

การออกแบบและสร้างท่อนำคลื่นสำหรับรวมกำลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า
ความถี่สูง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2565

DESIGN AND FABRICATION OF WAVEGUIDE FOR COMBINING
HIGH-FREQUENCY ELECTROMAGNETIC WAVE



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Suranaree University of Technology

Academic Year 2022

การออกแบบและสร้างท่อนำคลื่นสำหรับรวมกำลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า
ความถี่สูง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยพิจารณาเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ. ดร.ชาญชัย ทองโสภณ)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร. ชาญสิทธิ์ ทศศิริพัฒน์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ดร. อภิชาติ อินทรพานิชย์)

กรรมการ



(รศ. ดร. ฉัตรชัย โชติชูช่างกูร)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ



(รศ. ดร. พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

เสาวลักษณ์ ศิริบุญคุณ : การออกแบบและสร้างท่อนำคลื่นสำหรับรวมกำลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง (DESIGN AND FABRICATION OF WAVEGUIDE FOR COMBINING HIGH-FREQUENCY ELECTROMAGNETIC WAVE)

อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนเสฏฐ์ ทศศิกรพัฒน์, 91 หน้า.

คำสำคัญ : ท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม การรวมกำลังงานในท่อนำคลื่น คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ นำเสนอการออกแบบและสร้างท่อนำคลื่นสำหรับรวมกำลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง โดยใช้ท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมเป็นสายนำสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงกำลังงานสูง เนื่องจากท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมมีคุณสมบัติสามารถทนต่อคลื่นที่กำลังงานสูงได้และสูญเสียกำลังงานที่ต่ำในย่านความถี่ไมโครเวฟ ดังนั้นจึงเป็นข้อดีของการใช้ท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมมาใช้เป็นสายนำสัญญาณสำหรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงและถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย ซึ่งการรวมกำลังงานโดยการใช้ท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมเป็นสายนำสัญญาณ โดยมีการทดสอบการวัดค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญเพื่อดูประสิทธิภาพการใช้งานของท่อนำคลื่นสำหรับรวมกำลังงาน คือ การสูญเสียจากการสะท้อนกลับ การสูญเสียจากการส่งผ่านสัญญาณจากแหล่งกำเนิดไปยังโหลด นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์การสูญเสียจากการแทรกสอดที่เกิดขึ้นภายในท่อนำคลื่นหรือที่เรียกว่าการสูญเสียจากการส่งผ่านของสัญญาณจากอินพุตไปยังเอาต์พุต และการใช้แหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงด้วยแมกนีตรอนเป็นแหล่งกำเนิดกำลังงาน ความถี่ที่ใช้ คือ 2.45 กิกะเฮิร์ต เนื่องจากเป็นความถี่มาตรฐานตามกำหนด ISM (Industrial Sciences Medicine) วิทยานิพนธ์นี้ผู้วิจัยได้นำเสนอการออกแบบท่อนำคลื่นสำหรับรวมกำลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงเพื่อให้ได้กำลังงานที่สูงขึ้น โดยการออกแบบนั้นเลือกใช้ท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมขนาดมาตรฐาน WR340 โครงสร้างทางแยก Y ระนาบ H สำหรับการรวมกำลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง เพื่อสามารถเข้ากับอุตสาหกรรมที่ต้องการกำลังงานสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

ปีการศึกษา 2565

ลายมือชื่อนักศึกษา.....*1922007*

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....*สม*

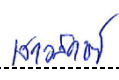
SAOWALAK SIRIBUNKUN: DESIGN AND FABRICATION OF WAVEGUIDE FOR
COMBINING HIGH-FREQUENCY ELECTROMAGNETIC WAVE. THESIS ADVISOR:
ASST. PROF. THANASET THOSDEEKORAPHAT, Ph.D., 91 PP.

Keyword: Rectangular Waveguide, Combining, Electromagnetic wave, High-Frequency

This thesis research proposes a waveguide design for the combination of high-frequency electromagnetic power, achieved by utilizing a rectangular waveguide as a guide for high-power, high-frequency electromagnetic waves. The rectangular waveguide capability to withstand high-power waves and exhibit low power dissipation within the microwave band is an advantage. Therefore, employing a rectangular waveguide as a signal guide for high-frequency electromagnetic waves is both advantageous and widely adopted. Which combiner power by using a rectangular waveguide as a signal guide. A key parameter tested the efficiency of the waveguide in concentrating power is the return loss, transmission loss from source to load. Additionally, the insertion loss, that occurs within the waveguide, known as the input-to-output transmission loss, is also taken into consideration in addition, a high-frequency electromagnetic wave source based on a magnetron is employed as the power source. The chosen frequency is 2.45 GHz, as it aligns with the standard frequency defined by ISM (Industrial, Scientific, and Medical) applications. This design employs a standard rectangular waveguide with Y-plane and H-plane structures for the integration of high-frequency electromagnetic power, making it suitable for industries that require high power and enhanced efficiency.

School of Electronic Engineering

Academic Year 2022

Student's Signature.....

Advisor's Signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านดำเนินงานวิจัย จากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนเสกฐ์ ทศศิริพัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำปรึกษา ช่วยแก้ปัญหาและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอดรวมทั้งช่วยตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนเสกฐ์ ทศศิริพัฒน์ หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ได้แก่ รองศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ทองโสภาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สำราญ สันทาลุณย์ อาจารย์ ดร.ศุภวัฒน์ คชประดิษฐ์ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความรู้ทางวิชาการ และให้โอกาสในการศึกษา

ขอขอบคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนาที่สนับสนุนเงินทุนสำหรับการตีพิมพ์บทความในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ และเจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ช่วยอำนวยความสะดวกด้านเครื่องมืออุปกรณ์

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ให้การอบรมเลี้ยงดู ให้ความรักความอบอุ่น และให้การสนับสนุนทางการศึกษาอย่างดียิ่งมาโดยตลอด อีกทั้งเป็นกำลังใจที่ยิ่งใหญ่ในยามที่ผู้วิจัยท้อแท้และทุกข์ใจ ทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดามารดา รวมถึงญาติพี่น้องซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ผู้สอนที่เคารพทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยทั้งในอดีตและปัจจุบัน จนสำเร็จการศึกษาไปด้วยดี

เสาวลักษณ์ ศิริบุญคุณ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ท

บทที่

1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	3
1.3 สมมุติฐานของการวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตของเบื้องต้น	3
1.5 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.6 วิธีดำเนินการวิจัย.....	4
1.6.1 แนวทางการดำเนินงาน.....	4
1.6.2 ระเบียบวิธีวิจัย	4
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
2 ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1.1 การออกแบบเพื่อนำคลื่นโครงสร้างทางแยกรูปตัว Y ระบาย E และ โครงสร้างทางแยกรูปตัว Y ระบาย H สองตัว	5

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.1.2	ระบบรวมกำลังงานไมโครเวฟที่มีพื้นฐานมาจากแมกนีตรอนลือคการฉีด แบบไฮบริด 20 กิโลวัตต์ในตัวในย่านความถี่ S-band	12
3	หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	16
3.1	กล่าวนำ.....	16
3.2	หลักการและทฤษฎีของคลื่นไมโครเวฟ	16
3.2.1	คลื่นไมโครเวฟ.....	16
3.2.2	หลักการเกิดคลื่นไมโครเวฟ.....	17
3.3	หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการรวมกำลังงานของท่อนำคลื่นโดยคลื่น แม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง.....	17
3.3.1	ท่อนำคลื่น.....	17
3.1.2	ตัวแบ่งกำลังทางแยก T.....	23
3.1.3	คุณสมบัติพื้นฐานของตัวแบ่งและตัวรวม.....	29
3.1.4	การแมตซ์อิมพีแดนซ์ในวงจรท่อนำคลื่น.....	31
3.4	สรุป.....	32
4	การศึกษาและออกแบบระบบสำหรับการวิเคราะห์.....	33
4.1	กล่าวนำ.....	33
4.2	การออกแบบโครงสร้างของท่อนำคลื่น	34
4.2.1	การออกแบบและผลการจำลองท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม	34
4.2.2	การออกแบบและจำลองท่อนำคลื่นแบบท่อนำคลื่นแบบรวมกำลังงาน.....	39
4.2.3	ผลการจำลองของท่อนำคลื่นสำหรับรวมกำลังงานใช้กับ แหล่งกำเนิดคลื่นแบบโมนโพล	47
4.3	สรุป.....	56
5	การทดลองและผลการทดสอบ.....	57
5.1	กล่าวนำ.....	57

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.2	ขั้นตอนการทดสอบ	57
5.2.1	การทดสอบสายอากาศโมโนโพลกับท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม WR340 โดยใช้ เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบสองทาง.....	58
5.2.1	การทดสอบสายอากาศโมโนโพลกับท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมแบบรวมกำลังงาน โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบสองทาง.....	59
5.2.3	การทดสอบวัตต์กำลังงานของท่อนำคลื่นแบบรวมกำลังงานโดย ใช้แหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงกำลังงานสูง.....	61
5.2.4	การทดสอบวัตต์กำลังงานแมกนีตรอนกับท่อนำคลื่นแบบรวมกำลังงาน โดยใช้ Power Meter	63
5.2.5	การใช้งานท่อนำคลื่นแบบรวมกำลังงานกับพลาสมาความร้อนโดย ใช้แมกนีตรอนเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง	66
5.3	ผลการทดสอบ.....	69
5.3.1	การทดสอบสายอากาศโมโนโพลกับท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม WR340 โดยใช้ เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบสองทาง.....	69
5.3.2	การทดสอบสายอากาศโมโนโพลกับท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมแบบรวมกำลังงาน โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบสองทาง.....	70
5.3.3	การทดสอบวัตต์กำลังงานของท่อนำคลื่นแบบรวมกำลังงานโดยใช้ แหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงกำลังงานสูง	75
5.3.4	การทดสอบวัตต์กำลังงานแมกนีตรอนกับท่อนำคลื่นแบบรวมกำลังงาน โดยใช้ Power Meter	76
5.3.5	การใช้งานท่อนำคลื่นแบบรวมกำลังงานกับพลาสมาความร้อนโดยใช้ แมกนีตรอนเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง	77
5.4	สรุปผลและอภิปราย.....	80
6	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	82
	เอกสารอ้างอิง	84
	ภาคผนวก ก	86

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	86
ประวัติผู้เขียน.....	91



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
4.1	ขนาดของท่อนำคลื่นรวมกำลังงานค่าที่ได้จากการออกแบบ.....	40
4.2	การปรับขนาดของท่อนำคลื่นรวมกำลังงานเพื่อหาค่าที่เหมาะสม	41
4.3	ขนาดของท่อนำคลื่นรวมกำลังงานที่ได้รับการปรับให้เหมาะสม	43
4.4	การปรับความลึกของสกรูเพื่อหาค่าที่ดีที่สุด	54
5.1	การปรับสัดบจุณเนอร์สำหรับท่อนำคลื่นแบบรวมกำลังงานเพื่อให้ได้ค่าเหมาะสม	74
5.2	การปรับสัดบจุณเนอร์สำหรับท่อนำคลื่นแบบรวมกำลังงานเพื่อให้ได้ค่าเหมาะสม สำหรับการทดสอบด้วยกำลังงานสูง	75
5.3	การเทียบอัตราส่วนระหว่างอินพุตกำลังงาน 10 วัตต์ และ 1.5 กิโลวัตต์	76
5.4	ผลการทดสอบความแตกต่างของอุณหภูมิด้วยกำลังงานที่แตกต่างกัน	78

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	ท่อนำคลื่นรูปสี่เหลี่ยมขนาดมาตรฐาน..... 2
2.1	การกำหนดพอร์ตของตัวแบ่งกำลังงานของท่อนำคลื่น..... 6
2.2	ทางแยกประเภท Y ระนาบ E..... 7
2.3	ผลการจำลองการสูญเสียการส่งสัญญาณ..... 7
2.4	การเพิ่มสแต็ปขึ้นบันไดแบบสองชั้น..... 8
2.5	การเพิ่มสแต็ปขึ้นบันไดแบบสี่ชั้น..... 8
2.6	แบบจำลองผลลัพธ์ของมุมเปิดที่แตกต่างกัน..... 8
2.7	ผลการจำลองของมุมเปิดที่แตกต่างกันของการปรับสแต็ปของชั้นบันไดแบบต่าง ๆ..... 9
2.8	ทางแยกประเภท T ระนาบ H..... 9
2.9	ผลการจำลองการสูญเสียจากการสะท้อนกลับและการสูญเสียจากการส่งผ่านสัญญาณ ของตัวแบ่งกำลังงานทางแยก T ระนาบ H..... 10
2.10	ผลการจำลองการสูญเสียการส่งผ่านสัญญาณระหว่างอินพุตไปยังเอาต์พุตของ ตัวแบ่งกำลังงานสี่ทาง..... 11
2.11	ลักษณะเฟสเอาต์พุตของตัวแบ่งกำลังงานสี่ทาง..... 11
2.12	การตั้งค่าระบบการรวมกำลังงานสำหรับแมกนีตรอนแบบต่อเนื่องขนาด 60 กิโลวัตต์..... 13
2.13	ผลการจำลองและผลการทดสอบจริงของท่อนำคลื่นรวมกำลังงาน 5 พอร์ต..... 13
2.14	ผลการจำลองของแอมพลิจูดอินพุต..... 14
2.15	การกระจายของสนามไฟฟ้าสำหรับกำลังงานรวมสี่ทาง กำลังงาน 80 กิโลวัตต์..... 15
3.1	คลื่นความถี่ไมโครเวฟ..... 16
3.2	การลดทอนเนื่องจากการสูญเสียจากตัวนำและค่าคงที่การลดทอนเนื่องจากการสูญเสีย อิเล็กทรอนิกส์..... 21
3.3	ทางแยก T ท่อนำคลื่นระนาบ E..... 24
3.4	วงจรเทียบเท่าสายส่งของทางแยก T ระนาบ E..... 24
3.5	ทางแยก T ท่อนำคลื่นระนาบ H..... 25

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.6	วงจรถียบเท่าสายส่งของในทางแยก T ระนาบ H..... 26
3.7	ทางแยก T ท่อนำคลื่นระนาบ E-H..... 27
3.8	วงจรถียบเท่าสายส่งของทางแยก T ระนาบ E-H..... 27
3.9	ทิศทางการแยกของสนามไฟฟ้าท่อนำคลื่นระนาบ E ทิศทางสนามไฟฟ้าเฟสตรงกันข้าม 28
3.10	ทิศทางการแยกของสนามไฟฟ้าท่อนำคลื่นระนาบ H ทิศทางสนามไฟฟ้าเฟสตรงกัน..... 28
3.11	การแบ่งกำลังงาน 29
3.12	การรวมกำลังงาน 29
3.13	การแมทช์อิมพีแดนซ์โดยใช้รีแอกแทนซ์ 2 ตำแหน่งที่วางห่างกัน $\lambda_g / 8$ 31
3.14	แอดมิตแทนซ์สมิตชาร์ตของวงจรมัทช์ 32
4.1	บล็อกไดแกรมของระบบการรวมกำลังงานของท่อนำคลื่นกับการนำไปใช้งาน 33
4.2	ท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมขนาดมาตรฐาน WR340 35
4.3	การจำลองท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมขนาดสี่เหลี่ยมมาตรฐาน WR340 36
4.4	ผลการจำลองค่าการสูญเสียจากการสะท้อนกลับของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมขนาด มาตรฐาน WR340 ที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรต..... 37
4.5	ผลการจำลองค่าการสูญเสียการส่งผ่านระหว่างอินพุตไปยังเอาต์พุตของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม..... 37
4.6	ผลการจำลองการแพร่กระจายคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม ขนาดมาตรฐานWR340 ที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรต..... 38
4.7	การจำลองท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมขนาดสี่เหลี่ยมมาตรฐานกับแหล่งกำเนิดคลื่น แม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง 38
4.8	ผลการจำลองค่าการสูญเสียจากการสะท้อนกลับของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมกับ แหล่งกำเนิดคลื่น..... 39
4.9	ขนาดมุมมองด้านบนของท่อนำคลื่นทางแยกสองทางแยกรูปตัว Y ระนาบ H..... 40
4.10	ตัวอย่างการจำลองทิศทางการแพร่กระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในการปรับ พารามิเตอร์ลำดับที่ 1..... 42
4.11	ตัวอย่างการจำลองทิศทางการแพร่กระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในการปรับ พารามิเตอร์ลำดับที่ 5..... 42

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 ตัวอย่างการจำลองทิศทางการแพร่กระจายของของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในการปรับพารามิเตอร์ลำดับที่ 8.....	42
4.13 ตัวอย่างการจำลองทิศทางการแพร่กระจายของของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในการปรับพารามิเตอร์ลำดับที่ 10	43
4.14 ผลการจำลองการแพร่กระจายคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของพอร์ตอินพุตพอร์ตที่ 1.....	44
4.15 ผลการจำลองการแพร่กระจายคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของพอร์ตอินพุตพอร์ตที่ 2.....	44
4.16 ผลการจำลองการแพร่กระจายคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของพอร์ตเอาต์พุตพอร์ตที่ 3	44
4.17 ค่าสูญเสียจากการสะท้อนกลับอินพุต (S11, S22).....	45
4.18 ค่าสูญเสียจากการสะท้อนกลับเอาต์พุต (S33).....	46
4.19 ค่าการสูญเสียการส่งสัญญาณระหว่างพอร์ตอินพุตไปยังเอาต์พุต (S31, S32, S13, S23).....	46
4.20 การจำลองท่อนำคลื่นแบบรวมกำลังงานโครงสร้าง Y ระนาบ H.....	47
4.21 การแพร่กระจายสนามไฟฟ้าของท่อนำคลื่นอินพุตพอร์ตที่ 1	48
4.22 การแพร่กระจายสนามไฟฟ้าของท่อนำคลื่นอินพุตพอร์ตที่ 2	48
4.23 การแพร่กระจายสนามไฟฟ้าของท่อนำคลื่นเอาต์พุตพอร์ตที่ 3	49
4.24 ผลการจำลองค่าสูญเสียจากการสะท้อนกลับพอร์ตอินพุต (S11, S22).....	50
4.25 ผลการจำลองค่าสูญเสียจากการสะท้อนกลับเอาต์พุต (S33).....	50
4.26 ผลการจำลองค่าการสูญเสียการส่งสัญญาณระหว่างพอร์ตอินพุตไปยังเอาต์พุต (S31, S32, S13 และ S23).....	51
4.27 แบบจำลองของท่อนำคลื่นสำหรับรวมกำลังงานโครงสร้าง Y ระนาบ H กับแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงเมื่อมีการเพิ่มสตาบิลไนเซอร์.....	52
4.28 แบบจำลองการแพร่กระจายสนามไฟฟ้าอินพุตพอร์ตที่ 1	52
4.29 แบบจำลองการแพร่กระจายสนามไฟฟ้าอินพุตพอร์ตที่ 2	53
4.30 แบบจำลองการแพร่กระจายสนามไฟฟ้าเอาต์พุตพอร์ตที่ 3	53
4.31 ผลการจำลองค่าสูญเสียจากการสะท้อนกลับอินพุต (S11, S22)	54
4.32 ผลการจำลองค่าสูญเสียจากการสะท้อนกลับเอาต์พุต (S33).....	55

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.33 ผลการจำลองค่าสูญเสียจากการส่งสัญญาณระหว่างพอร์ตอินพุตไปยังเอาต์พุต (S31, S32, S13 และ S23).....	55
5.1 ระบบการทดสอบที่นำคลื่นแบบรวมกำลังงานสำหรับใช้งานกับพลาสมาความร้อน	58
5.2 การทดสอบวัดค่าพารามิเตอร์ที่นำคลื่นขนาด WR340 โดยใช้ เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบสองทาง	59
5.3 การทดสอบวัดค่าพารามิเตอร์ที่นำคลื่นแบบรวมกำลังงานโดยใช้ เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบสองทาง	60
5.4 การทดสอบวัดค่าพารามิเตอร์ที่นำคลื่นแบบรวมกำลังงานเมื่อเพิ่มสตัปจูนเนอร์ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบสองทาง.....	61
5.5 บล็อกไดแกรมการทดสอบการแบ่งและรวมกำลังงานสำหรับที่นำคลื่น แบบรวมกำลังงาน.....	62
5.6 การวัดกำลังงานเอาต์พุตของสัญญาณระหว่างพอร์ตอินพุตไปยังพอร์ตเอาต์พุต โดยใช้ POWER METER.....	62
5.7 การวัดกำลังงานเอาต์พุตของสัญญาณระหว่างพอร์ตอินพุตไปยังพอร์ตเอาต์พุต เมื่อมีการเพิ่มสตัปจูนเนอร์ โดยใช้ POWER METER.....	63
5.8 การวัดกำลังงานเอาต์พุตของแมกนีตรอนโดยใช้ POWER METER.....	64
5.9 การวัดกำลังงานเอาต์พุตของแมกนีตรอนแบบรวมกำลังงานโดยใช้ POWER METER	65
5.10 การทดสอบแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงด้วยแมกนีตรอนที่มีเอาต์พุต ขนาด 800 วัตต์.....	66
5.11 บล็อกไดแกรมที่นำคลื่นแบบรวมกำลังงานสำหรับใช้งานกับพลาสมา	67
5.12 การทดสอบแหล่งกำเนิดพลาสมาความร้อนเมื่อยังไม่ใช้ที่นำคลื่นแบบรวมกำลังงาน.....	67
5.13 การทดสอบแหล่งกำเนิดพลาสมาความร้อนเมื่อใช้ที่นำคลื่นแบบรวมกำลังงาน.....	68
5.14 การทดสอบแหล่งกำเนิดพลาสมาความร้อนเมื่อใช้ที่นำคลื่นแบบรวมกำลังงานร่วมกับ สตัปจูนเนอร์	69
5.15 ผลการวัดค่าสูญเสียสะท้อนกลับของทั้งสามพอร์ต (S11, S22 และ S33).....	70
5.16 ผลการวัดค่าการสะท้อนกลับของทั้งสามพอร์ต (S11, S22 และ S33) เมื่อใช้กับ ที่นำคลื่นแบบรวมกำลังงาน	71

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.17 ค่าการสูญเสียการแยกตัวระหว่างพอร์ตอินพุต (S12, S21) ของท่อนำคลื่น แบบรวมกำลังงาน ที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรต์.....	71
5.18 ค่าการสูญเสียการนำส่งสัญญาณ (S13, S23, S31 และ S32) ของท่อนำคลื่น แบบรวมกำลังงานความถี่ 2.45 กิกะเฮิรต์.....	72
5.19 ผลการวัดค่าการสะท้อนกลับของทั้งสามพอร์ต (S11 S22 และ S33) เมื่อใช้ท่อนำคลื่น รวมกำลังงานและมีการเพิ่มสตัปจูนเนอร์.....	73
5.20 ค่าการสูญเสียการแยกตัวระหว่างพอร์ตอินพุต (S12, S21) ของท่อนำคลื่น แบบรวมกำลังงานและมีการเพิ่มสตัปจูนเนอร์.....	73
5.21 ค่าการสูญเสียการนำส่งสัญญาณ (S13, S23, S31 และ S32) เมื่อมีการเพิ่มสตัปจูนเนอร์.....	74
5.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะเปลวและความเร็วลมก่อนใช้ ท่อนำคลื่นแบบรวมกำลังงาน	78
5.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะเปลวและความเร็วลมเมื่อใช้ ท่อนำคลื่นแบบรวมกำลังงาน	79
5.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะเปลวและความเร็วลมเมื่อใช้ ท่อนำคลื่นแบบรวมกำลังงานและเพิ่มสตัปจูนเนอร์	79
5.25 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานที่แตกต่างกันที่ความเร็วลมเท่ากัน.....	80

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

a	=	ด้านกว้างของคือนำคลื่น
b	=	ด้านแคบของคือนำคลื่น
m	=	จำนวนเท่าของครึ่งความยาวคลื่นที่ด้านกว้างของท่อนำคลื่น
n	=	จำนวนเท่าของครึ่งความยาวคลื่นที่ด้านแคบของท่อนำคลื่น
c	=	ความเร็วแสงในอากาศว่าง
f_{cutoff}	=	ความถี่ตัด
Z_o	=	อิมพีแดนซ์ลักษณะในพื้นที่ว่าง
$Z_{TE(m,n)}$	=	อิมพีแดนซ์ลักษณะเฉพาะโหมดของท่อนำคลื่น
Z_0	=	อิมพีแดนซ์ลักษณะพื้นที่ว่าง
λ	=	ความยาวคลื่นในอากาศว่าง
λ_{cutoff}	=	ความยาวคลื่นคัทออฟ
λ_g	=	ความยาวคลื่นในที่แพร่กระจายในท่อนำคลื่น
η'	=	อิมพีแดนซ์ลักษณะในพื้นที่ว่าง
R_s	=	ความต้านทานพื้นผิวของผนังท่อนำคลื่น
δ	=	ความลึกผิว
k	=	Wave Number
σ	=	ค่าการนำไฟฟ้าของวัสดุ
R_s	=	ค่าความต้านทานพื้นผิวของผนังท่อนำคลื่น
ϵ	=	การอนุญาตทางไฟฟ้า
ϵ_0	=	คงที่การอนุญาตในพื้นที่ว่าง
ϵ_r	=	การอนุญาตสัมพัทธ์หรือค่าคงที่ไดอิเล็กทริก
μ	=	ความสามารถในการซึมผ่าน
μ_0	=	การซึมผ่านของพื้นที่ว่าง
μ_r	=	การซึมผ่านสัมพัทธ์

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

α_d	=	การสูญเสียจากการสูญเสียไดโอดเล็กทริก
α_c	=	การสูญเสียจากตัวนำ
P_T	=	คือกำลังไฟฟ้าที่ส่งไปยังโหลด
P_R	=	คือกำลังที่โหลดได้รับ
IL_{dB}	=	การสูญเสียยกแทรก
$S_{11}S_{22}S_{33}$	=	การสูญเสียจากการสะท้อนกลับ
$S_{23}S_{13}$	=	ค่าการสูญเสียจากการส่งสัญญาณในการแบ่งกำลังงาน
$S_{31}S_{32}$	=	ค่าการสูญเสียจากการส่งสัญญาณในการรวมกำลังงาน

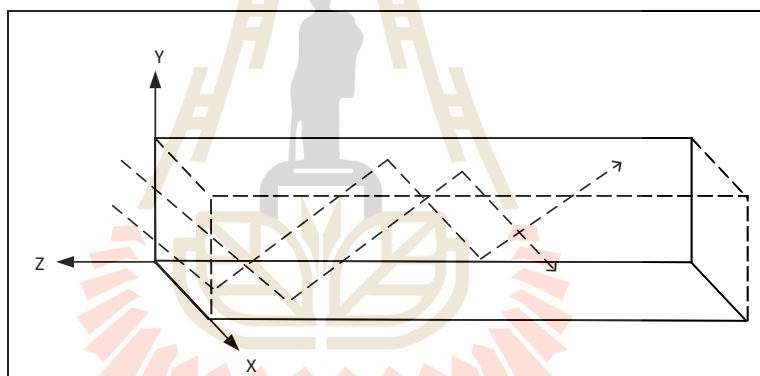
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

แมกนีตรอนเป็นหลอดสุญญากาศที่กำลังงานสูงที่สร้างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงย่านความถี่ไมโครเวฟ ปัจจุบันเป็นที่ต้องการอย่างมากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงกำลังงานสูงย่านไมโครเวฟถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เนื่องจากมีข้อได้เปรียบหลายประการ เช่น มีราคาไม่แพง ประสิทธิภาพสูง และให้กำลังงานที่สูง แมกนีตรอนถูกนำมาใช้หลากหลายอย่างต่อเนื่อง ซึ่งสามารถใช้เป็นแหล่งไมโครเวฟเชิงอุตสาหกรรมได้ ปัจจุบันมีการใช้แมกนีตรอนในดาวเทียมสื่อสาร เตาอบไมโครเวฟ และอุปกรณ์เครื่องมือสื่อสารไมโครเวฟ การใช้งานทางทหารหรืออาจถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมพลาสติกความร้อน (Wnukowski and Moróń 2021) ในระบบสื่อสารที่ใช้คลื่นไมโครเวฟนั้นจำเป็นต้องมีส่วนประกอบต่าง ๆ เหมือนกับในระบบที่ใช้คลื่นวิทยุความถี่ต่ำกว่า กล่าวคือจะต้องมีส่วนประกอบหลัก ๆ คือเครื่องส่ง ตัวกลางนำสัญญาณ และเครื่องรับ ในเครื่องส่งจะมีตัวกำเนิดสัญญาณไมโครเวฟมีมอดูเลเตอร์ทำหน้าที่มอดูเลตสัญญาณที่ต้องการส่งเข้าไป ส่วนประกอบหลักคือตัวกลางที่ใช้ส่งสัญญาณไมโครเวฟซึ่งโดยทั่วไปจะทำสองวิธีด้วยกันคือ ส่งผ่านไปทางสายนำสัญญาณและส่งผ่านไปทางบรรยากาศโดยใช้สายอากาศ โดยทั่วไปสายนำสัญญาณที่ใช้ในความถี่ย่านไมโครเวฟจะมี 3 แบบหลัก ๆ คือท่อนำคลื่น สายโคแอกเซียล และไมโครสตริป ในส่วนของไมโครสตริป จะมีขนาดเล็กและสร้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ได้ จึงนิยมที่ใช้ในงานที่กำลังงานไม่สูงหรือในวงจรภาครับทั่วไป ส่วนท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมโดยทั่วไปจะมีรูปหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าถือว่าเป็นสายนำสัญญาณของคลื่นไมโครเวฟที่ใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุดแบบหนึ่งคุณสมบัติของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมโดยจะพิจารณาจากท่อนำคลื่นภายในที่เป็นอากาศที่ไม่มีการสูญเสียของตัวกลางและมีการสูญเสียต่ำสามารถทนต่อคลื่นกำลังงานสูงได้ ลักษณะของท่อเป็นเส้นตรงไม่คดงอ และรูปหน้าตัดของท่อเป็นรูปสี่เหลี่ยม สามารถแยกสัญญาณที่อยู่ติดกันได้ดีมีการป้องกันอย่างสมบูรณ์ สามารถส่งกำลังงานสูงสุดที่สูงมากและมีการสูญเสียต่ำมากที่ความถี่สูงย่านไมโครเวฟ สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมที่ต้องการกำลังงานสูงจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงมาก เช่น อุตสาหกรรมในการสื่อสารด้วยคลื่นไมโครเวฟและคลื่นมิลลิเมตรเวฟ อุตสาหกรรมพลาสติก และระบบเรดาร์ (Themelis and Vardelle 2012) เนื่องจากการแพร่กระจายของคลื่นทำได้โดยการตอบสนองจากผนังของท่อมากกว่าผ่านท่อการสูญเสียกำลังงานในท่อนำคลื่นจึงต่ำกว่าในสายส่งที่เทียบเคียงได้ อย่างไรก็ตามกำลังงานภายในท่อนำคลื่นอาจถูกจำกัดด้วยข้อจำกัดของขนาดช่องของท่อนำคลื่นหรืออาจถูกจำกัดด้วยความถี่

ในการทำงาน และนอกจากนี้ยังมีการแบ่งกำลังงานและการรวมกำลังงานของท่อนำคลื่นที่ใช้เป็นทางเลือกในการเพิ่มกำลังงานของคลื่นความถี่สูงเพื่อใช้เป็นส่วนประกอบที่สำคัญในการส่งสัญญาณที่ใช้กันในความถี่ย่านสูง สำหรับอุตสาหกรรมที่ต้องการกำลังงานสูง (Chen, Yang et al. 2020) ตัวแบ่งกำลังและตัวรวมกำลังมีหลายรูปแบบ ในที่นี้กล่าวถึงตัวแบ่งและตัวรวมกำลังงานท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม สำหรับตัวแบ่งและตัวรวมของท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมมีรูปแบบในการออกแบบค่อนข้างง่าย (Cui, Wang et al. 2018) ซึ่งตัวแบ่งและตัวรวมท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมมีการสูญเสียการแทรกต่ำและการออกแบบโครงสร้างที่ง่ายสำหรับความถี่ที่สูงขึ้น แบนด์วิดท์กว้างและความสามารถในการทนต่อคลื่นกำลังงานสูงได้ดี โดยท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมเหมาะใช้เป็นสายนำสัญญาณกับคลื่นความถี่สูง เนื่องจากการแพร่กระจายของคลื่นทำได้โดยการตอบสนองจากผนังของท่อ (Lomakin, Gold et al. 2017) ดังนั้นท่อนำคลื่นที่มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าจึงถูกนำมาใช้สำหรับเป็นสายส่งแบบท่อนสี่เหลี่ยมขนาดมาตรฐานและรูปทรงที่มีคุณสมบัติง่ายต่อการออกแบบ แสดงดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 ท่อนำคลื่นรูปสี่เหลี่ยมขนาดมาตรฐาน

ดังนั้นจึงมีแนวคิดที่จะออกแบบและสร้างท่อนำคลื่นสำหรับแบ่งและรวมกำลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงด้วยแมกนีตรอนกำลังงานอินพุต 1.5 กิโลวัตต์ ที่ย่านความถี่เดียวกันของแมกนีตรอนทั้งสองตัวเพื่อให้ได้กำลังงานสูงในย่านความถี่สูง (Zhang, Huang et al. 2017) โดยการออกแบบท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมขนาดมาตรฐาน WR340 ความถี่ย่าน S-Band ใช้สำหรับออกแบบเป็นตัวแบ่งและรวมกำลังงานของท่อนำคลื่นโครงสร้างที่ใช้ออกแบบเป็นโครงสร้าง Y ระนาบ H (Chen, Xie et al. 2010) สำหรับใช้ในการเพิ่มกำลังงานของแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง ลักษณะของการแบ่งกำลังงานเมื่อกำลังงานถูกป้อนจากพอร์ตอินพุตก็จะแยกตัวไปตามพอร์ตเอาต์พุตสองพอร์ตด้วยที่ขนาดที่เท่ากันและอยู่ในเฟสเดียวกัน (Kutsak and Logachova 2014) ในทางกลับกันเมื่อกำหนดป้อนอินพุตเข้าทั้งสองพอร์ตและกำหนดเอาต์พุตหนึ่งพอร์ต ลักษณะของเอาต์พุตจะมี

กำลังงานเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าในกรณีที่มีไม่มีการสูญเสียจากปัจจัยต่าง ๆ (Liu, Chen et al. 2018) และวัสดุที่ใช้ในการออกแบบใช้ในการออกแบบท่อนำคลื่นเป็นอลูมิเนียมขนาดความหนา 3 มิลลิเมตร ซึ่งวิธีนี้เป็นแนวทางที่ดีที่สุดสำหรับการเพิ่มกำลังงานของแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงเพื่อให้สามารถใช้เป็นแหล่งไมโครเวฟที่กำลังงานสูงต้นทุนต่ำ ราคาไม่แพงและให้กำลังงานที่สูง สามารถใช้เป็นแหล่งไมโครเวฟเชิงอุตสาหกรรม เพื่อใช้ในงานอุตสาหกรรมที่ต้องการกำลังงานสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อออกแบบและสร้างท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมสำหรับรวมกำลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง โดยใช้แมกนีตรอนเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง สำหรับประยุกต์ใช้เป็นแหล่งกำเนิดกำลังงานสูงย่านความถี่ไมโครเวฟที่ประหยัดต้นทุนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.3 สมมุติฐานของการวิจัย

การรวมกำลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง โดยใช้ท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมสำหรับรวมกำลังงาน จากแหล่งกำเนิดคลื่นราคาถูกที่มากกว่าหนึ่งแหล่งแล้วสามารถเพิ่มกำลังงานของคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ย่านไมโครเวฟได้มากขึ้น

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

ออกแบบและสร้างท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมเพื่อรวมกำลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าย่านความถี่ไมโครเวฟได้ โดยใช้ท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมแบบสามพอร์ตโครงสร้างทางแยก Y ระนาบ H ในการเพิ่มกำลังงานเอาท์พุทให้มีกำลังงานสูงสุดและสามารถนำไปใช้เป็นสายนำสัญญาณสำหรับแหล่งกำเนิดคลื่นที่ต้องการกำลังงานสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

- 1) ศึกษาค้นคว้าข้อมูลประเภทต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม
- 2) วิจัย พัฒนา ออกแบบและสร้างท่อนำคลื่นสำหรับรวมกำลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง
- 3) ทดสอบ วัดผลค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องับหลักการรวมกำลังงานของท่อนำคลื่น เช่น ค่าการสูญเสียการสะท้อนกลับ ค่าการสูญเสียจากการส่งสัญญาณ รวมถึงการแบ่งและรวมกำลังงานของท่อนำคลื่น

1.6 วิธีดำเนินการวิจัย

1.6.1 แนวทางการดำเนินงาน

ศึกษาและสำรวจประสิทธิภาพที่เกี่ยวกับการการออกแบบท่อนำคลื่นสำหรับรวมกำลังงานและแบ่งกำลังงาน เพื่อเป็นตัวเลือกในการตัดสินใจในการออกแบบท่อนำคลื่นให้ตรงตามวัตถุประสงค์ของการใช้งาน จึงได้ทำการออกแบบและสร้างท่อนำคลื่นสำหรับรวมกำลังงานโดยใช้แมกนีตรอนเป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ต และได้มีการทดสอบการทำงานของระบบและทำการบันทึกค่าพารามิเตอร์ของระบบดังนี้ ค่าการสูญเสียจากการสะท้อนกลับ ค่าสูญเสียจากการส่งผ่านสัญญาณ ค่าการสูญเสียการแยกตัวของพอร์ตอินพุต และกำลังงานเอาต์พุตของแมกนีตรอน

1.6.2 ระเบียบวิธีวิจัย

- 1) ศึกษาค้นคว้าและเก็บรวบรวมข้อมูล โดยการสำรวจประสิทธิภาพและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์
- 2) วิเคราะห์ ออกแบบ และศึกษาถึงความเป็นไปได้ด้วยข้อมูลต่าง ๆ ทางคณิตศาสตร์ หรือข้อมูลที่มีความน่าเชื่อถือทางวิชาการ เกี่ยวกับการรวมกำลังงานของท่อนำคลื่น
- 3) สร้างเครื่องต้นแบบ เพื่อทำการวัดและทดสอบประสิทธิภาพในการรวมกำลังงานและการแบ่งกำลังงานของท่อนำคลื่น พร้อมทั้งทำการทดลองผลให้ได้ตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้ท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีขนาดมาตรฐานที่สามารถแบ่งหรือรวมกำลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงได้
- 2) ได้องค์ความรู้ในเรื่องของการออกแบบการแบ่งและรวมกำลังงานสำหรับท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม ซึ่งเป็นแนวทางที่สนใจสามารถนำไปประยุกต์ใช้ เพื่อต่อยอดให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากยิ่งขึ้น
- 3) รู้จักกระบวนการคิด วิเคราะห์ อย่างเป็นระบบ เพื่อสามารถนำความรู้ที่ได้มาประยุกต์ใช้งานในด้านอื่น ๆ เพื่อแก้ไขปัญหาทางวิศวกรรม ที่เกิดขึ้นในทางปฏิบัติและสามารถนำความรู้ไปใช้ประกอบวิชาชีพได้

บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

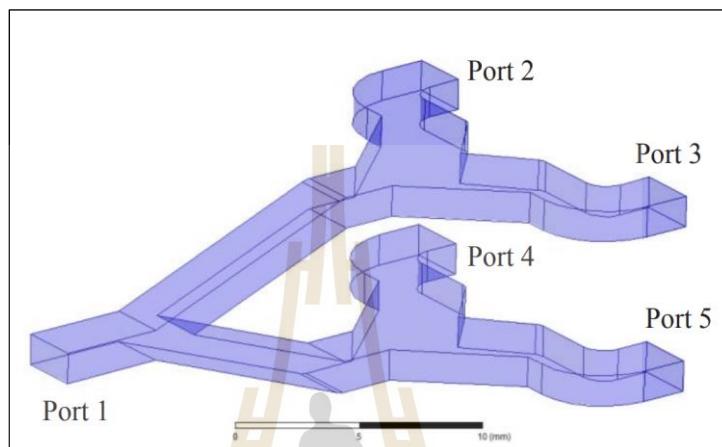
2.1 ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์หลักคือ เพื่อออกแบบและสร้างท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมสำหรับรวมกำลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง โดยใช้แมกนีตรอนเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง สำหรับประยุกต์ใช้เป็นแหล่งกำเนิดกำลังงานสูงย่านความถี่ไมโครเวฟที่ประหยัดต้นทุนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ด้วยวิธีการใช้ท่อนำคลื่นขนาดสี่เหลี่ยมมาตรฐานประเภท WR340 ออกแบบเป็นท่อนำคลื่นแบบแบ่งและรวมกำลังงานในช่วงความถี่ที่ต้องการใช้งาน เพื่อให้สามารถนำมาใช้เป็นท่อนำสัญญาณในการรวมกำลังงานสำหรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงกำลังงานสูงได้ เพื่อให้เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นแบบกำลังงานสูงความถี่สูงตามความต้องการในการใช้งาน สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้คิดค้นการออกแบบและสร้างท่อนำคลื่นแบบรวมกำลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงเพื่อให้ได้กำลังงานสูงสุดจึงได้ศึกษาปรัทัศน์วรรณกรรมเกี่ยวกับการออกแบบท่อนำคลื่นสำหรับรวมกำลังงานและการใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นให้กับท่อนำคลื่นสำหรับรวมกำลังงาน

2.1.1 การออกแบบท่อนำคลื่นโครงสร้างทางแยกรูปตัว Y ระบาย E และโครงสร้างทางแยกรูปตัว Y ระบาย H สองตัว

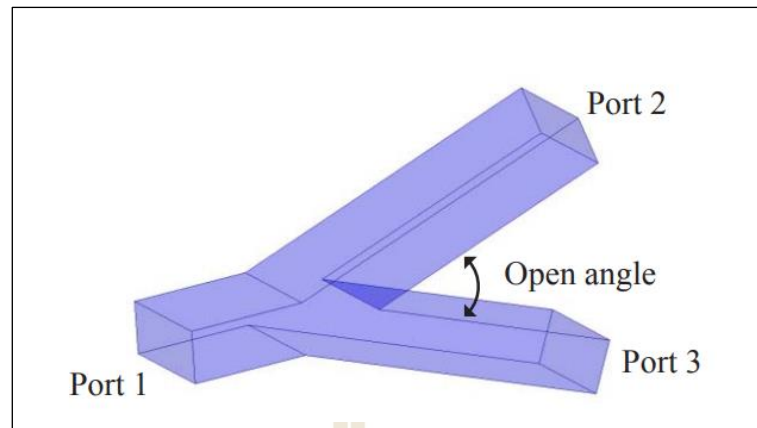
จากงานวิจัย (Zhang, Song et al. 2015) ที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบการแบ่งและรวมกำลังงานของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม ตัวแบ่งกำลังและรวมกำลังงานได้รับการออกแบบเป็นสองทางแยก Y ระบาย E และทางแยก T ระบาย H เหตุผลที่นักวิจัยได้เลือกทางแยก Y ของระบาย H คือ ท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมโครงสร้างนี้ง่ายต่อการออกแบบ และเหมาะสำหรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง ข้อได้เปรียบของของท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมคือมีการสูญเสียต่ำที่ย่านความถี่สูงและง่ายต่อการออกแบบและการสร้างท่อนำคลื่นแบบแบ่งและรวมกำลังงานสำหรับความถี่ที่สูง ในบทความนี้นักวิจัยได้กล่าวถึงเกี่ยวกับรายละเอียดของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมที่สร้างจากโลหะทั้งหมด ซึ่งจะมีวิธีการออกแบบท่อนำคลื่นสำหรับแบ่งและรวมกำลังงานสำหรับคลื่นมิลลิเมตร มีการกล่าวถึงการออกแบบสำหรับตัวแบ่งกำลังโดยใช้โครงสร้างทางแยกตัว T ระบาย E ที่ได้รับการพัฒนาแล้ว และได้ถูกนำมาใช้เพื่อสร้างท่อนำคลื่นสำหรับแบ่งกำลังและรวมกำลังงาน

สำหรับการวิเคราะห์และการออกแบบตัวแบ่งกำลังท่อนำคลื่นโลหะทั้งหมดที่ออกแบบไว้แบบสี่ทางแยกดังรูปที่ 2.1 ตัวแบ่งที่ใช้แยกระหว่างพอร์ตในพอร์ตที่ 1 ในที่นี้คือจุดแยก Y ระนาบ E และทางแยกในพอร์ตที่ 2 กับ 3 และ ในพอร์ตที่ 4 และ 5 คือโครงสร้างทางแยกรูปตัว T ระนาบ H เหตุผลที่ทำให้นักวิจัยเลือกทางแยกตัว Y และทางแยก T เนื่องจากโครงสร้างนี้ง่ายต่อการออกแบบ

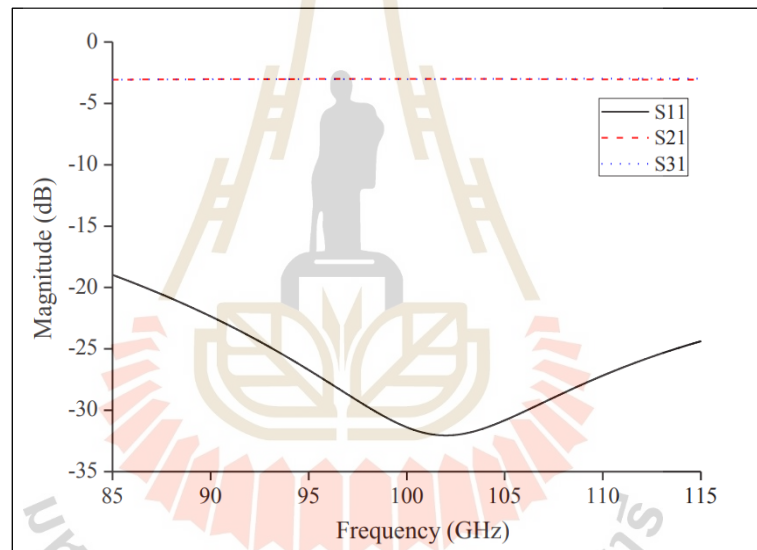


รูปที่ 2.1 การกำหนดพอร์ตของตัวแบ่งกำลังงานของท่อนำคลื่น

ต่อมานักวิจัยได้มีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่สำคัญเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพสำหรับการแบ่งและรวมกำลังงาน ซึ่งเอาต์พุตทั้งหมดต้องอยู่ในเฟสเดียวกันด้วยโครงสร้างทางแยกตัว Y ระนาบ E กำลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ในการออกแบบอยู่ในโหมด TE₁₀ คือแยกออกเป็นสองเอาต์พุต แสดงดังรูปที่ 2.2 โดยโครงสร้างสมมาตรของทางแยกประเภท Y ระนาบ E กำลังงานที่แยกออกไปยังพอร์ตที่ 2 และ 3 มีความเท่ากันดังรูปที่ 2.3 แสดงผลการจำลองของตัวแบ่งกำลังงานสองทางแยกในระนาบ E ผลการจำลองการสูญเสียการแทรกหรือการสูญเสียการแบ่งกำลังงานใกล้เคียงกับ -3 dB เนื่องจากผนังตัวนำไฟฟ้าที่สมบูรณ์แบบจึงมีการสูญเสียจากการสะท้อนกลับน้อยกว่า -20 dB

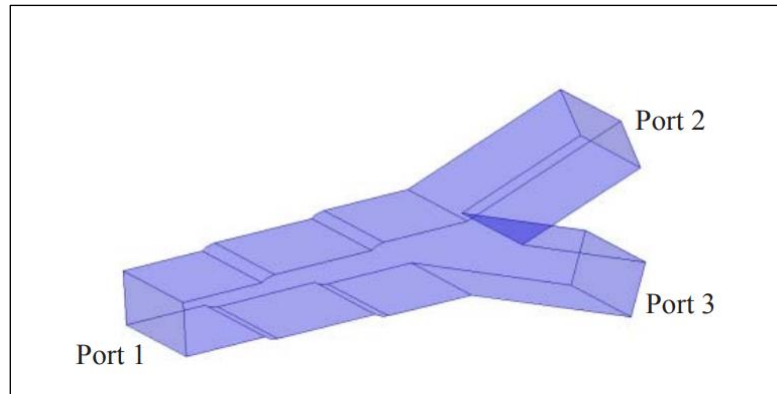


รูปที่ 2.2 ทางแยกประเภท Y ระนาบ E

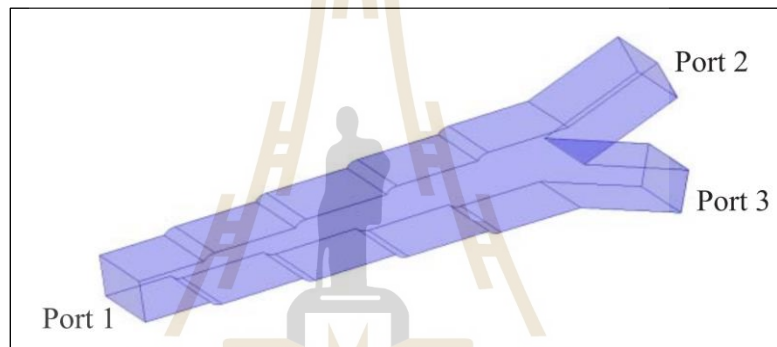


รูปที่ 2.3 ผลการจำลองการสูญเสียการส่งสัญญาณ

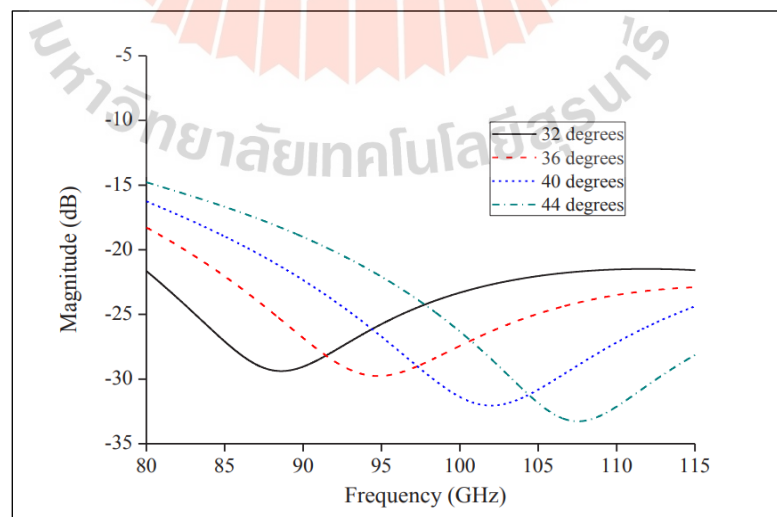
โดยทั่วไปเพื่อให้ได้ผลการแมทซ์อิมพีแดนซ์ที่ดีที่สุด นักวิจัยได้มีการปรับมุมเปิดระหว่างสองทางแยกของรูปตัว Y ระนาบ E เพื่อให้สามารถจับคู่อิมพีแดนซ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตได้ดี การเพิ่มสเต็ปเป็นขั้นบันไดแบบสองขั้นและสี่ขั้นจะแสดงดังรูปที่ 2.4 และ 2.5 โดยผลของการปรับมุมเปิดของสองทางแยกที่แตกต่างกัน แสดงดังรูปที่ 2.6 และ แสดงแบบจำลองผลลัพธ์ผลการจำลองของมุมเปิดที่แตกต่างกันของการเพิ่มสเต็ปแบบขั้นบันไดต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 2.7



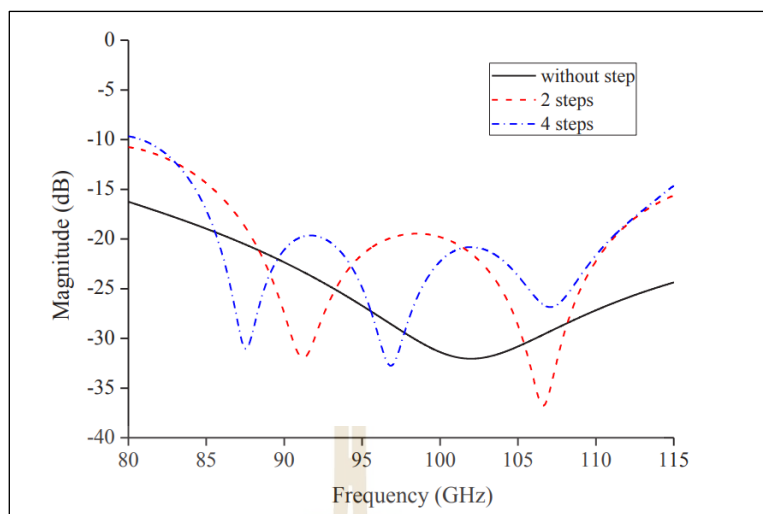
รูปที่ 2.4 การเพิ่มสเต็ปขึ้นบันไดแบบสองขั้น



รูปที่ 2.5 การเพิ่มสเต็ปขึ้นบันไดแบบสี่ขั้น

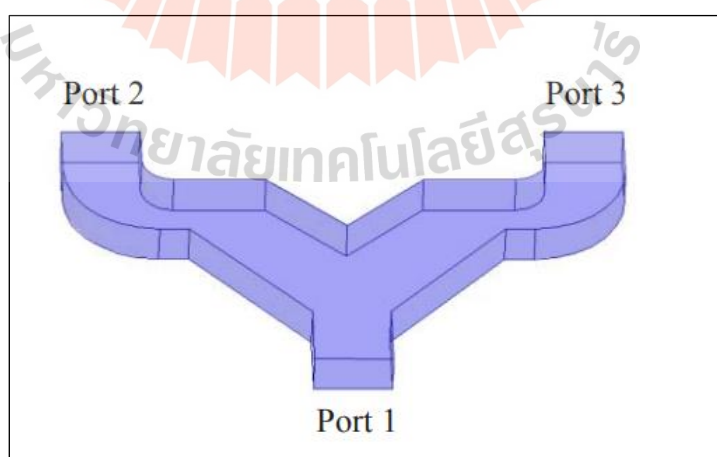


รูปที่ 2.6 แบบจำลองผลลัพธ์ของมุมเปิดที่แตกต่างกัน

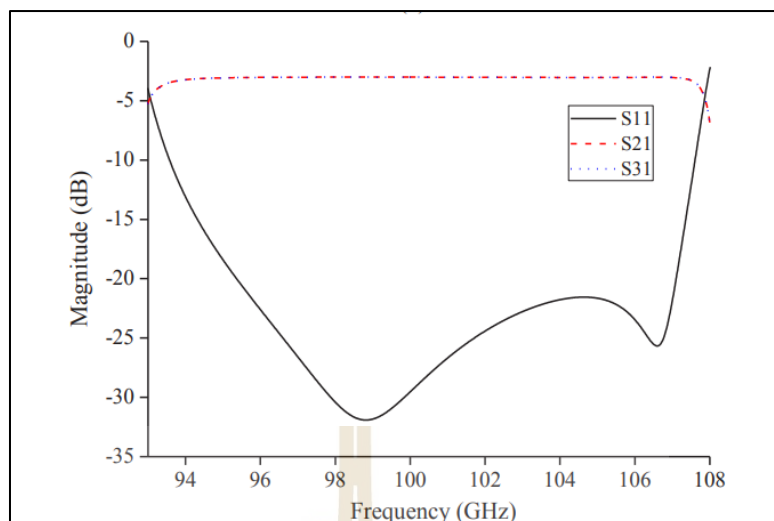


รูปที่ 2.7 ผลการจำลองของมุมเปิดที่แตกต่างกันของการปรับสเต็ปของชั้นบันไดแบบต่าง ๆ

ในส่วนต่อมาทางแยก T ระนาบ H แสดงดังรูปที่ 2.8 โดยทางแยกเป็นผนังรูปสามเหลี่ยม ระบายสมมาตร การสูญเสียผลตอบแทนสามารถปรับได้นอกจากนี้ยังใช้การแปลงอิมพีแดนซ์แบบไล่ระดับเพื่อให้ได้การแมทซ์อิมพีแดนซ์กับเอาต์พุตดังรูปที่ 2.9 แสดงผลการจำลองของตัวแบ่งกำลังงานทางแยกระนาบ H รูปตัว T การสูญเสียจากการสะท้อนกลับน้อยกว่า -20 dB จาก 95.4 ถึง 107.1 กิกะเฮิร์ต และการสูญเสียการแทรกหรือการสูญเสียการแบ่งกำลังงานมีค่าใกล้เคียงกับ -3 dB เนื่องจากการนำไฟฟ้าที่สมบูรณ์แบบของตัวนำ

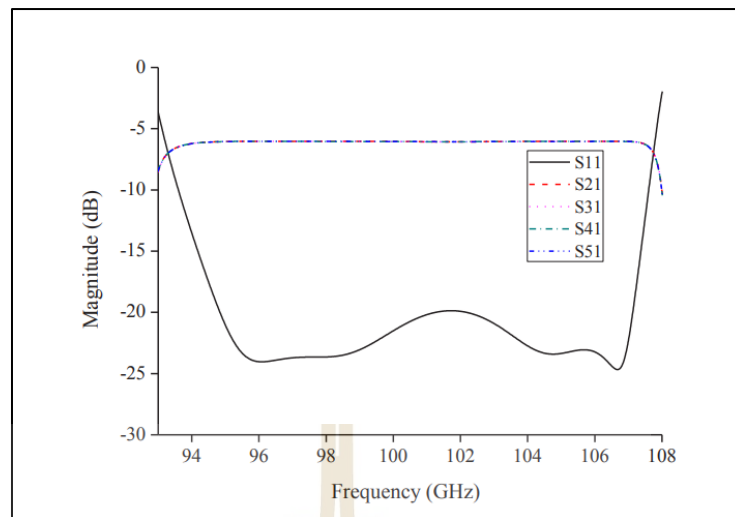


รูปที่ 2.8 ทางแยกประเภท T ระนาบ H

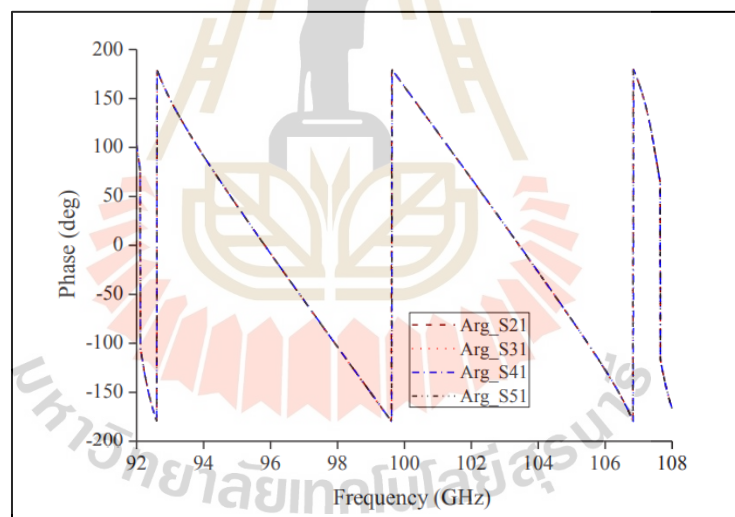


รูปที่ 2.9 ผลการจำลองการสูญเสียจากการสะท้อนกลับและการสูญเสียจากการส่งผ่านสัญญาณของตัวแบ่งกำลังงานทางแยก T ระนาบ H

จากการวิเคราะห์ระนาบ E ทางแยก Y และทางแยกตัว T ระนาบ H ซึ่งเป็นท่อนำคลื่นโลหะทั้งหมดสี่ทิศทางแบบจำลองตัวแบ่งที่แสดงในรูปที่ 2.1 ถูกสร้างขึ้นสองระนาบตัว T ระนาบ H เชื่อมต่อพอร์ตเอาต์พุตสองพอร์ตของตัวแบ่งกำลังงานของทางแยก Y ระนาบ E อินพุตสัญญาณจากพอร์ตที่หนึ่ง ถูกแบ่งออกเป็นสี่ทาง ซึ่งท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมมาตรฐานที่ใช้คือ WR10 ซึ่งมีขนาดความกว้างเท่ากับ 2.54 มิลลิเมตร และมีความสูงเท่ากับ 1.27 มิลลิเมตร พอร์ตเอาต์พุตสี่พอร์ตถูกจัดเรียงไว้ที่ระยะเท่ากัน โดยผลการจำลองการสูญเสียการส่งผ่านสัญญาณระหว่างอินพุตไปยังเอาต์พุตของตัวแบ่งกำลังงานสี่ทาง แสดงดังรูปที่ 2.10 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการสูญเสียจากการสะท้อนกลับมีค่าน้อยกว่าน้อยกว่า -20 dB จากความถี่ 94.8 ถึง 107.1 กิกะเฮิรตซ์ การสูญเสียการส่งผ่านระหว่างอินพุตไปยังเอาต์พุตคือ (S21, S31, S41 และ S51) ลักษณะเฟสของพอร์ตเอาต์พุต (พอร์ต 2, พอร์ต 3, พอร์ต 4 และพอร์ต 5) อยู่ในเฟสที่ตรงกัน แสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.10 ผลการจำลองการสูญเสียการส่งผ่านสัญญาณระหว่างอินพุตไปยังเอาต์พุตของตัวแบ่งกำลังงานสี่ทาง



รูปที่ 2.11 ลักษณะเฟสเอาต์พุตของตัวแบ่งกำลังงานสี่ทาง

โดยงานวิจัยนี้เป็นท่อนำคลื่นที่ทำด้วยโลหะตัวแบ่งและตัวรวมกำลังงานแบบสี่ทางสำหรับแอปพลิเคชันการอาร์เรย์ของคลื่นมิลลิเมตร ได้รับการวิเคราะห์และออกแบบตัวแบ่งกำลังที่พัฒนาขึ้นเพื่อให้สามารถแบ่งสัญญาณออกเป็นสี่ทางขนาดและเฟสเท่า ๆ กัน ข้อดีคือมีการสูญเสียต่ำการระบายความร้อนที่มีประสิทธิภาพโครงสร้างการแบ่งและรวมกำลังงานสามารถนำมาใช้ได้อย่างแพร่หลายในแอปพลิเคชันอาร์เรย์สายอากาศ

2.1.2 ระบบรวมกำลังงานไมโครเวฟที่มีพื้นฐานมาจากแมกนีตรอนล้อยการฉีดแบบไฮบริด 20 กิโลวัตต์สี่ตัวในย่านความถี่ S-band

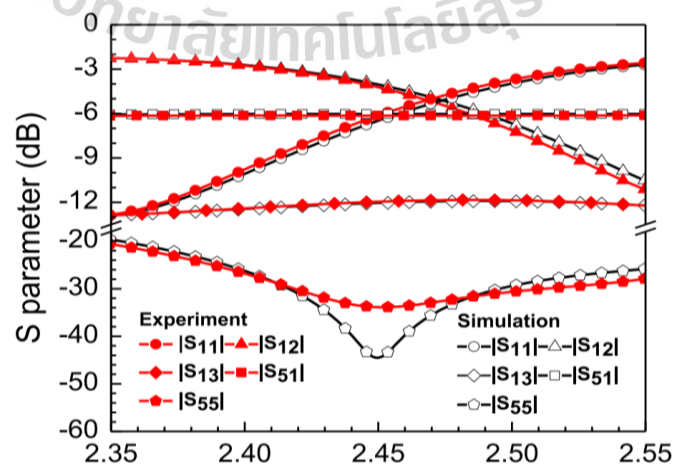
จากงานวิจัยของ (Liu, Chen et al. 2019) ที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับระบบรวมกำลังงานไมโครเวฟที่ใช้แหล่งกำเนิดคลื่นจากแมกนีตรอนล้อยการฉีดแบบไฮบริด 20 กิโลวัตต์สี่ตัวในย่านความถี่ S-band มีการออกแบบการรวมกำลังงานที่ความถี่สูง และใช้แมกนีตรอนล้อยการฉีดแบบไฮบริด เป็นรุ่นทดลองระบบรวมกำลังงานในการออกแบบ ผลที่ได้ทำการทดสอบการรวมกำลังแมกนีตรอนล้อยการฉีด การรวมกำลังงานที่มีการสูญเสียต่ำและได้รับการออกแบบความสัมพันธ์ของเฟสร่วมกับผลลัพธ์วิเคราะห์ประสิทธิภาพการรวมกำลังงานของแมกนีตรอนสี่ตัวการตรวจสอบเฟส มีความเสถียรของแอมพลิจูดเอาต์พุตที่ 0.01 dB (ยอดถึงยอด) เฟสความเสถียร ± 0.9 องศา (ยอดถึงยอด) แมกนีตรอน 20 กิโลวัตต์ สี่ทิศทางที่ได้นำเสนอระบบรวมกำลังงานเอาต์พุต 60.6 กิโลวัตต์ พร้อมทั้งกระบวนการปรับเฟสอัตโนมัติจำเป็นต้องมีตัวหมุนเวียนในระบบ ผลการทดสอบสำหรับระบบรวมกำลังงานแมกนีตรอนมีประสิทธิภาพในการใช้งานแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่ย่านไมโครเวฟกำลังสูงของงานอุตสาหกรรม ระบบการรวมกำลังงานของคลื่นไมโครเวฟที่มีแมกนีตรอนสี่ตัวเป็นแมกนีตรอนแบบคลื่นต่อเนื่อง ความถี่ย่าน S-band ขนาด 20 กิโลวัตต์ ได้สำเร็จ กำลังงานเอาต์พุตมากกว่า 60.0 กิโลวัตต์ และเฟสที่ตรงกันมีประสิทธิภาพการรวม 91.5 เปอร์เซ็นต์

ผลการทดสอบระบบรวมกำลังงานของแมกนีตรอนของระบบการรวมกำลังงานไมโครเวฟแมกนีตรอน 20 กิโลวัตต์ สี่ทิศทางตามท่อนำคลื่นขนาด WR340 ไมโครเวฟแมกนีตรอน 60 กิโลวัตต์ CW ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของระบบรวมพลังงาน ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.12 ระบบความเย็นสำหรับการไหลเวียนของน้ำที่ถูกเชื่อมต่อกับแมกนีตรอน เซอร์คูเลเตอร์ทำหน้าที่ส่งผ่านคลื่นที่สะท้อนกลับจากแอฟฟลิเคเตอร์เข้าไปในโหลดหลอกหรือดัมมี่โหลดระบายความร้อนด้วยน้ำ แมกนีตรอนอุตสาหกรรมที่ใช้สำหรับการรวมกำลังงานการทดลองคือแมกนีตรอนแบบต่อเนื่อง ที่ใช้การระบายความร้อนด้วยน้ำ โดยมีความเข้มสนามแม่เหล็กของแมกนีตรอนคือ 1.25 กิโลวัตต์ นอกจากนี้ความถี่ของแมกนีตรอนถูกควบคุมโดยการปรับจูนค่าการสะท้อนของแมกนีตรอนโดยใช้จูนเนอร์สามต้นข้าว (HD-22WST3, HD Microwave Co., ซีอาน, จีน)

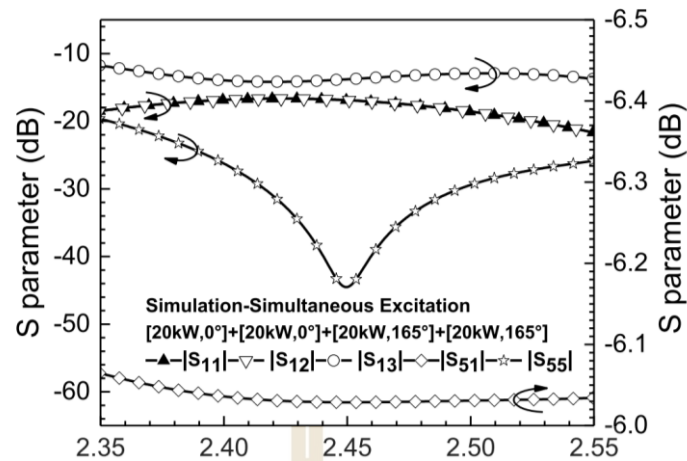


รูปที่ 2.12 การตั้งค่าระบบรวมกำลังงานสำหรับแมกนีตรอนแบบต่อเนื่องขนาด 60 กิโลวัตต์

ระบบการรวมกำลังงานจากรูปที่ 2.12 ประกอบด้วย หมายเลข (1) แมกนีตรอน (2) แหล่งจ่ายไฟแรงดันสูง 12 กิโลโวลต์ (3) แหล่งจ่ายไฟของไส้หลอด (4) สตัมป์จูนเนอร์แบบสามต้น (5) ข้อต่อ 60 dB (6) เซอร์คูเลเตอร์สี่พอร์ตขนาด 30 กิโลวัตต์ (7) ตัมมีโหลดระบายความร้อนด้วยน้ำ 30 กิโลวัตต์ (8) เครื่องรวมกำลังงานระนาบ H-T (9) ท่อนำคลื่นรวมกำลังงานระนาบ E-T (10) ตัมมีโหลดระบายความร้อนด้วยน้ำ 80 กิโลวัตต์ (11) ข้อต่อ 20 dB (12) ตัวแปลงท่อนำคลื่นเป็นสายโคแอกเซียล (13) เซอร์คูเลเตอร์สามพอร์ตขนาด 50 กิโลวัตต์ (14) ตัมมีโหลดระบายความร้อนด้วยน้ำ 5 กิโลวัตต์ (15) เพาเวอร์แอมป์ 200 วัตต์ (16) เครื่องวัดกำลังงานไฟฟ้า (17) เครื่องวิเคราะห์สัญญาณ (18) เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (19) เครื่องกำเนิดสัญญาณ (20) คอมพิวเตอร์ควบคุมเฟส และหมายเลข (21) ระบบการไหลเวียนน้ำเย็น

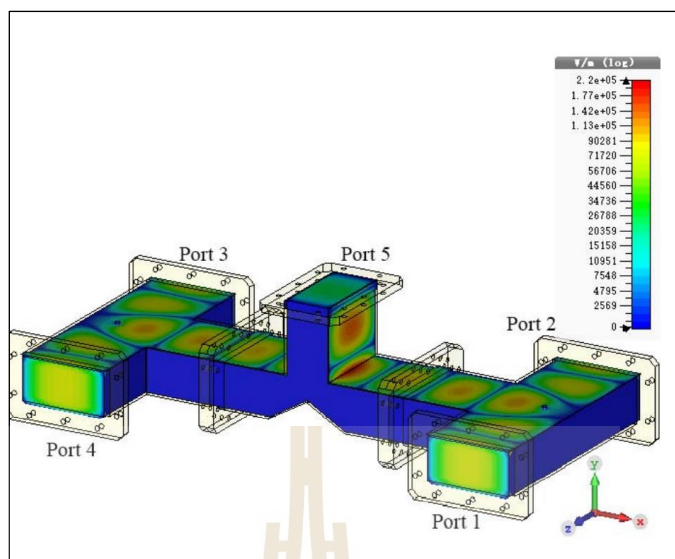


รูปที่ 2.13 ผลการจำลองและผลการทดสอบจริงของท่อนำคลื่นรวมกำลังงาน 5 พอร์ต



รูปที่ 2.14 ผลการจำลองของแอมพลิฟายเออร์อินพุต

ผลการทดลองที่นำคลื่นสำหรับรวมกำลังงานทางแยกรูปตัว T ที่นำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมที่มีความไม่ต่อเนื่องของท่อภายในที่นำคลื่นที่มีมุมข้อต่อระหว่างทางแยก T ซึ่งจะทำให้มีผลอย่างมากต่อการสูญเสียการแทรกในการรวมกำลังงาน แสดงค่าพารามิเตอร์ของพอร์ต 1 และ (S55) จำลองค่าพารามิเตอร์และทดสอบตัวรวมกำลังงาน 5 พอร์ต แสดงดังรูปที่ 2.13 เอ้าต์พุตคือพอร์ตที่ 5 ที่นำคลื่นรวมกำลังงานสามารถรวมกำลังงานได้ดี ซึ่งแสดงด้วยค่าการสูญเสียจากการสะท้อนกลับ (S55) ค่าการสูญเสียจากการสะท้อนกลับของพอร์ตเอ้าต์พุตคือดีกว่า -20.0 dB ค่าสูญเสียจากการส่งสัญญาณ (S51) ประมาณ -6.0 dB และการสูญเสียการแทรกน้อยกว่า 0.2 dB ความสัมพันธ์ระหว่างพอร์ตอินพุต H-T สองพอร์ตที่แตกต่างกัน (S13) ประมาณ -12.0 dB การสูญเสียจากการสะท้อนของพอร์ตอินพุต 1 (S11) ตั้งแต่ -2.2 ถึง -9.9 dB ด้วยความถี่ที่เพิ่มขึ้นและความสัมพันธ์ระหว่างกันพอร์ตอินพุต H-T (S12) เปลี่ยนไปในแนวโน้มตรงกันข้ามกัน จากผลการจำลองและการทดลองของท่อนำคลื่นรวมกำลังงาน 5 พอร์ตสอดคล้องกับค่าทางทฤษฎี เมื่อพิจารณาถึงการบิดเบือนแบบไฮบริดตอบสนองความสัมพันธ์ ($\phi_1 = \phi_2 = 0$ และ $\phi_3 = \phi_4 = 165$ องศา) ที่นำคลื่นสำหรับรวมกำลังงานที่ออกแบบได้รับกำลังงานจากสัญญาณอินพุตทั้งหมดสี่ตัวซึ่งมีแอมพลิจูด 20 กิโลวัตต์ และเฟสสัมพันธ์กันมีค่าเท่ากัน ซึ่งผลการจำลองค่า S พารามิเตอร์ แสดงดังรูปที่ 2.14 แสดงค่าการสูญเสียการส่งสัญญาณ (S51) จะเหมือนกับพารามิเตอร์ ก่อนหน้านี้ที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น การสูญเสียจากการสะท้อนกลับทั้งหมด (S11) และ (S55) มีค่าเท่ากับ -16.0 dB การแยกตัวระหว่างพอร์ตอินพุต (S12) มีค่าเท่ากับ 16.0 dB และการสูญเสียจากการส่งผ่านสัญญาณ (S13) มีค่าเท่ากับพารามิเตอร์ที่วัดได้ดังกล่าวข้างต้น



รูปที่ 2.15 การกระจายของสนามไฟฟ้าสำหรับกำลังงานรวมสี่ทางด้วยกำลังงาน 80 กิโลวัตต์

การกระจายของสนามไฟฟ้าด้วยกำลังตกกระทบทั้งหมด 80 กิโลวัตต์ แสดงในรูปที่ 2.15 การกระจายสนามไฟฟ้าที่ขนาดเท่ากันทุกพอร์ตและเอาต์พุตความเข้มของสนามไฟฟ้าสูงเป็นสองเท่าของสัญญาณอินพุตสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เอาต์พุตระหว่างระนาบ E และระนาบ T มีค่าประมาณ 220.0 กิโลโวลต์ต่อเมตร สำหรับการทำงานของแมกนีตรอนแบบต่อเนื่องใช้กับท่อนำคลื่นสำหรับรวมกำลังงานห้าพอร์ต ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการรวมกำลังงานของแมกนีตรอนที่ความถี่ย่าน S-band กำลังงานอินพุตแบบสี่ทิศทางขนาด 20 กิโลวัตต์ ด้วยระบบที่ไม่มีกระบวนการปรับเฟสอัตโนมัติตามเวลาจริงและมีการวัดค่าระบบหมุนเวียนแบบแยกกำลังงานสูง โดยท่อนำคลื่นสำหรับรวมกำลังงานที่ กำลังงานสูงได้รับการออกแบบการฉีดล็อคแบบไฮบริดแมกนีตรอน ทำให้ได้เอาต์พุตที่มีความเสถียรของแอมพลิจูด 0.01 dB (ยอดถึงยอด) ซึ่งเป็นความเสถียรของเฟส ± 0.9 องศา (ยอดถึงยอด) ด้วยแมกนีตรอนสี่ทางขนาด 20 กิโลวัตต์ ที่รวมกำลังงานเข้าด้วยกัน สามารถรวมกำลังงานได้มากกว่า 60.6 กิโลวัตต์ ประสิทธิภาพการรวม 91.5 เปอร์เซ็นต์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบการรวมกำลังงานแมกนีตรอนมีประสิทธิภาพสูงสามารถที่จะนำไปใช้เป็นแหล่งรวมกำลังงานคลื่นความถี่ย่านไมโครเวฟที่กำลังงานสูงได้

บทที่ 3

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 กล่าวนำ

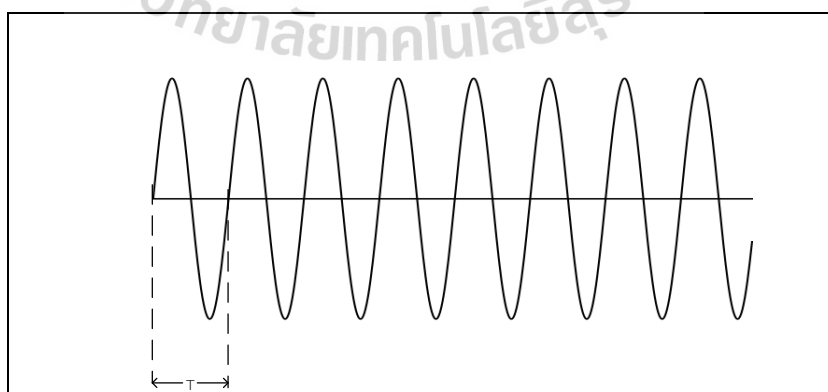
บทนี้จะกล่าวถึงหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์และออกแบบการรวมกำลังงานของท่อนำคลื่นเพื่อรวมกำลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง ซึ่งสามารถแบ่งเป็นส่วน ๆ ที่สำคัญได้ดังนี้

- 1) หลักการและทฤษฎีการของคลื่นไมโครเวฟ
- 2) หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม
- 3) หลักการและทฤษฎีการกำลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง
- 4) สรุป

3.2 หลักการและทฤษฎีของคลื่นไมโครเวฟ

3.2.1 คลื่นไมโครเวฟ

คลื่นไมโครเวฟ (Microwave) เป็นชื่อเรียกคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Wave) พุทธิกรรมการให้ความร้อนที่เกิดจากกำลังงานจากไมโครเวฟ ซึ่งคลื่นความถี่ย่านไมโครเวฟเป็นรูปแบบหนึ่งของคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามีช่วงความถี่ประมาณ 0.3 กิกะเฮิรต ถึง 300 กิกะเฮิรต หรือมีความยาวคลื่นตั้งแต่ 100 เซนติเมตร ถึง 0.1 เซนติเมตร



