทดลองต่ำกว่าอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมจะทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนในการหาสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนสูงมากขึ้น ดังสมการที่ 2.6 และสุดท้ายพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด ASTM 304 แบบหยาบ (ค่าความขรุขระ $3.2 \mu\text{m}$) มีค่ามากกว่าค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด ASTM 304 แบบเรียบ (ค่าความขรุขระ $0.4 \mu\text{m}$) ทั้งค่าที่ได้จากการวัดด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนและค่าที่ได้จากการคำนวณในกล่องควบคุมสภาวะแวดล้อมที่มีสมบัติการสะท้อนสูงและต่ำ จึงสรุปได้ว่าเมื่อวัสดุมีพื้นผิวขรุขระเพิ่มขึ้นจะมีค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนสูงขึ้น ดังนั้น ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนกับค่าความขรุขระของพื้นผิววัสดุเป็นสัดส่วนโดยตรงกัน [4, 13, 14]

4.2.2 การวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนจากกราฟ

การวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่อ่านได้จากกล้องถ่ายภาพความร้อน (T_{TI}) กับสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนที่กำหนดไว้ (ϵ) ที่กล้องถ่ายภาพความร้อนดังรูปที่ 4.3 ซึ่งเป็นกรณีกล่องควบคุมสภาวะแวดล้อมมีสมบัติการสะท้อนต่ำ และรูปที่ 4.4 กรณีกล่องควบคุมสภาวะแวดล้อมมีสมบัติการสะท้อนสูง โดยควบคุมอุณหภูมิของอ่างควบคุมอุณหภูมิน้ำร้อนไว้ที่ 80°C และรอให้วัสดุทดลองมีอุณหภูมิที่ผิววงที่ซึ่งวัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิ้ล ซึ่งแสดงดังตาราง ก.2 และ ก.3 (ภาคผนวก ก)

พิจารณารูปที่ 4.3 พบว่า สามารถหา ϵ ได้โดยใช้วิธีปรับค่า ϵ ในกล้องถ่ายภาพความร้อนตั้งแต่ 0.1-1.0 โดยค่า ϵ ของตัวอย่างทดสอบจะอยู่ในช่วงที่อุณหภูมิเริ่มคงที่หรือค่าการเปลี่ยนแปลงความชันของกราฟน้อยมาก ซึ่งพบว่า กลุ่มวัสดุที่มีสมบัติการสะท้อนต่ำเช่น น้ำมีแนวโน้มของค่า ϵ ประมาณ 0.92 - 0.96 แต่วิธีนี้สามารถใช้ประมาณค่า ϵ ได้เป็นช่วง ๆ เท่านั้นแต่ไม่สามารถระบุค่าได้ชัดเจน ส่วนกรณีกลุ่มวัสดุที่มี ϵ ต่ำ เช่น แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมแบบหยาบและแบบเรียบ และแผ่นอลูมิเนียม ไม่เหมาะสมสำหรับการหา ϵ ด้วยวิธีการวัดจากกล้องถ่ายภาพความร้อน เนื่องจากวัสดุกลุ่มพวกนี้มี

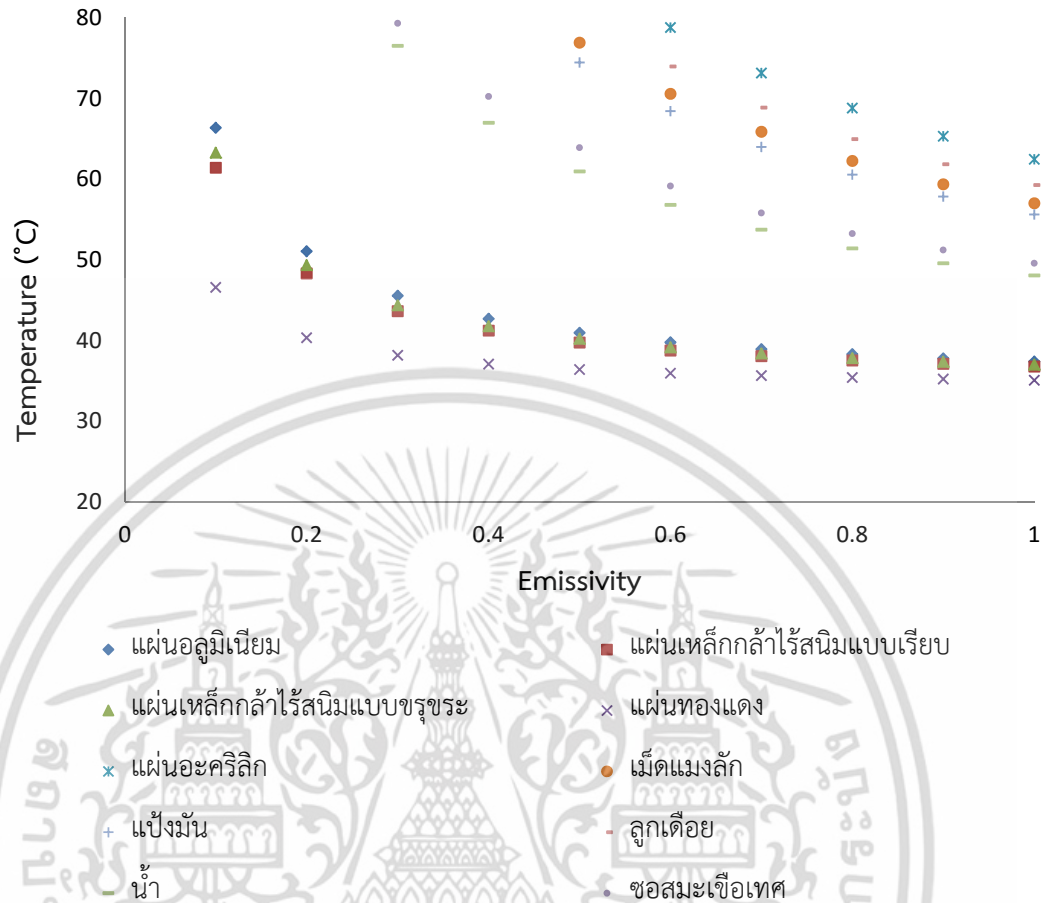
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมบัติการสะท้อนรังสีความร้อนสูง ทำให้พลังงานที่แผ่รังสีความร้อนส่วนใหญ่ที่เข้ากล้องถ่ายภาพความร้อนมาจากกล่องควบคุมสภาวะแวดล้อม ทำให้การปรับค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิที่อ่านได้จากกล้องถ่ายภาพความร้อนโดยเฉพาะแผ่นอลูมิเนียม ส่วนกรณีของแผ่นแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดหยาบไม่สามารถหาสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนจากกราฟนี้ได้เนื่องจากกราฟมีแนวโน้มลดลงเรื่อย ๆ โดยไม่มีค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนที่ทำให้อุณหภูมิที่อ่านได้จากกล้องถ่ายภาพความร้อนมีช่วงที่คงที่ แต่กรณีนี้ใช้วิธีการคำนวณได้ ดังนั้น สามารถหาสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของวัสดุกลุ่มพวกที่มีสมบัติการสะท้อนต่ำจากกล่องควบคุมสภาวะแวดล้อมที่มีสมบัติการสะท้อนต่ำกว่าได้ แต่อย่างไรก็ตาม วิธีนี้ไม่เหมาะสมสำหรับวัสดุที่มีค่า ε สูงเพราะกราฟลดลงเรื่อย ๆ แทบจะไม่สามารถระบุช่วงที่อุณหภูมิที่อ่านจากกล้องถ่ายภาพความร้อนคงที่ ดังนั้น กลุ่มวัสดุที่มีค่า ε สูงควรหา ε ด้วยวิธีการวัดด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนหรือวิธีการคำนวณแต่ควรควบคุมให้สิ่งแวดล้อมมี ε ต่ำกว่า



