

การศึกษากระบวนการทำความร้อนในชั้นวัสดุที่เป็นของเหลว โดยใช้คลื่นไมโครเวฟติดท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม (โหมด TE_{10}) ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบสามมิติ

A Study of Microwave Heating of Liquid Layer by Using a Rectangular Wave Guide (MODE TE_{10}) Through Three - Dimensional Simulation

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบสามมิติศึกษากระบวนการทำความร้อนในของเหลวที่ได้รับความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟโหมด TE_{10} ที่เคลื่อนที่ผ่านท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม ขนาดพื้นที่หน้าตัด 109.22 mm x 54.61 mm ความถี่ 2.45 GHz กำลังของไมโครเวฟ 300 W และ 1,000 W ที่อุณหภูมิทางเข้าท่อนำคลื่นเท่ากับ 56°C วัสดุตัวอย่างที่นำมาทดสอบ คือ ของเหลวที่เป็นน้ำและน้ำเกลือ (NaCl) ความเข้มข้น 5% และ 20% โดยน้ำหนักบรรจุในภาชนะมีขนาดพื้นที่หน้าตัดเท่าขนาดของท่อนำคลื่นความหนา 50 mm จากผลการคำนวณพบว่าหากเพิ่มอุณหภูมิจากเดิม 2 เท่า การกระจายของอุณหภูมิจะดีกว่าเดิมถึง 5 เท่า ส่วนการกระจายของอุณหภูมิภายในชั้นของเหลวที่เป็นน้ำที่ตำแหน่งต่าง ๆ มีค่าอุณหภูมิใกล้เคียงกันและอุณหภูมิภายในชั้นน้ำเพิ่มขึ้นตามเวลา แต่สถานะการกระจายของอุณหภูมิจะยังคงรักษารูปแบบเป็นโดม โดยสนามอุณหภูมิที่กำลังไฟฟ้า 1,000 W มีค่าความทะลุทะลวงสูงกว่าที่ 300 W ค่ากำลังการดูดซับและอัตราการทำความร้อนพบว่าน้ำเกลือมีค่าสูงกว่าชั้นน้ำ โดยเฉพาะที่บริเวณด้านบนของชั้นของเหลวมีการดูดซับพลังงานไมโครเวฟสูงเนื่องจากอิทธิพลของแรงตึงผิว (Surface Tension) แต่บริเวณด้านล่างของชั้นของเหลวโหมดของการนำความร้อนจะมีบทบาทแทน และแอมพลิจูดของคลื่นจะค่อนข้างต่ำมากที่ระยะความลึกมากกว่า 20 mm เป็นต้นไป (เมื่อวัดเทียบกับผิวบน)

Abstract

In this research the heating process of dielectric using microwave TE_{10} mode was investigated using 3D mathematic model. The microwave was emitted at 2.45 GHz, 300 W and 1,000 W, into rectangular wave guide, whose cross - sectional dimension is 109.22 mm x 54.61 mm, and inlet temperature was 56°C. The heating process was performed on 50 mm - depth water and Brine (NaCl) with concentration of 5%wt and 20%wt. The results showed that temperature distribution at dielectric material surface increased 5 times when inlet temperature was double. The temperature distribution in water layer, however, showed quite uniform profile and increased with time. With respect to penetration coefficient, 1,000 W power showed higher value. Regarding to absorption and heating rate, brine illustrated better properties due to the effect of surface tension.

