

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24
20-22 ตุลาคม 2553 จังหวัดอุบลราชธานี

การศึกษาเชิงทดลองของกระบวนการทำแข็งของวัสดุพรุนแบบอิมิตัว 1 มิติ Experimental Study of 1-D Solidification Process in Saturated Porous Media

ยุทธนา สุโงะ¹, อัฐพล เสนากัสป์², สุกิจ ส่งรุ่งอรุณ³ และ มณฑล ชูโซนาค^{4*}

^{1,2,3} นักศึกษา, ⁴ อาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
เลขที่ 2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพฯ 10120
*E-mail: monthon6@hotmail.com, โทรศัพท์: 081-8432096

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาเชิงทดลองของกระบวนการทำแข็งของวัสดุพรุนแบบอิมิตัว เพื่อศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคและอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแข็งที่มีผลต่อการกระจายอุณหภูมิและการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งภายในชุดทดสอบ จากการศึกษาพบว่าอัตราการเกิดผิวทำแข็งมีลักษณะเป็นแบบไม่เชิงเส้นสูงในช่วงแรกของกระบวนการและที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่โตกว่าจะมีอัตราการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งสูงกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กกว่า ซึ่งองค์ความรู้ที่ได้จากการศึกษาสามารถนำไปใช้เป็นความรู้พื้นฐานในงานวิจัยระดับที่สูงขึ้น และเป็นประโยชน์ต่องานทางวิศวกรรมที่หลากหลายต่อไป

คำหลัก: วัสดุพรุนแบบอิมิตัว, ผิวทำแข็ง, อนุภาค, การกระจายอุณหภูมิ

Abstract

This research study the experimental of solidification process of saturated porous media. The influence of the particle size and solidification temperature on temperature distribution and solidification front during solidification process in saturated porous media are clarified in details. It is found that the nonlinearity of solidification rate occurs for a short time. Moreover, it is found that using a larger particle size result in a higher solidification rate. The results presented here provide a fundamental understanding of solidification process in porous media.

Keywords: porous media, solidification front, particle, temperature distribution

1. บทนำ

การเปลี่ยนแปลงเฟสของวัสดุพรุนแบบอิมิตัว หรือการเคลื่อนตัวของผิวทำแข็งนั้นเป็นปัญหาทางกายภาพที่มีลักษณะเด่น คือ ปัญหาที่มีการเคลื่อนที่ของขอบเขต ซึ่งจะส่งผลให้การใช้สมการกำกับที่ได้ นั้นจะมีลักษณะที่เป็นแบบไม่เชิงเส้น จึงไม่สามารถทำนายตำแหน่งการเคลื่อนตัวของผิวทำแข็งได้ การ

เปลี่ยนแปลงเฟสมีให้เห็นอยู่ทั่วไปในธรรมชาติ การที่นำวัสดุพรุนมาศึกษาทดลอง เนื่องจากวัสดุพรุนเป็นพื้นฐานของวัสดุต่างๆ ทั่วไป ที่เกี่ยวข้องกับงานทางด้านวิศวกรรม เช่น การแข็งตัวของ คอนกรีต เซรามิก และโลหะต่างๆ หรือในด้านการแพทย์ เช่น การถนอมเนื้อเยื่อต่าง ๆ รวมถึงในด้านอุตสาหกรรมอาหารซึ่งสามารถช่วยรักษาคุณภาพและยืดอายุของ

อาหารให้ยาวนานขึ้น เป็นต้น การที่เราสามารถทำความเข้าใจกลไกของการเปลี่ยนแปลงในปรากฏการณ์ต่างๆ เหล่านี้จะช่วยให้เราสามารถออกแบบหรือพัฒนาปรับปรุงกระบวนการที่เกี่ยวข้องให้ดียิ่งขึ้น