รูปที่ 4.3 สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนกับอุณหภูมิที่ผิววัสดุทดลองซึ่งอ่านจากกล้องถ่ายภาพความร้อนกรณีกล่องควบคุมสภาวะแวดล้อมมีสมบัติการสะท้อนต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนกับอุณหภูมิที่ผิววัสดุทดลองซึ่งอ่านจากกล้องถ่ายภาพ ความร้อนกรณีก่อคลุมสภาวะแวดล้อมมีสมบัติการสะท้อนสูง

กรณีของกราฟดังรูปที่ 4.4 พบว่า กลุ่มวัสดุที่มีสมบัติการสะท้อนต่ำ เช่น น้ำ ซึ่งมีค่า ϵ ค่าประมาณ 0.92-0.96 วิธีนี้สามารถใช้ประมาณค่า ϵ ได้เป็นช่วง ๆ เท่านั้นแต่ไม่สามารถระบุค่าได้ชัดเจนเช่นเดียวกับกรณีกล่องควบคุมสภาวะแวดล้อมที่มีสมบัติการสะท้อนต่ำและแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมแบบเรียบ ซึ่งมีค่า ϵ ประมาณ 0.52-0.60 มีความคลาดเคลื่อนจากค่าอ้างอิงแต่ไม่มาก กรณีแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมแบบหยาบกราฟที่ได้มีแนวโน้มคองที่ที่ ϵ สูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่าที่วัดได้จากค่าอ้างอิงและจากการคำนวณ สำหรับแผ่นอลูมิเนียมเมื่อพิจารณาจากกราฟ พบว่า กราฟที่ได้มีแนวโน้มคองที่ที่ ϵ สูงขึ้นซึ่งได้ค่า ϵ ไม่สอดคล้องกับความเป็นจริงเนื่องจากกล่องควบคุมสภาวะแวดล้อมมีสมบัติการสะท้อนสูงกว่าวัสดุทดลองรังสีความร้อนที่แผ่ออกจากพื้นผิววัสดุทดลองถูกสะท้อนกลับมาเกือบ 100% จึงทำให้การปรับค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิที่อ่านได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กล้องถ่ายภาพความร้อนเพราะอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุทดลองถูกตั้งไว้ให้สูงกว่าอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม ดังนั้น หากใช้วิธีกราฟถือว่าการหาสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของวัสดุจะได้แค่นวโน้มที่บอกค่าประมาณเป็นช่วง ๆ เท่านั้น และวัสดุที่มีสมบัติการสะท้อนต่ำจะใช้กล้องควบคุมสภาวะแวดล้อมที่มีสมบัติการสะท้อนสูงกว่าหรือต่ำกว่าก็ได้ แต่การหาสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของกลุ่มวัสดุที่มีสมบัติการสะท้อนสูงควรใช้กล้องควบคุมสภาวะแวดล้อมที่มีสมบัติการสะท้อนสูงกว่าวัสดุทดลอง แต่สำหรับการหาสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของกลุ่มวัสดุที่มีสมบัติการสะท้อนสูงเหมาะสมกับวิธีการคำนวณมากกว่าแต่ต้องยอมรับถึงค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากการตั้งสมมุติฐาน

อย่างไรก็ตามพบว่า กรณีกล้องควบคุมสภาวะแวดล้อมที่มีสมบัติการสะท้อนต่ำ พบว่า กลุ่มวัสดุที่มีสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนสูง ไม่สามารถใช้กราฟในการประมาณค่าได้เพราะพลังงานส่วนมากแผ่รังสีความร้อนจากตัววัสดุเอง ดังนั้น เมื่อปรับสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนเพิ่มขึ้นทำให้อุณหภูมิที่อ่านได้จากกล้องถ่ายภาพความร้อนจะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ เป็นไปตามสมการที่ 2.5 แต่สำหรับกลุ่มวัสดุที่มีสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนต่ำบางตัวอย่างสามารถใช้วิธีกราฟหาสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนได้ เช่น กรณีของเหล็กกล้าไร้สนิมแบบเรียบเนื่องจากมีช่วงที่กราฟมีอัตราการเปลี่ยนแปลงความชันน้อยมากจนเกือบคงที่เพราะกล้องควบคุมสภาวะแวดล้อมมีสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนสูงพลังงานส่วนใหญ่แผ่รังสีความร้อนมาจากสิ่งแวดล้อม ดังนั้น การปรับสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนไม่ค่อยส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่อ่านได้จากกล้องถ่ายภาพความร้อน และสุดท้ายหากเป็นกล้องควบคุมสภาวะแวดล้อมที่มีสมบัติการสะท้อนสูงไม่เหมาะสมที่จะใช้วิธีกราฟหาสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนเนื่องจากเมื่อปรับสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนเพิ่มขึ้นทำให้อุณหภูมิที่อ่านได้จากกล้องถ่ายภาพความร้อนจะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ ไม่พบช่วงที่อัตราการเปลี่ยนแปลงความชันน้อยมากจนเกือบคงที่ได้

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองหาสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนที่มุม θ เท่ากับ 0° ในช่วงอุณหภูมิ 70-80 °C

วัสดุทดลอง	กล่องควบคุมสภาวะแวดล้อมที่มีสมบัติการสะท้อนสูง			กล่องควบคุมสภาวะแวดล้อมที่มีสมบัติการสะท้อนต่ำ			ค่าอ้างอิง		
	ϵ_{cal}	ϵ_{TI}	% Accuracy	% Precision	ϵ_{cal}	ϵ_{TI}		% Accuracy	% Precision
แผ่นอลูมิเนียม	0.58±0.03	0.27±0.04	60.00	11.00	0.48±0.11	-	-	-	0.39-0.51, [11]
แผ่นสแตนเลส	0.60±0.04	0.31±0.04	67.40	9.60	0.16±0.12	-	-	-	0.34-0.52, [10]
แบบเรียบ (0.4 μm)									
แผ่นสแตนเลส	0.61±0.05	0.45±0.01	65.22	1.47	0.36±0.20	-	-	-	0.60-0.78, [4]
แบบขรุขระ (3.2 μm)									
แผ่นทองแดง	0.56±0.04	0.20±0.03	86.96	8.10	0.04±0.02	-	-	-	0.20-0.25, [11]
แมงลัก	0.95±0.00	0.88±0.01	91.67	1.13	0.52±0.01	0.90±0.02	93.75	1.00	0.93-0.99, [9]
แป้งมัน	0.77±0.05	0.71±0.04	91.02	3.70	0.42±0.02	0.75±0.02	96.15	4.00	0.75-0.80, [17]
น้ำ	0.95±0.02	0.93±0.01	96.88	1.07	0.62±0.07	0.95±0.00	98.96	0.60	0.96, [13]
ซอสมะเขือเทศ	0.88±0.00	0.70±0.00	73.00	1.40	0.44±0.07	0.70±0.01	73.00	1.40	0.95-0.96, [20]
ลูกเต๋อย	0.80±0.02	0.73±0.01	76.04	1.63	0.57±0.04	0.77±0.01	80.21	1.40	0.93-0.99, [9]
แผ่นอะคริลิก	0.82±0.03	0.82±0.02	91.11	2.00	0.54±0.01	0.93±0.01	96.67	0.70	0.90, [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการหาสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน (ϵ) ของวัสดุชีวภาพที่อยู่ในสถานะของแข็ง ของแข็งขนาดเล็กมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน (ผง) ได้แก่ เม็ดแมงลัก ลูกเดือย และแป้งมัน และของเหลว ได้แก่ น้ำ และซอสมะเขือเทศ โดยเริ่มทำการทดลองจากการหาค่า ϵ ของวัสดุทางวิศวกรรมที่พื้นผิวมีความมันวาว ได้แก่ แผ่นอลูมิเนียม แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมแบบเรียบและแบบขรุขระ แผ่นทองแดง และแผ่นอะคริลิก เพื่อหาวิธีที่เหมาะสมสำหรับวัสดุที่มีความมันวาวและเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของวิธีการทดลองที่นำเสนอและเปรียบเทียบผลที่ได้กับค่าอ้างอิงจากงานวิจัยอื่น ๆ ทำการทดลองโดยให้ความร้อนแก่วัสดุตัวอย่างด้วยกลไกการนำความร้อนจากน้ำร้อน ในอ่างควบคุมอุณหภูมิผ่านภาชนะหรือตัวกลางที่มีสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูงไปยังวัสดุตัวอย่าง และเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้กับผลที่ได้จากการคำนวณด้วยหลักการแผ่รังสีความร้อน

