



การออกแบบเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน แบบสายพานลำเลียงต้นแบบ

Design of Prototype of Combined Microwave-hot Air Conveyor Belt Dryer

กฤษณ์ อภิญญาวิศิษฐ์^{1*} อติศักดิ์ นาดกรณกุล¹ และ สมชาติ โสภณรณฤทธิ์¹

¹สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

*Corresponding Author, E-mail: krit.apin@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาแบบจำลองการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิของโหลดจำลอง เพื่อออกแบบขนาดของห้องอบแห้งในเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงต้นแบบโดยใช้โปรแกรม COMSOL MULTIPHYSICS ขอบเขตการออกแบบขนาดของเครื่องอบแห้งแบบทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ในช่วงความกว้าง ความยาว และความสูง 0.3-0.5 m ต่อขนาดแมกนีตรอน 800 W จากการจำลองโดยใช้โปรแกรมพบว่า การเปลี่ยนแปลงขนาดของเครื่องอบแห้งทั้งความกว้าง ความยาว และความสูงมีผลต่อลักษณะการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิของโหลด ในกรณีของการออกแบบสำหรับแมกนีตรอน 1 ตัว เงื่อนไขที่ความกว้าง 0.30 m ความยาว 0.30 m และความสูง 0.50 m มีการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ นอกจากนี้ในกรณีการขยายขนาดของเครื่องอบแห้ง เงื่อนไขที่ความกว้าง 0.30 m ความยาว 0.68 m ความสูง 0.50 m และระดับความสูงของสายพานจากระดับฐานห้องอบแห้ง 0.09 m ทำให้โหลดมีการกระจายอุณหภูมิที่สม่ำเสมอ ในการทดสอบเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนต้นแบบที่ออกแบบและสร้างขึ้นพบว่า มีการกระจายของคลื่นไมโครเวฟที่สม่ำเสมอ และมีการรั่วไหลของคลื่นไมโครเวฟอยู่ในมาตรฐานความปลอดภัยของตู้อบไมโครเวฟของ The US Department of Health and Human Services (DHHS) ผลการศึกษาสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟแบบสายพานสำหรับอุตสาหกรรม

ABSTRACT

Electric field and temperature distribution of load are simulated by the COMSOL MULTIPHYSICS program to design dimensions of the prototype of combined microwave-hot air conveyor belt dryer (MHBD). The width, length and height of the cube MHBD chamber for each 800 W magnetron installed are varied in the range of 0.3-0.5 m in the simulation. The result showed that the changes in the width, length and height effect the electric field and temperature distribution of the load in the chamber. The uniform distribution for one magnetron installed is achieved at the dimension of the chamber of 0.3 m width, 0.3 m length and 0.5 m height. For double magnetrons installed, the uniform distribution is at the dimension of the chamber of 0.3 m width, 0.68 m length, 0.5 m height and at the level of conveyor belt from the base of the chamber of 0.09 m. The temperature of water in the manufactured prototype from the design shows uniform distribution and a microwave leakage from the prototype is in the microwave oven safety standard of the US Department of Health and Human Services (DHHS). This study can be used as a guide line for an industrial MHBD design.

คำสำคัญ: การอบแห้งด้วยไมโครเวฟ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สนามไฟฟ้า สายพานลำเลียง

Keywords: Microwave drying, Mathematical model, Electric field, Conveyor belt

สัญลักษณ์

c_0	คือ ความเร็วแสงในสภาวะสุญญากาศ (Speed of light in vacuum, m/s)	n	คือ Normal vector
C_{p_w}	คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ, (J/(kg·K))	P_{abs}	คือ พลังงานการดูดซับคลื่นไมโครเวฟ, (W)
E	คือ ความเข้มของสนามไฟฟ้า (Electric field intensity, V/m)	Q_{MW}	คือ พลังงานจากไมโครเวฟ (W/m ³)
f	คือ ความถี่, Hz	t	คือ เวลา (s)
h_b	คือ ความสูงของระดับสายพานจากระดับฐานห้อง อบแห้ง (m)	T	คือ อุณหภูมิ (K)
h_g	คือ ความสูงของท่อนำคลื่น (m)	w_g	คือ ความกว้างของท่อนำคลื่น (m)
h_o	คือ ความสูงของเครื่องอบแห้ง (m)	w_o	คือ ความกว้างของเครื่องอบแห้ง (m)
j	คือ $\sqrt{-1}$	μ_r	คือ สมบัติการซึมผ่านของสนามแม่เหล็กสัมพัทธ์ (Relative permeability)
k	คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal conductivity, W/(m·K))	μ_0	คือ สมบัติการซึมผ่านของสนามแม่เหล็ก ในสุญญากาศ (Permeability of vacuum, H/m)
k_0	คือ Wave number of free space (rad/m)	ϵ_r	คือ สมบัติไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (Relative permittivity, -)
l_g	คือ ความยาวของท่อนำคลื่น (m)	ϵ_r'	คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (Relative Dielectric Constant, -)
l_o	คือ ความยาวของเครื่องอบแห้ง (m)	ϵ_r''	คือ เพกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (Relative Dielectric Loss Factor, -)
m_w	คือ มวลของน้ำ, (kg)		

