

การศึกษาแบบจำลองการกระจายความร้อนในโดขนมปัง  
ที่ผ่านการให้ความร้อนจากไมโครเวฟด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

A FINITE ELEMENT METHOD FOR THE STUDY OF  
MICROWAVE HEAT DISTRIBUTION MODEL IN BREAD DOUGH

วิศรา ทุโต  
WISARA THUTO

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคณะหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตรการอาหาร

คณะอุตสาหกรรมเกษตร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2554

KMITL-2011-AI-M-053-105

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาแบบจำลองการกระจายความร้อนในโดขนมปัง  
ที่ผ่านการให้ความร้อนจากไมโครเวฟด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

A FINITE ELEMENT METHOD FOR THE STUDY OF  
MICROWAVE HEAT DISTRIBUTION MODEL IN BREAD DOUGH

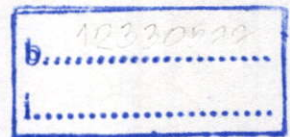


T116798

วิสรา ทูโต

WISARA THUTO

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 116798  
วันเดือนปี 15 ส.ค. 2554



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การอาหาร

คณะอุตสาหกรรมเกษตร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2554

KMITL-2011-AI-M-053-105

**A FINITE ELEMENT METHOD FOR THE STUDY OF  
MICROWAVE HEAT DISTRIBUTION MODEL IN BREAD DOUGH**

**WISARA THUTO**

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE  
OF MASTER OF SCIENCE IN FOOD SCIENCE  
FACULTY OF AGRO-INDUSTRY  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2011**

**KMITL-2011-AI-M-053-105**

**COPYRIGHT 2011**

**FACULTY OF AGRO-INDUSTRY**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาแบบจำลองการกระจายความร้อนในโคขนมปังที่ผ่านการให้ความร้อนจากไมโครเวฟด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ชื่อนักศึกษา

นางสาววิสรา ทูโต

รหัสประจำตัว

52680304

ปริญญา

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิทยาศาสตร์การอาหาร

พ.ศ.

2554

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ดร.กิตติชัย บรรจง

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาการกระจายความร้อนในอาหารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ มุ่งเน้นศึกษาอิทธิพลความเข้มข้นของเกลือที่ระดับ 0.0% 0.2% 0.5% 1.0% และ 1.5% ต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในชิ้นอาหาร โดยใช้โคขนมปังเป็นตัวอย่างในการทดสอบการจำลองพฤติกรรมของการกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นภายในโคขนมปังอาศัยพื้นฐานการวิเคราะห์ปัญหาด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จากโปรแกรม COMSOL™ Multiphysics ซึ่งพบว่าความร้อนเริ่มเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วบริเวณใจกลางของโค แล้วจึงแผ่ขยายออกตามแนวรัศมีจากด้านในสู่ด้านนอกตามลำดับ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ มีลักษณะแปรผันตรงกับเวลา และระดับความเข้มข้นของเกลือในโคขนมปัง โดยผลจากแบบจำลองและผลจากการทดลองนั้นมีลักษณะการกระจายความร้อนและการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่สอดคล้องไปในทิศทางเดียวกัน และผลจากแบบจำลองยังสามารถทำนายอุณหภูมิได้แม่นยำใกล้เคียงกับผลการทดลองอีกด้วย ซึ่งอาจนำแบบจำลองการกระจายอุณหภูมินี้ไปประยุกต์ใช้ในอาหารชนิดอื่นต่อไป

<b>Thesis Title</b>	A FINITE ELEMENT METHOD FOR THE STUDY OF MICROWAVE HEAT DISTRIBUTION MODEL IN BREAD DOUGH
<b>Student</b>	Miss Wisara Thuto
<b>Student ID.</b>	52680304
<b>Degree</b>	Master of Science
<b>Program</b>	Food Science
<b>Year</b>	2011
<b>Thesis Advisor</b>	Dr. Kittichai Banjong

## ABSTRACT

The objective of this project was to study on microwave heat distribution model for food using dough as the test material, focused on the influence of 0.0% 0.2% 0.5% 1.0% and 1.5% NaCl concentration. The simulation of behavior inside the cavity was based on the finite element method analysis with COMSOL<sup>TM</sup> Multiphysics. The results showed the rapid rising of temperature from the center of dough toward its surface. The rising temperature and heat distribution were directly depended on heating time and NaCl concentration in dough. The experimental temperatures and the finite element predicted temperatures exhibited a good fit to each other in all regions. This simulation model can further applied to the other foods.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงและสมบูรณ์ได้ เนื่องจากได้รับความกรุณาเป็นอย่างสูงจาก ดร. กิตติชัย บรรจง ที่ให้เกียรติเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และกรุณามอบความรู้ คำแนะนำ ชี้แนะ ตลอดจนช่วยตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสมบูรณ์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

กราบขอบพระคุณ รศ.ดร. วุฒิชัย นาครักษา รศ.ดร. ระติพร หาเรือนกิจ และผศ.ดร.พอใจ ถามากร ที่ให้เกียรติเป็นคณะกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ และช่วยแก้ไข ตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชา ตลอดจนให้คำแนะนำแก่ข้าพเจ้าตลอดระยะเวลาการศึกษา

วิสรา ทูโต

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง .....	VI
สารบัญภาพ.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1. ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎี และผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1. ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข.....	3
2.2. ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขสำหรับวิเคราะห์ปัญหาการทำความร้อน .....	6
2.3. ไมโครเวฟ.....	7
2.4. หลักการพื้นฐานการทำความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ.....	10
2.5. การทำให้เกิดความร้อนจากพลังงานไดอิเล็กทริก.....	11
2.6. ขนมัน.....	12
2.7. เกลือแกง.....	14
2.8. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	15
บทที่ 3 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	18
3.1. ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	18
3.2. ความเป็นมาของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ .....	19
3.3. ขั้นตอนพื้นฐานของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	19
3.4. ข้อดีและข้อเสียของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	20
3.5. ซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ที่นิยมใช้ในระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	22
3.6. สมการทางคณิตศาสตร์ในระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย.....	22

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 หลักการและวิธีการทดลอง.....	27
4.1. หลักการวิเคราะห์ .....	27
4.2. การวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์.....	27
4.3. การทวนสอบความถูกต้อง.....	37
4.4. การวางแผนการทดลอง และการวิเคราะห์ทางสถิติ.....	39
บทที่ 5 ผลการจำลอง และผลการทดลอง.....	40
5.1. ความแม่นยำของแบบจำลองการกระจายความร้อนในโดชนมปัง ที่ผ่านการให้ความร้อนจากไมโครเวฟด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	40
5.2. การศึกษารูปแบบการกระจายความร้อนในโดชนมปัง ที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ.....	45
5.3. การศึกษาอิทธิพลของระดับความเข้มข้นเกลือและเวลา ต่ออุณหภูมิเฉลี่ยของโดชนมปัง.....	53
บทที่ 6 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	55
บรรณานุกรม.....	56
ภาคผนวก ก .....	59
ภาคผนวก ข .....	74
ภาคผนวก ค .....	78
ประวัติผู้เขียน.....	82

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ค่าพารามิเตอร์วัสดุของเตาอบไมโครเวฟ.....	30
4.2 ค่าคุณสมบัติจำเพาะของแบบจำลองโค.....	30
5.1 การเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างแบบจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์ (FEM) กับการทดลองในห้องปฏิบัติการของโคขนมปัง ที่ระดับความเข้มข้นของเกลือ 0.0%.....	41
5.2 การเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างแบบจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์ (FEM) กับการทดลองในห้องปฏิบัติการของโคขนมปัง ที่ระดับความเข้มข้นของเกลือ 0.2%.....	42
5.3 การเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างแบบจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์ (FEM) กับการทดลองในห้องปฏิบัติการของโคขนมปัง ที่ระดับความเข้มข้นของเกลือ 0.5%.....	42
5.4 การเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างแบบจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์ (FEM) กับการทดลองในห้องปฏิบัติการของโคขนมปัง ที่ระดับความเข้มข้นของเกลือ 1.0%.....	43
5.5 การเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างแบบจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์ (FEM) กับการทดลองในห้องปฏิบัติการของโคขนมปัง ที่ระดับความเข้มข้นของเกลือ 1.5% .....	43
5.6 การเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยของจุดวัดอุณหภูมิตามแนวรัศมี และจุดวัดอุณหภูมิที่ศูนย์กลางของโคขนมปังจากแบบจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์ ที่ระดับความเข้มข้นของเกลือ 0.0% .....	46
5.7 การเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยของจุดวัดอุณหภูมิตามแนวรัศมี และจุดวัดอุณหภูมิที่ศูนย์กลางของโคขนมปังจากแบบจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์ ที่ระดับความเข้มข้นของเกลือ 0.2%.....	47
5.8 การเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยของจุดวัดอุณหภูมิตามแนวรัศมี และจุดวัดอุณหภูมิที่ศูนย์กลางของโคขนมปังจากแบบจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์ ที่ระดับความเข้มข้นของเกลือ 0.5%.....	47
5.9 การเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยของจุดวัดอุณหภูมิตามแนวรัศมี และจุดวัดอุณหภูมิที่ศูนย์กลางของโคขนมปังจากแบบจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์ ที่ระดับความเข้มข้นของเกลือ 1.0%.....	48
5.10 การเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยของจุดวัดอุณหภูมิตามแนวรัศมี และจุดวัดอุณหภูมิที่ศูนย์กลางของโคขนมปังจากแบบจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์ ที่ระดับความเข้มข้นของเกลือ 1.5%.....	48

## สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.6 การศึกษาอิทธิพลของระดับความเข้มข้นเกลือ และเวลาต่ออุณหภูมิเฉลี่ยของโคชนมปัง จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM).....	54

# สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ขั้นตอนการพัฒนา CAE.....	4
2.2 แบบจำลองโหมดของคลื่น TM mode และ TE mode.....	8
2.3 แบบจำลองโหมดของคลื่น TEM mode.....	9
2.4 การเคลื่อนที่ของสารประกอบมีขั้วเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้า.....	11
2.5 โครงสร้างผลึกของเกลือแกง.....	14
3.1 แบบจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์ที่ถูกแบ่งออกเป็นเอลิเมนต์และ โหนด.....	18
4.1 แผนภาพขั้นตอนการวิเคราะห์ปัญหา.....	28
4.2 แบบจำลองของเตาอบไมโครเวฟ.....	31
4.3 แบบจำลองของโคชนมปัง.....	31
4.4 แบบจำลองของโคชนมปังที่ประกอบเข้ากับแบบจำลองของเตาอบไมโครเวฟ.....	32
4.5 แสดงการเมชแบบจำลองของโคชนมปัง.....	33
4.6 แสดงค่าพารามิเตอร์ของเมช.....	33
4.7 แผนภาพขั้นตอนการคำนวณวิเคราะห์ปัญหา.....	34
4.8 ตัวอย่างการแสดงผลของแบบจำลองสามมิติของแบบจำลอง การกระจายความร้อนในโคชนมปัง.....	35
4.9 แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในโคชนมปังที่ถูกตัดแนวขวาง.....	35
4.10 ตัวอย่างการแสดงผลของแบบจำลองสามมิติและค่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ.....	36
4.11 แบบจำลองสามมิติแสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในโคชนมปัง.....	36
4.12 เตาอบไมโครเวฟ หัววัดอุณหภูมิ และเครื่องบันทึกอุณหภูมิที่ติดตั้งเข้าด้วยกัน.....	37
4.13 แสดงตำแหน่งการติดตั้งหัววัดอุณหภูมิภายในเตาอบไมโครเวฟ.....	38
4.13 แสดงตำแหน่งการติดตั้งหัววัดอุณหภูมิภายในเตาอบไมโครเวฟจริง.....	38
5.1 การเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างแบบจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์ (FEM) กับการทดลองในห้องปฏิบัติการของโคชนมปัง ที่ระดับความเข้มข้นของเกลือต่างๆ.....	44
5.2 เปรียบเทียบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของจุดวัดตามแนวรัศมี และจุดวัดที่ศูนย์กลางของโคชนมปังที่ระดับความเข้มข้นเกลือต่างๆ.....	49

## สารบัญญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.3 แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของโคชนมปิ้งที่ความเข้มข้นเกลือ 0.0% ที่ระยะเวลา 0, 1, 2, 3, 4 และ 5 นาที.....	50
5.4 แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของโคชนมปิ้งที่ความเข้มข้นเกลือ 0.2% ที่ระยะเวลา 0, 1, 2, 3, 4 และ 5 นาที.....	50
5.5 แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของโคชนมปิ้งที่ความเข้มข้นเกลือ 0.5% ที่ระยะเวลา 0, 1, 2, 3, 4 และ 5 นาที.....	51
5.6 แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของโคชนมปิ้งที่ความเข้มข้นเกลือ 1.0% ที่ระยะเวลา 0, 1, 2, 3, 4 และ 5 นาที.....	51
5.7 แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของโคชนมปิ้งที่ความเข้มข้นเกลือ 1.5% ที่ระยะเวลา 0, 1, 2, 3, 4 และ 5 นาที.....	52
5.8 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่จุดวัดตามแนวรัศมีของแบบจำลองโคชนมปิ้ง .....	52
5.9 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่จุดวัดที่จุดศูนย์กลางของแบบจำลองโคชนมปิ้ง .....	53
5.10 ความสัมพันธ์ของระดับความเข้มข้นเกลือ และเวลาต่ออุณหภูมิเฉลี่ยของโคชนมปิ้งจาก แบบจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์ (FEM).....	54

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1. ความเป็นมาและความสำคัญ

ในอุตสาหกรรมอาหารพบว่ามี การนำ การให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟมาใช้กันอย่างแพร่หลาย เช่น การนำไมโครเวฟมาใช้ในการทำให้ผลิตภัณฑ์สุก หรือสุกบางส่วน เพื่อช่วยลดระยะเวลาในการผลิต (Ressing *et al.*, 2007) โดยไมโครเวฟจะตอบสนองต่อโมเลกุลชนิดต่างๆ ไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเชิงไดอิเล็กทริกของวัตถุดิบ (Gabriel *et al.*, 1998) โดยค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant :  $\epsilon'$ ) จะแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการจัดเก็บพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า และค่าไดอิเล็กทริคลอสแฟกเตอร์ (dielectric loss factor :  $\epsilon''$ ) จะแสดงถึงความสามารถในการกระจายพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานความร้อนของวัตถุดิบ โดยพบว่าความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า อุณหภูมิ ปริมาณน้ำ และความเข้มข้นของเกลือในวัตถุดิบจะมีผลต่อความสัมพันธ์ของคุณสมบัติเชิงไดอิเล็กทริก และการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก (Rahman, 1995 and Ressing *et al.*, 2007 and Venkatesh *et al.*, 2004) ทั้งนี้เนื่องจากเกลือเป็นวัตถุดิบที่จำพวกค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวนี้จะส่งผลกระทบต่อความสามารถในการจัดเก็บพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าไปเป็นพลังงานความร้อนในอาหารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ ดังนั้นระดับความเข้มข้นของเกลือในอาหารจึงเป็นตัวแปรที่สำคัญตัวแปรหนึ่งต่อการเกิดและการกระจายความร้อน รวมไปถึงระยะเวลาในการเพิ่มอุณหภูมิของอาหาร

ตำแหน่งการเกิดและการกระจายตัวของความร้อนในอาหารที่อยู่ระหว่างกระบวนการให้ความร้อนนั้นเป็นหนึ่งในปัจจัยในการควบคุมคุณลักษณะและคุณภาพของอาหาร โดยการกระจายของความร้อนที่ดีจะช่วยให้อาหารสุกทั่วถึงกัน ช่วยยืดอายุการเก็บรักษา และรวมไปถึงช่วยลดต้นทุนด้านพลังงานในกระบวนการแปรรูปได้ แต่อย่างไรก็ตามการศึกษาเรื่องการกระจายตัวของความร้อนในอาหารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟในปัจจุบันนั้นมีน้อย (Knoerzer *et al.*, 2008) สำหรับในประเทศไทยมีการศึกษาการกระจายตัวของความร้อนในอาหารมีอยู่ในวงจำกัด และโดยทั่วไปมักใช้การทดลองในการหาความเหมาะสมของปริมาณวัตถุดิบและระยะเวลาในกระบวนการแปรรูป ซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองวัตถุดิบและระยะเวลาเป็นอย่างมาก ด้วยเหตุดังกล่าวงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการกระจายตัวของความร้อนในอาหารที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ โดยมุ่งเน้นเรียนรู้อิทธิพลของระดับความเข้มข้นของเกลือแกงที่มีผลต่อการเพิ่มอุณหภูมิ และระยะเวลาในการกระจายตัวของความร้อนในอาหาร โดยใช้โคชนมปังเป็นตัวอย่างในการทดสอบ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารของไทย

## 1.2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อเปรียบเทียบความแม่นยำของแบบจำลองการกระจายตัวของความร้อนในโคชนมปังที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟจากการวิเคราะห์ปัญหาด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม COMSOL<sup>TM</sup> Multiphysics กับผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ
2. เพื่อศึกษารูปแบบการกระจายตัวของความร้อนในโคชนมปังที่ได้รับความร้อนผ่านไมโครเวฟ
3. เพื่อศึกษาอิทธิพลของระดับความเข้มข้นของเกลือแกงที่ 0.0% 0.2% 0.5% 1.0% และ 1.5% ต่อรูปแบบการกระจายตัวของความร้อนในโคชนมปังที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ

## 1.3. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้เกิดความเข้าใจในรูปแบบการกระจายตัวของความร้อนในโคชนมปังที่ได้รับความร้อนผ่านไมโครเวฟ
2. ทำให้ทราบอิทธิพลของระดับความเข้มข้นของเกลือที่มีต่อการกระจายตัวของความร้อนในโคชนมปังที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ
3. สามารถใช้เป็นแนวทางในการศึกษาแบบจำลองการกระจายตัวของความร้อนในตัวอย่างที่มีลักษณะหรือคุณสมบัติคล้ายคลึงกับโคชนมปังได้ เช่น ผลิตภัณฑ์ขนมอบ
4. นำผลที่ได้ไปใช้ในการออกแบบกระบวนการให้ความร้อนแก่อาหารด้วยไมโครเวฟ เช่น สามารถประเมินระยะเวลาที่เหมาะสมในการให้ความร้อนแก่อาหารที่ได้รับความร้อนผ่านไมโครเวฟ เพื่อใช้ในการลดต้นทุนค่าใช้จ่าย และลดการสิ้นเปลืองพลังงาน เป็นต้น

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงความรู้พื้นฐาน, คุณสมบัติ, นิยาม ตลอดจนกระบวนการที่สำคัญต่อ งานวิจัย เช่น ความรู้พื้นฐานของระเบียบวิธีเชิงตัวเลข, พื้นฐานของการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ, สมบัติไดอิเล็กทริก, ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาการทำความร้อนด้วย ไมโครเวฟ, กระบวนการเตรียมโคชนมปัง, วัตถุประสงค์ที่เป็นตัวแปรสำคัญต่อการศึกษาวิจัย ซึ่งในที่นี้ คือ เกลือแกง เป็นต้น เพื่อให้สามารถเข้าใจในคุณสมบัติ, หลักการ และพฤติกรรมที่เกิดขึ้นใน งานวิจัยได้ และได้นำผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องมารวบรวม และเรียบเรียงไว้อย่างย่อ เพื่อใช้ใน การศึกษา, เรียนรู้ และอ้างอิงประกอบการดำเนินงานวิจัย

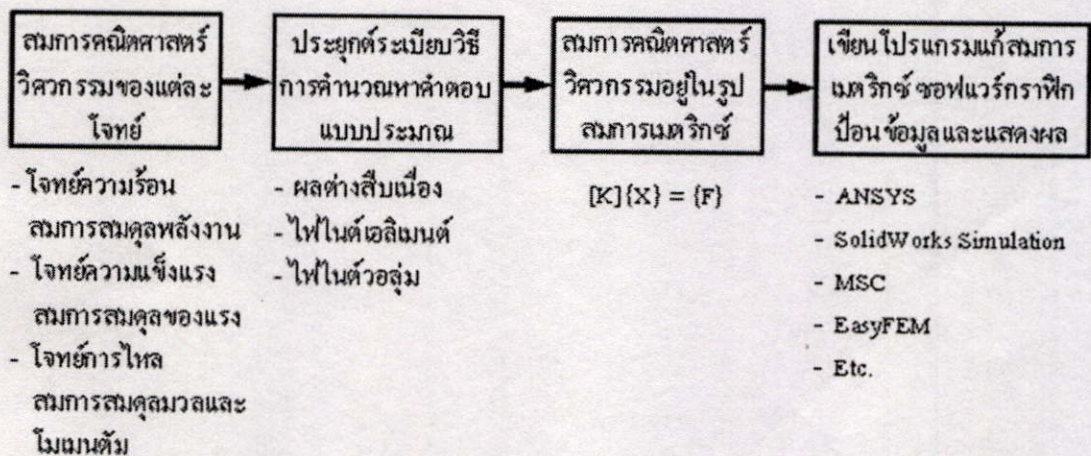
### 2.1. ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

ปัญหาทางคณิตศาสตร์บางอย่างไม่สามารถหาคำตอบได้โดยตรงจากการวิเคราะห์หรือต้อง ใช้เวลานานในการวิเคราะห์ จึงมีความพยายามที่จะใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (numerical method) มา ช่วยในการแก้ปัญหาเพราะสะดวก ง่าย และลดเวลาที่ใช้ได้มาก ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเป็นวิธีการ แก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์ที่ต้องใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณ โดยนำวิธีหรือขั้นตอนการ คำนวณต่างๆ มาเขียน โปรแกรมให้เครื่องคำนวณหาคำตอบออกมา ซึ่งคอมพิวเตอร์จะดำเนินการ ด้วยระบบตัวเลขต่างๆ เช่น เลขไบนารี เลขฐานสิบหก หรือเลขฐานอื่นๆ จึงเป็นที่มาของระเบียบวิธี เชิงตัวเลข วิธีการแก้ปัญหา (algorithms) สามารถใช้ได้กับเครื่องคอมพิวเตอร์ทุกเครื่อง โดยไม่จำกัด หรือบังคับให้ต้องเขียน โปรแกรมในรูปแบบภาษาคอมพิวเตอร์ภาษาใดภาษาหนึ่ง เนื่องจากวิธีการ แก้ปัญหานั้นไม่ขึ้นกับภาษาที่จะนำมาเขียน โปรแกรม แต่ขึ้นกับกระบวนการทางคณิตศาสตร์และ กระบวนการลอจิก โดยสิ่งสำคัญที่จำเป็นต้องใช้คือความเข้าใจหลักการหรือลำดับขั้นตอนการ คำนวณในแต่ละวิธีที่นำมาใช้ ในการศึกษาเกี่ยวกับระเบียบวิธีเชิงตัวเลขนี้เป็นการแก้ปัญหาทาง คณิตศาสตร์เพื่อหาคำตอบ โดยกำหนดลำดับวิธีการแก้ปัญหาเพื่อให้ได้คำตอบ ซึ่งแตกต่างจากการ วิเคราะห์ที่แก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์ออกมาในรูปของสูตรหรือฟังก์ชันซึ่งติดค่าตัวแปรอยู่ เมื่อแทน ตัวแปรด้วยตัวเลขแล้วถึงจะได้คำตอบที่ต้องการ หากเงื่อนไขเปลี่ยนวิธีการวิเคราะห์อาจต้องทำ ตั้งแต่ต้น ส่วนระเบียบวิธีเชิงตัวเลขนั้นจะคำนวณหาคำตอบด้วยตัวเลขชุดใหม่โดยไม่ต้องเริ่มการ วิเคราะห์ตั้งแต่ต้น ซึ่งเป็นความแตกต่างที่แยกวิธีการทางคณิตศาสตร์ออกจากระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (กิตติวุฒิ, 2546)

การศึกษาระเบียบวิธีเชิงตัวเลขนั้นประกอบไปด้วย 2 ส่วนประกอบสำคัญ ส่วนประกอบแรกคือ เนื้อหาขั้นตอนของวิธีการชนิดต่างๆ ที่ต้องศึกษาทำความเข้าใจ และส่วนที่สองคือ ความสามารถในการใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ รวมทั้งความเข้าใจในการใช้ภาษาคอมพิวเตอร์เพื่อเปลี่ยนขั้นตอนของวิธีการชนิดต่างๆ ออกมาเป็นตัวเลข (ปราโมทย์, 2546) การใช้โปรแกรมเพื่อช่วยในการคำนวณในระเบียบวิธีเชิงตัวเลขนี้เปรียบได้กับการสร้างหรือทำงานด้านวิศวกรรมโดยแทนการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ทางฮาร์ดแวร์ด้วยส่วนของซอฟต์แวร์โดยไม่ต้องสร้างฮาร์ดแวร์จริง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีความรู้ในการใช้โปรแกรมเพื่อใช้เป็นเครื่องมือสำหรับการศึกษาระเบียบวิธีเชิงตัวเลข โดยการใช้โปรแกรมและรันโปรแกรมไปพร้อมกับสังเกตว่าทำอย่างไรโปรแกรมจึงจะทำงานได้ตามขั้นตอนที่กำหนดขึ้นได้ จะช่วยให้สามารถเข้าใจวิธีการต่างๆ ได้ง่ายและรวดเร็วขึ้น (กิตติวุฒิ, 2546)

### 2.1.1. คอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณงานวิศวกรรม

คอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณงานวิศวกรรม (computer-aided engineering : CAE) เป็นเครื่องมือหนึ่งที่ช่วยในการหาคำตอบของโจทย์ด้านวิศวกรรมด้วยการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์และช่วยในเรื่องการคำนวณที่ซับซ้อน ระเบียบวิธีการคำนวณหาคำตอบแบบประมาณของโจทย์วิศวกรรมที่ซับซ้อนบนเครื่องคอมพิวเตอร์ได้มีการพัฒนาหลายระเบียบวิธี เช่น ระเบียบวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (finite difference method) ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method) ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม (finite volume method) เป็นต้น ระเบียบวิธีเหล่านี้จะเปลี่ยนสมการทดแทนพฤติกรรมความเป็นจริงของแต่ละโจทย์ให้เป็นสมการคณิตศาสตร์วิศวกรรมที่อยู่ในรูปเมตริกซ์ ( $[K]\{X\} = \{F\}$ ) จากนั้นจึงเขียนโปรแกรมแก้สมการเมตริกซ์โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (numerical method) และเพื่อให้ใช้งานได้สะดวก จึงต้องเขียนซอฟต์แวร์กราฟิกเพื่อป้อนข้อมูลและแสดงผลลัพธ์ได้ง่ายขึ้น (วิโรจน์, มปป.) ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการพัฒนา CAE

(ที่มา : วิโรจน์, มปป.)

### 2.1.2. ระเบียบวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (Finite Difference Method)

ระเบียบวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์มีความง่ายในการเขียนโปรแกรม โดยปัจจุบันระเบียบวิธีนี้ถูกใช้ในการเขียนโปรแกรมเฉพาะทางในบางโปรแกรมเท่านั้น แต่ระเบียบวิธีนี้มีข้อดีคือต้องการโครงตาข่ายที่มีโครงสร้าง (structured mesh) และต้องการการแปลงระบบพิกัดสำหรับรูปทรงหรือเรขาคณิตที่มีความสลับซับซ้อนสูง (จอมภพ, 2549)

### 2.1.3. ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method)

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นระเบียบวิธีที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างของแข็ง แต่ก็สามารถใช้ได้กับของไหลเช่นเดียวกัน (จอมภพ, 2549) ซึ่งจะกล่าวอย่างละเอียดต่อไปในบทที่ 3

### 2.1.4. ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม (Finite Volume Method)

ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มเป็นระเบียบวิธีแบบเก่าหรือเป็นระเบียบวิธีมาตรฐานสำหรับใช้ในการพัฒนาซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์และโปรแกรมสำหรับงานวิจัย โดยสมการควบคุม (governing equation) จะถูกแก้โดยพิจารณาให้เป็นปริมาตรควบคุมแบบเป็นช่วง (discrete control volumes) และอาศัยการอินทิเกรตเพื่อให้ได้ปริมาณที่มีการอนุรักษ์ (จอมภพ, 2549)

### 2.1.5. ระเบียบวิธีบาวนด์ารีเอลิเมนต์ (Boundary Element Method)

ระเบียบวิธีบาวนด์ารีเอลิเมนต์จะพิจารณาขอบเขตที่สนใจ โดยแบ่งออกเป็นโครงตาข่ายพื้นผิว (surface mesh) (จอมภพ, 2549)

ในการแก้ปัญหาที่บรรยายด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย วิธีที่นิยมใช้ คือ วิธีเชิงตัวเลข ในบรรดาวิธีเชิงตัวเลขที่ได้รับความนิยม วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method) เป็นวิธีที่โดดเด่นเหนือวิธีเชิงตัวเลขอื่น เนื่องจากวิธีนี้สามารถแก้ปัญหาค้นหาได้หลากหลายและแก้ปัญหามีโดเมน (domain) ซับซ้อนได้ อย่างไรก็ตามวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีข้อเสียเปรียบตรงที่ต้องการการสร้างเมช (mesh) ภายในโดเมน ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ขั้นตอนเตรียมข้อมูล (pre-processing) เพื่อป้อนสู่โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ยุ่งยากและใช้เวลานาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของปัญหาสามมิติที่มีโดเมนซับซ้อน วิธีเชิงตัวเลขอีกวิธีหนึ่งที่กำลังเป็นที่ยอมรับในความสามารถในการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยเอกพันธ์ (homogeneous) คือ วิธีบาวนด์ารีเอลิเมนต์ (boundary element method) ข้อได้เปรียบของวิธีนี้เทียบกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์คือ วิธีนี้ต้องการเมชที่มีมิติน้อยกว่าเมชสำหรับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์หนึ่งมิติ กล่าวคือวิธีบาวนด์ารีเอลิเมนต์ต้องการเพียงเมชขอบเขต (boundary mesh) ในขณะที่วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ต้องการเมชโดเมน (domain mesh) อย่างไรก็ตามวิธีบาวนด์ารีเอลิเมนต์ก็ประสบปัญหาเช่นเดียวกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในเรื่องของการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยไม่เอกพันธ์ (inhomogeneous) เพราะต้องการเมชโดเมนเช่นกัน

## 2.2. ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขสำหรับวิเคราะห์ปัญหาการทำให้เกิดความร้อนด้วยไมโครเวฟ

การวิเคราะห์พฤติกรรมการกระจายตัวของคลื่นและการถ่ายเทความร้อนภายในวัสดุขณะรับพลังงานไมโครเวฟสามารถทำได้โดยการผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (mathematical model) โดยอาศัยเทคนิคต่างๆ เช่น การทำนายการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในที่ว่างหรือคาวิตี (cavity) ใดๆ อาจใช้วิธีการคำนวณเชิงวิเคราะห์ (analytical solution) ซึ่งวิธีนี้สามารถใช้อธิบายปรากฏการณ์ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในรูปทรงเรขาคณิตอย่างง่ายได้ โดยประเด็นหลักคือ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของปัญหาอยู่ในรูปที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อนและมีพฤติกรรมทางกายภาพที่เป็นไปในลักษณะไม่เป็นเส้นตรง (linearity) แต่ในกรณีที่คาวิตีหรือเตาอบไมโครเวฟมีรูปร่างซับซ้อนหรือภายในคาวิตีมีการบรรจุไหลหรือวัสดุที่มีความสามารถในการดูดซับพลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (วัสดุไดอิเล็กทริก) กรณีนี้สมการแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์จะมีความยุ่งยากซับซ้อนและมีพฤติกรรมทางกายภาพเป็นไปในลักษณะไม่เชิงเส้น (nonlinearity) ทำให้ต้องใช้ระยะเวลาในการคำนวณมาก หรือในบางกรณีอาจจะไม่สามารถใช้วิธีการคำนวณเชิงวิเคราะห์แบบธรรมดาได้เลย ด้วยเหตุดังกล่าวจึงมีการแสวงหาวิธีการและเครื่องมือช่วยคำนวณเพื่อใช้ในการวิเคราะห์และอธิบายปรากฏการณ์จากปัญหาดังกล่าวที่เกิดขึ้น ซึ่งวิธีการที่นิยมใช้กัน ได้แก่ ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (numerical method) และเครื่องมือที่ใช้ก็คือคอมพิวเตอร์ช่วยคำนวณนั่นเอง (ผดุงศักดิ์, 2551)

สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์กระบวนการทำความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟนั้นประกอบไปด้วยส่วนประกอบสองส่วนหลักๆ คือ แบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้า และแบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์ทางความร้อน ซึ่งแบบจำลองทั้งสองส่วนจะอยู่ในรูปของระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (partial differential equation) ประกอบกับชุดสมการเงื่อนไขขอบเขตตามลักษณะเฉพาะของปัญหานั้นๆ ดังนั้นการวิเคราะห์โดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยคำนวณ ผู้วิเคราะห์จะต้องแปลงระบบสมการดังกล่าวให้อยู่ในรูปพีชคณิต (algebraic equation) และทำการเขียนโปรแกรมการคำนวณเพื่อให้คอมพิวเตอร์แสดงผลลัพธ์ต่อไป ซึ่งวิธีการที่กล่าวมานี้ก็คือระเบียบวิธีเชิงตัวเลขนั่นเอง โดยผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขของแบบจำลองสามารถแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมที่เกิดขึ้นภายในคาวิตีหรือบริเวณทำความร้อนได้โดยแสดงให้เห็นรายละเอียดทางกายภาพต่างๆ เช่น ค่าตัวแปรของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และค่ากำลังการดูดซับพลังงาน (microwave power absorption) ภายในไหลหรือวัสดุทำความร้อน โดยที่ค่าดังกล่าวสามารถขยายผลไปสู่การหาค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในวัสดุได้ต่อไป ซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์ดังกล่าวมีความจำเป็นอย่างยิ่งต่อการพัฒนาหรือการออกแบบปรับปรุงระบบทำความร้อนด้วยไมโครเวฟให้เหมาะสมกับการใช้งาน ซึ่งความแม่นยำของผลเฉลยที่ได้จากแบบจำลองเชิงตัวเลขนั้นจะขึ้นอยู่กับข้อกำหนดสมบัติของวัสดุทั้งในส่วนการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าและการวิเคราะห์ทางความร้อนนอกจากนั้นยังขึ้นอยู่กับความละเอียดของ

โครงสร้าง (เช่น ระยะห่างระหว่างโหนดแต่ละโหนดในระเบียบวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (finite difference method: FDM) หรือ ขนาดของเอลิเมนต์ในกรณีที่เป็นระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method: FEM) หรือที่เรียกว่า ความละเอียดของเมช (mesh) ซึ่งความละเอียดของเมช ที่มากขึ้นจะส่งผลให้ผลเฉลยมีความแม่นยำสูงขึ้นหรือให้ผลการวิเคราะห์ที่ดีขึ้น แต่ความละเอียดที่ มากขึ้นจะส่งผลโดยตรงต่อศักยภาพของเครื่องคอมพิวเตอร์และทรัพยากรที่ใช้ (เช่น ใช้ระยะเวลา วิเคราะห์นานขึ้น ใช้พื้นที่หน่วยความจำมากขึ้น ใช้พื้นที่เก็บข้อมูลมากขึ้น ฯลฯ) จึงกล่าวได้ว่าหาก ผู้วิเคราะห์มีการวางแผนขั้นตอนการคำนวณที่ไม่ดีพอ อาจทำให้เครื่องคอมพิวเตอร์ไม่สามารถ คำนวณผลเฉลยออกมาได้ หรืออาจจะใช้เวลานานมากจนไม่สามารถยอมรับได้ (ผดุงศักดิ์, 2551)

ในปัจจุบันมีการใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในรูปแบบซอฟต์แวร์สำเร็จรูปมาใช้วิเคราะห์ อ่างอิงมากมาย (Datta, 1998) ซึ่งข้อดีของโปรแกรมสำเร็จรูปเหล่านี้คือ สะดวกต่อการใช้งานและ ไม่ต้องเสียเวลาในการเขียนพัฒนาโค้ดเพื่อใช้ในงานวิจัยที่สนใจ (เป็นงานที่ต้องใช้เวลาในการ พัฒนามาก) แต่ข้อเสียของการใช้โปรแกรมสำเร็จรูปดังกล่าวคือ ไม่สามารถแก้ไขปรับปรุง โปรแกรมได้เหมือนกับกรณีการเขียนพัฒนาโค้ดด้วยตนเอง นอกจากนี้ข้อควรระวังในการใช้ โปรแกรมสำเร็จรูปคือ ผู้ที่วิเคราะห์จะต้องทราบถึงรายละเอียดและข้อจำกัดของโปรแกรมรวมไป ถึงสถานะที่โปรแกรมสำเร็จรูปนั้นสามารถวิเคราะห์ได้ เพราะหากเลือกใช้โปรแกรมสำเร็จรูปไม่ เหมาะสมกับงานที่ผู้วิจัยต้องการวิเคราะห์ ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะไร้ประโยชน์ทันที ดังคำกล่าว ของ Meredith (1995)

## 2.3. ไมโครเวฟ

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงลักษณะของไมโครเวฟเมื่ออยู่ในสถานที่ต่างๆ

### 2.3.1. คลื่นระนาบ (Plane Wave)

ในที่ว่าง (free space) คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะแพร่กระจายออกไปเป็นลักษณะรูปทรง กลม (spherical configuration) ทำให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีการแพร่กระจายออกไปเรื่อยๆ และจะ ค่อยๆ ถูกลดทอนด้วยตัวกลางจนหมดไป อย่างไรก็ตามในอุดมคติคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะต้อง แพร่กระจายออกไปในที่ว่างได้เรื่อยๆ ไม่มีที่สิ้นสุดโดยไม่ถูกลดทอนด้วยตัวกลาง คลื่น แม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกไปเป็นรูปทรงกลม (spherical wave) เมื่อพิจารณาที่ระยะห่างจาก แหล่งกำเนิดคลื่นมากๆ พื้นที่เล็กๆ บนพื้นที่ผิวทรงกลมสมมติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะกลายเป็น พื้นที่ระนาบแบน การพิจารณาสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก บนพื้นที่ผิวระนาบนี้จะทำมุมฉากซึ่ง กันและกัน ฉะนั้นคลื่นรูปทรงกลมที่มีระยะห่างจากแหล่งกำเนิดมากๆ จะกลายเป็นคลื่นระนาบ (plan wave) และคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เป็นรูปทรงระนาบแบบนี้จะได้สนามไฟฟ้าและ

สนามแม่เหล็กที่ทำมุมฉากซึ่งกันและกัน โดยที่ระนาบของสนามทั้งสองจะตั้งฉากกับทิศทางของการแพร่กระจายของคลื่น (ผดุงศักดิ์, 2551)

### 2.3.2. รูปแบบของสำหรับการกระจายของคลื่น (Wave Propagation Modes)

ผดุงศักดิ์ (2551) ได้อธิบายว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ในสายส่งใดๆ จะมีรูปแบบการเคลื่อนที่ภายในสายส่งที่ขึ้นอยู่กับลักษณะการพุ่งเข้าของคลื่นและรูปทรงภาคตัดขวางของสายส่งสัญญาณไฟฟ้านั้น โดยแต่ละรูปแบบของสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามีรูปร่างลักษณะที่สอดคล้องกับภาคตัดขวางภายในของสายส่ง ซึ่งในทางคณิตศาสตร์จะเปรียบรูปทรงภาคตัดขวางเป็นเงื่อนไขขอบเขต (boundary conditions) ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ภายในสายส่งสัญญาณไฟฟ้า สนามแม่เหล็กไฟฟ้าภาคตัดขวาง (transverse fields) ที่เกิดขึ้นมานี้จะมีรูปแบบของสนามเฉพาะตัวที่เรียกว่า รูปแบบภาคตัดขวาง (transverse mode) โดยทั่วไปแล้วสายส่งได้จำแนกตามประเภทของรูปแบบการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

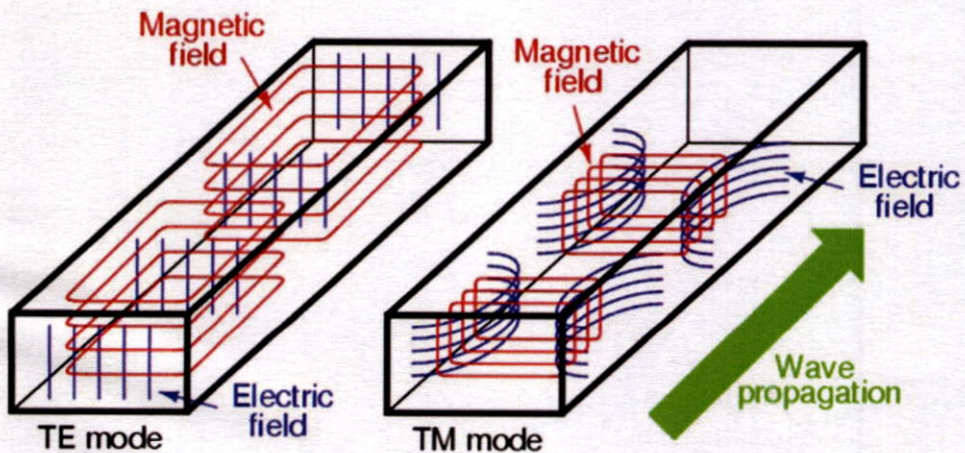
โดยจำแนกออกเป็นรูปแบบพื้นฐานได้ 3 แบบ คือ

#### 1. รูปแบบสนามแม่เหล็กตัดขวาง (Transverse Magnetic Mode : TM mode)

TM mode เป็นรูปแบบคลื่นที่เคลื่อนที่ไปตามตัวกลางโดยมีส่วนประกอบของสนามแม่เหล็กเท่านั้นที่ตั้งฉากกับทิศทางการเดินทางของคลื่นในสายส่ง หรืออีกนัยหนึ่งคือ คลื่นจะเคลื่อนที่ไปตามตัวกลางโดยไม่มีสนามแม่เหล็กในทิศทางของคลื่นในสายส่ง ดังรูปที่ 2.2

#### 2. รูปแบบสนามไฟฟ้าตัดขวาง (Transverse Electric Mode : TE mode)

TE mode เป็นรูปแบบคลื่นที่เคลื่อนที่ไปตามตัวกลางโดยมีส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าเท่านั้นที่จะตั้งฉากกับทิศทางการเดินทางของคลื่นในสายส่งนั้น หรืออีกนัยหนึ่งคือคลื่นจะเคลื่อนที่ไปตามตัวกลางโดยไม่มีสนามไฟฟ้าในทิศทางเดินทางของคลื่นในสายส่ง (ดังรูปที่ 2.2)

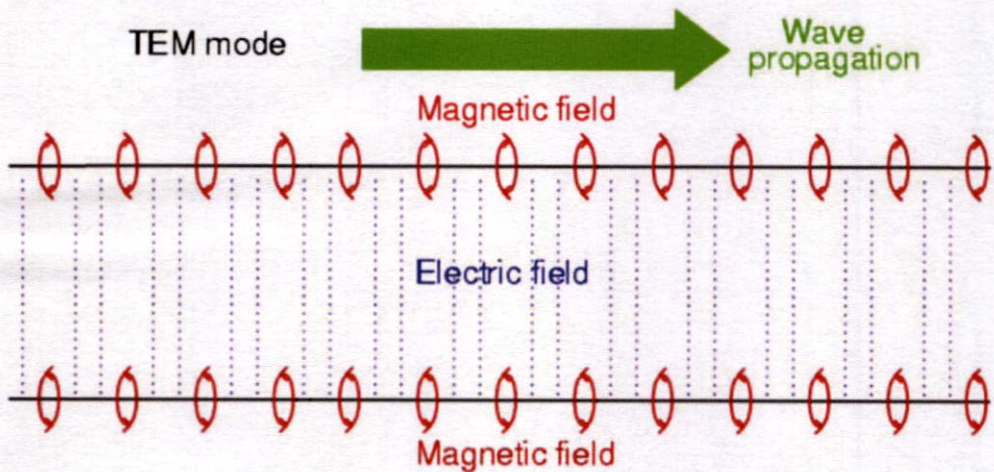


รูปที่ 2.2 แบบจำลองรูปแบบของคลื่น TM mode และ TE mode

(ที่มา : Kuphaldt, 2004)

### 3. รูปแบบสนามแม่เหล็กไฟฟ้าตัดขวาง (Transverse Electromagnetic Mode : TEM mode)

TEM mode เป็นรูปแบบของคลื่นที่เคลื่อนที่ไปตามตัวกลางโดยมีส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉากกับทิศทางการเดินทางของคลื่นในสายส่งหรืออีกนัยหนึ่งคือ คลื่นจะเคลื่อนที่ไปตามตัวกลางโดยไม่มีสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในทิศทางการเดินทางของคลื่นในสายส่งเลย ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แบบจำลองรูปแบบของคลื่น TEM mode  
(ที่มา : Kuphaldt, 2004)

#### 2.3.3. อันตรกิริยาระหว่างไมโครเวฟกับวัสดุ

ผดุงศักดิ์ (2551) ได้กล่าวว่าอันตรกิริยาระหว่างไมโครเวฟกับวัสดุสามารถแบ่งออกเป็น 4 ประเภท คือ

##### 1. ตัวนำไฟฟ้า (conductors)

วัสดุที่มีอิเล็กตรอนอิสระ (free electrons) เช่น โลหะซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ โดยปกติวัสดุเหล่านี้ถูกใช้ออกแบบเป็นตัวกักเก็บอุปกรณ์ (container) และบังคับทิศทางไมโครเวฟในรูปของแอฟพลิคเคเตอร์และท่อนำคลื่น

##### 2. ฉนวนไฟฟ้า (insulators)

วัสดุประเภทนี้ไม่มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้า เช่น แก้ว เซรามิก และอากาศ โดยฉนวนนี้จะสามารถสะท้อนและดูดซับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ไปจนถึงส่งผ่านคลื่นได้ โดยปกติถูกใช้เป็นตัวรองรับหรือตัวบรรจุวัสดุที่ต้องการทำให้ร้อนด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น อยู่ในรูปของ

สายพานลำเลียง ฐานรองรับงานหรือวัสดุอื่นๆ และวัสดุเหล่านี้ถูกพิจารณาเป็นวัสดุไดอิเล็กตริกที่ไม่มีการสูญเสียของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (non-lossy dielectrics)

### 3. ไดอิเล็กตริก (dielectrics)

โดยวัสดุประเภทนี้มีคุณสมบัติอยู่ระหว่างตัวนำและฉนวนไฟฟ้า และจัดอยู่ในประเภทของวัสดุไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสียของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (lossy dielectrics) ดังนั้นวัสดุกลุ่มนี้จึงสามารถดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและแปลงเป็นพลังงานความร้อนไว้ ตัวอย่างวัสดุไดอิเล็กตริก ได้แก่ น้ำ น้ำมัน ไม้ อาหารที่มีความชื้น เป็นต้น

### 4. องค์ประกอบของแม่เหล็ก (Magnetic Compounds)

วัสดุประเภทนี้ ยกตัวอย่างเช่น แม่เหล็ก ซึ่งจะมีอันตรกิริยากับองค์ประกอบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าคือ สนามแม่เหล็กเปลี่ยนเป็นความร้อนได้ดียิ่งขึ้น เช่น วัสดุจำพวกชิลิกอนคาร์ไบด์ เป็นต้น ดังนั้นวัสดุในกลุ่มนี้จึงถูกใช้เป็นตัวกั้นหรือโฉาก (shielding or choking devices) เพื่อป้องกันการรั่วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

## 2.4. หลักการพื้นฐานการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ

การให้ความร้อนแก่วัตถุด้วยไมโครเวฟเป็นอีกวิธีหนึ่งที่น่าสนใจและไม่เหมือนวิธีการให้ความร้อนแบบเก่าที่ให้ความร้อนจากภายนอกผ่านผิววัตถุที่มักจะมีปัญหาเกี่ยวกับคุณภาพของผลิตภัณฑ์เนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของการกระจายอุณหภูมิและความชื้นภายในผลิตภัณฑ์นั้น การให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟจะอาศัยสมบัติของการดูดกลืนพลังงานจากไมโครเวฟภายในผลิตภัณฑ์ โดยผลิตภัณฑ์ที่นำมาผ่านกระบวนการนี้ศัพท์ทางวิศวกรรมที่เกี่ยวกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเรียกว่า วัสดุไดอิเล็กตริก (dielectric Materials) ยกตัวอย่างเช่น โมเลกุลของน้ำ เป็นต้น ซึ่งอันตรกิริยาระหว่างวัสดุที่มีขั้วทางไฟฟ้า และคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีการสลับเฟสไปมาหลายล้านครั้งในหนึ่งวินาที ส่งผลทำให้เกิดความร้อนภายใน (internal heat generation) วัสดุไดอิเล็กตริก (ผดุงศักดิ์, 2551)

### 2.4.1. กลไกการเกิดความร้อน (Heating Mechanism)

การเกิดความร้อนของวัสดุไดอิเล็กตริกที่ดูดซับพลังงานไมโครเวฟ มีสาเหตุมาจากกลไกสองประการ (ผดุงศักดิ์, 2551) คือ

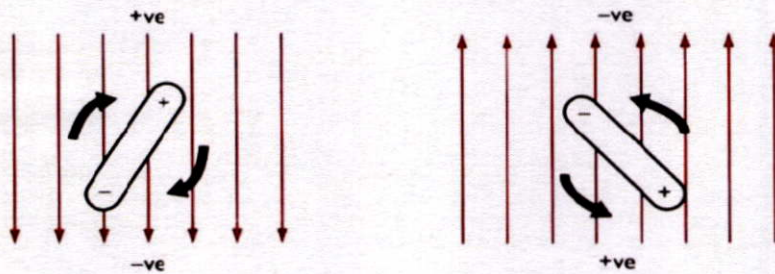
#### 1. ไอออนิก โพลารีเซชัน (ionic polarization)

เมื่อนุภาคที่มีประจุในวัสดุไดอิเล็กตริกได้รับไมโครเวฟจะทำให้เกิดการสั่นและเคลื่อนที่ จึงเกิดการชน (collisions) หรือเสียดสีกับอนุภาคที่อยู่ข้างเคียงเป็นผลให้เกิดความร้อนขึ้นในวัสดุไดอิเล็กตริกนั้น ตัวอย่างวัสดุไดอิเล็กตริกที่พบมากในชีวิตประจำวัน ได้แก่ อาหาร ซึ่งโดยทั่วไปในอาหารจะมีองค์ประกอบที่ซับซ้อน มีปริมาณน้ำและเกลือที่ละลายได้แตกต่างกันไป เช่น โซเดียม-โปแตสเซียม- หรือแคลเซียมคลอไรด์ ซึ่งโมเลกุลเหล่านี้จะแตกตัวให้อิออนบวก

และอออนลบ ดังนั้นอนุภาคที่มีประจุจึงสามารถที่จะมีอันตรกิริยากับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าใดๆ รวมทั้งสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกสร้างขึ้นในเตาอบไมโครเวฟด้วยเช่นเดียวกัน

## 2. การหมุนของสารประกอบที่มีขั้ว (dipole rotation)

ในวัสดุไดอิเล็กตริก เช่น อาหาร จะประกอบด้วยน้ำในปริมาณแตกต่างกัน น้ำเป็นโมเลกุลที่มีขั้ว ในสภาพปกติจะเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ (random orientation) เมื่อผ่านสนามไฟฟ้ากระแสสลับเข้าไป ประจุบวกและลบในโมเลกุลจะหมุนตัวเพื่อเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ของสนามไฟฟ้ากระแสสลับนั้น โดยการหมุนตัวกลับไปมาจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วตามความถี่ของไมโครเวฟ คือ 915 หรือ 2450 พันล้านครั้งต่อวินาที (ดังรูปที่ 2.4) ทำให้เกิดความร้อนขึ้นและกระจายไปยังโมเลกุลข้างเคียงและจากการชนระหว่างโมเลกุลของน้ำในอาหาร ในส่วนของโมเลกุลที่อยู่ในสถานะของแข็ง เช่น น้ำแข็งนั้น โมเลกุลของน้ำจะถูกยึดติดกับโครงสร้างที่มีลักษณะเฉพาะของผลึกและไม่สามารถหมุนตัวเองให้มากพอที่จะชนกับโมเลกุลอื่นๆ ที่อยู่ข้างเคียงเพื่อทำให้เกิดความร้อนขึ้นได้และโมเลกุลที่อยู่ในสถานะก๊าซหรือไอ จะมีโมเลกุลข้างเคียงน้อยมากที่จะชนจนทำให้เกิดความร้อนขึ้นได้เช่นเดียวกัน โดยอันตรกิริยาชนิดนี้มีความสำคัญที่สุดในอาหาร



รูปที่ 2.4 การเคลื่อนที่ของสารประกอบมีขั้วเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้า

(ที่มา : Singh and Heldman, 2001)

## 2.5. การทำให้เกิดความร้อนจากพลังงานไดอิเล็กตริก (Dielectric Heating)

Fellows (2000) รายงานว่า พลังงานไดอิเล็กตริก (dielectric energy) จากไมโครเวฟ และคลื่นความถี่วิทยุ (radio frequency) เป็นพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าอย่างหนึ่ง ซึ่งส่งผ่านในรูปของคลื่น (wave) และแทรก (penetrate) เข้าไปในอาหาร และพลังงานนี้จะถูกดูดซับและแปลงเป็นพลังงานความร้อน โดยทั่วไปสามารถทำให้เกิดความร้อนในอาหารได้ทั้งโดยทางตรง (direct method) ซึ่งความร้อนจะเกิดขึ้นภายในตัวอาหาร เช่น ความร้อนจากไมโครเวฟ และคลื่นวิทยุ และโดยทางอ้อม (indirect method) ซึ่งเป็นการทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายนอก และส่งผ่านพื้นที่ผิวหน้าของอาหารไปยังด้านใน โดยเกิดจากการแผ่รังสี (radiation) การพาความร้อน (convection) หรือการนำความร้อน (conduction)

### 2.5.1. คุณสมบัติไดอิเล็กทริกของอาหารและวัตถุ

Singh และ Heldman (2001) รายงานว่าในกระบวนการแปรรูปด้วยไมโครเวฟจะเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติทางไฟฟ้า (electrical properties) ของวัตถุที่ทำให้เกิดความร้อน ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวจะมีความสำคัญต่อการสร้างสุตราอาหารเพื่อใช้กับไมโครเวฟ คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่สำคัญและแสดงเป็นตัวเลข ได้แก่

#### 1. ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ (relative dielectric constant : $\epsilon'$ )

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ หรืออาจเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า ค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ (relative permittivity) เป็นค่าที่แสดงความสามารถของวัตถุในการกักเก็บพลังงานไฟฟ้าไว้เมื่อนำมาวางในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ ถ้าค่าสูงแสดงว่าเก็บพลังงานได้มาก แต่ค่านี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิและความชื้นในอาหาร

#### 2. ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกทอสแฟคเตอร์สัมพัทธ์ (relative dielectric loss factor : $\epsilon''$ )

เป็นค่าที่แสดงความสามารถของวัตถุที่จะกระจายพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานความร้อน ถ้าค่านี้สูงแสดงว่าจะเกิดความร้อนสูง โดยคำว่า “loss” หรือ การสูญเสีย ในที่นี้หมายถึงการเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานความร้อน

## 2.6. ขนมปัง

ขนมปัง เป็นขนมอบชนิดหนึ่ง ซึ่งจัดว่าเป็นผลิตภัณฑ์ที่ใช้ยีสต์ (จิตรนา และอรอนงค์, 2549) โดยมีส่วนผสมประกอบด้วย แป้งสาลีโปรตีนสูง, น้ำ, ยีสต์ และเกลือ โดยทั้ง 4 อย่างนี้จัดเป็นส่วนผสมหลัก ซึ่งจำเป็นต้องมีในสูตรทำขนมปังทั่วไป นอกจากนั้นอาจใส่สารอื่นเพื่อปรับปรุงลักษณะของขนมปังให้แตกต่างกันไปตามความต้องการของผู้บริโภค เช่น ไขมัน แป้งมอลต์ น้ำมัน ผลไม้ เป็นต้น (อรอนงค์, 2540)

### 2.6.1. โดขนมปัง

โด (dough) คือ ลักษณะที่ใช้เรียกแทนก้อนแป้งที่ได้จากการผสมวัตถุดิบจนรวมตัวเข้ากันดีหลังจากการนวดผสม โดยลักษณะสำคัญของโด คือ ก้อนโดจะมีลักษณะเรียบเนียนแห้ง ไม่ติดกับด้านข้างของอ่างผสม และตะขอที่ใช้ผสม เมื่อจับดูก้อนแป้งจะมีความนุ่ม มีความยืดหยุ่นที่พอเหมาะ เมื่อดึงขึ้นมาจะไม่เหนียวติดมือ และสามารถดึงเป็นแผ่นบางๆ ได้โดยไม่ฉีกขาด (จิตรนา และอรอนงค์, 2549)

#### 2.6.1.1. กระบวนการทำโดขนมปัง (จิตรนา และอรอนงค์, 2549 และอรอนงค์, 2540)

##### - การผสมแป้ง

เป็นขั้นตอนแรกที่สำคัญของการทำขนมปัง มีวัตถุประสงค์ 2 ประการ คือ เพื่อผสมส่วนผสมทั้งหมดให้เข้ากันได้อย่างสม่ำเสมอทุกส่วน และช่วยให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทาง

เคมี และกายภาพ เกิดกลูเตนในโด ให้ความยืดหยุ่นเหมาะสมในการทำขนมปัง โดยในการผสมนี้ สามารถแบ่งลักษณะการผสมออกเป็น 6 ขั้นตอน คือ

1. การผสมให้เข้ากัน (pick up stage) เป็นการเริ่มผสม จะเห็นได้ว่า ส่วนผสมแห้ง คือ แป้งจะเริ่มดูดซึมน้ำของเหลว คือ น้ำ เข้ามารวมกันเป็นก้อนแป้งที่หยาบ และไม่สม่ำเสมอ

2. การทำความสะอาดอย่าง (clean up stage) หมายถึง ส่วนผสมของโดเริ่มจับตัวกันมากขึ้น ทำให้อ่างที่ใช้สะอาดไม่มีก้อนแป้งติดอยู่อีกต่อไป

3. โดเริ่มมีลักษณะดี (development stage) เมื่อผสมนานขึ้น โดจะเริ่มมีความยืดหยุ่น สามารถดึงได้ แต่ยังคงขาดง่ายอยู่ ผิวเรียบ และเนียนขึ้น

4. ลักษณะโดเหมาะสม (final stage) เป็นระยะที่โดได้รับการผสมถึงจุดที่เหมาะสมที่สุด มีความยืดหยุ่นดี สามารถดึงเป็นฟิล์มบาง แสงส่องผ่านได้ มีเนื้อเนียนเป็นมัน มีความนุ่มตัวดี ดังนั้นเมื่อผสมถึงจุดนี้ จึงควรหยุดได้ เพราะได้ลักษณะโดที่สามารถอุ้มก๊าซได้ดีที่สุดแล้ว

5. โดเริ่มขาดง่าย (letdown stage) ถ้าผสมโดต่อไปจากขั้นที่ 4 จะมีผลทำให้โครงสร้างของโดเริ่มอ่อนแอ ขาดง่าย และมีลักษณะแฉะ เป็นโดที่ไม่ดีอีกต่อไป

6. โดขาดง่ายและไหลได้ (breakdown stage) เป็นขั้นตอนที่โดขาดไม่มีชั้นดี จนสามารถไหลได้ และมาก ไม่สามารถนำไปทำขนมปังได้ จึงไม่ควรผสมนานเกินไปจนถึงขั้นนี้

#### - การหมัก

เมื่อผสมส่วนต่างๆ จนได้เป็นโดที่ดีแล้ว จึงนำมาหมักไว้ระยะหนึ่งเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีโดยเอนไซม์และยีสต์ ทำให้โดมีสภาพขึ้นฟู จากการเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในโด

#### - การไล่ลม

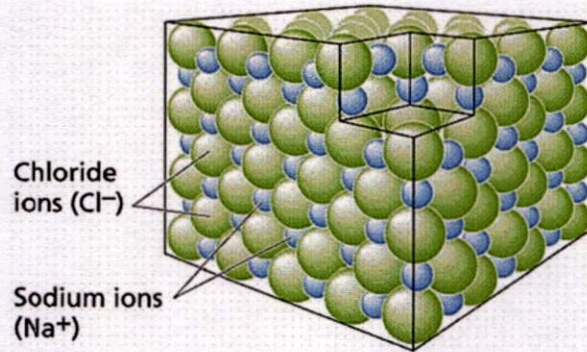
โดยการนวดโดให้ยุบตัวลง ไล่ก๊าซออกจากโด ปรับสภาพอุณหภูมิภายในโดใหม่ นวดให้โดมีโครงสร้างแข็งแรงอีกครั้ง เพิ่มอากาศเข้าไปในโด เพื่อให้ยีสต์ได้ใช้ในการเจริญเติบโต ช่วยให้โดมีความยืดหยุ่นในการอุ้มก๊าซได้ดีขึ้นเมื่อทำการหมักต่อไปจะได้ลักษณะโดที่ดี มีโครงสร้างเป็นร่างแหดึงยึดได้

#### - การซั้ง ปั้น และแต่งโด

เมื่อหมักโดได้ที่แล้วหลังจากไล่ลมออกแล้วจึงนำมาซั้ง นำหนักที่ซั้งก็ขึ้นอยู่กับผลิตภัณฑ์ที่ทำ ขนาด ราคา เมื่อตัดได้น้ำหนักตามที่ต้องการแล้ว ก่อนที่จะทำเป็นรูปร่างต่างๆ ในแต่ละก้อน ควรคลึงโดให้เรียบแล้วจึงนำมาทำรูปร่าง

## 2.7. เกลือแกง

ทางวิทยาศาสตร์การอาหาร เกลือแกงนั้นหมายถึง เกลือที่ใช้ในการปรุงอาหาร (cooking salt หรือ table salt) ซึ่งมีชื่อทางเคมีว่า Sodium Chloride (NaCl) เกลือบริสุทธิ์นั้นมีลักษณะสีขาว ผลึกรูปร่างไม่คงที่ แต่จัดว่าเป็นแบบลูกบาศก์ (cubic system) ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 โครงสร้างผลึกของเกลือแกง  
(ที่มา : Purves *et al.*, 1995)

### 2.7.1. คุณสมบัติทั่วไปของเกลือแกง

1. เกลือ เป็นสารประกอบ สถานะปกติเป็นของแข็ง ไม่นำไฟฟ้า
2. เกลืออาจจะละลายน้ำหรือไม่ละลายน้ำก็ได้ หากละลายน้ำจะทำให้น้ำเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เพราะเกลือแตกตัวเป็นไอออนทำให้น้ำนั้นนำไฟฟ้าได้ โดยการนำไฟฟ้า เนื่องจากการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟจะเกิดการเคลื่อนที่ของโมเลกุลที่มีประจุในอาหาร จึงมีความสัมพันธ์กับการนำไฟฟ้าในอาหาร เมื่อเพิ่มการนำไฟฟ้าให้กับอาหาร เช่น เติมเกลือ หรือสารอื่น (เช่น น้ำตาล) ที่สามารถแตกตัวให้ประจุ จะทำให้อัตราการให้ความร้อนสูงขึ้น
3. สารละลายเกลืออาจเป็นกรด กลาง หรือเบสก็ได้
  - เกลือที่มีคุณสมบัติเป็นกรด เกิดจาก กรดแก่ + เบสอ่อน
  - เกลือที่มีคุณสมบัติเป็นกลาง เกิดจาก กรดแก่ + เบสแก่
  - เกลือที่มีคุณสมบัติเป็นเบส เกิดจาก กรดอ่อน + เบสแก่

