CST027

การใช้เทคนิควิธีทรานไฟไนต์อินเทอร์โพเลชัน ร่วมกับวิธีพีดีอีสำหรับการหา คำตอบของปัญหาขอบเขตเคลื่อนที่รวมผลของการกำเนิดความร้อนภายใน เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟ

A Combined Transfinite Interpolation Technique and PDE Mapping Method for Solving Moving Boundary Problem Included Internal Heat Generation by Microwave

ผดุงศักดิ์ รัตนเดโซ^{*} ชยานนท์ เสริฐธิกุล หน่วยวิจัยเพื่อการใช้ประโยชน์จากไมโครเวฟในงานวิศวกรรม (RCME) ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต 99 หมู่ 18 ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง ปทุมธานี 12120 โทร 0-2564-3001-9 ^{*}อีเมล์ <u>ratphadu@engr.tu.ac.th</u> ^{*} (ผู้รับผิดชอบบทความ)

Phadungsak Ratanadecho^{*} Chayanon Serttikul Resource Center of Microwave Utilizations in Engineering (RCME) Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University, Rungsit Campus, 99 Mu 18, Klong Luang, Pathumthani 12120, Thailand, Tel: 0-2564-3001-9, ^{*}E-mail: <u>ratphadu@engr.tu.ac.th</u> ^{*} (Corresponding Author)

บทคัดย่อ

สำหรับเนื้อหาในรายงานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ ศึกษาและนำเสนอระเบียบวิธีเชิงตัวเลขรูปแบบใหม่โดยการ ใช้วิธีทรานไฟในต์อินเทอร์โพเลชัน (Transfinite Interpolation) ร่วมกับวิธีพีดีอีหรือการแปลงพิกัดแกน (PDE Mapping Method) เพื่อแก้ปัญหาขอบเขตเคลื่อนที่ที่รวมผล ของการกำเนิดความร้อนภายในอันเนื่องมาจากพลังงาน ไมโครเวฟ ซึ่งแบบจำลองที่ทำการศึกษานี้อยู่บนพื้นฐานของ สมการการส่งถ่ายความร้อนและ สมการสเดฟาน ร่วมกับ สมการแม็กซ์เวล (Maxwell's equation) สำหรับปัญหาการ ทำละลาย ซึ่งจะกำหนดให้ขณะเริ่มต้นนั้นชิ้นวัสดุทดสอบจะ แบ่งออกเป็นสองบริเวณ คือ บริเวณโซนของแข็งและบริเวณ โซนของเหลว ส่วนตัวแปรที่สำคัญที่ศึกษาครั้งนี้ได้แก่ การ กระจายตัวของอุณหภูมิ การดูดซับของพลังงานไมโครเวฟ และตำแหน่งของผิวละลายที่เกิดการเคลื่อนที่ จากผล การศึกษาที่ได้พบว่าทิศทางและอัตราการละลายตัวของผิว ละลาย(Moving boundary) นั้นขึ้นอยู่กับลักษณะการเรียงตัว ของโครงสร้างของชิ้นวัสดุทดสอบอันเนื่องมาจากความ แตกต่างกันของค่าคุณสมบัติทางไดอิเล็คตริก (Dielectric Properties) โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการทำนายจะถูกนำมา เปรียบเทียบกับผลของการทดลองจริง

Abstract

The objective of this study is to present the novel numerical technique, i.e. a combined Transfinite Interpolation and PDE Mapping Method for solving moving boundary problem included internal heat generation term due to microwave energy. The basic equations are based on heat transfer equation and Stefan equation together with Maxwell equation for solving melting problem with microwave energy. The sample studied, it was performed for the two difference layer, which consist of frozen and unfrozen layer. This

ME NETT 20th หน้าที่ 502 CST027

CST027

paper focus on the prediction of the temperature field , as well as the microwave energy absorbed, and the melting front within the layer packed bed. Based on the combined model of Maxwell and heat transport equation The results show that the direction of melting against the incident microwave strongly depends on the structural layered packed beds because of the difference in the dielectric properties between water and ice. The accuracy of predicted results are compared with experimental results.

1. บทนำ

สำหรับในการศึกษาถึงกระบวนการทำละลายในวัสดุ เปลี่ยนแปลงเฟส โดยใช้พลังงานไมโครเวฟนั้นได้ถูกศึกษา โดย Pangrle et al. [1] ในรูปแบบของระบบหนึ่งมิติ ซึ่งได้ถูก นำมาประยุกต์ใช้กับกระบวนการทำละลาย ด้วยพลังงาน ไมโครเวฟในทรงกระบอก ภายหลัง Zeng et al. [2] ได้ทำ การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในระบบสองมิติเพื่อ ทำนายปรากฏการณ์การทำละลายด้วยพลังงานไมโครเวฟ ภายในทรงกระบอก และได้นำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้ จากผลของการทดลอง จากนั้น Basak et al. [3] ได้ ทำการศึกษากระบวนการทำละลายด้วยพลังงานไมโครเวฟ ด้วยการใช้วิธี Fixed-Grid-Based Effective Heat-Capacity method คู่กับสมการแม็กซ์เวล (Maxwell's Equation) นอกจากนั้นยังได้มีการศึกษาที่เกี่ยวกับการประยุกต์ใช้ พลังงานไมโครเวฟในกระบวนการทางความร้อนปรากฏขึ้น อีกในภายต่อมา เช่น Torres et al. [4] , Ratanadecho et al. [5] , Feher et al. [6] , Aoki et al. [7] และ Ratanadecho et al. [8]

เมื่อพิจารณากระบวนการทำละลายด้วยพลังงาน ไมโครเวฟนั้น ก่อนหน้านี้โดยส่วนมากมักจะใช้กฎของลอม เบิร์ก (Lambert's law) ได้พิจารณาการดูดซับคลื่นไมโครเวฟ เข้าสู่ซิ้นวัสดุทดสอบโดยอยู่ในเทอมของเอกโพเนนเซียล อย่างไรก็ตามวิธีนี้มักจะใช้ได้กับสมมุติฐานที่ใช้กับซิ้นวัสดุ ทดสอบที่มีขนาดใหญ่มาก ส่วนในชิ้นวัสดุทดสอบที่มีขนาด เล็กนั้น การดูดซับพลังงานของคลื่นไมโครเวฟของชิ้นวัสดุ ทดสอบนั้นมีลักษณะสั่นพ้องซึ่งต้องคำนวณเชิงตัวเลข พิจารณาหาคำตอบจากสมการของแม็กซ์เวล [8] แบบ สมบูรณ์เท่านั้น

