

การวิเคราะห์เชิงทฤษฎีของการถ่ายเทความร้อน มวลสารและความดัน
ในวัสดุพรุนที่ไม่อิ่มตัวภายใต้พลังงานไมโครเวฟ
(อิทธิพลของขนาดอนุภาค ความเข้มของสนามไฟฟ้าและความถี่ไมโครเวฟ)

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

ศศิกิตา สังข์สุนทร¹ ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช^{2*}

หน่วยวิจัยเพื่อการใช้ประโยชน์จากไมโครเวฟในงานวิศวกรรม (RCME)

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

99 หมู่ 18 ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง ปทุมธานี 12120

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

* (ผู้รับผิดชอบบทความ)

Sopida Sungsoontorn¹, Phadungsak Ratanadecho^{2*}

Microwave Utilization Research Center for Engineering (RCME)

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University, Rungsit Campus,

99 Mu 18, Klong Luang, Pathumthani 12120, Thailand,

Tel: 0-2564-3001-9, *E-mail: ratphadu@engr.tu.ac.th

* (Corresponding Author)

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้ เป็นการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีที่สมมุติของการถ่ายเทความร้อน มวลสารและความดันในวัสดุพรุนที่ไม่อิ่มตัว ภายใต้พลังงานจากคลื่นไมโครเวฟ โดยอิทธิพลของความดันที่เกิดขึ้นภายในวัสดุพรุนที่ไม่อิ่มตัวในระหว่างกระบวนการอบแห้งถูกนำมาพิจารณาด้วยผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้มาจากการแก้ปัญหาด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขโดยวิธีไฟไนต์วอลุ่ม ในการวิเคราะห์แบบจำลองได้พิจารณาถึง คุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ คุณสมบัติการส่งผ่าน คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุพรุนที่ไม่อิ่มตัว (ซึ่งประกอบด้วยอนุภาคของเม็ดแก้ว น้ำ และอากาศ) ซึ่งข้อมูลได้จากการทดลองและจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง จากผลการวิจัยพบว่า การเปลี่ยนแปลงขนาดของอนุภาค ความเข้มของสนามไฟฟ้าและความถี่ไมโครเวฟ มีผลต่อจลนศาสตร์ของการอบแห้งโดยรวมเป็นอย่างมาก และอิทธิพลแรงดันคาปิลลารีมีผลอย่างยิ่งต่อการกระจายความชื้น ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปเป็นข้อมูลพื้นฐานต่อการทำความเข้าใจกระบวนการอบแห้งวัสดุพรุนที่ไม่อิ่มตัวโดยไมโครเวฟได้ รวมทั้งใช้ในการออกแบบระบบจริงในทางปฏิบัติ

Abstract: In this study, a 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) were either from our measurements or from the literature. From the results showed that the variation of particle size, electric field intensity and frequency plays an important role on overall drying kinetics. The moisture profile in the unsaturated porous material suggests the importance of capillary flow in microwave drying. The results presented here provide a basis for fundamental understanding of microwave drying of unsaturated porous materials and can be applied as useful tool for exploring practical problems.

1. บทนำ

ในอดีตที่ผ่านมา การศึกษากระบวนการถ่ายเทความร้อน มวลสารและความดัน ในระดับจุลภาคนั้นยังมีการศึกษาวิจัยกันน้อย โดยเฉพาะการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีในวัสดุพอร์นที่ไม่อ้อมตัว ที่อธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงขนาดของอนุภาค ความเข้มข้นของสนามไฟฟ้าและความถี่ไมโครเวฟ พิจารณาอิทธิพลของความดันที่เกิดขึ้นภายในวัสดุพอร์นระหว่างกระบวนการอบแห้ง ซึ่งที่ผ่านมาได้มีการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการถ่ายเทความร้อน มวลสารและความดันครั้งนี้ งานวิจัยของ Boukadida et al.^[1] และ Wang et al.^[2] ได้ทำการทดลองและสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนและมวลของวัสดุพอร์นเพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิความดันแก๊สและความชื้นของอากาศต่อการอบแห้ง แต่ไม่ได้ใช้ไมโครเวฟและเน้นที่การทดลอง Ratanadecho et al.^[3] ได้ศึกษากระบวนการถ่ายเทความร้อน มวลสารและการทำละลายของวัสดุพอร์นในระบบสองมิติเพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟ โดยทำการทดลองและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Feng et al.^[4] สร้างแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนและมวลสารของกระบวนการอบแห้งโดยใช้ระบบ Microwave - Spouted Bed โดยใช้ Scaling Technique และ Finite Difference Method ในการสร้างแบบจำลองที่ทำนายระดับของอุณหภูมิ ความชื้น และความดัน พบว่าการถ่ายเทความร้อนขึ้นเนื่องจาก อิทธิพลของแรงดันในระบบนี้ส่งผลให้อัตราการอบแห้งสูง Ratanadecho.^[5] ได้ทำการทดลองและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษากระบวนการถ่ายเทความร้อนในการอบไมโครเวฟโดยใช้ระบบไมโครเวฟ ศึกษาถึงอิทธิพลของความถี่ของคลื่นไมโครเวฟและขนาดของชั้นทดสอบ Ni et al.^[6] ได้สร้างแบบจำลองของวัสดุพอร์นแบบหลายเฟส เพื่อทำนายการถ่ายเทความร้อนระหว่างการให้ความร้อนกับวัสดุที่มีความชื้นต่ำ และวัสดุที่มีความชื้นสูงด้วยไมโครเวฟ พบว่าไมโครเวฟจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายใน และช่วยให้มีการถ่ายเทความร้อนมากขึ้น Ratanadecho et al.^[7] ทำการศึกษาทั้งทฤษฎีและการทดลองของกระบวนการอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟในวัสดุพอร์นที่ไม่อ้อมตัว โดยศึกษาเน้นในเรื่องการถ่ายเทความร้อนและความชื้น การแพร่ของไอน้ำในระบบ 1 มิติ พบว่าวัสดุพอร์นที่มีอนุภาคขนาดเล็กจะมีแรงดันคาปิลลารีสูงกว่าทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่าวัสดุพอร์นที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ไม่ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของความดันแก๊ส กำลังและความถี่ไมโครเวฟ Ratanadecho et al.^[8] ทำการศึกษาระบบการอบแห้งวัสดุพอร์นชนิดคาปิลลารีที่มีหลายชั้นโดยใช้ไมโครเวฟ โดยศึกษาถึงการกระจายของสนามไฟฟ้า ความชื้นและอุณหภูมิในระบบ 2 มิติ พบว่าวัสดุพอร์นที่มีอนุภาคขนาดเล็กจะมีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนได้สูงกว่าวัสดุพอร์นที่มีอนุภาคขนาดใหญ่และพบว่ารูปแบบของการจัดเรียงชั้นวัสดุด้วยอย่างมีผลต่อการถ่ายเทความร้อน

