

**การวิเคราะห์เชิงทฤษฎีของการถ่ายเทความร้อน มวลสารและความดัน
ในวัสดุพอร์นที่ไม่อิ่มตัวภายใต้พลังงานอินฟราเรดร่วมกับไมโครเวฟ
(อิทธิพลของขนาดอนุภาค ความเข้มข้นของสนามไฟฟ้าและความถี่ไมโครเวฟ)**

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

โสภิดา สังข์สุนทร และผดุงศักดิ์ รัตนเดโช *

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 Sungsoontorn, Phadungsak Ratanadecho *

Research Center of Microwave Utilization in Engineering (R.C.M.E.)

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

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาวิเคราะห์เชิงทฤษฎีที่สมบูรณ์ของการถ่ายเทความร้อน มวลสารและความดันในวัสดุพอร์นที่ไม่อิ่มตัว ภายใต้พลังงานจากคลื่นอินฟราเรดร่วมกับไมโครเวฟ โดยอิทธิพลของความดันที่เกิดขึ้นภายในวัสดุพอร์นที่ไม่อิ่มตัวในระหว่างกระบวนการอบแห้งถูกนำมาพิจารณาด้วยผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้มาจากการแก้ปัญหาด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขโดยวิธีไฟไนต์วอลุ่ม ในการวิเคราะห์แบบจำลองได้พิจารณาถึง สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางอุณหพลศาสตร์ สมบัติการส่งผ่าน สมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุพอร์นที่ไม่อิ่มตัว (ซึ่งประกอบด้วยอนุภาคของเม็ดแก้ว น้ำ และอากาศ) ซึ่งข้อมูลได้จากการทดลองและจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง จากผลการวิจัยพบว่า การเปลี่ยนแปลงขนาดของอนุภาค ความเข้มข้นของสนามไฟฟ้าและความถี่ไมโครเวฟ และการผสมผสานระหว่างคลื่นอินฟราเรดร่วมกับไมโครเวฟมีผลต่อจลนศาสตร์ของการอบแห้งโดยรวมเป็นอย่างมาก และอิทธิพลแรงดันคาพิลลารีมีผลอย่างยิ่งต่อการกระจายความชื้น ซึ่ง

ผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปเป็นข้อมูลพื้นฐานต่อการทำความเข้าใจกระบวนการอบแห้งวัสดุพอร์นที่ไม่อิ่มตัวโดยไมโครเวฟได้ รวมทั้งใช้ในการออกแบบระบบจริงในทางปฏิบัติ

Abstract

In this study, a multiphase porous media model was theoretically developed to predict heat and mass transfer under applying a combined infrared and microwave energy. However, the effect of gas pressure during drying process with a combined infrared and microwave energy was taken into consideration. The governing equations were numerically solved by using the finite volume method. In the simulation of the unsaturated porous media which were composed of glass beads, water and air, all physical, thermal, transport, and dielectric properties were either derived from this experimental study and from the relevant literatures. The results show that variations of particle size,

electric field intensity and frequency play important roles on overall drying kinetics. In addition, the moisture profile in the unsaturated porous media was influenced by capillary pressure in a combined infrared and microwave energy. These findings are significant to a further research conducted along the same line of this study as well as to the application of the porous media in the future.

1. บทนำ

ในอดีตที่ผ่านมาการศึกษากระบวนการถ่ายเทความร้อน มวลสารและความดันในระดับจุลภาคนั้นยังมีการศึกษาวิจัยกันน้อย โดยเฉพาะการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีในวัสดุพอร์นที่ไม่อ้อมตัวที่อธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงขนาดของอนุภาค ความเข้มของสนามไฟฟ้าและความถี่ โดยพิจารณาอิทธิพลของความดันที่เกิดขึ้นภายในวัสดุพอร์นระหว่างกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารที่ผสมผสานระหว่างพลังงานอินฟราเรดร่วมกับไมโครเวฟ ซึ่ง Boukadida [1] และ Wang [2] ได้ทำการทดลองและสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนและมวลของวัสดุพอร์นเพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิความดันก๊าซและความชื้นของอากาศต่อการอบแห้ง แต่ไม่ได้ใช้ไมโครเวฟและเน้นที่การทดลอง Ratanadecho [3] ศึกษากระบวนการถ่ายเทความร้อน มวลสารและการทำลายของวัสดุพอร์นในระบบสองมิติเพื่อศึกษาอิทธิพลของพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟ โดยทำการทดลองและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และงานวิจัยที่ศึกษากระบวนการอบแห้งที่ผสมผสานระหว่างคลื่นอินฟราเรดร่วมกับไมโครเวฟมีดังนี้ Adonis [4] สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งโดยใช้ระบบลมร้อนและการแผ่รังสีอินฟราเรด พบว่าพฤติกรรมที่เกิดขึ้นเป็นปัญหาไม่เชิงเส้นของสมการอนุพันธ์ตลอดระยะเวลาในการอบแห้ง Glouannece [5] ทดลองอบแห้งวัสดุพอร์นโดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรด ซึ่งในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงการใช้ประโยชน์ของการนำเทคโนโลยีการแผ่รังสีของคลื่นเข้ามาช่วยในการอบแห้ง Praveen [6] ทดลองอบแห้งหัวหอมโดยใช้รังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนเพื่อศึกษาอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในการอบแห้ง ความหนาของวัสดุที่อบ อุณหภูมิอากาศร้อนและความเร็วของลมร้อน Salagnac [7] และ Datta [8] สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และทดลองเพื่อการศึกษาปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจากการให้ความร้อนโดยใช้รังสีอินฟราเรดและลมร้อนร่วมกับคลื่นไมโครเวฟกับวัสดุพอร์น สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาการกระจายอุณหภูมิและความชื้นสำหรับกระบวนการให้ความร้อนกับอาหารด้วยรังสีอินฟราเรดและการใช้ระบบลมร้อนร่วมกับพลังงานไมโครเวฟ จากการศึกษาพบว่า การให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟเพียงอย่างเดียวจะทำให้ความชื้นที่ผิวหน้าของวัสดุเพิ่มขึ้นเนื่องจากการผลัดดัน (pressure-driven) ของความชื้นมายังผิวหน้ามากและลมร้อนสามารถไล่ความชื้นที่บริเวณผิวหน้าของวัสดุได้เช่นเดียวกันแต่ประสิทธิภาพไม่ดีเท่าการใช้รังสีอินฟราเรด ดังนั้นการใช้รังสีอินฟราเรดร่วมกับพลังงานไมโครเวฟจึงให้ผลที่ดีกว่า

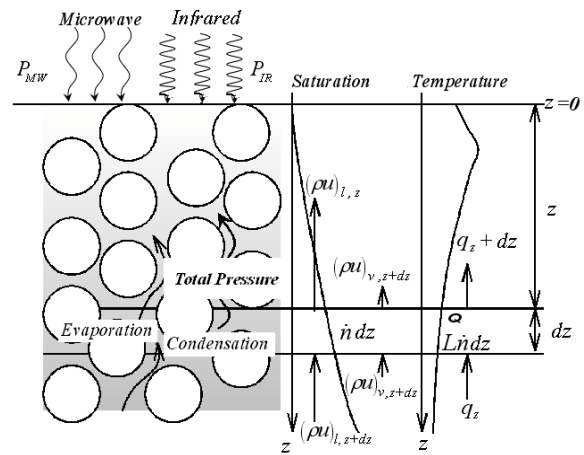
เห็นได้ว่าที่ผ่านมาในงานวิจัยส่วนใหญ่จะเน้นการทดลองและศึกษาการกระจายอุณหภูมิ ความชื้นเป็นส่วนใหญ่ แต่การศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างของวัสดุพอร์น (ขนาดอนุภาคหรือรู

พอร์น) ความเข้มของสนามไฟฟ้า และความถี่ นั้นยังไม่มีการศึกษาอย่างเป็นระบบ โดยงานวิจัยนี้มุ่งศึกษาถึงอิทธิพลของการเปลี่ยนขนาดของอนุภาค ความเข้มของสนามไฟฟ้าและความถี่ของคลื่นไมโครเวฟที่มีผลต่อจลนศาสตร์ของกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพอร์นที่ไม่อ้อมตัวภายใต้การผสมผสานระหว่างคลื่นอินฟราเรดร่วมกับไมโครเวฟอย่างสมบูรณ์ เนื่องจากรังสีอินฟราเรดเป็นรังสีที่มีช่วงความยาวคลื่นกว้างมาก คือตั้งแต่ $0.7 \mu\text{m}$ ถึง $100 \mu\text{m}$ ซึ่งโดยทั่วไปแบ่งช่วงคลื่นอินฟราเรดออกเป็นระดับความยาวคลื่นได้ 3 ระดับคือ อินฟราเรดใกล้ (near infrared) มีความยาวคลื่น $0.7 \mu\text{m}$ ถึง $3 \mu\text{m}$ อินฟราเรดกลาง (medium infrared) มีความยาวคลื่น $3 \mu\text{m}$ ถึง $25 \mu\text{m}$ และอินฟราเรดไกล (far infrared) มีความยาวคลื่น $25 \mu\text{m}$ ถึง $1000 \mu\text{m}$ โดยรังสีอินฟราเรดมีการแผ่พลังงานออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้โดยไม่ต้องอาศัยตัวกลางหรือตัวนำในการส่งผ่านความร้อนไปยังวัสดุ Mohsenin [9] โดยข้อดีของรังสีชนิดนี้ คือ สามารถแผ่รังสีได้รวดเร็ว จึงไม่ทำให้อุณหภูมิของอากาศบริเวณรอบ ๆ รัศมีที่มีรังสีกระจายไปถึงสูงขึ้น แต่สามารถทำให้เกิดความร้อนได้อย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอที่บริเวณของผิววัตถุที่แสงนี้ได้สัมผัส ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปเป็นข้อมูลพื้นฐานต่อการทำความเข้าใจกระบวนการอบแห้งโดยใช้พลังงานอินฟราเรดร่วมกับไมโครเวฟได้ รวมทั้งใช้ในการออกแบบระบบจริงในทางปฏิบัติ

2. วิธีการวิจัย

2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางกายภาพของการวิเคราะห์แบบจำลองของกระบวนการถ่ายเทความร้อน มวลสารและความดันในวัสดุพอร์นที่ไม่อ้อมตัวภายใต้พลังงานอินฟราเรดร่วมกับไมโครเวฟ รูปที่ 1 โดยพิจารณาในระบบ 1 มิติ ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้พิจารณาลักษณะคลื่นเป็นคลื่นระนาบ (plane wave) โดยปล่อยคลื่นอินฟราเรดร่วมกับไมโครเวฟให้กับแพคเกจของวัสดุพอร์นซึ่งประกอบด้วย 3 เฟส คือ เม็ดแก้ว (glass beads) น้ำและอากาศ



รูปที่ 1 แบบจำลองทางกายภาพสำหรับวิเคราะห์กระบวนการถ่ายเทความร้อน มวลสารและความดันในวัสดุพอร์นที่ไม่อ้อมตัวโดยใช้อินฟราเรดร่วมกับไมโครเวฟ

สมมุติฐานที่ใช้ในแบบจำลองของกระบวนการถ่ายเทความร้อน มวลสาร และความดันในวัสดุพอร์ที่ไม่อิ่มตัวโดยใช้อินฟราเรดร่วมกับไมโครเวฟ มีดังนี้

1. วัสดุพอร์ที่พิจารณาเป็นชนิดคาพิลลารีและเป็นวัตถุคงรูปไม่มี

ปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นภายใน

2. แพลกเบตของวัสดุพอร์มีความสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์

3. ที่บริเวณด้านบนแพลกเบตพิจารณาเป็นขอบเขตเปิด

4. การกระจายสนามไฟฟ้า อุณหภูมิและการเคลื่อนย้ายความชื้น สมมุติให้เป็น 1 มิติ

โดยอัตราการกำเนิดปริมาณความร้อนภายใน (local volumetric heat generation) หรือความหนาแน่นของพลังงานอินฟราเรดและไมโครเวฟที่ถูกดูดซับในวัสดุที่มีความยาวกึ่งอนันต์ (semi-infinite) แสดงได้ดังสมการต่อไปนี้ Ratanadecho [10]

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

งานวิจัยนี้จะให้ Dielectric Properties เป็น ฟังก์ชันของความชื้น และอุณหภูมิซึ่งการวิเคราะห์นั้นจะใช้ทฤษฎีของ Surrounding Mixing Formulas [11], ซึ่งสัดส่วนเชิงปริมาตร (V) ของ Water Saturation ใต้น้ำ และอนุภาคของเม็ดแก้ว (Glass Beads) ถูกนำมาพิจารณา Ratanadecho [10] ส่วนค่า Loss Tangent Coefficient ของแพลกเบตสามารถแสดงได้ในสมการต่อไปนี้

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

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

ในงานวิจัยครั้งนี้จะทำการวิเคราะห์จากรูปที่ 1 ซึ่งกลไกสำคัญในการเคลื่อนที่ของความชื้นระหว่างกระบวนการถ่ายเทความร้อน มวลสารและความดันในวัสดุพอร์ที่ไม่อิ่มตัวโดยใช้อินฟราเรดร่วมกับไมโครเวฟ คือ เกรเดียนของความดันคาพิลลารีและแรงโน้มถ่วงของโลกซึ่งอาจจะเสริมหรือหน่วงการเคลื่อนตัวของของไหล ขณะที่เกรเดียนของความดันบางส่วนของกระแสนั้นเกี่ยวข้องกับการไหลของไอ

2.1.2. สมการถ่ายเทความร้อน (Heat Transport Equation)

ปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนภายในวัสดุพอร์สามารถอธิบายโดยสมการอนุรักษ์พลังงานซึ่งจะรวมเทอมของการดูดซับพลังงานไมโครเวฟและอินฟราเรดเข้าไปด้วย โดยอยู่ในเทอมของความหนาแน่นของพลังงานความร้อนที่ผลิตขึ้น ซึ่งอธิบายการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในวัสดุที่ขึ้นกับเวลาโดยพิจารณาสมการเหล่านี้ในลักษณะ 1 มิติ จาก Darcy's Law, Fick's Law ทำให้ได้สมการที่ควบคุมกระบวนการถ่ายเทความร้อนดังนี้

