การวิเคราะห์เชิงทฤษฏีของการถ่ายเทความร้อน มวลสารและความดัน ในวัสดุพรุนหลายชั้นภายใต้พลังงานไมโครเวฟโดยใช้กฎของแลมเบิร์ท

Theoretical Analysis of Heat-Mass Transport and Total Pressure in Multi-Layer Porous/slab: Under Microwave Energy Using Lambert's Law

โศภิดา สังข์สุนทร และผดุงศักดิ์ รัตนเดโช * หน่วยวิจัยเพื่อการใช้ประโยชน์จากไมโครเวฟในงานวิศวกรรม (R.C.M.E.) ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต 99 หมู่ 18 ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง ปทุมธานี 12120 โทร 0-2564-3001-9 โทรสาร 0-2564-3010 ^{*}อีเมล์ ratphadu@engr.tu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์เชิงทฤษฏีของการถ่ายเทความร้อน มวลสารในวัสดุพรุนหลายชั้น (ประกอบด้วยอนุภาคของเม็ดแก้ว น้ำ และอากาศ) ภายใต้พลังงานไมโครเวฟโดยใช้กฎของแลมเบิร์ท นอกจากนี้ยังได้พิจารณาถึงอิทธิพลของความดันที่ส่งผลต่อการถ่ายเท มวลสาร ภายในวัสดุพรุนหลายชั้นในระหว่างกระบวนการอบแห้งอีก ด้วย เพื่อศึกษาอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงขนาดอนุภาคในชั้นวัสดุ พรุน ความถี่ไมโครเวฟและความหนาของชั้นวัสดุพรุนที่มีผลต่อการ ถ่ายเทความร้อน มวลสารและความดันในวัสดุพรุนหลายชั้น ภายใต้ พลังงานไมโครเวฟ จากผลการวิจัยพบว่า การเปลี่ยนแปลงขนาด อนุภาคในชั้นวัสดุพรุน (ขนาดของเม็ดแก้ว) ความถี่ไมโครเวฟและ ความหนาของชั้นวัสดุพรุนมีผลต่อจลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง โดยรวมเป็นอย่างมาก ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปเป็น ข้อมูลพื้นฐานและประยุกต์ใช้ในกระบวนการอบแห้งวัสดุพรุนภายใต้ พลังงานไมโครเวฟได้เป็นอย่างดี

Abstract

In this paper, the heat and mass transfer under microwave energy in multi-layered packed beds is investigated by theoretically. The multi-layered packed beds composed of glass beads, water and air. The model is developed based on the Lambert's law. However, the effect of gas pressure during drying process was taken into consideration. Most importantly, this work focuses on the influence of particle size in the layered structure of porous media, frequency and thickness to predict heat and mass transfer in multi-layer porous under microwave energy. The results show that variations of particle size in the layered structure of porous media, frequency and thickness a microwave energy play an important role on overall drying kinetics. Furthermore the result of this research conducted to application for the microwave drying process of porous media.

1. บทนำ

ในปัจจุบันมีการนำเทคโนโลยีไมโครเวฟมาประยุกต์ใช้ในงาน อุตสาหกรรมต่างๆ มากมาย เช่น กระบวนการอบแห้งอาหาร กระบวนการอบแห้งวัสดุสิ่งทอ กระบวนการอบแห้งเยือกแข็ง (Freeze Drying Process) และกระบวนการวัลคาในซ์ยางพารา Metaxas [1] และในปัจจุบันนี้เริ่มมีการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการให้ความร้อนจาก ไมโครเวฟมากขึ้น ดังเช่นในรายงานการวิจัยของ Ayappa และคณะ [2-Li และคณะ [4] และ Clemens และคณะ [5] การวิเคราะห์ 31. กระบวนการถ่ายเทมวลและความร้อน 1 มิติในกระบวนการอบแห้งวัสดุ พรุน ได้มีการศึกษาโดย Gori และคณะ [6], Perkin และคณะ [7]และ Tuner และคณะ [8] ซึ่งรูปแบบทั้งหลายที่ได้ศึกษาผ่านมาล้วนอยู่บน พื้นฐานของแลมเบิร์ท (Lambert's Law) แต่มักจะเน้นไปที่การทดลอง สำหรับงานวิจัยที่เน้นสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อวิเคราะห์ กระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพรุนและทำให้ทราบ ถึงข้อมูลพื้นฐานของจลนพลศาสตร์ของกระบวนการอบแห้งได้แก่ Turner และคณะ [9] ,Feng และคณะ [10] , Ni และคณะ [11] และจาก งานวิจัยของ Ratanadecho และคณะ [12] พบว่าวัสดุพรุนที่มีอนุภาค ขนาดเล็กจะมีแรงดันคาพิลลารีสูงกว่าทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งสั้น กว่าวัสดุพรุนที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยเหล่านี้ เป็นเพียงการศึกษาในวัสดุชั้นเดียว (Single Layered Materials) เท่านั้น สำหรับงานวิจัยที่ศึกษาถึงวัสดุพรุนหลายชั้น (Multi Layered Materials) ยังมีการศึกษากันน้อย ซึ่งวัสดุพรุนหลายชั้นนั้นยกตัวอย่าง เช่น ถนน ซีเมนต์ วัสดุชีวมวลต่างๆ เป็นต้น โดย Ratanadecho และ คณะ [13] ได้ทำการทดลองและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใน ระบบสองมิติ เพื่อศึกษาอิทธิพลขนาดอนุภาค ความชื้นเริ่มต้นและเวลา การให้ความร้อน ในกระบวนการอบแห้งวัสดุพรุนหลายชั้น (ขนาด อนุภาคแต่ละชั้นไม่เท่ากัน) โดยใช้ไมโครเวฟท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม ในการศึกษาครั้งนี้ผลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความ สอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลองจริง แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ใช้ ทฤษฎีของแมกซ์เวลและไม่ได้ศึกษาถึงอิทธิพลความถี่ไมโครเวฟและ ความหนาของชั้นวัสดุพรุน