โดยทั่วไปในกระบวนการทำละลายใดๆเพื่อให้เกิดการ เคลื่อนที่ของผิวละลายในชิ้นวัสดุที่ถูกทำให้แข็งตัวนั้นเป็น ปรากฏการณ์ที่ถือว่าซับซ้อนมาก ในอดีตตำแหน่งของผิว ละลายในชิ้นวัสดุทดสอบมักจะได้จากการประมาณค่าใน ระบบหนึ่งมิติ โดยที่ยังไม่มีการศึกษาในรูปแบบของ กระบวนการทำละลายที่เกิดจากการกำเนิดความร้อนภายใน อย่างเช่นการดูดซับพลังงานของคลื่นไมโครเวฟโดยใช้ระบบ ของพิกัดที่เป็นเส้นโค้งใดๆ สำหรับการคำนวณหาตำแหน่ง ของผิวละลาย

ในส่วนของรายงานวิจัยฉบับนี้จะทำการประมวลผลของ การคำนวนจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นใน ระบบสองมิติ ประกอบกับอาศัยหลักการทางนิวเมอริคัลซึ่งอยู่ บนพื้นฐานของเทคนิควิธีทรานไฟไนต์อินเทอร์โพเลชัน และ เทคนิควิธีพีดีอีหรือการแปลงพิกัดแกน ซึ่งถือเป็นวิธีการใหม่ ในการรวมเอาสองวิธีนี้เข้าด้วยกัน โดยที่รายละเอียดของข้อดี ในการรวมกันของทั้งสองวิธีนี้จะกล่าวถึงในหัวข้อลำดับต่อไป ซึ่งผลที่ได้จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากผลการ ทดลอง ซึ่งเป็นการทดลองโดยใช้คลื่นไมโครเวฟในโหมด TE₁₀ ที่ความถี่ 2.45 GHz ซึ่งในที่นี้ จะไม่คำนึงถึงการ เปลี่ยนแปลงปริมาตรเนื่องจากการทำละลาย และอิทธิพลของ การพาความร้อนแบบธรรมชาดิในโซนของเหลว

2. แบบจำลองทางกายภาพ





สำหรับรูปแบบจำลองทางกายภาพของกระบวนการทำ ละลายในระบบ 2 มิติ นั้นได้แสดงให้เห็นในรูปที่ 1 โดยที่ใน แบบจำลองนี้จะพิจารณากระบวนการทำละลายของวัสดุ เปลี่ยนแปลงเฟสซึ่งคือน้ำที่แข็งตัวอยู่ในวัสดุพรุน ที่อยู่ใน กล่องสี่เหลี่ยมที่มีขนาดของมิติ (กว้าง*ยาว) เท่ากับ 50×110 ตารางมิลลิเมตร โดยที่จะพิจารณาในส่วนผลของ การนำความร้อนอย่างเดียวเท่านั้น เมื่อพิจารณาถึงเงื่อนไข ขอบเขตจะกำหนดให้ระบบมีฉนวนกันความร้อนโดยรอบ ียกเว้นส่วนของขอบด้านบน (z₁) ของชิ้นวัสดุทดสอบ ซึ่งเป็นตำแหน่งที่จะกำหนดให้เป็นบริเวณที่ได้รับคลื่น ไมโครเวฟที่ปล่อยออกมาจากแมกนีตรอนและส่งผ่านสู่ท่อ ้รูปทรงสี่เหลี่ยมจากทางด้านซ้ายมือ โดยที่สมมุติฐานที่ใช้กับ แบบจำลองทางกายภาพนี้จะกล่าวในหัวข้อแบบจำลองทาง คณิตศาสตร์ ซึ่งแบ่งเป็นส่วนของการวิเคราะห์การเคลื่อนตัว ของคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและในส่วนของการนำความ ร้อนขณะมีการละลายตัวเกิดขึ้น

โดยในขณะเริ่มต้นก่อนที่จะปล่อยคลื่นไมโครเวฟเข้าไป ในชิ้นวัสดุทดสอบนั้นลักษณะของชิ้นวัสดุทดสอบจะแบ่ง ออกเป็นสองบริเวณ คือบริเวณโซนของเหลว (น้ำและอนุภาค ของแข็ง) และบริเวณโซนของแข็ง (น้ำแข็งและอนุภาค ของแข็ง) ซึ่งในที่นี้จะทำการแบ่งการเรียงตัวของชั้นวัสดุทั้ง

ME NETT 20th | หน้าที่ 503 | CST027

CST027

สองออกเป็นสองกรณี ดังนี้ ในกรณีแรก กำหนดให้บริเวณ โซนของเหลวอยู่ด้านบนบริเวณโซนของแข็ง ส่วนในกรณีที่ สองจะกำหนดให้บริเวณโซนของแข็งอยู่บนบริเวณโซน ของเหลว ซึ่งขณะเริ่มต้นกำหนดให้โซนของเหลวและโซน ของแข็งมีอุณหภูมิเดียวกันเท่ากับ 0 องศาเซลเซียส

หลังจากนั้นระบบจะเริ่มเข้าสู่กระบวนการทำละลายเมื่อ ถูกกระตุ้นโดยการปล่อยคลื่นไมโครเวฟเข้าไปในระบบ ณ บริเวณด้านบนของชิ้นวัสดุทดสอบ โดยสิ่งที่คาดหวังก็คือ ลำดับการจัดเรียงตัวของโซนของเหลวและของแข็งที่แตกต่าง กันจะมีผลต่ออัตราการทำละลายของน้ำแข็งที่ต่างกัน ซึ่ง ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิ และรูปทรงของผิว ละลาย นั้นจะสามารถหาได้จากการแก้ปัญหาจากสมการ แมกซ์เวล (Maxwell's equation), สมการส่งถ่ายความร้อน (Heat equation) และสมการสเตฟาน (Stefan equation) *(ส่วนหนึ่งของงานวิจัยชิ้นนี้เคยตีพิมพ์ในวารสารนานาชาติ P.Ratanadecho [14])

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในส่วนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับ กระบวนการทำละลายในวัสดุเปลี่ยนแปลงเฟส (น้ำที่แข็งตัว อยู่ในวัสดุพรุน) โดยใช้พลังงานไมโครเวฟนั้นจะแบ่งการ วิเคราะห์ออกเป็นสองส่วน คือ ในส่วนของการวิเคราะห์การ เคลื่อนตัวสำหรับสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และในส่วนของการ วิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน ดังนี้

 3.1 การวิเคราะห์รูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ สนามแม่เหล็กไฟฟ้า

3.1.1 สมมุติฐาน

- ไม่พิจารณาถึงการดูดซับพลังงานไมโครเวฟของ อากาศภายในท่อนำคลื่น รูปทรงสี่เหลี่ยม
- กำหนดให้ผนังของท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม เป็นวัสดุตัวนำที่สมบูรณ์ (สะท้อนคลื่นได้ดี)
- สนามแม่เหล็กไฟฟ้าไม่มีผลต่อกระบวนการกำเนิด ความร้อน

 3.1.2 สมการพื้นฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ สนามแม่เหล็กไฟฟ้านั้นจะอยู่บนพื้นฐานของสมการ แม็กซ์เวลสำหรับคลื่นไมโครเวฟในโหมด TE₁₀ ซึ่ง สมการที่เกี่ยวข้องสามารถแบ่งให้อยู่ในส่วนของ สนามไฟฟ้าและความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก (magnetic-field intensities)ได้ ดังนี้ [8]

$$\frac{\partial E_{y}}{\partial z} = \mu \frac{\partial H_{x}}{\partial t}$$
$$\frac{\partial E_{y}}{\partial x} = -\mu \frac{\partial H_{z}}{\partial t}$$
$$-\left(\frac{\partial H_{z}}{\partial x} - \frac{\partial H_{x}}{\partial z}\right) = \sigma E_{y} + \varepsilon \frac{\partial E_{y}}{\partial t}$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$$
$$\mu = \mu_0 \mu_r$$
$$\sigma = 2\pi f \varepsilon \tan \delta$$

(2)

โดยที่กำหนดให้คุณสมบัติทางไดอิเล็คตริกนั้นเปลี่ยนแปลง ขึ้นกับอุณหภูมิวัสดุในระหว่างกระบวนการให้ความร้อน

3.1.3 เงื่อนไขขอบเขตที่เกี่ยวข้อง

Ε

 เงื่อนไขขอบเขตของการนำอย่างสมบูรณ์ : สำหรับเงื่อนไขขอบเขตที่ใช้กับผิวภายในท่อนำ คลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมนั้นอาศัยกฎของ ฟาราเดย์ (Faraday's law) และ ทฤษฎีของ Gauss ดังนี้

$$H_n = 0$$
 $H_n = 0$

(3)

โดยที่ n และ t คือองค์ประกอบของทิศทางตั้งฉากกับ ระนาบ และ ทิศทางในแนวสัมผัสกับระนาบ

เงื่อนไขขอบเขตของความต่อเนื่อง : สำหรับ
 เงื่อนไขขอบเขตที่ใช้กับผิวสัมผัสรอยต่อของวัสดุ
 ต่างชนิดกัน เช่น ระหว่างอากาศ กับ ผิวของชิ้น
 วัสดุทดสอบนั้นอาศัยกฎของแอมป์แปร์
 (Ampere's law) และ ทฤษฎีของ Gauss ดังนี้

$$E_{t} = E_{t}^{'} \quad H_{t} = H_{t}^{'} \quad D_{n} = D_{n}^{'} \quad B_{n} = B_{n}^{'}$$
(4)

โดยที่ D คือความหนาแน่นของ electric flux และ B คือ magnetic induction

 เงื่อนไขขอบเขตของการดูดชับคลื่น : ที่ปลายทั้ง สองของท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมจะใช้เงื่อนไข การดูดชับคลื่นนี้เสมอโดย Mur [10] ดังสมการ

$$\frac{\partial E_{y}}{\partial t} = \pm v \frac{\partial E_{y}}{\partial z}$$

(5)

 การ Oscillation ของความเข้มของสนามไฟฟ้า และแม่เหล็กไฟฟ้าที่กำเนิดจากแมกนีตรอนที่ ส่งผ่านท่อนำคลื่น เสนอในรูปสมการดังต่อไปนี้

$$E_{y} = E_{y in} \sin\left(\frac{\pi x}{L_{x}}\right) \sin(2\pi ft)$$
$$H_{x} = \frac{E_{y in}}{Z_{H}} \sin\left(\frac{\pi x}{L_{x}}\right) \sin(2\pi ft)$$

โดยที่ E_y คือ ค่าความเข้มของสนามไฟฟ้า L_x คือ ค่า ความกว้างของท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยมในทิศทางแกน x และ Z_x คือ ค่า Wave impedance

3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวิเคราะห์การถ่ายเท ความร้อน

3.2.1 สมมุติฐาน

ME NETT 20th | หน้าที่ 504 | CST027

(1)

School of Mechanical Engineering, Suranaree University of Technology

CST027

- กำหนดให้การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และอุณหภูมิเป็นลักษณะ 2 มิติ (x-z)
- รอยต่อระหว่างโซนของเหลวและโซนของแข็งนั้น แยกจากกันชัดเจนโดยพิจารณาจากอุณหภูมิ หลอมละลาย (Fusion temperature)
- กำหนดให้บริเวณรอบ ๆของผิวชิ้นวัสดุทดสอบ
 เป็นฉนวนกันความร้อน
- ไม่คิดผลของการเปลี่ยนแปลงขนาดของชิ้นวัสดุ ทดสอบเนื่องจากผลของการเปลี่ยนแปลงความ หนาแน่น
- ไม่คำนึงถึงผลของการพาความร้อนแบบธรรมชาติ ที่เกิดขึ้นในเฟสของเหลวที่เกิดขึ้น
- พิจารณาให้องค์ประกอบของชิ้นวัสดุทดสอบมี ความสมดุลทางความร้อน
- กำหนดให้บริเวณโซนของแข็งของชิ้นวัสดุทดสอบ นั้นเป็นแบบ Homogeneous และ Isotropic

3.2.2 สมการพื้นฐาน

สมการที่ใช้อธิบายการกระจายดัวของอุณหภูมิภายใน ชิ้นวัสดุทดสอบซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาเปลี่ยนไปคือ

$$\frac{\partial T_{j}}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^{2} T_{j}}{\partial x^{2}} + \frac{\partial^{2} T_{j}}{\partial z^{2}} \right) + \frac{Q_{j}}{\rho \cdot C_{p}} \left(\frac{\partial T_{j}}{\partial z} \right) \frac{dz}{dt}$$

$$Q_{j} = 2\pi f \varepsilon_{0} \varepsilon_{r} \tan \delta E_{y}^{2}$$
(7)

(8)

โดยที่ a คือค่า การแพร่ความร้อน และ Q คือ ค่าการดูด ซับพลังงานไมโครเวฟ โดยที่คุณสมบัติเชิงความร้อนต่างๆหา จากค่าเฉลี่ยของวัสดุในแต่ละเฟส

3.2.3 เงื่อนไขขอบเขต

 กำหนดให้บริเวณรอบผิวชิ้นวัสดุทดสอบเป็น ฉนวนทั้งหมด

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0$$

(9)

 สำหรับผิวละลายเคลื่อนที่ (Melting front) ที่เกิดขึ้น ระหว่างโซนของเหลวและโซนของแข็งสามารถอธิบาย ได้ด้วยสมการของสเดฟาน (Stefan equation) ดังนี้

$$\left(\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial z} - q_{Bou} \Delta z_{Bou} - \lambda_l \frac{\partial T_l}{\partial z}\right) \cdot \left[1 + \left(\frac{\partial z_{Bou}}{\partial x}\right)\right]$$
(10)
= $\rho_s L_s S_s \frac{\partial z_{Bou}}{\partial t}$

โดยที่ตัวห้อย Bou หมายถึงตำแหน่งของผิวละลาย

4 การสร้างกริดด้วยวิธีทรานไฟในต์อินเทอร์โพเลชัน ร่วมกับวิธีการแปลงพิกัดแกน (วิธีพีดีอี)

4.1 วิธีทรานไฟในต์อินเทอร์โพเลชัน

วิธีการที่นำเสนอนี้ถือเป็นวิธีการที่ใช้ในการสร้าง โครงสร้างของกริดในระบบ 2 มิติ ของระบบที่มีรูปทรงแบบ สี่เหลี่ยมมุมฉาก ซึ่งถือเป็นวิธีการที่เกี่ยวข้องกับพื้นฐานของ วิธีการทางพีชคณิตโดยตรง โดยที่วิธีการนี้ถือว่าเป็นวิธีการที่ สามารถสร้างโครงสร้างของกริดได้ง่ายกว่าวิธีการทางด้าน สมการเชิงอนุพันธ์ล้วนๆ และสามารถควบคุมลักษณะเฉพาะ ของโครงสร้างกริดได้ง่ายกว่า เช่น ตำแหน่ง หรือ ระยะห่าง ของกริด อย่างไรก็ตามจุดด้อยของวิธีการนี้คือ มักเกิดความ ไม่ต่อเนื่องของกริดที่อยู่บนขอบเขตของโดเมน (Discontinuities on the boundary) ซึ่งมีผลต่อกริดภายในที่ ถกสร้างขึ้นภายหลัง โดยความต่อเนื่องและราบเรียบของ โครงสร้างกริดจะน้อยกว่าโครงสร้างกริดที่ถูกสร้างขึ้นโดย วิธีการแปลงพิกัดแกน ดังนั้น จึงเกิดความคิดในการสร้าง โครงสร้างของกริดเริ่มต้นด้วยวิธีการทางพืชคณิต (วิธีทราน ไฟในต์อินเทอร์โพเลชัน) และนำวิธีการแปลงพิกัดแกนมา ช่วยทำให้โครงสร้างกริดภายในมีลักษณะต่อเนื่องและ ราบเรียบมากขึ้นกว่าเดิม

การหาค่าฟังก์ชันขอบเขต (Boundary) ของโดเมนที่ พิจารณาซึ่งมีขอบเขตที่ไม่คงที่นั้นมีความจำเป็นที่จะต้องใช้ วิธีการประมาณค่าฟังก์ชันซึ่งจะต้องใช้คู่ลำดับของข้อมูลซึ่ง สอดคล้องกับขอบเขตของโดเมนที่พิจารณา



รูปที่ 2 พาราเมดริกโดเมน $f_{(u,w)}$ ที่กำหนดอยู่บนระนาบ ของ u, w

จากรูปที่ 2 แสดงถึงวิธีการสร้างโครงสร้างกริดใน ระนาบ 2 มิติของวัสดุที่เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสโดยใช้ คู่ลำดับของข้อมูลที่สอดคล้องกับฟังก์ชันขอบเขตที่พิจารณา ซึ่งเป็นวิธีทางพืชคณิตโดยตรง ในช่วงแรกจะเป็นการสร้าง ระนาบของโครงสร้างกริดเริ่มต้นจากขอบเขตของโดเมนขณะ เริ่มแรกที่พิจารณา

ให้ f(u,w) = (x(u,w), z(u,w)) เป็นฟังก์ชัน ของค่าเวคเตอร์ของตัวแปร u และ w ซึ่งกำหนดให้อยู่ในช่วง บริเวณ $u_1 \le u \le u_{\max}$ และ $w_1 \le w \le u_{\max}$ โดยที่ฟังก์ชันนี้ไม่สามารถหาค่าได้ ณ ภายนอกของโดเมนที่

School of Mechanical Engineering , Suranaree University of Technology

CST027

ของ

พิจารณาในรูปที่ 2 ซึ่งเราจะได้ขั้นตอนในการแก้ปัญหาเพื่อ หาค่าฟังก์ชัน $f_{(u,w)}$ จากการประมาณค่าได้ดังนี้ [14]

$$\begin{aligned} f_{(u,w)}^{(1)} &= A_{1(u)} \cdot f_{(1,w)} + A_{2(u)} \cdot f_{(u_{\max},w)} \\ f_{(u,w)} &= f_{(u,w)}^{(1)} + B_{1(w)} \cdot \left[f_{(u,1)} - f_{(u,1)}^{(1)} \right] \\ &+ B_{2(w)} \cdot \left[f_{(u,w_{\max})} - f_{(u,w_{\max})}^{(1)} \right] \end{aligned}$$
(11)

