

“การพัฒนาตัวดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ”
(Development of Microwave Absorbers)

นางสาวนิฏฐิตา เชิดชู B3705551

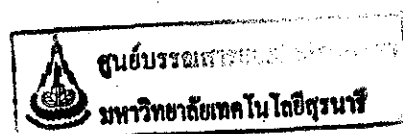
รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2541

CONTRIBUTION

“การพัฒนาตัวดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ”
(Development of Microwave Absorbers)

นางสาวนิฏฐิตา เชิดชู B3705551

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2541





ใบรับรองโครงการทางวิศวกรรม
สำนักวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เรื่อง การพัฒนาตัวตุ๊กตกลิ้งเคลื่อนไม่ไครเวฟ

โดย นางสาวนิฏฐิตา เชิดชู B3705551

ได้รับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

_____ คณบดี
วันที่ _____ เดือน _____ พ.ศ. 2542

คณะกรรมการสอบ

_____ ประธานกรรมการ
(รศ.ดร. สรวุฒิ สุจิตจร)

_____ กรรมการ
(อ.ดร. รังสรรค์ ทองทา)

_____ กรรมการ
(อ.สมศักดิ์ วาณิชอนันต์ชัย)

อาจารย์ที่ปรึกษา
วิรุฬห์ มังคละวิรัช
(รศ. วิรุฬห์ มังคละวิรัช)

โครงการ	การพัฒนาตัวดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ
ผู้ดำเนินงาน	นางสาวนิฏฐิตา เชิดชู B3705551
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ. วิรุพห์ มังคละวิรัช
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
ภาคการศึกษาที่	1/2541

บทคัดย่อ

โครงการพัฒนาตัวดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อทำการสร้างตัวดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่สามารถนำไปใช้งานได้ โดยการทำการศึกษาค้นคว้าหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างผงเขม่าดำและโพลีเอสเตอร์เรซิน

จากการศึกษาพบว่าในการสร้างตัวดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่ใช้กับความถี่แถบ X (10 GHz) โดยทำการทดลองเปรียบเทียบระหว่างตัวดูดกลืนแบบ Tapered E-plane, Tapered H-plane และ Tapered E-plane & H-plane ที่ความยาว $1\lambda_g$, $2\lambda_g$ และ $3\lambda_g$ และที่ความเข้มข้นของผงเขม่าดำที่ 5% 10% และ 15% นั้น จุดที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด คือ การใช้สารผสมระหว่างผงเขม่าดำกับโพลีเอสเตอร์เรซินโดยให้ความเข้มข้นของผงเขม่าดำ 15% ของน้ำหนักของโพลีเอสเตอร์เรซินแล้วทำการขึ้นรูปให้เป็นแบบ Tapered H-plane สำหรับตัวดูดกลืนที่ได้จะมีความสามารถในการดูดกลืนคลื่นสูงถึง 36.7dB สำหรับตัวดูดกลืนที่ผสมผงเขม่าดำชนิด N330 และ 40.7dB สำหรับตัวดูดกลืนที่ผสมผงเขม่าดำชนิด N550 โดยตัวดูดกลืนทั้งสองมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนคือ -32.04dB และ -28.64dB ตามลำดับ

Project : Development of Microwave Absorbers
Written by : Miss Nitthita Chirdchoo B3705551
Supervisor : Assoc. Prof. Virul Mangclaviraj
School : Telecommunication Engineering
Trimester : 1/1998

Abstract

This project was to develop the microwave absorbers with the high enough absorption for application by using the right mixture of carbon black and polyester resin.

The result of the study at X-band frequency(10 GHz) was that by comparing 3 basic types of microwave absorbers, E-plane, Tapered H-plane and Tapered E-plane & H-plane, varying the length from $1\lambda_g$ to $3\lambda_g$ and the concentration of carbon black from 5% to 15%, these microwave absorbers could be built with the high capacity of 36.7dB microwave power absorption with reflection coefficient of -32.04dB and 40.7dB microwave power absorption with reflection coefficient of -28.64dB for the mixture of N330 and N550 respectively. To gain the performance mentioned above, the built microwave absorbers had to take the shape of a tapered H-plane with the length of $2\lambda_g$ (which doubled the guide wavelength). The materials used were the combination of polyester resin and the carbon black . The right amount of the carbon black mixed to the polyester resin was 15 % by weight.

กิตติกรรมประกาศ

ในการจัดทำโครงการการพัฒนาตัวдукกลินคลิ่นไมโครเวฟและรายงานครั้งนี้สามารถเสร็จสมบูรณ์ได้ ผู้เขียนต้องขอขอบพระคุณบิดาและมารดาของผู้เขียนที่คอยให้กำลังใจและด้วยความกรุณาของบุคคลหลายท่านซึ่งคอยให้ความช่วยเหลือและคำปรึกษา รวมถึงข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ในการทำโครงการในครั้งนี้ ซึ่งมีรายนามดังต่อไปนี้

บริษัทเมืองงามหล่อยาง จำกัด

คุณ ประสิทธิ์ งามสันเทียะ

รศ. วิรุพห์ มังคละวิรัช

ผศ.ดร. อุทัย มีคำ

คณาจารย์สำนักวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

และคณาจารย์ทุกท่านในอดีตที่ได้ถ่ายทอดความรู้แก่ผู้เขียน

สำหรับการเขียนรายงานฉบับนี้ ผู้เขียนต้องขอขอบพระคุณอาจารย์ วิรุพห์ มังคละวิรัช ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่ได้ให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ ตลอดจนแก้ไขและตรวจทานรายงานฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์ นอกจากนี้ต้องขอขอบคุณเพื่อน ๆ ทุกคนที่คอยให้กำลังใจ

นางสาวนิฏฐิตา เชิดชู

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
Abstract	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญภาพ	ช
สารบัญตาราง	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 กล่าวนำ	1
1.2 วัตถุประสงค์และเป้าหมายของโครงการ	1
1.3 เค้าโครงของโครงการ	2
1.3.1 ชื่อโครงการ	2
1.3.2 วิธีการดำเนินงาน	2
1.3.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.3.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.3.5 แผนการดำเนินงาน	3
1.4 การจัดรูปเล่มรายงาน	4
บทที่ 2 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าย่านความถี่ไมโครเวฟ	6
2.1 ท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม(Rectangular Waveguide)	6
2.1.1 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของคลื่นความถี่ไมโครเวฟ TE_{10}	7
2.1.2 โหมดโดมิแนนท์(Dominant Mode)	7
2.1.3 คุณสมบัติของคลื่นโหมดโดมิแนนท์เมื่อเทียบกับโหมดที่สูงกว่า	9
2.2 ตัวดูดกลืนคลื่น	10
2.2.1 การลดทอนคลื่นระนาบที่เคลื่อนผ่านตัวกลางที่มีการสูญเสีย	12
2.2.2 การดูดกลืนกำลังคลื่นในตัวกลางที่มีการสูญเสียโดยใช้ทฤษฎีเวกเตอร์พอยน์ติง	13

บทที่ 3 เขม่าดำและโพลีเอสเตอร์เรซิน	15
3.1 เขม่าดำ	15
3.1.1 การผลิตเขม่าดำ	15
3.1.2 คุณสมบัติของผงเขม่าดำ	15
3.2 โพลีเอสเตอร์เรซิน	18
 บทที่ 4 การเตรียมการทดลอง	 21
4.1 ขั้นตอนการเตรียมแบบหล่ออย่าง	21
4.2 ขั้นตอนการขึ้นรูปตัวดูดกลืนคลื่น	27
 บทที่ 5 อุปกรณ์ไมโครเวฟและการจัดอุปกรณ์เพื่อวัดค่าดูดกลืนคลื่น	 30
5.1 แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของหลอดไครสตรอน(Klystron Power Supply)	30
5.2 หลอดไครสตรอน(Klystron Tubes)	30
5.3 ไซเรเตอร์(Gyrator)	33
5.4 ตัวลดทอนปรับค่าได้(Variable Attenuator)	35
5.5 อุปกรณ์วัดความถี่(Direct Reading Frequency Meter)	36
5.6 ตัววัดสัญญาณ(Crystal Detector)	37
5.7 ออสซิลโลสโคป(Oscilloscope)	38
5.8 ไดเรกชันนัลคัปเปิลเลอร์(Directional Coupler)	38
 บทที่ 6 การทดลองและผลการทดลอง	 40
6.1 อุปกรณ์การทดลอง	40
6.2 ขั้นตอนการทดลอง	40
6.2.1 วัดค่าการดูดกลืนของคลื่น	40
6.2.2 วัดค่าสัมประสิทธิ์ของการสะท้อน	41
6.3 ผลการทดลอง	45
6.4 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง	49
 บทที่ 7 บทสรุป	 63
 เอกสารอ้างอิง	 64
 ภาคผนวก	 65

ภาคผนวก ก. แสดงการแบ่งช่วงความถี่ต่างๆ	66
ภาคผนวก ข. แสดงสมการที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์เวกเตอร์ และเวกเตอร์ ดิฟเฟอเรนเชียลโอเปอเรเตอร์(Vector Differential Operator)	67
ภาคผนวก ค. สัญลักษณ์และหน่วยที่ใช้ในคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	70
ภาคผนวก ง. การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของคลื่นในท่อนำคลื่น แบบสี่เหลี่ยม	73
ภาคผนวก จ. เอกลักษณ์ของเวกเตอร์(Vector Identities)	78
ประวัติผู้เขียน	79

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 ท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม	6
รูปที่ 2.2 การกระจายตัวของสนามในท่อนำคลื่น	7
รูปที่ 2.3 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าในท่อนำคลื่นตามด้านกว้าง	9
รูปที่ 2.4 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าในท่อนำคลื่นตามด้านยาว	9
รูปที่ 2.5 แสดงตัวดัดคลื่นคลื่นชนิดแท่งตัน	11
รูปที่ 2.6 แสดงตัวดัดคลื่นคลื่นชนิดแผ่น	11
รูปที่ 3.1 โครงสร้างของผงเซมาดำ	16
รูปที่ 3.2 สัดส่วนการผสมโพลีเอสเตอร์เรซินกับตัวช่วยเร่งปฏิกิริยาและตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อใช้งาน	20
รูปที่ 4.1 ดันแบบดินน้ำมัน	21
รูปที่ 4.2 ขนาดของท่อนำคลื่นที่ใช้ในการทดลอง	22
รูปที่ 4.3 การเทน้ำยางเพื่อสร้างแบบหล่อยาง	24
รูปที่ 4.4 แบบหล่อยางเมื่อแข็งตัว	25
รูปที่ 4.5 แบบหล่อยาง	26
รูปที่ 4.6 ตัวดัดคลื่นคลื่น	29
รูปที่ 5.1 โครงสร้างของหลอดโครสตรอนชนิดลำอิเล็กตรอนสะท้อนกลับ	30
รูปที่ 5.2 ช่วงเวลาการเดินทางของอิเล็กตรอน	31
รูปที่ 5.3 ทิศทางของกลุ่มอิเล็กตรอนและทิศทางของสนามไฟฟ้าที่กิริตของวงจรเรโซแนนซ์	32
รูปที่ 5.4 รูปเปรียบเทียบการส่งพลังงานจากกลุ่มอิเล็กตรอนให้กับสัญญาณไมโครเวฟกับการไกวชิงช้า	32
รูปที่ 5.7 สัญญลักษณ์ของใจเรเตอร์	33
รูปที่ 5.8 การหมุนรอบนิวเคลียสของอิเล็กตรอน	33
รูปที่ 5.9 การหมุนรอบตัวเองของอิเล็กตรอน	34
รูปที่ 5.10 การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กในแท่งเฟอร์ไรต์	34
รูปที่ 5.11 การหมุนของอิเล็กตรอนแบบลูกข่าง	35
รูปที่ 5.12 อุปกรณ์ลดทอนแบบปรับค่าได้	35
รูปที่ 5.13 อุปกรณ์วัดความถี่	36
รูปที่ 5.14 อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ	37
รูปที่ 5.15 การทำงานของไดเรกชันนัลคัปเปิลอร์ *	39

รูปที่ 6.1	แผนภาพบล็อกแสดงระบบไมโครเวฟที่ใช้ในการทดลองหาค่าการ ดูดกลืนคลื่น	43
รูปที่ 6.2	แผนภาพบล็อกแสดงระบบไมโครเวฟที่ใช้ในการทดลองหาค่า สัมประสิทธิ์การสะท้อน	44
รูปที่ 6.3	แสดงระบบไมโครเวฟที่ใช้ในการทดลอง	48
รูปที่ 6.4	กราฟแสดงความสามารถในการดูดกลืนกำลังคลื่นของตัวดูดกลืนชนิด Tapered E-plane โดยผสมผงเขม่าดำชนิด N330 ที่ความเข้มข้นต่างๆ	51
รูปที่ 6.5	กราฟแสดงความสามารถในการดูดกลืนกำลังคลื่นของตัวดูดกลืนชนิด Tapered H-plane โดยผสมผงเขม่าดำชนิด N330 ที่ความเข้มข้นต่างๆ	52
รูปที่ 6.6	กราฟแสดงความสามารถในการดูดกลืนกำลังคลื่นของตัวดูดกลืนชนิด Tapered E-plane และ H-plane โดยผสมผงเขม่าดำชนิด N330 ที่ความเข้มข้นต่างๆ	53
รูปที่ 6.7	กราฟแสดงความสามารถในการดูดกลืนกำลังคลื่นของตัวดูดกลืนชนิด Tapered E-plane โดยผสมผงเขม่าดำชนิด N550 ที่ความเข้มข้นต่างๆ	54
รูปที่ 6.8	กราฟแสดงความสามารถในการดูดกลืนกำลังคลื่นของตัวดูดกลืนชนิด Tapered H-plane โดยผสมผงเขม่าดำชนิด N550 ที่ความเข้มข้นต่างๆ	55
รูปที่ 6.9	กราฟแสดงความสามารถในการดูดกลืนกำลังคลื่นของตัวดูดกลืนชนิด Tapered E-plane และ H-plane โดยผสมผงเขม่าดำชนิด N550 ที่ความเข้มข้นต่างๆ	56
รูปที่ 6.10	กราฟแสดงความสามารถในการดูดกลืนกำลังคลื่นชนิด Tapered E-plane, Tapered H-plane และ Tapered E-plane และ H-plane โดยผสมผงเขม่าดำชนิด N330 เข้มข้น 5%	57
รูปที่ 6.11	กราฟแสดงความสามารถในการดูดกลืนกำลังคลื่นชนิด Tapered E-plane, Tapered H-plane และ Tapered E-plane และ H-plane โดยผสมผงเขม่าดำชนิด N330 เข้มข้น 10%	58
รูปที่ 6.12	กราฟแสดงความสามารถในการดูดกลืนกำลังคลื่นชนิด Tapered E-plane, Tapered H-plane และ Tapered E-plane และ H-plane โดยผสมผงเขม่าดำชนิด N330 เข้มข้น 15%	59
รูปที่ 6.13	กราฟแสดงความสามารถในการดูดกลืนกำลังคลื่นชนิด Tapered E-plane, Tapered H-plane และ Tapered E-plane และ H-plane โดยผสมผงเขม่าดำชนิด N550 เข้มข้น 5%	60
รูปที่ 6.14	กราฟแสดงความสามารถในการดูดกลืนกำลังคลื่นชนิด Tapered E-plane, Tapered H-plane และ Tapered E-plane และ H-plane โดยผสมผงเขม่าดำชนิด N550 เข้มข้น 10%	61

รูปที่ 6.15 กราฟแสดงความสามารถในการดูดกลืนกำลังคลื่นชนิด Tapered E-plane, Tapered H-plane และ Tapered E-plane และ H-plane โดยผสมผงเขม่าดำชนิด N550 เข้มข้น 15%

62

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 6.1 แสดงผลการทดลองของการวัดการดูดกลืนคลื่น	45
ตาราง ก.1 แสดงการแบ่งช่วงความถี่	66
ตาราง ก.2 แสดงการแบ่งช่วงความถี่ในย่านไมโครเวฟ	66
ตาราง ค.1 แสดงหน่วยมาตรฐาน SI	70
ตาราง ค.2 แสดงสัญลักษณ์ที่ใช้ในการพิสูจน์สมการคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	70
ตาราง ค.3 แสดงหน่วยอุปสรรคที่ใช้เป็นตัวคูณ	72

บทที่ 1

บทนำ

1.1 กล่าวนำ

ถึงแม้ว่าระบบการสื่อสารด้านไมโครเวฟจะมีการใช้งานมาตั้งแต่สมัยสงครามโลกครั้งที่ 2 แต่ก็ยังคงมีแนวโน้มที่จะใช้ต่อไปเรื่อย ๆ เพราะนอกจากจะมีคุณสมบัติที่เคลื่อนที่ได้เร็ว เพราะเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแล้ว ยังมีคุณสมบัติที่เด่น ๆ อีกหลายประการ จึงทำให้ไมโครเวฟถูกนำไปใช้ประโยชน์ในงานด้านต่าง ๆ มากมายหลายด้านด้วยกัน คุณสมบัติเหล่านี้ได้แก่

- 1.1.1 การมีช่วงแบนวิทท์ที่กว้างจึงสามารถรองรับการใช้งานได้สูง
- 1.1.2 การมีความถี่สูงกว่า 1GHz ซึ่งหมายถึงความยาวคลื่นจะต่ำกว่า 30 ซม. ลงมา ทำให้อุปกรณ์ไมโครเวฟมีขนาดเล็ก
- 1.1.3 ในย่านไมโครเวฟสัญญาณรบกวนที่มนุษย์สร้างขึ้น (man-made noise) มีระดับต่ำเมื่อเทียบกับย่านความถี่ต่ำกว่า

ปัจจุบันระบบไมโครเวฟยังมีบทบาทอย่างสูงในสาขาต่าง ๆ โดยเฉพาะงานด้านสื่อสารโทรคมนาคม นอกจากนั้นยังมีการประดิษฐ์คิดค้นและพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ ๆ ทางด้านไมโครเวฟซึ่งจะทำให้มีการใช้ประโยชน์ไมโครเวฟมากขึ้นไปอีกในอนาคต ในการใช้ประโยชน์ไมโครเวฟ อุปกรณ์ดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ (microwave absorber) เป็นสิ่งจำเป็นเพื่อลดทอนสัญญาณในวงจรไมโครเวฟ เพื่อไม่ให้เกิดคลื่นสะท้อนกลับมาทำลายแหล่งกำเนิดของคลื่นได้ สำหรับอุปกรณ์ดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่ใช้งานกันอยู่ในปัจจุบันจำเป็นต้องมีการนำเข้ามาจากต่างประเทศทำให้มีราคาสูง ดังนั้นการพัฒนาวัสดุดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟด้วยการใช้วัสดุที่สามารถหาได้ง่ายภายในประเทศ และมีราคาถูกจึงเป็นที่มาของโครงการ

1.2 วัตถุประสงค์และเป้าหมายของโครงการ

- 1.2.1 เพื่อศึกษาคุณลักษณะของสารที่มีคุณสมบัติในการดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ
- 1.2.2 เพื่อออกแบบและจัดสร้างตัวดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ

1.3 เค้าโครงของโครงการ

1.3.1 ชื่อโครงการ

การพัฒนาตัวดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ

(Development of microwave absorbers)

1.3.2 วิธีการดำเนินงาน

- 1.3.2.1 ออกแบบและจัดสร้างท่อนำคลื่นชนิดสี่เหลี่ยม(rectangular waveguide) ที่มีความยาว $5\lambda_g$ ที่ความถี่ 10 GHz เพื่อที่จะใช้ประกอบในการทดลอง
- 1.3.2.2 ออกแบบและจัดสร้างตัวดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ ด้วยขนาดและวัสดุต่าง ๆ กัน
- 1.3.2.3 ทำการทดสอบอัตราการดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ
- 1.3.2.4 วิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลอง
- 1.3.2.5 เขียนรายงานโครงการฉบับสมบูรณ์

1.3.3 ขอบเขตของงาน

- 1.3.3.1 ศึกษาวัสดุต่างๆ ที่มีคุณสมบัติเป็นไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสีย (lossy dielectric)
- 1.3.3.2 ออกแบบและจัดสร้างตัวดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ

1.3.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.3.4.1 ได้รับความรู้เกี่ยวกับเทคนิคการออกแบบและสร้างตัวดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ
- 1.3.4.2 ได้รับความรู้เกี่ยวกับคุณสมบัติทางวัสดุของสารที่นำมาใช้ในการทดลอง
- 1.3.4.3 เพิ่มพูนทักษะการทำแบบหล่อขึ้นตัวอย่าง (sample)
- 1.3.4.4 ได้ตัวดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่สามารถนำมาใช้ในห้องปฏิบัติการ
- 1.3.4.5 ได้รับความรู้เกี่ยวกับอุปกรณ์การวัดในย่านความถี่ไมโครเวฟ

1.3.5 แผนการดำเนินงาน

กิจกรรม	ช่วงเวลาดำเนินการ
1.3.5.1 ศึกษาการทำงานของระบบไมโครเวฟ และ สารที่จะใช้ในการทดลอง ประกอบด้วย - ผงเขม่าดำ (carbon black) - โพลีเอสเตอร์เรซิน	1 มิ.ย. 41 ถึง 31 ก.ค. 41
1.3.5.2 ทำการออกแบบ และ จัดสร้างอุปกรณ์ ที่จำเป็นในการทดลองซึ่งประกอบด้วย - ท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีความยาว $5 \lambda_g$ - ต้นแบบที่จะใช้ในการทำแบบหล่ออย่าง ของตัวดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ	1 ส.ค. 41 ถึง 15 ส.ค. 41
1.3.5.3. ศึกษาวิธีการทำแบบหล่อและการขึ้น รูปตัวดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ	16 ส.ค. 41 ถึง 15 ก.ย. 41
1.3.5.4 จัดหาวัสดุต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งประกอบด้วย - ผงเขม่าดำเบอร์ N330 และ N550 - โพลีเอสเตอร์เรซิน - ยางซิลิโคน	16 ก.ย. 41 ถึง 10 พ.ย. 41
1.3.5.5 จัดสร้างแบบหล่อและขึ้นรูปตัวดูดกลืน คลื่นไมโครเวฟ	11 พ.ย. 41 ถึง 15 ธ.ค. 41
1.3.5.6. ทำการทดลอง	16 ธ.ค. 41 ถึง 30 ธ.ค. 41
1.3.5.7. จัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์ส่งสำนัก วิชา	1 ม.ค. 42 ถึง 23 เม.ย. 42

รวมระยะเวลาดำเนินการทำโครงการวิจัยทั้งสิ้น 11 เดือน ตั้งแต่วันที่ 1 มิ.ย. 41 ถึง 23 เม.ย. 42

1.4 การจัดรูปแบบรายงาน

โครงการวิจัยนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาตัวดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ โดยทำการจัดสร้างตัวดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟขึ้นด้วยสารเรซิน ผสมกับผงเขม่าดำที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ กัน ตั้งแต่ 5% 10% และ 15% เพื่อหาความเข้มข้นที่เหมาะสมในการใช้ผลิตตัวดูดกลืนคลื่นสำหรับใช้งานต่อไป รายงานโครงการวิจัยนี้ได้แบ่งออกเป็น 7 บทดังต่อไปนี้

บทที่ 1 เป็นการกล่าวถึงความจำเป็นของตัวดูดกลืนคลื่นที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในระบบไมโครเวฟ วัตถุประสงค์และเป้าหมายของโครงการ เค้าโครงของโครงการ และ การจัดรูปแบบรายงาน

บทที่ 2 เป็นการกล่าวถึงความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่ไมโครเวฟ ทำความรู้จักกับตัวดูดกลืนคลื่น และ ท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมที่จะใช้ในการทดลอง โดยในบทนี้จะต้องทำการศึกษาควบคู่ไปกับภาคผนวก ง. เพราะมีการอ้างอิงถึงสูตรที่ใช้ในการวิเคราะห์คลื่นในท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม

บทที่ 3 จะแบ่งเนื้อหาออกเป็นสองส่วน คือ ในส่วนแรกจะเป็นการกล่าวถึงคุณลักษณะทางกายภาพ และทางเคมีของเขม่าดำ ซึ่งเป็นสารที่ใช้ในการผสมกับโพลีเอสเตอร์เรซินเพื่อขึ้นรูปให้ได้ตัวดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ และยังได้กล่าวถึงหลักมาตรฐานสากลที่ใช้จัดกลุ่มของเขม่าดำ โดยใช้หลักการความแตกต่างกันด้านขนาดของอนุภาค ส่วนที่สองนั้นจะกล่าวถึงตัวโพลีเอสเตอร์เรซินที่ใช้เป็นสารขึ้นรูปตัวดูดกลืนคลื่น(binder) ที่ใช้ในการทำโครงการ

บทที่ 4 เป็นการกล่าวถึงขั้นตอนในการเตรียมอุปกรณ์ และการขึ้นรูปตัวดูดกลืนคลื่นทั้ง 3 แบบคือ ชนิด Tapered E-plane Tapered H-plane และ Tapered E-plane และ H-plane โดยเนื้อหาจะเริ่มตั้งแต่การออกแบบตัวดูดกลืนคลื่น การสร้างแบบหล่ออย่างที่ใช้ในการขึ้นรูปตัวดูดกลืนคลื่น และ กรรมวิธีในการขึ้นรูปตัวดูดกลืนคลื่นโดยละเอียด โดยในส่วนท้ายของบทจะมีการแสดงรูปเพื่อให้เกิดความเข้าใจยิ่งขึ้น

บทที่ 5 เป็นการกล่าวถึงอุปกรณ์ไมโครเวฟและหลักการทำงานของอุปกรณ์ดังกล่าวที่ใช้ในการทดลองวัดค่าการดูดกลืนคลื่นและค่าของคลื่นสะท้อนที่เกิดจากตัวดูดกลืนคลื่น

บทที่ 6 เนื้อหาจะแบ่งออกเป็นขั้นตอนในการทดลอง ผลการทดลอง และการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง โดยในส่วนของผลการทดลองจะมีตารางแสดงผลการทดลอง และกราฟที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง ในส่วนท้ายของบทจะมีการแสดงรูปของระบบไมโครเวฟที่ใช้งาน

บทที่ 7 สรุปโครงการทั้งหมดที่ได้ปฏิบัติมาและกล่าวถึงแนวทางการปรับปรุงคุณภาพของตัวดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่ได้สร้างขึ้นมา

ภาคผนวก ก. แสดงการแบ่งช่วงของความถี่ที่ใช้งานในระบบไมโครเวฟ

ภาคผนวก ข. แสดงสมการที่ใช้สำหรับทำการวิเคราะห์เวกเตอร์ และเวกเตอร์ดิฟเฟอเรนเชียลโอเปอเรเตอร์(Vector differential operator)

ภาคผนวก ค. แสดงความหมายต่าง ๆ ของสัญลักษณ์ที่ใช้ในการศึกษาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ภาคผนวก ง. เป็นการแสดงการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของคลื่นในท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมโดยจะใช้ในการอธิบายร่วมกับบทที่ 2

ภาคผนวก จ. แสดงเอกลักษณ์ของเวกเตอร์(Vector Identity) ที่ใช้ในการอธิบายการเคลื่อนผ่านของคลื่นไมโครเวฟในตัวดูดกลืนคลื่น

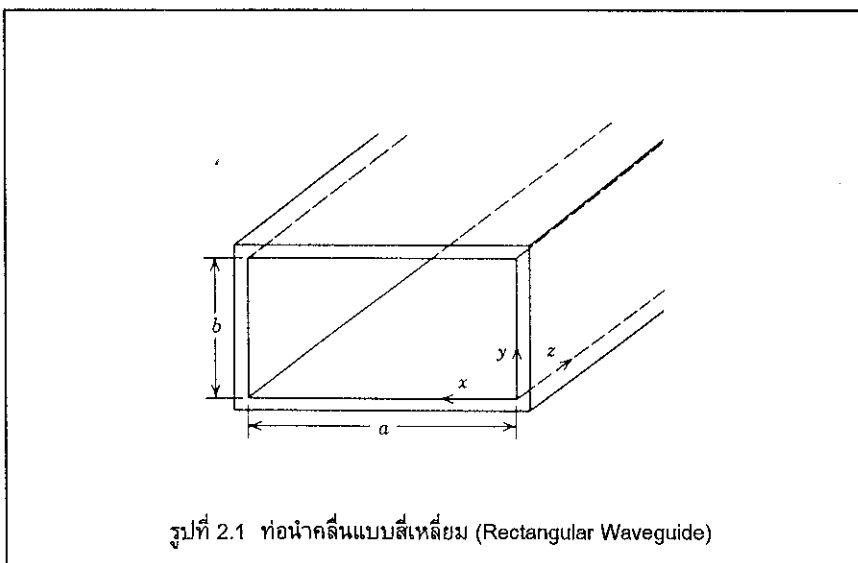
บทที่ 2

ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าย่านความถี่ไมโครเวฟ

การนำพาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าให้ไปในทิศทางที่ต้องการสามารถทำได้โดย การใช้สายส่งชนิดตัวนำคู่(Two-Conductor Transmission Line) ในการส่งคลื่นระนาบ(Plane Waves) ที่มีความถี่หลายเมกะเฮิรตซ์ สำหรับคลื่นที่มีความถี่ในช่วงไมโครเวฟ(1GHz ถึง40GHz) จะนิยมใช้ท่อนำคลื่นชนิดตัวนำเดี่ยว(ท่อกลวง) เนื่องจากที่ความถี่สูงการลดทอนของสัญญาณในท่อนำคลื่นมีเพียงเล็กน้อย โดยท่อนำคลื่นสามารถจะนำพาคลื่นระนาบซึ่งมีหน้าคลื่นเป็นระนาบตั้งฉากกับทิศทางการแพร่กระจายของคลื่น อย่างไรก็ตามเงื่อนไขขอบเขตสำคัญคือพื้นผิวด้านในของท่อนำคลื่นเป็นตัวกำหนดสนาม

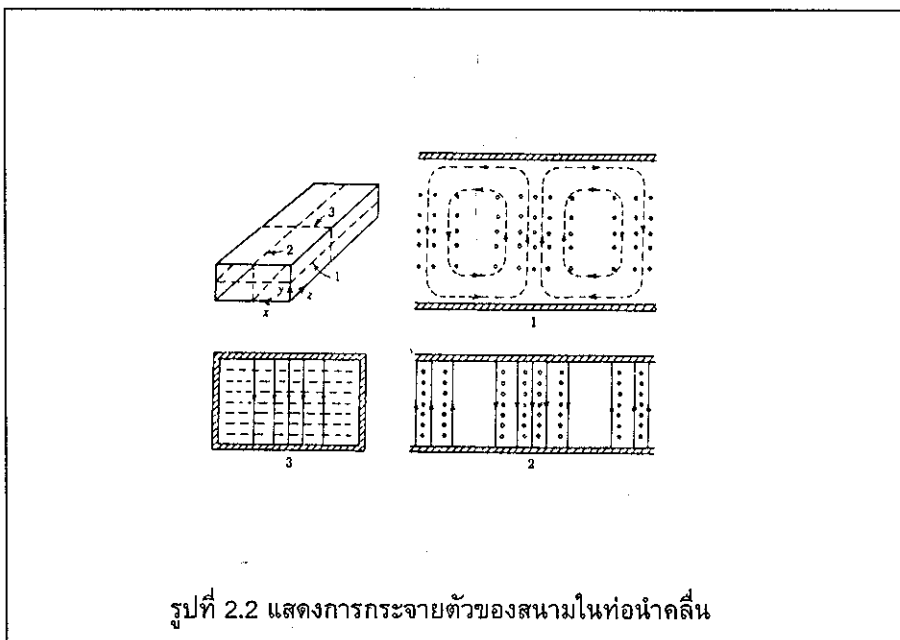
2.1 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม (Rectangular Waveguide)