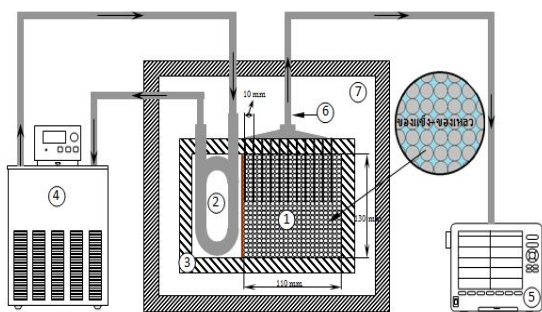
เริ่มต้นจากปี ค.ศ. 1860 Neumann (H.S. Carslaw and J.C.Jaeger,1959), (J.C. Muehlbauer and J.E. Sunderland 1965) ได้ทำการศึกษาปัญหาการเปลี่ยนแปลงเฟส (กรณี 1-phase change problem) สำหรับเงื่อนไขขอบเขตที่มีอุณหภูมิคงที่จนสามารถหาคำตอบของปัญหาที่อยู่ในรูปของผลเฉลยแม่นยำในกรณี 1 มิติได้สำเร็จ ต่อมาในปี ค.ศ. 1889 Stefan (L.I. Rubinstein , 1971) ได้ศึกษาปัญหาเพิ่มเติมจนสามารถหาผลเฉลยในกรณี 2-phase-change problem ได้เช่นกัน กล่าวได้ว่านักวิจัยทั้งสองคนนี้เป็นจุดเริ่มต้นของการศึกษาปัญหาการเปลี่ยนแปลงเฟสในยุคต่อมา ซึ่งทำให้สามารถหาผลเฉลยแม่นยำได้หลากหลายวิธี เช่น วิธี Neumann's Solution (John Crank, 1981), วิธี Similarity Transformation Method (H.S. Carslaw and J.C. Jaeger , 1959) , (A.B. Taylor , 1974) หรือวิธี Heat Balance Integral Methods (T.R. Goodman , 1961) หลังจากนั้นต่อมาได้มีการพัฒนาเพื่อนำเสนอวิธีการหาผลเฉลยแบบใหม่ โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข เช่น Murray และ Landis (Murray, 1959) ได้ทำการเปรียบเทียบระหว่างวิธีแปรผันระยะกริด(Variable space grid method) กับวิธีกำหนดระยะกริดแบบคงที่(Fixed space grid method) พบว่าวิธีแรกจะมีความแม่นยำมากกว่าเนื่องจากมีค่าความคลาดเคลื่อนขณะเริ่มต้นน้อยกว่า Mastanaiah (1976) ได้ศึกษากระบวนการเปลี่ยนแปลงเฟสโดยใช้วิธี Taylor forward projection method และทำการเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ผลเฉลยแม่นยำพบว่ามีความสอดคล้องและใกล้เคียงกันของค่าทั้งสอง ใน ค.ศ. 2004 ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช ได้ศึกษาเชิงทฤษฎีและเชิงทดลองของกระบวนการทำแข็งในเกรนูลาร์แพคเบตที่ไม่อ้อมตัว ในระบบ 1 มิติ ซึ่งแบบจำลองของกระบวนการทำแข็งที่

ทำศึกษาจะใช้เทคนิคการแปลงพิกัดแกนที่อยู่บนพื้นฐานของวิธีการกำหนดขอบเขตแบบคงที่ (Boundary fixing method) ซึ่งพบว่าอัตราการดูดซึมของน้ำในโซนของแข็งในกระบวนการทำแข็งจะมีความสัมพันธ์กับฟลักซ์ความร้อนของการทำแข็งและค่าความอ้อมตัวของน้ำที่ผิวเชื่อมต่อระหว่างเฟส และค่าที่ได้จากการทำนายจะสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลองเป็นอย่างดี ต่อมาใน พ.ศ. 2549 จิตติน แดงเที่ยง ได้นำเอาระเบียบวิธีเชิงตัวเลขมาประยุกต์ใช้กับปัญหาการแข็งตัวของน้ำแข็งของเพื่อทำนายอัตราการผลิตของน้ำแข็งและสามารถนำไปปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นและ ผลการคำนวณเชิงตัวเลขที่ได้เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลเฉลยแม่นยำพบว่าค่าที่ใกล้เคียงกัน ในปี พ.ศ. 2551 มณฑล ชูโชนาค และ ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช ใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อทำนายการกระจายของอุณหภูมิภายในวัสดุและการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็ง (solid surface) ที่เวลาต่างๆ ในระบบหนึ่งมิติ และทำการเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งที่ได้จากการทำนายด้วยวิธีแปรผันระยะกริด วิธีการกำหนดขอบเขตแบบคงที่และผลเฉลยแม่นยำ (Exact solution) พบว่าอัตราการเกิดผิวทำแข็งมีลักษณะเป็นแบบไม่เชิงเส้นสูงในช่วงแรกของกระบวนการ นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทำนายกับค่าที่ได้จากสมการแม่นยำพบว่าค่าที่สอดคล้องกันและพบว่าที่อุณหภูมิที่ใช้ในการทำแข็งใดๆ เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นระยะของผิวทำแข็งก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น และอัตราการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งที่ระยะเวลาทำแข็งน้อยๆ จะมีค่าสูงกว่าที่เวลามากๆ ซึ่งอาจเกิดจากการที่โซนของแข็งเพิ่มขึ้นเป็นผลให้เกิดความต้านทานของความร้อนที่ต้องระบายออกจากโซนของเหลวจะมีค่าลดลง ทำให้อัตราการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งลง และที่อุณหภูมิทำแข็งมีค่าสูงๆ อัตราการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งจะเพิ่มขึ้นด้วย ต่อมาวิระศักดิ์ คงแก้ว ,มณฑล ชูโชนาค ,จิระพล กลิ่นบุญ และผดุงศักดิ์ รัตนเดโช ได้ศึกษาเชิงตัวเลขและเชิงทดลองของกระบวนการทำแข็งในวัสดุที่มีการเปลี่ยนแปลงเฟส 1 มิติ โดยนำผลที่

