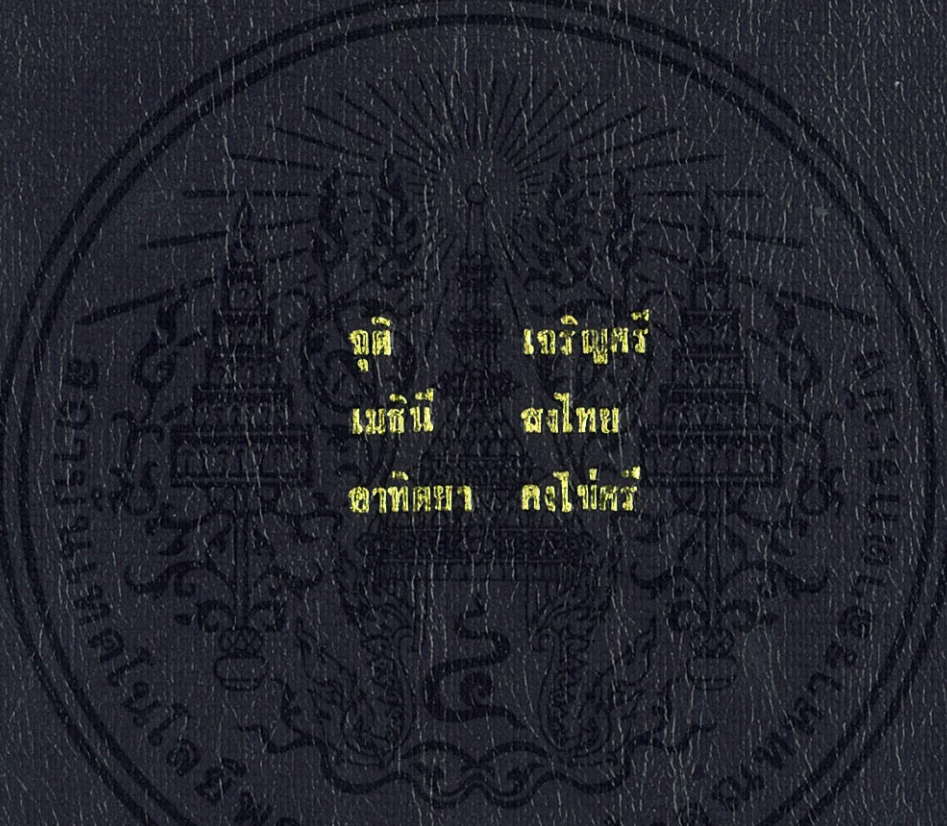


แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนระหว่าง
กระบวนการให้ความร้อนแบบสัมผัส

Mathematical Model of Heat Transfer during
a Contact Heating Process



จตุดี เจริญศรี
เมธินี ชงไทย
อาทิตยา คงไพบร์

ปริญญาโท สาขาวิศวกรรมอาหาร
ปริญญาโท สาขาวิศวกรรมอาหาร

สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2555

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนระหว่าง
กระบวนการให้ความร้อนแบบสัมผัส

**Mathematical Model of Heat transfer during
a Contact Heating Process**



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ปีการศึกษา 2555

**Mathematical Model of Heat transfer during
a Contact Heating Process**



**Juti Charoensri
Maethinee Songthai
Artitaya Kongkaisri**

**THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN FOOD ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING**

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2012

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang อนุญาตให้ใช้เพื่อการศึกษาค้นคว้าวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำเอกสารนี้ไปใช้
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาระบบข้อมูลใดๆในเอกสารนี้เพื่อใช้ในการอื่นใด เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ ปีการศึกษา 2555

สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนระหว่างกระบวนการให้ความร้อนแบบสัมผัส

Mathematical Model of Heat transfer during a Contact Heating Process

ผู้จัดทำ

- | | | | | |
|----|---------------|----------|--------------|----------|
| 1. | นายจตุติ | เจริญศรี | รหัสประจำตัว | 52010176 |
| 2. | นางสาวเมธินี | สงไทย | รหัสประจำตัว | 52010958 |
| 3. | นางสาวอาทิตยา | คงไขศรี | รหัสประจำตัว | 52011449 |



(ผศ.ดร. นวภัทรา หนูนาค)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการ	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนระหว่างกระบวนการให้ความร้อนแบบสัมผัส	
นักศึกษา	นายจตุติ	เจริญศรี
	นางสาวเมธิณี	สงไทย
	นางสาวอาทิตย์ยา	คงไขศรี
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.นวกัทรာ หนูนา	
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	
สาขาวิชา	วิศวกรรมอาหาร	
ปีการศึกษา	2555	

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนระหว่างกระบวนการให้ความร้อนแบบสัมผัสและนำแบบจำลองที่ได้มาทวนสอบกับผลการทดลอง โดยใช้กระบวนการผลิตแพนเค้กเป็นกรณีศึกษา ชุดทดลองประกอบด้วย อุปกรณ์ให้ความร้อน อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ และคอมพิวเตอร์สำหรับประมวลผล โดยทดลองให้ความร้อนแก่แพนเค้กที่อุณหภูมิของแผ่นส่งผ่านความร้อน (T_{set}) เท่ากับ 145°C และ 165°C เป็นเวลา 20 นาที วัดอุณหภูมิภายในแพนเค้ก (ตำแหน่ง B C D และ E) ด้วยเทอร์โมคัปเปิล Type K และวัดอุณหภูมิที่ผิวด้านบนแพนเค้ก (ตำแหน่ง A) ด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน แบบจำลองของการถ่ายเทความร้อนพัฒนาโดยใช้โปรแกรม MATLAB และสมการการกระจายอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งใด ๆ ของผลิตภัณฑ์ในระหว่างกระบวนการอบแบบสัมผัสหาได้จากการใช้วิธี Finite-Difference แบบ Implicit Method จากการทดลองพบว่า อุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองในทุกตำแหน่งมีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลอง โดยตำแหน่ง A B C D และ E ที่ T_{set} 165°C มีความคลาดเคลื่อน 3.51% 5.74% 2.01% 6.31% และ 2.60% และ T_{set} เท่ากับ 145°C มีความคลาดเคลื่อน 3.37% 2.82% 3.47% 2.75% และ 5.20% ตามลำดับ และในระหว่างการทดลองได้สังเกตการเปลี่ยนสีน้ำตาลที่เกิดขึ้นบริเวณผิวด้านล่างของแพนเค้กที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ โดยแพนเค้กเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลเข้มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิของแผ่นให้ความร้อนสูงขึ้นและระยะเวลาให้ความร้อนนานขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Project Title	Mathematical Model of Heat transfer during a Contact Heating Process	
Students	Mr. Juti Charoensri	Miss Maethinee Songthai
	Miss Artitaya Kongkaisri	
Project Advisor	Asst.Prof.Dr.Navaphattra Nunak	
Degree	Bachelor of Engineering	
Program	Food Engineering	
Academic Year	2012	

ABSTRACT

This project proposed a mathematical model of heat transfer during a contact heating process and validated a model with experimental data. Pancake process was used to be a case study. The experimental setup consisted of a heating rig, temperature measuring devices and a computer for data processing. Pancakes were heated at the heating plate temperature of (T_{set}) 145°C and 165°C for 20 minutes. During the process, the temperatures inside a pancake (positions B, C, D and E) were measured by thermocouple type K, and temperature at the top surface of a pancake (position A) was measured by a thermal imaging camera. The mathematical model of heat transfer was developed by MATLAB software and solution of the temperature distribution in the product was calculated with finite - difference technique using the implicit method. From the experiment, it was found that temperatures obtained from the model in all position were consistent with experiment data. The standard error in position A B C D and E at T_{set} 165°C were 3.51% 5.74% 2.01% 6.31% and 2.60%, respectively and at T_{set} 145°C were 3.37%, 2.82%, 3.47%, 2.75% and 5.20%, respectively. Also, the brown color changing at the bottom surface of pancake during heating were observed and found that the brown color of sample increased with increasing of temperature and time of the heating process.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลงได้ด้วยความรู้และความอนุเคราะห์จาก ผศ.ดร.นวกัทรานุชานาค อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการวิจัยที่ให้ความรู้ ความช่วยเหลือ คำแนะนำ และช่วยแก้ปัญหา รวมถึงอุปสรรคต่าง ๆ ในระหว่างการทำโครงการวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี นอกจากนี้ ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ประสิทธิประสาทความรู้ให้ตลอดระยะเวลาในการศึกษา ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ภายในสาขาวิชาวิศวกรรมอาหารทุกคน ที่ได้ให้ความสะดวกในการยื่นอุปกรณ์ และห้องปฏิบัติการ

ขอขอบคุณ รศ.ดร.ทวีพล ชื่อสัตย์ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำปรึกษาในการจัดทำชุดอุปกรณ์ทดลองที่ใช้ในโครงการนี้

ขอขอบคุณ ดร.เกียรติศักดิ์ รุ่งพระแสง อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำปรึกษาในส่วนการทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการใช้งานโปรแกรม MATLAB

ขอขอบคุณ คุณธีระวัฒน์ หนูนาค (บริษัท เมเซอร์โทรนิคส์ จำกัด) ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ต่างๆในการทดลอง ตลอดจนความรู้เกี่ยวกับรังสีอินฟราเรด และให้คำแนะนำทางวิชาการต่าง ๆ สำหรับโครงการวิจัยและช่วยติดตามผลงานจนกระทั่งสำเร็จไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดา มารดา และทุกคนในครอบครัวที่คอยให้กำลังใจ ให้การสนับสนุนตลอดมา ขอขอบคุณเพื่อน ๆ นักศึกษาทุกคนที่คอยให้กำลังใจและช่วยเหลือจนโครงการวิจัยนี้ ประสบผลสำเร็จ

คณะผู้วิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูปภาพ	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ตรวจเอกสาร	3
2.1 กระบวนการให้ความร้อนแบบสัมผัส	3
2.2 การผลิตแพนเค้ก	4
2.3 สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางความร้อนของอาหาร	5
2.3.1 ความชื้น	6
2.3.2 ความพรุน	6
2.3.3 ความหนาแน่น	6
2.3.4 สี	7
2.3.5 ความจุความร้อนจำเพาะ	9
2.3.6 สัมประสิทธิ์การนำความร้อน	9
2.3.7 สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน	10
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	11
บทที่ 3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การถ่ายเทความร้อนแบบสัมผัส	14
3.1 สมการทางคณิตศาสตร์การถ่ายเทความร้อนในกระบวนการอบแบบสัมผัส	15
3.1.1 การถ่ายเทความร้อนบริเวณผิวด้านล่างของผลิตภัณฑ์	15
3.1.2 การถ่ายเทความร้อนภายในผลิตภัณฑ์	15
3.1.3 การถ่ายเทความร้อนบริเวณผิวด้านบนของผลิตภัณฑ์	20
3.2 ขั้นตอนการทำงานของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	28

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง	30
4.1 วัสดุและวัสดุอุปกรณ์	30
4.1.1 วัสดุ	30
4.1.2 วัสดุอุปกรณ์	30
4.2 การเตรียมแป้งแพนเค้ก	30
4.3 การสร้างชุดอุปกรณ์การทดลอง	31
4.4 การทดลอง	32
4.4.1 การให้ความร้อนแก่แป้งเค้ก	32
4.4.2 การวัดอุณหภูมิ	33
4.5 การวัดและการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางความร้อน	34
4.5.1 ความชื้น	34
4.5.2 เปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนัก	35
4.5.3 ความพรุน	35
4.5.4 ความหนาแน่น	35
4.5.5 ความจุความร้อนจำเพาะ	36
4.5.6 สัมประสิทธิ์การนำความร้อน	37
4.5.7 สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน	37
4.5.8 สี	38
4.5.9 การวิเคราะห์ทางสถิติ	38
4.6 การทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระหว่างกระบวนการอบแบบสัมผัส	39
บทที่ 5 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	40
5.1 สมบัติทางกายภาพและทางความร้อน	40
5.1.1 ความชื้น	40
5.1.2 เปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนัก	40
5.1.3 ความพรุน	41
5.1.4 ความหนาแน่น	42
5.1.5 ความจุความร้อนจำเพาะ	42
5.1.6 สัมประสิทธิ์การนำความร้อน	43
5.1.7 สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น กรุณาแจ้งการละเมิดลิขสิทธิ์มาที่ กองอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำ ไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2 ผลของอุณหภูมิในกระบวนการอบแบบสัมผัส	44
5.3 การทวนสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อน	49
5.4 ผลของสื่อน้ำตาลที่เปลี่ยนแปลงบริเวณผิวด้านล่างของแพนเค้ก	52
บทที่ 6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	55
6.1 สรุปผลการทดลอง	55
6.2 ข้อเสนอแนะ	55
บรรณานุกรม	56
ภาคผนวก	60
ภาคผนวก ก	61
ภาคผนวก ข	75
ภาคผนวก ค	79



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ความชื้นของกลุ่มผลิตภัณฑ์เบเกอรี่	6
2.2 ความพรุนของขนมปังและโต	6
2.3 ความหนาแน่นของกลุ่มผลิตภัณฑ์เบเกอรี่	7
2.4 แสดงค่า X_w และ Z_w ในระบบ CIE 2 Degree Standard Observer	9
2.5 ความจุความร้อนจำเพาะของกลุ่มผลิตภัณฑ์เบเกอรี่	9
2.6 สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของกลุ่มผลิตภัณฑ์เบเกอรี่	10
2.7 สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของอาหารชนิดต่าง ๆ	10
3.1 สมการการกระจายอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์	25
4.1 อุปกรณ์ในการทดลอง	31
4.2 ความจุความร้อนจำเพาะของแต่ละองค์ประกอบทางเคมี	36
5.1 ความชื้นที่ T_{set} เท่ากับ 145 และ 165°C	40
5.2 เปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักที่ T_{set} เท่ากับ 145 และ 165°C	41
5.3 ความพรุนที่ T_{set} เท่ากับ 145 และ 165°C	41
5.4 ความหนาแน่นที่ T_{set} เท่ากับ 145 และ 165°C	42
5.5 ความจุความร้อนจำเพาะที่ T_{set} เท่ากับ 145 และ 165°C	43
5.6 สัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ T_{set} เท่ากับ 145 และ 165°C	43
5.7 สมบัติของแป้งแพนเค้ก	44
5.8 การเปลี่ยนแปลงสีของแป้งเค้กที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปร่างภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 กลไกการถ่ายเทความร้อน (ก) กระบวนการให้ความร้อนแบบสัมผัส (ข) กระบวนการอบขนมปัง	3
2.2 ผลิตรัณฑ์ในกระบวนการอบแบบสัมผัส (ก) ขนมปัง Drop scones (ข) ขนมบ้าบิ่น (ค) แผ่นแป้ง Tortilla และ (ง) แผ่นแป้ง Chapatti	4
2.3 ผลิตรัณฑ์ในกระบวนการอบ (ก) ขนมปัง (ข) พิชซ่า (ค) คัพเค้ก	4
2.4 ขั้นตอนการผลิตแพนเค้ก	4
2.5 ตัวอย่างผลิตรัณฑ์แพนเค้ก	5
2.6 ระบบบรรยายสีแบบแกน 3 มิติ	7
2.7 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	11
3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	14
3.2 การถ่ายเทความร้อนภายในผลิตรัณฑ์ในช่วงเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ผลิตรัณฑ์	15
3.3 การถ่ายเทความร้อนภายในผลิตรัณฑ์ในช่วงการระเหยน้ำ	18
3.4 การถ่ายเทความร้อนบริเวณผิวด้านบนในช่วงเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ผลิตรัณฑ์	20
3.5 การถ่ายเทความร้อนบริเวณผิวด้านบนของผลิตรัณฑ์ในช่วงการระเหยน้ำ	22
3.6 แผนผังการทำงานของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การถ่ายเทความร้อนของผลิตรัณฑ์	29
4.1 ชุดอุปกรณ์ในการทดลอง	31
4.2 กล้องถ่ายภาพความร้อน	32
4.3 อุปกรณ์ในการวัดอุณหภูมิภายในแพนเค้ก (ก) เทอร์โมคัปเปิล Type K (ข) Data logger	32
4.4 การให้ความร้อนแก่แพนเค้ก (ก) ชุดอุปกรณ์ให้ความร้อนแก่แพนเค้ก (ข) การวัดอุณหภูมิภายในแพนเค้ก	33
4.5 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิภายในแพนเค้ก (จุด B C D และ E) และบริเวณ ผิวด้านบน (จุด A)	33
4.6 อุปกรณ์ในการหาความชื้น (ก) ตู้อบลมร้อน และ (ข) เครื่องชั่งน้ำหนัก 4 ตำแหน่ง	34
4.7 แผนภาพแสดงขั้นตอนการหา ε ของแพนเค้ก	37
4.8 ตู้ควบคุมแสง	38
5.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งกับเวลาที่ (ก) T_{set} เท่ากับ $145\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ (ข) T_{set} เท่ากับ $165\text{ }^{\circ}\text{C}$	45

เอกสารนี้เป็น 5.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในตำแหน่ง E อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งที่ T_{set} เท่ากับ 145 และ 165°C ี่หา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำ 46 ี่

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในตำแหน่ง D ที่ T_{set} เท่ากับ 145 และ 165°C	47
5.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในตำแหน่ง C ที่ T_{set} เท่ากับ 145 และ 165 °C	47
5.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในตำแหน่ง B ที่ T_{set} เท่ากับ 145 และ 165 °C	48
5.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในตำแหน่ง A ที่ T_{set} เท่ากับ 145 และ 165°C	49
5.7 การทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดลองในแต่ละตำแหน่งของแพนเค้กที่ T_{set} เท่ากับ 165°C	50
5.8 การทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดลองในแต่ละตำแหน่งของแพนเค้กที่ T_{set} เท่ากับ 145°C	51
5.9 การเปลี่ยนแปลง (ก) ค่าความสว่าง (L^*) (ข) ค่าสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน (b^*) และ (ค) ค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม (ΔE)	53
5.10 การเปลี่ยนแปลงสีของตัวอย่างแพนเค้กบริเวณผิวด้านล่างที่ T_{set} เท่ากับ 145 และ 165°C ในเวลาต่าง ๆ	54
5.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาบริเวณผิวด้านล่างของแพนเค้ก (ตำแหน่ง E) ที่ T_{set} เท่ากับ 145 และ 165°C	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

กระบวนการให้ความร้อนแบบสัมผัส (Contact heating process) เป็นกระบวนการแปรรูปอาหารที่อุณหภูมิ 140-300°C (Feyissa et al., 2011) โดยอาศัยหลักการนำความร้อนผ่านแผ่นส่งผ่านความร้อน (Heating plate) มายังผลิตภัณฑ์ สำหรับการแปรรูปผลิตภัณฑ์ที่มีวัตถุดิบหลักคือแป้ง เรียกว่ากระบวนการนี้ว่า การอบแบบสัมผัส (Contact baking process) ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ ได้แก่ แพนเค้ก ขนมปัง Drop scones แผ่นแป้ง Chapatti แผ่นแป้ง Tortilla ขนมปังปิ้ง เป็นต้น ในระหว่างกระบวนการอบแบบสัมผัส เกิดการถ่ายเทความร้อน 3 รูปแบบ คือ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน เมื่ออุณหภูมิของแป้งเพิ่มสูงขึ้น แป้งจะเริ่มเกิดการพองตัว และเกิดการพองตัวสูงสุดแบบผันกลับไม่ได้เมื่อแป้งมีอุณหภูมิถึง 60-85°C ซึ่งเรียกระบวนการนี้ว่า เจลาติไนซ์เซชัน (Gelatinization) (Collison, 1968) แป้งสุกและเกิดการขยายตัวของอากาศภายในแป้ง เมื่ออุณหภูมิของแป้งสูงกว่า 120°C เกิดการเปลี่ยนแปลงสีเหลืองเป็นสีน้ำตาล เรียกปฏิกิริยานี้ว่า ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลชนิดที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ (Non enzymatic browning reaction) โดยการเกิดสีน้ำตาลเป็นสมบัติทางกายภาพของอาหาร ด้านสมบัติเชิงทัศนศาสตร์ (Optical properties) ในกระบวนการแปรรูปอาหารส่วนใหญ่รวมถึงกระบวนการอบแบบสัมผัส การสุกและการเปลี่ยนแปลงของสีน้ำตาลขึ้นกับอุณหภูมิและเวลาในการให้ความร้อน ซึ่งปัจจัยทั้งสองเป็นลักษณะสำคัญต่อความต้องการและการยอมรับของผู้บริโภค (นิธิยา, 2554) โดยการสุกและการเปลี่ยนแปลงของสีน้ำตาลขึ้นกับอุณหภูมิและเวลาในการให้ความร้อน

ในกระบวนการผลิตแพนเค้กให้ได้คุณภาพเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคอาศัยการควบคุมอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในระหว่างการให้ความร้อน เพื่อป้องกันไม่ให้สีของแพนเค้กที่ได้เปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลเข้มหรืออ่อนจนเกินไป โดยบริเวณผิวด้านล่างของแพนเค้กที่สัมผัสโดยตรงกับแผ่นให้ความร้อนเป็นส่วนที่เกิดการเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลมากที่สุด และในระหว่างกระบวนการให้ความร้อน ผู้ปฏิบัติงานจะไม่สามารถสังเกตการเปลี่ยนสีที่บริเวณผิวด้านล่างนี้ ซึ่งกลุ่มนักวิจัย Feyissa et al. (2011) ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การถ่ายเทความร้อนและมวลระหว่างกระบวนการอบแบบสัมผัส ใช้แพนเค้กเป็นกรณีศึกษา และทำการทวนสอบแบบจำลองทางที่สร้างขึ้น โดยในการทดลองไม่ได้วัดอุณหภูมิที่ผิวแพนเค้กด้านบน จากการทดลองพบว่าแบบจำลองนี้สามารถทำนายอุณหภูมิภายในกายเค้กได้ แต่ไม่สามารถทำนายอุณหภูมิบริเวณผิวด้านล่างของแพนเค้กได้อย่างถูกต้อง ซึ่งการวัดอุณหภูมิที่ผิวด้านบนและสามารถทำนายอุณหภูมิที่ผิวด้านล่างได้จะสามารถโยงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ เวลา และการเกิดสีน้ำตาลที่บริเวณผิวด้านล่างของแพนเค้กได้

ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จึงสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนสำหรับกระบวนการอบแบบสัมผัส ซึ่งใช้สำหรับการทำนายอุณหภูมิ ณ จุดต่าง ๆ ของแพนเค้ก และทำการทวนสอบแบบจำลองดังกล่าวกับผลการทดลอง รวมถึงสังเกตการเปลี่ยนสีน้ำตาลที่เกิดขึ้นบริเวณผิวที่สัมผัสกับแผ่นส่งผ่านความร้อน

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนในระหว่างกระบวนการให้ความร้อนแบบสัมผัสและทวนสอบแบบจำลองดังกล่าวกับผลการทดลอง

1.3 ขอบเขตการศึกษา

สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนในระหว่างกระบวนการอบแบบสัมผัส จากนั้นนำแบบจำลองดังกล่าวมาทวนสอบกับผลการทดลอง โดยใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนวัดอุณหภูมิที่ผิวด้านบนของผลิตภัณฑ์ เพื่อให้อุณหภูมิที่วัดได้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น พร้อมทั้งสังเกตสีน้ำตาลที่เกิดขึ้นบริเวณผิวด้านล่างของผลิตภัณฑ์ โดยใช้กระบวนการผลิตแพนเค้กเป็นกรณีศึกษา

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนระหว่างกระบวนการอบแบบสัมผัส
2. สามารถนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไปพัฒนาและปรับปรุงกระบวนการผลิต รวมถึงสามารถประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์ชนิดอื่นได้

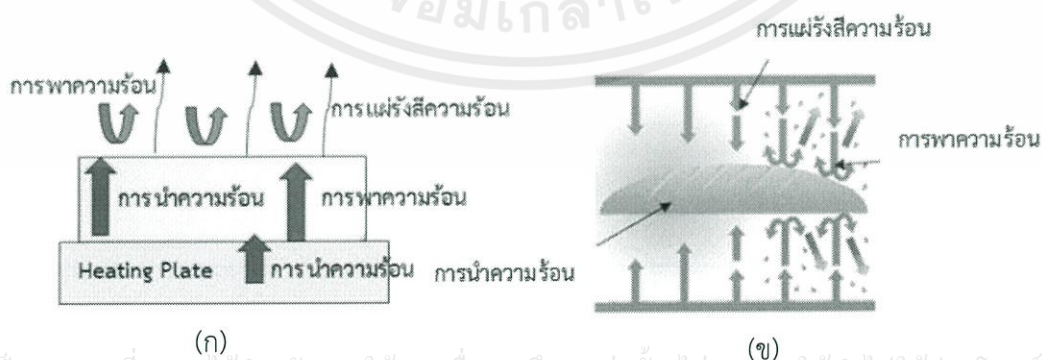
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ตรวจเอกสาร

2.1 กระบวนการให้ความร้อนแบบสัมผัส

กระบวนการให้ความร้อนแบบสัมผัส (Contact heating process) เป็นกระบวนการแปรรูปอาหาร โดยใช้ความร้อนจากแหล่งให้ความร้อนผ่านวัตถุตัวกลางนำความร้อนมายังอาหาร ได้แก่ กระบวนการทอดแบบสัมผัส (Contact frying process) ซึ่งเป็นกระบวนการแปรรูปอาหารในช่วงอุณหภูมิ 170-200°C โดยใช้น้ำมันเป็นตัวกลางในการส่งผ่านความร้อน (Anastasia et al., 2007) ตัวอย่างอาหารทอดแบบสัมผัส ได้แก่ เนื้อสัตว์ แฮมเบอร์เกอร์ ไข่ดาว และขนมโรตี เป็นต้น และกระบวนการอบแบบสัมผัส (Contact baking process) ซึ่งเป็นกระบวนการแปรรูปอาหารในช่วงอุณหภูมิ 140-300°C (Feyissa et al., 2011) โดยอาศัยหลักการนำความร้อน (Conduction) จากแผ่นส่งผ่านความร้อนขึ้นมาที่ผิวด้านล่างของผลิตภัณฑ์ และส่งผ่านเข้าสู่ภายในผลิตภัณฑ์ด้วยการนำความร้อนและการพาความร้อน (Convection) โดยที่บริเวณผิวของผลิตภัณฑ์อาจมีการสูญเสียความร้อนในรูปของการพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน (Radiation) รูปแบบกลไกการถ่ายเทความร้อนของกระบวนการให้ความร้อนแบบสัมผัส และกระบวนการอบขนมปัง (Baking) แสดงดังรูปที่ 2.1 (ก) และ (ข) ตามลำดับ ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการอบแบบสัมผัส ได้แก่ ขนมปัง Drop scones แผ่นแป้ง Chapatti แผ่นแป้ง Tortilla และขนมข้าวปั้น ดังแสดงในรูป 2.2 และตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการอบ ได้แก่ ขนมปัง พิซซ่า คัพเค้ก เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยการถ่ายเทความร้อนของกระบวนการให้ความร้อนแบบอบสัมผัสมีความคล้ายคลึงกับกระบวนการอบขนมปังที่ใช้เตาอบ เนื่องจากมีวัตถุหลักคือแป้งเหมือนกัน แต่แตกต่างกันที่กระบวนการถ่ายเทความร้อน โดยกระบวนการอบขนมปังอาศัยหลักการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนภายในเตาอบมายังผลิตภัณฑ์ จากนั้นจะเกิดการนำความร้อนภายในเนื้อผลิตภัณฑ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (ข)

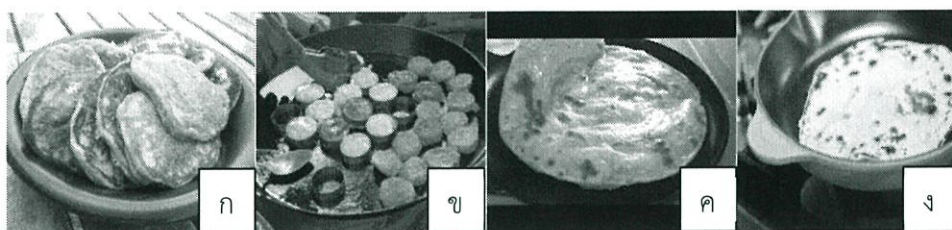


(ก)

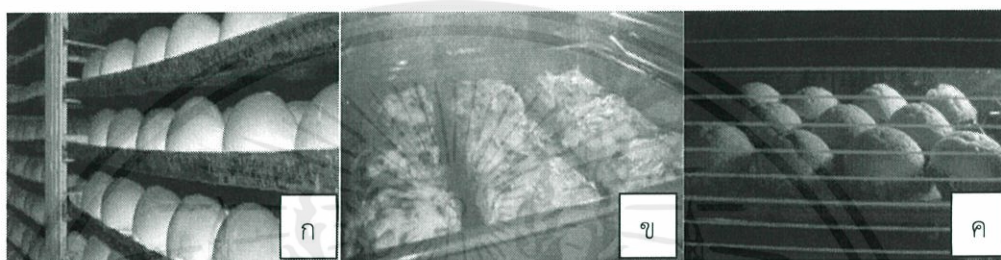
(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 2.1 กลไกการถ่ายเทความร้อน (ก) กระบวนการให้ความร้อนแบบสัมผัส (ข) กระบวนการอบขนมปัง