ท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมโดยทั่วไปจะมีรูปหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าดังแสดงไว้ในรูป 2.1 ซึ่งเป็นท่อนำคลื่นไมโครเวฟในย่านความถี่แถบ X (X-Band) ที่มีความยาว $5 \lambda_g$ และเพื่อให้การวิเคราะห์การทำงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในท่อนำคลื่นดังกล่าวง่ายขึ้น จึงกำหนดโดยพิจารณาท่อนำคลื่นที่ภายในเป็นอากาศ ที่ไม่มีการสูญเสียของตัวกลางอยู่(loss free) คือ $\sigma = 0$ และแกนของท่อเป็นเส้นตรงไม่คดงอ และรูปหน้าตัดของท่อไม่เปลี่ยนแปลงตามแนวแกน z



2.1.1 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของคลื่นความถี่ไมโครเวฟ TE_{10}

ในกรณีของท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมนี้ มีเพียงคลื่น TE และ TM เท่านั้นที่สามารถเคลื่อนที่ผ่าน แต่ในกรณีของการพัฒนาตัวดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ คลื่นไมโครเวฟที่เคลื่อนผ่านในท่อนำคลื่นคือ คลื่น TE_{10} ที่มีความถี่ 10GHz โหมดคลื่น TE_{10} เป็นโหมดโดมิแนนท์ของคลื่นไมโครเวฟในท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม ดังรูปที่ 2.1 โหมดโดมิแนนท์เป็นโหมดของคลื่นความถี่ไมโครเวฟที่มีความถี่คutoffต่ำที่สุดบางทีโหมดโดมิแนนท์อาจถูกเรียกว่า โหมดพื้นฐาน(Principle Mode) ของคลื่น



2.1.2 โหมดโดมิแนนท์(Dominant Mode)

โหมดโดมิแนนท์ของคลื่นความถี่ไมโครเวฟในท่อนำคลื่นใด ๆ คือคลื่นที่มีความถี่คutoffต่ำที่สุดของโหมด TE หรือ TM สำหรับในท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมโดยที่ขนาด $a \geq b$ จากรูป 2.1 จะมีคลื่น TE_{10} เป็นโหมดโดมิแนนท์ (ดูรายละเอียดเพิ่มเติมในภาคผนวก ง.) ซึ่งจะได้สมการของการกระจายของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในท่อนำคลื่นดังนี้

$$H_z = H_{10} \cos \frac{\pi x}{a} \quad (2.1)$$

$$H_x = j \left(\frac{2a}{\lambda_{10}} \right) H_{10} \sin \frac{\pi x}{a} \quad (2.2)$$

$$E_y = -j\eta_0 \left(\frac{2a}{\lambda_0} \right) H_{10} \sin \frac{\pi x}{a} = -\eta_{10} H_x \quad (2.3)$$

$$H_y = 0 \quad (2.4)$$

$$E_x = 0 \quad (2.5)$$

$$E_z = 0 \quad (2.6)$$

สำหรับ H_{10} ที่เป็นค่าจริง องค์ประกอบทั้ง 3 ของสนามที่ไม่มีค่าเป็น 0 ซึ่งสามารถแสดงในโดเมนของเวลา(Time-Domain) ได้ดังนี้

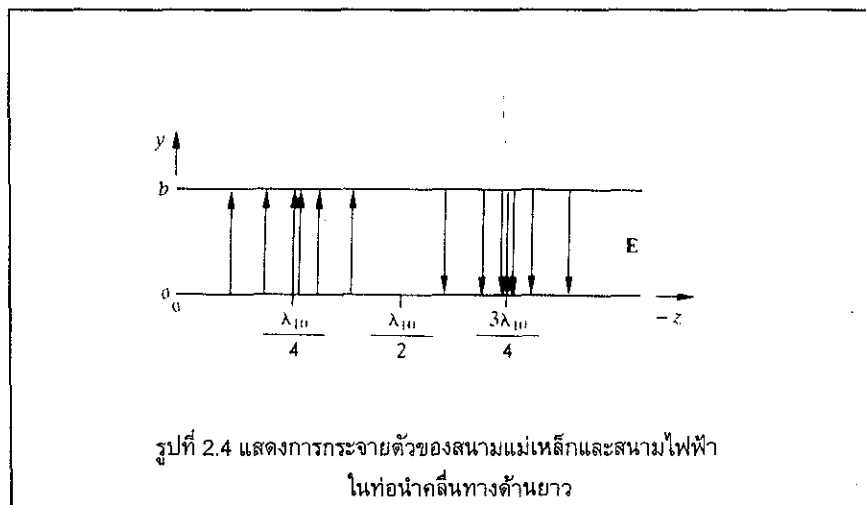
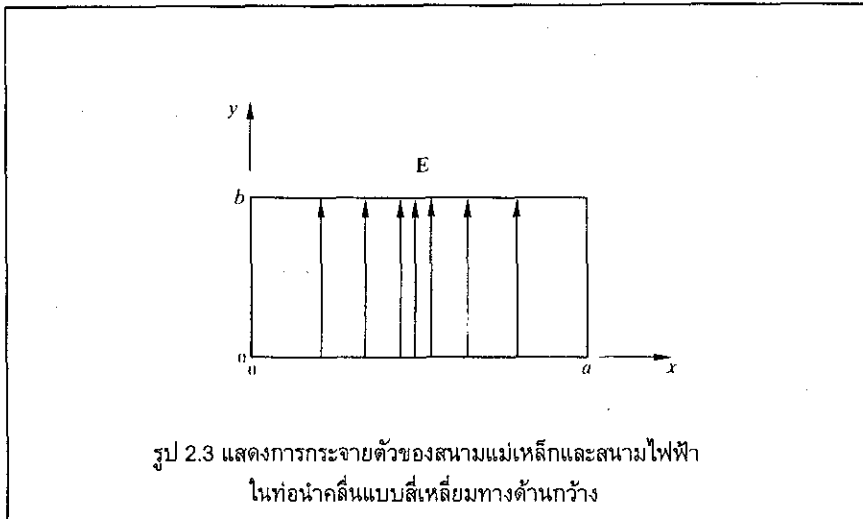
$$H_{z10} = H_{10} \cos \left(\frac{\pi x}{a} \right) \cos(\omega t - k_{10} z) \quad (2.7)$$

$$H_{x10} = - \left(\frac{2a}{\lambda_{10}} \right) H_{10} \sin \left(\frac{\pi x}{a} \right) \sin(\omega t - k_{10} z) \quad (2.8)$$

$$E_{y10} = \eta_0 \left(\frac{2a}{\lambda_0} \right) H_{10} \sin \left(\frac{\pi x}{a} \right) \sin(\omega t - k_{10} z) \quad (2.9)$$

ถ้าทำการพล็อตสนามในโหมดโดมิแนนท์ที่ $t=0$ จะได้ดังรูปที่ 2.3 และ 2.4 ทั้ง $|E_y|$ และ $|H_x|$ แปรตาม $\sin(\pi x/a)$ และจากรูปที่ 2.3 แสดงให้เห็นว่าเส้นของสนามไฟฟ้ามีความหนาแน่นมากที่สุด ณ ตำแหน่ง $x = a/2$ และมีค่าเท่ากับ 0 ณ ตำแหน่ง $x=0$ และ $x=a$ ส่วนรูปที่ 2.4 แสดงให้เห็นการสร้างคลื่นโหมด TE₁₀ ในท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมมุมฉากโดยการใส่โพรบท่อนำคลื่นกึ่งกลางระหว่างผนังด้านบน ($y=b, x=a/2$) ที่ระยะ $z = \lambda_{10}/4$ จากปลายสุดของท่อ

ในที่นี้เราจะสนใจเฉพาะการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าเท่านั้นเพราะสนามไฟฟ้าเป็นตัวทำให้เกิดกำลังงาน ในท่อนำคลื่น ซึ่งเป็นตัวที่ต้องใช้ตัวดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟดูดซับกำลังงานเหล่านี้เพื่อไม่ให้เกิดคลื่นสะท้อน ดังนั้นหลังจากที่เราสามารถหาการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าและพบว่าการกระจายตัวโดยมีลักษณะเป็น sine และมีกำลังคลื่นสูงสุด ณ ตำแหน่งกลางของท่อนำคลื่น เราจึงนำความรู้นี้ไปใช้ในการออกแบบตัวดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ



2.1.3. คุณสมบัติของคลื่นโหมดโดมิแนนท์เมื่อเทียบกับโหมดที่สูงกว่า (Higher Order Mode)

1. มีความยาวคลื่น ณ จุดที่ใช้งานสูงสุด
2. มีประสิทธิภาพในการส่งผ่านพลังงานสูงสุด
3. การกระจายตัวของสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กอยู่ในรูปแบบที่เข้าใจได้ง่ายที่สุด
4. เป็นโหมดที่เกิดได้ง่ายที่สุดในท่อนำคลื่น

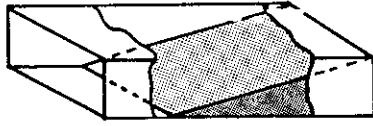
2.2 ตัวดูดกลืนคลื่น

เพื่อให้การทำงานของระบบไมโครเวฟเป็นไปอย่างสมบูรณ์ ตัวดูดกลืนคลื่นจะถูกนำมาใช้งานเพื่อเป็นการป้องกันกำลังของคลื่นที่จะสะท้อนกลับไปรบกวนการทำงานของแหล่งกำเนิดคลื่น ตัวดูดกลืนคลื่นนั้นจะมีที่ใช้อย่างกว้างขวางทั้งในการปฏิบัติจริง และ ในการทดลอง เช่น ในบางครั้งอาจถูกใช้เป็นชิ้นส่วนของวงจรต้านรับ ซึ่งในกรณีนี้ตัวดูดกลืนคลื่นจะถูกเรียกว่า เทอร์มิเนชัน หรือ เทอร์มิเนเตอร์(termination or terminator) เช่น ในการทดสอบการส่งสัญญาณวิทยุตัวเทอร์มิเนเตอร์จะถูกใช้แทนสายอากาศ โดยในกรณีนี้ตัวเทอร์มิเนเตอร์อาจเรียกว่า ดัมมี่โหลด(dummy load) นอกจากตัวดูดกลืนคลื่นแล้วยังมีชิ้นส่วนที่มีหลักการการทำงานคล้ายกับตัวดูดกลืนคลื่นเรียกว่า ตัวลดทอนกำลังคลื่น(attenuator) ความแตกต่างระหว่างตัวดูดกลืนคลื่นกับตัวลดทอนกำลังคลื่นก็คือ ตัวดูดกลืนคลื่นจะทำการลดทอนกำลังคลื่นให้ได้มากที่สุดจนแทบไม่มีกำลังของคลื่นหลงเหลือออกจากตัวดูดกลืนคลื่นเลย ส่วนตัวลดทอนคลื่นนั้นจะทำการลดระดับกำลังของคลื่นจากระดับที่สูงกว่าลงมาสู่ระดับที่ต่ำกว่าตามที่ต้องการ

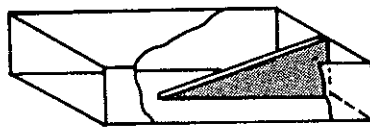
โดยปกติวัสดุที่นิยมใช้ในการสร้างตัวดูดกลืนคลื่นนั้นจะเป็นประเภทฉนวนไฟฟ้าที่มีการสูญเสีย(lossy dielectric) เนื่องจากมีค่าความนำไฟฟ้าต่ำถึงปานกลางและจะไม่นิยมนำเอาสารที่เป็นโลหะหรือสารโลหะผสม(alloy)มาใช้เนื่องจากค่าความนำไฟฟ้าของสารดังกล่าวมีค่าที่สูงเกินไป เพื่อให้จะได้สารที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าที่มีการสูญเสียที่จะนำมาใช้สร้างตัวดูดกลืนคลื่นนั้นจะต้องมีการเตรียมขึ้นโดยเฉพาะ จากการผสมสารที่มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำกับสารขึ้นรูป(binder)ที่เหมาะสม แล้วจึงทำการหล่อขึ้นรูปเป็นรูปทรงต่างๆ สารที่จะนำมาขึ้นรูปนั้นจะต้องมีคุณสมบัติที่สำคัญ 2 ประการก็คือ ต้องมีความสามารถในการทนต่อความร้อนสูง และ ต้องมีค่าความนำความร้อนที่สูงด้วย นั่นก็เนื่องมาจากว่าในขณะที่ตัวดูดกลืนคลื่นทำการดูดกลืนคลื่นอยู่นั้นกำลังของคลื่นที่ถูกดูดกลืนจะสูญเสียไปในรูปของพลังงานความร้อน ดังนั้นยิ่งถ้าต้องการสร้างตัวดูดกลืนที่สามารถดูดกลืนกำลังของคลื่นได้สูงๆ ปัจจัยทั้งสองข้างต้นจะเป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องนำมาพิจารณาในกาหาสารที่เหมาะสมเพื่อที่จะนำมาใช้สร้างเป็นตัวดูดกลืนคลื่นในขั้นต่อไป

ตัวดูดกลืนคลื่นมีอยู่หลายชนิดและรูปทรง แต่ชนิดที่ใช้งานกันทั่วๆ ไปมีอยู่ 2 ชนิดคือ

1. ตัวดูดกลืนคลื่นชนิดเป็นแท่งตัน(Plug-Type attenuator)
2. ตัวดูดกลืนคลื่นชนิดเป็นแผ่น(Fin-Type attenuator)



รูปที่ 2.5 แสดงตัวดูดกลืนคลื่นชนิดแท่งตัน



รูปที่ 2.6 แสดงตัวดูดกลืนคลื่นชนิดแผ่น

2.2.1 การลดทอนคลื่นระนาบที่เคลื่อนผ่านตัวกลางที่มีการสูญเสีย

ต่อไปจะเป็นการแสดงให้เห็นถึงการลดทอนของคลื่นระนาบที่เคลื่อนผ่านตัวกลางที่มีการสูญเสีย ซึ่งจะแสดงในรูปของการวิเคราะห์สมการคลื่นเคิร์ลของสมการแมกซ์เวลล์

$$\nabla \times \overline{H}_s = \overline{J}_s + j\omega\epsilon \overline{E}_s \quad (2.10)$$

หรือ

$$\nabla \times \overline{H}_s = (\sigma + j\omega\epsilon) \overline{E}_s \quad (2.11)$$

และ

$$\nabla \times \overline{E}_s = -j\omega\mu \overline{H}_s \quad (2.12)$$

โดยที่ σ คือ ค่าความนำไฟฟ้าของตัวกลาง

หาเคิร์ลของสมการที่ (2.12) จะได้

$$\nabla \times \nabla \times \overline{E_s} = -j\omega\mu \nabla \times \overline{H_s} \quad (2.13)$$

จากกฎการเหมือนของเวกเตอร์(Vector Identities)

$$\nabla \times \nabla \times \overline{E_s} = \nabla(\nabla \cdot \overline{E_s}) - \nabla^2 \overline{E_s} \quad (2.14)$$

แต่ค่าของ $(\nabla \cdot \overline{E_s}) = 0$ และ จากสมการที่(2.11) $\nabla \times \overline{H_s} = (\sigma + j\omega\epsilon)\overline{E_s}$

ดังนั้นจากสมการที่ (2.11), (2.13) และ (2.14) จะได้

$$\nabla^2 \overline{E_s} = j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)\overline{E_s} \quad (2.15)$$

เมื่อพิจารณาเฉพาะคลื่นที่เคลื่อนที่ตามแนวแกน X ที่เคลื่อนผ่านแนวตามแนวแกน Z สมการที่ (2.15) จะลดรูปเป็น

$$\frac{\partial^2 \overline{E_{xs}}}{\partial z^2} = j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)\overline{E_{xs}} \quad (2.16)$$

ซึ่งจะทำให้สมการที่เคลื่อนที่ผ่านตามแนวแกน Z ในทิศทางบวก

$$\overline{E_{xs}} = E_{x0}e^{-\gamma z} \quad (2.17)$$

โดยที่ค่าคงที่ของการเคลื่อนที่ผ่าน γ (Propagation Constant) ได้จากสมการ

$$\gamma^2 = (\sigma + j\omega\epsilon)j\omega\mu = -\omega^2\mu\epsilon(1 + \frac{\sigma}{j\omega\epsilon}) \quad (2.18)$$

หรือ

$$\gamma = j\omega\sqrt{\mu\epsilon}\sqrt{1 + \frac{\sigma}{j\omega\epsilon}} \quad (2.19)$$

และเนื่องจาก

$$\sigma \ll \omega\epsilon$$

$$\gamma \approx j\omega\sqrt{\mu\epsilon}(1 + \frac{1}{2}\frac{\sigma}{j\omega\epsilon}) \quad (2.20)$$

และถ้ากำหนดให้

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad \text{จะได้}$$

$$\alpha = \frac{\sigma}{2}\sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad \text{และ} \quad \beta = \omega\sqrt{\mu\epsilon} \quad (2.21)$$

ดังนั้นค่าของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ทำการเคลื่อนที่ผ่านในทิศทาง +Z ก็คือ

$$E_x = E_{x0}e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \beta z) \quad (2.22)$$

โดยที่ขนาดของสนามไฟฟ้าจะถูกลดทอนด้วยอัตรา $e^{-\alpha z}$ และค่า α ผันแปรตามค่าความนำ σ ของตัวกลางที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่าน ถ้าคลื่นเคลื่อนที่ผ่านในทิศ +Z มากเท่าใด ขนาดของสนามไฟฟ้าจะค่อยๆ มีขนาดเล็กลงเรื่อยๆ

2.2.2 การดูดกลืนกำลังคลื่นในตัวกลางที่มีการสูญเสียโดยใช้ทฤษฎีเวกเตอร์พอยน์ติง(The Poynting Vector)

การวิเคราะห์ทฤษฎีเวกเตอร์พอยน์ติงจะใช้ในการหาลำดับของคลื่นที่มีความสัมพันธ์กับค่าของสนามไฟฟ้าของคลื่น โดยทฤษฎีนี้คิดค้นโดยนักฟิสิกส์ชาวอังกฤษ John H. Poynting ในปี 1884 เวกเตอร์พอยน์ติง $\vec{P} = \vec{E} \times \vec{H}$ คือ อัตราในชั่วขณะหนึ่งของการไหลของพลังงานผ่านจุดๆ หนึ่งต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ในกรณีของคลื่นระนาบ ทิศทางการไหลของพลังงานเป็นทิศเดียวกับการแพร่กระจาย(การเคลื่อนผ่าน) ดังนั้นเวกเตอร์พอยน์ติงจะเป็นประโยชน์มากในการวิเคราะห์กำลังของคลื่น

$$\text{จากสมการแมกซ์เวลล์} \quad \nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.23)$$

ทำการคูณด้วย $\vec{E}$ ทั้งสองข้างของสมการที่ (2.23)

$$\vec{E} \cdot \nabla \times \vec{H} = \vec{J} \cdot \vec{E} + \vec{E} \cdot \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.24)$$

ใช้หลักการเหมือนของเวกเตอร์(Vector Identity)

$$\nabla \cdot (\vec{E} \times \vec{H}) = -\vec{E} \cdot \nabla \times \vec{H} + \vec{H} \cdot \nabla \times \vec{E} \quad (2.25)$$

จะได้

$$\vec{H} \cdot \nabla \times \vec{E} - \nabla \cdot (\vec{E} \times \vec{H}) = \vec{J} \cdot \vec{E} + \vec{E} \cdot \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.26)$$

และเนื่องจากกฎของแมกซ์เวลล์

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.27)$$

นำสมการที่ (2.27) ไปแทนค่าในสมการที่ (2.26) จะได้

$$-\vec{H} \cdot \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} - \nabla \cdot (\vec{E} \times \vec{H}) = \vec{J} \cdot \vec{E} + \vec{E} \cdot \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.28)$$

และเนื่องจาก

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \text{ และ } \vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.29)$$

นำสมการที่ (2.29) ไปแทนค่าในสมการที่ (2.28) จะได้

$$-\nabla \cdot (\vec{E} \times \vec{H}) = \vec{J} \cdot \vec{E} + \epsilon \vec{E} \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \mu \vec{H} \cdot \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (2.30)$$

เนื่องจาก

$$\epsilon \vec{E} \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \frac{\epsilon}{2} \frac{\partial E^2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\epsilon E^2}{2} \right) \quad (2.31)$$

และ

$$\mu \overline{H} \cdot \frac{\partial \overline{H}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\mu H^2}{2} \right) \quad (2.32)$$

นำสมการที่ (2.31) และ (2.32) ไปแทนค่าในสมการที่ (2.30) จะได้

$$-\nabla \cdot (\overline{E} \times \overline{H}) = \overline{J} \cdot \overline{E} + \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\epsilon E^2}{2} + \frac{\mu H^2}{2} \right) \quad (2.33)$$

และสุดท้ายทำการอินทิเกรตเชิงปริมาตรจะได้

$$-\int_{vol} \nabla \cdot (\overline{E} \times \overline{H}) dv = \int_{vol} \overline{J} \cdot \overline{E} dv + \frac{\partial}{\partial t} \int_{vol} \left(\frac{\epsilon E^2}{2} + \frac{\mu H^2}{2} \right) dv \quad (2.34)$$

และใช้ทฤษฎีไดเวอร์เจนส์จะได้

$$-\oint_S (\overline{E} \times \overline{H}) dS = \int_{vol} \overline{J} \cdot \overline{E} dv + \frac{\partial}{\partial t} \int_{vol} \left(\frac{\epsilon E^2}{2} + \frac{\mu H^2}{2} \right) dv \quad (2.35)$$

แต่เนื่องจาก

$$\overline{J} = \sigma \overline{E} \quad (2.36)$$

จะสามารถเขียนสมการที่ (2.35) ได้เป็น

$$-\oint_S (\overline{E} \times \overline{H}) dS = \int_{vol} \sigma \cdot \overline{E}^2 dv + \frac{\partial}{\partial t} \int_{vol} \left(\frac{\epsilon E^2}{2} + \frac{\mu H^2}{2} \right) dv \quad (2.37)$$

สำหรับในกรณีของตัวกลางที่มีการสูญเสียจะพบว่า ค่าอินทิเกรตของพจน์แรกด้านขวามือของสมการที่ (2.37) นั้นเป็นการแสดงการสูญเสียกำลังของคลื่นในรูปของความร้อนทั่วทั้งปริมาตรมีหน่วยเป็นวัตต์ เรียกว่า การสูญเสียโอมิก (Ohmic Loss) สำหรับในส่วนหนึ่งของพจน์ที่สองเป็นค่าของกำลังคลื่นทั้งหมดที่สะสมอยู่ในรูปของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าที่กำลังเปลี่ยนแปลงตามเวลา ผลบวกของทั้งสองพจน์ทางด้านขวามือของสมการที่ (2.37) จะให้ผลลัพธ์เป็นค่ากำลังของคลื่นที่ผ่านเข้าตัวกลาง(เห็นได้จากว่ามีเครื่องหมายลบอยู่ข้างหน้า) ซึ่งก็คือพจน์ของ $-\oint_S (\overline{E} \times \overline{H}) \cdot dS$ นั้นเอง

บทที่ 3

เขม่าดำ (CARBON BLACK) และ โพลีเอสเตอร์เรซิน

3.1 เขม่าดำ(Carbon Black)

มีสารมากมายหลายชนิดที่มีคุณสมบัติในการดูดกลืนคลื่น โดยหลักๆ แล้วสารที่จะนำมาใช้ในการผลิตตัวดูดกลืนคลื่นนั้นจะมีคุณสมบัติทางด้านการนำไฟฟ้าต่ำ ถึงปานกลาง และจะไม่นิยมนำเอาสารที่มีคุณสมบัติทางการนำไฟฟ้าสูงๆ เช่น สารที่เป็นโลหะทั้งหลายมาใช้ เพราะสารเหล่านี้จะทำการดูดกลืนกำลังของคลื่นอย่างรวดเร็ว แต่ ก่อให้เกิดคลื่นสะท้อนซึ่งจะก่อให้เกิดผลเสียต่อระบบไมโครเวฟได้ ดังนั้นสารที่นิยมนำมาใช้จะเป็นสารที่มีคุณสมบัติเป็นไดอิเล็กตริกชนิดที่มีการสูญเสีย(lossy dielectric) เช่น กระเบื้องที่มีส่วนผสมของซิลิกอนคาร์ไบด์ หรือ พลาสติกชนิดที่มีคุณสมบัติเป็นไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสีย(lossy dielectric) ผงเขม่าดำที่ถูกผสมกับเรซิน ก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่ง อีกทั้งการที่นำเอาผงเขม่าดำมาใช้สร้างตัวดูดกลืนคลื่นนี้ เนื่องจากเป็นวัสดุที่หาได้ง่ายในประเทศ และ ราคาถูก

3.1.1 การผลิตเขม่าดำ

1. Channel Process ทำโดยการเผาก๊าซธรรมชาติให้เปลวไฟกระทบแผ่นโลหะ แผ่นโลหะจะมีรูปร่างต่างๆ กัน อาจเป็นจานลูกกลิ้งตัวยู ซึ่งมีช่องแคบเรียก channel แบบตัวยูนี้เป็นที่นิยมมาก ดังนั้นเขม่าดำที่ได้จากวิธีนี้เรียกว่า channel black เมื่อควบคุมปริมาณของอากาศในการเผาไหม้ อุณหภูมิของเตาเผาและปริมาณอากาศที่ให้ออกมา ความดันของก๊าซที่ใช้ในการเผาไหม้และ อื่นๆ ก็ทำให้สามารถควบคุมขนาดของเขม่าดำที่ออกมาได้ เขม่าดำที่ได้จากวิธีนี้มีขนาดของอนุภาคตั้งแต่ $100 \text{ \AA}$ ถึง $400 \text{ \AA}$
2. Furnace Process ทำโดยการเผาก๊าซธรรมชาติ น้ำมันหรือของผสมของก๊าซธรรมชาติกับน้ำมันเตา โดยควบคุมปริมาณของอากาศที่ใส่เข้าไปในเตา การผลิตเขม่าดำในปัจจุบันนิยมใช้วิธีนี้เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูง ซึ่งจะสามารถเตรียมเขม่าดำที่มีขนาดอนุภาคตั้งแต่ $140 \text{ \AA}$ ถึง $900 \text{ \AA}$

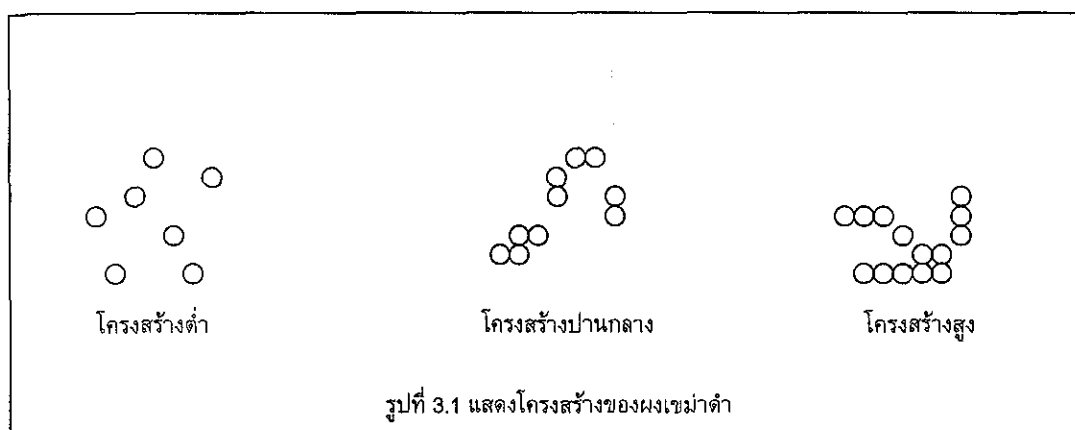
3.1.2 คุณสมบัติของเขม่าดำ คุณสมบัติของเขม่าดำขึ้นกับสิ่งสำคัญ 5 ประการคือ

1. ขนาดของอนุภาค (particle size)
2. โครงสร้างของเขม่า (structure)

3. ลักษณะผิว
4. สมบัติทางเคมีของผิว
5. ความเป็นรูพรุน (porosity)

ขนาดของอนุภาค การวัดขนาดของอนุภาคทำได้โดยตรงโดยการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ซึ่งจะต้องวัดขนาดของเม็ดแต่ละเม็ดแล้วนำมาเฉลี่ย วิธีนี้จะทำให้ได้ค่าที่ถูกต้องแน่นอนแต่เสียเวลามาก วิธีอื่นที่สามารถทำได้โดยการเปรียบเทียบกับเขม่าดำมาตรฐาน

โครงสร้างของเขม่าดำ หมายถึง การจัดตั้งระหว่างอนุภาคของเขม่าดำให้มีรูปโครงสร้าง ถ้าเขม่าดำมีการจัดเรียงต่อกันเป็นเส้นสายมาก แสดงว่ามีโครงสร้างสูง ถ้าการจัดตั้งไม่ต่อเนื่องกันหรือต่อกันน้อย แสดงว่ามีโครงสร้างต่ำ



การที่เขม่าดำมีโครงสร้างสูงจะทำให้การจัดตัวไม่แน่น ผลของโครงสร้างของเขม่าดำที่มีโครงสร้างสูงจะเกิดการกระจายตัวได้ดีเมื่อนำไปทำการผสมเพื่อขึ้นรูป แต่เขม่าดำที่มีโครงสร้างสูงจะใส่ผสมได้ในปริมาณที่น้อยกว่าเขม่าดำที่มีโครงสร้างต่ำ

ลักษณะผิว การจัดตัวของคาร์บอนอะตอมในเขม่าดำจะมีลักษณะเป็นชั้น ๆ เขม่าดำที่มีสมบัติในการเสริมประสิทธิภาพต่ำจะมีการจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอมอย่างเป็นระเบียบ เขม่าดำที่มีสมบัติการเสริมประสิทธิภาพสูงจะมีการจัดตัวของคาร์บอนอะตอมจความเป็นระเบียบน้อยกว่าแบบแรก และยิ่งขนาดอนุภาคของเขม่าดำมีขนาดเล็กยิ่งขึ้น การจัดตัวของคาร์บอนอะตอมก็ยิ่งไม่เป็นระเบียบยิ่งขึ้น โดยอัตราการเสริมประสิทธิภาพจะบ่งบอกถึง การที่เขม่าดำจะสามารถยึดเหนี่ยวกับสารที่ละลายอยู่ได้ดีเพียงใด บางทีลักษณะของคาร์บอนอะตอมที่ผิวจะมีผลต่อการเสริมประสิทธิภาพได้ เช่น ถ้าอะตอมของคาร์บอนเกิดการสร้างพันธะกันเองจนทำให้ลักษณะผิวจัดตัวเป็นระเบียบ