จากผลการทดลอง พบว่า วิธีที่นำเสนอสามารถใช้วัด ϵ ของวัสดุที่มีพื้นผิวมันวาวและวัสดุชีวภาพทั้งที่อยู่ในสถานะของแข็งและของเหลวได้ โดยกลุ่มวัสดุที่มี ϵ ต่ำ ควรควบคุมสภาวะสิ่งแวดล้อมให้มีผลกระทบจากรังสีสะท้อนให้น้อยที่สุด จึงควรควบคุมสภาวะสิ่งแวดล้อมให้มี ϵ และอุณหภูมิที่ต่ำกว่าวัสดุทดลอง แต่หากเป็นกลุ่มวัสดุที่มีค่า ϵ สูง สภาวะสิ่งแวดล้อมโดยรอบวัตถุจะส่งผลต่อการวัด ϵ น้อยมาก จึงสามารถกำหนดให้พื้นผิวของกล่องควบคุมสภาวะแวดล้อมมี ϵ ต่ำกว่าหรือสูงกว่าวัสดุทดลองก็ได้ และควรกำหนดให้อุณหภูมิของวัสดุทดลองสูงกว่าอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม ซึ่งจะให้มีค่าความคลาดเคลื่อนในการวัด ϵ ลดลง และกรณีกล่องควบคุมสภาวะแวดล้อมมีสมบัติการสะท้อนต่ำแต่วัสดุทดลองมีสมบัติการสะท้อนสูงบางชนิดการหา ϵ ด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนโดยตรงอาจไม่เหมาะสม ซึ่งอาจใช้วิธีการหาจากกราฟระหว่างอุณหภูมิที่อ่านได้จากกล้องถ่ายภาพความร้อนกับ ϵ ที่กำหนดไว้กับกล้องถ่ายภาพความร้อน หรืออาจใช้วิธีการคำนวณหากไม่สามารถใช้กราฟได้ แต่อย่างไรก็ตามวิธีการที่ไม่เหมาะสมสำหรับการหา ϵ ของกลุ่มวัสดุที่มี ϵ สูง โดยกลุ่มวัสดุที่มี ϵ สูงควรหา ϵ ด้วยวิธีการวัดด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนหรือใช้วิธีการคำนวณแต่ต้องควบคุมให้สิ่งแวดล้อมมี ϵ ต่ำกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยข้อดีของชุดทดลองที่ออกแบบสำหรับการวัด ϵ ของวัสดุชีวภาพ มีหลายประเด็น ดังนี้ งานวิจัยนี้ใช้น้ำร้อนจากอ่างควบคุมอุณหภูมิเป็นแหล่งให้ความร้อนผ่านแผ่นอลูมิเนียม ตัวอย่างทดสอบจึงไม่ต้องสัมผัสกับแหล่งความร้อนโดยตรง และสามารถให้ความร้อนกับตัวอย่างทดสอบได้อย่างทั่วถึง รวมถึงวิธีนี้สามารถใช้วัด ϵ ของวัสดุวิศวกรรมทั้งที่มีลักษณะพื้นผิวเรียบหรือขรุขระ รวมถึงสมบัติการนำไฟฟ้าที่สูงหรือต่ำก็ได้ และวัสดุชีวภาพทั้งของแข็ง ผง และของเหลวได้ โดยวัสดุวิศวกรรมที่มีลักษณะพื้นผิวขรุขระมากกว่าจะมีค่า ϵ สูงกว่าวัสดุที่มีลักษณะพื้นผิวเรียบอย่างไรก็ตาม วิธีการดังกล่าวเหมาะสมสำหรับการวัดสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนที่อยู่ในช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 100°C เพราะใช้อ่างควบคุมอุณหภูมิโดยอาศัยน้ำร้อนเป็นแหล่งให้ความร้อนหากใช้อุณหภูมิตั้งแต่ 100°C น้ำจะระเหยกลายเป็นไอได้

5.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัยต่อ

ความคลาดเคลื่อนของการวัด ϵ ของตัวอย่างทดสอบด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนทั้งกรณีกล่องควบคุมสภาวะแวดล้อมมีค่าสมบัติการสะท้อนสูงและมีค่าสมบัติการสะท้อนต่ำ เกิดจากหลายปัจจัย ได้แก่ ความถูกต้องของการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิบนพื้นผิวกล่องควบคุม อุณหภูมิหน้ากล่อง อุณหภูมิภายในห้องทดลอง เป็นต้น รวมถึงความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากวิธีการคำนวณ อาจเกิดจากการกำหนดสมมติฐานเพื่อลดจำนวนตัวแปร เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีอีกหลายตัวแปรที่ยังไม่ได้ควบคุมเช่น ลักษณะพื้นผิวความเรียบและความขรุขระของวัสดุทดลอง การควบคุมอุณหภูมิที่ผิววัสดุทดลองและอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมให้สม่ำเสมอ รวมถึงยังไม่ได้ทำการวิเคราะห์ในประเด็นของความไม่แน่นอนของการวัด (Measurement uncertainty analysis) ดังนั้น ในการวิจัยต่อจึงควรศึกษาถึงความไม่แน่นอนและตัวแปรที่ต้องควบคุมของการวัดเพิ่มเติม โดยเน้นความถูกต้องของการวัดที่ได้จากเครื่องมือวัดแต่ละอุปกรณ์

