



เครื่องแยกพลาสติกจากพอยลูลูมิเนียมด้วยคลื่นไมโครเวฟ

โดย

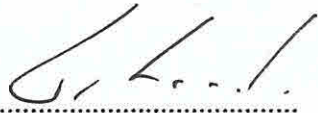
นายพงษ์ศร	ชาญประไพ	รหัสนักศึกษา	B5308200
นายปิติ	นิซัง	รหัสนักศึกษา	B5341634
นายสุเมธ	บุญปิ่น	รหัสนักศึกษา	B5342686

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาวิชา 438499 โครงการวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ภาคเรียนที่1 ปีการศึกษา 2557

เครื่องแยกพลาสติกจากพอยล์อลูมิเนียมด้วยคลื่นไมโครเวฟ

คณะกรรมการสอบโครงการ



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ทองโสหา)
อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล)
กรรมการ



(อาจารย์ ดร.บุญส่ง สุตะพันธ์)
กรรมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำรายงานโครงการฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม หลักสูตรวิชาวิศวกรรม
อิเล็กทรอนิกส์ ในรายวิชา 438499 โครงการวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ประจำปี
การศึกษา 2557

กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgment)

ในการจัดทำโครงงานเรื่องเครื่องแยกพลาสติกจากพอลิโพรพิลีนด้วยคลื่นไมโครเวฟ ในภาคการเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2557 นี้ ทำให้ได้รับความรู้และประสบการณ์ต่าง ๆ นอกเหนือจากในตำราเรียน ทดสอบความอดทนต่ออุปสรรคต่างๆ ที่เข้ามาระหว่างการทำโครงงาน ได้รู้จักการทำงานเป็นทีม จนโครงงานนี้สามารถสำเร็จลงได้ด้วยดีจากความร่วมมือและการให้คำปรึกษาจากหลายฝ่ายดังนี้

1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ทองโสภิต อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ที่มอบความรู้ให้คำปรึกษาตลอดช่วงการทำโครงงาน
2. พี่นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ในห้องปฏิบัติการทุกท่าน ที่คอยให้คำปรึกษาและช่วยเหลือทางด้านอุปกรณ์ เครื่องมือที่ขาดตกบกพร่อง
3. สมาชิกภายในกลุ่มที่คอยช่วยเหลือกัน มีน้ำใจต่อกัน รวมถึงให้กำลังใจตลอดการทำงาน
4. เพื่อนสมาชิกโครงงานกลุ่มอื่นๆ ที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ และแบ่งปันอุปกรณ์ เครื่องมือต่างๆ ในการจัดทำโครงงาน

ขอขอบพระคุณผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการให้ข้อมูลและเป็นที่ปรึกษาในการทำโครงงาน และจัดทำรายงานฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์ ตลอดจนให้การดูแลและให้ความเข้าใจเกี่ยวกับพื้นฐานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ และการใช้งานอุปกรณ์ต่าง ซึ่งผู้จัดทำโครงงานต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ด้วย



นายพงษ์ศธร ชาญประไพ	B5308200
นายปิติ นิซัง	B5341634
นายสุเมธ บุญปิ่น	B5342686

โครงการ	เครื่องแยกพลาสติกจากพอลิโพรพิลีนด้วยคลื่นไมโครเวฟ		
ผู้ดำเนินงาน	นายพงษ์ศธร ชาญประไพ	รหัสนักศึกษา	B5308200
	นายปิติ นีซัง	รหัสนักศึกษา	B5341634
	นายสุเมธ บุญปั้น	รหัสนักศึกษา	B5342686
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ทองโสภณ		
สาขาวิชา	วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์		
ภาคการศึกษา	1/2557		

บทคัดย่อ (Abstract)

เนื่องจากในปัจจุบันมีแหล่งพลังงานความร้อนต่าง ๆ มากมายที่ถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย เช่น การใช้ก๊าซหุงต้ม การใช้ขดลวดความร้อน การเหนี่ยวนำความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และการใช้คลื่นไมโครเวฟ ทั้งในครัวเรือน และภาคอุตสาหกรรม ซึ่งการใช้คลื่นไมโครเวฟนั้นมีความนิยมแพร่หลายในการใช้งานในครัวเรือนอย่างต่อเนื่อง และเป็นต้น และในปัจจุบันมีปริมาณขยะพอลิโพรพิลีนที่มีส่วนผสมของพลาสติกอยู่ในปริมาณมาก และเดิมการที่จะหลอมนำพอลิโพรพิลีนกลับมาใช้ใหม่นั้นจะสูญเสียพลาสติกทิ้งโดยเปล่าประโยชน์และยังเป็นมลภาวะทางอากาศ จึงมีแนวคิดที่จะทำการแยกทั้งสองส่วนออกจากกันก่อนที่จะนำไปรีไซเคิลใหม่โดยอาศัยหลักการทำงานของคลื่นไมโครเวฟ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อ	ข
สารบัญ	ค
สารบัญตาราง	ง
สารบัญรูป	จ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตงาน	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ส่วนประกอบการทำงานของเตาให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก	5
2.1.1 คุณสมบัติไดอิเล็กทริก (dielectric properties) ของวัสดุ	5
2.2 กลไกการเกิดความร้อนเนื่องจากไมโครเวฟ	7
2.3 แมกนีตรอน (magnetron)	8
2.4 พลังงานที่ถูกดูดซับในวัสดุ (absorbed power)	11
2.5 ประสิทธิภาพของเตาไมโครเวฟ	12
2.6 ความลึกในการทะลุทะลวง (penetration depth) ของไมโครเวฟ	13
2.7 ความปลอดภัยในการใช้ไมโครเวฟ	13
2.8 กระแสไหลวน (Eddy current)	14
2.8.1 การเกิดกระแสไหลวน	15
2.8.2 กระแสไหลวนทำให้เกิดอะไรขึ้น	15
บทที่ 3 การออกแบบและสร้างเครื่องแยกพลาสติกออกจากฟอยล์	18
3.1 ส่วนกำเนิดคลื่น (Magnetron)	18
3.2 ส่วนท่อนำคลื่น (Waveguide)	22
3.3 ส่วนเครื่องแยกพลาสติก	21
บทที่ 4 การทดสอบและผลการทดสอบ	25
4.1 การทดสอบการทำงานของส่วนให้กำเนิดคลื่น (magnetron)	25
4.2 การทดสอบการแยกพลาสติกออกจากฟอยล์	25
4.3 ปัญหาในการทำโครงงานและปัญหาในระหว่างการทดลอง	27
4.4 แนวทางการแก้ปัญหาระหว่างการทำโครงงานและการทดลอง	27
4.5 ผลผลิตที่เกิดจากการนำฟอยล์และพลาสติกที่แยกออกมาได้	28
บทที่ 5 สรุปผลการทำโครงงาน	29
5.1 บทสรุป	29
5.2 สิ่งที่ได้รับจากการทำโครงงาน	29

เรื่อง	สารบัญ(ต่อ)	หน้า
5.3 ข้อเสนอแนะ		29
บรรณานุกรม		30



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1 ความถี่ที่ใช้งานสำหรับ Radio และ Microwaves	5
ตารางที่ 2.2 แสดงคุณสมบัติไดอิเล็กทริกของสารและอาหารบางชนิด	6
ตารางที่ 3.1 ค่าattenuation และ ค่า Power loss ของโลหะชนิดต่างๆที่ความถี่ 2.45 GHz	22
ตารางที่ 4.1 ผลการทดลอง	25



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ชั้นของกล่องนม	1
2.1 การเกิดความร้อนในเนื้อวัสดุจากการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก	3
2.2 microwave spectrum	3
2.3 ปฏิกิริยาการของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าต่อวัสดุชนิดต่าง ๆ	4
2.4 วัตถุที่มีการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก (รูปซ้าย)	4
และการให้ความร้อนแบบเดิม (รูปขวา)	
2.5 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลง	7
ของค่า dielectric loss ของน้ำและน้ำแข็ง	
2.6 การเคลื่อนที่ของสารประกอบที่มีขั้วเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้า	8
2.7 ภาพตัดขวางของแมกนีตรอน	8
2.8 ภาพตัดขวางของแอโนดในแมกนีตรอน	9
2.9 ประสิทธิภาพของเตาไมโครเวฟ	12
2.10 กำลังของคลื่นไมโครเวฟจากเตาไมโครเวฟที่ระยะต่างๆ	14
2.11 กระแสไหลวนในวัตถุตัวนำ	15
2.12 การเกิดกระแสไหลวนและขั้วแม่เหล็กเหนี่ยวนำบนแผ่นอะลูมิเนียม	16
เมื่อขั้วเหนือของแม่เหล็กถาวรเคลื่อนที่ผ่าน	
2.13 การเกิดแรงผลักและแรงดึงดูดระหว่างแม่เหล็กถาวรและ	17
แม่เหล็กเหนี่ยวนำบนแผ่นอะลูมิเนียม	
3.1 ส่วนประกอบภายในหัวMagnetron	18
3.2 ส่วนประกอบของหัวMagnetron	18
3.3 วงจรจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับแมกนีตรอน ซึ่งเพิ่มแรงดันเป็น2เท่าโดยใช้ไดโอดและตัวเก็บประจุไฟฟ้าแรงสูง	19
3.4 ลักษณะของแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่จะจ่ายให้กับแมกนีตรอน	20
3.5 ลักษณะของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมแมกนีตรอน	20
3.6 วงจรจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงคงที่ 6,000 โวลต์ให้กับแมกนีตรอน	21
3.7 จงจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงให้กับแมกนีตรอน ซึ่งสามารถควบคุมแรงดันขาออก	22
3.8 ลักษณะคลื่นไมโครเวฟที่ถูกส่งออกจากสล็อตที่ปลายแมกนีตรอน	23
3.9 ลักษณะของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของโหมด TE ₁₀	23
3.10 ตัวเครื่องและส่วนประกอบภายในชุดไมโครเวฟ	24
4.1 กราฟแสดงปริมาณของฟอยล์เทียบกับเวลา	26
4.2 ฟอยล์ที่สามารถแยกออกมาได้	26

รูปที่	สารบัญรูป(ต่อ)	หน้า
4.3	พลาสติกที่แยกออกมาได้	27
4.4	น้ำยาที่ใช้ผสมทำไม้อัด	28
4.5	ไม้อัดที่ใช้ น้ำยาที่ทำมาจากพลาสติก	28



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันมีปริมาณของขยะเหลือใช้มีจำนวนมากขึ้นทุกวัน ซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและย่อยสลายยาก จึงได้มีความคิดที่นำมาใช้กลับมาใช้ ในรูปแบบต่างๆมาก (ในโครงการนี้เราจะนำขยะที่มาจากกล่องนม) นั้นมีส่วนประกอบดังนี้ (ดังรูปที่ 1.1)

1. โพลีเอทิลีน - ป้องกันความชื้นจากภายนอก
2. กระดาษ - เพื่อความคงทนแข็งแรงของกล่อง
3. โพลีเอทิลีน - ช่วยฉีกกล่องให้แน่นสนิท
4. อลูมิเนียมฟอยล์ - ป้องกันภาวะภายนอก
5. โพลีเอทิลีน - ช่วยฉีกกล่องให้แน่นสนิท
6. โพลีเอทิลีน - ช่วยป้องกันและยึดติดการรั่วซึมของของเหลว



รูปที่ 1.1 ชั้นของกล่องนม [1]

วิธีการแยกกระดาษออกนั้นปัจจุบันได้มีการแยกโดยการนำกล่องนมมาตีกับน้ำเพื่อให้กระดาษหลุดออกมา ซึ่งกระดาษนั้น นำมาทำเป็นกระดาษรีไซเคิล แต่จะเหลือฟอยล์กับพลาสติกจำนวนมากซึ่งไม่สามารถนำกลับมาใช้ได้ เราจึงมีความคิดที่จะแยกออกจากกันเพื่อสร้างมูลค่าและลดการเกิดขยะเหลือใช้ที่สูงขึ้นทุกวัน โดยเราใช้คลื่นไมโครเวฟในการแยกออกจากกัน โดยคลื่นไมโครเวฟมีคลื่นย่านความถี่ไมโครเวฟ โดยปกติจะใช้ช่วงความถี่ 2.45 จิกะเฮิรตซ์(GHz) (หรือ ความยาวคลื่น 12.24 เซนติเมตร)

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อสามารถนำความรู้ที่ได้จากภาคทฤษฎีของวิชาต่างๆ ที่ได้ทำการศึกษามาปฏิบัติและประยุกต์ใช้ เพื่อสร้างชิ้นงานขึ้นมาและสามารถนำมาใช้งานได้จริง
2. เพื่อศึกษา ออกแบบ และสร้างเครื่องกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ
3. เพื่อศึกษาการทำงานและออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์
4. เพื่อสามารถนำความรู้มาไปใช้งานได้จริง

1.3 ขอบเขตงาน

1. ศึกษาและวิเคราะห์หลักการทำงานของคลื่นไมโครเวฟ
2. ศึกษาการทำงานของหลอดแมกนีตรอน (Magnetron)
3. ออกแบบโครงสร้างเครื่องแยกพลาสติกออกจากฟอยล์
4. ศึกษาหลักการแยกพลาสติกออกจากฟอยล์

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาและค้นคว้าหาข้อมูลเกี่ยวกับโครงงาน
2. จัดเตรียมวัสดุและอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในโครงงาน
3. ออกแบบตัวเครื่องสำหรับการใช้งาน
4. สร้างเครื่องต้นแบบ
5. ทดสอบและปรับปรุงแก้ไข
6. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง
7. จัดทำรายงาน
8. ประเมินผลโครงงาน

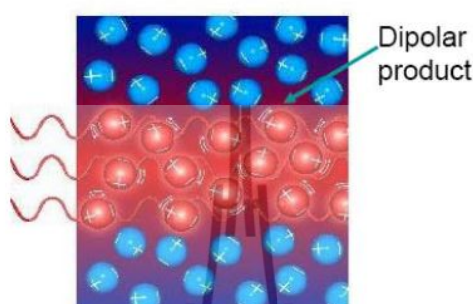
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำความรู้ที่ได้จากการทำโครงงานมาประกอบวิชาชีพได้
2. สามารถนำความรู้ที่ได้ทางทฤษฎีมาประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติได้
3. สามารถนำความรู้ที่ได้ทางทฤษฎีและปฏิบัติมาประยุกต์ใช้ในงานอื่นได้
4. สามารถแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในการปฏิบัติงานได้
5. รู้จักการคิด การวิเคราะห์ อย่างเป็นระบบ
6. สามารถทำงานร่วมกับผู้อื่นได้
7. สามารถจะแยกพลาสติกออกจากฟอยล์ได้

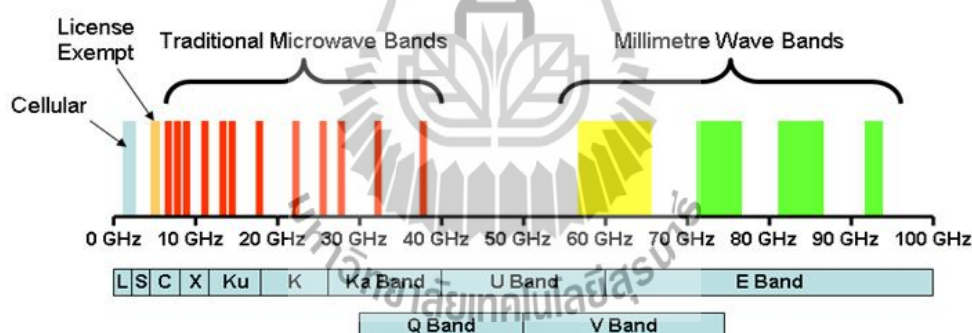
บทที่2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก (Dielectric Heating) ทำงานโดยอาศัยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ย่านคลื่นวิทยุหรือไมโครเวฟ (ดังรูปที่2.2) กำลังสูงส่งผ่านเข้าไปในเนื้อวัสดุ สนามของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะทำให้โมเลกุลของวัสดุที่มีโครงสร้างแบบมีขั้ว (Dipolar Molecules) ซึ่งมีขั้วไฟฟ้าที่เป็นขั้วบวกและขั้วลบพยายามเรียงตัวตามทิศทางของสนามคลื่นที่ส่งผ่านเข้ามา ทำให้เกิดการเสียดสีกันของโมเลกุล เกิดเป็นความร้อนกระจายทั่วภายในเนื้อวัสดุหรือการถ่ายเทพลังงานจากคลื่นไปยังวัสดุ แสดงในรูปที่2.1

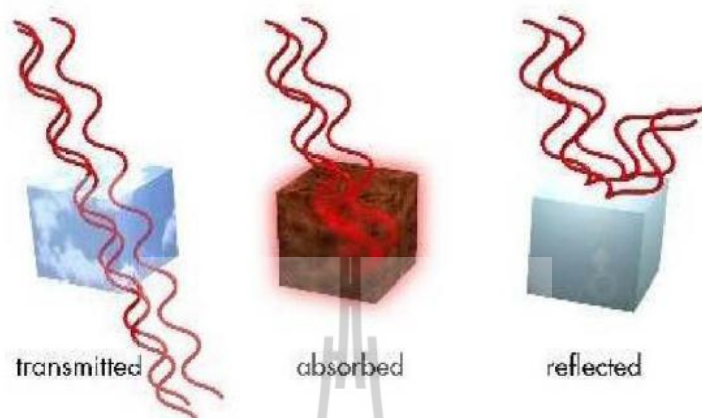


รูปที่2.1 การเกิดความร้อนในเนื้อวัสดุจากการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก[2]



รูปที่2.2 microwave spectrum[2]

จากรูปที่2.3 วัสดุที่สามารถใช้การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกได้จะต้องเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติที่ตอบสนองต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า กล่าวคือ จะต้องเป็นวัสดุที่มีโครงสร้างโมเลกุลแบบมีขั้วหรือประกอบไปด้วยน้ำซึ่งมีโมเลกุลแบบมีขั้วเช่นกันเป็นองค์ประกอบ วัสดุที่มีโครงสร้างโมเลกุลแบบไม่มีขั้ว เช่น อากาศ เทฟลอนหรือแก้ว จะไม่สามารถดูดซับ (Absorbed) พลังงานจากคลื่นได้ โดยคลื่นจะผ่านทะลุเข้าไปในเนื้อวัสดุ(Transmitted) โดยไม่เกิดความร้อนหรือการเปลี่ยนแปลงใดๆ ส่วนวัสดุที่เป็นโลหะจะมีคุณสมบัติสะท้อนคลื่น (Reflected) จึงไม่สามารถเกิดความร้อนได้ เหมาะสำหรับการทำโครงสร้างเตาและตัวสะท้อนคลื่น



รูปที่2.3 ปรากฏการณ์ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าต่อวัสดุชนิดต่างๆ[2]

จากรูปที่2.4 การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกเป็นวิธีการให้ความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูง เนื่องจากการถ่ายเทพลังงานเป็นความร้อนเกิดภายในเนื้อวัสดุโดยตรงและรวดเร็ว ในลักษณะภายในออกสู่ภายนอก ซึ่งแตกต่างจากการให้ความร้อนแบบเดิมซึ่งใช้เชื้อเพลิงหรือขดลวดไฟฟ้า ซึ่งการถ่ายเทความร้อนจะอาศัยการพาของอากาศร้อนหรือการแผ่รังสีจากแหล่งความร้อนเป็นหลัก ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นจะถ่ายเทไปที่ผิววัสดุก่อน จากนั้นจึงจะค่อยเกิดการนำความร้อนจากผิวนอกของวัสดุเข้าไปสู่ภายใน ในแง่ของคุณภาพผลิตภัณฑ์ กรรมวิธีการอบแห้งโดยใช้พลังงานที่เป็นลมร้อนจากการใช้เชื้อเพลิงแบบดั้งเดิมนั้น มักจะทำให้คุณสมบัติทางกายภาพและคุณภาพผลิตภัณฑ์เปลี่ยนแปลงไป เช่น สีของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนแปลง เกิดรอยร้าวอันเนื่องมาจากอิทธิพลของความดันแก๊สภายในวัสดุหรือการขยายตัวที่ไม่เท่ากันของโครงสร้างวัสดุ ผลิตภัณฑ์เกิดรอยไหม้เนื่องจากการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ไม่สม่ำเสมอ เป็นต้น



รูปที่2.4 วัสดุที่มีการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก (รูปซ้าย) และการให้ความร้อนแบบเดิม (รูปขวา) [2]

2.1 ส่วนประกอบการทำงานของเตาให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก

เตาให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกจะมีส่วนประกอบการทำงานหลัก คือ แหล่งกำเนิดคลื่นซึ่งใช้พลังงานไฟฟ้า ส่วนกระจายคลื่นไปยังวัสดุ และส่วนโครงสร้างเตา โดยจะแบ่งเตาออกได้เป็น 2 ประเภทตามย่านความถี่ของคลื่นที่ใช้งาน คือ เตาให้ความร้อนด้วยคลื่นวิทยุ (Radio Frequency Heating) และเตาให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Microwave Heating) โดยความถี่ที่ใช้งานสำหรับ Radio Frequency Heating และ Microwave Heating ที่จำแนกโดย FCC (Federal Communications Commission) มีดังตารางที่ 2.1

	Frequency
Radio	13.56 MHz ± 6.68 kHz
	27.12 MHz ± 160.00 kHz
	40.68 MHz ± 20.00 kHz
Microwaves	915 MHz ± 13 MHz- industrial
	2450 MHz ± 50 MHz- home & ind.
	5800 MHz ± 75 MHz
	24125 MHz ± 125 MHz

ตารางที่ 2.1 ความถี่ที่ใช้งานสำหรับ Radio และ Microwaves[2]

2.1.1 คุณสมบัติไดอิเล็กทริก (dielectric properties) ของวัสดุ

Singh และ Heldman (2001) รายงานว่าในกระบวนการแปรรูปด้วยไมโครเวฟจะเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติทางไฟฟ้า (electrical properties) ของวัสดุที่ถูกทำให้เกิดความร้อน ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวจะมีความสำคัญต่อการสร้างสูตรอาหารเพื่อใช้กับไมโครเวฟ คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่สำคัญและแสดงเป็นค่าตัวเลขได้แก่

1. Relative dielectric constant (ϵ') เป็นค่าที่แสดงความสามารถของวัสดุในการกักเก็บพลังงานไฟฟ้าไว้เมื่อนำวางในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ ถ้าค่านี้สูงแสดงว่าเก็บพลังงานได้มาก แต่ค่านี้จะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิและความชื้นของอาหาร
2. Relative dielectric loss (ϵ'') เป็นค่าที่แสดงความสามารถของวัสดุที่จะกระจายพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานความร้อน ถ้าค่านี้สูงแสดงว่าจะเกิดความร้อนสูง คำว่า “loss” หรือสูญเสียหมายถึงการเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน

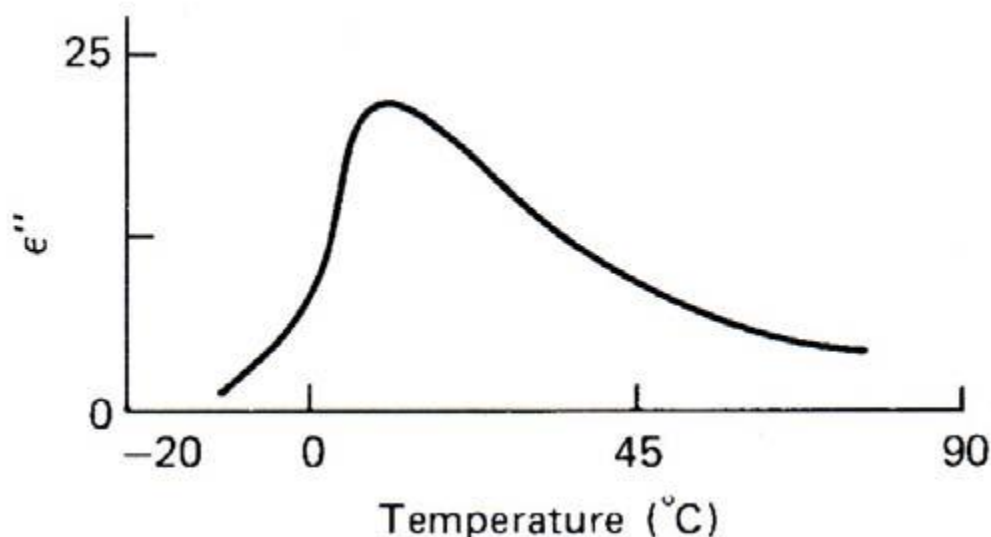
ค่าเหล่านี้จะทำให้ทราบเกี่ยวกับความสามารถในการเป็นฉนวนไฟฟ้า (electrical insulating ability) ของวัสดุ ซึ่งอาหารเป็นฉนวนที่ไม่ดี ดังนั้นอาหารจึงมักจะดูดซับพลังงานส่วนใหญ่ไว้เมื่อสัมผัสกับคลื่นไมโครเวฟและเป็นผลให้เกิดความร้อนขึ้น (Mudgett, 1986) โดยค่า dielectric loss และ dielectric constant มีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$\epsilon'' = \epsilon' \tan \delta$$

จากสมการ ค่า loss tangent ($\tan \delta$) แสดงให้เห็นถึงระดับการทะลุทะลวงของสนามไฟฟ้าและระดับการกระจายพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน ค่าเหล่านี้ถ้ามีค่าสูงแสดงว่าวัตถุจะเกิดความร้อนได้ดีขึ้น ตารางที่ 2.2 แสดงคุณสมบัติไดอิเล็กทริกของสารและอาหารบางชนิด Fellows (2000) รายงานว่าอุณหภูมิจะมีผลต่อคุณสมบัติไดอิเล็กทริกอย่างมาก จากรายงานการทดลองพบว่าค่านี้จะลดลงอย่างต่อเนื่องในระหว่างที่น้ำเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็ง โดยเมื่อคลื่นไมโครเวฟผ่านน้ำแข็งจะถูกดูดซับพลังงานได้น้อยกว่ามากเมื่อคลื่นไมโครเวฟผ่านน้ำ ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องจากการที่โมเลกุลของน้ำนั้นเคลื่อนที่ได้ น้อยลงหรือดูดซับพลังงานจากสนามไฟฟ้ากระแสสลับได้น้อยลง ซึ่งสามารถนำความรู้ไปประยุกต์ใช้ในการ กระบวนการละลายน้ำแข็ง (thawing) และการละลายน้ำแข็งบางส่วน (tempering) ของอาหารแช่เยือกแข็ง โดยเมื่อทำให้อาหารแช่เยือกแข็งร้อนขึ้นด้วยไมโครเวฟ ทำให้เกิดความไม่สม่ำเสมอของความร้อนในแต่ละจุด บริเวณของอาหารที่มีการละลายแล้วจะดูดซับพลังงานไมโครเวฟได้มากกว่า จึงทำให้มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ในขณะที่บริเวณของอาหารในส่วนที่ยังเป็นน้ำแข็งอยู่จะดูดซับพลังงานได้น้อยกว่า ผลจากการให้ความร้อนทำให้อาหารบางส่วนมีอุณหภูมิที่ต้องการในขณะที่บางส่วนของอาหารยังมีอุณหภูมิแช่แข็ง

อาหาร	dielectric constant (ϵ')	dielectric loss (ϵ'')	loss tangent ($\tan \delta$)
น้ำ (25 องศาเซลเซียส)	76.7	12	0.157
น้ำ (1.5 องศาเซลเซียส)	80.5	25	0.310
น้ำแข็ง (-12 องศาเซลเซียส)	3.2	0.0029	0.0009
0.1 M โซเดียมคลอไรด์ (25 องศาเซลเซียส)	75.5	18	0.24
เนยสดเค็ม (25 องศาเซลเซียส)	40.0	12	0.3
เนยดิบ (25 องศาเซลเซียส)	49.0	15	0.33
เนยสุก (25 องศาเซลเซียส)	45.0	12	0.56
เนยทำแข็ง (25 องศาเซลเซียส)			0.00096
เนยโค (25 องศาเซลเซียส 915 MHz)	55.0	22	0.4
เนยสุกร (25 องศาเซลเซียส 915 MHz)	54.0	23	0.426
มันฝรั่งบด (25 องศาเซลเซียส)	65	22	0.34

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติไดอิเล็กทริกของสารและอาหารบางชนิด[2]



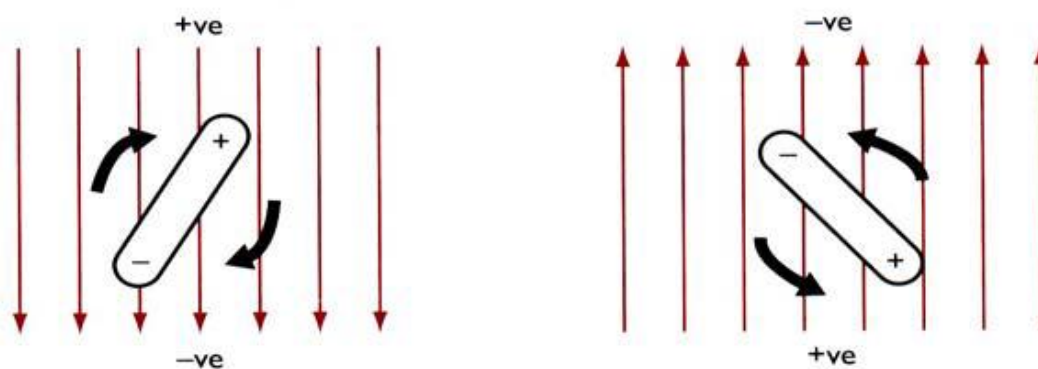
รูปที่ 2.5 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า dielectric loss ของน้ำและน้ำแข็ง[2]

2.2 กลไกการเกิดความร้อนเนื่องจากไมโครเวฟ

จากการที่วัตถุดูดซับพลังงานไมโครเวฟเนื่องจากการมีคุณสมบัติไดอิเล็กทริก ทำให้เกิดพลังงานความร้อนขึ้นภายในวัตถุ Singh และ Heldman (2001) รายงานว่าการเกิดความร้อนภายในวัตถุที่สัมผัสกับคลื่นไมโครเวฟนั้นมีสาเหตุมาจากกลไก 2 ประการได้แก่ 1. การเคลื่อนที่ของไอออนเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้า (ionic polarization) และ 2. การหมุนของสารประกอบที่มีขั้ว (dipole rotation)

1. การเคลื่อนที่ของไอออน เมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้า (ionic polarization) ภายในเตาไมโครเวฟ (microwave oven) จะมีอุปกรณ์ที่เรียกว่าแมกนีตรอน (magnetron) ที่ทำหน้าที่สร้างสนามไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งสนามไฟฟ้าจะถูกสร้างออกมาในลักษณะ 3 ทิศทาง คือบนสู่ล่าง ข้างสู่ข้างและหน้าสู่หลัง เมื่ออนุภาคที่มีประจุในอาหารสัมผัสกับคลื่นไมโครเวฟ จะทำให้เกิดการสั่นและเคลื่อนที่ จึงเกิดการชน (collisions) หรือเสียดสีกับอนุภาคที่อยู่ข้างเคียงเป็นผลให้เกิดความร้อนขึ้นในวัตถุนั้น ซึ่งโดยทั่วไปในวัตถุจะมีองค์ประกอบที่ซับซ้อน มีปริมาณน้ำและเกลือที่ละลายได้แตกต่างกันเช่น โซเดียม - โปตัสเซียม - หรือ แคลเซียมคลอไรด์ ซึ่งโมเลกุลเหล่านี้จะแตกตัวให้อิออนบวก (cations) และอิออนลบ (anions) ดังนั้นอนุภาคที่มีประจุจึงสามารถที่จะมีอันตรกิริยา (interactions) กับสนามไฟฟ้าใด ๆ รวมทั้งสนามไฟฟ้าที่ถูกสร้างขึ้นในเตาไมโครเวฟเช่นเดียวกัน

2. การหมุนของสารประกอบที่มีขั้ว (dipole rotation) ในอาหารประกอบด้วยน้ำที่มีปริมาณแตกต่างกัน น้ำเป็นโมเลกุลมีขั้ว (polar molecule) ซึ่งในสภาพปกติจะเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ (random oriented) เมื่อผ่านสนามไฟฟ้ากระแสสลับเข้าไป ประจุบวกและลบในโมเลกุลจะหมุนตัวเพื่อเปลี่ยนทิศทางตามทิศของสนามไฟฟ้าสลับนั้นๆ โดยการหมุนตัวกลับไปมาจะเกิดอย่างรวดเร็วตามความถี่ของไมโครเวฟคือ 915 หรือ 2,450 พันล้านครั้งต่อวินาที ทำให้เกิดความร้อนขึ้นและกระจายไปยังโมเลกุลข้างเคียง (ดังรูปที่ 2.6)



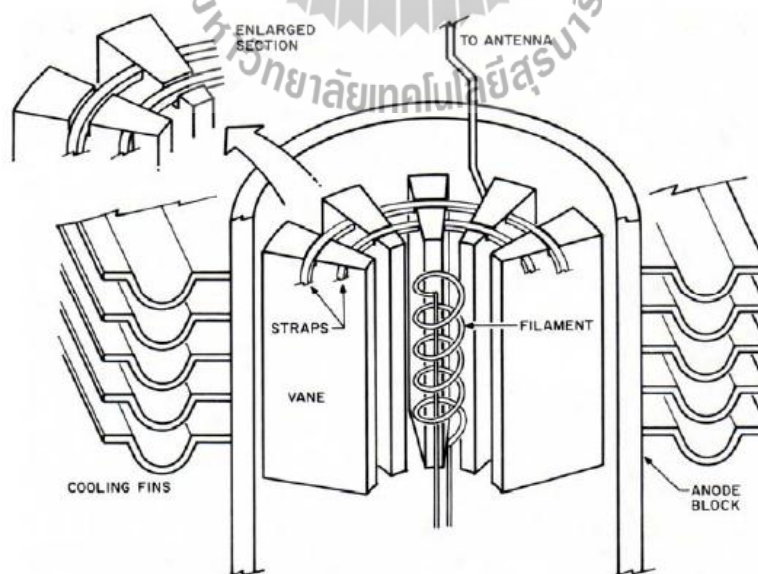
รูปที่ 2.6 การเคลื่อนที่ของสารประกอบที่มีขั้วเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้า[2]

การเกิดความร้อนในอาหารบริเวณจุดที่สัมผัสกับไมโครเวฟ เนื่องจากกลไกทั้งสองแบบดังที่กล่าวมาแล้วนั้น ความร้อนจะกระจายออกไปยังส่วนอื่นๆ เนื่องจากผลของการเดือดของน้ำโดยการนำความร้อนและเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งทำให้เกิดความร้อนขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับวิธีการให้ความร้อนแบบดั้งเดิม

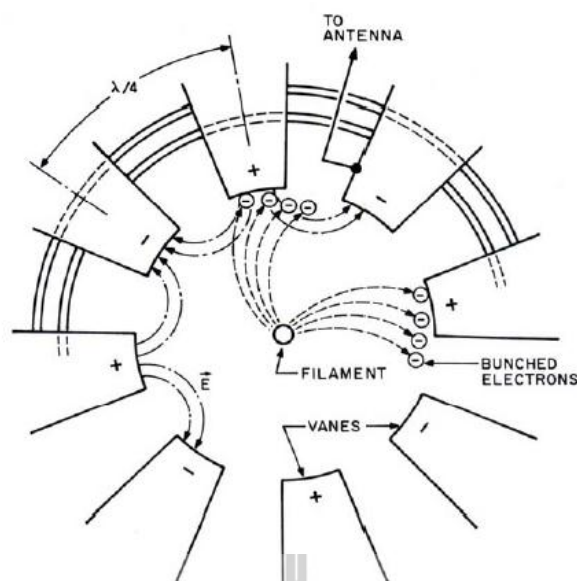
2.3 แมกนีตรอน (magnetron)

แมกนีตรอนเป็นหัวใจของเตาไมโครเวฟ ทำหน้าที่สร้างคลื่นไมโครเวฟ มีลักษณะเป็นหลอดสุญญากาศที่มีโครงภายนอกเป็นโลหะเพื่อเพิ่มความแข็งแรง โดยมีแผ่นลักษณะเป็นปีกเพื่อใช้ในการระบายความร้อน

จากรูปที่ 2.7, 2.8 แสดงโครงสร้างภายในของแมกนีตรอน ส่วนที่สร้างคลื่นไมโครเวฟเรียกว่าไดโอด (diode) ประกอบด้วยท่อทรงกระบอกทำจากทองแดง มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 4.5 เซนติเมตร และยาวประมาณ 3.2 เซนติเมตร โดยหลอดจะถูกปิดหัวท้ายด้วยแผ่นทองแดง เพื่อให้ภายในเป็นสุญญากาศ



รูปที่ 2.7 ภาพตัดขวางของแมกนีตรอน[3]



รูปที่2.8 ภาพตัดขวางของแอโนดในแมกนีตรอน[3]

ภายในหลอดไดโอด จะประกอบด้วยแผ่นทองแดง (vanes) ซึ่งมีประมาณ 12 แผ่น วางในแนวตั้งโดยหันสันด้านหนึ่งมาเรียงกันในแนววงกลม โดยเว้นช่องว่างตรงกลางที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.95 เซนติเมตรไว้ ให้เป็นที่อยู่ของไส้ (filament) ที่เป็นเกลียว (ทำหน้าที่เป็นแคโทด(cathode))และเรียกท่อทองแดงทรงกระบอก และ vanes ว่าเป็นส่วนแอโนด (anode)การทำงานของแอโนดในแมกนีตรอนในการทำให้เกิดคลื่นไมโครเวฟเป็นไปตามลำดับดังนี้

1. ไส้ที่เป็นเกลียว (filament) ถูกทำให้ร้อน
2. อิเล็กตรอนที่อยู่บริเวณผิวหน้าของสันแผ่นทองแดงจะถูกกระตุ้นทำให้เกิดหมอกอิเล็กตรอนบริเวณตรงกลางของไดโอด
3. เมื่อผ่านความต่างศักย์ประมาณ 4,000 โวลต์ ทำให้เกิดสนามไฟฟ้า (E) ขึ้นระหว่างแอโนดและไส้ filament และเร่งอิเล็กตรอนให้ไปยังแอโนดในแนวรัศมีวงกลม
4. สนามแม่เหล็ก (ที่ถูกสร้างขึ้นจากการนำวงแหวนแม่เหล็ก (ferrite) 2 วง มาวางไว้ด้านบนและล่างของแอโนด สนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้นจะมีทิศทางเดียวกันกับแกนของไส้ filament และมีทิศตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า) จะบังคับให้อิเล็กตรอนวิ่งเป็นทางโค้ง (ถ้าความแรงของสนามแม่เหล็กมีขนาดที่พอเหมาะ อิเล็กตรอนจะถูกกวาดออกจากพื้นผิวบริเวณปลายสุดของสันแผ่นทองแดง ถ้าสนามแม่เหล็กอ่อนเกินไปจะทำให้อิเล็กตรอนวิ่งเข้าชนกับแผ่นทองแดงและถ้ามีความแรงเกินไปจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ย้อนกลับและชนกับไส้ filament)
5. ทันทีที่อิเล็กตรอนวิ่งถึงแผ่นทองแดง จะเหนี่ยวนำให้เกิดประจุบวกขึ้นภายในแผ่นทองแดง ถ้าแผ่นทองแดงนี้ถูกเชื่อมต่อกันด้วยกระแสไฟฟ้า (เรียกว่า strapping และจุดที่มีการเชื่อมต่อเรียกว่า straps) (ในภาพที่ 6) กับแผ่นทองแดงอีกแผ่นหนึ่งที่อยู่ถัดออกไปจากเดิม 2 แผ่น จะทำให้เกิดการเคลื่อนย้ายประจุบวกเช่นกัน แผ่นทองแดงที่อยู่ระหว่างแผ่นที่มีประจุบวก จะถูกเหนี่ยวนำให้มีประจุลบและมีการเชื่อมต่อทางไฟฟ้าเช่นเดียวกับแผ่นที่มีประจุบวก ทำให้แผ่นทองแดงมีสภาพประจุบวกและลบสลับกันไปทั้งวง

6. จากการที่มีแรงดึงดูดและแรงผลักระหว่างประจุที่ต่างและเหมือนกัน ทำให้อิเล็กตรอนที่วิ่งวนอยู่ถูกรังเข้าไหาแผ่นทองแดงที่มีประจุบวก ในขณะที่เดียวกันแผ่นทองแดงที่มีประจุลบจะผลักรังอิเล็กตรอนเหล่านี้ไว้ ทำให้กลับมารวมอยู่กับอิเล็กตรอนในกลุ่มที่ถูกเร่งจนกลายเป็นกลุ่มก้อนของอิเล็กตรอน

7. ทันทีกกลุ่มอิเล็กตรอนนี้วิ่งผ่านแผ่นทองแดงที่อยู่ถัดมา จะเหนี่ยวนำให้เกิดประจุบวกขึ้นในแผ่นทองแดงนั้น ส่วนแผ่นทองแดงที่กลุ่มอิเล็กตรอนนี้วิ่งผ่านมาก่อนหน้านั้นเปลี่ยนจากสภาพประจุบวกเป็นลบ และเมื่อกลุ่มอิเล็กตรอนวิ่งต่อไปเรื่อย ๆ ตามวงโคจร จะทำให้แผ่นทองแดงแต่ละแผ่นเกิดสภาพประจุที่สลับกันไป มาจากบวกเป็นลบและเป็นบวกอีกครั้ง โดยถ้าอิเล็กตรอนมีความเร็วที่เหมาะสมกับช่องว่างระหว่างแผ่นทองแดง จะสามารถเปลี่ยนประจุสลับไปมาได้ 2.45 พันล้านครั้งต่อวินาที ประจุที่สลับกันดังกล่าวนี้จะถูกเชื่อมต่อกับเส้นลวดจากแผ่นทองแดงไปยังสายอากาศ(antenna) เพื่อจับคลื่นไมโครเวฟที่เกิดขึ้น แล้วส่งต่อผ่านท่อนำคลื่น (wave guide)และผ่านไปยังใบพัด (stirrer) ทำให้เกิดการแผ่ของคลื่นไมโครเวฟที่มีสัญญาณขนาด 2.45 GHz

ถ้าคลื่นไมโครเวฟถูกสร้างขึ้นและปล่อยให้ส่งผ่านในอากาศ พลังงานที่ถูกสร้างขึ้นจะไม่ถูกใช้อย่างมีประสิทธิภาพและไม่ได้ตามความต้องการ จึงมักใส่สายอากาศ (antenna) เพื่อจับคลื่นและส่งผ่านต่อทรงกระบอกที่เรียกว่า wave guide ซึ่งจะนำทางคลื่นไมโครเวฟให้ตรงไปสู่ช่องใส่อาหารโดยอาจมีใบพัด (stirrer) เพื่อกระจายคลื่นไปสัมผัสกับอาหาร ใบพัดจะช่วยทำให้คลื่นไมโครเวฟไปทำให้จุล็ดร้อนและจุดเย็นในอาหารร้อนขึ้นสม่ำเสมอและทั่วถึง

ปัญหาที่สำคัญในการใช้ไมโครเวฟคือการที่อาหารแต่ละจุดถูกทำให้ร้อนไม่ทั่วถึง ส่วนหนึ่งมีสาเหตุมาจากเตาไมโครเวฟและมีความเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของสนามไฟฟ้า ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของเตาไมโครเวฟ นอกจากนั้นการจัดเรียงของอาหารภายในไมโครเวฟและคุณสมบัติไดอิเล็กทริกของอาหาร จะมีผลต่อความสม่ำเสมอของความร้อนที่เกิดขึ้น เมื่อไมโครเวฟถูกปล่อยให้เข้ามาในช่องใส่อาหาร (cavity) จะสะท้อนที่ผนังโลหะ การสะท้อนของโลหะเกิดขึ้นเนื่องจากสนามไฟฟ้าที่มีทิศทางเดียวกันกับผนังโลหะถูกทำให้ลัดวงจร (short circuit) โดยโลหะเป็นตัวเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้น ทำให้สนามไฟฟ้ามีค่าเป็นศูนย์ในส่วนของใบพัด (stirrer) ทำมาจากโลหะ เป็นใบพัดที่หมุนอยู่ในช่องใส่อาหาร โดยใช้มอเตอร์ขนาดเล็กหรือใช้แรงลมที่ได้จากระบบระบายความร้อนให้แก่แมกนีตรอนและพาความร้อนออกไปด้านนอกเตาไมโครเวฟ นอกจากนี้ยังมีวิธีการอื่น ๆ ในการกระจายความร้อน เช่น การใช้จานแก้วหรือเซรามิกส์ที่สามารถหมุนและถอดออกได้ ในระบบนี้คลื่นไมโครเวฟจะสัมผัสกับอาหารที่ทำให้หมุนบนจาน ทำให้จุล็ดร้อนและเย็นได้รับพลังงานโดยเฉลี่ยใกล้เคียงกัน เตาไมโครเวฟอาจใช้ระบบใดระบบหนึ่งหรือใช้ควบคู่ทั้งสองระบบ เพื่อช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพการทำความร้อนแก่อาหารให้ดียิ่งขึ้น

2.4 พลังงานที่ถูกดูดซับในวัตถุ (absorbed power)

Singh และ Heldman (2001) รายงานว่าพลังงานไมโครเวฟเองไม่ใช่พลังงานความร้อน (thermal Energy) แต่ความร้อนที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากอันตรกิริยาระหว่างพลังงานไมโครเวฟและวัตถุที่มีคุณสมบัติไดอิเล็กทริก การเปลี่ยนพลังงานไมโครเวฟไปเป็นความร้อนหรือพลังงานที่ถูกดูดซับในอาหาร สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$P_D = 55.61 \times 10^{-14} E^2 f \epsilon' \tan \delta$$

โดย P_D = พลังงานที่สารดูดซับ (วัตต์/ลูกบาศก์เซนติเมตร)

E = ความเข้มสนามไฟฟ้า (โวลต์/เซนติเมตร)

f = ความถี่ของไมโครเวฟ (Hz)

ϵ' = relative dielectric constant

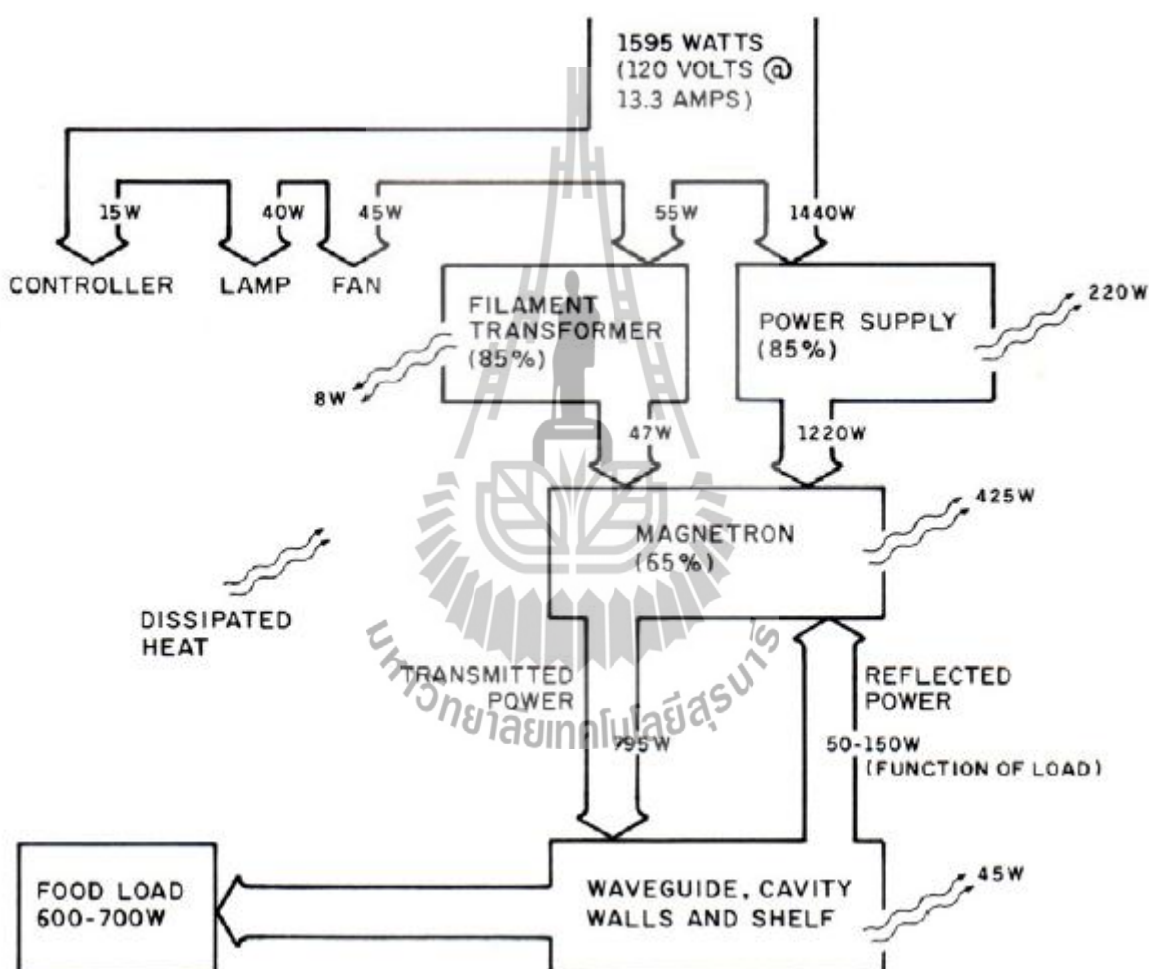
$\tan \delta$ = loss tangent

จากสมการค่าความถี่ของไมโครเวฟ ได้แก่ 915 หรือ 2,450 GHz ส่วนค่า ϵ' เป็นค่าคุณสมบัติไดอิเล็กทริก ซึ่งหาได้จากหนังสืออ้างอิงทั่วไป ค่า E ซึ่งเป็นความเข้มสนามไฟฟ้า (electrical field strength ; V/cm) ภายในช่องใส่อาหาร จะขึ้นอยู่กับการออกแบบของเตาไมโครเวฟคุณสมบัติไดอิเล็กทริกของวัตถุและรูปทรงของวัตถุ จากสมการจะเห็นว่าความเข้มของสนามไฟฟ้ามีผลอย่างมากต่อพลังงานที่ถูกดูดซับหรือความร้อนที่เกิดขึ้นสารหรือวัตถุที่ดูดซับคลื่นไมโครเวฟได้ดีจะเรียกว่ามี lossy หรือ lossiness สูง ซึ่งสารประเภทนี้จะทำให้ร้อนได้อย่างรวดเร็วเมื่อสัมผัสกับคลื่นไมโครเวฟ นอกจากนั้นรูปแบบของน้ำและเกลือแร่ที่เป็นองค์ประกอบอาหาร ลักษณะทางกายภาพของอาหาร อุณหภูมิและความถี่ของคลื่นไมโครเวฟจะมีผลต่อปริมาณพลังงานของไมโครเวฟที่ถูกดูดซับ โดยน้ำที่อยู่ในรูปน้ำอิสระ (free water) จะดูดซับพลังงานไมโครเวฟได้ดีกว่าน้ำที่จับอยู่กับสารประกอบอื่น ๆ (bound water) เช่น ที่จับกับโปรตีนหรือคาร์โบไฮเดรต ส่วนเกลือแร่ถ้าอยู่ในรูปที่แตกตัว (dissociated) จะทำให้อาหารนั้นดูดซับไมโครเวฟได้ดีกว่าเกลือแร่ที่รวมตัวกับสารอื่นๆ (associated) เป็นต้น

2.5 ประสิทธิภาพของเตาไมโครเวฟ

จากรูปที่ 2.8 แสดงประสิทธิภาพของไมโครเวฟ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากกฎทางไฟฟ้า โดยคำนวณจากค่าตัวเลขจากด้านหลังหรือด้านข้างของเตาไมโครเวฟ ตัวอย่างเช่น ตัวเลขแสดง 13.3 แอมป์ (A) 120 โวลต์ (V) ดังนั้นกำลังไฟฟ้า $P = IV = 13.3 \times 120 = 1,596$ วัตต์ (Watts) ถ้าพลังงานที่ถูกดูดซับในอาหารมีค่า 700 W (จากการทดสอบ) ดังนั้นประสิทธิภาพของไมโครเวฟ $= (700/1,596)100 = 44\%$ ซึ่งจะเห็นว่ามีความค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับกำลังที่ใช้ในการแปรรูปโดยวิธีอื่นๆ

โดยทั่วไปประสิทธิภาพของไมโครเวฟจะมีค่าประมาณ 50% ไม่ว่าจะเป็นเตาที่ใช้ตามบ้านเรือนทั่วไปหรือในอุตสาหกรรม โดยพลังงานส่วนใหญ่ที่สูญเสียกระจายไปเป็นความร้อนในส่วนของแมกนีตรอน ดังนั้นเตาไมโครเวฟจึงจำเป็นต้องมีระบบระบายความร้อนโดยใช้พัด



รูปที่ 2.9 ประสิทธิภาพของเตาไมโครเวฟ[3]

จะเห็นว่าการสูญเสียความร้อนเล็กน้อยในส่วนของหม้อแปลง (transformer) หลอดไฟ (light bulb) และแผงวงจรไฟฟ้า (electronic circuit) และเมื่อเกิดคลื่นไมโครเวฟ จะเห็นว่าการส่งถ่ายพลังงานไปยังอาหารที่มีขนาดใหญ่สูงถึง 85 – 90% แต่จะมีการสูญเสียพลังงานไปยังแหล่งต่างๆ เช่น แมกนีตรอน ช่องใส่อาหารจนถึงตัวอาหาร จะมีประสิทธิภาพเหลือประมาณ 44% ตามที่ได้ยกตัวอย่างไว้

2.6 ความลึกในการทะลุทะลวง (penetration depth) ของไมโครเวฟ

Singh และ Heldman (2001) รายงานว่าคุณสมบัติทางไฟฟ้า (electrical properties) ของวัตถุมีผลต่อการถ่ายเทพลังงานระหว่างคลื่นไมโครเวฟกับวัตถุที่สัมผัสกับไมโครเวฟ ความลึกของการทะลุทะลวงของไมโครเวฟ หาได้จากสมการดังนี้

$$z = (\lambda / 2\pi) \{ 2 / (\epsilon''(1 + \tan^2 \delta)^{1/2} - 1) \}^{1/2}$$

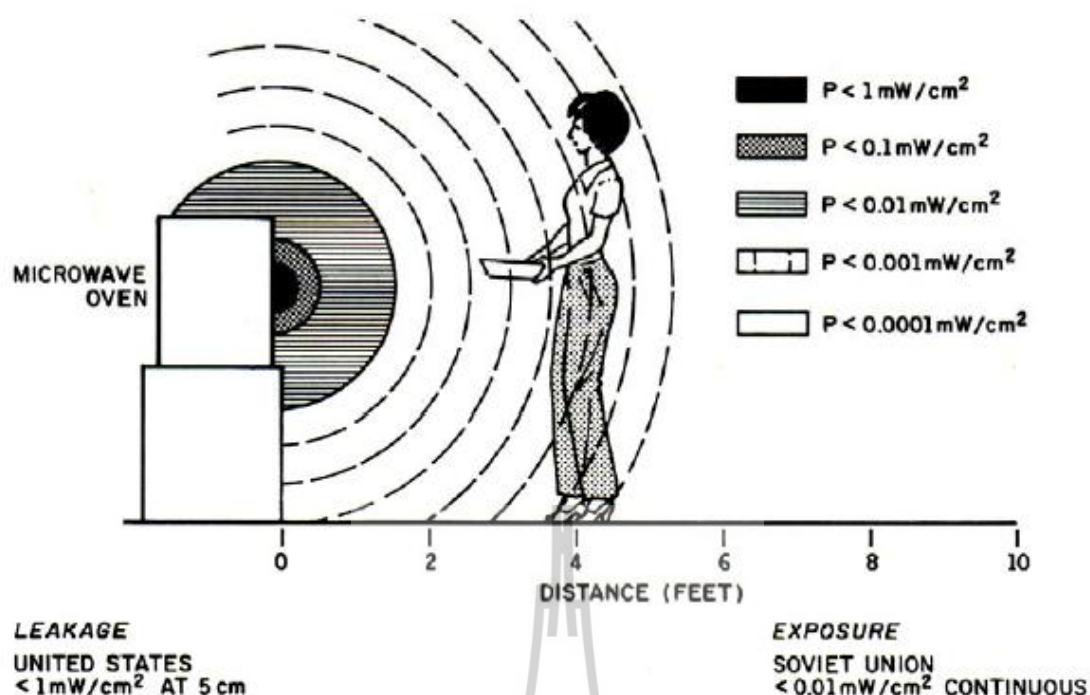
โดย z คือความลึกของการทะลุทะลวง (ที่ต่ำจากผิวของวัตถุ)

จากสมการจะเห็นว่าพลังงานไมโครเวฟที่ความถี่ 915 MHz จะสามารถทะลุทะลวงได้ลึกกว่าที่ 2,450 MHz เนื่องจากมีความยาวคลื่นมากกว่า โดยปัจจัยที่มีผลต่อการทะลุทะลวงผ่านเข้าไปในชิ้นวัตถุมิมีความสำคัญต่อการออกแบบหรือเลือกใช้ให้เหมาะสมกับลักษณะวัตถุ

2.7 ความปลอดภัยในการใช้ไมโครเวฟ

โดยส่วนใหญ่ผลจากอันตรกิริยาระหว่างไมโครเวฟกับอาหารนั้น มาจากความร้อนที่เกิดขึ้นโดยตรงแต่มีรายงานเกี่ยวกับอันตรายนอกเหนือจากนี้ เช่น จากสารเคมีในบรรจุภัณฑ์ที่ละลายสู่อาหารตัวอย่างอันตรายจากความร้อน เช่น การรับประทานอาหารที่ทำให้ร้อนโดยไมโครเวฟและความร้อนไม่สม่ำเสมอ บางส่วนในอาหารจะมีความร้อนสูงมาก ในขณะที่บางส่วนมีความร้อนไม่สูงนักซึ่งทำให้ลวกปากและคอได้ หรือการเกิดไอน้ำภายในภาชนะบรรจุ เช่น ในซองข้าวโพดคั่ว (popcorn) เมื่อถูกเปิดออกโดยไม่ระมัดระวัง (โดยเฉพาะเด็กๆ) จะทำให้เกิดอันตรายต่อตาและบริเวณใบหน้าเนื่องจากไอน้ำที่มีความร้อนสูงได้

อาหารที่ได้รับความร้อนสูงมาก (superheating) เช่น ในการเตรียมกาแฟ โดยการนำน้ำไปให้ความร้อนโดยไมโครเวฟ ถ้าน้ำได้รับพลังงานสูงมากจะทำให้เกิดความร้อนสูง น้ำในแก้วจะเดือดและพุ่งเป็นฟองออกนอกแก้ว และจะเกิดภายในเตาไมโครเวฟ หรือกรณีที่ยังไม่พุ่งทันทีแต่เมื่อนำน้ำออกจากไมโครเวฟและใส่ผงกาแฟเข้าไปขณะที่น้ำยังมีอุณหภูมิสูงมาก จะทำให้เกิดการพุ่งขึ้นมา ของฟองอากาศเนื่องมาจากปรากฏการณ์ที่เรียกว่า bubble nucleation ร่วมกับการที่แก๊สที่ละลายในน้ำหรือของเหลวเกิดความร้อนสูงขึ้นเฉพาะบางจุด ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สูงกว่าจุดเดือดของน้ำจนทำให้เกิดฟองพุ่งขึ้นมา ในกรณีที่อาหารนั้นมีความหนืด เช่น สัตว์ จะทำให้เกิดฟองพุ่งที่มีขนาดใหญ่กว่าและมีการเดือดที่รุนแรงกว่า และในน้ำมันเมื่อให้ความร้อนโดยไมโครเวฟพบว่าสามารถดูดซับพลังงานและเกิดความร้อนได้สูงจนใกล้เคียงกับจุดวาบไฟ (flash point) เมื่อนำอาหารที่มีความชื้นไปทอดในน้ำมันดังกล่าว จะทำให้เกิดการเดือดและกระเด็นจนเป็นอันตรายได้ในส่วนของกำลังของคลื่นไมโครเวฟจากเตาไมโครเวฟที่ระยะต่างๆ ที่ใช้ตามบ้านเรือนนั้น



รูปที่ 2.10 กำลังของคลื่นไมโครเวฟจากเตาไมโครเวฟที่ระยะต่างๆ[3]

Buffler (1993) รายงานว่าผลในการทำลายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าพลังงานสูง (high energy electromagnetic radiation) จะทำให้เกิดการทำลายยีน (genes) เซลล์ (cells) และเนื้อเยื่อ (tissue) ของสิ่งมีชีวิต การทำลายดังกล่าวเกิดเนื่องจากผลของการทำให้แตกตัวเป็นไอออน (ionizing effect) ของคลื่นซึ่งเริ่มต้นในช่วงแสงอัลตราไวโอเล็ต ที่ความถี่ประมาณ 1.5 พิโคเฮิร์ตซ์ (PHz) ตัวอย่างเช่น การที่มนุษย์เกิดเป็นโรคมะเร็งผิวหนังเนื่องจากสัมผัสกับแสงแดด ในส่วนของไมโครเวฟนั้นพบว่าในปัจจุบันยังไม่พบอันตรายที่ทำให้เกิดผลเสียต่อสุขภาพของมนุษย์แต่ก็มีการสัมผัสคลื่นไมโครเวฟที่มีกำลังความเข้มสูง จะทำให้เกิดความร้อนขึ้นได้ ทำให้มีการกำหนดปริมาณการรับของคลื่นไมโครเวฟซึ่งแตกต่างกันไปในแต่ละประเทศ (ดังรูปที่ 2.10)

2.8 กระแสไหลวน (Eddy current)

คำว่า “กระแสไหลวน” ในทางฟิสิกส์มีอยู่ในสองสาขา คือ พลศาสตร์ของไหลและแม่เหล็กไฟฟ้า ในพลศาสตร์ของไหล กระแสไหลวน (eddy current หรือ vortex) คือกระแสของของไหลที่เคลื่อนที่แตกต่างไปจากกระแสหลักของของไหล โดยปกติกระแสไหลวนจะมีลักษณะการเคลื่อนที่เป็นวงกลม ก้นหอย หรือเกลียว ตัวอย่างปรากฏการณ์ที่ทำให้เกิดกระแสไหลวน เช่น กระแสไหลวนเกิดขึ้นบริเวณรอบๆ พื้นที่ที่มีความดันต่ำ และดึงดูดของไหลเข้าหาจุดศูนย์กลางของมัน (พายุไต้ฝุ่น) วัตถุที่กำลังเคลื่อนที่อยู่ในของไหล (กระแสไหลวนด้านหลังเครื่องบิน) กระแสไหลวนที่เกิดขึ้นเมื่อของไหลไหลผ่านสิ่งกีดขวาง (น้ำไหลผ่านก้อนหินที่ไหลเหนือน้ำในแม่น้ำที่มีกระแสน้ำเชี่ยว หรือท้ายกระแสน้ำต่อหม้อสะพานที่สร้างข้ามแม่น้ำลำ)

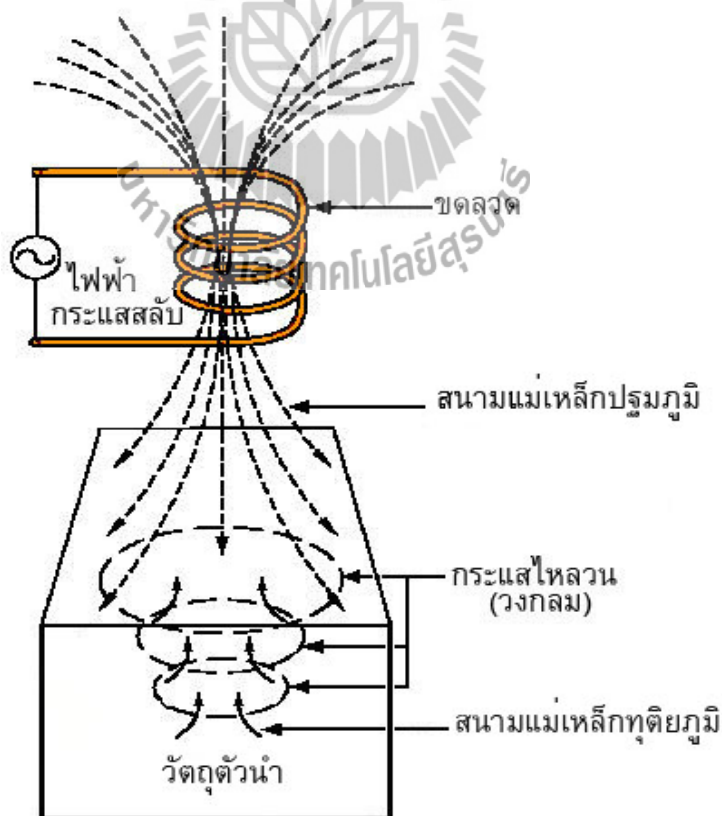
สำหรับในแม่เหล็กไฟฟ้า กระแสไหลวน (Eddy current) คือกระแสไฟฟ้าที่สร้างขึ้นใน วัตถุตัวนำโดย กระบวนการที่เรียกว่าการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า ต่อไปนี้จะกล่าวถึงเฉพาะกระแสไหลวนที่เกี่ยวข้องกับ แม่เหล็กไฟฟ้า

2.8.1 การเกิดกระแสไหลวน

อุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสสลับทุกชนิดจะล้อมรอบด้วยสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลาขณะที่มีไฟฟ้า กระแสสลับไหลผ่านอุปกรณ์นั้นๆ สนามแม่เหล็กอันเนื่องมาจากกระแสไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงอย่างคงตัวตามการ เปลี่ยนแปลงของไฟฟ้ากระแสสลับ (~ 50 Hz) การเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำให้เกิด แรงเคลื่อนไฟฟ้าในวัตถุตัวนำที่อยู่ในบริเวณที่สนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลง แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำนี้จะ ทำให้เกิดกระแสเหนี่ยวนำไหลในวัตถุตัวนำนั้น

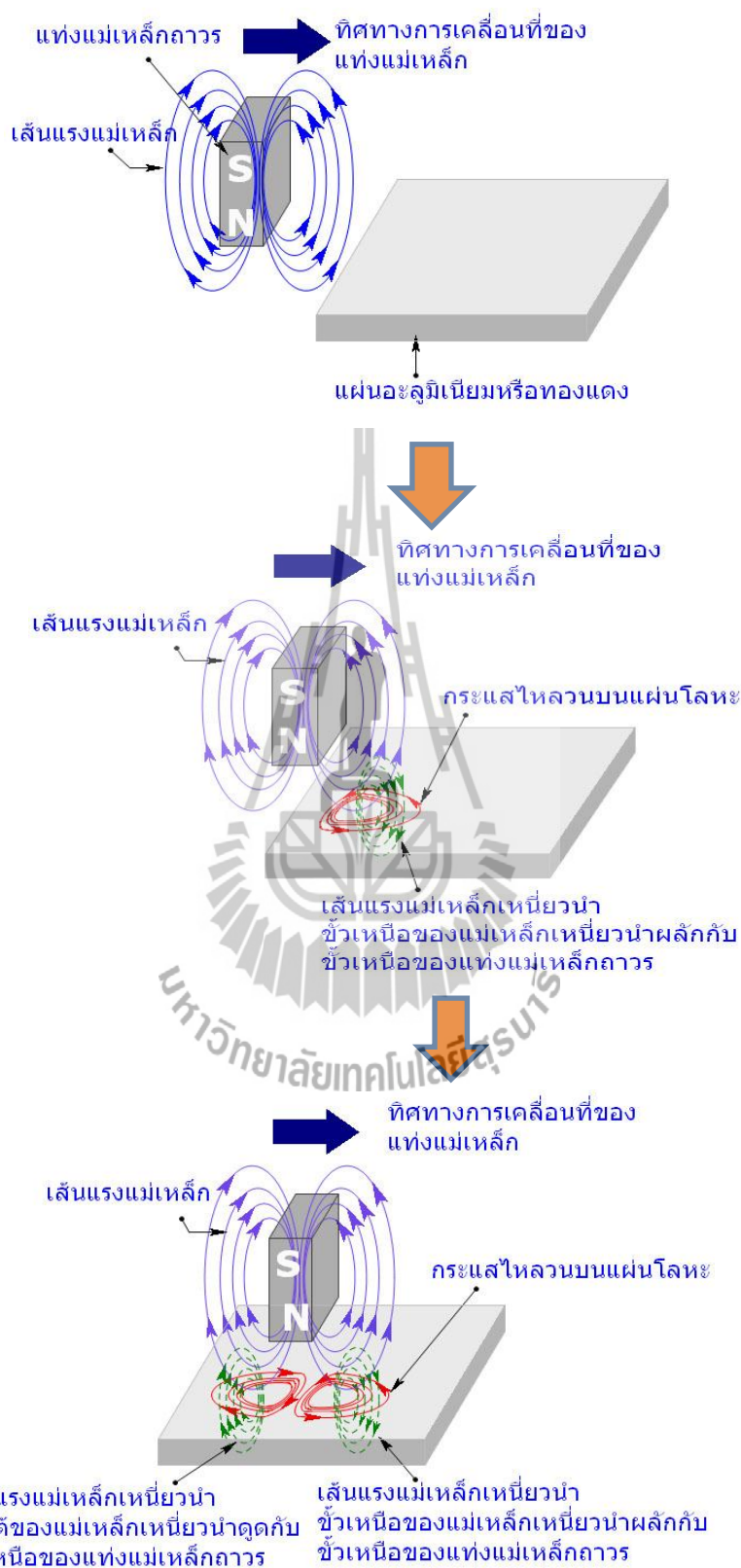
2.8.2 กระแสไหลวนทำให้เกิดอะไรขึ้น

พิจารณารูปที่ 2.11 เมื่อป้อนไฟฟ้ากระแสสลับให้กับตัวนำเช่นลวดทองแดงจะเกิดสนามแม่เหล็กปฐม ภูมิ (Primary magnetic field) ขึ้นรอบๆ ตัวนำ สนามแม่เหล็กนี้จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อกระแสเพิ่มขึ้นสูงสุดและ หายไปเมื่อกระแสลดลงเป็นศูนย์ ถ้าเอาวัตถุตัวนำอีกอันหนึ่งเข้ามาอยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กที่กำลัง เปลี่ยนแปลงนี้ สนามแม่เหล็กปฐมภูมิจะสร้างกระแสไหลวนขึ้นบนวัตถุนำไฟฟ้า เมื่อมีกระแสไหลวนปริมาณ มากอยู่ในวัตถุตัวนำนาน ๆ จะทำให้วัตถุตัวนำมีอุณหภูมิสูงขึ้นเนื่องจากพลังงานไฟฟ้าของกระแสไหลวนจะ เปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อน ตัวอย่างเช่น แกนของหม้อแปลงไฟฟ้า

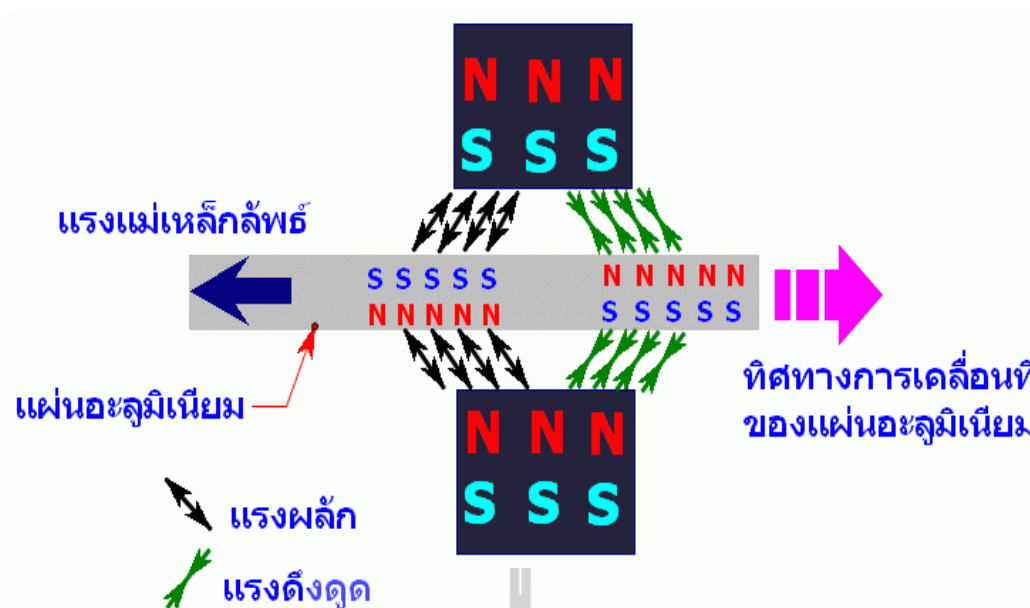


รูปที่ 2.11 กระแสไหลวนในวัตถุตัวนำ[4]

กระแสไหลวนและขั้วแม่เหล็กเหนี่ยวนำบนแผ่นอะลูมิเนียมเกิดขึ้นได้อย่างไร ให้พิจารณาจากรูปที่ 2.12 และรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.12 การเกิดกระแสไหลวนและขั้วแม่เหล็กเหนี่ยวนำบนแผ่นอะลูมิเนียม เมื่อขั้วเหนือของแม่เหล็กถาวรเคลื่อนที่ผ่าน[4]



รูปที่ 2.13 การเกิดแรงผลักและแรงดึงดูดระหว่างแม่เหล็กถาวรและ แม่เหล็กเหนี่ยวนำบนแผ่นอะลูมิเนียม[4]

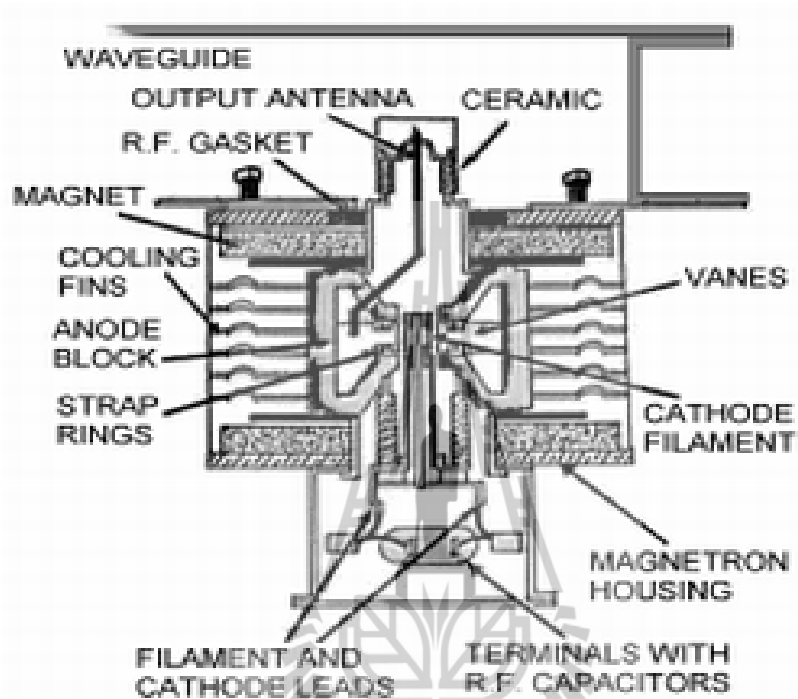
เมื่อแผ่นวัตถุตัวนำขนาดใหญ่เคลื่อนที่ผ่านสนามแม่เหล็กปฐมภูมิซึ่งติดตั้งฉากกับแผ่นโลหะ สนามแม่เหล็กจะเหนี่ยวนำกระแสไฟฟ้าวงเล็กๆ ซึ่งจะสร้างสนามแม่เหล็กทุติยภูมิที่ตรงข้ามกับสนามแม่เหล็กปฐมภูมิ นี่คือการที่ทำให้แผ่นวัตถุตัวนำที่แกว่งผ่านสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มสูง จะหยุดเมื่อมันเริ่มเคลื่อนที่ผ่านสนามแม่เหล็ก พลังงานจลน์ทั้งหมดของแผ่นวัตถุตัวนำจะเป็นสาเหตุการเปลี่ยนแปลงหลักในสนามแม่เหล็กเมื่อแผ่นวัตถุตัวนำเข้าไปในสนามแม่เหล็กซึ่งจะเหนี่ยวนำวงรอบของกระแสและสร้างสนามแม่เหล็กที่ตรงข้ามเพื่อลดความเร็วของแผ่นวัตถุตัวนำลง ในผลที่ตามมาพลังงานจลน์จะไปขับเคลื่อนกระแสเล็กๆ ภายในแผ่นโลหะและจะคายพลังงานออกมาในรูปของความร้อน

บทที่ 3

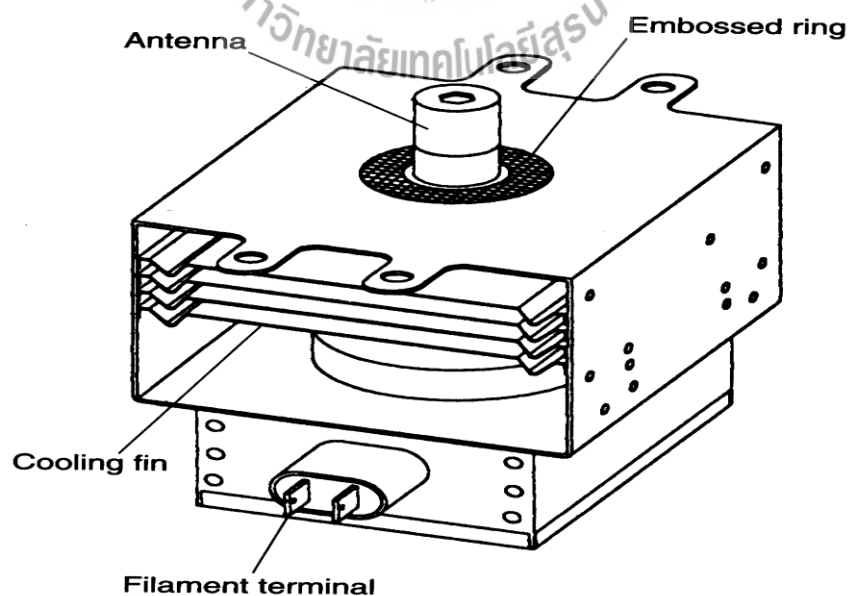
การออกแบบและสร้างเครื่องแยกพลาสติกออกจากฟอยล์

3.1 ส่วนกำเนิดคลื่น (Magnetron)

หลอดแม็กนีตรอน (Magnetron) จะมีลักษณะโดยทั่วไปแสดงดังรูป 3.1 และ 3.2



รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบภายในหัวMagnetron[5]



รูปที่ 3.2 ส่วนประกอบของหัวMagnetron[5]

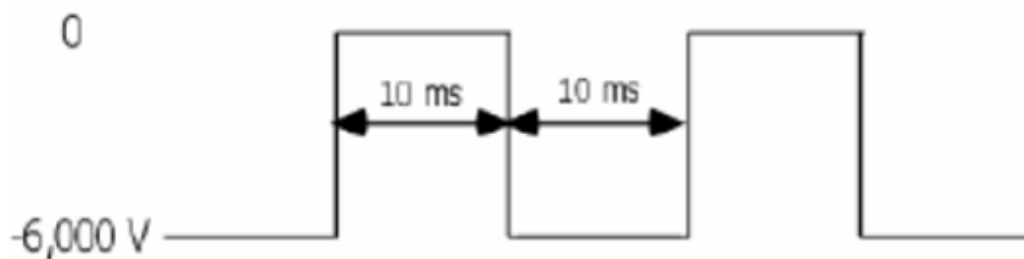
ซึ่งประกอบด้วยไส้หลอด(Filament) คาโทด(Cathode) ซึ่งเป็นขั้วใดขั้วหนึ่งของไส้หลอดและถูกบรรจุอยู่ในช่องสุญญากาศซึ่งส่วนของผนังรอบๆจะทำหน้าที่เป็นขั้วอโนด(Anode) คลื่นไมโครเวฟที่ถูกกำเนิดขึ้นจะถูกส่งออกมาภายนอกโดยAntenna ในการทำงานของหลอดแมกนีตรอนนั้น หลอดแมกนีตรอนจะถูกจ่ายด้วยไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันต่ำประมาณ 3-4 โวลต์ กระแส 10 แอมแปร์ที่ไส้หลอด ซึ่งจะทำให้ไส้หลอดร้อนและปล่อยอิเล็กตรอนออกมา และเมื่อจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงไปที่ขั้วใดขั้วหนึ่งของไส้หลอดซึ่งทำหน้าที่เป็นคาโทดเทียบกับขั้วอโนด ก็จะทำให้อิเล็กตรอนถูกบังคับให้เคลื่อนที่ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กถาวร และเมื่อความต่างศักย์มีค่าสูงจนถึงค่าหนึ่งก็จะทำให้หลอดแมกนีตรอนสามารถปล่อยคลื่นไมโครเวฟออกมาได้ โดยความถี่ของคลื่นไมโครเวฟจะถูกกำหนดด้วยโครงสร้างภายในของช่องสุญญากาศระหว่างขั้วคาโทดกับขั้วอโนด ซึ่งทำให้มีความเหมาะสมที่จะทำให้หลอดแมกนีตรอนสามารถกำเนิดคลื่นออกมาที่ความถี่ 2.45 GHz ออกมา

ชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงให้กับหลอดแมกนีตรอน ในขณะที่จ่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ 3-4 โวลต์ กระแส 10 แอมแปร์ให้กับไส้หลอดอยู่นั้นแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่จ่ายให้อโนดกับคาโทดจะต้องมีค่าสูงประมาณ 4000 โวลต์ จึงจะทำให้หลอดแมกนีตรอนปล่อยคลื่นไมโครเวฟออกมาได้และจากการทดลองโดยการเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมระหว่างคาโทดกับอโนดพบว่า ค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่สามารถทำให้แมกนีตรอนเริ่มปล่อยคลื่นไมโครเวฟออกมาได้จะมีค่าประมาณ 4,000 โวลต์ โดยที่เมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขั้วทั้งสองมีค่าสูงขึ้น ก็จะทำให้แมกนีตรอนสามารถปล่อยคลื่นไมโครเวฟที่มีกำลังสูงขึ้น ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมมีค่าคงที่เท่ากับ 4,000 โวลต์ นั้นแสดงว่าแรงดันไฟฟ้าส่วนเกินจะถูกเปลี่ยนเป็นกำลังของคลื่นไมโครเวฟที่เพิ่มขึ้นตามไมโครเวฟโดยทั่วไป จะมีชุดจ่ายแรงดันซึ่งประกอบด้วย stepup transformer ซึ่งมีแรงดันด้านขดทุติยภูมิ $V_{peak} = 3,000$ โวลต์ เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ 220 โวลต์ และต่อเข้ากับไดโอดและตัวเก็บประจุในลักษณะวงจรทวีแรงดัน 2 เท่า ดังรูปที่ 3.3



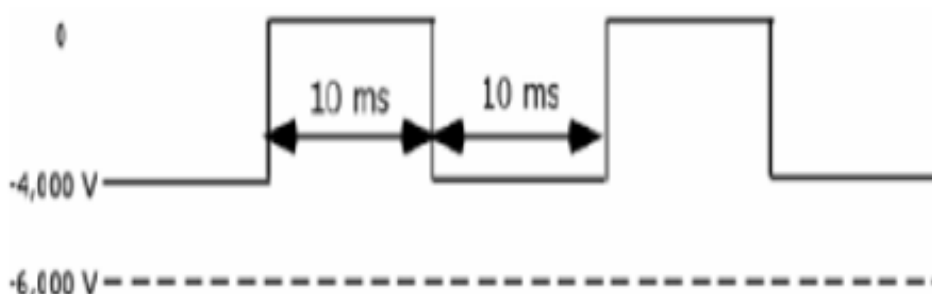
รูปที่ 3.3 วงจรจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับแมกนีตรอน ซึ่งเพิ่มแรงดันเป็น 2 เท่าโดยใช้ไดโอดและตัวเก็บประจุไฟฟ้าแรงสูง[5]

ในขณะที่ยังไม่ต่อชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้านี้ให้แก่แมกนีตรอน จะวัดค่าแรงดันสูงสุดตรงขาออกได้เท่ากับ 6,000 โวลต์ ซึ่งเป็นไปตามคุณสมบัติของวงจรทวีแรงดัน โดยจะมีลักษณะเป็นพัลส์ความถี่ 50 เฮิร์ต ดังแสดงในรูปที่ 3.4



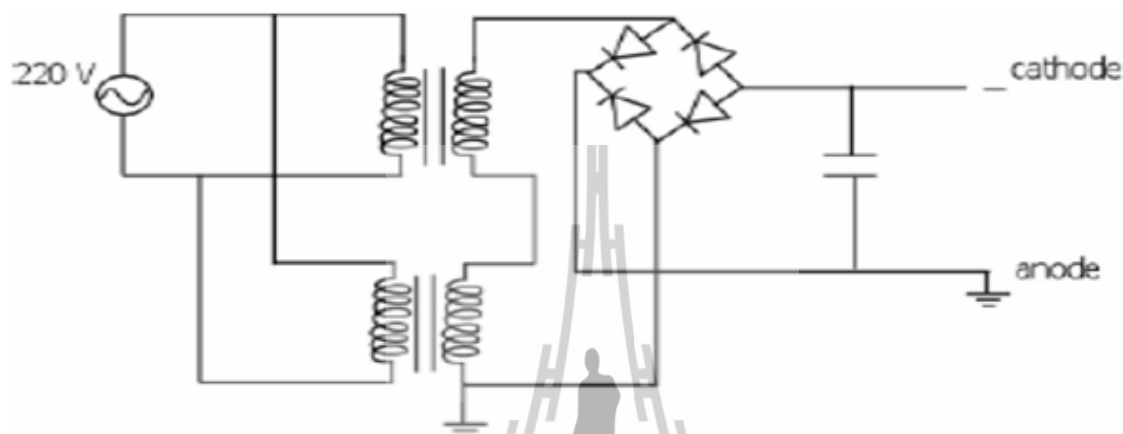
รูปที่ 3.4 ลักษณะของแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่จะจ่ายให้กับแมกนีตรอน[5]

การทำงานของวงจรทรีแรงดัน จะมีลักษณะคือ ขณะที่แรงดันไฟฟ้าขาออกของหม้อแปลงมีค่าเป็นบวก ($V_{peak} = 3,000$ โวลต์) ไดโอดก็จะนำกระแสและตัวเก็บประจุจะถูกชาร์จ ในขณะที่แรงดันที่ตกคร่อมคาโทดและอานอดมีค่าเป็นศูนย์ และเมื่อแรงดันไฟฟ้าขาออกของหม้อแปลงเปลี่ยนเป็นลบ ไดโอดก็จะหยุดนำกระแส ซึ่งจะมีผลทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมทำคาโทดและอานอดเป็นแรงดันไฟฟ้ารวมของแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุและแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลงซึ่งเท่ากับ 6,000 โวลต์เมื่อต้องวงจรจ่ายแรงดันไฟฟ้างกล่าวเข้ากับแมกนีตรอน แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อม อานอดและคาโทดจะลดเหลือ 4,000 โวลต์ดังรูปที่ 20 ซึ่งแรงดันไฟฟ้าผลต่างประมาณ 2,000 โวลต์ จะเปลี่ยนเป็นกำลังของคลื่นไมโครเวฟสูงสุดที่ถูกส่งออกมา ซึ่งคลื่นไมโครเวฟที่ถูกส่งออกมาก็จะมีลักษณะเป็นพัลส์เช่นเดียวกับรูปที่ 3.5



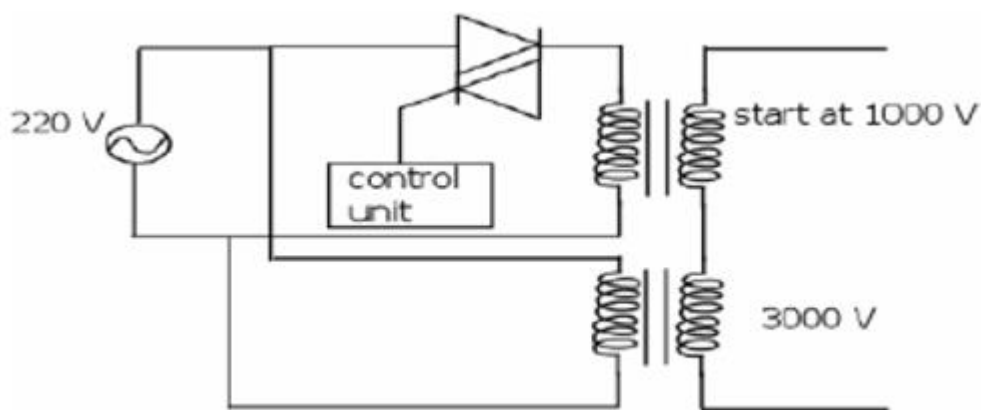
รูปที่ 3.5 ลักษณะของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมแมกนีตรอน[5]

การออกแบบและสร้างชุดจ่ายแรงดันให้แมกนีตรอนทำงานอย่างต่อเนื่องเพื่อให้วงจรจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงสามารถจ่ายแรงดันให้กับแมกนีตรอนได้อย่างต่อเนื่องที่ 6,000 โวลต์ จึงใช้หม้อแปลงที่มีลักษณะเดียวกันกับหม้อแปลงที่ใช้ในวงจร จำนวนสองตัวมาต่ออนุกรมเข้าด้วยกัน แล้วต่อเข้ากับ Bridge Rectifier พร้อมกับ Capacitor filter ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 วงจรจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงคงที่ 6,000 โวลต์ให้กับแมกนีตรอน[5]

การควบคุมการจ่ายกำลังไมโครเวฟของแมกนีตรอนจากการทดลองทำให้ทราบว่าวิธีที่เป็นไปได้ในการควบคุมการจ่ายกำลังไมโครเวฟของแมกนีตรอน ก็โดยการควบคุมแรงดันไฟฟ้าหรือความต่างศักย์ที่ตกคร่อมขั้วคาโทดและขั้วแอโนด ซึ่งจะเป็นตัวควบคุมลักษณะการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่ถูกปล่อยออกมาจากไส้หลอด โดยที่ค่าแรงดันไฟฟ้าที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้จะค่าระหว่าง 4,000 โวลต์ถึง 6,000 โวลต์ เนื่องจากวงจรกำเนิดแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแมกนีตรอน ประกอบด้วยหม้อแปลงสองตัวดังรายละเอียดในหัวข้อที่แล้ว ดังนั้นการควบคุมแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรสามารถทำได้โดยการควบคุมแรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงตัวใดตัวหนึ่งโดยใช้ Power Electronics ดังรูปที่ 3.7 และจะตั้งค่าเริ่มต้นของแรงดันที่ Rectifier แล้วเป็น 4,000 โวลต์ซึ่งเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ทำให้แมกนีตรอนสามารถจ่ายคลื่นไมโครเวฟออกมา



รูปที่3.7 จงจรรจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงให้กับแมกนีตรอน ซึ่งสามารถควบคุมแรงดันขาออก[5]

3.2 ส่วนท่อนำคลื่น (Waveguide)

โดยส่วนใหญ่ท่อนำคลื่นและอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้กันอยู่ในอุตสาหกรรมประเภทอาหารและยาจะเป็นสแตนเลส เพราะมีข้อดีคือทนความร้อนสูง และ ทนต่อการผุกร่อน (Corrosion) [10] แต่ข้อเสียคือค่าattenuationมีค่าสูง ดังแสดงในตารางที่ 3.1 ซึ่งค่าattenuationเป็นตัวบอกถึงค่าการสูญเสียที่บริเวณผิวของโลหะ สามารถพิจารณาได้ตามสมการที่ 9 α_c คือค่า attenuation (dB/m) [9]

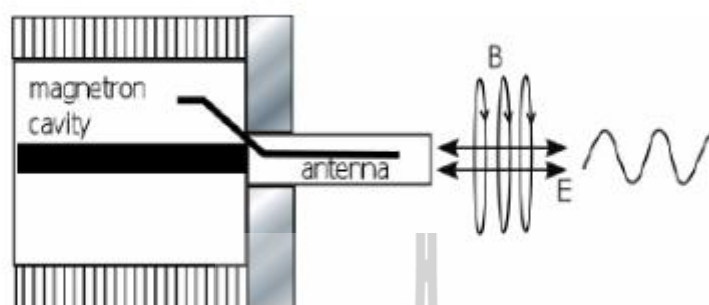
$$\alpha_c = \frac{1}{\eta b} \left[\frac{\pi f \mu}{\sigma \left[1 - \left(\frac{f_c}{f} \right)^2 \right]} \right]^{\frac{1}{2}} \left[1 + \frac{2b}{a} \left(\frac{f_c}{f} \right)^2 \right] \quad (9)$$

η คือค่าintrinsic impedanceของวัสดุไดอิเล็กตริก , a และ b คือค่าความกว้าง และความสูงของท่อนำคลื่น, σ คือค่าสภาพนำไฟฟ้า, f_c คือความถี่cutoff

Parameter	WG size (mm)	Cu	Al	Stainless steel
$\sigma(mho / m)$	n/a	5.5×10^7	3.0×10^7	1.4×10^6
α_c	86x43	2.28E-2	3.09E-2	1.43E-1
Power loss,watts per metre at 25 kW	86x43	132	178	837

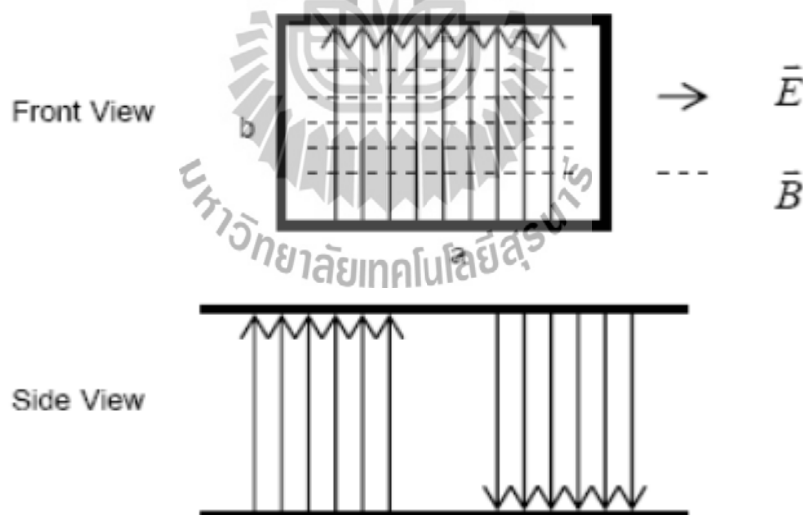
ตารางที่3.1 ค่าattenuation และ ค่า Power loss ของโลหะชนิดต่างๆที่ความถี่ 2.45 GHz[5]

จากเหตุผลข้างต้นประกอบกับในห้องตลาดมีท่อสเตนเลสขนาดหน้าตัด 8x6 เซนติเมตรซึ่งเป็นขนาดมาตรฐานจำหน่ายอยู่แล้ว จึงสามารถนำมาใช้เป็นท่อนำคลื่นได้ จากเหตุผลทั้งหมดดังที่กล่าวมาทำให้เลือกใช้สเตนเลสเป็นวัสดุหลักของ ท่อนำคลื่น และ เตาอบ(cavity)การออกแบบและสร้างท่อนำคลื่นเนื่องจากการทดลองนี้ได้ใช้แมกนีตรอนซึ่งใช้อยู่ในเตาอบไมโครเวฟเป็นตัวกำเนิดคลื่นไมโครเวฟดังนั้นคลื่นที่ถูกส่งออกมาจากรูหรือสลิต(slot)ที่ปลายของแมกนีตรอนจะมีลักษณะ ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่3.8 ลักษณะคลื่นไมโครเวฟที่ถูกส่งออกจากสลิตที่ปลายแมกนีตรอน[5]

เมื่อส่งคลื่นไมโครเวฟดังกล่าวผ่านเวฟไกด์รูปสี่เหลี่ยม (Rectangular waveguide) โดยเลือกโหมดของการส่งให้เป็น TE₁₀ จะได้คลื่นภายในท่อนำคลื่น มีลักษณะดังรูปที่ 3.9



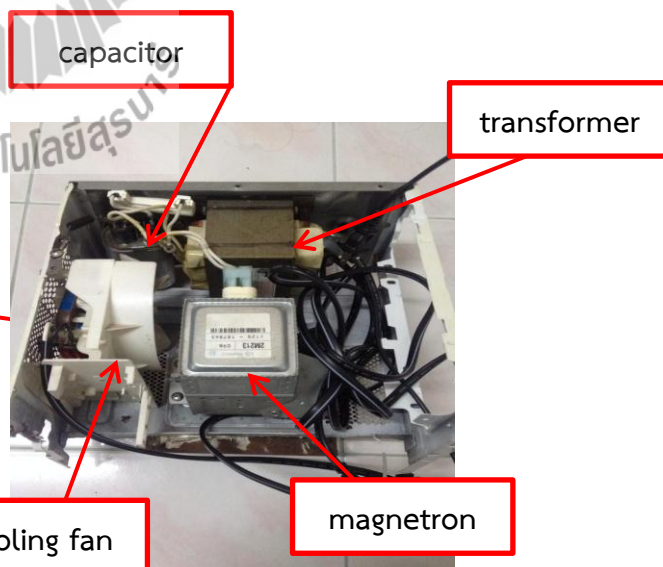
รูปที่3.9 ลักษณะของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของโหมด TE₁₀[5]

ซึ่งความถี่ต่ำสุดของคลื่นไมโครเวฟ(Cut-off frequency, f_c) ที่สามารถส่งผ่านไปตามท่อนำคลื่นแบบนี้ได้นั้น สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$f_{mn}^c = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \quad (10)$$

เมื่อ c คือความเร็วแสง m และ n คือเลขจำนวนเต็ม a และ b คือขนาดของท่อนำคลื่น เมื่อเลือกให้ $a = 8$ เซนติเมตร $b = 4$ เซนติเมตร เนื่องจาก $m = 0$; $n = 1$ สำหรับโหมด TE_{01} และใช้ไมโครเวฟที่มีความถี่ $f = 2.45$ GHz ดังนั้นจะได้ค่าความถี่ cutoff = 1.88GHz และค่าความยาวคลื่นในท่อนำคลื่น $\lambda_g = 19.02$ เซนติเมตร

3.3 ส่วนเครื่องแยกพลาสติก



รูปที่ 3.10 ตัวเครื่องและส่วนประกอบภายในชุดไมโครเวฟ

บทที่ 4

การทดสอบและผลการทดสอบ

4.1 การทดสอบการทำงานของส่วนให้กำเนิดคลื่น (magnetron)

โดยการทดสอบนั้นเราได้ทำการนำน้ำใส่ไว้ที่ขวดพลาสติก จากนั้น นำไปวางไว้บริเวณกำแพง แล้วนำส่วนของท่อนำคลื่นให้ใกล้กับขวดน้ำนั้น เพื่อให้ท่อเวฟไกด์ปล่อยคลื่นผ่านเข้าไปในขวดน้ำ แล้วทำการปล่อยคลื่นไมโครเวฟจากหลอดแมกนีตรอน(magnetron) โดยใช้ไฟกระแสสลับ (AC 220-240) จากการทดสอบนั้นใช้เวลาในการทำงานของหัวแมกนีตรอน(magnetron) 30 วินาที น้ำภายในขวดมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟทำปฏิกิริยากับน้ำ โดยโมเลกุลของน้ำจะดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ เกิดการสั่นพร้อมกับการเปลี่ยนตำแหน่ง โมเลกุลของน้ำ จัดเรียงเป็นระเบียบมากขึ้น ส่งผลให้น้ำเกิดความร้อนเพิ่มขึ้น ก็แสดงว่าหลอดแมกนีตรอน สามารถทำงานได้

4.2 การทดสอบการแยกพลาสติกออกจากฟอยล์

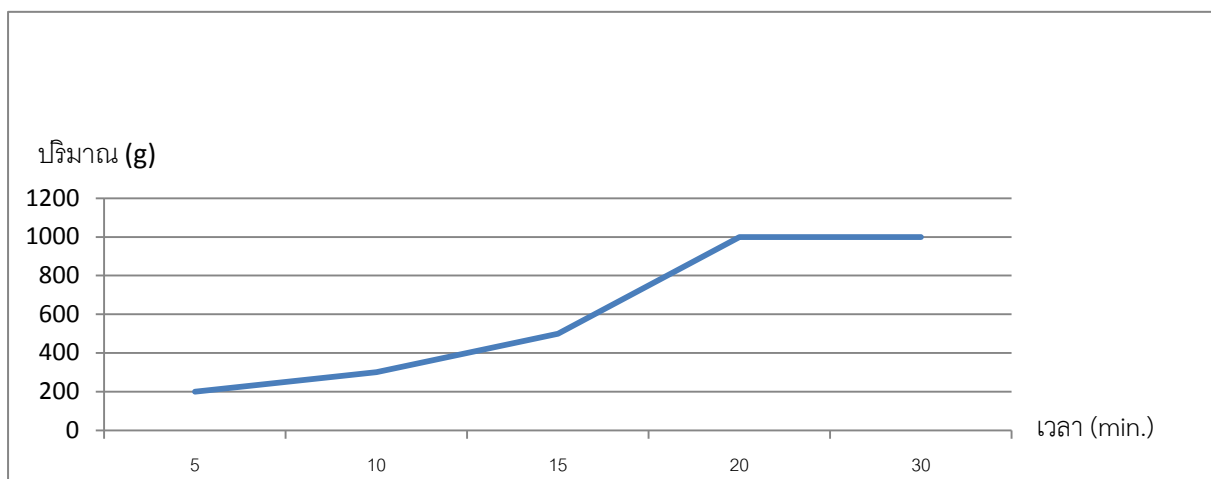
วิธีการทดสอบ : โดยการเติมน้ำลงไปในตัวถังปริมาณ $\frac{3}{4}$ ของถังที่เราได้ออกแบบไว้ และ นำเศษกล่องนมปริมาณ 2 กิโลกรัม ที่ทำการบดมาเติมลงภายในตัวถัง คนให้เศษกล่องนมผสมกับน้ำ จากนั้นทำการเปิดการทำงานส่วนของไมโครเวฟ ในระหว่างการเปิดเครื่องไมโครเวฟนั้นเราจะทำการคนอยู่เรื่อยๆ จนสิ้นการทำงาน

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลอง

โดยการทดลองเราจะทำการกำหนดปริมาณเศษกล่องนมไว้ที่ 2 กิโลกรัม

เวลา (นาที่)	ปริมาณฟอยล์ที่แยกออกมาได้ (กรัม)
5	200
10	300
15	500
20	1000
30	1000

รูปที่4.1 กราฟแสดงปริมาณของฟอยด์เทียบกับเวลา



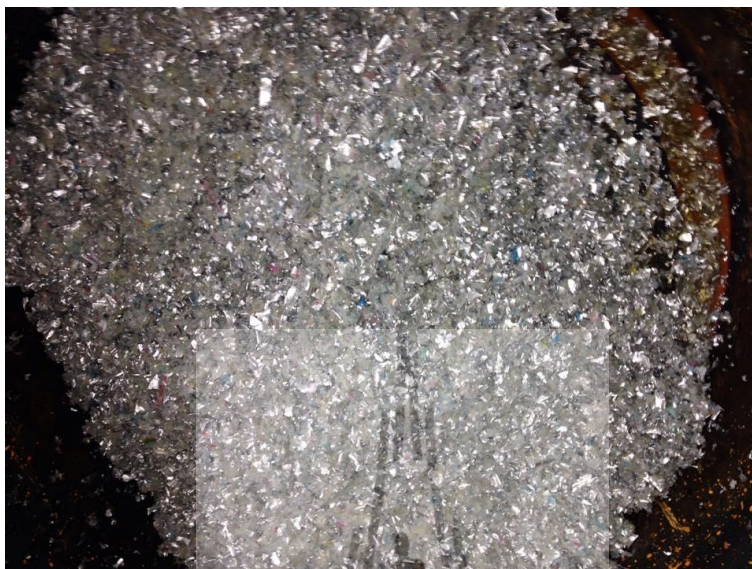
จากรูปที่4.1 ปริมาณของฟอยด์เทียบกับเวลา จะเห็นได้ว่าเมื่อเวลา 5 นาทีจะได้ปริมาณฟอยด์ออกมาจำนวน 200 กรัม และเมื่อเวลาผ่านไป 10 นาที จะได้ปริมาณฟอยด์ออกมาเป็น 300 กรัม จนเมื่อเวลาผ่านไป 20 นาที จะได้ปริมาณฟอยด์ออกมา 1000 กรัม แล้วเมื่อเวลา 30 นาที ก็ยังคงได้ปริมาณฟอยด์มา 1000 กรัม แสดงว่า เวลาหลังจาก 20 นาที ได้เกิดการแยกฟอยด์อย่างสมบูรณ์แล้ว

วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทดลอง เวลาที่มีผลต่อปริมาณของฟอยล์ที่สามารถแยกออกมาได้ แต่เมื่อเวลาถึงช่วงขณะหนึ่งจะไม่ส่งผลต่อปริมาณ เราจึงใช้เวลาในการทดลอง 20 นาที



รูปที่4.2 ฟอยล์ที่สามารถแยกออกมาได้



รูปที่4.3 พลาสติกที่แยกออกมาได้

4.3 ปัญหาในการทำโครงการและปัญหาในระหว่างการทดลอง

- บริเวณช่องที่นำวัสดุออกมีขนาดเล็กทำให้น้ำพอยล์และพลาสติกออกมาได้ยาก
- บริเวณมุมของโลหะเกิดการอาร์ค บนตัวเครื่อง
- เกิดน้ำซึมบริเวณ ฝาเปิดน้ำทิ้ง

4.4 แนวทางการแก้ปัญหาระหว่างการทำโครงการและการทดลอง

- ซื้อที่ซ้อนปลาขนาดที่สามารถเข้าออกกับช่องได้ง่าย เพื่อสามารถที่จะตัดวัสดุพอยล์และพลาสติกออกได้ง่ายและสะดวก
- ปัญหาบริเวณมุมโลหะเกิดการอาร์ค บนตัวเครื่องแนวทางการแก้ปัญหา โดนการนำกาวEpoxy นำมาอุดช่องว่างภายในตัวเครื่อง เพื่อไม่ให้เกิดการอาร์ค
- ปัญหาเกิดน้ำรั่วซึมบริเวณฝาเปิดน้ำทิ้ง แนวทางแก้ปัญหา โดยนำดินน้ำมันอุดบริเวณรอบๆฝาเปิดน้ำทิ้งเพื่อไม่ให้เกิดน้ำรั่วซึมออกมา

4.5 ผลผลิตที่เกิดจากการนำฟอยล์และพลาสติกที่แยกออกมาได้

- ฟอยล์ที่เราแยกมานั้นสามารถนำไปหลอม สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ซึ่งช่วยลดปริมาณต้นทุนการผลิตได้และปริมาณขยะ
- พลาสติกที่เราได้สามารถนำไปทำเป็นน้ำยาสำหรับเป็นส่วนผสมในการทำไม้แปรรูปได้



รูปที่4.4 น้ำยาที่ใช้ผสมทำไม้อัด



รูปที่4.5 ไม้อัดที่ใช้ น้ำยาที่ทำมาจากพลาสติก

บทที่ 5

สรุปผลการทำโครงการ

5.1 บทสรุป

เครื่องแยกพอลิโพรพิลีนออกจากพลาสติก เป็นการออกแบบเพื่อแยกขยะที่สามารถนำกลับไปใช้ได้ใหม่ ทั้งสองส่วน ทั้งนี้เพื่อไม่ให้ขยะพลาสติกต้องสูญเปล่าในกระบวนการของการหลอมนำพอลิโพรพิลีนกลับมาใช้การ แยกพอลิโพรพิลีนออกจากพลาสติกอาศัยหลักการทำงานของกระแสไหลวนที่เกิดขึ้นในพอลิโพรพิลีนจากการได้รับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในระดับความถี่ 2.45GHz (คลื่นไมโครเวฟ) ทำให้ในพอลิโพรพิลีนเกิดความร้อนและแยกตัวออกจากพลาสติก ปัจจัยที่สำคัญในการทำงานของเครื่องแยกพอลิโพรพิลีนออกจากพลาสติกโดยใช้คลื่นไมโครเวฟมีดังต่อไปนี้

- แหล่งกำเนิดคลื่น หลอดแมกนีตรอน (Magnetron)
- น้ำในถังเพื่อใช้เป็นตัวช่วยแยกชั้นระหว่างพอลิโพรพิลีนกับพลาสติก
- ระยะเวลาในการเปิดแหล่งกำเนิดคลื่น

5.2 สิ่งที่ได้รับจากการทำโครงการ

1. ได้รู้จักหลักการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ จากการทำงานจริง เห็นพฤติกรรมของอุปกรณ์ในการทำงาน การแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นจากการเสียหายของอุปกรณ์ในวงจร
2. ได้ประยุกต์ใช้ความรู้ที่ได้จากห้องเรียน จากการสอบถามผู้รู้ รวมถึงการศึกษาด้วยตัวเอง ทำให้ได้รับประสบการณ์จากการทำโครงการครั้งนี้ได้อย่างสูงสุด
3. ได้รู้จักกระบวนการในการทำโครงการ ตั้งแต่การวางแผน การออกแบบ การปฏิบัติ การทดลองผล การนำผลการทดลองมาสรุป จนถึงทำรูปเล่มรายงาน
4. ได้ฝึกความอดทนอดกลั้น ยอมรับความคิดเห็นของสมาชิกในกลุ่ม รู้จักการให้อภัยในการทำงานพลาด และรู้จักการทำงานเป็นทีม

5.3 ข้อเสนอแนะ

1. ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการออกแบบตัวเครื่องที่มีช่องสำหรับนำวัสดุเข้า/ออกมีขนาดเล็กทำให้ยากต่อการนำวัสดุใส่เข้าไป และการนำออกมาจากตัวเครื่อง หากมีการพัฒนาต่อควรปรับปรุงแก้ไขในจุดๆนี้
2. หม้อแปลงและตัวถังของเครื่องเป็นโลหะ มีโอกาสที่เกิดกระแสไฟฟ้ารั่วไหลได้ การทำงานกับตัวเครื่องจึงต้องมีความระมัดระวังอย่างมาก
3. เนื่องจากอาจมีการอาร์คเกิดขึ้นในบริเวณที่เป็นมุมของโลหะที่มีลักษณะแหลม และบริเวณที่เป็นช่องว่างระหว่างฝาเปิด/ปิดของเครื่อง โดยเราสามารถแก้ไขได้โดยการลบมุม หรือปิดปลายที่เป็นมุมต่างๆของโลหะด้วยวัสดุที่เป็นฉนวนไฟฟ้า

บรรณานุกรม

- [1]. <http://www.tcdc.or.th/src/17005/www-tcdcconnect-com/การใช้เครื่องกลั่นนม-เพื่อเราเพื่อธรรมชาติ-เพื่อโลก>
(Accessed Sep 20 , 2014)
- [2]. <http://www.eei-ku.com/technics/Deep/D05.pdf> (Accessed Sep 22 , 2014)
- [3]. อีระยุทธ สุวรรณประทีป พิชัย สิละพัฒนะ พงษ์ธร จริญญากรณ์ และนพดล เวชสวัสดิ์. เตาอบไมโครเวฟ.
<http://www.rmutphysics.com/CHARUD/specialnews/5/microwave/index.htm> (Accessed Sep 20 , 2014)
- [4]. สมนึก บุญพาไสว กุมภาพันธ์ ๒๕๕๑. กระแสไหลวน.<http://design.ipst.ac.th/docu/photo/doc0003.pdf>
(Accessed Sep 23 , 2014)
- [5]. ดร.วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล. อุปกรณ์อบแห้งอุตสาหกรรม
<http://thailandindustry.com/guru/view.php?id=14291§ion=9> (Accessed Sep 20 , 2014)

