



**เครื่องส่งความถี่วิทยุ 2.45 GHz กำลังงานสูง
High Power 2.45 GHz RF Generator**

โดย

นางสาวพิชญา ชัยปัญญา รหัสนักศึกษา B4702689

นางสาวอภิญญา อินทร์นอก รหัสนักศึกษา B4705581

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาวิชา 427499 โครงการวิศวกรรมโทรคมนาคม

และ 427494 โครงการศึกษาวิศวกรรมโทรคมนาคม

ประจำภาคการศึกษาที่ 1 และ 2 ปีการศึกษา 2550

หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม หลักสูตรปรับปรุง พ.ศ. 2545

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

โครงการ	เครื่องส่งความถี่วิทยุ 2.45 GHz กำลังงานสูง (High Power 2.45 GHz RF Generator)
โดย	นางสาวพิชญา ชัยปัญญา รหัสนักศึกษา B4702689 นางสาวอภิญญา อินทร์นอก รหัสนักศึกษา B4705581
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร. รั้งสรรค์ วงศ์สรรค์
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
ภาคการศึกษาที่	1/2550 และ 2/2550

บทคัดย่อ

เนื่องจากทางห้องปฏิบัติการสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคมยังขาดแคลนเครื่องผลิตความถี่วิทยุที่มีกำลังงานสูงเพื่อใช้ทดสอบการทนทานต่อกำลังงานสูง โครงการนี้จึงได้นำเสนอเครื่องผลิตความถี่วิทยุ 2.45 GHz กำลังงานสูงโดยใช้หลอดแมกนีตรอนพร้อมออกแบบวงจรเชื่อมต่อแบบโพรง (cavity) เพื่อส่งสัญญาณผ่านสายนำสัญญาณแบบแกนร่วมสำหรับนำไปป้อนให้กับสายอากาศที่จะทำการทดสอบด้านการทนทานต่อกำลังงานสูงต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

จากการที่คณะจัดทำรายงานได้รับมอบหมายให้ทำโครงการพิเศษด้านวิศวกรรมโทรคมนาคม เรื่อง “เครื่องส่งความถี่วิทยุ 2.45 GHz กำลังงานสูง” ส่งผลให้คณะจัดทำรายงานได้รับความรู้และประสบการณ์ต่างๆ เกี่ยวกับการออกแบบเครื่องส่งความถี่วิทยุ 2.45 GHz โดยใช้คลื่นไมโครเวฟอย่างมากมาย บัดนี้โครงการดังกล่าวพร้อมทั้งรายงานได้สำเร็จลงแล้ว ทั้งนี้ด้วยความร่วมมือและสนับสนุนจากบุคคลต่างๆ ดังนี้

- | | | |
|-------------------------------|--|------------------------------------|
| 1. ผศ.ดร. รังสรรค์ วงศ์สวรรค์ | | (อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ) |
| 2. นาย คมสัน ภาษยเดช | | (วิศวกรประจำอาคารเครื่องมือF1) |
| 3. นาย จิรวัดน์ ดำทองกลาง | | (ช่างเทคนิคประจำอาคารเครื่องมือF1) |
| 4. นาย วาที ทิพย์เลิศ | | (ช่างเทคนิคประจำอาคารเครื่องมือF1) |
| 5. นาย มานพ จันทร์สนิทศรี | | (ช่างฝีมือประจำอาคารเครื่องมือF1) |
| 6. นาย ณรงค์ เขียวสูงเนิน | | (พ.ห้องทดลองอาคารเครื่องมือF1) |
| 7. นาย โอภาส ไทยดี | | (วิศวกรประจำอาคารเครื่องมือF6) |
| 8. นาย สหัชชัย ทิพย์เนตร | | (วิศวกรประจำอาคารเครื่องมือF6) |

ข้าพเจ้าใคร่ขอขอบพระคุณผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการให้ข้อมูลและเป็นที่ปรึกษาในการทำรายงานฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์ ตลอดจนให้การดูแลและให้ความเข้าใจในการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆ ซึ่งข้าพเจ้าขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ด้วย

นางสาวพิชญา ชัยปัญญา
นางสาวอภิญา อินทร์นอก

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
กิตติกรรมประกาศ	ข
สารบัญ	ค
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 หลักการและเหตุผล	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตการทำงาน	1
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	3
2.1 ส่วนกำเนิดคลื่น (Magnetron)	3
2.2 หลักการของท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมมุมฉาก (Rectangular Waveguide)	5
2.3 หลักการปรับอิมพีแดนซ์ของคลื่นแบบใช้สกรู 3 ตัว (Three Screws Method)	12
2.4 สรุป	12
บทที่ 3 การออกแบบและสร้างเครื่องส่งความถี่วิทยุ	13
3.1 วงจรเชื่อมต่อโดยใช้โพรง (Cavity)	13
3.2 ผลการวัดการเรโซแนนซ์ของโพรง	19
3.3 การติดตั้งอุปกรณ์และวงจรไฟฟ้าสำหรับหลอดแมกนีตรอน	22
3.4 สรุป	23
บทที่ 4 การทดสอบและผลการทดสอบ	24
4.1 ทดสอบวัดการแมตซ์ของโพรง	24
4.2 ทดสอบวัดการแมตซ์ของสายอากาศ	26
4.3 ทดสอบวัดแรงดันและกำลังส่ง	30
4.4 สรุป	34
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	35
5.1 สรุปผลที่ได้จากโครงการ	35
5.2 ปัญหาที่พบในระหว่างการทำงาน	36
5.3 ข้อเสนอแนะ	37
5.4 แนวทางการพัฒนาต่อไป	37

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บรรณานุกรม	38
ภาคผนวก	39
ประวัติผู้เขียน	42

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 ค่าการลดทอน (Attenuation) และ ค่าการสูญเสียกำลังงาน (Power loss) ของโลหะชนิดต่างๆที่ความถี่ 2.45 GHz	14
ตารางที่ 3.2 ผลเฉลยจากโปรแกรม MATLAB	16
ตารางที่ 4.1 ผลการวัดเครื่องส่งความถี่โดยได้ค่ากำลังที่ภาครับ	33
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบที่วัดและที่ได้จากการคำนวณ	34
ตารางที่ 5.1 แสดงปัญหาที่พบ สาเหตุและแนวทางแก้ไข	36

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบต่างๆของหลอดแมกนีตรอน	3
รูปที่ 2.2 หลอดแมกนีตรอน	3
รูปที่ 2.3 วงจรจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับแมกนีตรอน ซึ่งเพิ่มแรงดันเป็นสองเท่าโดยใช้ไดโอดและตัวเก็บประจุไฟฟ้าแรงสูง	4
รูปที่ 2.4 ลักษณะของแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่จะจ่ายให้กับแมกนีตรอน	5
รูปที่ 2.5 ลักษณะของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมแมกนีตรอนจะมีค่าคงที่เท่ากับ -4000 โวลต์	5
รูปที่ 2.6 ท่อนำคลื่นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก ซึ่งใช้พิกัดฉากในการวิเคราะห์	5
รูปที่ 3.1 ลักษณะคลื่นไมโครเวฟที่ถูกส่งออกมาจากสายอากาศที่ปลายแมกนีตรอน	17
รูปที่ 3.2 ลักษณะของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของโหมด TE_{10}	17
รูปที่ 3.3 ขนาดของท่อนำคลื่นที่ออกแบบโดยใช้โปรแกรม Solid Work	18
รูปที่ 3.4 ภาพแสดงระยะห่างระหว่างสกรูทั้ง 3 ตัว	19
รูปที่ 3.5 ภาพแสดงการติดตั้งสกรูที่ท่อนำคลื่น	20
รูปที่ 3.6 ค่า SWR ของท่อนำคลื่นที่ความถี่ 2.45 GHz	20
รูปที่ 3.7 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน S_{11} ของท่อนำคลื่นที่ความถี่ 2.45 GHz	21
รูปที่ 3.8 ค่าอิมพีแดนซ์ของท่อนำคลื่นที่ความถี่ 2.45 GHz	21
รูปที่ 3.9 วงจรไฟฟ้าของเครื่องส่งความถี่วิทยุ 2.45 GHz	22
รูปที่ 3.10 การติดตั้งอุปกรณ์และวงจรไฟฟ้าภายในกล่อง	23
รูปที่ 3.11 รูปด้านหน้าของตัวเครื่องส่งความถี่วิทยุ 2.45 GHz	23
รูปที่ 4.1 แสดงการเชื่อมต่อระหว่างโพรงกับเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย	24
รูปที่ 4.2 ค่า SWR ของท่อนำคลื่นที่ความถี่ 2.462 GHz	25
รูปที่ 4.3 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน S_{11} ของท่อนำคลื่นที่ความถี่ 2.462 GHz	25
รูปที่ 4.4 ค่าอิมพีแดนซ์ของท่อนำคลื่นที่ความถี่ 2.462 GHz	26
รูปที่ 4.5 แสดงการเชื่อมต่อระหว่างสายอากาศตัวที่ 1 กับเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย	26
รูปที่ 4.6 ค่า SWR ของสายอากาศตัวที่ 1	27
รูปที่ 4.7 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศตัวที่ 1	27
รูปที่ 4.8 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน S_{11} ของสายอากาศตัวที่ 1	28
รูปที่ 4.9 แสดงการเชื่อมต่อระหว่างสายอากาศตัวที่ 1 กับเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย	28
รูปที่ 4.10 ค่า SWR ของสายอากาศตัวที่ 2	29
รูปที่ 4.11 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศตัวที่ 2	29

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.12 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน S_{11} ของสายอากาศตัวที่ 2	30
รูปที่ 4.13 แผนภาพแสดงการวัดแรงดันเพื่อหาค่ากำลังส่งของเครื่องส่งความถี่	30
รูปที่ 4.14 เครื่องควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแบบปรับค่าได้	31
รูปที่ 4.15 เครื่องวิเคราะห์แถบความถี่ (Spectrum Analyzer)	31
รูปที่ 4.16 การจัดวางอุปกรณ์เพื่อวัดกำลังงาน โดยผ่านทางสายอากาศส่งและรับ	31
รูปที่ 4.17 วัดกำลังงานภาครับที่เครื่องวิเคราะห์แถบความถี่	32
รูปที่ 6.1 แสดงตัวเครื่องที่ประกอบแล้วซึ่งเจาะช่องเพื่อระบายอากาศ รวมถึงช่องของหัววัดสายอากาศ ช่องใส่ไฟ ช่องควบคุมเวลาและแรงดัน	40
รูปที่ 6.2 ภาพด้านหน้าของเครื่องส่งความถี่วิทยุ 2.45 GHz กำลังงานสูง	40
รูปที่ 6.3 ภาพด้านข้างของเครื่องส่งความถี่วิทยุ 2.45 GHz กำลังงานสูง	40
รูปที่ 6.4 ภาพด้านบนของเครื่องส่งความถี่วิทยุ 2.45 GHz กำลังงานสูง	40

บทที่ 1

บทนำ

1.1 หลักการและเหตุผล

ปัจจุบันสายอากาศที่ใช้ในการแพร่กระจายสัญญาณวิทยุโทรทัศน์มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย โดยสายอากาศประเภทนี้เป็นสายอากาศที่รองรับกำลังงานสูง ซึ่งห้องปฏิบัติการสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคมได้มีการวิจัยสายอากาศประเภทนี้จำนวนมาก แต่ยังคงขาดเครื่องผลิตความถี่วิทยุกำลังส่งสูง เพื่อทดสอบการรองรับและการทนทานต่อกำลังงานสูงของสายอากาศ ดังนั้นทางผู้เสนอโครงการจึงได้นำเสนอโครงการนี้ขึ้นมา โดยโครงการนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบเครื่องส่งกำลังงานโดยใช้หลอดแมกนีตรอนขนาดความถี่ 2.45 GHz ซึ่งมีการเชื่อมต่อสัญญาณไปยังสายนำสัญญาณแบบแกนร่วมโดยใช้วงจรเชื่อมต่อแบบโพรง (Cavity) และสุดท้ายได้ประกอบลงแทนมาตรฐานเพื่อพร้อมใช้งานต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. ออกแบบเครื่องส่งกำลังงานให้ได้ความถี่ 2.45 GHz กำลังงานสูงสุดไม่ต่ำกว่า 700 วัตต์ โดยใช้หลอดแมกนีตรอนเป็นตัวกำเนิดสัญญาณ
2. ออกแบบวงจรเชื่อมต่อโดยใช้โพรง เพื่อใช้ส่งสัญญาณผ่านสายนำสัญญาณแบบแกนร่วมไปยังอินพุตของสายอากาศภายนอก

1.3 ขอบเขตการทำงาน

1. ศึกษาการทำงานของหลอดแมกนีตรอน
2. ศึกษาวงจรเชื่อมต่อโดยใช้โพรงเพื่อใช้ส่งสัญญาณผ่านสายนำสัญญาณแบบแกนร่วม
3. ติดตั้งหลอดแมกนีตรอนพร้อมอุปกรณ์ประกอบวงจรการทำงาน
4. ออกแบบและติดตั้งวงจรเชื่อมต่อโดยใช้โพรงสำหรับเชื่อมต่อสัญญาณผ่านสายส่งแบบแกนร่วม
5. ทำการทดสอบเพื่อให้ได้ตามวัตถุประสงค์ที่กำหนด
6. สรุปผลการทดลองและเขียนรายงาน

7. นำเสนอโครงการ

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาค้นหาข้อมูล
2. เขียนโครงการและเสนอโครงการกับอาจารย์ที่ปรึกษา
3. หาชื่ออุปกรณ์ที่ใช้ในโครงการนี้
4. ศึกษาการทำงานของหลอดแมกนีตรอน
5. ศึกษาวงจรเชื่อมต่อโดยใช้โพรงเพื่อใช้ส่งสัญญาณผ่านสายนำสัญญาณแบบแกนร่วม
6. ติดตั้งหลอดแมกนีตรอนพร้อมอุปกรณ์ประกอบวงจร
7. ออกแบบและติดตั้งวงจรเชื่อมต่อ โดยใช้โพรงสำหรับเชื่อมต่อสัญญาณผ่านสายส่งแบบ

แกนร่วม

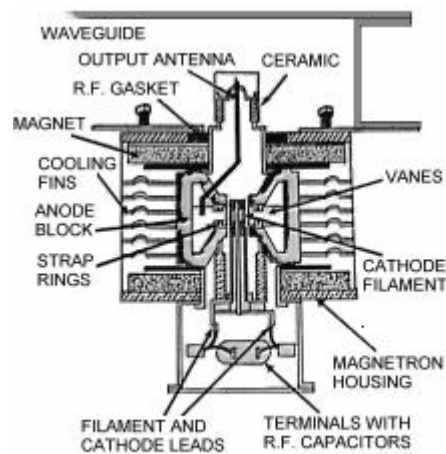
8. ทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อให้ได้ตามวัตถุประสงค์
9. สรุปผลการทดลองและเขียนรายงาน
10. นำเสนอโครงการ

บทที่ 2

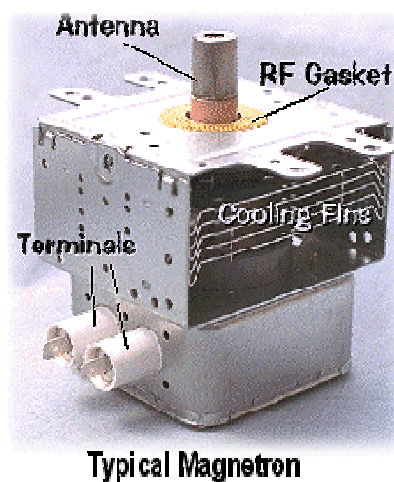
ทฤษฎีและหลักการ

2.1 ส่วนกำเนิดคลื่น (Magnetron)

หลอดแมกนีตรอน(Magnetron) ซึ่งใช้เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟความถี่ 2.45 GHz [1]ในโครงงานนี้จะมีลักษณะโดยทั่วไปแสดงดังรูป 2.1 และ 2.2



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบต่างๆของหลอดแมกนีตรอน

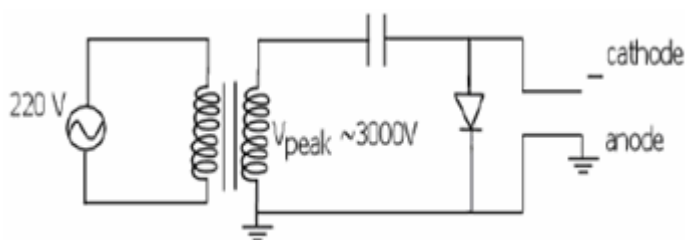


รูปที่ 2.2 หลอดแมกนีตรอน

โครงสร้างภายในของหลอดแมกนีตรอนประกอบด้วยไส้หลอด(Filament) คาโทด (Cathode) ซึ่งเป็นขั้วใดขั้วหนึ่งของไส้หลอด และถูกบรรจุอยู่ในช่องสุญญากาศซึ่งส่วนของผนัง

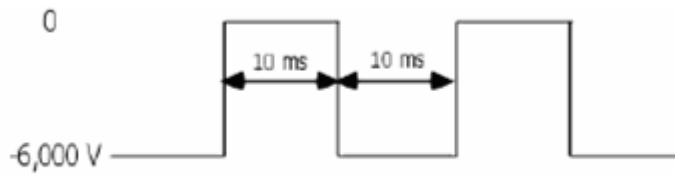
รอบๆจะทำหน้าที่เป็นขั้วอโนด(Anode) คลื่นไมโครเวฟที่ถูกกำเนิดขึ้นจะถูกส่งออกมาภายนอก โดยผ่านสายอากาศที่มีลักษณะเป็นโพรบ (Probe Antenna) ในการทำงานของหลอดแมกนีตรอน นั้น หลอดแมกนีตรอนจะถูกจ่ายด้วยไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันต่ำประมาณ 3-4 โวลต์ กระแส 10 แอมแปร์ให้กับไส้หลอด ซึ่งจะทำให้ไส้หลอดร้อนและปล่อยอิเล็กตรอนออกมา และเมื่อจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงไปที่ขั้วโคทขั้วหนึ่งของหลอดซึ่งทำหน้าที่เป็นคาโทดเทียบกับขั้วอโนด ก็จะทำให้ไอเล็กตรอนถูกบังคับให้เคลื่อนที่ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กถาวร และเมื่อความต่างศักย์มีค่าสูงจนถึงค่าหนึ่งก็จะทำให้หลอดแมกนีตรอนสามารถปล่อยคลื่นไมโครเวฟออกมาได้ โดยความถี่ของคลื่นไมโครเวฟจะถูกกำหนดด้วยโครงสร้างภายในของช่องสูญญากาศระหว่างขั้วคาโทดกับขั้วอโนด ซึ่งทำให้มีความเหมาะที่จะทำให้หลอดแมกนีตรอนสามารถกำเนิดคลื่นออกมาที่ความถี่ 2.45 GHz ออกมา

ในขณะที่จ่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ 3-4 โวลต์ กระแส 10 แอมแปร์ให้กับไส้หลอดอยู่นั้น แรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่จ่ายให้อโนดกับคาโทดจะต้องมีค่าสูงประมาณ -4000 โวลต์ จึงจะทำให้หลอดแมกนีตรอนปล่อยคลื่นไมโครเวฟออกมาได้ เตาไมโครเวฟโดยทั่วไป จะมีชุดจ่ายชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงซึ่งประกอบด้วยหม้อแปลงแบบแปลงขึ้น (Step up transformer) ซึ่งมีแรงดันด้านขดทุติยภูมิสูงสุด (V_{peak}) ประมาณ 3,000 โวลต์ เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ 220 โวลต์ และต่อเข้ากับไดโอดและตัวเก็บประจุในลักษณะวงจรทวิแรงดัน 2 เท่าดังรูปที่ 2.3



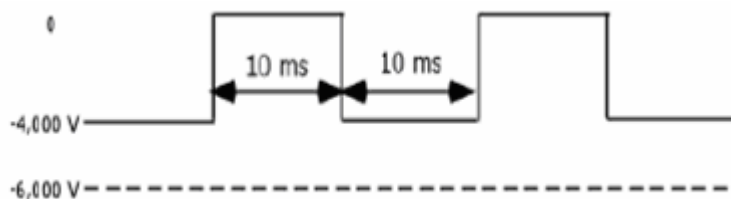
รูปที่ 2.3 วงจรจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับแมกนีตรอน ซึ่งเพิ่มแรงดันเป็นสองเท่า โดยใช้ไดโอดและตัวเก็บประจุไฟฟ้าแรงสูง

ในขณะที่ยังไม่ต่อชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้านี้ให้แก่แมกนีตรอน จะวัดค่าแรงดันสูงสุดตรงขาออกได้เท่ากับ -6,000 โวลต์ ซึ่งเป็นไปตามคุณสมบัติของวงจรทวิแรงดัน โดยจะมีลักษณะเป็นพัลส์ความถี่ 50 เฮิร์ต ดังแสดงในรูปที่ 2.4



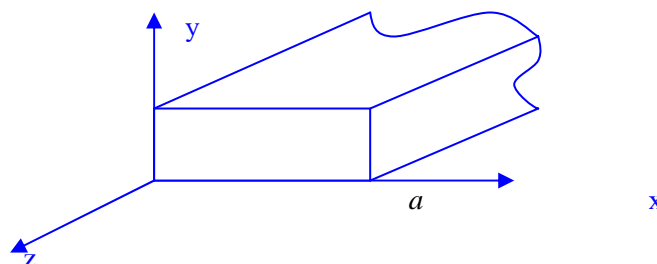
รูปที่ 2.4 ลักษณะของแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่จะจ่ายให้กับแมกนีตรอน

การทำงานของวงจรทีวีแรงดันในรูปที่ 4 จะมีลักษณะคือ ขณะที่แรงดันไฟฟ้าขาออกของหม้อแปลงมีค่าเป็นบวก ($V_{\text{peak}} = 3,000$ โวลต์) ไดโอดก็จะนำกระแสและตัวเก็บประจุจะทำการประจุกระแสไว้ ในขณะที่แรงดันที่ตกคร่อมคาโทดและอานอดมีค่าเป็นศูนย์ และเมื่อแรงดันไฟฟ้าขาออกของหม้อแปลงเปลี่ยนเป็นลบ ไดโอดก็จะหยุดนำกระแส ซึ่งจะมีผลทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมคาโทดและอานอดเป็นแรงดันไฟฟ้ารวมของแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุและแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลงซึ่งเท่ากับ $-6,000$ โวลต์เมื่อต่อวงจรจ่ายแรงดันไฟฟ้าดังกล่าว (รูปที่ 2.3) เข้ากับแมกนีตรอนแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อม อานอดและคาโทดจะลดเหลือ $-4,000$ โวลต์ดังรูปที่ 2.5 ซึ่งแรงดันไฟฟ้าผลต่างประมาณ $-2,000$ โวลต์ จะเปลี่ยนเป็นกำลังของคลื่นไมโครเวฟสูงสุดที่ถูกส่งออกมา ซึ่งคลื่นไมโครเวฟที่ถูกส่งออกมาก็จะมีลักษณะเป็นพัลส์เช่นเดียวกับรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ลักษณะแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมแมกนีตรอนจะมีค่าคงที่เท่ากับ -4000 โวลต์

2.2 หลักการของท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมมุมฉาก (Rectangular Waveguide)



รูปที่ 2.6 ท่อนำคลื่นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก ซึ่งใช้พิกัดฉากในการวิเคราะห์

ในการวิเคราะห์จะสมมติว่าท่อนำคลื่นซึ่งทำจากโลหะที่มีความนำสมบรูณ์มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากันเท่ากันตลอดความยาวท่อ (Uniform Cross-Section) วางอยู่ในแกน z ซึ่งเป็นทิศทางของการแพร่กระจายคลื่น สมการของสนามภายในท่อนำคลื่นที่ได้จากสมการของแมกซ์เวลจะต้องเป็นไปตามเงื่อนไขขอบเขตและขึ้นอยู่กับทิศทาง z ดังนั้นสมการของสนามจะอยู่ในรูปของ $e^{-\gamma z}$ โดยที่ γ คือ ค่าคงที่ของการแพร่กระจายคลื่น

จากสมการของแมกซ์เวล

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$\nabla \times H = \frac{\partial D}{\partial t} + J \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (2.4)$$

และจากคุณสมบัติ

$$\nabla \cdot A = \frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_y}{\partial y} + \frac{\partial A_z}{\partial z} \quad (2.5ก)$$

สำหรับในกรณีของ $\nabla \times A$ จะมีองค์ประกอบของเวกเตอร์คือ

$$\frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z}, \frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x}, \frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \quad (2.5ข)$$

สมการของแมกซ์เวลจะถูกนำมาพิจารณาในตัวกลางที่ไม่ใช่ตัวนำซึ่งมีค่าสภาพยอมสนามไฟฟ้า (Permissibility) และค่าความซึมซาบได้สนามแม่เหล็ก (permeability) โดยใช้สมการปรุงแต่ง (Constitutive Equations) ที่ใช้สำหรับตัวกลาง $\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$, $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$ และ $\mathbf{J} = s\mathbf{E}$ โดยที่ s คือ ค่าความนำ (Conductivity) และในกรณีที่ $s = 0$ จะทำให้ $\mathbf{J} = 0$, $\nabla \cdot D = 0$ และ $\nabla \cdot B = 0$ เมื่อกลับไปพิจารณาที่สมการ (2.1) และ (2.2) จะได้

$$\nabla \times E = -\mu \frac{\partial H}{\partial t} \quad (2.6)$$

และ

$$\nabla \times H = \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} \quad (2.7)$$

ดังนั้น

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} = \varepsilon \frac{\partial E_x}{\partial t} \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} = \varepsilon \frac{\partial E_y}{\partial t} \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = \varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial t} \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} = -\mu \frac{\partial H_x}{\partial t} \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} = -\mu \frac{\partial H_y}{\partial t} \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} = -\mu \frac{\partial H_z}{\partial t} \quad (2.13)$$