โดยที่ $A_{1(u)}, A_{2(u)}, B_{1(w)}$ และ $B_{2(w)}$ คือ เซตของ ฟังก์ชัน univariate blending ที่สอดคล้องกับเงื่อนไขต่อไปนี้

$$A_{1(1)} = 1, \quad A_{1(u_{\max})} = 0$$

$$A_{2(1)} = 0, \quad A_{2(u_{\max})} = 1$$

$$B_{1(1)} = 1, \quad B_{1(w_{\max})} = 0$$

$$B_{2(1)} = 0, \quad B_{2(w_{\max})} = 1$$

ซึ่งจะทำให้ได้สมการทางพืชคณิตในรูปทั่วไป

$$\begin{split} A_{1(u)}, A_{2(u)}, B_{1(w)} & \text{use } B_{2(w)} \text{ for } \\ A_{1(u)} &= \frac{u_{\max} - u}{u_{\max} - 1}, A_{2(u)} = 1 - A_{1(u)} \\ B_{1(w)} &= \frac{w_{\max} - w}{w_{\max} - 1}, B_{2(w)} = 1 - B_{1(w)} \end{split}$$
(12)

ซึ่งตำแหน่งของกริด ณ จุดต่างๆ ที่เคลื่อนที่ไป เนื่องจากการเคลื่อนที่ของผิวละลายนั้นจะสามารถหาได้จาก สมการของสเตฟาน (Eq.(10)) โดยใช้เทคนิคการแปลงพิกัด แกนเข้ามาช่วย

4.2 การแปลงพิกัดแกน

จากรูปที่ 1 จะเห็นได้ว่ากระบวนการทำละลายที่เกิดขึ้น จากพลังงานของคลื่นไมโครเวฟนั้น พบว่าผิวละลายที่เกิดขึ้น นั้นมีลักษณะรูปร่างไม่คงที่ ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะ แก้ปัญหานี้ด้วยการคำนวณบนพิกัดแกน x และ y ปกติ ด้วย เหตุนี้จึงต้องมีการแปลงพิกัดแกนจากพิกัดปกติให้อยู่ใน รูปแบบของพิกัดแกนใด ๆ เพื่อให้สามารถคำนวณลักษณะ การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับผิวละลาย ณ เวลาต่าง ๆได้ นอกจากนี้การแปลงพิกัดแกนยังช่วยทำให้กริดที่ถูกสร้างขึ้น โดยวิธีทรานไฟไนต์อินเทอร์โพเลชันมีลักษณะต่อเนื่องและ ราบเรียบ (smooth) สูงขึ้นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 3

ซึ่งเราสามารถแสดงรูปแบบของระบบพิกัดแกนเส้นโค้ง ใดๆ ได้ดังนี้

$$x = x(\xi, \eta), z = z(\xi, \eta)$$
 or
 $\xi = \xi(x, z), \eta = \eta(x, z)$

ซึ่งจะสามารถทำการแปลงพิกัดแกนสำหรับสมการที่ เกี่ยวข้องได้ดังนี้

$$\frac{1}{J} \left(x_{\xi} \frac{\partial L_{y}}{\partial \eta} \right) = \mu \frac{\partial H_{x}}{\partial t}$$

$$(14)$$

$$\frac{1}{J} \left(z_{\eta} \frac{\partial E_{y}}{\partial \xi} \right) - z_{\xi} \frac{\partial E_{y}}{\partial \eta} = -\mu \frac{\partial H_{z}}{\partial t}$$

$$(15)$$

$$-\frac{1}{J} \left\{ \left(z_{\eta} \frac{\partial H_{z}}{\partial \xi} - z_{\xi} \frac{\partial H_{z}}{\partial \eta} \right) - \left(x_{\xi} \frac{\partial H_{x}}{\partial \eta} \right) \right\}$$

$$= \sigma E_{y} + \varepsilon \frac{\partial E_{y}}{\partial t}$$

$$(16)$$

211

 ∂E

1 (

$$\frac{\partial E_{y}}{\partial t} = v \frac{1}{J} \left(x_{\xi} \frac{\partial E_{y}}{\partial \eta} \right)$$
(17)

$$\begin{split} \frac{\partial T_{j}}{\partial t} &= \frac{a}{J^{2}} \left(\alpha \frac{\partial^{2} T_{j}}{\partial \xi^{2}} - 2\beta \frac{\partial^{2} T_{j}}{\partial \xi \partial \eta} + \gamma \frac{\partial^{2} T_{j}}{\partial \eta^{2}} \right) \\ &+ \frac{a}{J^{3}} \left[\left(\alpha \frac{\partial^{2} x}{\partial \xi^{2}} \right) \left(z_{\xi} \frac{\partial T_{j}}{\partial \eta} - z_{\eta} \frac{\partial T_{j}}{\partial \xi} \right) + \alpha \frac{\partial^{2} z}{\partial \xi^{2}} \right] \\ &- 2\beta \frac{\partial^{2} z}{\partial \xi \partial \eta} + \gamma \frac{\partial^{2} z}{\partial \eta^{2}} \left(- x_{\xi} \frac{\partial T_{j}}{\partial \eta} \right) \right] + \frac{Q_{j}}{\rho \cdot C_{p}} \\ &+ \frac{1}{J} \left(x_{\xi} \frac{\partial T_{j}}{\partial \eta} \right) \frac{dz}{dt} \end{split}$$

$$\begin{cases} \lambda_{s} \frac{1}{J} \left(x_{\xi} \frac{\partial T_{s}}{\partial \eta} \right) - q_{Bou} \Delta z_{Bou} - \lambda_{l} \frac{1}{J} \left(x_{\xi} \frac{\partial T_{l}}{\partial \eta} \right) \end{cases}$$
$$\cdot \left\{ 1 + \left(\frac{1}{J} \left[z_{\eta} \frac{\partial z_{Bou}}{\partial \xi} - z_{\xi} \frac{\partial z_{Bou}}{\partial \eta} \right] \right)^{2} \right\}$$
$$= \rho_{s} L_{s} S_{s} \frac{\partial z_{Bou}}{\partial t}$$
(18)

โดยที่

(19)

(40)

$$\begin{split} &\alpha = x_{\eta}^{2} + z_{\eta}^{2}, \beta = x_{\xi} \cdot x_{\eta} + z_{\xi} \cdot z_{\eta}, \gamma = x_{\xi}^{2} + z_{\xi}^{2} \\ &\text{และ } x_{\xi}, x_{\eta}, z_{\xi}, z_{\eta} \text{ หมายถึง partial derivatives , J คือ } \\ &\text{Jacobian, } \beta, \alpha, \gamma \text{ คือ geometric factors และ } \eta, \xi คือ \\ &\widehat{\mathsf{whom}} \widetilde{\mathsf{mon}} \widetilde{\mathsf{ulavann}} \widetilde{\mathsf{whom}} \widetilde{\mathsf{whom}} x, z \end{split}$$

 $J = x_{\xi} \cdot z_{\eta} - x_{\eta} \cdot z_{\xi}$

(13)

CST027



รูปที่ 3. ลักษณะโครงสร้างตาข่าย (mesh) ภายในชิ้นทดสอบ ที่ถูกสร้างขึ้นด้วยเทคนิควิธี Transfinite interpolation ร่วมกับวิธีแปลงพิกัดแกน

5. ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method)

สำหรับการนำเทคนิคเชิงดัวเลขมาประยุกต์ใช้หา คำตอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับอธิบาย กระบวนการทำละลายโดยใช้พลังงานจากคลื่นไมโครเวฟนั้น ซึ่งเราจะใช้วิธี ไฟไนด์ดิฟเฟอร์เรนด์ไทม์โดเมน (Finite Difference Time-Domain - FDTD) [12] เข้ามาช่วยในการ คำนวณหาค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในท่อนำคลื่นรูปทรง สี่เหลี่ยม และใช้วิธี ไฟไนด์ดิฟเฟอร์เรนต์ (Finite difference) ในการคำนวณหาค่าการกระจายอุณหภูมิจากสมการการส่ง ถ่ายความร้อน

เมื่อพิจารณาคลื่นไมโครเวฟในโหมด TE₁₀ เราสามารถ คำนวณหาค่าความยาวคลื่นในอากาศ (λ) ความยาวคลื่น ภายในท่อนำคลื่น (λ_g) ได้เท่ากับ 122 และ 148 มิลลิเมตร ตามลำดับ ส่วนค่าความยาวคลื่นภายในชิ้นวัสดุทดสอบ (λ_{mg}) นั้นจะอยู่ในรูปของฟังก์ชันของค่าคุณสมบัติทางได อิเล็คตริกของชิ้นวัสดุทดสอบ นอกจากนั้นค่าคุณสมบัติทาง ไดอิเล็คตริกนี้ยังขึ้นอยู่กับค่าตัวแปรของอุณหภูมิซึ่งเป็น ความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลอง [8] ซึ่งข้อมูลที่เกี่ยวกับค่า คุณสมบัติต่างๆ ทางความร้อนและสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ ในการคำนวณได้แสดงไว้ในตารางที่ 1

<u>ตารางที่ 1</u> ค่าคุณสมบัติทางความร้อนและค่าคุณสมบัติได อิเล็คตริกของโซนของเหลวและโซนของแข็ง

คุณสมบัติ	โซนของเหลว	โซน
	(น้ำ+อนุภาคของแข็ง)	ของแข็ง (น้ำแข็ง+
		อนุภาค
		ของแข็ง)
ρ	1942.0 kg/m ³	1910.9
		kg/m ³
λ	0.855 W/mK	1.48 W/mK

α	$0.21 \times 10^{-6} \text{ (m}^2/\text{s})$	0.605 × 10
		⁶ (m ² /s)
C_{p}	2.099 kJ/kgK	1.280
1		kJ/kgK
μ_r	1.0 H/m	1.0 H/m
${\cal E}_r$	88.15 -0.414T+(0.131×	5.1 F/m
,	$10^{-2})T^{2}$ -(0.046 × $10^{-4})T^{3}$	
	F/m	
$\tan \delta$	0.323 -	0.0124
	(9.499×10 ³)T+(1.27	
	$\times 10^{-4})T^{2}$ -(6.13 $\times 10^{-7})T^{3}$	

ลำดับขั้นตอน และรายละเอียดของแผนผังขั้นตอนการ คำนวณ สำหรับการแก้ปัญหาการเปลี่ยนแปลงเฟสยังได้ แสดงไว้ในรูปที่ 4 ดังนี้



รูปที่ 4. รายละเอียดของแผนผัง และวิธีการคำนวณสำหรับ กระบวนการทางระเบียบวิธีเชิงดัวเลข

6. ผลลัพธ์และวิจารณ์

จากรูปที่ 5-8 แสดงผลการคำนวณจากแบบจำลองทาง คณิตศาสตร์ของผลการกระจายตัวของอุณหภูมิและค่าการดูด ซับพลังงานไมโครเวฟในซิ้นวัสดุทดสอบเมื่อพิจารณาให้ ไมโครเวฟส่งผ่านมาจากด้านบนของชิ้นวัสดุทดสอบ ซึ่งใน การศึกษาครั้งนี้ชิ้นทดสอบตอนเริ่มต้นจะแบ่งออกเป็นสอง บริเวณ คือ โซนของเหลว และโซนของแข็ง โดยที่จะทำการ แบ่งการศึกษาออกเป็นสองกรณี คือ กรณีแรก โซนของแข็ง

ME NETT 20th หน้าที่ 507 CST027

School of Mechanical Engineering, Suranaree University of Technology

CST027

จะอยู่ทางด้านบนของโซนของเหลว และกรณีที่สอง โซน ของแข็งจะอยู่ทางด้านล่างของโซนของเหลวโดยทั้งสองโซนมี อุณหภูมิเริ่มต้นที่ 0 ⁰C และใช้กำลังไมโครเวฟที่ ป้อนเข้ามา 1000 W

สำหรับในกรณีแรกนั้น (รูปที่ 5 และ 6) พลังงานทั้งหมด ของไมโครเวฟที่ถูกดูดซับโดยวัสดุทดสอบนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้น เพราะว่าคลื่นสามารถผ่านทะลุเข้าไปในชิ้นทดสอบได้มาก นอกจากนั้น การที่มีโซนของแข็งอยู่ทางด้านบนของโซน ของเหลวจะเป็นการช่วยป้องกันการเกิดการสะท้อนของคลื่น ออกจากผิววัสดุทดสอบ ซึ่งจะก่อให้เกิดคลื่นนิ่ง (Standing wave) ขึ้นในชิ้นวัสดุทดสอบบริเวณโซนของแข็ง ซึ่ง ปรากฏการณ์ดังกล่าวจะก่อให้เกิดอัตราการดูดซับพลังงาน ของคลื่นไมโครเวฟในระดับสูงขึ้นภายในชิ้นทดสอบ (รูปที่ 6)

เมื่อเวลาผ่านไปก็จะเกิดการทำละลายของโซนของแข็ง เพิ่มขึ้นซึ่งสังเกตได้ว่าบริเวณขอบเขตผิวละลายจะเคลื่อนที่ ขยับขึ้นด้านบนในกรณีนี้ ทำให้ค่า loss factor มีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้มีการดูดซับพลังงานไมโครเวฟเพิ่มขึ้นและทำให้การ กระจายด้วของอุณหภูมิภายในชิ้นวัสดุทดสอบมากขึ้นตามไป ด้วย(รูปที่5) อย่างไรก็ตามการกระจายตัวของอุณหภูมิ บริเวณโซนของแข็งส่วนที่ไม่ละลายก็ยังคงเดิม (0 องศา เซลเซียส) เนื่องจากค่าloss factor ของโซนของแข็งซึ่งเป็น น้ำแข็งมีค่าต่ำกว่าโซนของเหลวหรือน้ำมากจึงมีการดูดซับ พลังงานไมโครเวฟน้อย นอกจากนี้จะสังเกตเห็นได้ว่า ลักษณะของกริดที่สร้างขึ้นจะเกิดการเคลื่อนตัวไปพร้อม ๆกับ ผิวละลายที่มีลักษณะเป็นเส้นโค้ง โดยตำแหน่งของกริดที่เกิด การเคลื่อนตัวจะใกล้เคียงกับตำแหน่งต่าง ๆของบริเวณ รูปทรงผิวละลาย ซึ่งเป็นผลมาจากการรวมกันของเทคนิค วิธีทรานไฟไนต์อินเทอร์โพเลชันและวิธีการแปลงพิกัดแกน





90 sec

รูปที่ 5. แสดงลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิและการ เคลื่อนที่ของผิวละลายที่เวลา 30 และ 90 วินาที ตามลำดับ ในกรณีที่โซนของแข็งอยู่ทางด้านบนของโซนของเหลว (°C)



30 sec





รูปที่ 6. แสดงลักษณะการดูดซับพลังงานของคลื่นไมโครเวฟ ที่เวลา 30 และ 90 วินาที ตามลำดับ ในกรณีที่โซนของแข็ง อยู่ทางด้านบนของโซนของเหลว (W/m³)

้ ส่วนในกรณีที่สอง (รูปที่ 7 และ 8) เนื่องจากน้ำมีค่า Dielectric loss สูงกว่าน้ำแข็งและผลจาก Skin-depth heating ที่บริเวณโซนของเหลว ซึ่งเป็นบริเวณที่ถูกดูดซับ พลังงานจากคลื่นไมโครเวฟได้สูงนั้นจะอยู่บริเวณขอบ ด้านบนของโซนของเหลวซึ่งอยู่ไกลจากผิวรอยต่อระหว่าง โซนของเหลวกับของแข็ง ทำให้การถ่ายเทความร้อนโดยการ นำที่เกิดจากพลังงานของคลื่นไมโครเวฟไปยังบริเวณผิว ละลายที่เป็นรอยต่อระหว่างโซนของเหลวและโซนของแข็ง เป็นไปได้ลำบากกว่าในกรณีแรกสังเกตุได้ว่าบริเวณขอบเขต ผิวละลายจะเคลื่อนที่ขยับลงในกรณีนี้ อย่างไรก็ตามลักษณะ การกระจายตัวของอุณหภูมิและลักษณะของการดูดซับ พลังงานของคลื่นในโซนของแข็งในกรณีที่สองนี้ ก็ยัง เหมือนกับในกรณีแรกซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยคุณสมบัติ ทางไดอิเล็คตริกของวัสดุเหมือนกรณีแรก



30 sec



School of Mechanical Engineering, Suranaree University of Technology

CST027











รูปที่ 8. แสดงลักษณะการดูดซับพลังงานของคลื่นไมโครเวฟ ที่เวลา 30 และ 90 วินาที ตามลำดับ ในกรณีที่โซนของเหลว อยู่ทางด้านบนของโซนของแข็ง (W/m³)

จากผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แสดง ในรูปที่ 5-8 พบว่าผิวละลายนั้นจะเกิดการละลายมาก ณ บริเวณกึ่งกลางของชิ้นวัสดุทดสอบ ซึ่งเป็นดำแหน่งที่มีการ ดูดชับพลังงานของคลื่นไมโครเวฟสูง ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ พื้นฐานสำหรับไมโครเวฟในโหมด TE₁₀ และในกรณีแรกจะมี อัตราการละลายตัวของโซนน้ำแข็งมากกว่ากรณีที่สอง ซึ่ง สังเกตได้จากการเคลื่อนตัวของตำแหน่งผิวละลายเทียบกับ เวลาดังแสดงในรูปที่ (5) และ (7) ตามลำดับ และจากการ เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ กับ ผลข้อมูลที่ได้จากการทดลอง (รูปที่ 9) นั้นพบว่า ข้อมูลที่ได้จากการทดลองและที่ได้จากการทำนายผลจาก แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นมีค่าใกล้เคียงและสอดคล้อง กันแม้ว่าในช่วงปลายที่เวลา 90 วินาที ข้อมูลของการทดลอง จะมากกว่าข้อมูลที่ได้จากการทำนายเล็กน้อยก็ตาม ซึ่งอาจ เป็นผลมาจากความไม่คงที่ของคลื่นไมโครเวฟที่บริเวณผิว วัสดุ หรือค่าคุณสมบัติทางไดอิเล็คตริกที่แตกต่างกันเล็กน้อย ในทางทฤษฏีและปฏิบัติ และพบว่าค่าคาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น ของตำแหน่งของผิวละลายในกรณีการทดลองและการทำนาย โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นมีค่าโดยประมาณน้อย กว่า 3.5 เปอร์เซ็นต์ ส่วนค่าคาดเคลื่อนของการดูดซับ พลังงานไมโครเวฟนั้นมีค่าโดยประมาณน้อยกว่า 2 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 9. ดำแหน่งของผิวละลายที่ได้จากการทดลองแล แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (a) บริเวณโซนของแข็ง (frozen layer) อยู่บนบริเวณโซนของเหลว (unfrozen layer). (b) บริเวณโซนของเหลว (unfrozen layer) อยู่บน บริเวณโซนของแข็ง (frozen layer).

7. สรุป

จากผลลัพธ์ที่ได้จากการทำนายปรากฏการณ์ทำละลาย โดยใช้พลังงานไมโครเวฟจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ นำเสนอนั้นสามารถสรุปได้ดังนี้

 รูปแบบของสมการทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการ ทำละลายโดยใช้พลังงานของคลื่นไมโครเวฟนั้นสามารถ อธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจริงได้เป็นอย่างดี

2).จากผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลง ดำแหน่งของชั้นโชนของเหลวและโชนของแข็งจะทำให้

ME NETT 20th หน้าที่ 509 CST027

School of Mechanical Engineering , Suranaree University of Technology

CST027

ลักษณะการทะลุทะลวงของคลื่นและอัตราการดูดซับพลังงาน ของคลื่นไมโครเวฟแตกต่างกันไปด้วย

3).ลักษณะและอัตราการเกิดของผิวละลายนั้นแตกต่าง กันสำหรับทั้งสองกรณีโดยพิจารณาจากตำแหน่งการจัดวาง ของบริเวณชั้นโซนของเหลวและชั้นโซนของแข็งที่ไม่ เหมือนกันและความแตกต่างกันของค่าคุณสมบัติทางไดอิเล็ค ตริกของน้ำและน้ำแข็ง

4).อัตราการเกิดการสะท้อนของคลื่นไมโครเวฟภายใน ชิ้นวัสดุทดสอบนั้นขึ้นอยู่กับค่าคุณสมบัติทางใดอิเล็คตริก ของวัสดุที่นำมาใช้ในกระบวนการทำละลาย

5).รูปแบบของสมการทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการ ทำละลายโดยใช้พลังงานของคลื่นไมโครเวฟที่เสนอในครั้งนี้ นั้นสามารถอธิบายปรากฏการณ์การทำละลายได้หลาย รูปแบบ และสามารถนำไปวิเคราะห์สนับสนุนปรากฏการณ์ จริงในเชิงปฏิบัติ

รายการสัญลักษณ์

[6] L. Fener, G. Link and N
MiRa/THESIS-code package f
modeling of millimeter-wave r
Proc. Mater. Res.Soc.Spring N
San Francisco, pp 363-368.
[/] K.Aoki, P.Ratanadecho,
"Characteristics of microwave
materials using a rectangular
JSME-KSME Thermal Eng. Co
Oct.1-6, pp.191-196.
[8] P. Ratanadecho, K.Aoki a
numerical and experimental st
using a rectangular wave gu
vol.19, no.9, pp.2209-2234.
[9]A.R. Von Hippel,1954,
Applications. , Cambridge , MA
[10] G.Mur, 1981, "Absorbing
the finite-difference approxima
electromagnetic-field equatio
Electromagn. Compat., vol. El
382.
[11] L.E. Eriksson , 1982 , "O
conforming grid around wing -
transfinite interpolation ", AIA
1320.
[12] S.Tada , R. Echigo , Y. I
1998, "Numerical analysis of
partially loaded microwave app
Transf., vol. 41 , pp. 709-718.

[2] X. Zeng and A.Faghri, 1994, "Experimental and numerical study of microwave thawing heat transfer for food materials", ASME J. Heat Transfer, vol. 116, pp 446-455

[3] T.Basak and K.G. Ayappa , 1997 , "Analysis of microwave thawing of slab with the effective heat capacity method" AIChE J., vol 43, pp1662-1674

[4] F.Torres and B. Jecko , 1997 , "Complete FDTD analysis of microwave heating process in frequencydependent and temperature dependent media", IEEE Trans. Microwave Theory Tech, vol 45, pp 108-117

[5] P. Ratanadecho, K.Aoki and M.Akahori, 2002, "Influence of irradiation time particle sizes and initial moisture contents during microwave drying of multilayered capillary porous materials", ASME J.Heat Transf., vol. 124 , pp151-161.

C Link d M. Thumm , 1996 , "The or resonator design and material processing", in leeting Symp., vol 430,

and M.Akahori, 2000 heating for multi-layer wave guide" in Proc. 4" onf., vol.2, Kobe, Japan,

and M.Akahori , 2001, "A udy of microwave drying uide", Drying Technol.J.,

Dielectric Materials and : MIT Press.

g boundary conditions for ation of the time domain ons" IEEE Trans. . MC-23, no. 4 , pp. 377-

Generations of boundarybody configurations using AA J., vol. 20 , pp1313-

Kuno , and H. Yoshida , electromagnetic wave in licator",Int.J. Heat Mass

CST027

[13] S.V. Patankar , 1980 , Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. Bristol, PA: Hemisphere.

[14] P.Rattanadecho , K. Aoki , M. Akahori , 2002 "The Characteristics of Microwave Melting of Frozen Packed Beds Using a Rectangular Waveguide" IEEE Transactions on Microwave Theory and Techiques, vol.50 No.6 , pp.14951502.

[15] P.Rattanadecho, 2004, "Theoretical and experimental investigation of microwave thawing of frozen layer using a microwave oven (effects of layered configurations and layer thickness)", Int.J. Heat and Mass Transfer, 47 (5), pp.937-945.

