

รายงานการวิจัย

เครื่องอบแห้งชนิดควบคุมคุณภาพอาหารด้วยเทคนิคการวัดการแผ่รังสีอินฟราเรด

DRYER FOR FOOD QUALITY CONTROL BY
MEASURING OF IR RADIATION



ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ประจำปีงบประมาณ 2554

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจาก เงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประจำปี 2554

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

นวกัฑรา หนูนา



โครงการวิจัย เครื่องอบแห้งชนิดควบคุมคุณภาพอาหารด้วยเทคนิคการวัดการแผ่รังสีอินฟราเรด
DRYER FOR FOOD QUALITY CONTROL BY MEASURING OF IR RADIATION

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากเงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ-
ทหารลาดกระบัง

ประจำปีงบประมาณ 2554

จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 64,900 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี

ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2553 ถึง 30 กันยายน 2554

รายนามคณะผู้วิจัย

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

คำสำคัญ การแผ่รังสีอินฟราเรด กล้องถ่ายภาพความร้อน กระบวนการอบขนมปัง

Keywords: Infrared Emission, Thermal Imager, Bread Baking Process

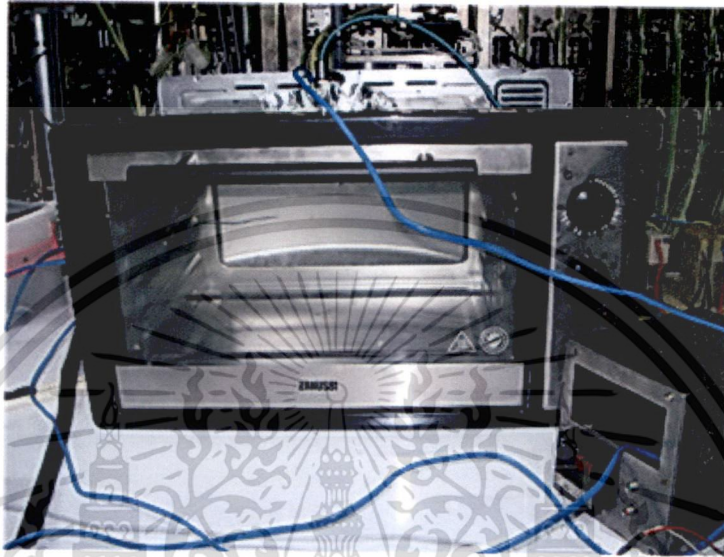
บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอการประยุกต์ใช้สมบัติการแผ่รังสีอินฟราเรดของวัตถุ (Emissivity, ϵ) ในกระบวนการแปรรูปอาหาร วิธีการวัดค่า ϵ ของวัตถุทำได้โดยวัดค่าอุณหภูมิของวัตถุด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน (Thermal Imager, TI) หรือด้วย IR sensor (ความยาวคลื่น 8-14 μm) โดยควบคุมอุณหภูมิที่ผิวของวัตถุให้คงที่ด้วยตู้ควบคุมอุณหภูมิ ปรับอุณหภูมิที่วัดได้จากกล้อง TI หรือ IR sensor ให้เท่ากับอุณหภูมิที่วัดได้จากเทอร์โมคัปเปิล ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่แท้จริงของวัตถุ จะได้ค่า ϵ ที่แท้จริงของวัตถุ ผลการทดลองวัดค่า ϵ ของวัสดุทางอาหารในกระบวนการอบขนมปัง 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 โดยในระหว่างการอบขนมปังด้วยอุณหภูมิเตาอบคงที่และไม่คงที่ ค่า ϵ ของขนมปังมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากค่า ϵ ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ผิวเป็นหลัก

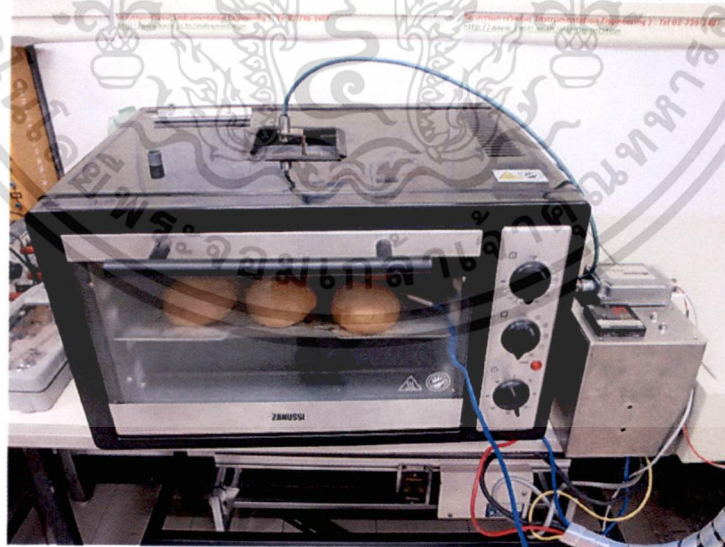
Abstract

The objective of this research is to propose the application of infrared radiation properties (Emissivity, ϵ) of object in the food industry. 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. 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.

รูปภาพผลงานวิจัย



รูปที่ 1 ตู้อบที่ติดตั้งเซนเซอร์ชนิดอินฟราเรด (IR sensor) ไว้ที่บริเวณด้านบน เพื่อตรวจวัดอุณหภูมิที่ผิวของวัตถุ



รูปที่ 2 การอบขนมปังด้วยตู้ควบคุมอุณหภูมิที่ผิวอาศัยหลักการการแผ่รังสีอินฟราเรดของวัตถุ

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	II
บทคัดย่อภาษาไทย	III
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	IV
รูปภาพผลงานวิจัย	V
สารบัญเรื่อง	VI
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญภาพ	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ตรวจสอบเอกสาร	3
2.1 การแผ่รังสีอินฟราเรด	3
2.2 รังสีที่แผ่ออกจากพื้นผิววัตถุ	5
2.3 การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างพื้นผิว	7
2.4 เปรียบเทียบการแผ่รังสีจากวัตถุจริงและวัตถุดำ	8
2.5 กระบวนการเกิดขนมปัง	9
2.5.1 ส่วนประกอบพื้นฐานของขนมปัง	9
2.5.2 ปฏิกิริยาการและการเปลี่ยนแปลงในระหว่างกระบวนการอบ	9
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	11
2.6.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบขนมปัง	11
2.6.2 การเฝ้าระวังและการตรวจสอบอุณหภูมิของอาหาร	14
บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	15
3.1 วัสดุทดลองและอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ	15
3.2 การทดสอบการอบขนมปัง	16
3.2.1 การเตรียมโด	16
3.2.2 การเตรียมเตาอบ	16
3.2.3 การวัดค่าต่างๆ	19

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 การทดสอบการอบขนมปังด้วยการควบคุมอุณหภูมิที่ผิว	20
3.3.1 การวัด Emissivity ของขนมปังโดยใช้ IR sensor	20
3.3.2 การทดสอบกระบวนการอบขนมปังโดยใช้ IR sensor ควบคุมอุณหภูมิที่ผิว	21
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	23
4.1 ค่า Emissivity ของขนมปังในระหว่างการอบ	23
4.2 การทดสอบการอบขนมปัง	24
4.2.1 คุณลักษณะของเตาอบ: ฮีตเตอร์วิธีสัมผัสต่ออุณหภูมิภายในเตาอบ	24
4.2.2 คุณลักษณะของเตาอบ: ความเร็วลมภายในเตาอบ	25
4.2.3 คุณลักษณะของเตาอบ: การกระจายอุณหภูมิภายในเตาอบ	27
4.2.4 การปรับอุณหภูมิอากาศภายในเตาอบในระหว่างการอบขนมปัง	28
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ผิวกับอุณหภูมิกึ่งกลางขนมปัง ในระหว่างการอบ	34
4.4 การทดสอบการอบขนมปังด้วยการควบคุมอุณหภูมิที่ผิวโดยใช้ IR Sensor	36
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	38
5.1 สรุปผลการทดลอง	38
5.2 ข้อเสนอแนะ	38
บรรณานุกรม	40
ภาคผนวก คุณลักษณะของ IR Sensor	42

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่า Emissivity ของพื้นผิววัสดุบางชนิด	5
4.1 ค่า Emissivity ของขนมปังเมื่อใช้ IR Sensor ในการวัดค่า	24
4.2 ความเร็วเฉลี่ย (m/s) ของลมภายในเตาอบที่แถวและตำแหน่งต่างๆ	26
4.3 ค่าการสูญเสียน้ำหนักของขนมปังหลังการอบ เมื่ออุณหภูมิในช่วงที่ 2 มีค่าแตกต่างกัน	30
4.4 ค่าการสูญเสียน้ำหนักของขนมปังหลังการอบ เมื่ออุณหภูมิในช่วงที่ 3 มีค่าแตกต่างกัน	32
4.5 สมการความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ผิวและที่กึ่งกลางขนมปัง และค่าร้อยละความชื้น (R ²) ของสมการในช่วงอุณหภูมิต่างๆ	34



สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 การถ่ายเทพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของวัตถุ	6
2.2 รังสีอินฟราเรดทั้งหมดที่แผ่ออกจากพื้นผิววัตถุจริง	7
2.3 การแลกเปลี่ยนรังสีระหว่างวัตถุ 2 วัตถุ	8
2.4 การถ่ายเทความร้อนสู่ขนมปังในระหว่างการอบ	11
2.5 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผิวขนมปังเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปังใน zone ที่ 1 2 3 และ 4	13
2.6 กราฟแสดงการเกิด gelatinization ของขนมปังเปรียบเทียบระหว่างการอบภายใต้เงื่อนไขเดิมและเงื่อนไขที่มีการปรับลดอุณหภูมิในบางช่วงของการอบ	13
3.1 ขนมปังในระหว่างการอบ	15
3.2 กล้องถ่ายภาพความร้อน รุ่น TI 32	15
3.3 เทอร์โมคัปเปิลแบบสัมผัส Type K และเทอร์โมมิเตอร์ Fluke รุ่น S2 II 2 Channel	16
3.4 เตารอบไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองอบขนมปัง	17
3.5 ตำแหน่งการเสียบสายเทอร์โมคัปเปิลเพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอากาศในเตารอบ	17
3.6 ตำแหน่งการวัดความเร็วลมร้อนภายในเตารอบบริเวณเหนือถาดวาง	18
3.7 ตำแหน่งการวางถ้วยสแตนเลสบรรจุน้ำเปล่าเพื่อหาการกระจายอุณหภูมิภายในเตารอบ	18
3.8 IR Sensor ที่ใช้ในการทดสอบ และการติดตั้ง IR Sensor ไว้ที่ด้านบนเตารอบขนาดเล็ก	20
3.9 ระบบการทดสอบการอบขนมปังด้วยการควบคุมอุณหภูมิที่ผิวโดยใช้ IR Sensor	21
3.10 แผนผังแสดงการทดสอบการอบขนมปังโดยการควบคุมอุณหภูมิที่ผิวด้วย IR Sensor	22
4.1 ลักษณะขนมปังระหว่างการอบเมื่ออุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปังมีค่าตั้งแต่เริ่มต้น 40°C 60°C 98°C และภายหลังการคงอุณหภูมิภายในเตารอบไว้ 10 นาที (สิ้นสุดกระบวนการอบ)	23
4.2 ตัวอย่างภาพถ่ายทางความร้อนของขนมปังในระหว่างการอบ	24
4.3 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศภายในเตารอบเมื่อตั้งค่าอุณหภูมิเตารอบไว้ที่ 210°C	25
4.4 กราฟแสดงค่าความเร็วลมในแต่ละตำแหน่งของแถวบน แถวกลาง และแถวล่าง	26
4.5 ตำแหน่งการวัดความเร็วลมร้อนภายในเตารอบบริเวณเหนือถาดวาง และค่าความเร็วลมที่ตำแหน่งต่างๆ เหนือถาดวาง	27

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 กราฟแสดงการกระจายอุณหภูมิภายในเตาอบ	27
4.7 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอากาศในเตาอบ (Tair) อุณหภูมิที่ผิวขนมปัง (Tsurface) และอุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปัง (Tcenter) ที่อุณหภูมิอากาศในช่วงที่ 1 เป็น 180 °C และ 210°C	29
4.8 ผิวภายในของขนมปัง เมื่อให้อุณหภูมิอากาศในช่วงที่ 2 เป็น 90°C 100°C 110°C โดยอุณหภูมิในช่วงที่ 1 และ 2 เป็น 180°C และ 170°C	30
4.9 ผิวด้านนอกของขนมปัง เมื่อให้อุณหภูมิอากาศในช่วงที่ 3 เป็น 170°C 180°C 190°C โดยอุณหภูมิในช่วงที่ 1 และ 2 เป็น 180°C และ 120°C	31
4.10 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอากาศในเตาอบ (Tair) อุณหภูมิที่ผิวขนมปัง (Tsurface) และอุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปัง (Tcenter) เมื่อให้อุณหภูมิของอากาศภายในเตาอบที่ 180°C	32
4.11 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศภายในเตาอบ (Tair) อุณหภูมิที่ผิว (Tsurface) และอุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปัง (Tcenter) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง ของอุณหภูมิอากาศในช่วงที่ 2 และ 3 จาก 180°C เป็น 120°C และ 170°C ตามลำดับ	33
4.12 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศภายในเตาอบ (Tair) อุณหภูมิที่ผิว (Tsurface) และอุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปัง (Tcenter) เมื่อให้อุณหภูมิ อากาศคงที่ที่ 170°C และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอากาศในช่วงที่ 1 2 และ 3 เป็น 180°C 120°C และ 170°C	33
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ผิวกับอุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปัง ในช่วงที่ 1 เมื่ออุณหภูมิที่กึ่งกลางเริ่มต้นจนถึง 40 °C	34
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ผิวกับอุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปัง ในช่วงที่ 2 เมื่ออุณหภูมิที่กึ่งกลางมีค่า 40–60°C	35
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ผิวกับอุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปัง ในช่วงที่ 3 เมื่ออุณหภูมิที่กึ่งกลางมีค่า 60–98°C	35

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

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

เซนเซอร์ชนิดอินฟราเรด (Infrared Sensor) เป็นอุปกรณ์อุณหภูมิที่ผิวแบบไม่สัมผัส ทำงานโดยการรับรังสีอินฟราเรดที่แผ่ออกมาจากผิวของวัตถุแล้วแปลงผลเป็นอุณหภูมิโดยอาศัยทฤษฎีของพลังค์และสเตฟานโบลท์ซมานน์ กล้อง TI สามารถตรวจวัดอุณหภูมิที่ผิวได้อย่างรวดเร็ว แสดงผลของอุณหภูมิออกมาในรูปแบบของตัวเลข ปัจจุบันที่มีผลต่อความถูกต้องอุณหภูมิที่ได้จากเซนเซอร์ปัจจุบันมีการประยุกต์เซนเซอร์ชนิดอินฟราเรดในงานที่ไม่สามารถใช้เครื่องมือวัดอุณหภูมิสัมผัสกับชิ้นงานได้โดยตรง เนื่องจากอาจเป็นอันตรายต่อคนหรือเครื่องมือวัด สำหรับอุตสาหกรรมอาหารในส่วนของกระบวนการผลิตต้องการความสะอาดสูงเพื่อป้องกันหรือลดโอกาสปนเปื้อนมาสู่ผลิตภัณฑ์ กล้อง TI จึงเข้ามามีบทบาทในกระบวนการผลิตทั้งในแง่ของการตรวจสอบและการควบคุมคุณภาพ เช่น ในกระบวนการลวก (blanching) กระบวนการทอด กระบวนการละลายและกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์ เป็นต้น (Gowen et al., 2010)

ในอุตสาหกรรมผลิตขนมปังควบคุมกระบวนการอบโดยการตั้งค่าอุณหภูมิเตาอบไว้คงที่ภายในระยะเวลาที่กำหนด ส่งผลต่อการสูญเสียน้ำหนักของขนมปังในระหว่างการอบและสิ้นเปลืองพลังงาน Therdthai et al. (2002) ทำการอบขนมปังโดยการปรับลดอุณหภูมิให้เหมาะสมสำหรับแต่ละขั้นตอนการอบโดยพิจารณาจากอุณหภูมิกึ่งกลางขนมปัง พบว่าสามารถลดการสูญเสียน้ำหนักโดยรวมลงได้โดยที่สีของขนมปังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ อย่างไรก็ตามการควบคุมอุณหภูมิดังกล่าวจำเป็นต้องใช้เครื่องมือวัดอุณหภูมิชนิดสัมผัสกับวัตถุซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อการปนเปื้อนจากเครื่องมือวัดไปสู่ขนมปังได้

