ME-NETT 25
The 25th Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand

TSF69

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25
19-21 ตุลาคม 2554 จังหวัดกระบี่

การศึกษาเชิงทดลองและเชิงระเบียบวิธีเชิงตัวเลขของกระบวนการทำแข็งในวัสดุพรุนอิ่มตัว (อิทธิพลของอุณหภูมิทำแข็ง และชนิดอนุภาคของแข็ง)

Experimental and Numerical Study of Solidification Process in Saturated Porous Media (Influence of the Solid Particle Types and Freezing Temperature)

วิระศักดิ์ คงแก้ว* ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช และมณฑล ชูโชนาค

หน่วยวิจัยเพื่อการใช้ประโยชน์จากไมโครเวฟในงานวิศวกรรม (R.C.M.E.) ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ศูนย์รังสิต) อ.คลองหลวง จ. ปทุมธานี 12120
* ติดต่อ: โทรศัพท์: 083-8216017, E-mail: vee_eng@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษาปัญหาของการทำแข็งในวัสดุพรุนแบบอิ่มตัวที่เน้นศึกษาทั้งการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีโดยอาศัยระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขและเชิงทดลองของกระบวนการทำแข็งในวัสดุพรุนที่อิ่มตัว โดยเริ่มต้นจากการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถครอบคลุมและอธิบายปรากฏการณ์ในปัญหาของกระบวนการทำแข็งในวัสดุพรุนที่อิ่มตัวและยืนยันความถูกต้องโดยตรวจสอบจากผลการทดลอง งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแข็งและอิทธิพลของชนิดของวัสดุที่มีผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในวัสดุและอัตราการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็ง จากการศึกษาพบว่าที่อุณหภูมิทำแข็งที่มีค่าสูงๆ ส่งผลทำให้อัตราการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งมีค่ามากขึ้นตาม อย่างไรก็ตามเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นระยะทางของผิวทำแข็งจะเพิ่มขึ้นแต่จะเพิ่มขึ้นในอัตราที่ลดลงเนื่องจากโซนของแข็งที่เพิ่มขึ้นนี้ทำให้เกิดความต้านทานของความร้อนภายในระบบและที่วัสดุพรุนที่มีค่าการนำความร้อนสูงจะทำให้อัตราการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งมีค่ามากกว่าวัสดุพรุนที่มีค่าการนำความร้อนต่ำ ผลการศึกษาด้วยระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขให้ผลที่สอดคล้องกับผลการศึกษาเชิงทดลองของกระบวนการทำแข็งในวัสดุพรุนที่อิ่มตัว

คำสำคัญ: ระเบียบเชิงตัวเลข, วัสดุพรุนแบบอิ่มตัว, กระบวนการทำแข็ง, อัตราการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็ง

Abstract

In this research, the problem of solidification process in the saturated porous media is focused on the theoretical analysis using numerical method and experimental method. Methodology of the study starting from developed a mathematical model to describe the phenomenon in the process and validation with experiments. In this problem consider the influence of freezing temperature and solid particle types that affect the temperature distribution within the material and the rate of freezing front. The result show the highest constant temperature cause moving rate of freezing front increase as well. At the time increased results this distance of freezing front increased and rate of freezing front at the time beginning of testing to have highest at the end. Because of increased the solid zone a result resistance of heat transfer from liquid to solid zone decrease thus, rate of freezing front decrease at the end. And the resulted of numerical method found that a fairly good.

Keyword: Numerical method; Saturated Porous Media; Solidification Process; Rate of freezing front.

1. ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ประเทศไทยเป็นผู้ผลิตสินค้าเกษตรรายใหญ่ของโลก การศึกษาค้นคว้าวิจัยเพื่อลดความเสียหายหลังการเก็บเกี่ยว จึงเป็นสิ่งที่มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะช่วยลดความสูญเสียในด้านคุณภาพและปริมาณของผลผลิต หรือปรับปรุงคุณภาพของผลิตผลการเกษตร หรือสินค้าแปรรูปและศึกษาวิจัยอาหารปลอดภัย(Food Safety) ให้มีมาตรฐานทัดเทียมต่างประเทศ สร้างความเข้มแข็งและผลักดันสินค้าเพื่อการส่งออกได้สูงขึ้น ซึ่งเป็นสิ่งที่ต้องการวิทยาการใหม่ๆ มาดำเนินการวิจัยเพื่อแก้ปัญหา เพิ่มประสิทธิภาพการผลิตและพัฒนาสินค้าให้มีคุณภาพสูง มีมาตรฐานเพื่อยกระดับราคาสินค้า เพื่อการแข่งขันในตลาดโลก ด้วยเหตุผลดังกล่าวนี้ ทำให้การวิจัยและพัฒนาด้านการแปรรูปวัสดุจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งเพราะผลผลิตทางการเกษตรจัดเป็นวัสดุพรุนชนิดหนึ่ง ซึ่งที่ผ่านมาการศึกษาพัฒนากระบวนการต่างๆ ในประเทศไทยยังไม่มีการศึกษาพัฒนาอย่างเป็นระบบ

การวิจัยในสาขาการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพรุนมีประโยชน์อย่างสูงในศาสตร์วิศวกรรมทุกสาขา ในความเป็นจริงแล้วประเทศที่พัฒนาแล้วจะให้ความสนใจในการวิจัยและพัฒนาในสาขานี้เป็นอันมาก เพราะวัสดุส่วนใหญ่ที่ใช้งานในทางวิศวกรรมจัดเป็นวัสดุพรุน ตัวอย่างวัสดุพรุนที่ใช้งานในทางวิศวกรรม เช่น ดินและคอนกรีตในงานวิศวกรรมปฐพี เซรามิค ในงานวิศวกรรมโลหะคาตาไลค์ (Catalyst) ในงานวิศวกรรมเคมี ฉนวนความร้อนในงานวิศวกรรมเครื่องกล และเคมี เนื้อเยื่อหรือเมมเบรน (Membrane) ในงานวิศวกรรมชีวภาพและการแพทย์ รวมจนถึงอาหารและผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรในงานวิศวกรรมการเกษตร จึงพูดได้ว่าความรู้ทางด้านการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพรุนมีความสำคัญอย่างยิ่งต่องานวิศวกรรมทุกสาขา

อย่างไรก็ตามประเทศไทยก็ยังขาดแคลนนักวิจัยในสาขาการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพรุน และเทคโนโลยีวัสดุพรุนในด้านอื่นๆ อีกจำนวนมาก ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความสนใจทำวิจัยทางด้านนี้ โดยงานวิจัยนี้จะเน้นศึกษาทั้งการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีโดยอาศัยระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขและเชิงทดลองของกระบวนการทำแข็งในวัสดุพรุนที่อิ่มตัว โดยเริ่มต้นจากการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถครอบคลุมและอธิบายปรากฏการณ์ในปัญหาของกระบวนการทำแข็งในวัสดุพรุนที่อิ่มตัว และยืนยันความถูกต้องโดยตรวจสอบจากผลการทดลองจริง งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแข็ง อิทธิพลของชนิดของวัสดุ อิทธิพลของขนาดของอนุภาค (Particle size)

2. ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวกับกระบวนการทำแข็งและกระบวนการทำละลายในวัสดุพรุนที่อิ่มตัวนั้นยังมีการศึกษาและวิจัยกันน้อยมากทั้งในระดับนานาชาติและระดับประเทศ งานวิจัยในระดับนานาชาติที่ผ่านมาที่เกี่ยวกับกระบวนการทำแข็ง กระบวนการทำละลาย การเคลื่อนตัวของขอบเขตและการเปลี่ยนแปลงเฟสของวัสดุ เช่น

ในปี ค.ศ.1860 Neumann ได้ทำการศึกษาปัญหาการเปลี่ยนแปลงเฟสที่มีหนึ่งเฟส(1-Phase change problem) สำหรับเงื่อนไขขอบเขตที่อุณหภูมิคงที่ จนสามารถหาคำตอบของปัญหาอยู่ในรูปของผลเฉลยที่แม่นตรงในกรณี 1 มิติได้สำเร็จ

ในปี ค.ศ.1899 Stefan ได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมต่อจาก Neumann จนหาผลเฉลยในกรณีของการเปลี่ยนแปลงเฟสในลักษณะสองเฟสพร้อมกันได้เป็นผลสำเร็จ กล่าวได้ว่าผลการวิจัยของนักวิจัยทั้งสองถือเป็นจุดเริ่มต้นของการศึกษาปัญหาของการเปลี่ยนแปลงเฟสในยุกต์ต่อมา ซึ่งทำให้สามารถหาผลเฉลยแม่นตรงได้หลายวิธี เช่น วิธี Neumann’s Solution , วิธี Similarity Transformation Method หรือ วิธี Heat Balance Integral Methods

Kim C.J. et al., 1990 ได้นำเสนอการแก้ปัญหาของการเปลี่ยนแปลงเฟสเชิงตัวเลขขณะที่มีการเคลื่อนที่ของขอบเขตหลายตำแหน่งที่มีรูปแบบที่ไม่แน่นอนโดยใช้วิธีผลต่างสืบเนื่อง โดยประยุกต์ใช้การแปลงพิกัดแกน (Coordinate transformation) เพื่อที่จะทำให้ขอบเขตที่เคลื่อนที่มีรูปแบบคงที่ และสามารถใช้รูปแบบของกฎการอนุรักษ์ในการหาสมการที่เกี่ยวข้องทั้งหมดได้ ผลที่ได้จะนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ซึ่งพบว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถนำไปใช้เป็นเครื่องมือในการแก้ปัญหาของการเปลี่ยนแปลงเฟสทั้งในระบบ 1 และ 2 มิติได้เป็นอย่างดีและมีความแม่นยำ

Ismail K.A.R. et al., 2000 [2] ได้นำเสนอการศึกษาเชิงตัวเลขของการทำแข็งของวัสดุที่มีการเปลี่ยนแปลงเฟสภายในแคปซูลทรงกลม แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อยู่บนพื้นฐานของการนำความร้อนเพียงอย่างเดียว พบว่าเวลาที่ใช้ในการทำแข็งให้สมบูรณ์จะมากขึ้นเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นและจะลดลงเมื่ออุณหภูมิของของไหลทำงานลดลง ค่าการนำความร้อนของวัสดุที่ใช้ทำเซลล์ทดลองจะมีอิทธิพลต่อการทำแข็งซึ่งที่ค่าการนำความร้อนของวัสดุมีค่าน้อยจะเป็นการหน่วงกระบวนการทำแข็งและการเพิ่มขึ้นของตัวเลขไบออส (Biot number) ที่ผิวด้านนอกจะทำให้เวลาที่ใช้ในการทำแข็งให้สมบูรณ์ลดลง

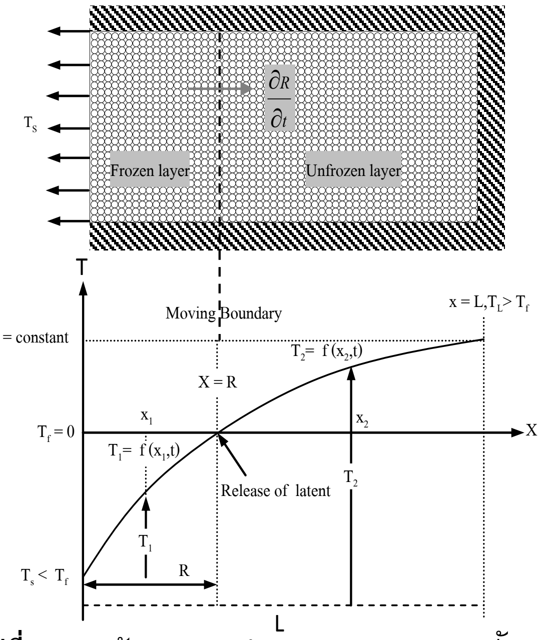
Rattanadecho P., 2004 [6] ได้ทำการศึกษาทั้งเชิงทดลองและเชิงระเบียบวิธีเชิงตัวเลขของกระบวนการทำแข็งในเกรนูลาร์แพคเบดที่ไม่อิ่มตัว โดยทำการศึกษาการเคลื่อนตัวของน้ำไปยังผิวเชื่อมต่อระหว่างเฟสเนื่องจากแรงดันคาพิวลารี พบว่าอัตราการดูดซึมของน้ำในโซนของแข็งจะมีความสัมพันธ์กับฟลักซ์ความร้อนของการทำแข็งและค่าความอิ่มตัวของน้ำที่ผิวเชื่อมต่อระหว่างเฟส นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความอิ่มตัวของน้ำในโซนของแข็งจะมีค่าสูงขึ้นที่อัตราการดูดซึมของน้ำมีค่าสูงๆ และค่าฟลักซ์ความร้อนของการทำแข็งมีค่าต่ำๆ สำหรับแบบจำลองที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิคการแปลงพิกัดแกน พบว่าค่าที่ได้จากการทำนายมีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลองเป็นอย่างดี

Rattanadecho P., 2008 [9] ได้จำลองของกระบวนการทำละลายของน้ำแข็งในวัสดุพรุนกรณีที่ได้รับความร้อนที่มีอุณหภูมิคงที่หลายตำแหน่งโดยใช้ วิธีทรานซ์ไฟไนต์อินเทอร์โพเลชัน รวมกับวิธีพีดีอี (PDE) เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพของโครงสร้างกริดที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการวิเคราะห์กระบวนการทำละลายและใช้วิธีทางระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่อยู่บนพื้นฐานของวิธีผลต่างสืบเนื่องเพื่อหาการกระจายของอุณหภูมิและการเคลื่อนที่ของผิวเชื่อมต่อระหว่างเฟส พบว่าความละเอียดของเมช (mesh) จะมีผลกระทบต่อการแก้ปัญหามาก ซึ่งที่ความละเอียดของเมชสูงๆ ทำให้มีความแม่นยำเพิ่มขึ้น ฯลฯ

จากรายงานการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการทำแข็ง กระบวนการทำละลายและการเคลื่อนตัวของขอบเขตและการเปลี่ยนแปลงเฟสของวัสดุที่ได้ทำการศึกษามานั้นพบว่าวิธีการศึกษาวิจัยส่วนมากเป็นการศึกษาเชิงตัวเลข (Numerical method) ซึ่งในการทำวิจัยในครั้งนี้จะศึกษาวิเคราะห์ทั้งเชิงทฤษฎีโดยอาศัยระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขและเชิงทดลองของกระบวนการทำแข็งในวัสดุพรุนที่อิ่มตัวแบบ 1 มิติ โดยมีข้อแตกต่างการการวิจัยที่ผ่านมาคือ พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อธิบายปรากฏการณ์ในปัญหาของกระบวนการทำแข็งในวัสดุพรุนที่อิ่มตัวภายใต้สมติฐานของระบบอยู่ในสภาวะ สมดุลทางความร้อน (Thermal Equilibrium) ระหว่างวัสดุที่มีการเปลี่ยนแปลงเฟสและโครงสร้างของวัสดุพรุน (Porous matrix) และยืนยันความถูกต้องโดยตรวจสอบกับผลการทดลอง โดยศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแข็งและคุณสมบัติของการนำความร้อนของวัสดุ ที่มีผลต่อการกระจายของอุณหภูมิทั้งในโซนของแข็งและของเหลว และการเคลื่อนที่ของผิวเชื่อมต่อระหว่างเฟสในกระบวนการทำแข็งของวัสดุพรุนที่อิ่มตัวในระบบ 1 มิติ

3. ระเบียบวิธีวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

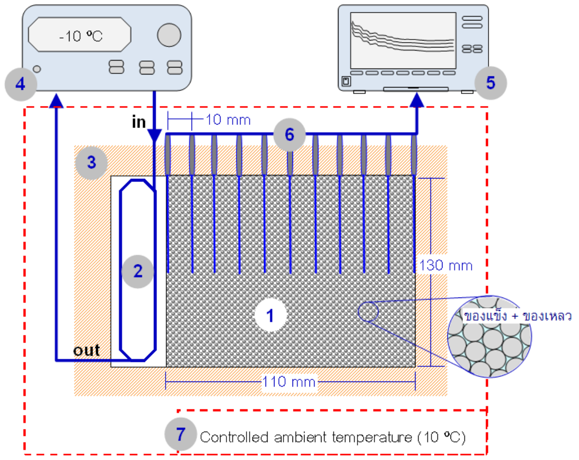
งานวิจัยนี้จะศึกษาทั้งเชิงทฤษฎีและเชิงทดลองของกระบวนการทำแข็งในวัสดุพรุนที่อิ่มตัวในระบบ 1 มิติเป็นหลัก โดยจะทำการออกแบบ สร้างชุดทดลอง ในการศึกษาจะปรับเปลี่ยนตัวแปรต่างๆ เช่น อุณหภูมิที่ใช้ทำแข็ง ชนิดของอนุภาค ดัง**รูปที่ 1**สำหรับในเชิงทฤษฎีจะทำการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบในสภาวะสมดุลทางความร้อนและไม่สมดุลทางความร้อนระหว่างวัสดุที่มีการเปลี่ยนแปลงเฟส และโครงสร้างของวัสดุพรุนเพื่ออธิบายปรากฏการณ์ในปัญหาของกระบวนการทำแข็งซึ่งเป็นปัญหาที่มีการเคลื่อนตัวของขอบเขต(Moving boundary) ในการศึกษาทั้งเชิงทฤษฎีและเชิงทดลองจะใช้เม็ดแก้ว เม็ดเหล็ก เป็นอนุภาคของแข็งและอิ่มตัวด้วยน้ำเป็นวัสดุที่เปลี่ยนแปลงเฟส แล้วทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลอง และจากทฤษฎีเพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น ซึ่งในการศึกษากระบวนการทำแข็งครั้งนี้ได้มีรูปแบบการจัดวางอนุภาคและลักษณะแบบจำลองทางกายภาพดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงลักษณะแบบจำลองทางกายภาพของปัญหา

3.1 อุปกรณ์ทดลอง

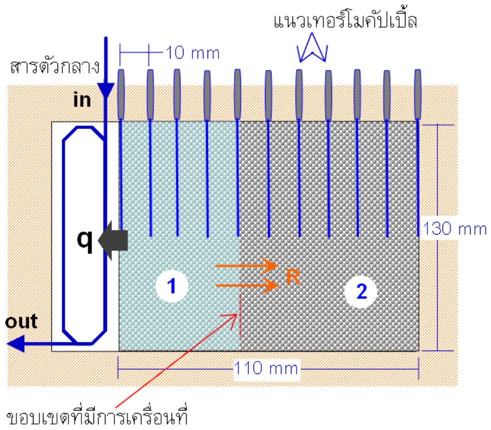
รูปที่ 2 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองสำหรับการทำแข็งของวัสดุพรุนแบบอิ่มตัว ซึ่งประกอบไปด้วยเซลล์ทดสอบรูปทรงสี่เหลี่ยมที่มีขนาดภายในสูง 130 mm กว้าง 110 mm และลึก 50 mm ทุกด้านของเซลล์ทดสอบหุ้มฉนวน เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนและการควบแน่น



รูปที่ 2. แสดงอุปกรณ์ทดลอง ประกอบด้วย 1) เซลล์ทดสอบ 2) อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน 3) ฉนวนความร้อน 4) เครื่องทำความเย็น 5) อุปกรณ์บันทึกอุณหภูมิ 6) เทอร์โมคัปเปิ้ล 7) ห้องควบคุมอุณหภูมิ

ของความชื้นที่ผนัง ภายในเซลล์ทดสอบบรรจุวัสดุทดสอบ(เม็ดแก้ว,เม็ดเหล็ก) ทรงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสม่ำเสมอขนาด 0.15 mm เป็นวัสดุพรุนและใช้น้ำเป็นวัสดุในการเปลี่ยนแปลงเฟส ที่ผนังในแนวดิ่งด้านข้างซ้ายได้ระบายความร้อนจากแหล่งให้ความร้อนอุณหภูมิต่ำโดยอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะต่อเข้ากับแหล่งอุณหภูมิต่ำจะประกอบไปด้วยสารละลาย เอทิลีนไกลคอลผสมน้ำ(ethylene glycol–water) ซึ่งใช้เป็นสารตัวกลางในการระบายความร้อน

ระหว่างทำการทดลองเซลล์ทดสอบจะติดตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้องควบคุมที่ 10 °C และใช้เทอร์โมคัปเปิ้ล Type K ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6 mm จำนวน 10 ตัว เพื่อหาค่าการกระจายของอุณหภูมิภายในเซลล์ทดสอบซึ่งตำแหน่งของเทอร์โมคัปเปิ้ลทั้งหมดที่ใช้วัดอุณหภูมิจะถูกติดตั้งที่ตำแหน่งศูนย์กลางในระนาบของเซลล์ทดสอบและมีระยะห่างเท่าๆกัน 10 mm โดยที่เทอร์โมคัปเปิ้ลทุกตัวจะต่อเข้ากับอุปกรณ์บันทึกอุณหภูมิ (Data logger) เพื่อเก็บและวิเคราะห์ข้อมูลที่ช่วงเวลาต่าง ๆ ตำแหน่งของผิวเชื่อมต่อระหว่างเฟสในเซลล์ทดสอบหาได้จากการประมาณค่าในช่วง (Interpolate) ของอุณหภูมิที่อ่านได้จากเทอร์โมคัปเปิ้ล



รูปที่ 3. เซลล์ทดสอบ

จากรูปที่ 3. เซลล์ทดสอบ เมื่อแลกเปลี่ยนความร้อนโดยชุดแลกเปลี่ยนความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งจะเกิดโซนของแข็ง (1) และโซนของเหลว (2) จากรูปที่ 3 จะเห็นขอบเขตที่มีการเคลื่อนที่ผ่านแนวเทอร์โมคัปเปิ้ลที่กระจายอยู่ในชุดทดลอง และทำการเก็บค่าการกระจายอุณหภูมิในชุดทดสอบ และนำข้อมูลที่ได้จากการ

ทดลองมาทำการวิเคราะห์และทำความเข้าใจกลไกของการเปลี่ยนแปลงในปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น

3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์กระบวนการทำแข็งในวัสดุพรุนที่อิ่มตัวในระบบ 1 มิติ ในส่วนของการถ่ายเทพลังงานจะอยู่บนพื้นฐานของกฎการอนุรักษ์พลังงานและอยู่ในระบบสภาวะสมดุลทางความร้อน(Thermal Equilibrium) ระหว่างวัสดุที่มีการเปลี่ยนแปลงเฟส (น้ำและน้ำแข็ง) และโครงสร้างของวัสดุพรุน

รูปที่ 1 แสดงแบบจำลองทางกายภาพของระบบดังแสดงใน ซึ่งประกอบไปด้วย 2 โซน คือโซนของแข็งและโซนของเหลว ภายในโซนของแข็งจะมีเฉพาะการถ่ายเทความร้อนเพียงอย่างเดียว ในขณะที่ภายในโซนของเหลวจะมีทั้งการถ่ายเทความร้อนและถ่ายเทมวลสารของน้ำ ซึ่งจากแบบจำลองทางกายภาพของกระบวนการทำแข็งที่จะทำการศึกษาจะอยู่ภายใต้สมมติฐานได้ดังนี้

1) ทำการวิเคราะห์กระบวนการทำแข็งในวัสดุพรุนที่อิ่มตัวในระบบ 1 มิติ และผิวทำแข็งหรือผิวเชื่อมต่อระหว่างเฟสมีลักษณะแบบเบนราบ

2) วัสดุพรุนที่พิจารณากำหนดให้มีคุณสมบัติเป็นแบบไอโซโทรปิก (Isotropic) มีเนื้อเดียวกันตลอด (Homogeneous) และมีค่าความพรุนคงที่ (Uniform porosity)

3) ไม่พิจารณาการเปลี่ยนแปลงปริมาตรในระหว่างการทำแข็ง

4) ไม่พิจารณาการถ่ายเทความร้อนโดยการพาแบบธรรมชาติในโซนของเหลว

5) ผิวเชื่อมต่อระหว่างโซนของแข็งและโซนของเหลวทราบได้จากตำแหน่งที่มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิหลอมละลายของวัสดุ

6) การวิเคราะห์ภายใต้สมติฐานของระบบอยู่ในสภาวะ สมดุลทางความร้อน (Thermal Equilibrium) ระหว่างวัสดุที่มีการเปลี่ยนแปลงเฟส (น้ำและน้ำแข็ง) และโครงสร้างของวัสดุพรุน (Porous matrix)

จากสมติฐานที่กล่าวมานั้นสามารถเขียนสมการเชิงอนุพันธ์เพื่อใช้อธิบายการถ่ายเทความร้อนทั้งบริเวณ โซนของแข็ง, โซนของเหลว และสมการการเคลื่อนของผิวเชื่อมต่อระหว่างเฟสในกรณี 1 มิติ ดังนี้

สมการเชิงอนุพันธ์อธิบายการถ่ายเทความร้อนสำหรับโซนของแข็ง (Frozen layer)

$$\langle \rho C_p \rangle_{ef} \frac{\partial T_1}{\partial t} = (k_1)_{ef} \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} \qquad (1)$$

เมื่อ $k_{ef} = \varepsilon k_f + (1-\varepsilon)k_s$ และ

$$\langle \rho C_p \rangle_{ef} = \varepsilon \langle \rho C_p \rangle^f + (1-\varepsilon)\langle \rho C_p \rangle^S \qquad (2)$$

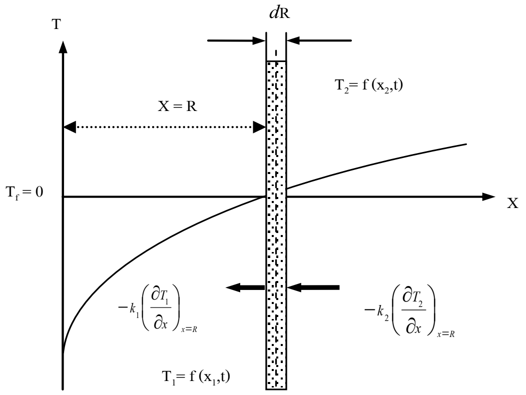
จะได้

$$(1-\varepsilon)\langle \rho C_p \rangle^S \frac{\partial T_1}{\partial t} = (k_1)_{ef} \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} \qquad (3)$$

โซนของเหลว (Unfrozen layer)

$$\varepsilon \langle \rho C_p \rangle^f \frac{\partial T_2}{\partial t} = (k_2)_{ef} \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} \qquad (4)$$

และสมการเชิงอนุพันธ์อธิบายการถ่ายเทความร้อนสำหรับที่ตำแหน่งของผิวทำแข็งของวัสดุพรุนแบบอิ่มตัว



รูปที่ 4. แสดงการสมดุลพลังงานที่ผิวทำแข็งของวัสดุพรุนแบบอิ่มตัว

จากรูปที่ 4. พิจารณาตำแหน่งของผิวทำแข็ง $x = R$ อุณหภูมิ 0°C จากนั้น ทำการสร้างสติปเล็กๆ มีความหนา ∂T ที่เวลา ∂t ที่ตำแหน่งนี้การถ่ายเทความร้อนเป็นไปแบบต่อเนื่อง ซึ่งความร้อนที่ถ่ายเทจากโซนของเหลวโดยการนำผ่านพื้นผิวที่มีอุณหภูมิคงที่ไปยังโซนของแข็งของวัสดุพรุนแบบอิ่มตัว จากกฎของการอนุรักษ์พลังงาน จะได้

$$L\rho \frac{dR}{dt} = q_2 - q_1 \qquad (5)$$

เมื่อ $q = -k\dfrac{\partial T}{\partial x}$

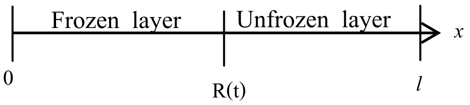
ซึ่งอัตราการเคลื่อนที่ของขอบเขต (Moving boundary) หาได้จาก

$$L\rho\varepsilon \frac{dR}{dt} = (k_1)_{ef}\left(\frac{\partial T_1}{\partial x}\right)_{x=R} - (k_2)_{ef}\left(\frac{\partial T_2}{\partial x}\right)_{x=R} \qquad (6)$$

3.2.1 การแปลงพิกัดแกนที่อยู่บนพื้นฐานของวิธีกำหนดขอบเขตแบบคงที่

เนื่องจากปัญหาที่ทำการศึกษาในครั้งนี้เป็นปัญหาไม่เชิงเส้น ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงเฟสและการเคลื่อนตัวของขอบเขต ดังนั้นในการวิเคราะห์จะเกี่ยวข้องกับการแปลงพิกัดแกน

สมการความร้อนสำหรับโซนของแข็ง (Frozen Layer) การแปลงพิกัดแกนในโซนของแข็งสามารถใช้ระบบพิกัดดังนี้



$$\eta = \frac{x}{R(t)}, \qquad 0 \le x \le R(t) \tag{7}$$

เมื่อ R(t) เป็นระยะระหว่างผิวที่ได้รับโหลดความเย็นถึงผิวทำแข็ง เมื่อใช้เทคนิคการแปลงพิกัดแกนจะแปลงจากพิกัด (x,t) ไปเป็น $\eta((x,t),t)$ ดังนั้นจะได้ตัวดำเนินการอนุพันธ์ (Differential operators) ที่คาบเกี่ยวกับการแปลงพิกัดแกน ซึ่งสามารถเขียนอยู่ในรูปความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial \eta}\frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{1}{R}\frac{\partial}{\partial \eta} \tag{8}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \eta}\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} - \frac{\eta \dot{R}}{R}\frac{\partial}{\partial \eta} \tag{9}$$

เมื่อ $\dot{R}$ เป็นค่าอนุพันธ์ของตำแหน่งของผิวทำแข็งเทียบกับเวลา

สมการความร้อนจากการแปลงพิกัดแกน จากสมการที่ (8) (9) และ **สมการความร้อนในโซนของแข็งสมการที่** (3) สามารถเปลี่ยนรูปสมการได้ดังนี้

$$(1-\varepsilon)\langle \rho C_p \rangle^s \frac{\partial T_1}{\partial t} = \langle \rho C_p \rangle^s \frac{\eta \dot{R}}{R}\frac{\partial T_1}{\partial \eta} + \frac{(k_1)_{ef}}{R^2}\frac{\partial^2 T_1}{\partial \eta^2} \tag{10}$$

การแปลงพิกัดแกนสำหรับสมการ**ในโซนของเหลว**ใช้ระบบพิกัดดังนี้

$$\varsigma = \frac{x - R(t)}{\iota - R(t)}, \qquad R(t) \le x \le \iota \tag{11}$$

$$\frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial \varsigma}\frac{\partial \varsigma}{\partial x} = \frac{1}{\iota - R}\frac{\partial}{\partial \varsigma} \tag{12}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \varsigma}\frac{\partial \varsigma}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} - \frac{\dot{R}(1-\varsigma)}{\iota - R}\frac{\partial}{\partial \varsigma} \tag{13}$$

จากสมการที่ (12) (13) และ **สมการความร้อนในโซนของเหลว**สมการที่ (4) สามารถเปลี่ยนรูปสมการได้ดังนี้

$$\varepsilon \langle \rho C_p \rangle^f \frac{\partial T_2}{\partial t} = \langle \rho C_p \rangle^f \frac{\dot{R}(1-\varsigma)}{\iota - R}\frac{\partial T_2}{\partial \varsigma} + \frac{(k_2)_{ef}}{(\iota - R)^2}\frac{\partial^2 T_2}{\partial \varsigma^2} \tag{14}$$

สมการการเคลื่อนที่ของขอบเขต จากสมการที่ (6) สามารถเปลี่ยนรูปของสมการได้ดังนี้

$$\rho L \varepsilon \frac{dR}{dt} = \frac{(k_1)_{ef}}{R}\left.\frac{\partial T}{\partial \eta}\right|_{x=R} - \frac{(k_2)_{ef}}{\iota - R}\left.\frac{\partial T}{\partial \varsigma}\right|_{x=R} \tag{15}$$

3.2.2 รูปแบบสมการในระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Schemes)

ในการศึกษาครั้งนี้ใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่อยู่บนพื้นฐานวิธีผลต่างสืบเนื่อง (Finite differences method) ได้รูปแบบสมการในระเบียบวิธีเชิงตัวเลขจากการแปลงพิกัดแกนที่อยู่บนพื้นฐานของวิธีกำหนดขอบเขตแบบคงที่จะได้

สมการความร้อนสำหรับโซนของแข็ง(Frozen Layer) จากสมการที่ (8)

$$(1-\varepsilon)\langle \rho C_p \rangle^s \frac{\partial T_1}{\partial t} = \langle \rho C_p \rangle^s \frac{\eta \dot{R}}{R}\frac{\partial T_1}{\partial \eta} + \frac{(k_1)_{ef}}{R^2}\frac{\partial^2 T_1}{\partial \eta^2} \tag{16}$$

$$(1-\varepsilon)\frac{\langle \rho C_p \rangle^{n+1}_{T_{1,i}} T^{n+1}_{1,i} - \langle \rho C_p \rangle^{n}_{T_{1,i}} T^{n}_{1,i}}{\Delta t} = \frac{\eta \dot{R}}{R}\frac{\langle \rho C_p \rangle^{n+1}_{T_{1,i+1/2}} T^{n+1}_{1,i+1/2} - \langle \rho C_p \rangle^{n+1}_{T_{1,i-1/2}} T^{n+1}_{1,i-1/2}}{\Delta \eta}$$
$$+ \frac{1}{R}\frac{1}{\Delta \eta}\left[\left((k_1)_{ef}\right)^{n+1}_{T_{1,i+1/2}} \left(\frac{T^{n+1}_{1,i+1} - T^{n+1}_{1,i}}{R\Delta \eta}\right) - \left((k_1)_{ef}\right)^{n+1}_{T_{1,i-1/2}} \left(\frac{T^{n+1}_{1,i} - T^{n+1}_{1,i-1}}{R\Delta \eta}\right) \right] \tag{17}$$

สมการความร้อน สำหรับโซนของเหลว (Unfrozen layer) จากสมการที่ (14)

$$\varepsilon \langle \rho C_p \rangle^f \frac{\partial T_2}{\partial t} = \langle \rho C_p \rangle^f \frac{\dot{R}(1-\varsigma)}{\iota - R}\frac{\partial T_2}{\partial \varsigma} + \frac{k_2}{(\iota - R)^2}\frac{\partial^2 T_2}{\partial \varsigma^2} \tag{18}$$

$$\varepsilon \frac{\langle \rho C_p \rangle^{n+1}_{T_{2,i}} T^{n+1}_{2,i} - \langle \rho C_p \rangle^{n}_{T_{2,i}} T^{n}_{2,i}}{\Delta t} = \frac{(1-\varsigma)\dot{R}}{\iota - R}\frac{\langle \rho C_p \rangle^{n+1}_{T_{2,i+1/2}} T^{n+1}_{2,i+1/2} - \langle \rho C_p \rangle^{n+1}_{T_{2,i-1/2}} T^{n+1}_{2,i-1/2}}{\Delta \varsigma}$$
$$+ \frac{1}{(\iota - R)}\frac{1}{\Delta \varsigma}\left[\left((k_2)_{ef}\right)^{n+1}_{T_{2,i}} \left(\frac{T^{n+1}_{2,i+1} - 2T^{n+1}_{2,i}}{(\iota - R)\Delta \varsigma}\right) - \left((k_2)_{ef}\right)^{n+1}_{T_{2,i}} \left(\frac{2T^{n+1}_{2,i} - T^{n+1}_{2,i-1}}{(\iota - R)\Delta \varsigma}\right) \right] \tag{19}$$

สมการการเคลื่อนที่ของขอบเขต จากสมการที่ (15)

$$\rho L \varepsilon \frac{dR}{dt} = \frac{(k_1)_{ef}}{R}\left.\frac{\partial T}{\partial \eta}\right|_{x=R} - \frac{(k_2)_{ef}}{\iota - R}\left.\frac{\partial T}{\partial \varsigma}\right|_{x=R} \tag{20}$$

$$\rho_1 L \varepsilon \frac{3R^{n+1} - 4R^{n} + R^{n-1}}{2\Delta t} = (k_1)_{ef} \left.\frac{3T^{n+1}_{1,end} - 4T^{n+1}_{1,end-1} + T^{n+1}_{1,end-2}}{2R^{n+1}\Delta \eta}\right|_{x=R}$$
$$- (k_2)_{ef} \left.\frac{-3T^{n+1}_{2,0} + 4T^{n+1}_{2,1} - T^{n+1}_{2,2}}{2(\iota - R^{n+1})\varsigma}\right|_{x=R} \tag{21}$$

3.2.3 เงื่อนไขในการคำนวณทางระเบียบวิธีเชิงตัวเลขมีดังนี้

1) กำหนดค่าเริ่มต้นที่จำเป็นเพื่อใช้ในการคำนวณค่าต่างๆ เช่น คุณสมบัติต่างๆ ทางความร้อน ตำแหน่งของผิวทำแข็งเริ่มต้น การกระจายตัวของอุณหภูมิเริ่มต้น เนื่องจากกำหนดให้มีบริเวณชั้นบางๆ ของโซนของแข็งขณะเริ่มต้นของกระบวนการเพื่อให้ง่ายต่อคำนวน

2) กำหนดช่วงเวลา Δt มีค่าเท่ากับ 1 วินาที สำหรับการคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและตำแหน่งของผิวเชื่อมต่อระหว่างเฟสหรือผิวทำแข็ง

3) จำนวนกริดที่สร้างทั้งหมด จำนวน 150 จุด

4) กำหนดค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้มีค่าเท่ากับ 10^{-6} เพื่อหยุดการคำนวณซ้ำของอัลกอริทึมที่สร้างขึ้น

ในส่วนของเงื่อนไขของระบบที่ใช้ในการวิเคราะห์ กำหนดให้ระบบที่พิจารณามีเงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขตดังนี้

เงื่อนไขเริ่มต้น

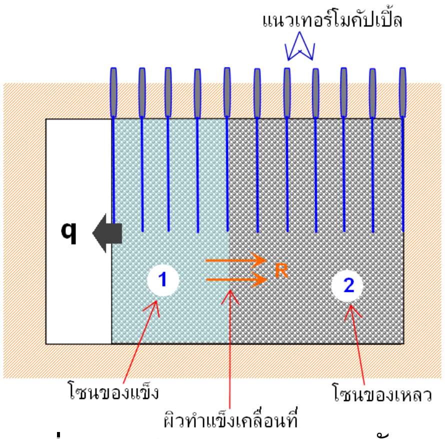
- ที่ตำแหน่ง $x > 0,\ t = 0,\ T_1 = T_O =$ constant

เงื่อนไขขอบเขต

- ที่ตำแหน่ง $x = 0,\ t \geq 0,\ T_1 = T_s$
- ที่ตำแหน่ง $x = l = 0.1$ m, $t \geq 0,\ \dfrac{\partial T}{\partial x} = 0$
- ที่ตำแหน่ง $x = R(t)$, $t > 0$, $T_1 = T_2 =$ constant $= T_f = 0$

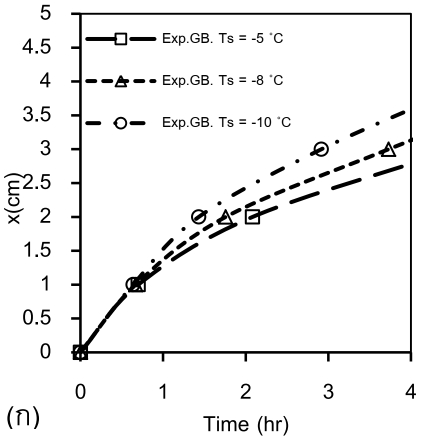
4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากรูปที่ 5. เซลล์ทดสอบเมื่อแลกเปลี่ยนความร้อนโดยชุดแลกเปลี่ยนความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งจะเกิดโซนของแข็ง (1) และโซนของเหลว (2) และจะเห็นขอบเขตผิวทำแข็งที่มีการเคลื่อนที่ผ่านแนวเทอร์โมคัปเปิ้ลที่กระจายอยู่ในชุดทดลองนั้น จากข้อมูลที่ได้ทำการวิเคราะห์และทำความเข้าใจกลไกของการเปลี่ยนแปลงในปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นสามารถสรุปได้ดังนี้

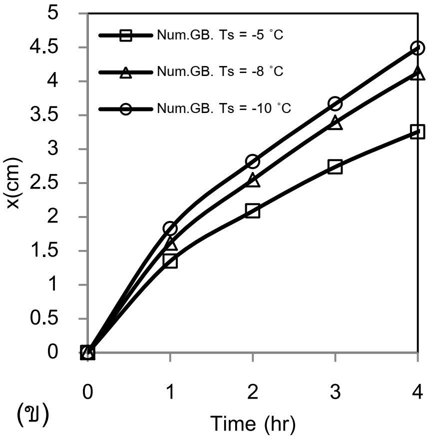


รูปที่ 5 แสดงลักษณะกายภาพของปัญหา

4.1 การเปรียบเทียบแนวโน้มการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งที่ใช้วัสดุพรุนชนิดเดียวกัน ขนาดเดียวกันสำหรับที่อุณหภูมิทำแข็งต่างกัน



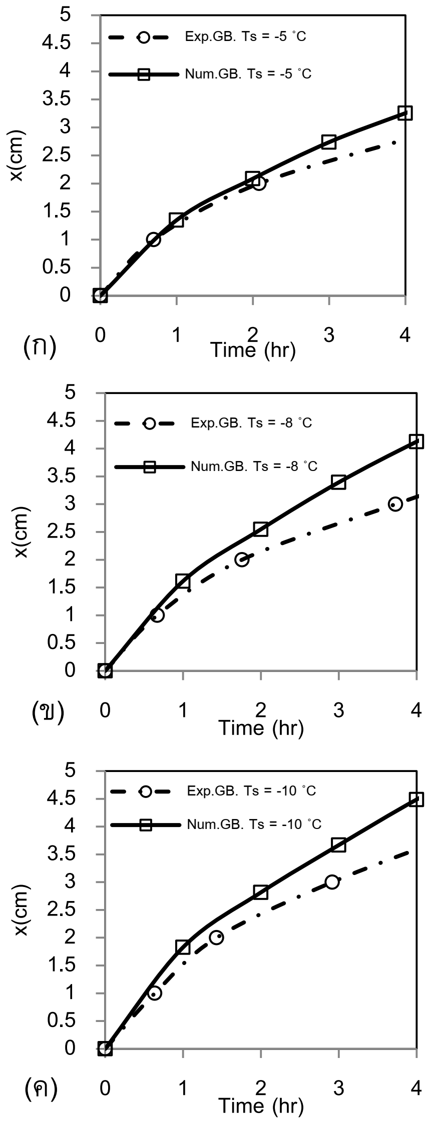
(ก)



(ข)

รูปที่ 6 การเปรียบเทียบแนวโน้มการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งที่ใช้อุณหภูมิทำแข็งต่าง ๆสำหรับเม็ดแก้ว (ก) ผลการทดลอง (ข) ผลเชิงตัวเลข

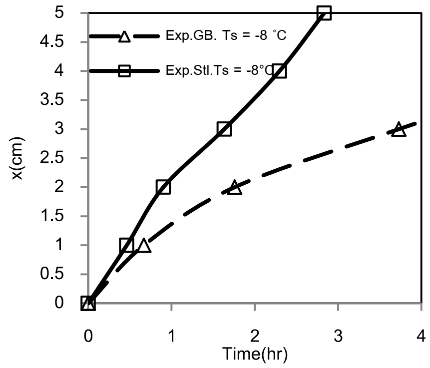
จากรูปที่ 6 เปรียบเทียบแนวโน้มอัตราการเกิดน้ำแข็งที่อุณหภูมิต่าง ๆพบว่าอัตราการเกิดน้ำแข็งที่อุณหภูมิทำแข็งต่ำจะเกิดขึ้นเร็วกว่าที่อุณหภูมิสูง แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแข็งที่อุณหภูมิทำแข็งต่ำ อัตราการการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งจะมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิทำแข็งสูง และพบว่าแนวโน้มอัตราของการเกิดน้ำแข็งช่วงแรกๆของกระบวนการอัตราการเกิดน้ำแข็งจะเกิดสูงกว่าช่วงหลัง เนื่องจากแนวโน้มอัตราของการเกิดน้ำแข็งช่วงแรกๆของกระบวนการทำแข็ง อัตราการเกิดน้ำแข็งจะเกิดสูงกว่าช่วงหลัง เนื่องจากการเกิดการต้านทานทางร้อนจากความหนาของโซนของแข็งที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 7 การเปรียบเทียบแนวโน้มการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งที่อุณหภูมิทำแข็งต่าง ๆสำหรับเม็ดแก้ว (ก) Ts = -5ºC (ข) Ts = -8ºC (ค) Ts = -10ºC

จากรูปที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบระยะการเคลื่อนตัวของผิวทำแข็งจากผลที่ได้จากการทดลองและผลเชิงตัวเลข อุณหภูมิที่ใช้ในการทำแข็งต่างๆ ซึ่งพบว่าอัตราการเคลื่อนตัวของผิวทำแข็งที่อุณหภูมิที่ใช้ในการทำแข็งต่างๆ ทั้งสองวิธีจะมีค่าใกล้เคียงและสอดคล้องกันแต่มีค่าความคลาดเคลื่อน

4.2 การเปรียบเทียบแนวโน้มการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งที่ใช้วัสดุพรุนต่างชนิดสำหรับอุณหภูมิทำแข็งเดียวกัน



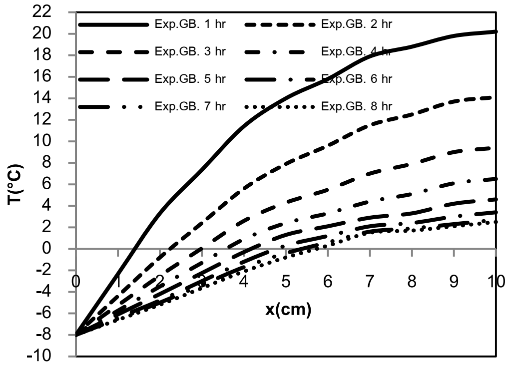
รูปที่ 8 การเปรียบเทียบแนวโน้มการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งที่ใช้วัสดุพรุนต่างชนิด สำหรับอุณหภูมิทำแข็ง -8 °C

