



การจำลองการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟต่อบรรจุภัณฑ์หน่อไม้ฝรั่งตัดแต่ง

ชนิสรา หนูช่วย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการแปรรูปผลผลิตเกษตร

สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการ มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2553

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

สำนักบริหารและพัฒนานิชาการ มหาวิทยาลัยแม่โจ้

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการแปรรูปผลผลิตเกษตร

ชื่อเรื่อง

การจำลองการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟต่อบรรจุภัณฑ์หน่อไม้ฝรั่งตัดแต่ง

โดย

ชนิสรา หนูช่วย

พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการที่ปรึกษา

ปิยนันท์ วาญ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิตพงศ์ วาญ์)
วันที่ 25 เดือน มี.ค. พ.ศ. 53

กรรมการที่ปรึกษา

สุเมธ สืบคำ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุเมธ สืบคำ)
วันที่ 25 เดือน มี.ค. พ.ศ. 53

กรรมการที่ปรึกษา

พูนพัฒน์ พูนน้อย

(อาจารย์ ดร.พูนพัฒน์ พูนน้อย)
วันที่ 25 เดือน มี.ค. พ.ศ. 53

กรรมการที่ปรึกษา

วรรณิ นิธิกร

(อาจารย์ ดร.วรรณิ นิธิกร)
วันที่ 25 เดือน มี.ค. พ.ศ. 53

ประธานกรรมการประจำหลักสูตร

สุเมธ สืบคำ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุเมธ สืบคำ)
วันที่ 25 เดือน มี.ค. พ.ศ. 53

สำนักบริหารและพัฒนานิชาการรับรองแล้ว

รองศาสตราจารย์ ดร.เทพ พงษ์พานิช

ประธานกรรมการบัณฑิตศึกษา
วันที่ 30 เดือน มี.ค. พ.ศ. 53

ชื่อเรื่อง	การจำลองการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟต่อบรรจุภัณฑ์ หน่อไม้ฝรั่งตัดแต่ง
ชื่อผู้เขียน	นางสาวชนิสรา หนูช่วย
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมการแปรรูปผลผลิต เกษตร
ประธานกรรมการที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จาดุพงศ์ วาฤทธิ์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์การกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟขนาด 2.45 GHz สำหรับหน่อไม้ฝรั่ง (*Asparagus officinalis* var. *altilis* L.) ตัดแต่งพร้อมปรุงสุก ในบรรจุภัณฑ์โพลีโพรพิลีน หน่อไม้ฝรั่งในบรรจุภัณฑ์ถูกจำลองกระบวนการปรุงสุกโดยใช้ตู้ไมโครเวฟขนาด 30x30x20 เซนติเมตร (กว้าง x ยาว x สูง) การจำลองการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟได้ประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีการไฟไนท์อินทิกรัล และสมการแมกซ์เวลล์ เพื่อคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้าภายในตู้ไมโครเวฟ แล้วจึงแปลงค่าที่ได้มาให้อยู่ในเทอมของอุณหภูมิโดยใช้สมการการถ่ายเทความร้อนโดยใช้วิธีการผลต่างสืบเนื่องเชิงเวลา การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมได้จากการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของหน่อไม้ฝรั่งที่ได้จากกล้องจับภาพความร้อนหลังการทดสอบจริงกับค่าอุณหภูมิที่คำนวณได้จากจำลอง หลังจากนั้นจึงได้ศึกษาการกระจายตัวของความร้อนจากการเปลี่ยนแปลงบรรจุภัณฑ์พร้อมปรุงสุกด้วยไมโครเวฟ ผลการทดลองพบว่า การกระจายตัวของความร้อนของหน่อไม้ฝรั่งในบรรจุภัณฑ์โพลีโพรพิลีนมีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากกล้องจับภาพความร้อน การกระจายอุณหภูมิของหน่อไม้ฝรั่งในบรรจุภัณฑ์มีความไม่สม่ำเสมอ ซึ่งมีอุณหภูมิอยู่ในช่วงระหว่าง 28.0 ถึง 75.6 องศาเซลเซียส จากการจำลองการเปลี่ยนค่าไดอิเล็กทริกของบรรจุภัณฑ์ ที่ค่าการตัวประกอบการสูญเสียยังผล (ϵ'') เท่ากับ 16 (ใกล้เคียงกับค่าของหน่อไม้ฝรั่ง) ทำให้การกระจายตัวของอุณหภูมิมีความสม่ำเสมอมากขึ้นและสามารถช่วยลดค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิต่าง 3.5 องศาเซลเซียส เมื่อเทียบกับค่า ϵ'' เท่ากับ 0.003 (ใกล้เคียงกับค่าบรรจุภัณฑ์โพลีโพรพิลีน) งานวิจัยนี้ได้นำเสนอแนวทางในการปรับปรุงสถานะการให้ความร้อนของคลื่นไมโครเวฟและการพัฒนาบรรจุภัณฑ์ของอาหารปรุงสุกซึ่งจะช่วยในการลดค่าใช้จ่ายในการทดลองกับวัสดุจริงได้

Title	Analysis of Microwave Distribution for Ready-to-Cook Asparagus Packaging
Author	Miss Chanisara Noochuay
Degree of	Master of Engineering in Agro – Process Engineering
Advisory Committee Chairperson	Assistant Professor Dr. Jatuphong Varith

ABSTRACT

This thesis dealt with the analysis of 2.45 GHz microwave (MW) distribution for ready-to-cook fresh-cut asparagus (*Asparagus officinalis* var. *altilis* L.) in polypropylene (PP) packaging. Pre-packed asparagus was simulated for cooking process inside a domestic microwave oven with size of 30x30x20 centimeters (w x l x h). The MW heating process simulation applied finite integral method and Maxwell's equations to solve an E-field inside microwave cavity. The E-field was further converted into temperature mapping based on heat transfer equations using finite different time domain. Validation was performed by comparing the simulated data and actual temperatures of MW asparagus captured on thermal imaging camera. Then heat distribution with the modified properties of microwavable packaging for asparagus was studied. The result indicated that simulated temperature mapping of asparagus on a regular PP packaging agreed with thermal images. Temperature distribution of MW-heated asparagus was not uniform within a range between 75.6 and 28.0°C. From simulation, the modified microwavable package with dielectric loss (ϵ''), of 16 (similar to ϵ'' of asparagus) helped improve heating uniformity, resulting in the mean temperature difference between hot and cold spots of 3.5°C compared to packaging with ϵ'' of 0.003 (similar to ϵ'' of regular PP packaging). This work provided guidelines to modify the MW cooking conditions and the microwavable packaging which can minimize experimental cost for ready-to-cook foods.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จาดุพงศ์ วาฤทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งกรุณาอบความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษาที่ดี กำลังใจ ความช่วยเหลือในทุกด้าน และการแก้ปัญหาต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาที่ทำการวิจัย รวมถึงการตรวจสอบวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงยิ่งไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐ วรยศ ที่กรุณารับเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุเนตร สืบคำ อาจารย์ ดร.พูนพัฒน์ พูนน้อย ดร.วรรณ นิธิศิริกุล ที่กรุณารับเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อีกทั้งยังเป็นอาจารย์ที่ให้คำแนะนำ ชี้แนะ ความรู้ที่เป็นประโยชน์ต่อผู้เขียนในหลาย ๆ ด้าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านบรรณารักษศาสตร์และสารนิเทศศาสตร์

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.โมไนย ไกรฤกษ์ ที่กรุณาเชื้อเพื่อทีมวิจัย เพื่อพัฒนาการจำลองโปรแกรม CST2006[®] Microwave studio (CST of America, Inc., Wellesley Hills, MA, USA) สำหรับการจำลองการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟ ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ขอขอบพระคุณ โครงการทุนสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (TGIST) ที่ให้ทุนการศึกษาในการทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ คุณครูทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ อบรมสั่งสอน แนะนำและดัดเตือนผู้จัดทำจนมาถึงวันนี้

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกตั้งแต่ผู้จัดทำได้เข้ามาศึกษาจนกระทั่งสำเร็จจากสถาบันแห่งนี้

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อชาญณรงค์ และคุณแม่จินดา หนูช่วย ที่ให้การศึกษาที่ดี คอยสนับสนุนและเป็นกำลังใจด้านการเรียน และการดำเนินชีวิตมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำหวังเป็นอย่างยิ่งว่า วิทยานิพนธ์เล่มนี้จะเป็นประโยชน์แก่ผู้สนใจไม่มากนัก

ชนิสรา หนูช่วย

มีนาคม 2553

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(3)
ABSTRACT	(4)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบัญ	(6)
สารบัญตาราง	(8)
สารบัญภาพ	(9)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(11)
บทที่ 1 บทนำ	1
ความสำคัญของปัญหา	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
ประโยชน์ที่ได้รับ	2
ขอบเขตของงานวิจัย	3
บทที่ 2 การตรวจเอกสาร	4
หน่อไม้ฝรั่ง	4
ผักสดตัดแต่ง	4
คลื่นไมโครเวฟ	5
สมบัติทางไดอิเล็กทริก	7
สมการแมกซ์เวลล์	10
สมการถ่ายเทความร้อน	14
การวิเคราะห์แบบจำลองโดยใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลข	22
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	24
กรอบแนวความคิด	30
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการ	31
อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	31
วิธีการ	32
การสร้างแบบจำลองในโปรแกรม CST2006 [*]	33

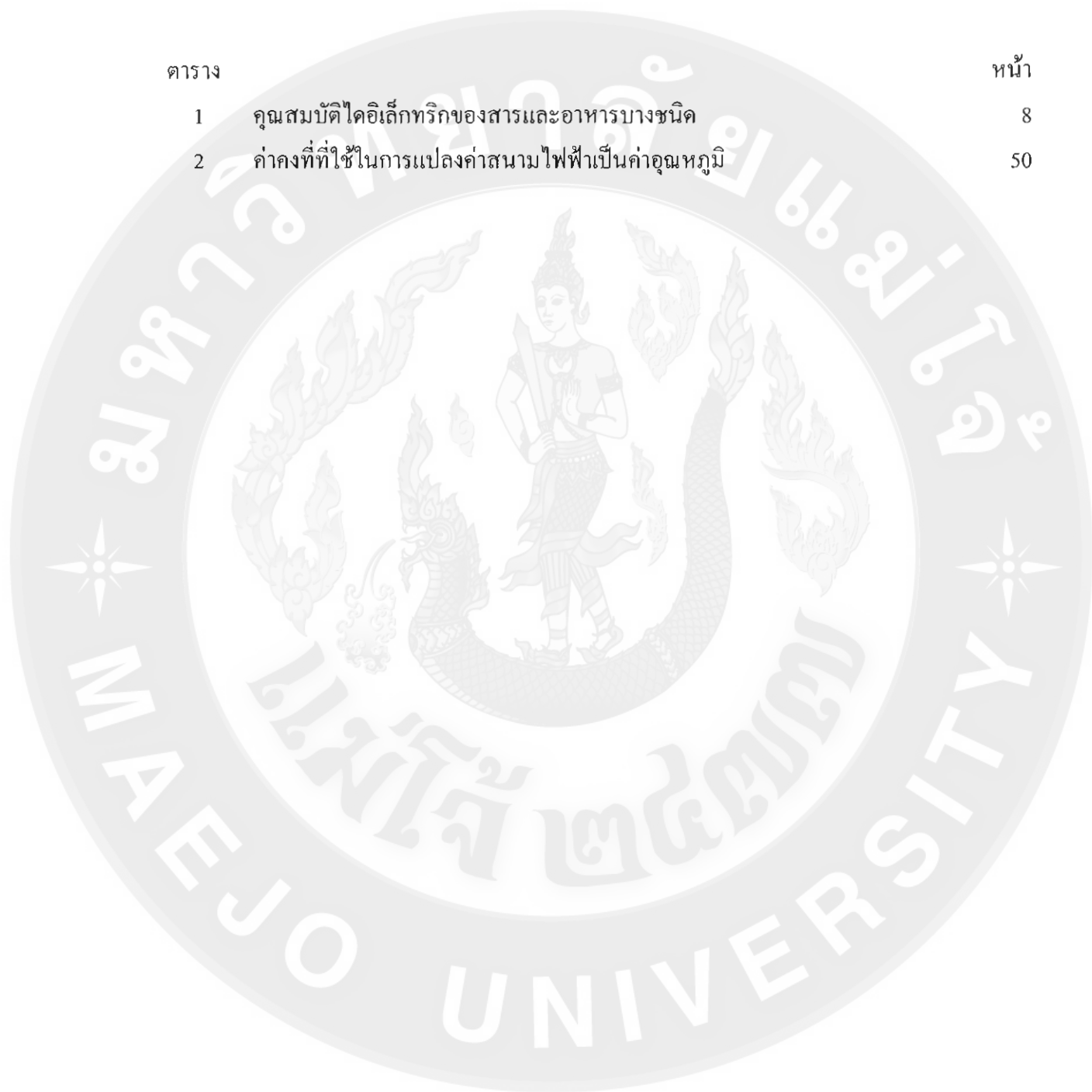
สถานที่ดำเนินการวิจัย	52
บทที่ 4 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง	53
ผลการสร้างแบบจำลองในโปรแกรม CST2006®	53
ผลการศึกษาการหาขนาดกริดที่เหมาะสม	54
ผลการออกแบบชุดสมการ FDTD ไฟฟ้าให้อยู่ในเทอมของอุณหภูมิ	57
ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง	58
ผลการศึกษาภาระโหลดที่เหมาะสมในการให้ความร้อนหน่อไม้ฝรั่งด้วยไมโครเวฟ	60
ผลการจำลองปรับแต่งคุณสมบัติบรรจุภัณฑ์	63
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	66
ข้อสรุป	66
ข้อเสนอแนะ	66
บรรณานุกรม	68
ภาคผนวก	72
ภาคผนวก ก Source Code ที่ใช้ในการแปลงค่าสนามไฟฟ้าให้อยู่ในเทอมของอุณหภูมิ	74
ภาคผนวก ข ประวัติผู้วิจัย	82

สารบัญตาราง

ตาราง

หน้า

- | | | |
|---|--|----|
| 1 | คุณสมบัติไดอิเล็กทริกของสารและอาหารบางชนิด | 8 |
| 2 | ค่าคงที่ที่ใช้ในการแปลงค่าสนามไฟฟ้าเป็นค่าอุณหภูมิ | 50 |



สารบัญภาพ

ภาพ	หน้า
1 การนำความร้อนสองมิติ	17
2 การสมดุลพลังงานของระบบ	20
3 สมการผลต่างสี่บ่งเนื่องสำหรับ Node ที่อยู่บนและมีการพาความร้อน	21
4 แผนผังการดำเนินงาน	32
5 แบบจำลองหน่วยไม่ฝังในบรรจุภัณฑ์สร้างโดยโปรแกรม CST2006®	33
6 ลำดับขั้นตอนการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตแบบจำลอง	34
7 ขอบเขตของการจำลอง	35
8 ขนาดของกริดที่แตกต่างกันตามจำนวนเส้นต่อความยาวคลื่น กรณีที่ 1) 10 เส้น กรณีที่ 2) 20 เส้น และ กรณีที่ 3) 30 เส้น	37
9 ระบบและปริมาตรควบคุมที่ศึกษาในงานวิจัย	38
10 การวิเคราะห์การกระจายความร้อนในแต่ละเซลล์	39
11 การกระจายตัวของอุณหภูมิในลักษณะที่ 1	40
12 การกระจายตัวของอุณหภูมิในลักษณะที่ 2	41
13 การกระจายตัวของอุณหภูมิในลักษณะที่ 3	42
14 การกระจายตัวของอุณหภูมิในลักษณะที่ 4	43
15 การกระจายตัวของอุณหภูมิในลักษณะที่ 5	44
16 การกระจายตัวของอุณหภูมิในลักษณะที่ 6	45
17 การกระจายตัวของอุณหภูมิในลักษณะที่ 7	46
18 การกระจายตัวของอุณหภูมิในลักษณะที่ 8	47
19 การกระจายตัวของอุณหภูมิในลักษณะที่ 9	48
20 ชุดถ่ายภาพความร้อน	49
21 บรรจุภัณฑ์หน่วยไม่ฝัง	49
22 บรรจุภัณฑ์หน่วยไม่ฝังกับชุดถ่ายภาพความร้อน	49
23 โพลตบรรจุภัณฑ์หน่วยไม่ฝังที่ใช้ในการจำลอง	51
24 แบบจำลองหน่วยไม่ฝังภายในบรรจุภัณฑ์ด้วยโปรแกรม CST2006®	53
25 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้า (E-field) ของแบบจำลองหน่วยไม่ฝัง ภายในบรรจุภัณฑ์	54

ภาพ	หน้า
26 ภาพสนามไฟฟ้า (E-field) ที่ที่ได้จากการจำลองด้วย CST2006® ด้วยขนาดกริดที่แตกต่างกัน ที่ระนาบ $y = 20$ น) 1.4 มิลลิเมตร ข) 0.7 มิลลิเมตร และ ค) 0.47 มิลลิเมตร	55
27 ภาพกำลังงานสูญเสีย (Power loss density) ที่ที่ได้จากการจำลองด้วย CST2006® ด้วยขนาดกริดที่แตกต่างกัน ก) 1.4 มิลลิเมตร ข) 0.7 มิลลิเมตร และ ค) 0.47 มิลลิเมตร	56
28 ลักษณะการกระจายอุณหภูมิที่ได้จากโปรแกรม Visual Basic for Applications™ (VBA)	57
29 ภาพกำลังงานสูญเสียที่ได้จากการจำลองด้วย CST2006®	57
30 ภาพด้านบน (เพลน x-z ที่ $y = 20$ มม.) ของการให้ความร้อนหน่อไม้ฝรั่งจากการทดสอบจริง และจากแบบจำลอง (ก) กำลังงานสูญเสีย (W/m^3) (ข) การจำลองค่าอุณหภูมิด้วยวิธี FDTD (ค) ภาพจากกล้องจับความร้อนในการทดสอบจริง	59
31 ภาพเส้นระดับของอุณหภูมิ (ก) ภาพเส้นระดับของอุณหภูมิของการจำลองค่าอุณหภูมิด้วยวิธี FDTD (ข) ภาพเส้นระดับของอุณหภูมิจากกล้องจับภาพความร้อนในการทดสอบจริง	60
32 อุณหภูมิต่างระหว่างจุดร้อนและจุดเย็นที่หน่อไม้ฝรั่ง ณ ระนาบผิวหน้าด้านบนในบรรจุภัณฑ์ที่โพลกของหน่อไม้ฝรั่งต่าง ๆ กัน	61
33 ค่าอุณหภูมิกำหนดด้วยวิธี FDTD ระนาบ x-z ของการกระจายอุณหภูมิ ($^{\circ}C$) ของหน่อไม้ฝรั่ง 2 ชั้น ก) $y = 26$ มิลลิเมตร และ ข) $y = 30$ มิลลิเมตร	62
34 ค่าอุณหภูมิกำหนดด้วยวิธี FDTD ระนาบ x-z ของการกระจายอุณหภูมิ ($^{\circ}C$) ของหน่อไม้ฝรั่ง 3 ชั้น (ก) $y = 36$ มิลลิเมตร และ (ข) $y = 24$ มิลลิเมตร	62
35 อุณหภูมิต่างระหว่างจุดร้อนและจุดเย็นของหน่อไม้ฝรั่งที่ระนาบ y ของบรรจุภัณฑ์หน่อไม้ฝรั่งสองชนิดที่ค่า ϵ'' เท่ากับ 0.003 และ 16	64
36 อุณหภูมิต่างระหว่างจุดร้อนและจุดเย็นของหน่อไม้ฝรั่งที่ระนาบ y ของบรรจุภัณฑ์หน่อไม้ฝรั่งสองชนิดที่ค่า ϵ'' เท่ากับ 0.003 และ 16 (ก) ที่ $y = 30$ มิลลิเมตร และ (ข) ที่ $y = 26$ มิลลิเมตร	64
37 อุณหภูมิต่างระหว่างจุดร้อนและจุดเย็นของหน่อไม้ฝรั่งที่ระนาบ y ของบรรจุภัณฑ์หน่อไม้ฝรั่งสองชนิดที่ค่า ϵ'' เท่ากับ 0.003 (ก) ที่ $y = 20$ มิลลิเมตร และ (ข) ที่ $y = 1$ มิลลิเมตร	65

อักษรย่อและสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
A	พื้นที่หน้าตัดที่ความร้อนไหลผ่าน	m^2
B	ค่าฟลักซ์แม่เหล็ก	T
B_i	Biot number	dimensionless
C	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของหน่วยไม้ฝรั่ง	$kJ/kg^\circ C$
D	ค่าฟลักซ์ไฟฟ้า	$N.m^2/C$
E	ค่าสนามไฟฟ้า	V/m
F	ค่าความถี่	GHz
F_0	Fourier number	dimensionless
H	ค่าการพาความร้อนของของไหล	$W.m^{-1}^\circ C^{-1}$
H	ค่าสนามแม่เหล็ก	T
I	กระแสไฟฟ้า	A
I_d	กระแสไฟฟ้าการจัด	A
K	ความนำความร้อน	$m^\circ C$
P	ค่ากำลังงานสนามไฟฟ้า	W
P_{av}	ค่ากำลังงานเฉลี่ย	W
Q	อัตราการเกิดความร้อน	$W.m^{-3}$
T	เวลา	s
T	อุณหภูมิ	$^\circ C$
$T_{m,n}$	อุณหภูมิของจุดที่พิจารณา	$^\circ C$
$T_{m,n}^P$	อุณหภูมิของจุดที่พิจารณา ณ เวลานั้นๆ	$^\circ C$
$T_{m,n}^{P+1}$	อุณหภูมิของจุดที่พิจารณา ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา	$^\circ C$
T_0	อุณหภูมิเริ่มต้น	$^\circ C$
T_α	อุณหภูมิสภาพแวดล้อมภายนอก	$^\circ C$
V	ปริมาตรหนึ่งหน่วย	m^3

อักษรย่อและสัญลักษณ์

สัญลักษณ์กรีก โรมัน

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
$\Delta \tau$	เวลาที่เปลี่ยนแปลงไป	s
Δx	ระยะทางที่เปลี่ยนแปลงไป	m
ε'	คงตัวของไดอิเล็กทริก	dimensionless
ε''	ค่าตัวประกอบการสูญเสียยังผล	dimensionless
ϕ_ε	ค่าฟลักซ์ทั้งหมดของสนามไฟฟ้า	N.m ² /C
α	ค่าความสามารถในการกระจายอุณหภูมิ	W m ² /kJ
μ	ค่าความนำไฟฟ้า	dimensionless
ω	ค่าความถี่เชิงมุม	rad/s
ε_0	ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของอากาศอิสระ	F/m
ρ	ความหนาแน่น	kg/m ³

บทที่ 1

บทนำ

ความสำคัญของปัญหา

อาหารพร้อมบริโภค (read-to-eat-food) เป็นอุตสาหกรรมหนึ่งซึ่งมีศักยภาพ และแนวโน้มในการส่งออกเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังเป็นอุตสาหกรรมที่สร้างมูลค่าเพิ่มให้กับวัตถุดิบเป็นอย่างมาก เนื่องจากอาหารพร้อมบริโภคมีลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพ ด้านสี กลิ่น รส เนื้อสัมผัส และคุณค่าทางโภชนาการใกล้เคียงผักสดมากที่สุด (รัชตา, 2548) และมีความสะดวกรวดเร็วในการบริโภค ดังนั้นจึงทำให้ความต้องการอาหารพร้อมบริโภคมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น นอกจากจะต้องการอาหารพร้อมบริโภคแล้ว ในปัจจุบันกระแสการดูแลสุขภาพยังทำให้ผู้บริโภคหันมาทานอาหารเพื่อสุขภาพมากขึ้น ดังนั้นผักตัดแต่ง (fresh-cut vegetable products) จึงเป็นผลิตภัณฑ์หนึ่งที่สามารถตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคได้เป็นอย่างดี ผู้บริโภคสามารถนำผักตัดแต่งปรุงสุกมาประกอบเป็นอาหารด้วยการใช้ไมโครเวฟในการให้ความร้อน จะเห็นได้ว่าปัจจุบันการใช้ไมโครเวฟในการแปรรูปอาหารเป็นที่นิยมเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในอุตสาหกรรมอาหารสามารถนำไมโครเวฟมาใช้ในกระบวนการต่างๆ ได้หลายกระบวนการ ได้แก่ การลวก (blanching) (Osinboyejo *et al.*, 2003; Brewer, 2002) การทำให้สุก (cooking) (Barbeau and Schnepf, 1989) การทำแห้ง (drying) (Feng *et al.*, 2002) การพาสเจอร์ไรส์ (pasteurizing) การสเตอริไลส์ (sterilization) (Lau and Tang, 2002) การละลายน้ำแข็ง (thawing) การอบ (baking) (Ozmutlu *et al.*, 2001) เป็นต้น ไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic wave) ที่มีความถี่ระหว่าง 300 เมกะเฮิร์ตซ์ (MHz) ถึง 300 จิกะเฮิร์ตซ์ (GHz) (ระหว่างความยาวคลื่น 100 เซนติเมตร – 1 มิลลิเมตร) (Rosenthal, 1992) ไมโครเวฟไม่ใช้ความร้อนแต่อยู่ในรูปของพลังงาน (energy) และถูกเปลี่ยนเป็นความร้อนโดยการสั่นสะเทือนของอนุภาคที่มีประจุหรือการหมุนตัวของโมเลกุลที่มีขั้ว ทำให้ชนกับอนุภาคหรือโมเลกุลที่อยู่ข้างเคียง ซึ่งเกิดขึ้นหลังจากที่วัตถุได้รับคลื่นและมีการดูดซับพลังงานดังกล่าว เป็นผลให้เกิดความร้อนขึ้น (Fellows, 2000)

การนำผักสดตัดแต่งมาให้ความร้อนภายในตู้ไมโครเวฟนั้นต้องอาศัยบรรพบุรุษพันธุ์ที่มีความเหมาะสมเพื่อทำให้คลื่นกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอภายในบรรพบุรุษพันธุ์นั้น ดังนั้นการจำลองการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟจึงเป็นวิธีการที่สามารถช่วยให้การออกแบบบรรพบุรุษพันธุ์ผักสดตัดแต่งมีคุณภาพมากยิ่งขึ้น ในการจำลองการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟนั้นสามารถใช้โปรแกรม

สำเร็จรูปและกระบวนการเชิงตัวเลข เช่น วิธีผลต่างสืบเนื่องเชิงเวลา (Finite Difference Time Domain: FDTD) เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการทดลองจริงได้

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาผลการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟภายในบรรจุภัณฑ์บรรจุผักสดโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีเชิงตัวเลข โดยได้ทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิเคราะห์กับผลการทดสอบจริง เพื่อเปรียบเทียบความแม่นยำในการทดลอง หลังจากนั้นก็ทำการปรับแต่งบรรจุภัณฑ์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปเพื่อให้การกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟภายในผักสดในบรรจุภัณฑ์มีความสม่ำเสมอมากขึ้น ผักที่นำมาทำจำลองและทดสอบคือ หน่อไม้ฝรั่ง (*Asparagus officinalis* var. *altilis* L.) เนื่องจากหน่อไม้ฝรั่งเป็นพืชผักที่ทำรายได้ให้แก่เกษตรกรและประเทศเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ โดยผลผลิตส่วนใหญ่ส่งออกในรูปแบบหน่อสดและแช่แข็งซึ่งในปี พ.ศ. 2545 มีปริมาณการส่งออกกว่า 17,295 ตัน มูลค่ากว่า 465.15 ล้านบาท (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2551) นอกจากนี้หน่อไม้ฝรั่งเป็นผักที่มีรสอร่อย และที่สำคัญหน่อไม้ฝรั่งยังมีสาร กลูตาไทโอน และสารรูติน ซึ่งเป็นสารที่ต่อต้านอนุมูลอิสระ ต่อต้านโรคมะเร็ง ช่วยเสริมสร้างความแข็งแรงของหลอดเลือด และช่วยลดอัตราการเสี่ยงในการเป็นหมันอีกด้วย (ประพันธ์, 2550)

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟภายในบรรจุภัณฑ์บรรจุหน่อไม้ฝรั่งตัดแต่งด้วยโปรแกรม CST2006® ร่วมกับการคำนวณเชิงตัวเลขแบบ FDTD
2. เพื่อเปรียบเทียบผลการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟที่เกิดขึ้นภายในบรรจุภัณฑ์บรรจุหน่อไม้ฝรั่งตัดแต่งที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม CST2006®
3. จำลองปรับแต่งคุณสมบัติบรรจุภัณฑ์ด้วยโปรแกรม CST2006® เพื่อให้การกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟภายในหน่อไม้ฝรั่งในบรรจุภัณฑ์มีความสม่ำเสมอมากยิ่งขึ้น

ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ได้แบบจำลองการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟภายในบรรจุภัณฑ์บรรจุหน่อไม้ฝรั่งตัดแต่งที่วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CST2006® ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการวิเคราะห์เพื่อออกแบบบรรจุภัณฑ์ ที่ใช้กับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ

2. ได้ผลการเปรียบเทียบการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟที่เกิดขึ้นภายในบรรจุภัณฑ์บรรจุหน่อไม้ฝรั่งตัดแต่งที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม CST2006®
3. ได้ลักษณะบรรจุภัณฑ์ที่ทำให้การกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟภายในหน่อไม้ฝรั่งมีความสม่ำเสมอมากยิ่งขึ้น

ขอบเขตของงานวิจัย

การจำลองการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟด้วยโปรแกรม CST2006® เทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบจริงภายในบรรจุภัณฑ์บรรจุหน่อไม้ฝรั่งตัดแต่งที่ให้ความร้อนด้วยเครื่องไมโครเวฟขนาดครัวเรือน ขนาด 300x300x200 (กว้างxยาวxสูง) มิลลิเมตร ซึ่งเป็นขนาดที่นิยมใช้ในครัวเรือนโดยทั่วไป บรรจุภัณฑ์เป็นพลาสติกโพลิโพรพิลีน (polypropylene, PP) ซึ่งมีขายในท้องตลาดเมื่อได้ลักษณะการกระจายตัวของคลื่นภายในบรรจุภัณฑ์บรรจุหน่อไม้ฝรั่งตัดแต่งแล้วจึงจะพัฒนาเพื่อให้ได้ซึ่งบรรจุภัณฑ์ต้นแบบที่มีการกระจายตัวของอุณหภูมิอย่างสม่ำเสมอ

บทที่ 2

การตรวจเอกสาร

หน่อไม้ฝรั่ง

หน่อไม้ฝรั่ง (*Asparagus officinalis* var. *altilis* L.) เดิมทีเป็นพืชพื้นเมืองแถบยุโรปและแอฟริกา เป็นผักที่ขึ้นชอบของผู้รักสุขภาพ เพราะมีคุณค่าทางอาหารค่อนข้างสูงโดยเฉพาะฟอสฟอรัส วิตามินเอ และกลูตาไรโอน (สารต่อต้านการเกิดมะเร็ง) หน่อไม้ฝรั่งเป็นพืชผักสำคัญที่มีแนวโน้มประมาณการทำการรายได้ให้แก่เกษตรกรและประเทศไทยอย่างมาก ผลผลิตส่วนใหญ่จะส่งออกในรูปของหน่อสดและแช่แข็ง ในปี พ.ศ. 2545 มีปริมาณการส่งออกหน่อไม้ฝรั่งประมาณ 17,295 ตัน มูลค่าประมาณ 465.15 ล้านบาท (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2551) จึงกล่าวได้ว่าหน่อไม้ฝรั่งเป็นผักที่มีมูลค่าสูงเหมาะแก่การนำมาแปรรูปเป็นผักตัดแต่งพร้อมปรุงสุกได้ และเป็น การสร้างตลาดใหม่แก่อุตสาหกรรมอาหารได้