เอกสารอ้างอิง

- [1] นวภัทรา หนูนาคน และทวีพล ชื่อสัตย์, 2555. การวัดและเครื่องมือวัด. พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพมหานคร : คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [2] K. Schurer, A method for measuring infrared emissivities of near-black surfaces at ambient temperatures, *Transactions of ASAE*, Vol. 42 (1999), p. 1383-1390.
- [3] S. Datcu, L. Ibos, Y. Candau and S. Matteri, Improvement of building wall surface temperature measurements by infrared thermography, *Infrared Phys Technol*, Vol. 46, (2005), p. 67-451.
- [4] D. Shi, F. Zou, S. Wang, Z. Zhu and J. Sun, Effect of surface oxidization on the spectral emissivity of steel 304 at the elevated temperature in air, *Infrared Phys*, Vol. 66 (2014), p. 6-12.
- [5] S. Marinetti and P.G. Cesaratto. Emissivity estimation for accurate quantitative thermography, *NDT&E International*, Vol. 51 (2012), p. 127-134.
- [6] T. Nunak, K. Rakrueangdet, N. Nunak and T. Suesut, Thermal image resolution on angular emissivity measurement using infrared thermography, *Proceedings of The International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2015*, (2015), 323-327, p. 18-20, March 2015, Hong Kong .
- [7] A. Lopez, F.D. Molina-Aiz, D.L. Valera, A. Pena, Determining the emissivity of the leaves of nine horticultural crops by means of infrared thermography, *Journal of Scientia Horticulturae*, Vol. 137 (2012), p. 49-58.
- [8] T. Nunak, N. Nunak, V. Tipsuwanporn, and T. Suesut, Surrounding Effects on Temperature and Emissivity Measurement of Equipment in Electrical Distribution System, *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2015*, (2015), p. 21-23, October 2015, San Francisco, USA.
- [9] D.U. Yu, B.L. Shrestha, O.D. Baik, Thermal conductivity, specific heat, thermal diffusivity, and emissivity of stored canola seeds with their temperature and moisture content, *Journal of Food Engineering*, Vol. 165 (2015), p. 156-165.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [10] T.Suesut, N.Nunak, T.Nunak, A.Rotrugsu and Y.Tuppadung, Emissivity Measurements on Material and Equipment in Electrical Distribution System, **11th International Conference on Control Automation and Systems**, (2011), 26-29 Oct 2011, in KINTEX, Gyeonggi-do, Korea.
- [11] N. Nunak, T.Suesut and T. Nunak, Emissivity estimation using thermographic camera, **Advanced Materials Research**, Vol. 811 (2013), p. 380-387.
- [12] ดาวสวัสดิ์ เครือวัลย์ และคณะ, การประยุกต์ใช้รังสีอินฟราเรดในการแปรรูปอาหาร, Department of Food Engineering and Department of Instrumentation and Control Engineering Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, (2010).
- [13] F.P. Incropera, D.P. Dewitt, T.L. Bergmann and A.S. Lavine. **Fundamentals of heat and mass transfer**. 6th edition. Willey. Asia. 2006.
- [14] M.Svantner, P. Vacikova, and M. Honner, Non-contact charge temperature measurement on industrial continuous furnaces and steel charge emissivity analysis, **Infrared Phys**, Vol. 61 (2013), p. 20–26.
- [15] Ginesu, G. Giusto, D. Märgner and V. Meinschmidt, Detection of Foreign Bodies in Food by Thermal Image Processing, **IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS**.51, (2004), p. 480-490.
- [16] J. Fraden, **Handbook of Modern Sensor : Physics Designs and Applications**, Springer, New York, (2010), pp. 648.
- [17] G.D. Saravacos and A.E. Kostaropoulos, **Handbook of food processing equipment**, Kluwer Academic, New York, (2002), p. 285.
- [18] Anonymous Therna CAM™ ,user's manual, professional edition.Version 2.8, **FLIR Systems**, (2006).
- [19] M. Fogie, **Handbook of mathematical, scientific and engineering: formulas, tables, functions graphs, transforms**, Research & Education Association., New Jersey, (1992), pp. 814-818.
- [20] D.G. Rao, **Fundamentals of food engineering**, Baba Barkha Nath., New Delhi., (2010), pp.203-204.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [21] Rogers, E. K. and Brimelow, C. J. B. *Instrumentation and sensors for the food industry*, 2nd ed. Woodhead., Cambridge., (2005), pp. 202-203.
- [22] M.Q. Brenster, *Thermal radiative transfer and properties*, John Wiley & Sons, (1992), pp. 56-57.
- [23] Bentley, R.E. *Handbook of Temperature Measurement: Temperature and Humidity Measurement*, Springer Verlag. , (1998), pp. 85.
- [24] Fosbinder, R. A., and Orth, D. *Essentials of Radiologic Science*, Wolters Kluwer Health., (2011), Maryland., pp. 206-209.
- [25] Seveik and Sunderland, *Handbook of Thermal properties of food and agricultural materials : Thermal Emissivity of beef*, Nuri N. MOhsenin Gordon and Breach science publishers., (1962), pp. 328.
- [26] C. Wen and I. Mudawar, Emissivity characteristics of polished aluminium alloy surfaces and assessment of multispectral radiation thermometry (MRT) emissivity models, *Int J Heat Mass Transfer*, Vol. 48, (2005), p. 1316–29.
- [27] C. Wen and I. Mudawar, Modeling the effects of surface roughness on the emissivity of aluminium alloys, *Int J Heat Mass Transfer*, Vol. 49, (2006), p. 4279–89.
- [28] P.R. Muniz, S.P.N. Cani, and R.S. Magalhães, Influence of Field of View of Thermal Imagers and Angle of View on Temperature Measurements by Infrared thermovision, *IEEE Sensors Journal*, vol. 14, no. 3, Mar. 2014.
- [29] G.D. Saravacos and A.E. Kostaropoulos, *Handbook of food processing equipment*, Kluwer Academic., New York, (2002), pp. 285.
- [30] Engineering 360 Global-spec “Biological Materials Information” สืบค้นเมื่อวันที่ 7 เดือนกรกฎาคม 2559 <http://www.ti.com/sc/does/msp/speech/index.htm>. 1990
- [31] The free encyclopedia “Biological Materials” สืบค้นเมื่อวันที่ 7 เดือนกรกฎาคม 2559 https://en.wikipedia.org/wiki/Biological_material. 2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

[32] อุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้ง “การอบแห้งเมล็ดพืช” สืบค้นเมื่อวันที่ 7 เดือนกรกฎาคม 2559

<http://www.foodnetworksolution.com>. 2013.

[33] จุดเดือดของสารละลาย “colligative properties” สืบค้นเมื่อวันที่ 7 เดือนกรกฎาคม 2559

<http://www.il.mahidol.ac.th>.2014.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลการทดลอง

วัสดุทดลอง	Chamber มีสมบัติการสะท้อนสูง				Chamber มีสมบัติการสะท้อนต่ำ			
	ϵ_{set}	T_{TI} (°C)	T_{TC} (°C)	ϵ_{meas}	ϵ_{set}	T_{TI} (°C)	T_{TC} (°C)	ϵ_{meas}
แผ่น อลูมิเนียม	0.96	34.30	73.50	0.32	0.96	38.03	76.13	หาโดย อาศัย กราฟ ระหว่าง ϵ_{meas} กับ T_{TI}
		26.20	72.10	0.23		37.62	76.30	
		23.40	67.90	0.27		38.03	75.97	
แผ่น ทองแดง		22.20	70.00	0.20		35.06	67.98	
		31.90	65.60	0.21		34.93	67.98	
		24.70	67.80	0.26		35.01	68.04	
แผ่น สแตนเลส เรียบ		34.20	78.00	0.32		37.18	55.60	
		34.60	67.20	0.26		37.18	55.80	
		46.30	79.80	0.34		37.17	55.60	
แผ่น สแตนเลส ขรุขระ		50.60	78.00	0.44		36.93	65.32	
		48.80	78.20	0.45		36.94	64.19	
		40.30	78.00	0.46		36.85	64.60	
แผ่น อะคริลิก	58.30	61.20	0.80	56.60	55.40	0.94		
	59.00	58.20	0.84	55.40	55.50	0.94		
	58.20	59.90	0.83	55.40	55.10	0.93		
ลูกเต๋อย	42.20	59.80	0.71	56.00	58.90	0.77		
	45.40	60.90	0.74	56.00	59.10	0.76		
	47.60	61.10	0.74	55.70	59.90	0.77		
แมงลัก	53.00	54.90	0.87	56.80	56.30	0.90		
	53.40	54.90	0.89	55.50	56.30	0.89		
	52.80	54.80	0.89	56.10	56.40	0.92		
แป้งมัน	50.10	73.20	0.71	51.90	55.30	0.72		
	55.80	70.00	0.67	52.10	55.80	0.76		
	53.20	75.20	0.75	52.40	56.10	0.76		
น้ำ	59.50	63.40	0.94	55.60	55.80	0.95		
	63.20	63.70	0.92	54.40	56.00	0.96		
	61.60	61.90	0.94	54.10	52.60	0.97		
ซอมะเขือเทศ	61.20	69.50	0.70	50.80	55.30	0.70		
	61.20	69.60	0.71	55.60	55.60	0.69		
	61.60	69.90	0.70	50.40	55.70	0.70		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.2 สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน (ϵ) ของวัสดุทดลองที่ตั้งค่าไว้กับกล้องถ่ายภาพความร้อนที่อ่านได้จากกล้องถ่ายภาพความร้อน (T_{IR} ($^{\circ}C$)) เมื่อกล้องควบคุมสภาวะแวดล้อมมีสมบัติการสะท้อนสูง

