

อิทธิพลของสถานะแม่เหล็กไฟฟ้าต่อการพาความร้อนและค่าความเข้มข้นของไหล ในวัสดุพูน : กรณีศึกษาแบบจำลองประเทกไม่สมดุลเชิงความร้อน

Effect of Electromagnetic Field on Convective Heat Transfer and Concentration of Fluid

Flow in Porous Media: Case Study Local Thermal Non-Equilibrium Models

เพรเมษพรียา มงคลเทียรทอง^{1)*} วรารณ์ กลินบุญ²⁾ และ พดุงศักดิ์ รัตนเดชา³⁾

^{1), 3)} ศูนย์เร่งความเป็นเลิศทางวิชาการด้านการใช้ประโยชน์จากพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าในงานวิศวกรรม (CEEE)
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ จังหวัดปทุมธานี 12121

²⁾ สถาบันเทคโนโลยีปัญญาภิวัฒน์

*ติดต่อ: E-mail: prempree_ya@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอผลการศึกษาเชิงทฤษฎีของการทำความร้อนในวัสดุพูนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโหมด TE_{10} ในงานวิจัยนี้ใช้ระเบียบวิธีผลิต่างสีนีองเชิงเวลา (FDTD) แก้สมการแม่กิเวลล์ เพื่อสร้างแบบจำลองการกระจายตัวของสถานะแม่เหล็กไฟฟ้า ในขณะที่สมการโนเมนตัม (Darcy-Brinkman-Forchheimer model) สมการขนส่งความเข้มข้น และสมการพลังงานแก้ปัญหาโดยระเบียบวิธีไฟฟ้าในต่อตอนทรัคคุณ (FCV) ร่วมกับ SIMPLE Algorithm เพื่อชิบหายรูปแบบ การไฟฟ้า การกระจายตัวของความเข้มข้นและอุณหภูมิ ตามลำดับ โดยสมการพลังงานจะพิจารณาแบบไม่สมดุลเชิงความร้อน (Local Thermal Non Equilibrium) ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ กำลังคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ความเร็วและความเข้มข้นของของไหลที่ป้อนเข้าจากผลการศึกษาพบว่ามีความสอดคล้องกับผลงานวิจัยที่ผ่านมา กำลังคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความเร็วและความเข้มข้นของของไหลที่ป้อนมีผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิและความเข้มข้นของของไหลรวมทั้งรูปแบบของการไหลในวัสดุพูน

คำสำคัญ : แบบจำลองด้วยปริมาณฟองอากาศ กระบวนการร้อน การกระจายความเข้มข้น คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (โหมด TE_{10}) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ประเทกไม่สมดุลเชิงความร้อน

Abstract

This paper presents a theoretical study of electromagnetic wave (mode TE_{10}) heating process in porous. This research using finite difference time domain method solve Maxwell's equations for simulation distribution of electromagnetic field. The local thermal non equilibrium (LTNE) assumption is considered in energy equation. Based on finite volume Algorithm SIMPLE, the model is applied to solve momentum, referred to as Darcy-Brinkman-Forchheimer's model, concentration, and energy equations for describing the flow pattern, distribution of concentration, and the level of temperature, respectively. The study analysis the influences of power input of electromagnetic wave, velocity and concentration input on the transport processes in porous media. Results obtained from the execution shown that, the proposed function of the govern parameters consistency with prior theoretical equations and past studies. The effects of velocity and fluid flow concentration have significant affect on the distribution of temperature and concentration as well as the flow patterns in porous media.

Keywords : Darcy-Brinkman-Forchheimer's model, Distribution of concentration, Electromagnetic wave (mode TE_{10}), Local thermal non equilibrium (LTNE) models.

1. บทนำ

ปัจจุบัน ไม่ โครงการมีเป็นบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมอย่างมาก เนื่องจากข้อดีของการทำความร้อนด้วยคลื่น ในโครงการมีหลายประการ เช่น มีประสิทธิภาพทางความร้อนสูง การหล่อเหลาของพลาสติกทำให้มีการกระจายของความร้อนสม่ำเสมอทั่วทั้งวัสดุ และมีความสามารถในการเลือกรับความร้อน

การเพร์ของความเข้มข้นในวัสดุพูนก็เป็นสิ่งที่สามารถพบรได้ทั่วไปในชีวิตประจำวัน ได้แก่ สิ่งเป็นพิษที่ปนเปื้อนในอาหาร ตัวคตต์ไอลิติกคอนเวอร์เตอร์ในท่อไอเสียรถยนต์ การเจริญเติบโตของคริสตัล ล้วนมีกระบวนการเพร์ของมวลเกิดขึ้น งานที่ประยุกต์ใช้เกี่ยวกับการเพร์ของมวลหรือความเข้มข้น ได้แก่ กระบวนการเผาผนึก (Sintering) เพื่อสร้างวัสดุแข็ง เช่นการทำโลหะผง การทำเซรามิกส์ เป็นต้น

ในอดีต ได้มีกลุ่มนักวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนและมวลสาร ในกระบวนการทำความร้อนจากคลื่น ในโครงการ และการศึกษาการพาความร้อนโดยธรรมชาติ (Natural Convection) ในของเหลวโดยได้ปรากฏในรายงานวิจัยของนักวิจัย เช่น Metaxas และ Meredith [1] และ Saltiel และ Datta [2] ได้ทำการศึกษากระบวนการถ่ายเทความร้อนในชั้นของเหลวด้วยพลาสติก ในโครงการ โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ประมาณค่าความร้อน

งานวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวกับกระบวนการทำความร้อนจากคลื่น ในโครงการ เช่น งานวิจัยของ Tada และคณะ [3] ที่พบว่า ตำแหน่งกึ่งกลางของภาชนะ เป็นตำแหน่งที่วัตถุมีอัตราการดูดซับพลังงาน ในโครงการสูงสุด งานวิจัยของ Zhang และคณะ [4] ได้สรุปว่า อุณหภูมิขึ้นกับสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุ

งานวิจัยของ Ratanadecho และคณะ [5] ทำการศึกษาอิทธิพลของระดับกำลังพลังงาน ในโครงการและค่าการนำไฟฟ้าของของเหลวมีผลต่อระดับการแทรกผ่านคลื่น และอัตราการสร้างความร้อนภายในของเหลว

Klinbun และคณะ [6] นำเสนอการวิเคราะห์เชิงตัวเลขและการทดสอบของการให้ความร้อนด้วยไม่โครงไฟในแพ็คเบดแบบอิมตัว โดยใช้ท่อน้ำคลื่นสีเหลือง (ไอน้ำ TE₁₀) เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สมบูรณ์ โดยใช้สมการพลังงานและสมการโมเมนตัมแบบสองมิติเพื่ออธิบายอุณหภูมิ และการให้คลื่นกับผลที่ได้จากสมการแม็กเวลล์