รูปที่ 3.1 คลื่นความถี่ไมโครเวฟ

3.2.2 หลักการเกิดคลื่นไมโครเวฟ

แหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ จะประกอบด้วยชุดแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าและแมกนีตรอน โดยแมกนีตรอนเป็นตัวสร้างคลื่นไมโครเวฟ โครงสร้างภายในของแมกนีตรอน ซึ่งประกอบไปด้วยไส้หลอด (Filament) ทำหน้าที่เป็นขั้วแคโทด (Cathode) ทำจากขดลวดทั้งสแตน เป็นขั้วใดขั้วหนึ่งของไส้หลอดจะถูกบรรจุอยู่ในหลอดสุญญากาศโดยส่วนของผนังรอบ ๆ เป็นแผ่นทองแดงทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนด (Anode) เพื่อสร้างสนามไฟฟ้า ส่วนสนามแม่เหล็กจะม้วนแม่เหล็กถาวรเป็นตัวสร้างคลื่นไมโครเวฟ โดยอาศัยการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงภายใต้แรงดันไฟฟ้าสูง ๆ มาเป็นพลังงานไมโครเวฟ แล้วถูกส่งออกมาภายนอกโดยผ่านสายอากาศที่มีลักษณะเป็นโพรบ (Probe Antenna)

3.3 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการรวมกำลังงานของท่อนำคลื่นโดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง

3.3.1 ท่อนำคลื่น

ท่อนำคลื่น (Waveguide) เป็นสายนำสัญญาณที่ทำหน้าที่ส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า คลื่นจะเดินทางผ่านผนังของท่อ โดยทั่วไปท่อนำคลื่นมีลักษณะเป็นท่อโลหะมีขนาดหน้าตัดภายในขึ้นอยู่กับความถี่ หากคลื่นมีความถี่สูงทำให้ความยาวคลื่นต่ำและขนาดของท่อนำคลื่นจะเล็กลง โดยขนาดของท่อนำคลื่นที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดจะเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นที่ถูกส่งภายในท่อ และท่อนำคลื่นจะมีการสูญเสียกำลังงานที่น้อยกว่า โดยทั่วไปจะมีลักษณะเป็นท่อทรงกลมหรือท่อทรงสี่เหลี่ยมทำมาจากทองแดงหรืออะลูมิเนียม ด้านในฉาบด้วยเงินเพื่อให้เป็นตัวนำที่ดี สาเหตุที่ต้องใช้ท่อนำคลื่นแทนสายนำสัญญาณนี้ก็เพราะว่าคลื่นไมโครเวฟมีความถี่สูงมากจะเดินทางได้ดีที่บริเวณผิวของตัวนำ ถ้าหากใช้สายนำสัญญาณทั่วไปจะทำให้เกิดการสูญเสียกำลังงานได้ จึงต้องใช้ท่อนำคลื่นเพื่อป้องกันการสูญเสียกำลังงานของสายสัญญาณความถี่ต่ำสุดที่สามารถใช้งานได้กับท่อนำคลื่น เรียกว่าความถี่คัทออฟ ซึ่งถ้าความถี่สูงกว่าความถี่คัทออฟคลื่นจะสามารถเดินทางไปผ่านท่อนำคลื่นได้ ส่วนความถี่ที่ต่ำกว่านี้จะไม่สามารถเดินทางผ่านท่อนำคลื่นได้ ในการเดินทางของคลื่นไมโครเวฟในท่อนำคลื่นจะเดินทางโดยการสะท้อนผนังท่อและเดินทางไปตามความยาวของท่อนำคลื่นและความถี่ที่สูงก็สามารถเดินทางได้ไกลกว่าความถี่ที่ต่ำ รูปแบบในการเกิดคลื่นในท่อนำคลื่นก็จะมีอยู่ 2 รูปแบบด้วยกัน คือ

- 1) รูปแบบสนามไฟฟ้าตัดขวาง (Transverse Electric Mode: TE Mode)
เป็นรูปแบบที่ไม่มีสนามไฟฟ้าในทิศทางการแพร่กระจายของคลื่นแต่จะมีเฉพาะสนามแม่เหล็กอยู่ในทิศทางนั้น โดยสนามไฟฟ้าจะตั้งฉากกับทิศทางการแพร่กระจายของคลื่น
- 2) รูปแบบสนามแม่เหล็กตัดขวาง (Transverse Magnetic Mode: TM Mode)
เป็นรูปแบบที่ไม่มีสนามแม่เหล็กในทิศทางการแพร่กระจายของคลื่นแต่จะมีเฉพาะสนามไฟฟ้า อยู่ในทิศทางนั้น โดยสนามแม่เหล็กจะตั้งฉากกับทิศทางการแพร่กระจายของคลื่น

ในท่อนำคลื่นจะแบ่งความถี่ที่สามารถผ่านท่อนำคลื่นได้ออกเป็น 2 กรณีคือ ความถี่ต่ำสุดที่สามารถผ่านท่อนำคลื่น และความถี่สูงที่สามารถผ่านท่อนำคลื่นได้

1. ความถี่ต่ำสุดที่สามารถผ่านท่อนำคลื่น (Cutoff frequency)

ความสัมพันธ์ในทางของความยาวคลื่นตกระทบคลื่นสะท้อนและคลื่นกลุ่มภายในท่อนำคลื่น เพื่อได้สนามไฟฟ้าเป็นศูนย์ที่ผนังด้านข้างของท่อนำคลื่น คลื่นตกระทบและคลื่นสะท้อนต้องเกิดขึ้นทุกระยะห่างหนึ่งความยาวคลื่นในด้านกว้างของท่อนำคลื่นที่ความถี่ของคลื่นค่าหนึ่งและความกว้างของท่อนำคลื่นค่าหนึ่งต้องมีมุมตกระทบและมุมสะท้อนที่เหมาะสมจึงจะทำให้สนามไฟฟ้าที่ผนังด้านข้างของท่อนำคลื่นเป็นศูนย์โดยความยาวคลื่นที่ยาวที่สุด (Longest wavelength) ที่สามารถเดินทางไปตามท่อนำคลื่นและยังคงให้ค่าสนามไฟฟ้าที่ผนังด้านข้างของท่อนำคลื่นเป็นศูนย์ มีค่าเท่ากับสองเท่าของด้าน กว้าง a ของท่อนำคลื่น ซึ่งที่ค่าความยาวคลื่นนี้จะมีมุมตกระทบและมุมสะท้อนเป็น 90 องศา จะทำให้เกิดคลื่นนิ่งจึงไม่มีการแพร่กระจายไปตามท่อนำคลื่น ค่าความยาวคลื่นและความถี่ที่จุดวิกฤตนี้ ให้ชื่อเรียกว่า ความยาวคลื่นคัทออฟ

สมการความถี่คัทออฟของท่อนำคลื่น

$$\lambda_{cutoff} = 2a \quad (3.1)$$

โดยที่ λ_{cutoff} คือ ความยาวคลื่นคัทออฟ มีหน่วยเป็นเมตร (m)
 a คือ ด้านกว้างของท่อนำคลื่น มีหน่วยเป็น (m)

ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่คัทออฟและความยาวคลื่นคัทออฟ เป็นไปตามสมการ

$$f_{cutoff} = \frac{v}{\lambda_{cutoff}} \quad (3.2)$$

แทนค่า $\lambda_{cutoff=2a}$ ในสมการที่ 3.9 และ v เท่ากับความเร็วของแสงในอากาศว่างจะได้

$$f_{cutoff} = \frac{c}{2a} \quad (3.3)$$

โดยที่ f_{cutoff} คือ ความถี่คutoff มีหน่วยเป็นเมตร (Hz)
 c คือ ความเร็วของแสงในอากาศว่างมีค่าเท่ากับ 3×10^8 (m/s)

2. โหมดที่สูงกว่า (Higher mode) ในท่อนำคลื่น

คลื่นความถี่ต่ำสุดที่สามารถแพร่กระจายไปในท่อนำคลื่นขนาดหนึ่ง (ขนาดในที่นี่หมายถึง สองมิติ (กว้าง x ยาว) แต่ค่าที่พิจารณาหาจุดตัดคือด้านที่กว้าง) ในชื่อโหมดการแพร่กระจายคลื่นนี้ว่าโหมดหลัก สำหรับโหมดหลักนี้จะให้สนามไฟฟ้าเท่ากับศูนย์ที่ผนังด้านข้างของท่อนำคลื่น โดยจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้า (ตามเวลา) ครึ่งความยาวคลื่นคร่อมที่ด้านกว้างของท่อนำคลื่น ซึ่งเป็นด้านที่ใช้งานและหาจุดวิกฤต หรือจุดคutoffด้วย สำหรับการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าที่ด้านกว้างของท่อนำคลื่นเป็นจำนวนเท่าของครึ่งความยาวคลื่นขึ้นไป จะถือว่าอยู่ในโหมดความถี่ที่สูงกว่าของการแพร่กระจายคลื่นด้านที่แคบของท่อนำคลื่นจะนำมาพิจารณาในการอธิบายเรื่องโหมดความถี่ที่สูงกว่า โดยโหมดที่สูงกว่าจะระบุได้ด้วยการใช้ตัวอักษร m และ n เขียนต่อท้ายทั้งโหมด TE และ TM ซึ่งค่า m จะบอกถึงจำนวนเท่าของครึ่งความยาวคลื่นของสนามไฟฟ้า หรือสนามแม่เหล็กที่ด้านกว้าง ของท่อนำคลื่น ส่วนค่า n จะบอกถึงจำนวนเท่าของครึ่งความยาวคลื่นของสนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็กทางด้านแคบของท่อนำคลื่น โหมด TE_{mn} และ TM_{mn} สำหรับท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมที่ใช้ทำงานกัน และโหมดความถี่ที่ใช้งานที่ต่ำสุดสำหรับคลื่น TE คือ TE_{10} และสำหรับ คลื่น TM คือ TM_{10}

สมการความถี่คutoffของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม ซึ่งมีด้านกว้าง a ด้านแคบเท่ากับ b และโหมด m กับ n จะได้เป็น

$$f_{cutoff} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \quad (3.4)$$

โดยที่ c คือ ความเร็วของแสงในอากาศว่างมีค่าเท่ากับ 3×10^8 (m/s)
 a คือ ด้านกว้างของคือนำคลื่น มีหน่วยเป็น (m)
 b คือ ด้านแคบของคือนำคลื่น มีหน่วยเป็น (m)
 m คือ จำนวนเท่าของครึ่งความยาวคลื่นที่ด้านกว้างของท่อนำคลื่น

n คือ จำนวนเท่าของครึ่งความยาวคลื่นที่ด้านแคบของท่อนำคลื่น

เมื่อ λ_{cutoff} คือความยาวคลื่นคัทออฟ

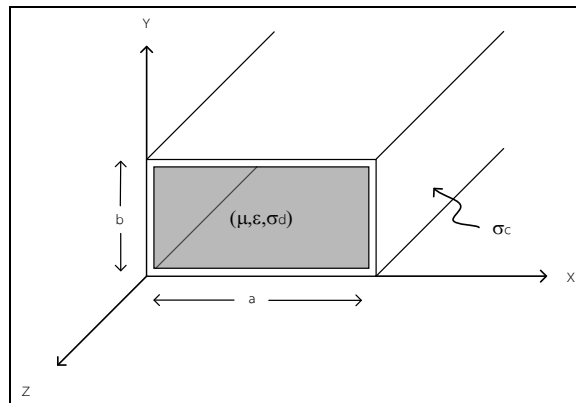
$$\lambda_{cutoff} = \frac{2\pi}{\sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2}} \quad (3.5)$$

เมื่อ λ_g คือสมการความยาวคลื่นในท่อนำคลื่น

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{cutoff}}\right)^2}} \quad (3.6)$$

3. การลดทอนกำลังงานในท่อนำคลื่น

การลดทอนในท่อนำคลื่นมีเพียงท่อนำคลื่นในอุดมคติเท่านั้น (Yeap, Choy et al. 2011) ที่ได้รับการพิจารณา (ลักษณะพิเศษคือตัวนำที่สมบูรณ์แบบซึ่งเต็มไปด้วยฉนวนที่สมบูรณ์แบบ) การแพร่กระจายคลื่นในท่อนำคลื่นในอุดมคติจะไม่มีการลดทอนเมื่อเดินทางผ่านท่อนำคลื่น มีการสูญเสียสองแบบในท่อนำคลื่นที่เหมือนจริง คือ การสูญเสียตัวนำและการสูญเสียไดอิเล็กทริก สนามไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับโหมดการแพร่กระจายท่อนำคลื่นจะสร้างกระแสที่ไหลในผนังท่อนำคลื่น เนื่องจากผนังท่อนำคลื่นสร้างจากตัวนำที่ไม่สมบูรณ์แบบเนื่องจากค่าความนำไฟฟ้ามีค่าน้อยกว่า ($\sigma_c < \infty$) ผนังจึงทำหน้าที่เหมือนตัวต้านทานและกระจายกำลังงานในรูปของความร้อน นอกจากนี้การสูญเสียไดอิเล็กทริกภายในท่อนำคลื่นยังไม่สมบูรณ์แบบเนื่องจากค่าความนำไฟฟ้ามีค่ามากกว่าศูนย์ ($\sigma_d > 0$) ดังนั้นไดอิเล็กทริกจึงกระจายกำลังงานในรูปของความร้อนด้วย ค่าคงที่การลดทอนโดยรวมแทนด้วย α (หน่วยเป็น Np/m) สำหรับท่อนำคลื่นที่เหมือนจริงสามารถเขียนแทนได้ในรูปของทั้งสองส่วนประกอบของการสูญเสีย โดยที่ α_c คือค่าคงที่การลดทอนเนื่องจากการสูญเสียตัวนำ และ α_d คือค่าคงที่การลดทอนเนื่องจากการสูญเสียไดอิเล็กทริก สำหรับโหมด TE หรือ TM อย่างไม่อย่างหนึ่งในท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม ค่าคงที่การลดทอนเนื่องจากการสูญเสียไดอิเล็กทริกจะแสดงดังสมการที่ (3.7)



รูปที่ 3.2 การลดทอนเนื่องจากการสูญเสียจากตัวนำและค่าคงที่การลดทอนเนื่องจากการสูญเสียไดอิเล็กทริก

ค่าคงที่การลดทอนโดยรวม α (หน่วยเป็น Np/m) สำหรับท่อนำคลื่นที่เหมือนจริงสามารถเขียนเป็นองค์ประกอบการสูญเสียสองส่วนได้เป็น

$$\alpha_{mn} = \alpha_{c_{mn}} + \alpha_{d_{mn}} \quad (3.7)$$

เมื่อ α_c คือค่าคงที่การลดทอนเนื่องจากการสูญเสียตัวนำ และ α_d คือค่าคงที่การลดทอนเนื่องจากการสูญเสียไดอิเล็กทริก สำหรับโหมด TE หรือ TM อย่างไม่อย่างหนึ่งในท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม ค่าคงที่การลดทอนเนื่องจากการสูญเสียไดอิเล็กทริกแสดงดังสมการที่ (3.8)

$$\alpha_{d_{mn}} = \frac{\sigma_d \eta'}{2 \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c_{mn}}}{f}\right)^2}} \quad (3.8)$$

เมื่อ η' คือ อิมพีแดนซ์ลักษณะในพื้นที่ว่าง

$$\eta' = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (3.9)$$

ค่าคงที่การลดทอนเนื่องจากการสูญเสียตัวนำในท่อนำคลื่นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขึ้นอยู่กับประเภทของโหมด (TE หรือ TM) เนื่องจากส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าต่าง ๆ มีอยู่ในทั้งสองโหมด

ค่าคงที่การลดทอนเนื่องจากการสูญเสียตัวนำสำหรับโหมด TM ในท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม ดังสมการที่ (3.10)

$$\alpha_{mn} = \frac{2R_s}{b\eta' \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c_{mn}}}{f}\right)^2}} \left[\frac{b^3 m^2 + a^3 n^2}{ab^2 m^2 + a^3 n^2} \right] \quad (3.10)$$

เมื่อ R_s คือค่าความต้านทานพื้นผิวของผนังท่อนำคลื่น

$$R_s = \frac{1}{\sigma_c \delta} \quad (3.11)$$

เมื่อ δ คือความลึกผิวของผนังท่อนำคลื่นที่ความถี่ในการทำงาน

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma_c}} \quad (3.12)$$

ความลึกผิว (skin depth) ของผนังท่อนำคลื่นที่ความถี่ในการทำงาน ความหนาของผนังท่อนำคลื่นมีความลึกของผิวผนังหลายระดับ ดังนั้นกระแสที่ผนังเป็นกระแสพื้นผิวโดยพื้นฐานแล้ว มีความถี่ในการทำงานทั่วไปของท่อนำคลื่นที่หน่วยกิกะเฮิรต์โดยที่ความลึกผิวของตัวนำทั่วไป เช่น อะลูมิเนียมและทองแดงอยู่ในระดับมิลลิเมตร

ค่าคงที่การลดทอนเนื่องจากการสูญเสียตัวนำสำหรับโหมด TE_{mn} ในท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมที่มี ($n \neq 0$) กำหนดโดย

$$\alpha_{c_{mn}}^{TE} = \frac{2R_s}{b\eta' \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c_{mn}}}{f}\right)^2}} \left\{ \left(1 + \frac{b}{a}\right) \left(\frac{f_{c_{mn}}}{f}\right)^2 + \frac{b^2 m^2 + abn^2}{b^2 m^2 + a^2 n^2} \left[1 - \left(\frac{f_{c_{mn}}}{f}\right)^2\right] \right\} \quad (3.13)$$

สำหรับกรณีพิเศษของ ($n=0$) ค่าคงที่การลดทอนเนื่องจากการสูญเสียตัวนำสำหรับโหมด TE_{m0} ในท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมคือ

$$\alpha_{c_{mn}}^{TE} = \frac{2R_s}{b\eta' \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c_{mn}}}{f}\right)^2}} \left\{ \frac{1}{2} + \frac{b}{a} \left(\frac{f_{c_{mn}}}{f}\right)^2 \right\} \quad (3.14)$$

สมการที่ (3.14) ใช้กับโหมดท่อนำคลื่นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก TE_{10}

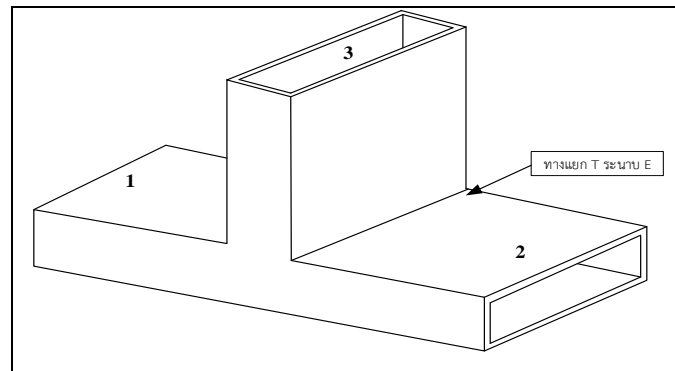
3.1.2 ตัวแบ่งกำลังทางแยก T

ในวงจร RF และไมโครเวฟ ทางแยกท่อนำคลื่นหรือสายโคแอกเซียลที่มี 3 พอร์ตเรียกว่า ทางแยก T อุปกรณ์นี้ใช้เป็นหลักในการรวมกำลังและแยกกำลังในระบบท่อนำคลื่น T ท่อนำคลื่นเป็นส่วนประกอบ 3 พอร์ต และส่วนใหญ่มี 2 ประเภท คือ ทางแยก T ระนาบ E ที่เชื่อมต่อเป็นอนุกรม และทางแยก T ระนาบ H ที่เชื่อมต่อแบบขนานของสายส่งท่อนำคลื่นหลัก การทำงานและหน้าที่ของท่อนำคลื่นทางแยกประเภท T รวมถึงความแตกต่างระหว่างทางแยก T ระนาบ E และทางแยก T ระนาบ H (Kutsak and Logachova 2014) อธิบายไว้ด้านล่าง

ตัวแบ่งกำลังทางแยกตัว T เป็นเครือข่ายสามพอร์ตอย่างง่ายที่สามารถใช้สำหรับจ่ายไฟได้ การแบ่งหรือการรวมกำลัง และสามารถนำมาใช้กับสื่อสายส่งชนิดใดก็ได้ แสดงจุดแยก T ที่ใช้กันทั่วไปในท่อนำคลื่นและเส้นไมโครสตริปหรือแบบสตริปไลน์ ทางแยกที่แสดงในที่นี้คือ ในกรณีที่ไม่มีการสูญเสียของสายส่งหรือทางแยกที่ไม่มีการสูญเสีย ดังที่กล่าวในก่อนนั้นทางแยกดังกล่าวไม่สามารถจับคู่พร้อมกันได้ทุกพอร์ต วิเคราะห์ตัวแบ่งทางแยก T ตามด้วยตัวแบ่งกำลังด้านทานซึ่งสามารถจับคู่ได้เลยพอร์ตและไม่สูญเสีย

1) ทางแยก T ระนาบ E

ทางแยก T ระนาบ E เป็นทางแยกแรงดันหรืออนุกรม ติดแขนด้านข้างเข้ากับท่อนำคลื่น โดยการตัดช่องสี่เหลี่ยมตามขนาดที่กว้างขึ้นของท่อนำคลื่นในระนาบ E แขนของแขนด้านข้างจะขนานกับช่อง E ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.3 ทางแยกประเภท T ระนาบ E นี้เข้ากันได้อย่างสมบูรณ์แบบโดยใช้สกรูหรือคาปาซิทีฟหรือแบบเหนียวว่าที่ทางแยก เนื่องจากไม่มีการสะท้อน S พารามิเตอร์ ของเมทริกซ์การกระเจิงจะเป็นศูนย์ (S_{11} , S_{22} และ S_{33}) จึงเป็นศูนย์ สำหรับจุดเชื่อมต่อที่ตรงกัน S เมทริกซ์จะเป็นดังที่แสดงในสมการ (3.15) เมื่อคลื่นถูกป้อนเข้าสู่พอร์ต 3 คลื่นจะกระจายไปที่พอร์ต 1 และพอร์ต 2 ของแขนคอลลิเนียร์ จะมีขนาดเท่ากันแต่จะมีเฟสตรงข้ามกัน เพราะฉะนั้น ($S_{13} = -S_{23}$) ใช้สำหรับจับคู่กัน แต่ในทางปฏิบัติตามสมการที่ (3.15) S เมทริกซ์จะจับคู่ได้ไม่ดี เมื่อแขนคอลลิเนียร์ สมมาตรแขนด้านข้างจึงถูกกล่าวถึงในสมการ (3.16) คือ ($S_{13} = S_{23}$) และ ($S_{11} = S_{22}$)

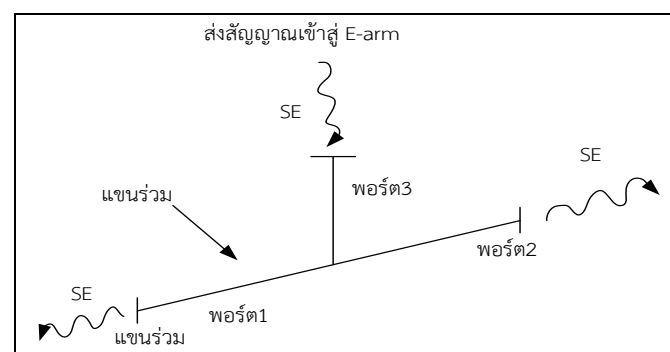


รูปที่ 3.3 ทางแยก T ท่อนำคลื่นระนาบ E

$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & s_{12} & s_{13} \\ s_{21} & 0 & s_{23} \\ s_{31} & s_{32} & 0 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

$$[S] = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} \\ s_{21} & s_{22} & -s_{13} \\ s_{31} & -s_{13} & s_{33} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

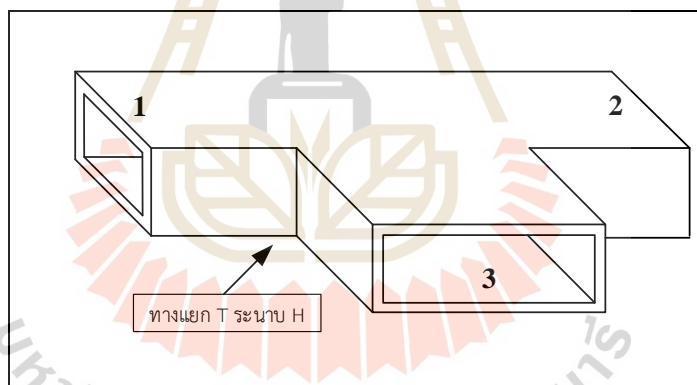
หากทางแยกระนาบ E มีความสมมาตรอย่างสมบูรณ์และเมื่อคลื่นเข้าสู่แขนด้านข้าง แสดงดังรูปที่ 3.4 คลื่นที่ออกจากพอร์ตหลักจะมีขนาดเท่ากันและอยู่ในเฟสตรงกันข้าม เนื่องจากเส้นสนามไฟฟ้าเปลี่ยนทิศทาง คลื่นเคลื่อนที่ออกจากพอร์ต 1 และ 2 จึงเรียกว่า ทางแยก T ระนาบ E สัญญาณจะถูกแบ่งออกในขนาดที่เท่ากัน หากคลื่นเคลื่อนที่เข้าจาก พอร์ต 1 และ 2 จะถูกรวมกันไปยังแขน E



รูปที่ 3.4 วงจรเทียบเท่าสายส่งของทางแยก T ระนาบ E

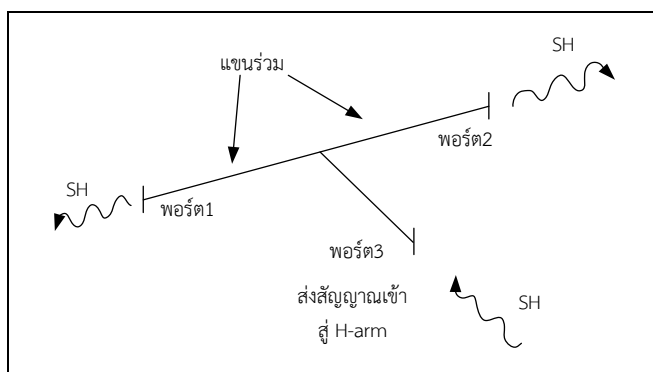
2) ทางแยก T ระนาบ H

ทางแยก T ระนาบ H คือทางแยกกระแสหรือทางขนาน เนื่องจากพอร์ตของแขนด้านข้างขนานกับระนาบของสนาม H ของท่อนำคลื่นหลัก จึงเรียกว่าทางแยก T ระนาบ H ช่องสี่เหลี่ยมถูกตัดตามขนาดความยาวของท่อนำคลื่นในทางแยก T ระนาบ H แขนของพอร์ตด้านข้างจะขนานกับช่อง H ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.5 ในทางแยก T ระนาบ H เมื่อสองอินพุตถูกป้อนเข้าสู่พอร์ต 1 และพอร์ต 2 ของแขนคอลลิเนียร์ เอ้าต์พุตที่พอร์ต 3 จะอยู่ในเฟสตรงกัน ถ้ามองในอีกด้านหนึ่งหากอินพุตถูกป้อนที่พอร์ต 3 คลื่นจะถูกแบ่งเท่า ๆ กันออกไปที่พอร์ต 1 และพอร์ต 2 ในเฟสเดียวกัน และมีขนาดเท่ากัน คุณสมบัติของทางแยกที่ระนาบ H ใช้ในท่อนำคลื่นแบบบวมกำลังงานและท่อนำคลื่นแบบแบ่งกำลังงาน S เมทริกซ์ของทางแยก T ระนาบ H ที่กล่าวถึงดังสมการที่ (3.15) และสมการที่ (3.16) เหมือนกับที่กล่าวถึงสำหรับทางแยก T ระนาบ E ($S_{13} = S_{23}$) เนื่องจากไม่สามารถจับคู่ได้ดี อาจสามารถใช้สกรูปรับค่ารีแอกแตนซ์เพื่อปรับค่ารีแอกแตนซ์ของระบบเพื่อให้ได้ค่าอิมพีแดนซ์ที่เหมาะสมที่สุด



รูปที่ 3.5 ทางแยก T ท่อนำคลื่นระนาบ H

ทางแยกระนาบ H มีความสมมาตรอย่างสมบูรณ์และเมื่อคลื่นเข้าสู่แขนด้านข้าง ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.6 ดังนั้นคลื่นที่เข้ามาพอร์ตใดพอร์ตหนึ่งจะส่งผ่านออกไปยังพอร์ตที่เหลือทั้งสองได้เท่ากัน ชั้นส่วนนี้จึงเป็นชั้นส่วนพื้นฐานที่ใช้ในการแบ่งกำลังคลื่นออกเป็น 2 ส่วนเท่า ๆ กัน รวมถึงจะมีขนาดและเฟสเท่ากัน



รูปที่ 3.6 วงจรเทียบเท่าสายส่งของในทางแยก T ระนาบ H

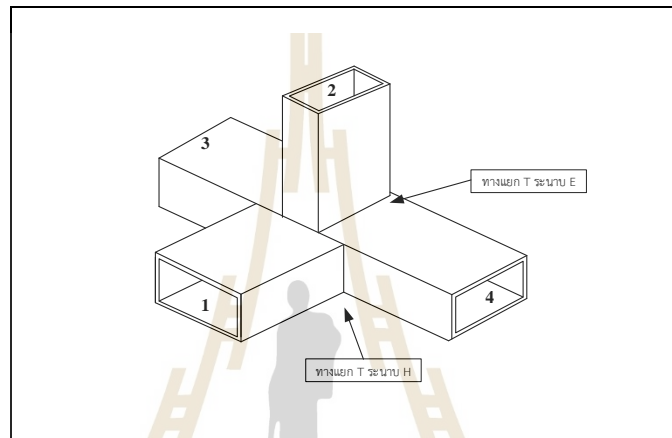
3) ทางแยก Magic Tee ระนาบ H-T

ทางแยก Magic Tee จะเป็นการรวมเอาคุณสมบัติของวงจรรูปตัว T ในระนาบ H และในระนาบ E เข้าด้วยกัน สามารถสร้างขึ้นได้โดยการติดแขนเข้ากับช่องที่ทำขึ้นในผนังกว้างและแคบของท่อนำคลื่น เรียกอีกอย่างว่าไฮบริดที่ซึ่งจ่ายกำลังงานเท่า ๆ กันระหว่างพอร์ตเอาต์พุต เอาต์พุตอาจมีความแตกต่างของเฟส 0° หรือ 180° Magic Tee เป็นข้อต่อแบบไฮบริด 3 dB ซึ่งเรียกอีกอย่างว่าข้อต่อแบบต่อต้านสมมาตร หากหนึ่งในแขนของระนาบร่วมถูกยุติลง กำลังงานที่ส่งไปยังแขนร่วมอีกข้างหนึ่งจะไม่ขึ้นกับพอร์ตที่ถูกยุติไฮบริด (Magic) Tee Junction แสดงดังรูปที่ 3.6 วงจรแบบสี่พอร์ตที่จะส่งสัญญาณโดยมีกฎเกณฑ์ ดังนี้

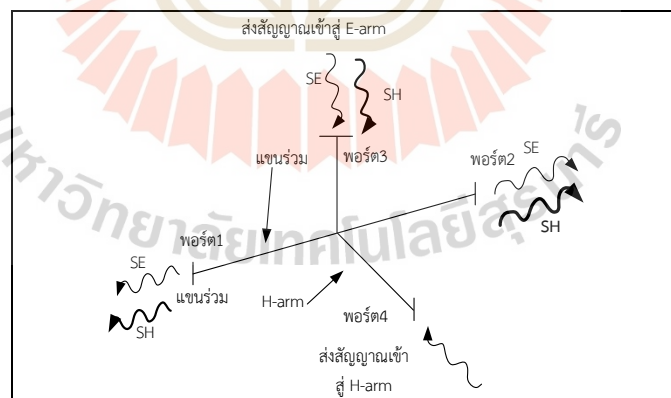
1. เมื่อส่งคลื่นเข้าทางพอร์ตที่ 1 คลื่นจะแยกออกไปทางพอร์ตที่ 3 และพอร์ตที่ 4 เท่า ๆ กันโดยมีเฟสตรงกัน และจะไม่มีคลื่นออกไปทางพอร์ต 2
2. เมื่อส่งคลื่นเข้าทางพอร์ตที่ 2 คลื่นจะแยกออกไปทางพอร์ตที่ 3 และพอร์ตที่ 4 เท่า ๆ กันโดยมีเฟสตรงกันข้าม และจะไม่มีคลื่นออกไปทางพอร์ต 1
3. ถ้าคลื่นมีขนาดเท่ากันและเฟสตรงกันส่งเข้ามาทางพอร์ตที่ 3 และพอร์ตที่ 4 คลื่นจะออกไปรวมกันที่พอร์ตที่ 1 โดยจะไม่ออกไปพอร์ตที่ 2
4. ถ้าคลื่นมีขนาดเท่ากันและเฟสตรงกันข้ามส่งเข้ามาทางพอร์ตที่ 3 และพอร์ตที่ 4 คลื่นจะออกไปรวมกันที่พอร์ตที่ 2 โดยจะไม่ออกไปพอร์ตที่ 1

ถ้าให้แขนในระนาบ H เป็นพอร์ตที่ 1 ถ้าให้แขนในระนาบ E เป็นพอร์ตที่ 2 และส่วนของท่อนำคลื่นหลักเป็นพอร์ตที่ 3 และพอร์ตที่ 4 คุณสมบัติข้างต้น เมื่อพิจารณาการจับตัวของเส้นแรงของไฟฟ้า จะพบว่าคลื่นที่เข้ามาทางพอร์ตที่ 3 และพอร์ตที่ 4 มีเฟสตรงกัน

คลื่นจะไม่สามารถส่งออกไปพอร์ตที่ 2 หรือแขนในระนาบ E ได้ เพราะตามรูปสนามไฟฟ้า โหมดที่ถูกกระตุ้นในระนาบแขนนี้จะเป็นโหมดอันดับสูง ซึ่งไม่สามารถส่งออกไปได้ ดังนั้น คลื่นทั้งสองก็จะออกมารวมกันที่พอร์ต 1 ในทำนองเดียวกันตามคุณสมบัติข้อที่ 4 ก็ จะพิจารณาตามคุณสมบัติรูปที่ 3.6 ถ้าคลื่นเข้ามาที่ทางพอร์ต 3 และพอร์ต 4 มีขนาดเท่ากัน และมีเฟสตรงกันข้าม คลื่นทั้งสองจะออกไปรวมกันที่พอร์ต 2 และจะไม่ออกไปที่พอร์ตที่ 1 เพราะสนามไฟฟ้าจะถูกหักล้างตรงปากทางเข้า H



รูปที่ 3.7 ทางแยก T ท่อนำคลื่นระนาบ E-H



รูปที่ 3.8 วงจรเทียบเท่าสายส่งของทางแยก T ระนาบ E-H

คุณสมบัติของท่อนำคลื่นระนาบ E-H ที่กล่าวมานี้เมื่อนำมาพิจารณาหา S พารามิเตอร์ จะเป็นดังนี้

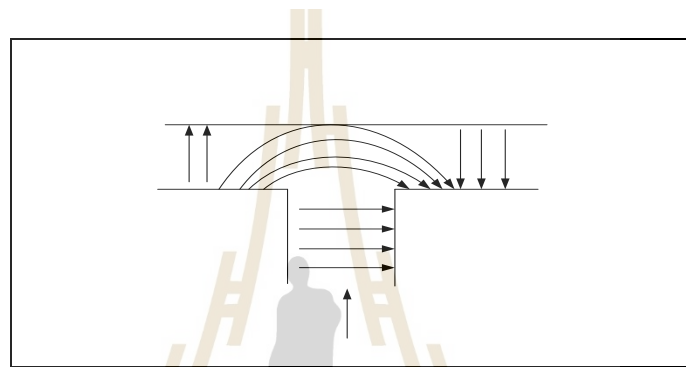
$$S_{31} = S_{41}, S_{21} = 0 \quad (3.17)$$

$$S_{32} = -S_{42}, S_{21} = 0 \quad (3.18)$$

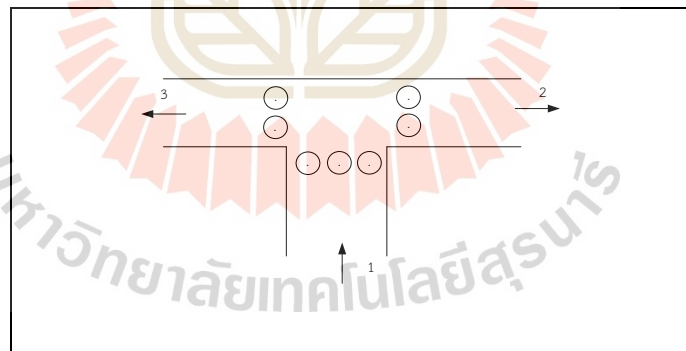
และเนื่องจากการใช้งานจริงจะมีการแมทซ์อิมพีแดนซ์ที่แขน H และแขน E ไม่ให้มีคลื่นสะท้อนกลับดังนั้นจะได้

$$S_{11} = 0, S_{22} = 0 \quad (3.19)$$

4) ทิศทางการแยกของสนามไฟฟ้า



รูปที่ 3.9 ทิศทางการแยกของสนามไฟฟ้าที่นำคลื่นระนาบ E ทิศทางสนามไฟฟ้าเฟสตรงกันข้าม



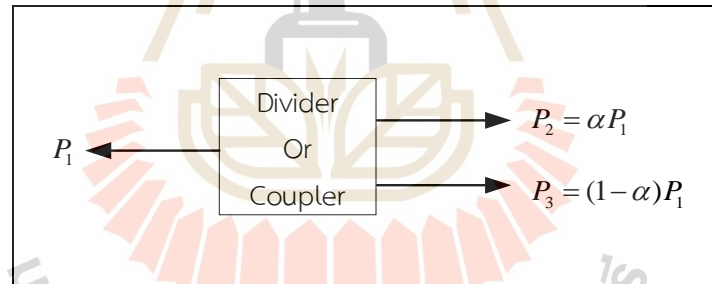
รูปที่ 3.10 ทิศทางการแยกของสนามไฟฟ้าที่นำคลื่นระนาบ H ทิศทางสนามไฟฟ้าเฟสตรงกัน

ระนาบทั้งสองจะทำให้มีสนามไฟฟ้าแยกออกไปในลักษณะที่แตกต่างกัน กล่าวคือในกรณีที่แยกในระนาบ E นั้น คลื่นโหมด TE_{10} ที่ส่งเข้ามาทางพอร์ตที่ 1 จะส่งผ่านไปยังพอร์ต 2 และ พอร์ต 3 ในลักษณะที่สนามไฟฟ้ามีเฟสตรงกันข้าม แสดงไว้ดังรูปที่ 3.8 สำหรับกรณีที่แยกในระนาบ H นั้น คลื่นเคลื่อนที่เข้าจากพอร์ตที่ 1 และแยกไปยังพอร์ตที่ 2 และพอร์ตที่ 3 โดยมีทิศทางสนามไฟฟ้าตรงกันคือมีเฟสตรงกัน แสดงไว้ดังรูปที่ 3.9

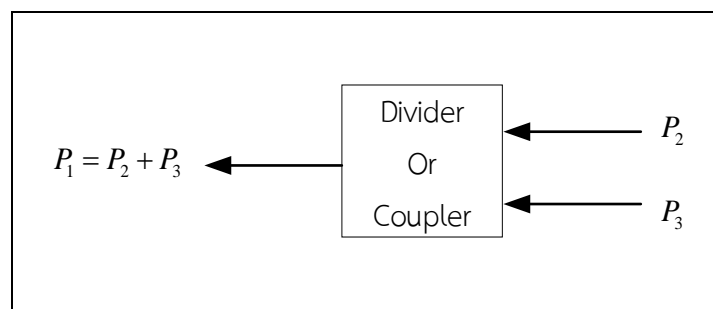
สำหรับกรณีที่ทำหน้าที่ในท่อไม่ได้โดยตรงตำแหน่งที่เป็นจำนวนเท่าของตัวของ $\lambda_g / 4$ ท่อนำคลื่นในช่วงพอร์ตที่ 1 จะมีคุณสมบัติเป็นค่าอินดักแทนซ์และคาปาซิแทนซ์โดยขึ้นกับความยาวของท่อ ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้จะสามารถใช้สำหรับการแมทซ์อิมพีแดนซ์ได้

3.1.3 คุณสมบัติพื้นฐานของตัวแบ่งและตัวรวม

ทางแยก T ท่อนำคลื่นไมโครเวฟใช้เพื่อจุดประสงค์ในการเชื่อมต่อสาขาหรือส่วนของท่อนำคลื่นเป็นชุดหรือขนานกับท่อนำคลื่นหลัก จุดตัดของท่อนำคลื่นในรูปตัวพิมพ์ใหญ่ภาษาอังกฤษ "T" เรียกว่าจุดแยกตัว T ระบาย E และจุดแยก T ระบาย H เป็นตัวอย่างของทางแยก T ท่อนำคลื่นแบบสามพอร์ต โดยทางแยกสามพอร์ตแบบปกติมีข้อเสียอย่างหนึ่งคือ ขาดการแยกระหว่างพอร์ตเอาต์พุต ซึ่งส่งผลให้เกิดการพึ่งพากำลังงานที่ใช้ที่พอร์ตหนึ่งในการสิ้นสุดที่พอร์ตเอาต์พุตอื่น การแยกระหว่างพอร์ตเอาต์พุตนี้จำกัดประโยชน์ของจุดเชื่อมต่อสามพอร์ต โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการตรวจสอบกำลังงานและแอปพลิเคชันตัวแบ่งโดยในส่วนี้เราจะใช้คุณสมบัติของเมทริกซ์การกระเจิงเพื่อหาคุณสมบัติพื้นฐานบางประการของเครือข่ายแบบสามพอร์ต ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับการกำหนดลักษณะเฉพาะของการแบ่งและรวมกำลังงาน



รูปที่ 3.11 การแบ่งกำลังงาน



รูปที่ 3.12 การรวมกำลังงาน

กำหนดให้ P_3 คือ เอาท์พุท P_1 และ P_2 คืออินพุท จะเขียนได้ว่า $P_1 = P_3/2$ และ $P_2 = (P_3/2P_3) = (P_1 + P_2) = (2P_1 + 2P_2)$ ปริมาณกำลังงานที่ออกจากพอร์ต 1 และ 2 มีหน่วยเป็น dB การสูญเสียการแทรกสอดในการส่งสัญญาณแสดงดังสมการที่ (3.20)

$$10 \log_{10} \frac{P_1}{P_3} = 10 \log_{10} \frac{P_1}{2P_1} = 10 \log_{10} \frac{P_1}{2P_2} = 10 \log_{10} \frac{1}{2} = -3dB \quad (3.20)$$

ทางแยกสามพอร์ต (T-Junctions) ประเภทที่ง่ายที่สุดของตัวแบ่งกำลังคือทางแยก T ซึ่งเป็นเครือข่ายสามพอร์ตที่มีสองอินพุทและหนึ่งเอาต์พุท สำหรับเมทริกซ์การกระเจิงของเครือข่ายสามพอร์ตองค์ประกอบอิสระดังสมการที่ (3.21)

$$[S] = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} \\ s_{21} & s_{22} & s_{23} \\ s_{31} & s_{32} & s_{33} \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

หากอุปกรณ์เป็นแบบพาสซีฟและไม่มีวัสดุแอนไอโซทรอปิก อุปกรณ์นั้นจะต้องเป็นแบบซึ่งกันและกันและเมทริกซ์การกระเจิงจะสมมาตร $S_{ij} = S_{ji}$ โดยปกติ เพื่อหลีกเลี่ยงการสูญเสียกำลังงานเพื่อให้มีทางแยกที่ไม่สูญเสียและตรงกันทุกพอร์ตสามารถแสดงได้อย่างง่าย อย่างไรก็ตามเป็นไปได้ที่จะสร้างเครือข่ายซึ่งกันและกันแบบไม่มีการสูญเสียแบบสามพอร์ตที่ตรงกันทุกพอร์ต หากพอร์ตทั้งหมดตรงกัน ดังนั้น $S_{ii} = 0$ และหากเครือข่ายมีส่วนกลับกัน การกระเจิงเมทริกซ์ดังสมการที่ (3.22) ลดลงเป็น

$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & s_{12} & s_{13} \\ s_{21} & 0 & s_{23} \\ s_{31} & s_{32} & 0 \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

หากทางแยกไม่มีการสูญเสีย การคงกำลังงานต้องการเมทริกซ์การกระเจิงเป็นไปตามคุณสมบัติรวมดังสมการที่ (3.23) ซึ่งนำไปสู่เงื่อนไขต่อไปนี้

$$|S_{12}|^2 + |S_{13}|^2 = 1, \quad (3.23ก)$$

$$|S_{12}|^2 + |S_{23}|^2 = 1, \quad (3.23ข)$$

$$|S_{12}|^2 + |S_{13}|^2 = 1, \quad (3.23ค)$$

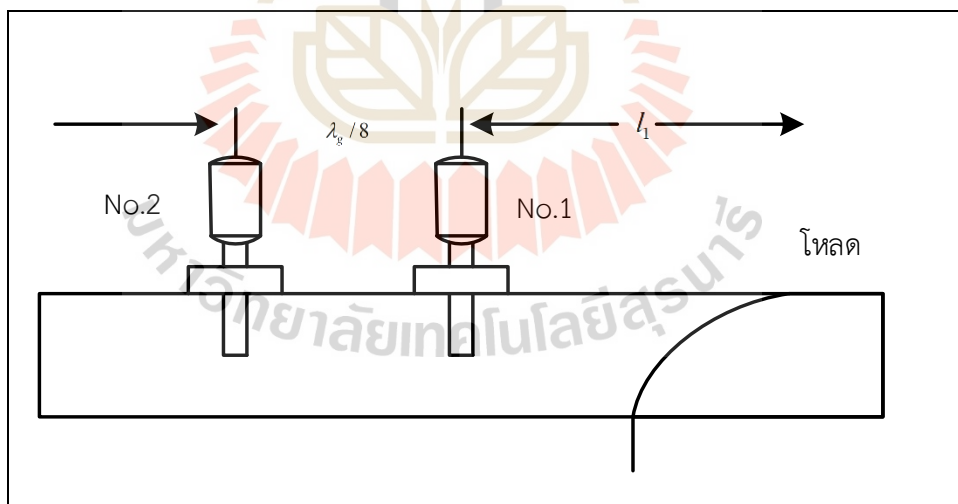
$$S_{13}^* S_{23} = 0, \quad (3.23ง)$$

$$S_{23}^* S_{12} = 0, \quad (3.23จ)$$

$$S_{12}^* S_{13} = 0, \quad (3.23ฉ)$$

3.1.4 การแมตซ์อิมพีแดนซ์ในวงจรท่อนำคลื่น

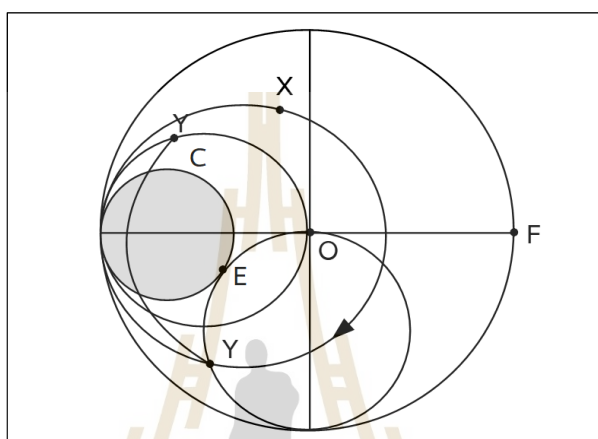
การแมตซ์อิมพีแดนซ์ในวงจรความถี่สูงนั้นเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งเพราะถ้าทำการแมตซ์อิมพีแดนซ์ไม่ได้ กำลังคลื่นที่ส่งเข้าสู่โหลดก็จะสะท้อนกลับมาบางส่วนซึ่งจะเป็นผลเสียหลาย ๆ อย่าง เช่น เป็นการใช้กำลังส่งที่ไม่ที่มีประสิทธิภาพ คลื่นที่สะท้อนกลับมาเป็นผลเสียต่อเครื่องส่งในวงจรรวมท่อนำคลื่นในระบบสื่อสารนั้น โหลดที่พบบ่อยมากที่สุดคือสายอากาศ ซึ่งอิมพีแดนซ์ของสายอากาศอาจจะไม่แมตซ์ไม่ได้พอดีกับท่อนำคลื่น ดังนั้นจึงต้องใช้หลักการแมตซ์อิมพีแดนซ์ วิธีที่ใช้คือการต่อชั้นตรีแอกแทนซ์หรือสตับที่ตำแหน่งเดียวกับการต่อชั้นตรีแอกแทนซ์หรือสตับ 2 ตำแหน่ง ในกรณีท่อนำคลื่นจะใช้เป็นสตับการแมตซ์โดยใช้ชั้นตรีแอกแทนซ์ 2 ตำแหน่ง โดยทั่วไประหว่างรีแอกแทนซ์ทั้งสองจะเป็น $\lambda_g/8$ หรือ $3\lambda_g/8$ รูปที่ 3.12 แสดงโครงสร้างการแมตซ์อิมพีแดนซ์โดยใช้รีแอกแทนซ์ 2 ตำแหน่ง



รูปที่ 3.13 การแมตซ์อิมพีแดนซ์โดยใช้รีแอกแทนซ์ 2 ตำแหน่งที่วางห่างกัน $\lambda_g/8$

สกรูทั้งสองห่างกัน $\lambda_g/8$ เนื่องจากสามารถปรับความลึกของเสาโลหะซึ่งจะทำให้ค่าซีเซปแทนซ์เปลี่ยนจาก $B = 0 \pm \infty$ ได้ ดังนั้นถ้าให้เสาที่ใกล้โหลดเป็นเสาที่หนึ่งและเสาที่เหลือเป็นเสาที่สองเราสามารถหาช่วงของแอดมิตแทนซ์ของโหลดที่สามารถทำการแมตซ์โดยพิจารณาจาก

แอดมิตแทนซ์สมิตชาร์ต เมื่อพิจารณาตรงเสาที่สองจะพบว่าเสาที่สองจะสามารถแมทซ์อิมพีแดนซ์ให้
 ได้ก็ต่อเมื่อแอดมิตแทนซ์ที่มองเห็นที่ตรงนั้นอยู่บนเส้นโค้งรูปวงกลม ACO เมื่อเราเลื่อนเส้นค้ำ ACO
 นี้ไปคูที่ตำแหน่งเสาที่หนึ่งซึ่งเป็นการเลื่อนเข้าโหนดเป็นระยะทาง $\lambda_g/8$ จะได้เส้นโค้งรูปวงกลม
 BEO ก็จะเป็นพื้นที่ขาวในสมิตชาร์ตสำหรับบริเวณสี่เทาจะเป็นบริเวณที่ไม่สามารถทำการแมตซ์
 อิมพีแดนซ์ได้ ดังนั้นจึงต้องใช้ I_1 ดึงแอดมิตแทนซ์ของโหนดให้มาอยู่ในบริเวณสีขาว



รูปที่ 3.14 แอดมิตแทนซ์สมิตชาร์ตของวงจรแมทซ์

3.4 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการ
 แบ่งและรวมกำลังงานสำหรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงภายในท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม ได้แสดงให้เห็น
 ว่ามีความเป็นไปได้ว่าท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมสามารถที่จะนำไปใช้เป็นสายนำสัญญาณสำหรับรวมกำลังงาน
 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงกำลังงานสูงเพื่อให้ได้กำลังงานสูงสุดและสามารถนำไปใช้งานได้จริง ส่วน
 ในบทต่อไปจะกล่าวถึงในเรื่องของการออกแบบและสร้างท่อนำคลื่นสำหรับรวมกำลังงานคลื่น
 แม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง

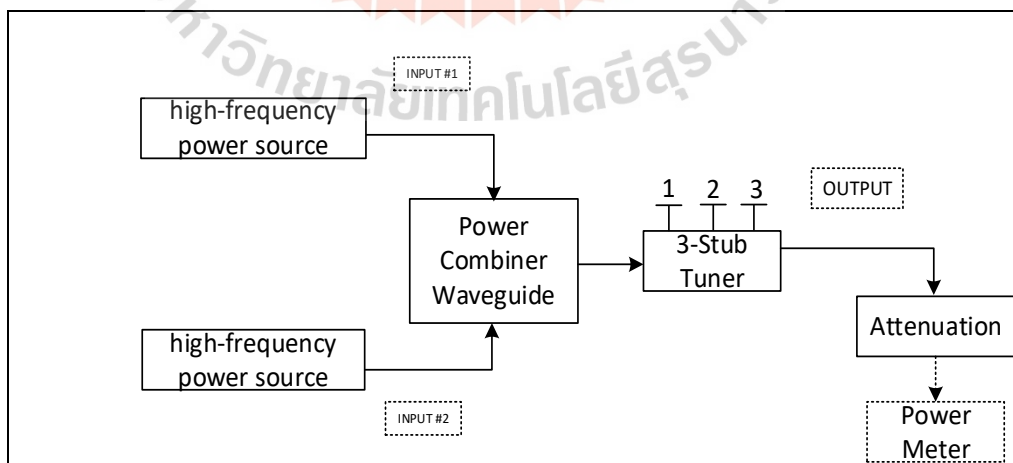
บทที่ 4

การศึกษาและออกแบบระบบสำหรับการวิเคราะห์

4.1 กล่าวนำ

ในบทนี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาและออกแบบการสร้างท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมมาตรฐานที่ใช้สำหรับรวมกำลังงานกำลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง ให้สามารถใช้กับแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงได้ โดยใช้หลอดแมกนีตรอนเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง เพื่อรวมกำลังงานให้ได้สูงสุดและสามารถนำไปใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและออกแบบการสร้างท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมที่ใช้สำหรับรวมกำลังงานกำลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง ให้สามารถใช้เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงได้ ในส่วนของท่อนำคลื่นกำลังงานคลื่นความถี่วิทยุในงานวิจัยนี้ได้ใช้วัสดุอลูมิเนียมสำหรับสร้างท่อนำคลื่นในการออกแบบเป็นหลัก โดยความถี่ที่ใช้ในการออกแบบคือ 2.45 กิกะเฮิรต ซึ่งเป็นย่านความถี่ที่ถูกอนุญาตให้ใช้สำหรับอุตสาหกรรม ประกอบไปด้วย ชุดแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง (High-Frequency power source) การออกแบบท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมที่ใช้สำหรับรวมกำลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง (Power/divider combining waveguide) สตัมป์จูนเนอร์แบบ 3 ตำแหน่งสำหรับปรับอิมพีแดนซ์เพื่อไม่ให้คลื่นที่ส่งเข้าไปยังโหลดสะท้อนกลับมา (Three-Stub tuner) และการนำไปใช้งาน (Plasma applications) แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 บล็อกไดแกรมสำหรับระบบการรวมกำลังงานของท่อนำคลื่นกับการนำไปใช้งาน

4.2 การออกแบบโครงสร้างของท่อนำคลื่น

การออกแบบในส่วนของท่อนำคลื่น ส่วนใหญ่ในการออกแบบท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมจะใช้โหมด TE_{10} ในการออกแบบและขนาดของท่อนำคลื่นจะใช้ขนาดมาตรฐาน WR340 ซึ่งเป็นมาตรฐานของท่อนำคลื่น เมื่อ a เท่ากับ 86.36 มิลลิเมตร และ b เท่ากับ 43.18 มิลลิเมตร ถูกนำมาใช้ทั้งหมดเป็นท่อนำคลื่นมาตรฐาน ความยาวในท่อนำคลื่นคือ λ_g มิลลิเมตร และความหนาของท่อนำคลื่นเท่ากับ 3.0 มิลลิเมตร เพื่อให้ได้กว้างขึ้นแบนด์วิธสามารถใช้โครงสร้างการจับคู่อิมพีแดนซ์ในการออกแบบ โดยโหมดที่สามารถอยู่ภายในท่อนำคลื่นจะขึ้นอยู่กับขนาดของท่อนำคลื่น ซึ่งส่วนใหญ่ที่ต้องการในการใช้งานท่อนำคลื่นในโหมดเดี่ยวลำดับที่โหมดต่าง ๆ เข้าสู่ท่อนำคลื่นขึ้นอยู่กับความถี่ตัดของโหมดต่าง ๆ โหมดที่มีความถี่ตัดเท่ากับหรือน้อยกว่าความถี่ในการทำงานสามารถมีอยู่ได้ภายในท่อนำโหมดสำหรับ TE_{10} คือโดเมนโหมด ที่เกี่ยวข้องสำหรับความเข้มของสนามไฟฟ้าและพารามิเตอร์ โดยกำหนดให้ m เท่ากับ 1 และ n เท่ากับ 0

สำหรับการออกแบบตัวแบ่งและรวมกำลังงานของท่อนำคลื่น เลือกใช้ระนาบ H ในการออกแบบแบบที่ขนาด WR340 เท่า ๆ กันทุกพอร์ต เหตุผลที่เลือกใช้ท่อนำคลื่นระนาบ H เนื่องจากง่ายต่อการขึ้นรูปและหลักการรวมกำลังงานของท่อนำคลื่นระนาบ H เมื่ออินพุตถูกป้อนเข้าสู่พอร์ต 1 และพอร์ต 2 เมื่อคลื่นจะออกไปรวมกันที่พอร์ตที่เหลือคือพอร์ต 3 โดยจะมีขนาดเท่ากันและอยู่ในเฟสเดียวกัน หากมองในอีกด้านหนึ่ง อินพุตถูกป้อนที่พอร์ต 3 คลื่นจะถูกแบ่งเท่า ๆ กันไปยังพอร์ตที่เหลือคือพอร์ต 1 และพอร์ต 2 โดยจะมีขนาดเท่ากันและมีเฟสตรงกัน คุณสมบัติเหล่านี้ของการแบ่งกำลังงานระนาบ H สามารถใช้ในเครื่องรวมกำลังงานของท่อนำคลื่นและแบ่งกำลังงานได้เมื่อป้อนกำลังงานอินพุตที่เฟสตรงกันทั้งสองพอร์ตพร้อม ๆ กัน จะทำให้กำลังงานถูกรวมที่พอร์ตเอาต์พุตพอร์ตเดียวกัน จะไม่เกิดการหักล้างในระนาบ H

4.2.1 การออกแบบและผลการจำลองท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม

การออกแบบในส่วนของท่อนำคลื่น ส่วนใหญ่ในการออกแบบท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมจะใช้โหมด TE_{10} ในการออกแบบและขนาดของท่อนำคลื่นจะใช้ขนาดมาตรฐาน WR340 ซึ่งเป็นมาตรฐานท่อนำคลื่น WR340 เมื่อกำหนดให้ a เท่ากับ 86.36 มิลลิเมตร และ b เท่ากับ 43.18 มิลลิเมตร ถูกนำมาใช้ทั้งหมดพอร์ตเป็นพอร์ตท่อนำคลื่นมาตรฐาน ความยาวคือ λ_g มีค่าเท่ากับ 173 มิลลิเมตร วัสดุที่ใช้ในการจำลองคืออลูมิเนียม ความหนาเท่ากับ 3.0 มิลลิเมตร ความถี่คัตออฟ 1.75 กิกะเฮิร์ต เข้าสู่ท่อนำคลื่นขึ้นอยู่กับความถี่ตัดของโหมดต่าง ๆ โหมดที่มีความถี่ตัดเท่ากับหรือน้อยกว่าความถี่ในการทำงานสามารถมีอยู่ได้ภายในท่อนำโหมดสำหรับ TE_{10} โหมดนิพจน์ที่เกี่ยวข้องสำหรับความเข้มของสนามและพารามิเตอร์ โดยให้ m เท่ากับ 1 และ n เท่ากับ 0 และขนาดจะแสดงดังรูปที่ 4.2

ความถี่คutoffของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม

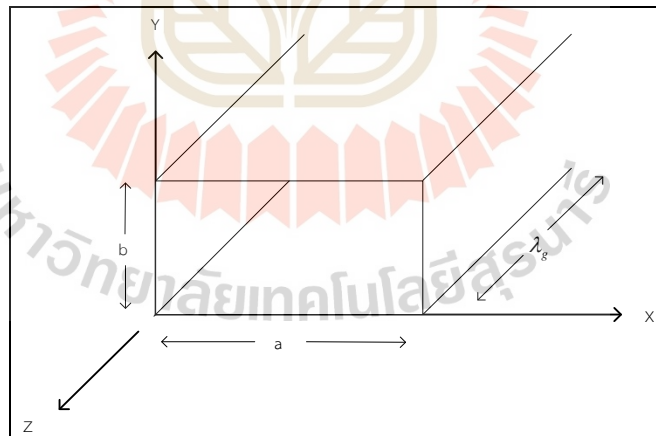
$$f_{cutoff} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} = 1.75GHz$$

ความยาวคลื่นคutoffด้วยตัวแปรเดียวกันนี้จะได้เป็น

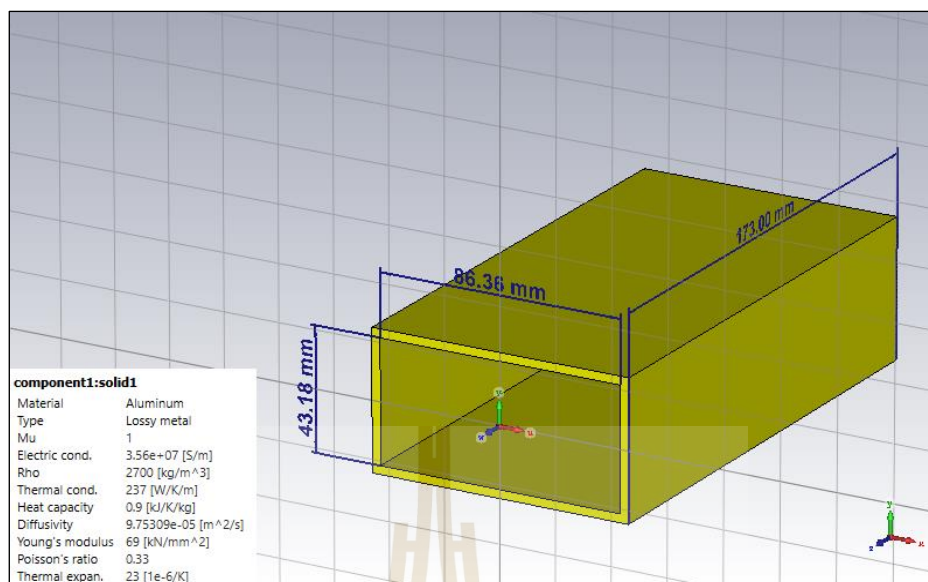
$$\lambda_{cutoff} = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{cutoff}}\right)^2}} = 122mm$$

ความยาวคลื่นในท่อนำคลื่น

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{cutoff}}\right)^2}} = 173mm$$

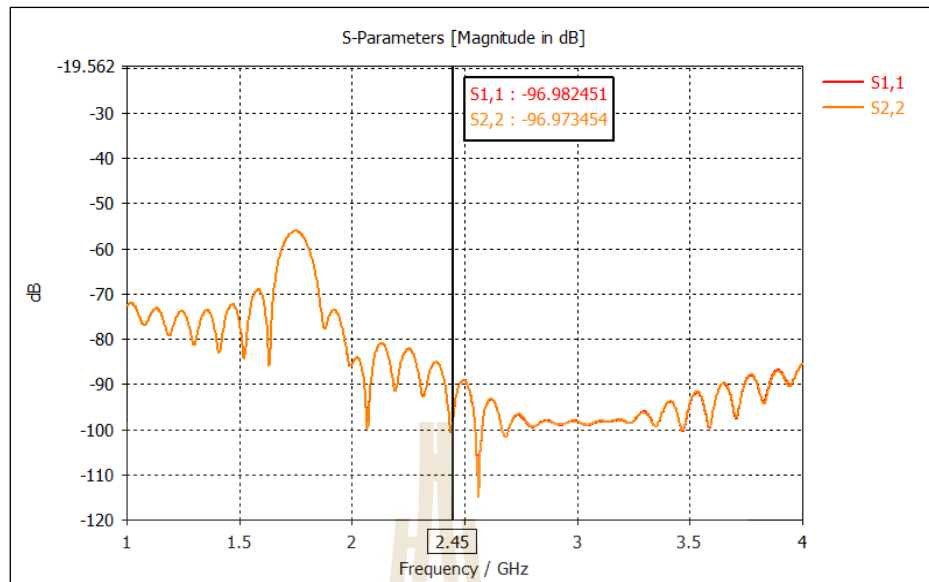


รูปที่ 4.2 ท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมขนาดมาตรฐาน WR340

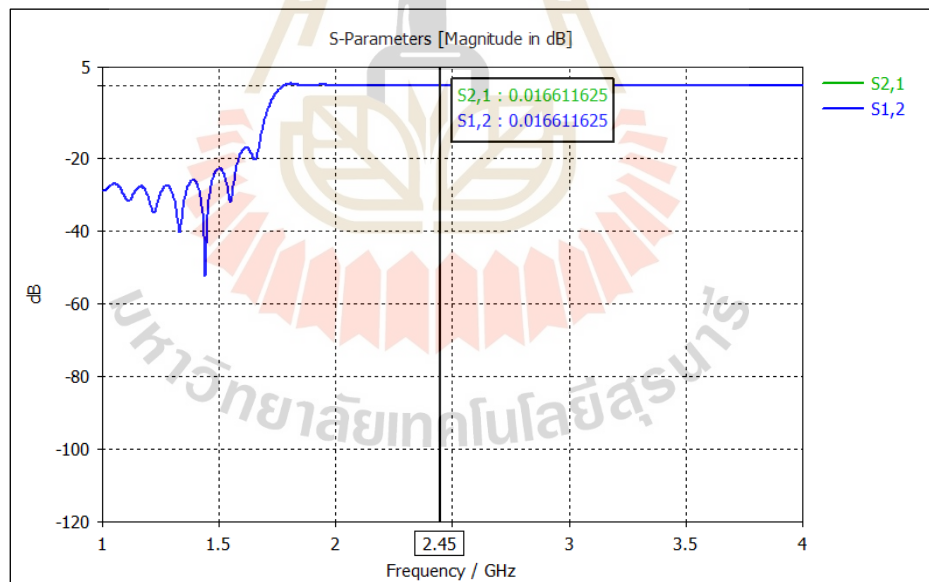


รูปที่ 4.3 การจำลองท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมขนาดสี่เหลี่ยมมาตรฐาน WR340

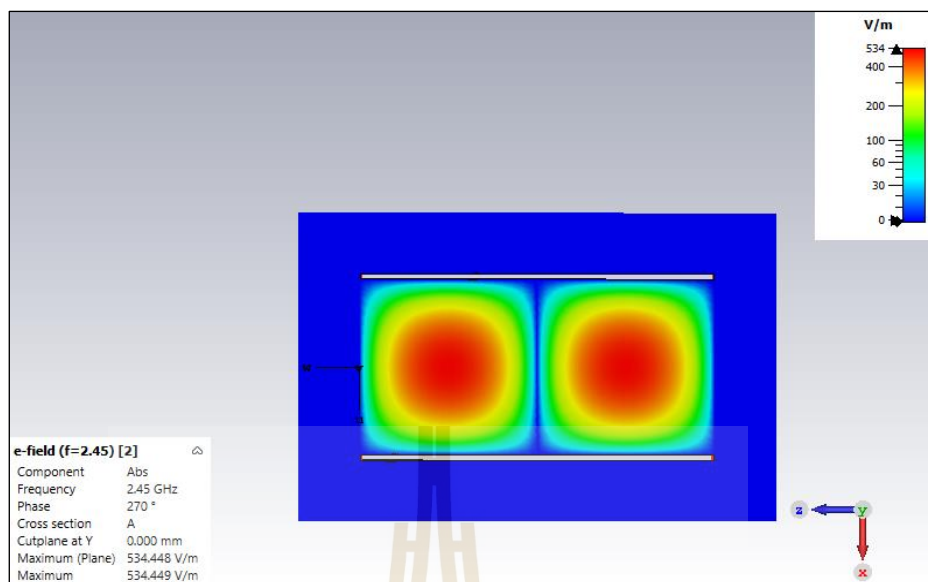
ผลการทดสอบการวัดพารามิเตอร์ต่าง ๆ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ CST Studio ในการจำลองใช้ท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม WR340 พอร์ตเอาต์พุตและอินพุตใช้เป็น (Waveguide port) ในการจำลอง โดยพิจารณาค่าการสะท้อนกลับของสัญญาณที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ต แสดงดังรูปที่ 4.4 พอร์ตที่ 1 (S11) ให้ค่าการสะท้อนกลับสัญญาณที่ -22 dB และในพอร์ตที่ 2 (S22) ให้ค่าการสะท้อนกลับสัญญาณที่ -96 dB เช่นกัน สำหรับค่าการสูญเสียการส่งสัญญาณ แสดงดังรูปที่ 4.5 (S21 ,S12) มีค่าเท่ากับ 0 dB นั้นแสดงให้เห็นว่าการการส่งสัญญาณระหว่างพอร์ตอินพุตไปยังเอาต์พุตไม่มีการสูญเสียจากท่อนำคลื่น และในส่วนของกระจายสนามไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 4.6 ความเข้มของสนามไฟฟ้ามีค่าประมาณ 534 โวลต์ต่อเมตร



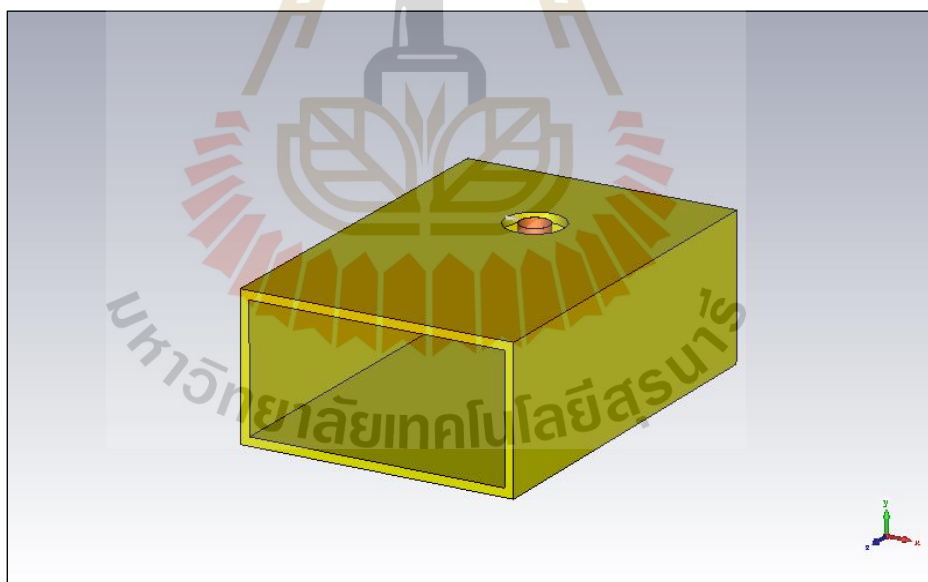
รูปที่ 4.4 ผลการจำลองค่าการสูญเสียจากการสะท้อนกลับของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมขนาดมาตรฐาน WR340 ที่ความถี่ 2.45 กิโลเฮิรต์



รูปที่ 4.5 ผลการจำลองค่าสูญเสียการส่งผ่านระหว่างอินพุตไปยังเอาต์พุตของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมขนาดมาตรฐาน WR340 ที่ความถี่ 2.45 กิโลเฮิรต์



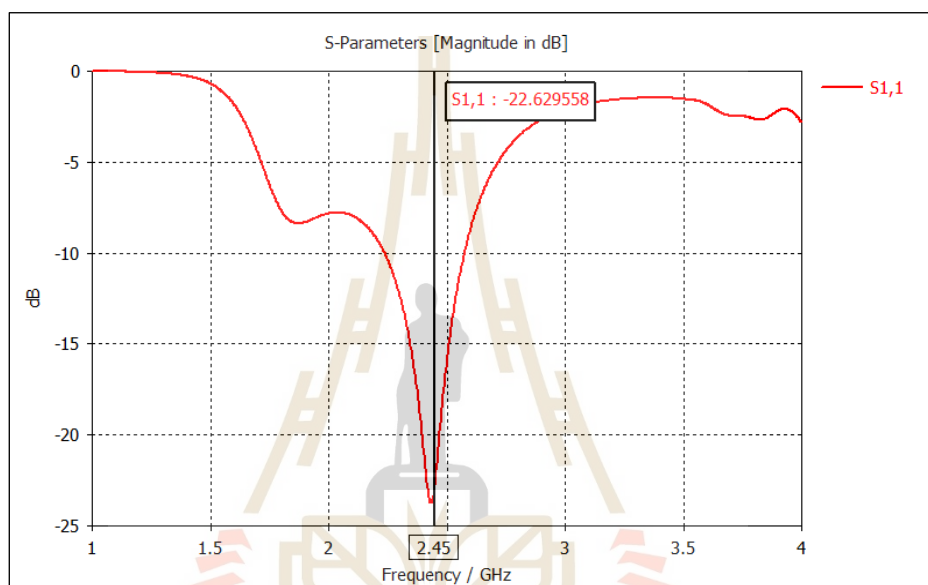
รูปที่ 4.6 ผลการจำลองการแพร่กระจายคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมขนาดมาตรฐาน WR340 ที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรต์



รูปที่ 4.7 การจำลองท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมขนาดสี่เหลี่ยมมาตรฐานกับแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง

ผลการทดสอบแหล่งกำเนิดคลื่นโดยใช้สายอากาศโมโนโพลแทนแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงในการพิจารณาพารามิเตอร์ต่าง ๆ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์จำลองผลใน

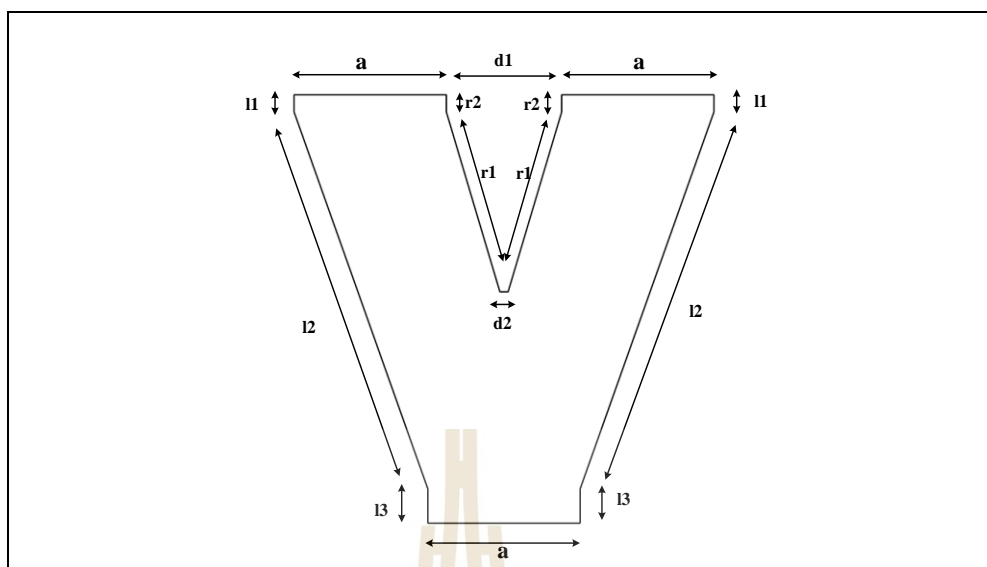
การจำลองผลใช้ท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม WR340 และเพิ่มสายอากาศโมนโพล ในการจำลองสายอากาศใช้วัสดุทองแดงกลวง ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ความยาวของทองแดงมีค่าเท่ากับ 30 มิลลิเมตร ตำแหน่งระยะห่างเท่ากับ $\lambda_g / 4$ เนื่องจากระยะการใช้คือค่าที่ดีที่สุด ผลการจำลองการวัดโดยใช้สายอากาศแบบโมนโพลแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง ส่วนการจำลองในการป้อนพอร์ตอินพุตใช้เป็น (Discrete port) ให้ค่าการสะท้อนกลับของสัญญาณ (S11) ที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ต พอร์ตที่ 1 ให้ค่าการสะท้อนกลับสัญญาณที่ -22 dB แสดงดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ผลการจำลองค่าการสูญเสียจากการสะท้อนกลับของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมกับแหล่งกำเนิดคลื่น

4.2.2 การออกแบบและจำลองท่อนำคลื่นแบบท่อนำคลื่นแบบรวมกำลังงาน

การออกแบบท่อนำคลื่นแบบรวมกำลังงานเพื่อให้ง่ายต่อการออกแบบการออกแบบโดยใช้ชิ้นส่วนท่อนำคลื่นสามพอร์ตที่มีขนาดช่องท่อนำคลื่นเท่ากันทั้งสามด้านคือด้าน a และด้าน b ที่ได้ออกแบบไว้ในหัวข้อที่ 4.1.1 ในส่วนของความยาวพอร์ตอินพุตสองพอร์ตขนาดความยาวภายในท่อเท่ากัน ใช้การออกแบบโครงสร้างอ้างอิงตามงานวิจัยที่ได้ศึกษาจากบทที่ 2 โดยโครงสร้าง Y ในส่วนของระนาบท่อนำคลื่นจะใช้เป็นระนาบ H เนื่องจากว่าคุณสมบัติของท่อนำคลื่นระนาบ H เมื่อคลื่นเคลื่อนที่เข้าจากพอร์ตที่ 1 จะแยกออกไปยังพอร์ตที่ 2 และพอร์ตที่ 3 โดยมีขนาดเท่ากันและมีทิศทางของสนามไฟฟ้าตรงกันคือมีเฟสตรงกัน ดังนั้นจึงเลือกใช้ระนาบ H และข้อดีของโครงสร้างทางแยก Y ระนาบ H ง่ายต่อการขึ้นรูป พารามิเตอร์สำหรับท่อนำคลื่นขนาดของท่อนำคลื่นสำหรับรวมกำลังงานจะถูกแทนด้วยพารามิเตอร์แสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ขนาดมุมมองด้านบนของท่อนำคลื่นทางแยกสองทางแยกรูปตัว Y ระบาย H

ตารางที่ 4.1 ขนาดของท่อนำคลื่นรวมกำลังงานค่าที่ได้จากการออกแบบ

พารามิเตอร์	ค่าที่ปรับให้เหมาะสม (มิลลิเมตร)
a	86.36
r1	43
$l1=r2$	30
$l2$	122
$l3$	30
$d1$	60
$d2$	10