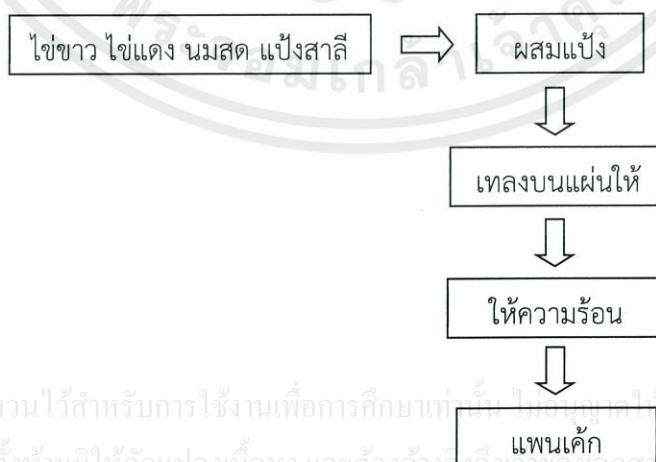
รูปที่ 2.2 ผลผลิตภัณฑ์ในกระบวนการอบแบบสัมผัส (ก) ขนมปัง Drop scones (ข) ขนมปังบ้าน (ค) แผ่นแป้ง Tortilla และ (ง) แผ่นแป้ง Chapatti



รูปที่ 2.3 ผลผลิตภัณฑ์ในกระบวนการอบ (ก) ขนมปัง (ข) พิซซ่า (ค) คัพเค้ก

2.2 การผลิตแพนเค้ก

แพนเค้กเป็นอาหารชนิดหนึ่งที่มีส่วนประกอบหลักคือแป้งสาลี มีลักษณะเป็นแผ่นกลม เนื้อสัมผัสนุ่ม มีความหนา และความหวานเพียงเล็กน้อย เป็นอาหารที่นิยมทานกันในหลายประเทศและดัดแปลงได้ในหลายรูปแบบ มีส่วนผสมดังนี้ แป้งสาลี นม น้ำตาล ไข่แดง ไข่ขาว และผงฟู เป็นต้น องค์ประกอบทางเคมีของแพนเค้กประกอบด้วย น้ำ 56.1% โปรตีน 6.9% คาร์โบไฮเดรต 33.8% และไขมัน 3.2% (%w/w, mass basis) (Feyissa et al., 2011) ขั้นตอนการผลิตแพนเค้กแสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ขั้นตอนการผลิตแพนเค้ก

ขั้นตอนการทำแป้งแพนเค้กเริ่มจากการผสมไข่ขาว ไข่แดง นมสด และแป้งสาลี ในเครื่องตีผสมแป้ง ผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นพักแป้งทิ้งไว้ประมาณ 20 นาที เมื่อครบเวลาเทแป้งลงบนแม่พิมพ์และให้ความร้อน เมื่อแป้งแพนเค้กได้รับความร้อนจนมีอุณหภูมิสูงกว่า 50°C แป้งเริ่มเกิดการพองตัว และเกิดการเปลี่ยนแปลงภายในโมเลกุลของเม็ดแป้ง เนื่องจากความร้อนเข้าไปทำลายพันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลของเม็ดแป้งที่อัดแน่นกันอยู่ (Morrison and Laignelet, 1983) จากนั้นเมื่อให้ความร้อนแก่แป้งเพิ่มขึ้น แป้งดูดน้ำเข้ามามากขึ้นทำให้มีความหนืดเพิ่มขึ้นและเกิดการพองตัวสูงสุดแบบผันกลับไม่ได้ เรียกกระบวนการนี้ว่าเจลาติไนซ์เซชัน (Collison, 1968) ซึ่งมีอุณหภูมิในช่วง 60-85°C (แป้งสาลีเกิดเจลาติไนซ์เซชันในช่วงอุณหภูมิ 53-65°C (นิธิยา, 2554)) เมื่อมีการให้ความร้อนต่อไปเรื่อย ๆ อุณหภูมิและความหนืดของแป้งจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงจุดที่เม็ดแป้งเริ่มแตกตัวและกระจายตัวอยู่ในน้ำแป้ง ทำให้ได้สารละลายที่ข้นหนืด เรียกลักษณะนี้ว่า การสุกของแป้ง หรือการเกิดเจลอย่างสมบูรณ์ (นิธิยา, 2554) จากนั้นเมื่อให้ความร้อนแก่แป้งจนกระทั่งมีอุณหภูมิมากกว่า 120°C จะเกิดการเปลี่ยนแปลงสีของแป้งจากสีเหลืองเป็นสีน้ำตาลบริเวณผิวที่สัมผัสกับแผ่นส่งผ่านความร้อน เรียกลักษณะดังกล่าวว่า ปฏิกริยาการเกิดสีน้ำตาลชนิดที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ (Non enzymatic browning reaction) ประเภทปฏิกริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) (Pylar, 1988) โดยสีน้ำตาลที่เกิดขึ้นเป็นลักษณะที่สำคัญต่อความต้องการของผู้บริโภค และเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญในการยอมรับของผลิตภัณฑ์เพราะเป็นตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับรสชาติและระดับความพึงพอใจของผู้บริโภค



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์แพนเค้ก

2.3 สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางความร้อนของอาหาร

สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางความร้อนของอาหาร เป็นตัวบ่งชี้ถึงลักษณะเฉพาะเจาะจงของอาหารชนิดนั้น ๆ โดยสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความชื้น ความพรุน ความหนาแน่น สี เป็นต้น สมบัติทางความร้อน ได้แก่ ความจุความร้อนจำเพาะ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน เป็นต้น โดยสมบัติดังกล่าว สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการกำหนดปัจจัยเพื่อควบคุมคุณภาพ การออกแบบเครื่องจักรอุปกรณ์ที่ใช้ในการแปรรูปและเครื่องมือที่เกี่ยวข้อง การออกแบบและควบคุมระบบการแปรรูปอาหาร เป็นต้น (ปานมนัส และคณะ, 2538)

2.3.1 ความชื้น

ความชื้น (Moisture Content, M_c) คือค่าที่แสดงปริมาณน้ำที่มีอยู่ในวัสดุ (นิธิยา, 2554) หรือปริมาณน้ำที่เปลี่ยนไปในวัสดุเมื่อได้รับความร้อนและเป็นสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของอาหาร เนื่องจากความชื้นมีผลต่อสมบัติทางกายภาพและทางความร้อนของอาหาร เช่น จุดเดือด จุดหลอมเหลว การนำความร้อน ความหนืด ความร้อนจำเพาะ และคุณภาพทางประสาทสัมผัส (Lodia, 2007) ตัวอย่างความชื้นของกลุ่มผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ความชื้นของกลุ่มผลิตภัณฑ์เบเกอรี่

ชนิดของอาหาร	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	ความชื้น (%Wb)	อ้างอิง
ขนมปัง	60-72	51.03-52.75	Manuela, 2012
Wheat bread	110	39.3-42.8	Alessia, 2007
โต	30	30	Maroulis, 2001

2.3.2 ความพรุน

ความพรุน (Porosity, ϵ) คือ สัดส่วนช่องว่างที่มีอยู่ในชิ้นวัสดุมีค่าเท่ากับอัตราส่วนของปริมาตรช่องว่างหรือปริมาตรอากาศในชิ้นวัสดุนั้นต่อปริมาตรรวมทั้งหมด ตัวอย่างความพรุนของขนมปังและโต แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ความพรุนของขนมปังและโต

ชนิดของอาหาร	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	ความพรุน	อ้างอิง
ขนมปัง	177-198	0.6-0.73	Mandala et al., 2007
ขนมปัง	220-240	0.88-0.92	Besbes et al., 2013
โต	103	0.78-1.26	Ruben and Alain, 2009

2.3.3 ความหนาแน่น

ความหนาแน่น (Density, ρ) เป็นสมบัติทางกายภาพที่สำคัญของอาหาร (Rahman, 1995) ซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิและสมบัติภายในของอาหาร (Choi and Okos, 1985) แสดงอัตราส่วนระหว่างมวล (m) ต่อปริมาตรของวัสดุ (V) หน่วยของความหนาแน่นในระบบ SI เป็น (kg/m^3) ส่วนในระบบอังกฤษ (lb/ft^3) ตัวอย่างความหนาแน่นของกลุ่มผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ แสดงดังตารางที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

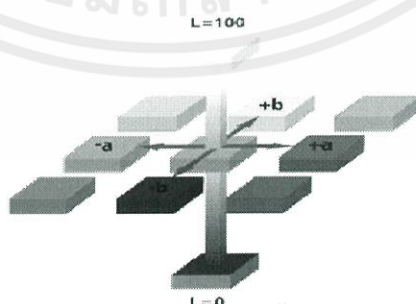
ตารางที่ 2.3 ความหนาแน่นของกลุ่มผลิตภัณฑ์เบเกอรี่

ชนิดของอาหาร	อุณหภูมิ (°C)	ความหนาแน่น (kg/m ³)	อ้างอิง
ขนมปัง	22	190-210	Bakshi and Yoon, 1984
โด	35-62.5	1035-1093	Gupta, 1993
ขนม Chapatti	35-62.5	1050-1200	Gupta, 1993

2.3.4 สี

สี (Color) เป็นสมบัติทางกายภาพของอาหารด้านสมบัติเชิงทัศนศาสตร์ (Optical Properties) ที่มีผลต่อคุณภาพและการยอมรับของผู้บริโภค สมบัติของสีแตกต่างจากสมบัติทางกายภาพและสมบัติอื่นๆ เช่น สมบัติเชิงเรขาคณิต สมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน โดยสีเป็นสมบัติที่เกิดจากการรับรู้สัญญาณในรูปของคลื่นแสงที่ตกกระทบดวงตาของมนุษย์ซึ่งมีเซลล์รับและส่งสัญญาณผ่านไปยังสมอง และแปลงค่าเป็นค่าสีต่างๆ ตามที่แต่ละบุคคลมีอยู่ในระบบความทรงจำ ซึ่งสีของอาหารเป็นลักษณะสำคัญประการหนึ่งที่มีผลต่อความต้องการและการยอมรับของผู้บริโภค ถ้าสีของอาหารผิดปกติไป ผู้บริโภคส่วนใหญ่จะไม่ยอมรับ โดยอาจไม่คำนึงถึงคุณภาพด้านอื่น เช่น กลิ่น รสชาติ หรือเนื้อสัมผัส (นิธิยา, 2554)

ระบบค่าของสีที่ใช้เป็นมาตรฐานสากล และนิยมใช้ในการบอกค่าสีของอาหารคือ ระบบค่าสีมันเซลล์ (Munsell color system) ระบบ C.I.E. (X Y และ Z) ระบบ Hunter (L a b) ระบบ C.I.E. LAB (L* a* b*) เป็นต้น โดยระบบ C.I.E. กำหนดสเกลการวัดสีเป็น X Y Z ซึ่งใช้บรรยายสีแดง (Red) เขียว (Green) และ น้ำเงิน (Blue) (R G B) มีค่า 0-255 แต่เนื่องจากระบบสีดังกล่าวไม่สามารถบรรยายถึงลักษณะความมืดและความสว่างของสีได้ จึงได้พัฒนาระบบสีต่อมาจนเป็นระบบที่ยอมรับและใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน คือระบบ L* a* b* ซึ่งเป็นระบบการบรรยายสีแบบ 3 มิติ ดังรูปที่ 2.6 โดย L* คือ ค่าความสว่างของสีซึ่งมีค่า 0-100 แสดงถึงสีดำ และสีขาว a* และ b* เป็นค่าที่บอกสีโดยแสดงในสองแกน a* คือสีแดงถึงเขียว และ b* คือ น้ำเงินถึงเหลือง โดยค่า L* a* b* สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.5 2.6 และ 2.7 ตามลำดับ (Purlis and Salvadori, 2007)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ หากมีข้อผิดพลาดประการใด ขออภัยเป็นอย่างสูงและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่มา: Hunterlab, (1986)

$$x = 0.4124g\left(\frac{R}{255}\right) + 0.3576g\left(\frac{G}{255}\right) + 0.1805g\left(\frac{B}{255}\right) \quad (2.1)$$

$$y = 0.2126g\left(\frac{R}{255}\right) + 0.7152g\left(\frac{G}{255}\right) + 0.0722g\left(\frac{B}{255}\right) \quad (2.2)$$

$$z = 0.0193g\left(\frac{R}{255}\right) + 0.1192g\left(\frac{G}{255}\right) + 0.9505g\left(\frac{B}{255}\right) \quad (2.3)$$

โดยที่

$$g(p) = \begin{cases} 100[(p + 0.055) / 1.055]^{2.4} & \text{if } p > 0.04045 \\ 100(p / 12.92) & \text{if } p \leq 0.04045 \end{cases} \quad (2.4)$$

$$L^* = 116h(Y/Y_w) - 16 \quad (2.5)$$

$$a^* = 500[h(X/X_w) - h(Y/Y_w)] \quad (2.6)$$

$$b^* = 200[h(Y/Y_w) - h(Z/Z_w)] \quad (2.7)$$

โดยที่

$$h(q) = \begin{cases} \sqrt[3]{q} & \text{if } q > 0.008856 \\ 7.787q + (16/116) & \text{if } q \leq 0.008856 \end{cases} \quad (2.8)$$

ค่า X_w , Y_w และ Z_w คือ ค่าอ้างอิงระบบการบรรยายสีแบบ 3 มิติ (Gonzalez and Woods, 2002) โดยที่ $Y_w = 100.00$ และ X_w, Z_w แสดงค่าดังตารางที่ 2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 แสดงค่า X_w และ Z_w ในระบบ CIE 2 Degree Standard Observer

Illuminant	X_n	Z_n
A	109.83	35.55
C	98.04	118.11
D65	95.02	108.82
F2	98.09	67.53
TL 4	101.40	65.90
UL 3000	107.99	33.91
D50	96.38	82.45
D60	95.23	100.86
D75	94.96	122.53

ที่มา: Hunterlab, (1986)

2.3.5 ความจุความร้อนจำเพาะ

ความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat, C_p) คือปริมาณความร้อนที่ทำให้วัสดุที่มีมวล 1 หน่วย มีอุณหภูมิเปลี่ยนไป 1 องศา โดยไม่มีการเปลี่ยนสถานะหรือปริมาณความร้อนที่วัสดุสะสม มีหน่วยเป็น (kJ/kg·K) (Califano and Calvelo, 1991) ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความจุความร้อนจำเพาะของอาหารขึ้นอยู่กับส่วนประกอบทางเคมี ความชื้นและอุณหภูมิ ซึ่งอาหารแต่ละชนิดมีส่วนประกอบทางเคมีที่ต่างกัน ส่งผลให้ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอาหารต่างกันด้วย (Mohsenin, 1980) ความจุความร้อนจำเพาะของกลุ่มผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ แสดงดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ความจุความร้อนจำเพาะของกลุ่มผลิตภัณฑ์เบเกอรี่

ชนิดของอาหาร	อุณหภูมิ (°C)	ความจุความร้อนจำเพาะ (kJ/kg·K)	อ้างอิง
แป้งโด	25	2900	Zanoni et al., 1995
ขนม Chapatti	58.5	2233.3	Gupta, 1993
ขนมปัง	30	3080	Wong et al., 2007

2.3.6 สัมประสิทธิ์การนำความร้อน

สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal conductivity, k) คือ อัตราการส่งผ่านความร้อนในวัสดุหนา 1 หน่วยที่มีอุณหภูมิต่างกัน 1 หน่วย มีหน่วยเป็น (W/m·K) ปัจจัยที่มีผลต่อค่าการนำความร้อนของอาหาร ได้แก่ ความชื้น อุณหภูมิ องค์ประกอบทางเคมีของอาหาร และลักษณะโครงสร้างทาง

กายภาพของอาหาร เป็นต้น (Mohsenin, 1980) สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของกลุ่มผลิตภัณฑ์เบเกอรี่แสดงดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของกลุ่มผลิตภัณฑ์เบเกอรี่

ชนิดของอาหาร	อุณหภูมิ (°C)	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W/m·K)	อ้างอิง
ขนมปัง	22	0.091-0.104	Rubén and Alain, 2008
โด	35-62.5	0.221-0.341	Gupta, 1993
Baked Chapatti	35-62.5	0.142-0.343	Gupta, 1993

2.3.7 สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน

สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของวัสดุ (Emissivity, ϵ) คือ ค่าสมบัติที่แสดงความสามารถของวัตถุในการแผ่รังสีความร้อน มีค่าเท่ากับอัตราส่วนของรังสีที่แผ่ออกจากวัตถุใด ๆ กับรังสีที่แผ่ออกจากวัตถุดำ (Black body) ณ อุณหภูมิเดียวกัน มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 ซึ่งวัตถุดำมีค่า ϵ เท่ากับ 1 เสมอ เนื่องจากรังสีความร้อนที่แผ่ออกมาจากวัตถุดำเป็นความร้อนที่เกิดจากพื้นผิวของตัวมันเองและมีความเข้มเท่ากันทุกทิศทาง ในส่วนของวัตถุจริงมีค่า ϵ ไม่คงที่ และมีค่าต่ำกว่า 1 ซึ่งค่า ϵ ของวัตถุจริงจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุ ลักษณะพื้นผิวของวัตถุ และอุณหภูมิที่ผิวของวัตถุ (นวกัทรธา และทวีพล, 2555) สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของอาหารชนิดต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 2.7

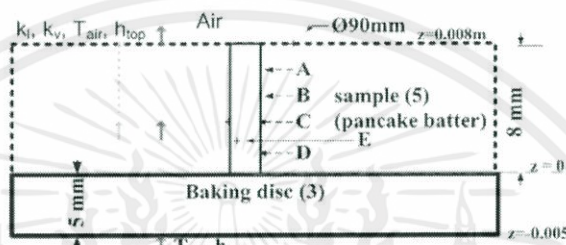
ตารางที่ 2.7 สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของอาหารชนิดต่าง ๆ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรณาไปใช้

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Feyissa et al. (2011) สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม Comsol เพื่อศึกษาและทำนายอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในการถ่ายเทความร้อนและมวลระหว่างกระบวนการอบแบบสั้มผัส โดยใช้แพนเค้กเป็นกรณีศึกษา ทดลองให้ความร้อนแก่แพนเค้กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 90 mm. หนา 8 mm. ที่อุณหภูมิ 3 ระดับ ได้แก่ 160 200 และ 240°C เป็นเวลา 20 นาที วัดอุณหภูมิ 4 ตำแหน่งคือ A B C และ D (รูปที่ 2.7) ภายในแพนเค้กด้วยเทอร์โมคัปเปิล Type k และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อนและมวลในระหว่างกระบวนการอบแบบสั้มผัส



รูปที่ 2.7 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์: ภายในแพนเค้กจะใส่เครื่องมือวัดอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ (A = 6.4 mm. B = 4.8 mm. C=3.2 mm. และ D=1.6mm.) ตำแหน่ง $z=-0.005$ เป็นบริเวณสัมผัสของแผ่นส่งผ่านความร้อนกับอุปกรณ์ให้ความร้อน ตำแหน่ง $z=0$ เป็นบริเวณสัมผัสของแผ่นส่งผ่านความร้อนกับแพนเค้ก และตำแหน่ง $z=0.008$ เป็นบริเวณสัมผัสของแพนเค้กกับอากาศ ที่มา: Feyissa et al. (2011)

โดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อยู่ภายใต้สมมติฐานดังนี้

1. การให้ความร้อนกับผลิตภัณฑ์ในช่วงแรกอาศัยหลักการนำความร้อน จากนั้นน้ำบางส่วนภายในแพนเค้กจะระเหยออก แต่เนื่องจากแพนเค้กมีความหนืดและหนา จึงมีการระเหยของน้ำน้อย (ไม่มี Natural Convection)

2. ผลิตภัณฑ์มีการสูญเสียความร้อนที่บริเวณผิวด้านบนจากการพาความร้อนของอากาศ และในการทดลองไม่คิดการแผ่รังสีของผลิตภัณฑ์เนื่องจากผลิตภัณฑ์มีอุณหภูมิที่จุด D ต่ำกว่า 100°C แสดงดังรูปที่ 2.7

3. การแพร่กระจายของน้ำภายในผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นพร้อมกับการระเหยของไอน้ำ

4. การถ่ายเทมวลภายในผลิตภัณฑ์สามารถแยกได้ 2 สถานะคือ น้ำ และไอน้ำ

5. ไอน้ำที่อยู่ภายในผลิตภัณฑ์จะแพร่ไปยังผิวด้านบนและแพร่กระจายไปยังสิ่งแวดล้อม (อากาศ)

จึงสามารถคิดพลังงานทั้งหมดได้จากการสมดุลภายในเนื้อขนมปัง

6. การคำนวณการถ่ายเทความร้อนภายในผลิตภัณฑ์คำนวณจากการถ่ายเทความร้อนแบบมิติเดียว เนื่องจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลิตภัณฑ์ (90 mm.) มีความกว้างมากเมื่อเทียบกับความ

หนา (8 mm.) จึงทำให้ค่าความร้อนที่สะสมในด้านข้าง (แกน x และ y) ส่งผลน้อยมากเมื่อเทียบกับด้านล่าง (z) สมการการถ่ายเทความร้อนบริเวณแผ่นส่งผ่านความร้อน แสดงดังสมการ 2.9

$$-k_{Al} \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=-0.005} = h_{bot} (T_{set} - T) \quad (2.9)$$

โดยที่ T_{set} คือ ความร้อนจากแผ่นให้ความร้อน (K)
 h_{bot} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของแผ่นด้านล่าง ($W/m^2 \cdot K$)
 k_{Al} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของแผ่นอลูมิเนียม ($W/m \cdot K$)
 ∂T คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (K)
 ∂z คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของความหนา
 T คือ อุณหภูมิของทองแดง (K)

จากนั้นสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนภายในแพนเค้กจากสมการที่ 2.10

$$-k_{Al} \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} = \left(-k_p \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} \right) + q_{evp} \Big|_{z=0} \quad (2.10)$$

โดย k_p คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของแพนเค้ก ($W/m \cdot K$)
 $q_{evp} \Big|_{z=0}$ คือ ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการระเหยของน้ำที่บริเวณด้านล่าง

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนบริเวณผิวของแพนเค้กได้จากสมการที่ 2.11

$$-k_p \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0.008} = q_{evp} \Big|_{z=0.008} + h_{top} (T - T_{air}) \quad (2.11)$$

โดย h_{top} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศ ($W/m^2 \cdot K$)
 $q_{evp} \Big|_{z=0.008}$ คือ ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการระเหยของน้ำที่บริเวณที่ผิว
 T_{air} คือ อุณหภูมิของอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำแบบจำลองดังกล่าวมาทวนสอบกับการทดลองจริง พบว่ามีความสอดคล้องกัน ดังนั้นจึงสามารถนำแบบจำลองดังกล่าวไปทำนายอุณหภูมิภายในแพนเค้กได้ แต่เนื่องจากแบบจำลองดังกล่าวไม่ได้ทำการวัดอุณหภูมิบริเวณที่ผิวจึงไม่สามารถทำนายอุณหภูมิผิวได้

Melike et al. (2006) สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายอุณหภูมิและความชื้นในกระบวนการอบขนมปัง โดยทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลองที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อนในกระบวนการอบ ซึ่งผลของอุณหภูมิและความชื้นที่ได้จากการทดลองมีความสอดคล้องกันอย่างมีนัยสำคัญ

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

Purlis and Salvadori (2007) ทดลองหาปฏิกริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ผิวขนมปัง โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิของเตาอบ 3 ระดับ คือ 180 200 และ 220°C ภายใต้การพาความร้อนแบบธรรมชาติและแบบควบคุม จากนั้นสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสีน้ำตาลที่เปลี่ยนกับปริมาณน้ำหนักที่สูญเสีย (Weight loss) และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายอัตราการเกิดสีน้ำตาลโดยตัวแปรอิสระคือ ปริมาณน้ำหนักที่สูญเสียกับอุณหภูมิที่ใช้ในการอบ พบว่าความสัมพันธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์สีน้ำตาลที่เปลี่ยนกับปริมาณน้ำหนักที่สูญเสียสามารถนำไปใช้ในการทำนายการเกิดสีน้ำตาลที่ผิวของขนมปังได้

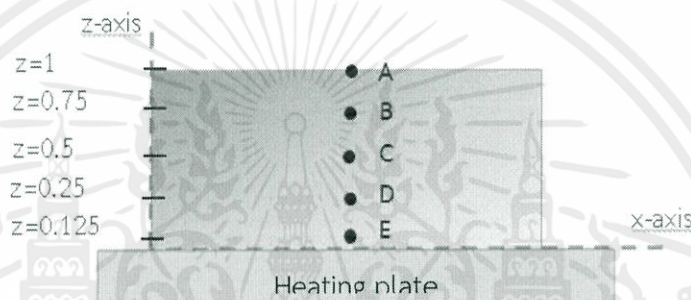
Jimenez et al. (2000) แสดงพัฒนาการเกิดสีน้ำตาลที่สามารถประเมินค่าอย่างมีประสิทธิภาพจากการวัดสีระหว่างกระบวนการอบและอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างสีกับเวลาในกระบวนการอบ และส่วนใหญ่การเกิดสีน้ำตาลที่เปลือกขนมปังจะสามารถควบคุมได้จากอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การถ่ายเทความร้อนแบบสัมผัส

การถ่ายเทความร้อนของผลิตภัณฑ์ในกระบวนการให้ความร้อนแบบสัมผัส อาศัยหลักการนำความร้อนจากแผ่นส่งผ่านความร้อน (Heating plate) ผ่านบริเวณผิวด้านล่างถ่ายเทความร้อนสู่ผิวด้านบนของผลิตภัณฑ์ และมีการสูญเสียความร้อนจากการพาความร้อนของสิ่งแวดล้อมบริเวณผิวด้านบนของผลิตภัณฑ์ ซึ่งในการทดลองได้แบ่งตำแหน่งในการวัดอุณหภูมิทั้งหมด 5 ตำแหน่ง ได้แก่ A B C D และ E โดยแต่ละตำแหน่งมีระยะห่าง 0.25 ซม. แสดงดังในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในการทดลองได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อนของผลิตภัณฑ์ในระหว่างกระบวนการอบแบบสัมผัสโดยมีสมมติฐานดังนี้

1. แผ่นส่งผ่านความร้อน ให้ความร้อนที่อุณหภูมิคงที่
2. อุณหภูมิผิวด้านล่างของผลิตภัณฑ์ เท่ากับอุณหภูมิของแผ่นส่งผ่านความร้อน (ตำแหน่ง E)
3. การถ่ายเทความร้อนภายในผลิตภัณฑ์ ขึ้นอยู่กับเวลาและอุณหภูมิ
4. บริเวณผิวด้านบนผลิตภัณฑ์มีการสูญเสียความร้อนจากการพาความร้อนของสิ่งแวดล้อม (ตำแหน่ง A) และไม่คิดการสูญเสียความร้อนจากการแผ่รังสีเนื่องจากอุณหภูมิบริเวณผิวของผลิตภัณฑ์มีอุณหภูมิต่ำกว่า 100°C
5. ไอน้ำที่อยู่ภายในผลิตภัณฑ์จะแพร่ไปยังผิวด้านบนและระเหยออกไปยังสิ่งแวดล้อม
6. การระเหยของน้ำภายในผลิตภัณฑ์ จะเริ่มระเหยเมื่ออุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ มากกว่า 100°C
7. สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางความร้อนมีค่าคงที่
8. ปริมาตรของผลิตภัณฑ์ไม่เปลี่ยนแปลงตลอดการทดลอง
9. การสูญเสียพลังงานความร้อนจากการพาความร้อนของสิ่งแวดล้อมและพลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำมีค่าคงที่ตลอดการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. การคำนวณการถ่ายเทความร้อนภายในผลิตภัณฑ์เป็นการถ่ายเทความร้อนแบบมิติเดียว เนื่องจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลิตภัณฑ์ (75 มม.) มีความกว้างมากเมื่อเทียบกับความหนา (10 มม.) จึงทำให้ค่าความร้อนที่สะสมในด้านข้าง (แกน x และ y) มีผลน้อยมากเมื่อเทียบกับความร้อนจากด้านล่าง (แกน z)

3.1 สมการทางคณิตศาสตร์การถ่ายเทความร้อนในกระบวนการอบแบบสัมพัทธ์

สมการทางคณิตศาสตร์การถ่ายเทความร้อนในกระบวนการอบแบบสัมพัทธ์ คือ สมการที่ใช้แสดงถึงลักษณะการถ่ายเทความร้อนของผลิตภัณฑ์ในกระบวนการอบแบบสัมพัทธ์ โดยใช้กฎทรงพลังงาน (Conservation of energy) และแก้สมการหาค่าการกระจายอุณหภูมิแต่ละตำแหน่งด้วยวิธี Finite-difference แบบ Implicit method และสามารถแบ่งสมการในการถ่ายเทความร้อนได้ 3 รูปแบบ ดังนี้