(Maxwell's Equation) ศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคขนาดตัวอย่าง การจัดวางภายใต้ท่อน้ำคลื่นและความถี่ที่ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนและลักษณะการให้โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ประมาณค่าความร้อนด้วยความถี่ ได้ว่าผลการจำลองเป็นที่ยอมรับเมื่อเทียบกับข้อมูลจากการทดลอง รูปแบบการให้คลื่นกับขนาดของอนุภาค และประสิทธิภาพทางความร้อนของตัวอย่างจะเปลี่ยนแปลงตามขนาดตัวอย่าง และความถี่คลื่น ไม่ โครงการ

จากนั้น มีการศึกษาการพาความร้อนแบบบังคับ (Forced Convection) โดย Klinbun และคณะ [7] ได้ทำการศึกษาในวัสดุพูนซึ่งมีของเหลวอิมตัว โดยศึกษาผลของกำลังคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แรง และความถี่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แรง ที่มีต่อสถานะอุณหภูมิ ใช้สมการแม็กเวลล์แก้ไขปัญหาเพื่อจำลองสถานะแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ภายใต้แรงคลื่นและภายนอกวัสดุพูน ใช้โมเดลบริงค์เมน (Brinkman-Forchheimer) นำเสนอการให้ของเหลว ไฟฟ้าในวัสดุพูนและใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ประมาณค่าความร้อนไม่สมดุล เชิงความร้อน (Local Thermal Non-Equilibrium, LTNE) มาพิจารณาสำหรับแบบจำลองสมการพลังงานสำหรับของเหลวและของแข็ง โดยงานวิจัยนี้วิเคราะห์ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ สถานะแม่เหล็กไฟฟ้า ที่มีผลต่อการให้ สถานะความร้อนและน้ำเสียงน้ำเบอร์ โดยงานวิจัยนี้เป็นพื้นฐานสำหรับการทำความเข้าใจของการพาความร้อนแบบบังคับในวัสดุพูน

มีกลุ่มนักวิจัยที่ศึกษาการถ่ายเทความร้อนในวัสดุพูน โดยการนำและการพาความร้อน โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ประมาณค่าความร้อนไม่สมดุล เชิงความร้อนแต่ไม่ได้ใส่คลื่น ในโครงการ ได้แก่ งานวิจัยของ Nakayama และคณะ [8], Quintard [9], Amiri และ Vafai [10] และงานวิจัยของ Kuznetzov [11]

นักวิจัยที่ศึกษาการถ่ายเทความร้อนของการพาความร้อนในสารละลาย ได้แก่ Khanafar และ Vafai [12] ศึกษาการให้ของเหลว ไฟฟ้า ที่เกิดจากผลของแรงลอยตัวนี้ ของมาจากการที่อุณหภูมิและความเข้มข้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ประมาณค่าความร้อน สร้างแบบจำลองแบบ 2 มิติรูปภาชนะ ที่สีเหลืองมาตุรัส งานวิจัยของ Karimi-Fard และคณะ [13] ศึกษาผลของแรงลอยตัวที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ และความเข้มข้น โดยผลการวิจัย

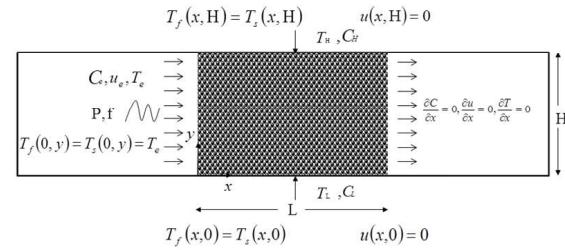
นี้ชี้ให้เห็นว่า สัดส่วนของแรงดูดตัว, ดาวน์นัมเบอร์, เลวินัมเบอร์ และริชาร์ดสันนัมเบอร์ล้วนมีผลต่อการ ไฟล์

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่ามีการศึกษาการพาร้อนในของเหลวเป็นส่วนใหญ่ และได้มีงานวิจัยที่ศึกษาระบวนการพาร้อนในวัสดุพูรนเนื่องจากความร้อนจากไมโครเวฟโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ประเกทสมดุลเชิงความร้อน (Local Thermal Equilibrium, LTE) ซึ่งอุณหภูมิที่สุดคงที่ ของของแข็งและของเหลวจะเท่ากัน เมื่อจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ประเกทไม่สมดุลเชิงความร้อนมีความซับซ้อนของปัญหามากกว่าเจิงยังมีงานวิจัยประเกทที่น้อย โดยงานที่เป็นวัสดุพูรนแบบอิมตัววิเคราะห์สมการพลังงานโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ประเกทไม่สมดุลเชิงความร้อน มีการป้อนค่าคงที่ไมโครเวฟและศึกษาการกระจายความร้อนขึ้นในวัสดุพูรนซึ่งไม่มีนักวิจัยกลุ่มใดทำดังนั้นในงานวิจัยนี้จะนำเสนอการศึกษาเชิงทฤษฎีของการทำความร้อนในวัสดุพูรนด้วยพลังงานไมโครเวฟ ศึกษาโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยเน้นศึกษาอิทธิพลของสถานะแม่เหล็กไฟฟ้าที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิ ความเร็วและความเข้มข้นของไฟล์ในวัสดุพูรน กรณีศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ประเกทไม่สมดุลเชิงความร้อน (Local Thermal Non-Equilibrium, LTNE) โดยวิจัยเพิ่มเติมจากการวิจัยของ Klinbun และคณะ [7]

2. วิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขไฟฟ้านิติดไฟฟ่อนซ์ไทร์โอดemen (FDTD) ในการวิเคราะห์สถานะแม่เหล็กไฟฟ้าและการดูดซับพลังงานไมโครเวฟที่ตำแหน่งและเวลาต่างๆ สมการพลังงาน สมการโน้ม-men ตั้นและสมการโนนถ่ายความเข้มข้นแก๊สปูห์หาด้วยระเบียบวิธีไฟฟ้านิติดคอนโทรลคลุ่ม (FCV) รวมกับ SIMPLE Algorithm

รูปที่ 1 แสดงแบบจำลองทางกายภาพที่ใช้ในการวิเคราะห์กระบวนการทำความร้อนในวัสดุพูรนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไมโครเวฟ บริเวณซ้ายของโอดemenป้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและใส่สารละลายของไฟล์ในการศึกษานี้ สารละลายของไฟล์คือน้ำภายในโอดemenประกอบด้วยวัสดุพูรนชนิดอิมตัว ได้แก่น้ำและเม็ดแก้ว ด้านบนและด้านล่างโอดemenควบคุมให้มีค่าอุณหภูมิและความเข้มข้นคงที่ โดย



รูปที่ 1 แบบจำลองทางกายภาพ [7]

ด้านบนโอดemenจะมีค่าอุณหภูมิและความเข้มข้นสูงกว่าด้านล่าง

2.1. การวิเคราะห์การกระจายตัวของสถานะแม่เหล็กไฟฟ้า

เนื่องจากสถานะแม่เหล็กไฟฟ้าในโอดemen TE₁₀ สถานะแม่เหล็กไฟฟ้าจะไม่แปรผันในทิศทางของท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม พิจารณาให้สถานะแม่เหล็กไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงเฉพาะในระนาบ 2 มิติ คือ ระนาบ x-y ภายในท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม สมมติฐานในการวิเคราะห์สถานะแม่เหล็กไฟฟ้า ได้แก่

(1) ผังของท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมนี้สมบูรณ์

(2) ไม่คำนึงถึงการดูดซับคลื่นไมโครเวฟที่ผ่านท่อนำคลื่น

ตารางที่ 1 สมบูรณ์โดยอิเล็กตริกและสมบูติดทางความร้อนที่ใช้ในการคำนวณ [7]

คุณสมบัติ	มีเดแก้ว	น้ำ
ความหนาแน่น, ρ (kg m^{-3})	2225	989
ความถูกความร้อนจำเพาะ, C_p ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)	835	4180
ค่าการนำความร้อน, ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	1.4	0.640
ความหนืด, μ ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) $\times 10^{-5}$	-	57.7
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก, ϵ_r	7.5	*
ค่าสัมประสิทธิ์ของแทนเนน, $\tan \delta$	0.0125	*

*ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าสัมประสิทธิ์ของแทนเนนของน้ำขึ้นกับอุณหภูมิคำนวณ ได้จาก

$$88.15 - 0.414T + (0.131 \times 10^{-2})T^2 - (0.046 \times 10^{-4})T^3 \quad \text{และ} \\ 0.323 - (9.499 \times 10^{-3})T + (1.27 \times 10^{-4})T^2 - (6.13 \times 10^{-7})T^3 \\ \text{ตามลำดับ}$$

สมการพื้นฐานสำหรับวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้า
อยู่บนพื้นฐานของสมการแม่กิเวลล์ สำหรับคลื่นในโหมด

TE_{10}

$$E_x = E_y = H_z = 0, \quad (1)$$

$$E_z, H_x, H_y \neq 0 \quad (2)$$

ดังนั้น เมื่อแทนค่าลงในสมการแม่กิเวลล์จะได้

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\gamma} \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - \sigma E_z \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = -\frac{1}{\phi} \left(\frac{\partial E_z}{\partial y} \right) \quad (4)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\phi} \left(\frac{\partial E_z}{\partial x} \right) \quad (5)$$

เมื่อ E และ H แทนถึงความเข้มสนามไฟฟ้าและความเข้มสนามแม่เหล็กตามลำดับ ตัวห้อย x , y และ z แทนองค์ประกอบ x , y และ z ของเวกเตอร์ตามลำดับ และ γ คือค่าการซึมผ่านของสนามไฟฟ้า ϕ คือค่าการซึมผ่านของสนามแม่เหล็ก และ σ คือค่าการนำไฟฟ้า

เงื่อนไขขอบเขตและสภาพเริ่มต้น

(1) เงื่อนไขขอบเขตตัวนำยื่งゆด

$$H_n = 0, E_t = 0 \quad (6)$$

เมื่อตัวห้อย n และ หมายถึงแกนในแนวตั้งจากและแนวสัมผัสตามลำดับ

(2) เงื่อนไขขอบเขตการดูดซับที่บริเวณปลายทั้งสองด้านของท่อนำคลื่น เสนอโดย Mur [14]

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \pm c \frac{\partial E_x}{\partial x} \quad (7)$$

เมื่อ c คือ ความเร็วไฟฟ้าของคลื่น

(3) ความเข้มของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดจากแมgnition

$$E_z = E_{zin} \sin\left(\frac{\pi y}{a}\right) \sin(2\pi f t) \quad (8)$$

$$H_y = \frac{E_{zin}}{Z_H} \sin\left(\frac{\pi y}{a}\right) \sin(2\pi f t) \quad (9)$$

$$E_{zin} = \sqrt{\frac{4Z_H P_{in}}{A}} \quad (10)$$

โดย f คือความถี่ของไมโครเวฟ a คือความกว้างของร澹นาที่ทางเข้าระบบ Z_H คือ อัมพีเดนซ์ของคลื่น (Wave

Impedance) E_{zin} คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ป้อนเข้าระบบ

(4) เงื่อนไขขอบเขตความต่อเนื่องตลอดรอยต่อระหว่างวัสดุกับอากาศ อธิบายโดยกฎของฟาราเดียและทฤษฎีบทของเกาส์

$$E_t = E'_t, H_t = H'_t \quad (11)$$

$$D_n = D'_n, B_n = B'_n \quad (12)$$

(5) เงื่อนไขเริ่มต้น

$$E, H = 0 ; t = 0 \quad (13)$$

2.2. การวิเคราะห์การกระจายของอุณหภูมิรูปแบบการให้ผล และความเข้มข้น

จากรูปที่ 1 สมมติฐานในการวิเคราะห์เพื่อลดความซับซ้อนของปัญหา ได้แก่

(1) เพื่อให้สอดคล้องกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้า สนามอุณหภูมิ, สนามการให้ผล และความเข้มข้น พิจารณาในร澹นา 2 มิติ

(2) การประมวล Boussinesq จะใช้เข้ามาสำหรับผลกระบวนการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นในแรงดึงดูดตัว

(3) วัสดุทดสอบมีความหนาแน่นสม่ำเสมอ เป็นเนื้อเดียวและมีความสมมาตรของคุณสมบัติทางฟิสิกส์ในทุกแนวแกน

(4) วัสดุพื้นที่มีความพรุน ไม่คงที่

(5) ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะของวัสดุทดสอบ

2.2.1. สมการการถ่ายเทความร้อน

สมการถ่ายเทความร้อนในของเหลว

$$\begin{aligned} & \varepsilon (\rho C_p)_f \frac{\partial T_f}{\partial t} + (\rho C_p)_f \left(u \frac{\partial T_f}{\partial x} + v \frac{\partial T_f}{\partial y} \right) \\ &= k_{eff} \left(\frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_f}{\partial y^2} \right) + h_s a_s (T_s - T_f) + \varepsilon Q_f \end{aligned} \quad (14)$$

สมการถ่ายเทความร้อนในของแข็ง

$$\begin{aligned} (1-\varepsilon) (\rho C_p)_s \frac{\partial T_s}{\partial t} &= k_{eff} \left(\frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_s}{\partial y^2} \right) \\ &- h_s a_s (T_s - T_f) + (1-\varepsilon) Q_s \end{aligned} \quad (15)$$

การผลิตความร้อนภายในหรือค่ากำลังการดูดซับที่เกิดขึ้นภายในวัสดุ

$$Q = 2\pi f \gamma_0 \gamma_r (\tan \delta) \cdot (E_z)^2$$

ค่าสัมประสิทธิ์ลอสเทนเจนท์

$$\tan \delta = \frac{\gamma_r'}{\gamma_r} = \frac{\sigma}{\omega \gamma_r' \gamma_0}$$

2.2.2. สมการการไหลของของไหหล

ในงานวิจัยนี้วัสดุพรุนมีความพรุนไม่สม่ำเสมอโดยมีของไหหลอื่นตัวภายในโพรงของแม่ปั้งอยู่ในภาวะไม่สมดุล เชิงความร้อนกับส่วนของแม่ปั้ง สมการที่ใช้อธินาณประภูมิการนี้ การไหลของของไหหลแสดงไว้ดังต่อไปนี้

สมการความต่อเนื่อง

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (16)$$

สมการ โวเมนตัม

$$\begin{aligned} \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial u}{\partial t} \right) + \frac{1}{\varepsilon^2} \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) &= - \frac{1}{\rho_f} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\mu}{\varepsilon} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \\ - \frac{\mu u}{\kappa} - \frac{F \mu}{\sqrt{\kappa}} (u^2 + v^2)^{1/2} u & \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial v}{\partial t} \right) + \frac{1}{\varepsilon^2} \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) &= - \frac{1}{\rho_f} \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right) + \frac{\mu}{\varepsilon} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \\ - \frac{\mu v}{\kappa} - \frac{F \mu}{\sqrt{\kappa}} (u^2 + v^2)^{1/2} v + g \beta_r (T - T_i) + g \beta_c (C - C_i) & \end{aligned} \quad (18)$$

เมื่อ ε , μ , β_r และ β_c คือค่าความพรุน, ความหนืด粘性, ค่าสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวทางความร้อนและค่าสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวทางความเข้มข้นของของไหหล ตามลำดับ ค่าการซึมผ่าน และฟังก์ชันทางเรขาคณิต เป็นดังนี้ [7]

$$\kappa = \frac{\varepsilon^3 d_p^2}{150(1-\varepsilon)^2} \quad (19)$$

$$F = \frac{1.75}{\sqrt{150\varepsilon^3}} \quad (20)$$

ค่าความพรุนถูกสมมติว่าเปลี่ยนแปลงแบบเอกโพเนนเชียลกับระยะห่างจากผนัง กำหนดโดย

$$\varepsilon = \varepsilon_\infty \left[1 + a_1 \exp \left(- \frac{a_2 y}{d_p} \right) \right] \quad (21)$$

โดยที่ ε_∞ คือ ความพรุนของ Free Stream, a_1 และ a_2 คือ ค่าคงที่ที่ได้จากการทดลอง [7]

2.2.3. สมการความเข้มข้นของของไหหล

ในการวิเคราะห์ลักษณะความเข้มข้นของของไหหลจะประกอบด้วยสมการ ดังต่อไปนี้

$$\varepsilon \frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) \quad (22)$$

โดยที่ C คือ ความเข้มข้นของของไหหล และ D การแพร่กระจายมวล (Mass Diffusivity)

เงื่อนไขของเบตและสภาวะเริ่มต้นการวิเคราะห์การแพร่กระจายของอุณหภูมิ, รูปแบบการไหหล และความเข้มข้นจากรูปที่ 1

(1) บริเวณทางเข้า

$$T_f(0, y) = T_s(0, y) = T_e = 27^\circ C$$

$$u(0, y) = u_e$$

$$C(0, y) = C_e = 30, 0.03 \text{ mol/dm}^3$$

(2) ผนังด้านบน

$$T_f(x, H) = T_s(x, H) = T_H = 67^\circ C$$

$$u(x, H) = 0$$

$$C(x, H) = C_H = 20 \text{ mol/dm}^3$$

(3) ผนังด้านล่าง

$$T_f(x, 0) = T_s(x, 0) = T_L = 15^\circ C$$

$$u(x, 0) = 0$$

$$C(x, 0) = C_L = 10 \text{ mol/dm}^3$$

(4) บริเวณทางออก

$$\frac{\partial C}{\partial x} = 0, \frac{\partial u}{\partial x} = 0, \frac{\partial T}{\partial x} = 0$$

(5) เงื่อนไขเริ่มต้น

$$T = T_0 = 27^\circ C$$

$$u = u_0$$

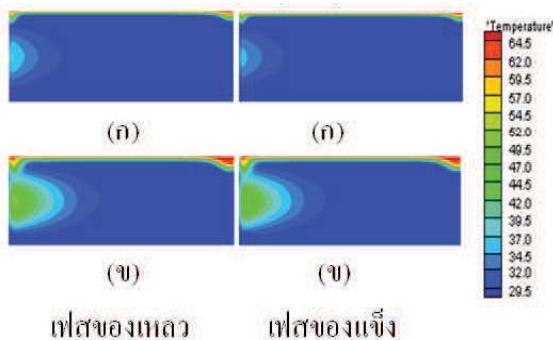
$$C = C_0 = 0 \text{ mol/dm}^3 ; t = 0$$

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

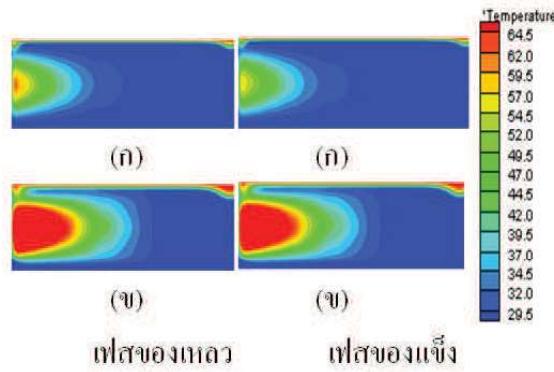
3.1. อิทธิพลของกำลังไมโครเวฟต่อรูปแบบการแพร่กระจายตัวของอุณหภูมิ ความเร็วและความเข้มข้นของของไหหลในวัสดุพรุน

3.1.1. การแพร่กระจายตัวของอุณหภูมิ

รูปที่ 2 และรูปที่ 3 เปรียบเทียบการแพร่กระจายตัวของอุณหภูมิในไฟฟ้าของเหลวและไฟฟ้าของแก๊ส ช่วงเวลาต่างๆ ที่กำลังไมโครเวฟ 800 และ 1600 W ตามลำดับ ที่ความถี่



รูปที่ 2 การกระจายตัวของอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) ณ ช่วงเวลา: (ก) 20 s (ข) 60 s ที่ความถี่ 2.45 GHz กำลังไมโครเวฟ $800 \text{ W} \text{ Re}_p = 0.1$



