

การวิเคราะห์เชิงทฤษฎีของการถ่ายเทความร้อน มวลสาร
และความดันในวัสดุพูนที่ไม่อ้อมตัวภายใต้พลังงานไมโครเวฟ
(อิทธิพลของขนาดอนุภาค ความเข้มของสนามไฟฟ้า และความถี่ไมโครเวฟ)

ศโรภิตา สังข์สุนทร¹ และ ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช^{2*}

หน่วยวิจัยเพื่อการใช้ประโยชน์จากไมโครเวฟในงานวิศวกรรม (RCME)

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต คลองหลวง ปทุมธานี 12121

รับเมื่อ 30 ตุลาคม 2549 ตอบรับเมื่อ 22 พฤษภาคม 2550

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ เป็นการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีที่สมบูรณ์ของการถ่ายเทความร้อน มวลสารและความดันในวัสดุพูนที่ไม่อ้อมตัวภายใต้พลังงานจากคลื่นไมโครเวฟ โดยอิทธิพลของความดันที่เกิดขึ้นภายใน วัสดุพูนที่ไม่อ้อมตัวระหว่างกระบวนการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นได้มาจากการแก้ปัญหาคู่สมการเชิงตัวเลขโดยวิธีไฟไนต์วอลุ่ม การวิเคราะห์แบบจำลองพิจารณาถึง สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางอุณหพลศาสตร์ สมบัติการส่งผ่าน สมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุพูนที่ไม่อ้อมตัว (ประกอบด้วยอนุภาคของเม็ดแก้ว น้ำ และอากาศ) ซึ่งข้อมูลได้จากการทดลองและจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ผลการวิจัยพบว่า การเปลี่ยนแปลงของอนุภาค ความเข้มของสนามไฟฟ้า และความถี่ไมโครเวฟ มีผลต่อปรากฏการณ์ของการถ่ายเทความร้อนและมวลสารโดยรวมเป็นอย่างมากและอิทธิพลของแรงดันคาพิลลารีมีผลอย่างยิ่งต่อการกระจายความชื้น ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปเป็นข้อมูลพื้นฐานต่อการทำความเข้าใจกระบวนการอบแห้งวัสดุพูนที่ไม่อ้อมตัวโดยใช้ไมโครเวฟได้รวมทั้งใช้ในการออกแบบระบบจริงในทางปฏิบัติ

คำสำคัญ : วัสดุพูนไม่อ้อมตัว / ขนาดของอนุภาค / ความเข้มของสนามไฟฟ้า / ความถี่ไมโครเวฟ

¹ นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

² รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

* ผู้รับผิดชอบบทความ: E-mail : ratphadu@engr.tu.ac.th

Theoretical Analysis of Heat-Mass Transport and Pressure in Unsaturated Porous Material: Under Microwave Energy (Influence of Particle Size, Electric Field Intensity and Frequency)

Sopida Sungsoontorn¹ and Phadungsak Ratanadecho^{2*}

Research Center of Microwave Utilization in Engineering (RCME)
Thammasat University, Rangsit Campus, Klong Luang, Pathum Thani 12121

Received 30 October 2006 ; accepted 22 May 2007

Abstract

In this study, a multiphase porous media model was developed to predict heat transfer and moisture transport during microwave drying of unsaturated porous material. A total gas pressure equation was introduced to address internal vapor generation in microwave drying. The resulting governing equations were numerically solved with the finite volume method. All the physical, thermodynamic, thermal, transport, and dielectric properties used in the simulation were for unsaturated porous material (composed of glass beads, water and air) and were either from our measurements or from the literature. The results showed that variation of particle size, electric field intensity and frequency gave strong effect on overall drying kinetics. The moisture profile in the unsaturated porous material suggests the importance of capillary flow in microwave drying. The results could provide a basis for fundamental understanding of microwave drying of unsaturated porous materials and they could be applied as a useful tool for exploring practical problems.

Keywords : Unsaturated Porous Material / Particle Size / Electric Field Intensity / Frequency

¹ Graduate Student, Department of Mechanical Engineering.

² Associate Professor, Department of Mechanical Engineering.

* Corresponding author : E-mail: ratphadu@engr.tu.ac.th

1. บทนำ

ในอดีตที่ผ่านมา การศึกษากระบวนการถ่ายเทความร้อน มวลสารและความดัน ในระดับจุลภาคนั้นยังมีการศึกษาวิจัยกันน้อย โดยเฉพาะการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีในวัสดุพอร์ที่ไม่อิ่มตัว ที่อธิบายถึงการเปลี่ยนขนาดของอนุภาค ความเข้มของสนามไฟฟ้าและความถี่ไมโครเวฟ ทิศทางอิทธิพลของความดันที่เกิดขึ้นภายในวัสดุพอร์ระหว่างกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสาร ซึ่งที่ผ่านมาได้มีการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการถ่ายเทความร้อน มวลสาร และความดันดังนี้ งานวิจัยของ Boukadida et al. [1] และ Wang et al. [2] ได้ทำการทดลองและสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนและมวลของวัสดุพอร์เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิความดันก๊าซและความชื้นของอากาศต่อการอบแห้งแต่ไม่ได้ใช้ไมโครเวฟ และเน้นที่การทดลอง Ratanadecho et al. [3] ได้ศึกษากระบวนการถ่ายเทความร้อน มวลสาร และการทำละลายของวัสดุพอร์ในระบบสองมิติเพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟ โดยทำการทดลองและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Feng et al. [4] สร้างแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนและมวลสารของกระบวนการอบแห้งโดยใช้ระบบไมโครเวฟร่วมกับสเปาเต็ดเบด ซึ่งใช้ Scaling Technique และวิธีผลต่างสืบเนื่อง (Finite difference method) ในการสร้างแบบจำลองที่ทำนายระดับของอุณหภูมิ ความชื้นและความดันพบว่า การถ่ายเทความร้อนเนื่องจากอิทธิพลของแรงดันในระบบนี้ส่งผลให้อัตราการอบแห้งสูง Ratanadecho [5] ได้ทำการทดลองและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษากระบวนการถ่ายเทความร้อนในการบ่มไม้โดยใช้ระบบไมโครเวฟ ศึกษาถึงอิทธิพลของความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ และขนาดของชั้นทดสอบ Ni et al. [6] สร้างแบบจำลองของตัวกลางที่มีรูพอร์แบบหลายเฟสเพื่อทำนายการถ่ายเทความร้อนระหว่างการให้ความร้อนกับวัสดุที่มีความชื้นต่ำและวัสดุที่มีความชื้นสูงด้วยไมโครเวฟ พบว่าไมโครเวฟจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายใน และช่วยให้มี

