

การประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีด้วยกล้องถ่ายภาพอินฟราเรดและ
การวิเคราะห์ความไม่แน่นอน

EMISSIVITY ESTIMATION USING INFRARED THERMOGRAPHY AND
UNCERTAINTY ANALYSIS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2559
KMITL-2016-EN-D-018-108

การประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีด้วยกล้องถ่ายภาพอินฟราเรดและ
การวิเคราะห์ความไม่แน่นอน

EMISSIVITY ESTIMATION USING INFRARED THERMOGRAPHY AND
UNCERTAINTY ANALYSIS



ธีระวัฒน์ หนูนาค
TEERAWAT NUNAK

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

KMITL-2016-EN-D-018-108

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EMISSIVITY ESTIMATION USING INFRARED THERMOGRAPHY AND
UNCERTAINTY ANALYSIS



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2016

KMITL-2016-EN-D-018-108

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 การประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีด้วยกล้องถ่ายภาพอินฟราเรดและการวิเคราะห์ความไม่แน่นอน
Thesis Title Emissivity Estimation using Infrared Thermography and Uncertainty Analysis
นักศึกษา นายธีระวัฒน์ หนูนาค
รหัสประจำตัว 56601006
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ทวิพล ชือสัตย์
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2016-EN-D-018-108

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.วิทยา	ทิพย์สุวรรณพร	
รศ.ดร.วิศรุต	ศรีรัตน์	
รศ.ดร.พฤศักดิ์	ชีวิวิทย์	
ดร.อภินัย	ฤกษ์รัตน์	
รศ.ดร.ทวิพล	ชือสัตย์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 13 กรกฎาคม พ.ศ. 2559 เวลา 15.00-17.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้นที่ 13 กรกฎาคม พ.ศ. 2559 ด้านการค้ำ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีด้วยกล้องถ่ายภาพอินฟราเรดและการวิเคราะห์ความไม่แน่นอน
นักศึกษา	นายธีระวัฒน์ หนูนาค
รหัสประจำตัว	56601006
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ. ดร.ทวีพล ชื้อสตัย

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน ($\epsilon_{7.5-14 \mu m}$) ของวัสดุในงานวิศวกรรมและอุปกรณ์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าโดยใช้กล้องถ่ายภาพอินฟราเรด ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในงานซ่อมบำรุงเชิงการป้องกันสำหรับหลายอุตสาหกรรม และปัจจัยที่สำคัญที่สุดสำหรับการใช้ภาพความร้อนอย่างถูกต้อง คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของวัสดุ งานวิจัยนี้ได้ออกแบบและสร้างชุดอุปกรณ์สำหรับการประมาณค่า สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน ซึ่งประกอบด้วยตู้ควบคุมอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิ 50°C ถึง 200°C ใช้สำหรับการควบคุมอุณหภูมิของวัสดุให้คงที่ในระหว่างการวัดค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสี วัสดุที่ใช้ทดสอบเบื้องต้น ได้แก่ แผ่นเหล็ก แผ่นสแตนเลส แผ่นทองแดง แผ่นอลูมิเนียม แผ่นทองแดง และวัตถุทองเหลือง แล้วเทียบค่าที่วัดได้กับค่าอ้างอิงมาตรฐาน เพื่อทดสอบความน่าเชื่อถือของระบบการวัดค่า จากนั้นทำการทดสอบกับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ผ่านการใช้งานและยังไม่ผ่านการใช้งาน ได้แก่ เทอร์มินอลลัด นีอต และแหวนสกรู โดยพบว่า อุปกรณ์ที่ผ่านการใช้งานมีค่าความขรุขระที่พื้นผิวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนเพิ่มขึ้นด้วย นอกจากนี้ยังได้วิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความไม่แน่นอนในการวัด โดยศึกษาผลกระทบของความละเอียดและมุมมองในการถ่ายภาพความร้อน รวมถึงผลกระทบของสิ่งแวดล้อมที่มีต่อการวัดอุณหภูมิและการวัดค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีที่ถูกต้อง

Thesis Title	Emissivity Estimation using Infrared Thermography and Uncertainty Analysis
Student	Mr.Teerawat Nunak
Student ID.	56601006
Degree	Doctor of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2016
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr.Taweepol Suesut

ABSTRACT

This thesis studies on the emissivity ($\epsilon_{7.5-14 \mu m}$) of engineering material and equipment for electrical distribution system using infrared thermography. The infrared thermography camera is widely used for preventive maintenances propose in many industries. The most important factor to use the thermal image accurately is the emissivity of materials. The heat chamber to control the operating temperature 50°C to 200°C has been designed and created to maintain the temperature of material for measuring the emissivity. To ensure the emissivity measurement technique, the general used material, i.e., iron sheet, stainless steel sheet, copper sheet, aluminum sheet, and brass object were done the experiment and compared with the standard emissivity table. The emissivity values of new and used equipment for electrical distribution system, e.g., terminal lug, nut, and bolt were tested. It was found that the roughness and emissivity of equipment increases with increasing of the operating time. Moreover, the uncertainty of emissivity estimation has been analyzed. There are several sources of uncertainty such as thermal image resolution on different angular view and surrounding effects on temperature and emissivity measurements to be taken into account for accurately measurement.

กิตติกรรมประกาศ

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

ขอขอบพระคุณ รศ. ดร.ทวีพล ซื่อสัตย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำที่ดีเสมอมา และขอขอบคุณ รศ. ดร.นวกัทรာ หนูนาท ที่ช่วยทำให้วิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงด้วยดี และที่ขาดไม่ได้คือคณาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมการวัดคุม ได้แก่ รศ. ดร.สุพรรณ กุลพาณิชย์ รศ.วิริยะ กองรัตน์ รศ. ดร.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร และท่านอื่นๆ ที่มีได้เอื้อนนาม

ขอขอบคุณกองบำรุงรักษาระบบไฟฟ้า การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และบริษัท เมเซอร์โทรนิคส์ จำกัด ที่สนับสนุนการทำวิจัยในครั้งนี้

ขอกราบขอบพระคุณพ่อ คุณแม่ ที่คอยให้กำลังใจ และขอบคุณน้อง ๆ ในห้องปฏิบัติการ เช่น คุณเมธินี สงไทย และคุณกันต์ รัชธิ์เรืองเดช และทุก ๆ คนที่เกี่ยวข้องสำหรับการความสนับสนุนช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ

สุดท้ายนี้คุณค่าและคุณประโยชน์อันที่พึงมีจากวิทยานิพนธ์นี้ ผู้เขียนขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน และขอให้ทุกๆ ท่านจงมีแต่ความสุขตลอดไป

ธีระวัฒน์ หนูนาท

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูป	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 กล้องถ่ายภาพอินฟราเรด	4
2.1.1 การทำงานของกล้องถ่ายภาพอินฟราเรด.....	4
2.1.2 อุปกรณ์เสริม.....	5
2.1.3 คุณลักษณะที่สำคัญของกล้องถ่ายภาพอินฟราเรด.....	5
2.2 สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน	6
2.3 พลังงานความร้อนที่กล้องถ่ายภาพอินฟราเรดได้รับ	10
2.4 การวิเคราะห์ความไม่แน่นอน	11
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	15
บทที่ 3 การออกแบบชุดทดลอง.....	20
3.1 เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดสอบ.....	20
3.1.1 กล้องถ่ายภาพอินฟราเรด.....	20
3.1.2 เทอร์โมคัปเปิล	21
3.1.3 โปรแกรมสนับสนุนการวิเคราะห์ภาพถ่ายความร้อน.....	21
3.1.4 เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบวัสดุ.....	22
3.1.5 เครื่องมือวัดความขรุขระบนพื้นผิวของวัตถุ.....	22
3.2 อุปกรณ์ทดลอง.....	23
3.2.1 การประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีอินฟราเรด.	23
3.2.2 การศึกษาผลของมุมมองและความละเอียดของภาพอินฟราเรด.....	24
3.2.3 การศึกษาผลของสภาวะแวดล้อมรอบวัตถุ.....	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 วิธีการทดลอง	26
3.3.1 วิธีการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีอินฟราเรด.....	26
3.3.2 วิธีการศึกษาผลของมุมมองและความละเอียดของภาพอินฟราเรด.....	27
3.3.3 วิธีการศึกษาผลของสภาวะแวดล้อมรอบวัตถุ.....	28
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	29
4.1 การประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีอินฟราเรด.....	29
4.2 การศึกษาผลของมุมมองและความละเอียดของภาพอินฟราเรด	36
4.2.1 ผลของมุมมองกับค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน.....	37
4.2.2 ผลของระยะห่างระหว่างวัตถุและตัวตรวจจับกับค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสี	37
4.2.3 ผลของชนิดของเลนส์กับค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสี.....	40
4.3 ผลของสภาวะแวดล้อมรอบวัตถุที่มีต่อสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน.....	40
4.3.1 ผลกระทบของการวัดอุณหภูมิผ่านหน้าต่างอินฟราเรด.....	42
4.3.2 ผลกระทบของการสะท้อนในการวัดค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสี.....	43
4.4 การวิเคราะห์ความไม่แน่นอนของการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสี.....	45
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	48
5.1 สรุปผลการวิจัย	48
5.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัย	49
เอกสารอ้างอิง	50
ภาคผนวก ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์.....	53
ประวัติผู้เขียน	77

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ความละเอียดของภาพความร้อน (Ti400) ที่ระยะห่างระหว่างวัตถุกับตัวตรวจจับต่าง ๆ...	20
4.1 ค่าความขรุขระและค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของอุปกรณ์.....	32
4.2 ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของอุปกรณ์ที่สภาวะแวดล้อมต่าง ๆ.....	44



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การติดตั้งหน้าต่างอินฟราเรด.....	5
2.2 ความละเอียดเชิงพื้นที่ที่ระยะทางระหว่างกล้องอินฟราเรดกับวัตถุแตกต่างกัน.....	6
2.3 ปริมาณการแผ่รังสีความร้อนในทิศทางต่าง ๆ	8
2.4 การดูดซึมรังสี การสะท้อนรังสี และการส่งผ่านรังสีผ่านตัวกลาง.....	9
2.5 รังสีทั้งหมดที่ออกจากพื้นผิววัตถุ.....	10
2.6 การใช้แผนภูมิกำลังปลาในการระบุถึงอิทธิพลของตัวแปรความไม่แน่นอน	13
2.7 ชุดอุปกรณ์ทดสอบ.....	15
2.8 การวัดอุณหภูมิผนังภายในและภายนอกอาคารด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน.....	16
2.9 ชุดทดลอง.....	16
2.10 ชุดทดลอง.....	18
2.11 การตรวจสอบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กด้วยกล้องถ่ายภาพอินฟราเรด.....	19
3.1 เครื่องมือวัดอุณหภูมิ.....	21
3.2 การปรับภาพเพื่อการวิเคราะห์ภาพถ่ายความร้อน	22
3.3 เครื่อง Energy Dispersive X-ray Analyzer (EDX).....	23
3.4 ชุดอุปกรณ์ทดลองการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีอินฟราเรด.....	23
3.5 ชุดอุปกรณ์ทดลองเพื่อศึกษาผลของมุมมองและความละเอียดของภาพอินฟราเรด	24
3.6 ชุดอุปกรณ์ทดลองเพื่อศึกษาผลของสภาวะแวดล้อมรอบวัตถุ.....	25
4.1 ภาพจริงและภาพถ่ายความร้อนของวัสดุทดสอบชนิดต่าง ๆ	30
4.2 ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของวัสดุชนิดต่าง ๆ.....	31
4.3 ภาพจริงและภาพขยาย SEM x35,) x750 ของ terminal lug ใหม่ และผลวิเคราะห์จากเครื่อง EDX	33
4.4 ภาพจริงและภาพขยาย SEM x35,) x750 ของ terminal lug ใช้งาน 3 ปี และผลวิเคราะห์จากเครื่อง EDX.....	34
4.5 ภาพจริงและภาพขยาย SEM x35,) x750 ของ nut และ bolt ใหม่ และผลวิเคราะห์จากเครื่อง EDX.....	35
4.6 ภาพจริงและภาพขยาย SEM x35,) x750 ของ nut และ bolt ใช้งาน 3 ปี และผลวิเคราะห์จากเครื่อง EDX.....	36
4.7 ตัวอย่างภาพจริงและภาพความร้อนในทิศ normal direction และที่ 45 องศา จาก normal direction ของ blackbody แผ่นโลหะทาสีดำ และแผ่นชุบสังกะสี.....	38
4.8 ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของ blackbody แผ่นโลหะทาสีดำ และแผ่นเหล็กชุบสังกะสี ในมุมมองต่าง ๆ ที่ระยะ 50, 100 และ 300 ซม. และการใช้ tele infrared lens	39
4.9 ตัวอย่างภาพถ่ายความร้อนของแผ่นโลหะทาสีดำที่ $T_s > T_c$ และที่ $T_s < T_c$	41
4.10 ตัวอย่างภาพถ่ายความร้อนของแผ่นเหล็กกล้าไนซ์ที่ $T_s > T_c$ และที่ $T_s < T_c$	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.11	ค่าการส่งผ่านการแผ่รังสีอินฟราเรดของ blackbody ที่อุณหภูมิ 30 °C ถึง 250 °C	43
4.12	แผนภูมิแก๊งปลาในการระบุถึงอิทธิพลของตัวแปรความไม่แน่นอนสำหรับการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน.....	47



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนในช่วงความยาวคลื่นย่านอินฟราเรด เป็นคลื่นพลังงานความร้อนที่แผ่ออกมาจากวัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำ ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในการแผ่รังสีของวัตถุ และมีผลต่อความถูกต้องของการวัดอุณหภูมิเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งการวัดอุณหภูมิด้วยกล้องถ่ายภาพอินฟราเรด (infrared thermography) ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ ได้อย่างหลากหลาย เนื่องจากเป็นการวัดอุณหภูมิแบบเวลาจริง โดยไม่ทำลายและไม่ต้องสัมผัสกับวัตถุ [1] ตัวอย่างการใช้งานระบบภาพถ่ายอินฟราเรด ได้แก่ การประมาณค่าอุณหภูมิภายในวัตถุในระหว่างกระบวนการให้ความร้อน [2] การวางแผนการซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน [3] และการตรวจสอบกระบวนการ [4] เป็นต้น โดยการใช้งานแบ่งออกเป็นสองกลุ่ม คือ การวัดเชิงปริมาณและการวัดเชิงคุณภาพ ซึ่งการวัดอุณหภูมิเชิงปริมาณด้วยกล้องอินฟราเรด จะอาศัยตัวตรวจจับรังสีอินฟราเรด (IR detector) ที่ติดตั้งอยู่ในกล้องถ่ายภาพความร้อนแล้วแปลสัญญาณที่ได้ออกมาเป็นอุณหภูมิในรูปแบบของตัวเลขหรือเกรดสี

สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีเป็นคุณสมบัติที่ผิวของวัตถุ มีนิยามคือ “ปริมาณรังสีที่แผ่ออกจากผิววัตถุใดๆ เปรียบเทียบกับปริมาณรังสีที่แผ่ออกจากวัตถุอุณหภูมิต่ำ (blackbody) ที่อุณหภูมิเดียวกัน” [5] สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ ชนิดของวัสดุ การเตรียมพื้นผิว (การขัดเงา การ blasting การ rolling เป็นต้น) ลักษณะพื้นผิว มุมมอง (viewing angle) อุณหภูมิ และความยาวคลื่น [5, 6, 7] โดยเมื่อวัตถุใดๆ มีอุณหภูมิสูงกว่า 0 องศาสัมบูรณ์ (0 K) วัตถุจะเริ่มแผ่รังสีความร้อนออกมา ซึ่งปริมาณพลังงานที่แผ่ออกมาจากวัตถุขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของวัตถุนั้น ๆ วิธีการวัดค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีมีหลายวิธีซึ่งบางวิธีนำอุณหภูมิสะท้อนมาพิจารณาร่วมด้วย เช่น Schurer [8] วัดค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีอินฟราเรดในช่วงความยาวคลื่น 2 ย่าน และคิดการสะท้อนที่ผิวโดยใช้ตัวครอบสีดำที่ทราบอุณหภูมิคลุมที่วัตถุ Datcu et al. [9] ใช้อะลูมิเนียมที่มีค่าการสะท้อนและการกระจายรังสีสูงเป็นตัวสะท้อนเพื่อพิจารณาพลังงานการแผ่รังสีจากสิ่งแวดล้อมโดยรอบเพื่อให้การวัดอุณหภูมิได้ถูกต้องแม่นยำมากขึ้น นักวิจัยหลายคนศึกษาเกี่ยวกับผลของความขรุขระที่พื้นผิวที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสี เช่น Wen and Mudawar [10] เสนอโมเดลสำหรับทำนายค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีจากความขรุขระของพื้นผิว และพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของอะลูมิเนียมอัลลอยด์และความขรุขระมีความสัมพันธ์กัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อุณหภูมิสูงขึ้น โดยส่วนใหญ่อุปกรณ์ที่สร้างขึ้นเพื่อใช้สำหรับหาค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีมีความซับซ้อน Marinetti and Cesaratto [7] ได้เสนอวิธีการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีโดยอาศัยการตอบสนองของตัวเซนเซอร์ชนิดอินฟราเรด โดยไม่ต้องใช้วัสดุอ้างอิงประกอบการทดสอบ และกำหนดให้การแผ่รังสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสิ่งแวดลอมมีค่าคงที่และไม่ทราบค่า จึงไม่นำอุณหภูมิสะท้อนมาพิจารณาร่วมกับการหาค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสี ซึ่งข้อดีของวิธีนี้ คือ อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบค่อนข้างง่าย ไม่ซับซ้อน นักวิจัยกลุ่มนี้พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีที่ได้จากวิธีนี้ มีผลต่อความถูกต้องของการวัดอุณหภูมิภายนอกอาคาร ซึ่งอุณหภูมิสะท้อนเป็นตัวแปรสำคัญและส่งผลกระทบต่อความไม่แน่นอนของการวัดที่ต้องนำมาพิจารณาร่วมด้วย ดังนั้น การหาค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของอุปกรณ์ในระบบส่งจ่ายไฟฟ้า (electrical distribution system) ซึ่งเป็นงานภายนอกอาคาร จึงจำเป็นต้องพิจารณาค่าการสะท้อนร่วมด้วย โดยนิยามการสะท้อนที่ ASTM E 1862-97 [11] กำหนดไว้คือ “พลังงานที่แผ่ออกจากวัตถุอื่นและตกลงบนผิวของวัตถุตัวอย่างและสะท้อนออก” ซึ่งโดยส่วนใหญ่อุณหภูมิสะท้อนขึ้นอยู่กับรังสีที่เกิดจากสิ่งแวดลอมโดยรอบวัตถุเป้าหมาย

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงนำเสนอวิธีการการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนในย่านอินฟราเรดของวัตถุโดยอาศัยการตอบสนองของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของตัวตรวจจับรังสีอินฟราเรด ซึ่งติดตั้งอยู่ในกล้องอินฟราเรด และพิจารณาอุณหภูมิสะท้อนร่วมด้วย รวมถึงการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนของการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีอินฟราเรด เพื่อเป็นประโยชน์สำหรับการวัดที่ถูกต้องในอนาคต

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อนำเสนอวิธีการการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนในย่านอินฟราเรดโดยใช้กล้องอินฟราเรดและการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนของการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีอินฟราเรด โดยมีวัตถุประสงค์ ดังนี้

- 1) ศึกษาผลของมุมมองและความละเอียดของภาพอินฟราเรด (IFOV และ FOV) ที่ได้จากกล้องถ่ายภาพอินฟราเรด
- 2) ศึกษาผลของสภาวะแวดลอมรอบวัตถุ ได้แก่ การติดตั้งหน้าต่างอินฟราเรด (IR window) และลักษณะพื้นผิวของห้องควบคุมสภาวะแวดลอมที่มีต่อการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีอินฟราเรด

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1) วัสดุที่ใช้ทดลอง ได้แก่ แผ่นเหล็ก แผ่นทองแดง แผ่นสแตนเลส แผ่นอลูมิเนียม และวัตถุทองเหลือง และอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ได้แก่ terminal lug น็อต และแหวนสกรู โดยเป็นอุปกรณ์ใหม่และอุปกรณ์ที่มีอายุการใช้งาน 3 ปี
- 2) การให้ความร้อนแก่วัสดุทดสอบใช้กลไกการพาความร้อนผ่านอากาศร้อนภายในตู้ควบคุมอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บท โดยเนื้อหาแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ ขอบเขตของการวิจัย และรายละเอียดของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ กล้องถ่ายภาพอินฟราเรด สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน การวิเคราะห์ความไม่แน่นอน และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 กล่าวถึงวัสดุอุปกรณ์ ขั้นตอนการทดลอง การออกแบบชุดทดลอง การประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสี และปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการวัดค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีในยานอินฟราเรด ได้แก่ มุมมองและความละเอียดของภาพความร้อน การแผ่รังสีผ่านหน้าต่างอินฟราเรด และลักษณะพื้นผิวของห้องควบคุมสภาวะแวดล้อม

บทที่ 4 กล่าวถึงการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีอินฟราเรดของวัตถุที่มีลักษณะพื้นผิวต่างกัน ผลของมุมมองและความละเอียดของภาพความร้อน ลักษณะพื้นผิวของห้องควบคุมสภาวะแวดล้อม และการแผ่รังสีผ่านหน้าต่างอินฟราเรดที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสี

บทที่ 5 กล่าวถึงบทสรุปผลการวิจัย ข้อเสนอแนะและแนวทางการนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กล้องถ่ายภาพอินฟราเรด

2.1.1 การทำงานของกล้องถ่ายภาพอินฟราเรด

กล้องถ่ายภาพอินฟราเรดเป็นเครื่องมือวัดอุณหภูมิที่ทำงานโดยอาศัยการตรวจจับการแผ่รังสีความร้อนจากวัตถุ ในทางทฤษฎีเครื่องมือวัดชนิดนี้มีย่านการวัดที่กว้างมากและใช้วัตถุอุณหภูมิที่ต่ำมากๆ ได้ อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติความสามารถในการตรวจวัดอุณหภูมิจะขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีการสร้างเครื่องมือวัดเป็นสำคัญ ส่วนประกอบสำคัญของกล้องถ่ายภาพอินฟราเรด คือ ตัวตรวจจับรังสีอินฟราเรด (infrared detector) หรือเซนเซอร์ชนิดอินฟราเรด (Infrared sensor) วงจรอิเล็กทรอนิกส์ (electronic circuit) และส่วนแสดงผล (display) โดยตัวตรวจจับรังสีอินฟราเรดทำหน้าที่รับรังสีอินฟราเรดที่แผ่ออกจากวัตถุ ผ่านเลนส์ของเครื่องมือวัดและแปลงรังสีอินฟราเรดเหล่านี้ให้อยู่ในรูปของสัญญาณทางไฟฟ้า จากนั้นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ทำหน้าที่แปลงข้อมูลที่ได้รับมาจากตัวตรวจจับและนำไปแสดงข้อมูลที่ตัวแสดงผล โดยรังสีอินฟราเรดที่แผ่ออกจากวัตถุที่ต้องการวัดอุณหภูมิจะถูกแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าผ่านตัวตรวจจับรังสีอินฟราเรดที่ประกอบอยู่ภายในกล้อง และประมวลผลเป็นภาพความร้อนซึ่งแสดงเป็นจุดของอุณหภูมิจำนวนมากทั่วพื้นที่ในรูปแบบแผนที่ความร้อนของพื้นผิววัตถุที่วัด ผลของแต่ละจุดที่ได้จากเซนเซอร์แต่ละตัวเมื่อนำมารวมกันจะประกอบขึ้นเป็นภาพ เรียกว่า “ภาพถ่ายความร้อน (thermal image)”

โดยการวัดอุณหภูมิด้วยกล้องถ่ายภาพอินฟราเรดให้ถูกต้องขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีอินฟราเรด ซึ่งเป็นค่าคุณสมบัติที่แสดงถึงความสามารถในการแผ่รังสีของวัตถุ สัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสี (reflectivity) ซึ่งเป็นค่าคุณสมบัติที่แสดงถึงความสามารถในการสะท้อนรังสีออกจากวัตถุ เมื่อวัตถุได้รับพลังงานจากแหล่งความร้อนอื่น ดังนั้น เพื่อให้ค่าอุณหภูมิที่วัดได้ถูกต้องควรชดเชยค่าการสะท้อนของรังสีความร้อนที่เครื่องมือวัดด้วย นอกจากนี้ระยะห่างระหว่างวัตถุกับกล้องถ่ายภาพอินฟราเรด ก็มีผลต่อความถูกต้องของการวัดด้วยเช่นกัน โดยเมื่อวัตถุและกล้องอยู่ห่างกันมากจะทำให้รังสีของวัตถุที่เซนเซอร์ภายในกล้องตรวจจับได้มีปริมาณน้อยลง เนื่องจากพลังงานบางส่วนจะสูญเสียในสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ การวัดอุณหภูมิที่ระยะห่างจากวัตถุมากๆ อาจทำให้จุดที่ไม่ร้อนหรือจุดที่ไม่เกี่ยวข้องกับจุดที่ต้องการวัดค่าอุณหภูมิเข้าไปในพื้นที่ของการวัดด้วย ซึ่ง มีผลต่อการวัดอุณหภูมิ แต่อย่างไรก็ตามระยะห่างที่เหมาะสมของการวัดจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเฉพาะตัว (specifications) ของกล้องแต่ละรุ่น หรืออาจใช้อุปกรณ์เสริมเพื่อช่วยให้ค่าที่วัดได้ถูกต้องมากยิ่งขึ้น

2.1.2 อุปกรณ์เสริม

ในบางครั้งการใช้งานกล้องถ่ายภาพอินฟราเรดในระยะไกลอาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการวัดอุณหภูมิ ซึ่งมีผลมาจากระยะห่างระหว่างกล้องถ่ายภาพอินฟราเรดและตัววัตถุ หรือการวัดอุณหภูมิในพื้นที่ที่มีความเสี่ยงอันตรายอาจไม่สามารถวัดอุณหภูมิในระยะใกล้ได้ จำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์เสริม ได้แก่ การติดตั้งหน้าต่างอินฟราเรด (IR-window) หรือการใช้เลนส์ถ่ายภาพระยะไกล (telephoto infrared lens) สำหรับช่วยหักเหหรือรวม (focus) รังสีอินฟราเรด ณ จุดวัดอุณหภูมิ เพื่อช่วยให้อุณหภูมิที่วัดได้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น รายละเอียดและหน้าที่ของหน้าต่างอินฟราเรด และเลนส์ถ่ายภาพระยะไกล มีดังนี้

1) หน้าต่างอินฟราเรด เป็นอุปกรณ์ที่ยอมให้รังสีอินฟราเรดทะลุผ่านได้ มีคุณสมบัติการส่งผ่านรังสีอินฟราเรด (transmission : τ) ซึ่งมักติดตั้งในบริเวณจุดวัดอุณหภูมิที่มีความเสี่ยงต่ออันตราย เช่น ตู้ระบบไฟฟ้าที่มีแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าสูงตลอดเวลา โดยในการใช้กล้องถ่ายภาพอินฟราเรดวัดอุณหภูมิผ่านหน้าต่างอินฟราเรด จำเป็นต้องกำหนดค่าการส่งผ่านรังสีอินฟราเรดที่ถูกต้อง เพื่อให้กล้องนำค่าการส่งผ่านรังสีอินฟราเรดของหน้าต่างอินฟราเรดไปชดเชยพลังงานที่สูญเสียเมื่อผ่านอุปกรณ์เพื่อทำให้ค่าอุณหภูมิที่วัดได้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น ตัวอย่างการติดตั้งหน้าต่างอินฟราเรดแสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การติดตั้งหน้าต่างอินฟราเรด

2) เลนส์ถ่ายภาพระยะไกล เป็นเลนส์เสริมสำหรับใช้งานเมื่อต้องการวัดอุณหภูมิด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนของวัตถุที่อยู่ระยะไกล หรือเรียกอีกอย่างว่า เลนส์ระยะไกล มีคุณสมบัติช่วยรวมหรือโฟกัสรังสีอินฟราเรดที่แผ่จากวัตถุหรือจุดที่ต้องการวัดอุณหภูมิ ทำให้ความสามารถในการมองเห็นวัตถุขนาดเล็กและอยู่ในระยะไกลเพิ่มมากขึ้นหรือทำให้ภาพถ่ายความร้อนชัดขึ้น การวัดอุณหภูมิจึงมีความถูกต้องมากขึ้น

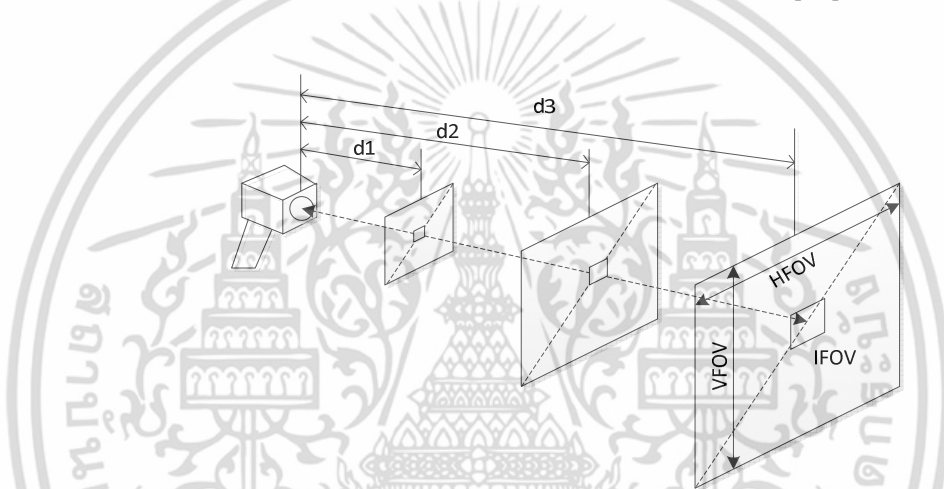
2.1.3 คุณสมบัติสำคัญของกล้องถ่ายภาพอินฟราเรด

คุณลักษณะที่สำคัญของกล้องถ่ายภาพอินฟราเรดที่ส่งผลต่อความถูกต้องของการวัดพลังงานที่

แผ่ออกจากวัตถุหรือการวัดอุณหภูมิ มีดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) ความละเอียดของภาพความร้อน หรือความละเอียดเชิงพื้นที่ ที่เกี่ยวข้องกับพารามิเตอร์ที่สำคัญของกล้องถ่ายภาพอินฟราเรดหลายพารามิเตอร์ ดังนี้ ขอบเขตการมองเห็นหรือมุมมอง (Field Of View; FOV) มุมมองที่ตัวตรวจจับเดียว (Instantaneous Field of View; IFOV) และ detector array ซึ่งหากต้องการนำกล้องถ่ายภาพอินฟราเรดไปใช้ในการวัดเชิงปริมาณ ควรพิจารณาคุณลักษณะดังกล่าวประกอบการเลือกใช้กล้องอินฟราเรดให้เหมาะสมงาน โดยพารามิเตอร์เหล่านี้นำมาใช้เพื่อแสดงให้เห็นถึงความสามารถของกล้องสำหรับการแยกแยะระหว่างวัตถุสองชิ้นใน FOV ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างวัตถุกับกล้อง ระบบเลนส์ และขนาดของตัวตรวจจับ โดยความละเอียดของภาพความร้อนจะลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างกล้องกับวัตถุเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูป 2.2 รวมถึงระบบเลนส์ที่มีมุมมองแคบจะมีความละเอียดเชิงพื้นที่สูง และสุดท้ายตัวตรวจจับที่มี array element จำนวนมากจะให้ภาพความร้อนที่มีความละเอียดเชิงพื้นที่ที่ดีขึ้น [12]



รูปที่ 2.2 ความละเอียดเชิงพื้นที่ที่ระยะทางระหว่างกล้องอินฟราเรดกับวัตถุแตกต่างกัน

2) โฟกัสทางความร้อน เป็นคุณลักษณะที่ส่งผลต่อการประเมินการกระจายตัวของอุณหภูมิ ซึ่งเกี่ยวข้องกับการปรับย่านอุณหภูมิ (span) และระดับอุณหภูมิ (level) ให้เหมาะสมกับการใช้งาน โดยการปรับย่านอุณหภูมิ คือ การปรับค่าช่วงอุณหภูมิสูงสุดหรือต่ำสุด ซึ่งจัดเป็นคุณลักษณะที่เกี่ยวกับโฟกัสทางความร้อนของภาพถ่ายความร้อน โดยความกว้างของ span แปรผันตามปริมาณของเฉดสีที่แสดงในภาพถ่ายความร้อน การปรับเฉดสีให้อยู่ในช่วงอุณหภูมิที่สนใจทำให้มองเห็นการกระจายอุณหภูมิแต่ละจุดบนภาพถ่ายความร้อนอย่างชัดเจน ส่วนการปรับระดับของอุณหภูมิ เป็นการปรับเลื่อนย่านอุณหภูมิทั้งชุด ถ้าในมุมมองของภาพถ่ายความร้อนถือว่าเป็นการปรับความสว่างของภาพ

2.2 สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน

สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน (emissivity, ซึ่งต่อไปจะใช้ ϵ เป็นตัวย่อ) เป็นสมบัติที่ผิวของวัตถุ ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการแผ่รังสีความร้อนของวัตถุใดๆ โดยมีนิยามคือ “ปริมาณรังสีที่

แผ่ออกจากผิววัตถุใดๆ ; $E(T)$ เปรียบเทียบกับปริมาณรังสีที่แผ่ออกจากวัตถุดำ (blackbody) ; $E_b(T)$ ที่อุณหภูมิเดียวกัน” [5] ซึ่งคำนวณได้ดังนี้

$$\varepsilon(T) = \frac{E(T)}{E_b(T)} \quad (2.1)$$

สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนมีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 (วัตถุดำ) ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ ลักษณะพื้นผิว (ความเรียบ ความขรุขระ) มุมมอง (viewing angle) และอุณหภูมิที่ผิว เป็นต้น [1, 5, 6] โดยการคำนวณพลังงานการแผ่รังสีความร้อนของวัตถุดำอธิบายได้ด้วยสมการกระจายของพลังค์ (Planck's distribution) ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่อยู่ในรูปของอุณหภูมิและความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังแสดงในสมการที่ 2.2 ต่อมา Stefan-Boltzmann นักวิทยาศาสตร์ชาวออสเตรียได้ศึกษาการแผ่รังสีความร้อนของ blackbody ที่อุณหภูมิใดๆ ตลอดทุกความยาวคลื่น และนำเสนอสมการกระจายของพลังค์มาอินทิเกรตตลอดทุกๆ ความยาวคลื่น (สมการที่ 2.3) จึงได้สมการสำหรับคำนวณการแผ่รังสีความร้อนของวัตถุดำดังแสดงในสมการที่ 2.4 ดังนี้

$$E_{\lambda,b}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]} \quad (2.2)$$

$$E_b(T) = \int_0^\infty \frac{C_1}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]} d\lambda \quad (2.3)$$

$$E_b(T) = \sigma T^4 \quad (2.4)$$

โดย C_1 เท่ากับ $3.742 \times 10^4 \text{ W}\mu\text{m}^4/\text{m}^2$, C_2 เท่ากับ $1.439 \times 10^4 \mu\text{m}\cdot\text{K}$

