บทที่ 3
วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 วัสดุทดลองและอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ

วัสดุที่นำมาใช้ในการหาค่า Emissivity คือขนมปัง (เริ่มตั้งแต่โดจนเป็นขนมปัง) ลักษณะของขนมปังในระหว่างการอบดังแสดงในรูปที่ 3.1

รูปที่ 3.1 ขนมปังในระหว่างการอบ

อุปกรณ์วัดอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองมี 2 ชนิดได้แก่ กล้องถ่ายภาพความร้อนและเทอร์โมคัปเปิล Type K โดยมีรายละเอียดดังนี้

กล้องถ่ายภาพความร้อน (Thermal Image Camera: TI)

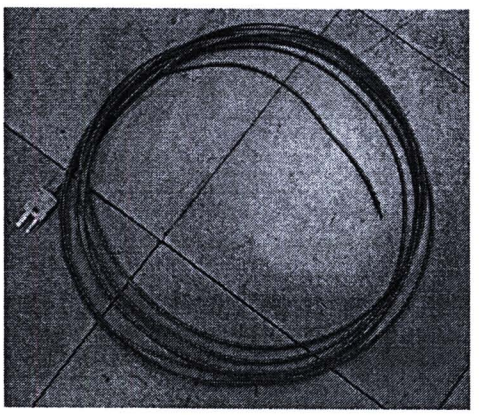
กล้องถ่ายภาพความร้อน Fluke รุ่น TI 32 รับรังสีอินฟราเรดในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 8-14 μm ช่วงวัดอุณหภูมิ -20°C ถึง +600°C ความละเอียดภาพความร้อน 320 x 240 VOX ดังรูปที่ 3.2 ในการทดลอง

รูปที่ 3.2 กล้องถ่ายภาพความร้อน รุ่น TI 32

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

<u>เทอร์โมคัปเปิ้ลแบบสัมผัส Type K</u>

เทอร์โมคัปเปิลแบบสัมผัส Type K แบบสัมผัสหุ้มด้วยฉนวนใยหินที่ผ่านการสอบเทียบวัดอุณหภูมิที่ผิวของวัตถุเพื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่กล้อง TI อ่านค่าได้ โดยเทอร์โมคัปเปิลจะเชื่อมต่ออยู่กับแทอร์โมมิเตอร์ Fluke รุ่น 52 II ซึ่งสามารถรับสัญญาณไฟฟ้าจากเทอร์โมมิเตอร์ได้ 2 Channel ช่วงวัดอุณหภูมิ 250°C-1,767°C ดังแสดงในรูปที่ 3.3