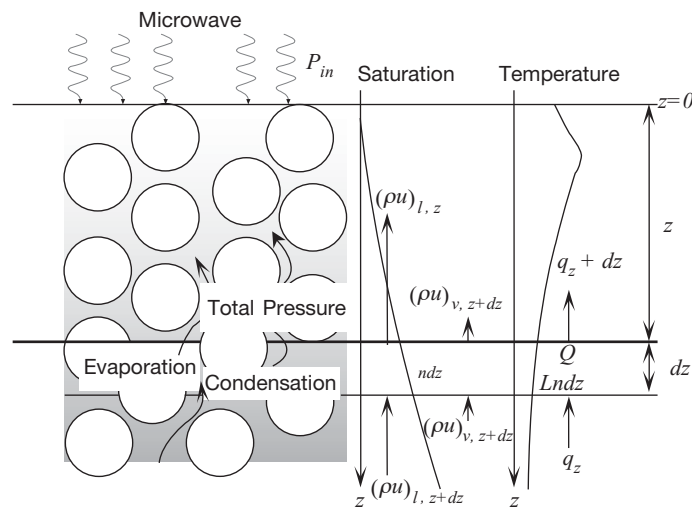
การถ่ายเทความร้อนมากขึ้น Ratanadecho et al. [7] ทำการศึกษาทั้งทฤษฎีและการทดลองของกระบวนการอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟในวัสดุพอร์ที่ไม่อิ่มตัว โดยศึกษาเน้นในเรื่องการถ่ายเทความร้อนและความชื้น การแพร่ของไอน้ำในระบบ 1 มิติ พบว่าวัสดุพอร์ที่มีอนุภาคขนาดเล็กจะมีแรงดันคาพิลลารีสูงกว่าทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่าวัสดุพอร์ที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ แต่อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ไม่ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของความดันก๊าซ กำลัง และความถี่ไมโครเวฟ Ratanadecho et al. [8] ทำการศึกษากระบวนการอบแห้งวัสดุพอร์ชนิดคาพิลลารีที่มีหลายชั้นโดยใช้ไมโครเวฟ เพื่อศึกษาถึงการกระจายของสนามไฟฟ้า ความชื้นและอุณหภูมิในระบบ 2 มิติ พบว่าวัสดุพอร์ที่มีอนุภาคขนาดเล็กจะมีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนได้สูงกว่าวัสดุพอร์ที่มีอนุภาคขนาดใหญ่และพบว่าการจัดเรียงชั้นวัสดุตัวอย่างมีผลต่อการถ่ายเทความร้อน

ที่ผ่านมาในงานวิจัยส่วนใหญ่จะเน้นการกระจายอุณหภูมิ ความชื้น และความดัน เป็นส่วนใหญ่ แต่การศึกษากลับมาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างของวัสดุพอร์ (ขนาดอนุภาคหรือรูพอร์) ความเข้มของสนามไฟฟ้าและความถี่ไมโครเวฟนั้นยังไม่มีการศึกษาอย่างเป็นระบบ โดยงานวิจัยนี้มุ่งศึกษาถึงอิทธิพลของการเปลี่ยนขนาดของอนุภาค ความเข้มของสนามไฟฟ้าและความถี่ไมโครเวฟที่มีผลต่อปรากฏการณ์ของกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพอร์ที่ไม่อิ่มตัวภายใต้พลังงานจากคลื่นไมโครเวฟอย่างสมบูรณ์นอกจากนี้ อิทธิพลของความดันในวัสดุจะถูกนำมาพิจารณาด้วย

2. วิธีการวิจัย

2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากรูปที่ 1 แสดงถึงแบบจำลองทางกายภาพของการวิเคราะห์กระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพอร์ที่ไม่อิ่มตัวโดยใช้ไมโครเวฟ ซึ่งวัสดุพอร์ที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย 3 เฟส คือ เม็ดแก้ว (Glass beads) น้ำ และอากาศ



รูปที่ 1 แบบจำลองทางกายภาพสำหรับวิเคราะห์กระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสาร ในวัสดุพอรุนที่ไม่อิมตัวโดยใช้ไมโครเวฟ [7]

โดยอัตราการกำเนิดปริมาณความร้อนภายใน (Local volumetric heat generation) หรือความหนาแน่นของพลังงานไมโครเวฟที่ถูกดูดซับ (Density of microwave power absorbed) ดังสมการ [7]

$$Q = -\frac{P}{z} dz = 2\alpha P dz \cdot 2\pi f \epsilon (\tan \delta) E^2 e^{-2\alpha z} \tag{1}$$

โดยที่ α คือ Attenuation Constant ซึ่งคำนวณได้จาก

$$\alpha = 2\pi f \sqrt{\frac{\epsilon_0 \epsilon_r \mu_0}{2} (\sqrt{\tan^2 \delta + 1} - 1)} = \frac{2\pi f}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_r}{2} (\sqrt{\tan^2 \delta + 1} - 1)} \tag{2}$$

ในงานวิจัยนี้กำหนดให้สมบัติไดอิเล็กตริกเป็นฟังก์ชันของความชื้นและอุณหภูมิ การวิเคราะห์นั้นจะใช้ทฤษฎีของ Surrounding Mixing Formulas [9] ซึ่งลัดส่วนเชิงปริมาตร (V) ของความอิมตัวของน้ำ ไอ น้ำ และอนุภาคของเม็ดแก้ว ถูกนำมาพิจารณาดังต่อไปนี้ [7]

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \tag{3}$$

2.1.1 การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน มวลสาร และความดัน (Analysis of heat - mass transport and pressure gradient)

ในงานวิจัยครั้งนี้จะทำการวิเคราะห์จากรูปที่ 1 ซึ่งกลไกสำคัญในการเคลื่อนที่ของความชื้นระหว่างกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพอรุนที่ไม่อิมตัวโดยใช้ไมโครเวฟ คือ เกรเดียนของความดันคาพิลลารีและแรงโน้มถ่วงของโลกซึ่งอาจจะเสริมหรือหน่วงการเคลื่อนตัวของของไหล ขณะที่เกรเดียนของความดันบางส่วนของการระเหยนั้นเกี่ยวข้องกับการไหล

ของไอสมมติฐานที่ใช้ในแบบจำลองของกระบวนการถ่าย
ความร้อน มวลสาร และความดัน มีดังนี้

1. วัสดุพูนที่พิจารณาเป็นชนิดคาพิว-
ลารีและเป็นวัตถุคงรูปไม่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นภายใน
2. แพคเบตของวัสดุพูนมีความสมดุล
ทางเทอร์โมไดนามิกส์
3. ที่บริเวณด้านบนแพคเบตพิจารณา
เป็นขอบเขตเปิด
4. การกระจายสนามไฟฟ้า อุณหภูมิ
และการเคลื่อนย้ายความชื้น สมมติให้เป็น 1 มิติ

2.1.2 สมการถ่ายเทความร้อน (Heat trans- port equation)

ปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนภายใน
วัสดุพูนสามารถอธิบายโดยสมการอนุรักษ์พลังงานซึ่ง
จะรวมเทอมของการดูดซับพลังงานไมโครเวฟเข้าไปด้วย
โดยอยู่ในเทอมของความหนาแน่นของพลังงานความร้อน
ที่ผลิตขึ้นภายในวัสดุ ซึ่งอธิบายการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิใน
ชั้นทดสอบที่ขึ้นกับเวลาโดยพิจารณาสมการเหล่านี้ใน
ลักษณะ 1 มิติ จาก Darcy's Law, Fick's Law ทำให้ได้
สมการที่ควบคุมกระบวนการถ่ายเทความร้อนดังนี้

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left((\rho_l C_{pl} \phi s + ((\rho C_p)_a + (\rho C_p)_v) \phi (1-s) + \rho_p C_{pp} (1-\phi)) T \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left((\rho_l C_{pl} w_l + (\rho_a C_{pa} + \rho_v C_{pv}) w_g \right) T \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \\ & - H_v \left(\frac{\partial}{\partial t} (\rho_v \phi (1-s)) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho_v \frac{KK_{rg}}{\mu_g} \left(-\frac{\partial P_g}{\partial z} + \rho_g g_z \right) - \rho_g D_m \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\rho_v}{\rho_g} \right) \right) \right) + Q \end{aligned} \quad (4)$$