ผักสดตัดแต่ง

ผักสดตัดแต่ง หมายถึง การนำผักที่ผ่านการคัดเลือกคุณภาพมีความอ่อน-แก่ ที่เหมาะสมในการบริโภค มาล้างทำความสะอาด ปอกเปลือก เจาะแกน ตัดแต่งดำหนิ ล้างทำความสะอาด หั่นให้เป็นชิ้นและบรรจุ ซึ่งผักตัดแต่งนั้นถือเป็นการแปรรูปขั้นต่ำ (minimal process) ดังนั้นผลิตภัณฑ์ผักตัดแต่ง จึงเป็นผลิตภัณฑ์ผักสดบรรจุพร้อมบริโภค แต่อย่างไรก็ตามผักตัดแต่งยังเป็นเนื้อเยื่อที่มีชีวิต ซึ่งยังคงกิจกรรมการมีชีวิตหรือมีปฏิกิริยาต่าง ๆ ภายในเซลล์เหมือนกับผักและผลไม้สด เช่น มีการหายใจอยู่ตลอดเวลา จึงยังคงมีกระบวนการแก่-สุกตามธรรมชาติ (Greve and Labavitch, 1991) ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเนื้อเยื่อในทางเสื่อมคุณภาพ เช่น สีของผักที่ซีดลง และมีการเปลี่ยนแปลงของรสชาติ เป็นต้น โดยขั้นตอนในกระบวนการตัดแต่ง เช่น การปอกเปลือก การเจาะแกนตัดแต่งและการหั่นเป็นชิ้น มีผลทำให้เนื้อเยื่อพืชเกิดความเสียหาย ซึ่งจะไปเร่งปฏิกิริยาต่างๆ ของเซลล์ส่งผลให้เนื้อผลไม้ตัดแต่งเน่าเสียเร็วขึ้น นอกจากนี้อัตราการหายใจที่สูงขึ้นของเนื้อเยื่อที่ได้รับความเสียหายจะไปเร่งการสูญเสีย น้ำของเนื้อเยื่อซึ่งส่งผลให้เกิดการสูญเสียความกรอบอันเป็นปัจจัยคุณภาพที่สำคัญอันหนึ่งของผักสด โดยปกติผักตัดแต่งเกิดการเน่าเสียได้ง่ายกว่าผักที่มีเปลือก เนื่องจากเปลือกเป็นโครงสร้างของพืชที่สามารถช่วยป้องกันการปนเปื้อนของจุลินทรีย์และความเสียหายของเนื้อเยื่อที่เกิดจากแรงกระทบบริเวณรอยตัดที่เกิดจากการปอก

เปลี่ยนการตัดแต่งและการหันให้เป็นขึ้น โดยจะเป็นจุดเริ่มต้นที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นในการแปรรูปผักตัดแต่งจึงต้องมีการจัดการแนวทางในการผลิตที่ดี (good manufacturing practice) และมีการควบคุมอุณหภูมิในการผลิตเพื่อลดการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ นอกจากนั้นดังที่กล่าวมาข้างต้นควรเป็นกรรมวิธีที่ทำให้เนื้อเยื่อผลไม้เกิดการเสียหายน้อยที่สุด ดังนั้นอุปกรณ์และเทคนิคในการตัดแต่งจึงจำเป็นต้องใช้ใบมีดที่มีความคมมากเพื่อลดความเสียหาย เนื่องจากการศึกษาของเนื้อเยื่อและรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้มีลักษณะผิวหน้าของขึ้นผักตัดแต่งที่สามารถทำให้ดึงดูดผู้บริโภคสนใจในตัวผลิตภัณฑ์ ซึ่งเป็นคุณลักษณะลำดับต้น ๆ ที่ผู้บริโภคส่วนใหญ่ใช้ตัดสินในการยอมรับหรือซื้อผลิตภัณฑ์ และนอกจากนี้หากผักตัดแต่งมีความสะดวกในการปรุงสุกพร้อมรับประทานก็จะทำให้ผู้บริโภคนิยมหันมาบริโภคผักสดตัดแต่งมากยิ่งขึ้น การปรุงสุกด้วยไมโครเวฟก็เป็นวิธีการหนึ่งที่ทำให้ผู้บริโภครับประทานผักตัดแต่งได้สะดวกรวดเร็วมากยิ่งขึ้น โดยในที่นี้จะกล่าวถึงคลื่นไมโครเวฟในหัวข้อถัดไป

คลื่นไมโครเวฟ

ไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic wave) ที่มีความถี่ระหว่าง 300 เมกะเฮิรตซ์ (MHz) ถึง 300 จิกะเฮิรตซ์ (GHz) (ระหว่างความยาวคลื่น 100 เซนติเมตร ถึง 1 มิลลิเมตร) (Rosenthal, 1992) ซึ่งอยู่ระหว่างความถี่ของคลื่นวิทยุกับรังสีอินฟราเรด ความถี่ถัดขึ้นไปคือ แสงที่ตามองเห็น รังสีอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet ray) สูงขึ้นไปถึงรังสีเอ็กซ์ (X-Rays) ที่ต่ำที่สุดคือ รังสีแกมมา (Gamma rays)

ไมโครเวฟไม่ใช่ความร้อนแต่อยู่ในรูปของพลังงาน (energy) และถูกเปลี่ยนไปเป็นความร้อนโดยการสั่นสะเทือนของอนุภาคที่มีประจุหรือการหมุนตัวโมเลกุลที่มีขั้วทำให้ชนกับอนุภาคหรือโมเลกุลที่อยู่ข้างเคียง ซึ่งเกิดขึ้นหลังจากที่วัตถุได้รับคลื่นและมีการดูดซับพลังงานดังกล่าว เป็นผลให้เกิดความร้อนขึ้น (Fellows, 2000) ถ้าหากนำเทคโนโลยีไมโครเวฟมาประยุกต์ใช้ในการอบแห้งอาหาร เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟสามารถทะลุผ่านอาหารซึ่งเป็นวัสดุชีวภาพและสามารถให้ความร้อนถึงด้านในของอาหารที่ต้องการอบแห้ง

กลไกการเกิดความร้อนเนื่องจากไมโครเวฟเกิดจากการที่วัตถุดูดซับพลังงานไมโครเวฟเนื่องจากการมีคุณสมบัติไดอิเล็กทริก ทำให้เกิดพลังงานความร้อนขึ้นภายในวัตถุ Singh และ Heldman (2001) กล่าวว่า การเกิดความร้อนภายในวัตถุที่สัมผัสกับคลื่นไมโครเวฟนั้นมีสาเหตุมาจากกลไก 2 ประการได้แก่ การเคลื่อนที่ของไอออนเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้า (ionic polarization) และ การหมุนของสารประกอบที่มีขั้ว (dipole rotation)

1. การเคลื่อนที่ของไอออนเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้า (ionic polarization)

ภายในเตาไมโครเวฟ (microwave oven) จะมีอุปกรณ์ที่เรียกว่าแมกนีตรอน (magnetron) ที่ทำหน้าที่สร้างสนามไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งสนามไฟฟ้าจะถูกสร้างออกมาในลักษณะ 3 ทิศทาง คือบนสู่ล่าง ข้างสู่ข้างและหน้าสู่หลัง เมื่ออนุภาคที่มีประจุในอาหารสัมผัสกับคลื่นไมโครเวฟ จะทำให้เกิดการสั่นและเคลื่อนที่ซึ่งเกิดการชน (collisions) หรือเสียดสีกับอนุภาคที่อยู่ข้างเคียงเป็นผลให้เกิดความร้อนขึ้นในอาหารนั้น ซึ่งโดยทั่วไปในอาหารจะมีองค์ประกอบที่ซับซ้อน มีปริมาณน้ำและเกลือที่ละลายได้แตกต่างกันเช่น โซเดียม โปตัสเซียม หรือแคลเซียมคลอไรด์ ซึ่งโมเลกุลเหล่านี้จะแตกตัวให้ ไอออนบวก (cations) และไอออนลบ (anions) ดังนั้นอนุภาคที่มีประจุจึงสามารถที่จะมีอันตรกิริยา (interactions) กับสนามไฟฟ้าใด ๆ รวมทั้งสนามไฟฟ้าที่ถูกสร้างขึ้นในเตาไมโครเวฟเช่นเดียวกัน

2. การหมุนของสารประกอบที่มีขั้ว (dipole rotation)

ในอาหารประกอบด้วยน้ำที่มีปริมาณแตกต่างกัน น้ำเป็นโมเลกุลมีขั้ว (polar molecule) ซึ่งในสภาพปกติจะเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ (random oriented) เมื่อผ่านสนามไฟฟ้ากระแสสลับเข้าไป ประจุบวกและลบในโมเลกุลจะหมุนตัวเพื่อเปลี่ยนทิศทางตามทิศของสนามไฟฟ้าสลับนั้น ๆ โดยการหมุนตัวกลับไปมาจะเกิดอย่างรวดเร็วตามความถี่ของไมโครเวฟคือ 915 หรือ 2,450 เมกกะเฮิร์ตซ์ (พันล้านครั้งต่อวินาที) ทำให้เกิดความร้อนขึ้นและกระจายไปยังโมเลกุลข้างเคียง เนื่องมาจากการชนระหว่างโมเลกุลของน้ำในอาหาร ในส่วนของโมเลกุลที่อยู่ในสถานะของแข็งเช่น น้ำแข็งนั้นโมเลกุลของน้ำจะถูกยึดติดกับโครงสร้างที่มีลักษณะเฉพาะของผลึกและไม่สามารถหมุนตัวเองมากพอที่จะชนกับโมเลกุลอื่น ๆ ที่อยู่ข้างเคียงเพื่อทำให้เกิดความร้อนขึ้นได้และในส่วนของโมเลกุลที่อยู่ในสถานะแก๊สหรือไอ จะมีโมเลกุลข้างเคียงจำนวนน้อยมากที่จะชนกันจนสามารถทำให้เกิดความร้อนขึ้นได้เช่นเดียวกัน อันตรกิริยาชนิดนี้มีความสำคัญที่สุดในอาหารยกเว้นในอาหารที่มีความเข้มข้นของเกลือสูงมาก เช่น แยม เป็นต้น การเกิดความร้อนในอาหารบริเวณจุดที่สัมผัสกับไมโครเวฟ เนื่องจากกลไกทั้งสองแบบดังที่กล่าวมาแล้วนั้น ความร้อนจะกระจายออกไปยังส่วนอื่นๆ เนื่องจากผลของการร้อนขึ้นของน้ำโดยการนำความร้อนและเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งทำให้เกิดความร้อนขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับวิธีการให้ความร้อนแบบดั้งเดิม (สายสนม, 2543)

จากกลไกการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟจะเห็นได้ว่าการให้ความร้อนด้วยวิธีนี้จะช่วยโมเลกุลของน้ำในอาหารได้รับความร้อนเร็วยิ่งขึ้น ดังนั้นการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟจึงเป็นกระบวนการที่สำคัญที่ช่วยในการลดเวลาในกระบวนการแปรรูปอาหารด้วยความร้อนให้น้อยลง แต่ทั้งนี้การใช้คลื่นไมโครเวฟนั้นมีข้อจำกัดอีกหลายประการ อาทิเช่น ความไม่สม่ำเสมอ

ของความร้อนภายในชิ้นวัสดุที่ปรุงสุกด้วยไมโครเวฟ ดังนั้นการออกแบบบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในการแปรรูปด้วยไมโครเวฟให้ดีขึ้นจึงต้องคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ สมบัติทางไดอิเล็กทริกก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลโดยตรงต่อการดูดซับความร้อนภายในวัสดุ ดังนั้นการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวัสดุที่มีค่าไดอิเล็กทริกต่างกันจึงเป็นวิธีการหนึ่งที่จะช่วยให้วัสดุที่ให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟมีความสม่ำเสมอของอุณหภูมิอย่างทั่วถึง

สมบัติทางไดอิเล็กทริก

สมบัติทางไดอิเล็กทริก (Dielectric properties) เป็นสมบัติที่บอกว่าสารชนิดหนึ่งดูดซับไมโครเวฟได้ดีเพียงใด สมบัตินี้สำคัญมากสำหรับผู้ผลิตอาหารที่ต้องการสร้างสูตรอาหาร (Singh and Heldman, 2001) ที่ใช้สำหรับการแปรรูปด้วยไมโครเวฟได้ เนื่องจากสมบัติทางไดอิเล็กทริกจะเปลี่ยนไปตามองค์ประกอบของอาหาร (คาร์โบไฮเดรต ไขมัน โปรตีน เกลือและปริมาณน้ำ เป็นต้น) โดยสมบัติทางไดอิเล็กทริกแบ่งได้ออกเป็นสองประเภท ได้แก่

1. ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ') เป็นค่าที่แสดงความสามารถของวัตถุในการกักเก็บพลังงานไฟฟ้าไว้เมื่อนำวางในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ ถ้าค่านี้สูงแสดงว่าเก็บพลังงานได้มาก แต่ค่านี้จะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิและความชื้นของอาหาร

2. ค่าไดอิเล็กทริกสูญเสีย (ϵ'') เป็นค่าที่แสดงความสามารถของวัตถุที่จะกระจายพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานความร้อน ถ้าค่านี้สูงแสดงว่าจะเกิดความร้อนสูง คำว่า “Loss” หรือสูญเสียหมายถึงการเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนค่าเหล่านี้จะทำให้ทราบเกี่ยวกับความสามารถในการเป็นฉนวนไฟฟ้าของวัตถุ ซึ่งอาหารเป็นฉนวนที่ไม่ดี ดังนั้นอาหารจึงมักจะดูดซับพลังงานส่วนใหญ่ไว้เมื่อสัมผัสกับคลื่นไมโครเวฟและเป็นผลให้เกิดความร้อนขึ้น (Mudgett, 1986) โดยค่าไดอิเล็กทริกสูญเสีย และ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก มีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$\epsilon'' = \epsilon' \tan \delta \quad (1)$$

หรือ

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (2)$$

จากสมการ ค่า Loss tangent ($\tan \delta$) แสดงให้เห็นถึงระดับการทะลุทะลวงของสนามไฟฟ้าและระดับการกระจายพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน ค่าเหล่านี้ถ้ามีค่าสูงแสดงว่าวัตถุนั้นจะเกิดความร้อนได้ดีขึ้น ดังแสดงค่าไดอิเล็กทริกของวัสดุต่าง ๆ ดังตาราง 1

ตาราง 1 คุณสมบัติไดอิเล็กทริกของสารและอาหารบางชนิด

อาหาร	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	915 MHz			2450 MHz		
		ϵ'	ϵ''	d_p (mm)	ϵ'	ϵ''	d_p (mm)
อากาศ		1.0	0		1.0	0	
น้ำที่ไม่มีประจุ	20	79.5	3.8	122.4	78.2	10.3	106.8
น้ำที่มีเกลือ 0.5%	23	77.2	20.8	22.2	75.8	15.6	10.9
น้ำแข็ง	-12	-	-	-	3.2	0.003	11.615
น้ำมันรำข้าว	25	2.6	0.18	467	2.5	0.14	220
แอปเปิล	22	60	9.5	42.6	57	12	12.3
มันฝรั่ง	25	65	20	21.3	54	16	9.0
หน่อไม้ฝรั่ง	21	74	21	21.5	71	16	10.3
ผลไม้แห้งที่ความชื้น	87.5%	22	56.0	8.0	48.9	54.5	11.2
	30.3%	22	14.4	6.0	33.7	10.7	5.5
	9.2%	22	2.2	0.2	38.7	2.2	0.1
	68.7%	60	32.8	9.1	33.1	30.8	7.5
	34.6%	60	22.5	6.8	36.8	19.7	6.6
	11.0%	60	5.3	1.7	71.5	4.5	1.4
เนย	22	51	17	22.2	40	13	9.6
แฮม	25	61	96	5.1	60	42	3.8
แฮม	50	50	140	3.7	53	55	2.8
เนื้อวัว	25	76	36	13.0	72	23	9.9
เนื้อวัว	50	72	49	9.5	68	25	8.9
โพลีเอทิลีน	-	-	-	-	2.3	0.003	7000
โพลีโพรพิลีน	-	-	-	-	2.3	0.003	-

ที่มา : ดัดแปลงจาก Rosenthal (1992), วิไล (2543)

เมื่อให้คลื่นไมโครเวฟแก่วัตถุจะเกิดปรากฏการณ์ขึ้นหนึ่งสามอย่างดังต่อไปนี้คือ

2.1 ความร้อนถูกดูดซับในระดับต่าง ๆ กัน

2.2 พลังงานจะผ่านวัตถุไปโดยไม่มีการดูดซับ

2.3 พลังงานถูกสะท้อนกลับ

วัตถุอาจสะท้อนหรือดูดซับไมโครเวฟขึ้นกับสมบัติทางไดอิเล็กทริกของวัตถุ ไมโครเวฟอาจส่งผ่านวัตถุ ไมโครเวฟอาจส่งผ่านวัตถุโดยไม่มีการดูดซับ เช่น วัสดุที่เป็นภาชนะบรรจุพวกแก้ว เซรามิกส์ และพวกเทอร์โมพลาสติกส่วนใหญ่ ไมโครเวฟอาจมีการเปลี่ยนทิศทางเมื่อเดินทางจากวัตถุหนึ่งไปอีกวัตถุหนึ่งเช่นเดียวกับการหักเหของแสงเมื่อผ่านจากอากาศไปยังน้ำ

เมื่ออาหารอยู่ในทางเดินของไมโครเวฟพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าบางส่วนจะถูกดูดซับและเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อน การถ่ายเทความร้อนในอาหารก็เกิดขึ้นโดยการนำความร้อนด้วยเช่นกัน เนื่องจากการกระจายพลังงานไม่สม่ำเสมอ แก้ว กระจก พลาสติกโพลีเมอร์ที่ใช้บรรจุหีบห่อยอมให้ไมโครเวฟผ่านและไม่ร้อนขึ้น ส่วนโลหะต่าง ๆ จะสะท้อนคลื่นไมโครเวฟซึ่งจะทำให้แมกนีตรอนเสื่อมสภาพได้

นอกจากสมบัติไดอิเล็กทริกจะแปรเปลี่ยนไปตามองค์ประกอบของอาหาร ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต ไขมัน โปรตีน เกลือและปริมาณน้ำแล้วยังขึ้นกับอุณหภูมิด้วย โดยพบว่าเมื่อไมโครเวฟผ่านน้ำแข็งจะมีการดูดซับพลังงานน้อยกว่าเมื่อผ่านน้ำ เนื่องจากสมบัติทางไดอิเล็กทริกของน้ำแข็งและน้ำที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงมีผลอย่างมากต่อการทำให้อาหารแช่แข็งร้อนขึ้น น้ำดูดซับพลังงานได้สูง สูงและร้อนได้ง่ายขณะที่น้ำแข็งยอมให้ไมโครเวฟผ่านไปจึงร้อนได้ช้ามาก เมื่ออาหารแช่แข็งถูกทำให้ร้อนขึ้นจึงเกิดสภาวะของการให้ความร้อนที่ไม่สม่ำเสมอ อาหารที่ละลายแล้วบางส่วนจะดูดซับพลังงานไมโครเวฟได้มากกว่า ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในส่วนที่ละลายนี้ ขณะที่อาหารที่ยังแข็งตัวอยู่บางส่วนจะดูดซับพลังงานได้น้อยกว่ามาก ผลคือบางส่วนของอาหารมีอุณหภูมิที่ต้องการขณะส่วนอื่นยังแข็งตัวอยู่

อันตรกิริยา (interaction) กับวัตถุ ไมโครเวฟอยู่ในรูปของพลังงานไม่ได้อยู่ในรูปของความร้อน แต่การให้ความร้อนเป็นผลของของอันตรกิริยาระหว่างพลังงานไมโครเวฟกับวัตถุที่เป็นไดอิเล็กทริก การเปลี่ยนแปลงพลังงานไมโครเวฟไปเป็นพลังงานความร้อนสามารถประมาณได้จากความเข้มของสนามไฟฟ้า ความถี่ของไมโครเวฟที่ใช้งานในกระบวนการให้ความร้อน วัตถุที่ถูกทำให้ร้อนมีความสัมพันธ์โดยตรงกับระบบไมโครเวฟที่ให้พลังงาน ค่าไดอิเล็กทริกยังบ่งบอกถึงความลึกของการทะลุทะลวงของไมโครเวฟ วิธีที่ใช้บอกความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางไดอิเล็กทริกกับความสม่ำเสมอของการให้ความร้อนจะใช้ความลึกของการทะลุทะลวง (depth of penetration) ของไมโครเวฟซึ่งเป็นระยะทางจากผิวของผลิตภัณฑ์ ความลึกของการทะลุทะลวงขึ้นกับสมบัติทางไฟฟ้าของวัตถุที่ทำให้ร้อน และการสูญเสียหรือการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนของอาหาร ความยาวคลื่น และความถี่ไมโครเวฟ โดยทั่วไปแล้ว ความถี่ของ

ไมโครเวฟที่ใช้ยิ่งต่ำ ความสามารถในการทะลุทะลวงยิ่งมาก เช่นพลังงานไมโครเวฟที่ความถี่คลื่น 915 เฮิร์ต (MHz) จะทะลุทะลวงได้ดีกว่าพลังงานไมโครเวฟที่ความถี่ 2450 เฮิร์ต (MHz) เนื่องจากมีความยาวคลื่นที่มากกว่า นอกจากนี้แล้วยังอุณหภูมิมีค่าต่ำ ๆ ความสามารถในการทะลุทะลวงยิ่งสูงขึ้นเมื่อใช้ความถี่เดียวกัน โดยทั้งนี้พฤติกรรมของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะอธิบายได้ด้วยสมการแมกซ์เวลล์ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

สมการแมกซ์เวลล์ (Maxwell's Equations)

ผดุงศักดิ์ (2551) กล่าวว่าระบบการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ จะมีความซับซ้อนในการทำงานเป็นอย่างมาก เนื่องจากการอธิบายที่สมบูรณ์ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจำเป็นต้องเข้าใจพฤติกรรมทางกายภาพอย่างถ่องแท้ โดยปกติการอธิบายพฤติกรรมของสนามแม่เหล็กไฟฟ้านั้นจะกระทำโดยผ่านสมการแมกซ์เวลล์ (Maxwell's Equations) ซึ่งสามารถใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามเวลา เมื่อใส่เงื่อนไขขอบเขตที่สมบูรณ์ลงไปก็จะสามารถอธิบายพฤติกรรมของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในตัวไมโครเวฟได้อย่างสมบูรณ์

สมการแรกของสมการแมกซ์เวลล์ คือ กฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law) ที่โยงความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้า E ที่เปลี่ยนไปกับเวลา กับสนามแม่เหล็ก H หรือกล่าวได้ว่า สนามไฟฟ้าที่หมุนวนรอบ ๆ คอนทัวร์ เท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์สนามแม่เหล็กที่ผ่านพื้นที่ผิวที่ล้อมรอบด้วยคอนทัวร์ ซึ่งแสดงได้ด้วยรูปสมการอนุพันธ์ในลักษณะโพรมิซามอนิก ดังต่อไปนี้

$$\nabla \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3)$$

สมการที่สองของสมการแมกซ์เวลล์ คือ กฎของแอมแปร์ ที่โยงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก (magnetic field strength) H กับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ารวม (total current density) J (ซึ่งรวมผลของกระแสดีสเพลสเมนต์และกระแสเหนี่ยวนำ) หรือกล่าวได้ว่า ความเข้มสนามแม่เหล็กที่หมุนวนรอบ ๆ คอนทัวร์ปิด (closed contour) เท่ากับกระแสสุทธิที่ผ่านพื้นที่ผิวที่ล้อมรอบด้วยคอนทัวร์ ยกตัวอย่างเช่น สนามไฟฟ้าที่ล้อมรอบ (surrounded) โดยสนามแม่เหล็กเป็นต้น ซึ่งแสดงได้ด้วยรูปสมการอนุพันธ์ในลักษณะโพรมิซามอนิก (time harmonic) ดังต่อไปนี้

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (4)$$

เพื่อความสมบูรณ์ในการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า กฎของเกาส์ (Gauss's Law) ถูกนำมาใช้ กล่าวคือฟลักซ์แม่เหล็กสุทธิที่ออกจากขอบเขตเท่ากับศูนย์และฟลักซ์ไฟฟ้าสุทธิที่ออกจากขอบเขตจะสัมพันธ์กับความหนาแน่นประจุ (charge) ภายในวัสดุนั้น จะได้

$$\nabla \cdot \vec{D} = q \quad (5)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (6)$$

โดยที่

q คือความหนาแน่นประจุไฟฟ้า (charge density)

เมื่อ E และ H คือความเข้มของสนามไฟฟ้าและความเข้มของสนามแม่เหล็ก ตามลำดับ J คือความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (current density) D คือความหนาแน่นของฟลักซ์ (flux density) และ B คือความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก (magnetic flux density) โดยความสัมพันธ์ระหว่าง J , D และ B กับ E และ H คือ

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (7)$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (8)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (9)$$

โดยที่

σ คือ ค่าการนำไฟฟ้า (electric conductivity)

μ คือค่าเปอร์มีลิตี (permeability)

ϵ คือค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant)

ดังที่กล่าวมาข้างต้น ความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก ประจุ และกระแส มีส่วนเกี่ยวข้องกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งอาจเขียนให้อยู่ในรูปแบบสมการของสมการอนุพันธ์ (สมการแมกซ์เวลล์) รูปแบบสมการอนุพันธ์ของสมการแมกซ์เวลล์ เป็นที่นิยมใช้

กันอย่างกว้างขวาง ในการแก้ปัญหาเพื่อจะหาคำตอบที่เงื่อนไขค่าของขอบเขตต่างๆ ซึ่งรูปแบบดังกล่าวสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า สนามไฟฟ้า E และค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก H โดยการแทนสมการที่ (7) ถึง (9) ลงในสมการที่ (3) ถึง (6) จะได้

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (10)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (11)$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon} \quad (12)$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0 \quad (13)$$

สมการที่ (10) และ (11) อ้างอิงมาจาก กฎของกฎของฟาราเดย์ ดังสมการที่ (3) และ กฎของแอมแปร์ ดังสมการที่ (4) ส่วนสมการที่ (12) และ (13) นั้นขึ้นอยู่กับกฎของเกาส์ ดังสมการที่ (5) และ (6) ตามลำดับ

จากชุดสมการแมกซ์เวลล์ สมการที่ (10) ถึงสมการที่ (13) ทำการคูณเชิงสเกลาร์ในสมการที่ (11) ด้วย E และสมการที่ (12) ด้วย H สามารถเขียนสมการแมกซ์เวลล์ ใหม่ในรูปของพลังงาน จะได้

$$\vec{E}(\nabla \times \vec{H}) = \vec{E} \cdot \left(\sigma \vec{E} + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \quad (14)$$

$$\vec{H}(\nabla \times \vec{E}) = -\vec{H} \cdot \left(\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \right) \quad (15)$$

ทำการหักกลับสมการที่ (15) ด้วยสมการที่ (14) และใช้คุณสมบัติของความสัมพันธ์ระหว่างสองเวกเตอร์ ในที่นี้คือ เวกเตอร์ F_1 และ F_2 และเขียนในรูปความสัมพันธ์จะได้

$$\nabla \cdot (\vec{F}_1 \times \vec{F}_2) = \vec{F}_2 \cdot (\nabla \times \vec{F}_1) - \vec{F}_1 \cdot (\nabla \times \vec{F}_2) \quad (16)$$

จากคุณสมบัติของสมการที่ (16) เราสามารถจัดรูปความสัมพันธ์ให้อยู่ในรูปสมการการอนุรักษ์พลังงานคือ

$$\nabla \cdot (\vec{E} \times \vec{H}) + \vec{H} \cdot \mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} + \vec{E} \cdot \left(\sigma \vec{E} + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) = 0 \quad (17)$$

เมื่อทำการอินทิเกรตตลอดปริมาตรของโดเมนและประยุกต์ใช้ทฤษฎีไดเวอร์เจนซ์ (Divergence theorem) ซึ่งโยงความสัมพันธ์กันระหว่างการหาอินทิกรัลเชิงพื้นผิว (surface integral) กับอินทิกรัลเชิงปริมาตร (volume integral) จะได้ (ผดุงศักดิ์, 2551)

$$\iint (\vec{E} \times \vec{H}) \cdot d\vec{s} + \iiint \left[\vec{H} \cdot \mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} + \vec{E} \cdot \left(\sigma \vec{E} + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \right] dv = 0 \quad (18)$$

ในที่นี้เทอมผลคูณ (cross product) คือ $\vec{E} \times \vec{H}$ แสดงถึงความหนาแน่นกำลังเชิงพื้นผิว (surface power density) ซึ่งมีหน่วยเป็น W/m^2 ซึ่งเกี่ยวข้องกับทิศทางการไหลของกำลัง ซึ่งเรามักจะอ้างถึงพอยน์ติงเวกเตอร์ (pointing vector) นั่นเอง หากทำการอินทิเกรตในเทอมที่สองซึ่งเป็นกำลังความหนาแน่นของแม่เหล็ก (magnetic power density) ก็จะได้

$$\vec{H} \cdot \mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = \frac{1}{2} \mu \frac{\partial \vec{H}^2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} \mu \vec{H}^2 \right) \quad (19)$$

เช่นเดียวกับขั้นตอนการหาสมการความสัมพันธ์ในรูปกำลังความหนาแน่นของแม่เหล็ก จากสมการที่ (18) เราสามารถหาสมการความสัมพันธ์ในรูปกำลังความหนาแน่นของไฟฟ้า (electric power density) ก็จะได้

$$\vec{E} \cdot \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \frac{1}{2} \epsilon \frac{\partial \vec{E}^2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} \epsilon \vec{E}^2 \right) \quad (20)$$

จากสมการข้างบนนี้ เราสามารถจัดรูปให้อยู่ในเทอมของค่ากำลังการดูดซับไมโครเวฟ (microwave power absorbed) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ค่าของการกำเนิดปริมาณความร้อนภายในต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (local volumetric heat generation) คือ

$$Q = \vec{E} \cdot (\sigma \vec{E}) = \sigma |\vec{E}|^2 \quad (21)$$

จากสมการที่ (21) พบว่าการเปลี่ยนแปลงเฟสของสนามไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยเวลาจะเร็วมาก ดังนั้น ค่าเฉลี่ยรากที่สอง (root mean square value) ของความเข้มของสนามไฟฟ้าจะถูกใช้ในการประมาณค่าพลังงานไมโครเวฟที่ถูกดูดซับโดยวัสดุไดอิเล็กทริก เมื่อสมมติให้ไม่มีการสูญเสียสนามแม่เหล็ก ค่ากำลังการดูดซับไมโครเวฟหรือ ค่าของการกำเนิดปริมาณความร้อนภายในต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร อาจเขียนให้อยู่ในรูปสมการต่อไปนี้ก็ได้

$$Q = \omega \epsilon_0 \epsilon_r'' = 2\pi \cdot f \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r'' (\tan \delta) E^2 \quad (22)$$

จากสมการด้านบน ค่าพลังงานไมโครเวฟที่ถูกดูดซับจะแปรผันตรงกับความถี่ของสนามไฟฟ้า ค่าไดอิเล็กทริกสูญเสีย (dielectric loss factor) และค่ากำลังสองของสนามไฟฟ้า หากค่าไดอิเล็กทริกสูญเสียของวัสดุไดอิเล็กทริกมีค่ามากจะส่งผลให้การดูดซับพลังงานจากไมโครเวฟและปริมาณความร้อนเกิดขึ้นมากขึ้นตาม แต่ถ้าค่าไดอิเล็กทริกสูญเสียน้อย คลื่นไมโครเวฟจะทะลุผ่านวัสดุไดอิเล็กทริกโดยเกิดความร้อนเพียงเล็กน้อยหรือไม่เกิดขึ้นเลย อย่างไรก็ตามปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นนี้อาจจะขึ้นกับตัวแปรอื่น ๆ เช่น ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (specific heat) คุณสมบัติของวัสดุไดอิเล็กทริกและขนาดของวัสดุไดอิเล็กทริกเป็นต้น

สมการถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อนภายในวัสดุมี 3 ลักษณะด้วยกันคือ การนำความร้อน (conduction heat transfer) การพาความร้อน (convection heat transfer) และการแผ่ความร้อน (radiation) โดยในงานวิจัยนี้จะอาศัยการนำความร้อนและการพาความร้อนมาพิจารณาอุณหภูมิในหม้อไม่ฝรัง โดยแหล่งกำเนิดเป็นกำลังงานสนามไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งกำลังงานสนามไฟฟ้าที่แพร่กระจายต่อ 1 หน่วยปริมาตร หาได้จากค่ากำลังงานเฉลี่ยคือ (โชคชัย, 2548)

$$P = \frac{P_{av}}{V} = \frac{1}{2} \omega \epsilon_0 \epsilon_r'' |\vec{E}|^2 \quad (23)$$