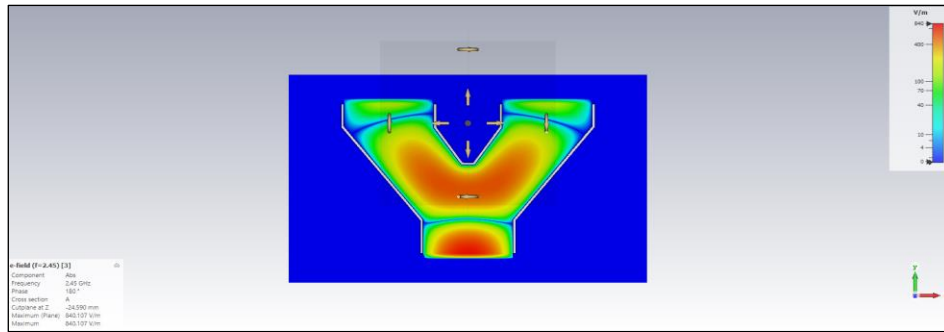
ท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมแบบรวมกำลังงานโครงสร้างทางแยก Y ระบาย H ตัวแบ่งกำลังของท่อนำคลื่นสามารถแบ่งออกเป็นแต่ละส่วนตัวแบ่งและรวมกำลัง สามารถออกแบบได้โดยใช้โปรแกรม CST Studio เพื่อความสะดวกในการออกแบบและง่ายต่อการพิจารณาค่าพารามิเตอร์ของทุก ๆ พอร์ตอินพุตและเอาต์พุต แต่ละพอร์ตอินพุตและเอาต์พุตของตัวแบ่งและตัวรวมกำลังงานถูกออกแบบให้มีความกว้างและความยาวภายในท่อเท่า ๆ กัน จากการวิเคราะห์ข้างต้นค่าเริ่มต้นของพารามิเตอร์ที่ได้ออกแบบไว้ดังตารางที่ 4.1 ยังไม่เป็นที่น่าพอใจสำหรับผลการจำลองแสดงดังตารางที่ 4.2 ในลำดับที่ 1 โดยจะมีการเริ่มปรับขนาดท่อนำคลื่นเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมจากที่ได้ทำการ

ออกแบบไว้ โครงสร้างขนาดของทั้งสามพอร์ตถูกแทนด้วย (a) ใช้ขนาดเท่ากันทั้งสามพอร์ตที่ขนาดความกว้างภายในท่อ 86.36 มิลลิเมตร เมื่อพิจารณาถึงระยะห่างระหว่างพอร์ตอินพุตทั้งสองและความยาวของท่อนำคลื่น กำหนดคือพารามิเตอร์ (L1 ถึง L3) คือความยาวของท่อนำคลื่นด้านนอก (d1 และ d2) คือระยะห่างระหว่างพอร์ตอินพุตทั้งสอง และพารามิเตอร์ (r1 และ r2) คือความยาวของท่อนำคลื่นด้านในเป็นขนาดที่ได้รับการออกแบบพัฒนาและปรับปรุงไว้ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.2

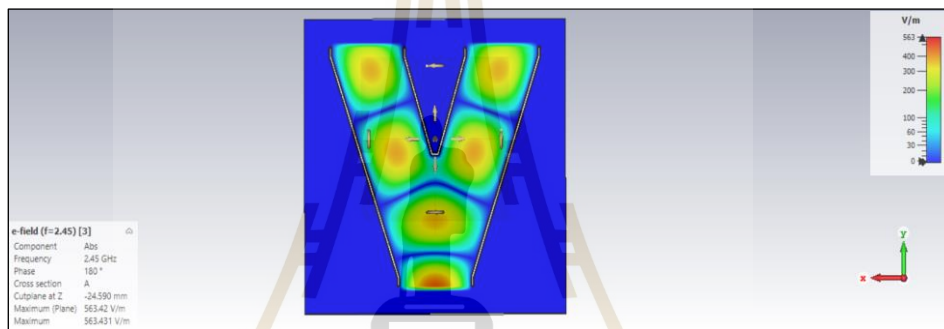
ตารางที่ 4.2 การปรับขนาดของท่อนำคลื่นรวมกำลังงานเพื่อหาค่าที่เหมาะสม

No.	พารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบ (มิลลิเมตร)							ค่าการสูญเสียการสะท้อนกลับ (dB)			ค่าการสูญเสียการส่งสัญญาณ (dB)			
	R1	R2	L1	L2	L3	D1	D2	S11	S22	S33	S13	S31	S23	S32
1	43	24	24	122	24	60	10	8.04	8.04	10.52	5.53	5.53	5.53	5.53
2	60	24	24	145	24	60	10	13.84	13.84	15.63	5.21	5.21	5.21	5.21
3	60	40	40	145	40	60	20	15.79	15.79	16.22	4.80	4.80	4.80	4.80
4	80	20	20	200	20	70	15	17.35	17.35	19.78	4.58	4.57	4.58	4.21
5	109	10	10	234	20	70	5	21.41	21.41	25.41	3.38	3.38	3.38	3.38
7	150	10	10	256	20	60	5	16.17	16.17	18.61	4.23	4.23	4.23	4.23
8	202	10	10	281	52	50	5	11.85	11.85	14.02	4.87	4.87	4.87	4.87
9	247	10	10	304	10	70	5	7.13	7.13	10.23	5.21	5.21	5.21	5.21
10	272	10	10	330	10	70	5	5.42	5.42	8.90	5.84	5.84	5.83	5.84

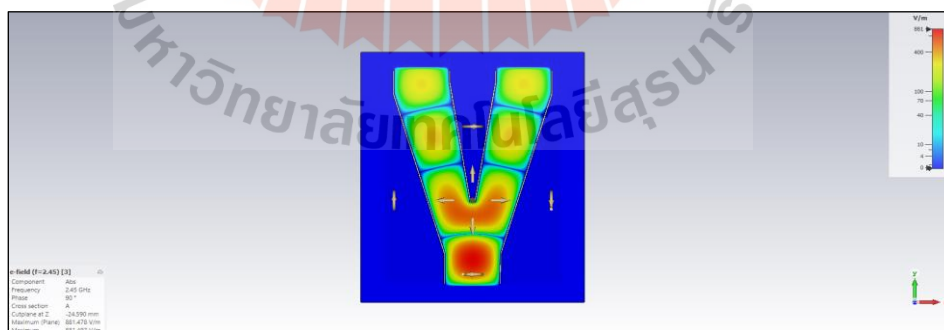
วิเคราะห์ผลการจำลองการปรับค่าพารามิเตอร์ในตารางที่ 4.1 แสดงผลการจำลองท่อนำคลื่นรวมกำลังงาน ในลำดับที่ 1 ถึงลำดับที่ 10 แสดงค่าการสูญเสียการสะท้อนกลับ (S11, S22, S33) และค่าการสูญเสียจากการส่งสัญญาณ (S13, S31, S23, S32) สรุปได้ว่าการปรับขนาดระยะความยาวพอร์ตอินพุตทั้งพอร์ตที่ 1 และพอร์ตที่ 2 คือพารามิเตอร์ r1 และ L2 มีผลต่อการสูญเสียการสะท้อนกลับของคลื่นสะท้อนกลับไปยังแหล่งจ่ายและการส่งสัญญาณระหว่างพอร์ตอินพุตไปยังเอาต์พุต ดังนั้นระยะของพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจะแสดงดังการจำลอง ครั้งที่ 5 แสดงผลการจำลองการปรับพารามิเตอร์ ในครั้งที่ 5 ให้ค่าการสูญเสียการสะท้อนกลับ (S11, S22 และ S33) มีค่าเท่ากับ (-21, -21 และ -23) ตามลำดับ ในส่วนค่าการสูญเสียจากการส่งสัญญาณ (S13, S31, S23 และ S32) มีค่าเท่ากับ (-3.38, -3.38, -3.38 และ -3.38) ตามลำดับ การสูญเสียการแทรกสอดประมาณ 0.35 dB ให้ประสิทธิภาพประมาณ 92 เปอร์เซ็นต์



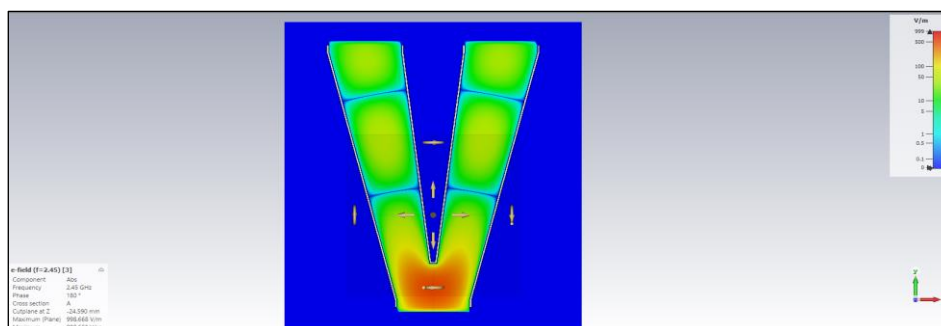
รูปที่ 4.10 ตัวอย่างการจำลองทิศทางการแพร่กระจายของของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในการปรับพารามิเตอร์ลำดับที่ 1



รูปที่ 4.11 ตัวอย่างการจำลองทิศทางการแพร่กระจายของของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในการปรับพารามิเตอร์ลำดับที่ 5



รูปที่ 4.12 ตัวอย่างการจำลองทิศทางการแพร่กระจายของของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในการปรับพารามิเตอร์ลำดับที่ 8

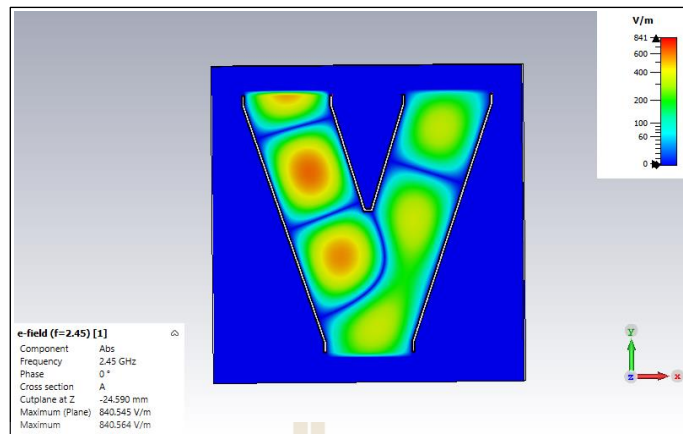


รูปที่ 4.13 ตัวอย่างการจำลองทิศทางการแพร่กระจายของของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในการปรับพารามิเตอร์ลำดับที่ 10

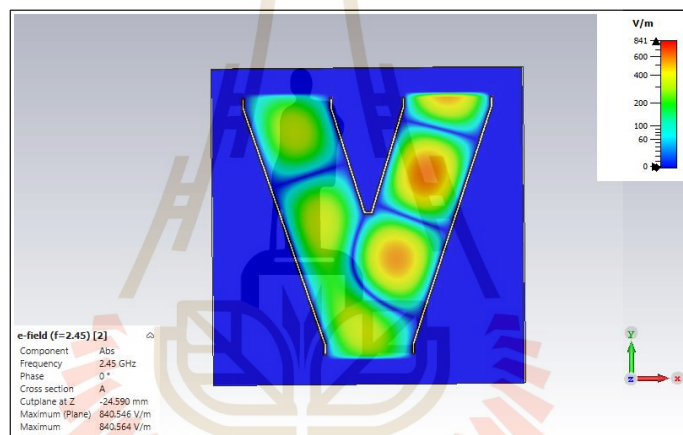
จากรูปที่ 4.10 ถึง 4.13 แสดงผลจำลองทิศทางการแพร่กระจายคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในการปรับพารามิเตอร์ดังตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าลำดับที่ 5 ดังรูปที่ 4.11 มีทิศทางการแพร่กระจายคลื่นระหว่างพอร์ตที่ 3 ไปยังพอร์ตที่ 1 และ พอร์ตที่ 3 ไปยังพอร์ตที่ 2 ในลักษณะที่เท่ากันโดยไม่มีการลดทอนขนาดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและมีสัมพันธ์กันกับค่าการสูญเสียในการส่งสัญญาณที่แสดงในตารางดังกล่าวและขนาดของท่อนำคลื่นรวมกำลังงานที่ได้รับการปรับให้เหมาะสมแสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ขนาดของท่อนำคลื่นรวมกำลังงานที่ได้รับการปรับให้เหมาะสม

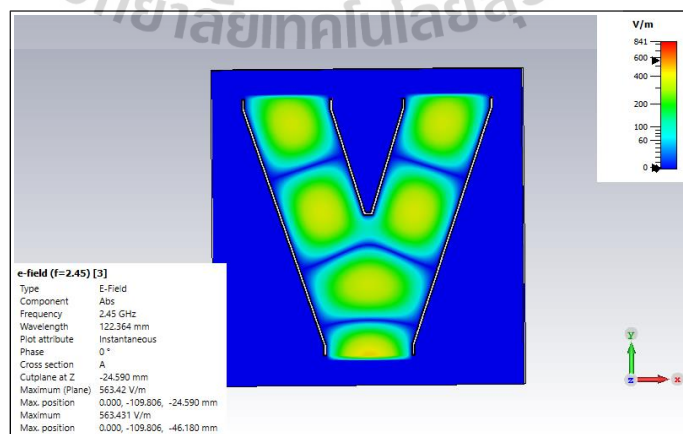
พารามิเตอร์	ค่าที่ปรับให้เหมาะสม (มิลลิเมตร)
a	86.36
r1	85
l1=r2	20
l2	110
l3	20
d1	70
d2	10



รูปที่ 4.14 ผลการจำลองการแพร่กระจายคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของพอร์ตอินพุตพอร์ตที่ 1

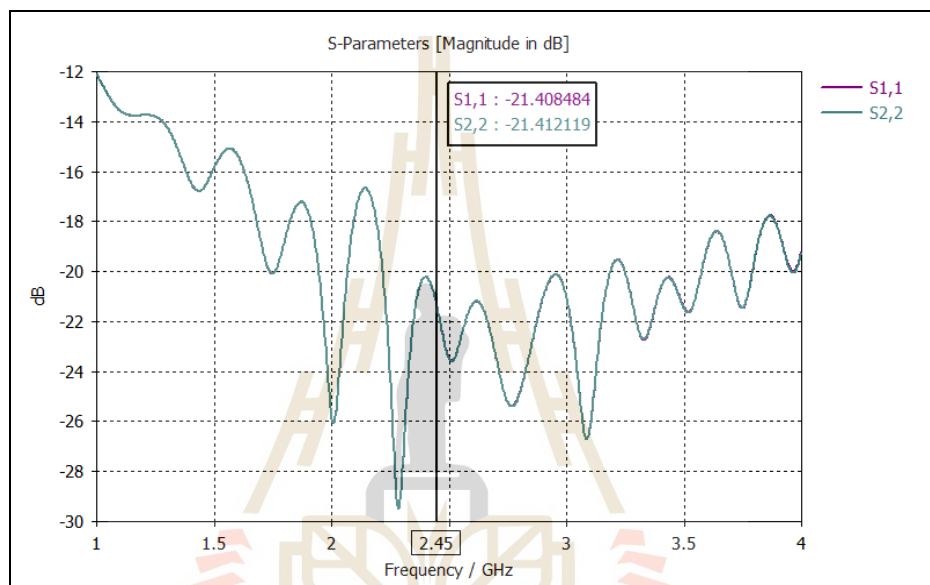


รูปที่ 4.15 ผลการจำลองการแพร่กระจายคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของพอร์ตอินพุตพอร์ตที่ 2

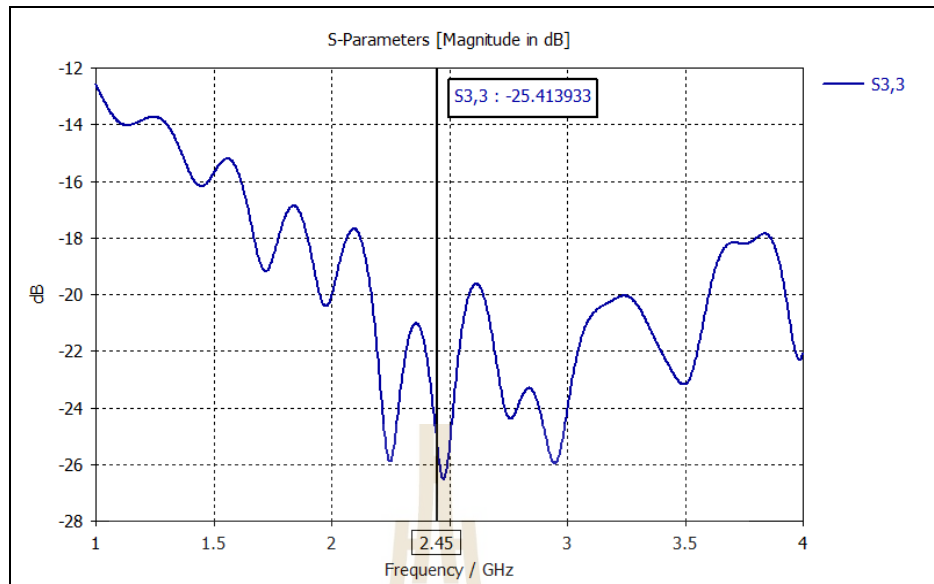


รูปที่ 4.16 ผลการจำลองการแพร่กระจายคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของพอร์ตเอาต์พุตพอร์ตที่ 3

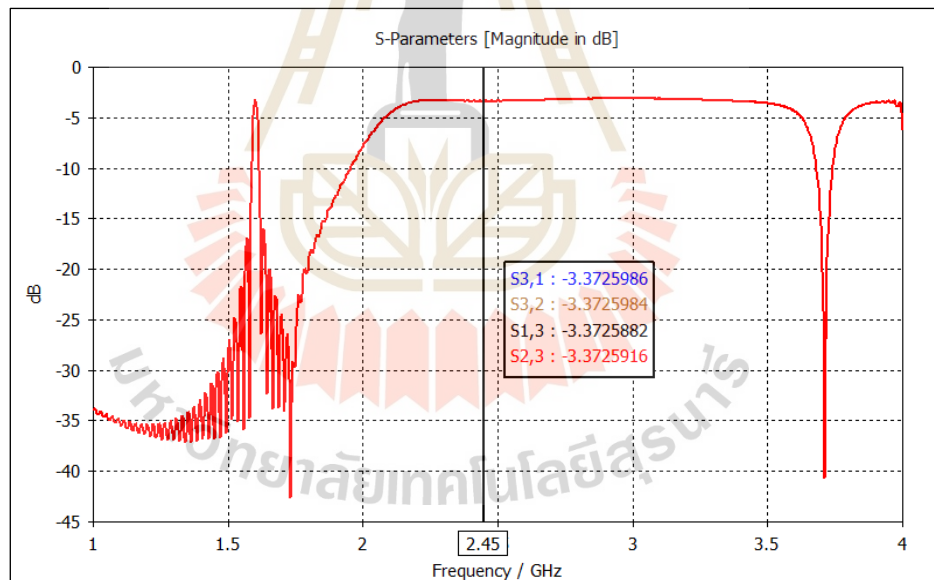
ผลการจำลองทิศทางการแพร่กระจายของของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าค่าที่ถูกปรับให้เหมาะสม ในการป้อนพอร์ตอินพุตใช้เป็น (Waveguide port) ทั้งหมด 3 พอร์ต เมื่อป้อนกำลังงานอินพุตให้กับพอร์ตที่ 1 และพอร์ตที่ 2 มีทิศทางการแพร่กระจายคลื่นที่มีขนาดเท่ากัน 858 โวลต์ต่อเมตร และมีเฟสตรงกันที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรต ในรูปที่ 4.14 และ 4.15 ตามลำดับ และทิศทางการแพร่กระจายของของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในพอร์ตที่ 3 ซึ่งถูกกำหนดให้เป็นเอาต์พุต แสดงดังรูปที่ 4.16 มีทิศทางการแพร่กระจายคลื่นที่มีขนาดเท่ากันและเฟสตรงกันเช่นกันกับพอร์ตที่ 1 และพอร์ตที่ 2



รูปที่ 4.17 ค่าสูญเสียจากการสะท้อนกลับอินพุต (S11, S22)



รูปที่ 4.18 ค่าสูญเสียจากการสะท้อนกลับเอาท์พุต (S33)



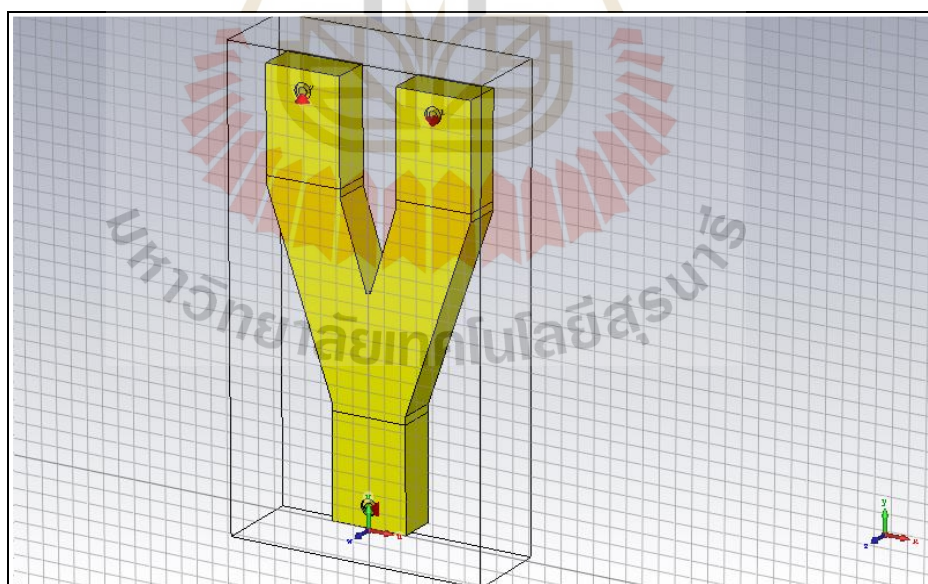
รูปที่ 4.19 ค่าการสูญเสียการส่งสัญญาณระหว่างพอร์ตอินพุตไปยังเอาท์พุต (S31, S32, S13, S23)

ผลการจำลองทำนายคลื่นสำหรับรวมกำลังงาน โดยค่าการสูญเสียสะท้อนกลับของสัญญาณ (S11, S22 และ S33) ในการจำลองพอร์ตใช้เป็น (Waveguide port) ทั้งหมด 3 พอร์ต ที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรต์ โดยพอร์ตที่ 1 และ พอร์ตที่ 2 ให้ค่าการสูญเสียการสะท้อนกลับของสัญญาณพอร์ตอินพุต -21.4 dB แสดงดังรูปที่ 4.18 และพอร์ตที่ 3 ให้ค่าการสะท้อนกลับสัญญาณของพอร์ต

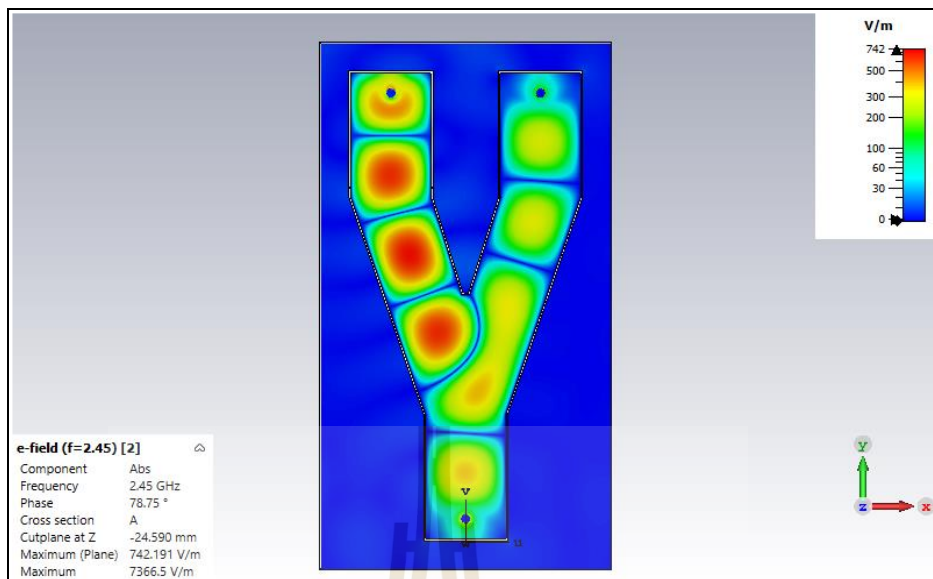
เอาร์ทพุต -25.4 dB แสดงดังรูปที่ 4.19 ในส่วนของค่าการสูญเสียการนำส่งสัญญาณ (S13, S23, S31 และ S32) มีค่าเท่ากับทุกพอร์ตประมาณ -3.37 dB แสดงดังรูปที่ 4.19 การสูญเสียจากการแทรกสอดมีค่าเท่ากับ 0.36 dB ดังนั้นการจำลองที่นำคลื่นรวมกำลังงานสามารถนำไปใช้งานจริง

4.2.3 ผลการจำลองของท่อนำคลื่นสำหรับรวมกำลังงานใช้กับแหล่งกำเนิดคลื่นแบบโมนโนโพล

การออกแบบท่อนำคลื่นแบบรวมกำลังงานกับแหล่งกำเนิดแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงแล้ว และได้มีการนำท่อนำคลื่นสำหรับรวมกำลังงานและแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง โดยแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงใช้เป็นสายอากาศโมนโนโพลเป็นแบบจำลองร่วมกับท่อนำคลื่นสำหรับรวมกำลังงาน การแสดงผลการจำลองการสูญเสียผลตอบแทนจากการสะท้อนกลับจากของพอร์ตต่าง ๆ โปรแกรม CST Studio แสดงผลการจำลองการแพร่กระจายคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของพอร์ตอินพุตและพอร์ตเอาต์พุตตามโครงสร้างการแยกแบบ Y โดยจะแสดงดังรูปที่ 4.20, 4.19 และ 4.20 และพารามิเตอร์ที่สำคัญ ค่าการสูญเสียจากการสะท้อนกลับของทั้งสามพอร์ตโดยพอร์ต 3 กำหนดให้เป็นพอร์ตเอาร์ทพุต (S33) พอร์ตที่ 1 และ 2 ถูกกำหนดให้เป็นพอร์ตอินพุต (S11,S22) แสดงดังรูปที่ 4.21 และ 4.22 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านระหว่างพอร์ตอินพุตไปยังพอร์ตเอาร์ทพุตหรือค่าการสูญเสียการส่งสัญญาณ (S31, S32, S13 และ S23) โดยจะแสดงดังรูปที่ 4.23



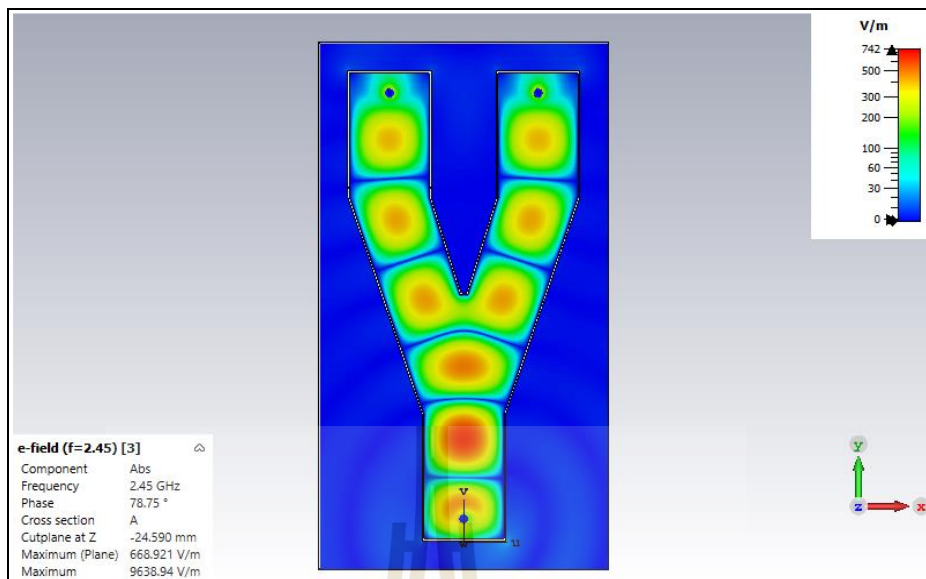
รูปที่ 4.20 การจำลองท่อนำคลื่นแบบรวมกำลังงานโครงสร้าง Y ระนาบ H



รูปที่ 4.21 การแพร่กระจายสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของท่อนำคลื่นอินพุตพอร์ตที่ 1

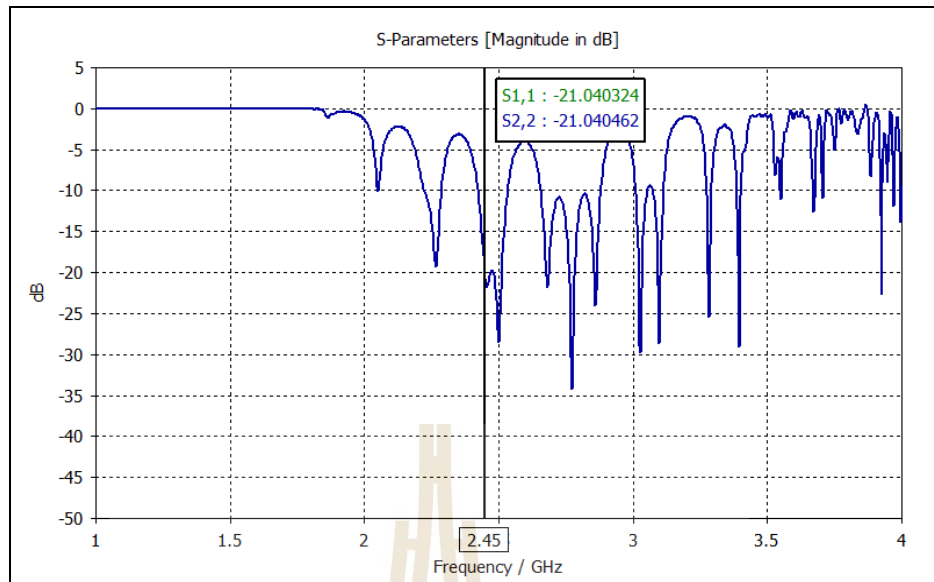


รูปที่ 4.22 การแพร่กระจายสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของท่อนำคลื่นอินพุตพอร์ตที่ 2

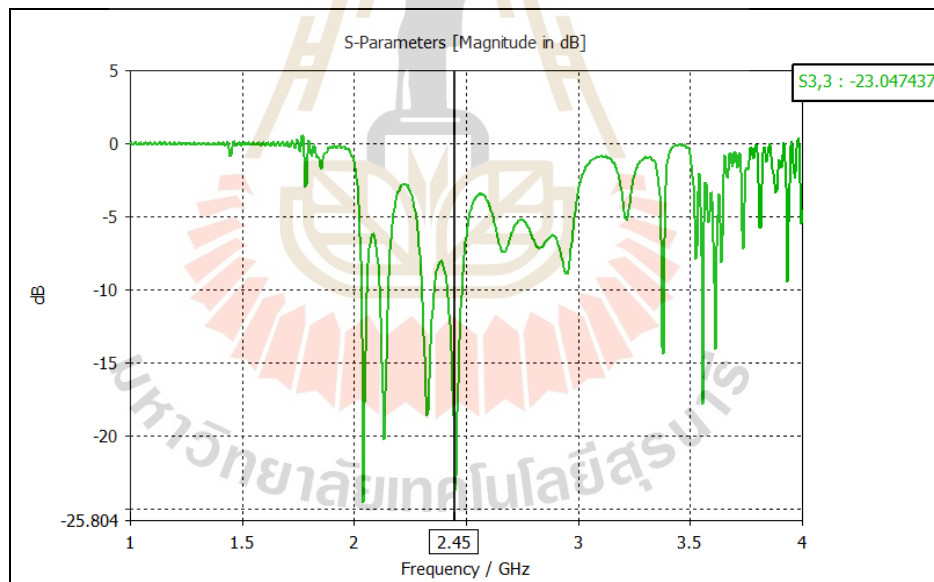


รูปที่ 4.23 การแพร่กระจายสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของท่อนำคลื่นเอ้าท์พุทพอร์ตที่ 3

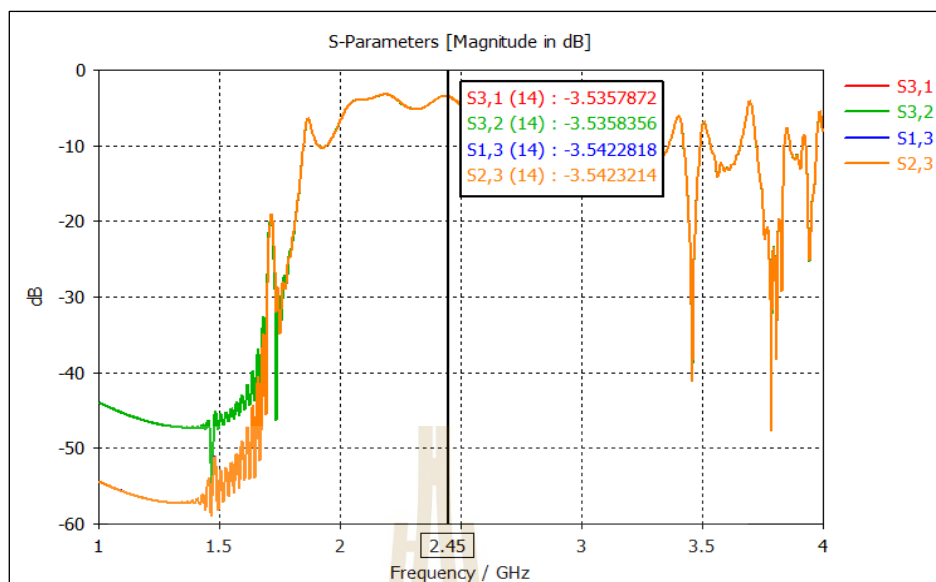
ผลการจำลองโดยใช้สายอากาศแบบโมนโพลแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง และท่อนำคลื่นสำหรับรวมกำลังงาน ในการป้อนพอร์ตอินพุตใช้เป็น (Discrete port) ทั้งหมด 3 พอร์ต เมื่อป้อนกำลังงานอินพุตให้กับพอร์ตที่ 1 และพอร์ตที่ 2 มีทิศทางการแพร่กระจายคลื่นที่มีขนาดเท่ากัน 742 โวลต์ต่อเมตร และเฟสตรงกันที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ต แสดงดังรูปที่ 4.21 และ 4.22 ตามลำดับ และทิศทางการแพร่กระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าพอร์ตที่ 3 ซึ่งถูกกำหนดให้เป็นพอร์ตเอ้าท์พุท แสดงดังรูปที่ 4.23 มีทิศทางการแพร่กระจายคลื่นที่มีขนาดเท่ากันและมีเฟสตรงกันเช่นเดียวกันกับพอร์ตที่ 1 และพอร์ตที่ 2 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลการจำลองดังกล่าวในด้านของการแบ่งหรือรวมกำลังงานสามารถนำไปใช้จริงและทดสอบในบทยต่อไปได้



รูปที่ 4.24 ผลการจำลองค่าสูญเสียจากการสะท้อนกลับพอร์ตอินพุต (S11, S22)



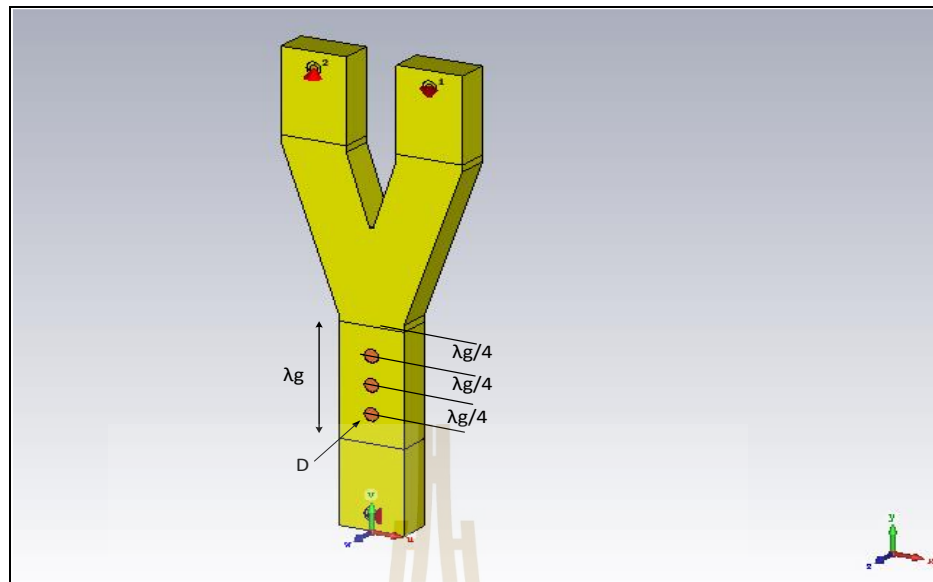
รูปที่ 4.25 ผลการจำลองค่าสูญเสียจากการสะท้อนกลับเอาต์พุต (S33)



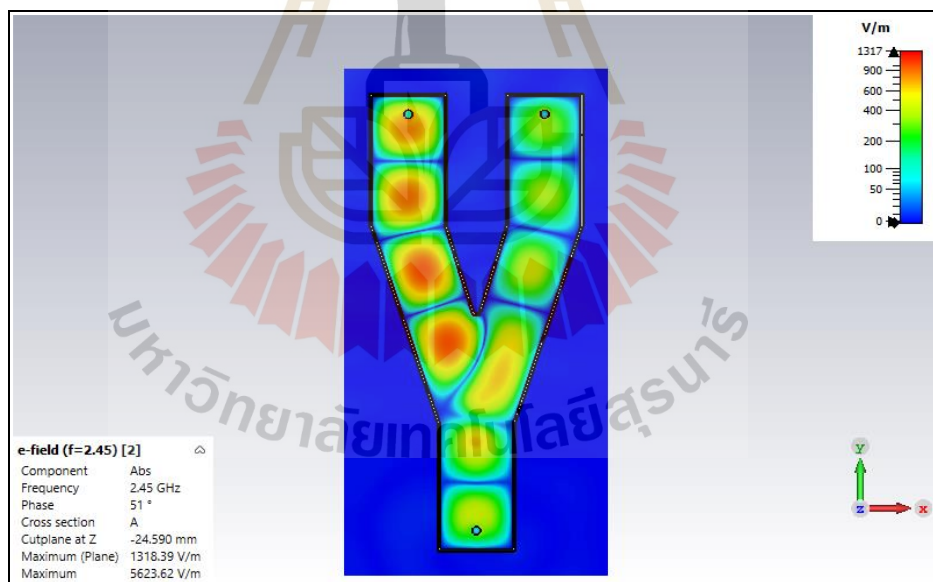
รูปที่ 4.26 ผลการจำลองค่าการสูญเสียการส่งสัญญาณระหว่างพอร์ตอินพุตไปยังเอาต์พุต (S31, S32, S13 และ S23)

จากการจำลองค่าการสะท้อนกลับของสัญญาณ (S11, S22 และ S33) โดยพอร์ตที่ 1 และ พอร์ตที่ 2 ให้ค่าการสูญเสียการสะท้อนกลับสัญญาณของพอร์ตอินพุต -21 dB แสดงดังรูปที่ 4.24 และพอร์ตที่ 3 ให้ค่าการสะท้อนกลับสัญญาณของพอร์ตเอาต์พุต -23 dB แสดงดังรูปที่ 4.25 ในส่วนของค่าการสูญเสียการนำส่งสัญญาณ (S13, S23, S31 และ S32) มีค่าเท่ากันทุกพอร์ตประมาณ -3.54 dB แสดงดังรูปที่ 4.26 การสูญเสียจากการแทรกอยู่ที่ 0.52 dB นั้นหมายความว่าทั้งการรวมและแบ่งกำลังงานที่ได้จำลองสามารถนำไปออกแบบได้

