

การประยุกต์ใช้รังสีอินฟราเรดในกระบวนการแปรรูปอาหาร

APPLICATION OF INFRARED IN FOOD PROCESSING



T119396

จุฑารัตน์ เพ็ชรรัตน์
ดาวสวัสดิ์ เกตุวัลย์
หทัยภัทร วงษ์ไทยวรรณ

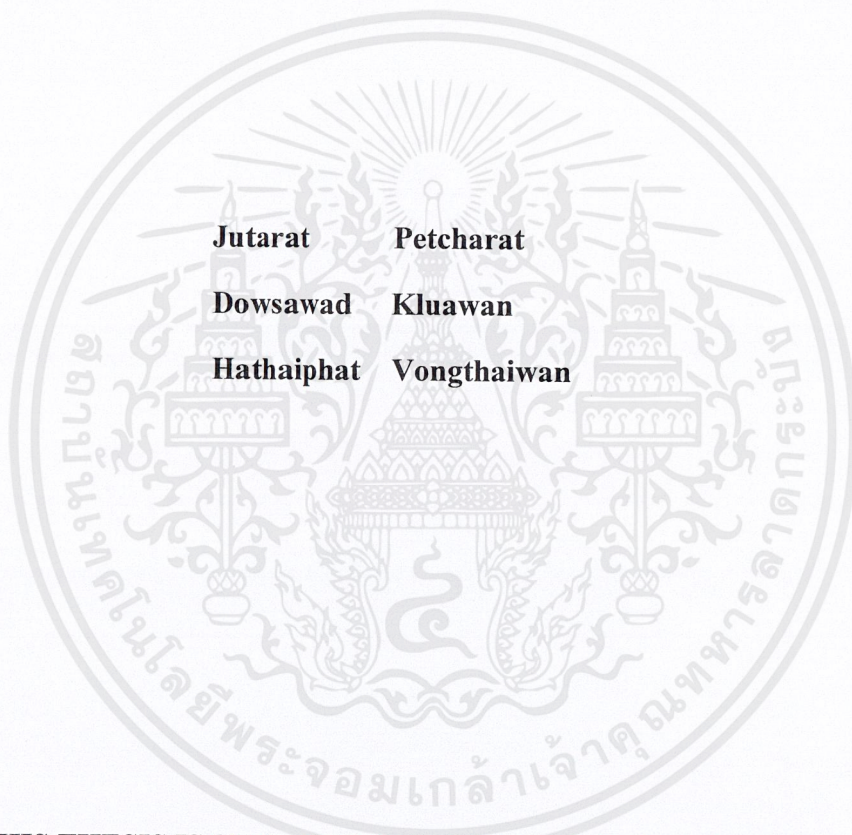
เลขหมู่.....
เลขทะเบียน **119396**
วัน,เดือน,ปี.....-7 S.ค. 2554

b. 12618492
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

APPLICATION OF INFRARED IN FOOD PROCESSING



**THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN FOOD ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2010**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2553

สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การประยุกต์ใช้รังสีอินฟราเรดในกระบวนการแปรรูปอาหาร

APPLICATION OF INFRARED IN FOOD PROCESSING

ผู้จัดทำ

1. นางสาวจุฑารัตน์ เพ็ชรรัตน์ รหัสประจำตัว 49012409
2. นางสาวดาวสวัสดิ์ เคลือวัลย์ รหัสประจำตัว 50010529
3. นางสาวหทัยภัทร วงษ์ไทยวรรณ รหัสประจำตัว 50011803



.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผศ.ดร. นวภัทรา หนูนาค)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการ	การประยุกต์ใช้รังสีอินฟราเรดในกระบวนการแปรรูปอาหาร
นักศึกษา	นางสาวจุฑารัตน์ เพ็ชรรัตน์ นางสาวดาวสวัสดิ์ เคลือวัลย์ นางสาวหทัยภัทร วงษ์ไทยวรรณ
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.นวลัทธา หนูนาค
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมอาหาร
ปีการศึกษา	2553

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอการประยุกต์ใช้คุณสมบัติการแผ่รังสีอินฟราเรดของวัตถุ (Emissivity, ϵ) ในอุตสาหกรรมอาหาร โดยวัตถุแต่ละชนิดมีค่า ϵ ที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิด 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 สเตนเลส อะลูมิเนียม ทองแดง และทองเหลือง ได้ค่า ϵ ดังนี้ 0.81-0.88 สำหรับเหล็ก 0.34-0.52 สำหรับทองแดง 0.33-0.51 สำหรับสเตนเลส 0.16-0.24 สำหรับอะลูมิเนียม และ 0.40-0.65 สำหรับทองเหลือง สำหรับวัสดุทางอาหารใช้กระบวนการอบขนมปังเป็นกรณีศึกษา เริ่มจากโดจนกลายเป็นขนมปัง โดยแบ่งช่วงการศึกษาค่า ϵ ออกเป็น 3 ช่วงตามอุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปัง ดังนี้ ช่วงที่ 1 อุณหภูมิที่กึ่งกลางและที่ผิวเท่ากับ 25°C – 40°C และ 40°C – 90°C ตามลำดับค่า ϵ เท่ากับ 0.950 ช่วงที่ 2 อุณหภูมิที่กึ่งกลางและที่ผิวเท่ากับ 40°C – 60°C และ 90°C – 100°C ตามลำดับค่า ϵ ประมาณ 0.950 (เท่ากับช่วงที่ 1) และช่วงที่ 3 อุณหภูมิที่กึ่งกลางและที่ผิวเท่ากับ 60°C – 98°C และ 100°C – 120°C ได้ค่า ϵ อยู่ในช่วง 0.81-0.95 โดยในระหว่างการอบขนมปังด้วยอุณหภูมิเดาอบคงที่และไม่คงที่ ค่า ϵ ของขนมปังมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากค่า ϵ ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ผิวเป็นหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Project Title	APPLICATION OF INFRARED IN FOOD PROCESSING	
Students	Miss Jutarat	Petcharat
	Miss Dowsawad	Kluawan
	Miss Hathaiphath	Vongthaiwan
Project Advisor	Asst.Prof.Dr.Navaphattra Nunak	
Degree	Bachelor of Engineering	
Program	Food Engineering	
Academic Year	2010	

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. For food material, the bread baking process was selected to be the case study. The baking process was divided into the following 3 stages: stage 1: the center temperature of bread was 25°C–40°C which caused to the surface temperature was 40°C–90°C and ϵ value was 0.95, stage 2: the center temperature was 40°C–60°C which caused to the surface temperature was 90°C–100°C and ϵ value was 0.95, and stage 3: the center temperature was 60°C–98°C which caused to the surface temperature was 100°C–120°C and ϵ value was in the range of 0.81-0.95. Both baking conditions with constant and non-constant oven temperature were not effect to the ϵ values because they mainly depended on the surface temperature.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาและความอนุเคราะห์จาก ผศ.ดร. นวภัทรา หนูนาถ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการงานวิจัยที่ได้ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะและช่วยแก้ปัญหา รวมถึงอุปสรรคต่างๆ ในระหว่างการทำโครงการงานวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี นอกจากนี้ ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ประสิทธิประสาทความรู้ให้ตลอดระยะเวลาในการศึกษา นอกจากนี้ ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ภายในสาขาวิชาวิศวกรรมอาหารทุกคน ที่ได้ให้ความสะดวกในการยื่นอุปกรณ์และห้องปฏิบัติการ

ขอขอบคุณ รศ.ดร.ทวิพล ช่อสัตย์ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และ คุณธีระวัฒน์ หนูนาถ (บริษัท เมเซอร์โทรนิคส์ จำกัด) ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ อุปกรณ์ต่างๆ ในการทดลอง ตลอดจนความรู้เกี่ยวกับรังสีอินฟราเรด ให้คำแนะนำทางวิชาการต่างๆ สำหรับ โครงการงานวิจัยและช่วยติดตามผลงานจนกระทั่งสำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ นายภูวนาท พรนิภาอำไพ นายรุ่งโรจน์ จันทร์ผล และนายอิสรา อาดำ เพื่อนนักศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมวัดคุม ที่ได้จัดทำระบบการวัดอุณหภูมิที่ผิวโดยใช้ IR Sensor และให้ความช่วยเหลือตลอดจนกระทั่ง โครงการงานวิจัยชิ้นนี้สำเร็จ

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดา มารดา และทุกคนในครอบครัวที่คอยให้กำลังใจ ให้การสนับสนุนตลอดมา ขอขอบคุณเพื่อนๆ นักศึกษาทุกคนที่คอยให้กำลังใจและช่วยเหลือจนโครงการงานวิจัยนี้ประสบผลสำเร็จ

คณะผู้วิจัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูปภาพ	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 หลักการ เหตุผล และที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ตรวจสอบเอกสาร	3
2.1 การแผ่รังสีอินฟราเรด	3
2.2 การแผ่รังสีของวัตถุดำ (Blackbody Radiation)	8
2.2.1 การกระจายของพลังค์ (The Planck Distribution)	9
2.2.2 กฎการกระจัดของเวิน (Wein's Displacement Law)	10
2.2.3 กฎของสเตฟาน โบลต์ซมานน์ (The Stefan-Boltzmann Law)	11
2.2.4 กฎของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's law)	11
2.3 การแผ่รังสีจากพื้นผิวจริง (Real surface Emission)	11
2.3.1 รังสีที่แผ่ออกจากพื้นผิววัตถุ (Radiosity: J)	16
2.3.2 วัตถุเทา (Gray body)	20
2.4 เปรียบเทียบการแผ่รังสีจากวัตถุจริงและวัตถุดำ	20
2.5 กล้องถ่ายภาพความร้อน	21
2.5.1 หลักการทำงานของกล้องถ่ายภาพความร้อน	21
2.5.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของกล้องถ่ายภาพความร้อน	22

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	23
2.6.1 การเฝ้าระวังและการตรวจสอบอุณหภูมิของอาหาร	23
2.6.2 คุณภาพของผลผลิตหลังการเก็บเกี่ยว	24
2.6.3 คุณภาพของเมล็ดพืช	24
2.7 กระบวนการเกิดขนมปัง	25
2.7.1 ส่วนประกอบพื้นฐานของขนมปัง	25
2.7.2 ปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงในระหว่างกระบวนการอบ	25
2.7.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบขนมปัง	28
บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง	31
3.1 การทดสอบหาค่า Emissivity	31
3.1.1 วัสดุที่นำมาใช้ในการหาค่า Emissivity	31
3.1.2 อุปกรณ์ตรวจวัดค่า Emissivity ของวัตถุ	32
3.1.3 หลักการทำงานของชุดอุปกรณ์ตรวจวัดค่า Emissivity	36
3.1.4 การทดลองวัดค่า Emissivity ของวัตถุชนิดต่าง ๆ	38
3.2 การทดสอบการอบขนมปัง	38
3.2.1 การเตรียมโด	38
3.2.2 การเตรียมเตาอบ	38
3.2.3 การวัดค่าต่างๆ (Measurement)	42
3.3 การทดสอบการอบขนมปังด้วยการควบคุมอุณหภูมิที่ผิว	43
3.3.1 การวัด Emissivity ของขนมปังโดยใช้ IR sensor	43
3.3.2 การทดสอบกระบวนการอบขนมปังโดยใช้ IR sensor	
ควบคุมอุณหภูมิที่ผิว	43
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	46
4.1 ค่า Emissivity (E) ของวัสดุทางวิศวกรรมและวัสดุทางอาหาร	46
4.1.1 ค่า Emissivity ของวัสดุทางวิศวกรรมที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม	46

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.2 ค่า Emissivity ของขนมปังในระหว่างการอบ	52
4.2 การทดสอบการอบขนมปัง	56
4.2.1 คุณลักษณะของเตาอบ: ฮีตเตอร์รีซีสการตัดต่ออุณหภูมิภายในเตาอบ	56
4.2.2 คุณลักษณะของเตาอบ: ความเร็วลมภายในเตาอบ	57
4.2.3 คุณลักษณะของเตาอบ: การกระจายอุณหภูมิภายในเตาอบ	59
4.2.4 การปรับอุณหภูมิอากาศภายในเตาอบในระหว่างการอบขนมปัง	60
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ผิวกับอุณหภูมิกึ่งกลางขนมปัง ในระหว่างการอบ	66
4.4 การทดสอบการอบขนมปังด้วยการควบคุมอุณหภูมิที่ผิวโดยใช้ IR Sensor	68
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	70
5.1 สรุปผลการทดลอง	70
5.2 ข้อเสนอแนะ	72
บรรณานุกรม	73
ภาคผนวก	75
ภาคผนวก ก ตารางแสดงข้อมูลที่ได้จากการทดลอง	76
ภาคผนวก ข ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ	79
ภาคผนวก ค IR Sensor	81

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่า Emissivity ของพื้นผิววัสดุบางชนิด	15
3.1 ส่วนประกอบของห้องควบคุมสภาวะแวดล้อม	35
4.1 ค่า Emissivity ของวัสดุทางวิศวกรรมที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร	50
4.2 ค่า Emissivity ของขนมปังในช่วงอุณหภูมิต่างๆเมื่อใช้กล้อง TI ในการวัดค่า	53
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
ก.1 แสดงข้อมูลการบันทึกค่าอุณหภูมิพร้อมค่า T_{BG} และค่า ε จากกล้อง TI ของเหล็ก	76
ก.2 ข้อมูลการบันทึกค่าอุณหภูมิพร้อมค่า T_{BG} และค่า ε จากกล้อง TI ของทองแดง	76
ก.3 ข้อมูลการบันทึกค่าอุณหภูมิพร้อมค่า T_{BG} และค่า ε จากกล้อง TI ของสแตนเลส	77
ก.4 ข้อมูลการบันทึกค่าอุณหภูมิพร้อมค่า T_{BG} และค่า ε จากกล้อง TI ของอะลูมิเนียม	77
ก.5 ข้อมูลการบันทึกค่าอุณหภูมิพร้อมค่า T_{BG} และค่า ε จากกล้อง TI ของทองเหลือง	78
ข.1 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของการทดสอบหาความเร็วลมเฉลี่ยที่ตำแหน่งบนของเตาอบ	79
ข.2 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของการทดสอบหาความเร็วลมเฉลี่ย ที่ตำแหน่งกลางของเตาอบ	79
ข.3 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของการทดสอบหาความเร็วลมเฉลี่ยที่ตำแหน่งล่างของเตาอบ	79
ข.4 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของการทดสอบหาความเร็วลมเฉลี่ย ที่ตำแหน่งบนและกลางของเตาอบ	80
ข.5 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของการหาค่าการสูญเสียน้ำหนักของขนมปัง หลังการอบเมื่ออุณหภูมิในช่วงที่ 2	80

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.6 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของการหาค่าการสูญเสียน้ำหนักของขนมปัง หลังการอบเมื่ออุณหภูมิในช่วงที่ 3	80



สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 สเปกตรัมการแผ่รังสีในย่านต่างๆ	4
2.2 การแผ่รังสีจากพื้นผิว	
ประกอบด้วย การแปรผันตามความยาวคลื่น (spectral distribution)	
และการแปรผันตามทิศทาง (directional distribution)	5
2.3 แสดงการถ่ายเทพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของวัตถุ	6
2.4 ทิศทางการแผ่รังสีอินฟราเรด	
ประกอบด้วย การแผ่รังสีจากพื้นที่เล็ก ๆ dA_1 ไปยังพื้นที่ dA_n โดยผ่าน	
มุมกรวย (solid angle) ที่ dA_n กระทำต่อจุดหนึ่งบน dA_1 ภาพฉายของ dA_1	
ในทิศทางตั้งฉากกับการแผ่รังสี และระบบพิกัดทรงกลม	7
2.5 การแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนภายใน enclosure ที่อุณหภูมิคงที่ (isothermal)	9
2.6 กำลังการแผ่รังสีของวัตถุดำที่แปรผันกับความยาวคลื่น	10
2.7 การแปรผันกับทิศทางของค่า Total directional emissivity	13
2.8 การแปรผันกับความยาวคลื่นของค่า Spectral normal emissivity (ϵ_{λ_n}) ของวัสดุบางชนิด	14
2.9 การแปรผันกับอุณหภูมิของค่า Spectral normal emissivity ของวัสดุบางชนิด	14
2.10 ค่าในย่านกว้าง ๆ ของค่า Total , normal emissivity	14
2.11 กระบวนการดูดซึม สะท้อนและส่งต่อรังสีความร้อนในวัตถุถึง โปร่งแสง	16
2.12 กระบวนการดูดซึม สะท้อน และส่งต่อรังสีความร้อนในวัตถุ	17
2.13 รังสีอินฟราเรดทั้งหมดที่แผ่ออกจากพื้นผิววัตถุจริง	18
2.14 การแลกเปลี่ยนรังสีระหว่างวัตถุ 2 วัตถุ	19
2.15 การเปรียบเทียบการแผ่รังสีของวัตถุดำและวัตถุจริง	
ประกอบด้วย การแปรผันกับความยาวคลื่น และการแปรผันกับทิศทาง	20
2.16 ระบบการวัดรังสีอินฟราเรด	21
2.17 FOV IFOV และบริเวณการมองเห็นจากกล้อง TI	23
2.18 การถ่ายเทความร้อนสู่ขนมปังในระหว่างการอบ	27
2.19 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผิวขนมปังเปรียบเทียบกับ	
อุณหภูมิที่ใจกลางขนมปังใน zone ที่ 1 2 3 และ 4	29

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.20 กราฟแสดงการเกิด gelatinization ของขนมปังเปรียบเทียบระหว่างการอบ ภายใต้เงื่อนไขเดิมและเงื่อนไขที่มีการปรับลดอุณหภูมิในช่วงของการอบ	30
3.1 วัสดุทางวิศวกรรมที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร	31
3.2 ขนมปังในระหว่างการอบ	31
3.3 ภาพรวมระบบตรวจวัดค่า Emissivity ของวัตถุ	32
3.4 กล้องถ่ายภาพความร้อน รุ่น TI 32	33
3.5 เทอร์โมคัปเปิลแบบสัมผัส Type K และเทอร์โมมิเตอร์ Fluke รุ่น 52 II 2 Channel	33
3.6 ภาพเขียนขนาดคู่ควบคุมอุณหภูมิและสถานะแวดล้อมแบบสองมิติและสามมิติ และภาพสมบูรณ (ภาพเขียนสามมิติและภาพจริง)	34
3.7 ชุดอุปกรณ์ตรวจวัดค่า Emissivity	35
3.8 ชุดอุปกรณ์จับยึดวัตถุ	36
3.9 แผนภาพแสดงขั้นตอนการหาค่า ϵ ของวัตถุ	37
3.10 เตาอบไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองอบขนมปัง	39
3.11 ตำแหน่งการเสียบสายเทอร์โมคัปเปิลเพื่อวัดการเปลี่ยนแปลง ของอุณหภูมิก๊าซในเตาอบ	40
3.12 ตำแหน่งการวัดความเร็วลมร้อนภายในเตาอบบริเวณเหนือถาดวาง	40
3.13 แสดงตำแหน่งการวางถ้วยสแตนเลสบรรจุน้ำเปล่า เพื่อหาการกระจายอุณหภูมิภายในเตาอบ	41
3.14 IR Sensor ที่ใช้ในการทดลอง และการติดตั้ง IR Sensor ไว้ที่ด้านบนเตาอบขนาดเล็ก	43
3.15 ระบบการทดสอบการอบขนมปังด้วยการควบคุมอุณหภูมิที่ผิวโดยใช้ IR Sensor	44
3.16 แผนผังแสดงการทดสอบการอบขนมปังโดยการควบคุมอุณหภูมิที่ผิวด้วย IR Sensor	45
4.1 ภาพถ่ายทางความร้อนของวัสดุทางวิศวกรรมที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม ประกอบด้วย เหล็ก สแตนเลส อะลูมิเนียม ทองแดง ทองเหลือง	47-48
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ϵ กับ T_{BG} ของสแตนเลส	49
4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Emissivity กับ T_{BG} ของทองแดง	49

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 กราฟแสดงค่า Emissivity ของวัสดุทางวิศวกรรม (เหล็ก สแตนเลส อะลูมิเนียม ทองแดง และทองเหลือง)	51
4.5 แสดงลักษณะมุมด้านข้างของขนมปังที่อยู่ในพื้นที่การมองเห็นของกล้อง TI	53
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Emissivity และอุณหภูมิที่ผิว กับอุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปังในระหว่างการอบที่ช่วงอุณหภูมิต่างๆ	53
4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ϵ กับอุณหภูมิที่ผิวขนมปังในระหว่างการอบ	54
4.8 ลักษณะขนมปังระหว่างการอบเมื่ออุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปังมีค่าตั้งแต่ เริ่มต้น 40°C 60°C 98°C และภายหลังการคงอุณหภูมิภายในเตาอบ ไว้ 10 นาที (สิ้นสุดกระบวนการอบ)	55
4.9 ตัวอย่างภาพถ่ายทางความร้อนของขนมปังในระหว่างการอบ	56
4.10 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศภายในเตาอบ เมื่อตั้งค่าอุณหภูมิเตาอบไว้ที่ 210°C	57
4.11 กราฟแสดงค่าความเร็วลมในแต่ละตำแหน่งของแฉกบน แฉกกลาง และแฉกล่าง	58
4.12 ตำแหน่งการวัดความเร็วลมร้อนภายในเตาอบบริเวณเหนือถาดวาง และค่าความเร็วลมที่ตำแหน่งต่างๆ เหนือถาดวาง	59
4.13 กราฟแสดงการกระจายอุณหภูมิภายในเตาอบ	59
4.14 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอากาศในเตาอบ (Tair) อุณหภูมิที่ผิวขนมปัง (Tsurface) และอุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปัง (Tcenter) ที่อุณหภูมิอากาศในช่วงที่ 1 เป็น 180 °C และ 210°C	61
4.15 ผิวภายในของขนมปัง เมื่อให้อุณหภูมิอากาศในช่วงที่ 2 เป็น 90°C 100°C 110°C โดยอุณหภูมิในช่วงที่ 1 และ 2 เป็น 180°C และ 170°C	62
4.16 ผิวด้านนอกของขนมปัง เมื่อให้อุณหภูมิอากาศในช่วงที่ 3 เป็น 170°C 180°C 190°C โดยอุณหภูมิในช่วงที่ 1 และ 2 เป็น 180°C และ 120°C	63
4.17 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอากาศในเตาอบ (Tair) อุณหภูมิที่ผิวขนมปัง (Tsurface) และอุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปัง (Tcenter) เมื่อให้อุณหภูมิของอากาศภายในเตาอบที่ 180°C	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.18 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศภายในเตาอบ (Tair) อุณหภูมิผิว (T _{surface}) และอุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปัง (T _{center}) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอากาศในช่วงที่ 2 และ 3 จาก 180°C เป็น 120°C และ 170°C ตามลำดับ	65
4.19 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศภายในเตาอบ (Tair) อุณหภูมิผิว (T _{surface}) และอุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปัง (T _{center}) เมื่อให้อุณหภูมิอากาศคงที่ที่ 170°C และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอากาศในช่วงที่ 1 และ 3 เป็น 180°C 120°C และ 170°C	66
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิผิวกับอุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปัง ในช่วงที่ 1 เมื่ออุณหภูมิที่กึ่งกลางเริ่มต้นจนถึง 40°C	67
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิผิวกับอุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปัง ในช่วงที่ 2 เมื่ออุณหภูมิที่กึ่งกลางมีค่า 40–60°C	67
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิผิวกับอุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปัง ในช่วงที่ 3 เมื่ออุณหภูมิที่กึ่งกลางมีค่า 60–98°C	68
ค.1 IR Sensor และ คุณสมบัติเฉพาะของ IR Sensor	81
ค.2 คุณสมบัติการมองเห็นของ IR Sensor	82
ค.3 ขนาด และส่วนประกอบของ IR Sensor82	
ค.4 คุณสมบัติทั่วไปของ IR Sensor	83
ค.5 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของ IR Sensor	83

บทที่ 1

บทนำ

1.1 หลักการ เหตุผล และที่มาของปัญหา

วัตถุทุกชนิดที่มีอุณหภูมิสูงกว่าศูนย์องศาสัมบูรณ์ ($-273\text{ }^{\circ}\text{C}$) จะแผ่รังสีอินฟราเรด (Infrared Radiation) ออกมา โดยปริมาณรังสีอินฟราเรดที่แผ่ออกมาจากวัตถุแต่ละชนิดมีค่าที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัตถุที่แสดงถึงความสามารถในการแผ่รังสีอินฟราเรด (Emissivity: ϵ) นอกจากนี้ค่า ϵ จะขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุแล้ว ลักษณะพื้นผิว อุณหภูมิที่ผิวของวัตถุ มุมของการแผ่รังสีและค่าความยาวคลื่นยังมีบทบาทสำคัญต่อค่า ϵ อีกด้วย

กล้องถ่ายภาพทางความร้อน (Thermal Image Camera: TI) เป็นเครื่องมือวัดอุณหภูมิที่ผิวแบบไม่สัมผัส ทำงานโดยการรับรังสีอินฟราเรดที่แผ่ออกมาจากผิวของวัตถุแล้วแปลผลเป็นอุณหภูมิโดยอาศัยทฤษฎีของแพลงค์และสเตฟาน-โบลซ์ทมานน์ กล้อง TI สามารถตรวจวัดอุณหภูมิที่ผิวได้อย่างรวดเร็ว แสดงผลของอุณหภูมิออกมาทั้งในรูปแบบของตัวเลขและรูปแบบของแถบสีซึ่งสัมพันธ์กับอุณหภูมิ (ภาพถ่ายทางความร้อน) บริเวณส่วนที่เย็นจะแสดงสีที่มีค่าน้อยกว่าบริเวณส่วนที่ร้อน 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 สำหรับอุตสาหกรรมอาหารในส่วนของกระบวนการผลิตต้องการความสะอาดสูงเพื่อป้องกันหรือลดโอกาสปนเปื้อนมาสู่ผลิตภัณฑ์ กล้อง TI จึงเข้ามามีบทบาทในกระบวนการผลิตทั้งในแง่ของการตรวจสอบและการควบคุมคุณภาพ เช่น ในกระบวนการลวก (blanching) กระบวนการทอด กระบวนการละลายและกระบวนการพาสเจอร์ไรส์ เป็นต้น (Gowen et al., 2010)

ในอุตสาหกรรมผลิตขนมปังควบคุมกระบวนการอบ โดยการตั้งค่าอุณหภูมิเตาอบไว้คงที่ภายในระยะเวลาที่กำหนด ส่งผลต่อการสูญเสียน้ำหนักของขนมปังในระหว่างการอบและสิ้นเปลืองพลังงาน Therdtthai et al. (2002) ทำการอบขนมปังโดยการปรับลดอุณหภูมิให้เหมาะสมสำหรับแต่ละขั้นตอนการอบโดยพิจารณาจากอุณหภูมิกึ่งกลางขนมปัง พบว่าสามารถลดการสูญเสียน้ำหนักโดยรวมลงได้โดยที่สีของขนมปังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ อย่างไรก็ตามการควบคุมอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังกล่าวจำเป็นต้องใช้เครื่องมือวัดอุณหภูมิชนิดสัมผัสกับวัตถุซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อการบินจากเครื่องมือวัดไปสู่ขนมปังได้

ดังนั้น โครงการวิจัยนี้จึงนำเสนอการประยุกต์ใช้หลักการแผ่รังสีอินฟราเรดของวัตถุ เพื่อนำมาวัดอุณหภูมิที่ผิวและนำไปใช้ในกระบวนการอบขนมปัง ซึ่งกล้อง TI จะสามารถวัดค่าอุณหภูมิที่ผิวของตัวอย่างได้ถูกต้องก็ต่อเมื่อมีการกำหนดค่า ε ที่แท้จริงของวัตถุให้กับกล้อง จึงต้องทำการทดลองเพื่อหาค่า ε ของขนมปังที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างกระบวนการอบและนำข้อมูลดังกล่าวไปควบคุมอุณหภูมิเตาอบโดยใช้ Infrared Sensor (IR-Sensor) เป็นอุปกรณ์วัดอุณหภูมิที่ผิวขนมปัง นอกจากนี้ยังทำการหาค่า ε ของวัสดุต่างๆ ที่นิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมอาหาร เช่น เหล็ก สแตนเลส อะลูมิเนียม ทองแดง และทองเหลือง เป็นต้น

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อหาค่า ε ของวัสดุทางวิศวกรรม (เหล็ก สแตนเลส อะลูมิเนียม ทองแดง และทองเหลือง) และวัสดุทางด้านอาหาร ได้แก่ ขนมปัง (เริ่มต้นตั้งแต่โดจนกลายเป็นขนมปัง)
2. เพื่อประยุกต์ใช้หลักการการแผ่รังสีอินฟราเรดกับกระบวนการอบขนมปัง

1.3 ขอบเขตการศึกษา

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

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ตรวจเอกสาร

2.1 การแผ่รังสีอินฟราเรด

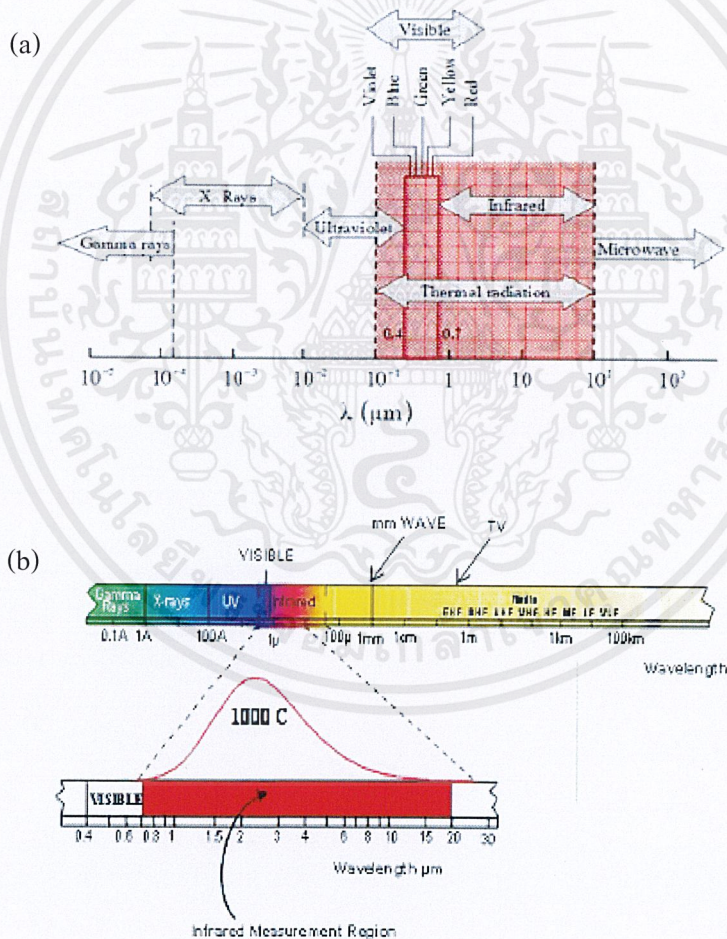
ในปี ค.ศ. 1800 นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษ Sir William Herschel เป็นผู้ค้นพบคลื่นรังสีอินฟราเรด (Infrared: IR) หรือคลื่นรังสีความร้อน ซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งแผ่มาจากดวงอาทิตย์ ค้นพบโดยการทดลองวัดอุณหภูมิของแถบสีรุ้งจากปริซึม โดยเลื่อนเทอร์โมมิเตอร์จากแถบสีม่วงไปยังแถบสีแดงพบว่าอุณหภูมิมียิ่งเพิ่มขึ้นโดยมีค่าสูงสุดที่แถบสีแดง 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 ช่วงตามช่วงของความยาวคลื่นได้แก่ 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 ส่วนรังสีในช่วงคลื่นสั้นถึงช่วงคลื่นยาวจะนำไปประยุกต์ใช้ในงานการตรวจสอบการแผ่รังสีของวัตถุ โดยที่ช่วงคลื่นยาวจะมีความไวในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิสูงสุดที่ช่วงอุณหภูมิต่ำ แต่ในช่วงกลางจะมีความไวในการตอบสนองที่อุณหภูมิสูงมาก เช่น 400°C (Gowen, 2010)

การแผ่รังสีอินฟราเรดสัมพันธ์กับพลังงานที่สสารแผ่ออกมา ณ อุณหภูมิหนึ่งๆ โดยกลไกของการแผ่รังสีอินฟราเรดเกี่ยวข้องกับพลังงาน เนื่องจากการสั่น (Oscillations) และการเคลื่อนที่ (Transition) ของอิเล็กตรอนซึ่งประกอบกันเป็นสสาร วัตถุที่มีอุณหภูมิสูงอิเล็กตรอนจะสั่นหรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคลื่อนที่มากส่งผลให้พลังงานภายในวัตถุมีค่าสูง กล่าวได้ว่าการแผ่รังสีอินฟราเรดเกี่ยวข้องกับสภาพทางความร้อนภายในสสาร โดยก๊าซและของแข็งชนิดกึ่ง โปร่งแสง (semi-transparent) เช่น กระจก การแผ่รังสีจะเป็นปรากฏการณ์เชิงปริมาตร (volumetric phenomenon) คือการแผ่รังสีความร้อนจากสสารเป็นผลรวมของการแผ่รังสีอินฟราเรดที่จุดใดๆ ของสสารนั้นตลอดทั้งปริมาตร ซึ่งในที่นี้จะเน้นไปที่การแผ่รังสีอินฟราเรดในลักษณะที่เรียกว่าเป็นปรากฏการณ์พื้นผิว (surface phenomenon) กล่าวคือในของแข็งและของเหลวส่วนใหญ่ รังสีอินฟราเรดที่แผ่ออกมาโดยโมเลกุลภายในจะถูกโมเลกุลที่ติดกันดูดซึมเอาไว้เกือบทั้งหมดจึงเป็นผลให้รังสีอินฟราเรดที่แผ่ออกมาจากของแข็งหรือของเหลว สามารถคิดได้ว่ารังสีอินฟราเรดแผ่ออกมาจากโมเลกุลบริเวณใกล้พื้นผิวหรือเป็นปรากฏการณ์พื้นผิว สเปกตรัมของการแผ่รังสีแสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 สเปกตรัมการแผ่รังสีในย่านต่างๆ

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

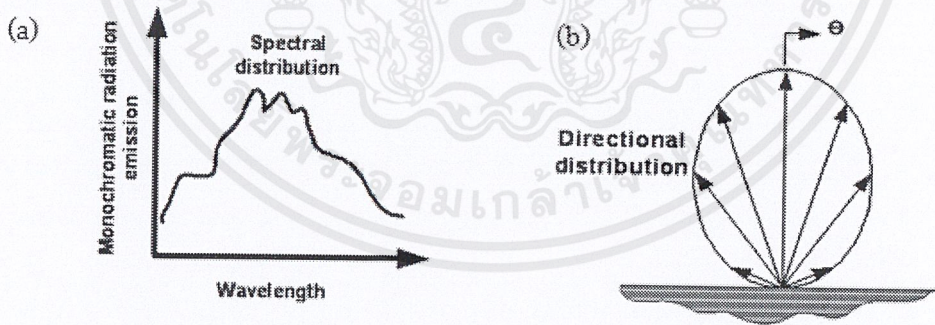
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทฤษฎีหนึ่งมองการแผ่รังสีอินฟราเรดว่าเป็นการแพร่ (Propagation) ของกลุ่มอนุภาคซึ่งเรียกว่า “photons” หรือ “quanta” แต่อีกทฤษฎีหนึ่งมองว่าเป็นการแพร่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic waves) แต่ไม่ว่าจะอธิบายธรรมชาติของการแผ่รังสีอินฟราเรดโดยทฤษฎีใดก็ตาม จะพบว่า การแผ่รังสีอินฟราเรดสัมพันธ์กับคุณสมบัติของคลื่นอันได้แก่ความถี่ (frequency: ν) และความยาวคลื่น (wavelength: λ) ซึ่งสัมพันธ์กันโดยสมการ 2.1

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

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

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



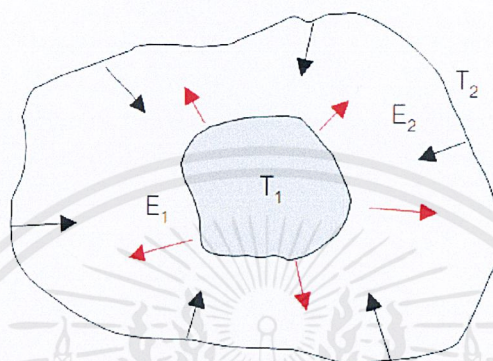
รูปที่ 2.2 การแผ่รังสีจากพื้นผิว a) การแปรผันตามความยาวคลื่น (spectral distribution)

b) การแปรผันตามทิศทาง (directional distribution)

ที่มา Incropera, et al., 2005.

รังสีอินฟราเรดหรือรังสีความร้อนจะแผ่ออกมาจากพื้นผิววัตถุในรูปแบบของพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.3 โดยรังสีอินฟราเรดหรือรังสีความร้อนที่ตกกระทบลงบนพื้นผิววัตถุ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บางส่วนจะถูกดูดกลืน (Absorbed) บางส่วนจะสะท้อน (Reflected) และบางส่วนจะทะลุผ่านออกไป (Transmitted) ซึ่งสัดส่วนเหล่านี้แสดงในสมการที่ (2.17) โดยกำหนดความสามารถในการดูดซับ (Absorbivity) 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)

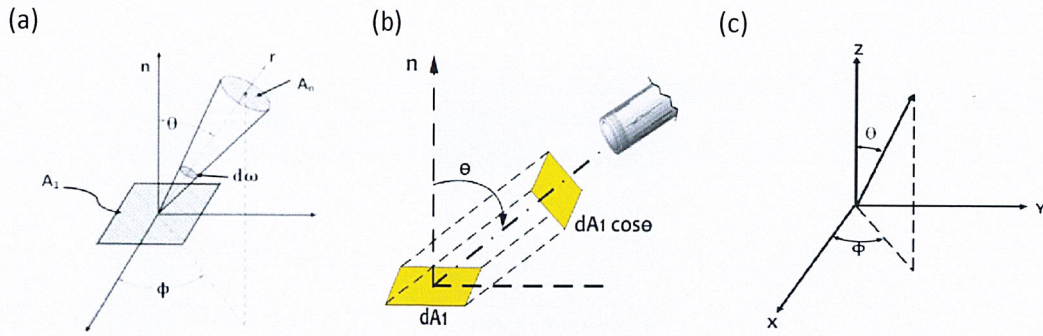
พิจารณาการแผ่รังสีความร้อนในทิศทางหนึ่งจากพื้นผิวเล็ก ๆ dA_1 ดังรูปที่ 2.4a ทิศทางนี้กำหนดให้อยู่ในรูปของมุม θ และ ϕ ในระบบพิกัดทรงกลม ดังรูปที่ 2.4c รังสีความร้อนจาก dA_1 จะไปกระทบกับพื้นผิวเล็ก ๆ ที่เรียกว่า dA_n ซึ่งอยู่ห่างออกไปโดยพื้นผิว dA_1 นี้จะทำมุมซึ่งเรียกว่า solid angle ($d\omega$) กับจุดหนึ่งบนพื้นผิว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

$$d\omega = \frac{dA_n}{r^2} \quad (2.2)$$

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 ทิศทางการแผ่รังสีอินฟราเรด a) การแผ่รังสีจากพื้นที่เล็ก ๆ dA_1 ไปยังพื้นที่ dA_n โดยผ่านมุมกรวย (solid angle) ที่ dA_n กระทำต่อจุดหนึ่งบน dA_1 b) ภาพฉายของ dA_1 ในทิศทางตั้งฉากกับการแผ่รังสี c) ระบบพิกัดทรงกลม

ที่มา Incropera, et al., 2005.

หากพิจารณาอัตราการแผ่รังสีที่ออกจาก dA_1 ตกกระทบบน dA_n 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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

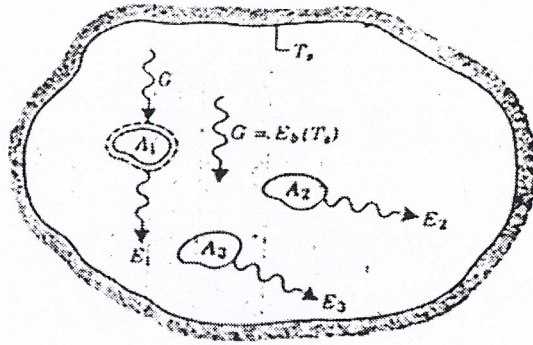
$$E_{\lambda}(\lambda) = I_{\lambda,\phi}(\lambda) \quad (2.6)$$

2.2 การแผ่รังสีของวัตถุดำ (Blackbody Radiation)

วัตถุดำคือวัตถุทางอุดมคติที่มีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

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

เนื่องจากวัตถุดำสามารถดูดซึมและแผ่รังสีอินฟราเรดได้โดยสมบูรณ์ จึงใช้วัตถุดำเป็นวัตถุมารฐานสำหรับเปรียบเทียบปริมาณการแผ่รังสีที่ออกจากพื้นผิวจริงใด ๆ กับปริมาณการแผ่รังสีที่ออกจากวัตถุดำ แม้ว่าจะมีพื้นผิวบางชนิดที่สามารถประมาณได้ว่ามีลักษณะเป็นวัตถุดำแต่ในความเป็นจริงแล้วไม่มีพื้นผิวใดที่มีลักษณะเป็นวัตถุดำโดยแท้จริง การประมาณที่ใกล้เคียงที่สุดได้มาโดยพิจารณาโพรง (cavity) ที่ด้านในมีอุณหภูมิคงที่ดังรูปที่ 2.5 ถ้ารังสีอินฟราเรดเข้าสู่โพรงนี้โดยผ่านทางรูเล็กๆ รังสีนี้จะถูกสะท้อนหลายครั้งก่อนที่จะกลับออกมาจากรูนี้ ดังนั้นรังสีจะถูกโพรงดูดซึมเอาไว้เกือบทั้งหมด โพรงจึงมีลักษณะเป็นวัตถุดำโดยประมาณ จากหลักการของเทอร์โมไดนามิกส์กล่าวได้ว่ารังสีที่ออกจากรูเล็กๆ ของโพรงนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของพื้นผิวของโพรงเท่านั้น โดยรังสีที่แผ่ออกมาจากโพรงก็คือการแผ่รังสีของวัตถุดำ และเนื่องจากรังสีอินฟราเรดที่แผ่ออกจากวัตถุดำเป็นแบบ 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 (ค่าคงที่ของโบลท์สมาน) และ T คืออุณหภูมิสัมบูรณ์ (K) ของวัตถุดำ เนื่องจากวัตถุดำเป็น diffuse emitter จากสมการ (2.6)

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

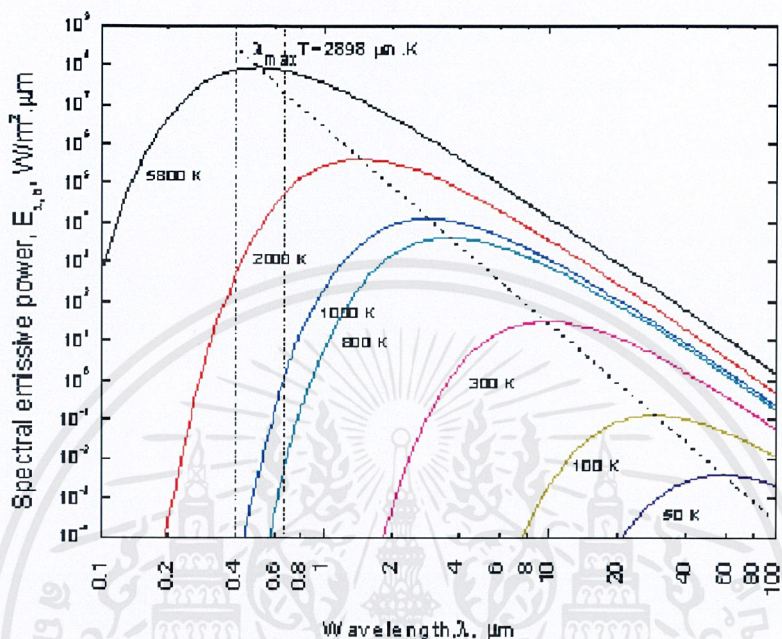
โดย $C_1 = 2\pi hc^2 = 3.742 \times 10^4$ W. μm^4 /m² และ $C_2 = hc/k = 1.439 \times 10^4$ $\mu\text{m} \cdot \text{K}$

สมการ (2.8) มีชื่อเรียกว่า “Planck distribution” สามารถพล็อตได้ดังรูปที่ 2.6 (สำหรับที่อุณหภูมิบางค่า) จากรูปสามารถสังเกตลักษณะสำคัญได้หลายประการคือ

1. การแผ่รังสีความร้อนแปรผันกับความยาวคลื่นอย่างต่อเนื่อง (continuously)
2. ที่ความยาวคลื่นใดๆ ขนาดของการแผ่รังสีความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น
3. ย่านความยาวคลื่นที่มีการแผ่รังสีหนาแน่นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และโดยการเปรียบเทียบจะพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นการแผ่รังสีจะหนาแน่นอยู่ในช่วงความยาวคลื่นสั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 สังเกตได้ว่ากราฟของการแผ่รังสีมีจุดสูงสุดที่ความยาวคลื่นหนึ่งซึ่งขึ้นอยู่กั อุณหภูมิ สามารถหาความสัมพันธ์ของสมการนี้ได้โดยการดิฟเฟอเรนทิเอต (differentiate) สมการ (2.8) เทียบกับ λ และให้เท่ากับศูนย์ซึ่งจะได้ผลลัพธ์เป็น

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

โดย $C_3 = 2897.6 \mu m \cdot K$

สมการ (2.9) เรียกว่า “Wein's Displacement Law” และจุดโลกัส (locus) ซึ่งได้จากสมการนี้เขียนแทนด้วยเส้นประในรูปที่ 2.6 สังเกตได้ว่ากำลังการแผ่รังสีสูงสุดอยู่ประมาณกึ่งกลางย่านของการมองเห็น ($\lambda \approx 0.5 \mu m$) สำหรับวัตถุดำที่มีอุณหภูมิ 1,000 K จุดสูงสุดของการแผ่รังสีอยู่ที่ความยาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลื่น 2.9 μm โดยที่รังสีบางส่วนปรากฏเป็นสีแดง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นการแผ่รังสีในย่านความยาวคลื่นสั้นจะเด่นกว่าและในที่สุดการแผ่รังสีจะครอบคลุมย่านการมองเห็นทั้งหมด

2.2.3 กฎของสเตฟานโบลต์ซมานน์ (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 คือค่าคงที่ของสเตฟานโบลต์ซมานน์ 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 สามารถใช้ในการคำนวณหาปริมาณการแผ่รังสีของวัตถุดำในทุกทิศทางและทุกความยาวคลื่น โดยที่รู้เฉพาะอุณหภูมิของวัตถุ เนื่องจากการแผ่รังสีของวัตถุดำเป็นแบบ “diffuse”

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

เมื่อวัตถุอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่สมดุล การแผ่รังสีอินฟราเรดของวัตถุจะมีค่าเท่ากับปริมาณรังสีที่วัตถุดูดกลืนไว้ ส่งผลให้วัตถุที่สามารถดูดกลืนรังสีได้ดีสามารถแผ่รังสีออกมาได้ดีด้วย จึงสามารถสรุปได้ว่าตัวแผ่รังสีทางอุดมคติ (Ideal Radiator) คือวัตถุที่มี α เป็น 1 และเมื่อพูดถึงการแผ่รังสีออกจากวัตถุ โดยต่างจากการดูดกลืนจะใช้คำว่า Emissivity (ϵ) แทนที่จะใช้ Absorptivity (α) อย่างไรก็ตามค่าทั้งสองมีความสัมพันธ์กันโดยตรงตามกฎของเคอร์ชอฟฟ์

$$\epsilon = \alpha$$

2.3 การแผ่รังสีจากพื้นผิวจริง (Real surface Emission)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

Spectral hemispherical^a 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 มีคำจำกัดความดังนี้

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

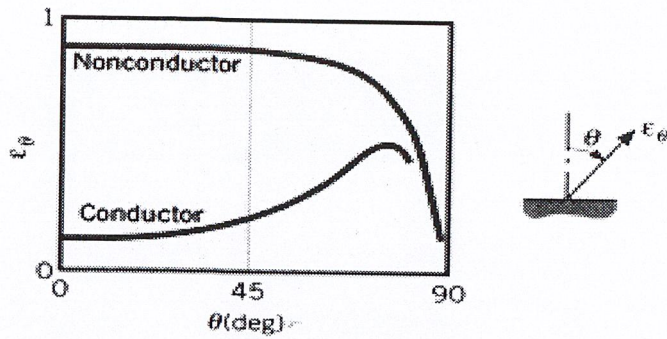
ดังนั้น

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

(สามารถใช้คำว่า Total emissivity แทน Total hemispherical emissivity)

จากสมการต่าง ๆ ข้างต้นเห็นได้ว่าหากรู้ค่า ϵ ของพื้นผิวก็สามารถคำนวณหาค่าอัตราการแผ่รังสีต่าง ๆ ของพื้นผิวได้

จากที่ได้กล่าวไว้ในตอนต้นว่าค่า ϵ ของ diffuse emitter นั้น ไม่ขึ้นอยู่กับทิศทางอย่างไรก็ตามถือเป็นเพียงการประมาณเท่านั้น เพราะพื้นผิวที่แท้จริงจะไม่เป็น “diffuse emitter” โดยการเปลี่ยนแปลงของ ϵ_θ ตาม θ แสดงดังในรูป 2.7 สำหรับทั้งวัสดุที่เป็นตัวนำและไม่นำไฟฟ้า



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

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

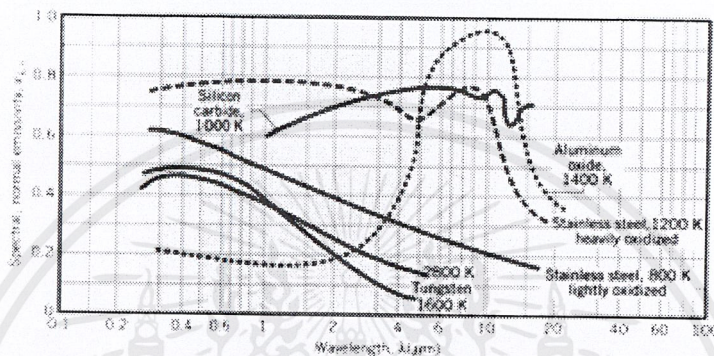
แม้ว่าข้อความข้างต้นจะกล่าวเฉพาะ Total emissivity แต่ก็สามารถใช้ได้กับ spectral emissivity ได้เช่นกัน เนื่องจากการแผ่รังสีจากพื้นผิวที่แท้จริงนั้นแตกต่างออกไปจาก Planck distribution (รูป 2.2a) จึงไม่คาดหมายว่า ϵ_{λ} จะเป็นอิสระจากความยาวคลื่น รูป 2.8 แสดงการเปลี่ยนแปลงของ ϵ_{λ} ตามความยาวคลื่น λ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของพื้นผิว 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 ของวัสดุที่ไม่เป็นตัวนำไฟฟ้ามักมีค่าสูง โดยปกติสูงกว่า 0.6
4. ค่า ϵ ของตัวนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ส่วนของวัสดุที่ไม่เป็นตัวนำไฟฟ้าอาจลดลงหรือเพิ่มขึ้นก็ได้เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น การเปลี่ยนแปลงของ ϵ_n ตามอุณหภูมิ T ในรูป 2.9 นั้นตรงกับ

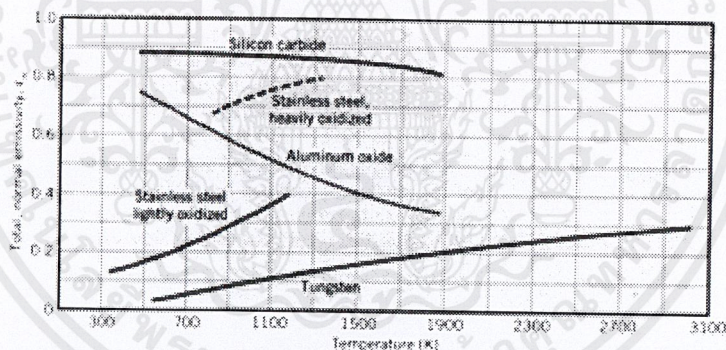
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแปรผันของ ϵ_{λ_n} ในรูป 2.8 แม้จะประมาณได้ว่า ϵ_{λ_n} ไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิแต่การแผ่รังสีจะอยู่ในช่วงความยาวคลื่นสั้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ดังนั้นวัสดุหนึ่งๆ จะมีค่า ϵ_{λ_n} เพิ่มขึ้นเมื่อความยาวคลื่นสั้นลง และวัสดุนั้นจะมีค่า ϵ_n เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น (วัสดุชิ้นเดียวกัน ϵ_{λ_n} จะสัมพันธ์กับ ϵ_n โดย ϵ_{λ_n} แปรผันตามความยาวคลื่น ส่วน ϵ_n แปรผันตามอุณหภูมิ)

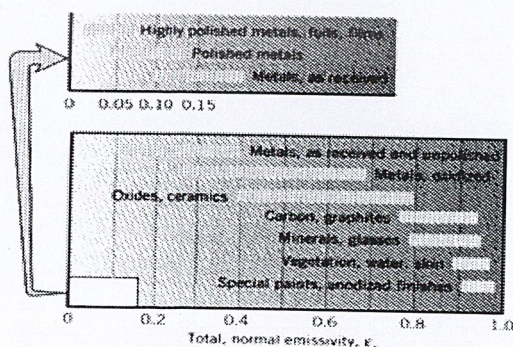
จากที่กล่าวจะเห็นว่าค่า ϵ นั้นจะขึ้นอยู่กับธรรมชาติของพื้นผิวเป็นอย่างมากซึ่งเป็นผลมาจากโครงสร้างของวัสดุ และการที่วัสดุทำปฏิกิริยากับสภาพแวดล้อม



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 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 Steel; Types 304		489	0.44	Fogiel,1992.
Stainless Steel; Types 316; Polished			0.28	Amidon, 1999.
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
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

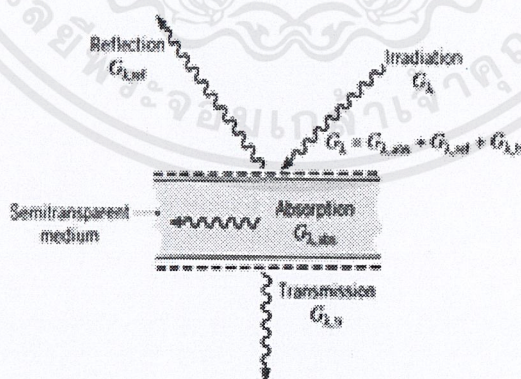
Total irradiation (G) เป็นอัตราการตกกระทบกับพื้นผิวหนึ่งหน่วยตลอดทุกความยาวคลื่น

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

$$G = G_{\lambda,abs} + G_{\lambda,ref} + G_{\lambda,tr}$$

หรือ

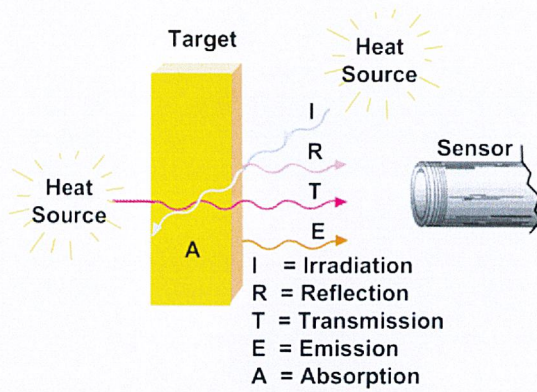
$$G = A + R + T \quad (2.16)$$



รูปที่ 2.11 กระบวนการดูดซึม สะท้อนและส่งต่อรังสีความร้อนในวัตถุโปร่งแสง

ที่มา Incropera, et. al., 2005.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 กระบวนการดูดซึม สะท้อน และส่งต่อรังสีความร้อนในวัตถุ

ที่มา Gruner, 2003

จากรูปจะเห็นว่า Irradiation (G) = $A+R+T$ (สมการ 16) หากนำ G หารตลอด 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

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \tag{2.17}$$

โดยที่ค่าทั้งสามของวัตถุใดๆ จะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับสมบัติต่างๆของวัตถุ

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

$$\epsilon + \rho = 1 \tag{2.18}$$

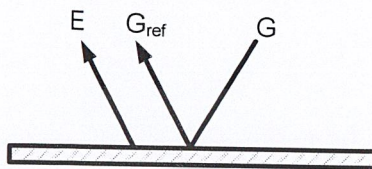
ส่วนวัตถุที่เป็น Black body จะดูดซับรังสีที่มากกระทบวัตถุไว้ทั้งหมดจึงไม่มีคุณสมบัติในการสะท้อน ($\rho = 0$) จะได้

$$\epsilon = 1 \tag{2.19}$$

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 ดังนั้นสีที่ปรากฏต่อสายตาดังขึ้นอยู่ว่าวัตถุจะดูดซึมและสะท้อน (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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนรังสีที่แผ่ออกจากพื้นผิวของวัตถุ 2 ($q_1: w$) 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)

เมื่อพิจารณาการแผ่รังสีของวัตถุ 2 วัตถุ ดังรูปที่ 2.13 พบว่ามีการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนกันระหว่างวัตถุทั้งสอง โดยรังสีที่แผ่ออกจากวัตถุ 1 บางส่วนไปตกกระทบบนพื้นผิวของวัตถุ 2 ($q_{1 \rightarrow 2}: w/m^2$) ในขณะที่เดียวกันรังสีที่แผ่ออกจากวัตถุ 2 บางส่วนจะไปตกกระทบบนวัตถุ 1 ($q_{2 \rightarrow 1}: w/m^2$)

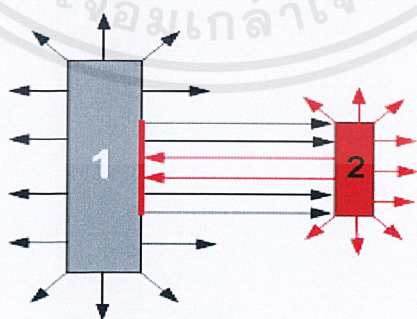
สัดส่วนของรังสีความร้อนออกจาก 1 ไปตก 2 เรียกว่า View Factor F_{12} (F_{12}) หรือ

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

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)



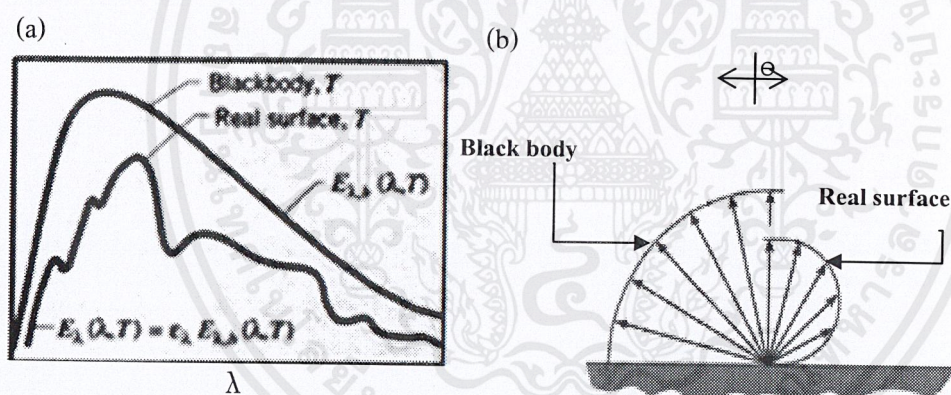
รูปที่ 2.14 การแลกเปลี่ยนรังสีระหว่างวัตถุ 2 วัตถุ

