

รายงานการวิจัย

ระบบควบคุมอุณหภูมิที่พื้นผิวสำหรับการสอบเทียบกล้องถ่ายภาพความร้อน

**SURFACE TEMPERATURE CONTROL SYSTEM FOR
INFRARED THERMOGRAPHY CALIBRATION**



ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ประจำปีงบประมาณ 2554

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจาก เงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประจำปี 2554

- ขอขอบคุณ - คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.
- นายภูวนาท พรนิภาอำไพ นายรุ่งโรจน์ จันทร์ผล และนายอิสรา อาดำ
นักศึกษาประจำสาขาวิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.
นางสาวดาวสวัสดิ์ เคลือวัลย์ และ นางสาวหทัยภัทร วงษ์ไทยวรรณ
นักศึกษาประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.



ทวีพล ชื้อสัตย์

โครงการวิจัย ระบบควบคุมอุณหภูมิที่พื้นผิวสำหรับการสอบเทียบกล้องถ่ายภาพความร้อน
SURFACE TEMPERATURE CONTROL SYSTEM FOR INFRARED
THERMOGRAPHY CALIBRATION

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากเงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประจำปีงบประมาณ 2554
ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี

จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 75,000 บาท
ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2553 ถึง 30 กันยายน 2554

รายนามคณะผู้วิจัย

- 1) ชื่อ-นามสกุล รศ.ดร.ทวิพล ชื้อสัตย์
หน่วยงาน สาขาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์
โทรศัพท์ 02-739-2407 ต่อ 109 โทรสาร 02-739-2406
Email kstaweeep@kmitl.ac.th
- 2) ชื่อ-นามสกุล ผศ.ดร.นวกัทธา หนูนา
หน่วยงาน สาขาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์
โทรศัพท์ 02-329-8356-7 ต่อ 17 โทรสาร 02-329-8358 ต่อ 13
Email kbnavaph@kmitl.ac.th

คำสำคัญ การแผ่รังสีอินฟราเรด กล้องถ่ายภาพความร้อน สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีอินฟราเรด

Keywords: Infrared Emission, Thermal Imager, Emissivity

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอการประยุกต์ใช้คุณสมบัติการแผ่รังสีอินฟราเรดของวัตถุ (Emissivity, ϵ) ในอุตสาหกรรม โดยวัตถุแต่ละชนิดมีค่า ϵ ที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิด อุณหภูมิที่ผิวของวัตถุ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมโดยรอบวัตถุ (Background Temperature: T_{BG}) มุมและความยาวคลื่นของรังสีอินฟราเรดที่แผ่ออกจากผิวของวัตถุ รวมไปถึงฟังก์ชันการใช้งานหรือความสามารถของอุปกรณ์ที่นำมาใช้ในการวัดค่า ϵ วิธีการวัดค่า ϵ ของวัตถุทำได้โดยวัดค่าอุณหภูมิของวัตถุด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน (Thermal Imager, TI) หรือด้วย IR sensor (ความยาวคลื่น 8-14 μm) โดยควบคุมอุณหภูมิที่ผิวของวัตถุให้คงที่ด้วยตู้ควบคุมอุณหภูมิ ปรับอุณหภูมิที่วัดได้จากกล้อง TI หรือ IR sensor ให้เท่ากับอุณหภูมิที่วัดได้จากเทอร์โมคัปเปิล ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่แท้จริงของวัตถุ จะได้ค่า ϵ ที่แท้จริงของวัตถุ ดังนั้นเพื่อให้ได้ค่า ϵ ที่แท้จริงจำเป็นต้องกำหนดค่า T_{BG} ให้กับอุปกรณ์วัดค่า ซึ่งอุปกรณ์จะนำค่า T_{BG} ไปชดเชยค่า $G_{\lambda,ref}$ เพื่อให้รังสีอินฟราเรดที่อุปกรณ์วัดค่ารับไปมีเพียงรังสีที่แผ่ออกมาจากตัววัตถุเองเท่านั้น ซึ่ง IR Sensor ไม่มีฟังก์ชันการรับค่า T_{BG} ดังนั้นค่า ϵ ที่ได้จาก IR Sensor จะไม่ใช่ค่า ϵ ที่แท้จริงของวัตถุ ผลการทดลองวัดค่า ϵ ของวัสดุทางวิศวกรรมทั้ง 5 ชนิด ได้แก่ เหล็ก สแตนเลส อะลูมิเนียม ทองแดง และทองเหลือง ได้ค่า ϵ ดังนี้ 0.81-0.88 สำหรับเหล็ก 0.34-0.52 สำหรับทองแดง 0.33-0.51 สำหรับสแตนเลส 0.16-0.24 สำหรับอะลูมิเนียม และ 0.40-0.65 สำหรับทองเหลือง

Abstract

The objective of this research is to propose the application of infrared radiation properties (Emissivity, ϵ) of object in the food industry. Each object has its own ϵ value depending on an objective type, the surface and surrounding temperatures of object (Background Temperature: T_{BG}), the angle and wavelength emitted from a surface, and the specification of an instrument. Emissivity value was obtained by measuring a surface temperature of the target object using Thermal Image Camera (TI) or IR Sensor (wavelength between 8- 14 μm) and a thermocouple. Temperature measured from TI must be adjusted by increasing/ decreasing of ϵ value until the temperature equal to the one obtained from thermocouple which was the actual surface temperature. The ϵ presented at that point is the radiation property of that object. According to radiation leaves a surface due to emission and reflection, T_{BG} should be set in the software of an instrument to compensate the reflection effect from the irradiation. In case of IR sensor there is no function to compensate the effect of T_{BG} ; therefore, the ϵ measured from this would be not the actual value. The experiment was performed on five types of engineering materials such as iron, stainless steel, aluminum, copper, and copper to determine the ϵ value. It was found that the ϵ values are in the range of 0.81-0.88 for iron, 0.33-0.51 for stainless steel, 0.16-0.24 for aluminum, 0.34-0.52 for copper, and 0.40-0.65 for brass.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	II
บทคัดย่อภาษาไทย	III
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	IV
รูปภาพผลงานวิจัย	V
สารบัญเรื่อง	VI
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญภาพ	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ตรวจสอบเอกสาร	3
2.1 การแผ่รังสีอินฟราเรด	3
2.1.1 ความเข้มในการแผ่รังสีอินฟราเรด	6
2.2 การแผ่รังสีของวัตถุดำ (Blackbody Radiation)	7
2.2.1 การกระจายของพลังค์ (The Planck Distribution)	8
2.2.2 กฎการกระจัดของเวิน (Wein's Displacement Law)	10
2.2.3 กฎของสเตฟาน โบลต์ทมานน์ (The Stefan-Boltzmann Law)	10
2.2.4 กฎของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's law)	10
2.3 การแผ่รังสีจากพื้นผิวจริง (Real surface Emission)	11
2.3.1 รังสีที่แผ่ออกจากพื้นผิววัตถุ (Radiosity: J)	15
2.3.2 การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างพื้นผิว	17
2.3.2 วัตถุเทา (Gray body)	18
2.4 เปรียบเทียบการแผ่รังสีจากวัตถุดำจริงและวัตถุดำ	18
2.5 กล้องถ่ายภาพความร้อน	19
2.5.1 หลักการทำงานของกล้องถ่ายภาพความร้อน	19
2.5.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของกล้องถ่ายภาพความร้อน	20
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจสอบอุณหภูมิ	21

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	23
3.1 การทดสอบหาค่า Emissivity	23
3.2 การเตรียมเตาอบเพื่อทำระบบควบคุม	26
3.3 การทดสอบการควบคุมอุณหภูมิของแผ่นเหล็กด้วยการวัดอุณหภูมิที่ผิว แบบไม่สัมผัส	28
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	30
4.1 ค่า Emissivity (E) ของวัสดุทางวิศวกรรม	30
4.2 การทดสอบคุณลักษณะของเตาอบ	36
4.2.1 ซีสเตอร์วิธีตัดต่ออุณหภูมิภายในเตาอบ	36
4.2.2 ความเร็วลมภายในเตาอบ	37
4.2.3 การกระจายอุณหภูมิภายในเตาอบ	38
4.4 การทดสอบการควบคุมอุณหภูมิที่ผิวโดยใช้ IR Sensor	39
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	41
5.1 สรุปผลการทดลอง	41
5.2 ข้อเสนอแนะ	42
บรรณานุกรม	43
ภาคผนวก	
ก. ตารางแสดงข้อมูลที่ได้อจากการทดลอง	45
ข. คุณลักษณะของ IR Sensor	48

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่า Emissivity ของพื้นผิววัสดุบางชนิด	14
4.1 ค่า Emissivity ของวัสดุทางวิศวกรรมที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม	34
4.2 ค่า Emissivity ของขนมปังในช่วงอุณหภูมิต่างๆเมื่อใช้กล้อง TI ในการวัดค่า	37
4.3 ค่า Emissivity ของขนมปังเมื่อใช้ IR Sensor ในการวัดค่า	55
4.4 ความเร็วเฉลี่ย (m/s) ของลมภายในเตาอบที่แถวและตำแหน่งต่างๆ	58
4.5 ค่าการสูญเสียน้ำหนักของขนมปังหลังการอบ เมื่ออุณหภูมิในช่วงที่ 2 มีค่าแตกต่างกัน	62
4.6 ค่าการสูญเสียน้ำหนักของขนมปังหลังการอบ เมื่ออุณหภูมิในช่วงที่ 3 มีค่าแตกต่างกัน	64
4.7 สมการความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ผิวและที่กึ่งกลางขนมปัง และค่าร้อยละความชื้น (R^2) ของสมการในช่วงอุณหภูมิต่างๆ	66

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 สเปกตรัมการแผ่รังสีในย่านต่างๆ	4
2.2 การแผ่รังสีจากพื้นผิว ประกอบด้วยการแปรผันตามความยาวคลื่น (spectral distribution) และการแปรผันตามทิศทาง (directional distribution)	5
2.3 แสดงการถ่ายเทพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของวัตถุ	6
2.4 ทิศทางการแผ่รังสีอินฟราเรด ประกอบด้วย การแผ่รังสีจากพื้นที่เล็ก ๆ dA_1 ไปยังพื้นที่ dA_2 โดยผ่าน มุมกรวย (solid angle) ที่ dA_2 กระทำต่อจุดหนึ่งบน dA_1 ภาพฉายของ dA_1 ในทิศทางตั้งฉากกับการแผ่รังสี และระบบพิกัดทรงกลม	6
2.5 การแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนภายใน enclosure ที่อุณหภูมิคงที่ (isothermal)	8
2.6 กำลังการแผ่รังสีของวัตถุดำที่แปรผันกับความยาวคลื่น	9
2.7 การแปรผันกับทิศทางของค่า Total directional emissivity	12
2.8 การแปรผันกับความยาวคลื่นของค่า Spectral normal emissivity (ϵ_{λ_n}) ของวัสดุบางชนิด	13
2.9 การแปรผันกับอุณหภูมิของค่า Spectral normal emissivity ของวัสดุบางชนิด	13
2.10 ค่าในย่านกว้าง ๆ ของค่า Total, normal emissivity	13
2.11 กระบวนการดูดซึม สะท้อนและส่งต่อรังสีความร้อนในวัตถุทึบ โปร่งแสง	15
2.12 กระบวนการดูดซึม สะท้อน และส่งต่อรังสีความร้อนในวัตถุ	16
2.13 รังสีอินฟราเรดทั้งหมดที่แผ่ออกจากพื้นผิววัตถุจริง	17
2.14 การแลกเปลี่ยนรังสีระหว่างวัตถุ 2 วัตถุ	18
2.15 การเปรียบเทียบการแผ่รังสีของวัตถุดำและวัตถุจริง ประกอบด้วย การแปรผันกับความยาวคลื่น และการแปรผันกับทิศทาง	19
2.16 ระบบการวัดรังสีอินฟราเรด	20
2.17 FOV IFOV และบริเวณการมองเห็นจากกล้อง TI	21
3.1 วัสดุทางวิศวกรรมที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม	23
3.2 ภาพรวมระบบตรวจวัดค่า Emissivity ของวัตถุ	23
3.3 กล้องถ่ายภาพความร้อน รุ่น TI 32	24
3.4 เทอร์โมคัปเปิลแบบสัมผัส Type K และเทอร์โมมิเตอร์ Fluke รุ่น 52 II 2 Channel	24
3.5 แผนภาพแสดงขั้นตอนการหาค่า ϵ ของวัตถุ	26

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.6 เตอบไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองอบขนมปัง	27
3.7 IR Sensor ที่ใช้ในการทดลอง และการติดตั้ง IR Sensor ไว้ที่ด้านบนเตอบขนาดเล็ก	27
3.8 หน้าต่างแสดงการควบคุมอุณหภูมิที่ผิวโดยใช้ IR Sensor	28
3.9 ระบบการทดสอบการทำงานของเตอบด้วยการควบคุมอุณหภูมิที่ผิวโดยใช้ IR Sensor	28
4.1 ภาพถ่ายทางความร้อนของวัสดุทางวิศวกรรมที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม ประกอบด้วย เหล็ก สแตนเลส อะลูมิเนียม ทองแดง ทองเหลือง	31-32
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ϵ กับ T_{BG} ของสแตนเลส	33
4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Emissivity กับ T_{BG} ของทองแดง	33
4.4 กราฟแสดงค่า Emissivity ของวัสดุทางวิศวกรรม (เหล็ก สแตนเลส อะลูมิเนียม ทองแดง และทองเหลือง)	35
4.5 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศภายในเตอบ เมื่อตั้งค่าอุณหภูมิเตอบไว้ที่ 210°C	36
4.6 กราฟแสดงค่าความเร็วลมในแต่ละตำแหน่งของแฉกบน แฉกกลาง และแฉกล่าง	38
4.7 ตำแหน่งการวัดความเร็วลมร้อนภายในเตอบบริเวณเหนือถาดวาง และค่าความเร็วลมที่ตำแหน่งต่างๆ เหนือถาดวาง	38
4.8 กราฟแสดงการกระจายอุณหภูมิภายในเตอบ	39

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญ และที่มาของปัญหา

วัตถุทุกชนิดที่มีอุณหภูมิสูงกว่าศูนย์องศาสัมบูรณ์ (-273°C) จะแผ่รังสีอินฟราเรด (Infrared Radiation) ออกมา โดยปริมาณรังสีอินฟราเรดที่แผ่ออกมาจากวัตถุแต่ละชนิดมีค่าที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัตถุที่แสดงถึงความสามารถในการแผ่รังสีอินฟราเรด (Emissivity: ϵ) นอกจากนี้ค่า ϵ จะขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุแล้ว ลักษณะพื้นผิว อุณหภูมิที่ผิวของวัตถุ มุมของการแผ่รังสีและค่าความยาวคลื่นยังมีบทบาทสำคัญต่อค่า ϵ อีกด้วย

กล้องถ่ายภาพทางความร้อน (Thermal Image Camera: TI) เป็นเครื่องมือวัดอุณหภูมิที่ผิวแบบไม่สัมผัส ทำงานโดยการรับรังสีอินฟราเรดที่แผ่ออกมาจากผิวของวัตถุแล้วแปลผลเป็นอุณหภูมิโดยอาศัยทฤษฎีของแพลงค์และสเตฟาน โบลซ์มานน์ กล้อง TI สามารถตรวจวัดอุณหภูมิที่ผิวได้อย่างรวดเร็ว แสดงผลของอุณหภูมิออกมาทั้งในรูปแบบของตัวเลขและรูปแบบของแถบสีซึ่งสัมพันธ์กับอุณหภูมิ (ภาพถ่ายทางความร้อน) บริเวณส่วนที่เย็นจะแสดงสีที่มืดกว่าบริเวณส่วนที่ร้อน เช่น สีแดงแสดงถึงบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงและสีน้ำเงินแสดงถึงบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ เป็นต้น ปัจจัยที่มีผลต่อความถูกต้องของภาพถ่ายหรือค่าอุณหภูมิที่ได้จากกล้อง TI ได้แก่ ค่า Emissivity ค่าการสะท้อน (Reflection) ของวัตถุ ระยะห่างระหว่างกล้องกับวัตถุ รวมไปถึง FOV กับ IFOV ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะของกล้อง TI แต่ละรุ่น

ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้งานกล้อง TI ในด้านต่างๆ มากมาย เช่น ทางด้านทหาร การแพทย์ งานอาคาร รวมไปถึงการตรวจสอบเพื่อซ่อมบำรุงเครื่องจักรอุปกรณ์ภายในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งมักนำไปใช้งานในตำแหน่งหรือบริเวณที่ไม่สามารถเข้าถึงได้ หรืองานที่ไม่สามารถใช้เครื่องมือวัดอุณหภูมิสัมผัสกับชิ้นงานได้โดยตรง เนื่องจากอาจเป็นอันตรายต่อคนหรือเครื่องมือวัด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอการประยุกต์ใช้หลักการแผ่รังสีอินฟราเรดของวัตถุ เพื่อนำมาวัดอุณหภูมิที่ผิวโดยการหาค่า ϵ ของวัสดุต่างๆ ที่นิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น เหล็ก สเตนเลส อะลูมิเนียม ทองแดง และทองเหลือง เป็นต้น เพื่อนำไปประยุกต์ใช้สำหรับงานตรวจวัดและควบคุมอุณหภูมิแบบไม่สัมผัส

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อหาค่า ϵ ของวัสดุทางวิศวกรรม (เหล็ก สเตนเลส อะลูมิเนียม ทองแดง และทองเหลือง)
2. เพื่อประยุกต์ใช้หลักการการแผ่รังสีอินฟราเรดกับกระบวนการควบคุมการทำงานของตู้อบ

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. ศึกษาวิธีการทดลองหาค่า ϵ ของวัสดุทางวิศวกรรม ได้แก่ เหล็ก สแตนเลส อะลูมิเนียม ทองแดง และทองเหลือง โดยใช้ชุดอุปกรณ์ตรวจวัดค่า ϵ ที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้น
2. ศึกษาการควบคุมอุณหภูมิภายในเตาอบ โดยใช้ IR-Sensor วัดอุณหภูมิที่ผิวของวัตถุ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ค่า ϵ ของวัสดุทางวิศวกรรม
2. การประยุกต์ใช้ IR-Sensor วัดอุณหภูมิที่ผิวของวัตถุเพื่อการควบคุมอุณหภูมิภายในเตาอบ



บทที่ 2

ตรวจเอกสาร

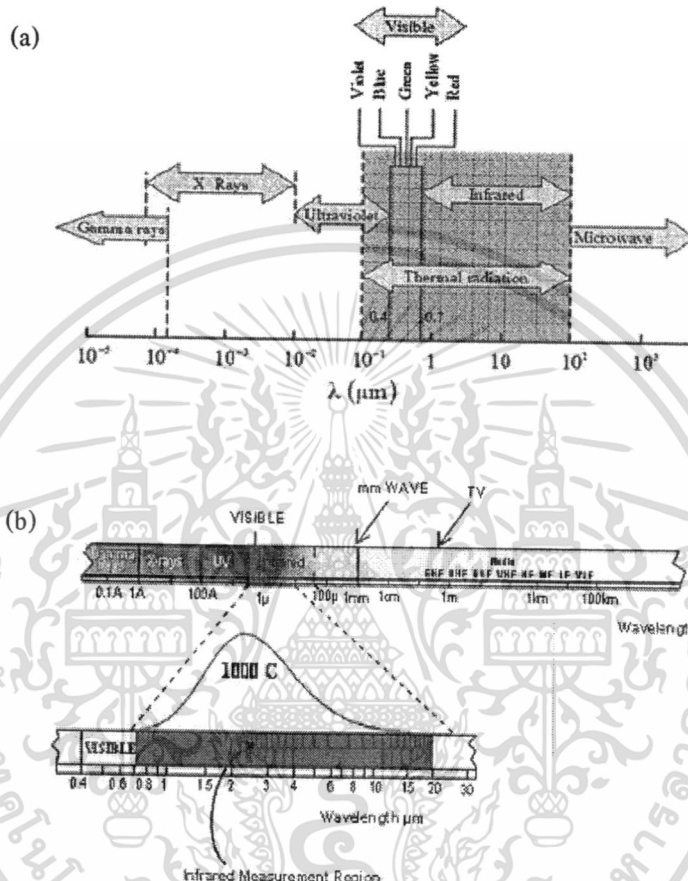
2.1 การแผ่รังสีอินฟราเรด

ในปี ค.ศ. 1800 นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษ Sir William Herschel เป็นผู้ค้นพบคลื่นรังสีอินฟราเรด (Infrared: IR) หรือคลื่นรังสีความร้อน ซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งแผ่มาจากดวงอาทิตย์ ค้นพบโดยการทดลองวัดอุณหภูมิของแถบสีรุ้งจากปริซึม โดยเลื่อนเทอร์โมมิเตอร์จากแถบสีม่วงไปยังแถบสีแดงพบว่าอุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้นโดยมีค่าสูงสุดที่แถบสีแดง ขอบเขตดังกล่าวเรียกว่า “อินฟราเรด” (ขอบเขตต่ำกว่าแถบสีแดง) ซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่น 0.75 ถึง 100 μm มีความถี่ในช่วง 1011 – 1014 Hz และมีคุณสมบัติไม่เบี่ยงเบนในสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยเมื่อความถี่สูงขึ้นพลังงานจะสูงขึ้นตามไปด้วย และเนื่องจากย่านรังสีอินฟราเรดอยู่ในช่วงคลื่นที่มีความถี่ต่ำกว่าความถี่ของแสงสีแดง มนุษย์จึงไม่สามารถมองเห็นรังสีอินฟราเรดแต่สามารถรู้สึกถึงความร้อนได้ โดยวัตถุทุกชนิดที่มีอุณหภูมิสูงกว่าค่าศูนย์องศาสัมบูรณ์ (Absolute Zero หรือ -273.15°C หรือ 0 K) จะมีการแผ่รังสีอินฟราเรดออกมา ซึ่งวัตถุที่ร้อนจะแผ่รังสีออกมามากกว่าวัตถุที่เย็น (ประวิทย์, 2553)