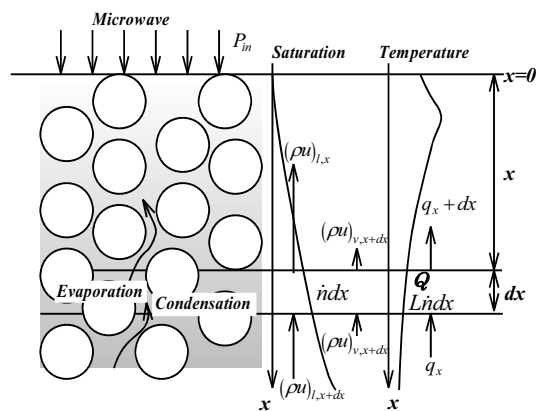
ซึ่งที่ผ่านมาในงานวิจัยส่วนใหญ่จะเน้นการกระจายอุณหภูมิ ความชื้นและความดันเป็นส่วนใหญ่ แต่การศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างของวัสดุพอร์น (ขนาดอนุภาคหรือรูพอร์น) ความเข้มข้นของสนามไฟฟ้า และความถี่ไมโครเวฟ นั้นยังไม่มีการศึกษาอย่างเป็นระบบ โดยงานวิจัยนี้มุ่งศึกษาถึงอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงขนาดของอนุภาค ความเข้มข้นของสนามไฟฟ้าและความถี่ไมโครเวฟที่มี

ผลต่อจลนศาสตร์ของกระบวนการถ่ายเทความร้อน มวลสารและความดันในวัสดุพอร์นที่ไม่อ้อมตัว ภายใต้พลังงานจากคลื่นไมโครเวฟอย่างสมบูรณ์นอกจากนี้อิทธิพลของความดันในวัสดุจะถูกนำมาพิจารณาด้วย

2. วิธีการวิจัย

2.1. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากรูปที่ 1 แสดงถึงแบบจำลองทางกายภาพของการวิเคราะห์กระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพอร์นที่ไม่อ้อมตัวโดยใช้ไมโครเวฟ ซึ่งวัสดุพอร์นที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย 3 เฟส คือ เม็ดแก้ว (Glass Beads) น้ำ และอากาศ



รูปที่ 1 แบบจำลองทางกายภาพสำหรับวิเคราะห์กระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพอร์นที่ไม่อ้อมตัวโดยใช้ไมโครเวฟ [7]

โดยอัตราการกำเนิดปริมาณความร้อนภายใน (Local Volumetric Heat Generation) หรือความหนาแน่นของพลังงานไมโครเวฟที่ถูกดูดซับ (Density of Microwave Power Absorbed) ในวัสดุที่มีความยาวกึ่งอนันต์ (Semi-infinite) สามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้ [7]

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

งานวิจัยนี้จะให้ Dielectric Properties เป็น ฟังก์ชันของความชื้นและอุณหภูมิซึ่งการวิเคราะห์นั้นจะใช้ทฤษฎีของ Surrounding Mixing Formulas [9], ซึ่งสัดส่วนเชิงปริมาตร (v) ของ Water Saturation ไอน้ำ และอนุภาคของเม็ดแก้ว (Glass Beads) ถูกนำมาพิจารณา [7] ส่วนค่า Loss Tangent Coefficient ของแพคเบต สามารถแสดงได้ในสมการต่อไปนี้

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (2)$$

2.1.1. การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน มวลสารและความดัน (Analysis of Heat - Mass Transport and Pressure Gradient)

ในงานวิจัยครั้งนี้นั้นจะทำการวิเคราะห์จากรูปที่ 1 ซึ่งกลไกสำคัญในการเคลื่อนที่ของความชื้นระหว่างกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพอร์นที่ไม่อ้อมตัวโดยใช้ไมโครเวฟ คือ เกรเดียนของความดันคาปิลลารีและแรงโน้มถ่วงของโลกซึ่งอาจจะเสริมหรือหน่วงการเคลื่อนตัวของของไหล ขณะที่เกรเดียนของความดันบางส่วนของกระบวนการเหยนนั้นเกี่ยวข้องกับการไหลของไอน้ำ

สมมติฐานที่ใช้ในแบบจำลองของกระบวนการถ่ายความร้อน
 มวลสารและความดัน มีดังนี้

1. วัสดุพูนที่พิจารณาเป็นชนิดคาบิลลารีและเป็นวัตถุเกร็งไม่มี
 ปฏิกริยาเคมีเกิดขึ้นภายใน
2. แพคเบตของวัสดุพูนมีความสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์
3. ที่บริเวณด้านบนแพคเบตพิจารณาเป็นขอบเขตเปิด
4. การกระจายสนามไฟฟ้า อุณหภูมิและการเคลื่อนย้ายความชื้น
 สมมติให้เป็น 1 มิติ

2.1.2. สมการถ่ายเทความร้อน (Heat Transport Equation)

ปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนภายในวัสดุพูนสามารถอธิบาย
 โดยสมการอนุรักษ์พลังงานซึ่งจะรวมเทอมของการดูดซับพลังงาน
 ไมโครเวฟเข้าไปด้วยโดยจะอยู่ในเทอม Local Heat Generation ซึ่ง
 อธิบายการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในชั้นทดสอบที่ขึ้นกับเวลาโดยพิจารณา
 สมการเหล่านี้ในลักษณะ 1 มิติ จาก Darcy's Law, Fick's Law ทำให้
 ได้สมการที่ควบคุมกระบวนการถ่ายเทความร้อนดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t} \{ \rho_l c_{pl} \phi s + (\rho c_p)_a + (\rho c_p)_v \} \phi (1-s) + \rho_p c_{pp} (1-\phi) T + \frac{\partial}{\partial z} [\rho_l c_{pl} w_l + (\rho_a c_{pa} + \rho_v c_{pv}) w_g] T = \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right] - h_{lv} \quad (3)$$

$$\left\{ \frac{\partial}{\partial t} \{ \rho_v \phi (1-s) \} + \frac{\partial}{\partial z} \left[\rho_v \frac{KK_{rg}}{\mu_g} \left(-\frac{\partial P_g}{\partial z} + \rho_g g_z \right) - \rho_g D_m \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\rho_v}{\rho_g} \right) \right] \right\} + Q$$

$$\text{เมื่อ } (\rho c_p)_T = \rho_l c_{pl} \phi s + (\rho c_p)_a + (\rho c_p)_v \phi (1-s) + \rho_p c_{pp} (1-\phi)$$