Key words: Microwave heating, Rectangular wave guide, Liquid Layer

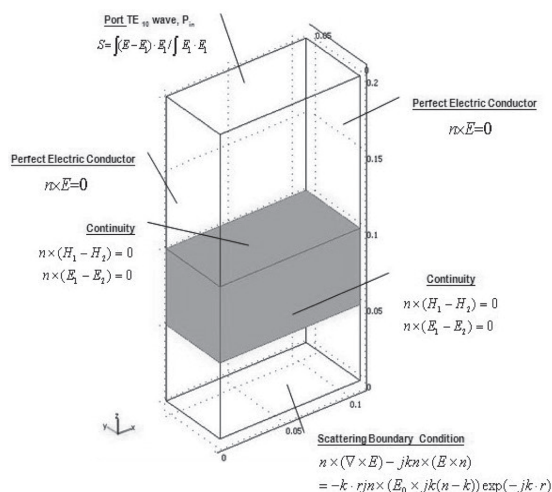
1. บทนำ

คลื่นไมโครเวฟถูกนำมาประยุกต์ใช้งานในหลายกระบวนการ เช่น กระบวนการให้ความร้อนและอบแห้งในอุตสาหกรรมอาหาร การอบแห้งถั่วลิสง การอบแห้งไม้ และการวัดคาบในซึ้ง เป็นต้น สำหรับในกระบวนการให้ความร้อน งานวิจัยทางด้านไมโครเวฟที่ผ่านมาส่วนใหญ่จะพิจารณาการให้ความร้อนในวัสดุของแข็งดังแสดงในงานวิจัยของ Ayappa, K.G., et al., 1991⁽¹⁾; Saltiel, C. and Datta, A., 1997⁽²⁾; Tada, S., et al., 1998⁽³⁾; Ratanadecho., et al., 2002⁽⁴⁾; Ratanadecho., et al., 2006⁽⁵⁾ มีงานวิจัยเพียงเล็กน้อยที่ศึกษาปัญหาการทำความร้อนในวัสดุในชั้นของเหลว อาทิ Ratanadecho., et al., 2002⁽⁶⁾ อันเนื่องมาจากข้อจำกัดเกี่ยวกับสมบัติไดอิเล็กตริกและโครงสร้างทางกายภาพของชั้นน้ำเอง⁽⁷⁾ งานวิจัยฉบับนี้เน้นศึกษากระบวนการทำความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟในของเหลวซึ่งเป็นวัสดุไดอิเล็กตริก (Dielectric) ในเรื่องที่เกี่ยวข้องอัตราการสะท้อนกลับของคลื่นไมโครเวฟ (Reflected Wave) การเปลี่ยนแปลงระดับกำลังของคลื่นไมโครเวฟ (Power) สมบัติการนำไฟฟ้า (Conductivity) และแรงตึงผิว (Surface Tension) ในชั้นของเหลวแต่ละชนิด โดยพิจารณาผลจากการพาความร้อน

2. แบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณ

คลื่นไมโครเวฟถูกปล่อยออกมาจากท่อนำคลื่นด้านบน ซึ่งต่อกับแหล่งกำเนิดคลื่น เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านท่อนำคลื่นจะผ่านชั้นของเหลวหนา 50 mm ก่อนผ่านออกไปทางด้านล่าง การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าใช้เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) ดังรูปที่ 1 คือ ด้านบนของท่อนำคลื่นกำหนดเป็นส่วนรับคลื่น (Port) มี

คลื่นไมโครเวฟ TE₁₀ Mode เข้ามาที่ 2.45 GHz กำลังไมโครเวฟ 300 และ 1,000 W ที่อุณหภูมิ 56°C บริเวณรอยต่อผิวสัมผัสระหว่างอากาศกับวัสดุไดอิเล็กตริกให้เป็นค่าขอบเขตของความต่อเนื่อง (Continuity) ด้านล่างเงื่อนไขขอบเขตเป็นการกระเจิงของคลื่น (Scattering Boundary Condition) ขอบเขตด้านอื่นกำหนดให้เป็นตัวนำสมบูรณ์ (Perfect Electric Conductor)



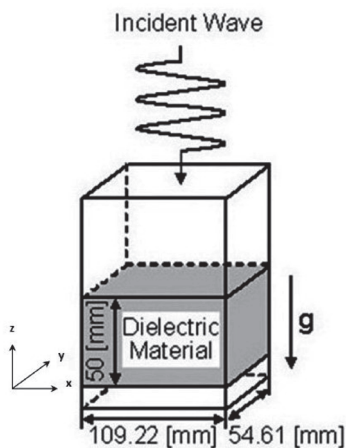
รูปที่ 1 แสดงเงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการวิเคราะห์

2.1 ท่อนำคลื่น

งานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมสำหรับกระบวนการทำความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ ที่ด้านบนของท่อปล่อยคลื่นไมโครเวฟที่ผลิตจากแมกนีตรอนเข้ามาในภาชนะบรรจุขนาด 0.10922 m x 0.05461 m x 0.25 m ไปตามแกน z⁽⁷⁾ ด้านล่างของท่อนำคลื่นจะติดตั้งอุปกรณ์เพื่อดูดซับคลื่นไมโครเวฟที่สะท้อนและผ่านวัสดุตัวอย่าง เพื่อป้องกันปัญหาคลื่นสะท้อนภายในระบบ ส่วนด้านอื่นๆ สมมติเป็นฉนวน (Insulate) ภายในท่อนำคลื่นก่อนใส่วัสดุไดอิเล็กตริกให้เป็นอากาศ

2.2 ชั้นของวัสดุไดอิเล็กตริก

วัสดุตัวอย่างที่นำมาทดสอบเป็นวัสดุไดอิเล็กตริกโดยใช้ชั้นของเหลวที่เป็นน้ำและน้ำเกลือ (NaCl) ที่ความหนา 50 mm ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงแบบจำลองทางกายภาพ (Physical Model) ของระบบที่ศึกษา

สำหรับงานวิจัยนี้ใช้น้ำและน้ำเกลือความเข้มข้นที่ 5% และ 20% โดยน้ำหนักเป็นวัสดุตัวอย่าง โดยสมบัติไดอิเล็กตริก เช่น ค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์หรือค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (Relative Dielectric Constant) และค่าสัมประสิทธิ์ลอสมแทนเจนท์ (Loss Tangent Coefficient) คุณลักษณะเฉพาะของวัสดุไดอิเล็กตริกแต่ละตัวโดยอาศัยข้อมูลจาก (Ratanadecho, et al., 2002) แสดงในตารางที่ 1 ดังนี้