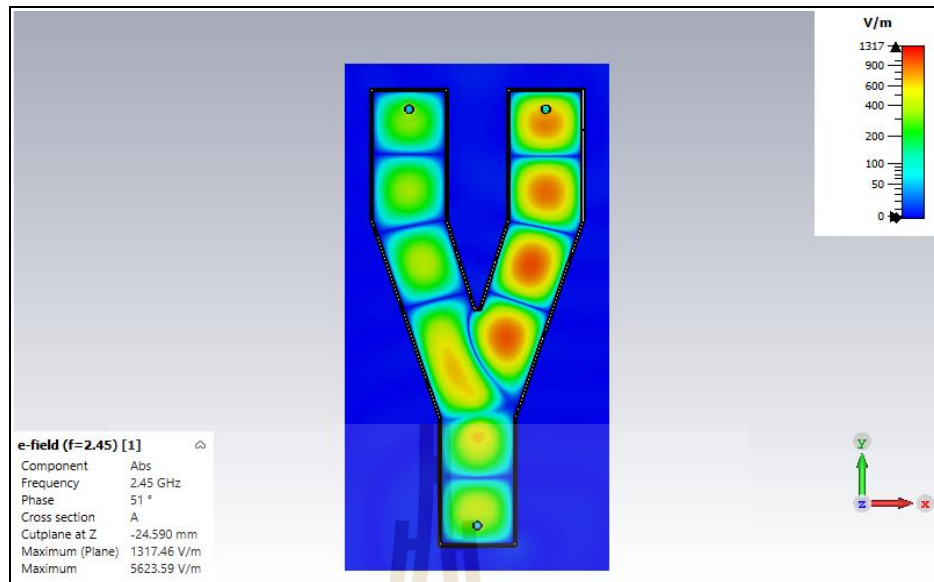
ในส่วนถัดไปเป็นการจำลองท่อนำคลื่นแบบรวมกำลังงานและเพิ่มสลับจูนเนอร์เพื่อช่วยการแมทซ์อิมพีแดนซ์ระหว่างโหลด เพื่อวิเคราะห์หาค่าที่ดีที่สุดในการปรับสกรูทั้งสามต้น วัสดุที่ใช้จำลองสกรูคือทองแดงที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร ระยะห่างระหว่างสกรูแต่ละแท่งมีค่าเท่ากับ $\lambda_g / 4$ ของความยาวคลื่นในท่อนำคลื่นขนาด WR340 หรือเท่ากับ 43 มิลลิเมตร (Marinel, Renault et al. 2018) แสดงดังรูปที่ 4.27



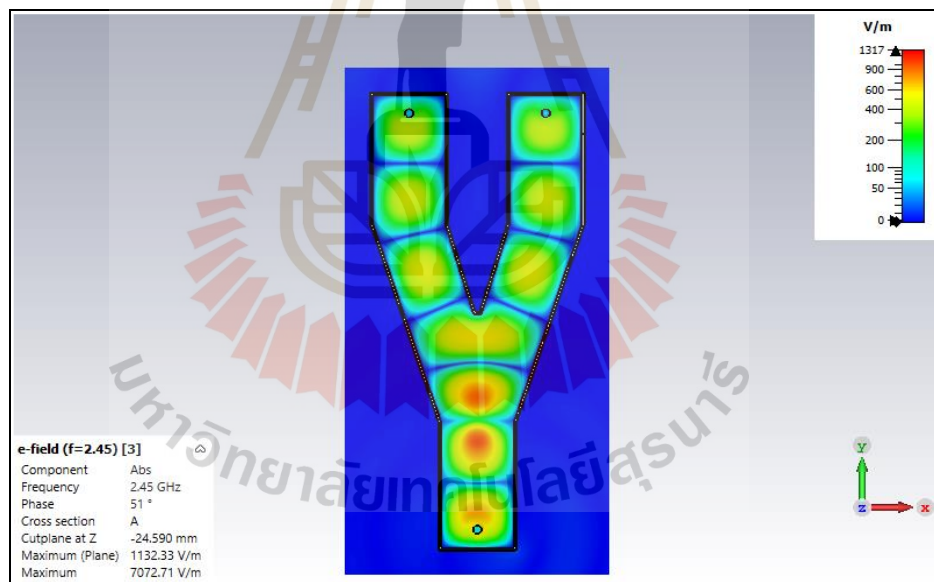
รูปที่ 4.27 แบบจำลองของท่อนำคลื่นสำหรับรวมกำลังงานโครงสร้าง Y ระนาบ H กับแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงเมื่อมีการเพิ่มสตัปจูนเนอร์



รูปที่ 4.28 แบบจำลองการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กไฟฟ้าอินพุตพอร์ตที่ 1



รูปที่ 4.29 แบบจำลองการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กไฟฟ้าอินพุตพอร์ตที่ 2



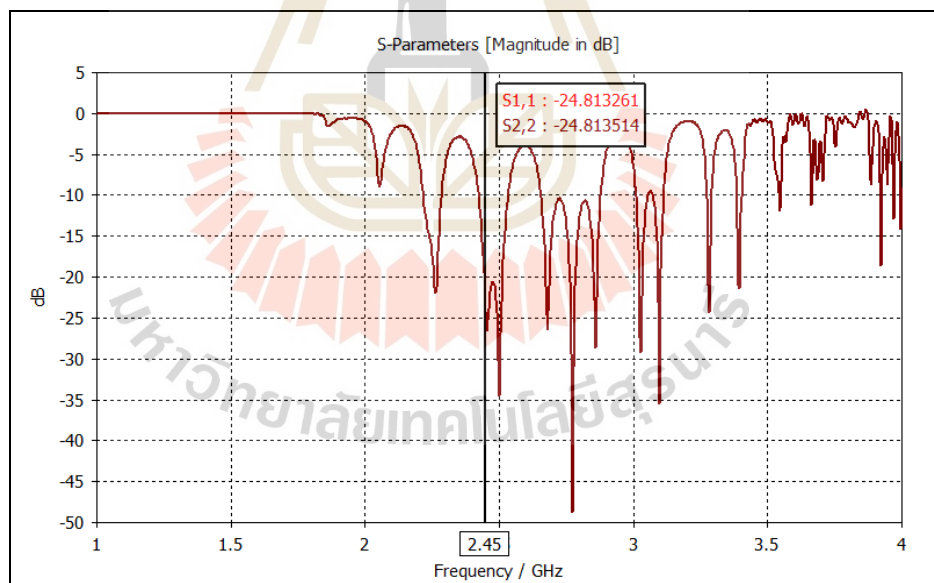
รูปที่ 4.30 แบบจำลองการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเอาต์พุตพอร์ตที่ 3

ผลจำลองทิศทางการแพร่กระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าป้อนกำลังงานอินพุตให้กับพอร์ตที่ 1 และพอร์ตที่ 2 มีทิศทางการแพร่กระจายคลื่นที่มีขนาดเท่ากัน 1,317 โวลต์ต่อเมตร และเฟสตรงกันที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรต์ แสดงดังรูปที่ 4.28 และ 4.29 ตามลำดับ และทิศทางการแพร่กระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในพอร์ตที่ 3 ซึ่งถูกกำหนดให้เป็นพอร์ตเอาต์พุต แสดงดังรูป

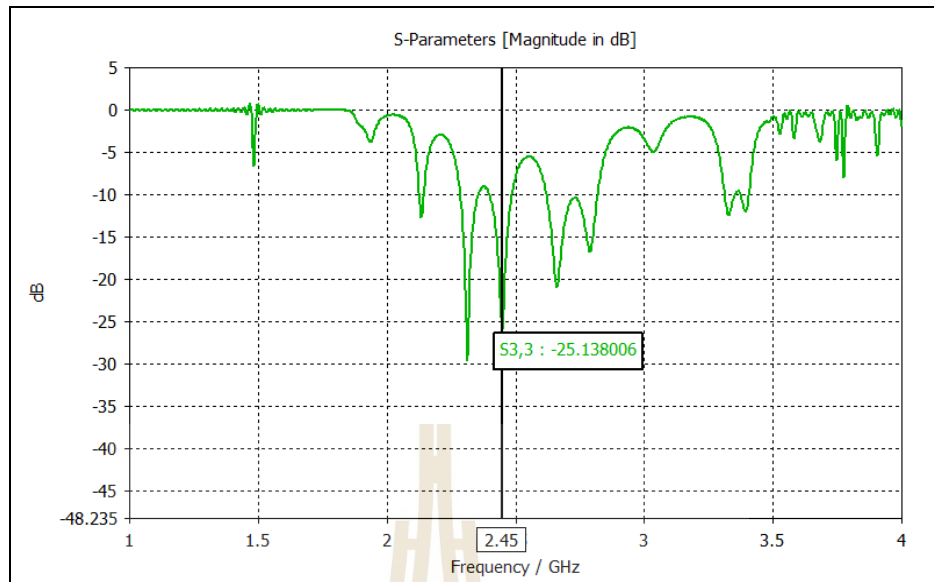
ที่ 4.30 มีทิศทางการแพร่กระจายคลื่นที่มีขนาดเท่ากันและเฟสตรงกันเช่นกันกับพอร์ตที่ 1 และพอร์ตที่ 2 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าถ้ามองทั้งในด้านของการแบ่งหรือรวมกำลังงานผลการจำลองดังกล่าวสามารถนำไปใช้งานได้จริง

ตารางที่ 4.4 การปรับความลึกของสกรูเพื่อหาค่าที่ดีที่สุด

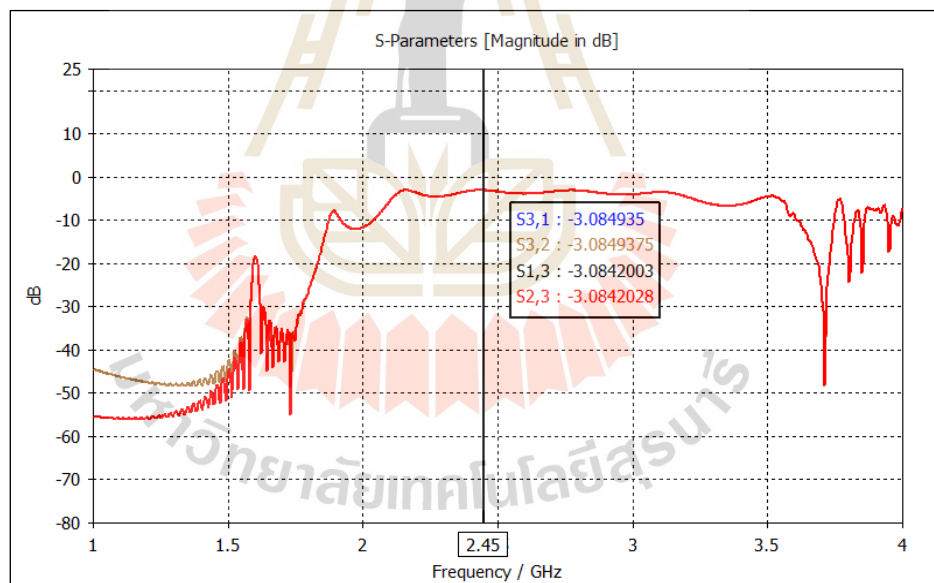
ครั้งที่	ความลึกของสกรู (mm)			ค่าการสูญเสียการส่งสัญญาณ (S31, S32, S13, S23)	ความถี่ (GHz)
	No.1	No.2	No.3		
1	0	0	0	-3.54	2.45
2	5.7	2.78	0	-3.40	2.45
3	12.4	3.45	0	-3.26	2.45
4	11.5	3.01	0	-3.13	2.45
5	8.42	3.34	0.59	-3.08	2.45



รูปที่ 4.31 ผลการจำลองค่าสูญเสียจากการสะท้อนกลับอินพุต (S11, S22)



รูปที่ 4.32 ผลการจำลองค่าสูญเสียจากการสะท้อนกลับเอ๊าท์พุต (S33)



รูปที่ 4.33 ผลการจำลองค่าสูญเสียจากการส่งสัญญาณระหว่างพอร์ตอินพุตไปยังเอ๊าท์พุต (S31, S32, S13 และ S23)

จากการจำลองค่าการสะท้อนกลับของสัญญาณ (S11, S22 และ S33) โดยพอร์ตที่ 1 และ พอร์ตที่ 2 ให้ค่าการสูญเสียการสะท้อนกลับสัญญาณของพอร์ตอินพุต -25 dB ดังรูปที่ 4.31 และพอร์ตที่ 3 ให้ค่าการสะท้อนกลับสัญญาณของพอร์ตเอ๊าท์พุต -24 dB ดังรูปที่ 4.32 การสูญเสีย

การส่งสัญญาณ (S13, S23, S31 และ S32) อยู่ที่ -3.54 dB และเมื่อมีการเริ่มปรับความลึกของสกรู ทั้งสามตัวจากลำดับครั้งที่ 1 ไปจนถึงลำดับครั้งที่ 5 ดังแสดงตารางที่ 4.2 ส่งผลให้ค่าการสูญเสียการส่งสัญญาณ (S13, S23, S31 และ S32) มีค่าเท่ากันทุกพอร์ตประมาณ -3.08 dB การสูญเสียการแทรกอยู่ที่ 0.07 dB แสดงดังรูปที่ 4.33 นั้นหมายความว่าทั้งการรวมและแบ่งกำลังงานที่ได้จำลองสามารถนำไปใช้ได้กับการออกแบบในบอทที่ 5 ได้

4.3 สรุป

ในบทนี้ได้ศึกษาและออกแบบวิเคราะห์ระบบการรวมกำลังงานของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม เพื่อใช้ในการรวมกำลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง ตามที่ได้มีการออกแบบท่อนำคลื่นขนาดมาตรฐาน WR340 จากนั้นได้ออกแบบท่อนำคลื่นสำหรับรวมกำลังงานโครงสร้าง Y ระบาย H ได้มีการปรับพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับท่อนำคลื่นรวมกำลังงานตามให้ความเหมาะสมที่แดนซ์ระหว่างแหล่งจ่ายและโหลดเพื่อให้ได้กำลังงานเอาต์พุตที่สูงที่สุด และยังได้มีการเพิ่มสตัปจูนเนอร์มาจำลองร่วมกับท่อนำคลื่นสำหรับรวมกำลังงานเป็นการแมทซ์อิมพีแดนซ์อินพุต เพื่อลดการสะท้อนกลับของคลื่นไปยังแหล่งกำเนิด และเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านระหว่างพอร์ตอินพุตไปยังพอร์ตเอาต์พุตเพื่อให้สามารถใช้เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นที่กำลังงานสูงที่สุด

บทที่ 5

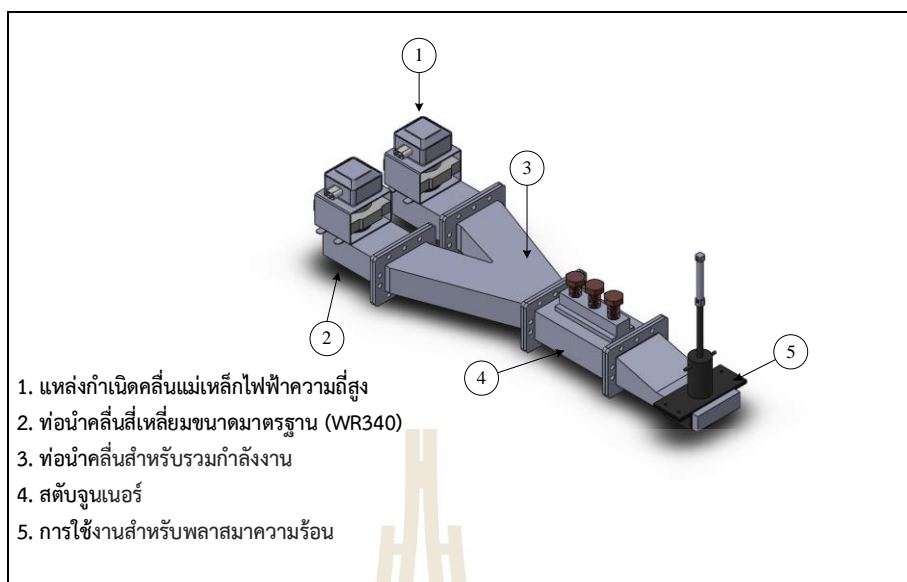
การทดลองและผลการทดสอบ

5.1 กล่าวนำ

จากที่ได้กล่าวถึงทฤษฎีและการออกแบบในบทที่ผ่านมา การออกแบบและสร้างระบบท่อนำคลื่นสำหรับรวมกำลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงที่มีแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงเป็นแมกนีตรอนกำลังงานอินพุตขนาด 1.5 กิโลวัตต์ ที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรต์ จากผลการศึกษาการแบ่งและรวมกำลังงานสำหรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง โดยใช้ท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมเป็นตัวนำสัญญาณ เนื่องจากว่าท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมนั้นมีการสูญเสียต่ำที่ย่านความถี่สูง จึงนำมาสู่การเพิ่มกำลังงานโดยการออกแบบท่อนำคลื่นโครงสร้าง Y ระนาบ H เพื่อให้สามารถรวมกำลังงานได้สูงสุด ในบทนี้จึงได้แสดงผลการทดสอบท่อนำคลื่นสำหรับรวมกำลังงาน ประกอบไปด้วย ชุดแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมที่ใช้สำหรับรวมกำลังงานกำลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง สตัมป์จูนเนอร์แบบ 3 ตำแหน่งสำหรับปรับอิมพีแดนซ์เพื่อไม่ให้คลื่นที่ส่งเข้าไปยังโหลดสะท้อนกลับมา การนำไปใช้งานถูกใช้เป็นแหล่งกำเนิดกำลังงานให้กับพลาสมาความร้อน และมีการวัดความแตกต่างของอุณหภูมิความร้อนและระยะเวลาการเกิดเปลวที่เกิดขึ้นหลังจากที่ใช้ท่อนำคลื่นสำหรับรวมกำลังงานและก่อนท่อนำคลื่นสำหรับรวมกำลังงาน

5.2 ขั้นตอนการทดสอบ

ในการทดสอบวัดท่อนำคลื่นสำหรับรวมกำลังงานที่ได้ออกแบบขึ้นตามการจำลองในบทที่ 4 แบ่งการทดสอบออกเป็น 3 ส่วนหลัก ๆ คือ วัดค่าการสะท้อนกลับของสัญญาณ และค่าการสูญเสียการส่งสัญญาณ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โคจรข่ายแบบสองทาง และวัดกำลังงานของท่อนำคลื่นสำหรับรวมกำลังงาน โดยใช้ Power meter รวมไปถึงการวัดอุณหภูมิเปลวพลาสมาความร้อนที่ระยะต่าง ๆ



รูปที่ 5.1 ระบบการทดสอบท่อนำคลื่นแบบรวมกำลังงานสำหรับใช้งานกับพลาสมาความร้อน

จากรูปที่ 5.1 แสดงระบบการทดสอบท่อนำคลื่นแบบรวมกำลังงานสำหรับใช้งานกับพลาสมาความร้อนโดยหมายเลข 1 คือแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงใช้หลอดแมกนีตรอนอินพุตทั้งหมดสองตัวกำลังงาน 1.5 กิโลวัตต์ หมายเลข 2 เป็นท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมขนาดมาตรฐาน WR340 ยานความถี่การใช้งาน 2.2 ถึง 3.3 กิกะเฮิรตต์ และมีความถี่คutoff ตั้งแต่ 1.75 กิกะเฮิรตต์ ขึ้นไปจนถึงความถี่สูง หมายเลข 3 คือท่อนำคลื่นแบบรวมกำลังงานที่ได้ทำการออกแบบกำหนดไว้มีอินพุตสองพอร์ตและเอาต์พุตหนึ่งพอร์ต หมายเลข 4 สตัมป์จูนเนอร์นำมาใส่ให้มีการแมทช์ระหว่างแหล่งจ่ายและโหลดเพื่อป้องกันการสะท้อนกลับของแหล่งกำเนิดคลื่น หมายเลข 5 คือพลาสมาความร้อนที่นำมาใช้เป็นโหลดเพื่อต้องการใช้เป็นชุดทดสอบประสิทธิภาพในการรวมกำลังงานของท่อนำคลื่นรวมกำลังงาน

5.2.1 การทดสอบสายอากาศโมโนโพลกับท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม WR340 โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบสองทาง

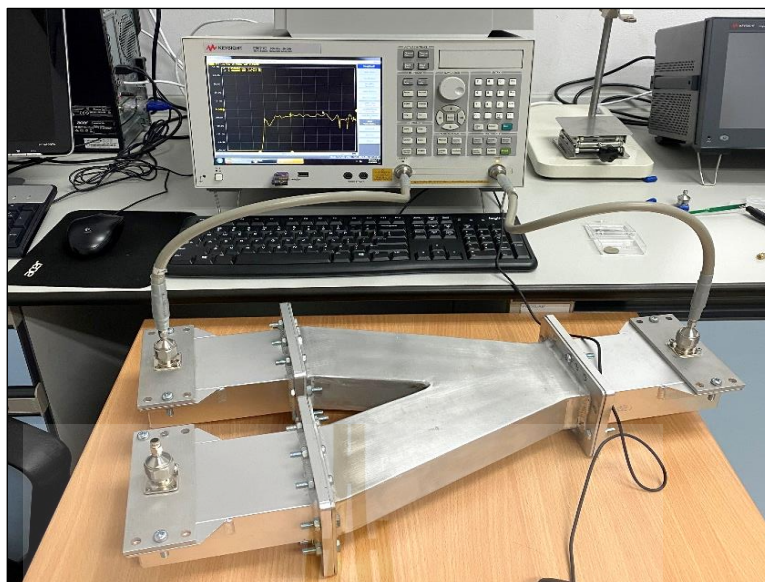
การทดสอบวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ สำหรับเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงให้กับท่อนำคลื่นแบบรวมกำลังงาน จะใช้แหล่งกำเนิดคลื่นใช้สายอากาศโมโนโพลแทนแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงในการวัดพารามิเตอร์ต่าง ๆ วัดการสะท้อนกลับของสัญญาณจะวัดทั้งหมด 3 พอร์ตการวัดการสะท้อนกลับของสัญญาณแต่ละพอร์ตจะถูกวัดแยกกันโดยทำการวัดและวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบสองทาง โดยจะทำการวัดที่ละพอร์ต กำหนดพอร์ต 1 เป็นอินพุตสัญญาณ การวัดการสะท้อนของสัญญาณแต่ละพอร์ตกำหนดเป็น (S11, S22 และ S33) แสดงดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 การทดสอบวัดค่าพารามิเตอร์ที่หน้าคลื่นขนาด WR340 โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบสองทาง

5.2.1 การทดสอบสายอากาศโมโนโพลกับที่หน้าคลื่นสี่เหลี่ยมรวมกำลังงานโดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบสองทาง

ที่หน้าคลื่นแบบแบ่งและรวมกำลังงาน ใช้สำหรับการรวมกำลังงานคลื่นความถี่ไมโครเวฟ การวัดการสะท้อนของสัญญาณจะวัดทั้งหมด 3 พอร์ต ถูกวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบสองทาง โดยจะทำการวัดที่ละพอร์ต ในขณะที่พอร์ตอื่น ๆ ถูกต่อเข้ากับโหลด 50 โอห์ม การวัดการสะท้อนของสัญญาณแต่ละพอร์ตกำหนดเป็น (S11), (S22) และ (S33) การวัดการสะท้อนของสัญญาณแต่ละพอร์ตกำหนดเป็น (S11), (S22) และ (S33) นอกจากนี้ยังมีการวัดค่าการสูญเสียการนำส่งสัญญาณจากพอร์ต 3 ไปยังพอร์ต 2 (S23) และพอร์ต 3 ไปยังพอร์ต 1 (S13) จะถูกวัดที่ละคู่เนื่องจากพอร์ตสัญญาณการวัดมี 2 พอร์ต ในขณะที่ทำการวัดค่าการสูญเสียการนำส่งสัญญาณทางใดทางหนึ่ง พอร์ตที่เหลือจะถูกต่อเข้ากับโหลด 50 โอห์ม ในส่วนของวงจรรวมกำลังงานการวัดการสะท้อนกลับของสัญญาณจะทำการวัดเช่นเดียวกันกับวงจรแบ่งกำลังงาน ส่วนค่าการสูญเสียการนำส่งสัญญาณของวงจรรวมกำลังงานจากพอร์ต 2 ไปยังพอร์ต 3 กำหนดคือ (S32) และค่าการสูญเสียการนำส่งสัญญาณจากพอร์ต 1 ไปยังพอร์ต 3 กำหนดคือ (S31) โดยที่พอร์ตไม่ได้ทำการวัดจะถูกต่อไว้กับโหลด 50 โอห์ม แสดงดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 การทดสอบวัดค่าพารามิเตอร์ของนำคลื่นแบบรวมกำลังงานโดยใช้เครื่องวิเคราะห์
โครงข่ายแบบสองทาง

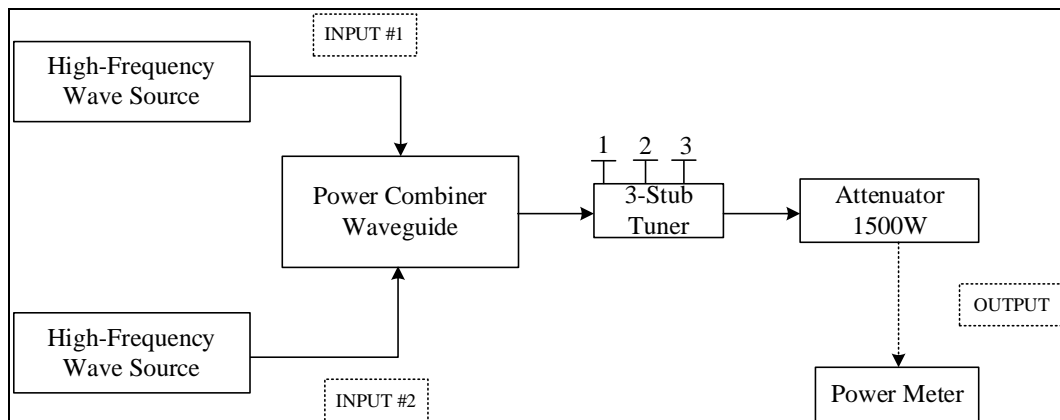
นอกจากนี้ยังมีการทดสอบเพิ่มสลับจูนเนอร์เพื่อให้ได้การจับคู่อิมพีแดนซ์ระหว่างแหล่งกำเนิดแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงที่ส่งไปยังโหลด เพื่อปรับค่าสัมประสิทธิ์การส่งกำลังที่ดีที่สุดสำหรับการแบ่งและการรวมกำลังงาน การวัดพารามิเตอร์ต่าง ๆ จะทำการวัดเหมือนกันกับเมื่อตอนที่ยังไม่ได้เพิ่มสลับ การวัดการสะท้อนของสัญญาณจะถูกวัดทั้งหมด 3 พอร์ต โดยจะทำการวัดที่ละพอร์ต ในขณะที่พอร์ตอื่น ๆ ถูกต่อเข้ากับโหลด 50 โอห์ม การวัดการสะท้อนของสัญญาณแต่ละพอร์ตกำหนดเป็น (S11), (S22) และ (S33) นอกจากนี้ยังมีการวัดค่าการสูญเสียการนำส่งสัญญาณจากพอร์ต 3 ไปยังพอร์ต 2 (S23) และพอร์ต 3 ไปยังพอร์ต 1 (S13) จะถูกวัดที่ละคู่ เนื่องจากพอร์ตสัญญาณการวัดมี 2 พอร์ต ในขณะที่ทำการวัดค่าการสูญเสียการนำส่งสัญญาณทางใดทางหนึ่ง พอร์ตที่เหลือจะถูกต่อเข้ากับโหลด 50 โอห์ม ในส่วนของท่อนำคลื่นรวมกำลังงานการวัดการสะท้อนกลับของสัญญาณจะทำการวัดเช่นเดียวกันกับท่อนำคลื่นแบ่งกำลังงาน ส่วนค่าการสูญเสียการนำส่งสัญญาณของท่อนำคลื่นรวมกำลังงานจากพอร์ต 2 ไปยังพอร์ต 3 กำหนดคือ (S32) และค่าการสูญเสียการนำส่งสัญญาณจากพอร์ต 1 ไปยังพอร์ต 3 กำหนดคือ (S31) โดยที่พอร์ตไม่ได้ทำการวัดจะถูกต่อเข้ากับโหลด 50 โอห์ม แสดงดังรูปที่ 5.4



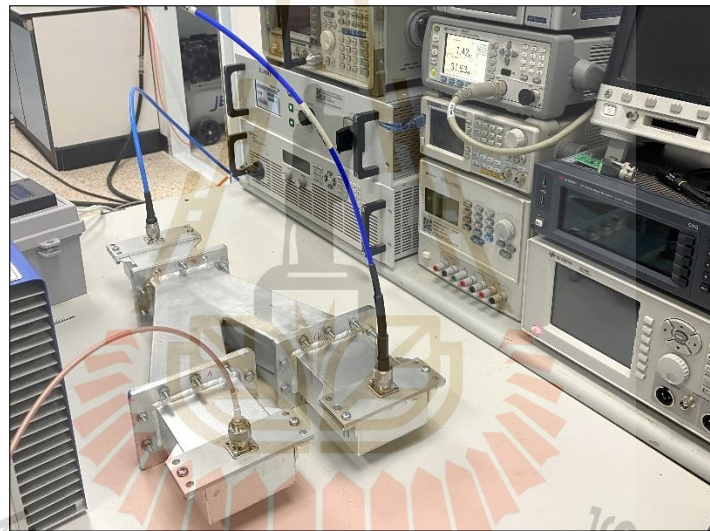
รูปที่ 5.4 การทดสอบวัดค่าพารามิเตอร์ที่นำคลื่นแบบรวมกำลังงานเมื่อเพิ่มสตับจูนเนอร์โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โคร่งข่ายแบบสองทาง

5.2.3 การทดสอบวัดกำลังงานของท่อนำคลื่นแบบรวมกำลังงานโดยใช้แหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงกำลังงานสูง

การออกแบบและสร้างระบบท่อนำคลื่นสำหรับรวมกำลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงที่มีแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงเป็นแมกนีตรอนขนาด 1.5 กิโลวัตต์ ที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรต์ ในการทดสอบการวัดค่าพารามิเตอร์เมื่อยังไม่มีการใช้สตับจูนเนอร์ ใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่สูงกำลังสูงแบบ (Solid-state) เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นกำลังงานสูงแทนแมกนีตรอนแสดงดังรูปที่ 5.6 การวัดกำลังงานเอาต์พุตของสัญญาณถูกวัดด้วย Thermistor Power Meter ป้อนกำลังงานอินพุตเข้าที่ละพอร์ตที่กำลังงาน 10 วัตต์ การวัดกำลังงานเอาต์พุตจากพอร์ต 3 ไปยังพอร์ต 2 (S23) และพอร์ต 3 ไปยังพอร์ต 1 (S13) จะถูกวัดที่ละคู่ เนื่องจากพอร์ตสัญญาณการวัดมี 2 พอร์ต ในขณะที่ทำการวัดการวัดกำลังงานเอาต์พุตทางใดทางหนึ่ง พอร์ตที่เหลือจะถูกต่อเข้ากับโหลด 50 โอห์ม (High Power Termination 0.7- 10 GHz) และก่อนที่สัญญาณเอาต์พุตเข้าเครื่องมือวัด จะถูกต่อเข้ากับตัวทอนสัญญาณย่านความถี่สูง เพื่อช่วยในการลดทอนกำลังงานที่สูงเกินกว่าค่าที่เครื่องมือวัดอ่านได้ ในส่วนของการรวมกำลังงาน ในการวัดการส่งผ่านสัญญาณของท่อนำคลื่นแบบรวมกำลังงานจะทำการวัดเช่นเดียวกันกับการแบ่งกำลังงาน กำลังงานเอาต์พุตของท่อนำคลื่นแบบรวมกำลังงานจากพอร์ต 1 ไปยังพอร์ต 3 กำหนดคือ (S31) และการวัดกำลังงานเอาต์พุตจากพอร์ต 2 ไปยังพอร์ต 3 กำหนดคือ (S32) โดยที่พอร์ตไม่ได้ทำการวัดจะถูกต่อไว้กับโหลด 50 โอห์ม



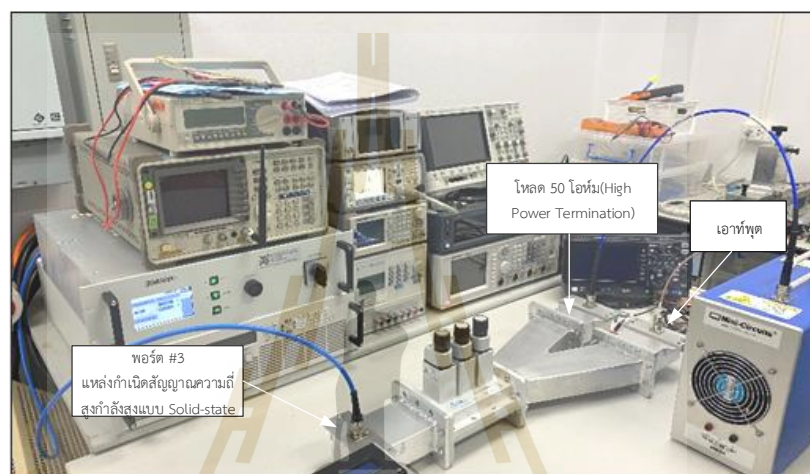
รูปที่ 5.5 บล็อกไดแกรมการทดสอบการแบ่งและรวมกำลังงานสำหรับท่อนำคลื่นแบบรวมกำลังงาน



รูปที่ 5.6 การวัดกำลังงานเอาต์พุตของสัญญาณระหว่างพอร์ตอินพุตไปยังพอร์ตเอาต์พุตโดยใช้ Power Meter

นอกจากนี้ยังมีการทดสอบเพิ่มระดับจูนเนอร์เพื่อให้ได้การจับคู่อิมพีแดนซ์ระหว่างแหล่งกำเนิดแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงที่ส่งไปยังโหลด เพื่อปรับค่าสัมประสิทธิ์การส่งกำลังที่ดีที่สุดสำหรับการแบ่งและการรวมกำลังงานเพื่อลดการสูญเสียการวัดพารามิเตอร์ต่าง ๆ จะทำการวัดเหมือนกันกับตอนที่ยังไม่ได้เพิ่มสตั๊ป ใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่สูงกำลังสูงเป็นแหล่งกำเนิดคลื่น ป้อนกำลังงานอินพุตเข้าที่ละพอร์ตที่กำลังงาน 10 วัตต์ การวัดกำลังงานเอาต์พุตของสัญญาณจากพอร์ต 3 ไปยังพอร์ต 2 (S23) และพอร์ต 3 ไปยังพอร์ต 1 (S13) จะถูกวัดทีละคู่ ในขณะที่ทำการวัดค่าการสูญเสียการนำส่งสัญญาณทางใดทางหนึ่ง พอร์ตที่เหลือจะถูกต่อเข้ากับโหลด 50 โอห์มและก่อนที่สัญญาณ

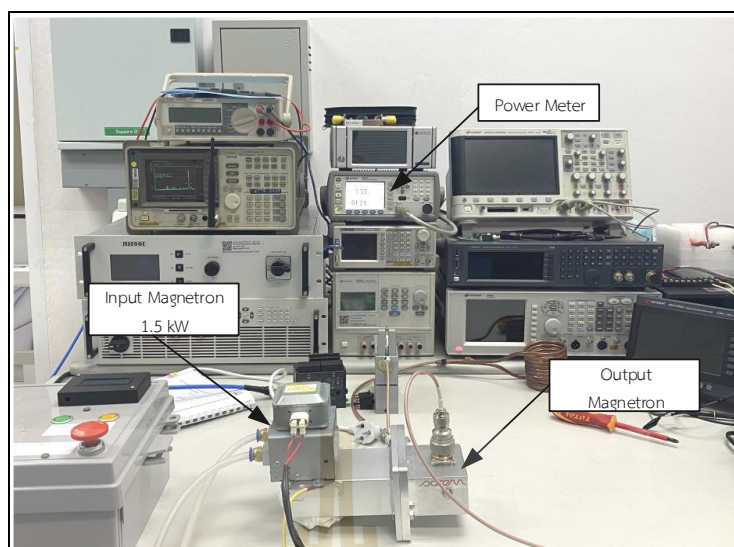
เอาต์พุตเข้าเครื่องมือวัดจะถูกต่อเข้ากับตัวทอนสัญญาณย่านความถี่สูง เพื่อช่วยในการลดทอนกำลังงานที่สูงเกินค่าที่เครื่องมือวัดอ่านได้ ในส่วนของกรรวมกำลังงานการวัดกำลังงานเอาต์พุตของสัญญาณของท่อนำคลื่นแบบรวมกำลังงานจะทำการวัดเช่นเดียวกันกับการแบ่งกำลังงาน การวัดกำลังงานเอาต์พุตของสัญญาณของท่อนำคลื่นแบบรวมกำลังงานจากพอร์ต 1 ไปยังพอร์ต 3 กำหนดคือ (S31) และการวัดกำลังงานเอาต์พุตของสัญญาณจากพอร์ต 2 ไปยังพอร์ต 3 กำหนดคือ (S32) โดยที่พอร์ตไม่ได้ทำการวัดจะถูกต่อไว้กับโหลด 50 โอห์ม ซึ่งแสดงดังรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 การวัดกำลังงานเอาต์พุตของสัญญาณระหว่างพอร์ตอินพุตไปยังพอร์ตเอาต์พุตเมื่อมีการเพิ่มสตับจูนเนอร์โดยใช้ Power Meter

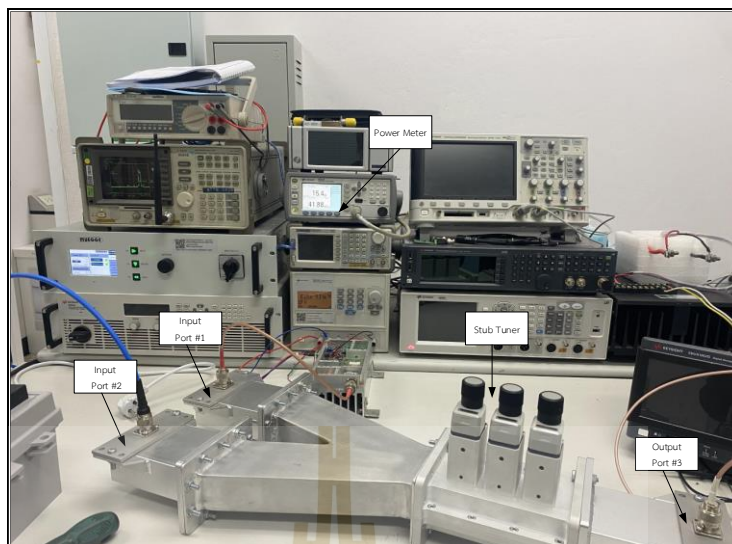
5.2.4 การทดสอบวัดกำลังงานแมกนีตรอนกับท่อนำคลื่นแบบรวมกำลังงานโดยใช้ Power Meter

การออกแบบและสร้างระบบท่อนำคลื่นสำหรับรวมกำลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงที่มีแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงเป็นแมกนีตรอนกำลังงานสูง ในการทดสอบการวัดค่าพารามิเตอร์ จะใช้แมกนีตรอนขนาด 1.5 กิโลวัตต์ ที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรต เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงกำลังงานสูง แสดงดังรูปที่ 5.8 การวัดกำลังงานเอาต์พุตของแมกนีตรอนถูกวัดด้วย Thermistor Power Meter กำลังงานอินพุตเข้า 1.5 กิโลวัตต์ การระบายความร้อนของแมกนีตรอนด้วยระบบการระบายความร้อนด้วยน้ำ การวัดกำลังงานเอาต์พุตพอร์ตที่ 1 ไปยังพอร์ตที่ 2 (S21) การวัดกำลังงานเอาต์พุตที่สูงของแมกนีตรอนนั้นก่อนสัญญาณเข้าเครื่องมือวัด มีการต่อเข้ากับตัวลดทอนสัญญาณย่านความถี่สูง 1.5 กิโลวัตต์ 30 dB ก่อนสัญญาณเอาต์พุตเข้าเครื่องมือวัด เพื่อช่วยในการลดทอนกำลังงานเอาต์พุตที่สูงเกินค่าที่เครื่องมือวัดรับได้