σ คือ ค่าคงที่ของสเตฟาน-โบลท์ซมานน์ มีค่าเท่ากับ $5.67 \times 10^{-8} (\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ และ

T คือ อุณหภูมิที่ผิว (K)

สำหรับพลังงานการแผ่รังสีความร้อนของวัตถุจริงต่างๆ ไปสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.5

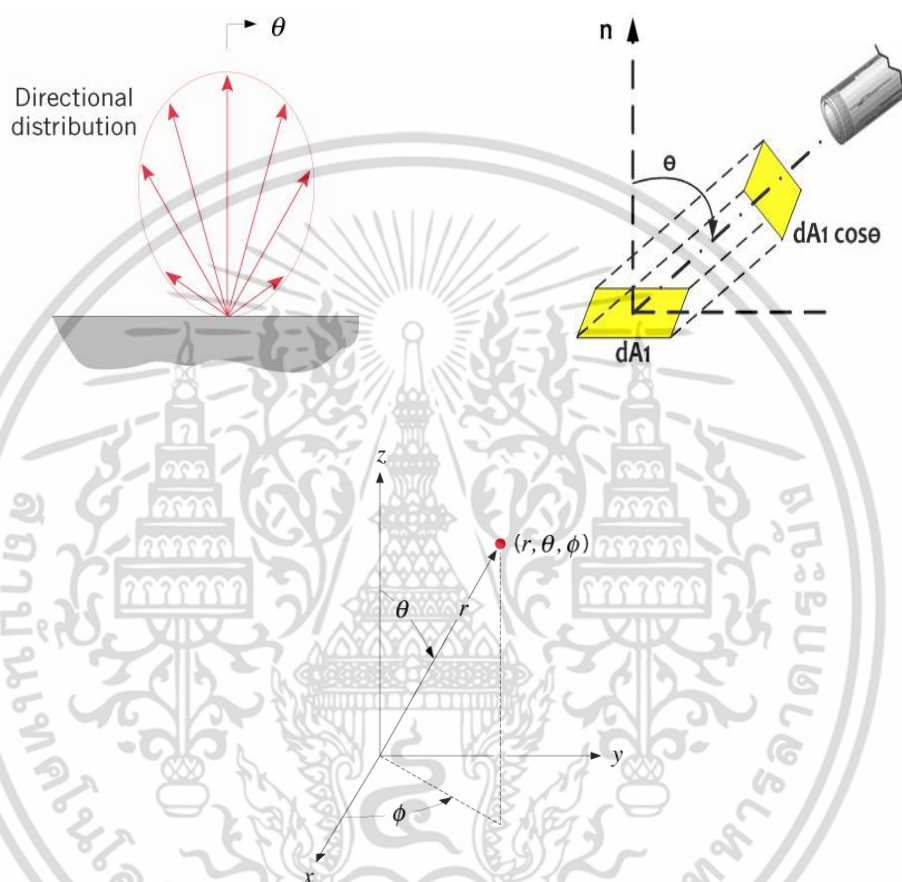
$$E(T) = \varepsilon \sigma T^4 \quad (2.5)$$

สำหรับวัตถุจริงใดๆ ที่อุณหภูมิ T เดียวกัน ปริมาณพลังงานที่แผ่ออกมาจากวัตถุจะมีค่าน้อยกว่าพลังงานที่วัตถุดำแผ่ออกมา โดยความเข้มของพลังงานที่วัตถุจริงแผ่ออกมา ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของวัตถุ นอกจากนี้ ยังขึ้นอยู่กับทิศทางของการแผ่รังสีและความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่วัตถุแผ่รังสีความร้อนออกมาด้วยดังแสดงในรูปที่ 2.3

โดยค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนสามารถแบ่งตามความยาวคลื่นและทิศทางออกเป็น 6

ประเภท ดังนี้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1) Spectral directional emissivity คือ สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนที่พิจารณาความเข้มของรังสีความร้อนจากความยาวคลื่นเดียวในทิศทางการแผ่รังสี 1 ทิศทาง ณ อุณหภูมิหนึ่งๆ โดยพิจารณาการแผ่รังสีความร้อนเป็นแบบพิกัดทรงกลม θ คือ Polar angle และ ϕ คือ Azimuth angle ซึ่งโดยส่วนใหญ่พื้นผิวมีการแผ่รังสีด้วยความเข้มสม่ำเสมอที่ $\theta \leq 15^\circ$



รูปที่ 2.3 ปริมาณการแผ่รังสีความร้อนในทิศทางต่าง ๆ [5]

- 2) Spectral hemispherical emissivity คือ สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนที่พิจารณาความเข้มของรังสีความร้อนจากความยาวคลื่นเดียว ที่กระจายเท่ากันตลอดทั้งพื้นผิว ณ อุณหภูมิหนึ่งๆ
- 3) Total directional emissivity คือ อัตราส่วนของพลังงานที่แผ่รังสีของพื้นผิววัตถุจริงที่แบ่งย่อยแล้วนำมาอินทิเกรตรวมกันทุกความยาวคลื่นต่อพลังงานการแผ่รังสีความร้อนของวัตถุดมคติที่แบ่งย่อยแล้วนำมาอินทิเกรตรวมกันทุกความยาวคลื่นซึ่งเกิดที่อุณหภูมิเดียวกัน ทิศทางการแผ่รังสีความร้อน 1 ทิศทางและเป็นแบบพิกัดทรงกลม โดยที่มุม $\theta \leq 15^\circ$ นั่นคือ การพิจารณาสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนจากการแผ่รังสีความร้อนทุกความยาวคลื่น 1 ทิศทาง

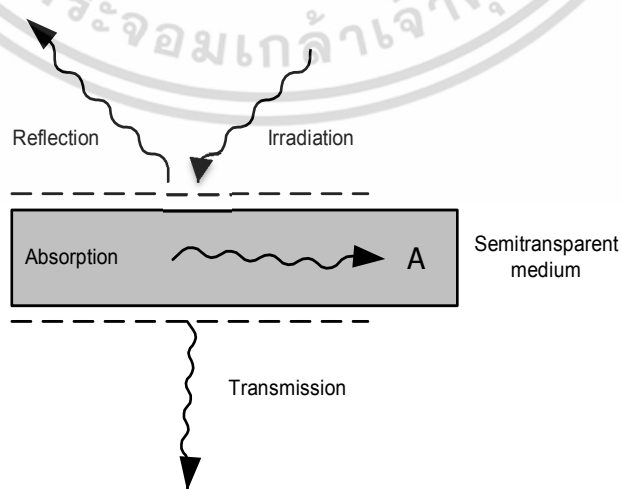
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 4) Total hemispherical emissivity คือ สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนที่พิจารณาจากการแผ่รังสีความร้อนทุกความยาวคลื่นและแผ่รังสีความร้อนทุกทิศทาง
- 5) Band emissivity คือ สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนที่พิจารณาโดยการเฉลี่ยค่าตั้งแต่ความยาวคลื่นค่าแรกถึงความยาวคลื่นค่าสุดท้ายในช่วงความยาวคลื่น นั้นๆ ที่อุณหภูมิพื้นผิวและช่วงความยาวคลื่นเดียวกัน การหาสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนทำได้โดยอินทิเกรตตลอดความยาวคลื่นแรกถึงความยาวคลื่นสุดท้ายในช่วงความยาวคลื่นนั้นๆ โดยคิดการแผ่รังสีความร้อนในทุกทิศทาง
- 6) Effective Emissivity คือ สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนที่ใช้กับ infrared-detector ไพโรมิเตอร์อินฟราเรด คือค่าเฉลี่ยแบบ hemispherical emissivity ตลอดช่วง band width นั้นๆ

เนื่องจากกล้องถ่ายภาพความร้อนหรือกล้องอินฟราเรดตรวจจับรังสีอินฟราเรดในช่วงความยาวคลื่นหนึ่ง เช่น 7.5-14 μm การวัดสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนนี้ จึงแสดงในรูปแบบสมการที่ 2.6

$$\epsilon_{7.5-14\mu\text{m}}(T) = \frac{E_{7.5-14\mu\text{m}}(T)}{E_{b, 7.5-14\mu\text{m}}(T)} \quad (2.6)$$

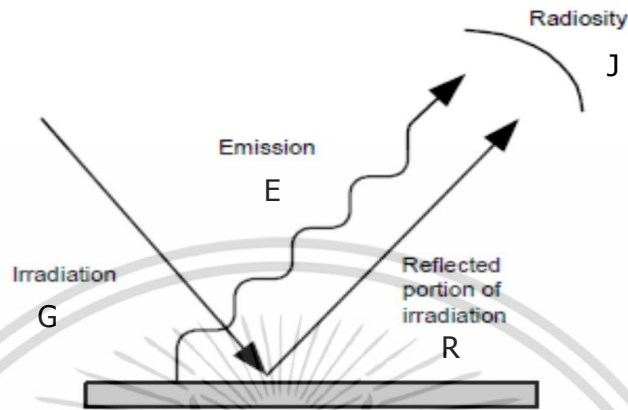
โดยพลังงานที่ตัวตรวจจับรังสีอินฟราเรดรับเข้าไปเป็นพลังงานรวมที่ได้จากการแผ่รังสีของวัตถุเป้าหมายและพลังงานจากสิ่งแวดล้อมที่สะท้อน ดูดซึม และส่งผ่านวัตถุเป้าหมาย ซึ่งพลังงานเหล่านี้จะถูกตรวจจับและนำไปแปลงเป็นอุณหภูมิของวัตถุ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งในการหาค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนด้วยกล้องอินฟราเรดนี้ จำเป็นต้องคำนึงถึงค่าพลังงานที่เกิดจากการสะท้อนจากวัตถุอื่นเข้ามาร่วมพิจารณาด้วย เพื่อให้การประเมินค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนที่ได้จากวิธีนี้เป็นค่าที่ถูกต้องและมีความน่าเชื่อถือ



รูปที่ 2.4 การดูดซึมรังสี การสะท้อนรังสี และการส่งผ่านรังสีผ่านตัวกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่ภายนอกการดำเนินงานโดยไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางปฏิบัติรังสีที่มาจากกระทบบนพื้นผิววัตถุใดๆ รังสีบางส่วนจะสะท้อนออกจากพื้นผิว (reflection, R) บางส่วนวัตถุจะดูดซับไว้ (absorption, A) และบางส่วนจะถูกส่งผ่านไปอีกด้านหนึ่ง (transmission, T) ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 รังสีทั้งหมดที่ออกจากพื้นผิววัตถุ [5]

2.3 พลังงานความร้อนที่กล้องถ่ายภาพอินฟราเรดได้รับ

พลังงานความร้อนที่กล้องถ่ายภาพอินฟราเรดได้รับอยู่ในรูปแบบของรังสีอินฟราเรดทั้งหมดที่แผ่ออกจากพื้นผิววัตถุใดๆ (radiosity: J) ประกอบด้วย รังสีที่สะท้อนออกจากพื้นผิว (R) ซึ่งเป็นรังสีที่ได้รับมาจากการแผ่ของวัตถุอื่น (G) และรังสีที่แผ่ออกจากพื้นผิววัตถุโดยตรง (E) (ดูรูปที่ 2.5) ซึ่งปริมาณรังสีที่แผ่ออกจากพื้นผิวของวัตถุจะขึ้นอยู่กับค่าความสามารถในการแผ่รังสีของวัตถุและอุณหภูมิที่ผิวของวัตถุ ในขณะที่ปริมาณรังสีที่สะท้อนออกจากพื้นผิววัตถุจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติการสะท้อนรังสีของวัตถุ และปริมาณรังสีที่แผ่ออกจากสิ่งแวดล้อม โดยพลังงานความร้อนที่กล้องถ่ายภาพอินฟราเรดได้รับกรณีที่รังสีอินฟราเรดแผ่เข้ากล้องโดยตรงผ่านอากาศ ประกอบด้วย รังสีที่แผ่จากวัตถุเอง และรังสีความร้อนที่สะท้อนออกจากวัตถุ ซึ่งสามารถคำนวณปริมาณรังสีความร้อนทั้งหมดที่แผ่ออกจากตัววัตถุและกล้องถ่ายภาพอินฟราเรดได้รับ จากสมการที่ 2.7

$$J = \varepsilon_s \sigma T_s^4 + \rho_s \varepsilon_{surr} \sigma T_{surr}^4 \quad (2.7)$$

โดยเทอมของ $\varepsilon_s \sigma T_s^4$ คือปริมาณรังสีที่แผ่จากวัตถุเอง (มีหน่วยเป็น W/m^2) และเทอม $\rho_s \varepsilon_{surr} \sigma T_{surr}^4$ คือ ปริมาณรังสีความร้อนที่แผ่มาจากสิ่งแวดล้อมโดยรอบหรือแผ่จากวัตถุอื่นมากระทบและสะท้อนออกจากวัตถุเอง

สำหรับกรณีที่ใช้กล้องถ่ายภาพอินฟราเรดวัดอุณหภูมิวัตถุผ่านหน้าต่างอินฟราเรด ปริมาณรังสีอินฟราเรดจะสามารถส่งผ่านหน้าต่างอินฟราเรดได้เพียงปริมาณหนึ่งเท่านั้นขึ้นอยู่กับค่าสมบัตการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่งผ่านรังสีความร้อนของหน้าต่างอินฟราเรด โดยปริมาณรังสีอินฟราเรดทั้งหมดที่จะผ่านเข้าตัวตรวจจับอินฟราเรด ประกอบด้วย

- 1) รังสีอินฟราเรดที่แผ่ออกจากตัววัตถุและผ่านหน้าต่างอินฟราเรดเข้าสู่ตัวตรวจจับอินฟราเรด
- 2) รังสีอินฟราเรดจากสิ่งแวดล้อมที่สะท้อนบนผิววัตถุและผ่านหน้าต่างอินฟราเรดเข้าสู่ตัวตรวจจับอินฟราเรด
- 3) รังสีอินฟราเรดที่แผ่ออกจากตัวหน้าต่างอินฟราเรดเข้าสู่ตัวตรวจจับอินฟราเรด
- 4) รังสีอินฟราเรดจากสิ่งแวดล้อมที่สะท้อนบนหน้าต่างอินฟราเรดเข้าสู่ตัวตรวจจับอินฟราเรด

สามารถคำนวณปริมาณรังสีความร้อนที่กล้องถ่ายภาพความร้อนได้รับกรณีมีหน้าต่างอินฟราเรดได้ดังสมการที่ 2.8

$$J = \varepsilon_{IRW}\sigma T_{IRW}^4 + (1 - \varepsilon_{IRW} - \tau_{IRW})\varepsilon_{surr}\sigma T_{surr}^4 + \tau_{IRW}\varepsilon_s\sigma T_s^4 \quad (2.8)$$

โดยเทอมของ $\varepsilon_{IRW}\sigma T_{IRW}^4$ คือ ปริมาณรังสีความร้อนที่แผ่จากหน้าต่างอินฟราเรด สำหรับเทอมของ $(1 - \varepsilon_{IRW} - \tau_{IRW})\varepsilon_{surr}\sigma T_{surr}^4$ คือ ปริมาณรังสีความร้อนที่สะท้อนจาก IR-windows โดย $\rho_s = (1 - \varepsilon_{IRW} - \tau_{IRW})$ ซึ่งหมายถึง ค่าความสามารถในการสะท้อนรังสีความร้อนจาก IR-windows และเทอมของ $\tau_{IRW}\varepsilon_s\sigma T_s^4$ คือ รังสีความร้อนที่แผ่ออกมาจากวัตถุแล้วส่งผ่าน IR-windows ได้ ซึ่งเกิดจากรังสีความร้อนที่แผ่ออกจากพื้นผิววัตถุเอง แล้วสามารถทะลุหรือส่งผ่าน IR-windows ได้ขึ้นกับค่าสมบัติการส่งผ่านรังสีความร้อนของ IR-windows

2.4 การวิเคราะห์ความไม่แน่นอน

การวิเคราะห์ความไม่แน่นอนเป็นการบอกถึงคุณภาพและความน่าเชื่อถือของระบบการวัดและความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่รายงานผลออกมา ความไม่แน่นอนจากการวัดเป็นค่าทางสถิติโดยมีแนวความคิดจากความคลาดเคลื่อนที่เกิดแบบสุ่มและความคลาดเคลื่อนเชิงระบบตามแนวปฏิบัติ (Guide to the expression of uncertainty in measurement: GUM) [13] ค่าความคลาดเคลื่อนที่หาออกมาได้นั้นถือว่าเป็นประโยชน์ต่อการนำค่าผลการวัดไปใช้งานในด้านอื่นต่อไป โดยความไม่แน่นอนจากการวัดที่เกิดจากความคลาดเคลื่อนและแบบสุ่มนั้น มาจากความแตกต่างของค่าที่วัดได้แต่ละครั้งที่ไม่สามารถอธิบายได้ชัดเจน และไม่สามารถคาดการณ์แนวโน้มของค่าความแตกต่างได้ ส่วนความไม่แน่นอนจากการวัดที่เกิดจากความคลาดเคลื่อนเชิงระบบนั้นมาจากความไม่สมบูรณ์ของระบบการวัดที่มีการควบคุมแล้ว โดยผู้ประเมินจะต้องมีประสบการณ์หรือมีความเชี่ยวชาญในระบบที่ทำการวัดนั้น เพื่อที่จะสามารถคาดการณ์ความไม่สมบูรณ์ต่างๆ ที่จะเกิดขึ้น หรือสามารถทราบแหล่งที่มาของความไม่สมบูรณ์ดังกล่าวจากเอกสารหรือข้อมูลทางวิชาการ

การประเมินความไม่แน่นอนนั้นมีความสำคัญเท่ากับผลของการวัด [14] เพราะเป็นสิ่งที่บ่งบอกถึงคุณภาพของเครื่องมือวัดหรือวิธีการวัด ผู้ทำการวัดจึงต้องแสดงค่าที่ได้จากการวัดพร้อมทั้งขนาดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของความไม่สมบูรณ์ดังกล่าวในรูปแบบของความไม่แน่นอนของการวัด พร้อมช่วงความเชื่อมั่น และระดับความเชื่อมั่น ซึ่งมาจากการรวมความไม่แน่นอนของปริมาณอินพุต (x) ทั้งหมดที่ทำให้เกิดปริมาณเอาต์พุต (y) แสดงในสมการที่ 2.9

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (2.9)$$

การประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัดแบ่งได้ 4 รูปแบบ (ISO, 1995) ได้แก่ การประเมินค่าความไม่แน่นอนมาตรฐาน Type A ความไม่แน่นอนมาตรฐาน Type B การรวมค่าความไม่แน่นอนและความไม่แน่นอนขยาย รายละเอียดสำหรับแต่ละรูปแบบ มีดังนี้

1) การประเมินความไม่แน่นอนมาตรฐาน Type A

การประเมินความไม่แน่นอนมาตรฐาน Type A ใช้หลักทางสถิติของปริมาณที่มีการแปรผันอย่างสูง โดยพิจารณาความสามารถในการซ้ำของค่าที่วัดได้ในขณะใดขณะหนึ่ง ซึ่งสามารถลดขนาดความไม่แน่นอนได้โดยเพิ่มจำนวนครั้งในการวัดซ้ำมักเรียกว่า “ความสามารถในการทำซ้ำ (repeatability)” การประเมิน Type A ($u_A(x)$) สามารถหาได้จากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย (standard Deviation of mean) แสดงในสมการที่ 2.10

$$u_A(x) = S(\bar{x}) \quad (2.10)$$

ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย: $S(\bar{x})$ สามารถหาได้จากสมการที่ 2.11

$$S(\bar{x}) = \frac{S(x)}{\sqrt{n}} \quad (2.11)$$

ค่าที่วัดได้มีความแตกต่างกันเพราะความแปรผันแบบสุ่มของปริมาณที่มีอิทธิพลต่อการวัด ซึ่งสามารถหาการกระจายของข้อมูลโดยประมาณจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation, $S(\bar{x})$) แสดงค่าในสมการที่ 2.12

$$S(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2.12)$$

โดยค่าเฉลี่ยเลขคณิต (arithmetic mean, \bar{x}) คือค่ากลางที่อ่านได้จากการวัด คำนวณได้จากผลการรวมจากค่าที่ได้ จากการวัดปริมาณที่เป็นอิสระต่อกันจำนวน n แสดงดังสมการที่ 2.13

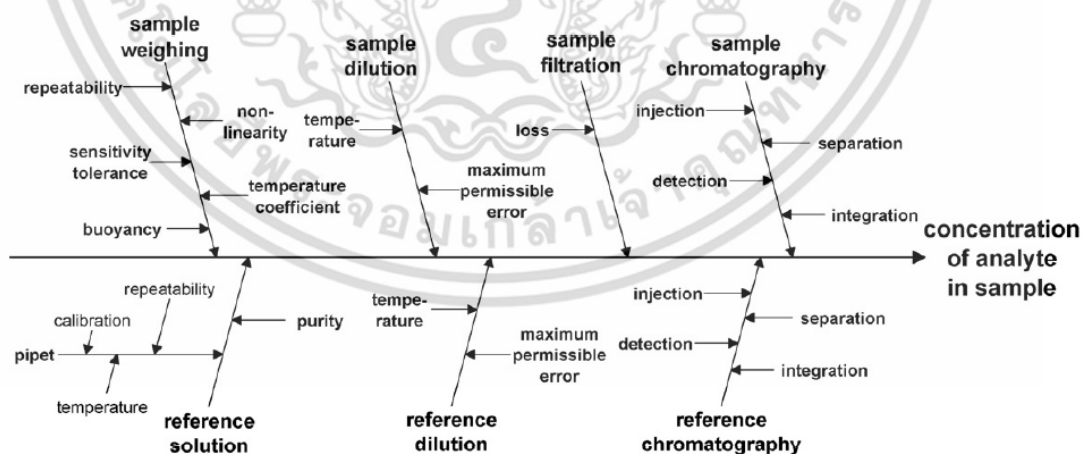
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.13)$$

2) การประเมินความไม่แน่นอนมาตรฐาน Type B

การประเมินความไม่แน่นอนมาตรฐาน Type B เป็นการเก็บรวบรวมข้อมูลจากแหล่งต่างๆ เพื่อประกอบการพิจารณา เรียกว่าความไม่แน่นอนลักษณะนี้ว่าความคลาดเคลื่อนของระบบ ฉะนั้นในการประเมินความไม่แน่นอนมาตรฐาน Type B ผู้ประเมินความไม่แน่นอนจะต้องมีความรู้และความเข้าใจในส่วนของ เทคนิคในกระบวนการวัด เพื่อให้สามารถกำหนดแหล่งที่มาของความไม่แน่นอนได้อย่างถูกต้องและครบถ้วน โดยเอกสาร GUM ได้สรุปตัวอย่างแหล่งที่มาของความไม่แน่นอนของการวัดในรูปแบบ Type B ได้แก่ ความผิดพลาดของมาตรฐาน ความไม่แน่นอนที่มาจาก การสอบเทียบ ความละเอียดในการวัด วิธีการสอบเทียบ สภาวะแวดล้อมในการสอบเทียบ ข้อกำหนดการใช้งานจากผู้ผลิต (ISO, 1995) ในการประเมินผู้ปฏิบัติงานนั้นต้องทราบขนาดและการกระจายตัวของความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น โดยความไม่แน่นอนประเภทนี้มีรูปแบบการกระจายตัวของข้อมูลแตกต่างกันได้แก่ รูปแบบการกระจายตัวแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า สามเหลี่ยม และรูปตัวยู เมื่อนำมาพิจารณารวมกันจะต้องแปลงรูปแบบการกระจายตัวให้เป็นรูปแบบความไม่แน่นอนมาตรฐาน (standard Uncertainty)

การประเมินค่าความไม่แน่นอน มาตรฐาน Type B สามารถประยุกต์ใช้แบบผังก้างปลาในการแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างปัญหากับสาเหตุทั้งหมดที่สามารถเป็นไปได้ แสดงในรูปที่ 2.6 โดยส่วนหัวแสดงถึงปัญหาและส่วนก้างแสดงถึงสาเหตุ พร้อมทั้งระบุถึงอิทธิพลและความสำคัญของความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นจากลำดับของลูกศร [15]



รูปที่ 2.6 การใช้แผนภูมิก้างปลาในการระบุถึงอิทธิพลของตัวแปรความไม่แน่นอน [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) การประเมินความไม่แน่นอนรวม

การรวมค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานของ y ที่เกิดขึ้นจากความไม่แน่นอนของอินพุต ($u(x_i)$) ซึ่งประกอบด้วยความไม่แน่นอน Type A และ Type B โดยแทนด้วย $u_c(y)$ ซึ่งค่าดังกล่าวคือรากที่สองของผลบวกของความแปรปรวนรวม (u_c^2) แสดงในสมการที่ 2.14 และผลรวมค่าดังกล่าวด้วยวิธีรากที่ 2 ของผลรวมค่าความไม่แน่นอนกำลังสอง ดังแสดงในสมการที่ 2.15

$$u_c^2(y) = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2 u^2(x_1) + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2 u^2(x_2) + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n}\right)^2 u^2(x_n) \quad (2.14)$$

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N C_i^2 u^2(x_i)} \equiv \sqrt{\sum_{i=1}^N u^2(y)} \quad (2.15)$$

4) การประเมินความไม่แน่นอนขยาย

ในกรณีที่ความไม่แน่นอนรวมมีความเชื่อมั่นไม่เพียงพอที่จะใช้ในภาคปฏิบัติ จึงนำความไม่แน่นอนรวมคูณกับตัวประกอบควบคุม (Coverage factor : K) ดังสมการที่ 2.16 เพื่อให้มีระดับความเชื่อมั่นสูงขึ้น ทัวไปจะรายงานค่าความไม่แน่นอนที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ซึ่งมีค่าตัวประกอบควบคุมเท่ากับ 2 [16]

$$U = k_p u_c(y) \quad (2.16)$$

ค่าตัวประกอบควบคุมเลือกได้จากตารางแจกแจง t (t-distribution) จากระดับความเชื่อมั่น (Confidence level) ที่ต้องการและค่าองศ์ความเป็นอิสระ (Effective Degree of Freedom) ซึ่งค่าดังกล่าวสามารถคำนวณได้จากสมการ Welch-Satterthwaite แสดงในสมการที่ 2.17

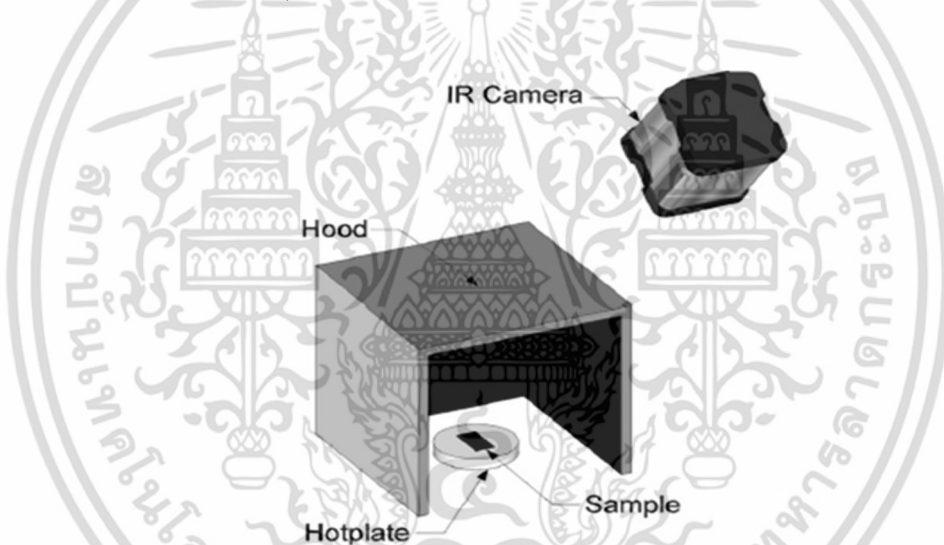
$$V_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^n \frac{u_i^4(y)}{v_i}} \quad (2.17)$$

การวัดความไม่แน่นอนของระบบการวัดสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ การวัดความไม่แน่นอนของเครื่องมือวัดและความไม่แน่นอนของวิธีการวัด โดยการประเมินความไม่แน่นอนของเครื่องมือวัดเพื่อระบุความแม่นยำของเครื่องมือวัดและความสามารถในการวัดของอุปกรณ์แสดงในค่าความไม่แน่นอน โดยสามารถแบ่งออกได้ 2 กลุ่ม คือ ความไม่แน่นอนของการสอบเทียบ และ ความแม่นยำของเครื่องมือวัด สำหรับการประเมินความไม่แน่นอนของวิธีการวัด เป็นตัวแปรที่บ่งชี้ถึงคุณภาพและค่าน่าเชื่อถือของวิธีการวัดและยังสามารถทำให้ทราบถึงความเหมาะสมของการวัดนั้นด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

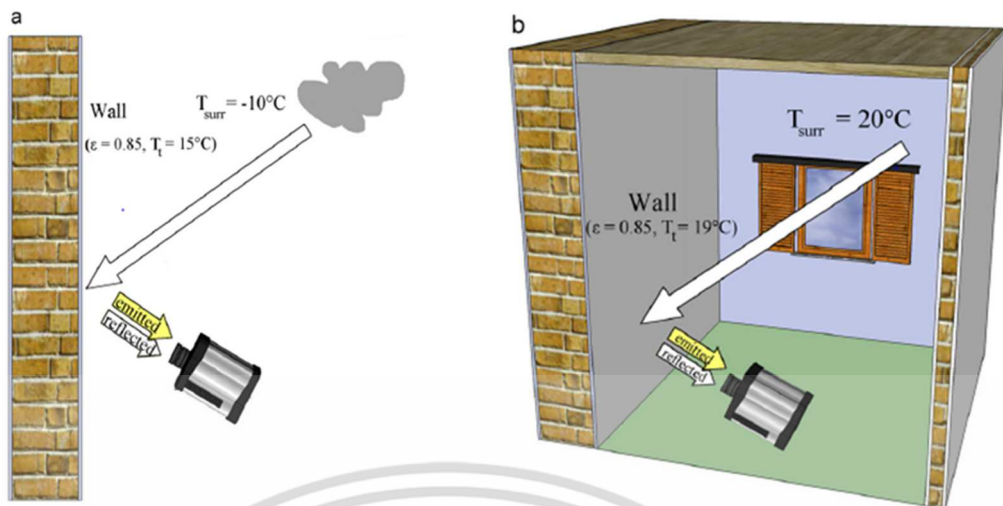
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Marinetti and Cesaratto [7] นำเสนอชุดอุปกรณ์ทดสอบการวัดค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ประกอบด้วย (1) กล้องอินฟราเรด FLIR SC6000 ในช่วงความยาวคลื่นกลาง 3-5 μm โดยใช้ Insb sensor ความละเอียด 640x512 pixel, (2) อุปกรณ์วัดอุณหภูมิที่ผิวแบบสัมผัสชนิด RTD Pt100 ซึ่งใช้เป็นตัวสอบเทียบอุณหภูมิที่วัดได้จริงบนพื้นผิวชิ้นตัวอย่าง, (3) แผ่นให้ความร้อนแก่ตัวอย่าง และ (4) กล่องครอบแผ่นให้ความร้อนและชิ้นตัวอย่างทดสอบภายในกล่องทาสีดำ เพื่อควบคุมการแผ่รังสีจากสิ่งแวดล้อมให้คงที่ และให้มีผลจากการสะท้อนรังสีน้อยที่สุด ทิศการวางกล้องถ่ายภาพความร้อนจะทำมุม 30° กับแนวราบ ชิ้นตัวอย่างที่ใช้ทดสอบได้แก่ กระจกดำ กระจกขาว เทป PVC สีดำ และ แผ่นอลูมิเนียมขนาดเล็ก ในการทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน ให้เพิ่มอุณหภูมิของชิ้นตัวอย่างให้สูงขึ้น 20 องศาเซลเซียส จากอุณหภูมิห้อง จากนั้นทำการลดอุณหภูมิลงตามต้องการ นำค่าที่วัดได้ทั้งหมดไปวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนด้วยโปรแกรม MATLAB, ThermoCAM™



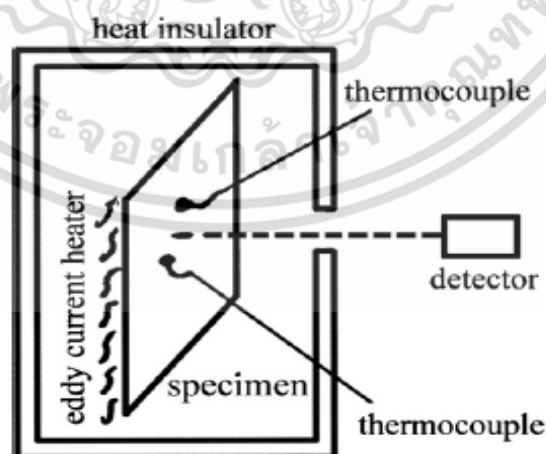
รูปที่ 2.7 ชุดอุปกรณ์ทดสอบ [7]

จากการทดลอง พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนที่ได้มีความคลาดเคลื่อนจากค่าอ้างอิงในตารางที่สภาวะแตกต่างกัน จึงนำค่าที่ได้ไปทดลองใช้ในการวัดอุณหภูมิด้วยไพโรมิเตอร์อินฟราเรด 2 แผนการทดลอง คือ การวัดอุณหภูมิผนังภายในอาคารและการวัดอุณหภูมิผนังภายนอกอาคาร โดยพบว่า การวัดอุณหภูมิภายนอกอาคารได้ผลที่คลาดเคลื่อนมากกว่าการวัดอุณหภูมิภายในอาคาร เนื่องจากการวัดอุณหภูมิภายนอกอาคารได้รับผลกระทบจากการการสะท้อนรังสีที่มาจากสิ่งแวดล้อมมากกว่าการวัดอุณหภูมิภายในอาคาร



