

การพัฒนาระบบการให้ความร้อนเพื่อการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ Developing the Heating System for Drying with Microwave

ยุทธพงศ์ เพ็ญโรจน์ พันธุ์ศักดิ์ เกิดทองมี หมุดตอเล็บ นินโส
หน่วยวิจัยฟิสิกส์ทดลอง สำนักวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ 222 ต.ไทยบุรี อ.ท่าศาลา จังหวัดนครศรีธรรมราช 80160
โทร.075-672005 E-mail: yutt_r@yahoo.com pansak20@hotmail.com mnisoa@yahoo.com
Yutthapong Pianroj Pansak Kerdthongmee Mudtorlep Nisoa
Experimental Physics Research Unit, Walailak University 222 Thasala, Nakhon Si Thammarat 80160, Thailand
Tel.075-672005 E-mail: yutt_r@yahoo.com pansak20@hotmail.com mnisoa@yahoo.com

บทคัดย่อ

เกษตรกรในพื้นที่ภาคใต้มีการทำการแปรรูปอาหารทะเลโดยการทำปลาแห้ง ซึ่งวิธีการที่เกษตรกรใช้อยู่ในปัจจุบันคือการตากแดด แต่ในฤดูฝนจะใช้เตาเผาซึ่งมีไม้ฟืนเป็นเชื้อเพลิง เพื่ออบแห้งปลา โดยการใช้อากาศเป็นตัวพาความร้อน(conventional heating)ซึ่งเป็นขบวนการถ่ายเทพลังงานที่มีประสิทธิภาพต่ำ และมีข้อจำกัดในการควบคุมความร้อนให้กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ในงานวิจัยชิ้นนี้จึงได้พัฒนาเทคโนโลยีการอบแห้งปลาด้วยคลื่นไมโครเวฟซึ่งเป็นพลังงานทางเลือกที่มีประสิทธิภาพในด้านการให้ความร้อนแก่วัสดุ โดยหลักการการเกิดอันตรกิริยาระหว่างคลื่นไมโครเวฟกับโมเลกุลของน้ำในเนื้อปลา (dielectric heating) ที่ต้องการอบโดยตรง(selective heating) โดยได้ทำการพัฒนาในส่วนชุดวงจรความต่างศักย์แรงสูงเพื่อควบคุมแมกนีตรอนให้จ่ายกำลังคลื่นไมโครเวฟตามที่ต้องการ รวมถึงการพัฒนาท่อนำคลื่น(waveguide) ระบบแมชชิง(matching) เตาอบ(cavity) และ เครื่องต้นแบบ ซึ่งคาดว่าจะผลที่ได้จะนำไปประยุกต์ใช้ในการอบวัสดุที่มีมูลค่าสูงในแง่เศรษฐกิจ เช่น ยา สมุนไพร หรือ ยางพารา ต่อไป.

คำสำคัญ: พลังงานทางเลือก/ไมโครเวฟ/ไดอิเล็กตริก ฮีตติ้ง

Abstract

In the southern of Thailand , dried fish is one of main commercial products. The conventional energies using for fish drying are sunshine and heat from wood. These drying method has problems such as low efficiency and environmental problems The better one using high power microwave heating has been developed in this paper. It is an efficiency technology to convert the energy from electricity to microwave to dry fish by interaction between high frequency electric field and the fish called dielectric heating .The development of this technique has been done on a high voltage part that control a magnetron for supply energy to drying products, waveguide, matching system, microwave cavity

and the prototype. The developed dryer is expect to use for drying the high valuable agricultural products .

Keyword; Efficiency Energy/Microwave/Dielectric heating

1. บทนำ

จากการสำรวจปัญหาของเกษตรกรในเขต จ.นครศรีธรรมราช ของหน่วยวิจัยฟิสิกส์ทดลอง ม.วลัยลักษณ์ พบว่าเกษตรกรที่ทำอาชีพการทำปลาแห้งซึ่งใช้แสงแดดเป็นแหล่งพลังงานหลัก จะประสบปัญหาในช่วงฤดูฝนเนื่องจากแสงแดดไม่เพียงพอและมีความชื้นสูง โดยจะมีการอบปลาแห้งโดยใช้เตาเผาซึ่งใช้ไม้ฟืนเป็นเชื้อเพลิงและมีอากาศเป็นตัวพาความร้อน(conventional heating)ทำให้ความร้อนที่ได้ไม่สม่ำเสมอ การขาดแคลนไม้ฟืน และต้องใช้ฟืนในการตากปลา ซึ่งพื้นที่ในการตากปลาเป็นระบบเปิดทำให้มีการปนเปื้อนเนื่องจากฝุ่นละออง และ เชื้อโรคจากแมลงชนิดต่างๆ จึงส่งผลให้เกษตรกรบางรายมีการใช้สารเคมีในการป้องกันแมลง เป็นผลให้เกิดการตกค้างของสารเคมีในปลาแห้ง

จากปัญหาดังที่กล่าวเป็นสาเหตุที่ต้องหาพลังงาน และเทคโนโลยีใหม่เข้ามาช่วยจัดการกับปัญหาที่มีอยู่เดิม ซึ่งพลังงาน และเทคโนโลยีใหม่ที่นำมาประยุกต์ใช้เพื่อแก้ปัญหาคือ การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยคลื่นไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งถูกกำเนิดขึ้นเป็นครั้งแรกเพื่อใช้สำหรับเรดาร์ในสมัยสงครามโลกครั้งที่สอง[1] และด้วยคุณสมบัติเฉพาะของคลื่นไมโครเวฟซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถเคลื่อนที่เข้าไปในวัสดุต่างๆด้วยความเร็วแสงแล้วทำให้วัสดุร้อนขึ้นอย่างรวดเร็วด้วยขบวนการที่เรียกว่า Dielectric heating[2] ขบวนการดังกล่าวทำให้พลังงานของคลื่นไมโครเวฟซึ่งอยู่ในรูปของสนามไฟฟ้าเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนภายในวัสดุได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพสูง ดังนั้นในปัจจุบันจึงได้มีการนำเทคโนโลยีไมโครเวฟมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆมากมายเช่น การอบแห้ง การฆ่าเชื้อโรค การvulcanization การเร่งปฏิกิริยาเคมี การกำจัดสารพิษ และ

การกำเนิดพลาสมา[3,4,5] เป็นต้น สำหรับในอุตสาหกรรมอาหารนั้นได้มีการนำมาประยุกต์ใช้ครั้งแรกเพื่ออบแห้งมันฝรั่งและpasta[3]

สำหรับขบวนการอบแห้งอาหารนั้น จะใช้คุณสมบัติของคลื่นไมโครเวฟที่จะตอบสนองต่อโมเลกุลชนิดต่างๆไม่เท่ากัน โดยจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเชิงไดอิเล็กตริกของมัน[2] คลื่นไมโครเวฟจะถูกดูดกลืนโดยโมเลกุลของน้ำได้ดีที่สุดเนื่องจากความถี่ของการหมุนของโมเลกุลของน้ำซึ่งมีความเป็นเชิงขั้ว(Dipole)สูงกับความถี่ของคลื่นไมโครเวฟที่มีความถี่ 2.45 GHzเกิดการกำทอน(Resonance)กัน ทำให้น้ำสามารถดูดพลังงานของคลื่นได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดโดยพลังงานของคลื่นไมโครเวฟมีผลกระทบต่อวัสดุอื่น ๆ น้อยมาก[6] น้ำจะถูกทำให้ร้อนขึ้นอย่างรวดเร็วจนระเหยออกไปหมด ดังนั้นพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจึงใช้ในการระเหยของความชื้นในอาหารโดยที่ความร้อนดังกล่าวจะไม่ทำให้โครงสร้างและรสชาติของอาหารเกิดการเสียหาย ถ้าหากมีการควบคุมที่เหมาะสม ซึ่งจะเห็นว่าการอบแห้งโดยคลื่นไมโครเวฟมีความเหมาะสมอย่างยิ่งที่จะนำไปใช้เพื่อพัฒนาขบวนการอบแห้งอาหารที่มีประสิทธิภาพสูง[3]

2. ทฤษฎีการให้ความร้อนของคลื่นไมโครเวฟ

คลื่นไมโครเวฟมีความถี่อยู่ในช่วง 300 MHz ถึง 300GHz ซึ่งเป็นช่วงความถี่หนึ่งในสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยมีสมการที่ใช้อธิบายพฤติกรรมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าคือสมการของ แมกเวล (Maxwell's equations)

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho_v \quad (3)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (4)$$

แต่ความร้อนที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากอันตรกิริยา(interaction)ระหว่างคลื่นไมโครเวฟ กับ วัสดุที่ต้องการอบ(dielectric) โดยส่วนของสนามไฟฟ้าจะทำให้โมเลกุลของน้ำ(น้ำเป็นโมเลกุลส่วนใหญ่ในวัสดุจำพวกอาหาร)เกิดโพลาไรเซชันทำให้ค่า dielectric permittivity ของวัสดุไดอิเล็กตริกเขียนได้ตามสมการ[8]

$$\epsilon = \epsilon_0(\epsilon_r + j\epsilon_i) = \epsilon_0\left(\epsilon_r + j\frac{\sigma}{\omega\epsilon_0}\right) \quad (5)$$

ในการอธิบายถึงความร้อนที่เกิดขึ้นจากคลื่นไมโครเวฟ จะถูกอธิบายด้วยค่า loss tangent

$$\tan \delta = \frac{\epsilon_i}{\epsilon_r} \quad (6)$$

โดยที่ loss tangent ที่เกิดขึ้นภายในวัสดุจะสัมพันธ์กับกำลังเป็นไปตามสมการ

$$P = \omega\epsilon_r\epsilon_0 \tan \delta |E_i|^2 \quad (7)$$

โดยที่ E_i คือ ค่าสนามไฟฟ้าภายในวัสดุ

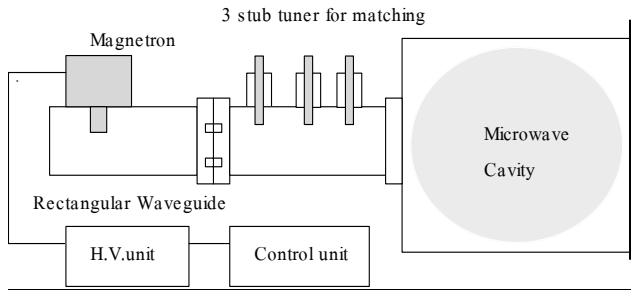
พบว่าในการให้กำลังความร้อนแก่วัสดุ จะมีความสัมพันธ์กับความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ในเชิงแปรผันโดยตรง จึงเสมือนว่าถ้าต้องการกำลังความร้อนที่สูงขึ้นก็เพียงแค่เพิ่มความถี่ แต่ในทางปฏิบัติจะมีค่าตัวแปรที่สำคัญอีกหนึ่งตัวที่เราจำเป็นต้องนำมาพิจารณาด้วยเสมอคือค่า penetration depth(D)

$$D = \frac{0.225\lambda}{\sqrt{\epsilon_r} \sqrt{\sqrt{1 + \tan^2 \delta} - 1}} \quad (8)$$

ในบทความฉบับนี้เป็นการนำเสนอส่วนต่างๆของเทคนิคการในการพัฒนาระบบส่งกำลังไมโครเวฟ,การวัดค่ากำลังของคลื่นไมโครเวฟที่ได้จากแมกเนตรอน,การเลือกใช้งานวัสดุ,การออกแบบระบบท่อนำคลื่น, การออกแบบระบบแมชชีน และ การออกแบบเตาอบ(cavity)

3. การออกแบบและพัฒนาระบบอบแห้ง

ในการอบปลาแห้งโดยใช้คลื่นไมโครเวฟเพื่อให้ได้ปลาแห้งที่มีคุณภาพเป็นที่ต้องการของตลาดนั้นจะต้องทราบเงื่อนไขที่เหมาะสมของการอบเช่น กำลังของคลื่นไมโครเวฟ การถ่ายเทความร้อนและความชื้นในเตาอบ และในตัวอย่างเป็นต้น ดังนั้นเพื่อเป็นการศึกษาเงื่อนไขดังกล่าวจึงได้ออกแบบและสร้างระบบอบปลาแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟซึ่งประกอบด้วยส่วนหลักๆ คือส่วนกำเนิดคลื่น ส่วนการควบคุมการส่งกำลัง ส่วนท่อนำคลื่น(Waveguide) ส่วนระบบแมชชีน(matching) ซึ่งใช้ 3-stub tuner และส่วนเตาอบ(cavity) ดังแสดงในรูปที่ 1.

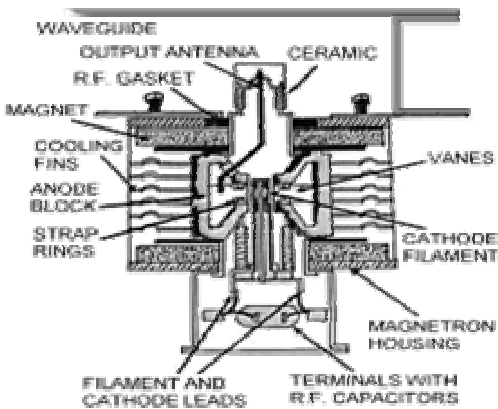


รูปที่ 1 ระบบอบแห้งวัสดุโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ

โดยที่ส่วนกำเนิดคลื่นและการควบคุมการส่งกำลังจะประกอบด้วยแมกนีตรอน (Magnetron) ส่วนกำเนิดแรงดันไฟฟ้าแรงสูง(H.V. unit) และระบบควบคุมการส่งกำลัง(Control unit) สำหรับส่วนท่อนำคลื่น(Waveguide)และระบบแมชซิ่ง(Matching)นั้นจะประกอบด้วยท่อนำคลื่นรูปสี่เหลี่ยม(Rectangular waveguide) 3-stub tuner และเตาอบ (cavity)

3.1 ส่วนกำเนิดคลื่นและการควบคุมการส่งกำลัง

แมกนีตรอน(Magnetron)จะมีลักษณะโดยทั่วไปดังแสดงในรูปที่ 2.



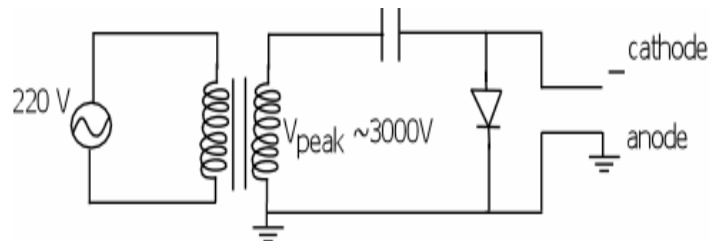
รูปที่ 2 ลักษณะโดยทั่วไปของแมกนีตรอน

ซึ่งประกอบด้วยไส้หลอด(Filament) คาโทด(Cathode)ซึ่งเป็นขั้วใดขั้วหนึ่งของไส้หลอด และถูกบรรจุอยู่ในช่องสูญญากาศซึ่งส่วนของผนังรอบๆจะทำหน้าที่เป็นขั้วแอนอด (Anode) คลื่นไมโครเวฟที่ถูกกำเนิดขึ้นจะถูกส่งออกมาภายนอกโดยAntenna ในการทำงานของแมกนีตรอนนั้น แมกนีตรอนจะถูกจ่ายด้วยไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันต่ำประมาณ 3-4 โวลต์ กระแส 10 แอมแปร์ที่ไส้หลอด ซึ่งจะทำให้ไส้หลอดร้อนและปล่อยอิเล็กตรอนออกมา และเมื่อจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงไปที่ขั้วใดขั้วหนึ่งของไส้หลอดซึ่งทำหน้าที่เป็นคาโทดเทียบกับขั้วแอนอด ก็จะทำให้อิเล็กตรอนถูกบังคับให้เคลื่อนที่ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กถาวร และเมื่อความต่างศักย์มีค่าสูงจนถึงค่าหนึ่งก็จะทำ

ให้แมกนีตรอนสามารถปล่อยคลื่นไมโครเวฟออกมาได้ โดยที่ความถี่ของคลื่นไมโครเวฟจะถูกกำหนดด้วยโครงสร้างภายในช่องสูญญากาศระหว่างขั้วคาโทดกับขั้วแอนอด ซึ่งทำให้มีความเหมาะที่ทำให้แมกนีตรอนสามารถกำเนิดคลื่นไมโครเวฟความถี่ 2.45 GHz ออกมา

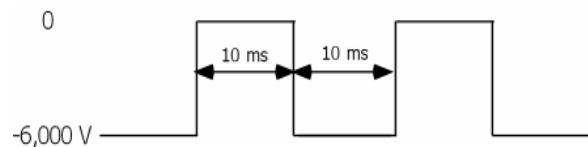
ชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงให้กับแมกนีตรอน ในขณะที่จ่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ 3-4 โวลต์ กระแส 10 แอมแปร์ให้กับไส้หลอดอยู่นั้น แรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่จ่ายให้กับคาโทดกับคาโทดจะต้องมีค่าสูงประมาณ -4,000 โวลต์ จึงจะทำให้แมกนีตรอนสามารถปล่อยคลื่นไมโครเวฟออกมาได้ และจากการทดลองโดยการเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมระหว่างคาโทดกับคาโทดพบว่า ค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่สามารถทำให้แมกนีตรอนเริ่มปล่อยคลื่นไมโครเวฟออกมาได้จะมีค่าประมาณ -4,000 โวลต์ โดยที่เมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขั้วทั้งสองมีค่าสูงขึ้น ก็จะทำให้แมกนีตรอนสามารถปล่อยคลื่นไมโครเวฟที่มีกำลังสูงขึ้น ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมมีค่าคงที่เท่ากับ -4,000 โวลต์ นั้นแสดงว่าแรงดันไฟฟ้าส่วนเกินจะถูกเปลี่ยนเป็นกำลังของคลื่นไมโครเวฟที่เพิ่มขึ้น

เตาไมโครเวฟโดยทั่วไป จะมีชุดจ่ายแรงดันซึ่งประกอบด้วย step up transformer ซึ่งมีแรงดันด้านขดทุติยภูมิ $V_{peak} = 3,000$ โวลต์ เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ 220 โวลต์ และต่อเข้ากับไดโอดและตัวเก็บประจุในลักษณะวงจรทวีแรงดัน 2 เท่าดังรูปที่ 3.



รูปที่ 3 วงจรจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับแมกนีตรอน ซึ่งเพิ่มแรงดันเป็นสองเท่าโดยใช้ไดโอดและตัวเก็บประจุไฟฟ้าแรงสูง

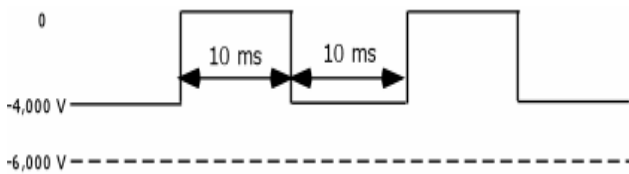
ในขณะที่ยังไม่ต่อชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้านี้ให้แก่แมกนีตรอน จะวัดค่าแรงดันสูงสุดตรงขาออกได้เท่ากับ -6,000 โวลต์ ซึ่งเป็นไปตามคุณสมบัติของวงจรทวีแรงดัน โดยจะมีลักษณะเป็นพัลส์ความถี่ 50 เฮิร์ต ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ลักษณะของแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่จะจ่ายให้กับแมกนีตรอน

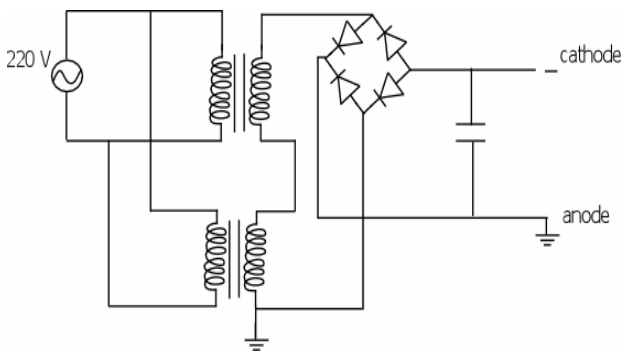
การทำงานของวงจรที่แรงดันในรูปที่ 4 จะมีลักษณะคือ ขณะที่มีแรงดันไฟฟ้าขาออกของหม้อแปลงมีค่าเป็นบวก ($V_{peak} = -3,000$ โวลต์) ไดโอดก็จะนำกระแสและตัวเก็บประจุจะถูกชาร์จ ในขณะที่แรงดันที่ตกคร่อมคาโทดและแอนโอดมีค่าเป็นศูนย์ และเมื่อแรงดันไฟฟ้าขาออกของหม้อแปลงเปลี่ยนเป็นลบ ไดโอดก็จะหยุดนำกระแส ซึ่งจะมีผลทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมทำคาโทดและแอนโอดเป็นแรงดันไฟฟ้ารวมของแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุและแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลงซึ่งเท่ากับ $-6,000$ โวลต์

เมื่อต่อวงจรจ่ายแรงดันไฟฟ้าง่ายดังกล่าวก่อรูปที่ 3) เข้ากับแมกนีตรอนแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมแอนโอดและคาโทดจะลดเหลือ $-4,000$ โวลต์ดังรูปที่ 5 ซึ่งแรงดันไฟฟ้าผลต่างประมาณ $-2,000$ โวลต์ จะเปลี่ยนเป็นกำลังของคลื่นไมโครเวฟสูงสุดที่ถูกส่งออกมา ซึ่งคลื่นไมโครเวฟที่ถูกส่งออกมาก็จะมีลักษณะเป็นพัลส์เช่นเดียวกับรูปที่ 5.



รูปที่ 5 ลักษณะของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมแมกนีตรอน
จะมีค่าคงที่เท่ากับ $-4,000$ โวลต์

การออกแบบและสร้างชุดจ่ายแรงดันให้แมกนีตรอนทำงานอย่างต่อเนื่องเพื่อให้วงจรจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงสามารถจ่ายแรงดันให้กับแมกนีตรอนได้อย่างต่อเนื่องที่ $6,000$ โวลต์ จึงใช้หม้อแปลงที่มีลักษณะเดียวกันกับหม้อแปลงที่ใช้ในวงจรในรูปที่ 3 จำนวนสองตัวมาต่ออนุกรมเข้าด้วยกัน แล้วต่อเข้ากับ Bridge Rectifier พร้อมกับ Capacitor filter ดังรูปที่ 6.



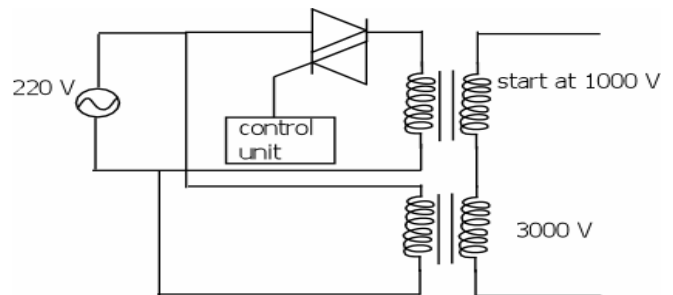
รูปที่ 6 วงจรจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงคงที่ $6,000$ โวลต์ให้กับแมกนีตรอน

โดยแรงดันไฟฟ้าขาออกจะมีค่าคงที่เท่ากับ $6,000$ โวลต์ดังแสดงในรูปที่ 7.



รูปที่ 7 ลักษณะของแรงดันที่มีค่าคงที่ของวงจรในรูปที่ 6.

การควบคุมการจ่ายกำลังไมโครเวฟของแมกนีตรอนจากการทดลองทำให้ทราบว่าวิธีที่เป็นไปได้ในการควบคุมการจ่ายกำลังไมโครเวฟของแมกนีตรอน ก็โดยการควบคุมแรงดันไฟฟ้าหรือความต่างศักย์ที่ตกคร่อมขั้วคาโทดและขั้วแอนโอด ซึ่งจะเป็นตัวควบคุมลักษณะการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่ถูกปล่อยออกมาจากไส้หลอด โดยที่ค่าแรงดันไฟฟ้าที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้จะค่าระหว่าง $-4,000$ โวลต์ถึง $-6,000$ โวลต์ เนื่องจากวงจรกำเนิดแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแมกนีตรอนประกอบด้วยหม้อแปลงสองตัวตั้งรายละเอียดในหัวข้อที่แล้ว ดังนั้นการควบคุมแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรสามารถทำได้โดยการควบคุมแรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงตัวใดตัวหนึ่งโดยใช้ Power Electronics ดังรูปที่ 8 และจะตั้งค่าเริ่มต้นของแรงดันที่ Rectifier แล้วเป็น $-4,000$ โวลต์ซึ่งเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ทำให้แมกนีตรอนสามารถจ่ายคลื่นไมโครเวฟออกมา



รูปที่ 8 วงจรจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงให้กับแมกนีตรอน ซึ่งสามารถควบคุมแรงดันขาออก โดยการเปลี่ยนค่าแรงดันด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง

3.2 ส่วนท่อนำคลื่นและระบบแมชซิ่ง

โดยส่วนใหญ่ท่อนำคลื่นและอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้กันอยู่ในอุตสาหกรรมประเภทอาหารและยาจะเป็นสเตนเลส เพราะมีข้อดีคือทนความร้อนสูง และ ทนต่อการผุกร่อน (corrosion) [10] แต่ข้อเสียคือค่า attenuation มีค่าสูง ดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งค่า attenuation เป็นตัวบอกถึงค่าการสูญเสียที่บริเวณผิวของโลหะ สามารถพิจารณาได้ตามสมการที่ 9 α_c คือค่า attenuation (dB/m) [9]

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

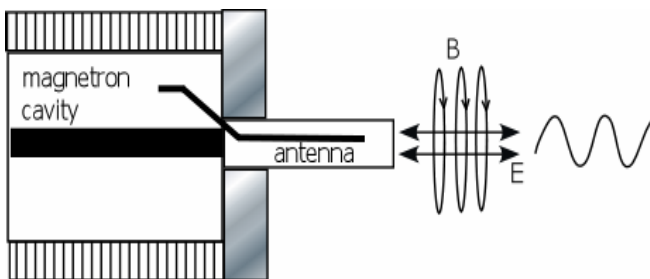
η คือค่าintrinsic impedanceของวัสดุไดอิเล็กตริก , a และ b คือค่าความกว้าง และความสูงของท่อนำคลื่น, σ คือค่าสภาพนำไฟฟ้า, f_c คือความถี่cutoff

ตารางที่ 1[10] ค่าattenuation และ ค่าPower lossของโลหะชนิดต่างๆ ที่ความถี่ 2.45 GHz

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

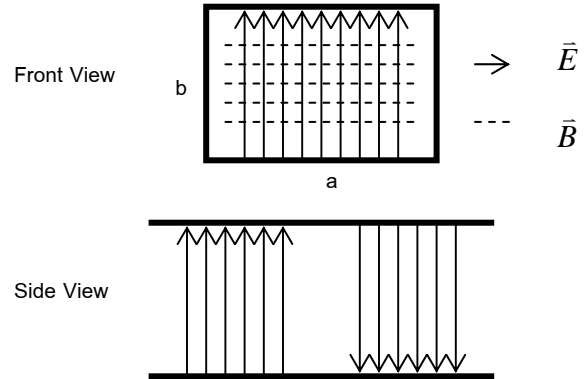
จากเหตุผลข้างต้นประกอบกับในท้องตลาดมีท่อสแตนเลสขนาดหน้าตัด 8x6 เซนติเมตร ซึ่งเป็นขนาดมาตรฐานจำหน่ายอยู่แล้ว จึงสามารถนำมาใช้เป็นท่อนำคลื่นได้ จากเหตุผลทั้งหมดดังกล่าวมาทำให้เลือกใช้สแตนเลสเป็นวัสดุหลักของ ท่อนำคลื่น และ เตออบ(cavity)

การออกแบบและสร้างท่อนำคลื่นเนื่องจากการทดลองนี้ได้ใช้แมกนีตรอนซึ่งใช้อยู่ในเตออบไมโครเวฟเป็นตัวกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ ดังนั้นคลื่นที่ถูกส่งออกมาจากรูหรือสลิต(stot)ที่ปลายของแมกนีตรอนจะมีลักษณะ ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 ลักษณะคลื่นไมโครเวฟที่ถูกส่งออกมาจากสลิตที่ปลายแมกนีตรอน

เมื่อส่งคลื่นไมโครเวฟดังกล่าวผ่านเวฟไกด์รูปสี่เหลี่ยม(Rectangular waveguide)โดยเลือกโหมดของการส่งให้เป็น TE₁₀ จะได้คลื่นภายในท่อนำคลื่นมีลักษณะดังรูปที่ 10.



รูปที่ 10 ลักษณะของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของโหมด TE₁₀

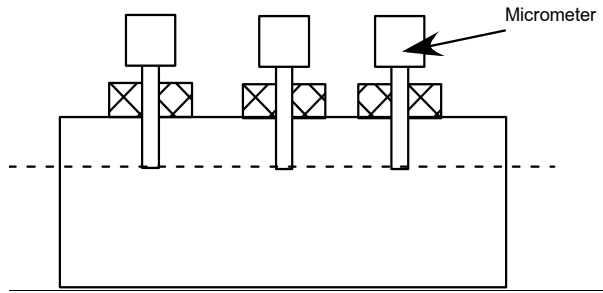
ซึ่งความถี่ต่ำสุดของคลื่นไมโครเวฟ(Cut-off frequency, f^c)ที่สามารถส่งผ่านไปตามท่อนำคลื่นแบบนี้ได้นั้น สามารถคำนวณได้จากสูตร

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

เมื่อ c คือความเร็วแสง m และ n คือเลขจำนวนเต็ม a และ b คือขนาดของท่อนำคลื่น เมื่อเลือกให้ $a = 8$ เซนติเมตร $b = 4$ เซนติเมตร เนื่องจาก $m = 0$; $n = 1$ สำหรับโหมด TE₀₁ และใช้ไมโครเวฟที่มีความถี่ $f^c = 2.45$ GHz ดังนั้นจะได้ค่าความถี่ cutoff = 1.88GHz และค่าความยาวคลื่นในท่อนำคลื่น $\lambda_g = 19.02$ เซนติเมตร

การออกแบบและสร้าง 3-stub tuner เนื่องจากริมพีแดนซ์ (Impedance) ในส่วนของระบบส่งกำลังไมโครเวฟซึ่งประกอบด้วยแมกนีตรอนและเวฟไกด์ และอิมพีแดนซ์ของวัสดุที่ต้องการอบซึ่งเป็นโพลของคลื่นไมโครเวฟมีค่าต่างกันมาก จะทำให้เกิดการสะท้อนกลับของคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งจะทำให้หลอดแมกนีตรอนอาจจะถูกทำลายได้ และการดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟของวัสดุมีความแตกต่างกัน ดังนั้นจำเป็นต้องเพิ่มส่วนของระบบอิมพีแดนซ์แมชซึ่งเข้าไปประหว่างระบบส่งกำลังไมโครเวฟและวัสดุที่ต้องการอบ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการส่งกำลังคลื่นไมโครเวฟไปยังวัสดุ ซึ่งในการทดลองนี้จะใช้ 3-stub tuner เป็นตัวทำหน้าที่เป็นอิมพีแดนซ์แมชซึ่ง 3-stub tuner โดยการประยุกต์ใช้แกนของไมโครมิเตอร์มาเป็นส่วนของตัวปรับ tuneซึ่งจาก

ภาพประกอบด้วยแท่งตัวนำสามแท่งสอดเข้าไปในเวฟไกด์ โดยแต่ละแท่งอยู่ห่างกันประมาณ 3 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 11



รูปที่ 11 ลักษณะของ 3-stub tuner

3.3 ส่วนของเตาอบ(Cavity)

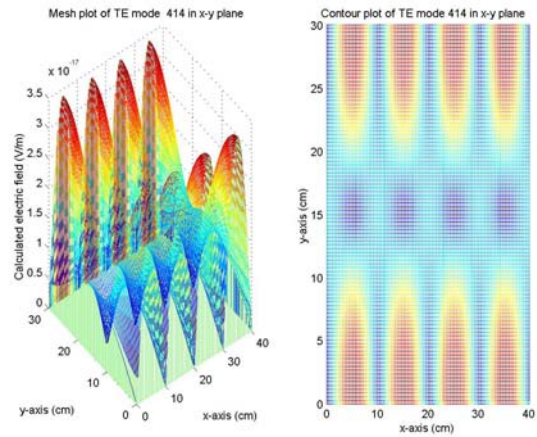
ในการออกแบบเตาอบโดยมีขนาดของเตาอบเป็นดังรูปที่ 13 และใช้สแตนเลสที่มีรูปขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร เพื่อใช้ในการอบวัสดุมีหลักการ โดยให้ภายในเตาอบเกิดการสะท้อนของคลื่นไมโครเวฟอยู่ภายในเตาอบ และเกิดการรวมกัน ซึ่งปรากฏนี้เรียกว่า การเกิดคลื่นนิ่งโดยการเกิดคลื่นนิ่งภายในเตาอบได้ถูกออกแบบให้เกิดขึ้นหนึ่งได้หลายโหมดการเกิด(multi mode) ซึ่งเป็นไปตามสมการ

$$f_{mnp}^c = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{d}\right)^2} \quad (11)$$

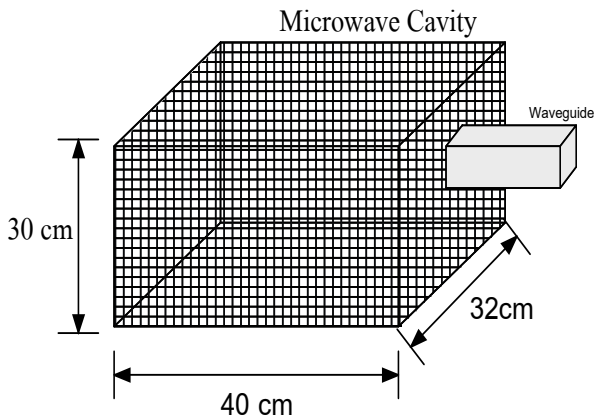
การคำนวณโดยใช้โปรแกรม Matlab เพื่อคำนวณหาโหมดที่เกิดขึ้นหนึ่งภายในเตาอบ[11] ผลการคำนวณเป็นดังตารางที่ 2 และ เมื่อใช้โปรแกรมจำลองการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟโดยเลือกโหมด mnp คือ 414 ดังแสดงในรูปที่ 13,14 และ 15

ตารางที่ 2 โหมดต่างๆที่เกิดขึ้นในเตาอบ

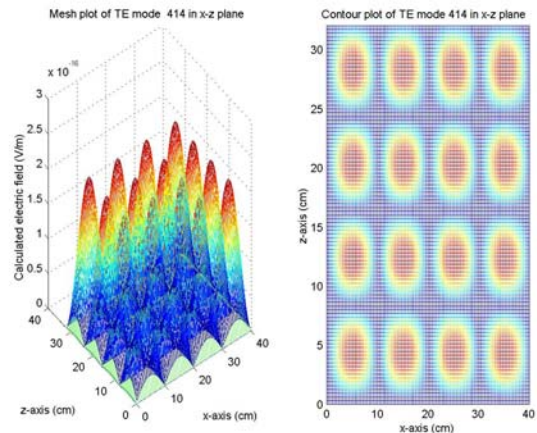
m	n	p	f(GHz)
3	4	1	2.4781
4	3	1	2.4286
5	1	1	2.4240
5	0	2	2.4591
2	4	3	2.4771
4	2	3	2.4027
0	4	4	2.4983
4	1	4	2.4510
1	3	5	2.4448
0	2	6	2.4605
2	0	6	2.4358
2	1	6	2.4865



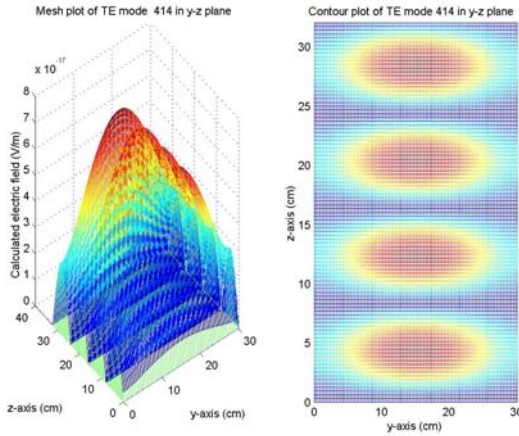
รูปที่ 13 การกระจายตัวในระนาบ x-y ของคลื่นไมโครเวฟในโหมด 414



รูปที่ 12 ขนาดของเตาอบ(cavity)ที่ได้ออกแบบสร้าง



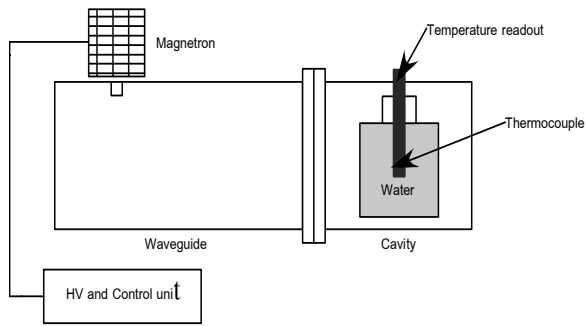
รูปที่ 14 การกระจายตัวในระนาบ x-z ของคลื่นไมโครเวฟในโหมด 414



รูปที่ 15 การกระจายตัวในระนาบ y-z ของคลื่นไมโครเวฟในโหมด 414

4. การวัดกำลังของคลื่นไมโครเวฟ

การวัดกำลังของคลื่นไมโครเวฟที่เกิดจากแมกนีตรอน ทำการวัดกำลังของคลื่นไมโครเวฟที่ถูกส่งออกมาจากแมกนีตรอน โดยใช้น้ำเป็นโหลด เนื่องจากน้ำสามารถดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟได้ดีที่สุด แล้วทำการวัดอุณหภูมิของน้ำที่เปลี่ยนไปโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) โดยจัดการทดลองดังรูปที่ 16.



รูปที่ 16 การทดลองเพื่อวัดกำลังของคลื่นไมโครเวฟที่ถูกส่งออกมาจากแมกนีตรอน

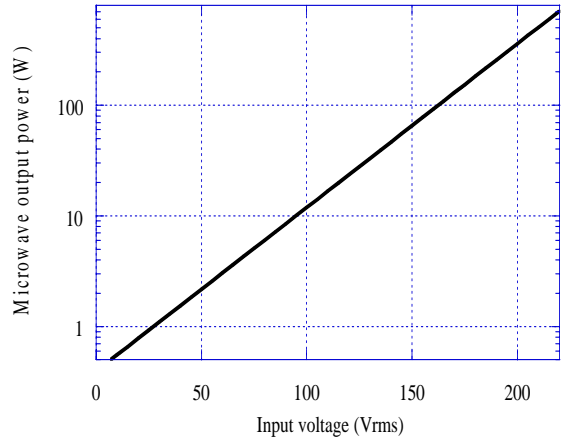
โดยที่สามารถคำนวณกำลังของไมโครเวฟได้จากความสัมพันธ์

$$P(\text{watt}) = \frac{4.19V\Delta T}{t} \quad (12)$$

โดยที่ P คือกำลังของคลื่นไมโครเวฟ V คือปริมาตรของน้ำ ΔT คือ อุณหภูมิของน้ำที่เปลี่ยนไป และ t คือเวลาที่คลื่นไมโครเวฟถูกส่งออกมา ซึ่งในการทดลองจะใช้น้ำจำนวน 250 ccบรรจุในภาชนะแก้วใส

Pyrex และใช้เวลา 60 วินาที จากการทดลองวัดกำลังของไมโครเวฟ เมื่อเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าต้านปฐมภูมิที่จ่ายให้กับหม้อแปลงพวามี ลักษณะดังกราฟในรูปที่ 17.

Microwave out put power from magnetron



รูปที่ 17 กราฟแสดงการเปลี่ยนค่ากำลังของคลื่นไมโครเวฟเมื่อเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้าต้านปฐมภูมิที่จ่ายให้กับหม้อแปลง

5. สรุปผลและข้อเสนอนแนะ

ในบทความฉบับนี้ได้ประสบความสำเร็จในการควบคุมการจ่ายกำลังของแมกนีตรอนให้สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง และเป็นไปตามที่ต้องการ รวมถึงการออกแบบสร้างระบบท่อนำคลื่น, ระบบแมชซิ่ง และเตาอบ โดยใช้คอมพิวเตอร์จำลอง (Computer modeling) สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในท่อนำคลื่น ซึ่งโหมดที่เกิดขึ้นคือ โหมด TE_{10} และเตาอบ เป็นหลายโหมด (multi mode) ที่เกิดขึ้นภายในเตาอบ ในส่วนสุดท้ายเป็นการวัดกำลังของคลื่นไมโครเวฟ พบว่าเมื่อเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้าต้านปฐมภูมิที่จ่ายให้กับหม้อแปลง จะส่งผลให้กำลังของคลื่นไมโครเวฟเปลี่ยนไปในลักษณะความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น

ดังผลการทดลองที่กล่าวมาข้างต้นทำให้ได้มาซึ่งเตาอบต้นแบบเพื่อที่จะนำไปใช้ในการอบปลาแห้ง เพื่อใช้หาค่าตัวแปรที่เหมาะสมในการอบที่มีประสิทธิภาพสูงสุด เพื่อพัฒนาสู่ระบบที่มีขนาดใหญ่ขึ้น มีกำลังการผลิตมากขึ้น มีการใช้งานอย่างต่อเนื่องยกระดับกระบวนการการอบวัสดุการเกษตรของประเทศให้มีคุณภาพสูงขึ้น พร้อมกับพัฒนาเทคโนโลยี dielectric heating ให้มีราคาที่เหมาะสม สามารถใช้งานได้จริง

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานโครงการวิจัยถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่ชุมชน
เครือข่ายภาคใต้ตอนบน คณะกรรมการการอุดมศึกษาแห่งชาติ(สกอ.)
ที่สนับสนุนทุนวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

1. L. Reynolds."The history of the microwave oven", Microwave World, Vol. 10, 1989
2. C. Gabriel and et.al. "Dielectric parameters relevant to microwave dielectric heating", Chemical society reviews, Vol.27, 213, 1988
3. R.V. Decareau. "Microwave in the food processing industry," Academic Press Inc. 1985
4. L. Harlfinger. "Microwave sterilization," Food Technology, December 1992, p. 57
5. M. Moisan and J. Pelletier. "Microwave Excited Plasmas," Elsevier(1992)
6. G. Roussy and J.A. Pearce, "Foundations and Industrial Applications of Microwaves and Radio Frequency Fields," John Wiley & Sons, 1995
7. W. L. Harrison, "Electric power for industrial processes using dielectric heating," Power engineering journal, p.105, 1988
8. John M,Osepchuk. "A History of Microwave Heating Application," IEEE transactions on microwave theory and technique,vol MTT-32,No.9,September 1984.
9. Kenneth R, Demarest, "Engineering Electromagnetics," Prentice Hall,Inc.
10. Roger Meredith, "Engineers'Handbook of Industrial Microwave Heating," IEE Power Series25 p113-115.
11. Chan,Tse V. Chow Ting. "Understanding Microwave heating cavities," Arch tech,Inc.