

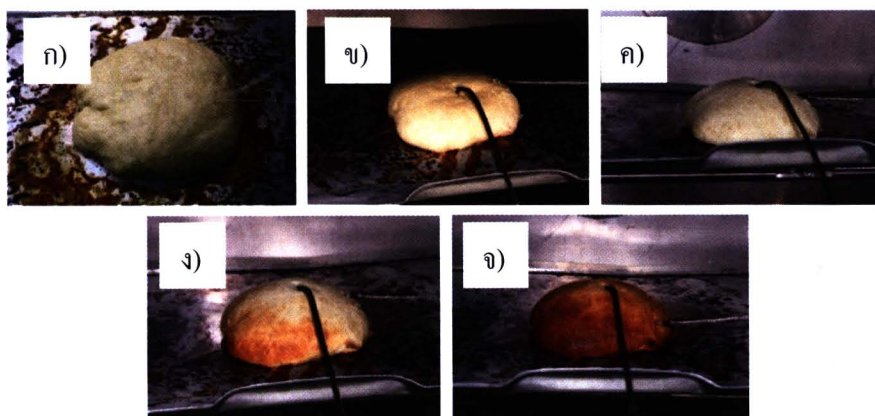
บทที่ 4

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)

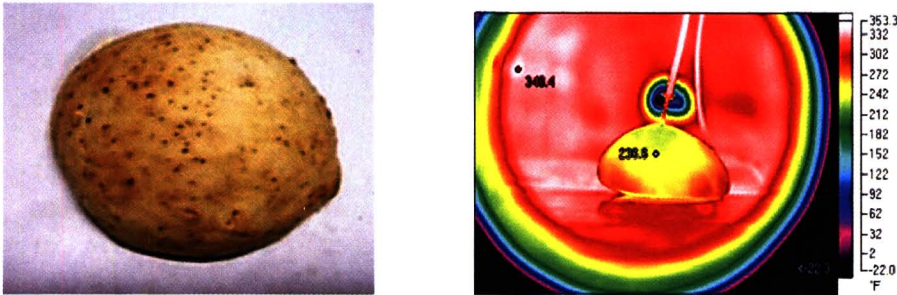
จากผลการทดลองพบว่าค่า ϵ ของขนมปังในช่วงที่ 1 และ 2 มีค่าอยู่ในช่วงเดียวกัน ซึ่งแตกต่างจาก ϵ ในช่วงที่ 3 อย่างเห็นได้ชัด โดยค่า ϵ ของขนมปังในช่วงที่ 1 และ 2 มีค่าเท่ากันคือ 0.95 ค่า ϵ ในช่วงที่ 3 มีค่าอยู่ในช่วง 0.81-0.95 เนื่องจากช่วงที่ 1 และ 2 อยู่ในช่วงเริ่มต้นของการอบ น้ำที่ผิวขนมปังมีอัตราการระเหยค่อนข้างต่ำ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



รูปที่ 4.1 ลักษณะขนมปังระหว่างการอบเมื่ออุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปังมีค่า ก) เริ่มต้น ข) 40°C ค) 60°C ง) 98°C จ) ภายหลังจากคงอุณหภูมิภายในเตาอบไว้ 10 นาที (สิ้นสุดกระบวนการอบ)



ภาพถ่ายทางความร้อนของวัสดุทางอาหาร



รูปที่ 4.2 ตัวอย่างภาพถ่ายทางความร้อนของขนมปังในระหว่างการอบ

ตารางที่ 4.1 ค่า ϵ ของขนมปังเมื่อใช้ IR sensor ในการวัดค่า

ช่วงที่	Emissivity	อุณหภูมิจากเทอร์โมคัปเปิล (°C)		อุณหภูมิจาก IR sensor (°C)
		อุณหภูมิที่กึ่งกลาง	อุณหภูมิที่ผิว	
1	0.95	31-40	98.0	110.8
2	0.95	41-50	99.5	113.9
3	0.95	51-60	113.0	124.2
	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