วัสดุทดลอง	ϵ	อุณหภูมิพื้นผิวของวัสดุทดลองที่อ่านได้จากกล้องถ่ายภาพความร้อน ($^{\circ}C$)									
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
แผ่นอลูมิเนียม	73.50	>80	72.57	60.81	54.55	50.65	47.98	46.04	44.55	43.4	42.47
แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม แบบเรียบ	78.00	40.06	37.2	36.04	35.46	35.11	34.88	34.71	34.59	34.49	34.4
แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม แบบซุระ	78.20	>80	>80	>80	74.28	67.06	62.05	58.35	55.52	53.27	51.44
แผ่นทองแดง	70.00	>80	>80	73.74	64.77	59.11	55.21	52.35	50.18	48.44	47.04
แผ่นอะคริลิก	61.20	>80	>80	>80	>80	>80	>80	74.6	70.1	66.59	63.55
เม็ดแมงลัก	54.90	>80	>80	>80	>80	>80	76.38	71.02	66.87	63.56	60.86
แป้งมัน	73.20	>80	>80	>80	>80	74.43	68.42	63.97	60.54	57.81	55.6
ลูกเต๋อย	61.10	>80	>80	>80	>80	>80	73.94	68.85	64.93	61.8	59.24
น้ำ	63.70	>80	>80	76.49	66.95	60.94	56.77	53.72	51.38	49.54	48.04
ขอสมะเจือเทศ	69.90	>80	>80	79.28	70.23	63.87	59.12	55.78	53.22	51.19	49.55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.3 สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน (ϵ) ของวัสดุทดลองที่ตั้งค่าไว้ให้กับกล้องถ่ายภาพความร้อนตั้งแต่ 0.1-1.0 และอุณหภูมิที่อ่านได้จากกล้องถ่ายภาพความร้อน (T_{Ti} (°C)) เมื่อกล้องควบคุมสถานะแวดล้อมมีสมบัติการสะท้อนต่ำ

อุณหภูมิพื้นผิวของวัสดุทดลองที่อ่านได้จากกล้องถ่ายภาพความร้อน (°C)											
วัสดุทดลอง	ϵ	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
แผ่นอลูมิเนียม	T_c (°C) 75.97	66.34	51.04	45.53	42.67	40.93	39.76	38.91	38.28	37.77	37.37
แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมแบบเรียบ	55.80	61.4	48.3	43.62	41.22	39.75	38.76	38.05	37.52	37.1	36.76
แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมแบบขรุขระ	78.20	63.27	49.33	44.34	41.76	40.2	39.14	38.38	37.8	37.35	37
แผ่นทองแดง	68.04	46.57	40.31	38.15	37.05	36.39	35.94	35.63	35.39	35.2	35.05
แผ่นอะคริลิก	55.50	>80	>80	>80	>80	>80	78.76	73.13	68.78	65.3	62.45
เม็ดแมงลัก	55.50	>80	>80	>80	>80	76.89	70.55	65.86	62.23	59.35	57
แป้งมัน	55.80	>80	>80	>80	75.59	68.16	62.99	62.14	56.26	53.94	52.05
ลูกเต๋อย	59.90	>80	>80	>80	>80	>80	73.84	68.77	64.85	61.73	59.18
น้ำ	56.50	>80	>80	>80	>80	74.14	68.17	63.75	60.35	57.64	55.43
ขอสระเพื่อทดสอบ	55.70	>80	>80	>80	78.68	70.76	65.24	61.16	58.03	55.54	53.52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของวัสดุทดลอง

กรณีกล่องควบคุมสภาวะแวดล้อมมีสมบัติการสะท้อนสูง

ตัวอย่างที่ 1 จากสมการที่ 3.17 สามารถคำนวณสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของลูกเต๋อย (ϵ_s) ดังสมการคือ

$$\epsilon_{set} T_{Ti}^4 = \epsilon_s T_s^4$$

เมื่อ อุณหภูมิที่ผิววัสดุทดลองซึ่งอ่านจากกล้องถ่ายภาพความร้อน (T_{Ti}) = 42.2°C

สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนที่ตั้งไว้กับกล้องถ่ายภาพความร้อน (ϵ_{set}) = 0.97

และอุณหภูมิที่ผิววัสดุทดลองซึ่งวัดจากเทอร์โมคัปเปิ้ลหรืออุณหภูมิที่ผิวของวัสดุอ้างอิงซึ่งอ่านจากกล้องถ่ายภาพความร้อน (T_s) = 59.8°C

แทนค่าลงในสมการจะได้

$$0.97(42.2 + 273)^4 = \epsilon_s(59.8 + 273)^4$$

จะได้ว่า

$$\epsilon_s = 0.78$$

ตัวอย่างที่ 2 จากสมการที่ 3.17 สามารถคำนวณสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 304 แบบเรียบ (ϵ_s) ดังสมการคือ

$$\epsilon_{set} T_{Ti}^4 = \epsilon_s T_s^4$$

เมื่อ อุณหภูมิที่ผิววัสดุทดลองซึ่งอ่านจากกล้องถ่ายภาพความร้อน (T_{Ti}) = 34.2°C

สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนที่ตั้งไว้กับกล้องถ่ายภาพความร้อน (ϵ_{set}) = 0.97

และอุณหภูมิที่ผิววัสดุทดลองซึ่งวัดจากเทอร์โมคัปเปิ้ลหรืออุณหภูมิที่ผิวของวัสดุอ้างอิงซึ่งอ่านจากกล้องถ่ายภาพความร้อน (T_s) = 78°C

แทนค่าลงในสมการจะได้

$$0.97(34.2 + 273)^4 = \epsilon_s(78 + 273)^4$$

จะได้ว่า

$$\epsilon_s = 0.57$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีกล่องควบคุมสภาวะแวดล้อมมีสมบัติการสะท้อนต่ำ

ตัวอย่างที่ 1 จากสมการที่ 3.18 สามารถคำนวณสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของลูกเต๋อย (ϵ_s) ดังสมการคือ

$$\epsilon_{set} T_{Ti}^4 + (1 - \epsilon_{set}) T_{cham}^4 = \epsilon_s T_{ref}^4 + (1 - \epsilon_s) T_{cham}^4$$

เมื่อ อุณหภูมิที่ผิววัสดุทดลองซึ่งอ่านจากกล้องถ่ายภาพความร้อน (T_{Ti}) = 56°C

สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนที่ตั้งไว้กับกล้องถ่ายภาพความร้อน (ϵ_{set}) = 0.95

อุณหภูมิที่ผิวด้านในของกล่องควบคุมสภาวะแวดล้อมโดยเฉลี่ยซึ่งวัดจากเทอร์โมคัปเปิ้ล

$$(T_{cham}) = \frac{34.5 + 36.2}{2} = 35.35^\circ\text{C}$$

และอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุอ้างอิงซึ่งอ่านจากกล้องถ่ายภาพความร้อน (T_{ref}) = 67.1°C

แทนค่าลงในสมการจะได้

$$0.95(56 + 273)^4 + (1 - 0.95)(35.35 + 273)^4 = \epsilon_s(67.1 + 273)^4 + (1 - \epsilon_s)(35.35 + 273)^4$$

จะได้ว่า $\epsilon_s = 0.59$

ตัวอย่างที่ 2 จากสมการที่ 3.18 สามารถคำนวณสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 304 แบบเรียบ (ϵ_s) ดังสมการคือ

$$\epsilon_{set} T_{Ti}^4 + (1 - \epsilon_{set}) T_{cham}^4 = \epsilon_s T_{ref}^4 + (1 - \epsilon_s) T_{cham}^4$$