จากรูปที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบแนวโน้มการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งที่ใช้อุณหภูมิทำแข็ง -8 °C ของวัสดุพรุนต่างชนิดกัน พบว่าแนวโน้มการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งของเม็ดเหล็กจะสูงกว่าเม็ดแก้ว เนื่องจากอิทธิพลของค่าการนำความร้อนของเหล็กมีค่ามากกว่าเม็ดแก้ว ซึ่งทำให้การถ่ายเทความร้อนในวัสดุดีกว่าและเร็วกว่า

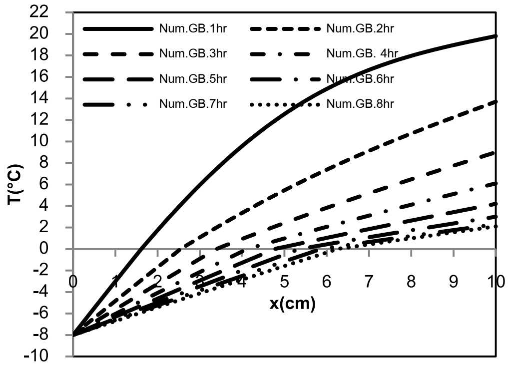
4.3 แสดงการกระจายอุณหภูมิและการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็ง

จากรูปที่ 9 แสดงลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิและการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งที่ใช้อุณหภูมิทำแข็ง -8°C สำหรับเม็ดแก้ว พบว่าที่อุณหภูมิที่ใช้ในการทำแข็งใดๆ เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นระยะของผิวทำแข็งจะมีค่าเพิ่มขึ้นและอัตราการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งที่ระยะเวลาทำ

แข็งน้อยๆ จะมีค่าสูงกว่าที่เวลามากๆซึ่งอาจเกิดจากการที่โซนของแข็งเพิ่มขึ้นเป็นผลให้เกิดความต้านทานของความร้อนที่ต้องระบายออกจากโซนของเหลวมีค่าลดลงทำให้อัตราการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งลดลง

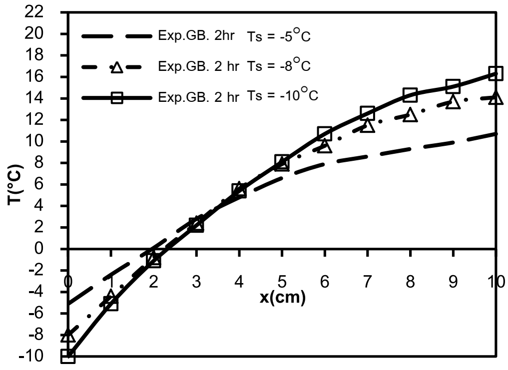


รูปที่ 9 (ก)

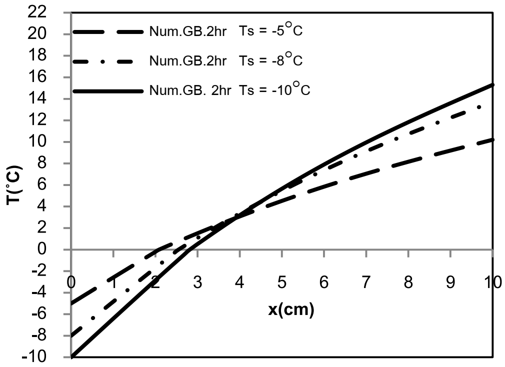


รูปที่ 9 (ข)

รูปที่ 9 ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิและการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งที่ใช้อุณหภูมิทำแข็ง -8°C สำหรับเม็ดแก้ว (ก) ผลการทดลอง (ข) ผลเชิงตัวเลข



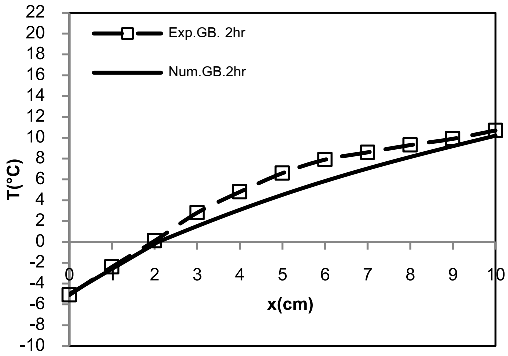
รูปที่ 10 (ก)



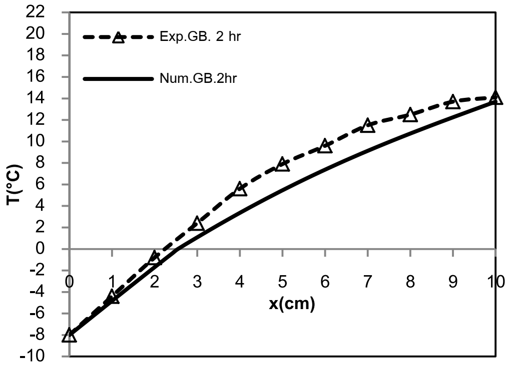
รูปที่ 10 (ข)

รูปที่ 10ผลของอุณหภูมิทำแข็ง ต่ออัตราการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็ง เม็ดแก้ว (ก) ผลการทดลอง (ข) ผลเชิงตัวเลข

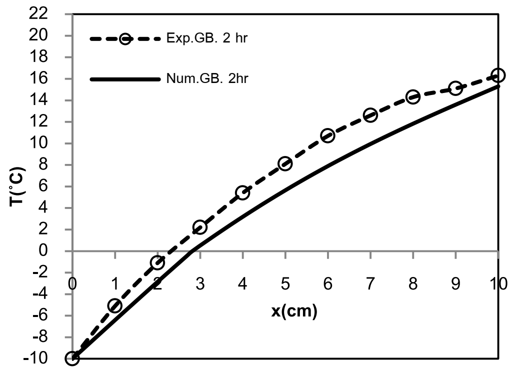
จากรูปที่ 10 พบว่าที่อุณหภูมิทำแข็งมีค่าต่ำๆอัตราการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งซิ่งจะเพิ่มขึ้นด้วย และเมื่อพิจารณาการกระจายอุณหภูมิในโซนของเหลวพบว่าที่อุณหภูมิทำแข็งต่ำๆอุณหภูมิจะมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิทำแข็งสูงเนื่องจากอุณหภูมิทำแข็งทำให้ปริมาณโซนของแข็งเพิ่มเร็วขึ้นซึ่งทำให้เกิดความต้านทานทางความร้อนเพิ่มขึ้นด้วย



รูปที่ 11 (ก)



รูปที่ 11 (ข)

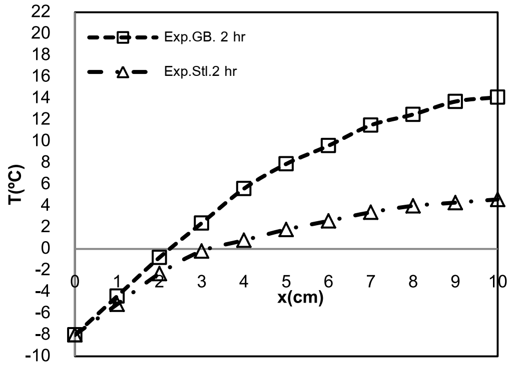


รูปที่ 11 (ค)

รูปที่ 11 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิและตำแหน่งของผิวทำแข็งสำหรับเม็ดแก้วที่เวลา 2 hr (ก) -5 °C (ข) -8 °C (ค) -10 °C

จากรูปที่ 11 การเปรียบเทียบการกระจายตัวอุณหภูมิที่เวลา 2 hr ระหว่างผลที่ได้จากการทดลองและผลเชิงตัวเลข พบว่ามีค่าใกล้เคียงและสอดคล้องกัน

4.3 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิและตำแหน่งของผิวทำแข็งของวัสดุพรุนต่างชนิดและขนาดเดียวกัน ที่ใช้อุณหภูมิทำแข็ง -8ºC เมื่อพิจารณาที่ 2 ชั่วโมง



รูปที่ 12 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิและตำแหน่งผิวทำแข็งของวัสดุพรุนต่างชนิด สำหรับอุณหภูมิทำแข็ง -8 °C (ก) ผลการทดลอง (ข) ผลเชิงตัวเลข

จากรูปที่ 12 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิและการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งของวัสดุพรุนต่างชนิดกัน-8 °C พบว่าการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งของเม็ดเหล็กจะมากกว่าเม็ดแก้ว เนื่องจากอิทธิพลของค่าการนำความร้อนของเม็ดเหล็กจะมีค่าสูงกว่าเม็ดสแตนเลสและเม็ดแก้ว จึงส่งผลให้การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเซลล์ทดสอบได้ดีกว่า การกระจายอุณหภูมิในโซนของเหลวจะเห็นว่าเม็ดเหล็กอุณหภูมิต่ำกว่าเม็ดแก้วเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนเร็วกว่าทำอุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็ว

5. สรุปผล

จากแบบจำลองที่นำเสนอเบื้องต้นเพื่อทำนายปรากฏการในกระบวนการทำแข็งวัสดุพรุนนี้ พบว่าแบบจำลองสามารถใช้ทำนายให้เห็นถึงลักษณะการเคลื่อนตัวของผิวทำแข็ง และอิทธิพลของระดับอุณหภูมิที่ทำแข็งที่มีแนวโน้มของการกระจายอุณหภูมิและอัตราการเคลื่อนตัวของผิวทำแข็งที่ไปในทิศทางเดียวกัน และค่าความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นอาจเป็นผลมาจากข้อจำกัดของวิธีทางระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ซึ่งเป็นวิธีการประมาณค่าดังนั้นย่อมมีคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นเสมอ และการกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นโดยกำหนดให้ที่เวลาเริ่มต้น(t=0) นั้นมีเฟสของแข็งที่เป็นลักษณะแผ่นบางๆ ที่มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิทำแข็งเกิดขึ้นอยู่ก่อนแล้ว ซึ่งเงื่อนไขนี้จำเป็นต้องกำหนดเพื่อให้กระบวนการคำนวณเชิงตัวเลขสามารถเริ่มดำเนินต่อไปได้ นอกจากนี้ ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากการทดลองที่อาจเกิดจากการสูญเสียทางความร้อนในระหว่างการทดลองซึ่งไม่สามารถควบคุมได้ทั้งหมด ค่าของความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือที่ใช้ทดลอง และอาจเกิดจากการพาความร้อนแบบอิสระในโซนของของเหลวซึ่งในการศึกษาเชิงตัวเลขไม่ได้ทำการพิจารณาถึงผลกระทบดังกล่าว ในส่วนของการเปรียบเทียบกรณีที่ชนิดของวัสดุพรุนต่างกันพบว่าอิทธิพลของค่าการนำความร้อนของวัสดุที่มีค่าสูงกว่าจะส่งผลให้แนวโน้มการเคลื่อนตังของผิวทำแข็งเคลื่อนตัวได้เร็วกว่า และการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเซลล์ทดสอบต่ำกว่า เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนเร็วกว่าทำอุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็ว

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ ทุนสนับสนุนโครงการวิจัยเพื่อทำวิทยานิพนธ์ระดับบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และ ภาควิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่ได้สนับสนุนการทำวิจัยในครั้งนี้

7. อักษรย่อและสัญลักษณ์

c_p ค่าความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ (kJ/kg-K)

L ความร้อนแฝงของการทำแข็ง (J/kg)

q การนำความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ (W/m^2)

T_o ค่าอุณหภูมิที่จุดเริ่มต้นของวัสดุที่มีเปลี่ยนแปลงเฟส(°C)
T_f อุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟส (°C)
T_s อุณหภูมิที่ใช้ในการทำแข็ง (°C)
T_1, T_2 อุณหภูมิโซนของแข็ง/โซนของเหลว (°C)
t เวลา (s)
x ตำแหน่งบนพิกัดแกน x (m)
ρ ความหนาแน่น (kg/m^3)
R ระยะการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็ง (m)
k_{ef} ประสิทธิผลของการนำความร้อน (W/mK)
$(k_1)_{ef}$ ประสิทธิผลของการนำความร้อนโซนของแข็ง
$(k_2)_{ef}$ ประสิทธิผลของการนำความร้อนโซนของเหลว
ε ค่าความพรุน
Exp. ผลการทดลอง / Num. ผลแบบจำลอง
GB เม็ดแก้ว / Stl. เม็ดเหล็ก

8. เอกสารอ้างอิง

[1] Zhang X. and Hung Nguyen T., Solidification of a superheated fluid in a porous medium: effects of convection, International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, 9(1)(1999) 72-91.

[2] Ismail K.A.R.and HenrõÂquez J.R., Solidification of PCM inside a spherical capsule, Energy Conversion & Management, 41(2000)173-187

[3] Beckermann C. and Viskanta R., Natural convection solid/liquid phase change in porous media, , Int J. Heat and Mass Transfer, 31(1)(1988) 35-46.

[4] Weaver J.A and Viskanta R., Melting of frozen, porous media contained in a horizontal or a vertical, cylindrical capsule, Int. J, Heat and Mass Transfer. 29(12)(1986)

[5] Weaver, J. A., and Viskanta, R., “Freezing of Liquid-Saturated Porous Media,” Journal of Heat Transfer, 108(1)(1986) 654–659.

[6] P. Rattanadecho, Experimental and Numerical Study of Solidification Process in Unsaturated Granular Packed Bed, journal of thermophysics and heat transfer, 18(1)(2004) 87-93.

[7] Chellaiah C. and Viskanta R., Freezing of Water-Saturated Porous Media in the Presence of Natural Convection: Experiments and Analysis Journal of Heat Transfer, 111(1989).

[8] Chellaiah, S., and Viskanta, R., “Freezing of Saturated and Superheated Liquid in Porous Media,” International Journal of Heat and Mass Transfer, 31(2) (1988) 321–330.

[9] P. Rattanadecho and S. Wongwises, Moving Boundary-Moving Mesh Analysis of Freezing Process in Water-Saturated Porous Media Using a Combined Transfinite Interpolation and PDE Mapping Methods, ASME Journal of Heat Transfer, 130(2008) 012601-1 – 012601-10.

[10] วิระศักดิ์ คงแก้ว จิรพล กลิ่นบุญ มณฑล ชูโชนาค และ ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช “การศึกษาเชิงตัวเลขและเชิงทดลองของกระบวนการทำแข็งในวัสดุ ที่มีการเปลี่ยนแปลงเฟส 1 มิติ" การประชุมวิชาการ การถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อน (ครั้งที่ 8) 12 - 13 มีนาคม 2552 โรงแรมโพธิ์วิดลรีสอร์ทแอนด์สปา จังหวัดเชียงราย

[11] วิระศักดิ์ คงแก้ว ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช มณฑล ชูโชนาคและจิระพล กลิ่นบุญ “ การศึกษาเชิงทดลองของกระบวนการทำแข็งของวัสดุที่มีการเปลี่ยนแปลงเฟส 1 มิติ " การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 24 (ME-NETT 24) วันที่ 20-22 ตุลาคม 2553 จังหวัดอุบลราชธานี