ตารางที่ 1 สมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำและน้ำเกลือที่ใช้ในการคำนวณ ที่ 56°C

	Parameter	
	Relative Permeability (ϵ'_r)	Dielectric Loss Coefficient ($\tan \delta_p$)
water	68	10
NaCl 5%	52	2
NaCl 20%	22	0.07

3. สมการสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ในการคำนวณ

ปรากฏการณ์ในระนาบสามมิติเป็นระนาบการเปลี่ยนแปลงเชิงขั้ว (Polarization) พิจารณาทั้งการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้า (Electric Field, E) และสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field, H) ในโหมดไมโครเวฟฮีตติ้ง (Microwave Heating) ซึ่งเป็นคลื่นอิเล็กโตรแมกเนติก (Electromagnetic Wave; EM Wave) โดยคำนึงถึงการดูดซับพลังงานไมโครเวฟของอากาศภายในภาชนะผนังของท่อนำคลื่นเป็นตัวนำยิ่งยวด (Perfect Conductors) ไม่พิจารณาอิทธิพลของภาชนะบรรจุที่มีต่อสนามไฟฟ้า สมการพื้นฐานที่ใช้คือสมการแมกซ์เวลล์ (Maxwell's Equation) คำนวณได้จาก

$$Q = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon'_r (\tan \delta) E^2 \quad (1)$$

เมื่อ Q คือ แหล่งความร้อนภายในหรือค่ากำลังการดูดซับที่เกิดขึ้นภายในวัสดุ (Internal Heat Source; W/m^3), f คือ ความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ (Frequency of Incident Wave; Hz), ϵ_0 คือ ค่าเปอร์มิตติวิตีของอากาศ (Permittivity of Free Space) มีค่าเท่ากับ 8.8542×10^{-12} F/m, ϵ'_r คือ ค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ (Relative Permittivity),

$\tan \delta$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ไดอิเล็กตริกสูญเสียแทนเจนต์ (Dielectric Loss Tangent), E คือ สนามไฟฟ้า (Electric Field; V/m) สำหรับวัสดุที่ได้รับคลื่นระนาบพบว่าประมาณ 63% ของกำลังถูกดูดซับที่สลายตัวภายในระยะความลึกเชิงกำลัง และ 86% ภายในระยะความลึกเชิงผิวด้านวนจาก

$$D_p = \frac{1}{2\pi f \sqrt{\epsilon_r' \sqrt{1 + (\tan \delta)^2} - 1}} \quad (2)$$

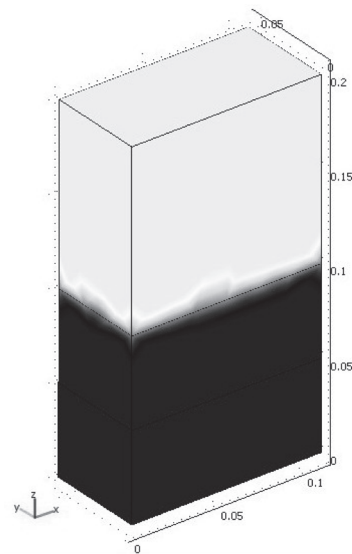
เมื่อคือ D_p คือ ค่าความลึกในการทะลุทะลวงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Penetration Depth; m), ν คือ ความหนืดจลน์ (Kinematic Viscosity; m^2/s) ซึ่งจากความสัมพันธ์ของเงื่อนไขขอบเขตตามรูปที่ 1 ภาชนะบรรจุตัวอย่างเป็นวัสดุแข็งเกร็ง จึงกำหนดให้ที่ผิวสัมผัสระหว่างชั้นของเหลวและผนังของภาชนะใช้เงื่อนไขขอบเขตของการไม่ลื่นไถล (Non Slip Condition) และถือว่าอิทธิพลของแรงตึงผิว (Surface Tension) หรือเรียกว่าการไหลแบบมาราโกนี (Marangoni flow) มีผลต่อการเคลื่อนตัวของของไหลที่บริเวณนี้ (Ratanadecho et al., 2002)⁽⁷⁾

ในการแก้ปัญหาหระเบียบวิธีเชิงตัวเลขสำหรับกระบวนการทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ไทม์โดเมน (FDTD) ในการหาคำตอบเพื่ออธิบายลักษณะการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและค่ากำลังการดูดซับคลื่นไมโครเวฟที่ตำแหน่งและเวลาต่างๆ สมการการถ่ายเทความร้อนและสมการการไหลเป็นระบบสมการไม่เป็นเชิงเส้น (Non linear) ถูกนำมาหาคำตอบด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขผ่านระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม (FVM) ซึ่งอยู่บนพื้นฐานซิมเปิ้ล (Simple) อัลกอริทึม ซึ่งถูกพัฒนาโดย Patankar., 1980⁽⁸⁾