เมื่อ

$$(\rho C_p)_T = \rho_l C_{pl} \phi s + ((\rho C_p)_a + (\rho C_p)_v) \phi (1-s) + \rho_p C_{pp} (1-\phi)$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left((\rho C_p)_T T \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left((\rho_l C_{pl} w_l + (\rho_a C_{pa} + \rho_v C_{pv}) w_g \right) T \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \\ & - H_v \left(\frac{\partial}{\partial t} (\rho_v \phi (1-s)) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho_v \frac{KK_{rg}}{\mu_g} \left(-\frac{\partial P_g}{\partial z} + \rho_g g_z \right) - \rho_g D_m \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\rho_v}{\rho_g} \right) \right) \right) + Q \end{aligned} \quad (5)$$

2.1.3 สมการถ่ายเทมวลสาร (Mass trans- port equation)

ปรากฏการณ์การถ่ายเทมวลสารภายใน
วัสดุพูนสามารถอธิบายโดยสมการอนุรักษ์มวลสำหรับน้ำ

ทั้งในรูปแบบของเหลวและไอน้ำ (สมการที่ 5.9 และ 5.10 ตาม
ลำดับ) โดยพิจารณาสมการเหล่านี้ในลักษณะ 1 มิติ และ
จาก Darcy's Law และ Fick's Law ทำให้ได้สมการที่
ควบคุมกระบวนการถ่ายเทมวลสารดังนี้

$$\phi \frac{\partial}{\partial t} (s + Y_v (I - s)) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{KK_{rl}}{\mu_l} \left(\frac{\partial P_c}{\partial z} - \frac{\partial P_g}{\partial z} + g_z \right) + Y_v \frac{KK_{rg}}{\mu_g} \left(-\frac{\partial P_g}{\partial z} + \rho_g g_z \right) - Y_g D_m \frac{\partial}{\partial z} (W_v) \right) = 0 \quad (6)$$

โดยที่ $\frac{\rho_v}{\rho_l} = Y_v, \frac{\rho_g}{\rho_l} = Y_g, \frac{Y_v}{Y_g} = W_v$

2.1.4 สมการความดันรวม (Total pressure equation)

ปรากฏการณ์ของความดันภายในวัสดุพรุนสามารถอธิบาย โดย Darcy's Law และ Fick's Law

โดยสมมติให้ก๊าซมีสมบัติเป็นก๊าซในอุดมคติ สามารถจัดรูปใหม่ดังนี้

$$\phi \frac{\partial}{\partial t} (Y_a (I - s)) + \frac{\partial}{\partial z} \left(Y_a \frac{KK_{rg}}{\mu_g} \left(-\frac{\partial P_g}{\partial z} + \rho_g g_z \right) - Y_g D_m \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\rho_a}{\rho_g} \right) \right) = 0 \quad (7)$$

โดยที่ $\frac{\rho_a}{\rho_l} = Y_a$

2.1.5 เงื่อนไขขอบเขตและเงื่อนไขเริ่มต้น (Boundary and initial condition)

เงื่อนไขขอบเขต คือ เงื่อนไขสำหรับขอบเขตเปิด (open boundary) โดยเงื่อนไขขอบเขตสำหรับการแลกเปลี่ยนพลังงานและมวลที่ขอบเขตเปิดสามารถเขียนได้ดังสมการต่อไปนี้

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = h_c (T - T_a) \quad (8)$$

$$\rho_l w_l + \rho_v w_v = h_m (\rho_v - \rho_{va}) \quad (9)$$

การพิจารณาเงื่อนไขขอบเขตที่ขอบเขตปิด (symmetry-impermeable) ซึ่งก็คือขอบเขตที่ไม่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนและมวลเกิดขึ้นสามารถเขียนด้วยสมการต่อไปนี้

$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0, \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (10)$$

2.2 วิธีการหาผลเฉลย

จากสมการถ่ายเทความร้อน มวลสาร และความดัน (สมการที่ 5 ถึง 7 ตามลำดับ) ทำการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม (finite volume method) [10] สำหรับตำแหน่งโหนดภายใน (internal node) ได้ดังนี้

สมการถ่ายเทความร้อน

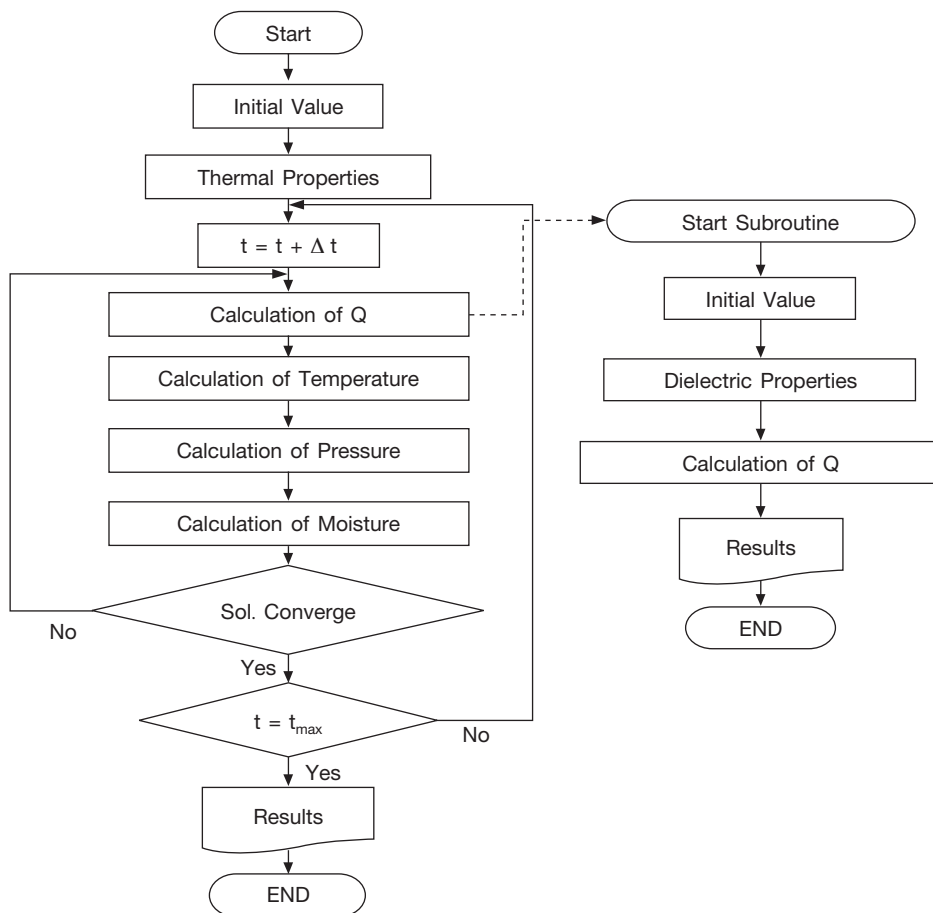
$$\begin{aligned} & \frac{(\rho C_p)_{T_k}^{n+1} T_k^{n+1} - (\rho C_p)_{T_k}^n T_k^n}{\Delta t} + \frac{\rho_l C_{pl}}{\Delta z} (w_{lk}^{n+1} T_k^{n+1} - w_{lk-1}^{n+1} T_{k-1}^{n+1}) + \frac{(\rho C_p)_{av}}{\Delta z} (w_{gk}^{n+1} T_k^{n+1} - w_{gk-1}^{n+1} T_{k-1}^{n+1}) \\ & - \frac{I}{\Delta z} \left(\lambda_{k+\frac{1}{2}}^{n+1} \left(\frac{T_{k+1}^{n+1} - T_k^{n+1}}{\Delta z} \right) - \lambda_{k-\frac{1}{2}}^{n+1} \left(\frac{T_k^{n+1} - T_{k-1}^{n+1}}{\Delta z} \right) \right) + \frac{H_v \rho_v \phi}{\Delta t} ((1 - s_{ir}) (s_{ek}^{n+1} - s_{ek}^n)) \\ & - \frac{I}{\Delta z} \left(\left(\rho_{vk}^{n+1} \frac{KK_{rg}}{\mu_g} \Big|_{k+\frac{1}{2}} \left(- \left(\frac{P_{gk+1}^{n+1} - P_{gk}^{n+1}}{\Delta z} \right) + \rho_g g_z \right) - \rho_{vk-1}^{n+1} \frac{KK_{rg}}{\mu_g} \Big|_{k-\frac{1}{2}} \left(- \left(\frac{P_{gk}^{n+1} - P_{gk-1}^{n+1}}{\Delta z} \right) + \rho_g g_z \right) \right) \right) \\ & - \frac{I}{\Delta z} \left(- \left(\rho_{gk}^{n+1} D_{mk+\frac{1}{2}}^{n+1} \left(\frac{\left(\frac{\rho_v}{\rho_g} \right)_{k+1}^{n+1} - \left(\frac{\rho_v}{\rho_g} \right)_k^{n+1}}{\Delta z} \right) - \rho_{gk-1}^{n+1} D_{mk-\frac{1}{2}}^{n+1} \left(\frac{\left(\frac{\rho_v}{\rho_g} \right)_k^{n+1} - \left(\frac{\rho_v}{\rho_g} \right)_{k-1}^{n+1}}{\Delta z} \right) \right) \right) \\ & - Q = 0 \end{aligned}$$

