บทที่ 5

การวิเคราะห์กระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพรุนที่ไม่อิ่มตัว ภายใต้พลังงานไมโครเวฟและอินฟราเรด : ระบบพิกัดฉาก

ในอดีตที่ผ่านมา การศึกษากระบวนการถ่ายเทความร้อน มวลสารและความดันใน ระดับจุลภาคนั้นยังมีการศึกษาวิจัยกันน้อย โดยเฉพาะการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีในวัสดุพรุน ที่ไม่อิ่มตัวที่อธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงขนาดของอนุภาค ความเข้มของสนามไฟฟ้าและความถี่ ของคลื่นไมโครเวฟ เพื่อศึกษาปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในวัสดุพรุนระหว่างกระบวนการ ถ่ายเทความร้อน มวลสาร ซึ่งที่ผ่านมาได้มีการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการถ่ายเทความร้อน มวล สารและความดัน ดังนี้ งานวิจัยของ Boukadida (2000) และ Wang (2000) ทำการทดลองและ สร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนและมวลของวัสดุพรุนเพื่อศึกษาอิทธิพล ของอุณหภูมิความดันก๊าซและความชื้นของอากาศต่อการอบแห้ง แต่ไม่ได้ใช้ไมโครเวฟ Ratanadecho et al. (2002) ศึกษากระบวนการถ่ายเทความร้อน มวลสารและการทำละลายของ วัสดุพรุนในระบบสองมิติเพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟ โดยทำการทดลอง และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Feng et al. (2001) สร้างแบบจำลองการถ่ายเทความร้อน และมวลสารของกระบวนการอบแห้งโดยใช้ระบบไมโครเวฟ-สเปาเต็ดเบด โดยใช้เทคนิคตัวแปร ้ไร้มิติและวิธีผลต่างสืบเนื่องในการสร้างแบบจำลองที่ทำนายระดับของอุณหภูมิ ความซื้น และ ความดัน พบว่าการถ่ายเทความชื้นเนื่องจากอิทธิพลของแรงดันในระบบนี้ส่งผลให้อัตราการ อบแห้งสูง Ratanadecho (2006) ทำการทดลองและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษา กระบวนการถ่ายเทความร้อนในการบ่มไม้โดยใช้ระบบไมโครเวฟ ศึกษาถึงอิทธิพลของความถี่ของ คลื่นไมโครเวฟและขนาดของชิ้นทดสอบ Ni et al.(1999) สร้างแบบจำลองของวัสดุพรุน เพื่อ ทำนายการถ่ายเทความชื้นระหว่างการให้ความร้อนกับวัสดุที่มีความชื้นต่ำและวัสดุที่มีความชื้นสูง ้ด้วยไมโครเวฟ พบว่าไมโครเวฟทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายในและช่วยให้มีการถ่ายเทความชื้นมาก ขึ้น Ratanadecho et al. (2001) ทำการศึกษาทั้งทฤษฎีและการทดลองของกระบวนการอบแห้ง โดยใช้ไมโครเวฟในวัสดุพรุนที่ไม่อิ่มตัว โดยศึกษาเน้นในเรื่องการถ่ายเทความร้อนและความชื้น การแพร่ของไอน้ำในระบบ 1 มิติ พบว่าวัสดุพรุนที่มีอนุภาคขนาดเล็กจะมีแรงดันคาพิวลารีสูงกว่า ทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่าวัสดุพรุนที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ไม่ได้ ศึกษาถึงอิทธิพลของความดันก๊าซ กำลังและความถี่ไมโครเวฟ Ratanadecho et al.(2002)

ทำการศึกษากระบวนการอบแห้งวัสดุพรุนชนิดคาพิวลารีที่มีหลายชั้นโดยใช้ไมโครเวฟ โดยศึกษา การกระจายของสนามไฟฟ้า ความชื้นและอุณหภูมิในระบบ 2 มิติ พบว่าวัสดุพรุนที่มีอนุภาคขนาด เล็กจะมีความสามารถในการถ่ายเทความชื้นได้สูงกว่าวัสดุพรุนที่มีอนุภาคขนาดใหญ่และพบว่า รูปแบบของการจัดเรียงชั้นวัสดุตัวอย่างมีผลต่อการถ่ายเทความชื้น

ที่ผ่านมางานวิจัยส่วนใหญ่จะเน้นการกระจายอุณหภูมิ ความชื้นและความดันเป็นส่วน ใหญ่ แต่การศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างของวัสดุพรุน (ขนาดอนุภาคหรือ รูพรุน) ความเข้มของสนามไฟฟ้า และความถี่ไมโครเวฟ นั้นยังไม่มีการศึกษาอย่างเป็นระบบ โดย งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาถึงอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงขนาดของอนุภาค ความเข้มของสนามไฟฟ้า และความถี่ไมโครเวฟที่มีผลต่อจลนศาสตร์ของกระบวนการถ่ายเทความร้อน มวลสารและ ความดันในวัสดุพรุนที่ไม่อิ่มตัวภายใต้พลังงานไมโครเวฟอย่างสมบรูณ์นอกจากนี้อิทธิพลของ ความดันในวัสดุจะถูกนำมาพิจารณาด้วย



ภาพที่ 5.1 ระเบียบวิธีวิจัยสำหรับระบบพิกัดฉาก

โดยมีระเบียบวิธีวิจัยสำหรับการวิเคราะห์ในระบบพิกัดฉากดังภาพที่ 5.1 การวิเคราะห์ เชิงทฤษฏีของการถ่ายเทความร้อนและมวลสารภายใต้พลังงานไมโครเวฟและพลังงานไมโครเวฟ ร่วมกับอินฟราเรดนั้น การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการวิเคราะห์นี้ได้พิจารณาถึง สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางอุณหพลศาสตร์ สมบัติการส่งผ่าน สมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุพรุน ที่ไม่อิ่มตัว (ซึ่งประกอบด้วยอนุภาคของเม็ดแก้ว น้ำ และอากาศ) จากนั้นทำการประยุกต์ให้อยู่ใน รูปแบบของระเบียบวิธีเซิงตัวเลข โดยอาศัยหลักการของระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุม (finite volume method) แล้วจึงทำการจัดสมการที่มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นให้สามารถหาคำตอบโดยใช้ระเบียบ วิธี Newton-Raphson ได้ตามลำดับ ซึ่งข้อมูลได้จากการทดลองและจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อ ศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงความดัน อุณหภูมิ ความชื้นและอัตราการดูดกลืนพลังงาน ซึ่งความรู้ที่ ได้จากงานวิจัยครั้งนี้จะเป็นประโยชน์อย่างมากในการทำนายพฤติกรรมการถ่ายเทมวลสารและ ความร้อน อุณหภูมิ ความดันและความชื้น ซึ่งสามารถช่วยควบคุมอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์และ สามารถปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ความรู้ความเข้าใจในการศึกษานี้สามารถ นำไปใช้ประยุกต์ออกแบบและสร้างอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องให้มีประสิทธิภาพสูงอีกด้วย

งานวิจัยในบทนี้ได้ศึกษาและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

- 5.1. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการวิเคราะห์กระบวนการถ่ายเทความร้อนและ มวลสารในวัสดุพรุนที่ไม่อิ่มตัวภายใต้พลังงานไมโครเวฟ (อิทธิพลของความเข้มของ สนามไฟฟ้า และความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ ขนาดอนุภาค ความชื้นเริ่มต้น)
- 5.2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการวิเคราะห์กระบวนการถ่ายเทความร้อน มวลสาร และความดันในวัสดุพรุนที่ไม่อิ่มตัวภายใต้พลังงานไมโครเวฟ (อิทธิพลของขนาด อนุภาค ความเข้มของสนามไฟฟ้าและความถี่ไมโครเวฟ)
- 5.3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีของการถ่ายเทความร้อน มวลสารและความดันในวัสดุพรุนที่ไม่อิ่มตัวภายใต้พลังงานไมโครเวฟร่วมกับ อินฟราเรด (อิทธิพลของขนาดอนุภาค ความเข้มของสนามไฟฟ้าและความถี่ ไมโครเวฟ)

# 5.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีในกระบวนการถ่ายเทความร้อน และมวลสารในวัสดุพรุนที่ไม่อิ่มตัวภายใต้พลังงานไมโครเวฟ

งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์เชิงทฤษฏีของกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารใน วัสดุพรุนที่ไม่อิ่มตัวโดยใช้พลังงานจากคลื่นไมโครเวฟ โดยมุ่งศึกษาถึงอิทธิพลของขนาดอนุภาค ปริมาณความชื้นเริ่มต้น ความเข้มของสนามไฟฟ้าและความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ พบว่าการ เปลี่ยนแปลงขนาดของอนุภาค (0.15 mm, 0.4 mm) ปริมาณความชื้นเริ่มต้น (0.3, 0.5, 0.7) ความเข้มของสนามไฟฟ้า (E<sub>in</sub> = 2800 V/m, E<sub>in</sub> = 4200V/m) และความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ (1.38 GHz, 2.45 GHz, 3.5 GHz) มีผลต่อจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งโดยรวมเป็นอย่างมาก ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปเป็นข้อมูลพื้นฐานต่อการทำความเข้าใจกระบวนการ อบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟและสามารถใช้ในการออกแบบระบบจริงในทางปฏิบัติ

ซึ่งที่ผ่านมานั้นการศึกษาด้านการอบแห้งด้วยไมโครเวฟจะเน้นที่การกระจายอุณหภูมิ ความชื้น ความดันและเน้นการทดลองเป็นส่วนใหญ่ดังนี้ Tulasidas (1995) ทำการทดลองอบแห้ง องุ่นโดยใช้ลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ Shivhare et al. (1991) ที่ทำการอบแห้งข้าวโพดด้วย ไมโครเวฟเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่และอุณหภูมิของอากาศ Benjamin (1996) ศึกษาโดยใช้ไมโครเวฟอบแห้งถั่วเหลืองและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แต่ใช้สมการ การแพร่เป็นพื้นฐานและเน้นที่การทดลอง Perre (1996) ศึกษาโดยสร้างแบบจำลองทาง คณิตศาสตร์เพื่ออธิบายปรากฏการณ์การส่งผ่านและการระเหยของของเหลวภายใต้กำลังงาน ไมโครเวฟสูง ๆ เป็นต้น แต่การศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างของวัสดุพรุน (ขนาดอนุภาคหรือรูพรุน) ปริมาณความชื้นเริ่มต้น ความเข้มของสนามไฟฟ้า และความถี่ของคลื่น ไมโครเวฟนั้นยังไม่มีการศึกษาอย่างเป็นระบบ

#### 5.1.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากภาพที่ 5.2 แสดงถึงแบบจำลองทางกายภาพของการวิเคราะห์แบบจำลองของ กระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพรุนที่ไม่อิ่มตัวภายใต้พลังงานไมโครเวฟ โดย พิจารณาในระบบ 1 มิติ ซึ่งจะปล่อยคลื่นไมโครเวฟที่เป็นคลื่นระนาบ (plane wave) ให้กับ แพคเบดของวัสดุพรุนซึ่งวัสดุพรุนที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย 3 เฟส คือ เม็ดแก้ว (glass beads) น้ำและอากาศ



ภาพที่ 5.2 แบบจำลองทางกายภาพสำหรับการวิเคราะห์กระบวนการถ่ายเทความร้อนและ มวลสารในวัสดุพรุนที่ไม่อิ่มตัวโดยใช้ไมโครเวฟ (Ratanadecho et al., 2001)

โดยอัตราการกำเนิดปริมาณความร้อนภายใน (local volumetric heat generation) หรือ ความหนาแน่นของพลังงานไมโครเวฟที่ถูกดูดซับ (density of microwave power absorbed) ดังสมการ (Ratanadecho et al., 2001)

$$Q = -\frac{\partial P}{\partial x}dx = 2\alpha P dx = 2\alpha dx \cdot 2\pi f \varepsilon (\tan \delta) E^2 e^{-2\alpha x}$$
(5.1)

โดยที่  $\alpha$  คือ Attenuation Constant ซึ่งคำนวณได้จาก

$$\alpha = 2\pi f \sqrt{\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0}{2}} \left( \sqrt{\tan^2 \delta + 1} - I \right) = \frac{2\pi f}{c} \sqrt{\frac{\varepsilon_r}{2} \left( \sqrt{\tan^2 \delta + 1} - I \right)}$$
(5.2)

ในงานวิจัยนี้กำหนดให้สมบัติไดอิเล็กตริก เป็นฟังก์ชั่นของความชื้นและอุณหภูมิ การวิเคราะห์นั้น จะใช้ทฤษฎีของ Surrounding Mixing Formulas (1980) ซึ่งสัดส่วนเชิงปริมาตร (*v*) ของความ อิ่มตัวของน้ำ ไอน้ำและอนุภาคของเม็ดแก้ว (glass beads) ถูกนำมาพิจารณาดังต่อไปนี้ (Ratanadecho et al, 2001)

$$\varepsilon(s,T) = (\varepsilon'(s,T) - j\varepsilon''(s,T))$$
(5.3a)

เมื่อ

$$\left[\varepsilon'(s,T)\right]^{m} = \sum_{i=1}^{3} \upsilon_{i} \left[\varepsilon'_{ri}(T)\right]^{m} = \phi \cdot s\left[\varepsilon'_{rl}(T)\right]^{m} + \phi(1-s)\left[\varepsilon'_{ra}\right]^{m} + (1-\phi)\left[\varepsilon'_{rp}\right]^{m}$$
(5.3b)

$$[\varepsilon''(s,T)]^{m} = \sum_{i=1}^{3} \upsilon_{i} [\varepsilon''_{i}(T)]^{m} = \phi \cdot s[\varepsilon''_{ri}(T)]^{m} + \phi(1-s)[\varepsilon''_{ra}]^{m} + (1-\phi)[\varepsilon''_{rp}]^{m}$$
(5.3c)

จากสมการข้างบนตัวแปร m นั้นควรจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ส่วนค่า Loss Tangent Coefficient ของแพคเบดสามารถแสดงได้ในสมการต่อไปนี้

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \tag{5.3d}$$

สมมุติฐานที่ใช้ในแบบจำลองของกระบวนการถ่ายเทมวลและความร้อนมีดังนี้

1. วัสดุพรุนที่พิจารณาเป็นชนิดคาพิวลารีและเป็นวัตถุคงรูปไม่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นภายใน

2. แพคเบดของวัสดุพรุนมีความสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์

3. ที่บริเวณด้านบนแพคเบดพิจารณาเป็นขอบเขตเปิด

4. การกระจายสนามไฟฟ้า อุณหภูมิและการเคลื่อนย้ายความชื้น สมมุติให้เป็น 1 มิติ

5.1.1.1 สมการความสัมพันธ์ของปรากฏการณ์ (Phenomenological Relations)

ความเร็วเฉลี่ยของของเหลวและก๊าซภายในแพคเบดของวัสดุพรุน สามารถอธิบายตาม สมการของ Darcy's Law ดังนี้

$$u_{l} = -\frac{KK_{rl}}{\mu_{l}} \left[ \frac{\partial P_{g}}{\partial x} - \frac{\partial P_{c}}{\partial x} - \rho_{l}g \right], u_{g} = -\frac{KK_{rg}}{\mu_{g}} \left[ \frac{\partial P_{g}}{\partial x} - \rho_{g}g \right]$$
(5.4)

โดยที่

 $u_l$  คือ ความเร็วเฉลี่ยของเฟสของเหลว (velocity of liquid)

- น ฐ คือ ความเร็วเฉลี่ยของเฟสของก๊าซ (velocity of gas)
- K คือ การซึมผ่าน (permeability)

 $K_r$ คือ การซึมผ่านสัมพัทธ์ (relative permeability)

้สำหรับความเร็วของไอน้ำและอากาศสามารถอธิบายในสมการของ Fick's Law ดังนี้

$$\rho_{v}u_{v} = \rho_{v}u_{g} - \rho_{g}D_{m}\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\rho_{v}}{\rho_{g}}\right), \ \rho_{a}u_{a} = \rho_{a}u_{g} - \rho_{g}D_{m}\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\rho_{a}}{\rho_{g}}\right)$$
(5.5)

5.1.1.2 สมการความสัมพันธ์เชิงสมดุล (Equilibrium Relations)

ในสมการความสัมพันธ์เชิงสมดุล ประกอบด้วยสมการซึมผ่านสัมพัทธ์สำหรับของเหลว และก๊าซ ดังนี้

$$K_{rl} = s_e^3$$
,  $K_{rg} = 1.2984 - 1.9832 s_e + 0.7432 s_e^2$  (5.6)

โดยที่  $K_{rl}$  คือ การซึมผ่านสัมพัทธ์ของของเหลว (liquid relative permeability)  $K_{rg}$  คือ การซึมผ่านสัมพัทธ์ของก๊าซ (gas relative permeability)

สำหรับค่าสมบัติของการถ่ายเทความชื้นในวัสดุพรุนที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ แสดงในตารางที่ 5.1 เมื่อ *s* ศือ ประสิทธิภาพความอิ่มตัวของน้ำ (effective water saturation) ซึ่งสัมพันธ์กับค่าความ อิ่มตัวของน้ำต่ำสุดที่ยอมให้ได้ (irreducible water saturation), *s<sub>ir</sub> สามารถหาได้จาก* 

$$s_e = \frac{s - s_{ir}}{l - s_{ir}} \tag{5.7}$$

ความดันคาพิวลารี *P*<sub>c</sub> แสดงอยู่ในรูปฟังก์ชันของความดันคาพิวลารี (Leverett functions) *J* (*s*<sub>e</sub>) ความสัมพันธ์ระหว่างความดันคาพิวลารีและความอิ่มตัวของน้ำจะถูกนิยามโดยใช้ ฟังก์ชันของความดันคาพิวลารี (Ratanadecho et al., 2001)

$$P_c = P_g - P_l = \frac{\sigma}{\sqrt{k/\phi}} J(s_e)$$
(5.8)

ตารางที่ 5.1 สมบัติของการถ่ายเทความชื้นในวัสดุพรุน

ขนาดอนุภาค, d [mm.]	ความพรุน, $\phi$ [-]	การซึมผ่าน, k [m²]
0.15	0.385	8.41×10 <sup>-12</sup>
0.4	0.371	3.52×10 <sup>-11</sup>

5.1.1.3 สมการอนุรักษ์มวล (Mass Conservation Equations)

สำหรับของแหลว

สมการอนุรักษ์มวลสำหรับของเหลวและไอน้ำได้อธิบายไว้ ดังต่อไปนี้

$$\rho_l \phi \frac{\partial s}{\partial t} + \rho_l \frac{\partial u_l}{\partial x} = - \dot{n}$$
(5.9)

สำหรับไอน้ำ 
$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_v \phi(1-s)) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho_v u_v) = \dot{n}$$
 (5.10)

5.1.1.4 สมการอนุรักษ์พลังงาน (Energy Conservation Equations)

อุณหภูมิของแพคเบดภายในวัสดุพรุนสามารถคำนวณได้จากสมการถ่ายเทความร้อน ซึ่งรวมเทอมของการดูดซับพลังงานไมโครเวฟเข้าไว้ด้วย โดยอยู่ในเทอมของความหนาแน่นของ พลังงานความร้อนที่ผลิตขึ้นภายในวัสดุ (local volumetric heat generation) สมการถ่ายเทความ ร้อนซึ่งอธิบายการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในชิ้นทดสอบซึ่งขึ้นกับเวลา คือ (Ratanadecho et al., 2001)

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \left( \rho \ C_p \right)_T T \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \left( \rho_l C_{pl} u_l + \left( \rho_a C_{pa} + \rho_v C_{pv} \right) u_g \right) T \right) + H_v \ \dot{n} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + Q$$
(5.11)

5.1.1.5 สมการถ่ายเทมวลสารและความร้อน (Moisture and Heat Transport Equations)

จากการรวมสมการอนุรักษ์มวลสำหรับของเหลว (5.9) และสมการอนุรักษ์มวลสำหรับ ไอน้ำ (5.10) ทำให้ได้สมการถ่ายเทมวลสาร (5.12) และจากสมการอนุรักษ์พลังงาน (5.11) โดย อาศัยสมการความสัมพันธ์ของปรากฏการณ์จาก Darcy's Law, Fick's Law และความเข้มข้นของ มวลสารจะได้สมการถ่ายเทความร้อน (5.13) ซึ่งทำให้ได้สมการที่ควบคุมกระบวนการถ่ายเทมวล สารและความร้อนตามลำดับ ดังนี้

$$\phi \frac{\partial}{\partial t} \left( \rho_l s + \rho_v (1 - s) \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \rho_l \frac{KK_{rl}}{\mu_l} \left( \frac{\partial P}{\partial x} + \rho_l g \right) + \rho_v \frac{KK_{rg}}{\mu_g} \left( \rho_g g \right) - D_m \frac{\partial P}{\partial x} \right) = 0$$
(5.12)

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \left( \rho \ C_p \right)_T T \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \left( \rho_l \ C_{pl} u_l + \left( \rho_a \ C_{pa} + \rho_v \ C_{pv} \right) u_g \right) T \right) + H_v \ \mathbf{\hat{n}} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + Q \tag{5.13}$$

$$(\rho C_p)_T = \rho_l C_{pl} \phi s + ((\rho C_p)_a + (\rho C_p)_v) \phi (1-s) + \rho_p C_{pp} (1-\phi)$$
(5.14)

$$\dot{n} = \frac{\partial}{\partial t} \left( \rho_{v} \phi (l - s) \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \rho_{v} \frac{KK_{rg}}{\mu_{g}} \left( \rho_{g} g \right) - D_{m} \frac{\partial P_{v}}{\partial x} \right)$$
(5.15)

5.1.1.6 เงื่อนไขขอบเขตและเงื่อนไขเริ่มต้น (Boundary and Initial Conditions)

เงื่อนไขขอบเขต คือ เงื่อนไขสำหรับขอบเขตเปิด (open boundary) โดยเงื่อนไข ขอบเขตสำหรับการแลกเปลี่ยนความร้อนและมวลสารที่ขอบเขตเปิดสามารถเขียนได้ ดังสมการ ต่อไปนี้

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = h_c \left( T - T_a \right) + \dot{n} H_v$$
(5.16)

$$\rho_l u_l + \rho_v u_v = h_m \left( \rho_v - \rho_{va} \right) \tag{5.17}$$

การพิจารณาเงื่อนไขขอบเขตที่ขอบเขตปิด (symmetry-impermeable) ที่ไม่มีการ แลกเปลี่ยนความร้อนและมวลเกิดขึ้นสามารถเขียนด้วยสมการต่อไปนี้

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0$$
,  $\frac{\partial u}{\partial x} = 0$  (5.18)

#### 5.1.2 ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

จากสมการถ่ายเทมวลสารและสมการถ่ายเทความร้อนต้องทำการประยุกต์ใช้ระเบียบ วิธีไฟในต์วอลุม (finite volume method) ซึ่งเป็นระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่อาศัยการอินทิเกรทสมการ อนุรักษ์บนปริมาตรควบคุม (control volume) โดยแบ่งขอบเขตของปัญหาที่สนใจออกเป็น ปริมาตรควบคุมย่อย ๆ จำนวนมาก แต่ละปริมาตรควบคุมจะล้อมรอบโหนด (node) ซึ่งเป็น ตำแหน่งที่แสดงค่าเฉลี่ยของปริมาณต่าง ๆ ในปริมาตรควบคุมนั้น ผลจากการอินทิเกรทสมการ อนุพันธ์แล้วประยุกต์ Gauss divergence theorem จะได้สมการพีชคณิตของแต่ละปริมาตร ควบคุมที่มีตัวแปรเป็นค่าของปริมาณใด ๆ บนโหนดในปริมาตรควบคุมนั้น และปริมาตรควบคุม รอบข้าง ดังแสดงในบทที่ 4 โดยหัวข้อนี้จะแสดงการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุม (finite volume method) สำหรับตำแหน่งโหนดภายใน (Internal node) ส่วนตำแหน่งที่บริเวณขอบเขต (boundary node) ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก.

จากสมการถ่ายเทมวลสาร (5.12) ทำการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟในต์วอลุม (finite volume method) จะได้

$$\frac{\phi}{\Delta t} (1 - s_{ir}) \Big\{ \rho_l \Big( s_{ei}^{n+l} - s_{ei}^n \Big) + \rho_{vi}^{n+l} \Big( 1 - s_{ei}^{n+l} \Big) - \rho_{vi}^n \Big( 1 - s_{ei}^n \Big) \Big\}$$

$$+ \frac{1}{\Delta z} \begin{cases} \rho_l \Bigg[ \frac{KK_{rl}}{\mu_l} \bigg|_{i+\frac{l}{2}} \Big( \frac{P_{ci+l}^{n+l} - P_{ci}^{n+l}}{\Delta z} + \rho_l g_z \Big) - \frac{KK_{rl}}{\mu_l} \bigg|_{i-\frac{l}{2}} \Big( \frac{P_{ci}^{n+l} - P_{ci-l}^{n+l}}{\Delta z} + \rho_l g_z \Big) \Big] \\ + \frac{1}{\Delta z} \begin{cases} + \left[ \rho_{vi+l}^{n+l} \frac{KK_{rg}}{\mu_g} \bigg|_{i+\frac{l}{2}} \Big( \rho_{gi}^{n+l} g_z \Big) - \rho_{vi-l}^{n+l} \frac{KK_{rg}}{\mu_g} \bigg|_{i-\frac{l}{2}} \Big( \rho_{gi-l}^{n+l} g_z \Big) \Big] \\ - \left[ D_{mi+\frac{l}{2}}^{n+l} \Big( \frac{\rho_{vi+l}^{n+l} - \rho_{vi}^{n+l}}{\Delta z} \Big) - D_{mi-\frac{l}{2}}^{n+l} \Big( \frac{\rho_{vi-l}^{n+l} - \rho_{vi-l}^{n+l}}{\Delta z} \Big) \Big] \\ = 0 = F_i^n = Gd[i] \end{cases}$$

(5.19)

# จากสมการถ่ายเทความร้อน (5.13) ทำการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟในต์วอลุม (finite volume method) จะได้

$$\frac{\left(\rho C_{p}\right)_{T_{i}}^{n+1} T_{i}^{n+1} - \left(\rho C_{p}\right)_{T_{i}}^{n} T_{i}^{n}}{\Delta t} + \frac{\rho_{l} C_{pl}}{\Delta z} \left(u_{li}^{n+1} T_{i}^{n+1} - u_{li-l}^{n+1} T_{i-l}^{n+1}\right) + \frac{\left(\rho C_{p}\right)_{av}}{\Delta z} \left(u_{gi}^{n+1} T_{i}^{n+1} - u_{gi-l}^{n+1} T_{i-l}^{n+1}\right) + H_{v}\dot{n} = \frac{1}{\Delta z} \left(\lambda_{i+\frac{l}{2}}^{n+1} \left(\frac{T_{i+1}^{n+1} - T_{i}^{n+1}}{\Delta z}\right) - \lambda_{i-\frac{l}{2}}^{n+l} \left(\frac{T_{i}^{n+1} - T_{i-l}^{n+1}}{\Delta z}\right)\right) + Q$$
(5.20)



ภาพที่ 5.3 รายละเอียดวิธีการคำนวณสำหรับกระบวนการทางระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

จากภาพที่ 5.3 แสดงรายละเอียดของแผนผังและวิธีการคำนวณสำหรับกระบวนการ เชิงตัวเลขโดยเริ่มต้นจากการรับค่าเริ่มต้นและสมบัติต่าง ๆ ซึ่งกำหนดให้ลำดับเวลา (time step) เพิ่มขึ้นเป็น ∆t โดยจะมีการเปลี่ยนค่าโหนดของความชื้นและอุณหภูมิ ในแต่ละเวลาที่เพิ่มขึ้นซึ่ง จะทำซ้ำเช่นนี้จนกระทั่งค่าที่ได้ลู่เข้าสู่ผลลัพธ์ (convergence) โดยใช้วิธีของ Newton-Raphson ในกระบวนการทำซ้ำ (iteration) คำนวณค่าอัตราการดูดกลืนพลังงานใน Subroutine Q ซึ่งรับค่า เริ่มต้นและสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุพรุนแล้วทำการคำนวณค่าอัตราการดูดกลืนพลังงาน จากนั้นจึงคำนวณค่าอุณหภูมิ ความชื้นตามลำดับ จากนั้นตรวจสอบค่าที่ได้ว่ามีค่าน้อยกว่าค่า ความคลาดเคลื่อนที่กำหนดไว้หรือไม่ ถ้ามีค่ามากกว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่มากสุดที่ยอมรับได้ ในกระบวนการ Iteration (คือ 10<sup>-8</sup>) จะทำการวนกลับไปทำซ้ำ ณ เวลาเดิม แต่ถ้ามีค่าน้อยกว่าค่า ความคลาดเคลื่อนที่กำหนดไว้ แล้วจึงตรวจสอบเวลาว่ามีค่าถึงเวลาที่กำหนดไว้หรือไม่

#### 5.1.3 ผลการวิจัยและการวิจารณ์ผล

ในการศึกษาเพื่อวิเคราะห์กระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพรุน ที่ไม่อิ่มตัวโดยป้อนคลื่นไมโครเวฟให้กับแพคเบดของวัสดุพรุนซึ่งประกอบด้วย 3 เฟส คือ เม็ดแก้ว (glass beads) น้ำและอากาศ ดังแสดงในภาพที่ 5.2 ซึ่งการใช้ไมโครเวฟนั้นจะเปลี่ยนพลังงาน ของคลื่นที่ถูกดูดซับสู่วัสดุเป็นความร้อนทำให้วัสดุนั้นร้อนขึ้นทั้งก้อน (volumetric heating) อุณหภูมิภายในจึงค่อนข้างสม่ำเสมอและการถ่ายเทความชื้นเป็นไปอย่างรวดเร็ว เมื่อทำการ ตรวจสอบความถูกต้องโดยนำเงื่อนไขการทดลองและรายละเอียดของข้อมูลงานวิจัยของ Kaviany (1992) มาตรวจสอบความถูกต้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้นในการศึกษานี้ พบว่าให้ผลที่สอดคล้องกันดังแสดงในภาพที่ 5.4 ยกเว้นค่าความชันตอนปลายในช่วงเวลาที่ 114 min ซึ่งมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยอาจเกิดจากความละเอียดในการคำนวณและคุณสมบัติ เชิงความร้อนของเอทานอลที่ใช้ในการคำนวณอย่างไรก็ตาม ถือได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้มีความถูกต้องและให้ความเชื่อมั่นสูงแก่ผู้ทำการวิจัย ซึ่งได้ผลจากการ สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังแสดงในภาพที่ 5.5 ถึง 5.16 ตามลำดับ



ภาพที่ 5.4 การกระจายความชื้นกับระยะความลึกตามเวลาที่ได้รับความร้อน

- ก. ผลการคำนวณจาก Kaviany (1992)
- ข. ผลการคำนวณจากการใช้แบบจำลองที่พัฒนาจากการศึกษา



ภาพที่ 5.5 อัตราการดูดกลืนพลังงานกับระยะความลึกของแพคเบดโดยเปลี่ยน ความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ (d = 0.15 mm, E<sub>in</sub> = 2800 V/m, S<sub>in</sub> = 0.7)



ภาพที่ 5.6 การกระจายอุณหภูมิกับระยะความลึกของแพคเบดโดยเปลี่ยน ความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ (d = 0.15 mm, E<sub>in</sub> = 2800 V/m, S<sub>in</sub> = 0.7)



ภาพที่ 5.7 การกระจายความชื้นกับระยะความลึกของแพคเบดโดยเปลี่ยน ความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ (d = 0.15 mm, E<sub>in</sub> = 2800 V/m, S<sub>in</sub> = 0.7)

จากภาพที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการดูดกลืนพลังงานกับระยะความลึก ของแพคเบดโดยเปลี่ยนความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ (1.38 GHz, 2.45 GHz และ 3.5 GHz) ที่สภาวะขนาดอนุภาค 0.15 mm. ความเข้มของสนามไฟฟ้า 2800 V/m และความชื้นเริ่มต้นที่ 0.7 ซึ่งผลที่ได้นั้น พบว่าที่เวลา 60 min จะมีความแตกต่างของอัตราการดูดกลืนพลังงานในแต่ละ ความถี่มาก เนื่องจากในช่วงแรกของกระบวนการอบแห้งนั้นมีปริมาณความชื้นสูงส่งผลให้ค่า Loss Tangent Coefficient สูง (สมการที่ 5.1) ทำให้อัตราการดูดกลืนพลังงานมาก แต่เมื่อเวลา ผ่านไป (180 min, 510 min) ปริมาณความชื้นลดลง ทำให้ความแตกต่างของอัตราการดูดกลืน พลังงานลดลง ค่า Loss Tangent Coefficient ลดลงในทุก ๆ กรณี ทำให้อัตราการดูดกลืน พลังงานลดลง จากภาพที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายอุณหภูมิกับระยะความลึกของ แพคเบดโดยเปลี่ยนความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ พบว่าที่ความถี่ต่ำ (1.38 GHz) มีการกระจาย อุณหภูมิค่อนข้างสม่ำเสมอในช่วงแรก (60 min) เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟเคลื่อนที่ผ่านแพคเบดที่มี การกระจายความชื้นอย่างสม่ำเสมอ ประกอบกับที่ความถี่ต่ำคลื่นไมโครเวฟ สามารถทะลุทะลวง ไปทำให้เกิดความร้อนที่ภายในได้สูงกว่าที่ความถี่สูง จะเห็นได้ว่าที่ความถี่ 1.38 GHz มีการ กระจายอุณหภูมิที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ กว่าในช่วงแรก (60 min) แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไป (510 min)

เกิดการเปลี่ยนเฟสของเหลวภายในแพคเบดกลายเป็นไอออกสู่ผิวหน้า (เกิด moving boundary) ทำให้บริเวณผิวหน้าเป็น Low Lossy Material (บริเวณที่ไม่มีความชื้น) ประกอบกับไม่มีการผลิต ความร้อนที่เม็ดแก้ว (glass beads) ทำให้ความร้อนที่เกิดบริเวณผิวหน้าเกิดจากการนำความร้อน จาก High Lossy Material (บริเวณที่มีความชื้น) ที่อยู่ภายในทำให้ที่ภายในมีอุณหภูมิสูง เมื่อ พิจารณาที่ความถี่ 2.45 GHz ซึ่งมีการทะลุทะลวงที่ต่ำกว่า แต่สามารถดูดกลืนพลังงานได้มากขึ้น ทำให้อัตราการดูดกลืนพลังงานโดยรวมสูงกว่า (ภาพที่ 5.5) ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่เวลา 60 min เกิด อุณหภูมิสูงที่บริเวณผิวหน้าแต่เมื่อระยะเวลาผ่านไปเกิดอุณหภูมิสูงที่ภายในของแพคเบด เหมือนกับในกรณีที่ความถี่ 1.38 GHz แต่อุณหภูมิที่เกิดขึ้นนั้นสูงกว่าและที่ความถึ่ 3.5 GHz พบว่าในช่วงแรก (60 min) มีการดูดกลืนพลังงานที่บริเวณผิวสูง ทำให้เกิดความร้อนสูงกว่าที่ ภายในของแพคเบด แต่เมื่อเวลาผ่านไป (510 min) ที่บริเวณผิวหน้ามีอุณหภูมิต่ำกว่าภายใน เนื่องจากการนำความร้อนที่ภายในส่งผ่านมาไม่มากพอ ประกอบกับที่ผิวหน้ามีการพาความร้อน เกิดขึ้นจึงทำให้ผิวหน้าแห้งอย่างรวดเร็วอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจึงต่ำกว่าภายในและเมื่อพิจารณา ความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายความชื้นกับระยะความลึกของแพคเบดโดยเปลี่ยนความถี่ของ คลื่นไมโครเวฟ (ภาพที่ 5.7) พบว่าช่วงแรกการกระจายความชื้นภายในแพคเบดในแต่ละกรณี (ความถี่ 1.38 GHz, 2.45 GHz และ 3.5 GHz) มีค่าใกล้เคียงกันแต่เมื่อเวลาผ่านไป การกระจาย ความชื้นในแต่ละกรณีมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนเพราะช่วงแรกมีปริมาณความชื้นมากทำให้ อิทธิพลของความดันคาพิวลารีมีมากส่งผลให้การเคลื่อนย้ายความชื้น ความดันคาพิวลารีภายใน โครงสร้างของแพคเบดมีอิทธิพลมากในทุกกรณี แต่เมื่อเวลาผ่านไปนาน ๆ ปริมาณความชื้นมี ้ค่าต่ำ ความดันคาพิวลารีจึงต่ำ ดังเห็นได้จากที่ความถี่ 3.5 GHz จะสามารถเคลื่อนย้ายความชื้น ได้มากกว่าที่ความถี่ 2.45 GHz และ 1.38 GHz ตามลำดับ เนื่องจากความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ มีค่าสูงจะเกิดการสลับขั้วของโมเลกุลมาก อัตราการดูดกลื่นพลังงานสูง (ดังแสดงในสมการที่ 5.1) จึงทำให้เกิดความร้อนสูงขึ้นที่ภายในแพคเบด (ดังภาพที่ 5.6) แล้วค่อยส่งความร้อนออกด้านนอก โดยในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการภายในเพดเบดจะมีเฟสของของเหลวอยู่ต่อเนื่อง ทำให้อิทธิพล ของความดันคาพิวลารีที่ขับเคลื่อนของเหลวไปยังผิวหน้าแพคเบดมีค่าสูงประกอบกับอิทธิพลของ การพาความร้อนบริเวณผิวหน้าของแพคเบดจึงทำให้การเคลื่อนย้ายความชื้นที่บริเวณผิวหน้าของ แพคเบดสูง แต่เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณความชื้นลดลง ทำให้การเคลื่อนที่ของความชื้น (ซึ่งเป็นไอ ส่วนใหญ่) ออกสู่ผิวหน้านั้นเป็นอิทธิพลของความดันไอเป็นหลัก



ภาพที่ 5.8 อัตราการดูดกลืนพลังงานกับระยะความลึกของแพคเบดโดยเปลี่ยน ขนาดของอนุภาค (f = 2.45 GHz, E<sub>in</sub> = 2800 V/m, S<sub>in</sub> = 0.5)



ภาพที่ 5.9 การกระจายอุณหภูมิกับระยะความลึกของแพคเบดโดยเปลี่ยน ขนาดของอนุภาค (f = 2.45 GHz, E<sub>in</sub> = 2800 V/m, S<sub>in</sub> = 0.5)



ภาพที่ 5.10 การกระจายความชื้นกับระยะความลึกของแพคเบดโดยเปลี่ยน ขนาดของอนุภาค (f = 2.45 GHz, E<sub>in</sub> = 2800 V/m, S<sub>in</sub> = 0.5)

้สำหรับกรณีของการเปลี่ยนขนาดอนุภาคของแพคเบด (0.15 mm, 0.4 mm) ที่สภาวะ ความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ 2.45 GHz ความเข้มของสนามไฟฟ้า 2800 V/m และความชื้นเริ่มต้นที่ 0.5 ดังแสดงในภาพที่ 5.8 ถึง 5.10 ตามลำดับ พบว่าแพคเบดที่มีขนาดอนุภาค 0.4 mm. จะมี ความสามารถในการดูดซับความร้อนและมวลสารน้อยกว่าที่แพคเบดที่มีขนาดอนุภาค 0.15 mm. ้จากภาพที่ 5.8 จะเห็นได้ว่าแพคเบดที่มีขนาดอนุภาค 0.15 mm. สามารถดูดกลืนพลังงานได้มาก เนื่องจากปริมาณน้ำภายในโครงสร้างของแพคเบดโดยเฉลี่ยมีค่ามากกว่าแพคเบดที่มีขนาด อนุภาค 0.4 mm. จึงทำให้อุณหภูมิที่เกิดขึ้นสูง (ดังภาพที่ 5.9) ประกอบกับแพคเบดที่มีอนุภาค ขนาด 0.15 mm. มีความดันคาพิวลารีสูง (Ratanadecho et al., 2001) ทำให้สามารถเคลื่อนย้าย ความชื้นที่ภายในได้ดีกว่าแพคเบดที่มีขนาดอนุภาค 0.4 mm. ซึ่งมีความดันคาพิวลารีน้อยกว่า โดยในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการจะมีอิทธิพลของความดันคาพิวลารีที่ขับเคลื่อนของเหลวไปยัง ้ผิวหน้าแพคเบดมีค่าสูง แต่เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณความชื้นลดลง ทำให้การเคลื่อนย้ายความชื้น ้ออกสู่ผิวหน้านั้นเป็นอิทธิพลของความดันไอเป็นหลัก จึงทำให้ช่วงสุดท้ายของกระบวนการนั้นมี ความแตกต่างของการกระจายความชื้นกับระยะความลึกของแพคเบดที่ทั้งสองอนุภาคของ แพคเบดมีไม่มากนักและกระบวนการอบแห้งเข้าใกล้สภาวะสมดุล อย่างไรก็ตาม พบว่าโดยเฉลี่ย แพคเบดที่มีอนุภาคขนาด 0.15 mm. สามารถเคลื่อนย้ายความชื้นได้สูงกว่าแพคเบดที่มีอนุภาค ขนาด 0.4 mm. (ดังภาพที่ 5.10)



ภาพที่ 5.11 อัตราการดูดกลืนพลังงานกับระยะความลึกของแพคเบดโดยเปลี่ยน ความเข้มของสนามไฟฟ้า (d = 0.15 mm, f = 2.45 GHz, S<sub>in</sub> = 0.5)



ภาพที่ 5.12 การกระจายอุณหภูมิกับระยะความลึกของแพคเบดโดยเปลี่ยน ความเข้มของสนามไฟฟ้า (d = 0.15 mm, f = 2.45 GHz, S<sub>in</sub> = 0.5)



ภาพที่ 5.13 การกระจายความชื้นกับระยะความลึกของแพคเบดโดยเปลี่ยน ความเข้มของสนามไฟฟ้า (d = 0.15 mm, f = 2.45 GHz, S<sub>n</sub> = 0.5)

จากภาพที่ 5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการดูดกลืนพลังงานกับระยะความลึกของ แพคเบดโดยเปลี่ยนความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไป (E<sub>in</sub> = 2800 V/m, E<sub>in</sub> = 4200 V/m) ที่ สภาวะขนาดอนุภาค 0.15 mm ความถี่ 2.45 GHz และความชื้นเริ่มต้นที่ 0.5 พบว่าอัตราการ ดูดกลืนพลังงานที่ความเข้มของสนามไฟฟ้า 4200 V/m ทำให้เกิดอุณหภูมิสูงกว่าการใช้ความเข้ม ของสนามไฟฟ้า 2800 V/m เนื่องมาจากการใช้ความเข้มของสนามไฟฟ้าที่มีค่าสูงจะทำให้มีการ ดูดกลืนพลังงานมาก (ดังแสดงในสมการที่ 5.1) จึงเกิดความร้อนสูงดังนั้นอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจึงสูง ตามไปด้วย (ภาพที่ 5.12) ทำให้สามารถเคลื่อนย้ายความชื้นได้มากกว่าการใช้ความเข้มของ สนามไฟฟ้าที่มีค่าต่ำ (ภาพที่ 5.13)



ภาพที่ 5.14 อัตราการดูดกลืนพลังงานกับระยะความลึกของแพคเบดโดยเปลี่ยน ความชื้นเริ่มต้น (d = 0.15 mm, f = 2.45 GHz, E<sub>in</sub> = 2800 V/m)



ภาพที่ 5.15 การกระจายอุณหภูมิกับระยะความลึกของแพคเบดโดยเปลี่ยน ความชื้นเริ่มต้น (d = 0.15 mm, f = 2.45 GHz, E<sub>in</sub> = 2800 V/m)



ภาพที่ 5.16 การกระจายความชื้นกับระยะความลึกของแพคเบดโดยเปลี่ยน ความชื้นเริ่มต้น (d = 0.15 mm, f = 2.45 GHz, E<sub>in</sub> = 2800 V/m)

ภาพที่ 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการดูดกลืนพลังงานกับระยะความลึกของ แพคเบด โดยเปลี่ยนแปลงความชื้นเริ่มต้น (0.3, 0.5 และ 0.7) ที่สภาวะขนาดอนุภาค 0.15 mm. ความถี่ 2.45 GHz และความเข้มของสนามไฟฟ้า 2800 V/m ซึ่งพบว่าช่วงแรกอัตราการดูดกลืน พลังงานในแต่ละเส้นความชื้นมีความแตกต่างกันมากเนื่องมาจากมีปริมาณความชื้นเริ่มต้นที่ แตกต่างกันมาก สมบัติไดอิเล็กตริกจะมีอิทธิพลมาก ซึ่งเห็นได้ว่าที่ความชื้นเท่ากับ 0.7 มีอัตราการ ดูดกลืนพลังงานสูงกว่าที่ความชื้น 0.5 และ 0.3 แต่พอช่วงปลายอัตราการดูดกลืนพลังงานแต่ละ เส้นความชื้นชิดกันมากขึ้น เนื่องจากเมื่อเวลาผ่านไปปริมาณความชื้นมีค่าน้อยลงทำให้สมบัติ ไดอิเล็กตริกไม่มีอิทธิพลมากนัก จากภาพที่ 5.15 แสดงความส้มพันธ์ระหว่างการกระจายอุณหภูมิ กับระยะความลึกของแพคเบด พบว่าที่ความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 0.7 มีอัตราการดูดกลืนพลังงานสูง กว่าที่ความชื้น 0.5 และ 0.3 เนื่องจากเมื่อเวลาผ่านไปปริมาณความสั้นมีค่าน้อยลงทำให้สมบัติ ไดอิเล็กตริกไม่มีอิทธิพลมากนัก จากภาพที่ 5.15 แสดงความส้มพันธ์ระหว่างการกระจายอุณหภูมิ กับระยะความลึกของแพคเบด พบว่าที่ความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 0.7 มีอัตราการดูดกลืนพลังงานสูง กราที่ความชื้น 0.5 และ 0.3 เนื่องจากมีองค์ประกอบของน้ำในรูพรุนสูงส่งผลทำให้ค่า Loss Tangent Coefficient สูง จึงทำให้เกิดความร้อนสูงและจากภาพที่ 5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างการ กระจายความชื้นเริ่มต้นที่มีค่าสูงนั้นเมื่อเวลาผ่านไปปริมาณความชื้นเริ่มต้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ ปริมาณความชื้นเริ่มต้นที่มีค่าสูงนั้นเมื่อเวลาผ่านไปปริมาณความชื้นจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องมาจากอิทธิพลของแรงดันคาพิวลารีจะมีบทบาทอย่างยิ่งในกรณีที่ความชื้นเริ่มต้นมีค่าสูง

#### 5.1.4 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาพบว่าในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการอบแห้งนั้นความดันคาพิวลารีจะมี อิทธิพลสูงในกระบวนการถ่ายเทมวลสาร แต่เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณความชื้นลดลงทำให้การ ถ่ายเทมวลสาร (การเคลื่อนที่ของความชื้นซึ่งเป็นไอส่วนใหญ่) ขึ้นกับอิทธิพลของความดันไอเป็น หลักและเมื่อความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปมีค่าสูงจะมีอัตราการดูดกลืนพลังงานสูง ทำให้ เกิดความร้อนสูงจึงสามารถถ่ายเทมวลสารได้มากกว่าความเข้มของสนามไฟฟ้าที่มีค่าต่ำ ความถี่ของคลื่นไมโครเวฟที่มีความถี่สูงจะมีอัตราการดูดกลืนพลังงานสูงเนื่องมาจากมีการ เปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้ามากกว่าปริมาณความชื้นเริ่มต้นที่มีค่าสูงจะมีอิทธิพลของความดัน คาพิวลารีสูงทำให้สามารถถ่ายเทมวลสารได้เร็วกว่าที่ปริมาณความชื้นเริ่มต้นที่มีค่าต่ำ อนุภาค ขนาดเล็กจะมีความดันคาพิวลารีที่สูงกว่าทำให้สามารถถ่ายเทความร้อนและมวลสารได้ดีกว่า อนุภาคขนาดใหญ่ ซึ่งงานวิจัยนี้สามารถนำไปเป็นข้อมูลพื้นฐานที่ใช้ในการออกแบบระบบจริง ในทางปฏิบัติและอาจจะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่จะศึกษาวิจัยเกี่ยวกับกระบวนการถ่ายเทความร้อน และมวลสารในกรณีอื่น ๆ



# 5.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีของการถ่ายเทความร้อน มวลสารและความดันในวัสดุพรุนที่ไม่อิ่มตัวภายใต้พลังงานไมโครเวฟ

งานวิจัยนี้ เป็นการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีที่สมบูรณ์ของการถ่ายเทความร้อน มวลสารและ ความดันในวัสดุพรุนที่ไม่อิ่มตัวภายใต้พลังงานจากคลื่นไมโครเวฟ โดยพิจารณาอิทธิพลของความ ดันที่เกิดขึ้นภายในวัสดุพรุนที่ไม่อิ่มตัวในระหว่างกระบวนการอบแห้งด้วย ผลลัพธ์ที่ได้จาก แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้จากการแก้ปัญหาด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขโดยระเบียบวิธี method) ในการวิเคราะห์แบบจำลองพิจารณาถึง สมบัติทาง ไฟในต์วอลุม (finite volume กายภาพ สมบัติทางอุณหพลศาสตร์ สมบัติการส่งผ่าน สมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุพรุนที่ไม่อิ่มตัว (ซึ่งประกอบด้วยอนุภาคของเม็ดแก้ว น้ำ และอากาศ) จากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Boukadida (2000) และ Wang (2000) ที่ทดลองและสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อน และมวลของวัสดุพรุนเพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิความดันก๊าซและความชื้นของอากาศต่อการ อบแห้งแต่ไม่ได้ใช้ไมโครเวฟและเน้นที่การทดลอง Turner (1998) และ Feng et al. (2001) สร้าง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในระบบการอบแห้งด้วยพลังงานไมโครเวฟร่วมกับการพาความร้อน โดยใช้วัสดุพรุนแบบซื้นมาก (hygroscopic porous material) Ni et al. (1999) สร้างแบบจำลอง ของตัวกลางที่มีรูพรุนแบบหลายเฟส เพื่อทำนายการถ่ายเทความชื้นระหว่างการให้ความร้อนกับ วัสดุที่มีความชื้นต่ำ Ratanadecho et al. (2002) ศึกษากระบวนการถ่ายเทความร้อน มวลสาร และการทำละลายของวัสดุพรุนในระบบสองมิติเพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของพลังงานจากคลื่น ใมโครเวฟ โดยทำการทดลองและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Ni et al.(1999) สร้าง แบบจำลองของวัสดุพรุนแบบหลายเฟส เพื่อทำนายการถ่ายเทความชื้นระหว่างการให้ความร้อน กับวัสดุที่มีความชื้นต่ำและวัสดุที่มีความชื้นสูงด้วยไมโครเวฟ พบว่าไมโครเวฟจะทำให้เกิดความ ร้อนขึ้นภายในและช่วยให้มีการถ่ายเทความชื้นมากขึ้น Ratanadecho et al.(2001) ทำการศึกษา ทั้งทฤษฎีและการทดลองของกระบวนการอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟในวัสดุพรุนที่ไม่อิ่มตัว โดย ศึกษาเน้นในเรื่องการถ่ายเทความร้อนและมวลสาร การแพร่ของไอน้ำในระบบ 1 มิติ พบว่าวัสดุ พรุนที่มีอนุภาคขนาดเล็กจะมีแรงดันคาปิลลารี่สูงกว่าทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่าวัสดุพรุน ที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ไม่ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของความดันก๊าซ กำลัง และความถี่ไมโครเวฟ ซึ่งที่ผ่านมานั้นงานวิจัยส่วนใหญ่จะเน้นการกระจายอุณหภูมิ ความชื้นและ ความดันเป็นส่วนใหญ่ แต่การศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างของวัสดุพรุน (ขนาดอนุภาคหรือรูพรุน) ความเข้มของสนามไฟฟ้าและความถี่ไมโครเวฟ นั้นยังไม่มีการศึกษา ้อย่างเป็นระบบ โดยงานวิจัยนี้มุ่งศึกษาถึงอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงขนาดของอนุภาค

ความเข้มของสนามไฟฟ้าและความถี่ไมโครเวฟที่มีผลต่อจลนพลศาสตร์ของกระบวนการ ถ่ายเทความร้อน มวลสารและความดันในวัสดุพรุนที่ไม่อิ่มตัวภายใต้พลังงานไมโครเวฟอย่าง สมบูรณ์

5.2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์



ภาพที่ 5.17 แบบจำลองทางกายภาพสำหรับวิเคราะห์กระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสาร ในวัสดุพรุนที่ไม่อิ่มตัวโดยใช้ไมโครเวฟ (Ratanadecho et al.,2001)

จากแบบจำลองทางกายภาพของการวิเคราะห์แบบจำลองของกระบวนการถ่ายเท ความร้อน มวลสารและความดันในวัสดุพรุนที่ไม่อิ่มตัวภายใต้พลังงานไมโครเวฟ โดยพิจารณาใน ระบบ 1 มิติ ซึ่งจะปล่อยคลื่นไมโครเวฟที่เป็นคลื่นระนาบ (plane wave) ให้กับแพคเบดของ วัสดุพรุนซึ่งประกอบด้วย 3 เฟส คือ เม็ดแก้ว (glass beads) น้ำและอากาศ โดยอัตราการกำเนิด ปริมาณความร้อนภายใน (local volumetric heat generation) หรือความหนาแน่นของพลังงาน ไมโครเวฟที่ถูกดูดซับ (density of microwave power absorbed) ในวัสดุที่มีความยาวกึ่งอนันต์ (semi-infinite) ดังแสดงในสมการที่ 5.1 ถึง 5.3 ซึ่งกลไกสำคัญในการเคลื่อนที่ของความชื้น ระหว่างกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสาร คือ เกรเดียนของความดันคาพิวลารีและ แรงโน้มถ่วงของโลกซึ่งอาจจะเสริมหรือหน่วงการเคลื่อนตัวของของไหล ขณะที่เกรเดียนของ ความดันบางส่วนของการระเหยนั้นเกี่ยวข้องกับการไหลของไอดังสมการที่ 5.4 ถึง 5.8 สมมุติฐานที่ใช้ในแบบจำลองของกระบวนการถ่ายความร้อน มวลสารและความดัน มีดังนี้

- 1. วัสดุพรุนที่พิจารณาเป็นชนิดคาพิวลารีและเป็นวัตถุคงรูปไม่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นภายใน
- 2. แพคเบดของวัสดุพรุนมีความสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์
- 3. ที่บริเวณด้านบนแพคเบดพิจารณาเป็นขอบเขตเปิด
- 4. การกระจายสนามไฟฟ้า อุณหภูมิและการเคลื่อนย้ายความชื้น สมมุติให้เป็น 1 มิติ

#### 5.2.1.1 สมการถ่ายเทความร้อน (Heat Transport Equation)

ปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนภายในวัสดุพรุนสามารถอธิบายโดยสมการอนุรักษ์ พลังงาน (สมการที่ 5.11) ซึ่งจะรวมเทอมของการดูดซับพลังงานไมโครเวฟเข้าไปด้วย โดยอยู่ใน เทอมของความหนาแน่นของพลังงานความร้อนที่ผลิตขึ้นภายในวัสดุ (local volumetric heat generation) ซึ่งอธิบายการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในชิ้นทดสอบที่ขึ้นกับเวลาโดยพิจารณาสมการ เหล่านี้ในลักษณะ 1 มิติ จาก Darcy's Law, Fick's Law ทำให้ได้สมการที่ควบคุมกระบวนการ ถ่ายเทความร้อนดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \left( \rho_{l} C_{pl} \phi s + \left( \left( \rho C_{p} \right)_{a} + \left( \rho C_{p} \right)_{v} \right) \phi (l - s) + \rho_{p} C_{pp} (l - \phi) \right) T \right) \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left( \left( \rho_{l} C_{pl} w_{l} + \left( \rho_{a} C_{pa} + \rho_{v} C_{pv} \right) w_{g} \right) T \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \\ - H_{v} \left( \frac{\partial}{\partial t} \left( \rho_{v} \phi (l - s) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \rho_{v} \frac{KK_{rg}}{\mu_{g}} \left( - \frac{\partial P_{g}}{\partial z} + \rho_{g} g_{z} \right) - \rho_{g} D_{m} \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\rho_{v}}{\rho_{g}} \right) \right) \right) + Q$$
(5.21)

เมื่อ

$$(\rho C_p)_T = \rho_l C_{pl} \phi s + ((\rho C_p)_a + (\rho C_p)_v) \phi (1-s) + \rho_p C_{pp} (1-\phi)$$
(5.22)

ด้งนั้น

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

(5.23)

5.2.1.2 สมการถ่ายเทมวลสาร (Mass Transport Equation)

ปรากฏการณ์การถ่ายเทมวลสารภายในวัสดุพรุนสามารถอธิบายโดยสมการอนุรักษ์ มวลสำหรับน้ำทั้งในรูปของเหลวและไอน้ำ(สมการที่ 5.9 และ 5.10 ตามลำดับ) โดยพิจารณา สมการเหล่านี้ในลักษณะ 1 มิติ และจาก Darcy's Law และ Fick's Law ทำให้ได้สมการที่ควบคุม กระบวนการถ่ายเทมวลสารดังนี้

$$\phi \frac{\partial}{\partial t} (s + Y_{v} (I - s)) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{KK_{rl}}{\mu_{l}} \left( \frac{\partial P_{c}}{\partial z} - \frac{\partial P_{g}}{\partial z} + g_{z} \right) + Y_{v} \frac{KK_{rg}}{\mu_{g}} \left( -\frac{\partial P_{g}}{\partial z} + \rho_{g} g_{z} \right) - Y_{g} D_{m} \frac{\partial}{\partial z} (W_{v}) \right) = 0$$
(5.24)

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

5.2.1.3 สมการความดันรวม (Total Pressure Equation)

ปรากฏการณ์ของความดันภายในวัสดุพรุนสามารถอธิบาย โดย Darcy's Law และ Fick's Law โดยสมมุติให้ก๊าซมีสมบัติเป็นก๊าซในอุดมคติ สามารถจัดรูปใหม่ดังนี้

$$\phi \frac{\partial}{\partial t} (Y_a (I - s)) + \frac{\partial}{\partial z} \left( Y_a \frac{KK_{rg}}{\mu_g} \left( -\frac{\partial P_g}{\partial z} + \rho_g g_z \right) - Y_g D_m \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\rho_a}{\rho_g} \right) \right) = 0$$
(5.25)

โดยที่

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

5.2.1.4 เงื่อนไขขอบเขตและเงื่อนไขเริ่มต้น (Boundary and Initial Condition)

เงื่อนไขขอบเขต คือ เงื่อนไขสำหรับขอบเขตเปิด (open boundary) โดยเงื่อนไข ขอบเขตสำหรับการแลกเปลี่ยนพลังงานและมวลที่ขอบเขตเปิด สามารถเขียนได้ดังสมการต่อไปนี้

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = h_c \left( T - T_a \right) \tag{5.26}$$

$$\rho_l w_l + \rho_v w_v = h_m \left( \rho_v - \rho_{va} \right) \tag{5.27}$$

การพิจารณาเงื่อนไขขอบเขตที่ขอบเขตปิด (symmetry-impermeable) ซึ่งก็คือขอบเขตที่ไม่มีการ แลกเปลี่ยนความร้อนและมวลเกิดขึ้นสามารถเขียนด้วยสมการต่อไปนี้

$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \tag{5.28}$$

5.2.2 ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

จากสมการถ่ายเทความร้อน มวลสารและความดัน (สมการที่ 5.23 ถึง 5.25 ตามลำดับ) ทำการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟในต์วอลุม (finite volume method) ดังแสดงไว้ใน บทที่ 4 โดยหัวข้อนี้จะแสดงการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟในต์วอลุม (finite volume method) สำหรับตำแหน่งโหนดภายใน (Internal node) ส่วนตำแหน่งที่บริเวณขอบเขต (boundary node) ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ข.

จากสมการถ่ายเทความร้อน (5.23) สามารถทำการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟในต์วอลุม (finite volume method) สำหรับตำแหน่งโหนดภายใน (Internal node) ได้ดังนี้

$$\frac{(\rho C_{p})_{lk}^{n+l} T_{k}^{n+l} - (\rho C_{p})_{lk}^{n} T_{k}^{n}}{\Delta t} + \frac{\rho_{l} C_{pl}}{\Delta z} (w_{lk}^{n+l} T_{k}^{n+l} - w_{lk-l}^{n+l} T_{k-l}^{n+l}) + \frac{(\rho C_{p})_{av}}{\Delta z} (w_{gk}^{n+l} T_{k}^{n+l} - w_{gk-l}^{n+l} T_{k-l}^{n+l})}{\Delta z} - \frac{1}{\Delta z} \left(\lambda_{k+\frac{1}{2}}^{n+l} \left(\frac{T_{k+\frac{1}{2}}^{n+l} - T_{k}^{n+l}}{\Delta z}\right) - \lambda_{k-\frac{1}{2}}^{n+l} \left(\frac{T_{k}^{n+l} - T_{k-\frac{1}{2}}^{n+l}}{\Delta z}\right)\right) + \frac{H_{v}\rho_{v}\phi}{\Delta t} ((1 - s_{lv})(s_{ek}^{n+l} - s_{ek}^{n}))$$

$$= \int_{-\frac{1}{\Delta z}} \left(\int_{-\frac{\rho_{vk}^{n+l} KK_{rg}}{\mu_{g}}} \left|_{k+\frac{1}{2}} \left(-\left(\frac{P_{gk+l}^{n+l} - P_{gk}^{n+l}}{\Delta z}\right) + \rho_{g}g_{z}\right) - \rho_{vk-l}^{n+l} \frac{KK_{rg}}{\mu_{g}}}{\mu_{g}}\right|_{k-\frac{1}{2}} \left(-\left(\frac{P_{gk-1}^{n+l} - P_{gk-1}^{n+l}}{\Delta z}\right) + \rho_{g}g_{z}\right) - \rho_{vk-l}^{n+l} \frac{KK_{rg}}{\mu_{g}}}{\lambda_{g}} - \left(-\left(\frac{P_{gk}^{n+l} - P_{gk-1}^{n+l}}{\Delta z}\right) + \rho_{g}g_{z}}\right)\right) - Q = 0$$

$$(5.29)$$

# จากสมการถ่ายเทมวลสาร (5.24) สามารถทำการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุม (finite volume method) สำหรับตำแหน่งโหนดภายใน (Internal node) ได้ดังนี้

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

$$= \left( \left( \frac{KK_{rl}}{\mu_{l}} \Big|_{k+\frac{1}{2}} \left( \left( \frac{P_{ek+l}^{n+l} - P_{ek}^{n+l}}{\Delta} \right) - \left( \frac{P_{gk+l}^{n+l} - P_{gk}^{n+l}}{\Delta} \right) + g_{z} \right) - \frac{KK_{rl}}{\mu_{l}} \Big|_{k-\frac{1}{2}} \left( \left( \frac{P_{ek}^{n+l} - P_{ek-l}^{n+l}}{\Delta} \right) - \left( \frac{P_{gk-l}^{n+l} - P_{gk-l}^{n+l}}{\Delta} \right) + g_{z} \right) \right) \right)$$

$$+ \frac{1}{\Delta} \left( + Y_{vk}^{n+l} \left( \frac{KK_{rg}}{\mu_{g}} \Big|_{k+\frac{1}{2}} \left( - \left( \frac{P_{gk+l}^{n+l} - P_{gk}^{n+l}}{\Delta} \right) + \rho_{g}g_{z} \right) - \frac{KK_{rg}}{\mu_{g}} \Big|_{k-\frac{1}{2}} \left( - \left( \frac{P_{gk-l}^{n+l} - P_{gk-l}^{n+l}}{\Delta} \right) + \rho_{g}g_{z} \right) \right) \right)$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$(5.30)$$

จากสมการความดันรวม (5.25) สามารถทำการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุม (finite volume method) สำหรับตำแหน่งโหนดภายใน (Internal node) ได้ดังนี้

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

$$+ \left( \frac{f_{ak}^{n+l} \left( \frac{KK_{rg}}{\mu_g} \Big|_{k+\frac{l}{2}} \left( -\left( \frac{P_{gk+l}^{n+l} - P_{gk}^{n+l}}{\Delta z} \right) + \rho_g g_z \right) - \frac{KK_{rg}}{\mu_g} \Big|_{k-\frac{l}{2}} \left( -\left( \frac{P_{gk}^{n+l} - P_{gk-l}^{n+l}}{\Delta z} \right) + \rho_g g_z \right) \right) \right)$$

$$+ \frac{1}{\Delta z} \left( -Y_{gk}^{n+l} \left( D_{mk+\frac{l}{2}}^{n+l} \left( \frac{\left( \frac{\rho_a}{\rho_g} \right)_{k+l}^{n+l} - \left( \frac{\rho_a}{\rho_g} \right)_{k}^{n+l}}{\Delta z} \right) - D_{mk-\frac{l}{2}}^{n+l} \left( \frac{\left( \frac{\rho_a}{\rho_g} \right)_{k-l}^{n+l} - \left( \frac{\rho_a}{\rho_g} \right)_{k-l}^{n+l}}{\Delta z} \right) \right)$$

$$= 0$$

(5.31)



ภาพที่ 5.18 รายละเอียดวิธีการคำนวณสำหรับกระบวนการทางระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

จากโดยรายละเอียดของแผนผังและวิธีการคำนวณสำหรับกระบวนการเซิงตัวเลขนั้น เริ่มต้นจากการรับค่าเริ่มต้นและสมบัติต่าง ๆ ซึ่งจะกำหนดให้ลำดับเวลา (time step) เพิ่มขึ้นเป็น ∆t โดยมีการเปลี่ยนค่าโหนดของความชื้นและอุณหภูมิในแต่ละเวลาที่เพิ่มขึ้นซึ่งจะทำซ้ำเช่นนี้ จนกระทั่งค่าที่ได้ลู่เข้าสู่ผลลัพธ์ (convergence) ซึ่งใช้วิธีของ Newton-Raphson สำหรับ กระบวนการทำซ้ำ (iteration) ในคำนวณค่าอัตราการดูดกลืนพลังงานได้จากการคำนวณของ Subroutine Q ซึ่งรับค่าเริ่มต้นและสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุพรุนแล้วทำการคำนวณค่าอัตราการ ดูดกลืนพลังงาน จากนั้นจึงคำนวณค่าอุณหภูมิ ความดันและความชื้น ตามลำดับ แล้วตรวจสอบ ค่าที่ได้ว่ามีค่าน้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่กำหนดไว้หรือไม่ ถ้ามีค่ามากกว่าค่าความคลาด เคลื่อนที่มากสุดที่ยอมรับได้ในกระบวนการ Iteration (คือ 10<sup>-8</sup>) จะทำการวนกลับไปทำซ้ำ ณ เวลาเดิม แต่ถ้ามีค่าน้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่กำหนดไว้ จึงเข้าลู่การตรวจสอบเวลาว่ามีค่า ถึงเวลาที่กำหนดไว้หรือไม่

#### 5.2.3 ผลวิจัยและวิจารณ์ผล

ในการศึกษาเพื่อวิเคราะห์กระบวนการถ่ายเทความร้อน มวลสารและความดันใน วัสดุพรุนที่ไม่อิ่มตัวโดยปล่อยคลื่นไมโครเวฟให้กับแพคเบดของวัสดุพรุนซึ่งประกอบด้วย 3 เฟส คือ เม็ดแก้ว (glass beads) น้ำและอากาศ ดังภาพที่ 5.17 จากนั้นตรวจสอบความถูกต้องของ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นโดยนำเงื่อนไขการทดลองและรายละเอียดของข้อมูล งานวิจัยของ Kaviany (1992) พบว่าผลที่ได้มี่ความสอดคล้องกันดังแสดงในภาพที่ 5.4 ซึ่งจาก ศึกษาพบว่า



ภาพที่ 5.19 อัตราการดูดกลืนพลังงานกับระยะความลึกของแพคเบดโดยเปลี่ยน ความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ (d = 0.15 mm, E<sub>in</sub> = 4,200 V/m, S<sub>in</sub> = 0.7)



ภาพที่ 5.20 การกระจายอุณหภูมิกับระยะความลึกของแพคเบดโดยเปลี่ยน ความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ (d = 0.15 mm, E<sub>in</sub> = 4,200 V/m, S<sub>in</sub> = 0.7)



ภาพที่ 5.21 การกระจายความชื้นกับระยะความลึกของแพคเบดโดยเปลี่ยน ความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ (d = 0.15 mm, E<sub>in</sub> = 4,200 V/m, S<sub>in</sub> = 0.7)



ภาพที่ 5.22 ความดันกับระยะความลึกของแพคเบดโดยเปลี่ยน ความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ (d = 0.15 mm, E<sub>in</sub> = 4,200 V/m, S<sub>in</sub> = 0.7)

จากภาพที่ 5.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการดูดกลืนพลังงาน กับระยะความ ลึกของแพคเบด โดยเปลี่ยนแปลงความถี่ของคลื่นไมโครเวฟที่สภาวะขนาดอนุภาค 0.15 mm. ความเข้มของสนามไฟฟ้า 4,200 V/m และความขึ้นเริ่มต้นที่ 0.7 ผลการศึกษา พบว่าในช่วงเริ่มต้น ของกระบวนการอัตราการดูดกลืนพลังงานในแต่ละความถี่มีความแตกต่างกันมาก เนื่องจาก ในช่วงเริ่มแรกของกระบวนการนั้นมีปริมาณความขึ้นสูงและค่า Loss Tangent Coefficient สูง (ดังแสดงในสมการที่ 5.1) ทำให้อัตราการดูดกลืนพลังงานมากจึงทำให้เกิดความร้อนสูง ดังนั้น อุณหภูมิที่เกิดขึ้นจึงสูงตามไปด้วย (ภาพที่ 5.20) แต่เมื่อเวลาผ่านไปความแตกต่างของอัตรา การดูดกลืนพลังงานในแต่ละความถี่น้อยเนื่องจากมีปริมาณความขึ้นลดลงและค่า Loss Tangent Coefficient ลดลง ทำให้อัตราการดูดกลืนพลังงานลดลง อย่างไรก็ตามที่ระยะความลึกมาก ๆ อัตราการดูดกลืนพลังงานที่ความถี่ต่ำกว่า (2.45 GHz) กลับมีค่าสูงกว่ากรณีที่ความถี่สูง (5 GHz) เล็กน้อย เนื่องจากกรณีที่ค่าความถี่ต่ำจะมีค่าความยาวคลื่นมากกว่า ทำให้การดูดขึม พลังงานไมโครเวฟสามารถขยายไปได้ไกลกว่า จากภาพที่ 5.21 เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ ระหว่างการกระจายความชื้นกับระยะความลึกของแพคเบดต่อความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ พบว่า ในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการที่ความถี่ของคลื่นไมโครเวฟมีค่า 5 GHz สามารถไล่ความชื้น ได้มากกว่าที่ความถี่ของคลื่นไมโครเวฟมีค่า 2.45 GHz เนื่องจากการที่ความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ ้มีค่าสูงจะทำให้อัตราการดูดกลืนพลังงานสูง (ดังแสดงในสมการที่ 5.1) ทำให้เกิดความร้อนสูงขึ้น ที่ภายในแพคเบด แล้วค่อยส่งความร้อนออกด้านนอก แต่ที่ช่วงท้ายของกระบวนการ (10 hr.) ที่ ความถี่ 2.45 GHz สามารถไล่ความชื้นที่ระยะความลึกของแพคเบดสูงได้มากกว่าที่ความถี่ 5 GHz โดยในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการภายในแพดเบดจะมีเฟสของของเหลวอยู่อย่างต่อเนื่อง ทำให้อิทธิพลของความดันคาพิวลารี (capillary pressure) ที่ขับเคลื่อนของเหลวไปยังผิวหน้า แพคเบดมีค่าสูง แต่เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณความชื้นลดลง ทำให้การเคลื่อนที่ของความชื้น (ซึ่งเป็นไอส่วนใหญ่) ออกสู่ผิวหน้านั้นเป็นอิทธิพลของการแพร่ของไอ (vapor diffusion) เป็นหลัก ประกอบกับอิทธิพลของการพาความร้อนบริเวณผิวหน้าของแพคเบดจึงทำให้การเคลื่อนย้าย ความชื้นที่บริเวณผิวหน้าของแพคเบดสูง จากภาพที่ 5.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับ ระยะความลึกของแพคเบดโดยเปลี่ยนความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ พบว่าความดันจะมีค่าเข้าใกล้ ความดันบรรยากาศที่บริเวณผิวแล้วค่อย ๆ เพิ่มขึ้นที่ความลึกแพคเบดมากขึ้น โดยเฉพาะเมื่อเวลา การอบแห้งเพิ่มมากขึ้น (10 hr) อย่างไรก็ตามที่เวลาไม่สูงมาก (5 hr) ที่ตอนปลายของแพคเบด (ระยะปริมาณ 16 ถึง 20 cm.) ค่าความดันจะมีค่าต่ำกว่าบรรยากาศที่เป็นเช่นนี้เพราะที่บริเวณ ดังกล่าวน้ำพยายามแยกตัวออกไปจากช่องว่างทำให้เป็นการเพิ่มปริมาตรของเฟสก๊าซ ในทำนอง เดียวกันทำให้ความดันย่อยของอากาศบริเวณนั้นต่ำลงส่งผลทำให้ความดันรวมนี้ต่ำลงไปด้วย แต่เมื่อเวลาผ่านไปเรื่อย ๆ ค่าอุณหภูมิ (ภาพที่ 5.20) และความดันจะเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่ คล้ายกัน อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้เกิดความดันรวมมากพอที่จะปลดปล่อยให้ไอที่ระเหย เนื่องจากฟลักซ์ความร้อนออกไปได้ ขณะเดียวกันพบว่าค่าความถี่ไมโครเวฟก็ส่งผลต่อการ เปลี่ยนแปลงของความดันรวม ที่ความถี่สูงอุณหภูมิแพคเบดก็สูงตามและส่งผลให้ความดันรวม สูงตามไปด้วย โดยเฉพาะที่บริเวณตอนบนของแพคเบดซึ่งสามารถดูดกลืนพลังงานไมโครเวฟได้ สูงกว่าแต่ตรงส่วนปลายของแพคเบดค่าความดันในกรณีความถี่สูงจะมีค่าต่ำกว่ากรณีความถี่

ต่ำมาก ทั้งนี้เพราะอิทธิพลของการดูดกลืนคลื่นที่บริเวณนี้มีค่าต่ำดังที่อธิบายไว้ในภาพที่ 5.19



ภาพที่ 5.23 อัตราการดูดกลื่นพลังงานกับระยะความลึกของแพคเบดโดยเปลี่ยน ขนาดของอนุภาค (f = 2.45 GHz, E<sub>in</sub> = 4,200 V/m, S<sub>in</sub> = 0.7)



ภาพที่ 5.24 การกระจายอุณหภูมิกับระยะความลึกของแพคเบดโดยเปลี่ยน ขนาดของอนุภาค (f = 2.45 GHz, E<sub>in</sub> = 4,200 V/m, S<sub>in</sub> = 0.7)



ภาพที่ 5.25 การกระจายความชื้นกับระยะความลึกของแพคเบดโดยเปลี่ยน ขนาดของอนุภาค (f = 2.45 GHz, E<sub>in</sub> = 4,200 V/m, S<sub>in</sub> = 0.7)



ภาพที่ 5.26 ความดันกับระยะความลึกของแพคเบดโดยเปลี่ยน ขนาดของอนุภาค (f = 2.45 GHz, E<sub>in</sub> = 4,200 V/m, S<sub>in</sub> = 0.7)

สำหรับการเปลี่ยนแปลงขนาดอนุภาคของแพคเบตที่สภาวะความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ 2.45 GHz ความเข้มของสนามไฟฟ้า 4,200 V/m และความชื้นเริ่มต้นที่ 0.7 ดังแสดงในภาพที่ 5.23 ถึง 5.26 ตามลำดับ พบว่าวัสดุพรุนที่มีขนาดอนุภาค 0.4 mm. จะมีความสามารถในการ ถ่ายเทความร้อนและมวลสารน้อยกว่าที่วัสดุพรุนที่มีขนาดอนุภาค 0.15 mm. จากภาพที่ 5.23 เห็นได้ว่าวัสดุพรุนที่มีขนาดอนุภาค 0.15 mm. สามารถดูดกลืนพลังงานได้มากเนื่องจากปริมาณ น้ำภายในโครงสร้างของแพคเบดโดยเฉลี่ยมีค่ามากกว่าแพคเบดของวัสดุพรุนที่มีขนาดอนุภาค 0.4 mm. ส่งผลทำให้ Loss Tangent Coefficient มีค่าสูงตามไปด้วย ทำให้อุณหภูมิที่เกิดขึ้นสูง ดังเห็นได้จากภาพที่ 5.24 ประกอบกับวัสดุพรุนที่มีอนุภาคขนาด 0.15 mm. มีความดันคาพิวลารี สูงกว่า (Ratanadecho et al., 2001) ทำให้สามารถไล่ความชื้นที่ภายในได้ดีกว่าวัสดุพรุนที่มี ขนาดอนุภาค 0.4 mm. ซึ่งมีความดันคาพิวลารีที่ขับเคลื่อนของเหลวไปยังผิวหน้าแพคเบดมีค่าสูง แต่เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณความชื้นลดลง ทำให้การเคลื่อนที่ของความชื้นออกสู่ผิวหน้านั้นเป็น อิทธิพลของการแพร่ของไอเป็นหลัก ภาพที่ 5.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับระยะ ความลึกของแพคเบดพบว่าค่าความดันรวมมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 5.27 อัตราการดูดกลืนพลังงานกับระยะความลึกของแพคเบดโดยเปลี่ยน ความเข้มของสนามไฟฟ้า (f = 2.45 GHz, d = 0.15 mm, S<sub>in</sub> = 0.7)



ภาพที่ 5.28 การกระจายอุณหภูมิกับระยะความลึกของแพคเบดโดยเปลี่ยน ความเข้มของสนามไฟฟ้า (f = 2.45 GHz, d = 0.15 mm, S<sub>in</sub> = 0.7)



ภาพที่ 5.29 การกระจายความชื้นกับระยะความลึกของแพคเบดโดยเปลี่ยน ความเข้มของสนามไฟฟ้า (f = 2.45 GHz, d = 0.15 mm, S<sub>in</sub> = 0.7)





จากภาพที่ 5.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการดูดกลืนพลังงานกับความ เข้มของสนามไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปที่ระยะความลึกใด ๆ ของแพคเบดพบว่าอัตราการดูดกลืน พลังงานที่ความเข้มของสนามไฟฟ้าที่มีค่า 4,200 V/m ทำให้เกิดอุณหภูมิสูงกว่าการใช้ความเข้ม ของสนามไฟฟ้าที่มีค่า 2,800 V/m เนื่องจากการที่ความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ป้อนมีค่าสูงนั้นส่งผล ให้อัตราการดูดกลืนพลังงานสูงขึ้น (ดังแสดงในสมการที่ 5.1) จึงทำให้อุณหภูมิที่เกิดขึ้นสูง (ดัง ภาพที่ 5.28) ดังนั้นจึงส่งผลต่อการเคลื่อนย้ายความชื้นได้มากกว่าการใช้ความเข้มของ สนามไฟฟ้าที่มีค่าต่ำ จากภาพที่ 5.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายความชื้นกับการ เปลี่ยนความเข้มของสนามไฟฟ้ากับระยะความลึกของแพคเบด พบว่าที่เวลาสุดท้ายของ กระบวนการนั้นมีความแตกต่างของการกระจายความชื้นกับระยะความลึกของแพคเบดที่เปลี่ยน ความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปไม่มากนัก เนื่องจากกระบวนการอบแห้งเข้าใกล้สภาวะ สมดลและภาพที่ 5.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับระยะความลึกของแพคเบด พบว่า การกระจายความดันรวมคล้ายกับภาพที่ 5.22 และภาพที่ 5.26 ซึ่งแสดงให้เห็นค่าความดันรวม โดยเฉลี่ยตลอดแพคเบดมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก ดังนั้นอิทธิพลของความดันรวมส่งผลต่อ ็จลนพลศาสตร์ของการอบแห้งไม่มากนัก ทั้งนี้เป็นเพราะในกระบวนการอบแห้งได้ดำเนินไปถึง สภาวะที่อุณหภูมิภายในวัสดุมีค่าไม่เกินจุดเดือด (100°C) ซึ่งอาจตัดอิทธิพลของความดันรวม ภายในวัสดุทิ้งได้หากมีการอบแห้งที่อุณหภูมิวัสดุที่ต่ำกว่า 100°C

#### 5.2.4 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษา พบว่าในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการอบแห้งนั้นความดันคาพิวลารีจะมี อิทธิพลสูงในกระบวนการถ่ายเทมวลสาร แต่เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณความชื้นลดลง ทำให้การ ถ่ายเทมวลสาร (การเคลื่อนที่ของความชื้นซึ่งเป็นไอส่วนใหญ่) นั้นเป็นอิทธิพลจากการแพร่ของไอ เป็นหลักและเมื่อความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปมีค่าสูงจะมีอัตราการดูดกลืนพลังงานสูง ทำให้เกิดความร้อนสูงจึงสามารถถ่ายเทมวลสารได้มากกว่าความเข้มของสนามไฟฟ้าที่มีค่าต่ำ คลื่นไมโครเวฟที่มีความถี่สูงจะมีอัตราการดูดกลืนพลังงานสูง เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลง สนามไฟฟ้ามากกว่า อนุภาคขนาดเล็กจะมีความดันคาพิวลารีที่สูงกว่าทำให้สามารถ ถ่ายเทมวลสารได้ดีกว่าอนุภาคขนาดเล็กจะมีความดันคาพิวลารีที่สูงกว่าทำให้สามารถ ถ่ายเทมวลสารได้ดีกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ ในส่วนของอิทธิพลของความดันรวมนั้นส่งผลน้อยมาก ต่อจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งที่มีอุณหภูมิแพคเบดต่ำ ดังในการศึกษาครั้งนี้ โดยงานวิจัยนี้ สามารถนำไปเป็นข้อมูลพื้นฐานที่ใช้ในการออกแบบระบบจริงในทางปฏิบัติ และอาจจะเป็น ประโยชน์ต่อผู้ที่จะศึกษาวิจัยเกี่ยวกับกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพรุนกรณี อื่นได้เป็นอย่างดี



# 5.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการวิเคราะห์เชิงทฤษฏีของการถ่ายเทความร้อน มวลสาร และความดันในวัสดุพรุนที่ไม่อิ่มตัวภายใต้พลังงานไมโครเวฟร่วมกับอินฟราเรด

งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์เชิงทฤษฏีที่สมบูรณ์ของการถ่ายเทความร้อน มวลสารและ ความดันในวัสดุพรุนที่ไม่อิ่มตัวภายใต้พลังงานไมโครเวฟร่วมกับอินฟราเรดโดยพิจารณาอิทธิพล ของความดันที่เกิดขึ้นภายในวัสดุพรุนในระหว่างกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารด้วย ผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้จากการแก้ปัญหาด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขโดยใช้ ระเบียบวิธีไฟในต์วอลุม (finite volume method) สำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองในครั้งนี้ พิจารณาถึง สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางอุณหพลศาสตร์ สมบัติการส่งผ่าน สมบัติไดอิเล็กตริก ของวัสดุพรุนที่ไม่อิ่มตัว (ซึ่งประกอบด้วยอนุภาคของเม็ดแก้ว น้ำ และอากาศ)

ในอดีตที่ผ่านมาการศึกษากระบวนการถ่ายเทความร้อน มวลสารและความดัน ในระดับจุลภาคนั้นยังมีการศึกษาวิจัยกันน้อย โดยเฉพาะการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีในวัสดุพรุนที่ไม่ อิ่มตัวที่อธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงขนาดของอนุภาค ความเข้มของสนามไฟฟ้าและความถึ่ โดยพิจารณาอิทธิพลของความดันที่เกิดขึ้นภายในวัสดุพรุนระหว่างกระบวนการถ่ายเทความร้อน และมวลสารที่ผสมผสานระหว่างพลังงานไมโครเวฟร่วมกับอินฟราเรด ซึ่งงานวิจัยที่ศึกษา กระบวนการอบแห้งที่ผสมผสานระหว่างคลื่นอินฟราเรดร่วมกับไมโครเวฟมีดังนี้ Adonis and Khan (2004) สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของอาหารและ แลผลิตทางการเกษตรสำหรับการคบแห้งโดยใช้ระบบลมร้คนและการแผ่รังสีคินฟราเรด ซึ่งพฤติกรรมที่เกิดขึ้นเป็นปัญหาไม่เชิงเส้นของสมการอนุพันธ์ตลอดระยะเวลาในการอบแห้ง ซึ่งระบบนี้มีจุดเด่นคือสามารถลดระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งและยังช่วยรักษาคุณภาพของวัสดุ หลังผ่านกระบวนการอบแห้ง Glouannece et al. (2002) ทดลองอบแห้งวัสดุพรุนโดยใช้ไมโครเวฟ ร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรดซึ่งในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงการใช้ประโยชน์ของการนำ เทคโนโลยีการแผ่รังสีของคลื่นเข้ามาช่วยในการอบแห้ง ซึ่งผลจาการทดลองสามารถนำเทคโนโลยี ้ดังกล่าวมาแทนการอบแห้งแบบการพาความร้อนได้ จุดประสงค์หลักของงานวิจัยนี้ คือ ศึกษาถึง จลน์ศาสตร์ของการอบแห้งและอุณหภูมิของการอบแห้ง อุปกรณ์ที่ใช้ คือ เตาอบที่สามารถ มิติ โดยวิเคราะห์การแลกเปลี่ยนความร้อนและมวล วัสดุที่ใช้ใน พิจารณาผลได้ในระบบ 1 การศึกษามีทั้งวัสดุพรุนและวัสดุแข็ง ซึ่งผลการทดลองที่ได้สามารถอธิบายถึงปรากฏการณ์การแผ่ กระจายของคลื่นในระหว่างกระบวนการอบแห้งที่มีผลต่อวัสดุชนิดต่าง ๆ ได้ Praveen et al. (2005) ทดลองอบแห้งหัวหอมโดยใช้รังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนเพื่อศึกษาอุณหภูมิที่เกิดขึ้นใน การอบแห้ง ความหนาของวัสดุที่อบ อุณหภูมิอากาศร้อนและความเร็วของลมร้อน ซึ่งการทดลองนี้ จะคำนึงถึงคุณภาพของวัสดุเป็นหลัก ผลจากการทดลองอบแห้งหัวหอม พบว่าการอบแห้งโดยใช้ รังสีอินฟราเรดร่วมกับอากาศร้อน สามารถลดเวลาที่ใช้ในการอบแห้งรวมถึง คุณค่าทางอาหาร และสีของหัวหอมหลังผ่านการอบมีคุณภาพดีกว่าการใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียว Salagnac et al. (2004) สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับปัญหา 1 มิติ เพื่อการศึกษาปรากฏการณ์ที่ เกิดขึ้นจากการให้ความร้อนโดยใช้รังสีอินฟราเรดและลมร้อนร่วมกับคลื่นไมโครเวฟกับวัสดุพรุนใน ระบบพิกัดฉาก ศึกษาการถ่ายเทความร้อนและมวลสาร โดยพิจารณาการกระจาย อุณหภูมิ ความชื้นและความดัน โดยใช้ทฤษฎีของ Lambert-Beer แล้วทำการเปรียบเทียบผลจากการสร้าง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลองด้วยคอนกรีต Datta et al. (2002) สร้างแบบจำลอง ทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาการกระจายอุณหภูมิและความชื้นสำหรับกระบวนการให้ความร้อนกับ อาหารด้วยรังสีอินฟราเรดและการใช้ระบบลมร้อนร่วมกับพลังงานไมโครเวฟ จากการศึกษาพบว่า การให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟเพียงอย่างเดียวจะทำให้ ความชื้นที่ผิวหน้าของวัสดุเพิ่มขึ้น เนื่องจากการยนลักดัน (pressure-driven) ของความชื้นมายังผิวหน้ามากและลมร้อนสามารถไล่ ความชื้นที่บริเวณผิวหน้าของวัสดุได้เช่นเดียวกันแต่ประสิทธิภาพไม่ดีเท่าการใช้รังสีอินฟราเรด ดังนั้นการใช้รังสีอินฟราเรดร่วมกับพลังงานไมโครเวฟจึงให้ผลที่ดีกว่า

เห็นได้ว่าที่ผ่านมานั้นงานวิจัยส่วนใหญ่จะเน้นการทดลองและศึกษากระจายอุณหภูมิ ความขึ้นเป็นส่วนใหญ่ แต่การศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างของวัสดุพรุน (ขนาดอนุภาคหรือรูพรุน) ความเข้มของสนามไฟฟ้า และความถี่ของอินฟราเรด นั้นยังไม่มี การศึกษาอย่างเป็นระบบ โดยงานวิจัยนี้มุ่งศึกษาถึงอิทธิพลของการเปลี่ยนขนาดของอนุภาค ความเข้มของสนามไฟฟ้าและความถี่ของคลื่นไมโครเวฟที่มีผลต่อจลนศาสตร์ของกระบวนการ ถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพรุนที่ไม่อิ่มตัวภายใต้การผสมผสานระหว่างคลื่นไมโครเวฟ ร่วมกับอินฟราเรดอย่างสมบรูณ์ เนื่องจากรังสีอินฟราเรดเป็นรังสีที่มีช่วงความยาวคลื่นไมโครเวฟ ร่วมกับอินฟราเรดอย่างสมบรูณ์ เนื่องจากรังสีอินฟราเรดเป็นรังสีที่มีช่วงความยาวคลื่นไมโครเวฟ ด้ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพรุนที่ไม่อิ่มตัวภายใต้การผสมผสานระหว่างคลื่นไมโครเวฟ ร่วมกับอินฟราเรดอย่างสมบรูณ์ เนื่องจากรังสีอินฟราเรดเป็นรังสีที่มีช่วงความยาวคลื่นไมโครเวฟ ด้ายตั้งแต่ 0.7 μm ถึง 100 μm ซึ่งโดยทั่วไปแบ่งช่วงคลื่นอินฟราเรดออกเป็นระดับความยาวคลื่นได้ 3 ระดับคืออินฟราเรดใกล้ (near infrared) มีความยาวคลื่น 0.7 μm ถึง 3 μm อินฟราเรดกลาง (medium infrared) มีความยาวคลื่น 3 μm ถึง 25 μm และอินฟราเรดไกล (far infrared) มีความ ยาวคลื่น 25 μm ถึง 1000 μm โดยรังสีอินฟราเรดมีการแผ่พลังงานออกมาในรูปของคลื่น แม่เหล็กไฟฟ้าได้โดยไม่ต้องอาศัยตัวกลางหรือตัวนำในการส่งผ่านความร้อนไปยังวัสดุ (Mohsenin, 1980) โดยข้อดีของรังสีชนิดนี้ คือ สามารถแผ่รังสีได้รวดเร็ว จึงไม่ทำให้อุณหภูมิของ อากาศบริเวณรอบ ๆ รัศมีที่มีรังสีกระจายไปถึงสูงขึ้น แต่สามารถทำให้เกิดความร้อนได้อย่าง รวดเร็วและสม่ำเสมอที่บริเวณของผิววัตถุที่แสงนี้ได้สัมผัส ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถ นำไปเป็นข้อมูลพื้นฐานต่อการทำความเข้าใจกระบวนการอบแห้งโดยใช้พลังงานไมโครเวฟร่วมกับ อินฟราเรดได้ รวมทั้งใช้ในการออกแบบระบบจริงในทางปฏิบัติ

#### 5.3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางกายภาพของการวิเคราะห์แบบจำลองของกระบวนการถ่ายเทความ ร้อน มวลสารและความดันในวัสดุพรุนที่ไม่อิ่มตัวภายใต้พลังงานไมโครเวฟร่วมกับอินฟราเรด ดังภาพที่ 5.31 โดยพิจารณาในระบบ 1 มิติ ซึ่งจะปล่อยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับอินฟราเรดโดยใน การศึกษาครั้งนี้พิจารณาลักษณะคลื่นเป็นคลื่นระนาบ (plane wave) โดยปล่อยคลื่นให้กับ แพคเบดของวัสดุพรุนซึ่งประกอบด้วย 3 เฟส คือ เม็ดแก้ว (glass beads) น้ำและอากาศ



ภาพที่ 5.31 แบบจำลองทางกายภาพสำหรับวิเคราะห์กระบวนการถ่ายเทความร้อน มวลสารและ ความดันในวัสดุพรุนที่ไม่อิ่มตัวโดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับอินฟราเรด สมมุติฐานที่ใช้ในแบบจำลองของกระบวนการถ่ายความร้อน มวลสารและความดันในวัสดุพรุนที่ ไม่อิ่มตัวโดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับอินฟราเรดมีดังนี้

- 1. วัสดุพรุนที่พิจารณาเป็นชนิดคาพิวลารีและเป็นวัตถุคงรูปไม่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นภายใน
- 2. แพคเบดของวัสดุพรุนมีความสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์
- 3. ที่บริเวณด้านบนแพคเบดพิจารณาเป็นขอบเขตเปิด
- 4. การกระจายสนามไฟฟ้า อุณหภูมิและการเคลื่อนย้ายความชื้น สมมุติให้เป็น 1 มิติ

โดยอัตราการกำเนิดปริมาณความร้อนภายใน (local volumetric heat generation) หรือความหนาแน่นของพลังงานไมโครเวฟและอินฟราเรดที่ถูกดูดซับในวัสดุที่มีความยาวกึ่งอนันต์ (semi-infinite) ดังแสดงในสมการที่ 5.1 ถึง 5.3 ซึ่งกลไกสำคัญในการเคลื่อนที่ของความชื้น ระหว่างกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสาร คือ เกรเดียนของความดันคาพิวลารีและแรง โน้มถ่วงของโลกซึ่งอาจจะเสริมหรือหน่วงการเคลื่อนตัวของของไหล ขณะที่เกรเดียนของความดัน บางส่วนของการระเหยนั้นเกี่ยวข้องกับการไหลของไอดังสมการที่ 5.4 ถึง 5.8

#### 5.3.1.1 สมการถ่ายเทความร้อน (Heat Transport Equation)

ปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนภายในวัสดุพรุนสามารถอธิบายโดยสมการอนุรักษ์ พลังงานซึ่งจะรวมเทอมของการดูดซับพลังงานไมโครเวฟและอินฟราเรดเข้าไปด้วย โดยอยู่ใน เทอมของความหนาแน่นของพลังงานความร้อนที่ผลิตขึ้นของดังแสดงในสมการที่ 5.1 ถึง 5.3 ซึ่ง อธิบายการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในวัสดุที่ขึ้นกับเวลาโดยพิจารณาสมการเหล่านี้ในลักษณะ 1 มิติ จาก Darcy's Law, Fick's Law ทำให้ได้สมการที่ควบคุมกระบวนการถ่ายเทความร้อนดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \left( \rho c_{p} \right)_{T} T \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \left( \rho_{l} c_{pl} w_{l} + \left( \rho_{a} c_{pa} + \rho_{v} c_{pv} \right) w_{g} \right) T \right) \\
= \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) - H_{v} \left( \frac{\partial}{\partial t} \left( \rho_{v} \phi (l - s) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \rho_{v} \frac{KK_{rg}}{\mu_{g}} \left( -\frac{\partial P_{g}}{\partial z} + \rho_{g} g_{z} \right) - \rho_{g} D_{m} \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\rho_{v}}{\rho_{g}} \right) \right) \right) \\
+ Q_{MW} + Q_{IR}$$
(5.32)

สำหรับสมการถ่ายเทมวลสารและสมการความดันสำหรับใช้ในการวิเคราะห์ ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในวัสดุพรุนสามารถอธิบายดังสมการที่ 5.24 และสมการที่5.25 5.3.1.2 เงื่อนไขขอบเขตและเงื่อนไขเริ่มต้น (Boundary and Initial Condition)

เงื่อนไขขอบเขต คือ เงื่อนไขสำหรับขอบเขตเปิด (open boundary) โดยเงื่อนไข ขอบเขตสำหรับการแลกเปลี่ยนพลังงานและมวลที่ขอบเขตเปิด สามารถเขียนได้ดังสมการต่อไปนี้

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = h_c \left( T - T_a \right) \tag{5.33}$$

$$\rho_l w_l + \rho_v w_v = h_m \left( \rho_v - \rho_{va} \right) \tag{5.34}$$

การพิจารณาเงื่อนไขขอบเขตที่ขอบเขตปิด (symmetry-impermeable) ซึ่งก็คือขอบเขตที่ไม่มีการ แลกเปลี่ยนความร้อนและมวลเกิดขึ้นสามารถเขียนด้วยสมการต่อไปนี้

$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \tag{5.35}$$

### 5.3.2 ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นนั้นความสัมพันธ์ของระบบสมการอนุพันธ์ เป็นแบบไม่เชิงเส้นของสมการถ่ายเทความร้อน มวลสารและความดัน (สมการที่ 5.32 5.23 และ 5.25 ตามลำดับ) โดยทำการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟในต์วอลุม (finite volume method) ดังแสดง ในบทที่ 4 โดยหัวข้อนี้จะแสดงการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟในต์วอลุม (finite volume method) สำหรับตำแหน่งโหนดภายใน (Internal node) ส่วนตำแหน่งที่บริเวณขอบเขต (boundary node) ดังแสดงในภาคมนวก ข.



## จากสมการถ่ายเทความร้อน (5.32) สามารถทำการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟในต์วอลุม (finite volume method) สำหรับตำแหน่งโหนดภายใน (Internal node) ได้ดังนี้

$$\frac{(\mu_{p})_{Tk}^{n+1}T_{k}^{n+1} - (\mu_{p})_{Tk}^{n}T_{k}^{n}}{\Delta t} + \frac{\rho_{l}c_{pl}}{\Delta t}(w_{lk}^{n+1}T_{k}^{n+1} - w_{lk-l}^{n+1}T_{k-l}^{n+1}) + \frac{(\mu_{p})_{av}}{\Delta t}(w_{gk}^{n+l}T_{k}^{n+1} - w_{gk-l}^{n+l}T_{k-l}^{n+1}) \\ - \frac{1}{\Delta t}\left(\lambda_{k+\frac{1}{2}}^{n+1}\left(\frac{T_{k+1}^{n+1} - T_{k}^{n+1}}{\Delta t}\right) - \lambda_{k-\frac{1}{2}}^{n+1}\left(\frac{T_{k}^{n+1} - T_{k-l}^{n+1}}{\Delta t}\right)\right) + \frac{H_{v}\rho_{v}\phi}{\Delta t}((1 - s_{ir})(s_{ek}^{n+1} - s_{ek}^{n})) \\ - \left(\left(\rho_{vk}^{n+l}\frac{KK_{rg}}{\mu_{g}}\right)_{k+\frac{1}{2}}^{n+1}\left(-\left(\frac{P_{gk+l}^{n+1} - P_{gk}^{n+1}}{\Delta t}\right) + \rho_{g}g_{z}\right) - \rho_{vk-l}^{n+l}\frac{KK_{rg}}{\mu_{g}}\right)_{k-\frac{1}{2}}^{n+1}\left(-\left(\frac{P_{gk-l}^{n+l} - P_{gk-l}^{n+l}}{\Delta t}\right) + \rho_{g}g_{z}\right)\right)\right) \\ - \frac{1}{\Delta t}\left(-\left(\rho_{gk}^{n+l}D_{mk+\frac{1}{2}}^{n+1}\left(\frac{\left(\frac{\rho_{v}}{\rho_{g}}\right)_{k+l}^{n+1} - \left(\frac{\rho_{v}}{\rho_{g}}\right)_{k}^{n+l}}{\Delta t}\right) - \rho_{gk-l}^{n+l}D_{mk-\frac{1}{2}}^{n+l}\left(\frac{\left(\frac{\rho_{v}}{\rho_{g}}\right)_{k-l}^{n+l}}{\Delta t}\right)\right) - \rho_{gk-l}^{n+l}D_{mk-\frac{1}{2}}^{n+l}\right) \\ - Q_{MW} - Q_{IR} = 0$$

(5.36)

สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการถ่ายเทมวลสาร (5.24) และสมการ (5.25) โดยทำการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุม (finite volume method) สำหรับตำแหน่ง โหนดภายใน (Internal node) เป็นดังสมการที่ 5.30 ถึง 5.31 ตามลำดับ โดยมีรายละเอียดของ แผนผังและวิธีการคำนวณสำหรับกระบวนการเชิงตัวเลขดังภาพที่ 5.18

#### 5.3.3 ผลวิจัยและวิจารณ์ผล

ในการศึกษาเพื่อวิเคราะห์กระบวนการถ่ายเทความร้อน มวลสารและความดันในวัสดุ พรุนที่ไม่อิ่มตัวโดยปล่อยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับอินฟาเรดให้กับแพคเบดของวัสดุพรุนซึ่ง ประกอบด้วย 3 เฟส คือ เม็ดแก้ว (glass beads) น้ำและอากาศ ดังภาพที่ 5.31 โดยแบบจำลอง ทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นถูกตรวจสอบความถูกต้องโดยนำเงื่อนไขการทดลองและรายละเอียด ของข้อมูลงานวิจัยของ Kaviany (1992) พบว่าให้ผลที่สอดคล้องกันดังแสดงในภาพที่ 5.4 ซึ่งถือได้ ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้มีความถูกต้อง



ภาพที่ 5.32 การกระจายอุณหภูมิกับระยะความลึกของแพคเบดโดยเปรียบเทียบการใช้คลื่น ไมโครเวฟและการใช้คลื่นอินฟาเรดร่วมกับไมโครเวฟ (d = 0.15 mm, S<sub>in</sub> = 0.7, E<sub>in</sub> (MW) = 4,200 V/m, E<sub>in</sub>(IR) = 500 V/m, f\_MW = 2.45 GHz, f\_IR = 742 GHz)



ภาพที่ 5.33 การกระจายความชื้นกับระยะความลึกของแพคเบดโดยเปรียบเทียบการใช้คลื่น ไมโครเวฟและการใช้คลื่นอินฟาเรดร่วมกับไมโครเวฟ (d = 0.15 mm, S<sub>in</sub> = 0.7, E<sub>in</sub> (MW) = 4,200 V/m, E<sub>in</sub>(IR) = 500 V/m, f\_MW = 2.45 GHz, f\_IR = 742 GHz)

จากภาพที่ 5.32 การกระจายอุณหภูมิกับระยะความลึกของแพคเบดโดยเปรียบเทียบ การใช้คลื่นไมโครเวฟและการใช้คลื่นอินฟาเรดร่วมกับไมโครเวฟ (d = 0.15 mm, S<sub>in</sub> = 0.7, E<sub>in</sub> (MW) = 4,200 V/m, E<sub>in</sub>(IR) = 500 V/m, f\_MW = 2.45 GHz, f\_IR = 742 GHz) พบว่าการใช้ คลื่นอินฟาเรดสามารถปลี่ยนพลังงานของคลื่นเป็นความร้อนที่บริเวณผิวของวัสดุเนื่องจากเป็น คลื่นที่มีย่านความถี่สูงโดยอยู่ในช่วง 10<sup>11</sup>-10<sup>14</sup> Hz และความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 10<sup>-3</sup>-10<sup>-6</sup> เมตร ส่วนคลื่นไมโครเวฟนั้นจะเปลี่ยนพลังงานของคลื่นที่ถูกดูดซับสู่วัสดุเป็นความร้อนทำให้วัสดุนั้น ร้อนขึ้นทั้งก้อน (volumetric heating) อุณหภูมิภายในจึงค่อนข้างสม่ำเสมอ และการถ่าย เทความชื้นเป็นไปอย่างรวดเร็วดังภาพที่ 5.33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายความชื้นกับ ระยะความลึกของแพคเบดโดยเปรียบเทียบการใช้พลังงานไมโครเวฟและการใช้พลังงานไมโครเวฟ ร่วมกับอินฟาเรด



ภาพที่ 5.34 อัตราการดูดกลืนพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟกับระยะความลึกของแพคเบดโดย เปลี่ยนความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ (d = 0.15 mm, S<sub>in</sub> = 0.7, E<sub>in</sub> (MW) = 4,200 V/m, E<sub>in</sub> (IR) = 500 V/m, f\_IR = 742 GHz)



ภาพที่ 5.35 อัตราการดูดกลืนพลังงานจากคลื่นอินฟาเรดกับระยะความลึกของแพคเบดโดย เปลี่ยนความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ (d = 0.15 mm, S<sub>in</sub> = 0.7, E<sub>in</sub> (MW) = 4,200 V/m, E<sub>in</sub> (IR) = 500 V/m, f\_IR = 742 GHz)



ภาพที่ 5.36 การกระจายอุณหภูมิกับระยะความลึกของแพคเบดโดยเปลี่ยนความถี่คลื่นไมโครเวฟ (d = 0.15 mm, S<sub>in</sub> = 0.7, E<sub>in</sub> (MW) = 4,200 V/m, E<sub>in</sub> (IR) = 500 V/m, f\_IR = 742 GHz)

จากภาพที่ 5.34 ถึง 5.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการดูดกลืนพลังงาน กับ ระยะความลึกของแพคเบด โดยเปลี่ยนแปลงความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ ผลการศึกษา พบว่าใน ภาพที่ 5.34 ในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการอัตราการดูดกลืนพลังงานในแต่ละความถี่มีความ แตกต่างกันมาก เนื่องจากในช่วงเริ่มแรกของกระบวนการนั้นมีปริมาณความชื้นสูงและค่า Loss Tangent Coefficient สูง (ดังแสดงในสมการที่ 5.1) ทำให้อัตราการดูดกลืนพลังงานมากจึงทำให้ เกิดความร้อนสูง ดังนั้นอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจึงสูงตามไปด้วย (ภาพที่ 5.36) แต่เมื่อเวลาผ่านไปความ แตกต่างของอัตราการดูดกลืนพลังงานในแต่ละความถี่น้อยเนื่องจากมีปริมาณความชื้นลดลงและ ค่า Loss Tangent Coefficient ลดลง ทำให้อัตราการดูดกลืนพลังงานลดลง อย่างไรก็ตามที่ระยะ ความลึกมาก ๆ อัตราการดูดกลืนพลังงานที่ความถี่ต่ำกว่า (2.45 GHz) กลับมีค่าสูงกว่ากรณีที่ ความถี่สูง (5 GHz) เล็กน้อย เนื่องจากกรณีที่ค่าความถี่ต่ำคะวามถี่ต่ำคะวามอัตราการดูดกลืนพลังงานของ วัสดุเนื่องจากการให้พลังงานอินฟราเรดพบว่ามีค่าสูงที่บริเวณผิวของวัสดุเนื่องจากอินฟราเรดเป็น คลื่นที่มีความยาวคลื่นสั้นจึงทำให้การดูดซึมพลังงานกิดที่บริเวณผิวของวัสดุดังภาพที่ 5.35



ภาพที่ 5.37 การกระจายความชื้นกับระยะความลึกของแพคเบดโดยเปลี่ยนความถี่ของคลื่น ใมโครเวฟ (d = 0.15 mm, S<sub>in</sub> = 0.7, E<sub>in</sub> (MW) = 4,200 V/m, E<sub>in</sub> (IR) = 500 V/m, f\_IR = 742 GHz)

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายความชื้นกับระยะความลึกของแพคเบด ต่อการความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ (ภาพที่ 5.37) พบว่าในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการที่ความถี่ของ คลื่นไมโครเวฟมีค่า 5 GHz สามารถไล่ความชื้นได้มากกว่าที่ความถี่ของคลื่นไมโครเวฟมีค่า 2.45 GHz เนื่องจากการที่ความถี่ของคลื่นไมโครเวฟมีค่าสูงจะทำให้อัตราการดูดกลืนพลังงานสูง (ดังแสดงในสมการที่ 5.1) ทำให้เกิดความร้อนสูงขึ้นที่ภายในแพคเบด แล้วค่อยส่งความร้อนออก ด้านนอก แต่ที่ช่วงท้ายของกระบวนการ (10 hr.) ที่ความถี่ 2.45 GHz สามารถไล่ความชื้นที่ระยะ ความลึกของแพคเบดสูงได้มากกว่าที่ความถี่ 5 GHz โดยในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการภายใน แพดเบดจะมีเฟสของของเหลวอยู่อย่างต่อเนื่อง ทำให้อิทธิพลของความดันคาพิวลารี (capillary pressure) ที่ขับเคลื่อนของเหลวไปยังผิวหน้าแพคเบดมีค่าสูง แต่เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณความชื้น ลดลง ทำให้การเคลื่อนที่ของความชื้น (ซึ่งเป็นไอส่วนใหญ่) ออกสู่ผิวหน้านั้นเป็นอิทธิพลของการ แพร่ของไอ (vapor diffusion) เป็นหลัก ประกอบกับอิทธิพลของการพาความร้อนบริเวณผิวหน้า ของแพคเบดจึงทำให้การเคลื่อนย้ายความชื้นที่บริเวณผิวหน้าของแพคเบดสูง



ภาพที่ 5.38 ความดันกับระยะความลึกของแพคเบดโดยเปลี่ยนความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ (d = 0.15 mm, S<sub>in</sub> = 0.7, E<sub>in</sub> (MW) = 4,200 V/m, E<sub>in</sub> (IR) = 500 V/m, f\_IR = 742 GHz) ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับระยะความลึกของแพคเบดโดยเปลี่ยนความถี่ของ คลื่นไมโครเวฟ พบว่าความดันจะมีค่าเข้าใกล้ความดันบรรยากาศที่บริเวณผิวแล้วค่อย ๆ เพิ่มขึ้นที่ ความลึกแพคเบดมากขึ้น โดยเฉพาะเมื่อเวลาการอบแห้งเพิ่มมากขึ้น (10 hr) อย่างไรก็ตามที่เวลา ไม่สูงมาก (5 hr) ที่ตอนปลายของแพคเบด ค่าความดันจะมีค่าต่ำกว่าบรรยากาศ ที่เป็นเช่นนี้ เพราะที่บริเวณดังกล่าวน้ำพยายามแยกตัวออกไปจากช่องว่างทำให้เป็นการเพิ่มปริมาตรของเฟส ก๊าซ ในทำนองเดียวกันทำให้ความดันย่อยของอากาศบริเวณนั้นต่ำลงส่งผลทำให้ความดันรวมนี้ ต่ำลงไปด้วย แต่เมื่อเวลาผ่านไปเรื่อย ๆ ค่าอุณหภูมิและความดันจะเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่ คล้ายกัน อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้เกิดความดันรวมมากพอที่จะปลดปล่อยให้ไอที่ระเหย เนื่องจากฟลักซ์ความร้อนออกไปได้ ขณะเดียวกันพบว่าค่าความถี่ไมโครเวฟก็ส่งผลต่อการ เปลี่ยนแปลงของความดันรวม ที่ความถี่สูงอุณหภูมิแพคเบดก็สูงตามและส่งผลให้ความดันรวมสูง ตามไปด้วย โดยเฉพาะที่บริเวณตอนบนของแพคเบดซึ่งสามารถดูดกลืนพลังงานไมโครเวฟได้ สูงกว่า แต่ตรงส่วนปลายของแพคเบดค่าความดันในกรณีความถี่สูงจะมีค่าต่ำกว่ากรณีความถี่ต่ำ

มาก ทั้งนี้เพราะอิทธิพลของการดูดกลืนคลื่นที่บริเวณนี้มีค่าต่ำดังที่อธิบายไว้ในภาพที่ 5.38



ภาพที่ 5.39 อัตราการดูดกลืนพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟกับระยะความลึกของแพคเบดโดย เปลี่ยนขนาดของอนุภาค (S<sub>in</sub> = 0.7, E<sub>in</sub> (MW) = 4,200 V/m, E<sub>in</sub> (IR) = 500 V/m, f\_MW = 2.45 GHz, f\_IR = 742 GHz)



ภาพที่ 5.40 อัตราการดูดกลืนพลังงานจากคลื่นอินฟาเรดกับระยะความลึกของแพคเบดโดย เปลี่ยนขนาดของอนุภาค (S<sub>in</sub> = 0.7, E<sub>in</sub> (MW) = 4,200 V/m, E<sub>in</sub> (IR) = 500 V/m, f\_MW = 2.45 GHz, f\_IR = 742 GHz)



ภาพที่ 5.41 การกระจายอุณหภูมิกับระยะความลึกของแพคเบดโดยเปลี่ยนขนาดของอนุภาค (S<sub>in</sub> = 0.7, E<sub>in</sub> (MW) = 4,200 V/m, E<sub>in</sub> (IR) = 500 V/m, f\_MW = 2.45 GHz, f\_IR = 742 GHz)



ภาพที่ 5.42 การกระจายความชื้นกับระยะความลึกของแพคเบดโดยเปลี่ยนขนาดของอนุภาค (S<sub>in</sub> = 0.7, E<sub>in</sub> (MW) = 4,200 V/m, E<sub>in</sub> (IR) = 500 V/m, f\_MW = 2.45 GHz, f\_IR = 742 GHz)



ภาพที่ 5.43 ความดันกับระยะความลึกของแพคเบดโดยเปลี่ยนขนาดของอนุภาค (S<sub>in</sub> = 0.7, E<sub>in</sub> (MW) = 4,200 V/m, E<sub>in</sub> (IR) = 500 V/m, f\_MW = 2.45 GHz, f\_IR = 742 GHz)

สำหรับการเปลี่ยนแปลงขนาดอนุภาคของแพคเบด พบว่าวัสดุพรุนที่มีขนาดอนุภาค 0.4 mm. จะมีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนและมวลสารน้อยกว่าที่วัสดุพรุนที่มีขนาด อนุภาค 0.15 mm. จากภาพที่ 5.39 และภาพที่ 5.40 จะเห็นได้ว่าวัสดุพรุนที่มีขนาดอนุภาค 0.15 mm. สามารถดูดกลืนพลังงานได้มากเนื่องจากปริมาณน้ำภายในโครงสร้างของแพคเบดโดยเฉลี่ย มีค่ามากกว่าแพคเบดของวัสดุพรุนที่มีขนาดอนุภาค 0.4 mm. ส่งผลทำให้ Loss Tangent Coefficient มีค่าสูงตามไปด้วย จึงทำให้อุณหภูมิที่เกิดขึ้นสูงดังเห็นได้จากภาพที่ 5.41 ประกอบ กับวัสดุพรุนที่มีอนุภาคขนาด 0.15 mm. มีความดันคาพิวลารีสูง (Ratanadecho et al.,2001) ทำ ให้สามารถไล่ความชื้นที่ภายในได้ดีกว่าวัสดุพรุนที่มีขนาดอนุภาค 0.4 mm. ซึ่งมีความดัน คาพิวลารีน้อยกว่าดังแสดงในภาพที่ 5.42 ในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการจะมีอิทธิพลของความดัน ลูกพิวลารีที่ขับเคลื่อนของเหลวไปยังผิวหน้าแพคเบดมีค่าสูง แต่เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณความชื้น ลดลง ทำให้การเคลื่อนที่ของความชื้นออกสู่ผิวหน้านั้นเป็นอิทธิพลของการแพร่ของไอเป็นหลัก ภาพที่ 5.43 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับระยะความลึกของแพคเบด พบว่าค่าความดัน มีค่าเพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 5.44 อัตราการดูดกลืนพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟกับระยะความลึกของแพคเบดโดย เปลี่ยนความเข้มสนามไฟฟ้าของไมโครเวฟ (d = 0.15 mm, S<sub>in</sub> = 0.7, E<sub>in</sub> (IR) = 500 V/m, f\_MW = 2.45 GHz, f\_IR = 742 GHz)



ภาพที่ 5.45 การดูดกลืนพลังงานจากคลื่นอินฟาเรดกับระยะความลึกของแพคเบดโดยเปลี่ยน ความเข้มสนามไฟฟ้าของไมโครเวฟ (d = 0.15 mm, S<sub>in</sub> = 0.7, E<sub>in</sub> (IR) = 500 V/m, f\_MW = 2.45 GHz, f\_IR = 742 GHz)



ภาพที่ 5.46 การกระจายอุณหภูมิกับระยะความลึกของแพคเบดโดยเปลี่ยนความเข้มสนามไฟฟ้า ของไมโครเวฟ (d = 0.15 mm, S<sub>in</sub> = 0.7, E<sub>in</sub> (IR) = 500 V/m, f\_MW = 2.45 GHz, f\_IR = 742 GHz)



ภาพที่ 5.47 การกระจายความชื้นกับระยะความลึกของแพคเบดโดยเปลี่ยนความเข้มสนามไฟฟ้า ของไมโครเวฟ (d = 0.15 mm, S<sub>in</sub> = 0.7, E<sub>in</sub> (IR) = 500 V/m, f\_MW = 2.45 GHz, f\_IR = 742 GHz)



ภาพที่ 5.48 ความดันกับระยะความลึกของแพคเบดโดยเปลี่ยนความเข้มสนามไฟฟ้าของ ไมโครเวฟ (d = 0.15 mm, S<sub>in</sub> = 0.7, E<sub>in</sub> (IR) = 500 V/m, f\_MW = 2.45 GHz, f\_IR = 742 GHz)

จากภาพที่ 5.44 และภาพที่ 5.45 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการดูดกลืน พลังงานกับความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปที่ระยะความลึกใด ๆ ของแพคเบด พบว่าอัตรา การดูดกลืนพลังงานที่ความเข้มของสนามไฟฟ้าที่มีค่า 4,200 V/m ทำให้เกิดอุณหภูมิสูงกว่าการใช้ ความเข้มของสนามไฟฟ้าที่มีค่า 2,800 V/m เนื่องจากการที่ความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ป้อนมีค่า สูงนั้นส่งผลให้อัตราการดูดกลืนพลังงานสูงขึ้น (ดังแสดงในสมการที่ 5.1) จึงทำให้อุณหภูมิที่ เกิดขึ้นสูง (ดังภาพที่ 5.46) ดังนั้นจึงส่งผลต่อการเคลื่อนย้ายความชื้นได้มากกว่าการใช้ความเข้ม ของสนามไฟฟ้าที่มีค่าต่ำ จากภาพที่ 5.47 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายความชื้นกับ การเปลี่ยนความเข้มของสนามไฟฟ้ากับระยะความลึกของแพคเบด พบว่าที่เวลาสุดท้ายของ กระบวนการนั้นมีความแตกต่างของการกระจายความชื้นกับระยะความลึกของแพคเบดที่ เปลี่ยนแปลงความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปไม่มากนัก เนื่องจากกระบวนการอบแห้งเข้า ใกล้สภาวะสมดุลและภาพที่ 5.48 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับระยะความลึกของ แพคเบด พบว่าการกระจายตัวของความดันรวมโดยเฉลี่ยตลอดแพคเบดมีการเปลี่ยนแปลง ไม่มากนัก ดังนั้นอิทธิพลของความดันรวมส่งผลต่อจลนศาสตร์ของการอบแห้งไม่มากนัก ทั้งนี้เป็น เพราะในกระบวนการอบแห้งได้ดำเนินไปถึงสภาวะที่อุณหภูมิภายในวัสดุมีค่าไม่เกินจุดเดือด

#### 5.3.4 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษา พบว่าในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการอบแห้งนั้นความดันคาพิวลารีจะมี อิทธิพลสูงในกระบวนการถ่ายเทมวลสาร แต่เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณความชื้นลดลง ทำให้การ ถ่ายเทมวลสาร (การเคลื่อนที่ของความชื้นซึ่งเป็นไอส่วนใหญ่) นั้นเป็นอิทธิพลจากการแพร่ของไอ เป็นหลัก และเมื่อความเข้มของสนามไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟที่ป้อนเข้าไปมีค่าสูงจะมีอัตราการ ดูดกลืนพลังงานสูง ทำให้เกิดความร้อนสูงจึงสามารถถ่ายเทมวลสารได้มากกว่าความเข้มของ สนามไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟที่มีค่าต่ำ คลื่นไมโครเวฟที่มีความถี่สูงจะมีอัตราการดูดกลืน พลังงานสูง เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้ามากกว่า อนุภาคขนาดเล็กจะมีความดัน คาพิวลารีที่สูงกว่าทำให้สามารถถ่ายเทมวลสารได้ดีกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ ในส่วนของอิทธิพล ของความดันรวมนั้นส่งผลน้อยมากต่อจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งที่มีอุณหภูมิแพคเบดต่ำดังใน การศึกษาครั้งนี้และพบว่าการใช้คลื่นอินฟาเรดร่วมกับคลื่นไมโครเวฟทำให้อุณหภูมิที่เกิดขึ้น ภายในวัสดุพรุนค่อนข้างสม่ำเสมอ และการถ่ายเทความชื้นที่เกิดขึ้นเป็นไปอย่างรวดเร็วกว่าการให้ ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟเพียงอย่างเดียวเนื่องจากอินฟาเรดจะเปลี่ยนพลังงานของคลื่นเป็น ความร้อนที่บริเวณผิวของวัสดุเพราะเป็นคลื่นที่มีย่านความถี่สูงซึ่งความยาวคลื่นสั้น ส่วนคลื่น ไมโครเวฟนั้นจะเปลี่ยนพลังงานของคลื่นที่ถูกดูดซับสู่วัสดุเป็นความร้อนทำให้วัสดุนั้นร้อนขึ้นทั้ง ก้อน (volumetric heating) ดังนั้นเมื่อใช้พลังงานไมโครเวฟร่วมกับอินฟราเรดจึงส่งผลให้การ ถ่ายเทความร้อน มวลสารและความดันนั้นเกิดได้ดีขึ้น ซึ่งงานวิจัยนี้สามารถนำไปเป็นข้อมูล พื้นฐานที่ใช้ในการออกแบบระบบจริงในทางปฏิบัติและอาจจะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่จะศึกษาวิจัย เกี่ยวกับกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพรุนสำหรับการวิเคราะห์ในกรณีอื่น ๆ คีกด้วย