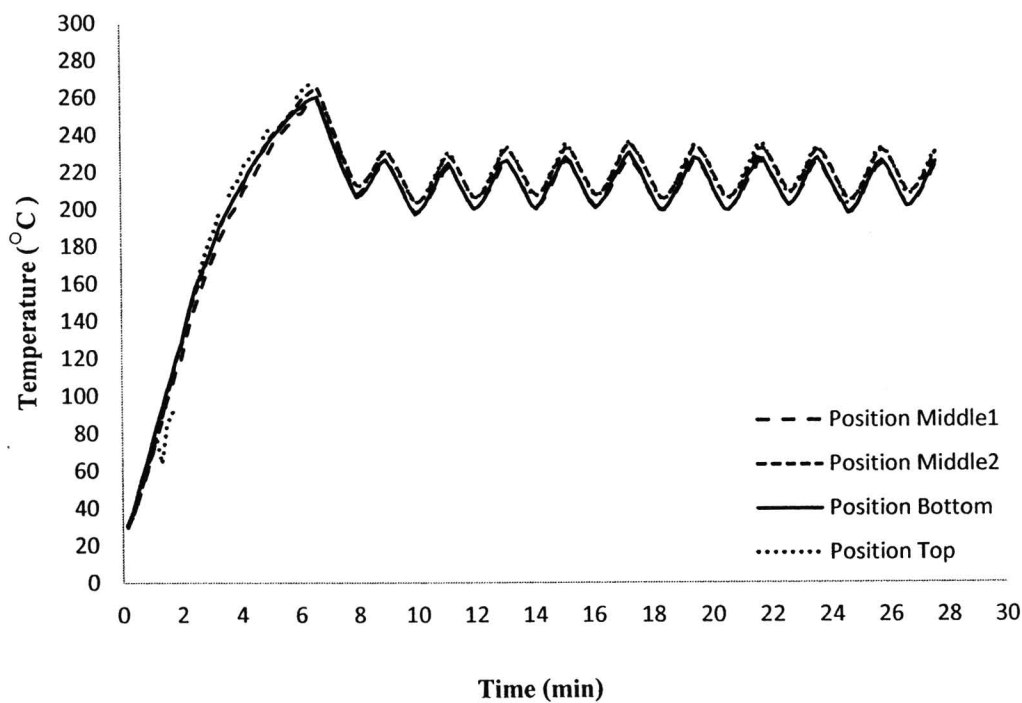
4.2 การทดสอบการอบขนมปัง

4.2.1 คุณลักษณะของเตาอบ: ฮีตเตอร์รีซีตการตัดต่ออุณหภูมิภายในเตาอบ

เมื่อให้พลังงานความร้อนแก่ฮีตเตอร์ (Heater) ภายในเตาอบจะทำให้ฮีตเตอร์มีอุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งมีเทอร์โมสตัท (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 โดยหากตั้งอุณหภูมิไว้สูงเตาอบจะใช้เวลา นานกว่าในการเข้าสู่สภาวะสมดุล แต่หากตั้งค่าอุณหภูมิไว้ต่ำเตาอบจะใช้เวลาเร็วกว่าในการเข้าสู่สภาวะสมดุล



รูปที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศภายในเตาอบเมื่อตั้งค่าอุณหภูมิเตาอบไว้ที่ 210°C

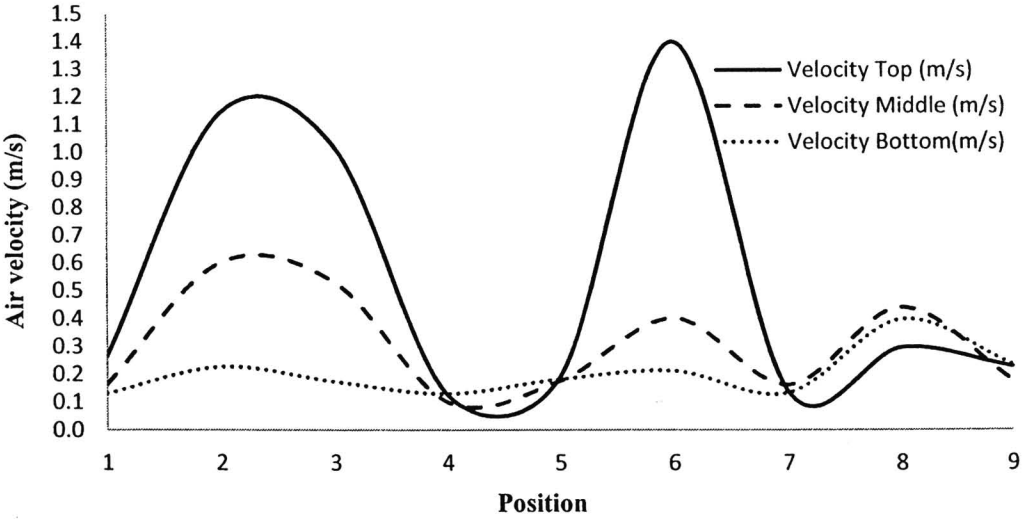
4.2.2 คุณลักษณะของเตาอบ: ความเร็วลมภายในเตาอบ

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

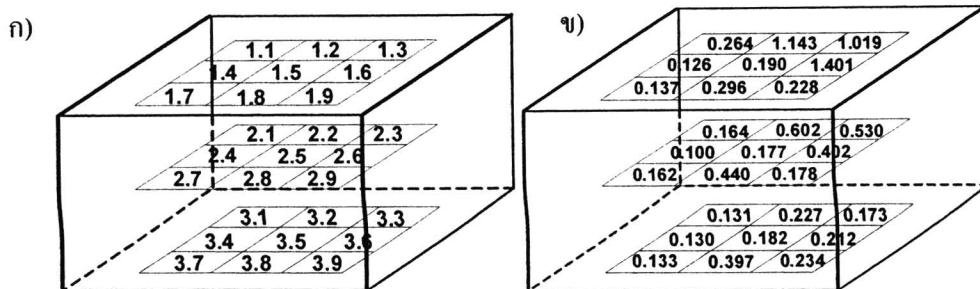
ตารางที่ 4.2 ความเร็วเฉลี่ย (m/s) ของลมภายในเตาอบที่แถวและตำแหน่งต่างๆ

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 ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรภาษาอังกฤษตามหลังต่างกันในแนวดิ่ง (a และ b) แสดงค่าความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงค่าความเร็วลมในแต่ละตำแหน่งของแถวบน แถวกลาง และแถวล่าง

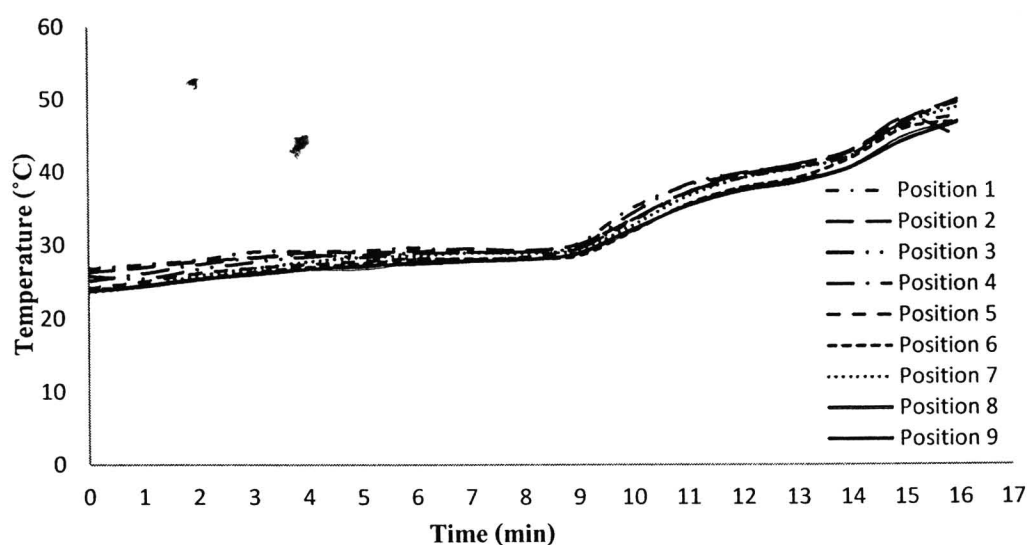


รูปที่ 4.5 ก) ตำแหน่งการวัดความเร็วลมร้อนภายในเตาอบบริเวณเหนือถาดวาง

ข) ค่าความเร็วลมที่ตำแหน่งต่างๆ เหนือถาดวาง

4.2.3 คุณลักษณะของเตาอบ: การกระจายอุณหภูมิภายในเตาอบ

ค่าการกระจายอุณหภูมิภายในเตาอบที่ตำแหน่งต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 จากรูปแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งมีค่าแตกต่างกันน้อยมาก ดังนั้นไม่ว่าจะวางโคไว้ในตำแหน่งใด ขนมหึ่งที่ได้จะมีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน ซึ่งในการทดลองได้วางโคไว้ที่ตำแหน่งที่ 5 เนื่องจากมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิค่อนข้างคงที่และแนวโน้มอุณหภูมิอยู่ในช่วงค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิทั้ง 9 ตำแหน่ง



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงการกระจายอุณหภูมิภายในเตาอบ

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

ระยะเวลาในการเข้าสู่ภาวะสมดุลจะขึ้นอยู่กับการตั้งค่าอุณหภูมิให้กับเตาอบ โดยฮีสเตอร์รีซิสการตัดต่ออุณหภูมิภายในเตาอบอยู่ในช่วง $\pm 10^{\circ}\text{C}$

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

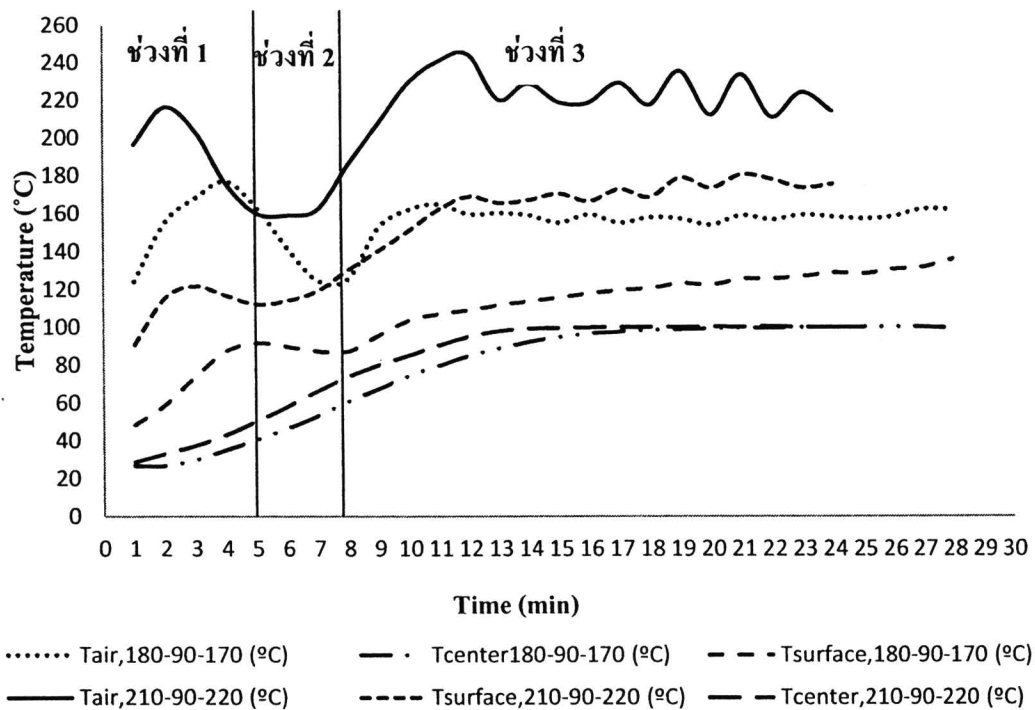
ช่วงที่ 1 เป็นช่วงที่อุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปังมีค่าตั้งแต่เริ่มต้นจนถึง 40°C การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในช่วงนี้จะจะเป็นไปอย่างช้าๆ ความร้อนในช่วงนี้ถูกนำไปใช้ในการทำให้เกิดปฏิกิริยาต่างๆ ของเอนไซม์ รวมทั้งเกิดการเจริญเติบโตของยีสต์ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้น ปริมาตรของโดจึงค่อยๆ เพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากอุณหภูมิในช่วงนี้มีค่าค่อนข้างต่ำ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

ดังนั้นความร้อนในช่วงนี้จึงยังไม่ส่งผลต่ออัตราการสูญเสียน้ำหนักของขนมปัง (Therdthai et al., 2002) จากรูปที่ 4.7 จะเห็นว่าอุณหภูมิ 210°C ทำให้อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ผิวขนมปังจากอุณหภูมิเริ่มต้นจนถึง 110°C สูงเกินไปส่งผลให้เกิดเปลือกขนมปัง (crust) ขึ้นเนื่องจากน้ำที่ผิวขนมปังระเหยอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ผิวขนมปังดำและไหม้ในขณะที่น้ำข้างในยังระเหยออกไม่หมด หรือเรียกว่าเกิดการไหม้ก่อนสุก เนื่องจาก crust ทำให้น้ำด้านในขนมปังไม่สามารถระเหยออกมาที่ผิวได้ (Therdthai et al., 2002) และเมื่อพิจารณาที่เส้นกราฟของอุณหภูมิ 180°C พบว่าอุณหภูมิที่ผิวขนมปังค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนมีค่าประมาณ $90-95^{\circ}\text{C}$ ในช่วงสุดท้ายซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ทำให้น้ำที่ผิวขนมปังเริ่มมีการระเหยกลายเป็นไอ โดยที่ยังไม่เกิด crust ป้องกันการระเหยออกของไอน้ำ ซึ่งจะส่งผลให้ไอน้ำที่อยู่ในชั้นถัดๆ ไป สามารถแทรกซึมออกมาที่ผิวขนมปังและระเหยออกจากผิวขนมปังได้เรื่อยๆ 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 ทำให้ปริมาตรของโดเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับช่วงที่ 1 แต่ในช่วงนี้ความดันไอที่ผิวเริ่มมีค่าสูงขึ้น ทำให้ช่วงนี้เริ่มมีผลต่อการสูญเสียน้ำหนักของขนมปัง (Therdthai et al., 2002)

อย่างไรก็ตามจากการทดลองการเพิ่มอุณหภูมิในช่วงนี้ ไม่มีผลต่อการสูญเสียน้ำหนักของขนมปังอย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงในตารางที่ 4.3 ซึ่งเป็นผลมาจากได้มีการปรับลดอุณหภูมิของอากาศภายในเตาอบ ในช่วงนี้ส่งผลให้อุณหภูมิที่ผิวขนมปังค่อนข้างคงที่ การระเหยออกของน้ำที่บริเวณผิว

ของขนมปังจึงคงที่หรือลดลงด้วย (Therdthai et al., 2002, 2004) อีกทั้งระยะเวลาที่ใช้ในช่วงนี้
ค่อนข้างสั้น 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

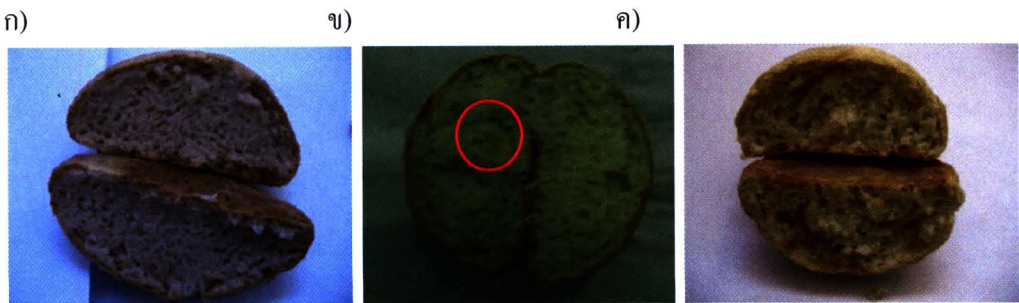
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอากาศในเตา (Tair) อุณหภูมิที่ผิวขนมปัง (Tsurface) และอุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปัง (Tcenter) ที่อุณหภูมิอากาศในช่วงที่ 1 เป็น 180 °C และ 210°C

ความร้อนในช่วงที่ 2 มีผลต่อการสุกของขนมปัง ซึ่งหากอุณหภูมิต่ำเกินไปจะทำให้ความชื้นในขนมปังระเหยออกได้น้อย ทำให้เมื่อสิ้นสุดกระบวนการอบโดไม่สามารถเปลี่ยนเป็นขนมปังได้ทั้งหมดหรือขนมปังไม่สุกทั่วทั้งก้อน และหากอุณหภูมิสูงเกินไปจะทำให้เนื้อขนมปังแห้งเกินไป ซึ่งจากการทดลองอุณหภูมิที่เหมาะสมในช่วงที่ 2 คือ 120°C เนื่องจากเป็นอุณหภูมิที่ทำให้ขนมปังสุกทั่วทั้งก้อน คือไม่มีโดเหลืออยู่ภายในขนมปัง ดังรูปที่ 4.8 จะเห็นว่าที่อุณหภูมิ 90°C และ 110°C เนื้อด้านในขนมปังยังมีโดปรากฏอยู่ (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: ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรภาษาอังกฤษตามหลังต่างกันในแนวดิ่ง (a และ b) แสดงค่าความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)



หมายเหตุ: วงกลมสีแดงแสดงตำแหน่งที่เนื้อขนมปังไม่สุก

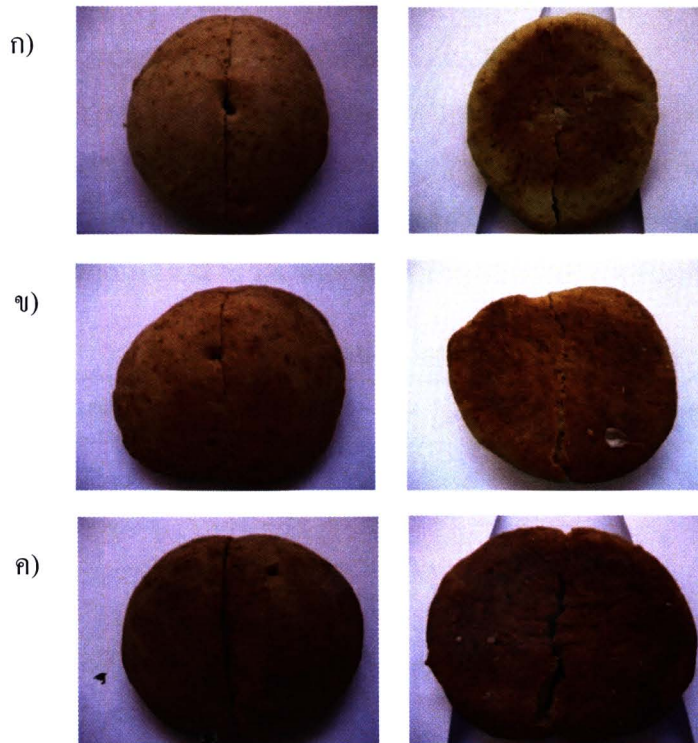
รูปที่ 4.8 ผิวภายในของขนมปัง เมื่อให้อุณหภูมิอากาศในช่วงที่ 2 เป็น ก) 90°C ข) 100°C ค) 110°C โดยอุณหภูมิในช่วงที่ 1 และ 2 เป็น 180°C และ 170°C

ช่วงที่ 3 คือช่วงที่อุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปังมีค่าตั้งแต่ 60°C จนถึง 98°C และคงอุณหภูมิไว้ที่ค่านี้เป็นเวลา 10 นาที ปฏิกริยาต่าง ๆ รวมทั้งการระเหยของความชื้น และการเกิด gelatinization จะเกิดขึ้นสูงสุดในช่วงนี้ที่อุณหภูมิประมาณ 98-99°C ในช่วงนี้ขนมปังจะเริ่มมีสีน้ำตาลอ่อนเนื่องมาจากปฏิกิริยาการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล (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 และมีการสูญเสียน้ำหนักต่ำคือ 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 และจากการที่อุณหภูมิที่ผิวลดลงทำให้อุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปังเพิ่มขึ้นในอัตราที่ลดลง เมื่ออุณหภูมิที่กึ่งกลางมีค่าเป็น 60°C ได้มีการปรับอุณหภูมิของอากาศในเตาขึ้นเป็น 170°C อุณหภูมิที่ผิวจึงเริ่มปรับตัวเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ทำอุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปังเพิ่มขึ้นจนกระทั่งคงที่ที่อุณหภูมิประมาณ 98-99°C ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการปรับลด-เพิ่มอุณหภูมิของอากาศในเตาอบกระบวนการเกิดเจล (gelatinization) ยังคงเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์

เมื่อพิจารณาอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปังพบว่าเมื่อมีการปรับลด-เพิ่มอุณหภูมิ