ดังนั้น โครงการวิจัยนี้จึงนำเสนอการประยุกต์ใช้หลักการแผ่รังสีอินฟราเรดของวัตถุ เพื่อนำมาวัดอุณหภูมิที่ผิวและนำไปใช้ในกระบวนการอบขนมปัง ซึ่งกล้อง TI จะสามารถวัดค่าอุณหภูมิที่ผิวของตัวอย่างได้ถูกต้องก็ต่อเมื่อมีการกำหนดค่า ϵ ที่แท้จริงของวัตถุให้กับกล้อง จึงต้องทำการทดลองเพื่อหาค่า ϵ ของขนมปังที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างกระบวนการอบและนำข้อมูลดังกล่าวไปควบคุมอุณหภูมิเตาอบโดยใช้ Infrared Sensor (IR-Sensor) เป็นอุปกรณ์วัดอุณหภูมิที่ผิวขนมปัง

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อหาค่า ε ของขนมปัง (เริ่มต้นตั้งแต่โดจนกลายเป็นขนมปัง)
2. เพื่อประยุกต์ใช้หลักการการแผ่รังสีอินฟราเรดกับกระบวนการอบขนมปัง

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. ศึกษาวิธีการทดลองหาค่า ε ของอาหาร ได้แก่ ขนมปัง (เริ่มต้นตั้งแต่โดจนกลายเป็นขนมปัง) โดยใช้ชุดอุปกรณ์ตรวจวัดค่า ε ที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้น
2. ศึกษาการควบคุมอุณหภูมิภายในเตาอบ โดยใช้ IR-Sensor วัดอุณหภูมิที่ผิวของวัตถุ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ตรวจเอกสาร

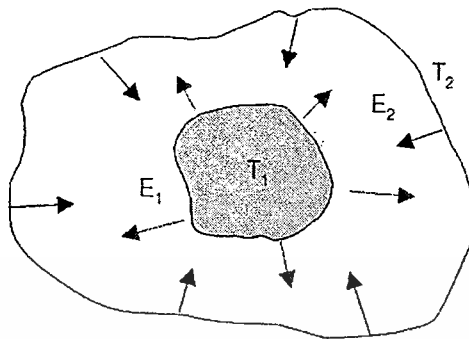
2.1 การแผ่รังสีอินฟราเรด

ในปี ค.ศ. 1800 นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษ Sir William Herschel เป็นผู้ค้นพบคลื่นรังสีอินฟราเรด (Infrared: IR) หรือคลื่นรังสีความร้อน ซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งแผ่มาจากดวงอาทิตย์ ค้นพบโดยการทดลองวัดอุณหภูมิของแถบสีรุ้งจากปริซึม โดยเลื่อนเทอร์โมมิเตอร์จากแถบสีม่วงไปยังแถบสีแดงพบว่าอุณหภูมิมียุ่ค่าเพิ่มขึ้นโดยมีค่าสูงสุดที่แถบสีแดง 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)

การแผ่รังสีอินฟราเรดสัมพันธ์กับพลังงานที่สสารแผ่ออกมา ณ อุณหภูมิหนึ่งๆ โดยกลไกของการแผ่รังสีอินฟราเรดเกี่ยวข้องกับพลังงาน เนื่องจากการสั่น (Oscillations) และการเคลื่อนที่ (Transition) ของอิเล็กตรอนซึ่งประกอบกันเป็นสสาร วัตถุที่มีอุณหภูมิสูงอิเล็กตรอนจะสั่นหรือเคลื่อนที่มากส่งผลให้พลังงานภายในวัตถุมียุ่ค่าสูง กล่าวได้ว่าการแผ่รังสีอินฟราเรดเกี่ยวข้องกับสภาพทางความร้อนภายในสสาร โดยก๊าซและของแข็งชนิดกึ่งโปร่งแสง (semi-transparent) เช่น กระจก การแผ่รังสีจะเป็นปรากฏการณ์เชิงปริมาตร (volumetric phenomenon) คือการแผ่รังสีความร้อนจากสสารเป็นผลรวมของการแผ่รังสีอินฟราเรดที่จุดใดๆ ของสสารนั้นตลอดทั้งปริมาตร ซึ่งในที่นี้จะเน้นไปที่การแผ่รังสีอินฟราเรดในลักษณะที่เรียกว่าเป็นปรากฏการณ์พื้นผิว (surface phenomenon) กล่าวคือในของแข็งและของเหลวส่วนใหญ่ รังสีอินฟราเรดที่แผ่ออกมาโดยโมเลกุลภายในจะถูกโมเลกุลที่ติดกันดูดซึมเอาไว้เกือบทั้งหมดจึงเป็นผลให้รังสีอินฟราเรดที่แผ่ออกมาจากของแข็งหรือของเหลว สามารถคิดได้ว่ารังสีอินฟราเรดแผ่ออกมาจากโมเลกุลบริเวณ ใกล้พื้นผิวหรือเป็นปรากฏการณ์พื้นผิว

รังสีอินฟราเรดหรือรังสีความร้อนจะแผ่ออกมาจากพื้นผิววัตถุในรูปแบบของพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.1 โดยรังสีอินฟราเรดหรือรังสีความร้อนที่ตกกระทบลงบนพื้นผิววัตถุบางส่วนจะถูกดูดกลืน (Absorbed) บางส่วนจะสะท้อน (Reflected) และบางส่วนจะทะลุผ่าน

ออกไป (Transmitted) โดยกำหนดความสามารถในการดูดซับ (Absorbitivity) การสะท้อน (Reflectivity) และการส่งผ่าน (Transmissivity) คือ α , ρ และ τ ตามลำดับ



รูปที่ 2.1 แสดงการถ่ายเทพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของวัตถุ

การแผ่รังสีของวัตถุดำ (Blackbody Radiation)

วัตถุดำคือวัตถุทางอุดมคติที่มีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1. วัตถุดำจะดูดซับ (absorb) รังสีที่มาจากทุกทิศทางบนทั้งหมดไม่ว่าจะเป็นที่ความยาวคลื่นและทิศทางใด
2. ที่ความยาวคลื่นและอุณหภูมิหนึ่งๆ ไม่มีวัตถุใดสามารถแผ่รังสีได้เท่ากับวัตถุดำ
3. แม้ว่ารังสีอินฟราเรดที่แผ่ออกจากวัตถุดำเป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่นและอุณหภูมิแต่ไม่ขึ้นอยู่กับทิศทาง นั่นคือวัตถุดำเป็น “diffuse emitter”

เนื่องจากวัตถุดำสามารถดูดซับและแผ่รังสีอินฟราเรดได้โดยสมบูรณ์ จึงใช้วัตถุดำเป็นวัตถุมารฐานสำหรับเปรียบเทียบปริมาณการแผ่รังสีที่ออกจากพื้นผิวจริงใด ๆ กับปริมาณการแผ่รังสีที่ออกจากวัตถุดำ แม้ว่าจะมีพื้นผิวบางชนิดที่สามารถประมาณได้ว่ามีลักษณะเป็นวัตถุดำแต่ในความเป็นจริงแล้วไม่มีพื้นผิวใดที่มีลักษณะเป็นวัตถุดำโดยแท้จริง

การแผ่รังสีจากพื้นผิวจริง (Real surface Emission)

จากคำกล่าวที่ว่าไม่มีพื้นผิวใดสามารถแผ่รังสีอินฟราเรดได้มากกว่าวัตถุดำ ดังนั้นจึงใช้วัตถุดำเป็นสิ่งที่เปรียบเทียบความสามารถในการแผ่รังสีของพื้นผิวจริง ซึ่งความสามารถในการแผ่รังสีของพื้นผิวหรือค่า ϵ เป็นคุณสมบัติของวัตถุเกี่ยวกับการแผ่รังสีความร้อน โดยเป็นส่วนหนึ่งของรังสีที่แผ่ออกจากพื้นผิวจริงต่อรังสีที่แผ่ออกจากวัตถุดำ ณ อุณหภูมิเดียวกัน ซึ่งค่า ϵ ของวัตถุจะสัมพันธ์กับทิศทางและความคลื่นของรังสีอินฟราเรดที่ถูกแผ่ออกมา

Total hemispherical emissivity เป็นค่าเฉลี่ยของ Emissivity ตลอดทุกทิศทางและทุกความยาวคลื่น มีคำจำกัดความเป็น

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

จากสมการต่าง ๆ ข้างต้นเห็นได้ว่าหากรู้ค่า ε ของพื้นผิวก็สามารถคำนวณหาค่าอัตราการแผ่รังสีต่าง ๆ ของพื้นผิวได้

ตารางที่ 2. 1 ค่า Emissivity ของพื้นผิววัสดุบางชนิด

Material's Surface	Wavelength (λ : μm)	Temperature (K)	Emissivity (ε)	Reference
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)

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

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

Irradiation (G) เป็นรังสีที่มาจากสิ่งแวดล้อมโดยรอบหรือจากการแผ่รังสีของวัตถุอื่นมากระทบกับวัตถุ โดยรังสีดังกล่าวอาจมีต้นกำเนิดมาจากหลายแหล่งและอาจมาจากทุกทิศทาง ซึ่ง Irradiation จะสัมพันธ์กับความยาวคลื่นของรังสีอินฟราเรดที่ถูกแผ่ออกมา โดย

Spectral irradiation (G_λ) เป็นอัตราการตกกระทบกับพื้นผิววัตถุหนึ่งหน่วยจากรังสีความร้อนที่มีความยาวคลื่น λ

Total irradiation (G) เป็นอัตราการตกกระทบกับพื้นผิวหนึ่งหน่วยตลอดทุกความยาวคลื่น

Irradiation ที่มาตกกระทบวัตถุบางส่วนจะถูกวัตถุดูดซับไว้ (Absorption: A or $G_{\lambda,ab}$) บางส่วนจะสะท้อนออกจากวัตถุ (Reflection: R or $G_{\lambda,ref}$) และบางส่วนจะทะลุผ่านวัตถุไป (Transmission: T or $G_{\lambda,tr}$)

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

หรือ

$$G = A + R + T \quad (2.2)$$

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 คือความสามารถในการส่งผ่าน (Transmissivity: τ) หากเขียนสมการใหม่จะได้

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (2.3)$$

โดยที่ค่าทั้งสามของวัตถุใด ๆ จะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับสมบัติต่างๆของวัตถุ

จากที่เคอร์ชอฟฟ์ได้กล่าวไว้ว่าเมื่อวัตถุอยู่ในสภาวะสมดุลความสามารถในการดูดซับของวัตถุ (α) จะเท่ากับความสามารถในการแผ่รังสีของวัตถุเอง (ϵ) หรือ $\alpha = \epsilon$ และหากวัตถุเป็นวัตถุทึบแสง (Opaque) วัตถุจะไม่มีคุณสมบัติการส่งผ่าน ($\tau=0$) ดังนั้นจากสมการ (2.2) จะได้ว่า

$$\epsilon + \rho = 1 \quad (2.4)$$

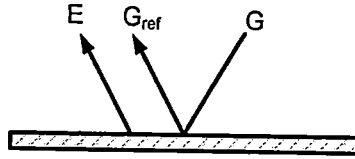
ส่วนวัตถุที่เป็น Black body จะดูดซับรังสีที่มากระทบวัตถุไว้ทั้งหมดจึงไม่มีคุณสมบัติในการสะท้อน ($\rho=0$) จะได้

$$\epsilon = 1 \quad (2.5)$$

ดังนั้นพลังงานรังสีที่แผ่จาก Black body จึงมีเฉพาะพลังงานที่เกิดจากการแผ่รังสีของวัตถุเอง (Perfect Reflector)

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

$$J = E + G_{\lambda,ref} \quad (2.6)$$



รูปที่ 2.2 รังสีอินฟราเรดทั้งหมดที่แผ่ออกจากพื้นผิววัตถุจริง

การดูดซึมและการสะท้อนของพื้นผิวเป็นตัวละครสำคัญในการมองเห็นสี ส่วนการแผ่รังสี (Emission) มักไม่มีผล ทั้งนี้เพราะวัตถุทั่วไปมีอุณหภูมิต่ำกว่า 1000 K และการแผ่รังสีจึงหนาแน่นอยู่ในช่วง Infrared ซึ่งมองด้วยตาเปล่าไม่เห็น ดังนั้นสีที่ปรากฏต่อสายตาจึงขึ้นอยู่กับว่าวัตถุจะดูดซึมและสะท้อน (Irradiation) ในช่วงความคลื่นใด เช่นเห็นว่าเป็นสีแดงเพราะสะท้อนรังสีในช่วงความยาวคลื่นของสีอื่น ๆ ไว้และสะท้อนรังสีในช่วงความยาวคลื่นของสีแดง และเห็นว่าพื้นผิวมีสีดำเพราะพื้นผิวได้ดูดซึมรังสีที่ตกกระทบในย่านการมองเห็นทั้งหมด ส่วนพื้นที่ผิวที่เห็นเป็นสีขาวก็เพราะพื้นผิวสะท้อนรังสีในย่านการมองเห็นทั้งหมด อย่างไรก็ตามควรมีการพิจารณาให้ถี่ถ้วนเกี่ยวกับการมองเห็นสีนี้ สำหรับค่า Irradiation หนึ่งๆ สีของพื้นผิวอาจไม่แสดงถึงการตอบรับรังสีทั้งหมดของพื้นผิวก็ได้ ทั้งนี้เพราะ Irradiation ส่วนใหญ่อาจอยู่ในย่านที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่า ตัวอย่างเช่น หิมะที่มองเห็นเป็นสีขาวนั้น เพราะสะท้อนรังสีในย่านการมองเห็นทั้งหมด แต่ดูดซึมรังสีส่วนใหญ่ในย่าน Infrared และสามารถประมาณได้เสมือนเป็นวัตถุดำในย่าน Infrared (คลื่นยาว) นี้

2.3 การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างพื้นผิว (Radiation Exchange between Surfaces)

รังสีที่แผ่ออกจากพื้นผิวของวัตถุ 1 (q_1 : w) มีค่าเป็น

$$q_1 = J_1 A_1 \quad (2.7)$$

ส่วนรังสีที่แผ่ออกจากพื้นผิวของวัตถุ 2 (q_2 : w) มีค่าเป็น

$$q_2 = J_2 A_2 \quad (2.8)$$

โดย J_1 และ J_2 คือ รังสีที่แผ่ออกจากวัตถุ 1 (Radiosity1: w/m²) และรังสีที่แผ่ออกจากวัตถุ 2 (Radiosity2: w/m²) ตามลำดับ A_1 และ A_2 คือ พื้นที่ผิวของวัตถุ 1 และวัตถุ 2 ที่มีการแผ่รังสีอินฟราเรดออกมา (m²)

เมื่อพิจารณาการแผ่รังสีของวัตถุ 2 วัตถุ พบว่ามีการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนกันระหว่างวัตถุทั้งสอง โดยรังสีที่แผ่ออกจากวัตถุ 1 บางส่วนไปตกกระทบบนพื้นผิวของวัตถุ 2 ($q_{1 \rightarrow 2}$: w/m²) ในขณะที่เดียวกันรังสีที่แผ่ออกจากวัตถุ 2 บางส่วนจะไปตกกระทบบนวัตถุ 1 ($q_{2 \rightarrow 1}$: w/m²)

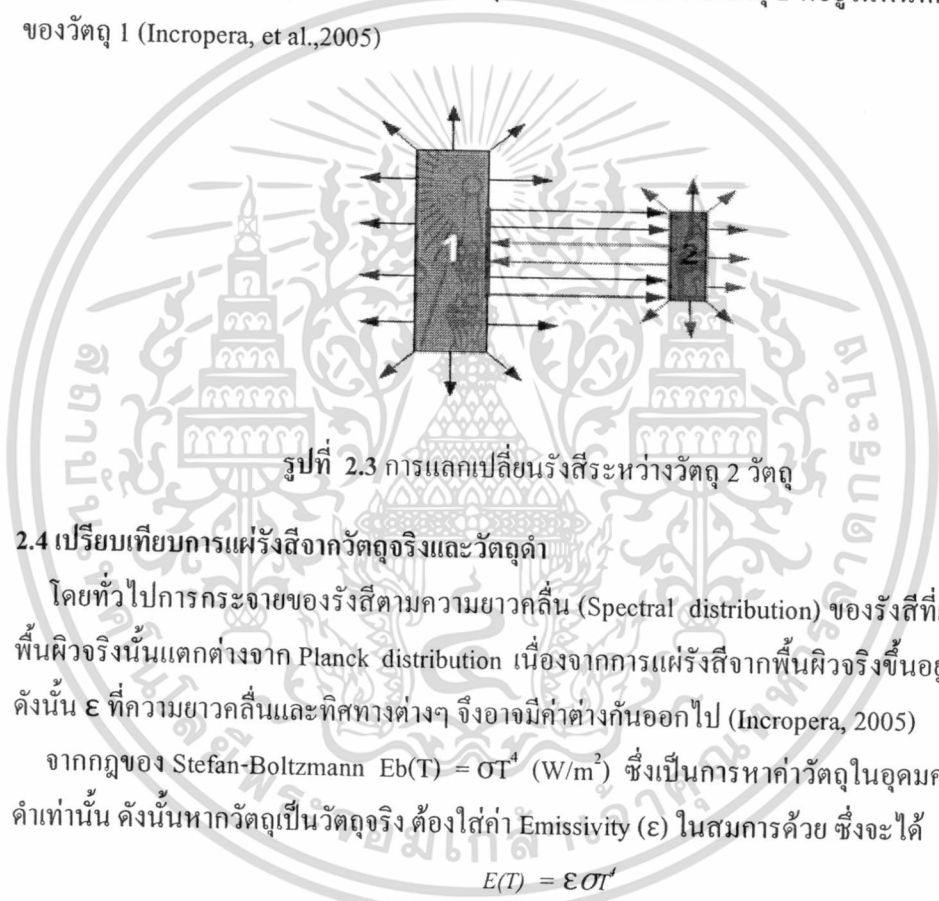
สัดส่วนของรังสีความร้อนออกจาก 1 ไปตก 2 เรียกว่า View Factor F_{12} (F_{12}) หรือ

$$F_{12} = \frac{q_{1-2}}{J_1 A_1} \quad (2.9)$$

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

$$F_{21} = \frac{q_{2-1}}{J_2 A_2} \quad (2.10)$$

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 2.3 การแลกเปลี่ยนรังสีระหว่างวัตถุ 2 วัตถุ