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

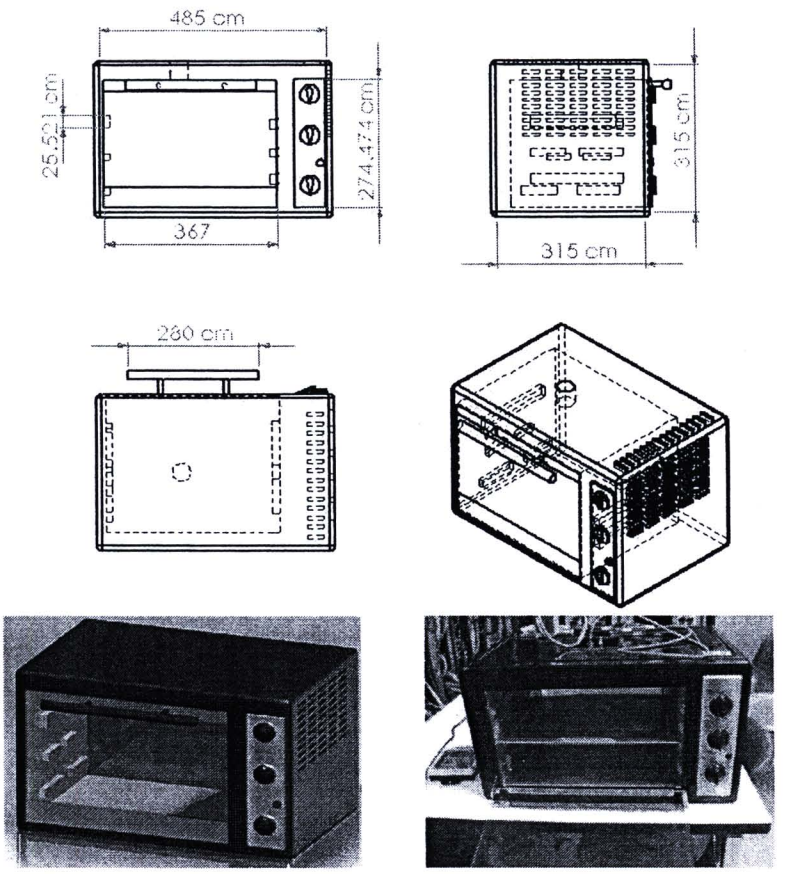
3.2 การทดสอบการอบขนมปัง

3.2.1 การเตรียมโด

เตรียมโดสำหรับอบขนมปัง ซึ่งมีส่วนผสมโดยประมาณดังต่อไปนี้ แป้งขนมปัง 50 เปอร์เซ็นต์ น้ำเย็น 25 เปอร์เซ็นต์น้ำตาล 10 เปอร์เซ็นต์ มาการีน 5.8 เปอร์เซ็นต์ ไข่ไก่ 3 เปอร์เซ็นต์ นมผง 2.5 เปอร์เซ็นต์เนยขาว 1.8 เปอร์เซ็นต์เกลือป่น 0.85 เปอร์เซ็นต์ และยีสต์ 0.75 เปอร์เซ็นต์ โดยผสมส่วนผสมทุกอย่าง (ยกเว้นยีสต์) เข้าด้วยกัน นวดจนเข้ากัน แล้วพักไว้ 40 นาที จากนั้นนำมานวดรวมกับยีสต์จนเนียนเรียบ แล้วตัดชั่งน้ำหนักก้อนละ 70 กรัม จำนวน 1 ก้อน นวดปละปั้นกลมพักไว้ที่อุณหภูมิห้อง (25°C) เป็นเวลา 2 ชั่งโมง 30 นาที เพื่อให้เกิดโด

3.2.2 การเตรียมเตาอบ

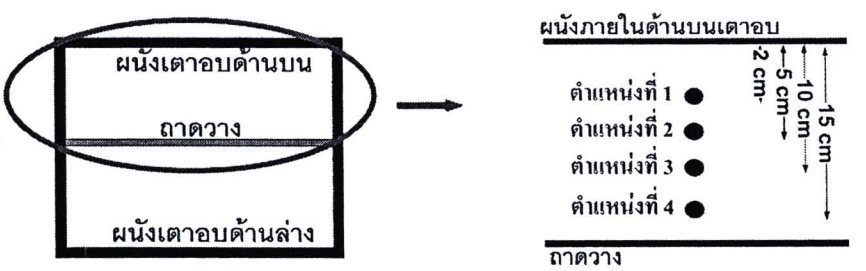
ใช้เตาอบไฟฟ้า (ZANUSSI รุ่น ZOT103KX อิเลคโทรลักซ์ ประเทศไทย ความจุของโพรงเตาอบ 300 ลิตร) ในการอบขนมปัง ก่อนอบโดต้องเปิดเครื่องทิ้งไว้อย่างน้อย 10 นาที โดยตั้งค่าอุณหภูมิเตาอบไว้ตามที่ต้องการเพื่อให้อุณหภูมิในเตาอบเข้าสู่สภาวะสมดุล (steady) โดยอุณหภูมิสูงสุดของอากาศในเตาอบคือ 230 ± 10°C ด้านหน้าเตาอบทำจากวัสดุที่ค่อนข้างใสทำให้สามารถมองเห็นขนมปังขณะอบได้ ลักษณะเตาอบที่ใช้ในการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 เตาอบไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองอบขนมปัง

3.2.2.1 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอากาศภายในเตาอบ

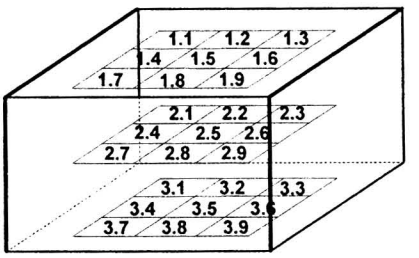
หาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของอากาศภายในเตาอบโดยตั้งค่าอุณหภูมิหน้าเตาไว้ที่ 210°C และใช้เทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในเตาอบทั้งหมด 4 ตำแหน่ง โดยตำแหน่งที่ 1 อยู่บนสุด ห่างจากผนังเตาด้านบนประมาณ 2 cm ตำแหน่งที่ 2 ห่างจากผนังเตาด้านบนประมาณ 5 cm ตำแหน่งที่ 3 ห่างจากผนังเตาด้านบนประมาณ 10 cm และตำแหน่งที่ 4 ต่ำสุดห่างจากผนังเตาด้านบนประมาณ 15 cm (ห่างจากถาด 1 cm) ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ตำแหน่งการเสียบสายเทอร์โมคัปเปิลเพื่อวัดอุณหภูมิอากาศในเตาอบ