3.1.1 การถ่ายเทความร้อนบริเวณผิวด้านล่างของผลิตภัณฑ์

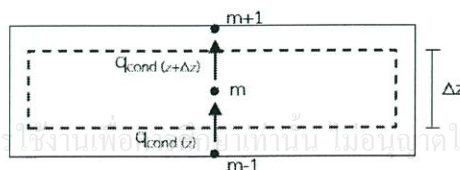
การถ่ายเทความร้อนบริเวณผิวล่างของผลิตภัณฑ์ ตำแหน่งนี้สัมผัสกับแผ่นให้ความร้อนโดยตรง ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้อุณหภูมิบริเวณดังกล่าวมีค่าเท่ากับอุณหภูมิของแผ่นส่งผ่านความร้อนดังสมมติฐานข้อที่ 1

3.1.2 การถ่ายเทความร้อนภายในผลิตภัณฑ์

การถ่ายเทความร้อนภายในผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ตำแหน่ง B C D และ E ในรูป 3.1 สามารถแบ่งช่วงการถ่ายเทความร้อนออกเป็น 2 ช่วงคือ ช่วงเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ผลิตภัณฑ์ (Heating period) และช่วงระเหยน้ำ (Evaporation period) สามารถแบ่งสมการในการถ่ายเทความร้อนได้เป็น 2 แบบ ได้แก่

3.1.2.1 การถ่ายเทความร้อนภายในผลิตภัณฑ์ ในช่วงเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ผลิตภัณฑ์

รูปแบบการถ่ายเทความร้อนในช่วงเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ผลิตภัณฑ์ แสดงดังรูปที่ 3.2 เป็นการถ่ายเทความร้อนเพื่อทำให้อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์สูงขึ้น ซึ่งเกิดขึ้นตั้งแต่เวลาเริ่มต้นจนอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ถึง 100°C (อุณหภูมิที่น้ำเริ่มระเหย) แต่การถ่ายเทความร้อนของผลิตภัณฑ์ ในตำแหน่ง E เป็นตำแหน่งที่อยู่ใกล้บริเวณผิวด้านล่างของผลิตภัณฑ์ ซึ่งบริเวณดังกล่าวมีอุณหภูมิคงที่เท่ากับอุณหภูมิของแผ่นส่งผ่านความร้อน ทำให้อุณหภูมิตำแหน่งที่ T_{m-1} ของตำแหน่ง E มีอุณหภูมิคงที่เท่ากับอุณหภูมิของแผ่นส่งผ่านความร้อน โดยสมการถ่ายเทความร้อนภายในผลิตภัณฑ์แสดงดังสมการที่ 3.1



รูปที่ 3.2 การถ่ายเทความร้อนภายในผลิตภัณฑ์ในช่วงเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ผลิตภัณฑ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ... ไม่อนุญาตให้拿去ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกฎทรงพลังงาน :

$$\dot{E}_{in} + \dot{E}_g - \dot{E}_{out} = \frac{dE_{st}}{dt}$$

$$\dot{E}_{in} = q_{cond(z)}$$

$$\dot{E}_g = 0$$

$$\dot{E}_{out} = q_{cond(z+\Delta z)}$$

$$\frac{dE_{st}}{dt} = \rho V C_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

แทนค่าลงในกฎทรงพลังงาน

$$q_{cond(z)} - q_{cond(z+\Delta z)} = \rho V C_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

ให้

$$q_{cond(z+\Delta z)} = q_{cond(z)} + \left(\frac{\partial q_{cond(z)}}{\partial z} \right) (\Delta z)$$

$$\cancel{q_{cond(z)}} - \left(\cancel{q_{cond(z)}} + \frac{\partial q_{cond(z)}}{\partial z} \Delta z \right) = \rho V C_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

$$-\frac{\partial q_{cond(z)}}{\partial z} (\Delta z) = \rho V C_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

ให้

$$q_{cond(z)} = (-k_p)(\Delta x)(\Delta y) \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)$$

$$-\frac{\partial(-k_p)(\Delta x)(\Delta y)}{\partial z} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) (\Delta z) = \rho V C_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

$$(k_p) \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) (\Delta x)(\Delta y)(\Delta z) = \rho V C_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

เมื่อ

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \Big|_m \approx \frac{T_{m+1} + T_{m-1} - 2T_m}{(\Delta z)^2} \text{ และ } \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_m^{p+1} - T_m^p}{\Delta t}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปทำประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะมิได้ทั้งสิ้น จะได้ $(k_p) \left(\frac{T_{m+1} + T_{m-1} - 2T_m}{(\Delta z)^2} \right) (A)(\Delta z) = \rho C_p (\Delta z)(A) \left(\frac{T_m^{p+1} - T_m^p}{\Delta t} \right)$

นำ $\left(\frac{\Delta t}{\rho C_p (\Delta z)(A)}\right)$ คูณตลอดสมการ

จะได้ $[(k_p) \left(\frac{\Delta t}{\rho C_p (A)}\right) \left(\frac{T_{m+1} + T_{m-1} - 2T_m}{(\Delta z)^2}\right) (A)] = T_m^{p+1} - T_m^p$

ให้ $\alpha = \frac{k}{\rho C_p}$ และ $F_0 = \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta z)^2}$

จะได้ $F_0 [T_{m-1} - 2T_m + T_{m+1}] = T_m^{p+1} - T_m^p$

จัดสมการตามแบบวิธี Implicit (Implicit Method)

โดยที่ T_m^p คือ อุณหภูมิที่จุดอ้างอิง ณ เวลาปัจจุบัน

T_m^{p+1} คือ อุณหภูมิที่จุดอ้างอิง ณ เวลาใหม่

จะได้ $F_0 [T_{m-1}^{p+1} + T_{m+1}^{p+1} - 2T_m^{p+1}] - T_m^{p+1} = -T_m^p$

นำ (-) คูณตลอดสมการ จะได้

$$-F_0 [T_{m+1}^{p+1} + T_{m-1}^{p+1} - 2T_m^{p+1}] + T_m^{p+1} = T_m^p$$

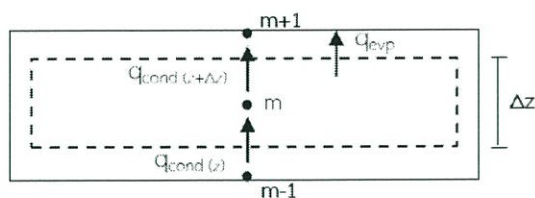
จัดรูปสมการ

$$-F_0 (T_{m-1}^{p+1}) + (1 + 2F_0) T_m^{p+1} - F_0 (T_{m+1}^{p+1}) = T_m^p \quad (3.1)$$

3.1.2.2 การถ่ายเทความร้อนภายในผลิตภัณฑ์ในช่วงการระเหยน้ำ

รูปแบบการถ่ายเทความร้อนในช่วงระเหยน้ำของผลิตภัณฑ์ แสดงดังรูปที่ 3.3 เป็นการถ่ายเทความร้อนเพื่อระเหยน้ำในผลิตภัณฑ์ โดยช่วงนี้อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ จะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจากความร้อนที่ถ่ายเทมาส่วนมากถูกใช้ในการระเหยน้ำ และความร้อนในส่วนที่เหลือส่งผลให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งช่วงนี้จะเกิดเมื่ออุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ มากกว่า 100°C (อุณหภูมิที่น้ำเริ่มระเหย) แสดงดังสมการที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 การถ่ายเทความร้อนภายในผลิตภัณฑ์ในช่วงการระเหยน้ำ

$$\text{จากกฎทรงพลังงาน : } E_{in} + E_g - E_{out} = \frac{dE_{st}}{dt}$$

$$E_{in} = q_{cond(z)}$$

$$E_g = 0$$

$$E_{out} = q_{evp} + q_{cond(z+\Delta z)}$$

$$\frac{dE_{st}}{dt} = \rho V C_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

แทนค่าลงในกฎทรงพลังงาน

$$q_{cond(z)} - (q_{cond(z+\Delta z)} + q_{evp(z)}) = \rho V C_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

ให้

$$q_{cond(z+\Delta z)} = q_{cond(z)} + \left(\frac{\partial q_{cond(z)}}{\partial z}\right) \cdot (\Delta z)$$

$$q_{cond(z)} - \left(q_{cond(z)} + \frac{\partial q_{cond(z)}}{\partial z} \Delta z + q_{evp(z)}\right) = \rho V C_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

$$-\frac{\partial q_{cond(z)}}{\partial z} (\Delta z) - q_{evp(z)} = \rho V C_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

ให้

$$q_{cond(z)} = (-k_p)(\Delta x)(\Delta y) \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่อนุญาตโดยศูนย์วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีพระยาภิรมย์เกล้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยชนด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$(k_p) \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) (\Delta x)(\Delta y)(\Delta z) - q_{\text{evp}(z)} = \rho \nabla C_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

เมื่อ $\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \Big|_m \approx \frac{T_{m+1} + T_{m-1} - 2T_m}{(\Delta z)^2}$ และ $\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_m^{p+1} - T_m^p}{\Delta t}$

จะได้ $(k_p) \left(\frac{T_{m+1} + T_{m-1} - 2T_m}{(\Delta z)^2} \right) (\nabla) - q_{\text{evp}(z)} = \rho C_p (\nabla) \left(\frac{T_m^{p+1} - T_m^p}{\Delta t} \right)$

นำ $\left(\frac{\Delta t}{\rho C_p (\nabla)} \right)$ คูณตลอดสมการ

จะได้ $\left[(k_p) \left(\frac{\Delta t}{\rho C_p (\nabla)} \right) \left(\frac{T_{m+1} + T_{m-1} - 2T_m}{(\Delta z)^2} \right) (\nabla) \right] - q_{\text{evp}(z)} \left(\frac{\Delta t}{\rho C_p (\nabla)} \right) = T_m^{p+1} - T_m^p$

นำ $\left(\frac{k}{k} \right)$ คูณในพจน์ $q_{\text{evp}(z)}$

จะได้ $\left[(k_p) \left(\frac{\Delta t}{\rho C_p (\nabla)} \right) \left(\frac{T_{m+1} + T_{m-1} - 2T_m}{(\Delta z)^2} \right) (\nabla) \right] - q_{\text{evp}(z)} \left(\frac{\Delta t}{\rho C_p (\nabla)} \right) \left(\frac{k}{k} \right) = T_m^{p+1} - T_m^p$

ให้ $\alpha = \frac{k}{\rho C_p}$ และ $F_0 = \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta z)^2}$

จะได้ $F_0 [T_{m+1} + T_{m-1} - 2T_m] - q_{\text{evp}(z)} \left(\frac{\alpha \Delta t}{(\nabla)(k_p)} \right) = T_m^{p+1} - T_m^p$

จัดสมการตามแบบวิธี Implicit (Implicit Method)

โดยที่ T_m^p คือ อุณหภูมิที่จุดอ้างอิง ณ เวลาปัจจุบัน

T_m^{p+1} คือ อุณหภูมิที่จุดอ้างอิง ณ เวลาใหม่

จะได้ $F_0 [T_{m-1}^{p+1} + T_{m+1}^{p+1} - 2T_m^{p+1}] - T_m^{p+1} = -T_m^p + q_{\text{evp}(z)} \left(\frac{\alpha \Delta t}{(\nabla)(k_p)} \right)$

นำ (-) คูณตลอดสมการ จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$-F_0 [T_{m+1}^{p+1} + T_{m-1}^{p+1} - 2T_m^{p+1}] + T_m^{p+1} = T_m^p - q_{\text{evp}(z)} \left(\frac{(\alpha)\Delta t}{(\nabla)(k_p)} \right)$$

จัดรูปสมการ

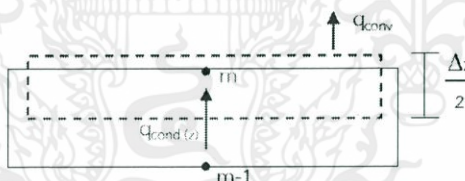
$$\boxed{-F_0 (T_{m-1}^{p+1}) + (1 + 2F_0)T_m^{p+1} - F_0 (T_{m+1}^{p+1}) = T_m^p - q_{\text{evp}(z)} \left(\frac{(\alpha)\Delta t}{(\nabla)(k_p)} \right)} \quad (3.2)$$

3.1.3 การถ่ายเทความร้อนบริเวณผิวด้านบนของผลิตภัณฑ์

การถ่ายเทความร้อนบริเวณผิวด้านบนของผลิตภัณฑ์ในตำแหน่ง A ดังรูปที่ 3.1 เป็นการถ่ายเทความร้อนมาจากภายในผลิตภัณฑ์ ซึ่งบริเวณด้านบนผิวมีการสูญเสียความร้อนเนื่องจากการพาความร้อนของสิ่งแวดล้อม โดยสามารถแบ่งช่วงการถ่ายเทความร้อนออกเป็น 2 ช่วงคือ ช่วงเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ผลิตภัณฑ์ และช่วงการระเหยน้ำ สามารถแบ่งสมการในการถ่ายเทความร้อนได้เป็น 2 แบบ ได้แก่

3.1.3.1 การถ่ายเทความร้อนบริเวณผิวด้านบน ในช่วงเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ผลิตภัณฑ์

รูปแบบการถ่ายเทความร้อนในช่วงเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ผลิตภัณฑ์ แสดงดังรูปที่ 3.4 เป็นการถ่ายเทความร้อนเพื่อทำให้อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ สูงขึ้น ซึ่งเกิดขึ้นตั้งแต่เริ่มต้นจนอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ ถึง 100°C (อุณหภูมิที่น้ำเริ่มระเหย) และมีการสูญเสียความร้อนเนื่องจากการพาความร้อนของสิ่งแวดล้อม แสดงดังสมการที่ 3.3



รูปที่ 3.4 การถ่ายเทความร้อนบริเวณผิวด้านบนในช่วงเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ผลิตภัณฑ์

$$\text{จากกฎทรงพลังงาน : } E_{\text{in}} + E_{\text{g}} - E_{\text{out}} = \frac{dE_{\text{st}}}{dt}$$

$$E_{\text{in}} = q_{\text{cond}(z)}$$

$$E_{\text{g}} = 0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงแก้ไขหรือทำซ้ำของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_{\text{out}} = q_{\text{conv}(z)}$$

$$\frac{dE_{st}}{dt} = \rho \frac{V}{2} C_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

แทนค่าลงในกฎทรงพลังงาน

$$q_{cond(z)} - q_{conv(z)} = \rho \frac{V}{2} C_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

ให้

$$q_{cond(z)} = (-k_p)(\Delta x)(\Delta y) \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)$$

$$\left[(-k_p)(\Delta x)(\Delta y) \frac{\partial T}{\partial z} \right] - q_{conv(z)} = \rho(\Delta x)(\Delta y) \frac{(\Delta z)}{2} C_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

นำ (2) คูณตลอดสมการ

$$2 \left[(-k_p)(\Delta x)(\Delta y) \frac{\partial T}{\partial z} \right] - 2q_{conv(z)} = \rho(\Delta x)(\Delta y)(\Delta z) C_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

เมื่อ

$$\frac{\partial T}{\partial z} \Big|_m \approx \frac{T_m - T_{m-1}}{\Delta z} \quad \text{และ} \quad \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_m^{p+1} - T_m^p}{\Delta t}$$

จะได้

$$2 \left[(-k_p)(A) \frac{T_m - T_{m-1}}{\Delta z} \right] - 2q_{conv(z)} = \rho(V) C_p \left(\frac{T_m^{p+1} - T_m^p}{\Delta t} \right)$$

นำ $\left(\frac{\Delta t}{\rho C_p (V)} \right)$ คูณตลอดสมการ

จะได้

$$\left(\frac{2(-k_p)(T_m - T_{m-1})(\Delta t)}{\rho C_p (\Delta z)^2} \right) - 2q_{conv(z)} \left(\frac{\Delta t}{\rho C_p (V)} \right) = T_m^{p+1} - T_m^p$$

นำ $\left(\frac{k}{k} \right)$ คูณในพจน์ $2q_{conv(z)}$ จะได้

$$\left(\frac{2(-k_p)(T_m - T_{m-1})(\Delta t)}{\rho C_p (\Delta z)^2} \right) - 2q_{conv(z)} \left(\frac{\Delta t}{\rho C_p (V)} \right) \left(\frac{k}{k} \right) = T_m^{p+1} - T_m^p$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับค่า k ใช้งานเพื่อการ $\alpha \Delta t$ เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ให้ $\alpha = \frac{k}{\rho C_p}$ และ $F_0 = \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta z)^2}$
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกและเผยแพร่ไปยังผู้อื่นหรือเข้าสู่ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้
$$-2F_0 [T_m^{p+1} - T_{m-1}^{p+1}] - 2q_{\text{conv}(z)} \left(\frac{(\alpha)\Delta t}{(\nabla)(k_p)} \right) = T_m^{p+1} - T_m^p$$

จัดสมการตามแบบวิธี Implicit (Implicit Method)

โดยที่ T_m^p คือ อุณหภูมิที่จุดอ้างอิง ณ เวลาปัจจุบัน

T_m^{p+1} คือ อุณหภูมิที่จุดอ้างอิง ณ เวลาใหม่

จะได้
$$-2F_0 [T_m^{p+1} - T_{m-1}^{p+1}] - T_m^{p+1} = -T_m^p + 2q_{\text{conv}(z)} \left(\frac{(\alpha)\Delta t}{(\nabla)(k_p)} \right)$$

นำ (-) คูณตลอดสมการ จะได้

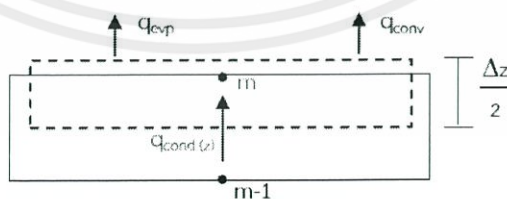
$$2F_0 [T_m^{p+1} - T_{m-1}^{p+1}] + T_m^{p+1} = T_m^p - 2q_{\text{conv}(z)} \left(\frac{(\alpha)\Delta t}{(\nabla)(k_p)} \right)$$

จัดรูปสมการ

$$-2F_0 (T_{m-1}^{p+1}) + (1 + 2F_0)(T_m^{p+1}) = T_m^p - 2q_{\text{conv}(z)} \left(\frac{(\alpha)\Delta t}{(\nabla)(k_p)} \right) \quad (3.3)$$

3.1.3.2 การถ่ายเทความร้อนบริเวณผิวด้านบนในช่วงการระเหยน้ำ

รูปแบบการถ่ายเทความร้อนในช่วงการระเหยน้ำของผลิตภัณฑ์ แสดงดังรูปที่ 3.5 เป็นการถ่ายเทความร้อนเพื่อระเหยน้ำในผลิตภัณฑ์ โดยช่วงนี้อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ จะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจากความร้อนที่ถ่ายเทมาส่วนมากถูกใช้ในการระเหยน้ำ และความร้อนในส่วนที่เหลือส่งผลให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งช่วงนี้จะเกิดเมื่ออุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ มากกว่า 100°C (อุณหภูมิที่น้ำเริ่มระเหย) และบริเวณนี้มีการสูญเสียความร้อนเนื่องจากการพาความร้อนของสิ่งแวดล้อม แสดงดังสมการที่ 3.4



รูปที่ 3.5 การถ่ายเทความร้อนบริเวณผิวด้านบนของผลิตภัณฑ์ในช่วงการระเหยน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกฎทรงพลังงาน :

$$\dot{E}_{in} + \dot{E}_g - \dot{E}_{out} = \frac{dE_{st}}{dt}$$

$$\dot{E}_{in} = q_{cond(z)}$$

$$\dot{E}_g = 0$$

$$\dot{E}_{out} = q_{conv(z)} + q_{evp(z)}$$

$$\frac{dE_{st}}{dt} = \rho \frac{\forall}{2} C_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

แทนค่าลงในกฎทรงพลังงาน

$$q_{cond(z)} - (q_{conv(z)} + q_{evp(z)}) = \rho \frac{\forall}{2} C_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

ให้

$$q_{cond(z)} = (-k_p)(\Delta x)(\Delta y) \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)$$

$$\left[(-k_p)(\Delta x)(\Delta y) \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] - q_{conv(z)} - q_{evp(z)} = \rho(\Delta x)(\Delta y) \frac{(\Delta z)}{2} C_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

นำ (2) คูณตลอดสมการ

$$2 \left[(-k_p)(\Delta x)(\Delta y) \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] - 2q_{conv(z)} - 2q_{evp(z)} = \rho(\Delta x)(\Delta y)(\Delta z) C_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

เมื่อ

$$\left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_m \approx \frac{T_m - T_{m-1}}{\Delta z} \quad \text{และ} \quad \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_m^{p+1} - T_m^p}{\Delta t}$$

จะได้

$$2 \left[(-k_p)(A) \frac{T_m - T_{m-1}}{\Delta z} \right] - 2q_{conv(z)} - 2q_{evp(z)} = \rho(\forall) C_p \left(\frac{T_m^{p+1} - T_m^p}{\Delta t} \right)$$

นำ $\left(\frac{\Delta t}{\rho C_p (\forall)} \right)$ คูณตลอดสมการ

จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ

$$\left(\frac{2(-k_p)(T_m - T_{m-1})(\Delta t)}{\rho C_p (\Delta z)^2} \right) - 2q_{conv(z)} \left(\frac{\Delta t}{\rho C_p (\forall)} \right) - 2q_{evp(z)} \left(\frac{\Delta t}{\rho C_p (\forall)} \right) = T_m^{p+1} - T_m^p$$

นำ $\begin{pmatrix} k \\ - \\ k \end{pmatrix}$ คูณในพจน์ $2q_{\text{evp}(z)}$ และ $2q_{\text{conv}(z)}$

จะได้

$$\left(\frac{2(-k_p)(T_m - T_{m-1})(\Delta t)}{\rho C_p (\Delta z)^2} \right) - 2q_{\text{conv}(z)} \left(\frac{\Delta t}{\rho C_p (\nabla)} \right) \begin{pmatrix} k \\ - \\ k \end{pmatrix} - 2q_{\text{evp}(z)} \left(\frac{\Delta t}{\rho C_p (\nabla)} \right) \begin{pmatrix} k \\ - \\ k \end{pmatrix} = T_m^{p+1} - T_m^p$$

ให้ $\alpha = \frac{k}{\rho C_p}$ และ $F_0 = \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta z)^2}$

จะได้

$$-2F_0 [T_m^{p+1} - T_{m-1}^{p+1}] - 2q_{\text{conv}(z)} \left(\frac{(\alpha)\Delta t}{(\nabla)(k_p)} \right) - 2q_{\text{evp}(z)} \left(\frac{(\alpha)\Delta t}{(\nabla)(k_p)} \right) = T_m^{p+1} - T_m^p$$

จัดสมการตามแบบวิธี Implicit (Implicit Method)

โดยที่ T_m^p คือ อุณหภูมิที่จุดอ้างอิง ณ เวลาปัจจุบัน

T_m^{p+1} คือ อุณหภูมิที่จุดอ้างอิง ณ เวลาใหม่

จะได้

$$-2F_0 [T_m^{p+1} - T_{m-1}^{p+1}] - T_m^{p+1} = -T_m^p + 2q_{\text{conv}(z)} \left(\frac{(\alpha)\Delta t}{(\nabla)(k_p)} \right) + 2q_{\text{evp}(z)} \left(\frac{(\alpha)\Delta t}{(\nabla)(k_p)} \right)$$

นำ (-) คูณตลอดสมการ จะได้

$$2F_0 [T_m^{p+1} - T_{m-1}^{p+1}] + T_m^{p+1} = T_m^p - 2q_{\text{conv}(z)} \left(\frac{(\alpha)\Delta t}{(\nabla)(k_p)} \right) - 2q_{\text{evp}(z)} \left(\frac{(\alpha)\Delta t}{(\nabla)(k_p)} \right)$$

จัดรูปสมการ

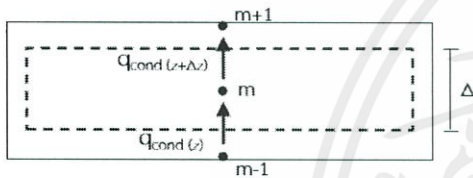
$$-2F_0 (T_{m-1}^{p+1}) + (1 + 2F_0)(T_m^{p+1}) = T_m^p - 2q_{\text{conv}(z)} \left(\frac{(\alpha)\Delta t}{(\nabla)(k_p)} \right) - 2q_{\text{evp}(z)} \left(\frac{(\alpha)\Delta t}{(\nabla)(k_p)} \right) \quad (3.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 สมการการกระจายอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์

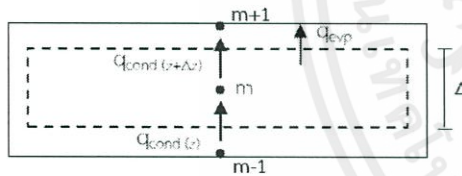
ตำแหน่งที่สนใจ (Node m)

สมการการกระจายอุณหภูมิ



$$-F_0(T_{m-1}^{p+1}) + (1 + 2F_0)T_m^{p+1} - F_0(T_{m+1}^{p+1}) = T_m^p$$

กรณีที่ 1 ตำแหน่งภายในผลิตภัณฑ์ในช่วงเพิ่มอุณหภูมิ



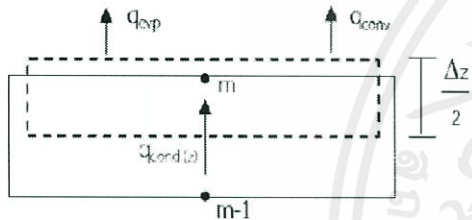
$$-F_0(T_{m-1}^{p+1}) + (1 + 2F_0)T_m^{p+1} - F_0(T_{m+1}^{p+1}) = T_m^p - q_{evp(z)} \left(\frac{(\alpha)\Delta t}{(\nabla)(k_p)} \right)$$

กรณีที่ 2 ตำแหน่งภายในผลิตภัณฑ์ในช่วงการระเหยน้ำ

ตารางที่ 3.1 (ต่อ) สมการการกระจายอุณหภูมิของผลิตรกัณฑ์

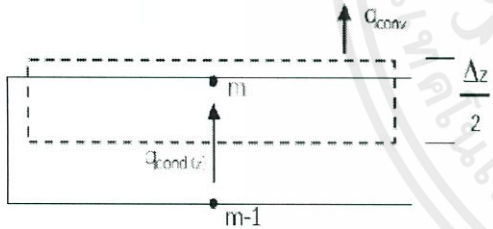
ตำแหน่งที่สนใจ (Node m)

สมการการกระจายอุณหภูมิ



$$-2F_0(T_{m-1}^{p+1}) + (1 + 2F_0)(T_m^{p+1}) = T_m^p - 2q_{\text{conv}(z)} \left(\frac{(\alpha)\Delta t}{(\nabla)(k_p)} \right)$$

กรณีที่ 3 ตำแหน่งผิวด้านบนผลิตรกัณฑ์ในช่วงเพิ่มอุณหภูมิ



$$-2F_0(T_{m-1}^{p+1}) + (1 + 2F_0)(T_m^{p+1}) = T_m^p - 2q_{\text{conv}(z)} \left(\frac{(\alpha)\Delta t}{(\nabla)(k_p)} \right) - 2q_{\text{evp}(z)} \left(\frac{(\alpha)\Delta t}{(\nabla)(k_p)} \right)$$

กรณีที่ 4 ตำแหน่งผิวด้านบนผลิตรกัณฑ์ในช่วงการระเหยน้ำ

จากตารางที่ 3.1 สามารถเขียนสมการการกระจายอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ ได้ดังนี้

สมการการกระจายอุณหภูมิในช่วงการเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ผลิตภัณฑ์

$$\text{ตำแหน่ง E (1): } -F_0(1+2F_0)(T_1)^{p+1} - F_0(T_2)^{p+1} = T_1^p + F_0(T_0)^{p+1}$$

$$\text{ตำแหน่ง D (2): } -F_0(T_1)^{p+1} - F_0(1+2F_0)(T_2)^{p+1} - F_0(T_3)^{p+1} = T_2^p$$

$$\text{ตำแหน่ง C (3): } -F_0(T_2)^{p+1} + (1+2F_0)T_3^{p+1} - F_0(T_4)^{p+1} = T_3^p$$

$$\text{ตำแหน่ง B (4): } -F_0(T_3)^{p+1} + (1+2F_0)T_4^{p+1} - F_0(T_5)^{p+1} = T_4^p$$

$$\text{ตำแหน่ง A (5): } -2F_0(T_4)^{p+1} + (1+2F_0)(T_5)^{p+1} = T_5^p - 2q_{\text{conv}(z)} \left(\frac{(\alpha)\Delta t}{(\nabla)(k_p)} \right)$$