2.4 เปรียบเทียบการแผ่รังสีจากวัตถุจริงและวัตถุดำ

โดยทั่วไปการกระจายของรังสีตามความยาวคลื่น (Spectral distribution) ของรังสีที่แผ่ออกจากพื้นผิวจริงนั้นแตกต่างจาก Planck distribution เนื่องจากการแผ่รังสีจากพื้นผิวจริงขึ้นอยู่กับทิศทาง ดังนั้น ϵ ที่ความยาวคลื่นและทิศทางต่างๆ จึงอาจมีค่าต่างกันออกไป (Incropera, 2005)

จากกฎของ Stefan-Boltzmann $E_b(T) = \sigma T^4$ (W/m^2) ซึ่งเป็นการหาค่าวัตถุในอุดมคติหรือวัตถุดำเท่านั้น ดังนั้นหากวัตถุเป็นวัตถุจริง ต้องใส่ค่า Emissivity (ϵ) ในสมการด้วย ซึ่งจะได้

$$E(T) = \epsilon \sigma T^4 \quad (2.11)$$

ซึ่ง ϵ เป็นคุณสมบัติในการแผ่รังสีความร้อนของวัตถุ โดยมีค่าเท่ากับอัตราส่วนของรังสีที่แผ่ออกจากวัตถุกับรังสีที่แผ่ออกจากวัตถุดำ ณ อุณหภูมิเดียวกันโดยมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 ซึ่งวัตถุดำจะมีค่า ϵ เท่ากับ 1 เสมอ เนื่องจากรังสีความร้อนที่แผ่ออกมาจากวัตถุดำเป็นความร้อนที่เกิดจากพื้นผิวดำมันเองทั้งหมดและมีความเข้มเท่ากันทุกทิศทาง 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 กระบวนการเกิดขนมปัง

2.5.1 ส่วนประกอบพื้นฐานของขนมปัง

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

2.5.2 ปฏิกิริยาการเกิดและการเปลี่ยนแปลงในระหว่างกระบวนการอบ

แบ่งช่วงการเกิดขนมปังตั้งแต่เริ่มเตรียมโดจนถึงสิ้นสุดกระบวนการอบออกเป็น 2 กระบวนการใหญ่ ๆ คือ ช่วงหมักโดและช่วงอบขนมปัง ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ช่วงหมักโด

ในระหว่างการหมักแป้งให้เกิดโด การทำงานภายในโดนั้น เอนไซม์โปรตีเอส (protease) ชนิดแอลฟาอะไมเลส (Alpha-amylase) จะเปลี่ยนแป้งสตาร์ชให้เป็นน้ำตาลเดกซทริน (dextrin) ส่วนเอนไซม์โปรตีเอส (protease) ชนิดเบต้าอะไมเลส (Beta-amylase) จะเปลี่ยนน้ำตาลเดกซทริน (dextrin) และแป้งบางส่วนให้เป็นน้ำตาลมอลโทส น้ำตาลมอลโทสจะถูกลดเปลี่ยนเป็นต่อไปโดยเอนไซม์มอสเทลให้เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวและน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวก็จะถูกย่อยต่อโดยยีสต์ ซึ่งจะได้คาร์บอนไดออกไซด์ แอลกอฮอล์ และสารอื่นอีกเล็กน้อย ซึ่งส่วนใหญ่เป็นกรด (ศิริลักษณ์และกมลวรรณ, 2544)

แอลกอฮอล์ที่เกิดขึ้นในโดซึ่งเป็นผลมาจากการหมักน้ำตาลด้วยยีสต์นั้นจะถูกระเหยออกไปในช่วงระยะเวลาการอบขนมปัง ส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะซึมผ่านผนังเซลล์ของยีสต์ออกมา โดยในช่วงแรกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ออกมาจะละลายน้ำ (ที่มีอยู่ในปริมาณน้อย) ในโด จนกระทั่งน้ำนั้นอิ่มตัวด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ จากนั้น คาร์บอนไดออกไซด์ที่ซึมออกมา

ใหม่ จะออกมาในรูปของฟองก๊าซ ซึ่งฟองก๊าซเหล่านี้จะมีทั่วทั้งก้อน โดและจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ โดยที่มีขนาดไม่เท่ากัน จึงทำให้เกิดการพองตัวของโด (วราวุฒิและรุ่งนภา, 2532) เนื่องจากโดมีความสามารถในการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ที่ยีสต์ผลิตขึ้น โครงสร้างของก้อนโดจึงมีลักษณะมีเซลล์แก๊สที่คงรูปอยู่ได้ในระหว่างการหมักและการพักก้อนโด เมื่อโดอยู่ในระยะพักตัว (proofing period) น้ำตาลที่มีอยู่เดิมในแป้งจะถูกใช้ไปหมด ในขณะที่น้ำตาลถูกใช้ เอนไซม์ในโดจะช่วยผลิตน้ำตาลออกมาด้วย เมื่อนำโดที่พักตัวแล้วเข้าเตาอบ เอนไซม์จะยังคงทำงานต่อไปอีกในครั้งแรกของการอบ 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

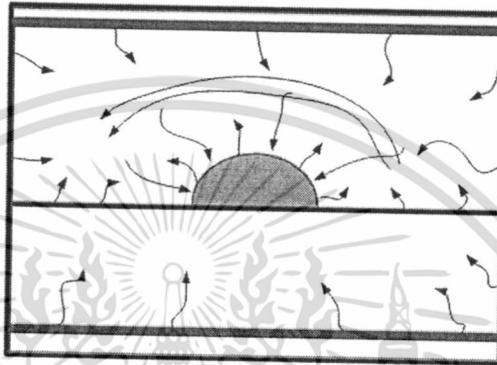
Stage ที่ 3 คือ ช่วงที่อุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปังคงที่ที่ 98-99°C และคงอุณหภูมิเตาอบเป็นเวลา 10 นาที อุณหภูมิที่ผิวขนมปังจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงสุดกระบวนการอบ (Therdthai, et al., 2002)

เมื่อให้ความร้อนกับโด ความร้อนในช่วงแรกของการอบจะกระตุ้นการทำงานของยีสต์และเอนไซม์ให้เกิดกระบวนการหมักเพิ่มขึ้น จึงเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และแอลกอฮอล์เสริมขึ้นมา ทำให้โดพองตัวมากขึ้น โดยปกติยีสต์จะหยุดการทำงานที่ 43°C และจะตายที่อุณหภูมิ 54°C เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกกักไว้ในโด จะถูกปลดปล่อยออกสู่ภายนอก (ความดันต่ำกว่า) ทำให้เกิดโพรงอากาศขึ้นภายในเนื้อขนมปัง (จินตนาและอรอนงค์, 2544)

ในระหว่างการอบอุณหภูมิภายในของโดจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ พลังงานความร้อนที่ผิวโดได้รับมีทั้งพลังงานที่เกิดจากการแผ่รังสี (Emission Energy) จากผนังเตาอบซึ่งได้รับความร้อนจากฮีทเตอร์ (ผิวของโดจะมีการแผ่รังสีความร้อนออกมาเช่นกันแต่มีปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับการแผ่รังสีที่เกิดจากฮีทเตอร์หรือผนังของเตาอบ) และความร้อนที่เกิดจากการพาความร้อน (Convection Energy) ของอากาศร้อนที่อยู่รอบๆ โด เมื่ออุณหภูมิที่ผิวของโดมีค่าสูงขึ้นความร้อนจะเกิดการถ่ายเทจากผิวชั้นนอกเข้าสู่ด้านในโดยอาศัยการนำความร้อน (Conduction Energy) ผ่านชั้นเนื้อโด โดยความร้อนจะถูกส่งผ่านชั้นเนื้อโดแต่ละชั้นจนกระทั่งถึงจุดกึ่งกลาง เมื่อเม็คแป้งได้รับความร้อนจะค่อยๆ พองตัวขึ้น จนกระทั่งอุณหภูมิกึ่งกลางโดมีค่าประมาณ 60°C เม็คแป้งจึงเริ่มหลอมละลายและแตกตัวเป็นเจลหรือเกิดกระบวนการ gelatinization ขึ้น (การเกิด gelatinization จะเริ่มเกิดที่อุณหภูมิ 55°C และสิ้นสุดที่อุณหภูมิ 85°C โดยประมาณ) (Therdthai, et al., 2002)

ในระหว่างที่แป้งสาลีเกิดเจลนั้นจะดึงน้ำจากโดมาทำให้ก่อบสูญเสียน้ำเปลี่ยนสภาพจากเดิมที่เคยยึดหยุ่นกลับแข็งตัวขึ้นทำให้ได้โครงสร้างของเซลล์ที่มีรูพรุน 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) ทำให้สีผิวของขนมปังค่อยๆคล้ำขึ้น พร้อมกับเกิดการระเหยของสารอินทรีย์ให้กลิ่นรส และสุกในที่สุด โดยเกิดการสูญเสียน้ำหนักของก้อนโด 9-10% เนื่องจากการระเหยของน้ำและสารอื่นๆ (Therdthai, et al., 2002)



รูปที่ 2.4 การถ่ายเทความร้อนสู่ขนมปังในระหว่างการอบ

เมื่อเกิด crust ขึ้นที่ผิวขนมปัง ใอน้ำที่อยู่ข้างในจะไม่สามารถระเหยสู่ภายนอกได้ ใอน้ำที่เกิดขึ้นจึงกลับเข้ามาเกิดการควบแน่นขึ้นที่กึ่งกลางขนมปัง(เนื่องจากที่กึ่งกลางขนมปังมีอุณหภูมิต่ำกว่า 100°C) การเกิดการเคลื่อนที่ของใอน้ำเข้าสู่ด้านในของขนมปังมีผลทำให้ขนมปังเกิดการแยกชั้นเป็น crust และ crumb อุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปังจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นและมีค่าคงที่อยู่ที่ประมาณ 100°C (Therdthai, et al., 2002) โดยที่ crust เป็นส่วนของเปลือกที่อยู่ด้านนอกขนมปัง มีความชื้นต่ำมาก และแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิตามอุณหภูมิของอากาศภายในเตาอบ ส่วน crumb เป็นส่วนที่อยู่ด้านในขนมปังถัดเข้าไปจาก crust มีความชื้นค่อนข้างคงที่และอุณหภูมิจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นแต่ไม่เกิน 100°C ดังที่ได้กล่าวไปแล้ว (Zanoni and Peri, 1993)

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.6.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบขนมปัง

Therdthai, et al., (2002, 2004) ทำการทดลองเพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในแต่ละ zone ของการอบขนมปัง (ขนมปังแบบไวท์แซนวิส) แบ่งกระบวนการเกิดขนมปังออกเป็น 4 zone ดังแสดงรูปที่ 2.5 โดยพิจารณาจากอุณหภูมิที่ผิวขนมปังเป็นหลักและใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการพิจารณาผลของอุณหภูมิที่ผิวขนมปังและระยะเวลาในการอบขนมปังต่อการสูญเสียน้ำหนัก สีและ

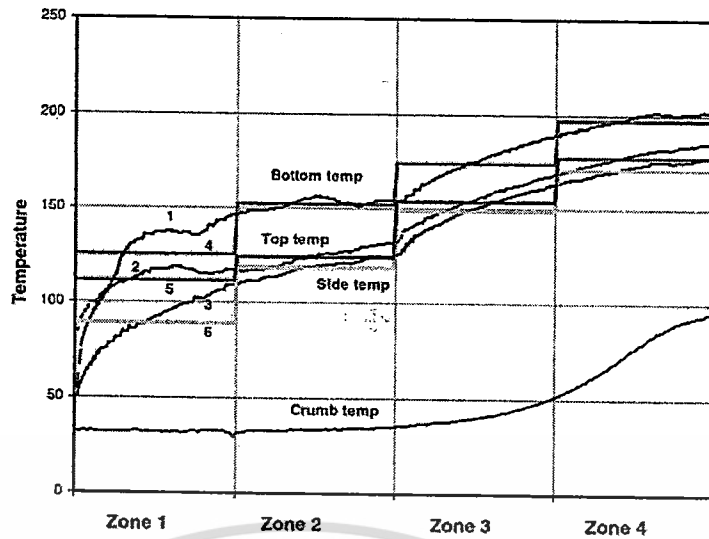
การเกิด gelatinization ของขนมปังในระหว่างการอบ จากการทดลองพบว่าค่าอุณหภูมิที่ผิวใน zone ต่างๆที่ทำให้เกิดการสูญเสียน้ำหนักต่ำที่สุด คือ 115°C 130°C 156°C และ 176°C ตามลำดับ โดยมีหลักในการพิจารณาการควบคุมอุณหภูมิดังนี้

ช่วง zone 1 อุณหภูมิที่ผิวมีค่าค่อนข้างต่ำ (ประมาณ 40°C) ทำให้ความดันไอลำบาก 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 2.6

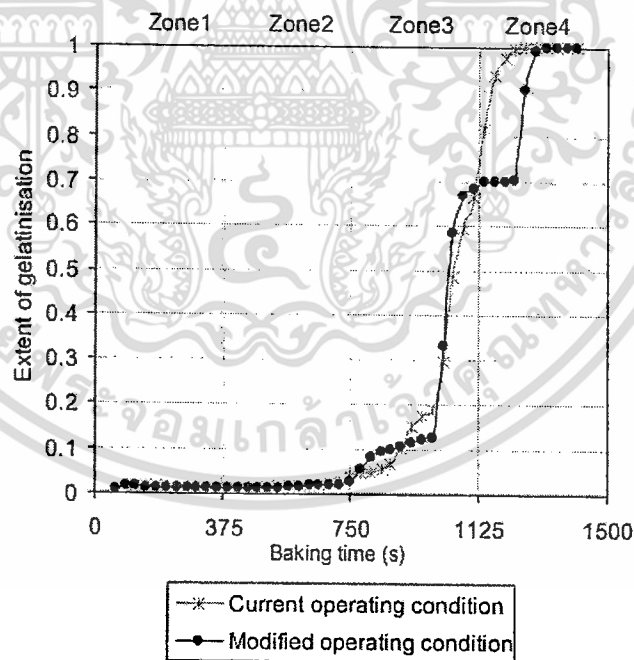
กระบวนการ gelatinization จะเกิดขึ้นเรื่อยๆ และเกิดอย่างสมบูรณ์เมื่อสิ้นสุด zone 4 ดังแสดงในรูปที่ 2.6 อย่างไรก็ตามการเพิ่มอุณหภูมิในช่วง zone 4 จะไม่ทำให้เกิดการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เพราะความชื้นส่วนใหญ่ของเปลือกนอกขนมปัง ได้มีการระเหยไประหว่างการอบใน zone 3 ทำให้ความดันไอนี้ใน zone 4 มีค่าต่ำแม้อุณหภูมิยังคงเพิ่มขึ้นก็ตาม

เมื่อพิจารณาที่สีของ crust พบว่าอุณหภูมิจึง ในช่วงที่ 3 และ 4 ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเกิดสีของ crust เปรียบเทียบกับ zone 1 และ 2 เพราะสีของ crust เกิดจากปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard Reaction) โดยปฏิกิริยาเมลลาร์ด จะเริ่มเกิดเมื่ออุณหภูมิที่ผิวมีค่าประมาณ 150-205°C (Pyle, 1988) ดังนั้นหากต้องการให้สีผิวของ crust คล้ำขึ้น ต้องเพิ่มอุณหภูมิในช่วง zone 3 และ zone 4 แต่หากเพิ่มอุณหภูมิใน zone 3 และ 4 ทำให้เกิดการสูญเสียน้ำหนักมาก ดังนั้นหากต้องการลดการสูญเสีย น้ำหนักให้น้อยที่สุด ควรจะมีการลดอุณหภูมิในช่วง 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 % จะทำให้อุณหภูมิจึงใน zone 1 และ zone 3 มีค่าต่ำลง ส่งผลให้อัตราการเกิด gelatinization ใน zone 3 ค่อย ๆ ลดลงด้วย และเมื่อให้ความร้อนต่อไปอุณหภูมิใน zone 4 จะสูงขึ้น ทำให้ อุณหภูมิที่ crumb เพิ่มขึ้นจากจุดเริ่มต้นจนถึง 99°C (เกิด gelatinization อย่างสมบูรณ์) เมื่อสิ้นสุดกระบวนการอบ สีของเปลือกนอกขนมปัง (crust) อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ซึ่ง และการสูญเสียน้ำหนักลดลง 1.4 %



