

ผลกระทบของความพรุนที่ไม่สม่ำเสมอที่มีต่อการพาความร้อนในวัสดุพรุนอัดตัวที่ทำ ความร้อนด้วยไมโครเวฟ

Effects of Non-Uniform Porosity on Convection in Saturated Porous Media Subjected to Microwave Heating

สันติพงษ์ คล้ายบวร, ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช และ วาทีต ภาคิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต จ.ปทุมธานี 12120
*ผู้ติดต่อ: E-mail: pwatit@engr.tu.ac.th, โทรศัพท์: 02 564-3001 ถึง 9 ต่อ 3143, โทรสาร: 02 5643023

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของความพรุนที่ไม่สม่ำเสมอที่มีต่อการพาความร้อนในวัสดุพรุนอัดตัวที่ทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในรูปแบบสองมิติ วัสดุพรุนที่ศึกษามีลักษณะเป็นสองชั้นโดยแต่ละชั้นมีคุณสมบัติทางกายภาพและความร้อนที่ต่างกัน สำหรับในส่วนการส่งถ่ายโมเมนตัมใช้ตัวแบบ non-Darcian เพื่อคำนวณอิทธิพลของแรงจุดและความเฉื่อย อันเนื่องจากส่วนของแข็งในวัสดุพรุน คำตอบของสมการ Maxwell ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาหาได้โดยอาศัยวิธีผลต่างสืบเนื่องเชิงเวลา (Finite Difference Time Domain, FDTD) เพื่ออธิบายพฤติกรรมของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในท่อนำคลื่นและในวัสดุพรุน สมการโมเมนตัม สมการพลังงาน และสมการ Maxwell ใช้แก้ปัญหการกระจายของอุณหภูมิและสนามความเร็ว แก๊สมการที่ไม่เชิงเส้นควบคู่โดยใช้วิธี SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations) ในงานวิจัยนี้ศึกษาโดยมุ่งเน้นถึงผลกระทบของ ค่าความพรุน ขนาดของอนุภาค คุณสมบัติเชิงความร้อนของวัสดุพรุนที่มีต่อการพาความร้อนในวัสดุพรุนตลอดจนกำลังและความถี่ไมโครเวฟที่มีต่อการพาความร้อนในวัสดุพรุนที่มีความพรุนไม่สม่ำเสมอดังกล่าว ผลการคำนวณแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของอิทธิพลจากความพรุนที่ไม่สม่ำเสมอที่มีต่อกระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ

คำหลัก: การทำความร้อนจากไมโครเวฟ, ความพรุนไม่สม่ำเสมอ, การพาความร้อนแบบธรรมชาติ, วัสดุพรุนอัดตัว, ท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม

Abstract

Microwave heating of porous media with a non-uniform porosity is numerically investigated, based on a proposed numerical model. A two-dimensional with two layers variation of porosity difference in each layer is considered. The generalized non-Darcian model developed takes into account of the presence of a solid drag and the inertial effect. The transient Maxwell's equations are solved by using the finite difference time domain (FDTD) method to describe the electromagnetic field in the waveguide and media. The temperature profile and velocity field within media are determined by solution of the momentum,

energy and Maxwell's equations. The coupled nonlinear set of these equations are solved using the SIMPLE algorithm. In this work, concentrate in effect of porosity and diameter of particle to heat convection on porous media with variation of porosity difference in each layer a detailed parametric study is conducted on heat transport inside a rectangular enclosure filled with saturated porous media of uniform two-layered porosity.

Keywords: microwave heating, non-uniform porosity, natural convection, saturated porous media, rectangular waveguide

1. บทนำ

งานวิจัยที่ผ่านมาไม่ได้ศึกษาผลกระทบที่เกิดจากความไม่สม่ำเสมอของวัสดุพอร์นเนื่องจากผนังเลย บริเวณที่ค่าความพอร์นสูงจะใกล้กับผนัง [1] Benenati and Brosilow [2] พบว่าบริเวณใกล้ผนังที่มีค่าความพอร์นสูงนั้นการอัดตัวของลูกแก้วจะมีประสิทธิภาพต่ำกว่าบริเวณที่ห่างออกมาจากผนังในทิศทางเข้าสู่ศูนย์กลางของแพคเกจ [3-4] นักวิจัยหลายท่านพบว่าความไม่สม่ำเสมอของความพอร์นนั้นสำคัญสามารถมีผลต่อรูปแบบการไหลและลักษณะการถ่ายเทความร้อน [2, 5-7] ค่าความพอร์นลดลงอย่างรวดเร็วจากที่ติดกับผนังในลักษณะรูปไซน์ [2] ปรากฏการณ์นี้ นำไปสู่อิทธิพลของปรากฏการณ์ Channeling Effect ที่ทำให้รูปแบบการไหลเปลี่ยนแปลงไปอย่างมีนัยสำคัญ [3] Hsiao et al. [6] ได้รวมเอาอิทธิพลจากความพอร์นไม่สม่ำเสมอและการแพร่กระจายความร้อนจากผลการศึกษาคำถามความร้อนแบบธรรมชาติของท่อทรงกระบอกที่ห่อหุ้มด้วยวัสดุพอร์นจากผลการคำนวณพบว่าค่าเฉลี่ยเลขคณิตเพิ่มขึ้นและลดความผิดพลาดระหว่างข้อมูลที่ได้จากการทดลองและจากการคำนวณ ด้วยเหตุนี้อิทธิพลจากความพอร์นไม่สม่ำเสมอควรจะได้นำมาพิจารณา [5,8-10] ในส่วนของงานที่เกี่ยวข้องกับวัสดุพอร์นที่ความพอร์นไม่สม่ำเสมอนั้น Rattanadecho et al. [11] ศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาการให้พลังงานในไมโครเวฟ ขนาดของอนุภาคและความชื้นเริ่มต้น ในระหว่างการอบแห้งวัสดุพอร์นหลายชั้นที่มีความพอร์นในแต่ละชั้นไม่เท่ากัน จากงานวิจัยนี้พบว่าความดันคาพิลลารีจะเพิ่มขึ้นในกรณีที่อนุภาคมีขนาดเล็กส่งผลให้อัตรา

การอบแห้งสูงขึ้น และโครงสร้างของชั้นวัสดุพอร์น Pakdee and Rattanadecho [12] เสนองานแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการให้ความร้อนจากไมโครเวฟต่อวัสดุพอร์นแบบอัดตัวในแพคเกจที่มีความพอร์นไม่สม่ำเสมอพิจารณาอิทธิพลของขนาดของอนุภาค ค่าความพอร์นเฉลี่ย ชั้นของวัสดุพอร์น ที่มีต่อลักษณะของความร้อนและรูปแบบการไหลโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความน่าเชื่อถือเมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองที่ใช้ท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมทำงานภายใต้คลื่นไมโครเวฟในแบบ TE₁₀

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่างานวิจัยส่วนใหญ่จะศึกษาการพาความร้อนแบบธรรมชาติในวัสดุพอร์นที่ไม่สม่ำเสมอที่ได้รับความร้อนด้วยวิธีธรรมชาติและงานวิจัยอีกส่วนหนึ่งศึกษาคำถามการถ่ายเทความร้อนในวัสดุพอร์นที่ได้รับความร้อนจากไมโครเวฟ แต่มีงานวิจัยน้อยมากที่ศึกษากระบวนการพาความร้อนในวัสดุพอร์นเนื่องจากความร้อนจากไมโครเวฟ [12] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาโดยมุ่งเน้นถึงผลกระทบของ ค่าความพอร์น ขนาดของอนุภาค ที่มีต่อการพาความร้อนในวัสดุพอร์นที่มีความพอร์นไม่สม่ำเสมอในลักษณะที่เป็นสองชั้นซึ่งค่าความพอร์นแต่ละชั้นไม่เท่ากัน

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้า

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดขึ้นจากการรวมกันของคลื่นไฟฟ้าและคลื่นแม่เหล็ก สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะตั้งฉากกัน คลื่นไมโครเวฟเป็นส่วนหนึ่งของสเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีช่วงของความยาวคลื่นเฉพาะ เนื่องจาก

สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ทำการศึกษาคือสนามไมโครเวฟในโหมด TE₁₀ สนามจะไม่แปรผันในทิศทางขวางของท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมซึ่งไปในทิศทาง y สมมติฐานว่าแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนสองเป็นแบบมิติในทิศทาง x และ z จึงเพียงพอที่จะระบุปรากฏการณ์การให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟในท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมได้ [15] สมมติฐานเพิ่มเติมมีดังต่อไปนี้

- 1) ไม่มีการดูดซึมไมโครเวฟโดยอากาศในท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมมีน้อย
 - 2) ผงของท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมเป็นตัวนำสมบูรณ์แบบ
 - 3) ไม่คิดผลกระทบของภาชนะบรรจุตัวอย่างในสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและอุณหภูมิ
- สำหรับโหมด TE₁₀ สมการแมกซ์เวลล์สามารถเขียนได้ในพจน์ของความเข้มไฟฟ้าและความเข้มแม่เหล็กได้ดังนี้

$$\varepsilon \frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} - \sigma E_y \quad (1)$$

$$\mu \frac{\partial H_z}{\partial t} = -\frac{\partial E_y}{\partial x} \quad (2)$$

$$\mu \frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{\partial E_y}{\partial z} \quad (3)$$

โดย E และ H แทนถึงความเข้มสนามไฟฟ้าและความเข้มสนามแม่เหล็กตามลำดับ ตัวห้อย x , y และ z แทน องค์ประกอบ x , y และ z ของเวกเตอร์ตามลำดับ และ ε คือ ค่าเปอร์มิตติวิตีหรือค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (permittivity) σ คือ ค่าการนำไฟฟ้า (electrical conductivity) และ μ คือ ค่าเปอร์มิบิลิตีของสนามแม่เหล็ก (magnetic permeability) ตัวแปรเหล่านี้ถูกกำหนดโดย

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r \quad (4)$$

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (5)$$

$$\sigma = 2\pi f \varepsilon \tan \delta \quad (6)$$

เงื่อนไขขอบเขตสำหรับโหมด TE₁₀ สามารถถูกกำหนดดังต่อไปนี้

- 1) ขอบเขตการนำความร้อนสมบูรณ์แบบ เงื่อนไขที่ขอบบนพื้นผิวผนังด้านในของท่อนำคลื่น

กำหนดตามกฎของฟาราเดย์ (Faraday's law) และทฤษฎีบทของเกาส์ (Gauss's theorem)

$$E_{\parallel} = 0, H_{\perp} = 0 \quad (7)$$

เมื่อ $\parallel$ และ $\perp$ แทนถึงทิศทางในแนวนอนและแนวตั้งฉากตามลำดับ

- 2) เงื่อนไขขอบเขตความต่อเนื่อง เงื่อนไขที่ขอบเชื่อมต่อระหว่างตัวอย่างทดสอบและอากาศ