สมการการกระจายอุณหภูมิในช่วงช่วงการระเหยของน้ำของผลิตภัณฑ์

$$\text{ตำแหน่ง E (1): } -F_0(1+2F_0)(T_1)^{p+1} - F_0(T_2)^{p+1} = T_1^p + F_0(T_0)^{p+1} - q_{\text{evp}(z)} \left(\frac{(\alpha)\Delta t}{(\nabla)(k_p)} \right)$$

$$\text{ตำแหน่ง D (2): } -F_0(T_1)^{p+1} - F_0(1+2F_0)(T_2)^{p+1} - F_0(T_3)^{p+1} = T_2^p - q_{\text{evp}(z)} \left(\frac{(\alpha)\Delta t}{(\nabla)(k_p)} \right)$$

$$\text{ตำแหน่ง C (3): } -F_0(T_2)^{p+1} + (1+2F_0)T_3^{p+1} - F_0(T_4)^{p+1} = T_3^p - q_{\text{evp}(z)} \left(\frac{(\alpha)\Delta t}{(\nabla)(k_p)} \right)$$

$$\text{ตำแหน่ง B (4): } -F_0(T_3)^{p+1} + (1+2F_0)T_4^{p+1} - F_0(T_5)^{p+1} = T_4^p - q_{\text{evp}(z)} \left(\frac{(\alpha)\Delta t}{(\nabla)(k_p)} \right)$$

$$\text{ตำแหน่ง A (5): } -2F_0(T_4)^{p+1} + (1+2F_0)(T_5)^{p+1} = T_5^p - 2q_{\text{evp}(z)} \left(\frac{(\alpha)\Delta t}{(\nabla)(k_p)} \right) - 2q_{\text{conv}(z)} \left(\frac{(\alpha)\Delta t}{(\nabla)(k_p)} \right)$$

นำสมการในช่วงการเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ผลิตภัณฑ์ จัดให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ คือ $[A] \cdot [T] = [C]$ จะได้

$$\begin{bmatrix} (1+2F_0) & -F_0 & 0 & 0 & 0 \\ -F_0 & (1+2F_0) & -F_0 & 0 & 0 \\ 0 & -F_0 & (1+2F_0) & -F_0 & 0 \\ 0 & 0 & -F_0 & (1+2F_0) & -F_0 \\ 0 & 0 & 0 & -2F_0 & (1+2F_0) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_1^{p+1} \\ T_2^{p+1} \\ T_3^{p+1} \\ T_4^{p+1} \\ T_5^{p+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_1^p + F_0(T_0)^{p+1} \\ T_2^p \\ T_3^p \\ T_4^p \\ T_5^p - q_{\text{conv}(z)} \left(\frac{(\alpha)\Delta t}{(\nabla)(k_p)} \right) \end{bmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำสมการในช่วงการระเหยของน้ำของผลิตภัณฑ์ จัดให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ คือ $[A] \cdot [T] = [C]$ จะได้

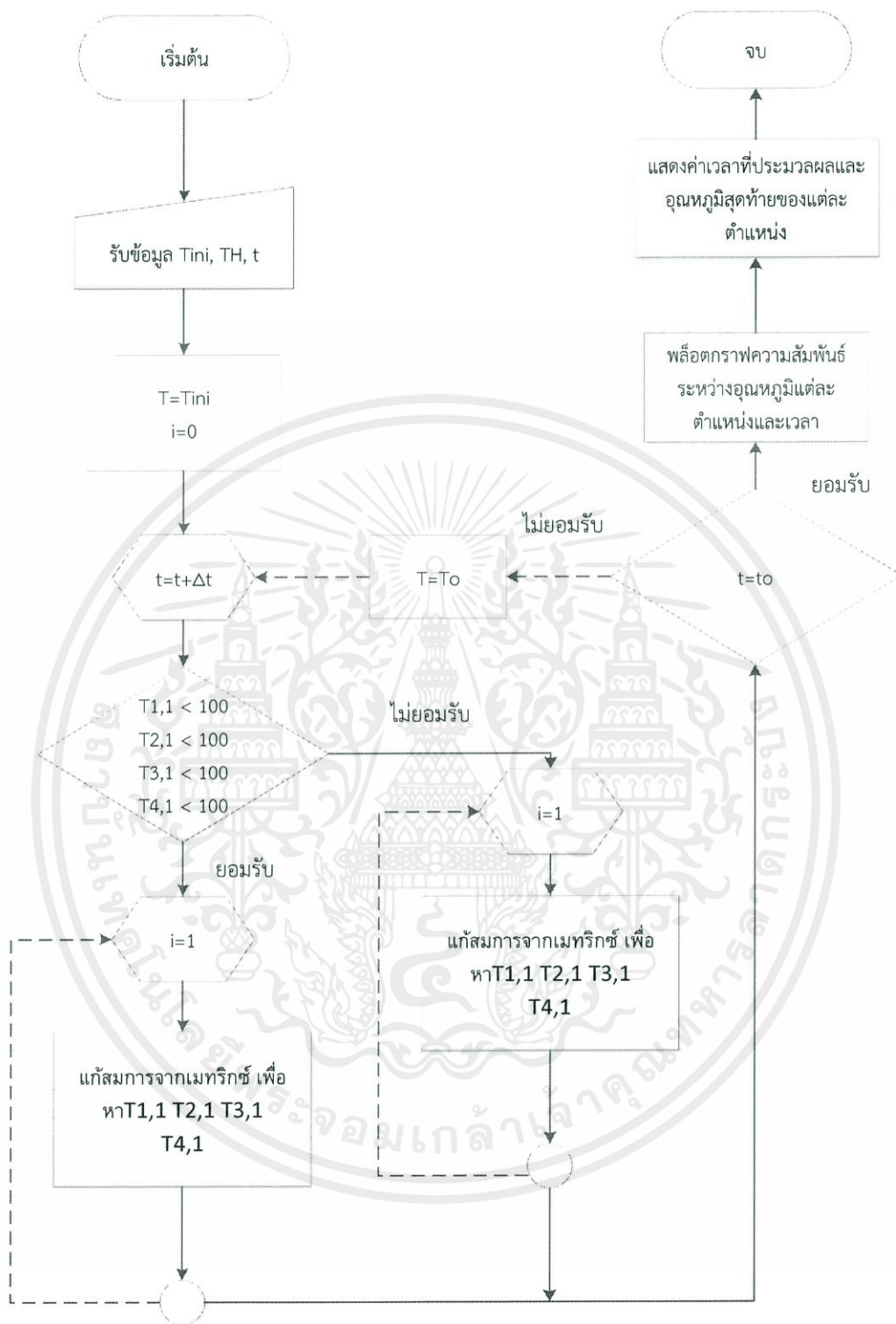
$$\begin{bmatrix} (1+2F_0) & -F_0 & 0 & 0 & 0 \\ -F_0 & (1+2F_0) & -F_0 & 0 & 0 \\ 0 & -F_0 & (1+2F_0) & -F_0 & 0 \\ 0 & 0 & -F_0 & (1+2F_0) & -F_0 \\ 0 & 0 & 0 & -2F_0 & (1+2F_0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1^{p+1} \\ T_2^{p+1} \\ T_3^{p+1} \\ T_4^{p+1} \\ T_5^{p+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_1^p + F_0(T_0^{p+1}) \\ T_2^p - q_{\text{evp}(z)} \left(\frac{(\alpha)\Delta t}{(\nabla)(k_p)} \right) \\ T_3^p - q_{\text{evp}(z)} \left(\frac{(\alpha)\Delta t}{(\nabla)(k_p)} \right) \\ T_4^p - q_{\text{evp}(z)} \left(\frac{(\alpha)\Delta t}{(\nabla)(k_p)} \right) \\ T_5^p - q_{\text{conv}(z)} \left(\frac{(\alpha)\Delta t}{(\nabla)(k_p)} \right) - q_{\text{evp}(z)} \left(\frac{(\alpha)\Delta t}{(\nabla)(k_p)} \right) \end{bmatrix}$$

3.2 ขั้นตอนการทำงานของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้พัฒนาขึ้นจากโปรแกรม MATLAB เวอร์ชัน R 2012a โดยแผนผังการทำงานของแบบจำลองนี้แสดงดังรูปที่ 3.6 เพื่อแสดงการกระจายอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งใด ๆ ของผลิตภัณฑ์ในระหว่างกระบวนการอบแบบสัมผัส โดยกำหนดตำแหน่งในการแสดงอุณหภูมิทั้งหมด 5 ตำแหน่ง ได้แก่ A B C D และ E โดยตำแหน่ง A B C D แต่ละตำแหน่งมีระยะห่างกัน 0.25 cm. จากแผ่นส่งผ่านความร้อน แต่บริเวณตำแหน่ง E เป็นตำแหน่งบริเวณใกล้แผ่นส่งผ่านความร้อนซึ่งมีระยะห่างเท่ากับ 0.125 cm. โดยอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งที่ผิวของผลิตภัณฑ์ที่สัมผัสกับแผ่นส่งผ่านความร้อนมีค่าเท่ากับอุณหภูมิของแผ่นส่งผ่านความร้อนตลอดการถ่ายเทความร้อนดังสมมติฐานข้อที่ 1 ส่วนอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งอื่น ๆ ขึ้นอยู่กับรูปแบบของสมการการกระจายอุณหภูมิของตำแหน่งนั้น

โดยการทำงานของจำลอง (Simulation) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เริ่มจากป้อนอุณหภูมิเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ อุณหภูมิของแผ่นส่งผ่านความร้อน และ เวลาที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนของผลิตภัณฑ์ลงในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อนำค่าดังกล่าวไปใช้ในการคำนวณหาอุณหภูมิแต่ละตำแหน่ง ในทุก ๆ 10 วินาทีของการถ่ายเทความร้อน โดยภายในโปรแกรมได้กำหนดค่าสมบัติต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์ และการทำงานของแบบจำลองแบ่งการคำนวณเป็น 2 ช่วงคือ ช่วงเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ผลิตภัณฑ์ และช่วงการระเหยน้ำของผลิตภัณฑ์ โดยช่วงเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ผลิตภัณฑ์ เกิดขึ้นตั้งแต่เวลาเริ่มต้นจนกระทั่งอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ ณ ตำแหน่งใด ๆ ถึง 100°C (อุณหภูมิที่น้ำเริ่มระเหย) และเมื่ออุณหภูมิของตำแหน่งใด ๆ มีอุณหภูมิเกิน 100°C จะเปลี่ยนการคำนวณเป็นแบบช่วงการระเหยน้ำ โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้มีการเก็บค่าเวลาเพื่อใช้ในการหยุดการทำงานของแบบจำลอง และเมื่อถึงเวลาที่ต้องการ โปรแกรมจะแสดง อุณหภูมิสุดท้ายของแต่ละตำแหน่ง และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในแต่ละตำแหน่งของผลิตภัณฑ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ขอสงวนสิทธิ์ในสิ่งที่ปรากฏ ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้ รูปที่ 3.6 แผนผังการทำงานของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การถ่ายเทความร้อนของผลิตภัณฑ์ยวณด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

4.1 วัตถุดิบและวัสดุอุปกรณ์

4.1.1 วัตถุดิบ

- 1) แป้งสาลี ตรา ว่าว บริษัท เซ็นทรัล ฟู้ด รีเทล จำกัด สาขาลาดกระบัง
- 2) นมพาสเจอร์ไรส์ ตรา ดัชมิลล์ บริษัท ซีพี ออลล์ จำกัด (มหาชน)
- 3) น้ำตาลทรายขาวบริสุทธิ์ ตรา มิตรผล บริษัท เซ็นทรัล ฟู้ด รีเทล จำกัด สาขาลาดกระบัง
- 4) ผงฟู สูตรดับเบิลแอ็คติง ตรา เบสท์ฟู้ดส์ บริษัท เซ็นทรัล ฟู้ด รีเทล จำกัด สาขาลาดกระบัง
- 5) ไข่ไก่

4.1.2 วัสดุอุปกรณ์

- 1) คอมพิวเตอร์พร้อมโปรแกรม 34907A Data logger และ เครื่องบันทึกค่า (Data logger) ยี่ห้อ Agilent รุ่น 34907A บริษัท อินเทอร์เน็ตเนชั่นแนล รีเสิร์ช คอร์ปอเรชั่น จำกัด
- 2) เครื่องชั่งน้ำหนัก 2 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น UX3200G ประเทศญี่ปุ่น และเครื่องชั่งน้ำหนัก 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Yamato รุ่น HB-120 ประเทศญี่ปุ่น
- 3) ตู้อบลมร้อน ยี่ห้อ Memmert รุ่น UFB 400 ประเทศเยอรมัน
- 4) กล้องถ่ายภาพความร้อน (Thermal Image Camera: TI) ยี่ห้อ Fluke รุ่น TI 32 บริษัท เมเซอร์โทรนิคส์ จำกัด รับรังสีอินฟราเรดในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 8-14 μm ช่วงวัดอุณหภูมิ -20°C ถึง 600°C ความละเอียดภาพความร้อน 320 x 165 VOX
- 5) เตาแก๊สอินฟราเรด (หัวเตี้ย) ยี่ห้อ Otto รุ่น GS-881 บริษัท ออโตโต คิงส์กลาส จำกัด
- 6) ตู้ดูดความชื้น (Dessicator) ยี่ห้อ Notthman รุ่น 50
- 7) กล้องดิจิทัล ยี่ห้อ Canon รุ่น Powershot SD850 IS
- 8) เทอร์โมคัปเปิล Type K ทำจากวัสดุตัวนำ คือ Nickel Chromium/Nickel Aluminium ย่านอุณหภูมิใช้งาน -250°C ถึง 1300°C
- 9) อุปกรณ์เครื่องครัวต่าง ๆ เช่น กระทะ กะละมัง ตะหลิว ทัพพี ช้อน มีด เขียง ถ้วย เครื่องตีผสม แป้ง เป็นต้น
- 10) อุปกรณ์อื่น ๆ เช่น กระดาษทิชชู ทราย แผ่นสแตนเลส ถังพลาสติก ผ้า ชุดหลอดไฟ เป็นต้น

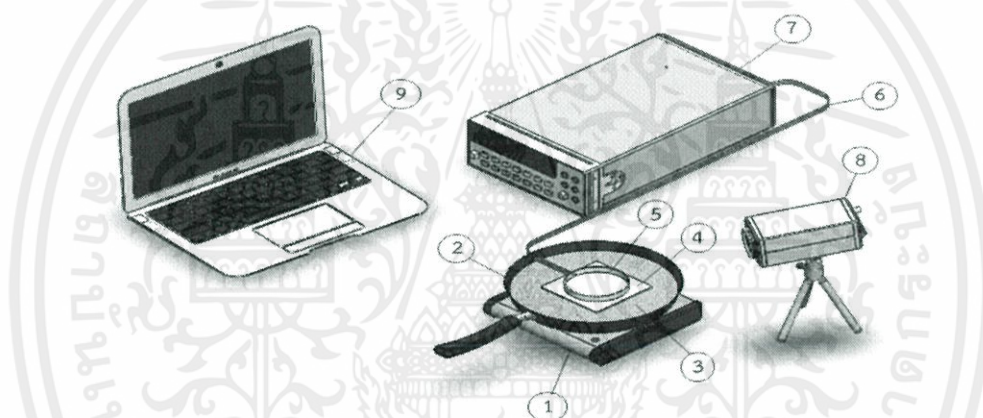
4.2 การเตรียมแป้งแพนเค้ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารเตรียมแป้งแพนเค้ก (Pancake batter) ซึ่งมีลักษณะเป็นแป้งเหลวหนืด โดยส่วนผสมของแป้ง ไม่ว่าจะเป็นแป้งเค้ก ประกอบด้วยแป้งสาลี 125 g นม 150 g น้ำตาล 20 g ไข่แดง 30 g ไข่ขาว 50 g และผงฟู

2 g ผสมส่วนผสมทุกอย่างเข้าด้วยกัน และพักทิ้งไว้ 20 นาที ในการทดลองใช้แป้งแพนเค้กประมาณ 45 g เพื่อทำแป้งแพนเค้กหนาประมาณ 1 cm. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.5 cm.

4.3 การสร้างชุดอุปกรณ์การทดลอง

ชุดอุปกรณ์ในการทดลอง ประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน คือ ชุดอุปกรณ์ให้ความร้อน อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ และ อุปกรณ์สำหรับประมวลผล ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ในส่วนของชุดอุปกรณ์ให้ความร้อนใช้เตาแก๊สชนิดหัวอินฟราเรด กระทะ และทราย โดยมีแผ่นสแตนเลสเป็นแผ่นส่งผ่านความร้อนไปยังแป้งแพนเค้ก มีอุปกรณ์ในการวัดอุณหภูมิบริเวณผิวโดยใช้กล้องถ่ายภาพความร้อน (รูปที่ 4.2) และวัดอุณหภูมิภายในแป้งแพนเค้กโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล Type K ที่เชื่อมต่อกับเครื่องบันทึกค่า (รูปที่ 4.3) และใช้คอมพิวเตอร์ในการประมวลผล โดยรายละเอียดอุปกรณ์ในการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.1

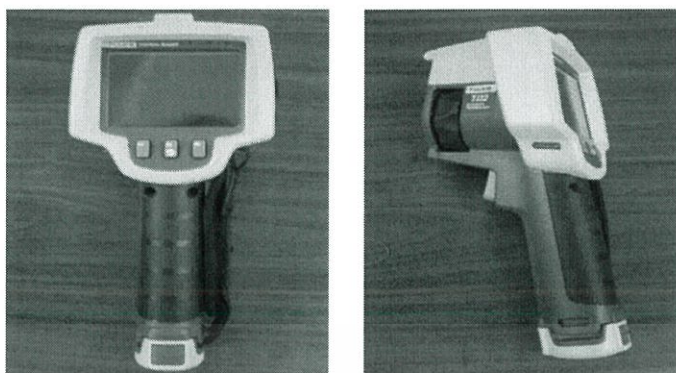


รูปที่ 4.1 ชุดอุปกรณ์ในการทดลอง

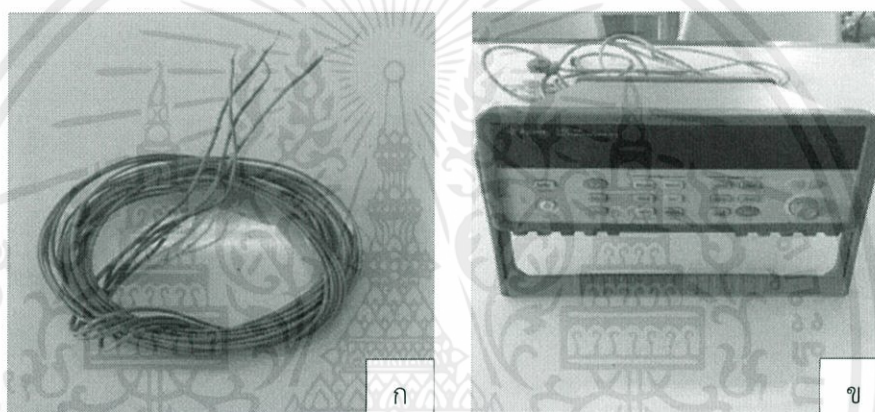
ตารางที่ 4.1 อุปกรณ์ในการทดลอง

หมายเลข	อุปกรณ์ในการทดลอง
1	เตาแก๊สชนิดหัวอินฟราเรด
2	กระทะ
3	ทราย
4	แผ่นสแตนเลสหรือแผ่นส่งผ่านความร้อน
5	แม่พิมพ์ทำแป้งแพนเค้ก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.5 cm. สูง 1 cm.
6	เทอร์โมคัปเปิล Type K
7	Data logger
8	กล้องถ่ายภาพความร้อน
9	คอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่ข้อมูลใดๆที่ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 กล้องถ่ายภาพความร้อน



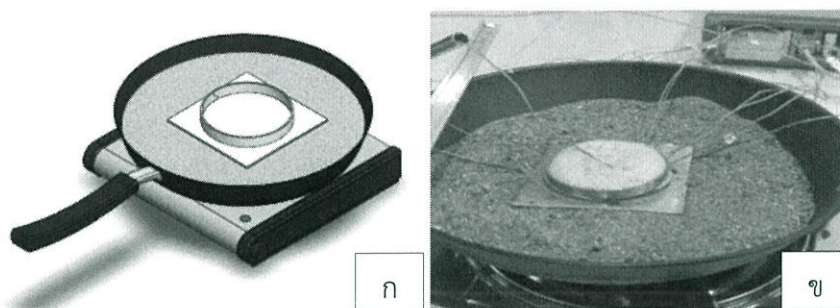
รูปที่ 4.3 อุปกรณ์ในการวัดอุณหภูมิภายในแพนเค้ก (ก) เทอร์โมคัปเปิล Type K (ข) Data logger

4.4 การทดลอง

4.4.1 การให้ความร้อนแก่แพนเค้ก

ให้ความร้อนแก่ทรายในกระทะโดยใช้เตาแก๊สชนิดหัวอินฟราเรด คั่วทรายจนอุณหภูมิของทรายประมาณ 390°C จากนั้นวางแผ่นส่งผ่านความร้อน (Heating plate) บนทราย วัดอุณหภูมิบนแผ่นส่งผ่านความร้อนด้วยเทอร์โมคัปเปิลจนถึงอุณหภูมิที่แผ่นส่งผ่านความร้อน (T_{set}) คือ 145°C และ 165°C ตามลำดับ วางแม่พิมพ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.5 cm. สูง 1 cm. พร้อมทั้งเทแป้งแพนเค้กลงในแม่พิมพ์ ให้ความร้อนเป็นเวลา 20 นาที ดังรูปที่ 4.4 โดยวัดอุณหภูมิภายในแพนเค้กด้วยเทอร์โมคัปเปิล และวัดอุณหภูมิที่ผิวด้านบนของแพนเค้กด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน นำอุณหภูมิที่ได้ไปประมวลผลในขั้นตอนต่อไป

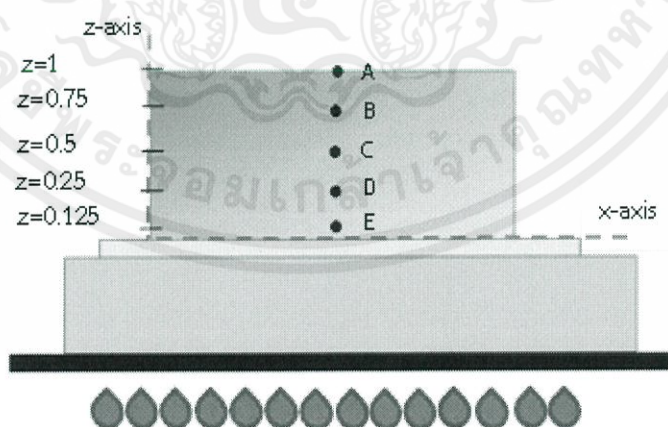
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 การให้ความร้อนแก่แพนเค้ก (ก) ชุดอุปกรณ์ให้ความร้อนแก่แพนเค้ก (ข) การวัดอุณหภูมิภายในแพนเค้ก

4.4.2 การวัดอุณหภูมิ

วัดอุณหภูมิภายในแพนเค้กโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล Type K ซึ่งเชื่อมต่ออยู่กับเครื่อง Data logger ในระหว่างการให้ความร้อนของแป้งแพนเค้กโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลในแต่ละตำแหน่งของแม่พิมพ์เพื่อวัดอุณหภูมิภายในเนื้อแพนเค้กทั้งหมด 4 ตำแหน่ง โดยตำแหน่ง B ห่างจากแผ่นส่งผ่านความร้อน 0.75 cm. ตำแหน่ง C ห่างจากแผ่นส่งผ่านความร้อน 0.5 cm. ตำแหน่ง D ห่างจากแผ่นส่งผ่านความร้อน 0.25 cm. และตำแหน่ง E ที่บริเวณผิวด้านล่างใกล้แผ่นส่งผ่านความร้อน 0.125 cm. โดยกำหนดให้บันทึกอุณหภูมิทุก ๆ 10 วินาที ซึ่งจะมีการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ และวัดอุณหภูมิบริเวณผิวด้านบนของแพนเค้ก (ตำแหน่ง A) ด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนและปรับค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีเป็น 0.87 เพื่อให้อุณหภูมิที่วัดได้มีความถูกต้อง ซึ่งบริเวณตำแหน่ง A ห่างจากแผ่นส่งผ่านความร้อน 1 cm. ดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิภายในแพนเค้ก (จุด B C D และ E) และบริเวณผิวด้านบน (จุด A) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของงานวิจัยเพื่อการศึกษาค้นคว้าและการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การวัดและการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางความร้อน

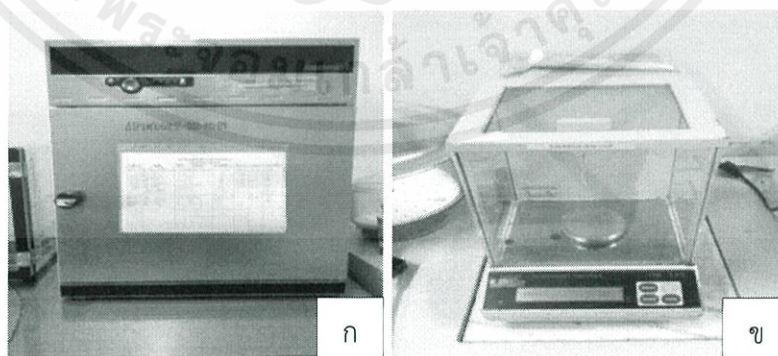
การวัดและการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางความร้อนต่าง ๆ ได้แก่ ความชื้น เเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนัก ความพรุน ความหนาแน่น ความจุความร้อนจำเพาะ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน สัมประสิทธิ์การแผ่รังสี รวมถึงการวิเคราะห์สีที่เกิดขึ้นบริเวณผิวด้านล่างของแพนเค้ก วัดค่าดังกล่าวที่เวลาเริ่มต้น จากนั้นทำการให้ความร้อนแก่แป้งแพนเค้กที่ T_{set} เท่ากับ 145°C และ 165°C ตามลำดับ เป็นเวลา 5 นาที นำแพนเค้กที่ได้มาวัดและการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางความร้อน ทำการทดลองแบบเดียวกัน โดยเปลี่ยนเวลาเป็น 10 นาที 15 นาที และ 20 นาที ตามลำดับ

4.5.1 ความชื้น

นำแป้งแพนเค้กที่ผสมแล้วประมาณ 3-5 g ใส่ภาชนะ ชั่งน้ำหนักเริ่มต้นก่อนอบโดยชั่งน้ำหนักจากเครื่องชั่งน้ำหนัก 4 ตำแหน่ง ใส่ลงในภาชนะปิดควบคุมความชื้น (Moisture can) และนำเข้าตู้อบลมร้อนอุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่ความดันบรรยากาศ (Feyissa et al., 2011) เมื่อถึงระยะเวลาที่กำหนดแล้ว นำไปพักไว้ที่ตู้ดูดความชื้นเป็นเวลา 10 นาที เพื่อรักษาระดับความชื้น จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนัก ดังรูปที่ 4.6 เพื่อคำนวณหาความชื้นฐานเปียก (Wet basis) ที่เวลาเริ่มต้น จากสมการที่ 4.1 จากนั้นทำการทดลองแบบเดียวกัน โดยเปลี่ยนเป็นแป้งแพนเค้กที่เวลาต่าง ๆ

$$\%Mc_{wb} = \frac{W_b - W_a}{W_b} \times 100 \quad (4.1)$$

โดยที่ $\%Mc_{wb}$ = ความชื้นฐานเปียก (%)
 W_b = น้ำหนักก่อนอบ (g)
 W_a = น้ำหนักหลังอบ (g)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 รูปที่ 4.6 อุปกรณ์ในการหาความชื้น (ก) ตู้อบลมร้อน และ (ข) เครื่องชั่งน้ำหนัก 4 ตำแหน่ง

4.5.2 เปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนัก

นำแพนเค้กที่ได้จากการทดลองไปชั่งน้ำหนักก่อนได้รับความร้อนและหลังได้รับความร้อนด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอลความละเอียด 2 ตำแหน่ง จากนั้นหาเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนัก (Weight loss, W_L) ที่เกิดจากมวลของน้ำที่ระเหยออกเมื่อได้รับความร้อนจากสมการที่ 4.2

$$W_L (\%) = \frac{\text{mass of water evaporated}}{\text{intitial mass of material}} = \frac{M_o - M_f}{M_o} \times 100 \quad (4.2)$$

โดยที่ W_L = เปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนัก (%)
 $M_o = M_{\text{initial}}$ = มวลของวัสดุก่อนได้รับความร้อน (g)
 $M_f = M_{\text{final}}$ = มวลของวัสดุหลังได้รับความร้อน (g)

4.5.3 ความพรุน

นำแพนเค้กที่ได้จากการทดลองหาความพรุน (Porosity, ϵ) โดยใช้สมการที่ 4.3 วัดความสูงที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากการขยายตัวของแพนเค้ก จากนั้นทำการหาปริมาตรของแพนเค้กก่อนและได้รับความร้อน ได้จากสมการที่ 4.4

$$\epsilon = \frac{\text{Volume of close pores}}{\text{Total volume of material}} = \frac{V_{\text{หลัง}} - V_{\text{ก่อน}}}{V_{\text{หลัง}}} \quad (4.3)$$