รูปที่ 2.5 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผิวขนมปังเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปัง ใน zone 1 2 3 และ 4 โดย (1) คืออุณหภูมิที่ผิวด้านล่างขนมปัง (2) คืออุณหภูมิที่ผิวด้านบนขนมปัง (3) คืออุณหภูมิผิวด้านข้างขนมปัง (4) คืออุณหภูมิที่ผิวด้านล่างขนมปังโดยเฉลี่ย (5) คืออุณหภูมิที่ผิวด้านบนขนมปังโดยเฉลี่ย (6) คืออุณหภูมิผิวด้านข้างขนมปังโดยเฉลี่ย



รูปที่ 2.6 กราฟแสดงการเกิด gelatinization ของขนมปังเปรียบเทียบระหว่างการอบภายใต้เงื่อนไขเดิมและเงื่อนไขที่มีการปรับลดอุณหภูมิในช่วงของการอบ

2.6.2 การเฝ้าระวังและการตรวจสอบอุณหภูมิของอาหาร

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

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

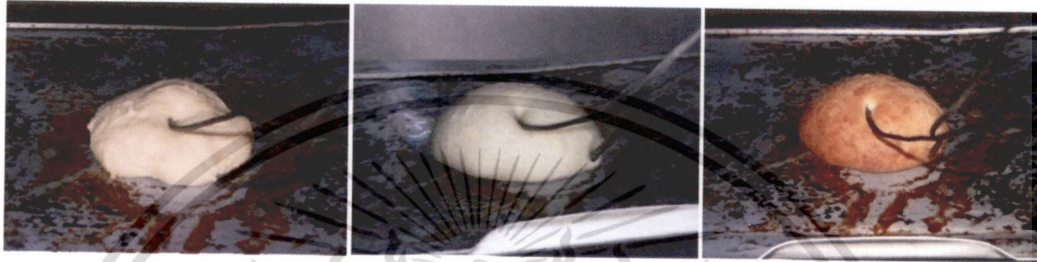
Meyer, et al. (1999) ใช้วิธีการวัดแบบไม่สัมผัสในการประมาณค่าอุณหภูมิภายในเนื้อไก่ (เนื้อไก่ไร้หนัง ไร้กระดูก) ตัวอย่างเนื้อไก่ที่ใช้คือเนื้อหน้าอก โดยวัดอุณหภูมิที่กึ่งกลางความหนาของชิ้นเนื้อไก่ ซึ่งอุณหภูมินี้จะสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่ผิวเนื้อไก่และเวลาในการแช่เย็นวัดอุณหภูมิที่ผิวเนื้อไก่โดยใช้กล้องถ่ายภาพความร้อน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

บทที่ 3

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 วัสดุทดลองและอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ

วัสดุที่นำมาใช้ในการหาค่า Emissivity คือขนมปัง (เริ่มตั้งแต่โคจนเป็นขนมปัง) ลักษณะของขนมปังในระหว่างการอบดังแสดงในรูปที่ 3.1

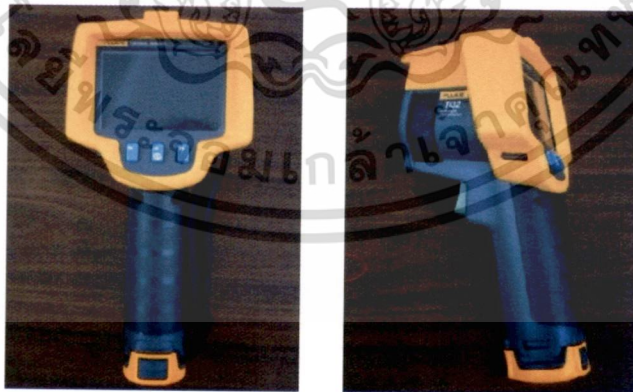


รูปที่ 3.1 ขนมปังในระหว่างการอบ

อุปกรณ์วัดอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองมี 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 3.2 ในการทดลอง

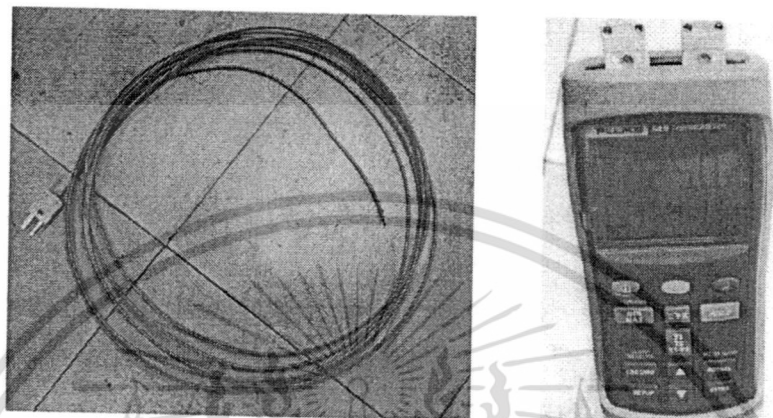


รูปที่ 3.2 กล้องถ่ายภาพความร้อน รุ่น TI 32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 3.3



รูปที่ 3.3 เทอร์โมคัปเปิลแบบสัมผัส Type K และเทอร์โมมิเตอร์ Fluke รุ่น 52 II 2 Channel

3.2 การทดสอบการอบขนมปัง

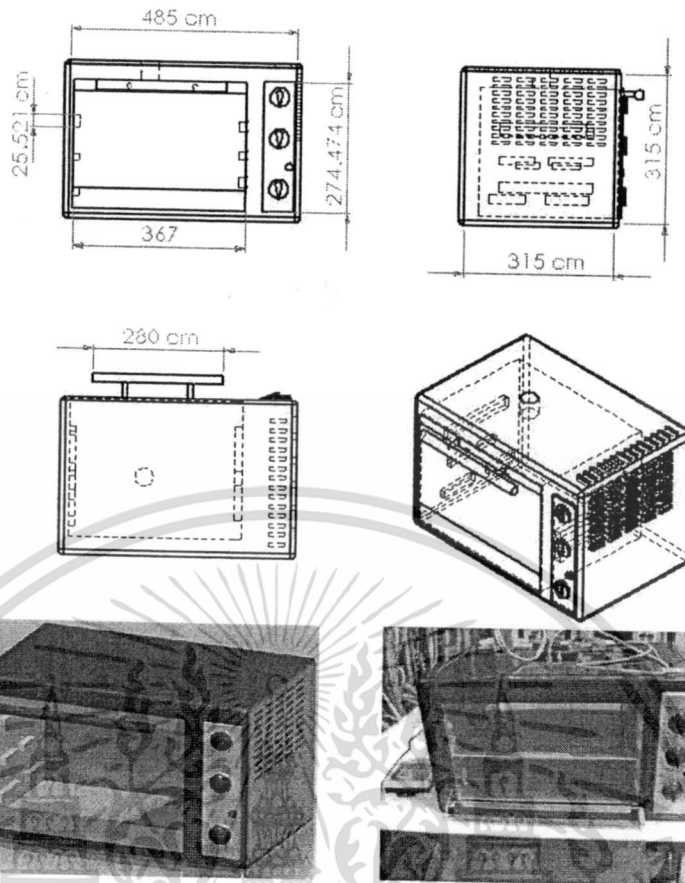
3.2.1 การเตรียมโด

เตรียมโดสำหรับอบขนมปัง ซึ่งมีส่วนผสมโดยประมาณดังต่อไปนี้ แป้งขนมปัง 50 เปอร์เซ็นต์ น้ำเย็น 25 เปอร์เซ็นต์ น้ำตาล 10 เปอร์เซ็นต์ มอลาซิน 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 จากนั้นนำมานวดร่วมกับยีสต์จนเนียนเรียบ แล้วตักชั่งน้ำหนักก้อนละ 70 กรัม จำนวน 1 ก้อน นวดปละป็นกลมพักไว้ที่อุณหภูมิห้อง (25°C) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง 30 นาที เพื่อให้เกิดโด

3.2.2 การเตรียมเตาอบ

ใช้เตาอบไฟฟ้า (ZANUSSI รุ่น ZOT103KX อิเลคโทรลักซ์ ประเทศไทย ความจุของโพรงเตาอบ 300 ลิตร) ในการอบขนมปัง ก่อนอบโดต้องเปิดเครื่องทิ้งไว้อย่างน้อย 10 นาที โดยตั้งค่าอุณหภูมิเตาอบไว้ตามที่ต้องการเพื่อให้อุณหภูมิในเตาอบเข้าสู่สภาวะสมดุล (steady) โดยอุณหภูมิสูงสุดของอากาศในเตาอบคือ $230 \pm 10^{\circ}\text{C}$ ด้านหน้าเตาอบทำจากวัสดุที่ค่อนข้างใสทำให้สามารถมองเห็นขนมปังขณะอบได้ ลักษณะเตาอบที่ใช้ในการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.4

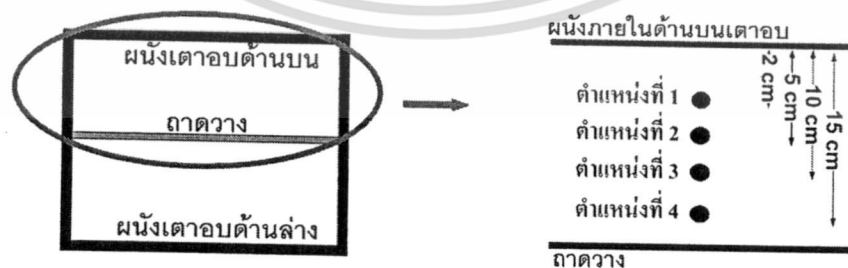
สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



รูปที่ 3.4 เต้าอบไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองอบขนมปัง

3.2.2.1 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอากาศภายในเต้าอบ

หากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของอากาศภายในเต้าอบโดยตั้งค่าอุณหภูมิหน้าเต้าไว้ที่ 210°C และใช้เทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในเต้าอบทั้งหมด 4 ตำแหน่ง โดยตำแหน่งที่ 1 อยู่บนสุด ห่างจากผนังเต้าด้านบนประมาณ 2 cm ตำแหน่งที่ 2 ห่างจากผนังเต้าด้านบนประมาณ 5 cm ตำแหน่งที่ 3 ห่างจากผนังเต้าด้านบนประมาณ 10 cm และตำแหน่งที่ 4 ต่ำสุดห่างจากผนังเต้าด้านบนประมาณ 15 cm (ห่างจากถาด 1 cm) ดังแสดงในรูปที่ 3.5



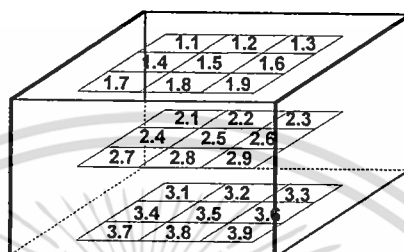
รูปที่ 3.5 ตำแหน่งการเสียบสายเทอร์โมคัปเปิลเพื่อวัดอุณหภูมิอากาศในเต้าอบ

121354

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา 17 เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2.2 หากค่าความเร็วลมร้อนในเตาอบ

เนื่องจากการทดลองได้มีการให้ความร้อนกับเตาอบโดยใช้โหมคไฟบน-ล่างและมีพัดลมเป่าเพื่อให้เกิดการหมุนเวียนลมร้อนภายในเตาอบ จึงได้มีการหาช่วงความเร็วลมเฉลี่ยภายในเตาอบโดยใช้หลอดปิโตท (Pitot Tube) ซึ่งมีการวัดความเร็วลมทั้งหมด 3 แถว 27 ตำแหน่งเหนือถาดวาง (แบ่งเป็น 3 แถว ได้แก่ แถวบน-กลาง-ล่าง แถวละ 9 ตำแหน่ง) ดังแสดงในรูปที่ 3.6 โดยวัดตำแหน่งละ 3 ซ้ำ

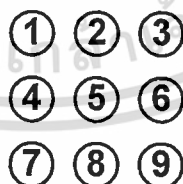


หมายเหตุ: เลขตัวแรกแสดงแถว เลขตัวที่ 2 แสดงตำแหน่งของการวัดความเร็วลมฝนแถวนั้นๆ เช่น 1.9 คือ แถวที่ 1 ตำแหน่งที่ 9

รูปที่ 3.6 ตำแหน่งการวัดความเร็วลมร้อนภายในเตาอบบริเวณเหนือถาดวาง

3.2.2.3 หากการกระจายอุณหภูมิภายในเตาอบ

เนื่องจากการอบมีการเปิดพัดลมเป่าเพื่อให้เกิดการหมุนเวียนลมร้อนภายในเตาอบซึ่งมีความเร็วลมร้อนโดยเฉลี่ยประมาณ 0.211 m/s จึงได้มีการทดลองเพื่อหาการกระจายอุณหภูมิของอากาศภายในเตาอบโดยใช้ถ้วยสแตนเลส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.1 cm สูง 3.1 cm บรรจุน้ำเปล่า 30 กรัม วางในตำแหน่งต่างๆ ภายในเตาอบทั้งหมด 9 ตำแหน่ง ดังรูปที่ 3.7 และใช้เทอร์โมคัปเปิลซึ่งเชื่อมต่ออยู่กับ Data Logger วัดอุณหภูมิของน้ำในถ้วยจากนั้นเปิดเตาโดยให้อุณหภูมิของอากาศภายในเตามีค่า 110°C



รูปที่ 3.7 แสดงตำแหน่งการวางถ้วยสแตนเลสบรรจุน้ำเปล่า เพื่อหาการกระจายอุณหภูมิภายในเตาอบ

3.2.2.4 การปรับค่าอุณหภูมิของอากาศภายในเตาอบในระหว่างการอบขนมปัง

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

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

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

ช่วงที่ 3 คือช่วงที่อุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปังมีค่าตั้งแต่ 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

ในการทดลองได้พิจารณาปรับเปลี่ยนเฉพาะค่าอุณหภูมิในช่วงที่ 1 และ 2 และให้อุณหภูมิในช่วงที่ 3 คงที่ที่ 180°C ก่อนในตอนแรก จากนั้นเมื่อได้ค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมของช่วงที่ 1 และ 2 จึงพิจารณาปรับเปลี่ยนค่าอุณหภูมิในช่วงที่ 3 เป็น 170°C และ 190°C ในการทดลองจะวางโดไว้ที่ตำแหน่งที่ 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

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

การวัดอุณหภูมิอื่นๆ

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

3.2.3.2 น้ำหนัก และเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนัก (Weight Loss: %) ของขนมปังหลังการอบ ซึ่งน้ำหนักขนมปังโดยใช้ตาชั่งดิจิทัลความละเอียดทศนิยม 2 ตำแหน่ง

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

3.3 การทดสอบการอบขนมปังด้วยการควบคุมอุณหภูมิที่ผิว

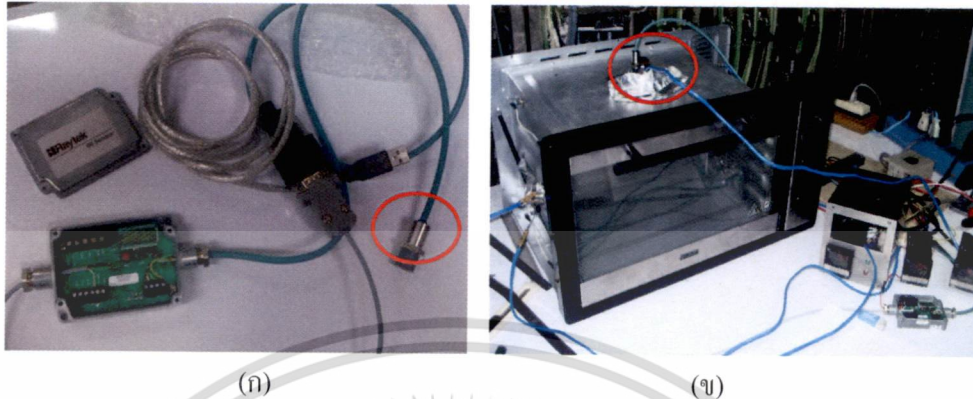
3.3.1 การวัด Emissivity ของขนมปังโดยใช้ IR sensor