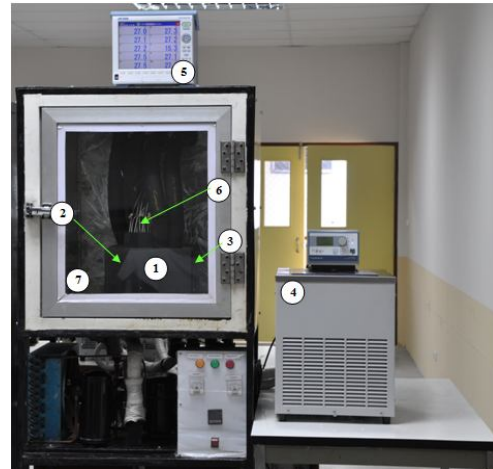
ได้เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากวิธีเชิงตัวเลข ซึ่งพบว่าแนวโน้มของการกระจายอุณหภูมิและอัตราการเกิดน้ำแข็งที่ได้จากระเบียบวิธีเชิงตัวเลขกับผลที่ได้จากการทดลองไปในทิศทางเดียวกัน

2.การทดลอง

จากรูปที่ 1 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองสำหรับการทำแข็งของวัสดุพูนแบบอิมิตัว ซึ่งประกอบไปด้วยเซลล์ทดสอบรูปทรงสี่เหลี่ยมที่มีขนาดภายในสูง 130 mm. กว้าง 110 mm. และลึก 50 mm. ผนังในแนวราบทั้งด้านบนและด้านล่าง และผนังในแนวตั้งทั้งด้านหน้าและด้านหลังทำจาก อะคริลิกเรซิน (acrylic resin) ทุกด้านของเซลล์ทดสอบหุ้มฉนวน Styrofoam หนา 1 in เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนและการควบแน่นของความชื้นที่ผนัง ภายในเซลล์ทดสอบบรรจุเม็ดแก้วรูปทรงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสม่ำเสมอ (porous matrix) ขนาด 0.15 mm., 0.25 mm. และ 0.3 mm. เป็นวัสดุพูนและใช้น้ำเป็นวัสดุในการเปลี่ยนแปลงเฟส ที่ผนังในแนวตั้งด้านข้างซ้ายได้ระบายความร้อนจากแหล่งให้ความร้อนอุณหภูมิต่ำโดยอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบหลายกลับ (multi pass) ซึ่งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะถูกต่อเข้ากับแหล่งอุณหภูมิต่ำโดยใช้วาล์วเปิด-ปิด แหล่งอุณหภูมิต่ำจะประกอบไปด้วยสารละลาย ethylene glycol-water ซึ่งใช้เป็นสารตัวกลางในการระบายความร้อน (เนื่องจากที่ความดันบรรยากาศน้ำจะแข็งตัวที่ 0°C แต่ในแหล่งความร้อนคงที่นั้น อุณหภูมิจะต่ำกว่าศูนย์ดังนั้นจึงต้องเติมสาร ethylene glycol เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำแข็งตัว)



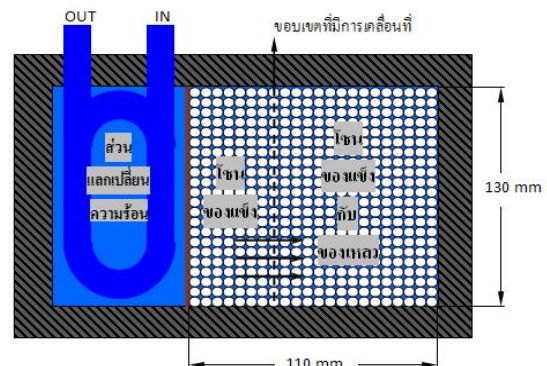
(ก) ภาพแสดงทางกายภาพอุปกรณ์การทดลอง



(ข) ภาพแสดงอุปกรณ์การทดลอง

- รูปที่ 1 แสดงอุปกรณ์ทดลอง 1) เซลล์ทดสอบ, 2) อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน, 3) ฉนวนความร้อน, 4) เครื่องทำความเย็น, 5) อุปกรณ์บันทึกอุณหภูมิ, 6) เทอร์โมคัปเปิล, 7) ห้องควบคุมอุณหภูมิ.

