

การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและการกระจายอุณหภูมิภายในสารไดอิเล็กตริก
ที่มีการสูญเสียระหว่างแผ่นระนาบตัวนำขนานขนาดอนันต์
เมื่อป้อนคลื่นด้วยสายอากาศสล롯อาร์เรย์

ANALYSIS OF ELECTRIC FIELD AND TEMPERATURE DISTRIBUTION
IN A LOSSY DIELECTRIC SHEET BETWEEN PARALLELED
INFINITE CONDUCTING PLANES EXCITED
BY THE SLOT ARRAY ANTENNA



วงศ์กร วัชรานันท์
WONGSAKORN WATCHARANANUNT

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2541

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน 30970

ISBN 974-622-161-2

วัน, เดือน, ปี: 4 ก.ย. 2541

สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ANALYSIS OF ELECTRIC FIELD AND TEMPERATURE DISTRIBUTION
IN A LOSSY DIELECTRIC SHEET BETWEEN PARALLELLED
INFINITE CONDUCTING PLANES EXCITED
BY THE SLOT ARRAY ANTENNA

WONGSAKORN WATCHARANANUNT



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

1998

ISBN 974-622-161-2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 1998

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและการกระจายอุณหภูมิภายใน
สารไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสียระหว่างแผ่นระนาบตัว
นำขนานขนาดอนันต์เมื่อป้อนคลื่นด้วยสายอากาศสล็อต
อาร์เรย์

นักศึกษา

นายวงศกร วัชรานานันท์

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์

รศ.ดร.โมไนย ไกรฤกษ์

หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

พ.ศ.

2541

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการวิจัย คำนวณและวิเคราะห์หาสนามไฟฟ้าและการกระจายของ
อุณหภูมิภายในแผ่นไดอิเล็กตริกระหว่างแผ่นระนาบตัวนำขนานอนันต์สองแผ่นขนานอยู่ด้านบน
และด้านล่าง โดยมีการป้อนสายอากาศสล็อตอาร์เรย์ (Slot array antenna) ด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดย
การคำนวณได้ใช้วิธีโดเมนเชิงสเปกตรัมในการหาค่าสนามไฟฟ้า และทำการเปรียบเทียบผลจากการ
คำนวณกับวิธีลากเส้นรังสี (Ray tracing) ของการสะท้อนหลายครั้ง (Multiple Reflection) จากนั้น
นำค่าสนามไฟฟ้าที่คำนวณได้ไปหาการกระจายอุณหภูมิโดยสมการส่งผ่านความร้อน (Heat transfer
equation) และ นำผลการคำนวณที่ได้เปรียบเทียบกับทดลอง ซึ่งผลที่ได้จะนำไปประยุกต์ใช้กับ
งานออกแบบเครื่องอบวัสดุโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ

Thesis Title	Analysis of Electric Field and Temperature Distribution in a Lossy Dielectric Sheet between Paralleled Infinite Conducting Planes Excited by the Slot Array Antenna
Student	Mr.Wongsakorn Watcharananunt
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Monai Krairiksh
Degree	Master of Engineering in Electrical Engineering
Year	1998

ABSTRACT

This thesis describes the research , calculation and analysis of electric field and temperature distribution in a lossy dielectric sheet between two paralleled infinite conducting planes which the slot array antenna is excited by microwave. The spectral domain approach is used for calculating that electric field and the numerical results are compared with the ray tracing method of multiple reflection. This electric field is employed as a heat source and the temperature distribution can be obtained by solving the heat transfer equation. The numerical results are confirmed by comparing with the experimental ones. These results can be applied in the design of microwave drying system.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาจาก รศ.ดร.โมไนย ไกรฤกษ์ ที่ได้ช่วยเหลือในการให้คำแนะนำชี้แนะแนวทางในการแก้ปัญหา ตลอดจนตรวจทานต้นฉบับของวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบคุณ รศ.ดร.จร สุรวัดน์ปัญญา ที่ช่วยเหลือในการตรวจทานต้นฉบับของวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบคุณ Prof.Toshio Wakabayashi และ Dr.Jun-ichi Takada ที่ช่วยให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณ คุณสำเนาวั รอดสุพรรณ และคุณอัญ จันทรวงศ์ ที่ช่วยเหลือในการออกแบบระบบ

ขอขอบคุณบุคคลที่มีส่วนให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ลุล่วงไปด้วยดี รวมถึงเพื่อนๆ ตลอดจนนักศึกษาทุกคน โดยเฉพาะ

คุณกิตติศักดิ์ วายภักตร์ คุณมนตรี ธนภควัด คุณคมศักดิ์ เมฆสมุทร คุณชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์ คุณชวลิต ชั้นไพบุลย์ คุณมานพ มาสีกุก คุณชานัฐ จารมีกรสกุล คุณนารี เทียงธรรม คุณสมอาจ อภิวันทนกุล คุณถัดดาวลัย สุวรรณประเสริฐ คุณอาณัติ เหมือนชู คุณประสิทธิ์ ผู้พัฒน์ คุณณยศ คุรุกิจ โกศลและคุณดวงอาทิตย์ ศรีมูล ที่ได้มีส่วนช่วยในการเก็บข้อมูลต่างๆ ตลอดจนจัดเตรียมต้นฉบับในการทำวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบคุณ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ในโครงการทุนส่งเสริมวิชาชีพนักวิจัย ที่ให้การสนับสนุนในการทำวิทยานิพนธ์ และทุนอุดหนุนการทำวิทยานิพนธ์ จากบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

คุณความดีอันใดที่บังเกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบแต่บิดาและมารดาของข้าพเจ้า

วงศกร วัชรานันท์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญภาพ.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 กล่าวนำ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของการศึกษาการประยุกต์ใช้งานคลื่นไมโครเวฟในงานอุตสาหกรรม.....	2
1.3 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีของคลื่นระนาบและการสะท้อน.....	5
2.1 กล่าวนำ.....	5
2.2 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโหมคตามขวางในตัวกลางที่ไม่มีการสูญเสีย.....	5
2.3 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโหมคตามขวางในตัวกลางที่มีการสูญเสีย.....	8
2.4 คลื่นระนาบตกกระทบตั้งฉากในตัวกลางที่ไม่มีการสูญเสีย.....	10
2.5 คลื่นระนาบตกกระทบตั้งฉากกับตัวกลางที่มีการสูญเสีย.....	13
2.6 สรุป.....	13
บทที่ 3 การวิเคราะห์การสะท้อนหลายครั้งโดยวิธีลากเส้นรังสี.....	14
3.1 กล่าวนำ.....	14

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 ลักษณะ โครงสร้างของปัญหา.....	14
3.3 สมการคลื่นระนาบที่มีการสะท้อนหลายครั้งภายในขอบเขตของแผ่นระนาบตัวนำ ขนานขนาดอนันต์.....	15
3.4 ผลการคำนวณ.....	18
3.5 สรุป.....	23
บทที่ 4 ทฤษฎีของวิธีโดเมนเชิงสเปกตรัม.....	25
4.1 กล่าวนำ.....	25
4.2 ทฤษฎีสนามสมมูล.....	25
4.3 การวิเคราะห์การแปลงฟูเรียร์ของสนามไฟฟ้า.....	31
4.4 สรุป.....	33
บทที่ 5 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าภายในไดอิเล็กทริกระหว่างแผ่นระนาบตัวนำขนานขนาด อนันต์.....	34
5.1 กล่าวนำ.....	34
5.2 เงื่อนไขขอบเขตของปัญหา.....	34
5.3 สมการของสนามไฟฟ้าในไดอิเล็กทริกที่วางระหว่างแผ่นตัวนำขนานขนาดอนันต์โดย วิธีโดเมนเชิงสเปกตรัม.....	38
5.4 ผลการคำนวณ.....	39
5.5 ผลการทดลอง.....	50
5.6 สรุป.....	51
บทที่ 6 ทฤษฎีและการคำนวณของการส่งผ่านความร้อน.....	52
6.1 กล่าวนำ.....	52

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.2 สมการส่งผ่านความร้อน.....	52
6.3 สมการผลต่างสี่บเนื่อง.....	54
6.4 การคำนวณและการวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิภายในไดอิเล็กตริกที่วางระหว่าง แผ่นระนาบตัวนำขนานขนาดอนันต์เมื่อป้อนคลื่นด้วยสายอากาศสี่ล้อตอร์เรย์.....	56
6.5 ผลการคำนวณ.....	56
6.6 ผลการทดลอง.....	62
6.7 สรุป.....	64
บทที่ 7 สรุปและวิจารณ์.....	66
บรรณานุกรม.....	68
ภาคผนวก.....	71
ภาคผนวก ก.....	72
บทความเกี่ยวข้องที่ได้รับการตีพิมพ์.....	100
ประวัติผู้เขียน.....	101

สารบัญตาราง

ตารางที่

หน้า

6.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณของนำและไม้.....57



สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1ก สนามเชิงซ้อนของคลื่นระนาบ.....	6
2.1ข สนามขณะใดขณะหนึ่งของคลื่นระนาบ.....	6
2.2 การสะท้อนและการส่งผ่านของคลื่นระนาบโดยการตกกระทบแบบตั้งฉาก.....	11
3.1 รูปแบบในการวิเคราะห์การสะท้อนหลายครั้ง.....	15
3.2 ผลการคำนวณการสะท้อนหลายครั้ง.....	18
3.3 ค่าสนามไฟฟ้าเมื่อมีการเปลี่ยนระยะ t_2 ที่ความหนาของน้ำ 1, 2 และ 3 เซนติเมตร...	19
3.4 ค่าสนามไฟฟ้าภายในน้ำที่ความหนา 1 เซนติเมตร.....	20
3.5 ค่าสนามไฟฟ้าภายในน้ำที่ความหนา 2 เซนติเมตร.....	20
3.6 ค่าสนามไฟฟ้าภายในน้ำที่ความหนา 3 เซนติเมตร.....	21
3.7 ค่าสนามไฟฟ้าภายในน้ำเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความถี่ต่างๆ.....	22
3.8 ค่าสนามไฟฟ้าภายในน้ำ, เนื้อัว, ข้าว.....	23
4.1ก แบบจำลองปัญหาจริง.....	26
4.1ข แบบจำลองปัญหาสมมูล.....	26
4.2ก แบบจำลองทฤษฎีสนามสมมูลของเลิฟ.....	28
4.2ข แบบจำลองตัวนำ ไฟฟ้าสมมูล.....	28
4.2ค แบบจำลองแม่เหล็กสมมูล.....	28
4.3 แบบจำลองสมมูลแหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็กแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าใกล้ตัวนำ สมมูล.....	29
4.4 แบบจำลองสมมูลอะเพอร์เจอร์ของท่อนำคลื่นวางบนระนาบตัวนำขนาดอนันต์.....	30
5.1ก แบบจำลองการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าภายในไดอิเล็กตริก.....	34
5.1ข แบบจำลองการเดินทางของคลื่นและเงื่อนไขขอบเขต.....	35
5.2ก ค่าสนามไฟฟ้าในแนวระนาบ $x-y$ ที่ผิวด้านบนของน้ำ	40

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5.2ข ค่าสนามไฟฟ้าในแนวระนาบx-yที่กึ่งกลางของน้ำ	40
5.2ค ค่าสนามไฟฟ้าในแนวระนาบx-yที่ผิวด้านล่างของน้ำ.....	41
5.3ก ค่าสนามไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงแผ่นตัวนำด้านล่างที่ระยะ 1.53 ซม., 3.06 ซม., 4.59 ซม., 6.12 ซม.	42
5.3ข ค่าสนามไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงแผ่นตัวนำด้านล่างที่ระยะ 7.65 ซม., 9.1 ซม., 10.71 ซม., 12.24 ซม.....	42
5.4 ค่าสนามไฟฟ้าที่มีระดับของแผ่นตัวนำด้านล่างระดับเดียวและหลายระดับ.....	43
5.5 เครื่องที่มีแผ่นตัวนำด้านล่างหลายระดับ.....	43
5.6 ค่าสนามไฟฟ้าภายในน้ำเมื่อมีการแกว่งของความถี่เนื่องจากแหล่งกำเนิด.....	44
5.7ก ค่าสนามไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงแผ่นตัวนำด้านล่างที่ระยะ 1.53 ซม., 3.06 ซม., 4.59 ซม., 6.12 ซม.	45
5.7ข ค่าสนามไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงแผ่นตัวนำด้านล่างที่ระยะ 7.65 ซม., 9.18 ซม., 10.71 ซม., 12.24 ซม.....	45
5.8 ค่าสนามที่มีการใช้แผ่นตัวนำด้านล่างสี่ระดับ.....	46
5.9ก ค่าสนามไฟฟ้าภายในไม้ที่ระยะ 0 ซม. ในระนาบx-y.....	47
5.9ข ค่าสนามไฟฟ้าภายในไม้ที่ระยะ 1 ซม. ในระนาบx-y.....	47
5.9ค ค่าสนามไฟฟ้าภายในไม้ที่ระยะ 2 ซม. ในระนาบ x-y.....	48
5.10 ค่าสนามไฟฟ้าภายในไม้ที่มีการเปลี่ยนระดับแผ่นตัวนำด้านล่าง.....	48
5.11 ค่าสนามไฟฟ้าภายในน้ำ,เนื้อ,ไม้.....	49
5.12 ค่าสนามไฟฟ้าโดยวิธีลากเส้นรังสีและ โดเมนเชิงสเปกตรัม.....	50
5.13 ค่าสนามไฟฟ้าจากการทดลองและการคำนวณ โดยวิธี โดเมนเชิงสเปกตรัม.....	51
6.1 การเคลื่อนที่ของวัสดุผ่านระบบให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ.....	56
6.2 อุณหภูมิของน้ำเมื่อเคลื่อนที่ผ่านระบบที่ตำแหน่งต่างๆ.....	57
6.3 อุณหภูมิของน้ำเมื่อผ่านแต่ละท่อนำคลื่น.....	58

สารบัญญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
6.4 อุณหภูมิน้ำที่ระดับต่างๆ.....	58
6.5 อุณหภูมิน้ำที่ความเร็วสายพานต่างๆ.....	59
6.6 อุณหภูมิที่ลดลงเมื่อออกจากระบบ.....	60
6.7 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของน้ำและไม้.....	61
6.8 อุณหภูมิที่ระดับต่างๆภายในเนื้อไม้.....	62
6.9 เครื่องให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟโดยใช้สายอากาศสล็อต.....	63
6.10 ท่อนำคลื่นและสายอากาศสล็อตอาร์เรย์.....	63
6.11 ผลการทดลองวัดความชื้นตามความกว้างของสายพาน.....	64



บทที่ 1

บทนำ

1.1 กล่าวนำ

การใช้งานคลื่นไมโครเวฟในด้านอุตสาหกรรมเริ่มขึ้นอย่างช้าๆ ในช่วงหลังสงครามโลกครั้งที่ 2 [1] โดยก่อนหน้านี้ได้มีการใช้งานอย่างกว้างขวางในด้านการสื่อสารและการทหาร แต่ในระยะหลังได้มีความสนใจในการใช้คลื่นไมโครเวฟในด้านอุตสาหกรรมมากขึ้นเนื่องจากมีข้อดีดังต่อไปนี้

- 1.1.1 มีความรวดเร็วในการให้ความร้อนและมีประสิทธิภาพในด้านพลังงานสูง
- 1.1.2 ก่อให้เกิดมลภาวะต่ำและประหยัดพลังงานเชื้อเพลิง
- 1.1.3 สามารถควบคุมความสม่ำเสมอในการให้ความร้อนได้
- 1.1.4 สามารถเพิ่มคุณภาพของผลผลิตและเพิ่มปริมาณการผลิตซึ่งส่งผลให้ลดต้นทุนการผลิต

สำหรับข้อเสียที่เกิดจากการนำคลื่นไมโครเวฟมาใช้ในด้านอุตสาหกรรมมีเพียงราคาการลงทุนครั้งแรกมีราคาค่อนข้างสูงมาก [2]

จากข้อดีที่กล่าวมาข้างต้นจึงมีการนำคลื่นไมโครเวฟมาใช้ในการงานอุตสาหกรรมกันอย่างแพร่หลายในหลายๆประเทศทั้งในยุโรป อเมริกา ญี่ปุ่น ออสเตรเลีย ฯลฯ อีกทั้งยังมีการใช้งานอย่างกว้างขวางในงานต่างๆ ได้แก่ การละลายอาหารที่แช่แข็ง , การพาสเจอร์ไรซ์ , การสเตอริไลซ์ , การอบแห้งสินค้าการเกษตรและอุตสาหกรรม [3] , การกำจัดขยะ [4] , การวัลคาไนซ์ , ช่วยเร่งปฏิกิริยาเคมี [5] , กระบวนการเกี่ยวกับการเตรียมเซรามิกส์ , การกำจัดกากนิวเคลียร์ [6] เป็นต้น

จากข้อดีและเนื่องจากมีการใช้งานได้อย่างกว้างขวางดังกล่าวข้างต้นทำให้ผู้วิจัยได้มีความสนใจในการใช้คลื่นไมโครเวฟในงานอุตสาหกรรมโดยมีการศึกษาออกแบบ สร้างและวิเคราะห์ปัญหามาเสนอมาเป็นลำดับ [7]-[16] อีกทั้งได้เพิ่มความละเอียดในการวิเคราะห์มากขึ้นเพื่อสามารถออกแบบระบบที่สามารถใช้งานได้จริงอย่างมีประสิทธิภาพ

1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของการศึกษาการประยุกต์ใช้งานคลื่นไมโครเวฟในงาน อุตสาหกรรม

ระบบให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟที่ได้นำเสนอในระยะแรกเป็นระบบให้ความร้อนอย่างต่อเนื่อง โดยมีหลักการทำงานคือ นำวัสดุที่ต้องการให้ความร้อนวางบนสายพานลำเลียงที่เคลื่อนที่ผ่านท่อนำคลื่นผนังลูกฟูกที่ใช้ป้องกันคลื่นรั่วเข้าไปในระบบที่เป็นตู้ปิดซึ่งใช้สายอากาศแบบสล็อตอาร์เรย์เป็นตัวปล่อยคลื่น โดยมีการวิเคราะห์ค่าสนามไฟฟ้าภายใต้สมมติฐานว่าคลื่นถูกดูดกลืนหมดภายในไดอิเล็กตริกและการกระจายอุณหภูมิภายใต้เงื่อนไขที่ไดอิเล็กตริกมีลักษณะเป็นเส้นบาง (Slab) ซึ่งเป็นปัญหาใน 1 มิติภายใต้สมมติฐานว่าคลื่นถูกดูดกลืนหมดภายในไดอิเล็กตริก [12]

เนื่องจากในสภาพการใช้งานจริงวัสดุที่ต้องการให้ความร้อนเป็นวัสดุที่มีความหนาทำให้เป็นปัญหาในการวิเคราะห์ 3 มิติ นอกจากนั้นภายในตู้จำเป็นต้องมีแผ่นตัวนำด้านล่างเนื่องจากเป็นตู้ปิดทำให้ต้องคำนึงถึงการสะท้อนจากแผ่นตัวนำของผนังตู้ด้านล่าง ดังนั้นวัตถุประสงค์และขอบเขตของวิทยานิพนธ์นี้จึงเป็นการวิเคราะห์ค่าสนามไฟฟ้าและการกระจายอุณหภูมิภายในสารไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสียภายใต้เงื่อนไขของไดอิเล็กตริกที่มีความหนาและอยู่ระหว่างแผ่นระนาบตัวนำขนาน ซึ่งในการศึกษานี้จะใช้สมมติฐานว่าตัวนำนี้มีขนาดอนันต์เมื่อป้อนคลื่นด้วยสายอากาศสล็อตอาร์เรย์ จะเริ่มต้นจากการพิจารณาคลื่นระนาบและวิเคราะห์ผลกระทบจากเงื่อนไขดังกล่าวโดยใช้วิธีการลากเส้นรังสี (Ray-Tracing) เพื่อพิจารณาการสะท้อนหลายครั้ง (Multiple Reflection) ผลจากการวิเคราะห์พบว่าในการหาสนามไฟฟ้าภายในไดอิเล็กตริกจำเป็นต้องคิดการสะท้อนหลายครั้งไม่เช่นนั้นจะทำให้เกิดความผิดพลาดหากคิดการสะท้อนเพียงครั้งเดียว เงื่อนไขดังกล่าวมีผลต่อการออกแบบระบบให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ แต่เนื่องจากวิธีการนี้ได้สมมติให้คลื่นตก-กระทบเป็นคลื่นระนาบโดยค่าอิมพีแดนซ์ของคลื่นสามารถหาได้จากอัตราส่วนของสนามไฟฟ้าต่อสนามแม่เหล็กได้ ในปัญหาที่พิจารณาเป็นการกระตุ้นโดยใช้สล็อต ซึ่งสนามจากสายอากาศดังกล่าวที่ระยะใกล้ตัวสายอากาศไม่เป็นคลื่นระนาบจึงไม่สามารถใช้ความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ จึงได้เพิ่มการวิเคราะห์โดยเลือกใช้วิธีโดเมนเชิงสเปกตรัมในการคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้า ซึ่งการกระทำเช่นนี้จะทำให้เราสามารถแปลงคลื่นที่ใกล้ตัวสายอากาศที่เป็นคลื่นทรงกลมไปเป็นคลื่นระนาบได้ การศึกษาจะพิจารณาการกระจายแรงดันบนปากสล็อตและทฤษฎีสนามไฟฟ้าสมมูลเพื่อหาแหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็กและใช้หลักการแปลงฟูริเยร์ (Fourier Transformation) และการแปลงฟูริเยร์ผกผัน (Inverse Fourier Transformation) หาค่าสนามไฟฟ้า จากนั้นนำค่าสนามไฟฟ้าที่ได้จากวิธีโดเมนเชิงสเปกตรัมมาหาการกระจายอุณหภูมิตามแผ่นไดอิเล็กตริกโดยใช้สมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การส่งผ่านความร้อน (Heat Transfer Equation) และได้เลือกใช้วิธีการคำนวณเชิงเลขเพื่อแก้สมการ โดยวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม (Finite Difference Method) โดยเลือกใช้ขั้นตอนการคำนวณของแครงก์นิโคลสัน (Crank Nicholson Algorithm) เพื่อหาค่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเคลื่อนที่ของสารไดอิเล็กตริกผ่านระบบให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ ที่ใช้สายอากาศสล็อตอาร์เรย์หลายตัว จากนั้นจะทำการวิเคราะห์หาเงื่อนไขที่จะทำให้การกระจายอุณหภูมิสม่ำเสมอตลอดเนื้อไดอิเล็กตริก ผลที่ได้จากการวิเคราะห์นี้สามารถนำไปใช้ออกแบบระบบที่มีอยู่ให้มีความเหมาะสมกับการใช้งาน

1.3 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 7 บท โดยบทที่ 1 เป็นบทนำซึ่งจะกล่าวถึง ข้อดี ข้อเสีย อีกทั้งการใช้งานที่มีอยู่ในปัจจุบันของเครื่องให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ นอกจากนี้ยังได้กล่าวถึงหลักการทำงานของระบบที่สร้างขึ้นรวมถึงวัตถุประสงค์ ขอบเขต เงื่อนไขที่กำหนดในการวิเคราะห์ปัญหาและส่วนประกอบทั้งหมดของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของคลื่นระนาบที่มีการเคลื่อนที่และตกกระทบแบบตั้งฉาก ทั้งในตัวกลางที่มีการสูญเสียและไม่มีการสูญเสียรวมถึงการสะท้อนและการส่งผ่านของคลื่นระนาบ เมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางต่างชนิดเพื่อนำทฤษฎีทั้งหมดมาใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างของปัญหาในบทถัดไป

บทที่ 3 กล่าวถึง โครงสร้างและข้อกำหนดของปัญหาที่ต้องการวิเคราะห์ หลักการที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ ผลการคำนวณเมื่อคำนึงถึงผลกระทบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต่างๆ รวมทั้งการพิจารณาสมมติฐานที่ตั้งขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการทำงานจริงของระบบดังกล่าว

บทที่ 4 กล่าวถึงความจำเป็นในการพิจารณาเลือกใช้ทฤษฎีโดเมนเชิงสเปกตรัมเพื่อลดค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นเนื่องจากสมมติฐานที่กำหนดในบทก่อนหน้านี้ ทฤษฎีโดเมนเชิงสเปกตรัม ทฤษฎีสนามสมมูล การวิเคราะห์การแปลงฟูริเยร์ของสนามไฟฟ้า ซึ่งทฤษฎีดังกล่าวจะถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์และคำนวณเพื่อแสดงผลในบทถัดไป

บทที่ 5 กล่าวถึงลักษณะ โครงสร้าง ขอบเขตของการวิเคราะห์ เงื่อนไขขอบเขตของปัญหา สมการของสนามไฟฟ้าในไดอิเล็กตริกที่วางระหว่างแผ่นตัวนำขนานขนาดอนันต์โดยวิธีโดเมนเชิงสเปกตรัม ผลการคำนวณจากสมการคำตอบและผลการวิเคราะห์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต่างๆ ตามการใช้งานจริง

บทที่ 6 กล่าวถึงการวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิโดยนำค่าสนามไฟฟ้าที่ได้จากบทก่อนมาใช้ในการคำนวณ ทฤษฎีการส่งผ่านความร้อน สมการผลต่างสี่เหลี่ยมและผลการวิเคราะห์ที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7 กล่าวถึงผลสรุปทั้งหมดที่ได้จากการวิเคราะห์ดังกล่าว วิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนระหว่างการคำนวณและการทดลองที่เกิดขึ้นและเสนอแนะแนวทางในการวิเคราะห์ที่ให้ความแม่นยำมากขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีของคลื่นระนาบและการสะท้อน

2.1 กล่าวนำ

โครงสร้างที่มีแผ่นตัวนำสองแผ่นขนาดอนันต์วางขนานกัน โดยมีแผ่น ไดอิเล็กทริกที่มีการสูญเสียวางแทรกอยู่ระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสองนั้น ในการหาค่าสนามไฟฟ้าภายในไดอิเล็กทริกที่มีการสูญเสีย โดยคิดการสะท้อนหลายครั้ง (Multiple Reflection) ซึ่งการหาค่าสนามไฟฟ้าดังกล่าวทำได้ภายใต้สมมติฐานของคลื่นระนาบ และจำเป็นต้องใช้ทฤษฎีพื้นฐานของคลื่นระนาบและการสะท้อน ซึ่งต้องพิจารณาการเคลื่อนที่ของคลื่นในโหมดแม่เหล็กไฟฟ้าตามขวาง (Transverse Electromagnetic Modes) ทั้งในตัวกลางที่ไม่มีการสูญเสีย (Lossless Medium) และตัวกลางที่มีการสูญเสีย (Lossy Medium) เนื่องจากมีการเดินทางของคลื่นผ่านตัวกลางดังกล่าว นอกจากนี้ขอบเขตของตัวกลางที่ต่างชนิดกัน การเดินทางของคลื่นจะเกิดปรากฏการณ์สะท้อนและส่งผ่านที่ขอบเขตนั้น ๆ โดยจะกล่าวถึงเฉพาะกรณีที่มีการตกกระทบแบบตั้งฉาก (Normal Incident) ทั้งในตัวกลางที่มีการสูญเสียและไม่มีการสูญเสีย ทฤษฎีพื้นฐานที่กล่าวมานี้เป็นหลักการที่จำเป็นต้องนำมาใช้ ในการคำนวณในบทถัดไป

2.2 คลื่นในโหมดแม่เหล็กไฟฟ้าตามขวางในตัวกลางที่ไม่มีการสูญเสีย

ในหัวข้อนี้จะอธิบายธรรมชาติของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าของคลื่นระนาบที่เดินทางในตัวกลางที่ไม่มีขอบเขตรวมถึงค่าอิมพีแดนซ์ของคลื่น (Wave Impedance) ในตัวกลางที่ไม่มีการสูญเสีย

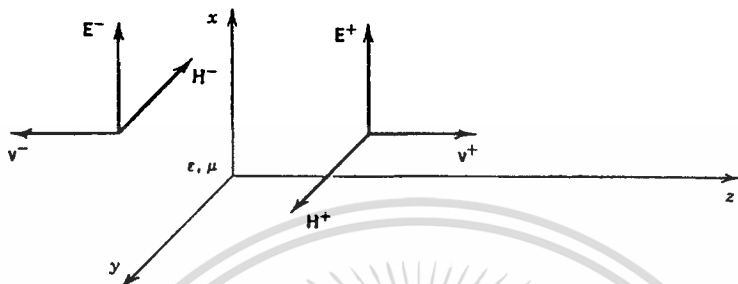
2.2.1 สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

ถ้าให้คลื่นระนาบสม่ำเสมอที่มีการเปลี่ยนแปลงกับเวลาเป็นแบบฮาร์มอนิก เดินทางในตัวกลางที่ไม่มีการสูญเสียที่ไม่มีขอบเขต (ϵ, μ) ในทิศทาง z (ทั้งทิศบวกและลบ) แสดงดังรูปที่ 2.1ก โดยให้มีเพียงสนามไฟฟ้าในทิศ x เท่านั้น ดังนั้นสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กต้องเป็นไปตาม

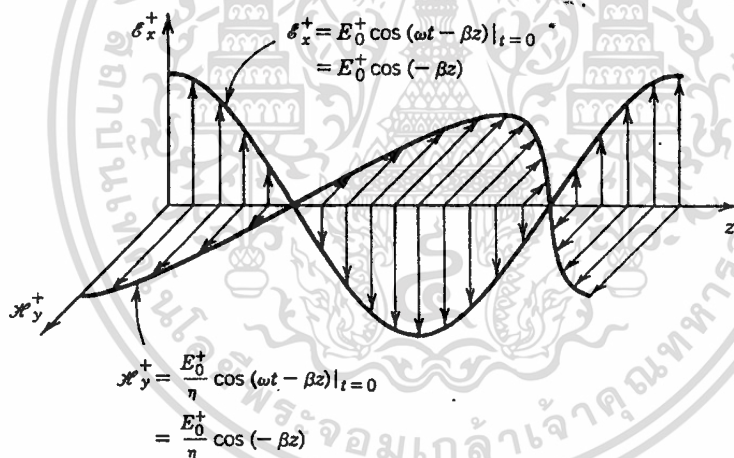
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's Equation) ทั้ง 4 สมการหรือเป็นไปตามสมการคลื่น (Wave Equation)

รูปที่ 2.1ก แสดงสนามเชิงซ้อนของคลื่นระนาบ



รูปที่ 2.1ข สนามขณะใดขณะหนึ่งของคลื่นระนาบ



เนื่องจากสมมติให้สนามไฟฟ้ามีเพียงองค์ประกอบในแนวแกน x ซึ่งจะต้องมีคุณสมบัติตามสมการคลื่นในรูปสเกลาร์ (Scalar Wave Equation) ที่มีการเดินทางในทิศ z ดังนั้นคำตอบจึงไม่เป็นฟังก์ชันของ x และ y จะได้ว่า

$$E_x(z) = h(z) \quad (2.1)$$

คำตอบของ $h(z)$ สามารถหาจากวิธีแยกตัวแปร (Separation of Variables) โดยจะเลือกคำตอบของคลื่นจร (Traveling Wave) โดยสามารถแสดงถึงคลื่นที่เดินทางในทิศ $+z$ และ $-z$ ดังในเทอมแรก และ เทอมที่สองตามลำดับ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_x(z) = E_0^+ e^{-j\beta z} + E_0^- e^{+j\beta z} \quad (2.2)$$

โดยที่ β คือ ค่าคงที่เฟส(phase constant rad/m) ซึ่งมีค่าเป็น $\sqrt{\beta_x^2 + \beta_y^2 + \beta_z^2}$ ดังนั้น $\beta_z = \beta$ เนื่องจาก $\beta_x = \beta_y = 0$ และ E_0^+, E_0^- คือ ขนาดของสนามไฟฟ้าที่เดินทางในทิศบวกและทิศลบตามลำดับ

ในการทำงานเดียวกันก็สามารถหาค่าสนามแม่เหล็กได้จากสมการคลื่น (Wave Equation) เช่นกัน ซึ่งรูปแบบจะเหมือนกับสมการ (2.2) โดยสามารถหาค่าสนามแม่เหล็กได้โดยใช้สมการแมกซ์เวลล์ โดยหากหาค่าสนามไฟฟ้าที่ได้จากสมการ (2.2) จะได้ว่า

$$\nabla \times \bar{E} = -j\omega\mu\bar{H} \quad (2.3)$$

โดยที่ ω คือ ความถี่เชิงมุม (Angular Frequency rad/s)

μ คือ ค่าความซึมซาบได้ (Permeability H/m)

\bar{H} คือ ค่าสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field A/m)

$$\begin{aligned} \bar{H} &= -\frac{1}{j\omega\mu} \nabla \times \bar{E} \\ &= -\frac{1}{j\omega\mu} \begin{bmatrix} \hat{a}_x & \hat{a}_y & \hat{a}_z \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ E_x & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.3.1)$$

เมื่อแทนค่าสมการ (2.2) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \bar{H} &= -\hat{a}_y \frac{1}{j\omega\mu} \left(\frac{\partial E_x}{\partial z} \right) \\ &= \hat{a}_y \frac{\beta}{\omega\mu} (E_0^+ e^{-j\beta z} - E_0^- e^{+j\beta z}) \\ &= \hat{a}_y \frac{1}{\sqrt{\mu/\epsilon}} (E_0^+ e^{-j\beta z} - E_0^- e^{+j\beta z}) \\ &= \hat{a}_y \frac{1}{\sqrt{\mu/\epsilon}} (E_x^+ - E_x^-) \\ &= \hat{a}_y (H_y^+ + H_y^-) \end{aligned} \quad (2.3.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น

$$H_y^+ = \frac{1}{\sqrt{\mu/\epsilon}} E_x^+ \quad (2.3.3)$$

$$H_y^- = -\frac{1}{\sqrt{\mu/\epsilon}} E_x^- \quad (2.3.4)$$

โดยที่ ϵ คือ สภาพยอม (permittivity F/m)

ภาพสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าที่เดินทางในทิศทางที่เวลา $t=0$ และเป็นฟังก์ชันของ z ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.1 ข

2.2.2 อิมพีแดนซ์ของคลื่น (Wave Impedance)

เนื่องจากแต่ละเทอมของสนามแม่เหล็ก (A/m) ในสมการ (2.3.3) และ (2.3.4) จะมีลักษณะเฉพาะเหมือนกับสนามไฟฟ้า (V/m) ในสมการ (2.2) เทอม $\sqrt{\mu/\epsilon}$ ในสมการ (2.3.3) และ (2.3.4) จะมีหน่วยเป็นโอห์ม (V/A) ดังนั้นค่า $\sqrt{\mu/\epsilon}$ จะถูกเรียกว่า อิมพีแดนซ์ของคลื่น (Wave Impedance) Z_w ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

$$Z_w = \frac{E_x^+}{H_y^+} = -\frac{E_x^-}{H_y^-} = \eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (2.4)$$

อิมพีแดนซ์ของคลื่นเป็นปริมาณที่มีค่าตรงกับตัวแปรที่เราเรียกว่า อินทรินซิกอิมพีแดนซ์ (Intrinsic Impedance) ของตัวกลางซึ่งจะเป็นจริงในกรณีทั่วไปของคลื่นระนาบสม่ำเสมอและคลื่นในโหมดแม่เหล็กไฟฟ้าตามขวาง แต่จะไม่เป็นจริงในกรณีโหมดไฟฟ้าตามขวาง (TE) และ โหมดแม่เหล็กตามขวาง (TM)

2.3 คลื่นในโหมดแม่เหล็กไฟฟ้าตามขวางในตัวกลางที่มีการสูญเสีย

ในหัวข้อนี้จะแสดงค่าสนามไฟฟ้า, สนามแม่เหล็ก อิมพีแดนซ์ของคลื่นระนาบที่มีการเดินทางในตัวกลางที่มีการสูญเสีย โดยใช้ระบบพิกัดของรูปที่ 2.1 ก โดยสมมติให้มีสนามไฟฟ้าในทิศ x และคลื่นเดินทางในทิศทาง $\pm z$ เนื่องจากค่าสนามไฟฟ้าต้องเป็นไปตามสมการคลื่น สำหรับตัวกลางเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่มีการสูญเสียจากไดอิเล็กตริก ($\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$) และค่าความนำไฟฟ้า (σ) โดยสามารถหาคำตอบของสมการได้โดยวิธีแยกตัวแปรซึ่งคำตอบของสมการคลื่นในตัวกลางที่มีการสูญเสียสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\bar{E}(z) &= \hat{a}_x E_x(z) \\ &= \hat{a}_x (E_0^+ e^{-\gamma z} + E_0^- e^{+\gamma z}) \\ &= \hat{a}_x (E_0^+ e^{-\alpha z} e^{-j\beta z} + E_0^- e^{+\alpha z} e^{+j\beta z})\end{aligned}\quad (2.5)$$

โดยที่ $\gamma_x = \gamma_y = 0$ และ $\gamma_z = \gamma$ โดยเทอมแรกของสมการ (2.5) แสดงการเดินทางของคลื่นในทิศ $+z$ และ เทอมหลังแสดงการเดินทางของคลื่นในทิศ $-z$, γ คือค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่น (Propagation Constant) มีส่วนจริง α คือ ค่าคงที่การลดทอน (Np/m) และค่าคงที่เฟสเป็นส่วนจินตภาพโดย

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (2.6)$$

ซึ่งค่าคงที่เฟสและค่าคงที่การลดทอนคือ [17]

$$\alpha = \omega \sqrt{\mu \epsilon_0 \epsilon'} / 2 \left(\sqrt{1 + (\epsilon'' / \epsilon')^2} - 1 \right) \quad (2.7)$$

$$\beta = \omega \sqrt{\mu \epsilon_0 \epsilon'} / 2 \left(\sqrt{1 + (\epsilon'' / \epsilon')^2} + 1 \right) \quad (2.8)$$

โดยที่ ϵ_0 คือ สภาพยอมในช่องว่างอิสระ (Free Space Permittivity F/m)

ϵ' คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (Relative dielectric constant)

ϵ'' คือ ค่าประกอบในการสูญเสียยังผล (Effective Loss Factor)

ค่าสนามแม่เหล็กซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับสนามไฟฟ้าโดยสามารถหาได้จากสมการแมกซ์เวลล์ นั่นคือ

$$\bar{H} = -\frac{1}{j\omega\mu} \nabla \times \bar{E} \quad (2.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อแทนสมการ (2.5) ในสมการ (2.9) จะได้

$$\begin{aligned}
 \bar{H} &= +\hat{a}_y \frac{\gamma}{j\omega\mu} (E_0^+ e^{-\gamma z} - E_0^- e^{+\gamma z}) \\
 &= +\hat{a}_y \sqrt{\frac{\sigma + j\omega\epsilon}{j\omega\mu}} (E_0^+ e^{-\gamma z} - E_0^- e^{+\gamma z}) \\
 &= +\hat{a}_y \frac{1}{Z_w} (E_0^+ e^{-\gamma z} - E_0^- e^{+\gamma z})
 \end{aligned} \tag{2.10}$$

Z_w คือ อิมพีแดนซ์ของคลื่นสามารถเขียนได้ในรูป

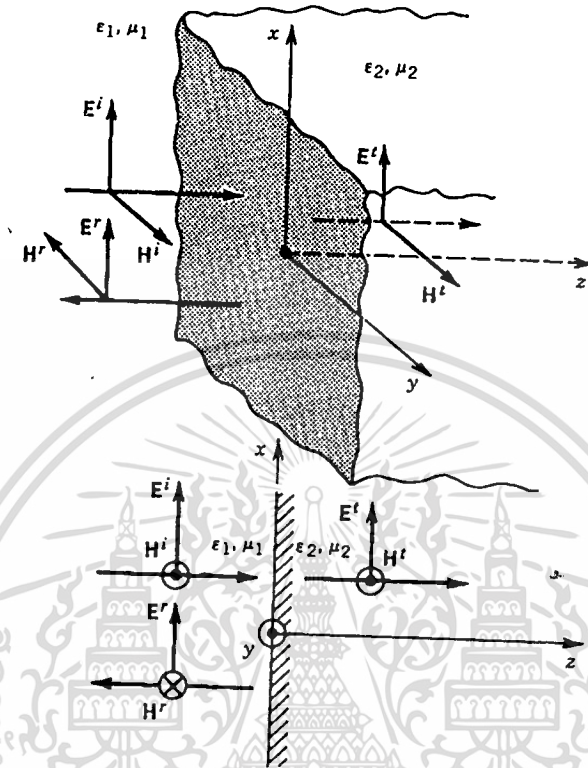
$$Z_w = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\epsilon}} = \eta_c \tag{2.11}$$

ค่า Z_w มีค่าเท่ากับอินทรีนซิกอิมพีแดนซ์ของตัวกลางที่มีการสูญเสียความเหมือนกันระหว่างอิมพีแดนซ์ของคลื่นและอินทรีนซิกอิมพีแดนซ์ของคลื่นในโหมคแม่เหล็กไฟฟ้าตามขวางในตัวกลางที่ไม่มีการสูญเสีย

2.4 คลื่นระนาบตกกระทบตั้งฉากในตัวกลางที่ไม่มีการสูญเสีย

หัวข้อนี้จะพิจารณาการสะท้อนและการส่งผ่านของคลื่นจากระนาบขอบเขตของตัวกลางที่ไม่มีการสูญเสีย โดยให้คลื่นเดินทางในทิศตั้งฉากกับระนาบรอยต่อของสองตัวกลางที่ไม่มีการสูญเสีย ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งมีพารามิเตอร์ประกอบ (Constitutive Parameters) มีค่าเป็น (ϵ_1, μ_1) และ (ϵ_2, μ_2) เมื่อคลื่นตกกระทบบนที่รอยต่อคลื่นส่วนหนึ่งจะสะท้อนกลับมายังตัวกลางที่ 1 ส่วนที่เหลือจะทะลุผ่านไปยังตัวกลางที่ 2

รูปที่ 2.2 แสดงการสะท้อนและการส่งผ่านของคลื่นระนาบโดยการกระทบแบบตั้งฉาก



สมมติให้สนามไฟฟ้าที่ตกกระทบมีขนาด E_0 และมีโพลาไรซ์ในทิศทาง x ดังนั้นสามารถเขียนสนามไฟฟ้าในเทอมของการตกกระทบ, สะท้อนและส่งผ่านได้ตามลำดับดังนี้

$$\bar{E}^i = \hat{a}_x E_0 e^{-j\beta_1 z} \quad (2.12.1)$$

$$\bar{E}^r = \hat{a}_x \Gamma^b E_0 e^{+j\beta_1 z} \quad (2.12.2)$$

$$\bar{E}^t = \hat{a}_x T^b E_0 e^{-j\beta_2 z} \quad (2.12.3)$$

เมื่อ Γ^b และ T^b คือค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและส่งผ่านตามลำดับ ค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวสามารถหาได้จากการใช้เงื่อนไขขอบเขตที่รอยต่อของการตกกระทบและในกรณีนี้สมมติให้ทิศของสนามไฟฟ้ามีทิศบวกจากสมการ (2.12) สามารถหาค่าสนามแม่เหล็กได้ตามลำดับดังนี้

$$\bar{H}^i = \hat{a}_y \frac{E_0}{\eta_1} e^{-j\beta z} \quad (2.13.1)$$

$$\bar{H}^r = -\hat{a}_y \Gamma^b \frac{E_0}{\eta_1} e^{+j\beta z} \quad (2.13.2)$$

$$\bar{H}^t = \hat{a}_y T^b \frac{E_0}{\eta_2} e^{+j\beta z} \quad (2.13.3)$$

สัมประสิทธิ์การสะท้อนและการส่งผ่านสามารถหาได้โดยกฎความต่อเนื่องของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่สัมผัสขนานกับรอยต่อ ดังนั้นสมการองค์ประกอบที่สัมผัสรอยต่อที่ $z=0$ จะได้ว่า

$$1 + \Gamma^b = T^b \quad (2.14.1)$$

$$\frac{1}{\eta_1}(1 - \Gamma^b) = \frac{1}{\eta_2} T^b \quad (2.14.2)$$

สามารถหาคำตอบของสมการทั้งสองได้ดังนี้

$$\Gamma^b = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1} = \frac{E^r}{E^i} = -\frac{H^r}{H^i} \quad (2.15.1)$$

$$\begin{aligned} T^b &= \frac{2\eta_2}{\eta_1 + \eta_2} = 1 + \Gamma^b \\ &= \frac{E^t}{E^i} = \frac{\eta_2}{\eta_1} \frac{H^t}{H^i} \end{aligned} \quad (2.15.2)$$

ดังนั้นสัมประสิทธิ์การสะท้อนและการส่งผ่านของคลื่นระนาบที่มีการดกกระทบแบบตั้งฉากอยู่ในรูปฟังก์ชันคุณสมบัติพารามิเตอร์ประกอบ

2.5 คลื่นระนาบตกกระทบบนตัวกลางที่มีการสูญเสีย

ในหัวข้อก่อนหน้านี้พิจารณาการตกกระทบบนตัวกลางที่ไม่มี การสูญเสีย ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและส่งผ่านของตัวกลางที่ มีการสูญเสีย เมื่อคลื่นระนาบเดินทางตามรูปที่ 2.2 จะได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและส่งผ่าน เป็นคำตอบเดียวกันกับในกรณีแรก เพียงแต่แตกต่างกันโดยการแทนค่าอินทิกรัลของฟังก์ชันของ ตัวกลางที่มีการสูญเสียลงไป

2.6 สรุป

ในบทนี้กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของคลื่นระนาบที่มีการเคลื่อนที่ในแกนหลัก (Principal Axis) โดยพิจารณาทั้งสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า รวมถึงความสัมพันธ์ของสนามทั้งสองซึ่งคือ ค่าอินทิกรัลของฟังก์ชันโดยมีการเดินทางของคลื่นระนาบทั้งในตัวกลางที่ไม่มี การสูญเสียและตัว กลางที่มีการสูญเสีย

นอกจากนี้ยังกล่าวถึงทฤษฎีการตกกระทบบนตัวกลางของคลื่นระนาบทั้งในตัวกลางที่ไม่มี การสูญเสียและในตัวกลางที่มีการสูญเสีย โดยสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและการส่ง ผ่านที่บริเวณรอยต่อในรูปความสัมพันธ์ของค่าอินทิกรัลของฟังก์ชันของตัวกลางทั้งสอง

ทฤษฎีที่กล่าวมาทั้งหมดในบทนี้สามารถนำไปใช้ในการหาค่าสนามไฟฟ้าภายในไดอิเล็ก- ทรिकที่อยู่ระหว่างแผ่นตัวนำขนานขนาดอนันต์ที่มีการสะท้อนหลายครั้ง (Multiple Reflection) เนื่อง จากมีการเดินทางของคลื่นระนาบและการตกกระทบบน , สะท้อนและส่งผ่านของคลื่นซึ่งจะพิจารณา ในรายละเอียดในบทถัดไป

บทที่ 3

การวิเคราะห์การสะท้อนหลายครั้งโดยวิธีลากเส้นรังสี

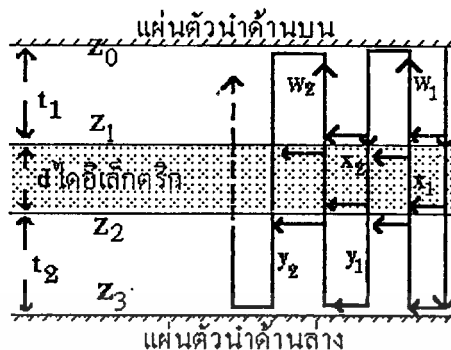
3.1 กล่าวนำ

การพิจารณาค่าสนามไฟฟ้าภายในเนื้อไดอิเล็กตริก มีความจำเป็นต่อการออกแบบระบบให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ เนื่องจากค่าสนามไฟฟ้าเป็นค่าที่ทำให้เกิดความร้อนภายในไดอิเล็กตริก ดังนั้นเราจึงจำเป็นต้องทราบการกระจายสนามไฟฟ้าภายในไดอิเล็กตริกทั้งแนวตั้งขวางและแนวลึก ซึ่งทำได้โดยนำทฤษฎีพื้นฐานของคลื่นระนาบและการสะท้อนจากบทที่ผ่านมา มาประยุกต์ใช้เพื่อหาค่าสนามไฟฟ้าภายในไดอิเล็กตริกที่มีความหนาและวางอยู่ระหว่างแผ่นตัวนำที่วางขนานกันขนาดคอนันต์ค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดจากการสะท้อนหลายครั้ง (Multiple Reflection) ภายในเนื้อไดอิเล็กตริกที่อยู่ระหว่างแผ่นตัวนำดังกล่าวจะถูกพิจารณาในบทนี้ ผลกระทบเมื่อมีการเปลี่ยนระยะห่างของแผ่นตัวนำด้านล่าง, ความหนาของไดอิเล็กตริก, ชนิดของไดอิเล็กตริก รวมถึงค่าความถี่ที่เปลี่ยนแปลงของแหล่งกำเนิดคลื่น

3.2 ลักษณะโครงสร้างของปัญหา

ในหัวข้อนี้อธิบายลักษณะ โครงสร้างของปัญหารวมทั้งข้อกำหนดเพื่อลดความซับซ้อนในการคำนวณ โดยพิจารณาจากรูปที่ 3.1

รูปที่ 3.1 แสดงรูปแบบในการวิเคราะห์การสะท้อนหลายครั้ง



พบว่าเมื่อให้คลื่นระนาบเดินทางจากแผ่นตัวนำด้านบน ตกกระทบวัสดุที่ต้องการให้ความร้อน คลื่นส่วนหนึ่งจะสะท้อนกลับมายังแผ่นตัวนำ คลื่นอีกส่วนหนึ่งจะทะลุผ่านวัสดุออกไปยังแผ่นตัวนำด้านล่างที่ขนานกับระนาบของวัสดุที่ต้องการให้ความร้อน แผ่นด้านบนจะมีคลื่นสะท้อนกลับมายังไดอิเล็กตริก นอกจากนี้ยังรวมถึงการสะท้อนกลับไปมาภายใน ไดอิเล็กตริก และระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสอง การวิเคราะห์ปัญหาที่มีโครงสร้างดังกล่าวจะถูกพิจารณาโดยกำหนดว่า

- ให้คลื่นระนาบที่ออกจากแผ่นตัวนำด้านบน โดยสมมติให้มีค่าสนามไฟฟ้า 100 V/m
- พิจารณาเฉพาะการตกกระทบแบบตั้งฉาก (Normal Incident) โดยที่ค่าสนามไฟฟ้าสามารถหาได้โดยวิธีการลากเส้นรังสี

3.3 สมการคลื่นระนาบที่มีการสะท้อนหลายครั้งภายในขอบเขตของแผ่นระนาบตัวนำขนานขนาดอนันต์

การคำนวณการสะท้อนหลายครั้งเพื่อหาค่าสนามไฟฟ้าภายในไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสียสามารถหาคำตอบได้โดยวิธีการลากเส้นรังสี[18] จากรูปที่ 3.1 เมื่อคลื่นเดินทางจากแผ่นตัวนำด้านบนผ่านตัวกลางที่เป็นอากาศตกกระทบไดอิเล็กตริกที่ขอบเขต Z_1 คลื่นส่วนหนึ่งจะเดินทางผ่านจาก Z_1 ไปยัง Z_2 ที่ขอบเขต Z_2 คลื่นจะเกิดการสะท้อนกลับไปยัง Z_1 และส่งผ่านไปยังแผ่นตัวนำด้านล่างอีกเช่นกัน ซึ่งจะเกิดการสะท้อนกลับไปมา การพิจารณาค่าสนามไฟฟ้าภายในเนื้อไดอิเล็กตริก ในกรณีนี้จำเป็นต้องหาค่าสัมประสิทธิ์ การสะท้อน และการส่งผ่านที่เกิดจากการสะท้อนหลายครั้ง

กำหนดให้

$$\theta_i = (\alpha + j\beta_i)d \quad (3.1)$$

$$\theta_1 = (j\beta_1 t_1) \quad (3.2)$$

$$\theta_2 = (j\beta_1 t_2) \quad (3.3)$$

จากรูปที่ 3.1 นำทฤษฎีการเคลื่อนที่ของคลื่นระนาบและการสะท้อนจากบทยกก่อนหน้ามาประยุกต์ใช้โดยเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ในตัวกลางใดๆ ก็จะมีรูปแบบตามสมการ (2.2) หรือ (2.5) เมื่อมีการสะท้อนหรือส่งผ่านที่ขอบเขตใดๆ ก็สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและการส่งผ่านระหว่างตัวกลางทั้งสองโดยสมการ (2.15.1) และ (2.15.2) ตามลำดับ เมื่อมีการตกกระทบที่ขอบเขตเดิมอีกก็นำค่าการเคลื่อนที่ของคลื่นระนาบในระยะที่เดินทาง และค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนหรือส่งผ่านคูณเข้ากับพจน์เดิมทำซ้ำอย่างนี้ ดังนั้นสมการคลื่นระนาบที่มีการสะท้อนหลายครั้งภายในขอบเขตของแผ่นระนาบตัวนำขนานขนาดอนันต์คือ

$$E = E_0 (T_{z_1 z_2} e^{-\gamma(z-z_1)} + \Gamma_{z_2 z_1} e^{+\gamma(z-z_2)}) \quad (3.4)$$

โดยที่ $T_{z_1 z_2}$ คือค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านเนื่องจากการสะท้อนหลายครั้งจากขอบเขต Z_1 ไปยัง Z_2 โดยมีค่า

$$T_{z_1 z_2} = T_{21} e^{-\theta_1} + \sum_{i=1}^n x_{2i} \quad (3.5)$$

โดยที่

$$x_{2i} = [x_{2i-1} \Gamma_{21} e^{-\theta_d}] + [w_i \Gamma_s T_{21} e^{-2\theta_1}] \quad (3.5.1)$$

$$w_i = [w_{i-1} \Gamma_s \Gamma_{12} e^{-2\theta_1}] + [x_{2i-1} T_{12} e^{-\theta_d}] \quad (3.5.2)$$

$\Gamma_{z_2 z_1}$ คือค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเนื่องจากการสะท้อนหลายครั้งจากขอบเขต z_2 ไปยัง z_1 โดยมีค่า

$$\Gamma_{z_2 z_1} = x_1 + \sum_{j=1}^n x_{2j+1} \quad (3.6)$$

โดยที่

$$x_{2j+1} = [x_{2j} \Gamma_{21} e^{-\theta_d}] + [y_j \Gamma_p T_{21} e^{-2\theta_2}] \quad (3.6.1)$$

$$y_j = [y_{j-1} \Gamma_p \Gamma_{12} e^{-2\theta_2}] + [x_{2j} T_{12} e^{-\theta_d}] \quad (3.6.2)$$

พิจารณารูปที่ 3.1 ประกอบจะได้ว่า

$$w_1 = \Gamma_{12} e^{-\theta_1} + x_1 T_{12} e^{-\theta_d} \quad (3.7)$$

$$x_1 = [\Gamma_{21} T_{21} e^{-(\theta_d + \theta_1)}] + [\Gamma_p T_{21}^2 T_{12} e^{(\theta_1 + \theta_d + 2\theta_2)}] \quad (3.8)$$

$$y_1 = [\Gamma_p T_{21} T_{12} \Gamma_{21} e^{-(\theta_1 + \theta_d + 2\theta_2)}] + [T_{12} x_2 e^{-\theta_d}] \quad (3.9)$$

โดยที่

Γ_{21}, Γ_{12} คือค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับไปยังตัวกลางที่ 2 และ 1 ตามลำดับ

T_{12}, T_{21} คือค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านไปยังตัวกลางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

Γ_s, Γ_p คือค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ผิวตัวนำมีค่า -1

จากสมการที่ (3.5) และ (3.6) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและส่งผ่านเนื่องจากการสะท้อนหลายครั้งถูกเขียนอยู่ในรูปของอนุกรม ดังนั้น ถ้าไม่สามารถพิจารณาการสะท้อนหลายครั้งหรือพิจารณาการสะท้อนเพียงครั้งแรกๆของการตกกระทบทำให้สนามไฟฟ้าที่ต้องการมีค่าผิดพลาด ค่าตอบของสนามไฟฟ้าสามารถหาได้โดยใช้โปรแกรม Mathematica

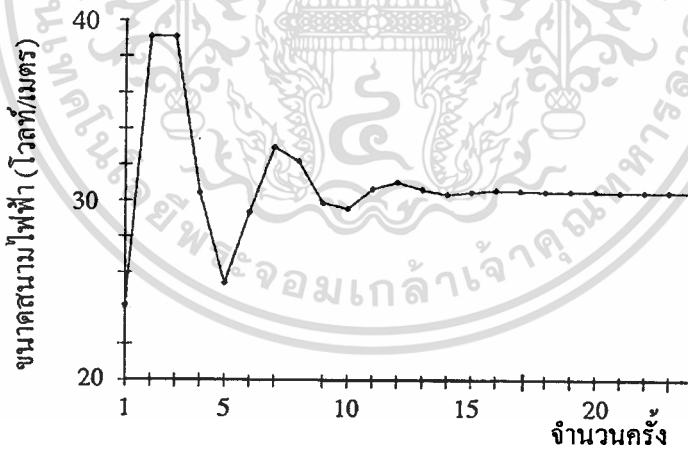
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 ผลการคำนวณ

จากการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าบริเวณใกล้สายอากาศสล็อตอาร์เรย์แบบระนาบ[7]พบว่าค่าสนามไฟฟ้าบริเวณที่ใกล้ปากสล็อตจะมีค่ามากกว่าบริเวณอื่นดังนั้นการวางวัสดุหรือไดอิเล็กตริกให้อยู่ใกล้สล็อตมากขึ้นก็สามารถให้ความร้อนกับวัสดุได้ดีขึ้น ดังนั้นในการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าตามรูปที่ 3.1 นั้นเราจะกำหนดระยะ t_1 ให้คงที่อยู่ที่ 1 เซนติเมตร และได้มีการวิเคราะห์โดยพิจารณาว่าสนามไฟฟ้าที่อยู่ภายในสารไดอิเล็กตริกเมื่อมีการเปลี่ยนระยะ t_2 การเปลี่ยนระยะความหนาของน้ำ (d) ซึ่งใช้เป็นสารไดอิเล็กตริกในการวิเคราะห์ นอกจากนี้ยังคำนึงถึงผลที่เกิดขึ้นเนื่องจากความไม่คงที่ในการให้ความถี่ของหลอดแมกนีตรอน และผลการคำนวณเมื่อมีการเปลี่ยนประเภทของสารไดอิเล็กตริกจากน้ำไปเป็น เนื้อวัว และ ข้าว[15]

3.4.1 ผลของการคำนวณการสะท้อนหลายครั้ง

รูปที่ 3.2 แสดงผลการคำนวณการสะท้อนหลายครั้ง



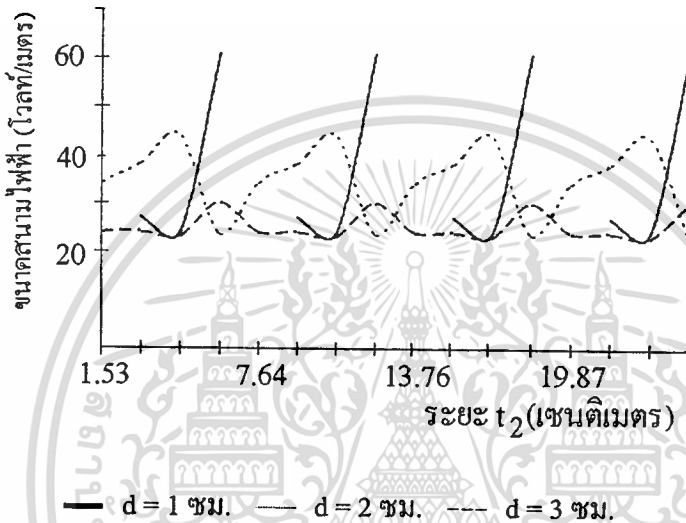
รูปที่ 3.2 แสดงผลการคำนวณสนามไฟฟ้าภายในน้ำที่ตำแหน่งห่างจาก Z_1 เท่ากับ 0.5 เซนติเมตร ซึ่งน้ำมีความหนา (d) 2 เซนติเมตร ระยะ t_1 1 เซนติเมตร ระยะ t_2 6.12 เซนติเมตร ที่จำนวนครั้งของการสะท้อนต่างๆ จากรูปจะพบว่าเมื่อมีการคิดการสะท้อนเพียงแค่หนึ่งครั้ง ค่าสนามไฟฟ้าที่ได้จะผิดพลาดจากค่าที่ได้คำนวณไป 23 ครั้งจนคำตอบลู่เข้าอยู่ 20% ดังนั้นจึงต้องมีการพิจารณาการสะท้อนอย่างละเอียด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 ผลการคำนวณค่าสนามไฟฟ้าที่มีค่ามากที่สุดภายในน้ำ

การเปลี่ยนระยะ t_2 ที่ความหนาของน้ำ 1, 2 และ 3 เซนติเมตร น้ำที่ใช้ในการคำนวณมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ $\epsilon_r = 80-j8$ ที่ความถี่ 2,450 MHz ผลการคำนวณแสดงดังรูปที่ 3.3

รูปที่ 3.3 แสดงค่าสนามไฟฟ้าเมื่อมีการเปลี่ยนระยะ t_2 ที่ความหนาของน้ำ 1, 2 และ 3 เซนติเมตร

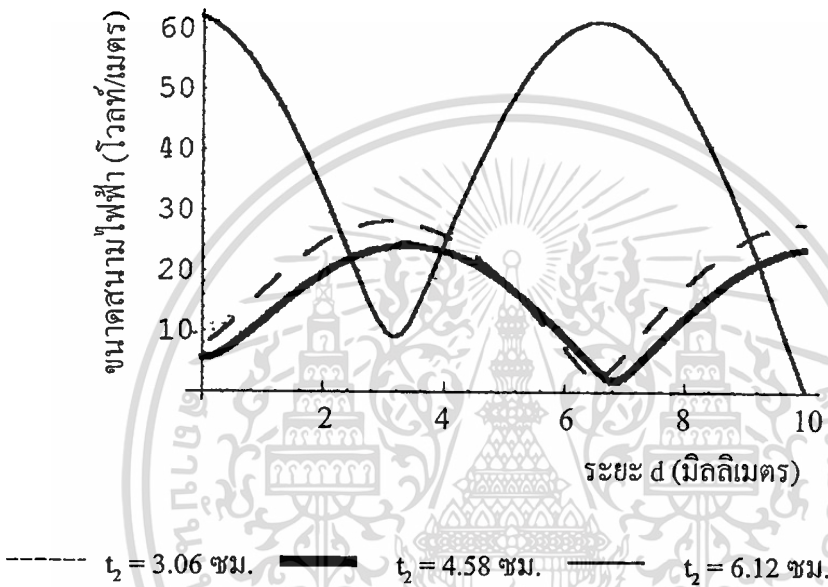


จากรูปที่ 3.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของสนามไฟฟ้าและระยะห่างของแผ่นตัวนำด้านล่างเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความหนาของไดอิเล็กตริกและแผ่นตัวนำด้านล่าง พบว่าที่ความหนา (d) มีค่า 1 เซนติเมตรสนามไฟฟ้าจะมีค่ามากที่สุดเมื่อ t_2 มีระยะประมาณ $(n\lambda/2)$ เนื่องจากที่ระดับแผ่นตัวนำด้านล่างอยู่ที่ตำแหน่ง 7.64 ซม. ไม่สามารถหาค่าคำตอบของสนามไฟฟ้าได้เนื่องจากไม่มีการลู่ออกของคำตอบ ที่ระยะ d เท่ากับ 2 และ 3 เซนติเมตรค่าสนามไฟฟ้าจะมีค่ามากที่สุดเมื่อ t_2 มีค่าเท่ากับ $(2n+1)\lambda/8$ และ $(n\lambda)/2$ ตามลำดับ เมื่อ n เป็นเลขจำนวนเต็มบวก และ λ เป็นความยาวคลื่นในอากาศ การเลือกค่า n ขึ้นอยู่กับการออกแบบว่าค่าไหนให้ความสะดวกในการออกแบบและสร้าง ดังนั้นการเลือกระยะห่างของแผ่นตัวนำด้านล่างที่เหมาะสมจะเพิ่มประสิทธิภาพในการให้ความร้อน

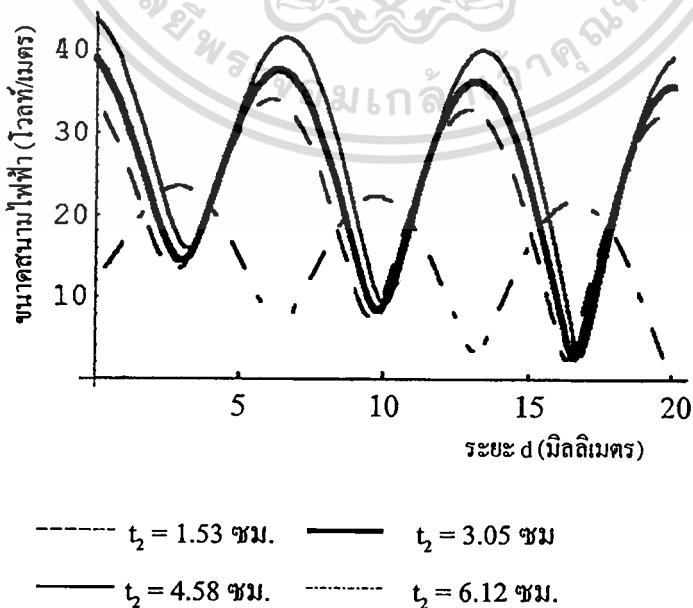
3.4.3 ผลการคำนวณค่าสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆภายในน้ำ

ในหัวข้อนี้จะแสดงการคำนวณสนามไฟฟ้าที่ระยะ d หนา 1 , 2 และ 3 เซนติเมตร โดยมีการเปลี่ยนระยะ t_2

รูปที่ 3.4 แสดงค่าสนามไฟฟ้าภายในน้ำที่ความหนา 1 เซนติเมตร

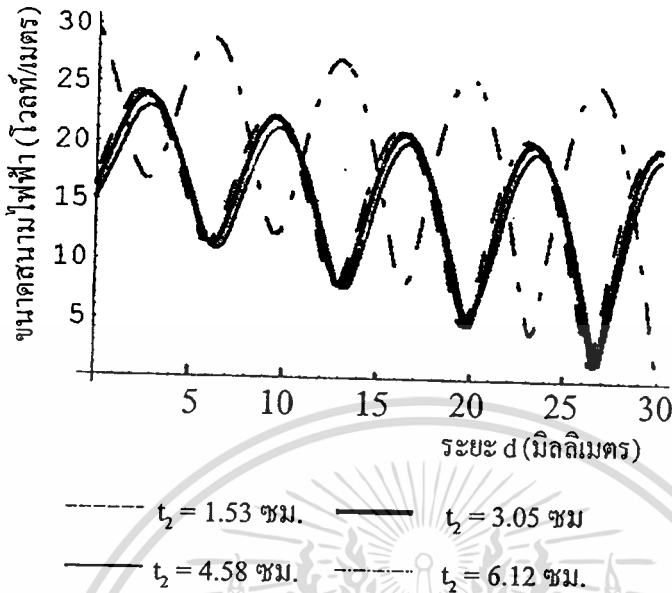


รูปที่ 3.5 แสดงค่าสนามไฟฟ้าภายในน้ำที่ความหนา 2 เซนติเมตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.6 แสดงค่าสนามไฟฟ้าภายในน้ำที่ความหนา 3 เซนติเมตร

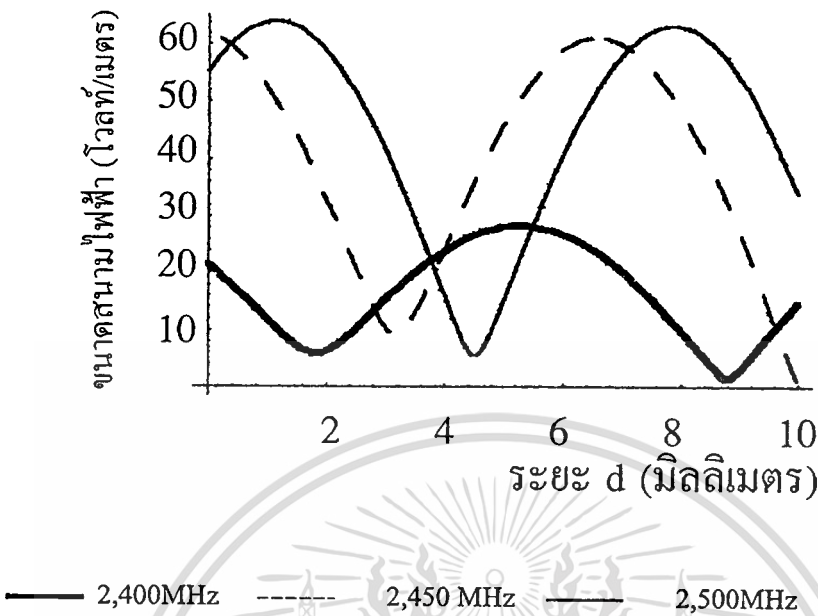


จากรูปที่ 3.4 , 3.5 และ 3.6 พบว่ามีคลื่นนิ่งเกิดขึ้นภายในน้ำ ลักษณะเช่นนี้ถ้าใช้คลื่นไมโครเวฟในการให้ความร้อนแก่วัสดุที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเช่น ไม้ หรือยาง จะทำให้ความร้อนมีการกระจายอย่างไม่สม่ำเสมอ บริเวณหนึ่งจะร้อนมากแต่อีกบริเวณหนึ่งจะร้อนน้อยกว่า และจากผลนี้พบว่าถ้าสาร ไดอิเล็กทริกมีค่าความหนา d มากขึ้น ก็ยังจะทำให้เกิดจำนวนของคลื่นนิ่งมากขึ้น

3.4.4 ผลการคำนวณค่าสนามไฟฟ้าภายในน้ำเมื่อความถี่เปลี่ยนไป

เนื่องจากหลอดแมกนีตรอนที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟจะให้ความถี่กลางที่ 2,450 MHz อย่างไรก็ตามอาจยังคงมีการเปลี่ยนแปลงของความถี่โดยจะอยู่ระหว่าง 2,400 MHz และ 2,500 MHz ดังนั้นจึงต้องมีการคำนวณ ค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ความถี่ทั้งสองด้วย เพื่อทราบลักษณะการกระจายสนามไฟฟ้าภายในสาร ไดอิเล็กทริกซึ่งคำนวณ โดยใช้น้ำที่ระยะ d เท่ากับ 1 เซนติเมตร ระยะ t_2 เท่ากับ 6.12 เซนติเมตร

รูปที่ 3.7 แสดงค่าสนามไฟฟ้าภายในน้ำเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความถี่ต่างๆ

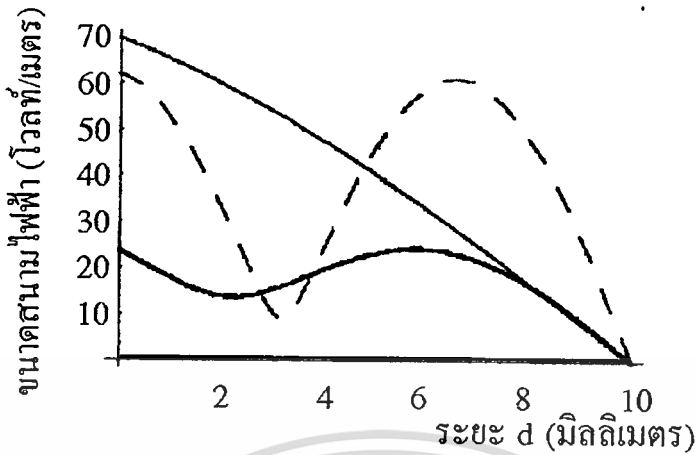


จากรูปที่ 3.7 พบว่าค่าสนามไฟฟ้าภายในน้ำมีค่าเปลี่ยนไปเมื่อความถี่เปลี่ยนไป สำหรับความถี่ 2,500 MHz มีขนาดสนามไฟฟ้าใกล้เคียงกับความถี่ที่ใช้งานคือ 2,450 MHz แต่สำหรับความถี่ 2,400 MHz จะมีขนาดค่าเหลือเพียงประมาณ 58% ของค่าความถี่ทั้งสองข้างต้น

3.4.5 ผลการคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้าภายใน น้ำ เนื้อวัว และข้าว

ในการใช้งานให้ความร้อนแก่วัสดุโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ สามารถใช้งานได้อย่างกว้างขวาง แต่การออกแบบระบบที่ใช้กับงานเฉพาะอย่างจะสามารถทำให้ระบบทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นจึงคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้าในสารไดอิเล็กทริกที่ใช้งาน ในหัวข้อนี้แสดงตัวอย่างการคำนวณสนามไฟฟ้าในวัสดุต่างๆ ได้แก่ น้ำ, เนื้อวัว และ ข้าว โดยคำนวณที่ระยะ d เท่ากับ 1 เซนติเมตร ϵ_r เท่ากับ 6.12 เซนติเมตร โดย $\epsilon_{\text{น้ำ}} = 53 - j20$ และ $\epsilon_{\text{ข้าว}} = 4 - j0.4$ [19] ดังแสดงในรูปที่ 3.8

รูปที่ 3.8 แสดงค่าสนามไฟฟ้าภายในน้ำ,เนื้อวัว,ข้าว



----- น้ำ ----- เนื้อวัว ----- ข้าว

จากรูปที่ 3.8 พบว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสารไดอิเล็กตริกทำให้ค่าสนามไฟฟ้าภายในมีค่าเปลี่ยนแปลงทั้งขนาดและตำแหน่งของคลื่นนี้ ในการออกแบบระบบที่ใช้กับวัสดุแต่ละชนิด จะต้องคำนวณเป็นกรณีไป

3.5 สรุป

ในการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าภายในไดอิเล็กตริกที่อยู่ระหว่างแผ่นตัวนำขนาดอนันต์ที่วางขนานกันของคลื่นระนาบที่มีการตกกระทบแบบตั้งฉาก โดยหาสัมประสิทธิ์การสะท้อนและส่งผ่านรวมที่เกิดจากการสะท้อนหลายครั้งด้วยวิธีลากเส้นรังสี ซึ่งได้คำตอบอยู่ในรูปอนุกรมและจากการคำนวณพบว่า สามารถเลือกกระยะ ϵ_2 เพื่อให้ได้ค่าสนามไฟฟ้าภายในไดอิเล็กตริกที่มีค่ามากที่สุดและจะเกิดคลื่นนิ่งภายในไดอิเล็กตริก ซึ่งในระบบให้ความร้อนต้องมีการเคลื่อนหรือพลิกวัสดุที่ต้องการให้ความร้อนเพื่อให้มีการกระจายความร้อนอย่างทั่วถึงอีกทั้งการออกแบบยังต้องคำนึงชนิดของสารไดอิเล็กตริกที่ต้องการให้ความร้อนและระบบหนึ่งๆควรออกแบบให้ใช้งานกับวัสดุเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงค่าความถี่ที่ออกจากแหล่งกำเนิด

จากการคำนวณที่แสดงมาในบทนี้แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนถึงผลกระทบของไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสียวางอยู่ระหว่างแผ่นตัวนำที่วางขนานกัน การพิจารณากระยะห่างที่เหมาะสมของแผ่นตัวนำด้านล่างมีผลอย่างยิ่งต่อประสิทธิภาพของระบบให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ แต่เนื่องจากการออกแบบได้ใช้สายอากาศสี่เหลี่ยมเป็นตัวป้อนคลื่น ค่าระยะห่างของแผ่นตัวนำด้านล่างที่เหมาะสมเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมจึงอาจมีการเปลี่ยนแปลง จากการคำนวณในบทนี้ เนื่องจากคลื่นที่ตกกระทบไม่ได้เป็นคลื่นระนาบตามที่กำหนดไว้ในเงื่อนไข ดังนั้นการคำนวณในบทถัดไปเป็นการเพิ่มความละเอียดในการคำนวณผลกระทบของระยะห่างของแผ่นตัวนำด้านล่างตาม โครงสร้างที่กำหนด เนื่องจากผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนที่แสดงไว้ในบทนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ทฤษฎีโดเมนเชิงสเปกตรัม

4.1 กล่าวนำ

ผลกระทบที่เกิดจากการสะท้อนหลายครั้งของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แสดงในบทที่ผ่านมา ได้แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนถึงผลการเปลี่ยนแปลงค่าสนามไฟฟ้าภายในไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสียที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างของแผ่นตัวนำด้านล่าง , ความถี่ , ชนิดไดอิเล็กตริก ดังนั้น การพิจารณาผลกระทบที่เกิดขึ้นภายใน โครงสร้างที่กำหนดจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งต่อการวิเคราะห์

เงื่อนไขการเป็นคลื่นระนาบที่กำหนดขึ้นในบทที่ผ่านมาเป็นเงื่อนไขที่กำหนดขึ้นมาเพื่อลดความซับซ้อนของปัญหาและเพื่อตรวจสอบว่ามีความจำเป็นมากน้อยอย่างไรในการพิจารณาตาม โครงสร้างตามที่กำหนด แต่จากผลการคำนวณพบที่มีความจำเป็นที่จะต้องคำนึงถึงผลกระทบดังกล่าว ดังนั้นเพื่อเพิ่มความละเอียดในการคำนวณให้มีความใกล้เคียงกับระบบให้ความร้อนที่ได้ออกแบบสร้างขึ้นมาโดยการใช้สนามที่มาจากสายอากาศสล็อต สนามดังกล่าวเป็นสนามระยะใกล้ที่ไม่เป็นคลื่นระนาบ ดังนั้นการหาค่าอินทิกรัลเชิงปริมาตร ไม่สามารถทราบค่าได้ในกรณีที่ไม่เป็นคลื่นระนาบ[18]

การวิเคราะห์โดยเลือกใช้วิธีโดเมนเชิงสเปกตรัม (Spectral Domain Approach) เป็นการแปลงคลื่นที่ใกล้สายอากาศที่เป็นคลื่นทรงกลมเป็นคลื่นระนาบได้ ในการศึกษาจะพิจารณาการกระจายแรงดันบนปากสล็อตและทฤษฎีสถานภาพไฟฟ้าสมมูลเพื่อหาแหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็ก และใช้หลักการแปลงฟูริเยร์และการแปลงฟูริเยร์ผกผัน เพื่อหาค่าสนามไฟฟ้า

วิธีการที่กล่าวมาข้างต้นมีความสัมพันธ์กับทฤษฎีสถานภาพสมมูล และ การวิเคราะห์การแปลงฟูริเยร์ของสนามไฟฟ้า ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีทั้งสองซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของวิธีโดเมนเชิงสเปกตรัม

4.2 ทฤษฎีสันนามสมมูล (Surface Equivalence Theorem)

ทฤษฎีสันนามสมมูลเป็นทฤษฎีที่ใช้ในการแทนที่แหล่งกำเนิดจริง (Actual Source) เช่น สายอากาศโดยแหล่งกำเนิดสมมูล (Equivalent Source) ทฤษฎีนี้กล่าวไว้ว่า “แต่ละจุดบนหน้าคลื่นปฐมภูมิ (Primary Wavefront) สามารถพิจารณาให้เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นทรงกลมทุติยภูมิ (Secondary Spherical Wave) และแต่ละหน้าคลื่นอันดับทุติยภูมิสามารถถูกสร้างเป็นกรอบคลื่นทุติยภูมิได้” [18]

จากทฤษฎีดังกล่าวจะหาสนามด้านนอกผิวปิดจินตภาพได้โดยการวางความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและกระแสแม่เหล็กตามเงื่อนไขขอบเขตที่เหมาะสม

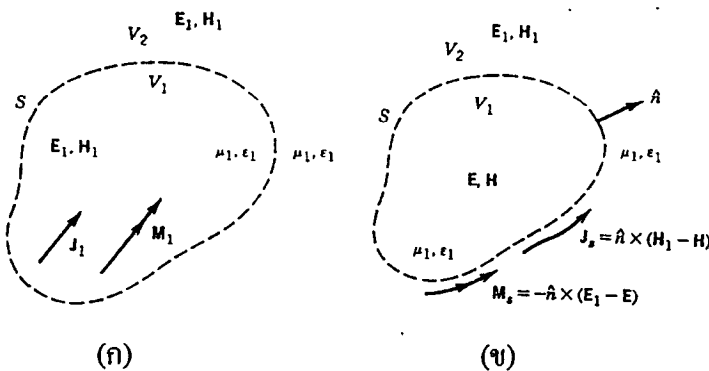
ถ้าเลือกความหนาแน่นกระแสนี้ให้สนามด้านในผิวปิดเป็นศูนย์ และสนามด้านนอกเป็นการแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Radiation) จากแหล่งกำเนิดจริง ดังนั้นวิธีนี้สามารถใช้หาสนามด้านนอกผิวปิดโดยแหล่งกำเนิดภายในผิวปิด สมการที่ได้รับเป็นค่าจริงแต่ต้องการ การอินทิเกรตตลอดผิวปิด

ทฤษฎีสันนามสมมูลถูกใช้ในการพิจารณาแหล่งกำเนิดการแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจริงคือความหนาแน่นกระแส \vec{J}_1 และ \vec{M}_1 ดังแสดงในรูปที่ 4.1ก แหล่งกำเนิดนี้ทำให้เกิดสนาม \vec{E}_1 และ \vec{H}_1 อย่างไรก็ตามเราต้องการหาสนามด้านนอกของผิวปิดดังนั้นจึงให้มีผิวปิด S เป็นรูปเส้นประดังรูปที่ 4.1ก ปริมาตรด้านใน ผิวปิดเป็น V_1 และด้านนอกเป็น V_2

ปัญหาสมมูลถูกแสดงในรูปที่ 4.1ข แหล่งกำเนิด \vec{J}_1 และ \vec{M}_1 ถูกย้ายและให้มีสนาม \vec{E} และ \vec{H} ด้านใน S สนาม \vec{E}_1 และ \vec{H}_1 ด้านนอก S สนามที่อยู่ด้านในและด้านนอกของผิว S ต้องเป็นไปตามเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition)

รูปที่ 4.1ก แสดงแบบจำลองปัญหาจริง

ข แสดงแบบจำลองปัญหาสมมูล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นพื้นผิว S จะมีแหล่งกำเนิดสมมูล

$$\bar{J}_s = \hat{n} \times (\bar{H}_1 - \bar{H}) \quad (4.1)$$

$$\bar{M}_s = \hat{n} \times (\bar{E}_1 - \bar{E}) \quad (4.2)$$

แหล่งกำเนิดทั้งสองเดินทางในตัวกลางตัวเดียวกัน ความหนาแน่นกระแสของสมการ (4.1)

และ (4.2) จะสมมูลเพียงในปริมาตร V_2 เนื่องจากทำให้เกิดสนาม \bar{E}_1 และ \bar{H}_1 ที่ด้านนอก S สนาม \bar{E}

และ \bar{H} ในรูป 4.1 ข จะแตกต่างจากสนามเดิม \bar{E}_1 และ \bar{H}_1 ซึ่งมีค่าภายใน V_1

เนื่องจากสนาม \bar{E} และ \bar{H} ในผิวดำนำ S ไม่ได้เป็นขอบเขตที่สนใจดังนั้นสมมติให้ค่าเหล่านี้มีค่าเท่ากับ 0 ได้ ดังนั้นสมการ (4.1) และสมการ (4.2) สามารถเขียนได้เป็น

$$\bar{J}_s = \hat{n} \times (\bar{H}_1 - \bar{H})_{\bar{H}=0} = \hat{n} \times \bar{H}_1 \quad (4.3)$$

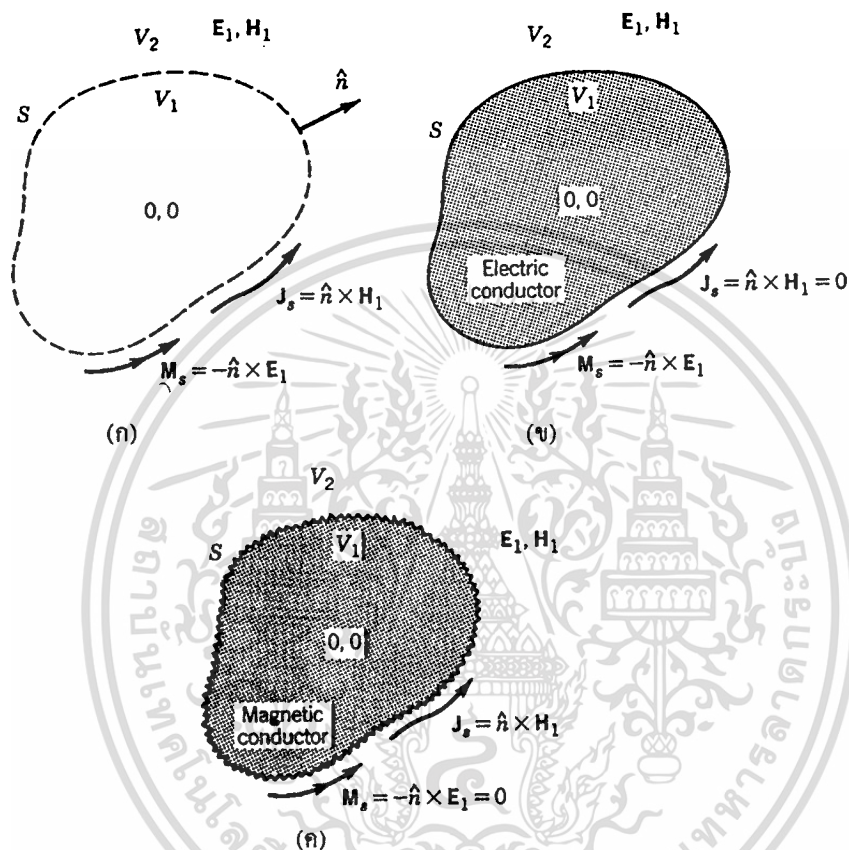
$$\bar{M}_s = \hat{n} \times (\bar{E}_1 - \bar{E})_{\bar{E}=0} = \hat{n} \times \bar{E}_1 \quad (4.4)$$

เราเรียกรูปสมการหลักการสนามสมมูลนี้ว่า ทฤษฎีสานามสมมูลของเลิฟ (Love's Equivalence Principle) ถ้าคุณสมบัติของตัวกลางภายในเปลี่ยนเช่นเปลี่ยนเป็นตัวนำสมบูรณ์ $\sigma = \infty$ จะมีผลต่อกระแสสมมูล \bar{J}_s ซึ่งโครงสร้างของผิวดำนำไฟฟ้าแทนที่พื้นผิวดำนำ S มี \bar{J}_s และ \bar{M}_s ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ข

รูปที่ 4.2ก แสดงแบบจำลองทฤษฎีสถานสมมูลของเลิฟ

ข แสดงแบบจำลองตัวนำไฟฟ้าสมมูล

ค แสดงแบบจำลองแม่เหล็กสมมูล

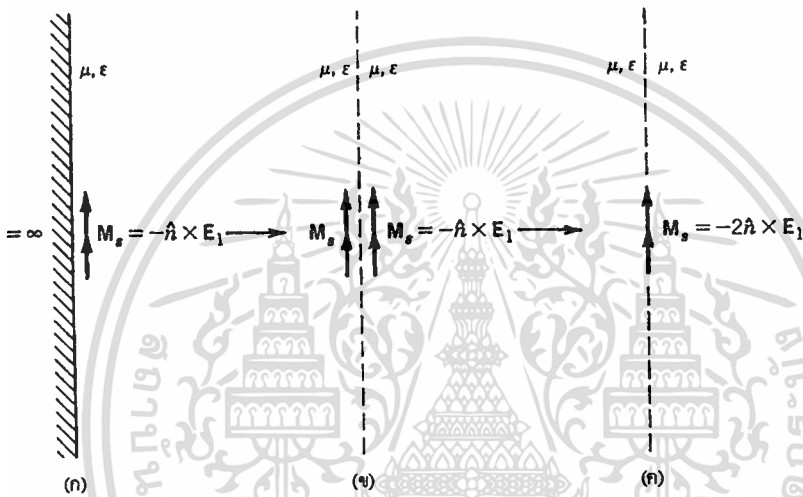


ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า \vec{J}_s สัมผัสที่ผิว S ถูกสังเคราะห์โดยตัวนำไฟฟ้างั้นปัญหาสมมูลของรูปที่ 4.2ก ถูกแทนที่ด้วยรูปที่ 4.2ข ดังนั้นจึงมีความหนาแน่นกระแสแม่เหล็ก \vec{M}_s ตลอดพื้นผิว S โดยจะเป็นตัวกำเนิดสนาม \vec{E}_1 และ \vec{H}_1 ด้านนอกพื้นผิว S ภายในพื้นผิว S ค่าสนามเป็นศูนย์ ซึ่งก็ไม่ได้เป็นขอบเขตที่สนใจ ความยากในการหาค่า \vec{E}_1 และ \vec{H}_1 คือไม่สามารถใช้สมการศักย์เวกเตอร์ (Vector Potential) เนื่องจากความหนาแน่นกระแสไม่มีการแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเข้าไปในตัวกลางที่ไม่มีขอบเขต

ในกรณีที่พื้นผิว S เป็นตัวนำแม่เหล็กสมบูรณ์ (Perfect Magnetic Conductor) กระแสแม่เหล็ก (Magnetic Current) จะถูกสังเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 4.2ค และทำให้ไม่สามารถหาสนามโดยใช้ศักย์เวกเตอร์ได้ซึ่งเป็นปัญหาเดียวกันกับรูปที่ 4.2ข

ในกรณีรูปที่ 4.2x เราสามารถพบปัญหานี้ได้ในลักษณะรูปที่ 4.3 โดยสมมติให้พื้นผิวของตัวนำไฟฟ้าเรียบและมีขนาดอนันต์ ในโครงสร้างปัญหานี้ต้องการทราบว่าแหล่งกำเนิดแม่เหล็กจะแผ่รังสีบนแผ่นตัวนำไฟฟ้าได้อย่างไร จากทฤษฎีเงา (Image Theory) สามารถแสดงปัญหาได้ดังรูปที่ 4.3ค

รูปที่ 4.3 แสดงแบบจำลองสมมูลแหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็กแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าใกล้ตัวนำ
สมมูล



ให้มีแหล่งกำเนิดเงาอยู่ที่ด้านข้างของแผ่นตัวนำจากนั้นเมื่อนำแผ่นตัวนำออก และเนื่องจากแหล่งกำเนิดเงามีทิศเดียวกับ แหล่งกำเนิดสมมูล (Equivalent Source) ดังนั้นแสดงได้ดังรูปที่ 4.3ค ความหนาแน่นกระแสแม่เหล็กมีค่าเป็น 2 เท่าและแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวกลางที่ไร้ขอบเขต และสามารถใช้ศักย์เวกเตอร์ได้

ในการวิเคราะห์ปัญหาเกี่ยวกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในหลาย ๆ โครงสร้างเป็นการง่ายที่จะใช้ทฤษฎีสมาสมมูล ซึ่งทฤษฎีนี้สามารถใช้ในการแก้ปัญหาเกี่ยวกับ การกระเจิง การแทรกสอดและสายอากาศอะพอร์เจอร์ (Aperture Antenna) โดยในส่วนนี้จะเน้นถึงสายอากาศสลีตโดยขั้นตอนต่อไปนี้จะสามารถใช้ในการแก้ปัญหาเกี่ยวกับสลีตได้

1. เลือกผิวจินตภาพที่ล้อมปิดแหล่งกำเนิดจริง ดังนั้นองค์ประกอบในทิศสัมผัสกับพื้นผิวสนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็กที่ทราบค่าโดยการหาจริงหรือประมาณค่า โดยทั่วไปพื้นผิวมีลักษณะเรียบและมีขนาดอนันต์

2. รูปแบบของ \bar{J}_s และ \bar{M}_s จะต้องเป็นไปตามเงื่อนไขใดเงื่อนไขหนึ่งในต่อไปนี้

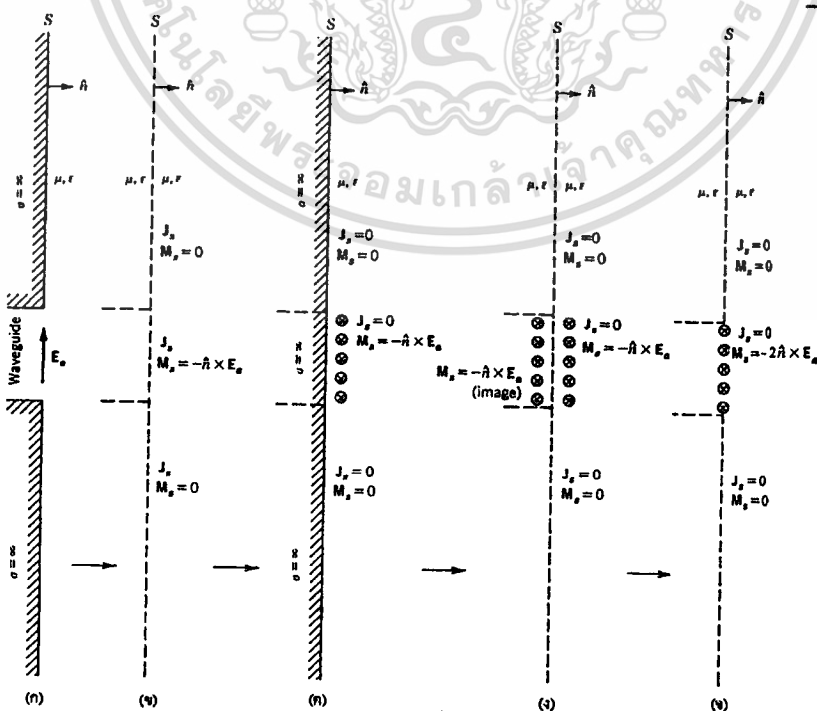
- ก. \bar{J}_s และ \bar{M}_s บน S สมมุติ \bar{E} และ \bar{H} ใน S ไม่เป็นศูนย์
- ข. \bar{J}_s และ \bar{M}_s บน S สมมุติ \bar{E} และ \bar{H} ใน S เป็นศูนย์ (Love's Theorem)
- ค. \bar{M}_s บน S ($\bar{J}_s = 0$) ภายใน S มีตัวกลางเป็นตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์
- ง. \bar{J}_s บน S ($\bar{M}_s = 0$) ภายใน S มีตัวกลางเป็นตัวนำแม่เหล็กสมบูรณ์

3. การแก้ปัญหาในรูปแบบ (ก) และ (ข) สามารถใช้ศักย์เวกเตอร์ได้โดยตรงสำหรับรูปแบบ

(ค) ไม่สามารถใช้ศักย์เวกเตอร์ได้โดยตรง เนื่องจากความหนาแน่นของกระแสไม่สามารถส่งผ่านไป
ยังตัวกลางได้ถ้าตัวกลางเป็นตัวนำไฟฟ้าที่เรียบและมีขนาดอนันต์ทฤษฎีเงาสามารถแก้ปัญหานี้ได้
ในรูปแบบ (ง) แหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าที่ติดกับตัวนำแม่เหล็กสมบูรณ์ในทำนองเดียวกันศักย์เวก
เตอร์ไม่สามารถใช้ได้โดยตรง ซึ่งถ้าพื้นผิวเรียบและมีขนาดอนันต์ก็สามารถแก้ปัญหานี้ได้เช่นกัน
โดยใช้ทฤษฎีเงา

จากขั้นตอนที่ผ่านมาพิจารณาอะเพอร์เจอร์ของท่อนำคลื่นที่อยู่บนระนาบขนาดอนันต์
(Infinite Ground plane) ดังรูปที่ 4.4ก สมมุติให้สนามไฟฟ้าที่สัมผัสที่ปากอะเพอร์เจอร์มีค่า \bar{E}_a
สามารถหาค่าสนาม \bar{E} และ \bar{H} ได้โดยขั้นตอนดังกล่าวคือ

รูปที่ 4.4 แสดงแบบจำลองสมมูลอะเพอร์เจอร์ของท่อนำคลื่นวางบนระนาบตัวนำขนาดอนันต์



สำหรับปัญหานี้ให้แผ่นตัวนำไฟฟ้าเป็นระนาบเรียบขนาดอนันต์จาก $-\infty$ ถึง $+\infty$ แสดงในรูปที่ 4.4ข ตลอดจนบนอนันต์นี้มีเพียงความหนาแน่นกระแสแม่เหล็ก \bar{M}_s อยู่บนปากอะเพอร์เจอร์ ส่วนค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า \bar{J}_s มีอยู่ทุกตำแหน่งแต่ไม่ทราบค่า สมมติให้มีพื้นผิวตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์เรียบขนาดอนันต์ดังนั้นค่าความหนาแน่นกระแส \bar{J}_s มีค่าเป็นศูนย์ตลอดผิวตัวนำและเหลือเพียงกระแสแม่เหล็ก \bar{M}_s บนปากอะเพอร์เจอร์ จากทฤษฎีเงาสามารถนำแผ่นตัวนำออก และแทนที่ด้วยแหล่งกำเนิดเงา (Image Source) ดังรูปที่ 4.4ง และค่า \bar{M}_s จะมีค่าเพิ่มเป็น 2 เท่าดังรูปที่ 4.4จ จากนั้นค่าสนาม \bar{E} และ \bar{H} สามารถหาได้จากวิธีศักร์กเวกเตอร์

4.3 การวิเคราะห์การแปลงฟูรีเยร์ของสนามไฟฟ้า

ทฤษฎีวิธีโดเมนเชิงสเปกตรัมเป็นวิธีที่ใช้วิเคราะห์งานเกี่ยวกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้อย่างดี วิธีนี้ได้เริ่มมีการใช้งานในปี 1970 โดย Raj Mittra [20] สำหรับโครงสร้างที่เหมาะสมกับวิธีโดเมนเชิงสเปกตรัมได้แก่ [21] สายส่งที่เป็นระนาบ เช่น ไมโครสตริป , ฟินไลน์ , ท่อนำคลื่นระนาบร่วม (Coplanar Waveguide) ในรูปร่างที่มีหลายชั้น (MultiLayer) ทั้งโครงสร้างที่เปิดและปิด , สายอากาศเชิงเส้นแบบคลื่นช้า (Slow-Wave line) ในวัสดุไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสีย , โครงสร้างที่มีการเรโซแนนซ์ของระนาบ ที่พบเห็นอย่างกว้างขวางมักใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างที่มีหลายชั้น อีกทั้งโครงสร้างที่เป็นไมโครสตริปและโครงสร้างที่เป็นท่อนำคลื่น[22]-[28] ซึ่งในโครงสร้างที่ต้องการจะวิเคราะห์เป็นโครงสร้างที่มีหลายชั้นเช่นกันและลักษณะของโครงสร้างใกล้เคียงกับงานของ William F. Cross Well, Roger C Rudduck และ Douglas M. Hathcher แต่แตกต่างกันรายละเอียด และผลลัพธ์ที่ต้องการ

ในการวิเคราะห์สมมติให้มีการกระจายกระแสแม่เหล็กบนปากสายอากาศลือคือ

$$\bar{M}(x, y) = \hat{a}_y \frac{\cos(k_0(l - |y|))}{\cos(k_0 l)} \delta(x) \quad \text{เมื่อ } \frac{-l}{2} \leq y \leq \frac{l}{2} \quad (4.5.1)$$

$$= 0 \quad \text{ที่บริเวณอื่น} \quad (4.5.2)$$

โดยที่ k_0 คือ ค่าคงที่เฟส

l คือ ความยาวของสายอากาศลือคือ

$\delta(x)$ คือ อิมพัลส์ฟังก์ชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้ทฤษฎีการแปลงฟูรีเยร์เพื่อแปลงกระแสแม่เหล็กบนปากสล็อตให้เป็นกระแสแม่เหล็กตลอดแผ่นตัวนำจากทฤษฎีการแปลงฟูรีเยร์และ การแปลงฟูรีเยร์ผกผันจะได้

$$\tilde{M}(k_x, k_y) = \int_{-\infty-\infty}^{+\infty+\infty} \int \bar{M}(x, y) e^{+jk_x x} e^{+jk_y y} dx dy \quad (4.6)$$

$$\bar{M}(x, y) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty-\infty}^{+\infty+\infty} \int \tilde{M}(k_x, k_y) e^{-jk_x x} e^{-jk_y y} dx dy \quad (4.7)$$

โดยที่ k_x คือ ค่าคงที่ในการเดินทางของคลื่นในทิศทาง x

k_y คือ ค่าคงที่ในการเดินทางของคลื่นในทิศทาง y

$\tilde{M}(k_x, k_y)$ คือ สเปกตรัมของความหนาแน่นกระแสแม่เหล็ก

$\bar{M}(x, y)$ คือ ความหนาแน่นกระแสแม่เหล็ก

แทนค่าสมการ (4.5) ลงใน (4.6) ทำการอินทิเกรตจะได้ว่า

$$\tilde{M}(k_x, k_y) = \hat{a}_y \frac{2k_0 \left(\sin(k_0 l) - \sin\left(\frac{k_0 l}{2}\right) \cos\left(\frac{k_y l}{2}\right) \right)}{\cos(k_0 l) (k_0^2 - k_y^2)} - \frac{2k_y \sin\left(\frac{k_y l}{2}\right) \cos\left(\frac{k_0 l}{2}\right)}{\cos(k_0 l) (k_0^2 - k_y^2)} \quad (4.8)$$

จากทฤษฎีสานสมมูลสามารถหาค่าสเปกตรัมสนามไฟฟ้าได้โดย

$$\tilde{M}(k_x, k_y) = -\hat{n} \times \tilde{E}(k_x, k_y) \quad (4.9)$$

ค่าสนามไฟฟ้าที่ได้นี้มีคุณสมบัติที่สามารถนำไปใช้ในรูปของคลื่นระนาบได้[28]

4.4 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์วิธีโดเมนเชิงสเปกตรัม การแปลงฟูรีเยร์ และทฤษฎีสนามสมมูล ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ตามโครงสร้างของปัญหาที่ต้องการวิเคราะห์ โดยสมมุติค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กบนปากสล็อตจากนั้นหาค่าสเปกตรัมของสนามแม่เหล็กโดยการใช้ทฤษฎีการแปลงฟูรีเยร์ นำทฤษฎีสนามสมมูลมาหาค่าสเปกตรัมของสนามไฟฟ้าตามลำดับ สเปกตรัมของสนามไฟฟ้าจะถูกนำไปใช้เพื่อหาค่าสนามไฟฟ้าภายในไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสียเนื่องจากสายอากาศสล็อต 1 สล็อตในบทถัดไป



บทที่ 5

การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าภายในไดอิเล็กทริกระหว่าง แผ่นระนาบตัวนำขนาดอนันต์

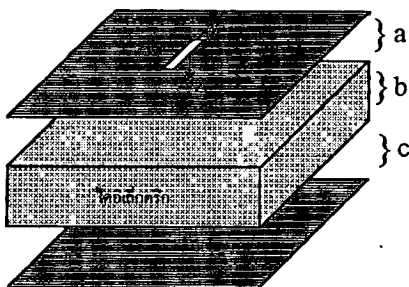
5.1 กล่าวนำ

ค่าสเปกตรัมของสนามไฟฟ้าที่ได้จากการแปลงฟูรีเยร์ในบทที่ผ่านมาจะถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าภายในไดอิเล็กทริกระหว่างแผ่นระนาบตัวนำขนาดอนันต์ โดยให้เป็นสนามปฐมภูมิ (Primary Electric field) เพื่อนำไปใช้เป็นคลื่นระนาบระหว่างตัวนำขนาดอนันต์ และนำไปเข้าเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและส่งผ่านที่เป็นตัวไม่ทราบค่า จากนั้นนำสเปกตรัมขององค์ประกอบทั้งหมดมาทำการแปลงฟูรีเยร์ผกผัน เพื่อหาค่าสนามไฟฟ้าภายในเนื้อไดอิเล็กทริก ในบทนี้จะแสดงผลของคำตอบของสมการที่ได้ โดยแสดงค่าสนามไฟฟ้าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างของแผ่นตัวนำด้านล่างของสล็อต 1 สล็อต ในวัสดุชนิดต่างๆ ความถี่ที่เปลี่ยนไป ชนิดของไดอิเล็กทริก เปรียบเทียบกับผลการทดลองและผลของการวางสายอากาศสล็อตตามที่ได้นำเสนอ

5.2 เงื่อนไขขอบเขตของปัญหา

ค่าสนามไฟฟ้าภายในเนื้อไดอิเล็กทริกเป็นคำตอบที่ต้องการในการพิจารณาออกแบบระบบให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ ดังได้กล่าวมาแล้ว

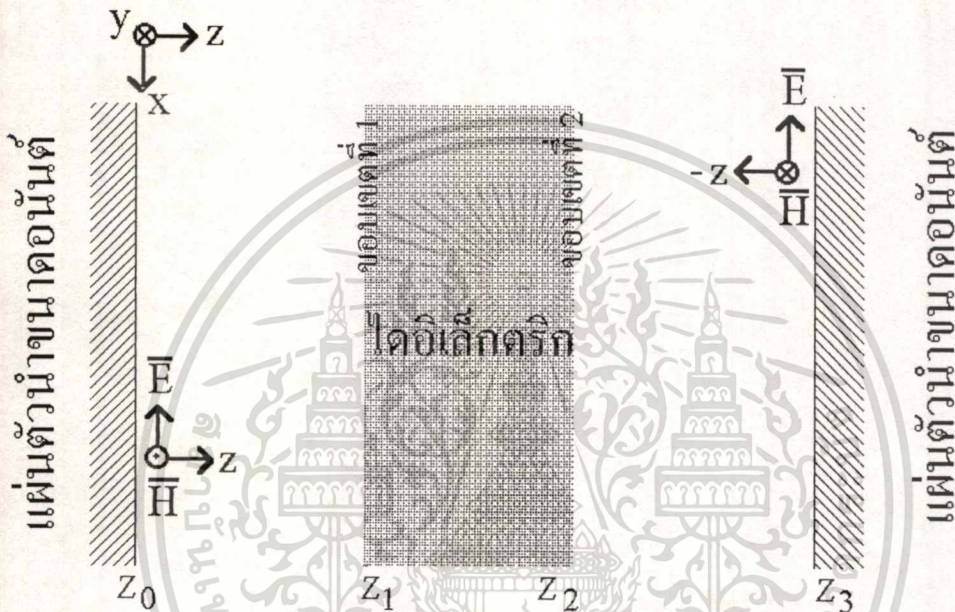
รูปที่ 5.1ก แสดงแบบจำลองการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าภายในไดอิเล็กทริก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณสนามไฟฟ้าที่อยู่ภายในไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสียและอยู่ระหว่างแผ่นตัวนำสองแผ่น โดยแผ่นตัวนำรวมทั้งแผ่น ไดอิเล็กตริกมีขนาดอนันต์และวางขนานกัน โดยให้มีสายอากาศสถิตหนึ่งสถิตต่ออยู่ที่แผ่นตัวนำด้านบนดังรูปที่ 5.1ก

รูปที่ 5.1ข แสดงแบบจำลองการเคลื่อนที่ของคลื่นและเงื่อนไขขอบเขต



เป็นที่ทราบกันว่าสเปกตรัมของสนามไฟฟ้าแสดงถึงคลื่นระนาบ ดังนั้นจะอาศัยเงื่อนไขขอบเขตความต่อเนื่องของสนามไฟฟ้าที่สัมผัส และความต่อเนื่องของสนามแม่เหล็กที่สัมผัส จากรูปที่ 5.1ข สามารถใช้เงื่อนไขขอบเขตดังนี้

5.2.1 ที่ $z = z_0 = 0$

สเปกตรัมของสนามไฟฟ้าในที่สัมผัสผิวตัวนำที่ $z = 0$ จะมีค่าเท่ากับค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดจากสเปกตรัมของความเข้มกระแสแม่เหล็ก โดยหลักการของฮอยเกน[18]

$$\tilde{E}_i^{XI}(z=0) + \tilde{E}_r^{XI}(z=0) = -\tilde{M}(\hat{a}_x) \quad (5.1)$$

โดยที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\tilde{E}_i^{XI}(z=0) = -\tilde{I}' \quad (5.1.1)$$

$$\tilde{E}_i^{XI}(z=0) = -\tilde{R}' e^{+jk_0(z_2-z_3-z_1)+\gamma_z(z_1-z_2)} \quad (5.1.2)$$

เมื่อให้ \tilde{I}' เป็นค่าสเปกตรัมของการส่งผ่านในขอบเขตที่ 1
 \tilde{R}' เป็นค่าสเปกตรัมของการสะท้อนในขอบเขตที่ 1

5.2.2 ที่ $z = z_1$

สเปกตรัมของสนามไฟฟ้าในขอบเขต 1 และ 2 ที่สัมผัสที่ z_1 มีค่าเท่ากัน

$$\tilde{\tilde{E}}_i^{XI}(z=z_1) + \tilde{\tilde{E}}_r^{XI}(z=z_1) = \tilde{\tilde{E}}_i^{XII}(z=z_1) + \tilde{\tilde{E}}_r^{XII}(z=z_1) \quad (5.2)$$

โดยที่

$$\tilde{\tilde{E}}_i^{XI}(z=z_1) = -\tilde{I}' e^{-jk_0 z_1} \quad (5.2.1)$$

$$\tilde{\tilde{E}}_r^{XI}(z=z_1) = -\tilde{R}' e^{+jk_0(z_2-z_3)+\gamma_z(z_1-z_2)} \quad (5.2.2)$$

$$\tilde{\tilde{E}}_i^{XII}(z=z_1) = -\tilde{I}'' e^{-jk_0 z_1} \quad (5.2.3)$$

$$\tilde{\tilde{E}}_r^{XII}(z=z_1) = -\tilde{R}'' e^{+jk_0(z_2-z_3)+\gamma_z(z_1-z_2)} \quad (5.2.4)$$

ให้ \tilde{I}'' เป็นค่าสเปกตรัมของการส่งผ่านในขอบเขตที่ 2
 \tilde{R}'' เป็นค่าสเปกตรัมของการสะท้อนในขอบเขตที่ 2

สเปกตรัมของสนามแม่เหล็กในขอบเขต 1 และ 2 ที่สัมผัสที่ z_1 มีค่าเท่ากันโดยหาค่าได้จากคุณสมบัติของคลื่นระนาบคือค่าสนามไฟฟ้าหารด้วยค่าสเปกตรัมของอินทรีนซิกอิมพีแดนซ์

$$\tilde{\tilde{H}}_i^{VI}(z=z_1) + \tilde{\tilde{H}}_r^{VI}(z=z_1) = \tilde{\tilde{H}}_i^{VII}(z=z_1) + \tilde{\tilde{H}}_r^{VII}(z=z_1) \quad (5.3)$$

โดยที่

$$\tilde{\tilde{H}}_i^{VI}(z=z_1) = \frac{-\tilde{I}' e^{-jk_0 z_1}}{\tilde{\eta}_0} \quad (5.3.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\tilde{H}_r^{II}(z = z_1) = \frac{+\tilde{R}^I e^{+jk_{z0}(z_2-z_3)+\gamma_z(z_1-z_2)}}{\tilde{\eta}_0} \quad (5.3.2)$$

$$\tilde{H}_i^{III}(z = z_1) = \frac{-\tilde{I}^{II} e^{-jk_{z0}z_1}}{\tilde{\eta}_1} \quad (5.3.3)$$

$$\tilde{H}_r^{III}(z = z_1) = \frac{+\tilde{R}^{II} e^{+jk_{z0}(z_2-z_3)+\gamma_z(z_1-z_2)}}{\tilde{\eta}_1} \quad (5.3.4)$$

5.2.3 ที่ $z = z_2$

สเปกตรัมของสนามไฟฟ้าในขอบเขต 2 และ 3 ที่สัมผัสที่ z_2 มีค่าเท่ากัน

$$\tilde{E}_i^{XII}(z = z_2) + \tilde{E}_r^{XII}(z = z_2) = \tilde{E}_i^{XIII}(z = z_2) + \tilde{E}_r^{XIII}(z = z_2) \quad (5.4)$$

โดยที่

$$\tilde{E}_i^{XII}(z = z_2) = -\tilde{I}^{II} e^{-jk_{z0}z_1 - \gamma_z(z_2-z_1)} \quad (5.4.1)$$

$$\tilde{E}_r^{XII}(z = z_2) = -\tilde{R}^I e^{+jk_{z0}(z_2-z_3)} \quad (5.4.2)$$

$$\tilde{E}_i^{XIII}(z = z_2) = -\tilde{I}^{III} e^{-jk_{z0}z_1 - \gamma_z(z_2-z_1)} \quad (5.4.3)$$

$$\tilde{E}_r^{XIII}(z = z_2) = -\tilde{R}^{III} e^{+jk_{z0}(z_2-z_3)} \quad (5.4.4)$$

ให้ \tilde{I}^{III} เป็นค่าสเปกตรัมของการส่งผ่านในขอบเขตที่ 3

\tilde{R}^{III} เป็นค่าสเปกตรัมของการสะท้อนในขอบเขตที่ 3

สเปกตรัมของสนามแม่เหล็กในขอบเขต 2 และ 3 ที่สัมผัสที่ z_1 มีค่าเท่ากันโดยหาค่าได้จากคุณสมบัติของคลื่นระนาบคือค่าสนามไฟฟ้าหารด้วยค่าสเปกตรัมของอินทรีนซิกอิมพีแดนซ์

$$\tilde{H}_i^{VIII}(z = z_2) + \tilde{H}_r^{VIII}(z = z_2) = \tilde{H}_i^{XIII}(z = z_2) + \tilde{H}_r^{XIII}(z = z_2) \quad (5.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

$$\tilde{H}_i^{yIII}(z = z_2) = \frac{-\tilde{I}'' e^{-jk_0 z_1 - \gamma_z(z_2 - z_1)}}{\tilde{\eta}_h} \quad (5.5.1)$$

$$\tilde{H}_r^{yIII}(z = z_2) = \frac{+\tilde{R}' e^{+jk_0(z_2 - z_3)}}{\tilde{\eta}_h} \quad (5.5.2)$$

$$\tilde{H}_i^{yIII}(z = z_2) = \frac{-\tilde{I}''' e^{-jk_0 z_1 - \gamma_z(z_2 - z_1)}}{\tilde{\eta}_0} \quad (5.5.3)$$

$$\tilde{H}_r^{yIII}(z = z_2) = \frac{+\tilde{R}''' e^{+jk_0(z_2 - z_3)}}{\tilde{\eta}_0} \quad (5.5.4)$$

5.2.4 ที่ $z = z_3$

ค่าสเปกตรัมสนามไฟฟ้าที่สัมผัสตัวนำมีค่าเท่ากับศูนย์

$$\tilde{E}_i^{xIII}(z = z_3) + \tilde{E}_r^{xIII}(z = z_3) = 0 \quad (5.6)$$

$$\tilde{E}_i^{xIII}(z = z_3) = -\tilde{I}''' e^{-jk_0(z_1 + z_3 - z_2) - \gamma_z(z_2 - z_1)} \quad (5.6.1)$$

$$\tilde{E}_r^{xIII}(z = z_3) = -\tilde{R}''' \quad (5.6.2)$$

5.3 สมการของสนามไฟฟ้าในไดอิเล็กตริกที่วางระหว่างแผ่นตัวนำขนานขนาดอนันต์ โดยวิธีโดเมนเชิงสเปกตรัม

จากสมการเงื่อนไขขอบเขตทำให้สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและการส่งผ่านในขอบเขตที่ต้องการได้ ในกรณีนี้ต้องการหาค่าสนามไฟฟ้าภายในเนื้อไดอิเล็กตริกดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์ที่ต้องการหาคือ \tilde{I}'' และ \tilde{R}''

ดังนั้นสมการค่าสเปกตรัมของสนามในเนื้อไดอิเล็กตริกคือ

$$\tilde{E}_{dielectric}(k_x, k_y) = \tilde{I}'' e^{-jk_z z_1 - \gamma(z-z_1)} + \tilde{R}'' e^{+jk_z(z_2-z_3) + \gamma(z-z_2)} \quad (5.7)$$

ดังนั้นสมการคำตอบของสนามไฟฟ้าคือ

$$E(x, y) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty-\infty}^{+\infty+\infty} \tilde{E}(k_x, k_y) e^{-jk_x x} e^{-jk_y y} dk_x dk_y \quad (5.8)$$

สมการ (5.8) สามารถทำการอินทิเกรตได้โดยการใช้การอินทิเกรตเชิงตัวเลข โดยใช้โปรแกรม Mathematica และจากการพิจารณากราฟของตัวถูกอินทิเกรตสามารถกำหนดขอบเขตของค่า k_x, k_y ระหว่าง -250 ถึง 250

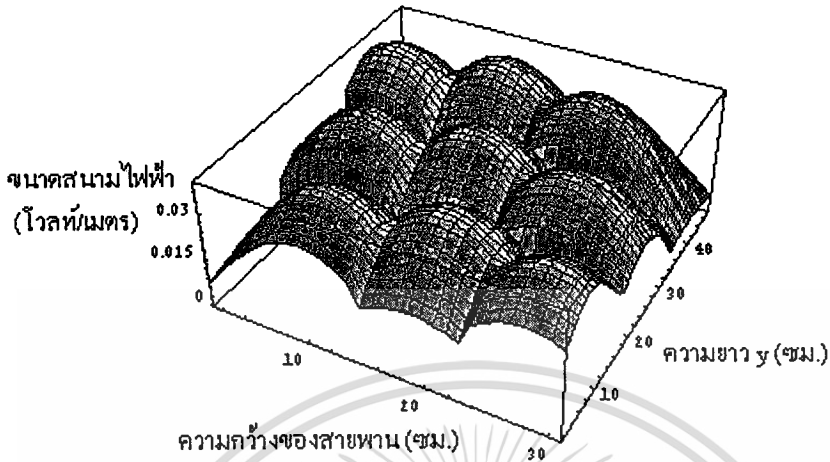
5.4 ผลการคำนวณ

จากการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าบริเวณใกล้สายอากาศสล็อตอาร์เรย์แบบระนาบ[7] พบว่าค่าสนามไฟฟ้าบริเวณที่ใกล้ปากสล็อตจะมีสนามแรงกว่าสนามที่ระยะห่างออกไป ดังนั้นในการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้จะกำหนดให้ระยะ a มีค่าคงที่ ที่ระยะ 1.53 ซม. ซึ่งตรงตามทีออกแบบสร้างไว้และกำหนดให้ความหนาของไดอิเล็กตริก(ระยะ b) มีค่าคงที่อยู่ที่ระยะ 2 ซม. เพราะเนื่องจากในระบบให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟที่มีการเคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องจำเป็นต้องมีท่อนำคลื่นที่มีความสามารถในการป้องกันคลื่นรั่ว[11] ในทางเดินเข้าออกของวัสดุซึ่งท่อนำคลื่นที่ได้สร้างขึ้นนี้มีช่องที่ไดอิเล็กตริกสามารถผ่านเข้าไปได้มีขนาดหนาไม่เกิน 2 ซม. ในการวิเคราะห์จะพิจารณาผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนระยะแผ่นตัวนำด้านล่าง(เปลี่ยนระยะ c), เปลี่ยนชนิดของไดอิเล็กตริก, ความถี่ที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากความไม่เสถียรของแหล่งกำเนิด, การนำสายอากาศสล็อต 9 ตัวมาวางเรียงตามทีออกแบบเพื่อดูความสม่ำเสมอของสนามไฟฟ้าในแนวระนาบ

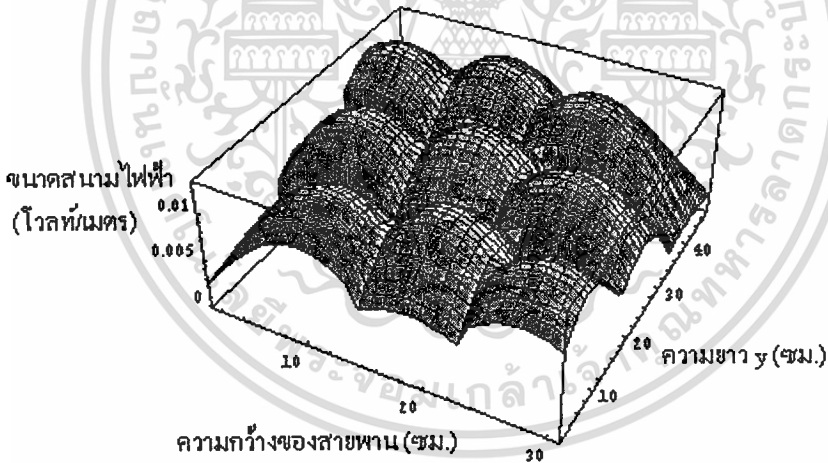
5.4.1 ผลการคำนวณค่าสนามไฟฟ้าภายในน้ำ

จากสมการคำตอบที่ได้เราสามารถหาค่าสนามไฟฟ้าได้ทั้งในระนาบ $x-y$ และตามแนว z สิ่งสำคัญในการออกแบบเครื่องให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟมีอยู่สองประการคือ ความปลอดภัยจากคลื่นรั่วและความสม่ำเสมอของการให้ความร้อน ในหัวข้อนี้จะพิจารณาความสม่ำเสมอในการให้ความร้อนทั้งในแนวระนาบ $x-y$ และตามแนว z โดยสามารถดูได้จากกราฟกระจายสนามไฟฟ้า

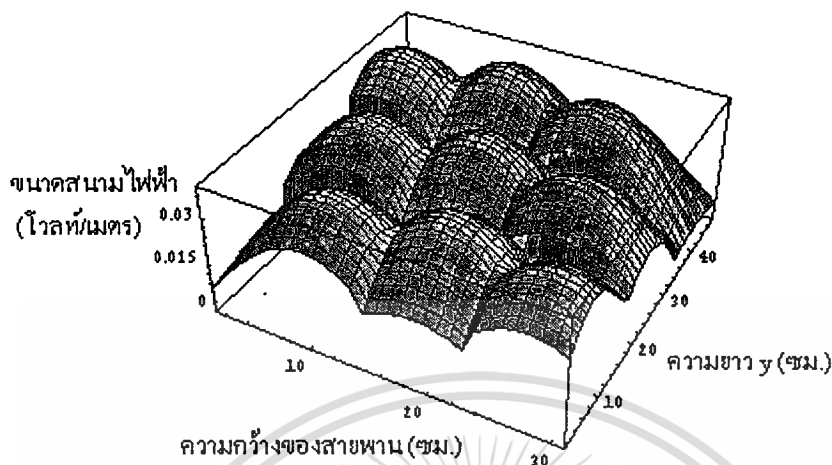
รูปที่ 5.2ก แสดงค่าสนามไฟฟ้าในแนวระนาบ x-y ที่ผิวด้านบนของน้ำ



รูปที่ 5.2ข แสดงค่าสนามไฟฟ้าในแนวระนาบ x-y ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของน้ำ



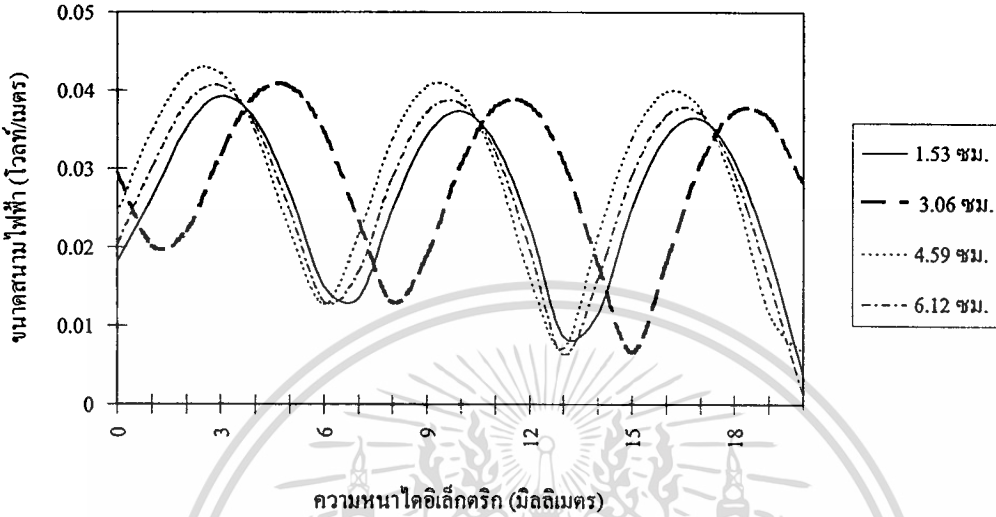
รูปที่ 5.2ก แสดงค่าสนามไฟฟ้าในแนวระนาบ x-y ที่ผิวด้านล่างของน้ำ



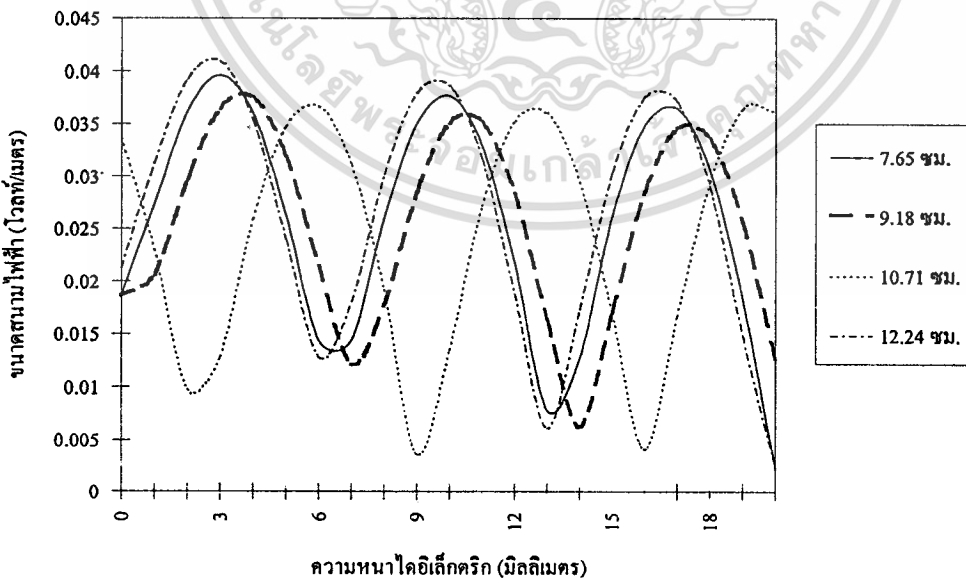
ค่าสนามไฟฟ้าที่ได้จากการจัดเรียงสายอากาศสี่ออร์เธอร์เรย์ตามที่ได้มีการออกแบบไว้แล้ว โดยมีท่อนำคลื่นสามท่อจัดวางให้มีการเรียงเยื้องกันในแต่ละท่อนำคลื่นมีสายอากาศสี่ออร์เธอร์เรย์สามตัว จากการคำนวณพบว่าขนาดสนามไฟฟ้าจะมีขนาดแรงที่ตำแหน่งกึ่งกลางของสี่ออร์เธอร์เรย์นั้น การให้สายอากาศวางเยื้องกันเพื่อให้เกิดการกระจายสนามไฟฟ้าอย่างสม่ำเสมอในแนวระนาบ x-y รูปที่ 5.2ก เป็นค่าสนามไฟฟ้าที่ผิวของน้ำที่คำนวณโดยให้น้ำมีความหนา 2 ซม. และแผ่นตัวนำด้านล่างอยู่ที่ระยะ 10.71 ซม. รูปที่ 5.2ข และ 5.2ค เป็นค่าสนามไฟฟ้าภายในน้ำที่ระยะ 1 ซม. และ 2 ซม. ตามลำดับ และจากรูปทั้งสามพบว่ารูปแบบการกระจายสนามไฟฟ้าในแนวระนาบมีรูปแบบที่ใกล้เคียงกันที่ในเนื้อไดอิเล็กตริกในระยะต่างๆ แต่มีความแตกต่างของขนาดของสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ ในแนวลึกของไดอิเล็กตริก

การเปลี่ยนแปลงระยะห่างของแผ่นตัวนำด้านล่าง โดยได้เลือกใช้ไดอิเล็กตริกเป็นน้ำที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (ϵ_r) 80-j8 ที่ความถี่ 2,450 MHz ซึ่งตรงกับความถี่ของแหล่งกำเนิดคลื่นที่ใช้งาน

รูปที่ 5.3ก แสดงค่าสนามไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงแผ่นตัวนำด้านล่างที่ระยะ 1.53 ซม., 3.06 ซม., 4.59 ซม., 6.12 ซม.



รูปที่ 5.3ข แสดงค่าสนามไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงแผ่นตัวนำด้านล่างที่ระยะ 7.65 ซม., 9.18 ซม., 10.71 ซม., 12.24 ซม.

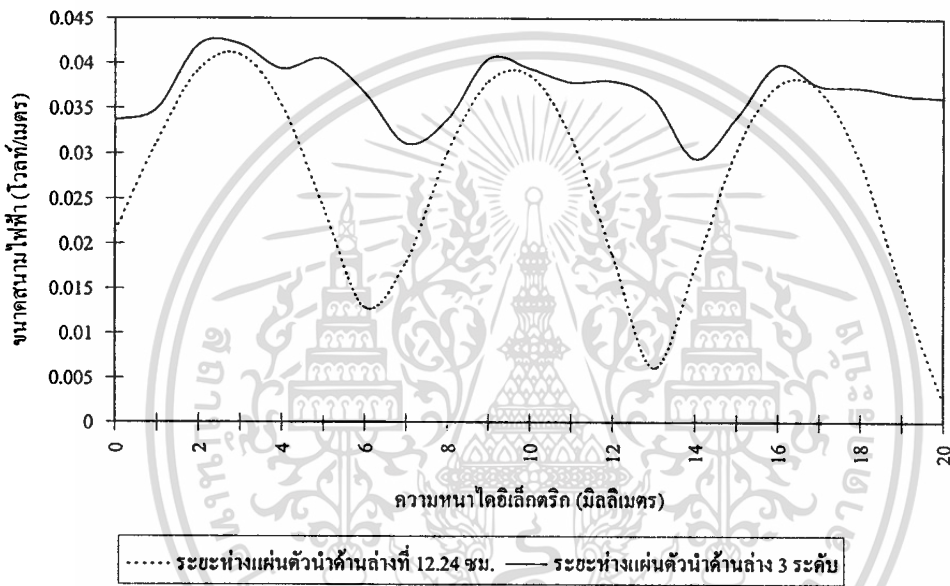


เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระยะแผ่นตัวนำด้านล่าง โดยให้ระยะแผ่นตัวนำด้านบนและความหนาของไดอิเล็กตริกคงที่ โดยพิจารณาที่ตำแหน่งกึ่งกลางของสายอากาศสี่ออด ผลการคำนวณพบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ว่าเกิดคลื่นนิ่งในความหนาของไดอิเล็กทริกโดยมีการเปลี่ยนตำแหน่งสูงสุดของสนามไฟฟ้าเมื่อมีการเปลี่ยนระยะห่างของแผ่นตัวนำด้านล่าง ระยะห่างที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงเป็นสัดส่วนกับความยาวคลื่นในอากาศ

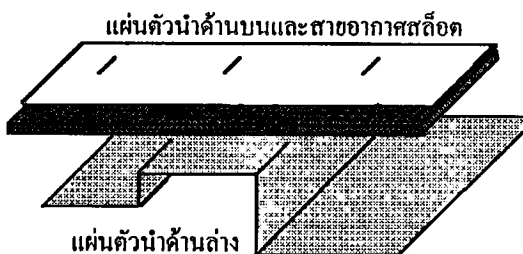
ผลจากการเกิดคลื่นนิ่งภายในไดอิเล็กทริกแสดงให้เห็นถึงความไม่สม่ำเสมอของสนามไฟฟ้าตามแนวลิขที่เพิ่มขึ้น ความไม่สม่ำเสมอดังกล่าวเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้น

รูปที่ 5.4 แสดงค่าสนามไฟฟ้าที่มีระดับของแผ่นตัวนำด้านล่างระดับเดียวและหลายระดับ



การลดปัญหาของการเกิดคลื่นนิ่งภายในเนื้อไดอิเล็กทริกสามารถทำได้โดยการใช้ระยะห่างของแผ่นตัวนำด้านล่างหลายระดับ จากรูปที่ 5.4 มีการใช้ระยะห่างแผ่นตัวนำด้านล่าง 3 ระดับโดยใช้ที่ระยะ 3.06 ซม., 4.59 ซม., และ 10.71 ซม. ตามลำดับ และสามารถเพิ่มความสม่ำเสมอที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้แผ่นตัวนำด้านล่างเพียงระดับเดียว

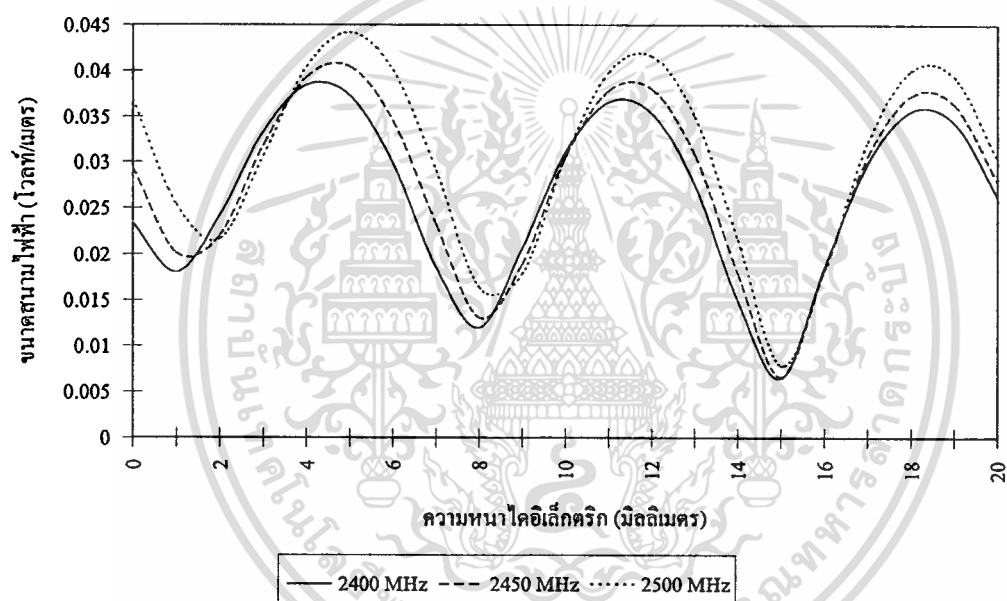
รูปที่ 5.5 แสดงเครื่องที่มีแผ่นตัวนำด้านล่างหลายระดับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามที่ได้อธิบายในบทนำเครื่องที่ได้สร้างขึ้นเป็นเครื่องให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟอย่างต่อเนื่องโดยใช้สายพานลำเลียง จากคลื่นนิ่งที่เกิดขึ้นสามารถลดความแตกต่างได้โดยการใช้แผ่นตัวนำด้านล่างหลายระดับซึ่งสามารถออกแบบได้ดังรูปที่ 5.5 วัสดุที่วางบนสายพานลำเลียงจะเคลื่อนที่ผ่านระดับของแผ่นตัวนำด้านล่างตามลำดับ ความแรงของสนามไฟฟ้าในแนวตั้งของไดอิเล็กตริกจะมีการเปลี่ยนไปตามตำแหน่งต่างๆซึ่งมีความเหมาะสมกว่าการใช้ระดับของแผ่นตัวนำระดับเดียว

รูปที่ 5.6 แสดงค่าสนามไฟฟ้าภายในน้ำเมื่อมีการแกว่งของความถี่เนื่องจากแหล่งกำเนิด

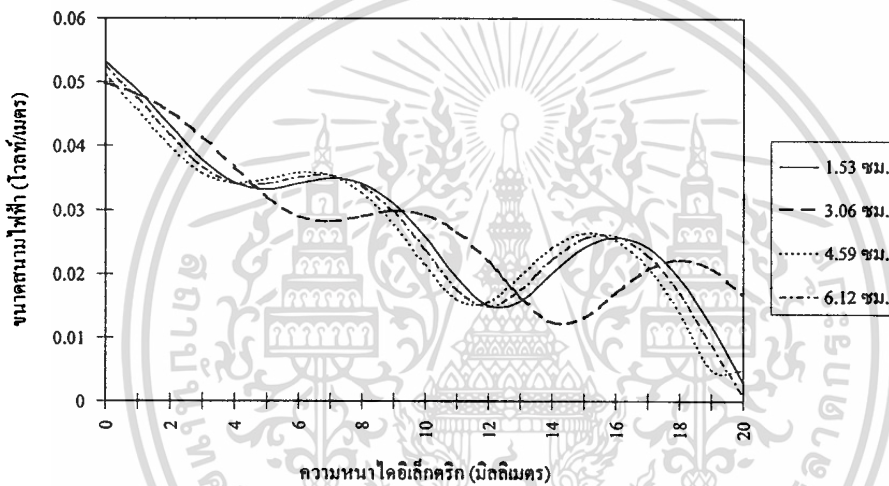


แหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟที่ใช้งานได้แสดงค่าการแกว่งตัวของความถี่ที่เกิดขึ้นในช่วง 2,400 - 2,500 MHz ดังนั้นจึงจำเป็นต้องพิจารณาถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นเนื่องจากความไม่เสถียรของแหล่งกำเนิดด้วย ในรูปที่ 5.6 แสดงผลกระทบที่เกิดขึ้นภายในน้ำแสดงให้เห็นว่าที่ความถี่ 2,500 MHz มีค่าสนามไฟฟ้ามากกว่าที่ความถี่อื่น และตำแหน่งแรงที่สุดของสนามไฟฟ้าได้ถูกเลื่อนไปเล็กน้อย ความไม่คงที่ของความถี่ของแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟนี้มีความจำเป็นต้องพิจารณาเนื่องจากสารไดอิเล็กตริกบางชนิดมีการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมากในช่วงความถี่ที่เปลี่ยนแปลงนี้ ซึ่งทำให้ค่าสนามไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงมากกว่าที่แสดงในรูป 5.6

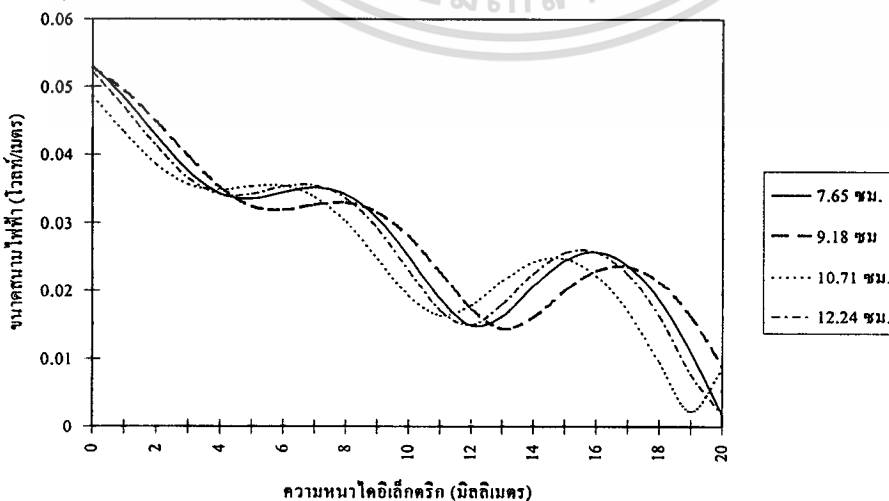
5.4.2 ผลการคำนวณค่าสนามไฟฟ้าภายในเนื้อัว

ในหัวข้อนี้พิจารณาถึงผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงชนิดของวัสดุที่ต้องการให้ความร้อน เนื่องจากในกรณีใช้งานจริงหากเรามีความจำเป็นต้องเปลี่ยนชนิดวัสดุจะสามารถใช้งานในเครื่องเดิมได้หรือไม่อย่างไร โดยค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของเนื้อัวมีค่า 53-j20

รูปที่ 5.7ก แสดงค่าสนามไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงแผ่นตัวนำด้านล่างที่ระยะ 1.53 ซม., 3.06 ซม., 4.59 ซม., 6.12 ซม.



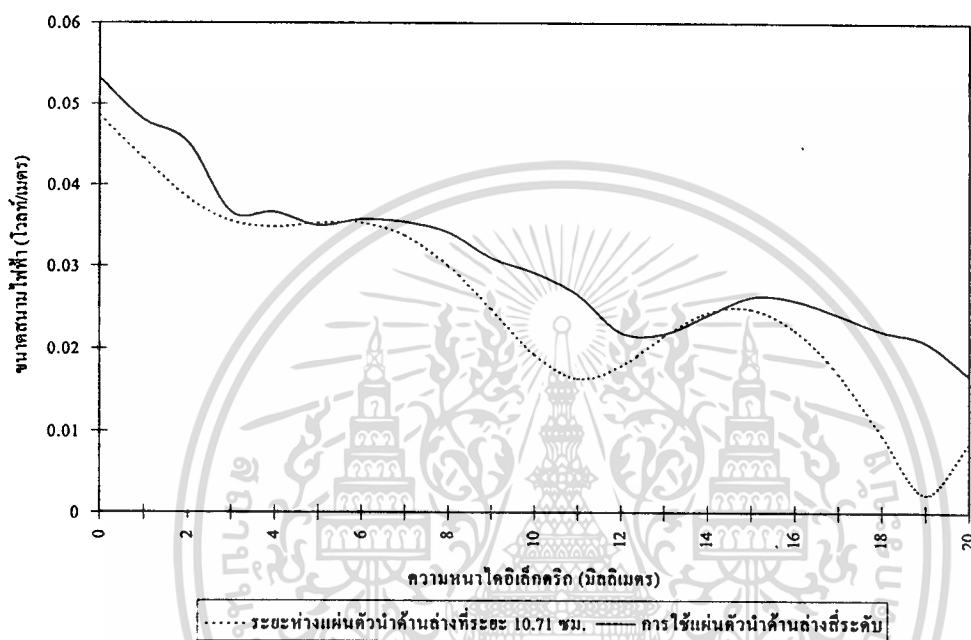
รูปที่ 5.7ข แสดงค่าสนามไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงแผ่นตัวนำด้านล่างที่ระยะ 7.65 ซม., 9.18 ซม., 10.71 ซม., 12.24 ซม.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการคำนวณ โดยการใช้เนื้อวุ้นที่มีความหนา 2 ซม. โดยเปลี่ยนระยะแผ่นตัวนำด้านล่างพบว่าเนื้อวุ้นเป็นวัสดุที่มีค่าการสูญเสียมากกว่าน้ำ ดังนั้นค่าสนามไฟฟ้าจะมีค่าลดลงกว่าน้ำและคลื่นนิ่งที่เกิดขึ้นมีขนาดของคลื่นสะท้อนน้อยกว่าจึงทำให้ค่าสนามไฟฟ้าด้านล่างมีค่าน้อยกว่าที่ผิวด้านบน

รูปที่ 5.8 แสดงค่าสนามที่มีการใช้แผ่นตัวนำด้านล่างสี่ระดับ

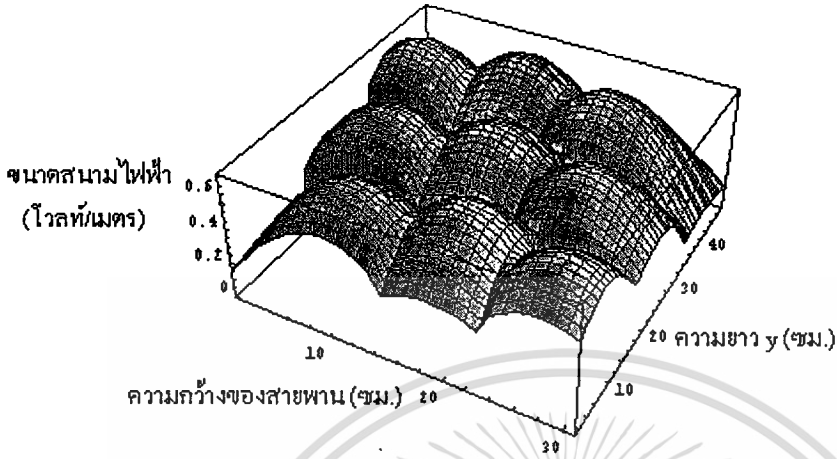


การใช้งานหลายระดับของแผ่นตัวนำด้านล่างยังสามารถลดปัญหาความไม่สม่ำเสมอในแนวความหนาของเนื้อวุ้นได้แต่ยังไม่ดีมากนักดังนั้นในวัสดุที่มีค่าคงที่การลดทอนสูง อาจจะต้องมีการออกแบบใหม่เพื่อให้มีความสม่ำเสมอในแนวหนาที่คืบขึ้น

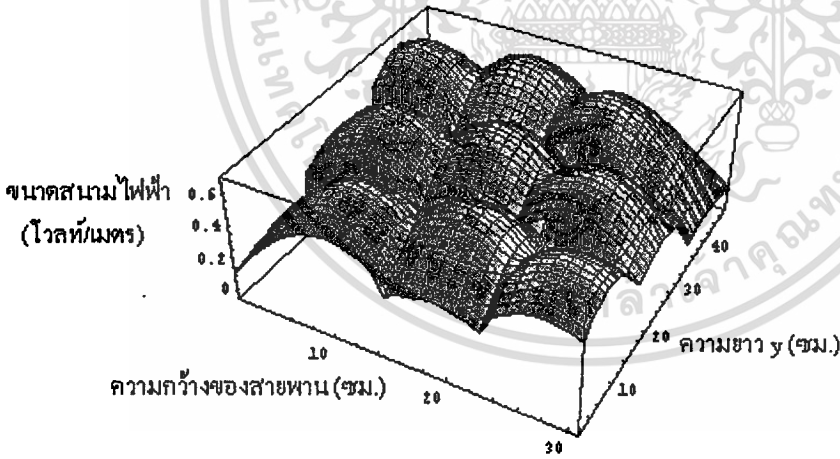
5.4.3 ผลการคำนวณค่าสนามไฟฟ้าภายในไม้

ไม้เป็นวัสดุอิกซินิกชนิดหนึ่งที่สามารถใช้งานในเครื่องให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟซึ่งจะใช้ในงานอบ ค่าความคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ของไม้คือ $2-j0.02$

รูปที่ 5.9ก แสดงค่าสนามไฟฟ้าภายในไม้ที่ระยะ 0 ซม. ในระนาบ x-y

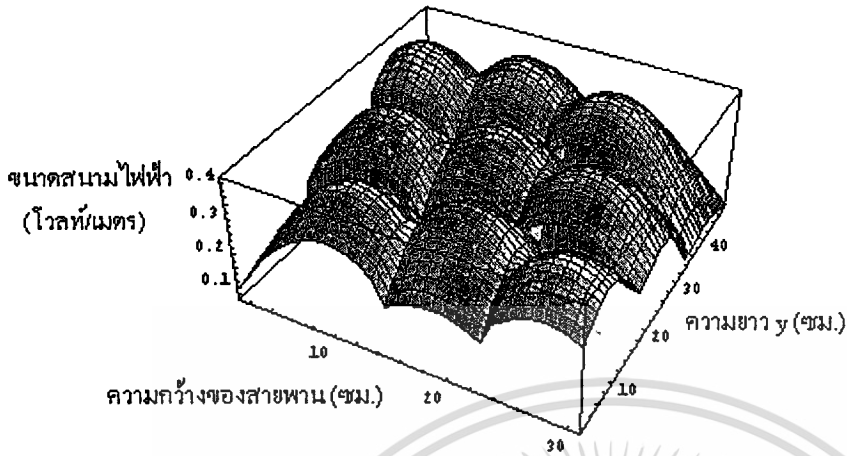


รูปที่ 5.9ข แสดงค่าสนามไฟฟ้าภายในไม้ที่ระยะ 1 ซม. ในระนาบ x-y

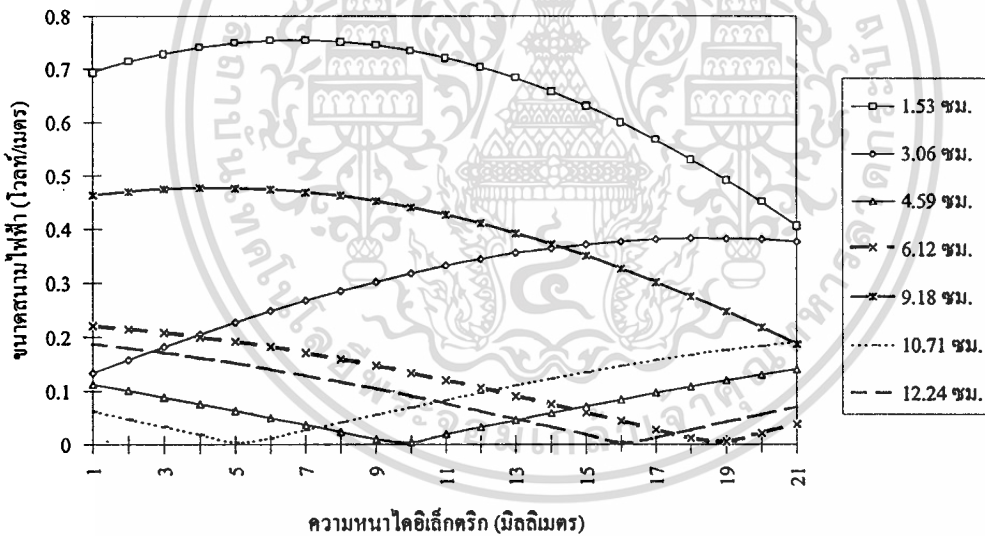


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.9ค แสดงค่าสนามไฟฟ้าภายในไม้ที่ระยะ 2 ซม. ในระนาบ x-y



รูปที่ 5.10 แสดงค่าสนามไฟฟ้าภายในไม้ที่มีการเปลี่ยนระดับแผ่นตัวนำด้านล่าง



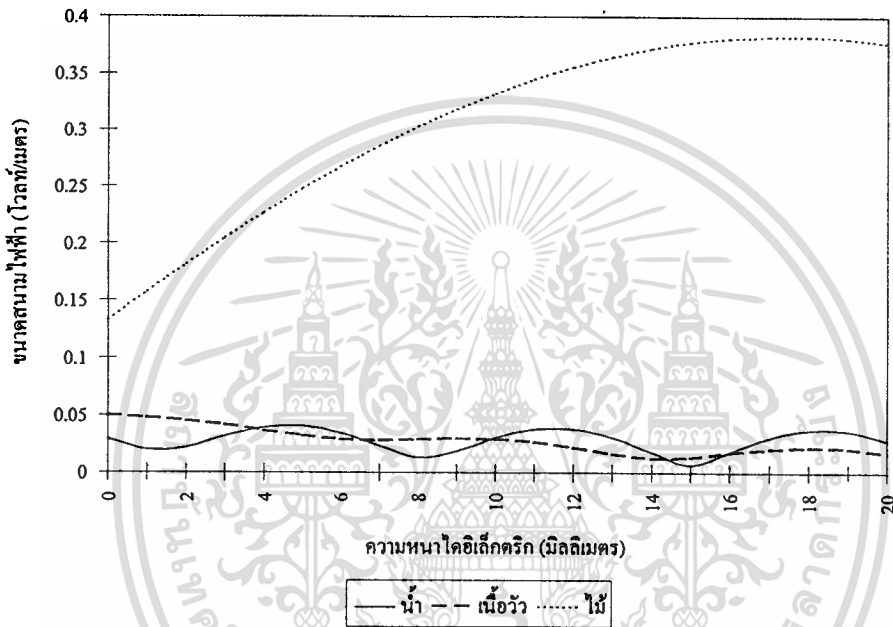
การเปลี่ยนชนิดของวัสดุที่ต้องการให้ความร้อนมีผลอย่างมากในการพิจารณาการออกแบบ ซึ่งในกรณีของไม้เป็นวัสดุที่มีค่าความยาวคลื่นในตัวกลางมากกว่า ดังนั้นผลกระทบจากการเกิดคลื่นนิ่งมีน้อยในกรณีที่วัสดุมีความหนาตามที่คำนวณคือ 2 ซม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.4 ผลการคำนวณเปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้าใน น้ำ เนื้อวัวและไม้

การใช้งานระบบให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟการให้ความร้อนอย่างสม่ำเสมอเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง คุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุที่แตกต่างกันส่งผลให้การกระจายสนามไฟฟ้าแตกต่างกัน

รูปที่ 5.11 แสดงค่าสนามไฟฟ้าภายในน้ำ,เนื้อ,ไม้

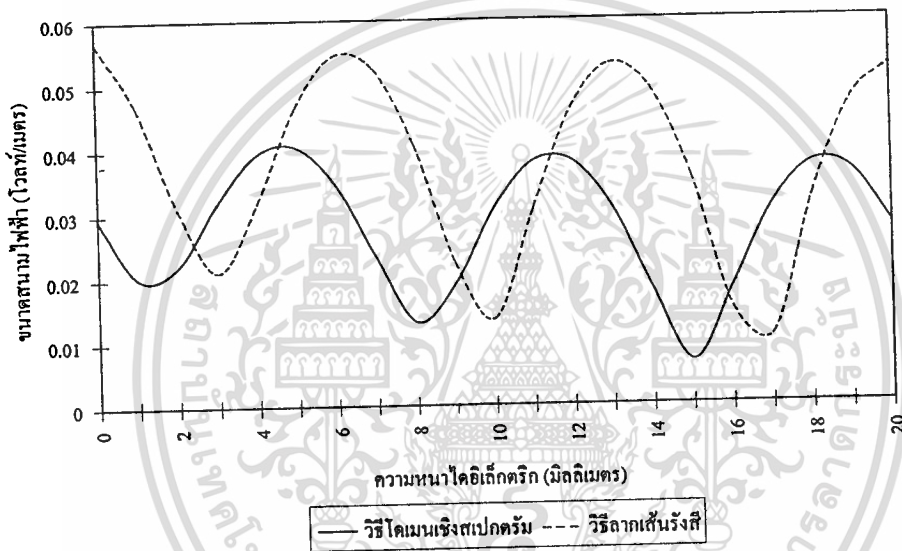


ความแตกต่างของค่าสนามไฟฟ้าภายในวัสดุต่างๆกัน จำนวนที่ระยะห่าง 3.06ซม.โดยค่าสนามไฟฟ้าในเนื้อไม้มีค่ามากกว่าภายในเนื้อวัวและน้ำ น้ำเป็นวัสดุที่เกิดจำนวนคลื่นนิ่งมากกว่าในเนื้อวัว ความแตกต่างของค่าสนามไฟฟ้าในวัสดุชนิดต่างๆสามารถพิจารณาได้ว่า ในการใช้งานที่มีประสิทธิภาพของเครื่องให้ความร้อนโดยคลื่นไมโครเวฟการออกแบบให้มีความเหมาะสมกับวัสดุประเภทเดียว

5.4.5 เปรียบเทียบผลการคำนวณโดยวิธีลากเส้นรังสี,โดเมนเชิงสเปกตรัม

จากการคำนวณที่ผ่านมาในการวิเคราะห์ค่าสนามไฟฟ้าภายในเนื้อไดอิเล็กตริกได้มีการวิเคราะห์สองวิธีคือ วิธีลากเส้นรังสีและโดเมนเชิงสเปกตรัม การเปรียบเทียบผลการคำนวณแสดงไว้ดังนี้คือ

รูปที่ 5.12 แสดงค่าสนามไฟฟ้าโดยวิธีลากเส้นรังสีและ โดเมนเชิงสเปกตรัม



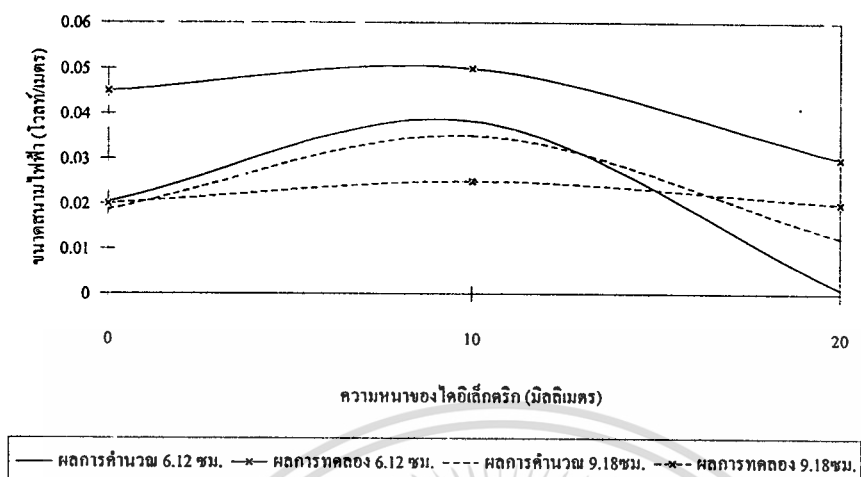
ผลการคำนวณสนามไฟฟ้าโดยวิธีการทั้งสองพบว่าเกิดคลื่นนิ่งในทั้งสองกรณีแต่ขนาดและตำแหน่งจุดแรงของคลื่นนิ่งแตกต่างกันโดยกำหนดให้สนามปฐมภูมิที่ใช้ในวิธีลากเส้นรังสีมีค่า 0.1 โวลต์/เมตร โดยทั้งสองวิธีพิจารณาในน้ำที่มีความหนา 2 ซม. ที่ระดับแผ่นตัวนำด้านล่างที่ระยะ 3.06 ซม. และห่างจากแผ่นตัวนำด้านบน 1.53 ซม.

5.5 ผลการทดลอง

การทดลองวัดค่าสนามไฟฟ้าภายในเนื้อไดอิเล็กตริกในกรณีที่มีแผ่นตัวนำด้านล่างวางขนานกับสายอากาศสล็อตโดยใช้การปรับระดับแผ่นตัวนำด้านล่างตามตำแหน่งต่างๆ ทำได้โดยการใช้อุปกรณ์วิเคราะห์โครงข่ายที่ความถี่ 2,450 MHz วางโพรบที่ตำแหน่งกึ่งกลางสล็อต โดยได้ทำการทดลองกับน้ำที่มีความหนา 2 ซม. แผ่นตัวนำด้านล่างได้กำหนดที่ระยะ 6.12 ซม. และ 9.18 ซม. ปรับระดับโพรบวัดค่าสนามไฟฟ้าภายในเนื้อไดอิเล็กตริกที่ระยะ 0 ซม. , 1 ซม. , 2 ซม. ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเฉพาะเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.13 แสดงค่าสนามไฟฟ้าจากการทดลองและการคำนวณ โดยวิธีโดเมนเชิงสเปกตรัม



ผลการทดลองเปรียบเทียบกับผลการคำนวณแสดงในรูปที่ 5.13 พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงค่าสนามไฟฟ้าที่ระดับต่างกันอย่างไรก็ตามผลการวัดค่าสนามไฟฟ้าก็ไม่ตรงกับค่าที่ได้จากการคำนวณเนื่องจากความสั่นที่เกิดขึ้นและความแตกต่างเงื่อนไขในการคำนวณและการทดลอง

5.6 สรุป

ค่าสเปกตรัมของสนามไฟฟ้าสามารถนำมาเข้าเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) และการแปลงฟูริเยร์ผกผันเพื่อหาค่าสนามไฟฟ้าภายในไดอิเล็กตริก ค่าสนามไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณพบว่าการจัดเรียงสายอากาศสี่ตัวที่วางเอียงกันทำให้เกิดความสม่ำเสมอของสนามไฟฟ้าภายในระนาบได้ ในกรณีค่าสนามไฟฟ้าตามแนวลึทพบว่าจะเกิดคลื่นนิ่งดังนั้นการแก้ปัญหาค่าความไม่สม่ำเสมอนี้สามารถทำได้โดยการใช้แผ่นตัวนำด้านล่างหลายระดับ สำหรับวัสดุที่มีค่าการลดทอนสูงการใช้แผ่นด้านล่างหลายระดับช่วยลดปัญหาได้ไม่มากนัก การวางสายอากาศแบบใหม่หรือการเปลี่ยนความถี่ใช้งานอาจสามารถลดปัญหาดังกล่าวได้

การเปลี่ยนแปลงความถี่เนื่องจากความไม่เสถียรของแหล่งกำเนิดทำให้ตำแหน่งแรงของคลื่นนิ่งเปลี่ยนไป และจะส่งผลกระทบต่อมากขึ้นกับวัสดุที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูง ในช่วงการเปลี่ยนแปลงความถี่ที่ใช้งาน ผลกระทบที่ได้จากการวิเคราะห์ที่ผ่านมาเป็นปัจจัยสำคัญในการออกแบบนอกจากนี้ คุณสมบัติของวัสดุแต่ละประเภทเป็นปัจจัยสำคัญในการออกแบบเครื่องให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ

บทที่ 6

ทฤษฎีและการคำนวณการส่งผ่านความร้อน

6.1 กล่าวนำ

การวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิในไดโอดีคตริกที่มีการสูญเสียที่เกิดจากสนามไฟฟ้าที่อยู่ภายในเนื้อไดโอดีคตริกที่ได้ทำการวิเคราะห์จากบทที่ผ่านมาสามารถทำได้โดยการใช้สมการการถ่ายเทความร้อน เนื่องจากกระบวนการ การให้ความร้อนในงานบางประเภทมีความจำเป็นต้องควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ เช่น กระบวนการสเตอร์ไรไลซ์ การแปลงค่าพลังงานของสนามไฟฟ้าให้อยู่ในรูปของอุณหภูมิจึงเป็นอีกประเด็นหนึ่งที่ต้องพิจารณา

ระบบให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟที่พิจารณาเป็นระบบต่อเนื่องโดยใช้สายพานลำเลียง ลำเลียงวัสดุผ่านคลื่นไมโครเวฟ การวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิจึงจำเป็นต้องพิจารณาในสถานะชั่วขณะ (Transient) โดยภายใต้เงื่อนไขที่ตัวกลางไดโอดีคตริกมีการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน (Heat Conduction) เพียงอย่างเดียวและไม่เกิดการระเหยกลายเป็นไอ (มวลคงที่) และเป็นการวิเคราะห์ใน 3 มิติ โดยใช้วิธีการหาผลเฉลยของสมการถ่ายเทความร้อนโดยวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม (Finite Difference Method) แบบแครงก์นิกโคลสัน (Crank Nicholson) ซึ่งเป็นวิธีเชิงเลขและหาผลเฉลยของระบบสมการเชิงเส้น

ในการวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิมักมีการเปลี่ยนค่าความเร็วของสายพานลำเลียง , ประเภทของวัสดุและได้เปรียบเทียบกับผลการทดลองโดยวิธีวัดความชื้นของวัสดุ

6.2 สมการการส่งผ่านความร้อน

การแพร่กระจายคลื่นไมโครเวฟสามารถทำให้เกิดความร้อนแก่วัสดุได้ความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถแสดงได้ในรูปของสมการการส่งผ่านความร้อน (Heat Transport Equation) [29]

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_T \nabla^2 T + \frac{\epsilon_v}{C_p} L_h \frac{\partial M_l}{\partial t} + \frac{P}{\rho C_p} \quad (6.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ	T	คือ อุณหภูมิ ($^{\circ}C$)
	t	เป็น เวลา (s)
	α_T	เป็น ความสามารถในการกระจายอุณหภูมิ (m^2/s)
	ε_v	เป็น อัตราส่วนการถ่ายเทไอน้ำต่ออัตราส่วนการถ่ายเทความร้อนทั้งหมด (kg^{-1})
	C_p	คือ ความจุความร้อนจำเพาะของสารไดอิเล็กตริก ($kJ/kg^{\circ}C$)
	L_h	คือ ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ (kJ/kg)
	p	คือ ความดัน
	M_l	คือ มวลของน้ำ (kg)
	ρ	เป็น ความหนาแน่นของเนื้อวัสดุไดอิเล็กตริก (kg/m^3)

โดยที่

$$P = 55.6 \times 10^{-8} E^2 f \varepsilon_{eff}'' \quad (W/m^3) \quad (6.2)$$

ในการวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้อยู่ภายใต้เงื่อนไขของการถ่ายเทความร้อนที่เกิดโดย การนำความร้อนเพียงอย่างเดียว และ ไม่มีการพิจารณาการระเหยกลายเป็นไอ แทนค่าสมการ (6.2) ใน (6.1)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_T \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{55.6 \times 10^{-8} E^2 f \varepsilon_{eff}''}{\rho C_p} \quad (6.3)$$

เมื่อ	E	คือ ความเข้มสนามไฟฟ้าที่คำนวณได้จากบทที่ 5 (V/m)
	f	คือ ความถี่ของคลื่นที่มาจากแหล่งกำเนิด (MHz)
	ε_{eff}''	คือ ค่าตัวประกอบในการสูญเสียยังผล (Effective Loss Factor)

สมการดังกล่าวอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์และสามารถหาผลเฉลยได้โดยวิธีเชิงเลขแบบผลต่างสี่เหลี่ยม (Finite Difference)

6.3 สมการผลต่างสี่เหลี่ยม

วิธีหาผลเฉลยเชิงตัวเลขโดยวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมได้มีการใช้ครั้งแรกโดย A.Thom ในปี 1920

[30] หลักการของทฤษฎีนี้คือ การประมาณและแทนค่าอนุพันธ์ของฟังก์ชันด้วยรูปแบบต่างๆ เช่น ผลต่างไปข้างหน้า (Forward Difference)

$$f'(x) = \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x} \quad (6.4)$$

ผลต่างไปข้างหลัง (Backward Difference)

$$f'(x) = \frac{f(x) - f(x - \Delta x)}{\Delta x} \quad (6.5)$$

ผลต่างตรงกลาง (Central Difference)

$$f'(x) = \frac{f(x + \Delta x) - f(x - \Delta x)}{2\Delta x} \quad (6.6)$$

นอกจากนี้ยังมีการประมาณค่าอนุพันธ์ของฟังก์ชันอีกหลายวิธีเช่น อนุกรมเทย์เลอร์ , วิธีโดยชัดแจ้ง (Explicit) , วิธีโดยปริยาย (Implicit) การเลือกรูปแบบการประมาณค่าอนุพันธ์มีหลักการคือ การพิจารณาค่าความเสถียร (Stability) ซึ่งสามารถทดสอบได้โดยวิธีนอยมานน์ (Neumann) [31] การพิจารณาประเภทของสมการ , ความละเอียดของผลเฉลยที่ต้องการและขนาดของระยะห่างของโหนด เช่น กรณีวิธีชัดแจ้ง (Explicit) จะเกิดความเสถียรเมื่อ

$$\alpha \left(\frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} + \frac{\Delta t}{(\Delta y)^2} + \frac{\Delta t}{(\Delta z)^2} \right) \leq 0.5 \quad (6.7)$$

ในการพิจารณาการกระจายอุณหภูมิในไดโอดีคริกใน 3 มิติ ที่จะกล่าวถึงนี้ได้เลือกใช้วิธีตรงกันโคลสัน เนื่องจากมีความเสถียร โดยไม่มีเงื่อนไข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_{x,y,z}^{n+1} - T_{x,y,z}^n}{\Delta t} \quad (6.8)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \theta \left(\frac{T_{x-1,y,z}^{n+1} - 2T_{x,y,z}^{n+1} + T_{x+1,y,z}^{n+1}}{(\Delta x)^2} \right) + (1-\theta) \left(\frac{T_{x-1,y,z}^n - 2T_{x,y,z}^n + T_{x+1,y,z}^n}{(\Delta x)^2} \right) \quad (6.9)$$

โดยที่ θ เป็นค่าที่ใช้ในการกำหนดวิธีการในกรณีแครงกันิโคลสันมีค่า 0.5

แทนค่าสมการ (6.8) และ (6.9) ในสมการ (6.3) จะได้สมการผลต่างสี่บเนื่องของสมการการส่งผ่านความร้อนใน 3 มิติคือ

$$\frac{T_{x,y,z}^{n+1} - T_{x,y,z}^n}{\alpha \Delta t} = \theta \left(\Delta x x T_{x,y,z}^{n+1} + \Delta y y T_{x,y,z}^{n+1} + \Delta z z T_{x,y,z}^{n+1} \right) + (1-\theta) \left(\Delta x x T_{x,y,z}^n + \Delta y y T_{x,y,z}^n + \Delta z z T_{x,y,z}^n \right) + Q \quad (6.10)$$

โดยที่

$$\Delta x x T_{x,y,z}^n = \frac{1}{(\Delta x)^2} \left(T_{x+1,y,z}^n - 2T_{x,y,z}^n + T_{x-1,y,z}^n \right) \quad (6.11)$$

$$\Delta y y T_{x,y,z}^n = \frac{1}{(\Delta y)^2} \left(T_{x,y+1,z}^n - 2T_{x,y,z}^n + T_{x,y-1,z}^n \right) \quad (6.12)$$

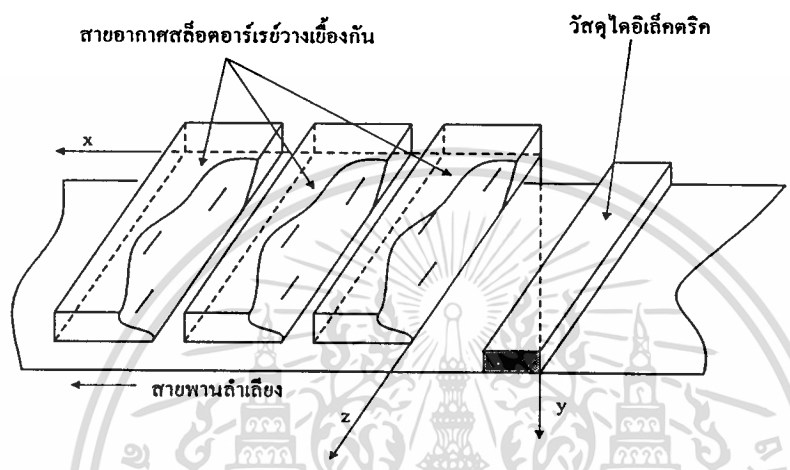
$$\Delta z z T_{x,y,z}^n = \frac{1}{(\Delta z)^2} \left(T_{x,y,z+1}^n - 2T_{x,y,z}^n + T_{x,y,z-1}^n \right) \quad (6.13)$$

โดยที่ $\theta = 0.5$

แทนค่าสมการ (6.11)-(6.13) ลงใน (6.10) จะได้สมการผลต่างสี่บเนื่องของการกระจายอุณหภูมิภายในไดอิเล็กตริกที่มีการเคลื่อนที่ผ่านระบบให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ คำตอบของการกระจายอุณหภูมิสามารถหาได้โดยการโปรแกรมภาษาซี ดังแสดงใน ภาคผนวก ก.

6.4 การคำนวณและวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิภายในไดอิเล็กตริกที่วางระหว่างแผ่นระนาบตัวนำขนานขนาดอนันต์เมื่อป้อนคลื่นด้วยสายอากาศสล็อตอาร์เรย์

รูปที่ 6.1 แสดงการเคลื่อนที่ของวัสดุผ่านระบบให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ



ค่าสนามไฟฟ้าที่คำนวณโดยวิธีโคเมนเชิงสเปกตรัมจากบทที่ 5 จะนำมาใช้ในการคำนวณและการวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิโดยแทนค่าสนามไฟฟ้าดังกล่าวลงในสมการผลต่างสี่เหลี่ยมตามตำแหน่งต่างๆที่พิจารณาโดยกำหนดให้ค่า $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 1$ ซม. และให้วัสดุมีขนาด $4 \times 2 \times 30$ ลูกบาศก์เซนติเมตร เคลื่อนที่ผ่านระบบให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟดังแสดงในรูปที่ 6.1 ในการแทนค่าสนามไฟฟ้าในแต่ละตำแหน่งจะทำให้ได้ระบบสมการเชิงเส้นในแต่ละชั้นเวลาจนกระทั่งเคลื่อนที่ออกจากระบบ

6.5 ผลการคำนวณ

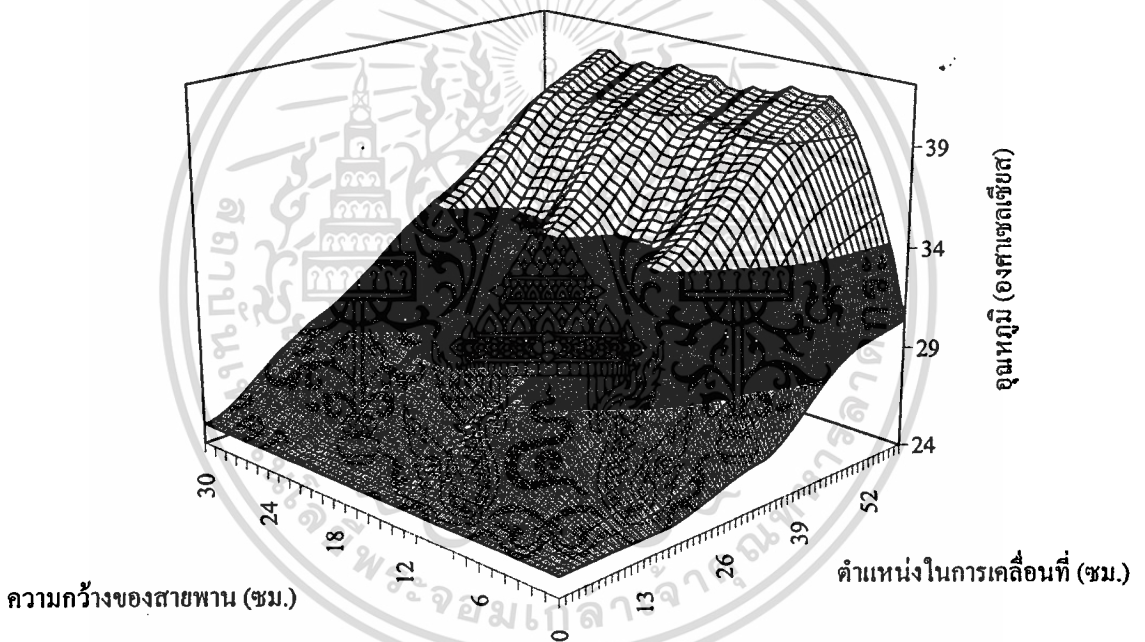
ในการพิจารณาการกระจายอุณหภูมิภายในเนื้อไดอิเล็กตริกที่เคลื่อนที่ผ่านระบบให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟจะพิจารณาการกระจายอุณหภูมิของน้ำและไม้ ที่มีการเคลื่อนที่ผ่านระบบดังกล่าว ที่ความเร็ว 0.5 ซม.ต่อวินาที และ 1 ซม.ต่อวินาที โดยใช้ค่าสนามไฟฟ้าภายในน้ำเมื่อแผ่นตัวนำด้านล่างอยู่ที่ระยะ 10.71 ซม. และค่าสนามไฟฟ้าภายในไม้เมื่อแผ่นตัวนำด้านล่างอยู่ที่ระยะ 12.24 ซม. โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการคำนวณของน้ำและไม้

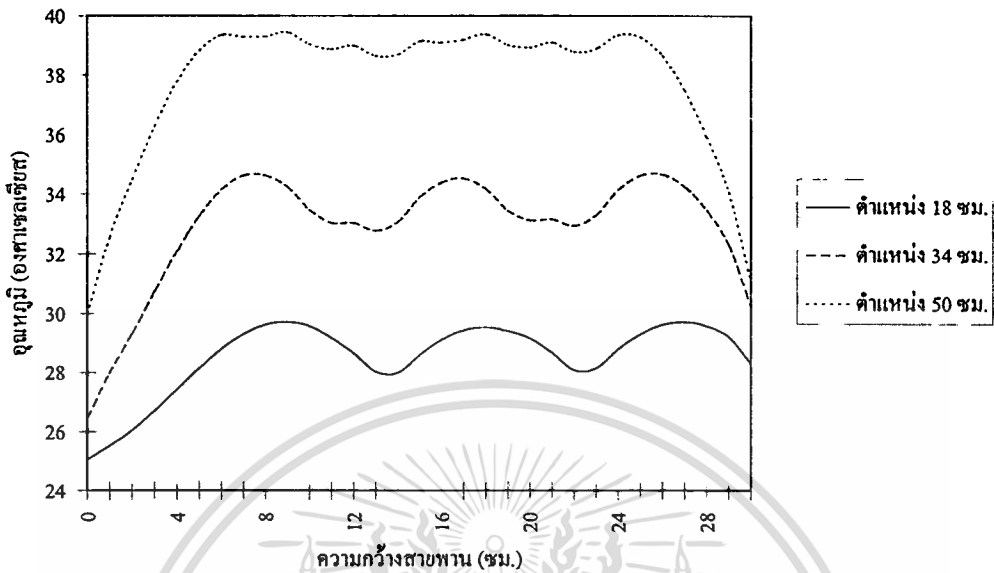
	$\alpha_T (\text{m}^2 / \text{s})$	ϵ_{eff}''	$\rho (\text{kg} / \text{m}^3)$	$C_p (\text{kJ} / \text{kg}^\circ \text{C})$
น้ำ	9.6×10^{-8}	8.00	1,000	4.18
ไม้	1.5×10^{-7}	0.02	420	2.72

รูปที่ 6.2 แสดงอุณหภูมิของน้ำเมื่อเคลื่อนที่ผ่านระบบที่ตำแหน่งต่างๆ



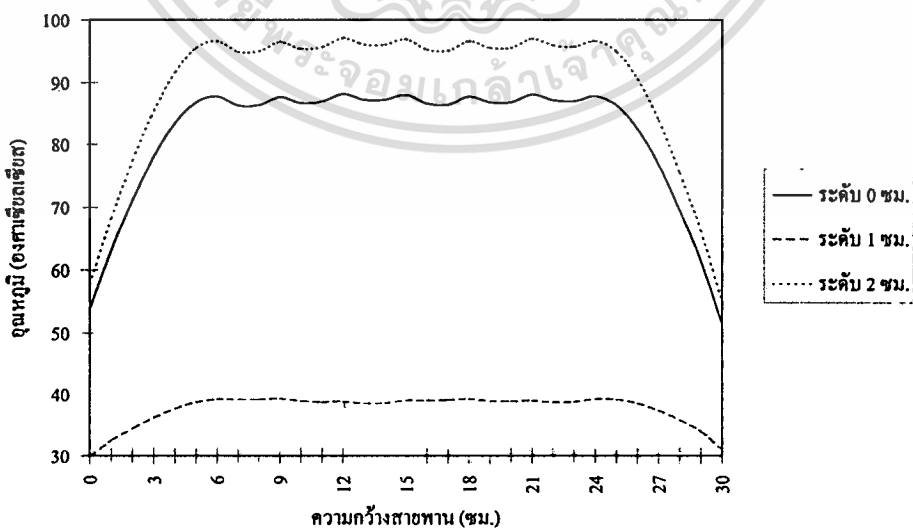
อุณหภูมิที่ตำแหน่งกึ่งกลางตามความหนาของน้ำเมื่อมีการเคลื่อนที่ของสายพานลำเลียงที่ความเร็ว 1 ซม./วินาที ได้แสดงดังรูปที่ 6.2 เมื่อมีการเคลื่อนที่ผ่านแต่ละท่ออากาศทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น การจัดวางสายอากาศแบบเอียงกันทำให้มีการกระจายอุณหภูมิที่ค่อนข้างสม่ำเสมอในแนวกว้างของสายพาน

รูปที่ 6.3 แสดงอุณหภูมิของน้ำเมื่อผ่านแต่ละท่อนำคลื่น



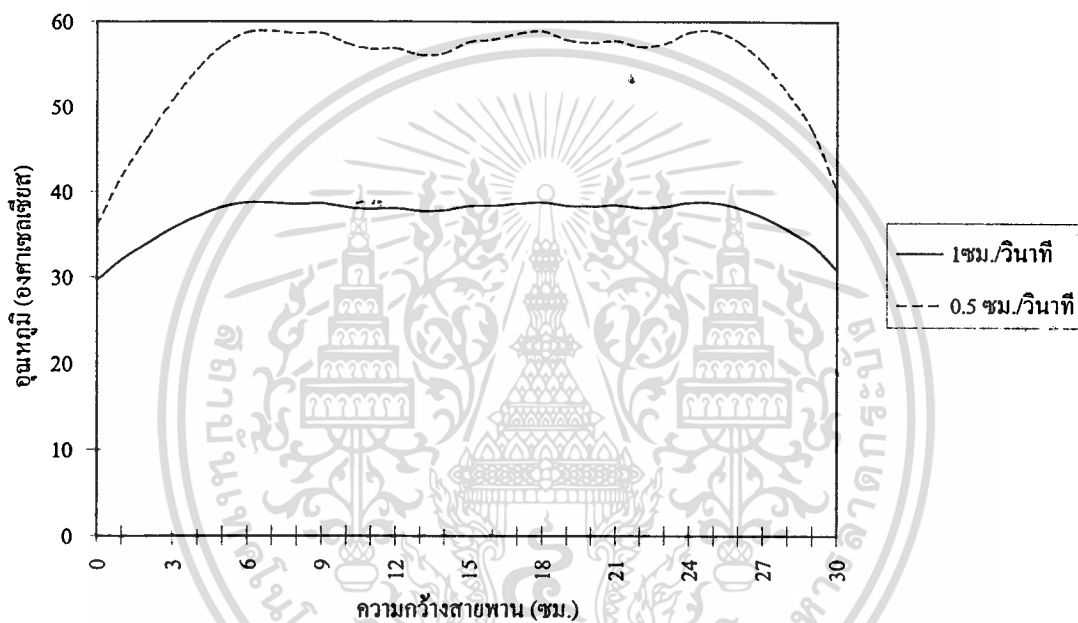
การออกแบบสายอากาศวางเยื้องกันเพื่อความสม่ำเสมอของการกระจายอุณหภูมิตามความกว้างของสายพาน รูปที่ 6.3 เป็นการพิจารณาค่าอุณหภูมิของน้ำที่ตำแหน่งกึ่งกลางของไดอิเล็กทริกเมื่อผ่านสายอากาศแต่ละตัวพบว่าสามารถให้ความสม่ำเสมอในช่วง 6 ซม. ถึง 24 ซม.

รูปที่ 6.4 แสดงอุณหภูมิน้ำที่ระดับต่างๆ



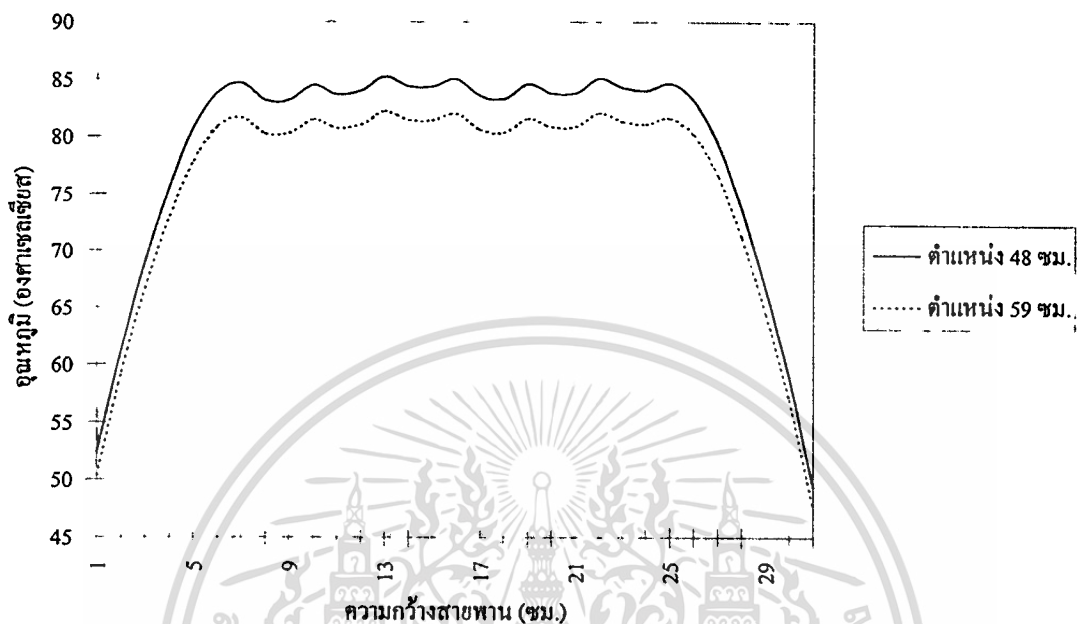
การเคลื่อนที่ของวัสดุที่มีความหนาผ่านระบบให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟการกระจายอุณหภูมิที่ระดับต่างๆตามความหนาของวัสดุ หลังจากผ่านคลื่นไมโครเวฟ ในรูปที่ 6.4 พบว่าที่ 1 ซม.มีอุณหภูมิต่ำสุดเนื่องจากค่าสนามไฟฟ้ามีค่าต่ำสุด ที่ตำแหน่ง 0 ซม.และ 2 ซม.มีค่าอุณหภูมิประมาณ 85 องศาเซลเซียส และ 95 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

รูปที่ 6.5 แสดงอุณหภูมิที่ความเร็วสายพานต่างๆ



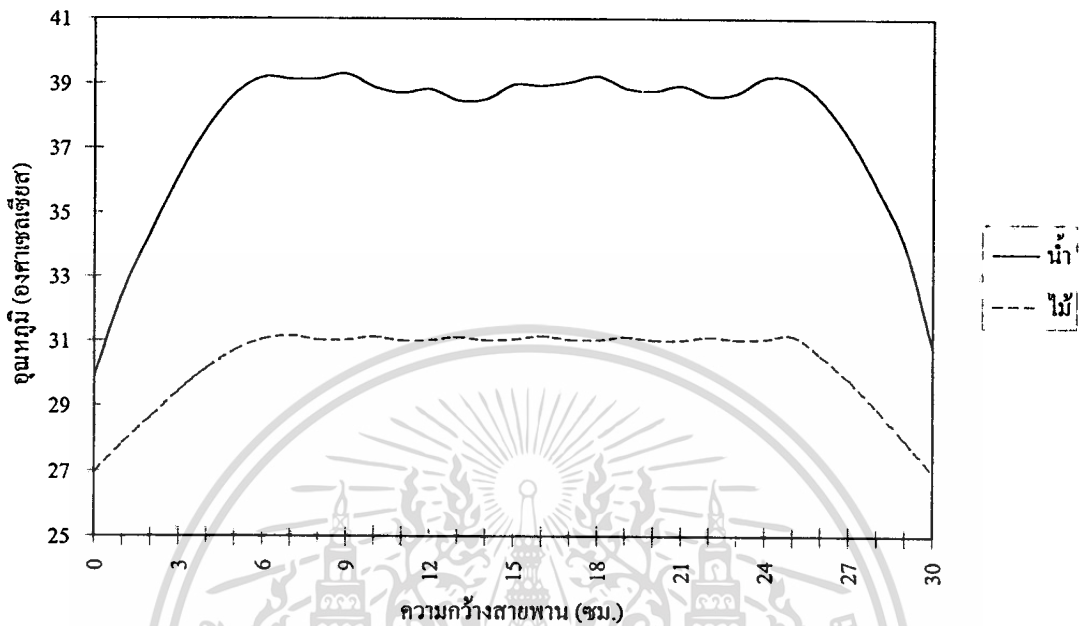
วัสดุที่มีการเคลื่อนที่ผ่านระบบด้วยความเร็วต่างกัน มีผลให้ค่าอุณหภูมิต่างกันด้วยดังแสดงในรูปที่ 6.5 ซึ่งเป็นอุณหภูมิของน้ำที่ตำแหน่งกึ่งกลางตามความหนาของวัสดุเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วของสายพานพบว่าความเร็วมากขึ้นจะทำให้ค่าอุณหภูมิลดลง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความเร็วนี้สามารถควบคุมอุณหภูมิภายในวัสดุได้

รูปที่ 6.6 แสดงอุณหภูมิที่ลดลงเมื่อออกจากระบบ



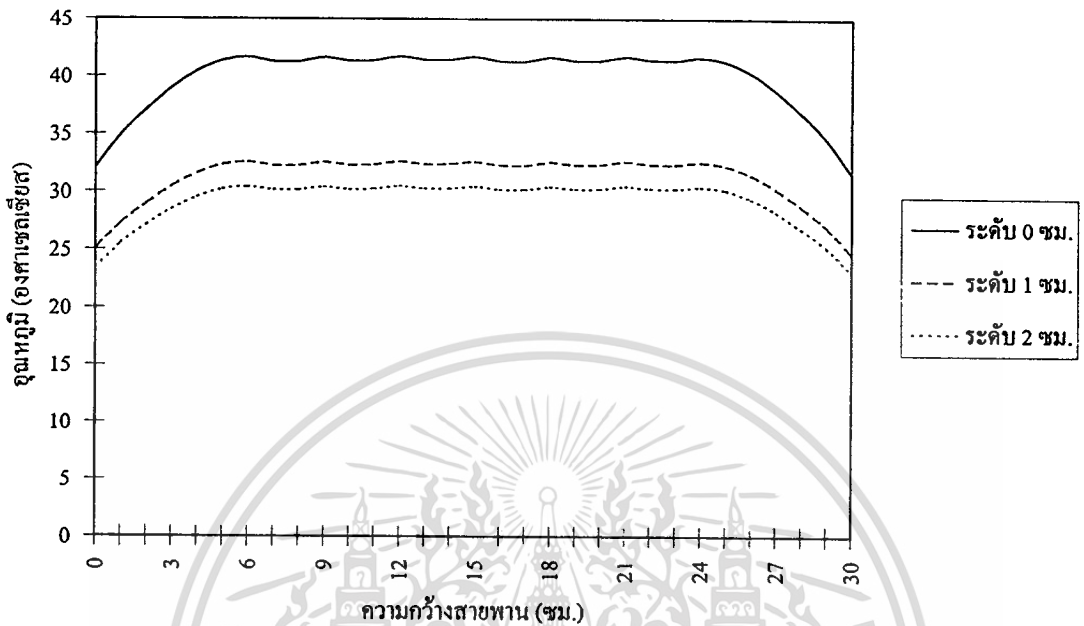
เครื่องให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟจะมีส่วนสำหรับป้องกันคลื่นร้าวอยู่ที่ทางเข้าออกของสายพานลำเลียง ดังนั้นเมื่อวัสดุเคลื่อนที่ออกจากระบบให้ความร้อนวัสดุจะต้องผ่านท่อนำคลื่นสำหรับป้องกันคลื่นร้าวซึ่งจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขณะไม่มีสนามไฟฟ้าให้ความร้อน โดยแสดงดังรูปที่ 6.6 เป็นการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำที่ระดับ 0 ซม. โดยมีค่าอุณหภูมิประมาณ 84 องศาเซลเซียสขณะเริ่มออกจากระบบ และให้มีการเคลื่อนที่ผ่านระบบป้องกันคลื่นร้าวอีกประมาณ 10 วินาทีจะทำให้ค่าอุณหภูมิในวัสดุมีค่าลดลงเหลือ 80 องศาเซลเซียส

รูปที่ 6.7 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิของน้ำและไม้



การให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟกับวัสดุที่ต่างชนิดกัน พบว่าค่าอุณหภูมิภายในวัสดุมีค่าแตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 6.7 แสดงอุณหภูมิของน้ำและไม้ที่เคลื่อนที่ออกจากระบบด้วยความเร็วสายพาน 1 ชม./วินาที ที่ระดับแผ่นตัวนำด้านล่างของน้ำอยู่ที่ระยะ 10.71 ซม. และแผ่นตัวนำด้านล่างของไม้อยู่ที่ระยะ 12.24 ซม. พบว่ามีความแตกต่างของค่าอุณหภูมิระหว่างวัสดุทั้งสองประมาณ 8 องศาเซลเซียส

รูปที่ 6.8 แสดงอุณหภูมิที่ระดับต่างๆภายในเนื้อไม้



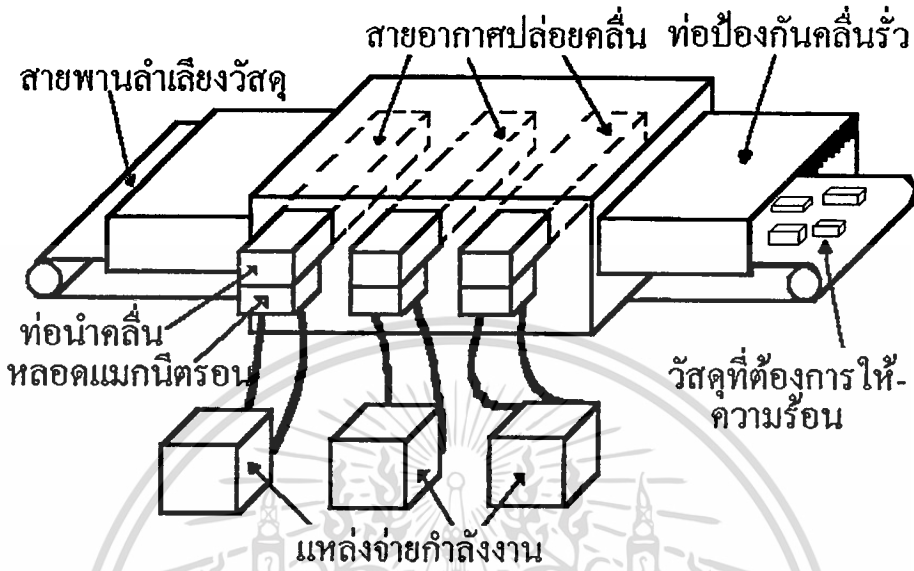
การกระจายอุณหภูมิของไม้ที่ระดับต่างๆภายในเนื้อไม้เมื่อเคลื่อนที่ออกจากระบบ โดยมีแผ่นตัวนำด้านล่าง 12.24 ชม. อุณหภูมิที่ระดับ 0 ชม. มีค่าประมาณ 40 องศาเซลเซียสที่ระดับ 1 ชม. 31 องศาเซลเซียส และระดับ 2 ชม. ประมาณ 30 องศาเซลเซียส

6.6 ผลการทดลอง

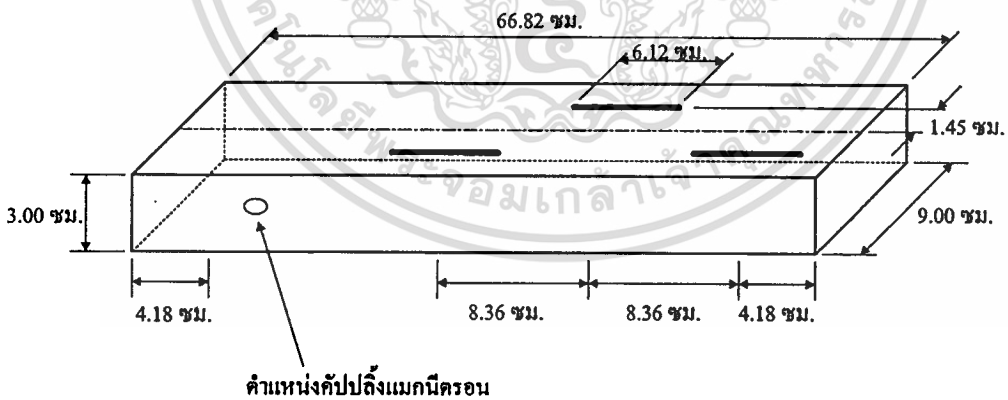
การวัดค่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆภายในเนื้อไดโอดีลิกทริก ไม่สามารถทำได้โดยง่ายเนื่องจากไม่สามารถนำอุปกรณ์วัดอุณหภูมิเข้าไปฝังในเนื้อไดโอดีลิกทริกในขณะที่มีคลื่นไมโครเวฟได้ เพราะอาจทำให้เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์วัดอุณหภูมิได้ ดังนั้นในการทดลองจึงได้ใช้การวัดค่าความชื้นของวัสดุ โดยวัสดุที่เลือกใช้คือข้าวเปลือกเนื่องจากสามารถวัดค่าความชื้นที่ตำแหน่งต่างๆตามความกว้างของสายพานลำเลียงได้ เนื่องจากค่าความชื้นที่ลดลงมีความสัมพันธ์กับค่าการดูดกลืนพลังงานไมโครเวฟ[32] ดังนั้นจึงได้ทำการทดลองกับเครื่องให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟที่ได้ออกแบบขึ้นแสดงดังรูปที่ 6.8 ขนาดท่อนำคลื่นและสายอากาศสี่อาร์ทาร์เรย์แสดงดังรูปที่ 6.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.9 แสดงเครื่องให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟโดยใช้สายอากาศสล็อต

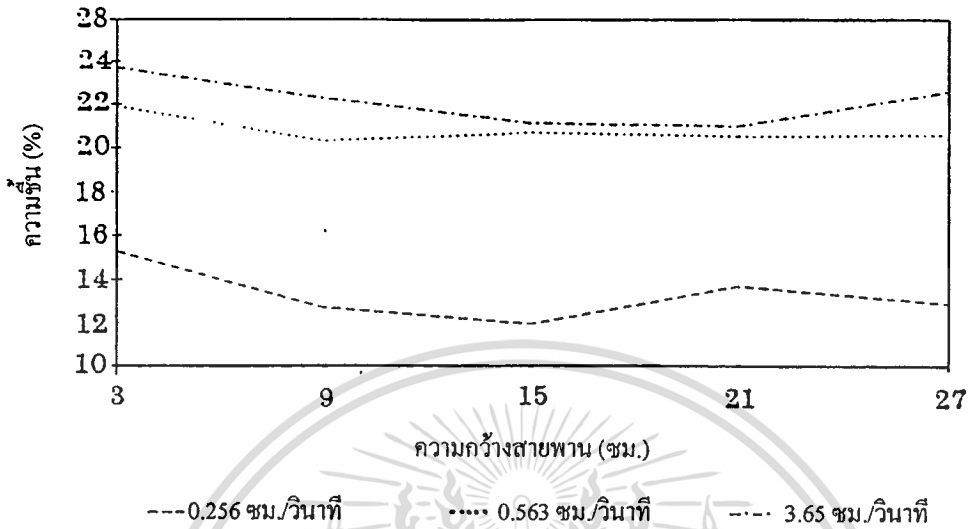


รูปที่ 6.10 แสดงท่อนำคลื่นและสายอากาศสล็อตคอร์เรย์



ขั้นตอนในการทดลองทำได้โดยการนำข้าวเปลือกแช่น้ำทิ้งไว้ประมาณ 10 ชั่วโมงเพื่อเพิ่มความชื้นของข้าวเปลือกหลังจากนั้นนำข้าวเปลือกมาวางบนสายพานลำเลียงตามตำแหน่งต่างๆตามความกว้างของสายพาน ผ่านข้าวเปลือกเข้าไปในระบบให้ความร้อนหลังจากนั้นนำข้าวเปลือกมาวัดความชื้น ทำการทดลองโดยเปลี่ยนความเร็วของสายพาน

รูปที่ 6.10 แสดงผลการทดลองวัดความชื้นตามความกว้างของสายพาน



ผลการทดลองพบว่าความชื้นของข้าวเปลือกก่อนผ่านเข้าระบบมีค่า 28% เมื่อสายพานเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.256 ซม./วินาที ค่าความชื้นลดลงเหลือประมาณ 14% และ ในกรณีสายพานเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.563 ซม./วินาที ค่าความชื้นลดลงเหลือประมาณ 21% เมื่อสายพานเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 3.65 ซม./วินาที ค่าความชื้นลดลงเหลือประมาณ 23% จากผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลการคำนวณทั้งความสม่ำเสมอตามความกว้างของสายพาน ผลของความเร็วของสายพานที่มีต่อค่าความชื้นที่ลดลงซึ่งการควบคุมความเร็วของสายพานให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมเป็นอีกทางหนึ่งในการควบคุมค่าพลังงาน

6.7 สรุป

การคำนวณการกระจายอุณหภูมิภายในไดอิเล็กทริกที่มีความหนาโดยพิจารณาเฉพาะการนำความร้อน โดยวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม โดยเลือกวิธีแครงกัน โคลสันสามารถหาผลเฉลยที่ต้องการได้ ความแตกต่างของสนามไฟฟ้าและชนิดของวัสดุมีผลต่อค่าการกระจายอุณหภูมิ เช่นในกรณีของน้ำ เมื่อเปรียบเทียบกับไม้ นอกจากนี้ค่าความสม่ำเสมอของอุณหภูมิอยู่ในช่วง 6 ซม. ถึง 24 ซม. ตามความกว้างของสายพาน การเปลี่ยนความเร็วของสายพานลำเลียงเป็นอีกวิธีหนึ่งซึ่งสามารถควบคุมอุณหภูมิภายในวัสดุได้ การคำนวณดังกล่าวทำให้ทราบว่าในการออกแบบเครื่องให้ความร้อนโดย

ใช้คลื่นไมโครเวฟที่ต้องการควบคุมอุณหภูมิควรมีการใช้แหล่งกำเนิดที่มีกำลังงานมากน้อยอย่างไร
ค่าความเร็วของสายพานลำเลียงควรเป็นเท่าไรจึงจะเหมาะสมกับความต้องการ

การทดลองโดยการวัดความชื้นพบว่าระบบที่ได้ออกแบบสร้าง สามารถให้ความสม่ำเสมอ
ในแนวระนาบได้และค่าความชื้นที่ต้องการสามารถควบคุมได้โดยความเร็วของสายพานที่มีความ
เหมาะสม



บทที่ 7

สรุปและวิจารณ์

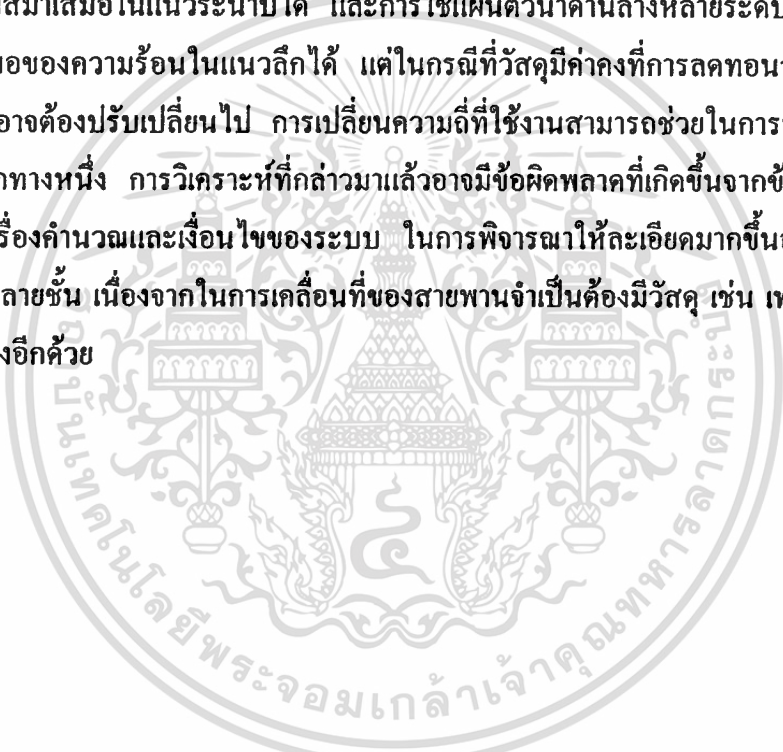
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอ การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและการกระจายอุณหภูมิที่อยู่ในเนื้อไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสียเพื่อนำไปใช้ในการพัฒนาระบบให้ความร้อนอย่างต่อเนื่อง โดยใช้คลื่นไมโครเวฟ โดยคำนึงถึงผลกระทบของค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเมื่อมีวัสดุที่ต้องการให้ความร้อนวางอยู่ระหว่างแผ่นตัวนำสองแผ่นขนานกัน ภายใต้เงื่อนไขที่แผ่นตัวนำทั้งสองมีขนาดคอนันต์ ได้พิจารณาผลกระทบที่เกิดจากการปรับระยะห่างของแผ่นตัวนำด้านล่าง ซึ่งพบว่าจะเกิดคลื่นนิ่งภายในเนื้อไดอิเล็กตริก เป็นสาเหตุของความไม่สม่ำเสมอของการให้ความร้อนตามแนวความหนาของไดอิเล็กตริก ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการใช้แผ่นตัวนำด้านล่างหลายระดับในการปรับตำแหน่งแรงของคลื่นนิ่งที่เกิดขึ้น

การวิเคราะห์ที่ได้แบ่งเป็นสามส่วนคือ วิเคราะห์เส้นรังสี โดเมนเชิงสเปกตรัมและการกระจายอุณหภูมิ การหาค่าสนามไฟฟ้าภายในเนื้อไดอิเล็กตริกโดยวิเคราะห์เส้นรังสีภายใต้เงื่อนไขของการเป็นคลื่นระนาบที่มีการสะท้อนหลายครั้งพบว่ามีเกิดคลื่นนิ่งภายในเนื้อไดอิเล็กตริก นอกจากนี้ยังเกิดความแตกต่างของค่าสนามไฟฟ้าเมื่อเปลี่ยนระยะห่างของแผ่นตัวนำด้านล่างอีกทั้งความถี่ที่ไม่เสถียรก็มีผลต่อการกระจายสนามไฟฟ้า ทำให้ได้ข้อสรุปว่าควรมีการใช้วัสดุเพียงอย่างเดียวกับเครื่องให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟเพื่อประสิทธิภาพที่สูงที่สุด อย่างไรก็ตามวิธีการลากเส้นรังสีจำเป็นต้องสมมุติให้คลื่นปฐมภูมิ (primary field) เป็นคลื่นระนาบเพื่อสามารถหาค่าอินทิกรัลอิมพีแดนซ์เพื่อนำไปใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและสัมประสิทธิ์การสะท้อน แต่เนื่องจากเครื่องให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟที่ได้นำเสนอ เป็นการปล่อยคลื่นโดยใช้สายอากาศสต็อคซึ่งสนามในระยะใกล้ที่เกิดจากสายอากาศสต็อคไม่ได้มีคุณสมบัติเป็นคลื่นระนาบ ดังนั้นจึงไม่สามารถหาค่าอินทิกรัลอิมพีแดนซ์ได้ จึงเป็นข้อจำกัดของวิธีการลากเส้นรังสีในการวิเคราะห์ให้ใกล้เคียงกับระบบที่นำเสนอ

เราได้นำวิธีโดเมนเชิงสเปกตรัมมาพิจารณาเนื่องจากสามารถแปลงสนามระยะใกล้ให้เป็นคลื่นระนาบได้ โดยใช้คุณสมบัติการแปลงฟูริเยร์และหลักการของฮอเวนร่วมกับเงื่อนไขขอบเขตในการหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและส่งผ่านผลจากการวิเคราะห์พบว่ามีคลื่นนิ่งเกิดขึ้นภายในเนื้อไดอิเล็กตริกตามแนวความหนา เมื่อมีการเปลี่ยนแผ่นตัวนำด้านล่าง , วัสดุ และ ความถี่อย่างไร

ก็ตามวิธีโคเมนเชิงสเปกตรัมอยู่ภายใต้สมมุติฐานที่ใกล้เคียงกับระบบมากกว่าวิธีลากเส้นรังสี ดังนั้น ผลการวิเคราะห์จึงน่าจะมีความถูกต้องมากกว่า

ค่าสนามไฟฟ้าที่ได้จากวิธีโคเมนเชิงสเปกตรัม สามารถนำมาวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิ ได้โดยใช้วิธีผลต่างอย่างสืบเนื่องแบบแครงก์นิโคลสันในสามมิติเพื่อดูการกระจายอุณหภูมิที่เกิดขึ้น ในเนื้อไอเดียเล็กตริกและเปรียบเทียบกับผลการทดลอง โดยวัดค่าความชื้นของข้าวเนื่องจากมีสัมพันธ ะหว่างความชื้นกับอุณหภูมิ เครื่องให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟจะมีความแตกต่างจากการ ให้ความร้อนชนิดอื่น เนื่องจากความสามารถในการให้ความร้อนขึ้นอยู่กับธรรมชาติของวัสดุที่ ต้องการนำมาให้ความร้อน การออกแบบจึงควรมีลักษณะเฉพาะ การวางสายอากาศเอียงกันสามารถ ทำให้เกิดความสม่ำเสมอในแนวระนาบได้ และการใช้แผ่นตัวนำด้านล่างหลายระดับก็สามารถเพิ่ม ความสม่ำเสมอของความร้อนในแนวลึกได้ แต่ในกรณีที่วัสดุมีค่าคงที่การลดทอนสูงรูปแบบการ วางสายอากาศอาจต้องปรับเปลี่ยนไป การเปลี่ยนความถี่ที่ใช้งานสามารถช่วยในการปรับปรุงความ สม่ำเสมอได้อีกทางหนึ่ง การวิเคราะห์ที่กล่าวมาแล้วอาจมีข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากข้อจำกัดในด้าน เงื่อนไขของเครื่องคำนวณและเงื่อนไขของระบบ ในการพิจารณาให้ละเอียดมากขึ้นอาจจำเป็นต้อง พิจารณาวัสดุหลายชั้น เนื่องจากในการเคลื่อนที่ของสายพานจำเป็นต้องมีวัสดุ เช่น เทฟลอนรองรับ สายพานลำเลียงอีกด้วย



บรรณานุกรม

1. S. M. Osepchuk, "A History of Microwave Heating Application," **IEEE Trans. Microwave Theory Tech.**, vol. MTT-32, no. 9, pp. 1200-1224, Sep. 1984.
2. A. W. Kraazewski, "Microwave Aquametry-Needs and Perspectives," **IEEE Trans. Microwave Theory Tech.**, vol. 43, no. 11, pp. 828-835, Nov. 1991.
3. J. Thuery, "Microwave: Industrial, Scientific and Medical Application," London: Artech House, 1992.
4. M. Giroux, "Microwave Treatment of Industrial Wastes," **Asia-Pacific Microwave Conference**, Adelaide, 1992.
5. Christopher R. Strauss, "Applications of Microwave Technology to Laboratory-Scale Organic Chemistry," presented in **International Science and Industrial RF and Microwave Applicators**, Melbourne, 1996.
6. F. Okada and C. Shibata, "Microwave Power Application and Its Device in Japan," **Asia-Pacific Microwave Conference**, Adelaide, 1992.
7. กิตติศักดิ์ วายุกัตร์ และคณะ, "การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าบริเวณใกล้สายอากาศสล็อตอาร์เรย์แบบระนาบ," เอกสารการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 14, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, หน้า 4-46 ถึง 4-50, พ.ศ.2534.
8. กิตติศักดิ์ วายุกัตร์ และคณะ, "การกระจายอุณหภูมิในสารไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสีย เมื่อเคลื่อนที่ผ่านสายอากาศสล็อตอาร์เรย์ที่วางเอียงกัน," เอกสารการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 15, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณนริ, หน้า 2-35 ถึง 2-38, พ.ศ.2535.
9. M. Krairiksh, et.al., "Overlapped slot-waveguide applicator for a continuous microwave heating system," **Proceedings of the 1993 Asia-Pacific Microwave Conference**, vol.2, pp.17-1 to 17-4, 1993.
10. กิตติศักดิ์ วายุกัตร์, โมไนย ไกรฤกษ์ และสมพล โกศลวิตร, "การวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิในไดอิเล็กตริกที่เกิดจากสายอากาศแพร่กระจายคลื่นแบบสล็อตอาร์เรย์," การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 16, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, หน้า 131-133, พ.ศ.2536.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. วงศกร วัชรานานันท์ และคณะ, “ท่อนำคลื่นผนังลูกฟูกสำหรับป้องกันคลื่นรั่ว,” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 17, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, หน้า 159-163, พ.ศ.2537.
12. M. Krairiksh and K. Wayuphak, “Analysis of temperature distribution on a moving dielectric slab across overlapped slot-waveguide applicators,” *Proceedings of the 1995 Asia-Pacific Microwave Conference*, vol.2, pp.710-713, 1995.
13. M. Krairiksh and W. Watcharananunt, “Development of a microwave heating system using overlapped slot-waveguide applicators,” presented in *International Scientific and Industrial RF and Microwave Applicators*, Melbourne, 1996.
14. วงศกร วัชรานานันท์ และ โมไนย ไกรฤกษ์, “เครื่องค้นแบบเครื่องอบแห้งไมโครเวฟ,” วารสารพระจอมเกล้าลาดกระบัง, ปีที่ 4, ฉบับที่ 2, หน้า 15-21, พ.ศ.2539.
15. วงศกร วัชรานานันท์, โมไนย ไกรฤกษ์ และสมพล โกศลวิตร, “การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าในบริเวณแผ่นไดอิเล็กตริกที่อยู่ระหว่างแผ่นตัวนำขนาดอนันต์ที่วางขนานกัน,” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 19, มหาวิทยาลัยขอนแก่น, หน้า CM-43 ถึง CM-47, พ.ศ.2539.
16. กิตติศักดิ์ วายุกัตร์, “การวิเคราะห์สายอากาศสี่ออดอาร์เรย์บนท่อนำคลื่นที่วางเยื้องกันสำหรับระบบให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ,” วิทยานิพนธ์ระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ.2537.
17. A. C. Metaxas, “Foundation of Electroheat,” John Wiley and Sons Inc., 1996.
18. C. A. Balanis, “Advances Engineering Electromagnetics,” John Wiley and Sons Inc., 1989.
19. S. O. Nelson, “Dielectric Properties of Agricultural Products Measurement and Applications,” *IEEE Trans. Elec. Insulation*, vol. 26, no. 5, pp. 845-869, Oct. 1991.
20. G. Scott, “The Spectral Domain Method in Electromagnetics,” Artech House Inc., 1989.
21. T. Itoh, “Numerical Techniques for Microwave and Millimeter-Wave Passive Structure,” John Wiley and Sons. Inc., 1989.
22. A. M. Tran, B. Houshmand, T. Itoh, “Analysis of Electromagnetic Coupling Through a Thick Aperture in Multilayer Planar Circuits Using the Extended Spectral Domain Approach and Finite Difference Time-Domain Method,” *IEEE Trans. Antennas Propagat*, vol.43, no. 9, pp. 921-926, Sept. 1995.
23. J. Galejs, “Admittance of a Waveguide Radiating into Stratified Plasma,” *ibid* , pp. 64-70

24. C. T. Swift, "Admittance of a Waveguide-Fed Aperture Loaded with a Dielectric Plug," **IEEE Trans. Antennas Propagat**, pp. 356-359, May 1979.
25. C. M. Butler, Y. Rahmat-Samii, R. Mittra, "Electromagnetic Penetration Through Aperture in Conducting Surfaces," **IEEE Trans. Antennas Propagat**, vol. AP-26, no. 1, pp. 82-93, Jan. 1978.
26. J-Y. Ke and C. H. Chen, "Modified Spectral-Domand Approach for Microstrip Lines with Finite Metallisation Thickness and Conductivity," **IEEE Trans. Antennas Propagat**, vol. 142, no. 4, pp. 357-363, Aug. 1995.
27. A. Dreher, "A New Approach to Dyadic Green's Function in Spectral Domain," **IEEE Trans. Antennas Propagat**, pp. 1297-1302, May. 1995.
28. W. F. Crowell, R. C. Rudduck, D. M. Hatcher, "The Admittance of a Rectagular Waveguide Radiating into a Dielectric Slab," **IEEE Trans. Antennas Propagat**, vol. AP-15, no. 5, pp. 627-633, Sept. 1967.
29. Metaxas and R. J. Meredith, "Industrial Microwave Heating," Peter Peregrinus Ltd, 1983, ch.8.
30. M. N. O. Sadiku, "Numerical Techniques in Electromagnetics," CRC Press Inc., 1992.
31. N. Ozisik, "Heat Conduction," John Wiley & Sons Inc., 1993.
32. B. Adu, L. Otten and R. B. Brown, "Modelling Thin Layer Microwave Drying of Soybeans," **Canadian Agricultural Engineering**, vol. 36, no. 3, Jul., Aug., Sep. 1994



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

โปรแกรมคำนวณการกระจายอุณหภูมิ

```

#include <math.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>
#include <time.h>

#define Delta_d 1.0e-2
#define TOL 1.0e-20
#define Die_constant 55.6e-8
#define X_field 48
#define Y_field 3
#define Z_field 31
#define X_Wide 7
#define Y_Height 5
#define Z_Length 33
#define Xsub2 5
#define Ysub2 3
#define Zsub2 31
#define XYZ X_Wide*Y_Height*Z_Length
#define XYZsub2 Xsub2*Ysub2*Zsub2

/* prototype */
void tox_cg(float A[][XYZsub2],float B[],float X[]);

```

```

/* start main program*/
void main(void)
{
int    i,j,k,n,time,steps,xx,yy,zz,choice;
float  a[XYZsub2][XYZsub2];
float  b[Xsub2][Ysub2][Zsub2];
float  x[XYZsub2];
float  b1[XYZsub2];
float  Speed,Tem,Alpha,R,Delta_t;
float  scal_e,frequency,effective,density,specific,Qconstant;
float  A,B,C,D,E,F,G,H;
float  Uold[X_Wide][Y_Height][Z_Length], Unew[X_Wide][Y_Height][Z_Length];
float  e_field[X_field][Y_field][Z_field];
float  e_die[Xsub2][Ysub2][Zsub2];

FILE  *fp;
FILE  *open;

if((fp=fopen("tem.out","w"))==NULL){
    printf("\tCouldn't open output file.\n");
    exit(1);
}

if((open=fopen("e_in.txt","r"))==NULL) {
    printf("\tCan't Open the File in.txt.\n");
    exit(1);
}

for(k=0;k<Z_field;k++)
for(j=0;j<Y_field;j++)
for(i=0;i<X_field;i++){

```

```

fscanf(open,"%f",&e_field[i][j][k]);
}

```

```

printf("\n\t*****\n\n");

```

```

printf("\t* This program use to calculate distribution of Temperature *\n");

```

```

printf("\t*   in 3 dimension by finite difference method   *\n");

```

```

printf("\t*****\n\n");

```

```

printf("\tElectric field form the file e_in.txt\n\n");

```

```

printf("\tDimension of dielectric : Lenght (z axis) = 30.0 cm.\n");

```

```

printf("\t           Wide (x axis) = 4.0 cm.\n");

```

```

printf("\t           Height (y axis) = 2.0 cm.\n\n");

```

```

printf("\tEnter another application below.\n");

```

```

printf("\t\t Speed of rotor(m/s) : ");

```

```

scanf("%f",&Speed);

```

```

printf("\t\t Steps stop(1..52) : ");

```

```

scanf("%d",&steps);

```

```

if(steps>52) steps = 59;

```

```

if(steps<1) steps = 1;

```

```

choice = steps;

```

```

printf("\t\t Initial temperature(c) : ");

```

```

scanf("%f",&Tem);

```

```

if(Tem<0) Tem = 0.0;

```

```

printf("\t Temperature variable(Alpha*1.0e-6) : ");

```

```

scanf("%f",&Alpha);

```

```

printf("\n\t\t Dielectric constant\n");

```

```

printf("\t Multiplies Normalized of E_field by : ");

```

```

scanf("%f",&scal_e);

```

```

printf("\t Frequency form applicator(MHz) : ");

```

```

scanf("%f",&frequency);
printf("\t\t Effective loss factor : ");
scanf("%f",&effective);
printf("\t\t Density of mass(kg/cubic m) : ");
scanf("%f",&density);
printf("\t\t Specific heat(KJ/kg*degree c) : ");
scanf("%f",&specific);

/* calculate value */
Qconstant = (1.0e+6*Die_constant*frequency*effective)/(density*specific);
Delta_t = Delta_d/Speed;
R = (1.0e-6*Alpha*Delta_t)/pow(Delta_d,2.0);
if(R>10){
printf("The value of R(Alpha*Delta_t/Delta_d sqr) so large the Answer may be
wrong.\n");
printf("please reruning and Enter values again\n");
exit(1);
}
xx = X_Wide-1;
yy = Y_Height-1;
zz = Z_Lenght-1;

/* indicate value */
A=B=C=E=F=G = -R;
D = 2.0*(1.0+3.0*R);

/* make matrix a[][]*/
for(j=0;j<XYZsub2;j++)
for(i=0;i<XYZsub2;i++){

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    a[i][j] = 0.0;
}
for(i=0;i<(XYZsub2-Xsub2*Ysub2);i++){
    a[i+(Xsub2*Ysub2)][i] = A;
    a[i][i+(Xsub2*Ysub2)] = G;
}
for(i=0;i<(XYZsub2-Xsub2);i++){
    if((i>Xsub2) && (((i+Xsub2)%(Xsub2*Ysub2))<Xsub2))
        continue;
    a[i+Xsub2][i] = B;
    a[i][i+Xsub2] = F;
}
for(i=0;i<(XYZsub2-1);i++){
    if((i>0) && ((i+1)%Xsub2==0))
        continue;
    a[i+1][i] = C;
    a[i][i+1] = E;
}
for(i=0;i<XYZsub2;i++){
    a[i][i] = D;
}

/* set initial temperature */
for(k=0;k<Z_Lenght;k++)
for(j=0;j<Y_Height;j++)
for(i=0;i<X_Wide;i++){
    Uold[i][j][k] = Tem;
}

/* start iterate */

```

```

for(time=0;time<steps;time++) {

    choice -= 1;

    printf("\n<Information of e_field>\n");

    printf("choice = %d and steps = %d\n",choice,steps);

        /* set e_die to zero */
        for(k=0;k<Zsub2;k++)
        for(j=0;j<Ysub2;j++)
        for(i=0;i<Xsub2;i++){
            e_die[i][j][k] = 0.0;
        }

/* choosen in each step */
if((steps-choice)==1){
    for(k=0;k<Zsub2;k++)
    for(j=0;j<Ysub2;j++){
        e_die[0][j][k] = e_field[47][j][k];
    }

    printf("e_die step %d\n",time+1);
}

if((steps-choice)==2){
    for(k=0;k<Zsub2;k++)
    for(j=0;j<Ysub2;j++){
        e_die[0][j][k]=e_field[46][j][k];
        e_die[1][j][k]=e_field[47][j][k];
    }

    printf("e_die step %d\n",time+1);
}

if((steps-choice)==3){

```

```

for(k=0;k<Zsub2;k++)
for(j=0;j<Ysub2;j++){
    e_die[0][j][k]=e_field[45][j][k];
    e_die[1][j][k]=e_field[46][j][k];
    e_die[2][j][k]=e_field[47][j][k];
}
printf("e_die step %d\n",time+1);
}

if((steps-choice)==4){
for(k=0;k<Zsub2;k++)
for(j=0;j<Ysub2;j++){
    e_die[0][j][k]=e_field[44][j][k];
    e_die[1][j][k]=e_field[45][j][k];
    e_die[2][j][k]=e_field[46][j][k];
    e_die[3][j][k]=e_field[47][j][k];
}
printf("e_die step %d\n",time+1);
}

if((steps-choice)==5){
for(k=0;k<Zsub2;k++)
for(j=0;j<Ysub2;j++){
    e_die[0][j][k]=e_field[43][j][k];
    e_die[1][j][k]=e_field[44][j][k];
    e_die[2][j][k]=e_field[45][j][k];
    e_die[3][j][k]=e_field[46][j][k];
    e_die[4][j][k]=e_field[47][j][k];
}
printf("e_die step %d\n",time+1);
}

if((steps-choice)==6){

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

for(k=0;k<Zsub2;k++)
for(j=0;j<Ysub2;j++){
    e_die[0][j][k]=e_field[42][j][k];
    e_die[1][j][k]=e_field[43][j][k];
    e_die[2][j][k]=e_field[44][j][k];
    e_die[3][j][k]=e_field[45][j][k];
    e_die[4][j][k]=e_field[46][j][k];
}
printf("e_die step %d\n",time+1);
}
if((steps-choice)==7){
for(k=0;k<Zsub2;k++)
for(j=0;j<Ysub2;j++){
    e_die[0][j][k]=e_field[41][j][k];
    e_die[1][j][k]=e_field[42][j][k];
    e_die[2][j][k]=e_field[43][j][k];
    e_die[3][j][k]=e_field[44][j][k];
    e_die[4][j][k]=e_field[45][j][k];
}
printf("e_die step %d\n",time+1);
}
if((steps-choice)==8){
for(k=0;k<Zsub2;k++)
for(j=0;j<Ysub2;j++){
    e_die[0][j][k]=e_field[40][j][k];
    e_die[1][j][k]=e_field[41][j][k];
    e_die[2][j][k]=e_field[42][j][k];
    e_die[3][j][k]=e_field[43][j][k];
    e_die[4][j][k]=e_field[44][j][k];
}

```

```

printf("e_die step %d\n",time+1);
}
if((steps-choice)==9){
for(k=0;k<Zsub2;k++)
for(j=0;j<Ysub2;j++){
e_die[0][j][k]=e_field[39][j][k];
e_die[1][j][k]=e_field[40][j][k];
e_die[2][j][k]=e_field[41][j][k];
e_die[3][j][k]=e_field[42][j][k];
e_die[4][j][k]=e_field[43][j][k];
}
printf("e_die step %d\n",time+1);
}
if((steps-choice)==10){
for(k=0;k<Zsub2;k++)
for(j=0;j<Ysub2;j++){
e_die[0][j][k]=e_field[38][j][k];
e_die[1][j][k]=e_field[39][j][k];
e_die[2][j][k]=e_field[40][j][k];
e_die[3][j][k]=e_field[41][j][k];
e_die[4][j][k]=e_field[42][j][k];
}
printf("e_die step %d\n",time+1);
}
if((steps-choice)==11){
for(k=0;k<Zsub2;k++)
for(j=0;j<Ysub2;j++){
e_die[0][j][k]=e_field[37][j][k];
e_die[1][j][k]=e_field[38][j][k];
e_die[2][j][k]=e_field[39][j][k];

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        e_die[3][j][k]=e_field[40][j][k];
        e_die[4][j][k]=e_field[41][j][k];
    }
    printf("e_die step %d\n",time+1);
}

if((steps-choice)==12){
    for(k=0;k<Zsub2;k++)
        for(j=0;j<Ysub2;j++){
            e_die[0][j][k]=e_field[36][j][k];
            e_die[1][j][k]=e_field[37][j][k];
            e_die[2][j][k]=e_field[38][j][k];
            e_die[3][j][k]=e_field[39][j][k];
            e_die[4][j][k]=e_field[40][j][k];
        }
    printf("e_die step %d\n",time+1);
}

if((steps-choice)==13){
    for(k=0;k<Zsub2;k++)
        for(j=0;j<Ysub2;j++){
            e_die[0][j][k]=e_field[35][j][k];
            e_die[1][j][k]=e_field[36][j][k];
            e_die[2][j][k]=e_field[37][j][k];
            e_die[3][j][k]=e_field[38][j][k];
            e_die[4][j][k]=e_field[39][j][k];
        }
    printf("e_die step %d\n",time+1);
}

if((steps-choice)==14){
    for(k=0;k<Zsub2;k++)
        for(j=0;j<Ysub2;j++){

```

```

    e_die[0][j][k]=e_field[34][j][k];
    e_die[1][j][k]=e_field[35][j][k];
    e_die[2][j][k]=e_field[36][j][k];
    e_die[3][j][k]=e_field[37][j][k];
    e_die[4][j][k]=e_field[38][j][k];
}

printf("e_die step %d\n",time+1);
}

if((steps-choice)==15){
    for(k=0;k<Zsub2;k++)
    for(j=0;j<Ysub2;j++){
        e_die[0][j][k]=e_field[33][j][k];
        e_die[1][j][k]=e_field[34][j][k];
        e_die[2][j][k]=e_field[35][j][k];
        e_die[3][j][k]=e_field[36][j][k];
        e_die[4][j][k]=e_field[37][j][k];
    }
    printf("e_die step %d\n",time+1);
}

if((steps-choice)==16){
    for(k=0;k<Zsub2;k++)
    for(j=0;j<Ysub2;j++){
        e_die[0][j][k]=e_field[32][j][k];
        e_die[1][j][k]=e_field[33][j][k];
        e_die[2][j][k]=e_field[34][j][k];
        e_die[3][j][k]=e_field[35][j][k];
        e_die[4][j][k]=e_field[36][j][k];
    }

    printf("e_die step %d\n",time+1);
}
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

if((steps-choice)==17){
    for(k=0;k<Zsub2;k++)
        for(j=0;j<Ysub2;j++){
            e_die[0][j][k]=e_field[31][j][k];
            e_die[1][j][k]=e_field[32][j][k];
            e_die[2][j][k]=e_field[33][j][k];
            e_die[3][j][k]=e_field[34][j][k];
            e_die[4][j][k]=e_field[35][j][k];
        }
    printf("e_die step %d\n",time+1);
}
if((steps-choice)==18){
    for(k=0;k<Zsub2;k++)
        for(j=0;j<Ysub2;j++){
            e_die[0][j][k]=e_field[30][j][k];
            e_die[1][j][k]=e_field[31][j][k];
            e_die[2][j][k]=e_field[32][j][k];
            e_die[3][j][k]=e_field[33][j][k];
            e_die[4][j][k]=e_field[34][j][k];
        }
    printf("e_die step %d\n",time+1);
}
if((steps-choice)==19){
    for(k=0;k<Zsub2;k++)
        for(j=0;j<Ysub2;j++){
            e_die[0][j][k]=e_field[29][j][k];
            e_die[1][j][k]=e_field[30][j][k];
            e_die[2][j][k]=e_field[31][j][k];
            e_die[3][j][k]=e_field[32][j][k];
            e_die[4][j][k]=e_field[33][j][k];

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    }
    printf("e_die step %d\n",time+1);
}

if((steps-choice)==20){
    for(k=0;k<Zsub2;k++){
        for(j=0;j<Ysub2;j++){
            e_die[0][j][k]=e_field[28][j][k];
            e_die[1][j][k]=e_field[29][j][k];
            e_die[2][j][k]=e_field[30][j][k];
            e_die[3][j][k]=e_field[31][j][k];
            e_die[4][j][k]=e_field[32][j][k];
        }
        printf("e_die step %d\n",time+1);
    }
}

if((steps-choice)==21){
    for(k=0;k<Zsub2;k++){
        for(j=0;j<Ysub2;j++){
            e_die[0][j][k]=e_field[27][j][k];
            e_die[1][j][k]=e_field[28][j][k];
            e_die[2][j][k]=e_field[29][j][k];
            e_die[3][j][k]=e_field[30][j][k];
            e_die[4][j][k]=e_field[31][j][k];
        }
        printf("e_die step %d\n",time+1);
    }
}

if((steps-choice)==22){
    for(k=0;k<Zsub2;k++){
        for(j=0;j<Ysub2;j++){
            e_die[0][j][k]=e_field[26][j][k];
            e_die[1][j][k]=e_field[27][j][k];

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        e_die[2][j][k]=e_field[28][j][k];
        e_die[3][j][k]=e_field[29][j][k];
        e_die[4][j][k]=e_field[30][j][k];
    }

    printf("e_die step %d\n",time+1);
}

if((steps-choice)==23){
    for(k=0;k<Zsub2;k++)
        for(j=0;j<Ysub2;j++){
            e_die[0][j][k]=e_field[25][j][k];
            e_die[1][j][k]=e_field[26][j][k];
            e_die[2][j][k]=e_field[27][j][k];
            e_die[3][j][k]=e_field[28][j][k];
            e_die[4][j][k]=e_field[29][j][k];
        }
        printf("e_die step %d\n",time+1);
}

if((steps-choice)==24){
    for(k=0;k<Zsub2;k++)
        for(j=0;j<Ysub2;j++){
            e_die[0][j][k]=e_field[24][j][k];
            e_die[1][j][k]=e_field[25][j][k];
            e_die[2][j][k]=e_field[26][j][k];
            e_die[3][j][k]=e_field[27][j][k];
            e_die[4][j][k]=e_field[28][j][k];
        }

        printf("e_die step %d\n",time+1);
}

if((steps-choice)==25){
    for(k=0;k<Zsub2;k++)

```

```

for(j=0;j<Ysub2;j++){
    e_die[0][j][k]=e_field[23][j][k];
    e_die[1][j][k]=e_field[24][j][k];
    e_die[2][j][k]=e_field[25][j][k];
    e_die[3][j][k]=e_field[26][j][k];
    e_die[4][j][k]=e_field[27][j][k];
}

printf("e_die step %d\n",time+1);
}

if((steps-choice)==26){
    for(k=0;k<Zsub2;k++)
    for(j=0;j<Ysub2;j++){
        e_die[0][j][k]=e_field[22][j][k];
        e_die[1][j][k]=e_field[23][j][k];
        e_die[2][j][k]=e_field[24][j][k];
        e_die[3][j][k]=e_field[25][j][k];
        e_die[4][j][k]=e_field[26][j][k];
    }
    printf("e_die step %d\n",time+1);
}

if((steps-choice)==27){
    for(k=0;k<Zsub2;k++)
    for(j=0;j<Ysub2;j++){
        e_die[0][j][k]=e_field[21][j][k];
        e_die[1][j][k]=e_field[22][j][k];
        e_die[2][j][k]=e_field[23][j][k];
        e_die[3][j][k]=e_field[24][j][k];
        e_die[4][j][k]=e_field[25][j][k];
    }

    printf("e_die step %d\n",time+1);
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    }
    if((steps-choice)==28){
        for(k=0;k<Zsub2;k++)
            for(j=0;j<Ysub2;j++){
                e_die[0][j][k]=e_field[20][j][k];
                e_die[1][j][k]=e_field[21][j][k];
                e_die[2][j][k]=e_field[22][j][k];
                e_die[3][j][k]=e_field[23][j][k];
                e_die[4][j][k]=e_field[24][j][k];
            }
        printf("e_die step %d\n",time+1);
    }
    if((steps-choice)==29){
        for(k=0;k<Zsub2;k++)
            for(j=0;j<Ysub2;j++){
                e_die[0][j][k]=e_field[19][j][k];
                e_die[1][j][k]=e_field[20][j][k];
                e_die[2][j][k]=e_field[21][j][k];
                e_die[3][j][k]=e_field[22][j][k];
                e_die[4][j][k]=e_field[23][j][k];
            }
        printf("e_die step %d\n",time+1);
    }
    if((steps-choice)==30){
        for(k=0;k<Zsub2;k++)
            for(j=0;j<Ysub2;j++){
                e_die[0][j][k]=e_field[18][j][k];
                e_die[1][j][k]=e_field[19][j][k];
                e_die[2][j][k]=e_field[20][j][k];
                e_die[3][j][k]=e_field[21][j][k];

```

```

        e_die[4][j][k]=e_field[22][j][k];
    }
    printf("e_die step %d\n",time+1);
}
if((steps-choice)==31){
    for(k=0;k<Zsub2;k++)
        for(j=0;j<Ysub2;j++){
            e_die[0][j][k]=e_field[17][j][k];
            e_die[1][j][k]=e_field[18][j][k];
            e_die[2][j][k]=e_field[19][j][k];
            e_die[3][j][k]=e_field[20][j][k];
            e_die[4][j][k]=e_field[21][j][k];
        }
    printf("e_die step %d\n",time+1);
}
if((steps-choice)==32){
    for(k=0;k<Zsub2;k++)
        for(j=0;j<Ysub2;j++){
            e_die[0][j][k]=e_field[16][j][k];
            e_die[1][j][k]=e_field[17][j][k];
            e_die[2][j][k]=e_field[18][j][k];
            e_die[3][j][k]=e_field[19][j][k];
            e_die[4][j][k]=e_field[20][j][k];
        }
    printf("e_die step %d\n",time+1);
}
if((steps-choice)==33){
    for(k=0;k<Zsub2;k++)
        for(j=0;j<Ysub2;j++){
            e_die[0][j][k]=e_field[15][j][k];

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    e_die[1][j][k]=e_field[16][j][k];
    e_die[2][j][k]=e_field[17][j][k];
    e_die[3][j][k]=e_field[18][j][k];
    e_die[4][j][k]=e_field[19][j][k];
}

printf("e_die step %d\n",time+1);
}

if((steps-choice)==34){
    for(k=0;k<Zsub2;k++)
    for(j=0;j<Ysub2;j++){
        e_die[0][j][k]=e_field[14][j][k];
        e_die[1][j][k]=e_field[15][j][k];
        e_die[2][j][k]=e_field[16][j][k];
        e_die[3][j][k]=e_field[17][j][k];
        e_die[4][j][k]=e_field[18][j][k];
    }
    printf("e_die step %d\n",time+1);
}

if((steps-choice)==35){
    for(k=0;k<Zsub2;k++)
    for(j=0;j<Ysub2;j++){
        e_die[0][j][k]=e_field[13][j][k];
        e_die[1][j][k]=e_field[14][j][k];
        e_die[2][j][k]=e_field[15][j][k];
        e_die[3][j][k]=e_field[16][j][k];
        e_die[4][j][k]=e_field[17][j][k];
    }

    printf("e_die step %d\n",time+1);
}

if((steps-choice)==36){

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

for(k=0;k<Zsub2;k++)
for(j=0;j<Ysub2;j++){
    e_die[0][j][k]=e_field[12][j][k];
    e_die[1][j][k]=e_field[13][j][k];
    e_die[2][j][k]=e_field[14][j][k];
    e_die[3][j][k]=e_field[15][j][k];
    e_die[4][j][k]=e_field[16][j][k];
}

printf("e_die step %d\n",time+1);
}

if((steps-choice)==37){
for(k=0;k<Zsub2;k++)
for(j=0;j<Ysub2;j++){
    e_die[0][j][k]=e_field[11][j][k];
    e_die[1][j][k]=e_field[12][j][k];
    e_die[2][j][k]=e_field[13][j][k];
    e_die[3][j][k]=e_field[14][j][k];
    e_die[4][j][k]=e_field[15][j][k];
}

printf("e_die step %d\n",time+1);
}

if((steps-choice)==38){
for(k=0;k<Zsub2;k++)
for(j=0;j<Ysub2;j++){
    e_die[0][j][k]=e_field[10][j][k];
    e_die[1][j][k]=e_field[11][j][k];
    e_die[2][j][k]=e_field[12][j][k];
    e_die[3][j][k]=e_field[13][j][k];
    e_die[4][j][k]=e_field[14][j][k];
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

printf("e_die step %d\n",time+1);
}

if((steps-choice)==39){
for(k=0;k<Zsub2;k++)
for(j=0;j<Ysub2;j++){
e_die[0][j][k]=e_field[9][j][k];
e_die[1][j][k]=e_field[10][j][k];
e_die[2][j][k]=e_field[11][j][k];
e_die[3][j][k]=e_field[12][j][k];
e_die[4][j][k]=e_field[13][j][k];
}
printf("e_die step %d\n",time+1);
}

if((steps-choice)==40){
for(k=0;k<Zsub2;k++)
for(j=0;j<Ysub2;j++){
e_die[0][j][k]=e_field[8][j][k];
e_die[1][j][k]=e_field[9][j][k];
e_die[2][j][k]=e_field[10][j][k];
e_die[3][j][k]=e_field[11][j][k];
e_die[4][j][k]=e_field[12][j][k];
}

printf("e_die step %d\n",time+1);
}

if((steps-choice)==41){
for(k=0;k<Zsub2;k++)
for(j=0;j<Ysub2;j++){
e_die[0][j][k]=e_field[7][j][k];
e_die[1][j][k]=e_field[8][j][k];
e_die[2][j][k]=e_field[9][j][k];

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        e_die[3][j][k]=e_field[10][j][k];
        e_die[4][j][k]=e_field[11][j][k];
    }
    printf("e_die step %d\n",time+1);
}
if((steps-choice)==42){
    for(k=0;k<Zsub2;k++){
        for(j=0;j<Ysub2;j++){
            e_die[0][j][k]=e_field[6][j][k];
            e_die[1][j][k]=e_field[7][j][k];
            e_die[2][j][k]=e_field[8][j][k];
            e_die[3][j][k]=e_field[9][j][k];
            e_die[4][j][k]=e_field[10][j][k];
        }
        printf("e_die step %d\n",time+1);
    }
}
if((steps-choice)==43){
    for(k=0;k<Zsub2;k++){
        for(j=0;j<Ysub2;j++){
            e_die[0][j][k]=e_field[5][j][k];
            e_die[1][j][k]=e_field[6][j][k];
            e_die[2][j][k]=e_field[7][j][k];
            e_die[3][j][k]=e_field[8][j][k];
            e_die[4][j][k]=e_field[9][j][k];
        }
        printf("e_die step %d\n",time+1);
    }
}
if((steps-choice)==44){
    for(k=0;k<Zsub2;k++){
        for(j=0;j<Ysub2;j++){

```

```

    e_die[0][j][k]=e_field[4][j][k];
    e_die[1][j][k]=e_field[5][j][k];
    e_die[2][j][k]=e_field[6][j][k];
    e_die[3][j][k]=e_field[7][j][k];
    e_die[4][j][k]=e_field[8][j][k];
}

printf("e_die step %d\n",time+1);
}

if((steps-choice)==45){
    for(k=0;k<Zsub2;k++){
        for(j=0;j<Ysub2;j++){
            e_die[0][j][k]=e_field[3][j][k];
            e_die[1][j][k]=e_field[4][j][k];
            e_die[2][j][k]=e_field[5][j][k];
            e_die[3][j][k]=e_field[6][j][k];
            e_die[4][j][k]=e_field[7][j][k];
        }
        printf("e_die step %d\n",time+1);
    }
}

if((steps-choice)==46){
    for(k=0;k<Zsub2;k++){
        for(j=0;j<Ysub2;j++){
            e_die[0][j][k]=e_field[2][j][k];
            e_die[1][j][k]=e_field[3][j][k];
            e_die[2][j][k]=e_field[4][j][k];
            e_die[3][j][k]=e_field[5][j][k];
            e_die[4][j][k]=e_field[6][j][k];
        }

        printf("e_die step %d\n",time+1);
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

if((steps-choice)==47){
    for(k=0;k<Zsub2;k++)
        for(j=0;j<Ysub2;j++){
            e_die[0][j][k]=e_field[1][j][k];
            e_die[1][j][k]=e_field[2][j][k];
            e_die[2][j][k]=e_field[3][j][k];
            e_die[3][j][k]=e_field[4][j][k];
            e_die[4][j][k]=e_field[5][j][k];
        }
    printf("e_die step %d\n",time+1);
}
if((steps-choice)==48){
    for(k=0;k<Zsub2;k++)
        for(j=0;j<Ysub2;j++){
            e_die[0][j][k]=e_field[0][j][k];
            e_die[1][j][k]=e_field[1][j][k];
            e_die[2][j][k]=e_field[2][j][k];
            e_die[3][j][k]=e_field[3][j][k];
            e_die[4][j][k]=e_field[4][j][k];
        }
    printf("e_die step %d\n",time+1);
}
if((steps-choice)==49){
    for(k=0;k<Zsub2;k++)
        for(j=0;j<Ysub2;j++){
            e_die[1][j][k]=e_field[0][j][k];
            e_die[2][j][k]=e_field[1][j][k];
            e_die[3][j][k]=e_field[2][j][k];
            e_die[4][j][k]=e_field[3][j][k];
        }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

printf("e_die step %d\n",time+1);
}
if((steps-choice)==50){
for(k=0;k<Zsub2;k++)
for(j=0;j<Ysub2;j++){
e_die[2][j][k]=e_field[0][j][k];
e_die[3][j][k]=e_field[1][j][k];
e_die[4][j][k]=e_field[2][j][k];
}
printf("e_die step %d\n",time+1);
}
if((steps-choice)==51){
for(k=0;k<Zsub2;k++)
for(j=0;j<Ysub2;j++){
e_die[3][j][k]=e_field[0][j][k];
e_die[4][j][k]=e_field[1][j][k];
}
printf("e_die step %d\n",time+1);
}
if((steps-choice)==52){
for(k=0;k<Zsub2;k++)
for(j=0;j<Ysub2;j++){
e_die[4][j][k]=e_field[0][j][k];
}
printf("e_die step %d\n",time+1);
}
if((steps-choice)>52){
printf("e_die step %d\n",time+1);
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

/* calculate value of right-hand-side */
for(k=1;k<zz;k++)
for(j=1;j<yy;j++)
for(i=1;i<xx;i++){
    b[i-1][j-1][k-1] = (2.0*(1.0-3.0*R)*Uold[i][j][k])+(R*Uold[i][j][k-1])+
(R*Uold[i][j-1][k])+(R*Uold[i-1][j][k])+(R*Uold[i+1][j][k])+(R*Uold[i][j+1][k])+(R*Uold[i][j]
[k+1])+(Qconstant*Delta_t*pow((scal_e*e_die[i-1][j-1][k-1]),2.0));
}

/* converse b value form 3d to 1d matrix */
for(k=0;k<Zsub2;k++)
for(j=0;j<Ysub2;j++)
for(i=0;i<Xsub2;i++){
    b1[(Xsub2*Ysub2*k)+(Xsub2*j)+i] = b[i][j][k];
}

/* call function tox_cg(conjugate gradient) to calculate x value*/
tox_cg(a,b1,x);
/* set temperature to initial */
for(i=0;i<XYZsub2;i++){
    if(x[i]<Tem) x[i] = Tem;
}

/* set Unew to Initial */
for(k=0;k<Z_Lenght;k++)
for(j=0;j<Y_Height;j++)
for(i=0;i<X_Wide;i++){
    Unew[i][j][k] = Tem;
}

/* converse x value form 1d to 3d matrix */
for(k=0;k<Zsub2;k++)
for(j=0;j<Ysub2;j++)
for(i=0;i<Xsub2;i++){

```

```

        Unew[i+1][j+1][k+1] = x[(Xsub2*Ysub2*k)+(Xsub2*j)+i];
    }

    /* reverse value form new to initial */

    for(k=1;k<zz;k++)
    for(j=1;j<yy;j++)
    for(i=1;i<xx;i++){
        Uold[i][j][k] = Unew[i][j][k];
    }

/* print to file */
fprintf(fp,"step %d",time+1);
for(j=1;j<yy;j++)
for(i=1;i<xx;i++){
    fprintf(fp,"\n");
    fprintf(fp,"x,y=[%d][%d]\n",i,j);
for(k=1;k<zz;k++){
    fprintf(fp,"%f",Unew[i][j][k]);
    }
}
fprintf(fp,"\n\n\n");
} /* end loop */

/* print on screen */
printf("\n\t\t\t\t\tDelta_d(m) = %f",Delta_d);
printf("\n\t\t\t\t\tDelta_t(s) = %f",Delta_t);
printf("\n\t\t\t\t\tR = %f",R);
printf("\n\n\t\t\t\t\tIf program successfull you will recieve file <tem.out>.\n");

/* close file */
fclose(fp);
fclose(open); /* close file a.txt */

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

return ;
} /* end main */

/* function used to calculate conjugate gradient */
void tox_cg(float A[][XYZsub2],float B[],float x[])
{
int      i,j,n;
float    p[XYZsub2],r[XYZsub2],u[XYZsub2];
float    sum1,sum2,sum3,sum4,cg_beta,cg_alpha;
for(i=0;i<XYZsub2;i++){
    x[i] = 0.0;
    p[i] = B[i];
    r[i] = B[i];
}
/* Iteration */
n = 0;
for (;) {
    ++n;
    for(i=0;i<XYZsub2;i++) {
        u[i] = 0.0;
        for(j=0;j<XYZsub2;j++)
            u[i] = u[i] + A[i][j]*p[j];
    }
    sum1=sum2=0.0;
    for(i=0;i<XYZsub2;i++){
        sum1 += p[i]*r[i];
        sum2 += p[i]*u[i];
    }
    cg_alpha = sum1/sum2;
    for(i=0;i<XYZsub2;i++){

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    x[i] += cg_alpha*p[i];
    r[i] -= cg_alpha*u[i];
}

/* calculate residuals and direction vectors */

sum3=sum4=0.0;
for(i=0;i<XYZsub2;i++){
    sum3 += r[i]*r[i];
    sum4 += r[i]*u[i];
}

/* Check if residuals are already small If or algorithm has converged */
if ((n==XYZsub2)||((sum3<TOL)) break;
cg_beta = -sum4/sum2;
for(i=0;i<XYZsub2;i++)
    p[i] = r[i] + cg_beta*p[i];
}
printf("\n<Information of conjugate gradient>\n");
printf("n=%d sum3=%f\n",n,sum3);

```

ประวัติผู้เขียน

นายวงศกร วัชรานานันท์ เกิดเมื่อวันที่ 29 กรกฎาคม พ.ศ. 2515 ที่จังหวัดนครสวรรค์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เมื่อปี พ.ศ. 2537 ในปี พ.ศ. 2538-2540 เป็นผู้ช่วยวิจัยในโครงการทุนส่งเสริมวิชาชีพนักวิจัย ของ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

ในระหว่างการศึกษาปริญญาโท มีบทความตีพิมพ์ทั้งในประเทศและต่างประเทศรวมทั้งสิ้น 4 บทความ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทความเกี่ยวข้องที่ได้รับการตีพิมพ์

1. M. Krairiksh and W. Watcharananunt, "Development of a Microwave Heating System Using Overlapped Slotted Waveguide Applicators," presented in International Scientific and Industrial RF and Microwave Applicators, Melbourne, 1996.
2. วงศกร วัชรานานนท์, กิตติศักดิ์ วายุภักตร์, สมพล โกศลวิศิษฐ์ และ โมไนย ไกรฤกษ์, "ท่อนำคลื่นผนังลูกฟูกสำหรับป้องกันคลื่นรั่ว," การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 17, หน้า 159-163, พ.ศ 2537.
3. วงศกร วัชรานานนท์ และ โมไนย ไกรฤกษ์, "เครื่องค้นแบบเครื่องอบแห้งไมโครเวฟ," เอกสารพระจอมเกล้าลาดกระบัง, ปีที่ 4, ฉบับที่ 2, หน้า 15-21, พ.ศ. 2539
4. วงศกร วัชรานานนท์, โมไนย ไกรฤกษ์ และ สมพล โกศลวิศิษฐ์, "การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าในบริเวณแผ่นไดอิเล็กตริกที่อยู่ระหว่างแผ่นตัวนำขนาดอนันต์ที่วางขนานกัน," การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 19 มหาวิทยาลัยขอนแก่น, หน้า CM-43 ถึง CM-163, พ.ศ 2539.