กำหนดให้

$$V = \frac{\pi d^2 h}{4} \quad (4.4)$$

โดยที่ ϵ = ความพรุนของผลิตภัณฑ์
 V = ปริมาตรของผลิตภัณฑ์ (cm^3)
 d = เส้นผ่านศูนย์กลางของผลิตภัณฑ์ (cm)
 h = ความสูงของผลิตภัณฑ์ (cm)

4.5.4 ความหนาแน่น

นำแพนเค้กที่ได้จากการทดลองไปชั่งน้ำหนักหลังได้รับความร้อนด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล เอกสารนี้เป็นความละเอียด 2 ตำแหน่ง และหาปริมาตรของแพนเค้ก จากนั้นหาความหนาแน่นของแพนเค้ก จากค่ามวล (Density, ρ) จากสมการที่ 4.5.4 และต้องอ้างอิงถึงค่าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (4.5)$$

โดยที่ ρ = ความหนาแน่น (kg/m³)
 m = น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ (kg)
 V = ปริมาตร (m³)

4.5.5 ความจุความร้อนจำเพาะ

หาความจุความร้อนจำเพาะ (Specific heat, C_p) ของแพนเค้กได้จากสมการที่ 4.6 โดยใช้สัดส่วนองค์ประกอบทางเคมีของแพนเค้ก (Feyissa et al., 2011) และความจุความร้อนจำเพาะของแต่ละองค์ประกอบทางเคมี ในตารางที่ 4.2 ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้แทนลงในสมการคืออุณหภูมิเฉลี่ยภายในแพนเค้ก (เฉลี่ยระหว่างตำแหน่ง A และ ตำแหน่ง E) ระหว่างการทดลองทุก ๆ 10 วินาทีจนสิ้นสุดการทดลองจากการบันทึกอุณหภูมิด้วย Data logger

$$C_p = \sum C_{pi} Y_i \quad (4.6)$$

โดยที่ C_p = ความจุความร้อนจำเพาะ (J/kg·K)
 C_{pi} = ความจุความร้อนจำเพาะของแต่ละองค์ประกอบทางเคมี (J/kg·K)
 Y_i = สัดส่วนขององค์ประกอบทางเคมี (%w/w, mass basis)

ตารางที่ 4.2 ความจุความร้อนจำเพาะของแต่ละองค์ประกอบทางเคมี

	C_p (J/kg·K)
Water	$4176.2 - 0.0909 T + 5.4731 \cdot 10^{-3} T^2$
Protein	$2008.2 + 1.2089 T - 1.3129 \cdot 10^{-3} T^2$
Fat	$1984.2 + 1.4373 T - 4.8008 \cdot 10^{-3} T^2$
Carbohydrates	$1548.8 + 1.9625 T - 5.9399 \cdot 10^{-3} T^2$

ที่มา: Rao et al. (2005)

โดยที่ T = อุณหภูมิเฉลี่ยภายในแพนเค้ก (เฉลี่ยระหว่างตำแหน่ง A และ ตำแหน่ง E) (K)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.6 สัมประสิทธิ์การนำความร้อน

นำความชื้นและความพรุนของแพนเค้กที่ได้จากการทดลองข้างต้นมาหาสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal conductivity, k) จากสมการที่ 4.7 โดยนำความชื้นจากการทดลองมาหาอัตราส่วนของน้ำในแพนเค้กจากสมการที่ 4.8

$$k_p = k_w y_w + \epsilon k_{\text{air}} \quad (4.7)$$

กำหนดให้

$$y_w = \frac{X}{1+X} \quad (4.8)$$

โดยที่

k_p = สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของผลิตภัณฑ์ (W/m·K)

k_w = สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของน้ำ (W/m·K)

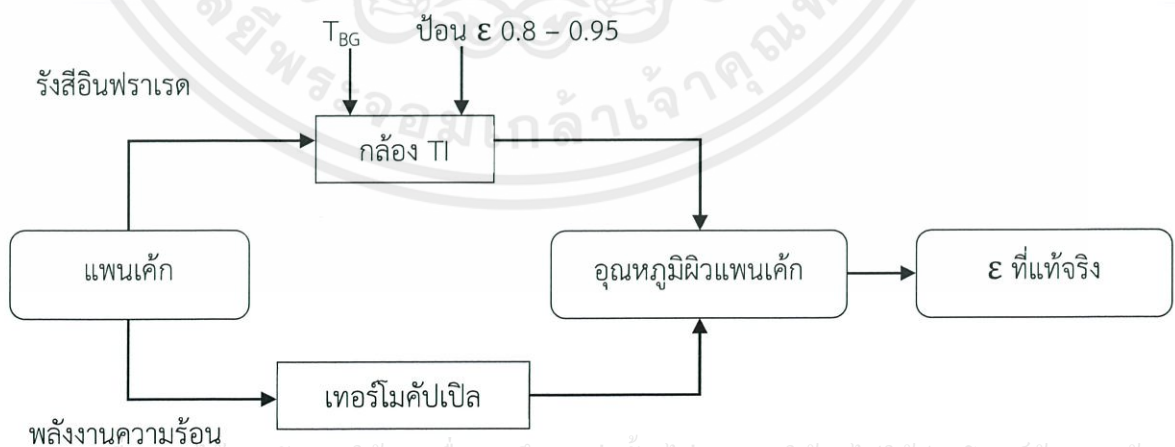
y_w = อัตราส่วนของน้ำในผลิตภัณฑ์ (kg of water/kg of sample)

X = ความชื้นของผลิตภัณฑ์ (kg of water/kg solid)

ϵ = ความพรุนของผลิตภัณฑ์

4.5.7 สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน

การหา ϵ ของแพนเค้ก เริ่มต้นจะกำหนดค่าอุณหภูมิพื้นหลัง (T_{BG}) ให้กับกล้องถ่ายภาพความร้อน (TI) มีค่าเท่ากับ 30°C จากนั้นปรับ ϵ ในช่วง 0.8 – 0.95 ที่ตัวกล้องจนกระทั่งอุณหภูมิที่อ่านค่าได้จากกล้อง TI มีค่าเท่ากับอุณหภูมิที่อ่านได้จากเทอร์โมคัปเปิล โดย ϵ ที่ได้คือค่า ϵ ที่แท้จริงของวัตถุ ขั้นตอนการหา ϵ ดังแสดงในรูปที่ 4.7



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และข้อมูลข้างต้นถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
รูปที่ 4.7 แผนภาพแสดงขั้นตอนการหา ϵ ของแพนเค้ก

4.5.8 สี

นำแป้นแป้นเค้กเริ่มต้นและแป้นเค้กในแต่ละเวลาการทดลอง มาถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิทัลในตู้ควบคุมแสงดังรูปที่ 4.8 และนำภาพที่ได้มาวิเคราะห์โดยใช้วิธี Image an analysis โดยใช้โปรแกรม Image J เพื่อหาค่า R G B ของแป้นเค้กแต่ละชิ้นในแต่ละเวลาที่ทำการทดลอง จากนั้นแปลงค่า R G B เป็นค่า X Y Z ทำการเปลี่ยนค่าดังกล่าวเป็น L^* a^* b^* ดังสมการที่ 2.5 2.6 และ 2.7 ตามลำดับ เมื่อได้ข้อมูลดังกล่าว นำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับ L^* a^* b^* และค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม (ΔE) ในแต่ละ T_{set} โดยสามารถคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม จากสมการที่ 4.9 (Gonzalez and Woods, 2002)

$$\Delta E = \left[(L^* - L^*_{ref})^2 + (a^* - a^*_{ref})^2 + (b^* - b^*_{ref})^2 \right]^{1/2} \quad (4.9)$$

โดยที่

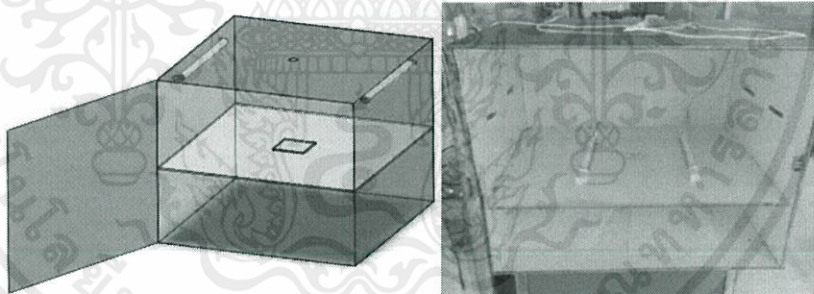
ΔE คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม

L^* คือ ค่าแสดงความสว่าง

a^* คือ ค่าแสดงสีแดงหรือสีเขียว (-สีเขียว +สีแดง)

b^* คือ ค่าแสดงสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน (-สีเหลือง +สีน้ำเงิน)

L^*_{ref} a^*_{ref} และ b^*_{ref} คือ ค่าอ้างอิงที่ได้มาจากแป้นเค้กเวลาเริ่มต้น



รูปที่ 4.8 ตู้ควบคุมแสง

4.5.9 การวิเคราะห์ทางสถิติ

วิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) และความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของข้อมูลด้วยวิธี Duncan ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS version

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 การทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระหว่างกระบวนการให้ความร้อนแบบสัมผัส

ในการทดลองได้วัดอุณหภูมิของแพนเค้กทั้งหมด 5 ตำแหน่ง ที่ T_{set} เท่ากับ 145°C และ 165°C ตามลำดับ เป็นเวลา 20 นาที ใช้เทอร์โมคัปเปิลซึ่งเชื่อมต่อกับเครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Data logger) วัดอุณหภูมิภายในแพนเค้กแต่ละตำแหน่งทั้งหมด 4 ตำแหน่ง และใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนวัดอุณหภูมิบริเวณผิวด้านบนของแพนเค้ก จากนั้นเมื่อได้ผลอุณหภูมิที่วัดได้ในแต่ละตำแหน่ง สร้างความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของแต่ละตำแหน่งกับเวลา และนำมาทวนสอบกับค่าการกระจายอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น เปรียบเทียบความสัมพันธ์และวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (Mean absolute relative error) ที่ได้จากการทวนสอบระหว่างผลการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้สมการที่ 4.10

$$e_{abs} (\%) = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{|T_{\text{experimental}} - T_{\text{predicted}}|}{T_{\text{experimental}}} \right) \quad (4.10)$$

โดยที่

- e_{abs} = เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (%)
- $T_{\text{experimental}}$ = อุณหภูมิที่วัดได้จากการทดลอง ($^{\circ}\text{C}$)
- $T_{\text{predicted}}$ = อุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ($^{\circ}\text{C}$)
- n = จำนวนข้อมูลของอุณหภูมิสำหรับการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

5.1 สมบัติทางกายภาพและทางความร้อน

สมบัติทางกายภาพและทางความร้อนที่ใช้เป็นตัวแปรป้อนเข้า (Input parameters) แบบจำลองของการถ่ายเทความร้อนของแป้งแพนเค้ก ได้แก่ ความชื้น เปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนัก ความพรุน ความหนาแน่น ความจุความร้อนจำเพาะ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน และสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน โดยมีค่าในช่วง T_{set} เท่ากับ 145 และ 165°C รายละเอียดของค่าสมบัติแต่ละชนิดมีดังนี้

5.1.1 ความชื้น

ความชื้นโดยเฉลี่ยที่ T_{set} เท่ากับ 145 และ 165°C อยู่ในช่วง 47.90-55.11% และ 44.60-55.11% ตามลำดับ โดยที่ T_{set} เท่ากับ 165°C มีความชื้นน้อยกว่าที่ 145°C และเมื่อพิจารณาจากตารางที่ 5.1 พบว่าความชื้นเฉลี่ยมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเวลาการให้ความร้อนนานขึ้น ซึ่งผลที่ได้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Manuela, (2012) ที่ศึกษาสมบัติทางกายภาพของขนมปังที่มีส่วนผสมของกลูเตนที่แตกต่างกัน และพบว่าความชื้นของขนมปังอยู่ในช่วง 51.03-52.75%

ตารางที่ 5.1 ความชื้นที่ T_{set} เท่ากับ 145 และ 165°C

เวลา (นาที)	ความชื้น (%)	
	T_{set} 145°C	T_{set} 165°C
0	55.11±0.000e	55.11±0.000e
5	52.07±0.397d	50.94±0.442d
10	50.82±0.425c	49.33±0.173c
15	49.60±0.504b	47.29±0.592b
20	47.90±0.980a	44.60±0.889a

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษตามหลังต่างกันในแนวตั้ง (a b c d และ e) แสดงค่าความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) จากผลการทดลอง 3 ซ้ำ

5.1.2 เปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนัก

เปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักโดยเฉลี่ยที่ T_{set} เท่ากับ 145 และ 165°C อยู่ในช่วง 4.73-18.37% และ 5.13-19.03% โดยที่ T_{set} เท่ากับ 165°C มีเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักมากกว่าที่ 145°C เนื่องจากเมื่อให้ความร้อนแก่แป้งแพนเค้กที่อุณหภูมิสูงขึ้นมวลของน้ำในเนื้อแป้งเกิดการระเหยมากขึ้น ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้น และพบว่าที่ T_{set} เดียวกันเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงในตารางที่ 5.2 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ

Manuela, (2012) ที่ศึกษาค่าคุณสมบัติทางกายภาพของขนมปังที่มีส่วนผสมของกลูเตนที่แตกต่างกัน พบว่าเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักของขนมปังอยู่ในช่วง 11.11-16.32%

ตารางที่ 5.2 เปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักที่ T_{set} เท่ากับ 145 และ 165°C

เวลา (นาที)	เปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนัก (%)	
	T_{set} 145°C	T_{set} 165°C
0	-	-
5	4.73±2.574a	5.13±0.080a
10	10.02±3.040b	9.74±0.822b
15	14.10±0.294c	16.87±0.310c
20	18.37±1.320d	19.03±0.626d

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษตามหลังต่างกันในแต่ละตัว (a b c และ d) แสดงค่าความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) จากผลการทดลอง 3 ซ้ำ

5.1.3 ความพรุน

ความพรุนโดยเฉลี่ยที่ T_{set} เท่ากับ 145 และ 165°C อยู่ในช่วง 0.30-0.41 และ 0.38-0.49 ตามลำดับ โดยที่ T_{set} เท่ากับ 165°C มีความพรุนมากกว่าที่ 145°C เนื่องจากเมื่อได้รับความร้อนเนื้อของแป้งแพนเค้กเกิดการขยายตัวเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และพบว่าที่ T_{set} เดียวกันความพรุนเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ แสดงดังตารางที่ 5.3 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ruben and Alain, (2009) ที่หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนและความพรุนในการอบขนมปัง และพบว่าความพรุนอยู่ในช่วง 0.78-1.26

ตารางที่ 5.3 ความพรุนที่ T_{set} เท่ากับ 145 และ 165°C

เวลา (นาที)	ความพรุน	
	T_{set} 145°C	T_{set} 165°C
0	-	-
5	0.30±0.014a	0.38±0.029a
10	0.38±0.011b	0.44±0.031b
15	0.40±0.010b	0.46±0.015b
20	0.41±0.0010b	0.49±0.040b

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษตามหลังต่างกันในแต่ละตัว (a และ b) แสดงค่าความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) จากผลการทดลอง 3 ซ้ำ

5.1.4 ความหนาแน่น

ความหนาแน่นโดยเฉลี่ยที่ T_{set} เท่ากับ 145 และ 165°C อยู่ในช่วง 548.26-1063.28 (kg/m^3) และ 420.79-1067.59 (kg/m^3) ตามลำดับ โดยที่ T_{set} เท่ากับ 165°C มีความหนาแน่นน้อยกว่าที่ 145°C ดังตารางที่ 5.4 เนื่องจากความหนาแน่นของแป้งแพนเค้กขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการให้ความร้อน (Choi and Okos, 1985) เมื่ออุณหภูมิสูงน้ำในเนื้อแป้งเกิดการระเหยมากขึ้นทำให้ความหนาแน่นลดลง และพบว่าความหนาแน่นของทั้งสอง T_{set} ที่เวลาเริ่มต้นจะมีความหนาแน่นสูงกว่าที่เวลาอื่น ๆ เมื่อเพิ่มเวลาในการให้ความร้อนมากขึ้นทำให้อุณหภูมิและปริมาตรสูงขึ้น แต่มวลของแป้งแพนเค้กลดลง จึงทำให้ความหนาแน่นลดลง และเมื่อพิจารณาความพรุนเฉลี่ยของทั้งสอง T_{set} พบว่ามีความใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Vanin and Lucas, (2009) ที่ศึกษาลักษณะการพองตัวของขนมปังในกระบวนการอบ พบว่าความพรุนของขนมปังแปรผันตรงกับการเปลี่ยนแปลงความสูงของแป้งเมื่อได้รับความร้อน

ตารางที่ 5.4 ความหนาแน่นที่ T_{set} เท่ากับ 145 และ 165°C

เวลา (นาที)	ความหนาแน่น (kg/m^3)	
	T_{set} 145°C	T_{set} 165°C
0	1063.28±8.032d	1067.59±5.171d
5	676.71±19.274c	565.89±24.646c
10	600.84±21.887b	497.17±12.369b
15	573.30±25.252ab	476.07±22.761b
20	548.26±15.825a	420.79±47.105a

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษตามหลังต่างกันในแต่ละแถว (a b c และ d) แสดงค่าความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) จากผลการทดลอง 3 ซ้ำ

5.1.5 ความจุความร้อนจำเพาะ

ความจุความร้อนจำเพาะโดยเฉลี่ยที่ T_{set} เท่ากับ 145 และ 165°C อยู่ในช่วง 3090.65-3158.94 ($\text{J/kg}\cdot\text{K}$) และ 3090.65-3165.44 ($\text{J/kg}\cdot\text{K}$) ตามลำดับ โดยที่ T_{set} เดียวกันความจุความร้อนจำเพาะเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ดังตารางที่ 5.5 เนื่องจากความจุความร้อนจำเพาะของอาหารขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการให้ความร้อน (Mohsenin, 1980) เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความจุความร้อนจำเพาะก็จะสูงขึ้นด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Pyle, (2005) ที่สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการหาสภาพโครงสร้างของแป้ง โดยกำหนดให้ความจุความร้อนจำเพาะมีค่าคงที่เท่ากับ 3650 ($\text{J/kg}\cdot\text{K}$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.5 ความจุความร้อนจำเพาะที่ T_{set} เท่ากับ 145 และ 165°C

เวลา (นาที)	ความจุความร้อนจำเพาะ (J/kg·K)	
	T_{set} 145°C	T_{set} 165°C
0	3090.65±0.000a	3090.65±0.000a
5	3140.89±2.231b	3139.48±8.346b
10	3149.86±0.952c	3151.73±12.847bc
15	3158.94±3.346d	3159.67±11.605c
20	3158.05±6.939d	3165.44±9.725c

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษตามหลังต่างกันในแต่ละแถว (a b c และ d) แสดงค่าความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) จากผลการทดลอง 3 ซ้ำ

5.1.6 สัมประสิทธิ์การนำความร้อน

สัมประสิทธิ์การนำความร้อนโดยเฉลี่ยที่ T_{set} เท่ากับ 145 และ 165°C อยู่ในช่วง 0.22-0.24 (W/m·K) โดยที่ T_{set} เท่ากับ 145 และ 165°C มีสัมประสิทธิ์การนำความร้อนใกล้เคียงกันเมื่อเวลาที่ให้ความร้อนนานขึ้น ดังตารางที่ 5.6 เนื่องจากสัมประสิทธิ์การนำความร้อนขึ้นกับความพรุนและอัตราส่วนของน้ำภายในแพนเค้ก (Feyissa et al., 2011) เมื่อพิจารณาความพรุนเฉลี่ยของทั้งสอง T_{set} พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันและอัตราส่วนของน้ำภายในแพนเค้กมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อเวลาการให้ความร้อนนานขึ้น ส่งผลให้สัมประสิทธิ์การนำความร้อนใกล้เคียงกัน โดยสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Sablain, (2002) สร้างแบบจำลองโครงข่ายเส้นประสาทของขนมปังเพื่อทำนายสัมประสิทธิ์การนำความร้อน และพบว่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนอยู่ที่ช่วง 0.14-0.34 (W/m·K)

ตารางที่ 5.6 สัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ T_{set} เท่ากับ 145 และ 165°C

เวลา (นาที)	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W/m·K)	
	T_{set} 145°C	T_{set} 165°C
0	0.22±0.000a	0.22±0.000a
5	0.24±0.002c	0.24±0.001d
10	0.24±0.002c	0.24±0.002d
15	0.24±0.003c	0.23±0.003c
20	0.23±0.001b	0.23±0.002b

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษตามหลังต่างกันในแต่ละแถว (a b c และ d) แสดงค่าความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) จากผลการทดลอง 3 ซ้ำ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกรหัสห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.7 สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน

สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของแป้งแพนเค้กและแพนเค้กที่ T_{set} เท่ากับ 145 และ 165°C อยู่ในช่วง 0.87-0.90 และ 0.86-0.93 ตามลำดับ โดยสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของทั้งสอง T_{set} ใกล้เคียงกัน เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิและเวลาในการให้ความร้อนน้อยมาก ซึ่งสอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของขนมปังที่มีค่ามากกว่า 0.8 (Kress and Brime, 2005)

จะเห็นว่าค่าสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางความร้อนของแพนเค้กที่ได้จากการทดลองที่ T_{set} เท่ากับ 145 และ 165°C มีค่าไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญตลอดการให้ความร้อน ดังนั้นตัวแปรป้อนเข้าที่ใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนในกระบวนการอบแบบสัมผัส จึงกำหนดให้มีค่าคงที่ตลอดระยะเวลาการให้ความร้อน ดังแสดงในตารางที่ 5.7

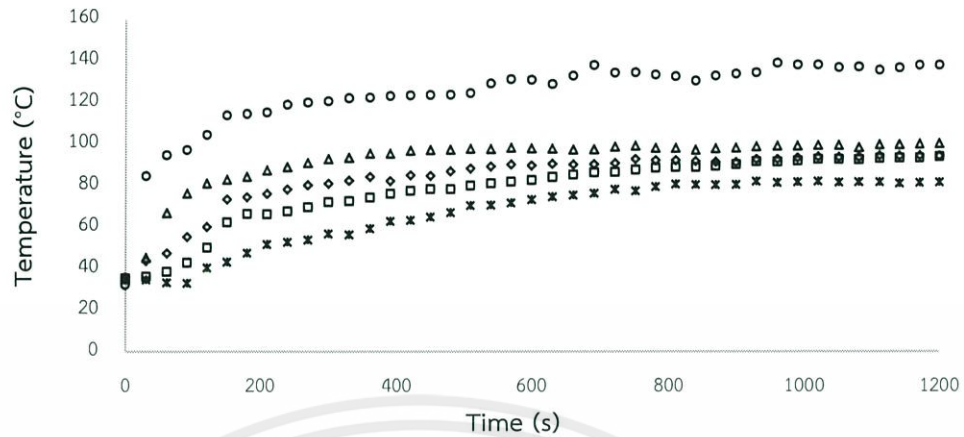
ตารางที่ 5.7 สมบัติของแป้งแพนเค้ก

สมบัติของแป้งแพนเค้ก	ค่าเฉลี่ย
ความชื้น (%)	50.28±0.880
เปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนัก (%)	12.25±1.133
ความพรุน	0.41±0.020
ความหนาแน่น (kg/m^3)	695.84±20.230
ความจุความร้อนจำเพาะ ($\text{J/kg}\cdot\text{K}$)	3146.88±5.595
สัมประสิทธิ์การนำความร้อน ($\text{W/m}\cdot\text{K}$)	0.23±0.002
สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน	0.87

5.2 ผลของอุณหภูมิในกระบวนการในกระบวนการอบแบบสัมผัส

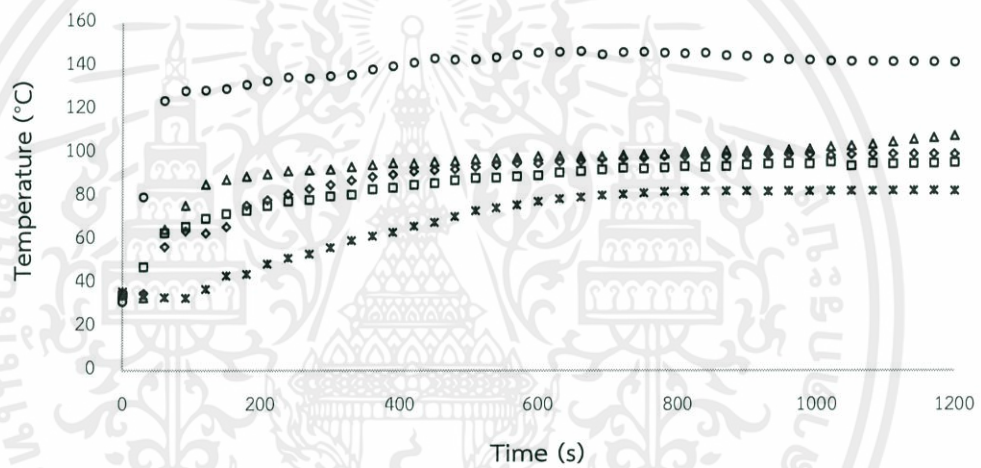
จากการวิเคราะห์กราฟความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและเวลาในแต่ละตำแหน่งของแพนเค้กที่ T_{set} เท่ากับ 145 และ 165°C ดังแสดงในรูปที่ 5.1 สามารถแบ่งการถ่ายเทความร้อนได้ 2 ช่วง คือ ช่วงให้ความร้อนแก่แพนเค้กเพื่อเพิ่มอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ให้สูงขึ้น ซึ่งเกิดขึ้นในช่วงที่แพนเค้กมีอุณหภูมิต่ำกว่า 100°C (อุณหภูมิที่น้ำเริ่มระเหย) โดยช่วงนี้อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิมียุทธศาสตร์สูง และเมื่อแพนเค้กมีอุณหภูมิสูงกว่า 100°C เกิดช่วงการระเหยของน้ำภายในแพนเค้ก ซึ่งเป็นช่วงที่ใช้ความร้อนเพื่อการระเหยน้ำภายในแพนเค้ก ส่งผลให้อุณหภูมิของแพนเค้กเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย โดยช่วงเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ผลิตภัณฑ์ อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของแพนเค้กสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งมีระยะเวลาสั้นกว่าช่วงระเหยน้ำ และจะยิ่งสั้นมากเมื่อตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิอยู่ใกล้กับแผ่นส่งผ่านความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



× ตำแหน่ง A □ ตำแหน่ง B ◊ ตำแหน่ง C ▲ ตำแหน่ง C ○ ตำแหน่ง E

(ก)



× ตำแหน่ง A □ ตำแหน่ง B ◊ ตำแหน่ง C ▲ ตำแหน่ง D ○ ตำแหน่ง E

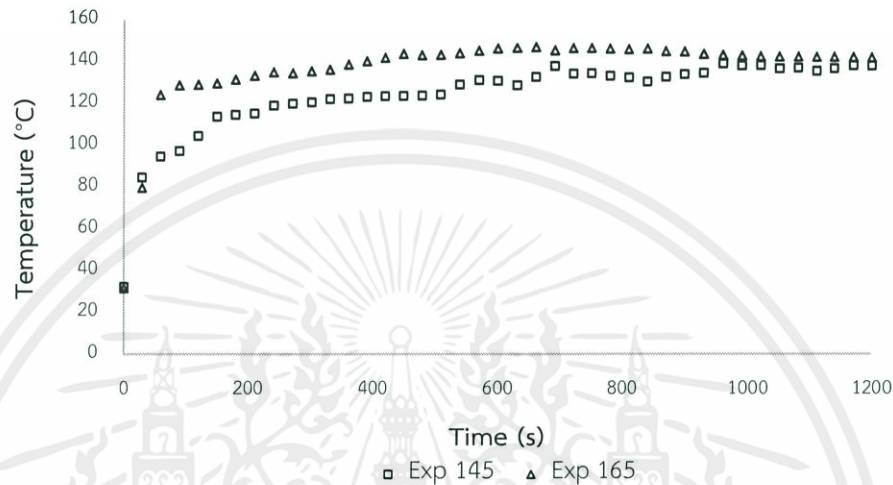
(ข)

รูปที่ 5.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งกับเวลาที่ (ก) T_{set} เท่ากับ 145°C และ (ข) T_{set} เท่ากับ 165°C

พิจารณาตำแหน่ง E ในรูปที่ 5.2 ซึ่งเป็นตำแหน่งบริเวณผิวด้านล่างของผลิตภัณฑ์ พบว่าที่ T_{set} เท่ากับ 145°C และ 165°C แพนเค้กมีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิสูงในช่วง 100 วินาทีแรก ซึ่งอยู่ในช่วงของการให้ความร้อน หลังจากนั้นอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งนี้จะเริ่มลดลง โดยในช่วงหลังนี้เป็นช่วงของการระเหยน้ำ ความร้อนที่แพนเค้กได้รับจะนำไปใช้เพื่อการระเหยน้ำออก ดัง