ระหว่างทำการทดลองเซลล์ทดสอบจะติดตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้องควบคุมที่ 10 °C และใช้เทอร์โมคัปเปิล type K ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6 mm. จำนวน 10 ตัว เพื่อหาค่าการกระจายของอุณหภูมิภายในเซลล์ทดสอบซึ่งตำแหน่งของเทอร์โมคัปเปิลทั้งหมดที่ใช้วัดอุณหภูมิจะถูกติดตั้งที่ตำแหน่งศูนย์กลางในระนาบของเซลล์ทดสอบและมีระยะห่างเท่าๆกัน 10 mm. โดยที่เทอร์โมคัปเปิลทุกตัวจะต่อเข้ากับอุปกรณ์บันทึกอุณหภูมิ (data logger) เพื่อเก็บและวิเคราะห์ข้อมูลที่ช่วงเวลาต่าง ๆ ตำแหน่งของผิวเชื่อมต่อระหว่างเฟสในเซลล์ทดสอบหาได้จากการประมาณค่าในช่วง (interpolate) ของอุณหภูมิที่อ่านได้จากเทอร์โมคัปเปิล



รูปที่ 2 แสดงขอบเขตที่มีการเคลื่อนที่

จากรูปที่ 2 เมื่อมีการแลกเปลี่ยนความร้อน โดยชุดแลกเปลี่ยนความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง จะเกิดโซนของแข็งในเซลล์ทดสอบ และเกิดการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งภายในเซลล์ทดสอบ ที่ผ่านแนววัดอุณหภูมิที่อยู่ในชุดทดสอบ แล้วเก็บค่าการกระจายอุณหภูมิในชุดทดสอบ และนำข้อมูลที่ได้จากทดลองมาวิเคราะห์เปรียบเทียบ

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

จากกฎการอนุรักษ์พลังงานเมื่อพิจารณาเฉพาะการนำความร้อนที่ถ่ายเทผ่านปริมาตรควบคุมใด ๆ ในที่นี้จะพิจารณาเป็นกรณีการถ่ายเทความร้อนแบบหนึ่งมิติ สามารถเขียนสมการเชิงอนุพันธ์เพื่อใช้อธิบายการถ่ายเทความร้อนทั้งภายในบริเวณโซนของเหลว และภายในบริเวณโซนของแข็งในกรณีหนึ่งมิติ ได้ดังนี้

3.1) สำหรับโซนของแข็ง (frozen layer) ($0 < x < \varepsilon(t)$)

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} = \alpha_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} \quad (1)$$

3.2) สำหรับโซนของเหลว (Unfrozen layer) ($x > \varepsilon(t)$) (ไม่พิจารณาการพาความร้อน)

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = \alpha_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} \quad (2)$$

3.3) สำหรับที่ตำแหน่งของผิวทำแข็ง ($x = \varepsilon$)

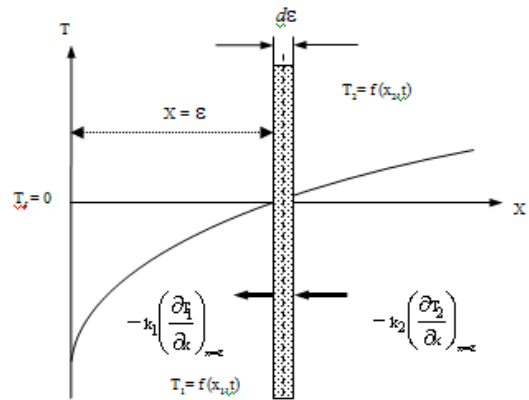
เมื่อพิจารณาดำแหน่งของผิวทำแข็งที่ $x = \varepsilon$ อุณหภูมิ 0°C จากนั้น ทำการสร้างสติปเล็กๆ มีความหนา $d\varepsilon$ ที่เวลา dt ดังรูปที่ 3 ที่ตำแหน่ง นี้การถ่ายเทความร้อนเป็นไปแบบต่อเนื่อง ซึ่งความร้อนที่ถ่ายเทจาก โซนของแข็งโดยการนำผ่านพื้นผิวที่มีอุณหภูมิคงที่ไปยังโซนของเหลวของวัสดุที่มีการเปลี่ยนแปลงเฟส จากกฎของการอนุรักษ์พลังงาน จะได้

$$L\rho \frac{d\varepsilon}{dt} = q_1 - q_2 \quad (3)$$

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

อัตราการเคลื่อนที่ของขอบเขตของผิวทำละลายหาได้จาก

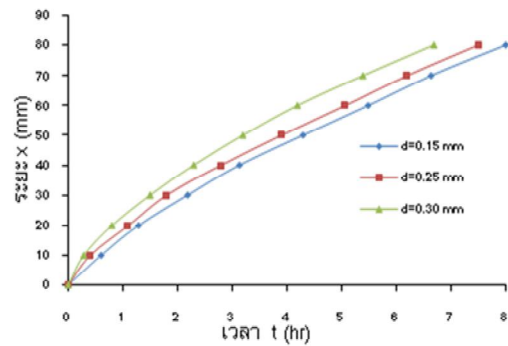
$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{L\rho} \left[k_1 \left(\frac{\partial T_1}{\partial x} \right)_{x=\varepsilon} - k_2 \left(\frac{\partial T_2}{\partial x} \right)_{x=\varepsilon} \right] \quad (4)$$



รูปที่ 3 แสดงการสมดุลพลังงานที่ผิวทำแข็ง

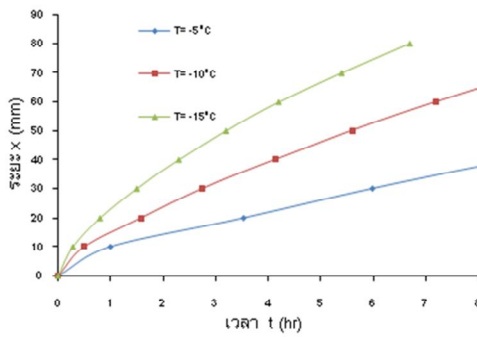
4. ผลการวิเคราะห์และวิจารณ์ผล

จากการทดลองในสภาวะต่าง ๆ แล้วนำผลที่ได้มาวิเคราะห์เปรียบเทียบจะได้



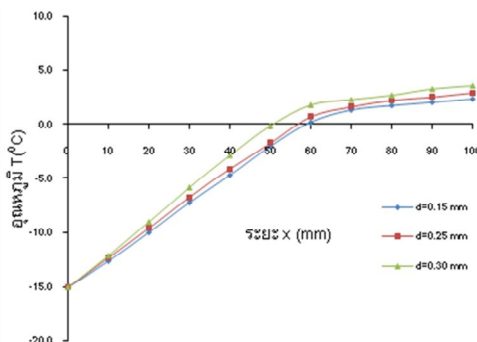
รูปที่ 4 เปรียบเทียบแนวโน้มการเคลื่อนตัวของผิวทำแข็งที่เกิดกับขนาดต่างๆ สำหรับอุณหภูมิ

จากรูปที่ 4 พบว่าแนวโน้มการเคลื่อนตัวของผิวทำแข็งที่เกิดขึ้นเนื่องจากอิทธิพลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่ใช้ในการทำแข็งที่มีผลต่อการกระจายอุณหภูมิและการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็ง พบว่าที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างๆ การกระจายอุณหภูมิและการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งที่สภาวะเริ่มต้นของกระบวนการจะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน แต่ในช่วงปลายที่ขนาดเม็ดแก้วโตกว่าจะมีอัตราการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งที่สูงกว่า เนื่องจากที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่จะมีช่องว่างมากกว่าจึงทำให้สามารถดึงความร้อนออกเซลล์ทดสอบได้ดี

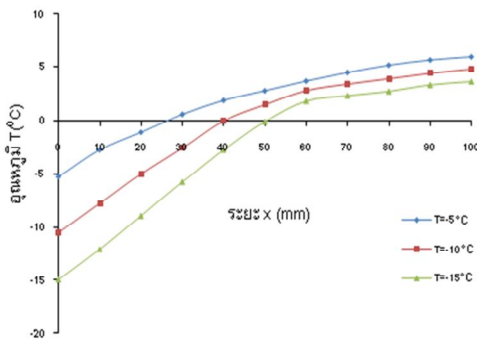


รูปที่ 5 เปรียบเทียบแนวโน้มการเคลื่อนตัวของผิวทำแฉ่งที่อุณหภูมิต่างๆ สำหรับเม็ดแก้วขนาด 0.3 mm

จากรูปที่ 5 พบว่าแนวโน้มการเคลื่อนตัวของผิวทำแฉ่งที่เกิดขึ้นเนื่องจากอิทธิพลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแฉ่งมีผลต่อการกระจายอุณหภูมิและการเคลื่อนที่ของผิวทำแฉ่ง พบว่าที่อุณหภูมิต่ำจะใช้เวลาในการทำแฉ่งได้เร็วกว่าอุณหภูมิที่สูงกว่า เนื่องจากอิทธิพลของการดึงความร้อนที่ดึงผ่านผิวทำแฉ่ง

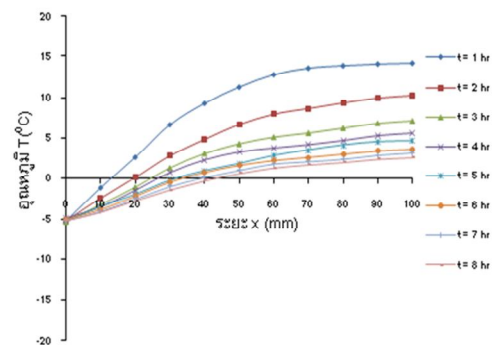


รูปที่ 6 เปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิและการเคลื่อนตัวของผิวทำแฉ่งที่เม็ดแก้วขนาดต่างๆ สำหรับอุณหภูมิทำแฉ่งที่ -15°C เมื่อพิจารณาที่เวลา 5 ชั่วโมง

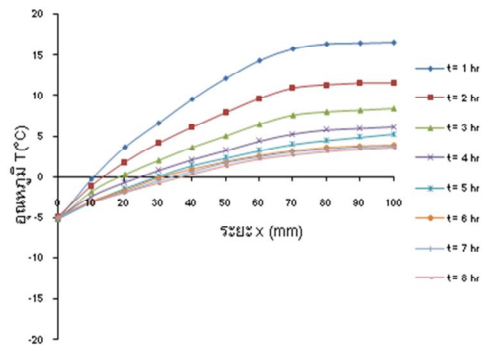


รูปที่ 7 เปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิและการเคลื่อนตัวของผิวทำแฉ่งที่อุณหภูมิต่างๆ สำหรับเม็ดแก้วขนาด 0.3 mm. เมื่อพิจารณาที่เวลา 5 ชั่วโมง

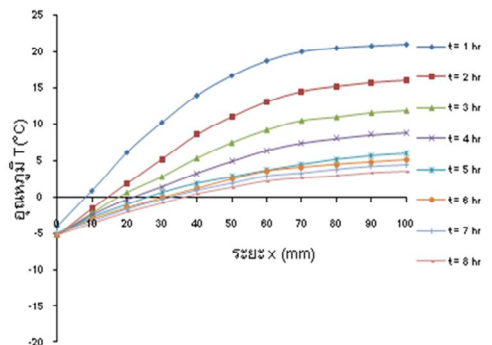
จากรูปที่ 6 และ 7 พบว่าเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับระยะการเคลื่อนตัวของผิวทำแฉ่งที่เกิดขึ้นเนื่องจาก อิทธิพลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคและอุณหภูมิที่มีผลต่อการกระจายอุณหภูมิและการเคลื่อนที่ของผิวทำแฉ่งที่เวลา 5 ชั่วโมง พบว่าที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโตกว่าจะมีอัตราการเคลื่อนที่ของผิวทำแฉ่งที่สูงกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กกว่า และที่อุณหภูมิทำแฉ่งที่ลดลงทำให้ผิวทำแฉ่งเคลื่อนที่ได้ดียิ่งขึ้น



(ก) การทำแฉ่งที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 mm.

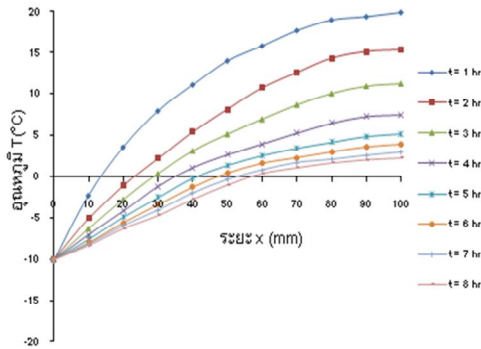


(ข) การทำแฉ่งที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 mm.

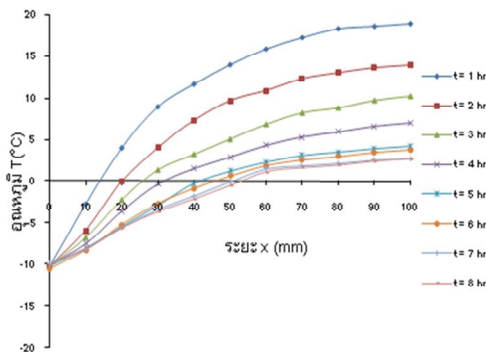


(ค) การทำแฉ่งที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 mm.