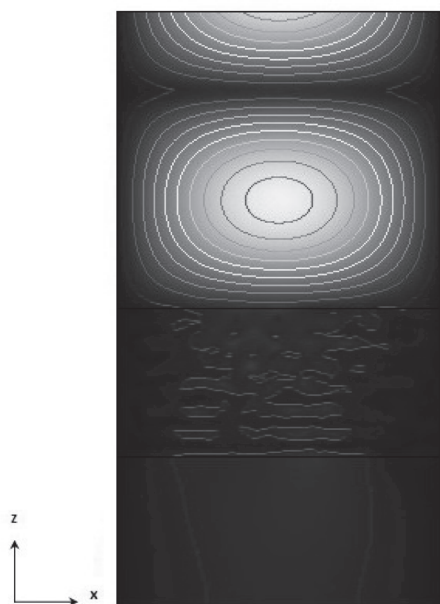
4. ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผล

4.1 การวิเคราะห์ปัญหาโดยใช้แบบจำลองสามมิติ

ผลจากการทดลองที่ได้จากกระบวนการทำความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟในชั้นของน้ำอ้างอิงจาก Cha-um et al.,⁽⁹⁾ ซึ่งเดิมศึกษาที่อุณหภูมิ 28°C ในงานวิจัยนี้จึงศึกษาที่อุณหภูมิมากขึ้นจากเดิม 1 เท่า (56°C) เนื่องจากทราบว่าอุณหภูมิเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้น⁽⁷⁾ ดังรูปที่ 3 ศึกษาการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมในชั้นของเหลวโดยใช้แบบจำลองสามมิติ



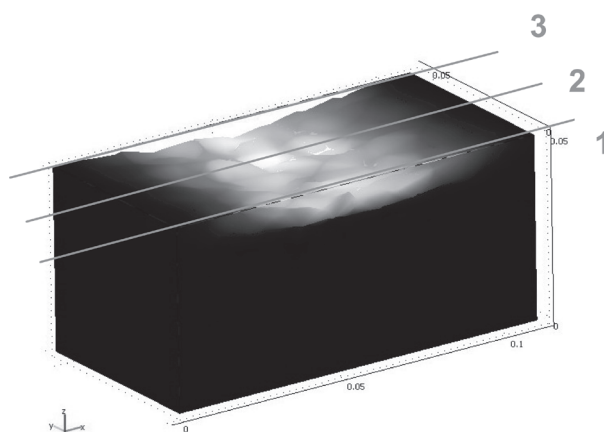
รูปที่ 3 แสดงการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าในชั้นของเหลวรูปทรงสี่เหลี่ยมแบบสามมิติ



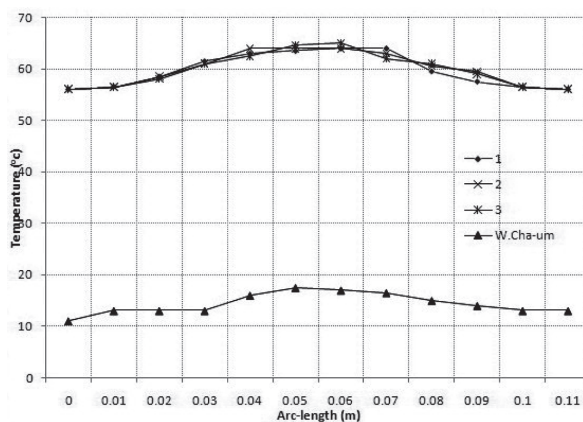
รูปที่ 4 แสดงการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าในชั้นของเหลวรูปทรงสี่เหลี่ยมแบบสองมิติ

จากรูปที่ 3 และ 4 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิและกำลังไมโครเวฟเคลื่อนที่ผ่านควิวด์มาจากด้านบน ซึ่งเป็นอากาศมีค่าเปอร์มิตติวิตี (Permittivity) ต่ำ มายังชั้นของเหลวที่มีค่าเปอร์มิตติวิตีสูงกว่า (หรือไดอิเล็กตริกอสแฟกเตอร์สูง) คลื่นส่วนใหญ่จะสะท้อนกลับจากผิวหน้าของชั้นของเหลว ทำให้เกิดการแทรกสอดกับคลื่นที่เดินเข้ามาบริเวณผิวหน้าของชั้นของเหลวจึงเกิดปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ของคลื่นนิ่ง สังเกตแอมพลิจูดของคลื่นพบว่าด้านบนซึ่งเป็นอากาศแอมพลิจูดของคลื่นจะมีขนาดใหญ่และจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านชั้นของเหลว แต่หากท่อนำคลื่นไม่มีชั้นของเหลวพบว่าการกระจายของสนามไฟฟ้าในท่อว่างเปล่าจะมีแอมพลิจูดที่คงที่ เนื่องจากค่าไดอิเล็กตริกของท่อว่างเปล่ามีค่าเท่ากับค่าไดอิเล็กตริกของอากาศ ต่อมาจึงศึกษาอุณหภูมิภายในเฉพาะชั้นของเหลวที่

56°C ที่ตำแหน่งต่างๆ ดังรูปที่ 5 เปรียบเทียบกับที่ 28°C ซึ่งศึกษาไว้ในแบบจำลองสองมิติ⁽⁹⁾ โดยศึกษาที่กำลังไมโครเวฟ 300 W ความถี่ 2.45 GHz ที่เวลา 60 วินาที ดังรูปที่ 6



รูปที่ 5 แสดงภาพสามมิติการกระจายของอุณหภูมิภายในเฉพาะชั้นของเหลว (น้ำ) ที่ 56°C ที่ตำแหน่งต่างๆ



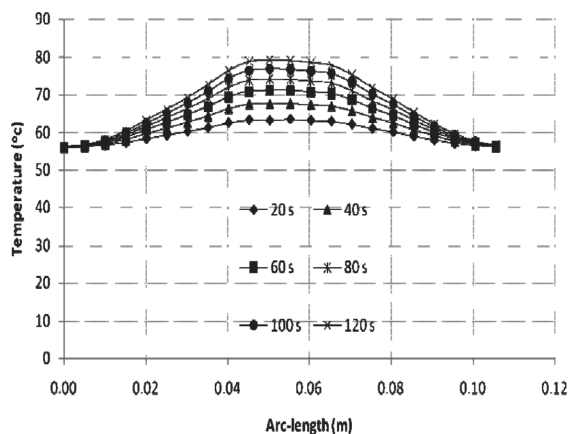
รูปที่ 6 แสดงอุณหภูมิภายในชั้นของเหลว (น้ำ) ที่ 56°C ตำแหน่งต่างๆ เปรียบเทียบข้อมูลอ้างอิงจาก Cha-um et al.,⁽⁹⁾

รูปที่ 6 แสดงการกระจายของอุณหภูมิภายในเฉพาะชั้นของเหลว (น้ำ) ที่ 56°C ที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวแกน x โดยตำแหน่งที่ 1

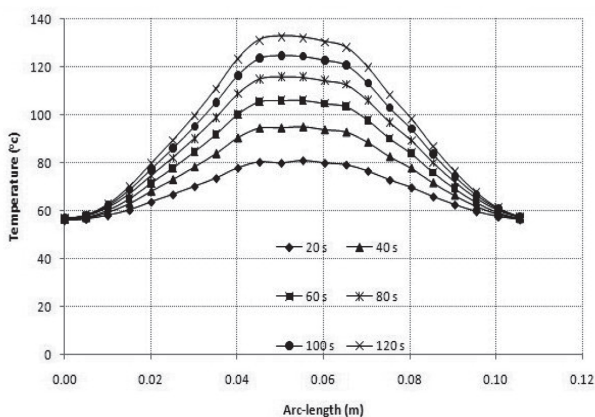
คือ ตำแหน่งด้านหน้าของท่อนำคลื่น ตำแหน่งที่ 2 คือ ตำแหน่งตรงกลางของท่อนำคลื่น และ ตำแหน่งที่ 3 คือ ตำแหน่งด้านหลังของท่อนำคลื่น เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับแกนนอนซึ่งเป็นระยะทางตามแนวแกนนอนและแกนตั้งเป็นอุณหภูมิในหน่วย $^{\circ}\text{C}$ พบว่า ตำแหน่งที่ 1 2 และ 3 มีค่าอุณหภูมิใกล้เคียงกันที่ตำแหน่งต่างๆ แสดงว่าสนามไฟฟ้าในโหมด TE_{10} มีการเปลี่ยนแปลงของสนามในทิศทางแกน y น้อยหรืออาจไม่พิจารณาได้ โดยสามารถพิจารณาเป็นแบบจำลองสองมิติในระนาบ $x-z$ ภายในท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมได้ แต่เมื่อพิจารณาที่การกระจายของอุณหภูมิ 56°C (ตำแหน่ง 1 2 และ 3) เปรียบเทียบกับการกระจายของอุณหภูมิ 28°C (Cha-um et al.⁽⁹⁾) ทำให้ทราบว่าอุณหภูมิที่การทำงานที่เวลาเท่ากันมีผลต่อการกระจายของชั้นของเหลว กล่าวคือที่อุณหภูมิที่สูงกว่าการกระจายตัวของชั้นของเหลวดีกว่าที่อุณหภูมิต่ำและเมื่อพิจารณาการกระจายตัวของสนามอุณหภูมิที่บริเวณกึ่งกลางชั้นน้ำพบว่าค่อนข้างสม่ำเสมอเนื่องจากอิทธิพลของแรงตึงผิว (Surface Tension)

4.2 การวิเคราะห์ปัญหาอุณหภูมิของชั้นน้ำที่เวลาและกำลังไมโครเวฟที่แตกต่างกัน

การศึกษากการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในชั้นน้ำทุก 20 วินาที ตามระยะต่างๆ ในแนวนอน (แกน x) ที่ 56°C กำลังไมโครเวฟเท่ากันที่ 300 W และ 1,000 W ความถี่ 2.45 GHz โหมด TE_{10} ดังรูปที่ 7 และ 8



รูปที่ 7 แสดงการกระจายตัวของสนามอุณหภูมิที่เวลาต่างกันใน เซลเซียส กำลังไมโครเวฟเท่ากันที่ 300 W



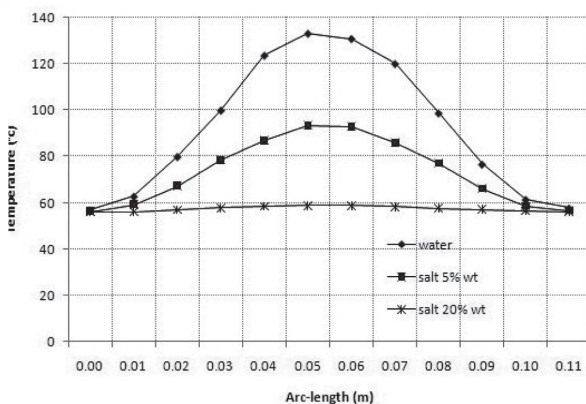
รูปที่ 8 แสดงการกระจายตัวของสนามอุณหภูมิที่เวลาต่างกันใน เซลเซียส กำลังไมโครเวฟเท่ากันที่ 1,000 W

จากรูปที่ 7 แสดงการกระจายอุณหภูมิภายในชั้นน้ำที่เวลาแตกต่างกันทุกๆ 20 วินาที ไปจนถึง 120 วินาที จากผลการศึกษาพบว่า อุณหภูมิสูงสุดที่บริเวณกึ่งกลางของชั้นของเหลว และค่อยๆ ลดลงที่บริเวณผนังของชั้นของเหลว เนื่องจากอิทธิพลของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมด TE_{10} จากรูปแสดงให้เห็นว่าการกระจายของ

อุณหภูมิเพิ่มขึ้นตามเวลา รูปร่างการกระจายของอุณหภูมิยังรักษารูปแบบเป็นโดมตลอดเวลา เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 8 ซึ่งให้กำลังไมโครเวฟ 300 W กับรูปที่ 8 ซึ่งให้กำลังไมโครเวฟ 1,000 W พบว่าสนามอุณหภูมิ 1,000 W มีค่าสูงกว่า 300 W เนื่องจากอิทธิพลของค่าความทะลุทะลวงที่คลื่นกำลังไมโครเวฟมาก สามารถแทรกเข้าไปภายในชั้นของเหลวได้มากกว่ากำลังไมโครเวฟที่ต่ำนั่นเอง

4.3 การวิเคราะห์ปัญหาอุณหภูมิในชั้นเหลวที่เป็นน้ำเปรียบเทียบกับชั้นของเหลวที่เป็นน้ำเกลือความเข้มข้น 5% และ 20% โดยน้ำหนัก

ศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ 1,000 W ความถี่ 2.45 GHz โหมด TE₁₀ เวลา 120 วินาที ซึ่งน้ำเกลือความเข้มข้น 5% โดยน้ำหนักจัดเป็นน้ำเกลือที่มีความเข้มข้นปานกลาง ส่วนน้ำเกลือที่มีความเข้มข้น 20% โดยน้ำหนักจัดเป็นน้ำเกลือที่มีความเข้มข้นมาก ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในชั้นน้ำเปรียบเทียบกับชั้นน้ำเกลือที่เวลา 120 วินาที

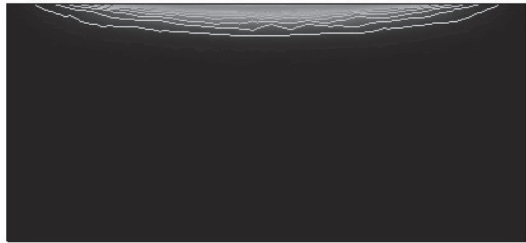
กรณีชั้นน้ำเกลือ (ความเข้มข้น 5% และ 20% โดยน้ำหนัก) การกระจายตัวของอุณหภูมิบริเวณโซนตรงกลางค่อนข้างสม่ำเสมอเพราะอิทธิพลของความตึงผิวมีค่าสูง อย่างไรก็ตามสำหรับน้ำเกลือที่มีค่าการนำไฟฟ้าสูง (ความเข้มข้น 20%) อิทธิพลของค่าความลึกทะลุทะลวงซึ่งมีค่าน้อยเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดการสะท้อนกลับของคลื่นที่บริเวณผิวหน้าในระหว่างกระบวนการทำความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟมีค่ามาก ซึ่งใช้อธิบายแอมพลิจูดคลื่นไมโครเวฟในชั้นน้ำเกลือที่มีค่าการนำไฟฟ้าสูง (น้ำเกลือความเข้มข้น 20%) จึงมีขนาดที่เล็กกว่าแอมพลิจูดของชั้นน้ำ น้ำเกลือที่มีค่าการนำไฟฟ้าต่ำกว่า (น้ำเกลือความเข้มข้น 5%) สำหรับในกรณีนี้ (หรือน้ำเกลือความเข้มข้น 0%)