เอกสารนี้เป็นรูปที่ 5.2 และเมื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของตำแหน่ง E ระหว่าง T_{set} เท่ากับ 145°C และ 165°C พบว่า อุณหภูมิของแพนเค้กในช่วงเพิ่มอุณหภูมิมีอัตราการเพิ่มขึ้นต่างกันเล็กน้อย

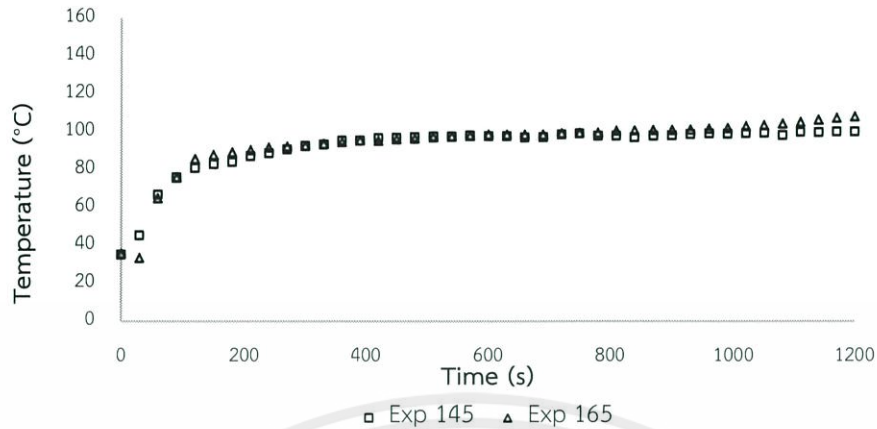
เนื่องจากในช่วงนี้มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว ซึ่งแตกต่างกับช่วงระเหยน้ำที่เห็นความแตกต่างกันอย่างชัดเจน และในตำแหน่งนี้มีการระเหยของน้ำอย่างรวดเร็วเนื่องจากเป็นตำแหน่งที่ใกล้แผ่นส่งผ่านความร้อน ส่งผลให้บริเวณนี้ได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิของ T_{set} มากที่สุดเมื่อเทียบกับตำแหน่งอื่นๆ



รูปที่ 5.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในตำแหน่ง E ที่ T_{set} เท่ากับ 145 และ 165°C

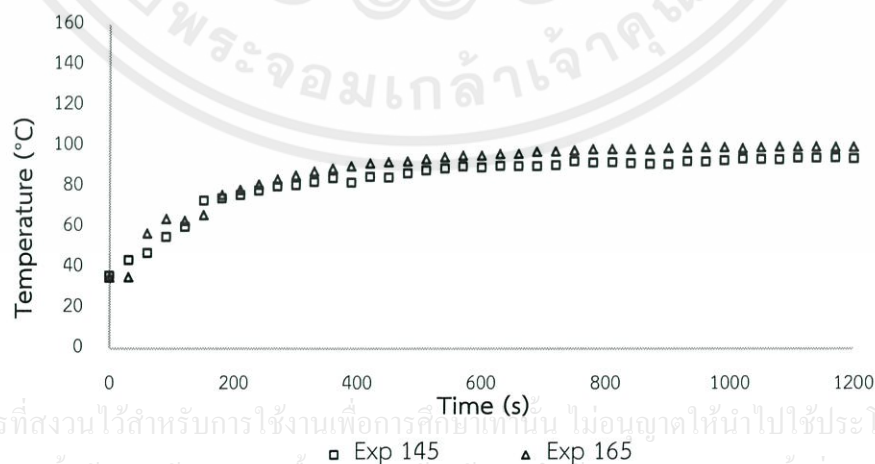
พิจารณาตำแหน่ง D ซึ่งเป็นตำแหน่งภายในแพนเค้กที่มีระยะห่างจากผิว 2.5 mm. ที่ระดับอุณหภูมิ T_{set} เท่ากับ 145 และ 165°C แสดงดังรูปที่ 5.3 พบว่า ในช่วง 200 วินาทีแรก แพนเค้กมีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิสูงขึ้น หลังจากนั้นอุณหภูมิจะเริ่มคงที่ เนื่องจากในช่วงเวลาดังกล่าว บริเวณตำแหน่ง E เข้าสู่ช่วงระเหยของน้ำทำให้อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิลดลง ส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของตำแหน่งนี้มีค่าน้อยมากเนื่องจากการทดลองเป็นการถ่ายเทความร้อนแบบมิติเดียว และเมื่อพิจารณาที่ตำแหน่ง T_{set} เท่ากับ 165°C ช่วงหลังจากเวลา 1000 วินาที มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเพิ่มมากขึ้นอีกครั้งเนื่องจากน้ำบริเวณนี้น้ำเริ่มระเหยออกหมดแล้ว ทำให้ปริมาณความร้อนที่เคยใช้ในการระเหยของน้ำเปลี่ยนเป็นการเพิ่มอุณหภูมิให้แก่แพนเค้ก และเมื่อเทียบการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในตำแหน่ง D ระหว่าง T_{set} เท่ากับ 145 และ 165°C อุณหภูมิในช่วงให้ความร้อนแก่ผลิตภัณฑ์ต่างกันเล็กน้อย และ T_{set} เท่ากับ 165°C จะเริ่มเข้าสู่ช่วงระเหยน้ำหลังจากเวลา 1000 วินาที แต่ T_{set} เท่ากับ 145°C ไม่เข้าสู่ช่วงระเหยน้ำเนื่องจากอุณหภูมิต่ำกว่า 100°C เมื่อพิจารณาการระเหยน้ำของตำแหน่ง D พบว่ามีการระเหยของน้ำน้อยกว่าตำแหน่ง E เนื่องจากตำแหน่ง E สัมผัสกับแผ่นส่งผ่านความร้อนโดยตรง และระยะห่างระหว่างแผ่นส่งผ่านความร้อนของตำแหน่ง D มากกว่าตำแหน่ง E ส่งผลให้บริเวณนี้จึงมีผลกระทบจากอุณหภูมิต่ำกว่าตำแหน่ง E

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการวิจัยและพัฒนาของโครงการวิจัยที่ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม โดยไม่หวังผลกำไร และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในตำแหน่ง D ที่ T_{set} เท่ากับ 145 และ 165°C

พิจารณาในตำแหน่ง C ซึ่งเป็นตำแหน่งภายในแพนเค้กที่มีระยะห่างจากผิว 5.00 mm. และเป็นตำแหน่งตรงกลางของแพนเค้ก ที่ T_{set} เท่ากับ 145 และ 165°C ดังรูปที่ 5.4 พบว่า 250 วินาทีแรกมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแพนเค้กเร็วมากซึ่งอยู่ในช่วงของการเพิ่มอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ และหลังจาก 250 วินาทีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ และคงที่และอยู่ต่ำกว่าอุณหภูมิจุดเดือดของน้ำ (Boiling point) จนสิ้นสุดกระบวนการให้ความร้อน เนื่องจากในช่วงเวลาดังกล่าวบริเวณตำแหน่ง D มีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิน้อยมากจึงส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในตำแหน่งนี้น้อยมากเช่นกัน ซึ่งตรงตามกับสมมติฐานที่ว่าในการทดลองเป็นการถ่ายเทความร้อนแบบมิติเดียว เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของตำแหน่ง C ระหว่าง T_{set} เท่ากับ 145 และ 165°C พบว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิช่วงเพิ่มอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์แตกต่างกันเล็กน้อย และบริเวณตำแหน่ง C ของทั้งสอง T_{set} ไม่ได้เข้าสู่ช่วงการระเหยน้ำ เนื่องจากอุณหภูมิของแพนเค้กต่ำกว่าอุณหภูมิที่น้ำระเหย ส่งผลให้ในตำแหน่งนี้ของทั้งสอง T_{set} ไม่เกิดการระเหยของน้ำ

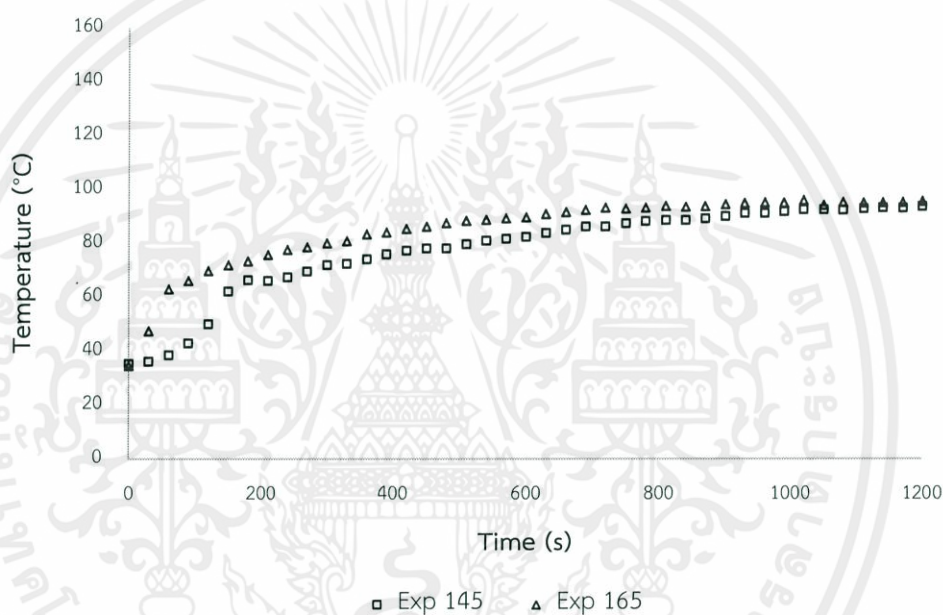


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในตำแหน่ง C ที่ T_{set} เท่ากับ 145 และ 165 °C

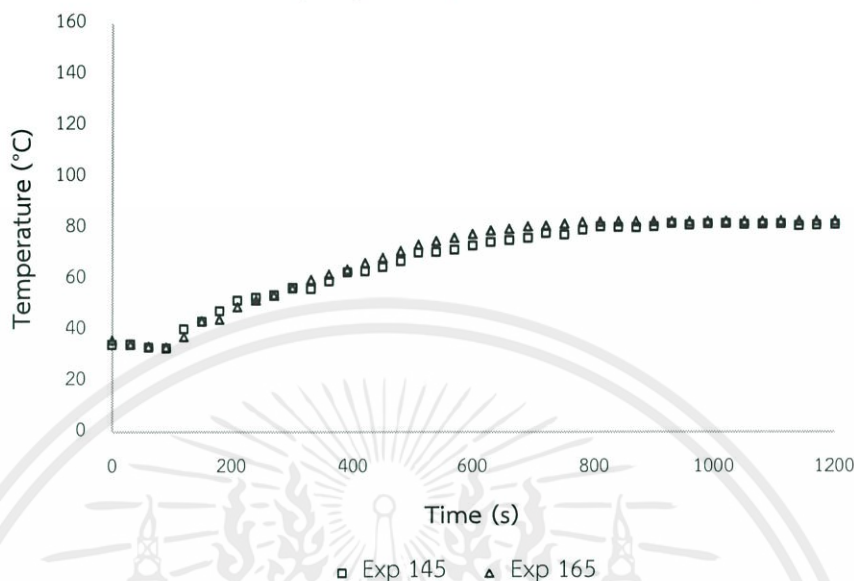
พิจารณาตำแหน่ง B ซึ่งเป็นตำแหน่งภายในแพนเค้กที่มีระยะห่างจากผิวด้านล่าง 7.5 mm. เมื่อพิจารณาที่ T_{set} เท่ากับ 145 และ 165°C ดังรูปที่ 5.5 พบว่า ในช่วง 350 วินาทีแรก อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของแพนเค้กค่อนข้างสูง แต่หลังจาก 350 วินาที พบว่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนจบกระบวนการ เนื่องจากบริเวณตำแหน่ง C อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิต่ำมากจึงส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในตำแหน่งนี้เปลี่ยนแปลงน้อยมากเช่นกัน และเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของตำแหน่ง B ระหว่าง T_{set} เท่ากับ 145 และ 165°C พบว่า อุณหภูมิช่วงเพิ่มอุณหภูมิแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย และตำแหน่ง B ของทั้งสอง T_{set} ไม่ได้เข้าสู่ช่วงระเหยน้ำเนื่องจากอุณหภูมิของแพนเค้กยังไม่ถึงอุณหภูมิที่น้ำระเหย



รูปที่ 5.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในตำแหน่ง B ที่ T_{set} เท่ากับ 145 และ 165 °C

พิจารณาตำแหน่ง A ในรูปที่ 5.6 เป็นตำแหน่งที่อยู่บริเวณผิวด้านบนของแพนเค้ก มีระยะห่างจากผิวด้านล่าง 10 mm. บริเวณนี้มีการสูญเสียความร้อนบริเวณที่ผิวจากการพาความร้อนของสิ่งแวดล้อม เมื่อพิจารณาที่ระดับ T_{set} เท่ากับ 145 และ 165°C พบว่าในช่วง 800 วินาทีแรก การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแพนเค้กเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ และหลังจาก 800 วินาทีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจะเริ่มคงที่ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิจุดเดือดของน้ำจนจบกระบวนการให้ความร้อน และเมื่อเทียบการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของตำแหน่ง A ระหว่าง T_{set} เท่ากับ 145 และ 165°C พบว่าการเปลี่ยนแปลงของทั้งสอง T_{set} จะแตกต่างกันเล็กน้อยและมีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเดือดของน้ำจนจบกระบวนการให้ความร้อน และเมื่อพิจารณาการระเหยน้ำของตำแหน่งดังกล่าว พบว่าไม่มีการระเหยของน้ำของตำแหน่งนี้ เนื่องจากตำแหน่ง A มีการสูญเสียความร้อนให้สิ่งแวดล้อมและมีอยู่ไกลจาก

แผ่นส่งผ่านความร้อนมากกว่าตำแหน่งอื่น จึงส่งผลให้บริเวณตำแหน่ง A ได้รับผลกระทบจาก T_{set} น้อยที่สุดและมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับตำแหน่งอื่น ๆ

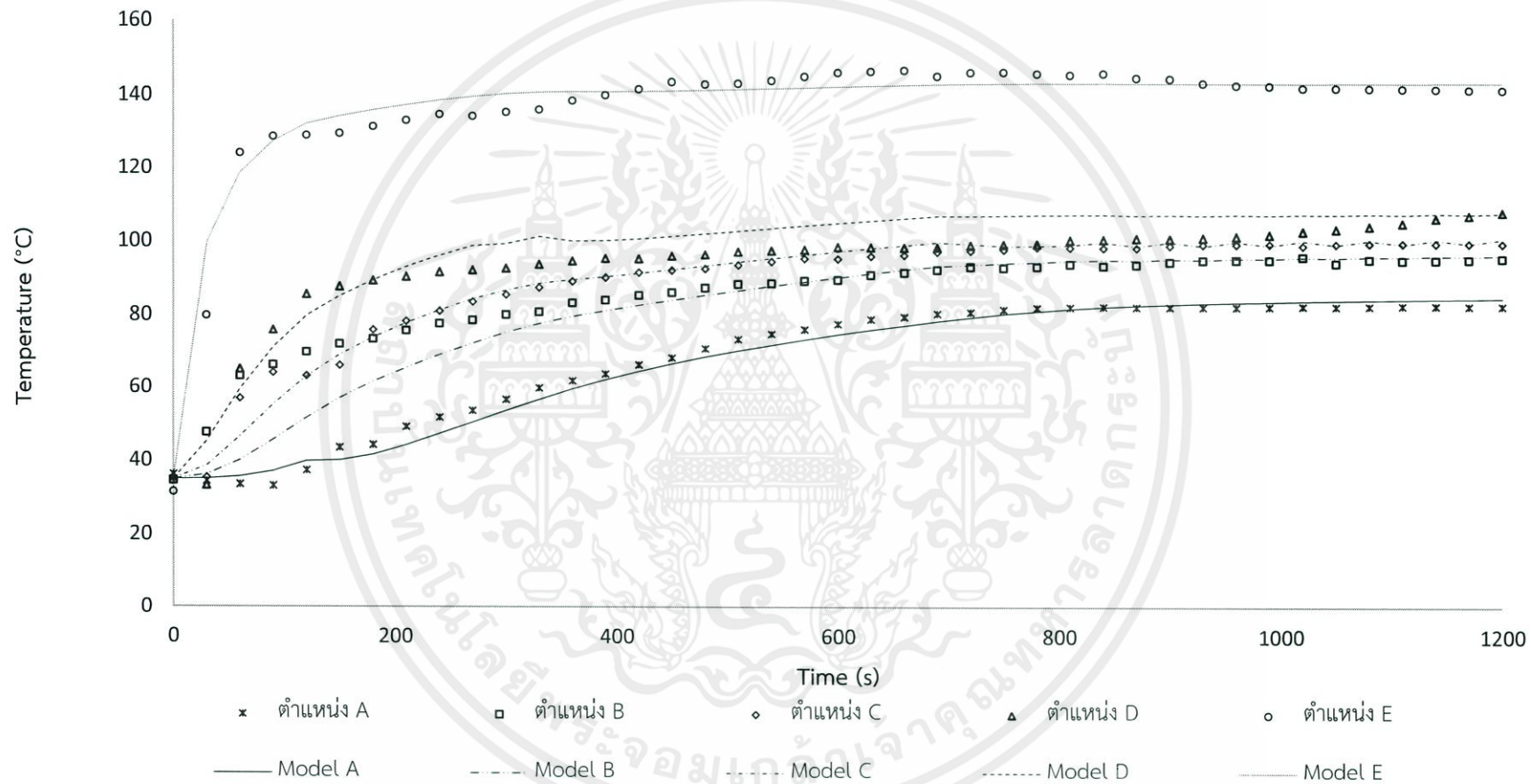


รูปที่ 5.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในตำแหน่ง A ที่ T_{set} เท่ากับ 145 และ 165°C

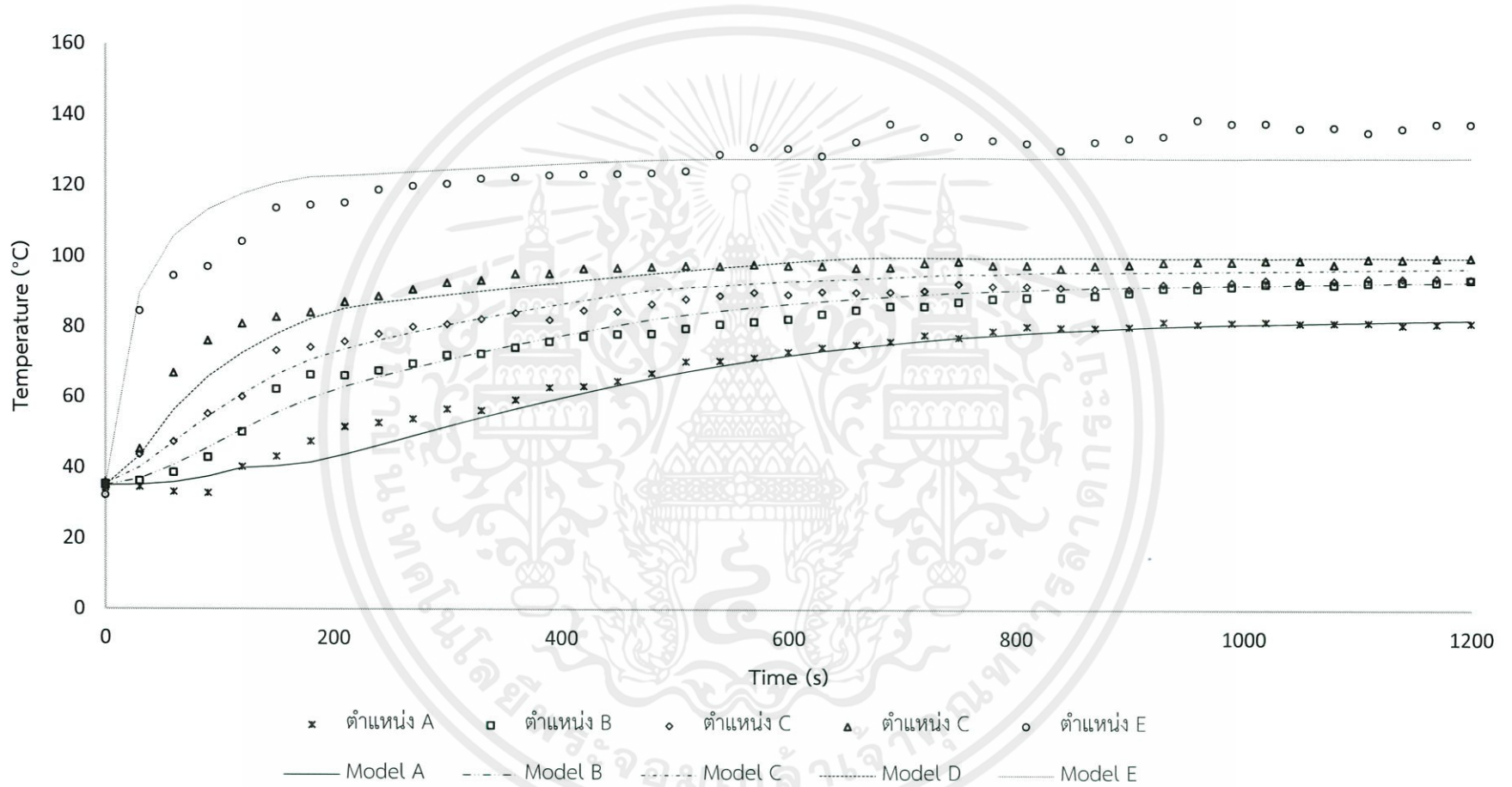
5.3 การทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อน

พิจารณากราฟความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและเวลาในแต่ละตำแหน่งที่ได้นำมาทดสอบกับผลของอุณหภูมิที่ได้กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนในกระบวนการอบแบบสัมผัสที่ T_{set} เท่ากับ 165°C ในรูปที่ 5.7 พบว่า ตำแหน่ง E มีความคลาดเคลื่อนน้อยตลอดทั้งช่วงให้ความร้อนและช่วงระเหยน้ำโดยมีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 2.6% และในตำแหน่ง D C B และ A ซึ่งมีเฉพาะช่วงการให้ความร้อนมีความคลาดเคลื่อน 6.31% 2.01% 5.74% และ 3.51% ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาที่ T_{set} เท่ากับ 145°C แสดงดังรูปที่ 5.8 พบว่าแต่ละตำแหน่งมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนบ้างเล็กน้อย โดยตำแหน่ง E มีความคลาดเคลื่อนน้อยตลอดทั้งช่วงให้ความร้อนและช่วงระเหยน้ำซึ่งมีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 5.2% และตำแหน่ง D C B และ A ความคลาดเคลื่อน 2.75% 3.47% 2.82% และ 3.37% ตามลำดับ

ซึ่งความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นอาจเกิดจากในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้กำหนดให้สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อน ความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำ และความร้อนที่สูญเสียมีค่าคงที่ตลอดกระบวนการให้ความร้อน ซึ่งในความเป็นจริงค่าตัวแปรดังกล่าวเปลี่ยนแปลงตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ นอกจากนี้กระบวนการอบแบบสัมผัสยังเป็นการให้ความร้อนบริเวณผิวด้านล่างของผลิตภัณฑ์เป็นหลักทำให้มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะบริเวณผิวด้านล่าง (Crust surface) ซึ่งส่งผลทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนระหว่างผลของแบบจำลองกับการทดลองจริง



รูปที่ 5.7 การทวนสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดลองในแต่ละตำแหน่งของแพนเค้กที่ T_{set} เท่ากับ 165°C



รูปที่ 5.8 การทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดลองในแต่ละตำแหน่งของแพนเค้กที่ T_{set} เท่ากับ 145°C

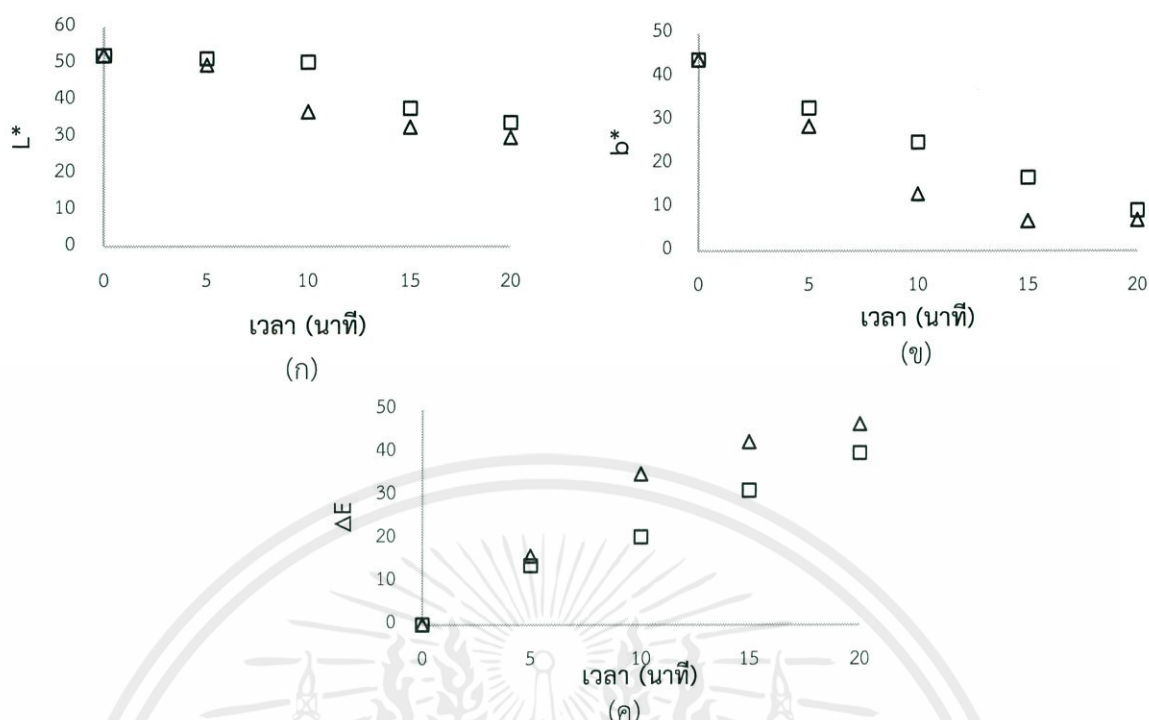
5.4 ผลของสีน้ำตาลที่เปลี่ยนแปลงบริเวณผิวด้านล่างของแพนเค้ก

พิจารณาตารางที่ 5.8 พบว่า เมื่อให้ความร้อนแก่แพนเค้กในแต่ละ T_{set} เกิดการเปลี่ยนแปลงสีของแพนเค้กขึ้น โดย L^* ซึ่งแสดงถึงความสว่างของแพนเค้กมีแนวโน้มลดลงหรือบริเวณผิวด้านล่างของแพนเค้กมีสีเข้มขึ้นสอดคล้องกับ Broyart et al. (1998) และในการให้ความร้อนที่ T_{set} เท่ากับ 165°C มีการเปลี่ยนแปลงค่าความสว่างมากกว่า 145°C ดังแสดงในรูปที่ 5.9 (ก) สำหรับค่า b^* ซึ่งแสดงถึงค่าสีเหลืองที่มีแนวโน้มลดลงดังรูปที่ 5.9 (ข) สีบริเวณผิวด้านล่างของแพนเค้กมีความเข้มเพิ่มขึ้น โดยความเข้มของสีบริเวณผิวด้านล่างของแพนเค้กที่สัมผัสกับแผ่นส่งผ่านความร้อนจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ให้ความร้อน และจากรูปที่ 5.9 (ค) ค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม (ΔE) ที่อุณหภูมิกำหนด 165°C มีการเปลี่ยนแปลงมากกว่า 145°C โดยค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการให้ความร้อนบริเวณผิวด้านล่างของแพนเค้กในแต่ละ T_{set} เช่นเดียวกัน

ตารางที่ 5.8 การเปลี่ยนแปลงสีของแพนเค้กที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ

T_{set} ($^{\circ}\text{C}$)	เวลา (min)	Color			ΔE
		L^*	a^*	b^*	
145°C	0	52.10	-0.12	43.89	-
	5	51.29	-8.17	32.80	13.73
	10	50.36	-7.26	24.89	20.39
	15	37.69	-5.69	16.82	31.16
	20	33.84	-7.73	9.26	39.88
	165°C	0	52.10	-0.12	43.89
5	49.49	-3.79	28.60	15.95	
10	36.76	-6.53	13.09	35.00	
15	32.57	-6.89	6.80	42.46	
20	29.68	-5.77	7.06	46.55	

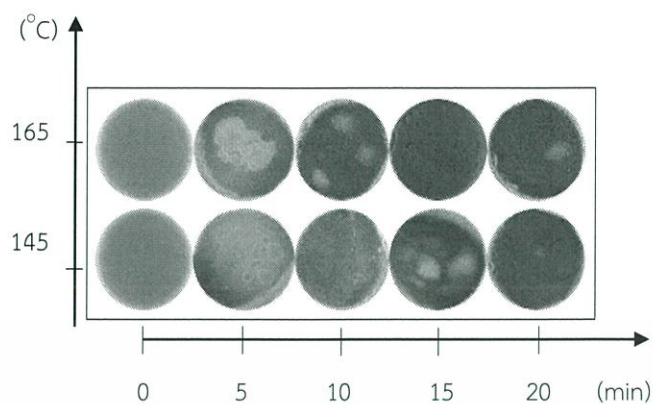
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



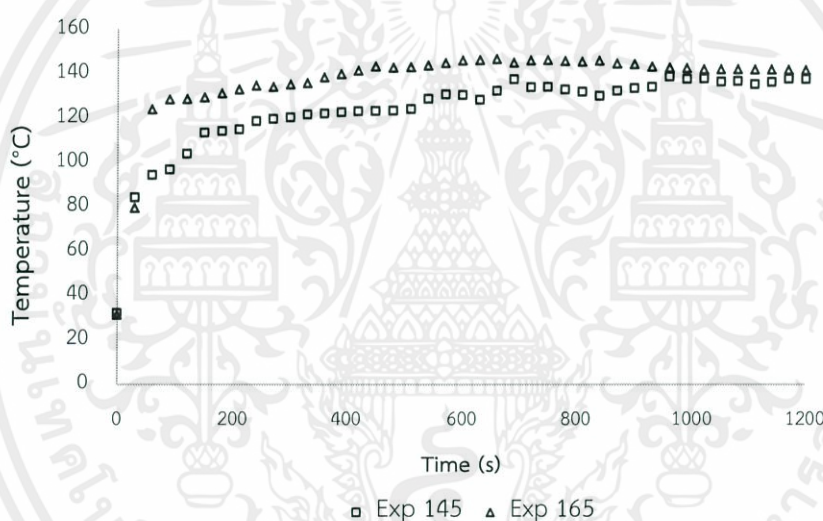
รูปที่ 5.9 การเปลี่ยนแปลง (ก) ค่าความสว่าง (L^*) (ข) ค่าสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน (b^*) และ (ค) ค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม (ΔE) ที่บริเวณผิวหนังด้านล่างของแพนเค้กที่เวลาต่าง ๆ โดยรูปสี่เหลี่ยมเป็นตัวแทนของ T_{set} เท่ากับ 145°C และสามเหลี่ยมสำหรับ 165°C

จากผลการทดลองให้ความร้อนกับแพนเค้กที่ T_{set} เท่ากับ 145°C เมื่อเวลาผ่านไป 5 นาที พบว่าสีบริเวณผิวหนังด้านล่างของแพนเค้กเริ่มเปลี่ยนแปลงจากสีเหลืองเป็นสีน้ำตาลโดยอุณหภูมิบริเวณผิวหนังด้านล่างของแพนเค้กเท่ากับ 120.5°C ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีของ Pyley, (1988) และเมื่อเวลาให้ความร้อนผ่านไป 10 นาที แพนเค้กมีการเปลี่ยนแปลงสีน้ำตาลมากขึ้นโดยอุณหภูมิจากบริเวณผิวหนังด้านล่างของแพนเค้กเท่ากับ 130.7°C แสดงให้เห็นว่าที่ T_{set} เท่ากับ 145°C ในช่วงเวลา 5-10 นาที แพนเค้กเริ่มเกิดสีน้ำตาลจนเกิดสีน้ำตาลที่เข้มขึ้น โดยสีน้ำตาลที่เพิ่มขึ้นที่ T_{set} เดียวกันขึ้นกับเวลาที่ให้ความร้อน และเมื่อเปรียบเทียบ T_{set} เท่ากับ 165°C กับ T_{set} เท่ากับ 145°C ในเวลาเดียวกัน พบว่าเมื่อ T_{set} สูงขึ้นส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงของสีน้ำตาลเพิ่มขึ้นด้วย แสดงดังรูปที่ 5.10

การเปลี่ยนแปลงสีบริเวณผิวหนังด้านล่างของแพนเค้กสามารถเชื่อมโยงกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิบริเวณผิวหนังด้านล่างของแพนเค้กที่ T_{set} เท่ากับ 145 และ 165°C ที่เวลาต่าง ๆ โดยเทียบจากอุณหภูมิบริเวณผิวหนังด้านล่างและเวลากับการเปลี่ยนแปลงสีที่เกิดขึ้นแสดงดังรูปที่ 5.11 เพื่อป้องกันไม่ให้สีของผลิตภัณฑ์ที่ได้เปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลเข้มหรืออ่อนจนเกินไป โดยบริเวณผิวหนังด้านล่างของแพนเค้กที่สัมผัสโดยตรงกับแผ่นให้ความร้อนเป็นส่วนที่เกิดการเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลมากที่สุด



รูปที่ 5.10 การเปลี่ยนแปลงสีของตัวอย่างแพนเค้กบริเวณผิวด้านล่างที่ T_{set} เท่ากับ 145 และ 165°C ในเวลาต่าง ๆ



รูปที่ 5.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาบริเวณผิวด้านล่างของแพนเค้ก (ตำแหน่ง E) ที่ T_{set} เท่ากับ 145 และ 165°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการทดลอง

ผลการทวนสอบอุณหภูมิแต่ละตำแหน่งจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลอง พบว่า อุณหภูมิของแต่ละตำแหน่งมีความคลาดเคลื่อนบ้างเล็กน้อย โดยที่ T_{set} เท่ากับ 145°C มีความคลาดเคลื่อนในตำแหน่ง E D C B และ A เท่ากับ 5.2% 2.75% 3.47% 2.82% และ 3.37% ตามลำดับ และที่ T_{set} เท่ากับ 165°C มีความคลาดเคลื่อนในตำแหน่ง E D C B และ A เท่ากับ 2.6% 6.31% 2.01% 5.74% และ 3.51% ตามลำดับ โดยความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นของการทดลองเกิดจากในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้กำหนดให้สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อน ความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำ และความร้อนที่สูญเสียให้สิ่งแวดล้อมมีค่าคงที่ตลอดการทดลองซึ่งในความเป็นจริง ค่าปัจจัยดังกล่าวเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ นอกจากนี้กระบวนการอบแบบสัมผัส เป็นการให้ความร้อนบริเวณที่ผิวด้านล่างของผลิตภัณฑ์เป็นหลักทำให้มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะบริเวณผิวด้านล่าง และในระหว่างการทดลองพบว่าบริเวณผิวด้านล่างของแพนเค้กมีการเปลี่ยนแปลงของสีน้ำตาล โดยสีน้ำตาลที่เกิดขึ้นเปลี่ยนแปลงตามเวลาให้ความร้อน และอุณหภูมิของแผ่นส่งผ่านความร้อน

6.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการวัดอุณหภูมิด้วยสายเทอร์โมคัปเปิล Type K ควรมีอุปกรณ์จับยึดสายเพื่อป้องกันการคลาดเคลื่อนของตำแหน่งในการวัดอุณหภูมิ
2. ในการทดลองพบว่าชุดอุปกรณ์ที่ใช้ไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ตลอดการทดลองได้ ส่งผลให้อุณหภูมิที่วัดได้มีความคลาดเคลื่อน ดังนั้นจึงควรสร้างชุดอุปกรณ์การทดลองที่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ตลอดการให้ความร้อนแก่ผลิตภัณฑ์
3. การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ควรกำหนดให้สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อน ความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำ และความร้อนที่สูญเสียให้สิ่งแวดล้อมเปลี่ยนแปลงตามเวลา และอุณหภูมิ เพื่อให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น
4. สามารถนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนในระหว่างกระบวนการอบแบบสัมผัสสามารถไปพัฒนาต่อเพื่อใช้ทำนายอุณหภูมิแต่ละตำแหน่งของแพนเค้ก รวมถึงสามารถทำนายอุณหภูมิที่ผิวด้านล่างได้ รวมทั้งสามารถโยงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ เวลา และการเกิดสีน้ำตาลที่บริเวณผิวด้านล่างของแพนเค้กได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- นิธิยา รัตนานพนธ์. (2554). *วิทยาศาสตร์การอาหารของไขมันและน้ำมัน*. กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์
- ปานมนัส ศิริสมบุรณ์ พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และสาทิป รัตนภาสกร. (2538). *สมบัติทางกายภาพ และวิศวกรรมวัสดุ*. ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง : หน้า 5- 38
- นวกัทรာ หนูนา และทวีพล ชื่อสัตย์. (2555). *การวัดและเครื่องมือวัด (Measurement and Instrumentation)*. กรุงเทพฯ : มิน เซอร์วิส ซัพพลาย
- Alessia, L. (2007). Characterization of water distribution in bread during storage using magnetic resonance imaging. *Magnetic Resonance Imaging*, (25), p. 1449–1458.
- Alessia, L. and Yael, V. (2008). Physical properties and water state changes during storage in soy bread with and without almond. *Food Chemistry*, 110 (3), p. 554–561.
- Anastasia, M. (2007). Oxidative Stability of Edible Vegetable Oils Enriched in Polyphenols with Olive Leaf Extract. *Food Science and Technology International*, 13 (6), p. 413-421.
- Bakshi and Yoon, (1984). Thermo physical properties of bread rolls during baking. *Lebens.-Wiss. u.-Technol*, (17), p. 90–93.
- Besbes, B., Jury, V., Monteau, Y. and Bail, A. (2013). Water vapor transport properties during staling of bread crumb and crust as affected by heating rate. *Food Research International*, 50 (1), p. 10–19.
- Broyart, B. and Trystram, G. (1998). Modelling of heat and mass transfer phenomena and quality changes during continuous biscuit baking using both. *Food and Bio products Processing*, 81 (4), p. 316–326.
- Choi, Y. and Okis, M. R. (1985). In *food Engineering and Process Application*, (1), London: (n.p.)
- Collison, R. (1968). **Starch retrogradation**. In *Proceeding of the starch and it derivatives*, London: Chapman and Hall
- Feyissa, A. H., Gernaeyb, K.V., Ashokkmar, S. and Nissena, A. J. (2011). **Modelling of coupled heat and mass transfer during a contact baking process**. *Journal of Food Engineering*, (106), p. 228-235.

- Gan, M., Regev, R., Asher, L. and Dani, E. (2011). **Adapted thermal imaging for the development of postharvest precision steam-disinfection technology for carrots.** *Postharvest Biology and Technology*, (59), p. 256-271.
- Gonzalez and Woods, (2002). **Image Enhancement Introduction. Digital Image Processing**, (2nd ed). (n.p.)
- Gowen, A. A., Tiwaria, B. K., Cullenb, P.J., McDonnella, K. and Donnella, C.P. (2010). **Application of thermal imaging in food quality and safety assessment.** *Trends in Food Science & Technology*, 26 (4), p. 190-200.
- Gupta, T. R., (1993). **Thermal conductivity of Indian unleavened flat bread (Chapatti) at various stages of baking.** *Journal of Food Process Engineering*, (16), p. 227–235.
- Hadiyantoa, A. A., Stratena, G. V., Boomb, R. M., Esveldb, D. C. and Boxtela, A. J. (2007). **Quality prediction of bakery product in the initial phase of process design.** *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 8 (2), p. 285-298.
- Incropera, F. P., DeWitt, D. D., Bergman, T. L. and Lavine, A. S. (2007). **Fundamentals of heat and mass transfer.** (6th ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Jimenez, R. A., Hernandez, G. E. and Villanova, B. G. (2000). **Browning indicators in bread.** *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48 (9), p. 4176–4181.
- Kress, E. R. and Brime, C. J. (2005). **Instrumentation and Sensors for the Food Industry** (2nd edition), William Andrew Publishing, Noyes
- Lodia, A. (2007). **Physical properties and water state changes during storage in soy bread with and without almond.** *Food Chemistry*, 110 (3), p. 554–561.
- Madamba, B., et al. (1994). **Bulk density porosity and resistance to airflow of garlicnslices.** *Drying Technology*, (12), p. 937-954.
- Mandala, I., Karabela, D. and Kostaropoulos, A. (2007). **Physical properties of breads containing hydrocolloids stored at low temperature. I. Effect of chilling.** *Food Hydrocolloids*, 21 (8), p. 1397–1406.
- Manuela, W., Ambrogina, P. and Mara, L. (2012). **The role of buckwheat and HPMC on the bread making properties of some commercial gluten-free bread mixtures.** *Food Hydrocolloids*, (30), p. 393–400.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Maroulis, Z. B., Kiranoudis, C. T. and Marinos, K. D. (1991). **Simultaneous estimation of heat and mass transfer coefficients in externally controlled drying.** Journal of Food Engineering, (14), p. 241–255.
- Melike, S., et al. (2006). **Simultaneous heat and mass transfer simulation applied to convective oven cup cake baking.** Journal of Food Engineering, (83), p. 463-474.
- Meyer, M.T., Campagnolo, Enzo. R., Johnson, R., Karpatia, A. B., Rubinb, C. S. and Kolpinc, D. W., (1999). **Antimicrobial residues in animal waste and water resources proximal to large-scale swine and poultry feeding operations.** Science of the total environment, 299 (3), p. 89–95.
- Miles, M. J. (1983). **Calculation of thermo physical properties of foods,** London: (n.p.).
- Miles, M. J., Morris, V. J., Orford, P. D. and Ring, S. G. (1985). **The role of amylose and amylopectin in the gelation and retrogradation of starch,** p. 135-271.
- Mohsenin, N. N. (1980). **Thermal Properties of Foods and Agricultural Materials.** Gordon and Breach, London: (n.p.)
- Moisture in Animal Feed. (2007). **Official Methods of Analysis. Association of Official Analytical Chemists,** (15th ed).
- Morrison, W. R. and Laignelet, B. (1983). **An improved colorimetric procedure for determining apparent and total amylose in cereal and other starches.** Journal of Cereal Science, (1), p. 9-20.
- Purlis, E. and Salvadori, V. O. (2007). **Bread browning kinetics during baking.** Journal of Food Engineering, (80), p. 1107-1115.
- Purlis, E. and Salvadori, V. O. (2009). **Modelling the browning of bread during baking.** Food Research International, (42), p. 865-870.
- Purlis, E. (2009). **Browning develops in bakery product.** Journal of Food Engineering, (99), p. 239-249.
- Pyler, D. L. (1988). **Baking science and technology.** Sosland: Merriam, (2), p. 850–910.
- Pyle, D. L. (2005). **Crumpet Structure Experimental and Modelling Studies.** School

เอกสารนี้เป็นเอกสารของ The University of Reading อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Rahman, M. S., Perera, O. C., Chen, X. D., Driscoll, R. H. and Potluri, P. L. (1996). **Density, shrinkage and porosity of calamari mantle meat during air drying in a cabinet dryer as a function of water content.** *Journal of Food Engineering*, (35), p. 57-63.
- Rao, D. G. (2005). **Engineering properties of food.** Taylor and Francis, p. 738.
- Rao, D. G. (2010). **Fundamentals of Food Engineering.** Baba Barkha Nath, p. 203-204.
- Ruben, Z. and Alain, L. (2009). **Assessment of thermal conductivity as a function of porosity in bread dough during proving.** *Food and Bio products Processing*, 87 (1), p. 17-22.
- Sablain, S. (2002). **Neural networks for predicting thermal conductivity of bakery products.** *Journal of Food Engineering*, 52 (3), p. 299-304.
- Therdthai, N., Zhou, W. and Adamezak, T. (2002). **Optimisation of temperature profile in bread baking.** *Journal of Food Engineering*, 55 (1), p. 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*, 65 (4), p. 543-550.
- Vanina, F. M., Lucasa, T. and Trystramc, G. (2009). **Crust formation and its role during bread baking.** *Trends in Food Science & Technology*, (20), p. 333-343.
- Wood, T. (1973). **The determination of the effective shear rate in the Brabender viscograph and in other systems of complex geometry.** (25), p. 89-91.
- Zanoni, C. Peri and Gianotti, R. (1994). **Determination of thermal Diffusivity of Bread as a Function of Porosity.** *Journal of Food Engineering*, 26 (1994), p. 497-510.
- Zanoni, C. P. and Gianotti, R. (1994). **Study of the bread baking process II.** *Journal of Food Engineering*, (23), p. 321-36.
- Zanoni, B., Peri, C. and Gianotti, R. (1995). **Determination of the thermal diffusivity of bread as a function of porosity.** *Journal of Food Engineering*, 26 (4), p. 497-510.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 แสดงข้อมูลความชื้น

T _{set} 145°C									
เวลา (นาทึ)	การทดลองครั้งที่ 1			การทดลองครั้งที่ 2			การทดลองครั้งที่ 3		
	น้ำหนักก่อน	น้ำหนักหลัง	%ความชื้น	น้ำหนักก่อน	น้ำหนักหลัง	%ความชื้น	น้ำหนักก่อนอบ	น้ำหนักหลังอบ	%ความชื้น
	อบ(g)	อบ(g)		อบ(g)	อบ(g)		(g)	(g)	
0	-	-	55.11	-	-	55.11	-	-	55.11
5	3.91	1.86	52.47	4.33	2.09	51.67	4.12	1.98	52.07
10	3.15	1.53	51.25	4.40	2.18	50.40	3.77	1.86	50.82
15	3.84	1.92	50.10	4.35	2.21	49.09	4.09	2.06	49.60
20	3.80	2.02	46.92	4.40	2.25	48.88	4.10	2.13	47.90

T _{set} 165°C									
เวลา (นาทึ)	การทดลองครั้งที่ 1			การทดลองครั้งที่ 2			การทดลองครั้งที่ 3		
	น้ำหนักก่อน	น้ำหนักหลัง	%ความชื้น	น้ำหนักก่อน	น้ำหนักหลัง	%ความชื้น	น้ำหนักก่อนอบ	น้ำหนักหลังอบ	%ความชื้น
	อบ(g)	อบ(g)		อบ(g)	อบ(g)		(g)	(g)	
0	-	-	55.11	-	-	55.11	-	-	55.11
5	4.33	2.10	51.38	4.08	2.02	50.50	4.20	2.06	50.94
10	4.36	2.20	49.51	4.29	2.18	49.16	4.33	2.19	49.33
15	4.31	2.30	46.70	4.37	2.28	47.88	4.34	2.29	47.29
20	4.27	2.33	45.49	4.21	2.37	43.71	4.24	2.35	44.60

ตารางที่ ก.2 แสดงข้อมูลเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนัก

T _{set} 145°C									
เวลา (นาที)	การทดลองครั้งที่ 1			การทดลองครั้งที่ 2			การทดลองครั้งที่ 3		
	M _o (g)	M _f (g)	W _L (%)	M _o (g)	M _f (g)	W _L (%)	M _o (g)	M _f (g)	W _L (%)
0	44.80	44.80	-	44.13	44.13	-	44.47	44.47	-
5	43.52	42.58	2.16	42.97	39.83	7.31	43.25	41.21	4.73
10	43.28	40.26	6.98	43.27	37.62	13.06	43.28	38.94	10.02
15	43.20	36.98	14.40	42.07	36.26	13.81	42.64	36.62	14.10
20	42.71	35.43	17.05	44.50	35.74	19.69	43.61	35.59	18.37

T _{set} 165°C									
เวลา (นาที)	การทดลองครั้งที่ 1			การทดลองครั้งที่ 2			การทดลองครั้งที่ 3		
	M _o (g)	M _f (g)	W _L (%)	M _o (g)	M _f (g)	W _L (%)	M _o (g)	M _f (g)	W _L (%)
0	44.84	44.84	-	44.72	44.72	-	44.78	44.78	-
5	43.34	41.08	5.21	42.73	40.57	5.05	43.04	40.83	5.13
10	43.56	38.96	10.56	43.18	39.33	8.92	43.37	39.15	9.74
15	43.12	35.98	16.56	43.66	36.16	17.18	43.39	36.07	16.87
20	43.25	35.29	18.40	43.14	34.66	19.66	43.20	34.98	19.03

ตารางที่ ก.3 แสดงข้อมูลความพรุน

T _{set} 145°C												
เวลา (นาที)	การทดลองครั้งที่ 1				การทดลองครั้งที่ 2				การทดลองครั้งที่ 3			
	h (cm)	V _{ก่อน} (cm ³)	V _{หลัง} (cm ³)	ความ พรุน	h (cm)	V _{ก่อน} (cm ³)	V _{หลัง} (cm ³)	ความ พรุน	h (cm)	V _{ก่อน} (cm ³)	V _{หลัง} (cm ³)	ความ พรุน
0	1.00	41.83	41.83	0.00	1.00	41.83	41.83	0.00	1.00	41.83	41.83	0.00
5	1.45	41.83	60.66	0.31	1.45	41.83	60.66	0.31	1.40	41.83	58.57	0.29
10	1.60	41.83	66.93	0.38	1.65	41.83	69.02	0.39	1.60	41.83	66.93	0.38
15	1.65	41.83	69.02	0.39	1.70	41.83	71.12	0.41	1.65	41.83	69.02	0.39
20	1.70	41.83	71.12	0.41	1.70	41.83	71.12	0.41	1.65	41.83	69.02	0.39

T _{set} 165°C												
เวลา (นาที)	การทดลองครั้งที่ 1				การทดลองครั้งที่ 2				การทดลองครั้งที่ 3			
	h (cm)	V _{ก่อน} (cm ³)	V _{หลัง} (cm ³)	ความ พรุน	h (cm)	V _{ก่อน} (cm ³)	V _{หลัง} (cm ³)	ความ พรุน	h (cm)	V _{ก่อน} (cm ³)	V _{หลัง} (cm ³)	ความ พรุน
0	1.00	41.83	41.83	0.00	1.00	41.83	41.83	0.00	1.00	41.83	41.83	0.00
5	1.60	41.83	66.93	0.38	1.70	41.83	71.12	0.41	1.55	41.83	64.84	0.35
10	1.80	41.83	75.30	0.44	1.90	41.83	79.48	0.47	1.70	41.83	71.12	0.41
15	1.85	41.83	77.39	0.46	1.90	41.83	79.48	0.47	1.80	41.83	75.30	0.44
20	1.95	41.83	81.57	0.49	2.10	41.83	87.85	0.52	1.80	41.83	75.30	0.44

ตารางที่ ก.4 แสดงข้อมูลความหนาแน่น

T _{set} 145 °C									
เวลา (นาที)	การทดลองครั้งที่ 1			การทดลองครั้งที่ 2			การทดลองครั้งที่ 3		
	Mass (g)	Volume (cm ³)	Density (kg/m ³)	Mass (g)	Volume (cm ³)	Density (kg/m ³)	Mass (g)	Volume (cm ³)	Density (kg/m ³)
0	44.80	41.83	1070.93	44.13	41.83	1054.92	44.51	41.83	1064.00
5	40.48	60.66	667.36	40.27	60.66	663.89	40.93	58.57	698.87
10	40.88	66.93	610.77	39.74	69.02	575.74	41.23	66.93	616.00
15	38.68	69.02	560.39	39.62	71.12	557.12	41.58	69.02	602.40
20	37.88	71.12	532.65	38.96	71.12	547.84	38.95	69.02	564.30

T _{set} 165 °C									
เวลา (นาที)	การทดลองครั้งที่ 1			การทดลองครั้งที่ 2			การทดลองครั้งที่ 3		
	Mass (g)	Volume (cm ³)	Density (kg/m ³)	Mass (g)	Volume (cm ³)	Density (kg/m ³)	Mass (g)	Volume (cm ³)	Density (kg/m ³)
0	44.84	41.83	1071.89	44.72	41.83	1069.02	44.42	41.83	1061.85
5	39.45	66.93	589.40	38.42	71.12	540.25	36.83	64.84	568.01
10	36.73	75.30	487.79	40.63	79.48	511.18	35.03	71.12	492.52
15	35.47	77.39	458.33	37.21	79.48	468.16	37.78	75.30	501.73
20	31.59	81.57	387.26	35.18	87.85	400.46	35.74	75.30	474.64

ตารางที่ ก.5 แสดงข้อมูลความจุความร้อนจำเพาะ

T _{set} 145 °C									
	เวลา (นาที)	T _{top} (°C)	T _{bottom} (°C)	T _{เฉลี่ย} (°C)	water	protein	fat	carbohy drates	C _p (J/kg·K)
การ ทดลอง ครั้งที่ 1	0	30.00	30.00	30.00	4178.40	2043.29	2023.00	1602.33	3091.39
	5	59.27	124.34	91.81	4213.98	2108.12	2075.69	1678.91	3143.40
	10	56.83	141.61	99.22	4221.06	2115.22	2079.55	1685.04	3150.06
	15	75.71	150.16	112.94	4235.74	2127.99	2085.29	1694.68	3162.61
	20	72.82	155.00	113.91	4236.86	2128.87	2085.63	1695.28	3163.51
การ ทดลอง ครั้งที่ 2	0	30.00	30.00	30.00	4178.40	2043.29	2023.00	1602.33	3091.39
	5	58.82	117.44	88.13	4210.70	2104.54	2073.58	1675.62	3140.13
	10	63.44	132.27	97.86	4219.71	2113.93	2078.88	1683.96	3148.82
	15	77.06	139.07	108.07	4230.29	2123.51	2083.46	1691.51	3158.12
	20	56.22	142.64	99.43	4221.27	2115.42	2079.65	1685.21	3150.24
การ ทดลอง ครั้งที่ 3	0	30.00	30.00	30.00	4178.40	2043.29	2023.00	1602.33	3091.39
	5	56.22	117.79	87.00	4209.72	2103.44	2072.91	1674.58	3139.13
	10	63.13	136.73	99.93	4221.77	2115.90	2079.89	1685.60	3150.70
	15	65.89	145.78	105.84	4227.88	2121.44	2082.54	1689.97	3156.07
	20	70.32	150.76	110.54	4233.03	2125.79	2084.42	1693.15	3160.39
T _{set} 165 °C									
	เวลา (นาที)	T _{top} (°C)	T _{bottom} (°C)	T _{เฉลี่ย} (°C)	water	protein	fat	carbohy drates	C _p (J/kg·K)
การ ทดลอง ครั้งที่ 1	0	30.00	30.00	30.00	4178.40	2043.29	2023.00	1602.33	3091.39
	5	55.86	98.24	77.05	4201.69	2093.55	2066.44	1664.74	3130.41
	10	68.18	103.32	85.75	4208.65	2102.21	2072.15	1673.41	3138.03
	15	74.08	116.00	95.04	4217.00	2111.24	2077.44	1681.66	3146.29
	20	78.62	129.13	103.87	4225.81	2119.60	2081.70	1688.56	3154.28
การ ทดลอง ครั้งที่ 2	0	30.00	30.00	30.00	4178.40	2043.29	2023.00	1602.33	3091.39
	5	58.87	119.75	89.31	4211.74	2105.70	2074.27	1676.70	3141.18
	10	67.12	139.25	103.18	4225.09	2118.96	2081.39	1688.06	3153.65
	15	79.54	153.08	116.31	4239.67	2131.05	2086.43	1696.70	3165.75
	20	83.20	158.37	120.79	4245.07	2135.06	2087.77	1699.18	3169.94
การ ทดลอง ครั้งที่ 3	0	30.00	30.00	30.00	4178.40	2043.29	2023.00	1602.33	3091.39
	5	54.03	137.28	95.65	4217.58	2111.82	2077.76	1682.17	3146.84
	10	74.87	152.93	113.90	4236.85	2128.86	2085.63	1695.27	3163.50
	15	73.12	162.14	117.63	4241.24	2132.24	2086.84	1697.46	3166.98
	20	82.94	163.23	123.09	4247.93	2137.11	2088.38	1700.37	3172.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.6 แสดงข้อมูลสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

$T_{set} 145^{\circ}C$								
	เวลา (นาที)	$T_{เฉลี่ย}$ ($^{\circ}C$)	k_w ($W/m \cdot K$)	k_{air} ($W/m \cdot K$)	ความ พรุน	M_c	Y_w	k ($W/m \cdot K$)
การ ทดลอง ครั้งที่ 1	0	303.00	0.62	0.03	0.00	0.55	0.36	0.219
	5	364.81	0.68	0.03	0.31	0.52	0.34	0.243
	10	372.22	0.68	0.03	0.38	0.51	0.34	0.242
	15	385.94	0.69	0.03	0.39	0.50	0.33	0.241
	20	386.91	0.69	0.03	0.41	0.47	0.32	0.233
การ ทดลอง ครั้งที่ 2	0	303.00	0.62	0.03	0.00	0.55	0.36	0.219
	5	361.13	0.67	0.03	0.31	0.52	0.34	0.238
	10	370.86	0.68	0.03	0.39	0.50	0.34	0.239
	15	381.07	0.68	0.03	0.41	0.49	0.33	0.236
	20	372.43	0.68	0.03	0.41	0.49	0.33	0.235
การ ทดลอง ครั้งที่ 3	0	303.00	0.62	0.03	0.00	0.55	0.36	0.219
	5	360.00	0.67	0.03	0.29	0.52	0.34	0.239
	10	372.93	0.68	0.03	0.38	0.51	0.34	0.240
	15	378.84	0.68	0.03	0.39	0.50	0.33	0.237
	20	383.54	0.68	0.03	0.39	0.48	0.32	0.233
$T_{set} 165^{\circ}C$								
	เวลา (นาที)	$T_{เฉลี่ย}$ ($^{\circ}C$)	k_w ($W/m \cdot K$)	k_{air} ($W/m \cdot K$)	ความ พรุน	M_c	Y_w	k ($W/m \cdot K$)
การ ทดลอง ครั้งที่ 1	0	303.00	0.62	0.03	0.00	0.55	0.36	0.219
	5	350.05	0.67	0.03	0.38	0.51	0.34	0.236
	10	358.75	0.67	0.03	0.44	0.50	0.33	0.235
	15	368.04	0.68	0.03	0.46	0.47	0.32	0.229
	20	376.87	0.68	0.03	0.49	0.45	0.31	0.227
การ ทดลอง ครั้งที่ 2	0	303.00	0.62	0.03	0.00	0.55	0.36	0.219
	5	362.31	0.67	0.03	0.41	0.51	0.34	0.238
	10	376.18	0.68	0.03	0.47	0.49	0.33	0.238
	15	389.31	0.68	0.03	0.47	0.48	0.32	0.236
	20	393.79	0.68	0.03	0.52	0.44	0.30	0.224
การ ทดลอง ครั้งที่ 3	0	303.00	0.62	0.03	0.00	0.55	0.36	0.219
	5	368.65	0.68	0.03	0.35	0.51	0.34	0.239
	10	386.90	0.68	0.03	0.41	0.49	0.33	0.238
	15	390.63	0.68	0.03	0.44	0.47	0.32	0.233
	20	396.09	0.68	0.03	0.44	0.45	0.31	0.225

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.7 แสดงข้อมูลสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน

สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนแพนเค้ก

อุณหภูมิจากกล้อง TI (°C)	ϵ	อุณหภูมิจากเทอร์โมคัปเปิล (°C)	อุณหภูมิ Background (T _{BG} : °C)
44.26	0.89	44.12	30
46.06	0.90	45.94	30
85.89	0.91	86.07	30
86.50	0.89	86.53	30
87.21	0.89	87.07	30
90.11	0.93	90.26	30
90.31	0.90	90.24	30
90.39	0.91	90.14	30
90.79	0.91	90.70	30
91.25	0.91	91.12	30
94.48	0.88	94.79	30
97.00	0.86	97.04	30
98.76	0.93	98.51	30

สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนแป้งแพนเค้ก

อุณหภูมิจากกล้อง TI (°C)	ϵ	อุณหภูมิจากเทอร์โมคัปเปิล (°C)	อุณหภูมิ Background (T _{BG} : °C)
11.52	0.88	11.66	30
11.88	0.90	11.88	30
12.12	0.88	12.14	30
12.09	0.87	12.19	30
12.97	0.87	13.01	30
13.13	0.88	13.25	30
13.69	0.88	13.01	30
13.88	0.88	13.67	30
14.08	0.89	14.07	30
14.96	0.87	15.03	30
15.16	0.87	15.15	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.8 แสดงข้อมูลการบันทึกอุณหภูมิจากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตำแหน่ง A ที่ T_{set} เท่ากับ 145°C และ 165°C

เวลา (s)	การทดลอง		แบบจำลอง	
	$T_A(145)^{\circ}\text{C}$	$T_A(165)^{\circ}\text{C}$	$T_{MA}(145)^{\circ}\text{C}$	$T_{MA}(165)^{\circ}\text{C}$
0	36.13	34.30	35.00	35.00
30	34.42	34.50	35.16	35.08
60	33.54	33.20	35.89	35.65
90	33.16	32.90	37.52	37.21
120	37.31	40.30	40.05	39.86
150	43.50	43.20	40.50	40.09
180	44.21	47.50	41.58	41.63
210	49.09	51.60	43.82	44.24
240	51.68	52.70	46.41	47.25
270	53.62	53.80	49.07	50.42
300	56.54	56.60	51.70	53.61
330	59.80	56.20	54.25	56.71
360	61.79	59.20	56.70	59.60
390	63.72	62.70	59.05	62.22
420	66.32	63.10	61.29	64.55
450	68.23	64.60	63.43	66.64
480	70.88	66.90	65.46	68.53
510	73.38	70.30	67.37	70.26
540	74.88	70.50	69.12	71.86
570	76.15	71.50	70.69	73.36
600	77.68	73.10	72.10	74.76
630	79.02	74.40	73.37	76.08
660	79.65	75.20	74.51	77.33
690	80.56	76.10	75.52	78.51
720	80.96	78.00	76.44	79.58
750	81.67	77.30	77.26	80.50
780	82.24	79.20	77.99	81.28
810	82.33	80.50	78.62	81.94
840	82.52	80.20	79.19	82.49
870	82.46	80.10	79.69	82.90
900	82.45	80.40	80.12	83.23
930	82.44	81.80	80.49	83.50
960	82.47	81.20	80.80	83.72
990	82.53	81.60	81.07	83.92
1020	82.62	81.80	81.24	84.10
1050	82.62	81.40	81.47	84.26
1080	82.67	81.50	81.68	84.41
1110	82.79	81.60	81.88	84.55
1140	82.77	80.90	82.06	84.68
1170	82.73	81.20	82.23	84.80
1200	82.72	81.40	82.39	84.92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น

ตารางที่ ก.9 แสดงข้อมูลการบันทึกอุณหภูมิจากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตำแหน่ง B ที่ T_{set} เท่ากับ 145°C และ 165°C

เวลา (s)	การทดลอง		แบบจำลอง	
	$T_B(145)^{\circ}\text{C}$	$T_B(165)^{\circ}\text{C}$	$T_{MB}(145)^{\circ}\text{C}$	$T_{MB}(165)^{\circ}\text{C}$
0	35.35	34.58	35.11	35.00
30	36.20	47.54	36.90	36.21
60	38.60	63.08	40.79	40.11
90	42.90	66.10	45.69	45.64
120	50.10	69.74	50.76	51.61
150	62.23	71.97	55.52	57.05
180	66.31	73.42	59.64	61.59
210	66.10	75.71	62.97	65.52
240	67.52	77.66	65.79	69.06
270	69.55	78.61	68.34	72.34
300	71.99	80.09	70.70	75.29
330	72.40	80.83	72.91	77.75
360	74.18	83.35	75.01	79.71
390	75.93	84.13	77.00	81.30
420	77.39	85.44	78.88	82.77
450	78.10	86.23	80.68	84.17
480	78.19	87.53	82.38	85.51
510	79.71	88.45	83.73	86.80
540	80.96	88.74	84.84	88.04
570	81.65	89.34	85.86	89.21
600	82.45	89.70	86.77	90.34
630	83.89	90.98	87.58	91.40
660	85.09	91.60	88.29	92.42
690	86.20	92.37	88.95	93.39
720	86.26	93.18	89.59	93.72
750	87.41	92.93	90.13	94.18
780	88.36	93.27	90.51	94.52
810	88.70	93.91	90.86	94.88
840	88.70	93.51	91.28	95.11
870	89.25	93.79	91.51	95.02
900	90.07	94.50	91.71	95.32
930	91.30	94.96	91.89	95.27
960	91.22	95.14	92.07	95.57
990	91.87	95.05	92.24	95.52
1020	92.55	95.95	92.36	95.82
1050	92.50	94.21	92.52	95.76
1080	92.38	95.25	92.68	96.05
1110	92.92	95.00	92.83	95.99
1140	93.20	95.14	92.97	96.27
1170	93.10	95.31	93.11	96.19
1200	93.80	95.60	93.24	96.46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.10 แสดงข้อมูลการบันทึกอุณหภูมิจากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ตำแหน่ง C ที่ T_{set} เท่ากับ 145°C และ 165°C

เวลา (s)	การทดลอง		แบบจำลอง	
	$T_C(145)^{\circ}\text{C}$	$T_C(165)^{\circ}\text{C}$	$T_{MC}(145)^{\circ}\text{C}$	$T_{MC}(165)^{\circ}\text{C}$
0	35.90	35.16	35.43	35.00
30	43.68	35.37	40.06	38.61
60	47.30	56.89	47.25	46.55
90	55.20	64.05	54.44	55.23
120	60.00	63.14	60.84	63.02
150	73.26	66.03	66.34	69.06
180	74.24	75.92	70.69	73.87
210	75.86	78.34	73.80	77.89
240	78.07	81.10	76.33	81.36
270	80.06	83.61	78.58	84.46
300	80.86	85.55	80.65	86.81
330	82.36	87.52	82.57	88.70
360	84.16	89.13	84.38	89.62
390	82.08	90.20	86.09	90.45
420	84.91	91.56	87.70	91.39
450	84.57	92.11	89.23	92.39
480	86.70	92.60	90.69	93.41
510	88.06	93.60	91.51	94.42
540	89.05	94.53	91.93	95.42
570	90.04	95.37	92.70	96.38
600	89.47	95.30	93.19	97.31
630	90.29	96.03	93.59	98.21
660	90.08	96.31	94.01	99.06
690	90.20	97.24	94.46	99.88
720	90.65	97.52	94.93	99.41
750	92.56	97.89	95.39	98.90
780	91.88	98.54	95.35	99.00
810	91.91	98.48	95.76	99.22
840	91.53	98.46	95.91	100.06
870	91.21	98.44	95.91	98.90
900	91.13	99.01	95.96	100.05
930	92.51	99.33	96.04	99.00
960	92.49	99.42	96.15	100.20
990	93.11	99.44	96.27	99.17
1020	93.77	99.01	96.35	100.38
1050	93.59	99.44	96.48	99.35
1080	93.55	99.68	96.60	100.56
1110	94.27	99.71	96.72	99.53
1140	94.19	99.70	96.84	100.74
1170	94.34	99.68	96.95	99.70
1200	94.01	99.59	97.06	100.90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.11 แสดงข้อมูลการบันทึกอุณหภูมิจากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
ตำแหน่ง D ที่ T_{set} เท่ากับ 145°C และ 165°C

เวลา (s)	การทดลอง		แบบจำลอง	
	$T_D(145) (^{\circ}\text{C})$	$T_D(165) (^{\circ}\text{C})$	$T_{MD}(145) (^{\circ}\text{C})$	$T_{MD}(165) (^{\circ}\text{C})$
0	35.01	35.10	35.00	35.57
30	43.42	45.20	45.23	33.36
60	56.32	66.80	59.43	65.00
90	65.72	76.07	71.21	75.85
120	72.66	80.94	79.84	85.65
150	78.04	82.83	85.23	87.71
180	82.37	84.21	89.53	89.28
210	85.34	87.14	93.11	90.33
240	86.92	88.77	96.17	91.66
270	88.08	90.75	98.82	92.12
300	89.18	92.69	99.35	92.61
330	90.29	93.30	101.31	93.69
360	91.38	95.23	100.10	94.60
390	92.43	95.29	100.25	95.39
420	93.45	96.71	100.73	95.30
450	94.43	96.96	101.36	96.06
480	95.36	97.22	102.06	96.37
510	96.25	97.58	102.80	97.26
540	97.09	97.47	103.54	97.54
570	97.90	98.01	104.27	97.83
600	98.67	97.67	104.98	98.56
630	99.39	97.63	105.67	98.52
660	99.86	97.08	106.34	98.43
690	100.01	97.25	106.97	98.48
720	100.01	98.49	106.99	99.08
750	99.94	98.94	107.17	99.35
780	99.91	97.92	107.25	99.50
810	99.97	97.93	107.38	100.52
840	100.02	96.97	107.42	100.65
870	100.04	97.80	107.17	101.03
900	100.05	98.06	107.33	100.90
930	99.88	98.69	107.18	101.18
960	99.93	98.97	107.40	101.55
990	100.12	98.91	107.28	101.99
1020	99.91	99.21	107.51	102.93
1050	100.07	99.31	107.40	103.48
1080	100.08	98.19	107.65	104.26
1110	100.15	99.73	107.54	105.14
1140	100.02	99.66	107.78	106.39
1170	99.96	99.99	107.67	107.25
1200	99.99	100.05	107.91	108.04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.12 แสดงข้อมูลการบันทึกอุณหภูมิจากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
ตำแหน่ง E ที่ T_{set} เท่ากับ 145°C และ 165°C

เวลา (s)	การทดลอง		แบบจำลอง	
	$T_E(145)^{\circ}\text{C}$	$T_E(165)^{\circ}\text{C}$	$T_{ME}(145)^{\circ}\text{C}$	$T_{ME}(165)^{\circ}\text{C}$
0	35.00	32.22	35.00	31.54
30	89.58	84.49	99.50	79.72
60	105.78	94.54	118.65	124.08
90	113.24	97.07	127.47	128.60
120	117.65	104.21	132.24	128.91
150	120.63	113.61	134.34	129.51
180	122.43	114.42	136.01	131.38
210	122.80	115.12	137.43	133.13
240	123.31	118.81	138.64	134.77
270	123.90	119.80	139.68	134.32
300	124.48	120.47	140.48	135.43
330	125.04	121.92	140.93	136.09
360	125.56	122.30	141.08	138.55
390	126.05	122.94	141.09	140.05
420	126.52	123.28	141.16	141.67
450	126.95	123.41	141.31	143.63
480	127.36	123.61	141.50	143.08
510	127.57	124.24	141.73	143.24
540	127.70	128.97	141.97	144.02
570	127.72	130.94	142.21	145.17
600	127.82	130.69	142.45	146.19
630	127.91	128.61	142.69	146.45
660	127.93	132.60	142.92	146.87
690	127.97	137.76	143.14	145.29
720	128.05	134.13	143.29	146.23
750	128.06	134.25	143.38	146.36
780	128.07	133.10	143.44	145.97
810	127.96	132.26	143.48	145.66
840	128.10	130.22	143.49	146.04
870	128.06	132.65	143.47	144.89
900	128.00	133.70	143.46	144.61
930	127.97	134.29	143.45	143.49
960	127.96	138.90	143.46	143.00
990	127.97	137.93	143.47	142.76
1020	127.99	137.98	143.49	142.25
1050	128.01	136.61	143.51	142.21
1080	128.04	136.85	143.53	142.16
1110	128.07	135.37	143.55	142.06
1140	128.10	136.51	143.58	142.02
1170	128.13	137.83	143.59	141.88
1200	128.16	137.76	143.62	141.78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่งานวิจัยสำหรับใช้งานเพื่อการวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.13 แสดงข้อมูลเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (Mean absolute relative error) การทดสอบระหว่างผลการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่ T_{set} เท่ากับ 145°C และ 165°C

Time (s)	e_{abs} (%) (mean absolute relative error)									
	ตำแหน่ง A		ตำแหน่ง B		ตำแหน่ง C		ตำแหน่ง D		ตำแหน่ง E	
	145°C	165°C	145°C	165°C	145°C	165°C	145°C	165°C	145°C	165°C
0	0.02	0.03	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.02	0.09	0.11
30	0.02	0.02	0.02	0.24	0.08	0.09	0.04	0.36	0.06	0.25
60	0.08	0.06	0.06	0.36	0.00	0.18	0.16	0.09	0.12	0.04
90	0.14	0.12	0.06	0.31	0.01	0.14	0.14	0.06	0.17	0.01
120	0.01	0.07	0.01	0.26	0.01	0.00	0.10	0.07	0.13	0.03
150	0.06	0.08	0.11	0.21	0.09	0.05	0.06	0.03	0.06	0.04
180	0.12	0.06	0.10	0.16	0.05	0.03	0.02	0.00	0.07	0.04
210	0.15	0.10	0.05	0.13	0.03	0.01	0.02	0.03	0.07	0.03
240	0.12	0.09	0.03	0.11	0.02	0.00	0.02	0.05	0.04	0.03
270	0.09	0.06	0.02	0.08	0.02	0.01	0.03	0.07	0.03	0.04
300	0.09	0.05	0.02	0.06	0.00	0.01	0.04	0.07	0.03	0.04
330	0.03	0.05	0.01	0.04	0.00	0.01	0.03	0.08	0.03	0.04
360	0.04	0.04	0.01	0.04	0.00	0.01	0.04	0.06	0.03	0.02
390	0.06	0.02	0.01	0.03	0.05	0.00	0.03	0.05	0.03	0.01
420	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	0.00	0.03	0.06	0.03	0.00
450	0.02	0.02	0.03	0.02	0.06	0.00	0.03	0.06	0.03	0.02
480	0.02	0.03	0.05	0.02	0.05	0.01	0.02	0.06	0.03	0.01
510	0.04	0.04	0.05	0.02	0.04	0.01	0.01	0.06	0.03	0.01
540	0.02	0.04	0.05	0.01	0.03	0.01	0.00	0.06	0.01	0.01
570	0.01	0.04	0.05	0.00	0.03	0.01	0.00	0.07	0.02	0.02
600	0.01	0.04	0.05	0.01	0.04	0.02	0.01	0.07	0.02	0.03
630	0.01	0.04	0.04	0.00	0.04	0.02	0.02	0.07	0.01	0.03
660	0.01	0.03	0.04	0.01	0.04	0.03	0.03	0.08	0.04	0.03
690	0.01	0.03	0.03	0.01	0.05	0.03	0.03	0.09	0.07	0.01
720	0.02	0.02	0.04	0.01	0.05	0.02	0.02	0.08	0.05	0.02
750	0.00	0.01	0.03	0.01	0.03	0.01	0.01	0.08	0.05	0.02
780	0.02	0.01	0.02	0.01	0.04	0.00	0.02	0.08	0.04	0.02
810	0.02	0.00	0.02	0.01	0.04	0.01	0.02	0.07	0.03	0.01
840	0.01	0.00	0.03	0.02	0.05	0.02	0.03	0.07	0.02	0.02
870	0.01	0.01	0.03	0.01	0.05	0.00	0.02	0.06	0.03	0.01
900	0.00	0.01	0.02	0.01	0.05	0.01	0.02	0.06	0.04	0.01
930	0.02	0.01	0.01	0.00	0.04	0.00	0.01	0.06	0.05	0.00
960	0.00	0.02	0.01	0.00	0.04	0.01	0.01	0.06	0.08	0.00
990	0.01	0.02	0.00	0.00	0.03	0.00	0.01	0.05	0.07	0.00
1020	0.01	0.02	0.00	0.00	0.03	0.01	0.01	0.04	0.07	0.01
1050	0.00	0.02	0.00	0.02	0.03	0.00	0.01	0.04	0.06	0.01
1080	0.00	0.02	0.00	0.01	0.03	0.01	0.02	0.03	0.06	0.01
1110	0.00	0.02	0.00	0.01	0.03	0.00	0.00	0.02	0.05	0.01
1140	0.01	0.02	0.00	0.01	0.03	0.01	0.00	0.01	0.06	0.01
1170	0.01	0.03	0.00	0.01	0.03	0.00	0.00	0.00	0.07	0.01
1200	0.01	0.03	0.01	0.01	0.03	0.01	0.00	0.00	0.07	0.01
Σ	1.38	1.44	1.16	2.35	1.42	0.82	1.13	2.51	2.13	1.07
% e_{abs}	3.37	3.51	2.82	5.74	3.47	2.01	2.75	6.13	5.20	2.60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติความชื้นที่ T_{set} เท่ากับ 145°C

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	88.793	4	22.198	71.328	.000
Within Groups	3.112	10	.311		
Total	91.905	14			

ตารางที่ ข.2 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติความชื้นที่ T_{set} เท่ากับ 165°C

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	187.372	4	46.843	171.657	.000
Within Groups	2.729	10	.273		
Total	190.101	14			

ตารางที่ ข.3 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักที่ T_{set} เท่ากับ 145°C

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	304.729	3	101.576	22.953	.000
Within Groups	35.403	8	4.425		
Total	340.132	11			

ตารางที่ ข.4 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักที่ T_{set} เท่ากับ 165°C

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	370.572	3	123.524	421.656	.000
Within Groups	2.344	8	.293		
Total	372.916	11			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.5 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติความพรุนที่ T_{set} เท่ากับ 145°C

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	.019	3	.006	59.385	.000
Within Groups	.001	8	.000		
Total	.020	11			

ตารางที่ ข.6 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติความพรุนที่ T_{set} เท่ากับ 165°C

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	.017	3	.006	6.279	.017
Within Groups	.007	8	.001		
Total	.025	11			

ตารางที่ ข.7 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติความหนาแน่นที่ T_{set} เท่ากับ 145°C

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	543431.806	4	135857.952	376.691	.000
Within Groups	3606.612	10	360.661		
Total	547038.418	14			

ตารางที่ ข.8 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติความหนาแน่นที่ T_{set} เท่ากับ 165°C

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	833101.244	4	208275.311	295.548	.000
Within Groups	7047.097	10	704.710		
Total	840148.341	14			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในมหาวิทยาลัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.9 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติความจุกความร้อนจำเพาะที่ T_{set} เท่ากับ 145°C

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	9651.164	4	2412.791	184.939	.000
Within Groups	130.464	10	13.046		
Total	9781.627	14			

ตารางที่ ข.10 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติความจุกความร้อนจำเพาะที่ T_{set} เท่ากับ 165°C

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	10793.214	4	2698.303	29.082	.000
Within Groups	927.812	10	92.781		
Total	11721.025	14			

ตารางที่ ข.11 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ T_{set} เท่ากับ 145°C

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	.001	4	.000	67.292	.000
Within Groups	.000	10	.000		
Total	.001	14			

ตารางที่ ข.12 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ T_{set} เท่ากับ 165°C

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	.001	4	.000	48.208	.000
Within Groups	.000	10	.000		
Total	.001	14			

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานทางการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ยกเว้นกรณีเหตุผลเบ็ดเสร็จ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มาไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Code MATLAB

```

% Heat Transfer Simulation Program
% Pancake Heat Conduction Calculation
% Last Edited 16.3.2013

clc
clear all
disp (' ')
disp ('-----')
fprintf('Simulation Program for Heat Transfer of Pancake\n')
disp ('-----')
fprintf('Please Enter Initial Data \n')
disp (' ')
% Input from User
Ti = input('Enter Initial Temperature of Pancake (C): ');
disp(' ');
To = input('Enter Surface Temperature of Pancake (C): ');
Tim = input('Enter Time to finish of Pancake Process (min): ');
%%-----%%
% Pancake Properties
% physical properties of pancake
L = 0.01;%meter
dz = L/8;%meter
r = 0.0375;%meter(radius)
p = 1067.58; %kg/m^3(density)
dt = 10;%sec
A = ((pi)*(r)^2); %m^2
V = A*dz;%m^3
% Thermal properties of pancake
k = 0.233;%w/mK (conductivity)
Cp = 3140.53;%j/kgK(specific heat capacity)
hair =8;%w/m^2K (heat transfer coefficients)
al=k/(p*Cp);%alpha
Fo=(al*dt)/(dz^2); %(Furiel Number)
% Energy
qEvp = 45.5;%w(v ทั้งหมด)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาก่อนนั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ยกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

qEvp1 = qEvp/4;%w(หาที่ v แต่ละ Layer)
qAir = (hair*A)*(57.5-35);%w
%-----
Qevp =(((qEvp1)*(a)*(dt))/((V)*(k)));
Conv =(2*(qAir)*(a)*(dt))/((V)*(k));
%-----
% Built Fo Metrix of transient method
i = 8;
j = i;
g = zeros([i j]);
for n=1:j-1;
    g(n,n+1) = -Fo;
    g(n,n) = (1+(2*Fo));
    g(n+1,n) = -Fo;
end
g(i-7,j-7) = 1+(2*Fo);
g(i-7,j-6) = (-Fo);
g(i-6,j-7) = -Fo;
g(i,j-1)=-2*Fo;
g(i-1,j) = -Fo;
g(i,j) = (1+(2*Fo));
clc
disp(g);
%-----
% Initial Temperature Matrix for Pancake
TPi = [Ti;Ti;Ti;Ti;Ti;Ti;Ti;Ti];
%-----
% Set Initial Temperature B.C.
TPo(1,1)=TPi(1,1);
%-----
% Set Counter
n = 0;
%-----ENTER FOR LOOP-----
N1=0;
N2=0;
N11=0;
N2=0;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

N22=0;
N3=0;
N33=0;
N4=0;
N44=0;
N5=0;
N55=0;
N6=0;
N66=0;
N7=0;
N77=0;
N8=0;
N9=0;
N88=0;
for i=1:60000 % Maximum Time Calculation is 60 second
% Count of Calculation Round
    n=n+1;
% Apply Temperature to Boundary Condition for PET Layer
    Ty = (Fo*To);
    Ta = [(Ty);0;0;0;0;0;0];% B.C. vecotr for PET
    Tconv=[0;0;0;0;0;0;Conv];
    Texp = [-Qevp;-Qevp;-Qevp;-Qevp;-Qevp;-Qevp;-Qevp;-Qevp];
    TPo=TPi;
    if TPo(1,1)<100
        TPi(1,1) = TPi(1,1) + Ta(1,1);
        N1=N1+1;
    end
    if (TPo(1,1))>=100
        TPi(1,1) = TPi(1,1) + Ta(1,1) + Texp(1,1);
        N11=N11+1;
    end
    if TPo(2,1)<100
        TPi(2,1) = TPi(2,1) + Ta(2,1);
        N2=N2+1;
    end
    if (TPo(2,1))>=100
        TPi(2,1) = TPi(2,1) + Ta(2,1) + Texp(2,1);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น หากมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

N22=N22+1;
end
if TPo(3,1)<100
  TPi(3,1) = TPi(3,1) + Ta(3,1);
  N3=N3+1;
end
if (TPo(3,1)>=100)
  TPi(3,1) = TPi(3,1)+ Ta(3,1) + Tevp(3,1);
  N33=N33+1;
end
if TPo(4,1)<100
  TPi(4,1) = TPi(4,1)+ Ta(4,1);
  N4=N4+1;
end
if (TPo(4,1)>=100)
  TPi(4,1) = TPi(4,1)+ Ta(4,1) + Tevp(4,1);
  N44=N44+1;
end
if TPo(5,1)<100
  TPi(5,1) = TPi(5,1)+ Ta(5,1);
  N5=N5+1;
end
if (TPo(5,1)>=100)
  TPi(5,1) = TPi(5,1)+ Ta(5,1) + Tevp(5,1);
  N55=N55+1;
end
if TPo(6,1)<100
  TPi(6,1) = TPi(6,1)+ Ta(6,1);
  N6=N6+1;
end
if (TPo(6,1)>=100)
  TPi(6,1) = TPi(6,1)+ Ta(6,1) + Tevp(6,1);
  N66=N66+1;
end
if TPo(7,1)<100
  TPi(7,1) = TPi(7,1)+ Ta(7,1);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ยกเว้นให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

N7=N7+1;
end
if (TPo(7,1)>=100)
    TPi(7,1) = TPi(7,1)+ Ta(7,1) + Tevp(7,1);
    N77=N77+1;
end
if TPo(8,1)<100
    TPi(8,1) = TPi(8,1)+ Ta(8,1);
    N8=N8+1;
end
if (TPo(8,1)>=40)&&(TPo(8,1)<100)
    TPi(8,1) = TPi(8,1)+ Ta(8,1)+Tevp(8,1)-Tconv(8,1);
    N88=N88+1;
end
if (TPo(8,1)>=100)
    TPi(8,1) = TPi(8,1)+ Ta(8,1)+Tevp(8,1);
    N9=N9+1;
end
%-----Matrix Operation for Pancake Layer-----
[luA,pvtA] = LUfactor(g);
ToutP = LUsolve (luA,TPi,pvtA);
TPo = ToutP';
%-----DATA COLLECTION MODULE-----
% Collecting Pancake Temperatur
for k = 1:8
    for j = 1:n
        ResultA(n,k) = TPo(k,1);
    end
end
%-----
%The result of Program

S2 = TPo(1,1); %Temperature at Time (p+1) of Node 2
S3 = TPo(2,1); %Temperature at Time (p+1) of Node 3
S4 = TPo(3,1); %Temperature at Time (p+1) of Node 4
S5 = TPo(4,1); %Temperature at Time (p+1) of Node 5
S6 = TPo(5,1); %Temperature at Time (p+1) of Node 6

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คิดเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

S7 = TPo(6,1); %Temperature at Time (p+1) of Node 7
S8 = TPo(7,1); %Temperature at Time (p+1) of Node 8
S9 = TPo(8,1); %Temperature at Time (p+1) of Node 9

TPI = TPO;
% Calculating Real Process Time
Time = (dt*n)/60;
% Return Command
if ((Time == Tim))
    break
end
end
% Real Time Progression Presenting
ResultT = ResultA;
for ll = 1:n
    ResultT(ll,9) = To;
end
clc
%-----
%The result of Program
fprintf('Process Time : %-1.3f sec. \n',Time)
disp ( ' ')
fprintf('dT @ Node 1 : %-1.4f C \n',To)
fprintf('dT @ Node 2 : %-1.4f C \n',S2)
fprintf('dT @ Node 3 : %-1.4f C \n',S3)
fprintf('dT @ Node 4 : %-1.4f C \n',S4)
fprintf('dT @ Node 5 : %-1.4f C \n',S5)
fprintf('dT @ Node 6 : %-1.4f C \n',S6)
fprintf('dT @ Node 7 : %-1.4f C \n',S7)
fprintf('dT @ Node 8 : %-1.4f C \n',S8)
fprintf('dT @ Node 9 : %-1.4f C \n',S9)
plot(ResultT);
xlabel('Time (sec)')
ylabel('temperature (C)')

```

title('Function of time as temperature')

legend('Tbot','T2','T3','T4','T5','T6','T7','T8','Ttop',5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คัดแบบลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้