ϵ_0	คือ สมบัติไดอิเล็กตริกในสภาวะสุญญากาศ (Permittivity of vacuum, F/m)
σ	คือ สมบัติการนำไฟฟ้า (Electric conductivity, S/m)
ω	คือ ความเร็วเชิงมุม (Angular Frequency, rad/s)
ρ	คือ ความหนาแน่น (Density, kg/m ³)
$\tan \delta$	คือ สัมประสิทธิ์ลอสมแทนเจนท์ (Loss Tangent Coefficient, -)

บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีการทำเกษตรกรรมเป็นจำนวนมาก เพราะมีภูมิประเทศและภูมิอากาศที่เหมาะสมในการเพาะปลูก ประเทศไทยได้มีการส่งออกผักและผลไม้ไปยังต่างประเทศต้องใช้เวลาในการเดินทางเป็นเวลานานอาจเกิดการเน่าเสียเป็นจำนวนมาก ดังนั้นจึงมีวิธีการเก็บรักษาในรูปแบบต่างๆ ได้แก่ ผลไม้แช่แข็ง ผลไม้อบแห้ง ผลไม้บรรจุภาชนะที่อากาศผ่านไม่ได้ เป็นต้น ผลไม้อบแห้งเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถยืดเวลาในการเก็บรักษาและเพิ่มมูลค่าของผลไม้ให้สูงขึ้น โดยทั่วไปการอบแห้งผลไม้ใช้วิธีการอบแห้งด้วยลมร้อน ซึ่งใช้เวลาในการอบแห้งที่นาน ใช้พลังงานมาก และคุณภาพของผลไม้อบแห้งไม่สม่ำเสมอ รวมทั้งสูญเสียคุณภาพของผลไม้หลังการอบแห้ง เช่น ทางด้านสี และเนื้อสัมผัส

ในปัจจุบันมีการศึกษาการนำเทคนิคไมโครเวฟมาร่วมในการอบแห้งผลไม้และพืชผัก เช่น การอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน การอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกล และการอบแห้งด้วยไมโครเวฟภายใต้ความดันสุญญากาศ เป็นต้น การนำเทคนิคไมโครเวฟมาประยุกต์ใช้กับวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนสามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งได้ เนื่องจากไมโครเวฟทำให้อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์สูงขึ้นอย่างรวดเร็ว (Paengkanya et al., 2015) น้ำในวัสดุอบแห้งเป็นตัวดูดซับพลังงานไมโครเวฟได้ดี ซึ่งน้ำ

เป็นโมเลกุลมีขั้วสามารถเหนี่ยวนำจากสนามไฟฟ้าให้มีการเปลี่ยนแปลงเชิงขั้วอย่างรวดเร็วตามความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ ทำให้สามารถเปลี่ยนพลังงานจลน์เป็นพลังงานความร้อนอย่างรวดเร็ว ซึ่งการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิส่งผลต่ออัตราการอบแห้งที่สูงขึ้นตามไปด้วย อีกทั้งยังสามารถลดการใช้พลังงานเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว (Varith et al., 2007; Kassem et al., 2011) นอกจากนี้ผลของการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนสามารถทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพทางด้านสีที่ดี (Alibas, 2006; Alibas, 2007) และการหดตัวของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งลดลง (Maskan, 2001) รวมทั้งคุณภาพการคืนตัวของผลิตภัณฑ์ที่ดี (Askari et al., 2009; Dev et al., 2011)

ปัจจุบันการอบแห้งด้วยไมโครเวฟแบบสายพานได้มีพัฒนาเพื่อใช้อุตสาหกรรม (Rattana-decho et al., 2008; Vongpradubchai and Rattanadecho, 2009; Prommas et al., 2012) เนื่องจากสามารถบ้อนวัสดุได้ครั้งละมากๆ อย่างต่อเนื่อง อีกทั้งยังทำให้วัสดุรับพลังงานไมโครเวฟอย่างสม่ำเสมอ การนำไมโครเวฟมาประยุกต์ใช้ในการอบแห้งจำเป็นต้องมีการออกแบบที่ดี เพื่อลดการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟที่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งจะเกิดจุดร้อนและจุดเย็นในเครื่องอบแห้งทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นการออกแบบระบบไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนจึงมีความซับซ้อน นอกจากนี้เครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงยังมีการรั่วไหลของคลื่นไมโครเวฟเนื่องจากเป็นระบบเปิด ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการติดตั้งตัวกันคลื่นซึ่งมีความซับซ้อนและต้องออกแบบให้เหมาะสมกับความยาวคลื่นและโหมดการทำงานของคลื่นไมโครเวฟ