โดย

P เป็นกำลังงานสนามไฟฟ้า

P_{av} เป็นกำลังงานเฉลี่ย

- V เป็นปริมาตรหนึ่งหน่วย
 ω เป็นความถี่เชิงมุม (radian)
 ϵ_0 เป็นสภาพยอมทางไฟฟ้าของอากาศอิสระ
 ϵ_r'' เป็นค่าตัวประกอบการสูญเสีย (dielectric loss factor) ของหน่อไม้ฝรั่ง
 $\vec{E}$ เป็นสนามไฟฟ้ารวม (V/m)

เมื่อหน่อไม้ฝรั่งไม่เป็นตัวกลางที่มีการสูญเสียและได้รับกำลังงานสนามไฟฟ้า จะทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นในอัตราที่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเฉพาะของหน่อไม้ฝรั่งเทียบกับเวลา ดังนั้นหากหน่อไม้ฝรั่งได้รับกำลังงานสนามไฟฟ้าจะทำให้มีอุณหภูมิในมวลเปลี่ยนแปลงไปจากอุณหภูมิเริ่มต้นตามเวลาที่ได้รับกำลังงานสนามไฟฟ้า ซึ่งความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงกับกำลังงานสนามไฟฟ้าที่ได้รับสามารถเขียนได้ว่า

$$P_{av} = M_u c_m \left(\frac{T - T_0}{t} \right) \quad (24)$$

โดย

- M_u เป็นมวลของหน่อไม้ฝรั่ง (kg)
 T_0 เป็นอุณหภูมิเริ่มต้น ($^{\circ}\text{C}$)
 c_m เป็นความจุความร้อนจำเพาะของหน่อไม้ฝรั่ง ($\text{kJ/kg}^{\circ}\text{C}$)
 t เป็นเวลา (s)

สมการที่ 24 มีความสำคัญในการศึกษาความสามารถในการดูดซับพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟของวัสดุไดอิเล็กทริกเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้าที่ความถี่สูง อย่างไรก็ตามอันตรกิริยาระหว่างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและวัสดุไดอิเล็กทริกก็ส่งผลต่อคุณสมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุนั้นด้วย และจากความสัมพันธ์ของสมการ (23) และ (24) ทำให้แสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อหน่วยเวลาได้คือ

$$\left(\frac{T - T_0}{t} \right) = \frac{\omega \epsilon_0 \epsilon_r'' |\vec{E}|^2}{2 \rho_m c_m} \quad (25)$$

โดย

ρ_m เป็นความหนาแน่นของหน่อไม้ฝรั่ง (kg/m^3)

เพราะฉะนั้นสมการการส่งผ่านความร้อนในหน่อไม้ฝรั่งที่สัมพันธ์กับกำลังงานสนามไฟฟ้าจะเป็น

$$\frac{\partial T(\rho, \varphi, z; t)}{\partial t} = \frac{k_i}{\rho_m c_m} \left\{ \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial T(\rho, \varphi, z; t)}{\partial \rho} \right) + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial T(\rho, \varphi, z; t)}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial T(\rho, \varphi, z; t)}{\partial z^2} \right\} - \frac{v_s}{\rho_m c_m} (T(\rho, \varphi, z; t) - T_a) + \frac{\omega \epsilon_0 \epsilon_r |\vec{E}|^2}{2 \rho_m c_m} \quad (26)$$

โดย

$T(\rho, \varphi, z; t)$ เป็นอุณหภูมิในหน่อไม้ฝรั่งตำแหน่งใด ๆ ($^{\circ}\text{C}$) ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

T_a เป็นอุณหภูมิสภาพแวดล้อมภายนอก ($^{\circ}\text{C}$)

k_i เป็นความนำความร้อนของหน่อไม้ฝรั่ง ($\text{W/m}^{\circ}\text{C}$)

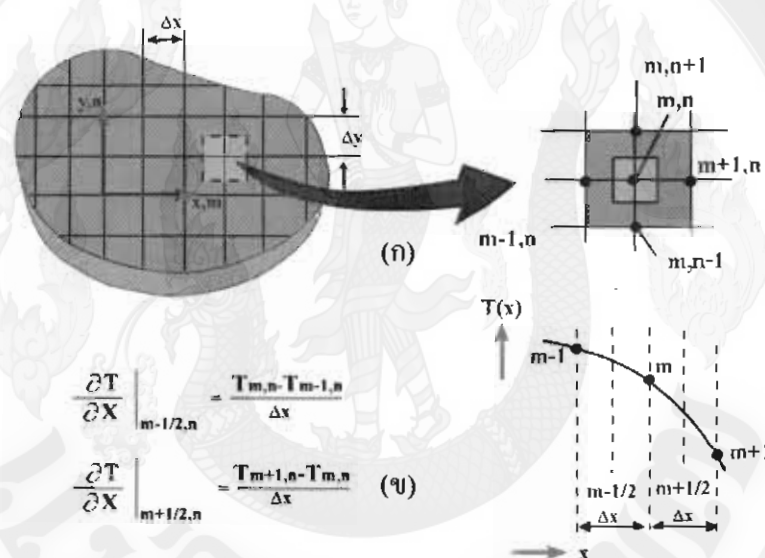
v_s เป็นอัตราการส่งผ่านความร้อนสู่สภาพแวดล้อมภายนอก ($\text{W/m}^{\circ}\text{C}$)

สมการที่ 26 เป็นสมการถ่ายเทความร้อนโดยการนำและการพาความร้อนเทียบกับเวลาและไม่มีภาระของน้ำ ซึ่งจะทำให้มวลของตัวกลางจะคงที่ การเกิดความร้อนในหน่อไม้ฝรั่งจากกำลังงานสนามไฟฟ้า (พจน์สุดท้ายของสมการที่ 26) กับคุณสมบัติของหน่อไม้ฝรั่งและสภาพแวดล้อมขณะนั้น สามารถหาได้ด้วยวิธีผลต่างสืบเนื่อง (finite difference)

การวิเคราะห์ปัญหาทางความร้อนโดยระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่อง

ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่อง เป็นระเบียบวิธีเชิงตัวเลขขั้นสูง ที่ใช้ในการแก้สมการอนุพันธ์ย่อยของปัญหาทางวิศวกรรมศาสตร์ และวิทยาศาสตร์ ที่ไม่สามารถหาคำตอบที่แม่นยำได้เงื่อนไขและรูปแบบของปัญหามีความซับซ้อน หากต้องการทราบค่าที่ตำแหน่งอื่น ๆ จำเป็นต้องใช้หลักการประมาณค่า โดยในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการหาอัตราการถ่ายเทความร้อนในระบบสองมิติด้วยวิธีการเชิงตัวเลข (numerical analytical) ซึ่งได้แก่ Finite Difference, Finite Element หรือ

Boundary element แต่ในการทำวิจัยครั้งนี้เลือกใช้วิธี Finite Difference แบบวิธี Nodal network โดยขั้นแรกของการใช้วิธีการเชิงตัวเลข คือ การเลือกกำหนดจุดที่ต้องการดังกล่าว ดังภาพ 1 แสดงการแบ่งตัวกลางออกเป็นย่านเล็ก ๆ จำนวนหนึ่ง และกำหนดจุดอ้างอิงที่กึ่งกลางของตัวเลขดังกล่าว จุดดังกล่าวเรียกว่า “Nodal point” หรือเรียกสั้น ๆ ว่า “Node” และ Node หลาย ๆ จุดรวมกันเรียกว่า “Nodal network”, “Grid” หรือ “Mesh” จำนวน Nodal point สำหรับระบบสองมิติที่ใช้กำหนดตัวเลขดังแสดงในภาพ 1 ก ตำแหน่ง x และ y กำหนดโดยสัญลักษณ์ m และ n ตามลำดับ (มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี, 2552)



ภาพ 1 การนำความร้อนสองมิติ

Node แต่ละ Node จะเป็นตัวแทนของย่านนั้น ๆ และอุณหภูมิของ Node แต่ละ Node นั้น หมายถึง อุณหภูมิเฉลี่ยของย่านนั้น ๆ เช่น พิจารณาภาพ 1 อุณหภูมิของ Node m, n อาจจะเป็นอุณหภูมิเฉลี่ยของย่านที่แรงเงา การเลือก Node – point ถ้ามีจำนวนมาก (Mesh สะเอียด) ก็จะได้ค่าความถูกต้องมากตามไปด้วย แต่การคำนวณก็จะช้ากว่าตามไปด้วย

การหาการกระจายอุณหภูมิโดยวิธีเชิงตัวเลขนั้น คือการเขียนสมการการอนุรักษ์สำหรับ Node แต่ละ Node อย่างเหมาะสม และนำสมการนั้นไปใช้กับระบบทั้งระบบ ผลลัพธ์ได้มาจากแก้สมการอุณหภูมิพร้อมกันแต่ละ Node สำหรับ Node ที่อยู่ภายในของระบบสองมิติที่ไม่มีการกำเนิดพลังงานความร้อนในระบบ และสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีค่าเท่ากันตลอด สมการการอนุรักษ์พลังงานของระบบเป็นไปตามดังแสดงในสมการที่ 27 ซึ่งเรียกว่า Exact form อย่างไรก็ตามถ้าระบบดังกล่าวอยู่ในรูปของ node network

สมการผลต่างสี่เหลี่ยมที่เหมะสมสำหรับ Node ที่อยู่ภายในของระบบสองมิติ สามารถหาได้โดยตรงจากสมการที่ 27 พิจารณาอนุพันธ์ลำดับที่สอง d^2T จากภาพ 1 ซึ่งค่าอนุพันธ์ Node m, n อาจประมาณได้จากสมการ

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \quad (27)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \bigg|_{m,n} \approx \frac{\frac{\partial T}{\partial x} \bigg|_{m+\frac{1}{2},n} - \frac{\partial T}{\partial x} \bigg|_{m-\frac{1}{2},n}}{\Delta x} \quad (28)$$

และ อนุพันธ์ที่เขียนอยู่ในรูป Node อนุพันธ์ได้คือ

$$\frac{\partial T}{\partial x} \bigg|_{m+\frac{1}{2},n} \approx \frac{T_{m+1,n} - T_{m,n}}{\Delta x} \quad (29)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} \bigg|_{m-\frac{1}{2},n} \approx \frac{T_{m,n} - T_{m-1,n}}{\Delta x} \quad (30)$$

แทนค่าสมการที่ 29 และ 30 ลงในสมการที่ 28 จะได้

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \bigg|_{m,n} \approx \frac{T_{m+1,n} + T_{m-1,n} - 2T_{m,n}}{(\Delta x)^2} \quad (31)$$

ในทำนองเดียวกันจะได้

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \bigg|_{m,n} &\approx \frac{\frac{\partial T}{\partial y} \bigg|_{m,n+\frac{1}{2}} - \frac{\partial T}{\partial y} \bigg|_{m,n-\frac{1}{2}}}{\Delta x} \\ &\approx \frac{T_{m,n+1} + T_{m,n-1} - 2T_{m,n}}{(\Delta x)^2} \end{aligned} \quad (32)$$

ในการใช้โครงข่ายถ้าให้ $\Delta x = \Delta y$ และแทนค่าสมการที่ 31 และ 22 ลงไปในสมการที่ 27 จะได้

$$T_{m,n+1} + T_{m,n-1} + T_{m+1,n} + T_{m-1,n} - 4T_{m,n} = 0 \quad (33)$$

พิจารณา Node (m, n) สมการความร้อนและสมการผลต่างสี่เหลี่ยม ซึ่งเป็น Exact Differential equation ได้ลดรูปกลายเป็นสมการ Approximate algebraic equation ซึ่งเป็นเพียงค่าประมาณ สมการความร้อนแบบผลต่างสี่เหลี่ยมสามารถประยุกต์ใช้กับ Node ภายในทุก ๆ Node ได้ดังสมการที่ 33 แสดงว่าผลรวมของอุณหภูมิของ Node ที่อยู่ติดกันมีค่าเท่ากับสี่เท่าของอุณหภูมิที่ Node นั้น ๆ หรืออุณหภูมิของ Node m, n เป็นค่าเฉลี่ยของ Node สี่ Node ที่อยู่ติดกับตัวมันเอง

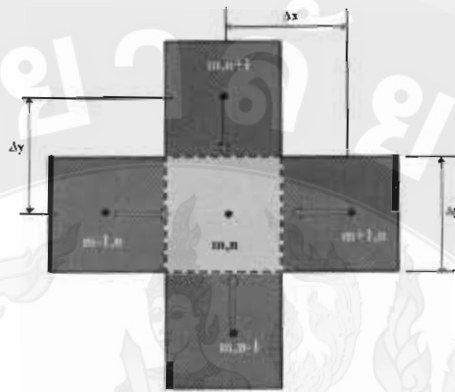
วิธีการสมดุลพลังงาน

การใช้สมการผลต่างสี่เหลี่ยมสำหรับ Node ใด ๆ อาจจะประยุกต์ใช้กับกฎการอนุรักษ์พลังงานสำหรับปริมาตรควบคุม Node นั้น ๆ โดยทั่วไปแล้วเราไม่ทราบทิศทางการไหลของความร้อน จึงสมมติให้ความร้อนทั้งหมดไหลเข้าสู่ Node และใช้กฎการสมดุลพลังงานกับปริมาณความร้อนทั้งหมด ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ถูกต้อง

$$E_m + E_g = 0 \quad (34)$$

พิจารณาสมการที่ 34 สำหรับปริมาตรควบคุม Node ดังภาพ 1 สำหรับระบบสองมิติ การเปลี่ยนแปลงพลังงานโดยการนำระหว่าง m, n และ Node ข้างเคียงทั้งสี่ สมการที่ 34 จะลดรูปเหลือ

$$\sum q(1) \rightarrow (m,n) + q''(\Delta x, \Delta y, 1) = 0$$



ภาพ 2 สมดุลพลังงานของระบบ

จากภาพ 2 พิจารณาอัตราการนำความร้อนจาก Node $(m-1, n)$ ไปยัง Node (m, n) สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$q_{(m-1,n) \rightarrow (m,n)} = k(\Delta y, 1) \frac{T_{m-1,n} - T_{m,n}}{\Delta x} \quad (35)$$

เทอม $(\Delta y, 1)$ คือ พื้นที่ของการถ่ายเทความร้อน และเทอมของ $[T_{m-1,n} - T_{m,n} / \Delta x]$ คือการประมาณค่าของลาดอุณหภูมิขอบเขตระหว่าง Node ทั้งสอง และอัตราการนำความร้อนทั้งสามด้านที่เหลืออาจเขียนสมการได้ดังนี้

$$q_{(m+1,n) \rightarrow (m,n)} = k(\Delta y, 1) \frac{T_{m+1,n} - T_{m,n}}{\Delta x} \quad (36)$$

$$q_{(m,n+1) \rightarrow (m,n)} = k(\Delta x, 1) \frac{T_{m,n+1} - T_{m,n}}{\Delta y} \quad (37)$$

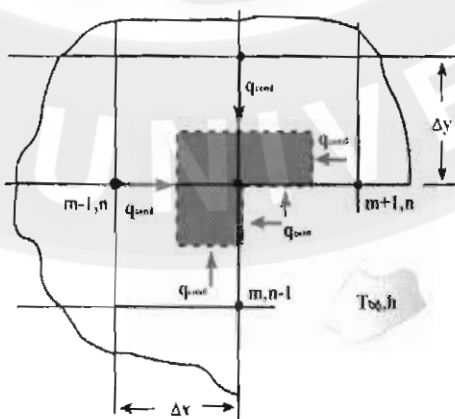
$$q_{(m,n-1) \rightarrow (m,n)} = k(\Delta x, 1) \frac{T_{m,n-1} - T_{m,n}}{\Delta y} \quad (38)$$

จะเห็นได้ว่าอัตราการนำความร้อนแต่ละด้าน เราจะนำอุณหภูมิของ Node แต่ละ Node (m, n) ไปหักล้างออกจากอุณหภูมิของ Node ที่อยู่ติดกัน ตามสมมติฐานอัตราการไหลของความร้อนเข้าสู่ Node (m, n) ตามทิศทางของลูกศรในภาพ 2 แล้วแทนค่าสมการ 35 ถึง 38 ลงในกฎการอนุรักษ์พลังงานในกรณี $\Delta x = \Delta y$ สำหรับ Node ภายในที่มีการกำเนิดของพลังงานความร้อนภายในตัวกลางสมการผลต่างสลับเนื่องจะได้

$$T_{m,n+1} + T_{m,n-1} + T_{m+1,n} + T_{m-1,n} + q'' \left(\frac{\Delta x \Delta y}{k} \right) - 4T_{m,n} = 0 \quad (39)$$

ถ้าไม่คิดการกำเนิดพลังงานภายในตัวกลาง เทอม ($q'' = 0$) สมการนี้ก็จะลดรูปเหลือดังสมการ 33 และสมการผลต่างสลับเนื่องจำเป็นต้องเขียนทุก ๆ Node ที่ไม่ทราบค่าอุณหภูมิ แต่อย่างไรก็ตามบางกรณีไม่สามารถใช้สมการที่ 39 ได้ สำหรับ Node ภายในทุก ๆ Node ได้ เช่น บาง Node เราจะไม่ทราบอุณหภูมิเนื่องจากผิวเป็นฉนวน หรืออาจมีการพาความร้อนที่ผิว ซึ่ง Node ต่าง ๆ เหล่านี้ต้องหาสมการผลต่างสลับเนื่องโดยใช้วิธีการสมดุลพลังงาน

วิธีการสมดุลพลังงานนี้สามารถพิจารณา Node ซึ่งเป็นมุมในภาพ 2 โดย Node นี้มีพื้นที่สามในสี่ส่วนของ Node ปกติคือ พื้นที่แรเงา และมีการแลกเปลี่ยนพลังงาน โดยการถ่ายเทความร้อน โดยการพาไปกับของไหลอุณหภูมิ T_f การนำความร้อนของ Node ข้างเคียงทั้งสี่ Node เข้าสู่ Node (m, n) ซึ่งอัตราการนำความร้อน q_{cond} สำหรับ Node ข้างเคียงแต่ละ Node สามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้



ภาพ 3 สมการผลต่างสลับเนื่องสำหรับ Node ที่อยู่ด้านบนและมีการถ่ายโอนความร้อนแบบการพา

$$q = k \Delta \left(\frac{\Delta T}{L} \right) \quad (40)$$

$$q_{(m-1,n) \rightarrow (m,n)} = k(\Delta y.1) \frac{T_{m-1,n} - T_{m,n}}{\Delta x} \quad (41)$$

$$q_{(m+1,n) \rightarrow (m,n)} = k(\Delta y.1) \frac{T_{m+1,n} - T_{m,n}}{\Delta x} \quad (42)$$

$$q_{(m,n-1) \rightarrow (m,n)} = k(\Delta x.1) \frac{T_{m,n-1} - T_{m,n}}{\Delta y} \quad (43)$$

$$q_{(m,n+1) \rightarrow (m,n)} = k(\Delta x.1) \frac{T_{m,n+1} - T_{m,n}}{\Delta y} \quad (44)$$

พื้นที่การนำความร้อนจาก Node (m-1,n) และ (m, n+1) คือ (1 . Δy) และ (1 . Δx) ตามลำดับ สำหรับ Node (m+1, n) และ node (m, n-1) คือ (1 . $\Delta y/2$) และ (1 . $\Delta x/2$) ตามลำดับ พิจารณาการพาความร้อนที่เกิดขึ้นที่ผิวของ Node ซึ่งอัตราการพาความร้อนทั้งหมด q_{cond} คือ

$$q_{(\infty) \rightarrow (m,n)} = h \left(\frac{\Delta X}{2} . 1 \right) (T_{\infty} - T_{m,n}) + h \left(\frac{\Delta y}{2} . 1 \right) (T_{\infty} - T_{m,n}) \quad (45)$$

โดยสมมติให้อุณหภูมิที่ผิวมีค่าสม่ำเสมอตลอดทั้ง Node (m, n) คือ $T_{m,n}$ ดังนั้นในกรณีการนำความร้อนในระบบสองมิติ พิจารณาผลของการกำเนิดพลังงานในตัวกลาง การอนุรักษ์พลังงานสมการ 34 และ 40 ถึง 44 รวมกันจะต้องเท่ากับศูนย์โดยให้ ($dx = dy$) จะได้

$$T_{m-1,n} + T_{m+1,n} + \frac{1}{2} (T_{m,n+1} + T_{m,n-1}) + \left(h \frac{\Delta x}{k} \right) T_{\infty} - \left(3 + \left(h \frac{\Delta x}{k} \right) \right) T_{m,n} = 0 \quad (46)$$

การวิเคราะห์แบบจำลองโดยใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลข

การวิเคราะห์เชิงตัวเลขนั้นจะมีขั้นตอนในการวิเคราะห์หลัก ๆ ดังนี้

1. กระบวนการ Pre-Processing: เป็นส่วนของการสร้างแบบจำลอง เพื่อให้ได้แบบจำลองเชิงตัวเลข สำหรับทำการวิเคราะห์ ซึ่งมีหลักการดังต่อไปนี้

วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขนั้นจะเริ่มจากการจำลองรูปร่างลักษณะดั้งเดิมของชิ้นงานโดยยึดหลักการที่ว่า เราสามารถหาคำตอบของชิ้นงานที่เป็นลักษณะของรูปที่แน่นอนได้ จึงได้นำมาใช้ในการแบ่งชิ้นงานที่มีความซับซ้อนยากในการหาคำตอบ ให้อยู่ในรูปโครงร่างตาข่ายเล็ก ๆ (grid cells) ที่มีรูปร่างแน่นอน ความละเอียดของโครงร่างตาข่ายจะมีผลต่อการคำนวณผลเป็นอย่างมาก เนื่องจากถ้าโครงร่างตาข่ายมีขนาดเล็กเกินไปก็ทำให้การคำนวณใช้เวลานานมาก ส่วนถ้าโครงร่างตาข่ายใหญ่เกินไปก็ทำให้ได้ค่าการคำนวณที่ไม่แน่นอน เมื่อกำหนดโครงร่างตาข่ายเป็นที่เรียบร้อยแล้วก็ให้กำหนดจุดที่กำหนดให้คลื่นเริ่มให้เคลื่อน (port)

2. กระบวนการ Solver: เป็นส่วนของการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป โดยโปรแกรมสำเร็จรูปจะทำการวิเคราะห์ค่าของคลื่นโดยการอินทิเกรตสมการแมกซ์เวลล์ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น

3. กระบวนการ Post-Processing: เป็นส่วนของการแสดงผลการวิเคราะห์ โดยในการวิเคราะห์ผลนี้จะวิเคราะห์ตามค่าบ่งชี้ต่าง ๆ ซึ่งจะได้กล่าวในหัวข้อถัดไป

ในการใช้โปรแกรมสำเร็จรูป ในคอมพิวเตอร์นั้นจำเป็นต้องใช้ด้วยความรอบคอบและระมัดระวัง ดังนั้นผู้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์จำเป็นต้องมีความรู้พื้นฐานของวิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขอย่างพอเพียง

การแสดงผลการวิเคราะห์แบบจำลอง

ในการวิเคราะห์ผลจะวิเคราะห์ตามค่าบ่งชี้ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. E-field คือ ค่าลักษณะการกระจายตัวสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในวัสดุ
2. S parameter คือ ค่าการสะท้อนกลับของคลื่น
3. Power loss density (W/m^3) คือ ความหนาแน่นของการสูญเสียกำลังงานโดยเทียบหน่วยปริมาตร

พารามิเตอร์ที่กล่าวมาข้างต้นเป็นค่าตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลจากแบบจำลอง วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขจะถูกต้องมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับสามประการหลัก คือ ประการแรก การกำหนดรูปร่างของเอลิเมนต์ให้ใกล้เคียงกับรูปร่างลักษณะจริงของชิ้นงานได้มากน้อยเพียงใด ประการที่สอง คือ การประมาณพฤติกรรมของเอลิเมนต์ได้ถูกต้องตามสภาพที่แท้จริงหรือไม่ และประการสุดท้ายคือ ความละเอียดในการคำนวณตัวเลขที่มีค่าน้อย ๆ ของเครื่องคอมพิวเตอร์ ดังนั้นหากต้องการใช้แบบจำลองออกมาอย่างมีประสิทธิภาพก็ต้องใส่ใจกับตัวแปรสามค่านี้เป็นอย่างมาก

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเรื่องพลังงานไมโครเวฟกับการแปรรูปผักและผลไม้บางชนิด

จิรวัดน์ และคณะ (2548) ได้ศึกษาการผลิตพริกแห้งจากพริกแดงสด ที่มีความยาวเฉลี่ย 6.5 ± 0.5 เซนติเมตร โดยใช้เครื่องไมโครเวฟสุญญากาศแบบถังหมุน พบว่าพริกไม่จำเป็นต้องผ่านการลวก โดยมีน้ำหนัก 700 กรัม ใช้คลื่นไมโครเวฟที่มีความถี่ 2450 เมกกะเฮิรตซ์ กำลังไฟฟ้า 1.18 กิโลวัตต์ ความดันสุญญากาศ 60 มิลลิเมตรปรอท และเวลาในการทำแห้ง 44 นาที เป็นปัจจัยที่เหมาะสม ทำให้ได้พริกแห้งที่มีลักษณะเฉพาะ ที่ไม่เหมือนกับพริกแห้งในท้องตลาด คือ มีสีแดงสดใส เม็ดป่อง ผลทางด้านประสาทสัมผัสพบว่าพริกแห้งที่ผลิตจากเครื่องไมโครเวฟสุญญากาศแบบถังหมุนจะมีสีแดง กลิ่นหอม ความป่อง ความกรอบและรสเผ็ดมากกว่าพริกแห้งท้องตลาด

Hemphill and Martin (1992) ทดสอบใช้เตาอบไมโครเวฟเพื่อหามวลแห้งรวมของสตรอเบอร์รี่ และเปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ที่ได้กับการอบแห้งแบบแช่แข็ง (freeze drying) และลมร้อน ซึ่งคุณภาพของมวลแห้งรวมในกระบวนการนี้มีความสำคัญมาก พบว่าที่ระดับพลังงานไมโครเวฟค่ามวลแห้งที่ได้มีคุณภาพดีใกล้เคียงกับการอบแห้งแบบแช่แข็งหรือลมร้อน

Tulasidas *et al.* (1993) ใช้การอบแห้งโดยลมร้อนและลมร้อนร่วมกับพลังงานไมโครเวฟสำหรับทำอุณหภูมิแห้งแบบไร้เมล็ดโดยอบที่อุณหภูมิแตกต่างกัน เตรียมตัวอย่างโดยแช่สารละลายอัลคาไรด์ (alkaline) ของเอทิลโอเลอเอท (ethyl oleate) เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ดี จากการทดลองพบว่า การอบโดยใช้พลังงานไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนสามารถลดเวลาการอบได้และผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพดีเทียบได้กับการอบด้วยลมร้อน โดยอุณหภูมิลมร้อนที่เหมาะสมในการอบแห้งคือ 50 องศาเซลเซียส

Bouraoui *et al.* (1994) ทดสอบการอบแห้งมันฝรั่งแบบแผ่นด้วยลมร้อนและลมร้อนร่วมกับพลังงานไมโครเวฟ ค่าการแพร่ของความชื้นถูกคำนวณโดยใช้สมการการแพร่ของ Fick ในแบบหนึ่งทิศทาง จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติ พบว่าการแพร่ของความชื้นเพิ่มขึ้นกับอุณหภูมิภายในของการอบ แต่กลับลดลง (ขณะอบด้วยพลังงานไมโครเวฟ) เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น การเปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ด้วยการพิจารณาช่วงเวลาที่ลดลง พบว่าการอบด้วยพลังงานไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนมีคุณภาพที่ดีกว่าการอบด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวและผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถดูน้ำกลับได้ดีกว่าอีกด้วย

Drouzas and Schubert (1996) แบ่งการศึกษา 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกโดยใช้เตาอบไมโครเวฟ-สุญญากาศอบแห้งแครนเบอร์รี่ (cranberry) โดยศึกษาการให้พลังงานไมโครเวฟอบ

แบบต่อเนื่องและให้พลังงานไมโครเวฟเป็นช่วง ๆ พบว่าการให้พลังงานไมโครเวฟเป็นช่วง ๆ มีประสิทธิภาพดีกว่าการให้พลังงานไมโครเวฟต่อเนื่อง โดยการเปิดให้พลังงานไมโครเวฟในเวลาสั้น ๆ และพักเป็นช่วงที่นานกว่า ขั้นตอนที่สองประเมินคุณภาพผลิตภัณฑ์ที่ได้ในด้านสี เนื้อสัมผัส และค่าน้ำอิสระ (water activity) โดยเปรียบเทียบการอบแห้งด้วยเตาอบไมโครเวฟสุญญากาศกับการอบแห้งด้วยลมร้อน พบว่าการอบแห้งด้วยเตาอบไมโครเวฟสุญญากาศได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสีแดงและนุ่มกว่าการอบแห้งแบบลมร้อน ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าเตาอบไมโครเวฟสุญญากาศสามารถใช้อบแห้งแครนเบอร์รี่ได้คุณภาพดีเช่นเดียวกับการอบแห้งแบบลมร้อน

Garcia *et al.* (1988) ทดสอบการอบกล้วยสุก กล้วยดิบที่หั่นเป็นชิ้น ๆ และกล้วยบดผงโดยใช้เตาอบไมโครเวฟดัดแปลงจากเตาไมโครเวฟที่ใช้ในครัวเรือนเปรียบเทียบกับการอบด้วยเตาอบลมร้อน พบว่าเวลาการอบแห้งลดลงเร็วกว่าการใช้เตาอบลมร้อน 17 เท่า ขณะที่ประสิทธิภาพของเตาอบไมโครเวฟมีค่าประมาณ 30 เปอร์เซนต์

Feng and Tang (1998) ศึกษาการใช้พลังงานไมโครเวฟอบแห้งชิ้นแอปเปิ้ลรูปลูกเต๋าด้วยเทคนิคสเปาเดตเบด (spouted bed) เพื่อให้เกิดการกระจายความร้อนสม่ำเสมอจึงทำชิ้นแอปเปิ้ลรูป ลูกเต๋าด้านขนาด 12.7x9.5x6.4 มิลลิเมตร อบลดความชื้นจากความชื้นเริ่มต้นประมาณร้อยละ 24 มาตรฐานเปียก จนเหลือความชื้นประมาณ ร้อยละ 5 มาตรฐานเปียกที่อุณหภูมิลมร้อน 70 องศาเซลเซียส โดยใช้พลังงานไมโครเวฟที่ความเข้ม 4 ระดับ คือ 0 3.7 4.9 และ 6.1 วัตต์ต่อกรัม ผลการทดลองพบว่าการกระจายอุณหภูมิมีความสม่ำเสมอว่าการอบลมร้อนเพียงอย่างเดียว สีของผลิตภัณฑ์มีความเข้มน้อยกว่า แต่การดูดน้ำกลับคืนได้มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ การอบด้วยลมร้อน นอกจากนี้ยังสามารถประหยัดพลังงานได้มากกว่า ร้อยละ 80

Maskan (2000) ศึกษาการอบกล้วยขึ้นสุดท้ายด้วยพลังงานไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน โดยใช้กล้วยตัวอย่างที่มีความหนา 4.3 7.4 และ 14.0 มิลลิเมตร ทำการอบโดย 1) อบกล้วยด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วลมร้อน 1.45 เมตรต่อวินาที และให้พลังงานไมโครเวฟ 3 ระดับ คือ 350 490 และ 700 วัตต์โดยชั่งน้ำหนักกล้วยที่เปลี่ยนไปทุก 10 นาที จนกระทั่งน้ำหนักกล้วยไม่เปลี่ยนแปลง 2) เลือกกล้วยตัวอย่างความหนา 4.3 มิลลิเมตร ทำการอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความเร็วลมร้อน 1.45 เมตรต่อวินาที จนกระทั่งความชื้นกล้วยลดลงเป็น 1.25 กิโลกรัม น้ำ/กิโลกรัมมวลแห้งกล้วย จึงใช้พลังงานไมโครเวฟระดับ 350 วัตต์ เข้าร่วมในการอบกล้วยขึ้นสุดท้ายจนได้ความชื้นกล้วยที่ต้องการ การทดลองพบว่าการใช้พลังงานไมโครเวฟร่วมในการอบลดความชื้นขึ้นสุดท้าย สามารถลดเวลาอบได้ประมาณ ร้อยละ 64.3 ของการอบกล้วยด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว สีของผลิตภัณฑ์ได้มีความเข้มน้อยกว่าการอบด้วยลมร้อน โดยมีค่า L^* , a^* , b^* และ ΔE เป็น 62.08 5.97 18.00 และ 9.89 ตามลำดับ และการดูดน้ำกลับ (rehydration) มีค่าสูง

