

อิทธิพลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิ ความเร็วและ
ความเข้มข้นของของไหลในวัสดุพรุน : กรณีศึกษาแบบจำลองประเภทไม่สมดุลเชิง
ความร้อน

**Effect of Electromagnetic Field on Distribution of Temperature, Velocity and
Concentration of Fluid in Porous Media: Case Study Local Thermal Non-
Equilibrium Models**

เปรมปรีชา มณเฑียรทอง, ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช* และ วราภรณ์ กลิ่นบุญ

ศูนย์แห่งความเป็นเลิศทางวิชาการด้านการใช้ประโยชน์จากพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าในงานวิศวกรรม (CEEE)
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
99 หมู่ 18 ถนนพหลโยธิน ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง ปทุมธานี 12120
*ติดต่อ: E-mail: ratphadu@engr.tu.ac.th, โทร : +66-(0)-2564-3001 ถึง 9
โทรสาร: +66-(0)-2564-3001 ถึง 9

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอผลการศึกษาเชิงทฤษฎีของการทำความร้อนในวัสดุพรุนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโหมด TE_{10} ในงานวิจัยฉบับนี้ใช้ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมเชิงเวลา (FDTD) แก่สมการแมกเวลล์ เพื่อสร้างแบบจำลองการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ในขณะที่สมการโมเมนตัม (Darcy-Brinkman-Forchheimer model) สมการขนส่งความเข้มข้น และสมการพลังงานแก้ปัญหาโดยระเบียบวิธีไฟไนต์คอนทอรอลวอลุ่ม (FCV) ร่วมกับ SIMPLE Algorithm เพื่ออธิบายรูปแบบการไหล การกระจายตัวของความเข้มข้นและอุณหภูมิ ตามลำดับ โดยสมการพลังงานจะพิจารณาแบบไม่สมดุลเชิงความร้อน (Local Thermal Non Equilibrium) ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ กำลังและความถี่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ป้อนเข้า จากผลการศึกษาพบว่ามีความสอดคล้องกับผลงานวิจัยที่ผ่านมา กำลังและความถี่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ป้อนล้วนมีผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิ รูปแบบของการไหล และการกระจายความเข้มข้นของของไหลในวัสดุพรุน

คำหลัก: แบบจำลองดาซีบริงก์แมนฟอชไฮเมอร์, การกระจายความเข้มข้น, คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (โหมด TE_{10}), แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ประเภทไม่สมดุลเชิงความร้อน

Abstract

Grounded on Maxwell's theoretical equations, in order to identify an alternative practical equations of electromagnetic wave (mode TE_{10}) heating process in porous. This paper developed a model, concerning on two main parameters, power and frequency input of electromagnetic wave. It is considered under the local thermal non equilibrium (LTNE) assumption. Study's methodology is designed by using finite difference time domain method to simulate the distribution of electromagnetic field in cavity. 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. Results obtained from the execution shown that, the proposed function of the govern parameters consistency with prior theoretical equations and past studies. Yet, the results also shown major issues on how high power with low frequency of electromagnetic wave, significantly affects the distribution of concentration and temperature and the flow patterns.

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

1. บทนำ

ในปัจจุบันไมโครเวฟมีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมอย่างมาก เนื่องจากข้อดีของการทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟมีหลายประการ เช่น มีประสิทธิภาพทางความร้อนสูง การทะลุทะลวงของพลังงานทำให้มีการกระจายของความร้อนสม่ำเสมอทั่วทั้งวัตถุ และมีความสามารถในการเลือกรับความร้อน

การแพร่ของความเข้มข้นในวัสดุพูนก็เป็นสิ่งที่สามารถพบได้ทั่วไป ในชีวิตประจำวัน ได้แก่ สิ่งเป็นพิษที่ปนเปื้อนในอาหาร ตัวตะตะไลติกคอนเวอเตอร์ในท่อไอเสียรถยนต์ การเจริญเติบโตของคริสตัล ล้วนมีกระบวนการแพร่ของมวลเกิดขึ้น งานที่ประยุกต์ใช้เกี่ยวกับการแพร่ของมวลหรือความเข้มข้น ได้แก่ กระบวนการเผาผนึก (Sintering) เพื่อสร้างวัสดุแข็ง เช่น การทำโลหะผง การทำเซรามิกส์ เป็นต้น

ในอดีตได้มีกลุ่มนักวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในกระบวนการทำความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ และการศึกษาการพาความร้อนโดยธรรมชาติ (Natural Convection) ในของเหลว โดยได้ปรากฏในรายงานวิจัยของนักวิจัย เช่น Metaxas และ Meredith [1] และ Saltiel และ Datta [2] ได้ทำการศึกษาระบวนการถ่ายเทความร้อนในชั้นของเหลวด้วยพลังงานไมโครเวฟ โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ประเภทสมดุลเชิงความร้อน

งานวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวกับกระบวนการทำความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ เช่น งานวิจัยของ Tada และคณะ

[3] ที่พบว่า ตำแหน่งกึ่งกลางของควาดี เป็นตำแหน่งที่วัตถุมีอัตราการดูดซับพลังงานไมโครเวฟสูงที่สุด งานวิจัยของ Zhang และคณะ [4] ได้สรุปว่า อุณหภูมิขึ้นกับสมบัติทางไฟฟ้าของวัตถุ

งานวิจัยของ Ratanadecho และคณะ [5] ทำการศึกษาอิทธิพลของระดับกำลังพลังงานไมโครเวฟและค่าการนำไฟฟ้าของของเหลวมีผลต่อระดับการแทรกผ่านคลื่นและอัตราการสร้างความร้อนภายในของเหลว