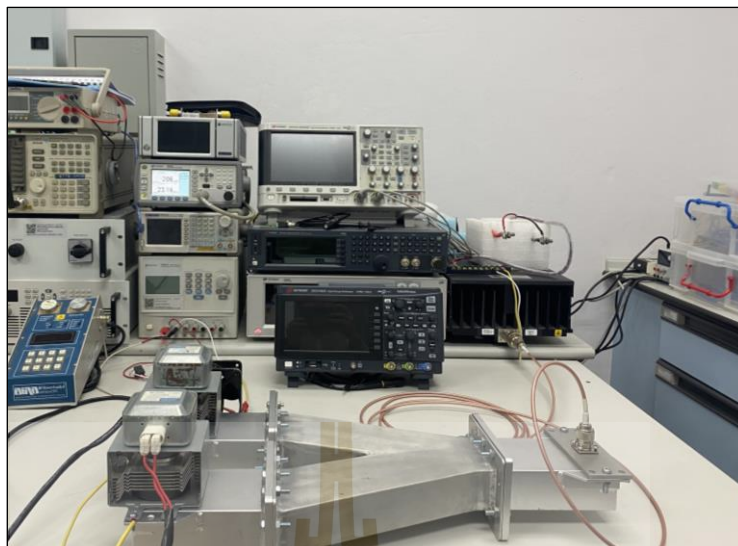
รูปที่ 5.8 การวัดกำลังงานเอาต์พุตของแมกนีตรอนโดยใช้ Power Meter

การออกแบบและสร้างระบบท่อนำคลื่นสำหรับรวมกำลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงที่มีแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงเป็นแมกนีตรอนกำลังงานสูง ในการทดสอบการวัดค่าพารามิเตอร์ไม่สามารถใช้แมกนีตรอนขนาด 1.5 กิโลวัตต์ ที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรต์ ทั้งสองตัวพร้อมกันได้เนื่องจากเครื่องมือวัดกำลังงานไม่สามารถรับได้ ดังนั้นในการวัดในส่วนของการรวมกำลังงานของแมกนีตรอนนั้นจะใช้วิธีการป้อนกำลังงานอินพุตพร้อมกันข้างละ 10 วัตต์ โดยใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่สูงกำลังสูงแทนแมกนีตรอนสำหรับพอร์ตที่ 1 และพอร์ตที่ 2 แสดงดังรูปที่ 5.9 ป้อนกำลังงานอินพุตพร้อมกันข้างละ 10 วัตต์เข้าที่พอร์ตที่ 1 และพอร์ตที่ 2 การวัดกำลังงานเอาต์พุตสามารถวัดที่พอร์ตที่ 3 เพื่อทราบกำลังงานรวมกันที่พอร์ตเอาต์พุต



รูปที่ 5.9 การวัดกำลังงานเอาต์พุตของแมกนีตรอนแบบรวมกำลังงานโดยใช้ Power Meter

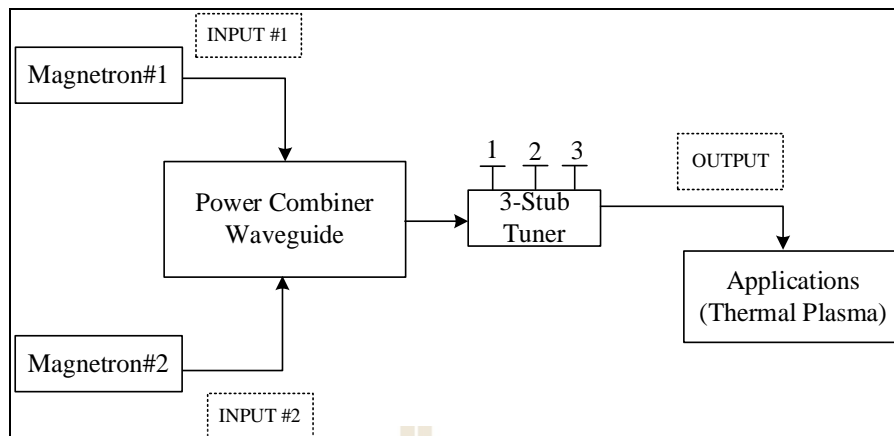
สำหรับส่วนต่อมาเป็นการทดสอบแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงเป็นแมกนีตรอนที่มีขนาดเอาต์พุต 800 วัตต์ ที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ทั้งสองตัว ในการวัดกำลังงานของแมกนีตรอนนั้น จะใช้วิธีการป้อนกำลังงานพร้อมกันข้างละ 800 วัตต์ สำหรับพอร์ตที่ 1 และพอร์ตที่ 2 แสดงดังรูปที่ 5.10 ป้อนกำลังงานเข้าที่พอร์ตที่ 1 และพอร์ตที่ 2 พร้อมกันข้างละ 800 วัตต์ การวัดกำลังงานเอาต์พุตสามารถวัดที่พอร์ตที่ 3 เพื่อทราบกำลังงานรวมกันที่พอร์ตเอาต์พุต เนื่องจากแมกนีตรอนทำงานเป็นจิ้งหะหรือพัลส์ (Pulsed Magnetron) ดังนั้นลักษณะการทำงานเอาต์พุตของไมโครเวฟถูกสร้างขึ้นเป็นจิ้งหะสั้นๆ แทนที่จะเป็นคลื่นต่อเนื่องส่งผลให้ระยะเวลาในการใช้งานไม่พร้อมกันส่งผลให้การกำเนิดสัญญาณคลื่นความถี่สูงที่ป้อนสัญญาณออกมา ถูกป้อนในช่วงเวลาที่แตกต่างกันมีการหักล้างของสัญญาณที่พอร์ตเอาต์พุตพอร์ตที่ 3 จึงไม่สามารถทดสอบกับแมกนีตรอนที่ขนาดเอาต์พุต 800 วัตต์ได้



รูปที่ 5.10 การทดสอบแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงด้วยแมกนีตรอนที่มีเอาท์พุทขนาด 800 วัตต์

5.2.5 การใช้งานท่อนำคลื่นแบบรวมกำลังงานกับพลาสมาความร้อนโดยใช้แมกนีตรอนเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง

การออกแบบและสร้างระบบท่อนำคลื่นสำหรับรวมกำลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงที่มีแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงเป็นแมกนีตรอนขนาด 1.5 กิโลวัตต์ ที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรต์ ในการทดลองนี้ใช้แมกนีตรอนเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงหนึ่งตัว กำลังงานอินพุต 1.5 กิโลวัตต์ เมื่อยังไม่ได้มีการต่อกับท่อนำคลื่นรวมกำลังงาน แสดงดังรูปที่ 5.12 มีการวัดพารามิเตอร์ที่สำคัญ การวัดอุณหภูมิ การวัดระยะเปลวในจุดที่แตกต่างกันออกไปตั้งแต่ 0 เซนติเมตร ไปจนถึง 20 เซนติเมตร เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแต่ละจุด ในการวัดอุณหภูมิใช้ (K-Type Thermocouple) ย่านการวัดอยู่ที่ (-45 °C ถึง 1025 °C) การปรับความเร็วลม (Air Velocity) เพื่อหาค่าเพื่อหาค่าความเร็วลมที่มีค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทดสอบเพื่อที่จะใช้ในการอ้างอิงการเปรียบเทียบระหว่างแมกนีตรอนหนึ่งตัวและสองตัว ในส่วนของการรวมกำลังงาน จะเพิ่มแมกนีตรอนเป็นสองตัวกำลังงานอินพุตเข้าที่กำลังงาน 3 กิโลวัตต์ ต่อเข้ากับท่อนำคลื่นแบบรวมกำลังงาน แสดงดังรูปที่ 5.13 ในส่วนการวัดพารามิเตอร์จะทำการวัดพารามิเตอร์เช่นเดียวกับการใช้แมกนีตรอนหนึ่งตัว การวัดอุณหภูมิ การวัดระยะเปลวในจุดที่แตกต่างกันออกไปตั้งแต่ 0 เซนติเมตร ไปจนถึง 20 เซนติเมตร เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแต่ละจุดการวัดอุณหภูมิ การปรับความเร็วลม สำหรับหาค่าความเร็วลมที่มีค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทดสอบเพื่อที่จะใช้ในการอ้างอิงการเปรียบเทียบระหว่างก่อนใช้และหลังใช้ท่อนำคลื่นแบบรวมกำลังงาน



รูปที่ 5.11 บล็อกไดแกรมที่นำคลื่นสำหรับรวมกำลังงานสำหรับใช้งานกับพลาสมา



รูปที่ 5.12 การทดสอบแหล่งกำเนิดพลาสมาความร้อนเมื่อยังไม่ใช้ที่นำคลื่นแบบรวมกำลังงาน



รูปที่ 5.13 การทดสอบแหล่งกำเนิดพลาสติกความร้อนเมื่อใช้ท่อนำคลื่นแบบรวมกำลังงาน

นอกจากนี้ยังมีการทดสอบเพิ่มสัดตั้งจูนเนอร์เพื่อให้ได้การจับคู่อิมพีแดนซ์ระหว่างแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงที่ส่งไปยังโหลด เพื่อการส่งกำลังที่ดีสำหรับการรวมกำลังงาน เพื่อลดการสูญเสียจากการแทรกสอดจากการส่งผ่านสัญญาณ ในส่วนของการเพิ่มสัดตั้งจูนเนอร์จะทำเช่นเดียวกับการทดสอบท่อนำคลื่นแบบรวมกำลังงาน โดยเพิ่มแมกนีตรอนเป็น 2 ตัว กำลังงานอินพุต 3 กิโลวัตต์ ต่อเข้ากับท่อนำคลื่นแบบรวมกำลังงาน ในการวัดพารามิเตอร์จะทำการวัดเช่นเดียวกับตอนที่ยังไม่ได้เพิ่มสัดตั้งจูนเนอร์ มีการวัดอุณหภูมิ การวัดระยะเปลวในจุดที่แตกต่างออกไปตั้งแต่ 0 เซนติเมตร ไปจนถึง 20 เซนติเมตร เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแต่ละจุดในการวัดอุณหภูมิ และการปรับความเร็วลม เพื่อหาค่าความเร็วลมให้มีค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทดสอบ แสดงดังรูปที่ 5.14 เพื่อที่จะสามารถนำไปเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างกำลังงานเอาต์พุตที่ต่างกันได้



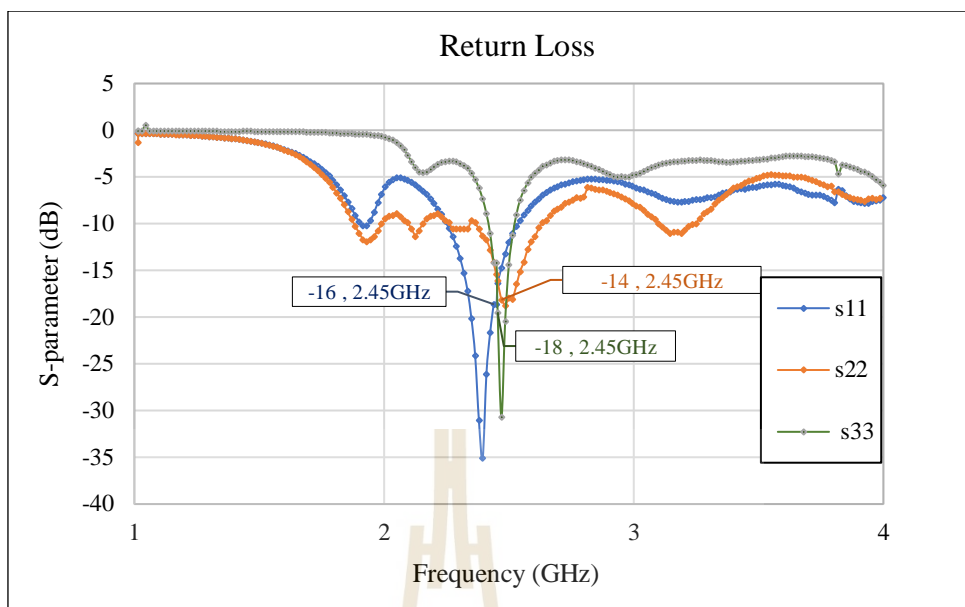
รูปที่ 5.14 การทดสอบแหล่งกำเนิดพลาสมาความร้อนเมื่อใช้ท่อนำคลื่นแบบรวมกำลังงานร่วมกับ สตัมป์จูนเนอร์

5.3 ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบท่อนำคลื่นสำหรับรวมกำลังงาน โดยผลการทดสอบแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ๆ คือ ค่าการสะท้อนกลับของสัญญาณ และค่าการสูญเสียการส่งสัญญาณ กำลังงานเอาท์พุทสำหรับการ แบ่งและรวมกำลังงาน รวมไปถึงการวัดอุณหภูมิเปลวพลาสมาความร้อนที่ระยะต่าง ๆ และการปรับ ความเร็วลมเพื่อหาค่าที่เหมาะสม จะถูกนำเสนอผลการทดลองในหัวข้อนี้

5.3.1 การทดสอบสายอากาศโมโนโพลกับท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม WR340 โดยใช้เครื่อง วิเคราะห์โครงข่ายแบบสองทาง

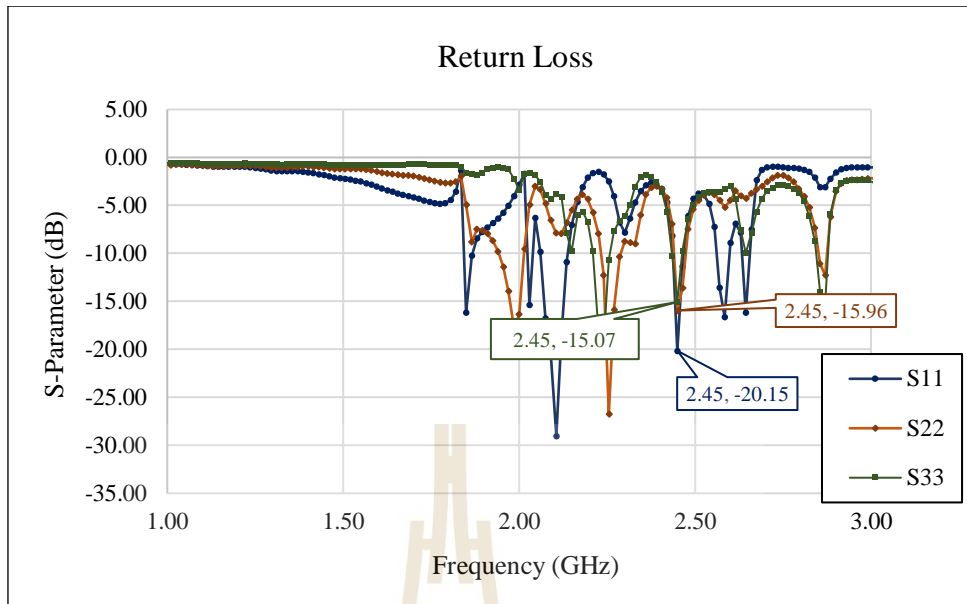
ผลการทดสอบแหล่งกำเนิดคลื่นเมื่อใช้สายอากาศแบบโมโนโพลแทนแหล่งกำเนิดคลื่น แม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงในการวัดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในการวัดค่าพารามิเตอร์ดมี้อยังไม่ได้ทดสอบกับ ท่อนำคลื่นแบบรวมกำลังงาน จะใช้ท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม WR340 และต่อเข้ากับสายอากาศโมโนโพล วัดค่าการสะท้อนกลับของสัญญาณ (S11, S22 และ S33) ค่าการสะท้อนกลับสัญญาณถูกวัดที่พอร์ต 1, 2 และ 3 ที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ต พอร์ตที่ 1 ให้ค่าการสะท้อนกลับสัญญาณที่ -16 dB พอร์ตที่ 2 ให้ค่าการสะท้อนกลับสัญญาณ -14 dB และพอร์ตที่ 3 ให้ค่าการสะท้อนกลับสัญญาณ -18 dB แสดง ดังรูปที่ 5.15



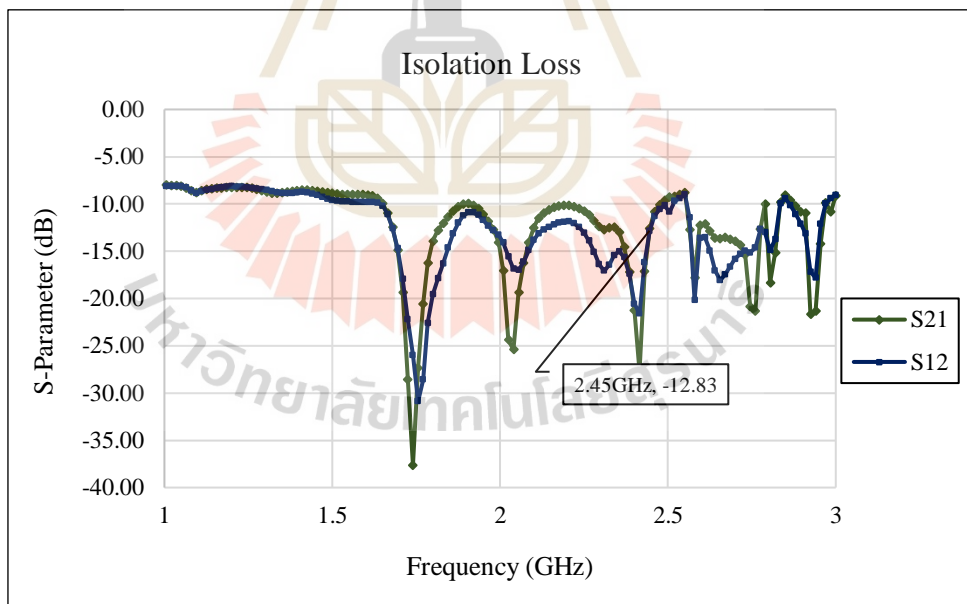
รูปที่ 5.15 ผลการวัดค่าสูญเสียสะท้อนกลับของทั้งสามพอร์ต (S11, S22 และ S33)

5.3.2 การทดสอบสายอากาศโมโนโพลกับท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมแบบรวมกำลังงานโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ที่โครงข่ายแบบสองทาง

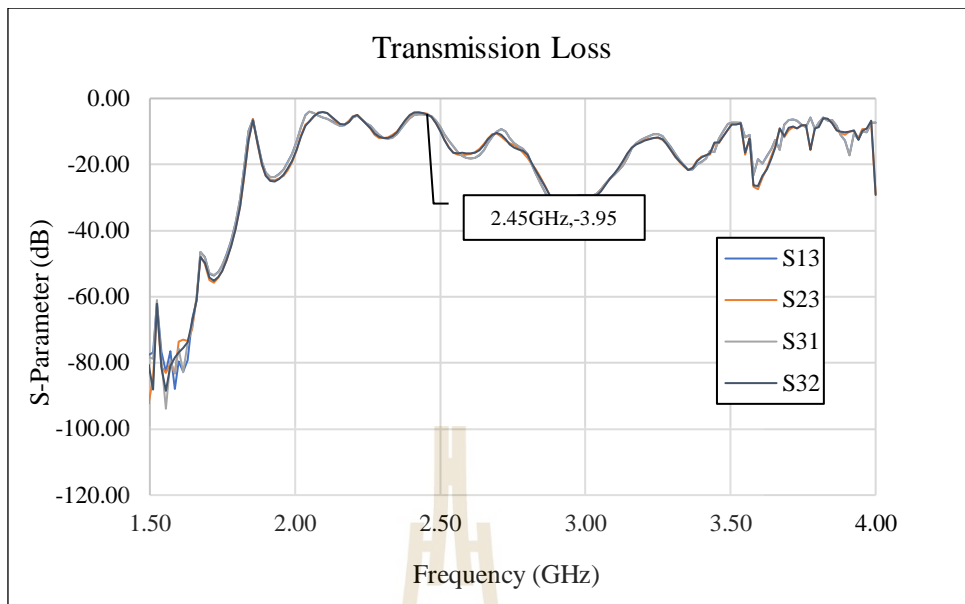
การทดสอบวัดผลของท่อนำคลื่นนี้จะเป็นการวัดเพื่อทดสอบความสามารถในการแบ่งและรวมกำลังงานของท่อนำคลื่น ในการวัดค่าพารามิเตอร์ จำลองการวัดโดยใช้สายอากาศแบบโมโนโพล แหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง มีพารามิเตอร์ที่สำคัญในการวัด คือ ค่าการสะท้อนกลับของสัญญาณ (S11, S22 และ S33) ที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ต พอร์ตที่ 1 ให้ค่าการสะท้อนกลับสัญญาณที่ -20.15 dB พอร์ตที่ 2 ให้ค่าการสะท้อนกลับสัญญาณ -15.96 dB และพอร์ตที่ 3 ให้ค่าการสะท้อนกลับสัญญาณ -15.07 dB แสดงดังรูปที่ 5.16 ในส่วนการแยกตัวระหว่างพอร์ตอินพุตทั้งสอง (S12, S21) มีค่าประมาณ -12.83 dB แสดงดังรูปที่ 5.17 และผลการทดสอบของท่อนำคลื่นแบ่งกำลังงาน ค่าการสูญเสียการนำส่งสัญญาณ (S31, S32, S13 และ S23) สำหรับทุกพอร์ตมีค่าเท่ากันประมาณ -3.95 dB แสดงดังรูปที่ 5.18



รูปที่ 5.16 ผลการวัดค่าการสะท้อนกลับของทั้งสามพอร์ต (S11, S22 และ S33) เมื่อใช้กับท่อนำคลื่นสำหรับรวมกำลังงาน

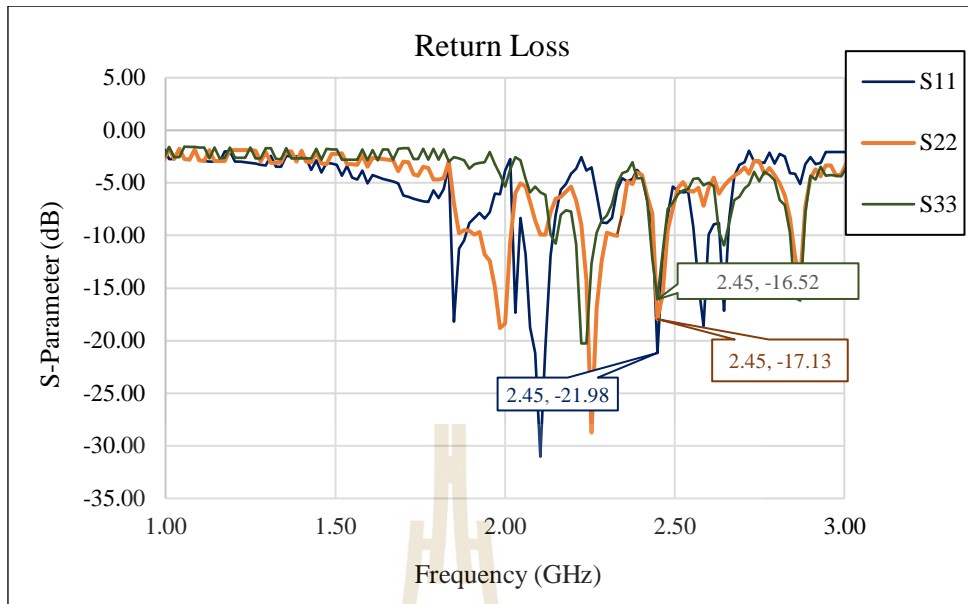


รูปที่ 5.17 ค่าการสูญเสียการแยกตัวระหว่างพอร์ตอินพุต (S12, S21) สำหรับท่อนำคลื่นรวมกำลังงานที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรต์

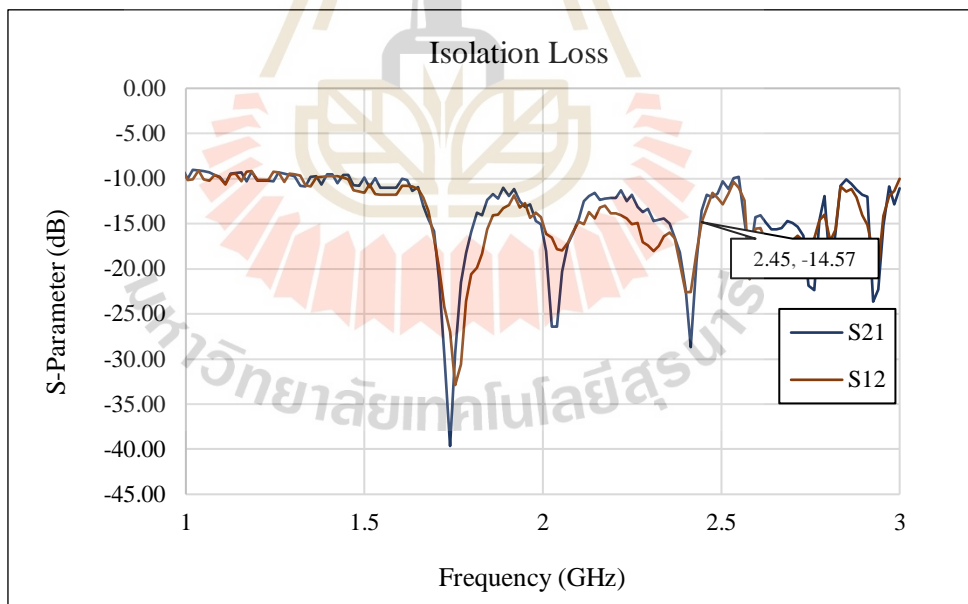


รูปที่ 5.18 ค่าการสูญเสียการนำส่งสัญญาณ (S13, S23, S31 และ S32) สำหรับท่อนำคลื่นรวม กำลังงานความถี่ 2.45 กิกะเฮิรต

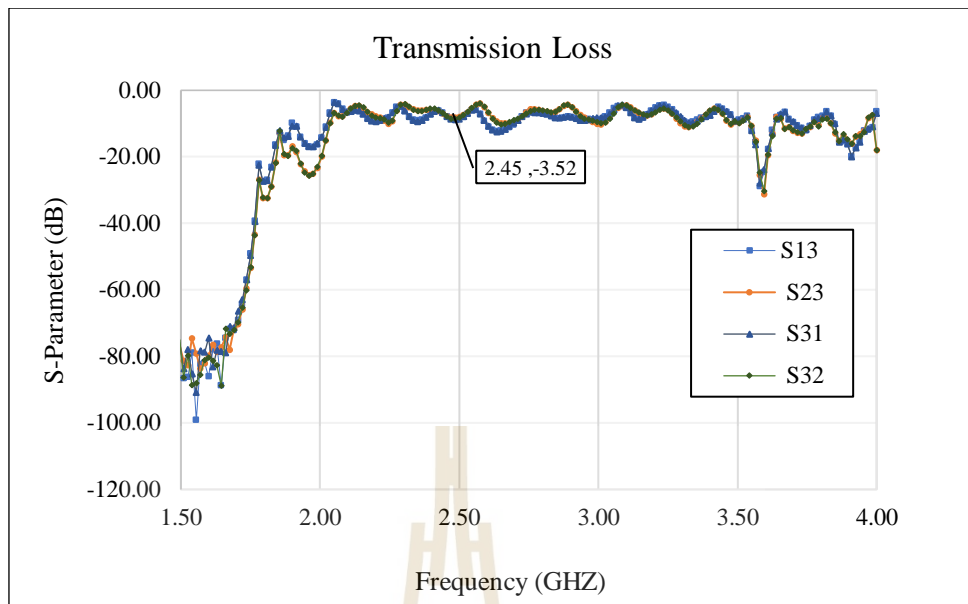
การทดสอบวัดผลเพื่อทดสอบความสามารถในการแบ่งและรวมกำลังงานของท่อนำคลื่น ได้มีการเพิ่มสับจูนเนอร์เพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบก่อนที่จะไม่ได้ทำการเพิ่มสับจูนเนอร์ในการปรับความลึกของสกรูดังตารางที่ 5.1 ตำแหน่งความลึกของสกรูที่ส่งผลให้ค่าการสะท้อนกลับของสัญญาณและค่าการสูญเสียการส่งสัญญาณมีค่าการสูญเสียลดลง คือการปรับความลึกของสกรู ตำแหน่งที่ 1 มีความลึกอยู่ที่ 12.98 มิลลิเมตร ตำแหน่งที่สองความลึกที่ 9.12 มิลลิเมตร และตำแหน่งที่ 3 ความลึกที่ 0.32 มิลลิเมตร ค่าการสะท้อนกลับของสัญญาณ (S11, S22 และ S33) พอร์ตที่ 1 ให้ค่าการสะท้อนกลับสัญญาณที่ -21.98 dB พอร์ตที่ 2 ให้ค่าการสะท้อนกลับสัญญาณ -17.13 dB และ พอร์ตที่ 3 ให้ค่าการสะท้อนกลับสัญญาณ -16.52 dB แสดงดังรูปที่ 5.19 ในส่วนการแยกระหว่าง พอร์ตอินพุตทั้งสอง (S12 S21) มีค่าประมาณ - 14.57 dB แสดงดังรูปที่ 5.20 ค่าการสูญเสีย การนำส่งสัญญาณ (S13, S23, S31 และ S32) สำหรับทุกพอร์ตมีค่าประมาณ -3.52 dB เช่นเดียวกัน ซึ่งแสดงดังรูปที่ 5.21 นั้นหมายความว่าทั้งการรวมและแบ่งกำลังงานเมื่อมีการสับจูนเนอร์ การสูญเสียการนำส่งสัญญาณมีค่าลดลงจากที่ได้ออกแบบไว้สามารถถ่ายโอนกำลังงานสูงสุดจาก อินพุตไปยังเอาต์พุตที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรต



รูปที่ 5.19 ผลการวัดค่าการสะท้อนกลับของทั้งสามพอร์ต (S11 S22 และ S33) เมื่อใช้ท่อนำคลื่นแบบรวมกำลังงานและมีการเพิ่มสตับจูนเนอร์



รูปที่ 5.20 ค่าการสูญเสียการแยกตัวระหว่างพอร์ตอินพุต (S12, S21) ของท่อนำคลื่นแบบรวมแบบกำลังงานและมีการเพิ่มสตับจูนเนอร์



รูปที่ 5.21 ค่าการสูญเสียการนำส่งสัญญาณ (S13, S23, S31 และ S32) เมื่อมีการเพิ่มระดับจูนเนอร์

ตารางที่ 5.1 การปรับระดับจูนเนอร์สำหรับท่อนำคลื่นแบบรวมกำลังเพื่อให้ได้ค่าเหมาะสม

ความลึกของสตัป (mm)			ค่าการสูญเสียการส่งสัญญาณ (dB)				ความถี่ (GHZ)
No.1	No.2	No.3	S13	S23	S31	S32	
0	0	0	-4.97	-5.11	-4.97	-5.07	2.45
2.59	0	0	-4.36	-4.56	-4.36	-4.36	2.45
5.14	1.88	3.01	-4.57	-4.54	-4.27	-4.32	2.45
5.14	1.87	3.20	-4.56	-4.02	-4.16	-4.36	2.45
6.32	2.45	0.49	-4.15	-4.11	-4.10	-4.12	2.45
7.87	2.57	0.41	-4.05	-4.08	-4.05	-4.05	2.45
10.87	5.64	0.54	-3.98	-3.67	-3.95	-3.65	2.45
11.06	8.64	0.54	-3.89	-3.54	-3.78	-3.54	2.45
11.95	9.54	0.46	-3.71	-3.52	-3.65	-3.54	2.45
12.98	9.12	0.32	-3.49	-3.50	-3.51	-3.53	2.45

5.3.3 การทดสอบวัดกำลังงานของท่อนำคลื่นแบบรวมกำลังงานโดยใช้แหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงกำลังงานสูง

การทดสอบวัดผลของท่อนำคลื่นเป็นการวัดเพื่อทดสอบความสามารถในการรวมกำลังงานของท่อนำคลื่น ในการวัดกำลังงานที่เอาท์พุทที่สูง ใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่สูงกำลังสูง ผลการทดสอบของท่อนำคลื่นแบ่งกำลังงานป้อนกำลังงานอินพุตพอร์ตที่ 3 กำลังงาน 10 วัตต์ ค่าสูญเสียการส่งผ่านสัญญาณ จากพอร์ตที่ 1 ไปพอร์ตที่ 1 (S13) มีค่าอยู่ที่ 3.82 วัตต์ และพอร์ตที่ 3 ไปพอร์ตที่ 2 (S23) มีค่าอยู่ที่ 3.80 วัตต์ ผลการทดสอบของท่อนำคลื่นรวมกำลังงานป้อนกำลังงานอินพุตพอร์ตที่ 10 วัตต์ ค่าการสูญเสียการนำส่งสัญญาณ จากพอร์ตที่ 1 ไปพอร์ตที่ 3 (S31) มีค่าอยู่ที่ 3.86 วัตต์ และพอร์ตที่ 2 ไปพอร์ตที่ 3 (S32) มีค่าอยู่ที่ 3.88 วัตต์ และเมื่อมีการเพิ่มสตัปจูนเนอร์เพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบก่อนยังไม่ได้เพิ่มสตัปในการปรับความลึกของสกรูดังตารางที่ 5.2 ตำแหน่งความลึกของสกรูที่ส่งผลให้กำลังงานเอาท์พุทเพิ่มขึ้น คือการปรับความลึกของสกรูครั้งที่ 5 ซึ่งความลึกของสกรูตำแหน่งที่ 1 มีความลึกอยู่ที่ 11.77 มิลลิเมตร ตำแหน่งที่สองความลึกที่ 4.45 มิลลิเมตร และตำแหน่งที่ 3 ความลึกที่ 0.89 มิลลิเมตร ผลการทดสอบป้อนกำลังงานอินพุตพอร์ตที่ 3 กำลังงาน 10 วัตต์ การกำลังงานเอาท์พุท จากพอร์ตที่ 1 ไปพอร์ตที่ 1 (S13) มีค่าอยู่ที่ 4.11 วัตต์ และพอร์ตที่ 3 ไปพอร์ตที่ 2 (S23) มีค่าอยู่ที่ 4.40 วัตต์ ผลการทดสอบของท่อนำคลื่นรวมกำลังงานป้อนกำลังงานอินพุตพอร์ตที่ 10 วัตต์ การวัดกำลังงานเอาท์พุท จากพอร์ตที่ 1 ไปพอร์ตที่ 3 (S31) มีค่าอยู่ที่ 4.38 วัตต์ และพอร์ตที่ 2 ไปพอร์ตที่ 3 (S32) มีค่าอยู่ที่ 4.41 วัตต์ แสดงให้เห็นว่าการใช้สตัปจูนเนอร์เข้ามาเพิ่มในการแมทซ์อิมพีแดนซ์สามารถทำให้กำลังงานเอาท์พุทเพิ่มได้มากขึ้นจริง

ตารางที่ 5.2 การปรับสตัปจูนเนอร์สำหรับท่อนำคลื่นแบบรวมกำลังงานเพื่อให้ได้ค่าเหมาะสมสำหรับการทดสอบด้วยกำลังงานสูง

อินพุต 10 วัตต์	ความลึกของสตัป (มิลลิเมตร)			การส่งผ่านสัญญาณเอาท์พุท (วัตต์)			
	No.1	No.2	No.3	S13	S23	S31	S32
1	0	0	0	3.82	3.80	3.86	3.88
2	1.56	0.15	0.11	3.82	3.83	3.89	3.95
3	4.58	0.78	0.23	3.86	3.85	3.98	4.30
4	7.85	1.22	0.52	3.89	4.12	4.25	4.38
5	11.77	4.45	0.89	4.11	4.40	4.38	4.41

5.3.4 การทดสอบวัตต์กำลังงานแมกนีตรอนกับท่อนำคลื่นแบบรวมกำลังงานโดยใช้ Power Meter

การทดสอบการวัดค่าพารามิเตอร์ ใช้แมกนีตรอนขนาด 1.5 กิโลวัตต์ ที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ต เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงกำลังงานสูง การวัดกำลังงานเอาต์พุตของแมกนีตรอน กำลังงานอินพุตเข้า 1.5 กิโลวัตต์ การวัดกำลังงานเอาต์พุตพอร์ต 1 ไปยังพอร์ต 2 มีการต่อเข้ากับตัวลดทอนสัญญาณย่านความถี่สูง 30 dB เอาต์พุตที่อ่านได้ มีค่าเท่ากับ 1.33 กิโลวัตต์ และการวัดกำลังงานเมื่อใช้ท่อนำคลื่นรวมกำลังงานใช้แมกนีตรอนขนาด 1.5 กิโลวัตต์ ที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตทั้ง 2 ตัว ไม่สามารถวัดกำลังงานได้พร้อมกัน เนื่องจากเครื่องมือวัดกำลังงานไม่สามารถรับได้ ดังนั้นในการวัดในส่วนของการรวมกำลังงานของแมกนีตรอนนั้นจะใช้วิธีการป้อนกำลังงานอินพุตที่ไม่สูงมากโดยทำการป้อนกำลังงานอินพุตพร้อมกันข้างละ 10 วัตต์ การวัดกำลังงานเอาต์พุตพอร์ต 1 ไปยังพอร์ตที่ 3 (S31) และ การวัดกำลังงานเอาต์พุตพอร์ต 2 ไปยังพอร์ตที่ 3 (S32) กำลังงานรวมกันที่พอร์ตเอาต์พุตพอร์ต 3 มีค่าเท่ากับ 14.3 วัตต์ และใช้วิธีการเทียบอัตราส่วนระหว่างอินพุต 10 วัตต์ และอินพุต 1.5 กิโลวัตต์ เทียบอัตราส่วนระหว่างอินพุตกำลังงาน 10 วัตต์ และ 1.5 กิโลวัตต์ กรณีที่เครื่องวัดไม่สามารถรับกำลังงานสูงได้ ประสิทธิภาพคิดเป็น 71.5 เปอร์เซ็นต์ และหลังจากเพิ่มสตัปมี ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเป็น 75.4 เปอร์เซ็นต์ ดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 การเทียบอัตราส่วนระหว่างอินพุตกำลังงาน 10 วัตต์ และ 1.5 กิโลวัตต์ กรณีที่เครื่องวัดไม่สามารถรับกำลังงานสูงได้

อินพุต 100 %	เอาต์พุต 100 %	เอาต์พุต 71.5 %	เอาต์พุตเมื่อเพิ่มสตัปจูนเนอร์ 75.4 %
(อินพุต 10 วัตต์) x2	≈ 20 วัตต์	≈ 14.3 วัตต์	≈ 15.4 วัตต์
(อินพุต 1.5 กิโลวัตต์) x2	≈ 2,600 วัตต์	≈ 2,005 วัตต์	≈ 2,120 วัตต์

ประสิทธิภาพบ่งบอกถึงความสามารถให้กำลังงานเอาต์พุตเทียบกับกำลังงานอินพุตที่เปอร์เซ็นต์ สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 5.1 หากประสิทธิภาพมีความใกล้เคียง 100 เปอร์เซ็นต์ สามารถบอกได้ว่า ท่อนำคลื่นนั้นสามารถทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ มีการสูญเสียของกำลังงานน้อยมาก โดยทั่วไปกำลังงานที่สูญเสียไปจะอยู่ในรูปของความร้อนที่เกิดขึ้น