รูปที่ 2.8 การวัดอุณหภูมิผนังภายในและภายนอกอาคารด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน [7]

Shi *et al.* [17] ได้ศึกษาหาสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของเหล็กกล้าเกรด 304 (Steel304) ในกระบวนการให้ความร้อน โดยทำการทดลองด้วยชุดอุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ด้วยการติดตั้งแผ่นเหล็กกล้าเกรด 304 รูปสี่เหลี่ยมขนาด $10 \times 7 \text{ cm}^2$ ในตู้ทดลอง และให้ความร้อนด้วยวิธีการให้กระแสเหนี่ยวนำขดลวดแม่เหล็กจำนวนหลายรอบจนเกิดกระแสสวน ที่ผิวของแผ่นเหล็กกล้าเกรด 304 ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ลแบบ Pt-Rh type R ด้วยการเชื่อมแบบสมมาตรทั้งสองข้าง เพื่อใช้เป็นตัวสอบเทียบอุณหภูมิ และใช้ตัวตรวจจับรังสีอินฟราเรดประเภท InGaAs photodiode detector ที่ความยาวคลื่นอินฟราเรด $1.5 \mu\text{m}$ โดยติดตั้งฉนวนกันรอบนอกเพื่อลดผลของการสะท้อนรังสีจากวัตถุอื่นและสิ่งแวดล้อม ทำการทดลองภายใต้ระบบควบคุมแบบ PID-Control ซึ่งสามารถบันทึกระยะเวลาในการให้ความร้อนที่มีความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนที่เกิดขึ้นได้



รูปที่ 2.9 ชุดทดลองของ Shi *et al.* [17]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

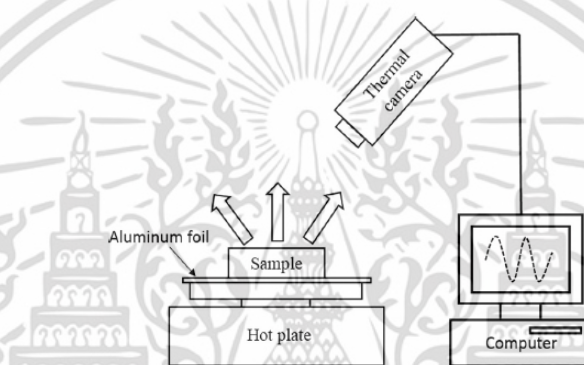
จากการทดลอง พบว่า เมื่อให้ความร้อนกับแผ่นเหล็กกล้าเกรด 304 และอากาศโดยรอบที่สัมผัสกับแผ่นเหล็ก เมื่อเวลาผ่านไปแผ่นเหล็กจะมีสนิมเกิดขึ้น และจากการประมวลผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ พบว่า เมื่อสนิมเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและระยะเวลาการให้ความร้อน ตั้งแต่อุณหภูมิ 830-1100 K ส่งผลให้วัสดุทดสอบมีค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนสูงขึ้น เนื่องจากพื้นผิวมีความขรุขระมากขึ้นหรือมีการเกิดสนิมเพิ่มขึ้น ซึ่งในการทดลองนี้กำหนดให้ blackbody มีค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนเท่ากับ 0.997 เมื่อสร้างแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในระหว่างการให้ความร้อนในแต่ละช่วงเวลา กับค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน จะได้ความสัมพันธ์ในรูปแบบของสมการแบบจำลองแบบโพลีโนเมียล โดยค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของแผ่นเหล็กกล้ามีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงกับลักษณะการเกิดสนิมที่แผ่นเหล็ก ซึ่งการเกิดสนิมจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและเวลาที่ใช้การให้ความร้อนกับแผ่นเหล็กเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้ Shi *et al.* [18] ยังได้ทำการทดลองเพื่อความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนกับอุณหภูมิขณะเกิดสนิมของทองเหลือง โดยใช้ชุดอุปกรณ์ทดสอบเช่นเดียวกับการทดสอบกับเหล็กกล้า 304 และเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้ระหว่างโลหะ 4 ชนิด ได้แก่ เหล็กกล้า 304, เหล็ก, อะลูมิเนียม และทองเหลือง ซึ่งพบว่าชุดอุปกรณ์ทดสอบนี้สามารถใช้วัดค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของวัสดุได้ และนำไปเชื่อมโยงเพื่อวิเคราะห์ถึงการเกิดสนิมที่ผิวของวัสดุได้ โดยทองเหลืองเกิดสนิมช้าที่สุดมีผลทำให้สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนค่อนข้างคงที่ เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่น

Muniz *et al.* [19] ศึกษาอิทธิพลของมุมมองและขอบเขตการมองเห็นภาพถ่ายความร้อน (FOV) กับการวัดอุณหภูมิเชิงมุมด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนชนิดอินฟราเรด โดยการทดลองนี้มีการสร้างแบบจำลองซึ่งอยู่บนพื้นฐานของการใช้โครงข่ายประสาทเทียมและการสร้างสมการถดถอยเพื่อศึกษาค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดอุณหภูมิ มีการเอียงมุมกล้องถ่ายภาพความร้อนกับพื้นผิวดตัวอย่าง (Polar angle, θ) ส่งผลต่อการหาค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนและการวัดอุณหภูมิด้วย ได้ออกแบบการทดลอง โดยการอ้างอิงค่าอุณหภูมิเมื่อมีการใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนวัดอุณหภูมิที่มุม 0° กับแนวตั้งซึ่งตั้งฉากกับพื้นผิวดตัวอย่าง เพื่อหาสัดส่วนเปรียบเทียบอุณหภูมิที่วัดจากการเอียงกล้องที่มุมใดๆ เพื่อวิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดอุณหภูมิ ซึ่งการทดลองนี้จะกำหนดให้ระยะห่างระหว่างตัวอย่างกับกล้องถ่ายภาพความร้อนคงที่ จากนั้นทำการทดลองโดยเปลี่ยนแปลงมุมเอียงของกล้องตั้งแต่ 0° - 75° ทั้งทางซ้ายและทางขวาของการหันเหกล้อง (-75° - 75°) โดยการขยับมุมทีละ 5° จนสูงสุด 75° เพื่อให้อยู่ในช่วงอุณหภูมิและสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนที่วัดได้คงที่ การทดลองมีการให้ความร้อนแก่ตัวอย่างจนมีอุณหภูมิ 100°C ผลลัพธ์จากการทดลองที่ได้นี้พบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดอุณหภูมิมีน้อย เมื่อมีค่า FOV สูงขึ้นเนื่องจากการกำหนดระยะจากกล้องถึงตัวอย่าง 2 m. ถือว่าเป็นระยะทางที่สั้นหากเทียบกับการใช้งานจริง ทำให้พื้นที่การมองเห็นภาพถ่ายความร้อนที่กล้องถ่ายภาพความร้อนได้รับมีค่าน้อย ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการวัดอุณหภูมิได้ และสุดท้ายพบว่าอุณหภูมิที่วัดได้มีความคลาดเคลื่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

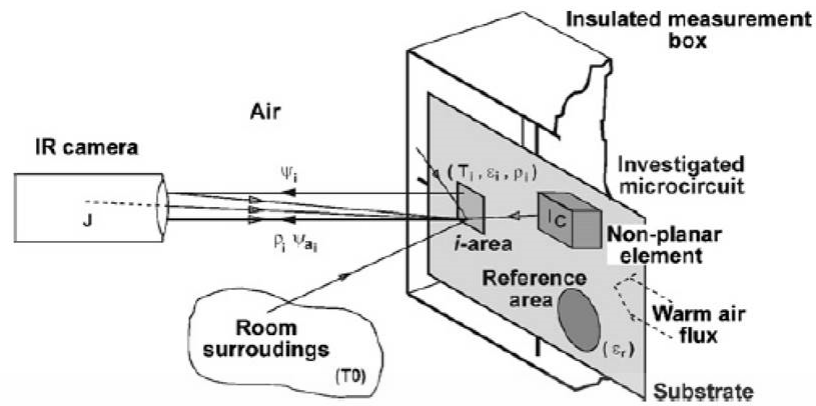
Yu *et al.* [20] ศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของเมล็ด Canola โดยให้ความร้อนด้วยกลไกการนำความร้อนจากแผ่นให้ความร้อนผ่านแผ่นเหล็กกล้าที่ห่อด้วยแผ่นอลูมิเนียมฟรอยด์สู่แผ่นเทปที่สัมผัสกับผิวตัวอย่างดังรูปที่ 2.10 โดยแผ่นเทปมีค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน 0.97 ใช้กล้องถ่ายภาพความร้อน FLIR Thermo Vision A20 (ความยาวคลื่นของรังสีอินฟราเรด 0.75 – 3 μm .) โดยพิจารณาผลของอุณหภูมิสะท้อนจากสิ่งแวดล้อมด้วย ระยะห่างระหว่างกล้องกับตัวอย่าง ความชื้นสัมพัทธ์ในบรรยากาศ และอุณหภูมิของบรรยากาศร่วมด้วย มีการป้อนค่าอุณหภูมิสะท้อนให้กับกล้องถ่ายภาพความร้อนด้วย จากการทดลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของเมล็ด Canola มีค่าลดลงตามอุณหภูมิที่สูงขึ้นจากการให้ความร้อน ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของเมล็ด Canola ที่ได้มีค่าอยู่ที่ 0.93 - 0.99



รูปที่ 2.10 ชุดทดลองของ Yu *et al.* [20]

Walach [21] นำเสนอการวัดค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของวงจรีเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ชุดอุปกรณ์ทดลองประกอบด้วย (1) กล้อง AGEMA THV900LW ในช่วงความยาวคลื่น 8 -12 μm โดยใช้ MCT Cryogenically cooled sensor 230 elements/line ความไวในการตรวจจับอุณหภูมิ 0.08 K พร้อมเลนส์ระยะใกล้ (2) กล่องฉนวนอุณหภูมิ (Insulated measurement box, AGEMA) ทำหน้าที่รักษาอุณหภูมิและให้ความร้อน โดยใช้อากาศอุ่นผ่านวงจรีเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กให้มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิแวดล้อม และมีการให้ความร้อนจากทางด้านหลังโดยใช้การนำความร้อน ตำแหน่งทิศทางการวางกล้องถ่ายภาพความร้อนทำมุม 90° กับวงจรีเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก

ขึ้นตัวอย่างที่นำมาทดสอบทาแล็กเกอร์ เพื่อลดผลการสะท้อนพลังงานจากที่อื่นเข้ามา จากนั้นจ่ายไฟให้วงจรีเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กทำงาน รोजนอุณหภูมิคงที่ จึงบันทึกสัญญาณที่แสดงถึงอุณหภูมิ คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน และทำการเปรียบเทียบวิธีการวัด 2 วิธี คือ การวัดครั้งเดียวขณะวงจรทำงานและการวัดสองครั้งแล้วนำค่ามาเฉลี่ย ซึ่งจากการทดลอง พบว่า วิธีการวัดค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนแบบวัดสองครั้งได้ผลที่แม่นยำมากกว่า



รูปที่ 2.11 การตรวจสอบวงจรรีเลย์ทรอนิกส์ขนาดเล็กด้วยกล้องถ่ายภาพอินฟราเรด [21]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบชุดทดลอง

ในบทนี้แนะนำเสนอการออกแบบชุดทดลอง วิธีการทดลองเกี่ยวกับการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนในย่านอินฟราเรด การทดลองเพื่อศึกษาผลของมุมมอง ความละเอียดของภาพความร้อน (IFOV และ FOV) และผลของสภาวะแวดล้อมรอบวัตถุ ได้แก่ การติดตั้งหน้าต่างอินฟราเรด (IR window) และลักษณะพื้นผิวของห้องควบคุมสภาวะแวดล้อมที่มีต่อการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีอินฟราเรด โดยเริ่มจากการนำเสนอเครื่องมือวัดและอุปกรณ์สำคัญที่ใช้ในชุดทดลอง การออกแบบชุดทดลอง และวิธีการทดลองโดยเรียงลำดับหัวข้อตามวัตถุประสงค์ของประเด็นวิจัย

3.1 เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดสอบ

3.1.1 กล้องถ่ายภาพอินฟราเรด

กล้องถ่ายภาพอินฟราเรดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ กล้องอินฟราเรด รุ่น Ti400 (Fluke Corporation, USA) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 (ก) โดยตัวตรวจจับอินฟราเรดรับแถบความยาวคลื่นในช่วง 7.5 ถึง 14 ไมโครเมตร มีช่วงการวัดอุณหภูมิ -20 ถึง 1,200 องศาเซลเซียส และความถูกต้อง ± 2 องศาเซลเซียส ที่ 25 องศาเซลเซียส หรือ 2% โดยเลือกใช้ค่าที่มากกว่า ตัวตรวจจับรังสีเป็นแบบ Focal Plane Array, uncooled microbolometer, 320 x 240 พิกเซล, FOV 24 องศา (แนวนอน) x 17 องศา (แนวตั้ง), ความละเอียดเชิงพื้นที่ (IFOV) 1.31 mRad และระยะโฟกัสใกล้สุด 15 ซม. โดยในการทดลองที่ 2 ซึ่งเป็นการทดลองเพื่อศึกษาผลของมุมมองและความละเอียดของภาพความร้อน (IFOV และ FOV) ที่มีต่อการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีอินฟราเรด ได้มีการใช้อุปกรณ์เสริม คือ เลนส์ (telephoto IR) ที่มี FOV 12 องศา (แนวนอน) x 9 องศา (แนวตั้ง), IFOV 0.65 mRad และระยะโฟกัสใกล้สุด 45 ซม. ความไวทางความร้อน (Thermal Sensitivity) เท่ากับ 0.05 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ค่าความละเอียดของภาพความร้อนที่ระยะทางแตกต่างกันแสดงในตารางที่ 3.1 โดยตัวอักษร a ถึง d ในตารางหมายถึง มุมมอง, มุมมองที่ตัวตรวจจับเดียว, ระยะแนวนอน x ระยะแนวตั้ง และ เลนส์ระยะไกล ตามลำดับ

ตารางที่ 3.1 ความละเอียดของภาพความร้อน (Ti400) ที่ระยะห่างระหว่างวัตถุกับตัวตรวจจับต่าง ๆ

Distance (cm)	FOV ^a (cm)	IFOV ^b (cm)
50	21x16 ^c	0.07 x 0.07 ^c
100	42x31	0.13 x 0.13
300	126x94	0.39 x 0.39
300 ^d	63x47	0.20 x 0.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 เทอร์โมคัปเปิล

เทอร์โมคัปเปิลเป็นอุปกรณ์วัดอุณหภูมิแบบสัมผัสชนิดหนึ่ง ในงานวิจัยนี้เลือกใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K หุ้มด้วยฉนวนใยหิน โดยค่าอุณหภูมิที่วัดได้จากเทอร์โมคัปเปิลใช้สำหรับการสอบเทียบการวัดอุณหภูมิที่ผิวของวัตถุด้วยกล้องถ่ายภาพอินฟราเรด โดยเทอร์โมคัปเปิลเชื่อมต่ออยู่กับเทอร์โมมิเตอร์ Fluke รุ่น 52 II ซึ่งสามารถรับสัญญาณไฟฟ้าจากเทอร์โมมิเตอร์ได้ 2 Channel และมีช่วงวัดอุณหภูมิ $-250^{\circ}\text{C} - 1,767^{\circ}\text{C}$ ตัวอย่างภาพเทอร์โมมิเตอร์และสายเทอร์โมคัปเปิลที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงในรูปที่ 3.1 (ข)

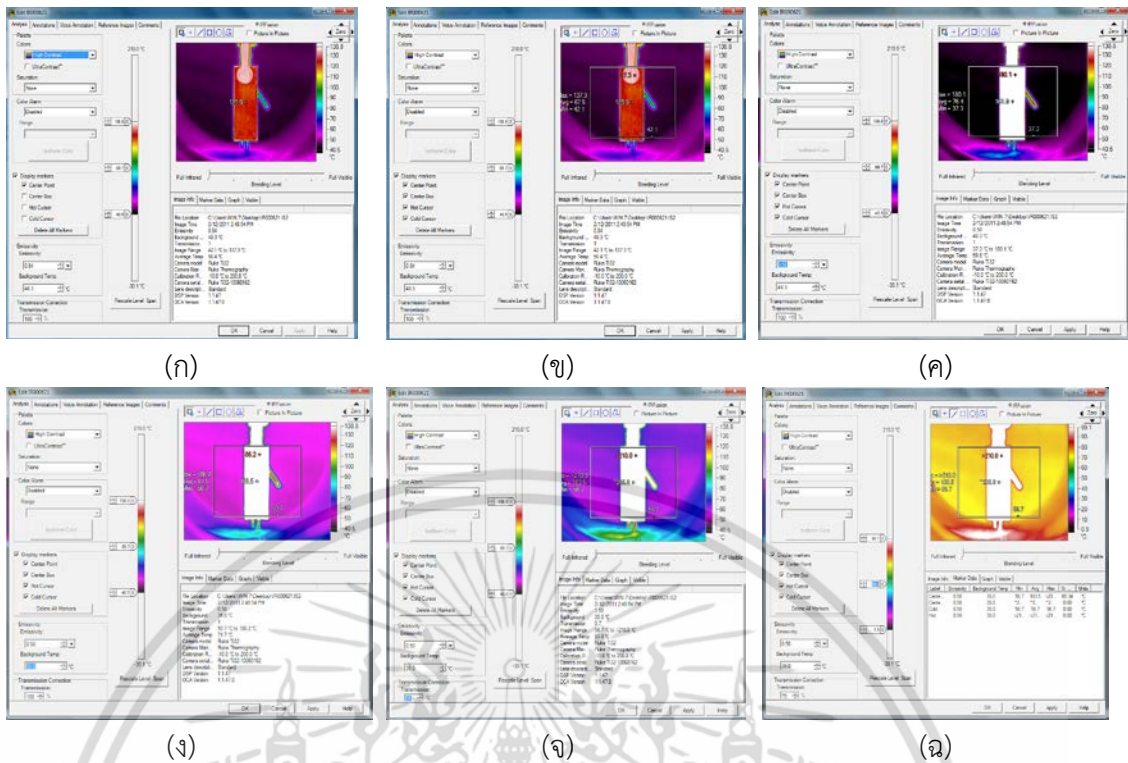


รูปที่ 3.1 เครื่องมือวัดอุณหภูมิ (ก) กล้องถ่ายภาพความร้อน และ (ข) เทอร์โมคัปเปิลจะเชื่อมต่ออยู่กับเทอร์โมมิเตอร์

3.1.3 โปรแกรมสนับสนุนการวิเคราะห์ภาพถ่ายความร้อน

งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรมวิเคราะห์ภาพถ่ายความร้อน Fluke SmartView® 3.5 สำหรับการวิเคราะห์ภาพความร้อนด้วยการปรับแต่งภาพที่ได้จากกล้อง เช่น การวิเคราะห์เฉดสีที่ปรากฏบนภาพ การปรับ level และการปรับ Span รวมถึงการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ค่า emissivity ของวัตถุที่ต้องการวัดอุณหภูมิ, ค่าอุณหภูมิแวดล้อมหรือ background temperature และ ค่า transmission เป็นต้น โดยเมื่อปรับแต่งภาพด้วยคำสั่งต่าง ๆ รวมถึงเมื่อปรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ภาพความร้อนจะแสดงผลในลักษณะที่เปลี่ยนแปลงไปตามคำสั่งหรือพารามิเตอร์ที่ปรับเปลี่ยน ดังแสดงในรูปที่ 3.2 และนอกจากโปรแกรมการวิเคราะห์ภาพถ่ายความร้อนนี้จะสามารถปรับแต่งภาพและแสดงผลของภาพตามการเปลี่ยนของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ผู้ใช้เป็นผู้กำหนดเองแล้ว โปรแกรมยังสามารถเลือกจุดหรือบริเวณที่สนใจเฉพาะได้ หรือเลือกให้การแสดงผลของข้อมูลพลังงานในแต่ละบริเวณแสดงในรูปแบบของกราฟได้ด้วยเช่นกัน รวมถึงผู้ใช้สามารถเลือกหน่วยของอุณหภูมิการวัดได้ตามที่ต้องการได้อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 การปรับภาพเพื่อการวิเคราะห์ภาพถ่ายความร้อน (ก) การเลือกภาพ (ข) การเลือกบริเวณที่ต้องการวิเคราะห์ความร้อน (ค) การปรับค่า emissivity (ง) การปรับค่า background temperature (จ) การปรับค่า transmission และ (ฉ) การปรับ span ของภาพความร้อน

3.1.4 เครื่องวิเคราะห์ห้องค์ประกอบวัสดุ

เครื่อง Energy Dispersive X-ray Analyzer (EDX) (รูปที่ 3.3) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมี การวิเคราะห์วัสดุ หรือคราบสกปรก โดยงานวิจัยนี้ใช้เครื่อง EDX สำหรับทดสอบการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของอุปกรณ์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ผ่านการใช้งานมาแล้วและยังไม่ผ่านการใช้งาน โดยทำการทดสอบที่ศูนย์พัฒนาและวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุ (ศพว.) สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.)

3.1.5 เครื่องมือวัดความขรุขระบนพื้นผิวของวัตถุ

งานวิจัยนี้ใช้เครื่องมือวัดความขรุขระ (Kosaka Surfcoorder SE-40D) สำหรับวิเคราะห์คุณลักษณะด้านความหยาบผิวที่บริเวณผิวของอุปกรณ์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าทั้งที่ผ่านการใช้งานและยังไม่ผ่านการใช้งาน

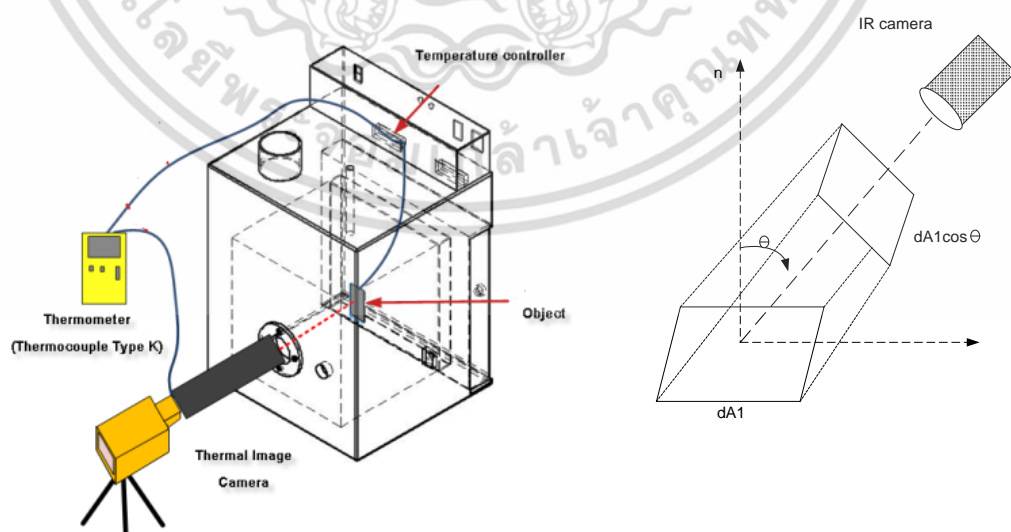


รูปที่ 3.3 เครื่อง Energy Dispersive X-ray Analyzer (EDX)

3.2 อุปกรณ์ทดลอง

3.2.1 การประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีอินฟราเรด

ชุดอุปกรณ์ทดลองสำหรับการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีอินฟราเรดแสดงดังรูปที่ 3.4 ประกอบด้วย ตู้ควบคุมสภาวะแวดล้อมและควบคุมอุณหภูมิ เพื่อให้แน่ใจว่าอุณหภูมิของวัตถุตัวอย่างและอุณหภูมิสะท้อนคงที่ในระหว่างการทดลอง ภายในตู้ควบคุมอุณหภูมิตั้งชุดจับยึดชิ้นวัตถุให้อยู่ในตำแหน่งที่กำหนดไว้ โดยวัตถุอุณหภูมิที่ผิวสัมผัสกับวัตถุด้วยโพรบเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ตู้ควบคุมอุณหภูมินี้สามารถให้ความร้อนได้ถึง 300°C พื้นผิวภายในตู้ทำจากสแตนเลสเพื่อลดการแผ่รังสีจากพื้นผิวตู้ไปยังวัตถุเป้าหมาย

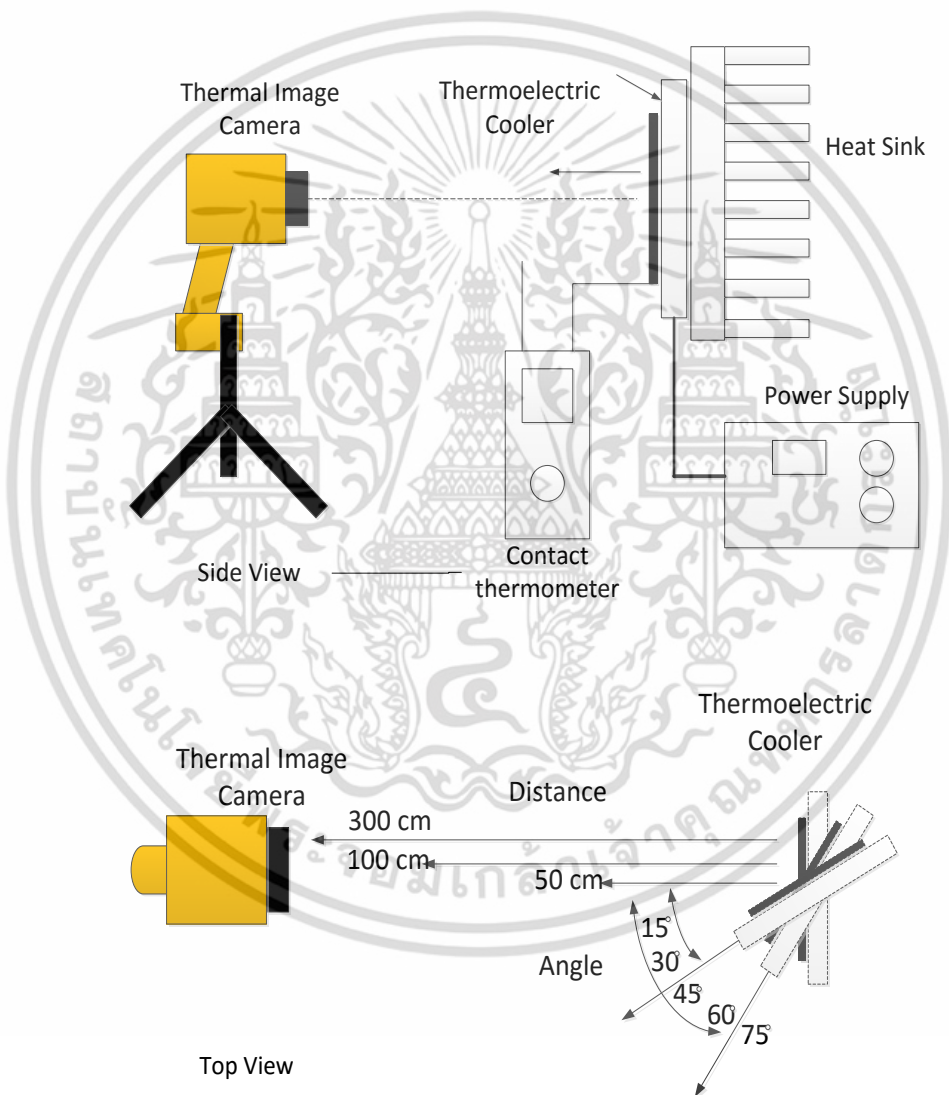


รูปที่ 3.4 ชุดอุปกรณ์ทดลองการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีอินฟราเรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 การศึกษาผลของมุมมองและความละเอียดของภาพอินฟราเรด

ชุดทดลองเพื่อศึกษาผลของมุมมอง (Viewing Angle) และความละเอียดของภาพอินฟราเรด แสดงดังรูปที่ 3.4 ประกอบด้วย กล้องอินฟราเรด ขาตั้งกล้อง และชุดกำเนิดความร้อน โดยตำแหน่งของกล้องถ่ายภาพอินฟราเรดติดตั้งอยู่ที่ด้านหน้าของตัวอย่างที่วางติดอยู่กับ Thermoelectric cooling device (ซึ่งต่อไปจะใช้ TEC เป็นตัวย่อ) ซึ่งใช้เป็นแหล่งความร้อน ควบคุมอุณหภูมิโดยใช้แหล่งจ่ายไฟ DC (24 V 2.1A) ที่มีวงจรควบคุมกระแสไฟฟ้า และเพื่อให้สามารถวัดค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีในทิศทางต่างๆ ได้ จึงออกแบบให้อุปกรณ์ยึดจับตัวอย่างทดสอบที่ยึดบน TEC สามารถปรับทิศทางในมุมมองต่างๆ ได้ดังแสดงในรูปที่ 3.5

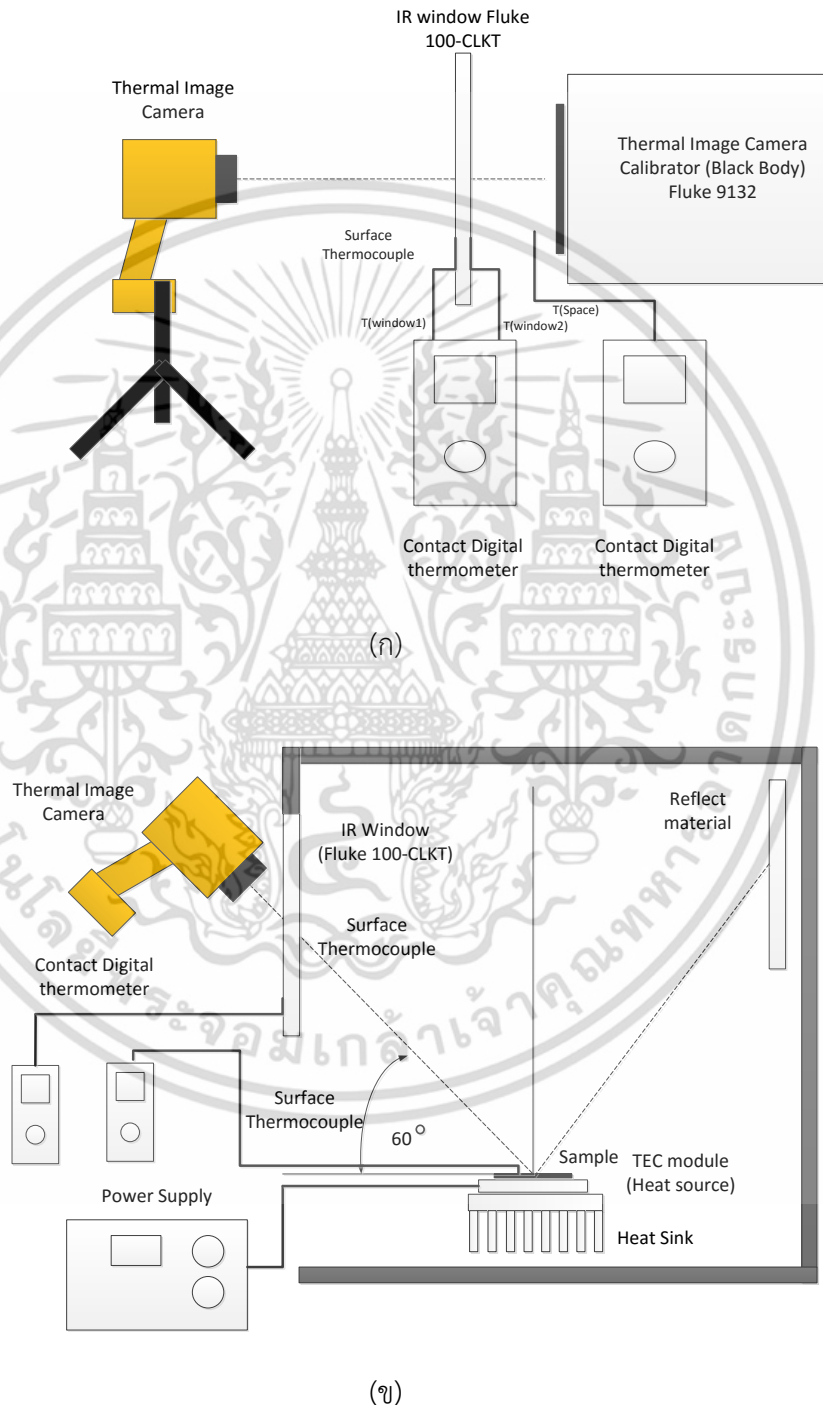


รูปที่ 3.5 ชุดอุปกรณ์ทดลองเพื่อศึกษาผลของมุมมองและความละเอียดของภาพอินฟราเรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 การศึกษาผลของสภาวะแวดล้อมรอบวัตถุ

การทดลองนี้ใช้ชุดอุปกรณ์ทดลอง จำนวน 2 ชุด ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก 5 ส่วน ได้แก่ กล้องอินฟราเรด, เทอร์โมคัปเปิลชนิด K, ขาตั้งกล้อง, IR-windows (Fluke, CLKT Type: 3, 12 indoor/outdoor use) และชุดกำเนิดความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ชุดอุปกรณ์ทดลองเพื่อศึกษาผลของสภาวะแวดล้อมรอบวัตถุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยรูปที่ 3.6 (ก) แสดงแผนผังการติดตั้งชุดอุปกรณ์ทดลองสำหรับศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติการแผ่รังสีอินฟราเรดผ่าน IR-windows (พลังงานการแผ่รังสีและพลังงานการส่งผ่านรังสี) ที่อุณหภูมิต่างๆ โดยติดตั้งกล้องอินฟราเรดบริเวณด้านหน้า ($\theta = 0^\circ$) Blackbody (model 9132, HART Scientific; USA) ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีเท่ากับ 0.95 สำหรับรูป 3.6 (ข) แสดงแผนผังการติดตั้งชุดอุปกรณ์ทดลองสำหรับศึกษาผลของการสะท้อนที่วัตถุทดสอบ โดยติดตั้งกล้องอินฟราเรดทำมุม 45° ($\theta = 45^\circ$) [5] กับวัตถุเป้าหมายที่ได้รับความร้อนจาก TEC และควบคุมอุณหภูมิโดยใช้แหล่งจ่ายไฟ DC (24 V 2.1A) ที่มีวงจรควบคุมกระแสไฟฟ้า สำหรับกล้องควบคุมสภาวะแวดล้อม ออกแบบให้สามารถปรับเปลี่ยนวัสดุที่ใช้ภายในกล่องควบคุมได้ โดยใช้วัสดุที่มีสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีสูงและต่ำ เพื่อพิจารณาผลของการสะท้อนที่เกิดขึ้นบนวัตถุเป้าหมาย