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho C_p)_T T + \frac{\partial}{\partial z} (\rho_l C_{pl} w_l + (\rho_a C_{pa} + \rho_v C_{pv}) w_g) T = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \\ - H_v \left(\frac{\partial}{\partial t} (\rho_v \phi (I-s)) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho_v \frac{KK_{rg}}{\mu_g} \left(-\frac{\partial P_g}{\partial z} + \rho_g g_z \right) - \rho_g D_m \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\rho_v}{\rho_g} \right) \right) \right) \\ + Q_{MW} + Q_{IR} \end{aligned} \quad (3)$$

2.1.3. สมการถ่ายเทมวลสาร (Mass Transport Equation)

ปรากฏการณ์การถ่ายเทมวลสารภายในวัสดุพอร์สามารถอธิบายโดยสมการอนุรักษ์มวลสำหรับน้ำทั้งในรูปของเหลวและไอน้ำโดย

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

$$\begin{aligned} \phi \frac{\partial}{\partial t} (s + Y_v (I-s)) + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{KK_{rl}}{\mu_l} \left(\frac{\partial P_c}{\partial z} - \frac{\partial P_g}{\partial z} + g_z \right) \right] \\ + Y_v \frac{KK_{rg}}{\mu_g} \left(-\frac{\partial P_g}{\partial z} + \rho_g g_z \right) - Y_g D_m \frac{\partial}{\partial z} (W_v) = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

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

2.1.4. สมการความดันรวม (Total Pressure Equation)

ปรากฏการณ์ของความดันภายในวัสดุพอร์สามารถอธิบายโดย Darcy's Law และ Fick's Law โดยสมมติให้ก๊าซมีสมบัติเป็นก๊าซในอุดมคติ สามารถจัดรูปใหม่ดังนี้

$$\phi \frac{\partial}{\partial t} (Y_a (I-s)) + \frac{\partial}{\partial z} \left[Y_a \frac{KK_{rg}}{\mu_g} \left(-\frac{\partial P_g}{\partial z} + \rho_g g_z \right) - Y_g D_m \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\rho_a}{\rho_g} \right) \right] = 0 \quad (5)$$

2.1.5. เงื่อนไขขอบเขตและเงื่อนไขเริ่มต้น

(Boundary and Initial Condition)

เงื่อนไขขอบเขต คือ เงื่อนไขสำหรับขอบเขตเปิด (Open Boundary) โดยเงื่อนไขขอบเขตสำหรับการแลกเปลี่ยนพลังงานและมวลที่ขอบเขตเปิด สามารถเขียนได้ดังสมการต่อไปนี้

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = h_c (T - T_a) \quad (6)$$

$$\rho_l w_l + \rho_v w_v = h_m (\rho_v - \rho_{va}) \quad (7)$$

การพิจารณาเงื่อนไขขอบเขตที่ขอบเขตปิด (Symmetry-Impermeable) ซึ่งก็คือขอบเขตที่ไม่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนและมวลเกิดขึ้นสามารถเขียนด้วยสมการต่อไปนี้

$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (8)$$

ข้อมูลสำหรับสมบัติทางกายภาพทางความร้อนและสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

$\varepsilon_0 = 8.85419 \times 10^{-12} \text{ [F/m]}$	$\mu_0 = 4.0\pi \times 10^{-7} \text{ [H/m]}$
$\varepsilon_{ra} = 1.0$	$\varepsilon_{rp} = 5.1$
$\mu_{ra} = 1.0$	$\mu_{rp} = 1.0$
$\mu_{rl} = 1.0$	
$\tan \delta_a = 0.0$	$\tan \delta_p = 0.01$
$\rho_a = 1.205 \text{ [kg/m}^3\text{]}$	$\rho_p = 2,500 \text{ [kg/m}^3\text{]}$
$\rho_l = 1,000 \text{ [kg/m}^3\text{]}$	
$C_{pa} = 1.007 \text{ [kJ/(kg} \cdot \text{K)}]$	$C_{pp} = 0.80 \text{ [kJ/(kg} \cdot \text{K)}]$
$C_{pv} = 4.186 \text{ [kJ/(kg} \cdot \text{K)}]$	
$\lambda_a \text{ [W/(m} \cdot \text{K)}]$	$\lambda_p = 1.0 \text{ [W/(m} \cdot \text{K)}]$
$\lambda_l = 0.610 \text{ [W/(m} \cdot \text{K)}]$	
Initial saturation (s) = 0.7	$T_{air} = 30^\circ \text{C}$
$htc = 15 \text{ [W/(m}^2 \cdot \text{K)}]$	$hr = 0.58 \text{ [m/s]}$

2.2. วิธีการหาผลเฉลย

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นนั้นความสัมพันธ์ของ

ระบบสมการอนุพันธ์เป็นแบบไม่เชิงเส้นของสมการถ่ายเทความร้อนมวลสารและความดัน (สมการที่ 3 และ 5 ตามลำดับ) จากนั้นประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม (finite volume method) สำหรับตำแหน่งโหนดภายใน (Internal node) Patankar [12] ได้ดังนี้

สมการถ่ายเทความร้อน (Heat Transport Equation)

$$\begin{aligned} & \frac{(\rho C_p)_{T_k}^{n+1} - (\rho C_p)_{T_k}^n}{\Delta t} + \frac{\rho C_p l}{\Delta z} (w_{lk}^{n+1} T_k^{n+1} - w_{lk-l}^{n+1} T_{k-l}^{n+1}) + \frac{(\rho C_p)_{av}}{\Delta z} (w_{gk}^{n+1} T_k^{n+1} - w_{gk-l}^{n+1} T_{k-l}^{n+1}) \\ & - \frac{1}{\Delta z} \left(\chi_{k+\frac{1}{2}}^{n+1} \left(\frac{T_{k+1}^{n+1} - T_k^{n+1}}{\Delta z} \right) - \chi_{k-\frac{1}{2}}^{n+1} \left(\frac{T_k^{n+1} - T_{k-l}^{n+1}}{\Delta z} \right) \right) + \frac{H_v \rho_s \phi}{\Delta z} ((1-s_{ir})^{n+1} (s_{ek}^{n+1} - s_{ek}^n)) \\ & \left(\left(\frac{\rho_{vk}^{n+1} K K_g}{\mu_g} \right)_{k+\frac{1}{2}} \left(\frac{P_{gk+l}^{n+1} - P_{gk}^{n+1}}{\Delta z} \right) + \rho_g g_z \right) - \left(\frac{\rho_{vk-l}^{n+1} K K_g}{\mu_g} \right)_{k-\frac{1}{2}} \left(\frac{P_{gk}^{n+1} - P_{gk-l}^{n+1}}{\Delta z} \right) + \rho_g g_z \\ & - \frac{1}{\Delta z} \left(\left(\frac{\rho_{gk}^{n+1} D_{mk+l}}{\mu_g} \right)_{k+\frac{1}{2}} \left(\frac{P_{gk+l}^{n+1} - P_{gk}^{n+1}}{\Delta z} \right) - \left(\frac{\rho_{gk-l}^{n+1} D_{mk-l}}{\mu_g} \right)_{k-\frac{1}{2}} \left(\frac{P_{gk}^{n+1} - P_{gk-l}^{n+1}}{\Delta z} \right) \right) \\ & - Q_{MW} - Q_{IR} = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

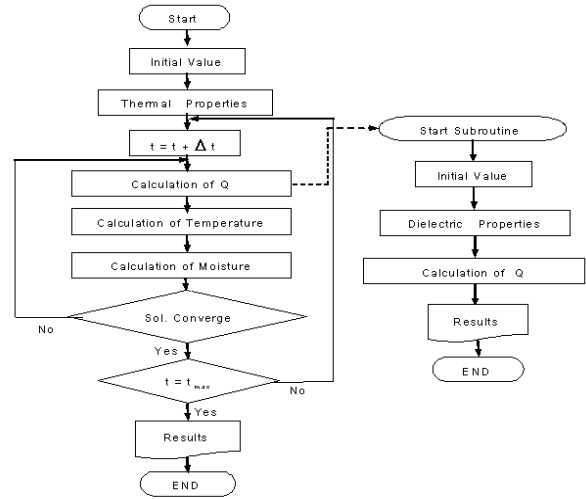
สมการถ่ายเทมวลสาร (Mass Transport Equation)

$$\begin{aligned} & \frac{\phi}{\Delta t} (1-s_{ir})^{n+1} (s_{ek}^{n+1} - s_{ek}^n) + (Y_{vk}^{n+1} (1-s_{ek}^{n+1}) - Y_{vk}^n (1-s_{ek}^n)) \\ & \left(\left(\frac{K K_{rl}}{\mu_l} \right)_{k+\frac{1}{2}} \left(\frac{P_{ck+l}^{n+1} - P_{ck}^{n+1}}{\Delta z} \right) - \left(\frac{P_{gk+l}^{n+1} - P_{gk}^{n+1}}{\Delta z} \right) + g_z \right) \\ & - \left(\frac{K K_{rl}}{\mu_l} \right)_{k-\frac{1}{2}} \left(\frac{P_{ck+l}^{n+1} - P_{ck}^{n+1}}{\Delta z} \right) - \left(\frac{P_{gk+l}^{n+1} - P_{gk}^{n+1}}{\Delta z} \right) + g_z \\ & + \frac{1}{\Delta z} \left(\left(\frac{K K_{rg}}{\mu_g} \right)_{k+\frac{1}{2}} \left(\frac{P_{gk+l}^{n+1} - P_{gk}^{n+1}}{\Delta z} \right) + \rho_g g_z \right) \\ & - \left(\frac{K K_{rg}}{\mu_g} \right)_{k-\frac{1}{2}} \left(\frac{P_{gk+l}^{n+1} - P_{gk}^{n+1}}{\Delta z} \right) + \rho_g g_z \\ & - Y_{gk}^{n+1} \left(D_{mk+l}^{n+1} \left(\frac{W_{vk+l}^{n+1} - W_{vk}^{n+1}}{\Delta z} \right) - D_{mk-l}^{n+1} \left(\frac{W_{vk}^{n+1} - W_{vk-l}^{n+1}}{\Delta z} \right) \right) \\ & = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

สมการความดันรวม (Total Pressure Equation)

$$\begin{aligned} & \frac{\phi}{\Delta t} (1-s_{ir})^{n+1} (Y_{ak}^{n+1} (1-s_{ek}^{n+1}) - Y_{ak}^n (1-s_{ek}^n)) \\ & \left(\left(\frac{K K_{rg}}{\mu_g} \right)_{k+\frac{1}{2}} \left(\frac{P_{gk+l}^{n+1} - P_{gk}^{n+1}}{\Delta z} \right) + \rho_g g_z \right) \\ & - \left(\frac{K K_{rg}}{\mu_g} \right)_{k-\frac{1}{2}} \left(\frac{P_{gk+l}^{n+1} - P_{gk}^{n+1}}{\Delta z} \right) + \rho_g g_z \\ & + \frac{1}{\Delta z} \left(D_{mk+l}^{n+1} \left(\frac{P_{gk+l}^{n+1} - P_{gk}^{n+1}}{\Delta z} \right) - \left(\frac{P_{gk}^{n+1} - P_{gk-l}^{n+1}}{\Delta z} \right) \right) \\ & - Y_{gk}^{n+1} \left(\left(\frac{P_{gk+l}^{n+1} - P_{gk}^{n+1}}{\Delta z} \right) - \left(\frac{P_{gk}^{n+1} - P_{gk-l}^{n+1}}{\Delta z} \right) \right) \\ & - D_{mk-l}^{n+1} \left(\frac{P_{gk}^{n+1} - P_{gk-l}^{n+1}}{\Delta z} \right) \\ & = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

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

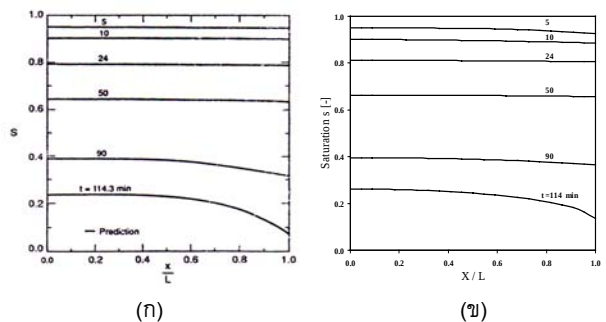


รูปที่ 2 รายละเอียดของแผนผัง และวิธีการคำนวณ

สำหรับกระบวนการทางระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

3. ผลวิจัยและวิจารณ์ผล

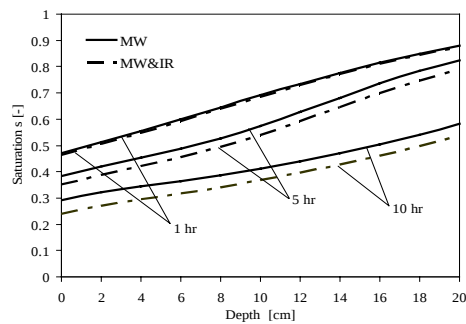
ในการศึกษาเพื่อวิเคราะห์กระบวนการถ่ายเทความร้อน มวลสาร และความดันในวัสดุพูนที่ไม่อิ่มตัวโดยปล่อยคลื่นอินฟราเรดร่วมกับไมโครเวฟให้กับแพคเกจของวัสดุพูนซึ่งประกอบด้วย 3 เฟส คือ เม็ดแก้ว (glass beads) น้ำและอากาศ ดังรูปที่ 1 โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นถูกตรวจสอบความถูกต้องโดยนำเงื่อนไขการทดลองและรายละเอียดของข้อมูลจาก Kaviany [13] พบว่าให้ผลที่สอดคล้องกันดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งถือได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้มีความถูกต้อง



รูปที่ 3 การกระจายความชื้นกับระยะความลึกตามเวลาที่ได้รับความร้อน

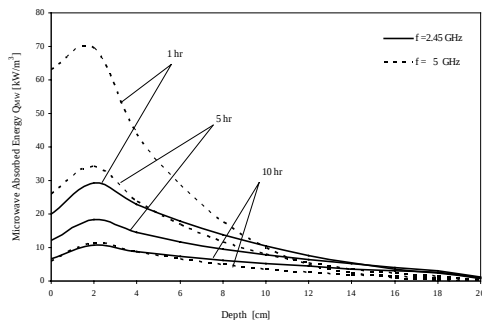
ก. ผลการคำนวณจาก Kaviany [13]

ข. ผลการคำนวณจากการใช้แบบจำลองที่พัฒนาจากการศึกษา

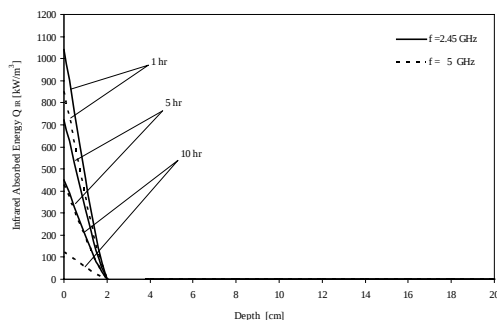


รูปที่ 4 การกระจายความชื้นกับระยะความลึกของแพคเบตโดยเปรียบเทียบการใช้คลื่นไมโครเวฟและการใช้คลื่นอินฟราเรดร่วมกับไมโครเวฟ ($d = 0.15 \text{ mm}$, $S_{in} = 0.7$, $E_{in(MW)} = 4,200 \text{ V/m}$, $E_{in(IR)} = 500 \text{ V/m}$, $f_{MW} = 2.45 \text{ GHz}$, $f_{IR} = 742 \text{ GHz}$)

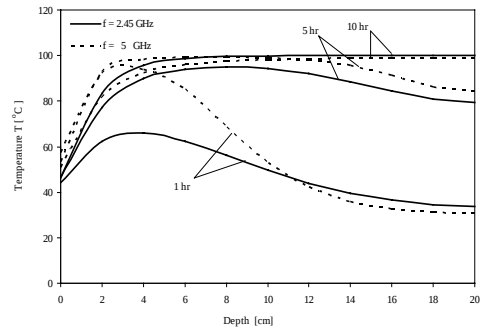
และพบว่าการใช้คลื่นอินฟราเรดสามารถเปลี่ยนพลังงานของคลื่นเป็นความร้อนที่บริเวณผิวของวัสดุเนื่องจากเป็นคลื่นที่มีย่านความถี่สูง โดยอยู่ในช่วง 10^{11} - 10^{14} Hz และความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 10^{-3} - 10^{-6} เมตร ส่วนคลื่นไมโครเวฟนั้นจะเปลี่ยนพลังงานของคลื่นที่ถูกดูดซับสู่วัสดุเป็นความร้อนทำให้วัสดุนั้นร้อนขึ้นทั้งก้อน (volumetric heating) อุณหภูมิภายในจึงค่อนข้างสม่ำเสมอ และการถ่ายเทความร้อนเป็นไปอย่างรวดเร็วดังรูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายความชื้นกับระยะความลึกของแพคเบตโดยเปรียบเทียบการใช้พลังงานไมโครเวฟและการใช้พลังงานอินฟราเรดร่วมกับไมโครเวฟ



รูปที่ 5 อัตราการดูดกลืนพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟกับระยะความลึกของแพคเบตโดยเปลี่ยนความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ ($d = 0.15 \text{ mm}$, $S_{in} = 0.7$, $E_{in(MW)} = 4,200 \text{ V/m}$, $E_{in(IR)} = 500 \text{ V/m}$, $f_{IR} = 742 \text{ GHz}$)

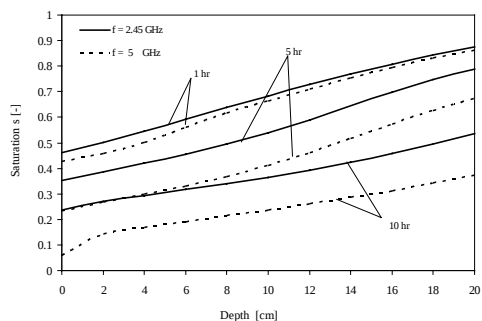


รูปที่ 6 อัตราการดูดกลืนพลังงานจากคลื่นอินฟราเรดกับระยะความลึกของแพคเบตโดยเปลี่ยนความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ ($d = 0.15 \text{ mm}$, $S_{in} = 0.7$, $E_{in(MW)} = 4,200 \text{ V/m}$, $E_{in(IR)} = 500 \text{ V/m}$, $f_{IR} = 742 \text{ GHz}$)



รูปที่ 7 การกระจายอุณหภูมิกับระยะความลึกของแพคเบตโดยเปลี่ยนความถี่คลื่นไมโครเวฟ ($d = 0.15 \text{ mm}$, $S_{in} = 0.7$, $E_{in(MW)} = 4,200 \text{ V/m}$, $E_{in(IR)} = 500 \text{ V/m}$, $f_{IR} = 742 \text{ GHz}$)

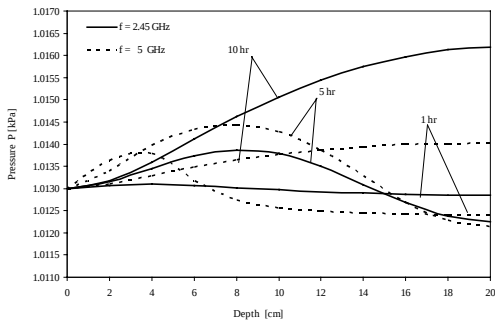
จากรูปที่ 5 ถึง 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการดูดกลืนพลังงานกับระยะความลึกของแพคเบต โดยเปลี่ยนแปลงความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ ผลการศึกษา พบว่าในรูปที่ 5 ในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการดูดกลืนพลังงานในแต่ละความถี่มีความแตกต่างกันมาก เนื่องจากในช่วงเริ่มแรกของกระบวนการนั้นมีความชื้นสูงและค่า Loss Tangent Coefficient สูง (ดังแสดงในสมการที่ 1) ทำให้อัตราการดูดกลืนพลังงานมากจึงทำให้เกิดความร้อนสูง ดังนั้นอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจึงสูงตามไปด้วย (รูปที่ 7) แต่เมื่อเวลาผ่านไปความแตกต่างของอัตราการดูดกลืนพลังงานในแต่ละความถี่น้อยลงเนื่องจากมีปริมาณความชื้นลดลงและค่า Loss Tangent Coefficient ลดลง ทำให้อัตราการดูดกลืนพลังงานลดลง อย่างไรก็ตามที่ระยะความลึกมาก ๆ อัตราการดูดกลืนพลังงานที่ความถี่ต่ำกว่า (2.45 GHz) กลับมีค่าสูงกว่าความถี่ที่สูง (5 GHz) เล็กน้อย เนื่องจากกรณีที่ค่าความถี่ต่ำจะมีค่าความยาวคลื่นมากกว่า ทำให้การดูดซึมพลังงานไมโครเวฟสามารถขยายไปได้ไกลกว่าแต่สำหรับอัตราการดูดกลืนพลังงานของวัสดุเนื่องจากการให้พลังงานอินฟราเรดพบว่ามีความสูงที่บริเวณผิวของวัสดุเนื่องจากอินฟราเรดเป็นคลื่นที่มีความยาวคลื่นสั้นจึงทำให้การดูดซึมพลังงานเกิดที่บริเวณผิวของวัสดุดังรูปที่ 6



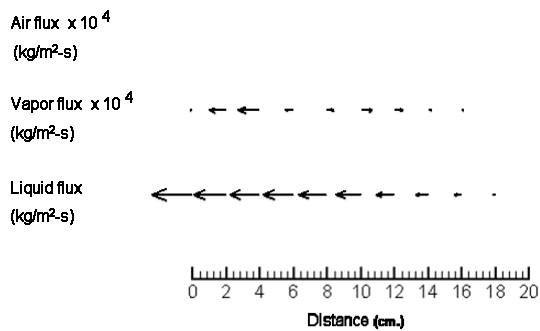
รูปที่ 8 การกระจายความชื้นกับระยะความลึกของแพคเบตโดยเปลี่ยนความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ ($d = 0.15 \text{ mm}$, $S_{in} = 0.7$, $E_{in(MW)} = 4,200 \text{ V/m}$, $E_{in(IR)} = 500 \text{ V/m}$, $f_{IR} = 742 \text{ GHz}$)

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายความชื้นกับระยะความลึกของแพคเบตต่อการความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ (รูปที่ 8) พบว่าในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการที่ความถี่ของคลื่นไมโครเวฟมีค่า 5 GHz สามารถไล่ความชื้นได้มากกว่าที่ความถี่ของคลื่นไมโครเวฟมีค่า 2.45 GHz เนื่องจากการที่ความถี่ของคลื่นไมโครเวฟมีค่าสูงจะทำให้

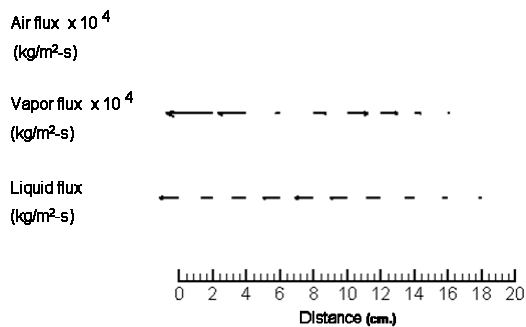
อัตราการดูดกลืนพลังงานสูง (ดังแสดงในสมการที่ 1) ทำให้เกิดความร้อนสูงขึ้นที่ภายในแพคเบต แล้วค่อยส่งความร้อนออกด้านนอก แต่ที่ช่วงท้ายของกระบวนการ (10 hr.) ที่ความถี่ 2.45 GHz สามารถไล่ความชื้นที่ระยะความลึกของแพคเบตสูงได้มากกว่าที่ความถี่ 5 GHz โดยในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการภายในแพคเบตจะมีเฟสของของเหลวอย่างต่อเนื่อง ทำให้อิทธิพลของความดันคาพิลลารี (capillary pressure) ที่ขับเคลื่อนของเหลวไปยังผิวหน้าแพคเบตมีค่าสูง แต่เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณความชื้นลดลง ทำให้การเคลื่อนที่ของความชื้น (ซึ่งเป็นไอส่วนใหญ่) ออกสู่ผิวหน้านั้นเป็นอิทธิพลของการแพร่ของไอ (vapor diffusion) เป็นหลัก ประกอบกับอิทธิพลของการพาความร้อนบริเวณผิวหน้าของแพคเบตจึงทำให้การเคลื่อนย้ายความชื้นที่บริเวณผิวหน้าของแพคเบตสูง



รูปที่ 9 ความดันกับระยะความลึกของแพคเบตโดยเปลี่ยนความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ ($d = 0.15 \text{ mm}$, $S_{in} = 0.7$, $E_{in(MW)} = 4,200 \text{ V/m}$, $E_{in(IR)} = 500 \text{ V/m}$, $f_{IR} = 742 \text{ GHz}$)

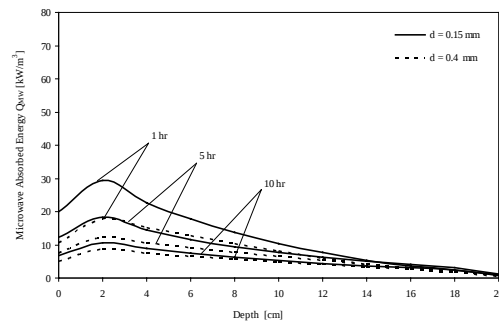


รูปที่ 10 พลักซ์เวคเตอร์ในแพคเบตที่เวลา 4 ชั่วโมง กรณี $f_{MW} = 2.45 \text{ GHz}$

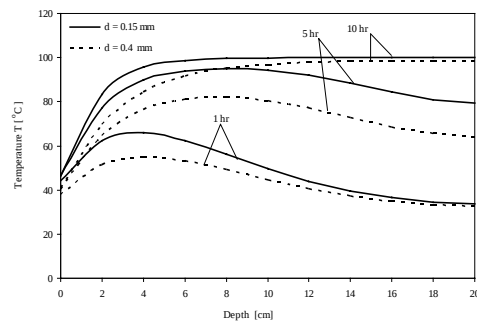


รูปที่ 11 พลักซ์เวคเตอร์ในแพคเบตที่เวลา 4 ชั่วโมง กรณี $f_{MW} = 5 \text{ GHz}$

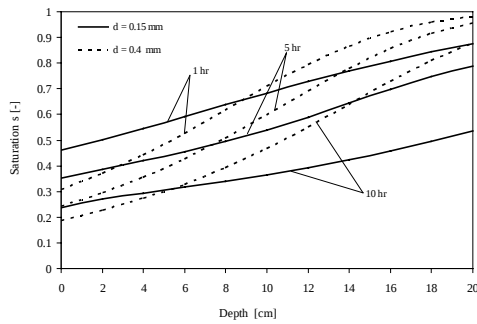
ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับระยะความลึกของแพคเบต โดยเปลี่ยนความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ พบว่าความดันจะมีค่าเข้าใกล้ความดันบรรยากาศที่บริเวณผิวแล้วค่อย ๆ เพิ่มขึ้นที่ความลึกแพคเบตมากขึ้น โดยเฉพาะเมื่อเวลาการอบแห้งเพิ่มมากขึ้น (10 hr) อย่างไรก็ตามที่เวลาไม่สูงมาก (5 hr) ที่ตอนปลายของแพคเบต ค่าความดันจะมีค่าต่ำกว่าบรรยากาศ ที่เป็นเช่นนี้เพราะที่บริเวณดังกล่าวน้ำพยายามแยกตัวออกไปจากช่องว่างทำให้เป็นการเพิ่มปริมาตรของเฟสก๊าซ ในทำนองเดียวกันทำให้ความดันย่อยของอากาศบริเวณนั้นต่ำลงส่งผลทำให้ความดันรวมนี้ต่ำลงไปด้วย แต่เมื่อเวลาผ่านไปเรื่อย ๆ ค่าอุณหภูมิและความดันจะเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่คล้ายกัน อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้เกิดความดันรวมมากพอที่จะปลดปล่อยให้อไที่ระเหยเนื่องจากพลักซ์ความร้อนออกไปได้ ขณะเดียวกันพบว่าค่าความถี่ไมโครเวฟก็ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของความดันรวม ที่ความถี่สูงอุณหภูมิแพคเบตก็สูงตามและส่งผลให้ความดันรวมสูงตามไปด้วย โดยเฉพาะที่บริเวณตอนบนของแพคเบตซึ่งสามารถดูดกลืนพลังงานไมโครเวฟได้สูงกว่า แต่ตรงส่วนปลายของแพคเบตค่าความดันในกรณีความถี่สูงจะมีค่าต่ำกว่ากรณีความถี่ต่ำมาก ทั้งนี้เพราะอิทธิพลของการดูดกลืนคลื่นที่บริเวณนี้มีค่าต่ำ จากรูปที่ 10 และ 11 แสดงพลักซ์เวคเตอร์ที่เกิดขึ้นภายในแพคเบตที่เวลา 4 ชั่วโมง พบว่าในกรณีความถี่ 2.45 GHz จะมีพลักซ์ของไอน้ำเกิดขึ้นน้อยกว่ากรณีความถี่ 5 GHz ซึ่งสอดคล้องกับการกระจายอุณหภูมิและความชื้นที่เกิดขึ้นภายในแพคเบต (รูปที่ 7 และ 8 ตามลำดับ)



รูปที่ 12 อัตราการดูดกลืนพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟกับระยะความลึกของแพคเบตโดยเปลี่ยนขนาดของอนุภาค ($S_{in} = 0.7$, $E_{in(MW)} = 4,200 \text{ V/m}$, $E_{in(IR)} = 500 \text{ V/m}$, $f_{MW} = 2.45 \text{ GHz}$, $f_{IR} = 742 \text{ GHz}$)

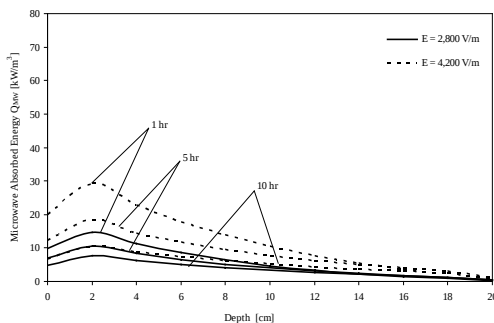


รูปที่ 13 การกระจายอุณหภูมิกับระยะความลึกของแพคเบตโดยเปลี่ยนขนาดของอนุภาค ($S_{in} = 0.7$, $E_{in(MW)} = 4,200 \text{ V/m}$, $E_{in(IR)} = 500 \text{ V/m}$, $f_{MW} = 2.45 \text{ GHz}$, $f_{IR} = 742 \text{ GHz}$)

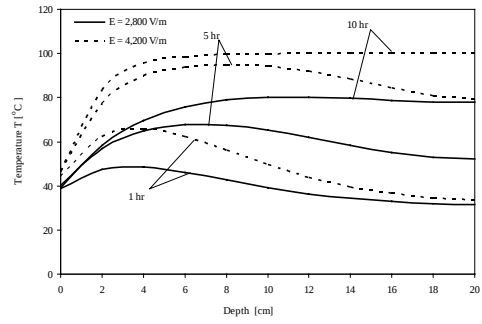


รูปที่ 14 การกระจายความชื้นกับระยะความลึกของแพคเบตโดยเปลี่ยนขนาดของอนุภาค ($S_{in}=0.7, E_{in(MW)}=4,200\text{ V/m}, E_{in(IR)}=500\text{ V/m}, f_{MW}=2.45\text{ GHz}, f_{IR}=742\text{ GHz}$)

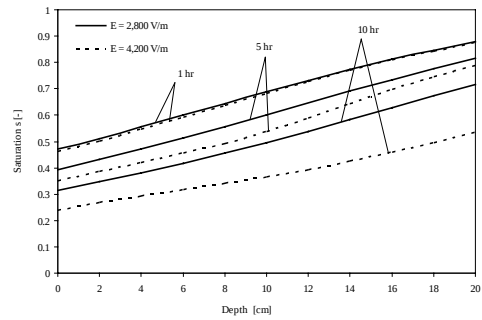
สำหรับการเปลี่ยนแปลงขนาดอนุภาคของแพคเบต พบว่าวัสดุพูนที่มีขนาดอนุภาค 0.4 mm. จะมีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนและมวลสารน้อยกว่าที่วัสดุพูนที่มีขนาดอนุภาค 0.15 mm. จากรูปที่ 12 จะเห็นได้ว่าวัสดุพูนที่มีขนาดอนุภาค 0.15 mm. สามารถดูดกลืนพลังงานได้มากเนื่องจากปริมาณน้ำภายในโครงสร้างของ แพคเบตโดยเฉลี่ยมีค่ามากกว่าแพคเบตของวัสดุพูนที่มีขนาดอนุภาค 0.4 mm. ส่งผลทำให้ Loss Tangent Coefficient มีค่าสูงตามไปด้วย จึงทำให้อุณหภูมิที่เกิดขึ้นสูงดังเห็นได้จากรูปที่ 13 ประกอบกับวัสดุพูนที่มีอนุภาคขนาด 0.15 mm. มีความต้านค่าพิวลาสูง [10] ทำให้สามารถไล่ความชื้นที่ภายในได้ดีกว่าวัสดุพูนที่มีขนาดอนุภาค 0.4 mm. ซึ่งมีความต้านค่าพิวลาต่ำกว่าดังแสดงในรูปที่ 14 ในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการจะมีอิทธิพลของความต้านค่าพิวลาที่ขับเคลื่อนของเหลวไปยังผิวหน้าแพคเบตมีค่าสูง แต่เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณความชื้นลดลง ทำให้การเคลื่อนที่ของความชื้นออกสู่ผิวหน้านั้นเป็นอิทธิพลของการแพร่ของไอน้ำเป็นหลัก และค่าความดันมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 15 อัตราการดูดกลืนพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟกับระยะความลึกของแพคเบตโดยเปลี่ยนความเข้มสนามไฟฟ้าของไมโครเวฟ ($d=0.15\text{ mm}, S_{in}=0.7, E_{in(IR)}=500\text{ V/m}, f_{MW}=2.45\text{ GHz}, f_{IR}=742\text{ GHz}$)



รูปที่ 16 การกระจายอุณหภูมิกับระยะความลึกของแพคเบตโดยเปลี่ยนความเข้มสนามไฟฟ้าของไมโครเวฟ ($d=0.15\text{ mm}, S_{in}=0.7, E_{in(IR)}=500\text{ V/m}, f_{MW}=2.45\text{ GHz}, f_{IR}=742\text{ GHz}$)



รูปที่ 17 การกระจายความชื้นกับระยะความลึกของแพคเบตโดยเปลี่ยนความเข้มสนามไฟฟ้าของไมโครเวฟ ($d=0.15\text{ mm}, S_{in}=0.7, E_{in(IR)}=500\text{ V/m}, f_{MW}=2.45\text{ GHz}, f_{IR}=742\text{ GHz}$)

จากรูปที่ 15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการดูดกลืนพลังงานกับความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปที่ระยะความลึกใด ๆ ของแพคเบต พบว่าอัตราการดูดกลืนพลังงานที่ความเข้มของสนามไฟฟ้าที่มีค่า 4,200 V/m ทำให้เกิดอุณหภูมิสูงกว่าการใช้ความเข้มของสนามไฟฟ้าที่มีค่า 2,800 V/m เนื่องจากการที่ความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ป้อนมีค่าสูงนั้นส่งผลให้อัตราการดูดกลืนพลังงานสูงขึ้น (ดังแสดงในสมการที่ 1) จึงทำให้อุณหภูมิที่เกิดขึ้นสูง (ดังรูปที่ 16) ดังนั้นจึงส่งผลต่อการเคลื่อนย้ายความชื้นได้มากกว่าการใช้ความเข้มของสนามไฟฟ้าที่มีค่าต่ำ จากรูปที่ 17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายความชื้นกับการเปลี่ยนความเข้มของสนามไฟฟ้ากับระยะความลึกของแพคเบต พบว่าที่เวลาสุดท้ายของกระบวนการนั้นมีความแตกต่างของการกระจายความชื้นกับระยะความลึกของแพคเบตที่เปลี่ยนแปลงความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปไม่มากนัก เนื่องจากกระบวนการอบแห้งเข้าใกล้สภาวะสมดุลและพบว่าการกระจายตัวของความดันรวมโดยเฉลี่ยตลอดแพคเบตมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก ดังนั้นอิทธิพลของความดันรวมส่งผลต่อจลนศาสตร์ของการอบแห้งไม่มากนัก ทั้งนี้เป็นเพราะในกระบวนการอบแห้งได้ดำเนินไปถึงสภาวะที่อุณหภูมิภายในวัสดุมีค่าไม่เกินจุดเดือด

4. สรุป

จากการศึกษา พบว่าในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการอบแห้งนั้น ความต้านค่าพิวลาจะมีอิทธิพลสูงในกระบวนการถ่ายเทมวลสาร แต่เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณความชื้นลดลง ทำให้การถ่ายเทมวลสาร (การ

เคลื่อนที่ของความชื้นซึ่งเป็นไอส่วนใหญ่) นั้นเป็นอิทธิพลจากการแพร่ของไอน้ำเป็นหลัก และเมื่อความเข้มข้นของสนามไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟที่ป้อนเข้าไปมีค่าสูงจะมีอัตราการดูดกลืนพลังงานสูง ทำให้เกิดความร้อนสูงจึงสามารถถ่ายเทมวลสารได้มากกว่าความเข้มข้นของสนามไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟที่มีค่าต่ำ คลื่นไมโครเวฟที่มีความถี่สูงจะมีอัตราการดูดกลืนพลังงานสูง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้ามากกว่าอนุภาคนาโนขนาดเล็กจะมีความต้านทานผิวที่ต่ำกว่าทำให้สามารถถ่ายเทมวลสารได้ดีกว่าอนุภาคนาโนขนาดใหญ่ ในส่วนของอิทธิพลของความดันรวมนั้นส่งผลน้อยมากต่อจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งที่มีอุณหภูมิแพคเกจต่ำดังในการศึกษาครั้งนี้และพบว่าการใช้คลื่นอินฟราเรดร่วมกับคลื่นไมโครเวฟทำให้อุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในวัสดุพูนก่อนข้างสม่ำเสมอ และการถ่ายเทความชื้นที่เกิดขึ้นเป็นไปอย่างรวดเร็วกว่าการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟเพียงอย่างเดียวเนื่องจากอินฟราเรดจะเปลี่ยนพลังงานของคลื่นเป็นความร้อนที่บริเวณผิวของวัสดุเพราะเป็นคลื่นที่มีย่านความถี่สูงซึ่งความยาวคลื่นสั้น ส่วนคลื่นไมโครเวฟนั้นจะเปลี่ยนพลังงานของคลื่นที่ถูกดูดซับสู่วัสดุเป็นความร้อนทำให้วัสดุนั้นร้อนขึ้นทั้งก้อน (volumetric heating) ดังนั้นเมื่อใช้พลังงานอินฟราเรดร่วมกับไมโครเวฟจึงส่งผลให้การถ่ายเทความร้อน มวลสารและความดันนั้นเกิดได้ดีขึ้น ซึ่งงานวิจัยนี้สามารถนำไปเป็นข้อมูลพื้นฐานที่ใช้ในการออกแบบระบบจริงในทางปฏิบัติและอาจจะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่ศึกษาวิจัยเกี่ยวกับกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพูนสำหรับการวิเคราะห์ในกรณีอื่น ๆ อีกด้วย

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยที่สนับสนุนทุนวิจัยในครั้งนี้

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_{MW}	= microwave power absorbed term (W/m^3)
Q_{IR}	= Infrared 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 ($W/m^2 K$)
h_m	= mass transfer constant ($W/m^2 K$)

Subscripts

MW = Microwave	IR = Infrared
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: 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] Adonis M, Khan, MTE, "Combined Convective and Infrared Drying Model for Food Applications", IEEE AFRICON, 2004, pp.1049-1052.
- [5] Glouannece, P et al., "Experimental Survey on The Combination of Radiating Infrared and Microwave Sources for the Drying of Porous Material", Applied Thermal Engineering 22, 2002, pp. 1689 -1703.
- [6] Praveen, D.G. et al., "Infrared and Hot-Air Drying of Onions." Journal of Food Processing and Preservation 29, 2005, pp. 132-150.
- [7] Salagnac, P et al., "Numerical Modeling of Heat and Mass Transfer in Porous Medium During Combined Hot Air, Infrared and Microwaves Drying." International Journal of Heat and Mass Transfer 47, 2004, pp. 4479-4489.

- [8] A.K.Datta, H.Ni, Infrared and hot-air-assisted microwave heating of food for control of surface moisture Journal of Food Engineering 51 , 2002, pp.355-364.
- [9] Pall,R., Mohsenin,N.N."A soil air pycrometer for determination of porosity and particle density." Transactions, American Society of Agricultural Engineers 23 (3), 1980, pp. 735-741, 745
- [10] 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.
- [11] 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
- [12] Patankar,S.V.,1980 "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, McGraw-Hill." New York, Chaps.1-4.
- [13] Kaviany, M., Principle of heat transfer in porous media, Springer, New York, (1991).