ดังนั้น

$$\frac{\partial}{\partial t} \{ (\rho c_p)_T T \} + \frac{\partial}{\partial z} [\rho_l c_{pl} w_l + (\rho_a c_{pa} + \rho_v c_{pv}) w_g] T = \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right] - h_{lv} \left\{ \frac{\partial}{\partial t} \{ \rho_v \phi (1-s) \} + \frac{\partial}{\partial z} \left[\rho_v \frac{KK_{rg}}{\mu_g} \left(-\frac{\partial P_g}{\partial z} + \rho_g g_z \right) - \rho_g D_m \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\rho_v}{\rho_g} \right) \right] \right\} + Q \quad (4)$$

2.1.3. สมการถ่ายเทมวลสาร (Mass Transport Equation)

ปรากฏการณ์การถ่ายเทมวลสารภายในวัสดุพูนสามารถอธิบาย
 โดยสมการอนุรักษ์มวลสำหรับน้ำทั้งในรูปของเหลวและไอน้ำโดย
 พิจารณาสมการเหล่านี้ในลักษณะ 1 มิติ และจาก Darcy's Law และ
 Fick's Law ทำให้ได้สมการที่ควบคุมกระบวนการถ่ายเทมวลสารดังนี้

$$\phi \frac{\partial}{\partial t} (s + Y_v (1-s)) + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{KK_{rl}}{\mu_l} \left(\frac{\partial P_c}{\partial z} - \frac{\partial P_g}{\partial z} + g_z \right) \right] + Y_v \frac{KK_{rg}}{\mu_g} \left(-\frac{\partial P_g}{\partial z} + \rho_g g_z \right) - Y_g D_m \frac{\partial}{\partial z} (W_v) = 0 \quad (5)$$

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

2.1.4. สมการความดันรวม (Total Pressure Equation)

ปรากฏการณ์ของความดันภายในวัสดุพูนสามารถอธิบาย โดย
 Darcy's Law และ Fick's Law โดยสมมติให้แก๊สมีคุณสมบัติเป็นแก๊สใน
 อุณหคติ สามารถจัดรูปใหม่ดังนี้

$$\phi \frac{\partial}{\partial t} (Y_a (1-s)) + \frac{\partial}{\partial z} \left[Y_a \frac{KK_{rg}}{\mu_g} \left(-\frac{\partial P_g}{\partial z} + \rho_g g_z \right) - Y_g D_m \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\rho_a}{\rho_g} \right) \right] = 0 \quad (6)$$

$$\text{โดยที่ } \frac{\rho_a}{\rho_l} = Y_a$$

2.1.5. เงื่อนไขขอบเขตและเงื่อนไขเริ่มต้น

(Boundary and Initial Condition)

เงื่อนไขขอบเขต คือ เงื่อนไขสำหรับขอบเขตเปิด (Open
 Boundary) โดยเงื่อนไขขอบเขตสำหรับการแลกเปลี่ยนพลังงานและ
 มวลที่ขอบเขตเปิด สามารถเขียนได้ดังสมการต่อไปนี้

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = h_c (T - T_a) \quad (7)$$

$$\rho_l w_l + \rho_v w_v = h_m (\rho_v - \rho_{va}) \quad (8)$$

การพิจารณาเงื่อนไขขอบเขตที่ขอบเขตปิด (Symmetry-Impermeable)
 ซึ่งก็คือขอบเขตที่ไม่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนและมวลเกิดขึ้นสามารถ
 เขียนด้วยสมการต่อไปนี้

$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (9)$$

2.2. วิธีการหาผลเฉลย

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นนั้นความสัมพันธ์ของ
 ระบบสมการอนุพันธ์เป็นแบบไม่เชิงเส้น (สมการที่ 4-6) จึงใช้วิธี Finite
 Differences ที่อยู่บนพื้นฐานของวิธีปริมาตรควบคุม (Control Volume)
 [10] ได้ดังนี้

สมการถ่ายเทความร้อน (Heat Transport Equation)

$$\frac{(\rho c_p)_{T_k}^{n+1} T_k^{n+1} - (\rho c_p)_{T_k}^n T_k^n}{\Delta t} + \frac{\rho_l c_{pl}}{\Delta z} (w_{lk}^{n+1} T_k^{n+1} - w_{lk-1}^{n+1} T_{k-1}^{n+1}) + \frac{(\rho c_p)_{av}}{\Delta z} (w_{gk}^{n+1} T_k^{n+1} - w_{gk-1}^{n+1} T_{k-1}^{n+1}) - \frac{1}{\Delta z} \left[\lambda_{k+\frac{1}{2}}^{n+1} \left(\frac{T_{k+1}^{n+1} - T_k^{n+1}}{\Delta z} \right) - \lambda_{k-\frac{1}{2}}^{n+1} \left(\frac{T_k^{n+1} - T_{k-1}^{n+1}}{\Delta z} \right) \right] + \frac{h_{lv} \rho_v \phi}{\Delta t} \{ (1-s)_{ir}^{n+1} (s_{ek}^{n+1} - s_{ek}^n) \}$$

$$- \frac{1}{\Delta z} \left\{ \left[\rho_{vk}^{n+1} \frac{KK_{rg}}{\mu_g} \Big|_{k+\frac{1}{2}} \left(-\left(\frac{P_{gk+1}^{n+1} - P_{gk}^{n+1}}{\Delta z} \right) + \rho_g g_z \right) \right] - \left[\rho_{vk-1}^{n+1} \frac{KK_{rg}}{\mu_g} \Big|_{k-\frac{1}{2}} \left(-\left(\frac{P_{gk}^{n+1} - P_{gk-1}^{n+1}}{\Delta z} \right) + \rho_g g_z \right) \right] \right\} - \frac{1}{\Delta z} \left\{ \left[\rho_{gk}^{n+1} D_{mk+\frac{1}{2}}^{n+1} \left(\frac{\left(\frac{\rho_v}{\rho_g} \right)_{k+1}^{n+1} - \left(\frac{\rho_v}{\rho_g} \right)_k^{n+1}}{\Delta z} \right) \right] - \left[\rho_{gk-1}^{n+1} D_{mk-\frac{1}{2}}^{n+1} \left(\frac{\left(\frac{\rho_v}{\rho_g} \right)_k^{n+1} - \left(\frac{\rho_v}{\rho_g} \right)_{k-1}^{n+1}}{\Delta z} \right) \right] \right\} - Q = 0$$

สมการถ่ายเทมวลสาร (Mass Transport Equation)

$$\frac{\phi}{\Delta t} \left\{ (1-s_{ir}) \left[(s_{ek}^{n+1} - s_{ek}^n) + (Y_{vk}^{n+1} (1-s_{ek}^{n+1}) - Y_{vk}^n (1-s_{ek}^n)) \right] \right\}$$

$$+ \frac{1}{\Delta z} \left\{ \begin{aligned} & \left[\frac{KK_{rl}}{\mu_l} \Big|_{k+\frac{1}{2}} \left(\left(\frac{P_{ck+1}^{n+1} - P_{ck}^{n+1}}{\Delta z} \right) - \left(\frac{P_{gk+1}^{n+1} - P_{gk}^{n+1}}{\Delta z} \right) + g_z \right) \right. \\ & \left. - \frac{KK_{rl}}{\mu_l} \Big|_{k-\frac{1}{2}} \left(\left(\frac{P_{ck}^{n+1} - P_{ck-1}^{n+1}}{\Delta z} \right) - \left(\frac{P_{gk}^{n+1} - P_{gk-1}^{n+1}}{\Delta z} \right) + g_z \right) \right] \\ & + Y_{vk}^{n+1} \left[\frac{KK_{rg}}{\mu_g} \Big|_{k+\frac{1}{2}} \left(- \left(\frac{P_{gk+1}^{n+1} - P_{gk}^{n+1}}{\Delta z} \right) + \rho_g g_z \right) \right. \\ & \left. - \frac{KK_{rg}}{\mu_g} \Big|_{k-\frac{1}{2}} \left(- \left(\frac{P_{gk}^{n+1} - P_{gk-1}^{n+1}}{\Delta z} \right) + \rho_g g_z \right) \right] \\ & - Y_{gk}^{n+1} \left[D_{mk+\frac{1}{2}}^{n+1} \left(\frac{W_{vk+1}^{n+1} - W_{vk}^{n+1}}{\Delta z} \right) - D_{mk-\frac{1}{2}}^{n+1} \left(\frac{W_{vk}^{n+1} - W_{vk-1}^{n+1}}{\Delta z} \right) \right] \end{aligned} \right\}$$

$$= 0$$

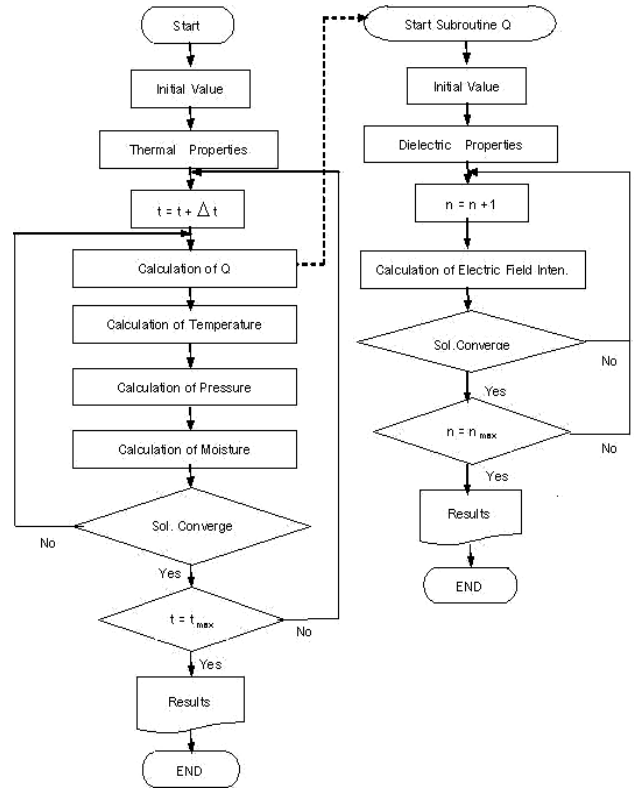
สมการความดันรวม (Total Pressure Equation)

$$\frac{\phi}{\Delta t} \left\{ (1-s_{ir}) (Y_{ak}^{n+1} (1-s_{ek}^{n+1}) - Y_{ak}^n (1-s_{ek}^n)) \right\}$$

$$+ \frac{1}{\Delta z} \left\{ \begin{aligned} & Y_{ak}^{n+1} \left[\frac{KK_{rg}}{\mu_g} \Big|_{k+\frac{1}{2}} \left(- \left(\frac{P_{gk+1}^{n+1} - P_{gk}^{n+1}}{\Delta z} \right) + \rho_g g_z \right) \right. \\ & \left. - \frac{KK_{rg}}{\mu_g} \Big|_{k-\frac{1}{2}} \left(- \left(\frac{P_{gk}^{n+1} - P_{gk-1}^{n+1}}{\Delta z} \right) + \rho_g g_z \right) \right] \\ & - Y_{gk}^{n+1} \left[D_{mk+\frac{1}{2}}^{n+1} \left(\frac{\left(\frac{\rho_a}{\rho_g} \right)_{k+1}^{n+1} - \left(\frac{\rho_a}{\rho_g} \right)_k^{n+1}}{\Delta z} \right) \right. \\ & \left. - D_{mk-\frac{1}{2}}^{n+1} \left(\frac{\left(\frac{\rho_a}{\rho_g} \right)_k^{n+1} - \left(\frac{\rho_a}{\rho_g} \right)_{k-1}^{n+1}}{\Delta z} \right) \right] \end{aligned} \right\}$$

$$= 0$$

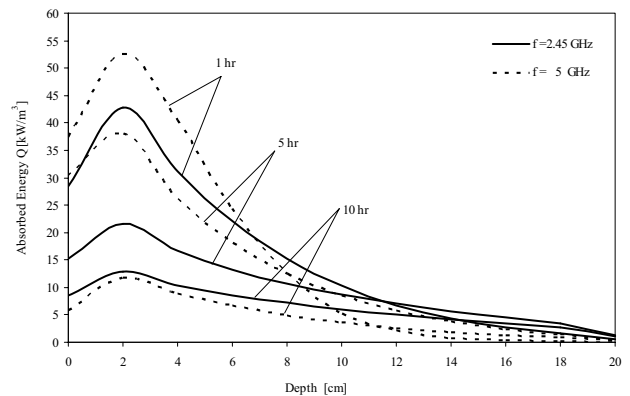
โดยจะมีการเปลี่ยนค่า Nodal ของความชื้นและอุณหภูมิ ในแต่ละเวลาที่เพิ่มขึ้นซึ่งจะทำซ้ำเช่นนี้จนกระทั่งค่าที่ได้เข้าสู่ผลลัพธ์ (Convergence) โดยใช้วิธีของ Newton - Raphson ในกระบวนการทำซ้ำ (Iteration) เพื่อให้การคำนวณเข้าสู่ผลลัพธ์ได้เร็วขึ้น โดยมีรายละเอียดของแผนผังที่แสดงกระบวนการคำนวณ สำหรับการแก้ปัญหา ดังรูปที่ 2 ดังนี้



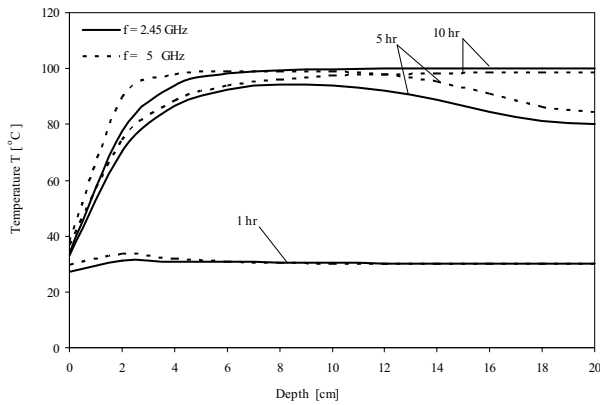
รูปที่ 2 รายละเอียดของแผนผัง และวิธีการคำนวณสำหรับกระบวนการทางระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

3. ผลวิจัยและวิจารณ์ผล

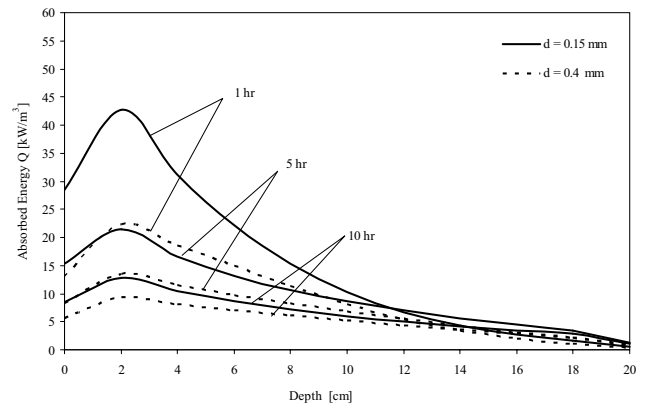
ในการศึกษาเพื่อวิเคราะห์กระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพูนที่ไม่อ้อมตัวโดยปล่อยคลื่นไมโครเวฟให้กับแพคเกจของวัสดุพูนซึ่งประกอบด้วย 3 เฟส คือ เม็ดแก้ว (glass beads) น้ำ และอากาศ ดังรูปที่ 1 ซึ่งการใช้ไมโครเวฟนั้นจะเปลี่ยนพลังงานของคลื่นที่ถูกดูดซับสู่วัสดุเป็นความร้อนทำให้วัสดุนั้นร้อนขึ้นทั้งก่อน (Volumetric heating) อุณหภูมิภายในจึงค่อนข้างสม่ำเสมอ และการถ่ายเทความร้อนเป็นไปอย่างรวดเร็ว



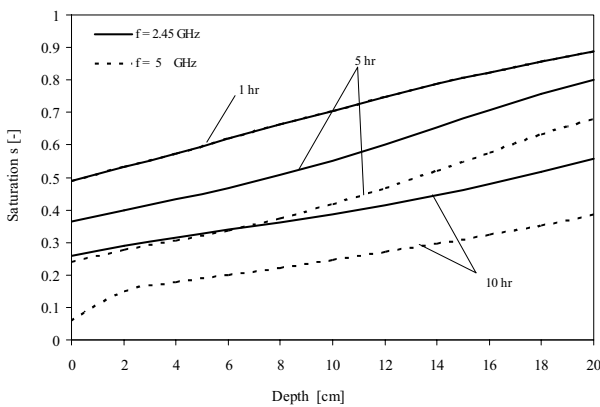
รูปที่ 3. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการดูดกลืนพลังงานกับระยะความลึกของแพคเกจโดยเปลี่ยนแปลงความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ (d = 0.15 mm, E_{in} = 4,200 V/m, S_{in} = 0.7)



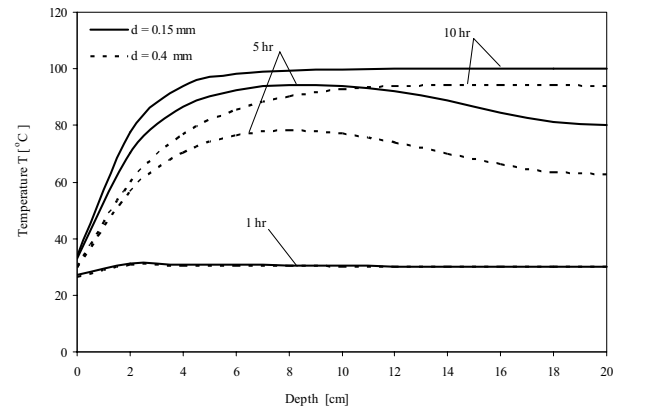
รูปที่ 4. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายอุณหภูมิกับระยะความลึกของแพคเบตโดยเปลี่ยนแปลงความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ (d = 0.15 mm, E_{in} = 4,200 V/m, S_{in} = 0.7)



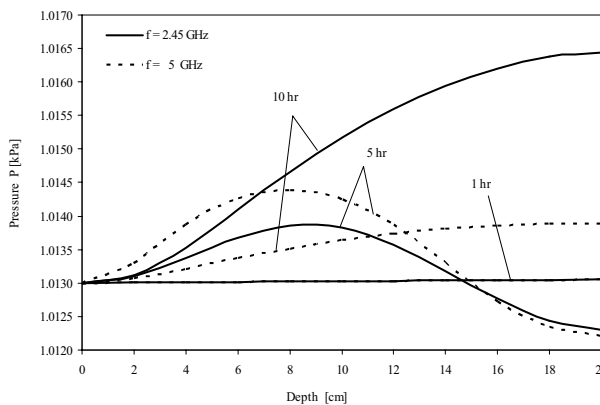
รูปที่ 7. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการดูดกลืนพลังงานกับระยะความลึกของแพคเบตโดยเปลี่ยนแปลงขนาดของอนุภาค (f = 2.45 GHz, E_{in} = 4,200 V/m, S_{in} = 0.7)