ย่านรังสีอินฟราเรดแบ่งออกเป็น 4 ช่วงตามช่วงของความยาวคลื่น ได้แก่ ช่วงใกล้อินฟราเรด (Near-IR: 0.75-0.25 μm) ช่วงคลื่นสั้น (1.4-3 μm) ช่วงกลาง (3-8 μm) ช่วงคลื่นยาว (8-15 μm) และช่วงไกล (Extreme: 15-100 μm) ซึ่งรังสีอินฟราเรดในย่าน Near-IR โดยทั่วไปจะนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบ การวัดค่าการกระจายความร้อน การสะท้อนหรือการหักเหของรังสี ส่วนรังสีในช่วงคลื่นสั้นถึงช่วงคลื่นยาวจะนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบการแผ่รังสีของวัตถุ โดยที่ช่วงคลื่นยาวจะมีความไวในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิสูงสุดที่ช่วงอุณหภูมิต่ำ แต่ในช่วงกลางจะมีความไวในการตอบสนองที่อุณหภูมิสูงมาก เช่น 400°C (Gowen, 2010)

การแผ่รังสีอินฟราเรดสัมพันธ์กับพลังงานที่สสารแผ่ออกมา ณ อุณหภูมิหนึ่งๆ โดยกลไกของการแผ่รังสีอินฟราเรดเกี่ยวข้องกับพลังงาน เนื่องจากการสั่น (Oscillations) และการเคลื่อนที่ (Transition) ของอิเล็กตรอนซึ่งประกอบกันเป็นสสาร วัตถุที่มีอุณหภูมิสูงอิเล็กตรอนจะสั่นหรือเคลื่อนที่มากส่งผลให้พลังงานภายในวัตถุมีค่าสูง กล่าวได้ว่าการแผ่รังสีอินฟราเรดเกี่ยวข้องกับสภาพทางความร้อนภายในสสาร โดยก๊าซและของแข็งชนิดกึ่งโปร่งแสง (semi-transparent) เช่น กระจก การแผ่รังสีจะเป็นปรากฏการณ์เชิงปริมาตร (volumetric phenomenon) คือการแผ่รังสีความร้อนจากสสารเป็นผลรวมของการแผ่รังสีอินฟราเรดที่จุดใดๆ ของสสารนั้นตลอดทั้งปริมาตร ซึ่งใน

ที่นี้จะเน้นไปที่การแผ่รังสีอินฟราเรดในลักษณะที่เรียกว่าเป็นปรากฏการณ์พื้นผิว (surface phenomenon) กล่าวคือในของแข็งและของเหลวส่วนใหญ่ รังสีอินฟราเรดที่แผ่ออกมาโดยโมเลกุลภายในจะถูกโมเลกุลที่ติดกันดูดซึมเอาไว้เกือบทั้งหมดจึงเป็นผลให้รังสีอินฟราเรดที่แผ่ออกมาจากของแข็งหรือของเหลว สามารถคิดได้ว่ารังสีอินฟราเรดแผ่ออกมาจากโมเลกุลบริเวณใกล้พื้นผิวหรือเป็นปรากฏการณ์พื้นผิว สเปกตรัมของการแผ่รังสีแสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 สเปกตรัมการแผ่รังสีในย่านต่างๆ

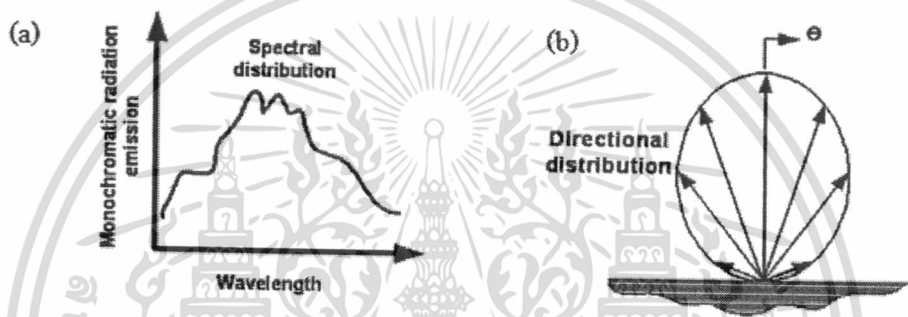
ที่มา (a) Gruner, 2003 และ (b) Incropera, et al., 2005

ทฤษฎีหนึ่งมองการแผ่รังสีอินฟราเรดว่าเป็นการแพร่ (Propagation) ของกลุ่มอนุภาคซึ่งเรียกว่า “photons” หรือ “quanta” แต่อีกทฤษฎีหนึ่งมองว่าเป็นการแพร่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic waves) แต่ไม่ว่าจะอธิบายธรรมชาติของการแผ่รังสีอินฟราเรดโดยทฤษฎีใดก็ตาม จะพบว่า การแผ่รังสีอินฟราเรดสัมพันธ์กับคุณสมบัติของคลื่นอัน ได้แก่ ความถี่ (frequency: ν) และความยาวคลื่น (wavelength: λ) ซึ่งสัมพันธ์กัน โดยสมการ 2.1

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (2.1)$$

โดย c คือความเร็วของแสงในสุญญากาศ สำหรับในสุญญากาศ $C=C_0=2.998 \times 10^8$ m/s

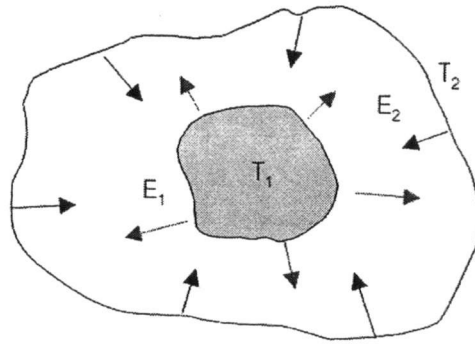
จากรูปที่ 2.1 รังสีอินฟราเรดที่แผ่ออกมาจากวัตถุจะอยู่ในช่วงความยาวคลื่นหนึ่ง ซึ่งขนาดของการแผ่รังสีอินฟราเรดจะเปลี่ยนแปลงไปตามความยาวคลื่น โดยในรูป 2.2a จะใช้คำว่า “spectral” การแผ่รังสีอินฟราเรดที่แต่ละความยาวคลื่นซึ่งเรียกว่า “monochromatic components” โดยปริมาณการแผ่รังสีอินฟราเรดที่ความยาวคลื่นใดๆ และการกระจายของรังสีอินฟราเรดตามความยาวคลื่น (spectral distribution) จะขึ้นอยู่กับธรรมชาติและอุณหภูมิของพื้นผิวที่แผ่รังสีอินฟราเรด นอกจากความยาวคลื่นแล้วการแผ่รังสีอินฟราเรดยังขึ้นอยู่กับทิศทางด้วย กล่าวคือพื้นผิวอาจแผ่รังสีออกมาในแต่ละทิศทางด้วยจำนวนที่ไม่เท่ากันดังแสดงในรูป 2.2b ดังนั้นในการพิจารณาการแผ่รังสีอินฟราเรดจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงทั้งความยาวคลื่นและทิศทางด้วย



รูปที่ 2.2 การแผ่รังสีจากพื้นผิว a) การแปรผันตามความยาวคลื่น (spectral distribution)
b) การแปรผันตามทิศทาง (directional distribution)

ที่มา Incropera, et al., 2005.

รังสีอินฟราเรดหรือรังสีความร้อนจะแผ่ออกมาจากพื้นผิววัตถุในรูปแบบของพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.3 โดยรังสีอินฟราเรดหรือรังสีความร้อนที่ตกกระทบบนพื้นผิววัตถุบางส่วนจะถูกดูดกลืน (Absorbed) บางส่วนจะสะท้อน (Reflected) และบางส่วนจะทะลุผ่านออกไป (Transmitted) ซึ่งสัดส่วนเหล่านี้แสดงในสมการที่ (2.17) โดยกำหนดความสามารถในการดูดซับ (Absorbitivity) การสะท้อน (Reflectivity) และการส่งผ่าน (Transmissivity) คือ α ρ และ τ ตามลำดับ รายละเอียดจะกล่าวต่อไปในหัวข้อ 2.3.1 และ 2.3.2



รูปที่ 2.3 แสดงการถ่ายเทพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของวัตถุ

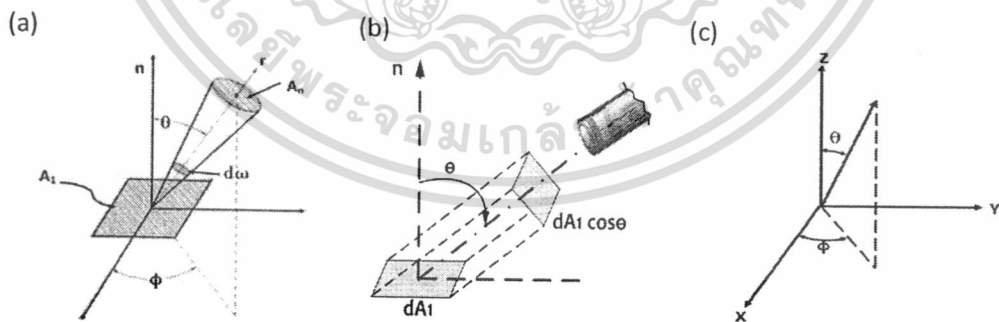
2.1.1 ความเข้มในการแผ่รังสีอินฟราเรด (radiation Intensity) (Incropera, et al., 2005)

พิจารณาการแผ่รังสีความร้อนในทิศทางหนึ่งจากพื้นผิวเล็ก ๆ dA_1 ดังรูปที่ 2.4a ทิศทางนี้กำหนดให้อยู่ในรูปของมุม θ และ ϕ ในระบบพิกัดทรงกลม ดังรูปที่ 2.4c รังสีความร้อนจาก dA_1 จะไปกระทบกับพื้นผิวเล็ก ๆ ที่เรียกว่า dA_n ซึ่งอยู่ห่างออกไปโดยพื้นผิว dA_1 นี้จะทำมุมซึ่งเรียกว่า solid angle ($d\omega$) กับจุดหนึ่งบนพื้นผิว dA_n สามารถนิยาม solid angle ได้ว่าเป็นย่าน (รูปกรวย) ล้อมรอบด้วยเส้นเชื่อมระหว่างจุดกับพื้นที่ที่ทำมุมซึ่งได้แก่สัดส่วนระหว่างพื้นที่ dA_n ต่อรัศมีของทรงกลมยกกำลังสองหรือ

$$d\omega = \frac{dA_n}{r^2} \tag{2.2}$$

solid angle แผ่คลุมครึ่งทรงกลม, $\omega = \frac{2\pi r^2}{r^2} = 2\pi$

solid angle แผ่คลุมเต็มทรงกลม, $\omega = \frac{4\pi r^2}{r^2} = 4\pi$



รูปที่ 2.4 ทิศทางการแผ่รังสีอินฟราเรด a) การแผ่รังสีจากพื้นที่เล็ก ๆ dA_1 ไปยังพื้นที่ dA_n โดยผ่านมุมกรวย (solid angle) ที่ dA_n กระทบต่อจุดหนึ่งบน dA_1 b) ภาพฉายของ dA_1 ในทิศทางตั้งฉากกับการแผ่รังสี c) ระบบพิกัดทรงกลม ที่มา Incropera, et al., 2005.

หากพิจารณาอัตราการแผ่รังสีที่ออกจาก dA_1 ตกกระทบลงบน dA_2 ปริมาณดังกล่าวเขียนในรูปของความเข้มการแผ่รังสีเชิงสเปกตรัม (Spectral Intensity : $I_{\lambda,\phi}$) ซึ่งมีนิยามคือเป็นพลังงานความร้อนที่ถูกปลดปล่อยออกมาที่ความยาวคลื่น λ ในทิศทาง (θ, ϕ) ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิวที่แผ่รังสี (ในทิศทางที่ตั้งฉากกับ θ และ ϕ) ต่อหน่วย solid angle (หน่วยเป็น sr) ในทิศทางนี้ และต่อหน่วยความยาวคลื่นในช่วง $d\lambda$ จากนั้นสามารถกำหนดเป็นสมการได้โดย

$$I_{\lambda,\phi}(\lambda, \theta, \phi) = \frac{dq}{dA_1 \cos\theta \cdot d\omega \cdot d\lambda} \quad (2.3)$$

การพิจารณาเกี่ยวกับความเข้มในการแผ่รังสีมักใช้แนวความคิดเกี่ยวกับการแผ่รังสี “Emissive Power” โดย

Emissive Power คือกำลังการแผ่รังสีของพื้นผิวหรือปริมาณการแผ่รังสีต่อหนึ่งต่อหน่วยพื้นที่ Spectral emissive power (E_λ : $W/m^2 \cdot \mu m$) คืออัตราการแผ่รังสีจากหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิวในช่วงความยาวคลื่นหนึ่งตลอดทุกทิศทาง

$$E_\lambda(\lambda) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda,\theta}(\lambda, \theta, \phi) \cos\theta \sin\theta \, d\theta \, d\phi \quad (2.4)$$

Total emissive power (E : $W/m^2 \cdot \mu m$) คือ อัตราการแผ่รังสีจากพื้นที่หนึ่งหน่วยในทุกความยาวคลื่นและทุกทิศทาง โดย

$$E = \int_0^\infty E_\lambda(\lambda) \, d\lambda \quad (2.5)$$

และหากวัตถุมิพื้นผิวเป็นแบบ Diffuse emitter หรือการแผ่รังสีอินฟราเรดขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นและอุณหภูมิแต่ไม่ขึ้นอยู่กับทิศทาง ซึ่งจะกล่าวต่อไปในหัวข้อ 2.2 จะได้ว่า $I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi) = I_{\lambda,e}(\lambda)$ และจากสมการ (2.4) สามารถอินทิเกรตได้เป็น

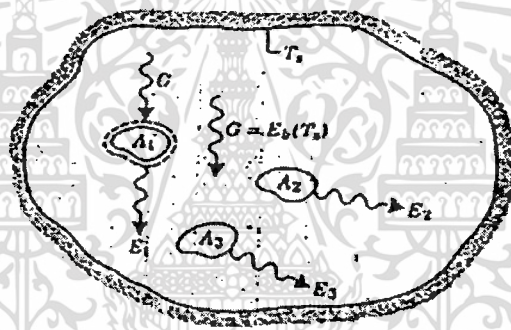
$$E_\lambda(\lambda) = I_{\lambda,\phi}(\lambda) \quad (2.6)$$

2.2 การแผ่รังสีของวัตถุดำ (Blackbody Radiation)

วัตถุดำคือวัตถุทางอุดมคติที่มีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1. วัตถุดำจะดูดซึม (absorb) รังสีที่มาตกกระทบบนทั้งหมด ไม่ว่าจะเป็นที่ความยาวคลื่นและทิศทางใด
2. ที่ความยาวคลื่นและอุณหภูมิหนึ่งๆ ไม่มีวัตถุใดสามารถแผ่รังสีได้เท่ากับวัตถุดำ
3. แม้ว่ารังสีอินฟราเรดที่แผ่ออกจากวัตถุดำเป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่นและอุณหภูมิแต่ไม่ขึ้นอยู่กับทิศทาง นั่นคือวัตถุดำเป็น “diffuse emitter”

เนื่องจากวัตถุดำสามารถดูดซึมและแผ่รังสีอินฟราเรดได้โดยสมบูรณ์ จึงใช้วัตถุดำเป็นวัตถุมาตรฐานสำหรับเปรียบเทียบปริมาณการแผ่รังสีที่ออกจากพื้นผิวจริงใด ๆ กับปริมาณการแผ่รังสีที่ออกจากวัตถุดำ แม้ว่าจะมีพื้นผิวบางชนิดที่สามารถประมาณได้ว่ามีลักษณะเป็นวัตถุดำแต่ในความเป็นจริงแล้วไม่มีพื้นผิวใดที่มีลักษณะเป็นวัตถุดำโดยแท้จริง การประมาณที่ใกล้เคียงที่สุดได้มาโดยพิจารณาโพรง (cavity) ที่ด้านในมีอุณหภูมิคงที่ดังรูปที่ 2.5 ถ้ารังสีอินฟราเรดเข้าสู่โพรงนี้โดยผ่านทางรูเล็กๆ รังสีนี้จะถูกสะท้อนหลายครั้งก่อนที่จะกลับออกมาจากรูนี้ ดังนั้นรังสีจะถูกโพรงดูดซึมเอาไว้เกือบทั้งหมด โพรงจึงมีลักษณะเป็นวัตถุดำโดยประมาณ จากหลักการของเทอร์โมไดนามิกส์กล่าวได้ว่ารังสีที่ออกจากรูเล็กๆ ของโพรงนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของพื้นผิวของโพรงเท่านั้น โดยรังสีที่แผ่ออกมาจากโพรงก็คือการแผ่รังสีของวัตถุดำ และเนื่องจากรังสีอินฟราเรดที่แผ่ออกมาจากวัตถุดำเป็นแบบ diffuse และสนามการแผ่รังสีภายในโพรงมีลักษณะเป็นสนามการแผ่รังสีของวัตถุดำ ดังนั้นหากนำพื้นผิวเล็กๆ ไปวางภายในโพรง จะพบว่ารังสีที่มากกระทบวัตถุ (irradiation) มีค่าเท่ากับรังสีที่วัตถุดำแผ่ออกมา จึงกล่าวได้ว่าการแผ่รังสีอินฟราเรดของวัตถุดำมีขึ้นภายในโพรงไม่ว่าพื้นผิวของวัตถุจะสะท้อนหรือดูดซึมได้ดีเพียงใด



รูปที่ 2.5 การแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนภายใน enclosure ที่อุณหภูมิคงที่ (isothermal)

ที่มา Incropera, et al., 2005.

2.2.1 การกระจายของพลังค์ (The Planck Distribution)

Planck ได้ให้สมการสำหรับคำนวณความเข้มในการแผ่รังสีอินฟราเรดของวัตถุดำ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและความยาวคลื่นดังนี้

$$I_{\lambda,b}(\lambda,T) = \frac{2hc^2\lambda^{-5}}{[\exp(\frac{hc}{\lambda kT}) - 1]} \quad (\text{W/m}^2 \cdot \mu) \quad (2.7)$$

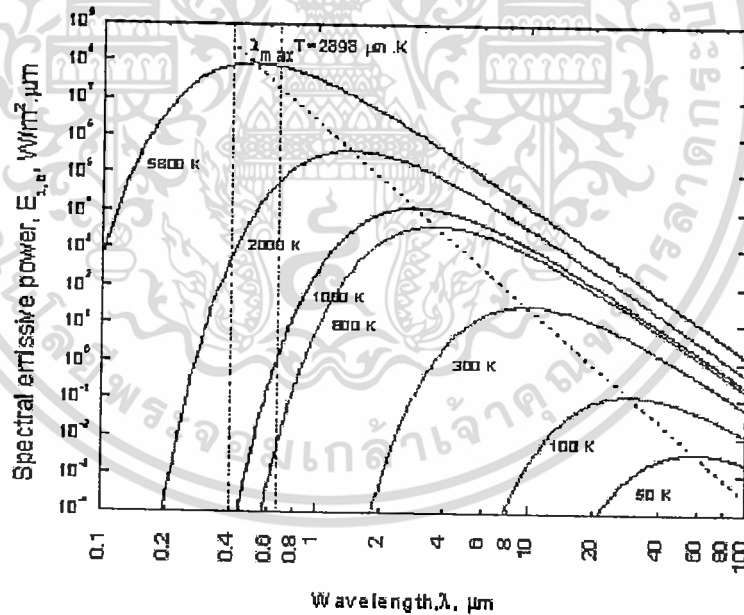
โดยที่ $h = 6.6256 \times 10^{-34}$ J.s (ค่าคงที่ของพลังค์) $c = 3 \times 10^8$ m/s (ความเร็วแสงในสุญญากาศ) $k = 1.3805 \times 10^{-23}$ J/K (ค่าคงที่ของโบลท์ซมาน) และ T คืออุณหภูมิสัมบูรณ์ (K) ของวัตถุดำ เนื่องจากวัตถุดำเป็น diffuse emitter จากสมการ (2.6)

$$E_{\lambda,b}(\lambda,T) = \pi I_{\lambda,b}(\lambda,T) = \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(\frac{C_2}{\lambda T}) - 1]} \quad (2.8)$$

โดย $C_1 = 2\pi h c^2 = 3.742 \times 10^4$ W. μm^4 / m^2 และ $C_2 = hc/k = 1.439 \times 10^4$ $\mu\text{m} \cdot \text{K}$

สมการ (2.8) มีชื่อเรียกว่า "Planck distribution" สามารถพล็อตได้ดังรูปที่ 2.6 (สำหรับที่อุณหภูมิบางค่า) จากรูปสามารถสังเกตลักษณะสำคัญได้หลายประการคือ

1. การแผ่รังสีความร้อนแปรผันกับความยาวคลื่นอย่างต่อเนื่อง (continuously)
2. ที่ความยาวคลื่นใดๆ ขนาดของการแผ่รังสีความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น
3. ย่านความยาวคลื่นที่มีการแผ่รังสีหนาแน่นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และโดยการเปรียบเทียบจะพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นการแผ่รังสีจะหนาแน่นอยู่ในช่วงความยาวคลื่นสั้น
4. รังสีความร้อนที่แผ่ออกมาจากดวงอาทิตย์ซึ่งสามารถประมาณได้ว่าเป็นวัตถุดำที่อุณหภูมิ 5,800 K นั้นหนาแน่นอยู่ในย่านการมองเห็น ในขณะที่เดียวกันสำหรับที่อุณหภูมิ $T < 800$ K การแผ่รังสีจะอยู่ในย่าน Infrared และไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า



รูปที่ 2.6 กำลังการแผ่รังสีของวัตถุดำที่แปรผันกับความยาวคลื่น

ที่มา Incropera, et al., 2005.