### 2.7.2. ความสำคัญของเกลือแกงต่อขนมปัง

เกลือแกงที่เติมลงไปในส่วนผสมของขนมปัง มีจุดประสงค์ 3 ประการ ที่สำคัญคือ ทำให้ขนมปังมีกลิ่นรสเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค ประการที่สองคือ ช่วยให้อุณหภูมิของแป้งและยีสต์เพิ่มขึ้น ทำให้โดไม่แฉะ ประการที่สามคือ มีส่วนในการควบคุมการทำงานของยีสต์ให้ช้าลง มีการหมักนานขึ้น ทำให้โดขึ้นฟูสม่ำเสมอ และมีโครงสร้างดี (อรอนงค์, 2540)

## 2.8. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Zhou และคณะ (1995) ศึกษาแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนและมวลในอาหารระหว่างกระบวนการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟในแง่ของการพัฒนาและทวนสอบแบบจำลอง โดยใช้ชั้นมันฝรั่งทรงกระบอก และแบบแผ่นบางเป็นตัวอย่างในการทดสอบ พบว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ได้จากซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ (TWOPEP, ANSYS) กับผลการทดลองนั้น มีลักษณะเป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยหลังจากให้ความร้อนแก่แบบจำลองเป็นเวลา 60 วินาที พบว่าแบบจำลองแบบแผ่นบางมีค่าความแตกต่างสูงสุดสัมบูรณ์  $8.1^{\circ}\text{C}$  (หรือความแตกต่างสัมพัทธ์ของ 15.5% จากค่าที่วัดได้) และแบบจำลองแบบทรงกระบอกมีค่าความแตกต่างสูงสุดสัมบูรณ์  $8.7^{\circ}\text{C}$  (หรือความแตกต่างสัมพัทธ์ของ 11.4%) ในขณะที่เมื่อเปรียบเทียบค่าความแตกต่างความชื้นสัมบูรณ์ของแบบจำลองกับการทดลองหลังจากให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟไป 60 วินาที ในตัวอย่างมันฝรั่งแบบบางและแบบทรงกระบอกมีค่าเท่ากับ 1.97% และ 1.85% นำหนักเปียกตามลำดับ

ในปี 2000 Oliveira และ Franca ได้ศึกษาการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ของการให้ความร้อนในผลิตภัณฑ์ของแข็ง พบว่าการกระจายสนามไฟฟ้าที่ได้จากการแก้สมการแมกซ์เวลควบคู่กับสมการพลังงานที่ใช้ในการทำนายการกระจายของอุณหภูมิในระหว่างการให้ความร้อนแก่ของแข็งด้วยไมโครเวฟ พบว่ารูปแบบการหมุนของตัวอย่างมีผลต่อแบบจำลอง โดยผลของการหมุนมีผลทำให้ตัวอย่างมีการกระจายอุณหภูมิอย่างสม่ำเสมอมากขึ้น โดยในกลุ่มตัวอย่างที่มีขนาดเล็กนั้น ความร้อนจะเกิดขึ้นมากที่ศูนย์กลาง ในขณะที่กลุ่มตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่มักจะเกิดความร้อนที่ตำแหน่งใกล้กับพื้นผิวอย่างมีนัยสำคัญ และผลของการศึกษายังแสดงให้เห็นว่ามีการดูดซึมพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพมากในที่มีความถี่ต่ำๆ

ต่อมา Oliveira และ Franca (2002) ได้เขียนบทความวิจัยเกี่ยวกับการให้ความร้อนแก่อาหารด้วยไมโครเวฟ ซึ่งกล่าวว่าการสร้างแบบจำลองของความร้อนจากไมโครเวฟเกี่ยวข้องกับ การจับคู่กันของแบบจำลองการดูดซับพลังงานไมโครเวฟและการกระจายอุณหภูมิภายในตัวอย่าง โดยการศึกษาี้ได้มีการนำเสนอแบบจำลองสำหรับการดูดซับพลังงานไมโครเวฟที่ได้จากการแก้สมการแมกซ์เวลร่วมกับสมการการถ่ายเทความร้อน โดยอาศัยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการแก้ปัญหาวิธีการดังกล่าวนี้จะถูกนำมาใช้เพื่อจำลองความร้อนของอาหารที่ได้รับความร้อนจากไมโครเวฟ ซึ่ง จะทำการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับพลังงานจากสมการแมกซ์เวล และกฎของแลมเบิร์ต โดยผลการจำลองพบว่า การให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟจะขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของอาหาร และที่ความถี่ต่ำจะมีประสิทธิภาพการดูดซับพลังงานที่ดีกว่าที่ความถี่สูงกว่า

Pandit และ Prasad (2003) ได้วิเคราะห์แนวโน้มอุณหภูมิของชั้นมันฝรั่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟโดยอาศัยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สองมิติถูกพัฒนาเพื่อใช้ในการทำนายอุณหภูมิในอาหารจำพวกของแข็งเมื่อได้รับความร้อนผ่านไมโครเวฟ

โดยการจำลองการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟแก่อาหารนั้นจะใช้ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ ALGOR ในการจำลองตัวอย่างที่มีรูปทรงเรขาคณิตรูปสี่เหลี่ยมและทรงกระบอก ความสามารถในการดูดซับพลังงานไมโครเวฟ ณ จุดใดๆ ที่ใช้ในการทดสอบจะทำให้เกิดฟังก์ชันคุณสมบัติไดอิเล็กทริกและรูปทรงของตัวอย่าง โดยจะมีการพัฒนาภาษาซีเพื่อหาปริมาณความร้อนที่เกิด ณ จุดที่เกิดความร้อนขึ้นในแบบจำลอง ทั้งนี้ได้มีการใช้ตัวอย่างหุ้มมันฝรั่งมาทดลองเพื่อทดสอบความถูกต้องของผลการจำลองด้วย การเปรียบเทียบเพื่อหาอุณหภูมิที่ถูกต้องถือเป็นเรื่องยาก ดังนั้นในที่นี้จึงนำอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิมาใช้ในการเปรียบเทียบค่าจากการทำนายและค่าจากการทดลอง ซึ่งพบว่าค่าการทำนายอุณหภูมิจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และผลการทดลองของตัวอย่างที่เป็นแผ่นบางมีค่าใกล้เคียงกันมาก สำหรับตัวอย่างมันฝรั่งแบบแผ่นบางพบว่า cold spot เกิดขึ้นไปตามแนวแกนกลาง โดยอุณหภูมิจะลดลงจากมุมและขอบไปยังใจกลางขึ้น สำหรับตัวอย่างรูปทรงกระบอกนั้นพบว่าค่าการทำนายอุณหภูมิจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และผลการทดลองมีค่าใกล้เคียงกันทุกจุดยกเว้นบริเวณใจกลาง เนื่องจากตามแนวแกนกลางนั้นมีความสามารถในการดูดซับพลังงานมาก เพราะฉะนั้นที่ใจกลางจึงมีการเพิ่มขึ้นของพลังงานสูง

Romano และคณะ (2005) ได้ศึกษาแบบจำลองการให้ความร้อนในอาหาร โดยมุ่งศึกษาอิทธิพลของขนาดตัวอย่างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดย Romano และคณะ พบว่าผู้วิจัยแบบจำลองความร้อนจากไมโครเวฟส่วนใหญ่มักจะใช้ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ที่ใช้พื้นฐานการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ทั้งนี้การประเมินผลของการกระจายสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามักมีวิธีประเมินค่าแตกต่างกันสองวิธีคือ การแก้สมการแมกซ์เวล และการใช้กฎของแลมเบิร์ต ซึ่งในงานวิจัยได้วิเคราะห์ผลของความร้อนจากไมโครเวฟที่ส่งผ่านไปยังตัวอย่างที่เป็นทรงกระบอกในการพัฒนาแบบจำลองเชิงตัวเลขที่แก้สมการผ่าน โปรแกรมเชิงพาณิชย์ (FEMLAB) เพื่อใช้จำลองการถ่ายเทความร้อนในอาหาร จากผลการทดลองพบว่าตลอดตามแนวแกนกลางนั้นมีความสามารถในการดูดซับพลังงานไมโครเวฟสูงซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลอง แต่เมื่อตัวอย่างมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางมากขึ้นความสามารถในการดูดซับพลังงานที่ตำแหน่งแกนกลางจะลดลง และที่ผิวหน้าจะมีความสามารถนี้เพิ่มขึ้น

Campanone และ Zaritzky (2005) ศึกษากระบวนการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟผ่านการวิเคราะห์เชิงคณิตศาสตร์โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite difference method) พบว่ารูปทรงของแบบจำลองที่ใช้ศึกษานั้นมีอิทธิพลต่อแนวโน้มอุณหภูมิและตำแหน่ง hot points และ cold points ของตัวอย่าง ในตัวอย่างที่เป็นทรงกลมนั้นจะมีค่าอุณหภูมิสูงสุด และมีพลังงานไมโครเวฟสูงสุดที่บริเวณตรงกลาง ส่วนในตัวอย่างที่มีรูปทรงกระบอกจะมีรูปแบบการกระจายของพลังงานไมโครเวฟตามแนวรัศมีไม่แน่ชัด และพบว่าที่บริเวณตรงกลางและบริเวณพื้นผิวจะมีค่าสูงสุด ส่วนในตัวอย่างที่มีรูปทรงลูกบาศก์หรือทรงสี่เหลี่ยมนั้นจะพบความเข้มของพลังงานไมโครเวฟสูงบริเวณมุมของตัวอย่าง

ปี 2007 Ressing และคณะ ศึกษาแบบจำลองกลไกการพองตัวของโครงสร้างการทำแห้งด้วยตู้อบไมโครเวฟสุญญากาศโดยใช้วิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ โดยแบบจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์สองมิติ (2 - D FE) ถูกพัฒนาขึ้นในเงื่อนไขการจำลองการพองตัวของโครงสร้างกระบวนการระเหยน้ำภายใต้สภาวะสุญญากาศด้วยพลังงานไมโครเวฟ ซึ่งแบบจำลองดังกล่าวจะเชื่อมโยงสองส่วนเข้าด้วยกันคือ ส่วนของความร้อนและส่วนที่เป็นกลศาสตร์ของแข็งที่มีผลต่อกลไกการพองตัวของอาหารระหว่างการทำแห้งด้วยตู้อบไมโครเวฟสุญญากาศ โดยแบบจำลองจะให้ผลการทำนายการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิได้แม่นยำในกรณีที่มีปริมาณเกลือต่ำ แบบจำลองการพองตัวแบ่งกลไกการเกิดออกเป็นสองส่วนด้วยกันคือ ความแตกต่างของความดันระหว่างโพรงอากาศในโด และความดันในตู้อบ และส่วนที่สองคือ การเกิดไอน้ำขึ้นซึ่งจะทำให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นในโด ทั้งนี้การกระจายของอุณหภูมิจะสามารถประเมินได้จากความลึกของการทะลุทะลวงของไมโครเวฟในตัวอย่างโดยแสดงให้เห็นว่ามีบางส่วนในโดที่เกิดการยุบตัวในขั้นต่อมาของกระบวนการทำแห้งซึ่งสามารถนำมาประกอบกับในส่วนที่มีความนุ่มในโดที่อุณหภูมิสูงและเกิดการสูญเสียอากาศระหว่างกระบวนการได้

Knoerzer และคณะ (2008) ได้กล่าวในงานวิจัยเรื่องแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์สำหรับการคำนวณการกระจายความร้อนจากการให้ความร้อนอาหารด้วยไมโครเวฟว่ากระบวนการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟมีข้อดีกว่ากระบวนการให้ความร้อนแบบดั้งเดิมอยู่หลายประการซึ่งประโยชน์หลักก็คือ การเพิ่มอัตราในกระบวนการผลิตและการปรับปรุงคุณภาพการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ ด้วยเหตุดังกล่าววิธีการจำลองแบบใหม่ได้ถูกพัฒนาขึ้น โดยมีพื้นฐานจากการทำงานร่วมกันระหว่างผู้ใช้งานกับซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ โดยแบบจำลองแนวโน้มของอุณหภูมิจะขึ้นอยู่กับเวลาและรูปร่างของตัวอย่างในลักษณะการแสดงผลแบบสามมิติ

Budd และ Hill (2011) ได้ศึกษาปัญหาการให้ความร้อนของตัวอย่างอาหารขึ้นบางแบบหนึ่งมิติในเตาอบไมโครเวฟซึ่งกำหนดให้สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงเฟส และการทำแห้งได้ โดยเริ่มต้นจากการตรวจสอบความถูกต้องของกฎแลมเบิร์ต โดยจากการศึกษาผลของการทำแห้งพบว่าการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติด้านไดอิเล็กทริกจะนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงในเรื่องอื่นๆ ต่อไป แต่จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในอาหารน้อยมาก

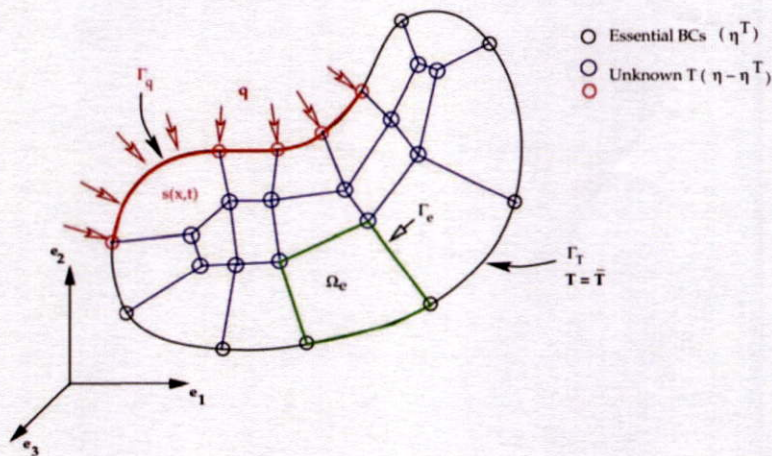
### บทที่ 3

## ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

เนื้อหาภาพรวมของบทนี้ได้แตกหัวข้อมาจากบทที่ 2 ในหัวข้อย่อยที่ 2.1.3 ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียด, ความเป็นมา, ขั้นตอนพื้นฐานของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, ข้อดีและข้อเสีย และซอฟต์แวร์ที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาทางไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นต้น และยังคงกล่าวรวมไปถึงสมการทางคณิตศาสตร์ในระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่นำมาใช้ในงานวิจัยด้วย

### 3.1. ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method : FEM) เป็นวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขชนิดหนึ่งสำหรับแก้สมการเชิงอนุพันธ์ ในการแก้ปัญหาหนึ่งๆด้วยระเบียบวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ จะทำการแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นเนื้อที่หลายๆ ชิ้นที่เรียกว่า เอลิเมนต์ (element) ซึ่งสามารถจำลองรูปแบบได้เที่ยงตรง ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ถูกแบ่งออกเป็นเอลิเมนต์และโหนด  
(ที่มา : เพชร, 2551 )

ในการแก้ปัญหา ปัญหานั้นจะต้องประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมา การหาค่าผลเฉลยแม่นยำตรง (exact solution) จะประกอบด้วยค่าต่างๆ เป็นจำนวนอนันต์ ซึ่งเราไม่สามารถหาค่าผลเฉลยได้จึงต้องเปลี่ยนค่าทั้งหมดที่เป็นอนันต์ให้เป็นจำนวนที่นับได้ (finite) แล้วทำการแทนรูปร่างลักษณะของปัญหาด้วยเอลิเมนต์ที่มีขนาดต่างๆ กัน หลักการทางไฟไนต์เอลิเมนต์จะเริ่มจากการพิจารณาเอลิเมนต์ทีละเอลิเมนต์ ทำการสร้างสมการให้แก่ละเอลิเมนต์

ให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหานั้นๆ แล้วจึงนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่สร้างขึ้น มาประกอบเข้าด้วยกัน รวมเป็นระบบสมการชุดใหญ่ จากนั้นทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่จะมาลงในสมการชุดใหญ่แล้วจึงแก้สมการทำให้เกิดผลเฉลยโดยประมาณที่ตำแหน่งต่างๆ ของปัญหานั้น (เพชร, 2551)

### 3.2. ความเป็นมาของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

แนวความคิดที่จะนำเอาระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้ในการวิเคราะห์เกิดขึ้นครั้งแรกเมื่อปี 1940 ต่อมาปี 1943 ได้เริ่มใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์คำนวณหาความเค้นในปัญหามิติเดียว เช่น ความเค้นที่เกิดในท่อนโลหะ, ในคาน แต่ในช่วงนั้นยังไม่เป็นที่นิยมแพร่หลาย ในช่วง 1954-1960 เครื่องคอมพิวเตอร์ได้รับการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น การวิเคราะห์โครงสร้างจึงนิยมใช้วิธีเมตริกซ์ และการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ก็ได้รับความนิยมมากขึ้น ปัจจุบันการวิเคราะห์ปัญหาด้านวิศวกรรมศาสตร์โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบ (computer-aided design: CAD) โดยอาศัยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นที่นิยมมากขึ้นทั้งในสถาบันการศึกษาและอุตสาหกรรมขนาดเล็กทั่วไป ทั้งนี้ขีดความสามารถของเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ และ โปรแกรมมาตรฐานสำหรับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่จะใช้กับเครื่องคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กได้พัฒนาขึ้นอย่างมากและกว้างขวางยิ่งขึ้น การใช้งานจึงทำได้สะดวก รวดเร็ว ถูกต้อง แม่นยำสูง และเสียค่าใช้จ่ายไม่มากนัก (เดช, 2548)

### 3.3. ขั้นตอนพื้นฐานของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ขั้นตอนพื้นฐานของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยทั่วไปจะประกอบไปด้วย 5 ขั้นตอนหลักๆ (เพชร, 2551) ดังนี้

#### 1. การแบ่งโดเมน

การแบ่งโดเมนของปัญหาจะถูกแบ่งออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ กระบวนการขั้นแรกนี้โดยปกติใช้เวลามากในทางปฏิบัติเพราะจำเป็นต้องสร้างรูปร่างของปัญหาอย่างถูกต้องขึ้นมาก่อน รูปร่างของปัญหาอาจประกอบด้วยส่วนเว้าส่วนโค้งที่มีความซับซ้อน ขั้นตอนนี้จึงจำเป็นอย่างมาก

#### 2. การเลือกใช้ชนิดของเอลิเมนต์

เอลิเมนต์ย่อยที่แบ่งบนโดเมนของปัญหานั้นอาจเป็นเอลิเมนต์ในรูปแบบของสามเหลี่ยม หรือสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่าก็ได้ หากแบ่งออกเป็นเอลิเมนต์สามเหลี่ยม ตัวไม่รู้ค่าจะอยู่ที่มุมทั้งสามของสามเหลี่ยมนั้นซึ่งเรียกกันว่าจุดต่อ (node) การเลือกใช้ชนิดเอลิเมนต์จะสอดคล้องกับลักษณะการกระจายของตัวไม่รู้ค่าที่สมมติขึ้นบนเอลิเมนต์นั้นๆ เช่น หากเลือกใช้เอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบสามจุดต่อที่มุมทั้งสามแล้ว ลักษณะการกระจายของตัวไม่รู้ค่าบนเอลิเมนต์นั้นจะถูกสมมติให้อยู่ใน

รูปแบบของแผ่นเรียบ เป็นต้น แต่หากเลือกใช้เอลิเมนต์แบบสี่เหลี่ยมแบบสี่จุดต่อที่มุมทั้งสี่ ลักษณะการกระจายของตัวไม่รู้ค่าบนเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมนี้อาจไม่เรียบแต่โค้งไปโค้งมาได้ ดังนั้น การเลือกใช้เอลิเมนต์ชนิดต่างๆ จึงมีผลโดยตรงกับผลลัพธ์ที่จะคำนวณได้

### 3. การประดิษฐ์สมการไฟไนต์เอลิเมนต์

สมการเชิงอนุพันธ์ที่สอดคล้องกับปัญหาที่วิเคราะห์อยู่นั้นจะถูกเปลี่ยนไปเป็นสมการทางพีชคณิตที่เรียกกันว่า สมการไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่จะถูกสร้างขึ้นสำหรับแต่ละเอลิเมนต์เนื่องจาก เอลิเมนต์ต่างมีขนาดไม่เท่ากัน กระบวนการประดิษฐ์สมการไฟไนต์จากสมการเชิงอนุพันธ์นี้ นับเป็นหัวใจหลักของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพราะหากมีความเข้าใจในขั้นตอนี้แล้วก็สามารถประยุกต์ใช้วิธีการทำนองเดียวกันนี้ในการแก้ปัญหาชนิดอื่นๆ ได้

### 4. การรวมสมการไฟไนต์เอลิเมนต์เข้าด้วยกันแล้วแก้ระบบสมการใหญ่

สมการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่อยู่ในรูปแบบของสมการทางพีชคณิตซึ่งได้ประดิษฐ์ขึ้นสำหรับแต่ละเอลิเมนต์ในขั้นตอนที่แล้วจำเป็นต้องนำมารวมกันอย่างถูกต้องและมีการประกอบสมการไฟไนต์เอลิเมนต์แต่ละสมการเข้าด้วยกันซึ่งจะก่อให้เกิดระบบสมการขนาดใหญ่ จากนั้นจึงประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตของปัญหานั้นๆ ก่อนที่จะแก้ระบบสมการขนาดใหญ่ชุดนั้น เพื่อหาผลลัพธ์ที่จุดต่อ ซึ่งผลลัพธ์ที่จุดต่อเหล่านี้อาจแทนค่าอุณหภูมิหากเป็นการวิเคราะห์ปัญหาด้านการถ่ายเทความร้อน เป็นต้น

### 5. การคำนวณหาค่าอื่นๆ ที่เหลือ

หลังจากคำนวณค่าอื่นๆ ที่เหลือแล้ว หลังจากนั้นจึงเป็นการหาค่าอื่นๆ ที่ต้องการทราบ เพื่อที่จะทำให้ปัญหานั้นได้รับการวิเคราะห์โดยสมบูรณ์ เช่น ในการแก้ปัญหาด้านความร้อนเมื่อทราบอุณหภูมิตามตำแหน่งต่างๆ แล้วก็จะสามารถคำนวณหาปริมาณฟลักซ์ความร้อนที่ไหลผ่านได้

## 3.4. ข้อดีและข้อเสียของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

### 3.4.1. ข้อดีของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Logan, n.d.)

1. สามารถนำมาใช้วิเคราะห์ปัญหาที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ (จุดเด่นที่สุด)
2. สามารถนำมาใช้วิเคราะห์ปัญหาที่ซับซ้อน เช่น
  - การสั่นสะเทือน (vibration)
  - ปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงของสภาพไฟฟ้า (transients)
  - ระบบนอนลิเนียร์ (nonlinear)
  - การถ่ายเทความร้อน (heat Transfer)
  - ของไหล (fluids)
  - การโก่งเดาะ (buckling)
  - แม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic)

3. สามารถนำมาใช้วิเคราะห์ปัญหาที่รับภาระต่างๆ เช่น
  - ภาระที่กระทำกับ node เช่น point loads
  - ภาระที่กระทำกับ element เช่น pressure, thermal, gravity forces
  - ภาระที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา หรือภาระที่ขึ้นอยู่กับความถี่
4. สามารถนำมาใช้วิเคราะห์ปัญหาที่วัสดุมีคุณสมบัติแบบ non-isotropic
  - Orthotropic
  - Anisotropic
5. สามารถนำมาใช้วิเคราะห์ปัญหาที่วัสดุมีคุณสมบัติพิเศษ เช่น
  - คุณสมบัติของวัสดุเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ
  - ความคืบ (creep)
  - การพองตัว (swelling)
6. สามารถนำมาใช้วิเคราะห์ปัญหาที่เป็นแบบ
  - Large displacements
  - Large rotations
  - Contact (gap) conditions

### 3.4.2. ข้อเสียของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Logan, n.d.)

1. เป็นวิธีการประเมินเชิงตัวเลขดังนั้นจะมี error เกิดขึ้นเสมอ
2. ผู้ใช้ต้องมีประสบการณ์และความชำนาญในการทำแบบจำลอง FEM ถึงจะทำให้ได้คำตอบที่สอดคล้องกับความเป็นจริง
3. ต้องใช้คอมพิวเตอร์ที่มีสมรรถนะสูงและซอฟต์แวร์ที่น่าเชื่อถือ (ราคาแพง)
4. มีปัญหาเชิงตัวเลขเกิดขึ้น
  - การเก็บค่าเลขนัยสำคัญที่จำกัดของเครื่องคอมพิวเตอร์
  - Round-off error สะสม
5. มีข้อผิดพลาดเกิดขึ้นจากการทำ Modeling เนื่องจาก
  - การเลือกใช้ชนิดเอลิเมนต์ที่ไม่เหมาะสม
  - การใช้ Distorted element ใน โมเดล
  - การทำเมชที่ไม่เหมาะสม
6. พฤติกรรมบางอย่างไม่ได้รวมให้โดยอัตโนมัติ เช่น
  - Buckling
  - Large displacements และ Large rotations
  - Materials nonlinearities
  - Nonlinearities อื่นๆ เช่น Contact condition

### 3.5. ซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ที่นิยมใช้ในระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ปัจจุบันนี้มีซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำนวนมาก โดยแบ่งซอฟต์แวร์ตามสิทธิในการใช้งานออกเป็น 2 กลุ่มหลัก คือ

1. กลุ่มของซอฟต์แวร์รหัสเปิด (Open Source Software) และฟรีแวร์ (Freeware) เช่น Elmer FEM solver, GetFEM++, CalculiX, Z88, ParaFEM เป็นต้น
2. กลุ่มของซอฟต์แวร์กรรมสิทธิ์ (proprietary software) และซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ (commercial software) เช่น MITCNL, NLFET, ABAQUS, NASTRAN, ALGOR, ANSYS, COMSOL Multiphysics ฯลฯ

สำหรับงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ซอฟต์แวร์ COMSOL<sup>TM</sup> Multiphysics ในการวิเคราะห์ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เนื่องจากมีโมดูล (module) ที่รองรับการวิเคราะห์ทางด้านสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และการวิเคราะห์ด้านการถ่ายเทความร้อนโดยตรงคือ RF Module และ Heat-Transfer Module ตามลำดับ ซึ่งจะเป็นการช่วยอำนวยความสะดวกในการวิเคราะห์ และลดระยะเวลาที่ใช้ในการป้อนสมการจำเพาะในการวิเคราะห์ลง ซึ่งต่างจากซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์อื่นๆ ที่บางส่วนผู้ใช้งานจำเป็นต้องใส่สมการจำเพาะในการวิเคราะห์บางส่วนเอง จึงเป็นการเสียเวลา และมีความเสี่ยงต่อการเลือกใช้สมการที่ถูกต้อง เนื่องจากหากผู้เลือกสมการผิดพลาดหรือใส่ตัวแปรในระบบสมการผิดจะทำให้ผลลัพธ์ที่แสดงออกมาผิดพลาดตามไปด้วย ผวนอกกับที่ผู้วิจัยมีความถนัดในการใช้งานจึงเลือกซอฟต์แวร์นี้มาใช้ในการวิเคราะห์ปัญหา

### 3.6. สมการทางคณิตศาสตร์ในระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

#### 3.6.1. พื้นฐานสมการทางด้านสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

$$\nabla \times \{H\} = \left\{ \frac{\partial D}{\partial t} \right\} = \{J_s\} + \{J_e\} + \{J_v\} + \left\{ \frac{\partial D}{\partial t} \right\} \quad (3.1)$$

$$\nabla \times \{E\} = - \left\{ \frac{\partial B}{\partial t} \right\} \quad (3.2)$$

$$\nabla \cdot \{B\} = 0 \quad (3.3)$$

$$\nabla \cdot \{D\} = \rho \quad (3.4)$$

เมื่อ	$\nabla \times$	=	ตัวปฏิบัติการเคิร์ล
	$\nabla \cdot$	=	ตัวปฏิบัติการไดเวอร์เจนซ์
	$\{H\}$	=	เวกเตอร์ความเข้มของสนามแม่เหล็ก
	$\{J\}$	=	เวกเตอร์ความหนาแน่นของกระแสรวม
	$\{J_s\}$	=	เวกเตอร์ความหนาแน่นของแหล่งกำเนิดกระแส
	$\{J_e\}$	=	เวกเตอร์ความหนาแน่นของกระแสที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ
	$\{J_v\}$	=	เวกเตอร์อัตราเร็วของความหนาแน่นของกระแส
	$\{D\}$	=	เวกเตอร์ความหนาแน่นของฟลักซ์ไฟฟ้า
	$\{E\}$	=	เวกเตอร์ความเข้มของสนามไฟฟ้า
	$\{B\}$	=	เวกเตอร์ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก
	$\rho$	=	ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้า
	$t$	=	เวลา

สมการที่ (3.5) เป็นสมการแสดงการหาค่าของเวกเตอร์ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก

$$\{B\} = [\mu]\{H\} \quad (3.5)$$

เมื่อ  $[\mu]$  = ค่าการดูดซึมสนามแม่เหล็กในรูปแบบของเมตริกซ์

เมื่อสมการที่ (3.5) แสดงค่าการดูดซึมสนามแม่เหล็กในรูปแบบเมตริกซ์

$$[\mu] = \mu_0 \begin{bmatrix} \mu_{rx} & 0 & 0 \\ 0 & \mu_{ry} & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{rz} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

เมื่อ  $\mu_0$  = ค่าการซึมซับสนามแม่เหล็กในสุญญากาศ

$\mu_{rx}$  = ค่าการดูดซึมสนามแม่เหล็กสัมพัทธ์ในแนวแกน x

สมการที่ (3.7) แสดงการหาเวกเตอร์ความหนาแน่นของกระแสรวม

$$\{D\} = [\sigma][\{E\} + \{V\} \times \{B\}] \quad (3.7)$$

สมการที่ (3.8) แสดงการหาเวกเตอร์ความหนาแน่นของกระแส

$$\{D\} = [\sigma][\{E\}] \quad (3.8)$$

เมื่อ

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{zz} \end{bmatrix} = \text{เมตริกซ์ของสภาพการนำไฟฟ้า}$$

$$[\varepsilon] = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix} = \text{เมตริกซ์ของสภาพการนำไฟฟ้า}$$

$$\{V\} = \begin{Bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{Bmatrix}$$

เมื่อ  $\sigma_{xx}$  = สภาพการนำไฟฟ้าในแนวแกน x มีหน่วยเป็น S/m  
 $\mu_{rx}$  = สภาพการดูดซึมทางไฟฟ้าในแนวแกน x มีหน่วยเป็น F/m

### 3.6.2. การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูง

จากสมการที่ (3.1) และสมการ (3.2) ซึ่งเป็นสมการแมกซ์เวลล์ ถ้าพิจารณาในกรณีที่มีสัญญาณฮาร์มอนิกโดยเขียนในรูปของ  $e^{j\omega t}$  จะได้เวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าในรูปของสมการเฮล์มโฮลทซ์ดังสมการที่ (3.9)

$$\nabla \times \left[ \mu_r^{-1} \cdot (\nabla \times \bar{E}) \right] - k_0^2 \bar{\varepsilon}_r \cdot \bar{E} = -j\omega \mu_0 \bar{J}_s \quad (3.9)$$

เมื่อ  $\bar{E}$  = ค่าเวกเตอร์สนามไฟฟ้า  
 $\bar{\varepsilon}_r$  = ความยินยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์  
 $\mu_0$  = ค่าการดูดซึมแม่เหล็กในที่ว่าง  
 $\mu_r$  = ค่าการดูดซึมแม่เหล็กในที่ว่าง  
 $k_0$  = จำนวนคลื่น (vacuum wave number)

$$\begin{aligned}\omega &= \text{ค่าความถี่เชิงมุม} \\ \bar{J}_s &= \text{เวกเตอร์ความหนาแน่นของกระแสแหล่งกำเนิด}\end{aligned}$$