3.2.2.2 หาค่าความเร็วลมร้อนในเตาอบ

เนื่องจากในการทดลองได้มีการให้ความร้อนกับเตาอบโดยใช้โหมดไฟบน-ล่างและมีพัดลมเป่าเพื่อให้เกิดการหมุนเวียนลมร้อนภายในเตาอบ จึงได้มีการหาช่วงความเร็วลมเฉลี่ยภายในเตาอบโดยใช้หลอดปิโตท์ (PitotTube) ซึ่งมีการวัดความเร็วลมทั้งหมด 3 แถว 27 ตำแหน่งเหนือถาดวาง (แบ่งเป็น 3 แถว ได้แก่ แถวบน-กลาง-ล่าง แถวละ 9 ตำแหน่ง) ดังแสดงในรูปที่ 3.6 โดยวัดตำแหน่งละ 3 ซ้ำ

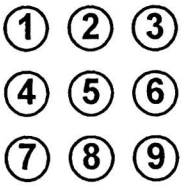


หมายเหตุ: เลขตัวแรกแสดงแถว แลขตัวที่ 2 แสดงตำแน่งของการวัดความเร็วลมฝนแถวนั้นๆ เช่น 1.9 คือ แถวที่ 1 ตำแหน่งที่ 9

รูปที่ 3.6 ตำแหน่งการวัดความเร็วลมร้อนภายในเตาอบบริเวณเหนือถาดวาง

3.2.2.3 หาการกระจายอุณหภูมิภายในเตาอบ

เนื่องจากในระหว่างการอบมีการเปิดพัดลมเป่าเพื่อให้เกิดการหมุนเวียนลมร้อนภายในเตาอบซึ่งมีความเร็วลมร้อนโดยเฉลี่ยประมาณ 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 แสดงตำแหน่งการวางถ้วยสแตนเลสบรรจุน้ำเปล่าเพื่อหาการกระจายอุณหภูมิภายในเตาอบ

3.2.2.4 การปรับค่าอุณหภูมิของอากาศภายในเตาอบในระหว่างการอบขนมปัง

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

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

<u>ช่วงที่ 2</u> คือช่วงที่อุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปังมีค่าตั้งแต่ 40°C ถึง 60°C ในการทดลองได้พิจารณาปรับลดค่าอุณหภูมิของอากาศภายในเตาอบในช่วงนี้จากช่วงแรกเป็นทั้งหมด 3 ค่า คือ 90°C 110°C และ 120°C เนื่องจากจากการทดลองเบื้องต้นพบว่าที่อุณหภูมิต่ำกว่า 90°C ขนมปังไม่สุกทั้งก้อนยังมีโดเหลืออยู่หลังการอบ ส่วนที่อุณหภูมิสูงกว่า 120°C เนื้อขนมปังมีลักษณะค่อนข้างแห้งและแข็ง หรืออาจเรียกได้ว่าขนมปังสุกเกินไป

<u>ช่วงที่ 3</u> 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 และ190°C ในการทดลองจะวางโดไว้ที่ตำแหน่งที่ 5 เพียงก้อนเดียว โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ

3.2.3 การวัดค่าต่างๆ (Measurement)

3.2.3.1 การวัดค่าอุณหภูมิ

<u>อุณหภูมิระหว่างการอบขนมปังและ อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ (°C/min)</u>

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

วัดอุณหภูมิอากาศภายในเตาอบ ที่ตำแหน่งห่างจากผนังเตาอบประมาณ 2 cm

วัดอุณหภูมิที่ผิวของขนมปัง (ลึกจากผิวขนมปัง 1 mm) วัดอุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปัง

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

<u>การวัดอุณหภูมิอื่นๆ</u>

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

3.2.3.2 น้ำหนัก และเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนัก (Weight Loss: %) ของขนมปังภายหลังการอบ