วัดค่า ε ของขนมปังในแต่ละช่วงของกระบวนการอบ โดยใช้ IR sensor (Raytex-IR sensor รุ่น MI วัดรังสีอินฟราเรดในช่วง $8-14\mu\text{m}$ ช่วงอุณหภูมิที่วัดได้ -40 ถึง 600°C) ซึ่งได้มีการติดตั้ง IR sensor ไว้ที่ด้านบนของเตาอบขนาดเล็ก ดังแสดงในรูปที่ 3.8 เนื่องจากด้านบนผิวขนมปังค่อนข้างแบนเรียบไม่มีมุมหรือมุมมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากในระหว่างการอบ ในการทดลองจึงได้มีการเจาะรูที่ด้านบนเตาอบเพื่อให้ IR sensor มองผ่าน ซึ่งวัดค่า ε โดยใช้เทอร์โมคัปเปิลติดไว้ที่ผิวของวัตถุ และปรับค่า ε ที่ IR sensor จนกระทั่งอุณหภูมิที่อ่านได้จาก IR sensor มีค่าเท่ากับอุณหภูมิที่อ่านได้จากเทอร์โมคัปเปิล ค่า ε ที่ได้คือค่า ε ของวัตถุ ซึ่งในการทดลองได้มีการวัดค่า ε เริ่มตั้งแต่โดจนกลายเป็นขนมปังหรือสิ้นสุดกระบวนการอบ

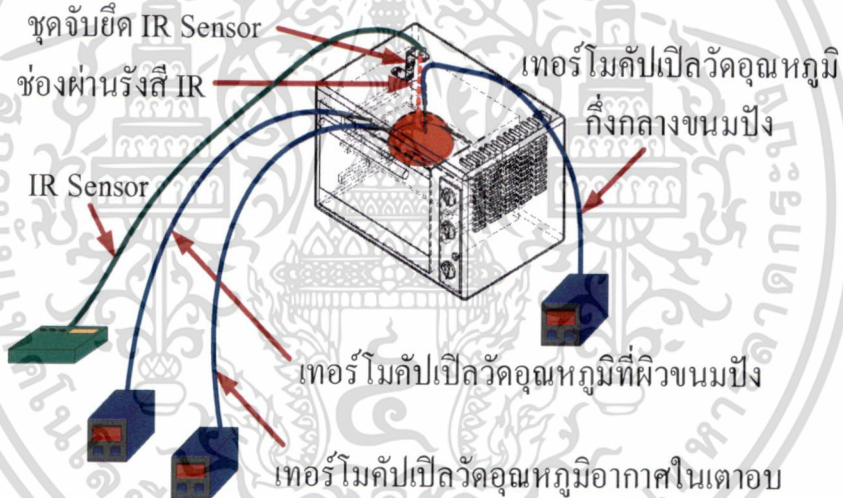
3.3.2 การทดสอบกระบวนการอบขนมปังโดยใช้ IR sensor ควบคุมอุณหภูมิที่ผิว

เมื่อได้ค่า ε ของขนมปังในแต่ละช่วงของกระบวนการอบแล้ว ให้นำค่า ε ดังกล่าวมาทดสอบกับ IR sensor ที่ติดตั้งอยู่บนตู้อบขนาดเล็ก โดยใช้ IR sensor วัดอุณหภูมิที่ผิวขนมปังและกำหนดค่า ε ที่ได้จากการทดลองให้กับ IR sensor เปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ผิวที่วัดได้จากเทอร์โมคัปเปิล ระบบ

การทดสอบขนมปังด้วยการควบคุมอุณหภูมิที่ผิวดังแสดงในรูปที่ 3.9 และแผนผังการทดสอบการอบขนมปังโดยการควบคุมอุณหภูมิที่ผิวด้วย IR sensor แสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.8 ก) IR sensor ที่ใช้ในการทดลอง ข) ติดตั้ง IR sensor ไว้ที่ด้านบนเตาอบขนาดเล็ก



รูปที่ 3.9 ระบบการทดสอบการอบขนมปังด้วยการควบคุมอุณหภูมิที่ผิวโดยใช้ IR sensor

การทดสอบการทำงานของตู้อบแบบใช้ IR sensor วัดอุณหภูมิที่ผิว ซึ่งใช้แผ่นเหล็กที่ทราบค่า ϵ มาใช้ในการทดสอบ โดยทำการวัดอุณหภูมิที่ผิวของวัตถุด้วย IR sensor และติดเทอร์โมคัปเปิลไว้ที่ผิวของแผ่นเหล็ก จากนั้นใช้ IR sensor วัดอุณหภูมิที่ผิวของแผ่นเหล็ก โดยป้อนค่า ϵ ของแผ่นเหล็กให้กับ IR sensor เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากจาก IR sensor กับอุณหภูมิที่ได้จากเทอร์โมคัปเปิลจากการทดสอบเบื้องต้นพบว่าอุณหภูมิที่ได้จาก IR sensor มีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่ได้จากเทอร์โมคัปเปิล แสดงให้เห็นว่าสามารถใช้ IR sensor ในการวัดอุณหภูมิที่ผิวของวัตถุได้ จากนั้นทำการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดสอบการวัดอุณหภูมิที่ผิวของขนมปังในระหว่างการอบ โดยป้อนค่า ϵ ของขนมปังในช่วงต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลองให้กับ IR sensor เปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ผิวที่วัดได้จากเทอร์โมคัปเปิล จากนั้นนำอุณหภูมิที่ผิวไปใช้ในการทำนายหาอุณหภูมิที่กึ่งกลางของขนมปังโดยใช้สมการความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ผิวกับอุณหภูมิที่กึ่งกลาง เปรียบเทียบอุณหภูมิที่กึ่งกลางที่ได้จากสมการความสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่กึ่งกลางวัดได้จากเทอร์โมคัปเปิล หากอุณหภูมิที่ได้จากสมการความสัมพันธ์แตกต่างจากอุณหภูมิที่ได้จากเทอร์โมคัปเปิล ต้องทดลองหาค่า ϵ ใหม่อีกครั้ง จนกว่าอุณหภูมิทั้งสองจะมีค่าเท่ากับหรือใกล้เคียงกัน เมื่อทดลองจนกระทั่งได้ ϵ ที่ทำให้อุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปังที่ได้จากสมการและอุณหภูมิที่ได้จากเทอร์โมคัปเปิลมีค่ากัน จึงนำค่าอุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปังที่ได้ไปใช้ในการควบคุมของเตาอบ อย่างไรก็ตาม สมการที่ใช้ในการทำนายควรนำหลักการถ่ายเทความร้อนและมวลสารเข้ามาร่วมพิจารณาด้วย รวมถึงปัจจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น ความเร็วลม ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน องค์ประกอบภายในวัตถุ เป็นต้น เพื่อให้ได้ผลการทำนายที่ถูกต้อง



รูปที่ 3.10 แผนผังแสดงการทดสอบการอบขนมปังโดยการควบคุมอุณหภูมิที่ผิวด้วย IR sensor

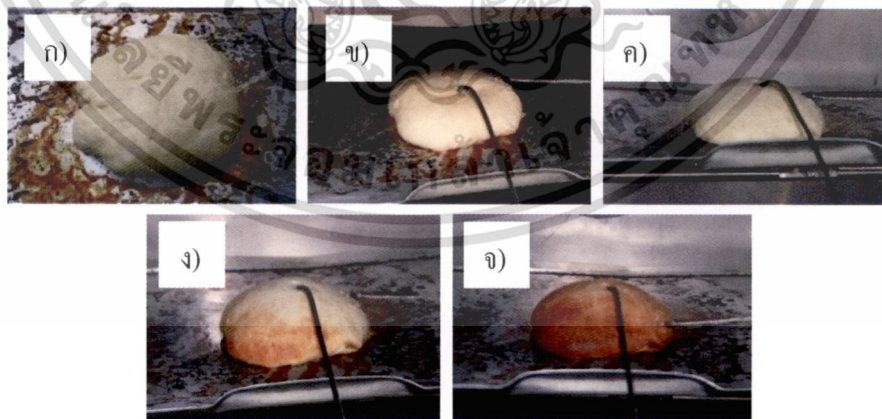
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ค่า Emissivity ของขนมปังในระหว่างการอบ

ผลการวัดค่า ϵ ของขนมปังในเตาอบโดยใช้ IR sensor ซึ่งเป็นการวัดค่า ϵ จากด้านบนของขนมปัง ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.1 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)

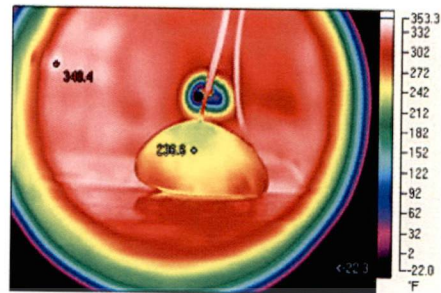
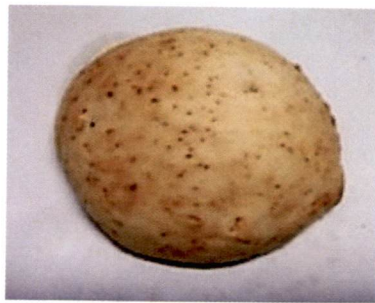
จากผลการทดลองพบว่าค่า ϵ ของขนมปังในช่วงที่ 1 และ 2 มีค่าอยู่ในช่วงเดียวกัน ซึ่งแตกต่างจาก ϵ ในช่วงที่ 3 อย่างเห็นได้ชัด โดยค่า ϵ ของขนมปังในช่วงที่ 1 และ 2 มีค่าเท่ากันคือ 0.95 ค่า ϵ ในช่วงที่ 3 มีค่าอยู่ในช่วง 0.81-0.95 เนื่องจากช่วงที่ 1 และ 2 อยู่ในช่วงเริ่มต้นของการอบ น้ำที่ผิวขนมปังมีอัตราการระเหยค่อนข้างต่ำ อุณหภูมิที่ผิวขนมปังจึงยังไม่สูงมาก จนกระทั่งในช่วงที่ 3 อุณหภูมิที่ผิวขนมปังสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด น้ำที่ผิวขนมปังส่วนใหญ่จึงเกิดการระเหยในช่วงนี้ ทำให้ลักษณะพื้นผิวของขนมปังในช่วงที่ 3 แตกต่างจากช่วงที่ 1 และ 2 ส่งผลให้ค่า ϵ แตกต่างกันด้วย อาจกล่าวได้ว่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นและการระเหยของน้ำที่ผิวทำให้ขนมปังในแต่ละช่วงกลายเป็นวัตถุต่างชนิดกัน จึงทำให้ค่า ϵ ที่ได้แต่ละช่วงมีค่าแตกต่างกัน ซึ่งสอดคล้องกับค่ากล่าวของปริญญา (2546) ที่ว่าวัตถุที่ต่างชนิดกันจะมีค่า ϵ แตกต่างกันขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัตถุ ลักษณะขนมปังที่อุณหภูมิต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ตัวอย่างภาพถ่ายทางความร้อนของขนมปังในระหว่างการอบแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 ลักษณะขนมปังระหว่างการอบเมื่ออุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปังมีค่า ก) เริ่มต้น ข) 40°C ค) 60°C ง) 98°C จ) 98°C (สิ้นสุดกระบวนการอบ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพถ่ายทางความร้อนของวัสดุทางอาหาร



รูปที่ 4.2 ตัวอย่างภาพถ่ายทางความร้อนของขนมปังในระหว่างการอบ

ตารางที่ 4.1 ค่า ϵ ของขนมปังเมื่อใช้ IR sensor ในการวัดค่า

ช่วงที่	Emissivity	อุณหภูมิจากเทอร์โมคัปเปิล (°C)		อุณหภูมิจาก IR sensor (°C)
		อุณหภูมิที่กลาง	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

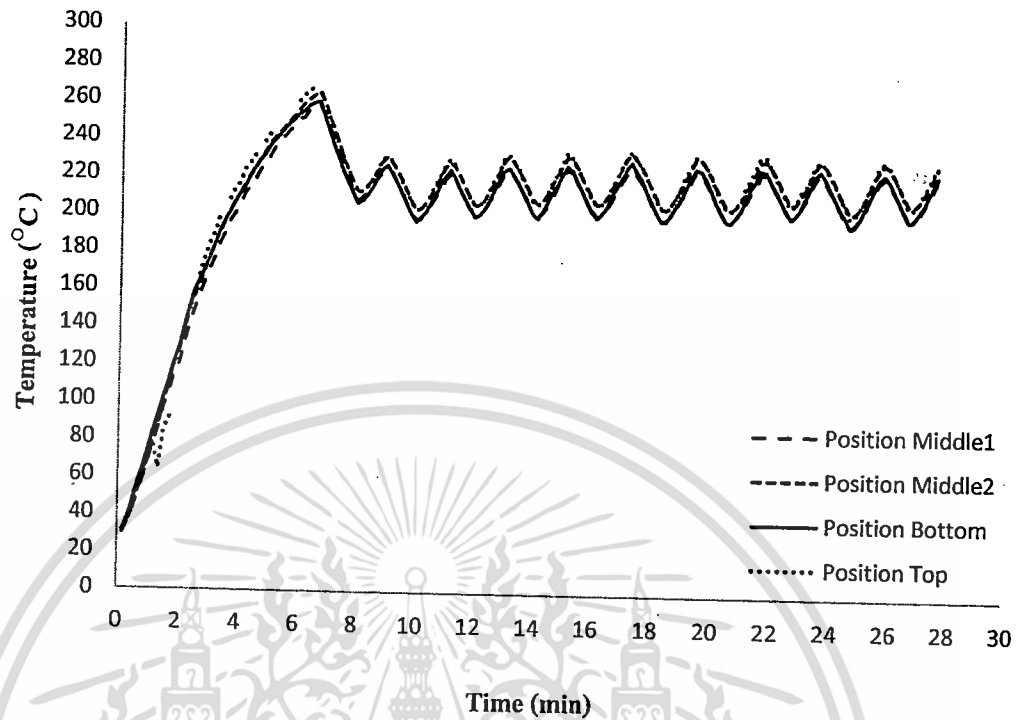
4.2 การทดสอบการอบขนมปัง

4.2.1 คุณลักษณะของเตาอบ: ฮีตเตอร์รีซิสการตัดต่ออุณหภูมิภายในเตาอบ

เมื่อให้พลังงานความร้อนแก่ฮีตเตอร์ (Heater) ภายในเตาอบจะทำให้ฮีตเตอร์มีอุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งมีเทอร์โมสแตท (Thermostat) เป็นอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ ทำหน้าที่ตัดต่อการจ่ายพลังงานให้กับฮีตเตอร์ โดยมีการตัดต่ออุณหภูมิในช่วง $\pm 10^{\circ}\text{C}$ ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งพบว่าหากตั้งค่าอุณหภูมิเตาไว้ที่ 210°C อุณหภูมิของอากาศภายในเตาจะมีค่า $210 \pm 10^{\circ}\text{C}$

เมื่อพิจารณากราฟที่ได้จากการทดลองพบว่าหากตั้งค่าอุณหภูมิภายในเตาอบไว้ที่ 210°C เตาอบจะใช้เวลาประมาณ 8-10 นาที ในการเข้าสู่สภาวะสมดุล ซึ่งเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะสมดุลขึ้นอยู่กับ

กับการตั้งค่าอุณหภูมิภายในเตาอบ โดยหากตั้งอุณหภูมิไว้สูงเตาอบจะใช้เวลานานกว่าในการเข้าสู่สภาวะสมดุล แต่หากตั้งค่าอุณหภูมิไว้ต่ำเตาอบจะใช้เวลาเร็วกว่าในการเข้าสู่สภาวะสมดุล



รูปที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศภายในเตาอบเมื่อตั้งค่าอุณหภูมิเตาอบไว้ที่ 210°C

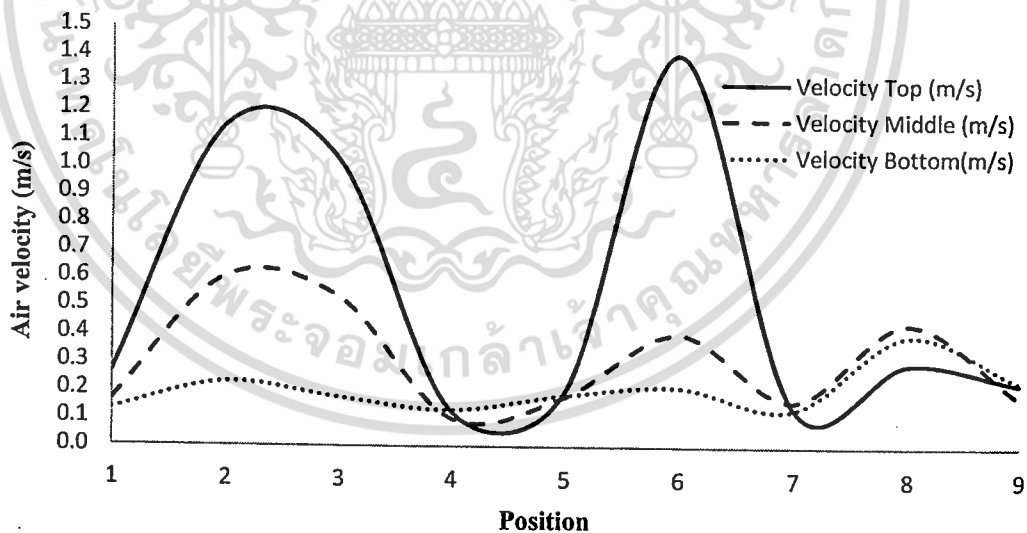
4.2.2 คุณลักษณะของเตาอบ: ความเร็วลมภายในเตาอบ

แบ่งพื้นที่ภายในเตาอบบริเวณเหนือถาดวางขึ้นไป ออกเป็น 3 แถว คือ แถวบน แถวกลาง และแถวล่าง เพื่อวัดความเร็วลม โดยแต่ละแถวมีการวัดความเร็วลมทั้งหมด 9 ตำแหน่ง ผลการทดลองพบว่าความเร็วลมเฉลี่ยและความแปรปรวนของความเร็วลมในแต่ละตำแหน่งมีค่าสูงสุดที่แถวบน สาเหตุที่ความเร็วลมเฉลี่ยและความแปรปรวนในแต่ละตำแหน่งของแถวบนมีค่าค่อนข้างสูงเนื่องจากช่องลมถูกติดตั้งไว้ที่บริเวณด้านบนของผนังเตาด้านขวา ซึ่งตรงกับบริเวณแถวบนพอดี ทำให้ลมถูกเป่ามาที่แถวบนโดยตรง อย่างไรก็ตามในการทดลองได้มีการวางโดไว้ที่ถาดวาง ดังนั้นลมร้อนที่สัมผัสกับโดหรือขนมปังโดยตรงคือลมร้อนบริเวณแถวกลางและแถวล่างซึ่งมีค่าความเร็วลมค่อนข้างใกล้เคียงกันและมีความแปรปรวนของความเร็วลมในแต่ละตำแหน่งไม่สูงมากนัก ดังแสดงในตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.4 ซึ่งความเร็วลมเฉลี่ยรวมของแถวกลางกับแถวล่างมีค่าอยู่ในช่วง 0.1-0.6 m/s โดยมีค่าเฉลี่ย 0.254 m/s ตำแหน่งการวัดและค่าความเร็วลมที่ตำแหน่งดังกล่าว แสดงในรูปที่ 4.5

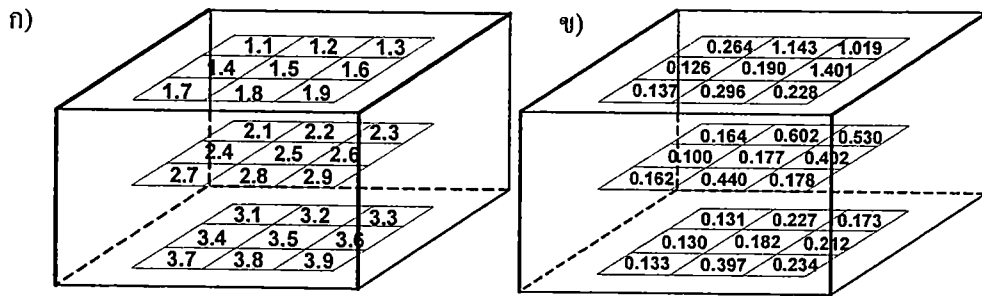
ตารางที่ 4.2 ความเร็วเฉลี่ย (m/s) ของลมภายในเตาอบที่แถวและตำแหน่งต่างๆ

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 ($P \leq 0.05$)



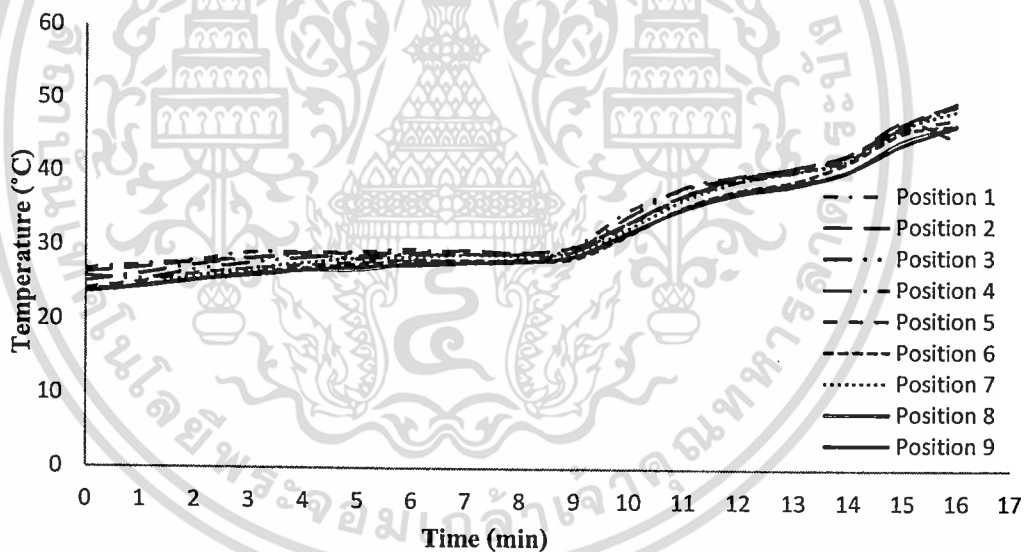
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงค่าความเร็วลมในแต่ละตำแหน่งของแถวบน แถวกลาง และแถวล่าง



รูปที่ 4.5 ก) ตำแหน่งการวัดความเร็วลมร้อนภายในเตาอบบริเวณเหนือถาดวาง
ข) ค่าความเร็วลมที่ตำแหน่งต่างๆ เหนือถาดวาง

4.2.3 คุณลักษณะของเตาอบ: การกระจายอุณหภูมิภายในเตาอบ

ค่าการกระจายอุณหภูมิภายในเตาอบที่ตำแหน่งต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 จากรูปแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งมีค่าแตกต่างกันน้อยมาก ดังนั้นไม่ว่าจะวางโคไว้ ณ ตำแหน่งใด ขนมปังที่ได้จะมีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน ซึ่งในการทดลองได้วางโคไว้ที่ตำแหน่งที่ 5 เนื่องจากมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิก่อนข้างคงที่และแนวโน้มอุณหภูมิอยู่ในช่วงค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิทั้ง 9 ตำแหน่ง



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงการกระจายอุณหภูมิภายในเตาอบ

เมื่อเปิดให้ความร้อนกับเตาอบโดยให้ความร้อนกับฮีตเตอร์ทั้งด้านบนและด้านล่าง พัดลมจะถูกเปิดขึ้นมาโดยอัตโนมัติเพื่อให้ความร้อนในเตาอบกระจายอย่างทั่วถึง โดยความเร็วลมร้อนบริเวณที่สัมผัสกับขนมปังโดยตรงมีค่าอยู่ในช่วง 0.1-0.6 เฉลี่ย 0.254 m/s โดยเมื่อเปิดให้ความร้อน เตาอบจะใช้ระยะเวลาช่วงหนึ่งเพื่อเข้าสู่สภาวะสมดุล (อุณหภูมิของอากาศภายในเตาอบคงที่) โดย

ระยะเวลาในการเข้าสู่สภาวะสมดุลจะขึ้นอยู่กับการตั้งค่าอุณหภูมิให้กับเตาอบ โดยฮีสเตอร์รีซิสการ ตัดต่ออุณหภูมิภายในเตาอบอยู่ในช่วง $\pm 10^{\circ}\text{C}$

4.2.4 การปรับอุณหภูมิอากาศภายในเตาอบในระหว่างการอบขนมปัง

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

4.2.4.1 ผลการปรับลดอุณหภูมิภายในเตาอบในแต่ละช่วงของการอบขนมปัง

จากการทดลองปรับลด-เพิ่มอุณหภูมิในระหว่างการอบขนมปังพบว่า

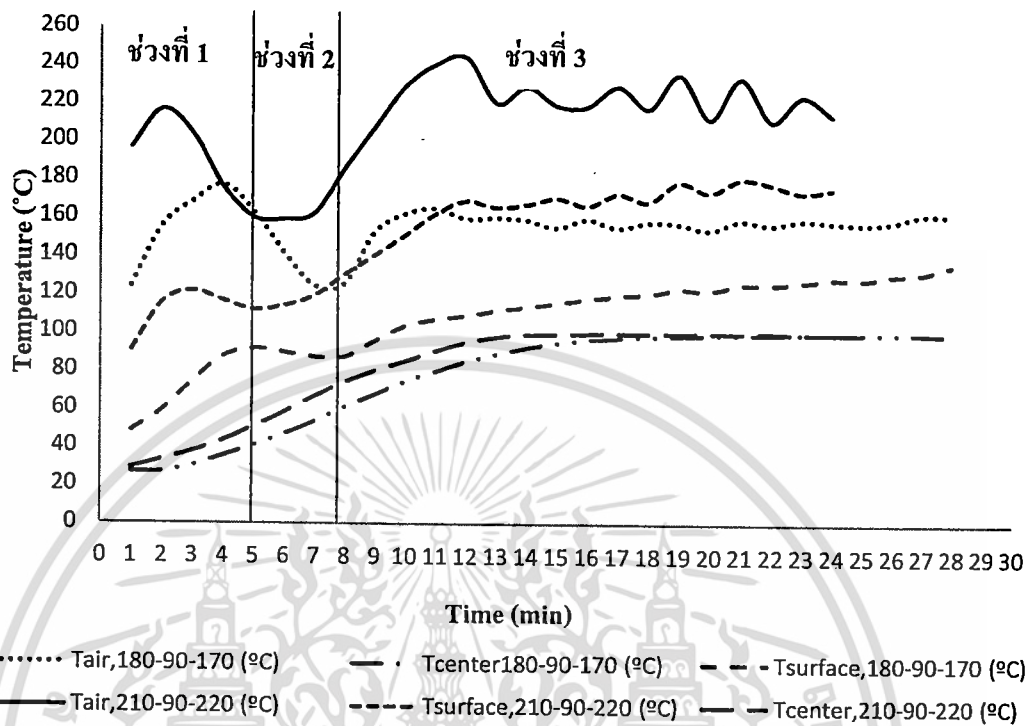
ช่วงที่ 1 เป็นช่วงที่อุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปังมีค่าตั้งแต่เริ่มต้นจนถึง 40°C การเพิ่มขึ้นของ อุณหภูมิในช่วงนี้จะขึ้นไปอย่างช้าๆ ความร้อนในช่วงนี้ถูกนำไปใช้ในการทำให้เกิดปฏิกิริยาต่างๆ ของเอนไซม์ รวมทั้งเกิดการเจริญเติบโตของยีสต์ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้น ปริมาตร ของโดจึงค่อยๆ เพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากอุณหภูมิในช่วงนี้มีค่าค่อนข้างต่ำ ความดันไอน้ำที่ผิวขนมปังจึงมี ค่าต่ำด้วย ในช่วงนี้จึงยังไม่เกิดการระเหยของไอน้ำที่ผิวด้านในของขนมปัง

ดังนั้นความร้อนในช่วงนี้จึงยังไม่ส่งผลต่ออัตราการสูญเสียน้ำหนักของขนมปัง (Therdthai et al., 2002) จากรูปที่ 4.7 จะเห็นว่าอุณหภูมิ 210°C ทำให้อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ผิวขนมปัง จากอุณหภูมิเริ่มต้นจนถึง 110°C สูงเกินไปส่งผลให้เกิดเปลือกขนมปัง (crust) ขึ้นเนื่องจากน้ำที่ผิว ขนมปังระเหยอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ผิวขนมปังดำและไหม้ในขณะที่น้ำข้างในยังระเหยออกไม่หมด หรือเรียกว่าเกิดการไหม้ก่อนสุก เนื่องจาก crust ทำให้น้ำด้านในขนมปังไม่สามารถระเหยออกมาที่ ผิวได้ (Therdthai et al., 2002) และเมื่อพิจารณาที่เส้นกราฟของอุณหภูมิ 180°C พบว่าอุณหภูมิที่ผิว ขนมปังค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนมีค่าประมาณ $90-95^{\circ}\text{C}$ ในช่วงสุดท้ายซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ทำให้น้ำที่ผิวขนม ปังเริ่มมีการระเหยกลายเป็นไอ โดยที่ยังไม่เกิด crust ป้องกันการระเหยออกของไอน้ำ ซึ่งจะส่งผล ให้ไอน้ำที่อยู่ในชั้นถัดๆ ไป สามารถแทรกซึมออกมาที่ผิวขนมปังและระเหยออกจากผิวขนมปังได้ เรื่อยๆ ดังนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสมในช่วงที่ 1 คือ 180°C ซึ่งช่วงที่ 1 ใช้เวลาในการอบคิดเป็น 21.4 % ของระยะเวลาที่ใช้ในการอบทั้งหมด (ระยะเวลาอบทั้งหมด 28 นาที)

ช่วงที่ 2 คือช่วงที่อุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปังมีค่าตั้งแต่ 40°C ถึง 60°C ในช่วงนี้ยังคงมีการ เกิดปฏิกิริยาต่างๆ ของเอนไซม์ และเกิดการเจริญเติบโตของยีสต์ ทำให้ปริมาตรของโดเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับช่วงที่ 1 แต่ในช่วงนี้ความดันไอน้ำที่ผิวเริ่มมีค่าสูงขึ้น ทำให้ช่วงนี้เริ่มมีผลต่อการสูญเสีย น้ำหนักของขนมปัง (Therdthai et al., 2002)

อย่างไรก็ตามจากการทดลองการเพิ่มอุณหภูมิในช่วงนี้ ไม่มีผลต่อการสูญเสียน้ำหนักของขนมปัง อย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงในตารางที่ 4.3 ซึ่งเป็นผลมาจากได้มีการปรับลดอุณหภูมิของอากาศ ภายในเตาอบ ในช่วงนี้ส่งผลให้อุณหภูมิที่ผิวขนมปังค่อนข้างคงที่ การระเหยออกของน้ำที่บริเวณผิว

ของขนมปังจึงคงที่หรือลดลงด้วย (Therdthai et al., 2002, 2004) อีกทั้งระยะเวลาที่ใช้ในช่วงนี้
ก่อนข้างสั้น ซึ่งคิดเป็น 7.2 % ของระยะเวลาที่ใช้ในการอบทั้งหมด (28 นาที)



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

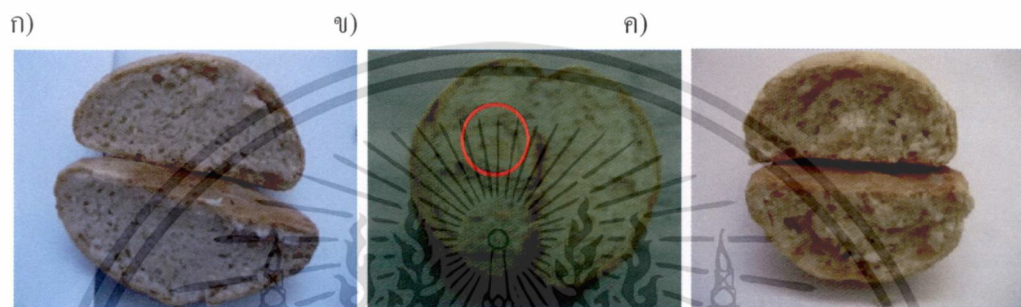
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอากาศในเตา (Tair) อุณหภูมิที่ผิวขนมปัง (Tsurface) และอุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปัง (Tcenter) ที่อุณหภูมิอากาศในช่วงที่ 1 เป็น 180 °C และ 210°C

ความร้อนในช่วงที่ 2 มีผลต่อการสุกของขนมปัง ซึ่งหากอุณหภูมิต่ำเกินไปจะทำให้ความชื้นในขนมปังระเหยออกได้น้อย ทำให้เมื่อสิ้นสุดกระบวนการอบโคไม่สามารถเปลี่ยนเป็นขนมปังได้ทั้งหมดหรือขนมปังไม่สุกทั่วทั้งก้อน และหากอุณหภูมิสูงเกินไปจะทำให้เนื้อขนมปังแห้งเกินไป ซึ่งจากการทดลองอุณหภูมิที่เหมาะสมในช่วงที่ 2 คือ 120°C เนื่องจากเป็นอุณหภูมิที่ทำให้ขนมปังสุกทั่วทั้งก้อน คือไม่มีโคเหลืออยู่ภายในขนมปัง ดังรูปที่ 4.8 จะเห็นว่าที่อุณหภูมิ 90°C และ 110°C เนื้อด้านในขนมปังยังมีโคปรากฏอยู่ (ลักษณะใสและเปียก)

ตารางที่ 4.3 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: ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรภาษาอังกฤษตามหลังต่างกันในแต่ละแถว (a และ b) แสดงค่าความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)



หมายเหตุ: วงกลมสีแดงแสดงตำแหน่งที่เนื้อขนมปังไม่สุก

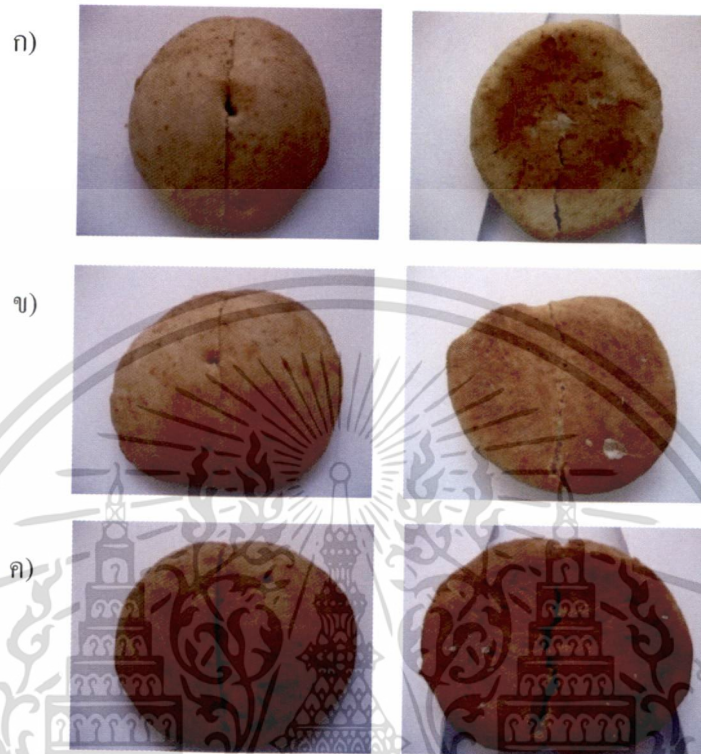
รูปที่ 4.8 ผิวภายในของขนมปัง เมื่อให้อุณหภูมิอากาศในช่วงที่ 2 เป็น ก) 90°C ข) 100°C ค) 110°C โดยอุณหภูมิในช่วงที่ 1 และ 2 เป็น 180°C และ 170°C

ช่วงที่ 3 คือช่วงที่อุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปังมีค่าตั้งแต่ 60°C จนถึง 98°C และคงอุณหภูมิไว้ที่ค่านี้เป็นเวลา 10 นาที ปฏิกริยาต่าง ๆ รวมทั้งการระเหยของความชื้น และการเกิด gelatinization จะเกิดขึ้นสูงสุดในช่วงนี้ที่อุณหภูมิประมาณ 98-99°C ในช่วงนี้ขนมปังจะเริ่มมีสีน้ำตาลอ่อนเนื่องมาจากปฏิกริยาการเกิดปฏิกริยาสีน้ำตาล (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 4.9 อีกทั้งเมื่อพิจารณาค่าการสูญเสียน้ำหนักของขนมปังหลังการอบพบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในช่วงที่ 3 ค่าการสูญเสียน้ำหนักจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากระยะเวลาของการอบในช่วงนี้ค่อนข้างนานคิดเป็น 71.4 % ของระยะเวลาที่ใช้ในการอบทั้งหมด (28 นาที) ใอน้ำส่วนใหญ่รวมทั้งสารอินทรีย์ต่างๆ จึงมีการระเหยในระหว่างช่วงนี้เป็นส่วนมาก ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ดังนั้นอุณหภูมิภายในเตาอบที่เหมาะสมต่อการอบขนมปังในช่วงที่ 1 2 และ 3 ซึ่งทำให้ขนมปังที่

ออกมาสุกทั้งก้อน สีพอดี ไม่คล้ำหรือสว่างเกินไป และมีการสูญเสียน้ำหนักค่าคือ 180°C 120°C และ 170°C



รูปที่ 4.9 ผิวด้านนอกของขนมปัง เมื่อให้อุณหภูมิอากาศในช่วงที่ 3 เป็น ก) 170°C ข) 180°C ค) 190°C โดยอุณหภูมิในช่วงที่ 1 และ 2 เป็น 180°C และ 120°C

4.2.4.2 เปรียบเทียบการอบขนมปังด้วยอุณหภูมิคงที่กับการอบขนมปังด้วยการปรับอุณหภูมิของอากาศภายในเตาอบ

เมื่อพิจารณาในรูปที่ 4.10 พบว่าเมื่อลดอุณหภูมิของอากาศภายในเตาอบในช่วงที่ 1 จาก 180°C เป็น 120°C ส่งผลให้อุณหภูมิที่ผิวของขนมปังลดลงและค่อนข้างคงที่ในช่วงหนึ่ง และจากการที่อุณหภูมิที่ผิวลดลงทำให้อุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมเพิ่มขึ้นในอัตราที่ลดลง เมื่ออุณหภูมิที่กึ่งกลางมีค่าเป็น 60°C ได้มีการปรับอุณหภูมิของอากาศในเตาขึ้นเป็น 170°C อุณหภูมิที่ผิวจึงเริ่มปรับตัวเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ทำให้อุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปังเพิ่มขึ้นจนกระทั่งคงที่ที่อุณหภูมิประมาณ 98-99°C ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการปรับลด-เพิ่มอุณหภูมิของอากาศในเตาอบกระบวนการเกิดเจล (gelatinization) ยังคงเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์

เมื่อพิจารณาอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปังพบว่าเมื่อมีการปรับลด-เพิ่มอุณหภูมิ

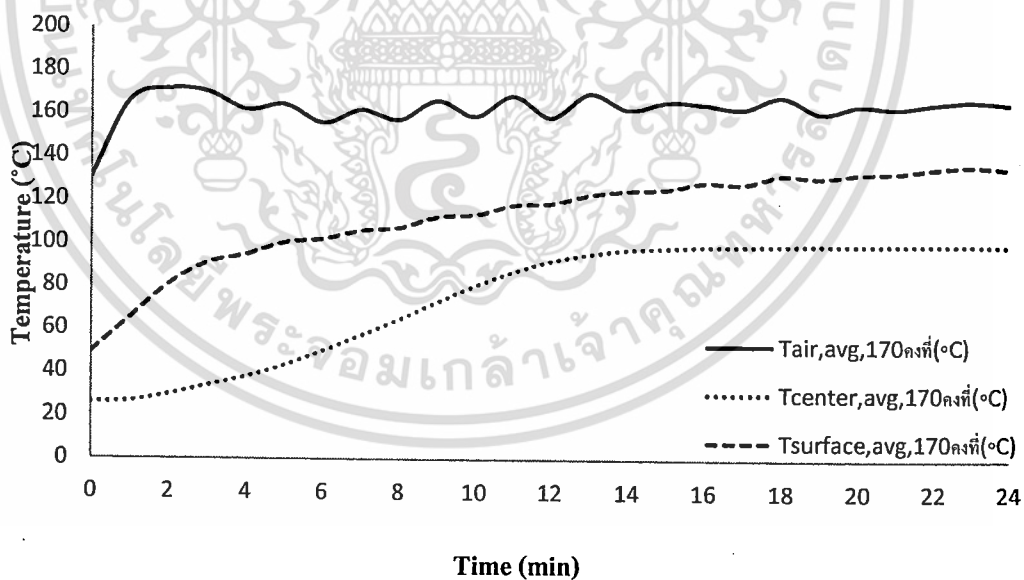
ของอากาศในเตาอบทำให้อุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปังใน stage 1 และ 2 ลดลงด้วย ในขณะที่เมื่อให้อุณหภูมิคงที่ อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปังใน stage 1 และ 2 จะค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดยมีค่าเฉลี่ยเป็น 5.24°C/min และ 5.14°C/min ตามลำดับ และเมื่อมีการปรับลด-เพิ่มอุณหภูมิของอากาศในเตาอบ อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่กึ่งกลางโดยเฉลี่ยลดลงเป็น 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)

เมื่อพิจารณาการสูญเสียน้ำหนักของขนมปังในระกวางการอบพบว่าเมื่อมีการปรับลด-เพิ่มอุณหภูมิของอากาศในเตาอบทำให้อัตราการสูญเสียน้ำหนักลดลงด้วย โดยเมื่อให้อุณหภูมิคงที่ อัตราการสูญเสียน้ำหนักมีค่าเป็น 11.46 % โดยเฉลี่ย และเมื่อมีการปรับลด-เพิ่มอุณหภูมิ อัตราการสูญเสียน้ำหนักมีค่าเป็น 10.82 % โดยเฉลี่ย ซึ่งมีค่าลดลงประมาณ 1 % ดังแสดงในตารางที่ 4.4

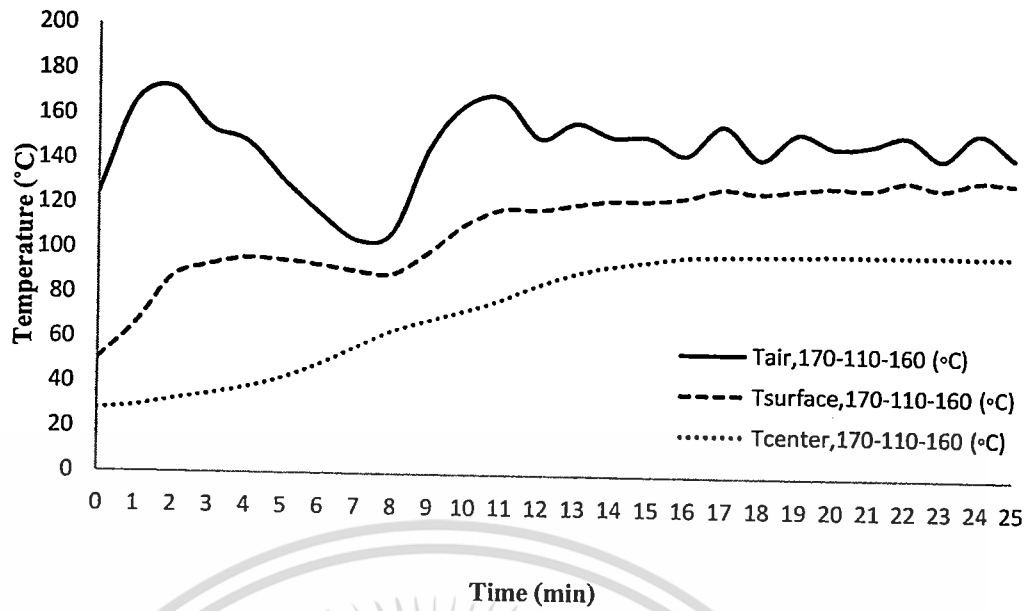
ตารางที่ 4.4 ค่าการสูญเสียน้ำหนักของขนมปังหลังการอบเมื่ออุณหภูมิในช่วงที่ 3 มีค่าแตกต่างกัน

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

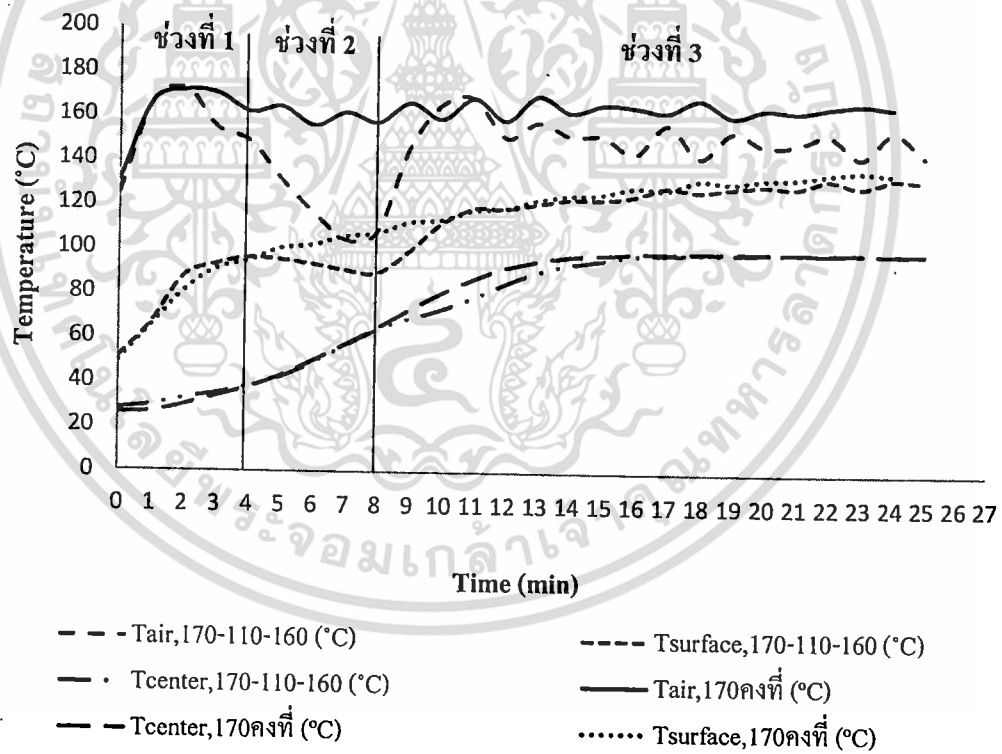
หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรภาษาอังกฤษตามหลังต่างกันในแต่ละแถว (a และ b) แสดงค่าความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอากาศในเตาอบ (T_{air}) อุณหภูมิที่ผิวขนมปัง ($T_{surface}$) และอุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปัง (T_{center}) เมื่อให้อุณหภูมิของอากาศภายในเตาอบที่ 180°C



รูปที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศภายในเตาอบ (T_{air}) อุณหภูมิที่ผิว ($T_{surface}$) และอุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปัง (T_{center}) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอากาศในช่วงที่ 2 และ 3 จาก 180°C เป็น 120°C และ 170°C ตามลำดับ



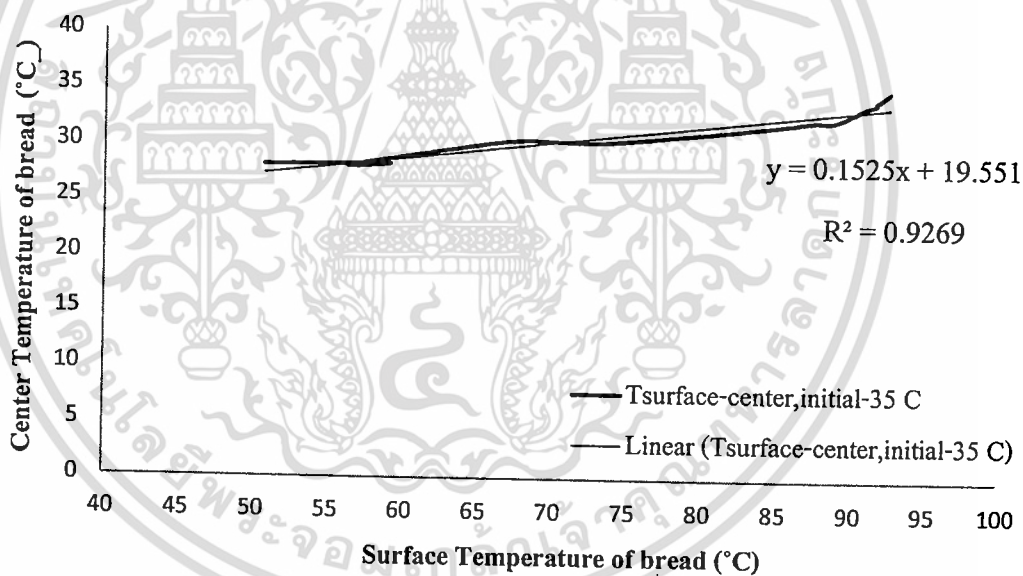
รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศภายในเตาอบ (T_{air}) อุณหภูมิที่ผิว ($T_{surface}$) และอุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปัง (T_{center}) เมื่อให้อุณหภูมิอากาศคงที่ที่ 170°C และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอากาศในช่วงที่ 1 2 และ 3 เป็น 180°C 120°C และ 170°C

4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ผิวกับอุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปังในระหว่างการอบ

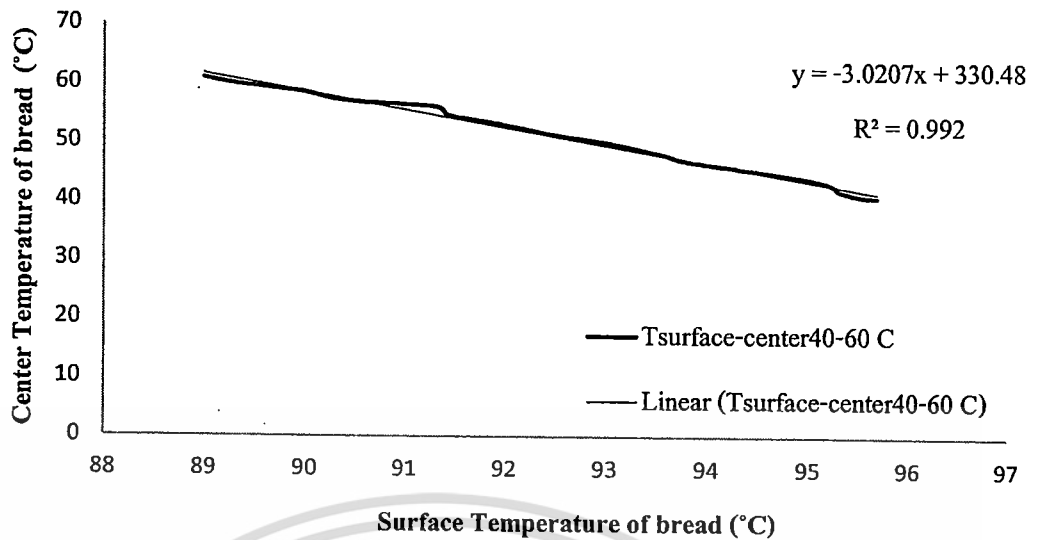
เนื่องจากการวัดอุณหภูมิจากการแผ่รังสีอินฟราเรดของวัตถุเป็นการวัดอุณหภูมิที่ผิววัตถุนั้น ในขณะที่คุณสมบัติต่างๆ ของขนมปังในระหว่างการอบขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปังเป็นสิ่งสำคัญ ซึ่งกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ผิวกับอุณหภูมิที่กึ่งกลางของปังที่วัดค่าอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิลแสดงในรูปที่ 4.13-4.15 และสมการความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ผิวขนมปัง (x) กับอุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปัง (y) ของช่วงต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 สมการความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ผิวและที่กึ่งกลางขนมปัง และค่าร้อยละความเชื่อมั่น (R^2) ของสมการในช่วงอุณหภูมิต่างๆ

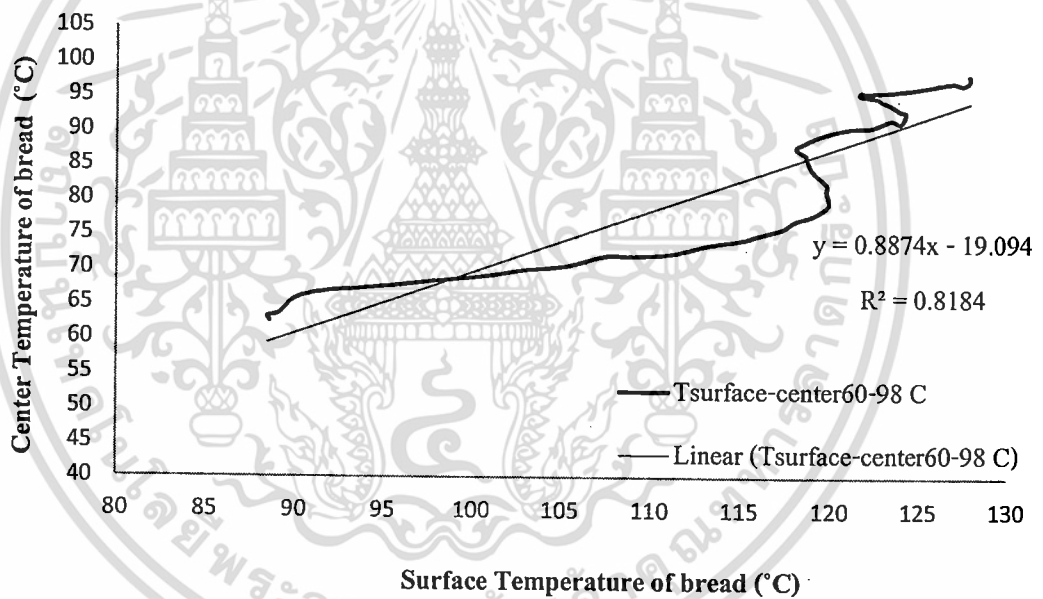
ช่วงการอบ (ช่วงอุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปัง: °C)	สมการความสัมพันธ์	%ความผิดพลาด (R^2)
(1) เริ่มต้น - 40	$y = 0.152x + 19.55$	0.926
(2) 40 - 60	$y = -3.020x + 330.4$	0.992
(3) 60 - 98	$y = 0.887x - 19.09$	0.818



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ผิวกับอุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปังในช่วงที่ 1 เมื่ออุณหภูมิที่กึ่งกลางเริ่มต้นจนถึง 40 °C



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ผิวกับอุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปังในช่วงที่ 2 เมื่ออุณหภูมิที่กึ่งกลางมีค่า 40–60°C



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ผิวกับอุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปังในช่วงที่ 3 เมื่ออุณหภูมิที่กึ่งกลางมีค่า 60–98°C

4.4 การทดสอบการอบขนมปังด้วยการควบคุมอุณหภูมิที่ผิวโดยใช้ IR sensor

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

- ในการทดสอบการวัดอุณหภูมิเปลือกด้วย IR sensor เพื่อจำลองกระบวนการอบขนมปังซึ่งเป็นช่วงที่มีอุณหภูมิก่อนข้างสูง (นอกย่านการใช้งานของ IR sensor) จึงต้องติดตั้ง IR sensor ไว้ด้านบนเตาอบ 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 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ดังกล่าวยังอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ดังนั้นจึงสามารถประยุกต์ใช้ IR sensor ดังกล่าวกับกระบวนการอบขนมปังได้

ทดสอบความถูกต้องของการวัดอุณหภูมิขนมปังในระหว่างกระบวนการอบ โดยป้อนค่า ϵ ที่ได้จากตารางที่ 4.1 ให้กับ IR sensor และเปรียบเทียบอุณหภูมิผิวขนมปังที่วัดได้จากเทอร์โมคัปเปิล พบว่าอุณหภูมิที่ผิวขนมปังที่วัดได้จาก IR sensor กับอุณหภูมิที่ผิวขนมปังที่วัดได้จากเทอร์โมคัปเปิลมีค่าใกล้เคียงกัน จากนั้นนำอุณหภูมิผิวที่ได้ไปใช้ในการทำนายหาอุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปังโดยใช้สมการความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ผิวกับอุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปัง เปรียบเทียบอุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปังที่วัดได้จากเทอร์โมคัปเปิล

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 ตลอดเวลาเป็นไปได้ยากมาก เนื่องจากวัตถุมีการเคลื่อนที่ตลอดเวลา อาจทำให้ไม่สามารถป้อนค่า ϵ ให้ IR sensor ได้ทันการเคลื่อนไหวของวัตถุได้ ดังนั้น IR sensor จึงไม่เหมาะกับการใช้งานในเชิงควบคุมกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่อง แต่อย่างไรก็ตาม IR sensor สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับกระบวนการผลิตแบบเป็นกะ (Batch) ในลักษณะของงานวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ (R&D) หรืองานทางด้าน การตรวจสอบคุณภาพผลิตภัณฑ์ในระหว่างกระบวนการผลิต รวมไปถึงการตรวจสอบเพื่อซ่อมบำรุงเครื่องจักร อุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิต



บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

1) 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 $G_{\lambda,ref}$) ซึ่ง IR sensor ไม่สามารถกำหนดค่า T_{BG} เพื่อชดเชยค่า $G_{\lambda,ref}$ ที่เกิดจากสิ่งแวดล้อมภายนอกได้ ดังนั้นค่า ε ที่ได้จาก IR sensor จึงไม่ใช่ค่า ε ที่แท้จริงของวัตถุ

2) สามารถประยุกต์ใช้ IR sensor วัดอุณหภูมิที่ผิวขนมปังในระหว่างกระบวนการอบขนมปัง และใช้อุณหภูมิผิวที่ได้เป็นตัวแปรอินพุตสำหรับควบคุมอุณหภูมิของเตาอบได้ โดยติดตั้ง IR sensor ไว้ด้านบนเตาอบขนาดเล็กวัดอุณหภูมิที่ผิวเพื่อทำนายอุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปัง สรุปการทดลองเพื่อนำ IR ไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการอบขนมปังได้ดังนี้

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

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

2.3) สามารถใช้ IR sensor วัดอุณหภูมิที่ผิวของขนมปังเพื่อใช้เป็นตัวแปรอินพุตสำหรับควบคุมอุณหภูมิของเตาอบได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. 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

2. การทดสอบเตาอบควรมีการเปรียบเทียบอุณหภูมิของวัตถุที่อ่านได้จาก IR sensor กับอุณหภูมิที่อ่านได้จากเทอร์โมคัปเปิลที่ผ่านการสอบเทียบ เพื่อให้มั่นใจได้ว่าอุณหภูมิที่อ่านได้จาก IR sensor คืออุณหภูมิที่แท้จริงของวัตถุ และควรมีการหาค่าการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นกับโคหรือขนมปังภายในเตาอบในช่วงต่างๆ เพื่อนำไปใช้ในการหาสมการที่แท้จริงในการทำนายอุณหภูมิกึ่งกลางขนมปังจากอุณหภูมิที่ผิว

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



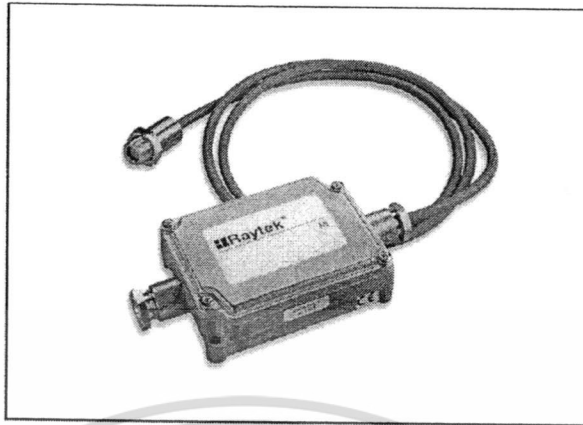
บรรณานุกรม

- จิตรณา แจ่มเมฆ และอรอนงค์ นัยวิกุล. 2544 เบเกอร์เทคโนโลยีเบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่ 6. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ประวิทย์ วัฒนากร. 2553. กล้องถ่ายภาพความร้อนบอกที่ซ่อนอุณหภูมิจ. [Online]. Available : <http://www.vcharkam.com/varticle/39579>
- มนตรี พิรุณเกษตร. 2548. การถ่ายเทความร้อน ฉบับเตรียมสอบและเสริมประสบการณ์. พิมพ์ครั้งที่ 4 กรุงเทพฯ: วิทยพัฒน์.
- วารวดี ครูส่ง และรุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต. 2532 เทคโนโลยีการหมักในอุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ : โอเดียนสโตร์. หน้า 141-143
- ศิริลักษณ์ สิ้นขวาลัย และกมลวรรณ แจ่มชัด. วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการทำงานมอบ I เล่ม 1 : วิทยาศาสตร์การทำงานมอบ.เอกสารการเรียนการสอนการทำงานมอบในระดับปริญญาวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) และระดับปริญญาตรี ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. ปทุมธานี; 2544
- เอกชัย พุฒพิวงค์ และอติคม มาน้อย. **Radiation Thermometry**. กรุงเทพฯ: ฝ่ายวิทยาอุณหภูมิจสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. เอกสารอัดสำเนา. หน้า 2-3.
- Amidon, G.L., Lee, P. I. and Topp, E.M. 2000. **Transport Processes in Pharmaceutical Systems**. Marcel Dekker., New York., pp.671
- Bentley, R.E. 1998. **Handbook of Temperature Measurement : Temperature and Humidity Measurement**. Springer., Verlag., pp.85
- Brenster, M.Q. 1992. **Thermal Radiative Transfer And Properties**. John Wiley & Sons. pp.56-57
- Fogiel, M. 1992. **Handbook of Mathematical,Scientific and Engineering : formulas ,tables ,functions graphs ,transforms**. Research & Education Association., New Jersey., pp.814-8
- Fosbinder, R. A., and Orth, D. 2011. **Essentials of Radiologic Science**. Wolters Kluwer Health., Maryland., pp.206-209
- Fraden, J. 2010. **Handbook of Modern Sensor : Physics Designs and Applications**. Springer., New York., pp.648

- Gowen, A.A, Tiwari, B.K., Cullen, P.J., McDonnell, K. and. O'Donnel, C.P. 2010. **Application of thermal imaging in food quality and safety assessment.** trends in Food Science & Technology . Vol.21, No.4, pp. 190-200.
- Gruner, K.D. 2553. **Principles of Non-Contact Temperature Measurement.** [Online]. Available : http://support.fluke.com/raytek-sales/Download/Asset/IR_THEORY_55514_ENG_REVB_LR.PDF.
- Ibarra, J. G. and Tao, Y. 1999. **Estimation of internal temperature in chicken meat by means of mild – infrared imaging & neural networks.** [Online]. Available : http://spie.org/x648.html?product_id=336903
- Incropera, F.P., DeWitt, D.P., Bergmann, T.L. and Lavine, A.S. 2005. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer.** 6th ed. Willey Asia.
- Rao, D.G. **Fundamentals of Food Engineering.** 2010. Baba Barkha Nath., New Delhi., pp.203-204
- Rogers, E. K. and Brimelow, C. J. B. 2005. **Instrumentation and sensors for the food industry.** 2nd ed.: Woodhead., Cambridge., pp.202-203
- Saravacos, G.D. and Kostaropoulos, A. E. 2002. **Handbook of food processing equipment.** Kluwer Academic., New York., pp.285
: http://spiedigitallibrary.org/proceedings/resource/2/psisdg/3543/1/24_1?isAuthorized=no
- 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

คุณลักษณะของ IR sensor



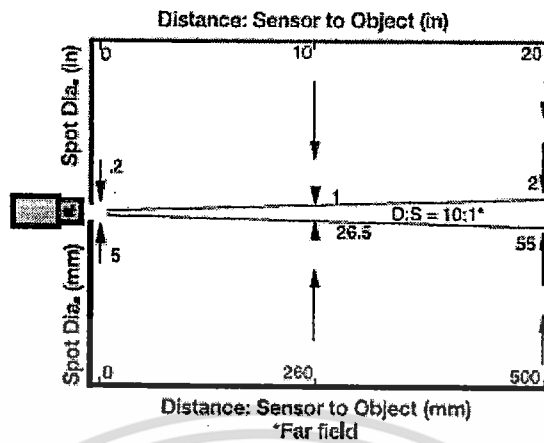
Measurement Specifications

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:	±0.5% of reading or ±0.5°C (1°F), whichever is greater
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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา⁴²เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Nominal Optical Specifications

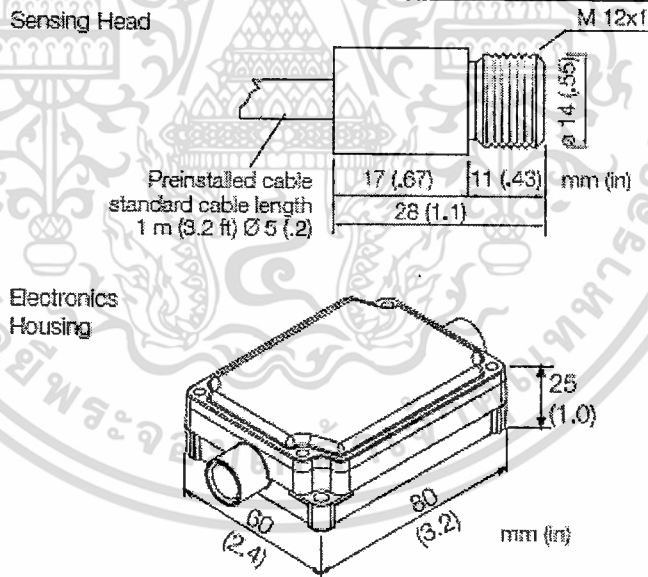


D:S is the optical resolution expressed as a ratio of the distance to the measurement spot divided by the diameter of the spot.

Optical resolution for the MI is 10:1.

Nominal spot size based on 90% energy.

Sensor Dimensions



Sensor Specifications

Environmental Rating:	NEMA-4 (IP 65)
Ambient Temperature Range:	
MID	0°C to 85°C (32°F to 185°F)
MIC	0°C to 125°C (32°F to 257°F)
MIH	0°C to 180°C (32°F to 356°F)
Electronics housing	0°C to 65°C (32°F to 150°F)
Storage Temperature:	-18°C to 85°C (0 to 185°F)
Relative Humidity:	10 to 95%, non-condensing
Construction:	
Sensing head	Stainless steel
Electronics housing	Zinc, die-cast
Weight:	
Sensing head (w/1 m cable)	50 g (1.75 oz)
Electronics housing	270 g (9.5 oz)
Shock IEC 68-2-27 (MIC ST 810D)	50g's, 11 ms on any axis
Vibration 68-2-27 (MIC ST 810D)	3g's, 11-200 Hz on any axis

Electrical Specifications

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