4.4 การวิเคราะห์ปัญหาการกระจายกำลังการดูดซับในชั้นเหลวที่เป็นน้ำเปรียบเทียบกับชั้นของเหลวที่เป็นน้ำเกลือความเข้มข้น 5% และ 20% โดยน้ำหนัก

ศึกษาการกระจายตัวของกำลังการดูดซับ (Microwave Power Absorption) กำลังไมโครเวฟ 1,000 W ความถี่ 2.45 GHz โหมด TE₁₀ เวลา 120 วินาที ของชั้นน้ำ น้ำเกลือความเข้มข้น 5% และ 20% โดยน้ำหนัก ดังรูปที่ 10



ก) การกระจายตัวกำลังการดูดซับในชั้นน้ำ



ข) การกระจายตัวกำลังการดูดซับในชั้นน้ำเกลือ ความเข้มข้น 5% โดยน้ำหนัก

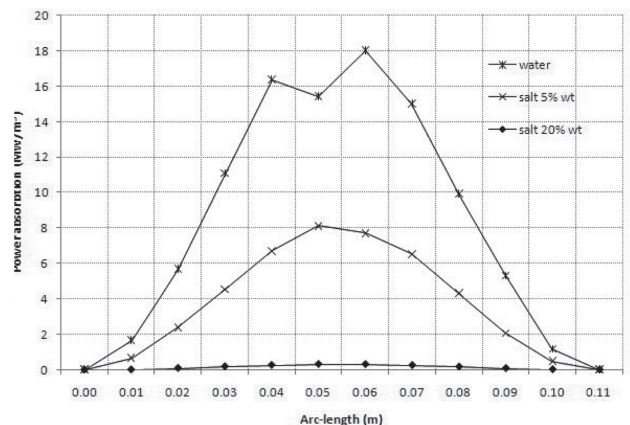


ค) การกระจายตัวกำลังการดูดซับในชั้นน้ำเกลือ ความเข้มข้น 20% โดยน้ำหนัก

รูปที่ 10 แสดงการกระจายตัวของกำลังการดูดซับที่กำลังไมโครเวฟ 1,000 W ความถี่ 2.45 GHz โหมด TE_{10} เวลา 120 วินาที ในชั้นของเหลว

รูปที่ 10 ก) แสดงการกระจายตัวกำลังการดูดซับในชั้นน้ำเปรียบเทียบการกระจายตัวกำลังการดูดซับในชั้นน้ำเกลือที่ความเข้มข้น 5% ในรูปที่ 10 ข) และความเข้มข้น 20% โดยน้ำหนักในรูปที่ 10 ค) จากรูปแสดงให้เห็นว่าค่ากำลังการดูดซับของน้ำเกลือมีค่าสูงกว่าชั้นน้ำ โดยเฉพาะที่

บริเวณด้านบนของชั้นของไหลที่มีการดูดซับพลังงานไมโครเวฟสูงทำให้เกิดแรงตึงผิว (Surface Tension) ที่สูงหรือมีอิทธิพลของการไหลแบบมารานโกนีที่เด่นชัด ส่งผลทำให้พฤติกรรมของโหมดการถ่ายเทความร้อนโดยการพา (Convection) เป็นกลไกสำคัญของกระบวนการถ่ายเทความร้อนดังกล่าวแสดงในรูปที่ 10 อย่างไรก็ตามที่พื้นที่บริเวณด้านล่างของชั้นของเหลว อิทธิพลของการพาความร้อนจะมีบทบาทน้อยมากแต่อิทธิพลของการถ่ายเทความร้อนในโหมดของการนำความร้อนจะมีบทบาทแทน โดยแอมพลิจูดของคลื่นจะค่อนข้างต่ำมากที่ระยะความลึกมากกว่า 20 mm เป็นต้นไป (เมื่อวัดเทียบกับผิวบน)



รูปที่ 11 แสดงการเปรียบเทียบกำลังการดูดซับที่กำลังไมโครเวฟ 1,000 W ความถี่ 2.45 GHz โหมด TE_{10} เวลา 120 วินาที ในชั้นของเหลว

จากรูปที่ 11 การกระจายกำลังการดูดซับไมโครเวฟภายในชั้นของเหลวในระนาบ $x-z$ ที่บริเวณผิวด้านบนของท่อนำคลื่นมีลักษณะการกระจายตัวและพฤติกรรมต่างๆ คล้ายกับอุณหภูมิเมื่อศึกษารูปที่ 10 พบว่าการกระจายตัวของ

กำลังการดูดซับในชั้นของเหลวที่เป็นน้ำให้ความยาวคลื่น (Wave Length) ที่ยาว และมีความลึกในการทะลุทะลวงสูงเมื่อเทียบกับชั้นน้ำเกลือ ทั้งนี้เป็นเพราะค่าการนำไฟฟ้าของน้ำเกลือที่มีสูงกว่าน้ำทำให้น้ำเกลือมีค่าไดอิเล็กตริกลอสมแฟคเตอร์ (Dielectric Loss factor) สูงกว่า ดังนั้นคลื่นไมโครเวฟส่วนใหญ่จึงถูกดูดซับที่บริเวณผิวทำให้ชั้นของน้ำเกลือเห็นเป็นเพียงชั้นบางๆ เท่านั้น

5. สรุปผลการศึกษา

5.1 ในกระบวนการทำความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟภายในท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมในชั้นของเหลวที่เป็นน้ำ หากเพิ่มอุณหภูมิจากเดิม 2 เท่า พบว่าการกระจายของอุณหภูมิดีกว่าเดิมถึง 5 เท่า

5.2 การกระจายของอุณหภูมิภายในชั้นของเหลวที่เป็นน้ำ ที่ตำแหน่งต่างๆ พบว่ามีค่าอุณหภูมิใกล้เคียงกัน แสดงว่าในโหมด TE_{10} มีการเปลี่ยนแปลงของสนามในทิศทางแกน y น้อยหรืออาจไม่พิจารณาได้ จึงสามารถพิจารณาเป็นแบบจำลองสองมิติบนระนาบ $x - z$ ภายในท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมได้

5.3 สนามอุณหภูมิที่กำลังไฟฟ้า 1,000 W มีค่าสูงกว่า 300 W เนื่องจากอิทธิพลของค่าความทะลุทะลวงที่กำลังคลื่นไมโครเวฟมาก

5.4 ชั้นน้ำเกลือความเข้มข้น 5% และ 20% โดยน้ำหนักการกระจายตัวของอุณหภูมิบริเวณโซนตรงกลางค่อนข้างสม่ำเสมอเพราะอิทธิพลของความตึงผิว (Surface Tension) มีค่าสูง ทำให้อิทธิพลของค่าความลึกทะลุทะลวงซึ่งมีค่าน้อยกว่าในชั้นน้ำ

5.5 ค่ากำลังการดูดซับ (Microwave Power Absorption) ของน้ำเกลือมีค่าสูงกว่าชั้นน้ำ โดยเฉพาะที่บริเวณด้านบนของชั้นของเหลวมีการดูดซับพลังงานไมโครเวฟสูงทำให้เกิดแรงตึงผิว (Surface Tension) ที่สูง และแอมพลิจูดของคลื่นจะค่อนข้างต่ำมากที่ระยะความลึกมากกว่า 20 mm เป็นต้นไป (เมื่อวัดเทียบกับผิวบน)

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณหน่วยวิจัยเพื่อการใช้ประโยชน์จากไมโครเวฟในงานวิศวกรรม (R.C.M.E.) ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี ที่เอื้อเพื่ออุปกรณ์และสถานที่ทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- (1) Ayappa, K.G., et al. "Microwave Heating: An Evaluation of Power." *Chemical Engineering Science J.*, Vol. 46, pp. 1005 - 1016, 1991.
- (2) Saltiel, C. and Datta, A., "Heat and Mass Transfer in Microwave Processing." *Adv. Heat Transfer* Vol. 30, pp. 1 - 94, 1997.
- (3) Tada, S., et al. "Numerical Analysis of Electromagnetic Wave in Partially Loaded Microwave Applicator." *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 41, pp.709 - 718. 1998.
- (4) Ratanadecho, P., Aoki, K. and Akahori, M. "The Characteristics of Microwave Melting of Frozen Packed Bed Using a Rectangular Waveguide." *IEEE Transaction of Microwave Theory and Techniques*, Vol. 50(6), pp. 1495 - 1502: 1, 2002.
- (5) Rattanadecho, P., Duangduen, A., Vongpradubchai, S. "Drying of a Slip Casting for Tableware Product Using Microwave - Continuous Belt Furnace." *Drying Technology An International J.*, Vol. 26, pp. 589 - 594, 2006.
- (6) Ratanadecho P., Aoki K., 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 Modeling*, Vol. 26, pp.449 - 472, 2002.
- (7) ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช. 2551. พื้นฐานการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- (8) Patankar S.V. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. Hemisphere, New York, 1980.
- (9) W. Cha-um, P. Ratanadecho, W. Pakdee. Experimental analysis of microwave heating of dielectric materials using rectangular wave guide (MODE: TE_{10}) (Case study: Water layer and saturated porous medium) *Experimental Thermal and Fluid Science* 33 (2009) 472 - 481.