ชั่งน้ำหนักขนมปังโดยใช้ตาชั่งดิจิตอลความละเอียดทศนิยม 2 ตำแหน่ง

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

3.3 การทดสอบการอบขนมปังด้วยการควบคุมอุณหภูมิที่ผิว

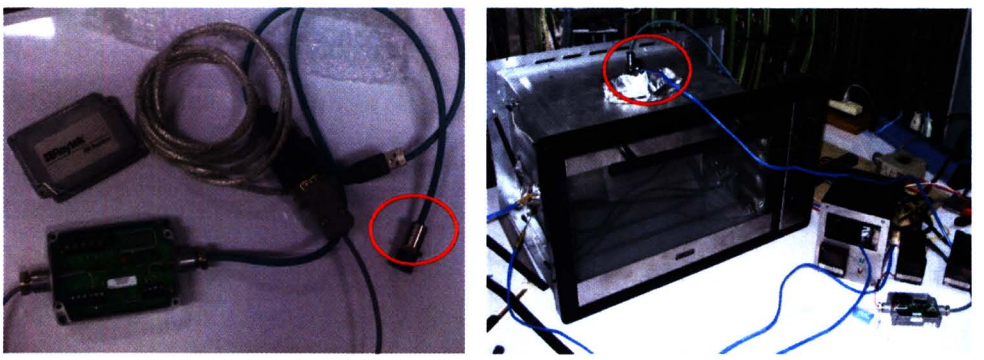
3.3.1 การวัด Emissivity ของขนมปังโดยใช้ IR sensor

วัดค่า ε ของขนมปังในแต่ละช่วงของกระบวนการอบโดยใช้ IR sensor (Raytex-IR sensor รุ่น MI วัดรังสีอินฟราเรดในช่วง 8-14μm 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

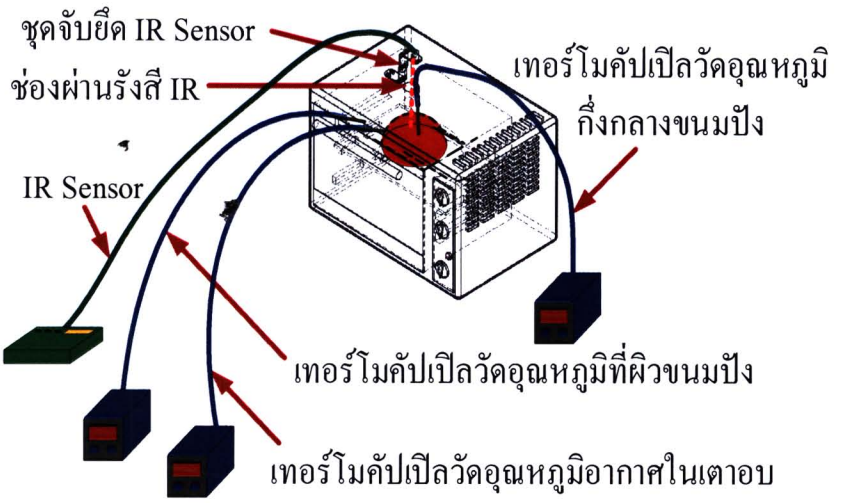
เมื่อได้ค่า ε ของขนมปังในแต่ละช่วงของกระบวนการอบแล้ว ให้นำค่า ε ดังกล่าวมาทดสอบกับ IR sensor ที่ติดตั้งอยู่บนตู้อบขนาดเล็ก โดยใช้ IR sensor วัดอุณหภูมิที่ผิวขนมปังและกำหนดค่า ε ที่ได้จากการทดลองให้กับ IR sensor เปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ผิวที่วัดได้จากเทอร์โมคัปเปิล ระบบ

การทดสอบขนมปังด้วยการควบคุมอุณหภูมิที่ผิวดังแสดงในรูปที่ 3.9 และแผนผังการทดสอบการอบขนมปังโดยการควบคุมอุณหภูมิที่ผิวด้วย IR sensor แสดงในรูปที่ 3.10



(ก) (ข)