2.2.2 กฎการกระจัดของเวิน (Wein's Displacement Law)

จากรูปที่ 2.6 สังเกตได้ว่ากราฟของการแผ่รังสีมีจุดสูงสุดที่ความยาวคลื่นหนึ่งซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ สามารถหาความสัมพันธ์ของสมการนี้ได้โดยการดิฟเฟอเรนทิเอต (differentiate) สมการ (2.8) เทียบกับ λ และให้เท่ากับศูนย์ซึ่งจะได้ผลลัพธ์เป็น

$$\lambda_{max}T = C_3 \quad (2.9)$$

โดย $C_3 = 2897.6 \mu\text{m}\cdot\text{K}$

สมการ (2.9) เรียกว่า “Wein's Displacement Law” และจุดโลกัส (locus) ซึ่งได้จากสมการนี้เขียนแทนด้วยเส้นประในรูปที่ 2.6 สังเกตได้ว่ากำลังการแผ่รังสีสูงสุดอยู่ประมาณกึ่งกลางย่านของการมองเห็น ($\lambda \approx 0.5 \mu\text{m}$) สำหรับวัตถุที่มีอุณหภูมิ 1,000 K จุดสูงสุดของการแผ่รังสีอยู่ที่ความยาวคลื่น $2.9 \mu\text{m}$ โดยที่รังสีบางส่วนปรากฏเป็นสีแดง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นการแผ่รังสีในย่านความยาวคลื่นสั้นจะเด่นกว่าและในที่สุดการแผ่รังสีจะครอบคลุมย่านการมองเห็นทั้งหมด

2.2.3 กฎของสเตฟานโบลท์ซมานน์ (The Stefan-Boltzmann Law)

แทนค่า “Planck distribution” (สมการ 2.8) ลงในสมการ (2.5) จะได้ Total emissive power ของวัตถุดำ (E_b) เป็น

$$E_b = \int_0^\infty \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(\frac{C_2}{\lambda T}) - 1]} d\lambda \quad (2.10)$$

ซึ่งสามารถแสดงได้ว่า

$$E_b = \sigma T^4 \quad (2.11)$$

โดยที่ σ คือค่าคงที่ของสเตฟานโบลท์ซมานน์ ซึ่งขึ้นอยู่กับ C_1 และ C_2 และมีค่าเท่ากับ $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ สมการ (2.11) มีชื่อเรียกว่า Stefan-Boltzmann Law สามารถใช้ในการคำนวณหาปริมาณการแผ่รังสีของวัตถุดำในทุกทิศทางและความยาวคลื่น โดยที่รู้เฉพาะอุณหภูมิของวัตถุ เนื่องจากการแผ่รังสีของวัตถุดำเป็นแบบ “diffuse”

2.2.4 กฎของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's law) (Incropera et al., 2005)

เมื่อวัตถุดำอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่สมดุล การแผ่รังสีอินฟราเรดของวัตถุจะมีค่าเท่ากับปริมาณรังสีที่วัตถุดำดูดกลืนไว้ ส่งผลให้วัตถุที่สามารถดูดกลืนรังสีได้ดีสามารถแผ่รังสีออกมาได้ดีด้วย จึงสามารถสรุปได้ว่าตัวแผ่รังสีทางอุดมคติ (Ideal Radiator) คือวัตถุที่มี α เป็น 1 และเมื่อพูดถึงการแผ่รังสีออกจากวัตถุ โดยต่างจากการดูดกลืนจะใช้คำว่า Emissivity (ϵ) แทนที่จะใช้ Absorptivity (α) อย่างไรก็ตามค่าทั้งสองมีความสัมพันธ์กัน โดยตรงตามกฎของเคอร์ชอฟฟ์

$$\epsilon = \alpha$$

2.3 การแผ่รังสีจากพื้นผิวจริง (Real surface Emission)

จากคำกล่าวที่ว่าไม่มีพื้นผิวใดสามารถแผ่รังสีอินฟราเรดได้มากกว่าวัตถุดำ ดังนั้นจึงใช้วัตถุดำเป็นสิ่งที่เปรียบเทียบความสามารถในการแผ่รังสีของพื้นผิวจริง ซึ่งความสามารถในการแผ่รังสีของพื้นผิวหรือค่า ϵ เป็นคุณสมบัติของวัตถุเกี่ยวกับการแผ่รังสีความร้อน โดยเป็นสัดส่วนของรังสีที่แผ่ออกจากพื้นผิวจริงต่อรังสีที่แผ่ออกจากวัตถุดำ ณ อุณหภูมิเดียวกัน ซึ่งค่า ϵ ของวัตถุจะสัมพันธ์กับทิศทางและความคลื่นของรังสีอินฟราเรดที่ถูกแผ่ออกมา โดย

Spectral directional emissivity ($\epsilon_{\lambda,\theta}$) เป็นสัดส่วนของความเข้มในการแผ่รังสีจากพื้นผิวจริงที่มีอุณหภูมิ T ในช่วงความยาวคลื่นหนึ่งในทิศทาง θ และ ϕ ต่อความเข้มในการแผ่รังสีจากวัตถุดำที่มีอุณหภูมิและความยาวคลื่นเดียวกัน

Total directional emissivity (ϵ_θ) เป็นสัดส่วนของความเข้มในการแผ่รังสีจากพื้นผิวจริงที่มีอุณหภูมิ T ตลอดทุกความยาวคลื่นและในทิศทาง θ และ ϕ ต่อความเข้มในการแผ่รังสีจากวัตถุดำที่มีอุณหภูมิและความยาวคลื่นเดียวกัน หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นค่าเฉลี่ยของ $\epsilon_{\lambda,\theta}$ ตลอดความยาวคลื่น

สำหรับการคำนวณทางวิศวกรรมส่วนใหญ่มักใช้ค่าเฉลี่ยตามทิศทาง ดังนั้น

Spectral hemispherical emissivity จึงเป็นค่า Emissivity ของวัตถุที่มีอุณหภูมิ T ที่ความยาวคลื่นหนึ่งตลอดทุกทิศทาง จากคำจำกัดความดังกล่าวสามารถเขียนแทนได้ด้วยสมการ (2.12)

$$\epsilon_\lambda(\lambda, T) \equiv \frac{E_{\lambda,e}(\lambda, T)}{E_{\lambda,b}(\lambda, T)} \quad (2.12)$$

หมายเหตุ: ตัวยก a หมายถึงการพิจารณาการแผ่รังสีของวัตถุในทุกทิศทาง การจะพิจารณาการแผ่รังสีครอบคลุมครึ่งทรงกลม

Total hemispherical emissivity เป็นค่าเฉลี่ยของ Emissivity ตลอดทุกทิศทางและทุกความยาวคลื่น มีคำจำกัดความเป็น

$$\epsilon(T) \equiv \frac{E(T)}{E_b(T)} \quad (2.13)$$

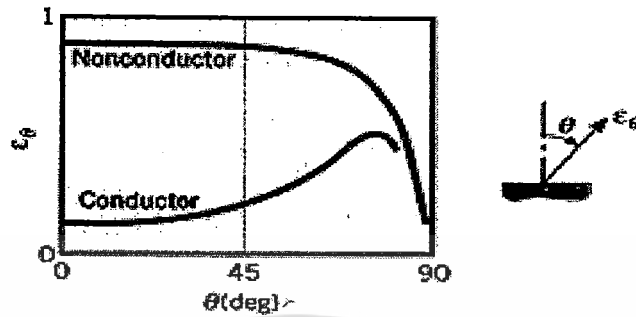
ดังนั้น

$$\epsilon(T) = \frac{\int_0^\infty \epsilon_\lambda(\lambda, T) E_{\lambda,b}(\lambda, T) d\lambda}{E_b(T)} \quad (2.14)$$

(สามารถใช้คำว่า Total emissivity แทน Total hemispherical emissivity)

จากสมการต่าง ๆ ข้างต้นเห็นได้ว่าหากรู้ค่า ϵ ของพื้นผิวก็สามารถคำนวณหาค่าอัตราการแผ่รังสีต่าง ๆ ของพื้นผิวได้

จากที่ได้กล่าวไว้ในตอนต้นว่าค่า ϵ ของ diffuse emitter นั้นไม่ขึ้นอยู่กับทิศทางอย่างไรก็ตามถือเป็นเพียงการประมาณเท่านั้น เพราะพื้นผิวที่แท้จริงจะไม่ใช่ “diffuse emitter” โดยการเปลี่ยนแปลงของ ϵ_θ ตาม θ แสดงดังในรูป 2.7 สำหรับทั้งวัสดุที่เป็นตัวนำและไม่เป็นตัวนำไฟฟ้า



รูปที่ 2.7 การแปรผันกับทิศทางของค่า Total directional emissivity
ที่มา Incropera, et al., 2005.

สำหรับตัวนำไฟฟ้า ϵ_θ ประมาณได้ว่าเป็นค่าคงที่สำหรับย่าน $\theta \leq 40^\circ$ หลังจากนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ θ มากขึ้นและในที่สุดจะลดลงเป็นศูนย์ ส่วนวัสดุที่ไม่เป็นตัวนำไฟฟ้า ϵ_θ ประมาณได้ว่าคงที่ในช่วง $\theta \leq 70^\circ$ และจะลดลงอย่างฉับพลันหลังจากนั้น จากรูป 2.7 จะพบว่าแม้การแผ่รังสีจะขึ้นอยู่กับทิศทาง แต่ว่า “hemispherical emissivity” นั้นจะไม่แตกต่างจากค่า ϵ_n (Total normal emissivity ซึ่งเป็นค่า ϵ ในทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิววัตถุหรือที่ $\theta = 0$) ไปไม่มากนัก ที่จริงแล้วสัดส่วนของ ϵ / ϵ_n สำหรับตัวนำไฟฟ้ามักจะไม่อยู่นอกเหนือจากช่วง $1.0 \leq \epsilon / \epsilon_n \leq 1.3$ และช่วง $0.95 \leq \epsilon / \epsilon_n \leq 1.0$ สำหรับวัสดุที่ไม่เป็นตัวนำไฟฟ้า ดังนั้นจึงเป็นการสมเหตุสมผลที่จะประมาณว่า

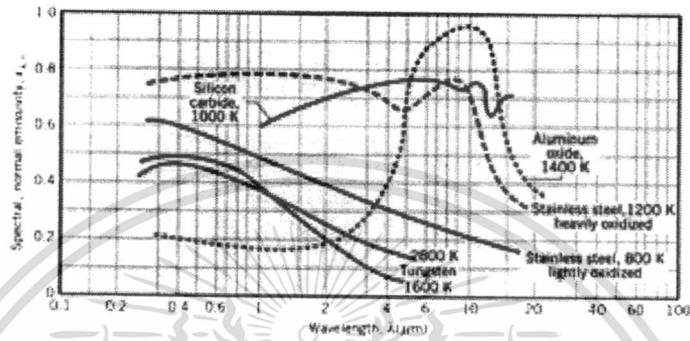
$$\epsilon \approx \epsilon_n \quad (2.15)$$

แม้ว่าข้อความข้างต้นจะกล่าวเฉพาะ Total emissivity แต่ก็สามารถใช้ได้กับ spectral emissivity ได้เช่นกัน เนื่องจากการแผ่รังสีจากพื้นผิวที่แท้จริงนั้นแตกต่างออกไปจาก Planck distribution (รูป 2.2a) จึงไม่คาดหมายว่า ϵ_λ จะเป็นอิสระจากความยาวคลื่น รูป 2.8 แสดงการเปลี่ยนแปลงของ ϵ_λ ตามความยาวคลื่น λ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของพื้นผิว ส่วนค่า Total normal emissivity (ϵ_n) สำหรับวัสดุบางชนิดนั้นแสดงไว้ในกราฟรูปที่ 2.9 และ 2.10 ซึ่งจากกราฟสามารถสรุปได้ดังนี้

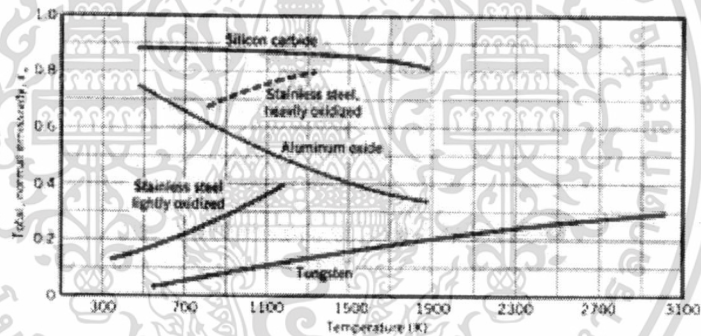
1. ค่า ϵ ของพื้นผิวที่เป็นโลหะมักมีค่าต่ำ ซึ่งอาจต่ำถึง 0.02 สำหรับทองและเงินที่ขัดมัน
2. การเคลือบผิวโลหะด้วย “oxide” อาจเพิ่มค่า ϵ ของพื้นผิวอย่างมาก ดังเช่น ค่า ϵ ของเหล็กไร้สนิมที่เคลือบด้วย “oxide” บางๆ เท่ากับ 0.10 แต่ที่เคลือบด้วย oxide หนาอาจมีค่าถึง 0.5
3. ค่า ϵ ของวัสดุที่ไม่เป็นตัวนำไฟฟ้ามักมีค่าสูงโดยปกติสูงกว่า 0.6
4. ค่า ϵ ของตัวนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ส่วนของวัสดุที่ไม่เป็นตัวนำไฟฟ้าอาจลดลง

หรือเพิ่มขึ้นก็ได้เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น การเปลี่ยนแปลงของ ϵ_n ตามอุณหภูมิ T ในรูป 2.9 นั้นตรงกับ การแปรผันของ ϵ_{λ_n} ในรูป 2.8 แม้จะประมาณได้ว่า ϵ_{λ_n} ไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิแต่การแผ่รังสีจะอยู่ในช่วงความยาวคลื่นสั้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ดังนั้นวัสดุหนึ่งๆ จะมีค่า ϵ_{λ_n} เพิ่มขึ้นเมื่อความยาวคลื่นสั้นลง และวัสดุนั้นจะมีค่า ϵ_n เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น (วัสดุขึ้นเดียวกัน ϵ_{λ_n} จะสัมพันธ์กับ ϵ_n โดย ϵ_{λ_n} แปรผันตามความยาวคลื่น ส่วน ϵ_n แปรผันตามอุณหภูมิ)

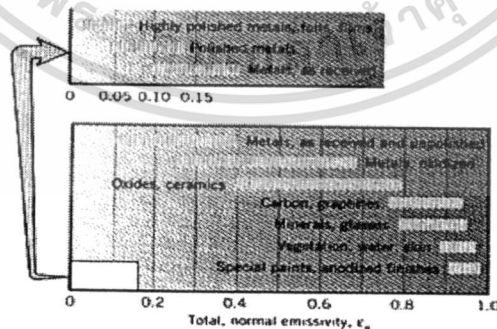
จากที่กล่าวจะเห็นว่าค่า ϵ นั้นจะขึ้นอยู่กับธรรมชาติของพื้นผิวเป็นอย่างมากซึ่งเป็นผลมาจาก โครงสร้างของวัสดุ และการที่วัสดุทำปฏิกิริยากับสภาพแวดล้อม



รูปที่ 2.8 การแปรผันกับความยาวคลื่นของค่า Spectral normal emissivity (ϵ_{λ_n}) ของวัสดุบางชนิด



รูปที่ 2.9 การแปรผันกับอุณหภูมิของค่า Spectral normal emissivity ของวัสดุบางชนิด



รูปที่ 2.10 ค่าในย่านกว้าง ๆ ของค่า Total, normal emissivity

ที่มา Incropera, et al., 2005.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2. 1 ค่า Emissivity ของพื้นผิววัสดุบางชนิด

Material's Surface	Wavelength (λ : μm)	Temperature (K)	Emissivity (ϵ)	Reference
Aluminum; Oxidized		273-373	0.11	Fraden, 2010.
Aluminum; Oxidized		550	0.63	Fogiel, 1992.
Aluminum; Oxidized		80-500	0.75	Rogalski, 2009
Aluminum; Polished		273-373	0.05	Fraden, 2010.
Aluminum; Rough		273-373	0.06- 0.07	Fraden, 2010.
Aluminum; Anodized	1.8-9.3		0.34-0.94	Rao,2010.
Brass; Oxidized	9.3		0.61	Rao,2010.
Brass; Oxidized		300	0.60	Brewster, 1992.
Brass; Polished	5.4 – 9.3		0.10	Rao,2010.
Brass; Polished		300-500	0.10	Brewster, 1992.
Brass; Polished		400-600	0.03	Rogalski, 2009
Brass; Dull tarnished		273-373	0.61	Fraden, 2010.
Copper; Oxidized		298	0.78	Fogiel, 1992.
Copper; Oxidized		300-800	0.77-0.87	Brewster, 1992.
Copper; Oxidized		273-373	0.60-0.70	Fraden, 2010.
Copper; Polished		390	0.023	Fogiel, 1992.
Copper; Polished		300-1600	0.04-0.17	Brewster, 1992.
Copper; Polished		273-373	0.02	Fraden, 2010.
Iron; Cast, Oxidized	3.6 – 9.3		0.63-0.76	Rao,2010.
Iron; Oxidized	9.3		0.96	Rao,2010.
Iron; Oxidized		300-800	0.60-0.80	Brewster, 1992.
Iron; Polished	3.6 – 9.3		0.06 -0.13	Rao,2010.
Iron; Polished		300-1600	0.06-0.20	Brewster, 1992.
Stainless				Fogiel, 1992.
Steel; Types 304		489	0.44	
Stainless				Amidon, 1999.
Steel; Types 316; Polished			0.28	
Stainless Steel	1-1,000		0.60	Saravacos and Kostaropoulos, 2002
Bread	10		> 0.80	Kress-Rogers and Brimelow, 2005.
Chocolate	10		0.85	Kress-Rogers and Brimelow, 2005.
Coke	8 - 13		0.95-1.00	Bentley, 1998.
Dough	1-1000		0.85	Saravacos and Kostaropoulos, 2002
Fat beef	1-1000		0.78	Saravacos and Kostaropoulos, 2002
Ice; Rough		300	0.99	Brewster, 1992.
Ice; Smooth		300	0.97	Brewster, 1992.
Lean beef	1-1000		0.74	Saravacos and Kostaropoulos, 2002
Paper		300	0.90-0.98	Brewster, 1992.
Vegetation		300	0.92-0.96	Brewster, 1992.
Water	9.3		0.96	Rao (2010)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 14
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1 รังสีที่แผ่ออกจากพื้นผิววัตถุ (Radiosity: J) (Incropera, et al., 2005)

รังสีอินฟราเรดทั้งหมดที่แผ่ออกจากพื้นผิววัตถุจริง (Radiosity: J) ประกอบด้วยรังสีที่เกิดจากวัตถุเอง (Emission: E) และรังสีที่มาจากสิ่งแวดล้อม (Irradiation, G) ที่มาจากสิ่งแวดล้อมโดยรอบหรือจากวัตถุอื่นมากระทบ

Irradiation (G) เป็นรังสีที่มาจากสิ่งแวดล้อมโดยรอบหรือจากการแผ่รังสีของวัตถุอื่นมากระทบกับวัตถุ โดยรังสีดังกล่าวอาจมีต้นกำเนิดมาจากหลายแหล่งและอาจมาจากทุกทิศทาง ซึ่ง Irradiation จะสัมพันธ์กับความยาวคลื่นของรังสีอินฟราเรดที่ถูกแผ่ออกมา โดย

Spectral irradiation (G_λ) เป็นอัตราการตกกระทบกับพื้นผิววัตถุหนึ่งหน่วยจากรังสีความร้อนที่มีความยาวคลื่น λ

Total irradiation (G) เป็นอัตราการตกกระทบกับพื้นผิวหนึ่งหน่วยตลอดทุกความยาวคลื่น

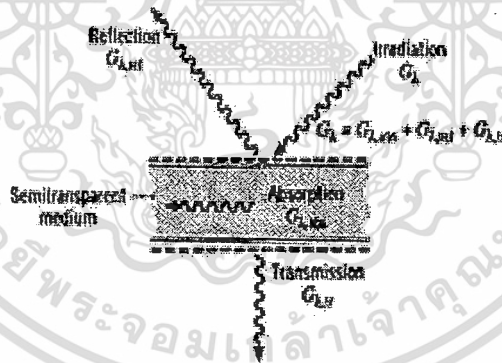
Irradiation ที่มาตกกระทบวัตถุบางส่วนจะถูกวัตถุดูดซับไว้ (Absorption: A or $G_{\lambda,ab}$) บางส่วนจะสะท้อนออกจากวัตถุ (Reflection: R or $G_{\lambda,ref}$) และบางส่วนจะทะลุผ่านวัตถุไป (Transmission: T or $G_{\lambda,t}$) ดังรูป 2.11 และ 2.12 ซึ่งได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 2.1

หรือ

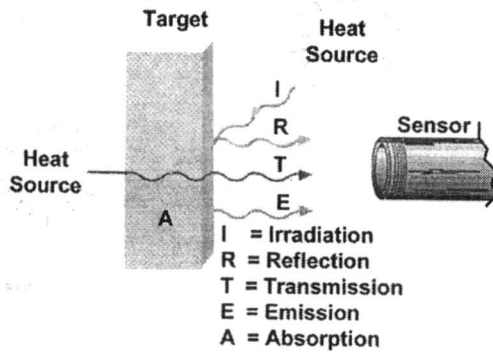
$$G = G_{\lambda,ab} + G_{\lambda,ref} + G_{\lambda,t}$$

$$G = A + R + T$$

(2.16)



รูปที่ 2.11 กระบวนการดูดซึม สะท้อนและส่งต่อรังสีความร้อนในวัตถุทึงโปร่งแสง
ที่มา Incropera, et. al., 2005.



รูปที่ 2.12 กระบวนการดูดซึม สะท้อน และส่งต่อรังสีความร้อนในวัตถุ
ที่มา Gruner, 2003

จากรูปจะได้ว่า Irradiation (G) = $A+R+T$ (สมการ 16) หากนำ G หาคลอก จะได้

$$1 = \frac{A}{G} + \frac{R}{G} + \frac{T}{G}$$

ซึ่ง A/G คือความสามารถในการดูดซับ (Absorptivity: α) ส่วน R/G คือความสามารถในการสะท้อน (Reflectivity: ρ) และ T/G คือ ความสามารถในการส่งผ่าน (Transmissivity: τ) หากเขียนสมการใหม่จะได้

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (2.17)$$

โดยที่ค่าทั้งสามของวัตถุใด ๆ จะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับสมบัติต่างๆของวัตถุ

จากที่เคอร์ชอฟฟ์ได้กล่าวไว้ว่าเมื่อวัตถุอยู่ในสภาวะสมดุลความสามารถในการดูดซับของวัตถุ (α) จะเท่ากับความสามารถในการแผ่รังสีของวัตถุเอง (ϵ) หรือ $\alpha = \epsilon$ และหากวัตถุเป็นวัตถุทึบแสง (Opaque) วัตถุจะไม่มีคุณสมบัติการส่งผ่าน ($\tau=0$) ดังนั้นจากสมการ (2.17) จะได้ว่า

$$\epsilon + \rho = 1 \quad (2.18)$$

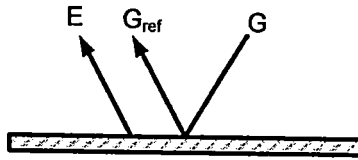
ส่วนวัตถุที่เป็น Black body จะดูดซับรังสีที่มากกระทบวัตถุไว้ทั้งหมดจึงไม่มีคุณสมบัติในการสะท้อน ($\rho=0$) จะได้

$$\epsilon = 1 \quad (2.19)$$

ดังนั้นพลังงานรังสีที่แผ่จาก Black body จึงมีเฉพาะพลังงานที่เกิดจากการแผ่รังสีของวัตถุเอง (Perfect Reflector)

รังสีอินฟราเรดทั้งหมดที่แผ่ออกจากพื้นผิววัตถุจริง (Radiosity: J) ประกอบด้วยรังสีที่เกิดจากวัตถุเอง (Emission: E) และ Irradiation ที่มาจากสิ่งแวดล้อมโดยรอบหรือจากวัตถุอื่นมากระทบและสะท้อนออกจากวัตถุ ($G_{\lambda,ref}$) แสดงในรูปที่ 2.13 ดังนั้น Radiosity ที่ออกมาจากวัตถุจึงเป็น

$$J = E + G_{\lambda,ref} \quad (2.20)$$



รูปที่ 2.13 รังสีอินฟราเรดทั้งหมดที่แผ่ออกจากพื้นผิววัตถุจริง

การดูดซึมและการสะท้อนของพื้นผิวเป็นตัวการสำคัญในการมองเห็นสี ส่วนการแผ่รังสี (Emission) มักไม่มีผล ทั้งนี้เพราะวัตถุทั่วไปมีอุณหภูมิต่ำกว่า 1000 K และการแผ่รังสีจึงหนาแน่นอยู่ในช่วง Infrared ซึ่งมองด้วยตาเปล่าไม่เห็น ดังนั้นสีที่ปรากฏต่อสายตาดิจจึงขึ้นอยู่กับว่าวัตถุจะดูดซึมและสะท้อน (Irradiation) ในช่วงความคลื่นใด เช่น เห็นว่าเสื้อมีสีแดงเพราะเสื้อได้ดูดซึมรังสีในช่วงความยาวคลื่นของสีอื่นๆ ไว้และสะท้อนรังสีในช่วงความยาวคลื่นของสีแดง และเห็นว่าพื้นผิวมีสีดำเพราะพื้นผิวได้ดูดซึมรังสีที่ตกกระทบในย่านการมองเห็นทั้งหมด ส่วนพื้นที่ผิวที่เห็นเป็นสีขาวก็เพราะพื้นผิวสะท้อนรังสีในย่านการมองเห็นทั้งหมด อย่างไรก็ตามควรมีการพิจารณาให้ถี่ถ้วนเกี่ยวกับการมองเห็นสีนี้ สำหรับค่า Irradiation หนึ่งๆ สีของพื้นผิวอาจไม่แสดงถึงการตอบรับรังสีทั้งหมดของพื้นผิวก็ได้ ทั้งนี้เพราะ Irradiation ส่วนใหญ่อาจอยู่ในย่านที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่า ตัวอย่างเช่น หิมะที่มองเห็นเป็นสีขาวนั้น เพราะสะท้อนรังสีในย่านการมองเห็นทั้งหมด แต่ดูดซึมรังสีส่วนใหญ่ในย่าน Infrared และสามารถประมาณได้เสมือนเป็นวัตถุดำในย่าน Infrared (คลื่นยาว) นี้

2.3.2 การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างพื้นผิว (Radiation Exchange between Surfaces)

จากรูป 2.14 จะได้ว่ารังสีที่แผ่ออกจากพื้นผิวของวัตถุ 1 (q_1 ; w) มีค่าเป็น

$$q_1 = J_1 A_1 \quad (2.21)$$

ส่วนรังสีที่แผ่ออกจากพื้นผิวของวัตถุ 2 (q_2 ; w) มีค่าเป็น

$$q_2 = J_2 A_2 \quad (2.22)$$

โดย J_1 และ J_2 คือ รังสีที่แผ่ออกจากวัตถุ 1 (Radiosity1: w/m^2) และรังสีที่แผ่ออกจากวัตถุ 2 (Radiosity2: w/m^2) ตามลำดับ A_1 และ A_2 คือ พื้นที่ผิวของวัตถุ 1 และวัตถุ 2 ที่มีการแผ่รังสีอินฟราเรดออกมา (m^2)

121362

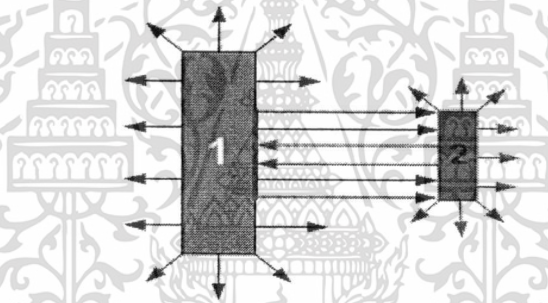
เมื่อพิจารณาการแผ่รังสีของวัตถุ 2 วัตถุ ดังรูปที่ 2.13 พบว่ามีการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนกันระหว่างวัตถุทั้งสอง โดยรังสีที่แผ่ออกจากวัตถุ 1 บางส่วนไปตกกระทบบนพื้นผิวของวัตถุ 2 ($q_{1 \rightarrow 2}$: w/m^2) ในขณะที่เดียวกันรังสีที่แผ่ออกจากวัตถุ 2 บางส่วนจะไปตกกระทบบนวัตถุ 1 ($q_{2 \rightarrow 1}$: w/m^2) สัดส่วนของรังสีความร้อนออกจาก 1 ไปตก 2 เรียกว่า View Factor F_{12} (F_{12}) หรือ

$$F_{12} = \frac{q_{1 \rightarrow 2}}{J_1 A_1} \quad (2.23)$$

ในทำนองเดียวกันสัดส่วนของรังสีความร้อนออกจาก 2 ไปตก 1 เรียกว่า View Factor F_{21} (F_{21}) หรือ

$$F_{21} = \frac{q_{2 \rightarrow 1}}{J_2 A_2} \quad (2.24)$$

เมื่อพิจารณารังสีที่แผ่จากวัตถุ 1 ตกกระทบบนวัตถุ 2 พบว่า รังสีที่วัตถุ 2 ได้รับเป็นรังสีจากวัตถุ 1 ที่อยู่ในพื้นที่การมองเห็นของวัตถุ 2 (Field of view) ในทำนองเดียวกันเมื่อพิจารณารังสีที่แผ่จากวัตถุ 2 ตกกระทบบนวัตถุ 1 พบว่า รังสีที่วัตถุ 1 ได้รับเป็นรังสีจากวัตถุ 2 ที่อยู่ในพื้นที่การมองเห็นของวัตถุ 1 (Incropera, et al., 2005)



รูปที่ 2.14 การแลกเปลี่ยนรังสีระหว่างวัตถุ 2 วัตถุ

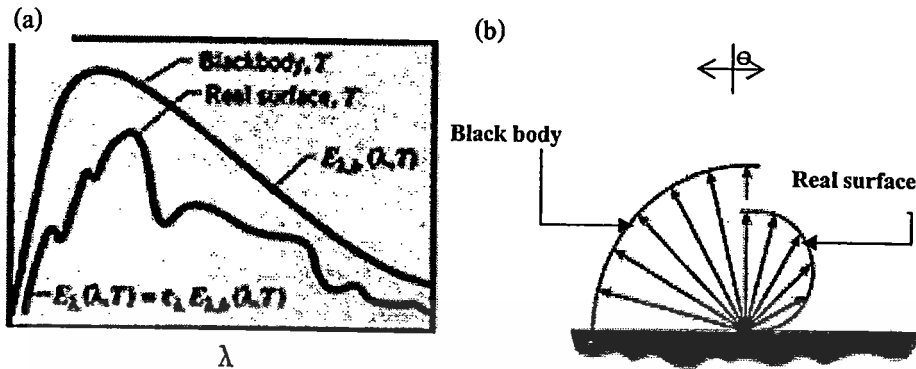
2.3.3 วัตถุเทา (Gray body) (Incropera, et al., 2005)

วัตถุเทาเป็นวัตถุสมมุติหรือวัตถุอุดมคติในด้านการแผ่รังสี โดยมีสมบัติในการแผ่รังสีเป็นไปตามกฎของเคอร์ชอฟฟ์คือค่าความสามารถในการแผ่รังสีมีค่าเท่ากับค่าความสามารถในการดูดซับ ($\epsilon = \alpha$) ซึ่งค่า Emissivity ของวัตถุเทามีค่าน้อยกว่า 1 และคงที่ที่อุณหภูมิใด ๆ ตลอดทุกความยาวคลื่น ซึ่งในทางอุดมคติจะพิจารณาว่าวัตถุจริงมีคุณสมบัติเป็นเหมือนวัตถุเทา

2.4 เปรียบเทียบการแผ่รังสีจากวัตถุจริงและวัตถุดำ

โดยทั่วไปการกระจายของรังสีตามความยาวคลื่น (Spectral distribution) ของรังสีที่แผ่ออกจากพื้นผิวจริงนั้นแตกต่างจาก Planck distribution รูปที่ 2.15a เนื่องจากการแผ่รังสีจากพื้นผิวจริงขึ้นอยู่กับ

กับทิศทาง (รูปที่ 2.15b) ดังนั้น ϵ ที่ความยาวคลื่นและทิศทางต่างๆ จึงอาจมีค่าต่างกันออกไป (Incropera, 2005)



รูปที่ 2.15 การเปรียบเทียบการแผ่รังสีของวัตถุดำและวัตถุจริง a) การแปรผันกับความยาวคลื่น b) การแปรผันกับทิศทาง

ที่มา Incropera, et al., 2005.

จากกฎของ Stefan-Boltzmann $E_b(T) = \sigma T^4$ (W/m²) ซึ่งเป็นการหาค่าวัตถุในอุดมคติหรือวัตถุดำเท่านั้น ดังนั้นหาวัตถุเป็นวัตถุจริง ต้องใส่ค่า Emissivity (ϵ) ในสมการด้วย ซึ่งจะได้

$$E(T) = \epsilon \sigma T^4 \quad (2.25)$$

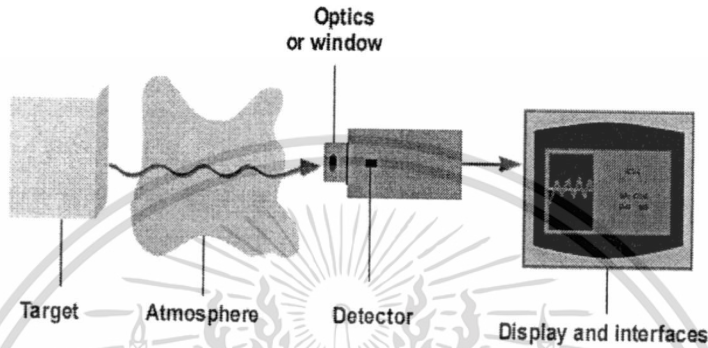
ซึ่ง ϵ เป็นคุณสมบัติในการแผ่รังสีความร้อนของวัตถุ โดยมีค่าเท่ากับอัตราส่วนของรังสีที่แผ่ออกจากวัตถุกับรังสีที่แผ่ออกจากวัตถุดำ ณ อุณหภูมิเดียวกัน โดยมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 ซึ่งวัตถุดำจะมีค่า ϵ เท่ากับ 1 เสมอ เนื่องจากรังสีความร้อนที่แผ่ออกมาจากวัตถุดำเป็นความร้อนที่เกิดจากพื้นผิวตัวมันเองทั้งหมดและมีความเข้มเท่ากันทุกทิศทาง แต่วัตถุจริงจะมีค่า ϵ ไม่คงที่ และต่ำกว่า 1 ซึ่งค่า ϵ ของวัตถุจริงจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ผิวของวัตถุ ชนิดและลักษณะผิวของวัตถุ ความยาวคลื่น (Wave Length) และมุมของการแผ่รังสี (Emission angle) ดังที่ได้กล่าวไปแล้ว โดยวัตถุจริงจะมีความเข้มของการแผ่รังสีสูงสุดที่มุม θ เท่ากับ 0 องศา (มนตรี, 2548)

2.5 กล้องถ่ายภาพความร้อน

2.5.1 หลักการทำงานของกล้องถ่ายภาพความร้อน

กล้องถ่ายภาพความร้อนหรือ Thermal image camera (TI - camera) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดอุณหภูมิที่ผิวของวัตถุ ซึ่งใช้เทคนิคการตรวจสอบวิเคราะห์ที่ไม่มีสัมผัสและทำลายวัตถุ โดยกล้องถ่ายภาพความร้อนจะมองไม่เห็นภาพจริง หรือไม่ได้ทำการวัดอุณหภูมิโดยตรงแต่ทำการวัดการแผ่รังสีอินฟราเรดของวัตถุ และทำการแปลรังสีอินฟราเรดที่วัดได้เป็นอุณหภูมิ

ส่วนประกอบหลักของกล้อง TI คือ เลนส์ (Lenses) ตัวตรวจจับ (Detector) และส่วนแสดงผล (Display) ซึ่งทำงานโดยพลังงานของรังสีอินฟราเรดจะแผ่จากวัตถุผ่านเลนส์ของกล้องถ่ายภาพความร้อน และจะถูกโฟกัสโดยเลนส์ไปยังตัวตรวจจับ โดยเซนเซอร์จะทำการแปลงรังสีอินฟราเรดให้อยู่ในรูปสัญญาณไฟฟ้า หลังจากนั้นอิเล็กทรอนิกส์เซนเซอร์ จะทำการแปลงข้อมูลที่รับมาจากตัวตรวจจับ และแสดงผลบนจอภาพ โดยอาจจะแสดงผลออกมาเป็นตัวเลข สี หรือกราฟ ซึ่งวัตถุที่ร้อนกว่าจะแสดงสีสว่างและวัตถุที่เย็นกว่าจะแสดงสีมืดกว่า ซึ่งกล้องแปลงรังสีอินฟราเรดที่วัดได้เป็นอุณหภูมิโดยอาศัยทฤษฎีของ Stefan-Boltzmann ดังแสดงในสมการ (2.25)



รูปที่ 2.16 ระบบการวัดรังสีอินฟราเรด
ที่มา Gruner, 2003

2.5.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของกล้องถ่ายภาพความร้อน

ค่า Emissivity (ϵ) (ปริญญา, 2546)

จากสมการที่ (2.25) จะเห็นได้ว่าการแปลงผลอัตราการแผ่รังสีอินฟราเรด (E) เป็นอุณหภูมิที่ถูกต้องจำเป็นต้องทำการกำหนดค่า ϵ ของผิววัตถุที่เหมาะสมสำหรับวัตถุนั้นๆ ดังนั้นในการใช้งานกล้องถ่ายภาพความร้อนจึงต้องมีการป้อนค่า ϵ ของวัตถุให้กับกล้องด้วย ซึ่งหากป้อนค่า ϵ ที่ใกล้เคียงกับค่าที่แท้จริงของวัตถุ จะทำให้กล้องสามารถอ่านค่าอุณหภูมิของวัตถุได้อย่างแม่นยำ ดังนั้นก่อนการใช้งานกล้องถ่ายภาพความร้อนต้องทราบค่า ϵ ของวัตถุก่อน

ค่าการสะท้อนรังสีของผิววัตถุ (Reflection: R) (Fosbinder and Orth, 2011)

จากสมการที่ (2.20) แสดงให้เห็นว่ารังสีอินฟราเรดที่แผ่ออกจากผิววัตถุ (Radiosity) ไม่ได้มีเพียงรังสีที่เกิดจากตัววัตถุเท่านั้น แต่ยังมีรังสีที่เกิดจากการสะท้อนรังสีที่แผ่มาจากแหล่งอื่นด้วย ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 2.3.1 ซึ่งกล้อง TI จะรับ Radiosity ดังกล่าวทั้งหมดไป ดังนั้นเพื่อให้รังสีที่กล้อง TI ได้รับเป็นรังสีที่เกิดจากวัตถุจริงๆ จึงต้องมีการป้อนค่าอุณหภูมิของ Background (อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมหรือวัตถุอื่นที่แผ่รังสีมากระทบกับวัตถุ) ให้กับกล้อง TI ด้วย ซึ่งกล้องจะนำอุณหภูมิดังกล่าวไปใช้ในการชดเชยค่าการสะท้อน ทำให้อุณหภูมิที่อ่านได้จากกล้องเป็นอุณหภูมิที่แท้จริงของวัตถุ

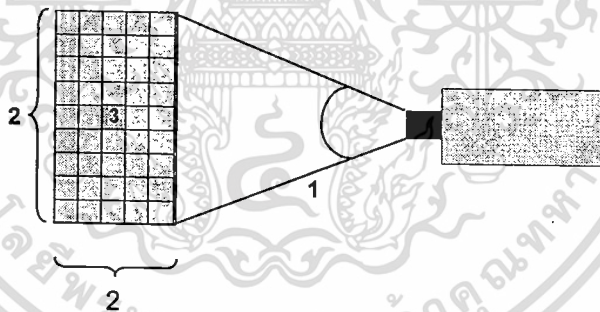
ระยะห่างระหว่างวัตถุกับกล้องถ่ายภาพความร้อน (ปริญญา, 2546)

เมื่อวัตถุและกล้องถ่ายภาพความร้อนอยู่ห่างกันมากจะทำให้รังสีความร้อนของวัตถุที่เซนเซอร์ภายในกล้องตรวจจับได้มีปริมาณน้อยลง เนื่องจากพลังงานบางส่วนจะสูญเสียในสิ่งแวดล้อม อีกนัยหนึ่งหากจุดที่ร้อน (Hot Spot) ของวัตถุ มีขนาดเล็กมาก หรือเล็กกว่าพื้นที่ของการวัด (พื้นที่ของการวัดจะปรากฏที่หน้าจอก้อง TI ในขณะที่ทำการวัด) การวัดอุณหภูมิที่ระยะห่างจากวัตถุมาก ๆ ซึ่งทำให้จุดที่ไม่ร้อนหรือจุดที่ไม่เกี่ยวข้องกับจุดที่ต้องการวัดค่าเข้าไปในพื้นที่ของการวัดซึ่งมีผลต่อการวัดอุณหภูมิ แต่อย่างไรก็ตามระยะห่างที่เหมาะสมของการวัดจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเฉพาะตัว (Specifications) ของกล้องแต่ละรุ่น

ขอบเขตการมองเห็นหรือ FOV (Field Of View) ของกล้อง TI (Fosbinder and Orth, 2011)

FOV มีผลต่อความละเอียดของกล้อง TI โดย FOV มีผลต่อพื้นที่การมองเห็นวัตถุของกล้อง จึงมีผลโดยตรงกับการรับค่าอุณหภูมิของวัตถุ ภายใน FOV มีค่า IFOV (Instantaneous Field Of View) เป็นหน่วยย่อย ซึ่ง IFOV มีผลต่อความละเอียดของกล้อง TI เช่นเดียวกับ FOV

FOV เป็นมุมของกล้องที่มองเห็น ไปยังวัตถุ มีหน่วยเป็นองศา ซึ่งหากระยะทางการวัดแตกต่างกัน จะส่งผลต่อการรับพื้นที่หรือบริเวณการมองเห็นจากวัตถุแตกต่างกันด้วย คือ ถ้าระยะระหว่างกล้องกับวัตถุห่างกันน้อย จะสามารถรับรายละเอียดของพื้นที่หรือบริเวณการมองเห็นของวัตถุได้มากกว่าระยะห่างกล้องกับวัตถุที่ห่างกันมาก ทำให้มีผลต่อความละเอียดของภาพ ส่วน IFOV คือ เป็นพื้นที่ที่เล็กที่สุดของ FOV ดังแสดงในรูปที่ 2.17



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

รูปที่ 2.17 FOV IFOV และบริเวณการมองเห็นจากกล้อง TI

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจสอบอุณหภูมิ

Ibarra, et al. (2000) ได้ประยุกต์ใช้งานกล้องถ่ายภาพความร้อนในสายการผลิตอาหาร โดยใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนในการบันทึกภาพถ่ายการแผ่รังสีความร้อนและประมาณค่าอย่างต่อเนื่องบนสายพาน ซึ่งช่วยให้อาหารมีความสะอาดปลอดภัย เหมาะสำหรับอาหารพร้อมรับประทาน

Fito, et al. (2004) ได้ใช้กล้องถ่ายภาพความร้อน ในการสร้างแบบจำลองในการกำจัดน้ำ โดยการวัดการกระจายของอุณหภูมิในผลไม้ตระกูลส้ม ในระหว่างการทำแห้ง ซึ่งสามารถใช้ในการคำนวณและวิเคราะห์หาจุดสุดท้ายของการทำแห้งและสามารถพัฒนาไปเป็นระบบควบคุมแบบออนไลน์ (Gowen, et al., 2010)

Meyer, et al. (1999) ใช้วิธีการวัดแบบไม่สัมผัสในการประมาณค่าอุณหภูมิภายในเนื้อไก่ (เนื้อไก่ไร้หนัง ไร้กระดูก) ตัวอย่างเนื้อไก่ที่ใช้คือเนื้อหน้าอก โดยวัดอุณหภูมิที่กึ่งกลางความหนาของชิ้นเนื้อไก่ ซึ่งอุณหภูมินี้จะสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่ผิวเนื้อไก่และเวลาในการแช่เย็นวัดอุณหภูมิที่ผิวเนื้อไก่โดยใช้กล้องถ่ายภาพความร้อน ในช่วงความยาวคลื่น 3.4–5 μm (ไม่สนใจไอน้ำที่เกาะอยู่ที่ผิวเนื้อไก่) จากนั้นใช้การวิเคราะห์โครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network) ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายใน อุณหภูมิที่ผิว และระยะเวลาในการแช่เย็นจากนั้นนำความสัมพันธ์ที่ได้ไปทดสอบกับการทำงานจริง ซึ่งพบว่าความสัมพันธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์โครงข่ายประสาทเทียมนี้สามารถนำไปใช้ในการทำนายค่าอุณหภูมิภายในเนื้อไก่ได้จริง

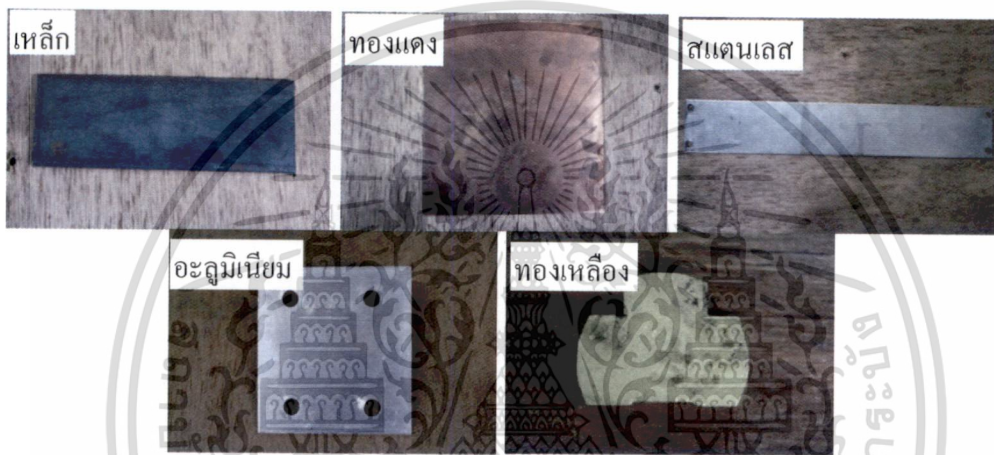


บทที่ 3

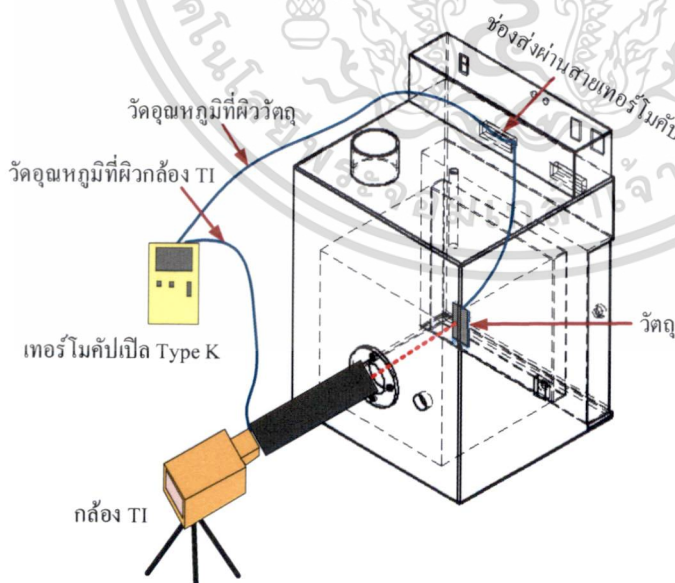
วัสดุอุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

3.1 การทดสอบหาค่า Emissivity

วัสดุที่นำไปใช้ในการทดลองหาค่า ϵ ได้แก่ วัสดุทางวิศวกรรมที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม ได้แก่ เหล็ก ทองแดง สแตนเลส อะลูมิเนียม และทองเหลือง ดังแสดงในรูปที่ 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดค่า Emissivity (ϵ) ของวัตถุประกอบด้วย อุปกรณ์วัดค่าอุณหภูมิ และตู้ควบคุมอุณหภูมิดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 วัสดุทางวิศวกรรมที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม



รูปที่ 3.2 ภาพรวมระบบตรวจวัดค่า Emissivity ของวัตถุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์วัดอุณหภูมิที่ใช้กับชุดอุปกรณ์ตรวจวัดค่า ϵ ของวัตถุมี 2 ชนิดได้แก่ กล้องถ่ายภาพความร้อนและเทอร์โมคัปเปิล Type K โดยมีรายละเอียดดังนี้

กล้องถ่ายภาพความร้อน (Thermal Image Camera: TI)

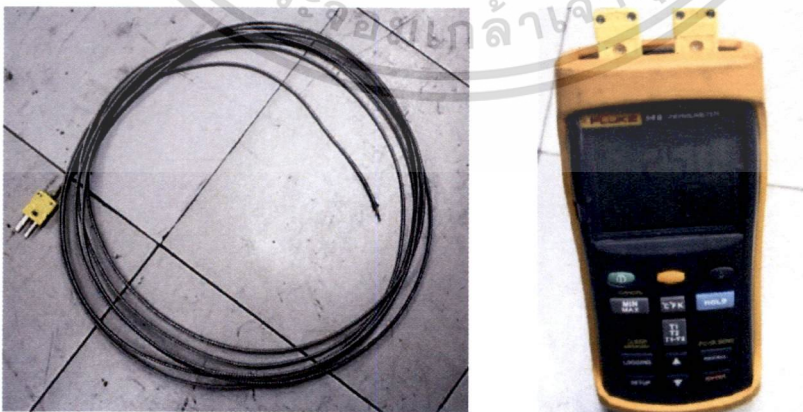
กล้องถ่ายภาพความร้อน Fluke รุ่น TI 32 รับรังสีอินฟราเรดในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 8-14 μm ช่วงวัดอุณหภูมิ -20°C ถึง $+600^{\circ}\text{C}$ ความละเอียดภาพความร้อน 320 x 240 VOX ดังรูปที่ 3.3 ในการทดลอง



รูปที่ 3.3 กล้องถ่ายภาพความร้อน รุ่น TI 32

เทอร์โมคัปเปิลแบบสัมผัส Type K

เทอร์โมคัปเปิลแบบสัมผัส Type K แบบสัมผัสหุ้มด้วยฉนวนใยหินที่ผ่านการสอบเทียบวัดอุณหภูมิที่ผิวของวัตถุเพื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่กล้อง TI อ่านค่าได้ โดยเทอร์โมคัปเปิลจะเชื่อมต่ออยู่กับเทอร์โมมิเตอร์ Fluke รุ่น 52 II ซึ่งสามารถรับสัญญาณไฟฟ้าจากเทอร์โมมิเตอร์ได้ 2 Channel ช่วงวัดอุณหภูมิ 250°C - $1,767^{\circ}\text{C}$ ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 เทอร์โมคัปเปิลแบบสัมผัส Type K และเทอร์โมมิเตอร์ Fluke รุ่น 52 II 2 Channel

ชุดอุปกรณ์ตรวจวัดค่า ε ประกอบด้วยส่วนหลัก ๆ 5 ส่วน ได้แก่ ผู้ควบคุมอุณหภูมิ ชุดจับยึด วัตถุ ระบบให้ความร้อนและระบบควบคุม โดยมีรายละเอียดของส่วนต่าง ๆ ดังนี้

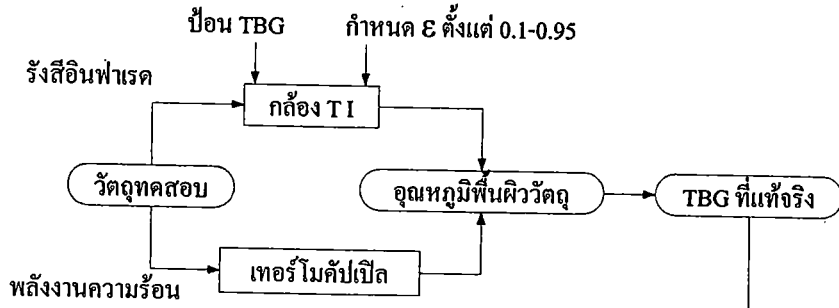
หลักการการทำงานของชุดอุปกรณ์ตรวจวัดค่า Emissivity

ชุดจับวัตถุที่ต้องการทราบค่า ε โดยใช้ชุดจับยึด ใช้เทอร์โมคัปเปิลแบบสัมผัสซึ่งเชื่อมต่ออยู่กับอุปกรณ์แสดงผลวัดอุณหภูมิผิวของวัตถุ จากนั้นเปิดให้ความร้อนกับชุดอุปกรณ์จนกระทั่งอุณหภูมิที่ผิวของวัตถุมีค่าตามต้องการ จึงใช้กล้อง TI วัดค่าอุณหภูมิที่ผิวของวัตถุผ่านช่องส่องผ่าน เนื่องจากรังสีอินฟราเรดที่กล้อง TI รับไปไม่ได้มีเฉพาะรังสีอินฟราเรดที่เกิดจากตัววัตถุเท่านั้นแต่ยังมีรังสีอินฟราเรดที่สิ่งแวดล้อมหรือวัตถุอื่น โดยรอบแผ่มาตกกระทบและสะท้อนออกจากผิววัตถุ (หัวข้อ 2.3.1) การหาค่า ε ของวัตถุจึงแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ

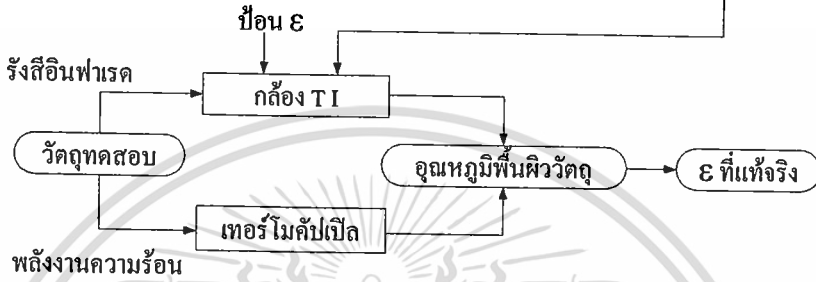
ขั้นตอนที่ 1 เมื่อค่าอุณหภูมิที่ผิววัตถุที่วัดได้จากเทอร์โมคัปเปิลได้ค่าตามที่กำหนดไว้แล้ว ให้ใช้กล้อง TI วัดอุณหภูมิที่ผิวของวัตถุผ่านช่องส่องผ่าน โดยการกำหนดค่า ε ให้กับกล้อง จากนั้นปรับค่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (Background Temperature: T_{BG}) ที่ตัวกล้อง จนกระทั่งอุณหภูมิที่อ่านได้จากกล้อง TI มีค่าเท่ากับอุณหภูมิที่อ่านได้จากจอแสดงผลที่ต่ออยู่กับเทอร์โมคัปเปิล ซึ่ง T_{BG} ที่ได้คืออุณหภูมิของรังสีอินฟราเรดที่แผ่มาจากสิ่งแวดล้อมหรือวัตถุอื่น โดยรอบวัตถุ ทำการหาค่า T_{BG} ที่ค่า ε ตั้งแต่ 0.1–0.95 จากนั้นวิเคราะห์หาค่า T_{BG} โดยเฉลี่ยในแต่ละช่วงอุณหภูมิ (เนื่องจากรังสีที่มาจากสิ่งแวดล้อม โดยรอบวัตถุ ไม่ได้มาจากแหล่งเดียวหรือวัตถุชนิดเดียว)

ขั้นตอนที่ 2 กำหนดค่า T_{BG} ที่ได้ในขั้นตอนที่ 1 ให้กับกล้อง TI ปรับค่า ε ที่ตัวกล้องจนกระทั่งอุณหภูมิที่อ่านค่าได้จากกล้อง TI มีค่าเท่ากับอุณหภูมิที่อ่านได้จากเทอร์โมคัปเปิลค่า ε ที่ได้คือค่า ε ที่แท้จริงของวัตถุ ขั้นตอนการหา ε ดังแสดงในรูปที่ 3.5

ขั้นตอนที่ 1



ขั้นตอนที่ 2



รูปที่ 3.5 แผนภาพแสดงขั้นตอนการหาค่า ϵ ของวัตถุ

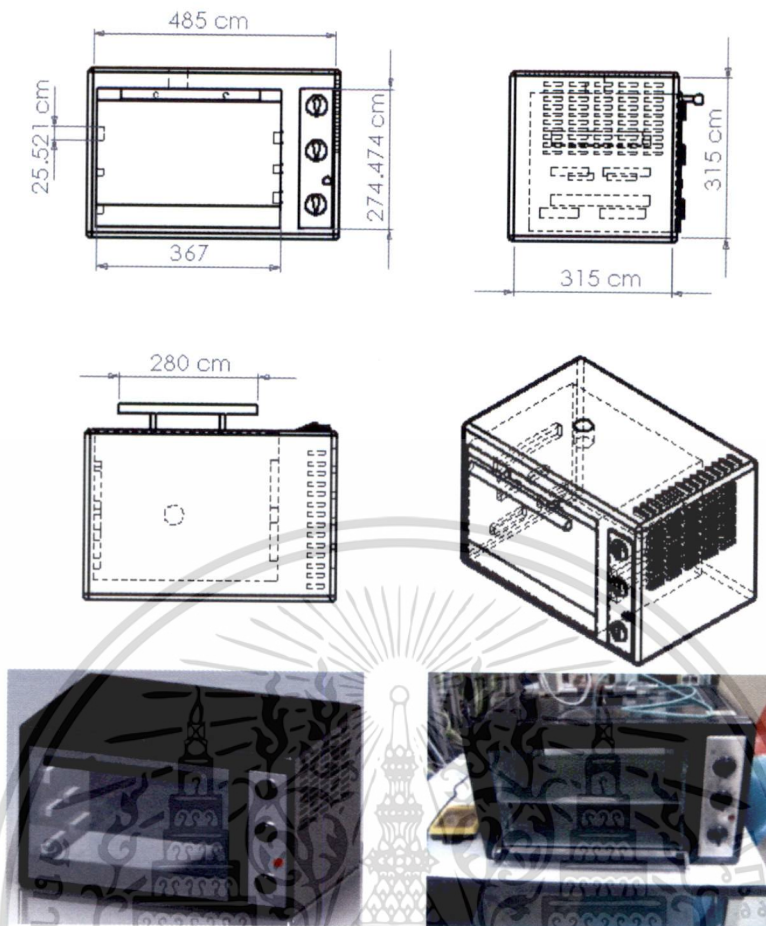
การทดลองวัดค่า Emissivity ของวัสดุชนิดต่าง ๆ

วัสดุทางวิศวกรรม

วัดค่า ϵ ของวัสดุทางวิศวกรรมเมื่ออุณหภูมิที่ผิวของวัสดุมีค่าตั้งแต่ 50 - 200°C โดยเปิดให้ความร้อนกับวัตถุจนกระทั่งอุณหภูมิที่ผิวของวัตถุเพิ่มขึ้นเป็น 200°C วัดค่า ϵ ของวัตถุที่ทำจากวัสดุชนิดต่าง ๆ และบันทึกผล จากนั้นหยุดให้ความร้อนและวัดค่า ϵ เมื่ออุณหภูมิที่ผิวของวัสดุลดลงทุก ๆ 10°C ทำการทดลอง 3 ซ้ำ บันทึกผล

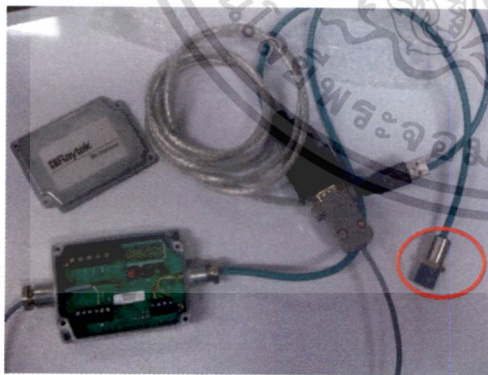
3.2 การเตรียมเตาอบเพื่อทำระบบควบคุม

ใช้เตาอบไฟฟ้า (ZANUSSI รุ่น ZOT103KX อิเล็กทรอนิกส์ ประเทศไทย มีความจุของโพรงเตาอบ (300 ลิตร) ในการใช้เตาอบควรเปิดเครื่องทิ้งไว้อย่างน้อย 10 นาที โดยตั้งค่าอุณหภูมิเตาอบไว้ตามที่ต้องการเพื่อให้อุณหภูมิในเตาอบเข้าสู่สภาวะสมดุล (Steady) โดยอุณหภูมิสูงสุดของอากาศในเตาอบคือ $230 \pm 10^\circ\text{C}$ ด้านหน้าเตาอบทำจากวัสดุที่ค่อนข้างใสทำให้สามารถมองเห็นวัตถุขณะให้ความร้อนได้ ลักษณะเตาที่ใช้ในการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.6-3.7 และหน้าต่างแสดงการควบคุมอุณหภูมิที่ผิวโดยใช้ IR sensor (รูปที่ 3.8)

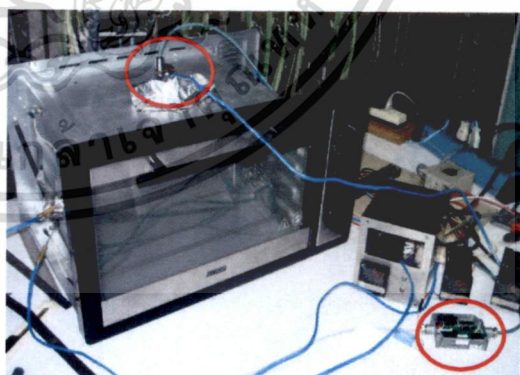


รูปที่ 3.6 เตาอบไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง

ก)

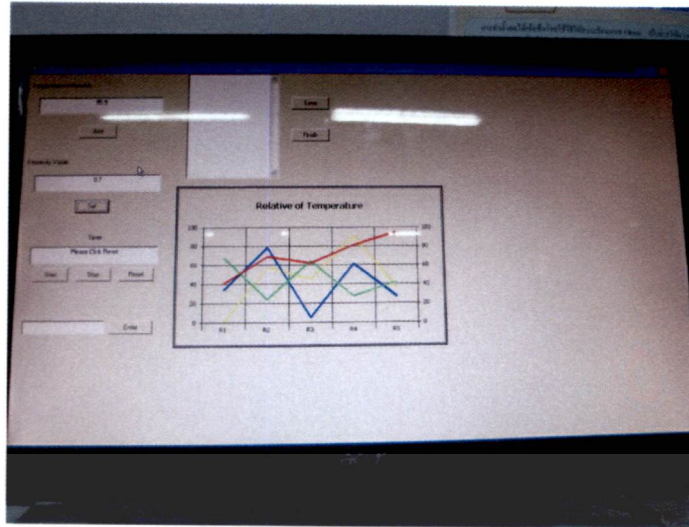


ข)



รูปที่ 3.7 ก) IR sensor ที่ใช้ในการทดลอง ข) ติดตั้ง IR sensor ไว้ที่ด้านบนเตาอบขนาดเล็ก

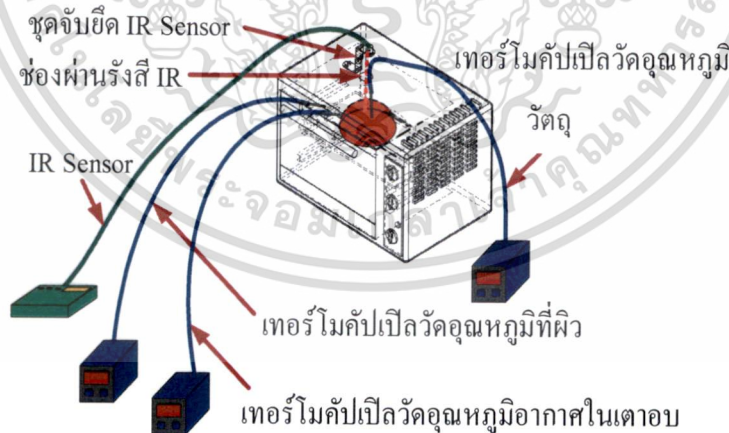
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 หน้าต่างแสดงการควบคุมอุณหภูมิที่ผิวโดยใช้ IR sensor

3.3 การทดสอบการควบคุมอุณหภูมิของแผ่นเหล็กด้วยการวัดอุณหภูมิที่ผิวแบบไม่สัมผัส

เมื่อได้ค่า ϵ ของแผ่นเหล็กในแต่ละช่วงอุณหภูมิแล้ว ให้นำค่า ϵ ดังกล่าวมาทดสอบกับ IR sensor ที่ติดตั้งอยู่บนตู้บขนาดเล็ก โดยใช้ IR sensor วัดอุณหภูมิที่ผิวของแผ่นเหล็กและกำหนดค่า ϵ ที่ได้จากการทดลองให้กับ IR sensor เปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ผิวที่วัดได้จากเทอร์โมคัปเปิล ระบบการทดสอบแผ่นเหล็กด้วยการควบคุมอุณหภูมิที่ผิวดังแสดงในรูปที่ 3.9 และแผนผังการทดสอบการควบคุมอุณหภูมิที่ผิวด้วย IR sensor



รูปที่ 3.9 ระบบการทดสอบการทำงานของเตาอบด้วยการควบคุมอุณหภูมิที่ผิวโดยใช้ IR sensor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบการทำงานของตู้อบแบบใช้ IR sensor วัดอุณหภูมิที่ผิว ซึ่งใช้แผ่นเหล็กที่ทราบค่า ϵ มาใช้ในการทดสอบ โดยทำการวัดอุณหภูมิที่ผิวของวัตถุด้วย IR sensor และเทอร์โมคัปเปิลไว้ที่ผิวของแผ่นเหล็ก จากนั้นใช้ IR sensor วัดอุณหภูมิที่ผิวของแผ่นเหล็กโดยป้อนค่า ϵ ของแผ่นเหล็กให้กับ IR sensor เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากจาก IR sensor กับอุณหภูมิที่ได้จากเทอร์โมคัปเปิลจากการทดสอบเบื้องต้นพบว่าอุณหภูมิที่ได้จาก IR sensor มีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่ได้จากเทอร์โมคัปเปิล แสดงให้เห็นว่าสามารถใช้ IR sensor ในการวัดอุณหภูมิที่ผิวของวัตถุได้



บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ค่า Emissivity ของวัสดุทางวิศวกรรมที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม

ค่า ε ของวัสดุที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม (เหล็ก สเตนเลส อะลูมิเนียม ทองแดง และทองเหลือง) แสดงในตารางที่ 4.1

เนื่องจากรังสีอินฟราเรดที่แผ่ออกจากผิววัตถุ (Radiosity: J) ไม่ได้มีเพียงรังสีที่ออกจากวัตถุเท่านั้น (E) แต่ยังมีรังสีอินฟราเรดที่สิ่งแวดล้อมหรือวัตถุอื่นโดยรอบแผ่มาตกกระทบและสะท้อนออกจากผิววัตถุ ($G_{\lambda,ref}$) ดังแสดงความสัมพันธ์ในรูปของ $J = E + G_{\lambda,ref}$ (Incropera, et al.,2005) (หัวข้อ 2.3.1) ดังนั้นรังสีอินฟราเรดที่กล้อง TI ตรวจจับจึงมีทั้งรังสีที่เกิดจากตัววัตถุเองและรังสีที่สะท้อนจากวัตถุอื่น ซึ่งรังสีจากวัตถุอื่นในที่นี้คือรังสีจากผนังชุดอุปกรณ์วัดค่า ε ที่ทำมาจากสเตนเลส ซึ่งมีความสามารถในการสะท้อนสูง จึงต้องหาอุณหภูมิที่เกิดจากการสะท้อนของผนังชุดอุปกรณ์ (Background Temperature: T_{BG}) เพื่อนำไปกำหนดให้กับกล้อง TI ซึ่งกล้องจะนำไปใช้ในการชดเชยค่า $G_{\lambda,ref}$ เพื่อให้รังสีอินฟราเรดที่กล้องรับไปเป็นรังสีที่เกิดจากวัตถุเท่านั้น ภาพถ่ายทางความร้อนของวัสดุแต่ละชนิดที่ได้จากกล้อง TI ดังแสดงในรูปที่ 4.1

จากรูปที่ 4.1ก-4.1ง จะเห็นว่าภาพถ่ายทางความร้อนของวัสดุแต่ละแผ่นประกอบด้วยสีหลายสีในวัสดุชิ้นเดียว เช่น สีแดง สีฟ้าหรือสีน้ำเงิน เป็นต้น ดังแสดงในรูป บริเวณสีม่วงและสีน้ำเงินเข้มที่ปรากฏในภาพถ่ายความร้อนคืออุณหภูมิที่เกิดจากม้วนกระดาษที่นำมาใช้เชื่อมต่อระหว่างหน้ากล้อง TI กับช่องส่งผ่านรังสีของตู้ควบคุมอุณหภูมิ (แสดงในรูปที่ 3.3) เพื่อป้องกันผลกระทบที่อาจเกิดจากสิ่งแวดล้อมภายนอกตู้ควบคุมอุณหภูมิ เช่น ลมหรือรังสีจากวัตถุอื่นที่อยู่รอบ ๆ บริเวณภายในวงกลมสีดำคือบริเวณที่เป็นแผ่นวัสดุทั้งหมด โดยบริเวณวงกลมสีฟ้า (อยู่ภายในวงกลมสีดำ) คือบริเวณที่รังสีจากวัตถุอื่นแผ่มาตกกระทบบนแผ่นวัสดุ และเนื่องจากวัสดุที่นำมาทดสอบส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นแผ่นเรียบ ผิวค่อนข้างมันวาว (ยกเว้นทองเหลือง) จึงมีความสามารถในการสะท้อนรังสีที่มากตกกระทบค่อนข้างสูง โดยเฉพาะรังสีที่แผ่มาจากวัตถุอื่นที่อยู่ในทิศตั้งฉากกับแผ่นวัสดุ พื้นที่บริเวณสีฟ้าแสดงถึงอิทธิพลการสะท้อนจากบริเวณหน้ากล้อง TI ซึ่งติดตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง ส่งผลให้อุณหภูมิสะท้อน (T_{BG} หรือ T อ้างอิง) บริเวณจุดสีฟ้ามีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้องด้วย ส่วนบริเวณสีแดงคือบริเวณที่ได้รับรังสีตกกระทบส่วนใหญ่ผนังตู้ควบคุมซึ่งมีอุณหภูมิค่อนข้างสูงมากดังนั้น หากใช้กล้อง TI วัดอุณหภูมิของวัตถุที่บริเวณสีแดงนี้ อุณหภูมิสะท้อน (T อ้างอิงหรือ T background: T_{BG}) จะมีค่าสูงดังแสดงในรูปที่ 4.2 และ 4.3 ซึ่งแสดงวิธีการวัดค่า T_{BG} ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เป็นผลมาจากการสะท้อนของผนังตู้ เมื่อพิจารณาภาพถ่ายทางความร้อนที่บริเวณผิวของทองเหลืองพบว่าภายในบริเวณผิวทองเหลืองและบริเวณรอบข้างมีสีค่อนข้าง

ใกล้เคียงกัน เป็นผลมาจากผิวทองเหลืองไม่มันวาว จึงมีความสามารถในการสะท้อนรังสีที่แผ่มา กระทบต่ำ จึงไม่ปรากฏบริเวณสีที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนเหมือนวัสดุแผ่นที่กล่าวไปแล้วข้างต้น

ในการพิจารณาช่วงค่า ε ที่เป็นไปได้ของวัสดุชนิดต่าง ๆ จะกำหนดค่า ε ให้กับกล้อง และปรับค่า T_{BG} ที่ตัวกล้องจนกระทั่งได้ T_{BG} ที่ค่า ε ดังกล่าว โดยหากกำหนดจุดวัดอุณหภูมิให้อยู่ภายใน บริเวณพื้นที่สีฟ้า ควรใช้อุณหภูมิหน้ากล้องกำหนดเป็น T_{BG} ให้กับกล้อง และหากกำหนดจุดวัด อุณหภูมิให้อยู่บริเวณพื้นที่สีแดงหรือบริเวณรอบนอกพื้นที่สีฟ้า ควรกำหนดเป็น T_{BG} ให้กับกล้อง ตามวิธีดังแสดงในรูปที่ 4.2 และ 4.3

ก)



ข)



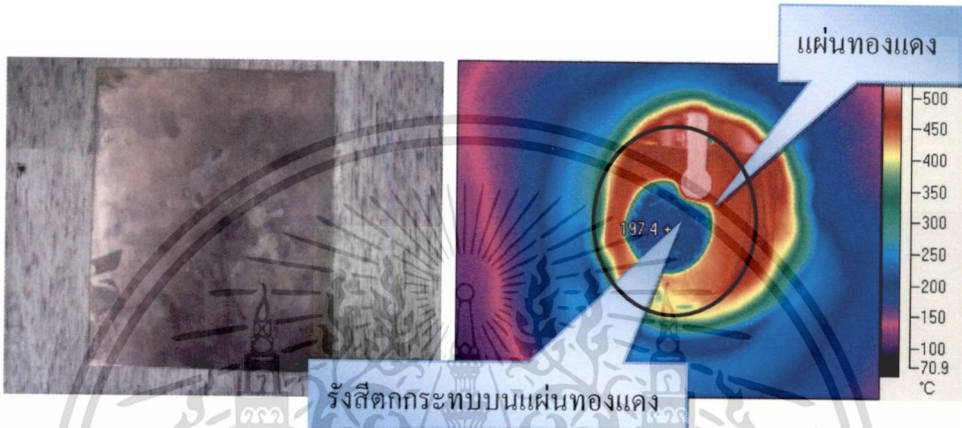
รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายทางความร้อนของวัสดุทางวิศวกรรมที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม ก) เหล็ก ข) สแตนเลส ค) อะลูมิเนียม ง) ทองแดง จ) ทองเหลือง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค)



ง)

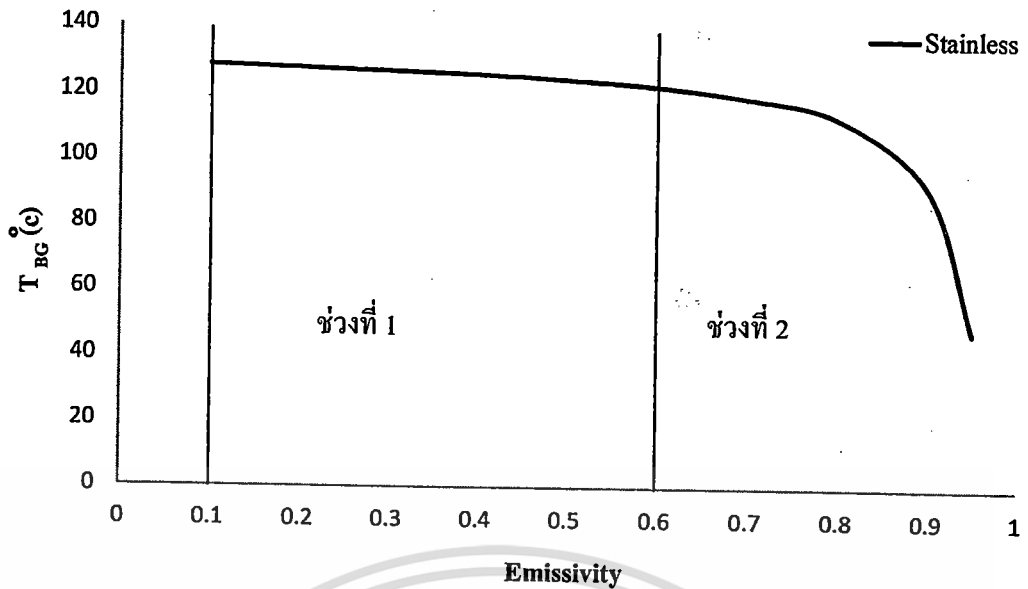


จ)

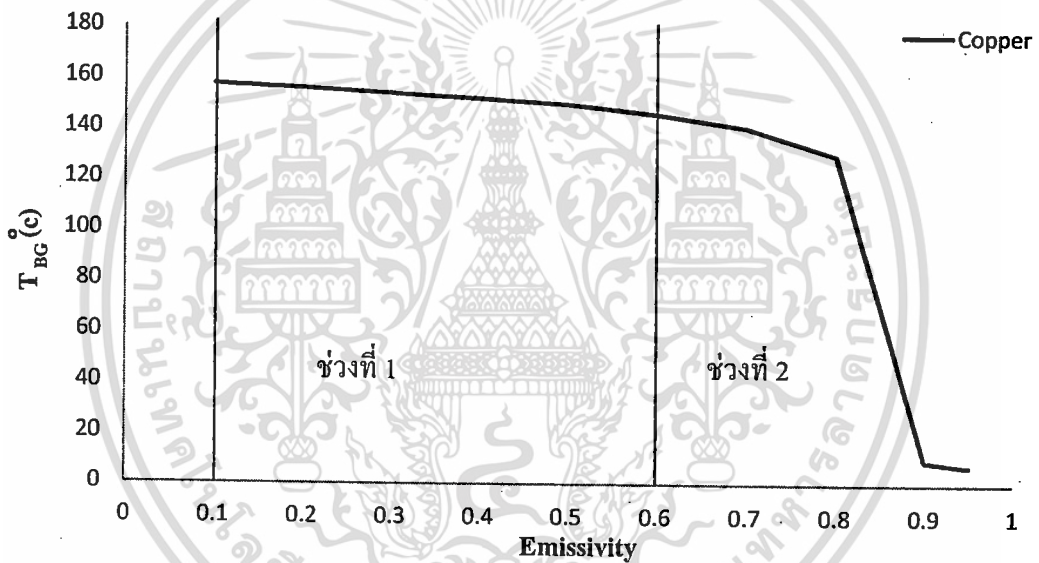


รูปที่ 4.1 (ต่อ) ภาพถ่ายทางความร้อนของวัสดุทางวิศวกรรมที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม ก) เหล็ก

ข) สแตนเลส ค) อะลูมิเนียม ง) ทองแดง จ) ทองเหลือง



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ϵ กับ T_{BG} ของสแตนเลส



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ϵ กับ T_{BG} ของทองแดง

จากกราฟจะพิจารณาว่าช่วงค่า ϵ ที่เป็นไปได้ของวัสดุ อยู่ในช่วงที่ค่า T_{BG} ก่อนข้างคงที่ เนื่องจากเมื่อพิจารณารูปที่ 4.2 และ 4.3 พบว่าในช่วงที่ ช่วงที่ 1 มีค่าต่ำ T_{BG} จะมีค่าค่อนข้างคงที่ แต่เมื่อ ϵ มีค่าสูงขึ้นจนเข้าใกล้ 1 ในช่วงที่ 2 ค่า T_{BG} จะลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นผลมาจาก พื้นผิวของสแตนเลสและทองแดงที่นำมาใช้ทดสอบค่อนข้างมันวาวจึงมีค่า ϵ ค่อนข้างต่ำ (0.28 และ 0.023 สำหรับสแตนเลสและทองแดงขัดมัน ตามลำดับ) (Amidon, 1999., Fogiel, 1992.) หากยิ่งป้อนค่า ϵ สูงกว่าช่วงค่า ϵ ที่เป็นไปได้ของวัสดุมากเท่าใด จะยิ่งทำให้ T_{BG} มีค่าต่ำกว่าค่าที่แท้จริงมากขึ้นเท่านั้น พิจารณาได้ว่าช่วงที่ค่า T_{BG} ลดลงอย่างรวดเร็ว (ช่วงที่ 2) เป็นช่วงที่ค่า ϵ อยู่เหนือค่า ϵ ที่เป็นไปได้

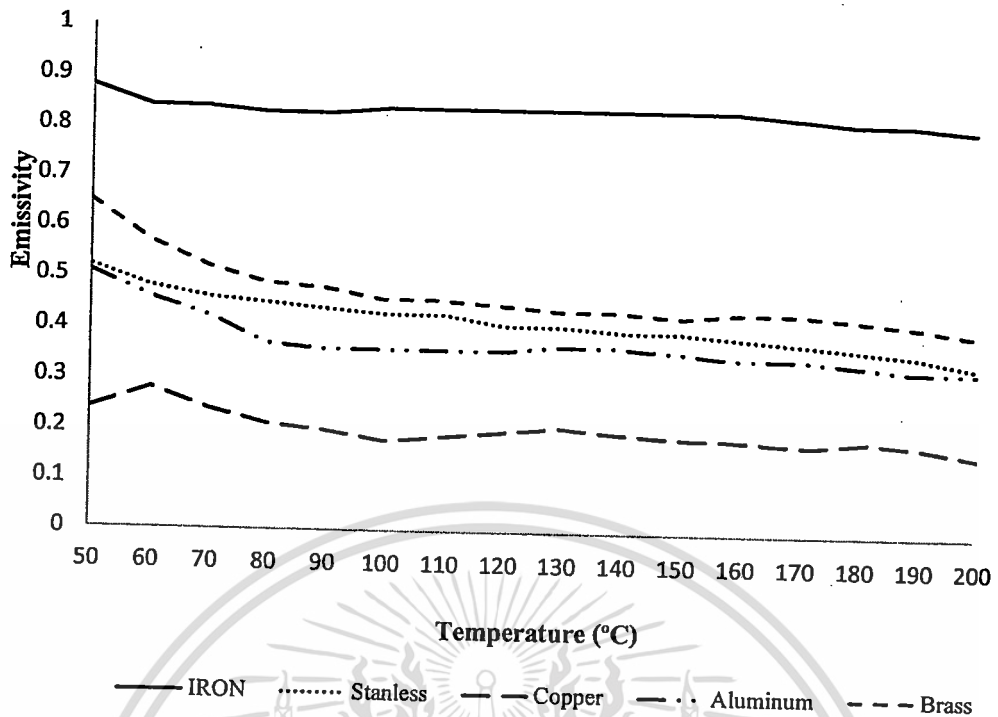
ได้ของวัตถุ และเมื่ออุณหภูมิภายในตู้อบคงที่ (อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมคงที่) หรือสภาวะแวดล้อมรอบ ๆ วัตถุมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ค่า T_{BG} ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เกิดจากสภาวะแวดล้อมโดยรอบก็ควรมีค่าคงที่หรือมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากด้วยเช่นกัน

เมื่อได้ช่วงค่า ϵ ที่เป็นไปได้แล้ว จึงหาค่า T_{BG} เฉลี่ย ตลอดช่วงค่า ϵ ดังกล่าว (ทุก ๆ 0.1) เพื่อนำไปใช้ในการหาค่า ϵ ที่แท้จริงของวัตถุ โดยป้อนค่า T_{BG} เฉลี่ยให้กับกล่องและปรับ ϵ ที่กล่องจนกระทั่งอุณหภูมิที่อ่านได้จากกล่องมีค่าเท่ากับอุณหภูมิที่อ่านได้จากเทอร์โมคัปเปิลเปิดค้างที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 3.1.3 ผลการทดลองหาค่า ϵ ของวัสดุต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.4

ตารางที่ 4.1 ค่า ϵ ของวัสดุทางวิศวกรรมที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม

Temperature (°C)	Emissivity (ϵ)				
	Iron	Copper	Stainless	Aluminium	Brass
50	0.88	0.24	0.52	0.51	0.65
60	0.84	0.28	0.48	0.46	0.57
70	0.84	0.24	0.46	0.42	0.52
80	0.83	0.21	0.45	0.37	0.49
90	0.83	0.20	0.44	0.36	0.48
100	0.84	0.18	0.43	0.36	0.46
110	0.84	0.19	0.43	0.36	0.46
120	0.84	0.20	0.41	0.36	0.45
130	0.84	0.21	0.41	0.37	0.44
140	0.84	0.20	0.40	0.37	0.44
150	0.84	0.19	0.40	0.36	0.43
160	0.84	0.19	0.39	0.35	0.44
170	0.83	0.18	0.38	0.35	0.44
180	0.82	0.19	0.37	0.34	0.43
190	0.82	0.18	0.36	0.33	0.42
200	0.81	0.16	0.34	0.33	0.40

หมายเหตุ: Temperature Background (T_{BG}) อยู่ในช่วง ($\pm 30^{\circ}\text{C}$) โดยค่า T_{BG} ของแต่ละช่วงอุณหภูมิแสดงในภาคผนวก ก.1



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงค่า ϵ ของวัสดุทางวิศวกรรม (เหล็ก สแตนเลส อะลูมิเนียม ทองแดง และทองเหลือง)

ค่า ϵ ของวัสดุแต่ละชนิดจะมีค่าแตกต่างกัน (ตารางที่ 4.1) เนื่องจากคุณสมบัติในการแผ่รังสีความร้อนของวัสดุมีค่าแตกต่างกัน โดยเหล็กมีค่า ϵ สูงที่สุด ทองแดงมีค่า ϵ ต่ำที่สุด โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.81-0.88 และ 0.16-0.28 ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากเมื่ออุณหภูมิที่พื้นผิวมีค่าเท่ากันเหล็กจะมีค่าความสามารถในการแผ่รังสีความร้อนได้มากกว่าทองแดง โดย สแตนเลส อะลูมิเนียมและทองเหลืองมีค่า ϵ ค่อนข้างใกล้เคียงกัน เนื่องจากพื้นผิวของวัสดุทั้งสามชนิดสามารถแผ่รังสีได้ใกล้เคียงกัน โดยค่า ϵ ของวัสดุทั้งสามอยู่ในช่วง 0.34-0.52, 0.33-0.51 และ 0.40-0.65 ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองของ เหล็ก สแตนเลส อะลูมิเนียม ทองแดง และทองเหลืองสอดคล้องกับการทดลองของ Rao (2010.), Brewster (1992.), Fogiell (1992.) และ Saravacos and Kostaropoulos (2002.)

แต่อย่างไรก็ตามผลการทดลองของอะลูมิเนียมไม่สอดคล้องกับ Fraden (2010.) ซึ่งได้ค่า ϵ ค่อนข้างต่ำประมาณ 0.05-0.07 ผลการทดลองที่ได้แตกต่างจากค่าดังกล่าวอาจเป็นผลมาจาก

- ใช้เครื่องมือวัดค่า ϵ ที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน ช่วงความยาวคลื่นของรังสีอินฟราเรดที่อุปกรณ์รับไปจึงอาจมีค่าแตกต่างกัน ซึ่งโครงการวิจัยนี้ใช้กล้อง TI ที่สามารถตรวจจับรังสีอินฟราเรดได้ในช่วงความยาวคลื่น 8-14 μm ในขณะที่ Fraden (2010.) ไม่ได้ระบุช่วงความยาวคลื่นที่ตรวจจับ

- ทดลองในสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกัน โดยโครงการวิจัยนี้ได้ทำการทดลองภายในชุดควบคุมอุณหภูมิ จึงอาจส่งผลให้อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (T_{BG}) ที่ป้อนให้อุปกรณ์วัดมีค่าแตกต่างกัน ซึ่ง Fraden (2010.) ไม่ได้ระบุค่า T_{BG} ดังกล่าว

- ระยะห่างระหว่างเครื่องมือวัดกับวัสดุ รวมไปถึงมุมในการวัดอาจแตกต่างกัน

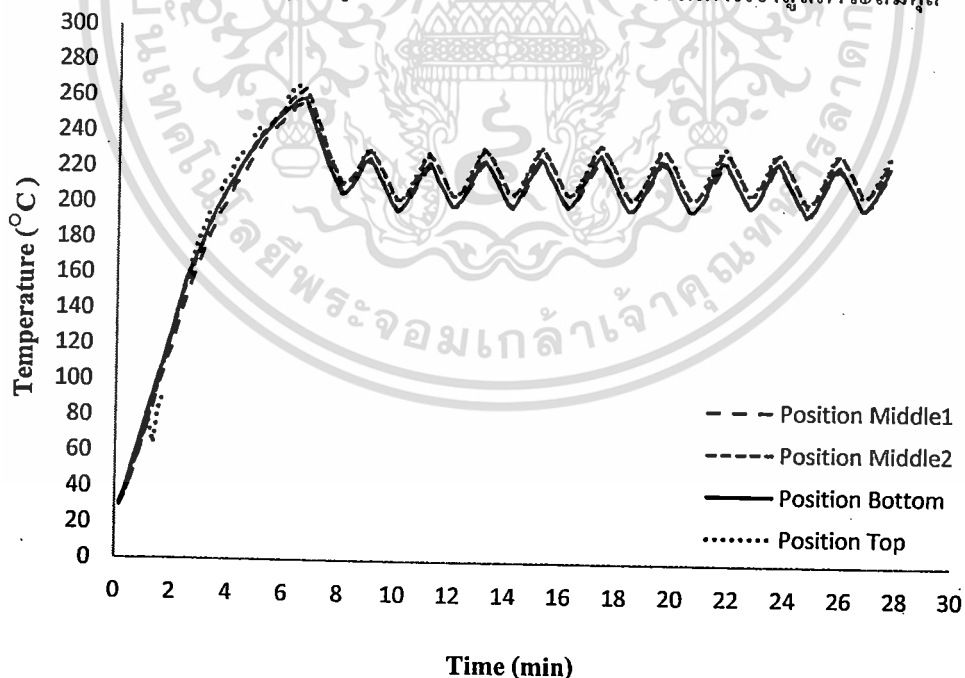
จากรูปที่ 4.4 พบว่าเมื่อพื้นผิวของวัสดุมีอุณหภูมิต่ำลง ค่า ϵ ของวัสดุจะมีค่าสูงขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิที่พื้นผิวของวัสดุสูงขึ้น ϵ จะมีค่าต่ำลง แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่พื้นผิวของวัสดุมีผลต่อค่า ϵ ของวัสดุ โดยวัสดุแต่ละชนิดมีแนวโน้มการลดลงของค่า ϵ ใกล้เคียงกัน

4.2 การทดสอบคุณลักษณะของเตาอบ

4.2.1 ฮีตเตอร์รีซิสการตัดต่ออุณหภูมิภายในเตาอบ

เมื่อให้พลังงานความร้อนแก่ฮีตเตอร์ (Heater) ภายในเตาอบจะทำให้ฮีตเตอร์มีอุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งมีเทอร์โมสแตท (Thermostat) เป็นอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ ทำหน้าที่ตัดต่อการจ่ายพลังงานให้กับฮีตเตอร์ โดยมีการตัดต่ออุณหภูมิในช่วง $\pm 10^{\circ}\text{C}$ ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.5 ซึ่งพบว่าหากตั้งค่าอุณหภูมิเตาไว้ที่ 210°C อุณหภูมิของอากาศภายในเตาจะมีค่า $210 \pm 10^{\circ}\text{C}$

เมื่อพิจารณากราฟที่ได้จากการทดลองพบว่าหากตั้งค่าอุณหภูมิภายในเตาอบไว้ที่ 210°C เตาอบจะใช้เวลาประมาณ 8-10 นาที ในการเข้าสู่สภาวะสมดุล ซึ่งเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะสมดุลขึ้นอยู่กับที่ตั้งค่าอุณหภูมิภายในเตาอบ โดยหากตั้งอุณหภูมิไว้สูงเตาอบจะใช้เวลาานกว่าในการเข้าสู่สภาวะสมดุล แต่หากตั้งค่าอุณหภูมิไว้ต่ำเตาอบจะใช้เวลาเร็วกว่าในการเข้าสู่สภาวะสมดุล



รูปที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศภายในเตาอบเมื่อตั้งค่าอุณหภูมิเตาอบไว้ที่ 210°C

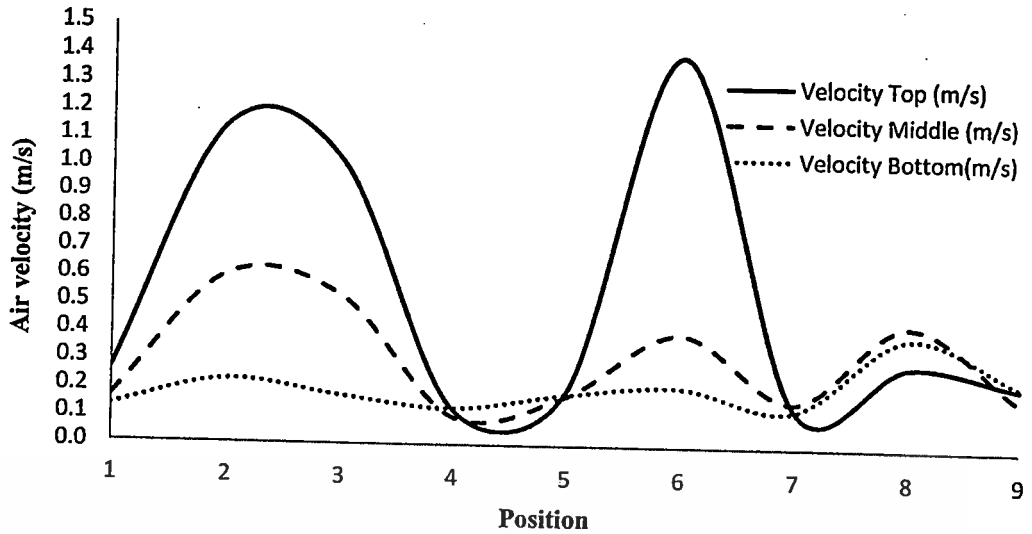
4.2.2 ความเร็วลมภายในเตาอบ

แบ่งพื้นที่ภายในเตาอบบริเวณเหนือถาดวางชิ้นไป ออกเป็น 3 แถว คือแถบบน แถวกลาง และแถวล่าง เพื่อวัดความเร็วลม โดยแต่ละแถวมีการวัดความเร็วลมทั้งหมด 9 ตำแหน่ง ผลการทดลองพบว่าความเร็วลมเฉลี่ยและความแปรปรวนของความเร็วลมในแต่ละตำแหน่งมีค่าสูงสุดที่แถบบน สาเหตุที่ความเร็วลมเฉลี่ยและความแปรปรวนในแต่ละตำแหน่งของแถบบนมีค่าค่อนข้างสูงเนื่องจากช่องลมถูกติดตั้งไว้ที่บริเวณด้านบนของผนังเตาด้านขวา ซึ่งตรงกับบริเวณแถบบนพอดี ทำให้ลมถูกเป่ามาที่แถบบนโดยตรง อย่างไรก็ตามในการทดลองได้มีการวางวัตถุไว้ที่ถาดวาง ดังนั้นลมร้อนที่สัมผัสกับวัตถุโดยตรงคือลมร้อนบริเวณแถวกลางและแถวล่างซึ่งมีค่าความเร็วลมค่อนข้างใกล้เคียงกันและมีความแปรปรวนของความเร็วลมในแต่ละตำแหน่งไม่สูงมากนัก ดังแสดงในตาราง 4.2 และรูปที่ 4.6 ซึ่งความเร็วลมเฉลี่ยรวมของแถวกลางกับแถวล่างมีค่าอยู่ในช่วง 0.1-0.6 m/s โดยมีค่าเฉลี่ย 0.254 m/s ตำแหน่งการวัดและค่าความเร็วลมที่ตำแหน่งดังกล่าว แสดงในรูปที่ 4.7

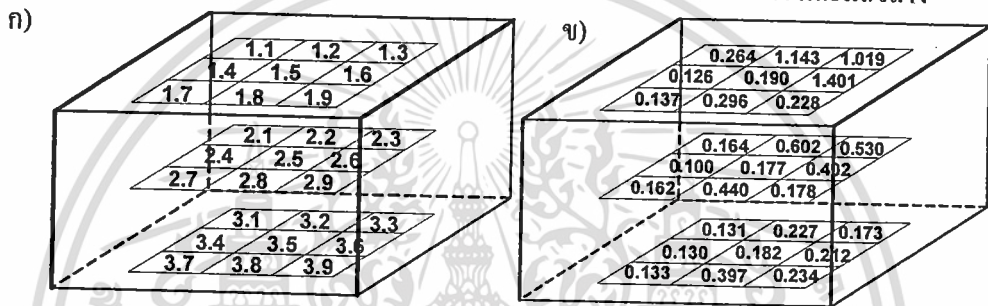
ตารางที่ 4.2 ความเร็วเฉลี่ย (m/s) ของลมภายในเตาอบที่แถวและตำแหน่งต่างๆ

ตำแหน่งการวัดความเร็วลมในแต่ละแถว	ความเร็วลม (m/s)			
	แถบบน ¹	แถวกลาง ²	แถวล่าง ³	เฉลี่ย ⁴
1	0.264±0.184a	0.164±0.039a	0.131±0.017a	0.148±0.022a
2	1.143±0.247b	0.602±0.215b	0.227±0.072bc	0.414±0.129c
3	1.019±0.330b	0.530±0.546b	0.173±0.045ab	0.352±0.279c
4	0.126±0.029a	0.100±0.014a	0.130±0.009a	0.115 ±0.008a
5	0.190±0.056a	0.177±0.051a	0.182±0.041abc	0.179 ±0.031a
6	1.401±0.279c	0.402±0.301b	0.212±0.056bc	0.307±0.163bc
7	0.137±0.023a	0.162±0.035a	0.133±0.011a	0.148 ±0.017a
8	0.296±0.072a	0.440±0.106b	0.397±0.104d	0.418±0.069c
9	0.228±0.034a	0.178±0.042a	0.234±0.077c	0.206±0.045ab
เฉลี่ย (n=9)	0.534±0.507	0.306±0.278	0.202±0.096	0.254±0.161

หมายเหตุ: 1 คือ ความเร็วลมเฉลี่ยของแถบบนซึ่งห่างจากผนังเตาด้านบน 2 cm 2 คือความเร็วลมเฉลี่ยของแถวกลางซึ่งห่างจากผนังเตาด้านบน 8.5 cm 3 คือความเร็วลมเฉลี่ยของแถวล่างซึ่งห่างจากผนังเตาด้านบน 15 cm (ห่างจากถาดวาง 2 cm) 4 คือ ความเร็วลมเฉลี่ยรวมของแถวกลางและแถวล่าง n คือจำนวนซ้ำที่ใช้ในการวัดความเร็วลมในแต่ละแถว ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรภาษาอังกฤษตามหลังต่างกันในแต่ละแถว (a และ b) แสดงค่าความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)



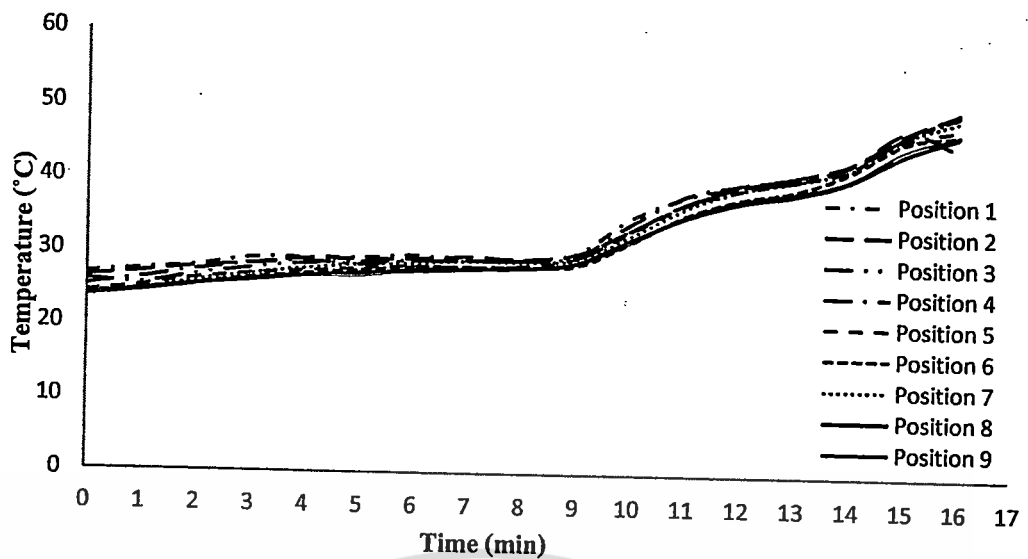
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงค่าความเร็วลมในแต่ละตำแหน่งของแถวบน แถวกลาง และแถวล่าง



รูปที่ 4.7 ก) ตำแหน่งการวัดความเร็วลมร้อนภายในเตาอบบริเวณเหนือถาดวาง ข) ค่าความเร็วลมที่ตำแหน่งต่างๆ เหนือถาดวาง

4.2.3 การกระจายอุณหภูมิภายในเตาอบ

ค่าการกระจายอุณหภูมิภายในเตาอบที่ตำแหน่งต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.8 จากรูปแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งมีค่าแตกต่างกันน้อยมาก ดังนั้นไม่ว่าจะวางวัตถุไว้ในตำแหน่งใด วัตถุที่ได้จะมีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน ซึ่งในการทดลองได้วางวัตถุไว้ที่ตำแหน่งที่ 5 เนื่องจากมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิก่อนข้างคงที่และแนวโน้มอุณหภูมิอยู่ในช่วงค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิทั้ง 9 ตำแหน่ง



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงการกระจายอุณหภูมิภายในเตาอบ

เมื่อเปิดให้ความร้อนกับเตาอบ โดยให้ความร้อนกับฮีตเตอร์ทั้งด้านบนและด้านล่าง พัดลมจะถูกเปิดขึ้นมาโดยอัตโนมัติเพื่อให้ความร้อนในเตาอบกระจายอย่างทั่วถึง โดยความเร็วลมร้อนบริเวณที่สัมผัสกับวัตถุโดยตรงมีค่าอยู่ในช่วง 0.1-0.6 เมตรต่อวินาที 0.254 m/s โดยเมื่อเปิดให้ความร้อน เตาอบจะใช้ระยะเวลาช่วงหนึ่งเพื่อเข้าสู่สภาวะสมดุล (อุณหภูมิของอากาศภายในเตาอบคงที่) โดยระยะเวลาในการเข้าสู่สภาวะสมดุลจะขึ้นอยู่กับค่าอุณหภูมิให้กับเตาอบ โดยฮีตเตอร์รีซีตการตัดต่ออุณหภูมิภายในเตาอบอยู่ในช่วง $\pm 10^{\circ}\text{C}$

4.3 การทดสอบการควบคุมอุณหภูมิที่ผิวโดยใช้ IR sensor

ทดสอบการวัดอุณหภูมิของแผ่นเหล็กที่ทราบค่า ϵ โดยใช้ IR sensor ที่ติดตั้งไว้ด้านบนเตาอบขนาดเล็ก พบว่าอุณหภูมิผิวที่วัดได้จาก IR sensor มีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิผิวที่วัดได้จากเทอร์โมคัปเปิล ($\pm 2^{\circ}\text{C}$) อุณหภูมิมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย ซึ่งอาจเป็นผลมาจาก

- ในการทดสอบการวัดอุณหภูมิเหล็กด้วย IR sensor เพื่อจำลองระบบควบคุมในช่วงที่มีอุณหภูมิก่อนข้างสูง (นอกย่านการใช้งานของ IR sensor) จึงต้องติดตั้ง IR sensor ไว้ด้านบนเตาอบ ทำให้จุดวัดอุณหภูมิ (spot) บนผิววัตถุที่ IR sensor รับไปมีขนาดค่อนข้างใหญ่ อาจทำให้ IR sensor รับอุณหภูมิจากจุดอื่นภายนอกจุดใจเข้าไปด้วย
- IR sensor รุ่นที่ใช้ในการทดลองไม่สามารถรับค่า T_{BG} ของสิ่งแวดล้อมได้ ส่งผลให้รังสีอินฟราเรดที่ IR sensor รับไม่ได้มีเพียงรังสีอินฟราเรดที่มาจากตัววัตถุเท่านั้น แต่ยังมีรังสีอินฟราเรดที่มาจากวัตถุอื่นหรือสิ่งแวดล้อมรอบ ๆ ด้วย

เมื่อพิจารณาการประยุกต์ใช้ IR sensor สำหรับการควบคุมอุณหภูมิที่ผิววัตถุในระหว่างกระบวนการให้ความร้อนเพื่อนำอุณหภูมิผิวที่ได้เป็นค่าอินพุตสำหรับควบคุมการเพิ่ม-ลดอุณหภูมิภายในเตา พบว่าค่าความผิดพลาดของอุณหภูมิที่อ่านได้จาก IR sensor ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ดังกล่าวยังอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ในระหว่างกระบวนการอบเมื่อวัตถุที่อยู่ในเตาได้รับความร้อน จะมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นที่บริเวณผิวและแผ่พลังงานรังสีอินฟราเรดออกมา ซึ่ง IR sensor จะรังสีอินฟราเรดที่แผ่ออกมาจากผิววัตถุและแปลผลเป็นอุณหภูมิ โดยอุณหภูมิดังกล่าวจะถูกนำไปใช้เป็นตัวแปรอินพุต (input) เพื่อใช้ในการควบคุมอุณหภูมิของเตาอบ โดยระบบควบคุมของเตาอบจะสั่งให้มีการปรับเพิ่มหรือลดอุณหภูมิตามที่ต้องการ

หากต้องการให้การควบคุมเตาอบด้วย IR sensor เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ จำเป็นต้องกำหนดค่า ϵ ที่แท้จริงของวัตถุให้กับ IR sensor เพื่อให้ IR sensor สามารถวัดอุณหภูมิที่ผิววัตถุได้อย่างถูกต้อง โดยค่า ϵ ดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติที่ผิวของวัตถุด้วย ดังนั้นสำหรับกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่องและคุณสมบัติของวัตถุ (โดยเฉพาะคุณสมบัติที่ผิว) มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทราบค่า ϵ ของวัตถุตลอดกระบวนการผลิต เพื่อนำไปกำหนดให้กับ IR sensor ซึ่งในการปฏิบัติงานจริงการป้อนค่า ϵ ให้กับ IR sensor ตลอดเวลาเป็นไปได้ยากมาก เนื่องจากวัตถุมีการเคลื่อนที่ตลอดเวลา อาจทำให้ไม่สามารถป้อนค่า ϵ ให้ IR sensor ได้ทันการเคลื่อนไหวของวัตถุได้ ดังนั้น IR sensor จึงไม่เหมาะกับการใช้งานในเชิงควบคุมกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่อง แต่อย่างไรก็ตาม IR sensor สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับกระบวนการผลิตแบบเป็นกะ (Batch) ในลักษณะของงานวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ (R&D) หรืองานทางด้าน การตรวจสอบคุณภาพผลิตภัณฑ์ในระหว่างกระบวนการผลิต รวมไปถึงการตรวจสอบเพื่อซ่อมบำรุงเครื่องจักรอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิต

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

วัตถุแต่ละชนิดมีค่า ε ที่แตกต่างกัน วิธีการวัดค่า ε ของวัตถุทำได้โดยการควบคุมอุณหภูมิที่ผิวของวัตถุให้คงที่ด้วยตู้ควบคุมอุณหภูมิ จากนั้นวัดค่าอุณหภูมิของวัตถุด้วยกล้อง TI หรือด้วย IR sensor เปรียบเทียบกับอุณหภูมิผิวที่แท้จริงของวัตถุ ซึ่งโดยทั่วไปวัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิลแบบสัมผัส กล้อง TI หรือ IR sensor วัดอุณหภูมิวัตถุโดยรับรังสีอินฟราเรดที่แผ่ออกมาจากวัตถุ และแปลค่าเป็นอุณหภูมิ ซึ่งรังสีอินฟราเรดที่กล้อง หรือ IR sensor รับไปอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 8-14 μm (สำหรับโครงการวิจัยนี้) โดยประกอบด้วยรังสีที่แผ่ออกจากตัววัตถุเอง (E) และรังสีจากสิ่งแวดล้อมหรือวัตถุอื่น โดยรอบแผ่มาตกกระทบและสะท้อนออกจากผิววัตถุ ($G_{\lambda,ref}$) การวัดค่า ε ที่แท้จริงของวัตถุจึงต้องกำหนดค่าอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมโดยวัตถุ (T_{BG}) ให้กับกล้อง TI ด้วย (IR sensor ไม่มีฟังก์ชันการรับค่า T_{BG}) ซึ่งกล้องจะนำค่า T_{BG} ดังกล่าวไปชดเชยค่า $G_{\lambda,ref}$ เพื่อให้รังสีอินฟราเรดที่กล้อง TI รับไปมีเพียงรังสีที่แผ่ออกมาจากตัววัตถุเองเท่านั้น เมื่อป้อนค่า T_{BG} แล้วจึงปรับค่า ε ที่ตัวกล้องจนกระทั่งอุณหภูมิที่ได้จากกล้องมีค่าเท่ากับอุณหภูมิพื้นผิวของวัตถุ ซึ่งค่า ε ที่ได้คือค่า ε ที่แท้จริงของวัตถุ T_{BG} (ค่า T_{BG} จะขึ้นอยู่กับตำแหน่งการรับรังสีอินฟราเรดของกล้อง TI)

ปัจจัยที่มีผลต่อค่า ε ได้แก่ ชนิดของวัตถุ อุณหภูมิพื้นผิวของวัตถุ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมโดยรอบวัตถุ (T_{BG}) มุมและความยาวของรังสีอินฟราเรดที่แผ่ออกมาจากผิวของวัตถุ รวมไปถึงฟังก์ชันการใช้งานหรือความสามารถของกล้อง TI ที่นำมาใช้ในการวัดค่าด้วย

ผลการทดลองของโครงการสรุปได้ดังนี้

- 1) อุณหภูมิมีผลต่อค่า ε ของวัตถุ โดยเมื่ออุณหภูมิของวัตถุมีค่าสูงขึ้น ค่า ε จะมีแนวโน้มลดลง
- 2) ค่า ε ของวัสดุทางวิศวกรรมแต่ละชนิดมีค่าแตกต่างกัน โดยเหล็กมีค่า ε มากที่สุด ทองแดงมีค่า ε ต่ำที่สุด โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.81-0.88 และ 0.16-0.24 ตามลำดับ ส่วนทองเหลือง สแตนเลส และอะลูมิเนียมมีค่า ε ค่อนข้างใกล้เคียงกัน โดย ε ของวัสดุดังกล่าวมีค่าอยู่ในช่วง 0.34-0.52 0.33-0.51 และ 0.40-0.65 ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากวัสดุแต่ละชนิดมีความสามารถในการแผ่รังสีที่แตกต่างกัน โดยวัสดุที่มีความสามารถในการแผ่รังสีสูงจะมีค่า ε สูง ส่วนวัสดุที่มีความสามารถในการแผ่รังสีต่ำจะมีค่า ε ต่ำ

3) สามารถประยุกต์ใช้ IR sensor วัดอุณหภูมิที่ผิววัตถุในระหว่างกระบวนการให้ความร้อนและใช้อุณหภูมิผิวที่ได้เป็นตัวแปรอินพุตสำหรับควบคุมอุณหภูมิของเตาอบได้ โดยติดตั้ง IR sensor ไว้ด้านบนเตาอบขนาดเล็กวัดอุณหภูมิที่ผิวเพื่อทำนายอุณหภูมิที่ของวัตถุ สรุปการทดลองเพื่อนำ IR ไปประยุกต์ใช้ได้ดังนี้

5.1) เตาอบที่ใช้ในการทดลอง มีค่าความเร็วลมอยู่ในช่วง 0.1-0.6 m/s เฉลี่ย 0.254 m/s โดยเมื่อเปิดให้ความร้อน เตาอบจะใช้ระยะเวลาช่วงหนึ่งเพื่อเข้าสู่สภาวะสมดุล (อุณหภูมิของอากาศภายในเตาอบคงที่) โดยระยะเวลาในการเข้าสู่สภาวะสมดุลจะขึ้นอยู่กับค่าอุณหภูมิให้กับเตาอบ ค่าฮีสเตอร์รีซิสการตัดต่ออุณหภูมิภายในเตาอบมีค่าอยู่ในช่วง $\pm 10^{\circ}\text{C}$ การกระจายอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งภายในเตาอบมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน

5.3) สามารถใช้ IR sensor วัดอุณหภูมิที่ผิวของวัตถุเพื่อใช้เป็นตัวแปรอินพุตสำหรับควบคุมอุณหภูมิของเตาอบได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

เพื่อให้ได้ค่า ϵ ที่ถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น

1. ในการทดลองหาค่า ϵ ของวัตถุชนิดต่าง ๆ โดยใช้กล้อง TI ควรมีการทดสอบหาค่า T_{BG} ของสิ่งแวดล้อมโดยรอบวัตถุและกำหนดค่า T_{BG} ที่ได้ให้กับกล้อง ซึ่งกล้องจะนำค่า T_{BG} ดังกล่าวไปชดเชยค่า $G_{\lambda_{cut}}$ จากสิ่งแวดล้อม ทำให้ค่า ϵ ที่ได้เป็นค่า ϵ ที่แท้จริงของวัตถุ และควรติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิลสำหรับวัดอุณหภูมิวัตถุให้สามารถกำหนดตำแหน่งซ้าย-ขวาหรือขึ้น-ลง ได้ เพื่อไม่ให้ตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลง (วัดตำแหน่งเดิมตลอด)

2. การทดสอบเตาอบควรมีการเปรียบเทียบอุณหภูมิของวัตถุที่อ่านได้จาก IR sensor กับอุณหภูมิที่อ่านได้จากเทอร์โมคัปเปิลที่ผ่านการสอบเทียบ เพื่อให้มั่นใจได้ว่าอุณหภูมิที่อ่านได้จาก IR sensor คืออุณหภูมิที่แท้จริงของวัตถุ

บรรณานุกรม

- ประวิทย์ วัฒนากร. 2553. กล้องถ่ายภาพความร้อนบอกที่ซ่อนอุณหภูมิ. [Online]. Available : <http://www.vcharkarn.com/varticle/39579>
- มนตรี พิรุณเกษตร. 2548. การถ่ายเทความร้อน ฉบับเตรียมสอบและเสริมประสบการณ์. พิมพ์ครั้งที่ 4 กรุงเทพฯ : วิทยพัฒน์.
- เอกชัย พุฒพิวงค์ และอริคม มาน้อย. **Radiation Thermometry**. กรุงเทพฯ : ฟ้าวิทยายุทธภูมิ สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. เอกสารอัดสำเนา. หน้า 2-3.
- Amidon, G.L., Lee, P. I. and Topp, E.M. 2000. **Transport Processes in Pharmaceutical Systems**. Marcel Dekker., New York., pp.671
- Bentley, R.E. 1998. **Handbook of Temperature Measurement : Temperature and Humidity Measurement**. Springer., Verlag., pp.85
- Brenster, M.Q. 1992. **Thermal Radiative Transfer And Properties**. John Wiley & Sons. pp.56-57
- Fogiel, M. 1992. **Handbook of Mathematical, Scientific and Engineering : formulas ,tables ,functions graphs ,transforms**. Research & Education Association., New Jersey., pp.814-8
- Fosbinder, R. A., and Orth, D. 2011. **Essentials of Radiologic Science**. Wolters Kluwer Health., Maryland., pp.206-209
- Fraden, J. 2010. **Handbook of Modern Sensor : Physics Designs and Applications**. Springer., New York., pp.648
- Gowen, A.A, Tiwari, B.K., Cullen, P.J., McDonnell, K. and O'Donnel, C.P. 2010. **Application of thermal imaging in food quality and safety assessment**. trends in Food Science & Technology . Vol.21, No.4, pp. 190-200.
- Gruner, K.D. 2553. **Principles of Non-Contact Temperature Measurement**. [Online]. Available : http://support.fluke.com/raytek-sales/Download/Asset/IR_THEORY_55514_ENG_REVB_LR.PDF.
- Ibarra, J. G. and Tao, Y. 1999. **Estimation of internal temperature in chicken meat by means of mild – infrared imaging & neural networks**. [Online]. Available : http://spie.org/x648.html?product_id=336903
- Incropera, F.P., DeWitt, D.P., Bergmann, T.L. and Lavine, A.S. 2005. **Fundamentals of Heat**

and Mass Transfer. 6th ed. Willey Asia.

Rao, D.G. **Fundamentals of Food Engineering**. 2010. Baba Barkha Nath., New Delhi., pp.203-204

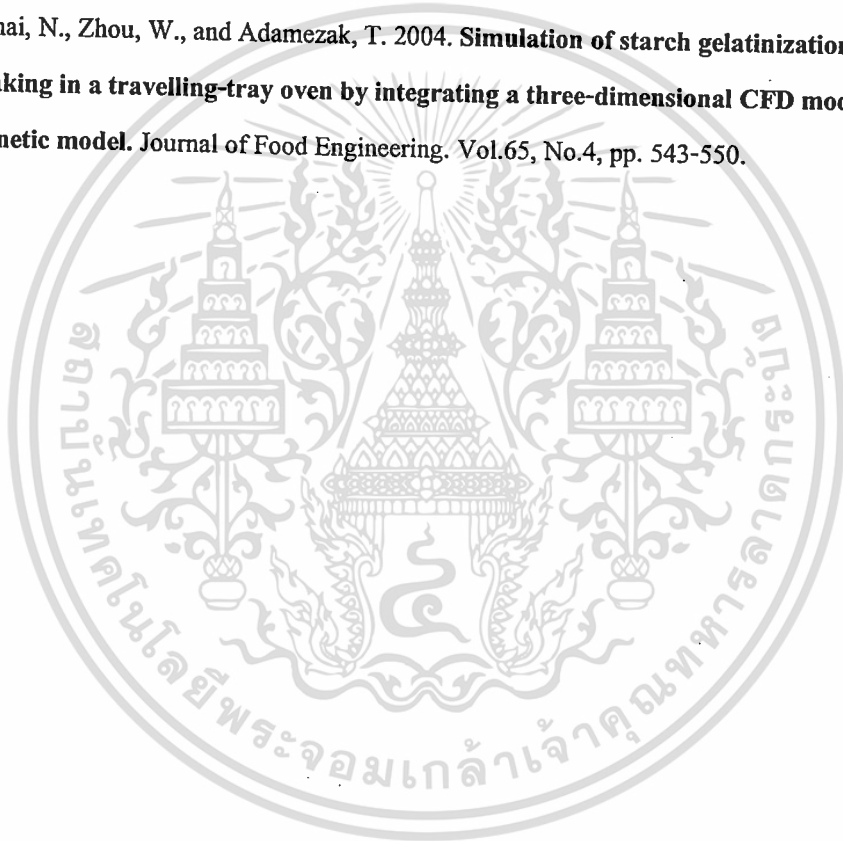
Rogers, E. K. and Brimelow, C. J. B. 2005. **Instrumentation and sensors for the food industry**. 2nd ed.: Woodhead., Cambridge., pp.202-203

Saravacos, G.D. and Kostaropoulos, A. E. 2002. **Handbook of food processing equipment**. Kluwer Academic., New York., pp.285

[:http://spiedigitallibrary.org/proceedings/resource/2/psisdg/3543/1/24_1?isAuthorized=no](http://spiedigitallibrary.org/proceedings/resource/2/psisdg/3543/1/24_1?isAuthorized=no)

Therdthai, N., Zhou, W., and Adamezak, T. 2002. **Optimisation of temperature profile in bread baking**. Journal of Food Engineering. Vol.55, No.1, pp. 41-48.

Therdthai, N., Zhou, W., and Adamezak, T. 2004. **Simulation of starch gelatinization during baking in a travelling-tray oven by integrating a three-dimensional CFD model with a kinetic model**. Journal of Food Engineering. Vol.65, No.4, pp. 543-550.



ภาคผนวก ก.

ตารางแสดงข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลการบันทึกค่าอุณหภูมิพร้อมค่า T_{BG} และค่า ε จากกล้อง TI ของเหล็ก

อุณหภูมิจากกล้อง TI (°C)	ค่า ε	อุณหภูมิ Background (T_{BG} : °C)	อุณหภูมิจาก เทอร์โมคัปเปิล (°C)
50	0.88	31.6	50.0
60	0.84	32.5	60.2
70	0.84	32.3	69.9
80	0.83	32.1	80.1
90	0.83	31.7	90.3
100	0.84	31.2	99.9
110	0.84	31.4	109.6
120	0.84	31.0	120.1
130	0.84	30.8	130.1
140	0.84	30.8	140.1
150	0.84	30.8	150.1
160	0.84	30.8	159.7
170	0.83	30.8	170.2
180	0.82	30.8	179.9
190	0.82	30.5	189.7
200	0.81	30.3	199.6

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลการบันทึกค่าอุณหภูมิพร้อมค่า T_{BG} และค่า ε จากกล้อง TI ของทองแดง

อุณหภูมิจากกล้อง TI (°C)	ค่า ε	อุณหภูมิ Background (T_{BG} : °C)	อุณหภูมิจาก เทอร์โมคัปเปิล (°C)
50	0.24	32.5	50.2
60	0.28	27.9	60.3
70	0.24	31.0	69.9
80	0.21	27.2	80.5
90	0.20	27.8	89.8
100	0.18	31.4	100.3
110	0.19	30.2	110.3
120	0.20	28.5	120.0
130	0.21	26.0	129.8
140	0.20	26.4	139.1
150	0.19	27.0	151.5
160	0.19	27.0	158.0
170	0.19	26.5	172.0
180	0.19	26.0	181.8
190	0.18	26.3	191.3
200	0.16	27.4	201.8

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลการบันทึกค่าอุณหภูมิพร้อมค่า T_{BG} และค่า ε จากกล้อง TI ของสแตนเลส

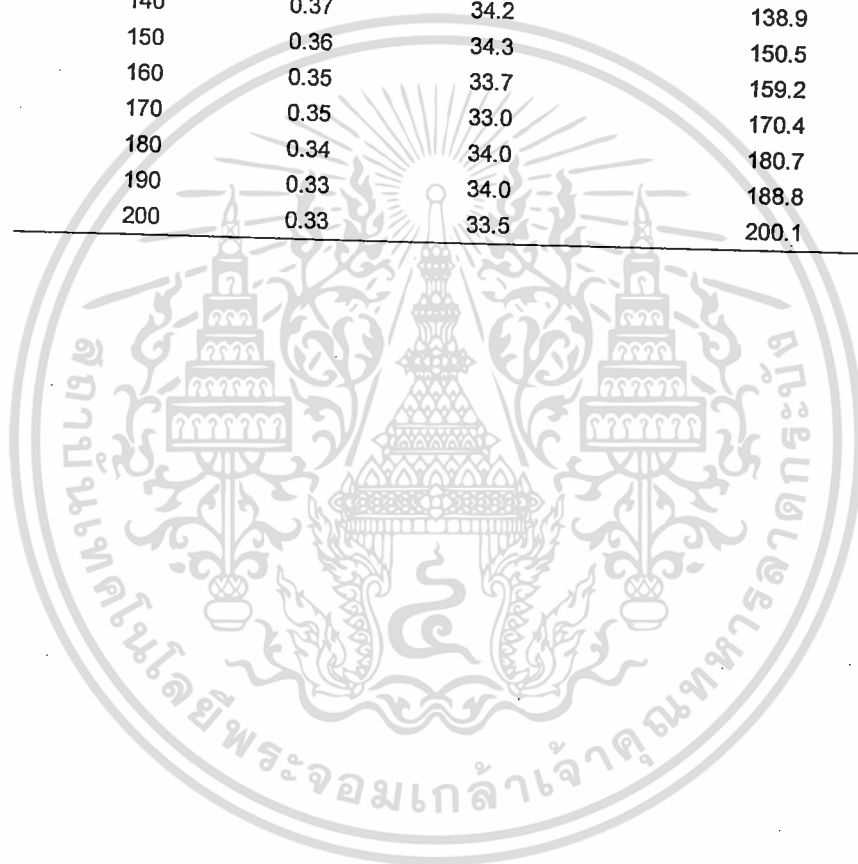
อุณหภูมิจากกล้อง TI (°C)	ค่า ε	อุณหภูมิ Background (T_{BG} , °C)	อุณหภูมิจาก เทอร์โมคัปเปิล (°C)
50	0.52	29.9	50.2
60	0.48	28.5	60.1
70	0.46	30.0	70.2
80	0.45	30.0	80.0
90	0.44	30.0	89.8
100	0.43	30.0	100.1
110	0.43	30.0	110.4
120	0.41	32.0	120.6
130	0.41	32.2	130.4
140	0.40	32.0	141.0
150	0.40	32.0	150.1
160	0.39	31.8	160.3
170	0.38	31.7	170.8
180	0.37	31.4	180.4
190	0.36	31.4	189.6
200	0.34	31.3	199.8

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลการบันทึกค่าอุณหภูมิพร้อมค่า T_{BG} และค่า ε จากกล้อง TI ของอะลูมิเนียม

อุณหภูมิจากกล้อง TI (°C)	ค่า ε	อุณหภูมิ Background (T_{BG} , °C)	อุณหภูมิจาก เทอร์โมคัปเปิล (°C)
50	0.65	27.0	50.0
60	0.57	27.0	60.1
70	0.52	27.0	70.2
80	0.49	27.5	79.6
90	0.48	27.7	90.1
100	0.46	27.0	99.7
110	0.46	27.0	109.2
120	0.45	27.5	120.1
130	0.44	27.5	130.7
140	0.44	27.5	140.1
150	0.43	27.9	150.3
160	0.44	27.8	159.8
170	0.44	27.5	170.7
180	0.43	27.5	179.5
190	0.42	28.7	189.5
200	0.40	27.2	202.1

ตารางที่ ก.5 ข้อมูลการบันทึกค่าอุณหภูมิพร้อมค่า T_{BG} และค่า ϵ จากกล้อง TI ของทองเหลือง

อุณหภูมิจากกล้อง TI (°C)	ค่า ϵ	อุณหภูมิ Background (T_{BG} : °C)	อุณหภูมิจากเทอร์ โมคัปเปิล (°C)
50	0.51	30.7	50.0
60	0.46	30.7	60.0
70	0.42	30.0	70.7
80	0.37	34.0	79.9
90	0.36	33.7	89.7
100	0.36	35.0	100.6
110	0.36	35.2	108.7
120	0.36	35.0	120.4
130	0.37	34.8	129.2
140	0.37	34.2	138.9
150	0.36	34.3	150.5
160	0.35	33.7	159.2
170	0.35	33.0	170.4
180	0.34	34.0	180.7
190	0.33	34.0	188.8
200	0.33	33.5	200.1



ภาคผนวก ข.

IR sensor

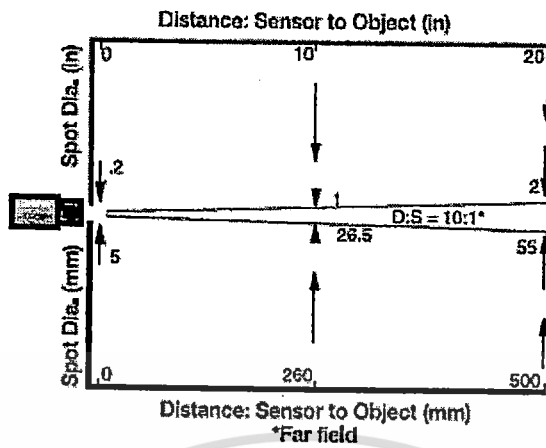


Measurement Specifications

Spectral Response	
Model	
LT (Low Temp.)	8 to 14 microns
Optical Resolution:	
LT	10:1
Temperature Range	
Model	
LT	-40°C to 600°C (-40°F to 1112°F); -25°C to 600°C for J-thermocouple output
System Accuracy:	±1% of reading or ±1°C, whichever is greater Thermocouple output accuracy ±1% of reading or ±2.5°C, whichever is greater
System Repeatability: whichever is greater	±0.5% of reading or ±0.5°C (1°F).
Temperature Coefficient	
MID	0.15K per K or 0.15% per K,
MIC	0.05K per K or 0.05% per K
MIH	0.05K per K or 0.05% per K, whichever is greater*
Temperature Resolution:	
LT	0.3°C or 0.5°F
System Response Time:	150ms (95%)
Emissivity:	0.100 to 1.100 digitally adjustable increments of .001
Transmission:	0.100 to 1.100 digitally adjustable increments of .001
Signal Processing:	Peak hold, valley hold, variable averaging filter, adjustable up to 998 seconds

* NIST/DKD certified models available with 0.05K per K

Nominal Optical Specifications

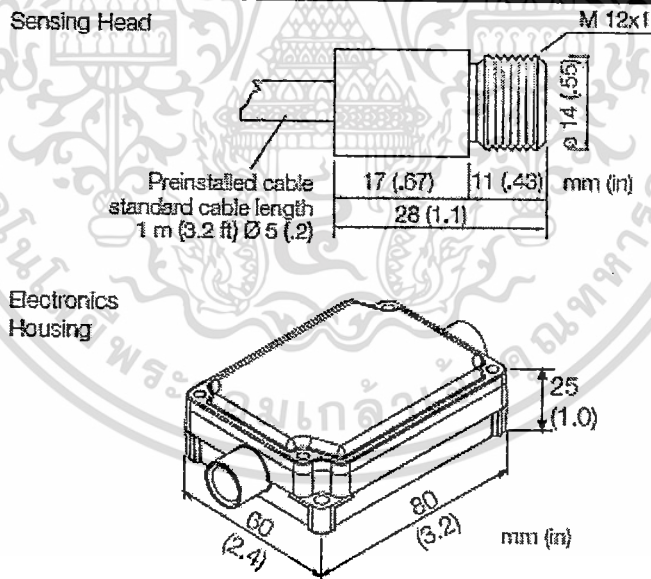


D:S is the optical resolution expressed as a ratio of the distance to the measurement spot divided by the diameter of the spot.

Optical resolution for the MI is 10:1.

Nominal spot size based on 90% energy.

Sensor Dimensions



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sensor Specifications

Environmental Rating:	NEMA-4 (IP 65)
Ambient Temperature Range:	
MID	0°C to 85°C (32°F to 185°F)
MIC	0°C to 125°C (32°F to 257°F)
MIH	0°C to 180°C (32°F to 356°F)
Electronics housing	0°C to 65°C (32°F to 150°F)
Storage Temperature:	-18°C to 85°C (0 to 185°F)
Relative Humidity:	10 to 95%, non-condensing
Construction:	
Sensing head	Stainless steel
Electronics housing	Zinc, die-cast
Weight:	
Sensing head (w/1 m cable)	50 g (1.75 oz)
Electronics housing	270 g (9.5 oz)

Shock IEC 68-2-27 (MIC ST 810D)-50g's, 11 ms on any axis
Vibration 68-2-27 (MIC ST 810D)-3g's, 11-200 Hz on any axis

Electrical Specifications

Outputs:	Scalable 4-20mA, 0-20mA, 0-5V, J or K thermocouple
Alarm Relay	10mV/°C Head Ambient signal
Cable Length:	1 m (3.2 ft) standard
Output Impedance (T/C output):	20 ohms
Minimum Load Impedance (mV output):	100K ohms
Maximum Loop Impedance (mA output):	500 ohms with 24 VDC power supply
Current Draw:	100 mA
Power Supply:	12-24 VDC