กำหนดตามกฎแอมแปร์ (Ampere's law) และทฤษฎีบทของเกาส์

$$E_{\parallel} = E'_{\parallel}, H_{\parallel} = H'_{\parallel} \quad (8)$$

- 3) เงื่อนไขขอบเขตการดูดซับที่ปลายทั้งสองของท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \pm v \frac{\partial E_y}{\partial z} \quad (9)$$

เมื่อ $\pm$ แทนทิศทางการไปข้างหน้าและถอยหลังและ v คือความเร็วของคลื่น

- 4) คลื่นตกกระทบเนื่องมาจากแมกนีตรอนจาก [7]

แสดงการสั่นของความเข้มของไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กโดยแมกนีตรอน

$$E_y = E_{y_{in}} \sin\left(\frac{\pi x}{L_x}\right) \sin(2\pi ft) \quad (10)$$

$$H_x = \frac{E_{y_{in}}}{Z_H} \sin\left(\frac{\pi x}{L_x}\right) \sin(2\pi ft) \quad (11)$$

โดย $E_{y_{in}}$ คือความเข้มสนามไฟฟ้าที่ป้อนเข้าระบบ L_x คือความยาวของท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมในทิศทาง x และ Z_H คืออิมพีแดนซ์ของคลื่น (Wave Impedance) กำหนดโดย

$$Z_H = \frac{\lambda_g Z_l}{\lambda} = \frac{\lambda_g}{\lambda} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \quad (12)$$

Z_l อินทรินสิคอิมพีแดนซ์ (Intrinsic Impedance) ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุ λ และ λ_g เป็นความยาวของคลื่นไมโครเวฟในพื้นที่ว่างและในท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมตามลำดับ พลักซ์ไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแสดงได้โดย พอยน์ติงเวกเตอร์ (Poynting Vector)

$$s = \frac{1}{2} \text{Re}(E \times H^*) \quad (13)$$

โดย H^* คือสังยุคเชิงซ้อน (Complex Conjugate) ของเวกเตอร์สนามแม่เหล็ก ทฤษฎีพอยน์ติง (Poynting Theorem) ใช้สำหรับประเมินกำลังไม่โครเวฟที่ต้องการ ซึ่งแสดงโดย

$$P_{in} = \int_A S dA = \frac{A}{4Z_H} E_{y_{in}}^2 \quad (14)$$

2.2 การวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิและสนามการไหล

เพื่อลดความซับซ้อนของปัญหาข้อสมมติฐานหลายประการได้ถูกนำเสนอลงในสมการการไหลและพลังงาน

- 1) เพื่อให้สอดคล้องกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้า สนามการไหลและอุณหภูมิที่สามารถสมมติให้เป็นระนาบสองมิติ
- 2) ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสถานะไม่นำมาเกี่ยวข้อง
- 3) การประมาณ Boussinesq จะใช้เข้ามาสำหรับผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นในแรงลอยตัว
- 4) สภาพแวดล้อมของแพคเบตที่มีรูพรุนเป็นฉนวน ยกเว้นที่พื้นผิวด้านบนซึ่งพลังงานแลกเปลี่ยนกับอากาศภายนอก

2.2.1 สมการสนามการไหล

ในงานวิจัยนี้วัสดุพรุนมีความพรุนไม่สม่ำเสมอโดยมีช่องไหลอ้อมตัวภายในโพรงของแข็งอยู่ในภาวะสมดุลทางความร้อน (Local thermodynamic equilibrium, LTE) กับส่วนของแข็ง [12-14] ขอบเขตการใช้สมมติฐาน LTE มีการศึกษาและถูกกำหนดขึ้น [16] สำหรับการไหลกำหนดให้เป็นการไหลราบเรียบและอัดตัวไม่ได้ ไม่คิดงานเนื่องจากความดันและการเปลี่ยนแปลงพลังงานเนื่องจากความหนืด สมบัติทางอุณหพลศาสตร์ถือว่าคงที่ขณะที่ผลของความหนาแน่นที่ไม่สม่ำเสมอที่มีต่อแรงลอยตัวใช้การประมาณวิธี Boussinesq ในการคำนวณแบบจำลอง Darcy-Forchheimer-Brinkmann ใช้สำหรับการคำนวณการไหลของของไหลส่วนของ Brinkmann และ Forchheimer คำนวณความดันเนื่องจากความ

หนืดที่เกิดกับผนังของแข็งและผลของแรงจุดจากส่วนของแข็งตามลำดับ [17] นอกจากนี้โครงสร้างของแข็งสร้างขึ้นจากอนุภาคทรงกลม ขณะที่ค่าความพรุนและค่าการซึมผ่านของตัวกลางเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับระยะห่างจากผนัง สมการกำกับที่ใช้อธิบายปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนแสดงไว้ดังต่อไปนี้ ในรูปสัญลักษณ์มาตรฐาน

สมการอนุรักษ์มวล

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (15)$$

สมการโมเมนตัม

$$\frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\varepsilon^2} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{w}{\varepsilon^2} \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_f} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\nu}{\varepsilon} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) - \frac{\mu u}{\rho_f \kappa} - F(u^2 + w^2)^{1/2} \quad (21)$$

$$\frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{u}{\varepsilon^2} \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{w}{\varepsilon^2} \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_f} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\nu}{\varepsilon} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) - \frac{w w}{\rho_f \kappa} - F(u^2 + w^2)^{1/2} + g\beta(T - T_0) \quad (22)$$

เมื่อ ε , ν และ β คือค่าความพรุน, ความหนืดจลน์ และค่าสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวทางความร้อนของของไหลตามลำดับ ค่าการซึมผ่าน κ และฟังก์ชันทางเรขาคณิต F เป็นดังนี้ [16,32]

$$\kappa = \frac{d_p^2 \varepsilon^3}{175(1-\varepsilon)^2} \quad (16)$$

$$F = \frac{1.75(1-\varepsilon)}{d_p \varepsilon^3} \quad (17)$$

ค่าความพรุนถูกสมมติฐานว่าเปลี่ยนแปลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลกับระยะห่างจากผนัง [2] บนพื้นฐานในงานที่ผ่านมา งานนี้เสนอรูปแบบของความพรุนที่ไม่สม่ำเสมอภายในผนังสามด้านที่จำกัดของแพคเบตซึ่งประกอบด้วยผนังด้านล่างและผนังด้านข้างแนวตั้งทั้งสอง สมการแสดงการกระจายความพรุนที่ไม่สม่ำเสมอในสองทิศทางในระนาบ XZ กำหนดโดย

$$\varepsilon = \varepsilon_s \left[1 + b \left\{ \exp\left(-\frac{cx}{dp}\right) + \exp\left(-\frac{c(W-x)}{dp}\right) + \exp\left(-\frac{cz}{dp}\right) \right\} \right] \quad (18)$$

เมื่อ d_p เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกแก้ว เป็นที่ทราบกันว่า ε_s คือค่าความพรุนเฉลี่ยที่ค่าความพรุนอยู่ห่างออกไปจากผนัง W คือความกว้างของแพคเบตส่วน b และ c คือค่าคงที่ที่ได้จากการทดลอง

อัตราส่วนของแพคเบตและเส้นผ่านศูนย์กลางของ
ลูกแก้วมีผลต่อค่าของ b และ c เพียงเล็กน้อย b
และ c ค่าแนะนำของ b และ c คือ 0.98 และ 1.0
ตามลำดับ [3]

2.2.2 สมการถ่ายเทความร้อน

อุณหภูมิของชั้นของวัสดุพูนด้านเปิดที่รับคลื่นตก
กระทบได้มาจากการแก้สมการถ่ายเทความร้อนที่
ร่วมกับพลังงานไมโครเวฟที่ถูกดูดกลืนซึ่งคือพจน์
ความร้อนที่เกิดขึ้นจากแม่เหล็กไฟฟ้า

$$\sigma \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q \quad (19)$$

เมื่ออัตราส่วนความร้อนจำเพาะ,

$$\sigma = \frac{[\varepsilon(\rho c_p)_f + (1-\varepsilon)(\rho c_p)_s]}{(\rho c_p)_f}$$

$\alpha = k_e / (\rho c_p)_f$ คือการแพร่กระจายความร้อน
ความร้อนแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นฟังก์ชันของสนามไฟฟ้า
และนิยามได้จาก

$$Q = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon_r' \tan \delta (E_y)^2 \quad (20)$$

เงื่อนไขขอบเขตและเงื่อนไขเริ่มต้นของสมการ
เหล่านี้ :

เนื่องจากผนังของแพคเบตเป็นวัสดุแข็ง
กำหนดความเร็วเป็นศูนย์ กำหนดให้ที่เชื่อมต่
ระหว่างวัสดุพูนและผนังของแพคเบตไม่มีการลื่นไถล
โดยใช้สมการโมเมนตัมแก้ปัญหา

1) ที่พื้นผิวด้านบน, ความเร็วในทิศแนวตั้งฉาก (w)
และความเครียดเฉือนในแนวระนาบจะถือว่าเป็นศูนย์
ซึ่งอิทธิพลต่อการไหลของ Marangoni [15] สามารถ
นำมาใช้โดยมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\eta \frac{\partial u}{\partial z} = - \frac{d\xi}{dT} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (21)$$

2) ผนังทุกด้านยกเว้นผนังด้านบนหุ้มฉนวนจึงไม่มี
การแลกเปลี่ยนความร้อนหรือมวล

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (22)$$

3) ความร้อนที่สูญเสียไปจากพื้นผิวเนื่องจากการพา
ความร้อนโดยธรรมชาติและการแผ่รังสี

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = h_c (T - T_0) + \sigma_{rad} \varepsilon_{rad} (T^4 - T_\infty^4) \quad (23)$$

4) เงื่อนไขขอบเขตที่จุดเชื่อมต่อระหว่างชั้นที่ 1 และ
ชั้นที่ 2 ถูกกำหนดเป็น

$$k_{eff} \frac{\partial T_1}{\partial y} = k_{eff} \frac{\partial T_2}{\partial y}, T_1 = T_2 \quad (24)$$

$$\mu_{eff} \frac{du}{dy} \Big|_1 = \mu_{eff} \frac{du}{dy} \Big|_2, u_1 = u_2, v_1 = v_2 \quad (25)$$

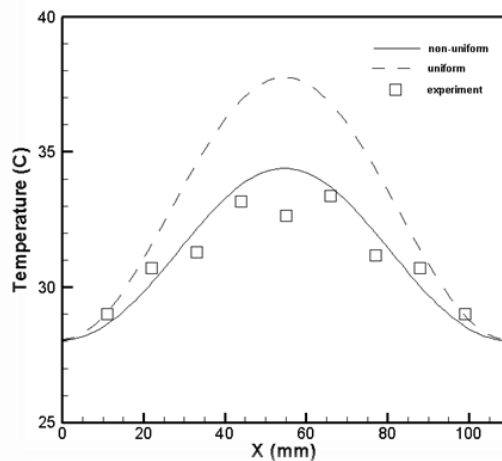
$$\text{เมื่อ } k_{eff} = \varepsilon k_f + (1-\varepsilon)k_s \quad (26)$$

5) เงื่อนไขเริ่มต้นของตัวกลางถูกกำหนดเป็น

$$T = T_0 \text{ ที่ } t = 0 \quad (27)$$

3. ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล

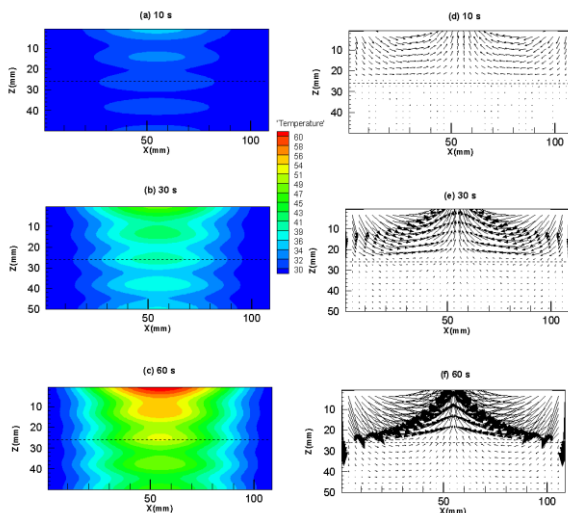
สมการที่ใช้ในการจำลองนี้ เป็นการคำนวณ
ในกรณีความพูนไม่สม่ำเสมอใน 2 มิติที่แสดงใน
สมการที่ 25 เพื่ออธิบายพฤติกรรมความพูนไม่
สม่ำเสมอใน 2 มิติ เพื่อทดสอบความถูกต้องใน
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ผลของระเบียบวิธีเชิง
ตัวเลขต้องเทียบกับผลที่ได้จากการทดลอง เส้นผ่าน
ศูนย์กลางของลูกแก้วและค่าความพูนเฉลี่ยเท่ากับ
0.15 มม. และ 0.385 ตามลำดับ และสัมพันธ์กับ
แบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณสำหรับทั้งกรณีที่ว่า
ความพูนสม่ำเสมอและค่าความพูนไม่สม่ำเสมอ ที่
เวลาเท่ากับ 30 วินาที อุณหภูมิที่กระจายในระนาบ X-
Z ที่เส้นแนวระนาบ $Z = 21$ มม. แสดงในรูปที่ 1 ที่
เวลาเท่ากับ 30 วินาที ผลที่แสดงออกมามีความ
สอดคล้องกันกับแนวคิดที่ว่าปัจจัยของค่าความพูนไม่
สม่ำเสมอนั้นสำคัญสมควรได้รับการพิจารณา สำหรับ
กรณีที่ค่าความพูนสม่ำเสมออุณหภูมิจะสูงสุดที่
ประมาณ 38 °C ที่เวลา 30 วินาที ในขณะที่อุณหภูมิ
จะต่ำกว่าเมื่อเป็นกรณีของค่าความพูนไม่สม่ำเสมอ
อย่างไรก็ตามเป็นที่แน่ชัดว่ารูปทรงนั้นอุณหภูมิจะ
สูงสุดที่กึ่งกลางของโดเมนเนื่องจากค่าความหนาแน่น
ของสนามไฟฟ้าในโหมด TE₁₀ นั้นสูงในบริเวณ
ส่วนกลางของท่อนำคลื่น



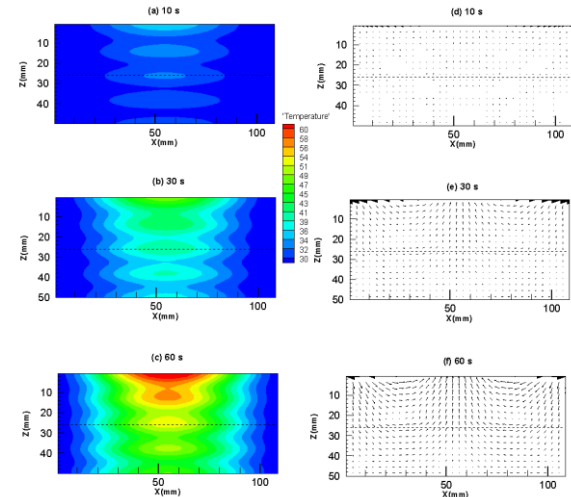
รูปที่ 1 การกระจายของอุณหภูมิที่เวลาเท่ากับ 30 วินาที เปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการคำนวณ

และผลจากการทดลอง [12]

หลังจากที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในรูปโปรแกรมคำนวณผ่านการทดสอบความถูกต้องแล้ว โปรแกรมจึงถูกนำมาใช้คำนวณเพื่อศึกษาในกรณีวัสดุพูนสองชั้น

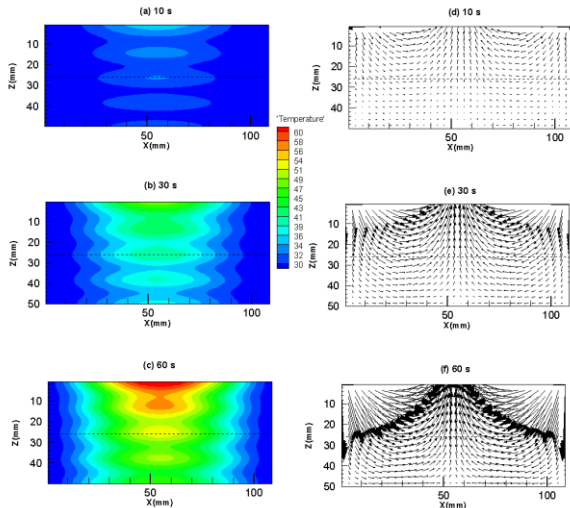


รูปที่ 2 คอนทัวร์ของอุณหภูมิในเวลาต่าง ๆ (°C) ของวัสดุพูนในแพคเกจที่เวลา 10,30,60 วินาที ในกรณีของวัสดุพูนสองชั้นที่ลูกแก้วมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.4 มม.อยู่ด้านบนและลูกแก้วมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.15 มม.อยู่ด้านล่าง ((a)-(c)) และความเร็วของเวกเตอร์ ((d)-(f)) ที่กำลังไมโครเวฟเท่ากับ 300 วัตต์

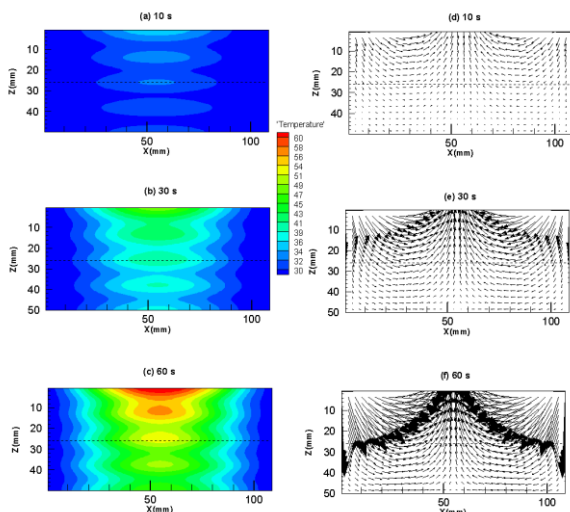


รูปที่ 3 คอนทัวร์ของอุณหภูมิในเวลาต่าง ๆ (°C) ของวัสดุพูนในแพคเกจที่เวลา 10,30,60 วินาที ในกรณีของวัสดุพูนสองชั้นที่ลูกแก้วมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.15 มม.อยู่ด้านบนและลูกแก้วมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.4 มม.อยู่ด้านล่าง ((a)-(c)) และความเร็วของเวกเตอร์ ((d)-(f)) ที่กำลังไมโครเวฟเท่ากับ 300 วัตต์

รูปที่ 2 และ รูปที่ 3 เป็นการจำลองของวัสดุพูนสองชั้นที่มีลูกแก้วเป็นตัวกลางซึ่งในแต่ละชั้นมีขนาดของลูกแก้วต่างกัน โดยที่รูปที่ 2 ลูกแก้วที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.4 มม.อยู่ด้านบนและลูกแก้วมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.15 มม. อยู่ด้านล่าง ส่วนในรูปที่ 3 ลูกแก้วถูกจัดวางสลับชั้นกันโดยมีค่าความพูนที่ $\phi=0.38$ และใช้กำลังไมโครเวฟเท่ากับ 300 วัตต์ เท่ากัน เพื่อทดสอบอิทธิพลของขนาดลูกแก้วและการจัดเรียงลูกแก้ว ตำแหน่งรอยต่อระหว่างชั้นอยู่ที่ $Z = 25$ มม.จากรูปที่ 2 จะพบว่าในกรณีที่ลูกแก้วที่มีขนาดใหญ่อยู่ด้านบน จะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ช้ากว่ากรณีที่ลูกแก้วมีขนาดเล็กอยู่ด้านบน (รูปที่ 3) เนื่องจากในกรณีที่ลูกแก้วขนาดใหญ่อยู่ด้านบนนั้น จะมีค่าความสามารถในการซึมผ่านของของไหลจึงทำให้ความเร็วของการไหลมีค่าสูง ขณะที่ชั้นล่างซึ่งที่ลูกแก้วมีขนาดเล็กนั้นการไหลจะมีความเร็วต่ำกว่าเนื่องจากของไหลซึมผ่านชั้นรอยต่อลงมาได้ยากและพบว่าของไหลส่วนใหญ่มีการไหลย้อนกลับอยู่ภายในชั้นบน ด้วยเหตุนี้การพาความร้อนลงสู่ชั้นล่างจึงมีประสิทธิภาพต่ำ



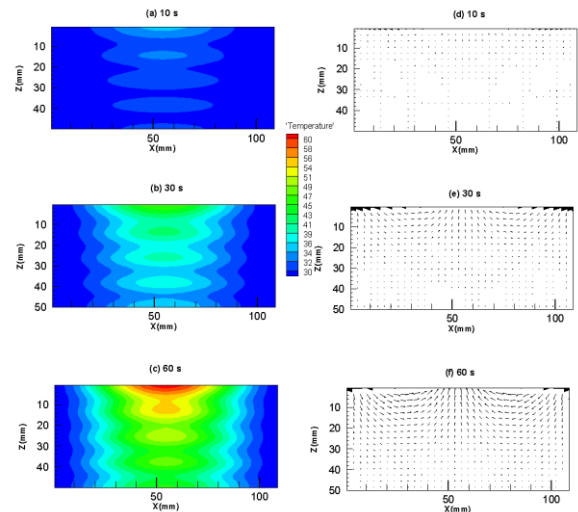
รูปที่ 4 คอนทัวร์ของอุณหภูมิในเวลาต่างๆ (°C) ของวัสดุพูนในแพคเบตที่เวลา 10,30,60 วินาที ในกรณีของวัสดุพูนสองชั้นที่ลูกแก้วมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.4 มม. โดยค่าความพูน $\phi=0.371$ อยู่ด้านบน ค่าความพูน $\phi=0.385$ อยู่ด้านล่าง ((a)-(c)) และความเร็วของเวกเตอร์ ((d)-(f)) ที่กำลังไมโครเวฟเท่ากับ 300 วัตต์



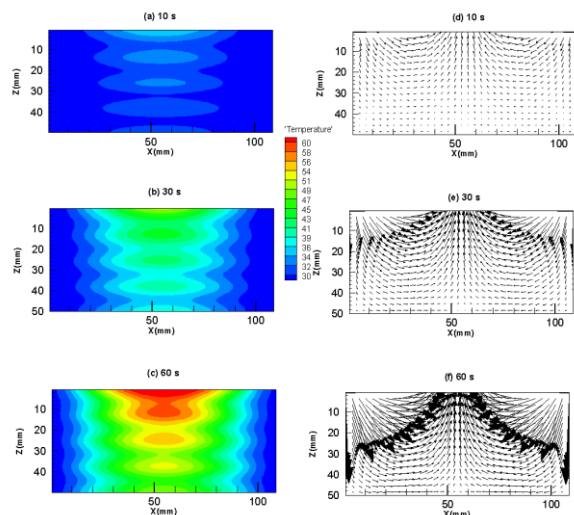
รูปที่ 5 คอนทัวร์ของอุณหภูมิในเวลาต่างๆ (°C) ของวัสดุพูนในแพคเบตที่เวลา 10,30,60 วินาที ในกรณีของวัสดุพูนชั้นเดียวที่ลูกแก้วมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.4 มม. โดยค่าความพูน $\phi=0.385$ อยู่ด้านบน ค่าความพูน $\phi=0.371$ อยู่ด้านล่าง ((a)-(c)) และความเร็วของเวกเตอร์ ((d)-(f)) ที่กำลังไมโครเวฟเท่ากับ 300 วัตต์

รูปที่ 4 และ รูปที่ 5 เป็นการจำลองของวัสดุพูนสองชั้นที่มีลูกแก้วเป็นตัวกลาง โดยรูปที่ 4 มีค่า

ความพูน $\phi=0.371$ อยู่ด้านบน ค่าความพูน $\phi=0.385$ อยู่ด้านล่าง ส่วนในรูปที่ 5 ลูกแก้วจะถูกจัดวางสลับชั้นกัน โดยลูกแก้วมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.4 มม. และใช้กำลังไมโครเวฟเท่ากับ 300 วัตต์ เท่ากัน ตำแหน่งรอยต่อระหว่างชั้นอยู่ที่ $Z = 25$ มม. เพื่อทดสอบอิทธิพลของค่าความพูน ผลจากการจำลองทั้งสองกรณีนั้นพบว่าแตกต่างกันน้อยมากทั้งในรูปแบบของอุณหภูมิและการไหล คือมีนัยสำคัญต่ำที่จะมาพิจารณาเรื่องการถ่ายเทความร้อน ต่างจากอิทธิพลของขนาดของลูกแก้วที่มีนัยสำคัญสูงกว่า ดังนั้นเมื่อเราพิจารณาจากอุปกรณ์การทดลองที่ใช้จริงในห้องทดลอง [11] ลูกแก้วที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.4 มม. จะมีค่าความพูน $\phi=0.371$ และลูกแก้วลูกแก้วที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.15 มม. จะมีค่าความพูน $\phi=0.385$ จะได้ผลการจำลองดังนี้



รูปที่ 6 คอนทัวร์ของอุณหภูมิในเวลาต่างๆ (°C) ของวัสดุพูนในแพคเบตที่เวลา 10,30,60 วินาที ในกรณีของวัสดุพูนชั้นเดียวที่ลูกแก้วมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.15 มม. มีค่าความพูน $\phi=0.385$ ((a)-(c)) และความเร็วของเวกเตอร์ ((d)-(f)) ที่กำลังไมโครเวฟเท่ากับ 300 วัตต์



รูปที่ 7 คอนทัวร์ของอุณหภูมิในเวลาต่างๆ (°C) ของวัสดุพูนในแพคเบดที่เวลา 10,30,60 วินาที ในกรณีของวัสดุพูนชั้นเดียวที่ลูกแก้วมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.4 มม. มีค่าความพูน $\phi = 0.371$ ((a)-(c)) และความเร็วของเวกเตอร์ ((d)-(f)) ที่กำลังไมโครเวฟเท่ากับ 300 วัตต์

รูปที่ 6 กับ รูปที่ 7 เป็นการจำลองของวัสดุพูนชั้นเดียวที่มีลูกแก้วเป็นตัวกลาง ซึ่งทั้งสองกรณีลูกแก้วมีขนาดและค่าความพูนที่แตกต่างกัน โดยที่รูปที่ 6 จะเป็นลูกแก้วที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.15 มม. มีค่าความพูน $\phi = 0.385$ และรูปที่ 7 ที่ลูกแก้วมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.4 มม. มีค่าความพูน $\phi = 0.371$ ผลการจำลองจะพบว่ารูปที่ 7 จะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เร็วกว่า เนื่องจากปัจจัยทั้งการนำความร้อนและการพาความร้อน การนำความร้อนนั้นในรูปที่ 6 เมื่อพิจารณาจากค่าความพูนทำให้ทราบว่ามีส่วนโดยรวมของน้ำและลูกแก้วเท่ากับ 38.5 %, 61.5 % ตามลำดับ รูปที่ 7 มีสัดส่วนโดยรวมของน้ำและลูกแก้วเท่ากับ 37.1%, 62.9 % ตามลำดับ เนื่องจากน้ำนั้นมีค่าการนำความร้อน 0.61 W/(m·K) ในขณะที่ลูกแก้วมีค่าการนำความร้อน 1.1 W/(m·K) ซึ่งสูงกว่าน้ำ ส่วนการพาความร้อนเมื่อพิจารณาเวกเตอร์ความเร็วในรูปที่ 7 แสดงให้เห็นถึงการไหลที่เคลื่อนที่ไปอย่างรวดเร็วกว่ารูปที่ 6 มาก ส่งผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนด้วยสาเหตุทั้งสองปัจจัยนี้ทำให้รูปที่ 7 มีอัตราการ

ถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่า จึงทำให้กรณีที่ค่าความพูน $\phi = 0.371$ (รูปที่ 7) มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงกว่า

4. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟในวัสดุพูนที่มีความพูนไม่สม่ำเสมอแบบสองชั้นด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบสองมิติ ผลการวิจัยพบว่า ขนาดของอนุภาคและรูปแบบการจัดวางของวัสดุพูน โดยกรณีที่ลูกแก้วขนาดเล็กอยู่ด้านบนมีอัตราการทำความร้อนสูงกว่าลูกแก้วขนาดใหญ่อยู่ด้านบน เนื่องจากอิทธิพลจากการพาความร้อนโดยของไหลในวัสดุพูน

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Lui, J. Masliyah, Single fluid flow in porous media, Chemical Engineering Communications 148 (1996) 653-732.
- [2] R. F. Benenati, C. B. Brosilow, Void fraction distribution in pack beds AIChE Journal, 8 (1962) 359-361.
- [3] K. Vafai, Convective flow and heat transfer in variable-porosity media, Journal of Fluid Mechanics 147 (1984) 233-259.
- [4] A. Amiri, K. Vafai, Analysis of dispersion effects and non-thermal equilibrium, non-Darcian, variable porosity incompressible flow through porous media, International Journal of Heat and Mass Transfer 37 (6) (1994) 939-954.
- [5] A. K. Abdul-Rahim, A. J. Chamkha, Variable porosity and thermal dispersion effects on coupled heat and mass transfer by natural convection from a surface embedded in a non-metallic porous medium, International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow 11 (5) (2001) 413-429.
- [6] S. W. Hsiao, P. Cheng, C. K. Chen, Non-uniform porosity and thermal dispersion effects on

natural convection about a heated horizontal cylinder in an enclosed porous medium,

International Journal of Heat and Mass Transfer 35 (12) (1992) 3407-3418.

[7] H. Sakamoto, F.A. Kulacki, Effective thermal diffusivity of porous media in the wall vicinity, Journal of Heat Transfer 130 (2) (2008) art.no. 022601.

including the effects of flow inertia, variable porosity and Brinkman friction. ASME Journal of Heat Transfer 109 (1987) 880-888.

[8] H. Shih-Wen, P. Cheng, C. Chao-Kuang, Non-uniform porosity and thermal dispersion effects on natural convection about a heated horizontal cylinder in an enclosed porous medium International Journal of Heat and Mass Transfer 35 (12) (1992) 3407-3418.

[9] Z. Chai, Z. Guo, Study of electro-osmotic flows in microchannels packed with variable porosity media via lattice Boltzmann method, Journal of Applied Physics 101 (2007) 104913.

[10] S. Akbal, F. Baytas, Effects of non-uniform porosity on double diffusive natural convection in a porous cavity with partially permeable wall, International Journal of thermal Sciences 47 (7) (2008) 875-885.

[11] Ratanadecho, P., Aoki, K., Akahori, M., Influence of Irradiation Time, Particle Sizes and Initial Moisture Content during Microwave Drying of Multi-Layered Capillary Porous Materials. ASME J. Heat Transfer 124 (2002) 151-161

[12] W.Pakdee, P.Rattanadecho, Natural Convection in a Saturated Variable-Porosity Medium due to Microwave Heating, Journal of Heat Transfer 133 (6) (2011)

[13] D. A. Nield, A. Bejan, Convection in Porous Media, Springer, New York, USA. 1999.

[14] A. A. Al-Amiri, Natural convection in porous enclosures: The application of the two-energy equation model, Numerical Heat Transfer Part A 41 (2002) 817-834.

[15] P. Ratanadecho, K. Aoki, M. Akahori, A numerical and experimental investigation of modelling of microwave heating for liquid layers using a rectangular wave guide (effects of natural convection and dielectric properties), Applied Mathematical Modelling 26 (2002) 449-472.

[16] Marafie A, Vafai K. Analysis of non-Darcian effects on temperature differentials in porous media. Int. J. Heat Mass Transfer 2001; 44:4401-4411.

[17] P. Nithiarasu, K. N. Seetharamu, T. Sundararajan, Natural convective heat transfer in a Fluid Saturated variable porosity medium, International Journal of Heat and Mass Transfer 40 (1996) 3955-3967.