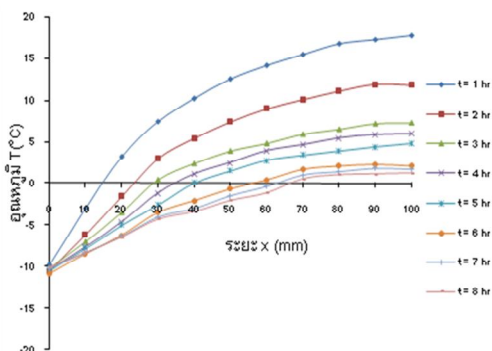
รูปที่ 8 ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิและการเคลื่อนตัวของผิวทำแข็งที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ ที่อุณหภูมิของการทำแข็งที่ -5°C



(ก) การทำแข็งที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 mm.

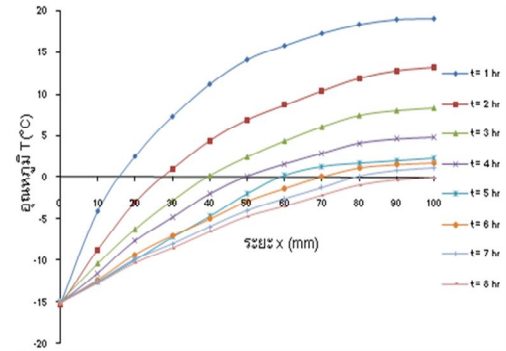


(ข) การทำแข็งที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 mm.

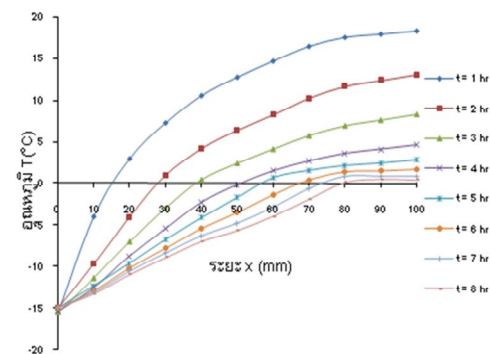


(ค) การทำแข็งที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 mm.

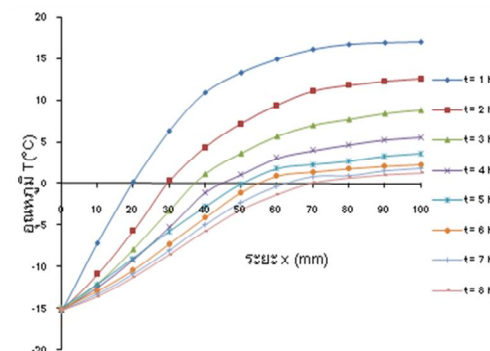
รูปที่ 9 ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิและการเคลื่อนตัวของผิวทำแข็งที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ ที่อุณหภูมิของการทำแข็งที่ -10°C



(ง) การทำแข็งที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 mm.



(ข) การทำแข็งที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 mm.



(ค) การทำแข็งที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 mm.

รูปที่ 10 ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิและการเคลื่อนตัวของผิวทำแข็งที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ ที่อุณหภูมิของการทำแข็งที่ -15°C

จากรูปที่ 8, 9 และ 10 เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นระยะของผิวทำแข็งจะมีค่าเพิ่มขึ้นแต่จะเพิ่มขึ้นในอัตราที่ลดลงเมื่อเวลาผ่านไปขณะหนึ่ง เนื่องจากโซนของแข็งเพิ่มขึ้นเป็นผลให้เกิดความต้านทานของความร้อนทำให้การระบายความร้อนออกจากโซนของเหลวมีค่าลดลง

5.สรุป

การศึกษาเชิงทดลองของกระบวนการทำแข็งของวัสดุพูนแบบอัดตัว 1 มิติ เพื่อศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคและอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแข็งที่มีผลต่อการกระจายอุณหภูมิและการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งภายในชุดทดสอบ จากการศึกษาพบว่าที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างๆการกระจายอุณหภูมิและการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งเริ่มต้นของกระบวนการจะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน แต่ในช่วงปลายที่ที่ขนาดเม็ดแก้วโตกว่าจะมีอัตราการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งที่สูงกว่าและที่อุณหภูมิทำแข็งใดๆ เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นระยะของผิวทำแข็งจะมีค่าเพิ่มขึ้นแต่จะเพิ่มขึ้นในอัตราที่ลดลงเมื่อเวลาผ่านไปขณะหนึ่ง เนื่องจากโซนของแข็งเพิ่มขึ้นเป็นผลให้เกิดความต้านทานของความร้อนทำให้การระบายความร้อนออกจากโซนของเหลวมีค่าลดลง

6.กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ ศ.ดร ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช หน่ววิจัยเพื่อการใช้ประโยชน์จากไมโครเวฟในงานวิศวกรรม (R.C.M.E.) ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ศูนย์รังสิต) และ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ที่ได้สนับสนุนการทำวิจัยในครั้งนี้

7.อักษรย่อและสัญลักษณ์

- ρ ความหนาแน่น (kg/m^3)
- α สัมประสิทธิ์การแผ่กระจายของความร้อน (m^2/s)
- k ประสิทธิภาพของการนำความร้อน (W/mK)
- t เวลา (s)
- T อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)
- ε ระยะการเคลื่อนที่ของผิวละลาย (m)
- L ความร้อนแฝงของการทำละลาย (J/kg)

ตัวห้อย

- o ที่สภาวะเริ่มต้น(initial)
- s ผิวที่ได้รับโหลดความเย็น
- 1 โซนของแข็ง
- 2 โซนของเหลว

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Rattanadecho, P. 2004. Experimental and Numerical Study of Solidification Process in Unsaturated Granular Packed Bed, J. Thermophysics and Heat Transfer, January-March: p.87-93.
- [2] ชยานนท์ เสริฐธิกุล และผดุงศักดิ์ รัตนเดโช. 2550. การใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแก้ปัญหาการทำละลาย (กรณีวัสดุพูนแบบอัดตัว) โดยเทคนิควิธีการแปรผันระยะกริด. วารสารสงขลานครินทร์ ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 29, ฉบับที่ 5ก.ย.- ต.ค.: p. 1393-1405.
- [3] จิตติน แดงเที่ยง. 2549. “การทำนายการแข็งตัวของน้ำแข็งในสองมิติโดยใช้วิธีผลต่างสืบเนื่องแบบกริดคงตัว” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 20 18-20 ตุลาคม 2549 จังหวัดนครราชสีมา.
- [4] มณฑล ชูโชนาค และผดุงศักดิ์ รัตนเดโช. 2551. “การวิเคราะห์เชิงทฤษฎีสำหรับปัญหาที่มีการเคลื่อนตัวของขอบเขตด้วยวิธีแปรผันระยะกริด และวิธีการกำหนดขอบเขตแบบคงที่ (กรณีศึกษา: กระบวนการฟรีซซิ่ง)” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22 15-17 ตุลาคม 2551 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต.
- [5] วีระศักดิ์ คงแก้ว, จิรพล กลิ่นบุญ และมณฑล ชูโชนาค. “การศึกษาเชิงตัวเลขและเชิงทดลองของกระบวนการทำแข็งในวัสดุที่มีการเปลี่ยนแปลงเฟส 1 มิติ” จัดการประชุมวิชาการ การถ่ายทอดผลงานความรู้และมวล ในอุปกรณ์ด้านความร้อน ครั้งที่ 8 ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่วันที่12-13 มีนาคม 2552 ณ โรงแรมดิอีโคโนมิก แอนด์ สปา จ.เชียงใหม่.
- [6] ชยานนท์ เสริฐธิกุล. 2550. การใช้เทคนิควิธีทรานซ์ไฟน์ได้นิเตอร์โพเลนซ์ร่วมกับวิธีแปลงฟังก์ชันเพื่อ แก้ปัญหาขอบเขตเคลื่อนที่รูปร่างใด ๆ สำหรับกรณีศึกษาวัสดุพูนแบบอัดตัว.วิทยานิพนธ์

หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

- [7] Carslaw,H.S. and Jaeger, J.C.. 1959.
“ Conduction of Heat in Solid ” 2nd Ed .: p.
283,353. Oxford University. Press, London and
New York.
- [8] Crank,J. 1984. Free and Boundary Problem.
Clarendon Press Oxford.
- [9] Frank P.Incropera - David P.DeWit,
Fundamentals of Heat and Mass Transfer [t]
Frank
- [10] Jack P. Holman, Heat transfer, Mc Graw Hill.
- [11] Robert W.Fox –Alant T.Mcdonald- Philip
J.Pritchard , Introduction to Fluid.
- [12] Yunus A.Cengel-Michael A Boles,
Thermodynamics, Mc Graw Hill.