จากสมการ (3.9) สามารถหาค่าของสนามไฟฟ้าได้จากสมการที่ (3.10) และหาค่าของสนามแม่เหล็กได้จากสมการที่ (3.11)

$$\bar{E} = \sum_{i=1}^N \bar{W}_i E_i \quad (3.10)$$

$$\bar{H} = \frac{j}{\omega \mu_0} \bar{\mu}_r^{-1} \cdot \sum_{i=1}^N \bar{W}_i E_i \quad (3.11)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned}\bar{E} &= \text{ค่าเวกเตอร์ความเข้มของสนามไฟฟ้า} \\ \bar{H} &= \text{เวกเตอร์ความเข้มของสนามแม่เหล็ก} \\ E_i &= \text{สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในแต่ละเอลิเมนต์} \\ \bar{W} &= \text{รูปแบบฟังก์ชันเวกเตอร์ของเอลิเมนต์แต่ละแบบ}\end{aligned}$$

### 3.6.3. สมการความสัมพันธ์ระหว่างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและอุณหภูมิ

ความสัมพันธ์ระหว่างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า กับความร้อนที่ใช้ในวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีรูปแบบของสมการทางคณิตศาสตร์แบบเมตริกซ์ซึ่งแสดงได้ดังสมการ (3.12)

$$\begin{bmatrix} [C] & [0] \\ [0] & [0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{T}\} \\ \{0\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_c] & [0] \\ [0] & [K_v] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{T\} \\ \{0\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{Q\} \\ \{I\} \end{Bmatrix} \quad (3.12)$$

เมื่อ  $\{Q\} = \{Q^{nd}\} + \{Q^g\} + \{Q^j\} + \{Q^c\}$

และ

$$\begin{aligned}[C] &= \text{เมตริกซ์ของความร้อนจำเพาะ} \\ \{\dot{T}\} &= \text{เอลิเมนต์ของการนำความร้อน} \\ \{T\} &= \text{เวกเตอร์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่โหนด โดยความสัมพันธ์กับเวลา} \\ \{V\} &= \text{เวกเตอร์แรงดันที่โหนด} \\ [K_c] &= \text{เวกเตอร์อัตราการไหลของความร้อนที่โหนดนั้นๆ} \\ [K_v] &= \text{เวกเตอร์อัตราการเกิดความร้อนภายใน}\end{aligned}$$

$[K^m]$	=	เวกเตอร์อัตราการเกิดความร้อนจากสมการ Joule heating
$\{Q\}$	=	ความร้อนรวม
$\{Q^{nd}\}$	=	เวกเตอร์อัตราการไหลของความร้อนที่โหนดนั้นๆ
$\{Q^s\}$	=	เวกเตอร์อัตราการเกิดความร้อนภายใน
$\{Q^j\}$	=	เวกเตอร์อัตราการเกิดความร้อนจากสมการ Joule heating
$\{Q^c\}$	=	เวกเตอร์การพาความร้อนที่ผิว
$\{I\}$	=	โหนดเวกเตอร์อันเนื่องมาจากการไหลของกระแสที่โหนด

จากสมการที่ (3.12) เป็นสมการที่มีการใช้ลักษณะการคำนวณของเมตริกซ์ที่มีความสัมพันธ์รูปแบบของอุณหภูมิ และกระแสไฟฟ้า ฟลักซ์แม่เหล็ก และค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิซึ่งถูกกำหนดด้วยการพาความร้อน ( $Q$ ), อุณหภูมิ ( $T$ ), ความร้อนจำเพาะ ( $C$ ), การพาความร้อน ( $K$ ), และในส่วนของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับพลังงานไฟฟ้า จะถูกกำหนดด้วยแรงดัน ( $V$ ), กระแส ( $I$ ), ในสมการค่าของตัวแปร ( $Q^j$ ) เวกเตอร์อัตราการเกิดความร้อนจากสมการ Joule heat ดังในสมการที่ (3.13)

$$Q^j = \text{Re} \left( \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n [\rho] \{J_{ii}\} \cdot \{J_{ii}\}^* \right) \quad (3.13)$$

เมื่อ	$Q^j$	=	Joule heat ต่อหน่วยปริมาตร
	$n$	=	จำนวนเอลิเมนต์ที่อินทิเกรต
	$[\rho]$	=	เมตริกซ์ของสภาพความต้านทาน
	$\text{Re}$	=	จำนวนจริงขององค์ประกอบ
	$\{J_{ii}\}$	=	ความหนาแน่นของกระแสรวมในแต่ละเอลิเมนต์
	$\{J_{ii}\}^*$	=	คอนจูเกตของความหนาแน่นของกระแสรวมในแต่ละเอลิเมนต์

## บทที่ 4

### หลักการและวิธีการทดลอง

บทนี้จะกล่าวถึงหลักการและวิธีการที่ใช้ในการทดลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการประมวลผล เงื่อนไขที่ใช้ในการจำลอง คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการจำลอง การเมชเอลิเมนต์ และวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม COMSOL™ Multiphysics รวมไปถึงการทวนสอบความถูกต้องของแบบจำลองด้วยการเทียบผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ปัญหาของแบบจำลองกับผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ

#### 4.1. หลักการวิเคราะห์

งานวิจัยฉบับนี้ได้ใช้โปรแกรม COMSOL™ Multiphysics ในการวิเคราะห์การส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่กำเนิดจากเตาอบไมโครเวฟไปยังโคชนมปังที่ระดับความเข้มข้นของเกลือต่างๆ โดยมีขั้นตอนการวิเคราะห์ปัญหาทั้งหมดดังรูปที่ 4.1

จากรูปที่ 4.1 เป็นกระบวนการในการวิเคราะห์ปัญหาทางด้านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและปัญหาทางด้านความร้อนซึ่งแปรเปลี่ยนไปตามเวลา ดังนั้นเมื่อทำการคำนวณปัญหาจึงต้องมีการประมวลผลอย่างสม่ำเสมอ เพื่อหาผลลัพธ์ ณ เวลานั้น จนกระทั่งครบเวลาที่กำหนดจึงถือว่าการวิเคราะห์ปัญหาเสร็จสิ้นอย่างสมบูรณ์ สามารถจะทำการรวบรวมข้อมูล และวิเคราะห์เพื่อตีความผลลัพธ์ได้

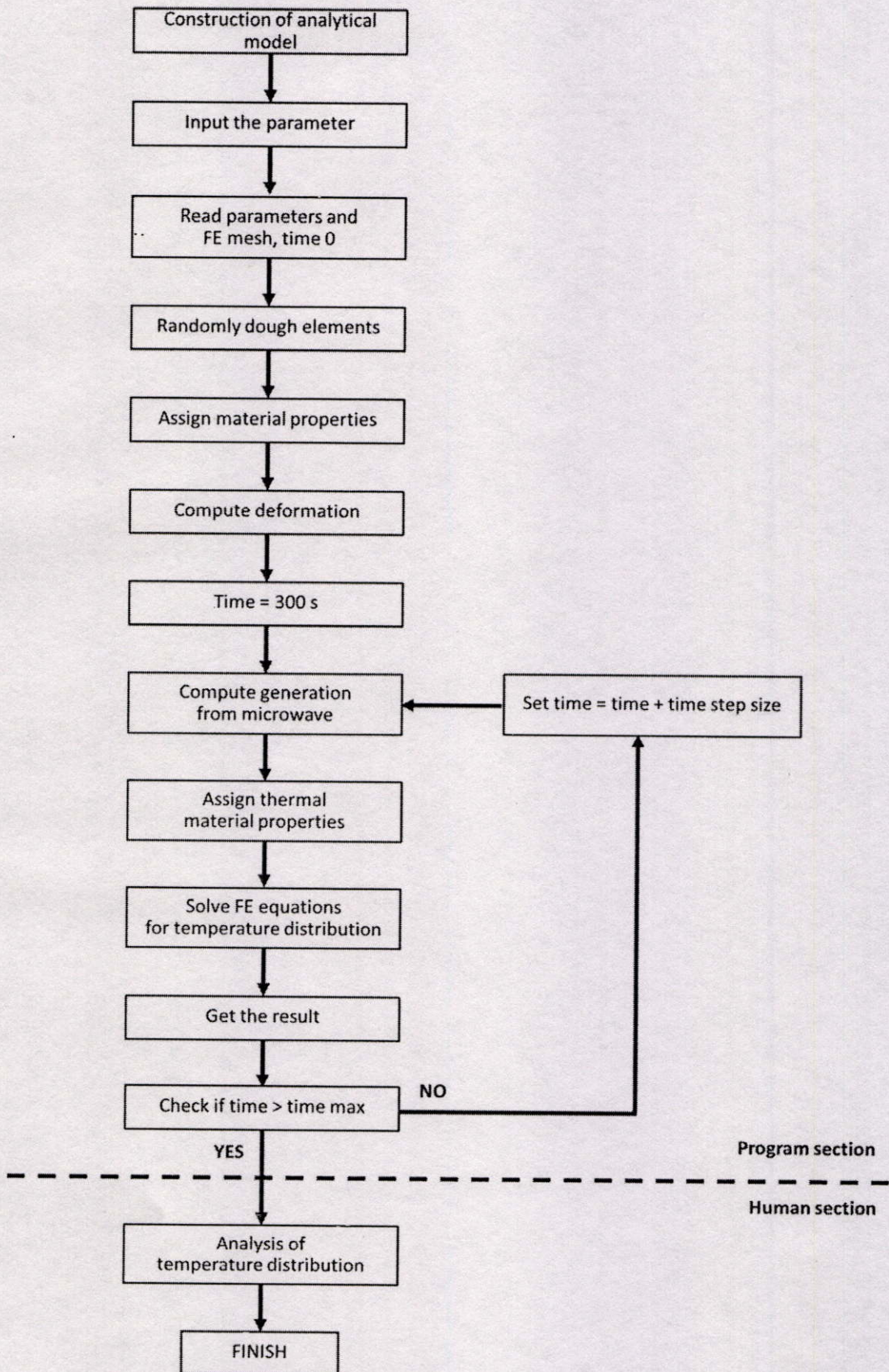
#### 4.2. การวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์

##### 4.2.1. ซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์

4.2.1.1. COMSOL™ Multiphysics (ลิขสิทธิ์การใช้งานถูกต้องตามกฎหมายผ่านงานบริการซอฟต์แวร์ สำนักบริการคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง)

4.2.1.2. Personal Computer (PC) ที่มีทรัพยากรในการประมวลผลดังต่อไปนี้

- หน่วยประมวลผลกลาง (CPU) : Intel(R) Core(TM) i7 (2.8 GHz)
- หน่วยความจำหลัก (RAM) : 4.00 GB
- ระบบปฏิบัติการ (operating system) : Windows 7 (64 bit)



รูปที่ 4.1 แผนภาพขั้นตอนการวิเคราะห์ปัญหา

#### 4.2.2. สภาพะเงื่อนไขขอบเขตและสมมติฐาน

สภาพะเงื่อนไขขอบเขตและสมมติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาการกระจายของอุณหภูมิภายใน โดชนมปัง มีดังต่อไปนี้

- พิจารณาปรากฏการณ์ในระนาบ 3 มิติ
- เลือกรูปแบบสนามไฟฟ้าตัดขวาง  $TE_{10}$
- ขอบเขตของโดเมนที่ใช้คำนวณเป็นแบบกระจายคลื่น (scattering)
- ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะของสสารภายในแบบจำลอง
- ไม่มีการถ่ายเทมวลสารเข้าออกจากแบบจำลอง
- ไม่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นภายในแบบจำลอง
- แบบจำลองมีความสมมูลย์ทางเทอร์โมไดนามิกส์
- แบบจำลองไม่มีการเคลื่อนที่
- กำหนดผิวของแบบจำลองโดไม่มีการถ่ายเทความร้อนกับสิ่งแวดล้อม
- ค่าสมบัติไดอิเล็กทริก และค่าสมบัติทางความร้อนของร่อนแบบจำลองมีค่าคงที่
- อุณหภูมิของแบบจำลอง โดชนมปังมีค่าเท่ากับ 32 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิเฉลี่ย อุณหภูมิห้องปฏิบัติการ)

#### 4.2.3. เงื่อนไขปัญหาด้านความร้อน

สนามไฟฟ้าที่ได้จากเงื่อนไขขอบเขตด้านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะถูกนำมาใช้เป็นสภาวะป้อนเข้า (input) ของปัญหาด้านความร้อน ดังนั้นความร้อนที่เกิดขึ้นภายใน โดชนมปังจะมาจากสนามไฟฟ้า โดยการวิเคราะห์ปัญหาการถ่ายเทความร้อนจะวิเคราะห์เฉพาะความร้อนที่เกิดขึ้นภายใน โดชนมปังภายใต้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในแบบจำลอง 3 มิติ (อากาศไม่มีผลต่อการดูดซับพลังงานไมโครเวฟเป็นความร้อน) โดยสมมติให้ภายในแบบจำลองมีการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำความร้อนเพียงอย่างเดียว

#### 4.2.4. ค่าตัวแปรที่ใช้ในการจำลอง

ค่าตัวแปรที่ใช้ในการจำลองจะถูกแบ่งออกเป็น ตัวแปรของเตาอบไมโครเวฟและโดชนมปัง โดยค่าตัวแปรของเตาอบไมโครเวฟแสดงดังตารางที่ 4.1 และค่าตัวแปรของโดชนมปังจะถูกกำหนดตามค่าคุณสมบัติจำเพาะของโดแสดงไว้ในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 ค่าตัวแปรวัสดุของเตาอบไมโครเวฟ

วัสดุ	คุณสมบัติ	ค่าจำเพาะ	หน่วย	ที่มา
ทองแดง (copper)	Electric conductivity ( $\sigma$ )	5.998e7	S/m	Anonymous (2007)
	Dielectric constant ( $\epsilon'$ )	1	-	
	Relative permeability ( $\mu$ )	1	-	
แก้ว (glass)	Electric conductivity ( $\sigma$ )	0	S/m	Anonymous (2007)
	Dielectric constant ( $\epsilon'$ )	2.55	-	
	Relative permeability ( $\mu$ )	1	-	
อากาศ (air)	Electric conductivity ( $\sigma$ )	0	S/m	Anonymous (2007)
	Dielectric constant ( $\epsilon'$ )	1	-	
	Relative permeability ( $\mu$ )	1	-	

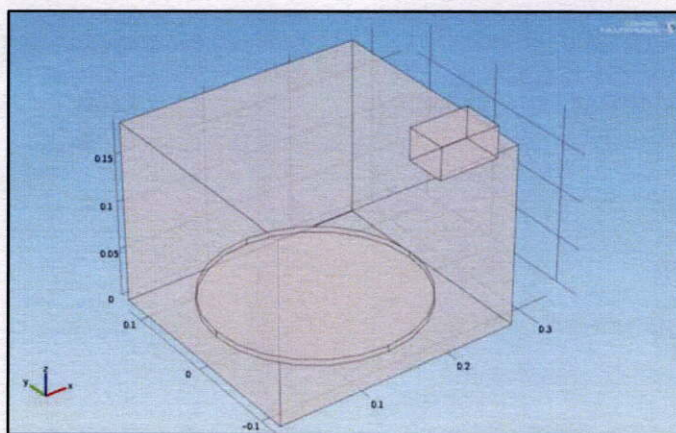
ตารางที่ 4.2 ค่าคุณสมบัติจำเพาะของแบบจำลองโอด

คุณสมบัติ	ค่าจำเพาะ	หน่วย	ที่มา
Electric conductivity ( $\sigma$ )	0	S/m	Puri (1993)
Dielectric constant ( $\epsilon'$ )	4.17-1.55j	-	Anonymous (1982)
Dielectric loss factor ( $\epsilon''$ )			Rahman (1995)
- 0.0% salt concentration	8.5	-	
- 0.2% salt concentration	8.9	-	
- 0.5% salt concentration	10.9	-	
- 1.0% salt concentration	11.5	-	
- 1.5% salt concentration	12.9	-	
Relative permeability ( $\mu$ )	0.48	-	Rahman (1995)
Thermal conductivity ( $k$ )	0.59	W/m.K	Anonymous (1982), Puri (1993),
Density ( $\rho$ )	1000	kg/m <sup>3</sup>	Anonymous (1982), Puri (1993),
Heat capacity at constant pressure ( $c_p$ )	4180	J/(kg.K)	Anonymous (1982), Puri (1993),

#### 4.2.5. การสร้างแบบจำลอง

##### 4.2.5.1. การสร้างแบบจำลองเตาอบไมโครเวฟ

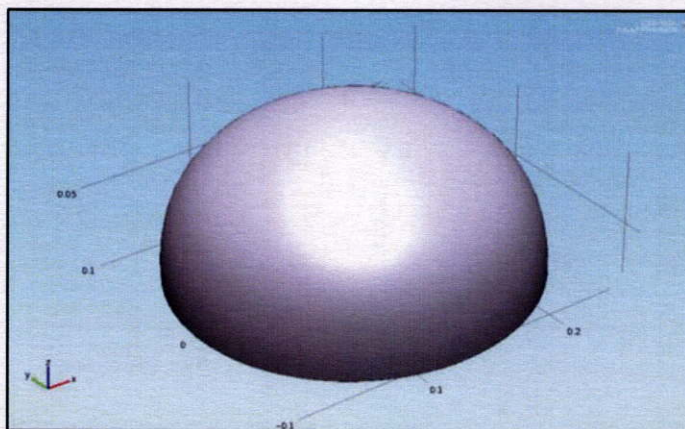
สร้างแบบจำลองเตาอบไมโครเวฟโดยอ้างอิงจากขนาดจริง (รูปที่ 4.2) โดยกำหนดให้ขนาดภายในตู้ไมโครเวฟ (microwave cavity) มีขนาด กว้าง  $\times$  ลึก  $\times$  สูง เท่ากับ  $292.1 \times 266.7 \times 191.77$  มิลลิเมตร และมีขนาดท่อนำคลื่น (waveguide) กว้าง  $\times$  ลึก  $\times$  สูงเท่ากับ  $50 \times 78 \times 18$  มิลลิเมตร ซึ่งจะกำหนดค่าตัวแปรของเตาอบไมโครเวฟเป็นดังตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.2 แบบจำลองของเตาอบไมโครเวฟ

##### 4.2.5.2. การสร้างแบบจำลองโคชนมปัง

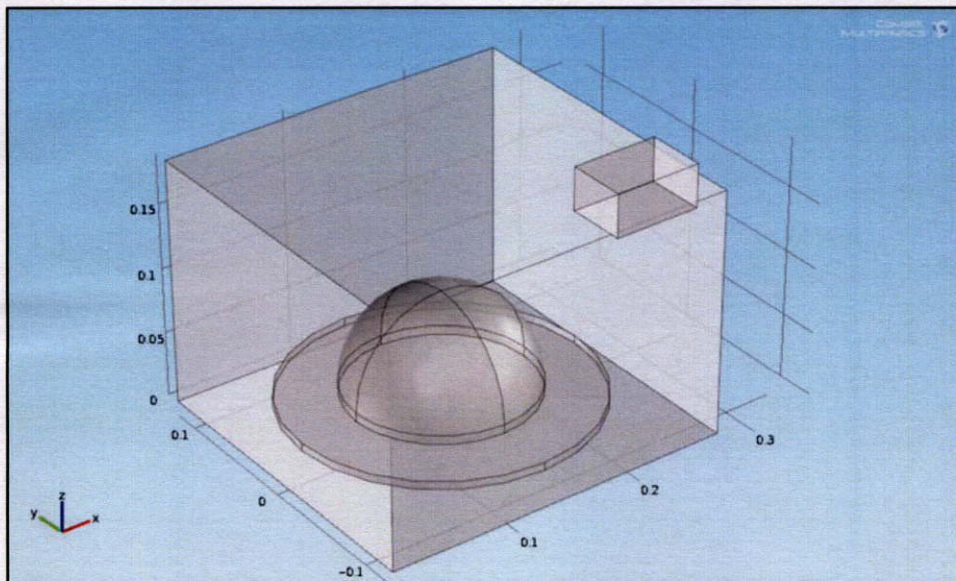
สร้างแบบจำลองโคชนมปังรูปทรงครึ่งทรงกลมตัดขวางมีรัศมี  $1.27 \times 10^2$  มิลลิเมตร และสูงเท่ากับ  $7.62 \times 10^2$  มิลลิเมตร (รูปที่ 4.3) โดยกำหนดค่าตัวแปรของโคชนมปังดังตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.3 แบบจำลองของโคชนมปัง

#### 4.2.6. การประกอบแบบจำลองเตาอบไมโครเวฟ และโดขนมปังเข้าด้วยกัน

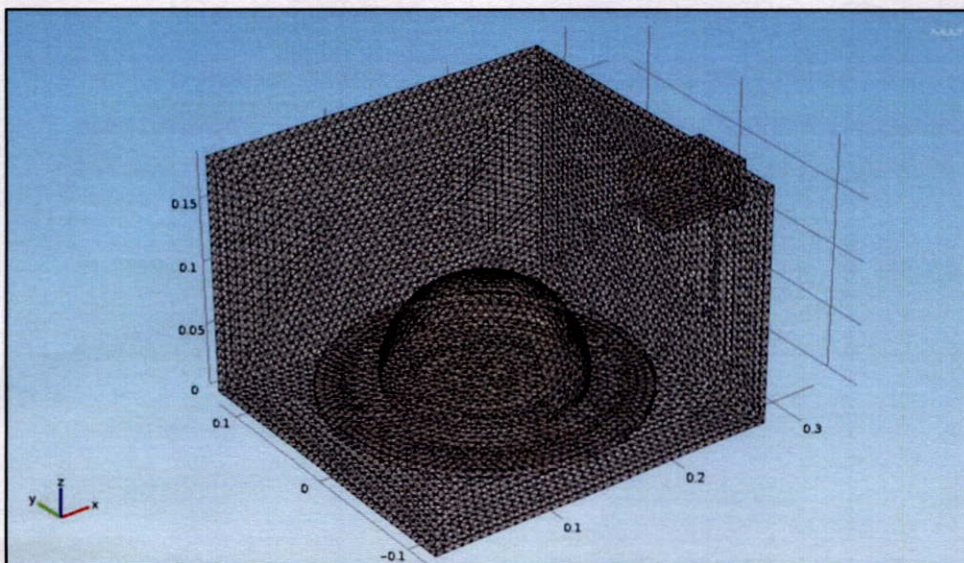
หลังจากสร้างแบบจำลองเตาอบไมโครเวฟและ โดขนมปังในหัวข้อที่ 4.2.5 เสร็จแล้ว จะทำการประกอบทั้งสองส่วนให้รวมเป็นแบบจำลองเดียวกันดังรูปที่ 4.4



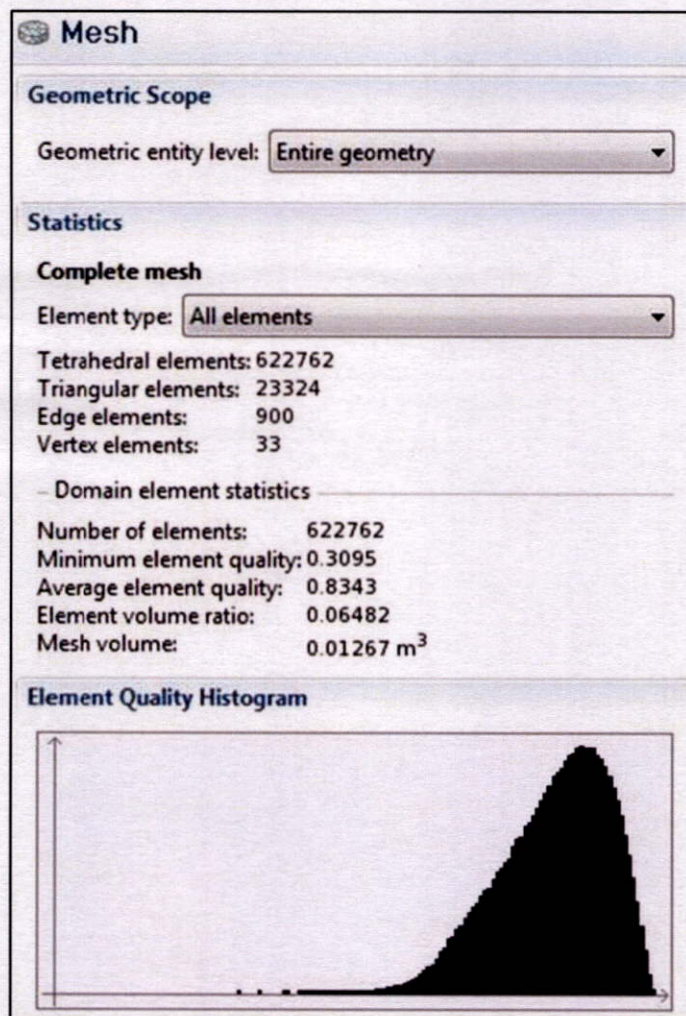
รูปที่ 4.4 แบบจำลองโดขนมปังที่ประกอบเข้ากับแบบจำลองเตาอบไมโครเวฟ

#### 4.2.7. กำหนดจำนวนเมชให้เหมาะสมกับองค์ประกอบแต่ละส่วน

ในการสร้างเมชแบบจำลองได้เลือกใช้เมชสี่เหลี่ยม (structured grid) ในการสร้างซึ่งจะใช้ตามความเหมาะสม ถ้าบริเวณใดมีความสำคัญและมีผลต่อการศึกษาจะมีการแบ่งจำนวนเมชที่ละเอียดกว่าบริเวณที่มีผลต่อศึกษาน้อย ในที่นี้ได้ทำการตรวจสอบแล้วว่าจำนวนเมชขนาดใดก็ตามล้วนแต่จะไม่ทำให้ผลลัพธ์เปลี่ยนแปลง ดังนั้นจำนวนเมชเซลล์จึงไม่มีผลต่อผลลัพธ์ (มีความเป็นอิสระของเมช) ทำให้แนวทางในการเลือกความหนาแน่นเมช (grid density) ของแบบจำลองนั้นสามารถเลือกใช้จำนวนเมชที่น้อยที่สุดที่ไม่ทำให้ผลลัพธ์เปลี่ยนแปลง ซึ่งจะช่วยลดระยะเวลาและขั้นตอนในการคำนวณลงได้ โดยรูปที่ 4.5 แสดงผลลัพธ์ของการเมชแบบจำลองโดขนมปังในเตาอบไมโครเวฟ และรูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นถึงจำนวนของโหนด จำนวนเอลิเมนต์ คุณภาพของเอลิเมนต์ จำนวนอัตราส่วนปริมาตรของเอลิเมนต์ของแบบจำลอง



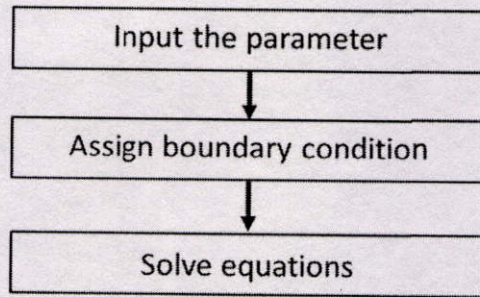
รูปที่ 4.5 แสดงการเมชแบบจำลองโดเมนปิ่งและเตาอบไมโครเวฟ



รูปที่ 4.6 แสดงค่าตัวแปรของเมชที่ใช้ในแบบจำลอง

#### 4.2.8. การคำนวณปัญหา

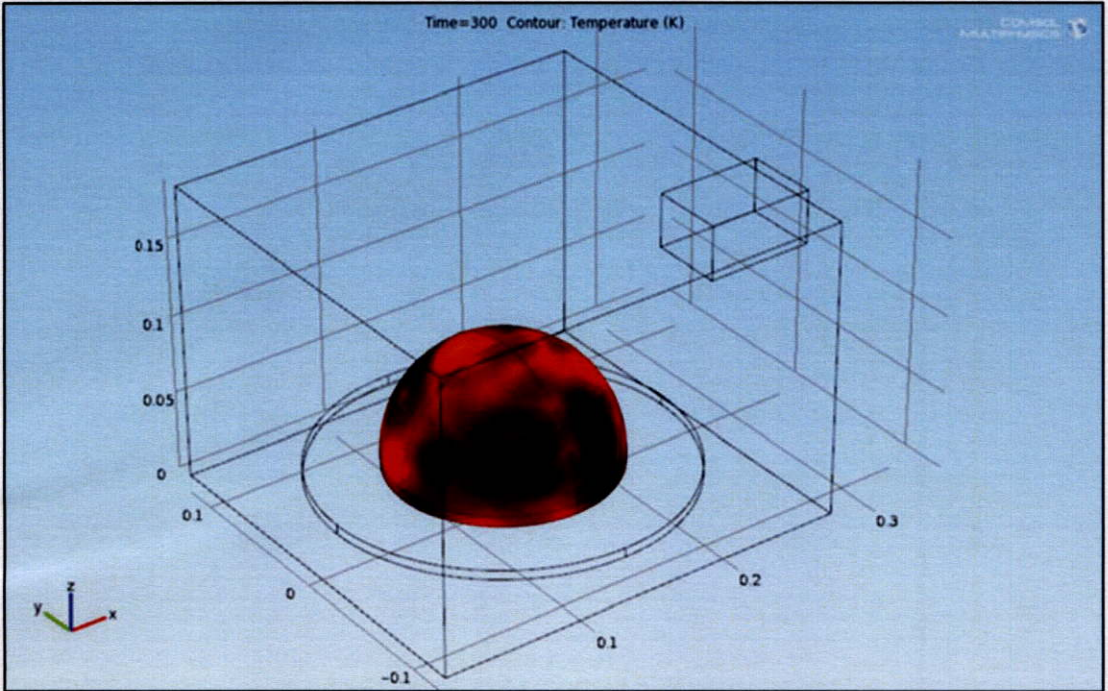
การคำนวณปัญหาทำได้โดยการใส่ค่าตัวแปรต่างๆ ลงในสมการความร้อนและสมการสนามแม่เหล็กไฟฟ้า แล้วกำหนดเงื่อนไขขอบเขตให้กับแบบจำลองเตาอบไมโครเวฟและโดชนมปัง โดยมีแผนภาพลำดับขั้นตอนการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.7 ซึ่งในงานวิจัยนี้จะคำนวณปัญหาในแต่ละระดับความเข้มข้นเกลือที่ 0.0% 0.2% 0.5% 1.0% และ 1.5%



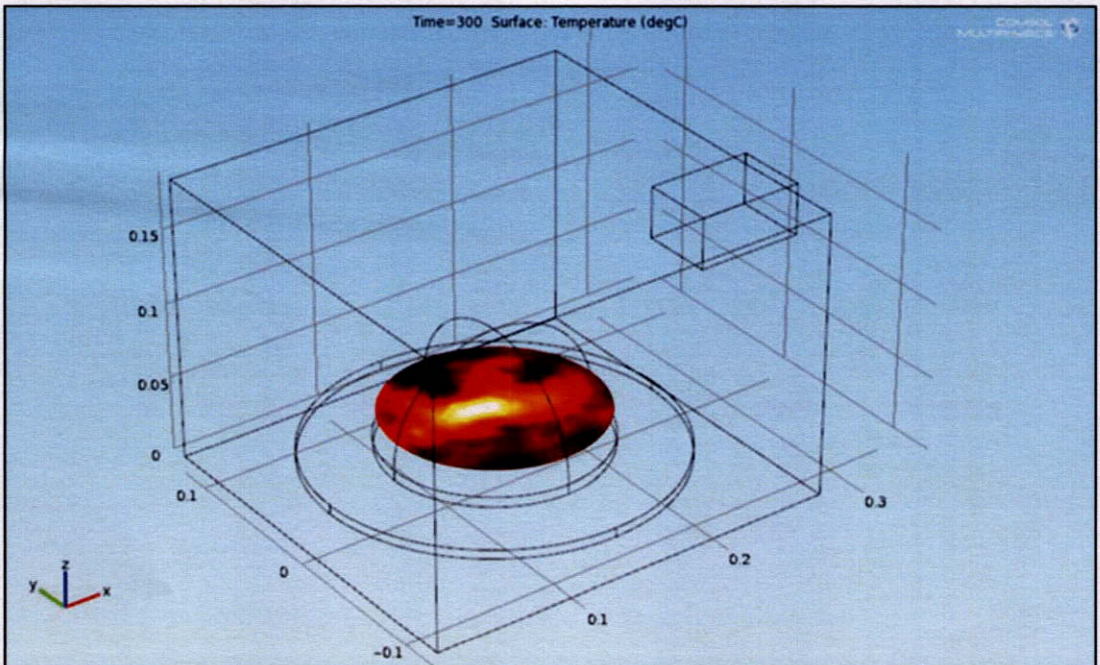
รูปที่ 4.7 แผนภาพขั้นตอนการคำนวณวิเคราะห์ปัญหา