ทำให้เกาะติดกับสารที่ละลายอยู่ได้ไม่ดี การเสริมประสิทธิภาพก็จะต่ำ แต่ถ้าคาร์บอนอะตอมมีไฮโดรเจนมาเกาะจะช่วยให้เขม่าดำนั้นเสริมประสิทธิภาพมากขึ้น และเพิ่มมากขึ้นถ้าเกิดอนุมูลอิสระอยู่บนผิวของเขม่าดำ

สมบัติทางเคมีของผิว เขม่าดำประกอบด้วยคาร์บอนประมาณร้อยละ 90-99 ที่เหลือเป็นไฮโดรเจนและออกซิเจน ที่เกาะกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ ไฮโดรเจนมาจากไฮโดรคาร์บอนเดิม (จากน้ำมันและก๊าซธรรมชาติ) ไฮโดรเจนจะกระจายตลอดทั้งอนุภาคของเขม่า ส่วนออกซิเจนมาจากการเผาไหม้ในขณะเตรียมเขม่าดำ ดังนั้นออกซิเจนส่วนใหญ่จะอยู่ที่ผิวของเขม่าดำ โดยอัตราส่วนของสารเคมีเหล่านี้จะเป็นสาเหตุให้ pH ของเขม่าดำมีค่าที่แตกต่างกันซึ่งมีผลในการแข็งตัวของสารผสม

ความเป็นรูปพรุนของเขม่าดำ ผิวของเขม่าดำไม่เรียบเนื่องจากในการเตรียมเขม่าดำนั้นทำให้เกิดการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูง การออกซิเดชันจะทำให้เกิดเป็นรูปพรุนขึ้นในอนุภาคของเขม่าดำได้ การมีรูปพรุนมากหรือน้อยในเขม่าดำจะเป็นเหตุทำให้การ cure เร็วหรือช้าได้ ถ้าเอาเขม่าดำที่มีรูปพรุนมากมาจะพบว่ามีจำนวนอนุภาคมากกว่าเขม่าดำที่มีรูปพรุนน้อย ดังนั้นถ้าใช้จำนวนเขม่าดำเท่า ๆ กันโดยน้ำหนัก เขม่าดำที่มีรูปพรุนมากจะทำให้มีการนำไฟฟ้าที่ดีกว่าเขม่าดำที่มีรูปพรุนน้อย เนื่องจากจำนวนอนุภาคมากกว่านั่นเอง

กล่าวโดยสรุป สมบัติของเขม่าดำนั้นขึ้นอย่างมากกับขนาด รองลงมาคือ โครงสร้างและความเป็นรูปพรุน ส่วนลักษณะผิวทางฟิสิกส์และเคมีจะมีผลน้อย

สำหรับผงเขม่าดำที่ใช้ในการทดลองนั้น จะเป็นชนิด N330 และ N550 เนื่องจากหาได้ง่ายและราคาถูก ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะใช้กันแพร่หลายในอุตสาหกรรมการผลิตยางรถยนต์ และ อุตสาหกรรมหมึกพิมพ์ ผงเขม่าดำทั้งสองนี้มีขนาดอนุภาค ดังนี้

N330 มีขนาดอนุภาคประมาณ $260 \text{ \AA}$ - $300 \text{ \AA}$

N550 มีขนาดอนุภาคประมาณ $400 \text{ \AA}$ - $480 \text{ \AA}$

3.2 โพลีเอสเทอร์เรซิน

โพลีเอสเทอร์เรซินเป็นรูปแบบหนึ่งของพลาสติกเหลวซึ่งส่วนใหญ่จะถูกใช้ทำผลิตภัณฑ์ไฟเบอร์กลาสสามารถแบ่งออกได้ดังนี้

1. ชนิดผสมขี้ผึ้ง หรือแว็ค(Wax) โพลีเอสเทอร์เรซินชนิดนี้เมื่อแข็งตัวแล้วผิวจะแห้งตัวไม่เหนียวเหนอะ ใช้สำหรับทำงานชิ้นเล็ก ซึ่งสามารถทำงานติดต่อกันจนเสร็จในเวลาอันสั้น
2. ชนิดไม่ผสมขี้ผึ้ง หรือแว็ค(Wax) โพลีเอสเทอร์เรซินชนิดนี้เมื่อแข็งตัวแล้วผิวจะยังเหนียวอยู่ประมาณ 1-2 วัน ใช้สำหรับชิ้นงานใหญ่ที่ต้องทำงานนานติดต่อกันหลายชั่วโมงหรือหลายวัน การมีผิวเหนียวเหนอะของโพลีเอสเทอร์เรซินจะช่วยให้การยึดเกาะของโพลีเอสเทอร์เรซินแต่ละชั้นดีขึ้น
3. ชนิดผสมตัวช่วยเร่งปฏิกิริยา โดยปกติโพลีเอสเทอร์เรซินไม่ควรผสมตัวช่วยเร่งปฏิกิริยา(Accelerator หรือ Promoter) เอาไว้ก่อนเพราะจะทำให้อายุการเก็บรักษา(shelf life) สั้นลง แต่เนื่องด้วยมีการแข่งขันกันในตลาดสูง บริษัทผู้ผลิตหลายแห่งจึงผสมตัวช่วยเร่งปฏิกิริยาลงไป
4. ชนิดผสมผงเบา(Thixotropic) โพลีเอสเทอร์เรซินหลายตัวผสมผงเบาเพื่อให้เรซินมีความข้นและมีแรงยึดเกาะมากขึ้น

โพลีเอสเทอร์เรซินมีกลิ่นฉุนแรงเมื่อเก็บไว้ในห้องอับ ห้องเก็บควรมีระบบการถ่ายเทอากาศที่ดีและอุณหภูมิไม่ควรเกิน 20°C โพลีเอสเทอร์เรซินจะมีอายุเก็บได้นาน 3-6 เดือนในอุณหภูมิดังกล่าว หากเก็บไว้ในห้องที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า 5°C โพลีเอสเทอร์เรซินจะหยุดทำปฏิกิริยา และจะมีอายุการเก็บได้นานกว่านั้นมาก

ตัวทำให้แข็ง(Hardener)

ตัวทำให้แข็งหรือตัวกระตุ้น(Catalyst) หรือตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นตัวทำให้เกิดปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชัน เปลี่ยนสภาพโพลีเอสเทอร์เรซินจากพลาสติกเหลวเป็นพลาสติกแข็ง ซึ่งในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีนั้นจะเกิดอุณหภูมิสูงกว่า 100°C โดยปกติแล้วตัวทำให้แข็ง (หรือตัวกระตุ้น หรือตัวเร่งปฏิกิริยา) นิยมใช้สารพวกเปอร์ออกไซด์(Peroxide) ซึ่งชนิดที่นิยมใช้กันมากที่สุด คือ Methyl Ethyl Ketone Peroxide (MEKP หรือ MEKPO)

MEKP มีลักษณะเป็นของเหลวใสไม่มีสี กลิ่นคล้ายกรดเป็นอันตรายต่อเยื่อจมูกและตามาก ควรระวังอย่าใช้มือที่จับเช็ดตา หรือให้กระเด็นเข้าตา เมื่อถูกมืออาจทำให้เกิดอาการแสบ เมื่อเข้าตาควรใช้น้ำสะอาดชะล้างโดยทันที แล้วรีบไปพบแพทย์

ตัวช่วยเร่งปฏิกิริยา(Accelerator หรือ Promoter)

ในการทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีโดยเปลี่ยนแปลงจากรูปพลาสติกเหลวเป็นพลาสติกแข็งของเรซินโดยใช้ตัวทำให้แข็งนั้น สามารถทำได้โดยใช้ความร้อนช่วยแต่ช้ามาก ในทางปฏิบัติจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Accelerator) มาช่วยปรับให้เกิดการแข็งตัวของพลาสติกเหลวให้เร็วขึ้น ตัวช่วยเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ คือ โคบอลต์ แนฟทีเนต (Cobalt Naphthenate) มีลักษณะเป็นของเหลวสีม่วง ความเข้มข้นที่ใช้งานประมาณ 5%

โคบอลต์ แนฟทีเนต ที่ซื้อมาส่วนใหญ่จะมีความเข้มข้นประมาณ 10% หรือมากกว่านั้น ซึ่งจะมีความเข้มข้นเกินไปใช้ไม่สะดวก ทำให้เจือจางเพิ่มขึ้นประมาณ 2-3 เท่า เหลือ 3-5% โดยใช้โมโนสไตรีน(Monostyrene) จะทำให้ใช้งานได้สะดวกมากขึ้น ในทางปฏิบัติจะใช้ตัวช่วยเร่งปฏิกิริยา(Accelerator) ความเข้มข้น 5% ประมาณ 0.2% โดยน้ำหนัก(ของโพลีเอสเตอร์เรซินที่ใช้ ผสมลงในโพลีเอสเตอร์เรซินเสียก่อน เมื่อจะใช้งานจึง ผสมตัวทำให้แข็ง (Catalyst) ในปริมาณ 0.5-2% หรือมากกว่าแต่ไม่เกิน 4% ลงไปในโพลีเอสเตอร์เรซินที่ผสมตัวทำให้แข็งแล้ว จะเริ่มทำปฏิกิริยากันทางเคมีเกิดการแข็งตัว โดยมีตัวช่วยเร่งปฏิกิริยาเป็นตัวเสริมทำให้เกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้น

เนื่องจากโพลีเอสเตอร์เรซินมีหลายชนิดบางชนิดจะผสมตัวช่วยเร่งปฏิกิริยา (Accelerator) เอาไว้เรียบร้อยแล้ว บางชนิดยังไม่ได้ผสมดังนั้นเมื่อเวลาซื้อโพลีเอสเตอร์เรซินควรถามผู้ขายเสียก่อน หากเป็นโพลีเอสเตอร์เรซินชนิดที่ผสมตัวช่วยเร่งปฏิกิริยาแล้วโดยปกติจะมีสีออกแดงหรือม่วง เมื่อจะใช้งานก็เพียงผสมตัวทำให้แข็ง (Catalyst) เข้าไปเท่านั้น หากเป็นชนิดที่ยังไม่ได้ผสมตัวช่วยเร่งปฏิกิริยาเอาไว้ ต้องผสมตัวช่วยเร่งปฏิกิริยาลงไปก่อน 0.2% แล้วกวนให้เข้ากันหรือ จะใช้วิธีค่อย ๆ เทตัวช่วยเร่งปฏิกิริยาเข้าไปทีละน้อยกวนให้เข้ากันจนมีสีออกแดงหรือม่วงจาง ๆ ก็ได้

ควรเก็บรักษาตัวช่วยเร่งปฏิกิริยา(Accelerator) โคบอลต์ แนฟทีเนต กับตัวทำให้แข็ง(Catalyst) MEKP ให้ห่างกัน และหลีกเลี่ยงการผสมกันโดยตรงเพราะจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่รุนแรงและเกิดความร้อนสูง อาจทำให้เกิดไฟไหม้ได้

โพลีเอสเตอร์เรซิน
(Unsaturated Polyester Resin)

+

ตัวช่วยเร่งปฏิกิริยา 0.2%
Accelerator-Promoter
(Cobalt Naphthenate)

+

ตัวทำให้แข็ง หรือตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5-2%
Hardener-Catalyst
(M.E.K.P.)

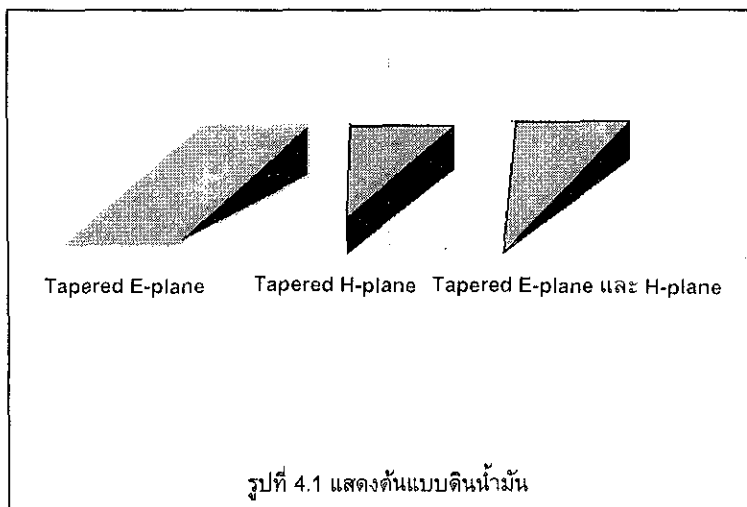
รูปที่ 3.2 สัดส่วนการผสมโพลีเอสเตอร์กับตัวช่วยเร่งปฏิกิริยาและตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อใช้งาน

บทที่ 4

การเตรียมการทดลอง

4.1 ขั้นตอนการเตรียมแบบหล่ออย่าง

4.1.1. ทำต้นแบบเป็นรูปตัวดุกกลืนคลื่นที่ต้องการด้วยการใช้ดินน้ำมัน โดยแบบจะมี 3 ลักษณะคือ tapered E-plane , tapered H-plane และ tapered E-plane & H-plane โดยแต่ละแบบจะมีการเปลี่ยนแปลงขนาดเป็น $1\lambda_g$, $2\lambda_g$ และ $3\lambda_g$ ดังรูป



ค่าของ λ_g (Guide Wavelength) หาได้ดังนี้

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \lambda_0^2 / \lambda_c^2}} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - f_c^2 / f^2}} \text{ (ม.)} \quad (4.1)$$

โดยที่

λ_g คือ ความยาวคลื่นในท่อนำคลื่น (เมตร)

λ_0, f คือ ความยาวคลื่นในอากาศและความถี่ของคลื่น (เมตรและเฮิรตซ์)

λ_c, f_c คือ ความยาวคลื่นคัทออฟและความถี่คัทออฟ (เมตรและเฮิรตซ์)

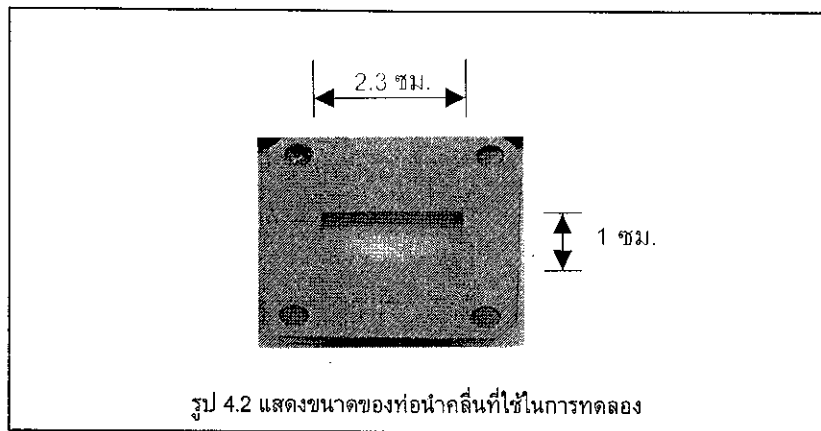
และ

$$\lambda_c = \frac{2}{\left[\left(\frac{m}{a} \right)^2 + \left(\frac{n}{b} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (4.2)$$

โดยที่

m, n คือ ตัวเลขที่แสดงโหมดของคลื่น

a, b คือ ความกว้างและความสูงของท่อนำคลื่น



เนื่องจากในท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมจะมีโหมดโดมิแนนท์ คือ TE_{10} ดังนั้นเราจะพิจารณาเฉพาะที่โหมดนี้เท่านั้น ดังนั้นเราสามารถแทนค่าสมการ (4.2) โดยให้

m มีค่าเป็น 1 และ n มีค่าเป็น 0

a มีค่าเป็น 2.3 ซม. และ b มีค่าเป็น 1 ซม.

แล้วนำมาแทนค่าในสมการ (4.2) จะได้

$$\lambda_c = \frac{2}{\left[\left(\frac{1}{2.3 \times 10^{-2}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (\text{ม.})$$

$$= 0.046 \quad (\text{ม.})$$

และจากสูตร

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (\text{ม.}) \quad (4.3)$$

เมื่อ

c คือ ค่าความเร็วของแสงในอากาศ (3×10^8 ม./วินาที)

f คือ ความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ

เพราะฉะนั้น

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{10 \times 10^9} \quad (\text{ม.})$$

$$= 0.03 \quad (\text{ม.})$$

นำเอาค่า λ_c และ λ แทนในสมการที่ (4.1) จะได้

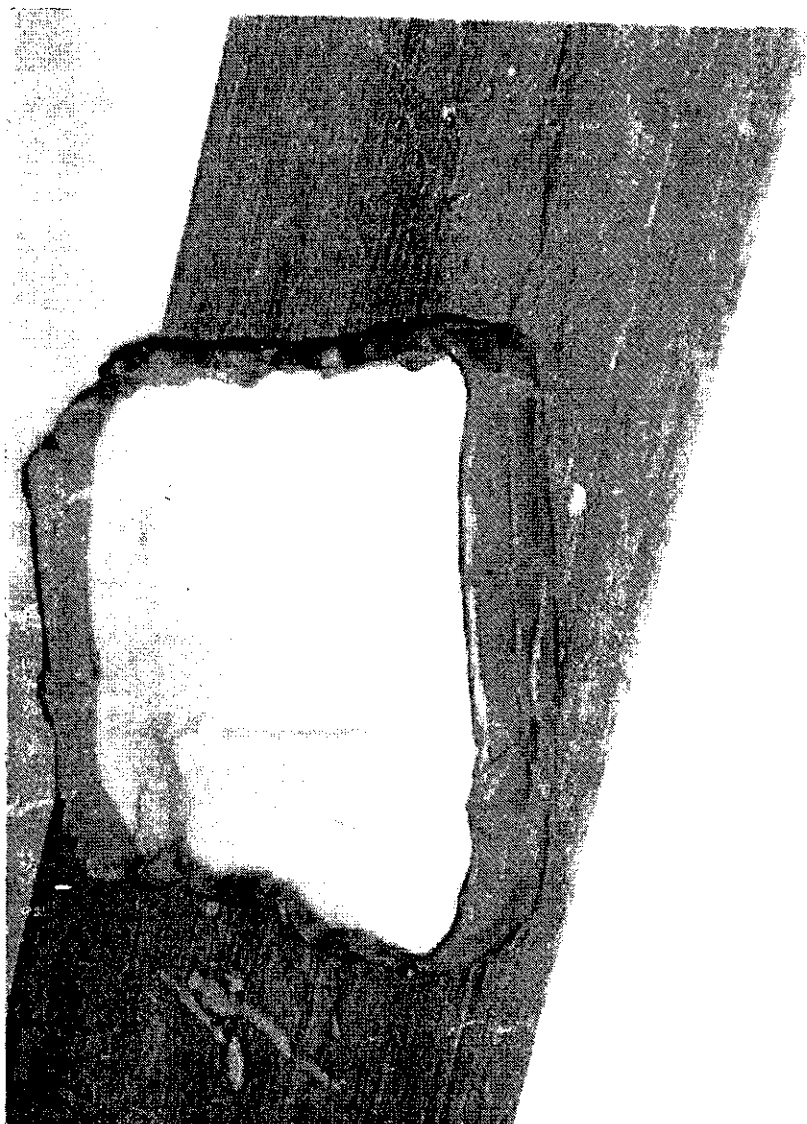
$$\lambda_g = \frac{0.03}{\sqrt{1 - \left(\frac{0.03}{0.046} \right)^2}}$$

$$= 0.040 \quad (\text{ม.})$$

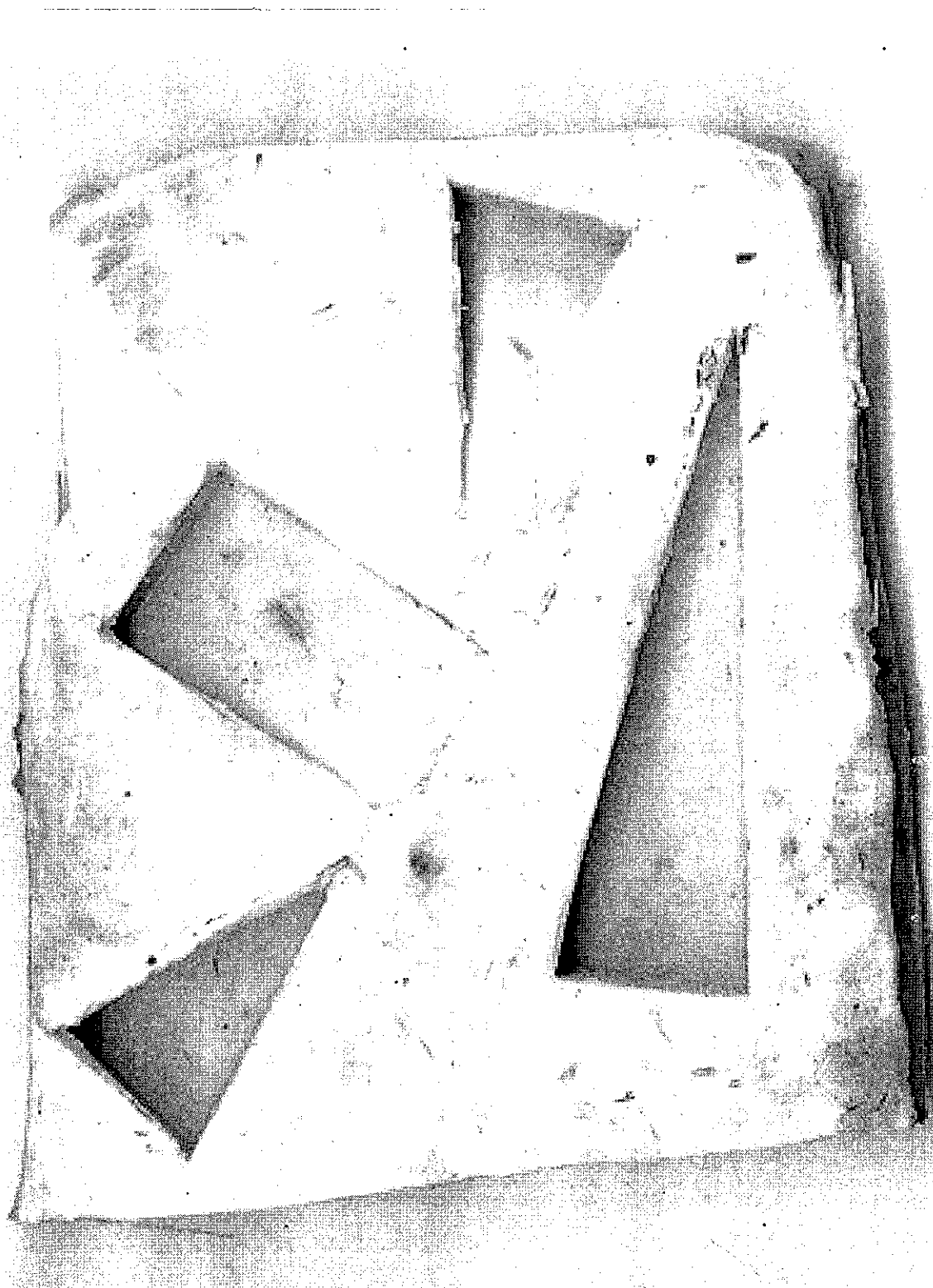
- 4.1.2. นำต้นแบบดินน้ำมันไปวางไว้บนพื้นผิวเรียบ เพื่อให้แบบหล่อย่างที่ได้มีความตรงไม่คดงอ
- 4.1.3. ทำการทาดันแบบดินน้ำมันด้วยน้ำสบู่ก่อนทำการเทยางเพื่อไม่ให้แบบหล่อย่างติดกับต้นแบบดินน้ำมัน และสามารถแกะตัวต้นแบบออกจากแบบหล่อย่างได้ง่าย
- 4.1.4. นำเอายางมาผสมกับตัวเร่งยางเพื่อให้ยางเกิดการแข็งตัวได้เร็วขึ้น แล้วใช้แปรงทายางที่ผสมแล้วทาบนผิวหน้าให้ทั่วเพื่อไม่ให้เกิดฟองอากาศระหว่างตัวต้นแบบดินน้ำมันกับแบบหล่อย่าง
- 4.1.5. เทยางที่เหลือทับต้นแบบดินน้ำมันให้พอท่วมทั่วทั้งชิ้นงานอย่างช้า ๆ เพื่อป้องกันการเกิดฟองอากาศ แล้วใช้ผ้าก๊อชวางทับลงไปหนึ่งชั้นเพื่อป้องกันไม่ให้แบบหล่อย่างที่ได้เกิดการฉีกขาดง่ายเวลาใช้งาน
- 4.1.6. เทยางทับลงไปให้ท่วมผ้าก๊อชประมาณ 0.5 ซม. แล้วรอให้ยางแห้ง
- 4.1.7. ในระหว่างที่รอให้ยางแห้งตัวต้องระวังไม่ให้เกิดฟองอากาศ โดยฟองอากาศจะลอยขึ้นมาที่ผิวด้านบนของแบบหล่อย่างดังนั้นจะต้องคอยใช้ไม้ปลายแหลมจิ้มฟองอากาศอยู่เสมอ
- 4.1.8. ประมาณ 2 ซม. ยางจะเริ่มแข็งตัวและฟองอากาศจะเริ่มลดลงเรื่อย ๆ
- 4.1.9. เมื่อยางเริ่มแข็งตัวให้หยุดคนยางเนื่องจากเป็นการรบกวนและอาจก่อให้เกิดการบิดเบี้ยวของแบบหล่อย่างได้
- 4.1.10. ทิ้งให้ยางแข็งตัวประมาณ 16 ชม.
- 4.1.11. เมื่อได้แบบหล่อย่างที่เป็นยางแล้วทำการผสมปูนปลาสเตอร์ที่มีความเข้มข้นสูงเททับลงไปอีกชั้นหนึ่งเพื่อที่จะใช้เป็นกรอบ เวลาขึ้นรูปชิ้นงานแบบหล่อย่างจะได้คงตัว ไม่เกิดการบิดเบี้ยว ก่อนทำการเทปูนปลาสเตอร์ต้องทาแบบหล่อย่างด้วยน้ำสบู่เพื่อให้สามารถแกะออกจากกันได้ง่าย
- 4.1.12. คอยประมาณ 10 ชม. จนปูนปลาสเตอร์แห้งสนิทแล้วจึงถอดตัวต้นแบบที่เป็นดินน้ำมันออก



รูปที่ 4.3 แสดงการเทน้ำยางเพื่อสร้างแบบหล่อยาง



รูปที่ 4.4 แสดงแบบหลอมยางเมื่อแข็งตัว



รูปที่ 4.5 แสดงแบบหล่อยาง

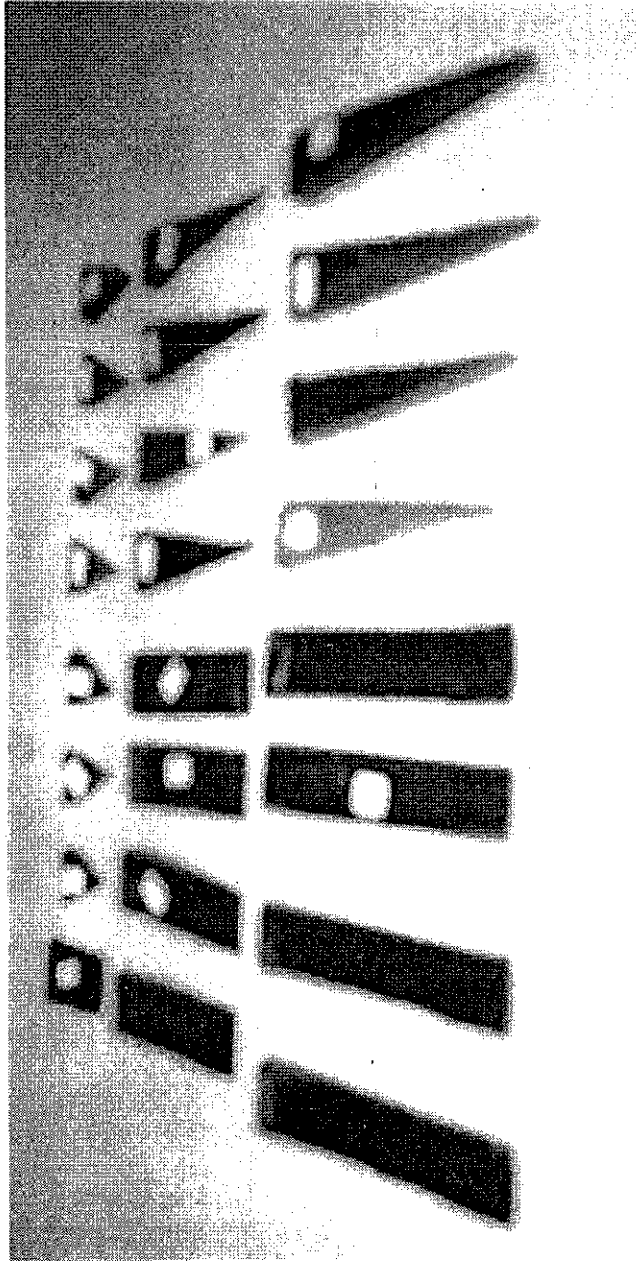
4.2 ขั้นตอนการขึ้นรูปตัวดูดกลืนคลื่น

- 4.2.1 ทำการผสมโพลิเอสเตอร์เรซินที่มีลักษณะใสไม่มีสีทั้งหมด กับตัวช่วยเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์ แนนพทีเนต(Cobalt Naphthenate) ที่มีลักษณะเป็นของเหลวสีม่วงเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวช่วยปรับให้เกิดการแข็งตัวของพลาสติกเหลวเร็วขึ้น โดยใช้ตัวช่วยเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์ แนนพทีเนต ความเข้มข้น 5% จำนวน 0.2% ของน้ำหนักโพลิเอสเตอร์เรซินที่ใช้แล้วคนให้เข้ากันจะสังเกตเห็นสีที่เปลี่ยนไปของโพลิเอสเตอร์เรซินเป็นสีออกม่วงแดง โดยโพลิเอสเตอร์เรซินที่ได้ผสมตัวช่วยเร่งปฏิกิริยาแล้วนี้จะเริ่มเกิดปฏิกิริยาทางเคมีแต่ยังไม่เกิดการแข็งตัว ดังนั้นจึงสามารถเก็บเอาไว้ใช้ได้อีก
- 4.2.2 แบ่งโพลิเอสเตอร์เรซินที่ผสมตัวช่วยเร่งปฏิกิริยามาจำนวนหนึ่ง ผสมด้วยตัวทำให้แข็งหรือตัวเร่งปฏิกิริยา(Hardener หรือ Catalyst) จำนวน 1% ของน้ำหนักเรซินทั้งหมด และเติมผงเขม่าดำขนาด N330 เข้าด้วยกัน โดยในการทดลองแต่ละครั้งจะทำการเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของตัวผงเขม่าดำ โดยน้ำหนัก จาก 5% 10% ถึง 15% เพื่อดูแนวโน้มของการดูดกลืนคลื่น ไม่ควรเติมตัวทำให้แข็งน้อยกว่า 1% เพราะจะทำให้ส่วนผสมที่ได้เมื่อทำการเทลงในแบบหล่อเกิดการแข็งตัวช้ามาก ซึ่งจะทำให้ผงเขม่าดำที่ผสมอยู่ตกตะกอนและทำให้ความเข้มข้นของผงเขม่าดำในชิ้นงานที่ได้ไม่คงที่(non-uniform) ในทางตรงกันข้ามถ้าเราใส่ตัวเร่งมากเกินไปจะทำให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วของสารผสม โดยที่ยังไม่สามารถคนให้สารทั้งสามเข้ากันได้ดี (uniform)
- 4.2.3 คนให้เข้ากันอย่างรวดเร็ว เพราะสารผสมจะแข็งตัวเร็วมากเนื่องจากตัวทำให้แข็งที่ใส่เข้าไป ควรระวังไม่ให้มือสัมผัสกับสารผสมโดยตรงเนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นภายในทำให้สารผสมมีอุณหภูมิสูงกว่า 100°C
- 4.2.4 ทำการเทสารผสมทั้งหมดลงในแบบหล่อที่ได้เตรียมเอาไว้อย่างช้า ๆ เพื่อป้องกันฟองอากาศ โดยถ้าชิ้นงานที่ได้มีฟองอากาศจะต้องเริ่มทำใหม่ตั้งแต่ ข้อ 4.2.1 เวลาเทส่วนผสมต้องเริ่มเทจากส่วนมุมทั้งสามของแบบหล่อเข้าไปหาส่วนด้านใน เพื่อให้สารผสมที่ได้เข้าไปถึงทุกซอกทุกมุมของแบบหล่อ ถ้าสารผสมไม่เข้าไปในทุกมุมของแบบหล่อจะทำให้ชิ้นงานที่ได้แห้วและไม่สามารถนำไปใช้งานได้
- 4.2.5 หลังจากเทสารผสมลงในแบบหล่อแล้ว สารผสมจะเริ่มแข็งตัวอย่างรวดเร็ว คอยประมาณ 30 นาที ให้ชิ้นงานที่แข็งแล้วลดอุณหภูมิลง แต่

ไม่ควรคอยจนนานเกินไปเพราะ จะทำให้ถอดชิ้นงานจากแบบหล่อได้ยากและเสี่ยงต่อการแตกหักของชิ้นงาน

4.2.6 ทำซ้ำจากข้อ 4.2.1-4.2.5 แต่เปลี่ยนขนาดของผงเขม่าดำให้เป็นชนิด N550

4.2.7 หลังจากได้ชิ้นงานครบแล้ว ต้องนำชิ้นงานที่ได้มาขัดด้วยกระดาษทรายน้ำเพื่อลบผิวที่หยابและส่วนเกินของชิ้นงานออก



รูปที่ 4.6 แสดงตัวดูดกลืนคลื่น

บทที่ 5

อุปกรณ์ไมโครเวฟและการจัดอุปกรณ์เพื่อวัดค่าการดูดกลืนคลื่น

5.1 แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับหลอดไครสตรอน(Klystron Power Supply)

เป็นอุปกรณ์ที่จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับหลอดไครสตรอน(Klystron Tube) ได้แก่ กำลังไฟฟ้าจุดไส้หลอด ศักดาไฟฟ้ารีเพลเลอร์(repeller voltage) และศักดาไฟฟ้าที่แอโนด(beam voltage) สำหรับอุปกรณ์จ่ายกำลังไฟฟ้าวรุ่น hp 715A นั้นศักดาไฟฟ้ารีเพลเลอร์จะมีค่าระหว่าง 600-900V และศักดาไฟฟ้าที่แอโนดจะมีค่าประมาณ 300V โดยที่ความต่างศักดาระหว่างแอโนดกับรีเพลเลอร์จะมีค่าเป็นลบ ขณะที่ความต่างศักดาระหว่างแอโนดกับแคโทดจะมีค่าเป็นบวก

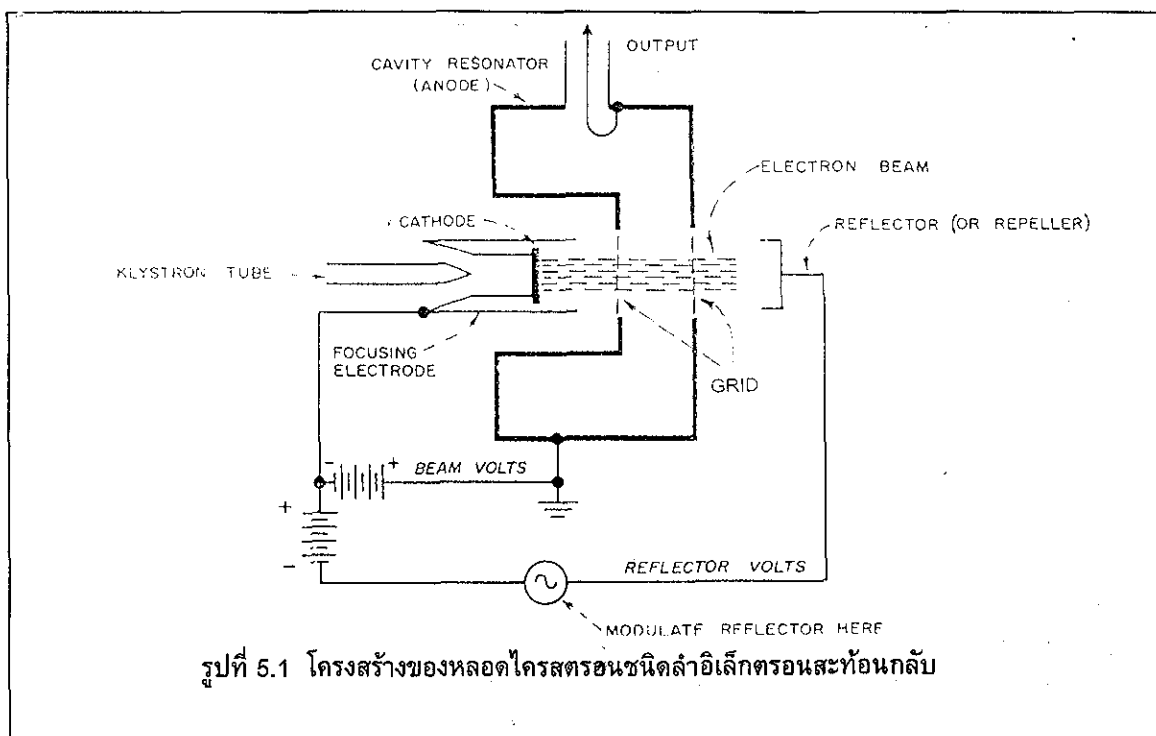
5.2 หลอดไครสตรอน(Klystron Tubes)

หลอดไครสตรอนเป็นหลอดอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้งานในช่วงความถี่ไมโครเวฟ ซึ่งมีอยู่ 2 แบบด้วยกันคือ

1. แบบที่ลำอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปข้างหน้าเพียงอย่างเดียว
2. แบบที่ลำอิเล็กตรอนสะท้อนกลับ (Reflex Klystron)

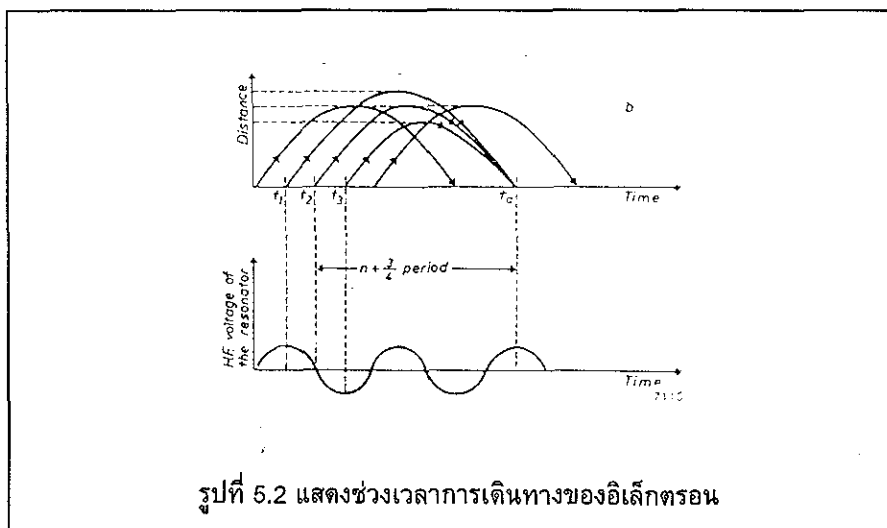
แบบแรกนั้นจะใช้สำหรับการขยายกำลังของคลื่นไมโครเวฟ ส่วนแบบที่สองนั้นจะใช้เป็นตัวออสซิลเลเตอร์สำหรับกำเนิดสัญญาณไมโครเวฟซึ่งเป็นชนิดที่ใช้ในการทดลอง

หลอดอิเล็กทรอนิกส์สะท้อนกลับ (Reflex Klystron)



รูปที่ 5.1 โครงสร้างของหลอดไครสตรอนชนิดลำอิเล็กตรอนสะท้อนกลับ

โครงสร้างของหลอดโครสตรอนชนิดลำอิเล็กตรอนสะท้อนกลับจะมีโครงสร้างและส่วนประกอบดังแสดงได้ด้วยรูปที่ 5.1 กล่าวคือประกอบด้วย ปืนอิเล็กตรอน วงจรเรโซแนนซ์(คาวิตีเรโซเนเตอร์(Cavity Resonator) จะเกิดการสั่นพ้อง(resonance)เช่นเดียวกับวงจรเรโซแนนซ์ในวงจรไฟฟ้า จึงเรียกคาวิตีเรโซเนเตอร์ว่าวงจรเรโซแนนซ์) และรีเพลเลอร์(Repeller) หรือตัวสะท้อน(Reflector) โดยจะทำหน้าที่เป็นแผ่นสะท้อนอิเล็กตรอน การสร้างความต่างศักย์ตามแนวแกนของหลอดนั้น จะใช้การไบแอสให้วงจรเรโซแนนซ์มีความต่างศักย์สูงกว่าปืนอิเล็กตรอนเพื่อเร่งให้อิเล็กตรอนมีความเร็วสูงขึ้นและมีพลังงานในตัวเองสูงขึ้น สำหรับรีเพลเลอร์นั้นจะถูกไบแอสให้มีค่าลบเมื่อเทียบกับวงจรเรโซแนนซ์โดยที่รีเพลเลอร์มีความต่างศักย์ต่ำกว่าปืนอิเล็กตรอน การที่รีเพลเลอร์มีความต่างศักย์ต่ำกว่าปืนอิเล็กตรอนนั้นทำให้อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ผ่านวงจรเรโซแนนซ์ถูกดันกลับมามีด้วยสนามไฟฟ้าในทิศทางตรงกันข้ามกับสนามไฟฟ้าระหว่างปืนอิเล็กตรอนกับคาวิตีเรโซเนเตอร์ ทำให้อิเล็กตรอนถูกสะท้อนกลับมากก่อนที่จะเคลื่อนที่ถึงแผ่นรีเพลเลอร์ ในสภาพของการไบแอสดังกล่าวนี้ ถ้ามีสัญญาณไมโครเวฟคร่อมอยู่ที่กริด(grid) ของวงจรเรโซแนนซ์ อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่เข้ามาในช่วงเวลาที่จังหวะของสัญญาณไมโครเวฟเป็นบวกก็จะออกจากวงจรเรโซแนนซ์ที่มีความเร็วสูงขึ้น ทำให้เคลื่อนที่เข้าใกล้รีเพลเลอร์ได้มากกว่าอิเล็กตรอนที่เข้าสู่วงจรเรโซแนนซ์ในช่วงจังหวะของสัญญาณไมโครเวฟเป็นศูนย์หรือเป็นลบดังรูปที่ 5.2

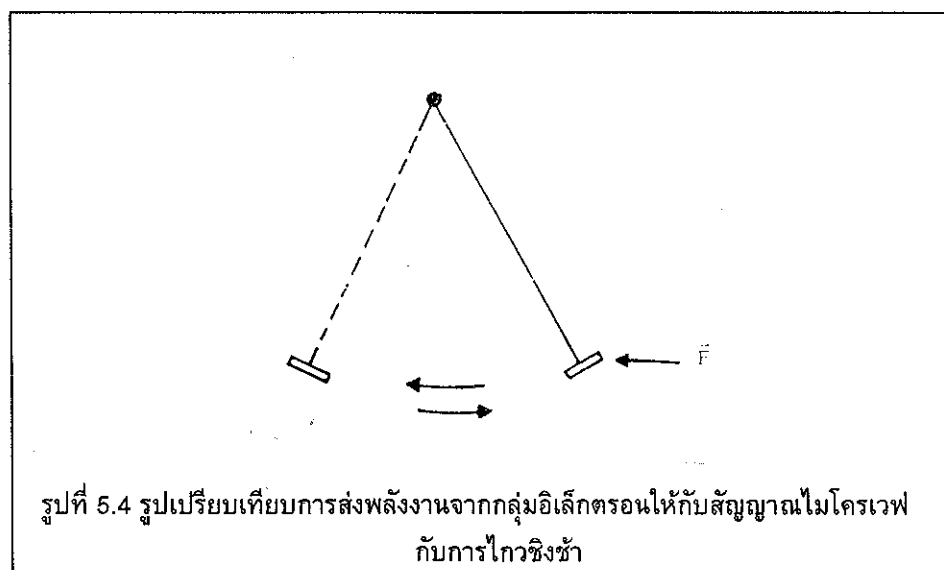
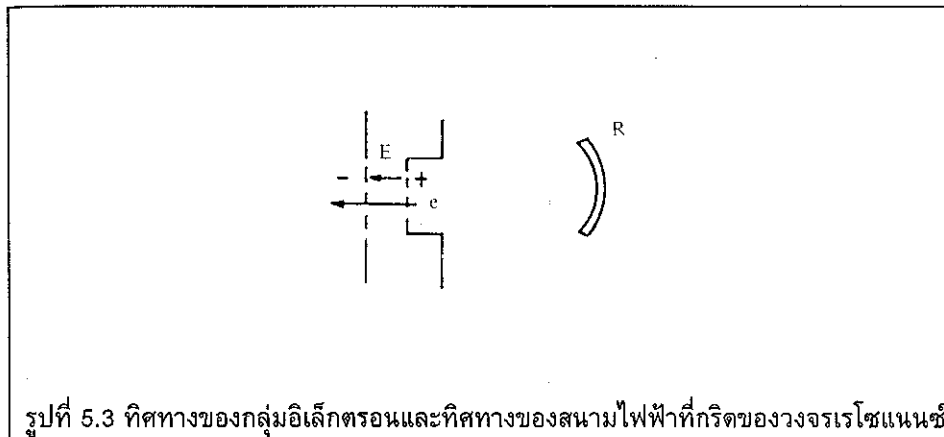


เนื่องจากอิเล็กตรอนต้องการเวลาช่วงหนึ่งในการเดินทางจากจุดกึ่งกลางของวงจรเรโซแนนซ์ไปทางด้านรีเพลเลอร์แล้วสะท้อนกลับมายังจุดกึ่งกลางใหม่เรียกว่า ช่วงเวลาทรานสิต (Transit Time) ช่วงเวลาทรานสิตของอิเล็กตรอนที่เข้าใกล้รีเพลเลอร์ได้มากกว่าจะมีค่าสูงกว่าอิเล็กตรอนที่เข้าใกล้รีเพลเลอร์ได้น้อยกว่า ดังนั้นจึงมีโอกาที่จะเกิดการเกาะกลุ่มของอิเล็กตรอนที่ตำแหน่งกึ่งกลางของวงจรเรโซแนนซ์ได้

หลอดโครสตรอนชนิดลำอิเล็กตรอนแบบสะท้อนกลับจะใช้หลักการที่อิเล็กตรอนเกาะกลุ่มกันที่วงจรเรโซแนนซ์นี้ในการสร้างออสซิลเลเตอร์โดยจะพยายามจัดให้อิเล็กตรอนมีการเกาะกลุ่มกันในจังหวะที่เหมาะสม กล่าวคือให้อิเล็กตรอนที่สะท้อนกลับมากเกาะกลุ่มกันที่จังหวะ

สัญญาณไมโครเวฟมีค่าสูงสุดทางด้านบวกดังรูป 5.2 ในสภาพดังกล่าวนี้กลุ่มอิเล็กตรอนที่ผ่านเข้ากริดทั้งสองของวงจรเรโซแนนซ์จะมีทิศทางที่ต้านกับสนามไฟฟ้าระหว่างกริดทั้งสอง ดังรูปที่ 5.3

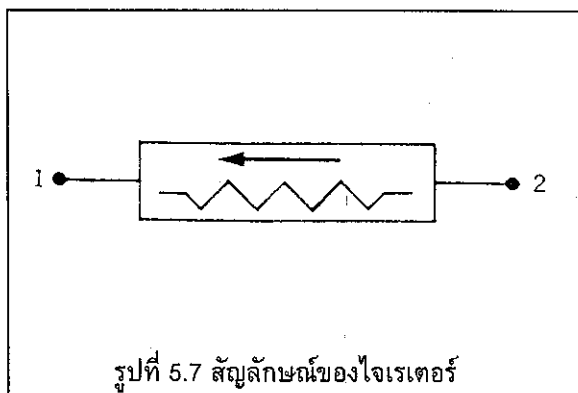
ในเงื่อนไขดังกล่าวนี้อิเล็กตรอนจะทำการส่งผ่านพลังงานให้กับสัญญาณไมโครเวฟ โดยสัญญาณไมโครเวฟสามารถเปรียบได้กับชิงช้าที่แกว่งอยู่ ส่วนกลุ่มของอิเล็กตรอนก็สามารถเปรียบได้กับแรงที่ผลักชิงช้าออกไปในช่วงที่ชิงช้าแกว่งมาทางขวาสุดดังรูป 5.4



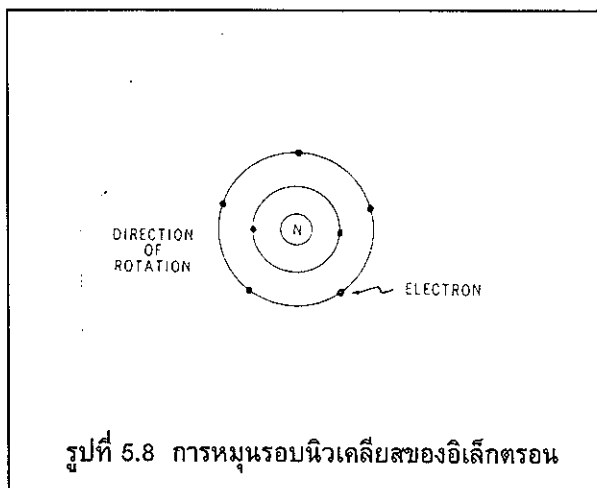
ดังนั้นเมื่อทำการออกแบบระบบให้เกิดการเกาะกลุ่มของอิเล็กตรอนที่จังหวะที่เหมาะสมก็จะทำให้เกิดการส่งผ่านพลังงานจากกลุ่มอิเล็กตรอนไปให้กับโหลดที่ต่ออยู่กับวงจรเรโซแนนซ์ได้ตลอดเวลา ซึ่งก็คือการทำงานของออสซิลเลเตอร์นั่นเอง สำหรับการเริ่มต้นของการออสซิลเลตนั้นก็จะเริ่มต้นจากสัญญาณรบกวนในระบบหลังจากเปิดเครื่องโดยที่สเปคตรัมของสัญญาณรบกวนจะมีส่วนที่เรโซแนนซ์กับกับวงจรเรโซแนนซ์ได้ก็จะเป็นตัวเริ่มต้นทำให้เกิดการเกาะกลุ่มของอิเล็กตรอน แล้วเกิดการก่อตัวเป็นการออสซิลเลตอย่างรวดเร็ว

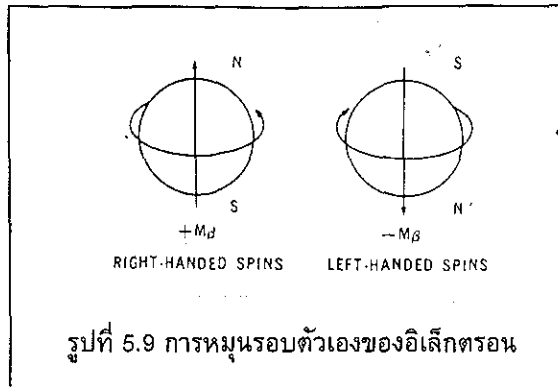
5.3 ไจเรเตอร์

คลื่นไมโครเวฟที่ออกจากหลอดโครสตรอนจะผ่านอุปกรณ์ที่มีชื่อว่า ไจเรเตอร์ หรือ เฟอไรท์ไอโซเลเตอร์ (Gyrator or Ferrite Isolator) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ไมโครเวฟที่ปล่อยให้คลื่นไมโครเวฟวิ่งผ่านได้ทิศทางเดียว คือทิศทางที่มาจากหลอดโครสตรอนเข้าสู่ท่อนำคลื่นและจะทำการสกัดกั้นไม่ให้ไมโครเวฟที่สะท้อนกลับผ่านเข้าสู่หลอดโครสตรอนซึ่งจะไปรบกวนการทำงานของหลอดโครสตรอน รูปที่ 5.7 แสดงสัญลักษณ์ของไจเรเตอร์ ซึ่งแสดงว่า สัญญาณคลื่นไมโครเวฟจะผ่านจากทางเข้า 1 ไปทางออก 2 ได้สะดวก แต่คลื่นไมโครเวฟที่ผ่านไจเรเตอร์จาก

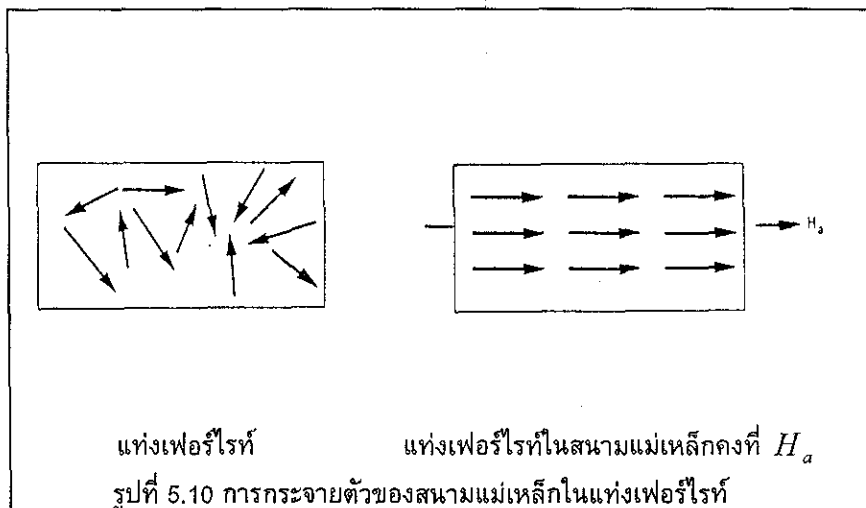


ทางเข้าที่ 2 ไปออกสู่ทางออกที่ 1 จะถูกกักไว้ในไจเรเตอร์ลดทอนขนาดลงมาก การทำงานของกลไกในไจเรเตอร์ขึ้นกับคุณสมบัติของอิเล็กตรอนในสารเฟอร์ไรต์ ซึ่งตามปกติอิเล็กตรอนจะทำการหมุนรอบนิวเคลียสดังรูป 5.8 และหมุนรอบตัวเองที่เรียกว่า อิเล็กตรอนสปิน (Electron Spin) ดังรูปที่ 5.9



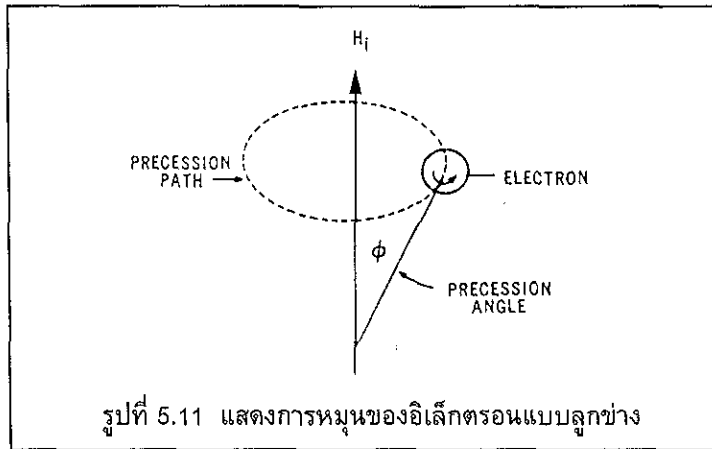


การหมุนของอิเล็กตรอนรอบนิวเคลียสและอิเล็กตรอนสปินทำให้เกิดโมเมนต์แม่เหล็ก (Magnetic Moment) ซึ่งโมเมนต์แม่เหล็กจากอิเล็กตรอนสปินจะมีค่าสูงกว่าโมเมนต์แม่เหล็กที่เกิดจากอิเล็กตรอนวิ่งรอบนิวเคลียสมาก โมเมนต์แม่เหล็กเหล่านี้มีคุณสมบัติคล้ายแม่เหล็กเล็กๆ ในแท่งเฟอร์ไรต์วางตัวอยู่อย่างไม่เป็นระเบียบดังรูปที่ 5.10



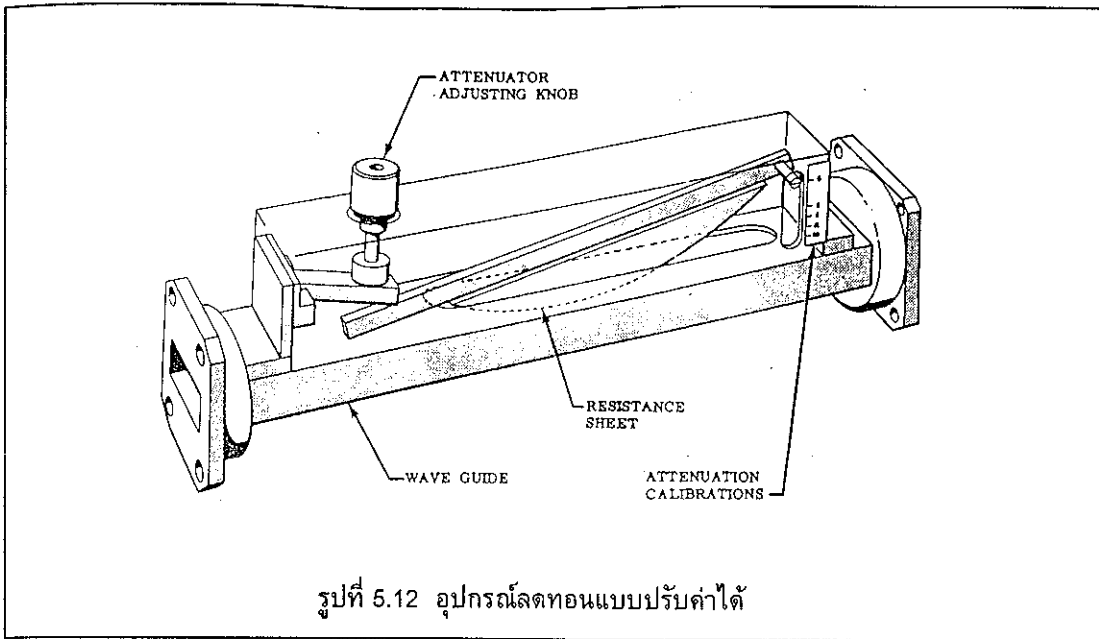
ถ้านำแท่งเฟอร์ไรต์ดังกล่าวไปวางในสนามแม่เหล็กคงที่ H_a อิเล็กตรอนสปินที่ไม่เป็นระเบียบเหล่านี้จะมีการเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ ทำให้เกิดค่าโมเมนต์แม่เหล็กรวมที่มีค่าสูง ดังรูปที่ 5.10 และในขณะเดียวกันอิเล็กตรอนจะหมุนแบบลูกข่าง(Process) รอบสนามแม่เหล็ก H_a โดยแกนของอิเล็กตรอนสปินทำมุม θ กับทิศทางของสนามแม่เหล็กดังรูปที่ 5.11 โดยค่า γ เป็นค่าคงที่ขึ้นอยู่กับการจัดของเฟอร์ไรต์ เรียกว่า ไซโรแมกเนติกเรโซ (Gyromagnetic Ratio) ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเป็นกลไกการทำงานของไจเรเตอร์ กล่าวคือ ถ้าคลื่นไมโครเวฟที่มีความถี่เชิงมุมเท่ากับ ω และมีโพลาไรเซชัน(Polarization) ของสนามแม่เหล็กไมโครเวฟเช่นเดียวกับอิเล็กตรอนสปิน อิเล็กตรอนสปินจะเกิดปฏิกิริยา(react) กับคลื่นไมโครเวฟและดูดกลืนพลังงานบางส่วนจากคลื่นไมโครเวฟเพื่อให้ θ มีขนาดโตขึ้น การดูดกลืนพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟ

ในทิศทางใดขึ้นอยู่กับตำแหน่งของแท่งเฟอร์ไรต์และทิศทางของสนามแม่เหล็กคงที่ในท่อนำคลื่น



5.4 ตัวลดทอนปรับค่าได้(Variable Attenuator)

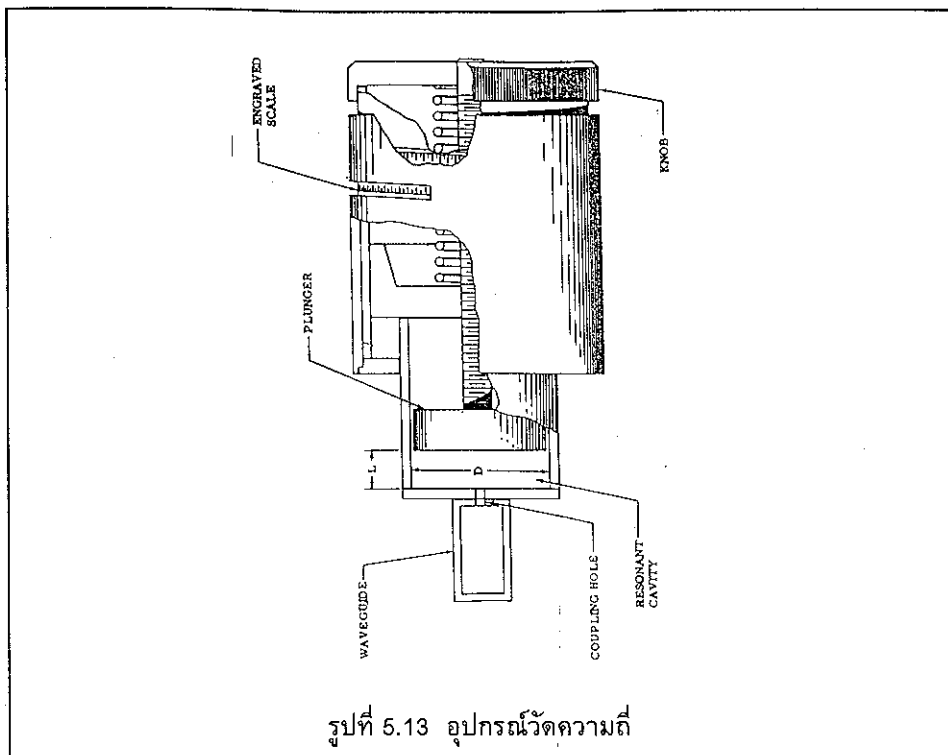
ตัวลดทอนปรับค่าได้จะมีลักษณะการทำงานเหมือนกับตัวดูดกลืนคลื่น กล่าวคือเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับลดทอนคลื่นไมโครเวฟด้วยการดูดกลืนพลังงานของคลื่นไมโครเวฟที่ผ่านไป ประกอบด้วย ท่อนำคลื่นที่มีร่องแคบๆ เป็นแนวยาวบริเวณตรงกลางด้านกว้างซึ่งจะมีสเกลสำหรับอ่านค่าดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่ได้ปรับเทียบแล้วกับตำแหน่งของแผ่นพลาสติกบางใสที่สอดร่องแคบๆ ที่กล่าวถึงข้างต้นที่ติดอยู่ แผ่นพลาสติกใสจะเคลื่อนที่เข้าสู่สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าในท่อนำคลื่นและดูดกลืนพลังงานของคลื่นไมโครเวฟที่ผ่านไป ค่าดูดกลืนขึ้นอยู่กับตำแหน่งของแผ่นพลาสติกใสที่มีคุณสมบัติของไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสีย(Lossy Dielectric) การเปลี่ยนตำแหน่งของแผ่นพลาสติกทำได้โดยการหมุนปุ่มปรับซึ่งยึดติดอยู่กับกลไกการอ่านค่าดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น อุปกรณ์ลดทอนไมโครเวฟมีทั้งแบบที่อ่านค่าลดทอนได้ละเอียด(Precision Flap Attenuator) และแบบที่อ่านค่าลดทอนได้อย่างหยาบ(Coarse Flap Attenuator)



รูปที่ 5.12 อุปกรณ์ลดทอนแบบปรับค่าได้

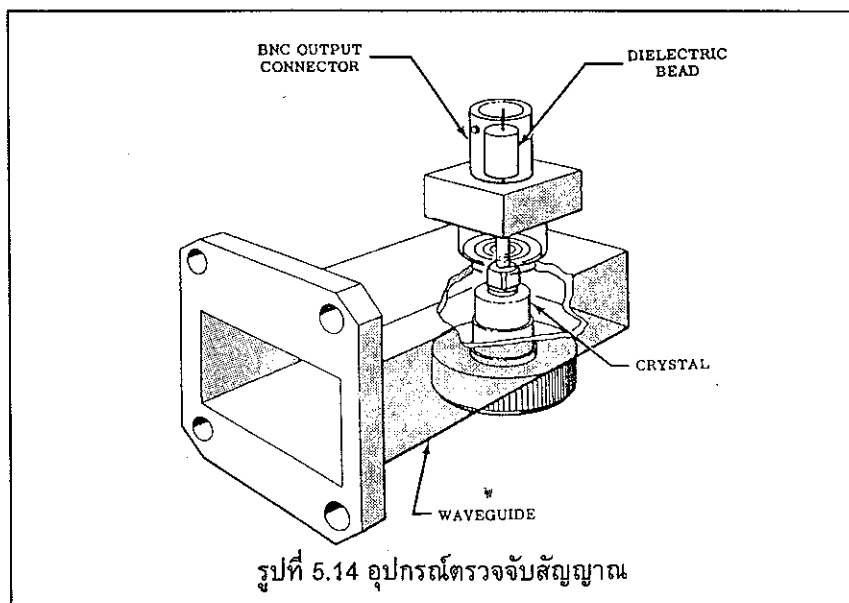
5.5 อุปกรณ์วัดความถี่(Direct Reading Frequency Meter)

ในการทดลองจำเป็นที่จะต้องรู้ค่าความถี่ของสัญญาณไมโครเวฟ อุปกรณ์วัดความถี่ไมโครเวฟประกอบด้วย ท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมเชื่อมติดกับควาวิตี้เรโซเนเตอร์(Cavity Resonator) แบบทรงกระบอก ท่อทรงกระบอกซึ่งภายในจะมีแผ่นตัวนำไฟฟ้าเคลื่อนที่ขึ้นลงในแนวดิ่ง ทำหน้าที่เป็นฝาบนของควาวิตี้เรโซเนเตอร์ สำหรับคลื่นไมโครเวฟที่ต้องการทราบความถี่จะถูกส่งผ่านท่อนำคลื่นที่ถูกเชื่อมต่อกับผนังด้านนอกของควาวิตี้เรโซเนเตอร์ ตรงบริเวณกึ่งกลางของรอยเชื่อมจะมีรูกลมขนาดเล็กพอประมาณสำหรับเหนี่ยวนำพลังงานบางส่วนของไมโครเวฟที่ถูกส่งผ่านในท่อนำคลื่นเข้าไปสู่ควาวิตี้เรโซเนเตอร์ ในกรณีที่ขนาดของควาวิตี้เรโซเนเตอร์มีขนาดพอเหมาะ(ด้วยการปรับตำแหน่งของแผ่นโลหะด้านบน) ควาวิตี้เรโซเนเตอร์จะเกิดการสั่นพ้องที่ความถี่ของไมโครเวฟด้วยโหมด(mode) TE_{111} ซึ่งเป็นโหมดโดมิแนนท์ของคลื่นในท่อทรงกระบอก ขณะที่โหมดของคลื่นในท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมเป็น TE_{10} การสั่นพ้องที่กล่าวถึงข้างต้นจะดูดกลืนพลังงานบางส่วนของไมโครเวฟที่ถูกส่งผ่านในท่อนำคลื่นทำให้คลื่นไมโครเวฟที่ทางออกของท่อนำคลื่นมีขนาดลดน้อยลง ซึ่งจะสังเกตได้จากการอ่านค่าของกำลังงานไมโครเวฟด้วยเครื่องวัดกำลังงาน(Power Meter) หรือการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของสัญญาณไฟฟ้าจากเครื่องอ่านสัญญาณไฟฟ้า(Oscilloscope) ค่าของความถี่สามารถอ่านได้จากสเกลที่ได้รับการปรับเทียบแล้วบนผิวทรงกระบอกที่มีแกนร่วมกับแกนของควาวิตี้เรโซเนเตอร์



5.6 ตัวตรวจจับสัญญาณ(Crystal Detector)

เป็นอุปกรณ์ตรวจจับ(detect) สัญญาณไมโครเวฟซึ่งประกอบด้วยท่อนำคลื่นและไดโอดความถี่สูง ดังรูปที่ 5.13 ไดโอดจะทำหน้าที่เป็นเรกติไฟเออร์(rectifier) ก่อให้เกิดกระแสตรงที่ผันแปรตามกำลังสองกับขนาดของศักดาไฟฟ้าไมโครเวฟ(square law detection) และเมื่อนำกระแสตรงดังกล่าวเข้าเครื่องวัดไฟฟ้า สามารถเปรียบเทียบกระแสดังกล่าวให้เป็นจำนวนที่ปรากฏบนสเกลของเครื่องวัด หรือจะอ่านค่าจากระดับความสูงของสัญญาณไฟฟ้าบนจอภาพของออสซิลโลสโคปก็ได้



5.7 ออสซิลโลสโคป(Oscilloscope)

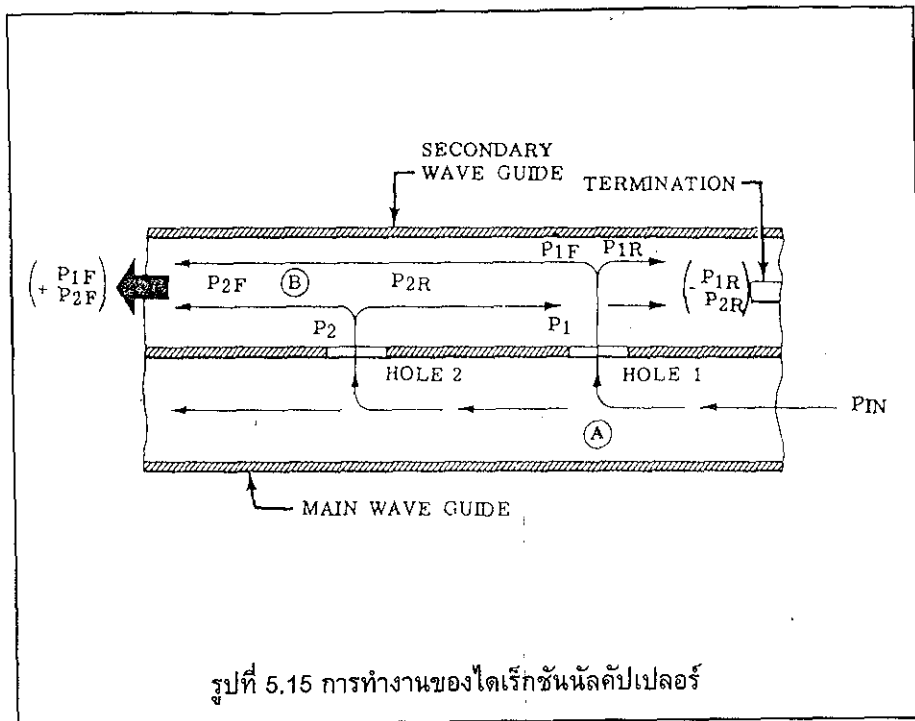
เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้อ่านสัญญาณไฟฟ้าทั่วไป เมื่อกระแสจากตัวตรวจจับไมโครเวฟผ่านเข้าสู่ทางเข้า(input) ของเครื่องอ่านสัญญาณไฟฟ้า จะปรากฏศักดาไฟฟ้าบนอิมพีแดนซ์ทางเข้า(input impedance) ซึ่งสัญญาณไฟฟ้านี้จะถูกขยายด้วยกำลังขยายสูง เพื่อให้สามารถอ่านเทียบค่าบนจอภาพได้สะดวก สัญญาณไฟฟ้าในกรณีของไมโครเวฟต่อเนื่องจะเป็นเส้นตรงในแนวราบบนจอภาพและสามารถปรับตำแหน่งขึ้นลงได้ด้วยการเปลี่ยนค่ากำลังขยาย จึงเหมาะสำหรับการวัดค่าการดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ

5.8 ไตเร็กชันนัลคัปเปิลเลอร์(Directional Coupler)

ไตเร็กชันนัลคัปเปิลเลอร์จัดเป็นอุปกรณ์ 4 พอร์ตที่ใช้วัดสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (Reflection Coefficient) ของไมโครเวฟแทนการใช้ slotted line ดังรูป 5.14 แสดงโครงสร้างของไตเร็กชันนัลคัปเปิลเลอร์ ซึ่งประกอบด้วยท่อนำคลื่น 2 ท่อประกบเข้าด้วยกัน ท่อนำคลื่นที่มีทางเข้าและทางออกของไมโครเวฟเรียกว่าท่อนำคลื่นหลัก A ส่วนท่อที่สองซึ่งมีทางออกทางเดียวเรียกท่อนำคลื่นรอง B (Auxiliary หรือ Secondary Waveguide) ด้านที่ประกบเข้าด้วยกันของท่อนำคลื่นทั้งสองจะมีรูเล็ก ๆ สองรูห่างกัน $\lambda_g/4$ สมมติให้ P_{IN} เป็นกำลังงานของคลื่นไมโครเวฟที่เข้าสู่ท่อนำคลื่นหลักจากทางขวา กำลังงานส่วนหนึ่งของ P_{IN} จะซึม(Leak) ผ่านรูที่ 1 เข้าสู่ท่อนำคลื่นที่ 2 และแยกออกเป็นไมโครเวฟ P_{IF} และ P_{IR} ซึ่งมีขนาดเท่ากันโดยที่ P_{IF} จะเคลื่อนที่ผ่านไปทางซ้ายในขณะที่ P_{IR} จะเคลื่อนที่ผ่านไปทางขวา P_{IN} ส่วนใหญ่ผ่านรูที่ 1 ไปยังรูที่ 2 ซึ่งจะมีกำลังงานไมโครเวฟบางส่วนซึมผ่านรูที่ 2 และแยกออกเป็นสองทางเช่นเดียวกันคือ P_{2F} และ P_{2R} ซึ่งมีขนาดเท่ากันเช่นเดียวกันกับ P_{IF} และ P_{IR}

P_{IF} และ P_{2R} เคลื่อนที่ด้วยระยะทางเท่ากันจึงมีมุมเฟส(Phase Angle) เท่ากันทุกจุด ดังนั้นจึงทำให้กำลังงานของไมโครเวฟที่เคลื่อนที่ไปทางซ้ายมีค่าเท่ากับ $2P_{IF}$ หรือ $2P_{2F}$

P_{2R} เป็นกำลังงานของไมโครเวฟที่เคลื่อนที่ไปทางขวาหลังจากซึมผ่านรูที่ 2 กลับมายังรูที่ 1 จึงมีระยะทางที่เคลื่อนผ่านในช่วงนั้นเท่ากับ $2(\lambda_g/4) = \lambda_g/2$ หรืออีกนัยหนึ่งก็คือ ค่าของมุมเฟสของไมโครเวฟเปลี่ยนไปเท่ากับ π เรเดียน จึงเกิดการหักล้างกับ P_{IR} ทำให้กำลังงานของไมโครเวฟรวมที่เคลื่อนที่ไปทางขวาในท่อนำคลื่นรองมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งหมายความว่าไมโครเวฟในท่อนำคลื่นรองมีทิศทางการเคลื่อนที่ไปทางเดียวกับไมโครเวฟในท่อนำคลื่นหลัก และไม่มีไมโครเวฟเคลื่อนผ่านในทิศทางตรงกันข้าม



บทที่ 6

การทดลอง และผลการทดลอง

6.1 อุปกรณ์การทดลอง

	รุ่น	จำนวน
1. Klystron Power Supply	715A	1
2. Flap Attenuator	X382A	1
3. Attenuator	X375A	1
4. Frequency Meter	532B	1
5. Crystal Detector	424A	1
6. Directional Coupler	752D	1
7. Oscilloscope		1
8. Ferrite Isolator	MA-159	1

6.2 ขั้นตอนการทดลอง

6.2.1 วัดค่าการดูดกลืนของคลื่น(ตอนที่ 1)

1. ประกอบระบบไมโครเวฟดังรูป 6.1
2. เปิดเครื่องจ่ายไฟของหลอดไครสตรอน (Klystron power supply รุ่น 715A Hewlett-Packard) ทิ้งไว้ประมาณ 30 นาทีก่อนทำการทดลอง เพื่อให้ความถี่ที่ใช้ในการทำงานคงที่ โดยสังเกตจากออสซิลโลสโคป
3. ทำการตรวจสอบว่าระบบไมโครเวฟพร้อมที่จะใช้ในการทดลองหรือไม่ โดยปรับตัววัดความถี่(Frequency Meter รุ่น X532B Hewlett-Packard) เพื่อหาความถี่ที่ระบบทำงานโดยถ้าระบบยังไม่พร้อมที่จะใช้งานค่าความถี่จะเปลี่ยนไปเรื่อยๆ ไม่คงที่ เมื่อความถี่คงที่แล้ว วัดความถี่ได้ 10.08 GHz
4. ปรับค่าตัวลดทอนคลื่นปรับค่าได้ตัวที่ 1 (Variable attenuator no.1) ไว้ที่ 45 dB และตัวลดทอนคลื่นปรับค่าได้ตัวที่ 2(Variable attenuator no.2) ไว้ที่ 15 dB เพื่อป้องกันการเสียหายที่จะเกิดจากกำลังของคลื่นที่สูงเกินไป กับตัววัดกำลังของคลื่น (Detector รุ่น X421A Hewlett-Packard)
5. ปรับปุ่ม REFL. RANGE บนเครื่องจ่ายไฟให้ไปอยู่ที่ช่วง 600-900 แล้วปรับปุ่ม REFL. VOLTS ให้ไปอยู่ที่ 700 V.

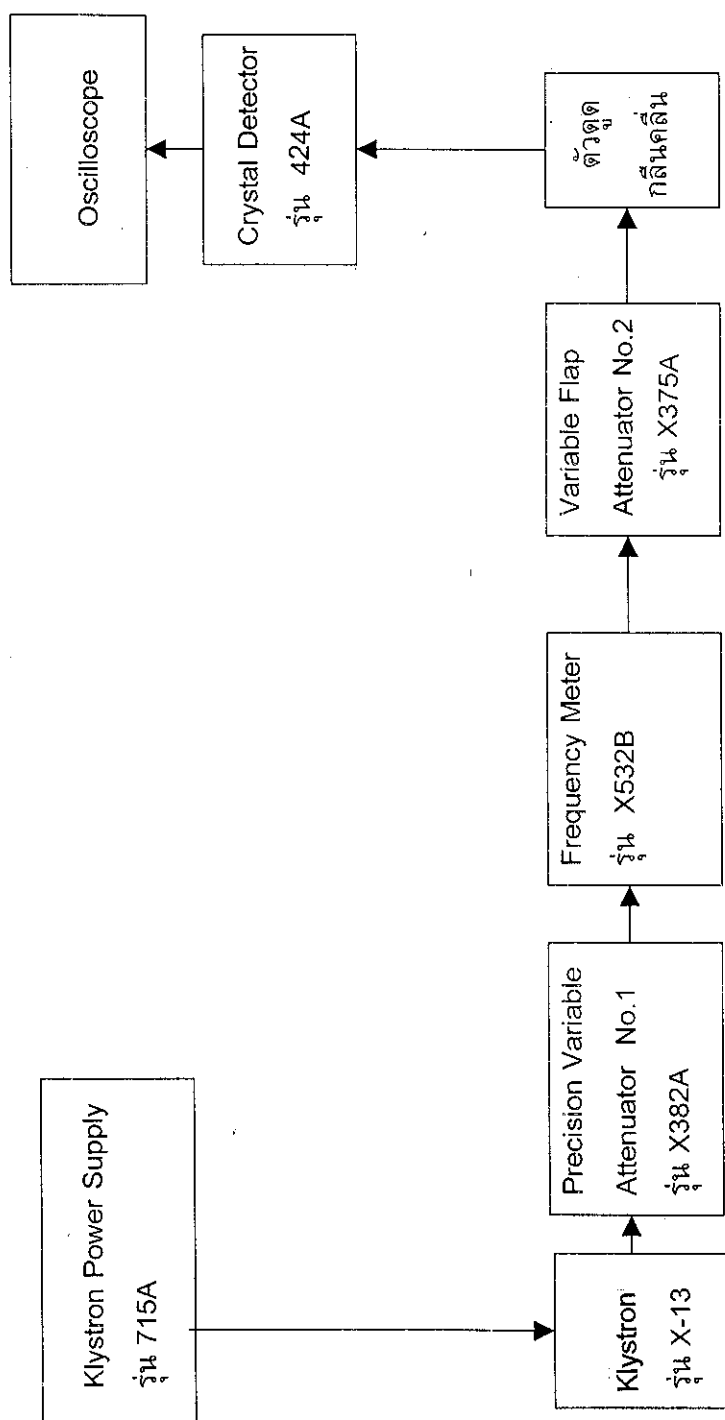
6. ปรับปุ่ม MODULATION ไปที่ CW เพื่อให้ตัวดูดกลืนคลื่นที่ทำการทดลองทำการดูดกลืนคลื่นที่มีความต่อเนื่อง(Continuous Wave) แล้วปรับปุ่ม BEAM VOLTS ไปที่ 300 V บันทึกค่าที่จะเป็นมาตรฐานของกำลังของคลื่นที่ผ่านไปยังด้านรับของตัวตรวจจับกำลังคลื่น(detector) เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับกำลังของคลื่นที่วัดได้ หลังจากที่ได้ใส่ตัวดูดกลืนคลื่นเข้าไป โดยใช้ฮอสซิลโลสโคป
7. เอาชิ้นงานที่ได้ทำขึ้นใส่เข้าไปในด้านปลายของตัวท่อนำคลื่นที่สัมผัสกับตัววัดกำลังของคลื่น(detector)
8. ทำการวัดค่าการดูดกลืนคลื่น โดยดูจากฮอสซิลโลสโคปเปรียบเทียบกับค่าที่ใช้เป็นมาตรฐาน หลังจากนั้นทำการลดค่า การลดทอนของตัวลดทอนปรับค่าได้เบอร์ 1 (attenuator no.1) ลงจาก 45 dB จนค่าที่สังเกตได้จากตัวฮอสซิลโลสโคปมีค่าเท่ากับค่ามาตรฐาน แล้วบันทึกค่าจำนวน dB ลงในตารางแสดงผลการทดลอง
9. หยุดการจ่ายไฟชั่วคราว ขณะทำการถอดเอาชิ้นงานออก
10. ถอดเอาชิ้นงานออกแล้วตั้งค่าของตัวลดทอนเบอร์ 1(attenuator no. 1) ให้กลับไปอยู่ที่ตำแหน่งเดิม(45 dB)
11. เอาชิ้นงานชิ้นใหม่ใส่เข้าไป แล้วประกอบเข้าในระบบไมโครเวฟ
12. เริ่มจ่ายไฟอีกครั้งหนึ่ง
13. ทำการทดลองจากข้อ 8-12 จนครบทั้งหมดทุกชิ้นงาน

6.2.2 การวัดค่าสัมประสิทธิ์ของการสะท้อน(ทำการวัดเฉพาะตัวดูดกลืนที่มีค่าการดูดกลืนสูงที่สุด 2 ตัวที่ได้จากการทดลองข้างต้นซึ่งก็คือ ตัวดูดกลืนชนิด Tapered H-plane ที่ใช้ผงเซมาต้าชนิด N330 และ N550 เข้มข้น 15%)

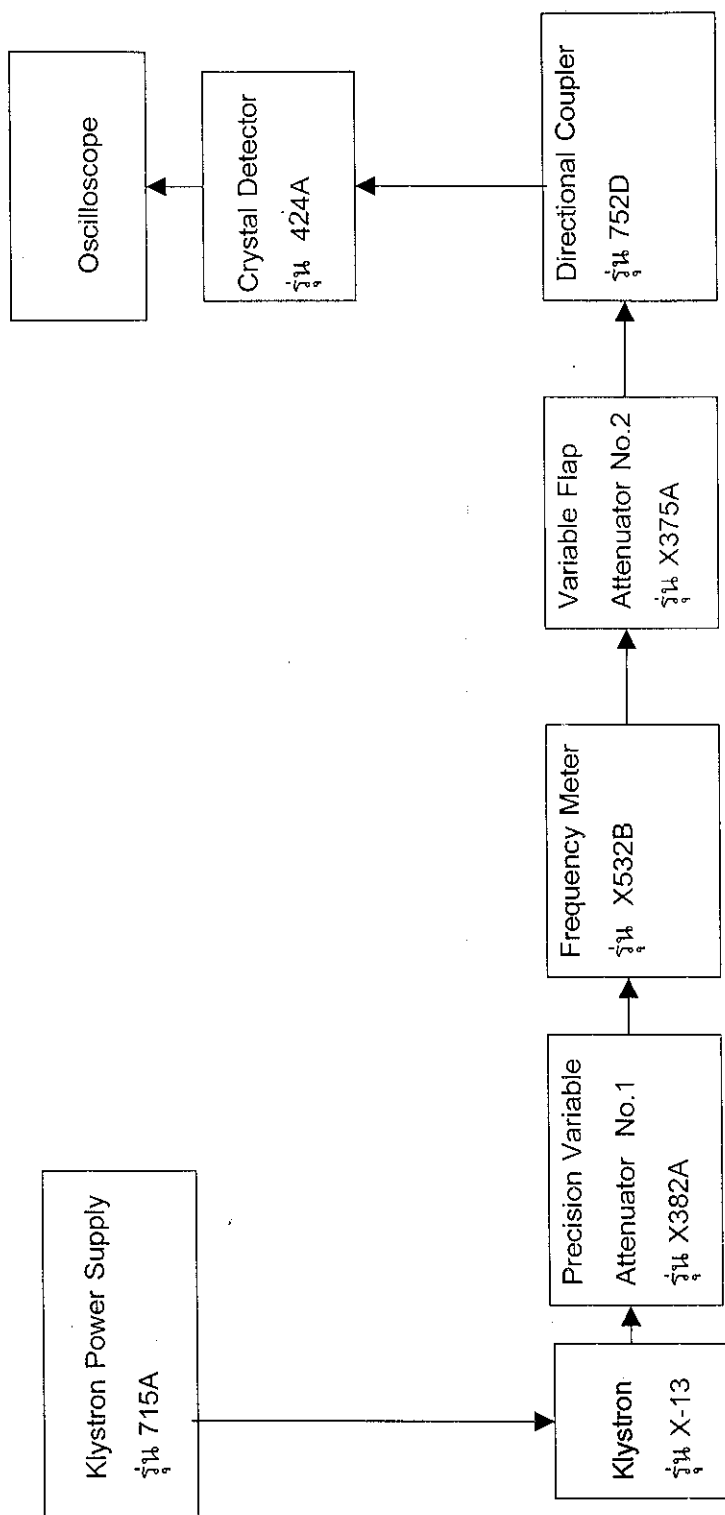
14. ทำการต่ออุปกรณ์ดังรูปที่ 6.2
15. นำเอาแผ่นทองเหลืองที่มีขนาด 4.1 ซม.× 4.1 ซม.มาปิดไว้ที่ปลายของไดเร็กชันนัลคัปเปิลเลอร์เพื่อให้คลื่นทั้งหมดสะท้อนกลับมา แล้วออกที่ท่อนำคลื่นรองของไดเร็กชันนัลคัปเปิลเลอร์
16. อ่านค่าระดับแรงดันที่ได้แล้วบันทึกไว้ โดยค่าที่วัดได้นี้จะเป็นค่าของคลื่นทั้งหมดที่ส่งมาจากแหล่งกำเนิดคลื่น(หลอดไครสตรอน)
17. ถอดแผ่นทองเหลืองออก แล้วนำเอาตัวดูดกลืนคลื่นที่ได้จากการทดลองที่ 6.2.1 คือ ตัวดูดกลืนชนิด Tapered H-plane ที่ทำการผสมเซมาต้าเข้มข้น 15% โดยใช้เซมาต้าชนิด N330 มาใส่เข้าไปทางด้านปลายของไดเร็กชันนัล

คัปเปิลอร์ แล้วต่อตัวเทอร์มิเนชันที่ปลายของไดเรกชันนัลคัปเปิลอร์เพื่อให้คลื่นที่วัดได้ในขั้นนี้เป็นผลของคลื่นสะท้อนที่เกิดตัวดูดกลืนคลื่นเพียงอย่างเดียวเท่านั้น

18. ทำการอ่านระดับแรงดันที่ปรากฏบนออสซิลโลสโคปแล้วบันทึกผล โดยค่าที่บันทึกนี้จะแสดงระดับของคลื่นสะท้อนที่เกิดจากตัวดูดกลืนคลื่น
19. ถอดตัวดูดกลืนคลื่นออก
20. ทำการทดลองซ้ำ 14-16
21. เปลี่ยนตัวดูดกลืนคลื่นเป็นชนิด Tapered H-plane ที่ทำการผสมผงเขม่าดำชนิด N550 เข้มข้น 15%
22. ทำการทดลองซ้ำ 18-19



รูปที่ 6.1 แผนภาพบล็อกแสดงระบบไมโครเวฟที่ใช้ในการทดสอบหาค่าการดูดกลืนคลื่น



รูปที่ 6.2 แผนภาพบล็อกแสดงระบบไมโครเวฟที่ใช้ในการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน

6.3 ผลการทดลอง

ตอนที่ 1

กำลังของคลื่นที่ถูกดูดกลืน(dB)																			
ความยาว ของตัว ดูดกลืนคลื่น (l)		Tapered E-plane						Tapered H-plane						Tapered E-plane และ Tapered H-plane					
		ผลสมด้วยเขม่าดำ เบอร์ N330			ผลสมด้วยเขม่าดำ เบอร์ N550			ผลสมด้วยเขม่าดำ เบอร์ N330			ผลสมด้วยเขม่าดำ เบอร์ N550			ผลสมด้วยเขม่าดำ เบอร์ N330			ผลสมด้วยเขม่าดำ เบอร์ N550		
		5%	10%	15%	5%	10%	15%	5%	10%	15%	5%	10%	15%	5%	10%	15%	5%	10%	15%
$1\lambda_g$	4.88	9	15	4.92	20.16	25.8	5.6	20.54	20.74	7.5	23.38	27.08	3.7	5.26	10.3	4.55	13.17	19	15
$2\lambda_g$	6.75	18.1	33.43	7.7	30.96	37.4	16.3	25.78	36.7	18.5	35.62	40.71	6	15.32	19	6.48	28.33	30.74	30.74
$3\lambda_g$	7.25	22.29	35.51	8.32	36.18	40.14	19.32	30.36	42.56	22.63	39.41	45.24	7	19.11	25.86	6.94	30.7	33.26	33.26

ตารางที่ 6.1 แสดงผลการทดลองของการวัดการดูดกลืนคลื่น

ตอนที่ 2 ผลการทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน

- ตัวดูดกลืนชนิด Tapered H-plane ที่ผสมเขม่าดำชนิด N330 เข้มข้น 15%

1. ในขั้นตอนการทดลองที่ 16 ทำการวัดระดับแรงดันของคลื่นที่สะท้อนจากแผ่นทองเหลือง โดยคลื่นสะท้อนจะออกมาที่ท่อรอง(Secondary Waveguide) ของไดเรกชันแนลคัปเปอเรอร์ วัดค่าได้

$$V_1' = 60 \text{ mV.}$$

โดยค่า V_1' ที่วัดได้นี้คือค่าของแรงดันของคลื่นทั้งหมดที่ส่งมาจากแหล่งกำเนิด(เนื่องจากไม่ได้ใส่ตัวดูดกลืนคลื่นไว้ภายในท่อนำคลื่น จึงไม่เกิดการดูดกลืนคลื่นในขณะที่คลื่นเคลื่อนที่ และจากการใช้แผ่นทองเหลืองซึ่งเป็นวัสดุที่นำไฟฟ้าปิดไว้ที่ปลายของไดเรกชันแนลคัปเปอเรอร์ ทำให้คลื่นทั้งหมดที่เคลื่อนที่มาจากท่อนำคลื่นหลัก(Primary Waveguide) เมื่อตกกระทบที่แผ่นทองเหลืองแล้วจะสะท้อนกลับเข้าท่อนำคลื่นรองของไดเรกชันแนลคัปเปอเรอร์

2. ในขั้นตอนการทดลองที่ 18 ทำการวัดระดับแรงดันของคลื่นที่สะท้อนจากตัวดูดกลืนคลื่น วัดค่าได้

$$V_2' = 1.5 \text{ mV.}$$

โดยค่า V_2' ที่ได้นี้เป็นค่าของแรงดันที่สะท้อนจากตัวดูดกลืนคลื่นเพียงอย่างเดียวเท่านั้น

3. การหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น: ρ

$$\begin{aligned} \rho &= \text{คลื่นสะท้อน/คลื่นตกกระทบ} \\ &= V_2' / V_1' \\ &= 1.5 \text{ mV.} / 60 \text{ mV.} \\ &= .025 \\ &= 20 \log (.025) \\ &= -32.04 \text{ dB} \end{aligned}$$

- ตัวดูดกลืนชนิด Tapered H-plane ที่ผสมเขม่าดำชนิด N550 เข้มข้น 15%

4. ทำการวัดระดับแรงดันของคลื่นที่สะท้อนจากแผ่นทองเหลือง โดยคลื่นสะท้อนจะออกมาที่ท่อรอง(Secondary Waveguide) ของไคเร็กซ์นัลคัปเปิลอร์ วัดค่าได้

$$V_1' = 60 \text{ mV.}$$

โดยค่า V_1' ที่วัดได้นี้คือค่าของแรงดันของคลื่นทั้งหมดที่ส่งมาจากแหล่งกำเนิด(เนื่องจากไม่ได้ใส่ตัวดูดกลืนคลื่นไว้ในท่อนำคลื่น จึงไม่เกิดการดูดกลืนคลื่นในขณะที่คลื่นเคลื่อนที่ และจากการใช้แผ่นทองเหลืองซึ่งเป็นวัสดุที่นำไฟฟ้าปิดไว้ที่ปลายของไคเร็กซ์นัลคัปเปิลอร์ ทำให้คลื่นทั้งหมดที่เคลื่อนที่มาจากท่อนำคลื่นหลัก(Primary Waveguide) เมื่อตกกระทบที่แผ่นทองเหลืองแล้วจะสะท้อนกลับเข้าท่อนำคลื่นรองของไคเร็กซ์นัลคัปเปิลอร์

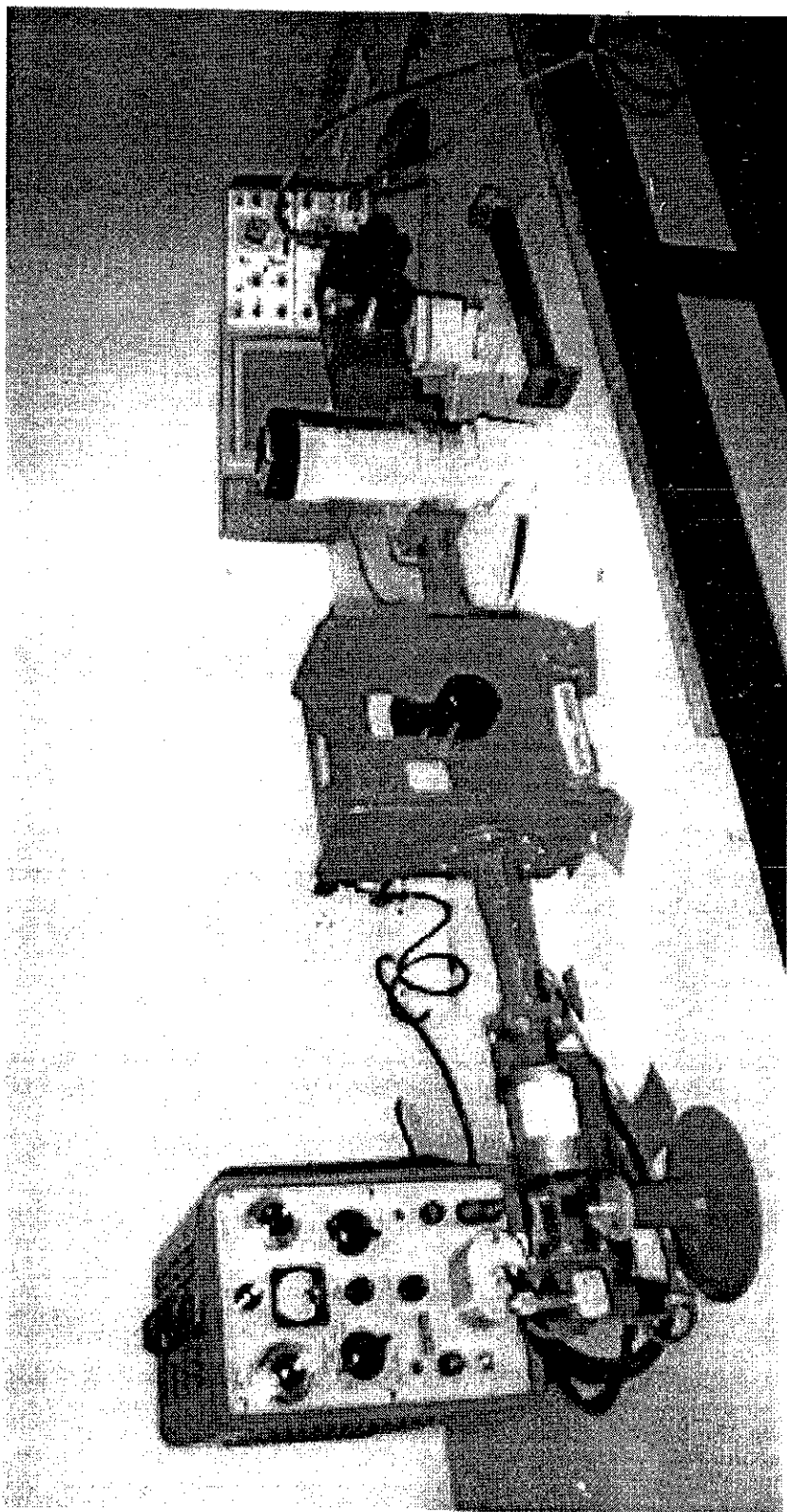
5. ทำการวัดระดับแรงดันของคลื่นที่สะท้อนจากตัวดูดกลืนคลื่น วัดค่าได้

$$V_2' = 2.2 \text{ mV.}$$

โดยค่า V_2' ที่ได้นี้เป็นค่าของแรงดันที่สะท้อนจากตัวดูดกลืนคลื่นเพียงอย่างเดียวเท่านั้น

6. การหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น: ρ

$$\begin{aligned} \rho &= \text{คลื่นสะท้อน/คลื่นตกกระทบ} \\ &= V_2' / V_1' \\ &= 2.2 \text{ mV.} / 60 \text{ mV.} \\ &= .037 \\ &= 20 \log (.037) \\ &= -28.71 \text{ dB} \end{aligned}$$



รูปที่ 6.3 แสดงระบบไม่เชิงเส้นที่ใช้ในการทดลอง

6.4 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

จากรูปที่ 6.4 ถึง 6.9 สามารถสรุปได้ว่าความเข้มข้นของผงเขม่าดำ(Carbon Black) ที่ผสมลงในตัวดูดกลืนคลื่นมีผลกระทบต่ออัตราการดูดกลืนกำลังของคลื่น โดยถ้าเพิ่มความเข้มข้นของผงเขม่าดำจาก 5% 10% และ 15% จะพบว่าที่ กราฟที่ 5% จะมีอัตราการดูดกลืนต่ำที่สุด และสูงขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเป็น 10% และ 15% ตามลำดับ โดย

รูปที่ 6.4 เป็นการแสดงความสามารถในการดูดกลืนคลื่นของตัวดูดกลืนคลื่นชนิด Tapered E-plane ในแกน y และความยาวของตัวดูดกลืนคลื่น(วัดเทียบกับความยาวคลื่นในท่อนำคลื่น) ในแกน x โดยใช้ผงเขม่าดำชนิด N330 ที่มีขนาด $260 \text{ \AA} - 300 \text{ \AA}$

รูปที่ 6.5 เป็นการแสดงความสามารถในการดูดกลืนคลื่นของตัวดูดกลืนคลื่นชนิด Tapered H-plane ในแกน y และความยาวของตัวดูดกลืนคลื่น(วัดเทียบกับความยาวคลื่นในท่อนำคลื่น) ในแกน x โดยใช้ผงเขม่าดำชนิด N330 ที่มีขนาด $260 \text{ \AA} - 300 \text{ \AA}$

รูปที่ 6.6 เป็นการแสดงความสามารถในการดูดกลืนคลื่นของตัวดูดกลืนคลื่นชนิด Tapered E-plane และ H-plane ในแกน y และความยาวของตัวดูดกลืนคลื่น(วัดเทียบกับความยาวคลื่นในท่อนำคลื่น) ในแกน x โดยใช้ผงเขม่าดำชนิด N330 ที่มีขนาด $260 \text{ \AA} - 300 \text{ \AA}$

รูปที่ 6.7 เป็นการแสดงความสามารถในการดูดกลืนคลื่นของตัวดูดกลืนคลื่นชนิด Tapered E-plane ในแกน y และความยาวของตัวดูดกลืนคลื่น(วัดเทียบกับความยาวคลื่นในท่อนำคลื่น) ในแกน x โดยใช้ผงเขม่าดำชนิด N550 ที่มีขนาด $400 \text{ \AA} - 480 \text{ \AA}$

รูปที่ 6.8 เป็นการแสดงความสามารถในการดูดกลืนคลื่นของตัวดูดกลืนคลื่นชนิด Tapered H-plane ในแกน y และความยาวของตัวดูดกลืนคลื่น(วัดเทียบกับความยาวคลื่นในท่อนำคลื่น) ในแกน x โดยใช้ผงเขม่าดำชนิด N550 ที่มีขนาด $400 \text{ \AA} - 480 \text{ \AA}$

รูปที่ 6.9 เป็นการแสดงความสามารถในการดูดกลืนคลื่นของตัวดูดกลืนคลื่นชนิด Tapered E-plane และ H-plane ในแกน y และความยาวของตัวดูดกลืนคลื่น(วัดเทียบกับความยาวคลื่นในท่อนำคลื่น) ในแกน x โดยใช้ผงเขม่าดำชนิด N550 ที่มีขนาด $400 \text{ \AA} - 480 \text{ \AA}$

และจากกราฟทั้งหมด เรายังสามารถสรุปได้อีกว่าสำหรับตัวดูดกลืนคลื่นที่ยาวกว่าสามารถดูดกลืนคลื่นได้ดีกว่าซึ่งนั่นเป็นเพราะว่าปริมาตรของตัวดูดกลืนมีมากกว่านั่นเอง แต่ในทางปฏิบัติควรเลือกที่จะสร้างตัวดูดกลืนคลื่นที่มีความยาวเพียง $2\lambda_g$ เพราะจากกราฟแสดงผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ที่ความยาว $2\lambda_g$ อัตราการดูดกลืนคลื่นของตัวดูดกลืนคลื่นเริ่มเข้าสู่ช่วงที่มีค่าคงที่(saturated region)

จากรูปที่ 6.10 ถึง 6.15 สามารถสรุปได้ว่ารูปแบบของตัวดูดกลืนคลื่นที่ดีที่สุดทั้งสามรูปแบบที่ได้ทำการออกแบบและทดลองนั้น ตัวดูดกลืนชนิดที่เป็น H-plane จะมีประสิทธิภาพดีที่สุด รองลงมาคือตัวดูดกลืนชนิด E-plane และชนิด E-plane และ H-plane ตามลำดับ นั้นเป็นเพราะว่ากำลังของคลื่นที่กระจายอยู่ในท่อนำคลื่นจะอยู่ในรูปของการกระจายตัวของสนามไฟฟ้า (Electric Field) ซึ่งเราได้ทำการพิสูจน์แล้วในบทที่ 2 ว่าการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าในท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมมีลักษณะเป็นรูป sin ดังนั้นผลการทดลองที่ออกมาพบว่าสอดคล้องกับทฤษฎี เพราะรูปแบบของตัวดูดกลืนคลื่นชนิด Tapered H-plane นั้นมีปริมาตรในบริเวณตรงกลางสูงสุด($a/2$) ซึ่งก็เป็นเหมือนกับที่สนามไฟฟ้ามีความหนาแน่นสูงสุดจึงทำให้เกิดการดูดกลืนกำลังของคลื่นได้ดีที่สุด โดย

รูปที่ 6.10 เป็นการแสดงความสามารถในการดูดกลืนคลื่นของตัวดูดกลืนคลื่นที่ผสมผงเขม่าดำชนิด N330 ที่มีขนาด $260 \text{ \AA} - 300 \text{ \AA}$ มีความเข้มข้น 5% โดยน้ำหนักในแกน y และความยาวของตัวดูดกลืนคลื่น(วัดเทียบกับความยาวคลื่นในท่อนำคลื่น) ในแกน x

รูปที่ 6.11 เป็นการแสดงความสามารถในการดูดกลืนคลื่นของตัวดูดกลืนคลื่นที่ผสมผงเขม่าดำชนิด N330 ที่มีขนาด $260 \text{ \AA} - 300 \text{ \AA}$ มีความเข้มข้น 10% โดยน้ำหนักในแกน y และความยาวของตัวดูดกลืนคลื่น(วัดเทียบกับความยาวคลื่นในท่อนำคลื่น) ในแกน x

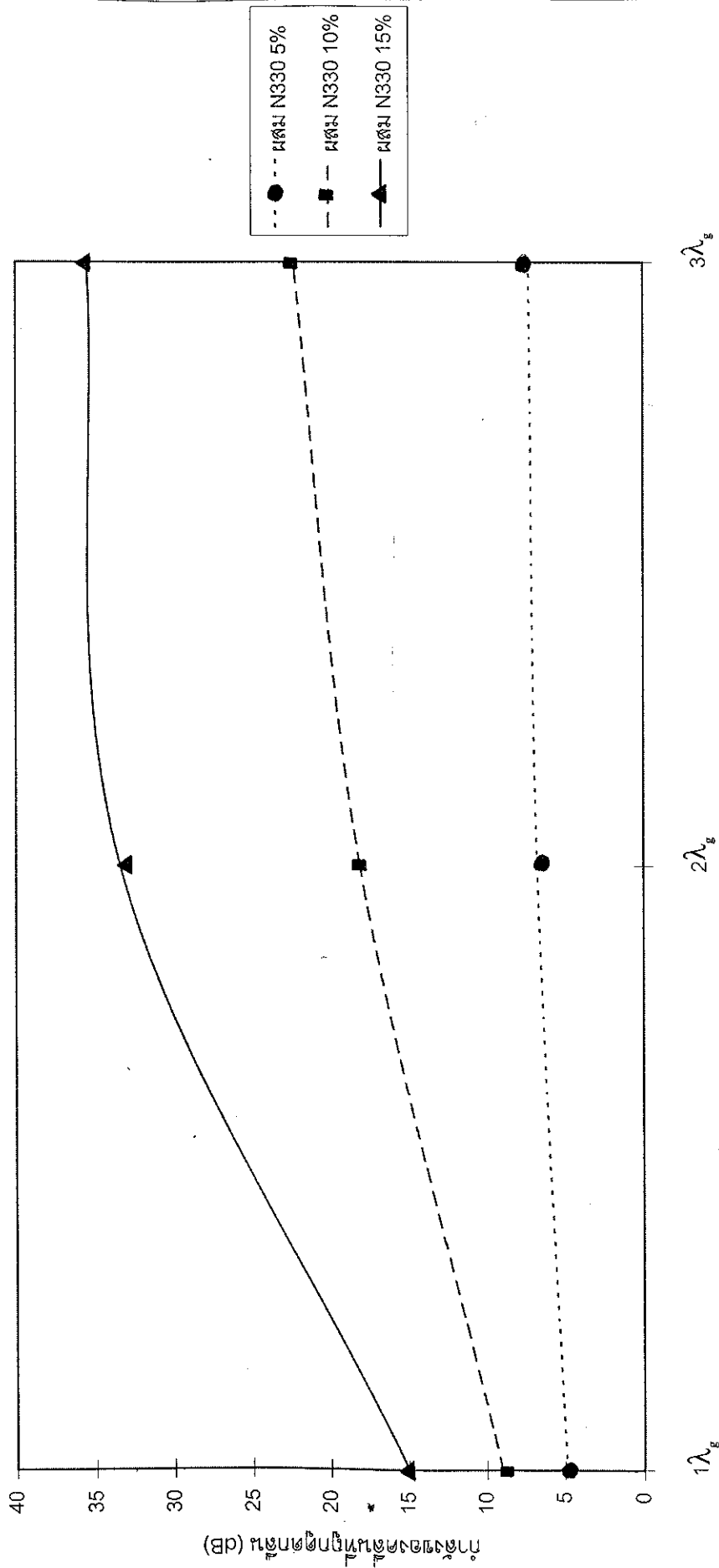
รูปที่ 6.12 เป็นการแสดงความสามารถในการดูดกลืนคลื่นของตัวดูดกลืนคลื่นที่ผสมผงเขม่าดำชนิด N330 ที่มีขนาด $260 \text{ \AA} - 300 \text{ \AA}$ มีความเข้มข้น 15% โดยน้ำหนักในแกน y และความยาวของตัวดูดกลืนคลื่น(วัดเทียบกับความยาวคลื่นในท่อนำคลื่น) ในแกน x

รูปที่ 6.13 เป็นการแสดงความสามารถในการดูดกลืนคลื่นของตัวดูดกลืนคลื่นที่ผสมผงเขม่าดำชนิด N550 ที่มีขนาด $400 \text{ \AA} - 480 \text{ \AA}$ มีความเข้มข้น 5% โดยน้ำหนักในแกน y และความยาวของตัวดูดกลืนคลื่น(วัดเทียบกับความยาวคลื่นในท่อนำคลื่น) ในแกน x

รูปที่ 6.14 เป็นการแสดงความสามารถในการดูดกลืนคลื่นของตัวดูดกลืนคลื่นที่ผสมผงเขม่าดำชนิด N550 ที่มีขนาด $400 \text{ \AA} - 480 \text{ \AA}$ มีความเข้มข้น 10% โดยน้ำหนักในแกน y และความยาวของตัวดูดกลืนคลื่น(วัดเทียบกับความยาวคลื่นในท่อนำคลื่น) ในแกน x

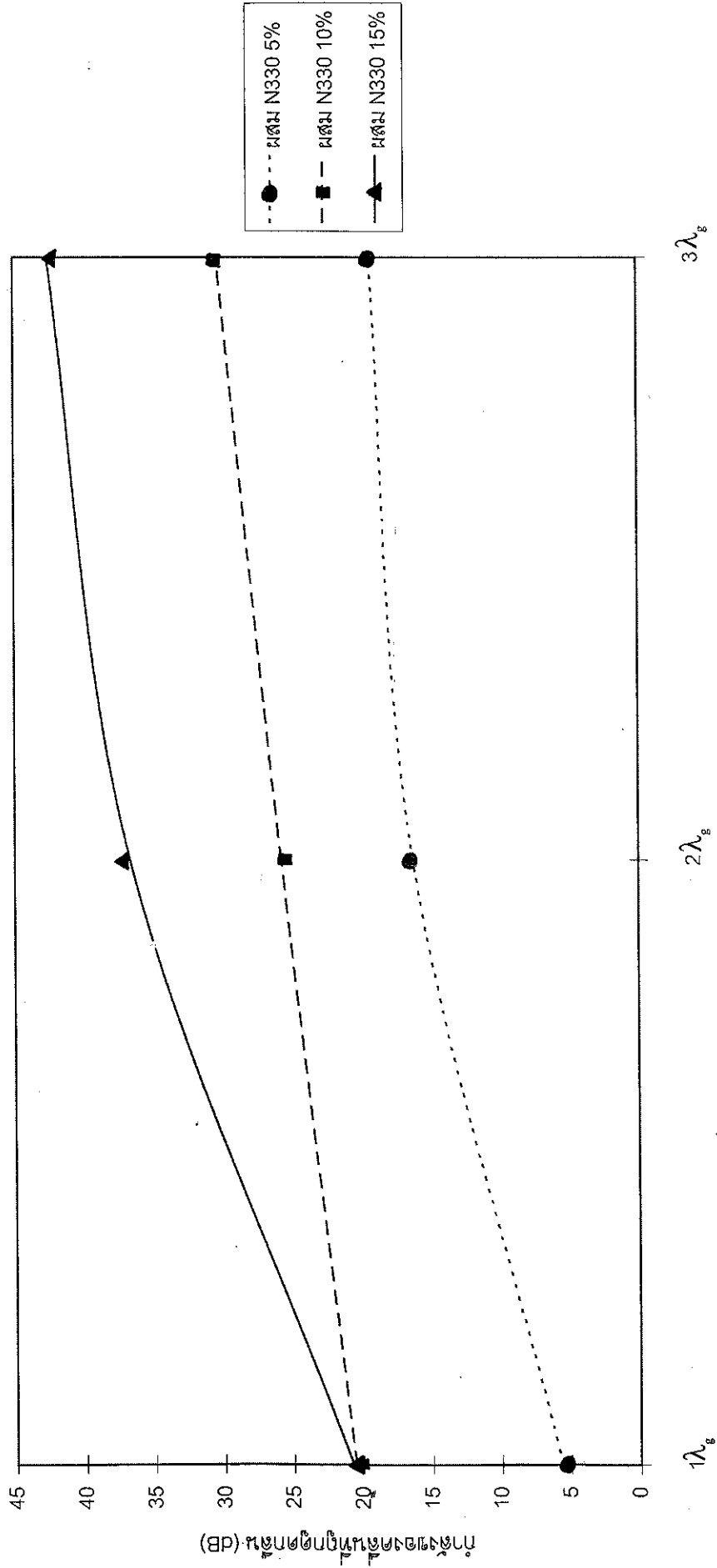
รูปที่ 6.15 เป็นการแสดงความสามารถในการดูดกลืนคลื่นของตัวดูดกลืนคลื่นที่ผสมผงเขม่าดำชนิด N550 ที่มีขนาด $400 \text{ \AA} - 480 \text{ \AA}$ มีความเข้มข้น 15% โดยน้ำหนักในแกน y และความยาวของตัวดูดกลืนคลื่น(วัดเทียบกับความยาวคลื่นในท่อนำคลื่น) ในแกน x

รูปที่ 6.4 แสดงความสามารถในการดูดกลืนกำลังคลื่นโดยใช้ตัวดูดกลืนชนิด Tapered E-plane



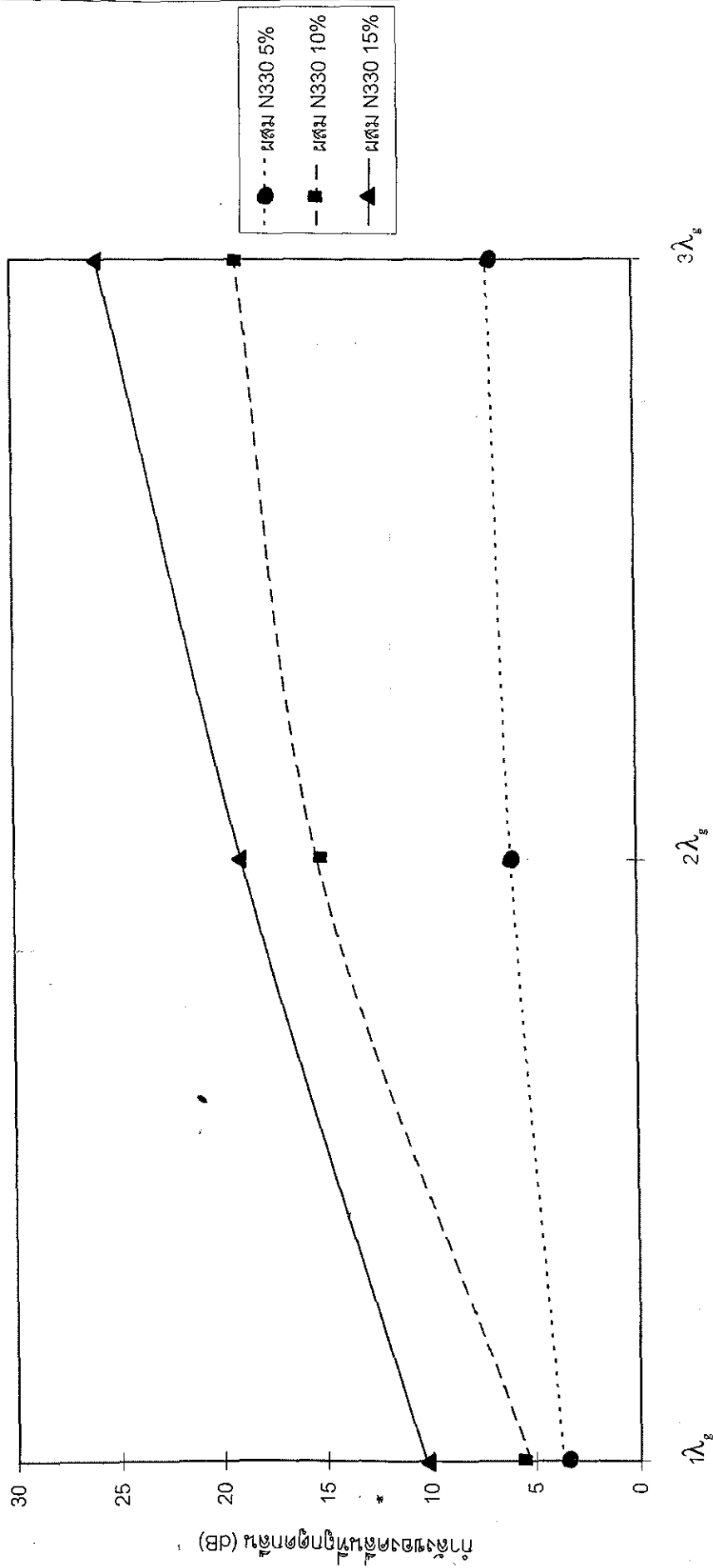
ความยาวของตัวดูดกลืนคลื่น (l) เมตร

รูปที่ 6.5 แสดงความสามารถในการดูดกลืนกำลังคลื่นโดยใช้ตัวดูดกลืนชนิด Tapered H-plane



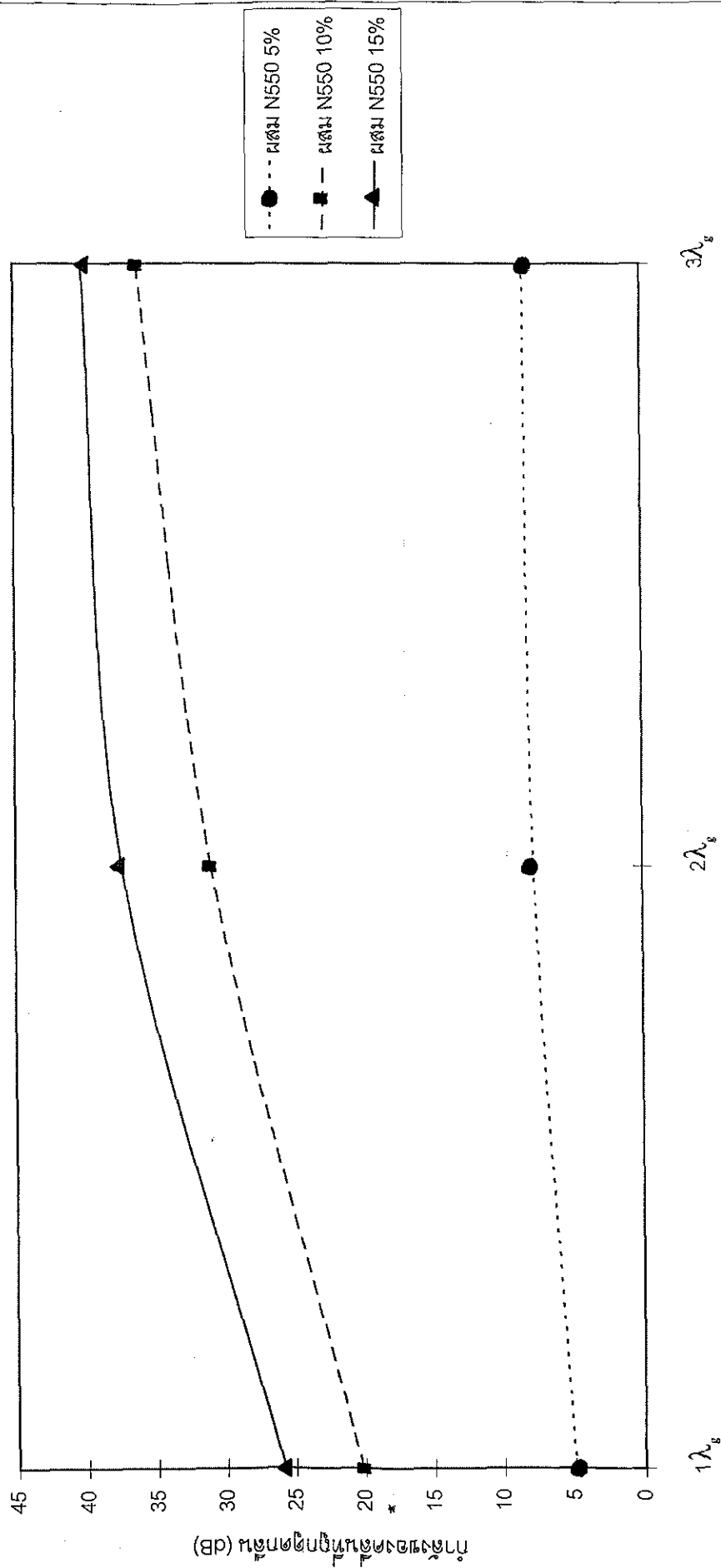
ความยาวของตัวดูดกลืนคลื่น(λ) เมตร

รูปที่ 6.6 แสดงความสามารถในการดูดกลืนกำลังคลื่นโดยใช้ตัวดูดกลืนชนิด Tapered E-plane และ H-plane



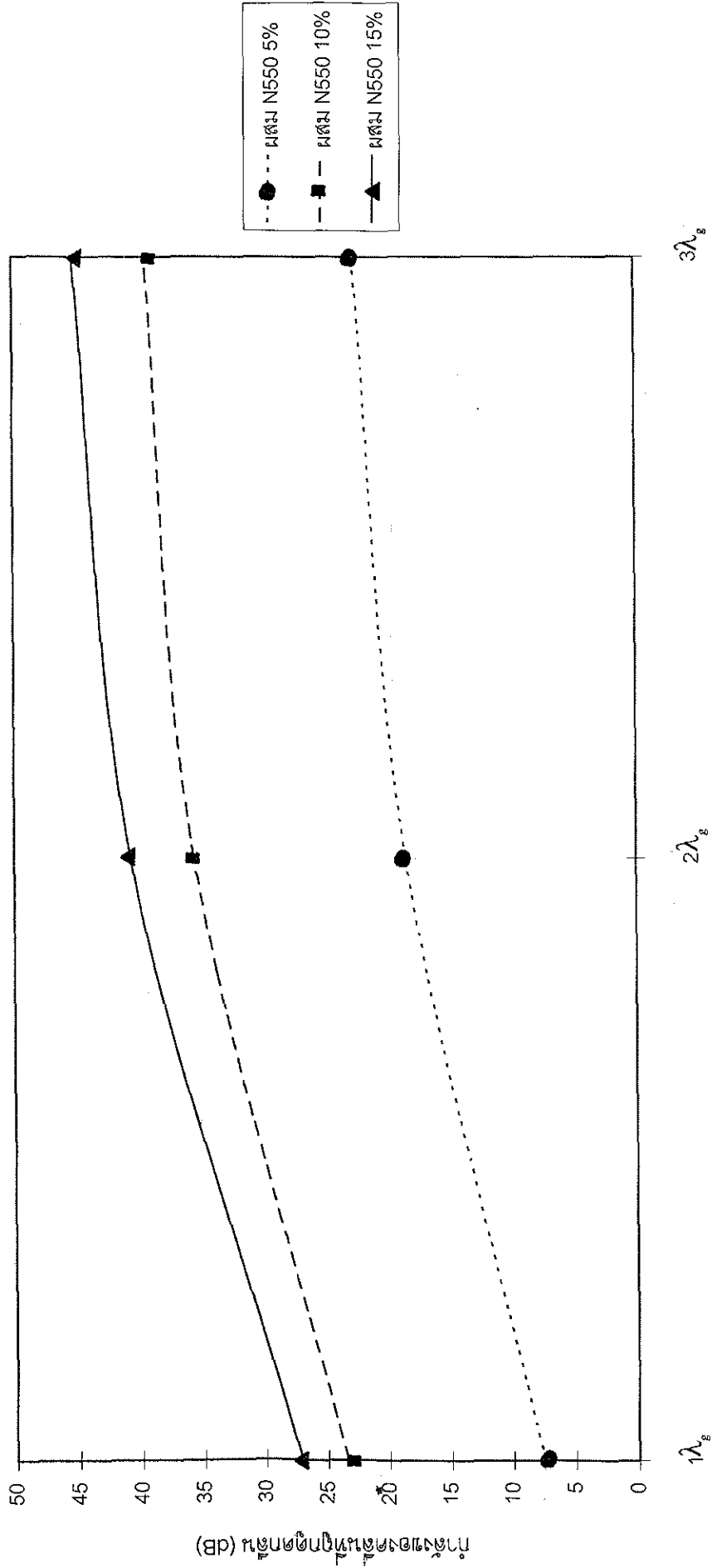
ความยาวของตัวดูดกลืนคลื่น (l) เมตร

รูปที่ 6.7 แสดงความสามารถในการดูดกลืนกำลังคลื่นโดยใช้ตัวดูดกลืนชนิด Tapered E-plane



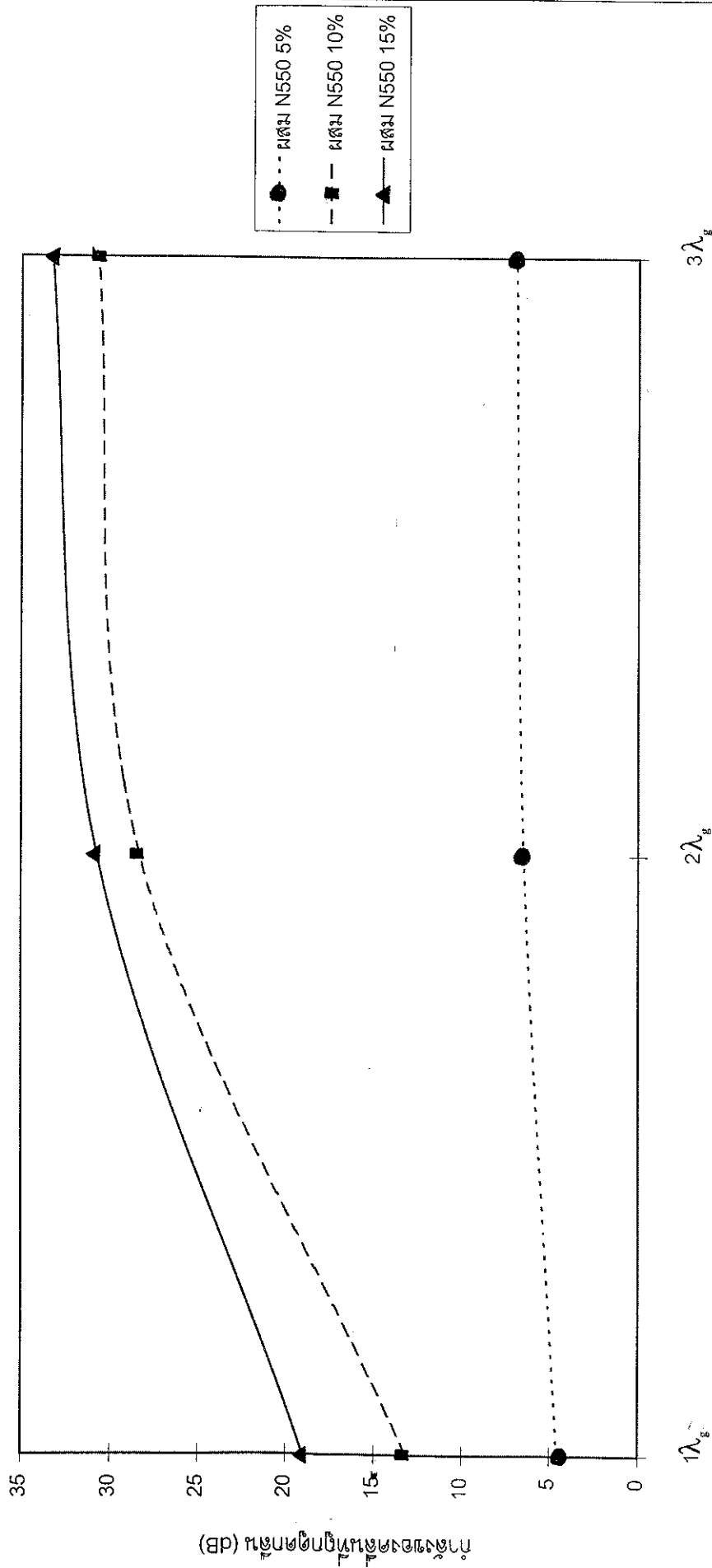
ความยาวของตัวดูดกลืนคลื่น (l) เมตร

รูปที่ 6.8 แสดงความสามารถในการดูดกลืนคลื่นโดยใช้ตัวดูดกลืนชนิด Tapered H-plane

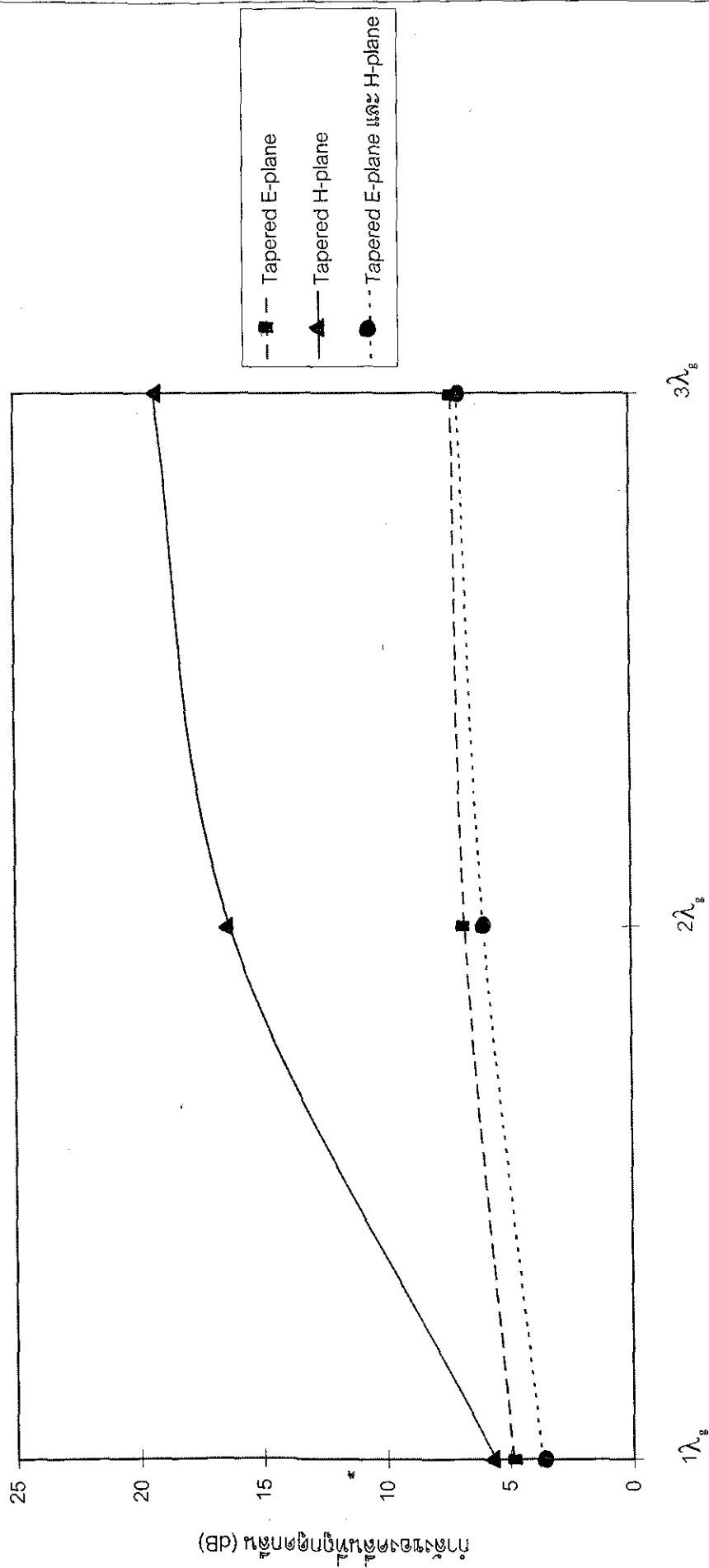


ความยาวของตัวดูดกลืนคลื่น(l) เมตร

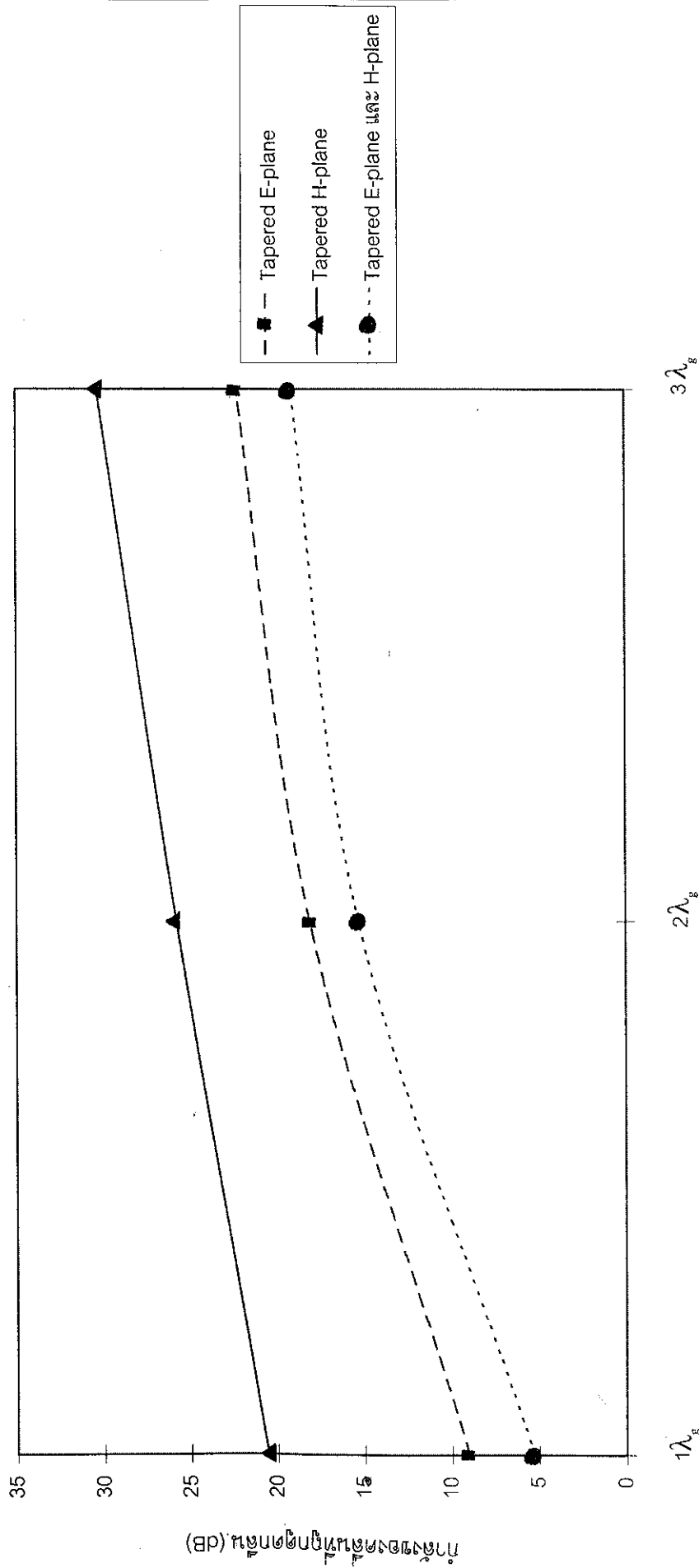
รูปที่ 6.9 แสดงความสามารถในการดูดกลืนกำลังคลื่นโดยใช้ตัวดูดกลืนชนิด Tapered E-plane และ H-plane



รูปที่ 6.10 แสดงความสามารถในการดูดกลืนกำลังคลื่นโดยใช้ผงเซมาต้าเบอร์ N330 เพิ่มขึ้น 5%

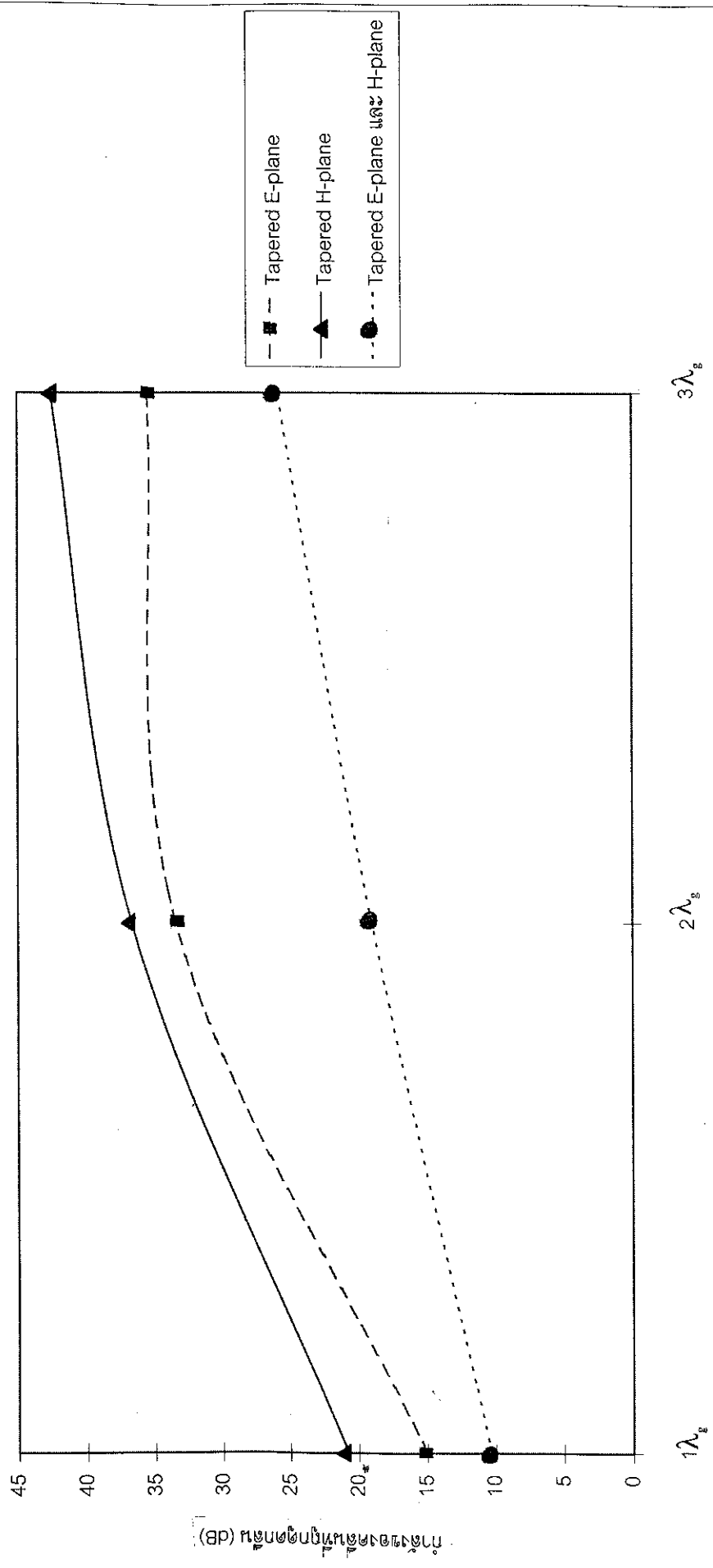


รูปที่ 6.11 แสดงความสามารถในการดูดกลืนกำลังคลื่นโดยใช้ตัวดูดกลืนที่เพิ่มขึ้น 10%



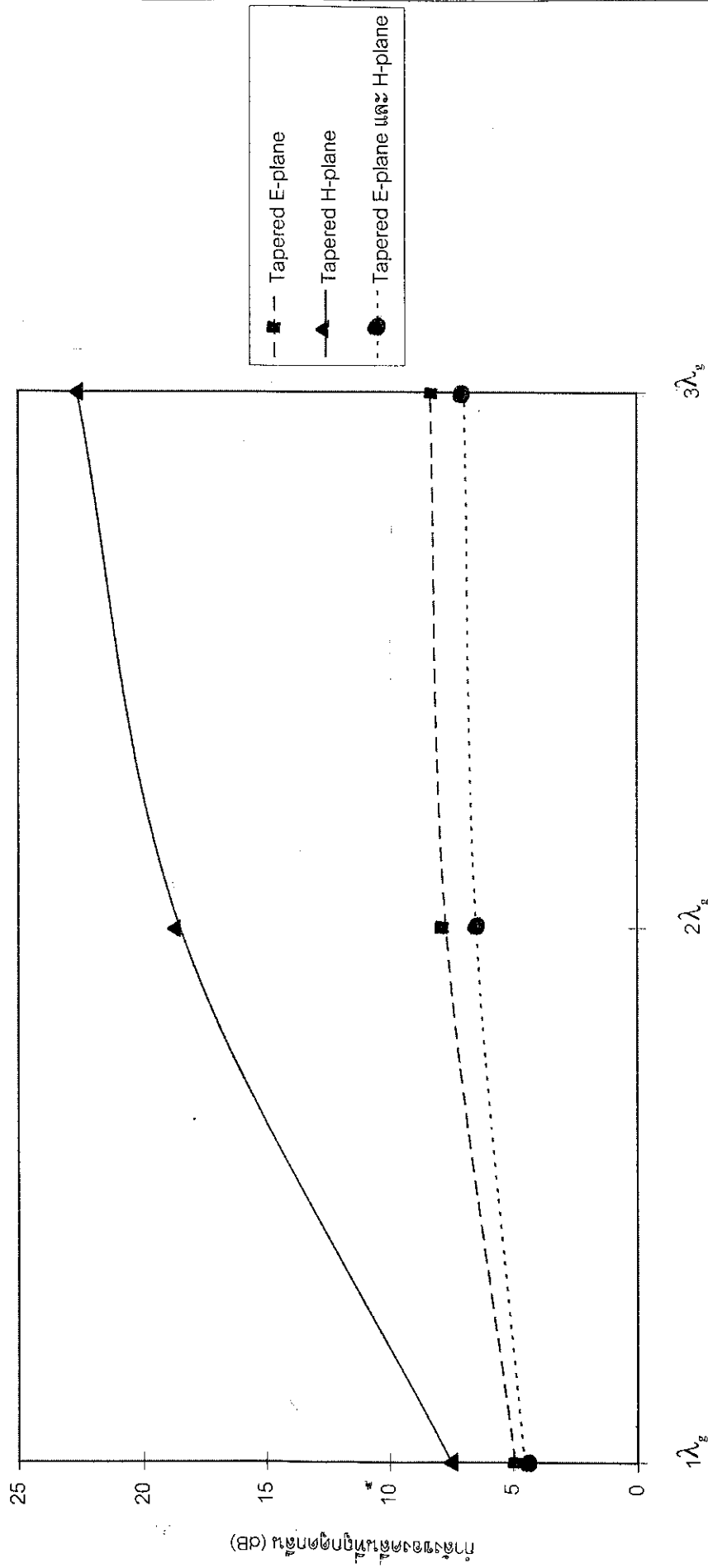
ความยาวของตัวดูดกลืนคลื่น (l) เมตร

รูปที่ 6.12 แสดงความสามารถในการดูดกลืนกำลังคลื่นโดยใช้ตัวดูดกลืนที่ผสมผงแม่ดำเบอร์ N330 เพิ่มขึ้น 15%

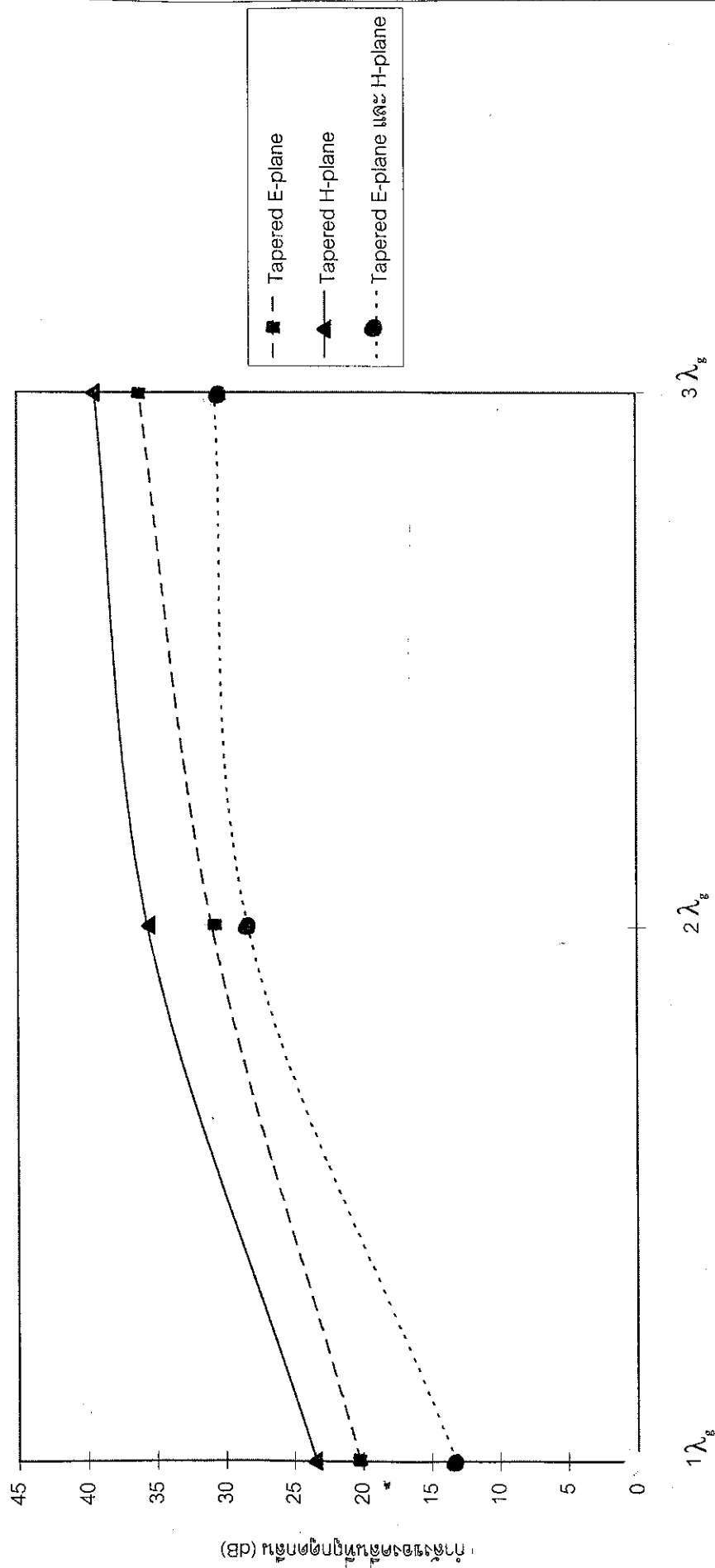


ความยาวของตัวดูดกลืนคลื่น(l) เมตร

รูปที่ 6.13 แสดงความสามารถในการดัดแปลงกำลังคลื่นโดยใช้ตัวดูดกลืนที่ผสมเข้ามาดำเปอร์ N550 เพิ่มขึ้น 5%

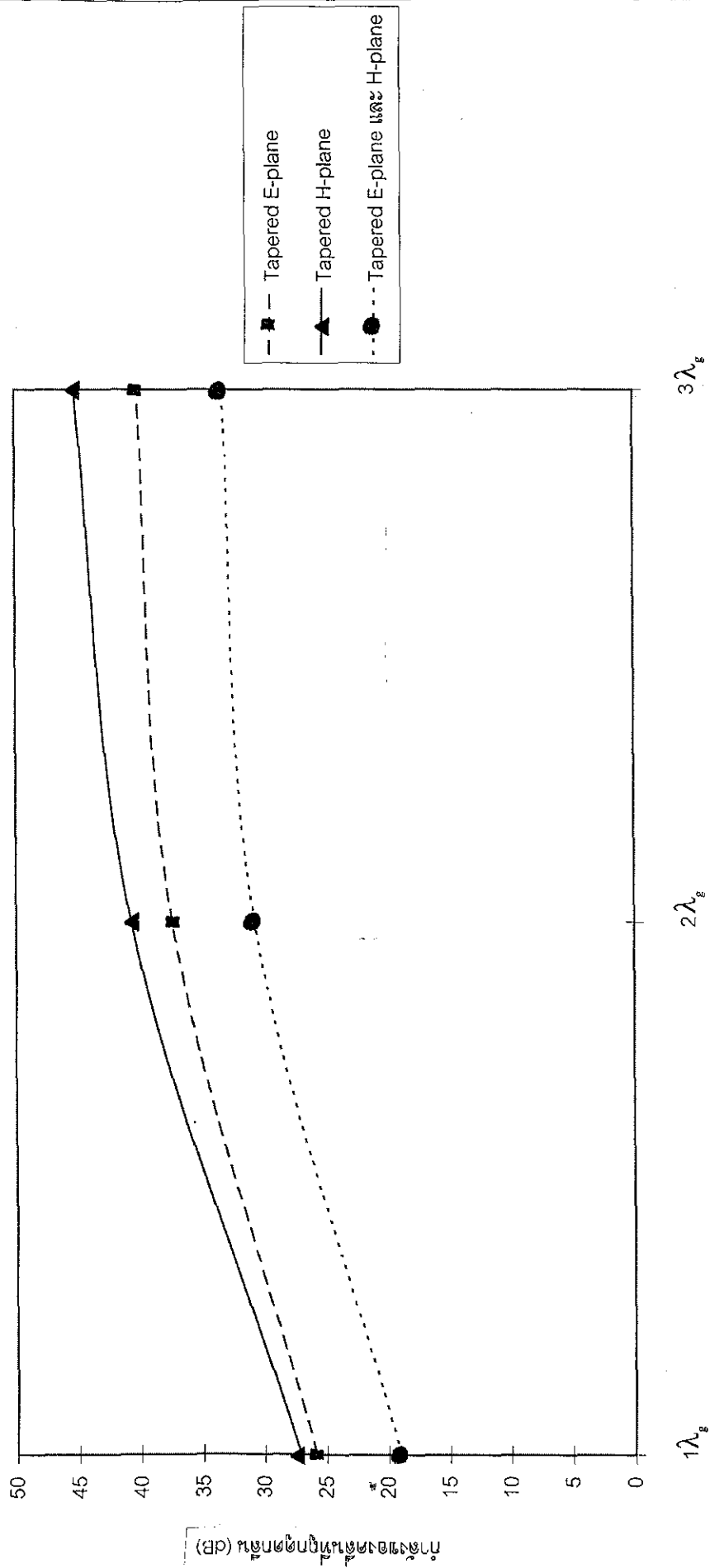


รูปที่ 6.14 แสดงความสามารถในการดูดกลืนคลื่นโดยใช้ตัวดูดกลืนที่ผสมผงเขม่าดำเบอร์ N550 เพิ่มขึ้น 10%



ความยาวของตัวดูดกลืนคลื่น (l) เมตร

รูปที่ 6.15 แสดงความสามารถในการดูดกลืนกำลังคลื่นโดยใช้ตัวดูดกลืนคลื่นที่ผสมผงมาดำเบอร์ N550 เพิ่มขึ้น 15%



ความยาวของตัวดูดกลืนคลื่น(l) เมตร

บทที่ 7

บทสรุป

โครงการนี้เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ที่นำมาวัดกับความสามารถในการดูดกลืนกำลังคลื่นของตัวดูดกลืนคลื่นซึ่งสรุปผลได้ว่า อัตราการดูดกลืนคลื่นขึ้นอยู่กับปัจจัยดังต่อไปนี้

1. ความยาวของตัวดูดกลืนคลื่น
2. ความเข้มข้นของผงเขม่าดำที่ผสมอยู่ในตัวดูดกลืนคลื่น
3. ขนาดของอนุภาคของผงเขม่าดำที่ผสมอยู่ในตัวดูดกลืนคลื่น
4. รูปแบบของตัวดูดกลืนคลื่น

สำหรับในการสร้างตัวดูดกลืนคลื่นเพื่อการใช้งานในย่านความถี่แถบ X (X-Band) ที่ใช้ในท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมนั้นจากรูปกราฟแสดงผลการทดลองทำให้เราทราบว่า จุดที่เหมาะสมที่สุดคือ สร้างตัวดูดกลืนคลื่นที่มีรูปทรงแบบ Tapered H-plane ให้มีความยาว $2\lambda_g$ (โดยที่ λ_g มีค่าเท่ากับ 4 ซม. ที่ความถี่แถบ X ดังแสดงให้ดูในบทที่ 4) โดยใช้โพลีเอสเตอร์เรซินผสมกับผงเขม่าดำเข้มข้น 15% โดยน้ำหนัก จะทำให้ได้ตัวดูดกลืนที่มีอัตราการดูดกลืนถึง 36.7dB สำหรับผงเขม่าดำชนิด N330 และ 40.71dB สำหรับผงเขม่าดำชนิด N550 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนคือ -32.04dB และ -28.71dB ตามลำดับ

เป็นที่ทราบกันดีว่าในการผลิตยางรถยนต์ที่ใช้กันโดยทั่วไป ผู้ผลิตจะทำการผสมผงเขม่าดำประมาณ 5% โดยส่วนใหญ่จะใช้ผงเขม่าดำเบอร์ N330 ลงในแผ่นยางก่อนทำการอัดขึ้นรูปทรงเพื่อเพิ่มความคงทนและอายุการใช้งานของยาง ดังนั้นเราสามารถนำเอายางรถยนต์ที่ไม่สามารถใช้งานได้แล้วกลับมาใช้ใหม่ โดยนำมาสร้างเป็นตัวดูดกลืนคลื่นอีกทั้งวิธีนี้ยังจะเป็นการช่วยรักษาสภาพแวดล้อมไปในตัวเพราะยางรถยนต์ถือว่าเป็นขยะที่ยากต่อการทำลายและย่อยสลาย ซึ่งจะยังทำให้ช่วยลดต้นทุนในการผลิตลงได้มาก

สำหรับเทคนิคในการวัดอัตราการดูดกลืนคลื่นของตัวดูดกลืนที่ใช้ในการทดลองนั้น ควรจะนำมาทำการศึกษาเพิ่มเติมในอนาคตโดยใช้การวัดค่าของอัตราคลื่นนิ่ง(SWR)เสริมเข้ามาเพื่อให้สามารถหาค่าของคลื่นสะท้อนเปรียบเทียบกับค่าอัตราส่วนคลื่นสะท้อนกลับ (Reflection Coefficient) โดยตรง

เอกสารอ้างอิง

- [1] David K. Cheng, *Field and Wave Electromagnetics*, 2nd ed., Addison Wesley, 1989
- [2] Jean-Baptiste Donnet, *Carbon Black*, 2nd ed., Dekker, 1993
- [3] Joseph A. Edminister, *Theory and problems of Electromagnetics*, 2nd ed., McGraw-Hill, 1993
- [4] Joseph Helszajn, *Microwave Engineering*, 4th ed., McGraw-Hill, 1991
- [5] Paul F. Combes, *Microwave Components Devices and Active Circuits*, 2nd ed., John Wiley & Sons, 1987
- [6] Robert E. Collin, *Foundations for Microwave Engineering*, 2nd ed., McGraw-Hill, 1992
- [7] Samuel Y. Liao, *Engineering Applications of Electromagnetic Theory*, 2nd ed., Info Access & Distribution, 1984
- [8] Simon Ramo, John R. Whinnery, Theodore Van Duzer, *Fields And Waves in Communication Electronics*, 3rd ed., John Wiley & Sons, 1994
- [9] Stephen C. Harsany, *Principles of Microwave Technology*, 7th ed., Prentice Hall, 1997
- [10] William F. Smith, *Principles of Materials Science and Engineering*, 2nd ed., McGraw-Hill, 1990
- [11] William H. Hayt, JR., *Engineering Electromagnetics*, 5th ed., McGraw-Hill, 1989

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.
แสดงการแบ่งช่วงความถี่ต่าง ๆ

ตาราง ก.1 แสดงการแบ่งช่วงความถี่

ย่านความถี่	ชื่อเรียก
3 – 30 kHz	Very low frequency (VLF)
30 – 300 kHz	Low frequency (LF)
300 – 3,000 kHz	Medium frequency (MF)
3 – 30 MHz	High frequency (HF)
30 – 300 MHz	Very-high frequency (VHF)
300 – 3,000 MHz	Ultra-high frequency (UHF)
3 – 30 GHz	Super-high frequency (SHF)
30 – 300 GHz	Extremely-high frequency (EHF)

ตาราง ก.2 แสดงการแบ่งช่วงความถี่ในย่านไมโครเวฟ

ช่วงความถี่	ชื่อเรียกเก่า	ชื่อเรียกใหม่
1 – 2 GHz	L	D
2 – 3 GHz	S	E
3 – 4 GHz	S	F
4 – 6 GHz	C	G
6 – 8 GHz	C	H
8 – 10 GHz	X	I
10 – 12.4 GHz	X	J
12.4 – 18 GHz	Ku	J
18 – 20 GHz	K	J
20 – 26.5 GHz	K	K
26.5 – 40 GHz	Ka	K

ภาคผนวก ข

แสดงสมการที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์เวกเตอร์ และเวกเตอร์ดิฟเฟอเรนเชียล
โอเปอเรเตอร์ (Vector differential operator)

ข.1 สูตรที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์เวกเตอร์

$$\begin{aligned}
 \nabla(UV) &= V\nabla U + U\nabla V \\
 \nabla(\vec{A} \cdot \vec{B}) &= \vec{A} \times (\nabla \times \vec{B}) + \vec{B} \times (\nabla \times \vec{A}) + (\vec{B} \cdot \nabla)\vec{A} + (\vec{A} \cdot \nabla)\vec{B} \\
 \nabla \cdot \nabla V &= \nabla^2 V \\
 \nabla \cdot (V\vec{A}) &= V\nabla \cdot \vec{A} + \vec{A} \cdot \nabla V \\
 \nabla \cdot (\vec{A} + \vec{B}) &= \vec{B} \cdot \nabla \times \vec{A} - \vec{A} \cdot \nabla \times \vec{B} \\
 \nabla \cdot \nabla \times \vec{A} &= 0 \\
 \nabla \times (\nabla V) &= 0 \\
 \nabla \times (V\vec{A}) &= V\nabla \times \vec{A} + \nabla V \times \vec{A} \\
 \nabla \times \nabla \times \vec{A} &= \nabla(\nabla \cdot \vec{A}) - \nabla^2 \vec{A} \\
 \nabla \times (\vec{A} \times \vec{B}) &= \vec{A}\nabla \cdot \vec{B} - \vec{B}\nabla \cdot \vec{A} + (\vec{B} \cdot \nabla)\vec{A} - (\vec{A} \cdot \nabla)\vec{B}
 \end{aligned}$$

ข.2 สูตรเวกเตอร์ดิฟเฟอเรนเชียลโอเปอเรเตอร์ (Vector differential operator)

ข.2.1 กรณีของระบบพิกัดคาร์ทีเซียน

$$\begin{aligned}
 \nabla \psi &= \vec{i}_x \frac{\partial \psi}{\partial x} + \vec{i}_y \frac{\partial \psi}{\partial y} + \vec{i}_z \frac{\partial \psi}{\partial z} \\
 \nabla \cdot \vec{A} &= \frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_y}{\partial y} + \frac{\partial A_z}{\partial z} \\
 \nabla \times \vec{A} &= \vec{i}_x \left(\frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z} \right) + \vec{i}_y \left(\frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \vec{i}_z \left(\frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \right) \\
 \nabla \cdot \nabla \psi &= \nabla^2 \psi = \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} \\
 \nabla \cdot \nabla \vec{A} &= \nabla^2 \vec{A} = \vec{i}_x \nabla^2 A_x + \vec{i}_y \nabla^2 A_y + \vec{i}_z \nabla^2 A_z
 \end{aligned}$$

ข.2.2 กรณีของระบบพิกัดประสานแบบทรงกลม

$$\nabla\psi = \vec{i}_r \frac{\partial\psi}{\partial r} + \vec{i}_\theta \frac{1}{r} \frac{\partial\psi}{\partial\theta} + \vec{i}_\phi \frac{1}{r\sin\theta} \frac{\partial\psi}{\partial\phi}$$

$$\nabla\cdot\vec{A} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 A_r) + \frac{1}{r\sin\theta} \frac{\partial}{\partial\theta} (\sin\theta A_\theta) + \frac{1}{r\sin\theta} \frac{\partial A_\phi}{\partial\phi}$$

$$\begin{aligned} \nabla\times\vec{A} &= \vec{i}_r \frac{1}{r\sin\theta} \left[\frac{\partial}{\partial\theta} (\sin\theta A_\phi) - \frac{\partial A_\theta}{\partial\phi} \right] + \vec{i}_\theta \frac{1}{r} \left[\frac{1}{\sin\theta} \frac{\partial A_r}{\partial\phi} \right. \\ &\quad \left. - \frac{\partial}{\partial r} (r A_\phi) \right] + \vec{i}_\phi \frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} (r A_\theta) - \frac{\partial A_r}{\partial\theta} \right] \end{aligned}$$

$$\nabla^2\psi = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial\psi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2\sin\theta} \frac{\partial}{\partial\theta} (\sin\theta \frac{\partial\psi}{\partial\theta}) + \frac{1}{r^2\sin^2\theta} \frac{\partial^2\psi}{\partial\phi^2}$$

$$\nabla\cdot\nabla\vec{A} = \nabla^2\vec{A} = \nabla(\nabla\cdot\vec{A}) - \nabla\times\nabla\times\vec{A}$$

$$\begin{aligned} &= \vec{i}_r \left[\frac{\partial^2 A_r}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial A_r}{\partial r} - \frac{2}{r^2} A_r + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 A_r}{\partial\theta^2} + \frac{\cot\theta}{r^2} \frac{\partial A_r}{\partial\theta} \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{r^2\sin^2\theta} \frac{\partial^2 A_r}{\partial\phi^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial A_\theta}{\partial\theta} - \frac{2\cot\theta}{r^2} A_\theta - \frac{2}{r^2\sin\theta} \frac{\partial A_\phi}{\partial\phi} \right] \\ &\quad + \vec{i}_\theta \left[\frac{\partial^2 A_\theta}{\partial r^2} + \frac{2\partial A_\theta}{\partial r} - \frac{A_\theta}{r^2\sin^2\theta} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 A_\theta}{\partial\theta^2} + \frac{\cot\theta}{r^2} \frac{\partial A_\theta}{\partial\theta} \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{r^2\sin^2\theta} \frac{\partial^2 A_\theta}{\partial\phi^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial A_r}{\partial\theta} - \frac{2\cot\theta}{r^2\sin\theta} \frac{\partial A_\phi}{\partial\phi} \right] \\ &\quad + \vec{i}_\phi \left[\frac{\partial^2 A_\phi}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial A_\phi}{\partial r} - \frac{1}{r^2\sin^2\theta} A_\phi + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 A_\phi}{\partial\theta^2} \right. \\ &\quad \left. + \frac{\cot\theta}{r^2} \frac{\partial A_\phi}{\partial\theta} + \frac{1}{r^2\sin^2\theta} \frac{\partial^2 A_\phi}{\partial\phi^2} + \frac{2}{r^2\sin\theta} \frac{\partial A_r}{\partial\phi} \right] \end{aligned}$$

ข.2.3 กรณีของระบบพิกัดประสานแบบทรงกระบอก

$$\nabla \psi = \vec{i}_r \frac{\partial \psi}{\partial r} + \vec{i}_\phi \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial \phi} + \vec{i}_z \frac{\partial \psi}{\partial z}$$

$$\nabla \cdot \vec{A} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r A_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial A_\phi}{\partial \phi} + \frac{\partial A_z}{\partial z}$$

$$\begin{aligned} \nabla \times \vec{A} &= \vec{i}_r \left(\frac{1}{r} \frac{\partial A_z}{\partial \phi} - \frac{\partial A_\phi}{\partial z} \right) + \vec{i}_\phi \left(\frac{\partial A_r}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial r} \right) \\ &\quad + \vec{i}_z \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (r A_\phi)}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial A_r}{\partial \phi} \right) \end{aligned}$$

$$\nabla^2 \psi = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2}$$

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \nabla \vec{A} &= \nabla (\nabla \cdot \vec{A}) - \nabla \times \nabla \times \vec{A} \\ &= \vec{i}_r \left(\frac{\partial^2 A_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial A_r}{\partial r} - \frac{A_r}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 A_r}{\partial \phi^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial A_\phi}{\partial \phi} + \frac{\partial^2 A_r}{\partial z^2} \right) \\ &\quad + \vec{i}_\phi \left(\frac{\partial^2 A_\phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial A_\phi}{\partial r} - \frac{A_\phi}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 A_\phi}{\partial \phi^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial A_r}{\partial \phi} + \frac{\partial^2 A_\phi}{\partial z^2} \right) \\ &\quad + \vec{i}_z \left(\frac{\partial^2 A_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial A_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 A_z}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial z^2} \right) \end{aligned}$$

ภาคผนวก ค

สัญลักษณ์และหน่วยที่ใช้ในคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ค.1 หน่วยมาตรฐาน SI (SI System Units)

Quantity	Symbol	Unit	Abbreviation
Length	ℓ	meter	m
Mass	m	kilogram	kg
Time	t	second	s
Current	I, i	ampere	A

ค.2 สัญลักษณ์ที่ใช้ในการพิสูจน์ (Derived Quantities)

Quantity	Symbol	Unit	Abbreviation
Admittance	Y	siemens	S
Angular frequency	ω	radian/second	rad/s
Attenuation constant	α	neper/meter	Np/m
Capacitance	C	farad	F
Charge	Q, q	coulomb	C
Charge density (linear)	ρ_ℓ	coulomb/meter	C/m
Charge density (surface)	ρ_s	coulomb/meter ²	C/m ²
Charge density (volume)	ρ	coulomb/meter ³	C/m ³
Conductance	G	siemens	S
Conductivity	σ	siemens/meter	S/m
Current density (surface)	$\mathbf{J}_s$	ampere/meter	A/m
Current density (volume)	$\mathbf{J}$	ampere/meter ²	A/m ²
Dielectric constant (relative permittivity)	ϵ_r	(dimensionless)	—
Directivity	D	(dimensionless)	—
Electric dipole moment	$\mathbf{p}$	coulomb-meter	C·m
Electric displacement (Electric flux density)	$\mathbf{D}$	coulomb/meter ²	C/m ²
Electric field intensity	$\mathbf{E}$	volt/meter	V/m
Electric potential	V	volt	V
Electric susceptibility	χ_e	(dimensionless)	—
Electromotive force	$\mathcal{V}$	volt	V
Energy (work)	W	joule	J
Energy density	w	joule/meter ³	J/m ³
Force	$\mathbf{F}$	newton	N
Frequency	f	hertz	Hz
Impedance	Z, η	ohm	Ω
Inductance	L	henry	H

สัญลักษณ์ที่ใช้ในการพิสูจน์ (Derived Quantities) (ต่อ)

Quantity	Symbol	Unit	Abbreviation
Magnetic dipole moment	$\mathbf{m}$	ampere-meter ²	A·m ²
Magnetic field intensity	$\mathbf{H}$	ampere/meter	A/m
Magnetic flux	Φ	weber	Wb
Magnetic flux density	$\mathbf{B}$	tesla	T
Magnetic potential (vector)	$\mathbf{A}$	weber/meter	Wb/m
Magnetic susceptibility	χ_m	(dimensionless)	—
Magnetization	$\mathbf{M}$	ampere/meter	A/m
Magnetomotive force	$\mathcal{F}_m$	ampere	A
Permeability	μ, μ_0	henry/meter	H/m
Permittivity	ϵ, ϵ_0	farad/meter	F/m
Phase	ϕ	radian	rad
Phase constant	β	radian/meter	rad/m
Polarization vector	$\mathbf{P}$	coulomb/meter ²	C/m ²
Power	P	watt	W
Poynting vector (power density)	$\mathcal{P}$	watt/meter ²	W/m ²
Propagation constant	γ	meter ⁻¹	m ⁻¹
Radiation intensity	U	watt/steradian	W/sr
Reactance	X	ohm	Ω
Relative permeability	μ_r	(dimensionless)	—
Relative permittivity (dielectric constant)	ϵ_r	(dimensionless)	—
Reluctance	$\mathcal{R}$	henry ⁻¹	H ⁻¹
Resistance	R	ohm	Ω
Susceptance	B	siemens	S
Torque	T	newton-meter	N·m
Velocity	u	meter/second	m/s
Voltage	V	volt	V
Wavelength	λ	meter	m
Wavenumber	k	radian/meter	rad/m
Work (energy)	W	joule	J

ค.3 หน่วยอุปสรรคที่ใช้เป็นตัวคูณ(Multiple and Submultiple of Units)

Factor by Which Unit Is Multiplied	Prefix	Symbol
$1\,000\,000\,000\,000\,000\,000 = 10^{18}$	exa	E
$1\,000\,000\,000\,000\,000 = 10^{15}$	peta	P
$1\,000\,000\,000\,000 = 10^{12}$	tera	T
$1\,000\,000\,000 = 10^9$	giga	G
$1\,000\,000 = 10^6$	mega	M
$1\,000 = 10^3$	kilo	k
$100 = 10^2$	hecto [†]	h
$10 = 10^1$	deka [†]	da
$0.1 = 10^{-1}$	deci [†]	d
$0.01 = 10^{-2}$	centi [†]	c
$0.001 = 10^{-3}$	milli	m
$0.000\,001 = 10^{-6}$	micro	μ
$0.000\,000\,001 = 10^{-9}$	nano	n
$0.000\,000\,000\,001 = 10^{-12}$	pico	p
$0.000\,000\,000\,000\,001 = 10^{-15}$	femto	f
$0.000\,000\,000\,000\,000\,001 = 10^{-18}$	atto	a

[†] These prefixes are generally not used except for measurements of length, area, and volume.

ภาคผนวก ง.

การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของคลื่นในท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม

ง.1 องค์ประกอบตามแนวขวางจากองค์ประกอบตามแนวแกน (Transverse Components From Axial Components)

จากสมการของแมกซ์เวลล์ในรูปของเฟสเซอร์ (Maxwell's Equations)

$$\nabla \times \bar{H} = (\sigma + j\omega\epsilon)\bar{E} \quad (ง. 1)$$

$$\nabla \times \bar{E} = -j\omega\mu\bar{H} \quad (ง. 2)$$

$$\nabla \cdot \bar{E} = 0 \quad (ง. 3)$$

$$\nabla \cdot \bar{H} = 0 \quad (ง. 4)$$

ทำเคิร์ลสมการที่(ง.1) และ (ง.2)

$$\nabla \times (\nabla \times \bar{H}) = (\sigma + j\omega\epsilon)(\nabla \times \bar{E}) \quad (ง.5)$$

$$\nabla \times (\nabla \times \bar{E}) = -j\omega\mu(\nabla \times \bar{H}) \quad (ง.6)$$

ในที่นี้ตัวกลางเป็นอากาศซึ่งมีคุณสมบัติที่ไม่มีการสูญเสีย(loss less) $\sigma = 0$ ดังนั้นสมการเคิร์ลข้างต้นสามารถเขียนได้เป็น

$$\nabla \times (\nabla \times \bar{H}) = j\omega\epsilon(\nabla \times \bar{E}) \quad (ง.7)$$

$$\nabla \times (\nabla \times \bar{E}) = -j\omega\mu(\nabla \times \bar{H}) \quad (ง.8)$$

ในพิกัดคาร์ทีเซียน จะได้เวกเตอร์ของลาปลาซเป็น

$$\nabla^2 \bar{A} \equiv (\nabla^2 A_x)a_x + (\nabla^2 A_y)a_y + (\nabla^2 A_z)a_z \quad (ง.9)$$

จากเอกลักษณ์ของเวกเตอร์

$$\nabla \times (\nabla \times \bar{A}) = \nabla(\nabla \cdot \bar{A}) - \nabla^2 \bar{A} \quad (ง.10)$$

แทนที่เคิร์ล เคิร์ล (Curl Curls) และใช้สมการ(ง.3) และ (ง.4) จะได้สมการคลื่นแบบเวกเตอร์(Vector Wave Equations)

$$\nabla \times (\nabla \times \bar{H}) = \nabla(\nabla \cdot \bar{H}) - \nabla^2 \bar{H} = j\omega\mu\nabla \times \bar{E} \quad (ง.11)$$

$$\nabla \times (\nabla \times \bar{E}) = \nabla(\nabla \cdot \bar{E}) - \nabla^2 \bar{E} = -j\omega\mu\nabla \times \bar{H} \quad (ง.12)$$

$$\nabla^2 \bar{H} = \omega^2 \mu\epsilon \bar{H} \quad (ง.13)$$

$$\nabla^2 \bar{E} = -\omega^2 \mu\epsilon \bar{E} \quad (ง.14)$$

สมการที่ (ง.13) และ(ง.14)เรียกว่า สมการเฮมโฮลต์ซ์ (Helmholtz Equation)

จากสมการที่ (ง.2) จะได้สมการสเกลาร์ 3 สมการคือ

$$-j\omega\mu H_x = jkE_y + \frac{\partial E_z}{\partial y} \quad (ง.15)$$

$$-j\omega\mu H_y = -jkE_x - \frac{\partial E_z}{\partial x} \quad (3.16)$$

$$-j\omega\mu H_z = \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} \quad (3.17)$$

โดยที่ค่า k คือ ค่าคงที่เฟส(Phase Constant)

และจาก (ง.1) เมื่อ $\sigma = 0$ ทำให้ได้สมการสเกลาร์เพิ่มมาอีก 3 สมการ

$$j\omega\varepsilon E_x = jkH_y + \frac{\partial H_z}{\partial y} \quad (3.18)$$

$$j\omega\varepsilon E_y = -jkH_x - \frac{\partial H_z}{\partial x} \quad (3.19)$$

$$j\omega\varepsilon E_z = \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \quad (3.20)$$

เราสามารถกำจัด H_x ระหว่างสมการ (ง.15) และ (ง.19) และ H_y ระหว่างสมการ (ง.16) และ (ง.18) จะได้

$$E_y = -\frac{jk}{k_c^2} \frac{\partial E_z}{\partial y} + \frac{j\omega\mu}{k_c^2} \frac{\partial H_z}{\partial x} \quad (3.21)$$

$$E_x = -\frac{jk}{k_c^2} \frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{j\omega\mu}{k_c^2} \frac{\partial H_z}{\partial y} \quad (3.22)$$

โดยที่ค่า $k_c^2 \equiv \omega^2\mu\varepsilon - k^2$ (rad/m) มีชื่อเรียกว่า Critical Wave Number

ถ้าทำการแทนค่าสมการ (ง.21) และ (ง.22) ลงไปในสมการ (ง.18) และ (ง.19) จะได้

$$H_y = -\frac{jk}{k_c^2} \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{j\omega\varepsilon}{k_c^2} \frac{\partial E_z}{\partial x} \quad (3.23)$$

$$H_x = -\frac{jk}{k_c^2} \frac{\partial H_z}{\partial x} + \frac{j\omega\varepsilon}{k_c^2} \frac{\partial E_z}{\partial y} \quad (3.24)$$

ง.2 การหาสนามตามแกน (Determination of The Axial Field)

จากสมการคลื่น

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_z}{\partial y^2} + k_{cTE}^2 H_z = 0 \quad (3.25)$$

โดยกำหนดให้ $k_{cTE}^2 = \omega^2\mu\varepsilon - k_{TE}^2$

คำตอบของสมการคลื่นตามวิธีการแยกตัวแปรคือ

$$H_z(x, y) = (A_x \cos k_x x + B_x \sin k_x x)(A_y \cos k_y y + B_y \sin k_y y) \quad (3.26)$$

โดยที่ $k_x^2 + k_y^2 = k_{cTE}^2$ *

จากสมการที่ (ง.26) ถ้าเราพิจารณาเงื่อนไขขอบเขต(Boundary Condition)โดยคิดว่าตัวกลางมีพื้นผิวเป็นตัวนำสมบูรณ์(Perfectly Conducting Boundary) ที่ตำแหน่ง $x=0$ ค่า $B_x = 0$ เพื่อที่จะทำให้ $H_z = 0$ และในทำนองเดียวกันที่ตำแหน่ง $y=0$ ค่า $B_y = 0$ แล้วทำการรวมค่าคงที่ A_x และ A_y ให้เป็นค่าคงที่ใหม่คือ A จะได้

$$H_z = A \sin k_x x \sin k_y y \quad (\text{ง.27})$$

จากเงื่อนไขขอบเขต $H_z = 0$ ที่ $x = a$ และ $y = b$ ซึ่งจะสามารถเกิดขึ้นได้เมื่อ

$$\sin k_x a = 0 \text{ หรือ } k_x = \frac{m\pi}{a} \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (\text{ง.28})$$

และ

$$\sin k_y b = 0 \text{ หรือ } k_y = \frac{n\pi}{b} \quad (n = 0, 1, 2, \dots) \quad (\text{ง.29})$$

แต่ละคู่ของจำนวนเต็มบวก (m, n) ยกเว้น $(0, 0)$ กำหนดโหมด TE ที่แตกต่างกันซึ่งแสดงด้วยค่า TE_{mn} โหมดนี้มีสนามตามแกน

$$H_{zmn}(x, y) = H_{mn} \cos \frac{m\pi x}{a} \cos \frac{n\pi y}{b} \quad (\text{ง.30})$$

และค่า Critical Wave Number และ Wave Number สามารถแสดงได้ดังนี้

$$k_{cTEmn} = \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \quad (\text{ง.31})$$

$$k_{TEmn} = \sqrt{\omega^2 \mu \epsilon - k_{cTEmn}^2} \quad (\text{ง.32})$$

สำหรับโหมด โดมิแนนท์ TE_{10} ในท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมนี้พบว่

$$f_{c10} = \frac{c}{2a} \quad (\text{ง.33})$$

$$\lambda_{10} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - (\lambda_0/2a)^2}} \equiv \frac{2\pi}{k_{10}} \quad (\text{ง.34})$$

$$\eta_{10} = \frac{\lambda_{10}}{\lambda_0} \eta_0 \quad (\text{ง.35})$$

จากสมการที่(ง.30) และ $E_{z10} \equiv 0$ เมื่อนำสมการข้างต้นไปแทนค่าในสมการที่ (ง.21) (ง.22) (ง.23) และ (ง.24) จะได้

$$H_z = H_{mn} \cos \frac{\pi x}{a} \quad (\text{ง. 36})$$

$$H_x = j \left(\frac{2a}{\lambda_{10}} \right) H_{mn} \sin \frac{\pi x}{a} \quad (\text{ง. 37})$$

$$E_y = -j \eta_0 \left(\frac{2a}{\lambda_0} \right) H_{mn} \sin \frac{\pi x}{a} = -\eta_{mn} H_x \quad (\text{ง. 38})$$

$$H_y = 0 \quad (\text{ง. 39})$$

$$E_x = 0 \quad (ง. 40)$$

$$E_z = 0 \quad (ง. 41)$$

สำหรับ H_{mn} ที่เป็นค่าจริง องค์ประกอบทั้ง 3 ของสนามที่ไม่มีค่าเป็น 0 ซึ่งสามารถแสดงในโดเมนของเวลา(Time-Domain) ได้ดังนี้

$$H_{zmn} = H_{mn} \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right) \cos(\omega t - k_{mn} z) \quad (ง. 42)$$

$$H_{xmn} = -\left(\frac{2a}{\lambda_{10}}\right) H_{mn} \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \sin(\omega t - k_{mn} z) \quad (ง. 43)$$

$$E_{ymn} = \eta_0 \left(\frac{2a}{\lambda_0}\right) H_{mn} \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \sin(\omega t - k_{mn} z) \quad (ง. 44)$$

ง.3 คลื่นโหมด TE_{10}

คลื่นโหมด TE_{10} นั้นเป็นโหมดหนึ่งของคลื่นโหมด TE ซึ่งคลื่นโหมด TE_{10} มักถูกเรียกว่าคลื่นโหมดหลัก หรือ โหมดโดมิแนนท์ของคลื่นไมโครเวฟที่เคลื่อนที่ในท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม ซึ่งคลื่นโหมดนี้มีความสำคัญมากเนื่องจาก

1. ความถี่คัทออฟ(Cutoff Frequency) จะเกิดขึ้นกับขนาดทางด้านกว้างของท่อนำคลื่นเท่านั้น ดังนั้นที่ความถี่ใด ๆ ความถี่หนึ่งขนาดของท่อนำคลื่นจะถูกออกแบบให้เล็กเพียงพอที่มีเพียงคลื่นโหมด TE_{10} เท่านั้นที่สามารถเคลื่อนผ่านไปได้ เนื่องจากคลื่นในโหมดอื่นๆ ที่สูงกว่า(Higher Order Mode) จะทำให้เกิดความยากที่ศึกษาพฤติกรรมของคลื่น
 2. คลื่นโหมด TE_{10} มีรูปแบบของการหมุนควง(Polarization) ของสนามเป็นแบบตายตัว โดยที่สนามไฟฟ้าจะมีการเคลื่อนที่จากส่วนบนของท่อนำคลื่นไปตามผนังของท่อนำคลื่นตามทิศทางในแกน y ส่วนล่างของท่อนำคลื่น ซึ่งรูปแบบของการหมุนควงที่ตายตัวนี้จะถูกนำไปประยุกต์ในการใช้งาน
 3. ณ ความถี่ใด ๆ ค่าการลดทอน(Attenuation) อันเกิดจากการสูญเสียของทองแดงซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้ในการผลิตท่อนำคลื่นมีค่าน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับ การสูญเสียอื่นๆ
- ดังนั้นในการศึกษาพฤติกรรมของคลื่นโหมด TE จึงสามารถที่จะวิเคราะห์เพียงคลื่นโหมด TE_{10} ก็เพียงพอแล้ว สำหรับการกระจายตัวของสนามของคลื่นไมโครเวฟโหมด TE_{10} เป็นดังนี้

$$H_z = H_{10} \cos \frac{\pi x}{a} \quad (3.45)$$

$$H_x = j \left(\frac{2a}{\lambda_{10}} \right) H_{10} \sin \frac{\pi x}{a} \quad (3.46)$$

$$E_y = -j \eta_0 \left(\frac{2a}{\lambda_0} \right) H_{10} \sin \frac{\pi x}{a} = -\eta_{10} H_x \quad (3.47)$$

$$H_y = 0 \quad (3.48)$$

$$E_x = 0 \quad (3.49)$$

$$E_z = 0 \quad (3.50)$$

สำหรับ H_{10} ที่เป็นค่าจริง องค์ประกอบทั้ง 3 ของสนามที่ไม่มีค่าเป็น 0 ซึ่งสามารถแสดงในโดเมนของเวลา(Time-Domain) ได้ดังนี้

$$H_{z10} = H_{10} \cos \left(\frac{\pi x}{a} \right) \cos(\omega t - k_{10} z) \quad (3.51)$$

$$H_{x10} = - \left(\frac{2a}{\lambda_{10}} \right) H_{10} \sin \left(\frac{\pi x}{a} \right) \sin(\omega t - k_{10} z) \quad (3.52)$$

$$E_{y10} = \eta_0 \left(\frac{2a}{\lambda_0} \right) H_{10} \sin \left(\frac{\pi x}{a} \right) \sin(\omega t - k_{10} z) \quad (3.53)$$

ภาคผนวก จ.

เอกลักษณ์ของเวกเตอร์(Vector Identities)

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{B} \times \mathbf{C} = \mathbf{B} \cdot \mathbf{C} \times \mathbf{A} = \mathbf{C} \cdot \mathbf{A} \times \mathbf{B}$$

$$\mathbf{A} \times (\mathbf{B} \times \mathbf{C}) = \mathbf{B}(\mathbf{A} \cdot \mathbf{C}) - \mathbf{C}(\mathbf{A} \cdot \mathbf{B})$$

$$\nabla(\psi V) = \psi \nabla V + V \nabla \psi$$

$$\nabla \cdot (\psi \mathbf{A}) = \psi \nabla \cdot \mathbf{A} + \mathbf{A} \cdot \nabla \psi$$

$$\nabla \times (\psi \mathbf{A}) = \psi \nabla \times \mathbf{A} + \nabla \psi \times \mathbf{A}$$

$$\nabla \cdot (\mathbf{A} \times \mathbf{B}) = \mathbf{B} \cdot (\nabla \times \mathbf{A}) - \mathbf{A} \cdot (\nabla \times \mathbf{B})$$

$$\nabla \cdot \nabla V = \nabla^2 V$$

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{A} = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{A}) - \nabla^2 \mathbf{A}$$

$$\nabla \times \nabla V = 0$$

$$\nabla \cdot (\nabla \times \mathbf{A}) = 0$$

$$\int_V \nabla \cdot \mathbf{A} \, dv = \oint_S \mathbf{A} \cdot d\mathbf{s} \quad (\text{Divergence theorem})$$

$$\int_S \nabla \times \mathbf{A} \cdot d\mathbf{s} = \oint_C \mathbf{A} \cdot d\boldsymbol{\ell} \quad (\text{Stokes's theorem})$$

ประวัติผู้เขียน

นางสาวนิฐิตา เชิดชู สำเร็จการศึกษาชั้นประถมศึกษา จากโรงเรียนสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2532 และศึกษาต่อระดับมัธยมศึกษาจนถึงระดับมัธยมศึกษาปีที่ 5 ที่ โรงเรียนสุรนารีวิทยา อ.เมือง จ.นครราชสีมา จากนั้นได้ทุน Thai-American ไปศึกษาต่อต่างประเทศ สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย(เกรด 12) จาก Tully High School ประเทศสหรัฐอเมริกา เมื่อ พ.ศ. 2538 ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับอุดมศึกษาชั้นปีที่ 4 สาขา วิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา