

# การสร้างพลาสมาชนิดกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟในบรรยากาศ

นายฤทธิรงค์ นวลศรี

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การสร้างพลาสมาชนิดกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟในบรรยากาศ



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคณะหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์  
คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# **Microwave Induced Plasma at Atmospheric Pressure**



**A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement**

**for the Degree of Bachelor of Science**

**Department of Applied Physics**

**Faculty of Science**

**King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang**

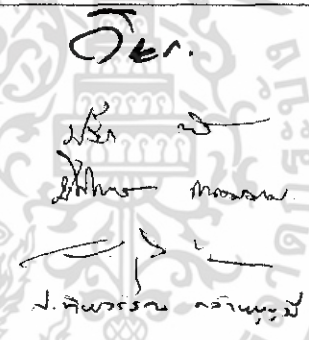
**Academic Year 2006**


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง การสร้างพลานามัยคนระดับด้วยคลื่นไมโครเวฟในบรรยากาศ  
นักศึกษา นายอุทธีรงค์ นวลศรี  
ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์  
สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์ - เครื่องมือวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.วราวุฒิ เถาถัดคา  
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม อ.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
อนุมัติให้โครงการพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ			ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ	รศ.วิชาญ	เดชิตธีระ	
กรรมการ	ผศ.ดร.ปรีชา	เทียนสมประสงค์	
กรรมการ	ดร.ปิติพร	ถนอมงาม	
กรรมการที่ปรึกษา	ผศ.ดร.วราวุฒิ	เถาถัดคา	
กรรมการที่ปรึกษาร่วม	อ.ศ.ทิพวรรณ	คล้ายบุญมี	

  
(รองศาสตราจารย์วิชาญ เดชิตธีระ)  
หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง	การสร้างพลาสมาชนิดกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟในบรรยากาศ
นักศึกษา	นายฤทธิรงค์ นवलศรี
ภาควิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์ - เครื่องมือวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม
ปีการศึกษา	2549
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.วราวุฒิ เถาดีคดา
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อ.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญภูมิ

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการพัฒนาพลาสมาชนิดกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ความดันบรรยากาศ แหล่งกำเนิดพลาสมาชนิด Guide-surfatron ได้รับการพัฒนาขึ้น คลื่นไมโครเวฟความถี่ 2.45 GHz ที่กำเนิดโดยแมกนีตรอนจะถูกส่งผ่านไปยังท่อพลาสมาผ่านทางท่อนำคลื่นขนาด WR340 ในโหมด TE<sub>106</sub> โดยท่อพลาสมาในโครงการพิเศษนี้เป็นท่อแก้วควอทซ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 4.2 มิลลิเมตร ที่ถูกสอดผ่านท่อนำคลื่นในแนวตั้งฉากที่ตำแหน่ง  $\lambda/4$  จากด้านปลายปิด จากการทดลองพบว่า ระบบสามารถกำเนิดพลาสมาของอาร์กอนในท่อควอทซ์ได้ที่ความดันสูงสุด 10 มิลลิบาร์

<b>Special Project Title</b>	Microwave Induced Plasma at Atmospheric Pressure
<b>Name</b>	Mr.Rittirong Nuansri
<b>Department</b>	Applied Physics
<b>Program</b>	Applied Physics – Science and Industry Instrumentation
<b>Academic Year</b>	2006
<b>Special Project Advisor</b>	Asst.Prof.Dr. Warawoot Thowladda
<b>Special Project co-advisor</b>	Miss S.Tipawan Khalayboonme

### ABSTRACT

This special project proposes a development of microwave induced plasma source at atmospheric pressure. Guide-surfatron type microwave induced plasma was developed. Plasma was generated in a quartz tube by coupling 2.45 GHz magnetron directly to WR340 waveguide in TE<sub>106</sub> mode. The plasma discharge quartz tube of 4.2 mm outer diameter was inserted into the waveguide, perpendicular to its wide wall, at a  $\lambda/4$  distance from its short-circuited end. From the experiments, it was found that plasma of argon could be generated along the quartz tube at pressure of 10 mbar.

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายๆท่านด้วยกัน ผู้เขียนขอขอบคุณ

- ครอบครัว ที่คอยให้กำลังใจ ห่วงใย สนับสนุนด้านการศึกษา และ ให้คำแนะนำ เป็นอย่างดีตลอดจนสำเร็จการศึกษาปริญญาตรี
- ผศ.ดร.วราวุฒิ เถาถัดคา ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ซึ่งถ่ายทอดวิชาการความรู้ด้านวิชาการ และ ให้โอกาสในการทำโครงการ ตลอดจนอนุเคราะห์อุปกรณ์ และ ค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการปฏิบัติงาน ทำให้โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี
- อ.ศ. ทิพวรรณ คล้ายบุญมี ผู้ช่วยที่ปรึกษา โครงการพิเศษที่คอยดูแลให้คำแนะนำอธิบายทั้ง ความรู้ และวิธีการปฏิบัติงานตลอดโครงการทำให้โครงการนี้สำเร็จ ลุล่วงไปได้ด้วยดี
- ที่อมร,พี่เคี้ยว,พี่แหลม ที่ช่วยเป็นที่ปรึกษาด้านการทดลอง ให้ความสะดวกในการทดลอง โครงการ และกรุณาหาอุปกรณ์ต่างๆ ตลอดจนถ่ายทอดวิชาความรู้ ทางด้านวิชาการ และให้คำแนะนำ จนโครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วง ไปได้ด้วยดี
- เพื่อนๆ ทุกคน ที่คอยช่วยเหลือและ ให้กำลังใจในการทำโครงการ จนสำเร็จลุล่วง ไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอคุณพระศรีรัตนตรัยของคณบันดาลให้ท่านทั้งหลายจงประสบแต่ความสุขตลอดไป

นายฤทธิรงค์ นวลศรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	
2.1 บทนำ	3
2.2 นิยามของพลาสมา	3
2.3 คลื่นไมโครเวฟ	4
2.4 ทฤษฎีของท่อนำคลื่น	7
2.5 การสร้างพลาสมา	10
2.6 สมบัติของพลาสมา	13
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	
3.1 ขั้นตอนการศึกษาระบบพลาสมาชนิดกระตุ้นด้วยไมโครเวฟ	15
3.2 ขั้นตอนการสร้างพลาสมาชนิดกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟในบรรยากาศ	16
3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	18
3.4 การควบคุมกำลังงานของแมกนีตรอนและการทำงานของแหล่งจ่ายไฟ	23
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	
4.1 ผลการทดลอง	29
4.2 ศักย์ไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟเลี้ยง	32
4.3 ความดันที่ใช้ในการทดลอง	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดลอง	34
5.2 ข้อเสนอแนะ	35
5.3 แนวทางในการพัฒนา	36
เอกสารอ้างอิง	37



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 ค่า Wave Resonance ของท่อนำคลื่นขนาดต่างๆ	22
ตารางที่ 2 แสดงค่า voltage output ของแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงแมกนีตรอน	32



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 การเปลี่ยนสถานะของสสารเมื่อได้รับพลังงาน	3
รูปที่ 2.2 แสดงสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	4
รูปที่ 2.3 แสดงโพรงกำเนิดและวงจรเสมือน	5
รูปที่ 2.4 แสดงการเคลื่อนที่ของกลุ่มอิเล็กตรอนและสนามไฟฟ้าในแมกนีตรอน	6
รูปที่ 2.5 ท่อนำคลื่นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า	8
รูปที่ 2.6 การรวมกันของคลื่นระนาบที่สะท้อนกลับจากผนังท่อนำคลื่น	8
รูปที่ 2.7 องค์ประกอบของสนามในท่อนำคลื่นที่มีโหมดการทำงานเป็น TE <sub>10</sub>	9
รูปที่ 2.8 โพรงกำเนิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า	10
รูปที่ 2.9 สนามในโพรงกำเนิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีโหมดการทำงาน	10
รูปที่ 2.10 การแตกตัวเป็นไอออน โดยกระตุ้นด้วยคลื่น ไมโครเวฟ	11
รูปที่ 2.11 แหล่งกำเนิดพลาสมาแบบ Torch an injection axial และ Guide-surfatron	12
รูปที่ 3.1 การติดตั้งระบบสร้างพลาสมาชนิดกระตุ้นด้วยคลื่น ไมโครเวฟ	16
รูปที่ 3.2 แหล่งกำเนิดคลื่น ไมโครเวฟ	18
รูปที่ 3.3 อุปกรณ์ตรวจสอบการรั่วของคลื่น ไมโครเวฟ	18
รูปที่ 3.4 ระบบควบคุมอุณหภูมิชนิดใช้น้ำ	19
รูปที่ 3.5 พัฒนาระบายความร้อนให้กับระบบ	19
รูปที่ 3.6 แหล่งจ่ายไฟเลี้ยงแมกนีตรอน	20
รูปที่ 3.7 Pirani Gauge และ Active Gauge Controller	20
รูปที่ 3.8 โรตารีปั๊ม	21
รูปที่ 3.9 Needle valve	21
รูปที่ 3.10 ชุดอุปกรณ์ระบบสร้างพลาสมา	23
รูปที่ 3.11 ไดอะแกรมวงจรไฟฟ้าของ magnetron ที่ใช้งานทั่วไป	24
รูปที่ 3.12 วงจรไฟฟ้าของ magnetron เมื่อแยก transformer ออกเป็น 2 ตัว โดยสามารถปรับค่า AC Voltage ของ H.V. Transformer ได้	25
รูปที่ 3.13 ผลการวัดกำลังงานของแมกนีตรอน ภายในเตาไมโครเวฟ	26
รูปที่ 3.14 แสดงส่วนประกอบของแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงแมกนีตรอน	27
รูปที่ 4.1 ลำแสงพลาสมาที่ความดัน 1x10 <sup>-1</sup> mbar	30
รูปที่ 4.2 ลำแสงพลาสมาที่ความดัน 1 mbar	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ 4.3 ลำแสงพลาสมาที่ความดัน 10 mbar

หน้า

31



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ในปัจจุบันได้มีการวิจัยและประยุกต์ใช้งานพลาสมากันอย่างกว้างขวาง อาทิ เช่น การเคลือบ(Coating) และการปรับปรุง (Treatment) ผิวหน้าวัสดุให้มีคุณสมบัติต่างๆ อย่างเช่น ทนต่อความร้อนสูง เพิ่มสมบัติกันน้ำ (Hydrophobic) จากการสร้างโพลิเมอร์โดยพลาสมา (Plasma Polymerizations) และที่ใช้ประโยชน์จากพลาสมาอย่างมากในอุตสาหกรรมเชื่อมหรือตัดแผ่นโลหะ และในอนาคตจะมีการใช้ประโยชน์อย่างมากมายไม่ว่าจะเป็น การใช้พลาสมาช่วยในการเผาไหม้ของเครื่องยนต์หรือการนำพลาสมาไปผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยจะเป็นการใช้ทรัพยากรต่างๆ ให้คุ้มค่าที่สุด

พลาสมา (Plasma) คือ สถานะที่สี่ของสสารโดยเกิดจากการให้พลังงานแก่อะตอมก๊าซที่เป็นกลาง จนเกิดการแตกตัวเป็นพลาสมา โดยปกติแล้วเมื่อทำการเพิ่มพลังงานให้กับสสารที่อยู่ในสถานะของแข็งจนถึงจุดหลอมเหลวจะทำให้ของแข็งกลายเป็นของเหลว จากของเหลวแล้วทำการเพิ่มพลังงานจนเปลี่ยนสถานะไปเป็นก๊าซ และในที่สุดเมื่อทำการเพิ่มพลังงานไปกระตุ้นจะทำให้อะตอมของก๊าซที่เป็นกลางเกิดการแตกตัวเป็นอิเล็กตรอนและไอออนประจุบวกที่เรียกว่า “พลาสมา” โดยปกติแล้ววิธีการกระตุ้นให้อะตอมของก๊าซที่เป็นกลางเกิดการแตกตัวเป็นพลาสมาสามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้วิธีการกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Microwave Induced Plasma) ที่คลื่นความถี่ 2.45 GHz มาทำการสร้างพลาสมาขึ้นในบรรยากาศ

สำหรับงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาและสร้างพลาสมาขึ้นในบรรยากาศ โดยใช้แหล่งกำเนิดพลาสมา (Plasma source) แบบ Guide-surfatron (GS)

### 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการส่งผ่านคลื่นไมโครเวฟผ่านท่อนำคลื่น
2. เพื่อศึกษาวิธีการกำเนิดพลาสมาด้วยคลื่นไมโครเวฟในบรรยากาศ
3. เพื่อทำการสร้างพลาสมาชนิดกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟในบรรยากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

สำหรับขอบเขตในการศึกษาของโครงการนี้สามารถแบ่งได้เป็นส่วน ๆ ได้ดังนี้

#### 1.3.1 ส่วนของทฤษฎี

เป็นการศึกษาทฤษฎีและหลักการของการกำเนิดพลาสมาใน บรรยากาศโดยวิธีกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ (MIP) นอกจากนี้ยังต้องทำการศึกษาทฤษฎีและหลักการของแหล่งกำเนิดพลาสมาแบบ Guide-surfatron (GS)

#### 1.3.2 ส่วนของการทดลอง

เป็นการสร้างพลาสมาในบรรยากาศโดยวิธีกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยจะใช้แหล่งกำเนิดพลาสมาแบบ Guide-surfatron (GS)

#### 1.3.3 ส่วนของผลและการสรุป

เป็นส่วนที่ทำการรวบรวมข้อมูลทั้งหมดที่ได้จากการสร้างพลาสมาชนิดกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ความดันบรรยากาศ และศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อการสร้างพลาสมา

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้ทราบถึงหลักการและกระบวนการกำเนิดพลาสมาชนิดกระตุ้นด้วยไมโครเวฟในบรรยากาศโดยใช้แหล่งกำเนิดพลาสมาแบบ Guide-surfatron (GS)
2. สามารถสร้างพลาสมาในบรรยากาศได้
3. ทำให้ได้รับความรู้เพิ่มเติมจากการวิเคราะห์ข้อมูลต่างๆตลอดจนทฤษฎีสำคัญที่เกี่ยวข้องกับโครงการพิเศษนี้ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านที่เกี่ยวข้องอีกด้วยต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

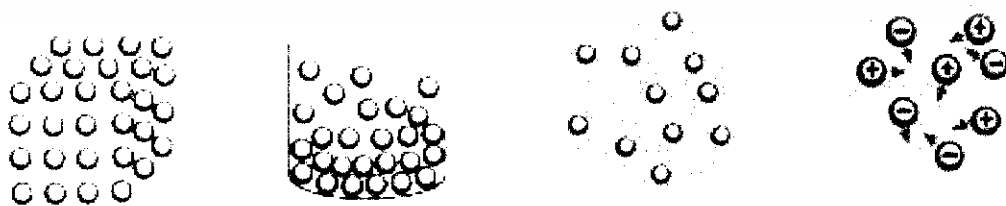
### ทฤษฎีและหลักการ

#### 2.1 บทนำ

พลาสมา(Plasma) คือสถานะที่ 4 ของสสาร นั่นคือเมื่อเพิ่มพลังงานให้กับสสารซึ่งมีอุณหภูมิต่ำเริ่มจากสสารในสถานะของแข็งจะเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลว และจากสถานะของเหลวเป็นแก๊สในที่สุด ถ้ายังให้พลังงานต่อไปอะตอมของแก๊สจะแตกตัวอิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอม อะตอมจะมีสภาพเป็นไอออน เรียกสถานะนี้ว่า “พลาสมา” โดยทั่วไปอนุภาคอิสระนอกจากจะเป็นอนุภาคที่มีประจุได้แก่ ไอออนบวก ไอออนลบ อิเล็กตรอนและอะตอมที่เป็นกลาง ดังนั้น อนุภาคในพลาสมาเหล่านี้มีสภาพต่างจากอนุภาคในสถานะแก๊สปกติ โดยที่ปฏิกริยาระหว่างอนุภาคภายในพลาสมาโดยรวมและปฏิกริยาที่มีกับสนามภายนอกจึงต่างไปจากสถานะแก๊สโดยทั่วไป

#### 2.2 นิยามของพลาสมา

พลาสมา (Langmuir, 1929) คือ ก๊าซประหนึ่งเป็นกลางทางไฟฟ้า (Quasineutral Gas) เกิดการแตกตัวเป็นไอออน ซึ่งจะประกอบด้วยอนุภาคประจุบวก ประจุลบ และประจุที่เป็นกลาง โดยแสดงพฤติกรรมร่วม (Collective Behavior) กล่าวคือ เมื่ออนุภาคประจุในพลาสมาเกิดการเคลื่อนที่ อนุภาคเหล่านี้จะสามารถทำให้เกิดความหนาแน่นของประจุบวกหรือลบในบริเวณหนึ่งๆซึ่งทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้น นอกจากนี้การเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุยังทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นซึ่งจะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้น ทั้งสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กนี้ที่ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุตัวอื่นๆที่อยู่ไกลออกไป พลาสมาเป็นสถานะที่สี่ของสสาร (4<sup>th</sup> state of matter) คือของแข็ง เมื่อได้รับพลังงานที่เพียงพอจะหลอมเหลวเป็น ของเหลว จากของเหลวจะระเหยกลายเป็น ก๊าซ และจะสามารถแตกตัวเป็น พลาสมา ดังรูปที่ 2.1



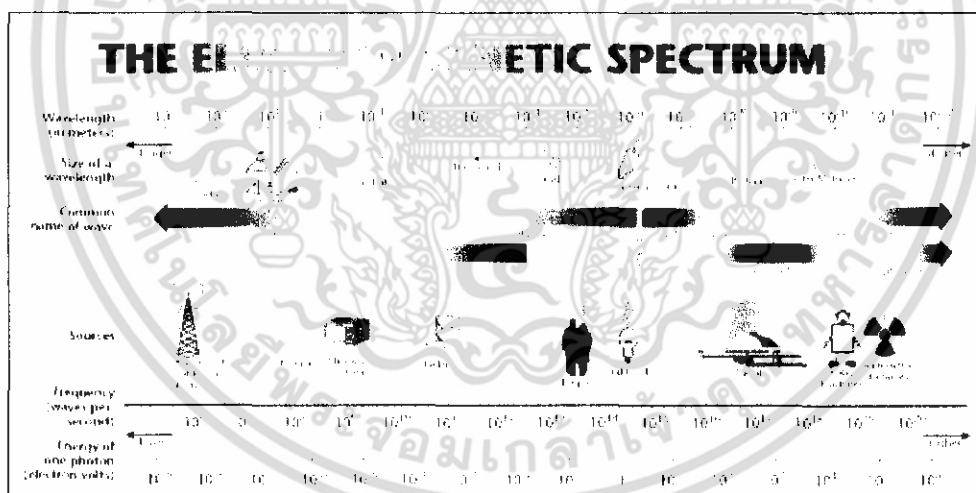
รูปที่ 2.1 การเปลี่ยนสถานะของสสารเมื่อได้รับพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลาสมา ถูกค้นพบโดย Sir William Crookes ในปี ค.ศ. 1879 ซึ่งพบอยู่ในรูปของประจุไฟฟ้าสามารถเห็นรังสีที่ปล่อยออกมาจากขั้วไฟฟ้าของก๊าซที่มีความดันต่ำ จึงเรียกว่า “Cathode Rays” ต่อมานักวิทยาศาสตร์รางวัลโนเบล Irving Langmuir ได้ศึกษาเกี่ยวกับการปลดปล่อยอนุภาคของประจุจากขดลวดความร้อน (Thermionic Emission) และเขาได้นิยามคำว่า พลาสมา คือ ก๊าซที่เกิดการแตกตัวเป็น ไอออน (Ionized Gases) ในปี ค.ศ. 1924

### 2.3 คลื่นไมโครเวฟ

คลื่นไมโครเวฟ คือ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นยาวกว่าความยาวคลื่นของแสงอินฟราเรดแต่จะสั้นกว่าความยาวคลื่นวิทยุ โดยคลื่นไมโครเวฟมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงประมาณ 1 มิลลิเมตร (300 กิกะเฮิร์ต) ถึง 100 เซนติเมตร (0.3 กิกะเฮิร์ต) ซึ่งคลื่นไมโครเวฟแบ่งเป็นสามย่านความถี่ คือ ย่านความถี่ยูเอชเอฟ (Ultra-High Frequency, UHF) มีความถี่ตั้งแต่ 0.3 ถึง 3 กิกะเฮิร์ต ย่านความถี่เอสเอชเอฟ (Super High Frequency, SHF) มีความถี่ตั้งแต่ 3 ถึง 30 กิกะเฮิร์ต และย่านความถี่อีเอชเอฟ (Extremely High Frequency, EHF) มีความถี่ตั้งแต่ 30 ถึง 300 กิกะเฮิร์ต



รูปที่ 2.2 แสดงสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

#### 2.3.1 แหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ

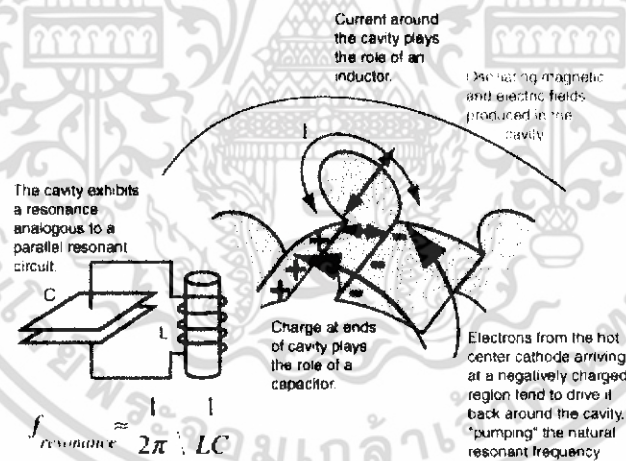
แหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟมีอยู่หลายชนิดขึ้นอยู่กับวิธีการกำเนิดคลื่น แต่โดยทั่วไปจะแบ่งเป็นสองกลุ่มใหญ่ คือ กลุ่มที่ใช้อุปกรณ์โซลิดสเตต (Solid state device) และกลุ่มอุปกรณ์ที่อาศัยหลักการของหลอดสุญญากาศ (vacuum-tube based devices) ในโครงการพิเศษนี้จะกล่าวถึงเฉพาะอุปกรณ์ที่อาศัยหลักการของหลอดสุญญากาศ ซึ่งอาศัยหลักการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายใต้การควบคุมสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ได้แก่ แมกนีตรอน(magnetron) ไคลสตรอน (klystron) หลอดคลื่นจร (traveling wave tube, TWT) และไซโรตรอน(gyrotron) โดยจะกล่าว รายละเอียดเฉพาะแหล่งกำเนิดคลื่น ไมโครเวฟชนิดแมกนีตรอนเท่านั้น

### 1) แมกนีตรอน

แมกนีตรอนเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟที่ประกอบด้วยขั้วแคโทดซึ่งทำมาจากไส้ร้อน (hot filament) ทำหน้าที่จ่ายอิเล็กตรอนเมื่อต่อเข้ากับขั้วลบของสัคย์ไฟฟ้าค่าสูงที่มีค่ากระแสสูงที่ โดยขั้วนี้วางอยู่ในตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแมกนีตรอน และมีขั้วแอนโอดอยู่ล้อมรอบซึ่งต่อเข้ากับ ขั้วบวกของสัคย์ไฟฟ้าค่าสูง โดยระหว่างขั้วทั้งสองจะเป็นพื้นที่ว่าง และมีสนามแม่เหล็กวางอยู่ใน แนวแกนกลางตั้งฉากกับทิศของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง

สำหรับ โครงสร้างขั้วแอนโอดของแมกนีตรอนนั้น จะมีลักษณะเป็น โพรงำทอน(cavity resonators) เชื่อมต่อกันอย่างต่อเนื่องหลายชุด โดยที่แต่ละชุดจะเปรียบเสมือนวงจรกำทอนของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ (LC resonant circuit) ดังแสดงในรูปที่ 2.3

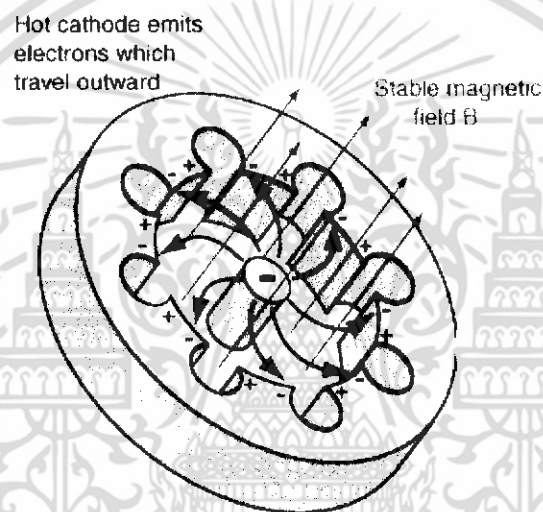


รูปที่ 2.3 แสดง โพรงำทอนและวงจรเสมือน

การทำงานของแมกนีตรอน อาศัยหลักการถ่ายเทพลังงานจลน์จากอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่อยู่ที่ให้กับสนามไมโครเวฟ ซึ่งแมกนีตรอนมีอยู่หลายแบบเช่น แบบไดนาตรอน(dynatron) แบบเอ (A-type magnetron) และแบบบี (B-type magnetron) แต่ปัจจุบันแบบบี เป็นแบบที่ได้รับความนิยมใช้ อย่างแพร่หลายมากกว่า เนื่องจากแบบไดนาตรอนมีปัญหาเรื่องความถี่ของการออสซิลเลตที่ต่ำ และแบบเอ มีปัญหาในเรื่องประสิทธิภาพการใช้งานที่มีค่าต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่ออิเล็กตรอนหลุดออกจากขั้วแคโทดและถูกเร่งด้วยศักย์ไฟฟ้าของขั้วแอโนด ก่อให้เกิดกลุ่มของอิเล็กตรอนรอบขั้วแคโทด ซึ่งเป็นการกระตุ้นให้เกิดการออสมิลเลตขึ้นเอง คล้ายกับการกระตุ้นให้เกิดการออสมิลเลตในวงจรถ่ายทอดของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ การออสมิลเลตที่เกิดขึ้นทำให้เกิดคลื่นไฟฟ้าภายในบริเวณพื้นที่ว่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง เมื่อเกิดการรวมตัวกับศักย์ไฟฟ้าสถิตกระแสตรง ทำให้กลุ่มของอิเล็กตรอนได้รับทั้งความเร่งและการหน่วง ส่งผลให้ความเร็วของอิเล็กตรอนเปลี่ยนแปลง ทำให้ความหนาแน่นของกลุ่มอิเล็กตรอนมีค่ามากขึ้น สลับกันไปรอบแกนกลาง ก่อให้เกิดลักษณะคล้ายซี่ของล้อหมุนรอบดิ่งแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงการเคลื่อนที่ของกลุ่มอิเล็กตรอนและสนามไฟฟ้าในแมกนีตรอน

การออสมิลเลตในแมกนีตรอน ซึ่งวงล้อของกลุ่มอิเล็กตรอนหมุนด้วยความเร็วเดียวกันกับความเร็วเฟสของคลื่น สำหรับการเกิดออสมิลเลตนั้น ความเร็วลอยเลื่อนของอิเล็กตรอน ( $E/B$ ) จะต้องเหมาะสมกับความเร็วเฟสของคลื่น ด้วยเงื่อนไขนี้ก็จะทำให้ซี่ของล้อหมุนเวียนรอบแกนกลางต่อไป ส่งผลให้เกิดคลื่นที่มีความถี่ไมโครเวฟขึ้นภายในโพรงกำเนิด ซึ่งในกระบวนการดังกล่าวนี้จะทำให้อิเล็กตรอนสูญเสียพลังงานให้กับคลื่น และวกกลับจนกระทั่งมีความเร็วต่ำลงและตกกลับเข้าสู่ขั้วแคโทดเช่นเดิม ดังนั้นขณะเกิดการออสมิลเลตจะพบว่ากระแสแอโนดมีค่าเป็นศูนย์

## 2.4 ทฤษฎีของท่อนำคลื่น

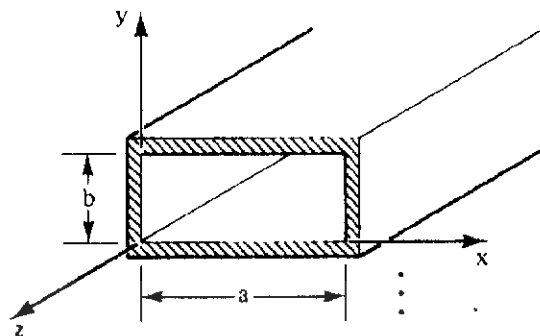
สำหรับการส่งผ่านคลื่นไมโครเวฟนั้นนอกจากจะส่งผ่านสายโคแอกเซียล (Coaxial transmission line) ซึ่งส่งผ่านคลื่นในโหมดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าตามขวาง (transverse electromagnetic mode) โดยจะมีสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น แต่สำหรับในท่อนำคลื่นจะไม่สามารถส่งผ่านคลื่นในโหมดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าตามขวางได้ แต่จะส่งผ่านในรูปแบบโครูปแบบหนึ่งเท่านั้น คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ในท่อนำคลื่นนั้นจะมีการจัดรูปแบบของสนามในหลายแบบ โดยที่ในแต่ละแบบจะมีองค์ประกอบของสนามไฟฟ้า หรือ องค์ประกอบของสนามแม่เหล็กตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น คือถ้าคลื่นมีองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นจะเรียกว่า คลื่นไฟฟ้าตามขวาง (transverse electric (TE) wave) ส่วนถ้าคลื่นมีองค์ประกอบของสนามแม่เหล็กตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นจะเรียกว่า คลื่นแม่เหล็กตามขวาง (transverse magnetic (TM) wave) ตามทฤษฎีแล้ว สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในท่อนำคลื่นจะเกิดขึ้นได้หลายรูปแบบ ซึ่งเรียกว่า โหมด (Modes) โดยที่การกำหนดโหมดนั้นจะบอกด้วยค่า  $m$  และ  $n$  เมื่อ  $m = 0, 1, 2, \dots$ , และ  $n = 0, 1, 2, \dots$ , โดยที่จำนวนเต็ม  $m$  จะเป็นตัวกำหนดจำนวนของครึ่งคลื่น (half-wave) ของสนามตามขวางที่เกิดขึ้นในแนวแกน  $x$  และจำนวนเต็ม  $n$  เป็นตัวกำหนดจำนวนของครึ่งคลื่น (half-wave) ของสนามตามขวางที่เกิดขึ้นในแนวแกน  $y$  ของท่อนำคลื่น

ท่อนำคลื่นจะทำงานเหมือนกับตัวกรองความถี่สูงผ่าน (high-pass filter) ซึ่งใช้สำหรับการส่งคลื่นที่มีความถี่ที่สูงกว่าความถี่คัตออฟ (cutoff frequency) โดยที่ในแต่ละโหมด  $TE_{m,n}$  และ โหมด  $TM_{m,n}$  จะมีค่าความถี่คัตออฟเป็นค่าเฉพาะ สำหรับโหมดที่ความถี่คัตออฟจะเรียกว่า โหมดโดมิแนน (dominant mode) ในท่อนำคลื่น โดยทั่วไปจะมีโหมดโดมิแนน หรือโหมดการทำงานเป็น  $TE_{10}$  ซึ่งโดยส่วนมากจะใช้ท่อนำคลื่นในโหมดดังกล่าวนี้

### 2.4.1 โหมดสนามไฟฟ้าตามขวางในท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า

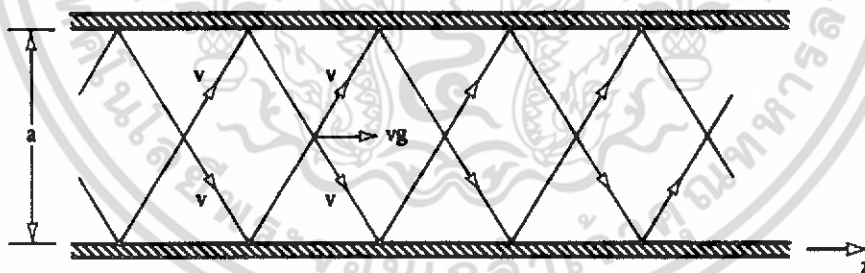
(Transverse Electric in Rectangular Wave guide)

สำหรับท่อนำคลื่นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีลักษณะรูปร่างแสดงได้ดังในรูปที่ 2.5 ซึ่งมีการส่งผ่านคลื่น โดยมีทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นอยู่ในแนวแกน  $z$  ส่วนแนวแกน  $x$  และแกน  $y$  จะอยู่ในแนวขวางกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น โดยทั่วไปขนาดของด้าน  $a$  ของท่อนำคลื่นจะมีขนาดมากกว่าด้าน  $b$  ซึ่งความยาวของด้านดังกล่าวนี้จะเป็นตัวกำหนดโหมดการทำงานของท่อนำคลื่น



รูปที่ 2.5 ท่อนำคลื่นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

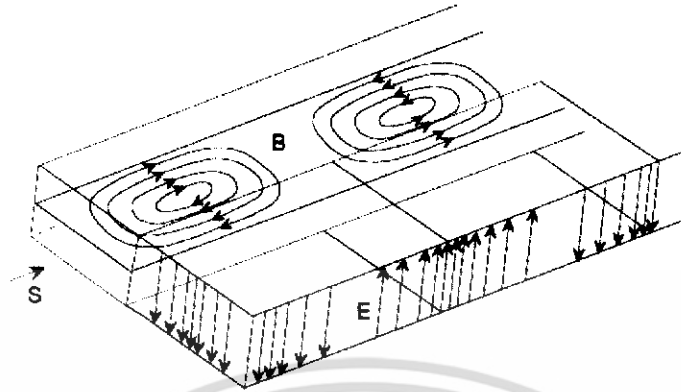
การอธิบายการเคลื่อนที่ของคลื่นในท่อนำคลื่น จะพิจารณาจากการรวมกันของคลื่นระนาบที่สะท้อนจากผนังของท่อนำคลื่น ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งแสดงการรวมกันของคลื่นระนาบที่สะท้อนกลับที่ผนังด้านในตลอดท่อนำคลื่น โดยที่องค์ประกอบของคลื่นในแนวการเคลื่อนที่ของคลื่นหรือในแนวแกน  $z$  จะมีความยาวของคลื่นที่แตกต่างจากความยาวคลื่นของคลื่นระนาบ ความยาวคลื่นดังกล่าวจะเรียกว่า ความยาวคลื่นของท่อนำคลื่น (waveguide wavelength) และ  $v_g$  คือ ความเร็วเฟส (phase velocity) ในการเคลื่อนที่ของคลื่นในแนวแกน  $z$



รูปที่ 2.6 การรวมกันของคลื่นระนาบที่สะท้อนกลับจากผนังท่อนำคลื่น

พิจารณาสนามของโหมด  $TE_{10}$  ภายในท่อนำคลื่น ดังในรูปที่ 2.7 จะพบว่าสนามไฟฟ้าจะวางตัวอยู่ในทิศทางของแนวแกน  $y$  เท่านั้น และมีค่าความเข้มของสนามมากที่สุดที่ตำแหน่งกึ่งกลางของท่อนำคลื่น และองค์ประกอบของสนามแม่เหล็กจะวางตัวทั้งในแนวแกน  $x$  และแนวแกน  $z$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 องค์ประกอบของสนามในท่อนำคลื่นที่มีโหมดการทำงานเป็น  $TE_{10}$

#### 2.4.2 โพรงำทอน (Resonant Cavity)

สำหรับคลื่นไมโครเวฟ การสร้างโพรงำทอนสามารถทำได้โดยการใช้แผ่นตัวนำทำเป็นขอบเขต ซึ่งจะมีกำทอนที่ความถี่ธรรมชาติ และมีพฤติกรรมเช่นเดียวกันกับวงจรกำทอนทางไฟฟ้า ซึ่งทำงานที่ความถี่ต่ำกว่า สำหรับโพรงำทอนท่อนำคลื่น (waveguide cavity) สามารถทำได้โดยการปิดปลายทั้งสองด้านของท่อนำคลื่น ซึ่งตำแหน่งของปลายปิดจะต้องเป็นตำแหน่งที่สนามไฟฟ้าที่ผิวสัมผัสมีค่าเป็นศูนย์ นั่นคือสามารถที่จะสร้างโพรงำทอนที่มีโหมดการทำงานได้หลากหลายโหมด ขึ้นอยู่กับรูปร่างทางเรขาคณิตของโพรงำทอนนั้นๆ

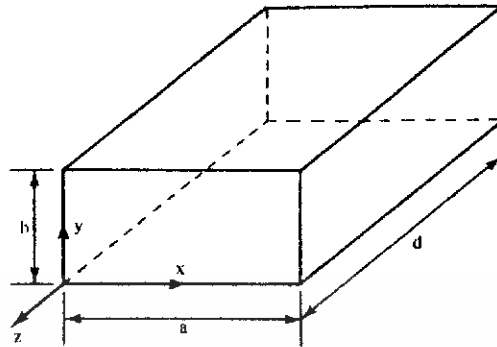
สำหรับโพรงำทอนรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (rectangular cavity) จะแสดงได้ในรูปที่ 2.8 ซึ่งสามารถออกแบบให้ทำงานได้หลายโหมดขึ้นอยู่กับค่า  $m, n$  และ  $p$  ซึ่งเป็นตัวกำหนดจำนวนครึ่งคลื่นของสนามในแนวแกน  $x, y$  และ  $z$  ตามลำดับ ในโหมด  $TE_{m,n,p}$  หรือ  $TM_{m,n,p}$  ใดๆ ความถี่ของการกำทอนกำหนดโดย

$$f_r = \frac{1}{2\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{d}\right)^2} \quad \text{Hz} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $\mu$  คือ ค่าเพอร์มิวบิลิตีของสาร ไดอิเล็กทริกภายในโพรงำทอน

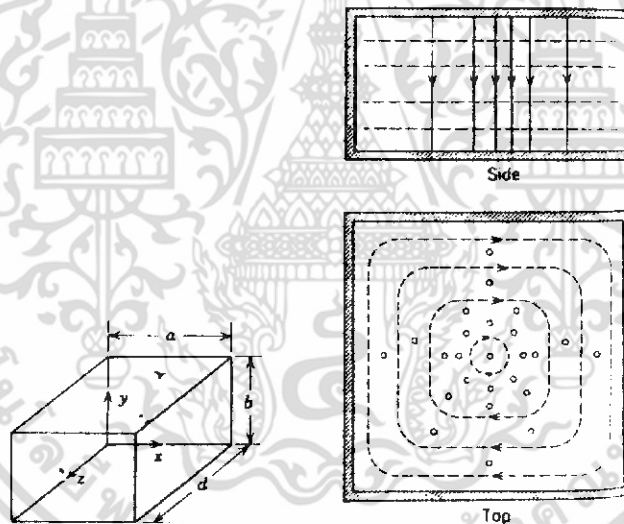
$\epsilon$  คือ ค่าเพอร์มิตติวิตีของสาร ไดอิเล็กทริกภายในโพรงำทอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 โพรงำทอนรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

สำหรับโพรงำทอนที่ทำงานในโหมด  $TE_{101}$  จะมีรูปแบบการจี้ควางตัวของสนามแสดงได้ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 สนามในโพรงำทอนรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีโหมดการทำงาน  $TE_{101}$

## 2.5 การสร้างพลาสมา

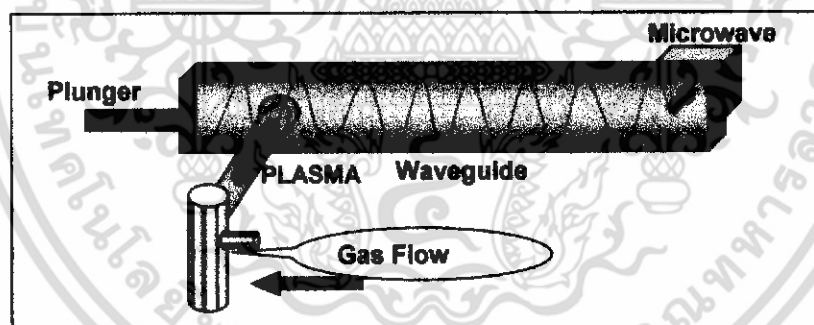
พลาสมาเกิดขึ้น โดยการทำให้อะตอมที่เป็นกลางเกิดการแตกตัว ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การแตกตัวเป็นไอออนบริเวณผิวหน้า (Surface Ionization) การแตกตัวเป็นไอออนโดยแสง (Photo Ionization) และ การปลดปล่อยอิเล็กตรอนโดยสนามไฟฟ้า (Field Emission) แต่วิธีที่ใช้แพร่หลายที่สุดได้แก่ วิธีก๊าซดิสชาร์จ (Gas Discharge) เมื่อโมเลกุลของก๊าซได้รับพลังงานเพียงพอจะทำให้ไอเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอม ขบวนการนี้เรียกว่า การแตกตัวเป็นไอออน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Ionization) เมื่ออัตราการเกิดอิเล็กตรอนอิสระเท่ากับหรือมากกว่าอัตราการสูญเสีย แสดงว่ามี การแตกตัวเป็นพลาสมาเกิดขึ้น พลังงานที่น้อยที่สุดที่ทำให้อิเล็กตรอนตัวนอกสุดหลุดออกจาก อะตอม เรียกว่า พลังงานการแตกตัวเป็นไอออน (Ionization Energy) ในกรณีของแข็งได้รับ พลังงานแล้วอิเล็กตรอนหลุดออกจากผิวของของแข็งนั้นเรียกขบวนการนี้ว่า การปล่อยอิเล็กตรอน (Electron Emission) และพลังงานที่น้อยที่สุดที่ทำให้อิเล็กตรอนหลุดได้ เรียกว่า ฟังก์ชันงาน (Work Function) การแตกตัวเป็นไอออนและการปล่อยอิเล็กตรอนเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญในการสร้าง พลาสมา ปรากฏการณ์ทั้งสองสามารถแบ่งตามขบวนการเกิดได้หลายแบบ แต่ที่เกี่ยวข้องกับการ สร้างพลาสมาสำหรับงานวิจัยมีดังนี้

### 2.5.1 การแตกตัวเป็นไอออนโดยกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Microwave Induced Plasma)

แหล่งกำเนิดพลาสมาด้วยคลื่นไมโครเวฟสามารถออกแบบสร้างได้หลากหลายรูปแบบ แต่ จะอาศัยหลักการสำคัญเดียว คือ พลาสมาที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากการดิซชาร์จของก๊าซ โดยอาศัย สนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งการที่จะรักษาระดับการเกิดพลาสมาให้เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องต่อไปนั้น จะต้องพิจารณาถึงอนุภาคที่มีประจุ และกลไกการสูญเสียพลังงานที่เกิดขึ้นภายในพลาสมานั้นด้วย



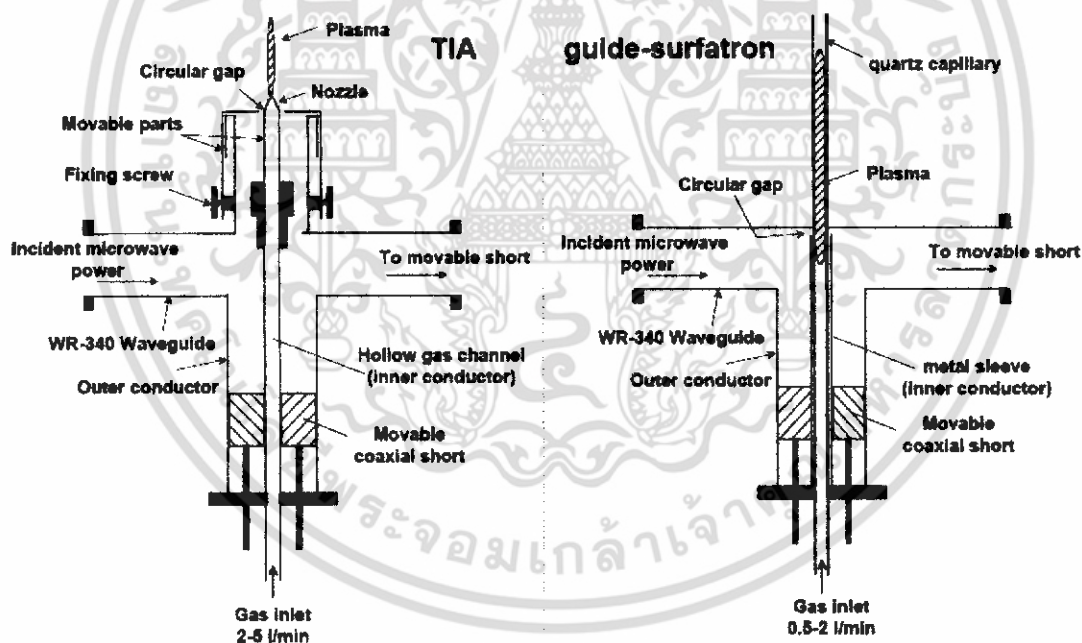
รูปที่ 2.10 การแตกตัวเป็น ไอออน โดยกระตุ้นด้วยคลื่น ไมโครเวฟ

วิธีการกระตุ้นให้เกิดพลาสมาด้วยคลื่นไมโครเวฟ (microwave Induce plasma) มีข้อดีใน ส่วนที่ให้พลาสมาที่มีความเข้มของกระแสสูง มีพลาสมาที่อุณหภูมิต่ำ และไม่จำเป็นต้องใช้ ขั้วไฟฟ้า (electrodeless) เหมือนกับกรณีการป้อนด้วยสนามไฟฟ้า หรือไส้ (filament) สำหรับการ ปลดปล่อยอิเล็กตรอนเพื่อก่อให้เกิดพลาสมา ซึ่งสะดวกสำหรับการซ่อมบำรุง

แหล่งกำเนิดพลาสมาที่สามารถกำเนิดพลาสมาที่ความดันบรรยากาศได้มี 2 แบบ คือ

1) **Torch an injection axial (TIA)** จะเกิดพลาสมาขึ้นอย่างอิสระในอากาศ ภายใน TIA เมื่อใส่คลื่น Microwave เข้าไป จะมีการเปลี่ยนแปลงจาก TE (Transverse Electric) ไปเป็น TEM mode (Transverse Electromagnetic Mode) และพลังงานภายในท่อจะมีการกระจายตัวขึ้นไป ส่วนบนของท่อ และผ่านหัวฉีดเกิดเป็นพลาสมา โดยหัวฉีดจะมีผลต่อรูปร่างของพลาสมาที่เกิดขึ้น

2) **Guide-surfatron (GS)** จะสร้างพลาสมาขึ้นภายในท่อ quartz โดยการทำงานของ GS จะมีการเปลี่ยนจาก TE (Transverse Electric) ไปเป็น TM mode (Transverse Magnetic) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้เกิดจากคลื่นไมโครเวฟที่ส่งผ่านเข้าไปภายในท่อ และขณะที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านส่วนเชื่อมต่อระหว่างท่อ quartz กับบริเวณที่จะเกิดพลาสมา และพลาสมาที่เกิดขึ้นสามารถขยายยาวออกไปตามขนาดของท่อได้



รูปที่ 2.11 แหล่งกำเนิดพลาสมาแบบ Torch an injection axial (TIA) และ Guide-surfatron (GS)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 สมบัติของพลาสมา

สำหรับการอธิบายสมบัติของพลาสมานั้นจะต้องพิจารณาถึงตัวแปรที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

### 2.6.1 ความหนาแน่นของพลาสมา (Plasma Density)

พลาสมามีส่วนประกอบที่เป็น ไอออน อิเล็กตรอน และ อะตอมที่ยังไม่ถูกทำให้แตกตัวเป็น ไอออน ผสมกันอยู่ โดยพลาสมาจะมีความหนาแน่นขององค์ประกอบต่างๆ แยกต่างหาก คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ( $n_e$ ) ความหนาแน่นของไอออน ( $n_i$ ) และ ความหนาแน่นของอนุภาคที่เป็นกลาง ( $n_n$ ) ความหนาแน่นของอนุภาคทั้งสามนี้จะเป็นตัวบ่งบอกเปอร์เซ็นต์การแตกตัวเป็น ไอออน

$$\text{เปอร์เซ็นต์การแตกตัวเป็นไอออน} = \frac{n_i}{(n_i + n_n)} \times 100\% \quad (2.2)$$

ถ้าเปอร์เซ็นต์การแตกตัวมีค่ามากกว่า 10 % ถือว่า แก๊สมีการแตกตัวเป็น ไอออนในปริมาณมาก ดังนั้นในการพิจารณาพฤติกรรมของตัวกลางต้องพิจารณาผลของพลาสมาเป็นหลัก แต่ถ้าเปอร์เซ็นต์การแตกตัวน้อยกว่า 1% จะต้องพิจารณาถึงผลของแรงปฏิกิริยาของอนุภาคที่เป็นกลางทางไฟฟ้าด้วย

### 2.6.2 อุณหภูมิของพลาสมา (Plasma Temperature)

ในงานด้านฟิสิกส์ของพลาสมา นิยมกำหนดหน่วยของพลังงานเป็นอิเล็กตรอน โวลต์ (eV) แต่สำหรับพลาสมาแล้วนิยามที่จะอธิบายอุณหภูมิพลาสมาในรูปของพลังงานพลาสมาแทน ดังนั้นอุณหภูมิของพลาสมาจึงถูกใช้เป็นพารามิเตอร์สำคัญในการอธิบายพลังงานของอนุภาคในพลาสมา โดยพลังงานเฉลี่ยของอนุภาคจะแปรผันกับอุณหภูมิตามสมการ

$$\bar{E} = \frac{3}{2} kT \quad (2.3)$$

โดยทั่วไปกำหนดอุณหภูมิของพลาสมาในหน่วยอิเล็กตรอน โวลต์ และ อุณหภูมิของพลาสมาสามารถคำนวณได้จากพลังงานเฉลี่ยของพลาสมา ตัวอย่างเช่นอุณหภูมิของพลาสมา 1 eV จะมีอุณหภูมิ 11,600 K

### 2.6.3 สภาพความต้านทานของพลาสมา (Plasma Resistivity)

ความต้านทานของพลาสมา เกิดขึ้นเนื่องจากการชนกันระหว่างอิเล็กตรอนกับไอออนหรืออนุภาคที่เป็นกลาง ความต้านทานของพลาสมาจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น (ซึ่งเปรียบเสมือนว่าอิเล็กตรอนในพลาสมามีพลังงานเพิ่มขึ้น) ทั้งนี้เนื่องจาก โอกาสในการชนกันระหว่างอิเล็กตรอนกับไอออนหรือกับอนุภาคที่เป็นกลางจะลดลงเมื่อความเร็วของอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น ซึ่งมีลักษณะตรงกันข้ามกับความต้านทานของโลหะ

### 2.6.4 การไหลของพลาสมา (Plasma Flow)

เนื่องจากพลาสมาเป็นอนุภาคที่ถูกทำให้มีประจุ ดังนั้นการไหลของพลาสมา จึงมีลักษณะคล้ายกับการไหลของอิเล็กตรอน ในโลหะกระแสไฟฟ้าเกิดจากการไหลของอิเล็กตรอนเพียงอย่างเดียว ไอออนหรือโครงผลึกจะ ไม่มีการเคลื่อนที่ แต่ในพลาสมาจะมีทั้งการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและไอออน ดังนั้น กระแสที่เกิดขึ้นจึงเป็นผลรวมของทั้งกระแสที่เกิดจากอิเล็กตรอนและไอออน ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ารวมหาได้จากสมการ

$$J = J_i - J_e \quad (2.4)$$

เมื่อ

$J$  คือ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ารวม

$J_i$  คือ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าไอออน

$J_e$  คือ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าอิเล็กตรอน

ในพลาสมา อิเล็กตรอนจะมีการเคลื่อนที่สวนทางกับไอออนบวก ดังนั้นถ้าให้กระแสไอออนมีค่าเป็นบวกกระแสอิเล็กตรอนจะมีค่าเป็นลบ โดยจะต้องคำนึงถึงเครื่องหมายของกระแสด้วย

### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินการวิจัย

ในโครงการพิเศษนี้เป็นการสร้างพลาสมาขึ้นในบรรยากาศ โดยวิธีกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ความถี่ 2.45 GHz (Microwave Induced Plasma; MIP) ทำให้แก๊สอาร์กอน (Ar) เกิดการแตกตัวเป็นไอออนแล้วเกิดพลาสมาขึ้นในบรรยากาศ ซึ่งในการทดลองจะใช้แหล่งกำเนิดพลาสมา (Plasma source) แบบ Guide-surfatron (GS) เพราะพลาสมาจะเกิดในหลอดแก้ว มีสิ่งรบกวนจากสิ่งแวดล้อมน้อย ทำให้มีแนวโน้มที่จะสามารถสร้างพลาสมาที่ความดันบรรยากาศได้สูงกว่าใช้แหล่งกำเนิดพลาสมาแบบ Torch an injection axial (TIA) ซึ่งจะเกิดพลาสมาขึ้นอย่างอิสระในอากาศ

#### 3.1 ขั้นตอนการศึกษากระบวนการพลาสมาชนิดกระตุ้นด้วยไมโครเวฟ

ทำการศึกษาค้นคว้าและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับระบบการเกิดพลาสมาชนิดกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ความดันบรรยากาศ ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อการเกิดพลาสมาในบรรยากาศ วิธีการกำเนิดพลาสมา รวมถึงวิธีการป้องกันคลื่นไมโครเวฟที่รั่วออกมาจากท่อนำคลื่นซึ่งจะเป็นอันตรายถ้ามีการสัมผัสในปริมาณที่มาก

ซึ่งในส่วนของ การทดลอง ได้ทำการทดลองที่แตกต่างกัน 3 ครั้ง โดยได้ทำการเปลี่ยนชนิดของหลอดแก้ว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหลอดแก้ว และเปลี่ยนขนาดของท่อโลหะแบบวงกลมด้านในที่หลอดแก้วผ่าน

**การทดลองครั้งที่ 1** ใช้หลอดแก้ว Pyrex ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 8 mm ซึ่งสามารถทนอุณหภูมิได้ถึง 700 °C และใช้ท่อโลหะทรงกระบอกด้านใน ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 10 mm ยาว 13 cm

**การทดลองครั้งที่ 2** ใช้หลอดแก้วควอตซ์ (quartz) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.3 mm ซึ่งสามารถทนอุณหภูมิได้ถึง 1,500 °C และใช้ท่อโลหะทรงกระบอกด้านใน ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 10 mm ยาว 13 cm เช่นเดียวกันกับการทดลองครั้งที่ 1

**การทดลองครั้งที่ 3** ใช้หลอดแก้วควอตซ์ (quartz) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.3 mm ซึ่งสามารถทนอุณหภูมิได้ประมาณ 1,500 °C และใช้ท่อนำคลื่นทรงกระบอกด้านในที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 4.4 mm ยาว 12.5 mm

โดยในการทดลองแต่ละครั้งจะมีขั้นตอนในการทดลองเหมือนกัน ซึ่งในการทดลองจะต้องทำการควบคุมความดันที่สามารถสร้างพลาสมาได้ , ค่า voltage ที่ป้อนให้กับแมกนีตรอนเพื่อกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งสามารถอธิบายขั้นตอนในการทดลองในหัวข้อ 3.2

### 3.2 ขั้นตอนการสร้างพลาสมาชนิดกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟในบรรยากาศ

3.2.1 ติดตั้งระบบดังรูป 3.1 ซึ่งประกอบด้วย แมกนีตรอน , ท่อนำคลื่นแบบ rectangular , ท่อนำคลื่นแบบ circular , stub tuner , Plunger หรือ ตัวสะท้อนคลื่น 2 ตัว และ หลอดแก้วที่ใช้ในการทดลองแต่ละครั้ง



รูปที่ 3.1 การติดตั้งระบบสร้างพลาสมาชนิดกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ

3.2.2 ต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงเข้ากับแมกนีตรอน ติดตั้งระบบทำความเย็น (water cooling system) เข้ากับแมกนีตรอนเพื่อระบายความร้อน ติดตั้งปั๊มสุญญากาศแบบโรตารีเข้ากับปลายด้านหนึ่งของหลอดแก้ว ในขณะที่ปลายอีกด้านหนึ่งของหลอดแก้วต่อกับ Needle valve ซึ่งเป็นส่วนที่ควบคุมปริมาณแก๊สอาร์กอนที่ผ่านเข้าไปในหลอดแก้ว เพื่อทำการเพิ่มความดันให้กับระบบ

3.2.3 ติดตั้ง Pirani gauge เข้ากับปั๊ม โรตารีและต่อสายไปยังส่วนควบคุมและแสดงผลความดันของ Pirani gauge ที่แสดงค่าความดันในหน่วยเป็น มิลลิบาร์ (mbar) และติดตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- พัฒนากระบวนการให้ความร้อนให้กับท่อนำคลื่นบริเวณที่มีการเกิดพลาสมาในท่อแก้ว เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้น เนื่องจากบริเวณนี้จะมีอุณหภูมิที่สูงมากๆ
- 3.2.4 เปิดระบบระบายความร้อน (water cooling system) ให้กับ Magnetron ซึ่งใช้น้ำเป็นตัวระบายความร้อน
- 3.2.5 เปิดแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงให้กับแมกนีตรอน จากนั้นจึงเปิดแหล่งจ่ายไฟเพื่อจ่ายกระแสให้กับ filament ของ magnetron เพื่อกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ
- 3.2.6 เปิดปั๊มโรตารีให้ทำงาน เพื่อสูดอากาศในหลอดแก้ว จนมีความดันระดับ  $10^{-3}$  mbar ภายในท่อแก้ว
- 3.2.7 เปิด Needle valve เพื่อจ่ายแก๊สอาร์กอนเข้าสู่หลอดแก้ว โดยทำการหมุนที่ Needle valve เพิ่มขึ้นช้า ๆ จนความดันภายในหลอดแก้วเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ  $1 \times 10^{-2}$  mbar ซึ่งเป็นค่าความดันที่เหมาะสมที่แก๊สอาร์กอนเกิดการแตกตัวได้จำนวนมาก และสามารถเกิดพลาสมาขึ้นได้
- 3.2.8 เพิ่มศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูงให้กับแมกนีตรอนขึ้น โดยการเพิ่มแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ จนมีค่าประมาณ 150 โวลต์ ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมในการทำให้เกิดแตกตัว
- 3.2.9 สังเกตที่หลอดแก้วว่าเกิดลำแสงพลาสมาขึ้นหรือยัง ถ้ายังไม่เกิดให้ทำการปรับ plunger ทั้ง 2 ตัวเพื่อปรับระยะ Resonance Cavity ให้เกิดคลื่นนิ่งที่เหมาะสม หรือเกิดแอมพลิจูดสูงสุดที่ตำแหน่งของหลอดแก้วซึ่งวางวางอยู่ในท่อนำคลื่น และทำการปรับ stub tuner เพื่อให้พลาสมาเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ
- 3.2.10 เมื่อเกิดพลาสมาขึ้นในหลอดแก้วแล้ว ทำการเพิ่มความดันขึ้น โดยการปรับ needle valve เพื่อเพิ่มปริมาณแก๊สอาร์กอนเข้าสู่หลอดแก้ว และสังเกตว่ายังคงเกิดพลาสมาได้ต่อไปหรือไม่
- 3.2.11 ระหว่างทำการเพิ่มความดันให้ปรับ Plunger เพื่อปรับระยะ Resonance Cavity ให้เกิดคลื่นนิ่งที่เหมาะสม และปรับ stub tuner เพื่อทำการปรับ Impedance Matching ให้เกิดความสม่ำเสมอของพลาสมา
- 3.2.12 ในระหว่างทำการทดลองให้ตรวจสอบการรั่วของคลื่นไมโครเวฟด้วย เพื่อป้องกันอันตรายที่เกิดขึ้น โดยใช้อุปกรณ์ตรวจสอบการรั่วของคลื่นไมโครเวฟ

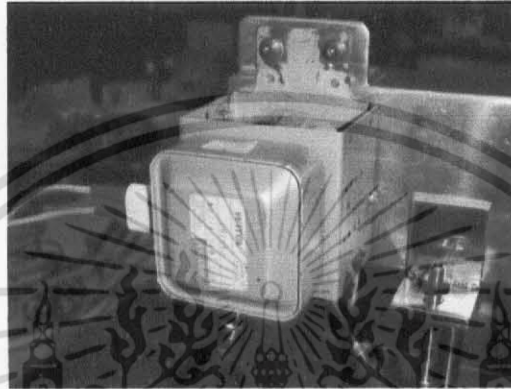
**หมายเหตุ** การที่จะทำให้พลาสมาที่เกิดขึ้นมีลักษณะเสถียรจะต้องทำการปรับ stub tuner โดยที่ stub tuner เป็นอุปกรณ์ในการปรับ Impedance Matching เพื่อให้พลาสมาเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ

### 3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

การเตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ดังต่อไปนี้ คือ

#### 3.3.1 แมกนีตรอน

ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟความถี่ 2.45 GHz



รูปที่ 3.2 แหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ

#### 3.3.2 อุปกรณ์ตรวจสอบการรั่วของคลื่นไมโครเวฟ (Microwave leakage meter)

ทำหน้าที่ตรวจสอบการรั่วของคลื่นไมโครเวฟจากระบบ

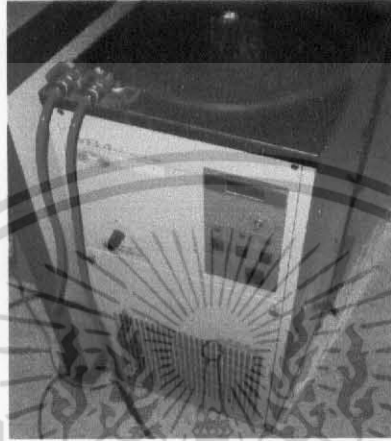


รูปที่ 3.3 อุปกรณ์ตรวจสอบการรั่วของคลื่นไมโครเวฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.3 ระบบควบคุมอุณหภูมิแมกนีตรอน (water cooling system)

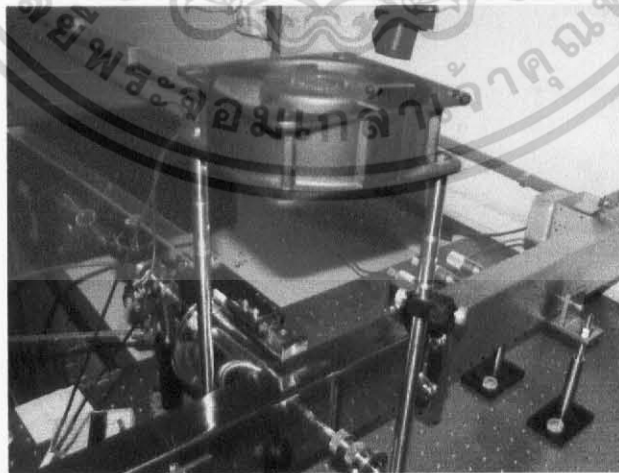
เป็นระบบทำความเย็นให้กับแมกนีตรอน โดยใช้น้ำเป็นตัวระบายความร้อนที่เกิดขึ้นที่แมกนีตรอน



รูปที่ 3.4 ระบบควบคุมอุณหภูมิชนิดใช้น้ำ

### 3.3.4 พัดลมระบายความร้อน

ในบริเวณที่แก๊สอาร์กอนถูกกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟแล้วเกิดการแตกตัว เกิดเป็นพลาสมาจะมีอุณหภูมิสูงมาก ดังนั้น จึงต้องมีพัดลมเพื่อใช้ในการระบายความร้อนให้กับท่อนำคลื่น และหลอดแก้วควอทซ์

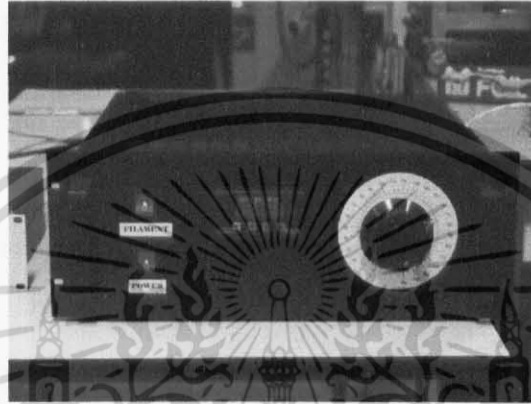


รูปที่ 3.5 พัดลมระบายความร้อนให้กับระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.5 แหล่งจ่ายไฟเลี้ยงแมกนีตรอน (Power supply)

แหล่งจ่ายไฟเป็นส่วนสำคัญของกระบวนการทดลองในการสร้างพลาสมาอีกอย่างหนึ่ง เพราะเป็นส่วนที่จ่ายกระแส และโวลเตจให้กับแมกนีตรอน เพื่อสร้างคลื่นไมโครเวฟมากระตุ้นก๊าซอาร์กอนให้เกิดการแตกตัว



รูปที่ 3.6 แหล่งจ่ายไฟเลี้ยงแมกนีตรอน

### 3.3.6 ระบบแกว้ตสุญญากาศ

**EDWARD Pirani Gauge (APG-M-NW16):** ทำงานที่ความดัน  $10^{13}$  –  $10^{-3}$  mbar และ ตัวควบคุมแกว้ (EDWARD: Active Gauge Controller)

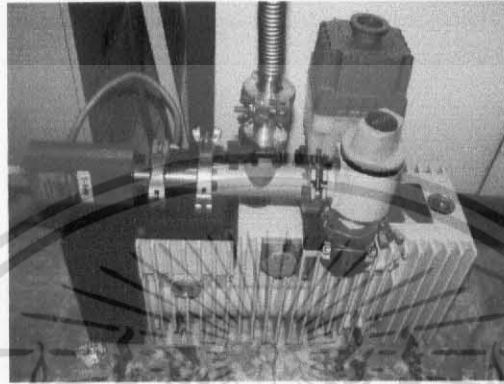


รูปที่ 3.7 Pirani Gauge และ Active Gauge Controller

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.7 ปั๊มสุญญากาศ

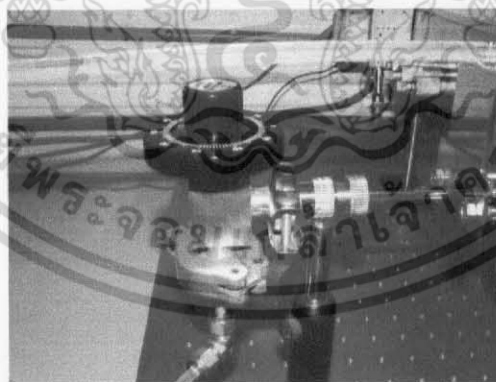
ปั๊มโรตารี (Rotary pump) รุ่น **Balzers** DUO 004B ทำงานที่ช่วงความดัน  $10^3$ - $10^{-3}$  mbar



รูปที่ 3.8 โรตารีปั๊ม

### 3.3.8 Needle valve

เป็นวาล์วที่ใช้ควบคุมการจ่ายแก๊สอาร์กอนเข้าไปในหลอดแก้ว เพื่อให้เกิดเกิดการแตกตัว และเป็นการเพิ่มความดันให้กับระบบ



รูปที่ 3.9 Needle valve

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.9 ท่อนำคลื่น (wave Guide)

ท่อนำคลื่น เป็นตัวนำไฟฟ้าที่เป็นโครงแบบง่าย ซึ่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเดินทางภายในท่อนำคลื่น โดยที่สามารถมีสนามในรูปแบบต่างๆ ได้ ซึ่งสนามต่างๆ มีทั้งส่วนประกอบของสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้าที่อยู่ในทิศทางของการเคลื่อนที่ ถ้าคลื่นมีสนามไฟฟ้าตั้งฉากกับทิศทางของการเคลื่อนที่และมียอดค่าประกอบของสนามแม่เหล็กในทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่จะถูกเรียกว่า คลื่น TE ส่วนคลื่น TM มีสนามแม่เหล็กในระนาบตั้งฉากกับทิศทางของการเคลื่อนที่ และองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่ ซึ่งในโครงการพิเศษนี้ใช้ท่อนำคลื่นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า mode  $TE_{106}$ , WR (Wave Resonance) 340 ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่า Wave Resonance ของท่อนำคลื่นขนาดต่างๆ  
Rigid Rectangular Waveguide Dimensions

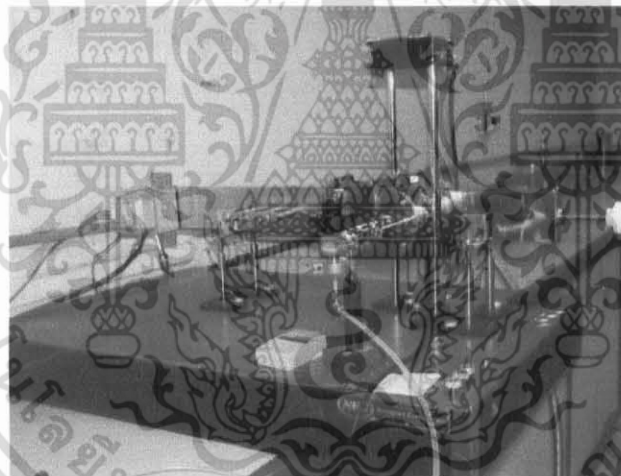
WG Designations	Frequency Range, GHz	Cut-off Freq., GHz	CW Power Rating, (MW)	Attenuation, dB/10m	Internal Dimensions	
					Inches	mm approx
WR2300	0.32-0.49	0.256	153.0-212.0	0.017-0.010	23.0×11.5	584.0×292.0
WR2100	0.35-0.53	0.281	120.0-173.0	0.018-0.011	21.0×10.5	533.0×267.0
WR1800	0.41-0.625	0.328	93.4-131.9	0.019-0.013	18.0×9.0	457.0×229.0
WR1500	0.49-0.75	0.393	67.6-93.3	0.023-0.017	15.0×7.5	381.0×191.0
WR1150	0.64-0.96	0.513	35.0-53.8	0.043-0.025	11.5×5.75	292.0×146.0
WR975	0.75-1.12	0.605	27.0-38.5	0.046-0.032	9.75×4.875	248.0×124.0
WR770	0.96-1.45	0.766	17.2-24.1	0.067-0.045	7.7×3.85	196.0×98.0
WR510	1.45-2.20	1.157	7.5-10.7		5.1×2.55	131.0×65.0
WR430	1.70-2.60	1.372	5.2-7.5	0.196-0.128	4.3×2.15	109.0×55.0
WR340	2.20-3.30	1.736	3.1-4.5	0.292-0.191	3.4×1.7	86.0×43.0
WR284	2.60-3.95	2.078	2.2-3.2	0.367-0.251	2.84×1.34	72.14×34.04
WR229	3.30-4.90	2.577	1.6-2.2		2.29×1.145	58.17×29.08
WR187	3.95-5.85	3.152	1.4-2.0	0.693-0.373	1.872×0.872	47.55×22.15
WR159	4.90-7.05	3.711	0.79-1.0		1.59×0.795	40.39×20.19
WR137	5.85-8.20	4.301	0.56-0.71	0.957-0.767	1.372×0.622	34.85×15.80
WR112	7.05-10.0	5.259	0.35-0.46	1.37-1.07	1.122×0.497	28.50×12.60
WR90	8.20-12.40	6.557	0.20-0.29	2.15-1.49	0.9×0.4	22.86×10.16
WR75	10.0-15.0	7.868	0.17-0.23		0.75×0.375	19.05×9.53
WR62	12.4-18.0	9.486	0.12-0.16	3.17-2.77	0.622×0.311	15.80×7.90
WR51	15.0-22.0	11.574	0.080-0.107		0.510×0.255	12.95×6.48
WR42	18.0-26.5	14.047	0.043-0.058	6.90-4.93	0.420×0.170	10.67×4.32
WR34	22.0-33.0	17.328	0.034-0.048		0.340×0.170	8.66×4.32
WR28	26.5-40.0	21.081	0.022-0.031	7.3-5.0	0.280×0.140	7.11×3.56
WR22	33.0-50.0	26.342	0.014-0.020	0.224-0.112	0.224×0.112	5.69×2.84

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของกรมการช่างอากาศยาน ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

WR19	40.0–60.0	31.357	0.011–0.015		0.188×0.094	4.78×2.39
WR15	50.0–75.0	39.863	0.0063–0.0090		0.148×0.074	3.76×1.88
WR12	60.0–90.0	48.350	0.0042–0.0060		0.122×0.061	3.10×1.55
WR10	75.0–110.0	59.010	0.0030–0.0041		0.100×0.050	2.54×1.27
WR8	90.0–140.0	73.840	0.0018–0.0026	51.33	0.080×0.040	2.03×1.02
WR7	110.0–170.0	90.840	0.0012–0.0017	54.46	0.065×0.0325	1.7×0.82
WR5	140.0–220.0	115.75	0.00071–0.00107	103.64	0.051×0.0255	1.3×0.65
WR4	170.0–260.0	131.520	0.00052–0.00075	128.85	0.043×0.0215	1.1×0.55
WR3	220.0–325.0	173.280	0.00035–0.00047	171.116	0.034×0.017	0.87×0.44

### 3.3.10 ชุดอุปกรณ์ระบบพลาสมา

ประกอบด้วย ท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม ท่อนำคลื่นแบบวงกลม ตัวปรับอิมพีแดนซ์ (stub tuner) ตัวสะท้อนคลื่น (Plunger) และหลอดแก้วควอทซ์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 4.2 mm และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.3 mm



รูปที่ 3.10 ชุดอุปกรณ์ระบบสร้างพลาสมา

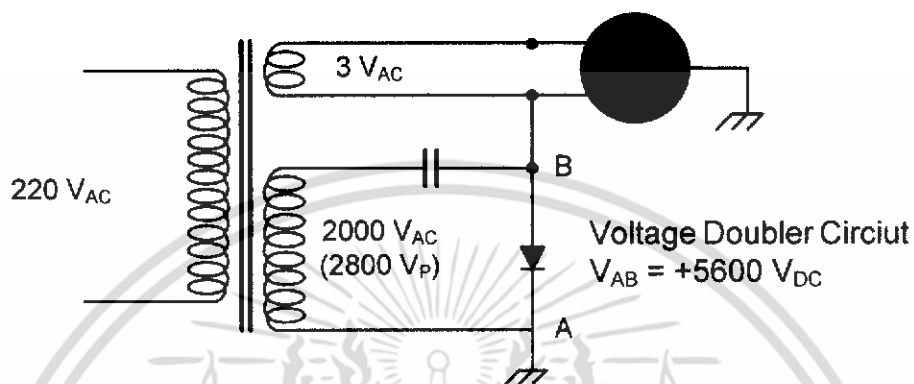
## 3.4 การควบคุมกำลังงานของแมกนีตรอนและการทำงานของแหล่งจ่ายไฟ

### 3.4.1 การควบคุมกำลังงานของแมกนีตรอน

ในโครงการพิเศษนี้ใช้แหล่งกำเนิดคลื่น ไมโครเวฟชนิดแมกนีตรอนที่ใช้กันทั่วไปในเตาไมโครเวฟทำหน้าที่เป็นแหล่งพลังงานเพื่อให้เกิดแตกตัวเป็นพลาสมา เนื่องจากมีราคาถูกมากเมื่อเทียบกับแหล่งกำเนิดไมโครเวฟชนิดอื่นและยังหาได้ง่าย จากการศึกษพบว่าแมกนีตรอนที่ใช้ในเตาไมโครเวฟที่ใช้งานทั่วไปจะมีกำลังงานประมาณ 600 – 800 W ซึ่งถ้านำคลื่น ไมโครเวฟที่มีกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระดับนี้ มากกระตุ้นเพื่อให้เกิดในหลอดขนาด O.D. 1 cm ยาว 10 cm เกิดการแตกตัวเป็นพลาสมาถือว่าเกินความจำเป็นและมีการสูญเสียในรูปของความร้อนจำนวนมาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาวิธีการลดกำลังงานของแมกนีตรอนลงให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม

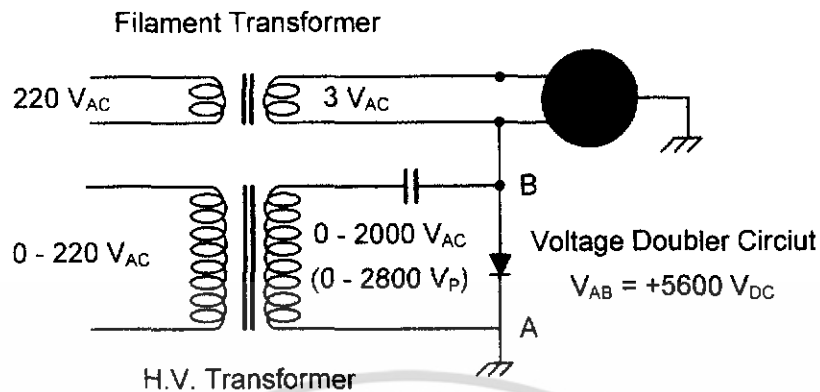


รูปที่ 3.11 โค้ดอะแกรมวงจรไฟฟ้าของ magnetron ที่ใช้งานทั่วไป

จากการศึกษาพบว่าแมกนีตรอนในสภาวะการทำงานปกติจะมีกระแส filament ประมาณ 10 A และมีความต่างศักย์ระหว่าง anode และ cathode ประมาณ 5600 V<sub>DC</sub> ดังแสดงในรูปที่ 3.11 โดยจำนวนของอิเล็กตรอนที่หลุดออกจาก filament ที่ร้อนจะแปรผันตามกระแสที่ไหลผ่าน filament อิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ผ่านสนามแม่เหล็กไปยัง anode และอิเล็กตรอนเหล่านี้จะแผ่พลังงานออกมาในรูปของคลื่นไมโครเวฟ โดยกำลังงานของคลื่นไมโครเวฟที่ได้จะแปรผันตามจำนวนอิเล็กตรอนที่ถูกเร่งไปยัง anode ดังนั้นการลดกำลังงานของแมกนีตรอนสามารถทำได้ 2 วิธี คือ

- ลดกระแสที่จ่ายให้กับ filament
- ลดความต่างศักย์ระหว่าง anode กับ cathode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 วงจรไฟฟ้าของ magnetron เมื่อแยก transformer ออกเป็น 2 ตัว โดยสามารถปรับค่า AC Voltage ของ H.V. Transformer ได้

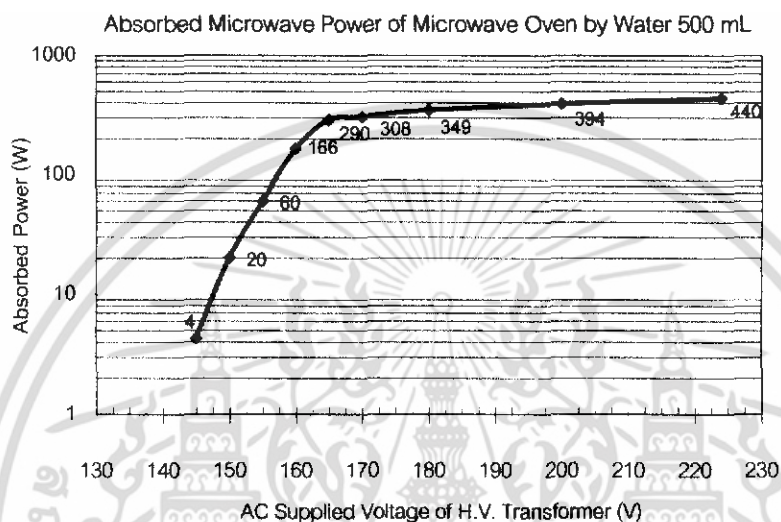
การลดกระแสที่จ่ายให้ filament จะทำให้มีอิเล็กตรอนหลุดออกมาน้อยลงจึงทำให้กำลังของคลื่นไมโครเวฟลดลงได้ แต่จากการศึกษาพบว่าเมื่อลดกระแส filament ลงถึงระดับหนึ่งจะทำให้แมกนีตรอนหยุดทำงาน จึงไม่สามารถลดกำลังของไมโครเวฟได้ตามที่ต้องการ ส่วนการลดความต่างศักย์ระหว่าง anode และ cathode นั้นโดยยังคงให้กระแส filament คงเดิม ซึ่งจะทำให้จำนวนอิเล็กตรอนที่ถูกเร่งไปยัง anode มีปริมาณลดลง ซึ่งจะเป็นผลให้กำลังงานของคลื่นไมโครเวฟลดลงเช่นกัน และจากการทดลองพบว่าสามารถลดกำลังของไมโครเวฟให้ต่ำลงได้ตามต้องการโดยไม่ทำให้แมกนีตรอนหยุดทำงานแต่อย่างใด ดังนั้นการควบคุมกำลังของคลื่นไมโครเวฟในงานวิจัยนี้จึงใช้วิธีควบคุมความต่างศักย์ระหว่าง anode กับ cathode แทนการควบคุมกระแส filament แต่เนื่องจาก transformer ที่จ่ายไฟให้แก่ filament และขั้ว anode ของแมกนีตรอนมีขด primary ขดเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 3.11 การลด โวลเตจที่ขด primary จึงไม่เพียงแต่เป็นการลดความต่างศักย์ระหว่าง anode กับ cathode เท่านั้นแต่ยังเป็นการลดกระแส filament ด้วย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงออกแบบวงจรไฟฟ้าโดยใช้ transformer แยกกัน 2 ตัว โดยให้ขด primary ของ transformer สำหรับ filament มีโวลเตจคงที่ ส่วนโวลเตจของขด primary ของ transformer สำหรับ anode สามารถปรับค่าได้ตั้งแต่ 0 – 220 V<sub>AC</sub> โดยใช้ variac ดังแสดงรูปที่ 3.12

สำหรับการวัดกำลังงานของ แมกนีตรอนของเตาไมโครเวฟนั้น ทำได้โดยการวัดการดูดกลืนพลังงานของน้ำปริมาตร 500 mL ซึ่งบรรจุอยู่ใน beaker วางอยู่ภายใน cavity ของเตาไมโครเวฟ จากนั้นทำการปรับ AC Voltage ของ H.V. ของแมกนีตรอนเพื่อควบคุมกำลังงานของแมกนีตรอนใช้เวลาในการทดลองแต่ละครั้งประมาณ 150 –160 วินาที มีผลการวัดแสดงดังรูปที่

3.13 ข้อควรพิจารณาสำหรับการวัดกำลังงานโดยวิธีนี้คือ กำลังงานที่ได้จะเป็นจริงเฉพาะกรณีนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เท่านั้น กล่าวคือกำลังของแมกนีตรอน ใน cavity ของเตาไมโครเวฟกับกำลังของแมกนีตรอนใน waveguide cavity (ที่พัฒนาเป็น waveguide cavity plasma source) จะไม่เท่ากันเมื่อให้ AC Voltage ของ H.V. ของแมกนีตรอน เท่ากัน หมายความว่ากำลังที่วัดได้ไม่ใช่กำลังที่แท้จริงของแมกนีตรอน แต่อย่างไรก็ตามเพื่อความสะดวกจะเรียกกำลังที่วัดได้นี้ว่ากำลังงานของแมกนีตรอน หรือกำลังงานของคลื่นไมโครเวฟ

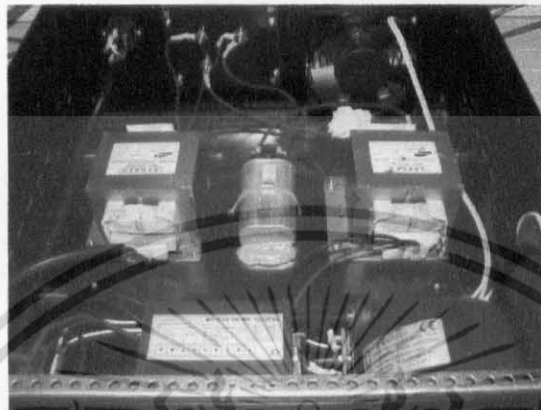


รูปที่ 3.13 ผลการวัดกำลังงานของแมกนีตรอน ภายในเตาไมโครเวฟ

จากผลการวัดกำลังงานของแมกนีตรอน ในเตาไมโครเวฟ ซึ่งทำโดยการวัดปริมาณความร้อนที่ถูกดูดกลืนโดยน้ำ 500 mL พบว่ากำลังของแมกนีตรอน ที่ถูกดูดกลืนโดยน้ำนั้น มีค่าเปลี่ยนแปลงตาม AC Voltage ที่ป้อนให้กับ H.V. Transformer ซึ่งสามารถลดกำลังของแมกนีตรอนลงเหลือเพียง 4 W เมื่อ AC Voltage ของ H.V. Transformer มีค่าประมาณ 145 V<sub>AC</sub> และกำลังของแมกนีตรอนมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตาม AC Voltage จนมีค่าประมาณ 290 W ที่ AC Voltage มีค่าประมาณ 165 V<sub>AC</sub> จากนั้นกำลังจะเพิ่มขึ้นตาม AC Voltage ในอัตราที่ลดลง ดังแสดงในรูปที่ 3.13

ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้สร้างแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงแมกนีตรอนขึ้นมาโดยใช้วงจรควบคุมความต่างศักย์ระหว่าง anode และ cathode ดังรูปที่ 3.11 และใช้ variac ในการควบคุมความต่างศักย์ระหว่าง anode และ cathode ซึ่งตัว variac จะสามารถปรับค่า voltage input ที่ป้อนให้กับ transformer ตัวที่ 2 ตั้งแต่ 0-220 V เพื่อควบคุม voltage output ที่ออกจาก transformer ตัวที่ 2 ในการจ่ายให้แมกนีตรอน เพื่อกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ ดังนั้นจึงสามารถควบคุมกำลังของคลื่น ไมโครเวฟที่สร้างขึ้นมาได้ เป็น

การลดกำลังของคลื่นไมโครเวฟที่เกินความต้องการในการใช้งาน และป้องกันอันตรายจากคลื่นไมโครเวฟที่รั่วออกมาได้ แหล่งจ่ายไฟที่สร้างขึ้นมาใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 แสดงส่วนประกอบของแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงแมกนีตรอน

### 3.4.2 หลักการทำงานของวงจรของแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงแมกนีตรอน

โดยวงจรของแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงแมกนีตรอนจะแบ่งออกเป็นสองส่วนด้วยกัน ดังรูปที่ 3.12 โดยแต่ละวงจรมีหลักการทำงาน ดังนี้

- **Filament transformer** เป็นแหล่งจ่ายไฟที่ทำหน้าที่จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับ filament ของแมกนีตรอนซึ่งเป็นขั้วแคโทด เพื่อให้ filament อยู่ในสถานะพร้อมที่จะปลดปล่อยอิเล็กตรอนให้กับขั้วแอโนดที่อยู่รอบๆ

- **High Voltage Transformer** เป็นแหล่งจ่ายไฟที่ทำหน้าที่จ่ายศักย์ไฟฟ้าให้กับ filament ของแมกนีตรอนซึ่งเป็นขั้วแคโทด เพื่อไปกระตุ้นให้อิเล็กตรอนจาก filament ที่พร้อมจะปลดปล่อยอิเล็กตรอนหลุดออกมาจากขั้วแคโทดและถูกเร่งด้วยศักย์ไฟฟ้าไปยังขั้วแอโนดที่อยู่รอบๆ เกิดเป็นคลื่นไมโครเวฟนำไปใช้ในการทดลอง โดยคลื่นไมโครเวฟจะเคลื่อนที่ผ่านท่อนำคลื่น

ในส่วนนี้ยังประกอบด้วยวงจรเร็คติไฟเออร์แบบแรงดัน 2 เท่า (Voltage Doubler Rectifier) เพื่อเพิ่มโวลเตจที่ได้ให้เป็นสองเท่าตามความต้องการในการทดลอง คือ หม้อแปลงที่ใช้ในการทดลองให้โวลเตจออกมาเพียง  $2800 V_{AC}$  แต่ในการทดลองต้องใช้โวลเตจถึง  $5600 V_{AC}$  จึงต้องใช้วงจร Voltage Doubler Rectifier ในการเพิ่มโวลเตจ

#### การทำงานของวงจร Voltage double rectifier

1. เมื่อมีแรงดันออกจากหม้อแปลงเป็น  $V_T$  สมมติว่ามีแรงดันในครึ่ง cycle ลบก่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ตัว Capacitor จะเก็บสะสมประจุจนมีแรงดันตกคร่อมเท่ากับแรงดันสูงสุดที่ออกจากหม้อแปลง  $V_T = V_C$
3. เมื่อแรงดันออกจากหม้อแปลง  $V_T$  มีแรงดันอยู่ในครึ่ง cycle บวก จะทำให้แรงดันตกคร่อม diode  $D_1$  มีค่าเท่ากับ  $V_C + V_T$  ซึ่ง  $V_T = V_C$  ดังนั้นค่าแรงดันเอาพุตเท่ากับ  $2V_T$  ซึ่งเป็นแรงดันเอาพุตที่นำไปใช้กระตุ้นฟิลาเมนต์ของแมกนีตรอน
4. จะเห็นว่า Diode จะต้องทนแรงดันได้เป็น 2 เท่า ของแรงดันไฟฟ้าสูงสุด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผล

จากที่กล่าวมาในตอนต้นแล้วว่าการสร้างพลาสมาชนิดกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ความดันบรรยากาศ จะมีแหล่งกำเนิดพลาสมาอยู่ 2 แบบ คือ แบบ Torch an injection axial (TIA) และแบบ Guide-surfatron (GS) แต่สำหรับในงานวิจัยนี้จะทดลองโดยใช้แหล่งกำเนิดพลาสมาแบบ Guide-surfatron (GS) เพราะพลาสมาจะเกิดในหลอดแก้วควอทซ์ ซึ่งจะมีสิ่งรบกวนจากสิ่งแวดล้อมน้อย

จากการสร้างพลาสมาชนิดกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ความดันบรรยากาศ โดยใช้แมกนีตรอนในการกำเนิดคลื่นไมโครเวฟที่ความถี่ 2.45 GHz เพื่อไปกระตุ้นแก๊สอาร์กอนให้เกิดการแตกตัวขึ้นในหลอดแก้วแล้วเกิดเป็นลำพลาสมา ซึ่งได้ทำการทดลอง 3 ครั้งโดยการเปลี่ยนชนิดของหลอดแก้ว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหลอดแก้ว และเปลี่ยนขนาดของท่อโลหะทรงกระบอกที่หลอดแก้วผ่าน ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

#### 4.1 ผลการทดลอง

##### การทดลองครั้งที่ 1

ใช้หลอดแก้ว Pyrex ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 8 mm ซึ่งสามารถทนต่ออุณหภูมิได้ถึง 700 °C และใช้ท่อโลหะทรงกระบอกมิด้านใน ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 10 mm ยาว 13 cm ซึ่งผลการทดลองสามารถเริ่มสร้างพลาสมาได้ที่ความดันเท่ากับ  $1 \times 10^{-2}$  mbar และใช้ค่าศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับที่แหล่งจ่ายไฟของแมกนีตรอนประมาณ 140-160 V จึงจะทำให้ลำพลาสมานิ่ง และมีความสม่ำเสมอได้ แต่ไม่สามารถทำให้พลาสมาเริ่มติดที่ความดันมากกว่า  $10^{-1}$  mbar ได้ และเมื่อมีความดันในระบบ มากกว่า 1 mbar จะไม่สามารถสร้างพลาสมาได้ แต่ระบบในการสร้างพลาสมาที่ความดันบรรยากาศเมื่อแก๊สอาร์กอนแตกตัว และเกิดเป็นพลาสมาขึ้น จะมีอุณหภูมิสูงมากเป็น 1,000 °C ซึ่งหลอดแก้ว Pyrex สามารถทนต่ออุณหภูมิได้แค่ 700 °C เมื่อลำพลาสมามีอุณหภูมิสูงขึ้นทำให้หลอดแก้ว Pyrex ไม่สามารถทนต่ออุณหภูมิได้ ทำให้หลอดแก้วเกิดการหลอมละลาย

### การทดลองครั้งที่ 2

ใช้หลอดแก้วควอทซ์ (quartz) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.3 mm ซึ่งสามารถทนต่ออุณหภูมิได้ถึง  $1,500^{\circ}\text{C}$  และใช้ท่อโลหะทรงกระบอกด้านใน ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 10 mm ยาว 13 cm เช่นเดียวกันกับการทดลองครั้งที่ 1

ซึ่งผลการทดลองสามารถเริ่มสร้างพลาสมาได้ที่ความดัน เท่ากับ  $1 \times 10^{-1}$  mbar และใช้ค่าศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับที่แหล่งจ่ายไฟของแมกนีตรอนประมาณ 140-160 V จึงจะทำให้ลำพลาสมานิ่ง และมีความสม่ำเสมอได้ แต่ไม่สามารถทำให้พลาสมาเริ่มติดที่ความดัน มากกว่า 1 mbar ได้ และเมื่อมีความดันในระบบ มากกว่า 10 mbar จะไม่สามารถสร้างพลาสมาได้ จากผลการทดลองสังเกตได้ว่าเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหลอดแก้วมีเล็กลงจะทำให้สามารถสร้างพลาสมาที่ความดันสูงขึ้น แต่ความดันที่ใช้ในการสร้างพลาสมาขังได้อยู่จึงได้มีการปรับปรุงและทำการทดลอง โดยการเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ โลหะแบบวงกลมด้านในให้เล็กลง ดังการทดลองครั้งที่ 3



รูปที่ 4.1 ลำแสงพลาสมาที่ความดัน  $1 \times 10^{-1}$  mbar

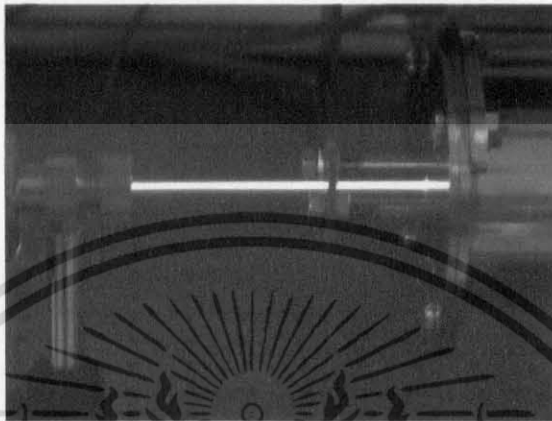
### การทดลองครั้งที่ 3

ใช้หลอดแก้วควอทซ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.3 mm และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 4.2 mm ซึ่งสามารถทนต่ออุณหภูมิได้ประมาณ  $1,500^{\circ}\text{C}$  และใช้ท่อโลหะทรงกระบอกด้านในที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 4.4 mm ยาว 12.5 cm

ซึ่งผลการทดลองสามารถเริ่มสร้างพลาสมาได้ที่ความดัน เท่ากับ 1 mbar และสามารถสร้างพลาสมาได้ที่ความดันสูงสุดถึง 10 mbar เมื่อเพิ่มความดันขึ้นมากกว่า 10 mbar ลำพลาสมาจะดับ และใช้ค่าศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับที่แหล่งจ่ายไฟของแมกนีตรอนประมาณ 140-160 V จึงจะทำให้ลำพลาสมานิ่ง และมีความสม่ำเสมอได้ ซึ่งในการทดลองสามารถสร้างพลาสมาได้สีม่วงอ่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพราะแก๊สที่ใช้เป็นอาร์กอน ดังรูป 4.1 ซึ่งเป็นลำพลาสมาทางด้านปลายหลอดแก้วควอทซ์ที่เชื่อมกับ Needle valve



รูปที่ 4.2 ลำแสงพลาสมาที่ความดัน 1 mbar



รูปที่ 4.3 ลำแสงพลาสมาที่ความดัน 10 mbar

สำหรับการทดลองจะมีการควบคุมค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการทดลองอยู่ 2 ตัวด้วยกันที่สามารถทำให้เกิดพลาสมาขึ้นได้ คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงที่ป้อนให้กับแมกนีตรอน และ ค่าความดันของแก๊สในหลอดแก้วซึ่งสามารถปรับความดันจากการจ่ายแก๊สอาร์กอนเข้าสู่หลอดแก้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 สักยไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟเลี้ยง

แหล่งจ่ายไฟเลี้ยงเป็นส่วนสำคัญมากสำหรับการสร้างพลาสมา ซึ่งเป็นส่วนที่ทำหน้าที่จ่ายกระแสไฟฟ้า และ จ่ายศักย์ไฟฟ้า ให้กับ filament ของแมกนีตรอน เมื่อนำค่า voltage output ที่ได้จากการทดลองไปเทียบกับค่าในกราฟ รูปที่ 3.13 จะได้ค่ากำลังงาน (Power) ที่ใช้ในการสร้างพลาสมา ซึ่งแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่า voltage output ของแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงแมกนีตรอน

Voltage input (V)	Voltage output (V)	Power (W)
5	50	-
25	350	-
45	670	-
65	950	-
85	1250	-
105	1530	-
125	1820	-
145	2120	4
165	2380	166
185	2670	349
205	2960	394
225	3250	440

ศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแมกนีตรอนต้องมีค่าสูงมาก เป็น high voltage เพื่อไปกระตุ้นให้อิเล็กตรอนของ filament หลุดจากขั้วแคโทด และถูกเร่งไปยังขั้วแอโนดที่อยู่รอบๆ

จากการทดลองศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่ออกจาก transformer ตัวที่ 2 เพื่อป้อนให้กับแมกนีตรอนในการกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ สามารถวัดได้ เท่ากับ 3250 V<sub>AC</sub> และได้ค่ากำลังของคลื่นไมโครเวฟเท่ากับ 440 W ดังตารางที่ 2

ในการทดลองค่า voltage output ที่ใช้ประมาณ 2000 – 2500 V จึงจะทำให้ลำพลาสมาที่สร้างขึ้นสามารถติด และมีความสม่ำเสมอ ซึ่งมีค่ามากพอต่อการนำไปใช้ในการทดลองสร้างพลาสมาได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ป้อนให้แหล่งจ่ายไฟเลี้ยงที่สามารถสร้างพลาสมาได้ อยู่ระหว่าง 140 -160 V แต่ค่าโวลเตจที่เหมาะสมจะอยู่ที่ 150 V เพราะจะทำให้พลาสมาติดอย่างสม่ำเสมอ และถ้าค่ามากกว่านี้จะทำให้มีคลื่นไมโครเวฟรั่วออกมามากเกินไป ซึ่งเกินความจำเป็นที่จะใช้ในการทดลอง และเป็นอันตรายต่อผู้ทดลอง

#### 4.3 ความดันที่ใช้ในการทดลอง

ความดันที่ใช้ในการทดลองต้องเป็นค่าที่สามารถสร้างพลาสมาให้ติดได้ และทำให้ลำพลาสมาติดอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งอ่านค่าได้จาก เกจวัดความดัน ซึ่งเป็น Active gauge ต่อมาจากพินานีเกจ ที่ต่ออยู่กับโรตารีปั๊ม เพื่อใช้ในการควบคุมความดันภายในหลอดแก้วควอทซ์

โดยตัวที่ใช้ในการควบคุมความดันภายในหลอดแก้วควอทซ์ คือ Needle valve เป็นวาล์วที่ใช้ควบคุม ปริมาณแก๊สอาร์กอน ที่ป้อน ไปยังหลอดแก้วควอทซ์ ถ้าแก๊สที่ใช้มีปริมาณมาก จะทำให้ความดันภายในหลอดแก้วสูงขึ้นเรื่อยๆ จนเข้าใกล้ความดันบรรยากาศ

จากการทดลองค่าความดันที่สามารถสร้างพลาสมาได้ คือ

ความดันต่ำสุดประมาณ  $1.0 \times 10^{-2}$  mbar

ความดันสูงสุดประมาณ 10 mbar

ความดันที่สามารถสร้างพลาสมาได้ในขณะนี้ยังไม่สูงพอถึงความดันบรรยากาศ คือ  $1 \times 10^3$  mbar

## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

บทนี้จะสรุปผลการทดลองในการสร้างพลาสมาที่ความดันบรรยากาศ ( $1.0 \times 10^3$  mbar) ซึ่งทำการทดลองจากความดันต่ำๆก่อน แล้วค่อยๆเพิ่มความดันให้มีค่าเข้าใกล้ความดันบรรยากาศมากขึ้นเรื่อยๆ จนถึงความดันบรรยากาศ และปรับค่าศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับแมกนีตรอนเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมกับการสร้างพลาสมามากที่สุด

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

โครงการพิเศษนี้เป็นการสร้างพลาสมาชนิดกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ความดันบรรยากาศ โดยใช้แหล่งกำเนิดพลาสมาแบบ Guide-surfatron (GS) และใช้แมกนีตรอนในการสร้างคลื่นไมโครเวฟความถี่ 2.45 GHz เพื่อไปกระตุ้นแก๊สอาร์กอนให้มีพลังงานมากพอแล้วเกิดการแตกตัวเป็นพลาสมาขึ้นมา

##### การทดลองที่ 1

เมื่อใช้หลอดแก้ว Pyrex เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 8 mm และใช้ท่อโลหะทรงกระบอกด้านใน เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 10 mm ยาว 13 cm สามารถเริ่มสร้างพลาสมาได้ที่ ความดัน  $1.0 \times 10^2$  mbar และ สามารถ สร้างพลาสมาได้ที่ความดันสูงสุด เท่ากับ  $1.0 \times 10^1$  mbar โดยใช้ศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้แมกนีตรอนประมาณ 140-160 V

##### ปัญหาที่พบ

ในการทดลองบริเวณที่แก๊สแตกตัวและเกิดล้าพลาสมามีอุณหภูมิสูงมาก ทำให้หลอดแก้ว Pyrex ไม่สามารถทนต่อความร้อนได้จึงเกิดการละลาย

##### การทดลองครั้งที่ 2

ใช้หลอดแก้ว quartz เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.3 mm และใช้ท่อโลหะทรงกระบอกด้านใน ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 10 mm ยาว 13 cm สามารถเริ่มสร้างพลาสมาได้ที่ความดัน เท่ากับ  $1 \times 10^1$  mbar และ สามารถสร้างพลาสมาได้ที่ความดันสูงสุด เท่ากับ 1 mbar ใช้ค่าศักย์ไฟฟ้าประมาณ 140-160 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ปัญหาที่พบ

ในการทดลองไม่สามารถสร้างพลาสมาที่ความดันสูงๆ ได้ และเมื่อเพิ่มค่าศักย์ไฟฟ้าถึงประมาณ 160 V จะเกิดการ spark ขึ้นที่บริเวณปลายของท่อโลหะทรงกระบอกด้านใน กับผนังของท่อนำคลื่น

### การทดลองครั้งที่ 3

ใช้หลอดแก้วควอทซ์ เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.3 mm และใช้ท่อโลหะทรงกระบอกด้านในที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 4.4 mm ยาว 12.5 cm สามารถเริ่มสร้างพลาสมาได้ที่ความดันเท่ากับ 1 mbar และสามารถสร้างพลาสมาได้ที่ความดันสูงสุดถึง 10 mbar และใช้ค่าศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับที่แหล่งจ่ายไฟของแมกนีตรอนประมาณ 140-160 V

### ปัญหาที่พบ

ไม่สามารถสร้างพลาสมาได้ที่ความดันบรรยากาศ เมื่อเพิ่มความดันสูงกว่า 10 mbar พลาสมาจะดับ

จากการทดลองความดันสูงสุดที่สามารถสร้างพลาสมาได้ คือ 10 mbar และใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่จ่ายให้กับแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงแมกนีตรอนเท่ากับ 150 โวลต์ ซึ่งความดันที่สามารถสร้างพลาสมายังไม่สูงถึงความดันบรรยากาศ

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การที่จะทำให้แก๊สเกิดการแตกตัวและเกิดเป็นพลาสมา ควรควบคุมอัตราการไหลของแก๊สให้เหมาะสมกับการเคลื่อนที่ของคลื่นไมโครเวฟในท่อนำคลื่น
2. ในระหว่างการทดลองต้องวัดการรั่วของคลื่นไมโครเวฟอยู่ตลอดเวลา และไม่ควรเข้าใกล้บริเวณที่มีคลื่นไมโครเวฟรั่วออกมา
3. ในการทดลองต้องปรับ Plunger และ สติป อย่างช้าๆ
4. ก่อนทำการทดลองต้องต่อสายดินกับระบบด้วย เพื่อป้องกันไฟดูด
5. ในระหว่างทำการทดลอง ต้องมีความพร้อม และต้องมีสมาธิอยู่ตลอดเวลา

### 5.3 แนวทางในการพัฒนา

1. เปลี่ยนขนาดของหลอดแก้วควอทซ์ให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลงกว่าที่ใช้ในการทดลอง
2. ใช้ท่อโลหะทรงกระบอกที่ใช้ในการส่งผ่านคลื่นไมโครเวฟให้มีความยาว และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เหมาะสมกับขนาดของหลอดแก้วควอทซ์ที่ใช้ในการทดลอง
3. สร้างพลาสติกความดันบรรยากาศเลย โดยที่ไม่ต้องใช้อุปกรณ์ในการดูดอากาศออก
4. เปลี่ยนแหล่งกำเนิดพลาสมา จากแบบ Guide-surface (GS) เป็นแบบ Torch an injection axial (TIA)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

What are Plasmas , address: <http://www.plasmas.org/rot-plasmas.html>

P. Chaivan, N. Pasaja, D. Boonyawan, P. Suanpoot, T. Vilaithong . 2005. Low-temperature plasma treatment for hydrophobicity improvement of silk. **Surface & Coatings Technology** : 193 (2005) 356–360

Nasser E. **Fundamentals of Gaseous Ionization and Plasma Electronics**. The United of America : John Wiley & Sons , Inc . 1971

บัณฑิต โรจน์อารยานนท์. 2539. วิศวกรรมไมโครเวฟ. ครั้งที่ 2. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย : กรุงเทพมหานคร.

ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี , 2544. การศึกษาแหล่งกำเนิดไอออนชนิดฮอโลแคโทดแมกนีตรอน วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

Alfred Grill. **Cold Plasma in Materials Fabrication**. New York: IEEE Press. 1994

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้