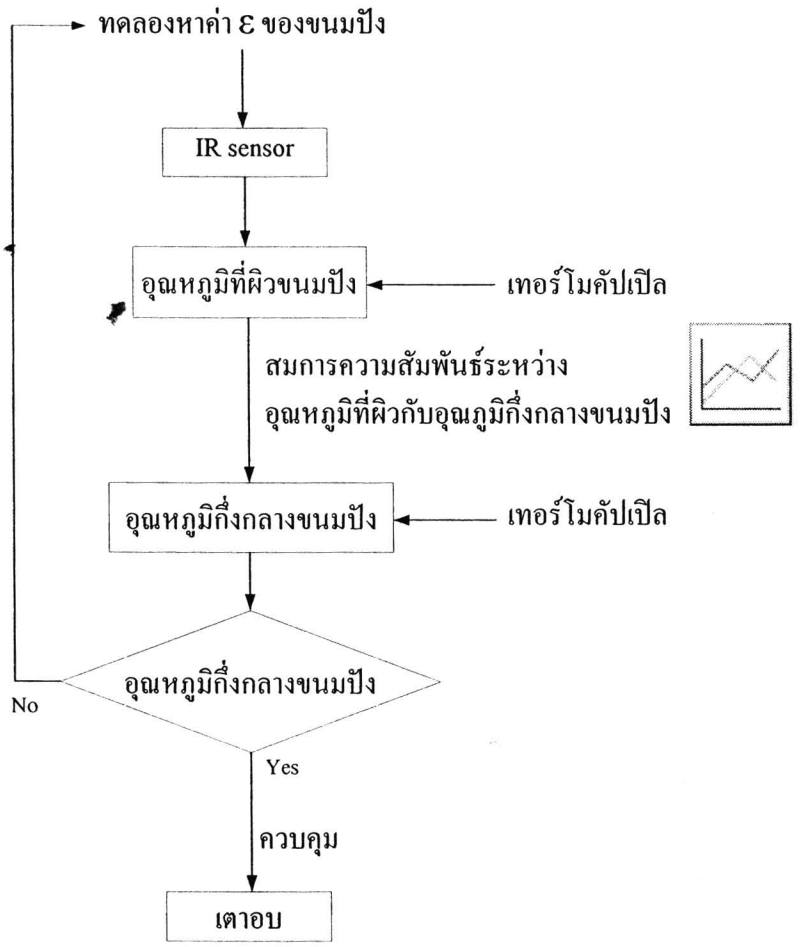
รูปที่ 3.8 ก) IR sensor ที่ใช้ในการทดลอง ข) ติดตั้ง IR sensorไว้ที่ด้านบนเตาอบขนาดเล็ก



รูปที่ 3.9 ระบบการการทดสอบการอบขนมปังด้วยการควบคุมอุณหภูมิที่ผิวโดยใช้ IR sensor

การทดสอบการทำงานของตู้อบแบบใช้ IR sensor วัดอุณหภูมิที่ผิว ซึ่งใช้แผ่นเหล็กที่ทราบค่า ε มาใช้ในการทดสอบ โดยทำการวัดอุณหภูมิที่ผิวของวัตถุด้วย IR sensor และติดเทอร์โมคัปเปิลไว้ที่ผิวของแผ่นเหล็ก จากนั้นใช้ IR sensor วัดอุณหภูมิที่ผิวของแผ่นเหล็กโดยป้อนค่า ε ของแผ่นเหล็กให้กับ IR sensor เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากจาก IR sensor กับอุณหภูมิที่ได้จากเทอร์โมคัปเปิล จากการทดสอบเบื้องต้นพบว่าอุณหภูมิที่ได้จาก IR sensor มีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่ได้จากเทอร์โมคัปเปิล แสดงให้เห็นว่าสามารถใช้ IR sensor ในการวัดอุณหภูมิที่ผิวของวัตถุได้ จากนั้นทำการ

ทดสอบการวัดอุณหภูมิที่ผิวของขนมปังในระหว่างการอบ โดยป้อนค่า ε ของขนมปังในช่วงต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลองให้กับ IR sensor เปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ผิวที่วัดได้จากเทอร์โมคัปเปิล จากนั้นนำอุณหภูมิที่ผิวไปใช้ในการทำนายหาอุณหภูมิที่กึ่งกลางของขนมปังโดยใช้สมการความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ผิวกับอุณหภูมิกึ่งกลาง เปรียบเทียบอุณหภูมิกึ่งกลางที่ได้จากสมการความสัมพันธ์กับอุณหภูมิกึ่งกลางวัดได้จากเทอร์โมคัปเปิล หากอุณหภูมิที่ได้จากสมการความสัมพันธ์แตกต่างจากอุณหภูมิที่ได้จากเทอร์โมคัปเปิล ต้องทดลองหาค่า ε ใหม่อีกครั้ง จนกว่าอุณหภูมิทั้งสองจะมีค่าเท่ากับหรือใกล้เคียงกัน เมื่อทดลองจนกระทั่งได้ ε ที่ทำให้อุณหภูมิกึ่งกลางขนมปังที่ได้จากสมการและอุณหภูมิที่ได้จากเทอร์โมคัปเปิลมีค่ากัน จึงนำค่าอุณหภูมิกึ่งกลางขนมปังที่ได้ไปใช้ในการควบคุมของเตาอบ อย่างไรก็ตาม สมการที่ใช้ในการทำนายควรนำหลักการถ่ายเทความร้อนและมวลสารเข้ามาร่วมพิจารณาด้วย รวมถึงปัจจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น ความเร็วลม ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน องค์ประกอบภายในวัตถุ เป็นต้น เพื่อให้ได้ผลการทำนายที่ถูกต้อง



รูปที่ 3.10 แผนผังแสดงการทดสอบการอบขนมปังโดยการควบคุมอุณหภูมิที่ผิวด้วย IR sensor