สมการถ่ายเทมวลสาร

$$\begin{aligned} & \frac{\phi}{\Delta t} (1 - s_{ir}) (s_{ek}^{n+1} - s_{ek}^n) + (Y_{vk}^{n+1} (1 - s_{ek}^{n+1}) - Y_{vk}^n (1 - s_{ek}^n)) \\ & + \frac{I}{\Delta z} \left(\left(\frac{KK_{rl}}{\mu_l} \Big|_{k+\frac{1}{2}} \left(\left(\frac{P_{ck+1}^{n+1} - P_{ck}^{n+1}}{\Delta z} \right) - \left(\frac{P_{gk+1}^{n+1} - P_{gk}^{n+1}}{\Delta z} \right) + g_z \right) - \frac{KK_{rl}}{\mu_l} \Big|_{k-\frac{1}{2}} \left(\left(\frac{P_{ck}^{n+1} - P_{ck-1}^{n+1}}{\Delta z} \right) - \left(\frac{P_{gk}^{n+1} - P_{gk-1}^{n+1}}{\Delta z} \right) + g_z \right) \right) \right) \\ & + \frac{I}{\Delta z} \left(Y_{vk}^{n+1} \left(\frac{KK_{rg}}{\mu_g} \Big|_{k+\frac{1}{2}} \left(- \left(\frac{P_{gk+1}^{n+1} - P_{gk}^{n+1}}{\Delta z} \right) + \rho_g g_z \right) - \frac{KK_{rg}}{\mu_g} \Big|_{k-\frac{1}{2}} \left(- \left(\frac{P_{gk}^{n+1} - P_{gk-1}^{n+1}}{\Delta z} \right) + \rho_g g_z \right) \right) \right) \\ & - Y_{gk}^{n+1} \left(D_{mk+\frac{1}{2}}^{n+1} \left(\frac{W_{vk+1}^{n+1} - W_{vk}^{n+1}}{\Delta z} \right) - D_{mk-\frac{1}{2}}^{n+1} \left(\frac{W_{vk}^{n+1} - W_{vk-1}^{n+1}}{\Delta z} \right) \right) \\ & = 0 \end{aligned}$$

สมการความดันรวม

$$\frac{\phi}{\Delta t} \left((1 - s_{ir}) (Y_{ak}^{n+1} (1 - s_{ek}^{n+1}) - Y_{ak}^n (1 - s_{ek}^n)) \right) + \frac{1}{\Delta z} \left(Y_{ak}^{n+1} \left(\frac{KK_{rg}}{\mu_g} \right)_{k+\frac{1}{2}} \left(- \left(\frac{P_{gk+1}^{n+1} - P_{gk}^{n+1}}{\Delta z} \right) + \rho_g g_z \right) - \frac{KK_{rg}}{\mu_g} \right)_{k-\frac{1}{2}} \left(- \left(\frac{P_{gk}^{n+1} - P_{gk-1}^{n+1}}{\Delta z} \right) + \rho_g g_z \right) \right) - Y_{gk}^{n+1} \left(D_{mk+\frac{1}{2}}^{n+1} \left(\frac{\left(\frac{\rho_a}{\rho_g} \right)_{k+1}^{n+1} - \left(\frac{\rho_a}{\rho_g} \right)_k^{n+1}}{\Delta z} \right) - D_{mk-\frac{1}{2}}^{n+1} \left(\frac{\left(\frac{\rho_a}{\rho_g} \right)_k^{n+1} - \left(\frac{\rho_a}{\rho_g} \right)_{k-1}^{n+1}}{\Delta z} \right) \right) \right) = 0$$



รูปที่ 2 รายละเอียดของแผนผังและวิธีการคำนวณสำหรับกระบวนการทางระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

จากโดยรายละเอียดของแผนผังและวิธีการคำนวณ สำหรับกระบวนการเชิงตัวเลขนั้นเริ่มต้นจากการรับค่าเริ่มต้นและสมบัติต่างๆ ซึ่งจะกำหนดให้ลำดับเวลา (time step) เพิ่มขึ้นเป็น Δt โดยมีการเปลี่ยนค่าไหนของความชื้นและอุณหภูมิในแต่ละเวลาที่เพิ่มขึ้นซึ่งจะทำซ้ำเช่นนี้จนกระทั่งค่าที่ได้เข้าสู่ผลลัพธ์ (convergence) ซึ่งใช้วิธีของ Newton-Raphson สำหรับกระบวนการทำซ้ำ (iteration) ในคำนวณค่าอัตราการดูดกลืนพลังงานได้จากการคำนวณของ Subroutine Q ซึ่งรับค่าเริ่มต้นและสมบัติไดอิเล็ก-

ตริกของวัสดุพูนแล้วทำการคำนวณค่าอัตราการดูดกลืนพลังงาน จากนั้นจึงคำนวณค่าอุณหภูมิ ความดัน และความชื้น ตามลำดับ แล้วตรวจสอบค่าที่ได้ว่ามีค่าน้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่กำหนดไว้หรือไม่ ถ้ามีค่ามากกว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่มากที่สุดที่ยอมรับได้ในกระบวนการ Iteration (คือ 10^{-5}) จะทำการวนกลับไปทำซ้ำ ณ เวลาเดิม แต่ถ้ามีค่าน้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่กำหนดไว้ จึงเข้าสู่การตรวจสอบเวลาว่ามีค่าถึงเวลาที่กำหนดไว้หรือไม่

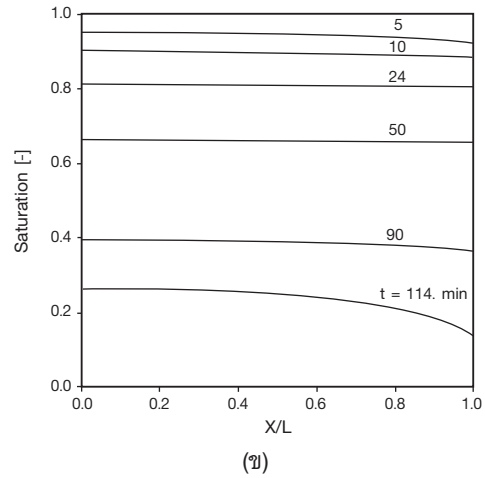
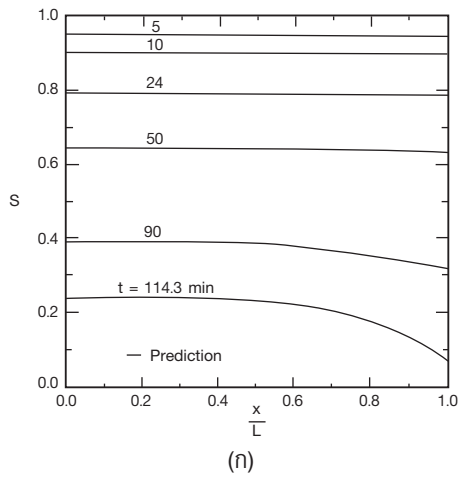
ตารางที่ 1 ข้อมูลสมบัติทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและสมบัติกายภาพทางความร้อน

$\epsilon_0 = 8.85419 \times 10^{-12}$ [F/m]	$\mu_0 = 4.0 \pi \times 10^{-7}$ [H/m]	
$\epsilon_{ra} = 1.0$	$\epsilon_{rp} = 5.1$	
$\mu_{ra} = 1.0$	$\mu_{rp} = 1.0$	$\mu_{rl} = 1.0$
$\tan \delta_a = 0.0$	$\tan \delta_p = 0.1$	
$\rho_a = 1.205$ [kg/m ³]	$\rho_p = 2,500$ [kg/m ³]	$\rho_l = 1,000$ [kg/m ³]
$C_{pa} = 1.007$ [kJ/(kg.K)]	$C_{pp} = 0.800$ [kJ/(kg.K)]	$C_{pl} = 4.186$ [kJ/(kg.K)]
$\lambda_a = 0.0262$ [W/(m.K)]	$\lambda_p = 1$ [W/(m.K)]	$\lambda_l = 0.610$ [W/(m.K)]

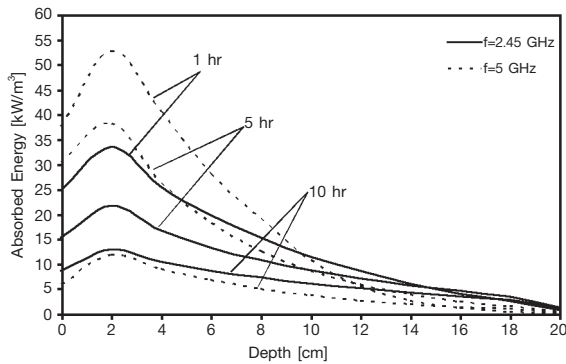
3. ผลวิจัยและวิจารณ์ผล

ในการศึกษาเพื่อวิเคราะห์กระบวนการถ่ายเทความร้อนมวลสารและความดันในวัสดุพูนที่ไม่อิ่มตัว โดยปล่อยคลื่นไมโครเวฟให้กับแพคเกจของวัสดุพูนซึ่งประกอบด้วย 3 เฟส คือ เม็ดแก้ว น้ำ และอากาศ ดังรูปที่ 1 จากนั้นตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นโดยนำเงื่อนไขการทดลองและรายละเอียดของข้อมูลงานวิจัย [11] พบว่าผลที่ได้มีความสอดคล้องกันดัง

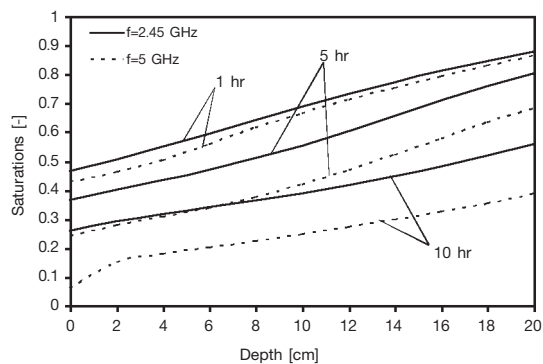
แสดงในรูปที่ 3 ยกเว้นค่าความชื้นตอนปลายในช่วงเวลาที่ 114 นาที ซึ่งมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยอาจเกิดจากความละเอียดในการคำนวณและคุณสมบัติเชิงความร้อนของเอทานอลที่ใช้ในการคำนวณอย่างไรก็ตาม ถือได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้มีความถูกต้องและให้ความเชื่อมั่นสูงแก่ผู้ทำการวิจัย ซึ่งได้ผลจากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังแสดงในรูปที่ 4 ถึง 15 ตามลำดับ



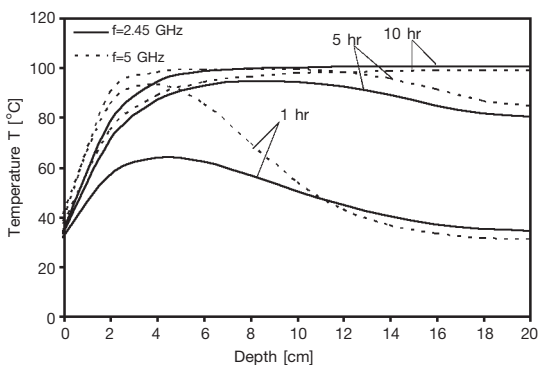
รูปที่ 3 การกระจายความชื้นกับระยะความลึกตามเวลาที่ได้รับความร้อน
 ก. ผลการคำนวณจาก Kaviany [11]
 ข. ผลการคำนวณจากแบบจำลองที่พัฒนาจากการศึกษา



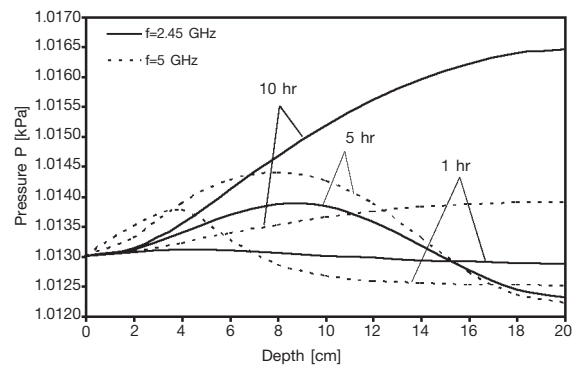
รูปที่ 4 อัตราการดูดกลืนพลังงานกับระยะความลึกของแพคเกจโดยเปลี่ยนความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ (d = 0.15 มม. $E_{in} = 4,200$ V/m, $S_{in} = 0.7$)



รูปที่ 6 การกระจายความชื้นกับระยะความลึกของแพคเกจโดยเปลี่ยนความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ (d = 0.15 มม. $E_{in} = 4,200$ V/m, $S_{in} = 0.7$)



รูปที่ 5 การกระจายอุณหภูมิกับระยะความลึกของแพคเกจ โดยเปลี่ยนความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ (d = 0.15 มม. $E_{in} = 4,200$ V/m, $S_{in} = 0.7$)

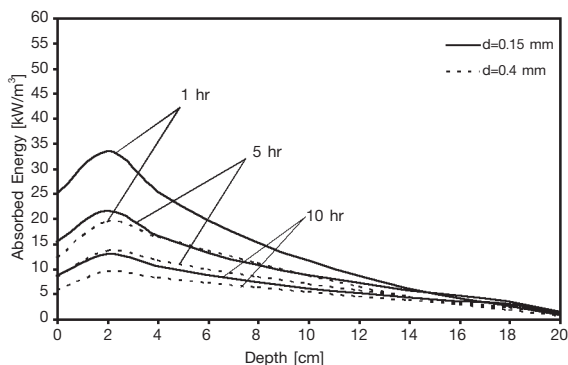


รูปที่ 7 การกระจายความดันกับระยะความลึกของแพคเกจโดยเปลี่ยนความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ (d = 0.15 มม. $E_{in} = 4,200$ V/m, $S_{in} = 0.7$)