รัชดา (2548) ได้ทำการทดลองให้ความร้อนแก่ยางโดยใช้วิธีแบบธรรมดา (conventional heating) กับวิธีการให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ (microwave heating) เพื่อเปรียบเทียบค่าการใช้พลังงานและเวลาในการให้ความร้อนรวม สำหรับการให้กระบวนการให้ความร้อนในแต่ละแบบ ซึ่งพบว่าการใช้คลื่นไมโครเวฟในการทำความร้อนซึ่งเป็นการให้ความร้อนเชิงปริมาตร (volumetric heating) จะทำให้ยางมีความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และอุณหภูมิภายในเนื้อยางกระจายตัวอย่างทั่วถึงภายในเวลาอันรวดเร็วอันเนื่องมาจากความสามารถในการทะลุทะลวงของคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งจะเป็นการลดเวลาในการให้ความร้อนแก่ยางได้ดีและจะส่งผลต่อการลดต้นทุนในกระบวนการผลิตด้วย

Funebo *et al.* (2000) ได้ทำการลอกแอปเปิ้ลขนาด $15 \times 15 \times 15$ มิลลิเมตร โดยการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟ 20 วัตต์/กรัม ด้วยเวลา 0 และ 5 นาที ก่อนนำไปอบแห้งแบบลมร้อนที่ 40 องศาเซลเซียส และเวลา 0 0.75 และ 2.5 นาที ก่อนอบแห้งที่ 60 องศาเซลเซียส และเวลา 0 2.5 และ 5 นาที ก่อนอบแห้งที่ 80 องศาเซลเซียส พบว่าการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟมีผลต่อความหนาแน่นรวม (bulk density) ความสามารถในการคืนรูป (rehydration capacity) และความแน่นเนื้อหลังคืนรูป (stress at maximum force) ของแอปเปิ้ลอบแห้ง โดยถ้านำ มาให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ 2.5 นาที ก่อนอบแห้งที่ 60 องศาเซลเซียส ให้ความหนาแน่นรวมสูงสุด 796 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ 2.5 นาที ก่อนอบแห้งที่ 80 องศาเซลเซียส ให้ความสามารถในการคืนรูปสูงสุด 6.70 (น้ำหนักแอปเปิ้ลคืนรูป/น้ำหนักแอปเปิ้ลแห้ง) และการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ 5 นาที ก่อนอบแห้งที่ 40 องศาเซลเซียส ให้ค่าความแน่นเนื้อต่ำที่สุด 0.19 MPa ส่วนแอปเปิ้ลที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนแบบไมโครเวฟ อบแห้งที่ 80 องศาเซลเซียส ให้ความหนาแน่นรวมและความสามารถในการคืนรูปต่ำที่สุดเท่ากับ 391 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร และ 3.78 น้ำหนัก/น้ำหนัก ตามลำดับ และอบแห้งที่ 40 องศาเซลเซียส ให้ค่าความแน่นเนื้อสูงที่สุด 1.0 MPa ทั้งนี้เพราะคลื่นไมโครเวฟในการลอกไปทำลายโครงสร้างเซลล์ของแอปเปิ้ล ทำให้ความหนาแน่นรวมและความสามารถในการคืนรูปเพิ่มขึ้น และความแน่นเนื้อลดลง

Krokida *et al.* (2000) ได้ทำการลอกแครอทขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร สูง 10 มิลลิเมตร ด้วยน้ำร้อนที่ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที ใช้น้ำ เป็นเวลา 2 นาที ชัลไฟด์ โดยจุ่มในสารละลายโซเดียมไบซัลไฟด์ร้อยละ 2 เป็นเวลา 5 นาที และไมโครเวฟที่กำลังไฟ 810 วัตต์ เป็นเวลา 1 นาที จากนั้นนำ ตัวอย่างลวกมาอบแห้งที่ 70 องศาเซลเซียส พบว่าการลวกด้วยไมโครเวฟให้ค่า L^* ต่ำกว่า ค่า a^* สูงกว่า ทำให้สีแครอทอบแห้งสีเข้มคล้ำกว่าการลวกด้วยน้ำร้อน ใช้น้ำ และชัลไฟด์ ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากการลวกด้วยไมโครเวฟอาจทำให้เกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล

ที่ไม่ใช่เอนไซม์คือปฏิกิริยาไมลาร์ด ทำให้เกิดสีน้ำตาลขึ้น ทำให้แครอทอบแห้งมีสีส้มคล้ำกว่าตัวอย่างอื่น

งานวิจัยเกี่ยวกับแบบจำลองการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ

Lin *et al.* (1995) ได้ทำ การศึกษาการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟกับตัวอย่าง Sodium alginate gel โดยใช้โปรแกรม TWODEPEP (two-dimensional commercial finite element software) วิเคราะห์ความร้อนที่เกิดขึ้น โดยตัวอย่าง Sodium alginate gel ที่ใช้มีรูปทรงเป็นแผ่นบาง และทรงกระบอกความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์แตกต่างกัน จากนั้นทำการสร้างแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนแหล่งของความร้อนประกอบด้วย ความร้อนจากการนำ ความร้อน การพาความร้อน ความร้อนที่เกิดขึ้นภายใน และความร้อนที่สูญเสียไปขณะเกิดการระเหย จากสมมติฐานว่า กำลังไมโครเวฟจะกระจายรอบ ๆ ตัวอย่าง และถูกดูดซับไว้ ความเข้มข้นของกำลังไมโครเวฟที่ถูกดูดซับ ณ ตำแหน่งใด ๆ ในตัวอย่างที่ทำ การทดสอบขึ้นอยู่กับคุณสมบัติไดอิเล็กตริก และรูปทรงของตัวอย่าง นอกจากนี้ Lin *et al.* (1995) ยังได้วิเคราะห์ผลจากความแปรปรวนของคุณสมบัติไดอิเล็กตริก สัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อนและพลังงานไมโครเวฟที่ตกกระทบพื้นผิว ต่อการทำนายค่าอุณหภูมิด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method) ในงานวิจัยนี้ใช้ตัวอย่างที่สร้างขึ้นมาแทนวัสดุอาหารที่มีความเข้มข้นของเกลือที่แตกต่างกัน แต่ในความเป็นจริงวัสดุอาหารชิ้นหนึ่งย่อมมีองค์ประกอบต่าง ๆ มากมาย ดังนั้นการจะสร้างแบบจำลองให้เหมือนจริงควรใช้อาหารตัวอย่างจริง นอกจากนั้นการทำไฟไนต์เอลิเมนต์เพียง 2 มิติจะได้แบบจำลองที่ไม่สมบูรณ์มากนัก จึงควรทำเป็น 3 มิติเพื่อให้เหมือนจริงที่สุด งานวิจัยที่กล่าวมาข้างเป็นการศึกษาเพียงการถ่ายเทความร้อนเท่านั้น แต่ในการให้ความร้อนจริง ๆ ยังมีการถ่ายเทมวลมาเกี่ยวข้องด้วย จึงควรที่จะศึกษาผลจากการถ่ายเทมวลร่วมด้วย

Zhou *et al.* (1995) สร้างแบบจำลองเพื่อทำนายการกระจายตัวของอุณหภูมิ และความชื้นระหว่างการทำแห้งด้วยไมโครเวฟ ตัวอย่างที่ใช้คือมันฝรั่งทรงกระบอก และแผ่นบาง ทำการวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิ และปริมาณความชื้นด้วย Fluorotropic temperature measurement system และ Near infrared technique ตามลำดับ แก้ปัญหาด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ พบว่ามันฝรั่งทั้งทรงกระบอกและแผ่นบางอุณหภูมิจากการทำนายแตกต่างจากค่าจริงร้อยละ 15.5 และร้อยละ 11.4 ตามลำดับ ส่วนปริมาณความชื้นของมันฝรั่งทรงกระบอกและแผ่นบางที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองแตกต่างจากค่าที่วัดได้จริงร้อยละ 2.4 และร้อยละ 2.1 มาตรฐานเบี่ยงตามลำดับ

Kim and Bhowmik (1995) ได้ศึกษาสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (effective moisture diffusivity) ของโยเกิร์ตภายใต้การทำแห้งด้วยระบบสุญญากาศร่วมกับไมโครเวฟ โดยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายความชื้นหาได้จากกราฟการทำแห้งที่อุณหภูมิคงที่มี 2 วิธีคือ Method of slope of the drying curve และ Regular regime technique พบว่าวิธี Method of slope of the drying curve เป็นวิธีที่เหมาะสมและดีกว่าวิธี regular regime technique ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายความชื้นที่หาได้สามารถนำมาใช้อธิบายกลไกการเคลื่อนที่ของความชื้นภายในวัสดุอาหารได้ เช่น liquid diffusion, vapor diffusion, surface diffusion, knudsen diffusion, capillary flow และ hydrodynamic flow นำไปสู่การสร้างและพัฒนาแบบจำลองกระบวนการถ่ายเทมวลเมื่อทำแห้งด้วยระบบสุญญากาศร่วมกับไมโครเวฟได้

Lian *et al.* (1997) ได้ศึกษาการถ่ายเทมวลและความร้อนขณะทำแห้งตัวอย่างอาหารเหลวเข้มข้น (concentrated water soluble food paste) ด้วยการทำแห้งระบบสุญญากาศร่วมกับไมโครเวฟ สมการการถ่ายเทมวลใช้แบบจำลองการแพร่ของของเหลว (liquid diffusion model) ประกอบด้วยการถ่ายเทน้ำและไอน้ำ สมการการถ่ายเทความร้อนประกอบด้วยความร้อนจากพลังงานไมโครเวฟ ความร้อนแฝงในการระเหย ความร้อนสัมผัสในการนำ ความร้อน และการพาความร้อน แก้ปัญหาสมการด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ร่วมกับ CFD (computational fluid dynamics) package FIDAP (fluid dynamics international) พบว่า ค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนายของแบบจำลองใกล้เคียงกัน ถึงแม้ว่าค่าคุณสมบัติบางตัว เช่น คุณสมบัติไดอิเล็กตริกจะไม่ใช้ค่าจริงของตัวอย่าง แต่เป็นเพียงค่าที่ได้จากการทำนายจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ข้อจำกัดของงานวิจัยนี้คือ จากการที่ทำนายค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในขณะให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟทำได้ยาก พจน์ของพลังงานไมโครเวฟในสมการการถ่ายเทความร้อน จึงใช้กฎของแลมเบิร์ต (Lambert's law) โดยสมมติให้ความเข้มของสนามไฟฟ้ารอบ ๆ ผลิตภัณฑ์มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ นอกจากนั้นตัวอย่างอาหารที่ใช้ก็ไม่ใช่อาหารจริง เป็นตัวอย่างที่เตรียมขึ้นมาจากประกอบและโครงสร้างต่าง ๆ ของตัวอย่างจึงไม่ซับซ้อนเท่าตัวอย่างอาหารจริงจากการดำเนินการวิจัยที่ผ่านมาพบที่ยังไม่สอดคล้องกับความเป็นจริงมากนัก และยังไม่สามารถนำไปใช้ในการดำเนินการได้จริง งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาหาแบบจำลองของการทำแห้งด้วยระบบสุญญากาศร่วมกับไมโครเวฟ โดยใช้ตัวอย่างอาหารจริงคือพริกไทยมาใช้ในการทดลอง เพื่อให้เหมือนกับสภาพที่เกิดขึ้นจริงสามารถนำไปใช้ได้กับกระบวนการที่เกิดขึ้นจริงต่อไปได้โดยเฉพาะในเชิงวิศวกรรม เช่น การขยายขนาด เป็นต้น

งานวิจัยที่ทำการศึกษเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีการทางไฟไนต์อินทิกรัล

การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวกับระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่ผ่านมาพบว่า ได้มีการนำระเบียบวิธีวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์อินทิกรัลมาใช้ในการสร้างแบบจำลองภาระของโครงที่เป็นตัวสันสะท้อนแบบฉนวน โดยใช้การแก้ปัญหาเชิงตัวเลขของสมการแมกซ์เวลล์แบบอินทิกรัล (Centeno and Excell, 1983) นอกจากนี้แล้ว Rao *et al.* (1998) ยังได้ทำการวิเคราะห์การกระจายของภาวะแม่เหล็กไฟฟ้าโดยโครงกลับ แบบช่องสองมิติในแนวระนาบ โดยคลื่นที่ให้เป็นคลื่นแนวระนาบแบบ TE หรือ TM อย่างใดอย่างหนึ่ง และในการวิเคราะห์ได้อาศัยการใช้เมตริกซ์เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ โดยโครงจะถูกจำลองให้มีรูปทรงกระบอกสามเหลี่ยม อุปกรณ์ที่แยกออกมาจะถูกกำหนดให้เป็นรูปทรงกระบอก ซึ่งโครงถูกวิเคราะห์โดยใช้ไฟไนต์อินทิกรัลเทคนิคในการแก้ปัญหาผลลัพธ์ไม่แท้ในตอนท้าย นอกจากการใช้ไฟไนต์อินทิกรัลในการแก้ปัญหาแล้ว Calalo *et al.* (1988) ได้ใช้วิธีผลต่างสืบเนื่องเชิงเวลา (FDTD: finite difference time domain) มาใช้ในการประมวลผลทางตัวเลขต่อเวลาในสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระทำต่อโครงสร้างที่เป็นฉนวนหรือตัวนำของ hypercube เนื่องจาก hypercube มีจำนวนยูนิตที่ต้องคำนวณมากถึง 2,048,000 นอกจากนี้ Sugeng *et al.* (2006) ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (CFEM: compact-finite element method) ในการจำลองค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแทนที่การหาค่าการกระจายของสนามแม่เหล็กจะทำให้แบบจำลองมีความแม่นยำมากขึ้นเนื่องจาก CFEM ถูกใช้ในการจำลองโมเดลเชิงซ้อน 3 มิติ

Davey and Pham (2000) ได้ศึกษาวิธีการทำนายภาระความร้อนและน้ำหนักที่สูญเสียไปของเนื้อวัวที่เกิดจากการแช่แข็ง โดยใช้ระเบียบวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์มาช่วยในการวิเคราะห์ ในการวิจัยนี้ได้แบ่งรูปร่างของเนื้อวัวออกเป็นหน้าตัดที่แตกต่างกัน แล้วทำการวิเคราะห์แบบ 2 มิติเพื่อเปรียบเทียบค่าปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทออกจากเนื้อวัว โดยค่าปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทออกจากเนื้อวัวที่คำนวณได้จากระเบียบวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์กับค่าปริมาณความร้อนที่วัดได้จริง โดยผลจากการทดลองของบริษัทแช่แข็ง 55 บริษัท พบว่าปริมาณความร้อนที่คำนวณได้สูงกว่าค่าที่ได้จากการทดลองร้อยละ 5.6 และค่าความผิดพลาดจากการทำนายน้ำหนักคิดเป็นร้อยละ 2.3 นอกจากนี้ ยังสามารถหาการกระจายของอุณหภูมิ ตามจุดต่าง ๆ ของเนื้อวัวได้ จากนั้นมีการพัฒนาใช้ระเบียบวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ กับงานวิจัยด้านอุตสาหกรรมทางด้านอาหารในสถานะชั่วคราวโดย Nabor *et al.* (2001) ได้ศึกษาหาความจุความร้อนเชิงปริมาตรและค่าการนำความร้อน โดยใช้ระเบียบวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในการคำนวณ ซึ่งได้จำลองแบบอาหารอยู่ในภาชนะบรรจุรูปทรงกระบอก แล้วกำหนดอัตราการให้ความร้อนแก่ภาชนะในรูปแบบต่าง ๆ กัน เช่น กำหนดอัตราการให้ความร้อนเป็นค่าคงที่ กำหนดอัตราการให้ความร้อนเป็นจังหวะหรือ

กำหนดอัตราการให้ความร้อนเป็นแบบเชิงเส้น แล้ววัดค่าอัตราการตอบสนองของอุณหภูมิและการกระจายของอุณหภูมิในภาชนะที่เวลาต่าง ๆ เปรียบเทียบกับค่าทำนายที่คำนวณจากระเบียบวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งพบว่าค่าที่ได้ใกล้เคียงกันและพบว่ากำหนดอัตราการให้ความร้อนเป็นจังหวะ ให้อัตราค่าตอบสนองที่ดี และให้ข้อมูลครบถ้วนในการนำไปคำนวณสมบัติทางความร้อนมากกว่าแบบอื่น

กรอบแนวความคิด

จากการตรวจสอบเอกสารพบว่ายังไม่มีการใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในการจำลองการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟภายในบรรจุภัณฑ์อาหาร ดังนั้นในโครงการวิจัยนี้จะประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในการวิเคราะห์หาการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟ อันเนื่องมาจากการใช้บรรจุภัณฑ์ที่แตกต่างกัน โดยยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองทางระเบียบวิธีเชิงตัวเลขกับการทดลองจริง หากค่าการกระจายตัวของคลื่นภายในบรรจุภัณฑ์หน่อไม้ฝรั่งในการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองจริงก็จะสามารถสรุปได้ว่า โปรแกรมสำเร็จรูปมีความน่าเชื่อถือในการนำมาจำลองหาค่าต่างๆ ทางด้านไมโครเวฟ และสามารถนำไปพัฒนาการออกแบบผลิตภัณฑ์บรรจุภัณฑ์เพื่อปรุงสุกด้วยไมโครเวฟได้ต่อไป โดยเมื่อนำไปทำการจำลองเพื่อปรับแต่งค่าไดอิเล็กทริกของบรรจุภัณฑ์ คาดหวังไว้ว่าหากปรับแต่งค่าไดอิเล็กทริกของบรรจุภัณฑ์แล้วจะทำให้การกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟภายในหน่อไม้ฝรั่งมีการกระจายตัวที่ดีขึ้น

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการ

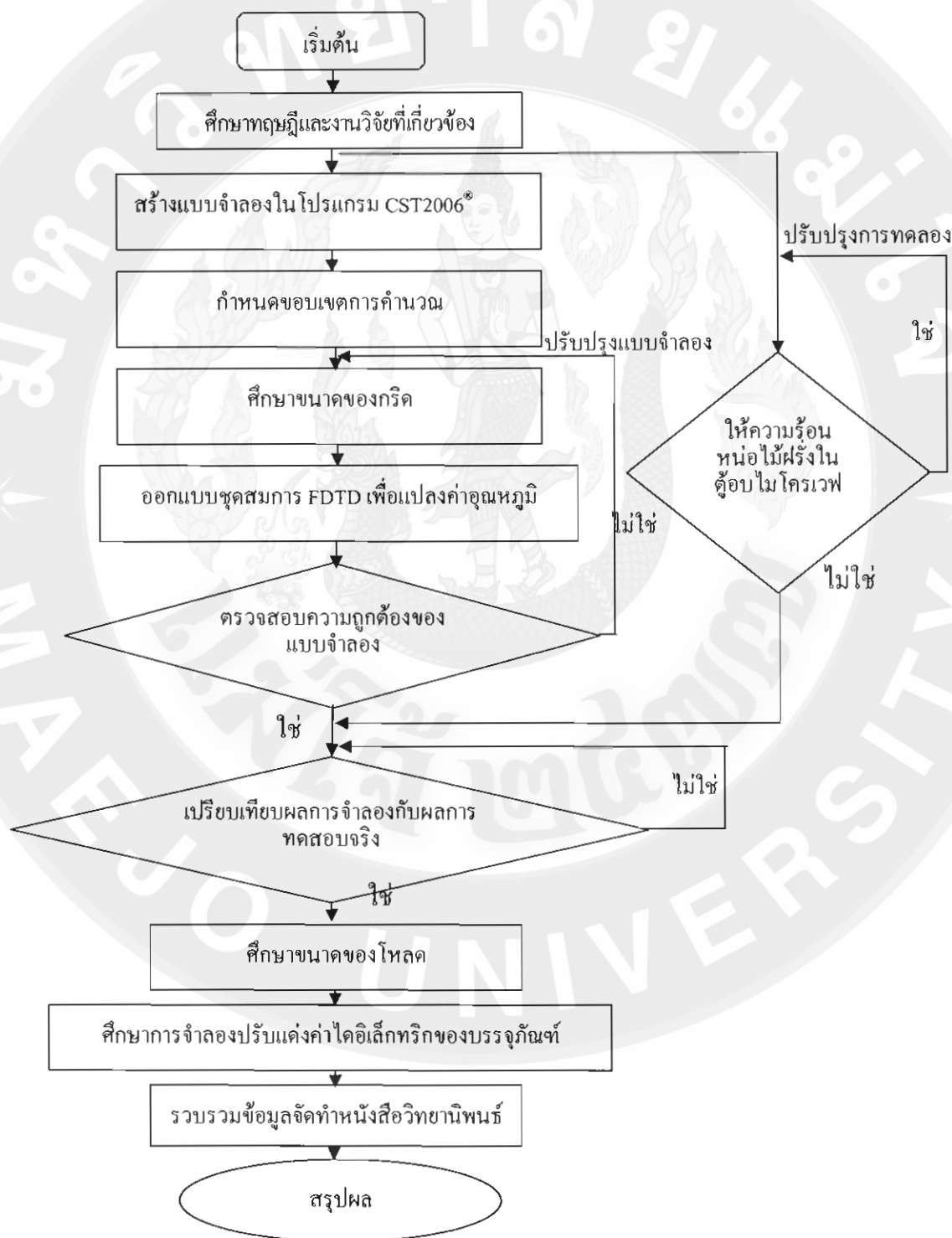
ในบทนี้จะกล่าวถึงอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย วิธีการดำเนินงานวิจัย วิธีการทดลอง การสร้างแบบจำลอง และวิธีการหาค่าอุณหภูมิของหน่อไม้ฝรั่งจากผลการจำลอง และผลการทดสอบจริง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

1. อุปกรณ์ที่ใช้ในการจำลองการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟด้วยโปรแกรม CST2006[®] Microwave studio (CST of America, Inc., Wellesley Hills, MA, USA) และโปรแกรม Microsoft Excel[™] ประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์แบบตั้งโต๊ะ จำนวน 1 เครื่อง
2. อุปกรณ์การทดลองเพื่ออุณหภูมิในการทดลองในห้องปฏิบัติการ
 - ไมโครเวฟขนาดครัวเรือน ขนาดความจุ 22 ลิตร กำลังไฟฟ้า 800 วัตต์ ความถี่ 2.45 จิกะเฮิร์ต รุ่น R-254 (Sharp Corp. Ltd, Japan)
 - กล้องจับภาพความร้อนโมเดล IR Flexcam S[™] (Infrared Solutions, Plymouth MN, USA)
 - เครื่องบันทึกวิดีโอ
 - หน่อไม้ฝรั่ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวประมาณ 9.8 ± 0.2 และ 94 ± 0.1 มิลลิเมตร ตามลำดับ
 - บรรจุภัณฑ์สำหรับใช้ปรุงอาหารด้วยไมโครเวฟ ชนิดโพลีโพรพิลีน (polypropylene)
 - ตะแกรงเหล็กขนาดกริด 5x5 มิลลิเมตร สำหรับสร้างกริดในการถ่ายภาพด้วยกล้องตรวจจับความร้อน
 - เครื่องชั่งดิจิตอล ขนาดความละเอียด 0.01 กรัม รุ่น CP224S (Satorious Ag., Goettingen, Germany)
 - กล้องถ่ายภาพนิ่งแบบดิจิตอล รุ่น S6500 (Fujifilm Corp. Ltd, Thailand)
 - เวอร์เนียร์คาลิปเปอร์

วิธีการ

การดำเนินงานวิจัยจะมีลำดับการวิจัยตามแผนภูมิการดำเนินงาน แสดงดังภาพ 4

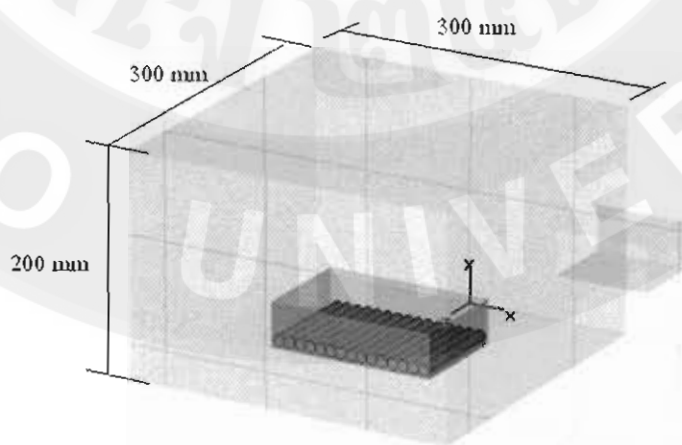


ภาพ 4 แผนผังการดำเนินงาน

จากแผนภูมิการดำเนินงานจะสามารถอธิบายการดำเนินงานโดยละเอียดในแต่ละหัวข้อตามการดำเนินงานดังต่อไปนี้

การสร้างแบบจำลองในโปรแกรม CST2006®

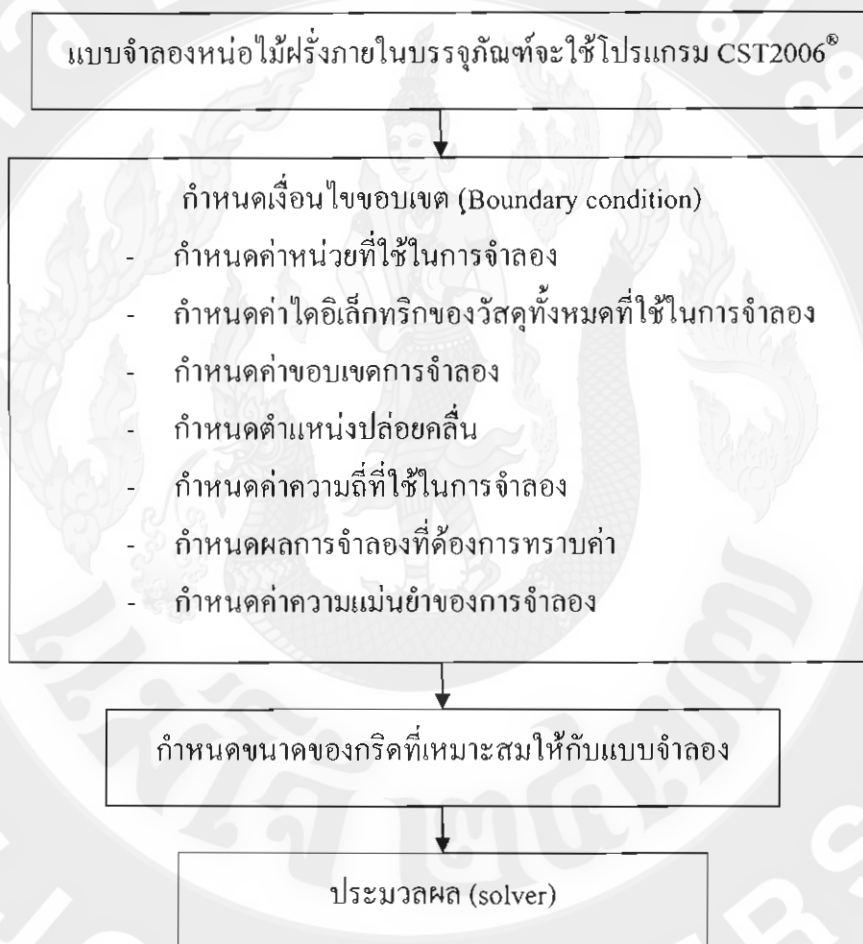
ในการสร้างแบบจำลองห่อไม้ฝรั่งภายในบรรจุภัณฑ์ใช้โปรแกรม CST2006® โดยทำการสร้างแบบจำลองตามขนาดของตู้ไมโครเวฟขนาดครัวเรือน ยี่ห้อ SHARP รุ่น R-254 ความถี่ 2.45 จิกะเฮิร์ต ขนาด 300x300x200 (กว้างxยาวxสูง) มิลลิเมตร กำหนดเงื่อนไขให้โครงสร้างภายในของตู้อบไมโครเวฟในแบบจำลองเป็นตัวนำสมบูรณ์ (perfect electric conductor, PEC) จากแบบจำลองต้องการสังเกตการณ์กระจายสนามไฟฟ้าภายในตู้ไมโครเวฟ ส่วนภายนอกตู้ไมโครเวฟมีลักษณะเป็นโลหะดังนั้นค่าสนามไฟฟ้าจะมีค่าเป็นศูนย์ ส่วนภายในตู้ไมโครเวฟตามภาพ 5 มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าเป็นสุญญากาศ (vacuum) ส่วนบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในแบบจำลองมีลักษณะเป็นกล่องสี่เหลี่ยมโดยมีขนาดเท่ากับ 100x150x40 (กว้างxยาวxสูง) มิลลิเมตร ซึ่งกำหนดให้ค่าไดอิเล็กทริกของบรรจุภัณฑ์มีค่าเท่ากับค่าไดอิเล็กทริกของพลาสติกโพลีโพรพิลีนที่มีค่า dielectric constant (ϵ') และ dielectric loss (ϵ'') เท่ากับ 2.3 และ 0.003 ตามลำดับ (วิไล, 2543) ส่วนห่อไม้ฝรั่งในบรรจุภัณฑ์กำหนดให้มีลักษณะเป็นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวเท่ากับ 9.8 และ 94 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยกำหนดให้ห่อไม้ฝรั่งมีค่า dielectric constant (ϵ') และ dielectric loss (ϵ'') เท่ากับ 71 และ 16 ตามลำดับ (Rosenthal, 1992)



ภาพ 5 แบบจำลองห่อไม้ฝรั่งในบรรจุภัณฑ์สร้างโดยโปรแกรม CST2006®

การกำหนดขอบเขตให้กับแบบจำลอง

ในการศึกษาการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าการกำหนดขอบเขตของแบบจำลองนั้นเป็นสิ่งสำคัญอย่างมากเพื่อให้แบบจำลองให้ผลเป็นไปตามลักษณะการทดลองที่นำมาเปรียบ โดยลำดับขั้นตอนการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตแบบจำลอง ดังลำดับขั้นตอนดังต่อไปนี้



ภาพ 6 ลำดับขั้นตอนการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตแบบจำลอง

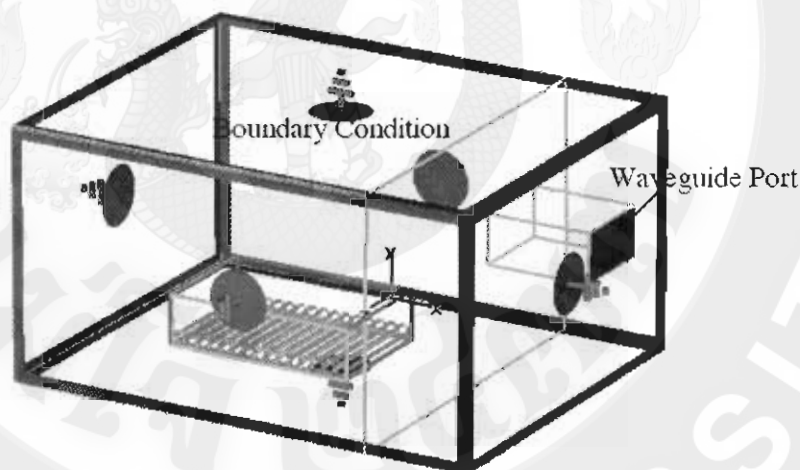
จากภาพ 6 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตนั้นจะมีการกำหนดค่าไดอิเล็กทริกของวัสดุต่างๆ ซึ่งได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ผ่านมา แต่การแทนค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุในโปรแกรม CST2006® นั้น ค่า dielectric constant (ϵ') สามารถกำหนดลงไปโปรแกรมได้โดยตรง ส่วนค่า dielectric loss (ϵ'') ต้องแปลงเป็นค่าความนำ (conductivity) ก่อนจึงสามารถกำหนดค่าลงในโปรแกรมได้ โดยการหาค่าความนำ (conductivity) จะเป็นไปตามสมการที่ 47 และ 48 (Bindu *et al.*, 2006)

$$\sigma(\text{conductivity}) = \omega \epsilon_0 \epsilon'' \quad (47)$$

$$\sigma(\text{conductivity}) = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon'' \quad (48)$$

โดยที่ f คือ ความถี่ที่ใช้ทดสอบซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.45 GHz ส่วน $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$

การกำหนดค่าขอบเขตของการจำลองจะกำหนดส่วนภายนอกตู้ไมโครเวฟเป็นโลหะ ดังนั้นสนามไฟฟ้าจึงมีค่าเป็นศูนย์การกำหนดตำแหน่งปล่อยคลื่น (waveguide port) จะกำหนด ณ จุดที่แสดงดังภาพ 7 โดยกำหนดความถี่ที่ใช้ในการจำลองเท่ากับความถี่ของไมโครเวฟที่ใช้ตามครัวเรือนซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.45 จิกะเฮิร์ตซ์ (GHz) ส่วนการกำหนดความแม่นยำของแบบจำลองจะกำหนดให้มีความแม่นยำเท่ากับ -30 dB



ภาพ 7 ขอบเขตของการจำลอง

การประมวลผลด้วยโปรแกรม CST2006® ในการวิเคราะห์ผลจะวิเคราะห์ด้วย Finite Integral Technique (FIT) โดยเทคนิคนี้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะถูกคำนวณด้วยวิธี FIT โดยมีพื้นฐานมาจากทฤษฎีการอินทิเกรตสมการแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equations) แบบต่างๆ ที่แตกต่างกัน ดังแสดงในสมการที่ 49 (Chen *et al.*, 2008; Lebaric, 1989)

$$\oint_{\partial A} \vec{E} \cdot d\vec{s} = - \int_A \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{A}, \quad \oint_{\partial A} \vec{H} \cdot d\vec{s} = - \int_A \left(\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J} \right) \cdot d\vec{A} \quad (49)$$

$$\oint_{\partial V} \vec{D} \cdot d\vec{s} = \int_V \rho dV, \quad \oint_{\partial V} \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$$

ชุดสมการที่ 49 มีความสัมพันธ์ตามสมการที่ 50 ดังต่อไปนี้

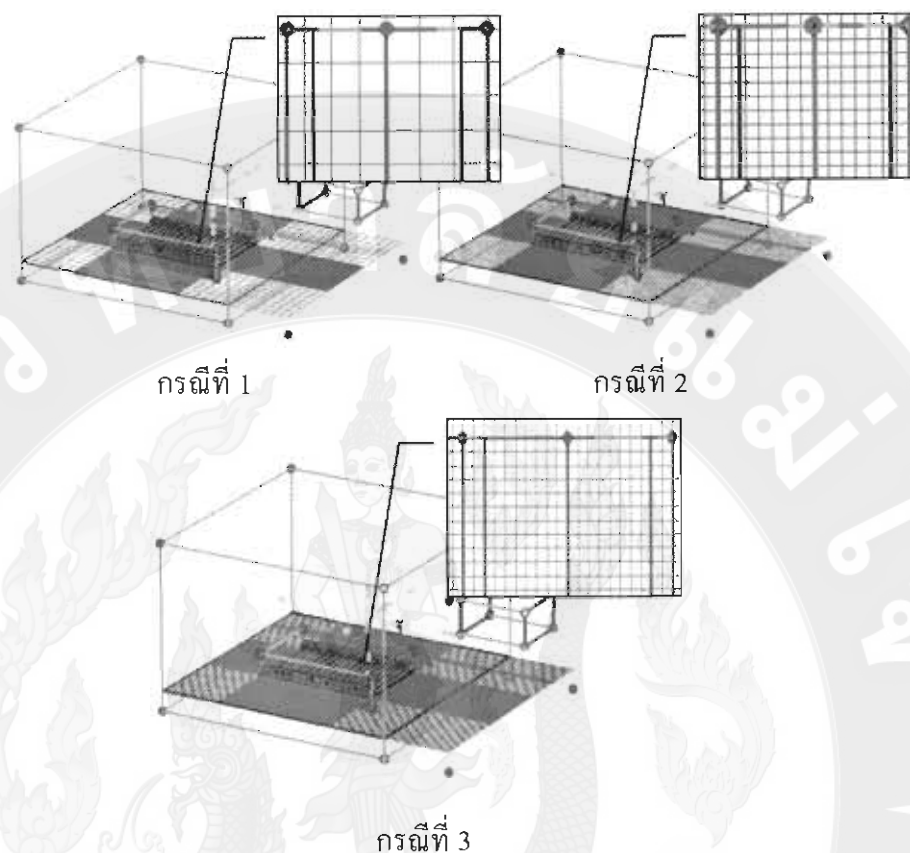
$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}, \quad \vec{B} = \mu \vec{H} \quad (50)$$

เมื่อ $\vec{E}$ คือ ค่าสนามไฟฟ้า $\vec{H}$ คือ ค่าสนามแม่เหล็ก $\vec{D}$ คือ ค่าฟลักซ์ไฟฟ้า $\vec{B}$ คือ ค่าฟลักซ์แม่เหล็ก ส่วน ϵ และ μ คือ ค่าสภาพยอมไฟฟ้า และค่าความนำไฟฟ้า ตามลำดับ

การจำลองเพื่อหาขนาดกริดที่เหมาะสม

ความละเอียดของกริดและจำนวนของกริดที่ใช้งานมีผลต่อความถูกต้องแม่นยำในการประมวลผลโดยใช้โปรแกรมที่ใช้วิธีการเชิงตัวเลขเป็นอย่างมาก ซึ่งขนาดของกริดที่ใหญ่มากจะทำให้การประมวลผลมีการคลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริง และขนาดของกริดที่เล็กมากจะได้การประมวลผลที่ถูกต้องแม่นยำ แต่จะใช้ระยะเวลาในการประมวลผลนาน ดังนั้นการจำลองเพื่อกำหนดขนาดของกริดจะขึ้นอยู่กับการนำไปใช้งานโดยคำนึงถึงระยะเวลาในการสร้างและเวลาที่ใช้ในการคำนวณ และยังคงคำนึงถึงความถูกต้องของผลที่ได้จากการคำนวณเช่นกันในโปรแกรม CST2006® นั้นมีส่วนการตั้งค่าเพื่อให้มีการจำลองหาขนาดของกริดที่เหมาะสมต่อแบบจำลองที่สร้าง โดยขนาดของ กริดที่ใช้ในการศึกษานั้นมีทั้งหมด 3 กรณี ดังภาพ 8 ซึ่งแสดงขนาดของกริด ตั้งแต่กรณีที่ 1-3 จะเห็นว่ากรณีที่ 1 จะมีขนาดกริดที่ใหญ่และขนาดของกริดจะลดลงตามลำดับ ดังนี้

- กรณีที่ 1: ขนาดของกริดที่เท่ากับ 10 เส้น ต่อหนึ่งความยาวคลื่น หรือเท่ากับ 1.40 มิลลิเมตร ต่อกริด
- กรณีที่ 2: ขนาดของกริดที่เท่ากับ 20 เส้น ต่อหนึ่งความยาวคลื่น หรือเท่ากับ 0.70 มิลลิเมตร ต่อกริด
- กรณีที่ 3: ขนาดของกริดที่เท่ากับ 30 เส้น ต่อหนึ่งความยาวคลื่น หรือเท่ากับ 0.47 มิลลิเมตร ต่อกริด



ภาพ 8 ขนาดของกริดที่แตกต่างกันตามจำนวนเส้นต่อความยาวคลื่น
กริดที่ 1) 10 เส้น กริดที่ 2) 20 เส้น และ กริดที่ 3) 30 เส้น

การออกแบบชุดสมการ FDTD เพื่อแปลงค่าสนามไฟฟ้าให้อยู่ในเทอมของอุณหภูมิ

การออกแบบชุดสมการการถ่ายเทความร้อนเพื่อแปลงค่าสนามไฟฟ้าที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม CST2006[®] ให้อยู่ในเทอมของอุณหภูมินั้นจะใช้โปรแกรม Visual Basic for Applications[™] (VBA) ใน Microsoft Excel[™] โดยในการออกแบบชุดสมการเพื่อแปลงค่าสนามไฟฟ้าให้อยู่ในเทอมของอุณหภูมิอาศัยสมการฟูเรียร์ (Fourier rate equations) ในการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ใช้กฎการไม่สูญหายไปของพลังงาน (energy conservation law) โดยพิจารณาอัตราการถ่ายเทความร้อนเข้าและออกจากปริมาตรควบคุมในทุกทิศทุกทาง อัตราการสะสมความร้อนและอัตราการกำเนิดความร้อนในปริมาตรควบคุม จากกฎการไม่สูญหายไปของพลังงานจะได้สมการสำหรับการถ่ายเทความร้อนในปริมาตรควบคุมภายในระบบที่สนใจ ซึ่งเมื่อแก้สมการแล้วจะได้คำตอบแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในวัตถุ กับตำแหน่ง x , y และเวลา (t) โดยระบบและปริมาตรควบคุมที่ศึกษาใน

งานวิจัยนี้แสดงดังภาพ 9 โดยภายในกรอบสี่เหลี่ยมสีแดงแสดงระบบที่สนใจ กำหนดปริมาตรควบคุมเป็น 1 เอลิเมนต์ (Element) จากการแบ่งกริดเซลล์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1×1 ตารางมิลลิเมตร

จากกฎการไม่สูญหายไปของพลังงาน สมดุลความร้อนบนปริมาตรควบคุมคือ ผลรวมของอัตราความร้อนที่เข้าสู่ปริมาตรควบคุมกับอัตราการกำเนิดความร้อนภายในปริมาตรควบคุม เท่ากับ ผลรวมของอัตราความร้อนที่ออกจากปริมาตรควบคุมกับอัตราการสะสมความร้อนภายในปริมาตรควบคุม



ภาพ 9 ระบบและปริมาตรควบคุมที่ศึกษาในงานวิจัย

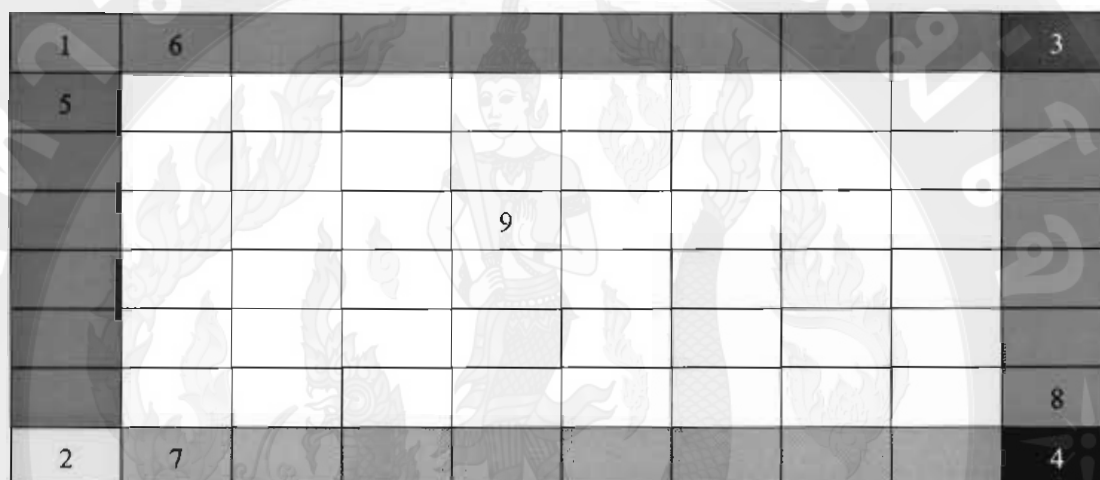
การกำหนดสมมติฐานของแบบจำลองแบบ FDTD

การแก้สมการที่ 49 เพื่อคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้ามีความซับซ้อนและยุ่งยากมาก ดังนั้นจึงได้กำหนดสมมติฐานของแบบจำลองดังต่อไปนี้

- กำหนดให้หน่วยไมล์ฝรั่งมีรูปร่างเป็นทรงกระบอก
- กำหนดให้หน่วยไมล์ฝรั่งมีโครงสร้างเป็นสารเนื้อเดียว (homogeneous)
- กำหนดการพิจารณาในระนาบ 2 มิติ คือ x และ z สมมติให้ไม่มีการถ่ายเทความร้อนในแนวแกน y
- กำหนดให้ในปริมาตรควบคุมไม่มีผลกระทบจากการการแผ่รังสีความร้อน
- กำหนดให้ไม่มีการถ่ายเทมวลในปริมาตรควบคุมเนื่องจากการให้ความร้อนที่ระยะเวลาสั้นมาก
- กำหนดให้ไม่มีการถ่ายเทโมเมนตัมในปริมาตรควบคุม

- กำหนดให้ไม่มีอัตราความร้อนที่ออกจากปริมาตรควบคุม

หลังจากพิจารณากฎการไม่สูญหายไปของพลังงานแล้ว จึงพิจารณาอัตราการถ่ายเทความร้อนของระบบโดยอาศัยสมการโดยอาศัยสมการฟูเรียร์ ซึ่งเมื่อแก้สมการแล้วจะได้คำตอบแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (T) ภายในวัตถุ กับตำแหน่ง x, z และเวลา (t) ซึ่งในงานวิจัยนี้สามารถหาลักษณะการกระจายความร้อนได้ทั้งสิ้น 9 ลักษณะ ดังภาพ 10



ภาพ 10 การวิเคราะห์การกระจายความร้อนในแต่ละเซลล์

โดยที่



แสดงลักษณะที่ 1

แสดงลักษณะที่ 2

แสดงลักษณะที่ 3

แสดงลักษณะที่ 4

แสดงลักษณะที่ 5



แสดงลักษณะที่ 6

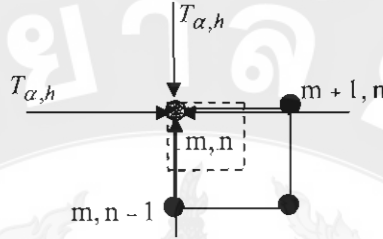
แสดงลักษณะที่ 7

แสดงลักษณะที่ 8

แสดงลักษณะที่ 9

สมการที่ 51 – 59 เป็นสมการผลต่างสืบเนื่องเชิงเวลาที่ใช้หาค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิในลักษณะที่ 1-9 ตามลำดับ เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าสมการทั้ง 9 ลักษณะ

ลักษณะที่ 1



ภาพ 11 การกระจายตัวของอุณหภูมิในลักษณะที่ 1

$$\left[\left(\frac{k\Delta y}{2\Delta x} \right) (T_{m+1,n}^p - T_{m,n}^p) \right] + \left[\left(\frac{k\Delta x}{2\Delta y} \right) (T_{m,n-1}^p - T_{m,n}^p) \right] + \left[\frac{2h\Delta y}{2} (T_\alpha - T_{m,n}^p) \right] + (2\omega E_0 E_{eff}'' |\vec{E}|^2)$$

$$= \left(\frac{\rho c \Delta x \Delta y T_{m,n}^{p+1} - T_{m,n}^p}{4\Delta \tau} \right)$$

เมื่อ $\Delta y = \Delta x$

$$T_{m,n}^{p+1} = \frac{2k\Delta y\Delta \tau}{\rho c \Delta x \Delta x^2} (T_{m+1,n}^p - T_{m,n}^p + T_{m,n-1}^p - T_{m,n}^p) + \left[\frac{4h\Delta y\Delta \tau}{\rho c \Delta x^2} (T_\alpha - T_{m,n}^p) \right]$$

$$+ \frac{8\omega \Delta \tau E_0 E_{eff}'' |\vec{E}|^2}{\rho c \Delta x^2} + T_{m,n}^p$$

คูณ k ทั้งสองข้างของสมการ

$$T_{m,n}^{p+1} = \frac{2k\Delta y\Delta \tau}{\rho c \Delta x \Delta x^2} \left(\frac{k}{k} \right) (T_{m+1,n}^p - T_{m,n}^p + T_{m,n-1}^p - T_{m,n}^p) + \frac{4h\Delta y\Delta \tau}{\rho c \Delta x^2} \left(\frac{k}{k} \right) (T_\alpha - T_{m,n}^p)$$

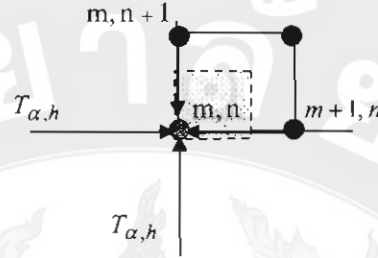
$$+ \frac{8\omega \Delta \tau E_0 E_{eff}'' |\vec{E}|^2}{\rho c \Delta x^2} \left(\frac{k}{k} \right) + T_{m,n}^p \left(\frac{k}{k} \right)$$

$$T_{m,n}^{p+1} = 2F_0 (T_{m+1,n}^p - T_{m,n}^p + T_{m,n-1}^p - T_{m,n}^p) + 4F_0 B_i (T_\alpha - T_{m,n}^p) + \frac{8\omega E_0 E_{eff}'' |\vec{E}|^2 F_0}{k} + T_{m,n}^p$$

$$T_{m,n}^{p+1} = 2F_0 (T_{m+1,n}^p + T_{m,n-1}^p + 2B_i T_\alpha) + (1 - 4F_0 - 4F_0 B_i) T_{m,n}^p + \frac{8\omega E_0 E_{eff}'' |\vec{E}|^2 F_0}{k}$$

$$T_{m,n}^{p+1} = 2F_0 (T_{m+1,n}^p + T_{m,n-1}^p + 2B_i T_\alpha) + (1 - 4F_0 B_i) T_{m,n}^p + \frac{8\omega E_0 E_{eff}'' |\vec{E}|^2 F_0}{k} \quad (51)$$

ลักษณะที่ 2



ภาพ 12 การกระจายตัวของอุณหภูมิในลักษณะที่ 2

$$\begin{aligned} & \left[\left(\frac{k\Delta y}{2\Delta x} \right) (T_{m+1,n}^p - T_{m,n}^p) \right] + \left[\left(\frac{k\Delta x}{2\Delta y} \right) (T_{m,n+1}^p - T_{m,n}^p) \right] + \left[\frac{2h\Delta y}{2} (T_\alpha - T_{m,n}^p) \right] + (2\omega E_0 E_{eff}'' |\vec{E}|^2) \\ &= \left(\frac{\rho c \Delta x \Delta y T_{m,n}^{p+1} - T_{m,n}^p}{4\Delta \tau} \right) \end{aligned}$$

เมื่อ $\Delta y = \Delta x$

$$\begin{aligned} T_{m,n}^{p+1} &= \frac{4k\Delta y\Delta \tau}{2\rho c \Delta x \Delta x^2} (T_{m+1,n}^p - T_{m,n}^p + T_{m,n+1}^p - T_{m,n}^p) + \left[\frac{4h\Delta y\Delta \tau}{\rho c \Delta x^2} (T_\alpha - T_{m,n}^p) \right]_{m,n}^p \\ &+ \frac{8\omega \Delta \tau E_0 E_{eff}'' |\vec{E}|^2}{\rho c \Delta x^2} + T_{m,n}^p \end{aligned}$$

คูณ k ทั้งสองข้างของสมการ

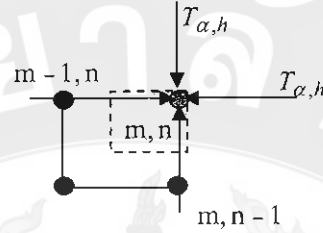
$$\begin{aligned} T_{m,n}^{p+1} &= \frac{2k\Delta y\Delta \tau}{\rho c \Delta x \Delta x^2} \left(\frac{k}{k} \right) (T_{m+1,n}^p - T_{m,n}^p + T_{m,n+1}^p - T_{m,n}^p) + \frac{4h\Delta y\Delta \tau}{\rho c \Delta x^2} \left(\frac{k}{k} \right) (T_\alpha - T_{m,n}^p) \\ &+ \frac{8\omega \Delta \tau E_0 E_{eff}'' |\vec{E}|^2}{\rho c \Delta x^2} \left(\frac{k}{k} \right) + T_{m,n}^p \left(\frac{k}{k} \right) \end{aligned}$$

$$T_{m,n}^{p+1} = 2F_0 (T_{m+1,n}^p - T_{m,n}^p + T_{m,n+1}^p - T_{m,n}^p) + 4F_0 B_i (T_\alpha - T_{m,n}^p) + \frac{8\omega E_0 E_{eff}'' |\vec{E}|^2 F_0}{k} + T_{m,n}^p$$

$$T_{m,n}^{p+1} = 2F_0 (T_{m+1,n}^p + T_{m,n+1}^p + 2B_i T_\alpha) + (1 - 4F_0 B_i) T_{m,n}^p + \frac{8\omega E_0 E_{eff}'' |\vec{E}|^2 F_0}{k}$$

(52)

ลักษณะที่ 3



ภาพ 13 การกระจายตัวของอุณหภูมิในลักษณะที่ 3

$$\begin{aligned} & \left[\left(\frac{k\Delta y}{2\Delta x} \right) (T_{m-1,n}^p - T_{m,n}^p) \right] + \left[\left(\frac{k\Delta x}{2\Delta y} \right) (T_{m,n-1}^p - T_{m,n}^p) \right] + \left[\frac{2h\Delta y}{2} (T_\alpha - T_{m,n}^p) \right] + (2\omega E_0 E_{eff}'' |\bar{E}|^2) \\ &= \left(\frac{\rho c \Delta x \Delta y T_{m,n}^{p+1} - T_{m,n}^p}{4\Delta \tau} \right) \end{aligned}$$

เมื่อ $\Delta y = \Delta x$

$$\begin{aligned} T_{m,n}^{p+1} &= \frac{4k\Delta y\Delta \tau}{2\rho c\Delta x\Delta x^2} (T_{m-1,n}^p - T_{m,n}^p + T_{m,n-1}^p - T_{m,n}^p) + \left[\frac{4h\Delta y\Delta \tau}{\rho c\Delta x^2} (T_\alpha - T_{m,n}^p) \right] \\ &+ \frac{8\omega\Delta \tau E_0 E_{eff}'' |\bar{E}|^2}{\rho c\Delta x^2} + T_{m,n}^p \end{aligned}$$

อุณหภูมิทั้งสองข้างของสมการ

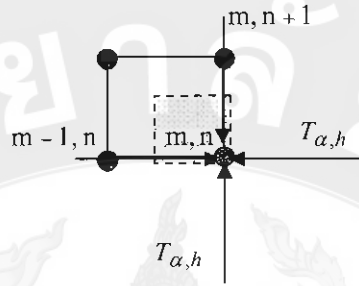
$$\begin{aligned} T_{m,n}^{p+1} &= \frac{2k\Delta y\Delta \tau}{\rho c\Delta x\Delta x^2} \left(\frac{k}{k} \right) (T_{m-1,n}^p - T_{m,n}^p + T_{m,n-1}^p - T_{m,n}^p) + \frac{4h\Delta y\Delta \tau}{\rho c\Delta x^2} \left(\frac{k}{k} \right) (T_\alpha - T_{m,n}^p) \\ &+ \frac{8\omega\Delta \tau E_0 E_{eff}'' |\bar{E}|^2}{\rho c\Delta x^2} \left(\frac{k}{k} \right) + T_{m,n}^p \left(\frac{k}{k} \right) \end{aligned}$$

$$T_{m,n}^{p+1} = 2F_0 (T_{m-1,n}^p - T_{m,n}^p + T_{m,n-1}^p - T_{m,n}^p) + 4F_0 B_i (T_\alpha - T_{m,n}^p) + \frac{8\omega E_0 E_{eff}'' |\bar{E}|^2 F_0}{k} + T_{m,n}^p$$

$$T_{m,n}^{p+1} = 2F_0 (T_{m-1,n}^p + T_{m,n-1}^p + 2B_i T_\alpha) + (1 - 4F_0 B_i) T_{m,n}^p + \frac{8\omega E_0 E_{eff}'' |\bar{E}|^2 F_0}{k}$$

(53)

ลักษณะที่ 4



ภาพ 14 การกระจายตัวของอุณหภูมิในลักษณะที่ 4

$$\begin{aligned} & \left[\left(\frac{k\Delta y}{2\Delta x} \right) (T_{m-1,n}^p - T_{m,n}^p) \right] + \left[\left(\frac{k\Delta x}{2\Delta y} \right) (T_{m,n+1}^p - T_{m,n}^p) \right] + \left[\frac{2h\Delta x}{2} (T_\alpha - T_{m,n}^p) \right] + (2\omega E_0 E_{eff}'' |\bar{E}|^2) \\ & = \left(\frac{\rho c \Delta x \Delta y T_{m,n}^{p+1} - T_{m,n}^p}{4\Delta \tau} \right) \end{aligned}$$

เมื่อ $\Delta y = \Delta x$

$$\begin{aligned} T_{m,n}^{p+1} &= \frac{4k\Delta y\Delta \tau}{2\rho c \Delta x \Delta x^2} (T_{m-1,n}^p - T_{m,n}^p + T_{m,n+1}^p - T_{m,n}^p) + \left[\frac{4h\Delta y\Delta \tau}{\rho c \Delta x^2} (T_\alpha - T_{m,n}^p) \right] \\ &+ \frac{8\omega \Delta \tau E_0 E_{eff}'' |\bar{E}|^2}{\rho c \Delta x^2} + T_{m,n}^p \end{aligned}$$

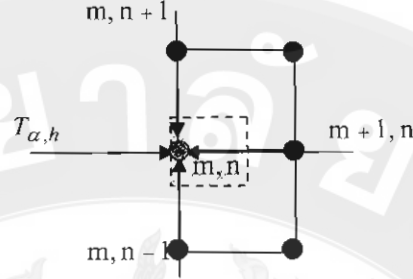
คูณ k ทั้งสองข้างของสมการ

$$\begin{aligned} T_{m,n}^{p+1} &= \frac{2k\Delta y\Delta \tau}{\rho c \Delta x \Delta x^2} \left(\frac{k}{k} \right) (T_{m-1,n}^p - T_{m,n}^p + T_{m,n+1}^p - T_{m,n}^p) + \frac{4h\Delta y\Delta \tau}{\rho c \Delta x^2} \left(\frac{k}{k} \right) (T_\alpha - T_{m,n}^p) \\ &+ \frac{8\omega \Delta \tau E_0 E_{eff}'' |\bar{E}|^2}{\rho c \Delta x^2} \left(\frac{k}{k} \right) + T_{m,n}^p \left(\frac{k}{k} \right) \end{aligned}$$

$$T_{m,n}^{p+1} = 2F_0 (T_{m-1,n}^p - T_{m,n}^p + T_{m,n+1}^p - T_{m,n}^p) + 4F_0 B_i (T_\alpha - T_{m,n}^p) + \frac{8\omega E_0 E_{eff}'' |\bar{E}|^2 F_0}{k} + T_{m,n}^p$$

$$T_{m,n}^{p+1} = 2F_0 (T_{m-1,n}^p + T_{m,n+1}^p + 2B_i T_\alpha) + (1 - 4F_0 B_i) T_{m,n}^p + \frac{8\omega E_0 E_{eff}'' |\bar{E}|^2 F_0}{k} \quad (54)$$

ลักษณะที่ 5



ภาพ 15 การกระจายตัวของอุณหภูมิในลักษณะที่ 5

$$\left[\left(\frac{k\Delta y}{2\Delta x} \right) (T_{m+1,n}^p - T_{m,n}^p) \right] + \left[\left(\frac{k\Delta x}{2\Delta y} \right) (T_{m,n+1}^p - T_{m,n}^p) \right] + \left[\left(\frac{k\Delta x}{2\Delta y} \right) (T_{m,n-1}^p - T_{m,n}^p) \right] + [h\Delta y (T_\alpha - T_{m,n}^p)] \\ + (2\omega E_0 E_{eff}'' |\vec{E}|^2) = \left(\frac{\rho c \Delta x \Delta y T_{m,n}^{p+1} - T_{m,n}^p}{4\Delta \tau} \right)$$

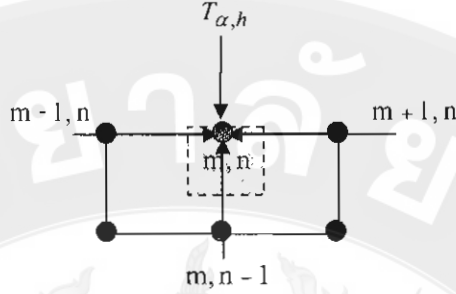
เมื่อ $\Delta y = \Delta x$

$$T_{m,n}^{p+1} = \frac{2k\Delta y\Delta \tau}{\rho c \Delta x \Delta x^2} (T_{m+1,n}^p - T_{m,n}^p) + \frac{2k\Delta y\Delta \tau}{2\rho c \Delta x \Delta x^2} (T_{m,n+1}^p - T_{m,n}^p + T_{m,n-1}^p - T_{m,n}^p) \\ + \left[\frac{2h\Delta y\Delta \tau}{\rho c \Delta x \Delta x^2} (T_\alpha - T_{m,n}^p) \right] + \frac{4\omega \Delta \tau E_0 E_{eff}'' |\vec{E}|^2}{\rho c \Delta x^2} + T_{m,n}^p$$

คูณ k ทั้งสองข้างของสมการ

$$T_{m,n}^{p+1} = \frac{2k\Delta y\Delta \tau}{\rho c \Delta x \Delta x^2} (T_{m+1,n}^p - T_{m,n}^p) + \frac{k\Delta y\Delta \tau}{\rho c \Delta x \Delta x^2} \left(\frac{k}{k} \right) (T_{m,n+1}^p - T_{m,n}^p + T_{m,n-1}^p - T_{m,n}^p) \\ + \left[\frac{2h\Delta y\Delta \tau}{\rho c \Delta x \Delta x^2} \left(\frac{k}{k} \right) (T_\alpha - T_{m,n}^p) \right] + \frac{4\omega \Delta \tau E_0 E_{eff}'' |\vec{E}|^2}{\rho c \Delta x^2} \left(\frac{k}{k} \right) + T_{m,n}^p \left(\frac{k}{k} \right) \\ T_{m,n}^{p+1} = 2F_0 (T_{m+1,n}^p - T_{m,n}^p) + F_0 (T_{m,n+1}^p - T_{m,n}^p + T_{m,n-1}^p - T_{m,n}^p) + [2F_0 B_i (T_\alpha - T_{m,n}^p)] \\ + \frac{4\omega E_0 E_{eff}'' |\vec{E}|^2 F_0}{k} + T_{m,n}^p \\ T_{m,n}^{p+1} = F_0 (2T_{m+1,n}^p - 2T_{m,n}^p + T_{m,n+1}^p - T_{m,n}^p + T_{m,n-1}^p - T_{m,n}^p) + [2F_0 B_i (T_\alpha - T_{m,n}^p)] \\ + \frac{4\omega E_0 E_{eff}'' |\vec{E}|^2 F_0}{k} + T_{m,n}^p \\ T_{m,n}^{p+1} = F_0 (2T_{m+1,n}^p + T_{m,n+1}^p + T_{m,n-1}^p - 2B_i T_\alpha) + [1 - 4F_0 + 2F_0 B_i] T_{m,n}^p + \frac{4\omega E_0 E_{eff}'' |\vec{E}|^2 F_0}{k} \quad (55)$$

ลักษณะที่ 6



ภาพ 16 การกระจายตัวของอุณหภูมิในลักษณะที่ 6

$$\left[\left(\frac{k\Delta y}{2\Delta x} \right) (T_{m-1,n}^p - T_{m,n}^p) \right] + \left[\left(\frac{k\Delta x}{2\Delta y} \right) (T_{m,n-1}^p - T_{m,n}^p) \right] + \left[\left(\frac{k\Delta x}{2\Delta y} \right) (T_{m+1,n}^p - T_{m,n}^p) \right] + [h\Delta y (T_\alpha - T_{m,n}^p)] + (2\omega E_0 E_{eff}'' |\vec{E}|^2) = \left(\frac{\rho c \Delta x \Delta y T_{m,n}^{p+1} - T_{m,n}^p}{4\Delta \tau} \right)$$

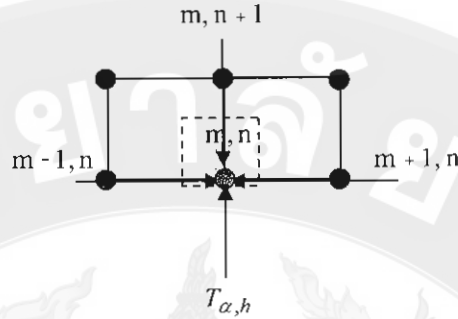
เมื่อ $\Delta y = \Delta x$

$$T_{m,n}^{p+1} = \frac{2k\Delta y\Delta \tau}{\rho c \Delta x \Delta x^2} (T_{m,n-1}^p - T_{m,n}^p) + \frac{2k\Delta y\Delta \tau}{2\rho c \Delta x \Delta x^2} (T_{m-1,n}^p - T_{m,n}^p + T_{m+1,n}^p - T_{m,n}^p) + \left[\frac{2h\Delta y\Delta \tau}{\rho c \Delta x \Delta x^2} (T_\alpha - T_{m,n}^p) \right] + \frac{4\omega \Delta \tau E_0 E_{eff}'' |\vec{E}|^2}{\rho c \Delta x^2} + T_{m,n}^p$$

อุณหภูมิทั้งสองข้างของสมการ

$$\begin{aligned} T_{m,n}^{p+1} &= \frac{2k\Delta y\Delta \tau}{\rho c \Delta x \Delta x^2} (T_{m,n-1}^p - T_{m,n}^p) + \frac{k\Delta y\Delta \tau}{\rho c \Delta x \Delta x^2} \left(\frac{k}{k} \right) (T_{m-1,n}^p - T_{m,n}^p + T_{m+1,n}^p - T_{m,n}^p) \\ &\quad + \left[\frac{2h\Delta y\Delta \tau}{\rho c \Delta x \Delta x^2} \left(\frac{k}{k} \right) (T_\alpha - T_{m,n}^p) \right] + \frac{4\omega \Delta \tau E_0 E_{eff}'' |\vec{E}|^2}{\rho c \Delta x^2} \left(\frac{k}{k} \right) + T_{m,n}^p \left(\frac{k}{k} \right) \\ T_{m,n}^{p+1} &= 2F_0 (T_{m,n-1}^p - T_{m,n}^p) + F_0 (T_{m-1,n}^p - T_{m,n}^p + T_{m+1,n}^p - T_{m,n}^p) + [2F_0 B_i (T_\alpha - T_{m,n}^p)] \\ &\quad + \frac{4\omega E_0 E_{eff}'' |\vec{E}|^2 F_0}{k} + T_{m,n}^p \\ T_{m,n}^{p+1} &= F_0 (2T_{m,n-1}^p - 2T_{m,n}^p + T_{m-1,n}^p - T_{m,n}^p + T_{m+1,n}^p - T_{m,n}^p) + [2F_0 B_i (T_\alpha - T_{m,n}^p)] \\ &\quad + \frac{4\omega E_0 E_{eff}'' |\vec{E}|^2 F_0}{k} + T_{m,n}^p \\ T_{m,n}^{p+1} &= F_0 (2T_{m,n-1}^p + T_{m-1,n}^p + T_{m+1,n}^p - 2B_i T_\alpha) + [1 - 4F_0 + 2F_0 B_i] T_{m,n}^p + \frac{4\omega E_0 E_{eff}'' |\vec{E}|^2 F_0}{k} \end{aligned}$$

ลักษณะที่ 7



ภาพ 17 การกระจายตัวของอุณหภูมิในลักษณะที่ 7

$$\left[\left(\frac{k\Delta y}{2\Delta x} \right) (T_{m,n+1}^p - T_{m,n}^p) \right] + \left[\left(\frac{k\Delta x}{2\Delta y} \right) (T_{m-1,n}^p - T_{m,n}^p) \right] + \left[\left(\frac{k\Delta x}{2\Delta y} \right) (T_{m+1,n}^p - T_{m,n}^p) \right] + [h\Delta y (T_{\alpha} - T_{m,n}^p)] \\ + (2\omega E_0 E_{eff}'' |\bar{E}|^2) = \left(\frac{\rho c \Delta x \Delta y T_{m,n}^{p+1} - T_{m,n}^p}{4\Delta \tau} \right)$$

เมื่อ $\Delta y = \Delta x$

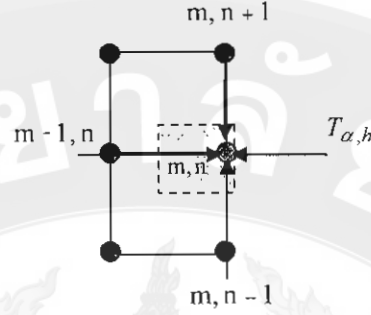
$$T_{m,n}^{p+1} = \frac{2k\Delta y\Delta \tau}{\rho c \Delta x \Delta x^2} (T_{m,n+1}^p - T_{m,n}^p) + \frac{2k\Delta y\Delta \tau}{2\rho c \Delta x \Delta x^2} (T_{m-1,n}^p - T_{m,n}^p + T_{m+1,n}^p - T_{m,n}^p) \\ + \left[\frac{2h\Delta y\Delta \tau}{\rho c \Delta x \Delta x^2} (T_{\alpha} - T_{m,n}^p) \right] + \frac{4\omega\Delta \tau E_0 E_{eff}'' |\bar{E}|^2}{\rho c \Delta x^2} + T_{m,n}^p$$

คูณ k ทั้งสองข้างของสมการ

$$T_{m,n}^{p+1} = \frac{2k\Delta y\Delta \tau}{\rho c \Delta x \Delta x^2} (T_{m,n+1}^p - T_{m,n}^p) + \frac{k\Delta y\Delta \tau}{\rho c \Delta x \Delta x^2} \left(\frac{k}{k} \right) (T_{m-1,n}^p - T_{m,n}^p + T_{m+1,n}^p - T_{m,n}^p) \\ + \left[\frac{2h\Delta y\Delta \tau}{\rho c \Delta x \Delta x^2} \left(\frac{k}{k} \right) (T_{\alpha} - T_{m,n}^p) \right] + \frac{4\omega\Delta \tau E_0 E_{eff}'' |\bar{E}|^2}{\rho c \Delta x^2} \left(\frac{k}{k} \right) + T_{m,n}^p \left(\frac{k}{k} \right) \\ T_{m,n}^{p+1} = 2F_0 (T_{m,n+1}^p - T_{m,n}^p) + F_0 (T_{m-1,n}^p - T_{m,n}^p + T_{m+1,n}^p - T_{m,n}^p) + [2F_0 B_i (T_{\alpha} - T_{m,n}^p)] \\ + \frac{4\omega E_0 E_{eff}'' |\bar{E}|^2 F_0}{k} + T_{m,n}^p \\ T_{m,n}^{p+1} = F_0 (2T_{m,n+1}^p - 2T_{m,n}^p + T_{m-1,n}^p - T_{m,n}^p + T_{m+1,n}^p - T_{m,n}^p) + [2F_0 B_i (T_{\alpha} - T_{m,n}^p)] \\ + \frac{4\omega E_0 E_{eff}'' |\bar{E}|^2 F_0}{k} + T_{m,n}^p$$

$$T_{m,n}^{p+1} = F_0 (2T_{m,n+1}^p + T_{m-1,n}^p + T_{m+1,n}^p - 2B_i T_{\alpha}) + [1 - 4F_0 + 2F_0 B_i] T_{m,n}^p + \frac{4\omega E_0 E_{eff}'' |\bar{E}|^2 F_0}{k} \quad (57)$$

ลักษณะที่ 8



ภาพ 18 การกระจายตัวของอุณหภูมิในลักษณะที่ 8

$$\left[\left(\frac{k\Delta y}{2\Delta x} \right) (T_{m-1,n}^p - T_{m,n}^p) \right] + \left[\left(\frac{k\Delta x}{2\Delta y} \right) (T_{m,n+1}^p - T_{m,n}^p) \right] + \left[\left(\frac{k\Delta x}{2\Delta y} \right) (T_{m,n-1}^p - T_{m,n}^p) \right] + [h\Delta y (T_\alpha - T_{m,n}^p)] \\ + (2\omega E_0 E_{eff}'' |\bar{E}|^2) = \left(\frac{\rho c \Delta x \Delta y T_{m,n}^{p+1} - T_{m,n}^p}{4\Delta \tau} \right)$$

เมื่อ $\Delta y = \Delta x$

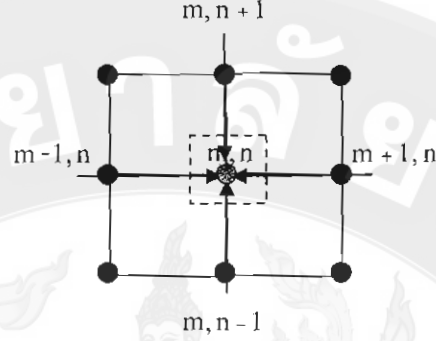
$$T_{m,n}^{p+1} = \frac{2k\Delta y\Delta \tau}{\rho c \Delta x \Delta x^2} (T_{m-1,n}^p - T_{m,n}^p) + \frac{2k\Delta y\Delta \tau}{2\rho c \Delta x \Delta x^2} (T_{m,n+1}^p - T_{m,n}^p + T_{m,n-1}^p - T_{m,n}^p) \\ + \left[\frac{2h\Delta y\Delta \tau}{\rho c \Delta x \Delta x^2} (T_\alpha - T_{m,n}^p) \right] + \frac{4\omega \Delta \tau E_0 E_{eff}'' |\bar{E}|^2}{\rho c \Delta x^2} + T_{m,n}^p$$

คูณ k ทั้งสองข้างของสมการ

$$T_{m,n}^{p+1} = \frac{2k\Delta y\Delta \tau}{\rho c \Delta x \Delta x^2} (T_{m-1,n}^p - T_{m,n}^p) + \frac{k\Delta y\Delta \tau}{\rho c \Delta x \Delta x^2} \left(\frac{k}{k} \right) (T_{m,n+1}^p - T_{m,n}^p + T_{m,n-1}^p - T_{m,n}^p) \\ + \left[\frac{2h\Delta y\Delta \tau}{\rho c \Delta x \Delta x^2} \left(\frac{k}{k} \right) (T_\alpha - T_{m,n}^p) \right] + \frac{4\omega \Delta \tau E_0 E_{eff}'' |\bar{E}|^2}{\rho c \Delta x^2} \left(\frac{k}{k} \right) + T_{m,n}^p \left(\frac{k}{k} \right) \\ T_{m,n}^{p+1} = 2F_0 (T_{m-1,n}^p - T_{m,n}^p) + F_0 (T_{m,n+1}^p - T_{m,n}^p + T_{m,n-1}^p - T_{m,n}^p) + [2F_0 B_i (T_\alpha - T_{m,n}^p)] \\ + \frac{4\omega E_0 E_{eff}'' |\bar{E}|^2 F_0}{k} + T_{m,n}^p \\ T_{m,n}^{p+1} = F_0 (2T_{m-1,n}^p - 2T_{m,n}^p + T_{m,n+1}^p - T_{m,n}^p + T_{m,n-1}^p - T_{m,n}^p) + [2F_0 B_i (T_\alpha - T_{m,n}^p)] \\ + \frac{4\omega E_0 E_{eff}'' |\bar{E}|^2 F_0}{k} + T_{m,n}^p$$

$$T_{m,n}^{p+1} = F_0 (2T_{m-1,n}^p + T_{m,n+1}^p + T_{m,n-1}^p - 2B_i T_\alpha) + [1 - 4F_0 + 2F_0 B_i] T_{m,n}^p + \frac{4\omega E_0 E_{eff}'' |\bar{E}|^2 F_0}{k} \quad (58)$$

ลักษณะที่ 9



ภาพ 19 การกระจายตัวของอุณหภูมิในลักษณะที่ 9

$$\begin{aligned}
 & k \left[\left(\frac{\Delta y}{\Delta x} \right) (T_{m+1,n}^p + T_{m-1,n}^p - 2T_{m,n}^p) \right] + \left[\left(\frac{\Delta x}{\Delta y} \right) (T_{m,n+1}^p + T_{m,n-1}^p - 2T_{m,n}^p) \right] + 2\omega E_0 E_{eff}'' |\vec{E}|^2 \\
 & = \left(\frac{\rho c \Delta x \Delta y T_{m,n}^p - T_{m,n}^p}{\Delta \tau} \right) \\
 & \text{เมื่อ } \Delta x = \Delta y \\
 & k(T_{m+1,n}^p + T_{m-1,n}^p + T_{m,n+1}^p + T_{m,n-1}^p + 4T_{m,n}^p) + \left(2\omega E_0 E_{eff}'' |\vec{E}|^2 \right) = \left(\frac{\rho c \Delta x^2 T_{m,n}^{p+1} - T_{m,n}^p}{\Delta \tau} \right) \\
 & T_{m,n}^{p+1} = \frac{\alpha \Delta \tau}{\Delta x^2} (T_{m+1,n}^p + T_{m-1,n}^p + T_{m,n+1}^p + T_{m,n-1}^p - 4T_{m,n}^p) + \left(2\alpha \Delta \tau \omega E_0 E_{eff}'' |\vec{E}|^2 \right) - T_{m,n}^p \\
 & T_{m,n}^{p+1} = \frac{\alpha \Delta \tau}{\Delta x^2} (T_{m+1,n}^p + T_{m-1,n}^p + T_{m,n+1}^p + T_{m,n-1}^p) + \left(1 - \frac{4\alpha \Delta \tau}{\Delta x^2} \right) T_{m,n}^p + \left(\frac{2\alpha \Delta \tau \omega E_0 E_{eff}'' |\vec{E}|^2}{\Delta x^2} \right) \\
 & T_{m,n}^{p+1} = F_0 (T_{m+1,n}^p + T_{m-1,n}^p + T_{m,n+1}^p + T_{m,n-1}^p) + (1 - 4F_0) T_{m,n}^p + 2F_0 \omega E_0 E_{eff}'' |\vec{E}|^2 \quad (59)
 \end{aligned}$$

การทดสอบเพื่อหาอุณหภูมิจากการทดลองจริง

การหาอุณหภูมิจากการทดลองทำโดยการจัดเตรียมชุดถ่ายภาพความร้อนดังภาพ 20 โดยได้เชื่อมต่อกล้องตรวจจับความร้อน (thermal imaging camera) ไว้กับเครื่องบันทึกภาพวีซีดี ที่เชื่อมต่ออยู่กับโทรทัศน์ จากนั้นนำหน่วยไม้อัดที่ติดตั้งให้ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และความยาวเท่ากับ 9.8 ± 0.2 และ 94 ± 0.1 มิลลิเมตรตามลำดับ แล้วนำไปจัดเรียงไว้ในบรรจุภัณฑ์ที่จัดเตรียมไว้ (ภาพ 21) นำหน่วยไม้อัดภายในบรรจุภัณฑ์ให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟเป็นเวลา 5

วินาที วางตะแกรงเหล็กขนาดกริด 5x5 มิลลิเมตร ที่เตรียมไว้บนบรรจุภัณฑ์เพื่อให้ภาพถ่ายที่ได้มีลักษณะคล้ายคลึงกับภาพที่ได้จากการจำลองแล้วนำไปถ่ายภาพความร้อนยังอุปกรณ์ที่จัดเตรียมไว้ ภาพ 22 เมื่อจับภาพความร้อนของหน่อไม้ฝรั่งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟแล้วก็นำภาพที่ได้ไปประมวลผลอุณหภูมิต่อไป



ภาพ 20 ชุดถ่ายภาพความร้อน



ภาพ 21 บรรจุภัณฑ์หน่อไม้ฝรั่ง



ภาพ 22 บรรจุภัณฑ์หน่อไม้ฝรั่งกับชุดถ่ายภาพความร้อน

ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง CST2006® และ FDTD

วัตถุประสงค์ของการศึกษาในหัวข้อนี้ เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทั้งสองโดยการเปรียบเทียบผลระหว่างอุณหภูมิที่ได้จากการคำนวณ FDTD กับผลจากแบบจำลองกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองให้ความร้อนหน่อไม้ฝรั่งในตู้อบไมโครเวฟ ว่าผลที่ได้เป็นไปในทางเดียวกันหรือไม่ การหาค่าอุณหภูมิจากแบบจำลองสามารถหาได้ โดยทำการจำลองเพื่อหาค่าการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าในโปรแกรม CST2006® จากนั้น นำค่าสนามไฟฟ้าที่ได้จากแบบจำลองมาใส่ชุดสมการ FDTD ที่ใช้ในการแปลงค่าสนามไฟฟ้าเป็นค่าอุณหภูมิ โดยค่าคงที่ที่ใช้ในชุดสมการแสดงดังตาราง 2

ตาราง 2 ค่าคงที่ที่ใช้ในการแปลงค่าสนามไฟฟ้าเป็นค่าอุณหภูมิ

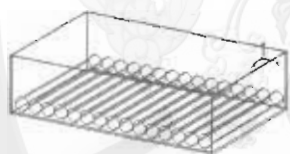
	ค่าคงที่	หน่วย	เอกสารอ้างอิง
อุณหภูมิเริ่มต้น (T_0)	28	°C	-
อุณหภูมิสภาพแวดล้อมภายนอก (T_α)	28	°C	-
ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อน (α)	1.81×10^{-4}	W m ² /kJ	โชคชัย, 2548
สภาพยอมทางไฟฟ้าของอากาศอิสระ (ϵ_0)	8.854×10^{-12}	F/m	โชคชัย, 2548
ค่าตัวประกอบการสูญเสียยังผลของหน่อไม้ฝรั่ง (Dielectric constant) (ϵ'_{eff})	71	-	Rosenthal, 1992
ค่าความถี่ที่ใช้	2.45	GHz	โชคชัย, 2548
ค่าความจุความร้อนจำเพาะของหน่อไม้ฝรั่ง	4.03	kJ/kg°C	Anderson, 2002
ค่าการนำความร้อนของหน่อไม้ฝรั่ง	0.409	W/m°C	Anderson, 2002
ค่าความหนาแน่นหน่อไม้ฝรั่ง	5.6×10^{-2}	kg/m ³	Anderson, 2002
ค่าการพาความร้อนของอากาศ	10	W /m °C	โชคชัย, 2548
อัตราการส่งผ่านความร้อนสู่สภาพแวดล้อมภายนอก	1.54×10^{10}	W/ m ³ °C	โชคชัย, 2548
dx	2	mm	-
dy	2	mm	-
เวลา	5	s	-

การวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

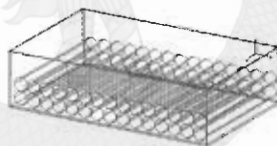
เมื่อทราบค่าอุณหภูมิที่ได้จากการทดสอบจริงและค่าที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม CST2006® จะได้ภาพอุณหภูมิในระนาบที่ทำการทดสอบ ซึ่งแสดงอยู่ในลักษณะของจุดอุณหภูมิของหลังจากนั้นนำภาพอุณหภูมิที่ได้แปลงเป็นภาพเส้นระดับ (contour) ของอุณหภูมิ แล้วนำค่าอุณหภูมิของทั้งสองวิธีมาเปรียบเทียบค่ากัน

การศึกษาขนาดของโหลดด้วยโปรแกรม CST2006®

การศึกษาขนาดของโหลดด้วยโปรแกรม CST2006® เพื่อหาค่าโหลดที่เหมาะสมในการให้ความร้อนหน่อไม้ฝรั่งด้วยไมโครเวฟ เพื่อจัดเก็บข้อมูลค่าสนามไฟฟ้าและ ค่าความหนาแน่นของการสูญเสียกำลังงานจากแบบจำลองที่การทดลองต่าง ๆ โดยการจำลองจะแบ่งออกเป็น 3 การทดลอง



(ก) กรณีหน่อไม้ฝรั่ง 1 ชั้น



(ข) กรณีหน่อไม้ฝรั่ง 2 ชั้น



(ค) กรณีหน่อไม้ฝรั่ง 3 ชั้น

ภาพ 23 โหลดบรรจุภัณฑ์หน่อไม้ฝรั่งที่ใช้ในการจำลอง

การจำลองปรับแต่งคุณสมบัติบรรจุภัณฑ์

การจำลองปรับแต่งคุณสมบัติบรรจุภัณฑ์ด้วยโปรแกรม CST2006® เพื่อจำลองปรับแต่งคุณสมบัติเชิงไมโครเวฟของบรรจุภัณฑ์เพื่อให้การกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟภายในหน่อไม้ฝรั่งในบรรจุภัณฑ์มีความสม่ำเสมอมากขึ้น การจำลองจะแบ่งออกเป็น 2 กรณี ดังต่อไปนี้

1. การจำลองให้บรรจุภัณฑ์ที่มีสมบัติไดอิเล็กทริกใกล้เคียงกับค่าไดอิเล็กทริกของพลาสติกชนิดโพลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) โดยมีค่า dielectric constant (ϵ') และ dielectric loss (ϵ'') เท่ากับ 2.3 และ 0.003 ตามลำดับ (วิลโล, 2543)

2. การจำลองให้บรรจุภัณฑ์ที่มีสมบัติไดอิเล็กทริกใกล้เคียงกับค่าไดอิเล็กทริกของ หน่อไม้ฝรั่งซึ่งมีค่า dielectric constant (ϵ') และ dielectric loss (ϵ'') เท่ากับ 71 และ 16 ตามลำดับ (Rosenthal, 1992)

สถานที่ดำเนินการวิจัย

การทดลองในภาคปฏิบัติได้ดำเนินการที่ ภาควิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ส่วนการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม CST2006® ได้ดำเนินการที่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร

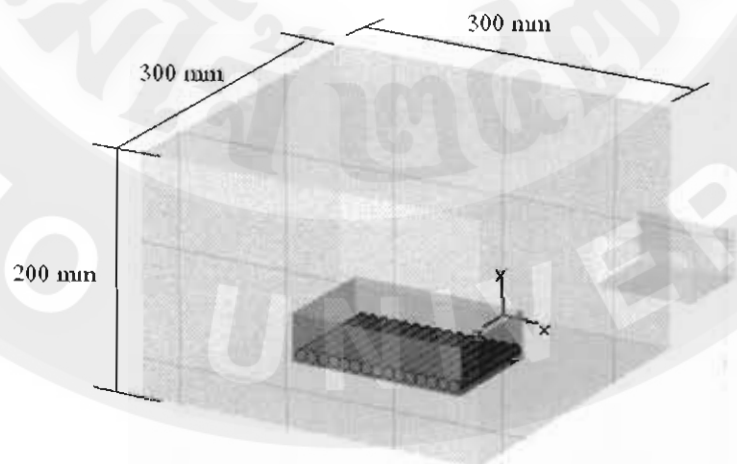
บทที่ 4

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

บทนี้เป็นการนำเสนอผลการวิจัยและวิจารณ์ผล ประกอบด้วยผลศึกษาการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟภายในตู้ไมโครเวฟแบบครัวเรือน และผลการจำลองปรับแต่งคุณสมบัติของบรรจุภัณฑ์ ซึ่งมีสาระสำคัญดังนี้

ผลการสร้างแบบจำลองในโปรแกรม CST2006®

ในการสร้างแบบจำลองห่อไม้ฝรั่งภายในบรรจุภัณฑ์ด้วยโปรแกรม CST2006® ได้สร้างแบบจำลองห่อไม้ฝรั่งภายในบรรจุภัณฑ์วาง ในตู้ไมโครเวฟที่มีรูปร่างเป็นกล่องสี่เหลี่ยมที่มีมิติ 300x300x200 มิลลิเมตร (กว้างxยาวxสูง) และห่อไม้ฝรั่งมีขนาดเท่ากับ 85x70x40 มิลลิเมตร (กว้างxยาวxสูง) โดยกำหนดให้ พื้นหลังของแบบจำลองเป็นตัวนำสมบูรณ์ บรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในแบบจำลองมีลักษณะเป็นกล่องสี่เหลี่ยมโดยมีขนาดเท่ากับ 100x150x40 มิลลิเมตร (กว้างxยาวxสูง) ส่วนห่อไม้ฝรั่งในบรรจุภัณฑ์กำหนดให้มีลักษณะเป็นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และความยาวเท่ากับ 9.8 ± 0.2 และ 94 ± 0.1 มิลลิเมตร ตามลำดับ



ภาพ 24 แบบจำลองห่อไม้ฝรั่งภายในบรรจุภัณฑ์ด้วยโปรแกรม CST2006®

เมื่อนำแบบจำลองในภาพ 26 มาทำการจำลองจะได้ลักษณะการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าดังภาพที่ 25 โดยจะเห็นได้ว่ามีสนามไฟฟ้ากระจายทั่วทั้งตู้ไมโครเวฟ ดังนั้นการสร้างแบบจำลองของตู้ไมโครเวฟที่มีลักษณะเป็นตู้สี่เหลี่ยมดังภาพ 24 สามารถใช้ในการประมวลผลแบบจำลองได้



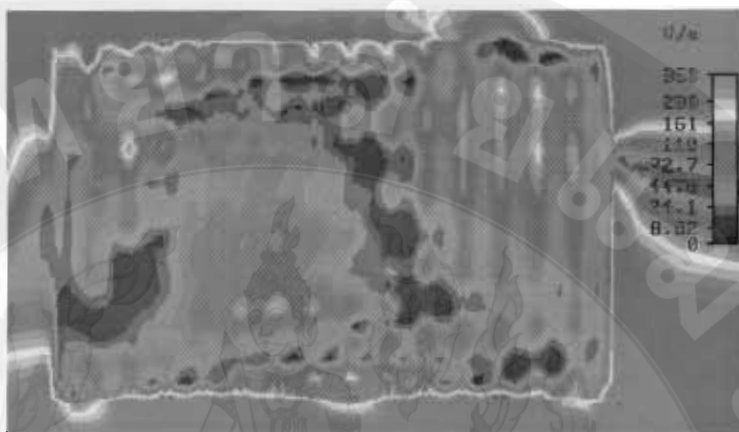
ภาพ 25 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้า (E-field) ของแบบจำลองห่อไม้ฝรั่งภายในบรรจุภัณฑ์

ผลการศึกษาการหาขนาดกริดที่เหมาะสม

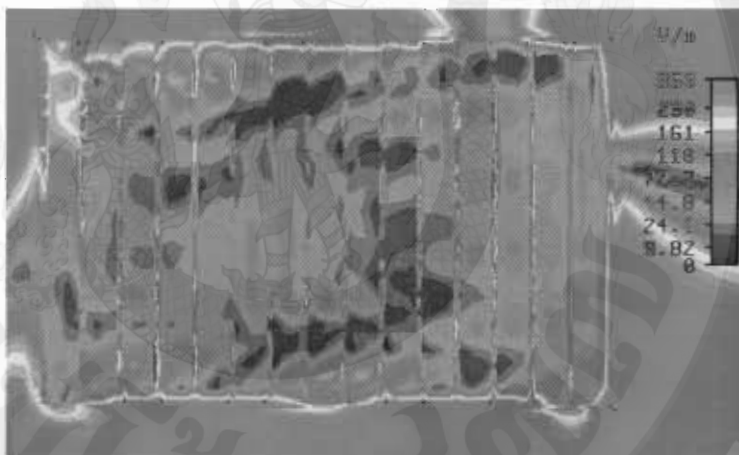
การเปลี่ยนแปลงขนาดของกริดมีผลต่อการคำนวณเนื่องจากความละเอียดของกริดและจำนวนของกริดที่ใช้คำนวณมีผลต่อความถูกต้องแม่นยำในการประมวลผล ถ้าขนาดของกริดใหญ่เกินไปก็จะทำให้การประมวลผลมีการคลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริง และหากขนาดของกริดเล็กมากไปก็จะใช้ระยะเวลาในการประมวลผลนาน โดยจากการศึกษาการคำนวณกริดใน 3 กรณี ได้แก่ ขนาดของกริดที่เท่ากับ 1.4, 0.7 และ 0.47 มิลลิเมตร พบว่าการคำนวณจะให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกันเล็กน้อย และยังใช้เวลาที่แตกต่างกันอีกด้วย ขนาดของกริดที่เท่ากับ 1.4, 0.7 และ 0.47 มิลลิเมตรจะใช้เวลาในการคำนวณที่ 0.5, 2 และ 8 ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งจากการจำลองด้วยขนาดกริดที่ต่างกันจะให้ลักษณะของค่าสนามไฟฟ้าและ ค่ากำลังงานสูญเสียดังภาพ 26 และ 27

จากการทดสอบค่าสนามไฟฟ้าพบว่าลักษณะสเกลสีที่ได้จากการจำลองสนามไฟฟ้ามีสีแดงจนถึงสีน้ำเงินตามค่าของสนามไฟฟ้าที่ได้จากค่าสนามไฟฟ้ามากไปจนถึงค่าสนามไฟฟ้าเป็นศูนย์ (ไม่มีการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าในจุดนั้น) จากผลการทดสอบค่ากำลังงานสูญเสีย (Power loss density) พบว่าหากค่ากำลังงานสูญเสียมากจะให้ลักษณะเป็นสีแดง โดยจะมีค่ากำลังงานสูญเสียประมาณ 15,000 วัตต์ต่อ ตารางเมตร ค่าสีจะลดทอนลงไปตามระดับค่ากำลังงานสูญเสียต่าง ๆ กัน ซึ่งสีน้ำเงินเป็นแถบสีที่มีค่ากำลังงานสูญเสียเป็นศูนย์ ค่ากำลังงานสูญเสีย

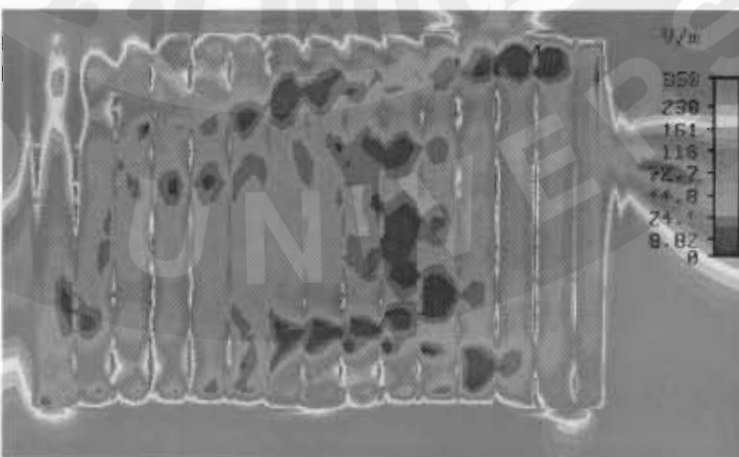
หมายถึง ค่าพลังงานไมโครเวฟมีการกระจายตัวของพลังงานไปสู่วัสดุ โดยพลังงานไมโครเวฟที่หายไปจะถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อนภายในวัสดุนั้นเอง (Datta and Ramaswamy, 2001)



(ก)

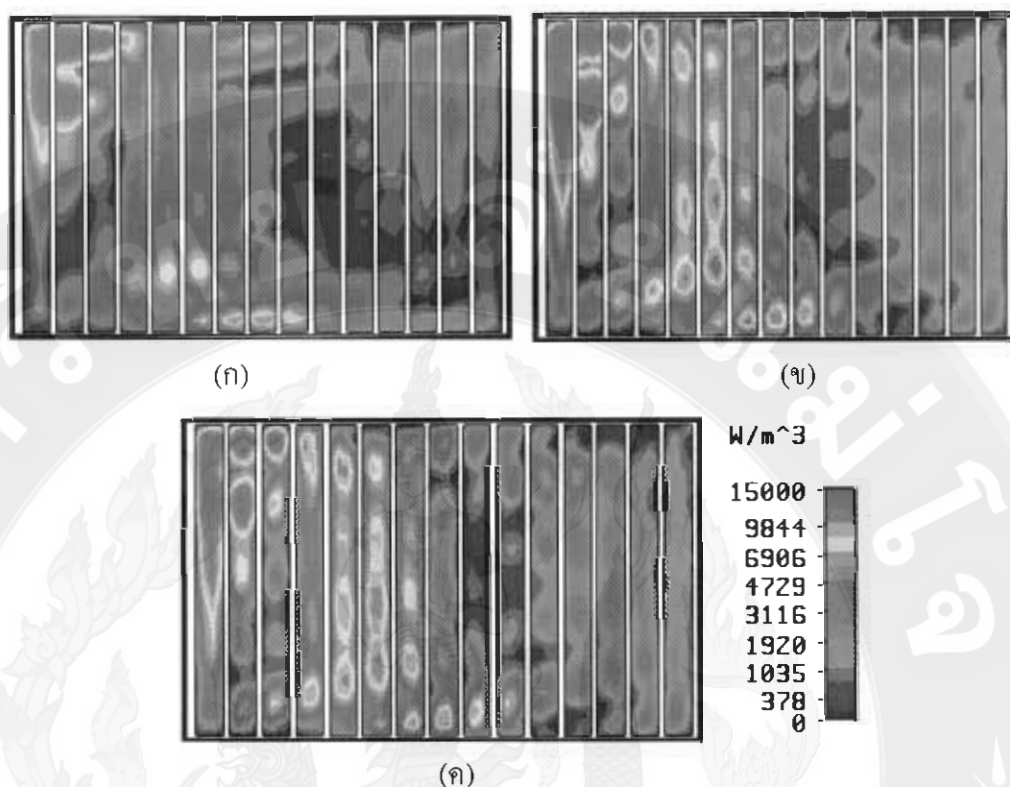


(ข)