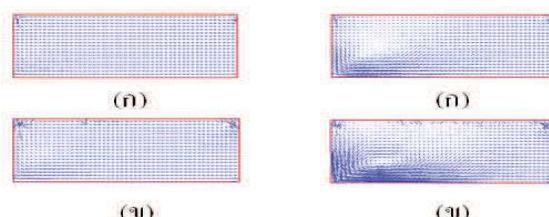
รูปที่ 3 การกระจายตัวของอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) ณ ช่วงเวลา: (ก) 20 s (ข) 60 s ที่ความถี่ 2.45 GHz กำลังไมโครเวฟ $1600 \text{ W} \text{ Re}_p = 0.1$

2.45 GHz เท่ากัน จะเห็นว่าที่กำลังไมโครเวฟ 1600 W มีขอบเขตของการกระจายตัวของอุณหภูมิมากกว่าเนื่องจากกำลังไมโครเวฟที่สูงจะมีความหนาแน่นของสนามไฟฟ้ามาก ทำให้สัดส่วนพลังงานไมโครเวฟมากตามไปด้วย โดยที่บริเวณกึ่งกลางจะมีการคัดซับพลังงานมากที่สุด เพราะมีความหนาแน่นของสนามไฟฟ้านักจึงทำให้บริเวณนี้มีอุณหภูมิสูงที่สุด การกระจายตัวของอุณหภูมิจะเกิดขึ้นที่บริเวณด้านซ้ายที่ได้รับคลื่นไมโครเวฟทำให้มีอุณหภูมิสูงและจะค่อยๆ ลดลงตามระยะแกน x

จากรูปจะเห็นว่าขอบเขตการกระจายตัวของอุณหภูมิบริเวณด้านบนสูงกว่าด้านล่าง เนื่องมาจากการกำหนดขอบเขตให้ด้านบนมีอุณหภูมิสูงกว่า

3.1.2. การกระจายความเร็ว

รูปที่ 4 เบอร์ยานเทียนการกระจายความเร็ว ณ ช่วงเวลาต่างๆ ที่กำลังไมโครเวฟ 800 และ 1600 W ตามลำดับ ที่ความถี่ 2.45 GHz เท่ากัน จะเห็นว่าที่กำลังไมโครเวฟ 1600



รูปที่ 4 รูปแบบการไหล ณ ช่วงเวลา: (ก) 20 s (ข) 60 s ที่ความถี่ 2.45 GHz $\text{Re}_p = 0.1$

W มีการกระจายของความเร็วมากกว่า เนื่องจากกำลังไมโครเวฟที่สูงจะมีความหนาแน่นของสนามไฟฟ้ามากทำให้สัดส่วนพลังงานไมโครเวฟมากตามไปด้วย โดยเวกเตอร์ความเร็วจะเคลื่อนที่จากผิวด้านซ้ายเนื่องจากคลื่นไมโครเวฟที่มากระทบที่ผิวทำให้ผิวร้อนเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิบริเวณซ้ายและขวาส่งผลให้เกิดความแตกต่างของความหนาแน่นมีการขยายตัวเชิงปริมาตรของของไหลร้อนและเกิดแรงดึงดูดที่ขึ้นให้ของไหลเคลื่อนที่ และจากรูปจะเห็นว่ามีการกระจายความเร็วบริเวณด้านบนซึ่งมีลักษณะคล้ายกับการกระจายตัวของอุณหภูมิเนื่องจากบริเวณขอบด้านบนเป็นบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง ทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิกับบริเวณข้างเคียง เวกเตอร์ความเร็วจึงเคลื่อนที่ออกจากตำแหน่งนั้น

3.1.3. การกระจายความเข้มข้นของของไหล

การแพร่กระจายของความเข้มข้นจะเกิดขึ้นโดยจะแพร่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ และจะหยุดการแพร่เมื่อเข้าสู่ส่วนคูลหรือความเข้มข้นในบริเวณนั้นเท่านั้น

จากรูปที่ 1 กำหนดให้แบบจำลองด้านบนมีความเข้มข้นสูงกว่าด้านล่าง ดังนั้นการแพร่จะแพร่จากบนลงสู่ด้านล่าง และเมื่อพิจารณาการกระจายของความเข้มข้นจากซ้ายไปขวาโดยป้อนของไหลจากด้านซ้าย ความเข้มข้นของของไหลจะลดลงจนเริ่มคงที่ที่ระยะแกน x เท่ากับ 55 mm และมีความเข้มข้นสูงที่สุดที่บริเวณด้านบนของแบบจำลองที่ระยะแกน x เท่ากับ 500 mm ที่ระยะแกน y 199 mm

ตารางที่ 2 การกระจายความเข้มข้น ณ ช่วงเวลา 20, 40 และ 60 s ที่ความถี่ 2.45 GHz กำลังไมโครเวฟ 800 W ที่ระยะแกน y เท่ากับ 199 mm $Re_p = 0.1$

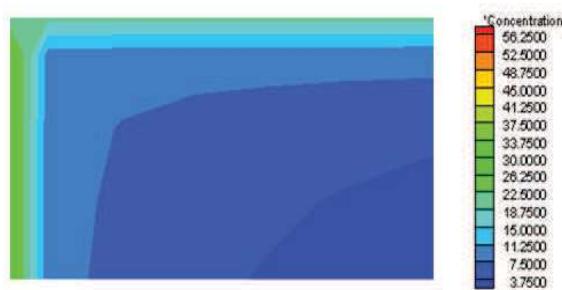
ระยะแกน x (mm)	ความเข้มข้นของไหลด้วยเวลาต่างๆ (mol/dm ³)		
	20 s	40 s	60 s
1	9.60820	9.61160	9.61965
5	8.92200	8.95574	8.97575
15	8.84958	8.80261	8.77418
55	8.61733	8.62495	8.63806
*	*	*	*
415	8.68698	8.68039	8.68535
455	8.95365	8.99579	9.00130
495	12.37287	12.42878	12.44990
500	13.47337	13.53583	13.55696

ตารางที่ 3 การกระจายความเข้มข้น ณ ช่วงเวลา 20, 40 และ 60 s ที่ความถี่ 2.45 GHz กำลังไมโครเวฟ 1600 W ที่ระยะแกน y เท่ากับ 199 mm $Re_p = 0.1$

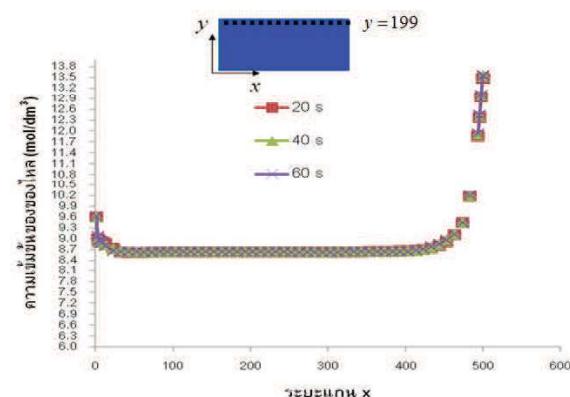
ระยะแกน x (mm)	ความเข้มข้นของไหลด้วยเวลาต่างๆ (mol/dm ³)		
	20 s	40 s	60 s
415	8.68717	8.68085	8.68609
455	8.95376	8.99604	9.00171
495	12.37289	12.42882	12.44996
500	13.47338	13.53582	13.55693

ดังตารางที่ 2 ดังนั้นจึงแสดงการกระจายความเข้มข้นของไหลด้วยระยะแกน y 199 mm

ข้อมูลในตารางที่ 2 และ 3 เปรียบเทียบการกระจายความเข้มข้น ณ ช่วงเวลาต่างๆ ที่กำลังไมโครเวฟ 800 และ 1600 W ตามลำดับ ที่ความถี่ 2.45 GHz เท่ากัน จะเห็นว่าที่กำลังไมโครเวฟ 1600 W ณ ตำแหน่งเดียวกัน มีการกระจายความเข้มข้นที่ค่าความเข้มข้นสูงกว่า เช่น ที่ระยะแกน x เท่ากับ 455 mm ณ ช่วงเวลา 60 s ที่กำลังไมโครเวฟ 1600 และ 800 W มีความเข้มข้นเท่ากับ 9.00171 และ 9.00130 mol/dm³ ตามลำดับ เนื่องจากกำลังไมโครเวฟที่สูงจะมีความ



รูปที่ 5 ภาพขยายของการกระจายความเข้มข้น ณ ช่วงเวลา 60 s ที่ความถี่ 2.45 GHz กำลังไมโครเวฟ 800 W $Re_p = 0.1$

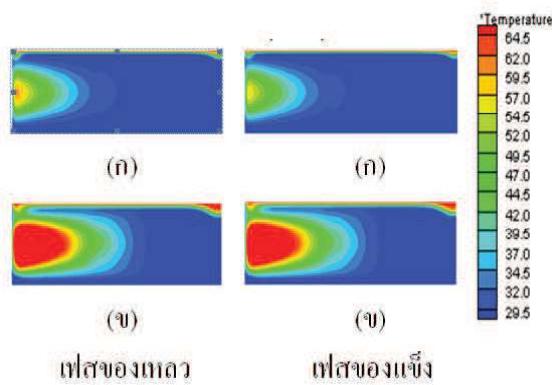


รูปที่ 6 กราฟความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของไหลด กับระยะแกน x ที่แกน y เท่ากับ 199 mm

หนาแน่นของสารน้ำไฟฟ้ามาก วัสดุดูดซับพลังงานมากทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น ของไหลดจึงมีความหนาแน่นต่ำทำให้ที่กำลังไมโครเวฟ 1600 W มีอัตราการแพร่ของความเข้มข้นดีกว่า จากตารางที่ 2 และ 3 มีการกระจายความเข้มข้นเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยตามระยะแกน x เมื่อนำมาข้อมูลการกระจายความเข้มข้นของไหลดทั้งหมด มาแสดงเป็นรูปกราฟกระจายความเข้มข้นใน 2 มิติ จะมีลักษณะดังรูปที่ 5 ซึ่งเห็นชัดเจนว่ามีขอบเขตของการกระจายความเข้มข้นบริเวณด้านบนและด้านซ้ายของวัสดุ

นำข้อมูลจากตารางที่ 2 มาเปรียบกราฟความสัมพันธ์ ดังรูปที่ 6 และแสดงความสัมพันธ์ของการกระจายความเข้มข้น กับระยะแกน x ที่ระยะแกน y เท่ากับ 199 mm ที่เวลา 20, 40 และ 60 s พบร่วมกันว่าการกระจายความเข้มข้นเมื่อเวลาผ่านไป ค่าความเข้มข้นมีแนวโน้มสูงขึ้นเพียงเล็กน้อย

3.2. อิทธิพลของความเร็วของไหลดที่ป้อนเข้าต่อรูป



รูปที่ 7 การกระจายตัวของอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) ณ ช่วงเวลา: (ก) 20 s (ข) 40 s (ค) 60 s (จ) 80 s ที่ความถี่ 2.45 GHz กำลังไมโครเวฟ 1600 W $\text{Re}_p = 0.5$

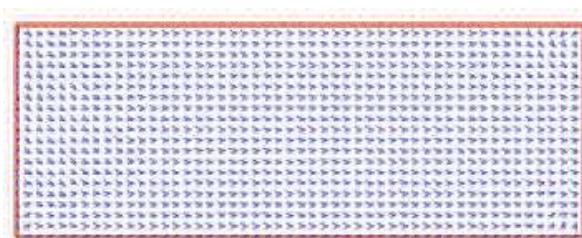
แบบการกระจายตัวของอุณหภูมิความเร็วและความเข้มข้นของของไหลดในวัสดุพูน

3.2.1. การกระจายตัวของอุณหภูมิ

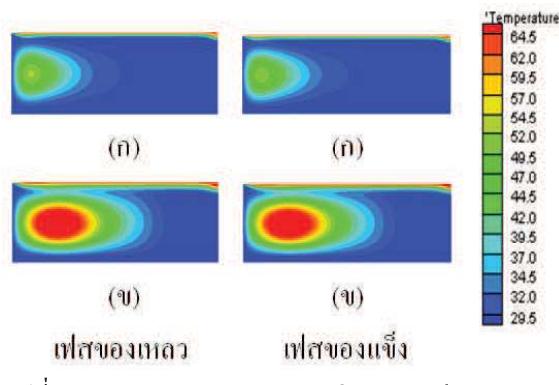
จากรูปที่ 7 และรูปที่ 8 เปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลาต่างๆ ที่ $\text{Re}_p = 0.5$ และ 10 ที่ความถี่ 2.45 GHz และ กำลังไมโครเวฟ 1600 W เท่ากัน จะเห็นว่าที่ $\text{Re}_p = 10$ มีการกระจายตัวของอุณหภูมินากกว่า เนื่องจากความเร็วน้ำที่ป้อนเข้าที่สูงกว่าส่งผลให้การกระจายของอุณหภูมิเกิดขึ้นได้ดีกว่า

3.2.2. การกระจายความเร็ว

จากรูปที่ 4, 9 และ 10 เปรียบเทียบการกระจายความเร็ว ณ ช่วงเวลาต่างๆ ที่ $\text{Re}_p = 0.1, 0.5$ และ 10 ตามลำดับ ที่ความถี่ 2.45 GHz และ กำลังไมโครเวฟ 1600 W เท่ากัน จะเห็นว่าที่ $\text{Re}_p = 0.1$ มีรูปแบบการกระจายความเร็วเห็นได้ชัดเจนที่สุดเนื่องจากความเร็วที่ป้อนเข้ามีค่าน้อย ที่ $\text{Re}_p = 0.5$ และ 10 มีรูปแบบการกระจายความเร็วที่เหมือนกันคือ



รูปที่ 9 รูปแบบการไหลด ณ ช่วงเวลา 60 s ความถี่ 2.45 GHz กำลังไมโครเวฟ 1600 W $\text{Re}_p = 0.5$



รูปที่ 8 การกระจายตัวของอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) ณ ช่วงเวลา: (ก) 20 s (ข) 40 s (ค) 60 s (จ) 80 s ที่ความถี่ 2.45 GHz กำลังไมโครเวฟ 1600 W $\text{Re}_p = 10$

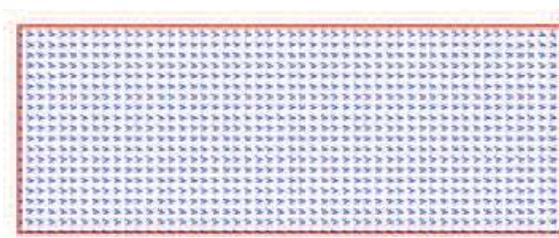
จากเตอร์ความเร็วผู้ไปทางขวาอย่างสม่ำเสมอ เนื่องจากความเร็วที่ป้อนเข้ามีค่าสูงทำให้มีอิทธิพลมากกว่าคืนแม่เหล็กไฟฟ้า

3.2.3. การกระจายความเข้มข้นของของไหลด

ข้อมูลในตารางที่ 3, 4 และ 5 เปรียบเทียบการกระจายความเข้มข้น ณ ช่วงเวลาต่างๆ ที่ $\text{Re}_p = 0.1, 0.5$ และ 10 ตามลำดับ ที่ความถี่ 2.45 GHz และ กำลังไมโครเวฟ 1600 W เท่ากัน จะเห็นว่า ณ ตำแหน่งเดียวกัน ที่ $\text{Re}_p = 10$ มีความเข้มข้นต่ำกว่า เช่น ที่ระยะแกน x เท่ากับ 455 mm ณ ช่วงเวลา 60 s ที่ $\text{Re}_p = 0.1, 0.5$ และ 10 มีความเข้มข้นเท่ากับ 9.00171, 8.97866 และ 8.14963 mol/dm³ ตามลำดับ

3.3. อิทธิพลของค่าความเข้มข้นของของไหลดต่อรูปแบบการกระจายตัวของอุณหภูมิและความเร็วของของไหลด ในวัสดุพูน

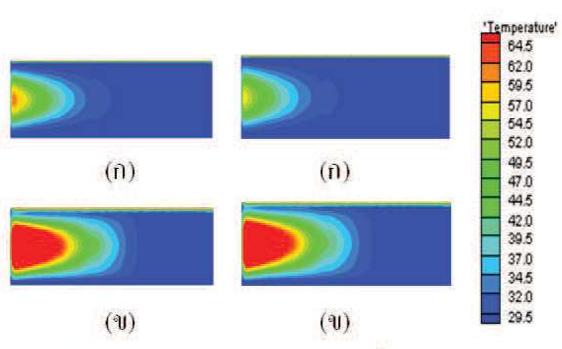
3.3.1. การกระจายตัวของอุณหภูมิ



รูปที่ 10 รูปแบบการไหลด ณ ช่วงเวลา 60 s ความถี่ 2.45 GHz กำลังไมโครเวฟ 1600 W $\text{Re}_p = 10$

ตารางที่ 4 การกระจายความเข้มข้น ณ ช่วงเวลา 20, 40 และ 60 s ที่ความถี่ 2.45 GHz กำลังไมโครเวฟ 1600 W ที่ระยะแกน y 199 mm $Re_p = 0.5$

ระยะแกน x (mm)	ความเข้มข้นของของไหหลังเวลาต่างๆ		
	20 s	40 s	60 s
415	8.65107	8.64483	8.64976
455	8.92742	8.97002	8.97866
495	12.36936	12.42422	12.44666
500	13.47357	13.53725	13.55896



รูปที่ 11 การกระจายตัวของอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) ณ ช่วงเวลา: (ก) 20 s (ข) 40 s (ค) 60 s ที่ความถี่ 2.45 GHz กำลังไมโครเวฟ 1600 W $Re_p = 0.1$ ความเข้มข้น $0.03 \text{ mol}/\text{dm}^3$

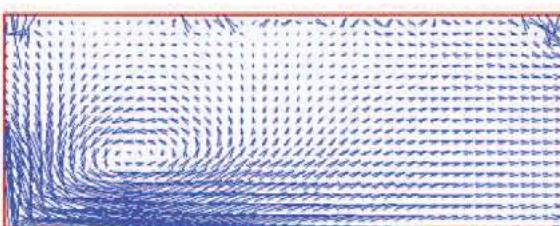
จากรูปที่ 3 และรูปที่ 11 เปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลาต่างๆ ที่ค่าความเข้มข้นของของไหหลสูงและต่ำคือ 30 และ $0.03 \text{ mol}/\text{dm}^3$ ตามลำดับ ที่ $Re_p = 0.1$, ความถี่ 2.45 GHz และ กำลังกำลังไมโครเวฟ 1600 W เท่ากัน จะเห็นว่ามีรูปแบบการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เหมือนกัน

3.3.2. การกระจายความเร็ว

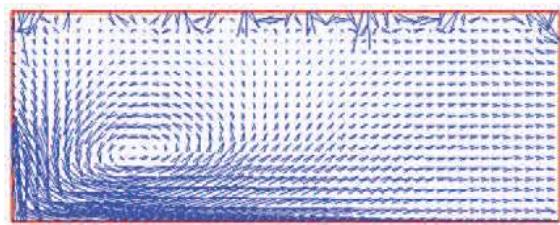
รูปที่ 12 และรูปที่ 13 เปรียบเทียบการกระจายความเร็ว ณ ช่วงเวลา 60 s ที่ค่าความเข้มข้นของของไหหลังป้อนเข้าสูงและต่ำคือ 30 และ $0.03 \text{ mol}/\text{dm}^3$ ตามลำดับ ที่ $Re_p = 0.1$, ความถี่ 2.45 GHz และ กำลังไมโครเวฟ 1600 W เท่ากัน จะเห็นว่ารูปแบบการไหหลังไม้แกะต่างอย่างเห็นได้ชัดคือบริเวณด้านบน ซึ่งที่ค่าความเข้มข้นของของไหหลต่ำ $0.03 \text{ mol}/\text{dm}^3$ จะเห็นว่า weak vortex ความเร็วมีการเคลื่อนที่เห็นได้ชัดเจนกว่า

ตารางที่ 5 การกระจายความเข้มข้น ณ ช่วงเวลา 20, 40 และ 60 s ที่ความถี่ 2.45 GHz กำลังไมโครเวฟ 1600 W ที่ระยะแกน y เท่ากับ 199 mm $Re_p = 10$

ระยะแกน x (mm)	ความเข้มข้นของของไหหลังเวลาต่างๆ		
	20 s	40 s	60 s
415	7.90798	7.90798	7.90925
455	8.09833	8.13578	8.14963
495	12.28585	12.37112	12.38851
500	13.53082	13.62606	13.64876



รูปที่ 12 รูปแบบการไหหล ณ ช่วงเวลา 60 s กำลังไมโครเวฟ 1600 W ความถี่ 2.45 GHz $Re_p = 0.1$ ความเข้มข้น $30 \text{ mol}/\text{dm}^3$



รูปที่ 13 รูปแบบการไหหล ณ ช่วงเวลา 60 s กำลังไมโครเวฟ 1600 W ความถี่ 2.45 GHz $Re_p = 10$ ความเข้มข้น $0.03 \text{ mol}/\text{dm}^3$

4. สรุป

จากการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีที่นำเสนอ ได้อธิบายถึงพฤติกรรมต่างๆ ที่สำคัญภายในวัสดุพูนชนิดอิ่มตัวระหว่างกระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

- ที่ความถี่เท่ากัน กำลังที่สูงกว่าทำให้การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ระยะลึกเท่ากันมากกว่า ส่งผลให้มีขอบเขตการกระจายตัวของอุณหภูมิสูงและมีรูปแบบการไหหลที่ชัดเจนกว่า

2) กำลังมีผลต่อการแพร่กระจายของความเข้มข้นของไหลด โดยกำลังที่สูงกว่ามีอิทธิพลต่อการกระจายตัวของความเข้มข้นมากกว่า

3) ที่ความเร็วของไหลดที่ป้อนเข้าที่สูงกว่าส่งผลให้การกระจายของอุณหภูมิกเด็จขึ้นได้ดีกว่า

4) ค่าความเข้มข้นของสารละลายไม่มีผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิ แต่ที่ค่าความเข้มข้นของไหลดน้อยกว่าส่งผลให้เวกเตอร์ความเร็วมีการเคลื่อนที่เห็นได้ชัดเจนกว่า

5. คำอธิบายสัญลักษณ์และตัวแปร

A พื้นที่ (m^2)

B ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก (Wb/m^2)

C_p ความจุความร้อนจำเพาะ

D_p ค่าความลึกทะลุทะลวง (m)

E ความเข้มสนามไฟฟ้า (V/m)

f ความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Hz)

G ค่าคงที่แรงดึงดูดของโลหะ (m/s^2)

H ความเข้มสนามแม่เหล็ก (A/m)

h สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (W/m^2K)

P กำลังของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (W)

P ความดัน (Pa)

Q การผลิตความร้อนเชิงปริมาตร (W/m^3)

Re_p particle Reynolds number, $\rho_f u_c d_p / \rho_f$

T อุณหภูมิ ($^{\circ}C$)

tan δ สัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงาน
คุณภาพเป็นพลังงานความร้อน

t เวลา (s)

u, v ความเร็ว (m/s)

อักษรกรีก

ε ความพรุน

ρ ความหนาแน่น

β สัมประสิทธิ์ของการแพร่กระจายความร้อน

φ คุณสมบัติการซึมผ่านของสนามแม่เหล็ก (h/m)

ω ความถี่เชิงมุม (rad/s)

σ คุณสมบัติการนำไฟฟ้า

γ_0 คุณสมบัติไดอิเล็กทริก

γ' จำนวนจริงของคุณสมบัติไดอิเล็กทริก

γ'' จำนวนจินตภาพของคุณสมบัติไดอิเล็กทริก

ตัวห้อ

eff ประสิทธิผล

f ของไหลด

s ของแท่ง

x,y,z แกน

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณโครงการมหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ (NRU-TU) สำหรับการทำวิจัยในครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] A.C. Metaxas, R.J. Meridith. Industrial Microwave Heating. Peter Peregrinus, London, (1983)
- [2] C. Saltiel, A. Datta. Heat and mass transfer in microwave processing. Adv. Heat Transfer 30. 1997, pp.1-94.
- [3] S.Tada, R.Echigo, H.Yoshida. Numerical analysis of electromagnetic wave in a partially loaded microwave applicator. Int. J. Heat Mass Transfer 41. 1998, pp.709-718.
- [4] Qiong Zhang, Tom H.Jackson, Aydin Ugan. Numerical modeling of microwave induced natural convection. Int. J. Heat Mass Transfer 43 (8).2000, pp.2141-2154.
- [5] Ratanadecho P., Aoki K. and Akahori M. A Numerical and Experimental Investigation of the Modeling of Microwave Heating for Liquid Layers Using a Rectangular Wave Guide (Effects of Natural Convection and Dielectric properties). Applied Mathematical Modelling. Volume 26. 2002, pp.449-472.
- [6] Klinbun W., Rattanadecho P. and Pakdee W. Microwave heating of saturated packed bed - Using A Rectangular Waveguide (TE₁₀ Mode) : influence of particle size sample dimension, frequency and placement inside the guide. International journal of Heat and Mass

- Transfer 54. 2011, pp.1763-1774.
- [7] Klinbun. W., Vafai. K. and Rattanadecho. P. Electromagnetic field effects on transport through porous media. International journal of Heat and Mass Transfer, 55 (1-3). January 2012, pp.325-335.
- [8] A. Nakayama, F. Kuwahara, M. Sugiyama, G. Xu. A two-energy equation model for conduction and convection in porous media. Int. J. Heat Mass Transfer 44. 2001, 4375–4379.
- [9] M. Quintard. Modelling local thermal non-equilibrium heat transfer in porous media. int: Proceedings of the Eleventh International Heat Transfer Conference, vol. 1. 1998, pp. 279–285.
- [10] A. Amiri, K. Vafai. Analysis of dispersion effects and non-thermal equilibrium, non-Darcian, variable porosity incompressible flow through porous media. Int. J. Heat Mass Transfer 37. 1994, 939–954.
- [11] A.V. Kuznetzov. An analysis solution of heating a two-dimensional porous packed bed by a non-thermal equilibrium fluid flow. Appl. Sci. Res. 55. 1995, 83–93.
- [12] K. Khanafer & K. Vafai. Double-diffusive convection in a lid-driven enclosure filled with a fluid-saturated porous medium. International Journal of Computation and Methodology, 42:5. 2002, 465-486.
- [13] M. Karimi-Fard, M. C. Charrier-Mojtabi & K. Vafai. Non-Darcian effects on double-diffusive convection within a porous medium. International Journal of Computation and Methodology, 31:8. 1997, 837-852.
- [14] Mur, G. Absorbing boundary conditions for the finite difference approximation of the time domain electromagnetic field equations. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility 23. 1981, 377-382.