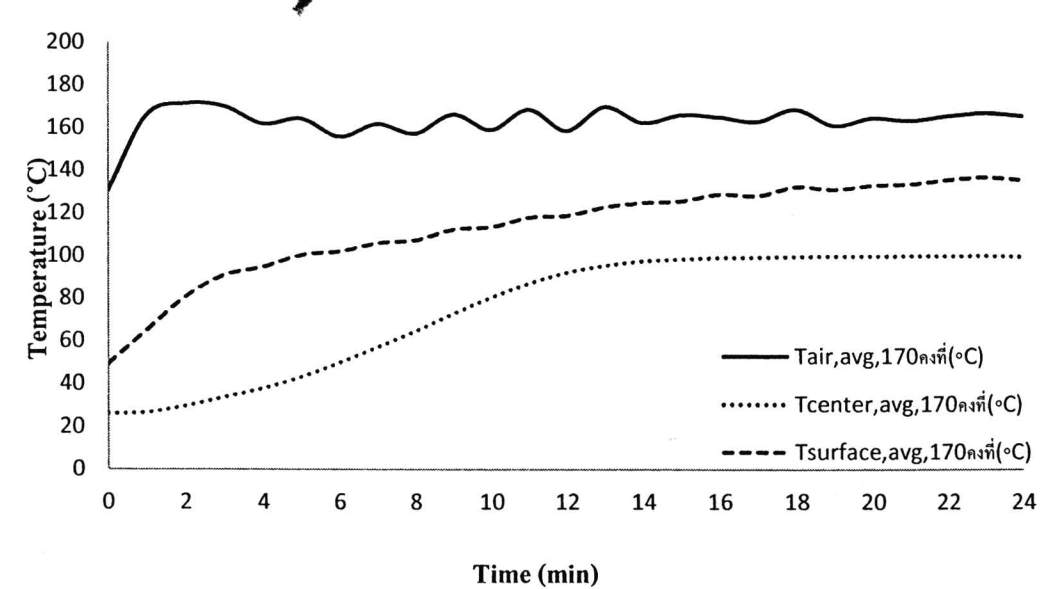
ของอากาศในเตาอบทำให้อุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปังใน stage 1 และ 2 ลดลงด้วย ในขณะที่เมื่อให้อุณหภูมิคงที่ อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปังใน stage 1 และ 2 จะค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดยมีค่าเฉลี่ยเป็น 5.24°C/min และ 5.14°C/min ตามลำดับ และเมื่อมีการปรับลด-เพิ่มอุณหภูมิของอากาศในเตาอบ อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่กึ่งกลางโดยเฉลี่ยลดลงเป็น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

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

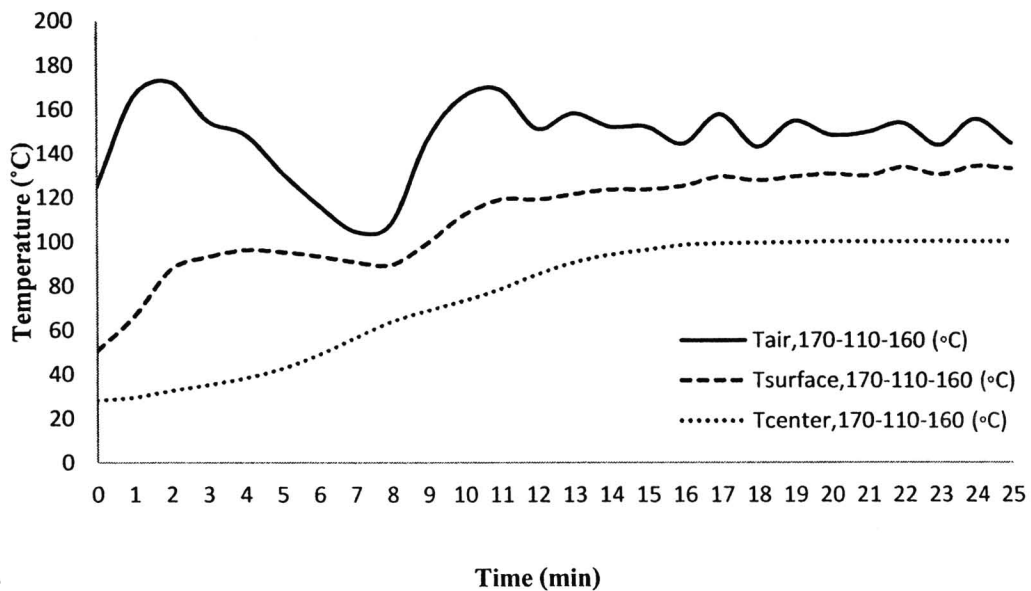
ตารางที่ 4.4 ค่าการสูญเสียน้ำหนักของขนมปังหลังการอบเมื่ออุณหภูมิในช่วงที่ 3 มีค่าแตกต่างกัน

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

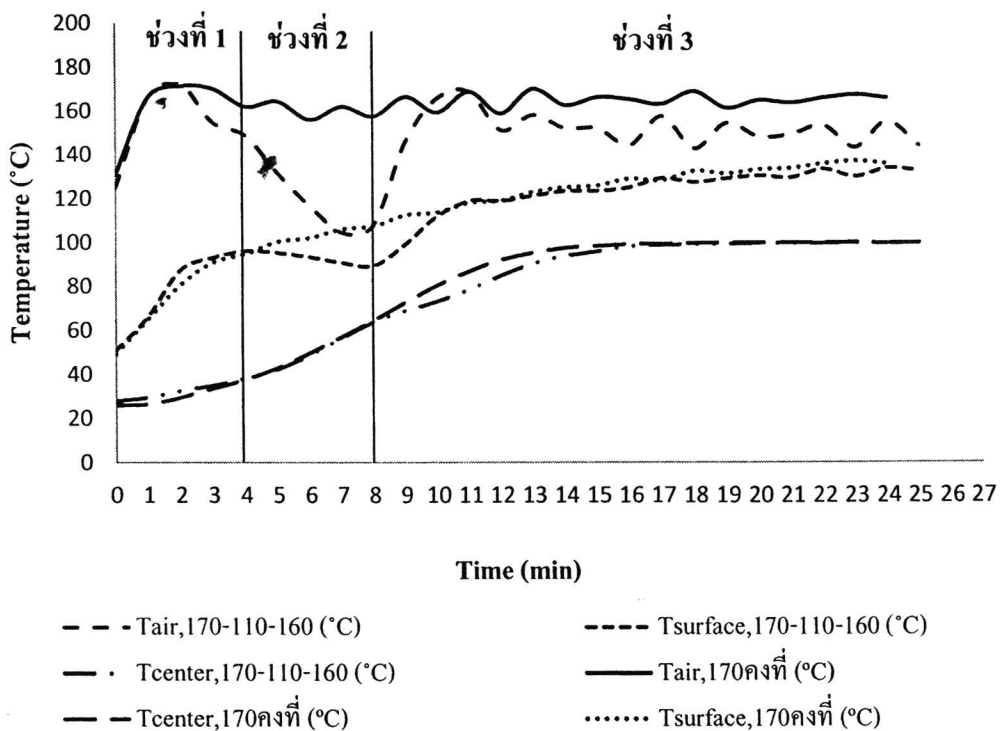
หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรภาษาอังกฤษตามหลังต่างกันในแนวดิ่ง (a และ b) แสดงค่าความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$)



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอากาศในเตาอบ (Tair) อุณหภูมิที่ผิวขนมปัง (Tsurface) และอุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปัง (Tcenter) 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



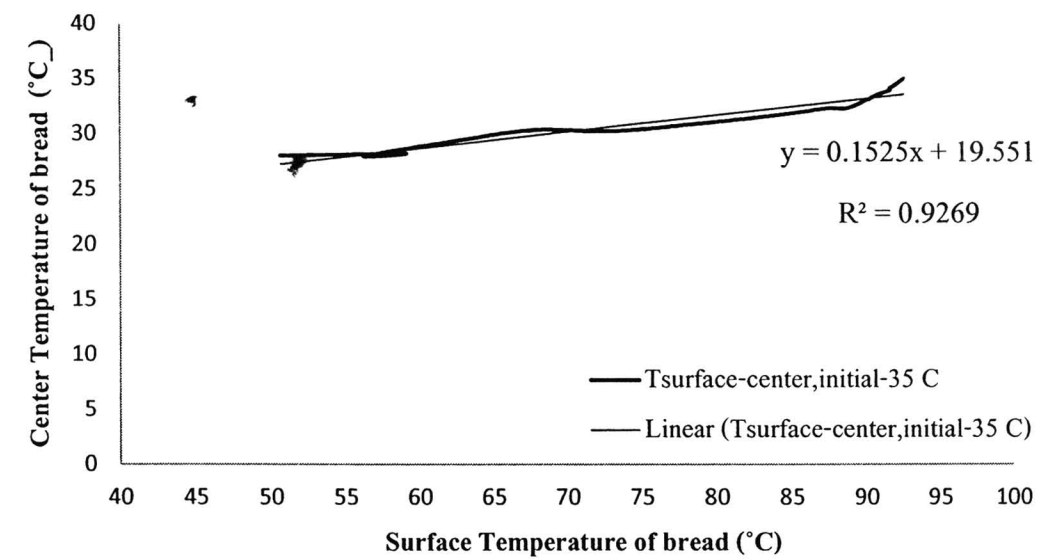
รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศภายในเตาอบ (T_{air}) อุณหภูมิที่ผิว ($T_{surface}$) และอุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปัง (T_{center}) เมื่อให้อุณหภูมิอากาศคงที่ที่ 170°C และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอากาศในช่วงที่ 1 2 และ 3 เป็น 180°C 120°C และ 170°C

4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ผิวกับอุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปังในระหว่างการอบ

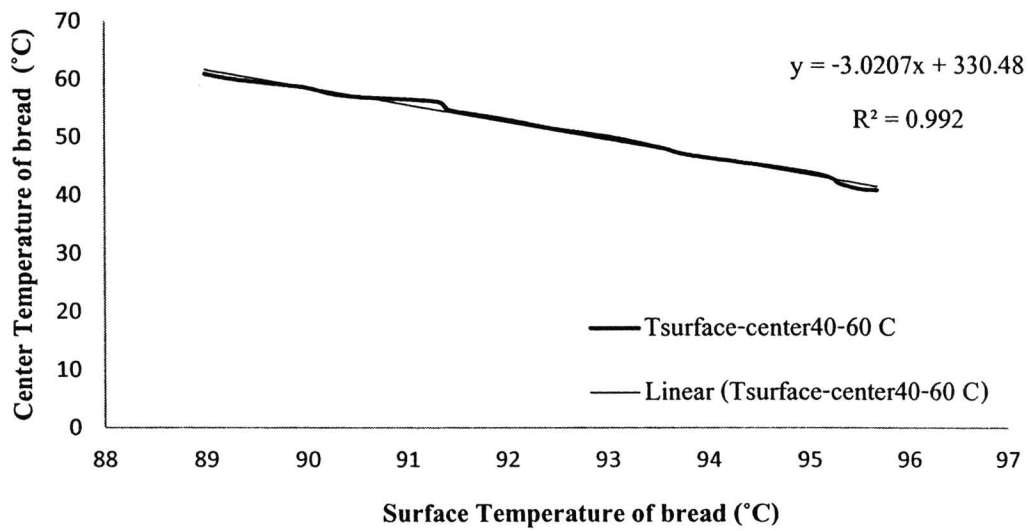
เนื่องจากการวัดอุณหภูมิจากการแผ่รังสีอินฟราเรดขอวัตถุเป็นการวัดอุณหภูมิที่ผิววัตถุเท่านั้น ในขณะที่คุณสมบัติต่างๆ ของขนมปังในระหว่างการอบขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปังเป็นสำคัญ ซึ่งกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ผิวกับอุณหภูมิที่กึ่งกลางของปังที่วัดค่าอุณหภูมิด้วยเทอร์โมไซด์เทอร์โมคัปเปิลแสดงในรูปที่ 4.13-4.15 และสมการความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ผิวขนมปัง (x) กับอุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปัง (y) ของช่วงต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 สมการความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ผิวและที่กึ่งกลางขนมปัง และค่าร้อยละความเชื่อมั่น (R²) ของสมการในช่วงอุณหภูมิต่างๆ

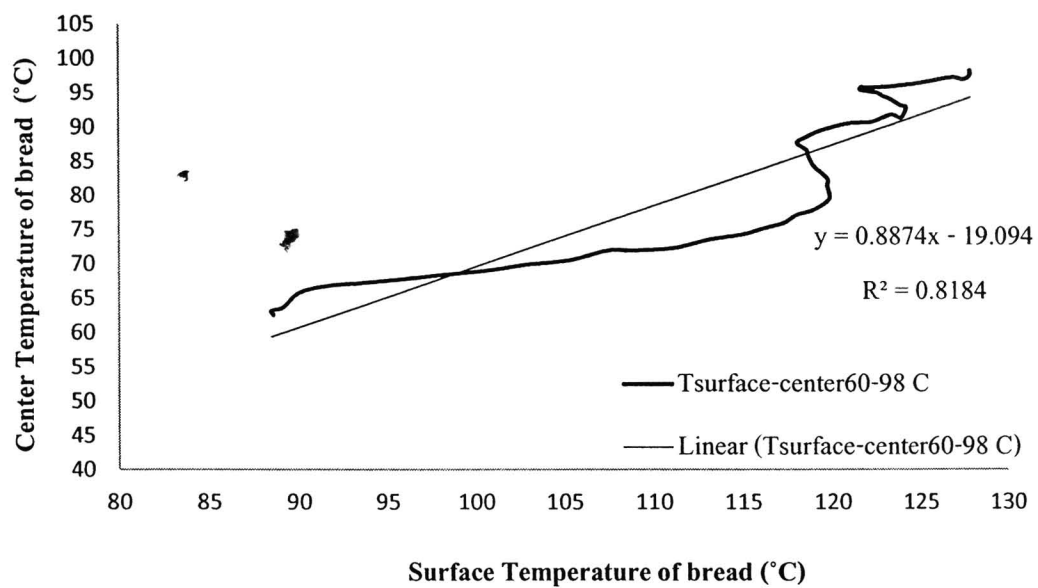
ช่วงการอบ (ช่วงอุณหภูมิที่กึ่งกลางขนมปัง: °C)	สมการความสัมพันธ์	%ความผิดพลาด (R ²)
(1) เริ่มต้น - 40	$y = 0.152x + 19.55$	0.926
(2) 40 – 60	$y = -3.020x + 330.4$	0.992
(3) 60 – 98	$y = 0.887x - 19.09$	0.818



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 เพื่อจำลองกระบวนการอบขนมปังซึ่งเป็นช่วงที่มีอุณหภูมิค่อนข้างสูง (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 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 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) หรืองานทางด้านการตรวจสอบคุณภาพผลิตภัณฑ์ในระหว่างกระบวนการผลิต รวมไปถึงการตรวจสอบเพื่อซ่อมบำรุงเครื่องจักรอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิต

