

การวิเคราะห์สายอากาศสล็อตอาร์เรย์บนท่อนำคลื่นที่วางเยื้องกัน
สำหรับระบบให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ

ANALYSIS OF OVERLAPPED SLOT-WAVEGUIDE APPLICATOR
FOR A CONTINUOUS MICROWAVE HEATING SYSTEM



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2537

ISBN 974-621-248-6

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หนังสืออ้างอิง
ห้ามนำออกนอกห้องสมุด

การวิเคราะห์สายอากาศสล롯อาร์เรย์บนท่อนำคลื่น
ที่วางเยื้องกันสำหรับระบบให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ

ANALYSIS OF OVERLAPPED SLOT-WAVEGUIDE APPLICATOR
FOR A CONTINUOUS MICROWAVE HEATING SYSTEM



กิตติศักดิ์ วายุกักร์
KITTISAK WAYUPHAK

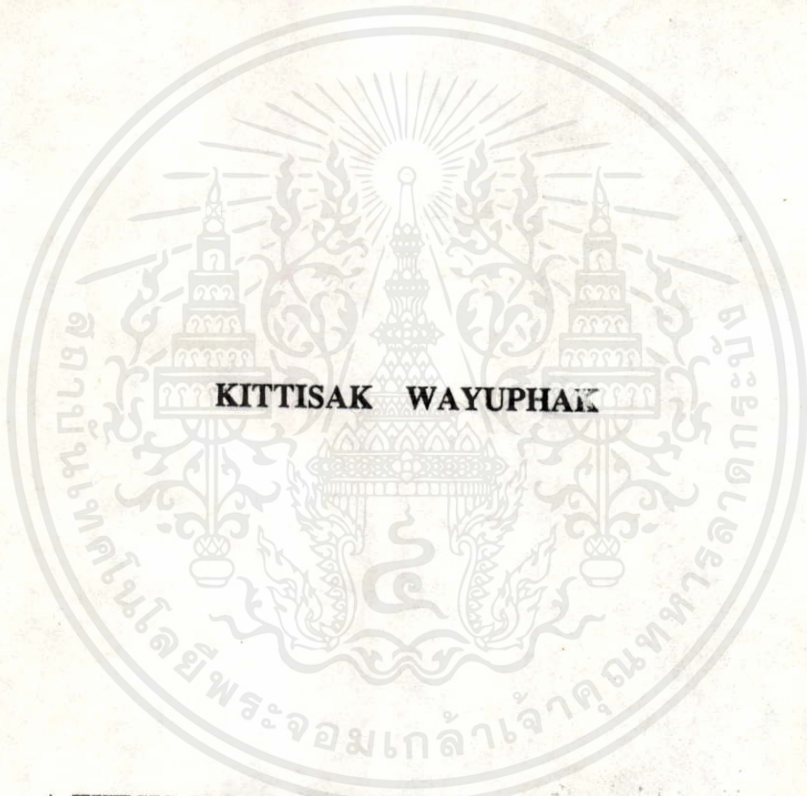


วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรสำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2537

ISBN 974-621-248-6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

**ANALYSIS OF OVERLAPPED SLOT-WAVEGUIDE APPLICATOR
FOR A CONTINUOUS MICROWAVE HEATING SYSTEM**



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

1994

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ISBN 974-621-248-6
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Analysis of Overlapped Slot-Waveguide Applicator for A Continuous Microwave Heating System
Name	Kittisak Wayuphak
Thesis Advisor	Asst. Prof. Sompol Kosalvit
Thesis Co-Advisor	Asst. Prof. Dr. Monai Krairiksh
Course	Master of Engineering in Electrical Engineering
Year	1994

Abstract

A microwave applicator system so called **Overlapped Slot-Waveguide Applicator** is proposed to apply microwave energy into the lossy dielectric material placed on a moving conveyor. By using electric field from the applicator as a heat source, temperature distribution in such a material can be analyzed in terms of various parameter i.e. electric field, temperature diffusivity (α_T), $\sigma/\rho c_p$ and conveyor speed. This is accomplished by solving the heat transport equation numerically using Crank-Nicholson's finite difference method. From the analysis the means to design the applicator system that provides the uniform temperature distribution across the conveyor, which is desirable in the continuous agricultural and industrial heating system, is obtained. A laboratory model heating system employing the proposed applicator is constructed to collect the primary data. Experimental results illustrate the feasibility of applying the proposed system in the area of agricultural and industrial applications.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทคัดย่อ	i
Abstract	ii
กิตติกรรมประกาศ	iii
สารบัญ	iv
สารบัญรูปภาพ	viii
คำอธิบายสัญลักษณ์	xv
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 กล่าวนำ	1
1.2 ไมโครเวฟกับการประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรม	1
1.3 วัตถุประสงค์ในการศึกษา	4
บทที่ 2 กลไกการให้ความร้อนแก่วัสดุไดอิเล็กตริก	7
2.1 กล่าวนำ	7
2.2 การสูญเสียในไดอิเล็กตริก	7
2.2.1 การเกิดโพลาริซซ์โดยการเรียงโคโพลในสนามสถิตย์	10
2.2.2 โมเมนต์โคโพลถาวร	14
2.2.3 การเกิดโพลาริซซ์เนื่องจากการเรียงโคโพลในสนามไฟฟ้าสลับ	15
2.2.4 การเกิดรีแลกเซชันในไดอิเล็กตริก	17
2.3 คุณสมบัติของไดอิเล็กตริก	21
2.4 การส่งถ่ายความร้อนและการกระจายอุณหภูมิ	22
2.5 สรุป	25
บทที่ 3 สายอากาศแพร่กระจายคลื่น ไมโครเวฟแบบสล็อตอาร์เรย์บนท่อนำคลื่น	26
3.1 กล่าวนำ	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2	ควาวิตีเรโซแนนท์กับการป้อนกำลังคลื่นให้สายอากาศสล็อตอาร์เรย์บนท่อนำคลื่น	27
3.3	การคำนวณสนามไฟฟ้าที่แพร่กระจายจากสายอากาศสล็อตอาร์เรย์บนท่อนำคลื่น	29
3.4	การคำนวณการกระจายอุณหภูมิมบนไดอิเล็กตริก	37
3.5	การนำสายอากาศสล็อตอาร์เรย์บนท่อนำคลื่นมาวางเชื่อมกันหลายท่อนำคลื่น	43
3.6	สรุป	45
บทที่ 4	ผลการคำนวณและการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและอุณหภูมิ	46
4.1	กล่าวนำ	46
4.2	การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าที่เกิดจากสายอากาศสล็อตอาร์เรย์บนท่อนำคลื่น	46
4.2.1	สนามไฟฟ้าจากสายอากาศสล็อตอาร์เรย์ 4 สล็อตบนท่อนำคลื่น	46
4.2.1-1	การพิจารณาส่วนประกอบต่าง ๆ ของสนามไฟฟ้า	47
4.2.1-2	การเปรียบเทียบสนามไฟฟ้า เมื่อสายอากาศสล็อตเปลี่ยนแปลงตามแนวแกน x	48
4.2.1-3	การเปรียบเทียบสนามไฟฟ้าเมื่อสายอากาศสล็อตเปลี่ยนแปลงตามความยาวของสล็อต	50
4.2.2	สนามไฟฟ้าจากสายอากาศสล็อตอาร์เรย์ 3 สล็อตบนท่อนำคลื่น	52
4.2.2-1	สนามไฟฟ้าจากสายอากาศสล็อตอาร์เรย์บนท่อนำคลื่นที่มี 3 สล็อต ที่ระยะห่างจากระนาบปากสล็อต 1 มิลลิเมตร	52
4.2.2-2	สนามไฟฟ้าจากสายอากาศสล็อตอาร์เรย์บนท่อนำคลื่นที่มี 3 สล็อต ที่ระยะห่างจากระนาบปากสล็อตต่าง ๆ กัน	55
4.3	วิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิมบนสแลบไดอิเล็กตริก	57
4.3.1	ในสภาวะอยู่นิ่ง (Steady State)	57
4.3.1-1	ผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อเวลา เมื่อสแลบไดอิเล็กตริกวางห่างจากสายอากาศสล็อตอาร์เรย์ต่าง ๆ กัน	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า โดยอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1-2 ผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อเวลาบนสแลบ ใคิเล็กตริก เมื่อ $\sigma/\rho c_p$ มีค่าต่างๆกัน	59
4.3.1-3 ผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อเวลาบนสแลบ ใคิเล็กตริก เมื่อสนามไฟฟ้ามีค่าต่างๆกัน	60
4.3.2 ในสภาวะชั่วขณะ (Transient State)	61
4.3.2-1 ผลการคำนวณการกระจายอุณหภูมิบนสแลบ ใคิเล็กตริก เมื่อค่าความสามารถในการแพร่กระจายอุณหภูมิ (α_T) มีค่าต่างๆกัน	63
4.3.2-2 ผลการคำนวณการกระจายอุณหภูมิบนสแลบ ใคิเล็กตริก เมื่อค่า $\sigma/\rho c_p$ มีค่าต่างๆกัน	76
4.3.2-3 ผลการคำนวณการกระจายอุณหภูมิบนสแลบ ใคิเล็กตริก เมื่อสนามไฟฟ้า (E) มีค่าต่างๆกัน	89
4.3.2-4 ผลการคำนวณการกระจายอุณหภูมิบนสแลบ ใคิเล็กตริก เมื่อความเร็วสายพานลำเลียงมีค่าต่างๆกัน	102
4.4 สรุป	115
บทที่ 5 แบบจำลองขนาดเล็ก	117
5.1 กล่าวนำ	117
5.2 หลอดแมกนีตรอน	112
5.3 ระบบสายอากาศสล็อตอาร์เรย์บนท่อนำคลื่น	128
5.4 โฉกท่อนำคลื่น	135
5.5 สายพานลำเลียงและชุดขับเคลื่อนสายพาน	148
5.6 แหล่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้าสำหรับหลอดแมกนีตรอน	150
5.7 แบบจำลองขนาดเล็ก	152
5.8 สรุป	153

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6 การทดสอบสายอากาศแพร่กระจายคลื่นและระบบ ไซค์	154
6.1 กล่าวนำ	154
6.2 การทดลองและผลการทดลอง	154
6.2.1 การกระจายสนามไฟฟ้าจากสายอากาศสี่ออร์เรย์ 4 สล็อต บนท่อนำคลื่น	154
6.2.2 การกระจายอุณหภูมิในไดอิเล็กตริก จากสายอากาศสี่ออร์เรย์ 3 สล็อต บนท่อนำคลื่นที่นำมาวางเยื้องกัน	157
6.2.3 การทดสอบการรั่วของคลื่นไมโครเวฟ ของระบบ ไซค์ ที่ทางเข้าออกของสายพานลำเลียง	163
6.3 สรุป	166
บทที่ 7 บทสรุปและวิจารณ์	167
เอกสารอ้างอิง	170
บทความที่เกี่ยวข้องที่ได้รับการตีพิมพ์	173
ภาคผนวก	174
ประวัติผู้เขียน	175

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

รูป 2-1	(ก) อะตอมเมื่อไม่มีสนามรบกวน	8
	(ข) เมื่อป้อนสนามไฟฟ้า E_a ให้กับอะตอม	8
รูป 2-2	โมเมนต์ไดโพลโมเลกุล	10
รูป 2-3	(ก) การเกิดโพลาริซ์ เมื่อสนามไฟฟ้าสลับมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น	17
	(ข) การลดลงของโพลาริซ์ เมื่อสนามไฟฟ้าสลับมีการเปลี่ยนแปลงลดลง	17
รูป 3-1	โหมด TE_{10p} ในควาดีเรโซแนนซ์	28
รูป 3-2	ท่อนำคลื่นปลายปิดที่ทำหน้าที่เป็นวงจรเรโซแนนซ์แบบควาดี	29
รูป 3-3	รายละเอียดสายอากาศสล็อตอาร์เรย์จำนวน n สล็อต	33
รูป 3-4	การรวมทางเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่ง (x, y, z) ใด ๆ ในสเปซ	37
รูป 3-5	โมเดลในการวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิจาก	37
รูป 3-6	ระบบกริด 1 มิติ ในการคำนวณการกระจายอุณหภูมิจาก	39
	บนสแลบ ไดอิเล็กตริก	
รูป 3-7	สายพานลำเลียงนำสาร ไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสีย	
	เคลื่อนที่ผ่านสายอากาศสล็อตอาร์เรย์บนท่อนำคลื่นที่วางเรียงกัน	44
รูป 3-8	การคำนวณการกระจายอุณหภูมิจาก E^2 รวม	
	ที่เกิดจากสนามไฟฟ้าที่เกิดจากสนามไฟฟ้าของสายอากาศสล็อต	
	วางเรียงกัน	44
รูป 4-1	การเปรียบเทียบขนาดของส่วนประกอบต่างๆของสนามไฟฟ้า	
	เมื่อคำนวณตามแนวกึ่งกลางท่อนำคลื่น	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป 4-2	การเปรียบเทียบสนามไฟฟ้า เมื่อเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของ สายอากาศสล็อตให้โกสและ โกลจากแนวกึ่งกลางของท่อนำคลื่น	
	(ก) โกลจากแนวกึ่งกลางท่อนำคลื่น	49
	(ข) โกสแนวกึ่งกลางของท่อนำคลื่น	50
รูป 4-3	การเปรียบเทียบสนามไฟฟ้า เมื่อเปลี่ยนแปลงความยาว ของสายอากาศสล็อต	
	(ก) สล็อตยาวขึ้น	51
	(ข) สล็อตสั้นลง	51
รูป 4-4	สนามไฟฟ้าที่ระยะห่าง จากระนาบปากสล็อต 1 มิลลิเมตร ที่ x ต่างๆกัน	
	(ก) $x = 1.6$ เซ็นติเมตร	52
	(ข) $x = 3.05$ เซ็นติเมตร (แนวสล็อต)	53
	(ค) $x = 4.5$ เซ็นติเมตร (แนวกึ่งกลางของท่อนำคลื่น)	53
	(ง) $x = 5.9$ เซ็นติเมตร (แนวสล็อต)	54
	(จ) $x = 7.4$ เซ็นติเมตร	54
รูป 4-5	สนามไฟฟ้าที่ระยะห่าง จากระนาบปากสล็อตต่างๆกัน ที่ $x = 4.5$ เซ็นติเมตร	
	ก) $y = -0.1, -0.5, -1.0, -1.5, -2.0, -2.5$ เซ็นติเมตร	55
	ข) $y = -3.0, -3.5, -4.0, -4.5, -5.0$ เซ็นติเมตร	56
	ค) $y = -6.0, -7.0, -8.0, -9.0, -10.0$ เซ็นติเมตร	56
รูป 4-6	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อเวลาบนสแลบ ไดอิเล็กตริก เมื่อสแลบ ไดอิเล็กตริกวางห่างจากสายอากาศสล็อต อาร์เรย์ ต่างๆกัน เมื่อ $x = 4.5$ เซ็นติเมตร	
		58

รูป 4-7	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อเวลาบนสแลบ ไดอิเล็กตริก เมื่อ $\sigma/\rho c_p$ มีค่าต่าง ๆ กัน	59
รูป 4-8	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อเวลาบนสแลบ ไดอิเล็กตริก เมื่อสนามไฟฟ้ามีค่าต่าง ๆ กัน ที่ $x = 4.5$ เซ็นติเมตร	60
รูป 4-9	การคำนวณอุณหภูมิบนสแลบ ไดอิเล็กตริก เมื่อให้เคลื่อนที่ผ่าน สายอากาศสล็อตอาร์เรย์ 3 สล็อตบนท่อนำคลื่นทั้ง 3 ท่อนำคลื่น	62
รูป 4-10	step 1-25 เป็นการกระจายอุณหภูมิบนสแลบ ไดอิเล็กตริก เมื่อเคลื่อนที่ผ่านสายอากาศสล็อตอาร์เรย์ 3 สล็อต บนท่อนำคลื่นทั้ง 3 ท่อนำคลื่น ที่มีค่า α_T ต่าง ๆ กัน	64-73
รูป 4-11	ภาพ 3 มิติ แสดงการกระจายอุณหภูมิบนสแลบ ไดอิเล็กตริก เมื่อเคลื่อนที่ผ่านสายอากาศสล็อตอาร์เรย์ 3 สล็อต บน ท่อนำคลื่นทั้ง 3 ท่อนำคลื่น ในการเคลื่อนที่แต่ละ step ที่มีค่า (ก) $\alpha_T = 1 \text{ cm}^2 / \text{s}$ (ข) $\alpha_T = 10 \text{ cm}^2 / \text{s}$ (ค) $\alpha_T = 20 \text{ cm}^2 / \text{s}$	74 74 75
รูป 4-12	step 1-25 เป็นการกระจายอุณหภูมิบนสแลบ ไดอิเล็กตริก เมื่อเคลื่อนที่ผ่านสายอากาศสล็อตอาร์เรย์ 3 สล็อต บนท่อนำคลื่นทั้ง 3 ท่อนำคลื่น ที่มีค่า $\sigma/\rho c_p$ ต่าง ๆ กัน	77-86
รูป 4-13	ภาพ 3 มิติ แสดงการกระจายอุณหภูมิบนสแลบ ไดอิเล็กตริก เมื่อเคลื่อนที่ผ่านสายอากาศสล็อตอาร์เรย์ 3 สล็อต บน ท่อนำคลื่นทั้ง 3 ท่อนำคลื่น ในการเคลื่อนที่แต่ละ step ที่มีค่า (ก) $\sigma/\rho c_p = 1 \text{ cm}^2 \cdot \text{C} / \text{V}^2 \text{ s}$ (ข) $\sigma/\rho c_p = 10 \text{ cm}^2 \cdot \text{C} / \text{V}^2 \text{ s}$ (ค) $\sigma/\rho c_p = 20 \text{ cm}^2 \cdot \text{C} / \text{V}^2 \text{ s}$	87 87 88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป 4-14	step 1-25 เป็นการกระจายอุณหภูมิมบนสแลบไดอิเล็กตริก เมื่อเคลื่อนที่ผ่านสายอากาศสล็อตอาร์เรย์ 3 สล็อต บนท่อนำคลื่นทั้ง 3 ท่อนำคลื่น ที่มีค่า E ต่างๆกัน	90-99
รูป 4-15	ภาพ 3 มิติ แสดงการกระจายอุณหภูมิมบนสแลบไดอิเล็กตริก เมื่อเคลื่อนที่ผ่านสายอากาศสล็อตอาร์เรย์ 3 สล็อต บน ท่อนำคลื่นทั้ง 3 ท่อนำคลื่น ในการเคลื่อนที่แต่ละ step ที่มีค่า (ก) สนามไฟฟ้า $E = A_{108} \times 10^{10} \text{ V/cm}$ (ข) สนามไฟฟ้า $E = 10 \times A_{108} \times 10^{10} \text{ V/cm}$ (ค) สนามไฟฟ้า $E = 20 \times A_{108} \times 10^{10} \text{ V/cm}$	100 100 101
รูป 4-13	step 1-25 เป็นการกระจายอุณหภูมิมบนสแลบไดอิเล็กตริก เมื่อเคลื่อนที่ผ่านสายอากาศสล็อตอาร์เรย์ 3 สล็อตบนท่อนำคลื่น ทั้ง 3 ท่อนำคลื่น ที่มีความเร็วสายพานลำเลียงต่างๆกัน	103-112
รูป 4-17	ภาพ 3 มิติ แสดงการกระจายอุณหภูมิมบนสแลบไดอิเล็กตริก เมื่อเคลื่อนที่ผ่านสายอากาศสล็อตอาร์เรย์ 3 สล็อต บน ท่อนำคลื่นทั้ง 3 ท่อนำคลื่น ในการเคลื่อนที่แต่ละ step ที่มีค่า (ก) ความเร็วสายพานลำเลียง 0.01 cm/s (ข) ความเร็วสายพานลำเลียง 0.1 cm/s (ค) ความเร็วสายพานลำเลียง 0.2 cm/s	113 113 114
รูป 5-1	โครงสร้างของหลอดแมกนีตรอน	118
รูป 5-2	(ก) คาวิตีเรโซแนนซ์ 1 ส่วนในแมกนีตรอน (ข) วงจรสมมูลย์ของคาวิตีเรโซแนนซ์ 1 ส่วน (ค) วงจรสมมูลย์ของคาวิตีเรโซแนนซ์ทั้งหมด	118 118 118
รูป 5-3	การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ในแมกนีตรอน (ก) เนื่องจากสนามไฟฟ้า E (ข) เนื่องจากสนามแม่เหล็ก H	119 120

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

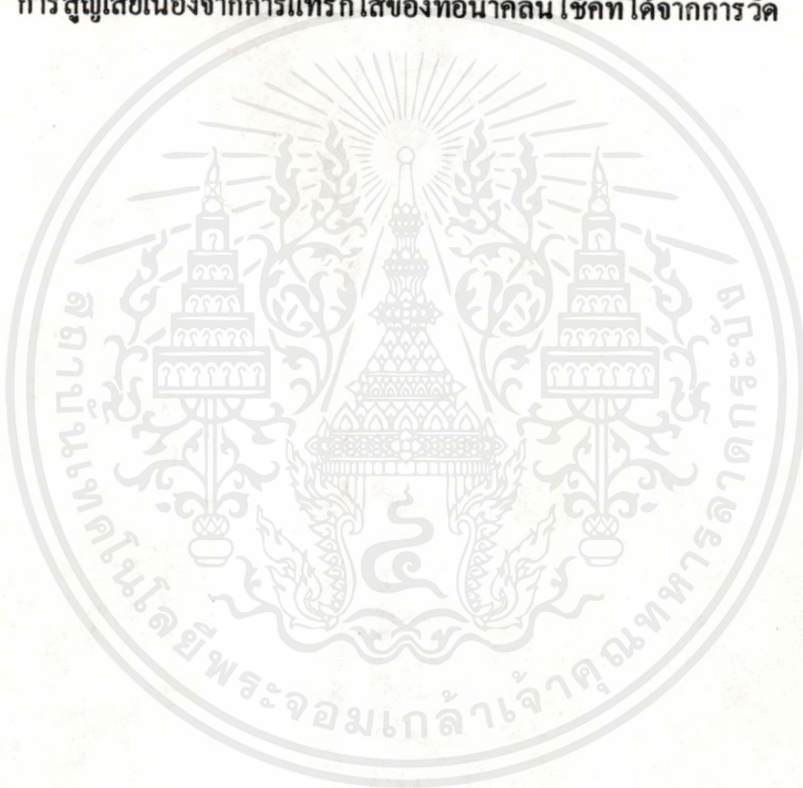
รูป 5-4	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ไหลระหว่างขั้วแอโนด และขั้วแคโทดกับความเข้มสนามแม่เหล็ก	121
รูป 5-5	การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในแมกนีตรอน เนื่องจากสนามแม่เหล็ก H และสนามไฟฟ้า E	122
รูป 5-6	การเกาะกลุ่มกันของอิเล็กตรอนในอินเตอร์แอคชันสเปซ	124
รูป 5-7	เทคนิคหนึ่งของรูปคัปปลิงในการคิงกำลังงานไมโครเวฟ จากควิตีเรโซแนนซ์ในแมกนีตรอน	125
รูป 5-8	(ก) การใช้สเตรปริงป้องกันการย้ายความถี่ตามค่าของโหมค (ข) การแยกกันของโหมคเนื่องจากสเตรปริง (ค) วงจรสมมูลย์ของควิตีที่ต่อกันแบบขนานเป็นผลมาจากสเตรปริง	126 126 126
รูป 5-9	ควิตีเรโซแนนซ์แบบต่างๆ (ก) แอโนคบล็อก (ข) โฮลและสล็อต (ค) แบบพระอาทิตย์ขึ้น	127 127 127
รูป 5-10	หลอดแมกนีตรอนที่ใช้ในการทดลอง	128
รูป 5-11	ความสัมพันธ์ของตำแหน่งสล็อตและตำแหน่งป้อนกำลังงานไมโครเวฟ	130
รูป 5-12	แสดงวงจรสายส่งสมมูลย์ สำหรับสายอากาศสล็อตอาร์เรย์ที่มี 3 สล็อต	131
รูป 5-13	(ก) ภาพถ่ายสายอากาศสล็อตอาร์เรย์ 3 สล็อตบนท่อนำคลื่น (ข) ภาพถ่ายสายอากาศสล็อตอาร์เรย์ 3 สล็อตบนท่อนำคลื่น เมื่อแยกส่วนประกอบ	133 134
รูป 5-14	ภาพถ่ายการนำสายอากาศสล็อตอาร์เรย์ 3 สล็อต บนท่อนำคลื่น 3 ท่อนำคลื่นมาวางเรียงกัน	135
รูป 5-15	ใช้คูลูกฟูกในท่อนำคลื่น	136

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป 5-16	ก) วงจรสมมูลอย่างง่ายของไอ้คลูกฟูก	137
	ข) วงจรสมมูลของไอ้คลูกฟูก 1 หน่วยเซลล์	137
	ค) วงจรสมมูลของไอ้คลูกฟูกที่แทนด้วยตัวเหนี่ยวนำ เป็นโหลด 1 หน่วยเซลล์	137
รูป 5-17	ไอ้คลูกฟูกคู่	143
รูป 5-18	วงจรสมมูลของไอ้คลูกฟูกหนึ่งส่วน	145
รูป 5-19	ค่าการสูญเสียเนื่องจากการแทรกใส่ที่ได้จากการออกแบบ	146
รูป 5-20	ภาพถ่ายของไอ้คลูกฟูกที่ได้ออกแบบไว้ (แยกส่วนประกอบ)	147
รูป 5-21	ภาพถ่ายสายพานลำเลียงและชุดขับเคลื่อนสายพาน	149
รูป 5-22	วงจรแหล่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้าที่มีเสถียรภาพด้วย แอล-ซี แบบทวีแรงดันไฟฟ้าครึ่งลูกคลื่น (Half-wave voltage double L-C stabilized power supply circuit)	150
รูป 5-23	ภาพถ่ายแหล่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้า สำหรับแมกนีตรอน	152
รูป 5-24	ภาพถ่ายแบบจำลองขนาดเล็กที่สร้างขึ้นมาทดสอบสายอากาศ	153
รูป 6-1	ผังภูมิของการวัดการกระจายสนามไฟฟ้า	155
รูป 6-2	การกระจายสนามไฟฟ้าจากผลการทดลอง เปรียบเทียบกับผลการคำนวณที่ $y = -1$ มิลลิเมตร	156
รูป 6-3	จังหวะในการหยุดบันทึกอุณหภูมิ สำหรับการวัด การกระจายอุณหภูมิตนสแลบไดอิเล็กตริก	158
รูป 6-4	การวัดการกระจายอุณหภูมิในสแลบภายในตู้ปิด	159
รูป 6-5	รูปถ่าย (ก) การนำหัววัดเทอร์โมคัปเปิล มาวัดการกระจาย อุณหภูมิในสแลบ ไดอิเล็กตริกที่เป็นกระดาษทิชชูอุ้มน้ำ	159
	(ข) ระบบการวัดอุณหภูมิ	160

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป 6-6	การกระจายอุณหภูมิในสแลบกระดาศทึชชอุ้มน้ำ เมื่อ	
	(ก) แรงดันไฟฟ้าเข้าแหล่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 190 โวลต์	161
	(ข) แรงดันไฟฟ้าเข้าแหล่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 220 โวลต์	161
รูป 6-7	รอยไหม้ที่เกิดขึ้นบนสายพานลำเลียงที่เป็นผ้า	163
รูป 6-8	การวัดการสูญเสียเนื่องจากการแทรกใส่ของโซ้ค	164
รูป 6-9	การสูญเสียเนื่องจากการแทรกใส่ของท่อนำคลื่น โซ้คที่ได้จากการวัด	165



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำอธิบายสัญลักษณ์

q	:	ประจุ (Charge)
p	:	ไดโพลโมเมนต์ถาวร (Permanet Dipole Moment)
\bar{l}	:	เวกเตอร์ตำแหน่งสัมพัทธ์ (Relative Positin Vector)
α'	:	ความสามารถในการเกิดโพลาริซ (Polarizability)
E_{loc}	:	สนามไฟฟ้าโลคัล (Local Field) ในไดอิเล็กตริก
P	:	การเกิดโพลาริซ (Polarization)
N	:	จำนวนโมเลกุลในไดอิเล็กตริก
E	:	สนามไฟฟ้า (Electric Field)
χ	:	ค่าซัสเซพทิบิลิตี (Susceptibility) ของตัวกลางไดอิเล็กตริก
D	:	ความหนาแน่นเส้นแรงไฟฟ้า (Eletric Flux Current)
ϵ_0	:	ค่าเพอร์มิตติวิตี (Permittivity) ของฟรีสเปซ (Free Space)
χ_r	:	ค่าซัสเซพทิบิลิตีสัมพัทธ์ (Relative Susceptibility) ของตัวกลางไดอิเล็กตริก
ϵ_r	:	ค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ (Relative Permittivity) ของตัวกลางไดอิเล็กตริก
C	:	คู่คัปเปิล (Couple) ที่เกิดบนโมเมนต์ไดโพลถาวร
k_B	:	ค่าคงที่ของโบลท์ซแมนน์ (Boltzmann's constant)
T	:	อุณหภูมิ
ϵ_∞	:	ค่าเพอร์มิตติวิตีทางแสง (Optical Permittivity)
n	:	ดัชนีทางแสง (Optical Index)
ϵ_{rs}	:	ค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์สถิตย์ (Static Relative Permittivity) ของตัวกลางไดอิเล็กตริก
$\epsilon_{r\infty}$:	ค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ทางแสง (Optical Relative Permittivity) ของตัวกลางไดอิเล็กตริก
t	:	เวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

τ	:	เวลารีแลกเซชัน (Relaxation Time)
α	:	ค่าคงที่ของการลดทอน (Attenuation constant)
ω	:	ความถี่เชิงมุม (Radian Frequency)
τ_e	:	เวลารีแลกเซชันขงผล (Effective Relaxation Time)
ϵ^*	:	เพอร์มิตติวิตีเชิงซ้อน (Complex Permittivity)
ϵ'	:	ปัจจัยในการแพร่ (Dispersion Factor)
ϵ''	:	ปัจจัยในการสูญเสีย (Loss Factor) หรือ การสูญเสีย (Dissipation)
ζ	:	สัมประสิทธิ์การเสียดทาน (Frictional Coefficient) ในการเปลี่ยนไดโพล
ζ	:	ความหนืด (Viscosity) ที่เกิดจากความเสียดทานในตัวกลางไดอิเล็กตริก
r_d	:	รัศมีของไดโพลที่เกิดจากการเปลี่ยนไดโพล
ϵ_{eff}''	:	ปัจจัยในการสูญเสียขงผล (Effective Loss Factor)
$\tan \delta_{eff}$:	ลอสแทนเจนต์ (Loss Tangent)
D_p	:	ระยะความลึกในการแพร่เข้าไปใน ไดอิเล็กตริกที่กำลังงานลดลง $1/e$ (Penetration Depth)
c	:	ความเร็วแสงในฟรีสเปซ (Speed of Light in Free Space)
f	:	ความถี่ของคลื่น (Frequency)
P_a	:	กำลังงานที่ไดอิเล็กตริกดูดกลืน (Absorbed Power)
α_T	:	ความสามารถในการแพร่กระจายอุณหภูมิ (Thermal Diffusivity)
c_p	:	ความจุความร้อนจำเพาะของสาร ไดอิเล็กตริก (Specific Heat) เมื่อความดันคงที่
L_h	:	ความร้อนแฝงของการระเหยกลายเป็นไอน้ำ (Latent Heat of Evaporation)
M_t	:	มวลของน้ำ (Mass of Water)
σ	:	ความนำไฟฟ้า (Conductivity) ของวัสดุไดอิเล็กตริก
ρ	:	ความหนาแน่น (Density) ของเนื้อวัสดุไดอิเล็กตริก
μ_0	:	ค่าเพอร์มิอะบิลิตี (Permeability) ของตัวกลาง
A_{mnp}	:	ค่าคงที่ที่โมเมนต์ m, n, p

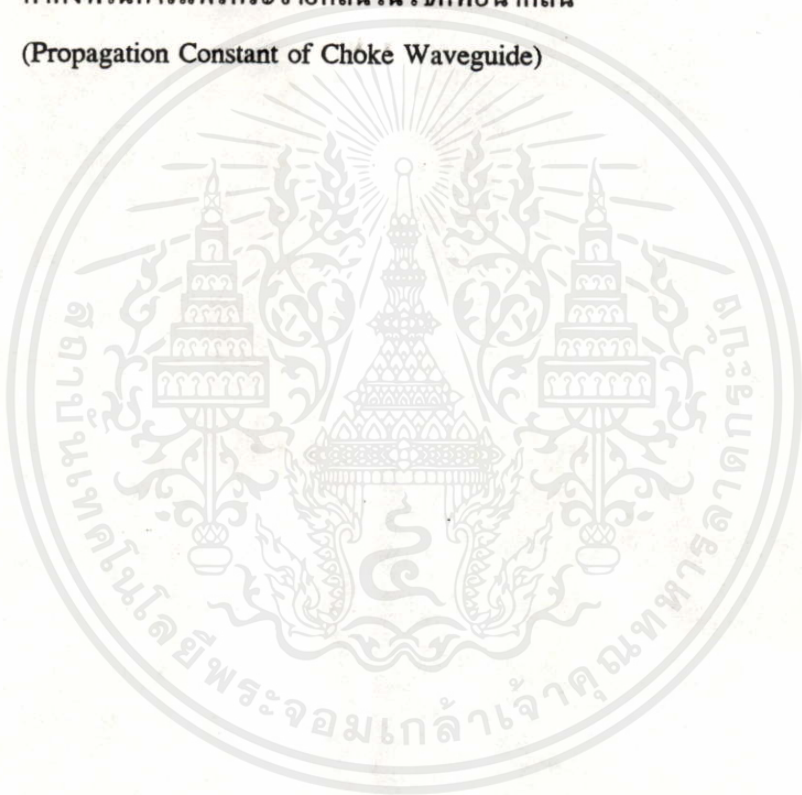
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

H	:	สนามแม่เหล็ก (Magnetic Field)
J	:	ความหนาแน่นกระแส (Electric Density)
\hat{n}	:	เวกเตอร์หนึ่งหน่วย (Unit Vector)
M	:	ความหนาแน่นกระแสแม่เหล็ก (Magnetic Density)
A	:	ศักดาเวกเตอร์ (Vector Potential)
k	:	ค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่น (Propagation Constant)
R	:	ระยะทางจากจุดหนึ่งไปจุดหนึ่ง (Distance)
λ_g	:	ความยาวคลื่นในท่อนำคลื่น (Guide Wavelength)
λ_c	:	ความยาวคลื่นคัตออฟ (Cut-Off Wavelength)
L	:	ค่าความเหนี่ยวนำสมมูลย์ของโช้ค (Equivalent Inductance of Choke)
Z_0	:	อิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (Characteristic Impedance)
\bar{X}	:	ค่ารีแอคแตนซ์ของโช้ค (Choke Reactance)
g_e	:	ค่าความนำไฟฟ้าสมมูลย์รวมของสล็อตอาร์เรย์ (Total Equivalent Electrical Conductance of Slot Array)
g_n	:	ค่าความนำไฟฟ้าสมมูลย์ของสล็อตตัวที่ n (n^{th} Slot Equivalent Electrical Conductance)
a_n	:	ค่าแอมพลิจูดสัมพัทธ์ที่กระตุ้นสล็อต (Relative Slot Excitation Amplitude)
l	:	ความยาวของสตัป (Stub Length)
l'	:	ความยาวทางไฟฟ้าสมมูลย์ของสตัป (Equivalent Electrical Length of Stub)
d	:	ความสูงของสตัป
d'	:	ความสูงทางไฟฟ้าสมมูลย์ของสตัป (Equivalent Electrical Height of Stub)
W	:	ความกว้างของโช้คท่อนำคลื่น (Choke Width)
g	:	ความสูงของโช้คท่อนำคลื่น (Height of Choke Waveguide)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- d_M : ความสูงทางไฟฟ้าสมมูลของสตัปจากวงจรสมมูลของมาร์คูวิทซ์
(Marcuvitz Equivalent)
- d_M' : ความยาวทางไฟฟ้าสมมูลของสตัปจากวงจรสมมูลของมาร์คูวิทซ์
- A : ค่าการสูญเสียเนื่องจากการแทรกใส่ทั้งหมดของโชคท่อนำคลื่น
(Total Insertion Loss of Choke Waveguide)
- β : ค่าคงที่ในการแพร่กระจายคลื่นในโชคท่อนำคลื่น
(Propagation Constant of Choke Waveguide)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 กล่าวนำ

ไมโครเวฟได้ถูกพัฒนาเพื่อใช้ในระบบเรดาร์มาตั้งแต่สมัยสงครามโลกครั้งที่ 2 หลังจากนั้นก็ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในวงการอื่นๆ เช่น ในวงการอุตสาหกรรมได้ใช้คลื่นไมโครเวฟเพื่อให้ความร้อนแก่วัสดุต่างๆ (Microwave Heating) เช่น ผลิตภัณฑ์อาหาร หรือผลิตผลทางการเกษตร ในวงการแพทย์ก็ได้ใช้คลื่นไมโครเวฟทำให้เกิดความร้อนเพื่อบำบัดความปวดเมื่อยและรักษาโรค หรือในด้านการสื่อสาร ซึ่งใช้ติดต่อสื่อสารระหว่างสถานีภาคพื้นดินด้วยกันหรือติดต่อสื่อสารผ่านดาวเทียม นอกจากนั้นยังนำมาใช้ในงานวิจัยต่างๆ ในด้านวิทยาศาสตร์ เป็นต้น

1.2 ไมโครเวฟกับการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม

หลังจากสงครามโลกครั้งที่ 2 สิ้นสุดลง ได้มีรายงานฉบับแรกตีพิมพ์เกี่ยวกับการให้ความร้อนแก่ไดอิเล็กตริก (Dielectric Heating) [1,2] ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นอาหาร ในช่วงนั้นการให้ความร้อนยังใช้ความถี่อยู่ในย่าน 1-15 MHz (RF Heating) จากการทดลองวิจัยที่มีการทำอย่างต่อเนื่อง หลังจากนั้นในช่วง 20 ปีถัดมาคลื่นอาร์เอฟก็ได้เริ่มนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมในย่านความถี่ที่สูงขึ้นแต่ยังไม่เกิน 40 MHz เช่น นำมาใช้ในการอบอาหาร ทำแห้งสำเร็จ และทำละลายน้ำแข็ง ในปลายปีทศวรรษที่ 1950 การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟในย่านความถี่ 800-3000 MHz ก็เริ่มเป็นที่สนใจ โดยเฉพาะการนำมาใช้เป็นเตาอบไมโครเวฟในครัวเรือน ในช่วงนั้นเตาอบไมโครเวฟมีการผลิตขึ้นมามากมาย เนื่องจากมีประโยชน์ใช้สอยในเรื่องขนาดที่เล็กกระทัดรัด และมีความรวดเร็วในการให้ความร้อนที่สูงในช่วงเวลาสั้นๆ เตาอบไมโครเวฟจึงเป็นที่นิยมแพร่หลายมาจนถึงปัจจุบัน และความสามารถของแหล่งจ่ายกำลังงานไมโครเวฟในการจ่ายกำลังงานได้สูงเพิ่มมากขึ้น ไมโครเวฟจึงได้เริ่มนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอย่างจริงจังนับแต่นั้นเป็นต้นมา (ทั้งๆที่ในช่วงนั้นการให้ความร้อนด้วยความถี่ย่านความถี่วิทยุ (RF frequency) ย่าน 27-40 MHz ยังคงมีใช้อย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรม) ปัจจุบันนี้แทบจะกล่าวได้ว่ามีเพียงความถี่ไมโครเวฟในย่านความถี่ 915(896) MHz และ 2450 MHz เท่านั้นที่นำมาใช้ในทาง

อุตสาหกรรม [2] ซึ่งก็ได้มีข้อมูลและผลการทดลองต่างๆที่ผู้วิจัยได้ศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติ และการให้ความร้อนแก่ไดอิเล็กตริกอยู่มากพอสมควร สะดวกในการนำไปประยุกต์ใช้และพัฒนาต่อไปในภายหลัง

การให้ความร้อนแก่วัสดุไดอิเล็กตริกด้วยวิธีต่างๆไป เช่นการให้ความร้อนโดยตรง การให้ความร้อนด้วยลมร้อน หรือการให้ความร้อนด้วยการอบไอน้ำ หรือวิธีอื่นๆทั่วไป ความร้อนจะถูกส่งผ่านไปที่ผิวของวัสดุที่ต้องการให้ความร้อนโดยการนำความร้อน (conduction) , การพาความร้อน (convection) (ซึ่งเกิดขึ้นในเนื้อของวัสดุที่มีของเหลว เป็นองค์ประกอบ) และ/หรือ การแผ่รังสีความร้อน (radiation) ความร้อนจะแพร่จากผิวด้านนอกเข้าไปในเนื้อวัสดุด้านในโดยการนำของอุณหภูมิตั้งแต่ในทางกลับกันสำหรับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟความร้อนจะเกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุนั้นโดยตรงเนื่องจากสนามไฟฟ้า ทำให้เกิดฟลักซ์ความร้อน (heat flux) และการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิได้สูงกว่าการให้ความร้อนด้วยวิธีการสร้างความร้อนที่กล่าวมาข้างต้นโดยตรง

สำหรับในกระบวนการให้ความร้อนในอุตสาหกรรมด้วยไมโครเวฟ มีข้อดีกว่าวิธีการให้ความร้อนทั่วไปกล่าวคือ [3,4]

- 1) มีประสิทธิภาพสูงในการให้ความร้อนในช่วงเวลาสั้นๆ เนื่องจากความร้อนเกิดขึ้นในเนื้อวัสดุ และพลังงานสามารถแพร่กระจายเข้าไปในเนื้อวัสดุได้อย่างรวดเร็ว
- 2) เวลาในการให้ความร้อนสั้น ทำให้สามารถเพิ่มผลผลิตได้มาก
- 3) ระบบให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟมีขนาดเล็กกว่า ประหยัดพื้นที่ในการติดตั้ง
- 4) ระบบมีความสะอาด ทำให้ผลิตภัณฑ์สะอาดและมีคุณภาพดี เนื่องจากความร้อนเกิดจากสนามไฟฟ้าโดยตรง เหมาะสมสำหรับการให้ความร้อนแก่ผลิตภัณฑ์อาหารและลดปัญหาการไหม้เกรียมที่ผิวโดยที่เนื้ออาหารภายในยังไม่สุก
- 5) ระบบสามารถป้องกันการให้ความร้อนเกินความต้องการได้ง่าย เนื่องจากสามารถควบคุมการเปิดปิดของแหล่งจ่ายกำลังงานได้โดยตรง ถ้าแหล่งจ่ายกำลังงานไมโครเวฟถูกปิดลงการแพร่กระจายคลื่นก็จะไม่เกิดขึ้น อุณหภูมิสะสมในระบบจะมีน้อยกว่าการให้ความร้อนด้วยวิธีอื่น เพราะความร้อนเกิดจากสนามไฟฟ้าโดยตรง
- 6) ง่ายในการติดตั้งเป็นสายการผลิต และสามารถนำมาใช้ร่วมกับการให้ความร้อนด้วยกระบวนการอื่นได้โดยไม่ยุ่งยาก

7) ระบบซ่อมบำรุงได้ง่าย ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาต่ำ ประหยัดกำลังคนในการซ่อมบำรุง

คลื่นไมโครเวฟสามารถนำมาใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมได้อย่างมากมายหลายประเภท [3,4,5] อาทิเช่น

1. นำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆไป ได้แก่

- อุตสาหกรรมกระดาษและสิ่งพิมพ์ เช่น ในการทำกระดาษ หมึกพิมพ์ และกาว
- อุตสาหกรรมสิ่งทอ และเครื่องหนัง
- ใช้ในการก่อสร้าง เช่น อบแห้งไม้ ทำไม้อัด พลาสเตอร์(plaster) คอนกรีต และ

เซรามิก

- อุตสาหกรรมการหล่อแบบ (molding)
- อุตสาหกรรมยางและพลาสติก เช่น การทำแห้งโพลีเมอร์ (polymer) การทำ

ฟิล์มถ่ายรูป และการทำเทปแม่เหล็ก

- อุตสาหกรรมการผลิตยา หรือ เกษัตริกรรม
- อุตสาหกรรมไบยาซูบ ไบชา และ กาแฟ
- การสร้างซีโอไลท์ (zeolite)

ฯลฯ เป็นต้น

2. นำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร ได้แก่ การทำแห้งเนื้อสัตว์และผักผลไม้ การทำเส้นบะหมี่ การละลายเนื้อแช่แข็ง การทำละลายไขมัน การทำชอคโกแลต การทำไอศกรีม การอบโดนัทและขนมปัง ฯลฯ เป็นต้น

รายละเอียดอื่นๆอีกมากมายที่ไม่ได้กล่าวถึง สามารถค้นคว้าได้จากหนังสืออ้างอิงหมายเลข [3,4,5,6]

จากกล่าวที่กล่าวมาข้างต้น เป็นตัวอย่างซึ่งแสดงถึงประโยชน์ของไมโครเวฟที่นำมาใช้ในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องในชีวิตประจำวัน การให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟจึงกลายเป็นเทคนิคการให้ความร้อนแบบใหม่ และอาจจะถือได้ว่าเป็นอุปกรณ์มาตรฐานในอุตสาหกรรมสายการผลิตที่ไม่ว่ากรรมใดทางอื่น อีกทั้งห้ามมิให้คิดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มาใช้ ซึ่งต้องการการให้ความร้อนอย่างรวดเร็ว และต้องการความสม่ำเสมอของการกระจายความร้อนที่ดี อย่างไรก็ตามการให้ความร้อนด้วยวิธีต่างๆไป โดยการนำความร้อนก็ได้ถูกนำมาใช้ร่วมกับการให้

ความร้อนด้วยไมโครเวฟ ในกรณีที่เนื้อวัสดุมีความหนาหลายๆและต้องการกระจายอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ในกรณีที่คลื่นไมโครเวฟอย่างเดียวทำได้ไม่เพียงพอ [2]

1.3 วัตถุประสงค์ในการศึกษา

ปัจจุบันแทบจะกล่าวได้ว่าในประเทศไทยมีการนำไมโครเวฟมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมให้ความร้อนน้อยมาก เพราะใช้ต้นทุนในการติดตั้งครั้งแรกค่อนข้างสูง เนื่องจากต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ทั้งผู้ประกอบการยังไม่มีความเข้าใจถึงประโยชน์และข้อแตกต่างของการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟกับการให้ความร้อนด้วยวิธีอื่นๆ ทำให้การนำระบบไมโครเวฟมาใช้ในอุตสาหกรรมภายในประเทศยังไม่แพร่หลายเท่าที่ควร การศึกษาเกี่ยวกับระบบให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟเพื่อสร้างพัฒนาเทคโนโลยีที่เหมาะสมขึ้นใช้เองภายในประเทศ จึงเป็นจุดเริ่มต้นที่ดีและเป็นการสร้างฐานความรู้เพื่อรองรับเทคโนโลยีในด้านนี้ ที่คาดว่าจะมีเข้ามาในอนาคต

โดยทั่วไปแล้วระบบการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ใช้ในอุตสาหกรรมนั้น มักจะให้ความร้อนในลักษณะต่อเนื่อง โดยการนำวัสดุที่ต้องการให้ความร้อนวางอยู่บนสายพานลำเลียงแล้วให้เคลื่อนที่ผ่านสายอากาศแพร่กระจายคลื่น (applicator) เพื่อให้วัสดุเกิดความร้อน สายอากาศแพร่กระจายคลื่นจึงเป็นส่วนที่มีความสำคัญที่สุดส่วนหนึ่งของระบบ คุณภาพของผลิตภัณฑ์จึงขึ้นกับคุณสมบัติของสายอากาศแพร่กระจายคลื่นเป็นสำคัญ ซึ่งจะต้องออกแบบให้เหมาะสมกับการให้ความร้อนแก่วัสดุเฉพาะอย่าง โดยเฉพาะการกระจายสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอ (uniform) ตลอดทั่วเนื้อวัสดุที่ต้องการให้ความร้อน ซึ่งถือว่าเป็นข้อกำหนดในการออกแบบระบบสายอากาศแพร่กระจายคลื่น ดังนั้นในการศึกษาและออกแบบสร้างระบบให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟให้สายอากาศทำหน้าที่ดังกล่าวได้จึงเป็นสิ่งที่ต้องกระทำเป็นอันดับแรก ซึ่งจำเป็นในการควบคุมคุณภาพของกระบวนการ

เป็นที่ทราบกันดีว่า การใช้สายอากาศเดี่ยวๆทำให้สนามมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอได้ยาก ทั้งนี้เพราะเงื่อนไขที่ขอบของตัวนำที่นำมาทำสายอากาศเป็นตัวกำหนด ดังนั้นการที่จะสังเคราะห์ให้สนามไฟฟ้ามีความสม่ำเสมอ นั้น อาจทำได้โดยใช้สายอากาศหลายตัวมาจัดการป้อนอย่างเหมาะสมให้ขนาดและเฟสของสนามที่ป้อนสายอากาศบังคับให้สนามมีผลลัพท์อย่างสม่ำเสมอเป็นตามต้องการ ซึ่งเราเรียกสายอากาศแบบนี้ว่าสายอากาศอาร์เรย์ [7]

ในระบบไมโครเวฟกำลังสูงการจัดป้อนสายอากาศอาร์เรย์สามารถทำได้หลายวิธี แต่วิธีหนึ่งที่สามารถทำได้โดยง่ายก็คือใช้สายอากาศสล็อตอาร์เรย์เจาะบนผิวของท่อนำคลื่น ที่เราสามารถบังคับการป้อนทั้งขนาดและเฟสด้วยการเลือกตำแหน่งของการเจาะและความยาวของสล็อตอย่างเหมาะสม การเลือกพารามิเตอร์เหล่านี้ทำได้โดยการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าในบริเวณที่จะให้ความร้อนแก่วัสดุ

ในการออกแบบระบบสายอากาศเพื่อแพร่กระจายคลื่น ไมโครเวฟในระบบให้ความร้อนจำเป็นจะต้องทำการทดสอบและวิเคราะห์ในเชิงคณิตศาสตร์เสียก่อนทั้งการกระจายสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษา และออกแบบสายอากาศสล็อตอาร์เรย์บนท่อนำคลื่นโดยนำมาวางเยื้องกันเพื่อผลในการกระจายอุณหภูมิที่สม่ำเสมอตลอดแนวหน้าตัดของสายพานลำเลียง จากการศึกษาวิเคราะห์และออกแบบสร้างสายอากาศแพร่กระจายคลื่นและแบบจำลองขนาดเล็กขึ้นมาในห้องปฏิบัติการเพื่อทดสอบระบบสายอากาศสล็อตอาร์เรย์ รายละเอียดและข้อบกพร่องต่างๆที่ได้จะเป็นข้อมูลที่น่าไปใช้ปรับปรุงและพัฒนาสร้างระบบให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟในต่อไปในอนาคต

สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีเนื้อหาแบ่งเป็น 8 บท โดยบทนี้เป็นบทที่ 1 บทนำ ซึ่งกล่าวถึงความจำเป็นมาของการนำคลื่นไมโครเวฟมาใช้ในงานอุตสาหกรรม และข้อดีต่างๆของระบบให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟกับระบบให้ความร้อนด้วยวิธีอื่นๆ รวมไปถึงวัตถุประสงค์ในการศึกษาและออกแบบสายอากาศสล็อตอาร์เรย์บนท่อนำคลื่นที่วางเยื้องกัน รวมทั้งรายละเอียดต่างๆไปของวิทยานิพนธ์ในแต่ละบท

บทที่ 2 จะกล่าวถึงกลไกการให้ความร้อนแก่ไดอิเล็กตริก ซึ่งกระบวนการสำคัญของการเกิดความร้อนในวัสดุไดอิเล็กตริกก็คือการเกิดโพราไลเซชัน (Polarization) นอกจากนั้นยังจะกล่าวถึงคุณสมบัติต่างๆ ของไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสีย (Lossy Dielectric) กลไกการส่งถ่ายความร้อนและการกระจายอุณหภูมิในเนื้อสารไดอิเล็กตริก

บทที่ 3 กล่าวถึงสายอากาศสล็อตอาร์เรย์บนท่อนำคลื่น วัตถุประสงค์ในการนำสายอากาศสล็อตอาร์เรย์บนท่อนำคลื่นมาเป็นสายอากาศแพร่กระจายคลื่นในระบบให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ รวมไปถึงการคำนวณสนามไฟฟ้าจากสายอากาศสล็อตอาร์เรย์บนท่อนำคลื่น โดยการคำนวณสนามไฟฟ้าจากศักยเคาเวกเตอร์ซึ่งหาได้จากกระแสสมมูลย์ที่กระจายบนสายอากาศ และได้สร้างโมเดลในการคำนวณการกระจายอุณหภูมิบนสแลบซึ่งหาได้จากการแก้สมการส่งถ่ายความ

ร้อนด้วยวิธีของแครงค์-นิโคลสันใน 1 มิติ และเหตุผลในการนำสายอากาศสล็อตอาร์เรย์บนท่อนำคลื่นมาวางเยื้องกัน

บทที่ 4 เป็นการคำนวณและวิเคราะห์สนามไฟฟ้าที่เกิดจากสายอากาศสล็อตอาร์เรย์บนท่อนำคลื่น และทำการปรับตำแหน่งและความยาวของสล็อตเพื่อดูการกระจายของสนามไฟฟ้า ทั้งได้คำนวณการกระจายอุณหภูมิบนสแลบไดอิเล็กตริกบนสายพานลำเลียง ในขณะที่สแลบอยู่นิ่งและสแลบเคลื่อนที่ โดยการเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ค่าสนามไฟฟ้า ค่าความสามารถในการแพร่ของอุณหภูมิของไดอิเล็กตริก (α_T) ค่า $\sigma/\rho c_p$ ของ ไดอิเล็กตริก และความเร็วของสายพานลำเลียง ผลการคำนวณจะนำไปแสดงในรูปกราฟการกระจายอุณหภูมิบนสแลบไดอิเล็กตริก เพื่อดูความสม่ำเสมอในการกระจายอุณหภูมิ

บทที่ 5 เป็นการออกแบบระบบให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟขนาดเล็กขึ้นมา เพื่อทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศ ระบบจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์กำเนิดคลื่นไมโครเวฟที่เรียกว่า "หลอดแมกนีตรอน", แหล่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้าให้แก่หลอดแมกนีตรอน, ระบบสายอากาศสล็อตอาร์เรย์ที่ประกอบไปด้วยสายอากาศสล็อตอาร์เรย์ 3 สล็อตบนท่อนำคลื่นที่นำมาวางเยื้องกัน 3 ชุด ท่อนำคลื่น, ระบบสายพานลำเลียงและชุดขับเคลื่อนสายพาน และระบบโซลคที่ทำหน้าที่คักคลื่นที่แพร่กระจายที่ทางเข้าออกของสายพานลำเลียง

บทที่ 6 เป็นการทดสอบและผลการทดสอบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศสล็อตอาร์เรย์และการกระจายอุณหภูมิใน ไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสีย ซึ่งได้เลือกใช้กระดาษทิชชู (tissue paper) ที่ซึบน้ำเปียกชุ่มเป็นสแลบไดอิเล็กตริกทดสอบ โดยมีเทอร์โมคัปเปิลเป็นอุปกรณ์ในการวัดอุณหภูมิเฉลี่ยในแต่ละจุดบนสแลบ และได้ทดสอบคุณสมบัติของระบบโซลคคักคลื่นไมโครเวฟที่ทางเข้าออกของสายพานลำเลียงอีกด้วย

บทที่ 7 เป็นบทสรุปและวิจารณ์ผลการศึกษาและออกแบบสายอากาศสล็อตอาร์เรย์สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ทั้งหมด พร้อมทั้งได้เสนอแนวคิดและแนวทางในการปรับปรุงแก้ไขระบบสายอากาศสล็อตอาร์เรย์สำหรับระบบให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ เพื่อนำไปประกอบการพิจารณาในการพัฒนาและการออกแบบสร้างต่อไปในอนาคต

ท้ายสุดในภาคผนวกจะเป็นมิติต่างๆของสายอากาศสล็อตอาร์เรย์บนท่อนำคลื่นทั้ง 3 ท่อนำคลื่นที่ได้สร้างขึ้นมาทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่สู่สาธารณะโดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่มีการรับประกันใดๆเกี่ยวกับความถูกต้องของข้อมูล และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

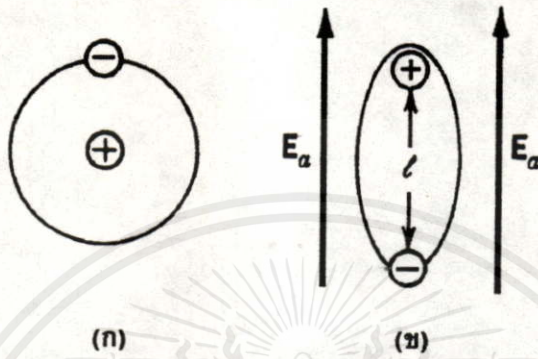
การสูญเสียในไดอิเล็กตริก

2.1 กล่าวนำ

ในการออกแบบสายอากาศแพร่กระจายคลื่นรวมทั้งระบบให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟแก่วัสดุไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสีย (Lossy Dielectric) จำเป็นจะต้องทราบคุณสมบัติของไดอิเล็กตริกเป็นอย่างดี ไดอิเล็กตริกแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติที่ไม่เหมือนกัน ดังนั้นจึงเกิดการสูญเสีย (loss) ไม่เท่ากัน การเข้าใจปรากฏการณ์การให้ความร้อนจะทำให้สามารถออกแบบระบบได้เหมาะสมกับชนิดของไดอิเล็กตริกเพื่อให้เกิดการกระจายอุณหภูมิได้ตามต้องการ สำหรับในบทนี้จะกล่าวถึงการสูญเสียในไดอิเล็กตริก คุณสมบัติของไดอิเล็กตริก การกระจายอุณหภูมิในไดอิเล็กตริก ก่อนที่จะกล่าวถึงระบบสายอากาศสล็อตอาร์เรย์และการออกแบบระบบให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟทั้งหมด

2.2 การสูญเสียในไดอิเล็กตริก [3,4,8]

ไดอิเล็กตริก (Dielectrics) หรือฉนวน (Insulators) เป็นวัสดุที่ประจุส่วนใหญ่ในอะตอมและโมเลกุลถูกยึด (bounded) ด้วยประจุบวกและลบ ซึ่งจะตรึงอยู่กับที่ด้วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมและโมเลกุลทำให้ประจุไม่สามารถเคลื่อนที่อิสระได้ ดังนั้นไดอิเล็กตริก (ที่เป็นอุดมคติ) จึงไม่มีประจุอิสระเช่นตัวนำ อะตอมและโมเลกุลจึงมีคุณสมบัติที่เป็นกลางทางไฟฟ้า พิจารณาได้จากรูป 2-1 (ก) อย่างไรก็ตามเมื่อเราป้อนสนามไฟฟ้าไมโครเวฟภายนอกให้แก่ไดอิเล็กตริก ประจุผูกพัน (bound charge) บวกและลบจะไม่เคลื่อนมาที่ผิวของวัสดุเช่นตัวนำ แต่ศูนย์กลางของประจุ (centroids) ต่างแยกตัวห่างจากกันและกันจากตำแหน่งเดิม ทำให้เกิดไดโพลไฟฟ้า (electric dipole) ค่าหนึ่งขึ้น แสดงได้ในรูป 2-1 (ข) สนามไฟฟ้าไมโครเวฟจะพยายามยึดประจุผูกพันออกด้านกับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างประจุ ครอบโคที่ประจุผูกพันยังคงแยกตัวห่างจากศูนย์กลางของประจุ จะทำให้ไดอิเล็กตริกสามารถกักเก็บพลังงานในตัวมันเองได้ คล้ายกับพลังงานศักย์ที่เก็บไว้ในตัวสปริงเมื่อเรายืดมันออก



รูป 2-1 (ก) อะตอมเมื่อไม่มีสนามไฟฟ้ารอบวง
 (ข) เมื่อป้อนสนามไฟฟ้า E_a ให้กับอะตอม

เป็นที่ทราบกันดีว่า คลื่นไมโครเวฟนั้นมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 2-3 ซม. ถึงกว่าสิบ เซ็นติเมตร การนำคลื่นไมโครเวฟมาทำให้วัสดุไดอิเล็กตริกเกิดความร้อนจึงถูกจำกัดด้วยระยะเวลา ความลึกในการแพร่เข้าไปในเนื้อไดอิเล็กตริก เนื่องจากการเกิดความร้อนนั้นจะเกิดขึ้นทันทีในเนื้อวัสดุ ปรากฏการณ์การนำความร้อน (Conduction), การพาความร้อน (Convection), และการแผ่รังสี (Radiation) จะมีบทบาททรงช่วยสนับสนุนให้เกิดการกระจายอุณหภูมิทั่วผิววัสดุให้ดีขึ้น