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 วิธีการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีอินฟราเรด

วัสดุที่ใช้ในการทดสอบการวัดสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีอินฟราเรด มีดังนี้ แผ่นเหล็ก แผ่นทองแดง แผ่นสแตนเลส แผ่นอลูมิเนียม และวัตถุทองเหลือง และอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ได้แก่ terminal lug น็อต และแหวนสกรู โดยเป็นอุปกรณ์ใหม่และอุปกรณ์ที่มีอายุการใช้งาน 3 ปี ซึ่งส่งผลให้ลักษณะพื้นผิวของอุปกรณ์มีความแตกต่างกัน นั่นคือ ความขรุขระของพื้นผิวมีความแตกต่างกัน โดยทดสอบความขรุขระด้วยเครื่อง Kasaka Surfcorer SE-40D ที่ความเร็วหัววัด (speed) 0.5 mm/s และวิเคราะห์พื้นผิวด้วยเครื่อง Energy Dispersive X-ray Analyser (EDX) เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพของพื้นผิวของอุปกรณ์ที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว เช่น ความเสื่อมสภาพที่เกิดจากการทำปฏิกิริยากับอากาศ การกัดกร่อน หรือความหนาของคราบสิ่งสกปรกที่เคลือบอยู่บนผิว ซึ่งจะส่งผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีอินฟราเรดเปลี่ยนแปลงไป

ทำการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีอินฟราเรดของวัตถุในช่วงอุณหภูมิ $50 - 200^\circ\text{C}$ โดยการให้ความร้อนกับวัตถุที่ยึดติดไว้ภายใต้ตู้จนวนต์อุณหภูมิ 200°C และใช้กล้องอินฟราเรดที่ติดตั้งทำมุม 0° กับพื้นผิวของตัวอย่างทดสอบวัดสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีในช่วงของการลดอุณหภูมิตัวอย่างทุกๆ 10°C จนวนต์อุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้องจึงเป็นอันสิ้นสุดการทดลอง โดยในขณะที่เซนเซอร์ชนิดอินฟราเรดตรวจจับรังสีความร้อนที่วัตถุแผ่ออกมา จะทำการวัดอุณหภูมิที่ผิวของวัตถุ ที่ผนังตู้ด้านใน และที่ตัวกล้องถ่ายภาพความร้อน (อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม) โดยใช้โพรบวัดอุณหภูมิแบบสัมผัสเทอร์โมคัปเปิลชนิด K จากนั้นทำการปรับค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีที่กล้องถ่ายภาพอินฟราเรดจนกระทั่งอุณหภูมิของวัตถุที่วัดได้จากกล้องถ่ายภาพอินฟราเรดมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับอุณหภูมิวัตถุที่วัดได้จากโพรบวัดอุณหภูมิแบบสัมผัส โดยพารามิเตอร์ที่สำคัญ คือ อุณหภูมิสะท้อนหรืออุณหภูมิพื้นหลัง (T_{BG}) ที่ต้องกำหนดให้กับกล้องถ่ายภาพอินฟราเรด ซึ่งสามารถหาได้จากการกำหนดค่า ϵ ของวัตถุตั้งแต่ 0.1 - 0.95 และปรับค่าอุณหภูมิพื้นหลังจนกว่าอุณหภูมิที่วัดได้จากกล้องอินฟราเรดจะเท่ากับอุณหภูมิที่วัดได้จากเทอร์โมคัปเปิลแบบสัมผัส จากนั้นนำค่าอุณหภูมิพื้นหลังที่อ่านได้จากการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดค่า \mathcal{E} ต่างๆ มาคำนวณเป็นค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิพื้นหลัง ซึ่งกำหนดให้เป็นค่าอุณหภูมิพื้นหลังที่แท้จริงสำหรับการทดลองนั้นๆ จากนั้นนำค่า T_{BG} เฉลี่ยที่ได้มากำหนดให้เป็นค่าชดเชยสำหรับการพิจารณาผลของพลังงานสะท้อน และดำเนินการประมาณค่า \mathcal{E} ของวัตถุที่อุณหภูมิใดๆ ด้วยการปรับค่า \mathcal{E} ภายในกล้องอินฟราเรดจนค่าอุณหภูมิที่วัดได้เท่ากับอุณหภูมิที่วัดได้จากเทอร์โมคัปเปิล จึงได้ค่า \mathcal{E} ของวัตถุนั้นๆ ณ อุณหภูมิที่กำหนดไว้ บันทึกภาพความร้อนและอุณหภูมิที่เวลาจริงของตัวอย่างเพื่อทำการวิเคราะห์ภาพเพิ่มเติมภายหลังจากการทดลองเสร็จสิ้น ทำการทดลอง 3 ซ้ำ และคำนวณค่า \mathcal{E} เฉลี่ยที่ได้จากการทดลอง

3.3.2 วิธีการศึกษาผลของมุมมองและความละเอียดของภาพอินฟราเรด

การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของวัตถุตัวอย่างเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงมุมมอง จากนั้นศึกษาผลของ IFOV และ FOV ที่มีต่อการเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสี โดยการเปลี่ยนระยะห่างระหว่างวัตถุกับตัวตรวจจับและประเภทของเลนส์ ในระหว่างการทดลองได้สอบเทียบการแผ่รังสีของวัตถุโดยใช้ blackbody รุ่น 9132 (HART Scientific, USA) เพื่อให้แน่ใจว่าผลการทดลองที่ได้ไม่ได้รับผลกระทบใดๆ จากเครื่องมือวัด

ทำการทดลองโดยวัดอุณหภูมิของพื้นผิวของตัวอย่างด้วยกล้องอินฟราเรด พร้อมกับการวัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิลแบบสัมผัสชนิด K เพื่อบันทึกอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจริง ซึ่งเทอร์โมคัปเปิลจะถูกติดไว้บนพื้นผิวตัวอย่างใกล้กับพื้นที่วัดอุณหภูมิด้วยตัวตรวจจับอินฟราเรด โดยค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของวัตถุที่ได้จากการทดลองในรูปแบบต่างๆ จะได้จากการปรับอุณหภูมิที่ปรากฏบนกล้องอินฟราเรด จนกระทั่งอุณหภูมิที่วัดได้เท่ากับอุณหภูมิที่แท้จริงของวัตถุซึ่งได้จากการวัดด้วยเทอร์โมคัปเปิล สำหรับอุณหภูมิสะท้อนหรือบางครั้งเรียกว่าอุณหภูมิพื้นหลัง (T_{BG}) เป็นพารามิเตอร์อีกหนึ่งตัวที่มีผลต่อการวัดค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสี ดังนั้น ในระหว่างการทดลองต้องตรวจสอบค่ารังสีที่สะท้อนจากสิ่งแวดล้อมโดยรอบอยู่เสมอ เพื่อใช้สำหรับการชดเชยผลของพลังงานสะท้อน ซึ่งในการทดลองนี้ T_{BG} มีค่าอยู่ระหว่าง 25.1 องศาเซลเซียส ถึง 26.4 องศาเซลเซียส

ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองนี้มี 2 ชนิด ได้แก่ แผ่นโลหะทาสีดำรูปสี่เหลี่ยม ซึ่งใช้เป็นตัวแทนของกลุ่มตัวอย่างที่มีค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีสูง และแผ่นเหล็กชุบสังกะสีใช้เป็นตัวแทนของกลุ่มตัวอย่างที่มีค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีต่ำ ของอุปกรณ์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า เช่น PG clamp, ตัวเชื่อมต่อ, หรือสกรู โดยการเคลือบพื้นผิวตัวอย่างด้วยสีดำ มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีที่พื้นผิว ทำการทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของตัวอย่างทดสอบที่อุณหภูมิพื้นผิวเท่ากับ 50 องศาเซลเซียส ในทิศทางตั้งฉากกับวัตถุ (normal direction) และ 15, 30, 45, 60 และ 75 องศา เทียบกับ normal direction ที่ระยะห่างระหว่างวัตถุกับตัวตรวจจับเท่ากับ 50 ซม. 100 ซม. และ 300 ซม. ตามลำดับ ทำการทดลองตัวอย่างละ 3 ซ้ำ และคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนเฉลี่ยที่ได้จากการทดลอง

3.3.3 วิธีการศึกษาผลของสภาวะแวดล้อมรอบวัตถุ

การทดลองแบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การศึกษาการเปลี่ยนแปลงพลังงานการแผ่รังสีและพลังงานการส่งผ่านรังสีผ่าน IR-windows ที่อุณหภูมิต่างๆ จากรูปที่ 3.6 (ก) ปรับอุณหภูมิที่พื้นผิวของ blackbody (T_{BB}) ซึ่งเป็นอุปกรณ์สอบเทียบให้มีอุณหภูมิเท่ากับ 50, 100, 150, 200 และ 250 °C ตามลำดับ และวัดอุณหภูมิด้วยกล้องอินฟราเรด โดยในขณะเดียวกันได้ทำการวัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิลใน 3 บริเวณ ได้แก่ อุณหภูมิของอากาศที่อยู่ระหว่าง IR-windows กับ blackbody อุณหภูมิที่พื้นผิวของ IR-windows บริเวณด้านที่อยู่ใกล้กับ blackbody และด้านที่อยู่ใกล้กับกล้องอินฟราเรด ตัวตรวจจذبอินฟราเรดติดตั้งในทิศทางตั้งฉากกับวัตถุ (normal direction) ทำหน้าที่รับรังสีอินฟราเรดที่แผ่ออกจาก blackbody ผ่าน IR-windows และแสดงผลของอุณหภูมิแต่ละตำแหน่งในลักษณะของพื้นที่ความร้อน โดยกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีอินฟราเรดของ blackbody ที่กล้องอินฟราเรดให้มีค่าเท่ากับ 0.95 ปรับค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านรังสีอินฟราเรด (Transmission) ที่กล้องอินฟราเรด จนอุณหภูมิที่วัดได้จากกล้องอินฟราเรดแสดงค่าการวัดเท่ากับอุณหภูมิที่กำหนดไว้ที่อุปกรณ์สอบเทียบ และบันทึกค่า Transmission ที่อ่านได้

สำหรับการทดลองชุดที่ 2 สำหรับรูป 3.6 (ข) ซึ่งเป็นการศึกษาผลของพลังงานการสะท้อนรังสีที่มีต่อการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีอินฟราเรดของวัสดุต่างๆ โดยทำการทดลองวัดสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของวัตถุ ซึ่งอยู่ในตู้ควบคุมสภาวะแวดล้อมที่ผนังภายในบุด้วยวัสดุที่มีสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีแตกต่างกัน ที่อุณหภูมิ 30 และ 50 °C ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมี 2 ชนิด ได้แก่ แผ่นโลหะทาสีดำรูปสี่เหลี่ยม ซึ่งใช้เป็นตัวแทนของกลุ่มตัวอย่างอุปกรณ์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่มีค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีสูง เช่น bail clamp และ connector splice compression) และแผ่นเหล็กชุบสังกะสีใช้เป็นตัวแทนของกลุ่มตัวอย่างอุปกรณ์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่มีค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีต่ำ เช่น drop fuse และ terminal lug of load break switch SF6 การทดลองนี้แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 อุณหภูมิตัวอย่าง (T_S) ต่ำกว่าอุณหภูมิพื้นผิวตู้ควบคุมสภาวะแวดล้อม (T_C); ($T_S < T_C$)

ส่วนที่ 2 อุณหภูมิตัวอย่าง (T_S) สูงกว่าอุณหภูมิพื้นผิวตู้ควบคุมสภาวะแวดล้อม (T_C); ($T_S > T_C$)

ส่วนที่ 3 อุณหภูมิตัวอย่าง (T_S) เท่ากับอุณหภูมิพื้นผิวตู้ควบคุมสภาวะแวดล้อม (T_C); ($T_S = T_C$)

ผลการทดลองที่ได้จากชุดทดลองที่ 1 พบว่า ค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านรังสีอินฟราเรดผ่าน IR-windows มีค่าเท่ากับ 50 สำหรับทุกอุณหภูมิ ดังนั้น ในการทดลองนี้จึงกำหนดค่า Transmission ภายในกล้องอินฟราเรดให้มีค่าเท่ากับ 50 ตลอดการทดลอง และกำหนดอุณหภูมิการสะท้อนรังสีหรืออุณหภูมิแวดล้อมโดยรอบวัตถุ ให้มีค่าเท่ากับอุณหภูมิของสภาวะแวดล้อมซึ่งกำหนดไว้ที่อุณหภูมิห้อง (30 °C) และ 50 °C โดยสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีอินฟราเรดของของแต่ละวัตถุพิจารณาจากพื้นที่การแผ่รังสี 0.5 ตารางเซนติเมตร ซึ่งเลือกจากพื้นที่บริเวณกึ่งกลางของภาพถ่ายความร้อน และปรับค่าอุณหภูมิที่วัดได้จากกล้องอินฟราเรดจนกระทั่งอุณหภูมิที่อ่านได้มีค่าเท่ากับอุณหภูมิที่วัดได้จากเทอร์โมมิเตอร์ซึ่งเป็นการวัดอุณหภูมิแบบสัมผัส ทำการทดลอง 3 ซ้ำ และคำนวณหาค่าเฉลี่ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

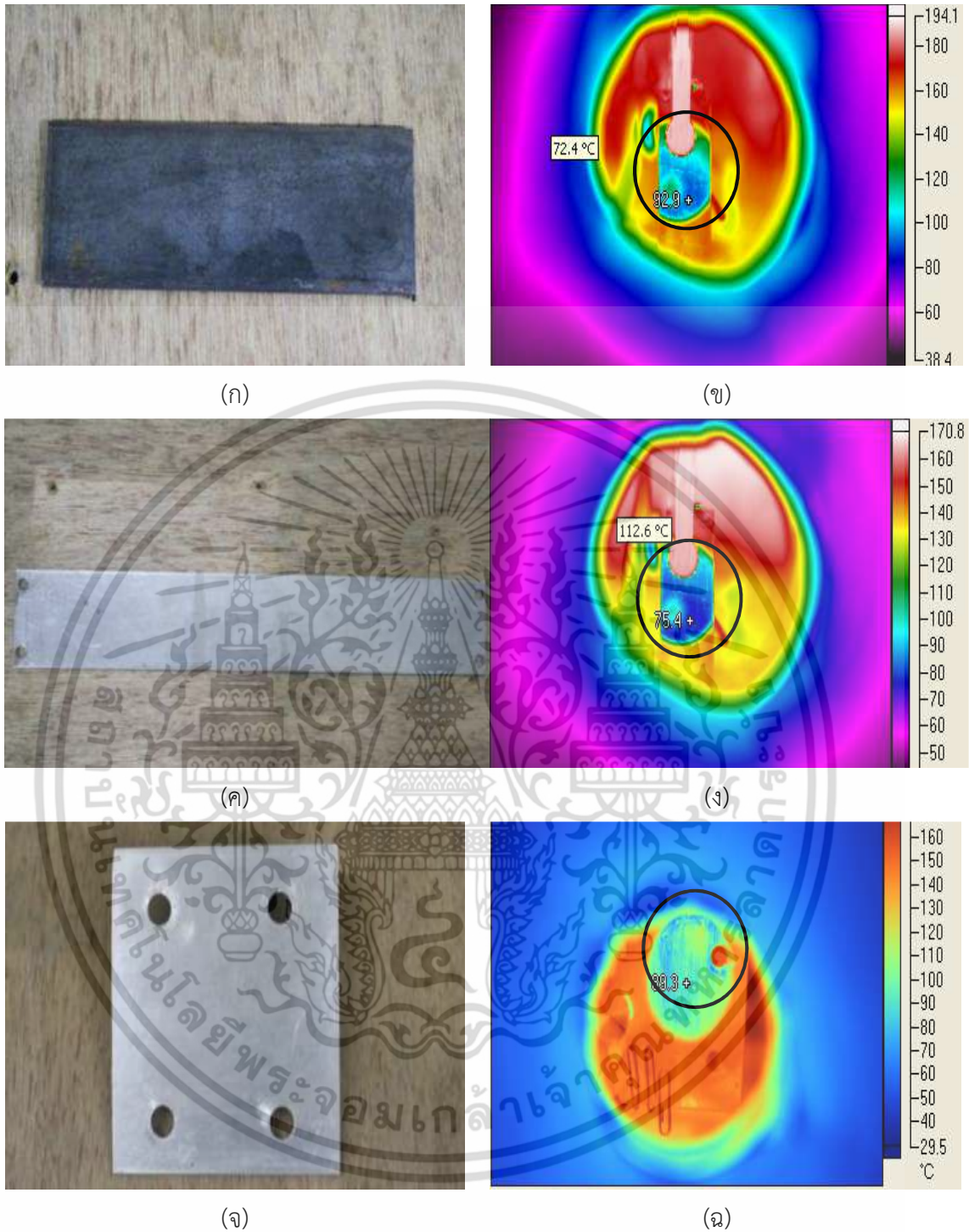
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 การประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีอินฟราเรด

จากการศึกษาวิธีการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนโดยใช้กล้องถ่ายภาพอินฟราเรดและนำผลของอุณหภูมิสะท้อนมาพิจารณาร่วมด้วย โดยทำการทดสอบกับวัสดุชนิดต่าง ๆ ได้แก่ แผ่นเหล็ก แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม แผ่นทองแดง แผ่นอะลูมิเนียม วัตถุทองเหลือง และชิ้นส่วนของอุปกรณ์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าทั้งของใหม่และของที่ผ่านการใช้งานแล้วประมาณ 3 ปี ได้แก่ cable lug, P.G. connector, some part of fuse holder และ disconnecting switch รวมถึงศึกษาผลของลักษณะเชิงพื้นผิว (Surface roughness) ที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน ซึ่งทดสอบกับอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ได้แก่ terminal lug น็อต และแหวนสกรู

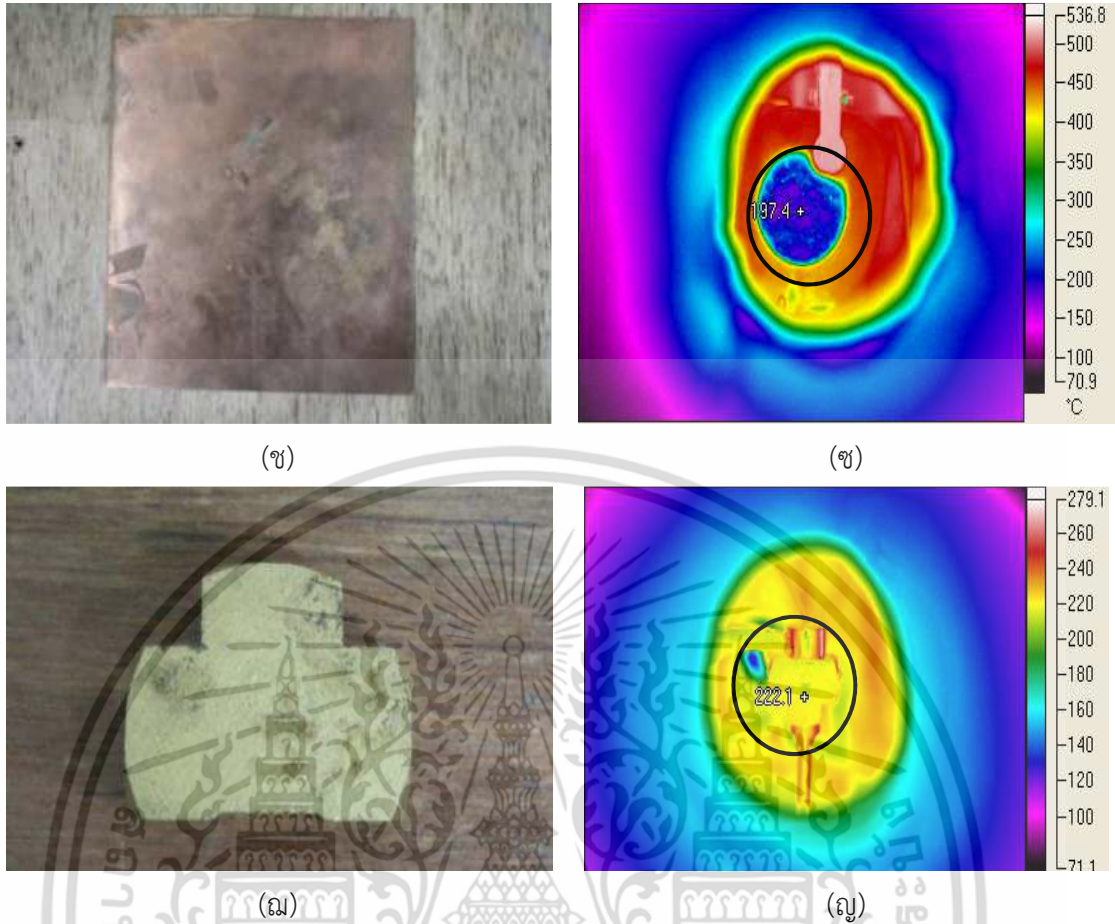
ผลทดสอบการวัดสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีอินฟราเรดของแผ่นเหล็ก แผ่นทองแดง แผ่นสแตนเลส แผ่นอะลูมิเนียม และวัตถุทองเหลือง แสดงดังรูปที่ 4.1 (ก ค จ ซ และ ฉ) ตามลำดับ โดยในภาพความร้อนของวัสดุทั้งหมดปรากฏภาพการสะท้อนของรังสีอินฟราเรด ซึ่งเป็นการสะท้อนของหน้ากล้องบนพื้นผิววัตถุดังแสดงในรูปที่ 4 (ข ง ฉ ซ และ ญ) ยกเว้นทองเหลืองซึ่งมีลักษณะเป็นผิวเรียบค่อนข้างวาว มีโทนสีของภาพความร้อนไปในทิศทางเดียวกัน โดยสีน้ำเงินแสดงถึงบริเวณที่ได้รับการสะท้อนจากหน้ากล้องอินฟราเรดซึ่งติดตั้งอยู่ภายนอกตู้ควบคุมสถานะแวดล้อมและมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าวัตถุ และเมื่อทดลองปรับค่า ε ตามวิธีการทดลองที่กำหนดไว้ พบว่า สัมประสิทธิ์การแผ่รังสี ($\varepsilon_{7.5-14\mu m}$) ของวัสดุทางวิศวกรรมทั่วไปในช่วงอุณหภูมิ 50 ถึง 200°C มีค่าดังแสดงในรูปที่ 4.2 โดยแผ่นเหล็กมีค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีสูงที่สุด (0.81-0.88) แผ่นทองแดงมีค่าต่ำที่สุด (0.16-0.28) ซึ่งค่าดังกล่าวสอดคล้องกับที่ปรากฏในเอกสารวิจัยอื่น [22, 23, 24, 25] สามารถสรุปได้ว่าค่า ε ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ และมีค่าค่อนข้างคงที่ตลอดย่านอุณหภูมิที่ไม่สูงมากนัก

สำหรับการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของอุปกรณ์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ยังไม่ผ่านการใช้งานและที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว 3 ปี โดยใช้วิธีเดียวกับการวัสดุวิศวกรรมแสดงผลดังตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.3 – 4.6 โดยอุปกรณ์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าเมื่อนำไปใช้งานจะสัมผัสกับอากาศ ความชื้น ฝุ่นละอองและมลภาวะต่างๆ เช่น ไอเสียจากรถยนต์ เป็นต้น ซึ่งตัวแปรเหล่านี้ล้วนก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติของวัสดุทั้งสมบัติทางกายภาพและทางเคมี โดยการเปลี่ยนแปลงสมบัติดังกล่าวที่บริเวณพื้นผิวของวัตถุจะส่งผลโดยตรงต่อสมบัติการแผ่รังสีของวัตถุ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพที่พื้นผิว ได้แก่ ค่าความขรุขระ (roughness) และการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีได้แก่ การเกิดออกไซด์ที่ผิว เป็นต้น

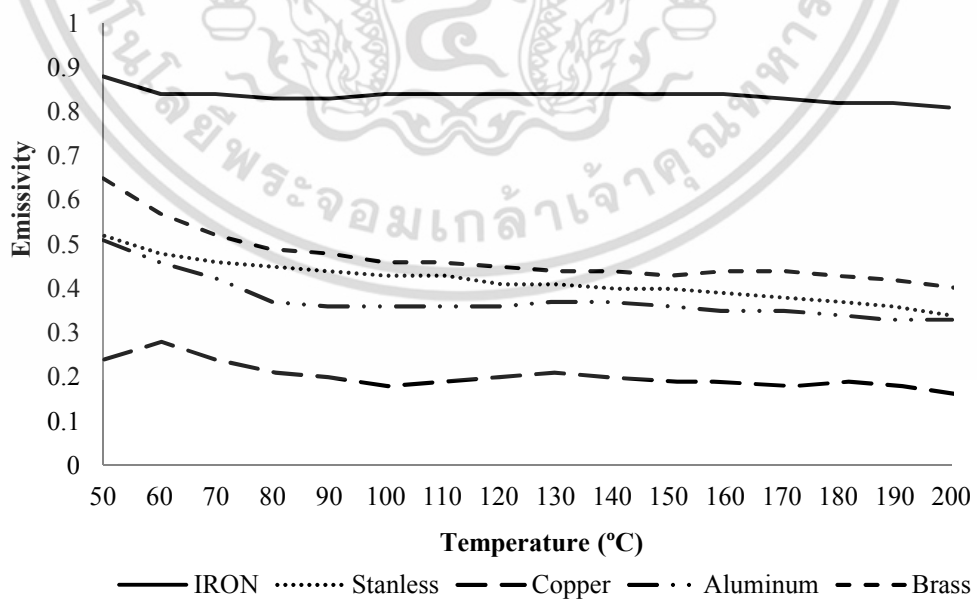


รูปที่ 4.1 ภาพจริงและภาพถ่ายความร้อนของ (ก และ ข) แผ่นเหล็ก; (ค และ ง) แผ่นสแตนเลส; (จ และ ฉ) แผ่นอลูมิเนียม; (ช และ ซ) แผ่นทองแดง และ (ฅ และ ฌ) วัตถุทองเหลือง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 (ต่อ) ภาพจริงและภาพถ่ายความร้อนของ (ก และ ข) แผ่นเหล็ก; (ค และ ง) แผ่นสแตนเลส; (จ และ ฉ) แผ่นอลูมิเนียม; (ช และ ซ) แผ่นทองแดง และ (ฅ และ ญ) วัตถุทองเหลือง



รูปที่ 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของวัสดุชนิดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

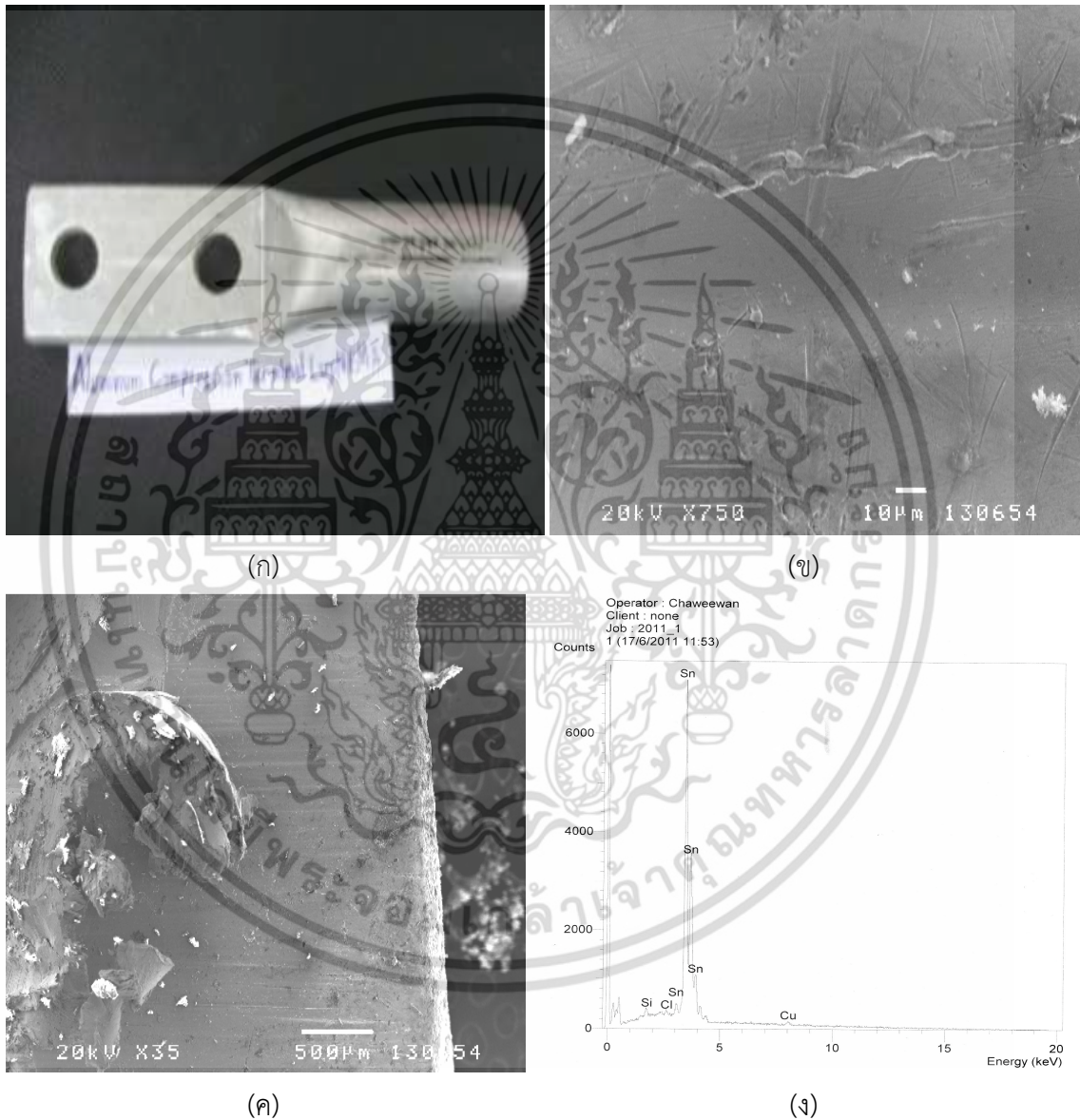
ตารางที่ 4.1 ค่าความขรุขระและค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของอุปกรณ์

ชนิดของอุปกรณ์	ความขรุขระ (R_a , μm)	สัมประสิทธิ์การแผ่รังสี ($\epsilon_{7.5-14\mu\text{m}}$)
ใหม่: Terminal lug	1.5	0.45-0.71
Nut	2.0	0.47-0.77
Bolt	1.4	0.47-0.77
ใช้งาน 3 ปี: Terminal lug	9.1	0.43-0.69
Nut	4.4	0.56-0.78
Bolt	3.2	0.56-0.78

พิจารณารูปที่ 4.3 (ข) พบว่า บริเวณผิวด้านนอกสุดของ terminal lug ที่ยังไม่ผ่านการใช้งานมีปริมาณของดีบุกซึ่งเคลือบผิวอยู่อย่างมาก และมีส่วนประกอบอื่นๆบ้างเล็กน้อย ส่วนชั้นในมีองค์ประกอบหลักเป็นทองแดง แต่ที่เห็นดีบุกอย่างเด่นชัดเนื่องจากการเคลือบผิวค่อนข้างหนา และจากกราฟจะเห็นได้ว่าไม่มีส่วนประกอบของออกซิเจนอยู่เลยแสดงว่ายังไม่มีเกิดการเกิดออกไซด์ขึ้นบนผิว และเมื่อส่งภาพถ่ายขยายจากเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) พบว่า terminal lug ที่ยังไม่ผ่านการใช้งานมีลักษณะพื้นผิวที่เรียบไม่มีส่วนของการเกิดสนิมหรือออกไซด์ขึ้นที่ผิววัสดุ ในขณะที่ terminal lug ที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว 3 ปี ดังแสดงในรูปที่ 4.4 (ข) พบว่า ไม่ได้มีส่วนประกอบของทองแดงเพียงอย่างเดียวแต่มีส่วนประกอบของออกซิเจนรวมอยู่ด้วย จึงทราบได้ว่าการเกิดออกไซด์เกิดขึ้นที่บริเวณผิวของ terminal lug ที่ใช้งานมาแล้ว นอกจากนี้ ยังพบว่า มีคลอสิ่นและซัลเฟอร์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อดูจากภาพถ่ายขยายของเครื่อง SEM ก็เห็นว่าผิวไม่เรียบ การเรียงตัวไม่เป็นเนื้อเดียวกัน องค์ประกอบทางเคมีที่อธิบายข้างต้นนี้ช่วยสนับสนุนค่าความขรุขระที่วัดได้จากพื้นผิวของ terminal lug ซึ่งพบว่า terminal lug ที่ยังไม่ผ่านการใช้งานมีค่าความขรุขระที่ต่ำกว่า ซึ่งส่งผลให้ค่า ϵ ที่วัดได้มีค่าต่ำกว่าด้วยเช่นกัน

สำหรับผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของลักษณะพื้นผิว องค์ประกอบทางเคมีที่พื้นผิว ความขรุขระ และค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของ nut และ bolt สามารถอธิบายผลที่เกิดขึ้นได้ในทิศทางเดียวกับกรณีของ terminal lug โดยจะเห็นได้ว่า nut และ bolt ซึ่งทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมและยังไม่ผ่านการใช้งาน ที่บริเวณพื้นผิวของ nut และ bolt มีความมันวาว และปรากฏธาตุเหล็กโครเมียม และนิกเกิลซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของเหล็กกล้าไร้สนิมอยู่ในกราฟซึ่งเป็นผลวิเคราะห์จากเครื่อง EDX ดังแสดงในรูปที่ 4.5 โดยไม่พบการเกิดออกไซด์ขึ้นที่พื้นผิว และเมื่อขยายภาพด้วยเครื่อง SEM ยังแสดงให้เห็นถึงความเป็นเนื้อเดียวและเรียบดีอยู่ ในขณะที่ nut และ bolt ที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว 3 ปี ดังแสดงในรูปที่ 4.6 จะปรากฏสังกะสีที่มีส่วนผสมของเหล็กอยู่ แต่ไม่พบการเกิดออกไซด์ขึ้น เมื่อส่งภาพพื้นผิวจากภาพถ่ายขยายด้วยเครื่อง SEM จะเห็นความขรุขระของพื้นผิวแต่ไม่ใช่การจับตัวของออกไซด์ฟิล์ม ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบค่าความขรุขระและค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน

ร้อนจะเห็นได้ว่า nut และ bolt ที่ยังไม่ผ่านการใช้งานมีค่าความขรุขระต่ำกว่าอุปกรณ์ที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว ซึ่งผลที่ได้นี้สอดคล้องกับค่า ϵ ที่วัดได้ นั่นคือ อุปกรณ์ที่ผ่านการใช้งานมาแล้วจะมีค่า ϵ ที่สูงกว่าอุปกรณ์ที่ยังไม่เคยใช้งาน โดยอุปกรณ์ที่มีค่า ϵ ต่ำ จะมีลักษณะพื้นผิวที่เรียบและมันวาว ในขณะที่อุปกรณ์ที่ใช้งานมาแล้ว ความมันวาวที่พื้นผิวจะลดลง หรือกล่าวได้ว่ามีคุณสมบัติการสะท้อนที่ลดลงนั่นเอง ส่งผลให้อุปกรณ์เหล่านี้มีค่า ϵ สูง ดังแสดงผลการทดลองในตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.3 (ก) ภาพจริงและ (ข) ภาพขยาย SEM x35 (ค) x750 ของ terminal lug ใหม่ และ (ง) ผลวิเคราะห์จากเครื่อง EDX

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



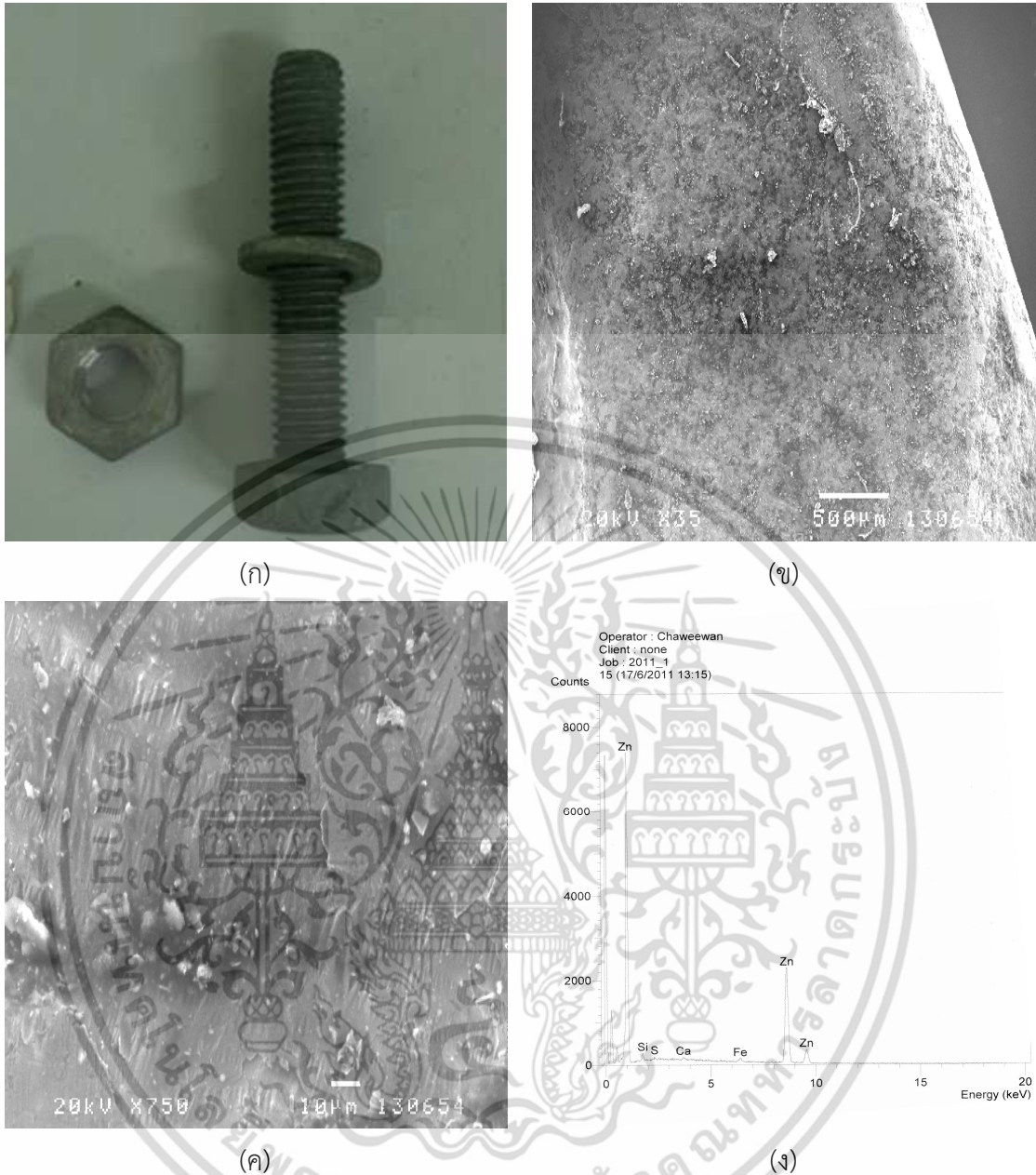
รูปที่ 4.4 (ก) ภาพจริงและ (ข) ภาพขยาย SEM x35 (ค) x750 ของ terminal lug ใช้งาน 3 ปี และ (ง) ผลวิเคราะห์จากเครื่อง EDX

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 (ก) ภาพจริงและ (ข) ภาพขยาย SEM x35 (ค) x750 ของ nut และ bolt ใหม่ และ (ง) ผลวิเคราะห์จากเครื่อง EDX

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 (ก) ภาพจริงและ (ข) ภาพขยาย SEM x35 (ค) x750 ของ nut and bolt ใช้งาน 3 ปี และ (ง) ผลวิเคราะห์จากเครื่อง EDX

4.2 การศึกษาผลของมุมมองและความละเอียดของภาพอินฟราเรด

ตัวอย่างภาพจริงและภาพความร้อนของตัวอย่างทดสอบที่ได้จากการทดลองที่ตำแหน่งกล้องอินฟราเรดอยู่ในทิศทางตั้งฉากกับวัตถุ (normal direction; $\theta = 0^\circ$) และ 45 องศา จาก normal direction ($\theta = 45^\circ$) แสดงดังรูปที่ 4.7 โดยมุมมองและคุณลักษณะความละเอียดของภาพอินฟราเรดที่ต่างกันส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนที่ได้ ดังนี้

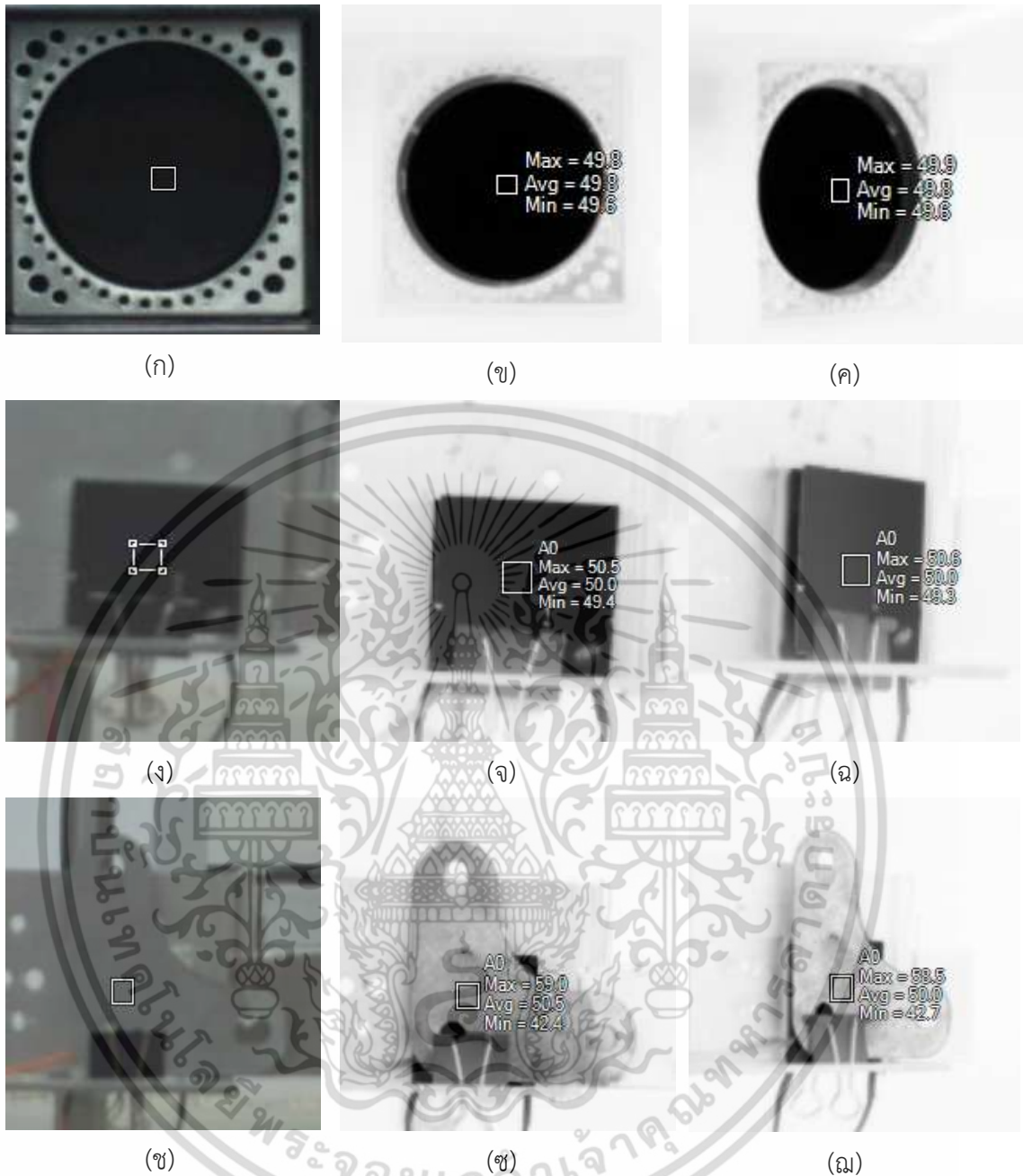
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1 ผลของมุมมองกับค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน

การศึกษาผลของมุมมองที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างความเข้าใจในผลของมุมมองที่มีอิทธิพลต่อค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสี รูปที่ 4.8 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของตัวอย่างชนิดต่างๆ ได้แก่ blackbody แผ่นโลหะทาสีดำ และแผ่นซุบสังกะสี ในแต่ละทิศทางต่าง ๆ ได้แก่ ที่ $\theta = 0^\circ 15^\circ 30^\circ 45^\circ 60^\circ$ และ 75° เทียบกับ normal direction โดยทำการทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของตัวอย่างทดสอบที่อุณหภูมิพื้นผิวเท่ากับ 50 องศาเซลเซียส จะเห็นได้ว่า ค่า ϵ ของตัวอย่างทั้ง 3 ชนิด มีค่าค่อนข้างคงที่ตลอดช่วงของการเปลี่ยนแปลงมุมมอง และจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามมุมมองที่เพิ่มขึ้น ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวอย่าง โดยกรณีของ blackbody และแผ่นโลหะทาสีดำสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีจะเริ่มลดลงในมุมมองที่มากกว่า 45 องศา ในขณะที่แผ่นเหล็กซุบสังกะสีจะมีค่าเพิ่มขึ้นที่มุมเดียวกันนี้ ผลลัพธ์เหล่านี้สอดคล้องกับ Fundamentals of Heat and mass Transfer [5] ซึ่งอธิบายเกี่ยวกับอิทธิพลของมุมมองที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของพื้นผิว โดยค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของตัวนำจะมีค่าค่อนข้างคงที่ตลอดช่วงของมุมที่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 40° ($\theta \leq 40^\circ$ องศา) และจะเพิ่มขึ้นเมื่อมุมเพิ่มขึ้น ในทางตรงกลับกัน ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของวัสดุที่ไม่เป็นตัวนำจะมีค่าค่อนข้างคงที่สำหรับมุมที่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 70° ($\theta \leq 70^\circ$) และจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อมีมุมมองที่เพิ่มขึ้น

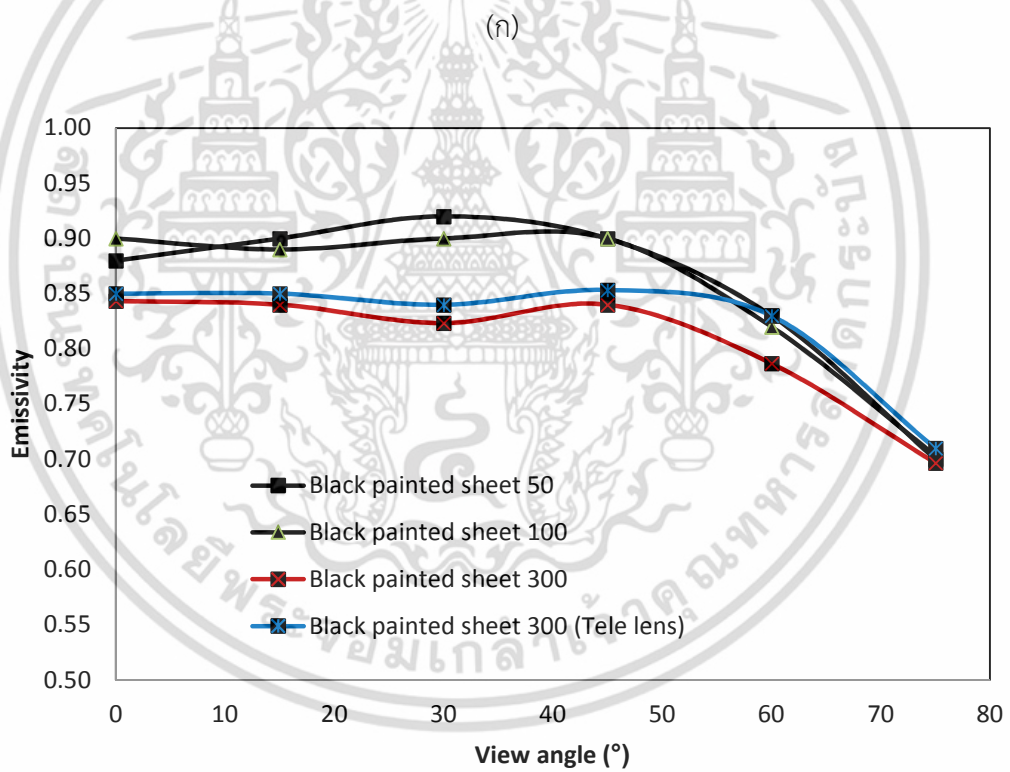
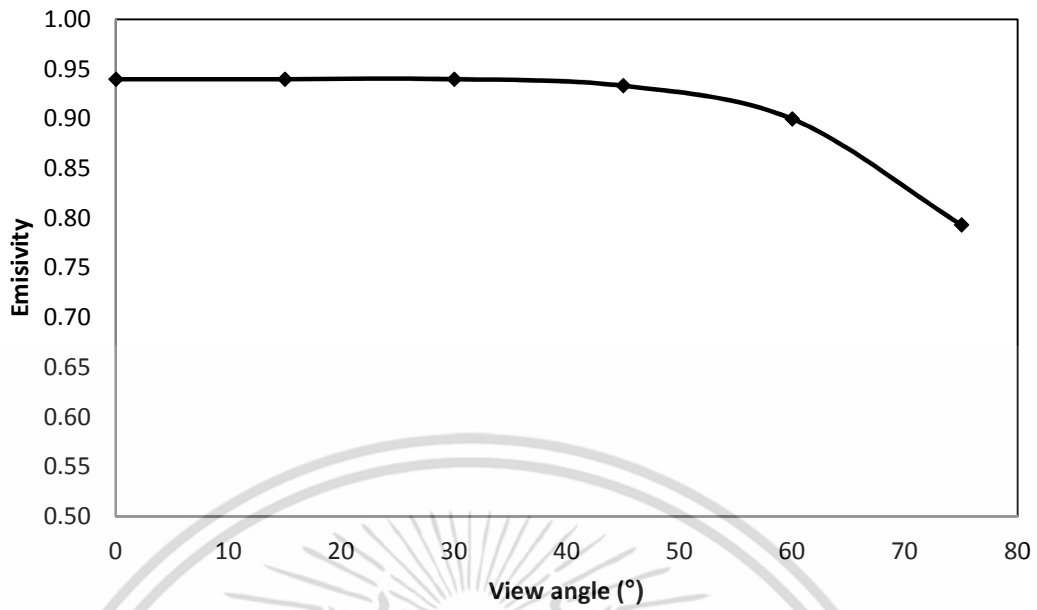
4.2.2 ผลของระยะห่างระหว่างวัตถุและตัวตรวจจับกับค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสี

การเพิ่มขึ้นของระยะห่างระหว่างวัตถุกับตัวตรวจจับจะทำให้ขนาดของ pixel เดียว (IFOV) และการขยายตัวในแนวนอนและแนวตั้งของพื้นที่วัดทั้งหมด (FOV) ที่วัตถุเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.8 โดย FOV และ IFOV ของ TI เปลี่ยนแปลงไปตามระยะทางต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่งจากรูปที่ 4.8 (ข และ ค) ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีในทุกระยะทางในมุมมองเดียวกันมีค่าใกล้เคียงกันมาก เนื่องจากขนาดการวัดหรือมุมมองของการวัด (MFOV) มีขนาดเล็กกว่าวัตถุที่กำหนดในทุกตัวอย่าง ดังแสดงเป็นกรอบสี่เหลี่ยมที่เน้นในรูปที่ 4.7 และสำหรับในทุกระยะห่างระหว่างวัตถุกับตัวตรวจจับในทุกมุมมอง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของทั้ง IFOV และ FOV



รูปที่ 4.7 ตัวอย่างภาพจริง (ก, ง, ช) และภาพความร้อน (ข, จ, ซ) ในทิศ normal direction และ (ค, ฉ, ฌ) ที่ 45 องศา จาก normal direction ของ blackbody, แผ่นโลหะทาสีดำ, และแผ่นชุบสังกะสี ตามลำดับ

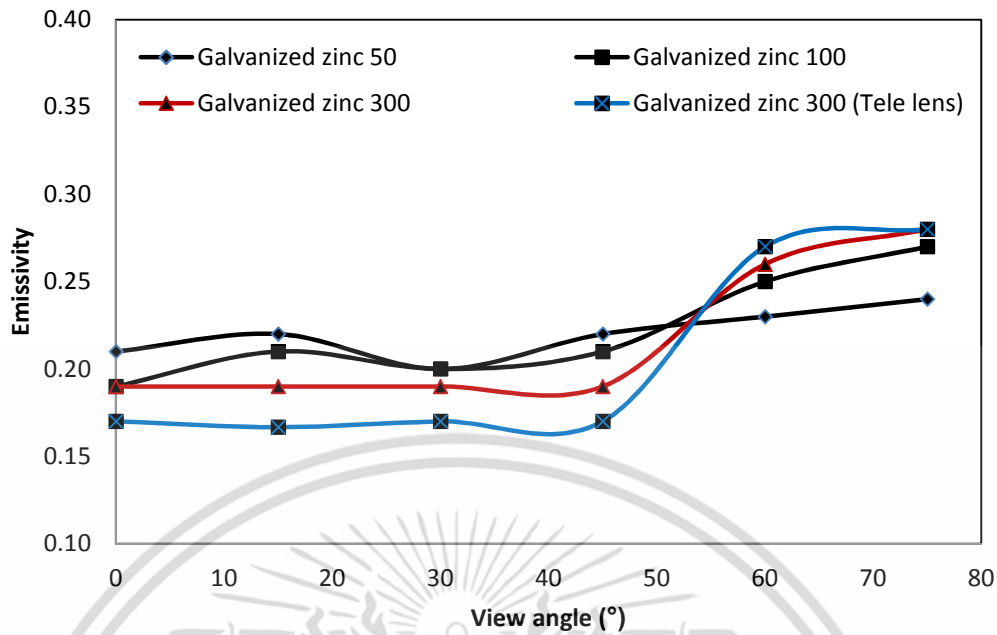
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

รูปที่ 4.8 ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของ (ก) blackbody (ข) แผ่นโลหะทาสีดำ และ (ค) แผ่นเหล็กชุบสังกะสี ในมุมมองต่างๆ ที่ระยะ 50, 100 และ 300 ซม. และการใช้ tele infrared lens

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)

รูปที่ 4.8 (ต่อ) ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของ (ก) blackbody (ข) แผ่นโลหะทาสีดำ และ (ค) แผ่นเหล็กชุบสังกะสี ในมุมมองต่างๆ ที่ระยะ 50, 100 และ 300 ซม. และการใช้ tele infrared lens

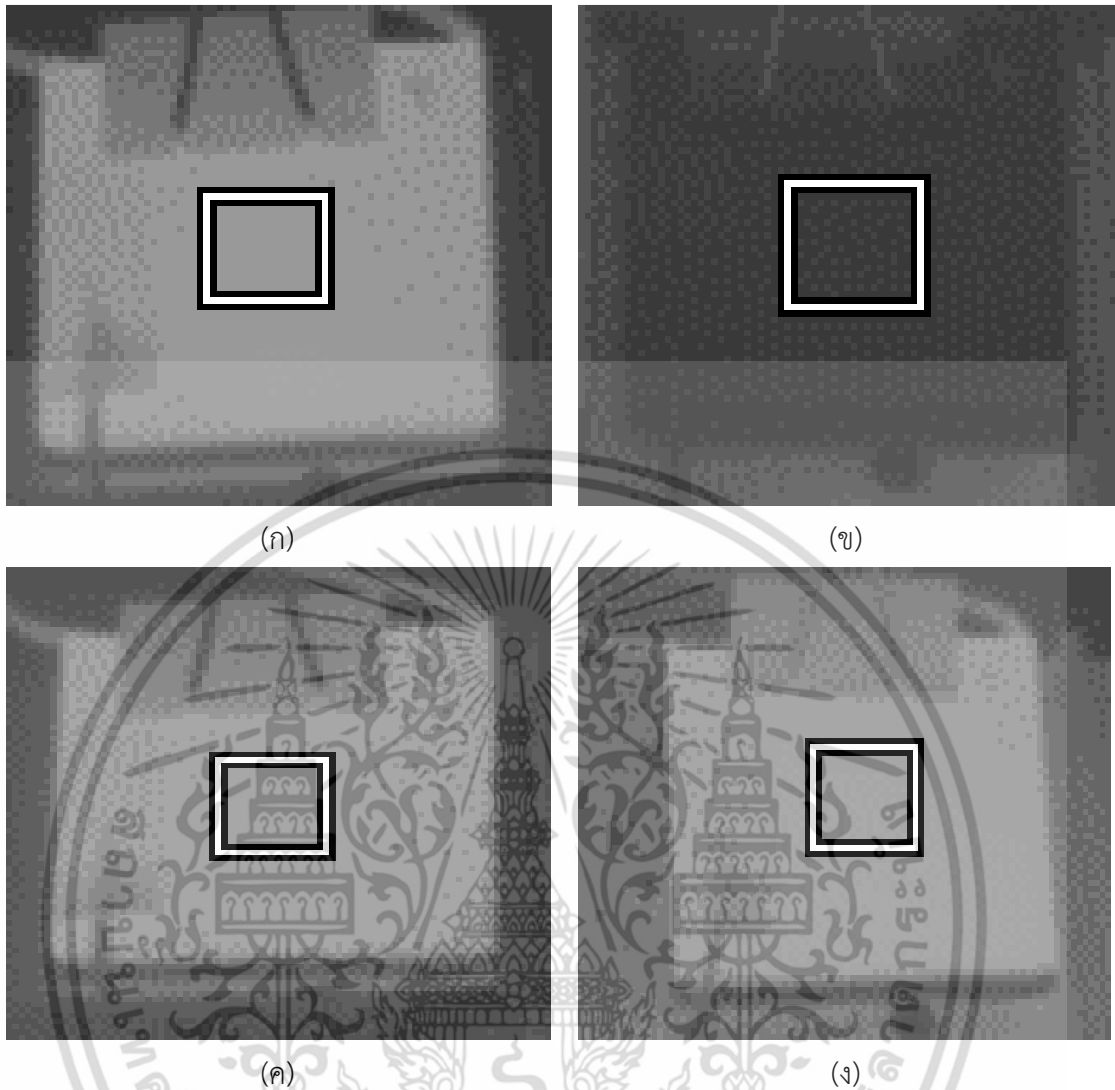
4.2.3 ผลของชนิดของเลนส์กับค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสี

การเปลี่ยนเลนส์ IR จากชนิดมาตรฐานเป็นเลนส์ไกลสามารถเปลี่ยนแปลงความละเอียดของภาพความร้อนได้ เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลง IFOV และ FOV จากรูปที่ 4.8 (ข และ ค) ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของทั้งเลนส์มาตรฐานและเลนส์ไกลที่ระยะเดียวกัน (300 ซม.) มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยเหตุผลที่เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างวัตถุกับตัวตรวจจับ อย่างไรก็ตาม สำหรับแผ่นเหล็กชุบสังกะสีที่ระยะ 300 เซนติเมตรนี้ ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีที่ได้ค่อนข้างต่ำ ซึ่งอาจเกิดจากวัสดุชนิดนี้มีค่าการสะท้อนสูงทำให้ได้รับผลกระทบอย่างมากจากรังสีโดยรอบ

4.3 ผลของสภาวะแวดล้อมรอบวัตถุที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน

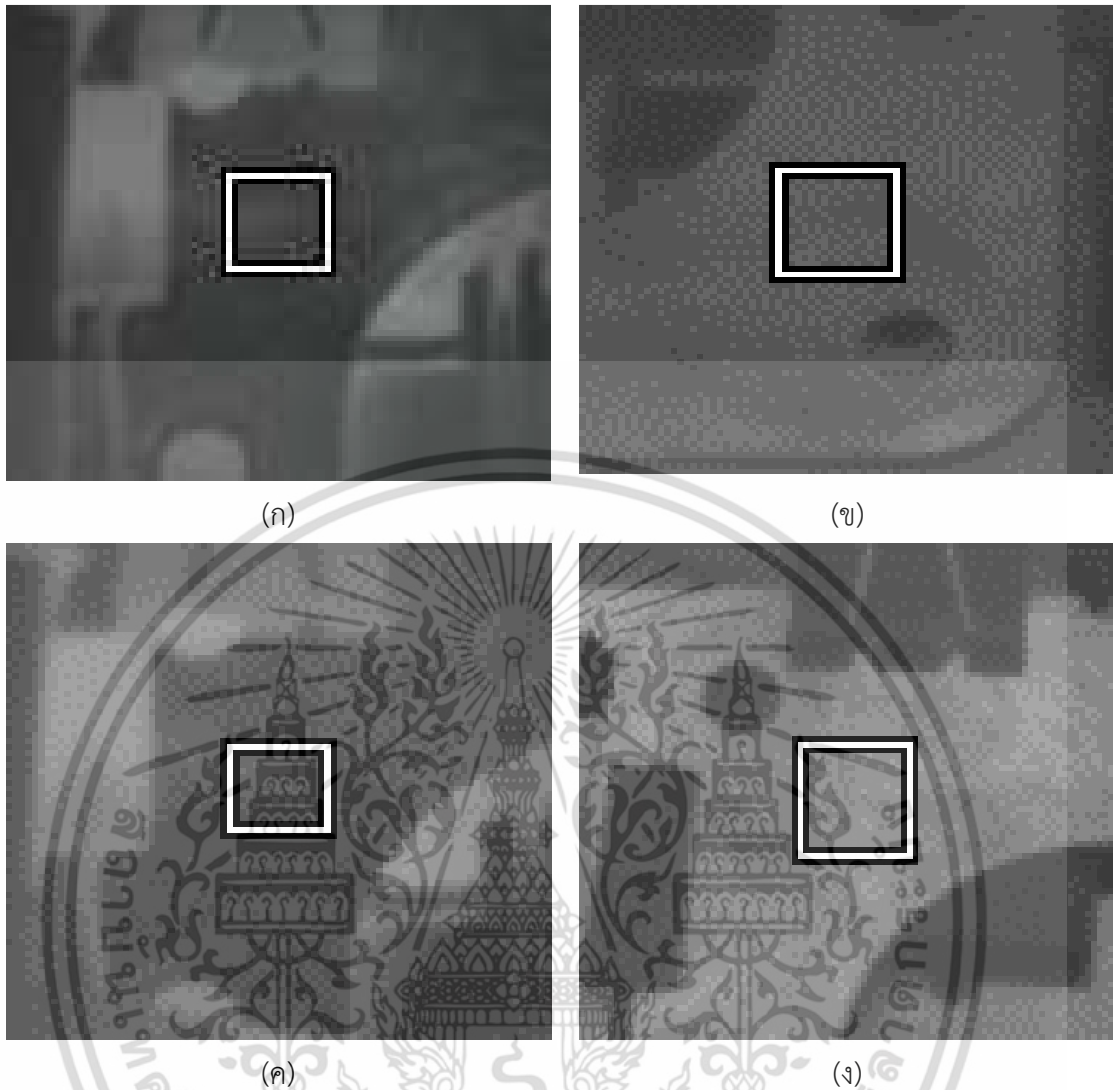
ภาพถ่ายความร้อนของแผ่นโลหะทาสีดำและแผ่นเหล็กกล้าไนซ์ ที่ $T_s > T_c$, และ ที่ $T_s < T_c$ แสดงในรูปที่ 4.9 และรูปที่ 4.10 ตามลำดับ โดยกรอบสี่เหลี่ยมที่ปรากฏอยู่บนภาพแสดงถึงพื้นที่ที่นำมาใช้สำหรับการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีอินฟราเรด ปรับพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ค่า Transmission และ ค่า Emissivity จนกว่าอุณหภูมิที่วัดได้จากกล้องอินฟราเรดมีค่าเท่ากับอุณหภูมิที่วัดได้จากเทอร์โมคัปเปิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 ตัวอย่างภาพถ่ายความร้อนของแผ่นโลหะทาสีดำ (ก) และ (ข) ที่ $T_s > T_c$ และ (ค) และ (ง) ที่ $T_s < T_c$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

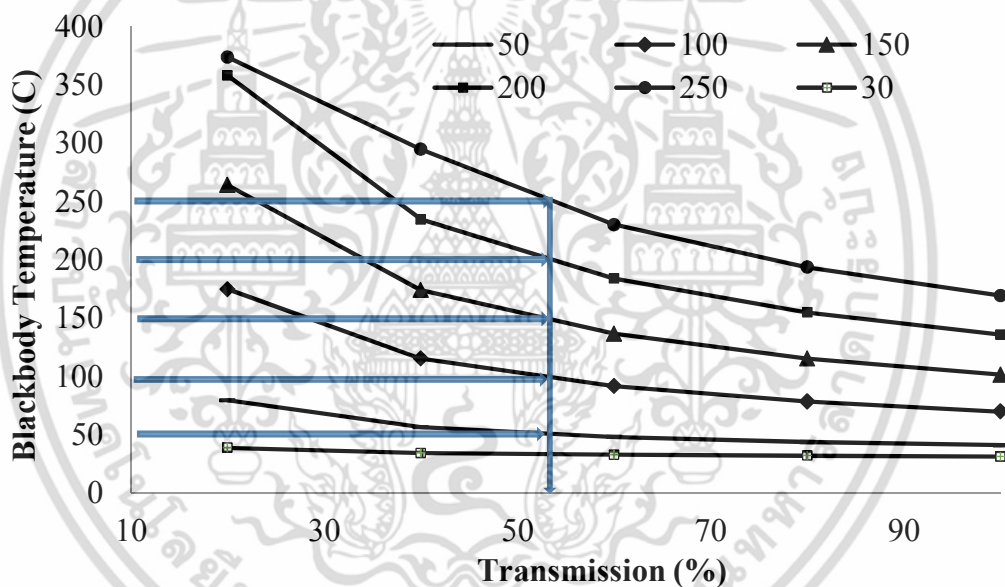


รูปที่ 4.10 ตัวอย่างภาพถ่ายความร้อนของแผ่นเหล็กกล้าไนซ์ (ก) และ (ข) ที่ $T_s > T_c$ และ (ค) และ (ง) ที่ $T_s < T_c$

4.3.1 ผลกระทบของการวัดอุณหภูมิผ่านหน้าต่างอินฟราเรด

การทดลองนี้ศึกษาการแผ่รังสีความร้อนของแผ่นโลหะทาสีดำและแผ่นกัลวาไนซ์ผ่านหน้าต่างอินฟราเรด (IR-windows) มายังกล้องถ่ายภาพอินฟราเรด โดยหน้าต่างอินฟราเรดทำจากวัสดุพิเศษที่ยอมให้รังสีอินฟราเรดผ่านได้ อย่างไรก็ตาม ก็ไม่สามารถยอมให้อินฟราเรดผ่านไปได้ 100 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้น การพิจารณาค่าการส่งผ่าน (transmittance) จึงเป็นตัวแปรที่มีผลกระทบโดยตรงกับการวัดอุณหภูมิให้ถูกต้องและเที่ยงตรง [26] ในหัวข้อนี้ทำการทดลองศึกษาผลจากการวัดอุณหภูมิของวัตถุเป้าหมายผ่านหน้าต่างอินฟราเรด ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิห้อง), 50, 100, 150, 200 และ 250 องศาเซลเซียส และวัดอุณหภูมิที่หน้าต่างอินฟราเรดได้ประมาณ 32, 35, 41, 50, 57 และ 65 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.11 จากการทดลองพบว่าผลจากการถ่ายภาพความร้อนของอุปกรณ์สอบเทียบเครื่องมือวัดอุณหภูมิด้วยอินฟราเรดซึ่งเป็นวัตถุเป้าหมาย ระดับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านของหน้าต่างอินฟราเรดจะอยู่ในช่วง 50-55 สำหรับทุกอุณหภูมิของหน้าต่างอินฟราเรด ยกเว้นเมื่ออุณหภูมิเป้าหมายมีค่าเท่ากับอุณหภูมิโดยรอบ ($T_s = T_c$) ซึ่งค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านของหน้าต่างอินฟราเรดมีค่า 100 เปอร์เซ็นต์ หมายถึงพลังงานซึ่งเรียกว่า radiosity ทั้งหมดที่ออกจากพื้นผิวของวัตถุเป้าหมาย สามารถแผ่รังสีไปยังตัวตรวจจับอินฟราเรดได้โดยตรง เมื่อพลังงานอินฟราเรดที่ส่งผ่านหน้าต่างอินฟราเรด พลังงานอินฟราเรดจะไม่สามารถส่งออกจากวัตถุผ่านไปยังตัวตรวจจับอินฟราเรดได้ทั้งหมด ซึ่งการลดลงของความสามารถในการส่งผ่านของหน้าต่างอินฟราเรดมีสาเหตุมาจากการลดลงของพลังงานอินฟราเรดที่แผ่ไปยังตัวตรวจจับ ทำให้มีผลกระทบต่อค่าความถูกต้องในการวัดอุณหภูมิ อย่างไรก็ตามถ้าผู้ใช้งานทราบระดับเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านของหน้าต่างอินฟราเรด ก็สามารถปรับแต่งค่าการส่งผ่านให้กับตัวกล้องถ่ายภาพความร้อนอินฟราเรด หรือปรับแต่งที่โปรแกรมสนับสนุนการทำงานของกล้อง เพื่อให้การวัดค่าอุณหภูมิมีค่าที่ถูกต้องได้



รูปที่ 4.11 ค่าการส่งผ่านการแผ่รังสีอินฟราเรดของ blackbody ที่อุณหภูมิ 30°C ถึง 250 °C

4.3.2 ผลกระทบของการสะท้อนในการวัดค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสี

ในการทดลองนี้ทำการศึกษาผลกระทบของการสะท้อนที่มีผลต่อการวัดค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสี จากรูปที่ 4.9 และ 4.10 แสดงให้เห็นภาพถ่ายความร้อนของวัสดุที่นำมาทดลองภายใต้สภาวะแวดล้อมของอุณหภูมิ และความสามารถในการสะท้อนของวัสดุที่แตกต่างกัน ที่ระดับอุณหภูมิของวัตถุเป้าหมายและอุณหภูมิแวดล้อม หรือ อุณหภูมิสะท้อนหรืออุณหภูมิฉากหลัง (reflection temperature, background temperature) กำหนดให้มีค่าอุณหภูมิเท่ากัน จากภาพถ่ายความร้อนของตัวอย่างที่มีค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีต่ำและสูง ซึ่งได้รับการสะท้อนจากพื้นผิวภายในห้องควบคุมสภาวะแวดล้อมที่มีทั้งค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีต่ำและสูง ผลที่เกิดขึ้นนี้สามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของการแผ่รังสีที่ได้ออกมาแล้ว [6] จากสถานะที่อุณหภูมิของตัวอย่างมีค่าคงที่ เราไม่สามารถวัดค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของวัตถุ แม้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีจะมีการเปลี่ยนแปลงก็ตาม กรณีของแผ่นโลหะทาสีดำการวัดค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีจะไม่ได้รับผลกระทบจากสถานะแวดล้อมดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของอุปกรณ์ที่สถานะแวดล้อมต่างๆ

ชนิดของอุปกรณ์	อุณหภูมิตัวอย่าง	อุณหภูมิพื้นผิวกล่องควบคุมสถานะแวดล้อม			
		พื้นผิวมีค่าการสะท้อนสูง		พื้นผิวมีค่าการสะท้อนต่ำ	
		30°C	50°C	30°C	50°C
แผ่นโลหะทาสีดำ	30°C	*	0.96 (รูป 4.9 ข)	*	0.96 (รูป 4.9 ง)
	50°C	0.96 (รูป 4.9 ก)	*	0.96 (รูป 4.9 ค)	*
แผ่นเหล็กกล้า-ไนซ์	30°C	*	0.27 (รูป 4.10 ข)	*	0.26 (รูป 4.10 ง)
	50°C	0.24 (รูป 4.10 ก)	*	0.21 (รูป 4.10 ค)	*

* อุณหภูมิตัวอย่างและอุณหภูมิสถานะแวดล้อมเท่ากันทำให้ไม่สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีได้

อย่างไรก็ตาม ในรูปที่ 4.9 (ข) แสดงให้เห็นว่าภาพถ่ายความร้อนมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่ารูปอื่นๆ รูปที่ 4.9 (ก) (ค) และ (ง) จากภาพทั้งหมดของแผ่นเหล็กกล้าไนซ์ในรูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นถึงความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของภาพที่ตัวตรวจจับอินฟราเรดได้รับ ในรูปที่ 4.10 (ก) และ 4.10 (ค) แสดงให้เห็นว่าพลังงานที่แผ่รังสีจากตัวอย่างผ่านหน้าต่างอินฟราเรดมีค่าต่ำเนื่องจากวัสดุทดสอบมีค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีต่ำและการแผ่รังสีจากห้องควบคุมสถานะแวดล้อมมีค่าต่ำ พิจารณารูปที่ 4.10 (ก) (ข) (ค) และ (ง) ภาพถ่ายความร้อนมีความสว่างกว่าภาพอื่น หรือคุณลักษณะว่ามีค่าอุณหภูมิสูงกว่า เนื่องจากเหล็กกล้าไนซ์มีค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีที่ต่ำและสามารถสะท้อนพลังงานที่แผ่รังสีมาจากผนังห้องควบคุมที่มีอุณหภูมิสูง เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิของผนังห้องควบคุมที่มีค่าเดียวกันซึ่งใช้วัสดุผนังที่มีค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีสูงในรูปที่ 4.10 (ค) และ (ง) จะมีอิทธิพลต่อค่าความถูกต้องในการวัดค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสี สาเหตุนี้เกิดขึ้นเนื่องจากพลังงานอินฟราเรดเกือบทั้งหมดที่แผ่รังสีไปยังตัวตรวจจับได้มาจากการสะท้อนของผนังห้องควบคุมแทนที่จะเป็นพลังงานที่แผ่ออกจากวัตถุตัวอย่าง ในกรณีของเหล็กกล้าไนซ์ซึ่งมีค่าการสะท้อนสูง ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีที่วัดได้จึงได้รับผลกระทบจากสถานะแวดล้อม ถึงแม้ว่าจะมีการปรับแก้ค่าในกล้องถ่ายภาพความร้อนเพื่อชดเชยต่ออุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สิ่งแวดล้อมแล้วก็ตาม ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าสถานะแวดล้อมมีอิทธิพลต่อความถูกต้องในการวัดค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของวัสดุที่มีค่าการสะท้อนสูง ในขณะที่การวัดค่าของวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีสูงไม่มีผลกระทบจากสิ่งแวดล้อม

ขึ้นตัวอย่างที่นำมาทดสอบหาแล็กเกอร์ เพื่อลดผลการสะท้อนพลังงานจากที่อื่นเข้ามา จากนั้นจ่ายไฟให้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กทำงาน รอกจนอุณหภูมิคงที่ จึงบันทึกสัญญาณที่แสดงถึงอุณหภูมิ คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน และทำการเปรียบเทียบวิธีการวัด 2 วิธี คือ การวัดครั้งเดียวขณะวงจรทำงานและการวัดสองครั้งแล้วนำค่ามาเฉลี่ย ซึ่งจากการทดลอง พบว่า วิธีการวัดค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนแบบวัดสองครั้งได้ผลที่แม่นยำมากกว่า

4.4 การวิเคราะห์ความไม่แน่นอนของการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสี

ในการวัดค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของวัตถุคือการหาค่าอัตราส่วนของการแผ่รังสีของวัตถุที่แผ่ออกมาเทียบกับการแผ่รังสีของ blackbody ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีนี้มีความสัมพันธ์กับหลายองค์ประกอบด้วยกัน เช่น อุณหภูมิ ความยาวคลื่น มุมของทิศทางการแผ่รังสี ชนิดของวัสดุ สภาพแวดล้อมของผิวของวัสดุทดสอบ รูปร่างของวัตถุ เป็นต้น ในงานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์ปัจจัยต่างๆ ที่เป็นสาเหตุของความไม่แน่นอนในการวัด ซึ่งเกิดขึ้นได้จาก 2 ประการ คือ ความไม่แน่นอนในการวัดของเครื่องมือทั้งหมดที่ใช้ในวัดและการสอบเทียบ และ ความไม่เข้าใจเกี่ยวกับการใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนที่ถูกต้อง ผลการวิเคราะห์สาเหตุของความไม่แน่นอนสรุปไว้ในแผนภูมิแก่งปลาที่ตั้งแสดงในรูปที่ 4.12 ซึ่งประกอบไปด้วย

- 1) สาเหตุจากวัสดุที่นำมาทดสอบ ได้แก่ ช่วงของอุณหภูมิในการทดสอบซึ่งจะสัมพันธ์กับความยาวคลื่นของตัวตรวจจับอินฟราเรด มุมและระยะทางในการจับภาพ ชนิดของวัสดุ ลักษณะของพื้นผิว และรูปทรง
- 2) สาเหตุจากคุณสมบัติของกล้องถ่ายภาพความร้อน ได้แก่ อุณหภูมิในการปฏิบัติงาน ค่าความไม่แน่นอนและค่าความถูกต้องของตัวตรวจจับอินฟราเรด ค่าพื้นที่การวัดของตัวตรวจจับอินฟราเรด (Instantaneous Field of View : IFOV) ค่าความละเอียดเชิงการวัดอุณหภูมิ (Temperature resolution) และความละเอียดในการปรับค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีอินฟราเรด
- 3) สาเหตุจากเครื่องมือวัดอุณหภูมิแบบสัมผัส ได้แก่ ค่าความไม่แน่นอนและค่าความถูกต้อง ค่าความละเอียดในการวัดอุณหภูมิ แรงกดเพื่อให้สัมผัสขณะทำการวัด และอุณหภูมิขณะปฏิบัติงาน
- 4) สาเหตุจากสภาพแวดล้อม ได้แก่ พลังงานที่สะท้อนจากสิ่งแวดล้อม ค่าอุณหภูมิความชื้น
- 5) สาเหตุจากการควบคุมแหล่งกำเนิดความร้อนแบบให้มีเสถียรภาพ สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่

โดยทั้งหมดที่ได้กล่าวมานี้เป็นภาระสู่ถึงความไม่แน่นอน Type B ทั้งสิ้น ซึ่งสามารถสรุปความไม่แน่นอนในการวัดค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีด้วยกล้องอินฟราเรด ได้ในหลายประเด็น ดังนี้

- คุณลักษณะเฉพาะของเครื่องมือวัด เช่น ความละเอียดของภาพความร้อน ความถูกต้อง ความแม่นยำ

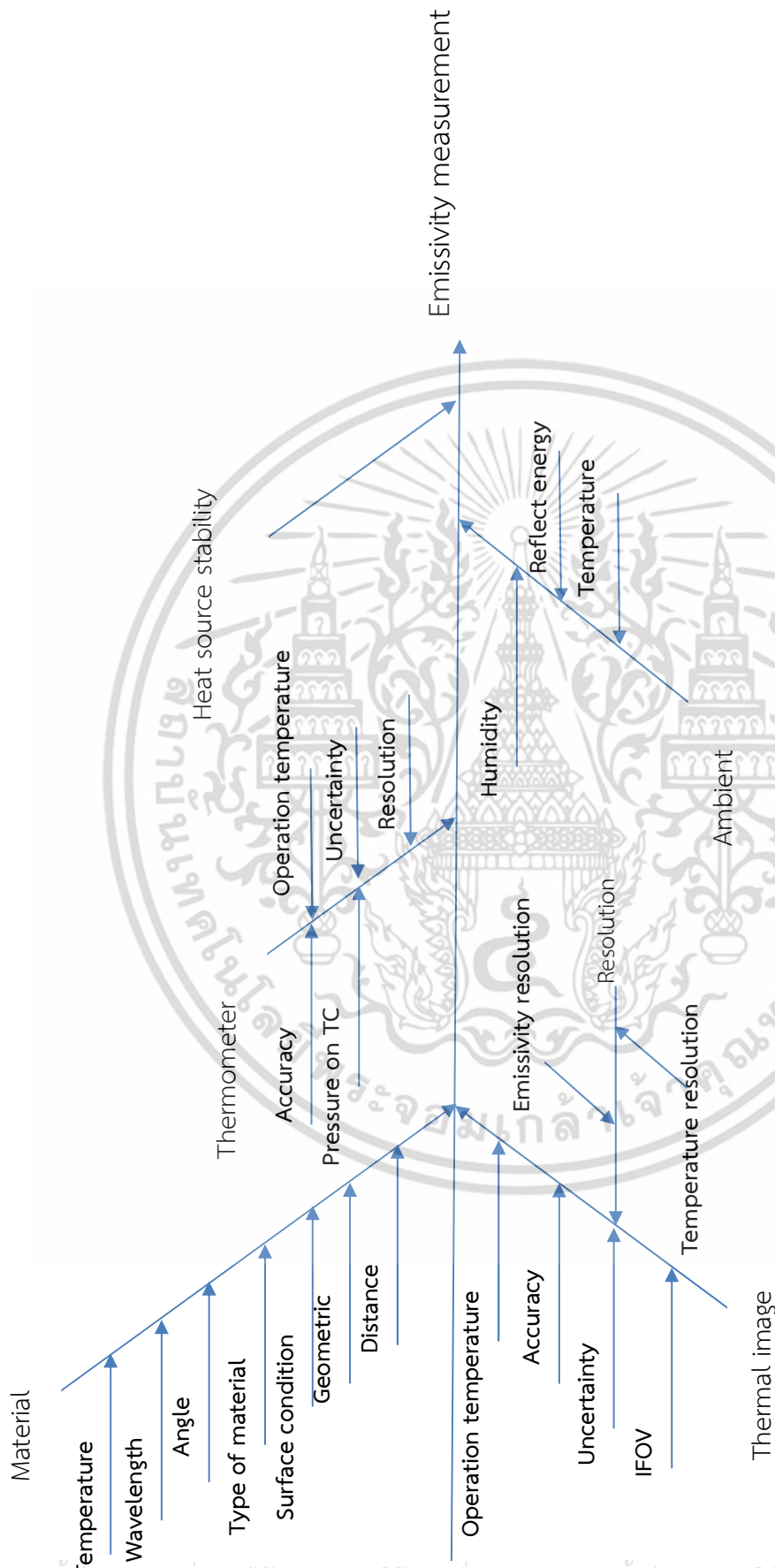
- การใช้งาน เช่น คุณลักษณะวัตถุที่ต้องการวัด (ชนิด พื้นผิว) มุมมอง และระยะการวัด

- สภาพแวดล้อมของการวัด เช่น ความชื้น อุณหภูมิ ความเร็วลม และภาระทางกระแสไฟฟ้า (กรณีใช้ในงานไฟฟ้า) เป็นต้น

ดังนั้น ในการประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัดค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีอินฟราเรดและการวัดอุณหภูมิด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนจำเป็นต้องใช้ผู้ที่มีความรู้และมีความเข้าใจเป็นอย่างดี และจำเป็นต้องมีเครื่องมือวัดที่มีความละเอียดสูง จึงจะทำให้สามารถประเมินค่าความไม่แน่นอนในเชิงปริมาณได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 แผนภูมิกำงปลาในการระบุถึงอิทธิพลของตัวแปรความไม่แน่นอนสำหรับการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

กล้องถ่ายภาพอินฟราเรดเป็นเครื่องมือวัดอุณหภูมิในระยะไกลโดยไม่ต้องสัมผัสกับวัตถุ สามารถใช้เป็นเครื่องมือตรวจสอบอุปกรณ์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าทั้งภายในและภายนอกอาคาร เพื่อรักษาความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้าตลอดระยะเวลาการใช้งาน โดยนิยมใช้กล้องอินฟราเรดกันอย่างแพร่หลายในงานซ่อมบำรุงเชิงการป้องกัน และปัจจัยสำคัญสำหรับการใช้กล้องอินฟราเรดวัดอุณหภูมิให้ได้ค่าที่ถูกต้อง คือ การกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน (ϵ) ของวัตถุให้ถูกต้อง โดยวัตถุแต่ละชนิดมีค่า ϵ ที่แตกต่างกัน งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการวัดค่า ϵ ของวัตถุ โดยให้ความร้อนและควบคุมอุณหภูมิที่ผิวของวัตถุให้คงที่ด้วยตู้ควบคุมสภาวะแวดล้อม จากนั้นวัดค่าอุณหภูมิของวัตถุด้วยกล้องอินฟราเรดและเปรียบเทียบกับอุณหภูมิพื้นผิวที่แท้จริงของวัตถุซึ่งวัดได้จากเทอร์โมคัปเปิลแบบสัมผัส จากการทดลองวัด $\epsilon_{7.5-14 \mu m}$ ของวัสดุในงานวิศวกรรม ได้แก่ แผ่นเหล็ก แผ่นสแตนเลส แผ่นทองแดง แผ่นอลูมิเนียม และวัตถุทองเหลือง และอุปกรณ์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ผ่านการใช้งาน และยังไม่ผ่านการใช้งาน ได้แก่ terminal lug, nut และ bolt ในช่วงอุณหภูมิพื้นผิวของวัตถุอยู่ที่ $50^{\circ}\text{C} - 200^{\circ}\text{C}$ โดยใช้กล้องถ่ายภาพอินฟราเรด พบว่า ค่า ϵ ที่ได้จากการทดลองสอดคล้องและเป็นไปตามค่าอ้างอิงจากงานวิจัยอื่นๆ นอกจากนี้ ยังได้ศึกษาเกี่ยวกับผลของพื้นผิวที่ขรุขระ (Surface roughness) กับค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสี ซึ่งพบว่าเมื่ออายุการใช้งานของวัตถุเพิ่มขึ้น (อุปกรณ์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า) ส่งผลให้ค่าความขรุขระของพื้นผิวเพิ่มขึ้น และค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีก็เพิ่มขึ้นตามค่าความขรุขระเช่นกัน อย่างไรก็ตาม เนื่องจากอุปกรณ์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าส่วนใหญ่มีลักษณะมันวาว มีคุณสมบัติการสะท้อนสูง จึงได้รับอิทธิพลจากสภาวะแวดล้อมรอบตัววัตถุสูงด้วยเช่นกัน ดังนั้น การหาค่า ϵ ของอุปกรณ์ไฟฟ้าจึงควรพิจารณาการทดสอบภายใต้สภาวะการใช้งานจริง เช่น ระยะทางระหว่างกล้องกับตัวตรวจจับอินฟราเรดและมุมมอง เป็นต้น และควรศึกษาผลของการแผ่รังสีผ่านหน้าต่างอินฟราเรด ในกรณีที่อุปกรณ์ไฟฟ้าติดตั้งอยู่ภายในตู้ควบคุมที่มีโอกาสเกิดประกายไฟจากกระแสไฟฟ้าแรงสูง (arc flash) รวมถึงควรศึกษาผลของพลังงานสะท้อนที่เกิดจากสิ่งแวดล้อมที่มีต่อการวัดค่า ϵ และการวัดอุณหภูมิให้ถูกต้อง

จากการทดลองศึกษามุมมองและค่าความละเอียดของภาพความร้อน (IFOV และ FOV) ของ TI กับการวัดค่า ϵ พบว่า ค่า ϵ ค่อนข้างคงที่ที่มุมมองน้อยกว่า 45 องศา และระยะห่างของวัตถุกับตัวตรวจจับรังสีอินฟราเรดไม่ส่งผลกระทบต่อค่าการวัดอุณหภูมิ ถ้า MFOV มีขนาดเล็กกว่าจุดวัดอุณหภูมิบนวัตถุเป้าหมาย สำหรับการศึกษามุมมองของการแผ่รังสีอินฟราเรดผ่านหน้าต่างอินฟราเรด พบว่า รังสีอินฟราเรดที่แผ่ออกจากวัตถุและผ่านหน้าต่างอินฟราเรด จะมีปริมาณความเข้มของรังสีที่ลดลง ซึ่งผู้ผลิตเครื่องมือวัดโดยส่วนใหญ่จะออกแบบเครื่องมือวัดให้สามารถชดเชยการลดลงของ

พลังงานที่ผ่านหน้าต่างอินฟราเรดได้ โดยอาจใช้วิธีการปรับค่าร้อยละการยอมให้รังสีผ่าน (transmission) ที่ตัวกล้องอินฟราเรดหรือการปรับที่โปรแกรมวิเคราะห์ภาพความร้อน และในกรณีที่วัตถุเป้าหมายมีความแม่นยำสูง ควรแน่ใจว่าสถานะแวดล้อมโดยรอบมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าวัตถุ หรือหากทำการทดสอบภายในตู้ควบคุมสถานะแวดล้อม ต้องแน่ใจว่าผนังภายในตู้ควบคุมมีอุณหภูมิและมีค่า ϵ ต่ำกว่าวัตถุเป้าหมาย เพื่อลดผลกระทบจากพลังงานสะท้อนให้ได้มากที่สุด เพื่อให้ค่าที่วัดได้มีความถูกต้องมากขึ้น

สามารถสรุปความไม่แน่นอนในการวัด ϵ ด้วยกล้องอินฟราเรด ได้ในหลายประเด็น ดังนี้ 1) คุณลักษณะเฉพาะของเครื่องมือวัด เช่น ความละเอียดของภาพความร้อน (thermal image resolution) ความถูกต้อง ความแม่นยำ 2) การใช้งาน เช่น คุณลักษณะวัตถุที่ต้องการวัด (ชนิด พื้นผิว) มุมมอง และระยะการวัด และ 3) สถานะแวดล้อมของการวัด เช่น ความชื้น อุณหภูมิ ความเร็วลม และภาระทางกระแสไฟฟ้า (กรณีใช้ในงานไฟฟ้า) เป็นต้น

5.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัย

จากงานวิจัยที่ได้ศึกษาการหาค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีอินฟราเรด เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการทำงานกับการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเพื่อใช้ในการปรับตั้งกล้องถ่ายภาพความร้อนให้มีความถูกต้องเที่ยงตรงในการตรวจวัดอุณหภูมิ เนื่องจากจะต้องนำค่าอุณหภูมิที่ได้ไปใช้เป็นเกณฑ์เพื่อพิจารณาวางแผนในการซ่อมบำรุงเชิงตรวจการในระบบไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีเป็นตัวแปรที่มีความซับซ้อนและส่งผลกระทบต่อค่าความถูกต้องในการวัดความถูกต้องในการวัดสูง จากผลการทดลองพบว่าปัจจัยที่เกี่ยวข้องมีหลายปัจจัย ได้แก่ ความละเอียดในเชิงภาพความร้อน และมุมของภาพที่ทำการตรวจสอบ ผลกระทบจากสิ่งแวดล้อม ซึ่งได้กล่าวรายละเอียดไว้แล้วในเนื้อหาก่อนหน้านี้ ซึ่งทั้งหมดนี้เป็นสาเหตุของความไม่แน่นอนในการวัดโดยใช้กล้องถ่ายภาพความร้อน สำหรับข้อมูลจากผู้ผลิตกล้องถ่ายภาพความร้อนที่จำหน่ายอยู่ในปัจจุบันไม่ได้กล่าวถึงค่าความไม่แน่นอนในการวัด โดยจะกล่าวเพียงค่าความถูกต้องของการวัดอุณหภูมิเท่านั้น ในการประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัดค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีอินฟราเรดและการวัดอุณหภูมิด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนจำเป็นต้องใช้ผู้ที่มีความรู้และมีความเข้าใจเป็นอย่างดี และจำเป็นต้องมีเครื่องมือวัดที่มีความละเอียดสูง จึงจะทำให้สามารถประเมินค่าความไม่แน่นอนในเชิงปริมาณได้ สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาปัจจัย และตัวแปรของสาเหตุของความไม่แน่นอนในการวัดเพื่อให้ผู้ที่สนใจศึกษาทางด้านนี้สามารถใช้เป็นข้อมูลในการประเมินหาค่าความไม่แน่นอนในเชิงปริมาณได้ต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] A.A. Gowen, B.K. Tiwari, P.J. Cullen, K. McDonnell and C.P. ÓDonnell, Applications of thermal imaging in food quality and safety assessment, **Trends in food science & technology**, Vol. 21 (2010), p. 190-200
- [2] J.G. Ibarra, Y. Tao, J. Walker and C. Griffis, Internal temperature of cooked chicken meat through infrared imaging and time series analysis, **Transactions of ASAE**, Vol. 42 (1999), p. 1383-1390
- [3] J.M. Laskar, S. Bagavathiappan, M. Sardar, T. Jayakumar, J. Philip and B. Raj, Measurement of thermal diffusivity of solids using infrared thermography, **Materials Letters**, Vol. 62 (2008), p. 2740-2742
- [4] A. Brosse, P. Naisson, H. Hamdi, J.M. Bergheau, Temperature measurement and heat flux characterization in grinding using thermography, **Journal of materials processing technology**, Vol. 201 (2008), p. 590-595
- [5] F.P. Incropera, D.P. Dewitt, T.L. Bergmann and A.S. Lavine. **Fundamentals of heat and mass transfer**. 6th edition. Willey. Asia. 2006.
- [6] L.D. Campo, R.B. Perez-Saez, L. Gonzalez-Fernandez, X. Esquisabel, I. Fernandez, P. Gonzalez-Martin and M.J. Tello, Emissivity measurements on aeronautical alloys, **Journal of alloys and compounds**, Vol. 489 (2010), p. 482-487.
- [7] S. Marinetti and P.G. Cesaratto. Emissivity estimation for accurate quantitative thermography, **NDT&E International**, Vol. 51 (2012), p. 127-134.
- [8] K. Schurer, A method for measuring infrared emissivities of near-black surfaces at ambient temperatures. **Infrared Phys Technol.**, Vol. 16 (1976), p. 157-163
- [9] S. Datcu, L. Ibos, Y. Candau, S. Matteï, Improvement of building wall surface temperature measurements by infrared thermography. **Infrared Phys Technol**, Vol. 46 (2005), p. 451-467
- [10] C. Wen and I. Mudawar, Modeling the effects of surface roughness on the emissivity of aluminum alloys, **International Journal of heat and mass transfer**, Vol. 49 (2006), p. 4279-4289
- [11] ASTM E 1862-97, **Standard test methods for measuring and compensating for reflected temperature using infrared imaging radiometers** (2002).

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [12] S. Bagavathiappan, B.B. Lahiri, T. Saravanan, J. Philip, and T. Jayakumar, “Infrared thermography for condition monitoring - A review,” **Infrared Physics & Technology**, vol. 60, pp. 35-55, Mar. 2013.
- [13] Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, 1st Edition, 1993,: corrected and reprinted edition, 1995, **International Organization for Standardization**, Geneva, Switzerland.
- [14] Reznik, L. and Dabke, K. P. (2004). Measurement models: Applications of intelligent methods. **Measurement**, 35 (1), 47–58.
- [15] Meyer, V. R. (2007). Measurement uncertainty. **Journal of Chromatography A**, 1158 (1-2), 15–24.
- [16] อัจฉรา เจริญสุข,. 2553. **มาตรวิทยาเบื้องต้น**. ปทุมธานี: สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ.
- [17] 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 Technol.**, Vol. 66 (2014), p. 6-12
- [18] D. Shi, Q. Liu, Z. Zhu, J. Sun and B. Wang, Experimental study of the relationships between the spectral emissivity of brass and the temperature in the oxidizing environment, **Infrared Phys Technol.**, Vol. 64 (2014), p. 119-124
- [19] 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.
- [20] 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, 2015, 156-165.
- [21] T. Walach, “Emissivity measurements on electronic microcircuits”. **Measurement**, 41, 2008, 503-515.
- [22] D.G. Rao, **Fundamentals of food engineering**, Baba Barkha Nath., New Delhi., (2010), pp.203-204
- [23] M.Q. Brenster, **Thermal radiative transfer and properties**, John Wiley & Sons, (1992), pp.56-57

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [24] M. Fogie, **Handbook of mathematical, scientific and engineering: formulas, tables, functions graphs, transforms**, Research & Education Association., New Jersey, (1992), pp.814-818
- [25] G.D. Saravacos and A.E. Kostaropoulos, **Handbook of food processing equipment**, Kluwer Academic., New York, (2002), pp.285
- [26] R.P. madding, “IR window transmittance temperature dependence”, InfraMation 2004 Proceedings, July 2004.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The seal of Rajabhat Nakhon Phanom University is a circular emblem. It features a central sun with rays, flanked by two traditional Thai stupas. Below the sun is a large Thai character '๙' (9). The entire emblem is surrounded by a decorative border with Thai text. The text at the top reads 'มหาวิทยาลัยราชภัฏนครพนม' (Mahavithayalai Rajabhat Nakhon Phanom) and the text at the bottom reads 'พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง' (Prachonkhae Jao Kun Thara Ladkrabang).

ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Modern Materials and Technologies
of Industrial Production**

Edited by
Zhang Jun
Honghua Tan

TTP TRANS TECH PUBLICATIONS

**Modern Materials and Technologies
of Industrial Production**

Zhang Jun and Honghua Tan

TTP



ISBN-13: 978-3-03785-860-8

Advanced Materials Research Vol. 811

Electronically available at <http://www.scientific.net>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**Modern Materials and Technologies
of Industrial Production**

Edited by
Zhang Jun
Honghua Tan

TTT TRANS TECH PUBLICATIONS

**Modern Materials and Technologies
of Industrial Production** Zhang Jun and Honghua Tan

TTT



ISBN-13: 978-3-03785-860-8
Advanced Materials Research Vol. 811
Electronically available at <http://www.scientific.net>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Emissivity Estimation Using Thermographic Camera

N.Nunak¹, K.Roonprasang¹, T.Suesut² and T.Nunak²

¹Department of Food Engineering

²Department of Instrumentation and Control Engineering Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand 10520

Tel : +66-2-329-8356; E-mail: kbnaph@kmitl.ac.th

Keywords: Emissivity, Thermographic camera, Infrared thermography

Abstract. This paper proposes a method based on the spectra response of IR detectors mounted on thermographic camera for emissivity measurement at various target surface temperatures, while the reflected temperature is taken into account, and also studies on the effect of surface roughness on the emissivity value. The emissivity ($\epsilon_{8-14\mu m}$) of general engineering material such as iron, stainless steel, brass, copper and aluminum obtained in this paper are in agreement with other literatures. Finally, results found that the roughness and emissivity of equipment increases with increasing of the operating time.

Introduction

The emissivity is a surface radiative property which is defined as how much radiation emitted by a surface compared to a blackbody at the same temperature [1]. It depends on many factors such as type of material, surface treatment (polishing, blasting, rolling, etc.), surface roughness, oxidation, viewing angle, temperature, and wavelength [1, 2, 3]. The emissivity highly influences to the temperature measurement especially with infrared pyrometer as the amount of energy radiating from the measured target object depends on the emissivity. The total signal captured by IR detectors mounted on thermographic camera is mainly the emission and reflection of a target surface. In order to obtain the accurate temperature measurement with infrared thermometer or infrared camera, the user should know the emissivity of measured object and reflection from the object. The ASTM E 1862-97 [4] defined the reflection as the 'energy incident upon and reflected from the measurement surface of a specimen' and reflected temperature depends mainly on the surrounding radiation. Campo et al. [2] mentioned that the emissivity values should be measured in the operating conditions. If this is not possible, the value could be searched from the research literatures.

Infrared thermography systems are suitable for a wide range of applications due to their portability, real-time imaging, non-invasive and non-contact temperature measurement capability [5]. There are many applications of infrared thermography such as estimation of internal temperature in the product during heating process [6]; planning for preventive maintenance; determination of thermal diffusivity of aluminum, copper and brass [7]; and inspection of process [8], etc. Most of them are pointed that the advantage of thermal image camera is for the non-destructive testing. The applications of infrared thermography can be divided into two groups: quantitative and qualitative measurements. The qualitative temperature measurement displays the data in number. The accurate measured value is very important. Therefore, the accurate emissivity is taken into account.

Several methods for emissivity measurement have been done. Some methodologies concerned about the reflected temperature. Schurer [9] measured the IR emissivity in two wavelength bands, providing the surface reflectivity with the use of a black painted hood with known temperature. Dacu et al. [10] used a highly reflective and diffusive aluminum mirror to quantify the surroundings mean radiation for improving the accuracy of surface temperature measurement. Some researchers have studied about the effect of surface roughness on the emissivity value. Wen and Mudawar [11] proposed the model to predict the emissivity from the surface roughness parameter. They found that there was a good relationship between the emissivity of aluminum alloy surfaces and surface roughness, especially with increasing temperature. The main drawback of many

methods was the complexity of the experimental setup. Recently, Marinetti and Cesaratto [3] have proposed a method for emissivity estimation which was based on the spectral response of a specific IR sensor without the use of reference materials. In their research the surroundings radiation was unknown but kept approximately constant; therefore, the reflected temperature was neglected, and its knowledge was not required. Thus, the non-sophisticate experimental setup for the emissivity estimation was the advantage of this method. However, they found that emissivity values obtained from the proposed method was influenced for outdoor temperature measurement, where the knowledge of the reflected temperature was important.

According to the main advantage of thermal image camera (TI) is non-invasive and non-contact temperature measurement, it is widely applied to many applications in outdoor conditions. The accurate temperature measurement which effected from the emissivity value is required for qualitative analysis especially when applied for the preventive maintenance of equipment. The measured temperature highly influences to the operator in making a decision such as a maintenance monitoring system of equipment in the electrical distribution system. Therefore, this paper proposes a method based on the spectra response of IR detectors mounted on thermographic camera for emissivity measurement at various target surface temperatures, while the reflected temperature is taken into account. Also, this paper studies on the effect of surface roughness on the emissivity value.

Principle of infrared thermography

Infrared thermography is a system of recording temperature by measuring infrared radiation emitted from a target surface. A large number of point temperatures are measured over an area and form to a thermal map of the target surface. For TI camera, temperature measurement method is converting the infrared energy emitted from a measured target surface into an electrical signal via IR detectors mounted on the camera and displays the true surface temperature as a colour or monochrome thermal image or a number [5, 12].

The intensity of energy emitted by a blackbody (L_0) at temperature T can be obtained by the Planck's distribution law (Eq. (1)).

$$L_0 = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{\pi [\exp(C_2 / \lambda T) - 1]} \quad (1)$$

Where C_1 is the first radiation constant: $3.741832 \times 10^{-16} \text{ W}\cdot\text{m}^2$; C_2 is the second radiation constant: $1.4388 \times 10^{-2} \text{ m}\cdot\text{K}$; λ is the wavelength [m], and T is the absolute temperature [K].

However, for a real surface at the same temperature T , the amount of energy emitted will be smaller than that of a blackbody. The intensity of energy emitted from a real surface (L) depends on its temperature and emissivity (ϵ). The spectral emissivity (ϵ_λ), a surface radiative property, is defined as the ratio of energy emitted from a surface to that emitted from a blackbody at the same temperature (Eq. (2)). Therefore, emissivity can be expressed as

$$\epsilon_\lambda(T) = \frac{L(T)}{L_0(T)} \quad (2)$$

The emissivity can vary from 0 to 1 (perfect blackbody). It varies with the surface condition and with temperature and wavelength.

As infrared thermography operates at a limited bandwidth, for example TI camera at a wavelength range of 8-14 μm , the emissivity measurement method using this TI camera could be expressed as

$$\epsilon_{8-14\mu\text{m}}(T) = \frac{L_{8-14\mu\text{m}}(T)}{L_{0,8-14\mu\text{m}}(T)} \quad (3)$$

The perfect blackbody will absorb all irradiation (G , W/m^2), defined as the rate at which radiation is incident on a surface per unit area of the surface. In practical situations, portions of the irradiation may be reflected, absorbed, and transmitted (Fig. 1), depending on its wavelength and angle of incidence. From a radiation balance on the medium, it follows that

$$G = G_{\text{ref}} + G_{\text{abs}} + G_{\text{tr}} \quad (4)$$

then division by G , the equation can be expressed as

$$1 = \rho + \alpha + \tau \quad (5)$$

where α , ρ and τ are defined as the fraction of the total irradiation absorbed, reflected and transmitted by a surface, respectively.

Since the signal detected by the IR detectors mounted on TI camera is a combination of energy radiated (emission, E), absorbed, reflected and transmitted from surrounding target body, the energy that reflected from, absorbed in, and transmitted through the target surface shall be known for converting the thermal energy into the real surface temperature. If the transmission is neglected, the total radiation is captured by TI can be expressed as

$$J = \varepsilon E + (1-\varepsilon)G_{\text{ref}} \quad (6)$$

where J is radiosity accounts for all the radiant energy leaving a surface. It represents the rate at which radiation leaves a unit area of the surface. This radiation includes the reflected portion of the irradiation (G), as well as direct emission from the surface (E) (see Fig. 2). It is generally different from the emissive power depending on the emissivity value.

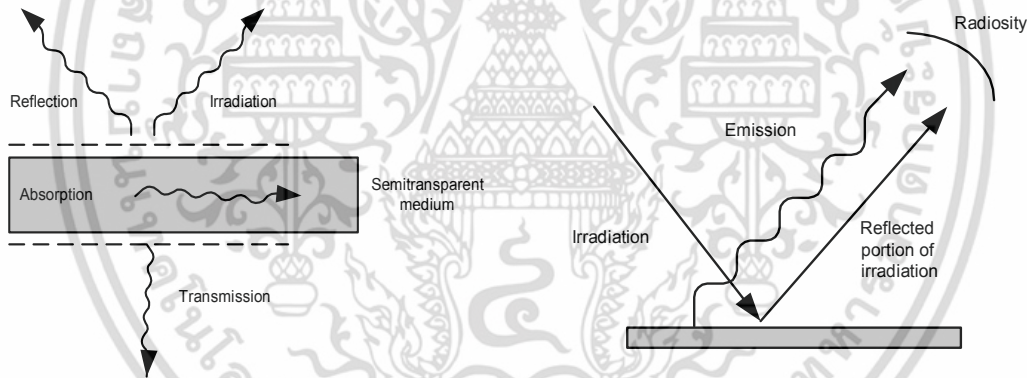


Fig. 1. Absorption (G_{abs}), reflection (G_{ref}), and transmission (G_{tr}) processes associated with a semitransparent medium

Fig. 2. Surface radiosity

Measurement system

The measurements were performed with a Fluke TI32 camera operating in the long-wave band (8 to 14 μm). The temperature measurement range is (not calibrated below $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$) $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $+600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($-4\text{ }^{\circ}\text{F}$ to $+1112\text{ }^{\circ}\text{F}$). The refresh rate of Image capture frequency is 9 Hz or 60 Hz, depending upon model variation. Detector type is 320 X 240 Focal Plane Array, uncooled microbolometer with operating temperature at $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($14\text{ }^{\circ}\text{F}$ to $122\text{ }^{\circ}\text{F}$). The amount of IR radiated from the target surface, including emission and radiation, was detected by IR sensor mounted on camera.

Suesut et al. [13] proposed the experimental setup (Fig. 3) that consisted of an oven chamber to heat up the sample and to ensure that the sample and reflected temperature is constant during the testing, and a jig and fixture for holding the sample in the marked position inside the chamber. The sample was placed with the fixture in the chamber and a thermocouple type K contact probe was

used to measure and record the target surface temperature. The chamber can be provided the temperature up to 300°C. The internal surfaces made from stainless steel for decreasing chamber surface radiation to target sample. The experiment was started by heating the sample until its temperature of 200°C and the cooling process was performed by the TI camera with an angle of 0° with respect to the normal of the target surface.

Samples of different materials were tested for emissivity measurement: iron plate, copper plate, stainless plate, aluminum plate, brass object as shown in Fig. 4 (a), (c), (e), (g), and (i), respectively, and some equipment in the electrical distribution system such as terminal lug of load break switch made from copper with tin plate; bolt and nut of distribution transformers. The effect of roughness on emissivity was also carried out with the new and used electrical distribution equipment approximately 3 years. The samples were performed the roughness test with Kasaka Surfcomer SE-40D and carried out the surface analysis with Energy Dispersive X-ray Analyser (EDX).

The temperature of oven chamber was set in the range of 50 – 200°C. The sample was held in the chamber and heated up to 200°C. The IR thermography was captured during the cooling process with a temperature decreasing about 10°C. Simultaneously, the thermal radiation radiated from the target sample surface was captured by IR sensors, and the temperature of the sample surface, chamber surface, TI camera surface (ambient temperature) was measured by thermocouple type K contact probes. The emissivity value presented on infrared thermography camera was adjusted until the temperature of the target surface measured by a contact probe being close or equal to that measured by TI camera.

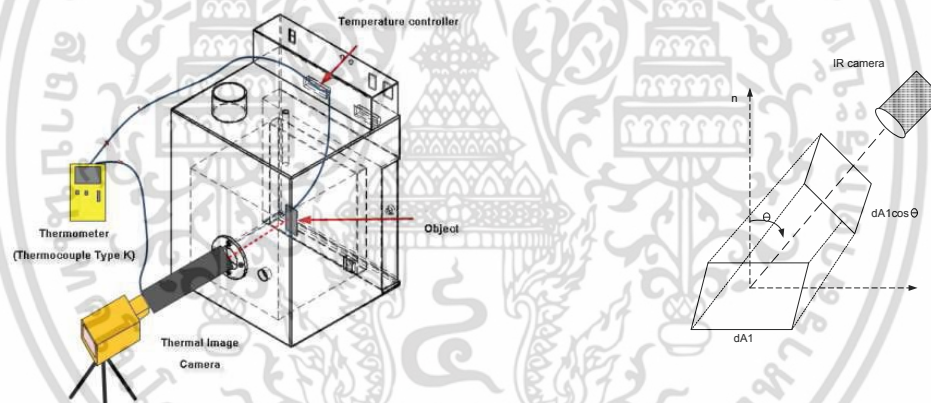
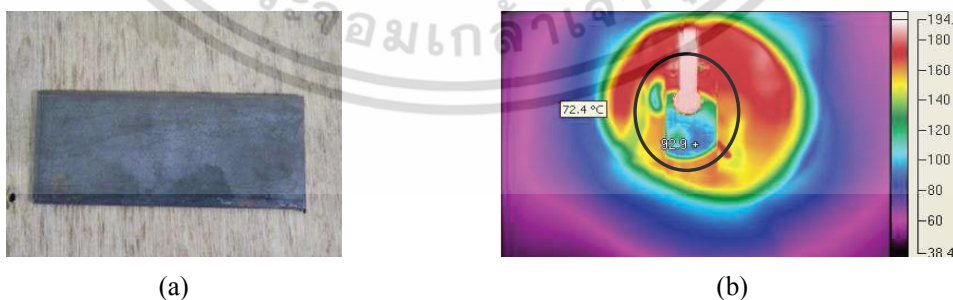


Fig. 3. Overview of the experimental setup



(a)

(b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

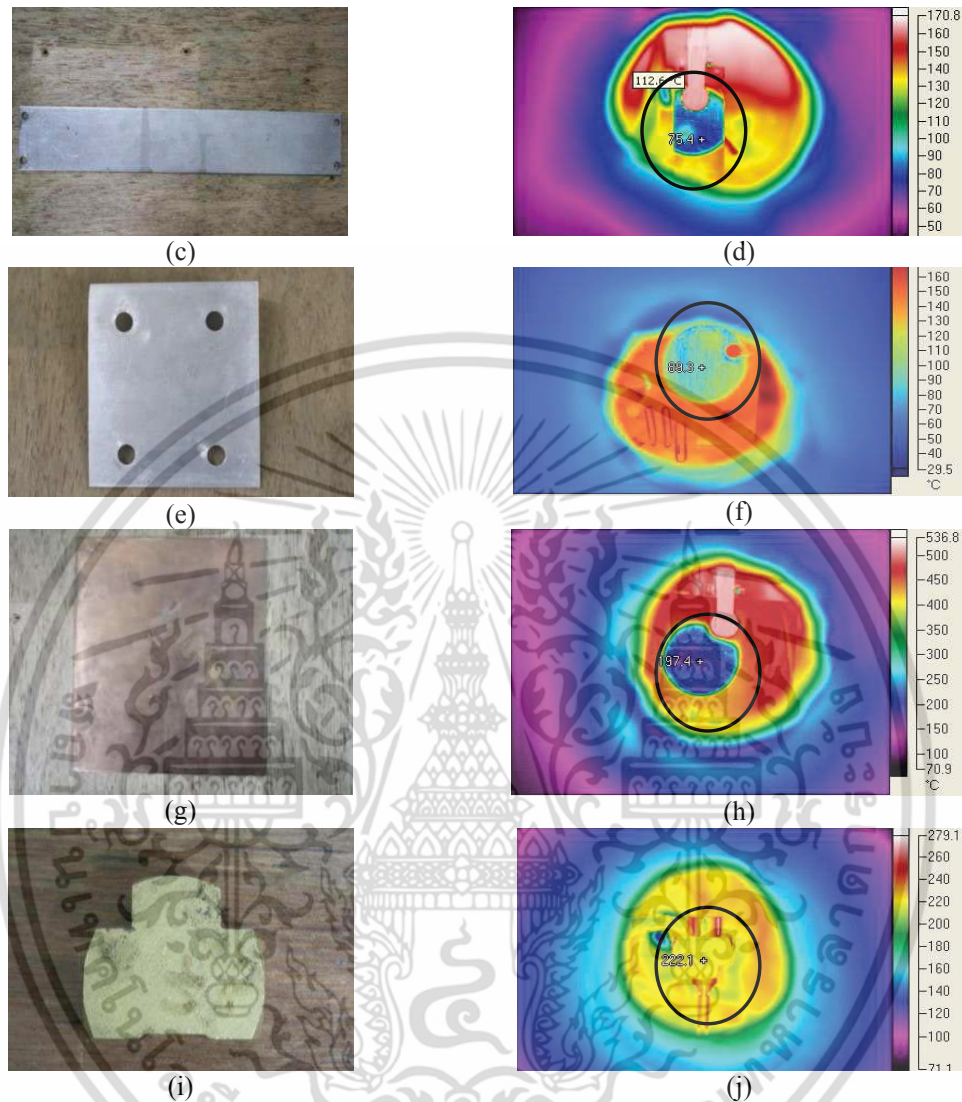


Fig. 4. Real image and thermal image of (a and b) iron plate; (c and d) stainless plate; (e and f) aluminum plate; (g and h) copper plate; and (i and j) brass object

The reflected temperature was required to set in the TI camera, measured by pointing the infrared camera at the target object and measuring the apparent surface temperature of an infrared reflector positioned on the target surface, which represents the reflected temperature of the object itself [4]. The reflection from the radiation of TI camera for various materials was presented in Fig. 4. In this paper, the reflected temperature was recorded at the reflection area as shown on the display of TI camera; therefore, for estimating emissivity $\varepsilon(T)$, the temperature measuring point must be located in the reflection area as presented in circle line on Fig. 4 (b), (d), (f), (h), and (j). All materials except brass have a smooth and quite gross surface. Their pictures have the same trend; the blue colour presents the reflection from the TI camera located outside the oven chamber. In case of brass object, it might be not suitable for measuring reflected temperature with this method. This is in agreement with the reported in ASTM E 1862-97 [4], this method is not suitable for a diffuse reflection.

Experimental results

The emissivity ($\epsilon_{8-14\mu m}$) of general engineering material such as iron, stainless steel, brass, copper and aluminum obtained from the method proposed in this paper was shown in Fig. 5. The emissivity value depends on type of material. The values are almost constantly through the temperature range of 50-200°C for all tested material types. Comparing among them iron plate was a highest emissivity (0.81-0.88) and copper plate was a lowest one (0.16-0.28). The estimated emissivity of various materials in this paper is in agreement with presented in the literature [14, 15, 16, 17].

The emissivity of new and three years terminal lug at a temperature of 50-200°C is presented in Table 1. As seen from Table 1 and Fig. 6, when the operating time of equipment increases, the roughness (in this paper) and the emissivity rises. This is in the expected since the emissivity of the oxides is usually higher than the emissivity of the metal [2].

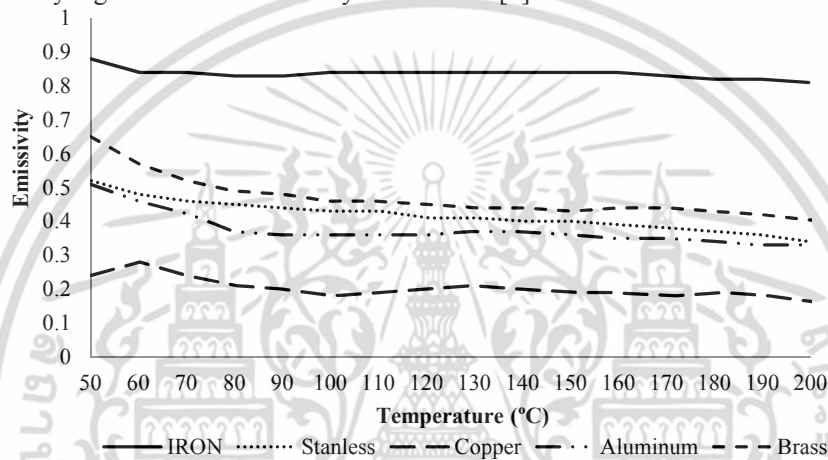
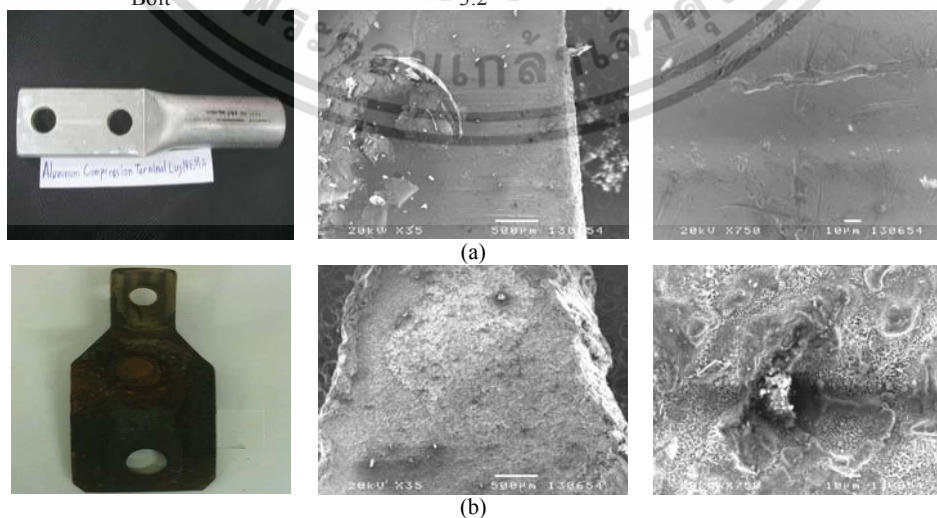


Fig. 5. Emissivity of different materials

Table 1 Typical of surface roughness and emissivity of equipment

Type of equipment		Roughness ($R_a, \mu m$)	Emissivity ($\epsilon_{8-14\mu m}$)
New:	Terminal lug	1.5	0.45-0.71
	Nut	2.0	0.47-0.77
	Bolt	1.4	0.47-0.77
Three years:	Terminal lug	9.1	0.43-0.69
	Nut	4.4	0.56-0.78
	Bolt	3.2	0.56-0.78



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

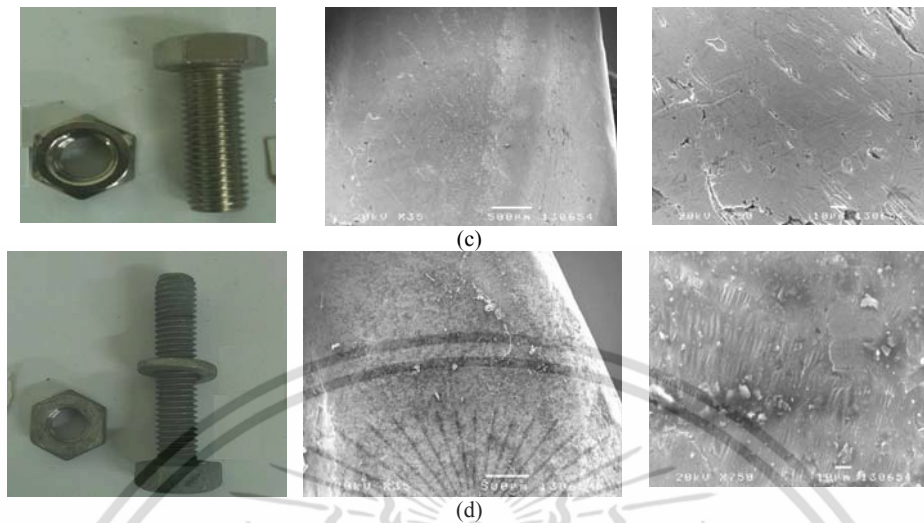


Fig. 6. Images and SEM images x35 and x750 of equipment: (a) new terminal lug; (b) three years terminal lug used; (c) new nut and bolt; and (d) three years nut and bolt used

Conclusion and recommendation

A method for emissivity measurement based on the spectra response of IR detectors mounted on thermographic camera is proposed. The experiment was carried out at a target surface temperature range of 50-200°C. The reflected temperature is taken into account for this proposed method. It was found that the emissivity ($\epsilon_{8-14\mu m}$) of general engineering material such as iron, stainless steel, brass, copper and aluminum measured in this paper are in agreement with other literatures. The emissivity value depends on type of material. The values are almost constantly through the temperature range of testing for all material types. Comparing among them iron plate was a highest emissivity and copper plate was a lowest one. Besides that this paper studied on the effect of surface roughness on the emissivity value. It was found that when the operating time of equipment increases, the roughness (in this paper) and the emissivity increase. Nevertheless, the obtained emissivity from the proposed method needs to validate in the operating conditions for evaluating the accuracy of temperature measurements, especially, in outdoor conditions.

References

- [1] F.P. Incropera, D.P. Dewitt, T.L. Bergmann and A.S. Lavine. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 6th edition. Wiley. Asia. 2006.
- [2] L.D. Campo, R.B. Perez-Saez, L. Gonzalez-Fernandez, X. Esquisabel, I. Fernandez, P. Gonzalez-Martin and M.J. Tello, Emissivity measurements on aeronautical alloys, Journal of alloys and compounds, Vol. 489 (2010), p. 482-487.
- [3] S. Marinetti and P.G. Cesaratto. Emissivity estimation for accurate quantitative thermography, NDT&E International, Vol. 51 (2012), p. 127-134.
- [4] ASTM E 1862-97, Standard test methods for measuring and compensating for reflected temperature using infrared imaging radiometers (2002).
- [5] A.A. Gowen, B.K. Tiwari, P.J. Cullen, K. McDonnell and C.P. ÓDonnell, Applications of thermal imaging in food quality and safety assessment, Trends in food science & technology, Vol. 21 (2010), p. 190-200

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [6] J.G. Ibarra, Y. Tao, J. Walker and C. Griffis, Internal temperature of cooked chicken meat through infrared imaging and time series analysis, Transactions of ASAE, Vol. 42 (1999), p. 1383-1390
- [7] J.M. Laskar, S. Bagavathiappan, M. Sardar, T. Jayakumar, J. Philip and B. Raj, Measurement of thermal diffusivity of solids using infrared thermography, Materials Letters, Vol. 62 (2008), p. 2740–2742
- [8] A. Brosse, P. Naisson, H. Hamdi, J.M. Bergheau, Temperature measurement and heat flux characterization in grinding using thermography, Journal of materials processing technology, Vol. 201 (2008), p. 590–595
- [9] K. Schurer, A method for measuring infrared emissivities of near-black surfaces at ambient temperatures. Infrared Phys Technol., Vol. 16 (1976), p. 157-163
- [10] S. Datcu, L. Ibos, Y. Candau, S. Mattei, Improvement of building wall surface temperature measurements by infrared thermography. Infrared Phys Technol, Vol. 46 (2005), p. 451-467
- [11] C. Wen and I. Mudawar, Modeling the effects of surface roughness on the emissivity of aluminum alloys, International Journal of heat and mass transfer, Vol. 49 (2006), p. 4279-4289
- [12] N. Arora, D. Martins, D. Ruggerio, E. Tousimis, A.J. Swistel, and M.P. Osborne, Effectiveness of a noninvasive digital infrared thermal imaging system in the detection of breast cancer, The American Journal of Surgery, Vol. 196 (2008) pp. 523-526.
- [13] T. Suesut, N. Nunak, T. Nunak, A. Rotrugsa and Y. Tuppadung, "Emissivity measurements on material and equipment in electrical distribution system", 11th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2011), KINTEX, Gyeonggi-do, Korea, 26th – 29th October 2011
- [14] D.G. Rao, Fundamentals of food engineering, Baba Barkha Nath., New Delhi., (2010), pp.203-204
- [15] M.Q. Brenster, Thermal radiative transfer and properties, John Wiley & Sons, (1992), pp.56-57
- [16] M. Fogie, Handbook of mathematical, scientific and engineering: formulas, tables, functions graphs, transforms, Research & Education Association., New Jersey, (1992), pp.814-818
- [17] G.D. Saravacos and A.E. Kostaropoulos, Handbook of food processing equipment, Kluwer Academic., New York, (2002), pp.285

Modern Materials and Technologies of Industrial Production

10.4028/www.scientific.net/AMR.811

Emissivity Estimation Using Thermographic Camera

10.4028/www.scientific.net/AMR.811.380



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2015

IMECS 2015, 18-20 March, 2015, Hong Kong

The International MultiConference of Engineers and Computer Scientists has been organized by the International Association of Engineers (IAENG), a non-profit international association for the engineers and the computer scientists. The IMECS 2015 takes place in The Royal Garden Hotel, Kowloon, Hong Kong, 18-20 March, 2015.

The focus of our conference is on the frontier topics in the theoretical and applied engineering and computer science subjects. The IMECS conferences have been serving as good platforms for our members and the entire engineering community to meet with each other and to exchange ideas. The conferences have also strove a balance between theoretical and application development.

Our IMECS 2015 has been organized with conference committees that have been formed with over three hundred committee members who are mainly research center heads, faculty deans, department heads, professors, and research scientists from over 30 countries. The conferences are truly international meetings with a high level of participation from many countries.

The response that we have received for the multiconference is excellent. The IMECS 2015 has attracted more than six hundred participants from over 50 countries. All submitted papers have gone through the peer review process. The summary of submissions and accepted papers in IMECS 2015 is as followed: total number of submissions reviewed: 617; total number of accepted papers: 313. And the overall acceptance rate in our multiconference is 50.73%.

Editors: S. I. Ao and Oscar Castillo and Craig Douglas and David Dagan Feng and Jeong-A Lee

ISBN of Vol I (pp1-592): 978-988-19253-2-9

ISBN of Vol II (pp593-1045): 978-988-19253-9-8

ISSN: 2078-0958 (Print) / ISSN: 2078-0966 (Online)

Publisher: Newswood Limited

Organization: International Association of Engineers

CONFERENCE PAPERS:

The 2015 IAENG International Conference on Artificial Intelligence and Applications

Air Conditioning Control System Learning Sensory Scale Based on Reinforcement Learning

Yohei Yamaguchi, Noritaka Shigei, and Hiromi Miyajima

Proceedings of The International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2015, pp1-6 [\[Online Full Text\]](#)

Yohei Yamaguchi, Noritaka Shigei, and Hiromi Miyajima, "Air Conditioning Control System Learning Sensory Scale Based on Reinforcement Learning," Lecture Notes in Engineering and Computer Science: Proceedings of The International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2015, 18-20 March, 2015, Hong Kong, pp1-6

Mutual Information-based Feature Selection in Spectrometric Data for Agriculture Applications

L.J. Herrera, V. Lafuente, R Ghinea, M.M Perez, I. Negueruela, H. Pomares, I. Rojas, and A. Guillen

Proceedings of The International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2015, pp7-13 [\[Online Full Text\]](#)

L.J. Herrera, V. Lafuente, R Ghinea, M.M Perez, I. Negueruela, H. Pomares, I. Rojas, and A. Guillen, "Mutual Information-based Feature Selection in Spectrometric Data for

Thermal Image Resolution on Angular Emissivity Measurements using Infrared Thermography

T. Nunak, K. Rakruangdet, N. Nunak, and T. Suesut

Abstract—This paper reports the effect of viewing angle and thermal image resolution (IFOV and FOV) of Thermal Imager (TI) on the emissivity, with a view to providing a potential temperature monitoring of equipment in the electrical power distribution system which the reliability of system is the most important concern. The results show that the emissivity, which is the most important parameter to obtain the accurate temperature, is approximately constant at the viewing angle less than 45°. In case of the changing of the object to detector distance, this will not affect to the temperature measurement if MFOV at the object level is smaller than the targeted object. This can be concluded that TI is an effective tool to measure the temperature and monitor the failure of electrical equipment installed in the position at far away from the operator.

Index Terms— Emissivity measurements, thermal imager, viewing angle, thermal image resolution, electrical equipment

I. INTRODUCTION

EMISSIVITY (ϵ) of object and infrared detector-to-object distance are technical factors for an accurate infrared thermography measurement which are the source of uncertainty in temperature measurement with the infrared camera. Emissivity values play a significant role in the determination of correct temperature of an object surface. Emissivity depends on many factors such as temperature, surface roughness, wavelength, and viewing angle [1], [2], [3]. In general, emissivity of a real surface is interested in emission at a given wavelength or in a given direction, or in integrated averages over wavelength and direction [4].

Thermal imager (TI) or infrared thermography is a novel nondestructive technique that measures the temperature of an object remotely by measuring infrared radiation emitted by an object surface. It can be used as a tool for monitoring process and preventive maintenance since the faults

generally presented with abnormal temperature distribution and easily detected by thermal image [2]. Electrical inspection is one of the monitoring applications that has successfully utilized from TI. The reliability is the most important topic that engineer who takes responsibility of the electrical power distribution system needs to concern in order to avoid the failure of equipment. This causes to the Condition Based Maintenance (CBM), based on using the real-time data, involves to the electrical system and need to be achieved maintaining the correct equipment before its failures actually occur. The contact measurement of temperature of the electrical power distribution system is usually impossible to achieve, whereas TI can be an effective tool to success [5], [6].

For accurate measurement of electrical equipment temperature by an infrared camera, emissivity and object to camera distance need to clearly understand. Since increasing of object to camera distance can decrease the spatial resolution of a thermal imaging system. This can affect to an accurate thermal image and can be achieved by choosing the right TI with the appropriate application. Spatial resolution is explained in many specifications of TI such as FOV, IFOV, and detector array [2].

There are several performance parameters of TI, which effected to a sharp and accurate thermal image, e.g. spectral range, temperature resolution, frame rate, and spatial resolution or thermal image resolution [2]. Some researchers have been studied about these parameters, e.g. Muniz *et al.* [7] have proposed the use of experimental models for error correction in temperature measurement by thermal imager due to the influence of the field of view of the imager's lens, combined with varying viewing angles between the measured object and the imager. However, they have not yet studied the accurate temperature measurement in the viewpoint of emissivity changes due to the thermal image resolution.

Also in general, the emission of a real surface differs from the Planck distribution. Emissivity of real surface obtained from TI with the specific infrared spectral band should be presented at a given direction. In 2011, Suesut *et al.* [8] have been studies the emissivity of electrical distribution equipment at a normal direction over wavelength band from 8 μm to 14 μm . Nevertheless, equipment in the electrical distribution system is installed at the approximately height of 10 meters above ground level, the operator who carry the TI for measuring the temperature of equipment usually is at an angle of elevation of 45° with the targeted object.

Manuscript received December 29, 2014, revised January 18, 2015

T. Nunak is with the King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Faculty of Engineering, Ladkrabang, Bangkok, 10520 Thailand (corresponding author to provide phone: 66-2-326-000; fax: 66-2-326-xxx; e-mail: t_nunak@yahoo.com).

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

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

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

Therefore, the main objective of this paper was to study the effect of viewing angle and the thermal image resolution (IFOV and FOV) of TI as the influence of instrument on the emissivity, with a view to providing a potential method capable of actual implementation. Also, consideration about these parameters has the benefit to operator for choosing an appropriate thermal imager because they had an influence on an accurate temperature measurement.

II. THEORETICAL BACKGROUND

A. Basic Principle of Thermal imaging

An object emits infrared radiation at a temperature above 0 K. The amount of radiation emitted by an object depends on its temperature and emissivity. Emissivity is defined as the ratio of energy emitted from an object to that of a blackbody at the same temperature. In general, the spectral radiation emitted by a real surface differs from the Planck distribution (Fig. 1). Emissivity of real surface is interested in emission at a given wavelength or in a given direction, or in integrated averages over wavelength and direction [4].

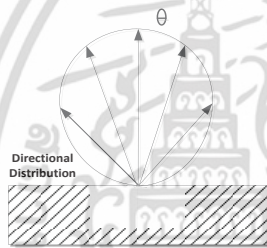


Fig. 1. Radiation emitted by a real surface at various directions or viewing angles (θ)

Source: Fundamentals of Heat and Mass Transfer [4]

For temperature measurement of an object with TI camera, the infrared radiation emitted from a measured object is converted into an electrical signal via IR detector in the camera and then processed into a thermal image which displayed a large number of point temperature over an area in form a thermal map of the measured object surface [2], [9].

B. Thermal Image Resolution

Thermal image resolution or spatial resolution is an important parameter, e.g. field of view (FOV), instantaneous field of view (IFOV), detector array, considered for choosing the infrared camera.

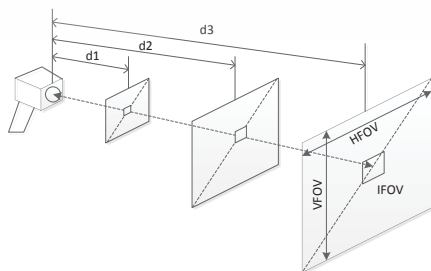


Fig.2. Spatial resolution at a different object to camera distances

This parameter can be used to indicate the ability of the camera to distinguish between two objects in the field of view. It primarily depends on object to camera distance, lens system and detector size. Thermal image resolution decreases with increasing object to camera distance as shown in Fig. 2. Lens system with small field of view has higher spatial resolution. Finally, detectors with larger number of array element will produce thermal images with better spatial resolution [2].

III. EXPERIMENTS

A. Experimental Setup

The equipment required for the experiments consists of an infrared camera of a thermal imager, a tripod of camera stand, and a heating unit. Fig. 3 shows the schematic of a typical experimental setup, where the thermal imager camera is placed suitably in front of the sample placed on thermoelectric cooling device (TEC) constructed on the holder. TEC was used as a heat source. The temperature was controlled by a DC power supply (24 V 2.1 A) with a current regulator circuit. In order to measure the emissivity at various directions, a special sample holder was used to enable adjusting of the samples direction as shown in Fig 3.

The acquired thermal images are displayed on the TI screen and stored in the personal computer and real time temperature of the sample can be remotely measured. Typical thermal images of samples at normal direction and 45° to the normal direction along with their original photograph are presented in Fig.4.

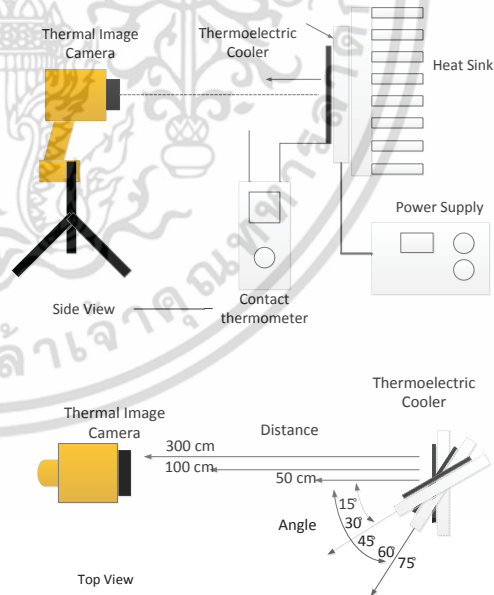


Fig. 3. Schematic of a typical experimental setup

B. Thermal Imager (TI)

Infrared detector with a band pass filter from $7.5 \mu\text{m}$ to $14 \mu\text{m}$ was used in experiments. A portable infrared camera or

thermal imager Tl400 (Fluke Corporation, USA), with a temperature measurement range of -20 to 1,200°C and an accuracy of ±2°C at 25°C or 2%, whichever is greater, was used in experiments. The thermal detector was a Focal Plane Array, uncooled microbolometer of 320 x 240 pixels with the field of view 24° (horizontal) x 17° (vertical), spatial resolution (IFOV) 1.31 mRad and minimum focus distance of 15 cm. An addition lens type (telephoto IR) with the field of view 12° (horizontal) x 9° (vertical), IFOV 0.65 mRad and minimum focus distance of 45 cm was also used. The thermal sensitivity was 0.05°C at 30°C. Thermal images were analyzed by thermal imager software Fluke

TABLE I
THERMAL IMAGE RESOLUTION OF THERMAL IMAGER (Ti400) AT VARIOUS OBJECT TO DETECTOR DISTANCE

Distance (cm)	FOV ^a (cm)	IFOV ^b (cm)
50	21x16 ^c	0.07x0.07 ^c
100	42x31	0.13x0.13
300	126x94	0.39x0.39
300 ^e	63x47	0.2x0.2

^aField of View; ^bInstantaneous Field of View; ^cHorizontal size x vertical size; ^dIR tele lens type

SmartView® 3.5. The thermal image resolution of Ti400 at different distances is presented in table 1.

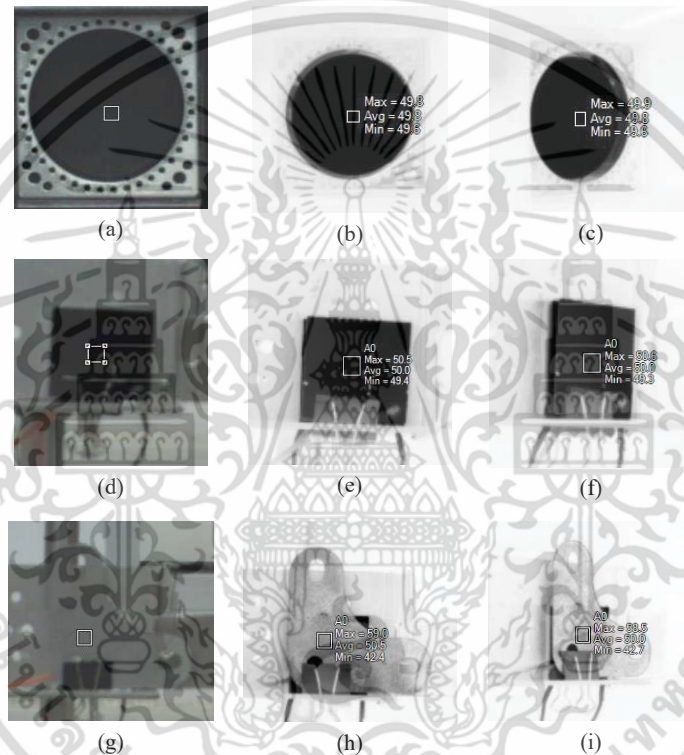


Fig. 4. Typical (a, d, g) original photograph and thermal images (b, e, h) at normal direction and (c, f, i) at 45° to the normal direction of blackbody, black painted sheet, and galvanized zinc sheet, respectively

C. Measurement Method

Three types of experiments were carried out. The change of emissivity of targeted object due to variations in viewing angle was studied. Then, the effect of IFOV and FOV changes on emissivity was investigated by changing the object to detector distance and lens type. The radiation emitted from the sample is measured using an infrared radiation detector, which has been calibrated at a blackbody model 9132 (HART Scientific, USA) during separate measurement in order to ensure that the obtained results from each experiment had no effect of the instrument.

Temperature of sample surface measured by TI was simultaneously measured with a J-type contact thermocouple, in order to record the actual temperature, which are placed on the sample surface, close to the area

viewed by the infrared detector. Emissivity of the object at each condition as displayed in TI was adjusted until the temperature measured with TI equal to that of a thermocouple, then the adjusted emissivity is the actual value of the object. The reflection temperature or sometimes call the background temperature (T_{BG}) is a parameter that affects the emissivity measurement; therefore, it was monitored during experiments for determining the reflection of radiation of the surrounding. In this study, T_{BG} was between 25.1°C to 26.4°C.

Experiments were performed on two types of samples: square piece of black painted sheet, as a representative of the high emissivity sample, and galvanized steel sheet, as a representative of the low emissivity sample, as a part of the electrical distribution equipment such as PG clamp, connector or bolt. The sample coated with a black-paint for

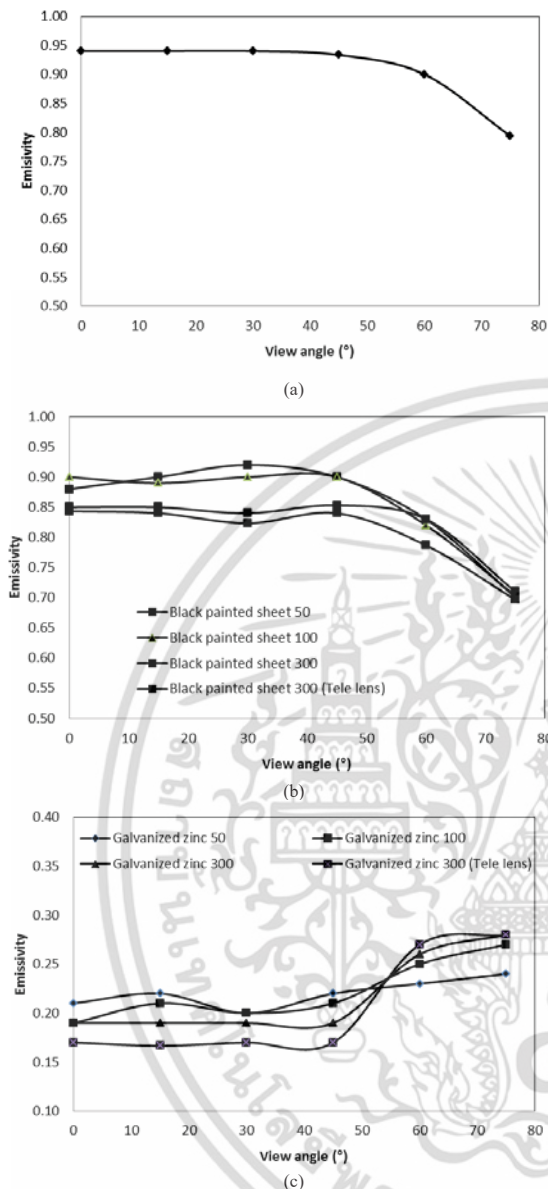


Fig. 5. Emissivity of (a) blackbody device, (b) black painted sheet, and (c) galvanized zinc steel sheet as a function of the emission angle at distance of 50 cm, 100 cm, 300 cm, and 300 cm with addition tele infrared lens

enhancing surface emissivity. The emissivity of each sample was measured at the temperature of 50°C normal to the surface and at the viewing angles 15°, 30°, 45°, 60°, and 75° to the normal direction at object to detector distance of 50 cm, 100 cm, and 300 cm. For each viewing angle the same sample was used for emissivity measurement. Each experiment was repeated three times and the average value was taken from the recorded data.

IV. RESULTS AND DISCUSSIONS

A. Effect of Viewing Angle on Emissivity

The first experiment was carried out to understand how

the angle of view was influenced to the emissivity. Changing in the emissivity was recorded in each direction, and results for all samples are shown in Fig. 5 (a, b, and c). It can be seen that the emissivity of all three types of samples is approximately constant over a range of viewing angle and dramatic changes to increasing or decreasing with increasing of viewing angle depends on sample types. Emissivity of blackbody device and black painted sheet starts to decrease at the angle beyond 45°, whereas that of galvanized zinc steel sheet increases at this viewing angle. These results are in agreement with reported in the textbook of Fundamentals of Heat and Mass Transfer [4], which explained about the influence of viewing angle on emissivity of a surface. For emissivity of conductors, it is approximately constant over the range of angle less than or equal to 40° ($\theta \leq 40^\circ$), after which it increases with increasing of angle. In contrast, for the emissivity of nonconductors, it is approximately constant for angle less than or equal to 70° ($\theta \leq 70^\circ$), beyond which it decreases sharply with increasing of angle.

B. Effect of distance between object and detector on Emissivity

The increasing of object to detector distance causes the increasing of the size of a single pixel (IFOV) and the horizontal and vertical enlargement of the total measuring field (FOV) at the object level as explained in Fig. 2. FOV and IFOV of TI at various distances is shown in Table 1. It can be seen from the results in Fig. 5 (b and c), the emissivity for all distances at the same viewing angle are quite similar. This is thought to be due to the measured size or measurement field of view (MFOV) at the object level is smaller than the targeted object, as a highlighted rectangular frame on the picture in Fig. 4, for all objects to detector distances and all viewing angles even IFOV and FOV are changed.

C. Effect of Lens type on Emissivity

Changing IR lens from standard type to tele type can also changes the thermal image resolution as IFOV and FOV changed. It can be seen from the Fig. 5 (b and c) that the emissivity of both standard lens and tele lens at the same distance (300 cm) has almost the same values. This can be explained with the similar reasons of changing in object to detector distance. However, it was found that there is a slight variation in the results of the galvanized zinc steel sheet at a distance of 300 cm. This is probably due to the emissivity of this sample is quite low, causing to the sample meets the large effect of the surrounding radiation.

V. CONCLUSION

From the importance of accurate temperature measurement using TI, especially when used for monitoring the operation of the electrical power distribution system that the reliability of system is the most important thing, this paper reports the effect of viewing angle and thermal image resolution (IFOV and FOV) of TI on the emissivity, with a view to providing a potential method capable of actual implementation. The results show that the emissivity, which is the most important parameter to obtain the accurate

temperature, is approximately constant at the viewing angle less than 45° . Although changing of the object to detector distance causes to change the thermal image resolution, this will not affect to the temperature measurement if MFOV at the object level is smaller than the targeted object. This can be concluded that TI is an effective tool to measure the temperature and monitor the failure of electrical equipment installed in the position at far away from the operator. Nevertheless, most of electrical equipment has the low emissivity that will be affected from the surrounding radiation. Their exact values of emissivity at each angle should be reconsidered with concern the reflection, and also the results should be brought to determine the emissivity correction methodology at different angles in further research.

REFERENCES

- [1] R. Brandt, C. Bird, and G. Neuer, "Emissivity reference paints for high temperature applications," *Measurement*, vol. 41, pp. 731-736, Nov. 2008.
- [2] S. Bagavathiappan, B.B. Lahiri, T. Saravanan, J. Philip, and T. Jayakumar, "Infrared thermography for condition monitoring- A review," *Infrared Physics & Technology*, vol. 60, pp. 35-55, Mar. 2013.
- [3] S. Marinetti and P.G. Cesaratto, "Emissivity estimation for accurate quantitative thermography," *NDT&E International*, vol. 51, pp. 127-134, Jun. 2012.
- [4] 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. 746-747.
- [5] R.A. Epperly, G.E. Heberlein, and L.G. Eads, "A tool for reliability and safety: predict and prevent equipment failures with thermography," *IEEE Conf. Petroleum and Chemical Industry*, pp. 59-68, 1997.
- [6] N.Y. Utami, Y. Tamsir, A. Pharmatrisanti, H. Gumiland, B. Cahyono, and R. Siregar, "Evaluation condition of transformer based on infrared thermography results," *Proceedings of the 9th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, pp. 19-23, 2009.
- [7] 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.
- [8] T. Suesut, N. Nunak, T. Nunak, A. Rotruga, and Y. Tuppadung, "Emissivity measurements on material and equipment in electrical distribution system," *International Conference on Control, Automatin and Systems*, pp. 1259-1263, Oct. 2011.
- [9] A.A. Gowen, B.K. Tiwari, P.J. Cullen, K. McDonnell, and C.P. O'Donnell, "Applications of thermal imaging in food quality and safety assessment," *Trends in Food Science & Technology*, Vol. 21, pp. 190-200, 2010.

Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2015

WCECS 2015, October 21 - 23, 2015, San Francisco, USA

The World Congress on Engineering and Computer Science has been organized by the International Association of Engineers (IAENG), a non-profit international association for the engineers and the computer scientists. The WCECS 2015 takes place in San Francisco, USA, 21-23 October, 2015.

The focus of our conference is on the frontier topics in the theoretical and applied engineering and computer science subjects. The WCECS conferences have been serving as good platforms for our members and the entire engineering community to meet with each other and to exchange ideas. The conferences have also strove a balance between theoretical and application development.

Our WCECS 2015 has been organized with conference committees that have been formed with over two hundred and sixty committee members who are mainly research center heads, faculty deans, department heads, professors, and research scientists from over 20 countries. The conferences are truly international meetings with a high level of participation from many countries.

The response that we have received for the congress is excellent. The WCECS 2015 has attracted more than six hundred participants from over 40 countries. All submitted papers have gone through the peer review process. The summary of submissions and accepted papers in WCECS 2015 is as followed: total number of submissions reviewed: 619; total number of accepted papers: 315. And the overall acceptance rate in our congress is 50.89%.

Editors: S. I. Ao and Craig Douglas and W. S. Grundfest and Jon Burgstone

ISBN of Vol I (pp1-528): 978-988-19253-6-7

ISBN of Vol II (pp529-1061): 978-988-14047-2-5

Publisher: Newswood Limited

Organization: International Association of Engineers

CONFERENCE PAPERS:

International Conference on Circuits and Systems 2015

DD-TDMA: A Distributed Dynamic TDMA Bus for 3D Bus-NoC Hybrid Network

Gaizhen YAN, Ning WU, Lei ZHOU, and Feng GE

Proceedings of The World Congress on Engineering and Computer Science 2015, pp1-6 [\[Online Full Text\]](#)

Gaizhen YAN, Ning WU, Lei ZHOU, and Feng GE, "DD-TDMA: A Distributed Dynamic TDMA Bus for 3D Bus-NoC Hybrid Network," Lecture Notes in Engineering and Computer Science: Proceedings of The World Congress on Engineering and Computer Science 2015, 21-23 October, 2015, San Francisco, USA, pp1-6

A New Multi-Level Switching Amplifier Architecture with Improved Power Efficiency

Jan Doutreloigne

Proceedings of The World Congress on Engineering and Computer Science 2015, pp7-11 [\[Online Full Text\]](#)

Jan Doutreloigne, "A New Multi-Level Switching Amplifier Architecture with Improved Power Efficiency," Lecture Notes in Engineering and Computer Science: Proceedings of

<http://www.iaeng.org/publication/WCECS2015/> ทรัพยากรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการ 1/30

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Surrounding Effects on Temperature and Emissivity Measurement of Equipment in Electrical Distribution System

T. Nunak, N. Nunak, V. Tipsuwanporn, and T. Suesut

Abstract—This paper reports the effect of surrounding conditions, e.g. IR radiation through IR window and the reflectivity and temperature of internal surface of chamber on the temperature and emissivity measurement. The results show that the transmission percentage of IR window is about 50 for all IR temperatures, except when the target temperature was the same as the surrounding temperature (T_{sur}). At this condition ($T_s = T_c$), the temperature readings were almost the same for all percentage of IR window. The accurate temperature measurement can be achieved by adjustment of the transmission correction in the IR camera or in the software. Considering the effect of materials surface and temperature of chamber, it can be concluded that the surrounding conditions can affect to the accurate emissivity measurement only with the high reflectance object, whereas the high emissivity object has no effect from the surround.

Index Terms— Temperature and Emissivity measurement, Reflectivity, Infrared thermography, IR window, Electrical distribution system

I. INTRODUCTION

ELECTRICAL distribution system has the main function to deliver the electricity from the transmission system to individual consumers. It consists of the utility electricity production, high voltage distribution, switchyards and substations, service transformers, switchgear, breakers, and meters [1]. The failure of electrical power distribution system can be occurred from many issues, e.g. poor surface contact, under-sized conductors, eddy current, loose connections or excessive current flow, causing to an unusual heat distribution as a hot spot around the equipment, and can be inspected with a contact or non-contact thermometer. For this application, an infrared thermography or thermal image (TI) camera, the non-contact temperature instrument, can be

used as an effective tool to inspect the equipment before their failures actually occur in order to maintain the reliability of the system which is the most important topic that needed to be taken into account from the electrical engineer who takes responsibility. This implementation is called the Condition Based Maintenance (CBM) [1] [2] [3].

An accurate temperature measurement of the electrical equipment is an important decision variable for the preventive maintenance of the electrical system. It can be affected from many factors: technical skill of the thermographer; technical factors or specification of an instrument such as thermal image resolution and thermal sensitivity; environmental or surrounding conditions such as relative humidity, temperature, wind speed, electric current load of the targeted equipment, and its emissivity. Several researchers have been studied on the emissivity measurement because it has a significant role to the temperature measurement of an object with TI camera [4] [5]. Emissivity is a surface radiative property, which relates to the amount of radiation emitted by an object [6]. In case the wrong emissivity value is entered into the TI camera, the displayed temperature on screen will be wrong.

Suesut *et al.* [7] and Nunak *et al.* [8] have been proposed the emissivity measurement method and have been reported the emissivity values of several electrical distribution equipment, e.g. terminal lug, bail clamp, driving stud, and insulators, which made of many types of materials, at the temperature range of 30°C to 200°C. They estimated the emissivity of object during the cooling process. The temperature of hot object is decreased with the convective heat transfer between the ambient air and hot object via the prepared aperture in front of the chamber. This may cause to be the source of uncertainty in measurement because it is difficult to maintain the constant temperature. Besides that, they chose the stainless steel to be an internal surface of chamber with the reason for decreasing the radiation from chamber surface to sample. However, this may be not true for all types of materials.

Therefore, the main objective of this paper is to study effect of surrounding conditions i.e. (1) mounting the infrared window (IR window), which is the infrared-transparent window, at the aperture in front of the chamber for controlling the temperature to be constant during the testing and (2) considering the characterization of internal surface of chamber, i.e. reflectivity and temperature of internal surface of chamber on the accurate temperature and emissivity measurement of tested samples.

Manuscript received June 29, 2015.

T. Nunak is with the King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Faculty of Engineering, Ladkrabang, Bangkok, 10520 Thailand (corresponding author to provide phone: 66-2-329-8347; fax: 66-2-329-8349; e-mail: teerawat@measuretronix.com).

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

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

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

II. THEORETICAL BACKGROUND

A. Thermal Radiation (Emission and Irradiation)

All objects emit thermal radiation at a temperature above 0 K. The mechanism of emission is related to energy released as a result of oscillations or transitions of electrons within the matter. The amount of radiation or emission (E) depends on its temperature and emissivity (ϵ), and the magnitude varies with wavelength and direction. Emissivity is defined as the ratio of energy emitted from an object to that of a blackbody at the same temperature. It depends strongly on the nature of the surface, which can be influenced by the method of fabrication, thermal cycling, and chemical reaction with its environment [6].

Incident radiation may originate from emission and reflection occurring at other surfaces (Fig. 1). The intensity of the incident radiation may be related to an important radiative flux, terms the irradiation (G), which encompasses radiation incident from all directions. It may be incident from all possible directions, and may originate from several different sources.

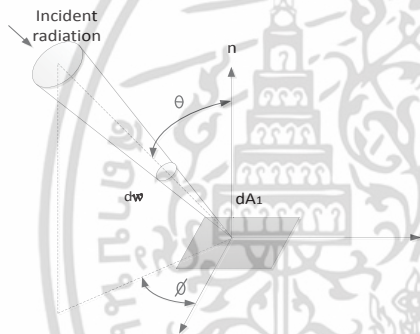


Fig. 1. Incident radiation.
 Source: Fundamentals of Heat and Mass Transfer [6]

B. Surface Reflection, Transmission, and Radiosity

Reflectivity (ρ) and transmissivity (τ) are properties to characterize the reflection and transmission (Fig. 2 (a)). In general they depend on surface material and finish, surface temperature, and the wavelength and direction of the incident radiation. The reflectivity is determined as the fraction of the incident radiation reflected by a surface, also depends on the direction of the reflected radiation. Most engineering applications assume the medium to be opaque to the incident radiation ($\tau = 0$) and the diffuse reflection (Fig. 2 (b)) [6].

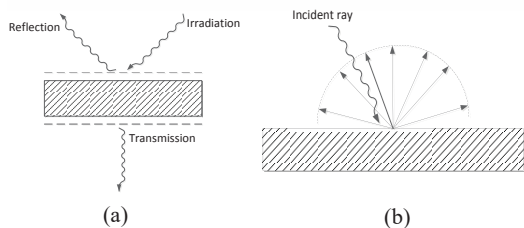


Fig. 2. (a) Reflection and transmission of semitransparent medium, (b) diffuse reflection.

Radiosity (J) represents the rate at which radiation leave a unit surface. This radiation includes the reflected portion of the irradiation and the direct emission from the object surface.

III. EXPERIMENTS

A. Experimental Setup

There are two sets of the experimental setup (Fig. 3), which consists of five main equipment, e.g. an infrared camera (Ti-400, Fluke Corporation, USA), J-type contact thermocouple, a tripod of camera stand, IR window (Fluke, CLKT Type: 3, 12 indoor/outdoor use) and a heating unit, as explained the detail of some equipment in Nunak *et al.* [5]. Thermal images were analyzed by thermal imager software Fluke SmartView® 3.5. The infrared radiation detector was calibrated before performing the experiment in order to ensure that the obtained results from each experiment had no effect of the instrument.

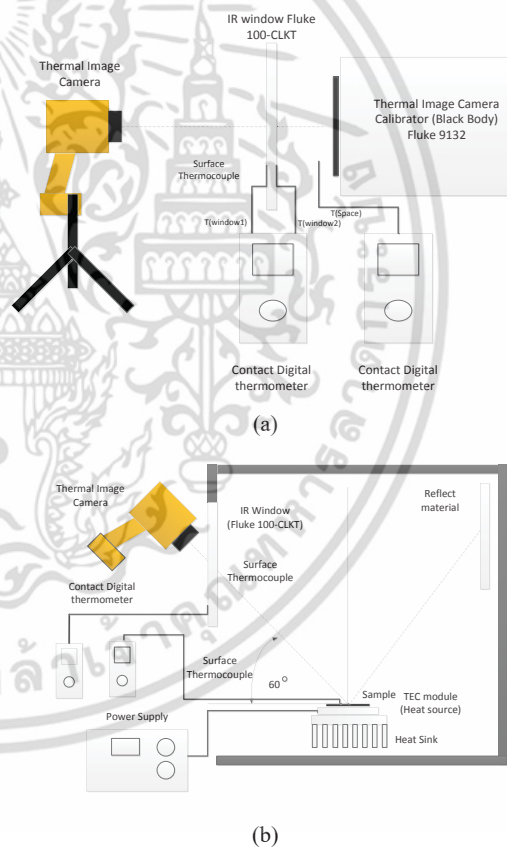


Fig. 3. Schematic of a typical experimental setup.

Fig. 3 (a) shows a schematic of the experimental setup for studying the changes in radiative properties of IR window (emission and transmission) at various surface temperatures. The measured object, in this experiment was Blackbody (model 9132, HART Scientific, USA), which the emissivity is known, i.e. 0.95). An IR camera is placed in front of the Blackbody in order to obtain the normal direction ($\theta = 0^\circ$) to

the object surface. Fig. 3 (b) shows a schematic of the experimental setup for studying the effect of reflection on the tested sample. An IR camera is placed at the viewing angles 45° to the normal direction ($\theta = 45^\circ$) [5]. The sample placed on thermoelectric cooling device (TEC) constructed on the holder for heating the sample. The temperature was controlled by a DC power supply (24 V 2.1 A) with a current regulator circuit. Inside the chamber, the reflective material (very low emissivity) and general material (high emissivity) were placed on the surface of chamber for considering the effect of reflection on the emissivity of test samples.

C. Measurement Method

Two types of experiments were carried out. Firstly, the experiment was studied on the change of emission and transmission through IR window due to variations on surface temperature. From Fig. 3 (a), blackbody was set at the temperature of 50, 100, 150, 200, and 250, respectively. At each blackbody temperature (T_{BB}), three thermocouples were used for recording the temperature of medium (air) between IR window and blackbody, IR window at inside area (closely to blackbody), and IR window at outside area. The T_{BB} was measured using TI camera. The IR detector received the IR radiation of blackbody emitted through IR window and then processed into a thermal image which displayed temperature over an area in form a thermal map [2] [9]. Emissivity in TI camera was set at 0.95 for the blackbody. Percentage of transmission in the TI camera was adjusted from 10 to 100 every 10 percent. The temperature that obtained from TI camera at each percentage of transmission was recorded. The reflection temperature or background temperature (T_{BG}) in TI camera (Fluke) was monitored during experiments for determining the reflection of radiation of the surrounding. In this study, T_{BG} was about 29°C .

The second experiment, effect of reflection on emissivity was investigated by changing the material types placed on the surface chamber at different surface temperatures of internal chamber. Two types of samples were tested in this experiment, i.e. square piece of black painted sheet as a representative of the high emissivity electrical distribution equipment (bail clamp and connector splice compression) and galvanized steel sheet as a representative of the low emissivity equipment in the electrical distribution system such as drop fuse and terminal lug of load break switch SF6. At the internal surface chamber was mounted with two types of materials having the different reflective radiation. The experiment was divided into three groups, i.e. sample temperature (T_s) is lower than internal surface chamber temperature (T_c) ($T_s < T_c$), $T_s = T_c$, and $T_s > T_c$. The experiment was performed at the sample temperature of 30°C (room temperature) and 50°C , and also the chamber temperature was set at the same temperature of tested sample. The infrared radiation emitted from sample was detected by infrared detector through IR window which mounted in front of the tested sample. The percentage of transmission IR window was set at 50 as obtained result from the first experiment. The reflection temperature or background temperature (T_{BG}) in TI camera (Fluke) was set

at a temperature of T_c . Thermal image of tested samples from each experimental group was captured by TI and recorded for considering the effect of reflection occurred. The emissivity of each sample as displayed on TI camera, which considered in the infrared radiation area of 0.5 cm^2 locating at the center of each thermal image as a highlighted rectangular frame on the picture in Fig. 5, was adjusted until the presented temperature equal to measured temperature by a thermocouple contacted with the sample surface. Each experiment was repeated three times and the average value was taken from the recorded data.

IV. RESULTS AND DISCUSSIONS

A. Effect of temperature measurement through IR window

As we know the IR window transmittance is an important parameter for accurate temperature measuring. The more accurately IR window is known, the more accurately temperature is obtained [10]. Figure 4 gives the transmittance results for the IR window at the target temperature from 30°C (room temperature), 50, 100, 150, 200, and 250°C , which IR window temperature was

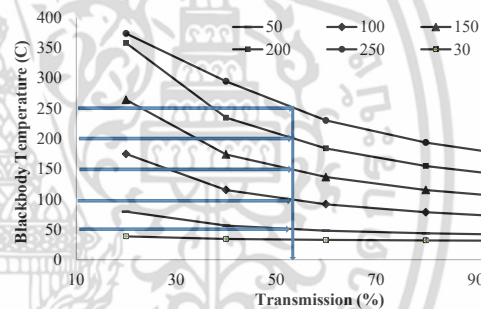


Fig. 4. IR transmission vs. target (blackbody) temperature from 30°C to 250°C .

approximately 32, 35, 41, 50, 57, and 65°C , respectively. It can be seen that the transmission percentage of IR window is in the range of 50 to 55 for all IR window temperatures which related to target temperatures or blackbody temperatures (in this experiment), except when the target temperature was the same as the surrounding temperature (T_{sur}). At this condition ($T_s = T_c$), the temperature readings were almost the same for all percentage of IR window.

The transmission percentage of IR window at 100% means all energy leaving from the target surface, which is called radiosity, can directly radiate to IR detector. When the infrared energy radiate through IR window, not all of the infrared energy emitted from the objects of interest is transmitted through the optical material in the window. The decreasing of transmission percentage causes the decreasing of the energy emitted to the IR detector. This will affect the accurate temperature measurement. However, this can be achieved, if the transmission percentage of the window is known. The accuracy of temperature measurement can be obtained by adjustment of the transmission correction in the IR camera or in the software.

B. Effect of reflection on emissivity measurement

This experiment was carried out to understand how the reflection had an influence to the emissivity measurement. Figure 5 shows the picture of thermal image of tested sample under the different control surrounding conditions, i.e. material reflectivity and temperature. At the target temperature and surrounding temperature or reflection temperature or background temperature being the same ($T_s = T_c$), the pictures of thermal image obtained from the sample having low and high emissivity with the reflection from internal chamber surface having low and high emissivity present the same (pictures not shown). This can be explained from the discussion of previous topic and the theory of radiosity [6]. For this situation, it is impossible to measure the emissivity because the temperature of sample was constant even the emissivity changed. In case of black painted sheet, the measured emissivity had no effect from all surrounding conditions as presented in Table 1. However, Fig. 5 (b) shows the image being colder than others in Fig. 5 (a, c, and d) since the sample emission was lower than the reflection. All thermal images of galvanized steel sheet in Fig. 5 shows the non uniform energy radiated to IR detector. Image in Fig. 5 (e and g) represents the low energy radiated

to IR window because the emissivity of tested samples is low and the emission from chamber surface is also not much. Considering images among Fig. 5 (e, f, g, and h), image in Fig. 5 (f and h) has the brightness higher than other images or looks warmer than others since the galvanized steel sheet is a low emissivity object and can reflect a lot of IR energy radiated from the high temperature of chamber. Comparing at the same temperature of chamber, it can be seen that the material of chamber surface having a high emissivity Fig. 5 (g and h) can affect to the accurate emissivity measurement. This cause to almost IR energy radiated to the IR detector is the reflection from the chamber surface instead of emission from sample surface. In case of galvanized steel sheet having a high reflectance, the measured emissivity was affected from the surrounding conditions, although the infrared energy radiated to IR detector was compensated by setting the condition e.g. surrounding temperature, in the TI camera. Therefore, it can be concluded that the surrounding conditions can affect to the accurate emissivity measurement with the high reflectance object, whereas the high emissivity object has no effect from the surround. The emissivity of tested sample using TI camera at different surrounding conditions is shown in Table 1.

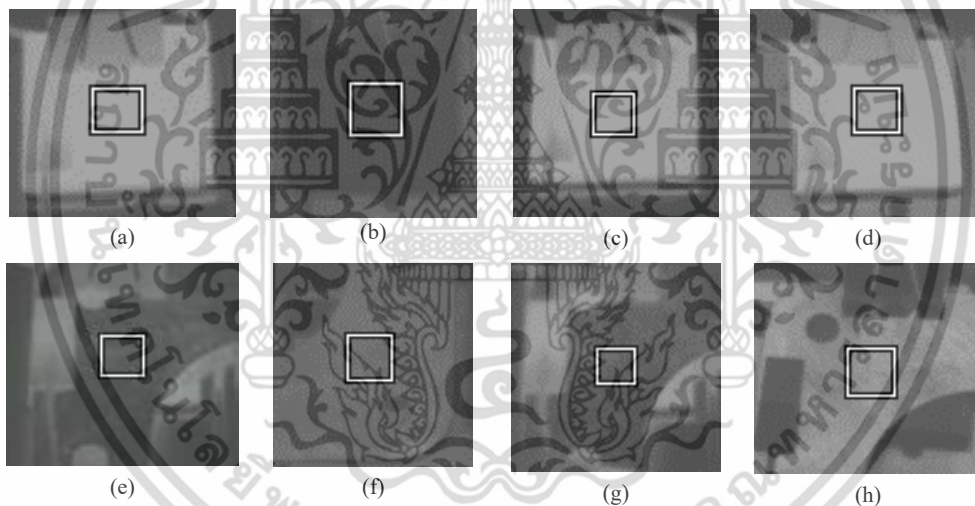


Fig. 5. Typical thermal images of black painted sheet (a, b) at $T_s > T_c$, and (c, d) $T_s < T_c$; and galvanized steel sheet (e, f) at $T_s > T_c$, and (g, h) $T_s < T_c$.

TABLE I
EMISSIVITY OF TARGET SAMPLE AT VARIOUS SURROUNDING CONDITIONS

Types of materials	Temperature	Chamber surface			
		High reflectance		Low reflectance	
		30°C	50°C	30°C	50°C
Black painted sheet	30°C	-	0.96 (b)	-	0.96 (d)
	50°C	0.96 (a)	-	0.96 (c)	-
Galvanized steel sheet	30°C	-	0.27 (f)	-	0.26 (h)
	50°C	0.24 (e)	-	0.21 (g)	-

^{Remark} alphabet (a, b, c, d, e, f, g, and h) presented in table referred to pictures in Fig. 5

V. CONCLUSION

As thermography or thermal image (TI) camera, the non-contact temperature instrument, can be used as an effective tool to inspect the electrical distribution equipment before their failures actually occur in order to maintain the reliability of the system. An accurate temperature measurement of the electrical equipment, based on the emissivity of each object, is an important decision variable for this applications. This paper reports the effect of surrounding conditions, e.g. IR radiation through IR window and the reflectivity and temperature of internal surface of chamber on the temperature and emissivity measurement. The results show that the transmission percentage of IR window is about 50 for all IR temperatures. The accurate temperature measurement can be achieved by adjustment of the transmission correction in the IR camera or in the software. Considering the effect of materials surface and temperature of chamber, it can be concluded that the surrounding conditions can affect to the accurate measurement of the high reflectance object, whereas the high emissivity object has no effect from the surround.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work has been carried out with the financial support of the EPPO (Energy Policy and Planning Office), Ministry of Energy, Thailand.

REFERENCES

- [1] R.A. Epperly, G.E. Heberlein, and L.G. Eads, "A tool for reliability and safety: predict and prevent equipment failures with thermography," *IEEE Conf. Petroleum and Chemical Industry*, pp. 59-68, 1997.
- [2] S. Bagavathiappan, B.B. Lahiri, T. Saravanan, J. Philip, and T. Jayakumar, "Infrared thermography for condition monitoring- A review," *Infrared Physics & Technology*, vol. 60, pp. 35-55, Mar. 2013.
- [3] N.Y. Utami, Y. Tamsir, A. Pharmtrisanti, H. Gumiland, B. Cahyono, and R. Siregar, "Evaluation condition of transformer based on infrared thermography results," *Proceedings of the 9th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, pp. 19-23, 2009.
- [4] 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.
- [5] T. Nunak, K. Rakruangdet, 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] 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. 746-747.
- [7] T. Suesut, N. Nunak, T. Nunak, A. Rotruga, and Y. Tuppadung, "Emissivity measurements on material and equipment in electrical distribution system," *International Conference on Control, Automatin and Systems*, pp. 1259-1263, Oct. 2011.
- [8] N. Nunak, K. Roonprasang, T. Suesut, and T. Nunak, "Emissivity Estimation using Thermographic Camera, *Advanced Materials Research*, Vol. 811, pp. 380-387, 2013.
- [9] A.A. Gowen, B.K. Tiwari, P.J. Cullen, K. McDonnell, and C.P. O'Donnell, "Applications of thermal imaging in food quality and safety assessment," *Trends in Food Science & Technology*, Vol. 21, pp. 190-200, 2010.
- [10] R.P. madding, "IR window transmittance temperature dependence", *InfraMation 2004 Proceedings*, July 2004.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นาย ธีระวัฒน์ หนูนาค
ที่อยู่ บริษัท เมเซอร์ทรอนิกส์ จำกัด ซอยลาดพร้าว 71 บางกะปิ
กรุงเทพมหานคร

ประวัติการศึกษา

- 2538 อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีไฟฟ้าอุตสาหกรรม
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- 2545 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- 2556 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประสบการณ์การทำงานและความเชี่ยวชาญ

- ผู้เชี่ยวชาญด้านกล้องถ่ายภาพความร้อนและคุณภาพของระบบไฟฟ้า
Level 2 Thermographer : Institute of Infrared Thermography
- วิทยากร วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท.)
- วิทยากร สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น (สสท.)
- ผู้จัดการฝ่ายขาย ผลิตภัณฑ์ถ่ายภาพความร้อนอินฟราเรด
บริษัท เมเซอร์ทรอนิกส์ จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้