#### 4.2.9. การแสดงผลการลัพธ์และแบบจำลอง

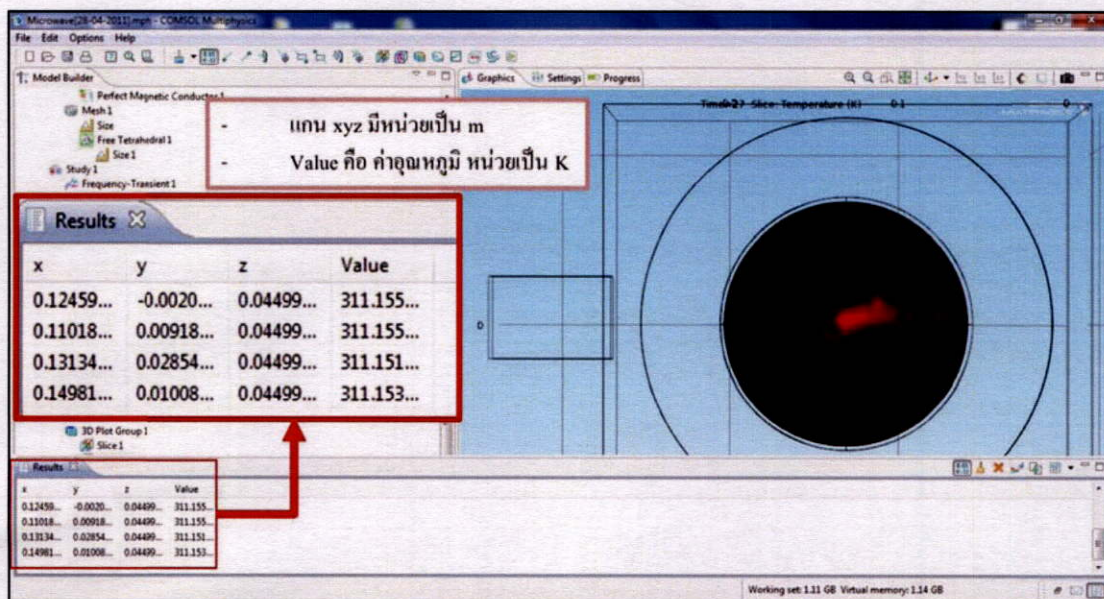
ผลลัพธ์การกระจายความร้อนในโดชนมปังที่ระดับความเข้มข้นของเกลือ 0.0% 0.2% 0.5% 1.0% และ 1.5% ที่ได้จากการแก้ปัญหาด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ผ่านโปรแกรม COMSOL™ Multiphysics จะแสดงในรูปของแบบจำลองสามมิติ (ดังรูปที่ 4.8) โดยจะพิจารณาเฉพาะแบบจำลองของโดชนมปังเท่านั้นและเพื่อให้สามารถพิจารณาการกระจายอุณหภูมิในแบบจำลองสามมิติให้ชัดเจนยิ่งขึ้นจึงพิจารณาแบบจำลองแบบตัดขวางผ่านการมองจากมุมมองด้านบน (top view) ดังรูปที่ 4.9 พร้อมให้ค่าผลลัพธ์ของอุณหภูมิตามแนวแกน xyz ของแบบจำลอง ซึ่งตำแหน่งบนแกน xyz นี้ จะเป็นตัวระบุจุดของอุณหภูมิที่ต้องการศึกษา (งานวิจัยนี้ได้กำหนดจุดบนแกน xyz ให้มีตำแหน่งเดียวกับตำแหน่งของหัววัดอุณหภูมิที่ติดตั้งภายในไมโครเวฟในการทดลองในห้องปฏิบัติการ) ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.10 ทั้งนี้นอกจากจะพิจารณาค่าของอุณหภูมิแล้วยังสามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิผ่านแบบจำลองสามมิติได้ โดยให้สีเป็นตัวแทนของอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลง (temperature gradient) ซึ่งได้กำหนดให้สีค่าสนิทเป็นสีที่มีอุณหภูมิต่ำสุด และไล่ลำดับสีจนกระทั่งกลายเป็นสีขาวบริสุทธิ์ซึ่งถูกกำหนดให้เป็นสีที่มีอุณหภูมิสูงสุด ดังรูปที่ 4.11



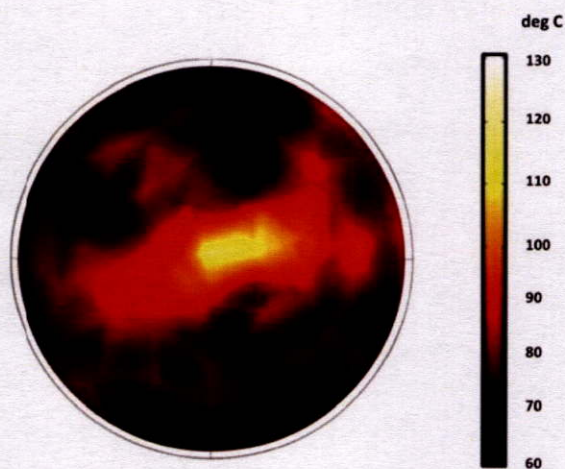
รูปที่ 4.8 ตัวอย่างการแสดงผลของแบบจำลองสามมิติ  
ของแบบจำลองการกระจายความร้อนในโดเมนปิ่ง



รูปที่ 4.9 แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในโดเมนปิ่งในแนวตัดขวาง



รูปที่ 4.10 ตัวอย่างการแสดงผลของแบบจำลองสามมิติ (มุมมองด้านบน) และค่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ

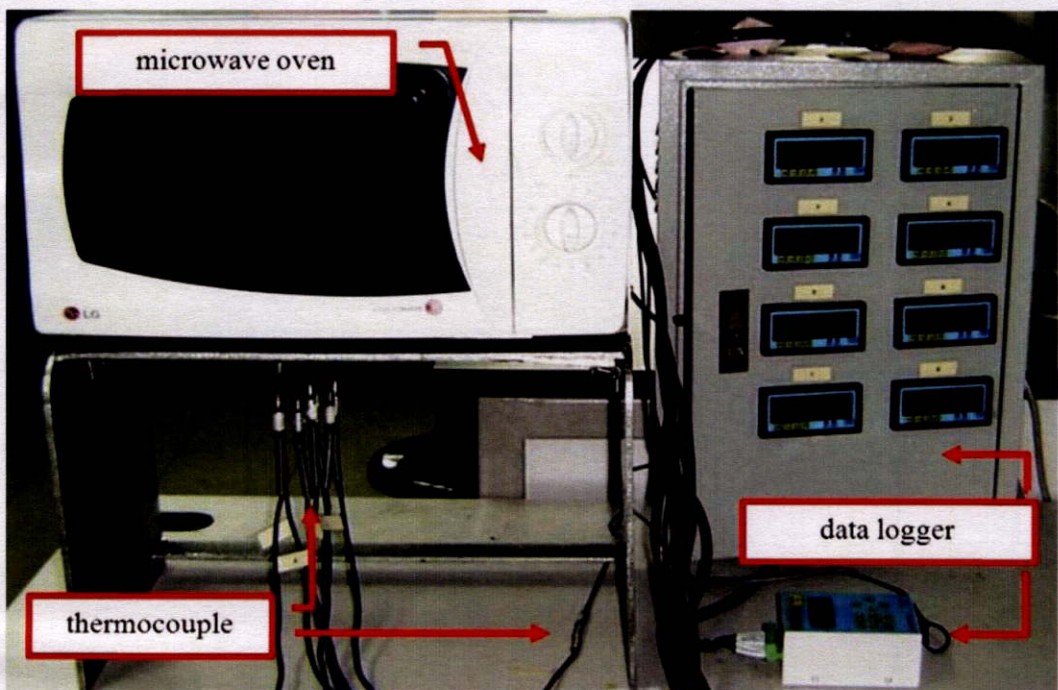


รูปที่ 4.11 แบบจำลองสามมิติแสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในโดเมนปิ่งที่มองผ่านมุมมองด้านบนเทียบกับสเกลสีแสดงค่าแนวโน้มอุณหภูมิ

### 4.3. การทวนสอบความถูกต้อง

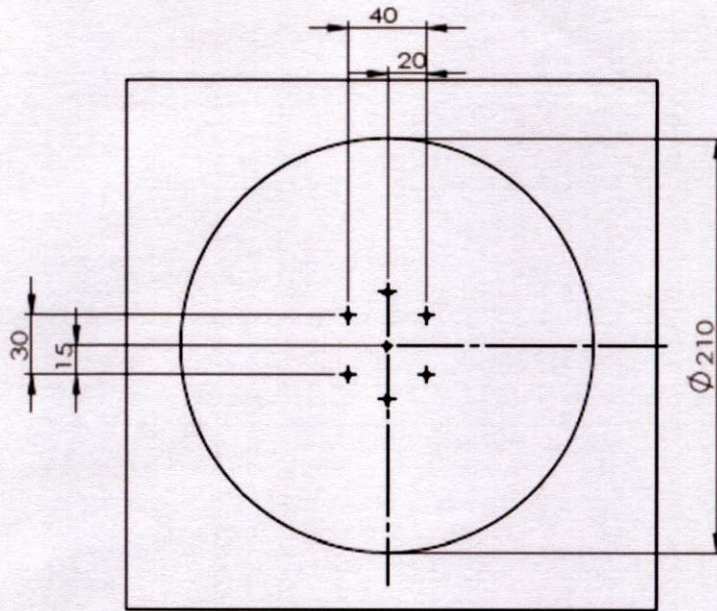
#### 4.3.1. อุปกรณ์ เครื่องมือ และการติดตั้ง

ในการทวนสอบใช้เตาอบไมโครเวฟยี่ห้อ แอลจี รุ่น MS-202W ขนาดความจุ 20 ลิตร (แรงดันและกำลังไฟ ดังต่อไปนี้ กระแสสลับ 220 โวลต์ 50 เฮิรซ์ 1150 วัตต์) ยานความถี่ 2450 เมกะเฮิรซ์ เป็นแหล่งกำเนิดไมโครเวฟ และติดตั้งหัววัดอุณหภูมิ (thermocouple) ทั้งหมด 8 หัว เชื่อมต่อกับเครื่องบันทึกอุณหภูมิอัตโนมัติ (แสดงไว้ดังรูปที่ 4.12)

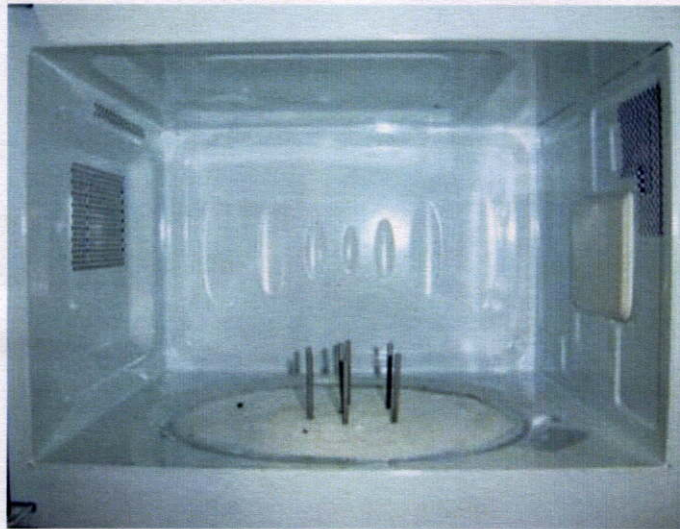


รูปที่ 4.12 เตาอบไมโครเวฟ หัววัดอุณหภูมิ และเครื่องบันทึกอุณหภูมิที่ติดตั้งเข้าด้วยกัน

โดยทำการติดตั้งหัววัดอุณหภูมิที่ 1-7 ให้เป็นหัววัดอุณหภูมิที่ใช้บันทึกอุณหภูมิแต่ละตำแหน่งของโดขนมปังในไมโครเวฟ แสดงไว้ดังรูปที่ 4.13 - 4.14 และหัววัดที่ 8 เป็นหัววัดควบคุมที่ใช้บันทึกอุณหภูมิของสถานะแวดล้อมปกติในขณะที่ทำการทดลอง (อยู่นอกไมโครเวฟ)



รูปที่ 4.13 แสดงตำแหน่งการติดตั้งหัววัดอุณหภูมิภายในเตาอบไมโครเวฟ (มุมมองด้านบน)



รูปที่ 4.14 แสดงตำแหน่งการติดตั้งหัววัดอุณหภูมิภายในเตาอบไมโครเวฟจริง

#### 4.3.2. การเตรียมตัวอย่างโคชนมปัง

เตรียมตัวอย่างโคชนมปังโดยใช้แป้งขนมปัง 1000 กรัม ยีสต์แห้ง 10 กรัม นมผงขาดมันเนย 30 กรัม น้ำตาลทราย 65 กรัม น้ำ 550 กรัม เนยขาว 55 กรัม และเกลือที่กำหนดให้มีความเข้มข้นที่แตกต่างกัน 5 ระดับ คือ 0.0% 0.2% 0.5% 1.0% และ 1.5% ของส่วนผสมทั้งหมด ตามลำดับ นำส่วนผสมทั้งหมดมาวัดผสมจนเข้ากัน พักไว้จนขึ้นเป็น 2 เท่าจากของเดิม (ประมาณ 1 ชั่วโมง) แล้วรีดไล่อากาศจนแป้งเนียน ชั่ง และตัดแบ่งให้ได้ขนาดเป็นก้อนละ 400 กรัม ปั้นเป็นก้อนกลม แล้วพักไว้จนขึ้นอีกครั้ง (ประมาณ 1 ชั่วโมง) รอการทดสอบขั้นต่อไป

### 4.3.3. ระยะเวลาการอบ และย่านความถี่ที่ใช้

นำโคที่ได้จากข้อ 4.3.2 มาวางบนหัววัดอุณหภูมิในเตาอบไมโครเวฟ โดยกำหนดให้โดวางอยู่ตรงกลาง และครอบหัววัดอุณหภูมิทั้งหมด (7 หัว) และให้ความร้อนโดยการผ่านไมโครเวฟที่กำหนดให้มีความถี่เท่ากับ 2450 เมกกะเฮิรซ์ 1150 วัตต์ เป็นเวลา 5 นาที และตั้งค่าเครื่องบันทึกอุณหภูมิอัตโนมัติให้บันทึกอุณหภูมิทุกๆ 1 วินาที โดยทำการทดลองในแต่ละระดับความเข้มข้นของเกลือละ 3 ซ้ำ

## 4.4. การวางแผนการทดลองและการวิเคราะห์ทางสถิติ

### 4.4.1. การทวนสอบความแม่นยำของแบบจำลองการกระจายความร้อนในโคขนมปัง

ทวนสอบความแม่นยำของแบบจำลองโดยการทดสอบค่าเฉลี่ยอุณหภูมิของทั้ง 2 กลุ่ม คือ อุณหภูมิเฉลี่ยจากแบบจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และค่าเฉลี่ยอุณหภูมิจากผลการทดลองในห้องปฏิบัติการด้วยวิธี Two Sample T-test เพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของตัวอย่าง 2 กลุ่ม ณ ระดับความเข้มข้นของเกลือที่ 0.0% 0.2% 0.5% 1.0% และ 1.5% ตามลำดับ ว่ามีความแตกต่างกันหรือไม่ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

### 4.4.2. การศึกษารูปแบบการกระจายความร้อนในโคขนมปัง

ศึกษารูปแบบการกระจายความร้อนใน โคขนมปังที่มีระดับความเข้มข้นของเกลือที่ 0.0% 0.2% 0.5% 1.0% และ 1.5% โดยการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยอุณหภูมิของแบบจำลองโคขนมปังที่จุดวัดอุณหภูมิ 2 ตำแหน่ง คือ ที่จุดวัดตามแนวรัศมี และที่จุดศูนย์กลางโค ของแต่ละระดับความเข้มข้นด้วยวิธี Pair Sample T-test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยพิจารณาพร้อมกับแบบจำลองสามมิติที่ได้จากการจำลองการกระจายอุณหภูมิด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จากโปรแกรม COMSOL™ Multiphysics ซึ่งจะใช้ในการพิจารณาเปรียบเทียบอิทธิพลของเกลือต่อการเพิ่มและกระจายอุณหภูมิ

### 4.4.3. การศึกษาอิทธิพลของระดับความเข้มข้นเกลือและเวลาต่ออุณหภูมิเฉลี่ยของแบบจำลองการกระจายความร้อนในโคขนมปัง

ศึกษาอิทธิพลของระดับความเข้มข้นเกลือและเวลาต่ออุณหภูมิเฉลี่ยของแบบจำลองโคขนมปังโดยทำการทดลองแบบแฟคทอเรียล ในแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Complete Randomized Design, CRD) โดยศึกษาที่ 2 ปัจจัย คือ

1. ระดับความเข้มข้นเกลือที่ 0.0% 0.2% 0.5% 1.0% และ 1.5%
2. ระยะเวลาในการให้ความร้อนผ่านไมโครเวฟที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 นาที

วิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติของอุณหภูมิที่ได้ในแต่ละระดับความเข้มข้นของเกลือ และระยะเวลาการให้ความร้อนผ่านไมโครเวฟ โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

## บทที่ 5

### ผลการจำลองและผลการทดลอง

บทนี้จะกล่าวถึงผลการจำลองและผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยการจำลองจะแสดงให้เห็นถึงการกระจายอุณหภูมิภายในโดขนมปังที่มีระดับความเข้มข้นของเกลือที่ต่างกันทั้ง 5 ระดับ คือ 0.0% 0.2% 0.5% 1.0% และ 1.5% ที่ระยะเวลารวม 5 นาที ซึ่งจะแสดงการกระจายอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในโดขนมปังผ่านรูปภาพที่ได้จากแบบจำลองสามมิติจากโปรแกรม COMSOL™ Multiphysics ณ เวลาที่กำหนด เพื่อเปรียบเทียบและศึกษาอิทธิพลของเกลือต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในโดขนมปัง

ข้อมูลจากผลการทดลองจริงในห้องปฏิบัติการจะถูกนำไปใช้เป็นฐานข้อมูลในการทวนสอบความแม่นยำของแบบจำลองการกระจายความร้อนในโดขนมปังที่สร้างขึ้น โดยคุณลักษณะตัวแปรจำเพาะของโคที่ใช้ในการทดลอง และโคที่ถูกจำลองผ่านโปรแกรมจะถูกควบคุมให้มีความใกล้เคียงกันมากที่สุด เพื่อลดความคลาดเคลื่อนที่จะเกิดขึ้น

#### 5.1. ความแม่นยำของแบบจำลองการกระจายความร้อนในโดขนมปังที่ผ่านการให้ความร้อนจากไมโครเวฟด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์

##### 5.1.1. ความแม่นยำของแบบจำลองการกระจายความร้อนในโดขนมปัง

ความแม่นยำของแบบจำลองการกระจายอุณหภูมิในโดขนมปังโดยใช้วิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ ถูกทวนสอบโดยการเปรียบเทียบกับผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยใช้การเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยของโคที่ระดับความเข้มข้นของเกลือ 0.0% 0.2% 0.5% 1.0% และ 1.5% ทุกๆ 1 นาที จนครบกำหนด 5 นาที เป็นหลัก โดยพบว่าค่าเฉลี่ยอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองการกระจายร้อนของโดขนมปังโดยใช้วิธีไฟไนท์เอลิเมนต์นั้นมีค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสูงกว่าค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของโคที่ได้จากผลการทดลองในห้องปฏิบัติการในทุกระดับความเข้มข้นของเกลือเสมอ (ดังรูปที่ 5.1) ทั้งนี้เนื่องจากการสร้างแบบจำลองนั้นได้กำหนดเงื่อนไขให้แบบจำลองโดขนมปังนั้นมีคุณสมบัติสมบูรณ์แบบอุดมคติ คือทุกส่วนนั้นมีคุณสมบัติเท่ากันหมด ทำให้การดูดซับพลังงานไมโครเวฟเพื่อเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนนั้นเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ สนวกกับการสร้างแบบจำลองด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ในงานวิจัยได้กำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่จำกัด กล่าวคือไม่พิจารณากลไกที่เกิดขึ้นจริงในหลายด้าน ดังหัวข้อที่ 4.2.2 ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ว่าสถานะเงื่อนไขขอบเขตที่ไม่ได้รับการพิจารณาในแบบจำลองนั้นอาจมีผลทำให้ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิในแบบจำลองเกิดความคลาดเคลื่อนได้ ซึ่งการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการนั้นไม่สามารถกำหนดให้โดขนมปังมีคุณสมบัติแบบอุดม

คติเหมือนกับแบบจำลองได้ เช่น ความเรียบของผิวหน้าโค การเกิดโพรงอากาศหรือการพองตัวของโคระหว่างการทำให้สุก เป็นต้น ซึ่งคุณสมบัติที่ควบคุมได้ยากเหล่านี้ล้วนเป็นปัจจัยสำคัญที่จะส่งผลต่อการเปลี่ยนพลังงานไมโครเวฟไปเป็นพลังงานความร้อนในโคให้เกิดขึ้นได้อย่างไรไม่สมบูรณ์ทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยของโคที่ได้จากผลการทดลองมักมีค่าต่ำกว่า (Zhou *et al.*, 1995)

อย่างไรก็ตามเมื่อทำการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยอุณหภูมิจากแบบจำลองและจากผลการทดลองในห้องปฏิบัติการที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่าค่าเฉลี่ยอุณหภูมิของโคขนมปังที่ได้จากแบบจำลองโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และผลจากการทดลองในห้องปฏิบัติการล้วนให้ผลที่ไม่แตกต่างกันในทุกๆ ระดับความเข้มข้นของเกลือ (ดังตารางที่ 5.1-5.5) ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าแบบจำลองการกระจายอุณหภูมิของโคขนมปังโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นมีความแม่นยำเพียงพอที่จะใช้ประเมินการกระจายอุณหภูมิภายในโคขนมปังที่ระดับความเข้มข้นของเกลือที่กำหนดได้

ตารางที่ 5.1 การเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) กับการทดลองในห้องปฏิบัติการของโคขนมปังที่ระดับความเข้มข้นของเกลือ 0.0%

ระยะเวลา	วิธีการ	อุณหภูมิเฉลี่ย
1 นาที	แบบจำลอง FEM	37.46±4.57
	การทดลอง	36.53±3.67
2 นาที	แบบจำลอง FEM	41.90±7.70
	การทดลอง	39.93±7.53
3 นาที	แบบจำลอง FEM	51.07±10.11
	การทดลอง	48.78±10.08
4 นาที	แบบจำลอง FEM	63.95±17.19
	การทดลอง	61.07±17.56
5 นาที	แบบจำลอง FEM	70.89±19.45
	การทดลอง	68.55±19.59

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อทดสอบด้วยวิธี Two Sample T-test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ 5.2 การเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) กับการทดลองในห้องปฏิบัติการของโคชนมปิ้งที่ระดับความเข้มข้นของเกลือ 0.2%

ระยะเวลา	วิธีการ	อุณหภูมิเฉลี่ย
1 นาที	แบบจำลอง FEM	41.27±5.31
	การทดลอง	38.10±2.94
2 นาที	แบบจำลอง FEM	49.33±6.16
	การทดลอง	46.64±6.37
3 นาที	แบบจำลอง FEM	60.22±12.57
	การทดลอง	57.07±12.90
4 นาที	แบบจำลอง FEM	73.11±17.48
	การทดลอง	70.85±17.58
5 นาที	แบบจำลอง FEM	82.91±15.87
	การทดลอง	80.58±16.11

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อทดสอบด้วยวิธี Two Sample T-test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ 5.3 การเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) กับการทดลองในห้องปฏิบัติการของโคชนมปิ้งที่ระดับความเข้มข้นของเกลือ 0.5%

ระยะเวลา	วิธีการ	อุณหภูมิเฉลี่ย
1 นาที	แบบจำลอง FEM	46.16±3.25
	การทดลอง	41.16±3.24
2 นาที	แบบจำลอง FEM	58.72±4.78
	การทดลอง	56.04±5.04
3 นาที	แบบจำลอง FEM	75.01±7.93
	การทดลอง	73.03±7.92
4 นาที	แบบจำลอง FEM	90.63±8.83
	การทดลอง	87.58±8.42
5 นาที	แบบจำลอง FEM	102.90±9.73
	การทดลอง	100.08±10.07

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อทดสอบด้วยวิธี Two Sample T-test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ 5.4 การเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) กับการทดลองในห้องปฏิบัติการของโคชนมปัง ที่ระดับความเข้มข้นของเกลือ 1.0%

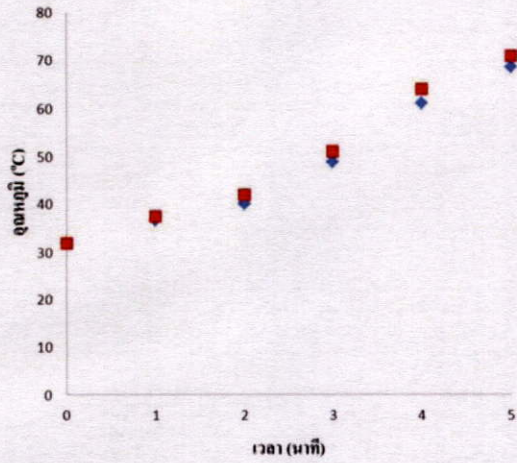
ระยะเวลา	วิธีการ	อุณหภูมิเฉลี่ย
1 นาที	แบบจำลอง FEM	50.66±4.18
	การทดลอง	48.63±4.19
2 นาที	แบบจำลอง FEM	65.64±10.74
	การทดลอง	63.43±10.83
3 นาที	แบบจำลอง FEM	80.90±8.43
	การทดลอง	77.47±8.89
4 นาที	แบบจำลอง FEM	98.03±9.67
	การทดลอง	96.00±9.64
5 นาที	แบบจำลอง FEM	114.95±9.68
	การทดลอง	110.62±10.64

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อทดสอบด้วยวิธี Two Sample T-test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

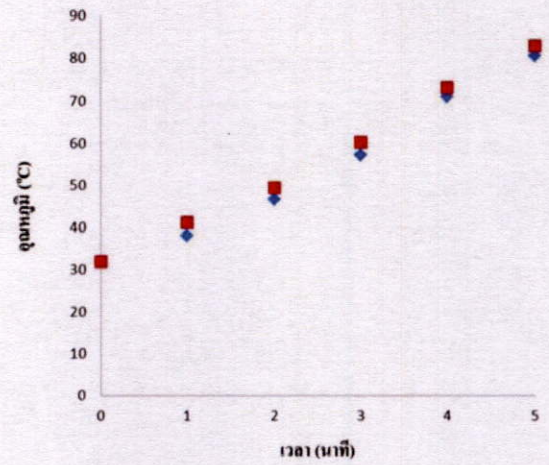
ตารางที่ 5.5 การเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) กับการทดลองในห้องปฏิบัติการของโคชนมปัง ที่ระดับความเข้มข้นของเกลือ 1.5%

ระยะเวลา	วิธีการ	อุณหภูมิเฉลี่ย
1 นาที	แบบจำลอง FEM	57.43±8.44
	การทดลอง	56.16±8.09
2 นาที	แบบจำลอง FEM	77.04±10.42
	การทดลอง	73.32±11.06
3 นาที	แบบจำลอง FEM	95.99±9.07
	การทดลอง	91.91±9.91
4 นาที	แบบจำลอง FEM	113.87±10.15
	การทดลอง	108.55±11.47
5 นาที	แบบจำลอง FEM	129.99±10.06
	การทดลอง	126.26±10.77

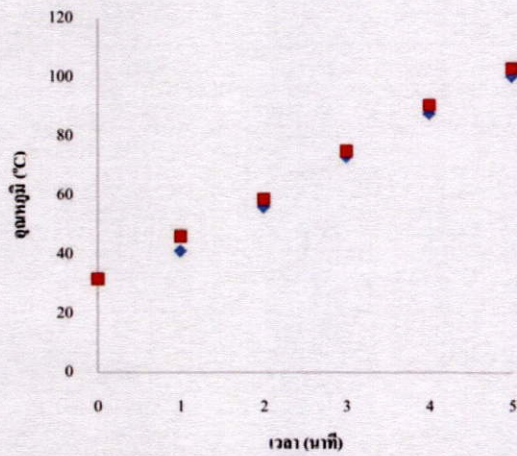
หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อทดสอบด้วยวิธี Two Sample T-test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%



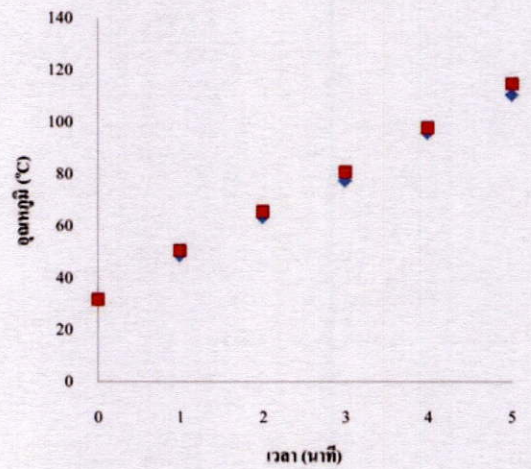
(ก)



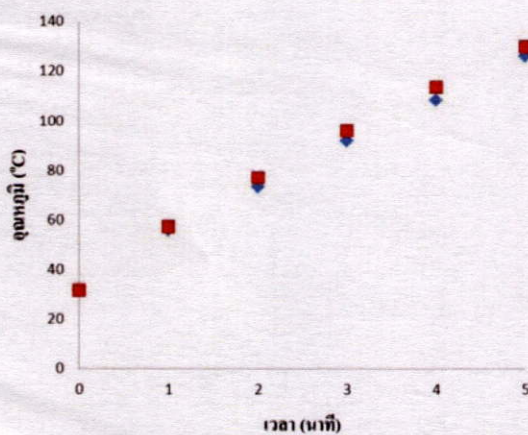
(ข)





(ค)



(ง)



(จ)

 การทดลอง  
 แบบจำลอง FEM

(ก) ที่ระดับความเข้มข้นของเกลือ 0.0%

(ข) ที่ระดับความเข้มข้นของเกลือ 0.2%

(ค) ที่ระดับความเข้มข้นของเกลือ 0.5%

(ง) ที่ระดับความเข้มข้นของเกลือ 1.0%

(จ) ที่ระดับความเข้มข้นของเกลือ 1.5%

รูปที่ 5.1 การเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) กับการทดลองในห้องปฏิบัติการของ โดชนมปิงที่ระดับความเข้มข้นของเกลือต่างๆ

## 5.2. การศึกษารูปแบบการกระจายความร้อนในโคขนมปังที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ

เนื่องจากแบบจำลองการกระจายร้อนของโคขนมปังโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นมีความแม่นยำเพียงพอดังที่กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 5.1 ดังนั้นจึงได้นำแบบจำลองดังกล่าวมาใช้เป็นตัวแทนในการศึกษาอิทธิพลของระดับความเข้มข้นเกลือ และเวลาต่ออุณหภูมิเฉลี่ยของโคขนมปัง เพื่อช่วยลดระยะเวลา และค่าใช้จ่ายในการศึกษา

ในการศึกษารูปแบบการกระจายความร้อนในแบบจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้กำหนดจุดวัดอุณหภูมิทั้งหมด 7 จุดด้วยกัน แบ่งเป็นที่จุดศูนย์กลาง 1 จุด และจุดวัดในแนวรัศมีจำนวน 6 จุด (แต่ละจุดห่างจากจุดศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร) โดยจากการทดลองพบว่ารูปแบบการกระจายความร้อนในโคที่ระดับความเข้มข้นของเกลือทั้ง 5 ระดับมีลักษณะคล้ายคลึงกัน กล่าวคือเมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ยอุณหภูมิในโคแล้วพบว่าในทุกระดับความเข้มข้นของเกลือของแบบจำลองต่างมีค่าเฉลี่ยอุณหภูมิของจุดวัดอุณหภูมิตามแนวรัศมี และจุดวัดอุณหภูมิที่ศูนย์กลางแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (ตารางที่ 5.6-5.10) ซึ่งเมื่อพิจารณาแล้วจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่ศูนย์กลางโคนั้นจะมีค่าสูงกว่าที่จุดวัดตามแนวรัศมีมาก และเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นอุณหภูมิก็จะเพิ่มสูงตามไปด้วย ดังรูปที่ 5.2 เมื่อพิจารณาร่วมกับแบบจำลองสามมิติ (รูปที่ 5.3-5.7) ซึ่งแสดงอุณหภูมิผ่านการเปลี่ยนแปลงของสีจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าอุณหภูมิที่จุดศูนย์กลางของโคนั้นจะสูงกว่าบริเวณอื่นๆ และจะกระจายความร้อนหรืออุณหภูมิออกไปในแนวรัศมีตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจะพบลักษณะนี้ได้ในทุกๆ ระดับความเข้มข้นของเกลือในโคขนมปัง

อย่างไรก็ตามจากผลการจำลองข้างต้นที่แสดงให้เห็นรูปแบบการกระจายความร้อนของโคขนมปังที่จะเริ่มเกิดความร้อนที่ตำแหน่งศูนย์กลางของโคก่อนเป็นอันดับแรกนั้นมีความขัดแย้งกับงานวิจัยของ Pandit และคณะ (2003) ที่กล่าวว่าในอาหารที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอก หรือมีรูปทรงใกล้เคียงจะมีการเพิ่มอุณหภูมิจากด้านนอกเข้าสู่ด้านใน เช่นเดียวกับ Resing และคณะ (2007) ที่ทำการศึกษากลไกที่เกิดขึ้นระหว่างการอบโคโดยใช้เครื่องอบแห้งไมโครเวฟสุญญากาศด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งพบเช่นกันว่าโคมีการกระจายอุณหภูมิจากด้านนอกมาสู่ด้านใน แต่กระนั้นผลการวิจัยในครั้งนี้กลับมีความสอดคล้องกับบทวิจารณ์เกี่ยวกับการให้ความร้อนแก่อาหารโดยใช้ไมโครเวฟของ Oliveira และคณะ (2002) ซึ่งกล่าวว่าขนาดของชิ้นอาหารจะส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมเกิดและการกระจายความร้อนในตัวอย่างอาหาร โดยในชิ้นอาหารที่มีขนาดเล็กมักจะเกิดความร้อนที่ใจกลางเป็นตำแหน่งแรกแล้วจึงเกิดการกระจายความร้อนออกไปยังบริเวณโดยรอบ ซึ่งตัวอย่างขนาดเล็กนี้ผลของรูปทรง และชนิดของตัวอย่างอาหารจะมีอิทธิพลต่อรูปแบบการกระจายความร้อนค่อนข้างน้อย ด้วยเหตุดังกล่าวเมื่อเปรียบเทียบขนาดของโคขนมปังในงานวิจัยนี้

กับตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบของ Pandit และคณะ (2003) และ Rensing และคณะ (2007) พบว่า โดชนมปิ้งที่ใช้ทดสอบในงานวิจัยในครั้งนี้มีขนาดเล็กกว่ามาก ดังนั้นจึงสอดคล้องกับบทวิจารณ์ของ Oliveira และคณะ (2002) ดังที่กล่าวไปแล้วในข้างต้น

เมื่อพิจารณารูปแบบการกระจายอุณหภูมิร่วมกับระดับความเข้มข้นของเกลือจะพบว่าเมื่อ ณ เวลาเดียวกัน แบบจำลองโดชนมปิ้งที่มีระดับความเข้มข้นของเกลือสูงขึ้นจะมีผลทำให้อุณหภูมิที่จุดศูนย์กลางโดสูงขึ้นตามไปด้วย และจะมีผลต่อระยะเวลาการกระจายความร้อนไปยังจุดวัดอุณหภูมิตามแนวรัศมี โดยพบว่าในแบบจำลองโดที่มีความเข้มข้นของเกลือสูงจะมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิได้รวดเร็วกว่าแบบจำลองโดที่มีระดับความเข้มข้นของเกลือต่ำกว่า ซึ่งหากเรียงลำดับแบบจำลองโดชนมปิ้งที่มีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและการกระจายความร้อนได้เร็วจากมากไปหาน้อย จะพบว่าแบบจำลองของ โดชนมปิ้งที่ระดับความเข้มข้นของเกลือที่ 1.5% นั้นจะมีพฤติกรรมการเพิ่มอุณหภูมิและการกระจายความร้อนได้รวดเร็วที่สุด รองลงมาคือที่ 1.0% 0.5% และ 0.2% ตามลำดับ โดยมีระดับความเข้มข้นของเกลือที่ 0.0% เป็นลำดับสุดท้าย ดังรูปที่ 5.8 และ 5.9

ตารางที่ 5.6 การเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยของจุดวัดอุณหภูมิตามแนวรัศมี และจุดวัดอุณหภูมิที่ศูนย์กลางของ โดชนมปิ้งจากแบบจำลอง ไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่ระดับความเข้มข้นของเกลือ 0.0%

ระยะเวลา	ตำแหน่งวัดอุณหภูมิ	อุณหภูมิเฉลี่ย
1 นาที	จุดวัดตามแนวรัศมี	35.70±0.00
	จุดวัดที่ศูนย์กลาง	47.23±0.23
2 นาที	จุดวัดตามแนวรัศมี	38.80±0.00
	จุดวัดที่ศูนย์กลาง	60.27±0.47
3 นาที	จุดวัดตามแนวรัศมี	47.00±0.00
	จุดวัดที่ศูนย์กลาง	75.20±0.00
4 นาที	จุดวัดตามแนวรัศมี	57.10±0.00
	จุดวัดที่ศูนย์กลาง	105.03±0.15
5 นาที	จุดวัดตามแนวรัศมี	63.100±0.00
	จุดวัดที่ศูนย์กลาง	117.37±0.15

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อทดสอบด้วยวิธี Pair Sample T-test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ 5.7 การเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยของจุดวัดอุณหภูมิตามแนวรัศมี และจุดวัดอุณหภูมิที่ศูนย์กลางของโคจนมปิ้งจากแบบจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์ (FEM) ที่ระดับความเข้มข้นของเกลือ 0.2%

ระยะเวลา	ตำแหน่งวัดอุณหภูมิ	อุณหภูมิเฉลี่ย
1 นาที	จุดวัดตามแนวรัศมี	39.20±0.00
	จุดวัดที่ศูนย์กลาง	53.97±0.21
2 นาที	จุดวัดตามแนวรัศมี	46.87±1.06
	จุดวัดที่ศูนย์กลาง	63.87±0.15
3 นาที	จุดวัดตามแนวรัศมี	55.27±2.21
	จุดวัดที่ศูนย์กลาง	89.90±0.36
4 นาที	จุดวัดตามแนวรัศมี	66.10±0.50
	จุดวัดที่ศูนย์กลาง	114.87±0.15
5 นาที	จุดวัดตามแนวรัศมี	76.63±1.47
	จุดวัดที่ศูนย์กลาง	120.73±0.64

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อทดสอบด้วยวิธี Pair Sample T-test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ 5.8 การเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยของจุดวัดอุณหภูมิตามแนวรัศมี และจุดวัดอุณหภูมิที่ศูนย์กลางของโคจนมปิ้งจากแบบจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์ (FEM) ที่ระดับความเข้มข้นของเกลือ 0.5%

ระยะเวลา	ตำแหน่งวัดอุณหภูมิ	อุณหภูมิเฉลี่ย
1 นาที	จุดวัดตามแนวรัศมี	44.87±0.06
	จุดวัดที่ศูนย์กลาง	53.90±0.30
2 นาที	จุดวัดตามแนวรัศมี	56.83±0.55
	จุดวัดที่ศูนย์กลาง	70.07±0.31
3 นาที	จุดวัดตามแนวรัศมี	71.87±0.58
	จุดวัดที่ศูนย์กลาง	93.93±0.20
4 นาที	จุดวัดตามแนวรัศมี	87.27±0.95
	จุดวัดที่ศูนย์กลาง	110.67±0.21
5 นาที	จุดวัดตามแนวรัศมี	99.00±0.36
	จุดวัดที่ศูนย์กลาง	126.13±0.31

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อทดสอบด้วยวิธี Pair Sample T-test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ 5.9 การเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยของจุดวัดอุณหภูมิตามแนวรัศมี และจุดวัดอุณหภูมิที่ศูนย์กลางของโดชนมปังจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) ที่ระดับความเข้มข้นของเกลือ 1.0%

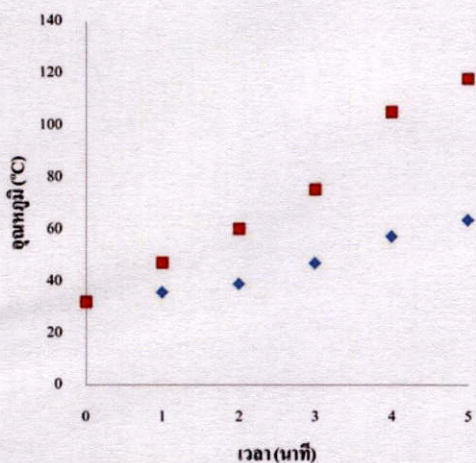
ระยะเวลา	ตำแหน่งวัดอุณหภูมิ	อุณหภูมิเฉลี่ย
1 นาที	จุดวัดตามแนวรัศมี	49.03±0.06
	จุดวัดที่ศูนย์กลาง	60.63±0.25
2 นาที	จุดวัดตามแนวรัศมี	61.40±0.53
	จุดวัดที่ศูนย์กลาง	91.30±0.44
3 นาที	จุดวัดตามแนวรัศมี	77.63±2.03
	จุดวัดที่ศูนย์กลาง	100.70±0.17
4 นาที	จุดวัดตามแนวรัศมี	94.17±1.20
	จุดวัดที่ศูนย์กลาง	121.03±0.15
5 นาที	จุดวัดตามแนวรัศมี	111.10±0.78
	จุดวัดที่ศูนย์กลาง	138.03±0.15

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อทดสอบด้วยวิธี Pair Sample T-test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

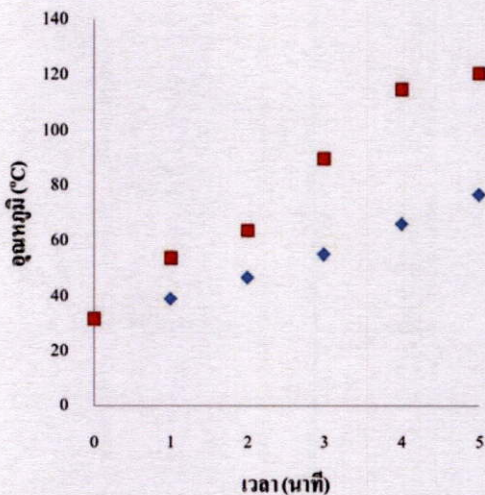
ตารางที่ 5.10 การเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยของจุดวัดอุณหภูมิตามแนวรัศมี และจุดวัดอุณหภูมิที่ศูนย์กลางของโดชนมปังจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) ที่ระดับความเข้มข้นของเกลือ 1.5%

ระยะเวลา	ตำแหน่งวัดอุณหภูมิ	อุณหภูมิเฉลี่ย
1 นาที	จุดวัดตามแนวรัศมี	54.07±1.12
	จุดวัดที่ศูนย์กลาง	77.50±0.10
2 นาที	จุดวัดตามแนวรัศมี	72.90±1.61
	จุดวัดที่ศูนย์กลาง	101.77±0.15
3 นาที	จุดวัดตามแนวรัศมี	92.37±0.95
	จุดวัดที่ศูนย์กลาง	117.60±0.53
4 นาที	จุดวัดตามแนวรัศมี	109.83±1.50
	จุดวัดที่ศูนย์กลาง	137.97±0.21
5 นาที	จุดวัดตามแนวรัศมี	125.97±0.55
	จุดวัดที่ศูนย์กลาง	154.00±0.20

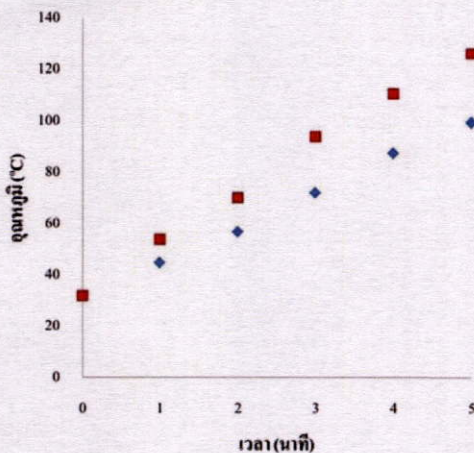
หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อทดสอบด้วยวิธี Pair Sample T-test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%



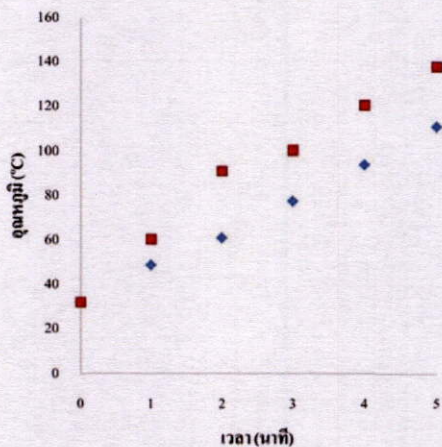
(ก)



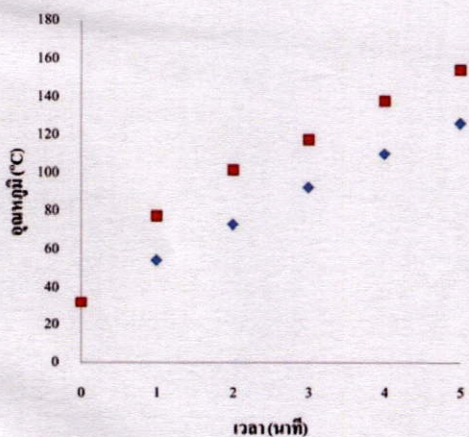
(ข)



(ค)



(ง)

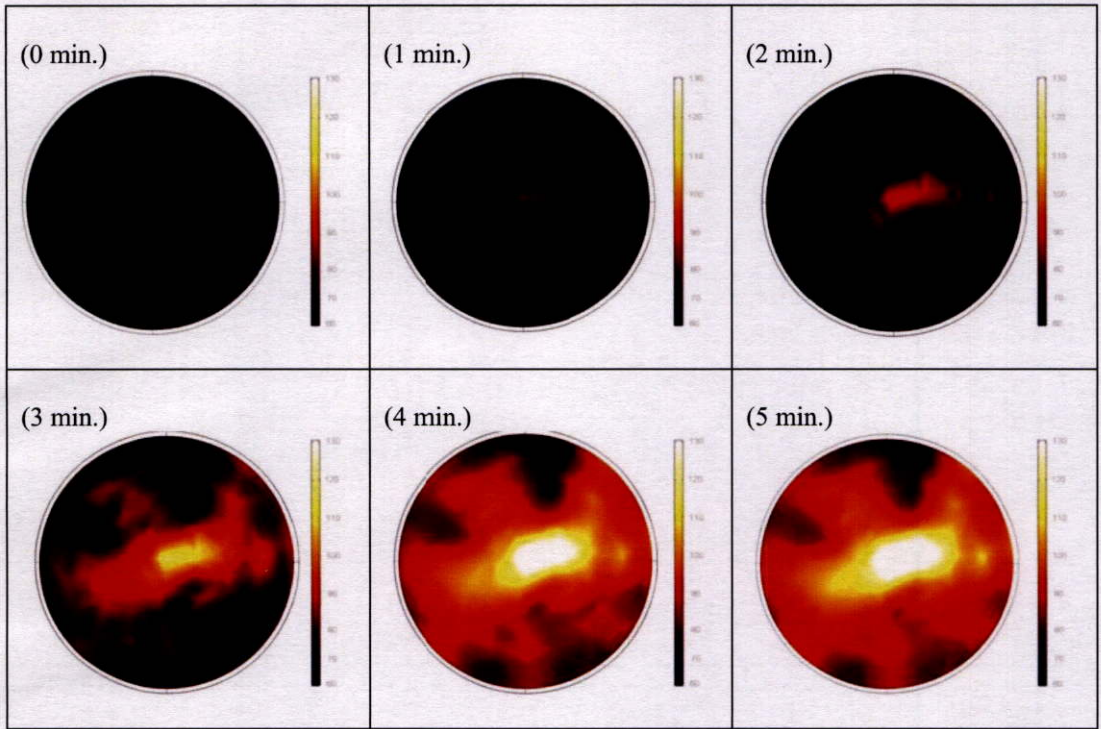


(จ)

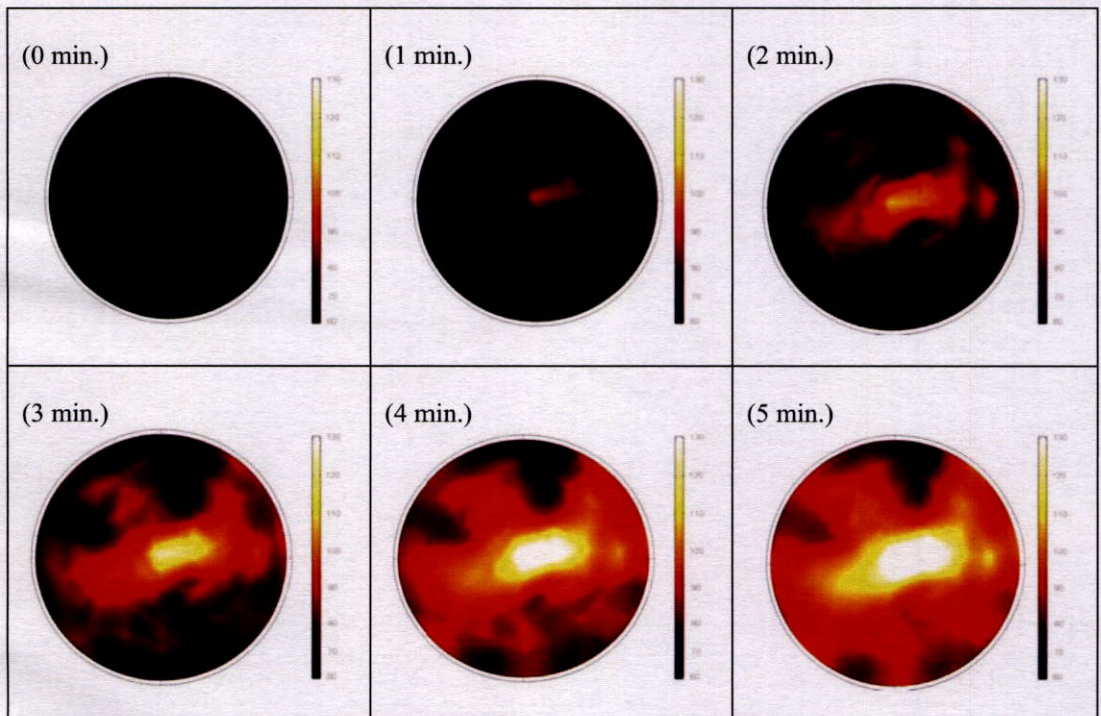
◆ จุดวัดตามแนวรัศมี  
■ จุดวัดที่ศูนย์กลาง

- (ก) ที่ระดับความเข้มข้นของเกลีอ 0.0%
- (ข) ที่ระดับความเข้มข้นของเกลีอ 0.2%
- (ค) ที่ระดับความเข้มข้นของเกลีอ 0.5%
- (ง) ที่ระดับความเข้มข้นของเกลีอ 1.0%
- (จ) ที่ระดับความเข้มข้นของเกลีอ 1.5%

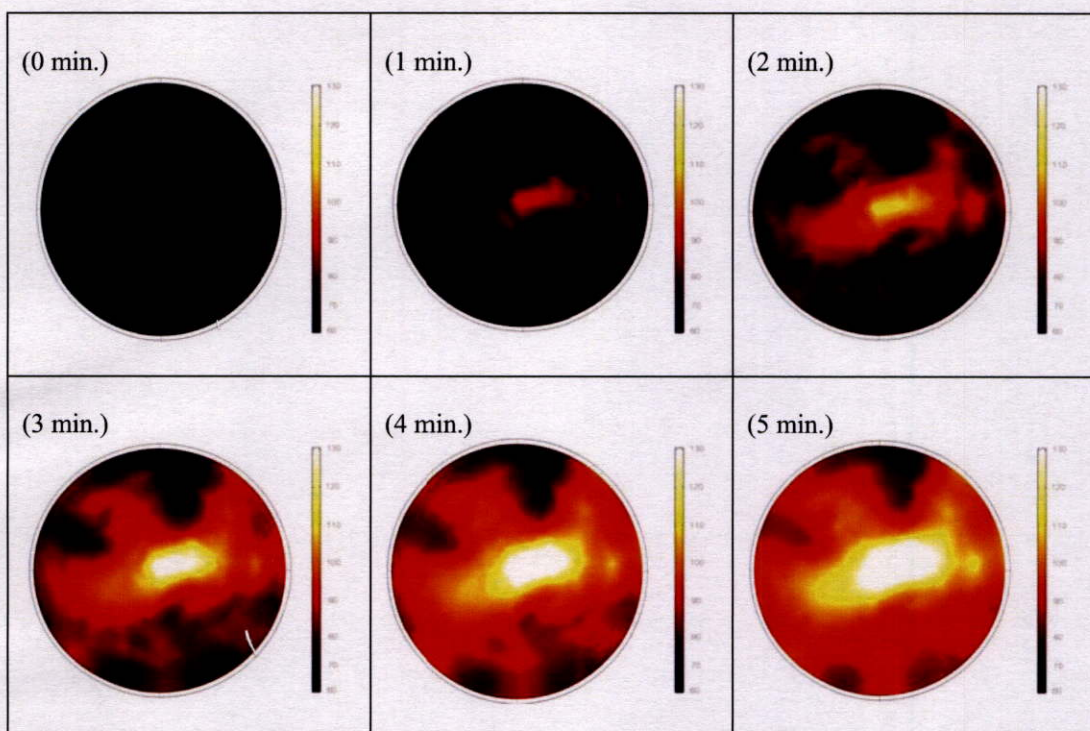
รูปที่ 5.2 เปรียบเทียบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของจุดวัดตามแนวรัศมีและจุดวัดที่ศูนย์กลางของโดขนมปังที่ระดับความเข้มข้นเกลีอต่างๆ



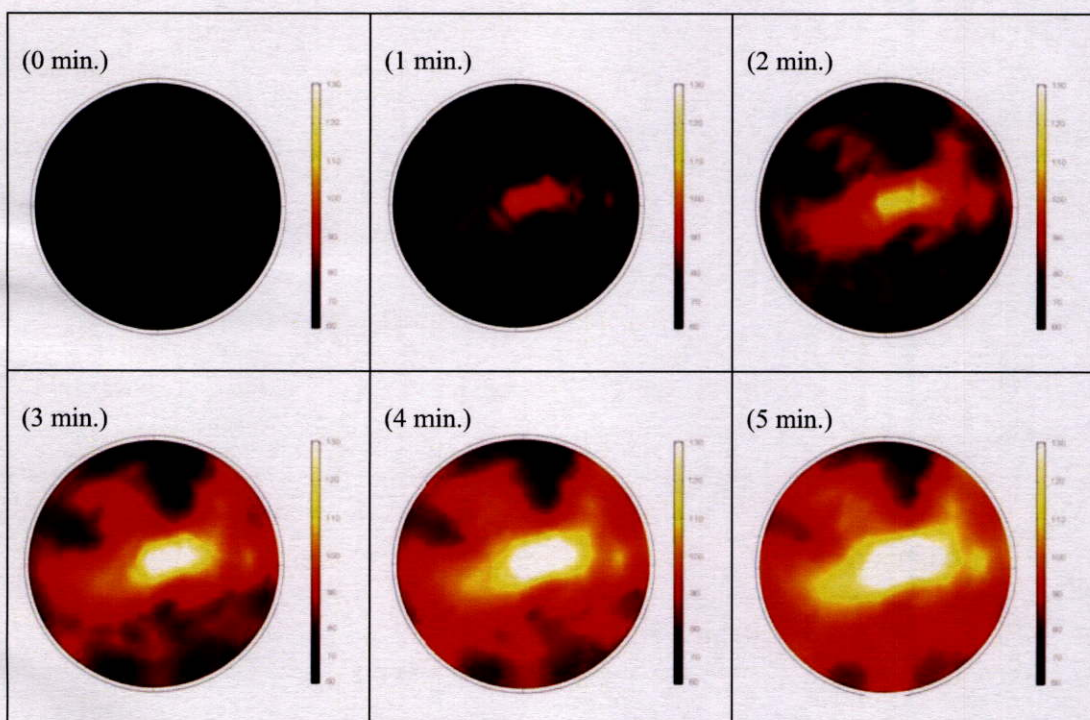
รูปที่ 5.3 แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของโคขนมปังที่ความเข้มข้นเกลือ 0.0%  
ที่ระยะเวลา 0, 1, 2, 3, 4 และ 5 นาที



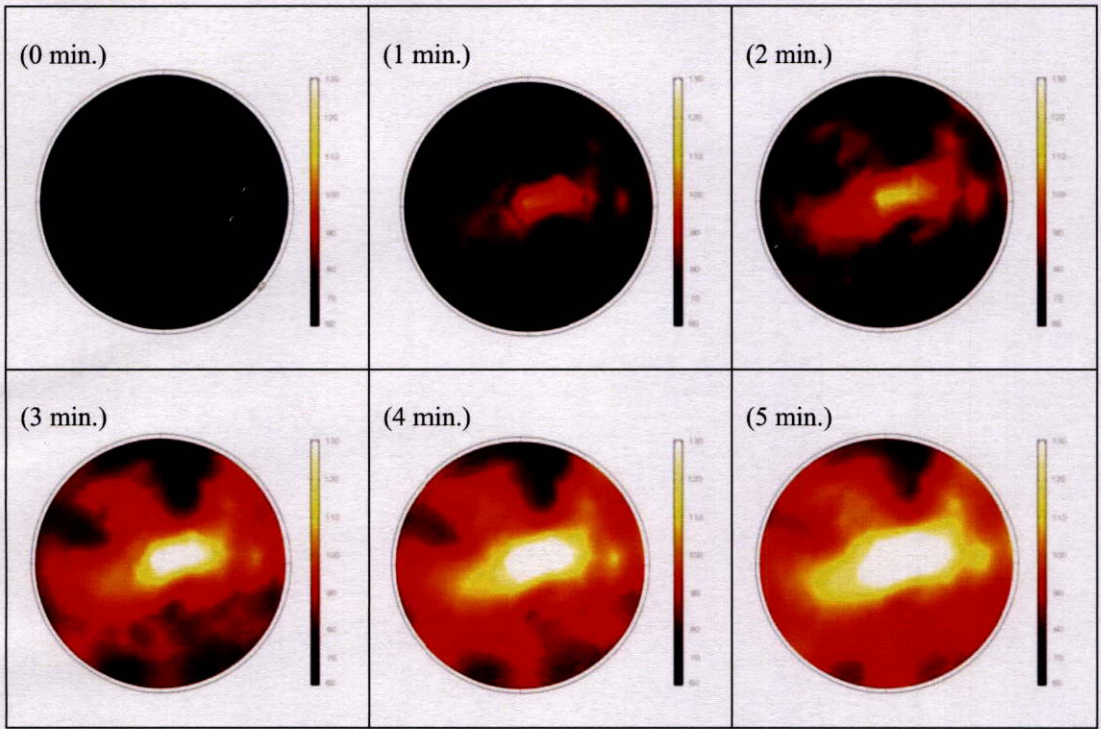
รูปที่ 5.4 แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของโคขนมปังที่ความเข้มข้นเกลือ 0.2%  
ที่ระยะเวลา 0, 1, 2, 3, 4 และ 5 นาที



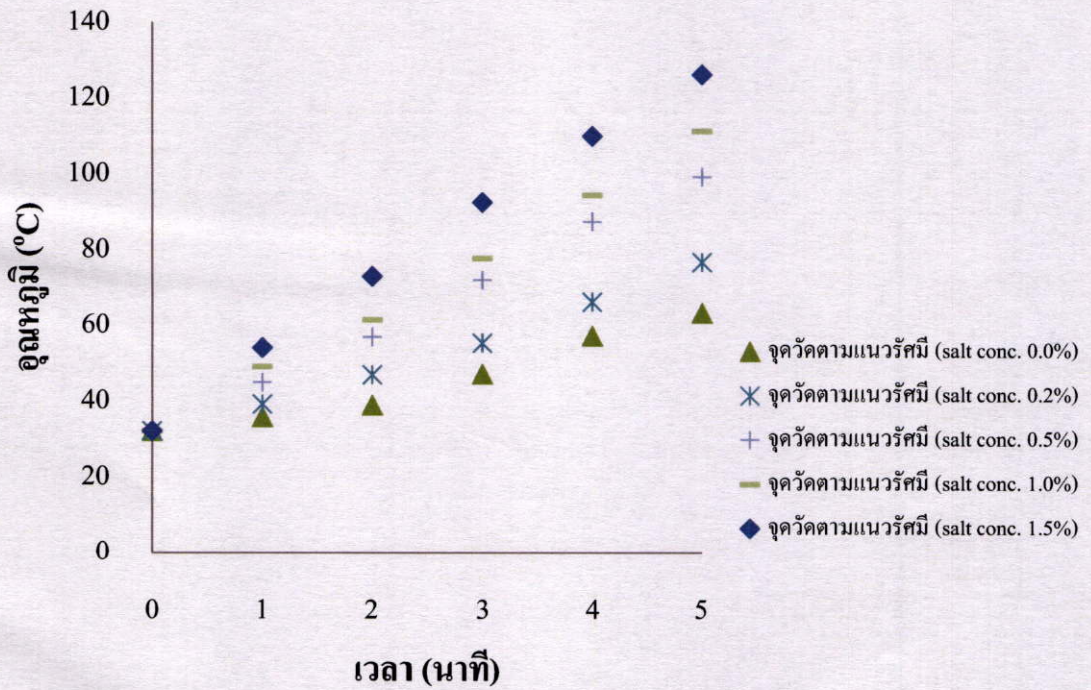
รูปที่ 5.5 แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของโคขนม빙ที่ความเข้มข้นเกลือ 0.5%  
ที่ระยะเวลา 0, 1, 2, 3, 4 และ 5 นาที



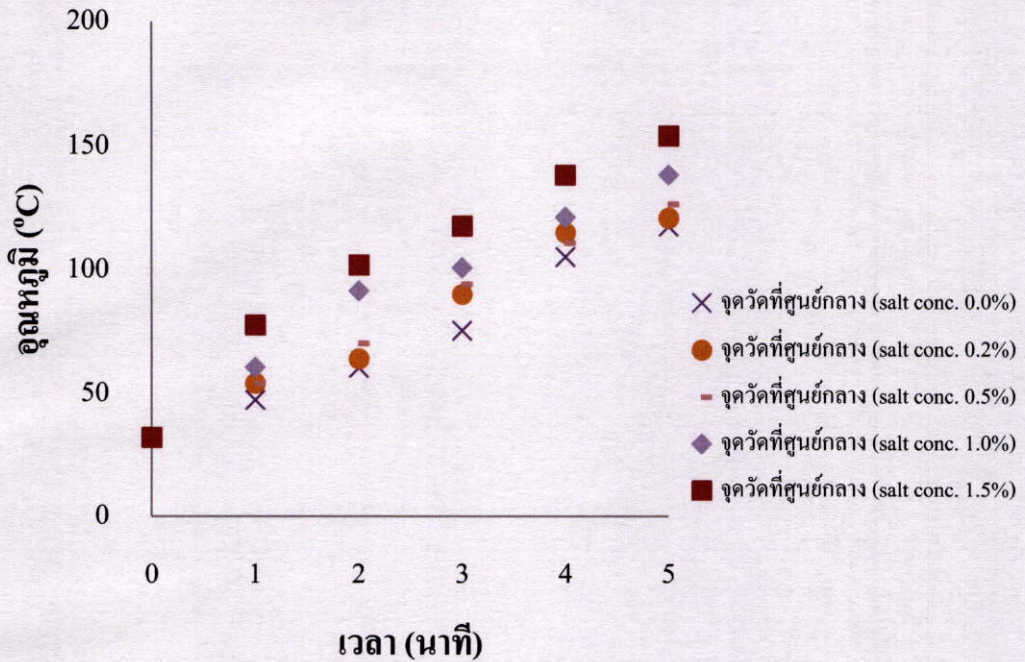
รูปที่ 5.6 แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของโคขนม빙ที่ความเข้มข้นเกลือ 1.0%  
ที่ระยะเวลา 0, 1, 2, 3, 4 และ 5 นาที



รูปที่ 5.7 แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของโคชนมปังที่ความเข้มข้นเกลือ 1.5% ที่ระยะเวลา 0, 1, 2, 3, 4 และ 5 นาที



รูปที่ 5.8 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่จุดวัดตามเนวรัศมีของแบบจำลองโคชนมปัง



รูปที่ 5.9 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่จุดวัดที่จุดศูนย์กลางของแบบจำลองโคชนมปัง

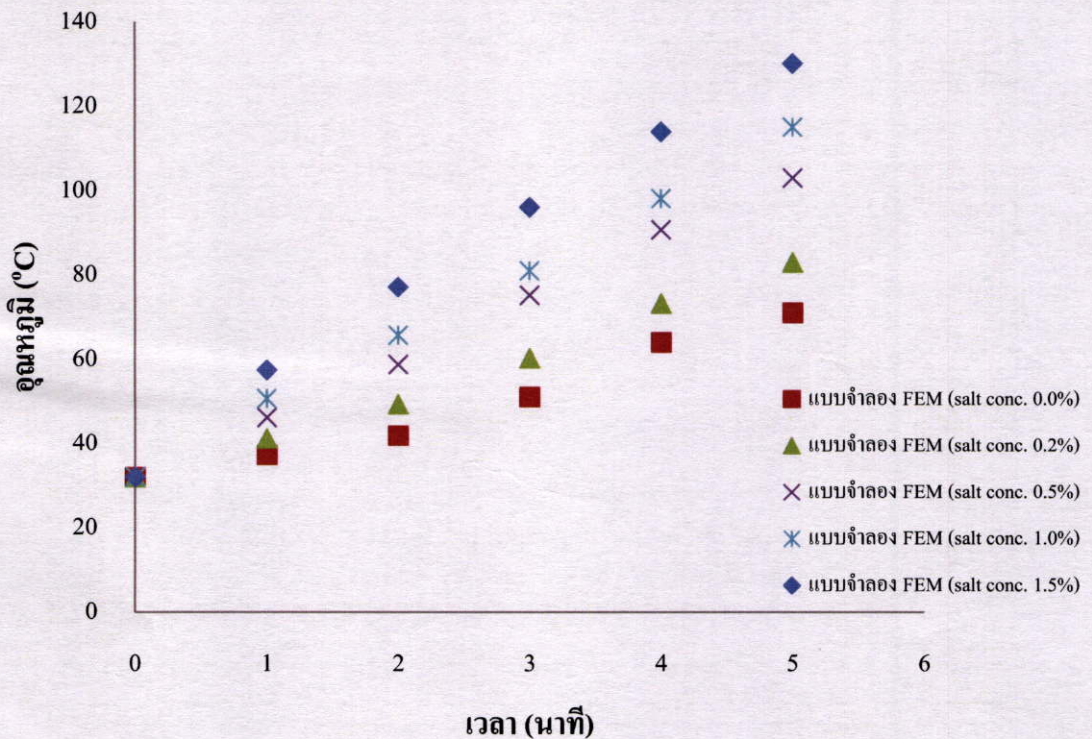
### 5.3. การศึกษาอิทธิพลของระดับความเข้มข้นเกลือ และเวลาต่ออุณหภูมิเฉลี่ยของโคชนมปัง

ผลที่ได้จากแบบจำลองการกระจายความร้อนในโคชนมปังพบว่า การกระจายอุณหภูมิของโคที่ระดับความเข้มข้นของเกลือที่ 0.0% นั้นมีการกระจายความร้อนช้าที่สุด รองลงมาคือแบบจำลองโคชนมปังที่ระดับความเข้มข้นของเกลือที่ 0.2% 0.5% 1.0% และ 1.5% ตามลำดับ (รูปที่ 5.10) โดยพบว่าที่ทุกระดับความเข้มข้นของเกลือมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังตารางที่ 5.11 ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าความเข้มข้นของเกลือมีอิทธิพลต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในโคชนมปัง ซึ่งเป็นผลมาจากคุณสมบัติด้านไดอิเล็กทริกของเกลือที่มีผลต่อการดูดซับไมโครเวฟ โดยพบว่าในตัวอย่างที่มีระดับความเข้มข้นของเกลือสูงจะสามารถส่งผ่านไมโครเวฟไปเป็นพลังงานความร้อนได้ดีกว่าในตัวอย่างที่มีระดับความเข้มข้นของเกลือต่ำ (Oliveira *et al.*, 2002) ดังนั้นในโคชนมปังที่มีระดับความเข้มข้นของเกลือสูงจึงสามารถเกิดความร้อนและมีความสามารถในการกระจายความร้อนได้ดีกว่าโคชนมปังที่มีระดับความเข้มข้นของเกลือที่ต่ำกว่า ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อระยะเวลาที่ใช้ในการกระจายความร้อนในโคชนมปังตามไปด้วย

ตารางที่ 5.11 การศึกษาอิทธิพลของระดับความเข้มข้นเกลือ และเวลาต่ออุณหภูมิเฉลี่ยของโคชนมปังจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM)

ระดับความเข้มข้นเกลือ	อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)				
	1 นาที	2 นาที	3 นาที	4 นาที	5 นาที
0.0%	35.70±0.00 <sup>a</sup>	38.83±0.06 <sup>a</sup>	47.03±0.06 <sup>a</sup>	57.13±0.06 <sup>a</sup>	63.13±0.06 <sup>a</sup>
0.2%	39.20±0.00 <sup>b</sup>	46.87±1.06 <sup>b</sup>	55.27±2.21 <sup>b</sup>	66.10±0.50 <sup>b</sup>	76.63±1.47 <sup>b</sup>
0.5%	44.90±0.00 <sup>c</sup>	56.83±0.56 <sup>c</sup>	71.87±0.58 <sup>c</sup>	87.27±0.95 <sup>c</sup>	99.00±0.36 <sup>c</sup>
1.0%	49.03±0.06 <sup>d</sup>	61.40±0.53 <sup>d</sup>	77.60±2.01 <sup>d</sup>	94.17±1.20 <sup>d</sup>	111.10±0.78 <sup>d</sup>
1.5%	54.07±1.12 <sup>e</sup>	72.90±1.61 <sup>e</sup>	92.37±0.95 <sup>e</sup>	109.83±1.50 <sup>e</sup>	125.97±0.55 <sup>e</sup>

หมายเหตุ : กำหนดให้อักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็ก a, b, c, d และ e ที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงค่าที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เมื่อเปรียบเทียบโดย DMRT



รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ของระดับความเข้มข้นเกลือและเวลาต่ออุณหภูมิเฉลี่ยของโคชนมปังจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM)

## บทที่ 6

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากการเปรียบเทียบและทดสอบค่าทางสถิติพบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยจากแบบจำลองการกระจายความร้อนด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และจากการทดลองในห้องปฏิบัติการมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าแบบจำลองการกระจายอุณหภูมิของโคขนมปังที่ได้จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม COMSOL™ Multiphysics นั้นมีความแม่นยำเพียงพอที่จะใช้ประเมินการกระจายอุณหภูมิภายในโคขนมปังที่ระดับความเข้มข้นของเกลือที่กำหนด และสามารถนำมาใช้ในการศึกษาการกระจายความร้อนของโคขนมปังแทนการทำการทดลอง เพื่อช่วยลดต้นทุนด้านเวลา วัสดุคิบ และพลังงานได้

จากผลการศึกษารูปแบบการกระจายความร้อนในโคขนมปังที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟพบว่า จะเริ่มเกิดความร้อนจากบริเวณศูนย์กลางของโคขนมปังก่อนเป็นตำแหน่งแรก โดยความร้อนหรืออุณหภูมิบริเวณศูนย์กลางของโคนั้นจะสูงขึ้นเรื่อยๆ ตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นและอุณหภูมิที่สูงขึ้นนี้จะแผ่ขยายออกตามแนวรัศมีจากด้านในออกสู่ด้านนอกตามลำดับ โดยการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ นั้น จะแปรผันตรงกับเวลาและระดับความเข้มข้นของเกลือในโคขนมปัง ดังนั้นในกรณีที่จะนำผลการศึกษาไปประยุกต์ใช้ในเชิงอุตสาหกรรมการแปรรูปอาหารแล้วอาหารนั้นมีคุณลักษณะหรือคุณสมบัติที่คล้ายคลึงกับโคขนมปัง จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องคำนวณระยะเวลาที่เหมาะสมในการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟตามองค์ประกอบของอาหาร โดยเฉพาะระดับความเข้มข้นของเกลือซึ่งเป็นตัวแปรหนึ่งที่มีผลทำให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วภายในชิ้นอาหาร หากละเอียดในส่วนนี้ไปอาจทำให้เนื้อด้านในของอาหารได้รับความร้อนสูงเกินไปหรือไหม้ในขณะที่ด้านนอกยังได้รับความร้อนไม่เพียงพอในขณะที่อยู่ระหว่างกระบวนการแปรรูป

อย่างไรก็ตามขนาด รูปทรง และองค์ประกอบของอาหารถือเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องคำนึงถึงเป็นอันดับต้นๆ ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติดังกล่าวจะมีผลต่อความสามารถในการดูดซับไมโครเวฟส่งผลให้อาหารแต่ละชนิดมีรูปแบบการกระจายความร้อนที่แตกต่างกันและมีความจำเพาะสูง ดังนั้นในศึกษาการกระจายความร้อนในอาหารที่อาศัยการจำลองผ่านวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นจึงจำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยต่างๆ อย่างละเอียดถี่ถ้วนเพื่อให้ผลลัพธ์ที่ได้มีความแม่นยำเพียงพอที่จะสามารถนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ได้จริงในระดับอุตสาหกรรม

## บรรณานุกรม

- กิตติวุฒิ จินนะบุตร. 2546. ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขสำหรับงานวิศวกรรม. นครราชสีมา : สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ.
- จิตรณา แจ่มเมฆ และ อรอนงค์ นัยวิกุล. 2546. เบนเกอร์เทคโนโลยีเบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- จอมภพ แววศักดิ์. 2549. “พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ.” วารสารวิทยาศาสตร์ทักษิณ. 3(1) : 32-42.
- เดช พุทธเจริญทอง. 2548. การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. กรุงเทพฯ : ศูนย์สื่อเสริมกรุงเทพ.
- ปราโมทย์ เคชะอำไพ. 2546. ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช. 2551. พื้นฐานการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ. ปทุมธานี : มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- เพชร นันทวิวัฒนา. 2551. รายงานการวิจัย ทูลอดหนุนการวิจัยมหาวิทยาลัยศรีปทุม. การศึกษาการกระจายความร้อนของการทำลายเซลล์มะเร็งย่านความถี่ไมโครเวฟด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยศรีปทุม.
- วิโรจน์ ล้มตระการ. ม.ป.ป. ก้าวสู่วิศวกรรมมืออาชีพระดับสากล ด้วยเทคโนโลยี CAE. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.decc.or.th/content.php?id=37>.
- อรอนงค์ นัยวิกุล. 2540. ข่าวสาร : วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- Anonymous. 2007. **COMSOL Multiphysics User's Guide Version 4.0**. Singapore. COMSOL AB.
- Anonymous. 1982. **Handbook of chemistry and physics**. 63rd ed. Boca Raton, USA : CRC Press.
- Budd, C.J. and Hill, A.D.C. 2011. “A comparison of models and methods for simulating the microwave heating of moist foodstuffs.” **International Journal of Heat and Mass Transfer**. 54 : 807-817.

- Campañone, L.A. and Zaritzky, N.E. 2005. "Mathematical analysis of microwave heating process." **Journal of Food Engineering**. 69 : 359–368.
- Datta, A.K. 1998. "Computer-Aided Engineering in Food Process and Product Design." **Food Technology**. 52(10) : 44-52.
- Fellows, P. J. 2000. "Dielectric, ohmic and infrared heating." **Food Processing Technology : Principles and Practice**. 2nd ed. Cambridge : Woodhead Publishing Limited.
- Gabriel, C., Garbiel, S., Grant, E.H., Halstead, B.S.J. and Mingos, D.M.P. 1998. "Dielectric parameters relevant to microwave dielectric heating." **Chemical society reviews**. 27 : 213-23.
- Knoerzer, K., Regier, M. and Schubert, H. 2008. "A computational model for calculating temperature distributions in microwave food application." **Innovation Food Science and Emerging Technologies**. 9 : 374-384.
- Kuphaldt, T.R. 2004. **Lessons In Electric Circuits**. [Online]. Available : [http://www.eng.cam.ac.uk /DesignOffice/mdp/electric\\_web/AC/AC\\_14.html](http://www.eng.cam.ac.uk /DesignOffice/mdp/electric_web/AC/AC_14.html)
- Logan, L. Daryl. n.d. **A First Course in the Finite Element Method**. 4th ed. California : Books/Cole.
- Meredith, R.J. 1995. "Trends in High Power Generators for Industrial Microwave." **Fifth International Conference on Microwave and High Frequency Heating**. University of Cambridge : F1.1-F1.8.
- Oliveira, M.E.C. and Franca, A.S. 2000. "Finite element analysis of microwave heating of solid products." **Heat Mass Transfer**. 27(4) : 527–536.
- Oliveira, M.E.C. and Franca, A.S. 2002. "Microwave heating of foodstuffs." **Journal of Food Engineering**. 53 : 347–359.
- Pandit, R.B. and Prasad, S. 2003. "Finite element analysis of microwave heating of potato— transient temperature profiles." **Journal of Food Engineering**. 60 : 193–202
- Puri, V. M. and Ananteswaran, R.C. 1993. "Finite element method in food processing a review." **Journal of Food Engineering**. 19 : 247-274.

- Purves, W.K., Orians, G.H. and Heller, H.C. 1995. **Life: The Science of Biology**. 4th ed. [Online]. Available : <http://mac122.icu.ac.jp/biobk/BioBookCHEM1.html>
- Rahman, S. 1995. **Food properties handbook**. Boca Raton, USA : CRC Press.
- Ressing, H., Ressing, M. and Durance T. 2007. "Modeling the mechanism of dough Puffing during vacuum microwave drying using the finite element method." **Journal of Food Engineering**. 82 : 498-508.
- Romano, V.R., Marra, F. and Tammaro, U. 2005. "Modelling of microwave heating of foodstuff: study on the influence of sample dimensions with a FEM approach." **Journal of Food Engineering**. 71: 233–241.
- Singh, R. P. and Heldman., D.R. 2001. "Microwave Heating." **Introduction to Food Engineering**. 3rd ed. London : Academic Press.
- Venkatesh, M.S., Raghavan, G.S.V. 2004. "An overview of microwave processing and dielectric properties of agri-food materials." **Biosystems Engineering**. 88 : 1–18.
- Zhou, L., Puri, V.M., Anantheswaran, R.C. and Yeh, G. 1995. "Finite Element Modeling of Heat and Mass Transfer in Food Materials During Microwave Heating – Model Development and Validation." **Journal of Food Engineering**. 25 : 509–529.

ภาคผนวก ก.

ทฤษฎีพื้นฐานทางคณิตศาสตร์

## ภาคผนวก ก.

## ทฤษฎีพื้นฐานทางคณิตศาสตร์

ในบทนี้จะกล่าวถึงพื้นฐานทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหา โดยกล่าวถึงสมการแมกซ์เวลล์, การเดินทางของคลื่นในตัวกลางชนิดต่างๆ, พื้นฐานการกระจายความร้อน, การหาค่าการดูดซับความร้อน และสมการความร้อน

## 1. การวิเคราะห์ทางด้านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

สนามแม่เหล็กไฟฟ้าในรูปทั่วไปแล้วจะเป็นคลื่นซึ่งเป็นสัญญาณที่มีฮาร์โมนิก (time-harmonic field) หรืออีกนัยหนึ่งคือ เป็นสัญญาณที่มีคาบการแกว่งแน่นอน ซึ่งโดยทั่วไปแล้วมักจะแทนด้วยผลรวมของสัญญาณรูปไซน์ที่สามารถใช้ฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ เขียนได้ทั้งฟังก์ชันโคไซน์ ฟังก์ชันไซน์ และฟังก์ชันเอ็กโปเนนเชียลเชิงซ้อน ถ้าพิจารณาสนามแม่เหล็ก ถ้าพิจารณาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นสัญญาณโคไซน์ก็จะได้  $\frac{\partial \bar{E}}{\partial t} = j\omega \bar{E}$  ในกรณีที่สนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นสัญญาณรูปไซน์นั้น สามารถวิเคราะห์ผลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีต่อตัวกลางได้ง่ายโดยพิจารณาการตอบสนองของช่วงเวลาที่มีต่อตัวกลาง การพิจารณาการตอบสนองของช่วงเวลาที่มีต่อตัวกลาง การพิจารณาการตอบสนองของเวลาที่สนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นสัญญาณชาน์คงตัว (steady state) ซึ่งสามารถอนุมานการเปลี่ยนแปลงกับเวลา  $\frac{\partial}{\partial t}$  คือการเฉลี่ยด้วยค่า  $j\omega$

## 1.1. สมการแมกซ์เวลล์ (Maxwell's Equation)

$$\nabla \times \bar{H} = -j\omega \epsilon \bar{E} + \sigma \bar{E} \quad (1.1)$$

$$\nabla \cdot \bar{D} = \rho \quad (1.2)$$

$$\nabla \cdot \bar{B} = 0 \quad (1.3)$$

$$\bar{D} = \epsilon \bar{E} \quad (1.4)$$

$$\bar{B} = \mu \bar{H} \quad (1.5)$$

เมื่อ  $\bar{E}$  = สนามไฟฟ้า

$\bar{D}$  = ฟลักซ์ของสนามไฟฟ้า

$\bar{H}$	=	ความเข้มของสนามแม่เหล็ก
$\rho$	=	ความหนาแน่นของประจุเชิงปริมาตร
$\bar{B}$	=	สนามแม่เหล็ก
$\epsilon$	=	ค่าอินยอมทางไฟฟ้า
$\mu$	=	ค่าการดูดซับแม่เหล็ก

## 1.2. สมการคลื่นสำหรับตัวกลางที่เป็นตัวนำ

เมื่อพิจารณาตัวกลางที่เป็นตัวนำ ในตัวกลางนี้ค่าสภาพนำไฟฟ้าจะไม่เป็นศูนย์ และมีกระแสการกำเนิดขึ้นซึ่งเกิดจากสามการของแมกซ์เวลล์

$$\nabla \times \bar{E} = -\mu \frac{\partial \bar{H}}{\partial t} \quad (1.6)$$

$$\nabla \times \bar{E} = -\mu \frac{\partial \bar{H}}{\partial t} + \bar{J} \quad (1.7)$$

ถ้า  $\sigma$  เป็นสภาพการนำตัวกลาง จากกฎของโอห์มจะให้ความหนาแน่นกระแสที่มีค่าดังนี้

$$\bar{J} = \sigma \bar{E} \quad (1.8)$$

ดังนั้น จากสมการ (1.1) และ (1.2) จะได้

$$\nabla \times \bar{H} = \epsilon \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} + \sigma \bar{E} \quad (1.9)$$

หาเคิร์ลของสมการ (1.1) จะได้

$$\nabla \times (\nabla \times \bar{E}) = -\mu \nabla \times \frac{\partial \bar{H}}{\partial t} = -\mu \frac{\partial}{\partial t} \nabla \times \bar{H} \quad (1.10)$$

แทนค่า  $\nabla \times \bar{H}$  จากสมการ (1.9) จะได้

$$\nabla \times \nabla \times \bar{E} = \mu \epsilon \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial t^2} = -\mu \sigma \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} \quad (1.11)$$

แต่ 
$$\nabla \times \nabla \times \bar{E} = \nabla(\nabla \cdot \bar{E}) - \nabla^2 \bar{E} \quad (1.12)$$

ดังนั้น 
$$\nabla(\nabla \cdot \bar{E}) - \nabla^2 \bar{E} = -\mu\epsilon \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial t^2} - \sigma \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} \quad (1.13)$$

$$\nabla^2 \bar{E} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial t^2} - \mu\sigma \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} = \nabla(\nabla \cdot \bar{E}) \quad (1.14)$$

สำหรับตัวกลางที่เป็นเนื้อเดียวกัน  $\epsilon$  มีค่าคงที่

$$\nabla \cdot \bar{E} = \frac{1}{\epsilon} \nabla \cdot \bar{D} \quad (1.15)$$

แต่  $\nabla \cdot \bar{D} = \rho$  เนื่องจากประจุสุทธิของตัวนำอยู่ที่ผิว ภายในตัวนำที่ไม่มีประจุ  $\sigma$  จึงเท่ากับศูนย์

ดังนั้น 
$$\nabla \cdot \bar{E} = \frac{1}{\epsilon} \nabla \cdot \bar{D} = \frac{1}{\epsilon} \rho = 0 \quad (1.16)$$

จากสมการ (1.14) จะได้

$$\nabla^2 \bar{E} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial t^2} - \mu\sigma \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} = 0 \quad (1.17)$$

สมการ (1.17) คือ สมการคลื่นสำหรับ  $\bar{E}$  ในทำนองเดียวกัน สามารถหาสมการคลื่นสำหรับ  $\bar{H}$  ได้ โดยการหาเคิร์ลของสมการ (1.9) จะได้

$$\nabla \times \nabla \times \bar{H} = \epsilon \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} = 0 \quad (1.18)$$

สมการ (1.18) คือสมการคลื่นสำหรับ  $\bar{H}$

### 1.3. สมการของแมกซ์เวลล์ที่แปรเปลี่ยนตามเวลา

ในทางปฏิบัติแหล่งกำเนิดส่วนมากจะให้ความแตกต่างและกระแสไฟฟ้ารวมทั้งสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กแปรเปลี่ยนตามเวลาเป็นเส้นโค้งรูปโคไซน์ ตัวอย่างเช่น

$$\bar{E} = \bar{E}_0 \cos \omega t = \bar{E}_0 \cos 2\pi ft \quad (1.19)$$

หรือ 
$$\bar{E} = \bar{E}_0 \sin \omega t = \bar{E}_0 \sin 2\pi ft \quad (1.20)$$

เมื่อเป็นความถี่ของการแปรเปลี่ยน จากสมการ (1.20) แสดงว่ามีแฟกเตอร์ (factor) ของเวลาที่เป็นเส้นโค้งรูปโคไซน์ปรากฏในทุกพจน์ในสมการใดๆ

เมื่อกำหนดให้  $\bar{E}(r, t)$  เป็นสนามไฟฟ้าที่แปรเปลี่ยนตามเวลา

$\bar{E}(r)$  เป็นสนามไฟฟ้าที่จุดๆ หนึ่งในที่ว่าง (space)

จะได้สนามไฟฟ้าที่แปรเปลี่ยนตามเวลามีรูปแบบดังนี้

$$\bar{E}(r, t) = \text{Re}[\bar{E}(r)e^{j\omega t}] \quad (1.21)$$

เมื่อ  $\bar{E}(r)$  เป็นจำนวนเชิงซ้อน (complex number) ในทำนองเดียวกัน จะได้ขจัดไฟฟ้า ความเข้มของสนามแม่เหล็ก และสนามแม่เหล็กที่แปรเปลี่ยนตามเวลาดังนี้

$$\bar{D}(r, t) = \text{Re}[\bar{D}(r)e^{j\omega t}] \quad (1.22)$$

$$\bar{H}(r, t) = \text{Re}[\bar{H}(r)e^{j\omega t}] \quad (1.23)$$

$$\bar{B}(r, t) = \text{Re}[\bar{B}(r)e^{j\omega t}] \quad (1.24)$$

เมื่อ  $\bar{D}(r)$ ,  $\bar{H}(r)$ ,  $\bar{B}(r)$  เป็นจำนวนเชิงซ้อน

พิจารณาจากสมการของแมกซ์เวลล์ เวิร์ลของสนามแม่เหล็ก เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเวลา

$$\nabla \times \bar{H} = \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} + \bar{J} \quad (1.25)$$

แทนค่า  $\bar{D}(r,t)$  และ  $\bar{H}(r,t)$  จากสมการ (1.22) และ (1.23) ในสมการ (1.25) จะได้

$$\nabla \times [\text{Re} \bar{H}(r) e^{j\omega t}] = \frac{\partial}{\partial t} [\text{Re} \bar{D}(r) e^{j\omega t}] + \text{Re} [\bar{J}(r) e^{j\omega t}] \quad (1.26)$$

$$\text{Re} [\nabla \times \bar{H}(r)] = \text{Re} [j\omega \bar{D}(r) + \bar{J}(r)] \quad (1.27)$$

ถ้าความสัมพันธ์นี้เป็นจริงทุกค่าของ  $t$  จะได้

$$\nabla \times \bar{H} = j\omega \bar{D} + \bar{J} \quad (1.28)$$

ในทำนองเดียวกัน จากสมการของแมกซ์เวลล์ เคิร์ลของสนามไฟฟ้าที่แปรเปลี่ยนตามเวลาจะได้

$$\nabla \times \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t} \quad (1.29)$$

แทนค่า  $\bar{E}(r,t)$  และ  $\bar{B}(r,t)$  จากสมการ (1.22) และ (1.23) ในสมการ (1.29) จะได้

$$\nabla \times [\text{Re} \bar{E}(r) e^{j\omega t}] = -\frac{\partial}{\partial t} [\text{Re} \bar{B}(r) e^{j\omega t}]$$

$$\text{Re} [\nabla \times \bar{E}(r)] = -\text{Re} [j\omega \bar{B}(r)]$$

$$\nabla \times \bar{E} = -j\omega \bar{B} \quad (1.30)$$

ดังนั้น สมการของแมกซ์เวลล์ที่แปรเปลี่ยนตามเวลาเป็นเส้นค้ำรูปโคซายน์ จึงมีรูปแบบดังสมการ ทั้งสี่ (1.31) ข้างล่าง โดยจัดอยู่ในรูปแบบอนุพันธ์

$$\nabla \cdot \bar{D} = \sigma$$

$$\nabla \cdot \bar{B} = 0$$

$$\begin{aligned}\nabla \times \bar{E} &= -j\omega \bar{B} \\ \nabla \times \bar{H} &= -j\omega \bar{D} + \bar{J}\end{aligned}\quad (1.31)$$

#### 1.4. การเดินทางของคลื่นในตัวกลางที่ไม่มีการสูญเสีย

สำหรับสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่แปรเปลี่ยนตามเวลาเป็นเส้นโค้งรูปไซน์ สมการคลื่นสำหรับสนามไฟฟ้าในตัวกลางที่ไม่มีการสูญเสียพลังงานมีรูปดังนี้

$$\nabla^2 \bar{E} = \mu\epsilon \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial t^2} \quad (1.32)$$

แทนค่า  $\bar{E}(r, t) = \text{Re}[\bar{E}(r)e^{j\omega t}]$  จะได้

$$\nabla^2 [\text{Re} \bar{E}(r)e^{j\omega t}] = \mu\epsilon \frac{\partial^2}{\partial t^2} [\text{Re} \bar{E}(r)e^{j\omega t}]$$

$$\text{Re} \nabla^2 \bar{E}(r) = \mu\epsilon \text{Re}(j\omega)^2 \bar{E}(r)$$

$$\nabla^2 \bar{E} = -\omega^2 \mu\epsilon \bar{E} \quad (1.33)$$

เรียกสมการ (1.33) ว่าสมการของเฮล์มโฮลทซ์ ดังนั้นในตัวกลางที่เป็นตัวนำ ถ้าสนามไฟฟ้าแปรเปลี่ยนตามเวลา สมการคลื่น (1.17) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\nabla^2 \bar{E} + \omega^2 \mu\epsilon \bar{E} - j\mu\sigma \bar{E} = 0 \quad (1.34)$$

$$\nabla^2 \bar{E} + (\omega^2 \mu\epsilon \bar{E} - j\mu\sigma) \bar{E} = 0 \quad (1.35)$$

$$\text{เมื่อ } \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} = j\omega \bar{E} \text{ และ } \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial t^2} = -\omega^2 \bar{E}$$

ในทำนองเดียวกัน สมการคลื่นสำหรับแม่เหล็ก  $\bar{H}$  (1.18) สามารถเขียนได้ในรูปแบบเดียวกัน ดังนี้

$$\nabla^2 \bar{E} + (\omega^2 \mu \epsilon - j\omega \mu \sigma) \bar{H} = 0 \quad (1.36)$$

เมื่อ  $\frac{\partial \bar{E}}{\partial t} = j\omega \bar{E}$  และ  $\frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial t^2} = -\omega^2 \bar{H}$

สำหรับคลื่นระนาบสม่ำเสมอที่ไม่แปรเปลี่ยนตาม x และ y สมการคลื่นมีรูปแบบดังนี้

$$\frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial t^2} = -\omega^2 \mu \epsilon \bar{E}$$

หรือ  $\frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial t^2} = -\beta^2 \bar{E} \quad (1.37)$

เมื่อ  $\beta = \omega \sqrt{\mu \epsilon}$

พิจารณาองค์ประกอบ  $E_x(z)$  ผลเฉลยของสมการ (1.37) อาจเขียนอยู่ในรูปแบบ ดังนี้

$$E_x(z) = C_1 e^{-j\beta z} + C_2 e^{j\beta z} \quad (1.38)$$

เมื่อ  $C_1$  และ  $C_2$  เป็นค่าคงตัวเชิงซ้อน (complex constant) สนามที่แปรเปลี่ยนตามเวลาคือ

$$E_x(z, t) = \text{Re} [ E_x(z) e^{j\omega t} ] \quad (1.39)$$

แทนค่า  $E_x(z)$  จากสมการ (1.38) จะได้

$$E_x(z, t) = \text{Re} [ C_1 e^{j(\omega t - \beta z)} + C_2 e^{j(\omega t + \beta z)} ] \quad (1.40)$$

ถ้าใช้ส่วนจริง (real part) ในสมการ (1.40) ผลเฉลยจะอยู่ในรูปแบบเส้นโค้งรูปไซน์ ตัวอย่างเช่น เมื่อ  $C_1$  และ  $C_2$  เป็นค่าจริง สมการ (1.40) จะกลายเป็น

$$E_x(z, t) = C_1 \cos(\omega t - \beta z) + C_2 \cos(\omega t + \beta z) \quad (1.41)$$

จะเห็นได้ว่าตัวกลางที่เป็นเนื้อเดียวกันและไม่มีการสูญเสียพลังงาน ถ้าสมมติว่าการแปรเปลี่ยนตามเวลาเป็นเส้นโค้งรูปไซน์ จะทำให้การแปรเปลี่ยนของปริภูมิ หรือพิคเป็นเส้นโค้งรูปไซน์ด้วย

สมการ (1.40) และ (1.41) แทนสนามไฟฟ้าที่เป็นบวกของคลื่น 2 ขบวนคลื่นที่ในทิศตรงกันข้าม ถ้า  $C_1 = C_2$  คลื่นเดินทาง (traveling wave) ทั้ง 2 ขบวนจะรวมกันเป็นคลื่นนิ่ง (standing wave) โดยความเร็วของคลื่นหรือความเร็วเฟส (phase velocity) มีค่าดังนี้

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{\omega}{\beta}$$

ถ้า  $f$  เป็นความถี่ของคลื่น  
 $\lambda$  เป็นความยาวของคลื่น

จะได้ 
$$v = f\lambda = \frac{\omega}{\beta}$$

แต่ 
$$\omega = 2\pi f$$

ดังนั้น 
$$v = f\lambda = \frac{2\pi f}{\beta}$$

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \tag{1.42}$$

เรียก  $\beta$  ว่า ค่าคงที่เฟส (phase constant) ของคลื่น

### 1.5. การเดินทางของคลื่นในตัวกลางที่เป็นตัวนำ

สำหรับสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่แปรเปลี่ยนตามเวลาเป็นเส้นโค้งรูปไซน์ สามารถหาผลเฉลยของสมการคลื่นในตัวกลางที่เป็นตัวนำได้ สมการคลื่น (1.35) สามารถเขียนในรูปแบบสมการเฮล์มโฮลทซ์ ได้ดังนี้

$$\nabla^2 \bar{E} - \gamma^2 \bar{E} = 0 \tag{1.43}$$

เมื่อ 
$$\gamma^2 = j\omega\mu\sigma - \omega^2\mu\epsilon = j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon) \tag{1.44}$$

เรียก  $\gamma$  ว่าค่าคงตัวการแผ่ (propagation constant) โดย  $\gamma$  เป็นจำนวนเชิงซ้อน ซึ่งมี ส่วนจริง (real) คือ  $\alpha$  โดยมีหน่วยเป็น Neper/m และส่วนจินตภาพ (imaginary part) มีหน่วยเป็น radian/m คือ  $\beta$

เมื่อ 
$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (1.45)$$

$$\alpha = \text{Re} \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)} \quad (1.46)$$

และ 
$$\beta = \text{Im} \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)} \quad (1.47)$$

เรียก  $\alpha$  ว่าค่าคงที่ของการลดทอน (attenuation constant) ตามความจริงแล้วรากที่สองของ  $\gamma^2$  มี 2 ค่า คือ ค่าที่เป็นบวก และค่าที่เป็นลบ แต่เพื่อความสะดวกจะต้องใช้ค่าที่เป็นบวก เมื่อพิจารณาคลื่นระนาบสม่ำเสมอที่เคลื่อนที่ในทิศ  $z$  สนามไฟฟ้าต้องสอดคล้องกับเงื่อนไขดังนี้

$$\frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial z^2} = \gamma^2 \bar{E} \quad (1.48)$$

ผลเฉลยที่เป็นไปได้คือ

$$E(z) = E_0 e^{-\gamma z} \quad (1.49)$$

ในรูปแบบการเปลี่ยนแปลงตามเวลา จะได้

$$\bar{E}(z, t) = \text{Re} \left[ \bar{E}_0 e^{j(\omega t - \beta z)} \right] \quad (1.50)$$

สมการ (1.50) คือ ผลเฉลยของสมการของคลื่นในทิศ  $z$  และมีสนามไฟฟ้าลดลงโดยแฟกเตอร์  $e^{-\alpha z}$  ตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับกรณีของตัวกลางที่ไม่มีการสูญเสียพลังงานค่าคงตัวของเฟส และความเร็วเฟสของคลื่นมีค่าดังนี้

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \quad \text{และ} \quad v = f\lambda = \frac{\omega}{\beta} \quad (1.51)$$

นอกจากนี้ยังสามารถเขียน  $\alpha$  และ  $\beta$  เป็นพจน์ของ  $\sigma$ ,  $\mu$  และ  $\epsilon$  ดังนี้

$$\alpha = \operatorname{Re} \sqrt{(j\omega\mu)(\sigma + j\omega\epsilon)}$$

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \left[ \sqrt{\left(1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2\epsilon^2}\right)} - 1 \right]} \quad (1.52)$$

$$\beta = \operatorname{Im} \sqrt{(j\omega\mu)(\sigma + j\omega\epsilon)}$$

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \left[ \sqrt{\left(1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2\epsilon^2}\right)} - 1 \right]} \quad (1.53)$$

### 1.6. ตัวนำและไดอิเล็กทริก

ในทางแม่เหล็กไฟฟ้า วัสดุถูกแบ่งออกเป็น 2 พวก คือ ตัวนำ และ ไดอิเล็กทริก หรือ ฉนวน (insulator) เส้นแบ่งระหว่าง 2 พวกนี้ไม่ชัดเจน ตัวอย่างเช่น โลหะ ในช่วงของความถี่วิทยุ จัดเป็นตัวนำแต่ช่วยอื่นจัดเป็น ไดอิเล็กทริก พิจารณาสมการแมกซ์เวลล์ที่แปรเปลี่ยนไปตามเวลา

$$\vec{V} \times \vec{H} = \vec{J} + j\omega\vec{D}$$

แทนค่า  $\vec{J} = \sigma\vec{E}$  และ  $\vec{D} = \epsilon\vec{E}$  จะได้

$$\vec{V} \times \vec{H} = \sigma\vec{E} + j\omega\epsilon\vec{E}$$

พจน์แรกทางขวาของสมการคือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (conduction current density) และพจน์ที่สองคือ ความหนาแน่นกระแสขจัด (displacement current density) อัตราส่วน  $\frac{J}{\omega D} = \frac{\sigma}{\omega\epsilon}$  คือ อัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นกระแสนำ และความหนาแน่นกระแสการขจัด

ในตัวกลางเรียกอัตราส่วนนี้ว่า แฟกเตอร์การกระจาย (dissipation factor) ดังนั้น  $\frac{\sigma}{\omega\epsilon} = 1$  คือ เส้น

แบ่งระหว่างตัวนำและไดอิเล็กทริก สำหรับตัวนำ  $\frac{\sigma}{\omega\epsilon} > 1$  ส่วนไดอิเล็กทริก  $\frac{\sigma}{\omega\epsilon} < 1$

สำหรับตัวนำที่ดี เช่น โลหะ ในช่วงสเปกตรัมความถี่วิทยุ  $\frac{\sigma}{\omega\epsilon} \gg 1$  จากสมการ (1.52) และ (1.53) จะได้

$$\alpha = \beta = \omega \sqrt{\frac{\mu\sigma}{2\omega}} = \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}}$$

ตัวอย่างเช่น ถ้าพิจารณาทองแดง ที่มีค่าความถี่สูงถึง 30,000 เมกะเฮิร์ตซ์  $\frac{\sigma}{\omega\epsilon}$  มีค่าประมาณ  $3.5 \times 10^8$

สำหรับไดอิเล็กทริกหรือฉนวนที่ดี ในช่วงความถี่วิทยุ  $\frac{\sigma}{\omega\epsilon} \ll 1$  ตัวอย่างเช่น ไมกา ในช่วงความถี่วิทยุที่คนได้ยิน  $\frac{\sigma}{\omega\epsilon}$  อยู่ที่ระดับ 0.0002

สำหรับตัวนำที่ดี  $\sigma$  และ  $\epsilon$  เกือบจะไม่ขึ้นกับความถี่ แต่สำหรับไดอิเล็กทริก  $\sigma$  และ  $\epsilon$  เป็นฟังก์ชันของความถี่ แต่อัตราส่วน  $\frac{\sigma}{\omega\epsilon}$  เป็นค่าคงที่ในช่วงความถี่ที่พิจารณา ด้วยเหตุผลนี้สมบัติของไดอิเล็กทริกถูกกำหนดด้วยพจน์ของค่าคงตัวไดอิเล็กทริก  $\sigma$  และอัตราส่วน  $\frac{\sigma}{\omega\epsilon}$

### 1.7. การเดินทางของคลื่นในไดอิเล็กทริกที่ดี

กรณีของไดอิเล็กทริกที่ดี  $\frac{\sigma}{\omega\epsilon} \ll 1$  ดังนั้นจากการใช้ทฤษฎีทวินาม (binomial theorem)

$$\sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2\epsilon^2}} = 1 + \frac{\sigma^2}{2\omega^2\epsilon^2}$$

ซึ่งมีเพียงสองพจน์แรกของการขยายทวินามเท่านั้น จากสมการ (1.52) จะได้  $\sigma$  มีค่าดังนี้

$$\sigma = \omega \sqrt{\frac{\mu\omega}{2} \left[ \left( 1 + \frac{\sigma^2}{2\omega^2\epsilon^2} \right) - 1 \right]}$$

$$\alpha = \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \tag{1.54}$$

ในทำนองเดียวกัน จากการใช้ทฤษฎีบทไมโนเมียล พจน์สำหรับ  $\beta$  จากสมการ (1.53) มีค่าดังนี้

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu\omega}{2} \left[ \left( 1 + \frac{\sigma^2}{2\omega^2 \epsilon^2} \right) + 1 \right]}$$

$$\beta = \omega \sqrt{\mu\epsilon} \sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{4\omega^2 \epsilon^2}}$$

จากการใช้ทฤษฎีบทไมโนเมียลอีกครั้งจะได้

$$\beta = \omega \sqrt{\mu\epsilon} \left[ 1 + \frac{\sigma^2}{4\omega^2 \epsilon^2} \right] \quad (1.55)$$

$\omega \sqrt{\mu\epsilon}$  คือ แฟคเตอร์การเลื่อนเฟส (phase factor) สำหรับไดอิเล็กทริกสมบูรณ์ (perfect dielectric) ถ้า  $v$  เป็นความเร็วคลื่นในไดอิเล็กทริก  $v$  มีค่าดังนี้

$$v = \frac{\omega}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon} \left[ 1 + \frac{\sigma^2}{8\omega^2 \epsilon^2} \right]} = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon} \left[ 1 + \frac{\sigma^2}{8\omega^2 \epsilon^2} \right]}$$

$$v = v_0 \left[ 1 - \frac{\sigma^2}{8\omega^2 \epsilon^2} \right] \quad (1.56)$$

สำหรับความต้านทานเชิงซ้อนในตัว หรือความต้านทานเชิงซ้อนเฉพาะ  $Z$  ของตัวกลางที่เป็นตัวนำบางส่วน ซึ่งมีค่าสภาพนำคงที่ และสนามแปรเปลี่ยนตามเวลา นิพจน์ทั่วไปของ  $Z$  มีค่าดังนี้

$$Z = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\epsilon}}$$

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon} \left[ \frac{1}{1 + \frac{\sigma}{j\omega\epsilon}} \right]} \quad (1.57)$$

จะเห็นได้ว่าในตัวนำที่ดี (good conductor)  $\sigma$  มีค่ามากกว่า  $\omega\varepsilon$  มากๆ ซึ่งหมายความว่า  $\alpha$ ,  $\beta$  และ  $\gamma$  มีค่ามากด้วย แสดงว่า คลื่นจะลดลงมากเมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวนำ และการเลื่อนเฟสต่อหนึ่งหน่วยความยาวมีค่ามาก ความเร็วของคลื่นซึ่งเป็นปฏิภาคผกผันกับ  $\beta$  จะมีค่าน้อยในตัวนำที่ดี ส่วนความต้านทานเชิงซ้อนเฉพาะมีค่าน้อย มุมของความต้านทานเชิงซ้อนมีค่า  $45^\circ$  เสมอสำหรับตัวที่ดี

$$Z = \sqrt{\frac{\omega\mu}{\sigma}} \angle 45^\circ = \sqrt{\frac{\omega\mu}{\sigma}} e^{j\pi/4} \quad (1.58)$$

สำหรับฉนวนสมบูรณ์  $\sigma = 0$  จากสมการ (1.57) จะได้

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \quad (1.59)$$

สำหรับสุญญากาศ  $Z = Z_0$

$$Z = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = 120\pi \quad (1.60)$$

### 1.8. การเดินทางของคลื่นในตัวกลางกึ่งไดอิเล็กทริกกึ่งตัวนำ

สารกึ่งไดอิเล็กทริกกึ่งตัวนำ คือสารไดอิเล็กทริกที่มีสภาพการนำไฟฟ้าสูงพอประมาณ โดยมีค่า  $\sigma$  อยู่ระหว่าง  $0.01 \approx 100$  เท่าของ  $\varepsilon$  ค่าคงที่ของเคลื่อนที่  $\gamma$  ( $\alpha$  กับ  $\beta$ ) และค่าอิมพีแดนซ์ของสาร  $Z$  จะได้ค่าสุดท้ายเป็นจำนวนเชิงซ้อนค่าหนึ่งซึ่งสามารถจะนำมาหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน  $\alpha$  ค่าคงที่ทางเฟส  $\beta$  ตามลำดับดังนี้

$$\alpha = \text{Re} \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\mu\varepsilon)} \quad (1.61)$$

$$\beta = \text{Im} \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\mu\varepsilon)} \quad (1.62)$$

และอิมพีแดนซ์ของเนื้อสาร  $Z$

$$Z = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\varepsilon}} \quad (1.63)$$

### 1.9. การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในแบบจำลอง

ในการวิเคราะห์หาการกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในแบบจำลอง สามารถหาได้จากสมการแม่เหล็กไฟฟ้าของแมกเวลล์ ดังต่อไปนี้

$$\nabla \times (\mu_r^{-1} \nabla \times E) - k_0^2 \left[ \epsilon_r - \frac{j\sigma}{\omega \epsilon_0} \right] E = 0 \quad (1.64)$$

$$\epsilon_r = n^2 \quad (1.65)$$

โดยที่	$E$	คือ	ความเข้มของสนามไฟฟ้า
	$H$	คือ	ความเข้มของสนามแม่เหล็ก
	$j$	คือ	ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า
	$\sigma$	คือ	สมบัติการนำไฟฟ้า
	$\mu_r$	คือ	สมบัติการซึมผ่านของสนามแม่เหล็กสัมพัทธ์
	$\omega$	คือ	ความเร็วเชิงมุมของไมโครเวฟ
	$\epsilon_0$	คือ	สมบัติไดอิเล็กทริกในสภาวะสุญญากาศ
	$n$	คือ	ดัชนีหักเห
	$\epsilon_r$	คือ	สมบัติไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์

เงื่อนไขขอบเขตของการกระจายตัวของไมโครเวฟภายในท่อนำคลื่นและแบบจำลองโดยกำหนดให้เป็นตัวนำยิ่งยวด ดังสมการที่ (1.66)

$$n \times E = 0 \quad (1.66)$$

เงื่อนไขขอบเขตความต่อเนื่องของไมโครเวฟที่ผิวรอยต่อระหว่างโอดและอากาศภายในแบบจำลอง สามารถเขียนได้เป็นดังนี้

$$n \times (H_1 - H_2) = 0 \quad (1.67)$$

$$n \times (E_1 - E_2) = 0 \quad (1.68)$$

สำหรับเงื่อนไขสภาวะเริ่มต้นของสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากำหนดให้

$$E_x(t_0), E_y(t_0), E_z(t_0) = 0 \quad (1.69)$$

ภาคผนวก ข.

การใช้งานโปรแกรม COMSOL™ multiphysics

ในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

ภาคผนวก ข.

## การใช้งานโปรแกรม COMSOL™ Multiphysics ในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม COMSOL™ Multiphysics นั้นสามารถใช้งานได้หลากหลาย และมีโมดูลการใช้งานที่ครอบคลุมในหลายๆ ด้าน เช่น ไมโครฟลูอิดิกส์ (microfluidics), การถ่ายเทความร้อน (heat transfer) เป็นต้น โดยภาคผนวก ค. นี้จะอธิบายขั้นตอนอย่างง่ายในการใช้งานโปรแกรม COMSOL™ Multiphysics ที่ใช้ดำเนินการในงานวิจัย

### 1. การสร้างแบบจำลองทางเรขาคณิต (Geometry Modeling)

สร้างแบบจำลองโดยใช้เมนู Draw ในการสร้างรูปร่างของวัตถุ และกำหนดขนาดของวัตถุ ซึ่งในที่นี้แบ่งการสร้างแบบจำลองออกเป็น 2 ส่วน คือ

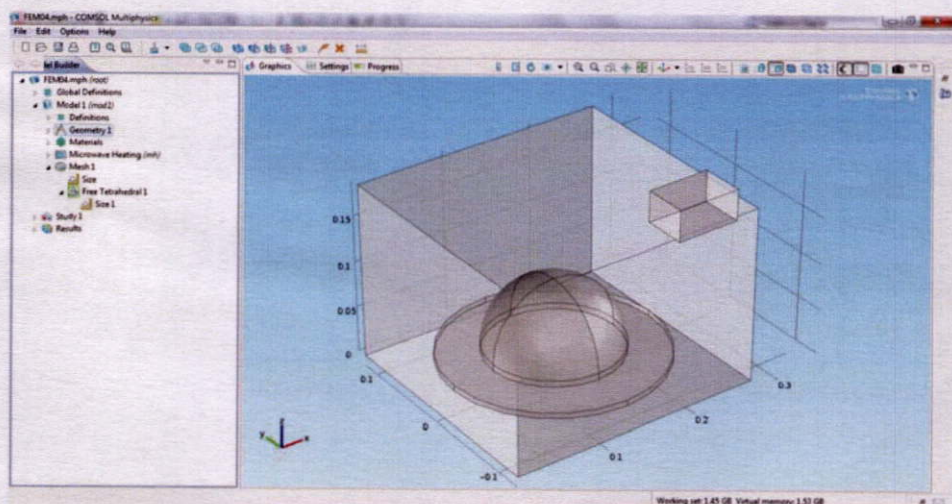
#### 1.1. แบบจำลองโดชนมปัง

#### 1.2. แบบจำลองเตาอบไมโครเวฟ

ซึ่งประกอบไปด้วยแบบจำลองย่อยทั้งหมด 3 ส่วน คือ

- เตาอบไมโครเวฟ
- ท่อนำคลื่น (wave guide)
- จานรองสำหรับวางตัวอย่าง

โดยหลังจากสร้างแบบจำลองทั้งสองส่วนเสร็จเรียบร้อยแล้ว จึงนำแบบจำลองทั้งส่วนมาประกอบเข้าด้วยกันเป็นชิ้นเดียว ดังรูปที่ 1ข.



รูปที่ 1ข. ตัวอย่างการสร้างแบบจำลองโดและเตาอบไมโครเวฟ

## 2. การกำหนดคุณสมบัติทางฟิสิกส์ (Physics Settings)

สำหรับในขั้นตอนนี้จะเป็นขั้นตอนในการกำหนดค่าตัวแปรต่างๆ ที่ใช้สำหรับระบุคุณสมบัติจำเพาะของแบบจำลองและระบุเงื่อนไขที่ใช้ในการประมวลผลของโปรแกรม

### 2.1. ตั้งค่าปัญหาทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

- ตั้งค่า Electromagnetic Waves (rfw) ที่เมนู Multiphysics

### 2.2. กำหนดตัวแปรแบบสเกลาร์ (Scalar Variable)

- ตั้งค่าความถี่ไมโครเวฟที่ใช้ ที่หน้าต่าง Scalar Variable

### 2.3. กำหนดโดเมนย่อย (Subdomain Setting)

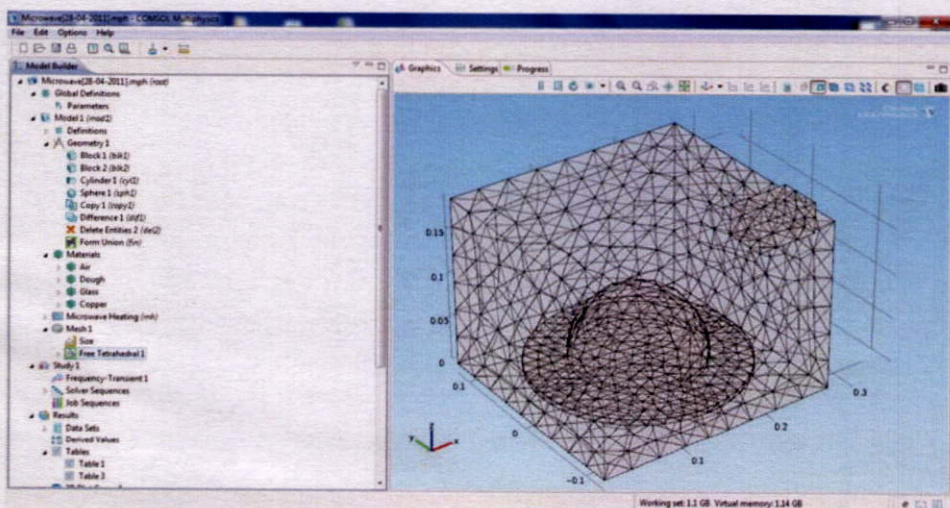
- ตั้งค่าการดูดซับสนามแม่เหล็กสัมพัทธ์ (relative permeability) ของจานรองสำหรับวางตัวอย่าง และโคขนมปัง

### 2.4. กำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition)

- ตั้งค่าเงื่อนไขขอบเขตต่างๆ ที่ใช้ในการประมวลผลในหน้าต่าง Boundary Setting
- ตั้งค่าและกำหนดส่วนที่เป็น Perfect electric conductor และ Perfect magnetic conductor

## 3. การสร้างเมช (Mesh Generation)

กำหนดรูปแบบของเมช และความละเอียดของเมชที่ใช้ในแบบจำลองแต่ละส่วน เมื่อสร้างเมชให้แบบจำลองแล้ว จะได้ผลแสดงดังรูปที่ 2ข.



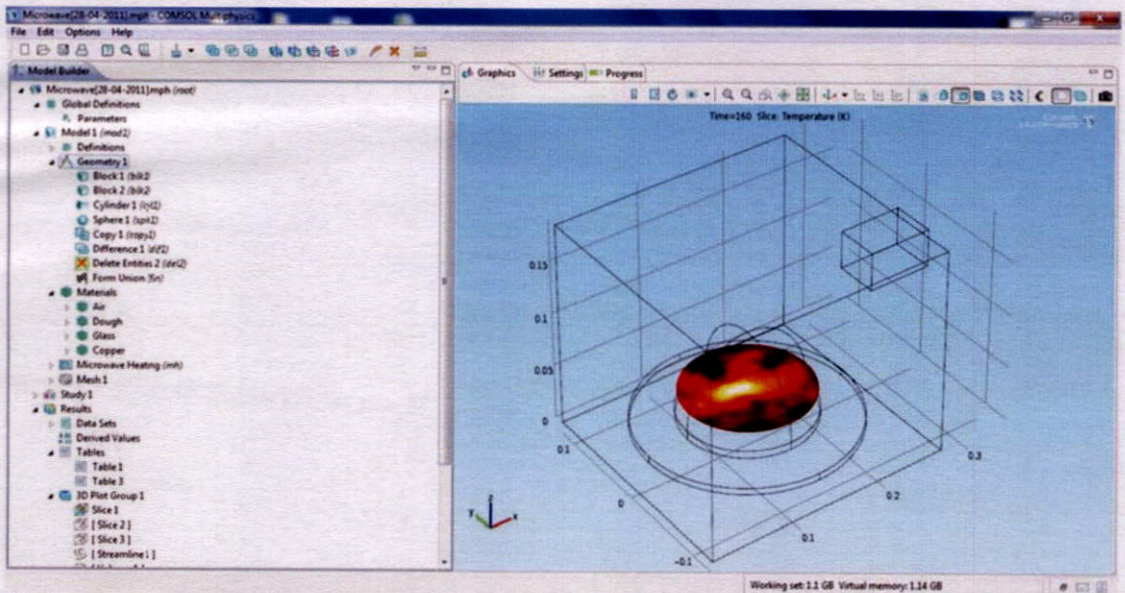
รูปที่ 2ข. ตัวอย่างการสร้างเมชแก่แบบจำลอง

#### 4. การคำนวณทางคอมพิวเตอร์เพื่อหาผลลัพธ์ (Computing The Solution)

- หาผลลัพธ์สำหรับ Electromagnetic Waves ที่หน้าต่าง Solver Manager
- หาผลลัพธ์สำหรับตัวแปรต่างๆ จากหน้าต่าง Solver Parameters โดยในส่วนนี้จะต้องกำหนดชนิดของการถ่ายเทความร้อน และพื้นที่ที่ต้องการศึกษา

#### 5. ผลลัพธ์ของแบบจำลองและการแสดงผล (Post-processing and Visualization)

- กำหนดค่าการแสดงผลที่ต้องการศึกษา เช่น การดูจุดขับเคลื่อนไม่เหล็กไฟฟ้า, อุณหภูมิ เป็นต้น
- กำหนดแกนระนาบ และจำนวนระนาบที่ต้องการศึกษาในแบบจำลอง เช่น ระนาบตัดขวาง ในการแสดงผลในรูปแบบจำลองสามมิติ ดังตัวอย่างในรูปที่ 3ข.



รูปที่ 3ข. ตัวอย่างการแสดงผลลัพธ์ของแบบจำลอง

ภาคผนวก ก.

การเตรียมตัวอย่างโคชนมปิ้ง

## ภาคผนวก ค.

### การเตรียมตัวอย่างโคขนมปัง

ในส่วนของการเตรียมตัวอย่างโคขนมปังในภาคผนวก ค. นี้ได้แบ่งหัวข้อออกเป็น 3 หัวข้อหลัก คือ วัตถุดิบ ซึ่งจะกล่าวถึงที่มาของวัตถุดิบที่นำมาใช้ นำหนักส่วนผสมแต่ละชนิดที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่าง และอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างโคขนมปัง รวมไปถึงขั้นตอนการเตรียมที่สรุปไว้เป็นแผนภาพอย่างง่าย

#### 1. วัตถุดิบ

##### 1.1. แป้งขนมปัง

- ตราหงส์ขาว (ผลิตโดย บริษัท ยูไนเต็ดฟลาวมิลล์ จำกัด (มหาชน), ประเทศไทย)

##### 1.2. ยีสต์แห้ง

- ตราเพอร์เฟ็คท์ (แบ่งบรรจุโดย ห้างหุ้นส่วนจำกัด เกรทฮิลล์, ประเทศไทย)

##### 1.3. น้ำตาลทราย

- ตราลิน สูตรละลายเร็ว (ผลิตโดย บริษัท อุตสาหกรรมน้ำตาลบ้านไร่ จำกัด, ประเทศไทย)

##### 1.4. เกลือบริโภค

- ตราปรุngthิพย์ (บริษัท อุตสาหกรรมเกลือบริสุทธิ์ จำกัด, ประเทศไทย)

##### 1.5. นมผงขาดมันเนย

- ตรามิชชั่นไฮแคล (ผลิตโดย บริษัท มิชชั่นเฮลท์ฟู๊ด จำกัด, ประเทศไทย)

##### 1.6. เนยขาว

- ตราแซมชั่น (ผลิตโดย บริษัท เกตุวานิชอุตสาหกรรม จำกัด, ประเทศไทย)

##### 1.7. น้ำสะอาด

#### 2. เครื่องมือและอุปกรณ์

2.1. เครื่องชั่งแบบดิจิทัล (METTLER TOLEDO, สหรัฐอเมริกา)

2.2. เครื่องผสมอาหาร (House Worth รุ่น HW-FM01, นำเข้าและจัดจำหน่ายโดย บริษัท คิวเซ็น (ประเทศไทย) จำกัด, ประเทศไทย)

2.3. อุปกรณ์อื่นๆ เช่น ไม้กวาดแป้ง, ไม้พาย (spatula), ที่ตัดแป้งโด (Dough Scraper) เป็นต้น

### 3. น้ำหนักส่วนผสม

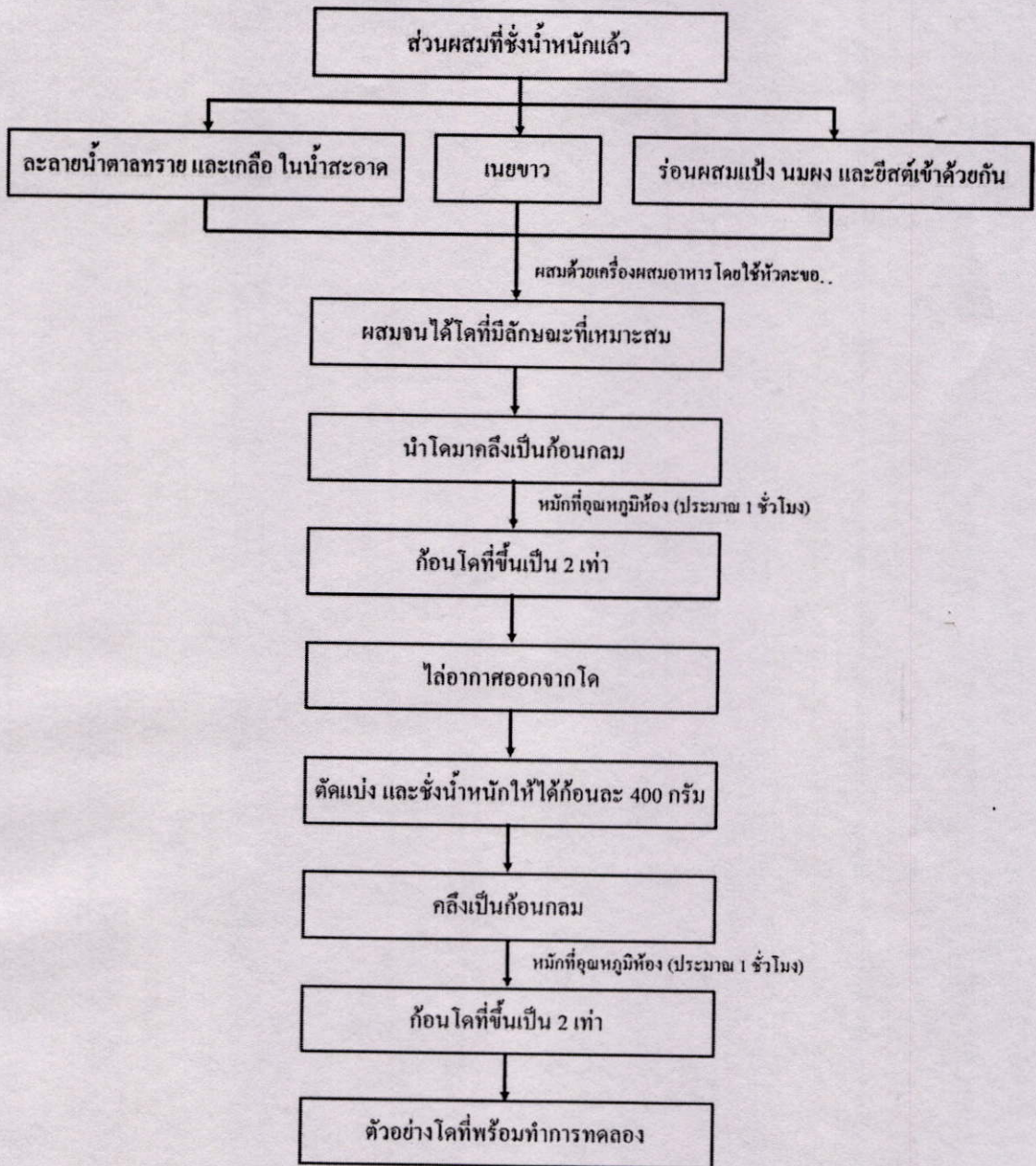
น้ำหนักส่วนผสมสำหรับเตรียมตัวอย่างโคชนมปังที่ระดับความเข้มข้นของเกลือต่างๆ แสดงไว้ดังตารางที่ 1ค.

ตารางที่ 1ค. น้ำหนักส่วนผสมในการเตรียมตัวอย่างโคชนมปังที่ระดับความเข้มข้นของเกลือที่ 0.0% 0.2% 0.5% 1.0% และ 1.5%

ส่วนผสม	น้ำหนักส่วนผสม (กรัม)				
	0.0%	0.2%	0.5%	1.0%	1.5%
แป้งขนมปัง	1000	1000	1000	1000	1000
ยีสต์แห้ง	10	10	10	10	10
น้ำตาลทราย	65	65	65	65	65
เกลือบริโภค	0	2	5	10	15
นมผงขาดมันเนย	30	30	30	30	30
เนยขาว	55	55	55	55	55
น้ำสะอาด	550	550	550	550	550

### 4. ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างโคชนมปัง

ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างโคชนมปังแสดงไว้ดังรูปที่ 1ค. โดยเตรียมตัวอย่างโคชนมปังที่ระดับความเข้มข้นของเกลือ 0.0% 0.2% 0.5% 1.0% และ 1.5% ตามลำดับ ซึ่งกำหนดให้มีตัวอย่างเพียงพอต่อการทดลองทั้งหมดจำนวน 3 ซ้ำ ในแต่ละระดับความเข้มข้นของเกลือ



รูปที่ 1ค. แผนภาพขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างโดขนมปัง

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาววิสรา ทุโต
วัน เดือน ปีเกิด	8 ธันวาคม 2529
ที่อยู่	67 หมู่ 5 ต.นครชุมน์ อ.บ้านโป่ง จ.ราชบุรี 70110
ประวัติการศึกษา	2552 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการ อาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก