

การจำลองการกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและอุณหภูมิภายในคาวิตี 3 มิติ สำหรับระบบไมโครเวฟไพโรไลซิส

The Simulation of Electromagnetic Wave and Temperature Distribution in Cavity 3 Dimension for Microwave Pyrolysis System

สรกฤษ กมลชัย ธีรัฐภูมิ สุวรรณภูมิ ยุทธพงศ์ เพียรโรจน์ และ ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช *

หน่วยวิจัยเพื่อการใช้ประโยชน์จากไมโครเวฟในงานวิศวกรรม (R.C.M.E.)

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

99 หมู่ 18 ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง ปทุมธานี 12120

โทร 0-2564-3001-9 *อีเมลล์ ratphadu@engr.tu.ac.th

บทคัดย่อ

คาวิตี 3 มิติโหมตถูกนำไปประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในกระบวนการทำความร้อนวัสดุด้วยไมโครเวฟ ซึ่งพฤติกรรมของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในวัสดุนั้นเกิดจากคลื่นนิ่งหลายระนาบที่อยู่ในคาวิตี สำหรับงานวิจัยฉบับนี้นำเสนอแบบจำลองการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในคาวิตีรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าในกรณี 3 มิติ เพื่อใช้ในการปรับปรุงการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในคาวิตีและการกระจายอุณหภูมิในวัสดุบนพื้นฐานของการใช้แหล่งป้อนคลื่นหลายตำแหน่ง ซึ่งแบบจำลองดังกล่าวสามารถช่วยระบุถึงตำแหน่งในการป้อนคลื่นที่สามารถลดปัญหาการคอสมักปปลิ่งที่เกิดขึ้นจากแหล่งป้อนคลื่นหลายตำแหน่งได้ สำหรับการจำลองพฤติกรรมที่เกิดขึ้นภายในคาวิตีนั้น อาศัยพื้นฐานการวิเคราะห์จากโปรแกรม COMSOL™ Multiphysics และหลังจากได้ผลการวิเคราะห์แบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดแล้ว ข้อมูลดังกล่าวทั้งหมดจะถูกนำไปประยุกต์ใช้กับระบบไมโครเวฟไพโรไลซิส ซึ่งใช้ในการรีไซเคิลขยะพลาสติกต่อไป

Abstract

Multimode cavities are extensively used in many applications for microwave heating of bulk materials in which the electromagnetic field uniformity and temperature profiles in the materials are usually uneven due to the multiple standing waves in the cavity. In this paper, we present the simulation of electromagnetic field distribution and temperature profiles in three dimensions of rectangular cavity for improve the electric field distribution and temperature profile base on multi-feeding technique. It is possible to identify the port position for reducing the cross-coupling between source. The commercial software COMSOL™ Multiphysics is used to simulate the phenomena

inside the cavity. After the best model had finished, all geometries and microwave feeding position will be implemented to the microwave pyrolysis system, which will use to recycle the plastic waste.

1. บทนำ

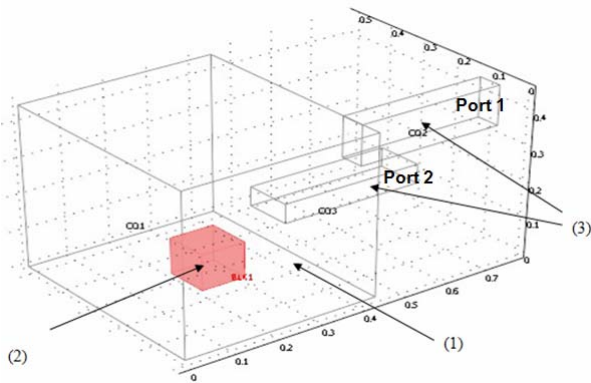
นับตั้งแต่มีการประยุกต์ใช้พลังงานไมโครเวฟในการทำความร้อนเกิดขึ้น ประเด็นสำคัญอย่างหนึ่งที่ได้รับความสะดวกในการศึกษา คือ ลักษณะการเกิดความร้อนที่ไม่สม่ำเสมอภายในโหลต (Heating Non-uniformity in Loaded) หรือวัสดุที่ได้รับพลังงานไมโครเวฟภายในคาวิตี สาเหตุดังกล่าวนั้นเกิดขึ้นจากความไม่สม่ำเสมอของการกระจายสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในแอฟพลีเคเตอร์หรือคาวิตี ทำให้เกิดจุดหรือตำแหน่งที่เรียกว่า จุดร้อนและจุดเย็น (Hot and Cold Spots) Tse V. et al. [1] สำหรับตัวอย่างที่ใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์จุดร้อนและจุดเย็นได้แก่ การเกิดปรากฏการณ์เทอร์มอลรันอะเวย์ (Thermal Runaway) ในบางส่วนของวัสดุเซรามิกส่งผลให้วัสดุเกิดความเสียหายหรือมีคุณภาพต่ำ (จุดร้อน) หรือในบางกรณีเช่นอาหารที่ต้องการฆ่าเชื้อแบคทีเรียด้วยความร้อน แต่ความร้อนบางจุดนั้นมีค่าไม่มากพอส่งผลให้แบคทีเรียยังสามารถเจริญเติบโตขึ้นได้ และทำให้อาหารเป็นพิษ (จุดเย็น) George, M., et al. [2] ด้วยเหตุผลดังกล่าวนักวิจัยส่วนใหญ่จึงมีความต้องการที่จะออกแบบระบบทำความร้อนด้วยไมโครเวฟให้สามารถเกิดความร้อนที่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งวัสดุหรือโหลต ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช [4]

สำหรับเทคนิคที่นิยมใช้ในการแก้ปัญหาดังกล่าวคือ การทำให้โหลตเคลื่อนที่และการใช้ใบพัดกวนคลื่น (Mode Stirrer) ซึ่งวิธีการดังกล่าวเป็นวิธีที่ง่ายไม่มีความซับซ้อน แต่ก็ยังมีข้อจำกัดหลายประการ เช่น การทำให้โหลตเคลื่อนที่อาจเกิดปรากฏการณ์กับดักคลื่น (Field Trapping) ส่วนการใช้ใบพัดส่งผลให้การวิเคราะห์เชิงทฤษฎีมีความยุ่งยาก เป็นต้น

งานวิจัยนี้นำเสนอเทคนิคการออกแบบการใช้แหล่งป้อนคลื่นหลายตำแหน่ง (Multi-feeding Technique) ซึ่งเป็นหนึ่งในวิธีการแก้ไขปัญหาความไม่สม่ำเสมอของการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและความร้อนภายในวัสดุ ซึ่งถือว่าเป็นปัญหาหลักของการออกแบบระบบทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ โดยการศึกษาในครั้งนี้จะศึกษาถึงตำแหน่งของการป้อนคลื่นและอิทธิพลของโหลด ต่อการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและอุณหภูมิภายในควาวิตี้ ซึ่งแตกต่างจากงานวิจัยที่ผ่านมาที่มักจะศึกษาการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในควาวิตี้ในสภาวะไม่มีโหลด ซึ่งง่ายต่อการคำนวณและวิเคราะห์

2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับกระบวนการทำความร้อนโดยพลังงานไมโครเวฟจะแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็นสองส่วน คือ ในส่วนของการวิเคราะห์การกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟและการวิเคราะห์การกระจายตัวของความร้อนภายในโหลด โดยสามารถเขียนเป็นแบบจำลองทางกายภาพในการวิเคราะห์ได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แบบจำลองทางกายภาพสำหรับการวิเคราะห์การทำความร้อนวัสดุไดอิเล็กตริกด้วยคลื่นไมโครเวฟ

จากรูปที่ 1 แสดงส่วนประกอบของการจำลองระบบไมโครเวฟโดยมีแหล่งป้อนคลื่นหลายตำแหน่งซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

(1) ควาวิตี้แบบมัลติโหมด (Multimode Cavity) ทำหน้าที่เป็นที่บรรจุโหลดโดยที่ผนังของควาวิตี้จะมีสมบัติเป็นตัวนำยิ่งยวด (Perfect Conducting Wall) ส่งผลให้ผนังไม่มีการดูดซับพลังงานไมโครเวฟที่ส่งออกมาจากท่อนำคลื่น

(2) โหลด (Load) คือวัสดุที่สามารถทำความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟได้ (สามารถดูดซับพลังงานไมโครเวฟและเปลี่ยนเป็นพลังงานทางความร้อน)

(3) ท่อนำคลื่น (Wave Guide) ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟโดยที่โหมดของคลื่นเป็นโหมด TE_{10}

สำหรับสภาวะและลักษณะทางกายภาพที่ใช้ในการศึกษาแบบจำลองมีดังต่อไปนี้

1. โหมดไมโครเวฟที่ใช้เป็นแบบมัลติโหมด มีตำแหน่งการป้อนคลื่น 2 ตำแหน่ง ทั้งนี้เพื่อหวังผลการกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (ไมโครเวฟ) ที่ดี

2. กำลังของคลื่นไมโครเวฟรวม 800 Watt X 2 (แมกนีตรอน 2 ตัว)
3. ความถี่คลื่นไมโครเวฟที่ใช้ 2.45 GHz
4. ลักษณะทางกายภาพของควาวิตี้เป็นทรงลูกบาศก์ขนาด 510 x 450 x 440 mm
5. ท่อนำคลื่นที่ใช้ คือ WR 430 (109 x 55 mm)
6. โหลดที่ใช้ คือ ซิลิกอนคาร์ไบด์ (Dielectric Constant = 10.8)
7. ขนาดของโหลดที่ใช้ศึกษามีขนาด 10 x 5 x 6 mm

สำหรับรายละเอียดการวิเคราะห์การกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟและการวิเคราะห์การกระจายตัวของความร้อนภายในโหลดมีดังต่อไปนี้

2.1 สมมุติฐานที่ใช้ในการจำลอง

สมมุติฐานหลักที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและอุณหภูมิภายในโหลดและควาวิตี้สำหรับการศึกษาค้างนี้

1. ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะของสสารภายในโหลด
2. โหลดมีสถานะเป็นของแข็งการถ่ายเทความร้อนภายในโหลดเกิดจากการนำความร้อน
3. ไม่มีการถ่ายเทมวลสารออกจากโหลด
4. ไม่มีการถ่ายเทพลังงานออกจากโหลด (ไม่คิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างโหลดกับอากาศรอบข้างภายในควาวิตี้)
5. ไม่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นภายในโหลด
6. องค์ประกอบของโหลดมีความสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์
7. ผนังทุกด้านของควาวิตี้เป็นตัวนำยิ่งยวด (Perfect Conducting Wall)
8. กำหนดให้โหลดอยู่นิ่ง
9. สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผิวรอยต่อระหว่างโหลดและอากาศที่อยู่ภายในควาวิตี้มีความสมดุลกัน
10. คลื่นไมโครเวฟที่ออกจากท่อนำคลื่นเป็นโหมด TE_{10}
11. ค่าสมบัติไดอิเล็กตริก (Dielectric Properties) ของโหลดเป็นค่าคงที่
12. ค่าสมบัติไดอิเล็กตริก (Dielectric Properties) ของอากาศภายในควาวิตี้เป็นค่าคงที่
13. ค่าสมบัติทางความร้อน (Thermal Properties) ของโหลดมีค่าคงที่
14. ปรากฏการณ์พิจารณาในระนาบ 3 มิติ

2.2 การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในควาวิตี้

สำหรับการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในควาวิตี้ (วิเคราะห์ทั้งในส่วนของท่อนำคลื่น ควาวิตี้ และโหลด) สามารถหาได้จากสมการสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของแมกเวลล์ในกรณี 3 มิติ โดยมีรายละเอียดสมการดังต่อไปนี้

$$\nabla \times (\mu_r^{-1} \nabla \times E) - k_o^2 \left(\epsilon_r - \frac{j\sigma}{\omega \epsilon_o} \right) E = 0 \quad (1)$$

$$\epsilon_r = n^2 \quad (2)$$

โดยที่

- E คือ ความเข้มของสนามไฟฟ้า (Electric Field Intensity)
- H คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field Intensity)
- j คือ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (Current Density)
- σ คือ สมบัติการนำไฟฟ้า (Electric Conductivity)
- μ_r คือ สมบัติการซึมผ่านของสนามแม่เหล็กสัมพัทธ์ (Relative Magnetic Permeability)
- ω คือ ความเร็วเชิงมุมของคลื่นไมโครเวฟ
- ϵ_o คือ สมบัติไดอิเล็กตริกในสภาวะสูญญากาศ (Permittivity of Vacuum)
- n คือ ดัชนีหักเห (Refractive Index)
- ϵ_r คือ สมบัติไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (Relative Dielectric Constant) ซึ่งบอกถึงคุณสมบัติของวัสดุใดๆที่อธิบายถึงความสามารถในการดูดซับ ส่งผ่านและสะท้อนพลังงานจากส่วนที่เป็นสนามไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟ

สำหรับเงื่อนไขขอบเขตการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟภายในท่อนำคลื่นและควาวิตี้กำหนดให้เป็นตัวนำยั้งยวดตั้งนั้นสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$n \times E = 0 \quad (3)$$

สำหรับเงื่อนไขขอบเขตความต่อเนื่องของคลื่นไมโครเวฟที่ผิวรอยต่อระหว่างโหลดและอากาศที่อยู่ภายในควาวิตี้สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$n \times (H_1 - H_2) = 0 \quad (4)$$

$$n \times (E_1 - E_2) = 0 \quad (5)$$

สำหรับเงื่อนไขขอบเขตของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากการเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ (Source) จากท่อนำคลื่น (ดังรูปที่ 1) สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$Port(1): S = \int (E - E_1) \cdot E_1 / \int E_1 \cdot E_1 \quad (6)$$

$$Port(2): S = \int (E - E_2) \cdot E_2 / \int E_2 \cdot E_2 \quad (7)$$

โดยที่ $Port(1)$ และ $Port(2)$ คือแหล่งกำเนิดคลื่นตัวที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

ในส่วนของเงื่อนไขสภาวะเริ่มต้นของสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากำหนดให้

$$E_x(t_0), E_y(t_0), E_z(t_0) = 0 \quad (8)$$

2.3 การวิเคราะห์ความร้อนภายในโหลด

สมการถ่ายเทความร้อนในปัญหานี้จะวิเคราะห์เฉพาะความร้อนที่เกิดขึ้นภายในโหลดที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในควาวิตี้ในกรณี 3 มิติเท่านั้น (เนื่องจากอากาศภายในควาวิตี้ไม่มีการดูดซับพลังงานไมโครเวฟเป็นความร้อน) โดยสมมติให้ภายในโหลดมีการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำความร้อน (Heat Conduction) เพียงอย่างเดียว และโหลดสามารถกำเนิดความร้อนภายใน (Heat Generation) ด้วยการเปลี่ยนพลังงานไมโครเวฟเป็นพลังงานความร้อน และจากสมมติฐานดังกล่าวสามารถเขียนเป็นสมการถ่ายเทความร้อนในโหมดของการนำความร้อน ได้ดังต่อไปนี้

$$\delta_{is} \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q \quad (9)$$

โดยที่

- δ_{is} คือ สัมประสิทธิ์เชิงเวลา (Time-Scaling Coefficient)
- T คือ อุณหภูมิ (Temperature)
- t คือ เวลา (Time)
- C_p คือ ความจุความร้อนของสสาร (Heat Capacity at Constant Pressure)
- ρ คือ ความหนาแน่น (Density)
- k คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity)
- Q คือ ความหนาแน่นของพลังงานความร้อนที่ผลิตขึ้นภายในวัสดุ (Local Volumetric Heat Generation Term) ซึ่งได้จากการดูดซับพลังงานไมโครเวฟและแปรเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน และเนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นจากพลังงานไมโครเวฟภายในควาวิตี้มีเฉพาะที่โหลด ดังนั้นโดเมนที่พิจารณาทางความร้อนจึงพิจารณาที่โหลดเพียงอย่างเดียว (ตำแหน่งหมายเลข 2 ในรูปที่ 1) ดังนั้นเงื่อนไขขอบเขตทางความร้อนจะมีเฉพาะที่ผิวโหลดเท่านั้น ซึ่งในการวิเคราะห์ครั้งนี้กำหนดให้ไม่มีการถ่ายเทความร้อนออกจากโหลด (ผนังโหลดเป็นฉนวน) ดังนั้นเงื่อนไขขอบเขตทางความร้อนที่ผิวโหลดสามารถเขียนได้ดังนี้

$$n \cdot (k \nabla T) = 0 \quad (10)$$

ในส่วนของเงื่อนไขสภาวะเริ่มต้นของการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนกำหนดให้

$$T(t_0) = T_0 \quad (11)$$

2.4 วิธีการหาผลเฉลย

การวิเคราะห์ผลจากแบบจำลองจะถูกแบ่งออกเป็น 2 กรณีคือกรณีที่วิเคราะห์การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในโหลดและควาวิตี้เพียงอย่างเดียว และในกรณีที่มีการวิเคราะห์ทั้งการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในโหลดและควาวิตี้ และการกระจายตัว

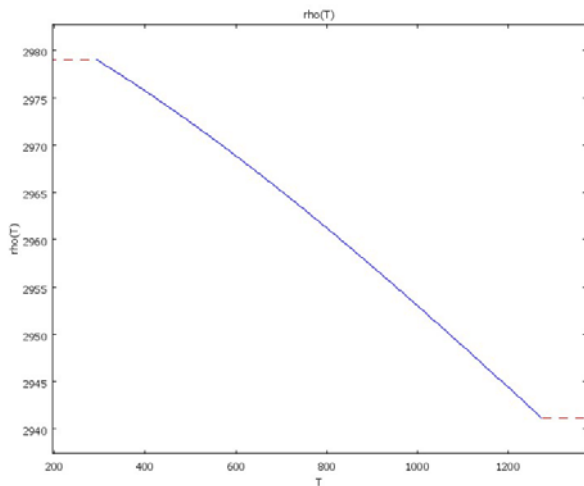
อุณหภูมิภายในโหนดด้วย โดยวิธีการหาผลเฉลยมีดังต่อไปนี้
 ในกรณีที่วิเคราะห์การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในโหนด และควาวิต้อย่างเดียวจะกำหนดให้เวลาไม่มีผลต่อพฤติกรรมของ สนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในควาวิตี้ ดังนั้นปัญหาดังกล่าวถือว่าเป็น ปัญหาที่อยู่ในสภาวะคงตัว (Steady State) จึงทำการวิเคราะห์ปัญหา การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในควาวิตี้ 3 มิติ ด้วย ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่อาศัยพื้นฐานการวิเคราะห์จากโปรแกรม COMSOLTM Multiphysics [3]

ส่วนในกรณีที่มีการวิเคราะห์สมการทางด้านความร้อนร่วมด้วย เวลาจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของโหนด ดังนั้นจึง กำหนดให้ปัญหาดังกล่าวเป็นปัญหาที่อยู่ในสภาวะไม่คงตัว (Transient) จึงทำการวิเคราะห์ปัญหาการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ภายในควาวิตี้ 3 มิติ ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่อาศัยพื้นฐานการ วิเคราะห์จากโปรแกรม COMSOLTM Multiphysics [3]

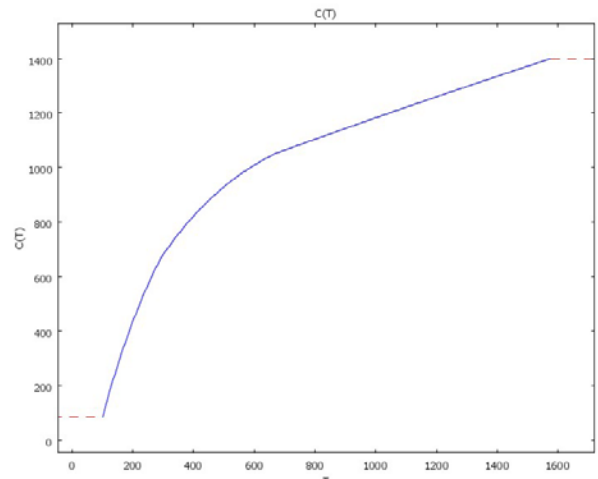
สำหรับค่าข้อมูลการป้อนเข้าที่ใช้ในการวิเคราะห์ทั้งในส่วนของ สนามแม่เหล็กไฟฟ้า การถ่ายเทความร้อนดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ข้อมูลป้อนเข้าที่ใช้ในการศึกษาแบบจำลอง

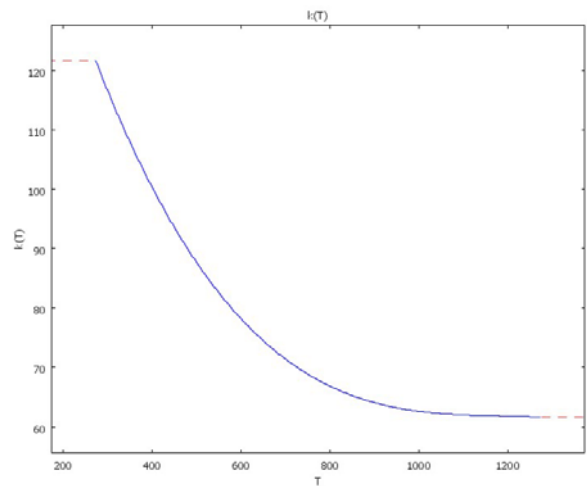
$\epsilon_0 = 8.85419 \times 10^{-12}$ [F/m]	$\mu_0 = 4.0\pi \times 10^{-7}$ [H/m]
$\epsilon_{ra} = 1.0, \mu_{ra} = 1.0$	$\epsilon_{rs} = 10.8, \mu_{rp} = 1.0$
$\tan \delta_p = 0.003, \tan \delta_a = 0.00$	ρ_s แสดงในรูปที่ 4
C_{ps} แสดงในรูปที่ 5	k_s แสดงในรูปที่ 6
$T(t_0) = 28^\circ C$	$f = 2.45$ [GHz]
Power / port = 800[watt]	end time = 5[s]



รูปที่ 2 ค่าความหนาแน่นของโหนดที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ [3]



รูปที่ 3 ค่าความจุความร้อนของโหนดที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ [3]



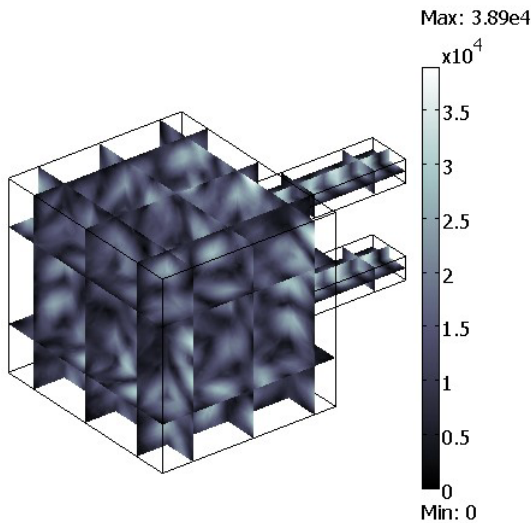
รูปที่ 4 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของโหนดที่เป็นฟังก์ชันกับ อุณหภูมิ [3]

3 ผลการศึกษาแบบจำลอง

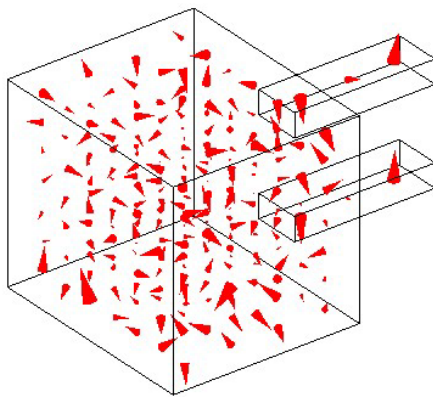
3.1 ผลการศึกษาแบบจำลองในสภาวะที่ไม่มีโหนด

จากรูปที่ 5(a) และ 6(a) พบว่า ค่าการกระจายตัวของ สนามแม่เหล็กไฟฟ้าสูงสุดภายในควาวิตี้ที่มีตำแหน่งป้อนคลื่นแบบ สมมาตรและไม่สมมาตรจะมีค่าเท่ากับ 3.89×10^4 V/m และ 8.14×10^4 V/m ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าทั้งสองมีความแตกต่างกันมาก และเมื่อพิจารณาการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะเห็นว่าควา วิตี้ตำแหน่งการป้อนคลื่นแบบสมมาตร สภาวะไม่มีโหนดจะเกิด การครอบงำปัดลิ่งมากกว่าควาวิตี้แบบไม่สมมาตรถึง 2 เท่า เนื่องจากการ ป้อนคลื่นแบบสมมาตรจะมีโอกาสเกิดการทับซ้อนคลื่นที่อยู่ในระนาบ เดียวกันได้มากกว่าเพราะคลื่นที่ปล่อยออกจากท่อนำคลื่นมีลักษณะการ เคลื่อนตัวในระนาบเดียวกัน ในขณะที่การป้อนคลื่นแบบไม่สมมาตรจะ เกิดการทับซ้อนกันของคลื่นน้อยเพราะการเคลื่อนตัวของคลื่นอยู่คนละ ระนาบกัน ดังนั้นการป้อนคลื่นแบบสมมาตรจะส่งผลให้พลังงานที่ ป้อนเข้าไปเกิดการสูญเสีย กล่าวคือ พลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่

ป้อนเข้ามาไม่ได้ถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน (กรณีมีโหลด) แต่เกิดการสูญเสียพลังงานจากการครอสคัปปลิงกันเองของคลื่น



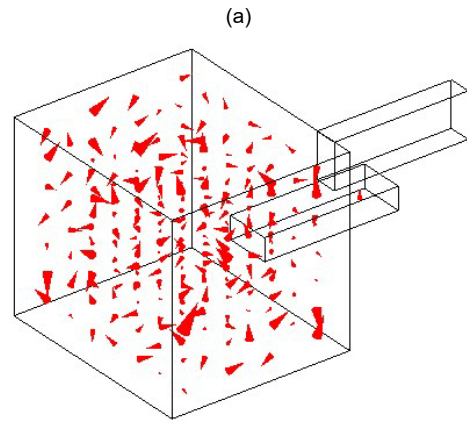
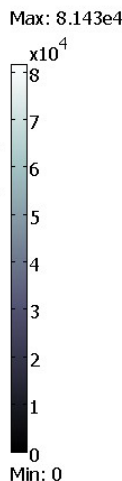
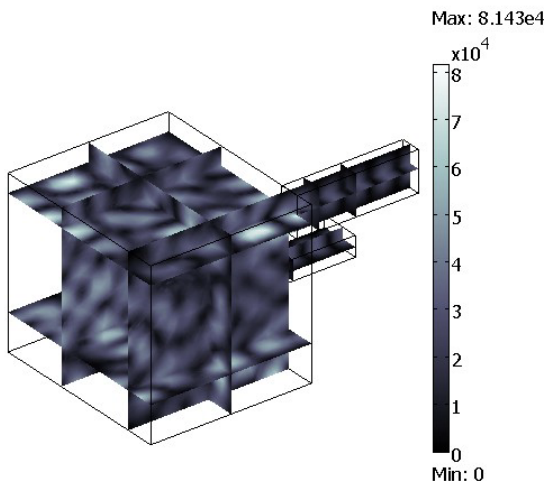
(a)



(b)

รูปที่ 5 การกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีตำแหน่งป้อนคลื่นที่สมมาตรกัน

- (a) Slice Plot Type (V/m)
- (b) Arrow Plot Type



(a)

(b)

รูปที่ 6 การกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีตำแหน่งป้อนคลื่นที่ไม่สมมาตรกัน

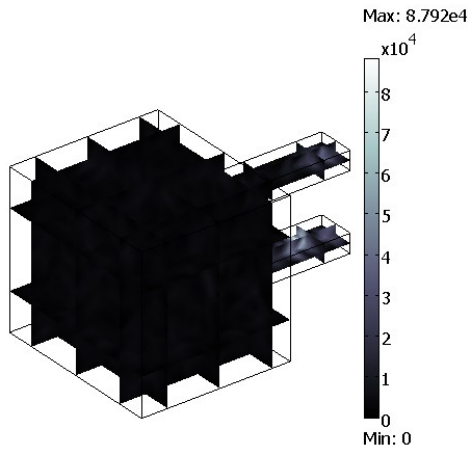
- (a) Slice Plot Type (V/m)
- (b) Arrow Plot Type

จากรูปที่ 5(b) และ 6(b) พบว่า เวกเตอร์จากรูปที่ 5(b) มีความสม่ำเสมอของขนาดเวกเตอร์น้อยกว่ารูป 6(b) แสดงว่าการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ควาดีตำแหน่งป้อนคลื่นแบบสมมาตรมีความสม่ำเสมอมากกว่าที่ควาดีตำแหน่งป้อนคลื่นแบบไม่สมมาตร และจากรูปที่ 5(b) พบว่าเวกเตอร์ในท่อนำคลื่นทั้งสองเกิดคลื่นนิ่งขึ้นภายในและมีความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า 3.5×10^4 V/m และรูปที่ 6(b) พบว่าเวกเตอร์ภายในท่อนำคลื่น Port 1 ไม่เกิดคลื่นนิ่ง แต่พบที่ Port 2 เกิดเพียงเล็กน้อย ซึ่งเมื่อนำเวกเตอร์ภายในท่อนำคลื่นจากรูปที่ 5(b) และ 6(b) มาเปรียบเทียบกัน พบว่า ในรูปที่ 5(b) เวกเตอร์ในท่อนำคลื่นทั้งสอง Port (Port 1 และ Port 2) เป็นเวกเตอร์ที่มีค่าเท่าค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก คือ 3.89×10^4 V/m (ค่าจากรูปที่ 5(a)) แต่ในกรณีรูปที่ 6(b) พบว่าขนาดของเวกเตอร์ใน Port 2 มีขนาดเพียง 1 ใน 4 ของเวกเตอร์ที่มีขนาดใหญ่ที่สุด (ค่าเวกเตอร์ของ Port 1 มีค่าน้อยกว่า Port 2) ซึ่งค่าเวกเตอร์ขนาดใหญ่ที่สุดในรูปที่ 6(b) จะมีค่าเท่ากับ 8.14×10^4 V/m (ค่าจากรูปที่ 6(a)) ดังนั้นเวกเตอร์ภายในท่อนำคลื่น Port 2 จะมีค่าประมาณ 2.04×10^4 V/m จากความแตกต่างของเวกเตอร์ภายในท่อนำคลื่นจากรูปที่ 5(b) และ 6(b) นี้แสดงว่า ในสภาวะที่ไม่มีโหลด ควาดีที่มีตำแหน่งการป้อนคลื่นแบบสมมาตรมีโอกาสมากที่แมกนิตรอนจะเสียหายจากคลื่นไมโครเวฟย้อนกลับมากกว่าควาดีที่มีตำแหน่งการป้อนคลื่นแบบไม่สมมาตรถึงสองเท่า

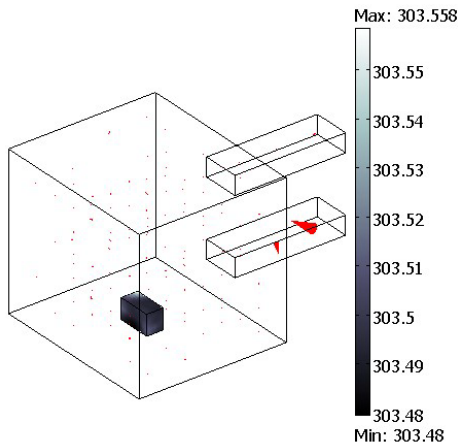
3.2 ผลการศึกษาแบบจำลองในสภาวะที่มีโหลด

จากรูปที่ 5(a) และ 7(a) ซึ่งเป็นการป้อนคลื่นแบบสมมาตรพบว่า ค่าที่มากที่สุดของการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า คือ 3.89×10^4 V/m และ 8.79×10^4 V/m ตามลำดับ และจากรูปที่ 5(a) จะมีการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นแบบจุดเย็นจุดร้อน คือ จะมีจุดที่สนามแม่เหล็กมีความเข้มสูงและต่ำกระจายอยู่ทั่วทั้งควาดี ซึ่งมีความแตกต่างกับรูปที่ 7(a) ซึ่งมีการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าอย่างสม่ำเสมอแต่มีค่าเพียง 1×10^4 V/m ถึง 2×10^4 V/m ดังนั้น

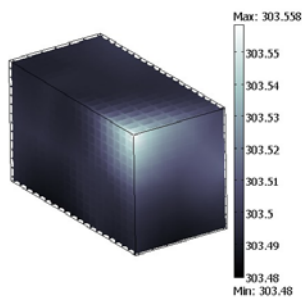
ลักษณะการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แตกต่างกัน มีผลจากอิทธิพลของไหลภายใน คิวตี้ และจากรูปที่ 7(a) และ 7(b) พบว่าการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ลดลงจนมีค่าเข้าใกล้ศูนย์นั้นเกิดจากการดูดซับพลังงานไมโครเวฟของไหล



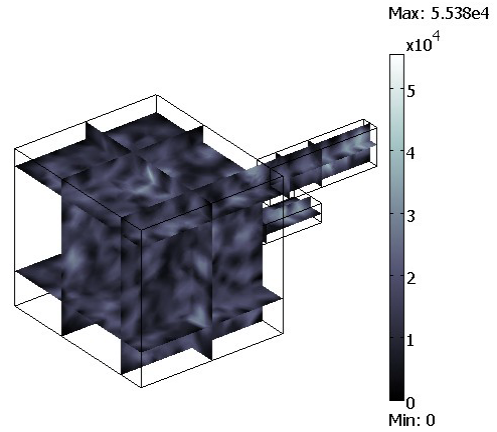
(a)



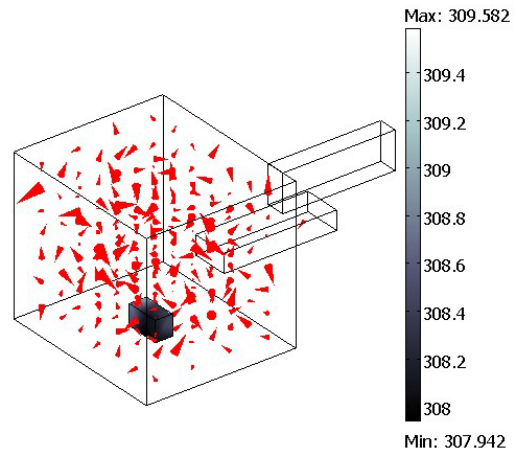
(b)



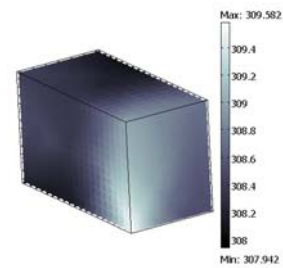
(c)



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 8 กรณีคิวตี้ในสภาวะมีไหลที่ตำแหน่งป้อนคลื่นไม่สมมาตรกัน

- (a) การกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (V/m)
- (b) การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในไหล (K) และการกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า
- (c) การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในไหล (K)

รูปที่ 7 กรณีคิวตี้ในสภาวะมีไหลที่ตำแหน่งป้อนคลื่นสมมาตรกัน

- (a) การกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (V/m)
- (b) การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในไหล (K) และการกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า
- (c) การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในไหล (K)

จากรูปที่ 6(a) และ 8(a) ซึ่งเป็นการป้อนคลื่นแบบไม่สมมาตรพบว่า ค่าที่มากที่สุดของการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า คือ 8.14×10^4 V/m และ 5.54×10^4 V/m ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกับรูปที่ 5(a) และ 7(a) อย่างสิ้นเชิงกล่าวคือ ไหลส่งผลให้การมีการกระจุกตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ณ ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งมากขึ้นในกรณีที่มีการป้อนคลื่นแบบสมมาตร แต่ในทางตรงข้ามการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีมากขึ้นเมื่อใส่ไหลในคิวตี้ในกรณีของ

การป้อนคลื่นแบบไม่สมมาตร แสดงให้เห็นว่าโหลดมีผลอย่างมากต่อการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งในกรณีป้อนคลื่นแบบสมมาตร และไม่สมมาตร ดังนั้นการวิเคราะห์แบบจำลองการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในกรณีไม่บรรจุโหลดไม่สามารถแสดงถึงแนวโน้มการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าในกรณีบรรจุโหลดไว้ภายในภาควิธีได้ เนื่องจากโหลดมีสมบัติไดอิเล็กตริกที่แตกต่างจากอากาศและส่งผลโดยตรงต่อรูปแบบการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟ นอกจากนี้เมื่อวิเคราะห์รูปที่ 7(c) และ 8(c) พบว่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในโหลดที่ผ่านการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟเป็นเวลา 5 วินาทีพบว่า มีค่าเท่ากับ 303 K และ 309 K ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการป้อนคลื่นไมโครเวฟกรณีไม่สมมาตรสามารถให้อุณหภูมิหรือความร้อนที่ต่ำกว่ากรณีการป้อนคลื่นแบบสมมาตร ซึ่งผลดังกล่าวยังสอดคล้องกับลักษณะการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าอีกด้วยและยังแสดงให้เห็นว่าอิทธิพลของการเกิดคลออสต์บัปป์ส่งผลเสียต่อประสิทธิภาพทางความร้อนในโหลด นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิในโหลดจากรูปที่ 7(c) และ 8(c) พบว่านอกจากการป้อนคลื่นแบบไม่สมมาตรจะให้ความร้อนได้ดีกว่าแล้วยังมีการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ดีกว่าอีกด้วย ซึ่งแสดงให้เห็นสอดคล้องว่าการป้อนคลื่นแบบไม่สมมาตรช่วยให้เกิดการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในโหลดได้ดีและส่งผลให้เกิดความสม่ำเสมอของอุณหภูมิในโหลด หรือกล่าวในอีกนัยหนึ่งว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในโหลดมีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงกับการกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในภาควิธี โดยการกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในภาควิธีที่ดี จะทำให้การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในโหลดที่ดีตามไปด้วย ดังนั้นกรณีของการป้อนคลื่นแบบไม่สมมาตร และหากการกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในภาควิธีไม่ดี จะส่งผลให้การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในโหลดก็จะไม่ดีด้วย ดังนั้นกรณีของการป้อนคลื่นแบบสมมาตร

4. สรุป

ในการศึกษานี้เป็นการศึกษาการจำลองการกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและอุณหภูมิในภาควิธี 3 มิติ เพื่อนำผลจากแบบจำลองที่ได้ไปใช้ในการออกแบบระบบไมโครเวฟไพโรไลซิส ตัวแปรที่สนใจศึกษา คือ ตำแหน่งการป้อนคลื่นไมโครเวฟและโหลดภายในภาควิธี จากการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ผลการทดสอบแบบจำลองของตำแหน่งป้อนคลื่นหลายตำแหน่งภายในภาควิธีที่วางเปล่าจะไม่สามารถนำมาใช้อ้างอิงกับการวิเคราะห์ในกรณีภาควิธีที่มีโหลด เนื่องจากรูปแบบโหมดของคลื่นมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาขณะมีอันตรกิริยาระหว่างคลื่นกับโหลด
2. การป้อนคลื่นในตำแหน่งที่ถูกต้องย่อมจะก่อให้เกิดรูปแบบการเกิดความร้อนที่มีประสิทธิภาพทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกรณีการกระตุ้นการก่อตัวของโหมดที่หลากหลาย เพราะคุณลักษณะของค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดจะแตกต่างกับค่าในฟรีสเปซหรือช่องว่างใดๆ ผลทำให้ความยาวคลื่นภายในโหลดจะสั้นกว่าและเกิดการสะท้อนของคลื่นจากผิวของโหลดเอง
3. การติดตั้งแหล่งป้อนคลื่นในตำแหน่งที่เหมาะสมจะช่วยลดการเกิดคลออสต์บัปป์ได้ แต่ไม่สามารถกำจัดได้ทั้งหมด

4. หลักการสมมาตรของตำแหน่งป้อนคลื่นจะใช้อธิบายผลของการเกิดคลออสต์บัปป์ได้เฉพาะกรณีภาควิธีที่วางเปล่าและโหลดมีคุณสมบัติเป็นวัสดุ Low Losses เท่านั้น

5. การป้อนคลื่นจากแหล่งมากกว่าหนึ่งแหล่งเข้าสู่ภาควิธีขนาดใหญ่จะทำให้เกิดโหมด จำนวนมาก หรือเรียกว่าการก่อตัวของคลื่นแบบมัลติโหมด โดยภายในท่อนำคลื่นจะปรากฏเป็นโหมดพื้นฐานที่เรียกว่าคลื่นโหมด TE_{10} ซึ่งภายในท่อนำคลื่นนี้จะมีค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ตรงบริเวณกึ่งกลางของท่อ หากมีการปรับทิศทางของท่อนำคลื่นให้อยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้องย่อมทำให้โหมดที่ถูกกระตุ้นภายในภาควิธีมีประสิทธิภาพสูงขึ้นตาม

6. ผลจากแบบจำลองในสภาวะที่มีโหลดและไม่มีโหลด ภายในภาควิธีพบว่าเกิดรูปแบบการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าโหลดมีอิทธิพลต่อสนามคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในภาควิธีอย่างชัดเจน

7. การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นมีความสำคัญในการออกแบบเพื่อให้เห็นพฤติกรรมของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อเป็นประโยชน์ในการออกแบบตำแหน่งการป้อนคลื่นไมโครเวฟที่เหมาะสม ซึ่งทำให้ระบบมีประสิทธิภาพดีที่สุดก่อนการลงมือสร้างเครื่อง

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ทุนวิจัยมหาบัณฑิต สกว. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ภายใต้โครงการสร้างกำลังคนเพื่อพัฒนาอุตสาหกรรมระดับปริญญาโท (สกว. – สสว.) ภายใต้สัญญาเลขที่ RDC5050010

ขอขอบคุณ COMSOL Singapore และ I – math Pte Ltd

เอกสารอ้างอิง

1. Tse, V., Chan, C. T., and Howard C. R., 2000. "Understanding Microwave Heating." Howard C. Reader., pp. 125.
2. George, M., Campbell, G., and Jarvis, A., 1995. "Temperature Variation During Microwave Heating Identification and Quantification of Contribution Factor." Fifth International Conference on Microwave and High Frequency Heating, university of Cambridge, pp. G5.1-G5.4.
3. COMSOL Multiphysics User's Guide Version 3.4, COMSOL AB, Singapore, 2007.
4. ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, 2551, พื้นฐานการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ, สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์