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงต้นแบบที่มีการกระจายคลื่นที่สม่ำเสมอตลอดสายพานในเครื่องอบแห้งและมีความปลอดภัยตามมาตรฐาน The US Department of Health and Human Services (DHHS) โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำนายการกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยวิเคราะห์ในส่วนของสนามไฟฟ้าในห้องอบแห้ง ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดความร้อนในวัสดุ โดยมีความสัมพันธ์แสดงในสมการที่ 3 เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมของขนาดเครื่องอบแห้ง ซึ่งจะเป็นแนวทางในการออกแบบเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียง

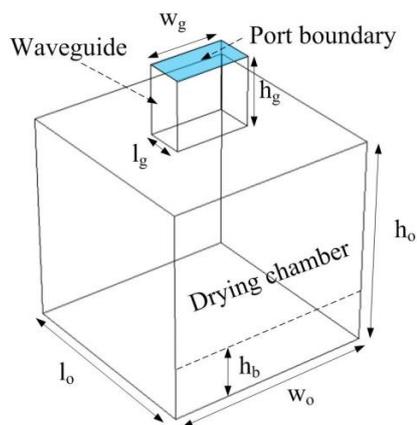
ระเบียบวิธีการวิจัย

ในการออกแบบจะพิจารณาการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิของโพลทภายในเครื่องอบแห้ง โดยใช้โปรแกรม COMSOL MULTIPHYSICS กำหนดขนาดแมกนีตรอนกำลังไมโครเวฟ 800 W ความถี่ 2.45 GHz ต่อกับท่อนำคลื่นมาตรฐาน WR430 ขนาดพื้นที่หน้าตัด 5.5×11 cm และยาว 10 cm ซึ่งใช้การวิเคราะห์ท่อนำคลื่นแบบ Rectangular และโหมดการแพร่กระจายของคลื่นแบบ TE_{10} (Transverse electric wave) ในงานวิจัยนี้ใช้ตัวกันคลื่นไมโครเวฟแบบ Corrugated filter เพื่อป้องกันการรั่วไหลของคลื่น

วิธีการออกแบบ

ในการศึกษานี้ใช้วิธีการทีละปัจจัย (One-factor at-a-time) (Wu and Hamada, 2009) ในการออกแบบโดยมีตัวแปรในการออกแบบคือ ความกว้าง ความสูง และความยาวของเครื่องอบแห้งรวมทั้งความสูงของสายพานจากระดับฐานห้องอบแห้ง ซึ่งขอบเขตของขนาดห้องอบแห้งในการวิเคราะห์อยู่ในช่วง 0.3-0.5 m ต่อไมโครเวฟ 1 ตัว สามารถเขียน

เป็นภาพสามมิติของเครื่องอบแห้งดังแสดงในรูปที่ 1 ขั้นตอนการออกแบบโดยเริ่มจากการออกแบบความสูงของเครื่อง หลังจากนั้นนำเงื่อนไขที่เหมาะสมมาออกแบบความยาวและความกว้างของเครื่องตามลำดับ โดยพิจารณาจากการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอภายในเครื่อง เมื่อได้เงื่อนไขขนาดของเครื่องอบแห้งที่เหมาะสมแล้ว จะนำไปวิเคราะห์ลักษณะการกระจายอุณหภูมิในโพลทแบบแผ่นกลมบางซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 mm และหนา 3 mm รวมทั้งเงื่อนไขของการขยายขนาดของเครื่องอบแห้งและตำแหน่งการติดตั้งสายพานที่เหมาะสมต่อไป



รูปที่ 1 ภาพสามมิติของแบบจำลองเรขาคณิต

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีสมมติฐานดังต่อไปนี้

- ค่าสมบัติไดอิเล็กตริก (Dielectric Properties) ของอากาศภายในห้องอบแห้งมีค่าคงที่
- ผนังทุกด้านของเครื่องอบแห้งเป็นตัวนำไฟฟ้าได้ดี (Perfect Conducting Wall)
- กำหนดให้มีการถ่ายโอนความร้อนภายในโพลทโดยการนำความร้อนเพียงอย่างเดียว

- คุณสมบัติของโพลีเมอร์ความร้อนและทางแม่เหล็กไฟฟ้าให้เหมือนกับน้ำ (วัสดุที่มีความชื้นสูง)

-ไม่มีการสูญเสียความร้อนระหว่างโพลีเมอร์กับอากาศ

สมการควบคุม (Governing equations) การวิเคราะห์สนามไฟฟ้า (E) ในเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟแบบสายพานลำเลียงต้นแบบที่ตำแหน่งต่างๆ หาได้จากสมการที่ 1 ซึ่งมาจากสมการแมกซ์เวลล์ที่อยู่ในรูปของ Time-harmonic

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

โดยที่ค่า k_0 คำนวณได้สมการที่ (2)

$$k_0 = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} = \frac{\omega}{c_0} \quad (2)$$

ในกรณีการวิเคราะห์แบบมีโพลีเมอร์จะต้องใช้วิธีคำนวณทางความร้อนมาเกี่ยวข้องซึ่งค่าความร้อนที่เกิดจากคลื่นไมโครเวฟภายในโพลีเมอร์สามารถหาได้จากสมการที่ 3 โดยคำนวณจากสนามไฟฟ้า (E)

$$Q_{MW} = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon_r' (\tan \delta) |\vec{E}|^2 \quad (3)$$

$$\text{โดย } \tan \delta = \epsilon'' / \epsilon' \quad (4)$$

ในการถ่ายเทความร้อนภายในโพลีเมอร์จะพิจารณาการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนเพียงอย่างเดียว ซึ่งจะได้สมการสมดุลทางความร้อนดังสมการที่ 5

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q_{MW} \quad (5)$$

เงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions)

ในการวิเคราะห์ที่ผิวผนังของเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟแบบสายพานลำเลียงต้นแบบเป็นตัวนำไฟฟ้าได้ดี (Perfect electric conductor) ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 6

$$\vec{n} \times \vec{E} = 0 \quad (6)$$

การพิจารณาทางด้านความร้อนของโพลีเมอร์ที่เงื่อนไขขอบเขตทางความร้อนจะพิจารณาที่ผิว

ของโพลีเมอร์นั้นและไม่มีการถ่ายเทความร้อนออกจากโพลีเมอร์ ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ 7

$$-\vec{n} \cdot (-k \nabla T) = 0 \quad (7)$$

คุณสมบัติของอากาศในห้องอบแห้งและโพลีเมอร์ซึ่งสมมติให้เป็นน้ำ (วัสดุความชื้นสูง) ใช้ค่าในโปรแกรม COMSOL ในการคำนวณ ยกเว้นค่าคุณสมบัติไดอิเล็กทริกซ์สัมพัทธ์ของโพลีเมอร์กับ 78-12j (กัสตูรีและคณะ, 2552)

การประมวลผล

ในการวิเคราะห์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) ซึ่งแบ่งเอลิเมนต์เป็นรูปทรงสี่หน้า (Tetrahedral) และกำหนดขนาดขนาดของเอลิเมนต์สูงสุดที่ 0.03 m ซึ่งจะได้จำนวนเอลิเมนต์จำนวนประมาณ 20,000-95,000 เอลิเมนต์ (Element) โดยในการคำนวณใช้คอมพิวเตอร์ซีพียู Intel(R) Core(TM) i7-3770@3.4 GHz และหน่วยความจำ (Ram) 32 GB

การวิเคราะห์สถิติ

การวิเคราะห์สถิติข้อมูลของการดูดซับพลังงานของน้ำในเครื่องอบแห้งใช้โปรแกรม SPSS (Version 13) ในการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) โดยใช้ Duncan's Test ในการวิเคราะห์ความแตกต่างของข้อมูล พิจารณาที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

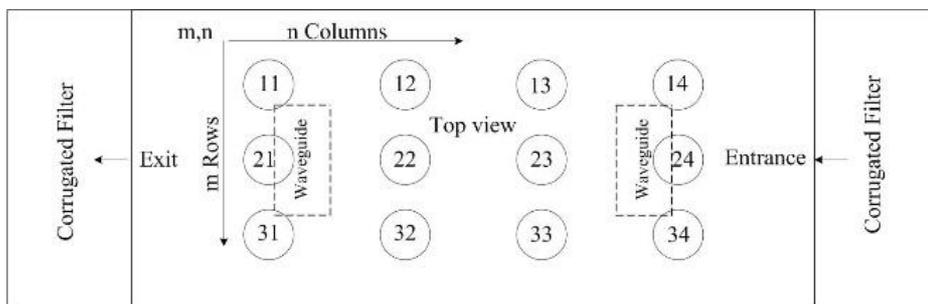
การทดสอบเครื่องอบแห้งและความปลอดภัย

การวิเคราะห์การกระจายตัวของคลื่นโดยการวัดพลังงานที่น้ำได้รับคลื่นไมโครเวฟในตำแหน่งต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยใช้สมการ (8) นำน้ำกลั่นใส่บีกเกอร์ขนาด 100 mL อุณหภูมิของน้ำวัดโดยเทอร์โมมิเตอร์แบบเส้นใยนำแสง (Fiber optic thermometer) (OMEGA, FOB 104) ซึ่งมีความแม่นยำ $\pm 0.8^\circ\text{C}$ การตรวจสอบความปลอดภัยของ

เครื่องอบแห้งโดยใช้เครื่องตรวจสอบการรั่วไหลของ ไมโครเวฟ (Microwave Leakage Detector) (RCME) โดยวัดที่ตำแหน่งทางเข้าและทางออกของสายพาน ซึ่ง

วัดห่างจากทางเข้าและทางออกสายพาน 5 cm ตามมาตรฐาน DHHS

$$P_{\text{abs}} = m_w C_p w \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (8)$$



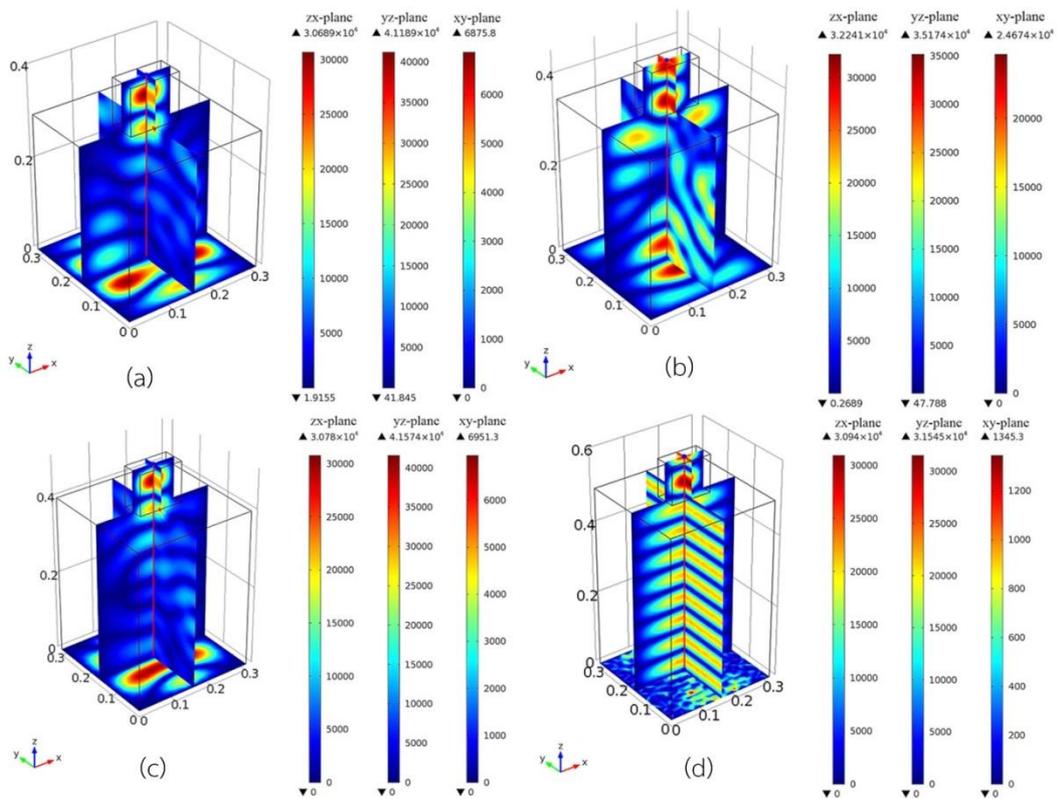
รูปที่ 2 ตำแหน่งการตรวจสอบการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟภายในห้องอบแห้ง

ผลและวิจารณ์ผล

วิเคราะห์สนามไฟฟ้า

เงื่อนไขในการออกแบบขนาดความสูงของเครื่องอบแห้งกำหนด คือ 0.30, 0.35, 0.40, 0.45 และ 0.50 m ซึ่งกำหนดขนาดความยาวและความกว้างเท่ากับ 0.30 m โดยวิเคราะห์การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าในห้องอบแห้งแบบไม่มีโหลด จากการวิเคราะห์พบว่า ความสูงของเครื่องที่แตกต่างกันจะทำให้การกระจายของสนามไฟฟ้ามีลักษณะแตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งจากการพิจารณาการกระจายของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในเงื่อนไขความสูง 0.50 m มีความเป็นไปได้ในการพัฒนาเป็นเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟแบบสายพานลำเลียงต้นแบบ เพราะคลื่นไมโครเวฟกระจายตัวเต็มพื้นที่ของสายพานและเกิดกระจายคลื่นที่สม่ำเสมอในตำแหน่งด้านล่างของ

วัสดุ โดยมีค่าสนามไฟฟ้ามากที่สุดในระนาบด้านล่าง (ระนาบ XY) เท่ากับ 1345.3 V/m ซึ่งเป็นค่าที่น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับขนาดความสูงของเครื่องที่เงื่อนไขอื่น ซึ่งค่าสนามไฟฟ้ามีผลต่อพลังงานความร้อนที่เกิดภายในวัสดุ ถ้าค่าสนามไฟฟ้ามีความแตกต่างกันน้อยก็ จะสามารถลดความแตกต่างด้านอุณหภูมิของวัสดุลงได้ หลังจากนั้นนำเงื่อนไขความสูงที่ 0.50 m นำไปออกแบบความกว้างและความยาวต่อไปตามลำดับ โดยกำหนดและพิจารณาเงื่อนไขเหมือนกับการออกแบบความสูง จากผลวิเคราะห์ของสนามไฟฟ้าพบว่า ขนาดความยาวและความกว้างที่เหมาะสมคือ 0.30 m ดังนั้นจากผลการวิเคราะห์ขนาดของเครื่องอบแห้งที่มีการกระจายคลื่นสม่ำเสมอต่อแมคเนตรอน 1 ตัว คือ ขนาดความกว้าง ความยาว ความสูง เท่ากับ 0.30 0.30 0.50 m ตามลำดับ (รูปที่ 3d)



รูปที่ 3 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้า (V/m) ที่เงื่อนไขความสูง 0.30(a) 0.35(b) 0.40(c) 0.50(d) m ความยาว 0.30 m และความกว้าง 0.30 m

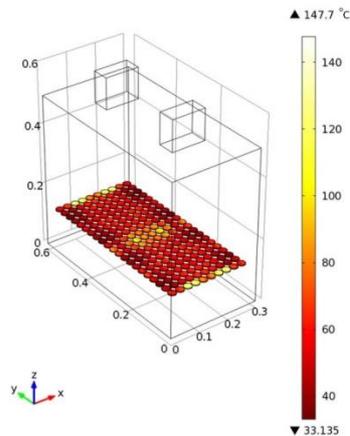
วิเคราะห์อุณหภูมิของโหนดในเครื่องอบแห้ง

การวิเคราะห์อุณหภูมิของโหนดใช้ขนาดของเครื่องอบแห้งที่เหมาะสมจากการวิเคราะห์สนามไฟฟ้ามาขยายขนาดของเครื่องโดยเพิ่มจำนวนแมคนิตรอนเป็น 2 ตัว ซึ่งจะได้ขนาดของเครื่องอบแห้งใหม่ที่มีขนาดความกว้าง ความยาว ความสูง คือ 0.30 0.60 0.50 m จากผลวิเคราะห์พบว่า การขยายขนาดของเครื่องอบแห้งอุณหภูมิของโหนดได้รับพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟยังมีความสม่ำเสมอแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งเป็นผลมาจากการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าที่ดีในการออกแบบขนาดเครื่องอบแห้งข้างต้น แต่บริเวณตรงกลางที่เป็นจุดเชื่อมต่อระหว่างแมคนิตรอน 2 ตัว เกิดจุดร้อนเกิดขึ้น อาจเป็นเพราะคลื่นจากแมคนิตรอนทั้ง

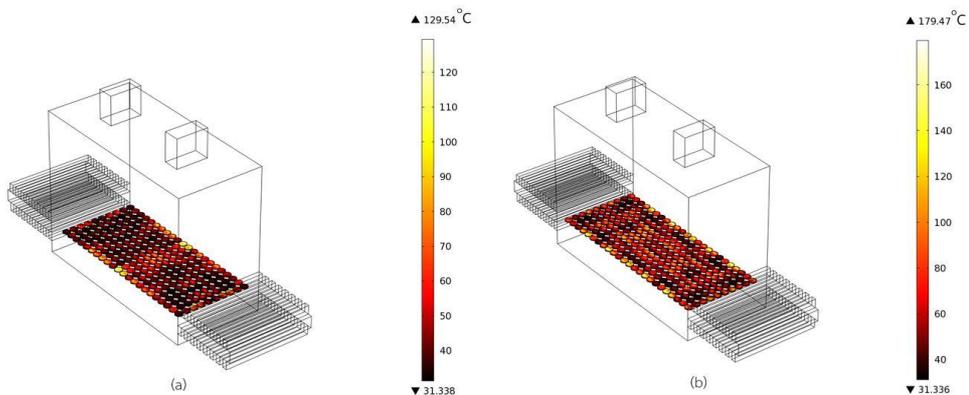
สองตัวเกิดการแทรกสอดกันจึงทำให้โหนดได้รับพลังงานมากกว่าบริเวณอื่นๆ ดังนั้นในการออกแบบจึงจำเป็นต้องขยายขนาดความยาวของเครื่องอบแห้งเพิ่มขึ้นเพื่อไม่ให้เกิดจุดร้อนของโหนดเกิดขึ้น จากปัญหาข้างต้นจึงได้กำหนดเงื่อนไขการออกแบบใหม่คือความยาว 0.64 0.66 0.68 0.70 m รวมทั้งเงื่อนไขการปรับเปลี่ยนความสูงของระดับสายพานจากระดับฐานห้องอบแห้ง 0.08 0.09 0.10 m ในขั้นตอนการออกแบบสุดท้ายนี้ได้ทำการติดตั้งตัวกันคลื่นไมโครเวฟเพื่อป้องกันไม่ให้คลื่นไมโครเวฟรั่วเกิดกว่ามาตรฐานที่กำหนด จากการวิเคราะห์พบว่า เงื่อนไขที่สามารถนำมาสร้างเครื่องอบแห้งได้ คือ ความกว้าง 0.30 m ความยาว 0.64 m ความสูง 0.50 m และระดับ

สายพาน 0.08 m (5a) และ ความกว้าง 0.30 m ความยาว 0.68 m ความสูง 0.50 m และระดับสายพาน 0.09 m (5b) ซึ่งแสดงในรูปที่ 6 แต่เมื่อพิจารณาอุณหภูมิเฉลี่ยพบว่า เจริญ 5a และ 5b มีอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 44.85°C และ 60.71°C

ตามลำดับ ซึ่งค่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่สูงกว่าจะทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งสูงขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกเงื่อนไข 5b เพื่อนำไปสร้างเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงต้นแบบ



รูปที่ 4 อุณหภูมิของไหลที่เงื่อนไขความกว้าง 0.30 m ความยาว 0.60 และความสูง 0.5 m



รูปที่ 5 อุณหภูมิของไหลที่เงื่อนไข (a) ความกว้าง 0.30 m ความยาว 0.64 m ความสูง 0.50 m ที่ความสูงของระดับสายพาน 0.08 m และ (b) ความกว้าง 0.30 m ความยาว 0.68 m ความสูง 0.50 m ที่ความสูงของระดับสายพาน 0.09 m

การสร้างเครื่องอบแห้ง

ผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้เงื่อนไขที่เหมาะสมคือ ขนาดความกว้าง ความยาว ความสูง และระดับสายพานจากระดับฐานห้องอบแห้ง เท่ากับ

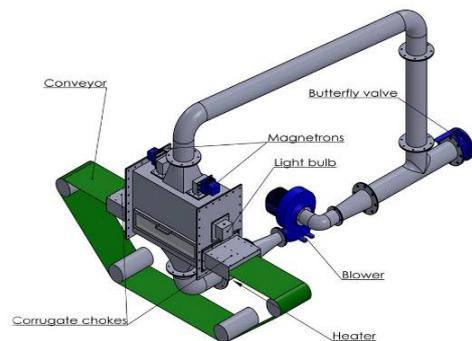
0.30 0.68 0.50 0.09 m ตามลำดับ ซึ่งสามารถนำไปสร้างเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงต้นแบบ (รูปที่ 6) โดยเครื่องอบแห้งติดตั้งแมคินีตรอนกำลัง 800 W จำนวน 2 ตัว

ร่วมกับระบบลมร้อนโดยใช้เครื่องเป่าลม (LDL, TB-0400) ขนาดกำลัง 0.4 W ซึ่งควบคุมอัตราการไหลของอากาศด้วยอินเวอร์เตอร์ (Fuji, FVR-E7S-EX) บังคับอากาศให้ผ่านขดลวดความร้อน (Heater) ขนาด 3 kW ซึ่งควบคุมด้วย PID (Omron, E5CN) ลมร้อนเคลื่อนที่ผ่านตะแกรงป้องกันคลื่นไมโครเวฟทางด้านล่างของห้องอบแห้งและกลับมาใช้ใหม่ได้ทางด้านบนของห้องอบแห้ง ซึ่งสามารถปรับอัตราส่วนการนำอากาศมาใช้ใหม่ได้ด้วยวาล์ว (Butterfly valve) การเคลื่อนที่ของสายพานควบคุมด้วยมอเตอร์ (Vexta, BLFM460-GFS) ขนาด 60 W ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนความเร็วได้ด้วยชุดควบคุมความเร็ว (Driver) (Vexta, BLFD60C2)

การทดสอบเครื่องอบแห้งและความปลอดภัย

ทดสอบการกระจายตัวของคลื่นไมโครเวฟโดยใช้การดูดซับพลังงานไมโครเวฟของน้ำที่ตำแหน่งต่างๆ ซึ่งไม่มีการเคลื่อนที่ของสายพาน จากตารางที่ 1 พบว่า การดูดซับพลังงานไมโครเวฟของน้ำในแต่ละตำแหน่งมีค่าระหว่าง 44.6-63.6 W ซึ่งความแตกต่างของการดูดซับพลังงานสามารถลดได้เมื่อมีการเคลื่อนที่ของสายพาน เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยของการดูดซับพลังงานของน้ำที่แถวต่างกันพบว่า ไม่มีความแตกต่างของการดูดซับพลังงานไมโครเวฟอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานมีความการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าที่เติมพื้นที่ของหน้าตัดสายพานซึ่ง

สอดคล้องกับผลของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แต่อย่างไรก็ตามบริเวณตรงกลางสายพานมีแนวโน้มที่รับพลังงานสูงกว่าตำแหน่งอื่นเล็กน้อย อาจเป็นเพราะมีตำแหน่งที่ตรงกับท่อนำคลื่น ในการทดสอบการรั่วไหลของคลื่นไมโครเวฟตรงตำแหน่งทางเข้าแล้วทางออกของสายพานพบว่า ความเข้มของสนามไฟฟ้าน้อยกว่า 5 mW/cm^2 ซึ่งมีความปลอดภัยตามมาตรฐานของ DHHS



รูปที่ 6 เครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงต้นแบบ

ตารางที่ 1 การดูดซับพลังงานไมโครเวฟของน้ำในตำแหน่งต่างๆ

Row	Microwave power absorption (W)				Average
	Column				
	1	2	3	4	
1	63.6±1.8 ^b	61.7±3.2 ^a	48.0±1.2 ^a	44.6±1.8 ^a	54.5±8.9 ^a
2	62.7±3.2 ^b	52.7±2.9 ^a	58.5±1.4 ^b	59.9±3.5 ^c	58.4±4.5 ^a
3	55.0±1.2 ^a	61.5±1.1 ^b	45.5±1.4 ^a	52.5±1.1 ^b	53.6±6.1 ^a

^aอักษรที่อยู่คอลัมน์เดียวกันที่เหมือนกันจะไม่มี ความแตกต่างกันในทางสถิติที่ $p < 0.05$

สรุปผลการทดลอง

จากการออกแบบเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียงต้นแบบ โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายสนามไฟฟ้ารวมทั้งวิเคราะห์ห่อหุ้มของไหลมาช่วยในการออกแบบขนาดเครื่องอบแห้งพบว่า ในการเปลี่ยนแปลงขนาดของเครื่องอบแห้งทั้งความกว้าง ความยาว และความสูงมีผลต่อลักษณะการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิของไหล ในกรณีของการออกแบบสำหรับแม่คั้นตรอน 1 ตัว เงื่อนไขที่ความกว้าง 0.30 m ความยาว 0.3 m และความสูง 0.50 m มีการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ เงื่อนไขที่เหมาะสมในกรณีการขยายขนาดของเครื่องอบแห้งคือ ความกว้าง ความยาว และความสูงของเครื่องอบแห้งเท่ากับ 0.30 0.68 0.50 m ตามลำดับ โดยมีตำแหน่งการติดตั้งสายพานที่ระดับความสูงจากระดับฐานของห้องอบแห้ง 0.09 m การทดสอบเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนต้นแบบ จากผลการออกแบบพบว่า การกระจายของคลื่นไมโครเวฟเต็มพื้นที่หน้าตัดของสายพานสอดคล้องกับแบบจำลอง และมีการรั่วไหลของคลื่นไมโครเวฟอยู่ในมาตรฐานความปลอดภัย DHHS

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนงานวิจัยจากโครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก (คปก.) (Grant No. PHD/0015/2555) โดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ร่วมกับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (มจธ.) โครงการทุนนักวิจัยวิจัยแกนนำ (Grant No. P-10-10308) โดยสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) และโครงการทุนศาสตราจารย์วิจัยดีเด่น (Grant No. DPG5980004) โดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และขอขอบคุณคณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ ที่สนับสนุนโปรแกรมสำเร็จรูป COMSOL Multiphysics

เอกสารอ้างอิง

- กัสตุรี เจ๊ะนิ, มุสตาฟา ยะภา และผดุงศักดิ์ รัตเดโช. (2552). การจำลองการกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและอุณหภูมิภายในควิวิต์แบบ 3 มิติ สำหรับการทำความร้อนโดยใช้ไมโครเวฟ. การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์: สาขาสถาปัตยกรรมและวิศวกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 47. กรุงเทพฯ. 400-407.
- Alibas, I. (2006). Characteristics of chard leaves during microwave, convective and combined microwave-convective drying. *Drying Technology* 24(11): 1425-1435.

- Alibas, I. (2007). Microwave, air and combined microwave-air-drying parameters of pumpkin slices. *LWT-Food Science and Technology* 40(8): 1445-1451.
- Askari, G.R., Emam-Djomeh, Z., and Mousavi, S.M. (2009). An investigation of the effects of drying methods and conditions on drying characteristics and quality attributes of agricultural products during hot air and hot air/microwave-assisted dehydration. *Drying Technology* 27(7): 831-841.
- Dev, S.R.S., Geetha, P., Orsat, V., Gariépy, Y., and Raghavan, G.S.V. (2011). Effects of microwave-assisted hot air drying and conventional hot air drying on the drying kinetics, color, rehydration, and volatiles of *Moringa oleifera*. *Drying Technology* 29(12): 1452-1458.
- Kassem, A.S., Shokr, A.Z., El-Mahdy A.R., Aboukarima A.M. and Hamed E.Y. (2011). Comparison of drying characteristics of thompson seedless grapes using combined microwave oven and hot air drying. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences* 10(1): 33-40.
- Maskan, M. (2001). Drying shrinkage and rehydration characteristics of kiwifruits during hot air and microwave drying. *Journal of Food Engineering* 48(2): 177-182.
- Paengkanya, S., Soponronnarit, S. and Nathakaranakule, A. (2015). Application of microwaves for drying of durian chips. *Food and Bioproducts Processing* 96: 1-11.
- Prommas, R., Rattanadecho, P. and Jindarat, W. (2012). Energy and exergy analyses in drying process of non-hygroscopic porous packed bed using a combined multi-feed microwave-convective air and continuous belt system (CMCB). *International Communications in Heat and Mass Transfer* 39(2): 242–250.
- Rattanadecho, P., Suwannapum, N., Chatveera, B., Atong, D., and Makul N. (2008). Development of compressive strength of cement paste under accelerated curing by using a continuous microwave thermal processor. *Materials Science and Engineering: A* 472(1-2): 299–307.
- US Department of Health and Human Services. (2014). Microwave Oven Safety Standard. Available at: <http://www.fda.gov>. Accessed 11 May 2016.
- Varith, J., Dijknarakul, P., Achariyaviriya, A. and Achariyaviriya, S. (2007). Combined microwave-hot air drying of peeled longan. *Journal of Food Engineering* 81(2): 459-468.
- Vongpradubchai, S., and Rattanadecho, P. (2009). The microwave processing of wood using a continuous microwave belt drier. *Chemical Engineering and Processing* 48(5): 997–1003.
- Wu, C.F.J and Hamada, M.S. (2009). Experiment: planning, analysis, and optimization. New Jersey: A John Wiley & Son. PP. 173-176.