(ค)

ภาพ 26 ภาพสนามไฟฟ้า (E-field) ที่ที่ได้จากการจำลองด้วย CST2006[®] ด้วยขนาดกริดที่แตกต่างกัน ที่ระยะนาบ $y = 20$ ก) 1.4 มิลลิเมตร ข) 0.7 มิลลิเมตร และ ค) 0.47 มิลลิเมตร



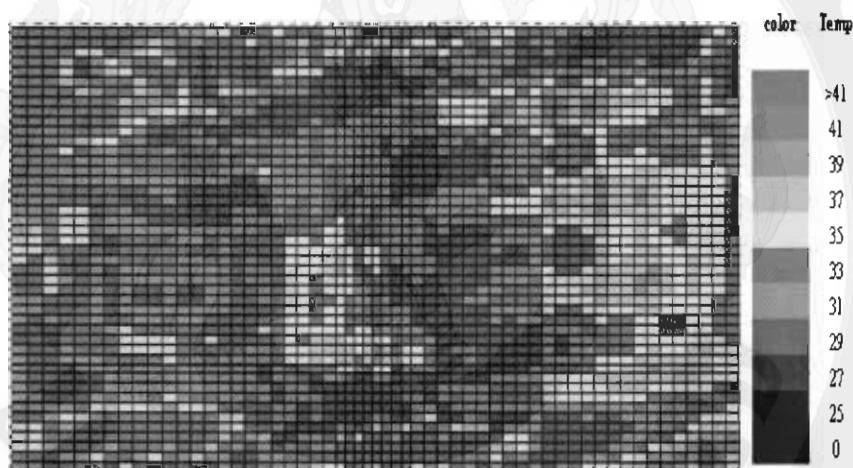
ภาพ 27 ภาพกำลังงานสูญเสีย (Power loss density) ที่ได้จากการจำลองด้วย CST2006[®] ด้วยขนาดกริดที่แตกต่างกันที่ระนาบ ก) 1.4 มิลลิเมตร ข) 0.7 มิลลิเมตร และ ค) 0.47 มิลลิเมตร

จากภาพ 26 จะเห็นได้ว่าลักษณะการกระจายตัวของสนามไฟฟ้า (e-field) ในภาพ ก ให้ลักษณะการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าที่แตกต่างจากภาพ ข และ ค โดยที่ลักษณะภาพ ข และ ค มีความแตกต่างกันน้อยมาก ภาพ 26ก ลักษณะการกระจายตัวของสนามไฟฟ้า แสดงให้เห็นว่าภาพ ก สนามไฟฟ้ามีความเข้มตรงกลางและมุมด้านขวาบน แต่ภาพ 26ข และ 26ค มีสนามไฟฟ้าเข้มตรงกลาง และมุมซ้ายบน เนื่องจากภาพ 26ก มีลักษณะสนามไฟฟ้าที่แตกต่างจากภาพ 26ข และ 26ค ส่วนภาพ 26ข และ 26ค มีลักษณะใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าที่ขนาดกริด 0.7 มิลลิเมตร และ 0.47 มิลลิเมตร ของภาพ 26ข และ 26ค สามารถใช้ในการจำลองได้ เนื่องจากให้ผลลัพธ์ในการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าที่เหมือนกัน แต่ทั้งนี้พบว่าภาพ 26ค ใช้เวลาในการคำนวณนานกว่า ภาพ 26ข ถึง 4 เท่า ซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองเวลาในการจำลองในขณะที่ให้ลักษณะภาพการจำลองที่แตกต่างกันน้อยมาก ซึ่งผลการจำลองที่ได้นี้จำลองเป็นไปในทางเดียวกันกับผลที่ได้จากการจำลองลักษณะค่ากำลังงานสูญเสีย (power loss density) ภาพ 27 ก ข และ ค ดังนั้นในการคำนวณขั้นต่อไปของงานวิจัยนี้จึงได้ทำการเลือกใช้กริดที่มีขนาด 0.7 มิลลิเมตร

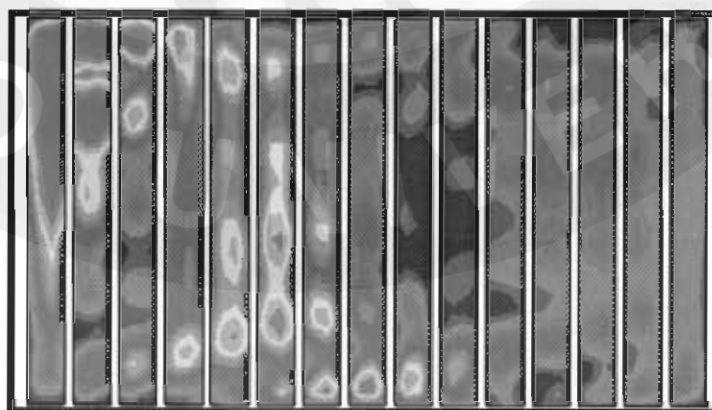
ผลการออกแบบชุดสมการ FDTD ไฟฟ้า

ให้อยู่ในเทอมของอุณหภูมิ

ในการออกแบบชุดสมการ FDTD เพื่อแปลงค่าสนามไฟฟ้าจากการจำลองด้วยโปรแกรม CST2006® ให้อยู่ในเทอมของอุณหภูมิโดยใช้โปรแกรม Visual Basic for Applications™ (VBA) ใน Microsoft Excel™ ซึ่งลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ได้หลังจากแปลงค่าข้อมูลแล้ว แสดงดังภาพ 28 โดย Source code ที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมแสดงในภาคผนวก ข. โดยค่าอุณหภูมิแสดงตามค่าสีที่กำหนดไว้



ภาพ 28 ลักษณะการกระจายอุณหภูมิที่ได้จากโปรแกรม Visual Basic for Applications™ (VBA)



ภาพ 29 ภาพกำลังงานสูญเสียที่ได้จากการจำลองด้วย CST2006®

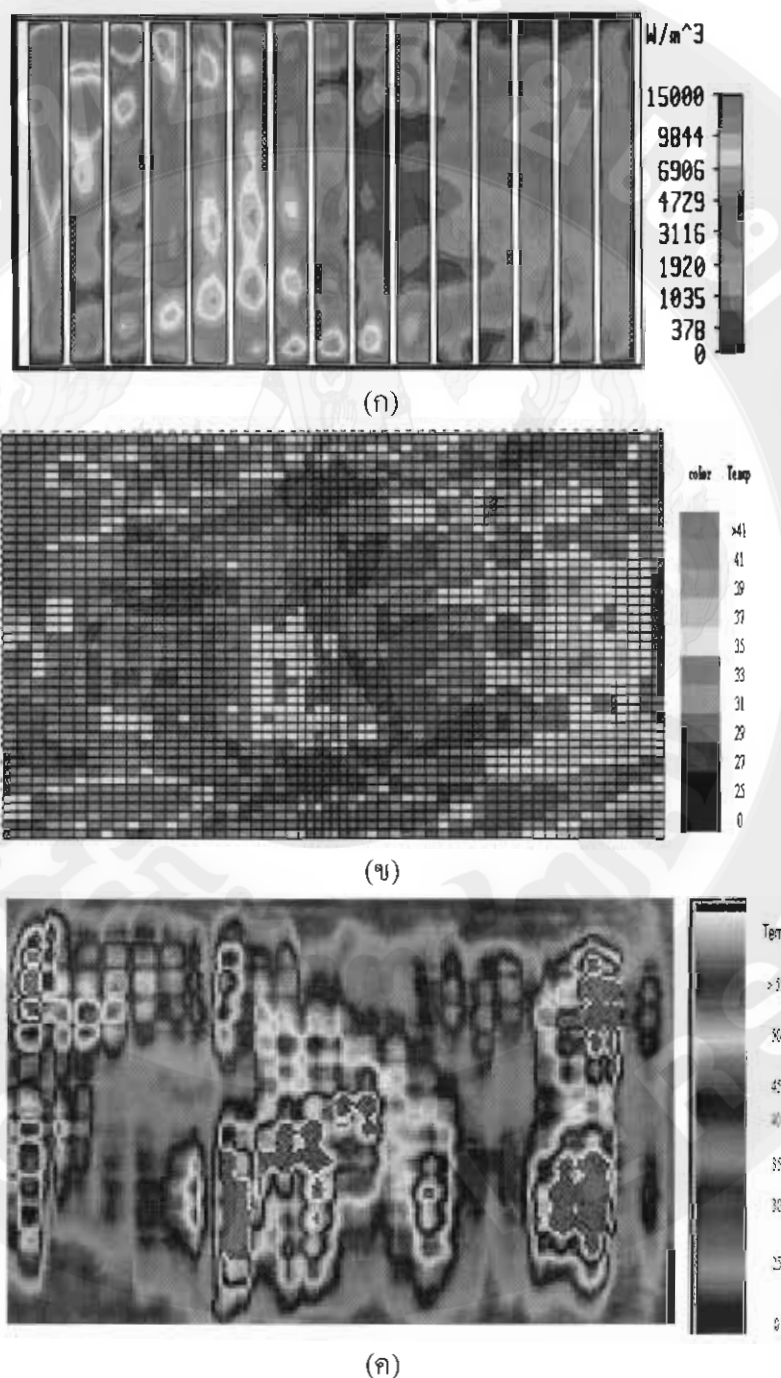
จากภาพ 28 จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้ชุดสมการ FDTD แปลงค่าสนามไฟฟ้า (e-field) ให้อยู่ในเทอมของอุณหภูมิ จะเห็นได้ว่าชุดสมการสามารถแปลงค่าได้อย่างถูกต้องเนื่องจากจะเห็นว่าภาพการกระจายอุณหภูมิที่ได้จากการแปลงค่านั้นมีคล้ายคลึงกับภาพกำลังงานสูญเสีย (power loss density) (ภาพ 29) อีกทั้งยังพบว่าผลการคำนวณอุณหภูมิเทียบกับการคำนวณด้วยโปรแกรมมีค่าเท่ากัน

ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

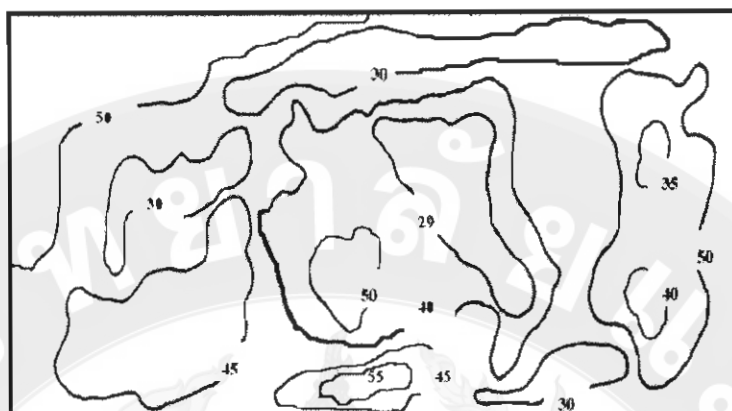
ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองนั้น มีวิธีการตรวจสอบโดยการนำค่าอุณหภูมิที่ได้มาจากการคำนวณการวิเคราะห์การกระจายตัวของความร้อนโดยวิธีผลต่างสืบเนื่องเชิงเวลา (FDTD) มาเปรียบเทียบกับค่าอุณหภูมิที่ได้จากกล้องจับภาพความร้อน โดยผลที่ได้จากกล้องจับภาพความร้อน (ภาพ 30 ก) มีความสอดคล้องกับผลของค่ากำลังงานสูญเสีย (ภาพ 30 ก) และการกระจายตัวของอุณหภูมิ (ภาพ 30 ข) ในการจำลอง โดยจากภาพจะเห็นได้ว่าภาพที่ได้จากการจำลองมีการกระจายตัวของความร้อนเกิดขึ้นสามจุดใหญ่ คือ บริเวณด้านบนซ้าย บริเวณตรงกลาง และบริเวณด้านขวาของภาพซึ่งเป็นตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับตำแหน่งของภาพที่ได้จากกล้องจับภาพความร้อนจากการทดสอบจริง

จากภาพเห็นระดับของอุณหภูมิในการจำลองค่าอุณหภูมิด้วยวิธี FDTD และเห็นระดับของอุณหภูมิจากกล้องจับภาพความร้อนในการทดสอบจริง (ภาพ 31 ก และ ข) จะเห็นได้ว่าทั้งสองภาพมีบริเวณร้อนและเย็นใกล้เคียงกัน บริเวณที่ร้อนจะอยู่บริเวณด้านบนซ้าย ซึ่งมีค่าอุณหภูมิที่คำนวณได้จากวิธี FDTD และอุณหภูมิที่คำนวณได้ในการทดสอบจริง มีค่าอยู่ในระหว่าง 45 ถึง 50 องศาเซลเซียส บริเวณส่วนกลางของภาพมีค่าอุณหภูมิที่คำนวณได้จากวิธี FDTD และอุณหภูมิที่คำนวณได้ในการทดสอบจริงเท่ากับ 50 และ 55 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และบริเวณด้านขวาของภาพ พบว่ามีค่าอุณหภูมิที่คำนวณได้จากวิธี FDTD และ อุณหภูมิที่คำนวณได้ในการทดสอบจริงเท่ากับ 50 องศาเซลเซียส ส่วนบริเวณเย็นจะปรากฏอยู่ในส่วนด้านล่างของบริเวณร้อนด้านซ้าย ส่วนบริเวณอื่นๆ ก็มีลักษณะการกระจายอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกัน ส่วนในบริเวณอื่น ๆ ที่อุณหภูมิมีลักษณะไม่เหมือนกันอาจเป็นผลมาจากขนาดของหน่วยไมล์ฟรังก์และข้อจำกัดทางการวัดอุณหภูมิในการทดสอบจริงซึ่งไม่สามารถตรวจวัดแบบ Real time ได้ นอกจากนี้ยังมีข้อจำกัดต่าง ๆ ในเชิงทฤษฎี เช่น ความคลาดเคลื่อนของการประมวลผลเชิงตัวเลข Round of error เป็นต้น อย่างไรก็ตามการจำลองการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟด้วยโปรแกรม CST2006® ก็สามารถให้ผลลัพธ์

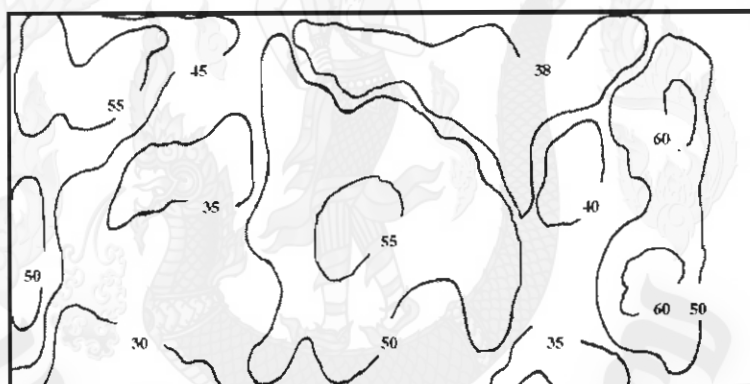
ของการกระจายคลื่นเป็นไปในทางเดียวกันกับผลการทดลอง ดังนั้นจึงสามารถใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์การกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟในงานวิจัยได้



ภาพ 30 ภาพด้านบน (เพลน x-z ที่ $y = 20$ มม.) ของการให้ความร้อนหน้าไม้ฝรั่งจากการทดสอบจริง และจากแบบจำลอง (ก) กำลังงานสูญเสีย (W/m^2) (ข) การจำลองค่าอุณหภูมิด้วยวิธี FDTD และ (ค) ภาพจากกล้องจับภาพความร้อนในการทดสอบจริง



(ก)



(ข)

ภาพ 31 ภาพเส้นระดับของอุณหภูมิ

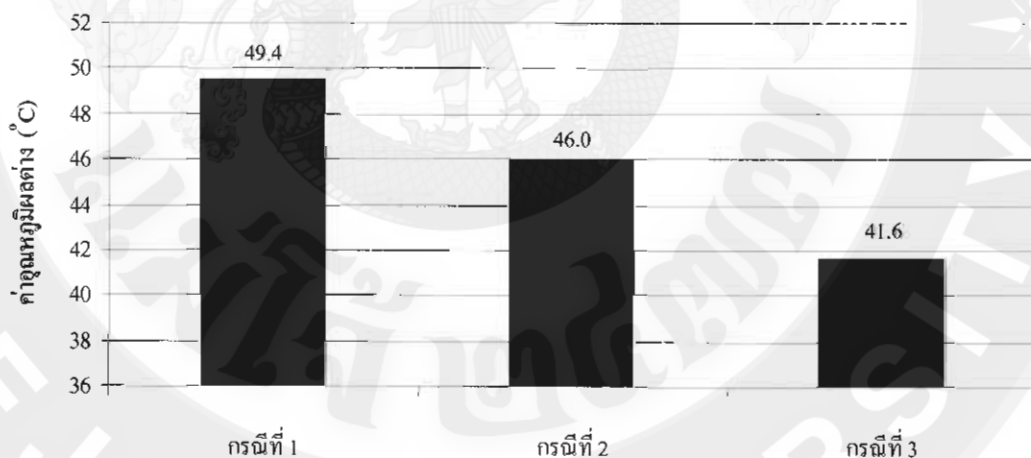
(ก) ภาพเส้นระดับของอุณหภูมิของการจำลองค่าอุณหภูมิด้วยวิธี FDTD

(ข) ภาพเส้นระดับของอุณหภูมิจากกล้องจับภาพความร้อนในการทดสอบจริง

ผลการศึกษาภาระโหลดที่เหมาะสมในการให้ความร้อน
หม้อไอน้ำฝรังด้วยไมโครเวฟ

การวิเคราะห์ความสม่ำเสมอของการกระจายอุณหภูมิในการหาค่าโหลดที่เหมาะสม
คำนวณจากผลต่างของอุณหภูมิในจุดร้อนและจุดเย็นของหม้อไอน้ำฝรังชั้นบนสุดในบรรจุภัณฑ์ โดย
สาเหตุที่เลือกระนาบผิวหน้าด้านบนสุดเนื่องจากในการถ่ายภาพด้วยกล้องจับภาพความร้อนนั้น
สามารถถ่ายภาพระนาบผิวหน้าด้านบนได้สะดวกและรวดเร็วที่สุด ซึ่งจะทำให้ได้ค่าอุณหภูมิ

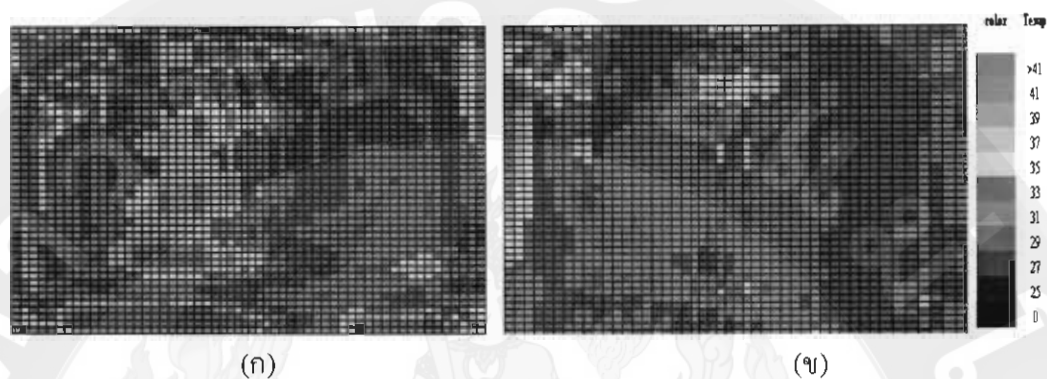
แน่นอนกว่าที่ระนาบอื่น ๆ โดยจากการทดลองหาขนาดของโหลดที่เหมาะสมพบว่าการให้โหลดที่แตกต่างกันจะให้ผลในการส่งผ่านคลื่น และการดูดซับคลื่นที่แตกต่างกัน โดยพบว่าหากให้โหลดในการทดลองหนึ่งชั้น(กรณีที่ 1) คลื่นก็จะส่งผ่านบรรจุภัณฑ์เข้าไปดูดซับในหน่อไม้ฝรั่ง ได้มากกว่าการให้โหลดในการทดลองที่ 2 หรือ 3 ชั้น เนื่องจากโหลดน้อยทำให้คลื่นเข้าไปดูดซับในน้ำอิสระภายในหน่อไม้ฝรั่งได้มากกว่าจึงทำให้หน่อไม้ฝรั่งในบรรจุภัณฑ์ที่บรรจุหน่อไม้ฝรั่ง 1 ชั้น มีอุณหภูมิสูงกว่าหน่อไม้ฝรั่ง 2 หรือ 3 ชั้น ในบรรจุภัณฑ์ จากภาพ 32 แสดงอุณหภูมิต่างในกรณีที่ 1, 2 และ 3 (กรณีที่ 1 หน่อไม้ฝรั่ง 1 ชั้น กรณีที่ 2 หน่อไม้ฝรั่ง 2 ชั้น และกรณีที่ 3 หน่อไม้ฝรั่ง 3 ชั้น) ซึ่งอุณหภูมิต่างมีค่าเท่ากับ 49.4, 46.0 และ 41.6 องศาเซลเซียส ตามลำดับ หากอุณหภูมิต่างมีมากจะทำให้หน่อไม้ฝรั่งหลังให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟไม่ได้คุณภาพ สำหรับกรณีที่ 1 การกระจายตัวของอุณหภูมิอยู่ในช่วง 28.2 ถึง 77.6 องศาเซลเซียสซึ่งเป็นการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นกรณีที่ 1 จึงไม่เหมาะที่ใช้ในการจำลองการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟเนื่องจากมีช่วงกว้างในการกระจายตัวของอุณหภูมิ



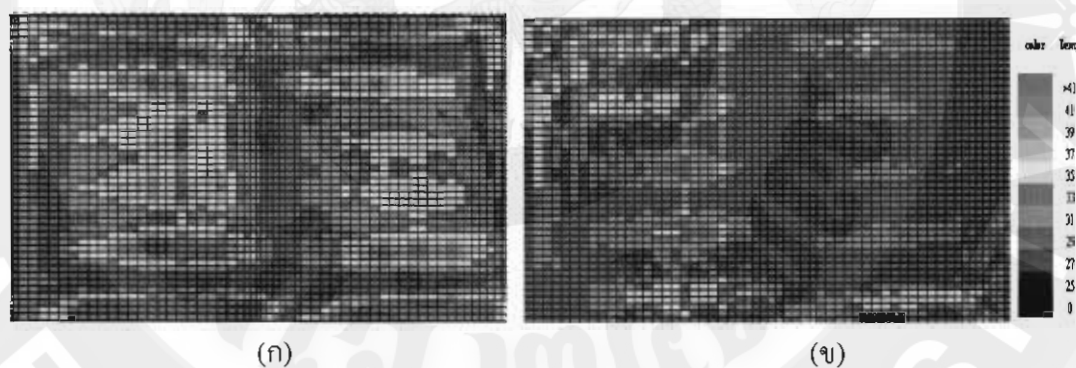
ภาพ 32 อุณหภูมิต่างระหว่างจุดร้อนและจุดเย็นที่หน่อไม้ฝรั่ง ณ ระนาบผิวหน้าด้านบนในบรรจุภัณฑ์ที่โหลดของหน่อไม้ฝรั่งต่าง ๆ กัน

จากภาพ 33 และ ภาพ 34 แสดงอุณหภูมิต่างระหว่างระนาบที่มีอุณหภูมิสูงสุดและอุณหภูมิต่ำสุดในกรณี 2 ชั้น และ 3 ชั้น อุณหภูมิจะอยู่ในช่วง 28.0 ถึง 75.6 และ 28.0 ถึง 105.8 ตามลำดับ โดยจะเห็นได้ว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิในกรณี 2 ชั้น จะมีความสม่ำเสมอมากกว่า

กรณี 3 ชั้น ดังนั้นกรณีการบรรจุหน่อไม้ฝรั่ง 2 ชั้น จึงมีความเหมาะสมที่นำมาใช้พิจารณาในแบบจำลองการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟของหน่อไม้ฝรั่งในบรรจุภัณฑ์ต่อไป



ภาพ 33 ค่าอุณหภูมิคำนวณด้วยวิธี FDTD ระนาบ x-z ของการกระจายอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) ของหน่อไม้ฝรั่ง 2 ชั้น (ก) $y = 26$ มิลลิเมตร และ (ข) $y = 30$ มิลลิเมตร

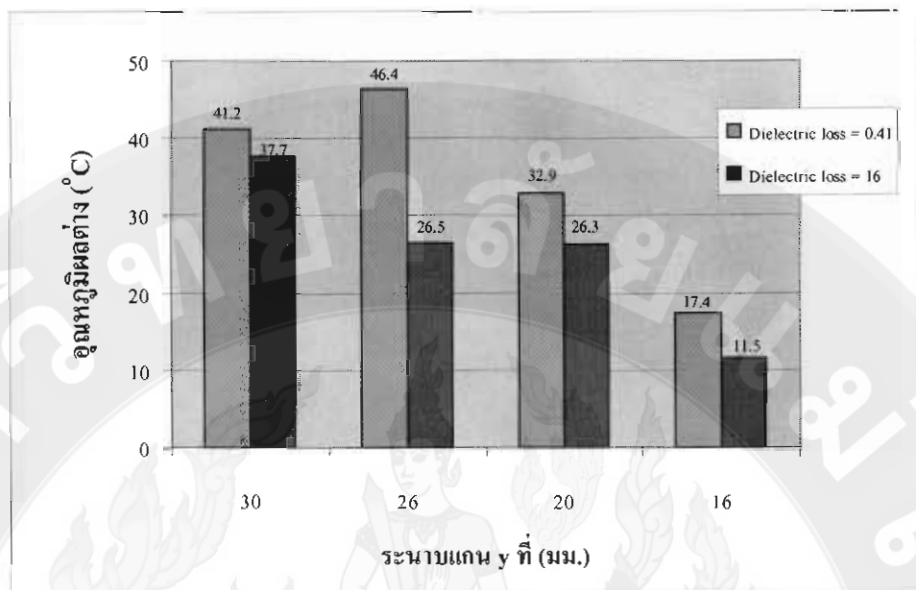


ภาพ 34 ค่าอุณหภูมิคำนวณด้วยวิธี FDTD ระนาบ x-z ของการกระจายอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) ของหน่อไม้ฝรั่ง 3 ชั้น (ก) $y = 36$ มิลลิเมตร และ (ข) $y = 24$ มิลลิเมตร

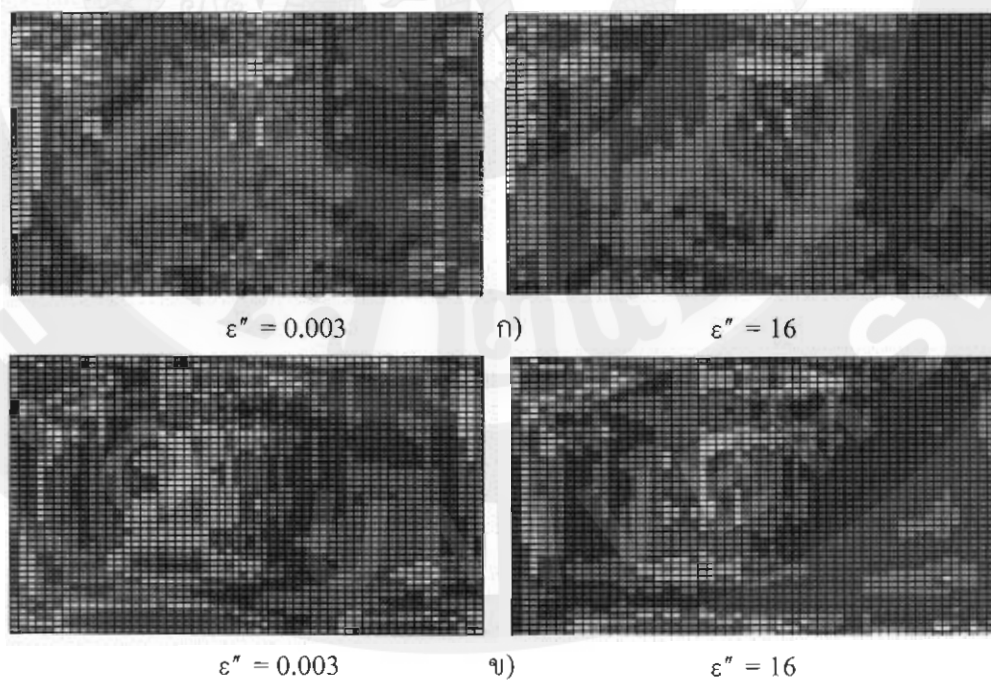
ผลการจำลองปรับแต่งคุณสมบัติบรรจุภัณฑ์

การจำลองอุณหภูมิต่างระหว่างจุดร้อนและจุดเย็นของหน่อไม้ฝรั่งสองชั้นภายในบรรจุภัณฑ์ (ผลที่ดีที่สุดที่ได้จากการจำลองหาค่าโหนดที่เหมาะสม) ที่มีค่าไดอิเล็กทริก เท่ากับ 0.003 (บรรจุภัณฑ์โพลีโพรพิลีน) และค่าไดอิเล็กทริกเท่ากับ 16 (ใกล้เคียงกับค่าไดอิเล็กทริกของหน่อไม้ฝรั่ง) แสดงดังภาพ 35 ที่ค่าไดอิเล็กทริกเท่ากับ 0.003 อุณหภูมิต่างระหว่างจุดร้อนและจุดเย็นมีค่าเท่ากับ 46.4 องศาเซลเซียส ที่ระยะนาบ 26 มิลลิเมตร จากระนาบด้านล่างสุด ขณะที่ค่าไดอิเล็กทริกเท่ากับ 16 อุณหภูมิต่างระหว่างจุดร้อนและจุดเย็นมีค่าเท่ากับ 37.7 องศาเซลเซียส ที่ระยะนาบ 30 มิลลิเมตร ซึ่งอุณหภูมิต่างระหว่างสองลักษณะมีค่าเท่ากับ 3.5 องศาเซลเซียส จากภาพการกระจายตัวของอุณหภูมิจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิต่างระหว่างจุดร้อนและจุดเย็นของบรรจุภัณฑ์ที่มีค่าไดอิเล็กทริกเท่ากับ 16 จะมีการกระจายอุณหภูมิที่ต่ำกว่าบรรจุภัณฑ์ที่มีค่าไดอิเล็กทริกเท่ากับ 0.003 หากอุณหภูมิต่างระหว่างจุดร้อนและจุดเย็นมีค่าต่ำ กล่าวได้ว่าเป็นลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ดีขึ้น ดังนั้นบรรจุภัณฑ์ที่มีค่าไดอิเล็กทริกสูญเสียเท่ากับ 16 จะให้คุณภาพของการกระจายตัวของความร้อนที่ดีกว่าบรรจุภัณฑ์ที่มีค่าไดอิเล็กทริกสูญเสียเท่ากับ 0.003

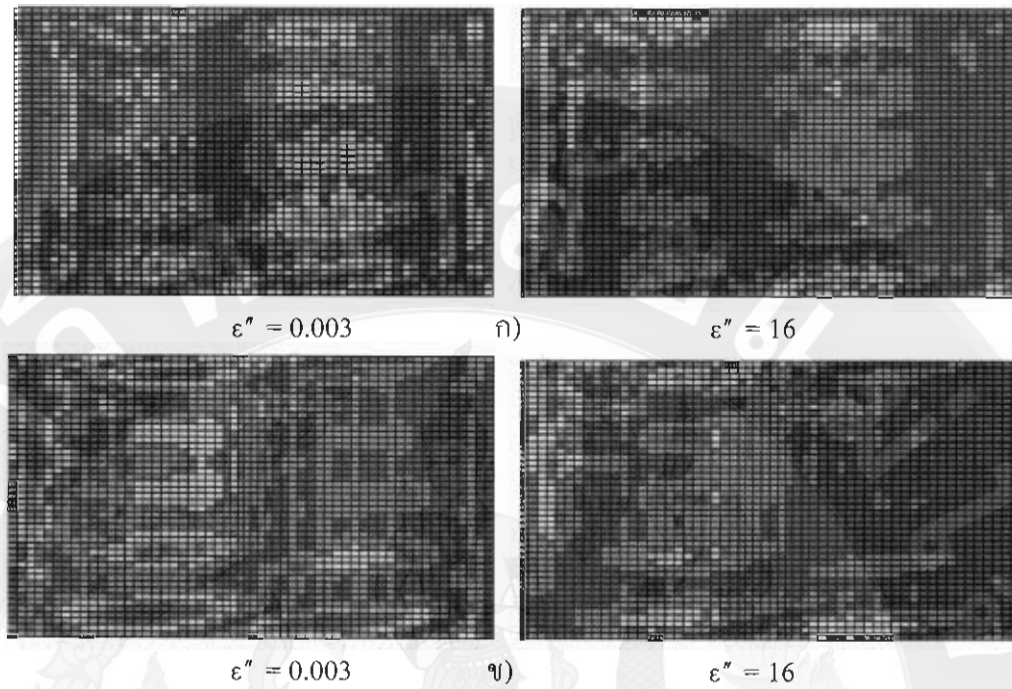
ภาพ 36 และ ภาพ 37 แสดง ระยะนาบ x-z 4 ระยะนาบ ของการกระจายตัวของอุณหภูมิของหน่อไม้ฝรั่ง 2 ชั้น ภายในบรรจุภัณฑ์ในตู้ไมโครเวฟขนาดครัวเรือน จะสามารถกล่าวได้ว่าบรรจุภัณฑ์ที่ค่าไดอิเล็กทริกสูญเสียเท่ากับ 0.003 จะมีจุดร้อนเกิดขึ้นบริเวณบริเวณขอบภาชนะ ขณะที่บรรจุภัณฑ์ที่ค่าไดอิเล็กทริกสูญเสียเท่ากับ 16 เกิดจุดร้อนน้อยกว่าจากการจำลองสามารถกล่าวได้ว่าบรรจุภัณฑ์ที่มีค่าไดอิเล็กทริกสูญเสียสูงสามารถดูดซับคลื่นไมโครเวฟและการกระจายตัวของความร้อนได้ดีกว่าบรรจุภัณฑ์ที่มีค่าไดอิเล็กทริกสูญเสียต่ำ ซึ่งจากผลการจำลองในงานวิจัยนี้สามารถยืนยันได้ว่าการเพิ่มขึ้นของค่าไดอิเล็กทริกสูญเสียสามารถช่วยเพิ่มความสม่ำเสมอในการกระจายตัวของอุณหภูมิและช่วยลดค่าจุดร้อนที่เกิดขึ้นภายในบรรจุภัณฑ์ได้ในระดับหนึ่ง แต่เนื่องจากในความเป็นจริงพบว่ามีบรรจุภัณฑ์ที่มีอยู่ในท้องตลาดส่วนใหญ่มีค่าใกล้เคียงกับค่าไดอิเล็กทริกสูญเสียของโพลีโพรพิลีน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.003 หากต้องการทำให้ค่าไดอิเล็กทริกสูญเสียของบรรจุภัณฑ์มีค่าเพิ่มขึ้นก็อาจทำได้โดยการเพิ่มสารเติมแต่งบรรจุภัณฑ์ หรืออาจทำได้โดยการใส่สารเติมแต่งภายในบรรจุภัณฑ์โดยสารเติมแต่งที่ใช้ควรเป็นสารเติมแต่งที่มีการคายความร้อนออกมาหลังจากมีการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ เนื่องจากความชื้นที่ออกมาจะมีค่าไดอิเล็กทริกเท่ากับ 15.6 ซึ่งสามารถดูดซับคลื่นไมโครเวฟได้มาก ดังนั้นหากสร้างบรรจุภัณฑ์ให้มีสารคายความร้อนอยู่ภายในบรรจุภัณฑ์ก็จะทำให้คลื่นไมโครเวฟมีการดูดซับที่ความชื้นก่อนที่จะไปถึงอาหาร หรืออาจนำเอาความชื้นที่ได้ในการให้ความร้อนนำไปให้ความร้อนอาหารอีกทางหนึ่งด้วย



ภาพ 35 อุณหภูมิต่างระหว่างจุดร้อนและจุดเย็นของหน่อไม้ฝรั่งที่ระยะแนบ y ของบรรจุภัณฑ์หน่อไม้ฝรั่งสองชนิดที่ค่า ϵ'' เท่ากับ 0.003 และ 16



ภาพ 36 อุณหภูมิต่างระหว่างจุดร้อนและจุดเย็นของหน่อไม้ฝรั่งที่ระยะแนบ y ของบรรจุภัณฑ์หน่อไม้ฝรั่งสองชนิดที่ค่า ϵ'' เท่ากับ 0.003 และ 16 (ก) ที่ y = 30 มิลลิเมตร และ (ข) ที่ y = 26 มิลลิเมตร



ภาพ 37 อุณหภูมิต่างระหว่างจุดร้อนและจุดเย็นของหน่อไม้ฝรั่งที่ระนาบ y ของบรรจุภัณฑ์
หน่อไม้ฝรั่งสองชนิดที่ค่า ϵ'' เท่ากับ 0.003 และ 16 (ก) ที่ $y = 20$ มิลลิเมตร และ
(ข) ที่ $y = 16$ มิลลิเมตร

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

ในบทสุดท้ายของวิทยานิพนธ์เป็นการสรุปใจความสำคัญของผลการศึกษาตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย คือ การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟภายในบรรจุภัณฑ์บรรจุหน่อไม้ฝรั่งตัดแต่งและจำลองปรับแต่งคุณสมบัติบรรจุภัณฑ์ด้วยโปรแกรม CST2006®

ข้อสรุป

1. ขนาดของกริดที่เหมาะสมที่ใช้ในการคำนวณคือ 0.7 มิลลิเมตร หรือ 20 เส้น ต่อหนึ่งความยาวคลื่น ซึ่งเป็นจำนวนกริดเซลล์ที่ไม่แสดงความแตกต่างของผลลัพธ์ของแบบจำลองคอมพิวเตอร์ และใช้เวลาในการคำนวณที่เหมาะสม
2. แบบจำลองที่สร้างขึ้นมา สามารถใช้ทำนายปรากฏการณ์และแนวโน้มของการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟได้ใกล้เคียงกับสถานการณ์จริง เมื่อทดสอบคำนวณการบรรจุหน่อไม้ฝรั่ง 2 ชั้นพบว่า ให้ผลต่างของอุณหภูมิน้อยกว่า การบรรจุด้วย 1 และ 3 ชั้น
3. ในการแปลงค่าสนามไฟฟ้าเป็นค่าอุณหภูมิสามารถคำนวณได้อย่างแม่นยำโดยใช้สมการทั้ง 9 สมการดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}T_{m,n}^{p+1} &= 2F_0(T_{m+1,n}^p + T_{m,n-1}^p + 2B_i T_a) + (1 - 4F_0 B_i) T_{m,n}^p + \frac{8\omega E_0 E_{eff}'' |\vec{E}|^2 F_0}{k} \\T_{m,n}^{p+1} &= 2F_0(T_{m+1,n}^p + T_{m,n+1}^p + 2B_i T_a) + (1 - 4F_0 B_i) T_{m,n}^p + \frac{8\omega E_0 E_{eff}'' |\vec{E}|^2 F_0}{k} \\T_{m,n}^{p+1} &= 2F_0(T_{m-1,n}^p + T_{m,n-1}^p + 2B_i T_a) + (1 - 4F_0 B_i) T_{m,n}^p + \frac{8\omega E_0 E_{eff}'' |\vec{E}|^2 F_0}{k} \\T_{m,n}^{p+1} &= 2F_0(T_{m-1,n}^p + T_{m,n+1}^p + 2B_i T_a) + (1 - 4F_0 B_i) T_{m,n}^p + \frac{8\omega E_0 E_{eff}'' |\vec{E}|^2 F_0}{k} \\T_{m,n}^{p+1} &= F_0(2T_{m+1,n}^p + T_{m,n+1}^p + T_{m,n-1}^p - 2B_i T_a) + [1 - 4F_0 + 2F_0 B_i] T_{m,n}^p + \frac{4\omega E_0 E_{eff}'' |\vec{E}|^2 F_0}{k} \\T_{m,n}^{p+1} &= F_0(2T_{m,n-1}^p + T_{m+1,n}^p + T_{m-1,n}^p - 2B_i T_a) + [1 - 4F_0 + 2F_0 B_i] T_{m,n}^p + \frac{4\omega E_0 E_{eff}'' |\vec{E}|^2 F_0}{k}\end{aligned}$$

$$T_{m,n}^{p+1} = F_0(2T_{m,n+1}^p + T_{m-1,n}^p + T_{m+1,n}^p - 2B_i T_\alpha) + [1 - 4F_0 + 2F_0 B_i] T_{m,n}^p + \frac{4\omega E_0 E_{eff}'' |\vec{E}|^2 F_0}{k}$$

$$T_{m,n}^{p+1} = F_0(2T_{m-1,n}^p + T_{m,n+1}^p + T_{m,n-1}^p - 2B_i T_\alpha) + [1 - 4F_0 + 2F_0 B_i] T_{m,n}^p + \frac{4\omega E_0 E_{eff}'' |\vec{E}|^2 F_0}{k}$$

$$T_{m,n}^{p+1} = F_0(T_{m+1,n}^p + T_{m-1,n}^p + T_{m,n+1}^p + T_{m,n-1}^p) + (1 - 4F_0) T_{m,n}^p + 2F_0 \omega E_0 E_{eff}'' |\vec{E}|^2$$

4. การเปลี่ยนแปลงค่าไดอิเล็กทริกสูญเสียจากค่าไดอิเล็กทริกสูญเสียเท่ากับ 16 ไปเป็นไดอิเล็กทริกสูญเสียเท่ากับ 0.003 จะให้คุณภาพของการกระจายตัวของความร้อนขึ้นที่ทุกระดับความหนาของหน่อไม้ฝรั่ง

ข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัยที่ได้ยังมีประเด็นควรแก่การศึกษาและพัฒนาเพิ่มเติม เพื่อให้งานสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น เพื่อเป็นแนวทางในการทำวิจัยในอนาคตต่อไปดังนี้คือ

1. พัฒนาแบบจำลองที่ให้แบบจำลองมีการเคลื่อนที่ในขณะให้ความร้อน เพื่อศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิให้เป็นไปตามการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟภายในตู้ไมโครเวฟขนาดครัวเรือนตัวอย่างแท้จริง
2. ควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับอิทธิพลของไอน้ำที่เกิดขึ้นภายในบรรจุภัณฑ์ในขณะให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟเนื่องจากอาหารบางส่วนสามารถปิ้งสุกได้ด้วยไอน้ำที่เกิดขึ้นภายในบรรจุภัณฑ์
3. ควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับอิทธิพลของสารเติมแต่งบรรจุภัณฑ์ต่อการเปลี่ยนแปลงค่าไดอิเล็กทริกสูญเสียซึ่งจะมีผลต่อการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟ

บรรณานุกรม

- จิรวัดน์ กันต์เกรียงวงศ์ วรพจน์ สุนทรสุข และประเวทย์ ดุ้ยเต็มวงศ์. 2548. การผลิตพริกแห้งแบบใหม่โดยเครื่องไมโครเวฟสุญญากาศแบบถังหมุน. น. 152 ใน การสัมมนาวิชาการวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยว/หลังการผลิตแห่งชาติ ครั้งที่ 3. วันที่ 10-12 ตุลาคม. โรงแรมทิพย์วิมานรีสอร์ท แอนด์ สปา จ.เพชรบุรี.
- โชคชัย แสงดาว. 2548. เครื่องอบแห้งเมล็ดข้าวเปลือกอย่างต่อเนื่องด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน. กรุงเทพฯ: ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร 156 น.
- ประพันธ์ ปรระกอบ. 2550. หน่อไม้ฝรั่ง. [ระบบออนไลน์]. แหล่งข้อมูล:<http://gotoknow.org/blog/pantree/145519> (22 มีนาคม 2552).
- ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช. 2551. พื้นฐานการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี. 2552. การวิเคราะห์ปัญหาทางความร้อนโดยวิธี Finite – Difference Equation. กรุงเทพฯ: แบบเรียนออนไลน์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี [ระบบออนไลน์]. แหล่งข้อมูล:http://mte.kmutt.ac.th/mte_learning/heat%20Conduction/HTML%20Documents/content%202.4.htm (13 มกราคม 2552)
- รัชดา โสภาคะยัง. 2548. การประยุกต์ใช้พลังงานไมโครเวฟในการทำความร้อนยาง. ใน การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 1. ชลบุรี: โรงแรมแอมบาสซาเดอร์ซิตี้. (เอกสารอัดสำเนา).
- วัฒนา วิรุฒิก. 2542. การอบแห้งอาหารด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า. วารสารอาหาร 29(2): 130-132.
- วิไล รังสาทอง. 2543. เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร. กรุงเทพฯ: ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 401 น.
- สายสนม ประดิษฐ์ดวง. 2543. การให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟและการฉายรังสีอาหาร. น. 173-195. ใน วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2551. ปริมาณการส่งออกหน่อไม้ฝรั่ง. [ระบบออนไลน์]

แหล่งข้อมูล: http://www.oae.go.th/oae_report/export_import/export.php (10 มกราคม 2552)

Anderson, R. E., R. E. Hardenburg and H. C. Baught. 2002. Controlled atmosphere storage studies with cranberries. ASHS 83:416. ASHRAE. 1993. **ASHRAE Handbook-Fundamentals** Table 1, Chapter 30.

Barbeau, W. E. and M. Schnepf. 1989. Sensory attributes and thiamine content of roasting chickens cooked in a microwave, convection microwave and convectional electric oven. **Journal of Food Quality** 12(3): 203-213.

Bindu, G., A. Lonappan. V. Thomas. C. K. Aanandan. And K. T. Mathew. 2006. Active Microwave Imaging for Breast Cancer Detection. In **Electromagnetics Research**, PIER 58: 149- 169

Brewer, S. 2002. Blanching Vegetables in the Microwave. **Food Preservation Fact Sheet**. University of Illinois Extension provides equal opportunities in programs and employment.

Bouraoui, M., P. Richard and T. Durance. 1994. Microwave and convective drying of potato slices. **Journal of Food Process Engineering** 17: 353-363.

Calalo, R. H., J. R. Jame and W. A. Imbriale. 1988. **Finite different time domain solution of electro,anetic scattering on the hypercube**. Association for Computing Machinery. C3P-596

Centeno, A. E. and P. S. Excell. 1983. Modelling of dielectrically loaded cavities using the finite integral technique. University of Bradford. **Transactions of ASAE** 26(2): 174-177

Chen, H., J. Tang and F. Liu. 2008. Simulation model for moving food packages in microwave heating processes using conformal FDTD method. **Journal of Food Engineering** 88: 294-305.

Datta, K. and R. C. Anantheswaran. 2001. Electromagnetics: Fundamental Aspects and Numerical Modeling. **Handbook of Microwave Technology for Food Applications**. New York. 1-31.

- Davey, L.M. and Q.T. Pham. 2000. A multi-layered two-dimensional finite element model to calculate dynamic product heat load and weight loss during beef chilling. **International J. Refrigeration**, 23(6): 444-456.
- Drouzas A.E. and H. Schubert. 1996. Microwave application in vacuum drying of fruits. **Journal of Food Engineering** 28: 203-209.
- Fellows, P. J. 2000. Dielectric, ohmic and infrared heating. p. 356-384. In **Food Processing Technology: principles and Practice**. 2nd ed. P. J. Fellows (ed.). Cambridge: Woodhead Publishing Limited.
- Feng, H. and J. Tang. 1998. Microwave finish drying of diced apples in a spouted bed. **Journal of Food Science** 63(4): 679-683.
- Feng, H., J. Tang and R. P. Cavalieri. 2002. Dielectric properties of dehydrated apples as effected by moisture and temperature. **Transactions of ASAE** 45(1): 129-135.
- Funebo, T., L. Ahme. S. Kidman. M. Langton and C. Skjoldebrand. 2000. Microwave heat treatment of apple before air dehydration effects on physical properties and microstructure. **Journal of Food Engineering** 46: 173-182.
- Garcia, R., F. Leal, and C. Rolz. 1988. Drying of bananas using microwave and air ovens. **Journal of Food Science and Technology** 23: 73-80.
- Greve, L. C. and J. M. Labavitch. 1991. Cell wall metabolism in ripening fruit. V. Analysis of cell wall synthesis in ripening tomato pericarp tissue using a D-[U-13C] glucose tracer and gas chromatography-mass spectrometry. **Plant Physiology** 97: 1456-1461.
- Hemphill, R. and L.W. Martin. 1992. Microwave oven drying method for determining total solids of strawberry. **Horticultural Science** 27(12): 1326.
- Kim, S. S. and S. R. Bhowmik. 1995. Effective Moisture Diffusivity of Plain Yogurt Undergoing Microwave Vacuum Drying. **Journal of Food Engineering** 24:137-148.
- Krokida, M. K., C. T. Kiranoudis, Z. B. Maroulis and D. Marinos-Kouris. 2000. Effect of pretreatment on color of dehydrated products. **Drying Technology** 18: 1239-1250.
- Lau, M. H. and J. Tang. 2002. Pastuerization of pickled asparagus using 915 MHz microwaves. **Journal of Food Engineering** 51(4): 283-290.

- Lebaric, J. 1989. Analysis of Dielectric Resonator Cavities Using the Finite Integration Technique. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques** 37(11): 1740-1748
- Lian, G. H., C. S. Harris, R. Evans, and M. Warboys. 1997. Coupled Heat and Moisture Transfer During Microwave Vacuum Drying. **Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy** 32: 34-44.
- Lin, Y. E., R. C. Anantheswaran and V. M. Puri. 1995. Finite Element Analysis of Microwave Heating of Solid Foods. **Journal of Food Engineering** 25: 85-112.
- Maskan M. 2000. Microwave/air and microwave finish drying of banana. **Journal of Food Engineering** 44:71-78.
- Miller, M. L. 1966. **The Structure of Polymers**. New York: Reinhold Publishing.
- Nabors, L. A., S. S. Leff. and J. E. Metrick. 2001. Assessing the costs of school-based mental health services. **Journal of School Health**. 71: 199-200.
- Osinboyejo, M. A., L. T. Walker, S. Ogutu and M. Verghese. 2003. Effects of Microwave Blanching vs. Boiling Water Blanching on Retention of Selected Water-soluble Vitamins in Turnip Greens Using HPLC. **Institute of Food Technologists Annual Meeting**. Chicago
- Ozmutlu, O., G. Sumnu and S. Sahins. 2001. Assessment of proofing of bread dough in the microwave oven. **European Food Research and Technology** 212(4): 487-490.
- Rao, S. M., G. K. Gothard and D. R. Wilton. 1998. Application of Finite- Integral Technique to Electromagnetic scattering by two-dimensional cavity-backed aperture in Ground plane. **IEEE Transactions** 46(5): 679-685
- Regier, M. and H. Schubert. 2005. **The microwave processing of foods**. New York: CRC Press. 345p.
- Rosenthal, I. 1992. Microwave Radiation. pp. 115-154. **In Electromagnetic Radiations in Food Science**. I. Rosenthal (ed.). Berlin: Springer-Verlag.
- Singh, R. P. and D. R. Heldman. 2001. Microwave Heating. pp. 306 – 331. **In Introduction to Food Engineering**. 3rd ed. London: Academic Press.

- Sugeng, F., A. Rache and G. Wililson. 2006. An efficient compact finite-element modeling method for the practical 3D inversion of electromagnetic data from high contrast complex structures. **Extended Abstract 18th Workshop**. El Vendrell. Spain.
- Tulasidas, T. N., G. S. V. Raghavan and E. R Norris. 1993. Microwave and convective drying of grapes. **Transactions of ASAE** 36(6): 1861-1865.
- Vega-Mercado, H., M. M. Gongora-Nieto and G. V. Barbosa-Canovas. 2001. Advances in dehydration of foods. **Journal of Food Engineering** 49: 271-289
- Zhou, L., V. M. Puri, R. C. Anantheswaran and G. Yeh. 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



ภาคผนวก ก

Source Code ที่ใช้ในการแปลงค่าสนามไฟฟ้าให้อยู่ในเทอมของอุณหภูมิ

```

Sub Run2()

actime = 0

wide = Worksheets(1).Cells(3, 3) ('Enter wide ')
Height = Worksheets(1).Cells(4, 3) ('Enter hight ')
delt = Worksheets(1).Cells(5, 3) ('Enter time increment ');
alpha = Worksheets(1).Cells(6, 3) ('Enter thermal diffusivity ')
k = Worksheets(1).Cells(7, 3) ('Enter thermal conductivity ')
h = Worksheets(1).Cells(8, 3) ('Enter surface heat transfer coefficient ')
Nx = Worksheets(1).Cells(9, 3) "Enter Number of node in r direction "
Ny = Worksheets(1).Cells(10, 3) ('Enter Number of node in y direction ')
T_int = Worksheets(1).Cells(11, 3) ' ('Enter Initial temperature of product')
Omega = Worksheets(1).Cells(33, 3) "Enter Omega "
E0 = Worksheets(1).Cells(34, 3) ('Enter E0 ')
Eeff = Worksheets(1).Cells(35, 3) ' ('Enter Eeff')
Fo = Worksheets(1).Cells(21, 3) ('Enter Fo ')
Bi = Worksheets(1).Cells(22, 3) ' ('Enter Bi')
Factor = Worksheets(1).Cells(23, 3) ' ('Enter factor')

delx = wide / Nx
dely = Height / Ny
actime = 0
Worksheets(1).Cells(27, 3) = actime
cc = 0

ReDim T(Ny, Nx)
For i = 1 To Ny
For j = 1 To Nx
T(i, j) = T_int
Worksheets(1).Cells(36 + i, 7 + j) = T(i, j)
Worksheets(1).Cells(36 + i, 7 + j) = T(i, j)

```

```

If T(i, j) <= 0 Then
    cc = 1
ElseIf 0 < T(i, j) <= 10 Then
    cc = 25
ElseIf 10 < T(i, j) <= 25 Then
    cc = 5
ElseIf 25 < T(i, j) <= 27 Then
    cc = 41
ElseIf 27 < T(i, j) <= 29 Then
    cc = 42
ElseIf 29 < T(i, j) <= 31 Then
    cc = 43
ElseIf 31 < T(i, j) <= 33 Then
    cc = 27
ElseIf 33 < T(i, j) <= 35 Then
    cc = 44
ElseIf 35 < T(i, j) <= 37 Then
    cc = 45
ElseIf 37 < T(i, j) <= 39 Then
    cc = 46
Else
    cc = 3
End If
Worksheets(1).Cells(36 + i, 7 + j).Select
With Selection.Interior
    .ColorIndex = cc
    .Pattern = xlSolid
End With
If i = 1 And j = 1 Then
    Range("ae12,ae13").Select

```



```

With Selection.Interior
    .ColorIndex = cc
    .Pattern = xlSolid
End With
ElseIf i = Ny And j = Nx Then
    Range("am19:am21").Select
    With Selection.Interior
        .ColorIndex = cc
        .Pattern = xlSolid
    End With
End If

'Worksheets(1).Cells(36 + i, 7 + j).Select
'With Selection.Interior
'.ColorIndex = cc
'.Pattern = xlSolid
'End With
Next
Next
Worksheets(1).Cells(15, 3) = delx
Worksheets(1).Cells(16, 3) = dely
ReDim newtemp(Ny, Nx)
For i = 1 To Ny
    For j = 1 To Nx
        newtemp(i, j) = T_int
    Next
Next
Next
Do Until actime = Worksheets(1).Cells(13, 3) ('Enter time')
    i = 0
    j = 0

```

If $Fo \leq 0.25$ And $Fo * (2 + Bi) \leq 0.5$ And $Fo * (1 + Bi) \leq 0.25$ Then

For i = 1 To Ny

For j = 1 To Nx

Rem left uper corner node

If i = 1 And j = 1 Then

$$\text{newtemp}(i, j) = 2 * Fo * (T(i + 1, j) + T(i, j + 1) + (2 * Bi * T_int)) + (1 - (4 * Fo * Bi))$$

$$* T(i, j) + (8 * Omega * E0 * Eeff * Worksheets(1).Cells(I19 + i, 7 + j) * Factor * Fo) / k$$

Rem uper surface nodes

ElseIf i = 1 And j > 1 And j < Nx Then

$$\text{newtemp}(i, j) = (Fo * (2 * T(i + 1, j) + T(i, j + 1) + T(i, j - 1) + (2 * Bi * T_int))) + (1 -$$

$$(4 * Fo) + (2 * Fo * Bi)) * T(i, j) + (4 * Omega * E0 * Eeff * Worksheets(1).Cells(119 + i, 7 + j)$$

$$* Factor * Fo) / k$$

Rem right uper corner node

ElseIf i = 1 And j > 1 And j = Nx Then

$$\text{newtemp}(i, j) = 2 * Fo * (T(i + 1, j) + T(i, j - 1) + (2 * Bi * T_int)) + (1 - (4 * Fo * Bi))$$

$$* T(i, j) + (8 * Omega * E0 * Eeff * Worksheets(1).Cells(119 + i, 7 + j) * Factor * Fo) / k$$

Rem left surface nodes

ElseIf i > 1 And i < Ny And j = 1 Then

$$\text{newtemp}(i, j) = Fo * (2 * T(i, j + 1) + T(i - 1, j) + T(i + 1, j) + (2 * Bi * T_int)) + (1 -$$

$$(4 * Fo) + (2 * Fo * Bi)) * T(i, j) + (4 * Omega * E0 * Eeff * Worksheets(1).Cells(119 + i, 7 + j)$$

$$* Factor * Fo) / k$$

Rem center node

ElseIf i > 1 And i < Ny And j > 1 And j < Nx Then

$$\text{newtemp}(i, j) = Fo * (T(i + 1, j) + T(i - 1, j) + T(i, j - 1) + T(i, j + 1)) + (1 - 4 * Fo) *$$

$$T(i, j) + (2 * Fo * Omega * E0 * Eeff * Worksheets(1).Cells(119 + i, 7 + j) * Factor)$$

Rem right surface node

ElseIf $i > 1$ And $i < N_y$ And $j > 1$ And $j = N_x$ Then

$$\text{newtemp}(i, j) = \text{Fo} * (2 * T(i, j - 1) + T(i - 1, j) + T(i + 1, j) + (2 * \text{Bi} * T_{\text{int}})) + ((1 - (4 * \text{Fo}) + (2 * \text{Fo} * \text{Bi})) * T(i, j)) + (4 * \Omega * E_0 * E_{\text{eff}} * \text{Worksheets}(1).\text{Cells}(119 + i, 7 + j) * \text{Factor} * \text{Fo}) / k$$

Rem left lower corner node

ElseIf $i > 1$ And $i = N_y$ And $j = 1$ Then

$$\text{newtemp}(i, j) = (2 * \text{Fo} * (T(i - 1, j) + T(i, j + 1) + (2 * \text{Bi} * T_{\text{int}}))) + ((1 - (4 * \text{Fo} * \text{Bi})) * T(i, j)) + (8 * \Omega * E_0 * E_{\text{eff}} * \text{Worksheets}(1).\text{Cells}(119 + i, 7 + j) * \text{Factor} * \text{Fo}) / k$$

Rem lower surface node

ElseIf $i > 1$ And $i = N_y$ And $j > 1$ And $j < N_x$ Then

$$\text{newtemp}(i, j) = (\text{Fo} * (2 * T(i - 1, j) + T(i, j - 1) + T(i, j + 1) + (2 * \text{Bi} * T_{\text{int}}))) + ((1 - (4 * \text{Fo}) + (2 * \text{Fo} * \text{Bi})) * T(i, j)) + (4 * \Omega * E_0 * E_{\text{eff}} * \text{Worksheets}(1).\text{Cells}(119 + i, 7 + j) * \text{Factor} * \text{Fo}) / k$$

Rem right lower corner node

ElseIf $i > 1$ And $i = N_y$ And $j > 1$ And $j = N_x$ Then

$$\text{newtemp}(i, j) = (2 * \text{Fo} * (T(i - 1, j) + T(i, j - 1) + (2 * \text{Bi} * T_{\text{int}}))) + ((1 - (4 * \text{Fo} * \text{Bi})) * T(i, j)) + (8 * \Omega * E_0 * E_{\text{eff}} * \text{Worksheets}(1).\text{Cells}(119 + i, 7 + j) * \text{Factor} * \text{Fo}) / k$$

End If

$\text{Worksheets}(1).\text{Cells}(36 + i, 7 + j) = \text{newtemp}(i, j)$

If $\text{newtemp}(i, j) \leq 0$ Then

$\text{cc} = 1$

ElseIf $\text{newtemp}(i, j) > 0$ And $\text{newtemp}(i, j) \leq 10$ Then

$\text{cc} = 25$

ElseIf $\text{newtemp}(i, j) > 10$ And $\text{newtemp}(i, j) \leq 25$ Then

$\text{cc} = 5$

ElseIf $\text{newtemp}(i, j) > 25$ And $\text{newtemp}(i, j) \leq 27$ Then

```

        cc = 41
    ElseIf newtemp(i, j) > 27 And newtemp(i, j) <= 29 Then
        cc = 42
    ElseIf newtemp(i, j) > 29 And newtemp(i, j) <= 31 Then
        cc = 43
    ElseIf newtemp(i, j) > 31 And newtemp(i, j) <= 33 Then
        cc = 27
    ElseIf newtemp(i, j) > 33 And newtemp(i, j) <= 35 Then
        cc = 44
    ElseIf newtemp(i, j) > 35 And newtemp(i, j) <= 37 Then
        cc = 45
    ElseIf newtemp(i, j) > 37 And newtemp(i, j) <= 39 Then
        cc = 46
    Else
        cc = 3
    End If
    Worksheets(1).Cells(36 + i, 7 + j).Select
    With Selection.Interior
        .ColorIndex = cc
        .Pattern = xlSolid
    End With
    If i = 1 And j = 1 Then
        Range("ae12,ae13").Select
        With Selection.Interior
            .ColorIndex = cc
            .Pattern = xlSolid
        End With
        ElseIf i = Ny And j = Nx Then
            Range("am19:am21").Select
            With Selection.Interior

```

```

.ColorIndex = cc
.Pattern = xlSolid
End With
End If
Next
Next
    For i = 1 To Ny
        For j = 1 To Nx
            T(i, j) = newtemp(i, j)
        Next
    Next
Else
    For i = 1 To Ny
        For j = 1 To Nx
            Worksheets(1).Cells(36 + i, 7 + j) = " "
        Next
    Next
    Worksheets(1).Cells(22, 8) = "System is not stable !!"
    Worksheets(1).Cells(23, 8) = " Calculation failed"
End If
    actime = actime + delt
    Worksheets(1).Cells(27, 3) = actime
Loop
End Sub

```



ภาคผนวก ข

ประวัติผู้วิจัย

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ - ชื่อสกุล	นางสาวชนิสรา หนูช่วย	
วัน เดือน ปี เกิด	3 กรกฎาคม 2526	
ภูมิลำเนา	298/1 ม.3 ต.ท่าประจะ อ.ชะอวด จ.นครศรีธรรมราช 80180	
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2539	มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนสตรีพัทลุง จังหวัดพัทลุง
	พ.ศ. 2544	ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่
ผลงานวิจัย	12 – 13	Chanisara Noochuay, Jatuphong Varith, Wannee
	มีนาคม 2552	Chinsirikul and Monai Krairiksh. Analysis of Microwave Distribution for Ready-to-Cook Fresh-Cut-Asparagus Packaging การวิเคราะห์การกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟต่อบรรจุภัณฑ์หน่อไม้ฝรั่งตัดแต่ง.
		การประชุมวิชาการเรื่อง การถ่ายเทความร้อนและมวล ในอุปกรณ์ด้านความร้อน (ครั้งที่ 8) ณ โรงแรมโพธิ์หวัด รีสอร์ท แอนด์ สปา จังหวัดเชียงราย.
	31 August – 2 September 2009	Chanisara Noochuay, Jatuphong Varith, Wannee Chinsirikul and Monai Krairiksh. 2009. Analysis of Microwave Distribution for Ready-to-Cook Fresh-Cut-Asparagus Packaging การวิเคราะห์การกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟต่อบรรจุภัณฑ์หน่อไม้ฝรั่งตัดแต่ง. 2009 CIGR Section VI International Symposium on Food Processing, Monitoring Technology in Bioprocesses and Food Quality Management. Potsdam, Germany.