นอกจากนี้งานวิจัยส่วนใหญ่จะเน้นการทดลองและศึกษาการ กระจายตัวของอุณหภูมิ ความชึ้นและความดันเป็นส่วนใหญ่ แต่ การศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงขนาดอนุภาคในชั้นวัสดุพรุน (ขนาด อนุภาคหรือรูพรุน) ความถี่ไมโครเวฟและความหนาของชั้นวัสดุพรุน โดยใช้กฎของแลมเบิร์ท (Lambert's Law) ในการวิเคราะห์การกำเนิด ปริมาณความร้อนภายในต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (Local Volumetric Heat Generation) หรือความหนาแน่นของพลังงานไมโครเวฟที่ถูกดูด ซับในวัสดุนั้นยังไม่มีการศึกษาอย่างเป็นระบบ ซึ่งงานวิจัยนี้เป็นการ ขยายผลจากงานวิจัยของ Ratanadecho และคณะ [13] โดยงานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาวิเคราะห์ในเชิงทฤษฎีอย่างสมบูรณ์ในกระบวนการ ถ่ายเทความร้อน มวลสารและความดันที่เกิดขึ้นในวัสดุพรุนหลายชั้น Porous) ภายใต้พลังงานจากคลื่นไมโครเวฟใน (Multi-Layered แบบจำลอง 1 มิติ และใช้กฎของแลมเบิร์ทในการวิเคราะห์การกำเนิด . ปริมาณความร้อนภายในต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรในวัสดุที่มีความยาวกึ่ง Infinite) โดยมุ่งเน้นศึกษาถึงอิทธิพลของของการ อนันต์ (Semi เปลี่ยนแปลงขนาดอนุภาคในชั้นวัสดุพรุน ความถี่ไมโครเวฟและความ หนาของชั้นวัสดุพรุนที่มีผลต่อจลนพลศาสตร์ของกระบวนการอบแห้ง ้วัสดุพรุนหลายชั้น โดยวัสดุพรุนที่พิจารณาเป็นแพคเบดสองชั้นที่ใช้ใส่ เม็ดแก้ว 2 ขนาดไว้ด้วยกันแต่อยู่คนละชั้น ดังนี้ 1. แพคเบด F-C และ แพคเบด C-F โดยที่แพคเบด F-C คือ แพคเบดละเอียด (Fine Bed; F; d=0.15 mm) อยู่ด้านบนแพคเบดหยาบ (Coarse Bed; C; d=0.4 mm) และ 2. แพคเบด C-F คือ แพคเบดหยาบ (Coarse Bed; C; d=0.4 mm) อย่ด้านบนแพคเบดละเอียด (Fine Bed;F;d=0.15mm) นอกจากนี้ ยังได้พิจารณาถึงอิทธิพลของความดันที่ส่งผลต่อการถ่ายเทมวลสาร ภายในวัสดุพรุนในระหว่างกระบวนการอบแห้งอีกด้วย โดยผลลัพธ์จาก แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้จากการหาคำตอบด้วยระเบียบวิธีเชิง ้ตัวเลขโดยผ่านระเบียบวิธีไฟในต์วอลลุม (Finite Volume Method) ใน การวิเคราะห์จากแบบจำลองได้พิจารณาถึงสมบัติทางกายภาพ สมบัติ ทางอุณหพลศาสตร์ สมบัติการส่งผ่าน สมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุพรุน หลายชั้น (ซึ่งประกอบด้วยอนุภาคของเม็ดแก้ว น้ำ และอากาศ) ซึ่ง ผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปเป็นข้อมูลพื้นฐานต่อการทำ ้ความเข้าใจกระบวนการอบแห้งโดยใช้พลังงานไมโครเวฟได้ รวมทั้งใช้ ในการออกแบบระบบจริงในทางปฏิบัติได้

2. วิธีการวิจัย

2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากแบบจำลองทางกายภาพของกระบวนการถ่ายเทความร้อน มวลสารและความดันในวัสดุพรุนหลายชั้นภายใต้พลังงานไมโครเวฟ ใน กรณี 1 มิติ ดังรูปที่ 1 ซึ่งจะทำการป้อนคลื่นไมโครเวฟที่เป็นคลื่น ระนาบ (Plane Wave) ให้กับแพคเบดของวัสดุพรุนหลายชั้น (แต่ละชั้น ประกอบด้วย 3 เฟส คือ เม็ดแก้ว (Glass Beads) น้ำและอากาศ) ซึ่ง ้ วัสดุพรุนที่พิจารณาเป็นแพคเบดสองชั้นที่มีความยาว 40 cm ใช้ใส่เม็ด แก้ว 2 ขนาดไว้ด้วยกันแต่อยู่คนละชั้น คือ แพคเบด F-C และแพคเบด C-F โดยที่แพคเบดละเอียด (Fine Bed; F; d=0.15 mm) และบน แพคเบดหยาบ (Coarse Bed;C;d=0.4 mm) สำหรับการเปลี่ยนความ หนา (δ) ของชั้นวัสดุพรุนแบ่งออกเป็น 6 กรณีดังนี้ F-C;10-30 cm, F-C;20-20cm, F-C;30-10cm, C-F;10-30cm, C-F;20-20cm, C-F;30-10cm ตามลำดับ ยกตัวอย่างเช่นกรณี F-C;10-30cm หมายถึงแพคเบด ละเอียด (F; d=0.15 mm) ที่มีชั้นความหนา 10 cm (δ₁=10 cm) อยู่ ด้านบนแพคเบดหยาบ (C;d=0.4 mm) ที่มีความหนา 30 cm (δ₂=30 cm) และกรณี C-F;10-30cm หมายถึงแพคเบดหยาบ (C; d=0.4 mm) ีที่มีชั้นความหนา 10 cm (δ₁=10cm) อยู่ด้านบนแพคเบดละเอียด (F;d=0.15 mm) ที่มีชั้นความหนา 30 cm (δ₂=30 cm) เป็นต้น ดัง แสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 1 แบบจำลองทางกายภาพสำหรับวิเคราะห์กระบวนการ ถ่ายเทความร้อน มวลสารและความดันในวัสดุพรุนโดยใช้ไมโครเวฟ



รูปที่ 2 วัสดุพรุนหลายชั้น โดยมีการปรับเปลี่ยนค่าความหนา $\delta_1:\delta_2$

โดยค่าการกำเนิดปริมาณความร้อนภายในต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (Local Volumetric Heat Generation) หรือความหนาแน่นของพลังงาน ไมโครเวฟที่ถูกดูดซับลดลงแบบเอกซ์โพเนนเซียลในวัสดุที่มีความยาว ้กึ่งอนันต์ (Semi Infinite) ตามกฎของแลมเบิร์ท (Lambert's Law) สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังต่อไปนี้ [12]

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

โดยที่ lpha คือ ค่าคงที่การลดทอนของคลื่น (Attenuation Constant) ซึ่ง คำนวณได้จาก

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

ในงานวิจัยนี้กำหนดให้สมบัติไดอิเล็กตริก เป็นฟังก์ชันของความชื้นและ อุณหภูมิ การวิเคราะห์นั้นจะใช้ทฤษฎีการผสมผสานเชิงไดอิเล็กตริก (Dielectric Mixing Theory) Wang and Schmugge [14] ส่วนค่า สัมประสิทธิ์ลอสแทนเจนท์ (Loss Tangent Coefficient) ของแพคเบด สามารถแสดงได้ในสมการต่อไปนี้

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

รวมบทความวิชาการ เล่มที่ 4 การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22

457



รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกาพิวลารี (P_c) และ ความอิ่มตัวประสิทธิผลของน้ำ (S_c) [12]

จากรูปพบว่าแพคเบดละเอียด (d=0.15mm) จะมีความดัน คาพิวลารีและค่าความอิ่มตัวประสิทธิผลของน้ำสูงกว่าแพคเบดหยาบ (d=0.4mm) เมื่อ *s*_e คือ ค่าความอิ่มตัวประสิทธิผลของน้ำ (Effective Water Saturation) สำหรับค่าสมบัติของการถ่ายเทความชื้นในวัสดุ พรุนที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ แสดงในตารางที่ 1 ดังนี้

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของการถ่ายเทความชื้นในวัสดุพรุน [12]

ขนาดอนุภาค, d (mm.)	ความพรุน, ϕ (-)	การซึมผ่าน, <i>K (m</i> ²)
0.15 (F-bed)	0.385	8.41×10 ⁻¹²
0.4 (C-bed)	0.371	3.52×10 ⁻¹¹



รูปที่ 4 การเคลื่อนตัวของ ความชิ้นและความดัน คาพิวลารีภายในแพคเบด [13]

สำหรับในกรณีของวัสดุพรุนหลายชั้นการเคลื่อนตัวของความชิ้น และความดันคาพิวลารีภายในแพคเบดสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 4 ซึ่ง วัสดุพรุนหลายชั้นประกอบด้วยแพคเบดละเอียด (Fine Bed; d=0.15 mm) และ แพคเบดหยาบ (Coarse Bed; d=0.4 mm) ดังรูป

สมมติฐานที่ใช้ในแบบจำลองของกระบวนการถ่ายความร้อน มวล สารและความดันภายใต้พลังงานไมโครเวฟ มีดังนี้

-วัสดุพรุนที่พิจารณาเป็นชนิดคาพิลลารี (Capillary Porous Media) และเป็นวัตถุคงรูปไม่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นภายใน

-แพคเบดของวัสดุพรุนมีความสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์

-ที่บริเวณด้านบนแพคเบดพิจารณาเป็นขอบเขตเปิด (มีการถ่ายเท ความร้อนและมวล)

-การกระจายตัวของสนามไฟฟ้า อุณหภูมิและการเคลื่อนย้าย ความชิ้น จะพิจารณาให้อยู่ในระนาบ 1 มิติ

-วัสดุที่มีความยาวกึ่งอนันต์ (Semi Infinite) และการดูดซับพลังงาน ไมโครเวฟในวัสดุลดลงแบบเอกซ์โพเนนเซียลตามกฎของ แลมเบิร์ท (Lambert's Law) 2.1.1.การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน มวลสารและความดัน (Analysis of Heat - Mass Transport and Pressure Gradient)

ในงานวิจัยครั้งนี้จะทำการวิเคราะห์จากรูปที่ 1 ซึ่งกลไกสำคัญใน การเคลื่อนย้ายความชื้นระหว่างกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวล สาร คือ เกรเดียนของความดันคาพิลลารีและแรงโน้มถ่วงของโลกซึ่ง อาจจะเสริมหรือหน่วงการเคลื่อนตัวของของไหล ขณะที่เกรเดียนของ ความดันย่อยของการระเหยนั้นเกี่ยวข้องกับการไหลของไหล 2.1.2. สมการถ่ายเทความร้อน (Heat Transport Equation)

ปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนภายในวัสดุพรุนสามารถอธิบาย โดยสมการอนุรักษ์พลังงาน ซึ่งจะรวมเทอมของค่ากำลังการดูดซับ พลังงานไมโครเวฟเข้าไปด้วย เมื่อทำการประยุกต์ใช้กฏของดาร์ซี่ (Darcy's Law) และกฏของฟิกส์ (Fick's Law) ทำให้ได้สมการที่ควบคุม กระบวนการถ่ายเทความร้อนในรูปแบบที่สมบรูณ์ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\left(\rho C_p \right)_T T \right) + \frac{\partial}{\partial t} \left(\left(\rho_l C_{pl} M_l + \left(\rho_a C_{pa} + \rho_v C_{pv} \right) W_g \right) T \right) = \frac{\partial}{\partial t} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial t} \right) \\ - H_v \left(\frac{\partial}{\partial t} \left(\rho_v \phi (l-s) \right) + \frac{\partial}{\partial t} \left(\rho_v \frac{K K_{rg}}{\mu_g} \left(-\frac{\partial P_g}{\partial t} + \rho_g g_z \right) - \rho_g D_m \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\rho_v}{\rho_g} \right) \right) \right) + Q$$
(4)

2.1.3. สมการถ่ายเทมวลสาร (Mass Transport Equation)

ปรากฏการณ์การถ่ายเทมวลสารภายในวัสดุพรุนสามารถอธิบาย โดยสมการอนุรักษ์มวลสำหรับน้ำทั้งในรูปของเหลวและไอน้ำ โดย พิจารณาสมการเหล่านี้ในลักษณะ 1 มิติ และจากกฏของดาร์ซี่ (Darcy's Law) และกฏของฟิกส์ (Fick's Law) ทำให้ได้สมการที่ควบคุม กระบวนการถ่ายเทมวลสารดังนี้

$$\varphi \frac{\partial}{\partial t} \left(s + Y_{v} \left(l - s \right) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{KK_{nl}}{\mu_{l}} \left(\frac{\partial P_{c}}{\partial z} - \frac{\partial P_{g}}{\partial z} + g_{z} \right) \right]$$

$$+ Y_{v} \frac{KK_{rg}}{\mu_{g}} \left(-\frac{\partial P_{g}}{\partial z} + \rho_{g} g_{z} \right) - Y_{g} D_{m} \frac{\partial}{\partial z} \left(W_{v} \right) = 0$$

$$W$$

$$W$$

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

2.1.4. สมการความดันรวม (Total Pressure Equation)

ปรากฏการณ์ของความดันภายในวัสดุพรุนสามารถอธิบายโดยใช้ สมการอนุรักษ์มวลสำหรับอากาศ เมื่อทำการประยุกต์ใช้กฏของดาร์ซี่ (Darcy's Law) และกฏของฟิกส์ (Fick's Law) โดยสมมติให้ก๊าซมี สมบัติเป็นก๊าซในอุดมคติ จึงสามารถจัดรูปใหม่ได้ดังนี้

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

โดยที่

2.1.5. เงื่อนไขขอบเขตและเงื่อนไขเริ่มตัน

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

(Boundary and Initial Condition)

เงื่อนไขขอบเขต คือ เงื่อนไขสำหรับขอบเขตเปิด (Open Boundary) โดยเงื่อนไขขอบเขตสำหรับการแลกเปลี่ยนพลังงานและ มวลที่ขอบเขตเปิด สามารถเขียนได้ดังสมการต่อไปนี้

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

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

รวมบทความวิชาการ เล่มที่ 4 การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22

พิจารณาเงื่อนไขขอบเขตที่ขอบเขตปิด (Impermeable Surface) ซึ่งก็ คือขอบเขตที่ไม่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนและมวลเกิดขึ้น สามารถ เขียนได้ดังสมการต่อไปนี้

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

ตารางที่ 2 ข้อมูลสำหรับสมบัติทางกายภาพทางความร้อน และสมบัติไดอิเล็กตริก [12]

$\varepsilon_0 = 8.85419 \times 10^{-12} \ [F/m]$	$\mu_0 = 4.0\pi \ x \ 10^{-7} \ [H/m]$		
$\varepsilon_{ra} = 1.0$	$\varepsilon_{rp} = 5.1$		
$\mu_{ra} = 1.0$	$\mu_{rp} = 1.0$		
$\mu_{rl} = 1.0$			
$\tan \delta_a = 0.0$	$tan \delta_p = 0.01$		
$\rho_a = 1.205[kg/m^3]$	$\rho_p = 2,500 \ [kg / m^3]$		
$\rho_l = 1,000 [kg / m^{3}]$			
$C_{pa} = 1.007 [kJ / (kg \cdot K)]$	$C_{pp} = 0.80 [kJ / (kg \cdot K)]$		
$C_{pa} = 4.186[kJ/(kg \cdot K)]$			
$\lambda_a[W/(m \cdot K)]$	$\lambda_p = 1.0 [W/(m \cdot K)]$		
$\lambda_l = 0.610 [W/(m \cdot K)]$			
Initial saturation (s) = 0.6	$T_{air} = 30^0 C$		
$htc = 15[W/(m^2 \cdot K)]$	hr = 0.58[m/s]		

2.2. วิธีการหาผลเฉลย

จากสมการถ่ายเทความร้อน มวลสารและความดัน ดังแสดงใน สมการที่ (4) ถึงสมการที่ (6) ก็ได้ทำการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์ วอลลุม (Finite Volume Method) ซึ่งเป็นระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่อาศัย การอินทิเกรตสมการอนุรักษ์บนปริมาตรควบคุม (Control Volume) โดยแบ่งขอบเขตของปัญหาที่สนใจออกเป็นปริมาตรควบคุมย่อย ๆ จำนวนมาก แต่ละปริมาตรควบคุมจะล้อมรอบโหนด (Node) ซึ่งเป็น ตำแหน่งที่แสดงค่าเฉลี่ยของปริมาณต่าง ๆ ในปริมาตรควบคุมนั้น ผล จากการอินทิเกรตสมการอนุพันธ์นี้ ก็จะได้สมการพีชคณิตของแต่ละ ปริมาตรควบคุมที่มีตัวแปรเป็นค่าของปริมาณใด ๆ บนโหนดในปริมาตร ควบคุมนี้ ตัวอย่างสำหรับกรณีตำแหน่งโหนดภายใน (Internal Node) จะได้สมการไฟไนต์วอลลุมได้ดังนี้

สมการถ่ายเทความร้อน (Heat Transport Equation)

$$\frac{(\rho C_p)_{nk}^{n+1} T_k^{n+1} - (\rho C_p)_{T_k}^n T_k^n}{\Delta t} + \frac{\rho_l C_{pl}}{\Delta z} (w_k^{n+1} T_k^{n+1} - w_{lk-1}^{n+1} T_{k-1}^{n+1}) \\ + \frac{(\rho C_p)_{av}}{\Delta z} (w_{gk}^{n+1} T_k^{n+1} - w_{gk-1}^{n+1} T_{k-1}^{n+1}) \\ - \frac{1}{\Delta z} \left(\lambda_{k+\frac{1}{2}}^{n+1} \left(\frac{T_{k+1}^{n+1} - T_k^{n+1}}{\Delta z} \right) - \lambda_{k-\frac{1}{2}}^{n+1} \left(\frac{T_{k-1}^{n+1} - T_{k-1}^{n+1}}{\Delta z} \right) \right) + \frac{H_v \rho_v \phi}{\Delta t} ((1 - s_w) (s_{ek}^{n+1} - s_{ek}^n)) \\ - \frac{1}{\Delta z} \left(\left(\rho_{vk}^{n+1} \frac{KK_{rg}}{\mu_g} \right)_{k+\frac{1}{2}} \left(- \left(\frac{P_{gk+1}^{n+1} - P_{gk}^{n+1}}{\Delta z} \right) + \rho_g g_z \right) \right) \\ - \frac{1}{\Delta z} \left(\left(\rho_{vk}^{n+1} \frac{KK_{rg}}{\mu_g} \right)_{k+\frac{1}{2}} \left(- \left(\frac{P_{gk+1}^{n+1} - P_{gk}^{n+1}}{\Delta z} \right) + \rho_g g_z \right) \right) \\ - \left(\rho_{gk}^{n+1} \frac{KK_{rg}}{\mu_g} \right)_{k+\frac{1}{2}} \left(\frac{\rho_v}{\rho_g} \right)_{k+1}^{n+1} - \left(\frac{\rho_v}{\rho_g} \right)_{k+1}^{n+1} - \rho_{gk-1}^{n+1} \right) \\ - \left(\rho_{gk}^{n+1} \frac{KK_{rg}}{\mu_g} \right)_{k+\frac{1}{2}} \left(\frac{\rho_v}{\rho_g} \right)_{k+1}^{n+1} - \left(\frac{\rho_v}{\rho_g} \right)_{k+1}^{n+1} - \rho_{gk-1}^{n+1} \right) \\ - \rho_{gk-1}^{n+1} \frac{\rho_{gk}}{\rho_g} \left(\frac{\rho_v}{\rho_g} \right)_{k+1}^{n+1} - \left(\frac{\rho_v}{\rho_g} \right)_{k+1}^{n+1} - \rho_{gk-1}^{n+1} \right) \\ - \rho_{gk-1}^{n+1} \frac{\rho_{gk}}{\rho_g} \left(\frac{\rho_v}{\rho_g} \right)_{k+1}^{n+1} - \left(\frac{\rho_v}{\rho_g} \right)_{k+1$$

-Q=0

สมการถ่ายเทมวลสาร (Mass Transport Equation)

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

$$+ \left(\left(\frac{KK_{rl}}{\mu_{l}} \right|_{k + \frac{l}{2}} \left(\frac{P_{ck+l}^{n+1} - P_{ck}^{n+1}}{\mathcal{A}z} - \left(\frac{P_{gk+l}^{n+1} - P_{gk-l}^{n+1}}{\mathcal{A}z} \right) + g_{z} \right) \right)$$

$$+ \frac{1}{\mathcal{A}z} \left(\frac{KK_{rl}}{\mu_{l}} \right|_{k - \frac{l}{2}} \left(\frac{P_{ck}^{n+1} - P_{ck-l}^{n+1}}{\mathcal{A}z} - \left(\frac{P_{gk-l}^{n+1} - P_{gk-l}^{n+1}}{\mathcal{A}z} \right) + g_{z} \right) \right)$$

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

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

$$= 0$$

$$= 0$$

$$(11)$$

สมการความดันรวม (Total Pressure Equation)



สำหรับกระบวนการทางระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

รวมบทความวิชาการ เล่มที่ 4 การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22

จากรายละเอียดในรูปที่ 5 นั้นเริ่มต้นจากการป้อนสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุดังที่แสดงในตารางที่2 ที่รวมถึงสมบัติเชิงความร้อนที่สภาวะ เริ่มต้น (t = 0) และเมื่อได้ค่าผลเฉลยของสมบัติทางความร้อนที่ สภาวะเริ่มต้นแล้ว จะทำการวิเคราะห์ที่ช่วงเวลาถัดไป โดยการคำนวณ ค่าการดูดซับพลังงานไมโครเวฟ (Q) และนำมาหาผลเฉลยของความชื้น (s) อุณหภูมิ (T) และความดัน (P) จากนั้นทำการตรวจสอบค่าที่ได้ว่ามี ค่าน้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่กำหนดไว้หรือไม่ ถ้ามีค่ามากกว่าค่า ความคลาดเคลื่อนที่มากสุดที่ยอมรับได้ในกระบวนการทำซ้ำ (คือ 10^{-s}) จะทำการวนกลับไปทำซ้ำ ณ เวลาเดิม แต่ถ้ามีค่าน้อยกว่าค่า ความคลาดเคลื่อนที่กำหนดไว้ ก็จะเข้าสู่กระบวนการคำนวณที่ช่วงเวลา ถัดไป กระบวนการคำนวณจะดำเนินซ้ำไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งถึง ช่วงเวลาสุดท้ายของกระบวนการที่กำหนด (t = t_{max}) ก็จะสิ้นสุด กระบวนการคำนวณ

3. ผลวิจัยและวิจารณ์ผล

ในการศึกษาเพื่อวิเคราะห์กระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวล สารในวัสดุพรุนหลายชั้นซึ่งในแต่ละชั้นประกอบด้วย 3 เฟส คือ เม็ด แก้ว (Glass Beads) น้ำและอากาศ โดยป้อนคลื่นไมโครเวฟให้กับ แพคเบดของวัสดุพรุนหลายชั้นและเกิดการดูดซับคลื่นไมโครเวฟใน ้วัสดุและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน ดังที่แสดงแบบจำลองทาง กายภาพในรูปที่ 1 ซึ่งได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง ที่นำเสนอ โดยทำการเปรียบเทียบผลการทำนายกับงานวิจัยของ Kaviany [15] ที่สภาวะเงื่อนไขในกรณีการอบแห้งด้วยการพาความ ้ร้อนและสมบัติวัสดุเหมือนกัน พบว่าให้ผลที่สอดคล้องกันดังแสดงในรูป ที่ 6 ยกเว้นค่าความชั้นตอนปลายในช่วงเวลาที่ 114 min ซึ่งมีความ แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ซึ่งความแตกต่างอาจเกิดจากความละเอียด ของจำนวนกริดที่ใช้ในการคำนวณและสมบัติเชิงความร้อนของวัสดุที่ใช้ ในการคำนวณ อย่างไรก็ตาม ถือได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้มีความถูกต้องและสามารถนำไปใช้วิเคราะห์ ปัญหาได้ ซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์ผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในเงื่อนไขขอบเขตและสภาวะที่ศึกษาดัง แสดงในรูปที่ 7 ถึงรูปที่ 18 ตามลำดับ





ก. ผลการคำนวณจาก Kaviany [15]

ข. ผลการคำนวณจากการใช้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นครั้งนี้

3.1 อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงขนาดอนุภาคในชั้นวัสดุพรุน

จากรูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการดูดกลืนพลังงาน (Absorbed Energy) หรือค่ากำลังการดูดซับไมโครเวฟ (Microwave Power Absorbed) กับระยะความลึกของแพคเบดที่สภาวะความชื้น เริ่มต้นที่ 0.6 ความเข้มของสนามไฟฟ้า 4,200V/m และความถึ ไมโครเวฟที่ 2.45 GHz ในกรณีแพคเบด F-C และแพคเบด C-F โดยที่ แต่ละชั้นของแพคเบดมีความหนา 20cm (δ₁:δ₂=20:20cm)ทั้งสองกรณี ผลการศึกษาพบว่าในช่วงระยะ 0 ถึง 20 cm แพคเบด F-C มีอัตราการ ดูดกลืนพลังงานสูงกว่าแพคเบด C-F อย่างเห็นได้ชัดเนื่องจากแพคเบด F-C มีแพคเบดละเอียด (F;d=0.15 mm) อยู่ที่ด้านบน (ระยะ 0 ถึง 20 cm) จึงสามารถดูดกลืนพลังงานได้มากเนื่องจากปริมาณน้ำภายใน โครงสร้างของแพคเบดละเอียดโดยเฉลี่ยมีค่ามากกว่าแพคเบดหยาบ (C;d=0.4 mm) ส่งผลทำให้สัมประสิทธิ์ลอสแทนเจนท์ (*tan δ*) มีค่าสูง ทำให้อัตราการดูดกลืนพลังงานมากตามไปด้วยดังแสดงในสมการที่ (1) แต่เมื่อเวลาผ่านไปความแตกต่างของอัตราการดูดกลืนพลังงานในแต่ละ กรณีน้อยเนื่องจากมีปริมาณความชื้นลดลงและค่าสัมประสิทธิ์ลอสแทน เจนท์ลดลง ทำให้อัตราการดูดกลืนพลังงานลดลง อย่างไรก็ตามในที่ ระยะความลึกมากๆ (ช่วง 25-40 cm) อัตราการดูดกลืนพลังงานมีค่า ้น้อยมากในทั้ง 2 กรณี เนื่องจากแพคเบดมีความหนามากกว่าค่าความ ลึกในการทะลุทะลวง (Penetration Depth, $D_p \approx 24 cm$) [16] จึงทำให้ การดูดซับพลังงานไมโครเวฟสามารถขยายไปได้น้อย ดังนั้นอุณหภูมิที่ เกิดขึ้นจึงมีค่าสูงในช่วงระยะ 0 ถึง 20 cm และจากนั้นก็ลดลง ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 8 ประกอบกับแพคเบดละเอียด (F) มีความ ้ดันคาพิลลารีสูงกว่าแพคเบดหยาบ (C) ซึ่งมีความดันคาพิลลารีน้อย กว่าดังแสดงในรูปที่ 3ทำให้สามารถไล่ความชื้นที่ภายในแพคเบด F-C ได้ดีกว่าแพคเบด C-F ดังแสดงในรูปที่ 9 และพบว่าภายในแพคเบดมี การกระจายของความชื้นไม่ต่อเนื่องเป็นเพราะความแตกต่างของ ้อนุภาคที่มีขนาดไม่เท่ากันโดยเฉพาะที่บริเวณรอยต่อจะมีความชื้น แตกต่างกันมากเนื่องจากมีค่าสมบัติไดอิเล็กตริกต่างกันและมีปริมาณ ้น้ำภายในโครงสร้างของแพคเบดโดยเฉลี่ยต่างกัน (รูปที่ 3) ประกอบ กับอิทธิพลของแรงโน้มถ่วงก็มีส่วนที่ทำให้ความชื้นบางส่วนยังคงถูก หน่วงไว้ที่ด้านล่างของแพคเบด จากรูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ ระหว่างความดันกับระยะความลึกของแพคเบดพบว่าความดันจะมีค่า เข้าใกล้ความดันบรรยากาศที่บริเวณผิวแล้วค่อย ๆ เพิ่มขึ้นที่ความลึก แพคเบดมากขึ้นโดยเฉพาะที่บริเวณผิวรอยต่อในกรณีแพคเบด C-F และมีค่าลดลงเมื่อเวลาการอบแห้งเพิ่มมากขึ้น ประกอบกับแพคเบด ละเอียดจะมีค่าความดันคาพิวลารีสูงกว่าแพคเบดหยาบ (ดังรูปที่ 4) ้อย่างไรก็ตามที่ช่วงเวลาท้ายกระบวนการ (10 hr.) ที่ระยะประมาณ 23 ถึง 33 cm ค่าความดันจะมีค่าต่ำกว่าความดันบรรยากาศ ที่เป็นเช่นนี้ เพราะบริเวณดังกล่าวน้ำพยายามแยกตัวออกไปจากช่องว่างทำให้เป็น การเพิ่มปริมาตรของเฟสก๊าซ ในทำนองเดียวกันทำให้ความดันย่อย ของอากาศบริเวณนั้นต่ำลงส่งผลทำให้ความดันรวมนี้ต่ำลงไปด้วย



รูปที่ 7 อัตราการดูดกลืนพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟกับ ระยะความลึกของแพคเบดโดยเปลี่ยนขนาดอนุภาคในชั้นวัสดุพรุน



โดยเปลี่ยนขนาดอนุภาคในชั้นวัสดุพรุน



3.2 อิทธิพลของความถี่ไมโครเวฟ

จากรูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการดูดกลืนพลังงานกับ ระยะความลึกของแพคเบดที่สภาวะความชื้นเริ่มตันที่ 0.6 ความเข้ม ของสนามไฟฟ้า 4.200V/m และแพคเบด F-C เมื่อแต่ละชั้นของ แพคเบดมีความหนา 20cm (δ₁:δ₂=20:20cm) โดยเปลี่ยนความถี่ของ ้คลื่นไมโครเวฟที่ 2.45 GHz และ 5 GHz ตามลำดับ พบว่าอัตราการ ดูดกลืนพลังงานกรณีที่ความถี่สูง (5 GHz) มีความแตกต่างกันกับที่ท้าย กระบวนการเป็นอย่างมาก เนื่องจากในช่วงเริ่มแรกของกระบวนการนั้น มีปริมาณความชื้นและค่าสัมประสิทธิ์ลอสแทนเจนท์ ($tan \delta$) สง ประกอบกับคลื่นไมโครเวฟมีค่าสูงจะทำให้อัตราการดูดกลืนพลังงานสูง ้ดังแสดงในสมการที่ (1) จึงทำให้เกิดความร้อนสูง ดังนั้นอุณหภูมิที่ ้เกิดขึ้นจึงสูงตามไปด้วยดังรูปที่ 12 แต่เมื่อเวลาผ่านไปความแตกต่าง ของอัตราการดูดกลืนพลังงานในแต่ละความถิ่น้อยเนื่องจากมีปริมาณ ความชื้นลดลงและค่าสัมประสิทธิ์ลอสแทนเจนท์ลดลง ทำให้อัตราการ ดูดกลืนพลังงานลดลง อย่างไรก็ตามที่ระยะความลึก 12 ถึง 24 อัตรา การดูดกลืนพลังงานที่ความถี่ต่ำกว่า (2.45GHz) กลับมีค่าสูงกว่ากรณีที่ ความถี่สง (5GHz) เล็กน้อย เนื่องจากกรณีที่ค่าความถี่ต่ำจะมีค่าความ ียาวคลื่นมากกว่า และพบว่าที่ระยะความลึกมากๆ (ช่วง 25 ถึง 40cm) ้อัตราการดูดกลืนพลังงานมีค่าน้อยมากในทั้ง 2 กรณี เนื่องจากแพคเบด มีความหนามากกว่าค่าความลึกในการทะลุทะลวง (D_p) เมื่อพิจารณา การกระจายความชื้น (รูปที่ 13) พบว่าความถี่ของคลื่นไมโครเวฟมีค่า 5 GHz สามารถไล่ความชื้นได้มากกว่าที่ความถี่ของคลื่นไมโครเวฟมีค่า 2.45 GHz เนื่องจากการที่ความถี่ของคลื่นไมโครเวฟมีค่าสูงจะทำให้ ้อัตราการดูดกลืนพลังงานสูง ดังแสดงในสมการที่ (1) ทำให้เกิดความ ้ร้อนสูงขึ้น และพบว่าความชื้นที่บริเวณรอยต่อมีสูงทั้งนี้เนื่องจากเกิด การขับเคลื่อนของความชื้นบริเวณกึ่งกลางของแพคเบดไปยังผนัง ้ด้านข้างทั้งสองอย่างมีนัยสำคัญทั้งภายใต้อิทธิพลของแรงดันคาพิลลารี และการแพร่กระจายของไอทั้งนี้ความชื้นบริเวณตอนล่างของแพคเบด ้ยังคงมีมากกว่าบริเวณอื่นเนื่องมาจากอิทธิพลของแรงโน้มถ่วง จากรูป ที่ 14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับระยะความลึกของ แพคเบด พบว่าความดันจะมีค่าเข้าใกล้ความดันบรรยากาศที่บริเวณผิว ้แล้วค่อยๆ เพิ่มขึ้นที่ความลึกแพคเบดมากขึ้นจนถึงบริเวณใกล้ๆ

รอยต่อจากนั้นค่าความดันจะมีค่าต่ำกว่าความดันบรรยากาศเล็กน้อย เมื่อเวลาการอบแห้งเพิ่มมากขึ้น ที่เป็นเช่นนี้เพราะบริเวณดังกล่าวน้ำ พยายามแยกตัวออกไปจากช่องว่างทำให้เป็นการเพิ่มปริมาตรของเฟส ก๊าซ ในทำนองเดียวกันทำให้ความดันย่อยของอากาศบริเวณนั้นต่ำลง ส่งผลทำให้ความดันรวมนี้ต่ำลงไปด้วย









โดยเปลี่ยนความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ



3.3 อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นวัสดุพรุน

ในส่วนนี้เป็นการศึกษาถึงอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงความหนา ของชั้นวัสดุพรุน โดยทำการเปลี่ยนความหนา (δ₁และδ₂ตามลำดับ) ของแพคเบดละเอียดกับแพคเบดหยาบเป็น 10-30 cm, 20-20 cm, 30-10 cm ทั้งในกรณีแพคเบค C – F และแพคเบด F-C ตามลำดับ ซึ่ง ์ แสดงการกระจายความชึ้นกับระยะความลึกของแพคเบดที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5 GHz ตามลำดับ พบว่าในกรณีที่แพคเบดละเอียดอยู่ ้ด้านล่าง แพคเบดหยาบ (แพคเบด C – F) ซึ่งได้แสดงไว้ในดังรูปที่ 15 และรูปที่ 16 ตามลำดับ ซึ่งการเปลี่ยนความหนาของชั้นวัสดุพรุนกรณีที่ ้ชั้นแพคเบดหยาบอยู่ด้านบนนั้น พบว่าในกรณี C-F;20-20cm แต่ละชั้น ของแพคเบดมีความหนา 20cm (δ₁:δ₂=20:20cm) จะส่งผลทำให้การ กระจายความชื้นโดยเฉลี่ยภายในแพคเบดมีประสิทธิภาพดีกว่าเมื่อ เทียบกับความหนาของชั้นแพคเบดหยาบในกรณีอื่นๆ เนื่องจาก ้ความชื้นภายในชั้นแพคเบดละเอียดจะมีค่าสูงกว่าชั้นที่มีแพดเบดหยาบ ้ทั้งนี้เป็นเพราะอิทธิพลของชั้นแพคเบดละเอียดซึ่งมีความดันคาพิลลารี มากกว่า (ตามที่อธิบายปรากฏการณ์ไว้ในรูปที่ 3 และ รูปที่ 4) ประกอบกับอิทธิพลของแรงโน้มถ่วง ส่งผลทำให้น้ำจากชั้นแพคเบด หยาบเคลื่อนที่ไปยังชั้นแพคเบดละเอียดและการมีชั้นแพคเบดหยาบอยู่ ้ด้านบนจะหน่วงการเคลื่อนที่ของน้ำไปยังที่ผิวของแพคเบดในระหว่างที่ กระบวนการอบแห้งดำเนินไป จึงสามารถไล่ความชื้นที่ภายในแพคเบด ได้ดีกว่ากรณีความหนาอื่น นอกจากนี้ยังพบว่าอิทธิพลของความถึ ้ไมโครเวฟที่ใช้มีผลน้อยมากในกรณีแพคเบด C-F สำหรับในกรณีของ แพคเบด F-C ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 17 ถึงรูปที่ 18 ซึ่งเป็นกราฟการ กระจายความชื้นโดยเปลี่ยนความหนาของชั้นวัสดุพรุนกรณีแพคเบด F-C ที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5 GHz ตามลำดับ พบว่ากรณี F-C;10-30cm ที่ชั้นของแพดเบดละเอียดมีความหนา 10cm (δ₁=10cm) จะ ส่งผลทำให้การกระจายความชื้นโดยเฉลี่ยภายในแพคเบดสม่ำเสมอกว่า เมื่อเทียบกับความหนาของชั้นแพคเบดละเอียดในกรณีอื่นๆ ทั้งนี้เพราะ แพคเบดละเอียด (F) มีความดันคาพิลลารีสูงกว่าแพคเบดหยาบ (C) ซึ่งมีความดันคาพิลลารีน้อยกว่าดังแสดงในรูปที่ 4 ทำให้สามารถไล่ ความชื้นที่ภายในแพคเบดได้ดีกว่ากรณีชั้นความหนาอื่น นอกจากนี้ยัง พบว่าอิทธิพลของความถี่ไมโครเวฟส่งผลอย่างมีนัยสำคัญกับการไล่

รวมบทความวิชาการ เล่มที่ 4 การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22

ความชิ้นโดยเฉพาะกรณี F-C;10-30cm ชั้นแพดเบดละเอียดมีความ หนา 10cm (δ₁=10cm) ซึ่งจะทำให้กระจายความชิ้นโดยเฉลี่ยภายใน แพคเบดมีประสิทธิภาพดีที่สุดเมื่อเทียบกับกรณีอื่นๆ



รูปที่ 15 การกระจายความชิ้นกับระยะความลึกของแพคเบด โดยเปลี่ยนความหนาของชั้นวัสดุพรุนกรณีแพคเบด C-F





โดยเปลี่ยนความหนาของชั้นวัสดุพรุนกรณีแพคเบด C-F





4. สรุป

จากการศึกษา พบว่าความชื้นภายในชั้นแพคเบดละเอียดจะมีค่า สงกว่าชั้นที่มีแพดเบดหยาบทั้งนี้เป็นเพราะอิทธิพลของความดัน คาพิลลารีในชั้นแพคเบดละเอียดมีมากกว่า ส่งผลทำให้น้ำจากชั้น แพคเบดหยาบเคลื่อนที่ไปยังชั้นแพคเบดละเอียดและการมีชั้นแพคเบด หยาบอย่ด้านบนจะหน่วงการเคลื่อนที่ของน้ำไปยังที่ผิวของแพคเบดใน ระหว่างที่กระบวนการอบแห้งดำเนินไป ประกอบกับอิทธิพลของแรง โน้มถ่วง จึงกล่าวได้ว่ากระบวนการอบแห้งแพคเบด C-F จะดำเนินไป ้อย่างไม่มีประสิทธิภาพ เมื่อเทียบกับกรณีอื่นๆ และเมื่อใช้คลื่น ไมโครเวฟที่มีความถี่สูงจะมีอัตราการดูดกลืนพลังงานสูงเนื่องจากมีการ เปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้ามากกว่า แต่อย่างไรก็ตามพบว่าอิทธิพลของ ้ความถี่ไมโครเวฟที่ใช้มีผลน้อยมากในกรณีแพคเบด C-F แต่จะมี อิทธิพลสูงในกรณีแพคเบด F-C สำหรับกรณีอิทธิพลของความหนาของ ชั้นแพคเบดพบว่ากรณี F-C;10-30cm ชั้นแพดเบดละเอียดอยู่ด้านบน และมีความหนา **10 cm** (δ₁=10cm) ส่งผลทำให้การกระจายความชื้น ้โดยเฉลี่ยภายในแพคเบดสม่ำเสมอกว่าเมื่อเทียบกับความหนาของชั้น แพคเบดในกรณีอื่นๆ ซึ่งงานวิจัยนี้สามารถนำไปเป็นข้อมูลพื้นฐานที่ใช้ ในการออกแบบระบบจริงในทางปฏิบัติและอาจจะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่ จะศึกษาวิจัยเกี่ยวกับกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุ พรุนสำหรับการวิเคราะห์ในกรณีอื่นๆ อีกด้วย

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่สนับสนุนทุน วิจัยในครั้งนี้

รายการสัญลักษณ์

- D_m = effective molecular mass diffusion (m²/s)
- S = water saturation
- D_p = penetration depth (m)

 H_v = specific heat of vaporization (J/kg)

C = velocity of light (m/s)

- E = electric field intensity (V/cm)
- t = time (s)
- Q = microwave power absorbed term (W/m[°])
- f = frequency (GHz)
- P = microwave power (W)
- *p* = pressure (Pa)
- , = phase change term (kg/m³s)
- w = velocity (m/s)
- λ = effective thermal conductivity (W/mK)
- k = permeability (m²)
- $tan \delta$ = loss tangent coefficient
- ϕ = Porosity
- g = gravitational constant (m/s²)
- ρ = density (kg/m³)
- 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/ m²K)
- h_m = mass transfer constant (W/ m²K)

Subscripts

0	= free space	р	= particle
а	= air	r	= relative
с	= capillary	v	= water vapor
g	= gas	Ι	= liquid water

x = coordinate axis[m]

เอกสารอ้างอิง

- Metaxas, A.C., and Meridith, R.J., 1983, Industrial Microwave Heating, Peregrinus., Ltd. Heating, Peregrinus, Ltd., London.
- Ayappa, K.G., Davis, H.T., Crapiste, G., Davis, E.A., and Gordon, J., 1991, Microwave Heating: An Evaluation of Power Formulations, Chem. Eng. Sci., 46, No.4, pp.1005-1016.
- Ayappa, K.G., Davis, H.T., Davis, E.A., and Gordon, J., 1991, Analysis of Microwave Heating of Material with Temperature-Dependent Propertes, AIChE J., 37, No.3, pp.313-322.
- Li, W., Ebadian, M.A., White, T.L., and Grubb, R.G., 1993, Heat Transfer Within a Concrete Slab Applying the Microwave Decontamination Process, ASME J.Heat Transfer ,115, pp.42-50.

- Clements, J. and Saltiel, C., 1996, Numerical Modeling of Material Processing in Microwave Furnaces, Int. J. Heat Mass Transfer., 39, No.8, pp.1655-1675.
- Gori, F., Gentili, G., and Matini, L., 1987, Microwave Heating of Porous Media, ASME J. Heat Transfer", 109, pp.522-525.
- Perkin, R.M., 1980, The Heat and Mass Transfer Characteristics of Boiling Point Drying Using Radio Frequency and Microwave Electromagnetic Fields, Int. J. Heat Mass Transfer., 23, pp.687-695.
- Turner, W. and Ilic, M., 1991, Combined Microwave and Convective Drying of a Porous Material, Drying Technology, 9, No.5, pp.1209-1269.
- Turner, I.W., Puiggali, J.R. and Jomaa, W., 1998, A Numerical Investigation of Combined Microwave and Convective Drying of a Hygroscopic Porous Material: A Study Based on Pine Wood., Trans IChemE, Vol.76, pp.193-209.
- Feng, H., Tang J., Cavalieri R.P. and Plumb O.A., 2001, Heat and Mass Transport in Microwave Drying of Porous Materials in a Spouted Bed., A.I.Ch.E. Journal , Vol.47, pp.1499-1512.
- Ni, H., Datta A.K. and Torrance K.E., 1999, Moisture Transport in Intensive Microwave Heating of Biomaterials: a Multiphase Porous Media Model, International Journal of Heat and Mass Transfer J., Vol.42, pp.1501-1512.
- 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.
- Ratanadecho, P., Aoki, K. and Akahori, M., 2002, Influence of Irradiation Time, Particle Sizes, and Initial Moisture Content During Microwave Drying of Multi-Layered Capillary Porous Materials., ASME J. Heat Transfer, Vol.124, pp.151-161.
- 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.
- Kaviany, M., 1991 ,Principle of heat transfer in porous media., Springer, New York.
- Ratanadecho, P., 2002, Microwave Heating Using a Rectangular Wave Guide, Doctor Dissertation Department of Mechanical Engineering Nagaoka University of Technology Nagaoka, Niigata, Japan, pp.103-110.