เมื่อ อุณหภูมิที่ผิววัสดุทดลองซึ่งอ่านจากกล้องถ่ายภาพความร้อน (T_{Ti}) = 52.6°C

สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนที่ตั้งไว้กับกล้องถ่ายภาพความร้อน (ϵ_{set}) = 0.95

อุณหภูมิที่ผิวด้านในของกล่องควบคุมสภาวะแวดล้อมโดยเฉลี่ยซึ่งวัดจากเทอร์โมคัปเปิ้ล

$$(T_{cham}) = \frac{36.4 + 36.2}{2} = 36.3^\circ\text{C}$$

และอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุอ้างอิงซึ่งอ่านจากกล้องถ่ายภาพความร้อน (T_{ref}) = 76.5°C

แทนค่าลงในสมการจะได้

$$0.95(52.6 + 273)^4 + (1 - 0.95)(36.30 + 273)^4 = \epsilon_s(76.5 + 273)^4 + (1 - \epsilon_s)(36.30 + 273)^4$$

จะได้ว่า $\epsilon_s = 0.42$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IMECS 2016

International MultiConference of
**Engineers and Computer
Scientists 2016**

Volume I

Hong Kong
16-18 March, 2016

S. I. Ao
Oscar Castillo
Craig Douglas
David Dagan Feng
A. M. Korsunsky (Eds.)

IA ENG

International Association of Engineers

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิง ISSN: 2078-0958 ครั้งที่มีการนำไปใช้

ISBN: 978-988-19253-8-1

ISSN: 2078-0958

Emissivity Measurements of Reflective Materials using Infrared Thermography

K. Rakreueangdet, N. Nunak, T. Suesut, and E. Sritham

Abstract— This paper proposes the technique to measure the band emissivity using the infrared detector with a band pass filter of 7.5 to 14 μm . The experimental setup consists of an infrared camera, K-type contact thermocouples, a tripod, a water bath, aluminium plate, a black tape, and an environmental control chamber. Three types of reflective engineering materials including aluminium, stainless steel, and copper are tested using this technique. Results are in good agreement with the findings from other literatures. Therefore, the proposed technique, which is easy to operate, can be an alternative method for measuring the emissivity of reflective materials. However, care must be taken in selecting the location the infrared camera, the material for lining internal surface of an environmental control chamber, and the temperature of chamber surface.

Index Terms—Emissivity measurement, Reflective materials, Infrared thermography

I. INTRODUCTION

THE diagnosis of mechanical and electrical systems in an industrial scale may be performed by measuring the temperature of surfaces, contact spots, or joints. The result could be used for decision making on system maintenance for the sake of safety of processing machine and operators. The temperature measurement may be carried out using a thermal image camera (TIC). The TIC can provide temperature reading values without being in contact with the object. The accuracy of the measurement depends on two input parameters: the emissivity (ε) of the object and the surrounding temperature (T_{sur}). Emissivity is a thermal property of an object that represents the ability to radiate heat. The measurement of emissivity need to consider material type, surface temperature, surface roughness, angle and direction of emission, wavelength or spectral of infrared radiation and the reflection of surface from surround (R), etc. [1]-[5], [7], [9]-[11].

Researchers have employed a number of techniques to measure the ε value of materials. Among these, the

technique that takes the reflected temperature from surrounding into consideration has been the most accurate one, though the experimental setup is rather complicated [2]-[5], [7], [10]. Another study reported a considerable error in measuring ε of exterior wall when the reflected temperature from surrounding was excluded from the measurement [4]. The significance of surrounding on the accuracy in measuring ε value depends on the reflectivity (ρ) of the target object [7]. To measure ε , the temperature of the surface has to be higher than that of its surrounding. Accordingly, a sample specimen is commonly heated prior to the measurement. Different heating techniques have been reported in previous studies, e.g., converting electrical energy to heat [3], direct contact heat conduction between heat source and samples [2]-[6]. The later heating technique is subjected to certain limitation in that the sample has to be thin enough so the conduction mainly occurs in one direction. Also, this technique is not suitable for some biological materials, for example, leaves which could be burnt easily. Lopez *et al.* [6] have proposed a technique to heat biological materials using hot water as a heat source. Moist heat does not cause burning. In the studies by Suesut *et al.* [9] and Nunak *et al.* [10], heat was applied to the samples through convection mechanism. It was found that the locations of samples and the design of the environmental control chamber affected the accuracy of measurements. The lining material for the chamber has to be properly selected particularly for glossy sample which would be highly reflective and exhibits a rather low emissivity coefficient. In the experiment where the test temperature is much higher than surrounding temperature, the infrared (IR) window is necessary to maintain the temperature of the environmental control chamber.

The majority of tested samples in prior studies were of a rather low reflective category [6], [11], except in the study by Shi *et al.* [3] where a reflective material like stainless steel 304 was tested using an electrical heating technique. Therefore, this study was aimed at presenting the technique to measure the band emissivity of three different reflective engineering materials including aluminium, stainless steel, and copper using the infrared detector with a band pass filter from 7.5 μm to 14 μm .

II. THEORETICAL BACKGROUND

A. Emissivity

Emissivity (ε) is a surface radiative property, which relates to the amount of radiation or emission from an object. It can be defined as the ratio of energy emitted from a real object (E) and that of a blackbody (E_b) at the same temperature as expressed in (1) [4]-[6], [8], [10], [11], [13].

Manuscript received December 8, 2015.

K. Rakreueangdet is with the King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Faculty of Engineering, Ladkrabang, Bangkok, 10520 Thailand (e-mail: gun.rukreangdach@gmail.com).

N. Nunak is with the King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Faculty of Engineering, Ladkrabang, Bangkok, 10520 Thailand (corresponding author to provide phone: 66-2-329-8356; fax: 66-2-329-8357; e-mail: navaphattra.nu@kmitl.ac.th).

T. Suesut is with the King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Faculty of Engineering, Ladkrabang, Bangkok, 10520 Thailand (e-mail: taweepol.su@kmitl.ac.th).

E. Sritham is with the King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Faculty of Engineering, Ladkrabang, Bangkok, 10520 Thailand (e-mail: Eakasit.sr@kmitl.ac.th).

$$\varepsilon(T) = \frac{E(T)}{E_b(T)} \quad (1)$$

Emissivity of each object depends on material type, surface characteristic, angle and direction of emission, wavelength or spectral of infrared, and surface temperature [5], [11], [12]. There are 6 types of emissivity depends on wavelength and direction of the radiation, i.e., (1) spectral directional emissivity, (2) spectral hemispherical emissivity, (3) total directional emissivity, (4) total hemispherical emissivity, (5) band emissivity, and (6) effective emissivity [12]. The typical values of emissivity are presented in Table 1.

TABLE I
EMISSIVITY OF TYPICAL REFLECTIVE MATERIALS

Material type	Wavelength (μm)	Temperature (K)	Emissivity	Ref.
Aluminum	3-5	263-328	0.022	[4]
	total	323-375	0.04-0.06	[13]
	1.5	725-1025	0.03-0.63	[3]
Stainless steel	8-14	323-473	0.39-0.51	[10]
	-	489	0.44-0.60	[14]
	8-14	303-473	0.34-0.52	[9]
Copper	8-14	323-473	0.40-0.52	[10]
	1.5	300-1600	0.04-0.17	[11]
	3-21	523-1173	0.012-0.040	[15]
	8-14	323-473	0.20-0.25	[10]

B. Radiosity

Radiosity (J) represents the rate at which all the radiant energy leaving a unit surface area. It is the amount of energy leaving from the target surface. This energy could be detected by IR detectors mounted on a thermal imaging device and consequently converted into a real surface temperature reading value. For gray surface and opaque materials, this radiation includes the reflected portion of the irradiation or reflection (R) which depends on its reflectivity (ρ) and surrounding temperature (T_{surr}), and the direct emission from the object surface (E) which depends on its emissivity (ε) and surface temperature (T_s). Radiosity can be calculated using (2),

$$J = \varepsilon_s \sigma T_s^4 + \rho_s \varepsilon_{surr} \sigma T_{surr}^4 \quad (2)$$

where σ is Stefan-Boltzmann constant ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$), and the terms $\varepsilon_s \sigma T_s^4$ and $\rho_s \varepsilon_{surr} \sigma T_{surr}^4$ are emission and reflection from target surface, respectively [8], [9], [10], [11].