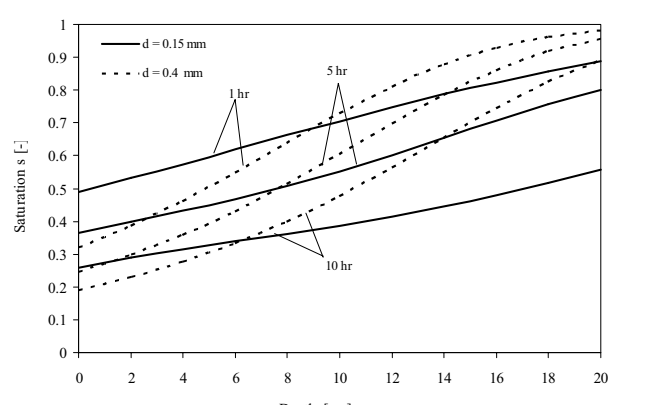
รูปที่ 5. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายความชื้นกับระยะความลึกของแพคเบตโดยเปลี่ยนแปลงความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ (d = 0.15 mm, E_{in} = 4,200 V/m, S_{in} = 0.7)



รูปที่ 8. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายอุณหภูมิกับระยะความลึกของแพคเบตโดยเปลี่ยนแปลงขนาดของอนุภาค (f = 2.45 GHz, E_{in} = 4,200 V/m, S_{in} = 0.7)

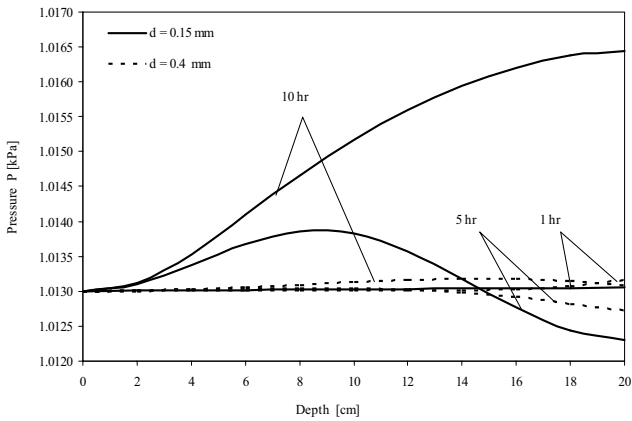


รูปที่ 6. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับระยะความลึกของแพคเบตโดยเปลี่ยนแปลงความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ (d = 0.15 mm, E_{in} = 4,200 V/m, S_{in} = 0.7)

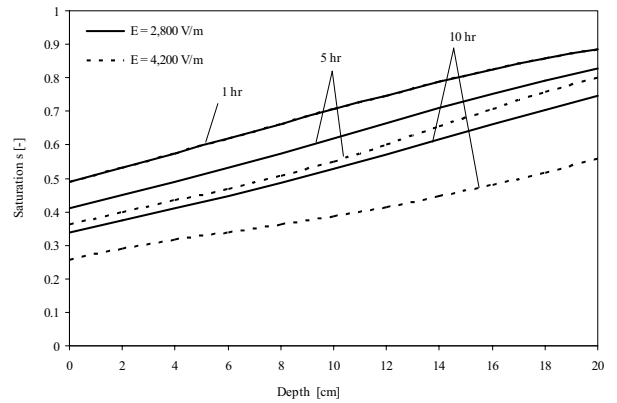


รูปที่ 9. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายความชื้นกับระยะความลึกของแพคเบตโดยเปลี่ยนแปลงขนาดของอนุภาค (f = 2.45 GHz, E_{in} = 4,200 V/m, S_{in} = 0.7)

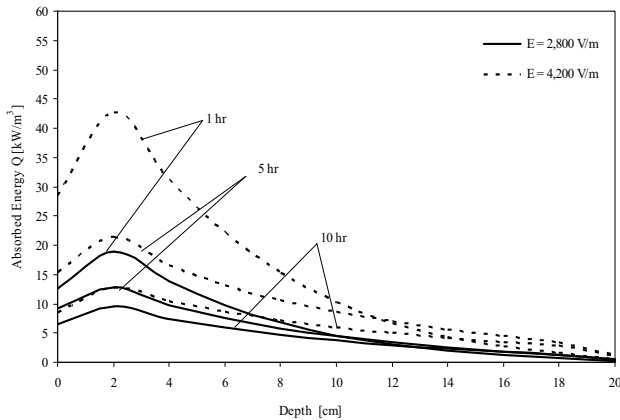
TSF011



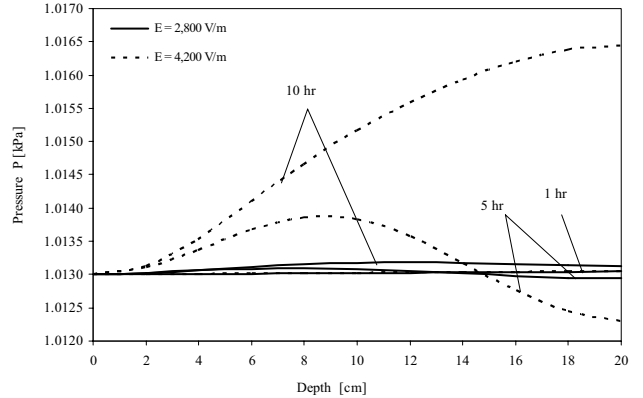
รูปที่ 10. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับระยะความลึกของแพคเบตโดยเปลี่ยนแปลงขนาดของอนุภาค
 ($f = 2.45 \text{ GHz}$, $E_{\text{in}} = 4,200 \text{ V/m}$, $S_{\text{in}} = 0.7$)



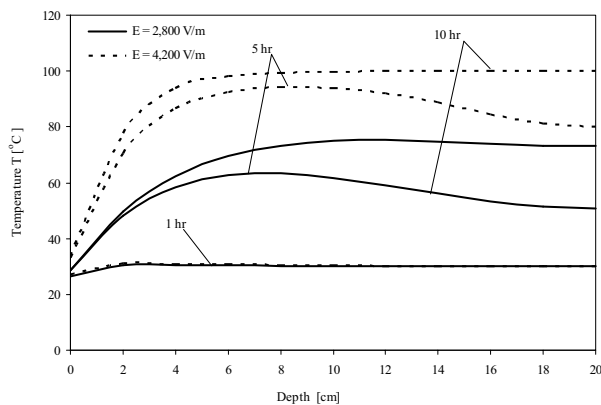
รูปที่ 13. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายความชื้นกับระยะความลึกของแพคเบตโดยเปลี่ยนแปลงความเข้มของสนามไฟฟ้า
 ($f = 2.45 \text{ GHz}$, $d = 0.15 \text{ mm}$, $S_{\text{in}} = 0.7$)



รูปที่ 11. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการดูดกลืนพลังงานกับระยะความลึกของแพคเบตโดยเปลี่ยนแปลงความเข้มของสนามไฟฟ้า
 ($f = 2.45 \text{ GHz}$, $d = 0.15 \text{ mm}$, $S_{\text{in}} = 0.7$)



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



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

จากรูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการดูดกลืนพลังงานกับระยะความลึกของแพคเบต โดยเปลี่ยนแปลงความถี่ของคลื่นไมโครเวฟที่สภาวะขนาดอนุภาค 0.15 mm ความเข้มของสนามไฟฟ้า $E_{\text{in}} = 4,200 \text{ V/m}$ และความชื้นเริ่มต้นที่ 0.7 ผลการศึกษา พบว่าในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการ มีความแตกต่างของอัตราการดูดกลืนพลังงานในแต่ละความถี่มาก เนื่องจากในช่วงเริ่มแรกของกระบวนการนั้นมีปริมาณความชื้นสูงและค่า loss tangent coefficient สูง (ดังแสดงในสมการที่ 1) ทำให้อัตราการดูดกลืนพลังงานมากจึงทำให้เกิดความร้อนสูง ดังนั้นอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจึงสูงตามไปด้วย (รูปที่ 4) แต่เมื่อเวลาผ่านไปความแตกต่างของอัตราการดูดกลืนพลังงานในแต่ละความถี่ก็น้อยลงเนื่องจากมีปริมาณความชื้นลดลงและค่า loss tangent coefficient ลดลง ทำให้อัตราการดูดกลืนพลังงานลดลง อย่างไรก็ตามที่ระยะความลึกมากๆ อัตราการดูดกลืนพลังงานที่ความถี่ต่ำกว่า (2.45 GHz) กลับมีค่าสูงกว่ากรณีที่มีความถี่สูง (5GHz) เล็กน้อย เนื่องจากกรณีนี้ค่าความถี่ต่ำจะมีค่าความยาวคลื่นมากกว่า ทำให้แถบการดูดซึมพลังงานไมโครเวฟสามารถขยายไปได้ไกลกว่า จากรูปที่ 5 เมื่อ

พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายความชื้นกับระยะเวลาลิกของแพคเบตโดยการเปลี่ยนแปลงความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ พบว่าในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการที่ความถี่ของคลื่นไมโครเวฟมีค่า 5 GHz สามารถไล่ความชื้นได้มากกว่าที่ความถี่ของคลื่นไมโครเวฟมีค่า 2.45 GHz เนื่องจากการที่ความถี่ของคลื่นไมโครเวฟมีค่าสูงจะทำให้อัตราการดูดกลืนพลังงานสูง (ดังแสดงในสมการที่ 1) จึงทำให้เกิดความร้อนสูงขึ้นที่ภายในแพคเบต แล้วค่อยส่งความร้อนออกด้านนอก แต่ที่ช่วงเวลาสุดท้ายของกระบวนการ (10 hr.) ที่ความถี่ 2.45 GHz สามารถไล่ความชื้นที่ระยะเวลาลิกของแพคเบตสูงได้มากกว่าที่ความถี่ 5 GHz โดยในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการภายในแพคเบตจะมีเฟสของเหลวอยู่อย่างต่อเนื่อง ทำให้อิทธิพลของความดันคาปิลลารี (Capillary Pressure) ที่ขับเคลื่อนของเหลวไปยังผิวหน้าแพคเบตมีค่าสูง แต่เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณความชื้นลดลง ทำให้การเคลื่อนที่ของความชื้น (ซึ่งเป็นไอส่วนใหญ่) ออกสู่ผิวหน้านั้นเป็นอิทธิพลของการแพร่ของไอ (Vapor Diffusion) เป็นหลัก ประกอบกับอิทธิพลของการพาความร้อนบริเวณผิวหน้าของแพคเบตจึงทำให้การเคลื่อนย้ายความชื้นที่บริเวณผิวหน้าของแพคเบตสูง จากรูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับระยะเวลาลิกของแพคเบตโดยเปลี่ยนแปลงความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ พบว่าความดันจะมีค่าเข้าใกล้ความดันบรรยากาศที่บริเวณผิวแล้วค่อยๆ เพิ่มขึ้นที่ความถี่แพคเบตมากขึ้น โดยเฉพาะเมื่อเวลาการอบแห้งเพิ่มมากขึ้น (10 hr) อย่างไรก็ตามที่เวลาไม่สูงมาก (5 hr) ที่ตอนปลายของแพคเบต (ระยะประมาณ 16 -20 cm) ค่าความดันจะมีค่าต่ำกว่าบรรยากาศ ที่เป็นเช่นนั้นเพราะที่บริเวณดังกล่าวน้ำพยายามแยกตัวออกไปจากช่องว่างทำให้เป็นการเพิ่มปริมาตรของเฟสแก๊ส ในทำนองเดียวกันทำให้ความดันย่อยของอากาศบริเวณนั้นต่ำลงส่งผลทำให้ความดันรวมนี้ต่ำลงไปด้วย แต่เมื่อเวลาผ่านไปเรื่อยๆ ค่าอุณหภูมิ (รูปที่ 4) และความดันจะเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่คล้ายกัน อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้เกิดความดันรวมมากพอที่จะปลดปล่อยไอที่ระเหยเนื่องจากฟลักซ์ความร้อนออกไปได้ ขณะเดียวกันพบว่าค่าความถี่ไมโครเวฟก็ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของความดันรวม ที่ค่าความถี่สูงอุณหภูมิแพคเบตก็สูงตามและส่งผลให้ความดันรวมสูงตามไปด้วย โดยเฉพาะที่บริเวณตอนบนของแพคเบตที่สามารถดูดกลืนพลังงานไมโครเวฟได้สูงกว่า แต่ตรงส่วนปลายของแพคเบตค่าความดันในกรณีความถี่สูงจะมีค่าต่ำกว่ากรณีความถี่ต่ำมาก ๆ ทั้งนี้เพราะอิทธิพลของการดูดกลืนคลื่นที่บริเวณนี้มีค่าต่ำดังที่อธิบายไว้ในรูปที่ 3 สำหรับการเปลี่ยนแปลงขนาดอนุภาคของแพคเบตที่สภาวะความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ 2.45 GHz ความเข้มของสนามไฟฟ้า $E_{in} = 4,200$ V/m และความชื้นเริ่มต้นที่ 0.7 ดังแสดงในรูปที่ 7-10 ตามลำดับ พบว่าวัสดุพูนที่มีขนาดอนุภาค 0.4 mm จะมีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนและมวลสารน้อยกว่าที่วัสดุพูนที่มีขนาดอนุภาค 0.15 mm จากรูปที่ 7 จะเห็นได้ว่าวัสดุพูนที่มีขนาดอนุภาค 0.15 mm สามารถดูดกลืนพลังงานได้มากเนื่องจากปริมาณน้ำภายในโครงสร้างของแพคเบตโดยเฉลี่ยมีค่ามากกว่าแพคเบตของวัสดุพูนที่มีขนาดอนุภาค 0.4 mm ส่งผลทำให้ loss tangent coefficient มีค่าสูงตามไปด้วย จึงทำให้อุณหภูมิที่เกิดขึ้นสูงดังเห็นได้จากรูปที่ 8 ประกอบกับวัสดุพูนที่มีอนุภาคขนาด

0.15 mm มีความดันคาปิลลารีสูง [7] ทำให้สามารถไล่ความชื้นที่ภายในได้ดีกว่าวัสดุพูนที่มีขนาดอนุภาค 0.4 mm ซึ่งมีความดันคาปิลลารีน้อยกว่าดังแสดงในรูปที่ 9 ในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการจะมีอิทธิพลของความดันคาปิลลารีที่ขับเคลื่อนของเหลวไปยังผิวหน้าแพคเบตมีค่าสูง แต่เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณความชื้นลดลง ทำให้การเคลื่อนที่ของความชื้นออกสู่ผิวหน้านั้นเป็นอิทธิพลของการแพร่ของไอเป็นหลัก รูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับระยะเวลาลิกของแพคเบต พบว่าค่าความดันรวมมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น จากรูปที่ 11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการดูดกลืนพลังงานกับความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปที่ระยะเวลาลิกใดๆ ของแพคเบต พบว่า อัตราการดูดกลืนพลังงานที่ความเข้มของสนามไฟฟ้าที่มีค่า $E_{in} = 4,200$ V/m ทำให้เกิดอุณหภูมิสูงกว่าการใช้ความเข้มของสนามไฟฟ้าที่มีค่า $E_{in} = 2,800$ V/m เนื่องจากการที่ความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ป้อนมีค่าสูงนั้นส่งผลให้อัตราการดูดกลืนพลังงานสูงขึ้น (ดังแสดงในสมการที่ 1) จึงทำให้อุณหภูมิที่เกิดขึ้นสูง (ดังรูปที่ 12) ดังนั้นจึงส่งผลต่อการเคลื่อนย้ายความชื้นได้มากกว่าการใช้ความเข้มของสนามไฟฟ้าที่มีค่าต่ำ จากรูปที่ 13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายความชื้นกับการเปลี่ยนแปลงความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ระยะเวลาลิกของแพคเบต พบว่าที่เวลาสุดท้ายของกระบวนการนั้นมีความแตกต่างของการกระจายความชื้นกับระยะเวลาลิกของแพคเบตที่เปลี่ยนแปลงความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปไม่มากนัก เนื่องจากกระบวนการอบแห้งเข้าใกล้สภาวะสมดุลย์ และรูปที่ 14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับระยะเวลาลิกของแพคเบต พบว่าการกระจายตัวของความดันรวมคล้ายกับรูปที่ 6 และรูปที่ 10 ซึ่งแสดงให้เห็นค่าความดันรวมโดยเฉลี่ยตลอดแพคเบตมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก ดังนั้นอิทธิพลของความดันรวมส่งผลต่อจลนศาสตร์ของการอบแห้งไม่มากนัก ทั้งนี้เป็นเพราะในกระบวนการอบแห้งได้ดำเนินไปถึงสภาวะที่อุณหภูมิภายในวัสดุมีค่าไม่เกินจุดเดือด (100°C) (เราอาจตัดอิทธิพลของความดันรวมภายในวัสดุทิ้งได้หากมีการอบแห้งที่อุณหภูมิวัสดุที่ต่ำกว่า 100°C) เหมือนดังงานวิจัยที่ผ่านมาของผู้วิจัยเอง [7]

4. สรุป

จากการศึกษา พบว่าในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการอบแห้งนั้นความดันคาปิลลารีจะมีอิทธิพลสูงในกระบวนการถ่ายเทมวลสาร แต่เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณความชื้นลดลง ทำให้การถ่ายเทมวลสาร (การเคลื่อนที่ของความชื้นซึ่งเป็นไอส่วนใหญ่) นั้นเป็นอิทธิพลจากการแพร่ของไอเป็นหลัก และเมื่อความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปมีค่าสูงจะมีอัตราการดูดกลืนพลังงานสูง ทำให้เกิดความร้อนสูงจึงสามารถถ่ายเทมวลสารได้มากกว่าความเข้มของสนามไฟฟ้าที่มีค่าต่ำ คลื่นไมโครเวฟที่มีความถี่สูงจะมีอัตราการดูดกลืนพลังงานสูง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามากกว่า อนุภาคขนาดเล็กจะมีความดันคาปิลลารีที่สูงกว่าทำให้สามารถถ่ายเทมวลสารได้ดีกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ ในส่วนของอิทธิพลของความดันรวมนั้นส่งผลน้อยมากต่อจลนศาสตร์ของการอบแห้งที่มีอุณหภูมิแพคเบตต่ำดังในการศึกษาครั้งนี้ ซึ่งงานวิจัยนี้สามารถนำไปเป็นข้อมูลพื้นฐานที่ใช้ใน

การออกแบบระบบจริงในทางปฏิบัติ และอาจจะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่
 ศึกษาวิจัยเกี่ยวกับกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุ
 พอรุนที่ไม่อิมิตัวในกรณีอื่นๆ

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ และ
 สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยที่สนับสนุนทุนวิจัยในครั้งนี้

รายการสัญลักษณ์

| | |
|-----------------|--|
| D_m | = effective molecular mass diffusion (m^2/s) |
| S | = water saturation |
| D_p | = penetration depth (m) |
| T | = temperature ($^{\circ}C$) |
| H_v | = 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 ($kg/m^3 s$) |
| 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 | r | = relative |
| a | = air | v | = water vapor |
| c | = capillary | l | = liquid water |
| g | = gas | x | = coordinate axis[m] |
| p | = particle | | |

เอกสารอ้างอิง

- [1] Boukadida, N., S. Ben Nasrallah and P. Perre., 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., G. Chen. 2000. Heat and mass transfer in batch fluidized –bed drying of porous particles. Chemical Engineering Science. 55: 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.P. Cavalieri and O.A. Plumb., 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 if Wood using a Rectangular Wave Guide : Influence of Frequency and Sample Size. "Chemical Engineering Science. 61: 4798-4811.
- [6] Ni, H., A.K.Datta and K.E. Torrance.,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. Int. Commune. " Heat 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] Wang, J., and Sehmugge,T., 1980,"An Empirical Model for the Complex Dielectric Permittivity of Soil as Function of Water Content." IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., GE-18, Vol.4, pp.288-295
- [10] Patankar,S.V.,1980 "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, McGraw-Hill." New York,Chaps.1-4.