Klinbun และคณะ [6] นำเสนอการวิเคราะห์เชิงตัวเลขและการทดลองของการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟในแพ็คเบตแบบอ้อมตัว โดยใช้ท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม (โหมด TE_{10}) เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สมบูรณ์โดยใช้สมการพลังงานและสมการโมเมนตัมแบบสองมิติเพื่ออธิบายอุณหภูมิ และการไหลคู่กับผลที่ได้จากสมการแมกเวลล์ (Maxwell's Equation) ศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาค ขนาดตัวอย่าง การจัดวางภายในท่อนำคลื่นและความถี่ที่ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนและลักษณะการไหลโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ประเภทสมดุลเชิงความร้อน ได้ว่าผลการจำลองเป็นที่ยอมรับเมื่อเทียบกับข้อมูลจากการทดลอง รูปแบบการไหลขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค และประสิทธิภาพทางความร้อนของตัวอย่างจะเปลี่ยนแปลงตามขนาดตัวอย่างและความถี่คลื่นไมโครเวฟ

จากนั้นมีการศึกษาการพาความร้อนแบบบังคับ (Forced Convection) โดย Klinbun และคณะ [7] ได้ทำการศึกษาในวัสดุพูนซึ่งมีของเหลวอ้อมตัว โดย

ศึกษาผลของกำลังคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไร้หน่วย และความถี่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไร้หน่วยที่มีต่อสนามอุณหภูมิและพิจารณาการกระจายของนัสเซลน์มเบอร์ ซึ่งใช้สมการแม็กเวลล์มาแก้ไขปัญหาเพื่อจำลองสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ภายในท่อนำคลื่นและภายในวัสดุพอรุน แลใช้โมเดลบริงค์แมน (Brinkman-Forchheimer) มาเสนอการไหลของของไหลภายในวัสดุพอรุนและใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ประเภทไม่สมดุลเชิงความร้อน (Local Thermal Non-Equilibrium, LTNE) มาพิจารณาสำหรับแบบจำลองสมการพลังงานสำหรับของเหลวและของแข็ง โดยงานวิจัยนี้วิเคราะห์ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์สนามแม่เหล็กไฟฟ้า ที่มีผลต่อการไหล สนามความร้อนและ นัสเซลน์มเบอร์ โดยงานวิจัยนี้เป็นพื้นฐานสำหรับการทำความเข้าใจของการพาความร้อนแบบบังคับในวัสดุพอรุน

มีกลุ่มนักวิจัยที่ศึกษาการถ่ายเทความร้อนในวัสดุพอรุนโดยการนำและการพาความร้อน โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ประเภทไม่สมดุลเชิงความร้อนแต่ไม่ได้ใส่คลื่นไมโครเวฟได้แก่ งานวิจัยของ Nakayama และคณะ [8], Quintard [9], Amiri และ Vafai [10] และงานวิจัยของ Kuznetsov [11]

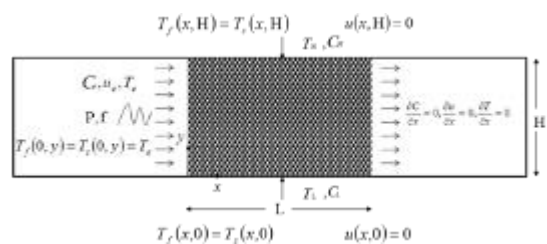
นักวิจัยที่ศึกษาการถ่ายเทความร้อนของการพาความร้อนในสารละลายได้แก่ Khanafer และ Vafai [12] ศึกษาการไหลของของไหลที่เกิดจากผลของแรงลอยตัวเนื่องมาจากทั้งอุณหภูมิและความเข้มข้น โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ประเภทสมดุลเชิงความร้อน สร้างแบบจำลองแบบ 2 มิติรูปคาวิตีสี่เหลี่ยมจัตุรัส งานวิจัยของ Karimi-Fard และคณะ [13] ศึกษาผลของแรงลอยตัวที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความเข้มข้นโดยผลการวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่าสัดส่วนของแรงลอยตัว, ดาซีน์มเบอร์, เลวีสน์มเบอร์ และริชาร์ดสันมเบอร์ล้วนมีผลต่อการไหล

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าการศึกษาการพาความร้อนในของเหลวเป็นส่วนใหญ่ และได้มีงานวิจัยที่ศึกษากระบวนการพาความร้อนในวัสดุพอรุนเนื่องจากความร้อนจากไมโครเวฟโดยใช้แบบจำลอง

ทางคณิตศาสตร์ประเภทสมดุลเชิงความร้อน (Local Thermal Equilibrium, LTE) ซึ่งอุณหภูมิที่จุดใดๆ ของของแข็งและของเหลวจะเท่ากัน เนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ประเภทไม่สมดุลเชิงความร้อนมีความซับซ้อนของปัญหามากกว่าจึงยังมีงานวิจัยประเภทนี้้อย โดยงานที่เป็นวัสดุพอรุนแบบอิมัตวิวิเคราะห์สมการพลังงานโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ประเภทไม่สมดุลเชิงความร้อน มีการบ่อนคลื่นไมโครเวฟ และศึกษาการกระจายความเข้มข้นในวัสดุพอรุนยังไม่มีนักวิจัยกลุ่มใดทำการศึกษา ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะนำเสนอการศึกษาเชิงทฤษฎีของการทำ ความร้อนในวัสดุพอรุนด้วยพลังงานไมโครเวฟ ศึกษาโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยเน้นศึกษาอิทธิพลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิ ความเร็วและความเข้มข้นของของไหลในวัสดุพอรุน กรณีศึกษา แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ประเภทไม่สมดุลเชิงความร้อน (Local Thermal Non-Equilibrium, LTNE) โดยวิจัยเพิ่มเติมจากงานวิจัยของ Klinbun และคณะ [7]

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

รูปที่ 1 แสดงแบบจำลองทางกายภาพที่ใช้ในการวิเคราะห์กระบวนการทำความร้อนในวัสดุพอรุนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโหมด TE₁₀ ที่บริเวณซ้ายของโดเมนบ่อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและใส่สารละลายของไหล ภายในโดเมนประกอบด้วยวัสดุพอรุนชนิดอิมัตวิได้แก่ น้ำและเม็ดแก้ว ด้านบนและด้านล่างควบคุมให้มีค่าอุณหภูมิและความเข้มข้นคงที่ โดยด้านบนจะมีค่าอุณหภูมิและความเข้มข้นสูงกว่าด้านล่าง ด้านขวา กำหนดให้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความเร็วและความเข้มข้นตามระยะแกน x



รูปที่ 1 แบบจำลองทางกายภาพ [7]

2.1 การวิเคราะห์การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

ตารางที่ 1 สมบัติไดอิเล็กตริกและสมบัติทางความร้อนที่ใช้ในการคำนวณ [7]

คุณสมบัติ	เม็ดแก้ว	น้ำ
ความหนาแน่น, ρ (kg m^{-3})	2225	989
ความจุความร้อน	835	4180
จำเพาะ, C_p ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)		
ค่าการนำความร้อน, ($\text{Wm}^{-1} \text{K}^{-1}$)	1.4	0.640
ความหนืด, μ ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) $\times 10^5$	-	57.7
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก, γ_r	7.5	*
ค่าสัมประสิทธิ์ลอสมแทนเจน, $\tan \delta$	0.0125	*

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

เนื่องจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมด TE₁₀ สนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะไม่แปรผันในทิศทางขวางของท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม พิจารณาให้สนามแม่เหล็กไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงเฉพาะในระนาบ 2 มิติ คือ ระนาบ x-y ภายในท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม สมมติฐานในการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้า ได้แก่

- (1) ผนังของท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมมีสมบัติเป็นตัวนำที่สมบูรณ์
- (2) ไม่คำนึงถึงการดูดซับคลื่นไมโครเวฟที่ผนังท่อนำคลื่น

สมการพื้นฐานสำหรับวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าอยู่บนพื้นฐานของสมการแมกเวลล์ สำหรับคลื่นในโหมด TE₁₀

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

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

ดังนั้นเมื่อแทนค่าลงในสมการแมกเวลล์จะได้

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

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

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

โดย E และ H แทนถึงความเข้มสนามไฟฟ้าและความเข้มสนามแม่เหล็กตามลำดับ ตัวห้อย x, y และ z แทนองค์ประกอบ x, y และ z ของเวกเตอร์ตามลำดับ และ γ คือ ค่าการซึมผ่านของสนามไฟฟ้า ϕ คือ ค่าการซึมผ่านของสนามแม่เหล็ก และ σ คือ ค่าการนำไฟฟ้า

เงื่อนไขขอบเขตและสภาวะเริ่มต้น

- (1) เงื่อนไขขอบเขตตัวนำยิ่งยวด เงื่อนไขขอบเขตของผนังภายในท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมอธิบายโดยกฎของฟาราเดย์และทฤษฎีบทของเกาส์

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

เมื่อตัวห้อย n และ t หมายถึง แกนในแนวตั้งฉากและแนวสัมผัสตามลำดับ

- (2) เงื่อนไขขอบเขตการดูดซับที่บริเวณปลายทั้งสองด้านของท่อนำคลื่น เสนอโดย Mur

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

- (3) ความเข้มของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดจากแมกนีตรอน

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

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

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

โดย f คือความถี่ของไมโครเวฟ a คือความกว้างของระนาบที่ทางเข้าระบบ Z_H คือ อิมพีแดนซ์ของคลื่น (Wave Impedance) E_{zin} ความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ป้อนเข้าระบบ

- (4) เงื่อนไขขอบเขตความต่อเนื่องตลอดรอยต่อระหว่างวัสดุกับอากาศ อธิบายโดยกฎของฟาราเดย์และทฤษฎีบทของเกาส์

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

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

- (5) เงื่อนไขเริ่มต้น

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

2.2 การวิเคราะห์การกระจายของอุณหภูมิรูปแบบการไหล และความเข้มข้น

จากรูปที่ 1 สมมติฐานในการวิเคราะห์เพื่อลดความซับซ้อนของปัญหา ได้แก่

(1) เพื่อให้สอดคล้องกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้า สนามอุณหภูมิ, สนามการไหล และความเข้มข้นพิจารณาในระนาบ 2 มิติ

(2) การประมาณ Boussinesq จะใช้เข้ามาสำหรับผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นในแรงลอยตัว

(3) วัสดุทดสอบมีความหนาแน่นสม่ำเสมอ เป็นเนื้อเดียวและมีความสมมาตรของคุณสมบัติทางฟิสิกส์ในทุกแนวแกน

(4) วัสดุพรมมีความพรมไม่คงที่ดังสมการที่ 21

(5) ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะของวัสดุทดสอบ

2.2.1 สมการการถ่ายเทความร้อน

สมการถ่ายเทความร้อนในของเหลว

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

สมการถ่ายเทความร้อนในของแข็ง

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

เงื่อนไขขอบเขตและสภาวะเริ่มต้น จากรูปที่ 1

(1) ที่บริเวณทางเข้ากำหนดให้อุณหภูมิคงที่ $T_f(x, y) = T_s(x, y) = T_e = 27^\circ C$; $x = 0$ ที่ y ใดๆ

(2) ผนังด้านบนกำหนดให้อุณหภูมิคงที่ $T_f(x, y) = T_s(x, y) = T_H = 67^\circ C$; $y = H$ ที่ x ใดๆ

(3) ผนังด้านล่างกำหนดให้อุณหภูมิคงที่ $T_f(x, y) = T_s(x, y) = T_L = 15^\circ C$; $y = 0$ ที่ x ใดๆ

(4) เงื่อนไขเริ่มต้นกำหนดเป็น

$$T = T_0 = 27^\circ C ; t = 0$$

2.2.2 สมการการไหลของของไหล

ในงานวิจัยนี้วัสดุพรมถูกสมมติว่ามีค่าความพรมเปลี่ยนแปลงแบบเอ็กโพเนนเชียลคำนวณจากสมการที่ 21 โดยมีของไหลอิมัลชันภายในโพรงของแข็งอยู่ในภาวะไม่สมดุลเชิงความร้อนกับส่วนของแข็ง ขอบเขตการใช้สมมติฐานไม่สมดุลเชิงความร้อนมีการศึกษาและถูกกำหนดขึ้น ผลของความหนาแน่นที่ไม่สม่ำเสมอที่มีต่อแรงลอยตัวใช้การประมาณวิธี Boussinesq ในการคำนวณแบบจำลอง Darcy-Forchheimer-Brinkman ใช้สำหรับการคำนวณการไหลของของไหล ส่วนแบบจำลองของ Brinkman และ Forchheimer-Brinkman คำนวณความเค้นเนื่องจากความหนืดที่เกิดขึ้นกับผนังของแข็งและผลของแรงจุดจากส่วนของแข็งตามลำดับ สมการที่ใช้อธิบายปรากฏการณ์การไหลของของไหลแสดงไว้ดังต่อไปนี้

สมการความต่อเนื่อง

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

สมการโมเมนตัม

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

$$-\frac{\mu\nu}{\kappa} - \frac{F\mu}{\sqrt{\kappa}} (u^2 + v^2)^{1/2} u$$

$$\begin{aligned} &\frac{1}{\epsilon} \left(\frac{\partial v}{\partial t} \right) + \frac{1}{\epsilon^2} \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) \\ &= -\frac{1}{\rho_f} \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right) + \frac{\mu}{\epsilon} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (18)$$

$$-\frac{\mu\nu}{\kappa} - \frac{F\mu}{\sqrt{\kappa}} (u^2 + v^2)^{1/2} v$$

$$+ g\beta_T (T - T_1) + g\beta_C (C - C_1)$$

เมื่อ ϵ, μ, β_T และ β_C คือค่าความพรม, ความหนืดจลน์, ค่าสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวทางความร้อนและค่าสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวทางความเข้มข้นของของไหล ตามลำดับ ค่าการซึมผ่าน และฟังก์ชันทางเรขาคณิต เป็นดังนี้ [7]

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

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

ค่าความพรุนถูกสมมติว่าเปลี่ยนแปลงแบบเอ็กโปเนนเชียลกับระยะห่างจากผนัง 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]

เนื่องจากผนังของภาชนะแข็งเกร็ง ไม่มีดีดหยุ่น ดังนั้นความเร็วจึงมีค่าเป็นศูนย์ นอกจากนี้ความเร็วที่ตำแหน่งผิวหน้าระหว่างชั้นน้ำและผนังของภาชนะก็มีค่าเท่ากับศูนย์เช่นกัน (Zero Slip Boundary Condition)

เงื่อนไขขอบเขตและสภาวะเริ่มต้น จากรูปที่ 1

(1) ที่บริเวณทางเข้ากำหนดให้ความเร็วคงที่

$$u(x, y) = u_e \quad ; x = 0 \quad \text{ที่ } y \text{ ใดๆ}$$

(2) ผนังด้านบนกำหนดให้ความเร็วเป็นศูนย์

$$u(x, y) = 0 \quad ; y = H \quad \text{ที่ } x \text{ ใดๆ}$$

(3) ผนังด้านล่างกำหนดให้ความเร็วเป็นศูนย์

$$u(x, y) = 0 \quad ; y = 0 \quad \text{ที่ } x \text{ ใดๆ}$$

(4) เงื่อนไขเริ่มต้นกำหนดเป็น

$$u = u_0 \quad ; t = 0$$

2.2.3 สมการความเข้มข้น

ในการวิเคราะห์ลักษณะความเข้มข้นของเหลวจะประกอบด้วยสมการ ดังต่อไปนี้

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

โดยที่ C คือ ความเข้มข้นของของไหล และ D คือ การแพร่กระจายมวล (Mass Diffusivity)

เงื่อนไขขอบเขตและสภาวะเริ่มต้น จากรูปที่ 1

(1) ที่บริเวณทางเข้ากำหนดให้ความเข้มข้นคงที่

$$C(x, y) = C_e \quad ; x = 0 \quad \text{ที่ } y \text{ ใดๆ}$$

(2) ผนังด้านบนกำหนดให้ความเข้มข้นคงที่

$$C(x, y) = C_H \quad ; y = H \quad \text{ที่ } x \text{ ใดๆ}$$

(3) ผนังด้านล่างกำหนดให้ความเข้มข้นคงที่

$$C(x, y) = C_L \quad ; y = 0 \quad \text{ที่ } x \text{ ใดๆ}$$

(4) เงื่อนไขเริ่มต้นกำหนดเป็น

$$C = C_0 \quad ; t = 0$$

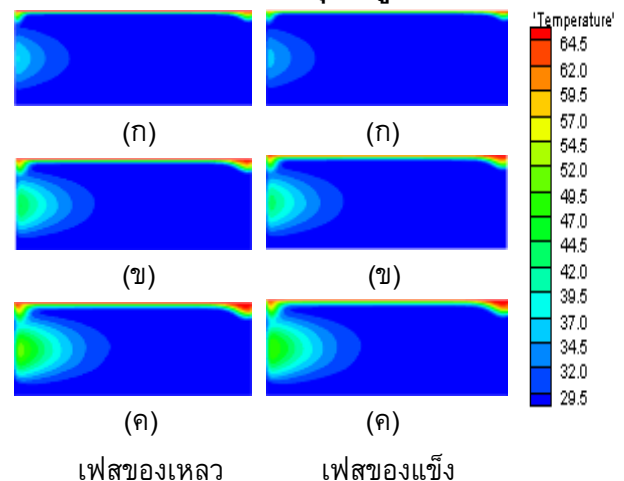
3. ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

ในงานวิจัยนี้ใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์โทมโดเมน (FDTD) ในการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าและการดูดซับพลังงานไมโครเวฟที่ตำแหน่งและเวลาต่างๆ สมการพลังงาน สมการโมเมนตัม และสมการขนส่งความเข้มข้นแก้ปัญหาด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์คอนโทรลวอลุ่ม (FCV) ร่วมกับ SIMPLE Algorithm