III. EXPERIMENTS

A. Experimental Setup

The experimental setup (Fig. 1) consists of an infrared camera, K-type contact thermocouples, a tripod, a water bath, aluminium plate, a black tape, and the environmental control chamber. The infrared camera or the thermal image

camera (TIC) (Model Ti-400, Fluke Corporation, USA) having a temperature measurement range of -20°C to $1,200^\circ\text{C}$, the accuracy of $\pm 2^\circ\text{C}$ at 25°C or 2%, whichever is greater, and the thermal sensitivity of 0.05°C at 30°C , was used in this study. The TIC was calibrated with a blackbody (model 9132, HART Scientific, USA) before performing the experiments. The thermal detector is a focal plane array, 320×240 pixels with a 24° (horizontal) $\times 17^\circ$ (vertical) field of view, spatial resolution (IFOV) of 1.31 mRad at the minimum focus distance of 15 cm. All infrared thermal images obtained from the experiments were analyzed using the thermography software (Fluke SmartView® 3.11).

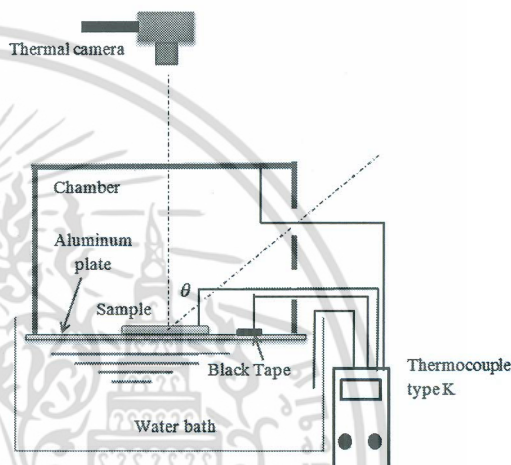


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental setup

The temperatures of sample surface, black tape surface, chamber internal surface, and hot water were measured using K-type thermocouples. Hot water was maintained at 85°C . Aluminium foil was used as a lining material for the internal surface of the chamber and an aluminium plate was placed over hot water surface to conduct heat to the sample and the black tape. The reason for choosing aluminium as a surrounding surface was mainly due to its reflective characteristic. Since highly reflective materials exhibit low emissivity, the energy that radiates from surroundings all aluminium surfaces, toward the sample would be less. That said the second term in (2) will be small and the obtained J value would mainly represent the emission from the target surface.

The TIC was attached to a tripod and located outside the chamber. Due to the fact that infrared is incapable of passing through a solid object, the square openings on the top and the side wall of chamber were made to allow the radiant energy (infrared) to reach the TIC. The locations of the openings were chosen so that the viewing angles of the TIC (θ) were 0° (normal direction) and 30° . A black tape with a known emissivity of 0.95 was used as a reference for the measurements. It was therefore placed on the aluminium plate next to the sample.

B. Measurement Method

Reflective samples in this study were stainless steel,

copper and aluminium. Specimens were made as thin slabs with the dimensions of 30 mm x 40 mm.

During the measurement, the sample and the black tape were placed on a thin aluminium plate which was heated with hot water (85°C) in a water bath (Fig.1). Heat conduction through aluminium plate was allowed to reach steady state before taking a measurement. The temperatures of chamber internal surfaces were measured with K-type thermocouples and were averaged as a surrounding temperature (T_{surr}). The T_{surr} was found to be 33 ± 2 °C and it was set in the TIC as a reflection temperature or background temperature throughout the experiments. After the temperature of the black tape surface became steady, it was simultaneously measured with the TIC and K-type contact thermocouple. The temperature value obtained with the thermocouple was set as the actual temperature. The ϵ value, displayed on the TIC, was adjusted until the temperature measured with the TIC equal to that measured with the thermocouple and the ϵ value was then recorded.

The emissivity measurement of reflective specimen began from heating the sample and black tape, until the temperature of their surfaces became constant. Then, all infrared radiation (radiosity) leaving from a surface area, based on the FOV specification, and passing through the air was captured by the infrared detector. It had to be sure that the energy emitted from both black tape and targeted sample was detected by IR detector within the FOV area. The percentage of radiative transmission through the air was set at 100%. This means that all energy leaving from the target surface could directly radiate to the IR detector. All of the thermal images captured from the experiments (Fig. 2) were analyzed using the thermography software.

There were two steps in the thermal image analysis. First, the emissivity of black tape (0.95) was set in TIC and the temperature of black tape was recorded. Then, the infrared radiation from the sample surface, covering an approximate area of 2 cm² and marked with rectangular frames on every image in Fig. 2, locating close to the black tape, was analyzed. The emissivity value was obtained by adjusting the emissivity of sample using thermography software until the temperature of sample surface measured with TIC equaled to the temperature obtained from the black tape.

During the entire experiment, temperatures of black tape and sample surfaces were also monitored with the thermocouples to assure that temperatures obtained from TIC were in acceptable range. In this study, two viewing angles of 0°(normal direction) and 30° were chosen. The experiment was carried out in triplicate and the average value was taken from the recorded data. Results obtained from the proposed experimental setup were then compared with those in other literatures. Typical thermal images of the tested samples at two different viewing angles are given in Fig. 2.

IV. RESULTS AND DISCUSSIONS

Emissivity is an important parameter used in the measurement of temperature using infrared thermography technique. The accuracy of the obtained temperature value is primarily dependent on how accurately the ϵ value is known. Researchers have proposed a number of techniques

to estimate the ϵ value of materials. For reflective materials, however, the effect of reflection appears to be the main issue for determining emissivity. According to (2) as previously explained, it could be seen that the ϵ value of a target sample will be more accurate, if we could control the temperature and emissivity of the surroundings. Therefore, the proposed experimental setup in this study was designed to overcome such issue by using a special designed environmental control chamber to cover the target sample during the measurement. An internal surface of the chamber was lined with aluminium foil, having high reflectivity value, and the measurement was carried out under the condition that the chamber surface temperature was much lower than that of the target sample. Accordingly, the radiation from surrounding would be far lower than the emission from the sample.