ประสิทธิภาพทางไฟฟ้า (η)

$$\eta(\%) = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \quad (5.1)$$

เมื่อระบบหรือท่อนำคลื่นบางอย่างถูกแทรกระหว่างแหล่งที่มาและโหลด กำลังงานสัญญาณบางส่วนจากแหล่งที่มาจะถูกกระจายผ่านส่วนประกอบของท่อนำคลื่นหรือตัวนำสัญญาณของนำคลื่น เนื่องจากลักษณะความต้านทานผนังของท่อนำคลื่นที่ส่งผลให้เกิดการสูญเสีย ดังนั้นจึงไม่ได้ถ่ายโอนกำลังสัญญาณที่ส่งทั้งหมด ไปยังโหลดเมื่อโหลดเชื่อมต่อกับแหล่งที่มา การสูญเสียที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่าการสูญเสียการแทรก

ประสิทธิภาพการสูญเสียการแทรกสอด

$$IL_{dB} = 10 \log \frac{P_T}{P_R} \quad (5.2)$$

โดยที่

P_T คือ กำลังไฟฟ้าที่ส่งไปยังโหลด
 P_R คือ กำลังที่โหลดได้รับ

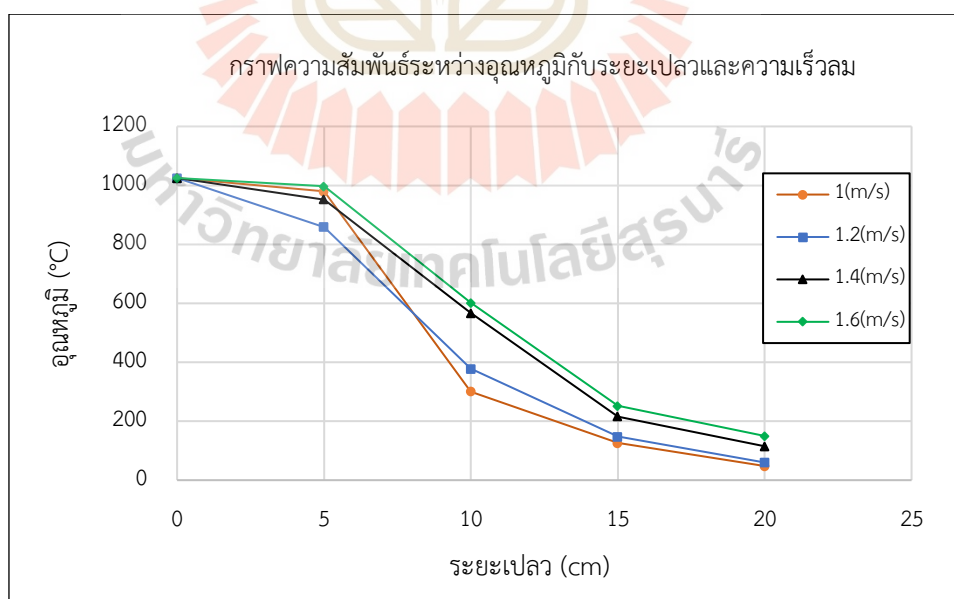
5.3.5 การใช้งานท่อนำคลื่นแบบรวมกำลังงานกับพลาสมาความร้อนโดยใช้แมกนีตรอนเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง

การทดสอบการใช้งานท่อนำคลื่นสำหรับรวมกำลังงานกับพลาสมาความร้อนโดยใช้แมกนีตรอนเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง ผลการวิเคราะห์ที่แสดงในตารางที่ 5.4 เปรียบเทียบอุณหภูมิกับระยะเวลาและความเร็วลมแต่ละช่วงที่แตกต่างกัน โดยโหลดจะได้รับกำลังงานที่ต่างกัน อุณหภูมิและระยะห่างของเปลวไฟถูกวัดในการใช้งานสำหรับพลาสมาความร้อน โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาและความเร็วลมก่อนใช้ท่อนำคลื่นสำหรับรวมกำลังงานที่มีกำลังไฟฟ้าเข้า 1.5 กิโลวัตต์ แสดงดังรูปที่ 5.22 ขณะที่ความเร็วลมเท่ากันที่ 1.2 เมตรต่อวินาที เนื่องจากเป็นความเร็วลมที่ได้รับการปรับให้มีค่าที่เหมาะสมที่สุดกับการทดสอบ ที่ระยะห่างของเปลวไฟ 0 เซนติเมตร อุณหภูมิสูงสุดจะอยู่ที่ 1,025 °C และในขณะเดียวกันที่ระยะห่างของเปลวไฟ 20 เซนติเมตร อุณหภูมิต่ำสุดคือ 60 °C หลังจากนั้นได้นำท่อนำคลื่นรวมกำลังงานมาทดสอบดังรูปที่ 5.23 อุณหภูมิและระยะห่างของเปลวไฟถูกวัดในพลาสมาที่มีกำลังไฟฟ้าเข้า 3 กิโลวัตต์ ที่ความเร็วลม 1.2 เมตรต่อวินาที ระยะห่างของเปลวไฟ 0 เซนติเมตร อุณหภูมิสูงสุดจะอยู่ที่ 1,025 °C ในขณะเดียวกันที่ระยะห่างของเปลวไฟ 20 เซนติเมตร อุณหภูมิต่ำสุดคือ 150 °C และสุดท้ายได้มีการ

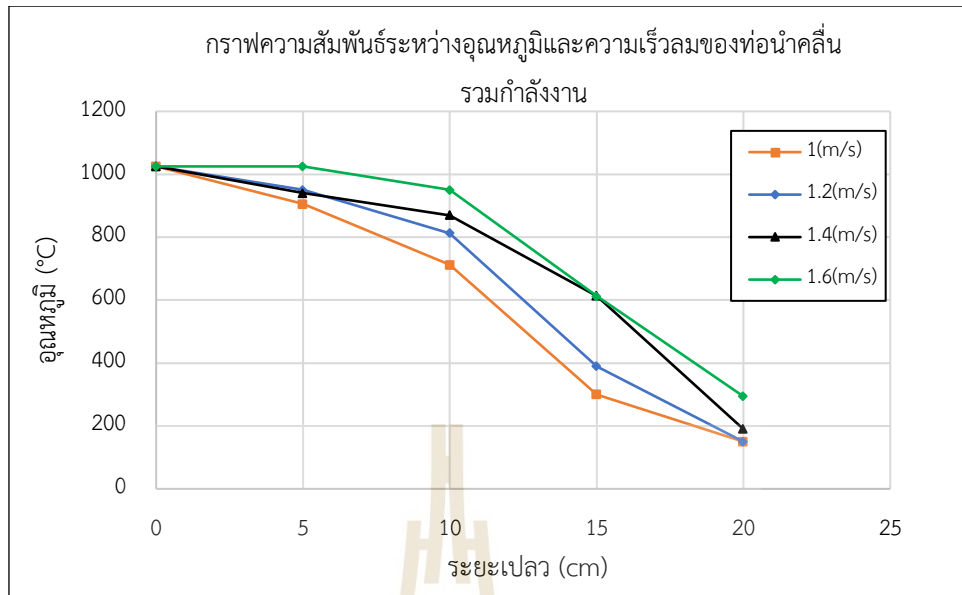
เพิ่มสัดตั้งรูปที่ 5.24 ที่ระยะห่างของเปลวไฟ 0 เซนติเมตร อุณหภูมิสูงสุดอยู่จะอยู่ที่ 1,025 °C ที่ระยะห่างของเปลวไฟ 20 เซนติเมตร อุณหภูมิต่ำสุดคือ 174 °C จากผลการทดลองจะเห็นว่าการใช้ท่อนำคลื่นสำหรับรวมกำลังงาน ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการใช้ท่อนำคลื่นสำหรับรวมกำลังงานเป็นแหล่งกำเนิดกำลังงานในการใช้งานสำหรับพลาสมาความร้อนสามารถเพิ่มอุณหภูมิและระยะเปลวได้จริง

ตารางที่ 5.4 ผลการทดสอบความแตกต่างของอุณหภูมิด้วยกำลังงานที่แตกต่างกัน

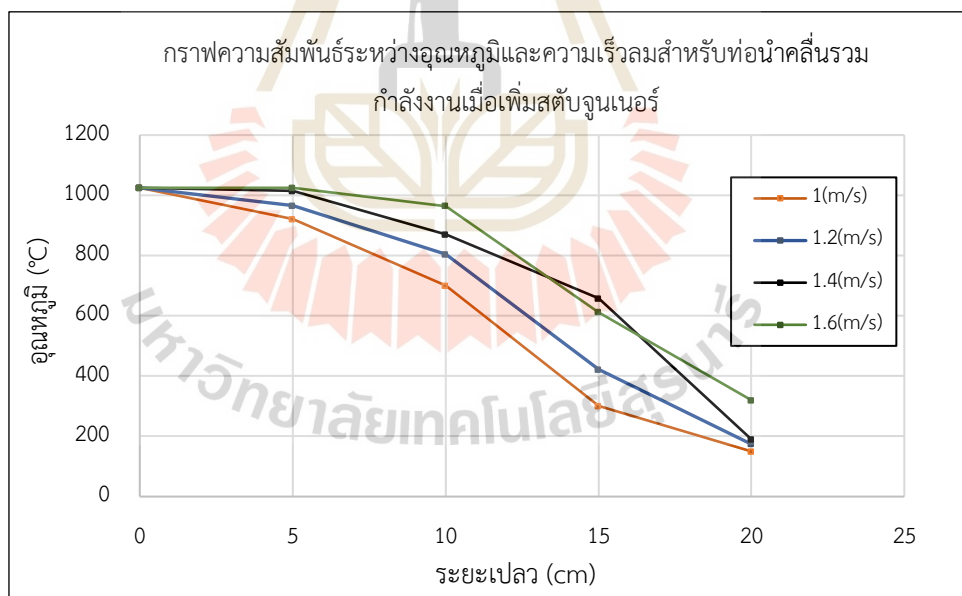
ระยะ เปลว (cm)	(1.3 กิโลวัตต์)				(2.6 กิโลวัตต์)				(2.6 กิโลวัตต์) ความเร็วลม (เมตรต่อวินาที) เพิ่มสัด			
	1.0	1.2	1.4	1.6	1.0	1.2	1.4	1.6	1.0	1.2	1.4	1.6
0	1025	1025	1025	1025	1025	1025	1025	1025	1025	1025	1025	1025
5	979	859	952	997	905	950	940	1025	921	965	1014	1025
10	301	378	567	601	712	813	870	950	700	804	870	964
15	126	148	216	252	300	390	613	612	300	421	657	612
20	48	60	115	150	150	150	190	294	150	174	190	320



รูปที่ 5.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะเปลวและความเร็วลมก่อนใช้ท่อนำคลื่นรวมกำลังงาน



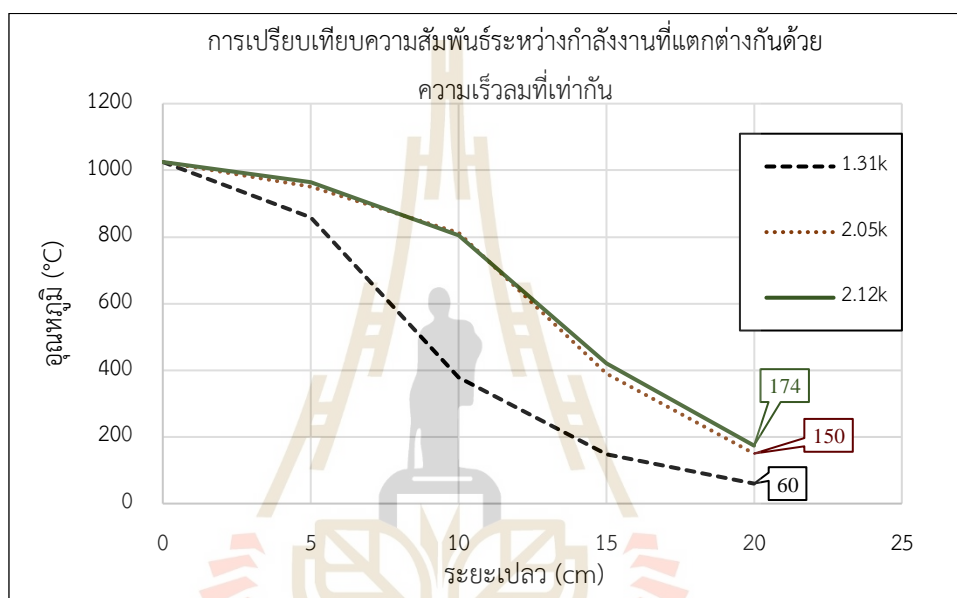
รูปที่ 5.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะแปลวและความเร็วลมเมื่อใช้ท่อนำคลื่นรวมกำลังงาน



รูปที่ 5.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะแปลวและความเร็วลมเมื่อใช้ท่อนำคลื่นรวมกำลังงานและเพิ่มสตัด์จูนเนอร์

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าที่ระยะ 0 เซนติเมตร ที่กำลังงานที่แตกต่างกันจะมีอุณหภูมิสูงสุดเท่ากัน และจะลดลงตามระยะห่างออกไปจากแหล่งกำเนิดคลื่นเมื่อแมกนีตรอนเป็นจุด

ปล่อยกำลังงาน ดังนั้นหากจะพิจารณาการกระจายตัวของอุณหภูมิ พิจารณาที่ความแตกต่างของระยะเปลวและกำลังงานที่แตกต่างกัน จะเห็นได้ชัดดังรูปที่ 5.25 ที่ระยะ 20 เซนติเมตร ที่ความเร็วลมเท่ากัน 1.2 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิเมื่อไม่ใช้ท่อนำคลื่นรวมกำลังงานที่ กำลังงาน 1.31 กิโลวัตต์ ให้ อุณหภูมิจะต่ำสุด 60 °C เมื่อใช้ท่อนำคลื่นสำหรับรวมกำลังงานที่ กำลังงาน 2.05 กิโลวัตต์ อุณหภูมิ ต่ำสุด 150 °C และเมื่อเพิ่มสตั๊บบจูนเนอร์กำลังงาน 2.12 กิโลวัตต์ อุณหภูมิต่ำสุด 174 °C แสดงให้เห็นว่าที่ก่อนการใช้ท่อนำคลื่นสำหรับรวมกำลังงานที่ระยะ 20 เซนติเมตร มีอุณหภูมิต่ำที่สุด



รูปที่ 5.25 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานที่แตกต่างกันที่ความเร็วลมเท่ากัน

5.4 สรุปผลและอภิปราย

ผลการทดสอบผลของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมแบบรวมกำลังงานประกอบไปด้วย แหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง (แมกนีตรอน) สามารถให้กำลังงานเอาต์พุตสูงสุด 1.31 กิโลวัตต์ ที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ต ท่อนำคลื่นสำหรับรวมหรือแบ่งกำลังงานให้ค่าการสะท้อนกลับของสัญญาณต่ำกว่า -20 dB และค่าการสูญเสียการนำสัญญาณมากกว่า -3.42 dB จากผลการทดสอบทั้งระบบ เมื่อทดสอบท่อนำคลื่นสำหรับรวมกำลังงานสามารถให้กำลังงานสูงสุด 2.05 กิโลวัตต์ ประสิทธิภาพทางไฟฟ้า 71.50 เปอร์เซ็นต์ และการทดสอบท่อนำคลื่นสำหรับรวมกำลังงานเมื่อมีการเพิ่มสตั๊บบจูนเนอร์สามารถให้กำลังงานสูงสุด 2.12 กิโลวัตต์ ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็น 75.40 เปอร์เซ็นต์ ที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ต ในส่วนของการนำท่อนำคลื่นแบบรวมกำลังงานไปใช้เป็นแหล่งกำเนิดกำลังงานให้กับพลาสมาความร้อน โดยใช้พารามิเตอร์ค่าที่เหมาะสมที่สุด ความเร็วของอากาศอยู่ที่ 1.2 เมตรต่อ

วินาที ใช้ในการเปรียบเทียบระหว่างก่อนใช้ท่อนำคลื่นแบบรวมกำลังงาน เมื่อไม่ใช้ท่อนำคลื่นสำหรับรวมกำลังงาน อุณหภูมิที่ระยะห่างของเปลวไฟ 0 ถึง 5 เซนติเมตร แสดงอุณหภูมิสูงสุดที่ 1,025 °C และที่ระยะห่างของเปลวไฟ 10 ถึง 20 เซนติเมตร อุณหภูมิต่ำสุดที่ 60 °C หลังจากใช้ท่อนำคลื่นสำหรับรวมกำลังงาน ที่ระยะห่างของเปลวไฟ 0 ถึง 5 เซนติเมตร แสดงอุณหภูมิสูงสุดที่ 1,025 °C และที่ระยะห่างของเปลวไฟ 10 ถึง 20 เซนติเมตร อุณหภูมิต่ำสุดที่ 150 °C และสุดท้ายใช้ท่อนำคลื่นสำหรับรวมกำลังงานเมื่อเพิ่มสตัดจ์จูนเนอร์ ที่ระยะห่างของเปลวไฟ 0 ถึง 5 เซนติเมตร แสดงอุณหภูมิสูงสุดที่ 1,025 °C และที่ระยะห่างของเปลวไฟ 10 ถึง 20 เซนติเมตร อุณหภูมิต่ำสุดที่ 174 °C นั้นแสดงให้เห็นว่าท่อนำคลื่นที่ได้ออกแบบสำหรับรวมกำลังงานสามารถรวมกำลังงานได้มากขึ้น



บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ออกแบบและสร้างท่อนำคลื่นสำหรับรวมกำลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยความถี่สูงด้วยหลักการใช้ท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมขนาดมาตรฐาน WR340 มาออกแบบเป็นท่อนำคลื่นสำหรับรวมกำลังงาน และยังนำเสนอวิธีการนำไปใช้งานเป็นแหล่งกำเนิดกำลังงานสำหรับพลาสมาความร้อน ประกอบไปด้วย ชุดแหล่งจ่ายกำลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง (แมกนีตรอน) กำลังงาน 1.5 กิโลวัตต์ ที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตส์ ท่อนำคลื่นสำหรับรวมกำลังงานคลื่นความถี่สูงกำลังงานสูง ท่อนำคลื่นความถี่ย่าน S-band สำหรับการออกแบบการรวมกำลังงาน ใช้ท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมระยะนาบ H โครงสร้างรูปตัว Y ประกอบด้วยพอร์ตอินพุตสองพอร์ตและพอร์ตเอาต์พุตหนึ่งพอร์ต สามารถให้กำลังงานสูงสุดถึง 2.02 กิโลวัตต์ ด้วยประสิทธิภาพทางไฟฟ้า 71.50 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อมีการเพิ่มสตัปจูนเนอร์ สามารถให้กำลังงานสูงสุดถึง 2.12 กิโลวัตต์ ด้วยประสิทธิภาพทางไฟฟ้า 75.40 เปอร์เซ็นต์ ผลการทดสอบอุณหภูมิของแมกนีตรอนสองตัวโดยใช้ท่อนำคลื่นรวมกำลังงานในการประยุกต์ใช้กับพลาสมาความร้อนแสดงอุณหภูมิที่ระยะห่างของเปลวไฟ 20 เซนติเมตร อุณหภูมิอยู่ที่ 150 °C ซึ่งเมื่อเทียบกับตอนที่ยังไม่ใช้ท่อนำคลื่นสำหรับรวมกำลังงานที่ระยะห่างของเปลวไฟ 20 เซนติเมตรอุณหภูมิอยู่ที่ 60 °C ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าที่ระยะห่างของเปลวไฟ 20 เซนติเมตรในการใช้ท่อนำคลื่นสำหรับรวมกำลังงานมีอุณหภูมิสูงกว่าตอนที่ยังไม่ใช้ท่อนำคลื่นสำหรับรวมกำลังงานนั้นแสดงให้เห็นว่า การใช้ท่อนำคลื่นสำหรับรวมกำลังงานเพื่อเพิ่มกำลังงานในการใช้งานสำหรับพลาสมาความร้อนสามารถนำไปสู่การเพิ่มอุณหภูมิได้และมีประสิทธิภาพกำลังงานสูง นอกจากนี้ยังได้มีการศึกษาการใช้เพิ่มสตัปเพื่อให้ประสิทธิภาพการรวมกำลังงานเพิ่มขึ้น ในการศึกษาที่ผ่านมาได้ปรับแต่งโลหะของสตัปตัวปรับตำแหน่งที่อยู่ใกล้กับเอาต์พุตของท่อนำคลื่นแบบรวมกำลังงานคือตำแหน่งที่ 1 มีผลต่อการส่งผ่านสัญญาณมากที่สุดด้วยความลึก 12.98 มิลลิเมตร ตำแหน่งที่ 2 ความลึกอยู่ที่ประมาณ 9.12 มิลลิเมตร ตำแหน่งที่ 3 ความลึกอยู่ประมาณ 0.32 มิลลิเมตร ซึ่งจะมีการทดสอบการวัดค่าการสูญเสียจากการส่งผ่านสัญญาณ (S13, S23, S31, และ S32) มีค่าต่ำกว่า (-3.49, -3.50, -3.51 และ -3.53) ที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตส์ ตามลำดับ

สำหรับปัญหาที่พบในระบบท่อนำคลื่นแบบรวมกำลังงานและแบ่งกำลังงาน อุณหภูมิความร้อนที่เกิดขึ้นภายในแมกนีตรอนหากมีการระบายความร้อนไม่ทันอาจทำให้เกิดความเสียหายได้ และเครื่องมือวัดกำลังงานไม่สามารถทนต่อกำลังงานที่สูงเกิน 1.5 กิโลวัตต์ ทำให้ไม่สามารถทราบกำลังงาน

เอาต์พุตของแมกนีตรอนทั้งสองตัวได้พร้อมกันเมื่อทดสอบการวัดกำลังงานด้วยเครื่องมือวัดอาจทำให้กำลังงานเกินเครื่องมือวัดสามารถรับได้อาจทำให้เครื่องมือวัดเสียหาย ดังนั้นสามารถรู้เอาต์พุตที่แท้จริงของแมกนีตรอนได้เพียงตัวเดียว ในส่วนของการนำท่อนำคลื่นแบบรวมกำลังงานไปใช้เป็นแหล่งกำเนิดกำลังงานให้กับพลาสมาความร้อนปัญหาที่พบคือความชื้นที่อยู่ในของผนังตัวนำอาจเกิดจากความชื้นที่อยู่ในท่อนำคลื่นทำให้เกิดเป็นความร้อนเนื่องจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงทำปฏิกิริยาความชื้นทำให้เกิดความร้อนในท่อนำคลื่นหรือที่เรียกว่าการสูญเสียจากไดอิเล็กตริกตัวนำและ การขึ้นรูปของท่อนำคลื่นที่ไม่ได้ขนาดตรงตามแบบตามผลการจำลองในโปรแกรม รวมทั้งเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิได้สูงสุด 1500 องศาเซลเซียสทำให้ไม่สามารถทราบอุณหภูมิสูงสุดสำหรับเปลวพลาสมาได้

สำหรับแนวทางการพัฒนาท่อนำคลื่นสำหรับรวมกำลังงาน สามารถเพิ่มกำลังงานเอาต์พุตได้สูงมากขึ้น ด้วยท่อนำคลื่นสำหรับรวมกำลังงาน สามารถนำไปพัฒนาการปรับโครงสร้างในท่อนำคลื่น และการปรับการแยกตัวระหว่างสองพอร์ตอินพุต เพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมระหว่างพอร์ตอินพุตและเอาต์พุต อาจจะมีการเจาะใส่สกรูเพิ่มที่สองพอร์ตอินพุตของท่อนำคลื่นเพื่อลดค่าการสูญเสียจากการสะท้อนกลับระหว่างแหล่งกำเนิดคลื่นที่ส่งเข้าไปยังโหลด สำหรับแท่งโลหะที่เพิ่มเข้าไปเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร ระยะห่างระหว่างสกรู $\lambda_g / 4$ หรือประมาณ 43 มิลลิเมตรของท่อนำขนาด WR340 สำหรับใช้เป็นขนาดในการศึกษาผลที่เกิดขึ้น เนื่องจากท่อนำคลื่นสำหรับรวมกำลังงานสามารถใช้เป็นตัวรวมแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงได้ ดังนั้นการปรับปรุงโครงสร้างของท่อนำคลื่นสามารถเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงกำลังงานสูงต้นทุนต่ำได้ถึงระดับอุตสาหกรรมเป็นสิ่งที่ควรพัฒนาต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- Chen, H., X. Xie and R. Xu (2010). An ultra wide band powerdivider/combiner based on Y-structure waveguide. 2010 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology.
- Chen, X., B. Yang, N. Shinohara and C. Liu (2020). "A High-Efficiency Microwave Power Combining System Based on Frequency-Tuning Injection-Locked Magnetrons." IEEE Transactions on Electron Devices **67**(10): 4447-4452.
- Cui, X., G. Wang, T. Jiang, H. Shao, J. Sun, X. Wu, X. Bai, X. Zhang and Z. Zhang (2018). "High-Efficiency, Broadband Converter From A Rectangular Waveguide TE₁₀ Mode to A Circular Waveguide TM₀₁ Mode for Overmoded Device Measurement." IEEE Access **6**: 14996-15003.
- Kutsak, S. V. and L. M. Logachova (2014). H-plane tee junction of rectangular waveguides: the three-dimensional case. 2014 International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory.
- Liu, Z., X. Chen, J. Wan, P. Wu, M. Yang, K. Huang and C. Liu (2018). "Phase-Shifterless Power Controlled Combining Based on 20-kW S-Band Magnetrons With an Asymmetric Injection." IEEE Electron Device Letters **39**(9): 1425-1428.
- Liu, Z., X. Chen, M. Yang, P. Wu, K. Huang and C. Liu (2019). "Experimental Studies on a Four-Way Microwave Power Combining System Based on Hybrid Injection-Locked 20-kW S-Band Magnetrons." IEEE Transactions on Plasma Science **47**(1): 243-250.
- Lomakin, K., G. Gold and K. Helmreich (2017). Transmission line model for rectangular waveguides accurately incorporating loss effects. 2017 IEEE 21st Workshop on Signal and Power Integrity (SPI)

Marinel, S., N. Renaut, E. Savary, R. Macaigne, G. Riquet, C. Coureau, T. Gadeyne and D. Guillet (2018). "Tuning, Impedance Matching, and Temperature Regulation during High-Temperature Microwave Sintering of Ceramics." Advances in Materials Science and Engineering **2018**: 1-8.

Themelis, N. J. and A. M. Vardelle (2012). Plasma-Assisted Waste-to-Energy Processes. Encyclopedia of Sustainability Science and Technology: 8097-8112.

Wnukowski, M. and W. Moron (2021). "Warm Plasma Application in Tar Conversion and Syngas Valorization: The Fate of Hydrogen Sulfide." Energies **14**(21).

Yeap, K. H., Y. Choy, Tham, G. Yassin and K. C. Yeong (2011). "Attenuation in Rectangular Waveguides with Finite Conductivity Walls." Radioengineering **20**.

Zhang, F., K. Song and Y. Fan (2015). A four-way all-metal-waveguide power divider for millimeter-wave/THz array application. 2015

Asia-Pacific Microwave Conference (APMC). Zhang, Y., K. Huang, D. K. Agrawal, T. Slaweki, H. Zhu and Y. Yang

(2017). "Microwave Power System Based on a Combination of Two Magnetrons." IEEE Transactions on Electron Devices **64**(10): 4272-4278.

โรจน์อานนท์, ป. (2559). วิศวกรรมไมโครเวฟ และสายนำสัญญาณคลื่นความถี่สูง



ภาคผนวก ก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

บทความวิชาการ

- S. Siribunkun, T. Thosdeekoraphat, C. Thongsopa and S. Santalunai (2018). **High Frequency Power Combiner of Two Magnetrons Based on the E-Plane Y-Structure Waveguide**, in Asia Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Bali, Indonesia, 27 - 30 September 2021.



High Frequency Power Combiner of Two Magnetrons Based on the E-Plane Y-Structure Waveguide

Saowalak Siribunkun
Electronic Engineer
Suranaree University of Technology
Nakhon Ratchasima 3000 Thailand
Email: m6302498@g.sut.ac.th

Thanaset Thosdeekoraphat
Electronic Engineer
Suranaree University of Technology
Nakhon Ratchasima 3000 Thailand
Email: Thanaset@g.sut.ac.th

Chanchai Thongsopa
Electronic Engineer
Suranaree University of Technology
Nakhon Ratchasima 3000 Thailand
Email: chan@g.sut.ac.th

Samran Santalunai
Electronic Engineer
Suranaree University of Technology
Nakhon Ratchasima 3000 Thailand
Email: samran.sa@g.sut.ac.th

Abstract— In this article, we propose to combine the powers of two magnetrons. By combining the power of a microwave, two continuous magnetrons waves are used as the source of the s-band waves. We use square waveguides (WR340) the Y-structure to achieve industrial high power at 2.45 GHz. To combine the power of a 1 kW magnetron and use it to adjust the phase difference of the two magnetrons. With low loss for using two magnetrons in the process, insertion loss is less than 0.5 dB, reflection loss is less than -28 dB at 2.45 GHz frequency.

Keywords—magnetrons, microwave power combining, waveguide.

I. INTRODUCTION

The magnetron is a high-power vacuum tube that creates a microwave. In great demand today, microwave energy is used in a variety of industrial applications. Due to its many advantages, such as being an industrial microwave source, it is inexpensive, highly efficient and provides high power. The magnetron only serves as an oscillator, generating a microwave signal from the direct current that is supplied to it. Magnetron vacuum tubes were used continuously on radar during the post-war period. Nowadays, magnetron is used such as communication satellites, microwave ovens, microwave communication equipment / equipment. Cell or energy is applied to the plasma industry[1] however, a single magnetron is energy that is limited by the operating frequency. CW Sources are excellent in a wide variety of military applications. It is expensive, has poor performance, so it is not. The ideal choice for most industrial thermal applications[2]. On the other hand, the energy capacity of a single microwave source Limited by the limitation of waveguide cavity size Which is limited by usable microwave frequencies[3]-[4], for example The electrical capacity of a single magnetron CW can be reduced by up to half a watt of the cavity. Of total output power at 2.45 GHz

So, we have the idea to combine 1 kW magnetron conductors with the same frequency band of both. To obtain high power at high frequencies, a square waveguide is a E-plane waveguide pattern and is known to operate at slightly different frequencies. The output phase may have a slight phase shift. To simplify the microwave output power In this article, we present two combiner microwave power[4] methods with a square waveguide. The main power of a square waveguide is TE₁₀ mode as the primary energy

concentrator. Waveguide type (WR340) S-Band [5]-[6]band uses aluminum material. Maximum frequency 2.45 GHz, which is the solution for increasing the power of microwave source. to be used for industrial applications that require high microwave power, in this article, we present a cost-effective combination of two CW magnetron at 2.45 GHz[7]-[8] with 1000 W / 1500 W power using two magnetrons. Together We analyzed and built applications using low loss waveguides. And the phase difference is negligible. And high efficiency, suitable for use in various industries.

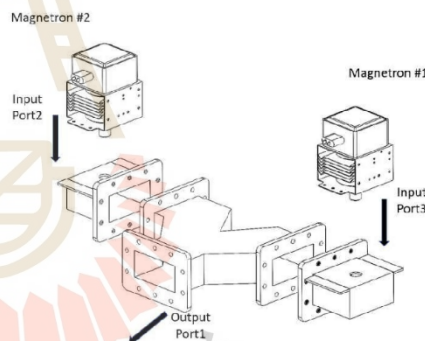


Fig. 1. Schematic diagram of the magnetron power combination system on the Y-structure

II. THEORY AND ANALYSIS

A. Lossless Power Combiner

To obtain a total of 3-dB of bidirectional microwave power. The E-plane T-junction (E-T) is used to combine two 3-dB elements. E-plane T-junctions are designed with output impedance matching Lossless distribution matrix 3-dB E-T power Combiner with perfect impedance matching at the output port can be a form of [9]. Ports 2 and 3 are two input

ports of the T junction. Combiner and port 1 are the output port.

Combiner 3 ports can be represented by 3 x 3. matrices concluded that the three port matrices should always be standard and Lossless. Fragmentation parameters combine the resulting three ports. will comply with the specifications [10]ports 2 and 3 are the E-plane Combiner's input port and port 1 is the output port.

$$[S] = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} S_{11} &= 0 \\ S_{21} &= S_{12} = -1/2 \\ S_{31} &= S_{13} = 1/2 \end{aligned}$$

B. Structure of the power combiner

The presented collector is based on the low loss Y structure waveguide. The collected tubes are shown in Figure 2. The high-frequency waveguides, port 1 and port 2, are inputs paired with square waveguides. Using a mid-range S-Band waveguide between port 1 and port 2, we created the correct symmetrical structure in the design of high-frequency converters for square waveguides. In this article, we used a wide wall-to-wall design (E-plan) to make it easy to assemble or mold the structure. We simplified the alignment of aluminum substrates using standardized (WR-340).

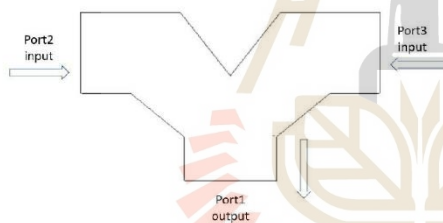


Fig 2. Design Y-structure 2-D.

C. Design and simulation

To examine the structure, waveguide power converters are used to simulate 3D models. Wide frequency range 2.45 GHz (S-Band), the return loss is better than -28 dB according to the CST simulation results Fig 4. (a)

Structural waveguide from conventional waveguide conversion to E-Plane rectangular waveguide design to Y-structure pattern, it can divide the power to form the travel structure of electric field wave travel well.

All power dividers / energy consolidators have a simple solution. And ease of use, including full height surfaces, using a customizable design with an S-band waveguide.

III. RESULT AND DISCUSSION

The two-way waveguide couplings, Y structure design were simulated with the magnetic field CST program, we demonstrated the excellent amplitude balance (S21, S31), the total loss simulated and measured data. The output of the two-way waveguide combiner is shown in Figure 3. The results are large. And the insertion loss (Loss <0.5 dB ,2.45 GHz), the power divider parameter, the simulation Y-structure and the results are shown in Figure 4 (a). This includes more than -28 dB in the (2.45 GHz) range, which includes the entire operating frequency range (2.45 GHz). In addition, the parameters required to divide / combine the power, S21 and S31 are essential to Power Consolidation Efficiency The results of S-parameter are shown in Figure 4 (b).

$$P_{out} \approx \frac{1}{2} + \sqrt{P_1 P_2} \cos \theta \quad (1)$$

Equation (1) shows that the larger the input phase, the lower the total output power, the phase and the output power are inversely proportional, and Efficiency is maximum when $\theta = 0^\circ$

The typical measured S parameters Shown in Fig. 4 all high energy losses are returned. The path is better than -24 dB and the insertion loss is Approximately equal to 0.5 dB, isolation loss-20 to -23 dB in the subsequent experimental bandwidth. Joint efficiency.

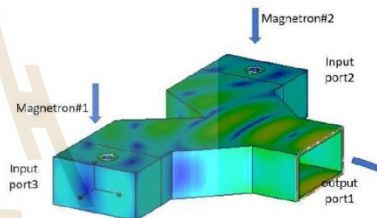
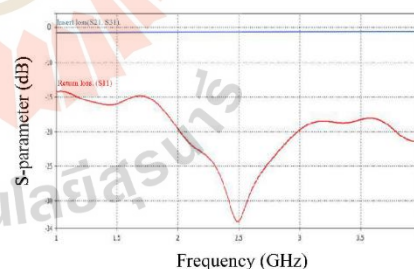
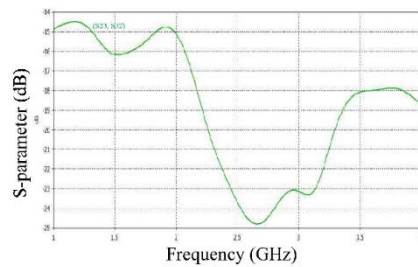


Figure 3. Simulation result of the E-TYPE waveguide combiner using CST.



(a) The Simulated results of the return loss of S11 and insert loss of S21, S31



(b) The simulation results of the isolation of S23, S32
Fig. 4 The simulation results of the power divider/combiner

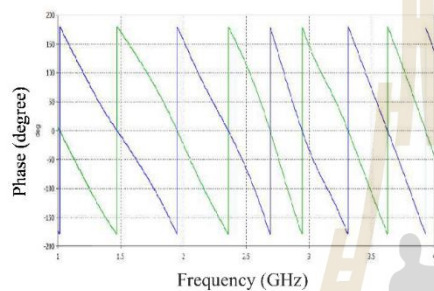


Figure 5. The simulated results of the phases of S21, S31, in degree two-way power combining.

IV. CONCLUSION

The waveguide power divider/combiner with Y-structure is a square tube built to industry standards (WR340), with the S-band frequency of 2.45 GHz as a three-dimensional mixer. There are two basic forms a waveguide in the H-plane and in the E-plane. As shown. The Y-structure waveguide consists of an input port 2 and an input port 3, an output port 1, return loss is better than -28 dB at 2.45 GHz structure is small with

low loss for using magnetrons in the power combination and there is the high-power efficiency.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by Suranaree University of Technology (SUT) and the Office of the Higher Education under NRU project of Thailand.

REFERENCES

- [1] Jordan, N.M., et al. Plasma-Based Pulse Shortening In The Recirculating Planar Magnetron*. in 2017 IEEE International Conference on Plasma Science (ICOPS). 2017.
- [2] Wiedenmann, O., et al. A multi-physics model for microwave heating in metal casting applications embedding a mode stirrer. in 2012 The 7th German Microwave Conference. 2012.
- [3] Beunas, A. and F. Kazarian. High power CW klystrons for fusion experiments. in 2008 IEEE 35th International Conference on Plasma Science. 2008.
- [4] Kubasek, S.E., et al., Power combining characteristics of backed-off traveling wave tubes for communications applications. IEEE Transactions on Electron Devices, 2003. 50(6): p. 1537-1542.
- [5] Ran, D., et al. A millimeter-wave solid-state power combining circuit based on low-loss corporate waveguide structure. in 2010 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology. 2010.
- [6] Chen, H., X. Xie, and R. Xu. An ultra wide band power divider/combiner based on Y-structure waveguide. in 2010 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology. 2010.
- [7] Huang, H., K. Huang, and C. Liu. *Experimental Study on the Phase Deviation of 20-kW SSS-Band CW Phase-Locked Magnetrons*. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2018. 28(6): p. 509-511.
- [8] Sayapin, A., U. Dai, and Y.E. Krasik. *SSS-Band Relativistic Magnetron Operation With Multichannel Radial Outputs of the Microwave Power*. IEEE Transactions on Plasma Science, 2017. 45(2): p. 229-234.
- [9] Liu, Z., et al., Experimental Studies on a 1-kW High-Gain SSS-Band Magnetron Amplifier With Output Phase Control Based on Load-Pull Characterization. IEEE Transactions on Plasma Science, 2018. 46(4): p. 909-916.
- [10] Liu, Z., et al., Phase-Shiftless Power Controlled Combining Based on 20-kW S-Band Magnetrons With an Asymmetric Injection. IEEE Electron Device Letters, 2018. 39(9): p. 1425-1428.

ประวัติผู้เขียน

นางสาวเสาวลักษณ์ ศิริบุญคุณ เกิดเมื่อวันที่ 28 มกราคม พ.ศ. 2541 ที่อำเภอจักราช จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนคลองเมืองพิทยาคม อำเภอจักราช จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2563 ต่อมาในปี พ.ศ. 2563 ได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต หลักสูตรวิศวกรรมไฟฟ้า สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี