



# การจำลองเพื่อออกแบบและสร้างตู้ไมโครเวฟสำหรับศึกษาอันตรกิริยา ระหว่างผลปาล์มน้ำมันกับคลื่นไมโครเวฟ

## Simulation and Design of Microwave Heating Oven for Interaction Study of Microwave and Oil Palm Fruits

หมุดตอเล็บ นนีสอ<sup>1,2,\*</sup>, อภัสรา ราชพิบูลย์<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านพลาสมาและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ นครศรีธรรมราช 80161

<sup>2</sup>สาขาฟิสิกส์ สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ นครศรีธรรมราช 80161

Mudtorlep Nisoa<sup>1,2,\*</sup>, Apassara Rachpibul<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Center of Excellence of Plasma Science and Electromagnetic Wave, Walailak University,  
Nakhonsrithammarat 80161

<sup>2</sup>Division of Physics, School of Science, Walailak University, Nakhonsrithammarat 80161

Received 2 October 2019; Received in revised 4 August 2020; Accepted 26 May 2022

### บทคัดย่อ

ในอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันของโรงบีบปาล์มน้ำมันขนาดเล็ก จะได้น้ำมันปาล์มดิบ (CPO) ที่มีคุณภาพต่ำ ซึ่งมีปริมาณกรดไขมันอิสระ (FFA) สูง และค่า โดบี (DOBI) ต่ำ เนื่องจากได้รับความร้อนเป็นเวลานาน ในทางตรงข้ามกัน การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟจะทำให้เกิดความร้อนกับผลปาล์มอย่างรวดเร็ว ทำให้สามารถยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ไลเปสทำให้มีปริมาณกรดไขมันอิสระลดลง และทำให้ค่าโดบีสูงขึ้นด้วย งานวิจัยนี้ทำการจำลองการส่งคลื่นและการเคลื่อนที่ของคลื่นไมโครเวฟในท่อนำคลื่นและห้องคลื่นด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics เพื่อออกแบบตู้ไมโครเวฟสำหรับการศึกษาอันตรกิริยาระหว่างคลื่นไมโครเวฟและผลปาล์มน้ำมัน โดยขนาดของตู้จะต้องทำให้สนามไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟความถี่ 2.45 GHz ซึ่งถูกส่งจากแมกนีตรอนผ่านท่อนำคลื่นมีความเข้มข้นในตัวตู้สูงสุด และมีความสม่ำเสมอในบริเวณที่วางผลปาล์ม ผลการวิจัยพบว่าตู้ที่มีรูปร่างเป็นลูกบาศก์ขนาด  $33 \times 33 \times 33$  cm<sup>3</sup> และตำแหน่งดังกล่าว จะเกิดการรวมกันของคลื่นเป็นตำแหน่งปฏิบัพบริเวณแนวตรงกลางของระนาบที่มีขนาดใหญ่ที่สุด ส่งผลให้มีขนาดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ และการทดลองวัดอุณหภูมิของไหลตน้ำที่ตำแหน่งต่างๆ เมื่อดูดคลื่นคลื่นไมโครเวฟพบว่า การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิสอดคล้องกับการกระจายตัวของขนาดสนามไฟฟ้าจากการจำลอง โดยคุณภาพของน้ำมันปาล์มดิบที่ผ่านการให้ความร้อน พบว่า มีปริมาณกรดไขมันอิสระ  $1.5 \pm 0.3$  เปอร์เซ็นต์ และค่าโดบี เพิ่มขึ้น แต่ที่กำลังไมโครเวฟสูงขึ้นค่าโดบีลดลง

คำสำคัญ: ไมโครเวฟ; กรดไขมันอิสระ; โดบี; COMSOL Multiphysics; น้ำมันปาล์มดิบ

## Abstract

In the small-scale palm mill industries, the processes have produced low-quality crude palm oil. The oils have high free fatty acid content (FFA) and low deterioration of bleachability index (DOBI), classified as grade B oils. Since, the palm fruits are being treated with hot air for too long time for pretreatment, drying and pressing. In this research, a microwave will be used as a heating source for pretreatment to shock the fresh palm fruits by rapidly increasing the temperature. Microwave heating can inhibit the action of lipase in the reaction hydrolysis to decrease FFA content. At the same time, microwave heating will melt crude palm oil in mesocarp, increasing DOBI. To develop microwave heating system, microwave propagation in the waveguide and cavity are modeled and simulated, therefore optimum dimensions of cavity and positions of waveguide installation were obtained. At the optimum conditions, the electric intensities of 2.45 GHz microwaves are strongest at the position of palm fruit placement. The optimum dimension of the cavity is 33 cm x 33 cm x 33 cm. Verification of the microwave field distributions in the cavity was consistent with the experimentally heating profile of the water load. And analysis of CPO from oil palm fruit heated by microwave, FFA decreased to  $1.5 \pm 0.3$  percent. DOBI increased in lower power microwaves and fell in higher power microwaves.

**Keyword:** Microwave; Free fatty acid; DOBI; COMSOL Multiphysics; Crude palm oil (CPO)

## 1. บทนำ

ปาล์มน้ำมันมีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Elaeis guineensis* เป็นพืชที่ให้น้ำมันต่อหน่วยพื้นที่การปลูกมากที่สุด ในบรรดาพืชน้ำมันทั้งหมด มีถิ่นกำเนิดอยู่ในทวีปแอฟริกา และได้มีการนำมาปลูกในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ และบางส่วนของประเทศบราซิล[1] ปาล์มน้ำมันเมื่อผ่านกระบวนการสกัดออกมาแล้วจะได้น้ำมันซึ่งเรียกว่า “น้ำมันปาล์ม” ชนิดของน้ำมันปาล์มที่สกัดได้จากผลปาล์มน้ำมันมี 2 ชนิด ได้แก่ น้ำมันเมล็ดใน (Palm Kernel Oil) สกัดได้จากเมล็ดในของผลปาล์ม น้ำมัน และน้ำมันปาล์มดิบ (Crude Palm Oil) ที่สกัดจากเปลือกนอกของผลปาล์มน้ำมันที่เรียกว่า “Mesocarp” น้ำมันปาล์มที่ได้จากกระบวนการสกัดจะถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร พลังงานทดแทน นำไปแปรรูปเป็นสินค้าอุปโภคบริโภค และอาหารสัตว์ [2] เป็นต้น

อุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มมีกระบวนการสกัดอยู่ 2 วิธี คือ ใช้ไอน้ำ และ ใช้ลมร้อน โรงงานทั้ง 2 แบบนี้มีขั้นตอนที่แตกต่างกันในกระบวนการ Pre-treatment หรือ sterilization เพื่อยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ไลเปส ไม่ทำให้กรดไขมันอิสระเพิ่มขึ้น โรงงานขนาดใหญ่ที่มีการลงทุนสูงจะใช้ไอน้ำในกระบวนการ Sterilization ซึ่งจะใช้อิน้ำที่ความดัน 40 psi อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส อบรมผลปาล์มเป็นเวลา 75-90 นาที [1], [3] โดยวิธีการนี้จะได้น้ำมันปาล์มดิบคุณภาพดีเกรดเอ ในขณะที่โรงงานขนาดเล็กใช้ลมร้อนในการ Sterilization โดยใช้ลมร้อนอุณหภูมิ 90 – 110 องศาเซลเซียส อบรมผลปาล์มเป็นเวลา 16-20 ชั่วโมง และผลิตได้น้ำมันปาล์มดิบคุณภาพต่ำเกรดบี ซึ่งไม่ผ่านมาตรฐานน้ำมันปาล์มดิบที่ถูกกำหนดโดย Malaysian Palm Oil Association (MPOA) ซึ่งจะต้องมีปริมาณ Free Fatty Acid (FFA) ไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ และมีค่า Deterioration

of Bleachability Index (DOBI) มากกว่า 2.3 [4] โดยสาเหตุที่คุณภาพน้ำมันปาล์มดิบจากโรงงานที่ใช้ลมร้อนมีคุณภาพต่ำ เนื่องมาจากการใช้เวลาในการให้ลมร้อนในกระบวนการ Sterilization เป็นเวลานานเกินไป

จากงานวิจัยพบว่า การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟในช่วงเวลาสั้นๆ ในกระบวนการ Sterilization สามารถลดปริมาณกรดไขมันอิสระ และ เพิ่มค่าโดบีได้ [1], [5]–[8] เนื่องจากไมโครเวฟมีกระบวนการเกิดความร้อนที่เรียกว่า Dielectric heating เมื่อโมเลกุลที่มีขั้วถูกกระทำโดยสนามไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟที่มีความถี่ 2.45 GHz แล้วทำให้เกิดการหมุนอย่างสุ่มและชนกระแทกกันระหว่างโมเลกุล ซึ่งจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นอย่างรวดเร็วภายในผลปาล์ม ความร้อนที่เกิดขึ้นจะยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ไลเปสที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา Hydrolysis ซึ่งทำให้กรดไขมันอิสระลดลง และละลายแคโรทีนจากใยปาล์มส่งผลให้ค่าโดบีของน้ำมันปาล์มดิบสูงขึ้น โดยความร้อนที่เกิดขึ้นจะต้องไม่สูงเกินไปที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันครั้งที่สอง (secondary oxidation) และทำลายแคโรทีน โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมในการ sterilization ด้วยคลื่นไมโครเวฟประมาณ 60-115 องศาเซลเซียส [6]

คลื่นไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าประกอบด้วยสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก เคลื่อนที่ในสุญญากาศด้วยความเร็วแสง เมื่อเคลื่อนที่ในตัวกลางที่ไร้ขอบเขตจะมีพฤติกรรมเป็นคลื่นระนาบ (Plane wave) แต่เมื่อเคลื่อนที่ในตัวกลางที่มีขอบเขตจะเป็นคลื่นนิ่ง (Standing wave) [9], [10] ในการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟจะต้องใช้ตู้อบ (Oven) และมีคลื่นร่วออกมาต่ำกว่ามาตรฐานความปลอดภัย [9] เนื่องจากการรับคลื่นไมโครเวฟจะทำให้เกิดอันตรายรุนแรงได้ ตู้ไมโครเวฟจะต้องถูกออกแบบอย่างเหมาะสมเพื่อให้สามารถส่งคลื่นจากแมกนีตรอนโดยใช้ท่อนำขนาดมาตรฐานสำหรับการส่งคลื่นไมโครเวฟโหมด  $TE_{10}$  เข้าไปยังห้องคลื่นอย่างมีประสิทธิภาพลักษณะคลื่นนิ่งของสนามไฟฟ้าใน

ห้องคลื่นจะขึ้นอยู่กับรูปร่างและขนาดของห้องคลื่น ซึ่งจะส่งผลต่อรูปแบบการเกิดความร้อนกับวัสดุที่ใส่เข้าไป การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าภายในตู้ที่ไม่สมมาตร และการเกิดความร้อนภายในวัสดุเป็นปัญหาที่อธิบายโดยสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยไม่เชิงเส้น ไม่สามารถหาคำตอบโดยคณิตศาสตร์วิเคราะห์ได้ จะต้องใช้วิธีแก้ปัญหาเชิงตัวเลขเพื่อหาค่าของสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในห้องคลื่น เช่น การใช้โปรแกรม C++ ในการคำนวณสนามไฟฟ้าในห้องคลื่นที่มีโหลดอยู่ภายในห้องคลื่น [11] การศึกษาการเกิดความร้อนในอาหารด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วย TMODEPEP [12] การจำลองห้องคลื่นขนาดใหญ่สำหรับอุตสาหกรรมและการให้ความร้อนกับโหลดด้วยโปรแกรม CST STUDIO SUITE [13] การจำลองการกระจายตัวในสามมิติของสนามไฟฟ้าภายในห้องคลื่นที่มีโหลดด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics [14], [15] และการจำลองไดอิเล็กตริกหลายชั้นของผลปาล์มเพื่อทำนายอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในการอบผลปาล์มน้ำมันด้วยเทคนิคไมโครเวฟ โดยใช้โปรแกรม COMSOL Multiphysics [16] COMSOL Multiphysics เป็นซอฟต์แวร์สำเร็จรูปที่ใช้สำหรับจำลองเพื่อออกแบบงานทางด้านวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมที่ซับซ้อน ซึ่งจะหาคำตอบของสมการเชิงอนุพันธ์โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และแสดงผลในลักษณะ หนึ่ง สอง หรือสามมิติ

ในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาตู้ไมโครเวฟสำหรับศึกษาอันตรกิริยาระหว่างคลื่นไมโครเวฟกับผลปาล์มซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพน้ำมันปาล์มดิบ โดยการจำลองการเคลื่อนที่ของคลื่นไมโครเวฟความถี่ 2.45 GHz ภายในท่อนำคลื่นและห้องคลื่นสี่เหลี่ยมจัตุรัส เพื่อหาขนาดของคลื่นและตำแหน่งการวางผลปาล์ม เมื่อสร้างตู้ขึ้นจากผลการจำลอง ได้ทำการวัดการกระจายตัวของความร้อนเพื่อเปรียบเทียบผลกับการจำลองการกระจายของสนามไฟฟ้า ซึ่งจะเป็นการยืนยันความถูกต้องของการจำลอง

## 2. อุปกรณ์และวิธีการ

### 2.1 สมการแมกซ์เวลล์ สมการคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และเงื่อนไขขอบเขต

การจำลองการเคลื่อนที่ของคลื่นไมโครเวฟภายในท่อนำคลื่นและภายในห้องคลื่นจะใช้สมการของแมกซ์เวลล์ ซึ่งเป็นสมการพื้นฐานของสมการคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสมบัติของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

ที่บริเวณผนังของท่อนำคลื่นและของห้องคลื่น หรือเงื่อนไขขอบเขต โดยสมการของแมกซ์เวลล์ 4 สมการจะอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้า สนามแม่เหล็ก ประจุไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า โดยสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเป็นปริมาณเวกเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงตามตำแหน่งและเวลา สมการของแมกซ์เวลล์ประกอบด้วย

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \tag{1}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \tag{2}$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \tag{3}$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \tag{4}$$

เมื่อ  $\vec{E}$  คือความเข้มของสนามไฟฟ้า (Electric field intensity, V/m),  $\rho$  คือ ความหนาแน่นประจุไฟฟ้า (Electric charge density, C/m<sup>3</sup>),  $\epsilon_0$  คือ ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าในสุญญากาศ (Permittivity of vacuum, F/m),  $\vec{B}$  คือ ความหนาแน่นของฟลักซ์สนามแม่เหล็ก (Magnetic flux density, Wb/m<sup>2</sup>),  $\mu_0$  คือ ค่าสภาพให้ซึมได้ทางแม่เหล็กในสุญญากาศ (Permea-

bility of vacuum, H/m),  $\vec{J}$  คือ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (Electric current density, A/m<sup>2</sup>) และ  $t$  คือ เวลา (s)[17] เนื่องจากภายในห้องคลื่นมีอากาศเป็นตัวกลาง ซึ่งไม่ตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ไม่มีประจุไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า หรือ  $\rho = 0$  และ  $\vec{J} = 0$  ดังนั้น

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0 \tag{5}$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \tag{6}$$

จากสมการที่ 3 และสมการที่ 6 สามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ของคลื่นไมโครเวฟที่มีอากาศเป็นตัวกลางได้ดังสมการที่ 7

$$\nabla \times \mu_r^{-1}(\nabla \times \vec{E}) - k_0^2 \left( \epsilon_r - j \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0} \right) \vec{E} = 0 \tag{7}$$

เมื่อ  $\mu_r$  คือ ค่าสัมพัทธ์ของค่าสภาพให้ซึมได้ทางแม่เหล็ก (Relative permeability),  $k_0$  คือ Wave number of free space (rad/m),  $\epsilon_r$  คือ ค่าสัมพัทธ์ของค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า (Relative permittivity),  $\sigma$  คือค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity, S/m) ในกรณีที่ผนังมีคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้าได้ดี (Perfect electric

conductor) จากสมการที่ 1 จะได้ว่าสนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉากกับผนัง  $E_{\perp} = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$  และจากสมการที่ 3 จะได้ว่าสนามไฟฟ้าในแนวขนานกับผนังจะเท่ากับ 0 ดังนั้นเงื่อนไขขอบ สำหรับการจำลองการเคลื่อนที่ของคลื่นไมโครเวฟภายในท่อนำคลื่นและภายในห้องคลื่น แสดงดังสมการที่ 8

$$\hat{n} \times \vec{E} = 0 \quad (8)$$

เมื่อ  $\hat{n}$  คือ Normal vector เมื่อวัสดุได้รับคลื่นไมโครเวฟความถี่ (f) อัตราการดูดกลืนพลังงานของสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดเป็นความร้อนขึ้นภายในวัสดุ จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเชิงไดอิเล็กตริกของมัน โดยค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนของวัสดุ  $\frac{\epsilon^*}{\epsilon_0} = \epsilon' + j\epsilon''$  เมื่อ  $\epsilon'$  เมื่อ คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของวัสดุ  $\epsilon''$  คือค่าการสูญเสียเชิงไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (Dielectric loss factor) ค่า  $\epsilon'$  เป็นค่าที่แสดงความสามารถในการสร้างหรือเก็บสนามไฟฟ้า

ภายในวัสดุ ส่วนค่า  $\epsilon''$  เป็นค่าที่แสดงการเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนภายในวัสดุ และสำหรับวัสดุชีวภาพจะไม่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก ดังนั้นความร้อนที่เกิดขึ้นในวัสดุชีวภาพจะตอบสนองเฉพาะสนามไฟฟ้าเท่านั้น[18] โดยอัตราการดูดกลืน(หรือกำลัง) ในการเกิดความร้อนในวัสดุ  $P$  จะอธิบายได้ด้วยสมการที่ 9[19]

$$P = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon'' E^2 \quad (9)$$

เมื่อ  $E$  คือ ความเข้มของสนามไฟฟ้าภายในวัสดุ โดยความร้อนดังกล่าวจะทำให้วัสดุมีอุณหภูมิสูงขึ้น หรือ  $P \propto T$  โดย  $T$  คืออุณหภูมิของวัสดุหลังจากดูดกลืนสนามไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟ

## 2.2 การจำลองการเคลื่อนที่ของคลื่นไมโครเวฟด้วย COMSOL Multiphysics

ในการจำลองการเคลื่อนที่ของคลื่นไมโครเวฟภายในท่อนำคลื่นและภายในห้องคลื่น จะใช้ซอฟต์แวร์ COMSOL Multiphysics ซึ่งมีขั้นตอนการจำลอง (Figure 1) [10] ซึ่งประกอบด้วย

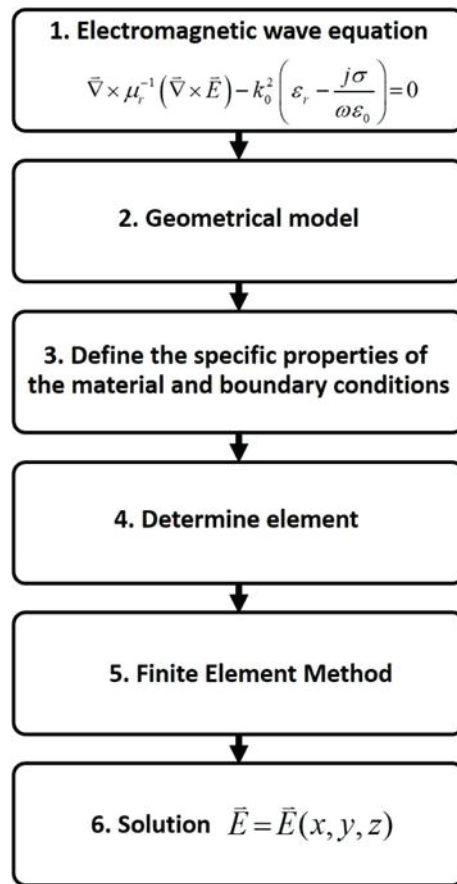


Figure 1 Flowchart for the modeling of the cavity by COMSOL Multiphysics.

ขั้นตอนที่ 1 เลือกสมการคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังสมการที่ 7 และเลือกวิธีการศึกษาให้โปรแกรมคำนวณหาคำตอบของสมการเชิงอนุพันธ์โดยขึ้นกับความถี่ (Frequency Domain)

ขั้นตอนที่ 2 สร้างรูปร่างแบบจำลองที่ต้องการศึกษาซึ่งประกอบด้วยท่อนำคลื่น ตัวกระตุ้นคลื่นไมโครเวฟ และห้องคลื่น โดยให้ใกล้เคียงกับปัญหาจริงเพื่อให้ผลการจำลองมีความถูกต้องมากที่สุด

ขั้นตอนที่ 3 เลือกชนิดของวัสดุของท่อนำคลื่น และห้องคลื่น โดยกำหนดให้เป็นตัวนำที่ไร้ความต้านทาน (Perfect conductor) แล้วใช้เงื่อนไขขอบเขตดังสมการที่ 8

ขั้นตอนที่ 4 กำหนดขนาดของอิลิเมนต์ (Element) ภายในท่อนำคลื่นและภายในห้องคลื่น โดยอิลิเมนต์จะเชื่อมต่อกันเป็นโครงตาข่าย (Mesh) ยิ่งอิลิเมนต์มีขนาดเล็กจะทำให้สามารถคำนวณหาสนามไฟฟ้าได้ละเอียดขึ้น และถูกต้องมากขึ้น

ขั้นตอนที่ 5 แก้มสมการคลื่นที่เลือกในขั้นตอนที่ 1 และใช้เงื่อนไขขอบเขตเพื่อหาค่าของสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆภายในท่อนำคลื่นและภายในห้องคลื่นด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์

ขั้นตอนที่ 6 แสดงค่าของสนามไฟฟ้า (E) ที่ตำแหน่งต่างๆ ใน 1 มิติ 2 มิติ หรือ 3 มิติ

## 2.3 แบบจำลองรูปร่าง (Geometric model) และการจำลอง

แบบจำลองรูปร่างของตู้ไมโครเวฟที่ใช้ในการศึกษาการเคลื่อนที่ของคลื่นไมโครเวฟในท่อนำคลื่นและในห้องคลื่นมีลักษณะ (Figure 2) โดยกำหนดให้ห้องคลื่นเป็นลูกบาศก์ขนาด  $L \times L \times L \text{ cm}^3$  และมีท่อนำคลื่นขนาด  $5.5 \times 9.6 \times 10 \text{ cm}^3$  จำนวน 1 ท่อติดที่ตำแหน่งกึ่งกลางของผนังห้องคลื่น โดยห้องคลื่นและท่อนำคลื่นทำจากแผ่นซีทตัวนำที่ไม่มีมีความหนาและไร้ความต้านทาน คลื่นไมโครเวฟโหมด  $TE_{10}$  ความถี่ 2.45 GHz กำลัง 800 วัตต์จะถูกกระตุ้นที่จุดกึ่งกลางผนังด้านนอกของท่อนำคลื่นให้เคลื่อนผ่านท่อนำคลื่นเข้าไปในห้องคลื่น โดยใช้แบบจำลองรูปร่างและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของคลื่นไมโครเวฟ ซอฟต์แวร์ COMSOL Multiphysics จะสามารถวิเคราะห์หาค่าของสนามไฟฟ้าที่ไม่ขึ้นกับเวลาที่ตำแหน่งต่างๆภายในท่อนำคลื่นและภายในห้องคลื่นเพื่อหาค่า  $L$  ที่เหมาะสมและหาบริเวณที่มีขนาดของสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

### 2.3.1 การจำลองเพื่อหาขนาดของห้องคลื่น

การส่งคลื่นไมโครเวฟความถี่ 2.45 GHz จากแหล่งกำเนิดคลื่น (แมกนีตรอน) ผ่านท่อนำคลื่นขนาดมาตรฐานสำหรับโหมด  $TE_{10}$  เข้าไปยังห้องคลื่นแบบมัลติโหมด (Multi-mode cavity) ประสิทธิภาพในการส่งพลังงานคลื่นไมโครเวฟจะขึ้นอยู่กับขนาดของห้องคลื่นและไดอิเล็กทริกโหลด (Dielectric load) ภายในห้องคลื่น เนื่องจากพลังงานของคลื่นไมโครเวฟแปรผันตรงกับสนามไฟฟ้ายกกำลังสอง  $E^2$  ในขณะที่ขนาดของห้องคลื่น ( $L$ ) และโหลดมีผลต่อโหมดการเกิดเรโซแนนซ์ (Resonance modes) ของคลื่นนิ่งภายในห้องคลื่น ซึ่งทำให้มีความเข้มของสนามไฟฟ้าของแต่ละโหมดไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงทำการจำลองเพื่อหาขนาดของห้องคลื่นที่ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าที่มีความเข้มสูงสุด โดยการเปลี่ยนขนาดของห้องคลื่นในช่วง 32 – 34 ซม มีความละเอียด (Resolution) 0.1 ซม และจะทำการจำลอง 2 กรณีคือเมื่อเป็นห้องคลื่นว่างเปล่า (Empty cavity) และเป็นห้องคลื่นที่มีไดอิเล็กทริกโหลด โหลดจะเป็นวัสดุไดอิเล็กทริกรูปร่างทรงกระบอก วางอยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของ

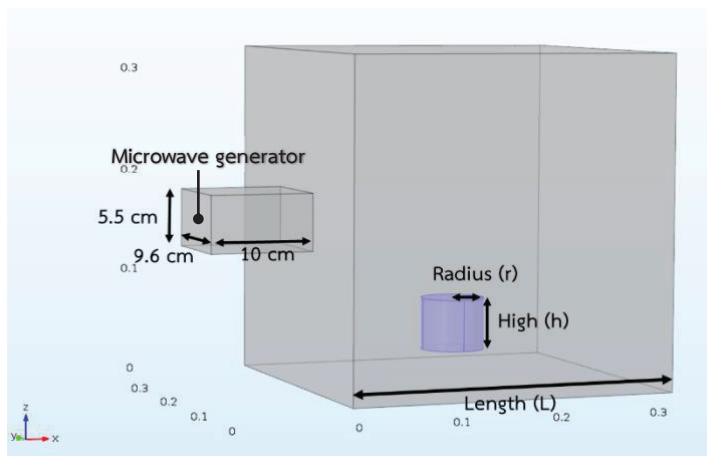


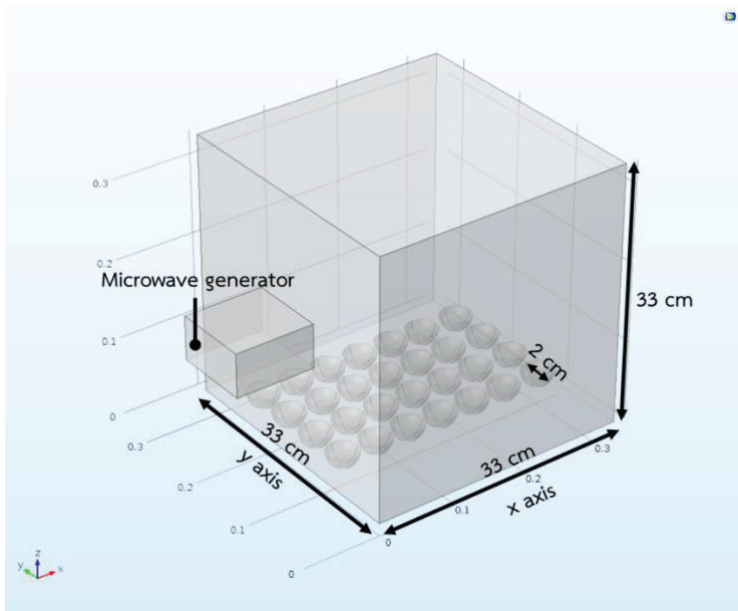
Figure 2 The 3D figure which including a cubic cavity of  $L \times L \times L \text{ cm}^3$ , load, waveguide, and microwave generator.

ห้องคลื่นเหนือจากผนังด้านล่าง 3 ซม ค่าไดอิเล็กตริกของโพลด์จะใช้ค่าของผลปาล์มเปลือกนอก (Mesocarp) ( $\epsilon$ ) ซึ่ง  $\epsilon = \epsilon' + \epsilon'' = 1.5 + 4.2j$  [8] ในการศึกษาผลของปริมาตรโพลด์ซึ่งทำให้มีการเปลี่ยนเรโซแนนซ์โพลด์ภายในห้องคลื่น จะจำลองเมื่อเปลี่ยนปริมาตรของโพลด์โดยที่โพลด์มีรัศมี (r) คงที่ หรือมีความสูง (h) คงที่ (Figure 2)

**2.3.2 การจำลองเพื่อศึกษาการกระจายตัวของคลื่น**

การกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟภายในห้องคลื่นซึ่งส่งผลให้ความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆไม่เท่ากัน และทำให้การเกิดความร้อนของวัสดุเนื่องจากดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟแตกต่างกัน เมื่อวัสดุมีขนาดหรือวางที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในห้องคลื่น เนื่องจาก

การกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟขึ้นอยู่กับเกิดการเรโซแนนซ์โพลด์ภายในห้องคลื่น ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าไดอิเล็กตริกของโพลด์ภายในห้องคลื่น [20] โดยค่าไดอิเล็กตริก รูปร่าง และขนาดของโพลด์มีผลต่อการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าภายในห้องคลื่น เพื่อศึกษาการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าภายในห้องคลื่นจึงได้ทำการจำลองและการทดลอง โดยในการจำลองจะใช้น้ำซึ่งมีค่าไดอิเล็กตริก  $78 + 12.5j$  [21] มีรูปร่างครึ่งทรงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 ซม วาง 7 แถว โดยแถวที่ 1 อยู่ที่ตำแหน่ง (2.5, 10), (2.5, 15), (2.5, 20), (2.5, 25) แถวที่ 2, 3, 4, 5, 6, 7 มีค่า x เท่ากับ 7, 11.5, 16, 20.5, 25 และ 30 ซม ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3 ผลของการจำลองจะทำให้ทราบค่าของสนามไฟฟ้ากำลังสอง ( $E^2$ ) ที่ตำแหน่งของโพลด์น้ำทั้ง 28 ตำแหน่ง



**Figure 3** The 3D figure which including cubic cavity of 33x33x33 cm<sup>3</sup>, load, waveguide, and microwave generator for study of the wave field distribution.



## 2.4 การวัดอุณหภูมิของน้ำเมื่อตุกคลื่นคลื่นไมโครเวฟ

เนื่องจากยังไม่มีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถวัดสนามไฟฟ้าที่มีความเข้มสูงได้ โดยสนามไฟฟ้าความเข้มสูงจะทำให้อุปกรณ์เสียหายหรือเกิดสัญญาณรบกวนอย่างรุนแรง ดังนั้นในการทดลองเพื่อหาลักษณะการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าภายในห้องคลื่น เพื่อยืนยันผลของการจำลองการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟ  $E(x,y)$  จะทำการวัดอุณหภูมิของน้ำที่ตำแหน่งต่างๆ  $T(x,y)$  เมื่อน้ำตุกคลื่นสนามไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟแล้วเกิดเป็นความร้อนขึ้น โดยที่  $T(x,y) \propto E^2(x,y)$  ตามสมการที่ 9 (Figure 4) แสดงอุปกรณ์ต่างๆ

ในการวัดอุณหภูมิของน้ำที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในห้องคลื่น น้ำจะถูกใส่ในหลุมครึ่งวงกลมของภาชนะสำหรับใส่น้ำ (ถาดซิลิโคน) ซึ่งเป็นฉนวนความร้อนและไม่ตุกคลื่นคลื่นไมโครเวฟ ถาดมีหลุมจำนวน 28 หลุม โดยแต่ละหลุมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 ซม. เมื่อนำถาดไปใส่ในห้องคลื่นของตู้ไมโครเวฟ จะระบุตำแหน่งจุดกึ่งกลางของหลุมด้วยจุด  $(x,y)$  หลังจากนำตุกคลื่นไมโครเวฟกำลัง 800 วัตต์เป็นเวลา 20 วินาที จะวัดอุณหภูมิของน้ำแต่ละหลุมที่ตำแหน่งต่างๆ โดยใช้อินฟราเรดเทอร์โมมิเตอร์ ซึ่งจะได้ข้อมูลการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ  $T(x,y)$  ภายในห้องคลื่น

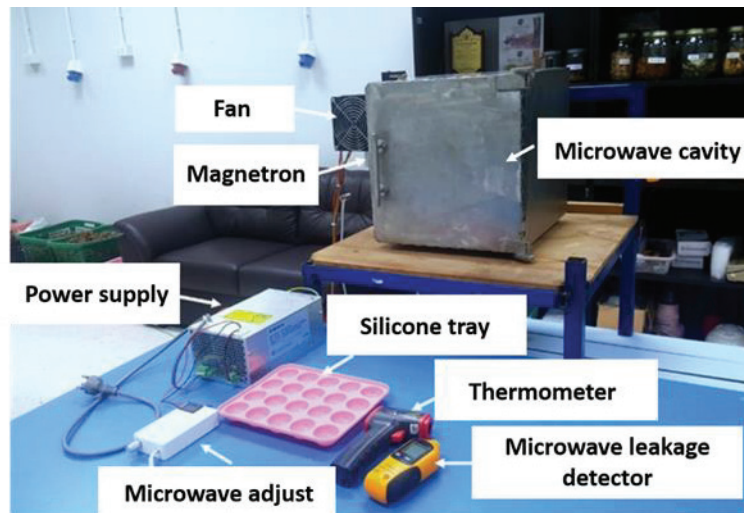


Figure 4 Experimental setup for the study of microwave field distribution.

## 2.5 การวิเคราะห์คุณภาพน้ำมันปาล์มดิบ

ในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำมันปาล์มจะนำผลปาล์มสดน้ำหนัก 100 กรัม วางบนถาดเทฟลอนที่ตำแหน่งกึ่งกลางตู้ไมโครเวฟแล้วให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟโดยใช้กำลังไมโครเวฟที่เหมาะสม จนกระทั่งผลปาล์มมีความชื้นเหลือเพียง 5 เปอร์เซ็นต์ จึงแยก

เปลือกปาล์ม (mesocarp) ไปสกัดน้ำมันปาล์มดิบด้วยเฮกเซน และวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระ ด้วยวิธีการมาตรฐาน AOCS Official Method Ca 5a-40 [13] และวิเคราะห์ค่าไอโอดีด้วยวิธีการที่ถูกพัฒนาโดย Dr. P.A.T. Swobada จากสถาบัน The Palm Oil Research Institute ของประเทศมาเลเซีย [22]

### 3. ผลการวิจัยและวิจารณ์

#### 3.1 การหาขนาดของห้องคลื่น

##### 3.1.1 กรณีไม่มีโหลด

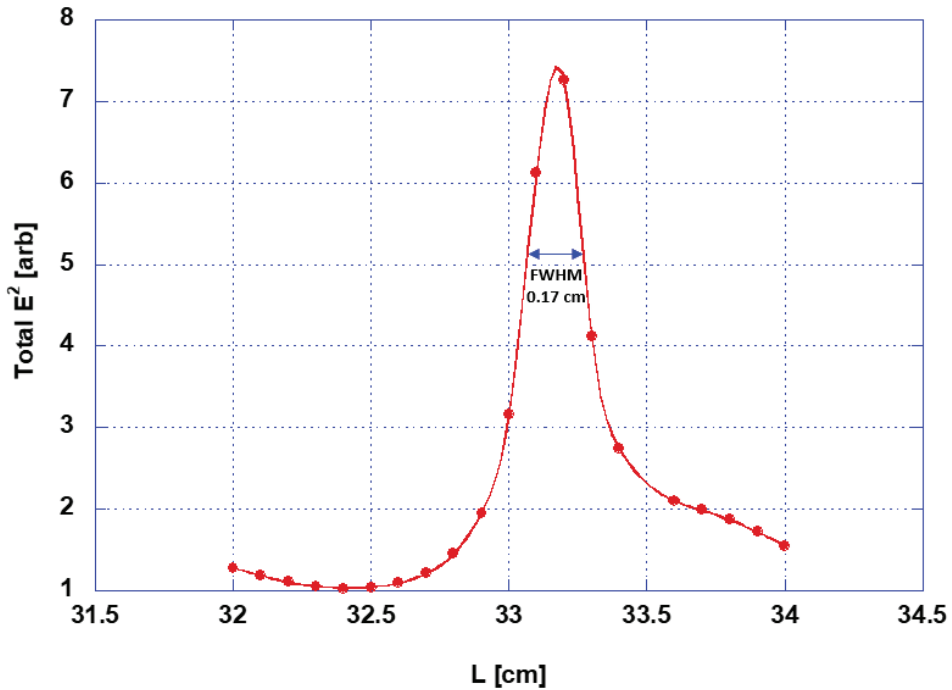


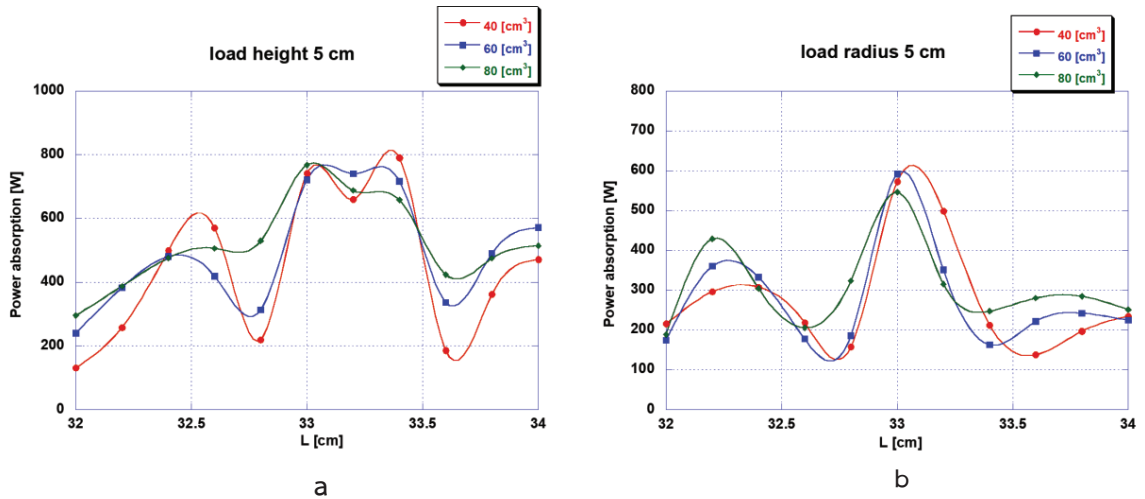
Figure 5 The dependence of total electric field (Total E<sup>2</sup>) on cavity size for no load.

ผลการจำลองเพื่อหาขนาดของห้องคลื่น L ที่ทำให้สามารถส่งพลังงานของคลื่นไมโครเวฟความถี่ 2.45 GHz เข้าไปในห้องคลื่นได้มากที่สุดมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 5 โดยที่พลังงานของคลื่นไมโครเวฟ  $\propto \text{Total } E^2 = \int_V E^2(x, y, z) dV$  เมื่อ  $V$  คือ ปริมาตรของห้องคลื่น ซึ่งพบว่าเมื่อ  $L \approx 33.2$  ซม จะทำให้ Total E<sup>2</sup> มีค่าสูงสุด ซึ่งแสดงว่าเมื่อ L มีค่าประมาณ 33.2 ซม จะทำให้สนามไฟฟ้ารวมของเรโซแนนซ์โหมดมีค่าสูงสุด โดยสนามไฟฟ้ารวมที่ตำแหน่งใดๆ ภายในห้องคลื่นเกิดจากการ Superposition ของเรโซแนนซ์โหมดทุกๆ โหมด ซึ่งขึ้นอยู่กับเฟสและแอมพลิจูด

ของแต่ละโหมด [24] [25] โดยมีค่า FWHM (Full width half maximum) ประมาณ 0.17 ซม

##### 3.1.2 กรณีมีโหลด

เมื่อส่งคลื่นไมโครเวฟเข้าไปในห้องคลื่นซึ่งมีไดอิเล็กทริกโหลดวางอยู่ โหลดจะดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟเนื่องจากกระบวนการ Dielectric heating ดังนั้นในการหาขนาดของห้องคลื่น L ที่จะทำให้มีการดูดกลืนกำลัง (Power absorption) ของคลื่นไมโครเวฟสูงสุด จะจำลองการเคลื่อนที่ของคลื่นไมโครเวฟและ คำนวณหา Power absorption เมื่อใช้โหลดที่มีปริมาตรต่างๆ ซึ่งมีผลการจำลอง (Figure 6a, 6b)



a Load's height is 5 cm b Load's radius 5 cm

Figure 6 Power absorption when the load's volumes are 40, 60, and 80 cm<sup>3</sup> for (a) load's height is 5 cm and (b) load's radius is 5 cm.

เมื่อเพิ่มปริมาตรของโหลดโดยเพิ่มรัศมี โหลด จะมีการดูดกลืนสูงเมื่อ L มีค่าอยู่ในช่วง 32.81 – 33.50 ซม โดยมี peaks ย่อยที่ตำแหน่ง 33.06 และ 33.37 ซม (Figure 6a) ในขณะที่เมื่อเพิ่มปริมาตรโดยเพิ่มความสูง ค่า L ที่ทำให้โหลดมีการดูดกลืนสูงสุดจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาตร โดย L = 33.06, 33.03 และ 33.00 เมื่อปริมาตรมีค่า 40, 60 และ 80 cm<sup>3</sup> ตามลำดับ จากผลการจำลองทั้งสองกรณีพบว่า ไดอิเล็กตริกมีผลต่อการเกิดโหมดเรโซแนนซ์ภายในห้องคลื่น โดยทำให้ 1. มีค่า FWHM สูงขึ้น โดยการเพิ่มปริมาตรเมื่อเพิ่มรัศมีและเพิ่มความสูง ทำให้ FWHM มีค่าเพิ่มเป็น 0.69 และ 0.32 ซม ตามลำดับ และ 2. ค่า L ที่โหลดมีการดูดกลืนสูงสุดมีค่าลดลงประมาณ 0.03-0.40 ซม

การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากไดอิเล็กตริกโหลดทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance) ของห้องคลื่นเปลี่ยนแปลง ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าไดอิเล็กตริกและรูปร่างของโหลด โดยค่าการสูญเสียเชิงไดอิเล็กตริก ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานของคลื่นไมโครเวฟภายในห้องคลื่น และทำให้ FWHM มีค่าสูงขึ้น ในขณะที่ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก และรูปร่างของโหลดทำให้ค่าความถี่เรโซแนนซ์โหมดเปลี่ยนแปลง [23] [26]

### 3.1.3 ความถี่เรโซแนนซ์

ประสิทธิภาพในการส่งกำลังของคลื่นไมโครเวฟจากแมกนีตรอนซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นผ่านท่อนำคลื่นเข้าไปยังห้องคลื่นขึ้นอยู่กับความถี่ของคลื่นไมโครเวฟและขนาดของห้องคลื่น (Figure 7) แสดงค่าของ Total E<sup>2</sup> ในห้องคลื่นที่ไม่มีโหลด เมื่อ L = 33.4 ซม โดยพบว่า Total E<sup>2</sup> เปลี่ยนแปลงเมื่อเปลี่ยนความถี่ และมีค่าสูงสุดที่ความถี่ประมาณ 2.45 GHz ซึ่งเกิดจากการเรโซแนนซ์ของความถี่คลื่นไมโครเวฟซึ่งเป็นความถี่ในการขับ (Driving frequency) และเรโซแนนซ์โหมดของห้องคลื่น [23] [26] จากผลการจำลองในหัวข้อ 3.1.1 และหัวข้อ 3.1.3 พบว่าสามารถออกแบบห้องคลื่นที่สามารถรับกำลังคลื่นไมโครเวฟได้สูงสุดโดยการปรับขนาดของห้องคลื่น (L) เมื่อกำหนดความถี่คงที่ หรือโดยการปรับความถี่เมื่อกำหนดขนาดของห้องคลื่นคงที่ โดยทั่วไปจะใช้วิธีปรับขนาดของห้องคลื่นเนื่องจากแมกนีตรอนที่มีการผลิตในเชิงพาณิชย์มีเพียงสองความถี่คือ 915 MHz และ 2.45 GHz สำหรับงานวิจัยนี้จะเลือกใช้ความถี่ 2.45 GHz ซึ่งมีแมกนีตรอนที่มีกำลังในช่วง 0.8 – 5 kW

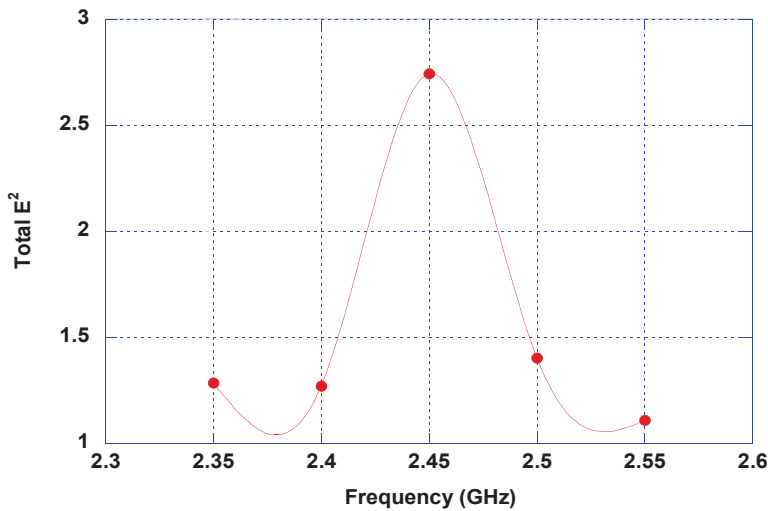


Figure 7 Dependence of electric field intensity on frequency.

3.1.4 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้า

การกระจายตัวของสนามไฟฟ้า E (x,y,z) ภายในห้องคลื่นจะเกิดจากการรวมกัน (Superposition)

ของสนามไฟฟ้าของแต่ละเรโซแนนซ์โหมด สำหรับ TE modes สนามไฟฟ้าของแต่ละเรโซแนนซ์โหมดจะประกอบด้วย E<sub>x</sub>, E<sub>y</sub> และ E<sub>z</sub> โดยที่

$$E_x = E_{x0} \cos\left(\frac{m\pi}{L}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{L}y\right) \sin\left(\frac{p\pi}{L}z\right)$$

$$E_y = E_{y0} \sin\left(\frac{m\pi}{L}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{L}y\right) \sin\left(\frac{p\pi}{L}z\right)$$

$$E_z = 0$$

เมื่อ m, n และ p เป็นจำนวนเต็ม โดยที่ E<sub>x0</sub> และ E<sub>y0</sub> คือแอมพลิจูดของ E<sub>x</sub> และ E<sub>y</sub> ตามลำดับ ของเรโซแนนซ์โหมด (m, n และ p) ใดๆ และจะได้ว่า E<sup>2</sup>(x, y) = (Σ<sub>m,n,p</sub> E<sub>x</sub>)<sup>2</sup> + (Σ<sub>m,n,p</sub> E<sub>y</sub>)<sup>2</sup> [26] (Figure 8) แสดง E<sup>2</sup> บนระนาบ (x, y) เมื่อ z มีค่า 0 - 7 ซม. ซึ่งแสดงลักษณะการเกิดบัพและปฏิบัพของคลื่นนิ่ง โดยความเข้มของปฏิบัพจะขึ้นอยู่กับตำแหน่ง (x, y, z) บนระนาบ z = 0, 1 และ 2 ที่บริเวณกึ่งกลางจะมี 2 ปฏิบัพ

ที่ตำแหน่ง (12, 16.5) และ (21, 16.5) และปฏิบัพทั้งสองจะเชื่อมกันเป็นปฏิบัพที่กว้างขึ้นเมื่อ z = 3, 4 และ 5 ซม. โดยตำแหน่งของปฏิบัพจะอยู่ที่จุดกึ่งกลาง (16.5, 16.5) ขณะที่ z = 4 ซม. ปฏิบัพจะมีพื้นที่มากที่สุดและมีความสม่ำเสมอของสนามไฟฟ้ามากที่สุด การเปลี่ยนแปลงของ E<sup>2</sup> ดังกล่าวเกิดจากแต่ละเรโซแนนซ์โหมดมีแอมพลิจูดไม่เท่ากันโดยโหมดหลัก (Dominant modes) จะมีแอมพลิจูดสูงกว่าโหมดอื่นๆ

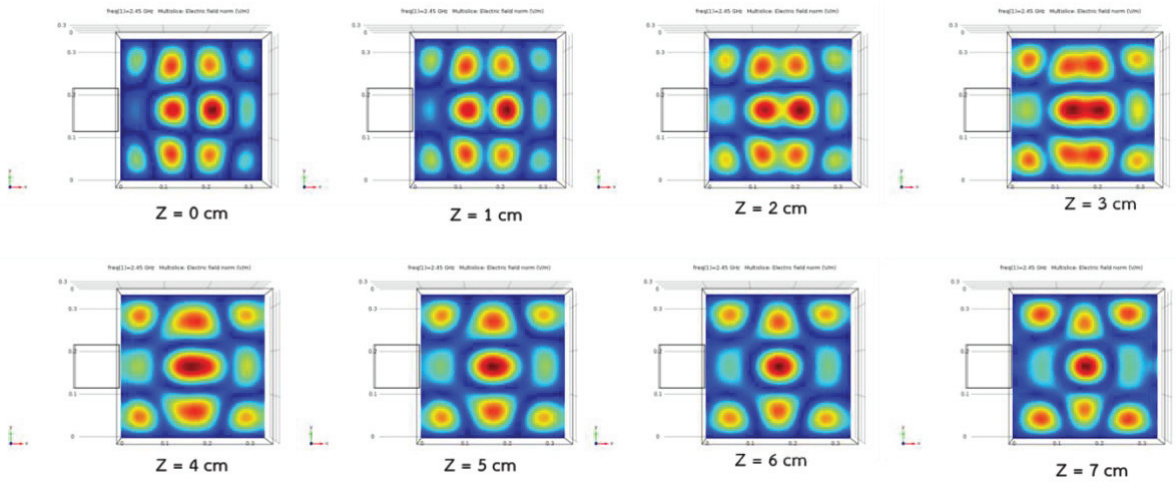


Figure 8 The values of  $E^2$  on  $xy$  plane when  $z = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6$  and  $7$ . The electric field intensities are expressed by color bar, dark blue and dark red have lowest intensity and highest intensity, respectively.

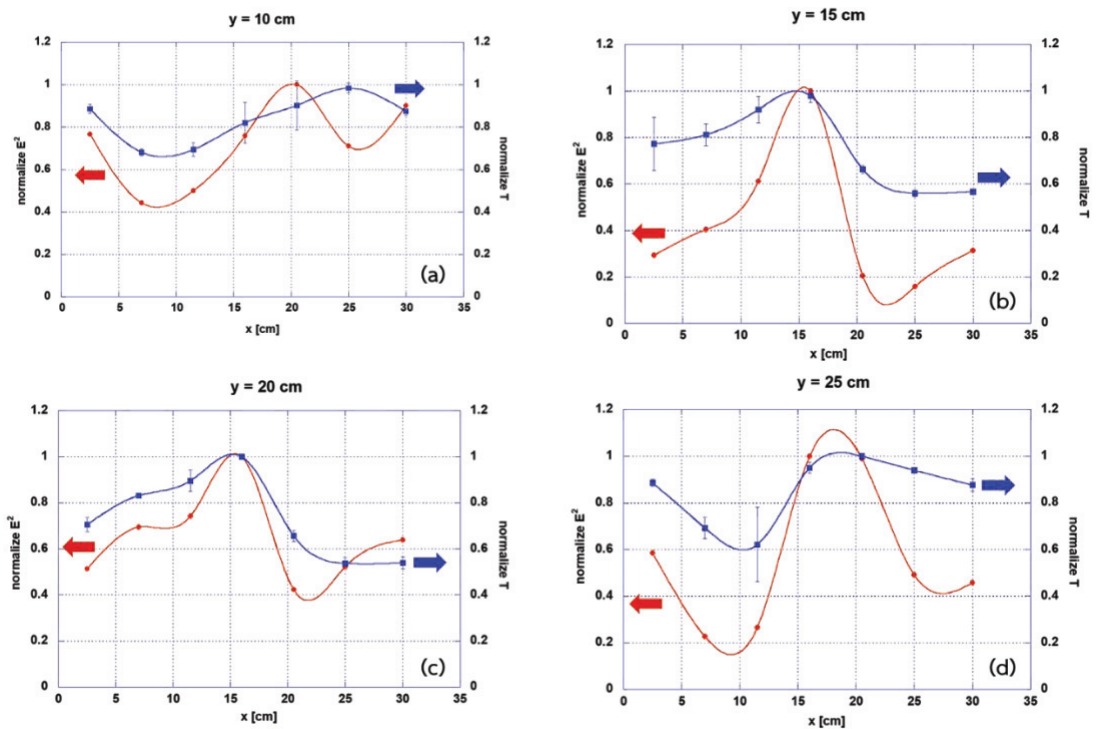


Figure 9 The variations of normalized  $E^2$  and measured temperature on  $x$ -axis when  $y = 10, 15, 20$  and  $25$  cm when  $z = 0$  cm for the water load.

### 3.2 การกระจายตัวของอุณหภูมิ

การศึกษาเปรียบเทียบระหว่างการจำลองการกระจายตัวของสนามไฟฟ้ายกกำลังสอง ( $E^2$ ) และการทดลองการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องคลื่นซึ่งมีรายละเอียดการจำลองการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าและการวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิในหัวข้อ 2.3.2 และ 2.4 ตามลำดับ มีลักษณะ (Figure 9) ซึ่งแสดงค่า normalized  $E^2(x)$  และ normalized  $T(x)$  เมื่อ  $y$  มีค่า 10, 15, 20 และ 25 cm โดยพบว่าค่าทั้งสองมีแนวโน้มสอดคล้องกัน ซึ่งเป็นการยืนยันความถูกต้องของผลการจำลอง (Figure 9) ตำแหน่งปฏิบัพของสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่บริเวณกึ่งกลางของระนาบที่ตำแหน่ง (15,15) โดยที่อุณหภูมิจะมีการกระจายมากกว่า

มีพีค (peak) กว้างกว่า ซึ่งเกิดจากการถ่ายเทความร้อนระหว่างน้ำในหลุมซิลิโคนที่อยู่ติดกัน เนื่องจากซิลิโคนไม่ได้เป็นฉนวนสมบูรณ์ทำให้มีการถ่ายเทความร้อนบางส่วนในรูปอื่นๆ ก็มีลักษณะเช่นเดียวกัน

### 3.3 อิทธิพลคลื่นไมโครเวฟที่มีผลต่อคุณภาพของน้ำมันปาล์มดิบ

เมื่อสกัดน้ำมันปาล์มดิบจากผลปาล์มสดที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ โดยให้ความร้อนจนผลปาล์มสดมีความชื้นสุดท้ายเหลือ 5 เปอร์เซ็นต์ และทำการวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระ พบว่าปริมาณกรดไขมันอิสระมีค่าลดลงเหลือ  $1.5 \pm 0.3$  (Figure 10) ซึ่งมีค่าต่ำกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ ตามที่เกณฑ์มาตรฐานกำหนดไว้

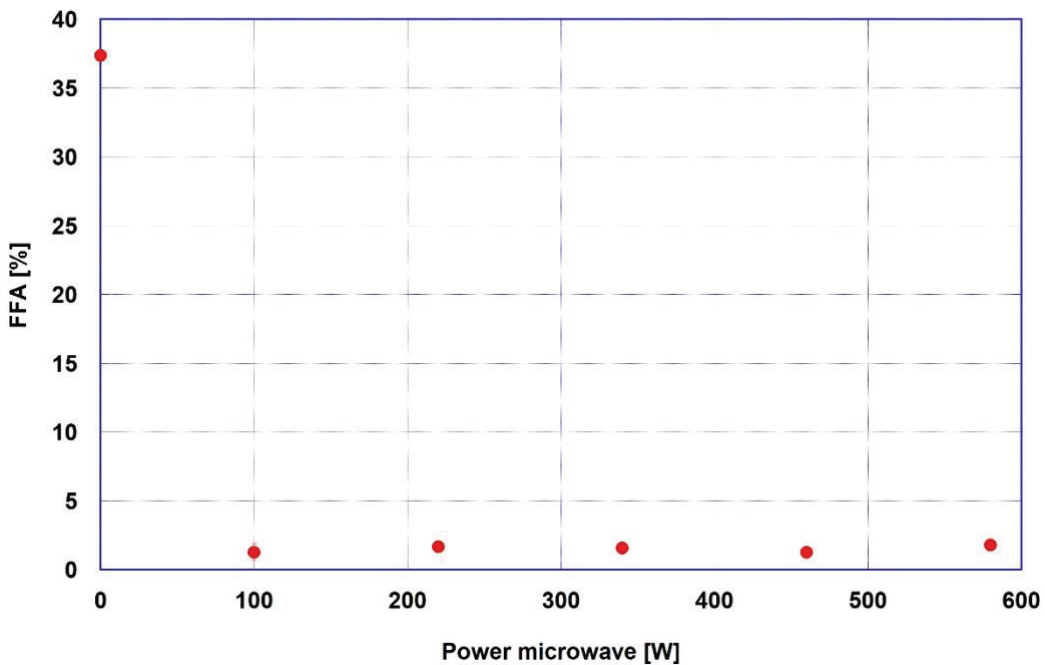


Figure 10 Dependence of FFA on microwave power after heating of fresh palm fruits.

สำหรับกรณีของค่าโด้บี พบว่า เมื่อผลปาล์มสดได้รับคลื่นไมโครเวฟในช่วงแรก ค่าโด้บี เพิ่มขึ้น และที่ไมโครเวฟกำลังสูงขึ้นปริมาณค่าโด้บี ลดลง (Figure 11) เพราะค่าโด้บี คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาณแคโรทีนที่มีในน้ำมันปาล์มดิบต่อปริมาณผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาออกซิเดชันครั้งที่ 2 ในการเพิ่มกำลังไมโครเวฟในช่วงแรกความร้อนที่เกิดขึ้นภายในผลปาล์มไปช่วยละลายแคโรทีนในเส้นใยออกมา ทำให้ค่าโด้บี เพิ่มสูงขึ้น แต่เมื่อเพิ่มกำลังไมโครเวฟให้สูงขึ้นปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นนั้นไปทำลายแคโรทีน ดังนั้น ทำให้ที่กำลังไมโครเวฟสูงๆ ทำให้ค่าโด้บี มีค่าต่ำลงเนื่องจากความร้อนได้ทำลายแคโรทีนในผลปาล์มน้ำมัน

#### 4. สรุป

การให้ความร้อนกับผลปาล์มด้วยไมโครเวฟสามารถเพิ่มคุณภาพของน้ำมันปาล์มดิบให้สูงขึ้นได้ในการพัฒนาตู้ไมโครเวฟสำหรับใช้ในการศึกษาอันตรกิริยาระหว่างคลื่นไมโครเวฟกับผลปาล์มเพื่อจะเข้าใจการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของน้ำมันปาล์ม เมื่อดูคลื่นคลื่นไมโครเวฟ ได้จำลองเพื่อหาขนาดห้องคลื่นแบบมัลติโหมดเมื่อใช้ท่อนำคลื่นขนาดมาตรฐาน และส่งคลื่นไมโครเวฟโหมด TE<sub>10</sub> ความถี่ 2.45 GHz พบว่าห้องคลื่นแบบลูกบาศก์ขนาด 33 × 33 × 33 cm<sup>3</sup> มีเรโซแนนซ์โหมดที่ทำให้มีพลังงานไฟฟ้าภายในห้องคลื่นสูงสุด

ในการจำลองผลการกระจายตัวของสนามไฟฟ้า พบว่า บริเวณที่มีการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอมากที่สุดอยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของระนาบ xy และสูงจากผนัง 4 เซนติเมตร และเมื่อสร้างตู้ไมโครเวฟที่มีขนาดของห้องคลื่นจากผลการจำลองและวัดอุณหภูมิของไหลที่เป็นน้ำ เมื่อดูคลื่นคลื่นไมโครเวฟที่ตำแหน่งต่างๆ อุณหภูมิของน้ำมีการกระจายตัวเช่นเดียวกับผลการกระจายตัวของ E<sup>2</sup> จากการจำลอง

เพื่อที่จะเข้าใจอัตราการเกิดความร้อนภายในผลปาล์มซึ่งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันปาล์ม จะต้องมีการจำลองผลร่วมกันของการ

ดูคลื่นคลื่นไมโครเวฟ และการแพร่ของความร้อนภายในผลปาล์มและอากาศรอบๆ โดยใช้แบบจำลองที่เหมาะสมของรูปร่างของผลปาล์ม องค์ประกอบทางเคมีฟิสิกส์ของผลปาล์ม

เมื่อวิเคราะห์น้ำมันปาล์มดิบที่สกัดจากผลปาล์มที่ได้รับความร้อนจากไมโครเวฟ พบว่าปริมาณกรดไขมันอิสระ ลดลงต่ำกว่าที่มาตรฐานกำหนด และค่าโด้บี มีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงกำลังไมโครเวฟต่ำๆ แต่ที่ไมโครเวฟกำลังสูงค่าโด้บีมีค่าลดลงเนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นสูงเกินไป ดังนั้น จึงเป็นโจทย์วิจัยในอนาคตหากต้องการศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟเพื่อให้ได้น้ำมันปาล์มดิบคุณภาพดี

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัยจากโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) (Grant No. MSD61I0043) โดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ร่วมกับห้างหุ้นส่วนจำกัด แสงอรุณปาล์มออยล์ และศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านพลาสมาและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (PEwave)

#### 6. References

- [1] C. J. Vincent, R. Shamsudin, and A. S. Baharuddin, 2014, Pre-treatment of oil palm fruits: A review, *J. Food Eng.*, vol. 143, pp. 123–131.
- [2] O. I. Mba, M. J. Dumont, and M. Ngadi, 2015, Palm oil: Processing, characterization and utilization in the food industry - A review, *Food Biosci.*, vol. 10, pp. 26–41.
- [3] M. C. Law, E. L. Liew, S. L. Chang, Y. S. Chan, and C. P. Leo, 2016, Modelling microwave heating of discrete samples of oil palm kernels, *Appl. Therm. Eng.*, vol. 98, pp. 702–726.

- [4] Department of standards Malaysia, 2007, Palm oil-specification (second revision), Department of Standards Malaysia, Ministry of Science, Technology and Innovation, Century Square Jalan Usaberyaya, Selangor Darul Ehsan, Malaysia, 6 p.
- [5] S. F. Cheng, M. Nor L., and C. H. Chuah, 2011, Microwave pretreatment: A clean and dry method for palm oil production, *Ind. Crops Prod.*, vol. 34, no. 1, pp. 967–971.
- [6] I. Umudee, M. Chongcheawchamnan, M. Kiatweerasakul, and C. Tongurai, 2013, Sterilization of oil palm fresh fruit using microwave technique, *Int. J. Chem. Eng. Appl.*, vol. 4, no. 3, pp. 111–113.
- [7] M. Tang et al, 2017, Effects of different pretreatments to fresh fruit on chemical and thermal characteristics of crude palm oil, *J. Food Sci.*, vol. 82, no. 12, pp. 2857–2863.
- [8] M. C. Chow and A. N. Ma, 2007, Processing of fresh palm fruits using microwaves., *J. Microw. Power Electromagn. Energy*, vol. 40, pp. 165–173.
- [9] M. Radiation and S. Handbook, 1993, RF and Microwave Radiation Safety Handbook, Reed Educational and Professional Publishing Ltd, 422 p.
- [10] D. Boonthum, 2017, The Development High-Temperature Microwave Furnace for Sintering of Thermoelectric Materials, Ph.D. Thesis, Walailak University, Nakhon Si Thammarat.
- [11] N. M. Bobrovskij et al. , 2017, Simulation of electrical and thermal fields in a multimode microwave oven using software written in C ++, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*
- [12] Y. E. Lin, R. C. Anantheswaran, and V. M. Puri, 1995, Finite element analysis of microwave heating of solid foods, *J. Food Eng.*, vol. 25, no. 1, pp. 85–112.
- [13] M. Gimersky and M. Ernst, 2014, Modeling of large microwave cavities for industrial and scientific applications, *Whitepaper / CST AG*, pp. 1–4.
- [14] T. Santos, L. Costa, and M. Valente, 2010, 3D electromagnetic field simulation in microwave ovens: a tool to control thermal runaway, The Proceedings of the COMSOL Conference 2010 Paris, pp. 3–7.
- [15] J. Monteiro, L. C. Costa, M. A. Valente, T. Santos, and J. Sousa, 2011, Simulating the electromagnetic field in microwave ovens, SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference Proceedings, pp. 493–497.
- [16] K. Pongsuwan, M. Chongcheawchamnan and C. Tongurai, 2555, Oil Palm Multilayer Dielectric Model for Microwave Drying Technique, The 50<sup>th</sup> Kasetsart University Conference on Architecture and Engineering, no. 2557-04–26, pp. 68–75. (in Thai)
- [17] K. Apinyavisit, A. Nadkorranakul and S. Soponranarit, 2017, Design of prototype of combined microwave-hot air conveyor belt dryer, *KKU.Sci.J.*, vol. 45, no. 3, pp. 628–638. (in Thai)
- [18] P. Krishnamoorthy, 2011, Electromagnetic and heat transfer modeling of



- microwave heating in domestic ovens, University of Nebraska-Lincoln, 179 p.
- [19] K. Pitchai, 2012, Coupled electromagnetic and heat transfer model for microwave heating in domestic ovens, *Journal of Food Engineering*, pp. 100-111.
- [20] S. A. Mekonnen, S. Yenikaya, G. Yenikaya, and G. Yilmaz, 2018, Effects of Dielectric Properties of the Material located inside Multimode Applicator on Microwave Efficiency, pp. 61–66.
- [21] J. T. Ang, 2005, Permittivity And Measurements, *American Cancer Society*, pp. 3693-3711.
- [22] R. Nokkaew, V. Punsuvon and S. Tsuchikawa, 2019, Determination of carotenoids and DOBI content in crude palm oil by spectroscopy techniques: comparison of raman and FT-NIR spectroscopy, *International of GEOMATE*, pp. 92-98.
- [23] M. Mehdizadeh, 2009, *Microwave/Rf Applicators And Probes For Material Heating, Sensing And Plasma Generation A Design Guide*, 389 p.
- [24] P. Rattanadecho, 2008, *The Basic of Microwave heating process*, Thammasat University punlisher, Thammasat University, Rangsit Centre, Pathum Thani. (in Thai)
- [25] Z. Zhang, T. Su, and S. Zhang, 2018, “Shape effect on the temperature field during microwave heating process, *Journal of Food Quality*, 24 p.
- [26] D. C. Dibben, 1995, *Numerical And Experimental Modelling Of Microwave Applicators*, Ph.D thesis, University of Cambridge, 207p.