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 เนื่องจากการแผ่รังสีจากพื้นผิวจริงขึ้นอยู่กับทิศทาง (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/m^2) ซึ่งเป็นการหาค่าวัตถุในอุดมคติหรือวัตถุดำเท่านั้น ดังนั้นหากวัตถุเป็นวัตถุจริง 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 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

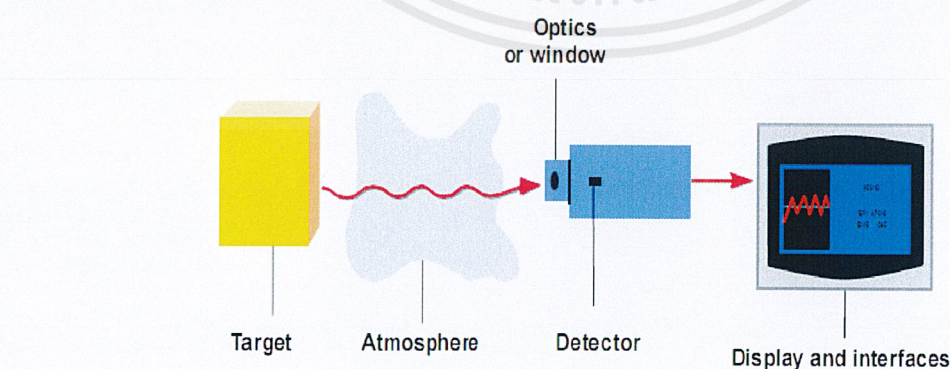
เท่ากับ 1 เสมอ เนื่องจากรังสีความร้อนที่แผ่ออกมาจากวัตถุค่าเป็นความร้อนที่เกิดจากพื้นผิวตัวมันเองทั้งหมดและมีความเข้มเท่ากันทุกทิศทางทุกทาง แต่วัตถุจริงจะมีค่า ϵ ไม่คงที่ และต่ำกว่า 1 ซึ่งค่า ϵ ของวัตถุจริงจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ผิวของวัตถุ ชนิดและลักษณะผิวของวัตถุ ความยาวคลื่น (Wave Length) และมุมของการแผ่รังสี (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 และทำการแปลงรังสีอินฟราเรดที่วัดได้เป็นอุณหภูมิ

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



รูปที่ 2.16 ระบบการวัดรังสีอินฟราเรด

ที่มา Gruner, 2003

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของกล้องถ่ายภาพความร้อน

ค่า Emissivity (ϵ) (ปริญา, 2546)

จากสมการที่ (2.25) จะเห็นได้ว่าการแปลผลอัตราการแผ่รังสีอินฟราเรด (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 ดังนั้นเพื่อให้อุณหภูมิที่กล้อง TI ได้รับเป็นรังสีที่เกิดจากวัตถุจริงๆ จึงต้องมีการป้อนค่าอุณหภูมิของ Background (อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมหรือวัตถุอื่นที่แผ่รังสีมากระทบกับวัตถุ) ให้กับกล้อง TI ด้วย ซึ่งกล้องจะนำอุณหภูมิดังกล่าวไปใช้ในการชดเชยค่าการสะท้อน ทำให้อุณหภูมิที่อ่านได้จากกล้องเป็นอุณหภูมิที่แท้จริงของวัตถุ

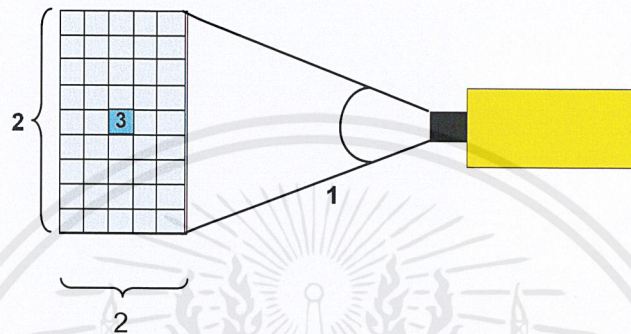
ระยะห่างระหว่างวัตถุกับกล้องถ่ายภาพความร้อน (ปริญา, 2546)

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 เป็นมุมของกล้องที่มองเห็นไปยังวัตถุ มีหน่วยเป็นองศา ซึ่งหากระยะทางการวัดแตกต่างกัน จะส่งผลต่อการรับพื้นที่หรือบริเวณการมองเห็นจากวัตถุแตกต่างกันด้วย คือ ถ้าระยะระหว่างกล้องกับวัตถุห่างกันน้อย จะสามารถรับรายละเอียดของพื้นที่หรือบริเวณการมองเห็นของวัตถุได้ แคลบกว่าระยะระหว่างกล้องกับวัตถุที่ห่างกันมาก 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 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.6.1 การเฝ้าระวังและการตรวจสอบอุณหภูมิของอาหาร

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

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

Meyer, et al. (1999) ใช้วิธีการวัดแบบไม่สัมผัสในการประมาณค่าอุณหภูมิภายในเนื้อไก่ (เนื้อไก่ไร้หนัง ไร้กระดูก) ตัวอย่างเนื้อไก่ที่ใช้คือเนื้อหน้าอก โดยวัดอุณหภูมิที่กึ่งกลางความหนาของชิ้นเนื้อไก่ ซึ่งอุณหภูมินี้จะสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่ผิวเนื้อไก่และเวลาในการแช่เย็นวัดอุณหภูมิที่ผิวเนื้อ

ไก่โดยใช้กล้องถ่ายภาพความร้อน ในช่วงความยาวคลื่น 3.4-5 μm (ไม่สนใจไอน้ำที่เกาะอยู่ที่ผิวเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื้อไก่) จากนั้นใช้การวิเคราะห์โครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network) ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายใน อุณหภูมิที่ผิว และระยะเวลาในการแช่เย็นจากนั้นนำความสัมพันธ์ที่ได้ไปทดสอบกับการทำงานจริง ซึ่งพบว่าความสัมพันธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์โครงข่ายประสาทเทียมนี้สามารถนำไปใช้ในการทำนายค่าอุณหภูมิภายในเนื้อไก่ได้จริง

2.6.2 คุณภาพของผลผลิตหลังการเก็บเกี่ยว

Van Linden et al. (2003) ใช้ภาพถ่ายทางความร้อนในการตรวจสอบรอยช้ำบนแอปเปิ้ลพันธุ์ฟูจิ และแมคอินทอช โดยเก็บแอปเปิ้ลไว้ที่อุณหภูมิ 3°C จากนั้นนำแอปเปิ้ลมาให้ความร้อนที่ 26°C เป็นเวลา 180 วินาที พบความแตกต่างของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างแอปเปิ้ลที่มีรอยช้ำและแอปเปิ้ลที่สมบูรณ์ ซึ่งเป็นผลมาจากความแตกต่างของคุณสมบัติทางความร้อน (Varith, et al. 2003) ได้สรุปว่าการตรวจสอบพบรอยช้ำในแอปเปิ้ลเป็นผลมาจากการกระจายของความร้อน โดยบริเวณที่มีรอยช้ำสามารถส่งผ่านความร้อนไปยังบริเวณรอบ ๆ ได้ดีกว่า ทำให้มีอุณหภูมิต่ำกว่าบริเวณที่ไม่มีรอยช้ำประมาณ 1-2°C ซึ่งการตรวจพบรอยช้ำไม่ได้เป็นผลมาจากการแผ่รังสีความร้อนของแอปเปิ้ล แต่อย่างใด เนื่องจากสังเกตเห็นว่าไม่มีความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างบริเวณที่มีรอยช้ำและไม่มีรอยช้ำภายใต้สภาวะคงตัว

Van Linden et al. (2003) ใช้ภาพถ่ายทางความร้อนในการตรวจสอบรอยช้ำใน (soft spot) ที่แฝงอยู่ในผลมะเขือเทศ โดยเปรียบเทียบ 3 กรรมวิธี คือแช่เย็นที่อุณหภูมิ 1°C เป็นเวลา 90 นาที ใช้เตาอบ (oven heating) ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 1 นาที หรือ 2 นาที และใช้เตาอบไมโครเวฟให้ความร้อนเป็นเวลา 7 หรือ 15 วินาที พบว่าการให้ความร้อนโดยใช้ไมโครเวฟสามารถมองเห็นรอยช้ำได้ชัดเจนที่สุด

2.6.3 คุณภาพของเมล็ดพืช

การประยุกต์ใช้ภาพถ่ายทางความร้อนในการตรวจสอบแมลงในระยะการฟักตัว โดยอาศัยความแตกต่างของการกระจายอุณหภูมิของผิวของเมล็ดพืชที่มีแมลงอยู่กับอัตราการหายใจของแมลงในแต่ละช่วงระยะการเจริญเติบโต (Emekci, 2002, 2004.)

ใช้ภาพถ่ายทางความร้อนในการแยกประเภทของสายพันธุ์ข้าวสาลี ซึ่งมองเห็นความแตกต่างได้ยากหากแยกแยะด้วยสายตา และได้เฝ้าสังเกตความถูกต้องในการแยกแยะ รวมไปถึงวิธีการแก้ปัญหาโดยใช้การถ่ายภาพทางความร้อน ซึ่งอาจนำไปสู่การพัฒนาวิธีการแบ่งประเภทหรือการจัดหมวดหมู่สำหรับเมล็ดพืช (Manickavasagan et al., 2008a, 2008b)

2.7 กระบวนการเกิดขนมปัง

2.7.1 ส่วนประกอบพื้นฐานของขนมปัง

ส่วนผสมของโดพร้อมอบประกอบด้วย แป้งสาลีชนิดแข็ง (Hard Wheat Flour) ยีสต์ เนยขาว น้ำตาลและน้ำ โดยน้ำและแป้งเป็นส่วนประกอบที่มีความสำคัญที่สุดในการทำขนมปัง ซึ่งมีผลต่อเนื้อสัมผัสและความชื้นของเนื้อด้านในขนมปัง (crumb) โดยทั่วไปมักจะมีน้ำมีส่วนประกอบในสูตร ประมาณ 60-70 เปอร์เซ็นต์ (Arpita et al., 2007) ในระหว่างที่เติมน้ำลงไป แป้งสาลีและนวดผสมกันนั้น โกลอะดินและกลูเตนินจะอุ้มน้ำทำให้เกิดสารที่สลับซับซ้อนเรียกว่ากลูเตน (Gluten) การทำการผสมดังกล่าวจะทำให้ส่วนผสมเป็นเกิดกลูเตนมากหรือน้อยแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของข้าวสาลี ซึ่งแป้งสาลีที่นำมาทำขนมปังควรมีปริมาณโปรตีนประมาณ 12 เปอร์เซ็นต์ การกระบวนการเกิดโดจะทำให้โดที่ได้มีคุณสมบัติยืดหยุ่น (elastic) หยุน (plastic) และเหนียวหนืด (viscous) (ศิริลักษณ์และกมลวรรณ, 2544) ส่วนผสมที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคือยีสต์ สายพันธุ์ที่นำมาใช้ คือ สายพันธุ์ *Saccharomyces cerevisiae* (วราวุฒิและรุ่งนภา, 2532) ซึ่งยีสต์จะทำให้เกิดการพองตัวและโพรงภายในขนมปัง จะเห็นว่าการขึ้นฟูของโดเกิดจากการหมักแป้งสาลี กับน้ำตาล ซึ่งเกิดขึ้นตามปฏิกิริยาการเกิดแป้งสตาร์ช โดยมีเอนไซม์มาเกี่ยวข้องด้วย

2.7.2 ปรากฏการณ์และการเปลี่ยนแปลงในระหว่างกระบวนการอบ

แบ่งช่วงการเกิดขนมปังตั้งแต่เริ่มเตรียมโดจนถึงสิ้นสุดกระบวนการอบออกเป็น 2 กระบวนการใหญ่ ๆ คือ ช่วงหมักโดและช่วงอบขนมปัง ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ช่วงหมักโด

ในระหว่างการหมักแป้งให้เกิดโด การทำงานภายในโดนั้น เอนไซม์โปรทีเอส (protease) ชนิดแอลฟาอะไมเลส (Alpha-amylase) จะเปลี่ยนแป้งสตาร์ชให้เป็นน้ำตาลเดกซทริน (dextrin) ส่วนเอนไซม์โปรทีเอส (protease) ชนิดเบต้าอะไมเลส (Beta-amylase) จะเปลี่ยนน้ำตาลเดกซทริน (dextrin) และแป้งบางส่วนให้เป็นน้ำตาลมอสโทส น้ำตาลมอสโทสจะถูกเปลี่ยนเป็นต่อไปโดยเอนไซม์มอสเทลให้เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวและน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวยังจะถูกย่อยต่อโดยยีสต์ ซึ่งจะได้คาร์บอนไดออกไซด์ แอลกอฮอล์ และสารอื่นอีกเล็กน้อย ซึ่งส่วนใหญ่เป็นกรด (ศิริลักษณ์และกมลวรรณ, 2544)

แอลกอฮอล์ที่เกิดขึ้นในโดซึ่งเป็นผลมาจากการหมักน้ำตาลด้วยยีสต์นั้นจะถูกระเหยออกไปในช่วงระยะเวลาการอบขนมปัง ส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะซึมผ่านผนังเซลล์ของ

ยีสต์ออกมา โดยในช่วงแรกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ออกมาจะละลายน้ำ (ที่มีอยู่ในปริมาณน้อย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในโค จนกระทั่งน้ำนั้นอึดตัวด้วยคาร์บอน ไดออกไซด์ จากนั้น คาร์บอนไดออกไซด์ที่ซึมออกมาใหม่ จะออกมาในรูปของฟองก๊าซ ซึ่งฟองก๊าซเหล่านี้จะมีหัวที่ก่อกัน โคและจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ โดยที่มีขนาดไม่เท่ากัน จึงทำให้เกิดการพองตัวของโค (วารวุฒิและรุ่งนภา, 2532) เนื่องจากโคมีความสามารถในการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ที่ยีสต์ผลิตขึ้น โครงสร้างของก่อกัน โคจึงมีลักษณะมีเซลล์แก๊สที่คงรูปอยู่ได้ในระหว่างการหมักและการพักก่อกัน โค เมื่อโคอยู่ในระยะพักตัว (proofing period) น้ำตาลที่มีอยู่เดิมในแป้งจะถูกใช้ไปหมด ในขณะที่น้ำตาลถูกใช้ เอนไซม์ในโคจะช่วยผลิตน้ำตาลออกมาด้วย เมื่อนำโคที่พักตัวแล้วเข้าเตาอบ เอนไซม์จะยังคงทำงานต่อไปอีกในครึ่งเวลาแรกของการอบ และตายในเวลาต่อมา (ศิริลักษณ์และกมลวรรณ, 2544)

ช่วงอบขนมปัง

แบ่งการเกิดขนมปังออกเป็น 3 stage โดยพิจารณาที่อุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปังเป็นหลัก ดังนี้

Stage ที่ 1 คือ ช่วงที่อุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปังตั้งแต่อุณหภูมิเริ่มต้น (25°C) จนถึง 60°C

Stage ที่ 2 คือ ช่วงที่อุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปังมีค่าตั้งแต่ 60°C จนกระทั่งอุณหภูมิกึ่งที่ ประมาณ 98°C และ

Stage ที่ 3 คือ ช่วงที่อุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปังอยู่ที่ 98-99°C และคงอุณหภูมิเตาอบเป็นเวลา 10 นาที อุณหภูมิที่ผิวขนมปังจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงสิ้นสุดกระบวนการอบ (Therdthai, et al., 2002)

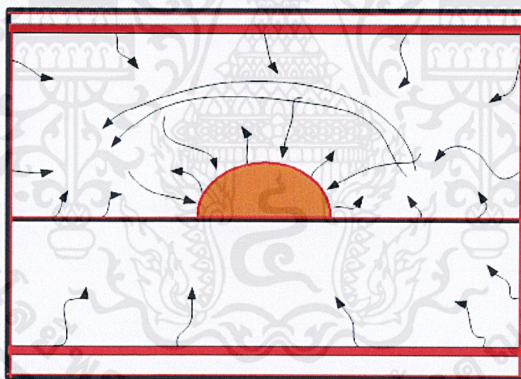
เมื่อให้ความร้อนกับโค ความร้อนในช่วงแรกของการอบจะกระตุ้นการทำงานของยีสต์และเอนไซม์ให้เกิดกระบวนการหมักเพิ่มขึ้น จึงเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และแอลกอฮอล์เสริมขึ้นมา ทำให้โคพองตัวมากขึ้น โดยปกติยีสต์จะหยุดการทำงานที่ 43°C และจะตายที่อุณหภูมิ 54°C เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกกักไว้ในโค จะถูกปลดปล่อยออกสู่ภายนอก (ความดันต่ำกว่า) ทำให้เกิดโพรงอากาศขึ้นภายในเนื้อขนมปัง (จินตนาและอรอนงค์, 2544)

ในระหว่างการอบอุณหภูมิภายในของโคจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ พลังงานความร้อนที่ผิวโคได้รับมีทั้งพลังงานที่เกิดจากการแผ่รังสี (Emission Energy) จากผนังเตาอบซึ่งได้รับความร้อนจากฮีตเตอร์ (ผิวของโคจะมีการแผ่รังสีความร้อนออกมาเช่นกันแต่มีปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับการแผ่รังสีที่เกิดจากฮีตเตอร์หรือผนังของเตาอบ) และความร้อนที่เกิดจากการพาความร้อน (Convection Energy) ของอากาศร้อนที่อยู่รอบๆ โค เมื่ออุณหภูมิที่ผิวของโคมีค่าสูงขึ้นความร้อนจะเกิดการถ่ายเทจากผิวชั้นนอกเข้าสู่ด้านในโดยอาศัยการนำความร้อน (Conduction Energy) ผ่านชั้นเนื้อโค โดยความร้อนจะถูกส่งผ่านชั้นเนื้อโคแต่ละชั้นจนกระทั่งถึงจุดกึ่งกลาง เมื่อเม็ดแป้งได้รับความร้อนจะค่อยๆ พองตัวขึ้น จนกระทั่งอุณหภูมิที่กึ่งกลางโคมีค่าประมาณ 60°C เม็ดแป้งจึงเริ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลอมละลายและแตกตัวเป็นเจลหรือเกิดกระบวนการ gelatinization ขึ้น (การเกิด gelatinization จะเริ่มเกิดที่อุณหภูมิ 55°C และสิ้นสุดที่อุณหภูมิ 85°C โดยประมาณ) (Therdthai, et al., 2002)

ในระหว่างที่แป้งสาลีเกิดเจลนั้นจะดึงน้ำจากโดมาทำให้กึ่งสุกและสูญเสียน้ำเปลี่ยนสภาพจากเดิมที่เคยยืดหยุ่นกลับแข็งตัวขึ้นทำให้ได้โครงร่างของเซลล์ที่มีรูพรุน ในขณะที่เดียวกันเอนไซม์และยีสต์จะค่อยๆ ตายไปเนื่องจากไม่สามารถทนความร้อนที่เพิ่มขึ้นได้ (Therdthai, et al., 2002) อุณหภูมิที่ผิวโดจะค่อยๆ สูงขึ้นจนกระทั่งมีค่าประมาณ 100°C น้ำที่อยู่บริเวณผิวจึงเริ่มระเหยออก อัตราการระเหยของน้ำจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ และหยุดการระเหยเมื่อผิวของโดเกิด crust ขึ้นอย่างสมบูรณ์เนื่องจากความดันไอที่ผิวมีค่าต่ำมาก โดยอุณหภูมิที่ผิวที่ผิวโดในช่วงนี้มีค่าประมาณ 110-125°C (Arpita et al., 2007) เมื่ออุณหภูมิที่ผิวขนมปังมีค่าประมาณ 150-205°C จะเริ่มเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดหรือเกิดสีน้ำตาลขึ้น (Maillard or browning Reaction) ทำให้สีผิวของขนมปังค่อยๆ คัล้ำขึ้น พร้อมกับเกิดการระเหยของสารอินทรีย์ให้กลิ่นรส และสุกในที่สุดโดยเกิดการสูญเสียน้ำหนักของก้อนโด 9-10% เนื่องจากการระเหยของน้ำและสารอื่นๆ (Therdthai, et al., 2002)



รูปที่ 2.18 การถ่ายเทความร้อนสู่ขนมปังในระหว่างการอบ

เมื่อเกิด crust ขึ้นที่ผิวขนมปัง ใอน้ำที่อยู่ข้างในจะไม่สามารถระเหยสู่ภายนอกได้ ใอน้ำที่เกิดขึ้นจึงกลับเข้ามาเกิดการควบแน่นขึ้นที่กึ่งกลางขนมปัง(เนื่องจากที่กึ่งกลางขนมปังมีอุณหภูมิต่ำกว่า 100°C) การเกิดการเคลื่อนที่ของใอน้ำเข้าสู่ด้านในของขนมปังมีผลทำให้ขนมปังเกิดการแยกชั้นเป็น crust และ crumb อุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปังจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นและมีค่าคงที่อยู่ประมาณ 100°C (Therdthai, et al., 2002) โดยที่ crust เป็นส่วนของเปลือกที่อยู่ด้านนอกขนมปัง มีความชื้นต่ำมาก และแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิตามอุณหภูมิของอากาศภายในเตาอบ ส่วน crumb เป็นส่วนที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อยู่ด้านในขนมปังถัดเข้าไปจาก crust มีความชื้นค่อนข้างคงที่และอุณหภูมิจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นแต่ไม่เกิน 100°C ดังที่ได้กล่าวไปแล้ว (Zanoni and Peri, 1993)

2.7.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบขนมปัง

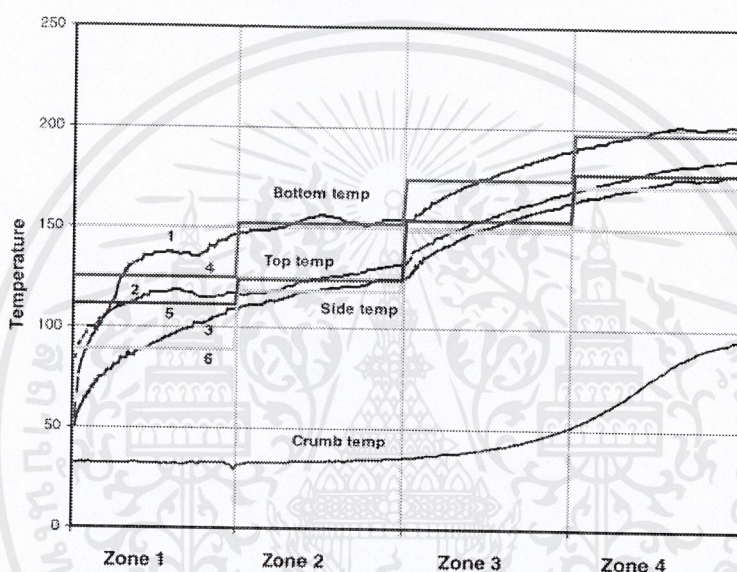
Therdthai, et al., (2002, 2004) ทำการทดลองเพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในแต่ละ zone ของการอบขนมปัง (ขนมปังแบบไวท์แซนวิช) แบ่งกระบวนการเกิดขนมปังออกเป็น 4 zone ดังแสดงรูปที่ 2.19 โดยพิจารณาจากอุณหภูมิที่ผิวขนมปังเป็นหลักและใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการพิจารณาผลของอุณหภูมิที่ผิวขนมปังและระยะเวลาในการอบขนมปังต่อการสูญเสียน้ำหนัก สีและการเกิด gelatinization ของขนมปังในระหว่างการอบ จากการทดลองพบว่าค่าอุณหภูมิที่ผิวใน zone ต่างๆที่ทำให้เกิดการสูญเสียน้ำหนักต่ำที่สุด คือ 115°C 130°C 156°C และ 176°C ตามลำดับ โดยมีหลักในการพิจารณาการควบคุมอุณหภูมิดังนี้

ช่วง zone 1 อุณหภูมิที่ผิวมีค่าค่อนข้างต่ำ (ประมาณ 40°C) ทำให้ความดันไอดำมาก จึงมีการสูญเสียน้ำหนักค่อนข้างต่ำ ยังไม่มีเกิดการเปลี่ยนสีและกระบวนการ gelatinization ขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นใน zone 2 และ 3 ความดันไอก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ส่งผลให้เกิดการสูญเสียน้ำหนักค่อนข้างสูง โดย zone 3 จะมีปริมาณการสูญเสียน้ำหนักสูงสุด ซึ่งเกิดจากน้ำที่ผิวส่วนใหญ่เกิดการระเหยในช่วง zone นี้ โดยในช่วงสุดท้ายของ zone 3 จะเริ่มมีการเกิด gelatinization ขึ้น และเกิดขึ้นในอัตราที่สูง ดังแสดงในรูปที่ 2.20

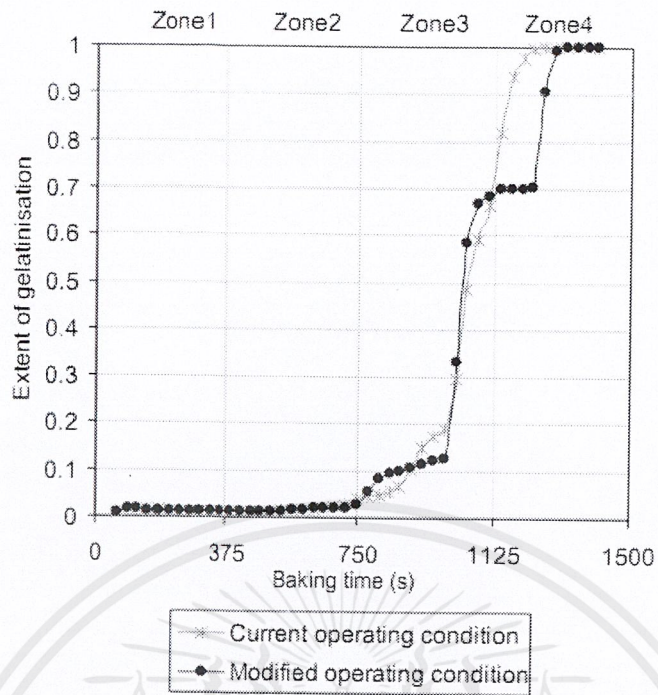
กระบวนการ gelatinization จะเกิดขึ้นเรื่อยๆ และเกิดอย่างสมบูรณ์เมื่อสิ้นสุด zone 4 ดังแสดงในรูปที่ 2.20 อย่างไรก็ตามการเพิ่มอุณหภูมิในช่วง zone 4 จะไม่ทำให้เกิดการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เพราะความชื้นส่วนใหญ่ของเปลือกนอกขนมปัง ได้มีการระเหยไประหว่างการอบใน zone 3 ทำให้ความดันไอนี้ใน zone 4 มีค่าต่ำแม้อุณหภูมิยังคงเพิ่มขึ้นก็ตาม

เมื่อพิจารณาที่สีของ crust พบว่าอุณหภูมิผิว ในช่วงที่ 3 และ 4 ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเกิดสีของ crust เปรียบเทียบกับ zone 1 และ 2 เพราะสีของ crust เกิดจากปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard Reaction) โดยปฏิกิริยาเมลลาร์ด จะเริ่มเกิดเมื่ออุณหภูมิที่ผิวมีค่าประมาณ 150-205°C (Pylar, 1988) ดังนั้นหากต้องการให้สีผิวของ crust ค่ำขึ้น ต้องเพิ่มอุณหภูมิในช่วง zone 3 และ zone 4 แต่หากเพิ่มอุณหภูมิใน zone 3 และ 4 ทำให้เกิดการสูญเสียน้ำหนักมาก ดังนั้นหากต้องการลดการสูญเสียน้ำหนักให้น้อยที่สุด ควรจะมีการลดอุณหภูมิที่ในช่วง zone 1 และ 2 เพราะอุณหภูมิใน zone 1 และ 2 ไม่มีผลต่อการเกิดสีของ crust อย่างมีนัยสำคัญ

การปรับลดปริมาณการจ่ายพลังงานในช่วง zone 1 zone 3 และ zone 4 ลงประมาณ 3.5 % ในขณะเดียวกันปรับปริมาณการไหลของอากาศใน zone 3 เป็น 100 % จะทำให้อุณหภูมิที่ผิวใน zone 1 และ zone 3 มีค่าต่ำลง ส่งผลให้อัตราการเกิด gelatinization ใน zone 3 ค่อย ๆ ลดลงด้วย และเมื่อให้ความร้อนต่อไปอุณหภูมิใน zone 4 จะสูงขึ้น ทำให้อุณหภูมิที่ crumb เพิ่มขึ้นจากจุดเริ่มต้นจนถึง 99°C (เกิด gelatinization อย่างสมบูรณ์) เมื่อสิ้นสุดกระบวนการอบ สีของเปลือกนอกขนมปัง (crust) อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ซึ่ง และการสูญเสียน้ำหนักลดลง 1.4 %



รูปที่ 2.19 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผิวขนมปังเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปังใน zone 1 2 3 และ 4 โดย (1) คืออุณหภูมิที่ผิวด้านล่างขนมปัง (2) คืออุณหภูมิที่ผิวด้านบนขนมปัง (3) คืออุณหภูมิที่ผิวด้านข้างขนมปัง (4) คืออุณหภูมิที่ผิวด้านล่างขนมปังโดยเฉลี่ย (5) คืออุณหภูมิที่ผิวด้านบนขนมปังโดยเฉลี่ย (6) คืออุณหภูมิที่ผิวด้านข้างขนมปังโดยเฉลี่ย



รูปที่ 2.20 กราฟแสดงการเกิด gelatinization ของขนมปังเปรียบเทียบระหว่างการอบภายใต้เงื่อนไขเดิมและเงื่อนไขที่มีการปรับลดอุณหภูมิในช่วงของการอบ

บทที่ 3

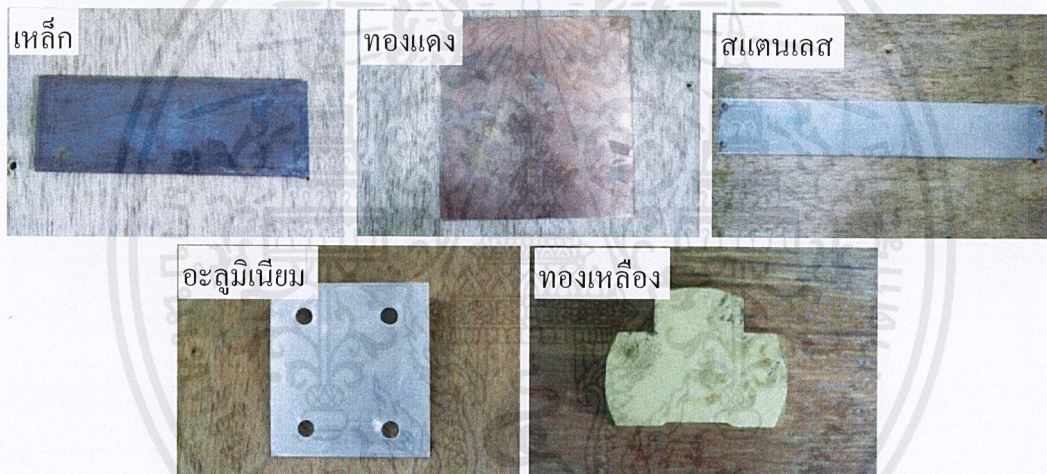
วัสดุอุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

3.1 การทดสอบหาค่า Emissivity

3.1.1 วัสดุที่นำมาใช้ในการหาค่า Emissivity

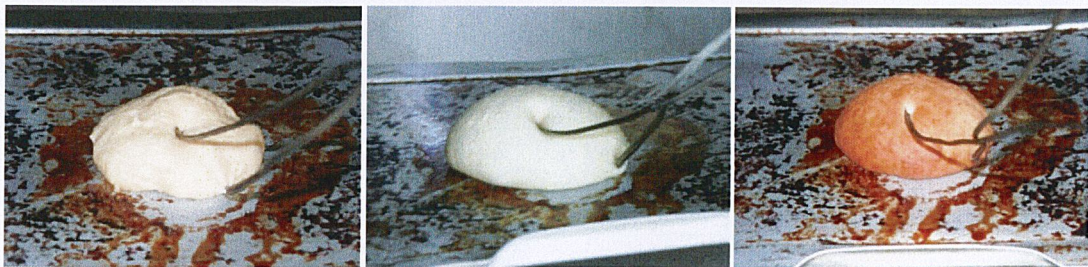
ในการทดลองหาค่า ϵ ได้ทำการแบ่งวัสดุและอุปกรณ์ออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ วัสดุทางวิศวกรรมที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมและวัสดุทางอาหาร

1) ประเภทที่ 1 วัสดุทางวิศวกรรม ได้แก่ เหล็ก ทองแดง สแตนเลส อะลูมิเนียม และทองเหลือง ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 วัสดุทางวิศวกรรมที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร

2) ประเภทที่ 2 คือตัวอย่างวัสดุทางอาหารซึ่งโครงการนี้ได้เลือกขนมปัง (เริ่มตั้งแต่โดจนเป็นขนมปัง) เป็นกรณีศึกษา ขนมปังในระหว่างการอบดังแสดงในรูปที่ 3.2

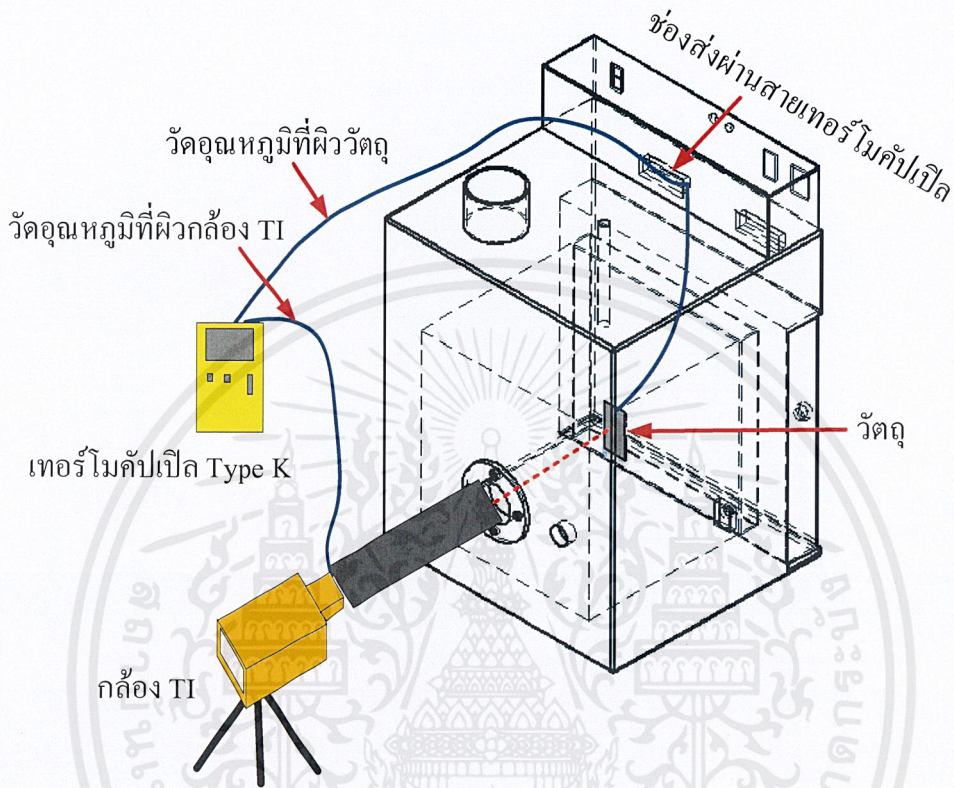


รูปที่ 3.2 ขนมปังในระหว่างการอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 อุปกรณ์ตรวจวัดค่า Emissivity ของวัตถุ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดค่า Emissivity (ϵ) ของวัตถุประกอบด้วย อุปกรณ์วัดค่าอุณหภูมิ และ ตัวควบคุมอุณหภูมิติดตั้งแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ภาพรวมระบบตรวจวัดค่า Emissivity ของวัตถุ

1) อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ

อุปกรณ์วัดอุณหภูมิที่ใช้กับชุดอุปกรณ์ตรวจวัดค่า ϵ ของวัตถุมี 2 ชนิดได้แก่ กล้องถ่ายภาพความร้อนและเทอร์โมคัปเปิล Type K โดยมีรายละเอียดดังนี้

กล้องถ่ายภาพความร้อน (Thermal Image Camera: TI)

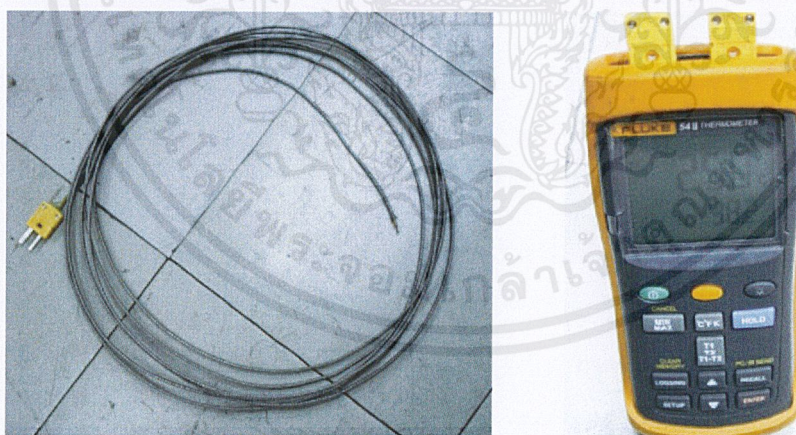
กล้องถ่ายภาพความร้อน Fluke รุ่น TI 32 รับรังสีอินฟราเรดในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 8-14 μm ช่วงวัดอุณหภูมิ -20°C ถึง $+600^{\circ}\text{C}$ ความละเอียดภาพความร้อน 320 x 240 VOX ดังรูปที่ 3.4 ในการทดลอง



รูปที่ 3.4 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 3.5



รูปที่ 3.5 เทอร์โมคัปเปิลแบบสัมผัส Type K และเทอร์โมมิเตอร์ Fluke รุ่น 52 II 2 Channel

2) ผู้ควบคุมอุณหภูมิ

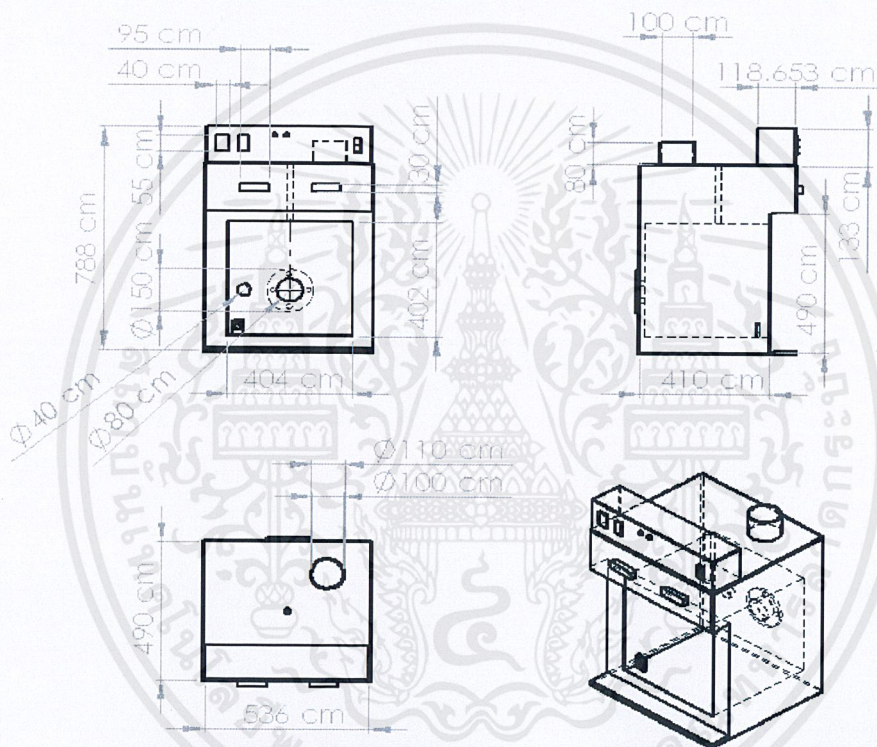
ชุดอุปกรณ์ตรวจวัดค่า ϵ ประกอบด้วยส่วนหลัก ๆ 5 ส่วน ได้แก่ ผู้ควบคุมอุณหภูมิ ชุดจับยึดวัตถุ ระบบให้ความร้อนและระบบควบคุม โดยมีรายละเอียดของส่วนต่าง ๆ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตู้ควบคุมอุณหภูมิ

ขนาดภายนอกของชุดอุปกรณ์ (กว้าง x ลึก x สูง) ประมาณ 76 x 81 x 80 cm (ถ้ารวมตู้ไฟสูง 100 cm) ขนาดภายใน (กว้าง x ลึก x สูง) 50 x 70 x 50 cm (รูปที่ 3.6) วัสดุภายในและภายนอกทำด้วย แสตนเลส อย่างดีหนา 1.2 mm ภายในตู้เชื่อมสแตนเลสหนา 6 mm (ตามแบบ) รอบตัวตู้และ ประตูด้วยใยหินกันความร้อนเพื่อป้องกันการถ่ายเทความร้อนระหว่างภายในและภายนอก บริเวณ ผังด้านหลังตู้มีช่องเปิดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 cm เป็นช่องสำหรับกล่อง TI รับรังสี อินฟราเรด รายละเอียดของชุดอุปกรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.7

ก)



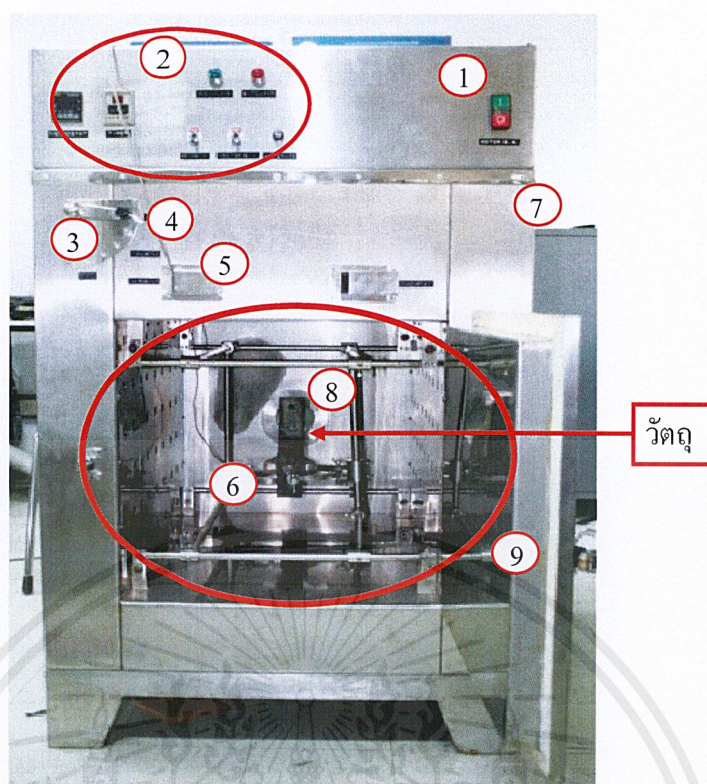
ข)



รูปที่ 3.6 ก) ภาพเขียนขนาดตู้ควบคุมอุณหภูมิและสภาวะแวดล้อมแบบสองมิติและสามมิติ)

ข) ภาพสมบูรณ (ภาพเขียนสามมิติและภาพจริง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 ชุดอุปกรณ์ตรวจวัดค่า Emissivity

ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบของห้องควบคุมสภาวะแวดล้อม

หมายเลข	ส่วนประกอบภายในห้องควบคุมสภาวะ
1	สวิตช์เปิด-ปิด
2	Temperature control
3	คันโยกเปิด-ปิดช่อง Refresh Air
4	สาย Thermocouple
5	ช่องสำหรับนำสาย Thermocouple ไปวัดอุณหภูมิที่ผิววัสดุ
6	ชุดจับยึดวัตถุ
7	ผนังตู้ทำจาก Stainless
8	IR-Window
9	ประตูเปิด-ปิด บุด้วยฉนวนใยหิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชุดจับยึดวัตถุ

ลักษณะของชุดจับยึดขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัตถุที่ต้องการทราบค่า ε ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ชุดอุปกรณ์จับยึดวัตถุ

ระบบให้ความร้อน

ใช้ไฟฟ้าให้ความร้อนโดยใช้แผงฮีตเตอร์ 12,000 Watt ภายในชุดอุปกรณ์มีพัดลมหมุนเวียนอากาศโดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้า ซึ่งพัดลมจะถูกเปิดโดยอัตโนมัติเมื่อเปิดให้ความร้อนแก่ชุดอุปกรณ์ มีตัวบังคับช่องอากาศที่ด้านหน้าตู้ สามารถปรับบังคับการหมุนเวียนของลมร้อนภายในตู้ให้ระบายความชื้นออกมากหรือน้อย (ปิด - เปิดได้) ที่ด้านหน้ามีช่อง Refresh Air 1 ช่อง (ปิด-เปิดได้) ดังแสดงในรูปที่ 3.7

ระบบควบคุม

มีชุดควบคุมอุณหภูมิเป็นตัวเลขดิจิทัล สามารถตั้งค่าอุณหภูมิได้ 35-300°C มีไทม์เมอร์ (Timer) ตั้งเวลาในการอบได้ 24 ชั่วโมง ใช้ไฟฟ้า 3 เฟส 380 โวลท์

3.1.3 หลักการทำงานของชุดอุปกรณ์ตรวจวัดค่า Emissivity

ยึดจับวัตถุที่ต้องการทราบค่า ε โดยใช้ชุดจับยึด ใช้เทอร์โมคัปเปิลแบบสัมผัสซึ่งเชื่อมต่อกับอุปกรณ์แสดงผลวัดอุณหภูมิผิวของวัตถุ จากนั้นเปิดให้ความร้อนกับชุดอุปกรณ์จนกระทั่งอุณหภูมิที่ผิวของวัตถุมีค่าตามต้องการ จึงใช้กล้อง TI วัดค่าอุณหภูมิที่ผิวของวัตถุผ่านช่องส่องผ่าน เนื่องจากรังสีอินฟราเรดที่กล้อง TI รับไปไม่ได้มีเฉพาะรังสีอินฟราเรดที่เกิดจากตัววัตถุเท่านั้นแต่ยังมีรังสีอินฟราเรดที่สิ่งแวดล้อมหรือวัตถุอื่น โดยรอบแผ่มาตกกระทบและสะท้อนออกจากผิววัตถุ

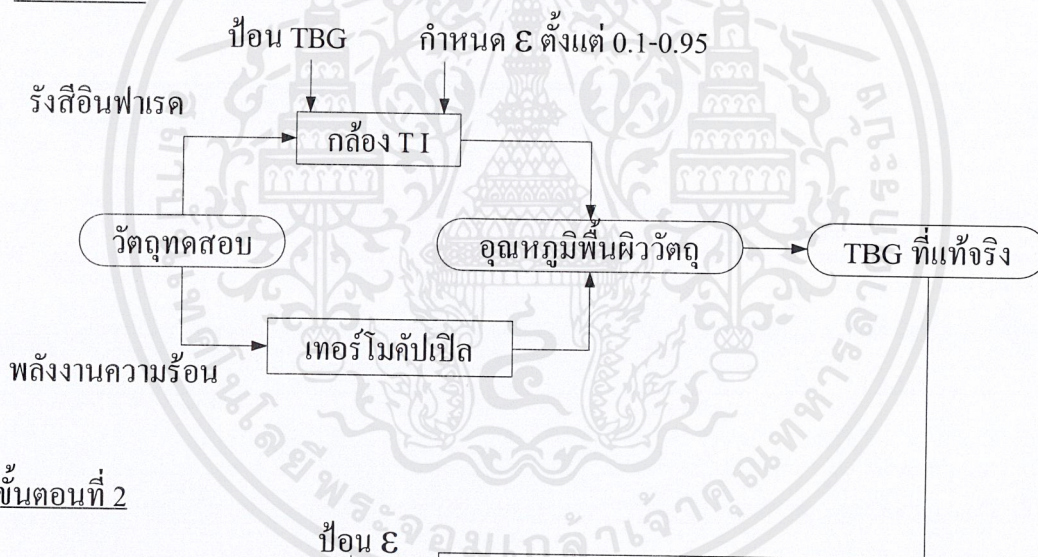
(หัวข้อ 2.3.1) การหาค่า ε ของวัตถุจึงแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

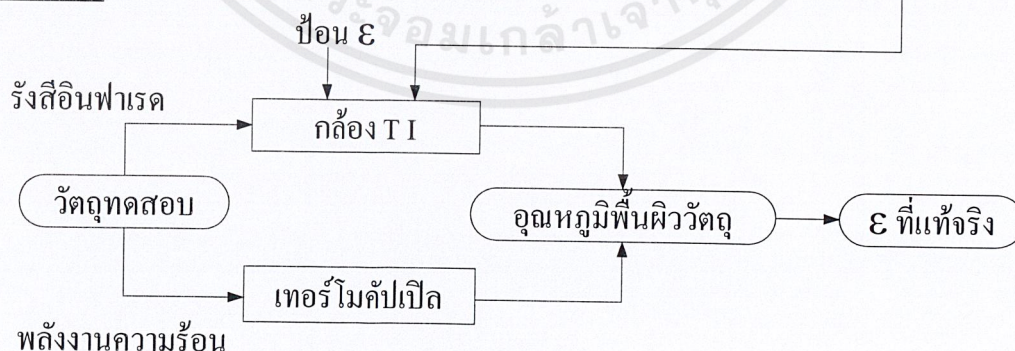
ขั้นตอนที่ 1 เมื่อค่าอุณหภูมิที่ผิววัตถุที่วัดได้จากเทอร์โมคัปเปิลได้ค่าตามที่กำหนดไว้แล้ว ให้ใช้กล้อง TI วัดอุณหภูมิที่ผิวของวัตถุผ่านช่องส่องผ่าน โดยการกำหนดค่า ε ให้กับกล้อง จากนั้นปรับค่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (Background Temperature: T_{BG}) ที่ตัวกล้อง จนกระทั่งอุณหภูมิที่อ่านได้จากกล้อง TI มีค่าเท่ากับอุณหภูมิที่อ่านได้จากจอแสดงผลที่ต่ออยู่กับเทอร์โมคัปเปิล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

ขั้นตอนที่ 2 กำหนดค่า T_{BG} ที่ได้ในขั้นตอนที่ 1 ให้กับกล้อง TI ปรับค่า ε ที่ตัวกล้องจนกระทั่งอุณหภูมิที่อ่านค่าได้จากกล้อง TI มีค่าเท่ากับอุณหภูมิที่อ่านได้จากเทอร์โมคัปเปิลค่า ε ที่ได้คือค่า ε ที่แท้จริงของวัตถุ ขั้นตอนการหา ε ดังแสดงในรูปที่ 3.9

ขั้นตอนที่ 1



ขั้นตอนที่ 2



รูปที่ 3.9 แผนภาพแสดงขั้นตอนการหาค่า ε ของวัตถุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.4 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 ครั้ง บันทึกผล

การวัดค่า Emissivity ของขนมปัง

หาค่า ϵ ของขนมปังโดยใช้วิธีการเช่นเดียวกับการหาค่า ϵ ของวัสดุทางวิศวกรรม โดยวางโคไว้บนภาควางภายในชุดอุปกรณ์ วัดค่า ϵ เริ่มต้นของโคและบันทึกผล จากนั้นเปิดให้ความร้อนแก่ชุดอุปกรณ์โดยตั้งค่าอุณหภูมิภายในชุดอุปกรณ์ไว้ที่ 180°C ให้ความร้อนจนกระทั่งอุณหภูมิที่กึ่งกลางโคหรือขนมปังมีค่าเป็น 40°C 60°C และ 98°C จึงใช้กล้อง TI วัดค่า ϵ ของขนมปังและบันทึกผล โดยเมื่ออุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปังมีค่าเป็น 98°C ให้คงอุณหภูมิภายในชุดอุปกรณ์ไว้เป็นเวลา 10 นาที จึงวัดค่า ϵ ของขนมปังอีกครั้งก่อนนำขนมปังออกจากชุดอุปกรณ์

วัดค่า ϵ ของขนมปังภายใต้การอบ 2 สภาวะ สภาวะแรกอบขนมปังโดยตั้งค่าอุณหภูมิภายในเตาอบคงที่ที่ 180°C คงที่ สภาวะที่ 2 มีการปรับอุณหภูมิภายในเตาอบในช่วงที่ 2 และ 3 เป็น 120°C และ 170°C ตามลำดับ

3.2 การทดสอบการอบขนมปัง

3.2.1 การเตรียมโค

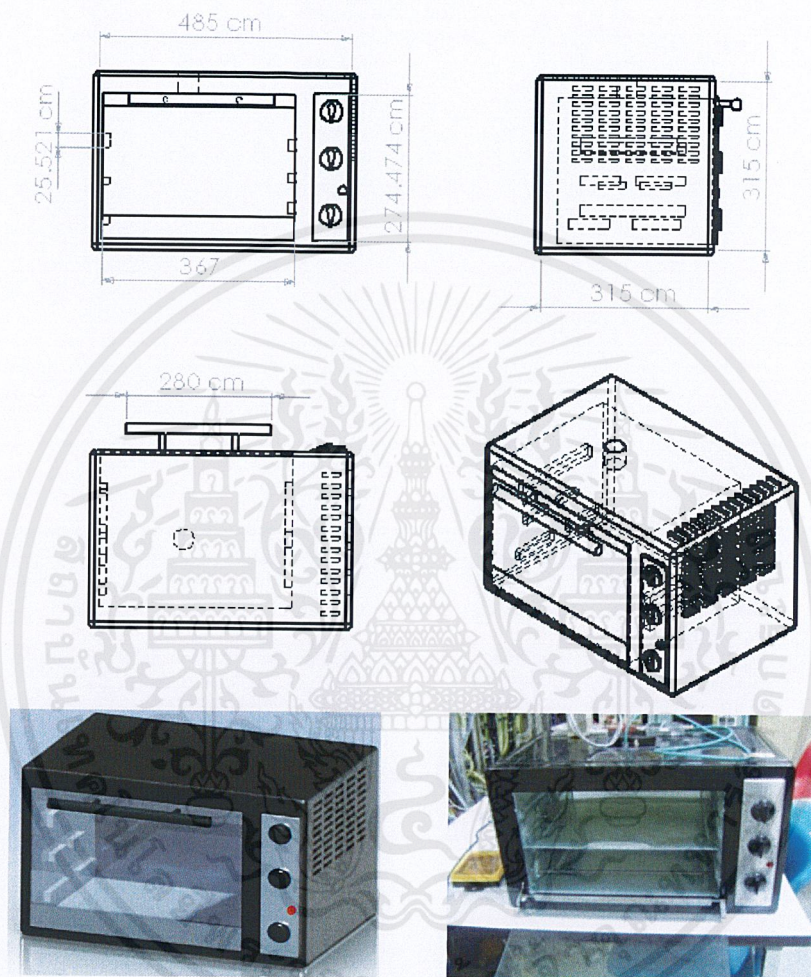
เตรียมโคสำหรับอบขนมปัง ซึ่งมีส่วนผสมโดยประมาณดังต่อไปนี้ แป้งขนมปัง 50 เปอร์เซ็นต์ น้ำเย็น 25 เปอร์เซ็นต์ น้ำตาล 10 เปอร์เซ็นต์ มากา린 5.8 เปอร์เซ็นต์ ไข่ไก่ 3 เปอร์เซ็นต์ นมผง 2.5 เปอร์เซ็นต์ เนยขาว 1.8 เปอร์เซ็นต์ เกลือป่น 0.85 เปอร์เซ็นต์ และยีสต์ 0.75 เปอร์เซ็นต์ โดยผสมส่วนผสมทุกอย่าง (ยกเว้นยีสต์) เข้าด้วยกัน นวดจนเข้ากัน แล้วพักไว้ 40 นาที จากนั้นนำมานวดรวมกับยีสต์จนเนียนเรียบ แล้วตัดชั่งน้ำหนักก้อนละ 70 กรัม จำนวน 1 ก้อน นวดปละปั่นกลมพักไว้ที่อุณหภูมิห้อง (25°C) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง 30 นาที เพื่อให้เกิดโค (สูตรขนมปัง ม.เกษตรศาสตร์)

3.2.2 การเตรียมเตาอบ

ใช้เตาอบไฟฟ้า (ZANUSSI รุ่น ZOT103KX อีเลคโทรลิกซ์ ประเทศไทย ความจุของโพรงเตาอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

300 ลิตร) ในการอบขนมปัง ก่อนอบ ต้องเปิดเครื่องทิ้งไว้อย่างน้อย 10 นาที โดยตั้งค่าอุณหภูมิเตาอบไว้ตามที่ต้องการเพื่อให้อุณหภูมิในเตาอบเข้าสู่สภาวะสมดุล (steady) โดยอุณหภูมิสูงสุดของอากาศในเตาอบคือ $230 \pm 10^{\circ}\text{C}$ ด้านหน้าเตาอบทำจากวัสดุที่ค่อนข้างใสทำให้สามารถมองเห็นขนมปังขณะอบได้ ลักษณะเตาอบที่ใช้ในการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.10

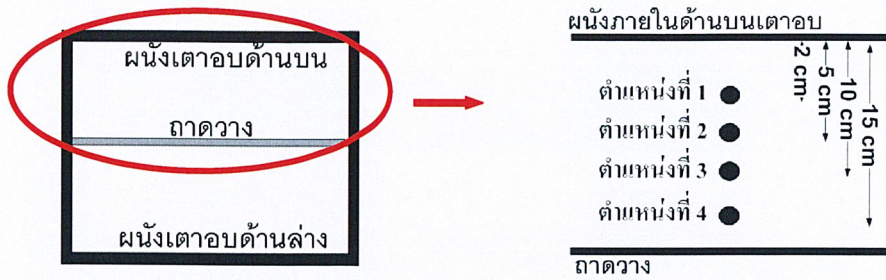


รูปที่ 3.10 เตาอบไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองอบขนมปัง

3.2.2.1 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอากาศภายในเตาอบ

หากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของอากาศภายในเตาอบโดยตั้งค่าอุณหภูมิหน้าเตาไว้ที่ 210°C และใช้เทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในเตาอบทั้งหมด 4 ตำแหน่ง โดยตำแหน่งที่ 1 อยู่บนสุด ห่างจากผนังเตาด้านบนประมาณ 2 cm ตำแหน่งที่ 2 ห่างจากผนังเตาด้านบนประมาณ 5 cm ตำแหน่งที่ 3 ห่างจากผนังเตาด้านบนประมาณ 10 cm และตำแหน่งที่ 4 ต่ำสุดห่างจากผนังเตาด้านบนประมาณ 15 cm (ห่างจากถาด 1 cm) ดังแสดงในรูปที่ 3.11

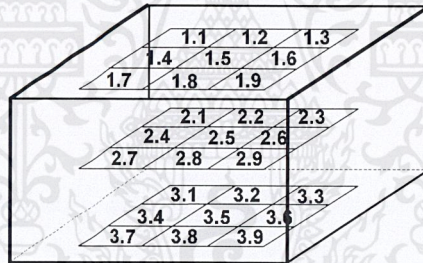
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 ตำแหน่งการเสียบสายเทอร์โมคัปเปิลเพื่อวัดอุณหภูมิอากาศในเตาอบ

3.2.2.2 หาค่าความเร็วลมร้อนในเตาอบ

เนื่องจากการทดลองได้มีการให้ความร้อนกับเตาอบโดยใช้โหมคไฟบน-ล่างและมีพัดลมเป่าเพื่อให้เกิดการหมุนเวียนลมร้อนภายในเตาอบ จึงได้มีการหาช่วงความเร็วลมเฉลี่ยภายในเตาอบโดยใช้หลอดปีโดท (Pitot Tube) ซึ่งมีการวัดความเร็วลมทั้งหมด 3 แถว 27 ตำแหน่งเหนือภาควาง (แบ่งเป็น 3 แถว ได้แก่ แถวบน-กลาง-ล่าง แถวละ 9 ตำแหน่ง) ดังแสดงในรูปที่ 3.12 โดยวัดตำแหน่งละ 3 ซ้ำ



หมายเหตุ: เลขตัวแรกแสดงแถว เลขตัวที่ 2 แสดงตำแหน่งของการวัดความเร็วลมบนแถวนั้นๆ เช่น 1.9 คือ แถวที่ 1 ตำแหน่งที่ 9

รูปที่ 3.12 ตำแหน่งการวัดความเร็วลมร้อนภายในเตาอบบริเวณเหนือภาควาง

3.2.3.3 หากการกระจายอุณหภูมิภายในเตาอบ

เนื่องจากการเปิดพัดลมเป่าเพื่อให้เกิดการหมุนเวียนลมร้อนภายในเตาอบซึ่งมีความเร็วลมร้อนโดยเฉลี่ยประมาณ 0.211 m/s จึงได้มีการทดลองเพื่อหาการกระจายอุณหภูมิของอากาศภายในเตาอบโดยใช้ถ้วยสแตนเลส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.1 cm สูง 3.1 cm บรรจุน้ำเปล่า 30 กรัม วางในตำแหน่งต่างๆ ภายในเตาอบทั้งหมด 9 ตำแหน่ง ดังรูปที่ 3.13 และใช้เทอร์โมคัปเปิลซึ่งเชื่อมต่ออยู่กับ Data Logger วัดอุณหภูมิของน้ำในถ้วยจากนั้นเปิดเตาโดยให้อุณหภูมิของอากาศภายในเตามีค่า 110°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 แสดงตำแหน่งการวางถ้วยสแตนเลสบรรจุน้ำเปล่าเพื่อหาการกระจายอุณหภูมิภายในเตาอบ

3.2.3.4 การปรับค่าอุณหภูมิของอากาศภายในเตาอบในระหว่างการอบขนมปัง

แบ่งช่วงการพิจารณาออกเป็น 3 ช่วง โดยพิจารณาอุณหภูมิกึ่งกลางขนมปังเป็นหลัก (Therdthai et al., 2002) โดยปรับลดอุณหภูมิในช่วงที่ 2 และปรับเพิ่มอุณหภูมิในช่วงที่ 3 รายละเอียดดังต่อไปนี้

ช่วงที่ 1 คือช่วงที่อุณหภูมิกึ่งกลางขนมปังมีค่าตั้งแต่เริ่มต้นจนถึง 40°C ในการทดลองได้พิจารณาปรับเปลี่ยนค่าอุณหภูมิของอากาศภายในเตาอบในช่วงนี้เป็น 2 ค่า คือ 180°C และ 210°C เนื่องจากจากการทดลองเบื้องต้นพบว่าเมื่อตั้งค่าอุณหภูมิของอากาศในเตาอบสูงกว่า 210°C ขนมปังจะไหม้เกรียมและเนื้อด้านในไม่สุก ในขณะที่เมื่อตั้งค่าอุณหภูมิต่ำกว่า 180°C ต้องใช้เวลาอบนานกว่าขนมปังจะสุกและมีสีน้ำตาลพอดิ ทำให้ความชื้นระเหยออกเกือบหมด เนื้อขนมปังจึงค่อนข้างแข็ง

ช่วงที่ 2 คือช่วงที่อุณหภูมิกึ่งกลางขนมปังมีค่าตั้งแต่ 40°C ถึง 60°C ในการทดลองได้พิจารณาปรับลดค่าอุณหภูมิของอากาศภายในเตาอบในช่วงนี้จากช่วงแรกเป็นทั้งหมด 3 ค่า คือ 90°C 110°C และ 120°C เนื่องจากจากการทดลองเบื้องต้นพบว่าที่อุณหภูมิต่ำกว่า 90°C ขนมปังไม่สุกทั้งก้อนยังมีโคเคลืออยู่หลังการอบ ส่วนที่อุณหภูมิสูงกว่า 120°C เนื้อขนมปังมีลักษณะค่อนข้างแห้งและแข็ง หรืออาจเรียกได้ว่าขนมปังสุกเกินไป

ช่วงที่ 3 คือช่วงที่อุณหภูมิกึ่งกลางขนมปังมีค่าตั้งแต่ 60°C จนถึง 98°C และคงอุณหภูมิไว้ที่ค่านี้เป็นเวลา 10 นาที จากการทดลองเบื้องต้นพบว่า ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 170°C สีของผิวขนมปังสว่างเกินไปซึ่งหากต้องการให้สีเข้มขึ้นต้องใช้เวลาในการอบนานขึ้น แต่จะส่งผลให้เปลือกนอกของขนมปังแข็งขึ้นตามไปด้วย ส่วนที่อุณหภูมิสูงกว่า 190°C สีของขนมปังเข้มเกินไป และมีค่าการสูญเสียน้ำหนักของขนมปังหลังการอบค่อนข้างสูง ดังนั้นในการทดลองจึงได้พิจารณาปรับเพิ่มค่าอุณหภูมิของอากาศภายในเตาอบในช่วงนี้จากช่วงที่ 2 เป็นทั้งหมด 3 ค่า ได้แก่ 170°C 180°C และ 190°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดลองได้พิจารณาปรับเปลี่ยนเฉพาะค่าอุณหภูมิในช่วงที่ 1 และ 2 และให้อุณหภูมิในช่วงที่ 3 คงที่ที่ 180°C ก่อนในตอนแรก จากนั้นเมื่อได้ค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมของช่วงที่ 1 และ 2 จึงพิจารณาปรับเปลี่ยนค่าอุณหภูมิในช่วงที่ 3 เป็น 170°C และ 190°C ดังนั้นจะมีการทดลองทั้งหมด $(3 \times 2) \times 2$ ครั้ง ในการทดลองจะวางโคไว้ที่ตำแหน่งที่ 5 เพียงก้อนเดียว โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ

3.2.3 การวัดค่าต่างๆ (Measurement)

3.2.3.1 การวัดค่าอุณหภูมิ

อุณหภูมิระหว่างการอบขนมปังและ อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$)

วัดอุณหภูมิโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล Type K ซึ่งเชื่อมต่ออยู่กับเครื่องบันทึกค่า (Data Logger) โดยกำหนดให้ Data Logger บันทึกค่าอุณหภูมิทุกๆ 10 วินาที ซึ่งจะมีการวัดค่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ดังต่อไปนี้

วัดอุณหภูมิอากาศภายในเตาอบ ที่ตำแหน่งห่างจากผนังเตาอบประมาณ 2 cm

วัดอุณหภูมิที่ผิวของขนมปัง (ลึกจากผิวขนมปัง 1 mm) วัดอุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปัง และ

$$\text{อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ } (^{\circ}\text{C}/\text{min}) = \frac{\text{อุณหภูมิสุดท้าย} - \text{อุณหภูมิเริ่มต้น}}{\text{เวลาสุดท้าย} - \text{เวลาเริ่มต้น}}$$

การวัดอุณหภูมิอื่นๆ

ใช้เทอร์โมคัปเปิลแบบสัมผัส Type K วัดอุณหภูมิที่ผิวของแผ่นเหล็ก อลูมิเนียม สแตนเลส และ ทองแดง ในระหว่างการทดสอบหาค่า ϵ ในกล่องดำ ใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนวัดอุณหภูมิที่ผิวของวัตถุเพื่อหาค่า ϵ และใช้เครื่องมือวัดรังสีอินฟราเรด (IR-Sensor) วัดอุณหภูมิที่ผิวของขนมปังในระหว่างการอบ

3.2.3.2 น้ำหนัก และเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนัก (Weight Loss: %) ของขนมปังภายหลังการอบ

ชั่งน้ำหนักขนมปังโดยใช้ตาชั่งดิจิทัลความละเอียดทศนิยม 2 ตำแหน่ง

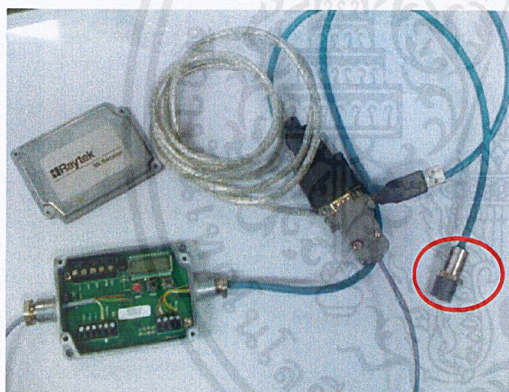
$$\text{เปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนัก } (\%) = \frac{\text{น้ำหนักก่อนอบ} - \text{น้ำหนักหลังอบ}}{\text{น้ำหนักก่อนอบ}} \times 100$$

3.3 การทดสอบการอบขนมปังด้วยการควบคุมอุณหภูมิที่ผิว

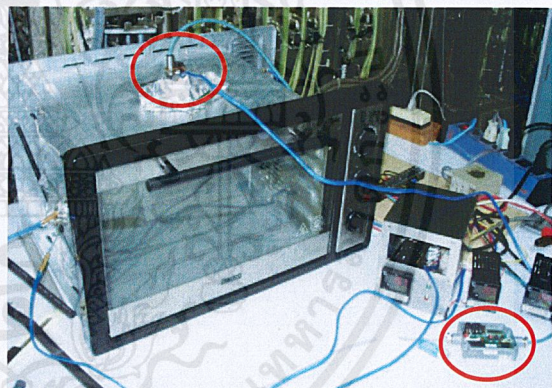
3.3.1 การวัด Emissivity ของขนมปังโดยใช้ IR sensor

วัดค่า ϵ ของขนมปังในแต่ละช่วงของกระบวนการอบโดยใช้ IR sensor (Raytek-IR sensor รุ่น MI วัดรังสีอินฟราเรดในช่วง $8-14\mu\text{m}$ ช่วงอุณหภูมิที่วัดได้ -40 ถึง 600°C) ซึ่งได้มีการติดตั้ง IR sensor ไว้ที่ด้านบนของเตาอบขนาดเล็ก ดังแสดงในรูปที่ 3.14 เนื่องจากด้านบนผิวขนมปังค่อนข้างแบนเรียบ ไม่มีมุมหรือมุมมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากในระหว่างการอบ ในการทดลองจึงได้มีการเจาะรูที่ด้านบนเตาอบเพื่อให้ IR sensor มองผ่าน ซึ่งวัดค่า ϵ โดยใช้เทอร์โมคัปเปิลติดไว้ที่ผิวของวัตถุ และปรับค่า ϵ ที่ IR sensor จนกระทั่งอุณหภูมิที่อ่านได้จาก IR sensor มีค่าเท่ากับอุณหภูมิที่อ่านได้จากเทอร์โมคัปเปิล ค่า ϵ ที่ได้คือค่า ϵ ของวัตถุ ซึ่งในการทดลองได้มีการวัดค่า ϵ เริ่มตั้งแต่โดจนกลายเป็นขนมปังหรือสิ้นสุดกระบวนการอบ

ก)



ข)

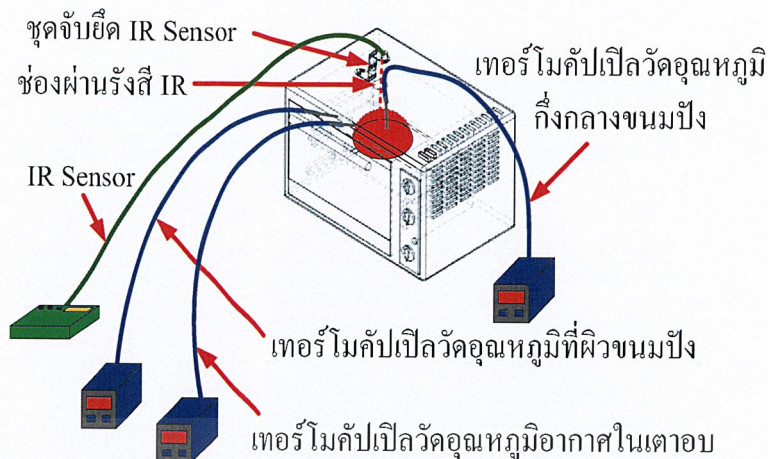


รูปที่ 3.14 ก) IR sensor ที่ใช้ในการทดลอง ข) ติดตั้ง IR sensor ไว้ที่ด้านบนเตาอบขนาดเล็ก

3.3.2 การทดสอบกระบวนการอบขนมปังโดยใช้ IR sensor ควบคุมอุณหภูมิที่ผิว

เมื่อได้ค่า ϵ ของขนมปังในแต่ละช่วงของกระบวนการอบแล้ว ให้นำค่า ϵ ดังกล่าวมาทดสอบกับ IR sensor ที่ติดตั้งอยู่บนตู้อบขนาดเล็ก โดยใช้ IR sensor วัดอุณหภูมิที่ผิวขนมปังและกำหนดค่า ϵ ที่ได้จากการทดลองให้กับ IR sensor เปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ผิวที่วัดได้จากเทอร์โมคัปเปิล ระบบการทดสอบขนมปังด้วยการควบคุมอุณหภูมิที่ผิวดังแสดงในรูปที่ 3.15 และแผนผังการทดสอบการอบขนมปัง โดยการควบคุมอุณหภูมิที่ผิวด้วย IR sensor แสดงในรูปที่ 3.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



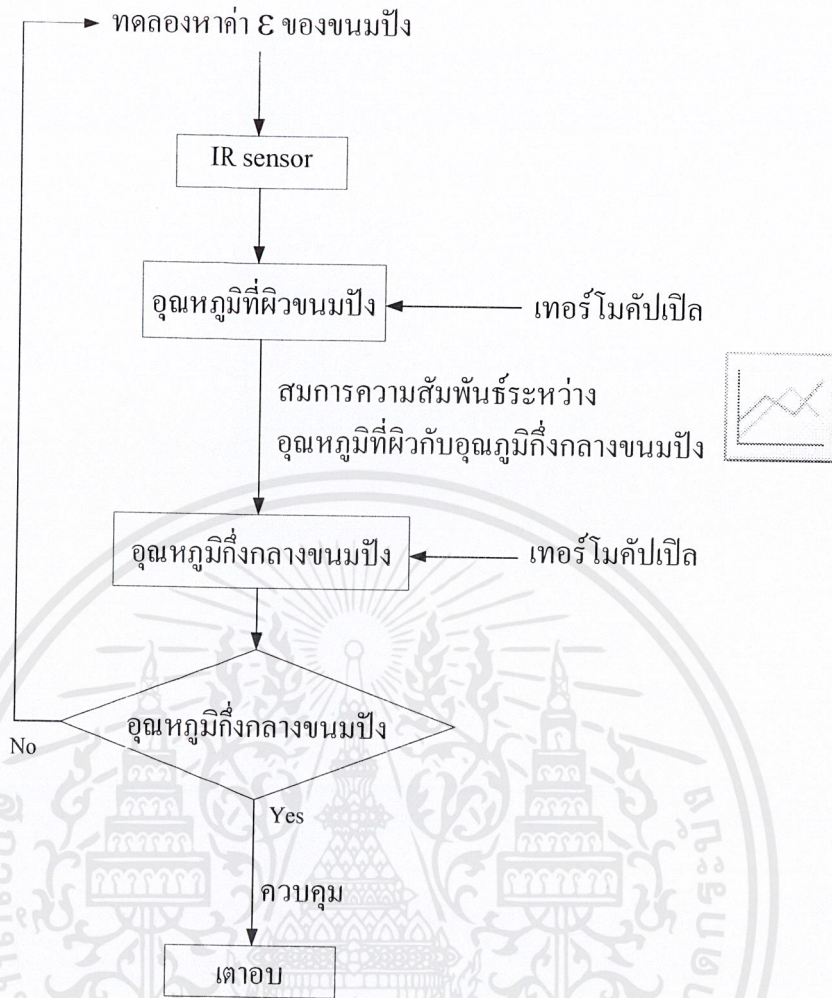
รูปที่ 3.15 ระบบการทดสอบการอบขนมปิ้งด้วยการควบคุมอุณหภูมิที่ผิวโดยใช้ IR sensor

การทดสอบการทำงานของคู่อบบแบบใช้ IR sensor วัดอุณหภูมิที่ผิว ซึ่งใช้แผ่นเหล็กที่ทราบค่า ϵ มาใช้ในการทดสอบ โดยทำการวัดอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุด้วย IR sensor และติดเทอร์โมคัปเปิลไว้ที่ผิวของแผ่นเหล็ก จากนั้นใช้ IR sensor วัดอุณหภูมิที่ผิวของแผ่นเหล็กโดยป้อนค่า ϵ ของแผ่นเหล็กให้กับ IR sensor เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากจาก IR sensor กับอุณหภูมิที่ได้จากเทอร์โมคัปเปิลจากการทดสอบเบื้องต้นพบว่าอุณหภูมิที่ได้จาก IR sensor มีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่ได้จากเทอร์โมคัปเปิล แสดงให้เห็นว่าสามารถใช้ IR sensor ในการวัดอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุได้

จากนั้นทำการทดสอบการวัดอุณหภูมิที่ผิวของขนมปิ้งในระหว่างการอบ โดยป้อนค่า ϵ ของขนมปิ้งในช่วงต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลองให้กับ IR sensor เปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ผิวที่วัดได้จากเทอร์โมคัปเปิล จากนั้นนำอุณหภูมิที่ผิวไปใช้ในการทำนายหาอุณหภูมิที่กึ่งกลางของขนมปิ้งโดยใช้สมการความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ผิวกับอุณหภูมิที่กึ่งกลาง เปรียบเทียบอุณหภูมิที่กึ่งกลางที่ได้จากสมการความสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่กึ่งกลางวัดได้จากเทอร์โมคัปเปิล

หากอุณหภูมิที่ได้จากสมการความสัมพันธ์แตกต่างจากอุณหภูมิที่ได้จากเทอร์โมคัปเปิล ต้องทดลองหาค่า ϵ ใหม่อีกครั้ง จนกว่าอุณหภูมิทั้งสองจะมีค่าเท่ากับหรือใกล้เคียงกัน เมื่อทดลองจนกระทั่งได้ ϵ ที่ทำให้อุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปิ้งที่ได้จากสมการและอุณหภูมิที่ได้จากเทอร์โมคัปเปิลมีค่ากัน จึงนำค่าอุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปิ้งที่ได้ไปใช้ในการควบคุมของเตาอบ อย่างไรก็ตาม สมการที่ใช้ในการทำนายควรนำหลักการถ่ายเทความร้อนและมวลสารเข้ามาร่วมพิจารณาด้วย รวมถึงปัจจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น ความเร็วลม ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน องค์ประกอบภายในวัสดุ เป็นต้น เพื่อให้ได้ผลการทำนายที่ถูกต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 แผนผังแสดงการทดสอบการอบขนมปังโดยการควบคุมอุณหภูมิที่ผิวด้วย IR sensor

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ค่า Emissivity (ϵ) ของวัสดุทางวิศวกรรมและวัสดุทางอาหาร

4.1.1 ค่า Emissivity ของวัสดุทางวิศวกรรมที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม

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

เนื่องจากรังสีอินฟราเรดที่แผ่ออกจากผิววัตถุ (Radiosity: J) ไม่ได้มีเพียงรังสีที่ออกจากวัตถุเท่านั้น (E) แต่ยังมีรังสีอินฟราเรดที่สิ่งแวดล้อมหรือวัตถุอื่น โดยรอบแผ่มาตกกระทบและสะท้อนออกจากผิววัตถุ ($G_{\lambda,ref}$) ดังแสดงความสัมพันธ์ในรูปของ $J = E + G_{\lambda,ref}$ (Incropera, et al., 2005) (หัวข้อ 2.3.1) ดังนั้นรังสีอินฟราเรดที่กล้อง TI รับไปจึงมีทั้งรังสีที่เกิดจากตัววัตถุเองและรังสีที่สะท้อนจากวัตถุอื่น ซึ่งรังสีจากวัตถุอื่นในที่นี้คือรังสีจากผนังชุดอุปกรณ์วัดค่า ϵ ที่ทำมาจากสแตนเลส 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) บริเวณจุดสีฟ้ามีอุณหภูมิใกล้เคียงกับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิห้องด้วย ส่วนบริเวณสีแดงคือบริเวณที่ได้รับรังสีตกกระทบส่วนใหญ่ผนังตู้ควบคุมซึ่งมีอุณหภูมิค่อนข้างสูงมากดังนั้น หากใช้กล้อง TI วัดอุณหภูมิของวัตถุที่บริเวณสีแดงนี้ อุณหภูมิสะท้อน (T อ้างอิงหรือ T background: T_{BG}) จะมีค่าสูงดังแสดงในรูปที่ 4.2 และ 4.3 ซึ่งแสดงวิธีการวัดค่า T_{BG} ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เป็นผลมาจากการสะท้อนของผนังตู้ เมื่อพิจารณาภาพถ่ายทางความร้อนที่บริเวณผิวของทองเหลืองพบว่าภายในบริเวณผิวทองเหลืองและบริเวณรอบข้างมีสีค่อนข้างใกล้เคียงกัน เป็นผลมาจากผิวทองเหลืองไม่มันวาว จึงมีความสามารถในการสะท้อนรังสีที่แผ่มากระทบต่ำ จึงไม่ปรากฏบริเวณสีที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนเหมือนวัสดุแผ่นที่กล่าวไปแล้วข้างต้น

ในการพิจารณาช่วงค่า ε ที่เป็นไปได้ของวัสดุชนิดต่าง ๆ จะกำหนดค่า ε ให้กับกล้อง และปรับค่า T_{BG} ที่ตัวกล้องจนกระทั่งได้ T_{BG} ที่ค่า ε ดังกล่าว โดยหากกำหนดจุดวัดอุณหภูมิให้อยู่ภายในบริเวณพื้นที่สีฟ้า ควรใช้อุณหภูมิหน้ากล้องกำหนดเป็น T_{BG} ให้กับกล้อง และหากกำหนดจุดวัดอุณหภูมิให้อยู่บริเวณพื้นที่สีแดงหรือบริเวณรอบนอกพื้นที่สีฟ้า ควรกำหนดเป็น T_{BG} ให้กับกล้องตามวิธีดังแสดงในรูปที่ 4.2 และ 4.3

ก)



ข)



รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายทางความร้อนของวัสดุทางวิศวกรรมที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม ก) เหล็ก ข) สแตน

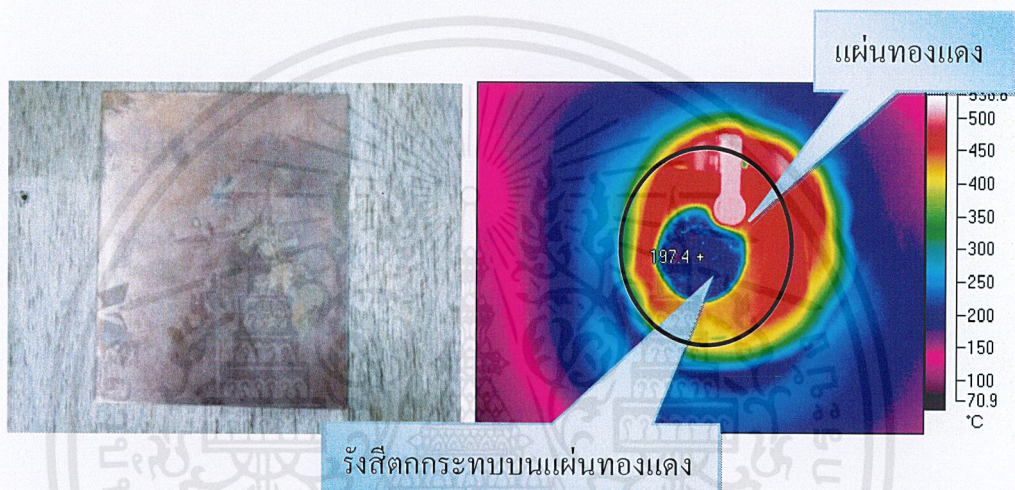
เลส ค) อะลูมิเนียม ง) ทองแดง จ) ทองเหลือง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

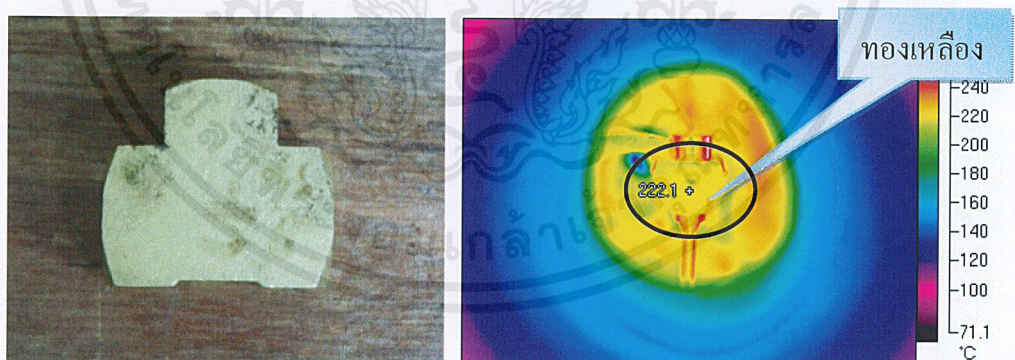
ค)



ง)

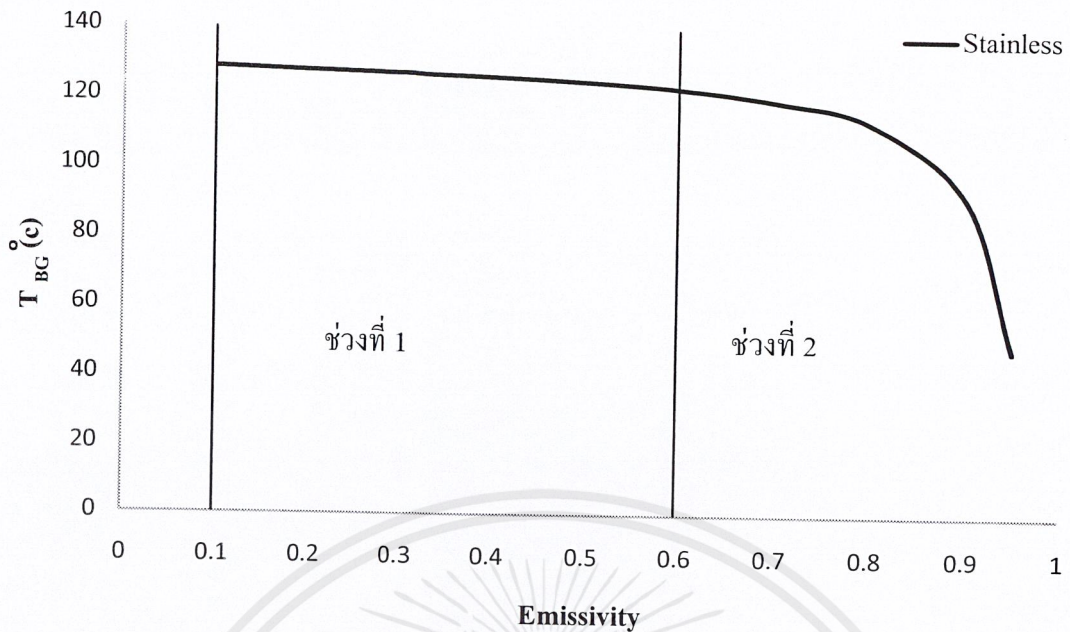


จ)

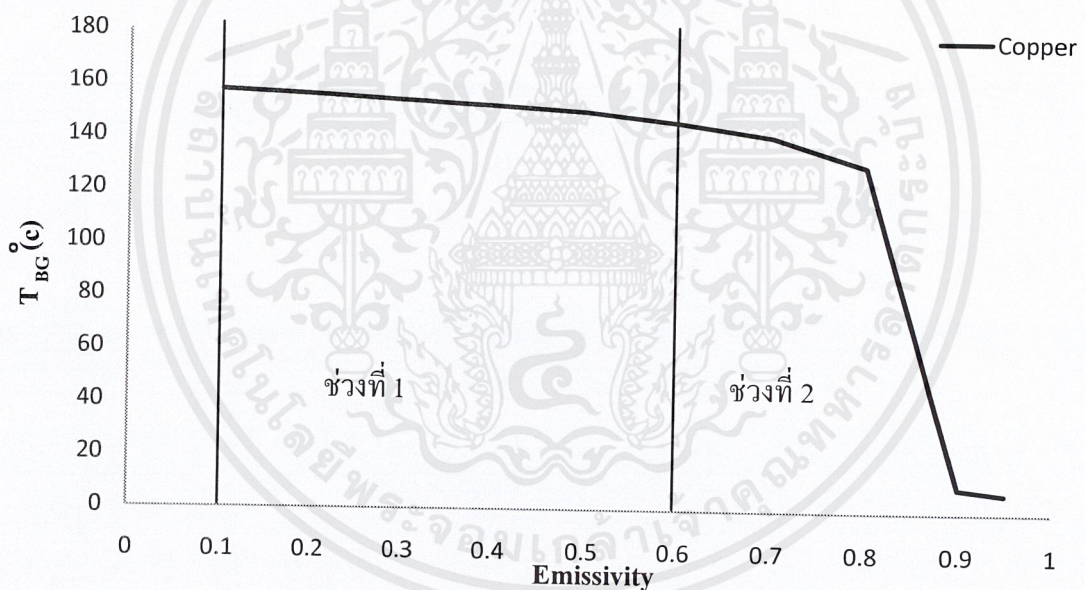


รูปที่ 4.1 (ต่อ) ภาพถ่ายทางความร้อนของวัสดุทางวิศวกรรมที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม ก) เหล็ก ข) สแตนเลส ค) อะลูมิเนียม ง) ทองแดง จ) ทองเหลือง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



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 ϵ มีค่าต่ำ T_{BG} จะมีค่าก่อนข้างคงที่ 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 ที่เป็นไปได้ของวัตถุมากเท่าใด จะยิ่งทำให้ T_{BG} มีค่าต่ำกว่าค่าที่แท้จริงมากขึ้นเท่านั้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาได้ว่าช่วงที่ค่า T_{BG} ลดลงอย่างรวดเร็ว (ช่วงที่ 2) เป็นช่วงที่ค่า ε อยู่นอกเหนือค่า ε ที่เป็นไปได้ของวัตถุ และเมื่ออุณหภูมิภายในตู้อบคงที่ (อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมคงที่) หรือสภาวะแวดล้อมรอบ ๆ วัตถุมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ค่า T_{BG} ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เกิดจากสภาวะแวดล้อมโดยรอบก็ควรมีค่าคงที่หรือมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากด้วยเช่นกัน

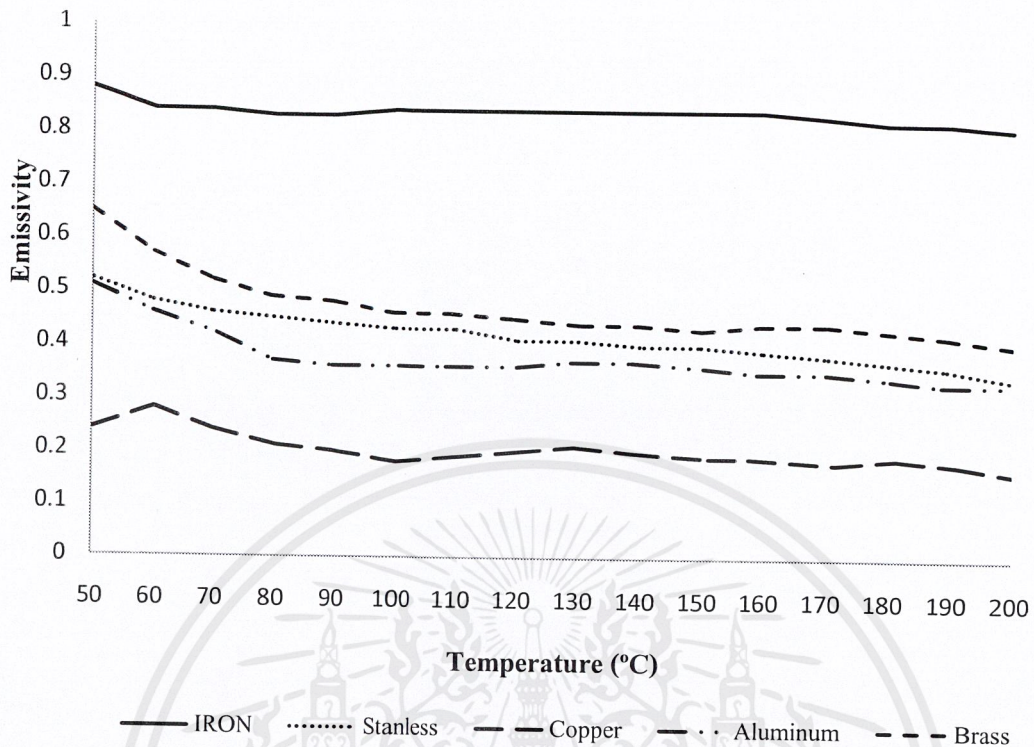
เมื่อได้ช่วงค่า ε ที่เป็นไปได้แล้ว จึงหาค่า T_{BG} เฉลี่ย ตลอดช่วงค่า ε ดังกล่าว (ทุก ๆ 0.1) เพื่อนำไปใช้ในการหาค่า ε ที่แท้จริงของวัตถุ โดยป้อนค่า T_{BG} เฉลี่ยให้กับกล่องและปรับ ε ที่กล่อง จนกระทั่งอุณหภูมิที่อ่านได้จากกล่องมีค่าเท่ากับอุณหภูมิที่อ่านได้จากเทอร์โมคัปเปิลดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ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

ตารางที่ 4.1 ค่า ε ของวัสดุทางวิศวกรรมที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



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.), Fogiel (1992.) และ Saravacos and Kostaropoulos (2002.) แต่อย่างไรก็ตามผลการทดลองของอะลูมิเนียมไม่สอดคล้องกับ Fraden (2010.) ซึ่งได้ค่า ϵ ค่อนข้างต่ำประมาณ 0.05-0.07 ผลการทดลองที่ได้แตกต่างจากค่าดังกล่าวอาจเป็นผลมาจาก

- ใช้เครื่องมือวัดค่า ϵ ที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน ช่วงความยาวคลื่นของรังสีอินฟราเรดที่อุปกรณ์รับไปจึงอาจมีค่าแตกต่างกัน ซึ่งโครงการวิจัยนี้ใช้กล้อง TI ที่สามารถตรวจจับรังสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อินฟราเรดได้ในช่วงความยาวคลื่น 8-14 μm ในขณะที่ Fraden (2010.) ไม่ได้ระบุช่วงความยาวคลื่นที่ตรวจจับ

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

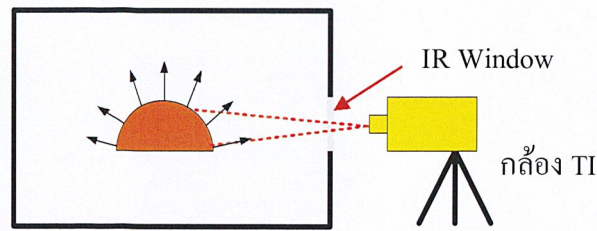
จากรูปที่ 4.4 พบว่าเมื่อพื้นผิวของวัสดุมีอุณหภูมิต่ำลง ค่า ϵ ของวัสดุจะมีค่าสูงขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิที่พื้นผิวของวัสดุสูงขึ้น ϵ จะมีค่าต่ำลง แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่พื้นผิวของวัสดุมีผลต่อค่า ϵ ของวัสดุ โดยวัสดุแต่ละชนิดมีแนวโน้มการลดลงของค่า ϵ ใกล้เคียงกัน

4.1.2 ค่า Emissivity ของขนมปังในระหว่างการอบ

4.1.2.1 ค่า Emissivity จากภาพถ่ายทางความร้อน

วัดค่า ϵ ของขนมปังในระหว่างการอบ โดยแบ่งช่วงการอบออกเป็น 3 ช่วง พิจารณาการแบ่งจากอุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปังเป็นหลัก ได้ค่า ϵ ของขนมปังอยู่ในช่วง 0.14-0.76 ซึ่งมีค่าต่ำกว่า ผลที่ได้จากการทดลองของ Rogers, et al., มปป. (พบว่า ϵ ของขนมปังตลอดช่วงการอบมีค่าอยู่ในช่วง 0.7-0.9) ซึ่งอาจเป็นผลมาสาเหตุหลายประการ เช่น

- การใช้กล้อง TI จับภาพที่ด้านข้างของขนมปังซึ่งมีลักษณะเป็นมุมโค้งดังแสดงในรูปที่ 4.5 (อ้างอิงจับภาพขนมปังจากมุมด้านบน) ดังนั้นรังสีอินฟราเรดที่ออกมาจากผิวขนมปังในมุมดังกล่าวและถูกกล้อง TI รับไปจึงมีค่าน้อยมาก เนื่องจากรังสีอินฟราเรดส่วนใหญ่จะแผ่ออกมาในทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิวของวัตถุ (Gruner, 2003) จึงอาจส่งผลให้ค่า ϵ ที่ได้จากการใช้กล้อง TI จับภาพจากทางด้านข้างขนมปังมีค่าค่อนข้างต่ำ
- โครงการวิจัยนี้ใช้กล้อง TI วัดอุณหภูมิของวัตถุผ่าน IR Window ดังนั้นรังสีที่ออกมาจากผิววัตถุบางส่วนอาจถูก IR Window กั้นไว้ กล้อง TI จึงได้รับรังสีอินฟราเรดเพียงบางส่วนเท่านั้น หรือรังสีอินฟราเรดที่กล้องรับไปอาจเป็นรังสีอินฟราเรดที่แผ่ออกมาจาก IR Window โดยตรงไม่ได้มาจากการแผ่รังสีของวัตถุที่ต้องการทราบค่า
- ในระหว่างการอบ ขนมปังมีการขึ้นฟู (ขนาดไม่คงที่) ทำให้มุมของผิวด้านข้างขนมปังมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา อีกทั้งโคที่นำมาอบในแต่ละครั้งมีขนาดไม่สม่ำเสมอ (ไม่สามารถควบคุมขนาดของขนมปังได้) ผลการทดลองที่ได้จึงแตกต่างจากค่าอ้างอิง



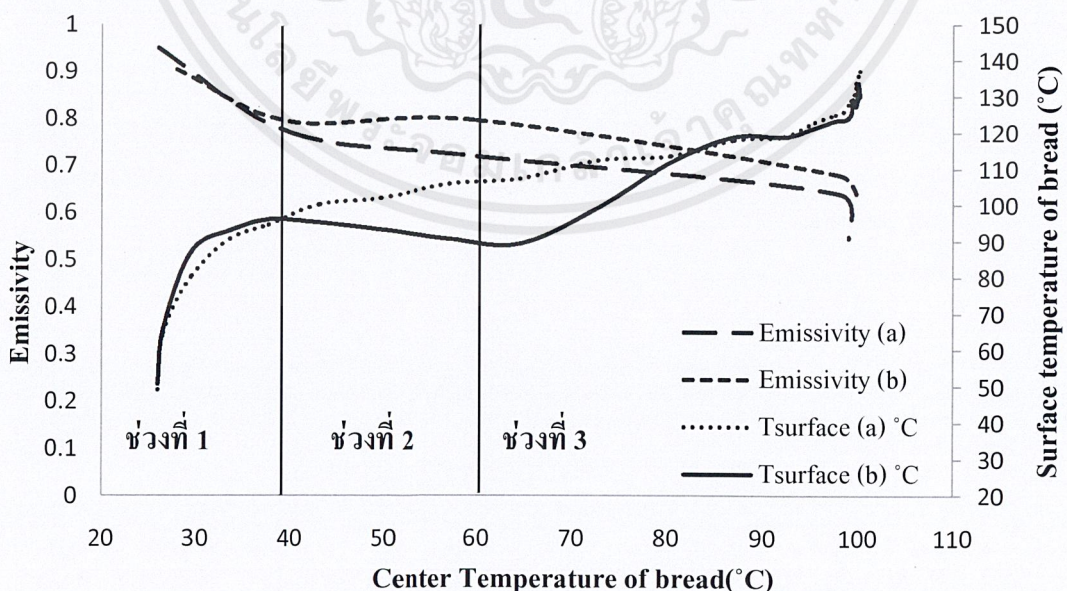
รูปที่ 4.5 แสดงลักษณะมุมมองด้านข้างของขนมปังที่อยู่ในพื้นที่การมองเห็นของกล้อง TI

อย่างไรก็ตามแม้ค่า ϵ ที่ได้จากการทดลองจะแตกต่างจากค่าอ้างอิงแต่แนวโน้มที่ได้จากการทดลองยังสามารถเชื่อถือได้ เนื่องจากวัตถุทุกชนิดใช้วิธีการวัดค่า ϵ แบบเดียวกัน และเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลองผ่านการสอบเทียบเกือบทุกชนิดแล้ว ผลการทดลองที่ได้แสดงในตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.6

ตารางที่ 4.2 ค่า ϵ ของขนมปังในช่วงอุณหภูมิต่างๆเมื่อใช้กล้อง TI ในการวัดค่า

ช่วงการอบ (ช่วงอุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปัง: °C)	Emissivity (a)	Emissivity (b)
25-40 (1)	0.770-0.950	0.793-0.903
40-60 (2)	0.720-0.770	0.793-0.797
60-98 คงที่ 10 นาที (3)	0.545-0.720	0.630-0.800

หมายเหตุ: (a) คือการอบขนมปังที่อุณหภูมิคงที่ 180°C (b) คือ การอบขนมปังโดยตั้งค่าอุณหภูมิภายในเตาอบในช่วงที่ 1 2 และ 3 ไว้ที่ 180°C 120°C และ 170°C

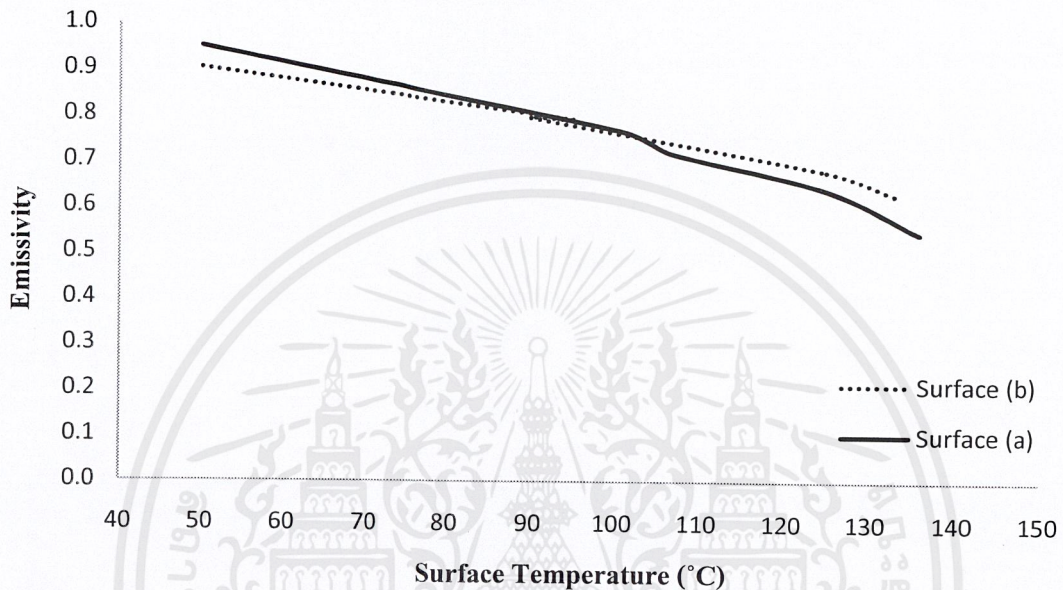


รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ϵ และอุณหภูมิที่ผิวกับอุณหภูมิกึ่งกลางขนมปังใน

ระหว่างการอบในช่วงอุณหภูมิต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ผิวขนมปังกับค่า ε ในรูปที่ 4.7 พบว่าเมื่ออบขนมปังที่อุณหภูมิกึ่งที่ 180°C กับอบขนมปังโดยการปรับอุณหภูมิภายในเตาอบในช่วงที่ 2 และ 3 เป็น 120°C และ 170°C ผลปรากฏว่าค่า ε ของขนมปังที่วัดได้มีค่าไม่แตกต่างกันมาก แสดงให้เห็นว่าไม่ว่าจะมีการปรับเปลี่ยนการตั้งค่าอุณหภูมิในเตาอบหรือไม่ จะมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่ออุณหภูมิที่ผิวใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ε กับอุณหภูมิที่ผิวขนมปังในระหว่างการอบ

4.1.2.2 ค่า Emissivity จาก IR sensor

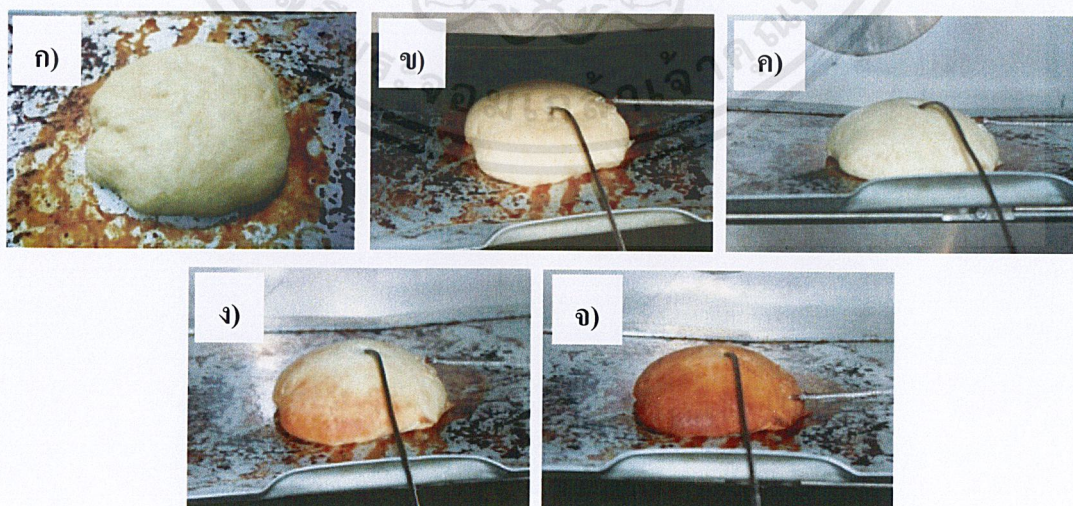
ผลการวัดค่า ε ของขนมปังในเตาอบโดยใช้ IR sensor ซึ่งเป็นการวัดค่า ε จากด้านบนของขนมปัง ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.3 อย่างไรก็ตามการหา ε โดยใช้ IR sensor จะไม่สามารถปรับค่า T_{BG} ได้เนื่องจาก IR sensor ไม่มีฟังก์ชันในการปรับค่าดังกล่าว ดังนั้นค่า ε ที่ได้จากวิธีนี้จะไม่ใช่ค่า ε ที่แท้จริงของขนมปัง แต่เป็นรังสีที่ทั้งหมดที่แผ่ออกมาจากวัตถุ (J) ซึ่งมีทั้งรังสีที่เกิดจากวัตถุเอง (E) และรังสีที่เกิดจากสิ่งแวดล้อมโดยรอบหรือวัตถุอื่นแผ่มากระทบและสะท้อนออกจากวัตถุ ($G_{\lambda,ref}$) (Incropera, et al.,2005)

จากผลการทดลองพบว่าค่า ε ของขนมปังในช่วงที่ 1 และ 2 มีค่าอยู่ในช่วงเดียวกัน ซึ่งแตกต่างจาก ε ในช่วงที่ 3 อย่างเห็นได้ชัด โดย ค่า ε ของขนมปังในช่วงที่ 1 และ 2 มีค่าเท่ากันคือ 0.95 ค่า ε ในช่วงที่ 3 มีค่าอยู่ในช่วง 0.81-0.95 เนื่องจากช่วงที่ 1 และ 2 อยู่ในช่วงเริ่มต้นของการอบ น้ำที่ผิวขนมปังมีอัตราการระเหยค่อนข้างต่ำ อุณหภูมิที่ผิวขนมปังจึงยังไม่สูงมาก จนกระทั่งในช่วงที่ 3 อุณหภูมิที่ผิวขนมปังสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด น้ำที่ผิวขนมปังส่วนใหญ่จึงเกิดการระเหยในช่วงนี้ ทำเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้ลักษณะพื้นผิวของขนมปังในช่วงที่ 3 แตกต่างจากช่วงที่ 1 และ 2 ส่งผลให้ค่า ε แตกต่างกันด้วย อาจกล่าวได้ว่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นและการระเหยของน้ำที่ผิวทำให้ขนมปังในแต่ละช่วงกลายเป็นวัตถุต่างชนิดกัน จึงทำให้ค่า ε ที่ได้แต่ละช่วงมีค่าแตกต่างกัน ซึ่งสอดคล้องกับค่ากล่าวของปริญา (2546) ที่ว่าวัตถุที่ต่างชนิดกันจะมีค่า ε แตกต่างกันขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัตถุ ลักษณะขนมปังที่อุณหภูมิต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ตัวอย่างภาพถ่ายทางความร้อนของขนมปังในระหว่างการอบแสดงในรูปที่ 4.9

ตารางที่ 4.3 ค่า ε ของขนมปังเมื่อใช้ IR sensor ในการวัดค่า

ช่วงที่	Emissivity	อุณหภูมิจากเทอร์โมคัปเปิล ($^{\circ}\text{C}$)		อุณหภูมิจาก IR sensor ($^{\circ}\text{C}$)
		อุณหภูมิกึ่งกลาง	อุณหภูมิที่ผิว	
1	0.95	31-40	98.0	110.8
2	0.95	41-50	99.5	113.9
	0.95	51-60	113.0	124.2
3	0.95	61-70	125.3	125.2
	0.94	71-80	126.0	126.1
	0.93	81-90	137.0	136.4
	0.87	91-100	140.0	139.0
	0.81	100-105	152.3	153.3

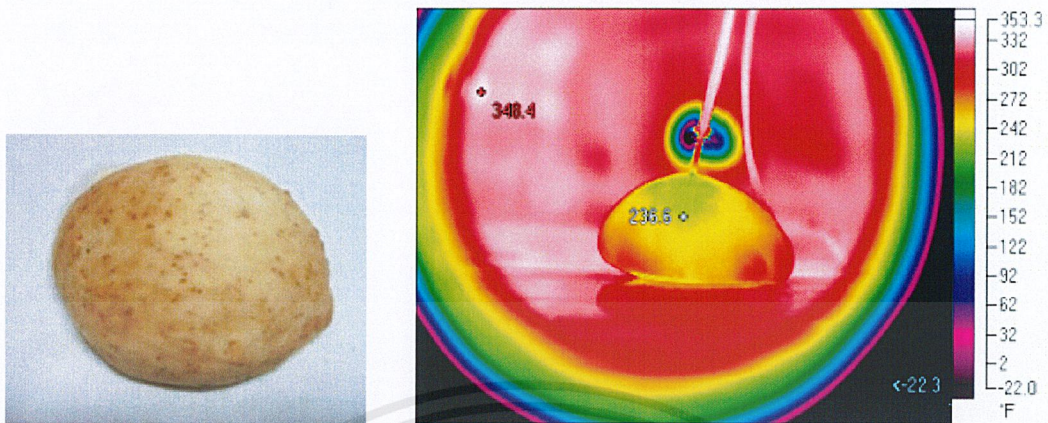


รูปที่ 4.8 ลักษณะขนมปังระหว่างการอบเมื่ออุณหภูมิกึ่งกลางขนมปังมีค่า ก) เริ่มต้น ข) 40°C

ค) 60°C ง) 98°C จ) ภายหลังการคงอุณหภูมิภายในเตาอบไว้ 10 นาที (สิ้นสุดกระบวนการอบ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการเรียนการสอน ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพถ่ายทางความร้อนของวัสดุทางอาหาร



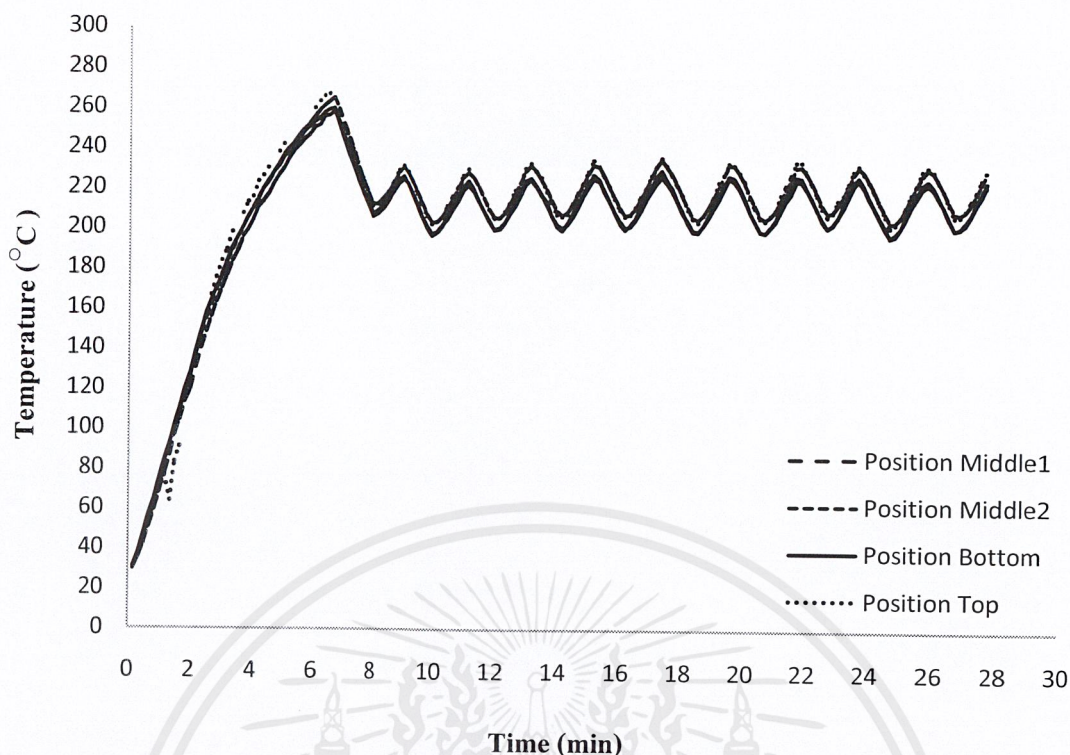
รูปที่ 4.9 ตัวอย่างภาพถ่ายทางความร้อนของขนมปังในระหว่างการอบ

4.2 การทดสอบการอบขนมปัง

4.2.1 คุณลักษณะของเตาอบ: ฮีตเตอร์รีซีการตัดต่ออุณหภูมิภายในเตาอบ

เมื่อให้พลังงานความร้อนแก่ฮีตเตอร์ (Heater) ภายในเตาอบจะทำให้ฮีตเตอร์มีอุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งมีเทอร์โมสแตท (Thermostat) เป็นอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ ทำหน้าที่ตัดต่อการจ่ายพลังงานให้กับฮีตเตอร์ โดยมีการตัดต่ออุณหภูมิในช่วง $\pm 10^{\circ}\text{C}$ ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.10 ซึ่งพบว่าหากตั้งค่าอุณหภูมิเตาไว้ที่ 210°C อุณหภูมิของอากาศภายในเตาจะมีค่า $210 \pm 10^{\circ}\text{C}$

เมื่อพิจารณากราฟที่ได้จากการทดลองพบว่าหากตั้งค่าอุณหภูมิภายในเตาอบไว้ที่ 210°C เตาอบจะใช้เวลาประมาณ 8-10 นาที ในการเข้าสู่สภาวะสมดุล ซึ่งเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะสมดุลขึ้นอยู่กับค่าอุณหภูมิภายในเตาอบ โดยหากตั้งอุณหภูมิไว้สูงเตาอบจะใช้เวลานานกว่าในการเข้าสู่สภาวะสมดุล แต่หากตั้งค่าอุณหภูมิไว้ต่ำเตาอบจะใช้เวลาเร็วกว่าในการเข้าสู่สภาวะสมดุล



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศภายในเตาอบเมื่อตั้งค่าอุณหภูมิเตาอบไว้ที่ 210°C

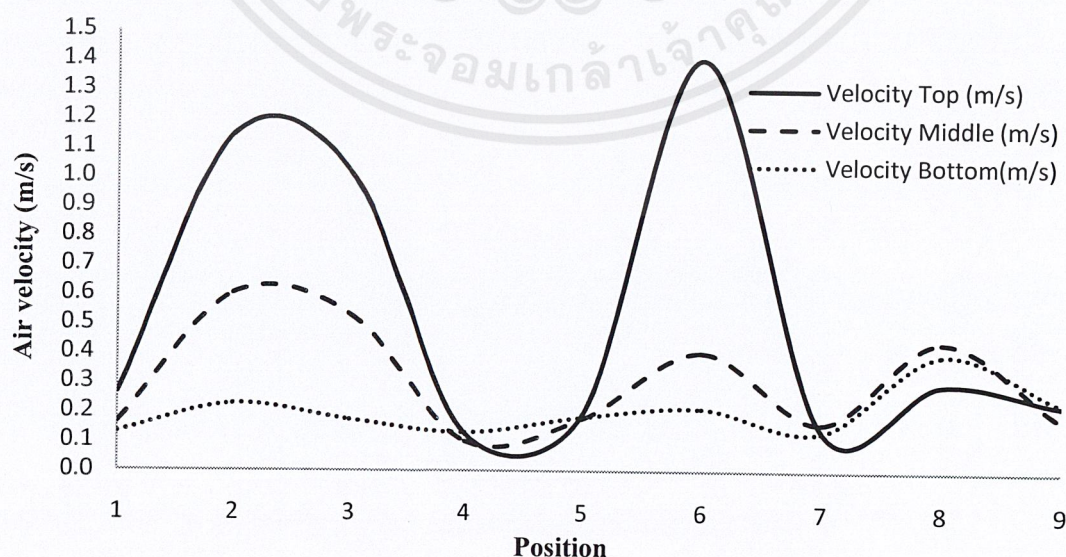
4.2.2 คุณลักษณะของเตาอบ: ความเร็วลมภายในเตาอบ

แบ่งพื้นที่ภายในเตาอบบริเวณเหนือถาดวางชิ้นไป ออกเป็น 3 แถว คือแถวนบน แถวกลาง และแถวล่าง เพื่อวัดความเร็วลม โดยแต่ละแถวมีการวัดความเร็วลมทั้งหมด 9 ตำแหน่ง ผลการทดลองพบว่าความเร็วลมเฉลี่ยและความแปรปรวนของความเร็วลมในแต่ละตำแหน่งมีค่าสูงสุดที่แถวนบน สาเหตุที่ความเร็วลมเฉลี่ยและความแปรปรวนในแต่ละตำแหน่งของแถวนบนมีค่าค่อนข้างสูง เนื่องจากช่องลมถูกติดตั้งไว้ที่บริเวณด้านบนของผนังเตาด้านขวา ซึ่งตรงกับบริเวณแถวนบนพอดี ทำให้ลมถูกเป่ามาที่แถวนบนโดยตรง อย่างไรก็ตามในการทดลองได้มีการวางโคไว้ที่ถาดวาง ดังนั้นลมร้อนที่สัมผัสกับโคหรือขนมปังโดยตรงคือลมร้อนบริเวณแถวกลางและแถวล่างซึ่งมีค่าความเร็วลมค่อนข้างใกล้เคียงกันและความแปรปรวนของความเร็วลมในแต่ละตำแหน่งไม่สูงมากนัก ดังแสดงในตาราง 4.4 และรูปที่ 4.11 ซึ่งความเร็วลมเฉลี่ยรวมของแถวกลางกับแถวล่างมีค่าอยู่ในช่วง 0.1-0.6 m/s โดยมีค่าเฉลี่ย 0.254 m/s ตำแหน่งการวัดและค่าความเร็วลมที่ตำแหน่งดังกล่าว แสดงในรูปที่ 4.12

ตารางที่ 4.4 ความเร็วเฉลี่ย (m/s) ของลมภายในเตาอบที่แถวและตำแหน่งต่างๆ

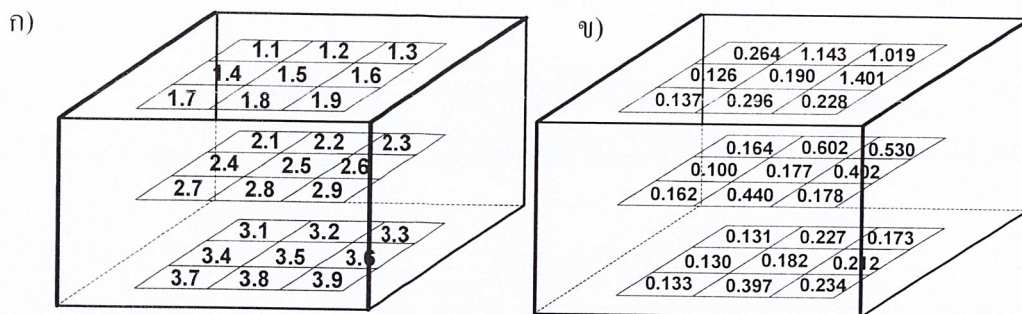
ตำแหน่งการวัดความเร็ว ลมในแต่ละแถว	ความเร็วลม (m/s)			
	แถวบน ¹	แถวกลาง ²	แถวล่าง ³	เฉลี่ย ⁴
1	0.264±0.184a	0.164±0.039a	0.131±0.017a	0.148±0.022a
2	1.143±0.247b	0.602±0.215b	0.227±0.072bc	0.414±0.129c
3	1.019±0.330b	0.530±0.546b	0.173±0.045ab	0.352±0.279c
4	0.126±0.029a	0.100±0.014a	0.130±0.009a	0.115 ±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 ความเร็วลมเฉลี่ยของแถวบนซึ่งห่างจากผนังเตาด้านบน 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 4.11 กราฟแสดงค่าความเร็วลมในแต่ละตำแหน่งของแถวบน แถวกลาง และแถวล่าง

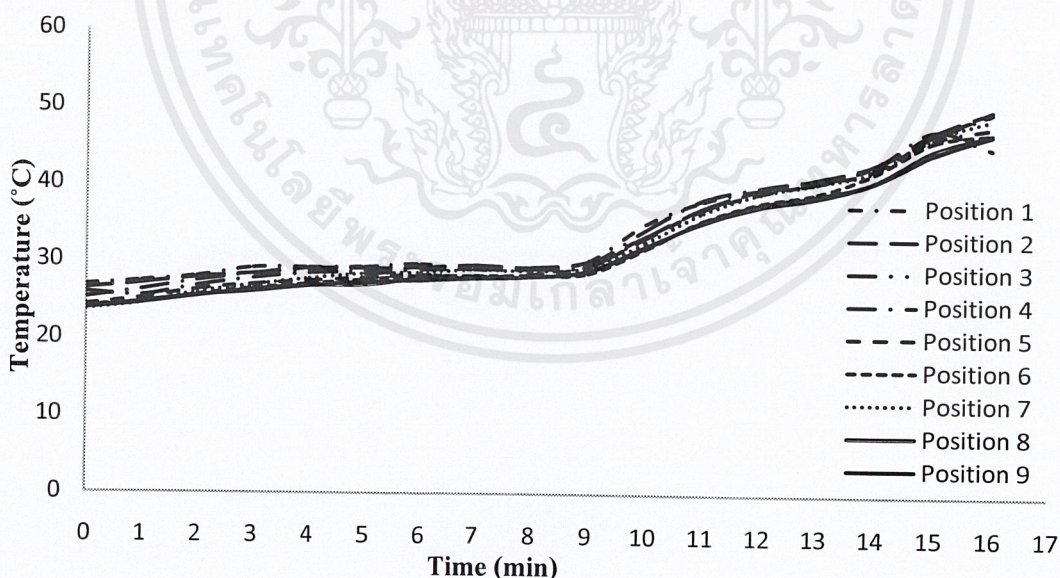
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 ก) ตำแหน่งการวัดความเร็วลมร้อนภายในเตาอบบริเวณเหนือถาดวาง ข) ค่าความเร็วลมที่ตำแหน่งต่างๆ เหนือถาดวาง

4.2.3 คุณลักษณะของเตาอบ: การกระจายอุณหภูมิภายในเตาอบ

ค่าการกระจายอุณหภูมิภายในเตาอบที่ตำแหน่งต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.13 จากรูปแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งมีค่าแตกต่างกันน้อยมาก ดังนั้นไม่ว่าจะวางโดไว้ในตำแหน่งใด ขนปังที่ได้จะมีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน ซึ่งในการทดลองได้วางโดไว้ที่ตำแหน่งที่ 5 เนื่องจากมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิก่อนข้างคงที่และแนวโน้มอุณหภูมิอยู่ในช่วงค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิทั้ง 9 ตำแหน่ง



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงการกระจายอุณหภูมิภายในเตาอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเปิดให้ความร้อนกับเตาอบ โดยให้ความร้อนกับฮีตเตอร์ทั้งด้านบนและด้านล่าง พัดลมจะถูกเปิดขึ้นมาโดยอัตโนมัติเพื่อให้ความร้อนในเตาอบกระจายอย่างทั่วถึง โดยความเร็วลมร้อนบริเวณที่สัมผัสกับขนมปัง โดยตรงมีค่าอยู่ในช่วง 0.1-0.6 เฉลี่ย 0.254 m/s โดยเมื่อเปิดให้ความร้อน เตาอบจะใช้ระยะเวลาช่วงหนึ่งเพื่อเข้าสู่สภาวะสมดุล (อุณหภูมิของอากาศภายในเตาอบคงที่) โดยระยะเวลาในการเข้าสู่สภาวะสมดุลจะขึ้นอยู่กับค่าอุณหภูมิให้กับเตาอบ โดยฮีตเตอร์ใช้สสารตัดต่ออุณหภูมิภายในเตาอบอยู่ในช่วง $\pm 10^{\circ}\text{C}$

4.2.4 การปรับอุณหภูมิอากาศภายในเตาอบในระหว่างการอบขนมปัง

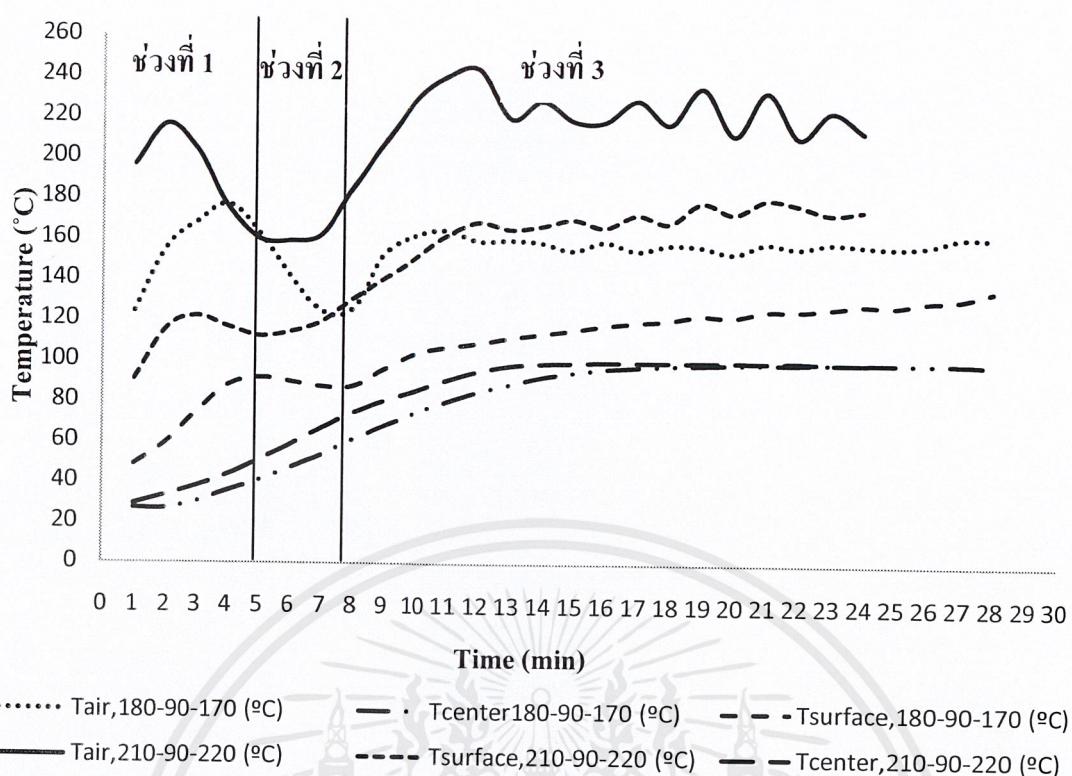
แบ่งช่วงอุณหภูมิอากาศภายในเตาอบในระหว่างการอบขนมปังออกเป็น 3 ช่วงโดยพิจารณาจากอุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปังและการแบ่ง stage การเกิดขนมปังออกเป็น 3 stage (Therdthai et al., 2002) โดยปรับลดอุณหภูมิในช่วงที่ 2 และปรับเพิ่มอุณหภูมิในช่วงที่ 3

4.2.4.1 ผลการปรับลดอุณหภูมิภายในเตาอบในแต่ละช่วงของการอบขนมปัง

จากการทดลองปรับลด-เพิ่มอุณหภูมิในระหว่างการอบขนมปังพบว่า

ช่วงที่ 1 เป็นช่วงที่อุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปังมีค่าตั้งแต่เริ่มต้นจนถึง 40°C การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในช่วงนี้จะเป็นไปอย่างช้าๆ ความร้อนในช่วงนี้ถูกนำไปใช้ในการทำให้เกิดปฏิกิริยาต่างๆ ของเอนไซม์ รวมทั้งเกิดการเจริญเติบโตของยีสต์ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้น ปริมาตรของโดจึงค่อยๆ เพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากอุณหภูมิในช่วงนี้มีค่าค่อนข้างต่ำ ความดันไอที่ผิวขนมปังจึงมีค่าต่ำด้วย ในช่วงนี้จึงยังไม่เกิดการระเหยของไอน้ำที่ผิวด้านในของขนมปัง

ดังนั้นความร้อนในช่วงนี้จึงยังไม่ส่งผลต่ออัตราการสูญเสียไอน้ำหนักของขนมปัง (Therdthai et al., 2002) จากรูปที่ 4.14 จะเห็นว่าอุณหภูมิ 210°C ทำให้อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ผิวขนมปังจากอุณหภูมิเริ่มต้นจนถึง 110°C สูงเกินไปส่งผลให้เกิดเปลือกขนมปัง (crust) ขึ้นเนื่องจากน้ำที่ผิวขนมปังระเหยอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ผิวขนมปังดำและไหม้ในขณะที่น้ำข้างในยังระเหยออกไม่หมด หรือเรียกว่าเกิดการไหม้ก่อนสุก เนื่องจาก crust ทำให้น้ำด้านในขนมปังไม่สามารถระเหยออกมาที่ผิวได้ (Therdthai et al., 2002)



**หมายเหตุ a คืออุณหภูมิในช่วงที่ 2 เป็น 90°C b คืออุณหภูมิในช่วงที่ 3 เป็น 170°C cคืออุณหภูมิในช่วงที่ 2 เป็น 210°C

รูปที่ 4.14 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอากาศในเตา (T_{air}) อุณหภูมิที่ผิวขนมปัง ($T_{surface}$) และอุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปัง (T_{center}) ที่อุณหภูมิอากาศในช่วงที่ 1 เป็น 180 °C และ 210°C

และเมื่อพิจารณาที่เส้นกราฟของอุณหภูมิ 180°C พบว่าอุณหภูมิที่ผิวขนมปังค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนมีค่าประมาณ 90-95°C ในช่วงสุดท้ายซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ทำให้ น้ำที่ผิวขนมปังเริ่มมีการระเหยกลายเป็นไอ โดยที่ยังไม่เกิด crust ป้องกันการระเหยออกของไอน้ำ ซึ่งจะส่งผลให้ไอน้ำที่อยู่ในชั้นถัดๆ ไปสามารถแทรกซึมออกมาที่ผิวขนมปังและระเหยออกจากผิวขนมปังได้เรื่อยๆ ดังนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสมในช่วงที่ 1 คือ 180°C ซึ่งช่วงที่ 1 ใช้เวลาในการอบคิดเป็น 21.4 % ของระยะเวลาที่ใช้ในการอบทั้งหมด (ระยะเวลาอบทั้งหมด 28 นาที)

ช่วงที่ 2 คือช่วงที่อุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปังมีค่าตั้งแต่ 40°C ถึง 60°C ในช่วงนี้ยังคงมีการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ ของเอนไซม์ และเกิดการเจริญเติบโตของยีสต์ ทำให้ปริมาตรของโคเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับช่วงที่ 1 แต่ในช่วงนี้ความดันไอที่ผิวเริ่มมีค่าสูงขึ้น ทำให้ช่วงนี้เริ่มมีผลต่อการสูญเสียน้ำหนักของขนมปัง (Therdthai et al., 2002)

อย่างไรก็ตามจากการทดลองการเพิ่มอุณหภูมิในช่วงนี้ ไม่มีผลต่อการสูญเสียน้ำหนักของขนมปัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงในตารางที่ 4.5 ซึ่งเป็นผลมาจากได้มีการปรับลดอุณหภูมิของอากาศภายในเตาอบ ในช่วงนี้ส่งผลให้อุณหภูมิที่ผิวขนมก่อนข้างคองที่ การระเหยออกของน้ำที่บริเวณผิวของขนมปังจึงคงที่หรือลดลงด้วย (Therdthai et al., 2002, 2004) อีกทั้งระยะเวลาที่ใช้ในช่วงนี้ค่อนข้างสั้น ซึ่งคิดเป็น 7.2 % ของระยะเวลาที่ใช้ในการอบทั้งหมด (28 นาที)

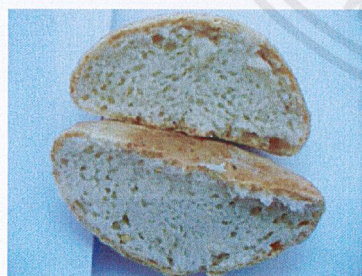
ความร้อนในช่วงที่ 2 มีผลต่อการสุกของขนมปัง ซึ่งหากอุณหภูมิต่ำเกินไปจะทำให้ความชื้นในขนมปังระเหยออกได้น้อย ทำให้เมื่อสิ้นสุดกระบวนการอบโคไม่สามารถเปลี่ยนเป็นขนมปังได้ทั้งหมดหรือขนมปังไม่สุกทั่วทั้งก้อน และหากอุณหภูมิสูงเกินไปจะทำให้เนื้อขนมปังแห้งเกินไป ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 3.2.3.4 ซึ่งจากการทดลองอุณหภูมิที่เหมาะสมในช่วงที่ 2 คือ 120°C เนื่องจากเป็นอุณหภูมิที่ทำให้ขนมปังสุกทั่วทั้งก้อน คือ ไม่มีโคเหลืออยู่ภายในขนมปัง ดังรูปที่ 4.15 จะเห็นว่าที่อุณหภูมิ 90°C และ 110°C เนื้อด้านในขนมปังยังมีโคปรากฏอยู่ (ลักษณะใสและเปียก)

ตารางที่ 4.5 ค่าการสูญเสียน้ำหนักของขนมปังหลังการอบเมื่ออุณหภูมิในช่วงที่ 2 มีค่าแตกต่างกัน

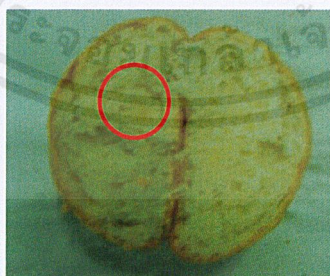
อุณหภูมิอากาศในเตาอบในช่วงที่ 2 (°C)	ค่าการสูญเสียน้ำหนัก (weight loss,%)
180-90-170	11.824 ±0.122b
180-110-170	10.533 ±0.767a
180-120-170	10.813 ±0.336a

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรภาษาอังกฤษตามหลังต่างกัน ในแนวตั้ง (a และ b) แสดงค่าความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)

ก)



ข)



ค)



หมายเหตุ: วงกลมสีแดงแสดงตำแหน่งที่เนื้อขนมปังไม่สุก

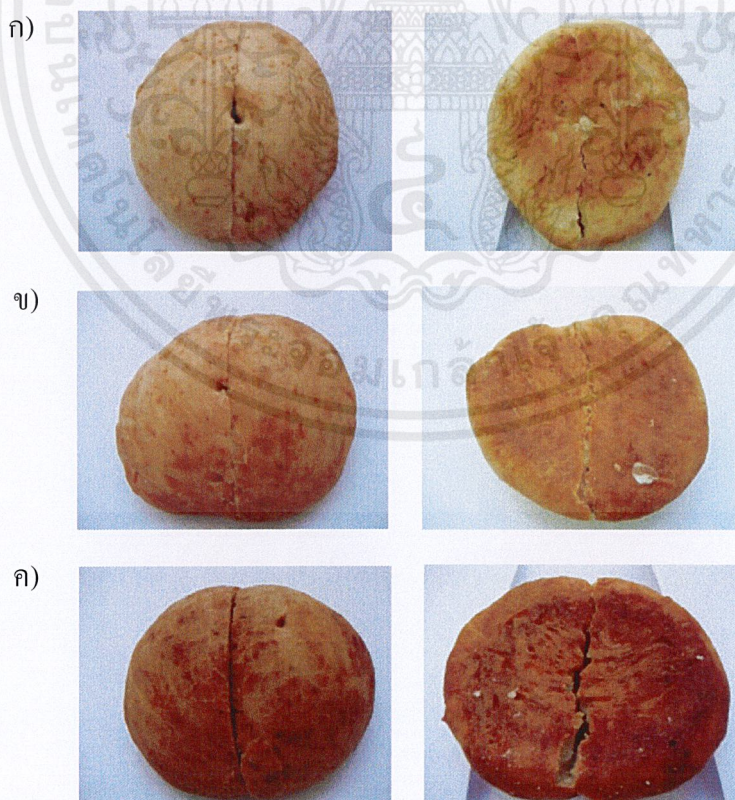
รูปที่ 4.15 ฝวภายในของขนมปัง เมื่อให้อุณหภูมิอากาศในช่วงที่ 2 เป็น ก) 90°C ข) 100°C ค) 110°C โดยอุณหภูมิในช่วงที่ 1 และ 2 เป็น 180°C และ 170°C

ช่วงที่ 3 คือช่วงที่อุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปังมีค่าตั้งแต่ 60°C จนถึง 98°C และคงอุณหภูมิไว้ที่ค่านี้เป็นเวลา 10 นาที ปฏิกริยาต่าง ๆ รวมทั้งการระเหยของความชื้น และการเกิด gelatinization จะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดขึ้นสูงสุดในช่วงนี้ที่อุณหภูมิประมาณ 98-99°C ในช่วงนี้ขนมปังจะเริ่มมีสีน้ำตาลอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล (Browning Reaction) โดยขนมปังจะเริ่มมีสีน้ำตาลปรากฏขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่ผิวมีค่าประมาณ 150-205°C เมื่ออุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปังมีค่าประมาณ 98- 99°C จึงคงอุณหภูมิของอากาศภายในเตาอบไว้เป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้ขนมปังมีสีน้ำตาลพอดีและเพื่อให้เกิดการระเหยของสารอินทรีย์ต่างๆ ทำให้เกิดกลิ่นหอมเฉพาะของขนมปัง (Therdthai et al., 2002)

จากการทดลองจึงได้อุณหภูมิที่เหมาะสมคือ 170°C เนื่องจากเมื่อสิ้นสุดกระบวนการอบ ผิวของขนมปังที่อุณหภูมิ 180°C และ 190°C มีสีคล้ำเกินไปดังรูปที่ 4.16 อีกทั้งเมื่อพิจารณาค่าการสูญเสียน้ำหนักของขนมปังหลังการอบพบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในช่วงที่ 3 ค่าการสูญเสียน้ำหนักจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากระยะเวลาของการอบในช่วงนี้ค่อนข้างนานคิดเป็น 71.4 % ของระยะเวลาที่ใช้ในการอบทั้งหมด (28 นาที) ใอน้ำส่วนใหญ่รวมทั้งสารอินทรีย์ต่างๆ จึงมีการระเหยในระหว่างช่วงนี้เป็นส่วนมาก ดังแสดงในตารางที่ 4.5

ดังนั้นอุณหภูมิภายในเตาอบที่เหมาะสมต่อการอบขนมปังในช่วงที่ 1 2 และ 3 ซึ่งทำให้ขนมปังที่ออกมาสุกทั้งก้อน สีพอดี ไม่คล้ำหรือสว่างเกินไป และมีการสูญเสียน้ำหนักต่ำคือ 180°C 120°C และ 170°C



รูปที่ 4.16 ผิวด้านนอกของขนมปัง เมื่อให้อุณหภูมิอากาศในช่วงที่ 3 เป็น ก) 170°C ข) 180°C ค)

190°C โดยอุณหภูมิในช่วงที่ 1 และ 2 เป็น 180°C และ 120°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4.2 เปรียบเทียบการอบขนมปังด้วยอุณหภูมิคงที่กับการอบขนมปังด้วยการปรับอุณหภูมิของอากาศภายในเตาอบ

เมื่อพิจารณาในรูปที่ 4.17 พบว่าเมื่อลดอุณหภูมิของอากาศภายในเตาอบในช่วงที่ 1 จาก 180°C เป็น 120°C ส่งผลให้อุณหภูมิที่ผิวของขนมปังลดลงและค่อนข้างคงที่ในช่วงหนึ่ง และจากการที่อุณหภูมิที่ผิวลดลงทำให้อุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปังเพิ่มขึ้นในอัตราที่ลดลง เมื่ออุณหภูมิที่กึ่งกลางมีค่าเป็น 60°C ได้มีการปรับอุณหภูมิของอากาศในเตาขึ้นเป็น 170°C อุณหภูมิที่ผิวจึงเริ่มปรับตัวเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ทำให้อุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปังเพิ่มขึ้นจนกระทั่งคงที่ที่อุณหภูมิประมาณ 98-99°C ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการปรับลด-เพิ่มอุณหภูมิของอากาศในเตาอบกระบวนการเกิดเจล (gelatinization) ยังคงเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์

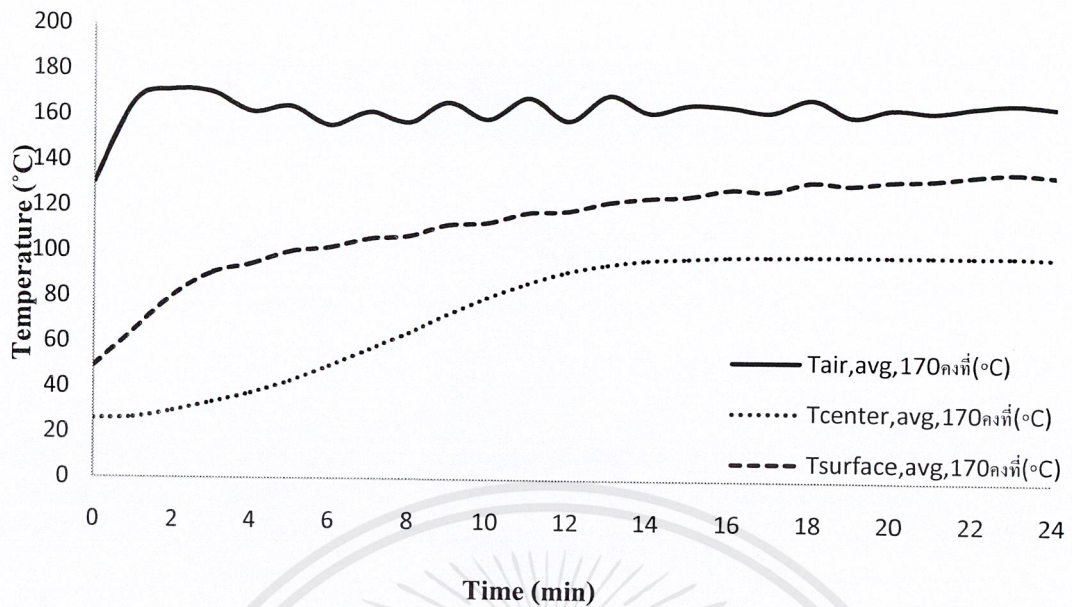
เมื่อพิจารณาอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปังพบว่าเมื่อมีการปรับลด-เพิ่มอุณหภูมิของอากาศในเตาอบทำให้อุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปังใน stage 1 และ 2 ลดลงด้วย ในขณะที่เมื่อให้อุณหภูมิคงที่ อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปังใน stage 1 และ 2 จะค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดยมีค่าเฉลี่ยเป็น 5.24°C/min และ 5.14°C/min ตามลำดับ และเมื่อมีการปรับลด-เพิ่มอุณหภูมิของอากาศในเตาอบ อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่กึ่งกลางโดยเฉลี่ยลดลงเป็น 4.515°C/min และ 4.215°C/min ตามลำดับ ซึ่งอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่เหมาะสมใน stage ที่ 1 และ 2 คือ 4.7°C/min และ 5.4°C/min ตามลำดับ (Therdthai, et al., 2002)

เมื่อพิจารณาการสูญเสียน้ำหนักของขนมปังในระว่างการอบพบว่าเมื่อมีการปรับลด-เพิ่มอุณหภูมิของอากาศในเตาอบทำให้อัตราการสูญเสียน้ำหนักลดลงด้วย โดยเมื่อให้อุณหภูมิคงที่ อัตราการสูญเสียน้ำหนักมีค่าเป็น 11.46 % โดยเฉลี่ย และเมื่อมีการปรับลด-เพิ่มอุณหภูมิ อัตราการสูญเสียน้ำหนักมีค่าเป็น 10.82 % โดยเฉลี่ย ซึ่งมีค่าลดลงประมาณ 1 % ดังแสดงในตารางที่ 4.6

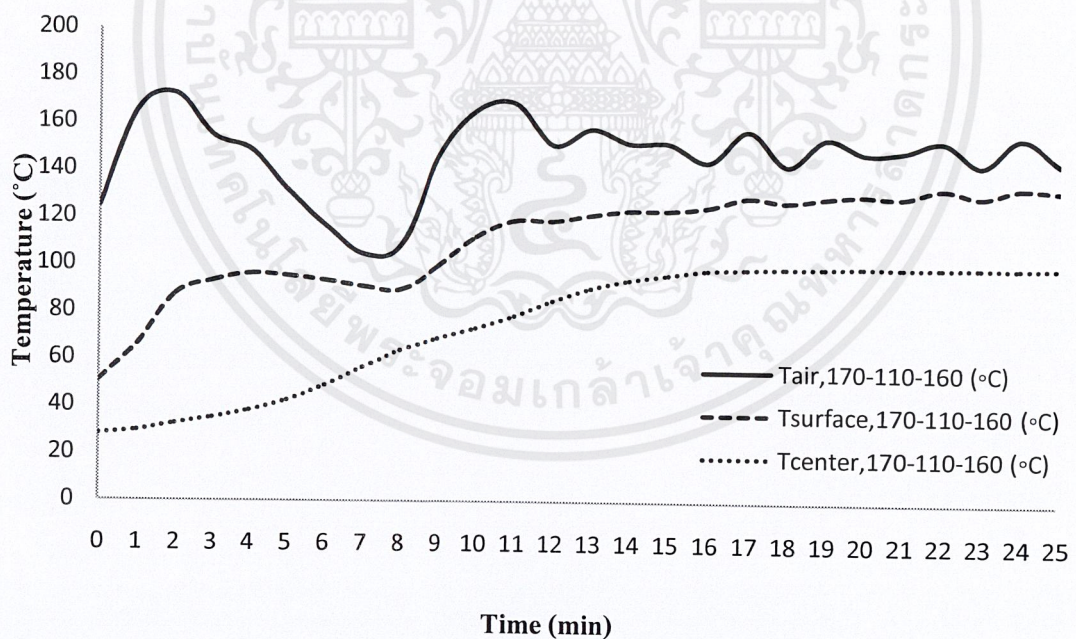
ตารางที่ 4.6 ค่าการสูญเสียน้ำหนักของขนมปังหลังการอบเมื่ออุณหภูมิในช่วงที่ 3 มีค่าแตกต่างกัน

อุณหภูมิอากาศในเตาอบในช่วงที่ 3 (°C)	ค่าการสูญเสียน้ำหนัก (weight loss,%)
180-120-170	10.813 ± 0.336a
180-120-180	12.564 ± 0.467c
180-120-190	11.850 ± 0.781b

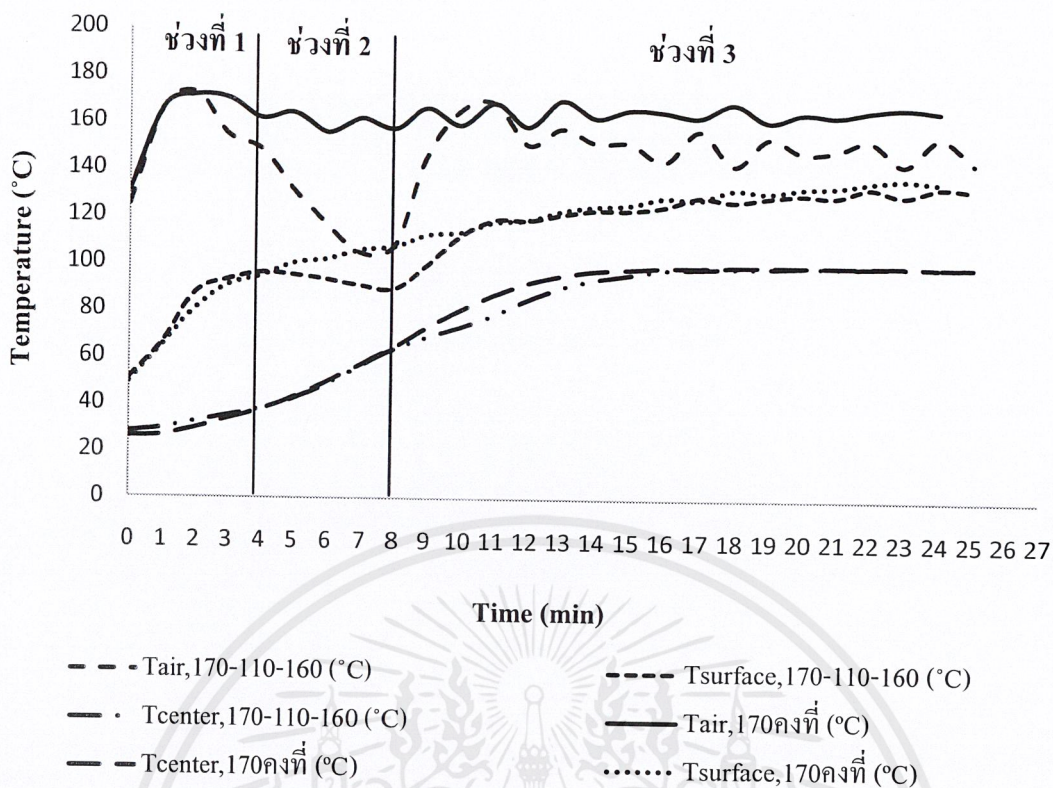
หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรภาษาอังกฤษตามหลังต่างกัน ในแนวตั้ง (a และ b) แสดงค่าความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอากาศในเตาอบ (T_{air}) อุณหภูมิที่ผิวขนมปัง ($T_{surface}$) และอุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปัง (T_{center}) เมื่อให้อุณหภูมิของอากาศภายในเตาคงที่ที่ 180°C



รูปที่ 4.18 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศภายในเตาอบ (T_{air}) อุณหภูมิที่ผิว ($T_{surface}$) และอุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปัง (T_{center}) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอากาศในช่วงที่ 2 และ 3 จาก 180°C เป็น 120°C และ 170°C ตามลำดับ



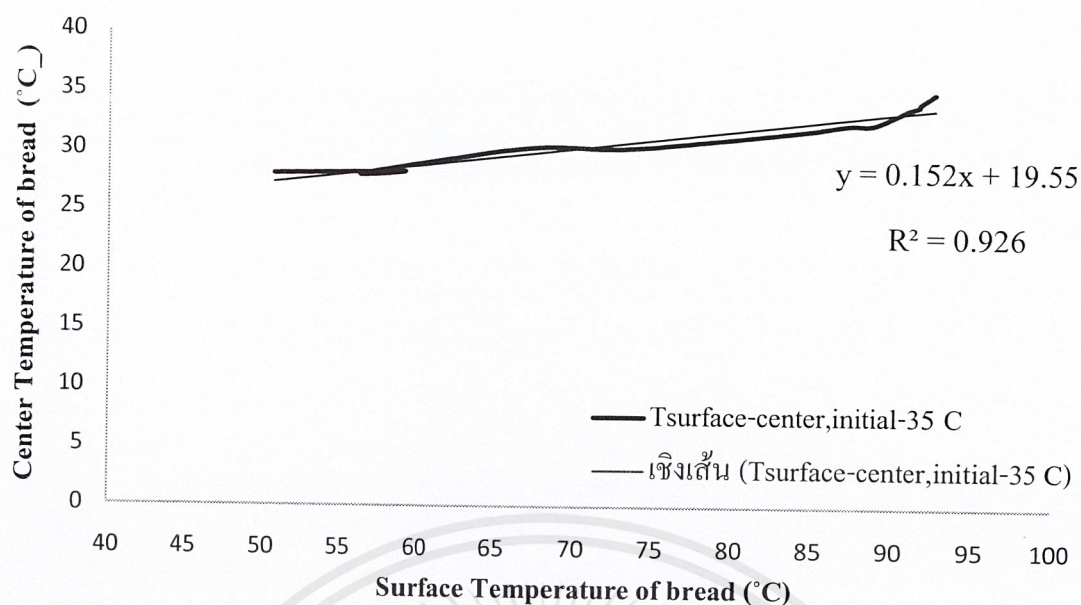
รูปที่ 4.19 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศภายในเตาอบ (Tair) อุณหภูมิที่ผิว (Tsurface) และอุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปัง (Tcenter) เมื่อให้อุณหภูมิอากาศคงที่ที่ 170°C และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอากาศในช่วงที่ 1 2 และ 3 เป็น 180°C 120°C และ 170°C

4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ผิวกับอุณหภูมิกึ่งกลางขนมปังในระหว่างการอบ

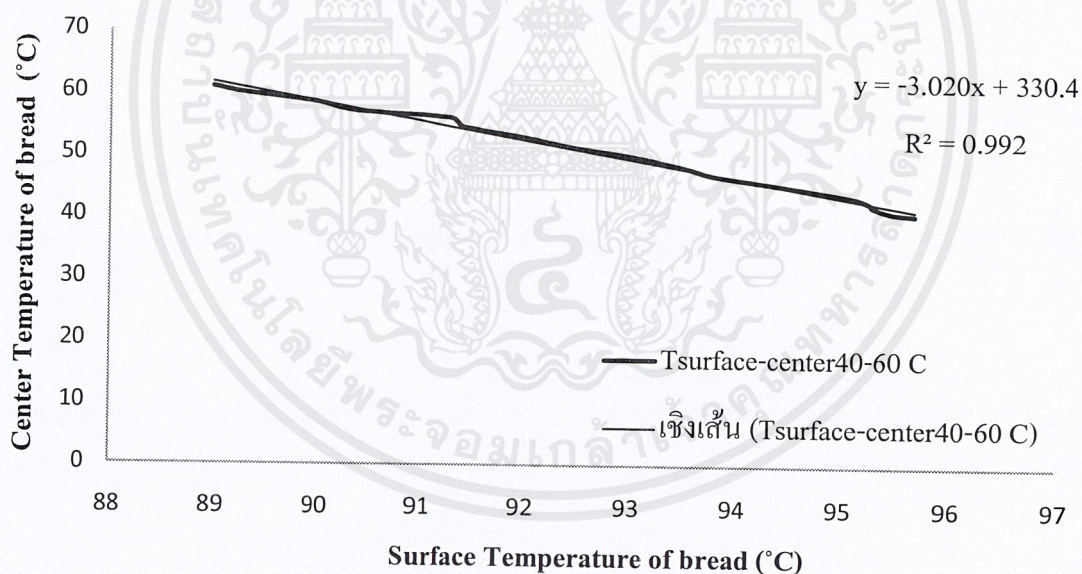
เนื่องจากการวัดอุณหภูมิจากการแผ่รังสีอินฟราเรดของวัตถุเป็นการวัดอุณหภูมิที่ผิววัตถุเท่านั้น ในขณะที่คุณสมบัติต่างๆ ของขนมปังในระหว่างการอบขึ้นอยู่กับอุณหภูมิกึ่งกลางขนมปังเป็นสิ่งสำคัญ ซึ่งกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ผิวกับอุณหภูมิกึ่งกลางของปังที่วัดค่าอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิลเปิดแสดงในรูปที่ 4.20-4.22 และสมการความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ผิวขนมปัง (x) กับอุณหภูมิกึ่งกลางขนมปัง (y) ของช่วงต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 สมการความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ผิวและที่กึ่งกลางขนมปัง และค่าร้อยละความเชื่อมั่น (R²) ของสมการในช่วงอุณหภูมิต่างๆ

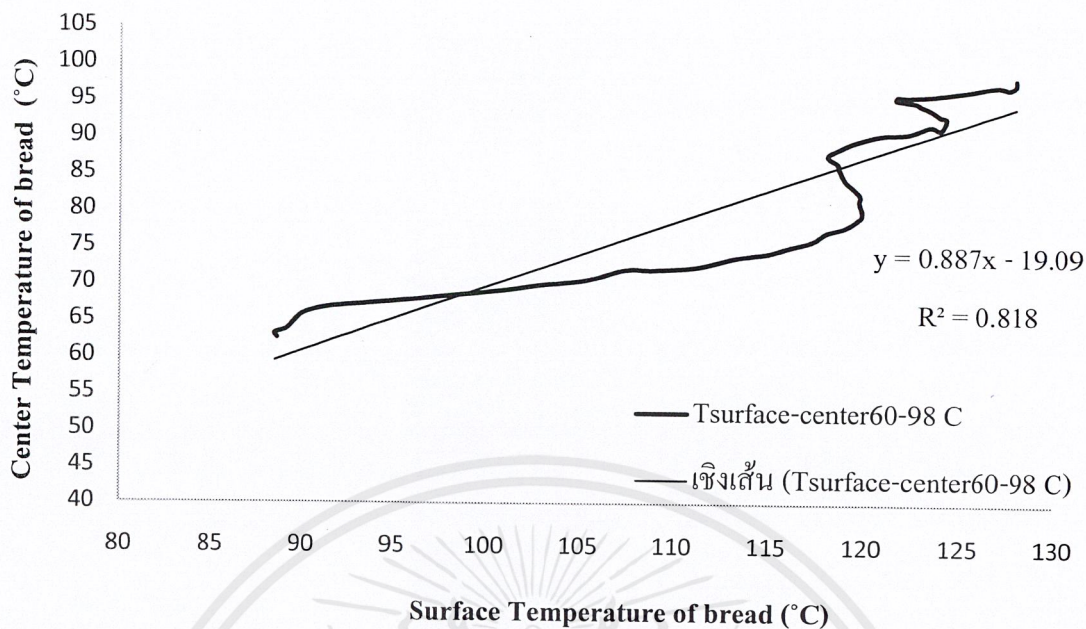
ช่วงการอบ (ช่วงอุณหภูมิกึ่งกลางขนมปัง: °C)	สมการความสัมพันธ์	%ความผิดพลาด (R ²)
(1) เริ่มต้น - 40	$y = 0.152x + 19.55$	0.926
(2) 40 - 60	$y = -3.020x + 330.4$	0.992
(3) 60 - 98	$y = 0.887x - 19.09$	0.818



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ผิวกับอุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปังในช่วงที่ 1 เมื่ออุณหภูมิที่กึ่งกลางเริ่มต้นจนถึง 40 °C



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ผิวกับอุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปังในช่วงที่ 2 เมื่ออุณหภูมิที่กึ่งกลางมีค่า 40–60°C



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ผิวกับอุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปังในช่วงที่ 3 เมื่ออุณหภูมิที่กึ่งกลางมีค่า 60–98°C

4.4 การทดสอบการอบขนมปังด้วยการควบคุมอุณหภูมิที่ผิวโดยใช้ IR sensor

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

- ในการทดสอบการวัดอุณหภูมิเหล็กด้วย IR sensor เพื่อจำลองกระบวนการอบขนมปังซึ่งเป็นช่วงที่มีอุณหภูมิก่อนข้างสูง (นอกย่านการใช้งานของ IR sensor) จึงต้องติดตั้ง IR sensor ไว้ด้านบนนอกเตาอบ ทำให้จุดวัดอุณหภูมิ (spot) บนผิววัตถุที่ IR sensor รับไปมีขนาดค่อนข้างใหญ่ อาจทำให้ IR sensor รับอุณหภูมิจากจุดอื่นภายนอกจุดใจเข้าไปด้วย
- IR sensor รุ่นที่ใช้ในการทดลองไม่สามารถปรับค่า T_{BG} ของสิ่งแวดล้อมได้ ส่งผลให้รังสีอินฟราเรดที่ IR sensor รับไม่ได้มีเพียงรังสีอินฟราเรดที่มาจากตัววัตถุเท่านั้นแต่ยังมีรังสีอินฟราเรดที่มาจากวัตถุอื่นหรือสิ่งแวดล้อมรอบ ๆ ด้วย

เมื่อพิจารณาการประยุกต์ใช้ IR sensor สำหรับการวัดอุณหภูมิที่ผิวขนมปังในระหว่างกระบวนการอบขนมปังเพื่อนำอุณหภูมิผิวที่ได้เป็นค่าอินพุตสำหรับควบคุมการเพิ่ม-ลดอุณหภูมิภายในเตา พบว่าค่าความผิดพลาดของอุณหภูมิที่อ่านได้จาก IR sensor ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ดังกล่าว เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยังอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ดังนั้นจึงสามารถประยุกต์ใช้ IR sensor ดังกล่าวกับกระบวนการอบขนมปังได้

ทดสอบความถูกต้องของการวัดอุณหภูมิขนมปังในระหว่างกระบวนการอบ โดยป้อนค่า ϵ ที่ได้จากรายที่ 4.3 ให้กับ IR sensor และเปรียบเทียบอุณหภูมิผิวขนมปังที่วัดได้จากเทอร์โมคัปเปิลพบว่าอุณหภูมิที่ผิวขนมปังที่วัดได้จาก IR sensor กับอุณหภูมิที่ผิวขนมปังที่วัดได้จากเทอร์โมคัปเปิลมีค่าใกล้เคียงกัน จากนั้นนำอุณหภูมิผิวที่ได้ไปใช้ในการทำนายหาอุณหภูมิกึ่งกลางขนมปังโดยใช้สมการความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ผิวกับอุณหภูมิกึ่งกลางขนมปัง เปรียบเทียบอุณหภูมิกึ่งกลางขนมปังที่วัดได้จากเทอร์โมคัปเปิล

ในระหว่างกระบวนการอบเมื่อวัตถุที่อยู่ในเตาอบได้รับความร้อน 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 ตลอดเวลาเป็นไปได้ยากมากเนื่องจากวัตถุมีการเคลื่อนที่ตลอดเวลา 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 ($G_{\lambda, \text{ref}}$) การวัดค่า ϵ ที่แท้จริงของวัตถุจึงต้องกำหนดค่าอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมโดยวัตถุ (T_{BG}) ให้กับกล้อง TI ด้วย (IR sensor ไม่มีฟังก์ชันการรับค่า T_{BG}) ซึ่งกล้องจะนำค่า T_{BG} ดังกล่าวไปชดเชยค่า $G_{\lambda, \text{ref}}$ 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}) มุมและความยาวของรังสีอินฟราเรดที่แผ่ออกจากผิวของวัตถุ 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 ซึ่งเป็นผลมาจากวัสดุแต่ละชนิดมีความสามารถในการแผ่รังสีที่ต่างกัน โดยวัสดุที่มีความสามารถในการแผ่รังสีสูงจะมีค่า ϵ สูง ส่วนวัสดุที่มีความสามารถในการแผ่รังสีต่ำจะมีค่า ϵ ต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) ค่า ε ของขนมปังระหว่างการอบ เมื่อวัดด้วย TI เปรียบเทียบระหว่างการอบด้วยอุณหภูมิคงที่ และการอบ โดยปรับเปลี่ยนอุณหภูมิเตอบในระหว่างการอบมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกันเมื่ออุณหภูมิที่ผิวใกล้เคียงกัน โดยช่วงที่ 1 ค่า ε อยู่ในช่วง 0.770-0.950 อุณหภูมิผิว 40°C - 90°C ช่วงที่ 2 ค่า ε อยู่ในช่วง 0.720-0.797 อุณหภูมิผิว 90°C - 100°C และช่วงที่ 3 ค่า ε อยู่ในช่วง 0.545-0.800 อุณหภูมิผิว 100°C - 120°C จึงพิจารณาได้ว่าเมื่ออุณหภูมิที่ผิวของขนมปังมีค่าเท่ากับหรือใกล้เคียงกันค่า ε จะมีค่าใกล้เคียงกันด้วย

4) ค่า ε ของขนมปังระหว่างการอบ เมื่อวัดด้วย IR sensor ในช่วงที่ 1 และ 2 มีค่าเท่ากันคือ 0.95 ส่วนช่วงที่ 3 ค่า ε อยู่ในช่วง 0.81-0.95 แต่เนื่องจาก IR sensor รับรังสีทั้งหมดที่แผ่ออกจากวัตถุไป (E และ $G_{\lambda, \text{ref}}$) ซึ่ง IR sensor ไม่สามารถกำหนดค่า T_{BG} เพื่อชดเชยค่า $G_{\lambda, \text{ref}}$ ที่เกิดจากสิ่งแวดล้อมภายนอกได้ ดังนั้นค่า ε ที่ได้จาก IR sensor จึงไม่ใช่ค่า ε ที่แท้จริงของวัตถุ

5) สามารถประยุกต์ใช้ IR sensor วัดอุณหภูมิที่ผิวของขนมปังในระหว่างกระบวนการอบขนมปัง และใช้อุณหภูมิผิวที่ได้เป็นตัวแปรอินพุตสำหรับควบคุมอุณหภูมิของเตอบได้ โดยติดตั้ง IR sensor ไว้ด้านบนเตอบขนาดเล็กวัดอุณหภูมิที่ผิวเพื่อทำนายอุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปัง สรุปการทดลองเพื่อนำ IR ไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการอบขนมปังได้ดังนี้

5.1) เตอบที่ใช้ในการทดลอง มีค่าความเร็วลมอยู่ในช่วง 0.1-0.6 m/s เฉลี่ย 0.254 m/s โดยเมื่อเปิดให้ความร้อน เตอบจะใช้ระยะเวลาช่วงหนึ่งเพื่อเข้าสู่สภาวะสมดุล (อุณหภูมิของอากาศภายในเตอบคงที่) โดยระยะเวลาในการเข้าสู่สภาวะสมดุลจะขึ้นอยู่กับค่าอุณหภูมิให้กับเตอบ ค่าฮีสเทอรีซิสการตัดต่ออุณหภูมิภายในเตอบมีค่าอยู่ในช่วง $\pm 10^{\circ}\text{C}$ การกระจายอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งภายในเตอบมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน

5.2) เมื่อมีการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิเตอบในช่วงที่ 2 และ 3 จาก 180°C เป็น 120°C และ 170°C ตามลำดับพบว่าเมื่อสิ้นสุดกระบวนการอบขนมปังยังคงสุกทั้งก้อน มีสีพอดีและมีการสูญเสียน้ำหนักภายหลังการอบลดลงประมาณ 1% เมื่อเปรียบเทียบกับกรอบโดยให้อุณหภูมิคงที่ที่ 180°C

5.3) สามารถใช้ IR sensor วัดอุณหภูมิที่ผิวของขนมปังเพื่อใช้เป็นตัวแปรอินพุตสำหรับควบคุมอุณหภูมิของเตอบได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

เพื่อให้ได้ค่า ϵ ที่ถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น

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

2. ในการหาค่า ϵ ของขนมปังควรมีการศึกษาคุณสมบัติอื่น ๆ ของโดหรือขนมปังประกอบ เช่น คุณสมบัติความขรุขระ หรือความมันวาวของผิวขนมปัง เป็นต้น การวัดค่า ϵ ควรวัดจากมุมด้านบนของขนมปัง (ไม่ควรวัดจากมุมด้านข้าง) เนื่องจากด้านข้างขนมปังมีลักษณะเป็นมุมโค้งทำให้รังสีอินฟราเรดที่แผ่ออกมาจากและถูกกล้อง TI หรือ IR sensor รับไปมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับด้านบน อีกทั้งระหว่างการอบ ขนมปังมีการขึ้นฟูหรือพอง (ขนาดไม่คงที่) ทำให้มุมของผิวด้านข้างขนมปังมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา จึงอาจส่งผลให้พื้นที่การรับรังสีอินฟราเรดจากขนมปังของกล้อง หรือ IR sensor มีการเปลี่ยนแปลงด้วย

3. การทดสอบเตาอบควรมีการเปรียบเทียบอุณหภูมิของวัตถุที่อ่านได้จาก IR sensor กับอุณหภูมิที่อ่านได้จากเทอร์โมคัปเปิลที่ผ่านการสอบเทียบ เพื่อให้มั่นใจได้ว่าอุณหภูมิที่อ่านได้จาก IR sensor คืออุณหภูมิที่แท้จริงของวัตถุ และควรมีการหาค่าการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นกับโดหรือขนมปังภายในเตาอบในช่วงต่างๆ เพื่อนำไปใช้ในการหาสมการที่แท้จริงในการทำนายอุณหภูมิกึ่งกลางขนมปังจากอุณหภูมิที่ผิว

4. การประยุกต์ใช้ IR sensor ไม่เหมาะกับกระบวนการอบแบบต่อเนื่อง (ในกรณีที่คุณสมบัติของวัตถุมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องในระหว่างกระบวนการผลิต) เนื่องจากต้องมีการป้อนค่า ϵ ให้ IR sensor ตลอดเวลา แต่ IR sensor เหมาะกับการประยุกต์ใช้งานทางด้านการตรวจสอบคุณภาพผลิตภัณฑ์ งานวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ ซึ่งมีลักษณะการทำงานแบบเป็นกะ รวมไปถึงการตรวจสอบการทำงานของเครื่องจักรอุปกรณ์เพื่อซ่อมบำรุงมากกว่า

บรรณานุกรม

จิตรณา แจ่มเมฆ และอรอนงค์ นัยวิกุล. 2544 **เบเกอริเทคโนโลยีเบื้องต้น**. พิมพ์ครั้งที่ 6. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ประวิทย์ วัฒนากร. 2553. **กล้องถ่ายภาพความร้อนบอกที่ซ่อนอุณหภูมิต**. [Online]. Available : <http://www.vcharkarn.com/varticle/39579>

มนตรี พิรุณเกษตร. 2548. **การถ่ายเทความร้อน ฉบับเตรียมสอบและเสริมประสบการณ์**. พิมพ์ครั้งที่ 4 กรุงเทพฯ : วิทย์พัฒน.

วราวุฒิ ครูส่ง และรุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต. 2532 **เทคโนโลยีการหมักในอุตสาหกรรม**. กรุงเทพฯ : โอเดียนสโตร์. หน้า 141-143

ศิริลักษณ์ สีนชวาลัย และกมลวรรณ แจ่มชัด. **วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการทำงานมอบ I เล่ม 1 : วิทยาศาสตร์การทำงานมอบ.เอกสารการเรียนการสอนการทำงานมอบในระดับปริญญาวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) และระดับปริญญาตรี ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. ปทุมธานี. ; 2544**

เอกชัย พุฒทิวังศ์ และอริคม มาน้อย. **Radiation Thermometry**. กรุงเทพฯ : ฝ่ายวิทยาอุณหภูมิตสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 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
- 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ

ตารางที่ ข.1 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของการทดสอบหาความเร็วลมเฉลี่ยที่ตำแหน่งบนของเตาอบ

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	18.221	8	2.278	70.113	.000
Within Groups	2.339	72	.032		
Total	20.560	80			

ตารางที่ ข.2 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของการทดสอบหาความเร็วลมเฉลี่ยที่ตำแหน่งกลางของเตาอบ

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	2.533	8	.317	6.283	.000
Within Groups	3.628	72	.050		
Total	6.162	80			

ตารางที่ ข.3 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของการทดสอบหาความเร็วลมเฉลี่ยที่ตำแหน่งล่างของเตาอบ

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	2.533	8	.317	6.283	.000
Within Groups	3.628	72	.050		
Total	6.162	80			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.4 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของการทดสอบหาความเร็วลมเฉลี่ยที่ตำแหน่งบนและกลางของเตาอบ

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	1.034	8	.129	8.974	.000
Within Groups	1.037	72	.014		
Total	2.070	80			

ตารางที่ ข.5 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของการหาค่าการสูญเสียน้ำหนักของขนมปังหลังการอบเมื่ออุณหภูมิในช่วงที่ 2

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	3.626	2	1.813	7.132	.017
Within Groups	2.034	8	.254		
Total	5.661	10			

ตารางที่ ข.6 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของการหาค่าการสูญเสียน้ำหนักของขนมปังหลังการอบเมื่ออุณหภูมิในช่วงที่ 3

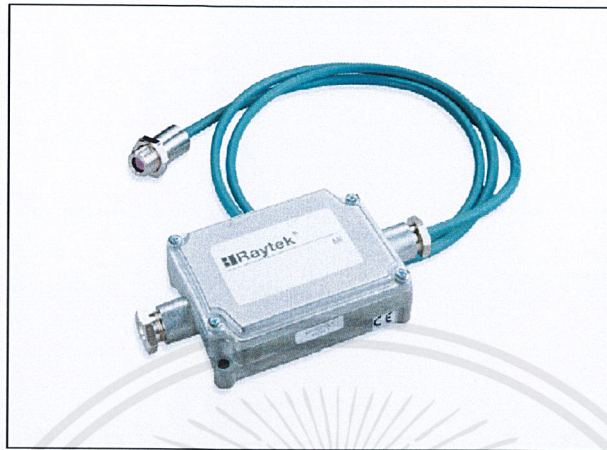
ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	4.647	2	2.324	20.703	.002
Within Groups	.673	6	.112		
Total	5.320	8			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.

IR sensor



Measurement Specifications

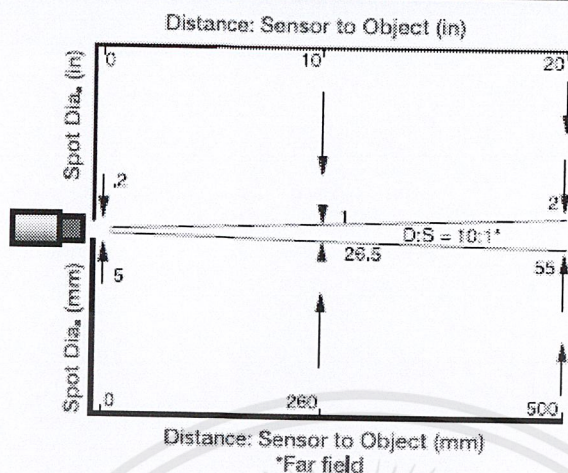
Spectral Response Model	LT (Low Temp.)	8 to 14 microns
Optical Resolution:	LT	10:1
Temperature Range Model	LT	-40°C to 600°C (-40°F to 1112°F); -25°C to 600°C for J-thermocouple output
System Accuracy:		±1% of reading or ±1°C, whichever is greater Thermocouple output accuracy ±1% of reading or ±2.5°C, 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

รูปที่ ค.1 IR sensor และ คุณสมบัติเฉพาะของ IR sensor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Nominal Optical Specifications



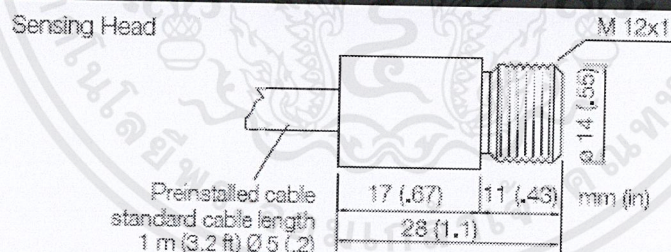
D:S is the optical resolution expressed as a ratio of the distance to the measurement spot divided by the diameter of the spot.

Optical resolution for the MI is 10:1.

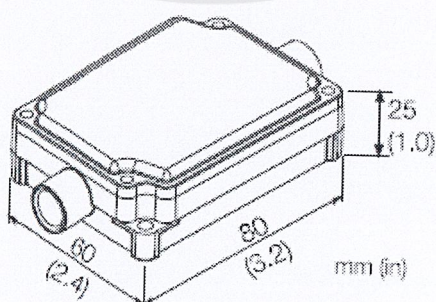
Nominal spot size based on 90% energy.

รูปที่ ค.2 คุณสมบัติการมองเห็นของ IR sensor

Sensor Dimensions



Electronics
Housing



รูปที่ ค.3 ขนาด และส่วนประกอบของ IR sensor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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	

รูปที่ ค.4 คุณสมบัติทั่วไปของ IR sensor

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

รูปที่ ค.5 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของ IR sensor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้