จากโครงสร้างของท่อนำคลื่น ซึ่งเกิดจากตัวนำที่เป็นโลหะทำหน้าที่เป็นผิวของขอบเขตที่ล้อมรอบพื้นที่ว่างซึ่งเป็นไดอิเล็กตริก จะทำให้เกิดเงื่อนไขขอบเขตซึ่งต้องสอดคล้องกับผลเฉลยของสมการที่กล่าวไปแล้วด้วย และในกรณีที่เป็นตัวนำสมบูรณ์จะเกิดเงื่อนไขที่ว่า องค์ประกอบ

ของสนามไฟฟ้าที่อยู่ภายในไดอิเล็กตริกและอยู่ในแนวที่สัมผัสกับผิวของของขอบเขตจะมีค่าเป็นศูนย์

สนามที่เกิดขึ้นภายในขอบเขตจะแปรตามเวลา ซึ่งเป็นไปตามตัวประกอบ $e^{j\omega t}$ โดยที่ $\omega = 2\pi f$ และ f คือ ความถี่ ซึ่งโดยทั่วไปมักจะไม่ได้แสดงในสมการของสนาม แต่จะอธิบายไว้ภายนอก และจากเงื่อนไขขอบเขตจากโครงสร้างของท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมมุมฉากในรูปที่ 1 ซึ่งภายในถูกเติมด้วยไดอิเล็กตริก จะสามารถพิจารณาสมการ (2.8)-(2.13) ใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} + \gamma H_y = j\omega \epsilon E_x \quad (2.14)$$

$$-\gamma H_x - \frac{\partial H_z}{\partial x} = j\omega \epsilon E_y \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = j\omega \epsilon E_z \quad (2.16)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} + \gamma E_y = -j\omega \mu H_x \quad (2.17)$$

$$-\gamma E_x - \frac{\partial E_z}{\partial x} = -j\omega \mu H_y \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} = -j\omega \mu H_z \quad (2.19)$$

จากสมการ (2.14) และ (2.18) เมื่อกำจัด H_y ออกไป จะได้

$$k^2 E_x = -j\omega \mu \frac{\partial H_z}{\partial y} - \gamma \frac{\partial E_z}{\partial x} \quad (2.20)$$

โดยที่

$$k^2 = \omega^2 \epsilon \mu + \gamma^2 \quad (2.21)$$

จากสมการ (2.15) และ (2.17) เมื่อกำจัด H_x ออกไป จะได้

$$k^2 E_y = -j\omega\mu \frac{\partial H_z}{\partial x} - \gamma \frac{\partial E_z}{\partial y} \quad (2.22)$$

จากสมการ (2.15) และ (2.17) เมื่อกำจัด E_y ออกไป จะได้

$$k^2 H_x = -j\omega\varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial y} - \gamma \frac{\partial H_z}{\partial x} \quad (2.23)$$

จากสมการ (2.14) และ (2.18) เมื่อกำจัด E_x ออกไป จะได้

$$k^2 H_y = -j\omega\varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial x} - \gamma \frac{\partial H_z}{\partial y} \quad (2.24)$$

เมื่อแทนค่าของ E_x , E_y , H_x และ H_y จากสมการ (2.20)-(2.24) ลงในสมการ (2.16) และ (2.19) จะได้

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial y^2} + k^2 E_z = 0 \quad (2.25)$$

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_z}{\partial y^2} + k^2 H_z = 0 \quad (2.26)$$

สมการทั้งสองเป็นสมการเชิงเส้นที่เป็นอิสระจากกันในรูปแบบของ E_z และ H_z ซึ่งเขียนในรูปแบบของ

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + k^2 \varphi = 0 \quad (2.27)$$

ดังนั้นในการวิเคราะห์จึงสามารถแบ่งได้ออกเป็น 2 ส่วน คือ

$$\left. \begin{array}{l} 1. H_z = 0, E_z \\ 2. E_z = 0, H_z \end{array} \right\} \text{เป็นผลเฉลยหนึ่งของสมการ (2.27)}$$

จากสมการของสนามดังกล่าวจะเป็นนิยามที่ใช้อธิบายพื้นฐานของคลื่น 2 ชนิด ที่สามารถแพร่กระจายออกไปในท่อนำคลื่น โดยถูกเรียกว่าโหมดของการแพร่กระจายคลื่น ได้แก่

โหมดสนามแม่เหล็กตามขวาง (Transverse Magnetic Mode : *TM-Mode*)

“สนามแม่เหล็กจะอยู่ในระนาบที่ตั้งฉากกับทิศทางของการแพร่กระจายคลื่น แต่จะมีสนามไฟฟ้าอยู่ในทิศทางเดียวกับทิศทางของการแพร่กระจายคลื่น” [3]

โหมดสนามไฟฟ้าตามขวาง (Transverse Electric Mode : *TE-Mode*)

“สนามไฟฟ้าจะอยู่ในระนาบที่ตั้งฉากกับทิศทางของการแพร่กระจายคลื่น แต่จะมีสนามแม่เหล็กอยู่ในทิศทางเดียวกับทิศทางของการแพร่กระจายคลื่น”

ผลเฉลยทั่วไปของสมการคลื่น จะเป็นการรวมกันแบบเชิงเส้น (Linear Combination) ของของคลื่นสองชนิด ซึ่งผลเฉลยทั่วไปที่ได้จากสมการ (27) สามารถเขียนได้ในรูปของ

$$\varphi = \frac{\sin}{\cos} \left\{ (k_1 x) \frac{\sin}{\cos} \right\} (k_2 y) \quad (2.28)$$

ขณะที่ $k_1^2 + k_2^2 = k^2$ ซึ่งขั้นตอนต่อไปสามารถนำไปใช้เพื่อพิจารณาชนิดของคลื่นทั้งสองชนิด (TE หรือ TM) ได้

2.2.1 คลื่นสนามแม่เหล็กตามขวาง (Transverse Magnetic Wave)

สมการของสนาม E_z จะเท่ากับ

$$E_z = E_0 \sin(k_1 x) \sin(k_2 y) e^{-\gamma z} \quad (2.29)$$

โดยที่ E_0 คือค่าคงที่ใดๆ ส่วนผลเฉลยที่เป็นฟังก์ชัน cosine จะตัดออกไป เนื่องจากเป็นเทอมของสนาม E_z และสนามที่มีการสัมผัสกับผนังของขอบเขตที่ $x = 0$ และ $y = 0$ จะต้องมีค่าเป็นศูนย์ ส่วนผนังของขอบเขตที่ $x = a$ และ $y = b$ จะถูกเขียนอยู่ในเงื่อนไข

$$\sin(k_1 a) = 0 \quad \sin(k_2 b) = 0$$

ซึ่งจะทำให้ $k_1 a = m\pi$ และ $k_2 b = n\pi$ โดยที่ m และ n จะเป็นตัวเลขจำนวนเต็มบวก ดังนั้น

$$k^2 = \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 \quad (2.30)$$

และจากสมการ (21) จะทำให้ได้

$$\gamma^2 = \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 - \left(\frac{\omega}{v}\right)^2 \quad (2.31)$$

ขณะที่ $v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}}$ คือ ความเร็วของคลื่นระนาบที่อยู่ในตัวกลางที่ไม่มีสิ่งใดล้อมรอบ จากสมการ (2.31) เป็นการแสดงให้เห็นจำนวนของโหมดที่เป็นอนันต์ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับจำนวนของ m และ n แต่อย่างไรก็ตามจะมีเพียงจำนวนหนึ่งเท่านั้นที่จะทำให้เกิดโหมดของการส่ง (Transmission Modes) ได้ เนื่องจากในกรณีนี้ ค่าของ γ จะมีค่าจินตภาพเพียงอย่างเดียว และจะต้องมีความถี่สูงเพียงพอที่จะทำให้อยู่ในเงื่อนไขต่อไปนี้เกิดขึ้นได้

$$\frac{\omega}{v} > \left[\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.32)$$

ในกรณีที่ $\gamma = \alpha + j\beta$ จากเงื่อนไขในสมการ (32) จะได้

$$\alpha = 0, \beta = \left[\left(\frac{\omega}{v}\right)^2 - \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.33)$$

ดังนั้นความยาวคลื่นภายในท่อนำคลื่น $\lambda_g = \beta / 2\pi$ จะเท่ากับ

$$\lambda_g = \left[\frac{1}{\lambda^2} - \left(\frac{m}{2a}\right)^2 - \left(\frac{n}{2b}\right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.34)$$

โดยที่ λ คือ ความยาวคลื่นที่อยู่ในตัวกลางที่ไม่มีสิ่งใดล้อมรอบ ถ้าเครื่องหมายในสมการ (32) เป็นเครื่องหมายเท่ากับ จะทำให้เกิดค่า ความถี่วิกฤตหรือค่าความถี่ตัด (Critical or Cut-off Frequency : f_c) ซึ่งเป็นการกำหนดขอบเขตระหว่างบริเวณการส่งและการลดทอน (Transmission and Attenuation Regions) ดังนั้นท่อนำคลื่นจึงมีพฤติกรรมเสมือนวงจรกรองผ่านสูง (High-Pass Filter) เนื่องจากความถี่ที่ผ่านท่อนำคลื่นออกไปได้จะต้องมีความถี่สูงกว่า f_c ซึ่งทำให้ $\alpha = 0$ แต่ถ้าความถี่ต่ำกว่า f_c จะทำให้ α มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ และคลื่นเกิดการลดทอนลง

อย่างรวดเร็วในลักษณะของเอกซ์โพเนนเชียล สำหรับความยาวคลื่นวิกฤต (Critical Wavelength) สามารถหาได้จาก

$$\lambda_c = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}} \quad (2.35)$$

2.3 หลักการปรับอิมพีแดนซ์ของคลื่นแบบใช้สกรู 3 ตัว (Three Screws Method)

เนื่องจากท่อนำคลื่นที่ทำขึ้นมาเมื่อนำมาทดสอบที่เครื่อง Network Analyzer แล้ว ท่อนำคลื่นยังไม่มีการแมตช์ ดังนั้นจึงต้องมีวิธีที่จะปรับท่อนำคลื่นให้เกิดการแมตช์โดยใช้วิธีติดตั้งสกรูเพิ่มที่ตำแหน่งของท่อนำคลื่น ซึ่งมีหลักการดังนี้

ระยะห่างของสกรูตัวแรกกับตำแหน่งโพรบยาวเท่ากับความยาวของความยาวคลื่น และระยะห่างระหว่างสกรูแต่ละตัวยาว $\frac{3}{8}\lambda$ เป็นต้น [4]

2.4 สรุป

จากบทนี้ได้นำความรู้ในด้านส่วนกำเนิดคลื่น (Magnetron), หลักการของท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมมุมฉาก (Rectangular Waveguide), หลักการของท่อนำคลื่นที่ปรับค่าได้ (Three Screws Method) มาใช้ในการทำเครื่องเครื่องส่งความถี่วิทยุ 2.45 GHz กำลังงานสูง โดย ใช้สมการของแมกซ์เวลล์ในการคำนวณหาค่าต่างๆ ซึ่งจะได้กล่าวในบทต่อไป

บทที่ 3

การออกแบบและสร้างเครื่องส่งความถี่วิทยุ

การออกแบบเครื่องส่งความถี่โดยใช้คลื่นไมโครเวฟเพื่อให้ได้ความถี่และกำลังงานตามต้องการนั้นจะต้องทราบเงื่อนไขที่เหมาะสม เช่น กำลังของคลื่นไมโครเวฟ การถ่ายเทความร้อน ภายในเครื่องส่ง และการออกแบบท่อนำสัญญาณเป็นต้น จึงได้ออกแบบเครื่องส่งความถี่ 2.45 GHz กำลังส่งสูง ซึ่งประกอบด้วยส่วนหลักๆ คือ ส่วนท่อนำคลื่นหรือโพรง ผลการวัดการเรโซแนนซ์ของโพรงและการติดตั้งอุปกรณ์ วงจรไฟฟ้าสำหรับหลอดแมกนีตรอน

3.1 การออกแบบวงจรเชื่อมต่อโดยใช้โพรง (Cavity)

โดยส่วนใหญ่ท่อนำคลื่นและอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้กันอยู่ในอุตสาหกรรมจะเป็นอคูมิเนียมเพราะมีข้อดีคือไม่เกิดสนิมและค่าอัตราการลดทอนมีค่าต่ำ ดังแสดงในตารางที่ 3.1 ซึ่งค่าอัตราการลดทอนเป็นตัวบอกลึค่าการสูญเสียที่บริเวณผิวของโลหะ [5] สามารถพิจารณาได้ตามสมการที่ 3.1 α_c คือค่าอัตราการลดทอน (dB/m)

$$\alpha_c = \frac{1}{\eta b} \left[\frac{\pi f \mu}{\sigma \left[1 - \left(\frac{f_c}{f} \right)^2 \right]} \right]^{\frac{1}{2}} \left[1 + \frac{2b}{a} \left(\frac{f_c}{f} \right)^2 \right] \quad (3.1)$$

η คือค่า Intrinsic impedance ของวัสดุไดอิเล็กตริก

a และ b คือค่าความกว้างและความสูงของท่อนำคลื่น

σ คือค่าสภาพนำไฟฟ้า

f_c คือความถี่ Cut-off

ตารางที่ 3.1 ค่าการลดทอน (Attenuation) และ ค่าการสูญเสียกำลังงาน (Power loss) ของโลหะชนิดต่างๆ ที่ความถี่ 2.45 GHz