การทำให้เกิดความร้อนจะทำให้เกิดกลไกอันหนึ่ง ซึ่งเกิดขึ้นเฉพาะกับช่วงความถี่ที่ใช้ งานนั้นๆคือ การหมุนไดโพล (Dipolar Rotation), การเกิดการเสียดทานภายในโมเลกุล (Intermolecular Friction), และฮิสเตอรีซิส (Hysteresis) ที่เกิดขึ้นระหว่างสนามที่ป้อนให้กับวัสดุกับการตอบสนองทางไฟฟ้าที่ถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้น โดยโมเลกุลของวัสดุนั้นจะต้องมีโมเมนต์ ไดโพล (Dipole Moment) ที่สูงพอ ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพในการให้ความร้อนแก่ ไดอิเล็กตริกให้มีการสูญเสียสูงๆ ไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสียส่วนใหญ่จะเป็นวัสดุที่มีน้ำเป็นองค์ ประกอบ

ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น การที่พลาสมาให้อุ่นเปลวเนื้อหวนและต้องอ้างอิงถึงค่าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ คุณสมบัติต่างๆ ไปของไดอิเล็กตริก ก็คือ ความสามารถในการกักเก็บพลังงานได้ดี ซึ่งเกิดจากการเกิดการเคลื่อนที่ของประจุผูกพันบวกและลบภายใต้สนามไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไดอิเล็กตริก

และการต้านกับแรงยึดเหนี่ยวของอะตอมและการดึงดูดของโมเลกุล (Molecular Attraction) กลไกการเกิดการเคลื่อนที่ของประจุ (เช่น การเกิดโพลาริเซชัน) จะขึ้นอยู่กับชนิดวัสดุไดอิเล็กตริก นั้นๆและสนามที่ป้อนให้กับวัสดุไดอิเล็กตริก โดยทั่วไปจะเกิดโพลาริเซชันในไดอิเล็กตริก สามารถเกิดได้ 4 แบบ ซึ่งจะเกิดผลคล้ายๆกันแต่เกิดที่ความถี่ต่างกัน ในทุกๆแบบสมดุลย์ทาง ไฟฟ้าจะถูกรบกวนโดยสนามภายนอกทำให้เกิดการแยกกันของประจุตรงข้าม สำหรับสนาม ไฟฟ้าสลับ ความถี่จะเป็นตัวกำหนดรูปแบบของการเกิดโพลาริเซชัน ซึ่งก็คือ

- การเกิดโพลาริเซชันแบบสเปซชาร์จ (Space Charge Polarization) หรือ แมกเวลล์-เวกเนอร์ (Maxwell-Wagner polarization) จะเกิดขึ้นในย่านความถี่ต่ำๆ (VLF, LF) เกิดขึ้นเมื่อวัสดุ มีอิเล็กตรอนอิสระ ซึ่งการเกิดการเคลื่อนที่ที่จะถูกจำกัดอยู่ในบริเวณสิ่งกีดขวาง (obstacles) เช่นขอบเขตของเกรน (grain boundaries) เมื่อป้อนสนามไฟฟ้าให้กับไดอิเล็กตริก อิเล็กตรอนจะสะสมกันที่บริเวณกีดขวาง เป็นผลให้เกิดการแยกกันของประจุเกิดโพลาริเซชันใน วัสดุไดอิเล็กตริก วัสดุไดอิเล็กตริกจึงเกิดทั้งประจุบวกและลบกระจายทั่วบริเวณทั้งหมด การ เกิดโพลาริเซชันแบบนี้เป็นพื้นฐานของอิเล็กทรอนิกส์สารกึ่งตัวนำ
- การเกิดโพลาริเซชันโดยการเรียงโมเมนต์ไดโพล (Polarization by Dipole Moment Alignment) หรือ การเกิดโพลาริเซชันไดโพลาร์ (Dipolar Polarization) จะเกิดที่ความถี่สูงขึ้นมา ในย่าน ความถี่สูง (HF) และย่านความถี่ไมโครเวฟ ซึ่งเกิดจะเกิดในระดับโมเลกุล เป็นพื้นฐานของ การให้ความร้อนแก่ไดอิเล็กตริก
- การเกิดโพลาริเซชันแบบไอออนิก (Ionic Polarization) จะเกิดขึ้นในย่านความถี่อินฟราเรด (Infrared) ซึ่งเกิดจากการแยกตัวของไอออนบวกและลบในโมเลกุล
- การเกิดโพลาริเซชันแบบอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Polarization) เกิดที่ความถี่สูงๆใกล้ย่าน อุลตราไวโอเลต (Ultraviolet Region) โดยนิวเคลียสอะตอมิก (atomic nucleus) ที่มีประจุ บวกจะอยู่กับที่ในเมตริกซ์ (matrix) ของไดอิเล็กตริก กลุ่มประจุลบอิเล็กทรอนิกส์ (Negative Electronic Cloud) รอบๆนิวเคลียสจะเกิดการเคลื่อนที่ในทิศทางของสนามภายนอก

ในความเป็นจริง ปรากฏการณ์เหล่านี้สามารถที่จะเกิดขึ้นเหลื่อมกันได้ ไม่สามารถ กำหนดขอบเขตของความถี่ได้แน่นอน เนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงหัวข้อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางปฏิบัติวัสดุไดอิเล็กตริกที่นำมาให้ความร้อนจะไม่เป็นไดอิเล็กตริกสมบูรณ์ทีเดียว ที่ความถี่ต่ำๆ ใกล้เคียงจะมีคุณสมบัตินำไฟฟ้าคิซี (D. C. Conductivity) ได้เล็กน้อย ถ้าจะกล่าวถึงการให้ความร้อนแก่ไดอิเล็กตริกต่างๆ ไปตลอดย่านความถี่ที่ใช้ไม่เฉพาะย่านไมโครเวฟแล้ว การเกิดโพลาริซแบบแมกเวลล์-แวกเนอร์, การเกิดโพลาริซโดยการเรียงไดโพล และการนำไฟฟ้าคิซีจะเป็นพื้นฐานของการให้ความร้อนแก่ไดอิเล็กตริกทั้งหมด [3]

2.2.1 การเกิดโพลาริซโดยการเรียงไดโพลในสนามสถิตย์

ในตัวกลางไดอิเล็กตริกที่มีขั้ว (เช่นน้ำ) องค์ประกอบของโมเลกุลจะแสดงคุณสมบัติเป็นกลาง แต่ศูนย์กลางของประจุ $+q$ และ $-q$ จะไม่อยู่ติดกัน จะมีการวางตัวของประจุที่ไม่สมมาตร ทำให้เกิดไดโพลไฟฟ้าถาวร (Permanent Dipole Moment) ขึ้นมา ดังแสดงในรูป 2-2



รูป 2-2 โมเมนต์ไดโพลโมเลกุล

โดยมีค่าเท่ากับ

$$p = q\vec{l} \quad (C.m) \quad (2-1)$$

เมื่อ \vec{l} เป็นเวกเตอร์ตำแหน่งสัมพัทธ์ (Relative Position Vector) ของประจุบวกและประจุลบ q

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในตัวอย่างที่ขนาดเวกเตอร์ $\vec{\epsilon}$ มีค่าเป็น 0 หรือมีการวางประจุทับกันสนิท เราจะนิยามเป็นตัวอย่างไดอิเล็กตริกที่ไม่มีขั้ว (Nonpolar Dielectric) แต่สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดโมเมนต์ไดโพลได้ด้วยการป้อนสนามไฟฟ้าให้แก่ไดอิเล็กตริกนั้นๆ

โดยปกติในตัวอย่างไดอิเล็กตริกที่มีขั้ว การเรียงตัวของไดโพลจะไม่เป็นระเบียบมีทิศทางไม่แน่นอน เมื่อป้อนสนามไฟฟ้าสถิตย์ E ให้กับไดอิเล็กตริก จะทำให้เกิดสนามโลคัล (Local Field) E_{loc} ภายในโมเลกุล ทำให้ไดโพลเรียงตัวมีทิศเดียวกับสนามโลคัลเกิดโพลาริเซชัน เราแสดงความสามารถในการเกิดโพลาริเซชันของไดอิเล็กตริกใดๆ ได้ (Polarizability) จากความสัมพันธ์

$$\alpha' = \frac{P}{E_{loc}} \quad (F \cdot m^2) \quad (2-2)$$

ถ้า N เป็นจำนวนโมเลกุลทั้งหมดในปริมาตรในไดอิเล็กตริก เพราะฉะนั้นโมเมนต์ไดโพลทั้งหมดที่เกิดจากการโพลาริเซชัน (P)

$$P = N\alpha E_{loc} \quad (C \cdot m^2) \quad (2-3)$$

จะเป็นฟังก์ชันของสนามไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไดอิเล็กตริก (E)

$$P \equiv \chi E \quad (2-4)$$

โดย χ เป็นค่าซัสเซพทิบิลิตี (Susceptibility) ของตัวอย่างไดอิเล็กตริก ($F m^{-1}$)

สำหรับในฟรีสเปซ (free space) ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเส้นแรงไฟฟ้า (D) และสนามไฟฟ้า (E) แสดงได้ด้วย
 เอกสารเรียนเชิงเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะพิมพ์ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} \quad (2-5)$$

โดย ϵ_0 เป็นเพอร์มิตติวิตี (Permittivity) หรือค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของฟรีสเปซ (free space) สำหรับในไดอิเล็กตริกแล้วจะกลายเป็น

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} \quad (2-6)$$

และ

$$\mathbf{D} = (\epsilon_0 + \chi) \mathbf{E} \quad (2-7)$$

อย่างไรก็ตาม

$$\mathbf{D} = \epsilon' \mathbf{E} \quad (2-8)$$

จะได้

$$\chi = \epsilon' - \epsilon_0 \quad (2-9)$$

เมื่อ ϵ' เป็นเพอร์มิตติวิตี (Permittivity) และเราสามารถนิยาม ค่าซัสเซพติบิลิตีสัมพัทธ์ (Relative Susceptibility) ได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\chi_r = \frac{\chi}{\epsilon_0} = \epsilon'_r - 1 \quad (2-10)$$

เมื่อ ϵ'_r เป็นค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ (Relative Permittivity) หรือค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant) ซึ่งเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของวัสดุไดอิเล็กตริก ในการแสดงถึงความเป็นฉนวนมากน้อยเพียงไร ดังนั้นไดอิเล็กตริกที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกต่างกันจะมีขีดความสามารถในการเก็บพลังงานไม่เท่ากัน

ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า ϵ' ซึ่งเป็นคุณสมบัติของตัวกลาง และ ค่า α' ซึ่งเป็นคุณสมบัติของโมเลกุล จะเป็น

$$\frac{N\alpha'}{\epsilon_0} = \epsilon'_r - 1 \quad (2-11)$$

และเราสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามโลคัล E_{loc} ที่เกิดภายในโมเลกุล และ สนามไฟฟ้าภายนอกที่ป้อนให้กับไดอิเล็กตริก (E) ได้ ซึ่ง Clausius และ Mosotti [3,4] ได้หาความสัมพันธ์ง่าย ๆ ระหว่างสนามทั้งสองได้เป็น

$$\begin{aligned} E_{loc} &= E + \frac{P}{3\epsilon_0} = E \left(1 + \frac{\chi}{3\epsilon_0} \right) \\ &= E \left(\frac{\epsilon'_r + 2\epsilon_0}{3\epsilon_0} \right) \\ &= E \left(\frac{\epsilon'_r + 2}{3} \right) \end{aligned} \quad (2-12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า เพราะฉะนั้นสมการ (2-3) การเกิดโพลาไรซ์จะกลายเป็น จึงถึงเข้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P = N\alpha \left(\frac{\epsilon_r' + 2}{3\epsilon_0} \right) E \quad (2-13)$$

จากสมการ (2-10) จะได้

$$\frac{N\alpha'}{3\epsilon_0} = \frac{\epsilon_r' - 1}{\epsilon_r' + 2} \quad (2-14)$$

จากความสัมพันธ์สมการ (2-12) จะนำมาใช้หาสนามโลคัลในไดอิเล็กตริกใดๆ ซึ่งมักจะใช้สำหรับตัวกลางไดอิเล็กตริกที่เป็นแก๊ส และของเหลวที่ไม่มีขั้ว (non-polar liquid)

2.2.2 โมเมนต์ไดโพลถาวร (Permanent Dipole Moment)

ในตัวกลางที่มีขั้ว สนามที่ป้อนจะสร้างให้เกิดคู่ขั้วเปิด (couple) บนโมเมนต์ไดโพลถาวร p ในแต่ละโมเลกุลตามความสัมพันธ์

$$C = p \times E \quad (2-15)$$

คู่ขั้วเปิดนี้จะทำให้เกิดการเรียงตัวของโมเมนต์ไดโพลกับสนาม ซึ่งจะมีโมเมนต์เฉลี่ยที่เกิดจากแต่ละโมเมนต์ คือ

$$p_{avr} = p(\cos\theta)_{avr} \quad (2-16)$$

เมื่อ $(\cos\theta)_{avr}$ เป็นค่าโคไซน์เฉลี่ยของมุม θ ระหว่าง p และ E

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าสนามมีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับพลังงานที่ทำให้เกิดความร้อน (Thermal Agitation Energy) จะทำให้ได้โมเมนต์เฉลี่ยเป็น

$$p_{avr} \cong \frac{p^2 E_{loc}}{3k_B T} \quad (2-17)$$

เมื่อ k_B เป็นค่าคงที่ของโบลท์ซแมนน์ (Boltzmann's constant)
 $= 1.308 \times 10^{-23} \text{ (J/}^\circ\text{K)}$

T เป็นอุณหภูมิในโคอีเล็กตริก ($^\circ\text{K}$)

2.2.3 การเกิดโพลาไรซ์เนื่องจากการเรียงตัวของไดโพล ในสนามไฟฟ้าสลับ (Alternative Field)

จากที่กล่าวมาแล้วเป็นการเกิดโมเมนต์ไดโพลในสนามสถิตย์หรือสนามดีซี (D.C. field) สำหรับในสนามสลับจะมีการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างออกไป ซึ่งการเปลี่ยนทิศทางของไดโพลจะเปลี่ยนแปลงตามคาบเวลาของความถี่ที่ป้อนให้กับโคอีเล็กตริก ที่ความถี่ต่ำๆ ไดโพลจะมีการตอบสนองกับความถี่เป็นจังหวะซิงโครนัส (synchronous) กับสนามที่ป้อนทันที แต่ที่ความถี่สูงๆ ความเฉื่อยของโมเลกุลและแรงยึดเหนี่ยวของโมเลกุลจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงไดโพลและคุณสมบัติของโคอีเล็กตริก ค่าเพอร์มิตติวิตีจะเปลี่ยนไปมีค่าเข้าใกล้เพอร์มิตติวิตีทางแสง (optical permittivity) ϵ_∞ ซึ่งแสดงโดยสมการ

$$\epsilon_\infty = n^2 \quad (2-18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ n เป็นดัชนีทางแสง (Optical Index) ของตัวกลาง

ดังนั้นความสัมพันธ์ในสนามสถิตย์จะเปลี่ยนไป สมการ (2-11) และ (2-17) จะกลายเป็น

$$\epsilon_{rs} - 1 = \frac{N}{\epsilon_0} \left(\alpha' + \frac{p^2}{3k_B T} \right) \quad (2-19)$$

$$\epsilon_{\infty} - 1 = \frac{N\alpha'}{\epsilon_0} \quad (2-20)$$

เมื่อ ϵ_{rs} เป็นเพอร์มิตติวิตีสถิตย์ (Static Permittivity) ในสนามดีซี
ซึ่งจะทำให้ได้

$$\epsilon_{rs} - \epsilon_{\infty} = \frac{N}{3\epsilon_0} \left(\alpha' + \frac{Np^2}{3k_B T\epsilon_0} \right) \quad (2-21)$$

จากสมการของ Clausius-Mosotti จะกลายเป็น

$$\frac{N}{3\epsilon_0} \alpha' = \frac{\epsilon_{\infty} - 1}{\epsilon_{\infty} + 2} \quad (2-22)$$

เพราะฉะนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้เพื่อใช้ศึกษาวิจัยและพัฒนาเท่านั้น ไม่ควรนำออกเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (2-23) การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้า P_1 และ P_2 เป็นองค์ประกอบในการเกิดโพลาริซก่อนและหลังการเปลี่ยนแปลงสนามสลับ

$$E = E_0 e^{j\omega t} \quad (2-24)$$

P_2 จะลดลงเป็นเอกซ์โปเนนเชียลกับค่าสูงสุด

$$P_2 = (P - P_1)(1 - \exp(-t/\tau)) \quad (2-25)$$

จาก (2-4) และ (2-10)

$$P = (\epsilon_{rs} - 1)E \quad (2-26)$$

$$P_2 = (\epsilon_{r\infty} - 1)E \quad (2-27)$$

จาก

$$\frac{dP_2}{dt} = \frac{P - P_1 - P_2}{\tau} = \frac{(\epsilon_{rs} - \epsilon_{r\infty})}{\tau} E_0 \exp(j\omega t) - \frac{P_2}{\tau} \quad (2-28)$$

จะได้ เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลง (เอ้าท์) อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_2 = \frac{(\epsilon_{rs} - \epsilon_{r\infty})}{\tau} \quad (2-29)$$

ค่าเชิงซ้อน $\frac{P_2}{E_2}$ ป็นค่าความต่างเฟส (phase difference) หรือเรียกว่า เกิดฮิสเทอรีซิส (hysteresis) ระหว่างสนามที่ป้อนให้กับไดอิเล็กตริกและโพลาริซึ่ คล้ายกับการเกิดขึ้นระหว่างสนามไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไดอิเล็กตริกและความหนาแน่นเส้นแรงไฟฟ้า D

จากที่กล่าวมา สำหรับความถี่สูงมากกว่า 1 GHz [3] ผลของการเกิดรีแลกเซชัน จะทำให้ค่าเพอร์มิตทิวิตีเชิงซ้อน $\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon''$ เปลี่ยนแปลง ซึ่งเดอบาย (Debye) ได้แสดงความสัมพันธ์

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon'' = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + j\omega\tau} \quad (2-30)$$

สมการข้างบนเป็นที่รู้จักกันในชื่อ สมการของเดอบาย (Debye 's Equation) จากการแยกส่วนจำนวนจริงและจำนวนเชิงซ้อนจะได้

$$\epsilon' = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + \omega^2\tau^2} \quad (2-31)$$

$$\epsilon'' = \frac{(\epsilon_s - \epsilon_\infty)\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2} \quad (2-32)$$

เมื่อ ϵ' เป็น ปัจจัยในการแพร่ (dispersion factor)

ϵ'' เป็น การสูญเสีย (dissipation) หรือ ปัจจัยการสูญเสีย (loss factor)

และ $\omega = \frac{1}{\tau}$ เป็นความถี่รีแลกเซชัน ซึ่งจะมีค่ามากที่สุดเมื่อ $\omega\tau = 1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกไปลงสื่อออนไลน์หรือส่งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\epsilon''_{\max} = \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{2} \quad (2-33)$$

จากสมการ (2-15) เนื่องจากการป้อนสนามไฟฟ้า ความเร็วเชิงมุม (angular velocity) $d\theta/dt$ จะเป็นอัตราส่วนกับคู่คัปเปิล

$$C = \zeta \frac{d\theta}{dt} \quad (2-34)$$

ζ เป็นสัมประสิทธิ์การเสียดทาน (frictional coefficient) ซึ่งขึ้นกับขนาดของโมเลกุล และแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล สำหรับโมเลกุลที่เป็นทรงกลมรัศมี r_q การเปลี่ยนไดโพลในของเหลวที่มีความหนืด ξ โดยการใช้ทฤษฎีของสโตก (Stoke's Theorem) จะได้ว่า

$$\zeta = 8\pi\xi r_q^3 \quad (2-35)$$

ซึ่งทำให้สามารถแสดงเวลารีแลกเซชันในไดโพลทรงกลม (Spherical Dipole) ได้เป็น

$$\tau = \frac{1}{\omega} = \frac{\zeta}{2k_B T} = \frac{4\pi r_q^3 \xi}{k_B T} \quad (2-36)$$

เมื่อ ξ เป็นความหนืด (viscosity) ซึ่งเกิดจากแรงเสียดทานในตัวกลาง ($P_a \cdot s$)

r_q เป็นรัศมีของไดโพลที่เกิดจากการเปลี่ยนไดโพล (m)

อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติ ไดอิเล็กตริกที่เป็นของเหลวและของแข็งจะมีเวลารีแลกเซชันมากกว่าที่หาได้จากสมการ จากทฤษฎีของเดอบายและสนามโลคัลของ Clauius-Mosotti จะได้ความสัมพันธ์ใหม่ โดยค่าคงที่เวลารีแลกเซชันยังผล (effective relaxation time constant) จะกลายเป็น

$$\tau_e = \frac{\epsilon_{rs} + 2}{\epsilon_{\infty} + 2} \tau \quad (2-37)$$

2.3 คุณสมบัติไดอิเล็กตริก

การทราบคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุที่ต้องการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ เป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการออกแบบสายอากาศแพร่กระจายคลื่นและระบบ คุณสมบัติอันหนึ่งซึ่งใช้อธิบายพฤติกรรมของไดอิเล็กตริกภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่สูง ซึ่งก็คือค่าเพอร์มิตทิวิตีเชิงซ้อน (complex permittivity) ϵ^* ซึ่งนิยามได้โดยสมการ

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (2-38)$$

โดย ϵ'' เป็นปัจจัยในการสูญเสียขงผล (effective loss factor) ซึ่งได้รวมผลการนำไฟฟ้าที่เข้าไปด้วย

เราจะนิยาม ลอสแทนเจนต์ (loss tangent) เป็น

$$\tan \delta_{eff} = \epsilon'' / \epsilon' \quad (2-39)$$

ระยะความลึกที่คลื่นแพร่เข้าไปในเนื้อไดอิเล็กตริก (penetration depth) ซึ่งทำให้กำลังงานลดลง 0.368 (1/e) ของกำลังงานเริ่มต้น หาได้จากความสัมพันธ์

$$D_p = \frac{c\sqrt{\epsilon'}}{2\pi f\epsilon''} \quad (m) \quad (2-40)$$

เมื่อ c เป็นความเร็วแสงในฟรีสเปซ $= 29979 \times 10^8$ (m/s)

และ f เป็นความถี่ของคลื่นไมโครเวฟในฟรีสเปซ (H_z)

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับครูอาจารย์เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 และ ฝ่าฝืนโทษตามกฎหมาย ผลิตและเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก [2,3] จะพบว่าตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของไดอิเล็กตริกมีหลายตัวแปร เช่น ปริมาณความชื้นในไดอิเล็กตริก, (moisture content), อุณหภูมิ, ความถี่, องค์ประกอบ (composition) และการรวมตัว (combined) ของสารประกอบในไดอิเล็กตริก และระยะความลึกในการแพร่เข้าไปในเนื้อไดอิเล็กตริกของคลื่นไมโครเวฟเป็นต้น รายละเอียดต่างๆศึกษาได้จากเอกสารอ้างอิงดังกล่าว

2.4 การส่งถ่ายความร้อนและการกระจายอุณหภูมิ

การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟเป็นการเปลี่ยนรูปพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าให้อยู่ในรูปพลังงานความร้อนในตัวกลางไดอิเล็กตริก ถ้าความยาวคลื่นมีค่าเหมาะสมกับขนาดของไดอิเล็กตริก การดูดกลืนกำลังงานในตัวกลางไดอิเล็กตริกจะมีค่ามากที่สุด และไดอิเล็กตริกจะเกิดความร้อนตลอดทั่วทั้งปริมาตรด้วยอัตราสูงสุด เมื่อป้อนสนามไฟฟ้า E แก่สารไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสียซึ่งมีลอสมแฟกเตอร์ (Loss Factor) แล้ว จะเกิดสนามไฟฟ้าโลคัล E_{loc} ภายในเนื้อไดอิเล็กตริก กำลังงานที่ไดอิเล็กตริกนี้จะดูดกลืนได้จะมีค่าเป็น P_a [3] ซึ่ง

$$P_a = 55.6 \times 10^{-8} E_{loc}^2 f \epsilon_{eff}'' \quad (\text{W/m}^3) \quad (2-41)$$

ในที่นี้ f เป็นความถี่ของคลื่นไมโครเวฟที่ป้อนให้แก่สายอากาศ (Hz)
 ϵ_{eff}'' เป็นค่าปัจจัยในการสูญเสียยังผล (effective loss factor)

ถ้าสมมติว่าคลื่นไมโครเวฟเดินทางในตัวกลางไดอิเล็กตริกที่มีการลดทอนตามแนวแกน y ค่ากำลังงานไมโครเวฟที่ระยะความลึก y ใดๆจะมีค่าเป็น [4]

$$P(y) = P_0 e^{-2\alpha y} \quad (2-42)$$

ซึ่งการนี้ P_0 ออกมาเป็นกำลังงานคลื่นเริ่มต้นก่อนคลื่นเดินทางเข้าไปในเนื้อไดอิเล็กตริก (W) นกอร์ค่าไม่ว่ากรณิ α ทั่วทั้งสิ่ง คือค่าคงที่ของการลดทอนกำลังงานคลื่นในเนื้อไดอิเล็กตริก (Np/m) ำไปใช้

สำหรับวัสดุไดอิเล็กตริกที่มีความหนา d และมีเนื้อสม่ำเสมอตลอดทั้งเนื้อสาร (homogeneous dielectric) การลคทอนคลื่นทั้งหมดบนระยะทาง d จะหาได้จาก

$$\int_0^d e^{-2\alpha y} dy = \frac{1}{2\alpha} (1 - e^{-2\alpha d}) \quad (2-43)$$

เพราะฉะนั้นจากสมการ (2-41) จะได้

$$P_a = 55.6 \times 10^{-8} (E^2 \cdot \frac{1 - e^{-2\alpha d}}{2\alpha}) f \epsilon''_{eff} \quad (\text{W/m}^3) \quad (2-44)$$

ถ้าวัสดุไดอิเล็กตริกมีความหนาน้อยมาก (slab) มีการลคทอนกำลังงานต่ำแล้ว E จะประมาณได้เป็น E_{loc} นั่นคือ

$$P_a = 55.6 \times 10^{-8} E^2 f \epsilon''_{eff} \quad (\text{W/m}^3) \quad (2-45)$$

ในการแพร่กระจายคลื่นไมโครเวฟ เพื่อให้เกิดความร้อนแก่วัสดุใดๆนั้น เราสามารถแสดงความสัมพันธ์ในรูปสมการการส่งถ่ายความร้อน (Heat transport) ในวัสดุไดอิเล็กตริกในตัวกลางใดๆที่มีเนื้อสม่ำเสมอได้ ดังสมการ (2-46) ซึ่งเราเรียกสมการนี้ว่า สมการส่งถ่ายความร้อน (Transport Equation)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_T \nabla^2 T + \frac{\epsilon_v}{c_p} L_h \frac{\partial M_t}{\partial t} + \frac{P_a}{\rho c_p} \quad (2-46)$$

โดยที่ T คืออุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)

t เป็น เวลา (s)

α_T เป็น ความสามารถในการแพร่กระจายอุณหภูมิ (m^2/s)

ϵ_v เป็นอัตราส่วนของ การถ่ายเทของไอน้ำต่ออัตราส่วนการถ่ายเททั้งหมดของความชื้น (Kg^{-1})

- c_p คือ ความจุความร้อนจำเพาะของสารไดอิเล็กตริก ($KJ/Kg \cdot ^\circ C$)
เมื่อความดันคงที่
- L_h คือ ความร้อนแฝงของการระเหยกลายเป็นไอน้ำ
 $= 2260.98$ (KJ/Kg)
- M_t คือ มวลของน้ำ (Kg)
- P_a คือ ความหนาแน่นกำลังงานที่เกิดขึ้นในวัสดุไดอิเล็กตริก (W/m^3)
- ρ เป็นความหนาแน่นของเนื้อวัสดุไดอิเล็กตริก (Kg/m^3)

ถ้าในตัวกลางไดอิเล็กตริกซึ่งการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นโดยการนำความร้อนเพียงอย่างเดียวและไม่คิดการระเหยกลายเป็นไอน้ำแล้ว (มวลของน้ำคงที่) [3] การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟแก่ตัวกลางไดอิเล็กตริกใดๆ สามารถอธิบายโดยสมการมาตรฐานของการถ่ายเทความร้อนในสภาวะชั่วขณะ (transient หรือ unsteady state) ซึ่งจะรวมเทอมการเกิดความร้อนที่เพิ่มขึ้นภายในเนื้อไดอิเล็กตริก $Q(x, y, z)$ เนื่องจากสนามไฟฟ้าไมโครเวฟ จากการลดรูปสมการ (2-46) การกระจายอุณหภูมิในเนื้อไดอิเล็กตริกจะเขียนความสัมพันธ์ต่างๆ ได้เป็น

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_T \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q(x, y, z) \quad (2-47)$$

โดยที่

$$Q(x, y, z) = \frac{P_a(x, y, z)}{\rho c_p} \quad (2-48)$$

สำหรับในสภาวะอยู่นิ่ง (steady state) ซึ่งไม่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามพิกัด x, y, z แล้ว (มีค่าคงที่) จากสมการ (2-47) และ (2-48) จะทำให้ได้อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิต่อเวลา ก่อนที่จะถึงจุดอิ่มตัว (saturation point) ทางอุณหภูมิเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้าม $\frac{(T - T_0)}{t} = \frac{0.556 \times 10^{-10} E^2 \epsilon_{eff}^2 f}{\rho c_p} \text{ } ^\circ C \cdot s^{-1}$ นำของเอกสารชุดครั้งที่มีการนำไปใช้ (2-49)

หรืออาจเขียนได้เป็น

$$\frac{(T - T_0)}{t} = \frac{\sigma E^2}{\rho c_p} \quad ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1} \quad (2-50)$$

- เมื่อ T_0 เป็นอุณหภูมิเริ่มต้น ($^\circ\text{C}$)
 T เป็นอุณหภูมิสุดท้าย ($^\circ\text{C}$)
 σ เป็นความนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity) ในไดอิเล็กตริก (mhos / m)

จากสมการ (2-47) จะนำไปคำนวณหาการกระจายอุณหภูมิในภายหลัง ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อ 4.3

2.5 สรุป

การเกิดโพลาริไซส์โดยการเรียงโมเมนต์ไดโพลในเนื้อไดอิเล็กตริก การหมุนไดโพล (Dipolar Rotation) รวมทั้งการเกิดการเสียดทานภายในโมเลกุล (Intermolecular Friction), และ ฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) ระหว่างสนามที่ป้อนให้กับวัสดุและการตอบสนองทางไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นตามสนามภายนอก จะทำให้เกิดการสูญเสียในรูปความร้อน ซึ่งเราสามารถแสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อเวลาได้ในรูปของสมการส่งถ่ายความร้อน

บทที่ 3

สายอากาศแพร่กระจายคลื่นแบบสล롯อาร์เรย์บนท่อนำคลื่น

3.1 กล่าวนำ

สายอากาศสล롯อาร์เรย์ได้ถูกนำมาใช้ในระบบเรดาร์ภาคพื้นดินและอากาศยานมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1940 [9] โดยสายอากาศสล롯อาร์เรย์ซึ่งถูกป้อนด้วยท่อนำคลื่นมีทั้งแบบเรโซแนนซ์และแบบคลื่นจร (Travelling wave) เพื่อควบคุมแอมพลิจูดและเฟสของสนามให้เป็นไปตามต้องการ และสามารถจัดโครงสร้างได้ทั้งแบบอาร์เรย์เชิงเส้น (linear array) หรือ ระนาบอาร์เรย์ (planar array) ข้อดีของสายอากาศสล롯นี้คือเมื่อนำมาประกอบเป็นระบบอาร์เรย์ ไม่ต้องการวงจรแมทซ์ (matching) ที่ยุ่งยาก ทำให้สายอากาศสล롯อาร์เรย์มักจะถูกนำมาใช้เป็นเรดิเอเตอร์ (radiator) ในระบบสายอากาศมาโดยตลอด

ในระบบให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ สายอากาศที่มีโครงสร้างเป็นสลอตได้ถูกนำมาใช้เป็นสายอากาศแพร่กระจายคลื่น (applicator) หลายๆ โครงสร้าง [3] สำหรับระบบสายอากาศแพร่กระจายคลื่นแบบท่อนำคลื่นหลายสลอต (Multislot Waveguide Applicator) ได้ถูกนำเสนอ โดย Rueggberg ในปี ค.ศ. 1980 [3,10] เพื่อปรับปรุงการกระจายสนามไฟฟ้าให้สม่ำเสมอยิ่งขึ้น โดยไม่ต้องใช้อุปกรณ์กระจายสนาม (slot / stirrer structure) เพื่อให้เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหลายๆ โหมดในตู้ปีคั้น Rueggberg ได้ทำการเจาะสลอตยาว $\lambda/2$ ที่หน้ากว้างของท่อนำคลื่น WR 340 ปลายปิด มีระยะห่างระหว่างสลอต $3\lambda_g/4$ โดยที่ระยะห่างระหว่างของแต่ละสลอตจากเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อนำคลื่นจะถูกกำหนดด้วยกำลังงานของคลื่นไมโครเวฟที่ปล่อยออกมา สลอตแต่ละคู่จะถูกปรับระยะห่างจากเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อนำคลื่น โดยการทดลองเพื่อให้ปลดปล่อยกำลังงานได้เท่าๆกัน สลอตตัวสุดท้ายจะอยู่ที่ขอบนอกของท่อนำคลื่นเพื่อปล่อยกำลังงานที่เหลือทั้งหมด โครงสร้างของสายอากาศสลอตอาร์เรย์จึงมีลักษณะการทำงานแบบคลื่นจร Rueggberg ได้หาความสัมพันธ์ของระยะห่างระหว่างระยะห่างจากแนวศูนย์กลางของท่อนำคลื่นแต่ละคู่สลอตจากข้อมูลของการทดลอง โดยไม่ได้ทำการคำนวณในเชิงคณิตศาสตร์

สำหรับการวิจัยนี้ได้เลือกใช้สายอากาศสลอตอาร์เรย์บนท่อนำคลื่นแบบเรโซแนนซ์มาเป็นสายอากาศแพร่กระจายคลื่นในระบบให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ เนื่องจากมีโครงสร้างที่ง่ายในการสร้าง การปรับกำลังงานของคลื่นไมโครเวฟที่ปล่อยจากสายอากาศสลอตแต่ละตัวไม่ยุ่งยาก

ผู้วิจัยคาดว่าสามารถปรับปรุงการกระจายสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิได้ด้วยการนำสายอากาศสล็อตอาร์เรย์บนท่อนำคลื่นแต่ละท่อนำคลื่นมาวางเยื้องกัน และได้ทำการคำนวณในเชิงคณิตศาสตร์ทั้งการกระจายสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิ เพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศก่อนที่จะสร้างสายอากาศใช้งานจริง

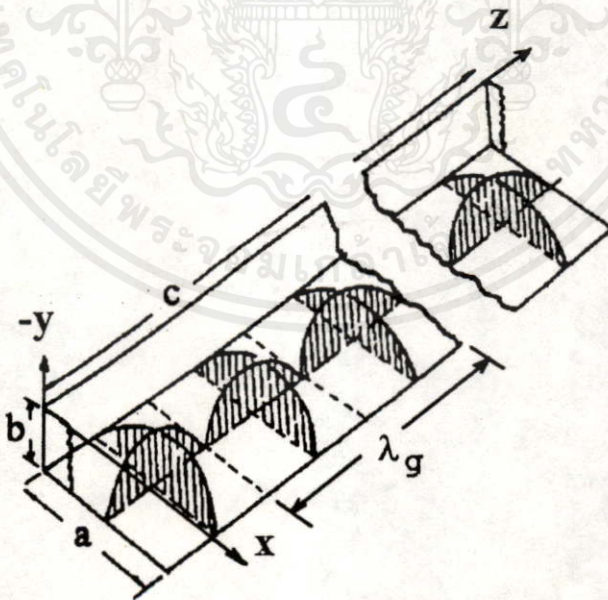
3.2 ทิวทัศน์เรขาคณิตกับการป้อนกำลังคลื่นไมโครเวฟให้กับสายอากาศสล็อตอาร์เรย์บนท่อนำคลื่น

การป้อนกำลังคลื่นไมโครเวฟให้กับสายอากาศชนิดนี้ เราจะดึงกำลังงานจากแหล่งจ่ายกำลังงานไมโครเวฟที่เรียกว่า “หลอดแมกนีตรอน” (Magnetron) (ซึ่งสามารถศึกษาการทำงานได้ในหัวข้อ 5.2) โดยโครงสร้างและลักษณะของสายอากาศของหลอดแมกนีตรอนที่มีลักษณะเป็นโพรบ (Probe) ดังนั้นในการคัปปลิง (Coupling) พลังงานระหว่างหลอดแมกนีตรอนและท่อนำคลื่น จะทำโดยการยื่นโพรบเข้าไปในท่อนำคลื่น โดยทั่วไปแล้วจะต้องคำนึงถึงรูปแบบการกระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เรียกว่า “โหมด” (Mode) ที่ต้องการกระตุ้นให้เกิดขึ้น จากการสร้างสมการคลื่นและการแก้สมการคลื่นของแมกเวลล์ สำหรับท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมนี้จะพบว่าจะมีเฉพาะคลื่น TE (Transverse Electric Waves) และคลื่น TM (Transverse Magnetic Waves) เท่านั้นที่สามารถเกิดขึ้นในท่อนำคลื่นได้ ซึ่งจะระบุอันดับของโหมดในรูป TE_{mn} และ TM_{mn} โดยที่ m และ n เป็นจำนวนการเปลี่ยนแปลงครึ่ง-คลื่น (Half-Wave) ของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในแนวตัดขวางด้านกว้างและด้านแคบของท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมตามลำดับ

ในทางปฏิบัติที่ความถี่หนึ่งๆ มักจะให้คลื่นส่งผ่านได้เพียงโหมดเดียวในท่อนำคลื่น ในการออกแบบท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมจะต้องออกแบบให้มีความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของท่อนำคลื่นและความถี่ที่ใช้งานให้เหมาะสม ขนาดของท่อนำคลื่นที่ไม่เหมาะสมอาจจะไม่มีคลื่นโหมดใดๆส่งผ่านได้เลย ซึ่งเราเรียกว่า “โหมดคัต-ออฟ” (Cut- Off Modes) หรือ คลื่นอาจเกิดการส่งผ่านได้พร้อมกันหลายๆโหมดก็ได้ ซึ่งจะยุ่งยากในการกำหนดตำแหน่งสล็อตบนท่อนำคลื่นสำหรับท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมที่ความถี่หนึ่งๆมักจะนิยมออกแบบขนาดท่อนำคลื่นให้คลื่นส่งผ่านได้เพียงโหมด TE_{10} เพียงอย่างเดียว โดยที่โหมดสูงๆ (Higher modes) จะถูกคัต-ออฟไป ดังนั้นพลังงานของคลื่นไมโครเวฟทั้งหมดจึงส่งผ่านไปโหมด TE_{10} เพื่อป้อนให้กับสายอากาศสล็อต

ได้สูงสุด ซึ่งเราเรียกโหมดนี้ว่า โหมดพื้นฐาน หรือ โหมดโดมิแนนท์ (Fundamental Mode or Dominant Mode)

ในการคับปลิงพลังงานไมโครเวฟจากหลอดแมกนีตรอนเพื่อป้อนให้กับสายอากาศสล็อต จะใช้วงจรเรโซแนนซ์เป็นตัวกักเก็บพลังงาน วงจรเรโซแนนซ์ย่านความถี่ไมโครเวฟนี้จะสร้างขึ้นจากท่อนำคลื่นที่มีปลายปิดทั้งสองด้านด้วยแผ่นตัวนำ ซึ่งเราเรียกว่า “วงจรเรโซแนนซ์แบบคาวิตี” (Cavity Resonator) สำหรับโหมดที่เกิดขึ้นในเรโซแนนซ์คาวิตีนี้จะมีโหมดโดมิแนนท์เป็น TE_{10p} เมื่อ p เป็นจำนวนครึ่ง-คลื่นที่เกิดขึ้นในแนวยาวของคาวิตี คาวิตีแบบเรโซแนนซ์จะทำให้เกิดคลื่นยืน (Standing Wave) เข้าไปมา เนื่องจากการสะท้อนกลับของคลื่นที่ผนังท่อนำคลื่นด้วยรูปร่างที่แน่นอน เมื่อพิจารณาท่อนำคลื่นที่มีความกว้าง a สูง b ยาว c ที่วางตัวตามแนวแกน z ดังแสดงในรูป 3-1 ท่อนำคลื่นนี้จะถูกปิดหัวท้ายด้วยตัวนำที่ตำแหน่ง $z = 0$ และ $z = c$ ที่ตำแหน่งยอดของคลื่นยืนที่มีระยะห่างกันเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นภายในคาวิตีนี้จะเป็นตำแหน่งที่มีสนามไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งจะนำมาพิจารณาประกอบในการเลือกเจาะตำแหน่งสล็อตในภายหลัง



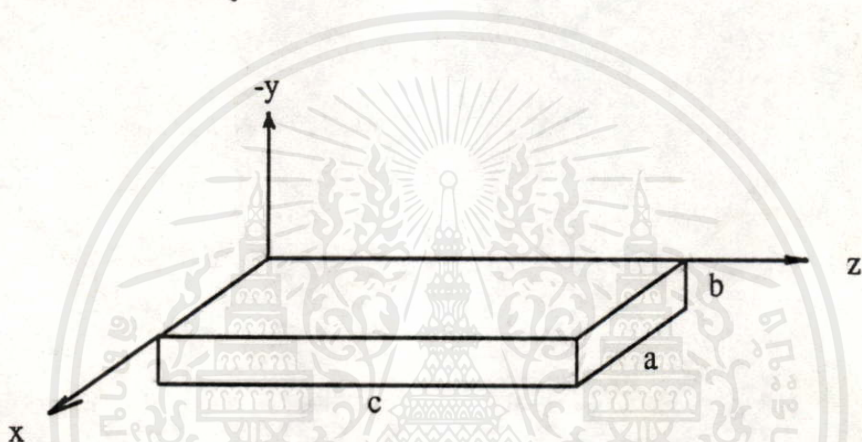
รูป 3-1 โหมด TE_{10p} ในคาวิตีเรโซแนนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่สงวนลิขสิทธิ์เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การคำนวณสนามไฟฟ้าที่แพร่กระจายจากสายอากาศสล็อตอาร์เรย์บนท่อนำคลื่น

[7,8]

เมื่อพิจารณาท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีความกว้าง a และ ความสูง b ที่วางตัวตามแนวแกน z ท่อนำคลื่นนี้ถูกปิดหัวท้ายด้วยตัวนำที่ตำแหน่ง $z = 0$ และ $z = c$ เพื่อทำหน้าที่เป็นควาวิตีเรโซแนนซ์ มีพิกัดและมิติดังรูป 3-2



รูป 3-2 ท่อนำคลื่นปลายปิดที่ทำหน้าที่เป็น
วงจรเรโซแนนซ์แบบควาวิตี

เราสามารถคำนวณหาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในควาวิตีในโหมดโคมิแนนท์ TE_{mnp} จากสมการคลื่นที่ตัวกลางในควาวิตีเป็นฟรีสเปซ ซึ่งมีค่าเพอร์มิตติวิตี ϵ_0 และเพอร์มิบิลิตี μ_0 ที่มีความถี่เชิงมุม ω_0 จะได้ความสัมพันธ์ของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าในควาวิตีคือ

$$\nabla^2 \mathbf{E} + \omega_0^2 \mu_0 \epsilon_0 \mathbf{E} = 0 \quad (3-1)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} + \omega_0^2 \mu_0 \epsilon_0 \mathbf{H} = 0 \quad (3-2)$$

โดยการแก้สมการคลื่น และใช้เงื่อนไขขอบเขตที่ผนังควาวิตี จะทำให้หาค่าสนามไฟฟ้าภายในควาวิตีเรโซแนนซ์รูปร่างสี่เหลี่ยมได้ คือ

$$E_x = \frac{\beta_y}{\epsilon_0} A_{mnp} \cos(\beta_x x) \sin(\beta_y y) \sin(\beta_z z) \quad (3-3)$$

$$E_y = \frac{\beta_x}{\epsilon_0} A_{mnp} \sin(\beta_x x) \cos(\beta_y y) \sin(\beta_z z) \quad (3-4)$$

$$E_z = 0 \quad (3-5)$$

และค่าความเข้มสนามแม่เหล็กภายในควาวิดีจะเป็น

$$H_x = \frac{-j\beta_x \beta_y}{\omega_0 \mu_0 \epsilon_0} A_{mnp} \sin(\beta_x x) \cos(\beta_y y) \cos(\beta_z z) \quad (3-6)$$

$$H_y = \frac{-j\beta_y \beta_z}{\omega_0 \mu_0 \epsilon_0} A_{mnp} \cos(\beta_x x) \sin(\beta_y y) \cos(\beta_z z) \quad (3-7)$$

$$H_z = \frac{jA_{mnp}}{\omega_0 \mu_0 \epsilon_0} (-\beta^2 + k^2) \cos(\beta_x x) \cos(\beta_y y) \sin(\beta_z z) \quad (3-8)$$

เมื่อ A_{mnp} เป็นค่าคงที่ที่ที่โหมด m, n, p

$$\left. \begin{aligned} \beta_x &= \frac{m\pi}{a} & m &= 0, 1, 2, \dots \\ \beta_y &= \frac{n\pi}{b} & m &= 0, 1, 2, \dots \\ \beta_z &= \frac{p\pi}{c} & p &= 1, 2, 3, \dots \end{aligned} \right\} m = n \neq 0 \quad (3-9)$$

ที่โหมด TE_{10p} จาก (3-3), (3-4), และ (3-5) สามารถที่จะจัดรูปได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ $E_x = 0$ ารใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (3-10) การค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_y = A_{10p} \left(\frac{\pi}{\epsilon_0 a} \right) \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{p\pi z}{c}\right) \quad (3-11)$$

$$E_z = 0 \quad (3-12)$$

และจาก (3-6), (3-7) และ (3-8) จะได้

$$H_x = j p A_{10p} \left(\frac{\pi^2}{a c \omega_0 \mu_0 \epsilon_0} \right) \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{p \pi z}{c}\right) \quad (3-13)$$

$$H_y = 0 \quad (3-14)$$

$$H_z = j A_{10p} \left(\frac{\pi^2}{a^2 \omega_0 \mu_0 \epsilon_0} \right) \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{p \pi z}{c}\right) \quad (3-15)$$

จากสมการ (3-10), (3-11) และ (3-12) จะพบว่า มีสนามไฟฟ้าที่มืองค์ประกอบในทิศหนึ่งเท่านั้น และขนาดของสนามไฟฟ้าก็จะมีค่าสูงสุดตรงกึ่งกลางของท่อ นำคลื่น ที่ตำแหน่ง $x = a/2$ เมื่อพิจารณาครั้งนี้จะเห็นได้ว่า โพรบของแหล่งจ่ายกำลังงานแมกนีตรอนที่ยื่นเข้าไปในควาวิตี้ นั้น จะต้องเป็นโพรบที่มีคุณสมบัติแบบไดโพลไฟฟ้า (Electric Dipole) ที่ชี้ในทิศ y และ จะต้องวางที่ตำแหน่ง $x = a/2$ เพื่อให้เกิดการกระตุ้นสนามไฟฟ้าในทิศ y เท่านั้น การวางโพรบในทิศ x และ z จะไม่ทำให้คลื่นส่งผ่านสนามไฟฟ้าในทิศเหล่านั้น

จากสมการ (3-13), (3-14) และ (3-15) สนามแม่เหล็ก \mathbf{H} จะเหนี่ยวนำให้เกิดความหนาแน่นกระแส (Electric Current Density) ที่ผิวบนเป็น

$$\mathbf{J} = \hat{n} \times \mathbf{H}|_{y=0} \quad (3-16)$$

โดยที่ \hat{n} เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับผิวควาวิตี้ด้านบน ขณะที่ความหนาแน่นกระแสแม่เหล็ก (Magnetic Current Density) เนื่องจากสนามไฟฟ้า \mathbf{E} ที่ผิวบนจะเป็น $\hat{n} \times \mathbf{E}|_{y=0}$ ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

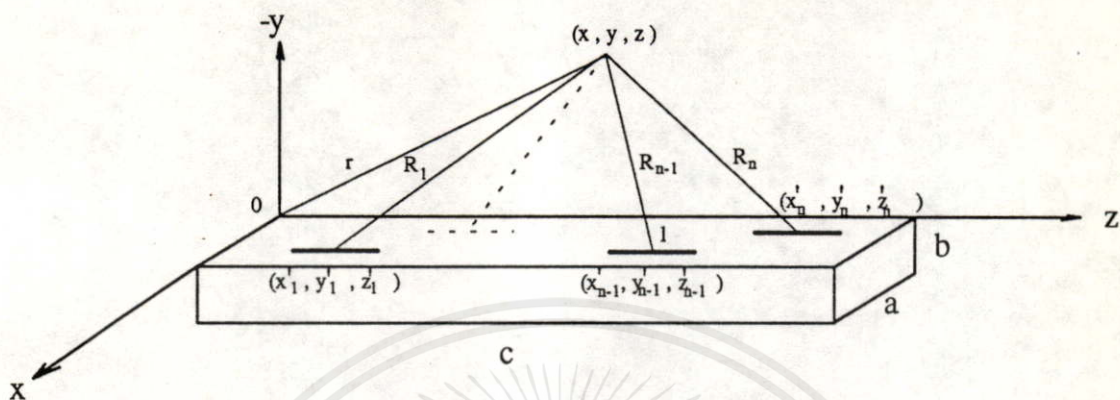
$$\mathbf{M} = -\hat{n} \times \mathbf{E}|_{y=0} = -\hat{a}_y \times \hat{a}_y E_y = 0 \quad (3-17)$$

ทำให้คำนวณได้ว่าที่ผิวของท่อนำคลื่นบนระนาบ $y = 0$ จะมีเฉพาะความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสมมูลที่มีค่า

$$\begin{aligned} \mathbf{J}(x, y, z) = & -jA_{10p} \left(\frac{\pi^2}{\omega_0 \mu_0 \epsilon_0 a^2} \right) \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{p\pi z}{c}\right) \hat{a}_x \\ & - jpA_{10p} \left(\frac{\pi^2}{\omega_0 \mu_0 \epsilon_0 ac} \right) \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{p\pi z}{c}\right) \hat{a}_z \end{aligned} \quad (3-18)$$

หากทำการเจาะช่องสล็อตในตำแหน่งที่เหมาะสมบนผิวของท่อนำคลื่นให้ตัดกับเส้นกระแสสมมูลนี้แล้ว จะมีการแพร่กระจายคลื่นเกิดขึ้น การคำนวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายจากสายอากาศสล็อตทำได้โดยการคำนวณศักดาเวกเตอร์ \mathbf{A} จากความหนาแน่นกระแสสมมูลก่อน จากนั้นจึงคำนวณหาความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากค่าศักดาเวกเตอร์ ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป

เมื่อพิจารณา รูป 3-3 จะพบว่าบนผิวของท่อนำคลื่นที่ระนาบ $y = 0$ จะถูกเจาะเป็นช่องสายอากาศสล็อต n สล็อต แต่ละตัวยาว l โดยที่สายอากาศแต่ละตัวจะมีพิกัดกึ่งกลางอยู่ที่ $(x_1', y_1', z_1'), \dots, (x_{n-1}', y_{n-1}', z_{n-1}'), (x_n', y_n', z_n')$ ตามลำดับ



รูป 3-3 รายละเอียดสายอากาศสล็อตอาร์เรย์จำนวน n สล็อต

จากความสัมพันธ์ของศักดาเวกเตอร์

$$A_n(x, y, z) = \frac{\mu_0}{4\pi} \iiint_V J_n(x'_n, y'_n, z'_n) \frac{e^{-jkR_n}}{R_n} dv'_n \quad (3-19)$$

เมื่อ R_n เป็นระยะทางจากกึ่งกลางสล็อตที่ n ไปยังจุด (x, y, z)

k เป็นค่าคงที่ของการแพร่กระจายคลื่น (Propagation Constant) = 2π/λ₀

ในการเจาะช่องสล็อตนี้เราจะกำหนดให้มีความกว้าง x น้อยมากๆ เพื่อที่จะประมาณว่า กระแสมีการเปลี่ยนแปลงตามความยาวเพียงอย่างเดียว ทำให้ศักดาเวกเตอร์ที่ตำแหน่งโคออดิเนต (x, y, z) ถูกลดรูปเป็น

$$A_n(x, y, z) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{z'_n - \frac{l}{2}}^{z'_n + \frac{l}{2}} J_n(x'_n, y'_n, z'_n) \frac{e^{-jkR_n}}{R_n} dz'_n \quad (3-20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในภาควิชาการศึกษาระดับปริญญาโทและปริญญาเอกเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ดังนั้นสนามแม่เหล็กเนื่องจากศักดาเวกเตอร์ A_n จะเป็น
 ไม่ว่าจะถี่ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 \mathbf{H}_n(x, y, z) &= \frac{1}{\mu_0} \nabla \times \mathbf{A}_n(x, y, z) \\
 &= \frac{1}{4\pi} \nabla \times \int_{z'_n - \frac{l}{2}}^{z'_n + \frac{l}{2}} \mathbf{J}_n(x'_n, y'_n, z'_n) \frac{e^{-jkR_n}}{R_n} dz'_n \quad (3-21)
 \end{aligned}$$

เนื่องจากการเคิร์ล (Curl) และการอินทิเกรตกระทำบนตัวแปรต่างกัน เป็นอิสระซึ่งกันและกัน โดยเคิร์ลกระทำบนฟังก์ชัน x, y, z แต่การอินทิเกรตกระทำบนฟังก์ชัน x', y', z' จึงสามารถสลับการเคิร์ลและการอินทิเกรตได้

$$\mathbf{H}_n(x, y, z) = \frac{1}{4\pi} \int_{z'_n - \frac{l}{2}}^{z'_n + \frac{l}{2}} \nabla \times [\mathbf{J}_n(x'_n, y'_n, z'_n)] \frac{e^{-jkR_n}}{R_n} dz'_n \quad (3-22)$$

จากคุณสมบัติของเวกเตอร์ที่ว่า

$$\nabla \times (g\mathbf{F}) = (\nabla g) \times \mathbf{F} + g(\nabla \times \mathbf{F}) \quad (3-23)$$

ดังนั้นจากสมการ (3-22) และ (3-23) จะได้

$$\begin{aligned}
 \nabla \times \left[\frac{e^{-jkR}}{R} \cdot \mathbf{J}(x', y', z') \right] &= \nabla \left(\frac{e^{-jkR}}{R} \right) \times \mathbf{J}(x', y', z') \\
 &\quad + \frac{e^{-jkR}}{R} \nabla \times \mathbf{J}(x', y', z') \quad (3-24)
 \end{aligned}$$

เนื่องจากพิจารณาที่ตัวแปรของฟังก์ชันต่างกันทำให้พจน์สุดท้ายขวามือเป็นศูนย์จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}\nabla \times \left[\frac{e^{-jkR}}{R} \cdot \mathbf{J}(x', y', z') \right] &= \nabla \left(\frac{e^{-jkR}}{R} \right) \times \mathbf{J}(x', y', z') \\ &= \left[-\hat{R} \left(\frac{1+jkR}{R^2} \right) \frac{e^{-jkR}}{R} \right] \times \mathbf{J}(x', y', z')\end{aligned}\quad (3-25)$$

โดยที่ \hat{R} เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของเวกเตอร์ระยะทาง R
ดังนั้น

$$\mathbf{H}_n(x, y, z) = -\frac{1}{4\pi} \int_{z_n - \frac{l}{2}}^{z_n + \frac{l}{2}} (\hat{R} \times \mathbf{J}_n(x'_n, y'_n, z'_n)) \left(\frac{1+jkR_n}{R_n^2} \right) e^{-jkR_n} dz'_n \quad (3-26)$$

ซึ่งเราสามารถหาสนามไฟฟ้า $\mathbf{E}(x, y, z)$ เนื่องจากศักดาเวกเตอร์ $\mathbf{A}(x, y, z)$ ได้จาก
สมการ

$$\mathbf{E}(x, y, z) = \frac{1}{j\omega_0 \epsilon_0} \nabla \times \mathbf{H}(x, y, z) \quad (3-27)$$

เพราะฉะนั้นจะได้

$$\begin{aligned}E_{x_n}(x, y, z) &= \frac{-j}{4\pi\epsilon_0\omega_0} \int_{z_n - \frac{l}{2}}^{z_n + \frac{l}{2}} \{G_1 J_x + (x - x'_n)G_2 \\ &\quad \times [(x - x'_n)J_x + (z - z'_n)J_z]\} e^{-jkR_n} dz'_n\end{aligned}\quad (3-28)$$

$$E_{y_n}(x, y, z) = \frac{-j}{4\pi\epsilon_0\omega_0} \int_{z_n - \frac{l}{2}}^{z_n + \frac{l}{2}} \{(y - y')G_2 \\ \times [(x - x'_n)J_x + (z - z'_n)J_z]\} e^{-jkR_n} dz'_n \quad (3-29)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเผยแพร่และต้องขออนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_{z_n}(x, y, z) = \frac{-j}{4\pi\epsilon_0\omega_0} \int_{z-\frac{l}{2}}^{z+\frac{l}{2}} \{G_1 J_z + (z-z'_n)G_2$$

$$\times [(x-x'_n)J_x + (z-z'_n)J_z]\} e^{-jkR_n} dz'_n \quad (3-30)$$

เมื่อ

$$G_1 = \frac{-1 - jkR_n + k^2 R_n^2}{R_n^3} \quad (3-31)$$

$$G_2 = \frac{3 + j3kR_n - k^2 R_n^2}{R_n^5} \quad (3-32)$$

ในที่นี้ J_x , J_y และ J_z เป็นความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสมมูลย์ ณ ตำแหน่งของสายอากาศสล็อตตัวที่ n ที่คำนวณได้จากสมการ (3-18)

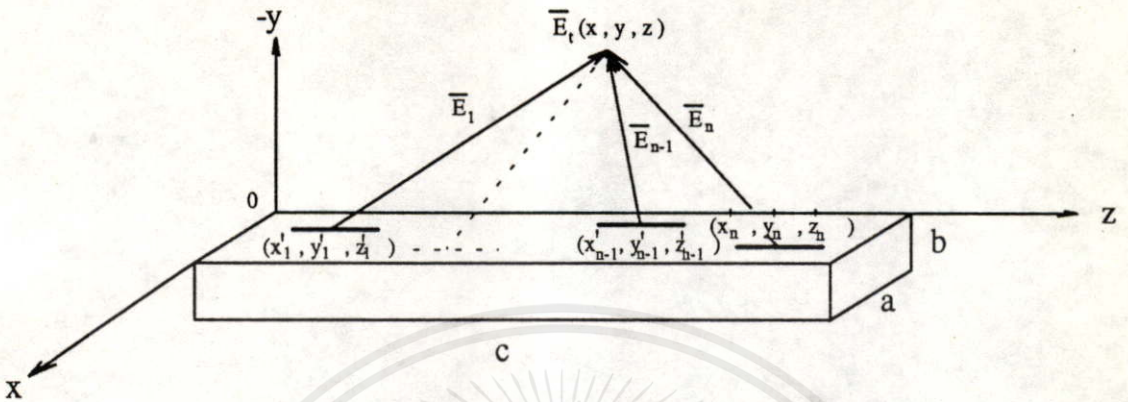
เมื่อต้องการคำนวณหาสนามไฟฟ้ารวมที่เกิดจากสายอากาศสล็อตทุกสล็อต n สล็อต ณ ตำแหน่ง (x, y, z) จะทำได้โดยรวมกันแบบเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าจากสายอากาศสล็อตแต่ละสล็อต (พิจารณาได้จากรูป 3-4) ซึ่งเขียนได้เป็น

$$E_i(x, y, z) = E_1(x, y, z) + E_2(x, y, z) + \dots + E_n(x, y, z)$$

$$= \sum_{i=1}^n E_i(x, y, z) \quad (3-33)$$

เมื่อ $E_i (i = 1, 2, 3, \dots, n)$ เป็นความเข้มสนามไฟฟ้าจากสายอากาศตัวที่ i

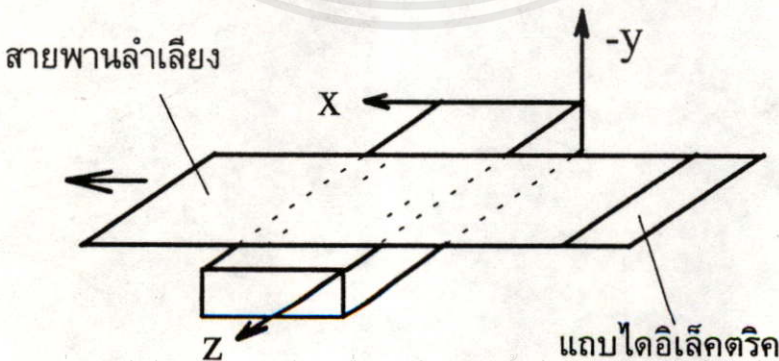
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 3-4 การรวมทางเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่ง (x, y, z) ใดๆ ในสเปซ

3.4 การคำนวณการกระจายอุณหภูมิบนไดโอดีคตริค [11,12,13]

การถ่ายเทความร้อนที่ได้ศึกษาในกระบวนการถ่ายเทความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟนั้น เราจะทำการศึกษาในรูปของการกระจายอุณหภูมิบนวัสดุไดโอดีคตริคที่มีการสูญเสีย โดยสร้างแบบจำลองการวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิได้ดังแสดงในรูป 3-5 โดยสมมติว่าวัสดุมีความสม่ำเสมอตลอดเนื้อสารเป็นแผ่นบางๆ ที่มีความหนาน้อยมาก (slab) และมีความกว้างน้อยมากๆ ($\Delta x \approx 0$) เมื่อเทียบกับความยาว (strip length) วางอยู่บนสายพานลำเลียงตามแนวยาวของสายอากาศ โดยให้เคลื่อนที่ผ่านสายอากาศสี่ลวดอาร์เรย์หนึ่งตัวที่มี 3 สลือด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นานต่อไปให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป 3-5 โมเดลในการวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิ

สมมติว่ายังไม่มีการระเหยกลายเป็นไอน้ำ (มวลของน้ำคงที่) เนื่องจากต้องการดูการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิก่อนที่จะถึงอุณหภูมิมืดตัว สมการการส่งถ่ายความร้อน (2-46) จึงสามารถลดรูปลงเป็นสมการหนึ่งมิติต่างๆ ที่มีความสัมพันธ์กับค่ากำลังสองของสนามไฟฟ้า นั่นคือ

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_T \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\sigma E^2}{\rho c_p} \quad (3-34)$$

สมการ (3-34) เป็นสมการนำความร้อนชั่วขณะในหนึ่งมิติ การแก้สมการสามารถหาผลเฉลยง่ายๆ โดยการวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical Method) ซึ่งจะหาคำตอบเป็นอุณหภูมิที่เป็นฟังก์ชันกับระยะ z และเวลาเป็นบางจุดในตัวกลางไดอิเล็กตริก ในที่นี้จะใช้วิธีวิเคราะห์เชิงตัวเลขโดยใช้วิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (Finite Difference Method) โดยการเปลี่ยนสมการการนำความร้อนพาราโบลาให้อยู่ในรูปไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (Finite-Difference Forms) ซึ่งจำเป็นจะต้องทราบเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) และ เงื่อนไขเริ่มต้น (Initial Conditions)

จากสมการ (3-34) สามารถเขียนอยู่ในรูป

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\alpha_T \partial^2 T(z,t)}{\partial z^2} + Q(z) \quad , \quad 0 \leq z \leq S \quad (3-35)$$

โดยที่ S เป็นความยาวของแถบสแลบ (Slab)

เมื่อกำหนดเงื่อนไขขอบเขตตัวนำและเงื่อนไขเริ่มต้น คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

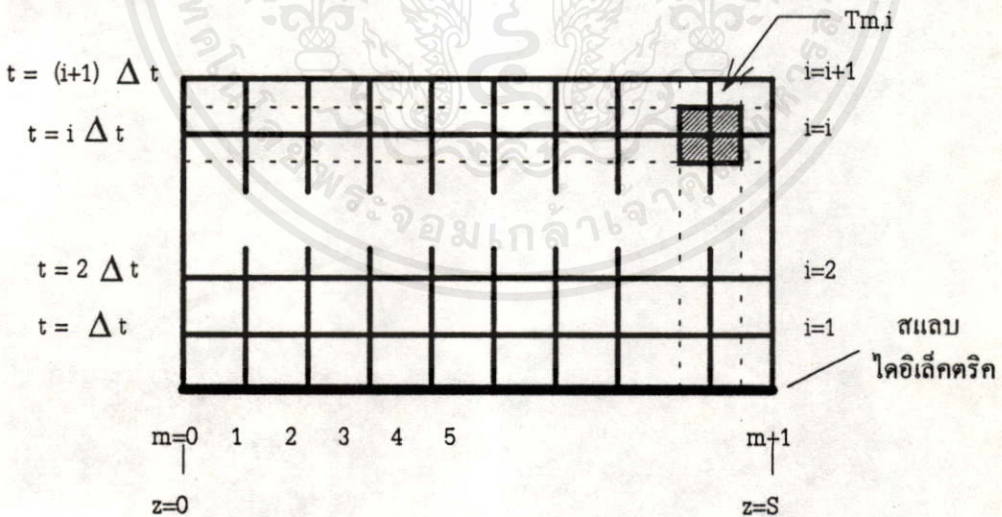
$$T(0,t) = T_L \quad , \quad T(S,t) = T_R \quad (\text{เงื่อนไขขอบเขต}) \quad (3-36)$$

$$T(z, 0) = T_{ini}(z) \quad (\text{เงื่อนไขเริ่มต้น}) \quad (3-37)$$

เราจำเป็นต้องเลือกจุดที่ต้องการรู้อุณหภูมิโดยการแบ่งบริเวณตัวกลางโคอีเล็กทริกที่ต้องการให้ความร้อนออกเป็นตารางสี่เหลี่ยมเล็กๆ โดยลากเส้นให้ขนานกับแกนตั้งซึ่งเป็นแกนเวลา (t) และแกนนอนก็คือแกน z จุดที่เส้นตัดกันเหล่านี้จะเป็นจุดที่ต้องการรู้อุณหภูมิ ถ้า z และ t น้อยๆ ผลเฉลยของอุณหภูมิก็จะละเอียดมากขึ้น

ในการคำนวณจะต้องมีการตั้งชื่อจุดต่างๆตามพิกัด z, t เช่น ที่ $T_{m,i-1}$, หรือ $T_{m,i+1}$ เป็นต้น แม้ว่าจะมีการระบุถึงอุณหภูมิของจุดเหล่านี้ แต่ในความเป็นจริงอุณหภูมิที่จะระบุจะเป็นอุณหภูมิโดยเฉลี่ยของบริเวณ เช่น ที่ $T_{m,i}$ หรือ T_m^i อุณหภูมิเฉลี่ยของบริเวณสี่เหลี่ยมในรูป 3-6 นั้นเอง รูป 3-6 แสดงระบบกริด (Grid) 1 มิติ สำหรับสมการ (3-34)

เมื่อ m แทนตัวเลขจำนวนเต็มในแกน z และ i แทนเลขจำนวนเต็มของแกนเวลา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูป 3-6 ระบบกริด 1 มิติ ในการคำนวณการกระจายอุณหภูมิตนสแลบโคอีเล็กทริก

การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับระยะทาง (Temperature Gradient) จะหาได้จากผลต่างของอุณหภูมิที่จุดสองจุดหารด้วยระยะห่างระหว่างจุดสองจุดของการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับระยะทางที่ได้ จะเป็นค่าเฉลี่ยระหว่างจุดสองจุดนั้น

สมการที่ได้สามารถเขียนในรูปดิฟเฟอเรนซ์ คือ

$$\frac{dT(z)}{dz} = \alpha_T \left\{ \frac{dT(z)}{dz} \Big|_{m+\frac{1}{2}} - \frac{dT(z)}{dz} \Big|_{m-\frac{1}{2}} \right\} + Q_m \quad (3-38)$$

$$\frac{T_m^{i+1} - T_m^i}{\Delta t} = \alpha_T \left\{ \left(\frac{T_{m+1}^i - T_m^i}{\Delta z} \right) - \left(\frac{T_m^i - T_{m-1}^i}{\Delta z} \right) \right\} + Q_m \quad (3-39)$$

ซึ่งจะได้

$$\frac{T_m^{i+1} - T_m^i}{\Delta t} = \alpha_T \left\{ \frac{T_{m-1}^i + T_{m+1}^i - 2T_m^i}{(\Delta z)^2} \right\} + Q_m \quad (3-40)$$

สมการ (3-40) นี้เราจะเรียกว่า วิธีของเอกซ์พลิซิท (Explicit Method) หรือฟอร์เวิร์ด ออเลอร์ (Forward Euler) [11] สมการ (3-40) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_m^{i+1} = T_m^i + \gamma \{T_{m-1}^i - 2T_m^i + T_{m+1}^i\} + \Delta t Q_m \quad (3-41)$$

เมื่อ
$$\gamma = \frac{\alpha_T \Delta t}{\Delta z^2} \quad (3-42)$$

โดย
$$\Delta t \leq \frac{0.5 \Delta z^2}{\alpha_T} \quad \text{และ} \quad \gamma \leq 0.5 \quad (3-43)$$

จากสมการ (3-41), (3-42) และเงื่อนไข (3-43) เราสามารถเขียนโปรแกรมเพื่อหาอุณหภูมิ T ที่เวลาและตำแหน่ง z ใดๆ ในระบบกริดได้ทุกจุดอุณหภูมิโดยไม่ยากนัก วิธีฟอร์เวิร์ดคอเลออร์ เป็นวิธีที่เขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้ง่าย แต่มีความผิดพลาดสูง และ Δt ต้องไม่เกินค่าที่กำหนด มิฉะนั้นจะทำให้ข้อมูลเกิดการออสซิลเลต (Oscillation) ดังนั้นเราสามารถปรับปรุงสมการ (3-40) ใหม่ ได้เป็น

$$\frac{T_m^{i+1} - T_m^i}{\Delta t} = \alpha_T \left[\frac{T_{m-1}^{i+1} - 2T_m^{i+1} + T_{m+1}^{i+1}}{(\Delta z)^2} \right] + Q_m \quad (3-44)$$

หรือ

$$-\gamma T_{m-1}^{i+1} + (1 + 2\gamma) T_m^{i+1} - \gamma T_{m+1}^{i+1} = T_m^i + \Delta t Q_m \quad (3-45)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น มิฉะนั้นโปรดแจ้งให้ทราบ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการ (3-44) เราจะเรียกว่า วิธีอิมพลิต (Implicit Method) หรือ แบคเวิร์คออเลอร์ (Backward Euler) สมการ (3-45) สามารถนำมาเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อหาอุณหภูมิที่จุดต่างๆได้ โดยทุกสมการของจุดกริดทั้งหมดจะต้องหาผลเฉลยพร้อมๆกัน (Simultaneously) การเขียนโปรแกรมจะยุ่งยากขึ้น วิธีนี้มีข้อเสีย คือ ผลเฉลยยังไม่ถูกต้องมากนัก

วิธีสุดท้ายซึ่งปรับปรุงมาจากทั้ง 2 วิธี ข้างบน โดยการหาค่าเฉลี่ยของทั้งสองวิธี ที่ตำแหน่งเวลา n และ $n+1$ วิธีนี้เรียกว่า วิธีของแครงค์-นิโคลสัน (Crank-Nicolson Methods) สมการ (3-49) และ (3-45) สามารถปรับปรุงใหม่ได้เป็นสมการ (3-46) และ (3-47) ตามลำดับ

$$\frac{T_m^{i+1} - T_m^i}{\Delta t} = \frac{\alpha_T}{2(\Delta z)^2} \left\{ (T_{m-1}^{i+1} - 2T_m^{i+1} + T_{m+1}^{i+1}) + (T_{m-1}^i - 2T_m^i + T_{m+1}^i) \right\} + Q_m \quad (3-46)$$

$$-\frac{\gamma}{2} T_{m-1}^{i+1} + (1+\gamma) T_m^{i+1} - \frac{\gamma}{2} T_{m+1}^{i+1} = T_m^i + \frac{\gamma}{2} \left\{ (T_{m-1}^i - 2T_m^i + T_{m+1}^i) \right\} + \Delta t Q_m \quad (3-47)$$

สมการ (3-47) เป็นวิธีที่ให้ค่าถูกต้องมากกว่าวิธีแบคเวิร์คออเลอร์และวิธีฟอร์เวิร์คออเลอร์ ในขณะที่โปรแกรมจะยุ่งยากกว่า และทุกสมการของจุดกริดจะต้องหาผลเฉลยพร้อมๆกัน เช่นกัน

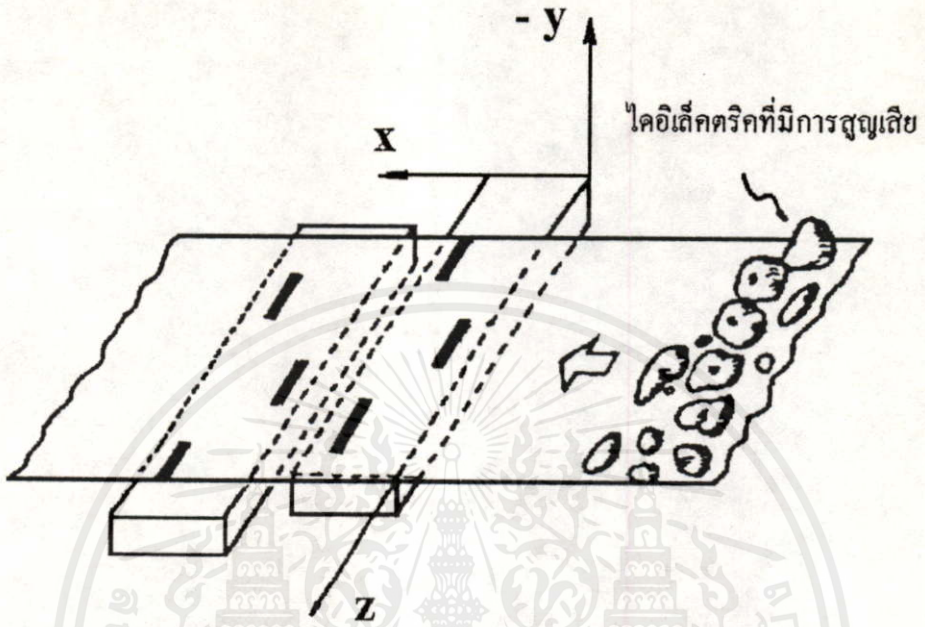
สำหรับการคำนวณการกระจายของอุณหภูมิในสารไดอิเล็กตริกเนื่องจากสนามไฟฟ้า โดยการแก้สมการไฮเปอร์โบลิก 1 มิติ เราจะใช้วิธีการแก้สมการเชิงตัวเลขของแครงค์-นิโคลสัน ซึ่งเป็นสมการ (3-47) ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นานญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การนำสายอากาศสล็อตอาร์เรย์บนท่อนำคลื่นมาวางเยื้องกันหลายท่อนำคลื่น

จากสมการ (3-46) และ (3-47) จะเห็นว่าอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิจะมีค่าแปรผันกับกำลังสองของสนามไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่สาร ไดอิเล็กตริกนั้นๆ ถ้าเราทราบการกระจายของสนามไฟฟ้า เราก็สามารถสังเคราะห์ลักษณะของการกระจายของอุณหภูมิได้เช่นกัน เนื่องจากเราต้องการสังเคราะห์การกระจายอุณหภูมิในสาร ไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสียที่เคลื่อนที่ผ่านสายอากาศสล็อตอาร์เรย์ที่วางเยื้องกันดังแสดงในรูป 3-7 ดังนั้นในการวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิจะสามารถทำได้โดยนำกำลังสองของสนามไฟฟ้าดังกล่าวมาพิจารณา การนำสายอากาศสล็อตอาร์เรย์มาวางเยื้องกันเกิดจากความคิดพื้นฐาน โดยการสมมติว่าระหว่างที่วัสดุเคลื่อนที่ผ่านมาอยู่ตรงสายอากาศสล็อตแต่ละตัววัสดุจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น แต่เมื่อเคลื่อนที่ผ่านพ้นรูสล็อตไปแล้วอุณหภูมินี้จะยังคงมีค่าที่คงที่ บริเวณอื่นที่ไม่ผ่านสนามไฟฟ้าเนื่องจากท่อนำคลื่นตัวแรกก็จะผ่านสนามไฟฟ้าจากสล็อตบนท่อนำคลื่นตัวถัดมา การสมมติเช่นนี้ทำให้สามารถคิดได้ว่าการกระจายอุณหภูมิตลอดหน้าตัดของสายพานจะมีค่าเสมือนว่ามีสล็อตมาเรียงต่อกันดังแสดงในรูป 3-8 คาดว่าการนำสายอากาศสล็อตอาร์เรย์สล็อตบนท่อนำคลื่นมาวางเยื้องกันหลายท่อนำคลื่น จะสามารถทำให้วัสดุที่ต้องการให้ความร้อนผ่านสนามไฟฟ้าได้เท่าๆกันทุกบริเวณตลอดแนวหน้าตัดสายพาน ดังนั้นการกระจายอุณหภูมิตลอดชิ้นงานจะมีการกระจายที่เท่ากันด้วย

นอกจากนั้นเทคนิคนี้ยังเหมาะสำหรับระบบการให้ความร้อนที่ต้องทำเป็นโมดูล (module) เนื่องจากไม่สามารถใช้แมกนีตรอนที่มีกำลังงานสูงๆได้ การนำท่อนำคลื่นมาคัปปลิ้งกับแมกนีตรอนหนึ่งหลอดต่อหนึ่งท่อนำคลื่นแล้วนำมาวางเยื้องกันหลายๆท่อนำคลื่น จะสามารถกระจายกำลังงานได้มากตามที่ต้องการได้ นอกจากนี้การทำเป็นโมดูลยังซ่อมบำรุงได้ง่ายกว่าระบบสามารถถอดเปลี่ยนได้ง่ายกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 3-7 สายพานลำเลียงนำสาร ไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสีย
เคลื่อนที่ผ่านสายอากาศสี่ออร์เรย์



หน้าตัดของสายพานลำเลียง

รูป 3-8 การคำนวณการกระจายอุณหภูมิโดยคิดจาก E^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ที่เก็จากสนามของสายอากาศสี่ออร์เรย์ชุดที่ 1
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอก
--- E^2 ที่เกิดจากสายอากาศสี่ออร์เรย์ชุดที่ 1
... E^2 ที่เกิดจากสายอากาศสี่ออร์เรย์ชุดที่ 2

ดังนั้นในการคิดการกระจายอุณหภูมิตลอดแนวโคออร์ดิเนต เมื่อให้เคลื่อนที่ผ่านสายอากาศ สล็อตอาร์เรย์บนท่อนำคลื่นแต่ละท่อนำคลื่น โดยการแก้สมการเชิงตัวเลขโดยวิธีของแครงค์-นิโคลสันบนสแลบไดอิเล็กตริก การเคลื่อนที่ของสแลบผ่านสล็อตในช่วงเวลาหนึ่งจะทำให้ อุณหภูมิตลอดแนวสูงขึ้น อุณหภูมิที่คำนวณได้นี้จะเป็นอุณหภูมิเริ่มต้นในการคำนวณเมื่อสแลบ เคลื่อนที่ต่อไป เมื่อคำนวณเป็นขั้นๆเช่นนี้ไปเรื่อยๆจนสแลบผ่านสายอากาศสล็อตบนท่อนำคลื่น ทั้งหมด ก็จะสามารถหาการกระจายอุณหภูมิตลอดแนวโคออร์ดิเนตท้ายสุดได้ ผลการคำนวณเหล่านี้จะแสดงในบทที่ 4

3.6 สรุป

บทนี้ได้กล่าวถึงสายอากาศแพร่กระจายคลื่นแบบสล็อตอาร์เรย์บนท่อนำคลื่นเรโซแนนซ์ และการกระจายอุณหภูมิตลอดแนวโคออร์ดิเนต เนื่องจากสนามไฟฟ้าที่แพร่กระจายจากสายอากาศ สล็อต ซึ่งหาได้จากการหาผลเฉลยของสมการส่งถ่ายความร้อนเชิงตัวเลขด้วยวิธีของแครงค์-นิโคลสัน โดยการสมมติให้ไดอิเล็กตริกเป็นสแลบวางตามแนวหน้าตัดของสายพานลำเลียงแล้วให้ เคลื่อนที่ผ่านสายอากาศสล็อตอาร์เรย์บนท่อนำคลื่นหลายท่อนำคลื่นที่นำมาวางเรียงกันเป็นโมดูล คาดว่าการนำสายอากาศสล็อตมาวางเรียงกันจะทำให้การกระจายสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิที่คิดว่าการ ใช้สายอากาศสล็อตอาร์เรย์บนท่อนำคลื่นเพียงท่อนำคลื่นเดียว นอกจากนั้นลักษณะสายอากาศ สล็อตบนท่อนำคลื่นที่เป็นโมดูลจะซ่อมบำรุงรักษาได้ง่ายกว่า

บทที่ 4

ผลการคำนวณ และผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและอุณหภูมิ

4.1 กล่าวนำ

ในการวิจัยแรกเริ่มในห้องวิจัยมีตู้ปิดขนาด $13 \times 37.5 \times 73.5$ ลูกบาศก์เซ็นติเมตร และได้สนใจที่จะศึกษาสายอากาศสี่ออร์เรย์บนท่อนำคลื่นที่มี 4 สล็อต [13] เนื่องจากสายอากาศสี่ออร์เรย์บนท่อนำคลื่นที่มี 4 สล็อตเมื่อนำมาวางเรียงกันในตู้ปิดจะสามารถนำมาวางเรียงกันได้เพียง 2 ท่อนำคลื่น ต่อมาพบว่าถ้าลดจำนวนสายอากาศสี่ออร์เรย์ลงเหลือ 3 สล็อตบนท่อนำคลื่นจะสามารถนำมาวางเรียงกันได้ถึง 3 ท่อนำคลื่น ในภายหลังจึงได้มาวิเคราะห์การกระจายสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิตามสายอากาศสี่ออร์เรย์บนท่อนำคลื่นที่มี 3 สล็อตเพื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่สร้างขึ้น [14,15,16] ดังนั้นในการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าในบทนี้จะมีทั้งสนามไฟฟ้าที่เกิดจากสายอากาศสี่ออร์เรย์บนท่อนำคลื่นที่มีทั้งสล็อต 3 และ 4 สล็อต แต่ในการวิเคราะห์อุณหภูมิและการสร้างแบบจำลองขึ้นมาทดสอบจะศึกษาเฉพาะสายอากาศสี่ออร์เรย์บนท่อนำคลื่นที่มี 3 สล็อตเท่านั้น

อย่างไรก็ตามสายอากาศสี่ออร์เรย์บนท่อนำคลื่นที่มี 3 สล็อตก็จะมีรูปแบบการกระจายคลื่นที่คล้ายๆกับสายอากาศสี่ออร์เรย์บนท่อนำคลื่นที่มี 4 สล็อต เมื่อขนาดพื้นที่หน้าตัดของท่อนำคลื่นคงเดิม เพียงแต่จำนวนโหนด (lobe) จะลดลง 1 โหนด และระยะความกว้างของแนวหน้าตัดสายพานจะลดลงเท่านั้น

4.2 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าจากสายอากาศสี่ออร์เรย์บนท่อนำคลื่น

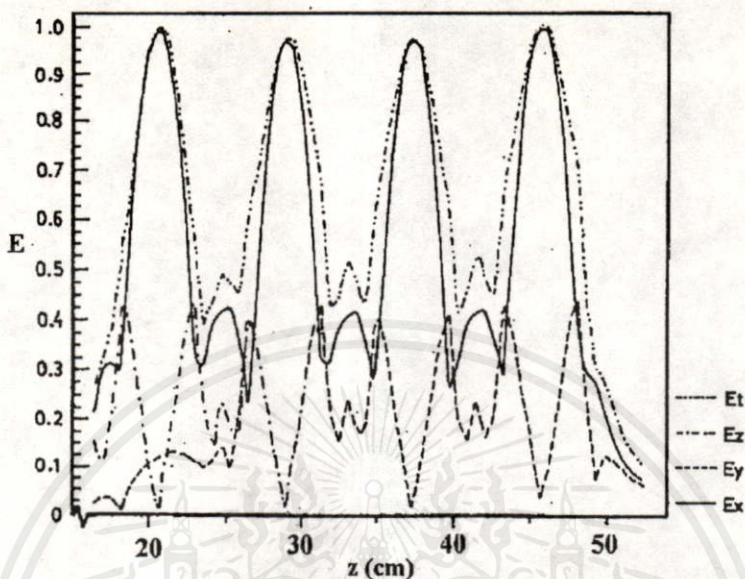
4.2.1 สนามไฟฟ้าจากสายอากาศสี่ออร์เรย์ 4 สล็อตบนท่อนำคลื่น [13]

ในการวิเคราะห์สนามในหัวข้อนี้ จะกำหนดให้ใช้สายอากาศสี่ตัวจะอยู่บนผิวของท่อนำคลื่นบนระนาบ $y = 0$ โดยที่สายอากาศสี่แต่ละตัวอยู่ที่พิกัด (x_n', y_n', z_n') เมื่อ $n = 1, 2, 3, 4$ กำหนดให้ท่อนำคลื่นมีขนาดความกว้าง a เท่ากับ 9 เซ็นติเมตร ความสูง b เท่ากับ 3 เซ็นติเมตร เลือกใช้งานที่ความถี่เท่ากับ 2,450 MHz การคำนวณจะกระทำในตำแหน่งต่าง ๆ ที่พิกัด (x, y, z) บนระนาบ $y = -1$ มิลลิเมตร (การที่เลือกระยะ 1 มิลลิเมตรจากระนาบปากสล็อต เนื่องจากในช่วงวิจัยค้นๆ ได้ตั้งวัตถุประสงค์ที่จะอบผ้าที่มีลักษณะเป็นแผ่นบางๆ (Web) หรือ อบวัสดุที่มีลักษณะ

เป็นผ่งเช่น แป้งหรือนมผงที่มีความชื้นสูง จึงต้องให้วัสดุเหล่านี้ยูโกลิ์ระนาบปากสลีตมากที่สุด แล้วเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่างๆ (ดูพิคัดในรูป 3-3) ได้แก่ ตำแหน่งของสายอากาศสลีตแต่ละตัวและความยาวของสายอากาศ

4.2.1-1 การพิจารณาส่วนประกอบส่วนต่าง ๆ ของสนามไฟฟ้า

ในการพิจารณาส่วนประกอบสนามส่วนต่างๆ ได้ทำการคำนวณจากสายอากาศที่มีสายอากาศ สลีสอดแต่ละตัว ยาว 6.12 เซ็นติเมตร จุดกึ่งกลางสลีสอดอยู่ที่พิคัด (3.3, 0, 20.7), (5.7, 0, 29.1), (3.3, 0, 37.5) และ (5.7, 0, 45.9) เซ็นติเมตรตามลำดับ ท่อนำคลื่นมีความยาว 50.12 เซ็นติเมตร การที่เลือกพิคัดนี้ก็เป็นเพราะเป็นเงื่อนไขของการป้อนสายอากาศอาร์เรย์ให้มีการป้อนแต่ละสลีสอดด้วยขนาดที่เท่ากันและมีการแมตช์กับแหล่งจ่ายกำลังงานพอดี (วิธีการหาดำแหน่งสลีสอดได้จากบทที่ 5 ผลจากการคำนวณสนามตามแนวแกน x เท่ากับ 4.5 เซ็นติเมตร ที่เป็นแนวกึ่งกลางของท่อนำคลื่นดังแสดงในรูป 4-1 จะพบว่าส่วนประกอบของสนามที่ตัดขวางรูสลีสอดคือ E_x เป็นส่วนที่มีขนาดสูงที่สุดเมื่อเทียบกับส่วนที่ค้งฉากและส่วนที่อยู่ตามยาวของสลีสอด คือ E_y และ E_z ตามลำดับ นอกจากนี้แสดงให้เห็นว่า บริเวณที่สนามมีขนาดสูงที่สุดจะเกิดขึ้นตรงกับบริเวณที่เป็นกึ่งกลางของสายอากาศสลีสอดอากาศสลีสอดแต่ละตัว (หมายเหตุ : รูปกราฟที่แสดงเป็นกราฟนอร์มอลไลซ์ให้ค่าสูงสุดเท่ากับหนึ่ง โดยที่มีค่านอร์มอลไลซ์แฟกเตอร์มีค่าเท่ากับ $45.88 \times 10^{10} \times A_{106}$)



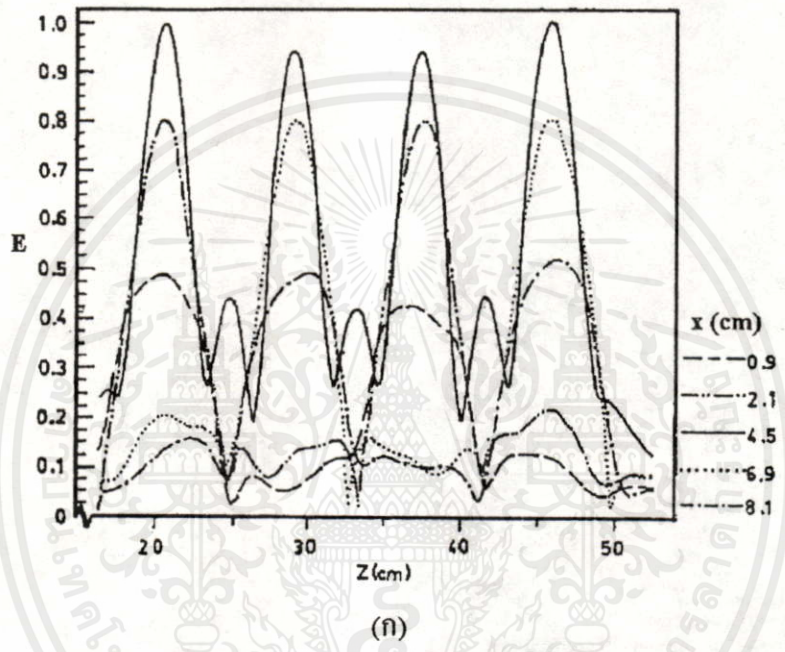
รูป 4-1 การเปรียบเทียบขนาดของส่วนประกอบต่าง ๆ ของสนามไฟฟ้า
เมื่อคำนวณตามแนวกึ่งกลางของท่อนำคลื่น

4.2.1-2 การเปรียบเทียบสนามไฟฟ้าเมื่อตำแหน่งของสายอากาศสลับเปลี่ยน

แปลงตามแนวแกน x

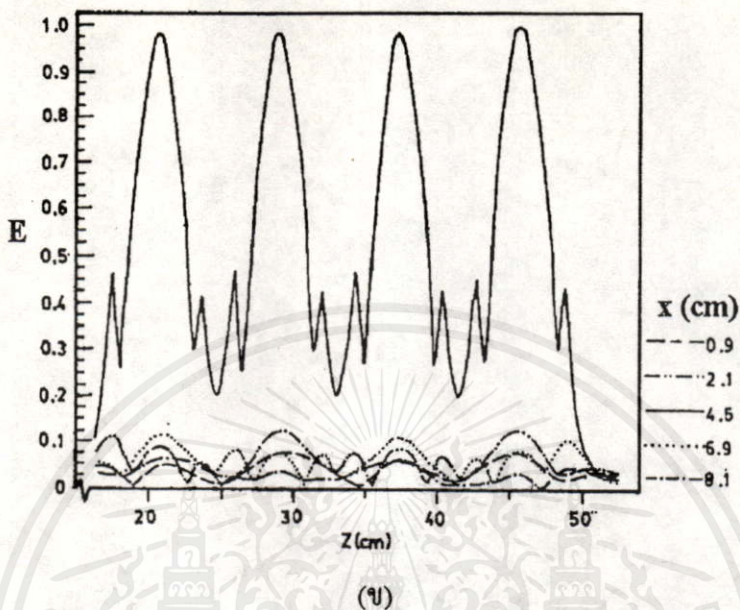
เมื่อพิจารณาสมการ (3-18) จะเห็นว่าความหนาแน่นของกระแสสมมูลย์บนผิวของท่อนำคลื่นจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามแนวแกน x เป็นฟังก์ชันคั้งแสดงในสมการ (3-18) ทำให้สามารถกำหนดขนาดของการป้อนสายอากาศสลับด้วยการกำหนดตำแหน่ง (x') ของสายอากาศแต่ละตัวในหัวข้อนี้เป็นการเปรียบเทียบสนามที่กระจายจากสายอากาศสลับตออาร์เรย์ เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะ x' เพื่อให้สายอากาศแต่ละตัวห่างจากแนวกึ่งกลางของท่อนำคลื่นออกไป สายอากาศแต่ละตัวอยู่ที่พิกัด (2.7, 0, 20.7), (6.3, 0, 29.1), (2.7, 0, 37.5), (6.3, 0, 45.9) เซ็นติเมตร ยาวตัวละ 6.12 เซ็นติเมตรคงเดิม ผลการคำนวณสนามไฟฟ้ารวมจะมีค่าใกล้เคียงกับ E_x ตามแนวแกน x ต่าง ๆ ดังได้แสดงในรูป 4-2 (ก) ในรูปนี้มีค่านอร์มอไลซ์แฟคเตอร์เท่ากับ $32.53 \times 10^{10} \times A_{106}$ สำหรับในแนวที่สายอากาศแต่ละตัวอยู่ใกล้แนวกึ่งกลางของท่อนำคลื่นเข้ามา คือ มีพิกัดอยู่ที่ (3.9, 0, 20.7), (5.1, 0, 29.1), (3.9, 0, 37.5), และ (5.1, 0, 45.9) เซ็นติเมตร จะแสดงในรูป 4-2 (ข) ที่มีค่านอร์มอไลซ์แฟคเตอร์เท่ากับ $63.38 \times 10^{10} \times A_{106}$ เป็นที่น่าสังเกตว่า สนามไฟฟ้ามีขนาดแรงที่สุด

ที่บริเวณแนวกึ่งกลางของท่อนำคลื่นและจะมีค่าลดลงในบริเวณที่ห่างจากแนวกึ่งกลางออกไป แต่ค่าสูงสุดจะเกิดบริเวณพิคคที่เป็นแนวกึ่งกลางของสล็อตแต่ละตัวเช่นเดียวกับในรูป 4-2 นอกจากนี้การที่สายอากาศอยู่ห่างจากแนวกึ่งกลางมากขึ้นจะทำให้ขนาดของสนามมีค่าลดต่ำลง



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

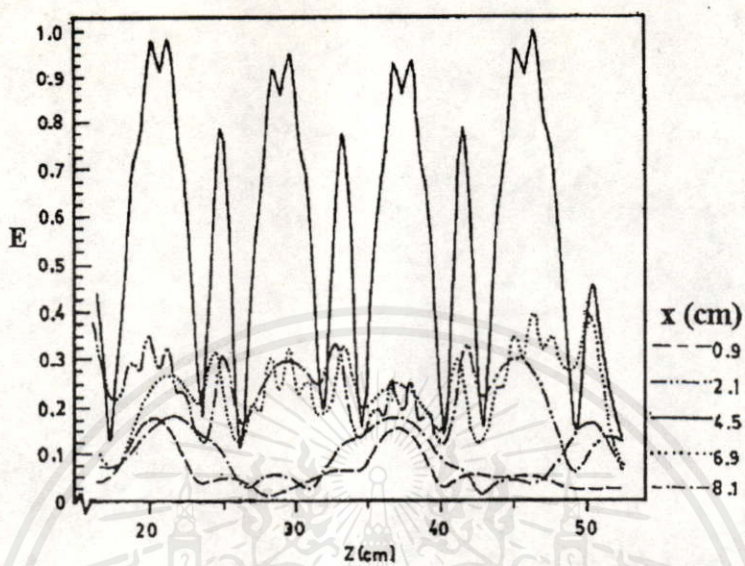


รูป 4-2 การเปรียบเทียบสนามไฟฟ้า เมื่อเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของ
 สายอากาศสล็อตให้ใกล้และไกลจากแนวกึ่งกลางของท่อนำคลื่น
 (ก) ไกลจากแนวกึ่งกลางของท่อนำคลื่น
 (ข) ใกล้แนวกึ่งกลางของท่อนำคลื่น

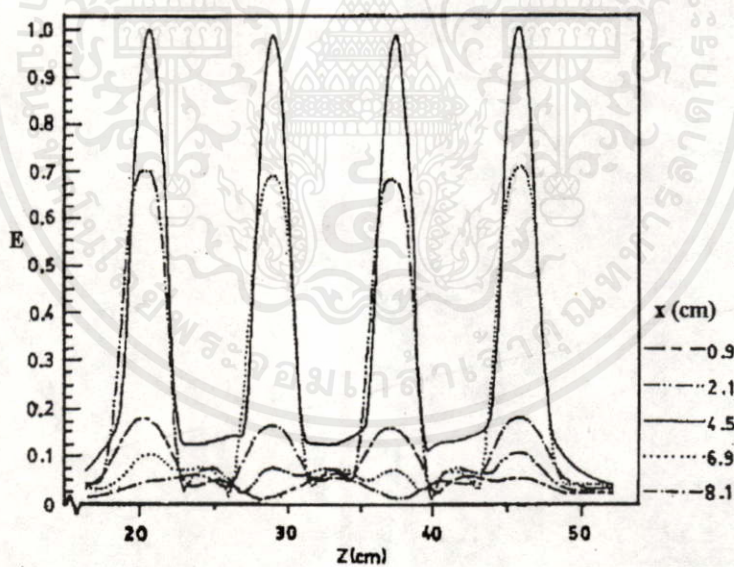
4.2.1-3 การเปรียบเทียบสนามไฟฟ้าเมื่อเปลี่ยนแปลงความยาวของสล็อต

เมื่อกำหนดให้พิกัดของสายอากาศสล็อตแต่ละตัวเหมือนกับหัวข้อ 4.2.1 แต่เปลี่ยนแปลงให้ความยาวสล็อตเพิ่มขึ้นหรือลดลง ผลการคำนวณแสดงในรูป 4-3 ในรูป 4-3 (ก) นั้นได้แสดงการคำนวณสนามเมื่อสล็อตแต่ละตัวยาวเท่ากับ 9.19 เซ็นติเมตร ในขณะที่รูป 4-3 (ข) แสดงผลการคำนวณเมื่อสล็อตมีความยาวยาว 3.06 เซ็นติเมตร ค่าแอมพลิจูดของรูปทั้งสองเป็น $5038 \times 10^{10} \times A_{106}$ และ $3703 \times 10^{10} \times A_{106}$ ตามลำดับ จะพบว่าในรูป 4-3 (ก) เมื่อสล็อตยาวขึ้นจะทำให้สนามมีขนาดแรงขึ้น และจำนวนโหนดของสายอากาศจะเพิ่มขึ้นอีกด้วย ทั้งนี้สนามตามแนวเส้นกึ่งกลางท่อนำคลื่นในทั้งสองกรณียังคงมีค่าสูงที่สุดและลดลง เมื่อคำนวณห่างจาก

แนวนี้ออกไป



(ก)



(ข)

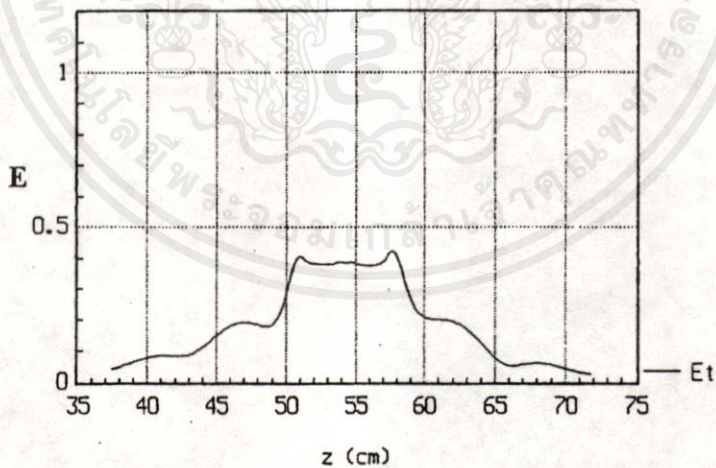
รูป 4-3 การเปรียบเทียบสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เมื่อเปลี่ยนแปลงความยาวของสายอากาศสล็อตขนานด้านการแก้ไข
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลง (ก) สล็อตยาวขึ้น (ข) สล็อตสั้นลง

4.2.2 สนามไฟฟ้าที่เกิดจากสายอากาศสล็อตอาร์เรย์ 3 สล็อตบนท่อนำคลื่น

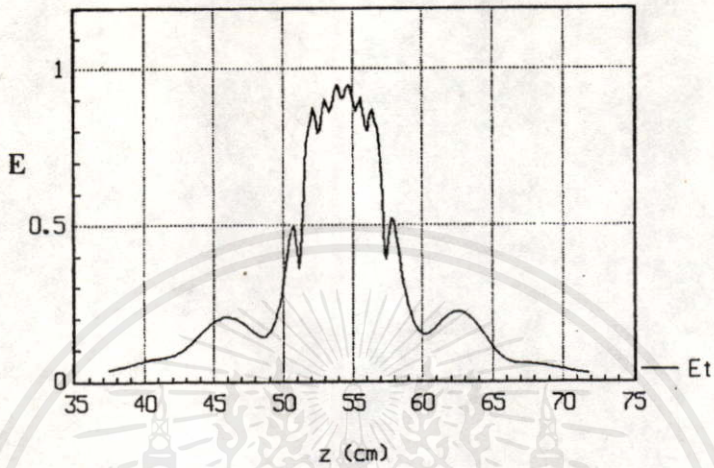
4.2.2-1 สนามไฟฟ้าที่เกิดจากสายอากาศสล็อตอาร์เรย์บนท่อนำคลื่นที่มี 3 สล็อต ที่ระยะห่างจากระนาบปากสล็อต 1 มิลลิเมตร

ในการพิจารณาสนามไฟฟ้าที่โหมด TE_{108} จากสายอากาศสล็อตบนท่อนำคลื่นที่มีขนาด $3 \times 9 \times 66.82$ ลูกบาศก์เซ็นติเมตร จุดกึ่งกลางสล็อตอยู่ที่พิกัด $(5.95, 0, 20.88)$, $(3.05, 0, 29.33)$, และ $(5.95, 0, 37.56)$ ได้คำนวณสายอากาศสล็อตแต่ละตัวยาว 6.12 เซ็นติเมตร เมื่อคำนวณสนามไฟฟ้าบริเวณที่ระยะ $y = -1$ มิลลิเมตร จากปากสล็อตจะพบว่าสนามไฟฟ้าบริเวณกึ่งกลางของท่อนำคลื่นจะมีขนาดแรงที่สุด จำนวนโหนดจะขึ้นอยู่กับจำนวนสล็อต และสนามจะแรงที่สุดตรงกึ่งกลางสล็อตบนท่อนำคลื่น เมื่อคำนวณห่างออกมาจากแนวกึ่งกลางของท่อนำคลื่นตรงปากสล็อต สนามจะลดลง และสนามไฟฟ้าจะน้อยลงเมื่อใกล้ขอบปากสล็อต รูป 4-4 แสดงสนามไฟฟ้าที่ระยะ x ต่างๆกัน (ค่าออร์มอลไฮซ์แฟกเตอร์เท่ากับ $39.322 \times 10^0 \times A_{108}$) สนามไฟฟ้าค่าเหล่านี้จะนำไปคำนวณการกระจายอุณหภูมิในภายหลัง

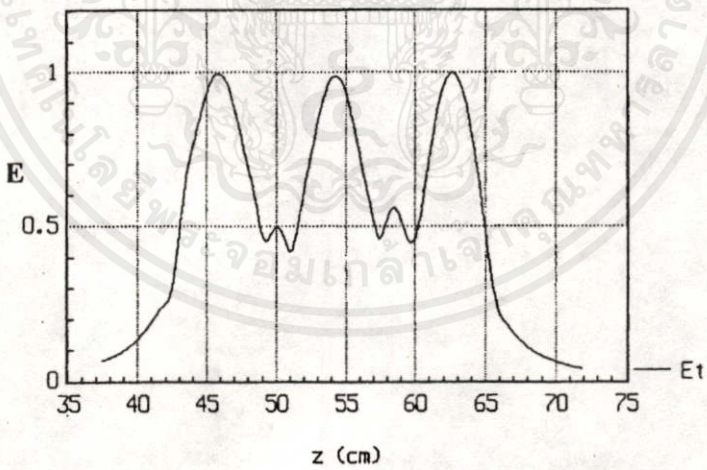


(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

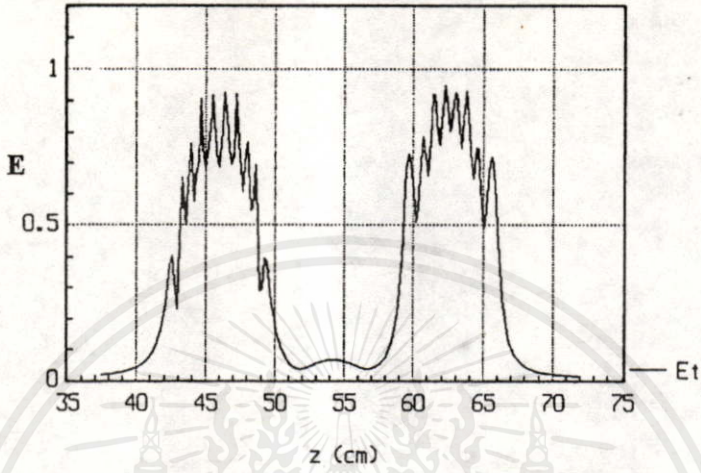


(ข)

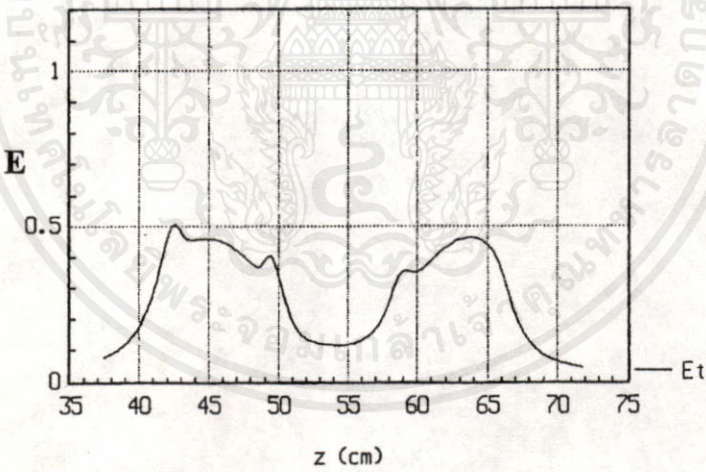


(ค)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูป 4-4 สนามไฟฟ้าที่ระยะห่าง จากระนาบปากสล็อต 1 มิลลิเมตร ที่ x ต่างๆกัน

(ค) $x = 1.6$ เซ็นติเมตร

(ข) $x = 3.05$ เซ็นติเมตร (แนวสล็อต)

(ค) $x = 4.5$ เซ็นติเมตร (แนวกึ่งกลางของท่อนำคลื่น)

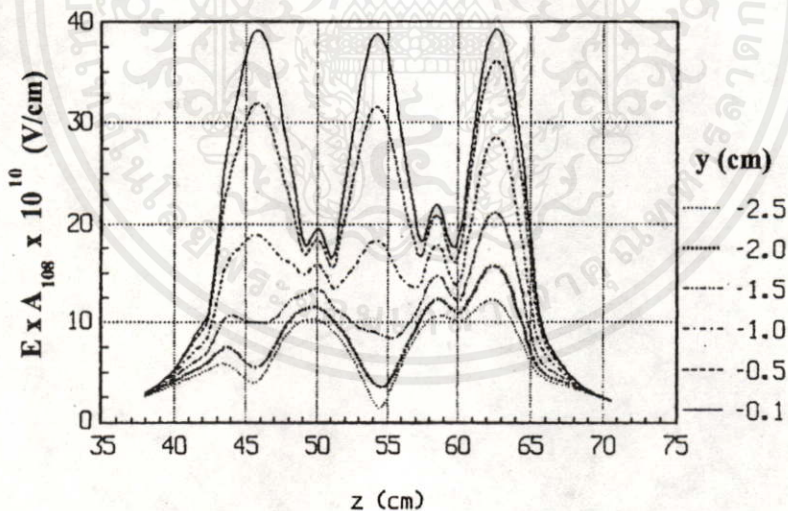
(ง) $x = 5.9$ เซ็นติเมตร (แนวสล็อต)

(จ) $x = 7.4$ เซ็นติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ใช้งานได้ตามที่ปรากฏในเอกสารนี้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำเอกสารนี้ไปใช้เพื่อวัตถุประสงค์อื่นใดได้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

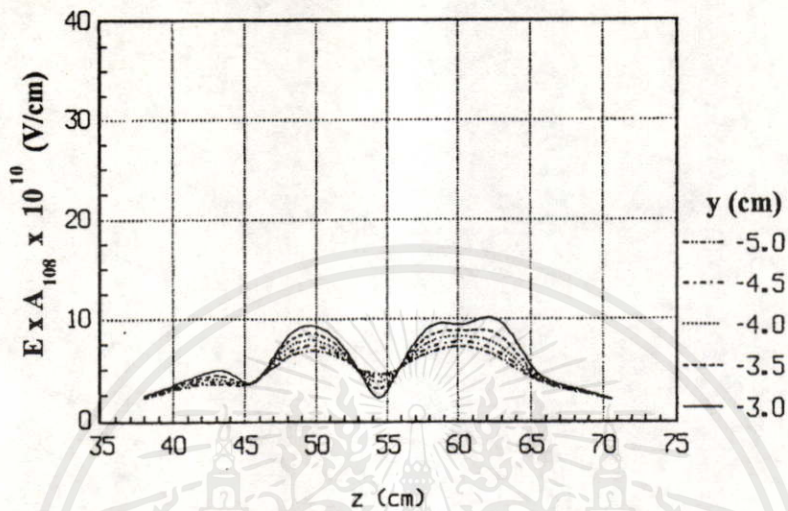
4.2.2-2 สนามไฟฟ้าที่เกิดจากสายอากาศสล็อตอาร์เรย์บนท่อนำคลื่นที่มี 3 สล็อต ที่ระยะห่างจากระนาบปากสล็อตต่างกัน

ในการคำนวณจะทำการคำนวณที่ระนาบ $y = -0.1, -0.5$ เซ็นติเมตร ถึง -10 เซ็นติเมตร โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.5 เซ็นติเมตร เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของสนามที่ระยะห่างจากระนาบปากสล็อตต่างกัน จากรูป 4-5 ได้เลือกทำการคำนวณที่แนวเส้น $x = 4.5$ เซ็นติเมตร จะพบว่าที่ระยะห่างจากระนาบปากสล็อต $y = -0.1$ เซ็นติเมตร สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นทั้ง 3 โหลบ จะมีความแรงของสนามไฟฟ้าเท่าๆกัน เมื่อคำนวณห่างออกมาที่ระนาบ $y = -0.5$ เซ็นติเมตร สนามไฟฟ้าจะเริ่มมีค่าลดลง โหลบของสนามไฟฟ้าที่ด้านปลายปิดของท่อนำคลื่นจะมีสนามไฟฟ้าแรงกว่าโหลบอื่นอีก 2 โหลบ แต่เมื่อคำนวณห่างออกมาถึง $y = -10$ เซ็นติเมตร สนามไฟฟ้าจะมีการกระจายที่ค่อนข้างจะเท่ากัน แต่มีค่าลดลงมากๆ

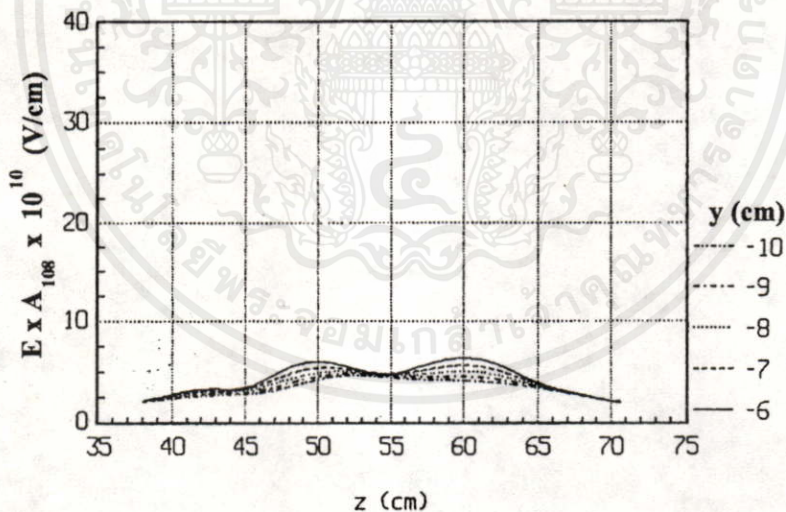


(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะมิใช่ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)



(ค)

รูป 4-5 สนามไฟฟ้าที่ระยะห่าง จากระนาบปากสล็อตต่างๆกัน

ที่ $x = 4.5$ เซ็นติเมตร

ก) $y = -0.1, -0.5, -1.0, -1.5, -2.0, -2.5$ เซ็นติเมตร

ข) $y = -3.0, -3.5, -4.0, -4.5, -5.0$ เซ็นติเมตร

ค) $y = -6.0, -7.0, -8.0, -9.0, -10.0$ เซ็นติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น การนำออกไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามออกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิบนสแลบไดอิเล็กตริก

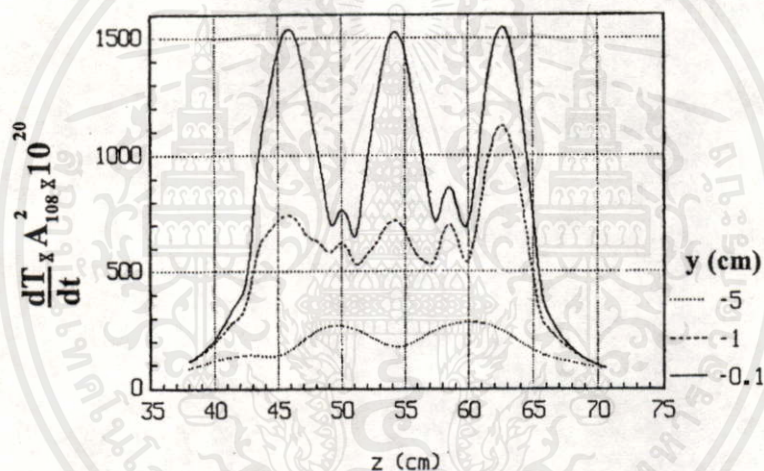
4.3.1 ในสถานะอยู่นิ่ง (steady state)

เมื่อพิจารณาสมการ (2-46) และ (2-47) ใน 1 มิติ ถ้าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิไม่เป็นฟังก์ชันของเวลา สถานะเช่นนี้จะเรียกว่า สถานะอยู่นิ่ง (steady state) ซึ่งจะทำให้การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่อเวลาเป็นฟังก์ชันของ $\sigma E^2 / \rho c_p$ เพียงอย่างเดียว ตามสมการ (2-49) และ (2-50) จะพบว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่อเวลาจะขึ้นอยู่กับตัวแปร 5 ตัวแปรคือ ค่ากำลังสองของสนามไฟฟ้า, ปัจจัยการสูญเสียในไดอิเล็กตริก, ความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ, ความหนาแน่นของ ไดอิเล็กตริก และความร้อนจำเพาะของไดอิเล็กตริก จากการวิเคราะห์สมการ (2-50) ซึ่งเป็นสมการเชิงเส้นความชันของเส้นกราฟของความสัมพันธ์อุณหภูมิต่อเวลาจึงขึ้นอยู่กับค่า $\sigma E^2 / \rho c_p$ ซึ่งจะพบว่าการเพิ่มกำลังงานไมโครเวฟ (E^2 เพิ่ม), ความถี่ไมโครเวฟ และปัจจัยการสูญเสียใน ไดอิเล็กตริกมากขึ้นจะทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อเวลาสูงขึ้น ในทางตรงกันข้ามไดอิเล็กตริกที่มีค่าความร้อนจำเพาะและความหนาแน่นสูง จะทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อเวลาดลดลง ในสาร ไดอิเล็กตริกหนึ่งๆจะมีค่าปัจจัยการสูญเสียยังผล, ค่าความหนาแน่นของไดอิเล็กตริกและค่าความร้อนจำเพาะที่คงที่ และเมื่อใช้ความถี่ของไมโครเวฟมีค่าคงที่ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่อเวลาจึงแปรผันตรงตามกำลังงานของไมโครเวฟ (แปรผันตาม E^2) เพียงอย่างเดียว กำลังงานของไมโครเวฟจะขึ้นอยู่กับชนิดของแหล่งจ่ายกำลังงานสำหรับแมกนีตรอน, แมกนีตรอน และระยะห่างระหว่างไดอิเล็กตริกกับสายอากาศแพร่กระจายคลื่น ในการแสดงผลการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่อเวลา จะทำการคำนวณโดยเปรียบเทียบค่ากำลังสองของสนามไฟฟ้าที่ระยะห่างระหว่างไดอิเล็กตริกกับสายอากาศแพร่กระจายคลื่นต่างๆกัน โดยที่ความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ, และคุณสมบัติของไดอิเล็กตริกหนึ่งๆ ($\sigma / \rho c_p$) ถูกกำหนดให้มีค่าคงที่ การคำนวณจะสมมติว่าสแลบไดอิเล็กตริกอยู่นิ่งในแนวยาวของสายอากาศสล็อตอาร์เรย์ที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่ง เพื่อศึกษาการกระจายอุณหภูมิในสถานะอยู่นิ่ง ในที่นี้เลือกแสดงที่ตำแหน่ง $x = 4.5$ เซนติเมตร ซึ่งเป็นบริเวณกึ่งกลางของท่อนำคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1-1 ผลการคำนวณการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อเวลา เมื่อสแลบไดอิเล็กตริกวางห่างจากสายอากาศสล็อตอาร์เรย์ต่างๆกัน

ในการคำนวณจะกำหนดให้ค่า $\sigma/\rho c_p = 1 \text{ cm}^2 \text{ } ^\circ \text{C} / \text{V}^2 \text{ s}$ และค่ากำลังสองของสนามไฟฟ้า $E^2 = A_{108}^2 \times 10^{20}$ มีค่าคงที่ สแลบไดอิเล็กตริกจะวางนิ่งที่กึ่งกลางสายอากาศตามแนวแกน z ที่ $x = 4.5$ เซ็นติเมตร และจะทำการคำนวณ เมื่อไดอิเล็กตริกวางห่างจากระนาบสายอากาศต่างๆกันที่ระยะ 0.1, 1, และ 5 เซ็นติเมตร ผลการคำนวณแสดงในรูป 4-6

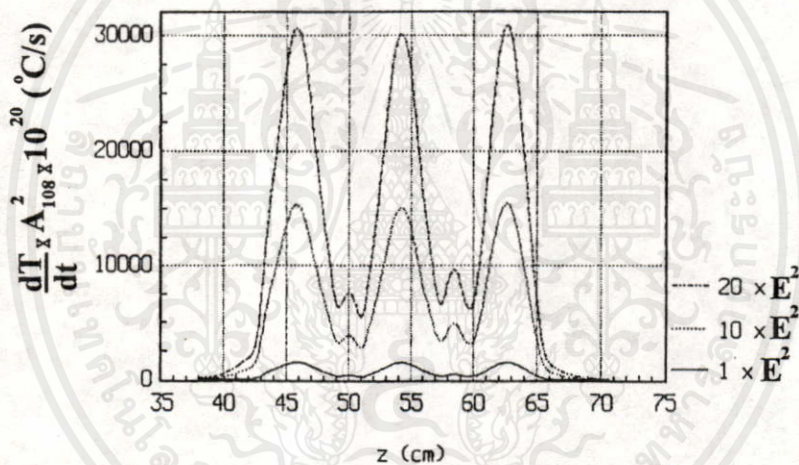


รูป 4-6 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อเวลาบนสแลบไดอิเล็กตริกเมื่อสแลบไดอิเล็กตริกวางห่างจากสายอากาศสล็อตอาร์เรย์ต่างๆกัน เมื่อ $x = 4.5$ เซ็นติเมตร

จากรูป 4-6 เมื่อพิจารณาที่สแลบไดอิเล็กตริกห่างจากระนาบสายอากาศค่าหนึ่งๆ จะพบว่า การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อเวลาจะมีความสัมพันธ์กับค่าแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้า (A_{108}) เป็นเชิงเส้น ค่าแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าสูงๆ จะทำให้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อเวลาสูงตามไปด้วย ซึ่งขึ้นกับกำลังงานของไมโครเวฟนั่นเอง แต่เมื่อระยะห่างของสแลบไดอิเล็กตริกห่างจากระนาบสายอากาศมากขึ้น อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อเวลาที่จะมีค่าลดลงตามระยะห่างเป็นเชิงเส้นด้วย โดยรูปแบบการกระจายสนามไฟฟ้า (แพทเทิร์น) จะเปลี่ยนแปลงตามระยะห่างของไดอิเล็กตริกจากระนาบปากสล็อต

4.3.1-2 ผลการคำนวณการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อเวลาบนสแลบไดอิเล็กตริก
เมื่อ $\sigma/\rho c_p$ มีค่าต่างกัน

ในหัวข้อนี้จะทำการคำนวณโดยให้ $\sigma/\rho c_p$ มีค่าเป็น 1, 10, และ 20 $\text{cm}^2 \cdot \text{C} / \text{V}^2 \cdot \text{s}$
กำหนดให้ค่ากำลังสองของสนามไฟฟ้า $E^2 = A_{108}^2 \times 10^{20}$ มีค่าคงที่ เพื่อดูการเปลี่ยนแปลง
อุณหภูมิต่อเวลา เงื่อนไขข้อกำหนดจะยังคงคำนวณที่ระยะห่างระหว่างสแลบไดอิเล็กตริก และ
ระนาบปากสล็อต = -1 มิลลิเมตร สนามไฟฟ้ามีค่าคงที่ สแลบไดอิเล็กตริกวางที่ตำแหน่งเดิมที่
 $x = 4.5$ เซนติเมตร



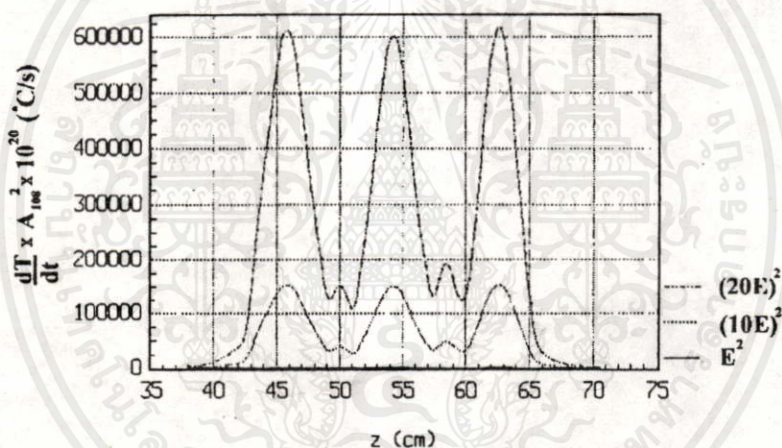
รูป 4-7 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อเวลาบนสแลบไดอิเล็กตริก
เมื่อ $\sigma/\rho c_p$ มีค่าต่างกัน

เมื่อพิจารณา รูป 4-7 อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อเวลาจะมีค่าความสัมพันธ์เป็น
เชิงเส้นกับค่า $\sigma/\rho c_p$ แพทเทิร์นการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อเวลาที่มีรูปร่างที่คงเดิม การเปลี่ยน
แปลงจะเพิ่มขึ้นตามค่า $\sigma/\rho c_p$ เป็น 10 และ 20 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำมาไปใช้

4.3.1-3 ผลการคำนวณการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อเวลาบนสแลบไดอิเล็กตริกเมื่อสนามไฟฟ้ามีค่าต่างกัน

ในการคำนวณข้างคงกำหนดให้ค่า $\sigma/\rho c_p = 1 \text{ cm}^2 \cdot \text{C} / \text{V}^2 \cdot \text{s}$ และระยะห่างของสแลบไดอิเล็กตริกจากปากสล็อตมีค่าคงที่ ($y = -1$ มิลลิเมตร) เงื่อนไขการวางสแลบไดอิเล็กตริกยังคงเดิม ที่ $x = 4.5$ เซ็นติเมตร วางตามแนวแกน z การคำนวณจะทำการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าเป็น E^2 , $(10E)^2$ และ $(20E)^2$



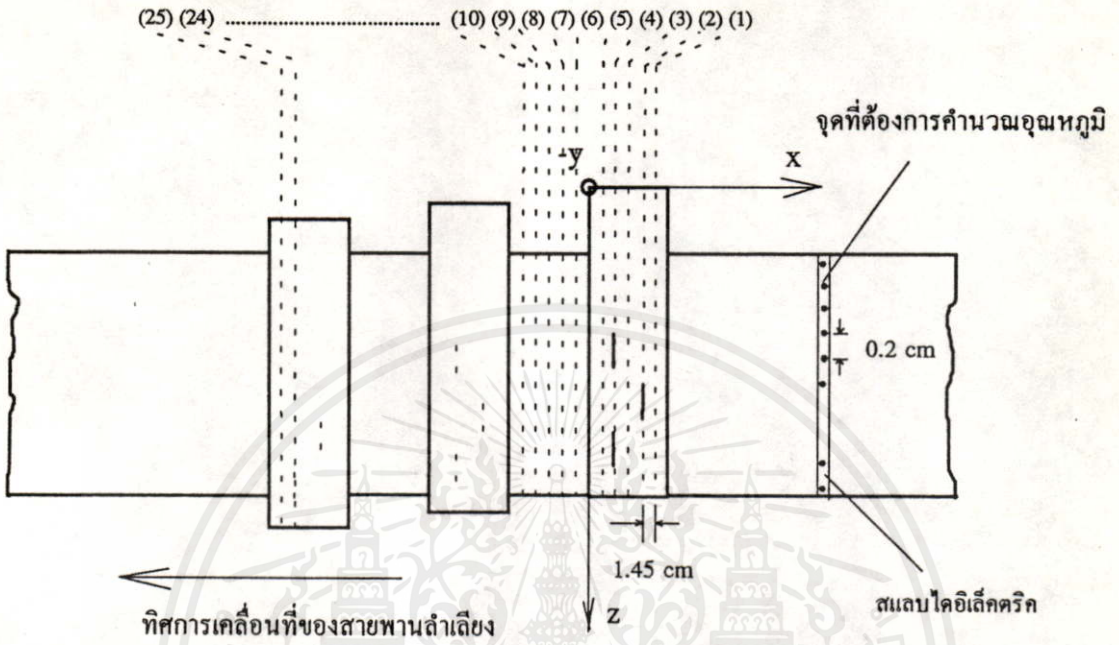
รูป 4-8 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อเวลาบนสแลบไดอิเล็กตริกเมื่อสนามไฟฟ้ามีค่าต่างๆกัน ที่ $x = 4.5$ เซ็นติเมตร

รูป 4-8 แสดงถึงผลการเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิต่อเวลาบนสแลบไดอิเล็กตริก โดยที่จะมีการเปลี่ยนแปลงที่สูงขึ้นมาก การเพิ่มของสนามไฟฟ้าเป็น 10 และ 20 เท่า จะทำให้ค่ากำลังสองของสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 100 และ 400 เท่า ตามความสัมพันธ์ของสมการพลาโบลาร์กำลังสอง การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่อเวลา จึงไม่เป็นเชิงเส้นเมื่อเทียบกับสนามไฟฟ้าแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้า ดังนั้นการเพิ่มสนามไฟฟ้าหรือกำลังงานของไมโครเวฟ จะทำให้การเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นมากกว่าการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของไดอิเล็กตริก และระยะห่างของไดอิเล็กตริกกับระนาบปากสล็อต

4.3.2 ในสถานะชั่วขณะ (Transient State)

ในหัวข้อนี้จะพิจารณาค้างจากหัวข้อ 4.3.1 ที่กล่าวมาแล้ว เมื่อพิจารณาสมการ (2-46) และ (2-47) ใน 1 มิติ ซึ่งเป็นสถานะที่อุณหภูมิบนสแลบโคอีเล็คทริกมีการเปลี่ยนแปลงกับระยะทางการเคลื่อนที่ของสายพานลำเลียงในช่วงเวลาหนึ่ง สถานะนี้จึงเรียกว่าสถานะชั่วขณะ (Transient State) ในการคำนวณจึงจำลองสถานะการทำงานจริง โดยสมมติว่าโคอีเล็คทริกเป็นสแลบวางบนสายพานลำเลียง แล้วเคลื่อนที่ผ่านสายอากาศสล็อตอาร์เรย์ทั้ง 3 ท่อนำคลื่นที่วางเยื้องกัน ซึ่งในแต่ละท่อนำคลื่นมีสายอากาศสล็อต 3 สล็อต (พิจารณารูป 4-9) ประกอบ สแลบจะเคลื่อนที่จากซ้ายไปขวา เมื่อพิจารณาสายอากาศสล็อตอาร์เรย์บนท่อนำคลื่นตัวใดตัวหนึ่ง ในการออกแบบสายอากาศสล็อตอาร์เรย์ทั้ง 3 สล็อตจะต้องมีระยะห่างระหว่างสายอากาศสล็อตกับแนวกึ่งกลางของท่อนำคลื่นเป็นระยะ 1.45 เซ็นติเมตร ซึ่งทำให้สายอากาศเมทซ์กับแหล่งจ่ายกำลังงานไมโครเวฟ ในการคำนวณในแต่ละท่อนำคลื่นจะเลือกคำนวณอุณหภูมิในสแลบที่เคลื่อนที่ในแต่ละจังหวัดที่เคลื่อนที่ เป็นระยะห่างกัน 1.45 เซ็นติเมตร ด้วย (ในแนวแกน x ดังรูป 4-9) โดยในแต่ละท่อนำคลื่น สแลบจะเคลื่อนที่ผ่านสายอากาศสล็อตบนท่อนำคลื่น 5 จังหวัด จังหวัดที่ 3 จะอยู่ที่แนวกึ่งกลางท่อนำคลื่น จังหวัดที่ 2 และ 4 จะอยู่ในแนวสล็อตซ้ายและขวาของแนวกึ่งกลางท่อนำคลื่น จังหวัดที่ 1 และ 5 จะอยู่ถัดจากสล็อตซ้ายขวาของแนวกึ่งกลาง ซึ่งก็คือ ที่ระยะ $x = 1.6, 3.05, 4.5, 5.95$ และ 7.4 เซ็นติเมตร ผ่านช่องว่างระหว่างสายอากาศสล็อตอาร์เรย์แต่ละท่อนำคลื่นที่มีระยะห่างเท่ากัน ซึ่งก็จะทำการคำนวณที่ระยะเดียวกันเหมือนผ่านท่อนำคลื่นเพียงแต่กำหนดให้สนามไฟฟ้าในบริเวณนี้มีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นสแลบเมื่อเคลื่อนที่ผ่านสายอากาศสล็อตทั้ง 3 ท่อนำคลื่นจึงต้องผ่าน 2 ช่องว่างระหว่างท่อนำคลื่น ซึ่งจะต้องทำการคำนวณทั้งหมด 25 จังหวัดการเคลื่อนที่ โดยมีอุณหภูมิเริ่มต้น 29°C การคำนวณอุณหภูมิบนสแลบจะคำนวณจากรยะ 38-71 เซ็นติเมตร เทียบกับพิคคของสายอากาศ ระยะนี้จะครอบคลุมสายอากาศสล็อตอาร์เรย์ทั้งหมด ผลการคำนวณจะถูกนำมาแสดงในรูปกราฟ 25 รูป โดยการเปรียบเทียบพารามิเตอร์ต่างๆกัน ที่ระยะห่างระหว่างโคอีเล็คทริกและระนาบสายอากาศระยะ -1 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4-9 การคำนวณอุณหภูมิบนสแลบไดอิเล็กตริก เมื่อให้เคลื่อนที่ผ่านสายอากาศสล็อตอาร์เรย์ 3 สล็อตบนท่อนำคลื่นทั้ง 3 ท่อนำคลื่น

ในการคำนวณจะเปรียบเทียบพารามิเตอร์คล้ายกับการคำนวณในสถานะอยู่นิ่ง คือค่า $\sigma/p c_p$, ค่ากำลังสองของสนามไฟฟ้า และจะมีพารามิเตอร์ที่เพิ่มขึ้นมา คือ ความสามารถในการแพร่กระจายอุณหภูมิ (α_T) และความเร็วของสายพานลำเลียง ในการเปรียบเทียบจะกำหนดให้พารามิเตอร์นั้นเปลี่ยนแปลงเป็น 10 และ 20 เท่าโดยจะให้พารามิเตอร์อื่นๆเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิง

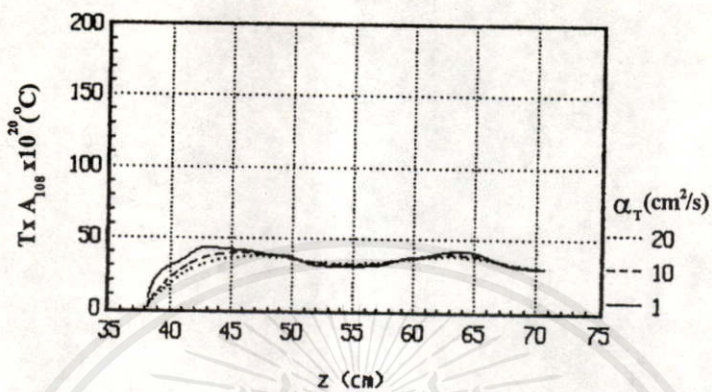
4.8.2-1 ผลการคำนวณการกระจายอุณหภูมิบนสแลบไดอิเล็กตริก เมื่อค่าความสามารถในการแพร่กระจายอุณหภูมิ (α_T) มีค่าต่าง ๆ กัน

ในการคำนวณจะทำการคำนวณที่ระยะห่างระหว่างสแลบไดอิเล็กตริกและระนาบปากสลีต 1 มิลลิเมตร ($y=1$ มิลลิเมตร) กำหนดให้ค่า $\sigma/\rho c_p = 1 \text{ cm}^2 \text{ C} / \text{V}^2 \text{ s}$, ความเร็วสายพานลำเลียงเท่ากับ 0.01 cm/s และค่ากำลังสองของสนามไฟฟ้า $E^2 = A_{108}^2 \times 10^{20}$ มีค่าคงที่ และกำหนดให้ $\alpha_T = 1 \text{ cm}^2 / \text{s}$ เป็นค่าอ้างอิง แล้วเพิ่มค่า α_T เป็น 10 และ 20 เท่า เพื่อเปรียบเทียบผลการกระจายอุณหภูมิต่อสแลบไดอิเล็กตริก เมื่อสแลบไดอิเล็กตริกมีอุณหภูมิเริ่มต้นเท่ากับ $29 \text{ }^\circ\text{C}$

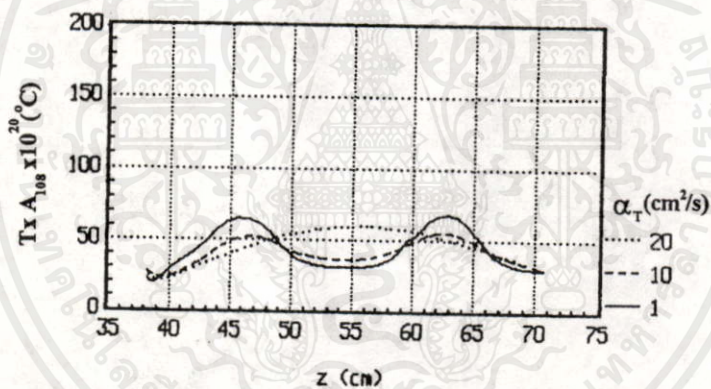
จากการพิจารณารูป 4-10 และ 4-11 พบว่าไดอิเล็กตริกที่มีค่า α_T ต่ำจะมีอุณหภูมิสะสมสูงกว่า เนื่องจากอัตราการถ่ายเทอุณหภูมิต่ำกว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่รับเข้ามา อุณหภูมิจึงมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงชัดเจน ตามค่ากำลังสองของสนามไฟฟ้า ในทางตรงข้ามไดอิเล็กตริกที่มีค่า α_T สูงขึ้น อัตราการถ่ายเทอุณหภูมิจะสูงขึ้น โดยจะพยายามถ่ายเทความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อมรอบข้าง ซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าจึงทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยมีค่าใกล้เคียงกัน และมีอุณหภูมิลดลงมากกว่าไดอิเล็กตริกที่มี α_T ต่ำ ถึงแม้ว่าไดอิเล็กตริกนั้นยังคงได้รับสนามไฟฟ้าตลอดเวลา เป็นที่น่าสังเกตว่าที่ปลายของสแลบทั้งสองข้างจะมีอุณหภูมิต่ำที่สุด เนื่องจากเงื่อนไขขอบเขตของอุณหภูมิต้อง $29 \text{ }^\circ\text{C}$ และเป็นบริเวณที่ได้รับสนามไฟฟ้าต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

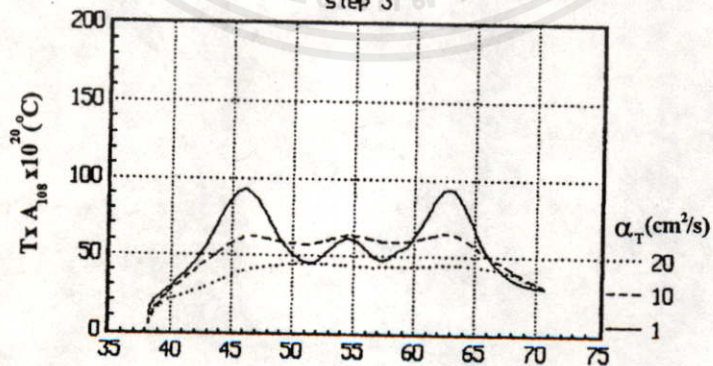
step 1



step 2

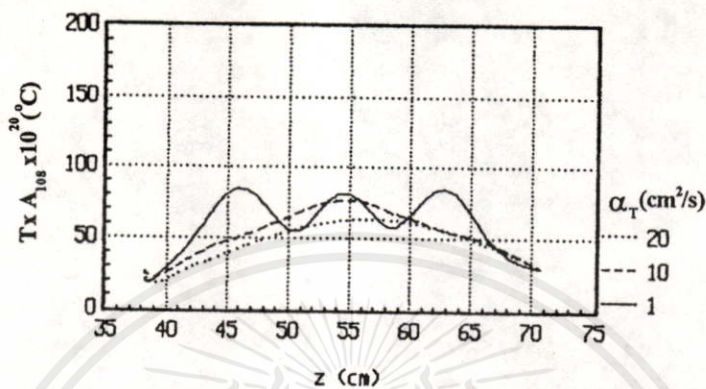


step 3

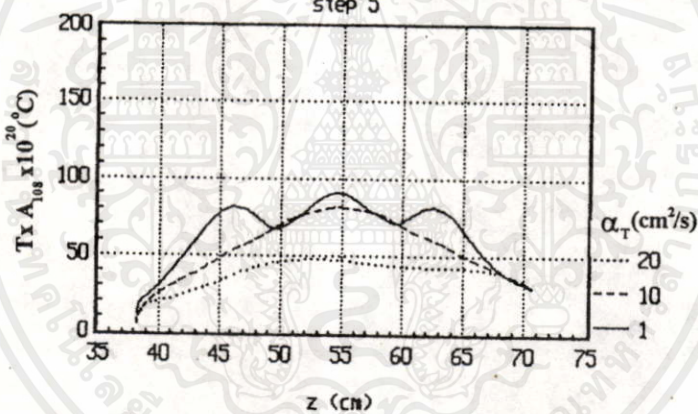


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเชิงการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

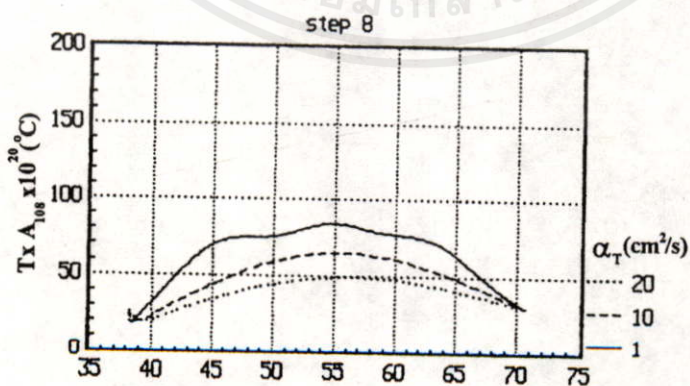
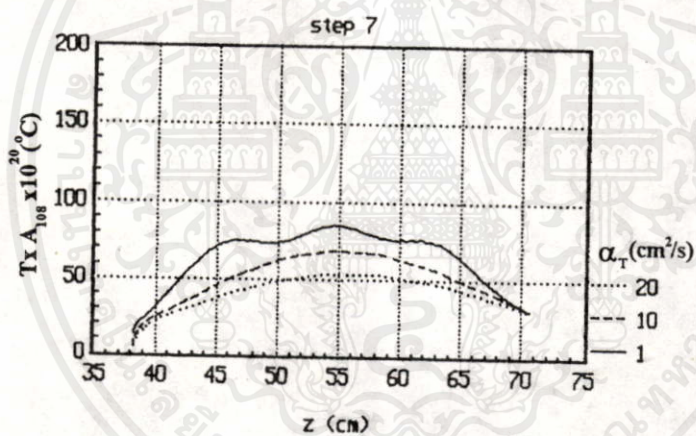
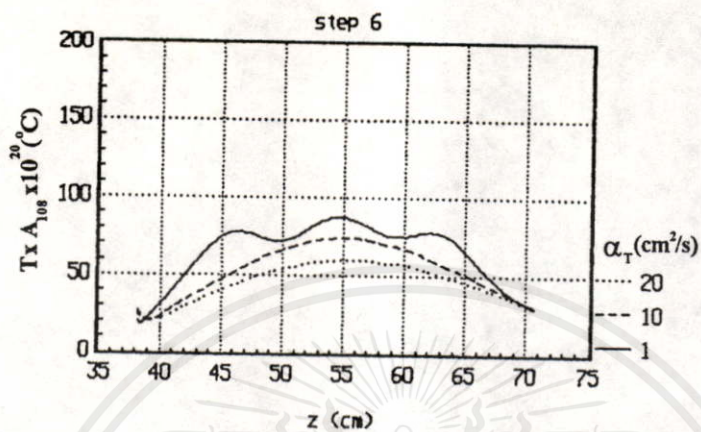
step 4



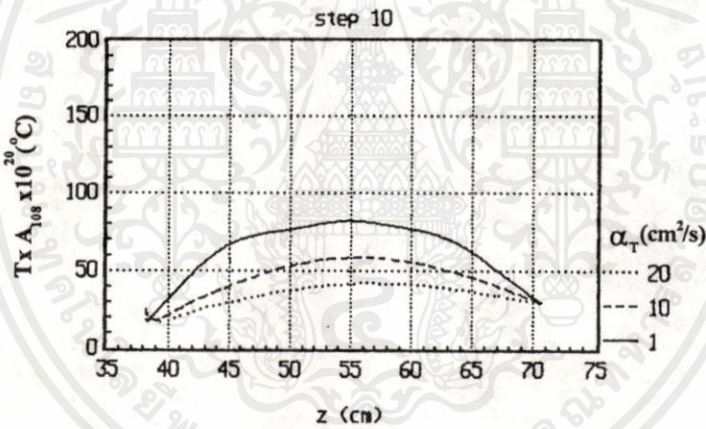
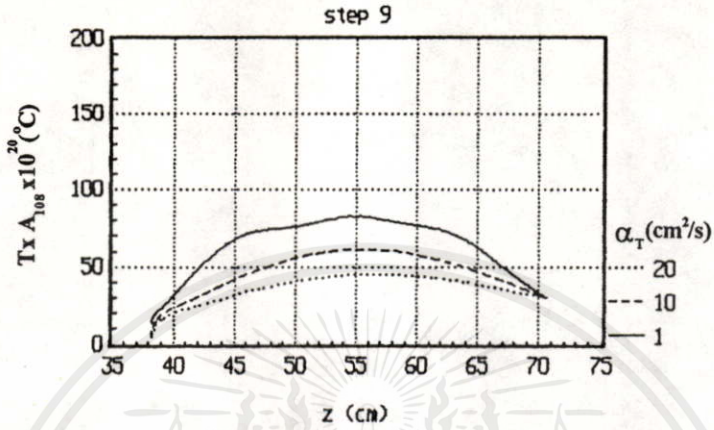
step 5



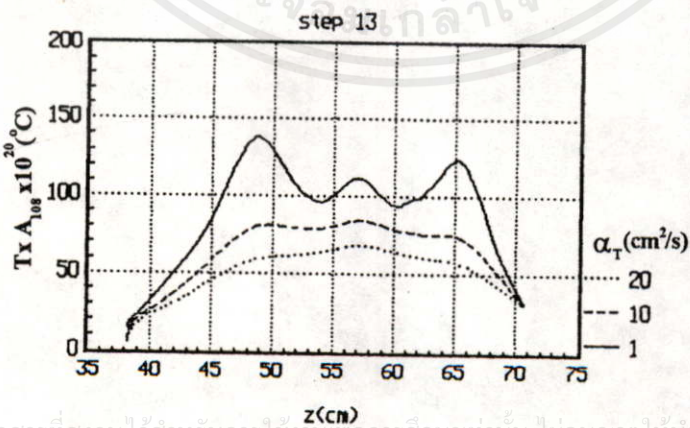
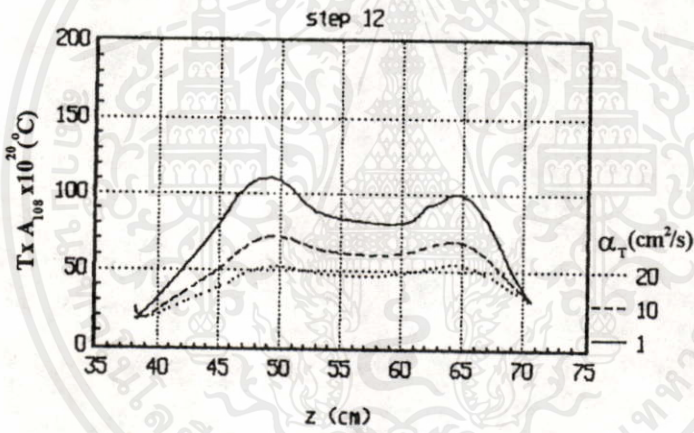
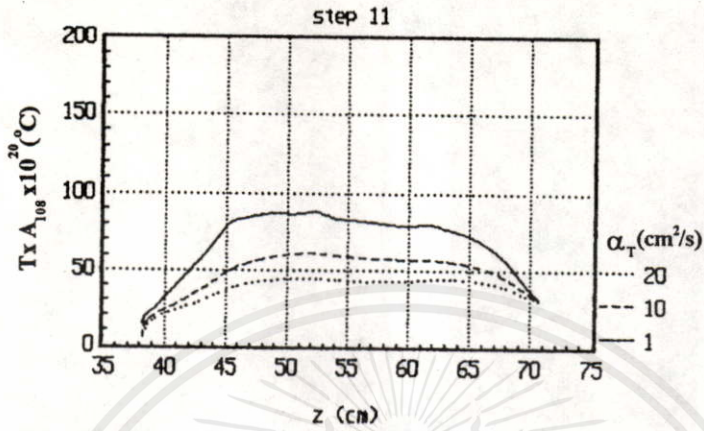
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



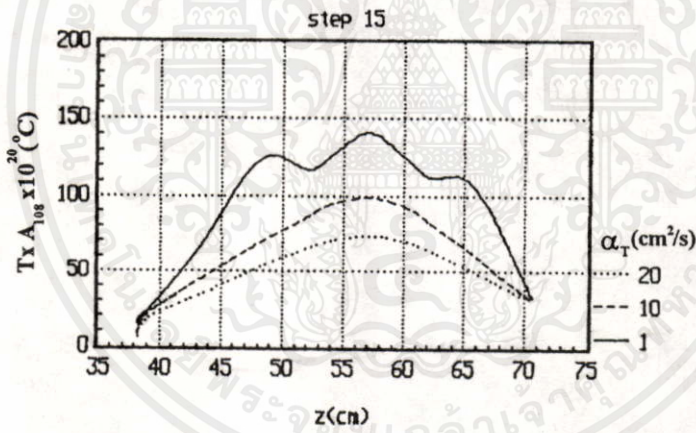
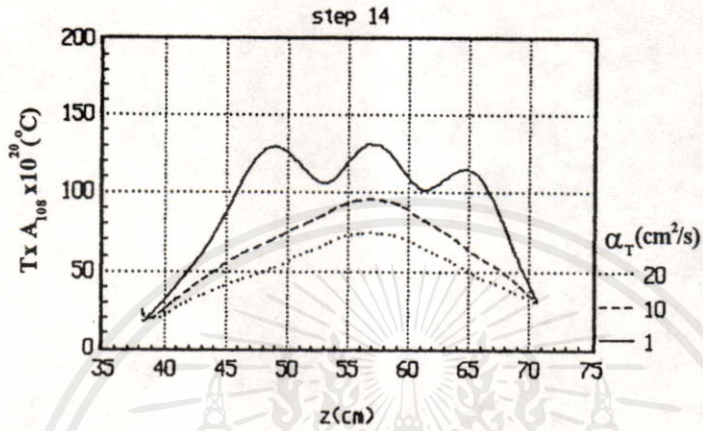
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้ z (cm) การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



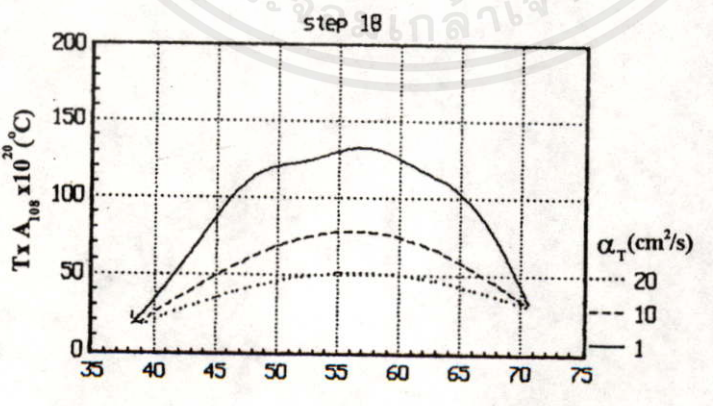
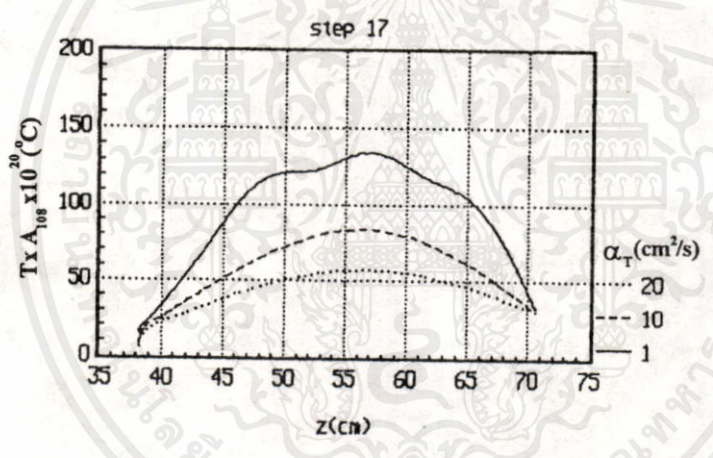
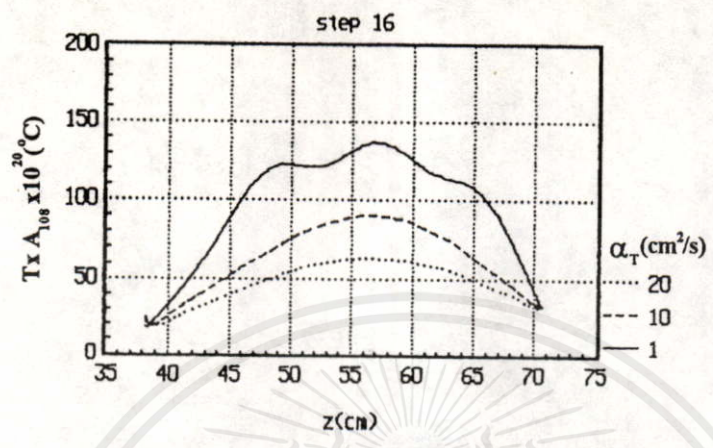
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



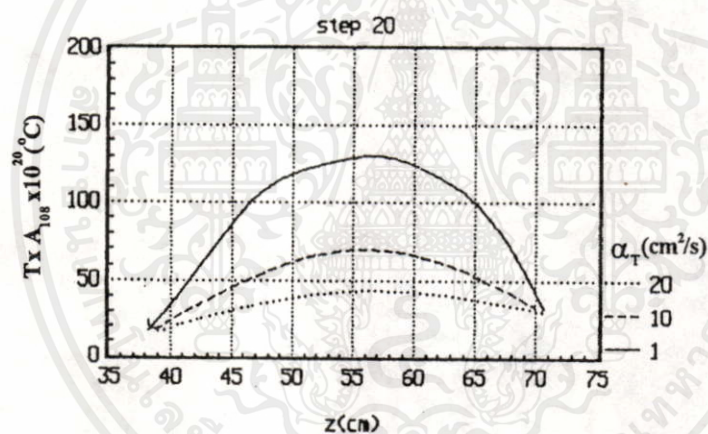
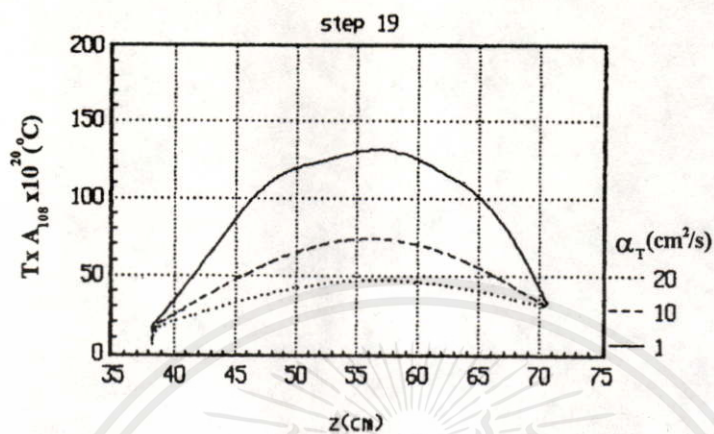
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



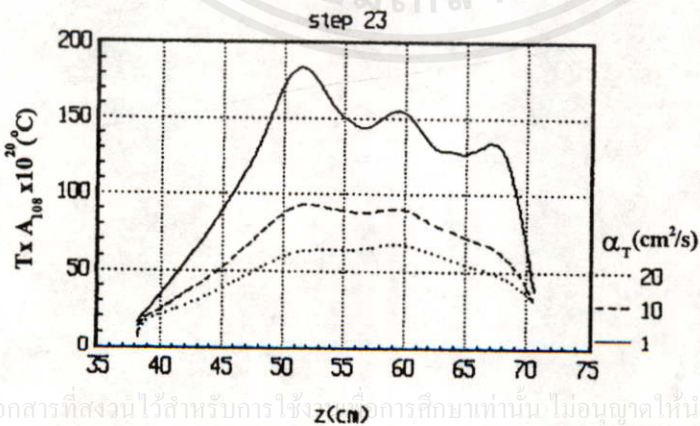
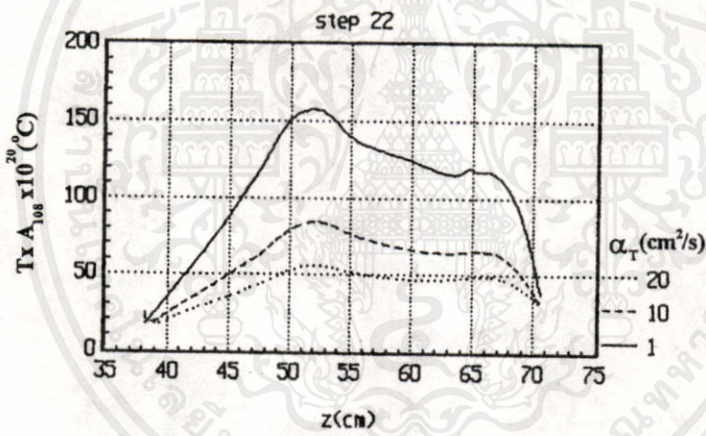
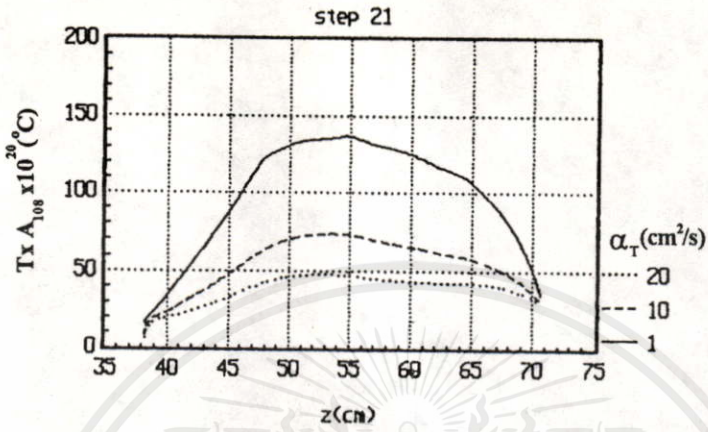
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



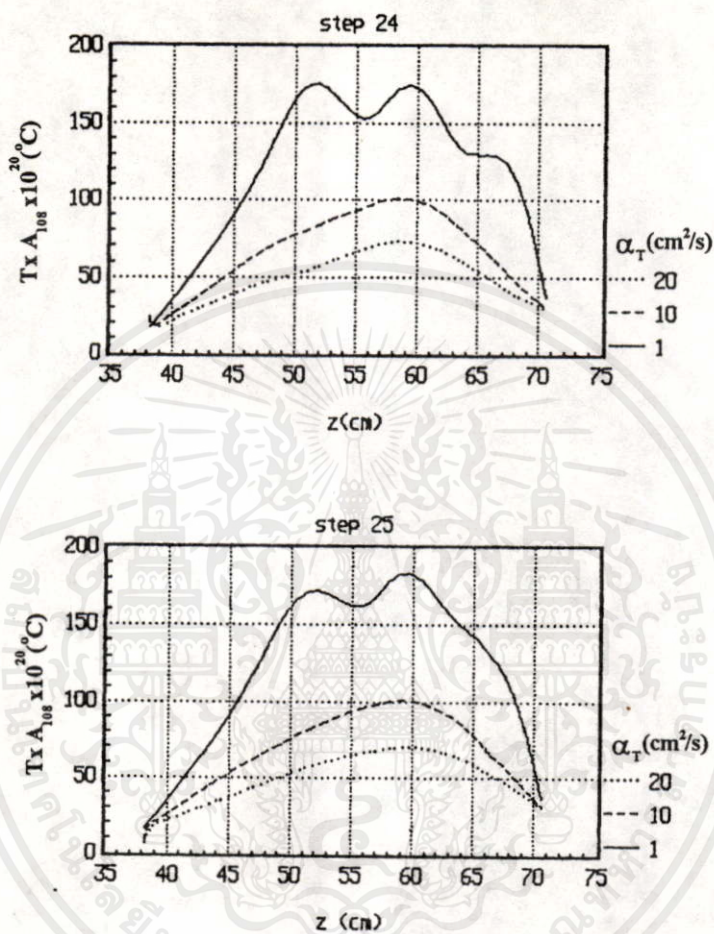
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

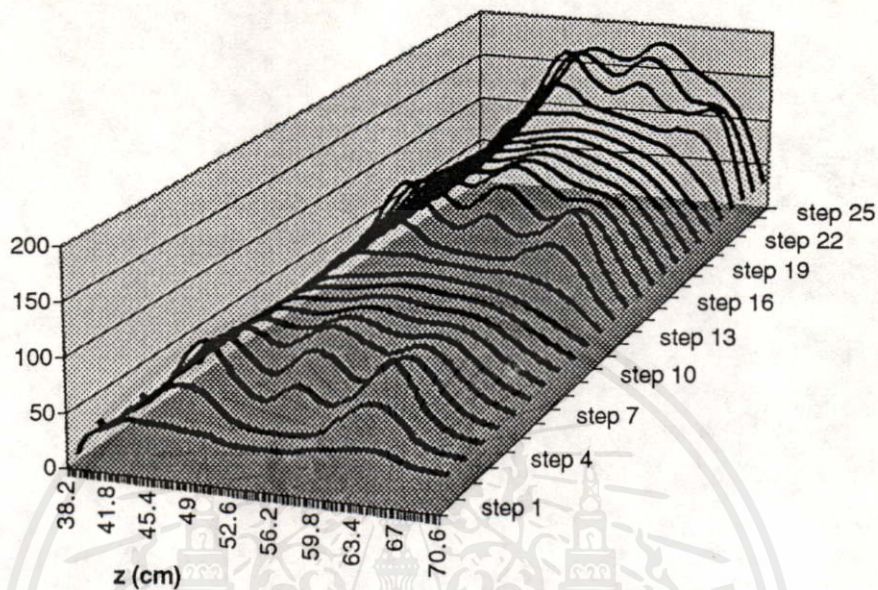


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ z(cm) การศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

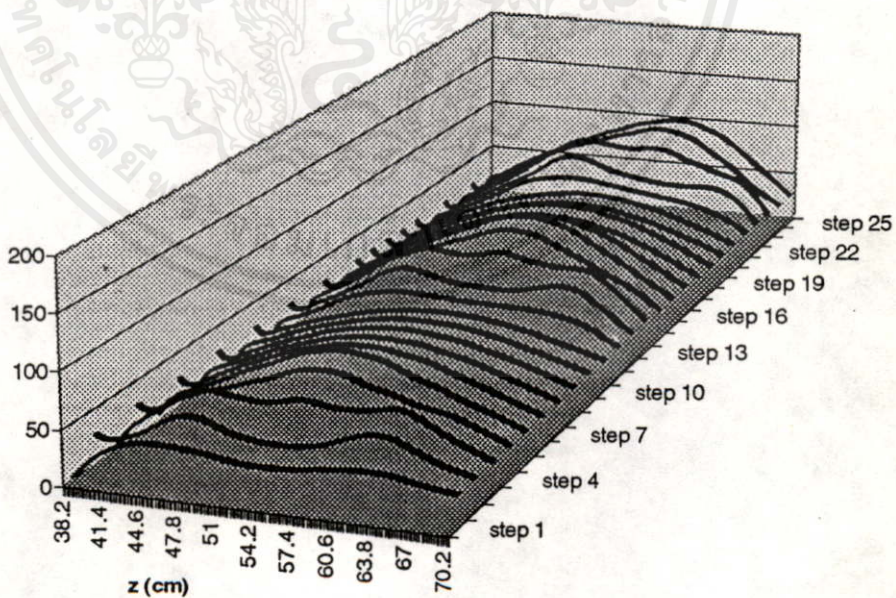


รูป 4-10 step 1-25 เป็นการกระจายอุณหภูมิบนสแลบไดอิเล็กตริก
เมื่อเคลื่อนที่ผ่านสายอากาศสี่ออร์เรย์ 3 สล็อต
บนท่อนำคลื่นทั้ง 3 ท่อนำคลื่น ที่มีค่า α_T ต่างๆกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

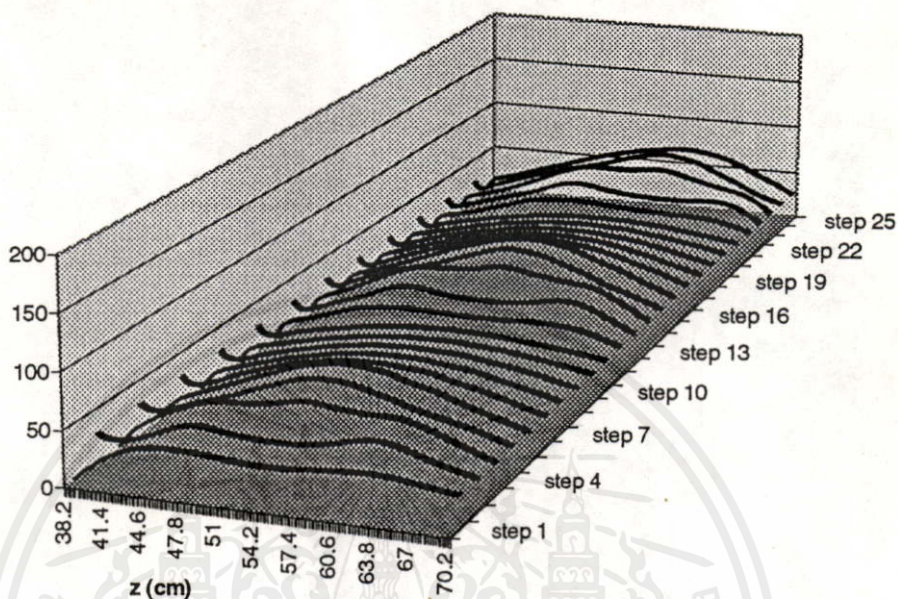


(ก)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกร ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ข)



(ก)

รูป 4-11 ภาพ 3 มิติ แสดงการกระจายอุณหภูมิบนสแลบไดอิเล็กตริก
เมื่อเคลื่อนที่ผ่านสายอากาศสี่ออร์เรย์ 3 สล็อต บน
ท่อนำคลื่นทั้ง 3 ท่อนำคลื่น ในการเคลื่อนที่แต่ละ step ที่มีค่า

(ก) $\alpha_T = 1 \text{ cm}^2 / \text{s}$

(ข) $\alpha_T = 10 \text{ cm}^2 / \text{s}$

(ค) $\alpha_T = 20 \text{ cm}^2 / \text{s}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

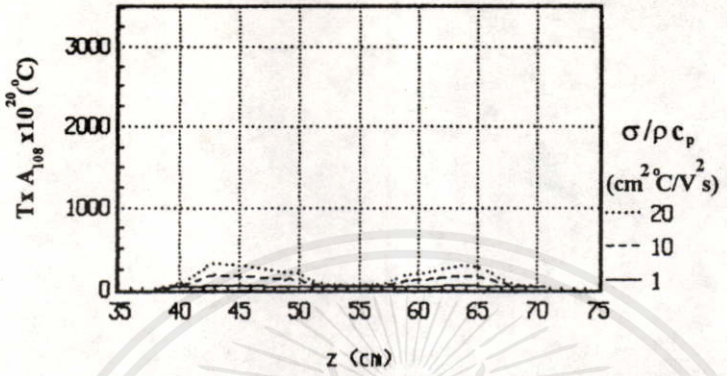
4.3.2-2 ผลการคำนวณการกระจายอุณหภูมิบนสแลบไดอิเล็กตริก เมื่อค่า $\sigma/\rho c_p$ มีค่าต่างๆกัน

การคำนวณจะกำหนดให้ค่า $\alpha_T = 1 \text{ cm}^2/\text{s}$ ความเร็วของสายพานลำเลียงมีค่าเท่ากับ 0.01 cm/s และ $E^2 = A_{108}^2 \times 10^{20} \text{ V}^2/\text{cm}$ เมื่อกำหนดให้ $\sigma/\rho c_p = 1 \text{ cm}^2 \cdot \text{C}/\text{V}^2 \cdot \text{s}$ เป็นค่าอ้างอิง แล้วเปรียบเทียบค่า $\sigma/\rho c_p$ ที่ 1, 10 และ 20 เท่า โดยคำนวณการกระจายอุณหภูมิตามสแลบไดอิเล็กตริกที่ $y = -1$ มิลลิเมตร

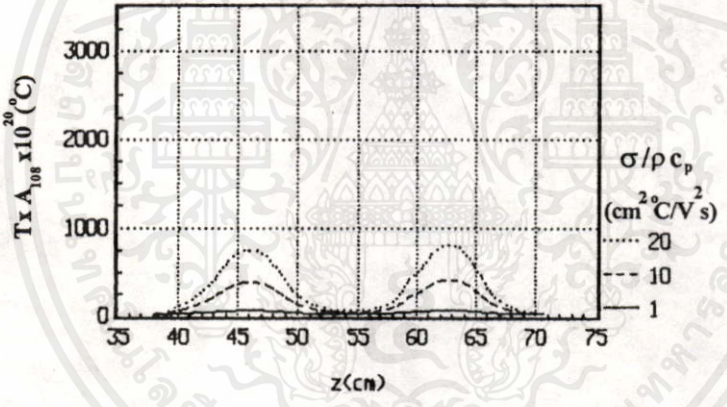
จากรูป 4-12 และ 4-13 จะพบว่าค่า $\sigma/\rho c_p$ เพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามเป็นจำนวนเท่าที่ชัดเจน การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมียังคงขึ้นอยู่กับค่ากำลังสองของสนามไฟฟ้าที่ได้รับในการเคลื่อนที่ผ่านสายอากาศแต่ละตำแหน่ง ค่า α_T จะทำให้อุณหภูมิมีการกระจายสม่ำเสมอตลอดเนื้อไดอิเล็กตริก ซึ่งสังเกตได้จากการกระจายของอุณหภูมิ เมื่อสแลบไดอิเล็กตริกเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างระหว่างท่อนำคลื่น ซึ่งกำหนดให้มีสนามน้อยมากๆ ค่า $\sigma/\rho c_p$ จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่สูง มากกว่าค่า α_T ค่า $\sigma/\rho c_p$ เพิ่มขึ้น 20 เท่า สามารถทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นถึง 2500 เท่า (1000 % ที่ค่า α_T , E^2 , ความเร็วสายพานลำเลียง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

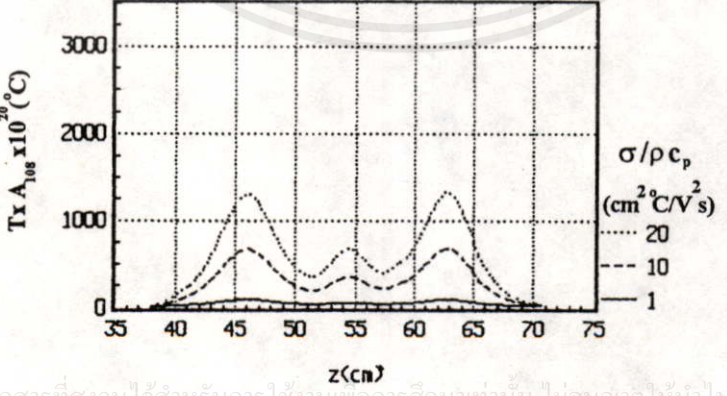
step 1



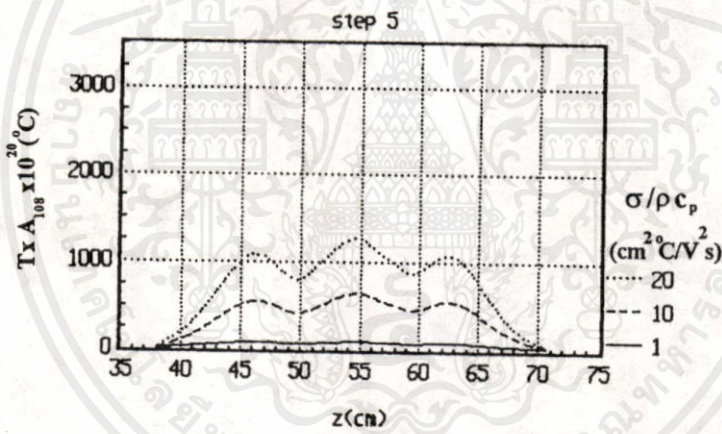
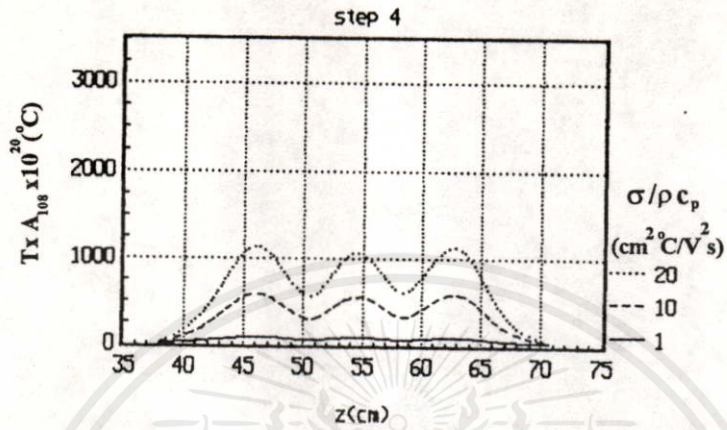
step 2



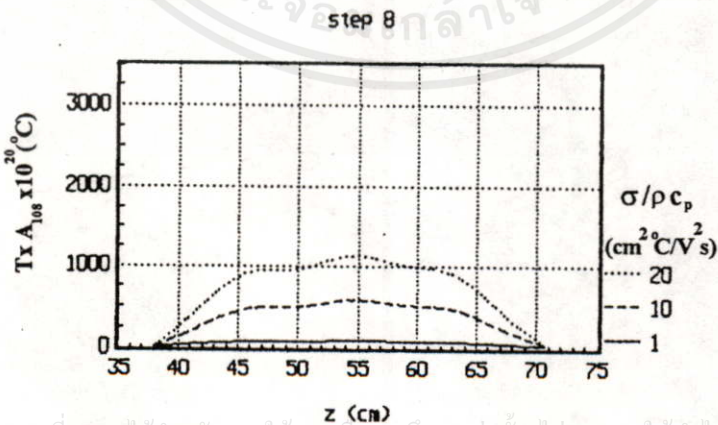
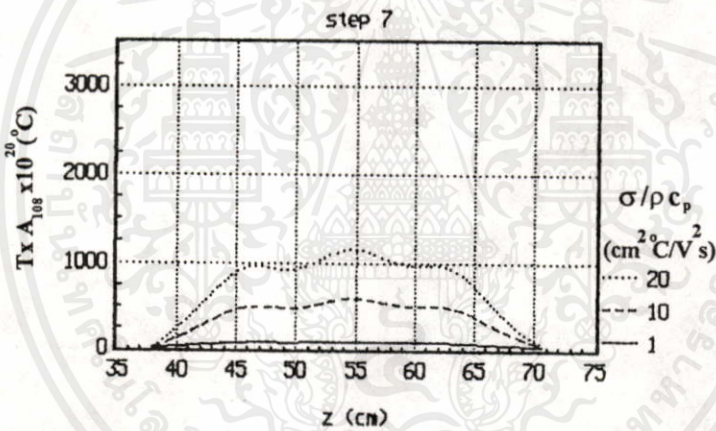
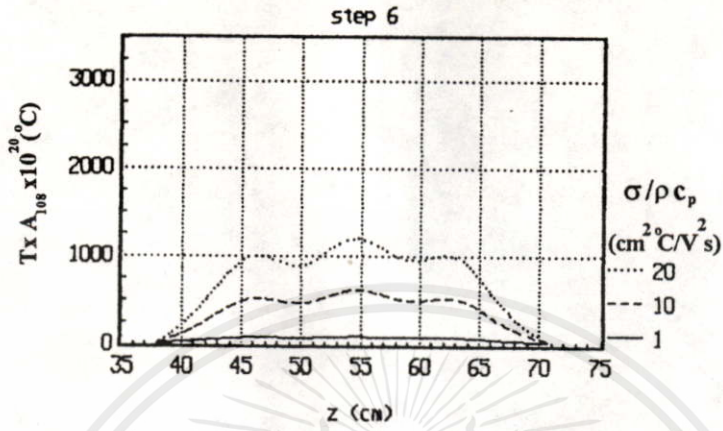
step 3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

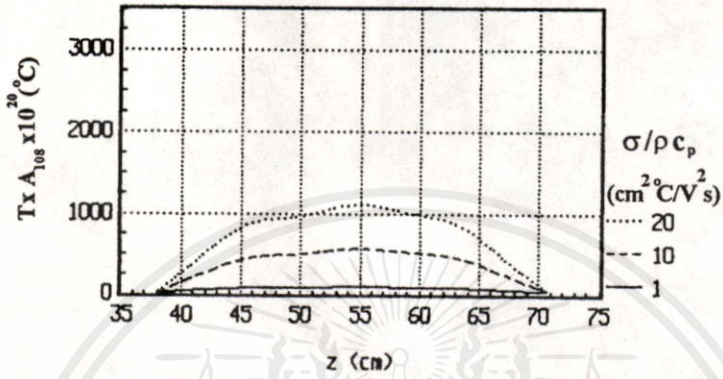


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น. ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น. อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

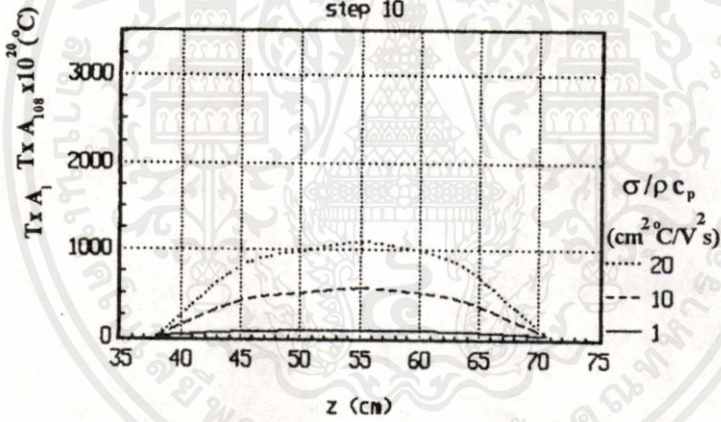


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

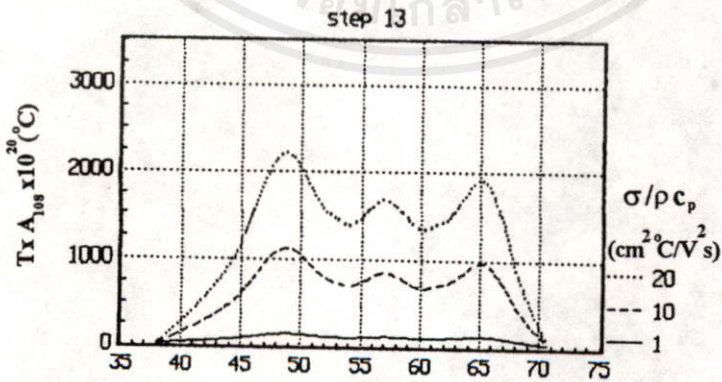
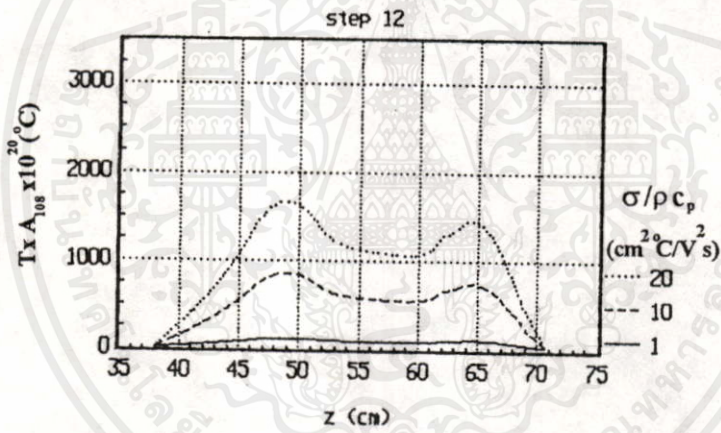
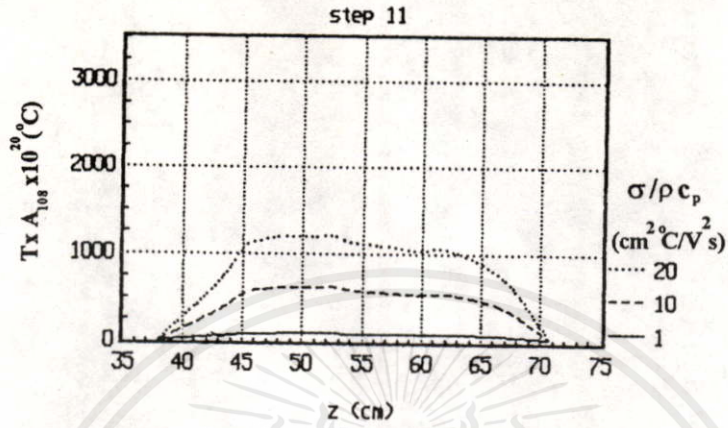
step 9



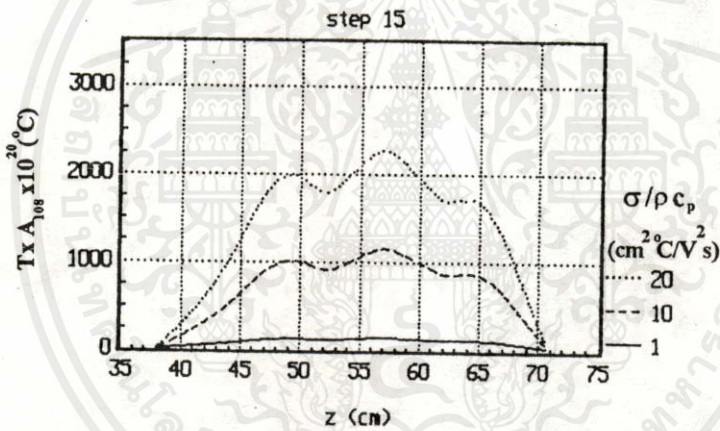
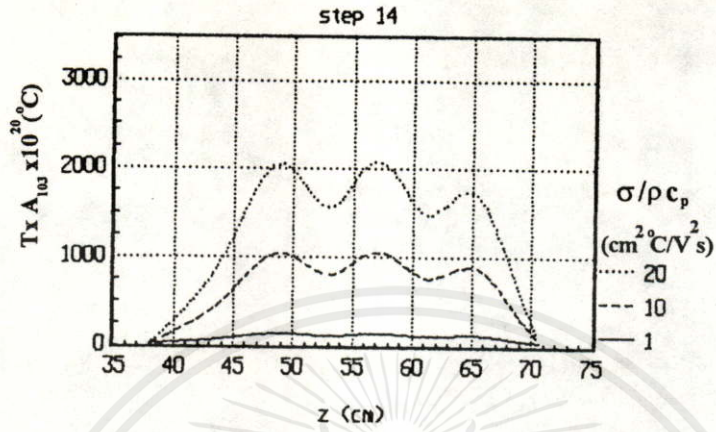
step 10



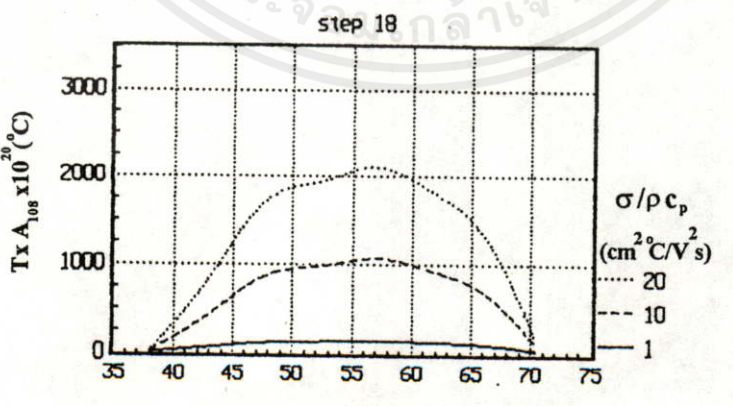
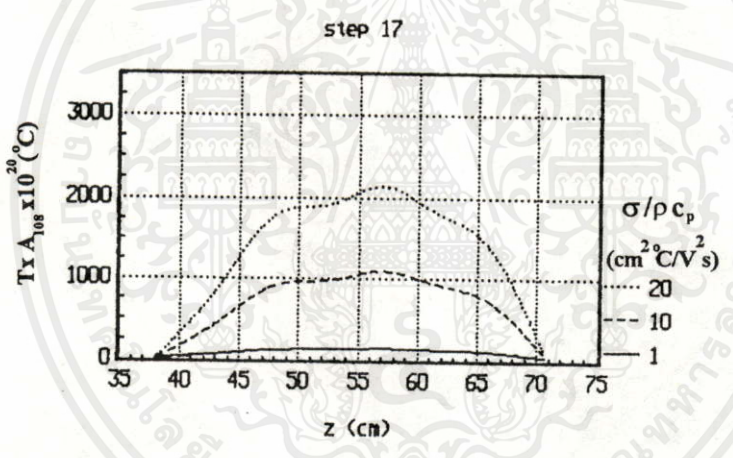
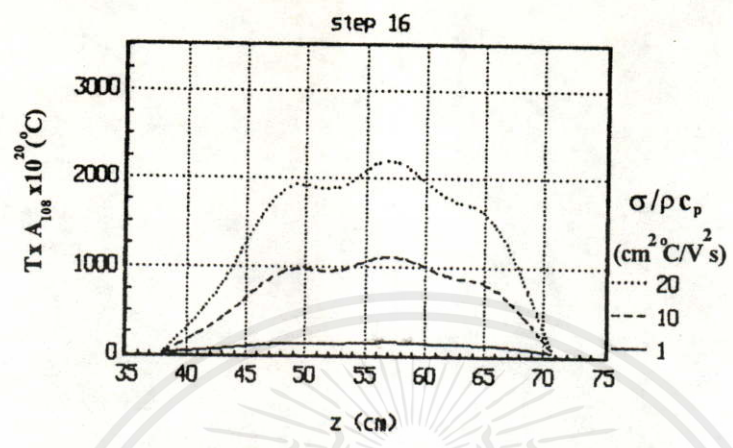
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



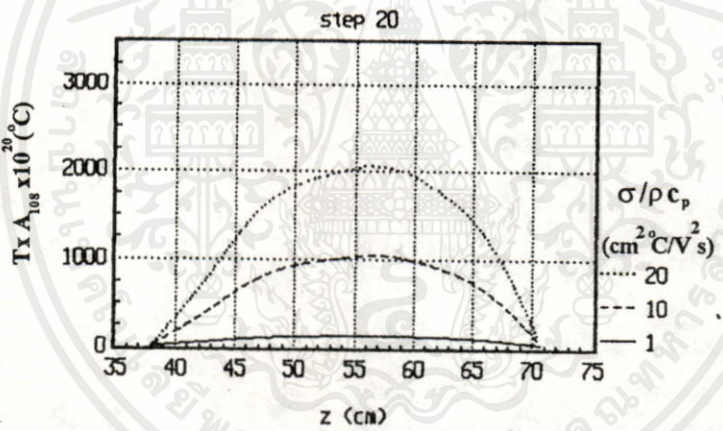
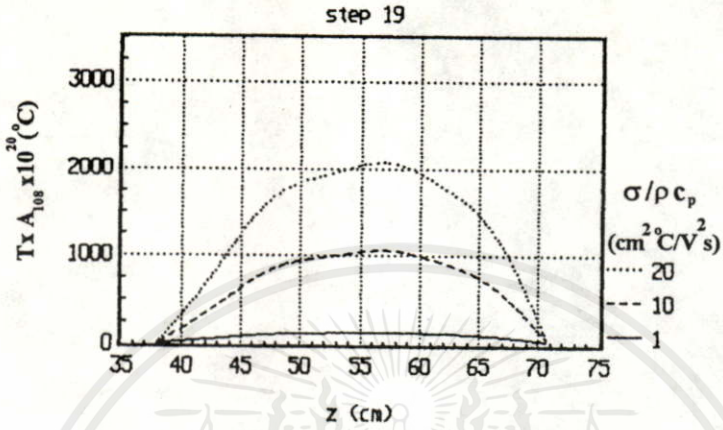
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



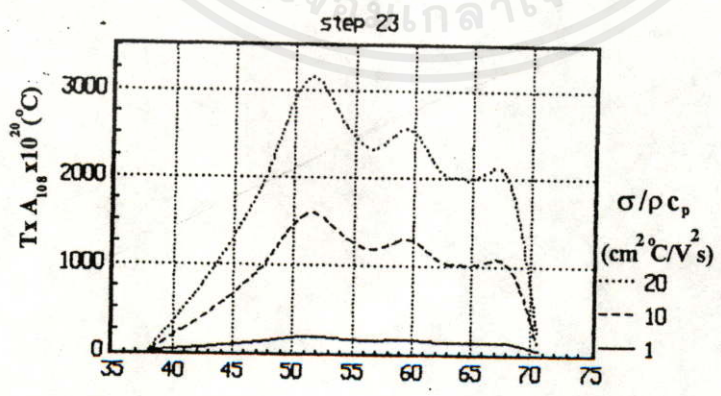
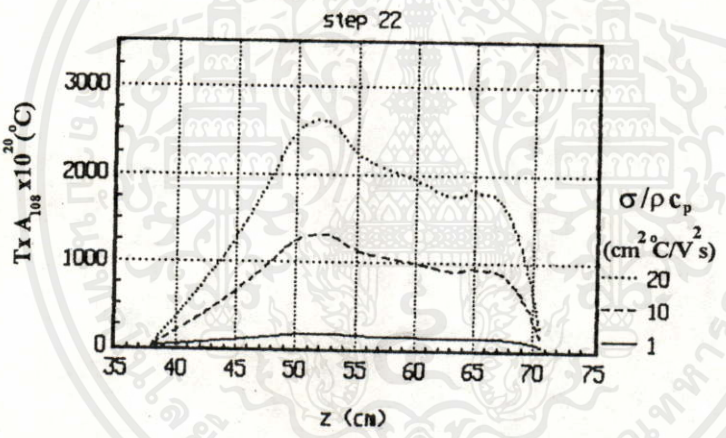
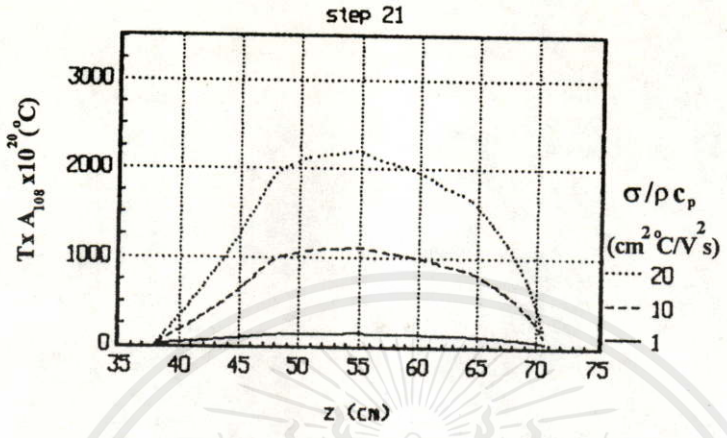
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



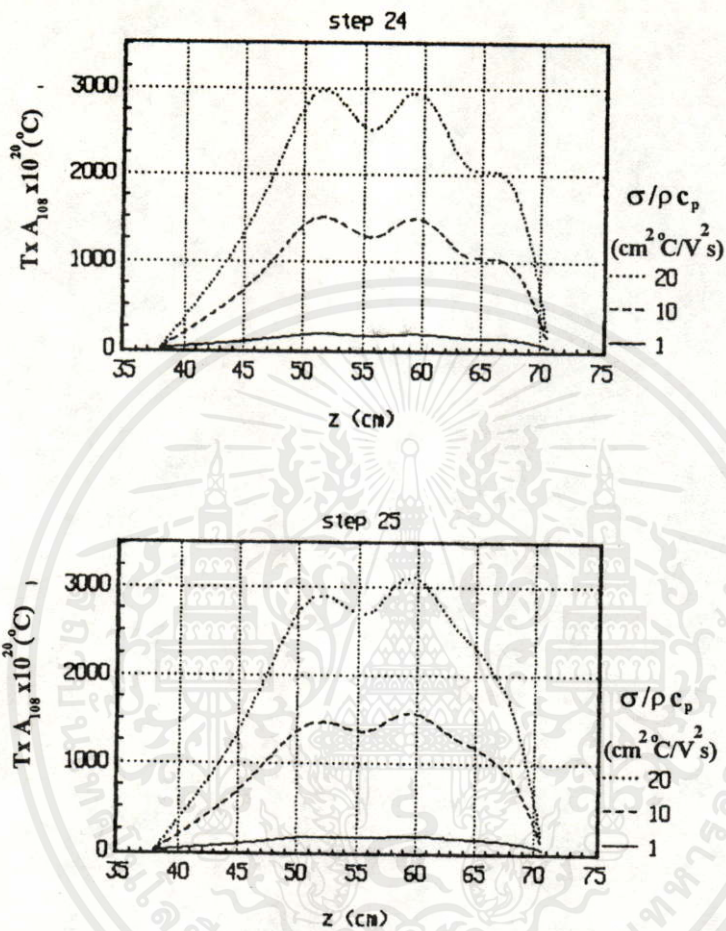
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

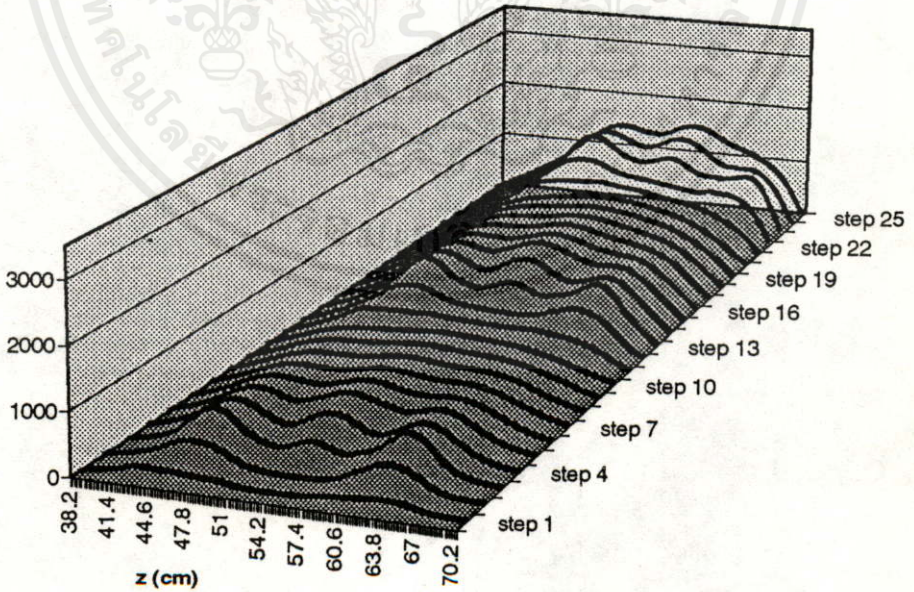
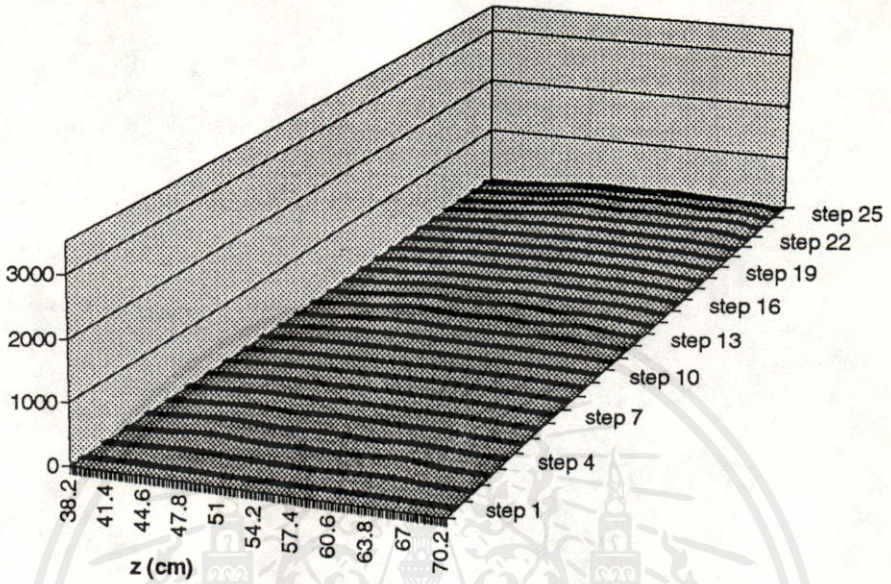


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ z (cm) การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

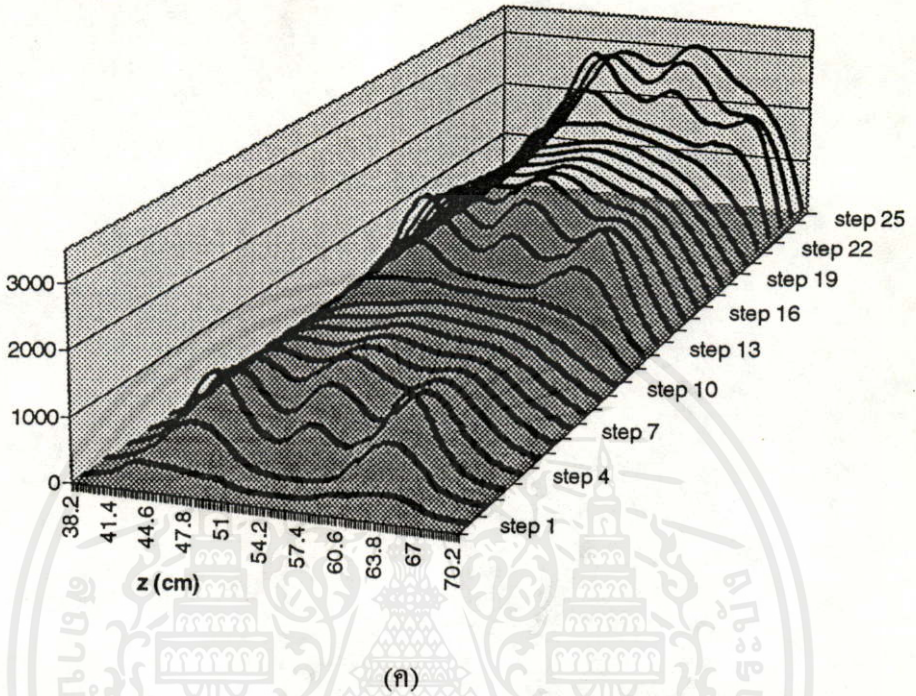


รูป 4-12 step 1-25 เป็นการกระจายอุณหภูมิบนสแลบไดอิเล็กตริก
เมื่อเคลื่อนที่ผ่านสายอากาศสี่ออร์เรย์ 3 สล็อต
บนท่อนำคลื่นทั้ง 3 ท่อนำคลื่น ที่มีค่า $\sigma/\rho c_p$ ต่างๆกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านธุรกิจ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



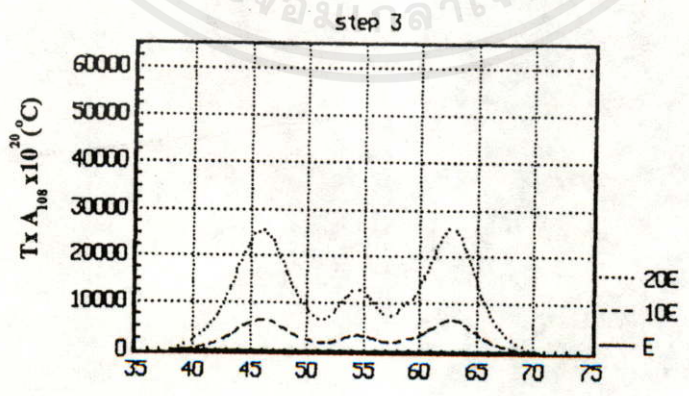
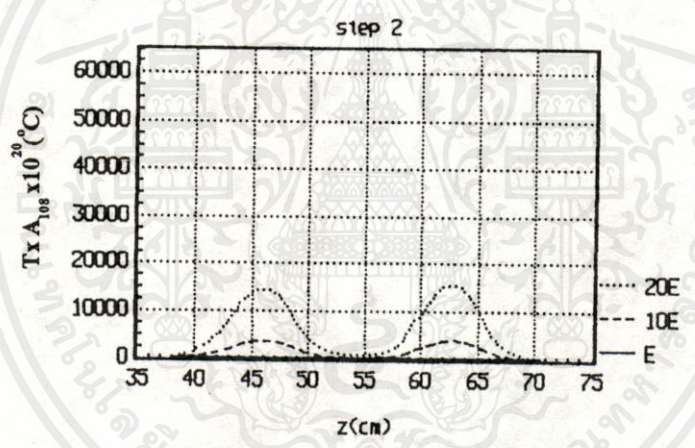
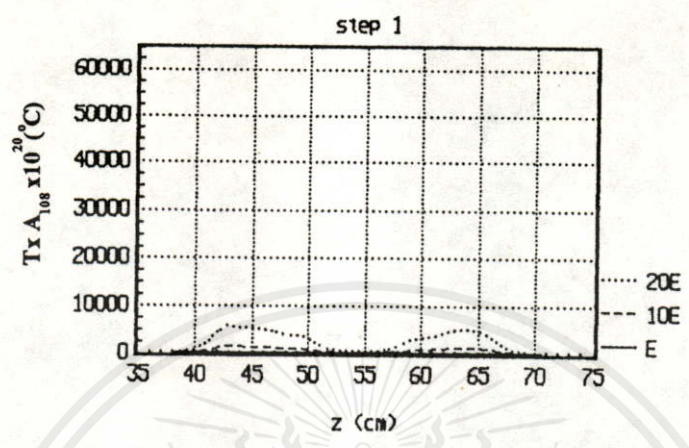
รูป 4-13 ภาพ 3 มิติ แสดงการกระจายอุณหภูมิบนสแลบไดอิเล็กตริก
เมื่อเคลื่อนที่ผ่านสายอากาศสี่คอร์เรย์ 3 สล็อต บน
ท่อนำคลื่นทั้ง 3 ท่อนำคลื่น ในการเคลื่อนที่แต่ละ step ที่มีค่า
(ก) $\sigma/\rho c_p = 1 \text{ cm}^2 \text{ }^\circ\text{C} / \text{V}^2 \text{ s}$
(ข) $\sigma/\rho c_p = 10 \text{ cm}^2 \text{ }^\circ\text{C} / \text{V}^2 \text{ s}$
(ค) $\sigma/\rho c_p = 20 \text{ cm}^2 \text{ }^\circ\text{C} / \text{V}^2 \text{ s}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

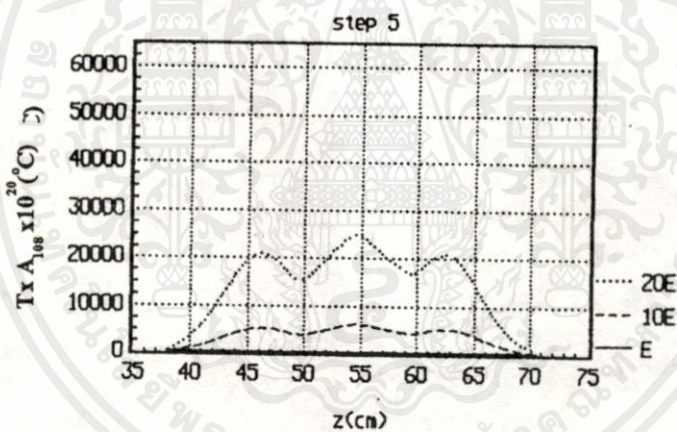
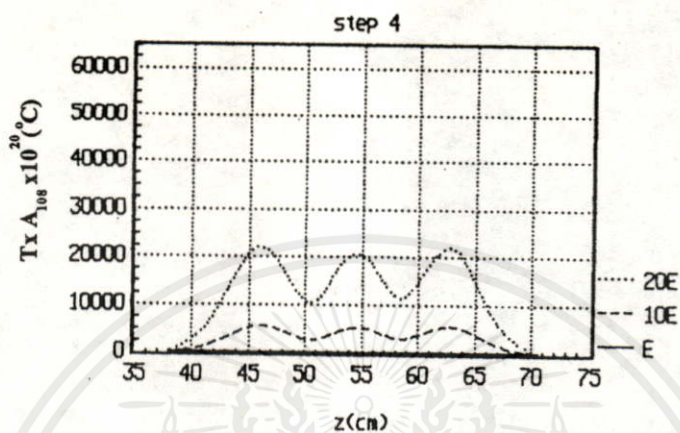
4.3.2-3 ผลการคำนวณการกระจายอุณหภูมิบนสแลบไดอิเล็กตริก เมื่อมีค่าสนามไฟฟ้า (E) ต่างๆกัน

ในการคำนวณจะทำการคำนวณที่ระยะห่างระหว่างสแลบไดอิเล็กตริกและระนาบปากสล็อต 1 มิลลิเมตร ($y=1$ มิลลิเมตร) กำหนดให้ค่าสนามไฟฟ้า $E = A_{108} \times 10^{10} \text{ V/cm}$ เป็นค่าอ้างอิง สนามไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นมีค่าเป็น 10 และ 20 เท่า และให้ $\alpha_T = 1 \text{ cm}^2/\text{s}$, $\sigma/\rho c_p = 1 \text{ cm}^2 \cdot \text{C}/\text{V}^2 \text{ s}$, และความเร็วสายพานลำเลียงเท่ากับ 0.01 cm/s มีค่าคงที่ และมีระยะห่างของสแลบไดอิเล็กตริกกับระนาบปากสล็อตเป็นระยะ 1 มิลลิเมตร เมื่ออุณหภูมิเริ่มต้นเท่ากับ $29 \text{ }^\circ\text{C}$

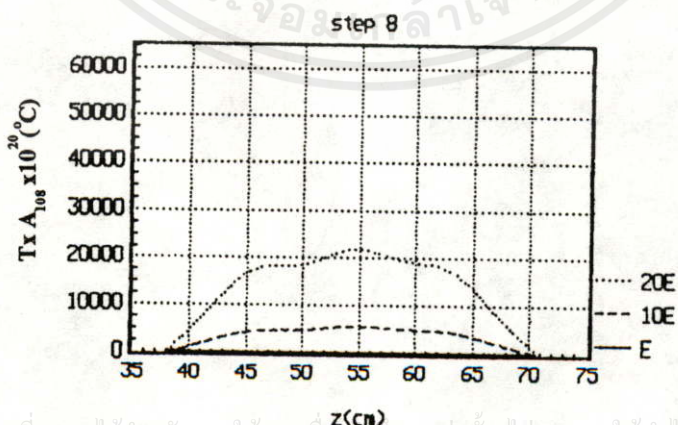
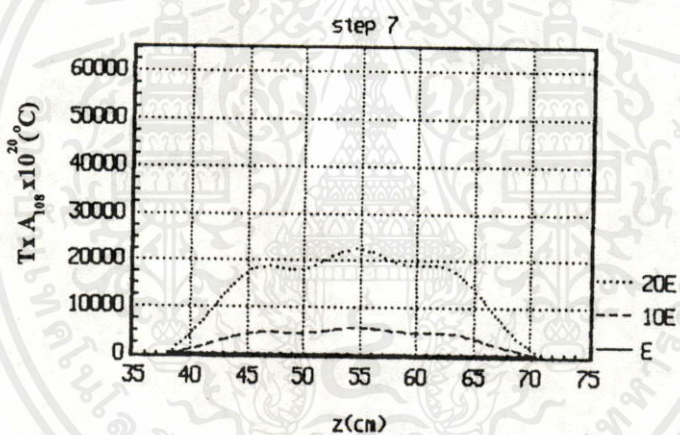
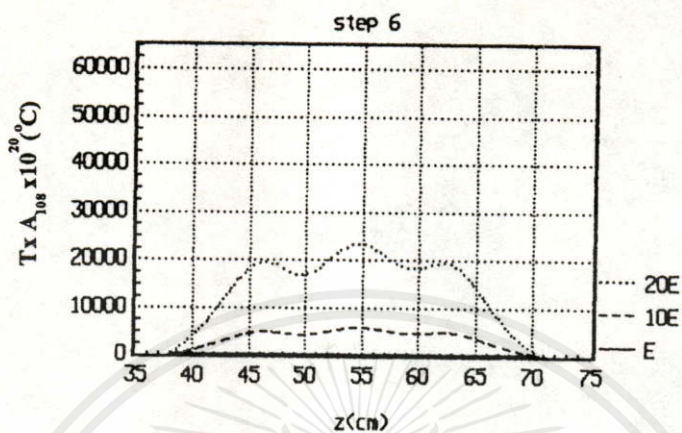
เมื่อพิจารณารูป 4-14 และ 4-15 การเพิ่มของสนามไฟฟ้าจะทำให้การเพิ่มของอุณหภูมิสูงมากๆ เนื่องจากแหล่งกำเนิดความร้อนภายใน ขึ้นอยู่กับค่า $\sigma/\rho c_p$ และค่ากำลังสองของสนามไฟฟ้า ดังนั้นการเพิ่มของสนามไฟฟ้า 20 เท่า จะทำให้ค่ากำลังสองของสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้นถึง 400 เท่า ซึ่งจะพบว่า การเพิ่มค่าสนามไฟฟ้าจะมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิมากกว่าการเพิ่มพารามิเตอร์อื่น นอกจากนี้ค่าสนามไฟฟ้ายังขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างไดอิเล็กตริกกับระนาบปากสล็อตอีกด้วย



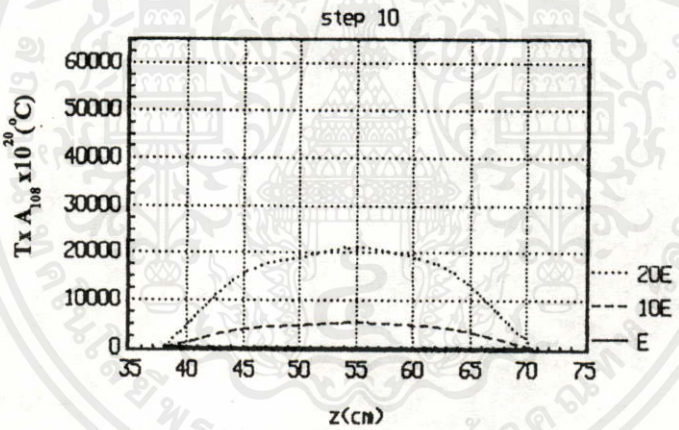
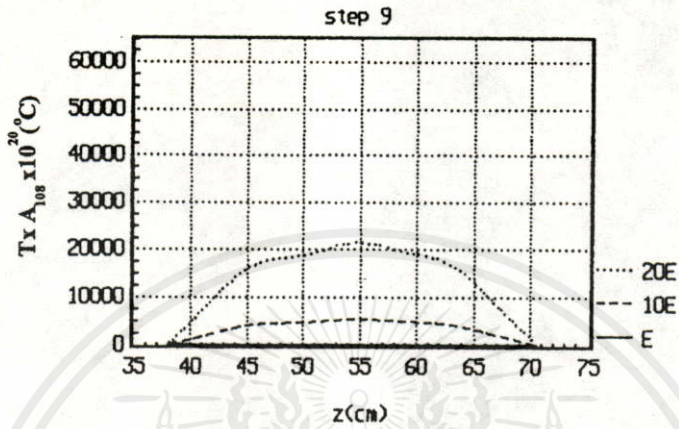
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานที่ใช้การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



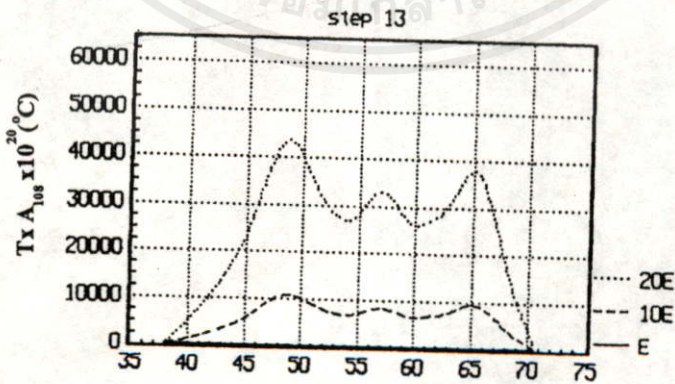
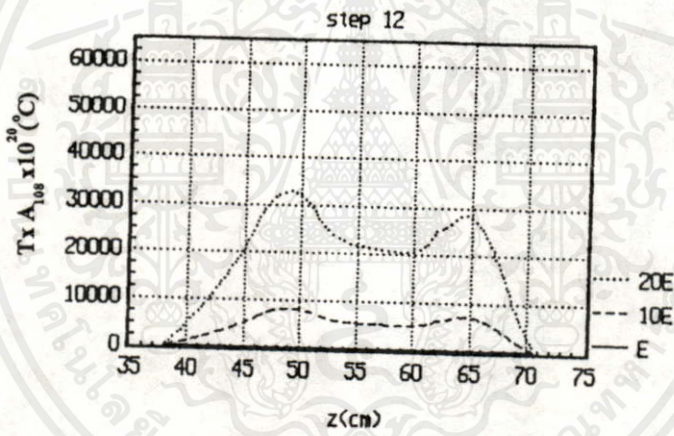
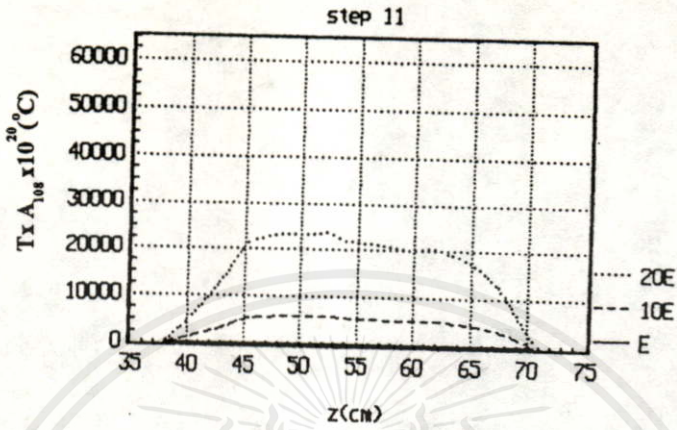
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



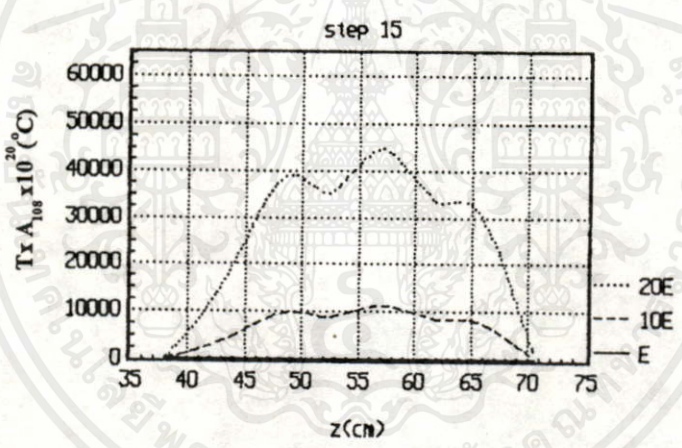
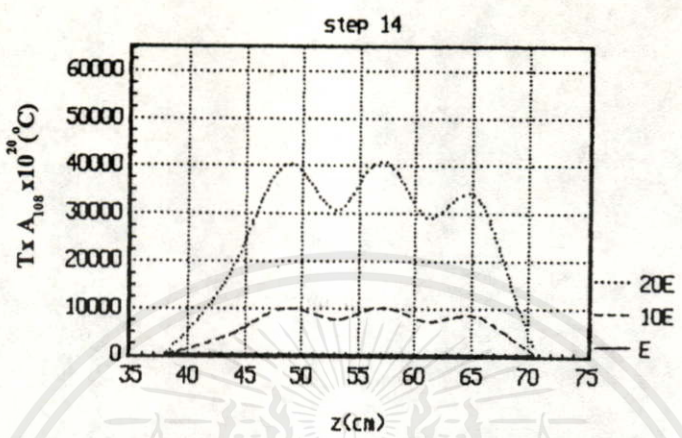
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีอานนำไปใช้



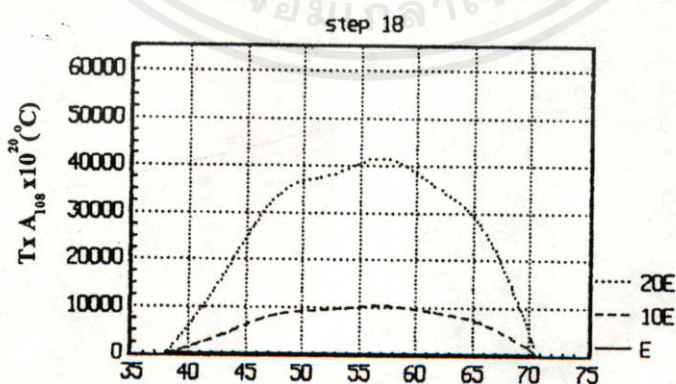
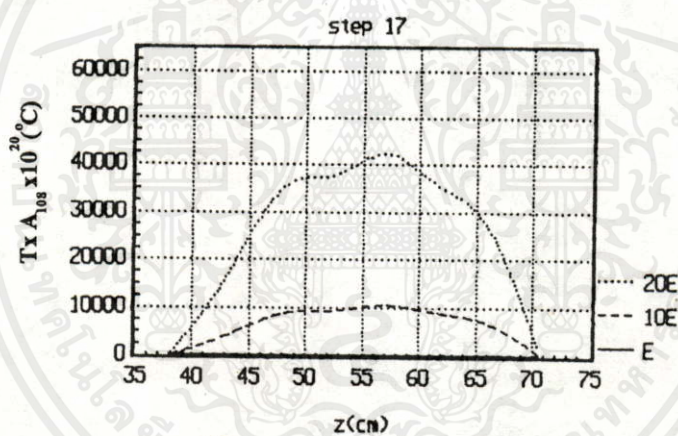
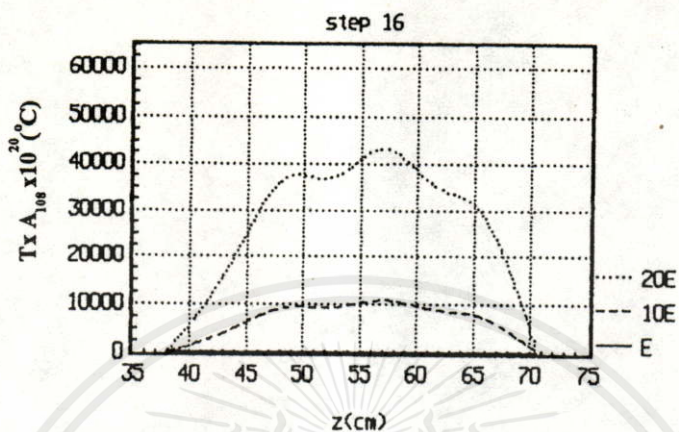
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



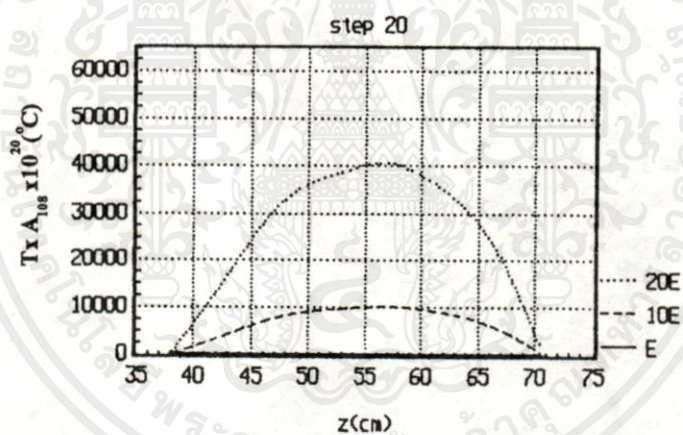
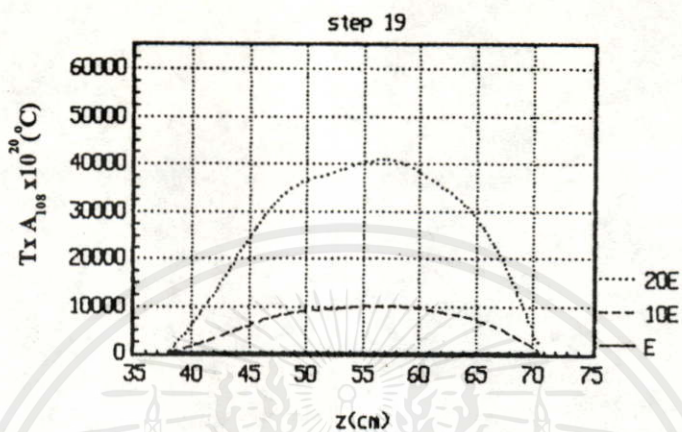
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



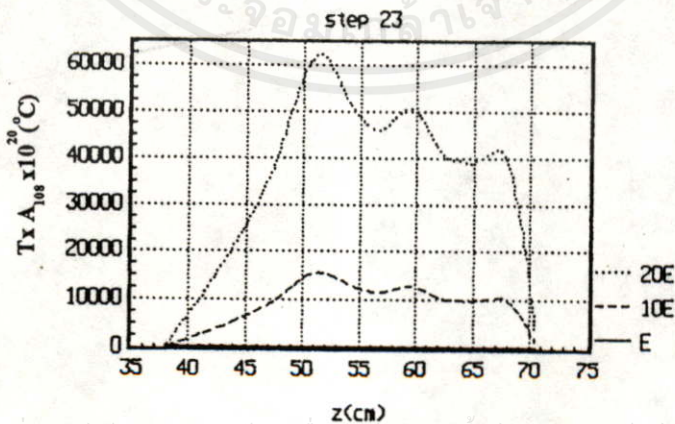
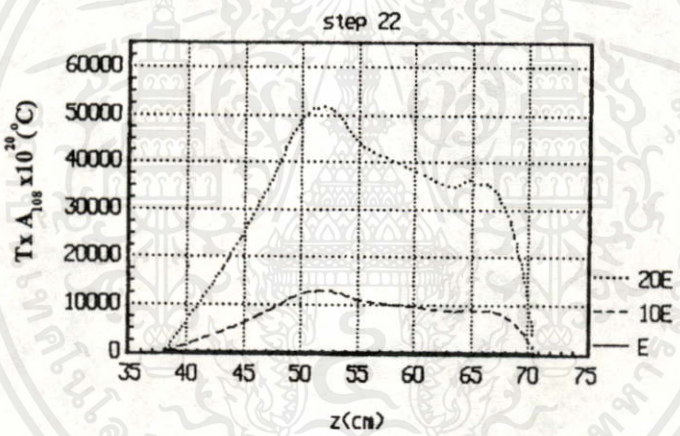
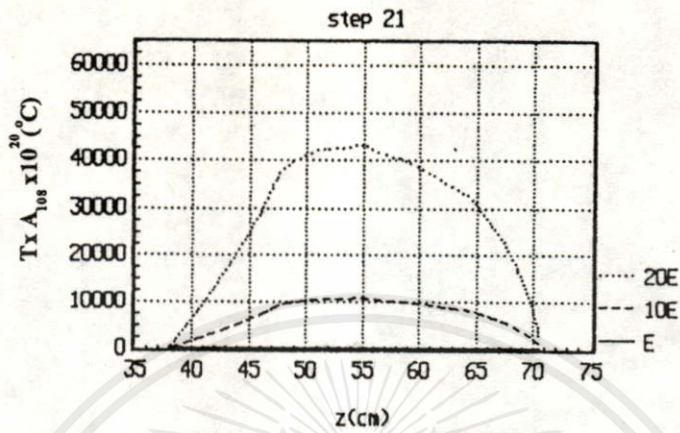
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



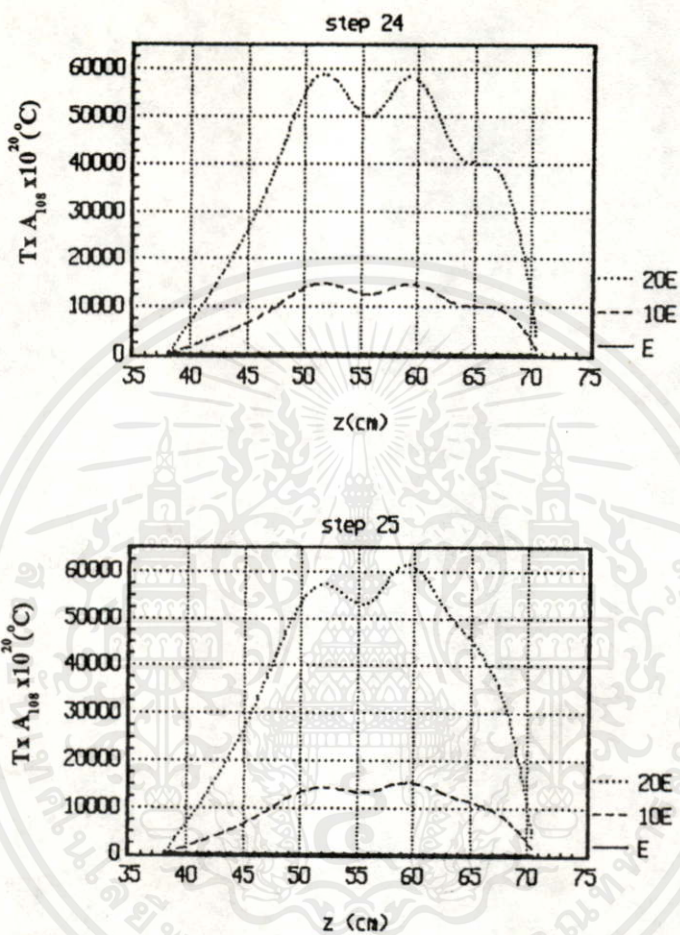
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านกวดำ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

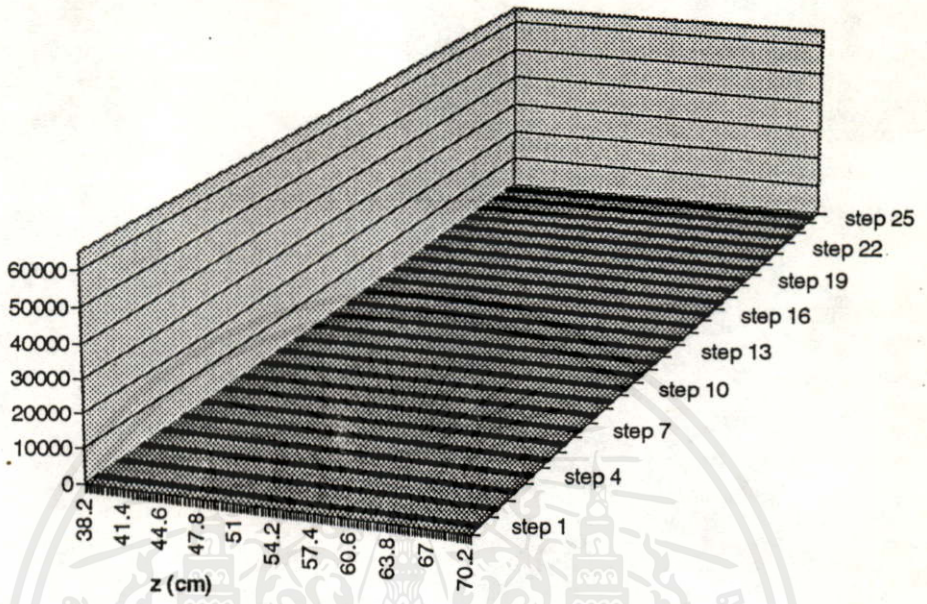


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีครรนำไปใช้

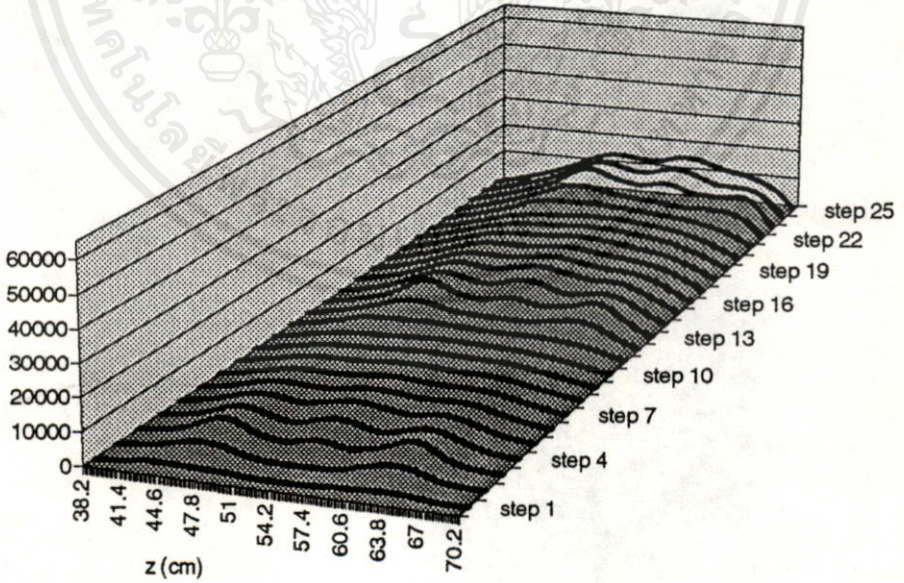


รูป 4-14 step 1-25 เป็นการกระจายอุณหภูมิบนสแลบไดอิเล็กตริก
เมื่อเคลื่อนที่ผ่านสายอากาศสี่อาร์ทาร์เรย์ 3 สล็อต
บนท่อนำคลื่นทั้ง 3 ท่อนำคลื่น ที่มีค่า E ต่างๆกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

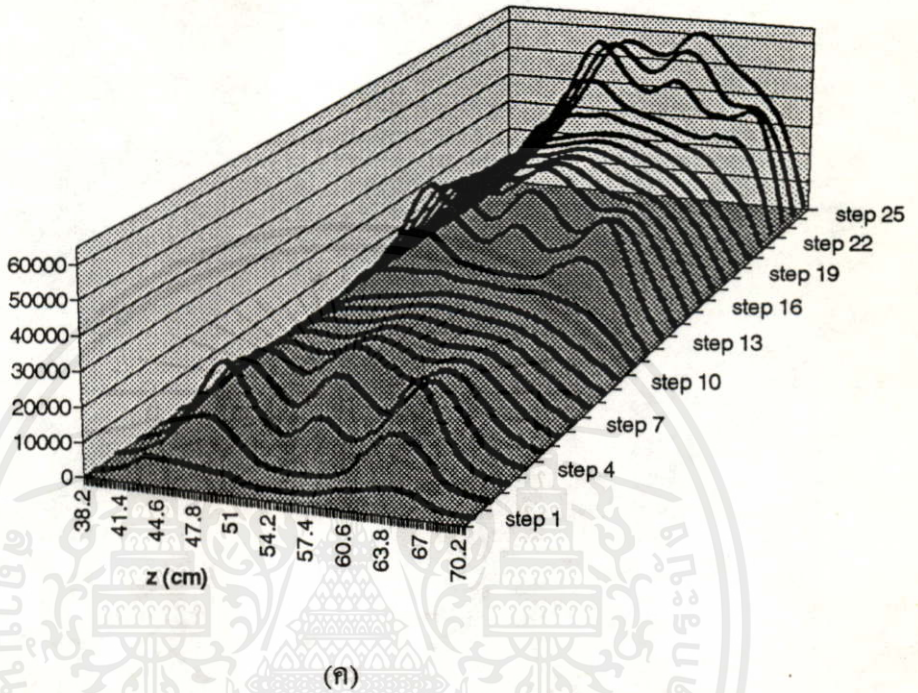


(ก)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ข)



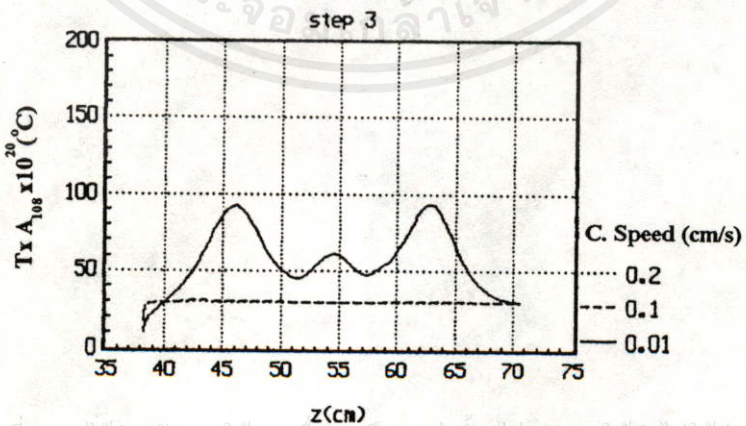
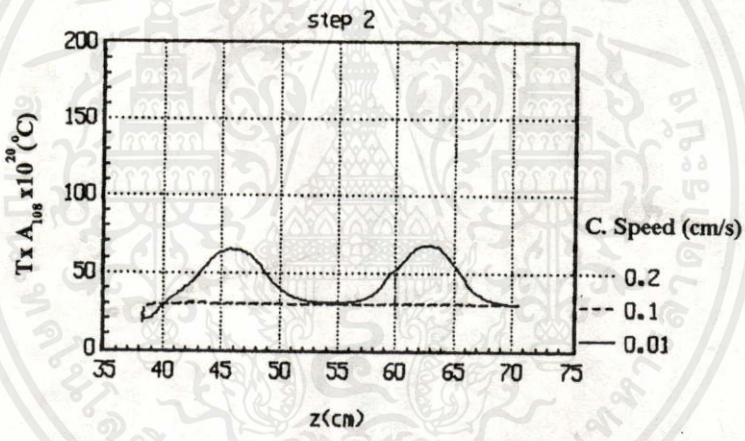
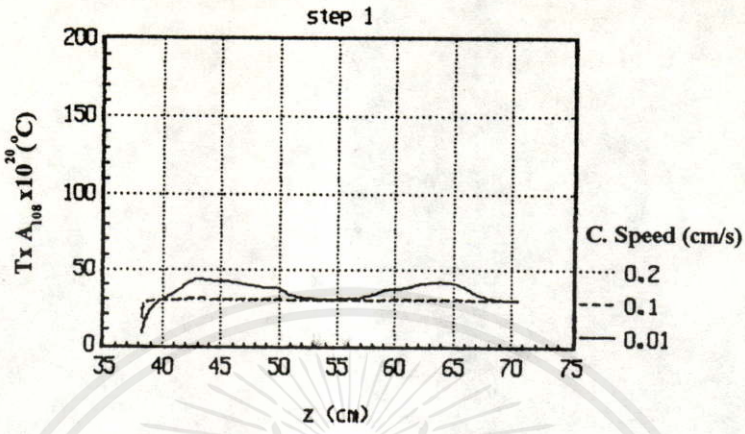
รูป 4-15 ภาพ 3 มิติ แสดงการกระจายอุณหภูมิบนสแลบไดอิเล็กตริก
เมื่อเคลื่อนที่ผ่านสายอากาศสี่อาร์ทรี 3 สล็อต บน
ท่อนำคลื่นทั้ง 3 ท่อนำคลื่น ในการเคลื่อนที่แต่ละ step ที่มีค่า
(ก) สนามไฟฟ้า $E = A_{108} \times 10^{10} \text{ V/cm}$
(ข) สนามไฟฟ้า $E = 10 \times A_{108} \times 10^{10} \text{ V/cm}$
(ค) สนามไฟฟ้า $E = 20 \times A_{108} \times 10^{10} \text{ V/cm}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

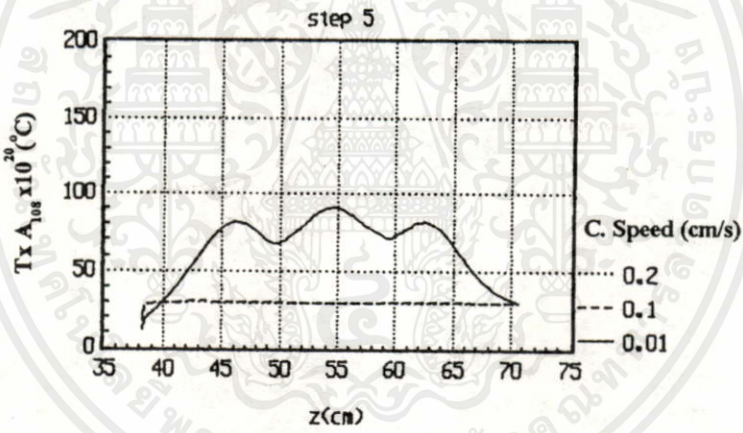
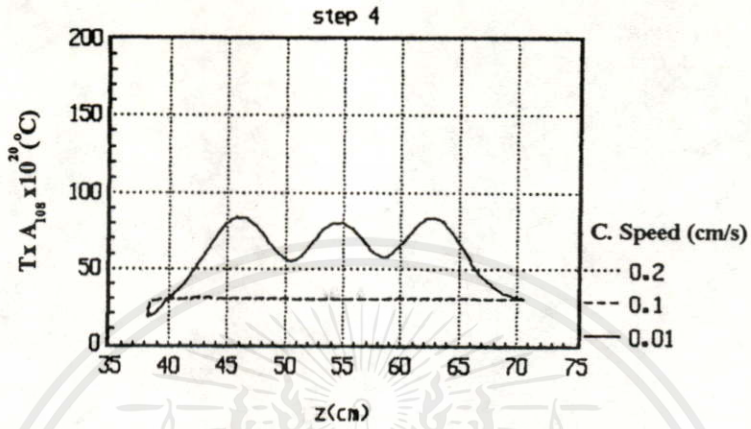
4.3.2-4 ผลการคำนวณการกระจายอุณหภูมิบนสแลบไดอิเล็กตริก เมื่อความเร็วสายพานลำเลียงมีค่าต่างๆ กัน

การคำนวณก็คล้ายกับหัวข้อที่ผ่านมา โดยจะเปลี่ยนแปลงความเร็วสายพานลำเลียงจากค่าอ้างอิง 0.01 cm/s แล้วเพิ่มค่าขึ้น 10 และ 20 เท่า เป็น 0.1 และ 0.2 cm/s ตามลำดับ โดยที่พารามิเตอร์อื่น ๆ มีค่าคงที่ คือ $\alpha_T = 1 \text{ cm}^2/\text{s}$, $\sigma/\rho c_p = 1 \text{ cm}^2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{V}^2 \text{ s}$, และค่าสนามไฟฟ้า $E = A_{108} \times 10^{10} \text{ V/cm}$ โดยยังคงคำนวณที่ระยะห่างระหว่างสแลบไดอิเล็กตริกและระนาบปากสล็อต 1 มิลลิเมตร ($y = -1$ มิลลิเมตร) เมื่อสแลบไดอิเล็กตริกมีอุณหภูมิเริ่มต้นเท่ากับ $29 \text{ }^\circ\text{C}$

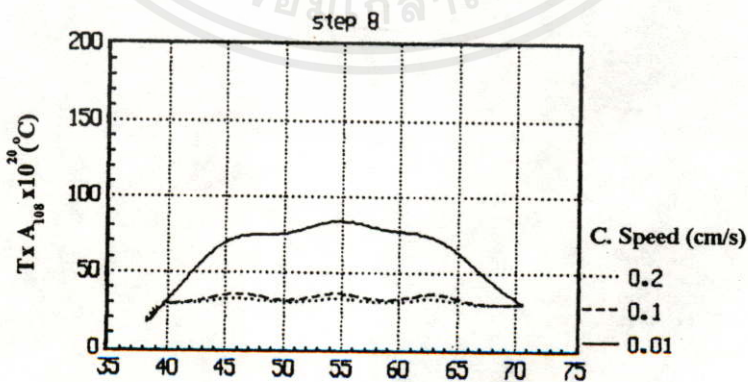
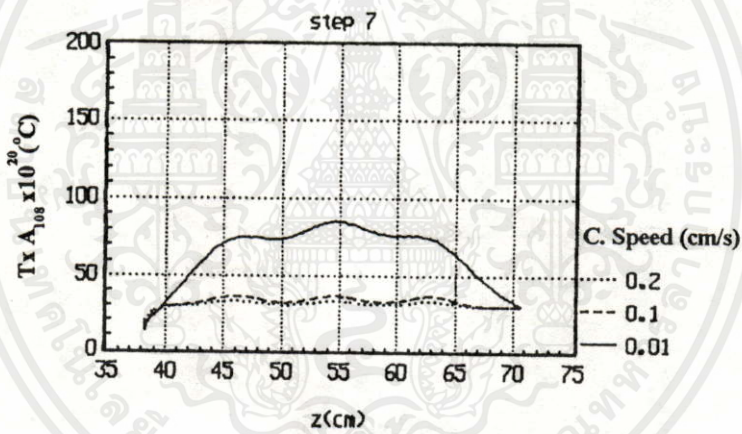
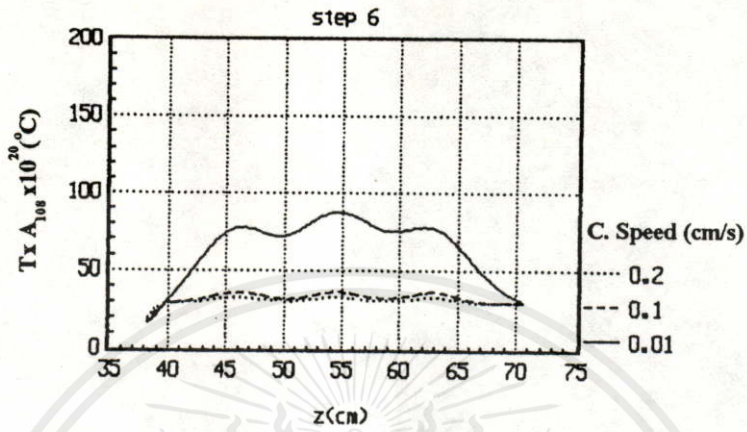
กราฟรูป 4-16 และ 4-17 ได้แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มความเร็วสายพานลำเลียง (C. Speed) ที่ค่า α_T , $\sigma/\rho c_p$ และ E^2 ตามค่าข้างบน การเพิ่มความเร็วสายพานลำเลียง 10 และ 20 เท่า ทำให้อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมिन้อยมาก แสดงว่าที่พารามิเตอร์ค่าต่างๆ นี้ ทำให้อัตราการถ่ายเทอุณหภูมิไปยังบริเวณข้างเคียงสูงกว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในเนื้อไดอิเล็กตริก การเพิ่มขึ้นของความเร็วสายพานทำให้อุณหภูมิตะสมเพิ่มขึ้นน้อยกว่า ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากความเร็วสายพานลำเลียง 0.01 cm/s ที่ความเร็วนี้เป็นความเร็วที่ทำให้อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิตะสมสูงกว่าอัตราการถ่ายเทอุณหภูมิไปยังบริเวณข้างเคียง จากรูป 4-16 และ 4-17 ยังสามารถทำนายได้ว่าถ้าความเร็วสายพานลำเลียงช้ามาก ๆ จะทำให้ความร้อนสะสมในบริเวณที่ได้รับสนามไฟฟ้าสูงๆ เกิดปัญหาความร้อนเฉพาะจุด (hot spot) เกิดขึ้น ดังนั้นความเร็วของสายพานลำเลียงจะต้องสัมพันธ์กับคุณสมบัติไดอิเล็กตริกแต่ละชนิดและค่ากำลังงานของไมโครเวฟอีกด้วย



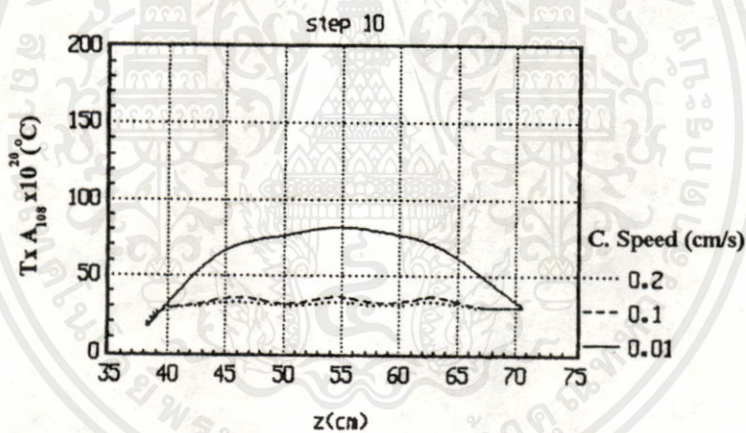
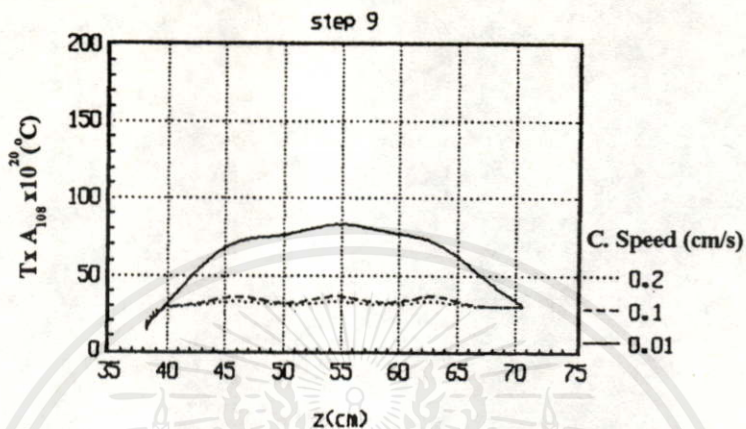
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



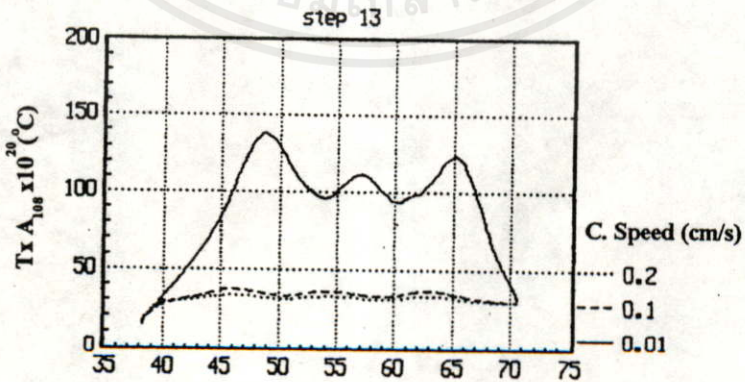
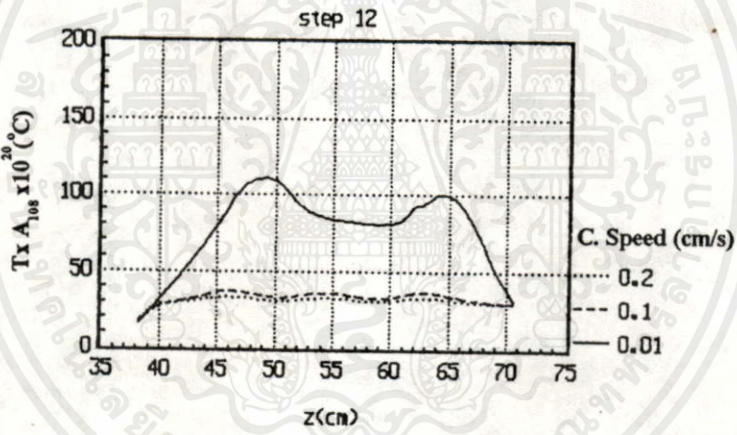
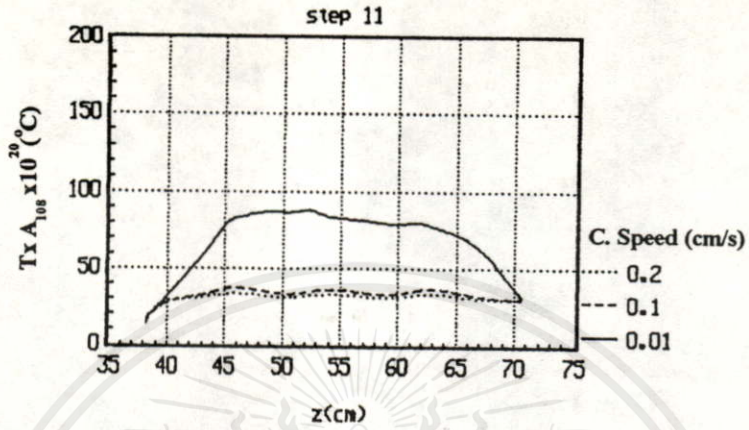
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



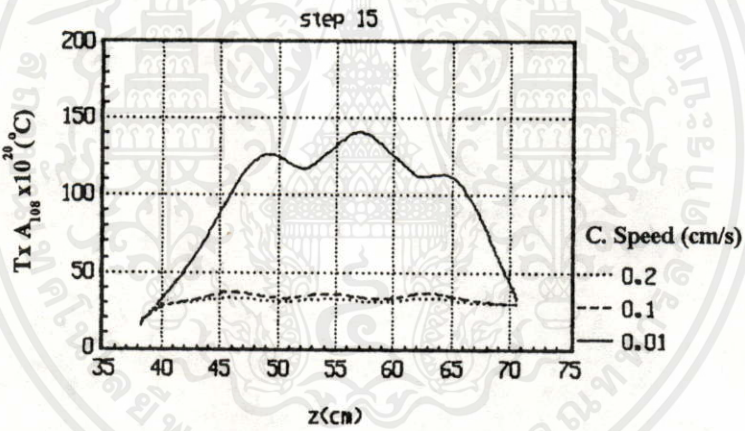
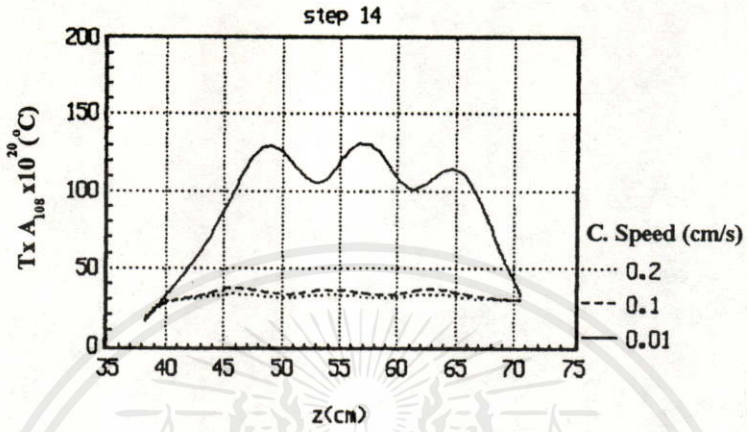
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งาน $z(cm)$ ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



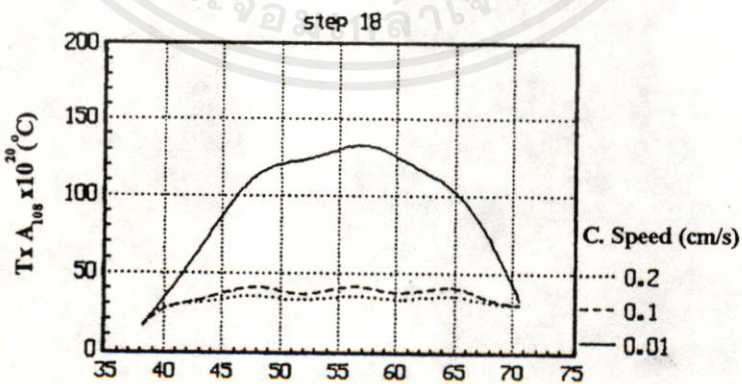
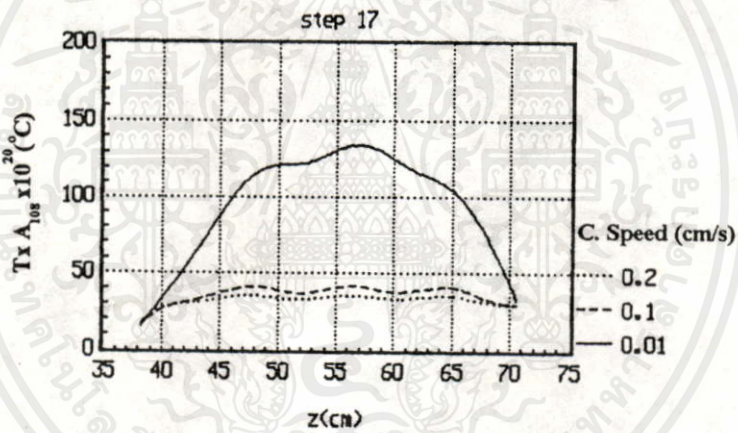
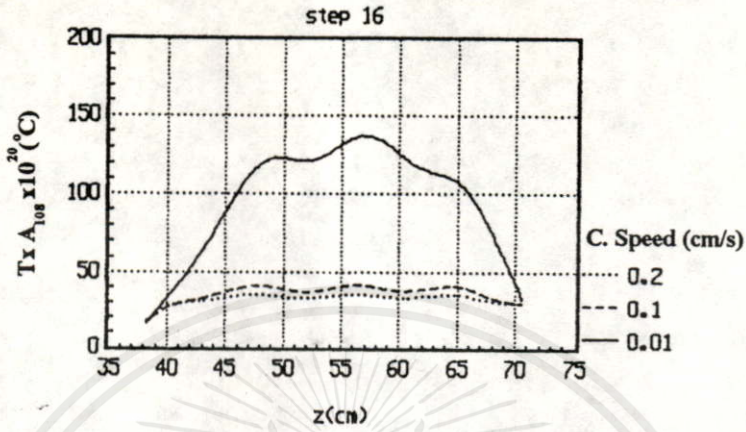
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



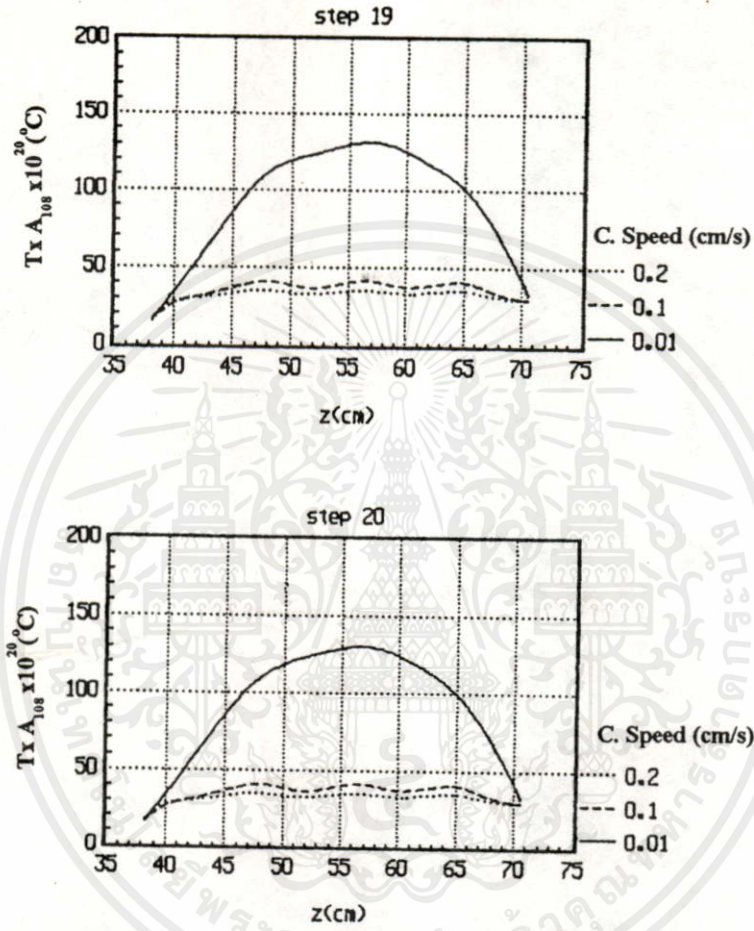
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน $z(\text{cm})$ ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



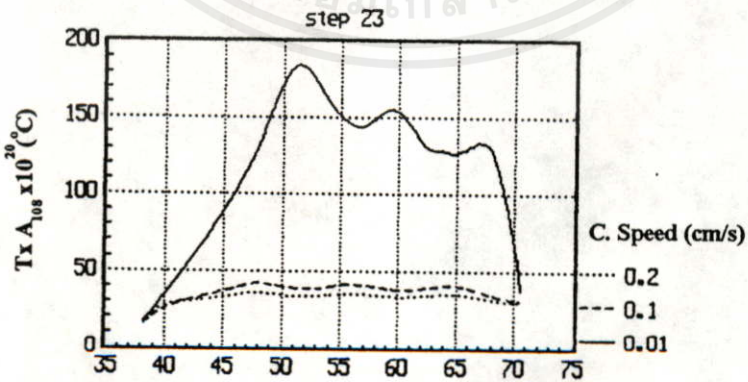
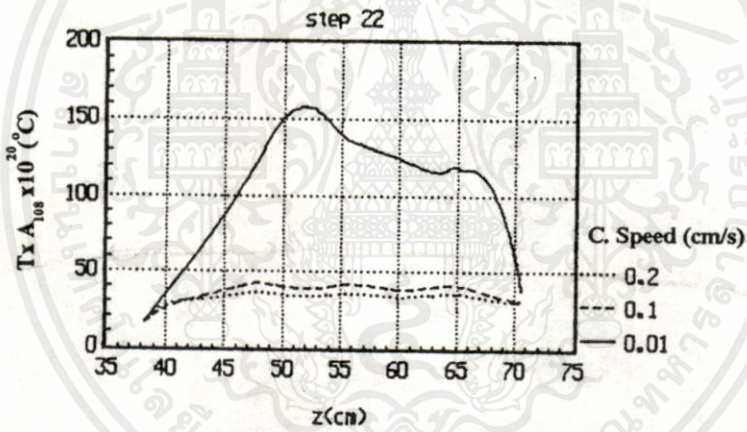
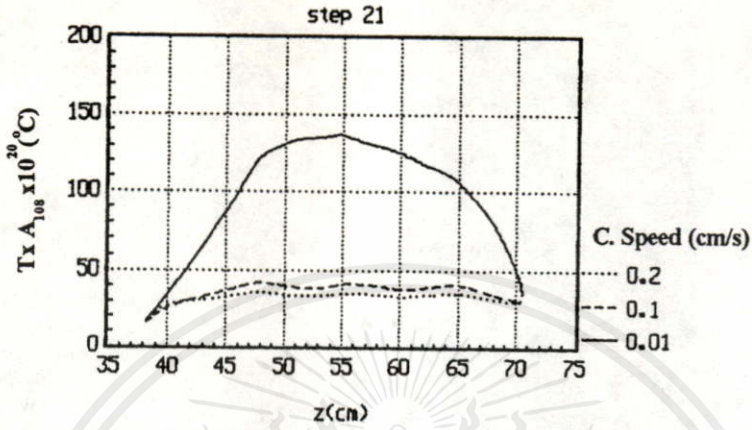
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



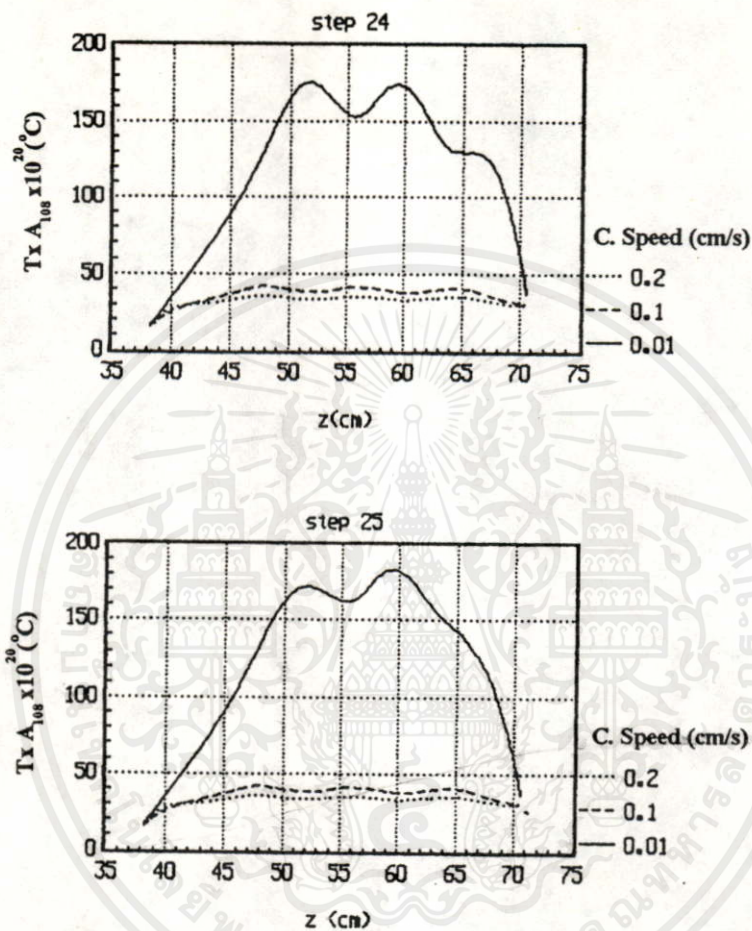
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

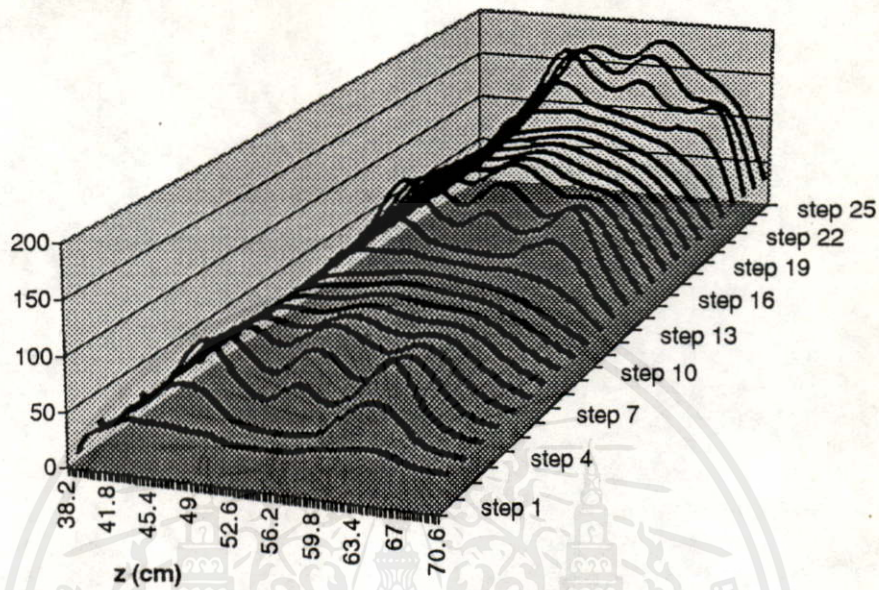


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้ $z(\text{cm})$ การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

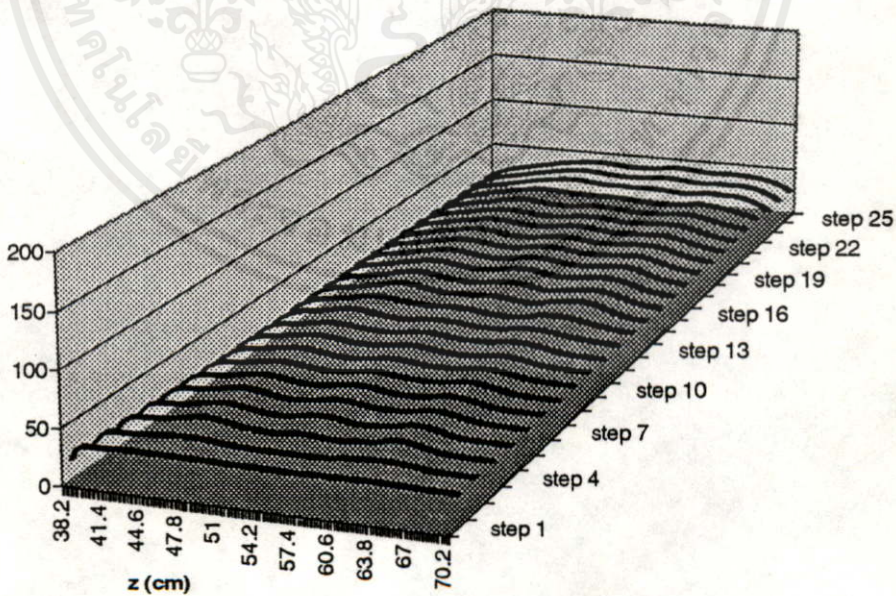


รูป 4-16 step 1-25 เป็นการกระจายอุณหภูมิบนสแลบไดอิเล็กตริก
เมื่อเคลื่อนที่ผ่านสายอากาศสี่ขั้วอาร์เรย์ 3 สลิต
บนท่อนำคลื่นทั้ง 3 ท่อนำคลื่น ที่มีความเร็วสายพาน
ลำเลียงต่างๆกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

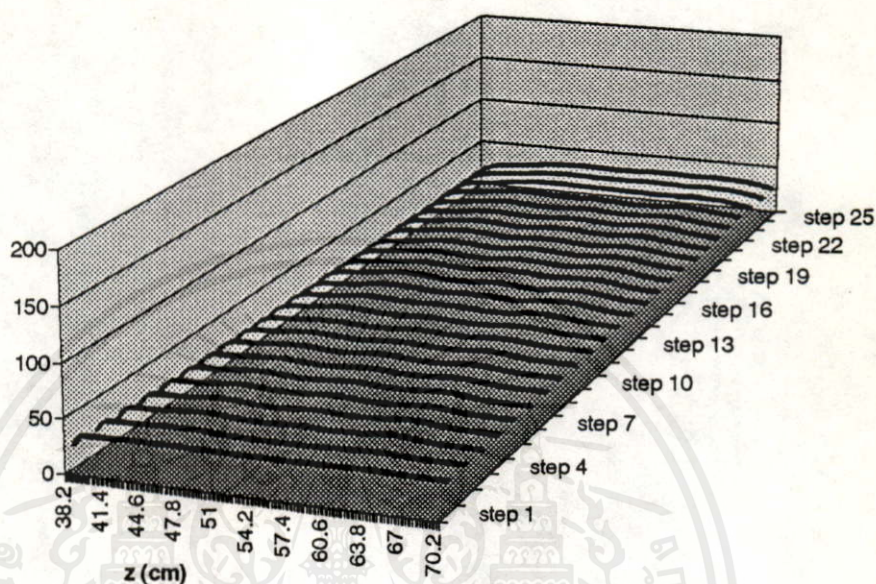


(ก)



(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

- รูป 4-17 ภาพ 3 มิติ แสดงการกระจายอุณหภูมิบนสแลบไดอิเล็กตริก
 เมื่อเคลื่อนที่ผ่านสายอากาศสี่คอร์เรย์ 3 สล็อต บน
 ท่อนำคลื่นทั้ง 3 ท่อนำคลื่น ในการเคลื่อนที่แต่ละ step ที่มีค่า
 (ก) ความเร็วสายพานลำเลียง 0.01 cm/s
 (ข) ความเร็วสายพานลำเลียง 0.1 cm/s
 (ค) ความเร็วสายพานลำเลียง 0.2 cm/s

4.4 สรุป

จากการพิจารณาผลของการเปลี่ยนพารามิเตอร์ α_T , $\sigma/\rho c_p$, E , และความเร็วสายพานลำเลียง ต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ โดยการเทียบกับค่าอ้างอิงเดียวกัน และมีการเพิ่มเป็นจำนวนเท่าๆกัน ผลการคำนวณได้แสดงให้เห็นว่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการเพิ่มของอุณหภูมิมากที่สุด คือ $E, \sigma/\rho c_p$ ตามลำดับ แต่สำหรับค่า α_T และความเร็วของสายพาน เมื่อมีค่ามากขึ้น อุณหภูมิจะสูงขึ้น เมื่อพิจารณาความสม่ำเสมอของการกระจายสนามไฟฟ้าตลอดแนวหน้าตัดสายพานลำเลียง พบว่าพารามิเตอร์ที่มีผลมากที่สุด ก็คือความเร็วของสายพานลำเลียง, α_T , สนามไฟฟ้า, และค่า $\sigma/\rho c_p$

อย่างไรก็ตามในการให้ความร้อนแก่ไดอิเล็กตริกหนึ่งๆที่มีค่า α_T และ $\sigma/\rho c_p$ คงที่ เราสามารถที่จะปรับการกระจายอุณหภูมิและการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิได้เฉพาะสนามไฟฟ้า และความเร็วของสายพานลำเลียง สำหรับไดอิเล็กตริกใดๆ จะต้องการสนามไฟฟ้าและความเร็วของสายพานลำเลียงที่ต่างกัน ดังนั้นในการออกแบบระบบให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ จะต้องปรับพารามิเตอร์ต่างๆเหล่านี้ให้เหมาะสมกับชนิดของไดอิเล็กตริกนั้นๆ อย่างน้อยระบบจะต้องสามารถปรับกำลังงานไมโครเวฟได้ หรือสามารถปรับระยะห่างระหว่างไดอิเล็กตริกกับระนาบปากสล็อตได้ และสามารถปรับความเร็วของสายพานลำเลียงให้เป็นไปตามต้องการได้ ถึงแม้ว่าเทคนิคการคำนวณนี้สามารถใช้กับไดอิเล็กตริกได้ทุกชนิด แต่ก็มีข้อยกเว้นในการคำนวณก็คืออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะต้องไม่ถึงจุดอิมิตัวทางอุณหภูมิ ยกตัวอย่างเช่น น้ำบริสุทธิ์จะมีจุดเดือด 100°C เมื่อให้ความร้อนอย่างต่อเนื่อง อุณหภูมิจะไม่สูงไปกว่าจุดเดือด โมเลกุลของน้ำจะได้รับพลังงานที่สูงมากพอที่จะเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่ผิวของน้ำ โมเลกุลเหล่านี้จึงเกิดการระเหยกลายเป็นไอน้ำที่อุณหภูมิ 100°C โดยที่โปรแกรมจะแสดงการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอย่างต่อเนื่อง ในช่วงไม่เกิน 100°C ซึ่งในไดอิเล็กตริกแต่ละชนิดจะมีจุดอิมิตัวทางอุณหภูมิที่ไม่เท่ากัน อย่างไรก็ตามผลการคำนวณก็สามารถใช้ทำนายการกระจายของอุณหภูมิและคุณสมบัติของไดอิเล็กตริกได้เพียงพอ และข้อมูลที่ไดจากการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟจริง จะถูกนำมาวิเคราะห์รวมกับการคำนวณเพื่อเป็นแนวทางในการปรับพารามิเตอร์ต่างๆอย่างเหมาะสมต่อไป

จากผลการคำนวณและการวิเคราะห์ทั้งหมดที่กล่าวมาแล้ว ได้แสดงให้เห็นว่า การนำสายอากาศสล็อตอาร์เรย์บนท่อนำคลื่นมาวางเรียงกัน จะต้อง สามารถที่จะปรับการกระจายอุณหภูมิให้สม่ำเสมอเป็นไปตามต้องการได้ ทั้งนี้ต้องขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของไดอิเล็กตริก, ความเร็วของ

สายพานลำเลียง และสนามไฟฟ้าประกอบกัน อย่างไรก็ตามการนำสายอากาศสล็อตอาร์เรย์ 3 สล็อตมาวางเรียงกัน 3 ท่อนำคลื่นเป็นเพียงกรณีศึกษา ถ้าสายอากาศสล็อตมีจำนวนสล็อตเพิ่มมากขึ้นหรือจำนวนท่อนำคลื่นที่นำมาวางเรียงกันเพิ่มมากขึ้น การกระจายอุณหภูมิจึงจะต่างออกไป ..



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครู ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

แบบจำลองขนาดเล็ก

5.1 กล่าวนำ

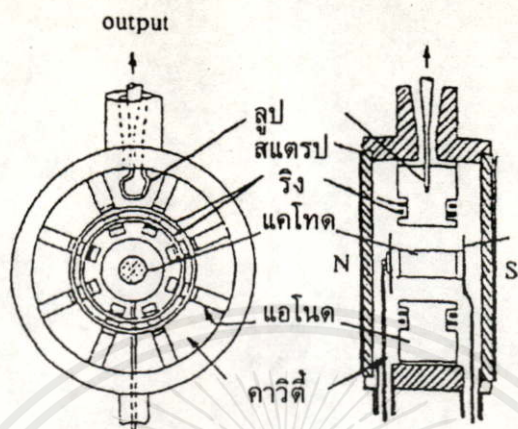
เพื่อให้ทราบคุณสมบัติต่างๆของระบบสายอากาศแพร่กระจายคลื่นและส่วนประกอบอื่นๆของระบบ แบบจำลองขนาดเล็กในห้องปฏิบัติการได้ถูกสร้างขึ้นมาในห้องปฏิบัติการ มีกำลังงานเอาท์พุทประมาณ 2 กิโลวัตต์ ระบบประกอบไปด้วยตู้ปิด มีสายอากาศแพร่กระจายคลื่นแบบสล็อตอาร์เรย์ 3 สล็อตบนท่อนำคลื่น 3 ท่อคลื่นนำมาวางเรียงเป็นระยะเท่ากันๆ ที่ปลายด้านปิดของสายอากาศด้านหนึ่งจะคัปปลิ่งกำลังงานจากแมกนีตรอนเพื่อป้อนให้กับสล็อตแต่ละตัว วัสดุที่ต้องการทดสอบจะเคลื่อนที่ผ่านสายอากาศทั้ง 3 ท่อนำคลื่น ผนังด้านหนึ่งของตู้ปิดจะเป็นทางเข้าออกของสายพานลำเลียงวัสดุ โดยมีใช้ลูกฟูกทำหน้าที่จำกัดการรั่วของคลื่นไมโครเวฟที่ทางเข้าออกของสายพานลำเลียง สำหรับในบทนี้ทั้งหมดจะกล่าวถึงส่วนประกอบของระบบ, หลักการทำงานและการออกแบบระบบต่างๆ

5.2 หลอดแมกนีตรอน

ในการออกแบบระบบให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ ถึงแม้ว่าเราไม่จำเป็นจะต้องศึกษาการออกแบบสร้างหลอดแมกนีตรอนโดยตรง แต่ในทางปฏิบัติการเข้าใจปรากฏการณ์และการทำงานของหลอดแมกนีตรอน จะทำให้เราสามารถควบคุมกำลังงานไมโครเวฟให้เป็นไปตามต้องการ และสามารถแก้ไขปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นเนื่องจากหลอดแมกนีตรอน ทั้งนี้เพื่อให้การออกแบบสร้างสายอากาศแพร่กระจายคลื่นได้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

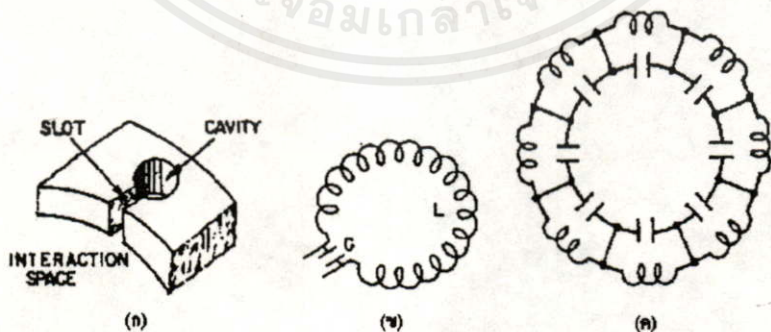
โดยพื้นฐานแล้วหลอดแมกนีตรอนเป็นหลอดไดโอดชนิดหนึ่งซึ่งไม่มีกริด (grid) มีโครงสร้างดังแสดงในรูป 5-1 คือประกอบด้วยขั้วแคโทดและขั้วแอโนดที่มีแกนร่วมกัน แคโทดและไส้หลอด (filament) จะอยู่ที่แกนกลางของหลอดซึ่งต่อกับสวดตัวนำ เพื่อป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับไส้หลอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 5-1 โครงสร้างของหลอดแมกนีตรอน

แคโทดจะถูกสร้างด้วยวัสดุที่มีคุณสมบัติที่สามารถปลดปล่อยอิเล็กตรอนได้ดีและทนอุณหภูมิสูงๆ ได้ ทางด้านขั้วแคโนคนั้นจะมีควิวตี้เรโซแนนซ์กระจายอยู่โดยรอบ ทำหน้าที่คล้ายกับวงจร LC (LC-tune) ที่มีค่า Q สูงๆ ซึ่งวงจรทางไฟฟ้าสมมูลย์สามารถแสดงในรูป 5-2 (ก) และ (ข) [17] วงจรจะทำหน้าที่เลือกความถี่ให้เรโซแนนซ์กับความถี่ไมโครเวฟที่ต้องการ โดยทั่วไปแล้วความลึกของควิวตี้จะมีค่าเท่ากับ $\lambda_g/4$ โดยประมาณ [3] ช่องว่างระหว่างแคโนดและแคโทดจะเรียกว่า "อินเตอร์แอคชันสเปซ" (Interaction Space) ซึ่งเป็นบริเวณที่สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กกระทำต่ออิเล็กตรอน เป็นผลให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในทิศทางต่างๆกัน



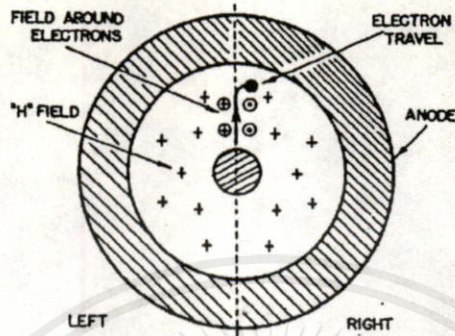
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับคนเรา ใช้เพื่อการศึกษานานัปการ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 รูป 5-2 (ก) ควิวตี้เรโซแนนซ์ 1 ส่วนในแมกนีตรอน
 (ข) วงจรสมมูลย์ของควิวตี้เรโซแนนซ์ 1 ส่วน
 (ค) วงจรสมมูลย์ของควิวตี้เรโซแนนซ์ทั้งหมด

การทำงานของแมกนีตรอนจะอยู่บนพื้นฐานของการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก สนามไฟฟ้าจะเกิดการจัดการให้แคโทดมีศักย์ค่าเป็นลบมากๆ หลายพันกิโลโวลต์เมื่อเทียบกับแอโนด ดังแสดงในรูป 5-3 (ก) เมื่อป้อนกระแสสูงศักย์ค่าให้กับไส้หลอดที่แคโทด อิเล็กตรอนที่หลุดจากไส้หลอดจะถูกสนามไฟฟ้า E เร่งด้วยศักย์สูงดึงอิเล็กตรอนไปยังแอโนดให้มีการเดินทางเป็นเส้นตรง ในขณะที่เดียวกันสนามแม่เหล็กก็จะถูกจัดให้ขนานกับแกนแคโทดด้วยแม่เหล็กถาวร ในรูป 5-3 (ข) สมมติให้มีทิศพุ่งเข้าหากระดาดตามกฎการเคลื่อนที่มือขวา (right-hand motor rule) อิเล็กตรอนจะถูกบังคับให้เคลื่อนที่ทางโค้งตามแรงลัพธ์ของสนามทั้งสองก่อนถึงแอโนด เพราะการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเนื่องจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะตั้งฉากซึ่งกันและกัน



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

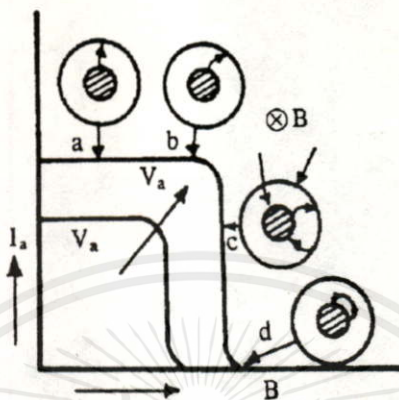
รูป 5-3 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ในแมกนีตรอน

(ก) เนื่องจากสนามไฟฟ้า E

(ข) เนื่องจากสนามแม่เหล็ก H

ถ้าจัดสนามไฟฟ้าค่าหนึ่งให้กับแมกนีตรอนที่ค่าสนามแม่เหล็กน้อยๆ อิเล็กตรอนที่ออกจากแคโทดทั้งหมดจะเดินทางไปยังแอโนดเป็นทางโค้งเล็กน้อย (a) ในรูป 5-4 ดังนั้นกระแสแอโนดจะมีค่าคงที่เมื่อเพิ่มค่าสนามแม่เหล็ก กระแสแอโนดจะค่อยๆ ลดลงและทางเดินของอิเล็กตรอนจะโค้งมากขึ้นเรื่อยๆ จนทางเดินของอิเล็กตรอนสัมผัสกับเส้นรอบวงแอโนดกระแสจะเริ่มลดลงอย่างรวดเร็ว (c) จนกระทั่งสนามแม่เหล็กมีค่าสูงเกินกว่าค่าๆหนึ่ง กระแสแอโนดจะมีค่าเป็นศูนย์ (d) ที่จุดนี้อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่โค้งกลับมาที่แคโทดเหมือนเดิม เราเรียกสนามแม่เหล็กนี้ว่า สนามแม่เหล็กวิกฤต (Ac)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



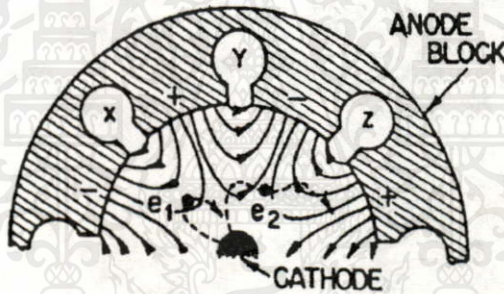
รูป 5-4 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ไหลระหว่างขั้วแอโนด และขั้วแคโทดกับความเข้มสนามแม่เหล็ก

ในทางกลับกันถ้าเราจัดสนามแม่เหล็กค่าหนึ่งให้กับแมกนีตรอน ที่ค่าสนามไฟฟ้าน้อยๆ อิเล็กตรอนที่หลุดจากแคโทดจะวิ่งวกกลับไปที่แคโทดหมด เมื่อเพิ่มค่าสนามไฟฟ้าจนมีค่ามากกว่า สนามไฟฟ้าวิกฤต (V_c) อิเล็กตรอนจะเดินทางไปถึงแอโนดทำให้เกิดกระแสแอโนดขึ้น เมื่อเพิ่มค่า สนามไฟฟ้าเรื่อยๆ กระแสแอโนดจะคงที่ เนื่องจากอิเล็กตรอนเดินทางถึงแอโนดทั้งหมด

เพราะฉะนั้นเราสามารถควบคุมกำลังของไมโครเวฟได้ โดยการบังคับสนามแม่เหล็กและ สนามไฟฟ้าที่มีค่าต่ำกว่าค่าสนามไฟฟ้าวิกฤต (V_c) และจัดให้สนามแม่เหล็กมีค่าสูงกว่าค่าสนาม แม่เหล็กวิกฤต (H_c) เพื่อให้อิเล็กตรอนส่วนน้อยวิ่งถึงแอโนด ในขณะที่อิเล็กตรอนส่วนใหญ่จะถูก หน่วงให้เคลื่อนที่ช้าลงเป็นทางโค้งและบางส่วนจะวิ่งชนแคโทด พลังงานจลน์ส่วนใหญ่จึงถ่ายเท ให้กับสนามไมโครเวฟในอินเตอร์แอคชันสเปซ ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้แมกนีตรอนมีประสิทธิภาพใน การแปลงพลังงานจากกำลังงานอินพุตพัลส์กระแสตรงเป็นกำลังเอาต์พุตไมโครเวฟได้ถึง 70 กว่า เปอร์เซ็นต์ [18]

แมกนีตรอนมีด้วยกันหลายแบบ ในปัจจุบันใช้แบบ B (b-type magnetron) เป็นหลัก เนื่องจากให้กำลังงาน และสามารถให้ความถี่ในการออกสวิตช์ได้สูงขึ้น ดังที่ได้แสดงไปแล้วในรูป 5-1 กลไกการทำงานของหลอดแมกนีตรอนสามารถพิจารณาได้ง่ายๆ จากรูป 5-5 ถ้าเราจัดสนามไฟฟ้า ซึ่งจะเรียกว่า สนามดีซี (DC field) และสนามแม่เหล็กด้วยเงื่อนไขข้างต้นแล้ว สนามดีซีจะ

กระจายอยู่ระหว่างแอโนดและแคโทด เนื่องจากเราไบอัสลบด้วยพัลส์กระแสตรงศักดาสูงทำให้ อิเล็กตรอนหลุดจากแคโทดเนื่องจากการจุดไส้หลอด อิเล็กตรอนจะนำพลังงานจากสนามคิซีไปยัง แอโนด ในขณะที่เดียวกันก็จะเกิดการถ่ายเทพลังงานให้กับสนามเอซี (AC field) ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจาก ถูกเหนี่ยวนำจากการเกิดออสซิลเลตที่ความถี่ไมโครเวฟในควาวิตรีโซแนนซ์ที่แอโนด การออสซิลเลต จะเกิดอย่างต่อเนื่องเพราะอิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากสนามคิซีอย่างสม่ำเสมอ และถ่ายเท พลังงานที่ได้รับมาให้กับสนามเอซีตลอดเวลาในขณะที่เรายังป้อนกำลังงานอินพุตให้กับ แมกนีตรอน ขั้วไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่แอโนดแสดงในรูป 5-5 จะเกิดขึ้นชั่วขณะ สัมพันธ์กับความถี่ในการออสซิลเลตที่เกิดขึ้น



รูป 5-5 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในแมกนีตรอน
เนื่องจากสนามแม่เหล็ก H และสนามไฟฟ้า E

ถ้าเราพิจารณาอิเล็กตรอน e_1 ที่กำลังเดินทางเข้าไปในสนามไฟฟ้าเอซีรอบๆทางเข้าหน้า สล็อตของควาวิตี x อิเล็กตรอนจะเดินทางเป็นทางโค้งสวนทิศกับสนามเอซีตามเข็มนาฬิกา เนื่องจากอิทธิพลของสนามแม่เหล็ก อิเล็กตรอน e_1 จะนำพลังงานจากสนามเอซีและจะถูกเร่งด้วยความเร็วสูง อิเล็กตรอน e_1 จะถูกผลักวกกลับอย่างรวดเร็วพุ่งเข้าชนแอโนด พลังงานจลน์ทั้งหมด จะถ่ายเทให้กับแคโทด พลังงานส่วนหนึ่งจะสูญเสียที่แคโทด พลังงานอีกส่วนหนึ่งจะถ่ายเทให้กับ อิเล็กตรอนที่แคโทด เมื่ออิเล็กตรอนที่แคโทดได้รับพลังงานเพิ่มขึ้นจะเอาชนะแรงยึดเหนี่ยว ระหว่างอะตอมได้ อิเล็กตรอนจะหลุดออกมาเสริมเพิ่มเติมจากเดิมและพุ่งไปยังแอโนดอย่างต่อเนื่อง ในทางกลับกันอิเล็กตรอน e_2 ที่เดินทางเข้าหาควาวิตี y จะถูกหน่วงให้เคลื่อนที่ช้าลงโดยสนามเอซี

พร้อมกับถ่ายเทพลังงานในตัวมันให้กับสนามเอซี เมื่อความเร็วของอิเล็กตรอน e_2 ลดลงแรงลัพท์ที่จะบังคับให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เป็นวงโค้งก็ลดลงด้วย (ในขณะที่สนามแม่เหล็กมีค่าคงที่) ดังนั้นอิเล็กตรอน e_2 จึงมีทิศทางการเคลื่อนที่ที่โค้งน้อยลง และจะเบี่ยงเบนเฉไปทางแอนโอดดังแสดงในรูป 5-5 เวลาที่ใช้ในการเดินทางจากควิตี y ไปควิตี z ใช้เวลาประมาณครึ่งคาบของการออสซิลเลตเมื่ออิเล็กตรอน e_2 เคลื่อนที่ถึงหน้าควิตี z ก็จะเป็นเวลาเดียวกับสนามเอซีของควิตีที่มีทิศทางเดียวกับการเคลื่อนของอิเล็กตรอน e_2 (แต่จะมีทิศกลับกับสนามเอซีในรูป 5-5) จึงหน่วงให้อิเล็กตรอน e_2 เคลื่อนที่ช้าลง อิเล็กตรอน e_2 จะถ่ายเทพลังงานให้กับสนามเอซีที่ควิตี z หลังจากนั้นอิเล็กตรอน e_2 ก็จะเคลื่อนที่ต่อไปในทิศทางตามเข็มนาฬิกาผ่านถัดไปควิตี w แล้วควิตี x ที่มันเคลื่อนที่ผ่านไปจนกว่าจะเดินทางถึงแอนโอด

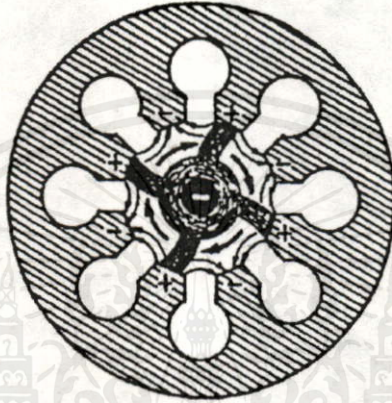
เงื่อนไขสำคัญของการออสซิลเลต คือช่วงเวลาที่กลุ่มอิเล็กตรอนหมุนครบ 1 รอบนั้นจะต้องเป็นจำนวนเท่าที่ลงตัวของคาบของคลื่นไมโครเวฟ หรือถ้าพิจารณาในรูปเฟสแล้ว คลื่นไมโครเวฟที่เกิดขึ้นในควิตีเรโซแนนซ์ใน 1 รอบ จะมีเฟสต่างกันเป็นจำนวนเท่าลงตัวของ 2π ดังนั้นถ้าให้ θ เป็นเฟสที่แตกต่างของคลื่นไมโครเวฟในควิตีเรโซแนนซ์ และ N เป็นจำนวนของควิตีเรโซแนนซ์ จะได้เงื่อนไขของการออสซิลเลตตามสมการ

$$N\theta = 2n\pi \quad (5-1)$$

เพื่อให้แน่ใจว่าสนามเอซีในควิตีเรโซแนนซ์วันควิตีมีขั้วสนามเหมือนกัน ในทางปฏิบัติจึงบังคับให้จำนวนควิตีเรโซแนนซ์เป็นเลขคู่ นั่นคือ $N = 2n$ โดยที่ $n = 1, 2, 3, \dots, n$ เช่น N อาจเป็น 6 หรือ 8 ซึ่งจะทำให้สมการ (5-1) มี $\theta = \pi$ การออสซิลเลตในเงื่อนไขเช่นนี้จะเรียกว่าเป็นการออสซิลเลตในโหมด π (π -mode Oscillation) ซึ่งจะมีเฟสต่างระหว่างสนามควิตีที่ติดกัน 180° หรือ π เรเดียน ที่โหมด π นี้จะให้กำลังงานเข้าที่ทุกสูงที่สุด แมกนีตรอนที่ใช้อยู่ทั่วไปจึงออสซิลเลตในโหมด π

สนามของคลื่นไมโครเวฟจะทำให้เกิดการเกาะกลุ่มของอิเล็กตรอนขึ้น เนื่องจากอิเล็กตรอนบางส่วนจะถูกเร่งให้มีความเร็วสูงขึ้น (รับพลังงานจากสนาม) และบางส่วนจะถูกหน่วงให้มีความเร็วต่ำลง (ถ่ายเทพลังงานให้สนาม) ทำให้อิเล็กตรอนเกิดการตามทันกันขึ้นเกาะเป็นกลุ่ม (อิเล็กตรอนที่เร็วจะแซง อิเล็กตรอนที่ช้าลงแล้วไปข้างหน้า และต้องอ้างอิงถึงค่าของแอมพลิจูดการแกว่งไปมาของอิเล็กตรอน) แสดงในรูป 5-6 ซึ่งจะได้รับแรงจากสนามแม่เหล็กหมุนไปรอบๆ แกนแคโทดโดยไม่มี

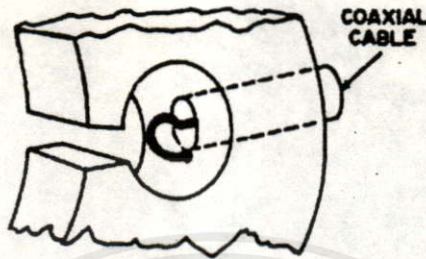
สิ้นสุดพร้อมกับเติมพลังงานให้กับสนามไมโครเวฟ (เอซี) อย่างต่อเนื่อง อิเล็กตรอน e_1 ในรูป 5-5 จะมีผลต่อปรากฏการณ์ในระบบน้อยมากเพราะมันจะพุ่งวกกลับไปยังแคโทดอย่างรวดเร็ว



รูป 5-6 การเกาะกลุ่มกันของอิเล็กตรอนในอินเตอร์แอคชันสเปซ

ปรากฏการณ์ในอินเตอร์แอคชันสเปซ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน e_1 ที่กลับไปยังแคโทด และอิเล็กตรอน e_2 ที่พุ่งไปยังแอโนดจะมีรูปคล้ายกับซี่ของล้อรถ ที่หมุนรอบแกนแคโทดอย่างต่อเนื่อง ในแมกนีตรอนแบบต่อเนื่อง (CW) จะมีการคลี่ปลิงกำลังคลื่นไมโครเวฟออกจากควาวิตรีโซแนนซ์ไปใช้ตลอดเวลา โดยใช้ลูปลัปลิง (loop coupling) ซึ่งทำได้โดยการอวดตัวนำแกนกลางของสายโคแอกหรือคอนเนคเตอร์กับตัวนำนอกของสายที่เชื่อมติดกับควาวิตรีโซแนนซ์เข้าไปในในควาวิตรีโซแนนซ์ดังรูป 5-7

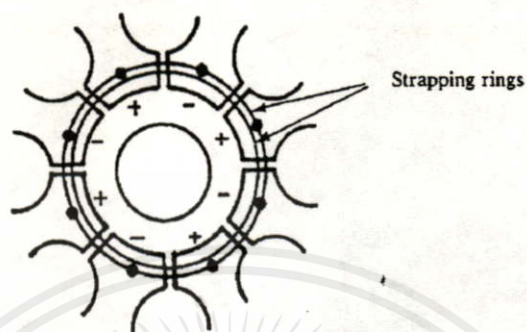
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



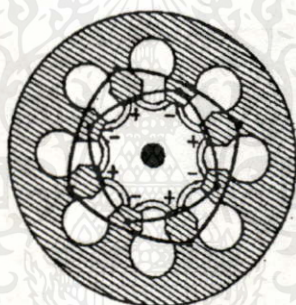
รูป 5-7 เทคนิคหนึ่งของอุปกรณ์ปลิงในการดึงกำลังงานไมโครเวฟ
จากควาวิตีเรโซแนนซ์ในแมกนีตรอน

ปัญหาที่เกิดขึ้นได้กับแมกนีตรอนที่เป็นแบบควาวิตีเรโซแนนซ์ที่กล่าวมาก็คือ ความถี่ในการออกสซิลเลตจะเปลี่ยนแปลงไปตามโหลดได้ [3] โหลดที่เป็นรีแอกทีฟ (reactive component) จะทำให้เกิดการเลื่อนความถี่ไปเพราะเป็นการเพิ่มความเหนี่ยวนำ (inductance) และค่าความจุ (capacitance) ให้กับควาวิตีเรโซแนนซ์ ในขณะที่โหลดเป็นตัวต้านทาน (resistive component) จะทำให้กำลังงานเอาต์พุตลดลง และมีปัญหาอีกประการหนึ่งของแมกนีตรอนแบบนี้ก็คือ การเปลี่ยนโหมดของการออกสซิลเลต แมกนีตรอนโดยทั่วไปจะป้องกันการเคลื่อนย้ายของความถี่ออกสซิลเลตโดยดิสแตรปริง (strap ring) ไว้ 2 ชุด สเตรปริงแต่ละชุดจะต่อกับขั้วของควาวิตีเรโซแนนซ์ขั้วเว้นขั้ว โดยที่ไม่ซ้อนกัน ดังแสดงในรูป 5-8 (ก) และ 5-8 (ข) เป็นวงจรสมมูลย์ทางไฟฟ้า เสมือนการนำแต่ละควาวิตีเรโซแนนซ์มาขนานกัน ในสภาพเช่นนี้ออกจากโหมด π แล้วโหมดอื่นๆจะไม่สามารถออกสซิลเลตได้ เพราะค่าความต่างเฟสระหว่างขั้วที่อยู่ห่างกัน 2 ขั้วนั้นจะไม่เท่ากับ 2π ตามที่ถูกบังคับโดยสเตรปริง ดังรูป 5-8 (ค) นอกจากนั้นการใช้ควาวิตีเรโซแนนซ์แบบรูปพระอาทิตย์ขึ้น (rising sun) ก็สามารถป้องกันการกระโดดข้ามโหมดได้เช่นเดียวกัน เพราะความถี่เรโซแนนซ์ของควาวิตีทั้งสองขนาดจะไม่เท่ากัน การออกสซิลเลตจึงเกิดขึ้นที่ความถี่กลางๆระหว่างความถี่เรโซแนนซ์ของทั้งสองควาวิตี โดยจะเกิดในโหมด π รูป 5-9 แสดงตัวอย่างของควาวิตีแบบต่างๆ

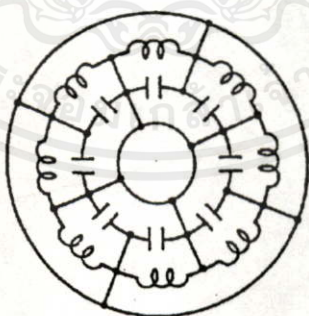
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



(ค)

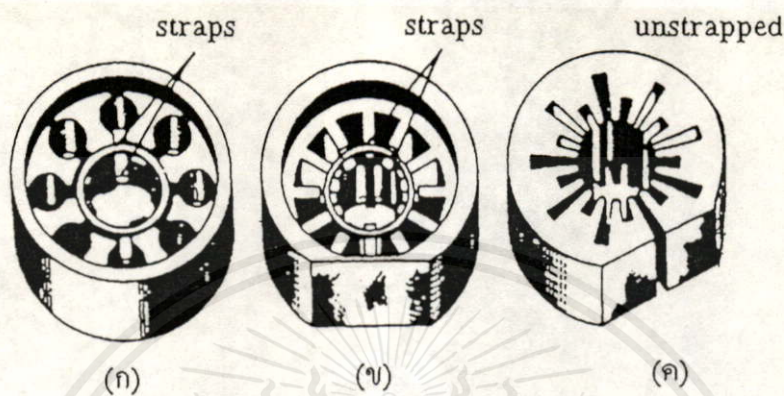
รูป 5-8 (ก) การใช้สเตรปริงป้องกันการย้ายความถี่ตามค่าของโหมค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษามาก่อน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

(ข) การแยกกันของโหมคเนื่องจากสเตรปริง

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ค) วงจรสมมูลย์ของควิต์ที่ต่อกันแบบขนานเป็นผลมาจากสเตรปริง

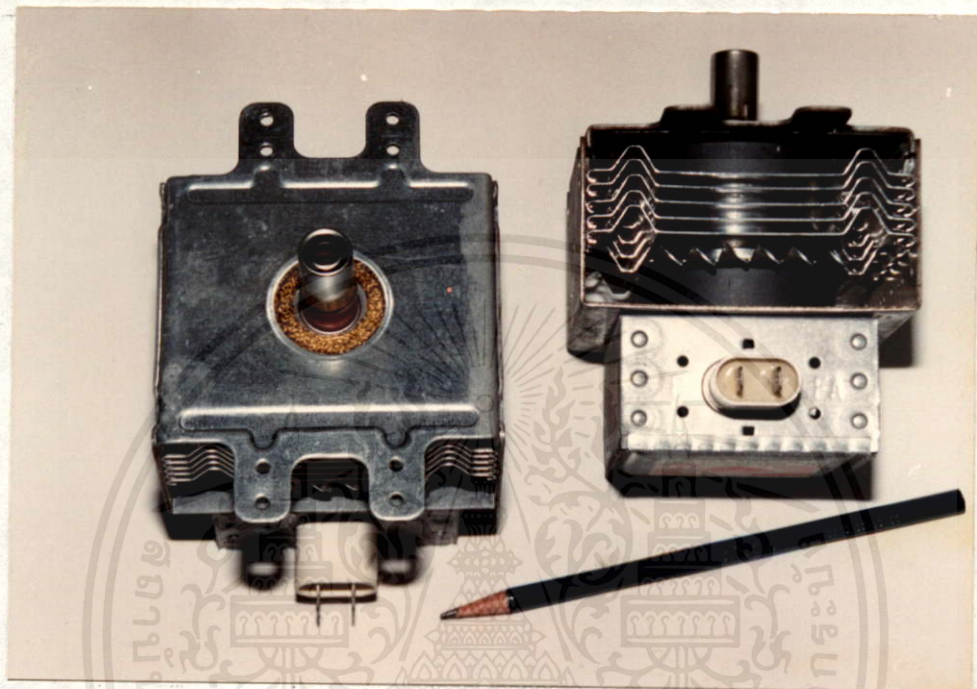


รูป 5-9 คิวตี้เรโซแนนซ์แบบต่างๆ

- (ก) แอนโคมบล็อก
- (ข) โซลและสล็อต
- (ค) แบบพระอาทิตย์ขึ้น

สำหรับการทดลองนี้ใช้แมกนีตรอนรุ่น RV-MZ 080 WREO 2M214 ของบริษัท SHARP ชนิดแม่เหล็กถาวรให้กำลังงานเอาท์พุทประมาณ 650 W ที่ความถี่ 2450 MHz มีวงจรกรอง L-C รวมภายในเพื่อป้องกันการแพร่กระจายคลื่นออกมาที่ขั้วไบอัส และทำหน้าที่กรองแรงดันทรานส์เซียนจากแหล่งจ่ายกำลังงานเข้าไปรบกวนการทำงานของหลอด รูป 5-10 แสดงแมกนีตรอนที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 5-10 ภาพถ่ายหลอดแมกนีตรอนที่ใช้ในการทดลอง

5.3 ระบบสายอากาศสล็อตอาร์เรย์บนท่อนำคลื่น [19,20,21,22]

ในการออกแบบจะออกแบบสายอากาศสล็อตอาร์เรย์ 3 สล็อตบนท่อนำคลื่น 3 ท่อนำคลื่น มาวางเรียงกัน โดยมีเงื่อนไขการออกแบบสายอากาศจะต้องให้สนามไฟฟ้าที่แพร่กระจายจาก สล็อตแต่ละสล็อตมีความแรงเท่า ๆ กันและมีเฟสที่ตรงกัน

ในที่นี้ได้ใช้ท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมปลายปิดมีคุณสมบัติเป็นควาวิตีเรโซแนนซ์ มีพื้นที่หน้า คัดของควาวิตี ขนาด $a \times b$ ตารางเซ็นติเมตร ความยาวของควาวิตีจะมีความสัมพันธ์กับจำนวนสล็อต ที่ต้องการและจำนวนคลื่นนิ่งที่เกิดขึ้นภายในควาวิตี และได้เลือกโหมดพื้นฐานหรือโหมด โดมิแนนท์ TE_{10p} ที่เกิดขึ้นในควาวิตีมาใช้ในการออกแบบ ที่ปลายปิดด้านหนึ่งของควาวิตีจะคัปปลิ่ง กำลังงานจากแมกนีตรอนเพื่อป้อนให้กับสายอากาศสล็อตทั้ง 3 สล็อต ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณี จากที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 4 ตำแหน่งขอดคลื่นขึ้นในควาวิตีจะสัมพันธ์กับตำแหน่งที่เจาะ สล็อตซึ่งมีระยะห่างระหว่างสล็อตเท่ากับครึ่งหนึ่งของค่าความยาวคลื่นในควาวิตี $\lambda_g/2$ ในที่นี้ได้

เลือกให้เกิดคลื่นขึ้นในควาวิตีทั้งหมด 8 คลื่นขึ้น เพื่อไว้สำหรับการสร้างสกรูระดับแมชชิง (screw stub matching) และการสร้างรีเฟลคโตมิเตอร์ (reflectometer) ในภายหลัง

ท่อนำคลื่นแบบควาวิตีได้ถูกสร้างด้วยเหล็กซิงค์ไร้สนิม ซึ่งเป็นโลหะชนิดเดียวกับใช้ทำตู้ปิด มีความหนา 1.5 มม. มีพื้นที่หน้าตัดภายใน 3×9 ตารางเซนติเมตร ความยาวของท่อนำคลื่นจะมีค่าเป็นจำนวนเท่าของค่าครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นภายในควาวิตี โดยที่ความยาวควาวิตี c จะมีความสัมพันธ์กับสมการ

$$c = \frac{p\lambda_g}{2} \quad (5-2)$$

เมื่อ p เป็นตัวเลขเรโซแนนซ์ (resonance number) ที่โหมด TE_{108}

$$c = \frac{8\lambda_g}{2} \quad (5-3)$$

โดย λ_g เป็นความยาวคลื่นนิ่งที่เกิดขึ้นในควาวิตี โดยสมการ

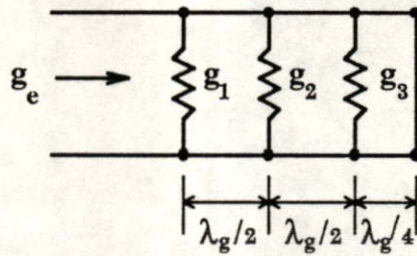
$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - (\lambda_0/\lambda_c)^2}} \quad (5-4)$$

ที่ความถี่ 2.45 GHz $\lambda_0 = 12.24$ เซนติเมตร

λ_0 และ λ_c เป็นความยาวคลื่นไมโครเวฟที่ป้อนให้กับควาวิตีและความยาวคลื่นคัตออฟสำหรับควาวิตีตามลำดับ ซึ่งก็คือ

$$\lambda_c = \frac{1}{\sqrt{(m/2a)^2 + (n/2b)^2}} \quad (5-5)$$

เอกสารนี้ สำหรับโหมด TE_{108} จะได้ $m = 1$, $n = 0$ และมีค่า a เท่ากับ 3 เซนติเมตรและ b เท่ากับ 9 เซนติเมตรจะได้ λ_g และ λ_c เท่ากับ 16.71 และ 18 เซนติเมตร ตามลำดับ ความยาวของควาวิตี (c) จึงมีค่าเท่ากับ 66.82 เซนติเมตร



รูป 5-12 แสดงวงจรสายส่งสมมูลย์ สำหรับสายอากาศ
สล็อตอาร์เรย์ที่มี 3 สล็อต

โดยสมมติให้ g_e เป็นค่าสมมูลย์ของค่าความนำสมมูลย์รวม (equivalent conductance) ที่
ถูกมองโดยที่นำคลื่น ผลรวมของค่าความนำสมมูลย์ของสล็อตแต่ละสล็อตต้องมีค่าเท่ากับหนึ่ง
นั่นคือ

$$g_e = \sum_{n=1}^3 g_n = 1 \quad (5-6)$$

และ

$$g_n = k a_n^2 \quad (5-7)$$

เมื่อ k เป็นค่าคงที่
 a_n เป็นค่าแอมพลิจูดสัมพัทธ์ที่กระตุ้นสล็อตตัวที่ n

จาก (5-6) และ (5-7) ทำให้ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่จารึกไว้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่น
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหามาใช้หรืออ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$k \sum_{n=1}^3 a_n^2 = 1 \quad (5-8)$$

ในการออกแบบเราต้องการให้การกระจายสนามสม่ำเสมอ ดังนั้นค่าแอมพลิจูดสัมพัทธ์ที่ กระตุ้นสล็อตต้องเท่ากันหมด คือ มีค่าเป็น 1
จะได้

$$k(a_1^2 + a_2^2 + a_3^2) = 1/3 \quad (5-9)$$

แต่
เพราะฉะนั้น

$$a_1 = a_2 = a_3 = 1/3 \quad (5-10)$$

$$k = 1/3 \quad (5-11)$$

$$g_1 = g_2 = g_3 = 1/3 \quad (5-12)$$

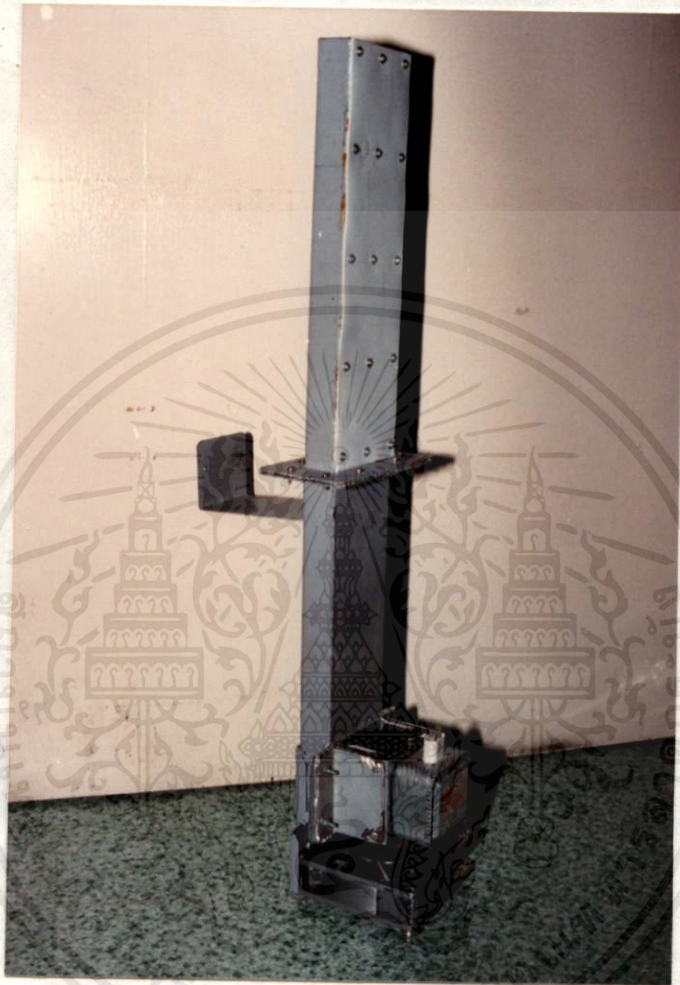
ที่โหมด TE_{10p} จะหาระยะห่างของสล็อตตัวที่ n จากกึ่งกลางของควาวิตี้ x_1 ได้จากความ สัมพันธ์

$$g_n = 2.09 \frac{\lambda_g a}{\lambda_0 b} \cos^2 \frac{\pi \lambda_0}{2\lambda_g} \sin \frac{\pi x_1}{a} \quad (5-13)$$

เมื่อแทนค่าตัวแปรต่าง ๆ ลงไปในสมการ (5-13) แล้วแก้สมการจะได้ระยะห่าง x_1 ของ สล็อตแต่ละตัวเท่า ๆ กัน นั่นคือ $x_1 = 1.45$ เซ็นติเมตร

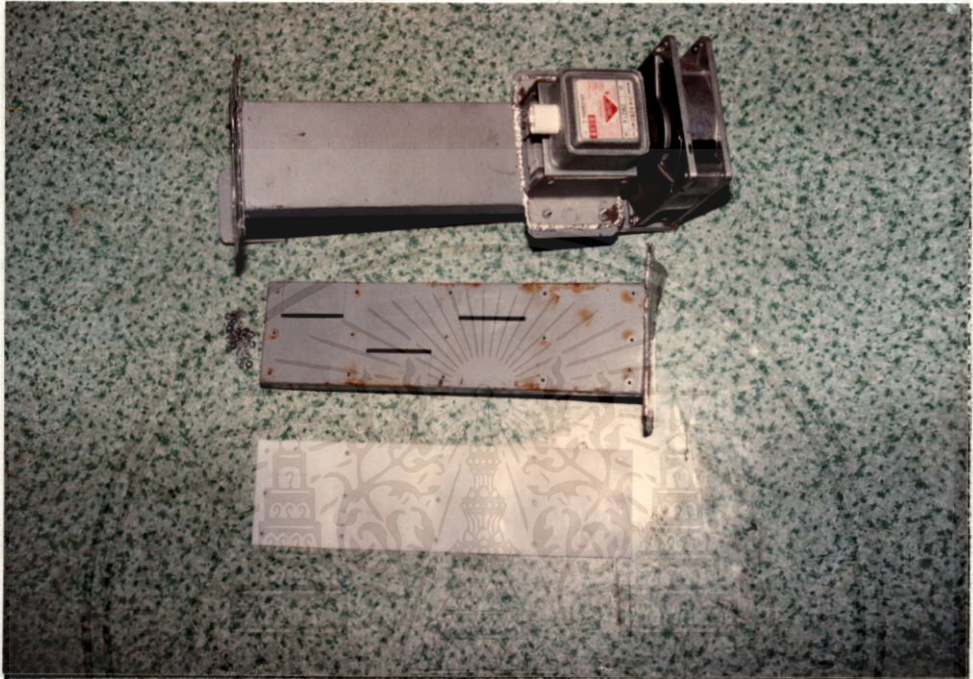
การนำสายอากาศสล็อตอาร์เรย์บนท่อนำคลื่นทั้ง 3 ท่อนำคลื่นมาวางเรียงกัน สาย อากาศสล็อตอาร์เรย์บนท่อนำคลื่นแต่ละท่อนำคลื่นจะวางเรียงกันเท่ากับระยะห่างระหว่างสล็อต ทหารด้วยจำนวนสล็อตในแต่ละท่อนำคลื่น ซึ่งก็คือ $\lambda_g/6 = 2.78$ เซ็นติเมตร สำหรับมิติต่างๆของ สายอากาศสล็อตอาร์เรย์ทั้ง 3 ท่อนำคลื่น ได้แสดงไว้ในภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านธุรกิจ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

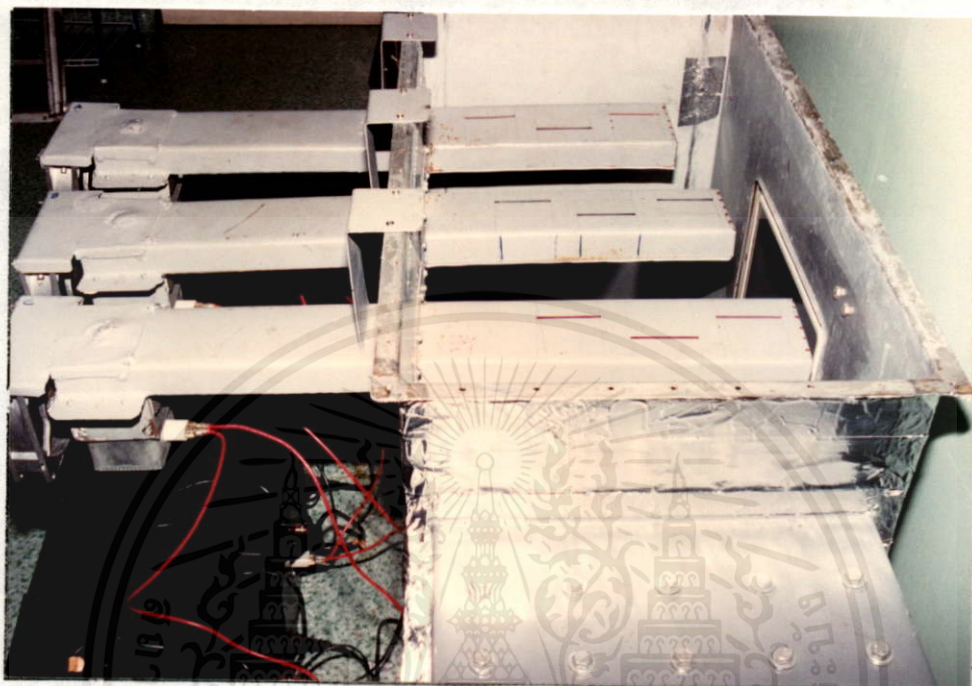


(ข)

รูป 5-13 (ก) ภาพถ่ายสายอากาศสล็อตอาร์เรย์ 3 สล็อตบนท่อนำคลื่น
 (ข) ภาพถ่ายสายอากาศสล็อตอาร์เรย์ 3 สล็อตบนท่อนำคลื่น
 เมื่อแยกส่วนประกอบ

จากรูป 5-13 ด้านหน้าของสายอากาศจะถูกปิดด้วยแผ่นเทฟลอน (teflon) บาง ซึ่งเป็นวัสดุที่มีการสูญเสียต่ำในย่านความถี่ไมโครเวฟ เพื่อป้องกันความชื้นและไอน้ำเข้าไปในสายอากาศ ซึ่งจะทำให้เกิดการอาร์ค (arc) และทำให้เกิดการสูญเสียในตัวกลางได้สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านธุรกิจ
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 5-14 ภาพถ่ายการนำสายอากาศสล็อตอาร์เรย์ 3 สล็อต
บนท่อนำคลื่น 3 ท่อนำคลื่นมาวางเรียงกัน

จากรูป 5-14 จะสังเกตเห็นการนำแมกนีตรอนมาคัปปลิ่งกับตัวสายอากาศ ที่ด้านปลายสุด
ของสายอากาศจะเป็นพัลลภระบายความร้อนให้กับแมกนีตรอน

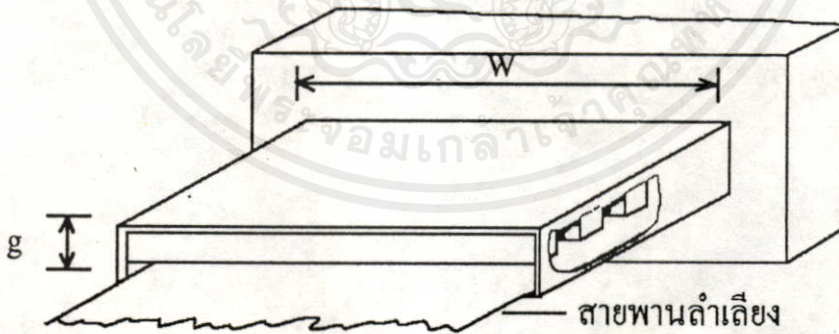
5.4 โฉลค้ท่อนำคลื่น

การออกแบบระบบป้องกันการรั่วของคลื่นไมโครเวฟ ถือว่ามีความสำคัญไม่ยิ่งหย่อนไป
กว่าระบบสายอากาศแพร่กระจายคลื่นในแง่ความปลอดภัยในการปฏิบัติงาน ในระบบการให้
ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟอย่างต่อเนื่อง จำเป็นจะต้องให้วัสดุที่ต้องการให้ความร้อนเคลื่อนที่
ผ่านระบบสายอากาศแพร่กระจายคลื่นโดยใช้สายพานลำเลียงวัสดุ ดังนั้นที่ทางเข้าและออกของ
สายพานจะต้องมีช่องเปิดที่มีขนาดที่โตพอที่จะไม่ไปขวางทางเดินในการลำเลียงวัสดุ ด้วยเหตุที่
ช่องเปิดมีขนาดโตจึงเกิดการรั่วของคลื่นไมโครเวฟแก่ผู้ปฏิบัติการใกล้เคียงได้ ตามมาตรฐาน

ANSI (American National Standard Institute) ความหนาแน่นของกำลังงาน (power density) ที่สามารถยอมรับได้ไม่ควรเกิน 1 mW/cm^2 [3,6,23]

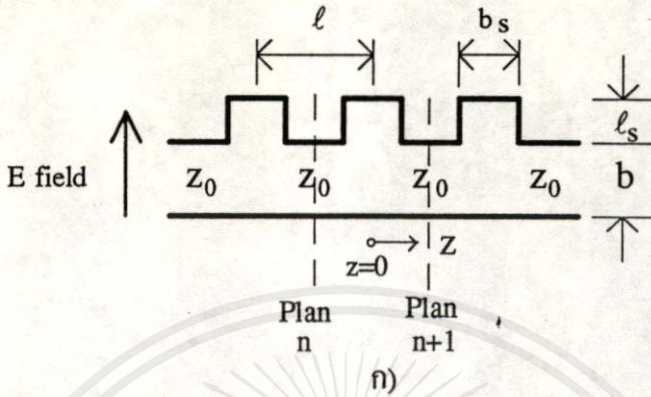
การรั่วของคลื่นไมโครเวฟสามารถควบคุมได้ โดยใช้ทั้งวิธีใช้วัสดุดูดคลื่นกำลังงานที่รั่วออกมา หรือโดยใช้วิธีสะท้อนกำลังงานกลับเข้าไปใหม่โดยการใช้โชครีแอคทีฟ (reactive choke) หรือการใช้สองเทคนิคนี้ร่วมกัน รีแอคทีฟโชคมักใช้สำหรับทางเข้าออกของวัสดุลำเลียงไมโครเวฟมากเกินไป ถ้าความกว้างและความสูงของทางเข้าออกวัสดุลำเลียงโตมากๆ มักจะใช้วัสดุดูดคลื่นคลื่นไมโครเวฟเข้าช่วย เทคนิคการจำกัดการรั่วของคลื่นไมโครเวฟได้มีผู้อธิบายไว้หลายวิธี [3,4,24,25,26] แต่ในที่นี้จะกล่าวถึง โชครีแอคทีฟแบบลูกฟูกคู่ (Doubly Corrugated Choke) เท่านั้น

โชครีแอคทีฟแบบลูกฟูกคู่ประกอบไปด้วยท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมที่เป็นทางเข้าออกสายพาน ที่เสมือนถูกโหลคด้วยสตัป (stub) ที่ตัดวงจร ซึ่งมีคุณสมบัติเหมือนกัน โชครีแอคทีฟลูกฟูกคู่จึงเป็นโครงสร้างแบบพีริออดิก (periodic structure) [19,20,27] โครงสร้างแบบนี้เป็นที่ทราบกันดีในการนำมาใช้ในการออกแบบเป็นวงจรกรองสัญญาณ (filter) [28] โชครีแอคทีฟลูกฟูกคู่จะมีโครงสร้างดังรูป 5-15 และสามารถเขียนวงจรสมมูลง่าย ๆ ได้ดังรูป 5-16 [28]



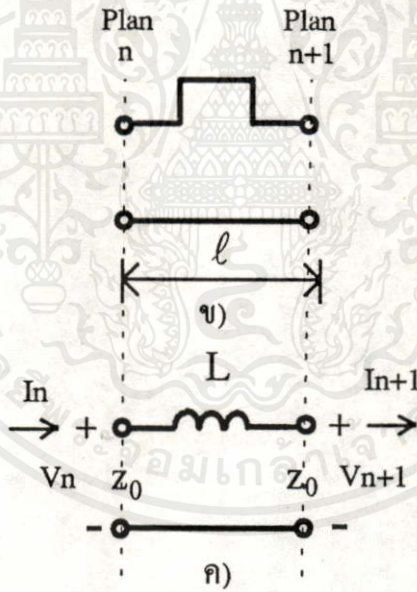
รูป 5-15 โชครีแอคทีฟลูกฟูกคู่ในท่อนำคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(เสมือนเป็นการไหลด้วยอนุกรมตัวเหนี่ยวนำเมื่อ b และ $b_s \ll \lambda$,

$$b_s \ll l \text{ และ } l_s < \frac{\lambda}{8})$$



รูป 5-16 ก) วงจรสมมูลอย่างง่ายของใช้คลูกฟูก

ข) วงจรสมมูลของใช้คลูกฟูก 1 หน่วยเซลล์

ค) วงจรสมมูลของใช้คลูกฟูกที่แทนด้วยตัวเหนี่ยวนำ

เป็นไหลค 1 หน่วยเซลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพียงการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราสามารถทำการวิเคราะห์โดยการพิจารณาโครงสร้างฟิรูดคที่เสมือนไหลคด้วยตัว
เหนี่ยวนำ 1 หน่วยเซลล์ (Unit Cell) ได้ ด้วยการพิจารณาลักษณะการเดินทางของคลื่น

(Propagation Characteristics) โดยใช้เมตริกซ์ ABCD จากรูป 5-16 (ข) และ 5-16 (ค) จะพิจารณาเพียง 1 ส่วน และสมมติว่าเป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างพรีออคลิกที่ไม่มีการสูญเสีย

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos \frac{k}{2} \ell & jz_0 \sin \frac{k}{2} \ell \\ \frac{j}{z_0} \sin \frac{k}{2} \ell & \cos \frac{k}{2} \ell \end{bmatrix} \begin{matrix} 1 \\ 0 \end{matrix} j\bar{X} \begin{bmatrix} \cos \frac{k}{2} \ell & jz_0 \sin \frac{k}{2} \ell \\ \frac{j}{z_0} \sin \frac{k}{2} \ell & \cos \frac{k}{2} \ell \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \left(\cos kl - \frac{\bar{X}}{2} \sin kl \right) & jz_0 \left\{ \sin kl + \frac{\bar{X}}{2} (1 + \cos kl) \right\} \\ \frac{j}{z_0} \left\{ \sin kl - \frac{\bar{X}}{2} (1 - \cos kl) \right\} & \left(\cos kl - \frac{\bar{X}}{2} \sin kl \right) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5-14)$$

เมื่อ $\bar{X} \equiv \omega_0 L / z_0$
 $k \equiv \omega_0 \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$ เป็นค่าคงที่ของเฟส (phase constant)
 $z_0 \equiv$ อิมพีแดนซ์ลักษณะ (Characteristics Impedance) ของส่วนหนึ่งของสายส่ง

การแพร่กระจายของคลื่นในแนวแกน z ของโครงสร้างพรีออคลิก กระแสและศักดาที่ ระบาย n และ $n+1$ จะมีค่าเป็น

$$V_{n+1} = V_n e^{-\gamma \ell} \quad (5-15)$$

และ

$$I_{n+1} = I_n e^{-\gamma \ell} \quad (5-16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า โดยที่แม้ใดๆทั้งสิ้น $e^{-\gamma \ell}$ ก็ยังห้ามมิให้คัดเป็นองค์ประกอบในการแพร่กระจายคลื่น (Propagation Factor)

และ $\gamma = \alpha + j\beta$ เป็นค่าคงที่ของการแพร่กระจายคลื่น (Propagation Constant) ของโครงสร้างพรีออติก
 l เป็นความยาวของสายส่ง

ในที่นี้ สายส่งที่โหลดด้วยโครงสร้างพรีออติก จะมีทั้งย่านส่งผ่านสัญญาณ (Pass Band) และย่านปิดสัญญาณ (Stop Band) เกิดสลับกัน

ในย่านส่งผ่านสัญญาณ $\alpha = 0$; $\gamma = j\beta$ (5-17)
 จะได้

$$V_{n+1} = V_n e^{-j\beta l} \quad (5-18)$$

$$I_{n+1} = I_n e^{-j\beta l} \quad (5-19)$$

ในย่านปิดสัญญาณ $\beta = 0$; $\gamma = \alpha$ (5-20)

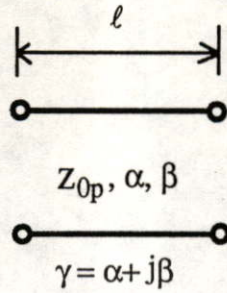
$$V_{n+1} = V_n e^{-\alpha l} \quad (5-21)$$

$$I_{n+1} = I_n e^{-\alpha l} \quad (5-22)$$

เพราะฉะนั้นอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (Z_{op}) สำหรับหนึ่งหน่วยเซลล์ในโครงสร้างแบบพรีออติก ก็คือ

$$Z_{op} \equiv \frac{V_n}{I_n} = \frac{V_{n+1}}{I_{n+1}} \quad (5-23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณี สำหรับสายส่งที่มีการสูญเสียสัญญาณ (Lossy Transmission Line) จะเขียนเมตริกซ์ ABCD ได้ คือ



$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma l & z_{op} \sinh \gamma l \\ \frac{\sinh \gamma l}{z_{op}} & \cosh \gamma l \end{bmatrix} \quad (5-24)$$

จากการเปรียบเทียบสมการ (5-14) และ สมการ (5-24) จะได้

$$\cosh \gamma l = \cos kl - \frac{\bar{X}}{2} \sin kl \quad (5-25)$$

และในหนึ่งหน่วยเซลล์ จะมี

$$z_{op} = z_o \left[\frac{2 \sin kl + \bar{X}(1 + \cos kl)}{2 \sin kd - \bar{X}(1 - \cos kd)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5-26)$$

จาก (5-25) จะพบว่าค่าคงที่ของการแพร่กระจายคลื่น (γ) จะเป็นฟังก์ชันของความถี่ (เนื่องจาก $k \equiv \omega_0 \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} = 2\pi \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} f$; $k \propto f$) และ $\bar{X} = \frac{\omega_0 L}{z_o}$

ดังนั้น โครงสร้างฟิรูดิกจะเป็นย่านปิดสัญญาณ ก็ต่อเมื่อ

$$|\cosh \gamma l| > 1, \quad \gamma = \alpha \quad (5-27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูเชิงคณิตศาสตร์เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเป็นย่านส่งผ่านสัญญาณก็ต่อเมื่อ

$$|\cosh \gamma l| < 1 \quad , \quad \gamma = j\beta \quad (5-28)$$

จากสมการ (5-25)

สำหรับ ย่านปิดสัญญาณจะได้

$$\cosh \alpha l = \left| \cos kl - \frac{\bar{X}}{2} \sin kl \right| > 1 \quad (5-29)$$

และย่านส่งผ่านสัญญาณจะได้

$$\begin{aligned} \cosh(j\beta)l &= \cosh(\beta l) \\ &= \left| \cos kl - \frac{\bar{X}}{2} \sin kl \right| < 1 \end{aligned} \quad (5-30)$$

ในวงจรสมมูลย์สายส่งยาว l จะแทนด้วยความยาวทางไฟฟ้าประสิทธิผล (effective electrical length) ของท่อนำคลื่นกว้าง W และสูง g (ดังแสดงในรูป 5-15) ที่ต่ออยู่ระหว่างค่ารีแอกแตนซ์สมมูลย์ \bar{X} ซึ่งมีความสัมพันธ์กับ อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งซึ่งจะมีค่าเป็น

$$\bar{X} = \frac{b}{g} \tan \beta d' \quad (5-31)$$

โดยที่ d' เป็นค่าความยาวทางไฟฟ้าของสตับ (stub)

β เป็นค่าคงที่ของการแพร่กระจายคลื่นในท่อนำคลื่น ($\beta = 2\pi/\lambda_g$) ที่ไม่มีโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และค่า λ_g เป็นค่าความยาวคลื่นในท่อนนำคลื่นในโหมดนั้นๆ ดังนั้นค่าความยาวทางไฟฟ้าประสิทธิผล l' และ d' จึงขึ้นกับความถี่กับโหมด และความถี่ในท่อนนำคลื่นนั้นๆ จากสมการ (5-29) และ (5-31) จะเขียนความสัมพันธ์ใหม่ได้

สำหรับย่านปิดสัญญาณแล้ว

$$\cosh \alpha l' = \left| \cos \beta l' - \frac{b}{2g} \tan \beta d' \sin \beta l' \right| > 1 \quad (5-32)$$

เพราะฉะนั้นค่าการสูญเสียเนื่องมาจากการแทรกใส่ (Insertion Loss) ของโช๊คต่อหนึ่งหน่วยเซลล์จะเป็น

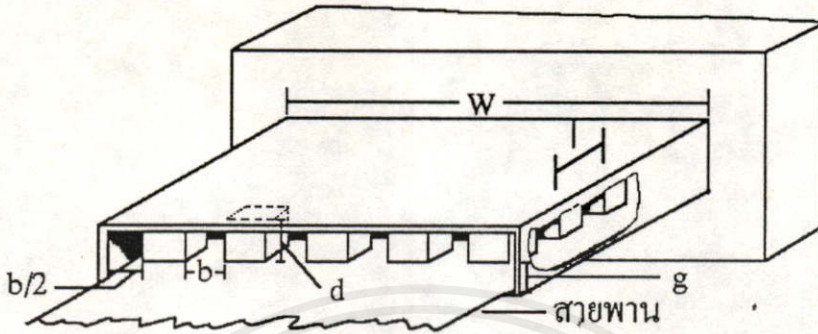
$$A = 8.686 \alpha l' \quad (5-33)$$

ถ้าสายส่งโครงสร้างพีริออดิกมี n หน่วยเซลล์ ค่าการสูญเสียเนื่องมาจากการแทรกใส่ทั้งหมดจะมีค่าเป็น

$$A = n \cdot 8.686 \alpha l' \quad (5-34)$$

สมการ (5-32), (5-33) และ (5-34) จะเป็นสมการสำคัญที่นำมาใช้ในการออกแบบโช๊คแบบลูกฟูก อย่างไรก็ตามโช๊คลูกฟูกแบบธรรมดาที่ใช้ได้ดีกับโหมดที่เกิดขึ้นในท่อนนำคลื่นเพียงโหมดๆ เดียวเท่านั้นโดยทั่วไปก็คือ โหมดพื้นฐานหรือโหมดโดมิแนนท์ คือ TE_{10} แต่ถ้าความกว้างและความสูงของทางเข้าออกวัสดุลำเลียงโตมากๆ เมื่อเทียบกับความยาวคลื่นไมโครเวฟแล้ว จะทำให้เกิดการแพร่กระจายคลื่นโหมดสูงๆ ได้ (higher mode) ขอบกพร่องนี้จะสามารถแก้ไขโดยใช้โช๊คลูกฟูกคู่ (doubly corrugated choke) แสดงได้ในรูป 5-17 ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีสารนำไปใช้



รูป 5-17 ไซ้คลูกฟูกคู่

ไซ้คลูกฟูกคู่เป็นโครงสร้างที่ดัดแปลงมาจากไซ้คลูกฟูกแบบธรรมดา โดยตัดช่องสล็อตในทิศทางการเคลื่อนที่ของสายพานเพิ่มขึ้นมา โครงสร้างของไซ้คจึงดูเหมือนจะขนานและตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของระนาบสายพานลำเลียง โครงสร้างไซ้คแบบลูกฟูก หรือ โครงสร้างแบบเวฟเฟิล-ไอรอน (waffle-iron) นี้เป็นโครงสร้างที่เคยนำมาใช้สร้างเป็นวงจรรองสัญญาณมาแล้ว โดยทำหน้าที่เป็นวงจรมอดูสัญญาณย่านความถี่กว้างๆ (wide stop band) จากเอกสารอ้างอิง [28] นี้ ได้กล่าวไว้ว่าโครงสร้างแบบลูกฟูกคู่ "เป็นโครงสร้างแบบไอโซทรอปิก (isotropic) ที่มีคุณสมบัติเหมือนกัน ที่ความถี่ที่ใช้งานเดียวกันสำหรับคลื่น TEM ที่เดินทางผ่านในทิศทางใดก็ได้ ดังนั้นที่โหมด TE_{m0} ใดๆ สามารถกระจายเป็นคลื่น TEM เดินทางในทิศทางต่างๆกันผ่านวงจรรองนี้ ซึ่งดูเหมือนว่าคุณสมบัติของวงจรรองเวฟเฟิลไอรอนสำหรับโหมด TE_{m0} นี้จึงเป็นฟังก์ชันของความถี่เพียงอย่างเดียวเท่านั้น" ซึ่งต่างจากไซ้คลูกฟูกแบบธรรมดา ที่คุณสมบัติของไซ้คลูกฟูกคู่จะฟังก์ชันของความถี่เพียงอย่างเดียวและไม่ขึ้นกับขนาดของท่อนำคลื่นและโหมดของคลื่นไมโครเวฟในท่อนำคลื่น การออกแบบโครงสร้างแบบลูกฟูกคู่นี้สามารถพิจารณาได้โดยการพิจารณาคลื่น TEM เดินทางตกกระทบตั้งฉากกับไซ้คที่มีความกว้าง W ไม่จำกัด กรณีนี้สล็อตที่ตัดในทิศทางการเคลื่อนที่ของสายพานลำเลียงจะไม่ขัดขวางทางเดินของคลื่น โครงสร้างแบบนี้ จึงเหมือนกับโครงสร้างแบบลูกฟูกเดี่ยวๆที่กล่าวมาแล้วก่อนหน้านี้ ดังนั้นในการออกแบบสามารถประมาณได้โดยใช้สมการ (5-32), (5-33) และ (5-34) ได้เช่นเดียวกัน ในกรณีนี้จะแทน λ_g ด้วย λ ในฟรีสเปซ ค่าความกว้างของท่อนำคลื่น W จะเพิ่มตามจำนวน

ถูกผูกที่วางตามแนวกว้างของโซ้ค สมการ (5-32) จึงสามารถเปลี่ยนแปลงได้ความสัมพันธ์ของค่าคงที่การลดทอนกำลังงานตามสมการ

$$\cosh \alpha \ell' = \left| \cos k \ell' - \frac{b}{2g} \tan kd' \sin k \ell' \right| > 1 \quad (5-35)$$

เมื่อ k เป็นค่าคงที่ในการแพร่กระจายคลื่น ($k = \frac{2\pi}{\lambda}$ โดยที่ λ เป็นความยาวคลื่นในฟรีสเปซ)

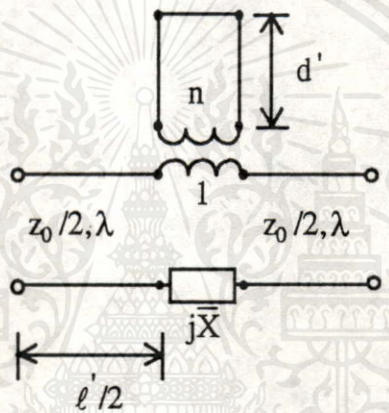
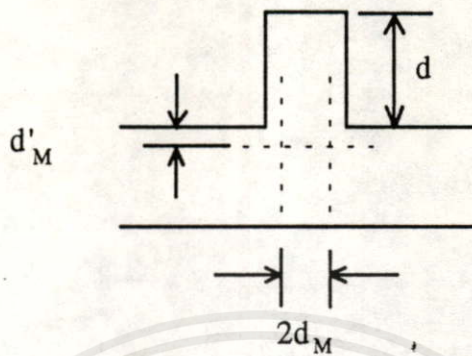
สมการ (5-35) เป็นสมการที่นำมาใช้ในการออกแบบโซ้คถูกผูกคู่ได้จากสมการค่าการสูญเสียเนื่องจากการแทรกใส่ และจะมีค่าเป็นอนันต์ก็ต่อเมื่อ X มีค่าเป็นอนันต์ หรือ $kd = 90^\circ$ ค่าแบนด์วิคท์ (band width) จะขึ้นกับขนาด $b \sin k \ell' / 2g$ เมื่อมาคูณกับ $\tan kd'$ ซึ่งมีค่ามาก ๆ แล้ว จะทำให้แบนด์วิคท์ของโซ้คมีความกว้างมากขึ้น ซึ่งสะดวกในการสร้างโซ้คที่ไม่ต้องมีความละเอียดมากเกินไป และไม่ผลต่อคุณสมบัติของโซ้คเมื่อถูกโหลดด้วยวัสดุที่ต้องการให้ความร้อนและสายพานลำเลียง

ในการออกแบบจึงควรกำหนดให้ค่า $b \sin k \ell' / 2g$ มีค่ามากที่สุดนั่นคือ $k \ell'$ ควรเป็นค่าเป็น 90° ที่ความถี่ไมโครเวฟ อัตราส่วน b/g ควรมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ซึ่งหมายถึงความสูงของช่อง g ไม่ควรมากเกินไปขนาดของวัสดุที่ต้องการให้ความร้อน ในทางปฏิบัติจริงอาจให้ $g < 0.2\lambda$ [24] เพื่อไม่ให้อัตราส่วน b/g น้อยเกินไป

เราสามารถที่จะออกแบบโซ้คแบบถูกผูกคู่ได้ 2 วิธี [28] โดยใช้กราฟของโคห์น (Cohn's graph) และโดยใช้วงจรสมมูลย์ ที-จังก์ชัน ของมาร์คูวิทซ์ (T-Junction Equivalent Circuit of Marcuvitz) [29] ในที่นี้เลือกใช้วิธีของมาร์คูวิทซ์ซึ่งง่ายและสะดวกกว่า

จาก [28] ได้แสดงวงจรสมมูลย์ของโซ้คถูกผูกขึ้นมาใหม่ที่ละเอียดขึ้น พิจารณาจากรูป 5-18 วงจรสมมูลย์นี้จะนำใช้หาความยาวทางไฟฟ้า ℓ' และ d' ในสมการ (5-35) โดยตัวแปร d_M และ d'_M หาได้จากวงจรสมมูลย์ของมาร์คูวิทซ์ (ซึ่งเป็น d และ d' เมื่อดูใน [29] รูป 6.1-2)

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 5-18 วงจรสมมูลของไอ้คลูกฟูกหนึ่งส่วน

จาก [29] ซึ่งเป็นโครงสร้างแบบ ที-จังก์ชันเปิด (Open T-junction) เราสามารถหาความยาวทางไฟฟ้า l' ได้เช่นเดียวกัน (โดยใช่วงจรสมมูลในรูป 6.1-2 ของ [29]) โดยที่

$$l' = l + 2d_M \quad (5-36)$$

และความยาวทางไฟฟ้า d' จาก

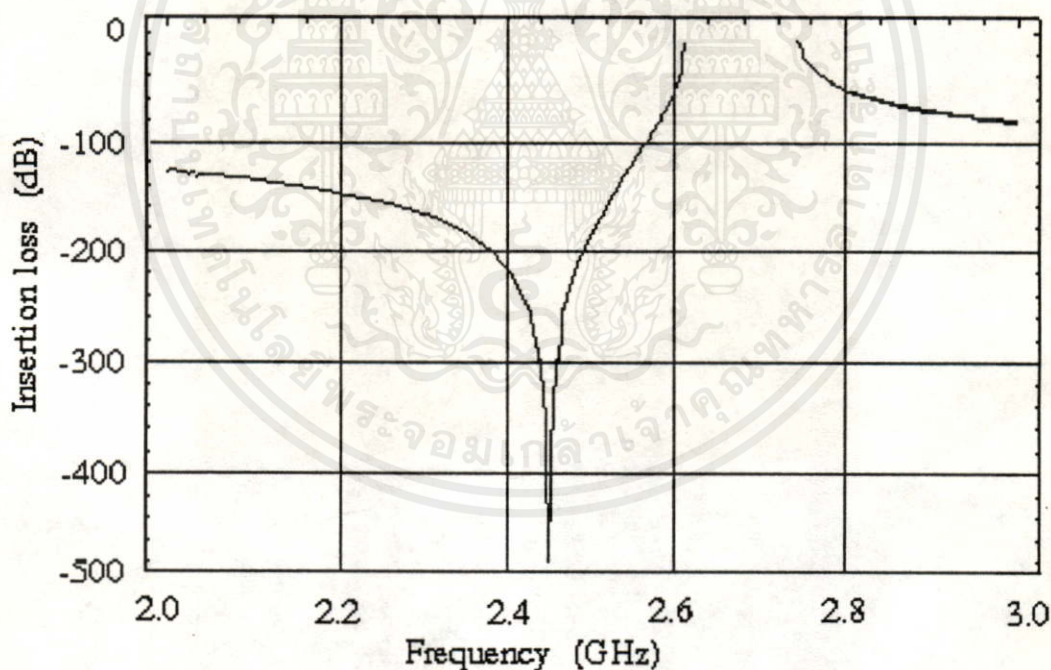
$$d' = d + d'_M \quad (5-37)$$

ในที่นี้เราสร้างไอ้คซึ่งทำด้วยอลูมิเนียมบนเปลือกสี่เหลี่ยมที่มีขนาด $l - b = 3.18$ เซ็นติเมตร ติดกับผนังท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมปลายเปิดด้วยสกรู และกำหนดให้มีค่า $g = 2.03$ เซ็นติเมตร ความกว้างของท่อนำคลื่นไอ้ค $w = 33.02$ เซ็นติเมตร (สัมพันธ์กับขนาดสายพาน) ระยะห่างระหว่าง

ลูกบอล $l = 6.60$ เซ็นติเมตร และ กำหนดจำนวนลูกโซ่ตามความกว้างและความยาวของท่อนำคลื่นโซ่เป็น 5 และ 7 ตามลำดับ ทำให้หา b ได้เท่ากับ 3.43 เซ็นติเมตร จาก [29] และสมการ (5-35), และ (5-37) จะได้ความสัมพันธ์ใหม่ ซึ่งจะพยายามทำให้แบนด์วิดท์ของโซ่มีความกว้างที่สุด คือ

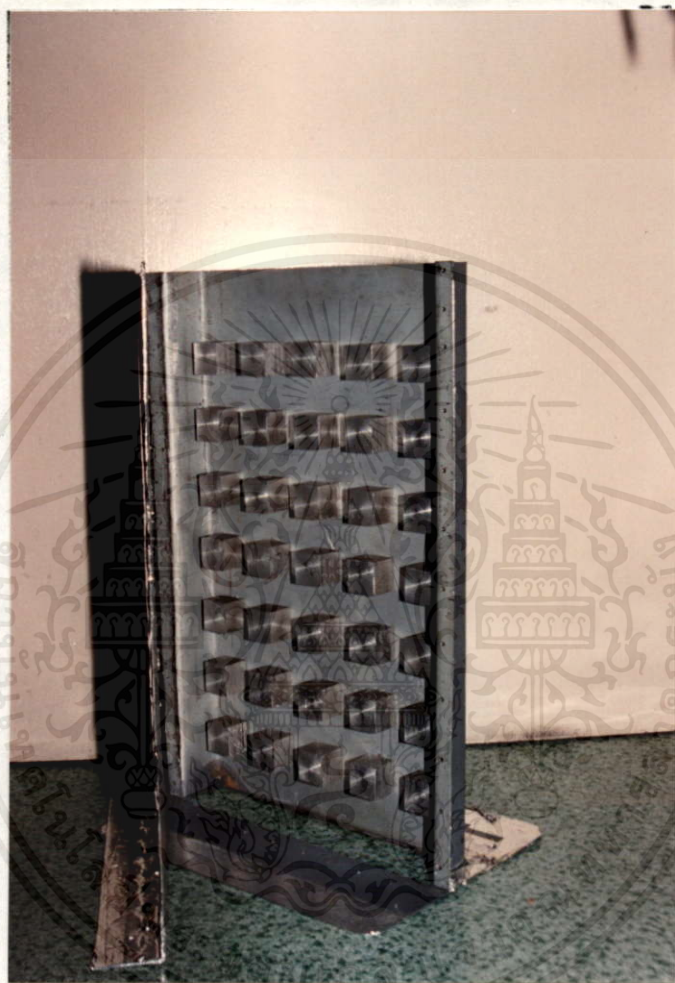
$$\cosh \alpha l' = \cos(160.65^\circ) - 0.686 \tan(90^\circ) \sin(160.65^\circ) \quad (5-38)$$

สมการ (5-34) ทำให้ได้ค่าการสูญเสียเนื่องจากการแทรกใส่เป็น, มีค่าเป็นอนันต์ที่ความถี่ใช้งาน 2450 MHz แสดงได้ในรูป 5-19



รูป 5-19 ค่าการสูญเสียเนื่องจากการแทรกใส่ที่ได้จากการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 5-20 ภาพถ่ายของไข้กลูกฟูกที่ได้ออกแบบไว้
(แยกส่วนประกอบ)

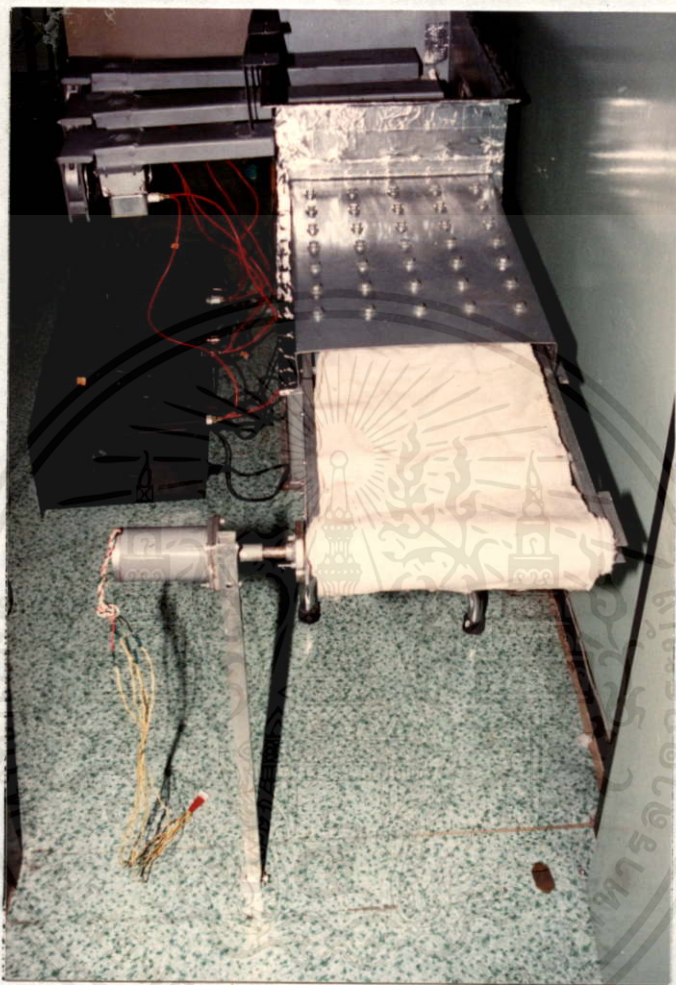
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5-5 สายพานลำเลียงและชุดขับเคลื่อนสายพาน

รูป 5-21 แสดงระบบสายพานลำเลียงและชุดขับเคลื่อนสายพานลำเลียง ซึ่งประกอบไปด้วยโครงรูปอลูมิเนียมรูปตัวยู (U) วางขนานกันยาว 1.6 เมตร และมีวัสดุที่มีการสูญเสียต่ำ (ซูเปอร์เลน:ชื่อทางการค้า) วางคั่นระหว่างโครงอะลูมิเนียมทั้งสองห่างกันเป็นระยะ 30 เซ็นติเมตร เพื่อรองรับน้ำหนักสายพานและวัสดุโคเอเล็กตริกที่นำมาให้ความร้อน โดยระนาบสายพานลำเลียงจะขนานกับระนาบสายอากาศสล็อตอาร์เรย์บนท่อนำคลื่นทั้ง 3 ท่อนำคลื่น โดยมีระยะห่างจากระนาบสายอากาศประมาณ 5 มิลลิเมตร (ไม่สามารถทำได้ที่ 1 มิลลิเมตร เนื่องจากในการทดลองต้องวัดอุณหภูมิด้วยหัววัดเทอร์โมคัปเปิลมีความหนา 1 เซ็นติเมตร)

สายพานลำเลียงทำด้วยผ้าด้ายดิบมีความหนาประมาณ 1.5 มิลลิเมตร กว้าง 30 เซ็นติเมตร ถูกม้วนที่ปลายทั้งสองด้าน ด้วยลูกกลิ้งยางที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 นิ้ว ที่ปลายด้านหนึ่งของลูกกลิ้งยางจะติดกับแกนสเต็ปปีงมอเตอร์รุ่น 103-746-31 ของ SANYO DENKI Co.,LTD ควบคุมการหมุนโดยใช้ไมโครคอมพิวเตอร์ ในแบบจำลองนี้จะสร้างโซ่เพียงด้านเดียวขึ้นมาทดสอบ ดังนั้นที่ปลายด้านหนึ่งของสายพานจึงอยู่ในตู้ปิด การหมุนของสายพานสามารถควบคุมได้ด้วยการส่งสัญญาณดิจิทัลจากไมโครคอมพิวเตอร์ไปยังวงจรขับเคลื่อนสเต็ปปีงมอเตอร์ ซึ่งอาศัยหลักการสวิทช์ของทรานซิสเตอร์กำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

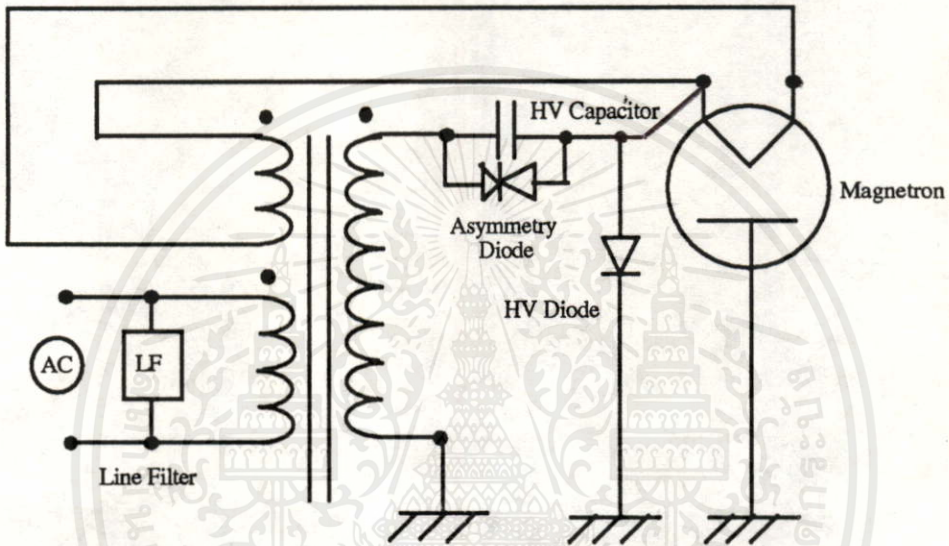


รูป 5-21 ภาพถ่ายสายพานลำเลียงและชุดขับเคลื่อนสายพาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5-6 แหล่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้าสำหรับแมกนีตรอน [3,18]

รูป 5-22 แสดงวงจรแหล่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้าสำหรับแมกนีตรอนที่ใช้ทั่วไป สำหรับเตาอบไมโครเวฟ และในระบบไมโครเวฟอุตสาหกรรมกำลังงานต่ำๆ



รูป 5-22 วงจรแหล่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้าที่มีเสถียรภาพด้วย แอล-ซี แบบทวิแรงดันไฟฟ้าครึ่งลูกคลื่น (Half-wave voltage double L-C stabilized power supply circuit)

ระบบแหล่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้าจะประกอบด้วย

1. หม้อแปลงไฟฟ้าความเหนี่ยวนำสูง ที่มี 2 ขดลวดทางด้านทุติยภูมิ โดยจะทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้าลงเพื่อจุดไส้หลอดที่แคโทด และแปลงแรงดันไฟฟ้าขึ้นเพื่อไบอัสให้กับแอโนดและแคโทดของแมกนีตรอน ขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีความเหนี่ยวนำสูงเมื่อนำมาต่ออนุกรมร่วมกับตัวเก็บประจุจะปฏิบัติตัวเป็นวงจรรีโซแนนซ์ที่ความถี่ค่าหนึ่ง ดังนั้นถ้ามีการเปลี่ยนแปลงความถี่ทางด้านแรงดันไฟฟ้าอินพุต ทำให้แรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตจะเกิดการเปลี่ยนแปลงความถี่น้อยมาก ในขณะเดียวกันก็จะทำหน้าที่เป็นตัวคูคกลืนแรงดันแปลกปลอมต่างๆ เช่น น้อยซ์, ทรานส์เซียนท์ที่มีผลต่อการทำงานของแมกนีตรอน ทำให้วงจรมีเสถียรภาพดีขึ้น

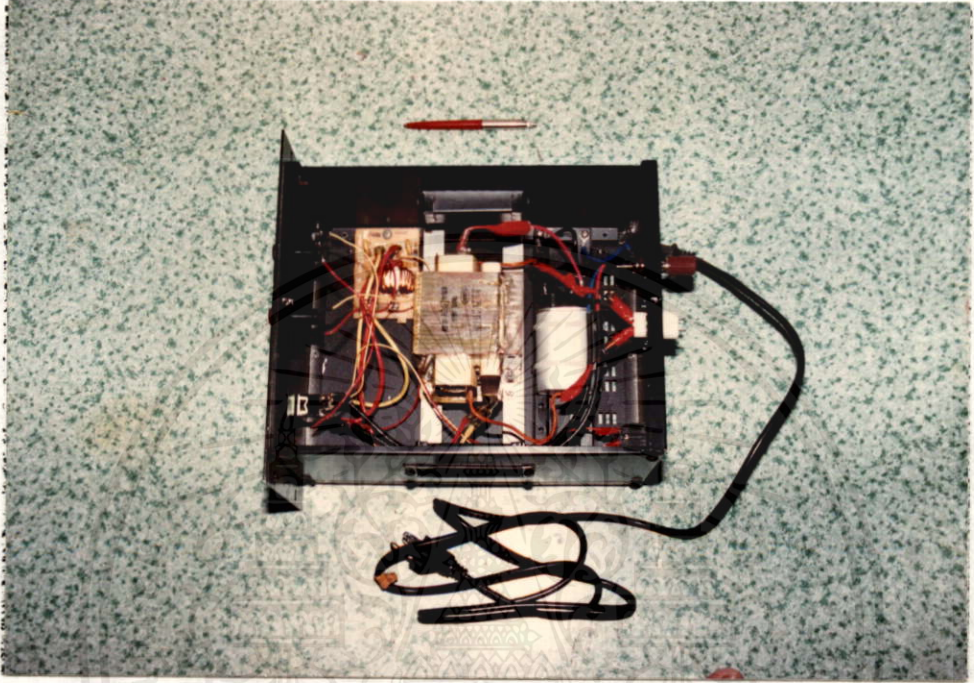
2) ตัวเก็บประจุทนแรงดันสูงและไดโอด จะทำหน้าที่เป็นวงจรทวิแรงดันไฟฟ้าและสร้างพัลส์กระแสตรงสัปดาห์สูงๆให้กับแมกนีตรอน ในบางวงจรจะต่อตัวต้านทานค่ามากกับตัวเก็บประจุเพื่อคายประจุอย่างรวดเร็ว เป็นการเพิ่มความปลอดภัยแก่ผู้ปฏิบัติงานในการซ่อมบำรุงวงจร

3) ไดโอด 2 ด้านแบบไม่สมมาตร (Asymmetry Diode) จะทำงานคล้ายกับวาริสเตอร์ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป แต่จะมีค่าแรงดันไฟฟ้าไบอัสย้อนกลับไม่เท่ากัน (1.3-1.7 กิโลโวลต์ และ 7.2 กิโลโวลต์โดยประมาณ) โดยจะทำหน้าที่ป้องกันแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุเกินกว่าที่จะทนได้ เนื่องจากแรงดันทรานส์เซียนส์หรือเซอร์จ หรือ เนื่องมาจากการเดินสายในวงจร ผิดเกิดการลัดวงจร ทั้งสองกรณีจะทำให้ไดโอดเกิดการเบรคควาน์และลัดวงจร มีการนำกระแสสูงอย่างรวดเร็ว การคับปลิงของหม้อแปลงจะทำให้เกิดการดึงกระแสทางด้านอินพุทของหม้อแปลงเป็นปริมาณสูงเกินกว่ากระแสที่ฟิวส์จะทนได้ทำให้ฟิวส์เปิดวงจร ไดโอดชนิดนี้จึงทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ป้องกันแบบ "Sharp Protection"

เป็นที่น่าสังเกตว่า ขดลวดหม้อแปลงทางด้านสัปดาห์ต่ำ (จุดไส้หลอด) จะพันทางด้านปฐมภูมิและมีขั้วต่างจากขดลวดหม้อแปลงสัปดาห์สูง เนื่องจากในการเริ่มต้นของการทำงานของหลอดจำเป็นต้องจุดไส้หลอดก่อน เพื่อปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมา ก่อนที่จะมีสัปดาห์ไฟฟ้าสูงเร่งอิเล็กตรอนมาที่แอโนด เฟสของแรงดันไฟฟ้าจึงต่างกันอยู่ π เรเดียน

สำหรับในระบบนี้แหล่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้าจะมีสัปดาห์ไฟฟ้าแคโทด-แอโนดประมาณ 3.2 กิโลโวลต์ และสัปดาห์ไฟฟ้าแคโทด (ไส้หลอด) 3.3 โวลต์ รูป 5-23 แสดงแหล่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้าสำหรับแมกนีตรอนซึ่งมี 3 ชุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

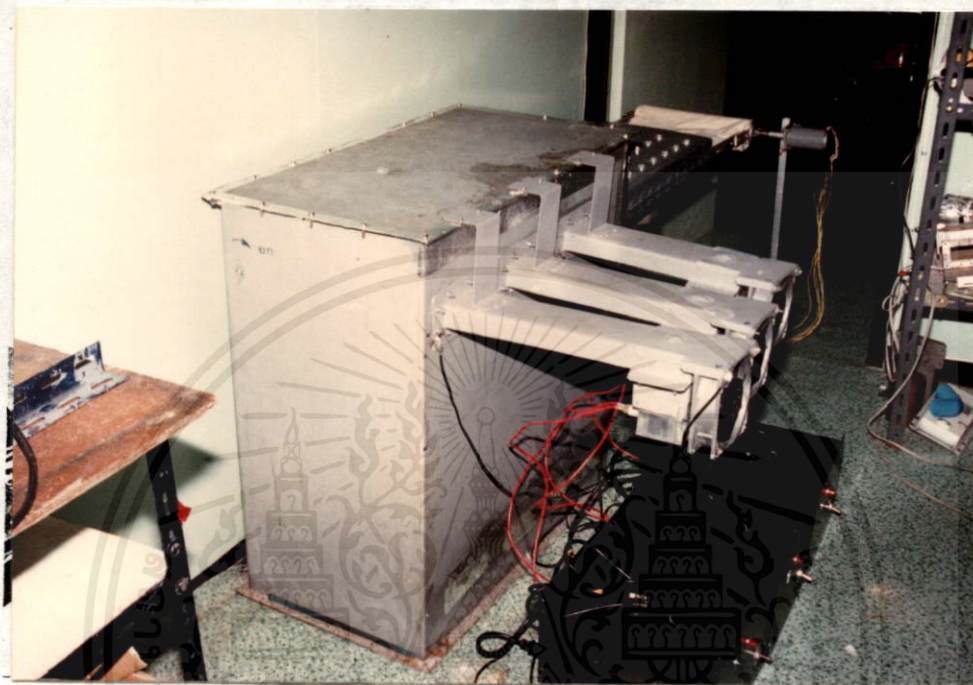


รูป 5-23 ภาพถ่ายแหล่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้า สำหรับแมกนีตรอน

5-7 แบบจำลองขนาดเล็ก

รูป 5-24 แสดงส่วนประกอบทั้งหมดของระบบสายอากาศสี่อัตรารีทซ์ทั้ง 3 ท่อนาคลื่น จะวางเชื่อมกันตลอดความกว้างสายพาน มีแมกนีตรอนจ่ายกำลังงานให้กับสายอากาศที่ปลายด้านนอกของท่อนาคลื่นและมีระบบพัลสมระบายความร้อนแบบเป่าลมเข้าให้กับแมกนีตรอน แหล่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้าทั้ง 3 ชุดจะจ่ายกำลังงานให้กับแมกนีตรอนและพัลสมระบายความร้อน โดยมีสวิทช์ปิดเปิดวงจรแยกกันแต่ละชุด ซึ่งจะป้องกันการลัดวงจรด้วยเบรกเกอร์ภายนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 5-24 ภาพถ่ายแบบจำลองขนาดเล็กที่สร้างขึ้นมาทดสอบสายอากาศ

5-8 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการทำงานและการออกแบบสร้างแบบจำลองขนาดเล็กขึ้นมาในห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาและเก็บข้อมูลต่างๆของสายอากาศแพร่กระจายคลื่น ระบบประกอบไปด้วยสายอากาศแพร่กระจายคลื่นแบบสลิตอาร์เรย์ 3 สลิตบนท่อนำคลื่นที่นำมาวางเยื้องกัน 3 ท่อนำคลื่น, หลอดแมกนีตรอน 3 หลอด, ไซค์ดักคลื่นที่ทางเข้าออกสายพาน, สายพานลำเลียงและชุดขับเคลื่อนสายพาน , และแหล่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้าสำหรับแมกนีตรอน 3 ชุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

การทดสอบสายอากาศแพร่กระจายคลื่นและระบบใช้ค

6.1 กล่าวนำ

จากบทที่ผ่านมาได้แสดงแนวความคิดในการออกแบบและการนำสายอากาศสล็อตอาร์เรย์มาวางเรียงกันเพื่อผลของการกระจายสนามไฟฟ้า และอุณหภูมิที่สม่ำเสมอตลอดแนวหน้ากว้างของสายพานลำเลียง รวมไปถึงการออกแบบระบบต่างๆ

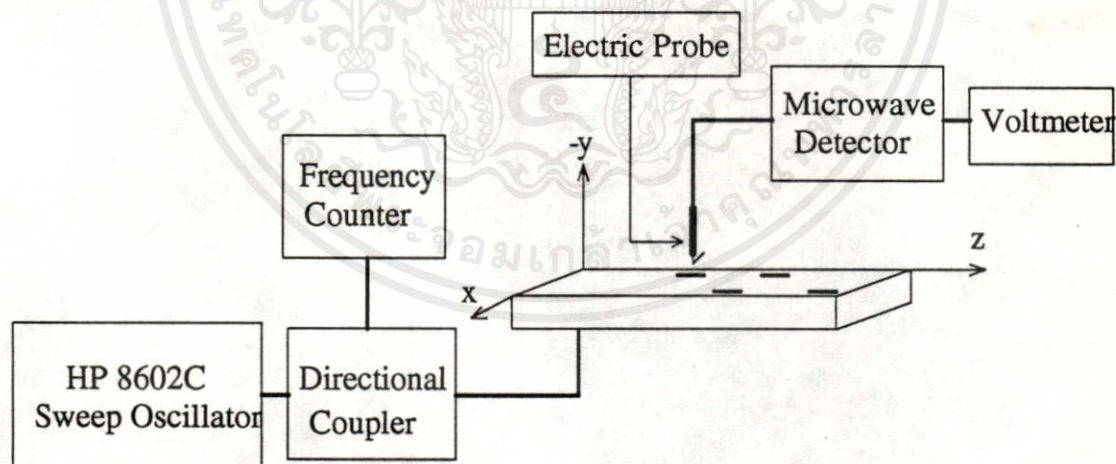
สำหรับในบทนี้จะกล่าวถึงการทดสอบสายอากาศสล็อตอาร์เรย์บนท่อนำคลื่นในการกระจายสนามไฟฟ้าและการหาองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าที่แพร่กระจายจากสายอากาศสล็อตบนพื้นที่หน้าตัดของสายอากาศที่ความสูง $y = -1$ มิลลิเมตร เปรียบเทียบกับการคำนวณที่ได้ในบทที่ 3 ในส่วนของการกระจายอุณหภูมิในไดอิเล็กตริกจะเป็นการทดสอบการกระจายอุณหภูมิในตัวกลางไดอิเล็กตริกที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ ซึ่งตัวกลางที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบจะมีการสูญเสียในรูปความร้อนสูง ในที่นี้เลือกใช้น้ำเป็นตัวกลางในการทดสอบ และใช้กระดาษทิชชูชุบน้ำเปียกชุ่มเป็นโหลด โดยนำมาวางเป็นสแลบยาววางพื้นที่หน้าตัดสายพาน ท้ายบทได้ทำการวัดการสูญเสียเนื่องจากกรแทรกใส่ของใช้คที่นำคลื่นที่ได้ออกแบบไว้ในบทที่ 5

6.2 การทดลองและผลการทดลอง

6.2.1 การกระจายสนามไฟฟ้า จากสายอากาศสล็อตอาร์เรย์ 4 สล็อต บนท่อนำคลื่น

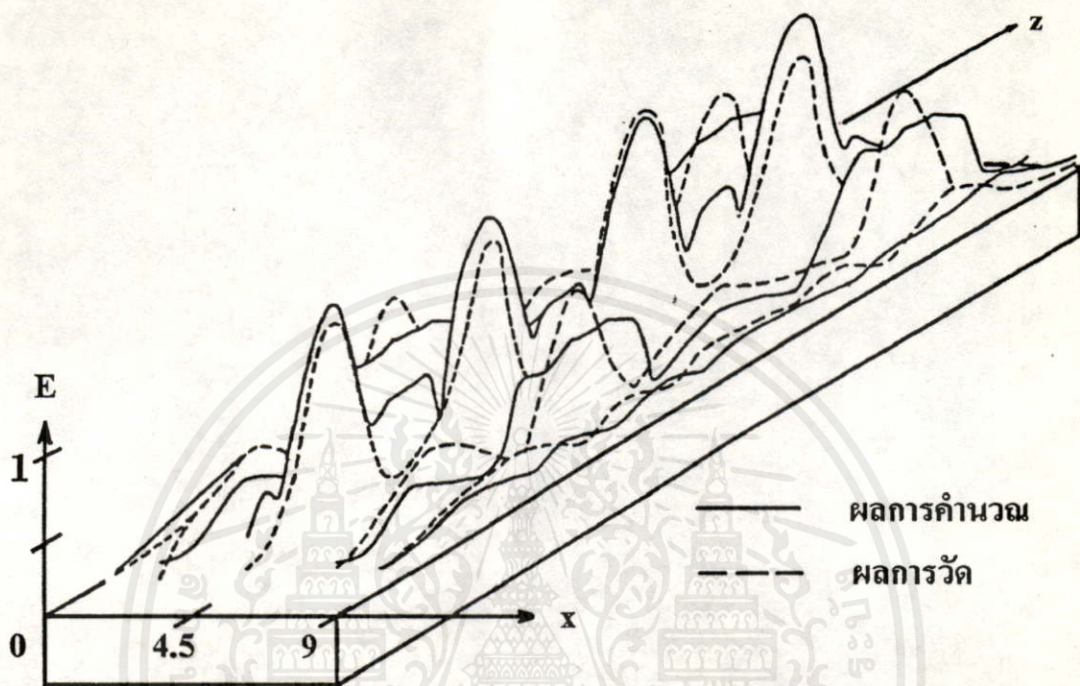
ในการทดสอบได้สร้างสายอากาศสล็อตอาร์เรย์ 4 สล็อต ที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัด $a \times b = 3 \times 9$ ตารางเซนติเมตร คาวิตีเรโซแนนซ์มีความยาว 50.12 เซนติเมตร ในการจัดระบบการวัดจะให้สายอากาศวางตัวขนานตามแนวแกน z (พิจารณาจากรูป 6-1 ประกอบ) และถูกยึดให้อยู่กับที่เพื่อมิให้สายอากาศเปลี่ยนตำแหน่ง เพื่อป้องกันความผิดพลาดในการวัดสนามไฟฟ้า การป้อนสนามไฟฟ้าให้กับสายอากาศ จะทำโดยการยื่นโพรบที่ทำด้วยสวดโลหะตัวนำที่เชื่อมติดกับตัวนำใน (Inner Conductor) ของคอนเนคเตอร์ชนิด N เข้าไปในสายอากาศ โพรบที่ยื่นเข้าไปในสายอากาศนี้จึงทำหน้าที่คล้ายกับสายอากาศแบบโมโนโพลไฟฟ้าที่กระตุ้นสนามไฟฟ้าในแนวแกน y เพื่อป้อนให้กับสายอากาศสล็อตอาร์เรย์ โดยวางอยู่ที่เส้นกึ่งกลางของท่อนำคลื่นตามแนวยาว และมีระยะห่างจากผนังปิดของท่อนำคลื่นเป็นระยะ $\lambda_g/4$ คือ 4.18 เซนติเมตร

ผังภูมิของการวัดแสดงในรูป 6-1 ในการวัดจะใช้ Sweep Oscillator HP 86240A เป็นอุปกรณ์ในการกำเนิดคลื่นที่มีความถี่ เพื่อป้อนสนามให้กับสายอากาศสล็อตผ่านไดเรกชันนอลคัปเปิลเลอร์ (Directional Coupler) พลังงานส่วนหนึ่งจะถูกคัปปลิงไปยังเครื่องวัดความถี่ (Frequency Counter) พลังงานที่เหลือจะป้อนให้กับสายอากาศสล็อตอาร์เรย์ ซึ่งมีโพรบไฟฟ้า (Electric Probe) ทำหน้าที่เป็นสายอากาศรับโมโนโพลขนาดเล็กระบุตำแหน่งโดยโคแอกเซียลชนิดแกนร่วมแข็ง (Solid Coaxial) ต่อกับไมโครเวฟดีเทกเตอร์ (Microwave Detector) และโวลต์มิเตอร์ (Voltmeter) เพื่อแสดงความแรงของสนามไฟฟ้า โพรบไฟฟ้าจะถูกวางในแนวแกน x (เนื่องจากทราบว่าสนามไฟฟ้าในแนวแกน x มีค่าใกล้เคียงกับสนามไฟฟ้ารวม) และจะถูกจับบนแท่นสไลด์ที่เคลื่อนที่ได้ขนานตามแนวแกน z โดยมีเวอร์เนียสเกลระบุตำแหน่งในการเคลื่อนที่ ในการวัดจะให้ตำแหน่งโพรบไฟฟ้าห่างจากระนาบปากสล็อตเป็นระยะ 1 มิลลิเมตร แล้วให้เคลื่อนที่ขนานตามแนวแกน z ที่ $x = 0.9, 2.1, 4.5, 6.9$, และ 8.1 เซนติเมตร ผลการวัดทั้งหมดจะนำมาแสดงในรูปการกระจายสนามไฟฟ้าระยะบนพื้นที่หน้าตัดของสายอากาศที่ระนาบความสูง 1 มิลลิเมตร จากปากสล็อต รูป 6-1 จะแสดงผังภูมิของการวัดการกระจายสนามไฟฟ้า



รูป 6-1 ผังภูมิของการวัดการกระจายสนามไฟฟ้า

ผลการทดสอบการกระจายสนามไฟฟ้าสามารถนำมาแสดงได้ในรูป 6-2 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบผลการทดลองเปรียบเทียบกับผลการคำนวณ ถ้าสนามไฟฟ้าที่ได้จะถูกนำมาอิมมูไลซ์ เพื่อสะดวกในการเปรียบเทียบขนาดในสเกลเดียวกัน



รูป 6-2 การกระจายสนามไฟฟ้าจากผลการทดลอง
เปรียบเทียบกับผลการคำนวณที่ $y = -1$ มิลลิเมตร

จากบทที่ 4 ทำให้ทราบว่าสนามในบริเวณสายอากาศสล็อตอาร์เรย์จะมีส่วนของสนามที่ตัดขวางสายอากาศสล็อตมีค่าเป็นส่วนใหญ่ สนามไฟฟ้ารวมจะมีค่าใกล้เคียงกับสนามส่วนนี้ เมื่อพิจารณารูป 6-2 พบว่า แนวเส้นกลางของท่อนำคลื่นจะเป็นแนวที่สนามไฟฟ้ามีค่าสูงที่สุดและเมื่อยิ่งห่างออกจากแนวเส้นนี้ออกไปสนามจะมีค่าต่ำลงและมีค่าน้อยๆเมื่อห่างออกไปถึงบริเวณขอบของท่อนำคลื่น ดังนั้นหากใช้ท่อนำคลื่นทำสายอากาศอาร์เรย์หลายตัวมาอยู่ใกล้กันการเหนี่ยวนำระหว่างแต่ละท่อนำคลื่นจะมีค่าน้อย ซึ่งจะมีผลต่อการทำให้เกิดคลื่นสะท้อนกลับไปยังแหล่งกำเนิดกำลังงานของสายอากาศแต่ละตัวมีค่าน้อย และจากการคำนวณและการวัดทำให้เราทราบว่าสนามจะมีค่าสูงสุดตามแนวที่เป็นกึ่งกลางของสล็อตแต่ละตัว

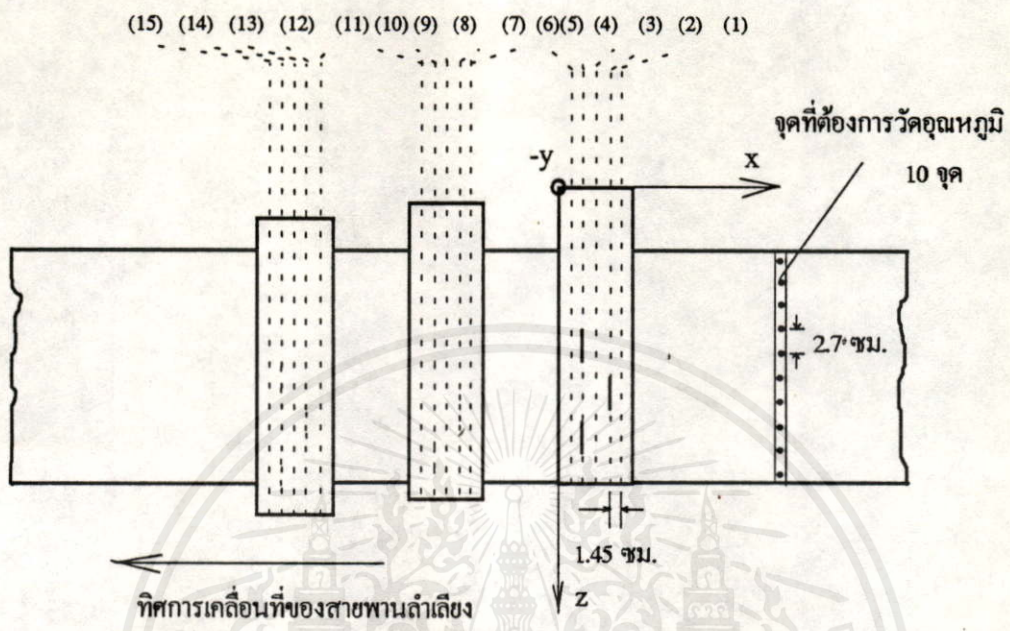
เมื่อญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คิดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสาร ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.2 การกระจายอุณหภูมิในไดอิเล็กตริก จากสายอากาศสล็อตอาร์เรย์ 3 สล็อตบนท่อ นำคลื่นที่นำมาวางเยื้องกัน

สำหรับในการทดลองนี้จะทำในตู้ปิดของระบบไมโครเวฟในสถานะใช้งานจริง โดยใช้สายอากาศสล็อตอาร์เรย์ 3 สล็อตบนท่อนำคลื่นโดยนำมาวางเยื้องกัน ในการแพร่กระจายคลื่น ระบบจะซิดส์ปิดรอบด้านเพื่อป้องกันการรั่วของคลื่นไมโครเวฟ ยกเว้นที่ทางเข้าออกของสายพาน ลำเลียงที่เป็นช่องเปิดโดยมีไส้ค้ำทำหน้าที่กรองการรั่วของคลื่น

สายอากาศจะถูกป้อนกำลังงานโดยแมกนีตรอน ดังนั้นสายอากาศสล็อตอาร์เรย์แต่ละท่อนำคลื่นจะรับและจ่ายกำลังงานเฉลี่ยประมาณ 650 วัตต์ สายอากาศจะถูกนำมาวางเยื้องกัน ดังรูป 6-3 โดยมีระยะห่างระหว่างสายอากาศ 9 เซ็นติเมตร กระจายทิศทางอุณหภูมิจะถูกนำมาวางเป็นแถบสแลบตามแนวยาวขวางหน้าตัดของสายพาน ดังรูป 6-3 และ 6-4 เทอร์โมคัปเปิลเซนเซอร์ชนิด T ทั้งสิบตัวจะวางห่างกัน 2.7 เซ็นติเมตร สอดเข้าไปในเนื้อกระจายทิศทางอุณหภูมิตั้งหน้า 2 มิลลิเมตร เพื่อวัดอุณหภูมิทั้งสิบจุด การหมุนกลับของสายพานลำเลียงซึ่งควบคุมความเร็วการเคลื่อนด้วยไมโครคอมพิวเตอร์จะทำให้แถบกระจายทิศทางอุณหภูมิต่างที่ผ่านสายอากาศสล็อตอาร์เรย์ ทั้ง 3 ท่อนำคลื่น เป็นจังหวะๆ และจะหยุดบันทึกอุณหภูมิตามแนวยาวของท่อนำคลื่นเส้นที่ (1), (2), (3), ...จนถึงจังหวะที่ (15) ของสายอากาศสล็อตในท่อนำคลื่นสุดท้าย โดยแต่ละจังหวะในการบันทึกอุณหภูมิในแต่ละท่อนำคลื่นจะมีระยะห่างกัน 1.45 เซ็นติเมตร

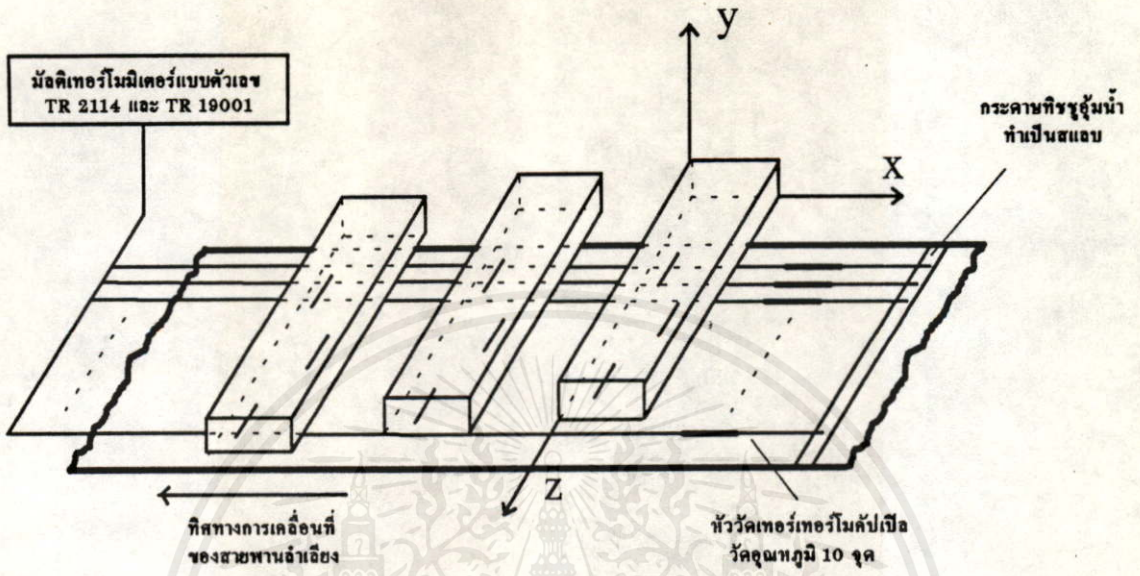
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 6-3 จังหวะในการหุขุดบันทึกอุณหภูมิ สำหรับการวัด การกระจายอุณหภูมิตนสแลบ โคอีเล็กตริก

ในขณะที่สายพานเคลื่อนที่ในแต่ละตำแหน่งอุณหภูมิจะถูกบันทึกตลอดเวลาทั้ง 10 จุด ด้วยเทอร์โมมิเตอร์แบบตัวเลข (Multi Digital Thermometer TR2114 และ Auto Channel Selector TR19001) ของ ในการทดลองเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าเข้าแหล่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้า 2 ค่าด้วยวาริแอก คือที่ 190 และ 220 โวลต์ เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ โดยอุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำเท่ากับ 29 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



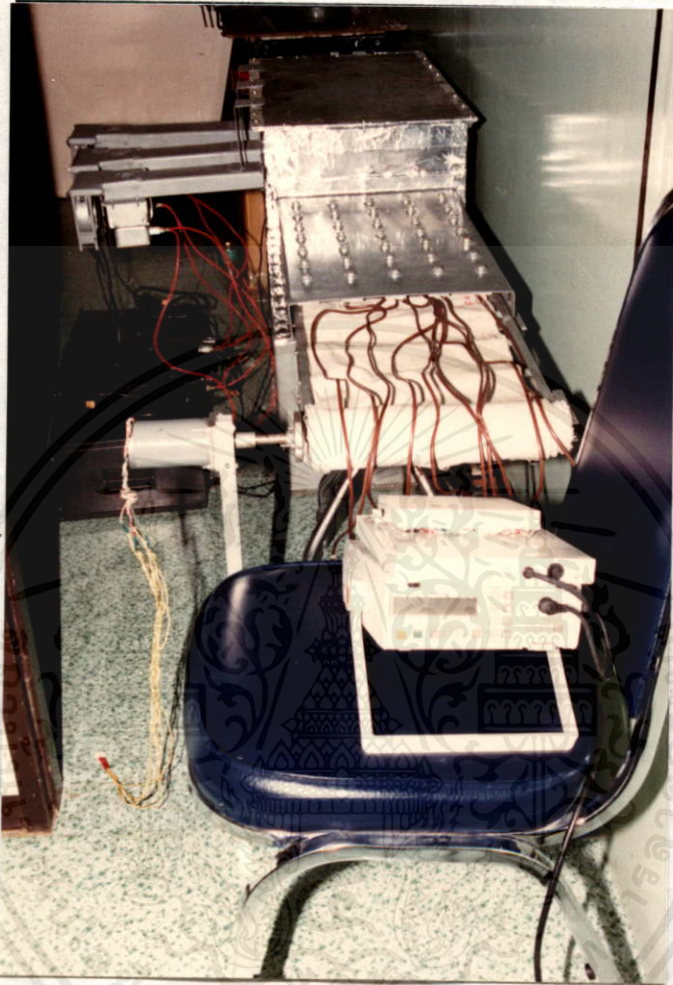
รูป 6-4 การวัดการกระจายอุณหภูมิในสแลบภายในตู้ปิด



เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของกรมวิทยาศาสตร์ทางธรณีวิทยา กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กรุงเทพมหานคร

ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม อีกรังห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ก)



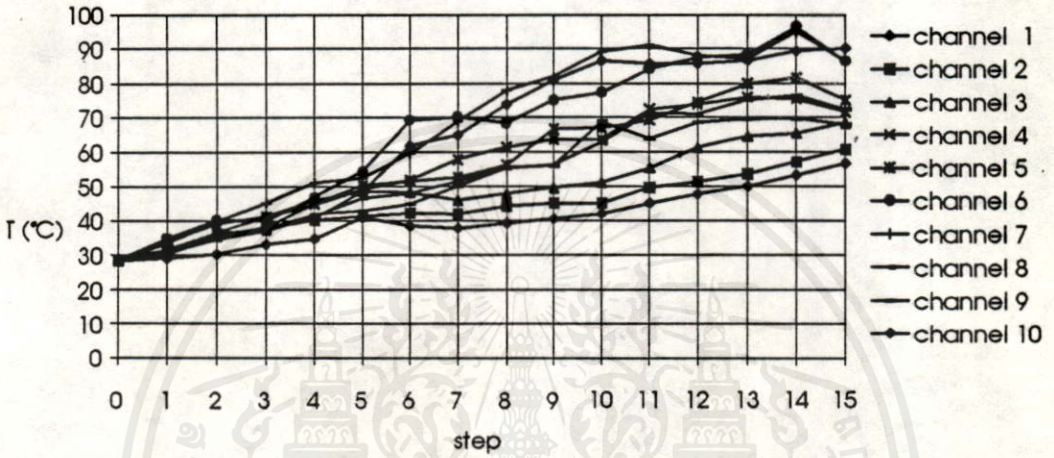
(ข)

รูป 6-5 รูปถ่าย (ก) การนำหัววัดเทอร์โมคัปเปิล มาวัดการกระจาย

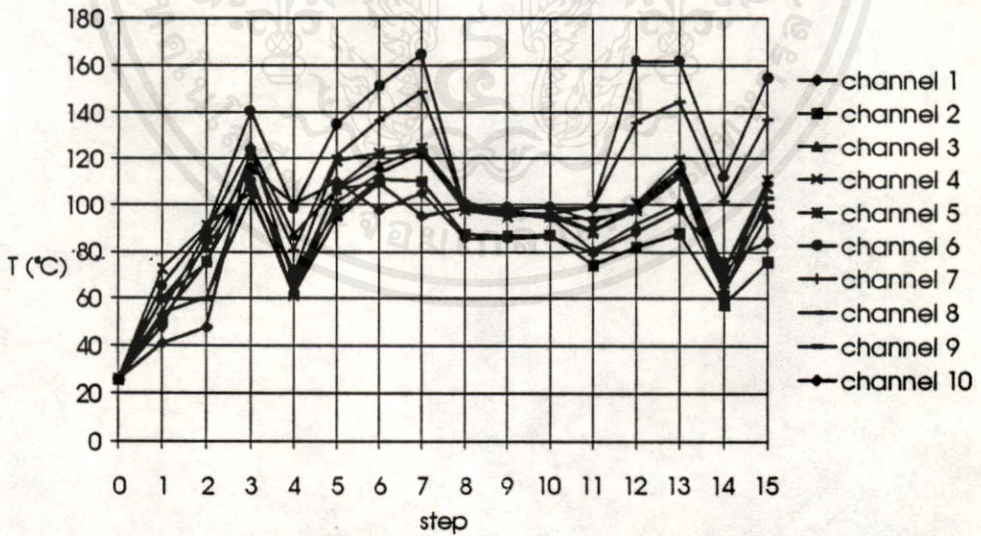
อุณหภูมิในสแลบ ไดอิเล็กตริกที่เป็นกระดาษทิชชูอ้วนน้ำ

(ข) ระบบการวัดอุณหภูมิ

รูป 6-6 แสดงผลการกระจายอุณหภูมิในสแลบ ไดอิเล็กตริกส่วนใหญ่ที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ (กระดาษทิชชูอ้วนน้ำ) เนื่องจากเทอร์โมคัปเปิลเซนเซอร์และขนาดของสายเทอร์โมคัปเปิลที่โตทำให้มีน้ำหนักมากขึ้น สเตปปีงมอเตอร์จะให้ทอร์คขับได้สูงสุด โดยการลำเลียงสม่ำเสมอไม่ติดขัดที่ความเร็ว 0.1 ซม./วินาที ดังนั้นในการทดลองนี้จะใช้ความเร็วสายพานที่ความเร็วค่าเดียวในการทดสอบ



(ก)



(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านธุรกิจ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีเมล: it@kmutt.ac.th หรือ โทร: 0-2942-3000

รูป 6-6 การกระจายอุณหภูมิในสแลบกระดาศทึบชุบน้ำ เมื่อ

(ก) แรงดันไฟฟ้าเข้าแหล่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 190 โวลต์

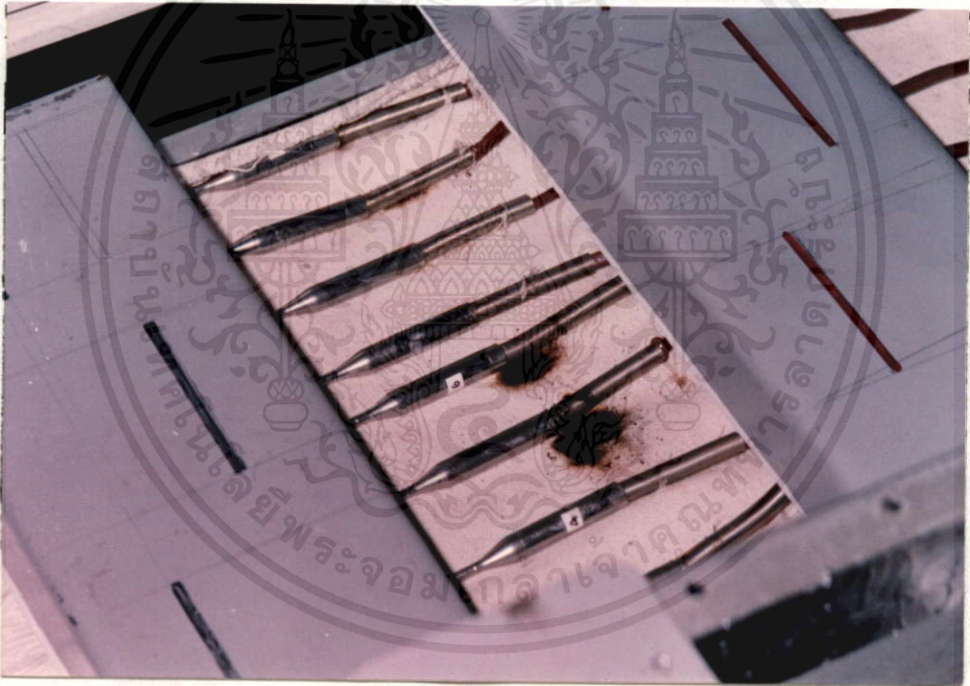
(ข) แรงดันไฟฟ้าเข้าแหล่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 220 โวลต์

เป็นที่ทราบกันทั่วไปว่า น้ำที่บริสุทธิ์จะมีจุดเดือดที่ 100°C ในการให้ความร้อนแก่น้ำบริสุทธิ์ในช่วงเวลาหนึ่งก่อนที่จะถึงจุดอิมิตัวทางอุณหภูมิที่จุดเดือด 100°C อุณหภูมิจะค่อยๆเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณารูป 6-6 (ก) ที่แรงดันไฟฟ้าเข้าที่แหล่งจ่ายกำลังงาน 190 โวลต์ กำลังงานไมโครเวฟซึ่งยังคงมีค่าน้อย ทำให้อุณหภูมิในแต่ละจุดค่อยๆสูงขึ้นจนใกล้กับจุดเดือดของน้ำที่ 100°C เมื่อผ่านเส้นการเคลื่อนที่ ที่ 15 การกระจายอุณหภูมิในจุดที่ใกล้กันจะมีอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกันเคียง ผลต่างอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดประมาณ 30°C

เมื่อพิจารณารูป 6-6 (ข) จะสังเกตว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิบนสแลบก่อนถึงอุณหภูมิ 100°C มีการเพิ่มขึ้นรวดเร็วมก เนื่องจากกำลังงานไมโครเวฟมีค่าสูง และจากการวิเคราะห์ทำให้ทราบว่าในความเป็นจริงสแลบเกิดจากรวมตัวของกระดาศที่ซุกกับน้ำ ทำให้คุณสมบัติไดอิเล็กตริกเปลี่ยนไปจากน้ำที่บริสุทธิ์ ซึ่งทำให้จุดอิมิตัวทางอุณหภูมิสูงกว่าจุดเดือดน้ำเนื่องจากเป็นสารผสม และอุณหภูมิจะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาสูงกว่าใกล้ 100°C เพราะอัตราส่วนของน้ำจะลดลงจากการระเหยของน้ำ

ปัญหาที่สำคัญที่สุดของการวัดอุณหภูมิปัญหาหนึ่งสำหรับการทดลองนี้ คืออุปกรณ์วัดอุณหภูมิจะต้องมีความเที่ยงตรงและทนกำลังงานไมโครเวฟสูงๆได้ ซึ่งอุปกรณ์ที่มีในห้องปฏิบัติการเป็นเทอร์โมคัปเปิลชนิด T ที่มีปลายหุ้มและสายนำสัญญาณเป็นโลหะ อาจทำให้เกิดปัญหาการกระเจิง (scattering) ของสนาม ทำให้แพทเทิร์นการแพร่กระจายคลื่นเปลี่ยนแปลงไปผิดไปจากที่คำนวณไว้ได้ โดยเฉพาะการกระจายสนามระยะใกล้ สำหรับระบบไมโครเวฟกำลังสูงปัญหาการเกิดน้อยสในระบการวัดอุณหภูมิมีสูงมาก เนื่องจากการเหนี่ยวนำของสนามในสายตัวนำของเทอร์โมคัปเปิล ในบางซัลนัลของเทอร์โมคัปเปิลไม่สามารถแสดงค่าอุณหภูมิได้ ปัญหานี้สามารถแก้ไขในขั้นต้นได้ โดยการปิดแหล่งจ่ายกำลังงานสำหรับแมกนีตรอนในช่วงวัดอุณหภูมิ แต่อาจจะทำให้ผลการวัดผิดพลาดไป เนื่องจากขาดความต่อเนื่องในการวัดอุณหภูมิ เพราะเมื่อเปิดแหล่งจ่ายกำลังงาน แมกนีตรอนจะใช้เวลาในการเริ่มต้นประมาณ 6-7 วินาที ก่อนที่แมกนีตรอนจะทำงานได้ตามปกติ นอกจากนี้ปัญหาการอาร์คระหว่างสายอากาศสล็อต และเทอร์โมคัปเปิลที่เป็นตัวนำก็เป็นปัญหาอีกประการหนึ่ง และการหลอมละลายของฉนวนที่หุ้มสายนำสัญญาณเนื่องจากเป็นวัสดุที่มีการสูญเสียสูง ล้วนแต่เป็นอุปสรรคในการวัดอุณหภูมิทำให้ผลการวัดเกิดการผิดพลาดไป รูป 6-7 แสดงรอยไหม้ที่เกิดขึ้นบนสายพานลำเลียงที่เป็นผ้า เนื่องมาจากการอาร์คและการหลอมละลายของฉนวนหุ้มสายนำสัญญาณของเทอร์โมคัปเปิล

จาก [23] ได้กล่าวถึงปัญหาการรบกวนของสนามไมโครเวฟกับโพรบวัดอุณหภูมิที่เป็นเทอร์โมคัปเปิล และเทอร์มิสเตอร์ที่เป็นโลหะที่ใช้ในไฮเปอร์เทอร์เมีย (hypertermia) ซึ่งเป็นปัญหาใหญ่ในการแสดงอุณหภูมิที่ต้องการความเที่ยงตรง โดยทั่วไปจะมีอยู่ 2 วิธี ที่ป้องกันปัญหาการรบกวนนี้ คือ การใช้เทอร์โมคัปเปิล และเทอร์มิสเตอร์ที่มีอิมพีแดนซ์สูง หรือการใช้หัววัดอุณหภูมิที่ปลายโพรบ (tip) ทำด้วย GaAs, liquid crystal, และ optical etalon ที่ใช้เส้นใยนำแสงเป็นสายนำสัญญาณ อุปกรณ์เหล่านี้ยังคงมีราคาแพงมาก

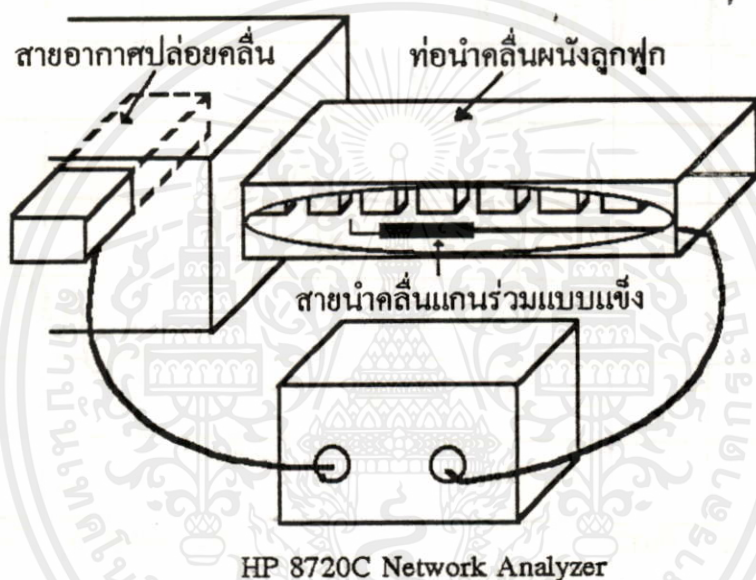


รูป 6-7 รอยไหม้ที่เกิดขึ้นบนสายพานลำเลียงที่เป็นผ้า

6.2.3 การทดสอบการรั่วของคลื่นไมโครเวฟ ของระบบโซลิตที่ทางเข้าออกสายพานลำเลียง

การทดสอบความสามารถของโซลิตในการกรองคลื่นไมโครเวฟทำได้โดยการวัดการสูญเสียเนื่องจากการแทรกใส่ (Insertion Loss) ของระบบโซลิตทั้งหมด ผังภูมิของการทดลองแสดงในรูป 6-8 ระบบการทดลองจะประกอบไปด้วยโซลิตที่นำคลื่น, Hewlette Packard Network Analyzer 8720 C, โพรบไฟฟ้า และสายโคแอกเซียล โดยการป้อนสนามไฟฟ้าผ่านสาย

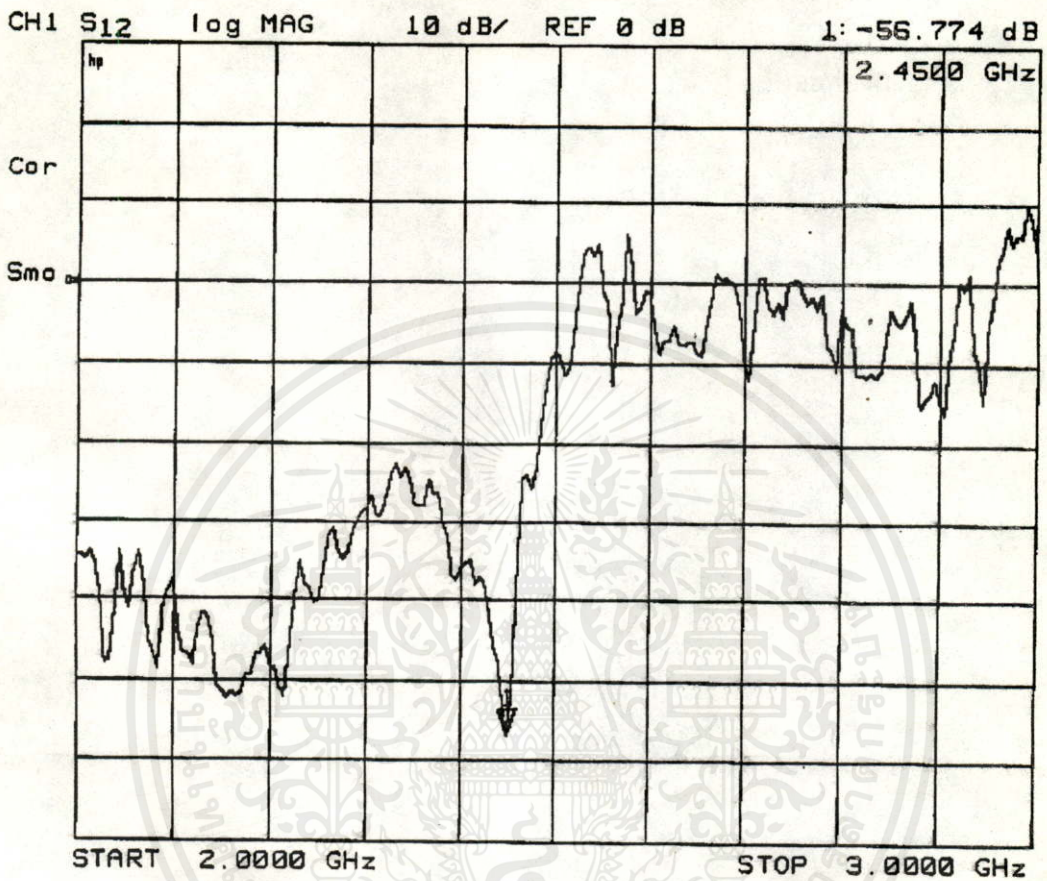
อากาศสล็อตอาร์เรย์หนึ่งท่อนำคลื่นเข้าไปในตู้ปิดด้วย Network Analyzer ที่พอร์ต 1 โพรบไฟฟ้าจะต่อกับ Network Analyzer ที่พอร์ต 2 ที่ปลายโพรบตัวนำในจะงอยนานกับแกน y เพื่อกระตุ้นให้รับสนามในแนวแกน y เนื่องจากสนามในแนวแกนนี้ในโซ่ท่อนำคลื่นมีค่าสูงสุด ผลการวัดการสูญเสียเนื่องจากการแทรกใส่เมื่อมีและไม่มีโซ่ท่อนำคลื่นจะถูกนำมาแสดงในรูปการส่งผ่านพลังงานด้วย พารามิเตอร์ S_{21} กับความถี่



รูป 6-8 การวัดการสูญเสียเนื่องจากการแทรกใส่ของโซ่

รูป 6-9 แสดงผลการวัดการสูญเสียเนื่องจากการแทรกใส่ของโซ่ท่อนำคลื่น [30] ซึ่งสามารถเปรียบเทียบกับการออกแบบโซ่ท่อนำคลื่นตามที่ได้ออกแบบไว้ในหัวข้อ 5.3 เครื่องหมายลูกศรแสดงค่าการสูญเสียเนื่องจากการแทรกใส่ที่ความถี่ไมโครเวฟ 2.45 GHz ซึ่งมีค่าการสูญเสียเนื่องจากการแทรกใส่ประมาณ 56.7 dB เพียงพอที่จะลดอัตราการใช้ของไมโครเวฟให้เป็นไปตามมาตรฐาน ANSI ที่ 1 mW/cm^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 6-9 การสูญเสียเนื่องจากการแทรกใส่ของท่อนำคลื่นโซ้ค
ที่ได้จากการวัด

เมื่อทดสอบโซ้คท่อนำคลื่นที่ใช้กับแบบจำลองที่มีกำลังงานประมาณ 2 กิโลวัตต์ และใช้มอนิเตอร์ที่วัดการรั่วของคลื่นไมโครเวฟ (leakage monitor) สำหรับเตาอบไมโครเวฟที่ใช้ทั่วไปในท้องตลาด ซึ่งมอนิเตอร์นี้จะแสดงอัตราการรั่วของคลื่นไมโครเวฟด้วยเข็มชี้สเกลแถบสี จากการวัดด้วยมอนิเตอร์ที่ระยะห่างออกมาจากระนาบปากโซ้คท่อนำคลื่น 50 เซนติเมตร เข็มจะชี้ที่สเกลในย่านที่ปลอดภัย แสดงว่าในการปฏิบัติงานจริง บริเวณที่ปฏิบัติงานจะต้องมีระยะห่างจากปากโซ้คท่อนำคลื่นอย่างน้อย 50 เซนติเมตร ซึ่งสามารถทำได้โดยการเพิ่มสายพานลำเลียงให้ยาวขึ้นไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คิดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3 สรุป

ในการทดสอบสายอากาศสล็อตอาร์เรย์บนท่อนำคลื่น จำเป็นจะต้องสร้างระบบให้ความร้อนอย่างต่อเนื่อง ในบทนี้ได้เปรียบเทียบการกระจายสนามไฟฟ้าที่ได้คำนวณไว้ในบทที่ 5 ผลการวัดและผลการคำนวณที่ระนาบ $y = -1$ มิลลิเมตร ให้การกระจายสนามไฟฟ้าใกล้เคียงกันอย่างน่าพอใจ ซึ่งยืนยันความน่าเชื่อถือของการคำนวณได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ได้วัดการสูญเสียเนื่องจากการแทรกใส่ของโหนดนำคลื่นตามที่ได้ออกแบบไว้ จากผลการวัดโหนดนำคลื่นให้การสูญเสียเนื่องจากการแทรกใส่ถึง 56.7 dB ผลการวัดการกระจายอุณหภูมิมบนสแลบกระดาษทิชชูอุ่นน้ำด้วยเทอร์โมคัปเปิลในแบบจำลอง ที่แรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้าสำหรับแมกนีตรอนต่างๆ ให้ผลที่น่าเชื่อถือได้ ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้าสำหรับแมกนีตรอนที่มีค่าสูงขึ้น การรบกวนของสนามไมโครเวฟต่อเทอร์โมคัปเปิลจะมีค่าสูง อุณหภูมิที่วัดได้มีความผิดพลาดมากขึ้น

บทที่ 7

บทสรุปและวิจารณ์

เป็นที่ทราบกันดีว่าคลื่นไมโครเวฟสามารถนำมาให้ความร้อนแก่วัสดุไดอิเล็กตริกใดๆได้ ซึ่งเห็นได้จากการผลิตเตาอบไมโครเวฟซึ่งนำมาใช้ในครัวเรือน ในชีวิตประจำวันของเราเกี่ยวข้องกับมากมายกับผลิตภัณฑ์ที่ต้องใช้ความร้อน การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟมีข้อดีกว่าการให้ความร้อนทั่วไปหลายประการ กลไกสำคัญของการเกิดความร้อนในไดอิเล็กตริกคือการเกิดโพลาไรซ์ในเนื้อไดอิเล็กตริกซึ่งได้กล่าวไว้แล้วในบทอื่นๆ ในเตาอบไมโครเวฟการเปลี่ยนแปลงผลิตภัณฑ์ที่ต้องการนำมาให้ความร้อนจะอยู่ในลักษณะปิดเปิดประตูตู้อบแล้วนำผลิตภัณฑ์เข้าและออก ในสายการผลิตที่เป็นอุตสาหกรรมที่ต้องการความรวดเร็วและความต่อเนื่องในการผลิตจำเป็นจะต้องใช้สายพานลำเลียงผลิตภัณฑ์เคลื่อนที่ผ่านสายอากาศที่แพร่กระจายคลื่นไมโครเวฟเพื่อให้เกิดความร้อน ดังนั้นการออกแบบสร้างสายอากาศแพร่กระจายคลื่นไมโครเวฟจึงถือว่าเป็นหัวใจของระบบ การนำสายอากาศเดี่ยวๆมาทำสายอากาศแพร่กระจายคลื่นไมโครเวฟไม่สามารถทำให้สนามไฟฟ้ากระจายสม่ำเสมอได้ เนื่องจากเงื่อนไขขอบเขตของสนามไฟฟ้าที่ตัวนำทำให้มีลักษณะการกระจายสนามไฟฟ้าเป็นรูปคล้ายระฆังคว่ำ การนำสายอากาศมาทำเป็นอาร์เรย์จะสามารถแก้ปัญหานี้ได้ สายอากาศสล็อตอาร์เรย์บนท่อนำคลื่นเป็นสายอากาศชนิดหนึ่งที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นสายอากาศแพร่กระจายคลื่นในระบบไมโครเวฟ และการนำสายอากาศสล็อตอาร์เรย์บนท่อนำคลื่นมาวางเรียงกันหลายๆท่อนำคลื่นจะให้การกระจายสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิที่สม่ำเสมอว่าการใช้สายอากาศสล็อตบนท่อนำคลื่นท่อเดียว

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้กล่าวถึงการออกแบบระบบสายอากาศสล็อตอาร์เรย์บนท่อนำคลื่น โดยนำมาวางเรียงกัน ในขั้นแรกได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของสายอากาศสล็อตอาร์เรย์ 4 สล็อตบนท่อนำคลื่นตัวเดียวก่อนในการกระจายสนามไฟฟ้า ซึ่งการหาสนามไฟฟ้าสามารถหาได้โดยการใช้วิธีศักดาเวกเตอร์ซึ่งได้จากการหาการกระจายกระแสสมมูลย์ที่ปากสล็อต และได้ทำการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ความสูงจากระนาบปากสล็อต 1 มิลลิเมตร ซึ่งมีการกระจายสนามไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกัน สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้ ไม่นานญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่นๆได้ไม่ช้านัก หลังจากนั้นได้ทำการคำนวณการกระจายอุณหภูมิบนสแลบใดๆ โดยการแก้สมการการส่งถ่ายความร้อนที่สัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าที่แพร่กระจายจากสายอากาศสล็อต โดยใช้การคำนวณ

เชิงตัวเลขโดยวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ด้วยวิธีของแครงค์-นิโคลสัน และเมื่อนำสายอากาศสล็อตอาร์เรย์บนท่อนำคลื่นมาวางเรียงกัน โดยสมมติให้โคอีเล็คทริกมีลักษณะเป็นสแลบบางอยู่สูงจากระนาบสายอากาศ 1 มิลลิเมตรวางบนสายพานลำเลียง และให้เคลื่อนที่ผ่านสายอากาศสล็อตอาร์เรย์ 3 สล็อตบนท่อนำคลื่นซึ่งนำมาวางเรียงกัน 3 ท่อนำคลื่น ผลการคำนวณได้แสดงถึงความเป็นไปได้ในการในการกระจายอุณหภูมิที่สม่ำเสมอเมื่อสแลบเคลื่อนที่ผ่านสายอากาศสล็อตทั้งหมด ทั้งนี้การกระจายอุณหภูมิจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ, และคุณสมบัติของโคอีเล็คทริก, กำลังงานไมโครเวฟ และความเร็วของสายพานลำเลียง ดังนั้นในโคอีเล็คทริกแต่ละชนิดจะมีความต้องการพารามิเตอร์นี้ไม่เหมือนกัน

ถัดมาระบบให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟขนาดเล็กๆ ได้ถูกสร้างขึ้นมาทดสอบสายอากาศสล็อตอาร์เรย์ ระบบประกอบไปด้วย แหล่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้า แมกนีตรอน สายอากาศสล็อตอาร์เรย์ 3 สล็อต บนท่อนำคลื่นนำมาวางเรียงกัน 3 ท่อนำคลื่นซึ่งอยู่ในตู้ปิดที่มีทางเข้าออกเป็นสายพานลำเลียงสแลบโคอีเล็คทริกเคลื่อนที่ผ่านสายอากาศสล็อตอาร์เรย์ ที่ช่องเปิดของทางเข้าออกของสายพานลำเลียงจะมีไซ้กท่อนำคลื่นลดการรั่วของคลื่นไมโครเวฟให้ความหนาแน่นของกำลังงานมีค่าอยู่ในช่วงที่ไม่เป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานตามมาตรฐานของ ANSI ผลการทดสอบสามารถลดการรั่วของคลื่นไมโครเวฟได้ถึง 56.7 dB จากกำลังงานไมโครเวฟทั้งหมดประมาณ 2 KW

ในการวัดการกระจายอุณหภูมิจะนำหัววัดเทอร์โมคัปเปิลชนิด T 10 หัววัดสอดเข้าไปในสแลบซึ่งทำด้วยกระดาษทิชชูซึ่งซับน้ำเปียกชุ่ม แล้วให้สแลบนี้เคลื่อนที่ผ่านสายอากาศสล็อตอาร์เรย์บนท่อนำคลื่นทั้ง 3 ท่อนำคลื่น อุณหภูมิจะถูกบันทึกตลอดเวลา เมื่อผ่านท่อนำคลื่นแต่ละตัว โดยปรับแรงดันไฟฟ้าขาเข้าของแหล่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้าที่ 190 และ 220 V ที่แรงดันไฟฟ้าเข้าแหล่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้าใช้งานจริงที่ 220 V ผลการทดลองไม่เป็นที่น่าพอใจหลายประการ เนื่องจากการรบกวนของสนามไมโครเวฟกับหัววัดอุณหภูมิที่เป็นโลหะ ทำให้การแสดงผลการกระจายอุณหภูมิลดหายไป ซึ่งเป็นตัวแปรหนึ่งที่ทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิได้ถูกต้องมากนัก

เนื่องจากอุปกรณ์วัดอุณหภูมิในระบบให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟยังคงมีราคาแพง ในขั้นต้นคงต้องใช้เทคนิคอื่นๆ ช่วยในการวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิ ซึ่งอาจทำได้หลายวิธี เช่น ใช้สารเคมีที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิผสมกับโคอีเล็คทริกแล้วดูการเปลี่ยนแปลงของสี

หรือการวัดความชื้นในไดอิเล็กตริก เป็นต้น เทคนิคต่างๆเหล่านี้จะถูกนำมาใช้ในการพัฒนาระบบครั้งต่อไป

สำหรับระบบให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ การออกแบบให้สายพานลำเลียงมีแรงบิดสูงๆ และสามารถปรับความเร็วรอบได้หลายความเร็ว, สายพานลำเลียงมีทางเข้าออกได้ทั้ง 2 ทาง และปรับระดับความสูงได้เมื่อเทียบกับระนาบสายอากาศสล็อต จะทำให้สามารถเก็บข้อมูลนำมาวิเคราะห์เพื่อปรับปรุงระบบสายอากาศสล็อตอาร์เรย์ได้ถูกต้องมากยิ่งขึ้น และสามารถเก็บข้อมูลกับไดอิเล็กตริกได้หลายชนิด

จากการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ ทำให้ทราบว่า การนำสายอากาศสล็อตอาร์เรย์มาวางเรียงกัน เพื่อแพร่กระจายคลื่นไมโครเวฟแก้วสคูไดอิเล็กตริกใดๆ สามารถที่จะให้การกระจายสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอได้ โดยเลือกช่วงการกระจายอุณหภูมิบนสายพานลำเลียงในช่วงใช้งานที่มีการกระจายอุณหภูมิเฉลี่ยใกล้เคียงกัน (ซึ่งการเพิ่มจำนวนสายอากาศสล็อตหลายๆท่อนำคลื่นจะเพิ่มระยะหน้ากว้างสายพานมากขึ้น ในการวิจัยนี้เป็นเพียงกรณีศึกษาเฉพาะสายอากาศสล็อตบนท่อนำคลื่นที่มี 3 สล็อต การเพิ่มจำนวนสล็อตหรือการเพิ่มท่อนำคลื่นสล็อตที่วางเรียงกันหลายๆท่อนำคลื่นจะให้การกระจายอุณหภูมิที่ต่างออกไป) หรืออาจใช้เทคนิคอื่นเข้ามาช่วย เช่น การเพิ่มพัดลมเข้าไปในตู้อบเพื่อกระจายอุณหภูมิได้ดีขึ้น เป็นต้น การเพิ่มความเร็วในการให้ความร้อนสามารถเพิ่มได้โดยการเพิ่มกำลังงานไมโครเวฟ อย่างไรก็ตามนอกจากระบบสายอากาศแล้วยังมีตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการกระจายสนามไฟฟ้ามากมายนอกเหนือจากตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณ ประโยชน์และข้อบกพร่องที่ได้จากการวิจัยนี้จะถูกนำมาศึกษาวิเคราะห์เพื่อปรับปรุงและพัฒนาระบบสายอากาศแพร่กระจายคลื่นต่อไปในอนาคตได้อย่างมั่นใจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. J. M. Osepchuk, " A History of Microwave Heating Applications," **IEEE Trans. Microwave Theory Tech.**, Vol. MTT-32, pp 1200-1224, Sep. 1984
2. N. E. Bengtsson and T. Ohlsson, " Microwave Heating in the food industry," **Proc. of the IEEE**, Vol. 62, NO.1, pp 44-55, 1974
3. A. C. Metaxas, R. J. Meredith, "**Industrial Microwaves Heating**," London:Peter Peregrinus. Ltd., 1983
4. H. Grant , "**Microwaves: Industrial, Scientific, and Medical Applications**," Arctect House, Inc., 1992
5. E. C. Okress,"**Microwave Power Engineering**," Vol. 2 , New York:Academic Press, 1968
6. D. A. Copson, "**Microwave Heating**," 2nd ed.,Westport, CT:Avi Publ. CO., 1975
7. C. A. Balanis, " **Antenna Theory Analysis and Design**," McGraw-Hill Book Company , 1949, Ch.3
8. C. A. Balanis,"**Advanced Engineering Electromagnetics**," John Wiley & Sons, Inc., 1989, Ch.9
9. R. H. Johnson and H. Jasik, "**Antenna Engineering Handbook**," 2 nd ed., part 2, 1961
10. W. Rueggberg , "A Multislotted Waveguide Antenna for High-Power Microwave Heating System, " **IEEE Trans. Industry Applications**, Vol. 2A-16, No. 6,pp. 809-813, 1980
11. S. Nakamura," **Applied Numerical Medthod with softwre**," Prentice Hall Inc., ch.10,12, 1991
12. M. N. Ozisik, "**Heat Transfer A Basic Approach** ," International ed., Mc-Graw-Hill Book Company, 1985

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13. กิตติศักดิ์ วายุกัตร์, พงศ์พัชร น้อยแรม, โมไนย ไกรฤกษ์, และ สมผล โกศลวิตร, "การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าบริเวณใกล้สายอากาศสล็อตอาร์เรย์แบบระนาบ," เอกสารการประชุมทางวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 14 , มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, หน้า 4-46 ถึง 4-50 , พ.ศ. 2534
14. กิตติศักดิ์ วายุกัตร์, โมไนย ไกรฤกษ์, กิตติชัย พานิชปฐมพงศ์, พงศ์พัชร น้อยแรม, และ สมผล โกศลวิตร, "การกระจายอุณหภูมิในสารไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสียเมื่อเคลื่อนที่ผ่านสายอากาศสล็อตอาร์เรย์ที่วางเอียงกัน," เอกสารการประชุมทางวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 15 , สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี , หน้า 2-35 ถึง 2-38 , พ.ศ. 2535
15. M. Krairiksh, et.al., "Overlapped Slot-Waveguide Applicator for a Continuous Microwave Heating System," Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings, Vol.2, pp. 17-1,17-4, Taiwan, Oct. 1993.
16. กิตติศักดิ์ วายุกัตร์, โมไนย ไกรฤกษ์, และ สมผล โกศลวิตร, " การวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิในไดอิเล็กตริกที่เกิดจากสายอากาศแพร่กระจายคลื่นแบบสล็อตอาร์เรย์," เอกสารการประชุมทางวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 18 , สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, หน้า 131 ถึง 133 , พ.ศ. 2536
17. V. F. Veley, "Modern Microwave Technology," Prentice-Hall, Inc.,1989
18. 2M167B-M63C Magnetron Part Specification Sheets," Matsushita Electronics Corporations.,1988
19. D. M. Pozar,"Microwave Engineering," Addison-Westley Publishing Company,Inc., 1990
20. P. A. Rizzi, "Microwave Engineering Passive Circuits", Prentice-Hall, Inc.,1988
21. R. E. Collin and F. J. Zucker. "Antenna Theory", vols 2. New York: McGraw-Hill, 1969
22. R. E. Collin, "Antenna and Radiowave Propagation," McGraw-Hill Book Company, 1985, Ch.3
23. W. S. Cheung and F. H. Levin , " Microwaves Made Simple: Principles and Applications, " Artech House, Inc., 1985

24. A. L. Vankoughnett and J. G. Dunn, " Doubly Corrugated chokes for microwave heating system ," **J. Microwave Power** ,8(1),101(1973)
25. T. S. Laszlo and T. A. Newman, "The Application of the Cutoff-Tube Principle to the End Seal of Microwave Conveyor Syetem, " **J. Microwave Power**, 15(3), 173 (1980)
26. I. Holmet and A. C. Metaxas, " Microwave Drying of Nylon Tufted Carpets III Field Trials," , **J. Microwave Power**, 14(4), 367 (1979)
27. R. E. Collin, "Foundations for Microwave Engineering," McGraw-Hill Inc., 1966
28. G. L. Matthaei, L. Young, and E. M. T. Jones, " Microwave Filters, Impedance-Matching Networks, and Coupling Structures, "Artech House, Inc., Ch.7,15, 1980
29. N. Marcuvitz, " Waveguide Handbook," New York : Dover Puplication,Inc., pp. 336-350, 1965
30. วงศกร วัชรานันท์, กิตติศักดิ์ วายุกักตร์, สมผล โกศลวิตร,และ โมไนย ไกรฤกษ์ "ท่อนำคลื่นผนังลูกฟูกสำหรับป้องกันคลื่นรั่ว," เอกสารการประชุมทางวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17 , สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ,หน้า 159-163, 1-2 ธ.ค. พ.ศ. 2537

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

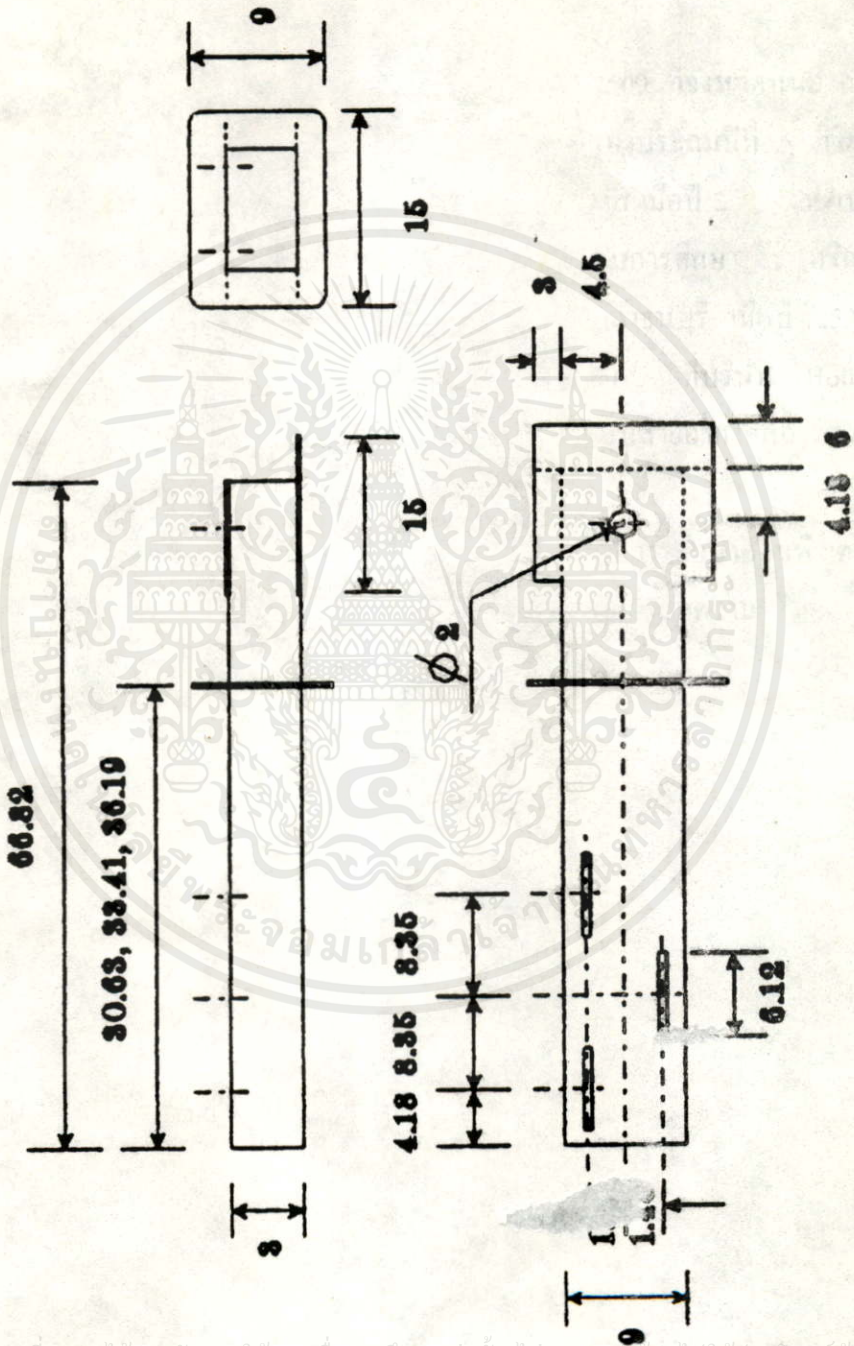
บทความที่เกี่ยวข้องที่ลงตีพิมพ์

1. กิตติศักดิ์ วายุกัตร์, พงศ์พัชร น้อยแรม, โมไนย ไกรฤกษ์, และ สมผล โกศลวิตร ,การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าบริเวณใกล้สายอากาศสล็อตอาร์เรย์แบบระนาบ," เอกสารการประชุมทางวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 14 , มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, หน้า 4-46 ถึง 4-50 , พ.ศ. 2534
2. กิตติศักดิ์ วายุกัตร์, โมไนย ไกรฤกษ์, กิตติชัย พาณิชปฐมพงศ์, พงศ์พัชร น้อยแรม, และ สมผล โกศลวิตร, "การกระจายอุณหภูมิในสารไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสียเมื่อเคลื่อนที่ผ่านสายอากาศสล็อตอาร์เรย์ที่วางเยื้องกัน," เอกสารการประชุมทางวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 15 , สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ,หน้า 2-35 ถึง 2-38 , พ.ศ. 2535
3. M. Krairiksh et.al., "Overlapped Slot-Waveguide Applicator for a Continuous Microwave Heating System," Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings, Vol.2, pp. 17-1,17-4, Taiwan, Oct. 1993.
4. กิตติศักดิ์ วายุกัตร์, โมไนย ไกรฤกษ์, และ สมผล โกศลวิตร , " การวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิในไดอิเล็กตริกที่เกิดจากสายอากาศแพร่กระจายคลื่นแบบสล็อตอาร์เรย์," เอกสารการประชุมทางวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 16 , สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, หน้า 131 ถึง 133 , พ.ศ. 2536
5. วงศกร วัชรานันท์, กิตติศักดิ์ วายุกัตร์, สมผล โกศลวิตร, และ โมไนย ไกรฤกษ์ "ท่อนำคลื่นผนังลูกตุ๊กสำหรับป้องกันคลื่นรั่ว," เอกสารการประชุมทางวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17 , สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ,หน้า 159-163, 1-2 ธ.ค. พ.ศ. 2537

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Slot - Array Waveguide Applicator 1, 2, 3

ภาคผนวก



หน่วยเป็นเซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายกิตติศักดิ์ วาญักตร์ เกิดเมื่อวันที่ 12 สิงหาคม พ.ศ. 2509 ที่จังหวัดหนองคาย ในวัยเด็กได้ย้ายตามบิดาซึ่งรับราชการไปศึกษาหลายแห่ง จนจบการศึกษาประถมศึกษาปีที่ 6 ที่โรงเรียนกรุงเทพศึกษา เมื่อปี 2521 มัธยมศึกษาปีที่ 3 ที่โรงเรียนวัดราชาธิวาส เมื่อปี 2524 และจบมัธยมศึกษาปีที่ 6 ที่โรงเรียนอานวยศิลป์ พระนคร เมื่อปี 2527 จบการศึกษาระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เมื่อปี 2532 เคยทำงานในตำแหน่ง Technical Engineer ในแผนก Bio-Medical ที่บริษัท Hollywood International Co.,Ltd., ปี 2536 เป็นผู้ช่วยนักวิจัยโครงการออกแบบสายอากาศสถานีดาวเทียมภาคพื้นดิน ของ NECTEC กระทรวงวิทยาศาสตร์

ในระหว่างศึกษาปริญญาโทได้รับทุนการศึกษาจากมูลนิธิเพื่อการศึกษาคอมพิวเตอร์และการสื่อสาร มีบทความตีพิมพ์ทั้งในประเทศและต่างประเทศรวมทั้งสิ้น 9 บทความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้