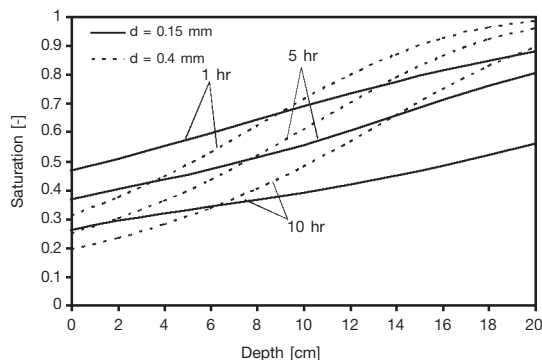
จากรูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการดูดกลืนพลังงานกับระยะความลึกของแพคเบต โดยเปลี่ยนแปลงความถี่ของคลื่นไมโครเวฟที่สภาวะขนาดอนุภาค 0.15 มม. ความเข้มของสนามไฟฟ้า 4,200 V/m และความชื้นเริ่มต้นที่ 0.7 ผลการศึกษา พบว่าในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการอัตราการดูดกลืนพลังงานในแต่ละความถี่มีความแตกต่างกันมาก เนื่องจากในช่วงเริ่มแรกของกระบวนการนั้นมีความชื้นสูงและค่า Loss Tangent Coefficient สูง (ดังแสดงในสมการที่ 1) ทำให้อัตราการดูดกลืนพลังงานมากจึงทำให้เกิดความร้อนสูง ดังนั้นอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจึงสูงตามไปด้วย (รูปที่ 5) แต่เมื่อเวลาผ่านไปความแตกต่างของอัตราการดูดกลืนพลังงานในแต่ละความถี่น้อยลงเนื่องจากมีปริมาณความชื้นลดลงและค่า Loss Tangent Coefficient ลดลง ทำให้อัตราการดูดกลืนพลังงานลดลง อย่างไรก็ตามที่ระยะความลึกหลายๆ อัตราการดูดกลืนพลังงานที่ความถี่ต่ำกว่า (2.45 GHz) กลับมีค่าสูงกว่ากรณีที่มีความถี่สูง (5 GHz) เล็กน้อยเนื่องจากกรณีที่มีความถี่ต่ำจะมีค่าความยาวคลื่นมากกว่า ทำให้อัตราการดูดกลืนพลังงานไมโครเวฟสามารถขยายไปได้ไกลกว่า

จากรูปที่ 6 เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายความชื้นกับระยะความลึกของแพคเบตต่อความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ พบว่าในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการที่ความถี่ของคลื่นไมโครเวฟมีค่า 5 GHz สามารถไล่ความชื้นได้มากกว่าที่ความถี่ของคลื่นไมโครเวฟมีค่า 2.45 GHz เนื่องจากการที่ความถี่ของคลื่นไมโครเวฟมีค่าสูงจะทำให้อัตราการดูดกลืนพลังงานสูง (ดังแสดงในสมการที่ 1) ทำให้เกิดความร้อนสูงขึ้นที่ภายในแพคเบต แล้วค่อยส่งความร้อนออกด้านนอก แต่ที่ช่วงท้ายของกระบวนการ (10 ซม.) ที่ความถี่ 2.45 GHz สามารถไล่ความชื้นที่ระยะความลึกของแพคเบตสูงได้มากกว่าที่ความถี่ 5 GHz โดยในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการภายในแพคเบตจะมีเฟสของของเหลวอยู่อย่างต่อเนื่อง ทำให้

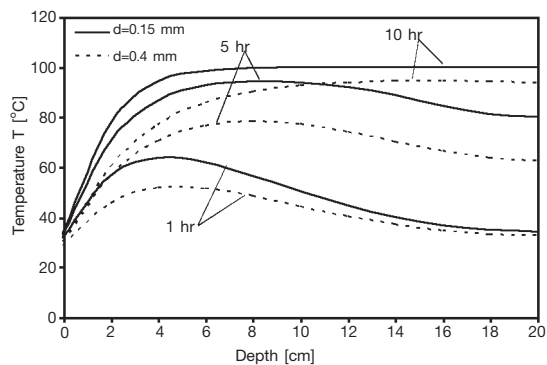
อิทธิพลของความดันคาพิลลารี (capillary pressure) ที่ขับเคลื่อนของเหลวไปยังผิวหน้าแพคเบตมีค่าสูง แต่เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณความชื้นลดลง ทำให้การเคลื่อนที่ของความชื้น (ซึ่งเป็นไอส่วนใหญ่) ออกสู่ผิวหน้านั้นเป็นอิทธิพลของการแพร่ของไอ (vapor diffusion) เป็นหลัก ประกอบกับอิทธิพลของการพาความร้อนบริเวณผิวหน้าของแพคเบตจึงทำให้การเคลื่อนย้ายความชื้นที่บริเวณผิวหน้าของแพคเบตสูง จากรูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับระยะความลึกของแพคเบตโดยเปลี่ยนความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ พบว่าความดันจะมีค่าเข้าใกล้ความดันบรรยากาศ ที่บริเวณผิวแล้วค่อยๆ เพิ่มขึ้นที่ความลึกแพคเบตมากขึ้น เนื่องจากอิทธิพลของอุณหภูมิภายในแพคเบตที่สูงขึ้น (ระยะประมาณ 5 ถึง 15 ซม.) โดยเฉพาะเมื่อเวลาการอบแห้งเพิ่มมากขึ้น (10 ซม.) อย่างไรก็ตามที่เวลาไม่สูงมาก (5 ซม.) ที่ตอนปลายของแพคเบต (ระยะประมาณ 16 ถึง 20 ซม.) ค่าความดันจะมีค่าต่ำกว่าบรรยากาศ ที่เป็นเช่นนี้เพราะที่บริเวณดังกล่าว น้ำพยายามแยกตัวออกไปจากช่องว่างทำให้เป็นการเพิ่มปริมาตรของเฟสก๊าซ ในทำนองเดียวกันทำให้ความดันย่อยของอากาศบริเวณนั้นต่ำลง ส่งผลให้ความดันรวมนี้ต่ำลงไปด้วย แต่เมื่อเวลาผ่านไปเรื่อยๆ ค่าอุณหภูมิ (รูปที่ 5) และความดันจะเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่คล้ายกัน อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้เกิดความดันรวมมากพอที่จะปลดปล่อยให้อไที่ระเหยเนื่องจากฟลักซ์ความร้อนออกไปได้ ขณะเดียวกันพบว่าค่าความถี่ไมโครเวฟก็ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของความดันรวม ที่ความถี่สูงอุณหภูมิแพคเบตก็สูงตามและส่งผลให้ความดันรวมสูงตามไปด้วย โดยเฉพาะที่บริเวณตอนบนของแพคเบตซึ่งสามารถดูดกลืนพลังงานไมโครเวฟได้สูงกว่า แต่ตรงส่วนปลายของแพคเบตค่าความดันในกรณีความถี่สูงจะมีค่าต่ำกว่ากรณีความถี่ต่ำมาก ทั้งนี้เพราะอิทธิพลของการดูดกลืนคลื่นที่บริเวณนี้มีค่าต่ำดังที่อธิบายไว้ในรูปที่ 4



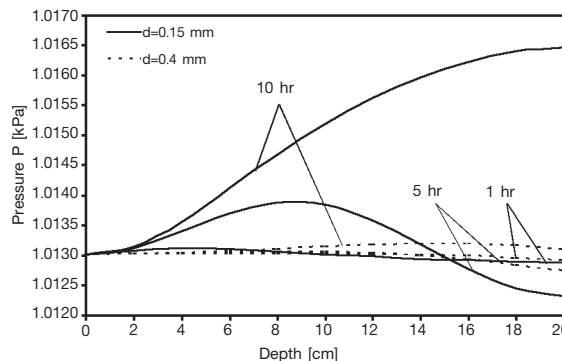
รูปที่ 8 อัตราการดูดกลืนพลังงานกับระยะความลึกของแพคเบตโดยเปลี่ยนขนาดของอนุภาค ($f = 2.45 \text{ GHz}$, $E_{in} = 4.200 \text{ V/m}$, $S_{in} = 0.7$)



รูปที่ 10 การกระจายความชื้นกับระยะความลึกของแพคเบตโดยเปลี่ยนขนาดของอนุภาค ($f = 2.45 \text{ GHz}$, $E_{in} = 4.200 \text{ V/m}$, $S_{in} = 0.7$)



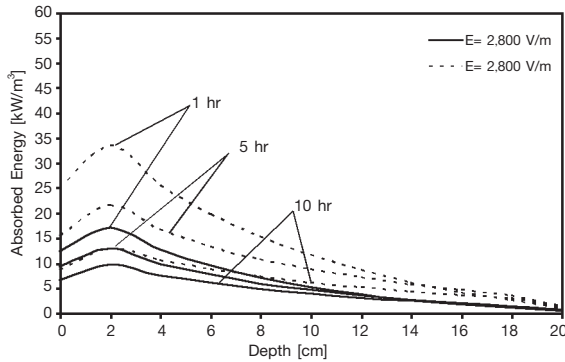
รูปที่ 9 การกระจายอุณหภูมิกับระยะความลึกของแพคเบตโดยเปลี่ยนขนาดของอนุภาค ($f = 2.45 \text{ GHz}$, $E_{in} = 4.200 \text{ V/m}$, $S_{in} = 0.7$)



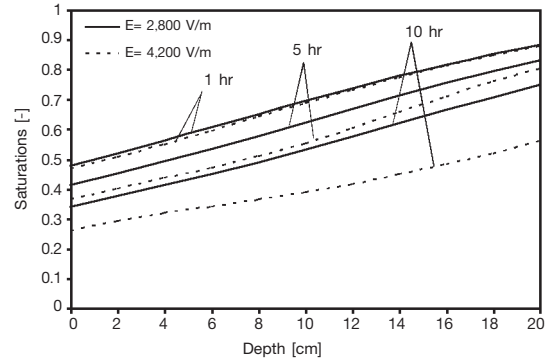
รูปที่ 11 การกระจายความดันกับระยะความลึกของแพคเบตโดยเปลี่ยนขนาดของอนุภาค ($f = 2.45 \text{ GHz}$, $E_{in} = 4.200 \text{ V/m}$, $S_{in} = 0.7$)

สำหรับการเปลี่ยนแปลงขนาดอนุภาคของแพคเบตที่สถานะความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ 2.45 GHz ความเข้มของสนามไฟฟ้า 4,200 V/m และความชื้นเริ่มต้นที่ 0.7 ดังแสดงในรูปที่ 8 ถึง 11 ตามลำดับ พบว่าวัสดุพูนที่มีขนาดอนุภาค 0.4 มม. จะมีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนและมวลสารน้อยกว่าที่วัสดุพูนที่มีขนาดอนุภาค 0.15 มม. จากรูปที่ 8 เห็นได้ว่าวัสดุพูนที่มีขนาดอนุภาค 0.15 มม. สามารถดูดกลืนพลังงานได้มากเนื่องจากปริมาณน้ำภายในโครงสร้างของแพคเบตโดยเฉลี่ยมีค่ามากกว่าแพคเบตของวัสดุพูนที่มีขนาดอนุภาค 0.4 มม. ส่งผลทำให้ Loss Tangent Coefficient มีค่าสูงตามไปด้วย ทำให้อุณหภูมิที่เกิดขึ้นสูง ดังเห็นได้จากรูปที่ 9 ประกอบ

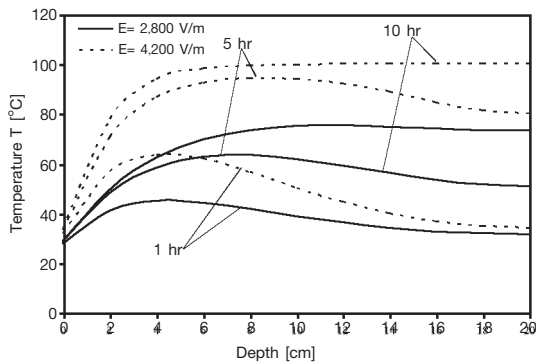
กับวัสดุพูนที่มีขนาดอนุภาค 0.15 มม. มีความดันคาพิวลาที่สูงกว่า [7] ทำให้สามารถไล่ความชื้นที่ภายในได้ดีกว่าวัสดุพูนที่มีขนาดอนุภาค 0.4 มม. ซึ่งมีความดันคาพิวลาที่น้อยกว่าดังแสดงในรูปที่ 10 ในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการจะมีอิทธิพลของความดันคาพิวลาที่ขับเคลื่อนของเหลวไปยังผิวหน้าแพคเบตมีค่าสูง แต่เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณความชื้นลดลง ทำให้การเคลื่อนที่ของความชื้นออกสู่ผิวนั้นเป็นอิทธิพลของการแพร่ของไอน้ำเป็นหลัก รูปที่ 11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับระยะความลึกของแพคเบตพบว่าค่าความดันรวมมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น



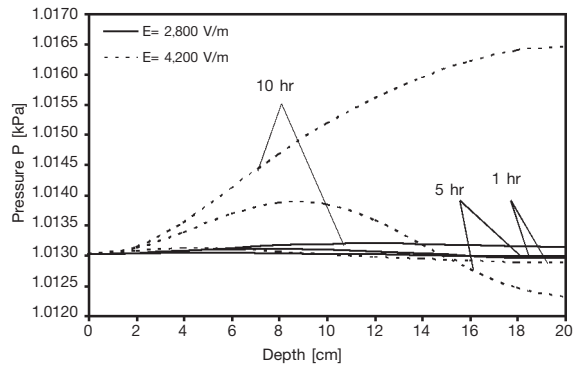
รูปที่ 12 อัตราการดูดกลืนพลังงานกับระยะความลึกของแพคเกจโดยเปลี่ยนความเข้มสนามไฟฟ้า ($f = 2.45 \text{ GHz}$, $d = 0.15 \text{ มม.}$ $S_{in} = 0.7$)



รูปที่ 14 การกระจายความชื้นกับระยะความลึกของแพคเกจโดยเปลี่ยนความเข้มสนามไฟฟ้า ($f = 2.45 \text{ GHz}$, $d = 0.15 \text{ มม.}$ $S_{in} = 0.7$)



รูปที่ 13 การกระจายอุณหภูมิกับระยะความลึกของแพคเกจโดยเปลี่ยนความเข้มสนามไฟฟ้า ($f = 2.45 \text{ GHz}$, $d = 0.15 \text{ มม.}$ $S_{in} = 0.7$)



รูปที่ 15 การกระจายความดันกับระยะความลึกของแพคเกจโดยเปลี่ยนความเข้มสนามไฟฟ้า ($f = 2.45 \text{ GHz}$, $d = 0.15 \text{ มม.}$ $S_{in} = 0.7$)

จากรูปที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการดูดกลืนพลังงานกับความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปที่ระยะความลึกใดๆ ของแพคเกจพบว่าอัตราการดูดกลืนพลังงานที่ความเข้มของสนามไฟฟ้าที่มีค่า 4,200 V/m ทำให้เกิดอุณหภูมิสูงกว่าการใช้ความเข้มของสนามไฟฟ้าที่มีค่า 2,800 V/m เนื่องจากการที่ความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ป้อนมีค่าสูงนั้นส่งผลให้อัตราการดูดกลืนพลังงานสูงขึ้น (ดังแสดงในสมการที่ 1) จึงทำให้อุณหภูมิที่เกิดขึ้นสูง (ดังรูปที่ 13) ดังนั้นจึงส่งผลต่อการเคลื่อนย้ายความชื้นได้มากกว่าการใช้ความเข้มของสนามไฟฟ้าที่มีค่าต่ำ จากรูปที่ 14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายความชื้นกับการเปลี่ยนความเข้มของสนามไฟฟ้ากับระยะความลึกของแพคเกจ พบว่าที่เวลาสุดท้ายของกระบวนการนั้นมีความ

แตกต่างของการกระจายความชื้นกับระยะความลึกของแพคเกจที่เปลี่ยนความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปไม่มากนัก เนื่องจากกระบวนการอบแห้งเข้าใกล้สภาวะสมดุลและรูปที่ 15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับระยะความลึกของแพคเกจ พบว่าการกระจายความดันรวมคล้ายกับรูปที่ 7 และรูปที่ 11 ซึ่งแสดงให้เห็นค่าความดันรวมโดยเฉลี่ยตลอดแพคเกจมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก ดังนั้นอิทธิพลของความดันรวมส่งผลต่อจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งไม่มากนัก ทั้งนี้เป็นเพราะในกระบวนการอบแห้งได้ดำเนินไปถึงสภาวะที่อุณหภูมิภายในวัสดุมีค่าไม่เกินจุดเดือด ($100 \text{ }^{\circ}\text{C}$) ซึ่งอาจตัดอิทธิพลของความดันรวมภายในวัสดุทิ้งได้หากมีการอบแห้งที่อุณหภูมิวัสดุที่ต่ำกว่า $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$

4. สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษา พบว่าในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการอบแห้งนั้น ความดันคาพิวลาโรจะมีอิทธิพลสูงในกระบวนการถ่ายเทมวลสาร แต่เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณความชื้นลดลง ทำให้การถ่ายเทมวลสาร (การเคลื่อนที่ของความชื้นซึ่งเป็นไอส่วนใหญ่) นั้นเป็นอิทธิพลจากการแพร่ของไอน้ำเป็นหลักและเมื่อความเข้มข้นของสนามไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปมีค่าสูงจะมีอัตราการดูดกลืนพลังงานสูง ทำให้เกิดความร้อนสูงจึงสามารถถ่ายเทมวลสารได้มากกว่าความเข้มข้นของสนามไฟฟ้าที่มีค่าต่ำ คลื่นไมโครเวฟที่มีความถี่สูงจะมีอัตราการดูดกลืนพลังงานสูงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้ามากกว่า อนุภาคขนาดเล็กจะมีความดันคาพิวลาโรที่สูงกว่าทำให้สามารถถ่ายเทมวลสารได้ดีกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ในส่วนของอิทธิพลของความดันรวมนั้นส่งผลน้อยมากต่อจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งที่มีอุณหภูมิแคบแต่ต่ำ ดังในการศึกษาครั้งนี้ โดยงานวิจัยนี้สามารถนำไปเป็นข้อมูลพื้นฐานที่ใช้ในการออกแบบระบบจริงในทางปฏิบัติและอาจจะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่ศึกษาวิจัยเกี่ยวกับกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพูนกรณอื่นได้เป็นอย่างดี

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติและสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยที่สนับสนุนทุนวิจัยในครั้งนี้

รายการสัญลักษณ์

D_m	= effective molecular mass diffusion (m^2/s)
S	= water saturation
D_p	= penetration depth (m)
T	= temperature ($^{\circ}C$)
h_{lv}	= specific heat of vaporization (J/kg)
c	= velocity of light (m/s)
E	= electric field intensity (V/cm)
t	= time (s)
Q	= microwave power absorbed term (W/m^3)
f	= frequency (GHz)
P	= microwave power (W)

p	= pressure (Pa)
\dot{n}	= phase change term (kg/m^3s)
w	= velocity (m/s)
λ	= effective thermal conductivity (W/mK)
k	= permeability (m^2)
$\tan \delta$	= loss tangent coefficient
ϕ	= Porosity
g	= gravitational constant (m/s^2)
ρ	= density (kg/m^3)
ϵ	= complex permittivity (F/m)
μ	= magnetic permeability (H/m)
ϵ'	= permittivity or dielectric constant
μ_l	= dynamic viscosity of liquid (Pa s)
ϵ''	= dielectric loss factor
μ_g	= dynamic viscosity of gas (Pa s)
h_c	= heat transfer constant (W/m^2K)
h_m	= mass transfer constant (W/m^2K)

Subscripts

0	= free space
a	= air
c	= capillary
g	= gas
p	= particle
r	= relative
v	= water vapor
l	= liquid water
x	= coordinate axis[m]

6. เอกสารอ้างอิง

1. Boukadida, N., S., Ben Nasrallah, and Perre, P., 2000, "Mechanism of Heat and Mass Transfer During Convective Drying of Porous Media under Different Drying Conditions", *Drying Technology*, Vol. 18, pp. 1367-1388.
2. Wang, Z. H. and Chen, G., 2000, "Heat and Mass Transfer in Batch Fluidized-bed Drying of Porous Particles", *Chemical Engineering Science*,

Vol. 55, pp. 1857-1869.

3. Ratanadecho, P., Aoki, K., and Akahori, M., 2002, "The Characteristics of Microwave Melting of Frozen Packed Beds Using a Rectangular Waveguide", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 50, No. 6, pp. 1495-1502.

4. Feng, H., J., Tang, R., Cavalieri, P., and Plumb, O.A., 2001, "Heat and Mass Transport in Microwave Drying of Porous Materials in a Spouted Bed", *AIChE Journal*, Vol. 47, pp. 1499-1512.

5. Ratanadecho, P., 2006, "The Simulation of Microwave Heating of Wood using a Rectangular Wave Guide: Influence of Frequency and Sample Size", *Chemical Engineering Science*, Vol. 61, pp. 4798-4811.

6. Ni, H., Datta, A.K., and Torrance, K.E., 1999, "Moisture Transport in Intensive Microwave Heating of Biomaterials: a Multiphase Porous Media Model", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 42, pp. 1501-1512.

7. Ratanadecho, P., Aoki, K., and Akahori, M., 2001, "Experimental and Numerical Study of Microwave Drying in Unsaturated Porous Material",

International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 28, pp. 605-616.

8. Ratanadecho, P., Aoki, K., and Akahori, M., 2002, "Influence of Irradiation Time, Particle Sizes, and Initial Moisture Content During Microwave Drying of Multi-Layered Capillary Porous Materials", *Journal of Heat Transfer*, Vol. 124, pp. 151-161.

9. Kaviani, M. and Mittal, M., 1987, "Funicular State in Drying of Porous Slab", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 30, pp. 1407-1418.

10. ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, 2547, "การวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งในวัสดุพรุน (I หลักการเบื้องต้นของการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในกระบวนการอบแห้งวัสดุพรุน)", *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (ภาษาไทย)*, ฉบับที่ 1 ม.ค - เม.ย 47, หน้า 1-11.

11. ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, 2547, "การวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งในวัสดุพรุน (II การพาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพรุน)", *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (ภาษาไทย)* ฉบับที่ 2 พ.ค 47, หน้า 1-14.