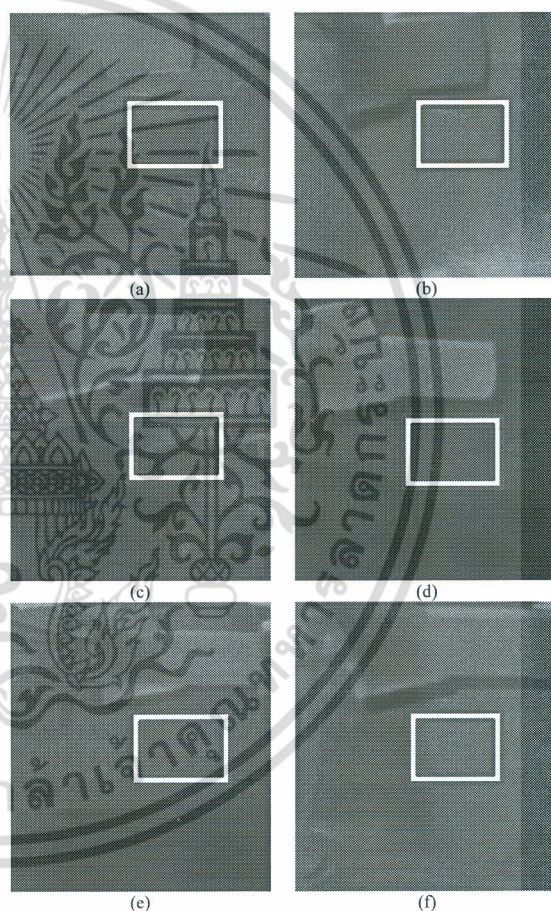


Fig. 2. Typical thermal images of aluminium plate at (a) $\theta = 0^\circ$ and (b) $\theta = 30^\circ$, copper plate at (c) $\theta = 0^\circ$ and (d) $\theta = 30^\circ$, and stainless steel plate at (e) $\theta = 0^\circ$ and (f) $\theta = 30^\circ$

Given in Fig. 2 are typical thermal images of the tested samples in grayscale at viewing angle of 0° (normal direction) and 30°. From the image, it could be seen that the black tape exhibited the highest brightness level as compared to other areas of the image. This means the black tape has a higher diffusivity than that of other tested materials. All thermal images of reflective samples obtained in normal direction (Fig. 2-a, 2-c, and 2-e) shows a non-

uniform energy radiation due to the effect of reflections. On the other hand, there was no observable effect of reflection on the thermal images at viewing angle of 30°. After analyzing the images, however, the ε values for all of the reflective samples from both viewing angles were not much different, as presented in Table 2. The results also are in good agreement with those reported by Nunak *et al.* [11]. It would imply that, according to the method used in this study, there was no noticeable interference from surrounding reflection on the captured thermal images. The results obtained in this study falls within a similar range reported in some literatures, showing in Table 1 [9], [10], while the ε values found in other literatures [3], [4], [11], [13]-[15] are considerably different from this study. There are several factors that could be the reason for such difference, say, type of IR detector, band of wavelength, and the operating temperature. Particularly, the operating temperature was quite different between the setting in this experiment and in other studies. Nevertheless, the proposed technique could be an interesting alternative method for measuring emissivity of reflective materials, primarily due to its simplicity. The major concerns for this technique seem to be a temperature setting and a lining material for an internal surface of the chamber. Nunak *et al.* discussed the effects of reflection at different experimental conditions on the emissivity measurement elsewhere [7].

TABLE II
EMISSIVITY OF SELECTED REFLECTIVE MATERIALS

Types of materials	Emissivity at polar angle (θ)	
	0°	30°
Aluminium plate	0.26 ± 0.042 (a)	0.26 ± 0.042 (b)
Copper plate	0.27 ± 0.023 (c)	0.27 ± 0.038 (d)
Stainless steel plate	0.39 ± 0.026 (e)	0.42 ± 0.060 (f)

Remark: The letters in parentheses are designated according to Fig. 2.

V. CONCLUSION

The technique to measure emissivity of reflective materials was proposed with a simple experimental setup. The band emissivity of three different reflective engineering materials, including aluminium, stainless steel, and copper, was captured using an infrared detector with a band pass filter of 7.5 μm to 14 μm . The experimental setup consists of seven parts including an infrared camera, K-type contact thermocouples, a tripod, a water bath, aluminium plate, a black tape, and the environmental control chamber. The results are in good agreement with literature values. Care need to be taken into consideration when selecting the location the camera, the lining material for the environmental control chamber, and the temperature of chamber surface. The major advantage of this technique is its simplicity.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors would like to extend grateful thanks to their colleagues Mr. Teerawat Nunak and Miss. Maethinee Songthai for all their support about thermal image analysis technique and instrumentation.

REFERENCES

- [1] K. Schurer, "A method for measuring infrared emissivities of near-black surfaces at ambient temperatures", *Infrared Phys*, 16, pp.157-63, 1976.
- [2] S. Dacru, L. Ibos, Y. Candau, S. Mattei, "Improvement of building wall surface temperature measurements by infrared thermography", *Infrared Phys Technol*, 46, pp. 451-67, 2005.
- [3] Deheng Shi, Fenghui Zou, Shuai Wang, Zunlue Zhu, Jinfeng Sun, "Effect of surface oxidization on the spectral emissivity of steel 304 at the elevated temperature in air", *Infrared Phys*, 66, pp.6-12, 2014.
- [4] Sergio Marinetti, Pier Giorgio Cesaratto, "Emissivity estimation for accurate quantitative thermography", *NDT&E International*, 51, pp.127-134, 2012.
- [5] T. Nunak, K. Rakruengdet, N. Nunak, and T. Suesut, "Thermal Image Resolution on Angular Emissivity Measurements using Infrared Thermography", *Proceedings of The International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2015*, pp. 323-327, 18-20 March, 2015, Hong Kong
- [6] A. Lopez, F.D. Molina-Aiz, D.L. Valera, A. Pe na, "Determining the emissivity of the leaves of nine horticultural crops by means of infrared thermography", *Journal of Scientia Horticulturae*, 137, pp. 49-58, 2012.
- [7] T. Nunak, N. Nunak, V. Tipsuwanporn, and T.Suesut, "Surrounding Effects on Temperature and Emissivity Measurement of Equipment in Electrical Distribution System", *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2015*, 21-23 October 2015, San Francisco, USA
- [8] D.U. Yu, B.L. Shrestha, O.D. Baik, "Thermal conductivity, specific heat, thermal diffusivity, and emissivity of stored canola seeds with their temperature and moisture content", *Journal of Food Engineering*, 165, pp.156-165, 2015
- [9] T. Suesut, N. Nunak, T. Nunak, A. Rotrugsa, and Y. Tuppadung, "Emissivity measurements on material and equipment in electrical distribution system", *International Conference on Control, Automation and Systems*, pp. 1259-1263, Oct. 2011
- [10] N. Nunak, K. Roonprasag, T. Suesut, and T. Nunak, "Emissivity Estimation using Thermographic Camera, Advanced Materials Research, Vol. 811, pp. 380-387, 2013.
- [11] F.P. Incropera, D.P. DeWitt, T.L. Bergman, and A.S. Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 6th ed., John Wiley & Sons, 2007, pp. 724 - 839.
- [12] M. Svantner, P. Vacikova, M. Honner, "Non-contact charge temperature measurement on industrial continuous furnaces and steel charge emissivity analysis", *Infrared Phys*, 61, pp.20 - 26, 2013.
- [13] Anonymous, "Therma CAM™ "user"smanual, professional edition, Version 2.8", *FLIR Systems*, 2006.
- [14] G.D. Saravacos and A. E. Kostaropoulos, *Handbook of food processing equipment*, Kluwer Academic, pp.285, New York, 2002
- [15] J. Fraden, 222wdc, *Handbook of Modern Sensor : Physics Designs and Applications*, Springer, pp.648, New York, 2010

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นาย กันต์ รักเรืองเดช

ที่อยู่ บ้านเลขที่ 8 หมู่ที่ 5 ถนนควนเจาะ-วังหี ตำบลละมอ อำเภอนาโยง จังหวัดตรัง

ประวัติการศึกษา

2557 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประสบการณ์การทำงานและความเชี่ยวชาญ

- งานวิจัยเรื่อง การหาสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของวัสดุด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน
- งานวิจัยเรื่อง การตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมที่ปนมากับเมล็ดพืชด้วยกล้องถ่ายภาพร้อน
- การศึกษาสมบัติเชิงความร้อนของการย่างสเต็กเนื้อด้วยเตาไฟฟ้า
- ครูฝ่ายสอนหมวดวิชาคณิตศาสตร์และฟิสิกส์ สถาบันกวตวิชา Nationwide Success อำเภอบางบ่อ จังหวัดสมุทรปราการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้