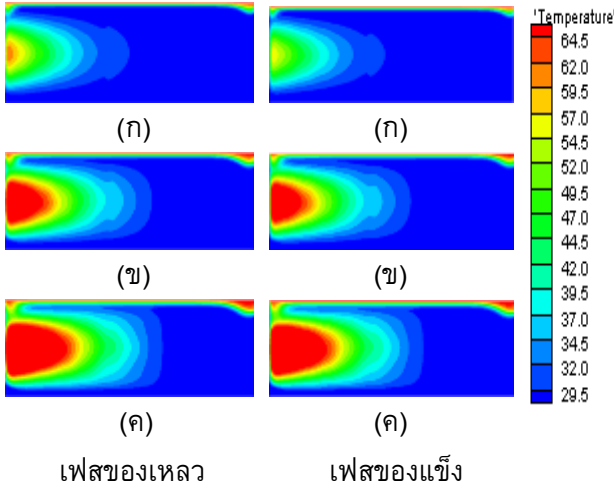
4. ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล

4.1 อิทธิพลของกำลังไมโครเวฟต่อรูปแบบการกระจายตัวของอุณหภูมิ ความเร็วและความเข้มข้นของของไหลในวัสดุพรุน

4.1.1 การกระจายตัวของอุณหภูมิ



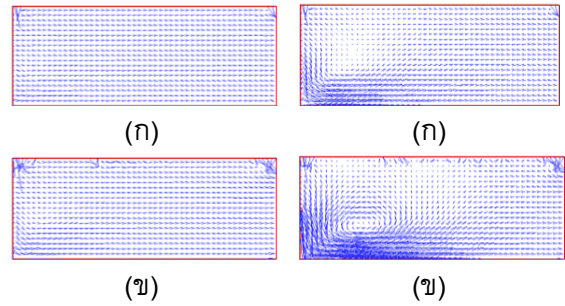
รูปที่ 2 การกระจายตัวของอุณหภูมิ (°C) ณ ช่วงเวลา: (ก) 20 s (ข) 40 s (ค) 60 s ที่ความถี่ 2.45 GHz กำลังไมโครเวฟ 800 W



รูปที่ 3 การกระจายตัวของอุณหภูมิ (°C) ณ ช่วงเวลา:
(ก) 20 s (ข) 40 s (ค) 60 s ที่ความถี่ 2.45 GHz
กำลังไมโครเวฟ 1600 W

รูปที่ 2 และรูปที่ 3 เปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิในเฟสของเหลวและเฟสของแข็ง ณ ช่วงเวลาต่างๆ ที่กำลังไมโครเวฟ 800 และ 1600 W ตามลำดับ ที่ความถี่ 2.45 GHz เท่ากัน จะเห็นว่าที่ กำลังไมโครเวฟ 1600 W มีการกระจายตัวของอุณหภูมิมากกว่า เนื่องจากกำลังไมโครเวฟที่สูงจะมีความหนาแน่นของสนามไฟฟ้ามาก ทำให้วัสดุดูดซับพลังงานไมโครเวฟมากตามไปด้วย โดยที่บริเวณกึ่งกลางจะมีการดูดซับพลังงานมากที่สุดเพราะมีความหนาแน่นของสนามไฟฟ้ามากจึงทำให้บริเวณนี้มีอุณหภูมิสูงที่สุด การกระจายตัวของอุณหภูมิจะเกิดขึ้นที่บริเวณด้านซ้ายที่ได้รับคลื่นไมโครเวฟทำให้มีอุณหภูมิสูงและจะค่อยๆ ลดลงตามระยะแกน x และจากรูปจะเห็นว่า การกระจายตัวของอุณหภูมิจากบริเวณด้านบนสูงกว่าด้านล่าง เนื่องมาจากการกำหนดขอบเขตให้ด้านบนมีอุณหภูมิสูงกว่า

4.1.2 การกระจายความเร็ว



กำลังไมโครเวฟ 800 W กำลังไมโครเวฟ 1600 W
รูปที่ 4 รูปแบบการไหล ณ ช่วงเวลา
(ก) 20 s (ข) 60 s ที่ความถี่ 2.45 GHz

จากรูปที่ 4 เปรียบเทียบการกระจายความเร็ว ณ ช่วงเวลาต่างๆ ที่กำลังไมโครเวฟ 800 และ 1600 W ตามลำดับ ที่ความถี่ 2.45 GHz เท่ากัน จะเห็นว่าที่ กำลังไมโครเวฟ 1600 W มีการกระจายของความเร็วมากกว่า เนื่องจากกำลังไมโครเวฟที่สูงจะมีความหนาแน่นของสนามไฟฟ้ามาก ทำให้วัสดุดูดซับพลังงานไมโครเวฟมากตามไปด้วย โดยเวกเตอร์ความเร็วจะเคลื่อนที่จากผิวด้านซ้าย เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟที่มากกระทบที่ผิวทำให้ผิวร้อน เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิจากบริเวณซ้ายและขวาส่งผลให้เกิดความแตกต่างของความหนาแน่นมีการขยายตัวเชิงปริมาตรของของไหลร้อนและเกิดแรงลอยตัวขึ้นของไหลเคลื่อนที่ และจากรูปจะเห็นว่ามีการกระจายความเร็วบริเวณด้านบนซึ่งมีลักษณะคล้ายกับการกระจายตัวของอุณหภูมิ เนื่องจากบริเวณขอบด้านบนเป็นบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง ทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิจากบริเวณข้างเคียง เวกเตอร์ความเร็วจึงเคลื่อนที่ออกจากตำแหน่งนี้

4.1.3 การกระจายความเข้มข้นของของไหล

การแพร่กระจายของความเข้มข้นจะเกิดขึ้นโดยจะแพร่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ และจะหยุดการแพร่เมื่อเข้าสู่สมดุลหรือความเข้มข้นในบริเวณนั้นเท่ากัน

จากรูปที่ 1 กำหนดให้แบบจำลองด้านบนมีความเข้มข้นสูงกว่าด้านล่าง ดังนั้นการแพร่จะแพร่จากบนลงสู่ด้านล่าง และเมื่อพิจารณาการกระจายของความ

เข้มข้นจากซ้ายไปขวาโดยป้อนของไหลจากด้านซ้าย ความเข้มข้นของของไหลจะลดลงจนเริ่มคงที่ที่ระยะ แกน x เท่ากับ 55 mm และมีความเข้มข้นสูงที่สุดที่ บริเวณบนขวาของแบบจำลองที่ ระยะแกน x เท่ากับ 500 mm ที่ระยะแกน y 199 mm ดังนั้นจึงแสดงการ กระจายความเข้มข้นของของไหลที่ระยะแกน y 199 mm ดังตารางที่ 2, 3 และ 4

ตารางที่ 2 การกระจายความเข้มข้นของของไหล ณ ช่วงเวลา 20, 40 และ 60 s ที่ความถี่ 2.45 GHz กำลัง ไมโครเวฟ 800 W ที่ระยะแกน y 199 มิลลิเมตร

ระยะแกน x (mm)	ความเข้มข้นของของไหลที่เวลาต่างๆ (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
95	8.62540	8.63497	8.63620
135	8.62887	8.63805	8.63887
175	8.63061	8.63942	8.63998
215	8.63162	8.63991	8.64015
255	8.63274	8.64051	8.64033
295	8.63462	8.64149	8.64068
335	8.63897	8.64398	8.64193
375	8.65040	8.64972	8.64355
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

จากข้อมูลในตารางที่ 2 และ 3 เปรียบเทียบการ กระจายความเข้มข้น ณ ช่วงเวลาต่างๆ ที่กำลัง ไมโครเวฟ 800 และ 1600 W ตามลำดับ ที่ความถี่ 2.45 GHz เท่ากัน จะเห็นว่าที่กำลังไมโครเวฟ 1600 W ณ ตำแหน่งเดียวกัน มีการกระจายความเข้มข้นที่ ค่าความเข้มข้นสูงกว่า เช่น ที่ระยะแกน x เท่ากับ 455 mm ณ ช่วงเวลา 60 s ที่กำลังไมโครเวฟ 1600 และ 800 W มีความเข้มข้นเท่ากับ 9.00171 และ 9.00130 mol/dm³ ตามลำดับ เนื่องจากกำลังไมโครเวฟที่สูงจะมีความหนาแน่นของสนามไฟฟ้ามาก วัสดุดูดซับ

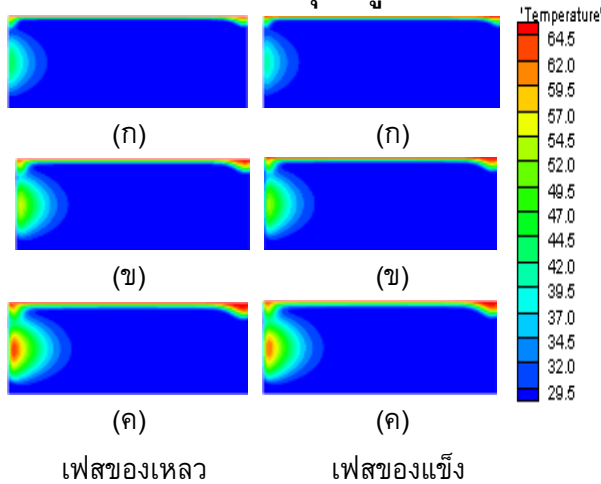
พลังงานมากทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น ของไหลจึงมีความ หนาแน่นต่ำ เกิดการเคลื่อนที่ของของไหลดี ทำให้ที่ กำลังไมโครเวฟ 1600 W มีการแพร่กระจายของของ ไหลที่ค่าความเข้มข้นสูงกว่า

ตารางที่ 3 การกระจายความเข้มข้นของของไหล ณ ช่วงเวลา 20, 40 และ 60 s ที่ความถี่ 2.45 GHz กำลัง ไมโครเวฟ 1600 W ที่ระยะแกน y 199 mm

ระยะแกน x (mm)	ความเข้มข้นของของไหลที่เวลาต่างๆ (mol/dm ³)		
	20 s	40 s	60 s
1	9.60766	9.61121	9.62001
5	8.92129	8.95593	8.97792
15	8.84704	8.79734	8.77020
55	8.62030	8.63172	8.64581
95	8.62887	8.64163	8.64615
135	8.63205	8.64428	8.64771
175	8.63314	8.64433	8.64618
215	8.63315	8.64263	8.64402
255	8.63383	8.64240	8.64189
295	8.63515	8.64186	8.63898
335	8.63952	8.64532	8.64424
375	8.65072	8.65045	8.64473
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

4.2 อิทธิพลของความถี่ไมโครเวฟต่อรูปแบบการ กระจายตัวของอุณหภูมิ ความเร็วและความ เข้มข้นของของไหลในวัสดุพูน

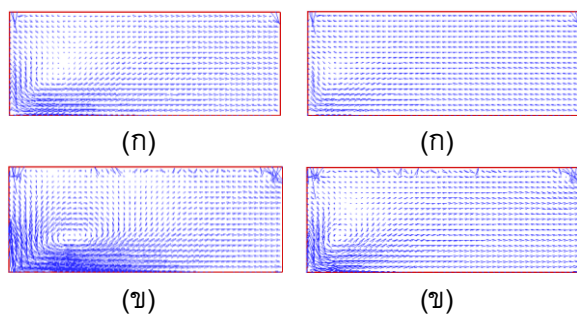
4.2.1 การกระจายตัวของอุณหภูมิ



รูปที่ 5 การกระจายตัวของอุณหภูมิ (°C) ณ ช่วงเวลา: (ก) 20 s (ข) 40 s (ค) 60 s ที่ความถี่ 4 GHz กำลังไมโครเวฟ 1600 W

จากรูปที่ 3 และรูปที่ 5 เปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลาต่างๆ ที่ความถี่ 2.45 และ 4 GHz ตามลำดับที่กำลังไมโครเวฟ 1600 W เท่ากัน จะเห็นว่าที่ความถี่ 4 GHz มีการกระจายตัวของอุณหภูมิน้อยกว่า เนื่องจากคลื่นที่ความถี่สูงจะมีความยาวคลื่นที่สั้นและค่าความลึกในการทะลุทะลวงของคลื่นน้อยทำให้คลื่นส่วนใหญ่ถูกดูดซับอย่างรวดเร็วที่บริเวณคลื่นตกกระทบ

4.2.2 การกระจายความเร็ว



รูปที่ 6 รูปแบบการไหล ณ ช่วงเวลา (ก) 20 s (ข) 60 s กำลังไมโครเวฟ 1600 W

จากรูปที่ 6 เปรียบเทียบการกระจายความเร็ว ณ ช่วงเวลาต่างๆ ที่ความถี่ 2.45 และ 4 GHz ตามลำดับที่กำลังไมโครเวฟ 1600 W เท่ากัน จะเห็นว่าที่

ความถี่ 4 GHz มีการกระจายของความเร็วน้อยกว่า เนื่องจากคลื่นที่ความถี่สูงจะมีความยาวคลื่นที่สั้นทำให้คลื่นส่วนใหญ่ถูกดูดซับอย่างรวดเร็วที่บริเวณคลื่นตกกระทบ การกระจายความเร็วจึงเกิดขึ้นบริเวณที่ป้อนคลื่นไมโครเวฟ เนื่องจากบริเวณที่ป้อนคลื่นไมโครเวฟมีการดูดซับพลังงานมากที่สุด ทำให้ของไหลบริเวณนั้นมีอุณหภูมิสูงกว่า และมีความหนาแน่นต่ำ เกิดความแตกต่างของความหนาแน่นในสองบริเวณ เกิดแรงลอยตัวทำให้ของไหลเคลื่อนที่ดังรูป

4.2.3 การกระจายความเข้มข้นของของไหล

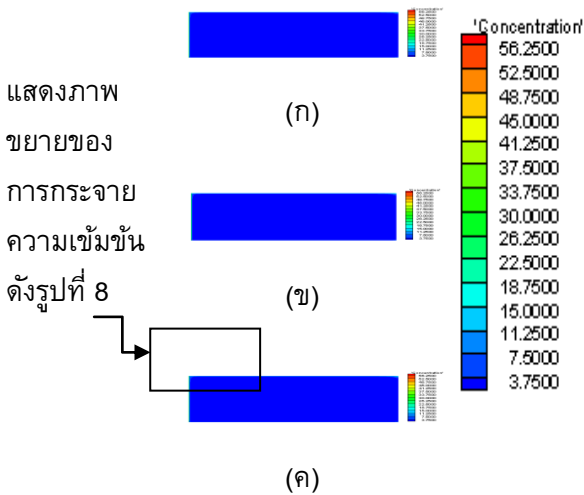
ตารางที่ 4 การกระจายความเข้มข้นของของไหล ณ ช่วงเวลา 20, 40 และ 60 s ที่ความถี่ 4 GHz กำลังไมโครเวฟ 1600 W ที่ระยะแกน y 199 มิลลิเมตร

ระยะแกน x (mm)	ความเข้มข้นของของไหลที่เวลาต่างๆ (mol/dm ³)		
	20 s	40 s	60 s
1	9.60791	9.61119	9.61913
5	8.92144	8.95502	8.97494
15	8.84847	8.80003	8.77081
55	8.61777	8.62580	8.63828
95	8.62578	8.63584	8.63751
135	8.62907	8.63859	8.63984
175	8.63064	8.63956	8.64036
215	8.63162	8.64001	8.64037
255	8.63270	8.64051	8.64043
295	8.63460	8.64150	8.64078
335	8.63891	8.64387	8.64177
375	8.65037	8.64965	8.64346
415	8.68696	8.68035	8.68529
455	8.95363	8.99576	9.00127
495	12.37287	12.42878	12.44990
500	13.47337	13.53583	13.55697

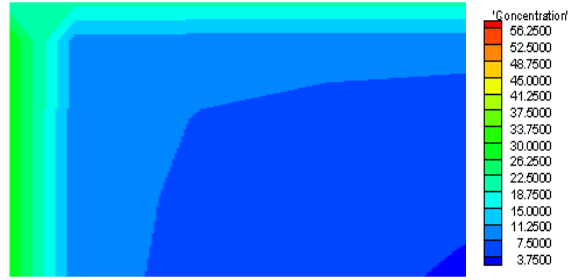
จากข้อมูลในตารางที่ 3 และ 4 เปรียบเทียบการกระจายความเข้มข้นของของไหล ณ ช่วงเวลาต่างๆ ที่ความถี่ 2.45 และ 4 GHz ตามลำดับที่กำลังไมโครเวฟ 1600 W เท่ากัน จะเห็นว่าที่ความถี่ไมโครเวฟที่มากกว่าคือ 4 GHz ณ ตำแหน่งเดียวกัน มีการกระจายความเข้มข้นที่ค่าความเข้มข้นต่ำกว่า เช่น ที่ระยะแกน x เท่ากับ 455 mm ณ ช่วงเวลา 60 s ที่ความถี่ไมโครเวฟ 2.45 และ 4 GHz มีความเข้มข้น

เท่ากับ 9.00171 และ 9.00127 mol/dm³ ตามลำดับ เนื่องจากคลื่นที่มีความถี่สูงจะมีความยาวคลื่นที่สั้นและค่าความลึกในการทะลุทะลวงของคลื่นน้อยทำให้คลื่นส่วนใหญ่ถูกดูดซับอย่างรวดเร็วที่บริเวณคลื่นตกกระทบ การกระจายความเข้มข้นที่ค่าความเข้มข้นสูงกว่าจะเกิดขึ้นบริเวณที่ป้อนคลื่นไมโครเวฟซึ่งมีการดูดซับพลังงานมากจึงทำให้บริเวณนั้นมีอุณหภูมิสูงกว่าของไหลมีความหนาแน่นต่ำ จึงทำให้อัตราการแพร่ของความเข้มข้นเกิดขึ้นดีกว่า รูปแบบการกระจายความเข้มข้นอธิบายในหัวข้อ 4.1.3

จากตารางที่ 2, 3 และ 4 มีการกระจายความเข้มข้นของของไหลเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยตามระยะแกน x เมื่อนำข้อมูลการกระจายความเข้มข้นของของไหลทั้งหมด มาแสดงเป็นรูปการกระจายความเข้มข้นใน 2 มิติ จะมีลักษณะดังรูปที่ 7 ซึ่งรูปที่ได้จะมีลักษณะใกล้เคียงกันทั้งหมด และเมื่อนำรูปที่ 7 ในส่วนบริเวณที่ยกตัวอย่างดังรูปมาขยาย จะเห็นเป็นเจดสีดังรูปที่ 8 ซึ่งเห็นชัดเจนว่ามีขอบเขตของการกระจายความเข้มข้นบริเวณด้านบนและด้านซ้ายของวัสดุ

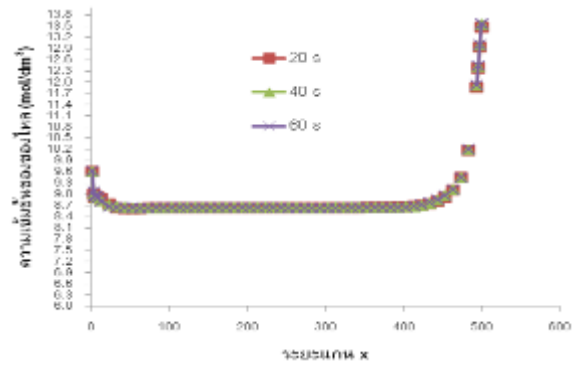


รูปที่ 7 การกระจายความเข้มข้นของของไหล ณ ช่วงเวลา: (ก) 20 s (ข) 40 s (ค) 60 s ที่ความถี่ 2.45 GHz กำลังไมโครเวฟ 800 W



รูปที่ 8 ภาพขยายของการกระจายความเข้มข้นของของไหล ณ ช่วงเวลา 60 s ที่ความถี่ 2.45 GHz กำลังไมโครเวฟ 800 W

นำข้อมูลจากตารางที่ 2 มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ดัง รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ของการกระจายความเข้มข้นกับระยะแกน x ที่ระยะแกน y เท่ากับ 199 มิลลิเมตร ที่เวลา 20, 40 และ 60 วินาที พบว่าการกระจายความเข้มข้นของของไหลเมื่อเวลาผ่านไปค่าความเข้มข้นมีแนวโน้มสูงขึ้นเพียงเล็กน้อย โดยเมื่อนำข้อมูลจากตารางที่ 3 และ 4 มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ก็จะได้กราฟความสัมพันธ์ในลักษณะเดียวกัน



รูปที่ 9 กราฟความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของของไหลกับระยะแกน x

5. สรุปผลการศึกษา

จากการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีที่นำเสนอได้อธิบายถึงพฤติกรรมต่างๆที่สำคัญภายในวัสดุพุนระหว่างกระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

- (1) ที่ความถี่ไมโครเวฟป้อนเข้าเท่ากัน กำลังไมโครเวฟที่สูงกว่าทำให้การกระจายตัวของ

สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ระยะลึกเท่ากันมากกว่า ส่งผลให้การกระจายตัวของอุณหภูมิสูงและมีรูปแบบการไหลที่ชัดเจนกว่า

(2) ที่กำลังไมโครเวฟเท่ากัน ความถี่ไมโครเวฟป้อนเข้าที่ต่ำกว่ามีอิทธิพลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิและรูปแบบการไหลมากกว่า

(3) กำลังและความถี่ไมโครเวฟมีผลต่อการแพร่กระจายของความเข้มข้นของของไหล โดยที่กำลังไมโครเวฟที่สูงและความถี่ไมโครเวฟที่ต่ำกว่ามีอิทธิพลต่อการกระจายตัวของความเข้มข้นมากกว่า

6. เอกสารอ้างอิง

[1] A.C. Metaxas, R.J. Meredith (1983). *Industrial Microwave Heating*, Peter Peregrinus, London,

[2] C. Saliel, A. Datta (1997). Heat and mass transfer in microwave processing, *Adv. Heat Transfer* 30, pp.1 - 94.

[3] S.Tada, R.Echigo, H.Yoshida (1998). Numerical analysis of electromagnetic wave in a partial loaded microwave applicator, *Int. J. Heat Mass Transfer* 41, pp.709 - 718.

[4] Qiong Zhang, Tom H.Jackson, Aydin Ungan (2000). Numerical modeling of microwave induced natural convection, *Int. J. Heat Mass Transfer* 43 (8), pp.2141 - 2154.

[5] Ratanadecho P., Aoki K. and Akahori M. (2002). 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, pp.449 - 472.

[6] Klinbun. W., Rattanadecho. P.and Pakdee, W. (2011). Microwave heating of saturated packed bed Using A Rectangular Waveguide (TE₁₀ Mode): influence of partial size, sample dimension, frequency and placement inside the

guide, *International journal of Heat and Mass Transfer*. 54, pp.1763-1774.

[7] Klinbun. W., Vafai. K. and Rattanadecho. P. (2012). 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 (2001). A two-energy equation model for conduction and convection in porous media, *Int. J. Heat Mass Transfer* 44, pp.4375 - 4379.

[9] M. Quintard (1998). Modelling local thermal non-equilibrium heat transfer in porous media, *int: Proceedings of the Eleventh International Heat Transfer Conference*, vol. 1, pp. 279 - 285.

[10] A. Amiri, K. Vafai (1994). Analysis of dispersion effects and non-thermal equilibrium, non-Darcian, variable porosity incompressible flow through porous media, *Int. J. Heat Mass Transfer* 37, pp.939 - 954.

[11] A.V. Kuznetsov, An analysis solution of heating a two-dimensional porous packed bed by a non-thermal equilibrium fluid flow, *Appl. Sci. Res.* 55, pp.83 - 93.

[12] K. Khanafer & K. Vafai (2002). Double-diffusive mixed convection in a lid-driven enclosure filled with a fluid-saturated porous medium, *International Journal of Computation and Methodology*, 42:5, pp.465 - 486.

[13] M. Karimi-Fard, M. C. Charrier-Mojtabi & K. Vafai (1997). Non-Darcian effects on double-diffusive convection within a porous medium, *International Journal of Computation and Methodology*, 31:8, pp.837 - 852.