Parameter	WG size (mm)	Cu	Al	Stainless steel
σ (mho / m)	n/a	5.5×10^7	3.0×10^7	1.4×10^6
α_c	86×43	2.28E-2	3.09E-2	1.43E-1
Power loss, Watts per Metre at 25 kW	86×43	132	178	837

จากเหตุผลข้างต้นและการคำนวณ ซึ่งความถี่ต่ำสุดของคลื่นไมโครเวฟ (Cut-off frequency, f_c) ที่สามารถส่งผ่านไปตามท่อนำคลื่นแบบนี้ได้นั้น สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$f = 2.45 \text{ GHz}$$

; ความถี่ที่นำไปใช้งาน

$$\rho = 0.37 \times 10^8$$

; ความนำไฟฟ้า

$$f_c = \frac{3 \times 10^8}{2a}$$

; ความถี่ตัด

$$b = \frac{a}{2}$$

; ความสูงของท่อนำคลื่น

$$(f_r)_{101}^{TE} = \frac{3 \times 10^8}{2} \sqrt{\left(\frac{1}{a}\right)^2 + \left(\frac{1}{c}\right)^2}$$

; ใช้โหมด TE₁₀₁

$$Q_{101}^{TE} = \frac{\pi\eta}{2R_s} \left[\frac{b(a^2 + c^2)^{3/2}}{ac(a^2 + c^2) + 2b(a^3 + c^3)} \right]$$

; สูตรการหาคุณภาพของโพรง

$$R_s = \sqrt{\frac{\omega_r \mu}{2\sigma}}$$

; ความต้านทานของอิมพีแดนซ์

$$= \sqrt{\frac{2\pi(2.45 \times 10^9) \times (4\pi \times 10^{-7})}{2(0.37 \times 10^8)}} = 2.7 \times 10^{-8} \text{ โอห์ม}$$

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}}$$

; สูตรหาความลึกผิว

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} = \sqrt{\frac{2}{2\pi(2.45 \times 10^9) \times (4\pi \times 10^{-7}) \times (0.37 \times 10^8)}}$$

$$= 1.67 \times 10^{-6} \text{ m}$$

$$= 1.67 \times 10^{-4} \text{ cm} \text{ ต้องใช้ความหนาของอลูมิเนียมอย่างน้อย } = 1.67 \times 10^{-4} \text{ cm}$$

หาความถี่ตัดที่ทำให้ประสิทธิภาพสูงสุดโดยใช้โปรแกรม MATLAB

```

fr=2.45e9;           ; ความถี่ที่ใช้งาน
n=377;              ; Intrinsic impedance ของวัสดุไดอิเล็กตริกใน
                    ; อากาศ
Rs=2.7e-8;          ; ความต้านทานของอลูมิเนียม
fc=2.20x10^9        ; ความถี่ตัด
a=(3e8/(2*fc));     ; ความกว้างของท่อนำคลื่น
b=a/2;              ; ความสูงของท่อนำคลื่น
c1=4*(fr^2);
c2=(3e8)^2;
c3=c1/c2;
c4=1/(a^2);
c5=c3-c4;
c6=sqrt(c5);
c=1/c6;
q1=(a^2)+(c^2);
q2=b*(q1^(3/2));
q3=a*c*q1;
q4=(a^3)+(c^3);
q5=2*b*q4;
q6=q3+q5;
q7=(pi*n)/(2*Rs);
Q=q7*(q2/q6)        ; ค่าที่แสดงถึงคุณภาพ

```

ตารางที่ 3.2 ผลเฉลยจากโปรแกรม MATLAB

ความถี่	ผลจากโปรแกรม	ความถี่	ผลจากโปรแกรม
2.00GHz	$Q=1.1417 \times 10^6$ $a=0.075$ m $b=0.0375$ m $c=0.106$ m	2.25GHz	$Q=1.0103 \times 10^6$ $a=0.0667$ m $b=0.033$ m $c=0.1547$ m
2.05GHz	$Q=1.1174 \times 10^6$ $a=0.0732$ m $b=0.0336$ m $c=0.1118$ m	2.30GHz	$Q=9.8119 \times 10^5$ $a=0.0652$ m $b=0.0326$ m $c=0.1777$ m
2.10GHz	$Q=1.0921 \times 10^6$ $a=0.0714$ m $b=0.0357$ m $c=0.1189$ m	2.35GHz	$Q=9.5105 \times 10^5$ $a=0.0638$ m $b=0.0319$ m $c=0.2165$ m
2.15GHz	$Q=1.0658 \times 10^6$ $a=0.0698$ m $b=0.0349$ m $c=0.1277$ m	2.40GHz	$Q=9.1975 \times 10^5$ $a=0.0625$ m $b=0.0313$ m $c=0.3046$ m
2.20GHz	$Q=1.0385 \times 10^6$ $a=0.0628$ m $b=0.0341$ m $c=0.1391$ m	2.45GHz	$Q=\text{NaN}$ $a=0.0612$ m $b=0.0306$ m $c=\infty$

จากตารางที่ 3.2 ความถี่ที่ดีที่สุดที่ทำให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดคือ 2.00 GHz

ความถี่ 2.45GHz มีประสิทธิภาพร้อยละ 100

ความถี่ 2.00GHz มีประสิทธิภาพร้อยละ $\frac{2.00\text{GHz} \times 100}{2.45\text{GHz}} =$ ร้อยละ 81.63

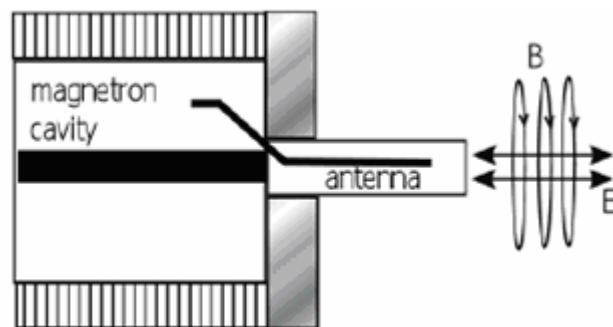
จะได้ขนาดของโพรง (Cavity)

กว้าง $a = 7.5$ เซนติเมตร

สูง $b = 3.75$ เซนติเมตร

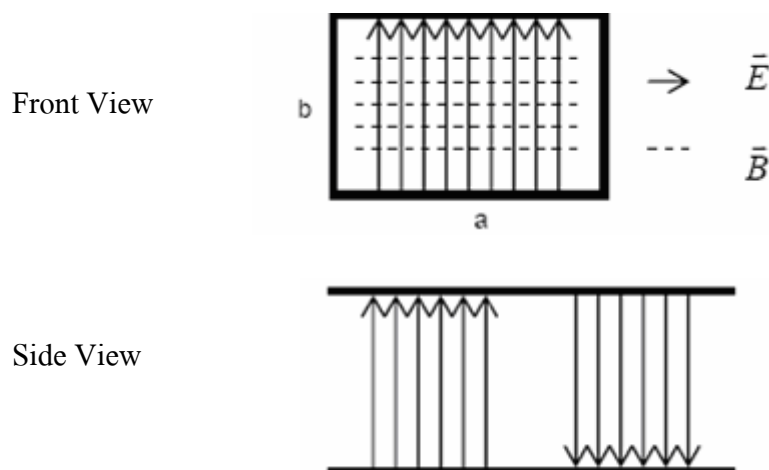
และยาว $c = 10.6$ เซนติเมตร

ซึ่งในท้องตลาดมีท่อลูมิเนียมขนาดหน้าตัดกว้าง 7.5 เซนติเมตร ยาว 11 เซนติเมตรและสูง 4.0 เซนติเมตร หน้า 1 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นขนาดมาตรฐานจำหน่ายอยู่แล้ว จึงสามารถนำมาใช้เป็นท่อนำคลื่นได้ จากเหตุผลทั้งหมดดังที่กล่าวมาทำให้เลือกใช้ลูมิเนียมเป็นวัสดุหลักของ ท่อนำคลื่น และ เครื่องส่งความถี่วิทยุและสร้างท่อนำคลื่นเนื่องจากการทดลองนี้ได้ใช้แม็กนีตรอนที่มีในเตาอบไมโครเวฟเป็นตัวกำเนิดคลื่นไมโครเวฟดังนั้นคลื่นที่ถูกส่งออกมาจากสายอากาศ (Antenna) ที่ปลายของแม็กนีตรอนจะมีลักษณะ ดังแสดงในรูปที่ 3.1



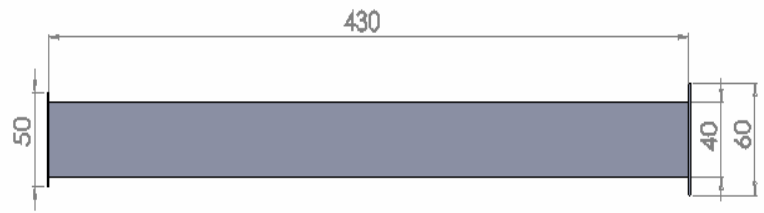
รูปที่ 3.1 ลักษณะคลื่นไมโครเวฟที่ถูกส่งออกมาจากสายอากาศที่ปลายแม็กนีตรอน

เมื่อส่งคลื่นไมโครเวฟดังกล่าวผ่านท่อนำคลื่นรูปสี่เหลี่ยม (Rectangular waveguide) โดยเลือกโหมดของการส่งให้เป็น TE_{10} จะได้คลื่นภายในท่อนำคลื่น มีลักษณะดังรูปที่ 3.2



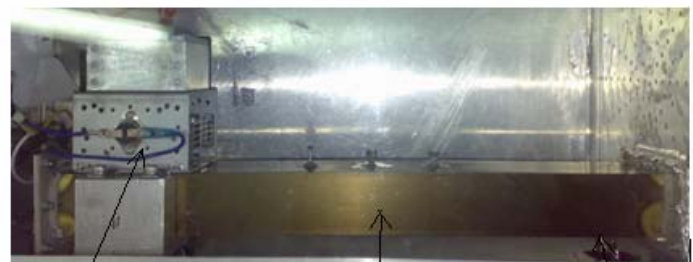
รูปที่ 3.2 ลักษณะของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของโหมด TE_{10}

ภาพการออกแบบมีดังนี้



ก) ลักษณะสามมิติของท่อนำคลื่น

ข) ภาพด้านหน้าของท่อนำคลื่น



แมกนีตรอน

โพรง

โพรบ

ค) ภาพด้านบนของท่อนำคลื่น

ง) ภาพแสดงการเชื่อมต่ออุปกรณ์เข้ากับโพรง

รูปที่ 3.3 ขนาดของท่อนำคลื่นที่ออกแบบโดยใช้โปรแกรม Solid Work

3.2 ผลการวัดการเรโซแนนซ์ของโพรง

เนื่องจากท่อนำคลื่นที่ออกแบบมายังไม่เกิดการแมตซ์ตรงตามความถี่ที่ต้องการ ผู้ออกแบบจึงนำวิธีการติดตั้งสกรูมาปรับค่าเพื่อให้เกิดการแมตซ์ที่ค่าต่างๆ ตามทฤษฎี

โดยเลือกใช้ $f_c = 2.00\text{GHz}$
 $a = 7.5\text{cm}$
 $b = 3.75\text{cm}$
 $c = 10.6\text{cm}$

จาก $v = f\lambda$

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

$$= \frac{3 \times 10^8}{2.45 \times 10^9}$$

$$= 0.1124\text{m}$$

$$= 12.24\text{cm}$$

จากค่าความยาวคลื่นที่ได้ 122.4 มิลลิเมตร ทำให้ทราบวาระยะห่างระหว่างโพรงถึงสกรูตัวแรก เท่ากับ 122.4 มิลลิเมตร

จาก $\frac{\lambda}{4} = \frac{12.24\text{cm}}{4} = 3.06\text{cm}$

ดังนั้น ระยะจากปลายท่อถึงโพรงยาว 30.6 มิลลิเมตร

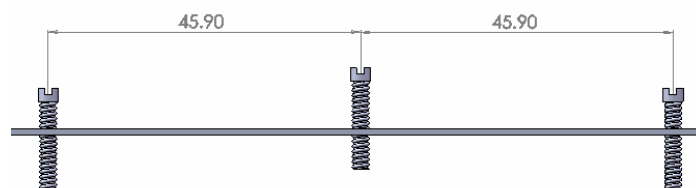
คำนวณหาระยะห่างของสกรูแต่ละตัวจาก

จาก $\frac{3}{8}\lambda_g = \frac{3}{8} \times 12.24\text{cm}$

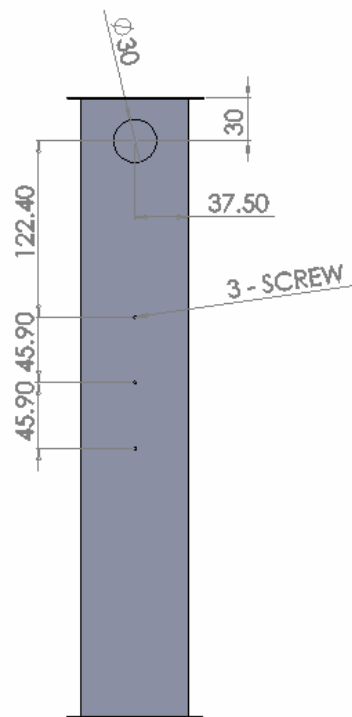
$$= 4.59\text{cm}$$

จะได้ระยะห่างของสกรูแต่ละตัว 45.9 มิลลิเมตร

ดังรูป

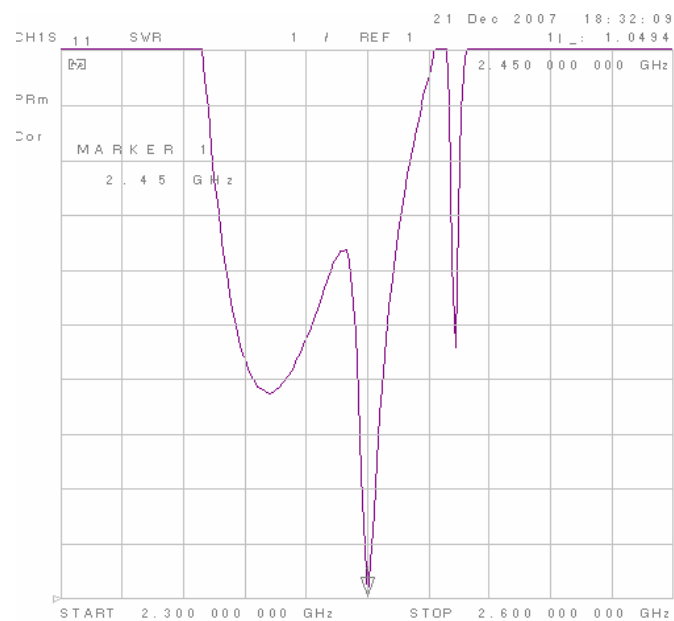


รูปที่ 3.4 ภาพแสดงระยะห่างระหว่างสกรูทั้ง 3 ตัว

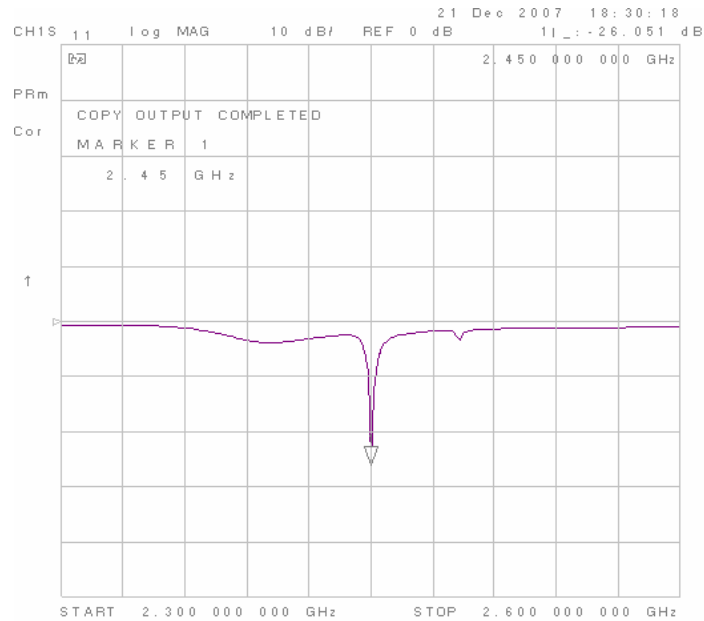


รูปที่ 3.5 ภาพแสดงการติดตั้งสกรูที่ท่อนำคลื่น

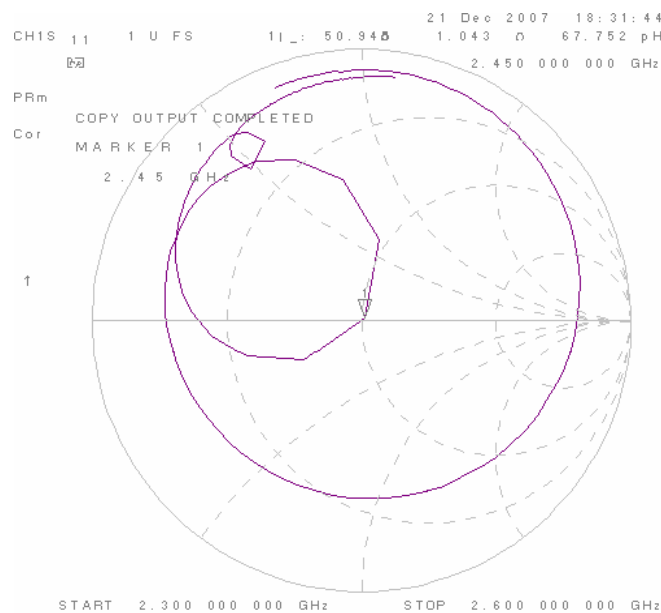
จากการออกแบบ โพรงที่ได้ต้องมีค่า SWR ค่าอิมพีแดนซ์ และค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน S_{11} ที่วัดที่ความถี่ 2.45 GHz ดังนี้



รูปที่ 3.6 ค่า SWR ของท่อนำคลื่นที่ความถี่ 2.45 GHz



รูปที่ 3.7 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน S_{11} ของท่อนำคลื่นที่ความถี่ 2.45 GHz

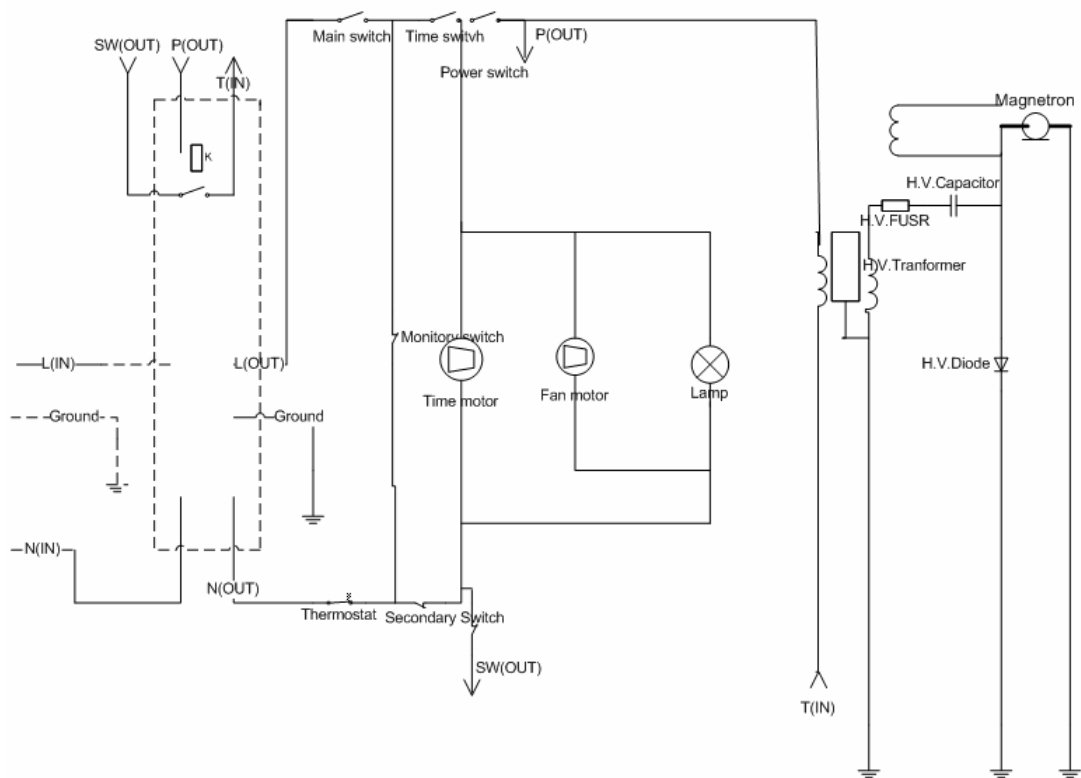


รูปที่ 3.8 ค่าอิมพีแดนซ์ของท่อนำคลื่นที่ความถี่ 2.45 GHz

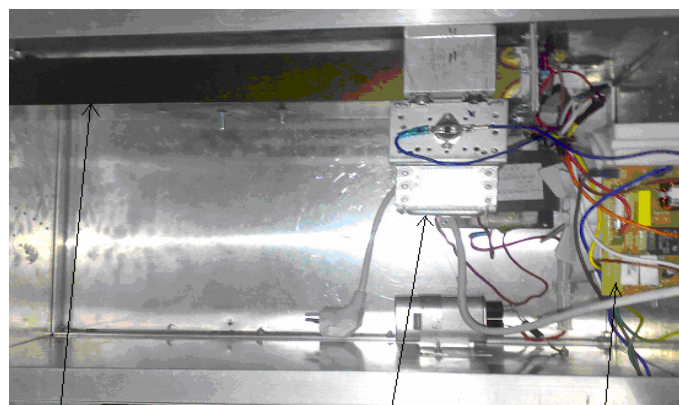
จากรูปที่ 3.6, 3.7 และ 3.8 จะเห็นว่าที่ความถี่ 2.45 GHz เมื่อพิจารณาในโหมด SWR จะได้ค่า 1.0494 ซึ่งมีค่าไม่เกิน 1.4 แสดงว่าสามารถนำไปใช้งานได้ เมื่อเปลี่ยนไปพิจารณาในโหมดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน S_{11} ได้ -26.051 dB ซึ่งมีค่าต่ำกว่า -10 dB มาก และเมื่อพิจารณาในโหมดอิมพีแดนซ์จะได้ค่าที่ $50.94 + j1.043$ โอห์ม ซึ่งมีค่าใกล้เคียง 50 โอห์มมาก แสดงว่าท่อนำคลื่นนี้สามารถนำไปใช้งานที่ความถี่นี้ได้เนื่องจากเกิดการแมตช์

3.3 การติดตั้งอุปกรณ์และวงจรไฟฟ้าสำหรับหลอดแมกนีตรอน

เนื่องจากเครื่องส่งความถี่วิทยุต้องใช้อุปกรณ์ในการประกอบเครื่องส่งหลายอย่าง เช่น วงจรไฟฟ้าของตัวกำเนิดความถี่ วงจรจ่ายแรงดัน วงจรพัลลวม วงจรตัดเวลา และอื่นๆ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องจัดสัดส่วนของวงจรเหล่านี้ให้เหมาะสมกับลักษณะการใช้งาน ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 วงจรไฟฟ้าของเครื่องส่งความถี่วิทยุ 2.45 GHz



ห้องนำคลื่น (cavity)

แมกนีตรอน (magnetron)

วงจร (circuit)

รูปที่ 3.10 การติดตั้งอุปกรณ์และวงจรไฟฟ้าภายในกล่อง



รูปที่ 3.11 รูปด้านหน้าของตัวเครื่องส่งความถี่วิทยุ 2.45 GHz

3.4 สรุป

การออกแบบเครื่องส่งความถี่โดยใช้คลื่นไมโครเวฟเพื่อให้ได้ความถี่และกำลังงานตามต้องการนั้นมีเงื่อนไขที่เหมาะสม ดังนี้ คือ ใช้ลูมิเนียมในการออกแบบโพรงเพราะไม่เกิดสนิมและอัตราการลดทอนต่ำ เกิดการสูญเสียที่บริเวณผิวน้อย ซึ่งปรับการแมตซ์ของโพรงโดยใช้วิธีของท่อนำคลื่นที่ปรับค่าได้ ติดตั้งสกรูที่ตำแหน่งของท่อนำคลื่นดังกล่าวข้างต้น ปรับให้เกิดการแมตซ์ให้ได้ตั้งเงื่อนไข 3 กรณี ได้แก่ SWR ค่าอิมพีแดนซ์และค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน S_{11} ส่วนเรื่องการออกแบบติดตั้งอุปกรณ์และวงจรไฟฟ้าภายในเครื่องส่งความถี่นั้นติดตั้งอุปกรณ์วงจรภายในกล่องให้มีความเหมาะสมต่อการใช้งานและความปลอดภัย

บทที่ 4

การทดสอบและผลการทดสอบ

การทดสอบแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ 1.) ทดสอบวัดการแมตซ์ของโพรงกับความถี่ใช้งานจริงอีกครั้งเพื่อให้เกิดการแมตซ์ซึ่งและป้องกันอันตรายขณะทดสอบเนื่องจากกำลังส่งของแหล่งกำเนิดคลื่นมีค่าสูงมาก 2.) ทดสอบวัดการแมตซ์ของสายอากาศเพื่อให้สายอากาศใช้งานร่วมกับโพรงได้และใช้เป็นตัวทดสอบเครื่องส่งความถี่วิทยุด้วยและสุดท้าย 3.) ทดสอบวัดแรงดันและกำลังส่งเพื่อให้ส่งได้ที่กำลังสูงสุดไม่ต่ำกว่า 700 วัตต์ ตามวัตถุประสงค์ต่อไป

4.1 ทดสอบวัดการแมตซ์ของโพรง

เนื่องจากค่าตามทฤษฎีผลการวัดจะต้องออกมาที่ความถี่ 2.45 GHz แต่ค่าที่วัดได้จริงนั้นวัดได้ที่ความถี่ 2.462 GHz จึงต้องทำการวัดอีกครั้งโดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer)



รูปที่ 4.1 แสดงการเชื่อมต่อระหว่างโพรงกับเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย

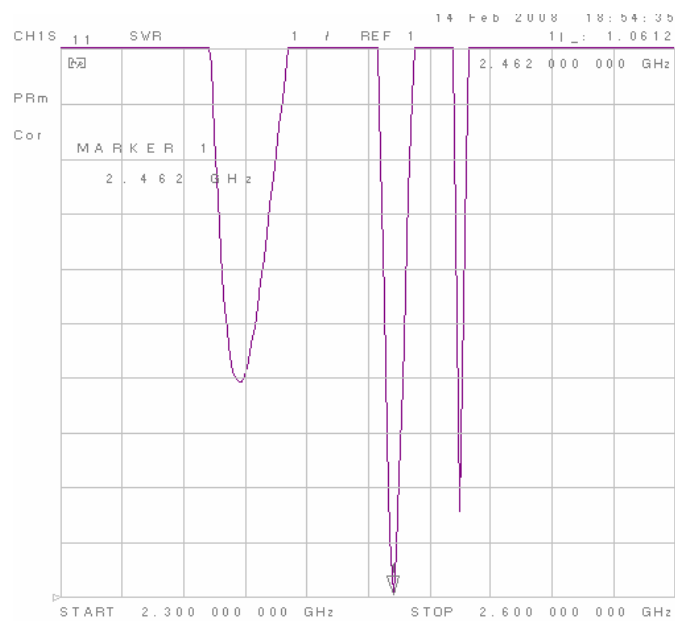
ซึ่งมีขั้นตอนการวัดดังนี้

1. ปรับโหมดการวัดที่ S_{11} โดยทำการปรับเทียบหนึ่งพอร์ต (Calibrate one port) ที่ความถี่ 2.462 GHz
2. ปรับโพรงให้เกิดการแมตซ์ โดยปรับที่สกรูทั้งสามตัว

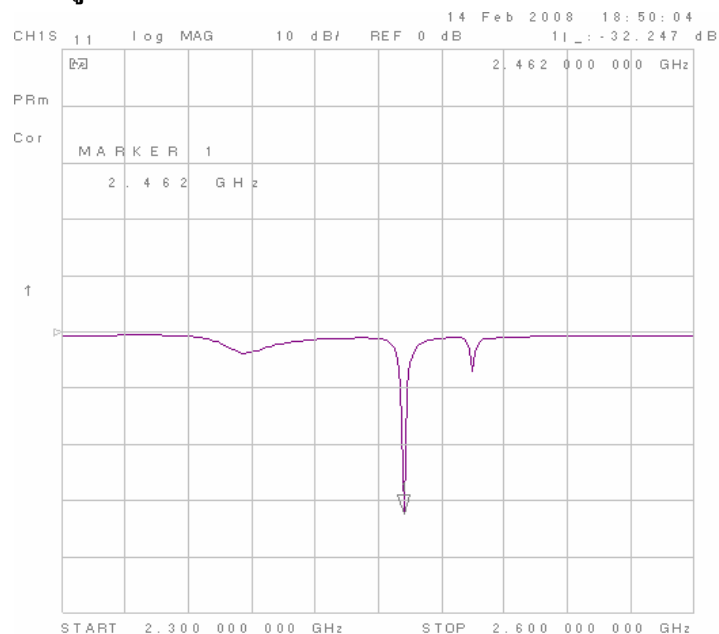
3. เมื่อเกิดการแมตซ์แล้วให้หยุดหมุนและใส่กาวอพอกซ์เพื่อป้องกันการเกิดประกายไฟฟ้า (arc) ในขณะที่ทดลองเพราะแหล่งกำเนิดคลื่นมีกำลังสูงมากอาจเป็นอันตรายได้

4.1.1 ผลการทดสอบ

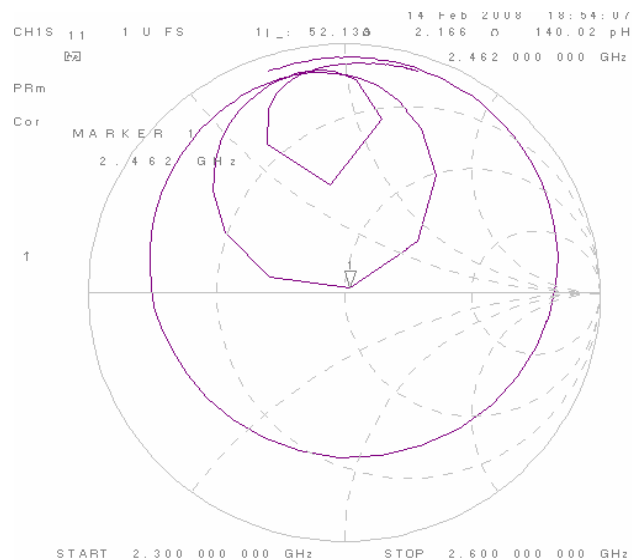
ทำการทดลองที่ความถี่ 2.462 GHz โดยปรับโหมคการวัดไปที่ค่า SWR ใช้ S_{11} ปรับ สกรูจนได้ค่า SWR 1.0412 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน S_{11} ได้ค่า -32.247 dB และได้ค่า อิมพีแดนซ์ $50.13 + j2.166$ โอห์ม ดังรูปที่ 4.2, 4.3 และ 4.4



รูปที่ 4.2 ค่า SWR ของท่อนำคลื่นที่ความถี่ 2.462 GHz



รูปที่ 4.3 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน S_{11} ของท่อนำคลื่นที่ความถี่ 2.462 GHz



รูปที่ 4.4 ค่าอิมพีแดนซ์ของท่อนำคลื่นที่ความถี่ 2.462 GHz

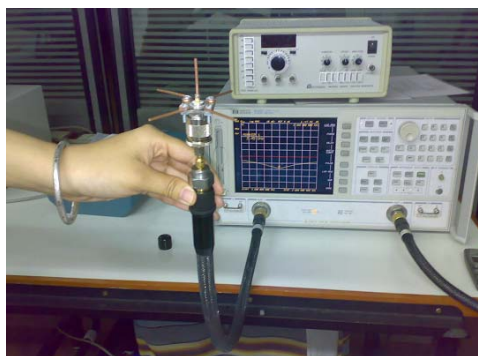
4.1.2 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากการทดสอบวัดการแมตซ์ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน S_{11} ที่ได้มีค่าต่ำกว่า -10 dB มาก ค่าอิมพีแดนซ์ มีค่าใกล้เคียง 50 โอห์ม มากและค่า SWR ได้ค่าใกล้เคียงกับ 1 แสดงว่าโพรงหรือท่อนำคลื่นที่ทดสอบมีความเหมาะสม อัตราการลดทอนน้อยมากซึ่งเป็นผลดีต่อการทดลอง ท่อนำคลื่นเกิดการแมตซ์สามารถนำไปใช้งานได้

4.2 ทดสอบวัดการแมตซ์ของสายอากาศ

วัด โดยใช้ เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) โดยทำการวัดในโหมด S_{11} ทำการปรับเทียบที่ความถี่ 2.462 GHz

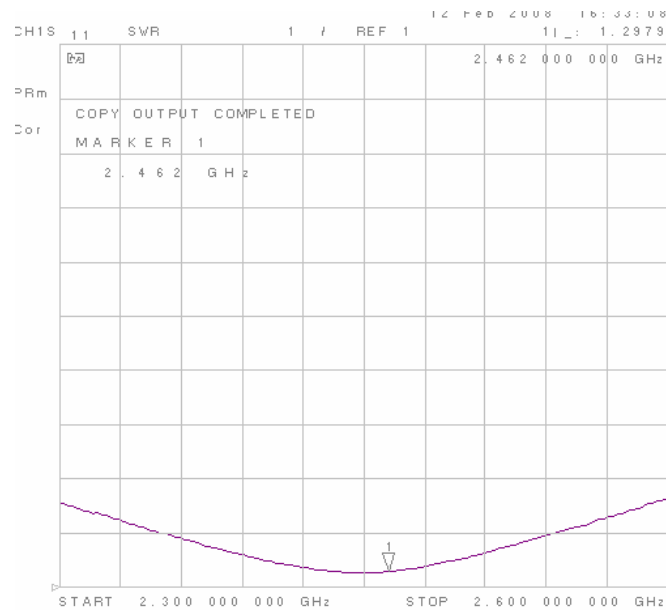
4.2.1 สายอากาศตัวที่ 1



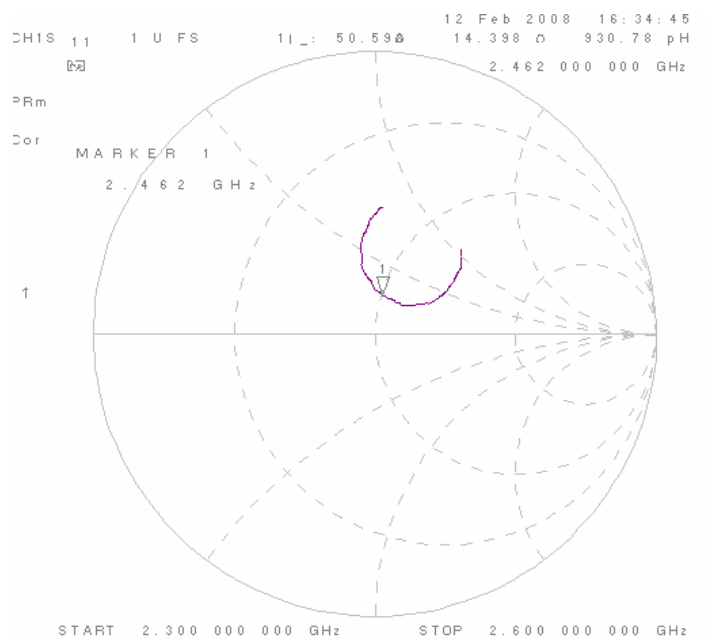
รูปที่ 4.5 แสดงการเชื่อมต่อระหว่างสายอากาศตัวที่ 1 กับเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย

ก) ทดสอบสายอากาศตัวที่ 1

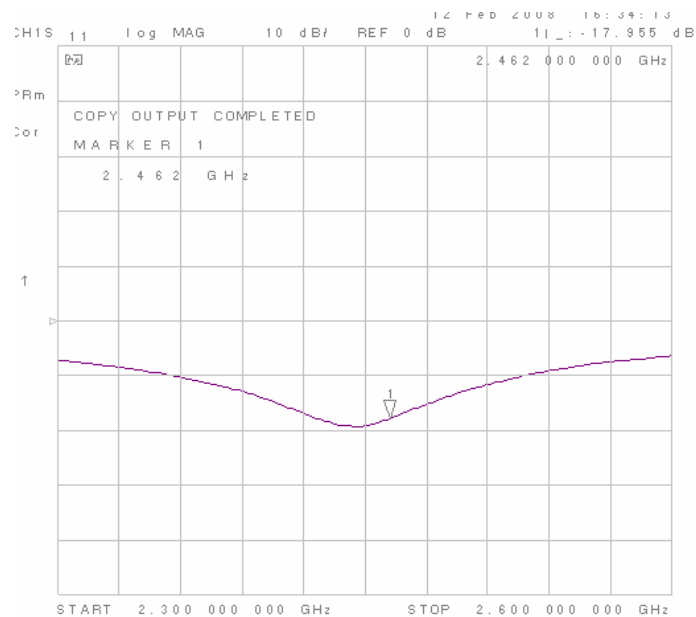
โดยปรับไปที่โหมควัดค่า SWR ทำการปรับสายอากาศจนได้ค่า SWR 1.2979 ค่าอิมพีแดนซ์ $50.9 + j14.398$ โอห์มและค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน S_{11} ได้ -17.955 dB ดังรูปที่ 4.6, 4.7 และ 4.8



รูปที่ 4.6 ค่า SWR ของสายอากาศตัวที่ 1



รูปที่ 4.7 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศตัวที่ 1

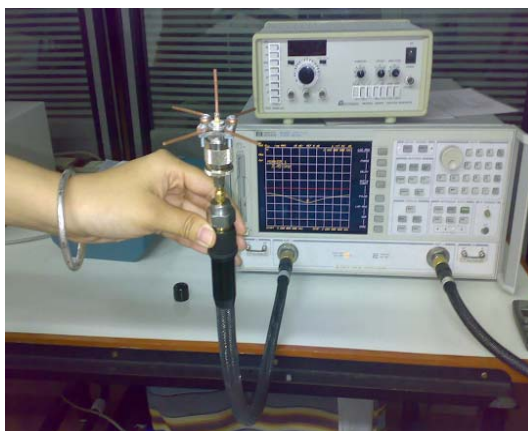


รูปที่ 4.8 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน S_{11} ของสายอากาศตัวที่ 1

ข) วิเคราะห์ผลการทดสอบสายอากาศตัวที่ 1

จากการทดสอบวัดการแมตซ์ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน S_{11} ที่ได้มีค่าต่ำกว่า -10 dB มาก ค่าอิมพีแดนซ์มีค่าใกล้เคียง 50 โอห์มและค่า SWR ได้ค่าใกล้เคียงกับ 1 แสดงว่าโพรงที่ทดสอบมีค่าที่เหมาะสม ท่อนำคลื่นเกิดการแมตซ์สามารถนำไปใช้งานได้

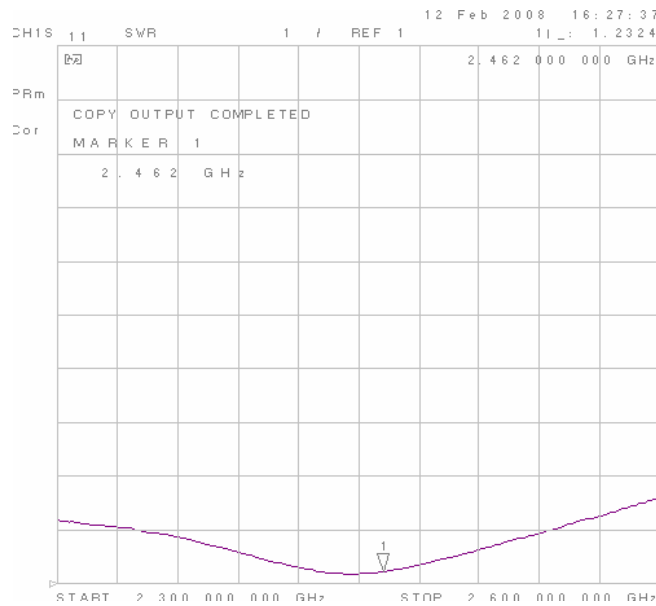
4.2.2 สายอากาศตัวที่ 2



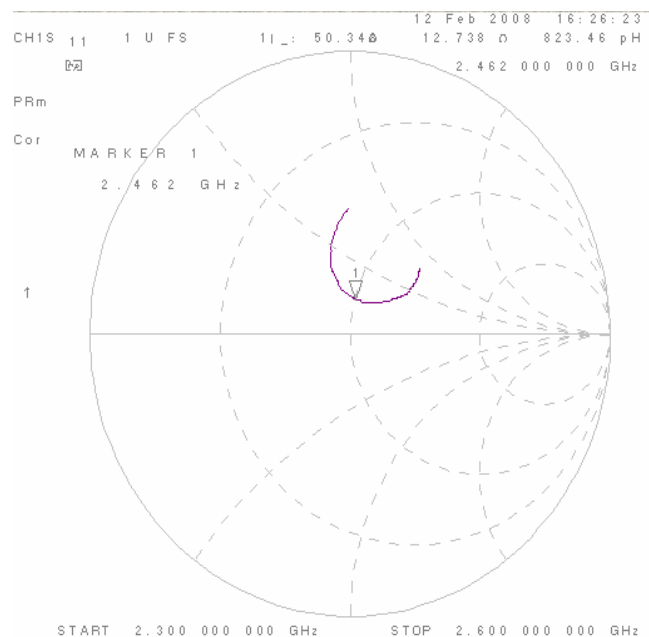
รูปที่ 4.9 แสดงการเชื่อมต่อระหว่างสายอากาศตัวที่ 2 กับเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย

ก) ทดสอบสายอากาศตัวที่ 2

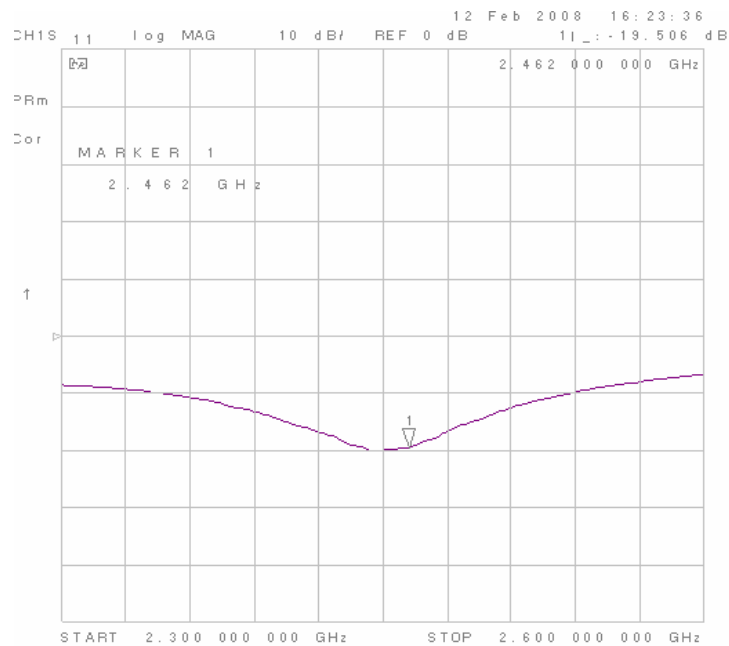
โดยปรับไปที่โหมดวัดค่า SWR ทำการปรับสายอากาศได้ค่า 1.2324 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศได้ค่า $50.34 + j12.728$ โอห์มและค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน S_{11} ได้ค่า -19.506 dB ดังรูปที่ 4.10, 4.11 และ 4.12



รูปที่ 4.10 ค่า SWR ของสายอากาศตัวที่ 2



รูปที่ 4.11 ค่าอิมพีแดนซ์ความต้านทานของสายอากาศตัวที่ 2



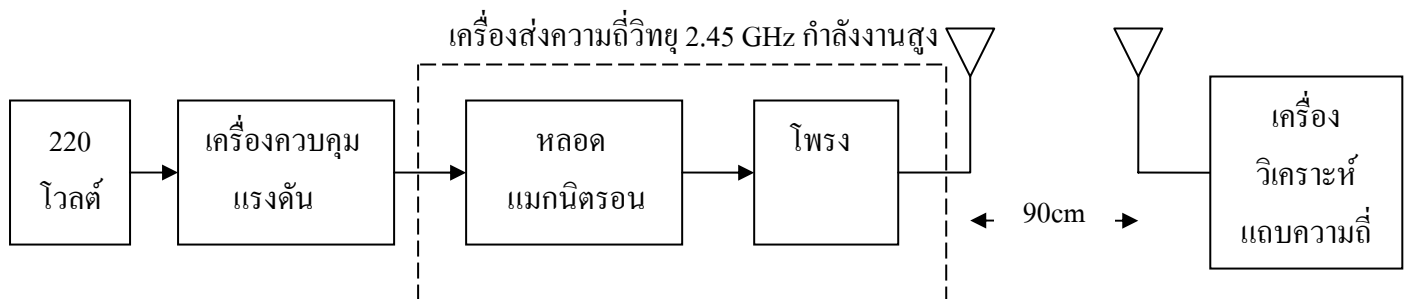
รูปที่ 4.12 ค่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน S_{11} ของสายอากาศตัวที่ 2

ข) วิเคราะห์ผลการทดสอบสายอากาศตัวที่ 2

จากการทดสอบวัดการแมตซ์ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน S_{11} ที่ได้มีค่าน้อยกว่า -10 dB มาก ค่าอิมพีแดนซ์มีค่าใกล้เคียง 50 โอห์มและค่า SWR ได้ค่าใกล้เคียงกับ 1 แสดงว่าโพรงที่ทดสอบมีค่าที่เหมาะสมโพรงเกิดการแมตซ์สามารถนำไปใช้งานได้

4.3 ทดสอบวัดแรงดันและกำลังส่ง

โดยกำหนดให้ค่าแรงดันกระแสลับที่ 200 โวลต์ แล้วปรับระดับของตัวเล็อกมีทั้งหมด 6 ระดับ และวัดหาค่า $P_{r(dBm)}$ เพื่อนำไปคำนวณหา $P_{t(dBm)}$ ตามวัตถุประสงค์ ในการทดสอบวัดแรงดันและกำลังส่งเครื่องส่งความถี่วิทยุมีการจัดอุปกรณ์ของเครื่องมือที่ใช้วัด โดยมีแผนภาพแสดงดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 แผนภาพแสดงการวัดแรงดันเพื่อหากำลังส่งของเครื่องส่งความถี่

4.3.1 การทดสอบมีอุปกรณ์ดังนี้



รูปที่ 4.14 เครื่องควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแบบปรับค่าได้



รูปที่ 4.15 เครื่องวิเคราะห์แถบความถี่ (Spectrum Analyzer)



รูปที่ 4.16 การจัดวางอุปกรณ์เพื่อวัดกำลังงาน โดยผ่านทางสายอากาศส่งและรับ



รูปที่ 4.17 วัดกำลังงานภาครับที่เครื่องวิเคราะห์แถบความถี่

4.3.1 การคำนวณกำลังงาน

การทดสอบเครื่องส่งความถี่ขั้นตอนแรกใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายหาอัตราขยาย (Gain) ของเครื่องส่งในโหมด S_{21} มีขั้นตอนคือใช้สายอากาศตัวส่งและตัวรับต่อเข้ากับเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายโดยกำหนดระยะห่างระหว่างสายอากาศทั้งสองประมาณ 20 เซนติเมตร อ่านค่ากำลังส่งจากเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายได้ -10 dB และอ่านค่ากำลังที่ภาครับได้ -20 dB นำค่าที่ได้จากการทดสอบมาคำนวณหาค่าต่างๆ

$$P_t = -10dB$$

เมื่อ $R = 0.2m$

$$P_r = -20dB$$

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{2.462 \times 10^9} = 0.12m$$

$$G_{0t} = G_{0r} = G$$

จาก

$$P_{r(dB)} - P_{t(dB)} = G_{r(dB)} + G_{t(dB)} + 10 \log \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2$$

จะได้

$$(-20) - (-10) = 2G + 10 \log \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2$$

$$-10 = 2G - 26.42 \quad ; R = 20 \text{ เซนติเมตร}$$

$$2G = 16.42$$

$$\therefore G = 8.21dB$$

เมื่อหาค่าอัตราขยายของเครื่องส่ง 8.21 dB ได้แล้วเราต้องหาค่ากำลังที่ภาครับโดยใช้เครื่องวิเคราะห์แถบความถี่ (Spectrum Analyzer) เพื่อจะนำไปคำนวณกลับหาค่ากำลังส่งของเครื่องส่งความถี่ได้โดยใช้ระยะห่างระหว่างเครื่องส่งความถี่วิทยุกับเครื่องวิเคราะห์แถบความถี่ 90 เซนติเมตร วัดค่าที่ระดับต่างๆ ตั้งแต่ระดับ 1 จนถึงระดับ 6 ได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการวัดเครื่องส่งความถี่โดยได้ค่ากำลังที่ภาครับ

ระดับ	ผลจากการวัด $P_{r(dBm)}$
1	-35
2	-33
3	-28
4	-26
5	-25
6	-24

ทำการคำนวณหา $P_{t(dBm)}$ จากสูตร

$$\frac{P_r}{P_t} = G_{0t} G_{0r} \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \text{ หรือ}$$

$$P_{r(dB)} - P_{t(dB)} = G_{r(dB)} + G_{t(dB)} + 10 \log \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2$$

$$P_{r(dB)} - P_{t(dB)} = 2(8.21) + 10 \log \left(\frac{0.12}{4\pi \times 0.9} \right)^2$$

$$P_{r(dB)} - P_{t(dB)} = -23.065$$

$$P_t = P_r + 23.065$$

แปลงจากหน่วย $P_{t(dBm)}$ ให้เป็นหน่วยวัตต์ได้ดังนี้

$$dB_m = 10 \log \frac{W}{1000}$$

$$\text{ดังนั้น } W = \left(10^{\frac{dB_m}{10}} \right) \times 10^3$$

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบที่วัดและที่ได้จากการคำนวณ

ระดับ	จากการวัด	จากการคำนวณ	
	$P_{r(dBm)}$	$P_{t(dBm)}$	$P_{(w)}$
1	-35	-11.935	64.05
2	-33	-9.935	101.51
3	-28	-4.935	321.00
4	-26	-2.935	508.74
5	-25	-1.935	640.47
6	-24	-0.935	806.31

4.3.2 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากการทดสอบซึ่งกำหนดให้แรงดันกระแสสลับมีค่า 200 โวลต์ จะเห็นว่าค่ากำลังงานในการส่งความถี่ที่คำนวณได้ มีค่าอยู่ในช่วง 64.05-806.31 วัตต์ แสดงว่าเครื่องส่งความถี่นี้สามารถทำงานได้ตามวัตถุประสงค์

4.4 สรุป

ในบทนี้ได้ทำการทดลองอีกครั้ง โดยใช้ความถี่ 2.462 GHz เนื่องจากค่าที่วัดได้จริงมีค่าความถี่ที่ใช้งานไม่ตรงตามทฤษฎี จากการทดสอบการแมตซ์ซึ่งจะได้ว่าท่อนำคลื่น สายอากาศรับและส่งมีค่าที่เหมาะสม สามารถนำไปใช้งานได้ ส่วนค่าของกำลังงานที่วัดและคำนวณได้มีค่าอยู่ในช่วง 64.05-806.31 วัตต์ แสดงว่าเครื่องส่งความถี่นี้สามารถทำงานได้ตามวัตถุประสงค์

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะกล่าวถึงระบบรวมของเครื่องส่งความถี่ 2.45 GHz กำลังส่งสูง โดยได้อธิบายถึงปัญหาที่พบในระหว่างการทำงาน วิธีแก้ปัญหา ข้อเสนอแนะ แนวทางการพัฒนาต่อไป และบทสรุปของโครงการที่จัดทำขึ้นนี้

5.1 สรุปผลที่ได้จากโครงการ

ระบบรวมของเครื่องส่งความถี่วิทยุ 2.462 GHz กำลังงานสูง ประกอบไปด้วย

- วงจรเชื่อมต่อแบบโพรงที่ความถี่ 2.462 GHz
- สายอากาศตัวส่งและตัวรับที่ 2.462 GHz
- เครื่องส่งความถี่วิทยุ 2.45 GHz กำลังส่งสูง

5.5.1. วงจรเชื่อมต่อแบบโพรงที่ความถี่ 2.462 GHz

ทำการปรับให้เกิดการ Matching โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย โหมด S_{11} ที่ความถี่ 2.462 GHz ซึ่งทำการแมตซ์ซึ่ง ค่าอิมพีแดนซ์ได้ $50.13+j2.166$ โอห์ม, ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน S_{11} ได้ -32.427 dB และค่า SWR ได้ 1.0812 ดังนั้นค่าที่ได้ทั้งหมดเกิดการแมตซ์สามารถนำไปใช้งานได้

5.5.2. สายอากาศตัวส่งและตัวรับที่ 2.462 GHz

ทำการแมตซ์ทั้งสองค่าโดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย ได้ค่าสายอากาศตัวที่ 1 (ตัวส่ง) ดังนี้ ค่า SWR 1.2979, ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน S_{11} -17.955 dB และค่าอิมพีแดนซ์ $50.59+j14.398$ โอห์ม ส่วนสายอากาศตัวที่ 2 (ตัวรับ) ได้ค่า SWR 1.2324 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน S_{11} -19.506 dB และค่าอิมพีแดนซ์ $50.34+j12.728$ โอห์มจากผลการทดสอบได้ผลไปในทางที่ดีแสดงว่าสายอากาศทั้งสองตัวเกิดการแมตซ์ สามารถนำไปใช้งานร่วมกับโพรงได้

5.5.3. เครื่องส่งความถี่วิทยุ 2.45 GHz กำลังส่งสูง

เครื่องส่งความถี่วิทยุเป็นระบบรวมของทั้งสายอากาศและวงจรเชื่อมต่อแบบโพรงนำมาทดสอบกับเครื่องวิเคราะห์แถบความถี่ โดยให้เครื่องส่งความถี่วิทยุที่ทำงานมาเป็นตัวส่งความถี่ และใช้เครื่องวิเคราะห์แถบความถี่เป็นตัวรับ ทดสอบที่ความถี่ 2.462 GHz วัดค่า 6 ระดับ ได้ค่า

กำลังงานตั้งแต่ 64.5 วัตต์ จนถึง 806.31 วัตต์ ดังนั้นบรรลุวัตถุประสงค์ที่เราตั้งไว้ว่าน่าจะได้ความถี่สูงสุดที่มากกว่า 700 วัตต์

5.2 ปัญหาที่พบในระหว่างการทำงาน

เนื่องจากขณะที่ดำเนินการ ได้เกิดปัญหาและอุปสรรค ซึ่งสามารถสรุปเป็นข้อมูลได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 แสดงปัญหาที่พบ สาเหตุและแนวทางแก้ไข

ปัญหาที่พบ	สาเหตุและแนวทางแก้ไข
1. N-Type ตัวเมียที่ติดกับท่อนำคลื่นพังง่าย	<u>สาเหตุ</u> ความร้อนที่เกิดจากตัวจ่ายกำลังงาน (Magnetron) มีกำลังสูง <u>แนวทางแก้ไข</u> ใช้พัดลมเป่าและเปลี่ยน N-Type ที่มีคุณภาพทนความร้อนได้สูง
2. N-Type ตัวเมียที่ใช้สร้างสายอากาศพังง่าย	<u>สาเหตุ</u> ความร้อนที่แผ่ออกมาจากหลอดแมกนีตรอนมีความร้อนมาก ทำให้ฉนวนที่หุ้ม N-Type หลอมละลาย <u>แนวทางแก้ไข</u> เปลี่ยน N-Type ใหม่ที่มีคุณภาพดีกว่าเดิม ซึ่งสามารถทนความร้อนได้สูง
3. โบลต์ (Bolt) ที่ติดเพื่อปรับการแมตซ์ยาวเกินไปแล้วเมื่อทดสอบเกิดการไหม้	<u>สาเหตุ</u> ติดโบลต์ที่ท่อนำคลื่นแล้วบางตัวเมื่อจ่ายกำลังงานให้เกิดไหม้ที่ปลายของโบลต์ <u>แนวทางแก้ไข</u> ใส่โบลต์ให้ยาวพอประมาณ ไม่ยาวเกินไปแต่ก็ต้องให้เกิดการแมตซ์
4. ความถี่ที่ตั้งไว้ 2.45 GHz แต่ความถี่ที่ต้องใช้จริงคือ 2.462 GHz	<u>สาเหตุ</u> เนื่องจากผู้ทดสอบต้องการทำเครื่องส่งที่ความถี่ 2.45 GHz เมื่อทดสอบแล้วเกิดการสูญเสียตามสายส่งของสายอากาศทำให้ทดสอบได้จริงที่ความถี่ 2.462 GHz <u>แนวทางแก้ไข</u> ใช้ความถี่ 2.462 GHz จึงจะทดสอบได้โดยใช้เครื่องวิเคราะห์แถบความถี่

5.3 ข้อเสนอแนะ

- 5.3.1 ท่อนำคลื่นที่ออกแบบเสร็จแล้วควรใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) วัดเพื่อคว้าอินพุตและเอาท์พุตว่าเกิดการแมตซ์ที่ 50 โอห์มหรือไม่
- 5.3.2 เนื่องจาก N-Type ที่ซื้อมาทำสายอากาศไม่ทนต่อความร้อนสูงจึงควรจะมีตัวระงับในการบัดกรี เพราะเวลาบัดกรีร้อนมาก ระวังอย่าให้โดนฉนวนตรงกลางซึ่งอาจพังได้

5.4 แนวทางการพัฒนาต่อไป

- 5.4.1 เครื่องส่งความถี่เมื่อทดสอบนานๆ แล้วมีความร้อนมาก ต้องทดสอบแล้วเปิดปิดอยู่บ่อยๆ เพื่อระบายความร้อน ดังนั้นควรจะมีตัวตัดลมอีกหนึ่งตัว
- 5.4.2 เนื่องจาก N-Type ที่ซื้อมาคุณภาพไม่ดีพอ ดังนั้นควรใช้ N-Type ที่มีคุณภาพดีผลิตจากต่างประเทศ

บรรณานุกรม

- [1] ลูติพงษ์ นาคประเสริฐ นฤนาท ดอกเข็ม และรุจศักดิ์ พุ่มเจริญ “เครื่องอบแห้งโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ” วิทยานิพนธ์ปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา, 2549
- [2] <http://www.sut.ac.th/Engineering/Telecom/faculty/wipawee/wusahaweb/downloads427322/Rectangular%20WG.ppt> ราชสีมา, 2549
- [3] http://www.vcharkarn.com/snippets/board/show_message.php?dtn=dtm20&ID=CS2893
- [4] Robert E. Collin “**Foundations For Microwave Engineering**” International Edition 1992, p. 342-343
- [5] <http://e-nett.sut.ac.th/download/AE/AE12.pdf>

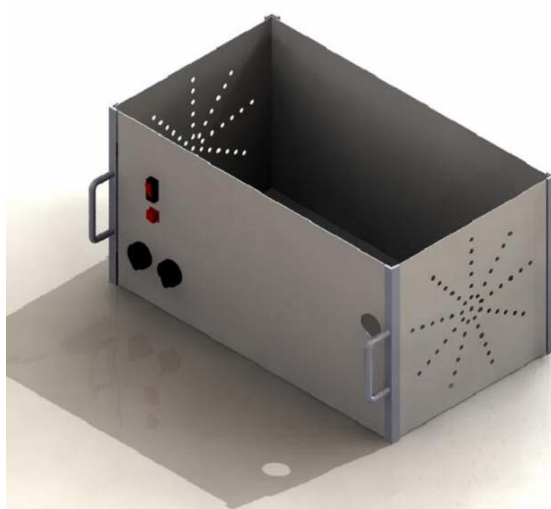
ภาคผนวก

ตัวกล่องสำหรับติดตั้งอุปกรณ์

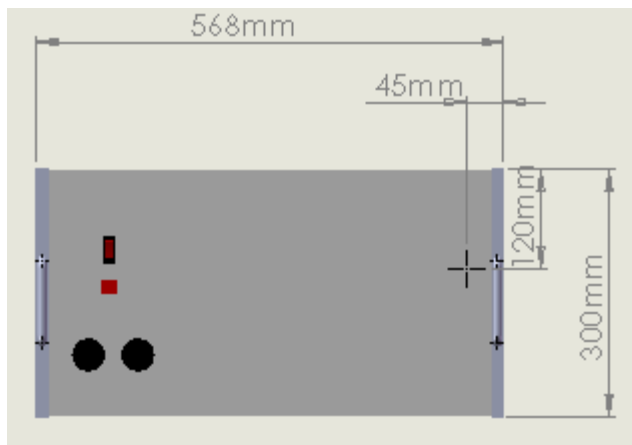
ในการทำเครื่องส่งความถี่วิทยุ 2.45 GHz กำลังงานสูง ได้ออกแบบกล่องสำหรับติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ดังนี้

1. ตัวเครื่อง (Housing)
2. แท่นรองท่อนำสัญญาณ
3. ท่อนำสัญญาณ

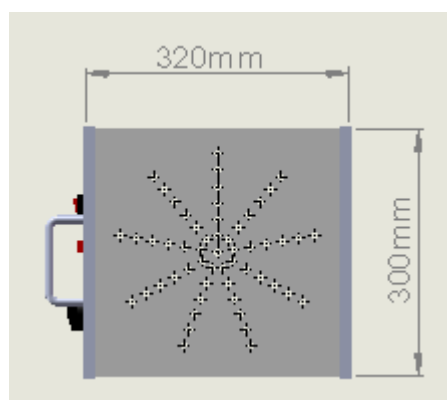
ในการออกแบบกล่องสำหรับติดตั้งอุปกรณ์ได้ใช้โปรแกรม Solid Works ในการออกแบบและวัสดุที่ใช้คือแผ่นอลูมิเนียมที่มีความหนา 1.5 มิลลิเมตร อลูมิเนียมฉาก และพลาสติกใสเพื่อใช้ในสร้างส่วนต่างๆ ดังนั้นจึงต้องออกแบบตัวเครื่องขึ้นมาเพื่อสะดวกในการสร้าง ซึ่งมีรูปร่างและขนาดดังรูป



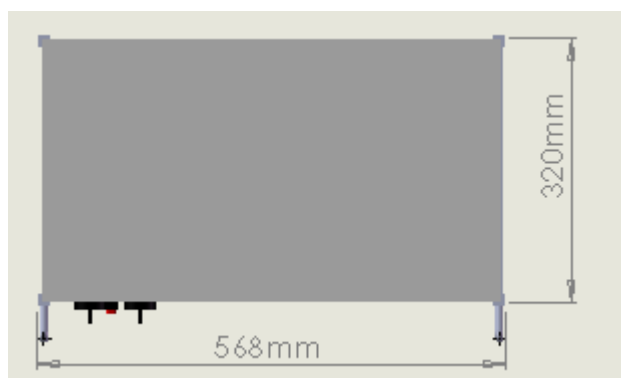
รูปที่ 6.1 แสดงตัวเครื่องที่ประกอบแล้วซึ่งเจาะช่องเพื่อระบายอากาศ รวมถึงช่องของหัววัดสายอากาศ ช่องใส่ไฟ ช่องควบคุมเวลาและแรงดัน



รูปที่ 6.2 ภาพด้านหน้าของเครื่องส่งความถี่วิทยุ 2.45 GHz กำลังงานสูง



รูปที่ 6.3 ภาพด้านข้างของเครื่องส่งความถี่วิทยุ 2.45 GHz กำลังงานสูง



รูปที่ 6.4 ภาพด้านบนของเครื่องส่งความถี่วิทยุ 2.45 GHz กำลังงานสูง

ประวัติผู้เขียน



นางสาวพิชญา ชัยปัญญา เกิดเมื่อวันอาทิตย์ที่ 10 พฤศจิกายน พ.ศ.2528 ภูมิลำเนาอยู่ที่ 49/56 หมู่ 4 ถนนเชียงราย-เทิง ตำบลท่าสาย อำเภอเมืองเชียงราย จังหวัดเชียงราย สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมปลาย จากโรงเรียนดำรงราษฎร์สงเคราะห์ อำเภอเมืองเชียงราย จังหวัด เชียงราย เมื่อปี พ.ศ.2546 ปัจจุบันเป็นนักศึกษาชั้นปีที่ 4 สาขา วิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารี



นางสาวกัญญา อินทร์นอก เกิดเมื่อวันเสาร์ที่ 28 กันยายน พ.ศ. 2528 ภูมิลำเนาอยู่ที่ 2489/2 ถนนสีบศิริ ตำบลในเมือง อำเภอ เมือง จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาปลายจาก โรงเรียนสุรนารีวิทยา อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2546 ปัจจุบันเป็นนักศึกษาชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี