การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25
19-21 ตุลาคม 2554 จังหวัดกระบี่

การศึกษาเชิงทดลองการทำแข็งของวัสดุพรุนแบบอิ่มตัวภายในรูปทรงสี่เหลี่ยมปิด: อิทธิพลของชนิดของวัสดุ

Experimental study of solidification of saturated porous media inside a rectangular enclosure: Influence of material types.

พิรสิทธิ์ ทวยนาค[1], ภาณุพันธ์ พรหมสวัสดิ์[1], ทวีศักดิ์ จินดาวงศ์[1] และมณฑล ชูโชนาค[2*]

[1] นักศึกษา , [2] อาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
เลขที่ 2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพฯ 10120
* E-mail: monthon6@hotmail.com, โทรศัพท์: 081-8432096

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาเชิงทดลองการทำแข็งของวัสดุพรุนแบบอิ่มตัวบรรจุในภาชนะรูปทรงสี่เหลี่ยม วัสดุพรุนแบบอิ่มตัวประกอบด้วยอนุภาคของแข็งรูปทรงกลม และน้ำอิ่มตัวภายในรูพรุน โดยตัวแปรที่ศึกษา คือ อิทธิพลของชนิดของวัสดุ (เม็ดแก้ว, เม็ดเหล็ก,เม็ดสเตนเลส) ที่มีผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิและการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็ง ภายในวัสดุพรุนแบบอิ่มตัว จากการศึกษาพบว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิและการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งของวัสดุพรุนแบบอิ่มตัวชนิดเม็ดเหล็กจะดีกว่าแบบเม็ดสเตนเลส และเม็ดแก้วตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อเวลาผ่านไปการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งจะเพิ่มขึ้นในอัตราที่ลดลง เนื่องจากความต้านทานในโซนของแข็งเพิ่มมากขึ้น

คำหลัก: กระบวนการทำแข็ง, วัสดุพรุนแบบอิ่มตัว, ผิวทำแข็ง

Abstract

This research study experimentally of solidification in a saturated porous medium filled in a rectangular enclosure. The saturated porous medium consists of spherical solid particle and water fulfill in the voids. The effect of solid particle types such as glass bead, steel, stainless on heat transfer behavior and freezing front is discussed. The results show that the temperature distribution and freezing front for the saturated porous medium with steel particle are greater than stainless and glass bead, respectively. In addition, it is found that the freezing front is increasing with decreasing rate because the resistant in solid phase is increasing during the solidification process.

Keywords: solidification, saturated porous medium, freezing front

1. บทนำ

การเปลี่ยนแปลงเฟสของวัสดุพรุนแบบอิ่มตัวเป็นปัญหาทางกายภาพที่มีความซับซ้อน นั่นคือมีการเคลื่อนที่ของขอบเขตเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงเฟสของสาร ซึ่งปัญหาดังกล่าวสามารถพบเห็นอยู่ทั่วไปในธรรมชาติและในทางด้านวิศวกรรมต่าง ๆ การที่นำวัสดุพรุนมาศึกษาทดลองเนื่องจากวัสดุพรุนเป็นวัสดุพื้นฐานที่ใช้ในด้านวิศวกรรม ดังนั้นถ้าที่เราสามารถทำความเข้าใจถึงกลไกของการเปลี่ยนแปลงในปรากฏการณ์ต่าง ๆ เหล่านี้ได้จะช่วยให้สามารถออกแบบหรือพัฒนาปรับปรุงกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการทำแข็งของวัสดุต่าง ๆ ให้ดียิ่งขึ้น ดังนั้นได้มีนักวิจัยจำนวนมากพยายามที่จะทำการศึกษาถึงปัญหาดังกล่าวโดยเริ่มจาก ปี ค.ศ. 1860 Neumann[1] ได้ทำการศึกษาปัญหาการเปลี่ยนแปลงเฟส โดยสามารถหาคำตอบของปัญหาที่อยู่ในรูปของผลเฉลยแม่นตรงในกรณี 1 มิติได้สำเร็จ ในปี ค.ศ. 1889 Stefan (L.I.Rubinstein,1971)[2] ได้ศึกษาปัญหาเพิ่มเติมจนสามารถหาผลเฉลยในกรณี 2-phase-change problem ได้เช่นกัน กล่าวได้ว่านักวิจัยทั้ง 2 ท่านนี้ถือเป็นจุดเริ่มต้นของการศึกษาปัญหาของการเปลี่ยนแปลงเฟส ต่อมาได้มีการพัฒนาเพื่อนำเสนอวิธีการหาผลเฉลยแบบใหม่ โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข เช่น Murray และ Landis (Murray, 1959) ได้ทำการเปรียบเทียบระหว่างวิธีแปรผันระยะกริด (Variable space grid method) กับวิธีกำหนดระยะกริดแบบคงที่ (Fixed space grid method) พบว่าวิธีแรกจะมีความแม่นยำกว่า เนื่องจากมีค่าความคลาดเคลื่อนขณะเริ่มต้นน้อยกว่า ในปี ค.ศ. 1986 Weaver J.A.and Viskanta R.[3] ได้ศึกษาเชิงทดลองและเชิงวิเคราะห์ของการทำละลายของน้ำแข็งในวัสดุพรุนแช่แข็งในแคปซูลทรงกระบอกที่วางในแนวนอนหรือแนวดิ่ง พบว่าอัตราการทำละลายจะขึ้นอยู่กับการพาความร้อนโดยธรรมชาติในโซนของเหลว กรณีที่ค่าของการนำความร้อนของวัสดุที่มีการเปลี่ยนแปลงเฟส และวัสดุพรุนมีค่าแตกต่างกันมากนั้นผลจากการทำนายของแบบจำลองจะทำนายได้ไม่แม่นยำเป็นผลให้ค่าที่ได้จากการทดลองและที่ได้จากการทำนายโดยใช้แบบจำลองแตกต่างกัน ในปี ค.ศ. 1999 Zhang X.และคณะ[4] ศึกษาเชิงตัวเลขของการทำแข็งของของไหลซุปเปอร์ฮีทในวัสดุพรุนที่บรรจุอยู่ในคาวิตี้รูปทรงสี่เหลี่ยม พบว่าการพาแบบธรรมชาติในระหว่างการทำแข็งจากด้านบนนั้นจะแตกต่างจากการทำแข็งทางด้านล่าง ซึ่งอิทธิพลทั้งหมดของการพาความร้อนแบบธรรมชาติจะช่วยลดเวลาที่ใช้ในการทำแข็ง ในปี ค.ศ. 2000 Ismail K.A.R. และคณะ[5] ได้นำเสนอการศึกษาเชิงตัวเลขของการทำแข็งของวัสดุที่มีการเปลี่ยนแปลงเฟสภายในแคปซูลทรงกลม แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อยู่บนพื้นฐานของการนำความร้อนเพียงอย่างเดียว พบว่าเวลาที่ใช้ในการทำแข็งให้สมบูรณ์จะมากขึ้นเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นและจะลดลงเมื่ออุณหภูมิของของไหลทำงานลดลง ในปี พ.ศ. 2547 ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช[6] ได้ทำการศึกษาเชิงทดลองและเชิงระเบียบวิธีเชิงตัวเลขของกระบวนการทำแข็งในเกรนูลาร์แพคเบดที่ไม่อิ่มตัว โดยทำการศึกษาการเคลื่อนที่ของน้ำไปยังผิวเชื่อมต่อระหว่างเฟสเนื่องจากแรงดันคาพิวลารี พบว่าอัตราการดูดซึมของน้ำในโซนของแข็งจะมีความสัมพันธ์กับฟลักซ์ความร้อนของการทำแข็งและค่าความอิ่มตัวของน้ำที่ผิวเชื่อมต่อระหว่างเฟส ในปี พ.ศ. 2549 จิตติน แตงเที่ยง[7] ได้นำระเบียบวิธีเชิงตัวเลขมาประยุกต์ใช้กับปัญหาการแข็งตัวของน้ำแข็งซองเพื่อทำนายอัตราการผลิตของน้ำแข็งและสามารถนำไปปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นและผลการคำนวณเชิงตัวเลขที่ได้เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลเฉลยแม่นตรง พบว่ามีค่าที่ใกล้เคียงกัน ในปี พ.ศ. 2550 ชยานนท์ เสริฐธิกุล และผดุงศักดิ์ รัตนเดโช[8] ได้ใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแก้ปัญหาการทำละลาย (กรณีวัสดุพรุนแบบอิ่มตัว) โดยใช้เทคนิควิธีแปรผันระยะกริดและทำการเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ผลเฉลยแม่นตรง พบว่ามีความใกล้เคียงและสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกัน ในปี พ.ศ. 2551 มณฑล ชูโชนาค และผดุงศักดิ์ รัตนเดโช[9] ใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อ

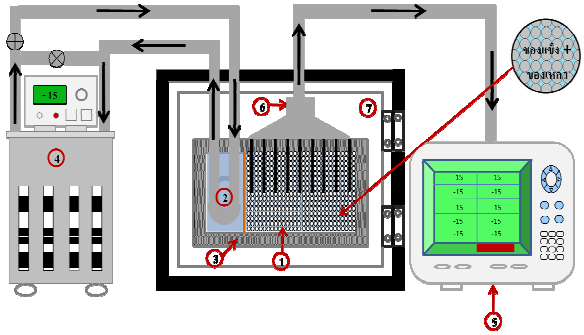
ทำนายการกระจายของอุณหภูมิภายในวัสดุและการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็ง (Freezing front) ที่เวลาต่างๆ ในระบบหนึ่งมิติและทำการเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งที่ได้จากการทำนายด้วยวิธีแปรผันระยะกริด วิธีการกำหนดขอบเขตแบบคงที่และผลเฉลยแม่นตรง (Exact solution) พบว่าอัตราการเกิดผิวทำแข็งมีลักษณะเป็นแบบไม่เชิงเส้นสูงในช่วงแรกของกระบวนการ นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทำนายกับค่าที่ได้จากสมการแม่นตรง พบว่ามีค่าที่สอดคล้องกัน ในปีเดียวกัน วิระศักดิ์ คงแก้ว และคณะ[10] ได้ศึกษาเชิงตัวเลขและเชิงทดลองของกระบวนการทำแข็งในวัสดุที่มีการเปลี่ยนแปลงเฟส 1 มิติ โดยนำผลที่ได้เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากวิธีเชิงตัวเลข ซึ่งพบว่าแนวโน้มของการกระจายอุณหภูมิและอัตราการเกิดน้ำแข็งที่ได้จากระเบียบวิธีเชิงตัวเลขกับผลที่ได้จากการทดลองไปในทิศทางเดียวกัน ในปี พ.ศ. 2553 ยุทธนา สุโง๊ะ และคณะ[11] ได้ศึกษาเชิงทดลองของกระบวนการทำแข็งของวัสดุพรุนแบบอิ่มตัว 1 มิติ โดยใช้เม็ดแก้วและน้ำเป็นสารทำงานในการเปลี่ยนแปลงเฟส โดยจะทำการศึกษาอิทธิพลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคและอุณหภูมิที่ใช้ในการทำละลายที่มีผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิและการเคลื่อนตัวที่ของผิวทำแข็ง พบว่าที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ เกรเดียนการกระจายอุณหภูมิในเซลล์ทดสอบที่เม็ดแก้วขนาดใหญ่จะมีค่าสูงกว่าเม็ดแก้วขนาดเล็ก การเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งช่วงแรกของเม็ดแก้วที่มีขนาดโตกว่าจะมีอัตราเคลื่อนที่ได้เร็วกว่า แต่ในช่วงปลายที่ขนาดเม็ดแก้วเล็กกว่าจะมีอัตราการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งที่สูงกว่า ในปีเดียวกัน อติยะ ประคองเกื้อ และคณะ[12] ได้ศึกษาเชิงทดลองกระบวนการทำละลายของวัสดุพรุนแบบอิ่มตัว 1 มิติ โดยใช้เม็ดแก้วและน้ำเป็นสารทำงานในการเปลี่ยนแปลงเฟส โดยจะทำการศึกษาอิทธิพลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคและอุณหภูมิที่ใช้ในการทำละลายที่มีผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิและการเคลื่อนที่ของผิวทำละลาย พบว่าที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่าจะมีอัตราการเคลื่อนที่ของผิวทำละลายที่สูงกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่โตกว่าและที่อุณหภูมิทำละลายเพิ่มขึ้น ผิวทำละลายจะเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้นและพบว่าอัตราการทำละลายจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของกระบวนการทำละลาย และในปี 2553 เช่นกัน วิระศักดิ์ คงแก้ว และคณะ[13] ได้ศึกษาเชิงทดลองของกระบวนการทำแข็งของวัสดุที่มีการเปลี่ยนแปลงเฟส 1 มิติ พบว่าแนวโน้มของการกระจายอุณหภูมิและอัตราการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งที่ได้จากการทดลองกับผลเฉลยแม่นตรงมีค่าไปในทิศทางเดียวกัน

ในงานวิจัยในครั้งนี้ได้ศึกษาเชิงทดลองของกระบวนการทำแข็งในวัสดุพรุนอิ่มตัวภายในรูปทรงสี่เหลี่ยมปิด “ศึกษาอิทธิพลของชนิดของวัสดุ” โดยใช้เม็ดแก้ว เม็ดเหล็ก และเม็ดสเตนเลสเป็นวัสดุพรุนและใช้น้ำเป็นสารทำงานในการเปลี่ยนแปลงเฟส เพื่อที่จะศึกษาอิทธิพลของวัสดุแต่ละชนิดที่มีผลต่อการทำแข็ง

2. การทดลอง

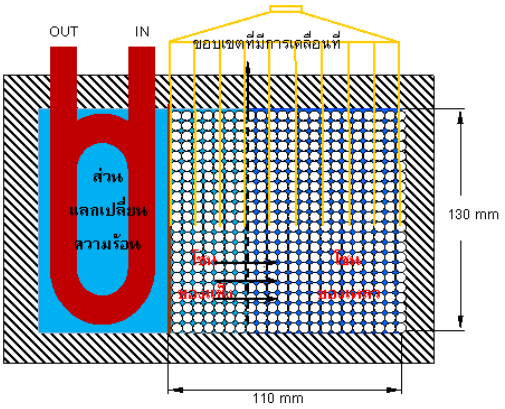
จากภาพที่ 1 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองสำหรับการทำแข็งของวัสดุพรุนแบบอิ่มตัว ซึ่งประกอบไปด้วยเซลล์ทดสอบรูปทรงสี่เหลี่ยมที่มีขนาดภายในสูง 130 mm กว้าง 110 mm และลึก 50 mm ผนังในแนวราบทั้งด้านบนและด้านล่าง ผนังในแนวดิ่งทั้งด้านหน้าและด้านหลังทำจากอะครีลิกเรซิน (Acrylic resin) ทุกด้านของเซลล์ทดสอบหุ้มฉนวน Styrofoam หนา 25.4 mm ยกเว้นด้านที่ให้โหลดเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนและการควบแน่นของความชื้นที่ผนังของเซลล์ทดสอบ โดยที่ภายในเซลล์ทดสอบบรรจุเม็ดแก้ว, เม็ดเหล็กและเม็ดสเตนเลสรูปทรงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสม่ำเสมอ (Porous matrix) ขนาด 0.25 mm เป็นวัสดุพรุนและใช้น้ำเป็นสารทำงานในการเปลี่ยนแปลงเฟส ที่ผนังในแนวดิ่งด้านข้างซ้ายได้มีการระบายความร้อนจากแหล่งให้ความร้อนอุณหภูมิต่ำโดยใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบหลายกลับ ซึ่งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะถูกต่อเข้ากับแหล่งอุณหภูมิต่ำโดยใช้วาล์วเปิด-ปิด แหล่งอุณหภูมิต่ำจะประกอบไปด้วยสารละลาย เอทิลีนไกลคอลในน้ำมี

ความเข้มข้น 50 % ซึ่งใช้เป็นสารตัวกลางในการระบายความร้อน (เนื่องจากที่ความดันบรรยากาศน้ำจะแข็งตัวที่ 0 °C แต่ในแหล่งความร้อนคงที่นั้นอุณหภูมิจะต่ำกว่าศูนย์ ดังนั้นจึงต้องเติมสาร Ethylene Glycol เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำแข็งตัว)



ภาพที่ 2 ภาพแสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง
1) เซลล์ทดสอบ 2) อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน
3) ฉนวนความร้อน 4) เครื่องทำความเย็น
5) อุปกรณ์บันทึกอุณหภูมิ 6) เทอร์โมคัปเปิ้ล
7) ตู้ควบคุมอุณหภูมิ

ระหว่างทำการทดลอง เซลล์ทดสอบจะติดตั้งไว้ในห้องควบคุมอุณหภูมิและควบคุมอุณหภูมิภายในห้อง 10 °C ใช้เทอร์โมคัปเปิ้ล type K ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6 mm จำนวน 10 ตัว เพื่อหาค่าการกระจายของอุณหภูมิและการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งภายในเซลล์ทดสอบซึ่งตำแหน่งของเทอร์โมคัปเปิ้ลทั้งหมดที่ใช้วัดอุณหภูมิจะถูกติดตั้งที่ตำแหน่งศูนย์กลางในระนาบของเซลล์ทดสอบและมีระยะห่างเท่า ๆ กัน 10 mm โดยที่เทอร์โมคัปเปิ้ลทุกตัวจะต่อเข้ากับอุปกรณ์บันทึกอุณหภูมิ (Data logger) เพื่อเก็บและวิเคราะห์ข้อมูลที่ช่วงเวลาต่าง ๆ โดยที่ตำแหน่งของผิวทำแข็งภายในในเซลล์ทดสอบหาได้จากการประมาณค่าในช่วง (Interpolate) ของอุณหภูมิที่อ่านได้จากเทอร์โมคัปเปิ้ล



ภาพที่ 2 แสดงขอบเขตที่มีการเคลื่อนที่

จากภาพที่ 2 เมื่อมีการแลกเปลี่ยนความร้อนโดยชุดแลกเปลี่ยนความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง จะเกิดโซนของแข็งในเซลล์ทดสอบ ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนภายในเซลล์ทดสอบและจากนั้นทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งภายในเซลล์ทดสอบขึ้น

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

จากกฎการอนุรักษ์พลังงานเมื่อพิจารณาเฉพาะการนำความร้อนที่ถ่ายเทผ่านปริมาตรควบคุมใด ๆ ในที่นี้จะพิจารณาเป็นกรณีการถ่ายเทความร้อนแบบหนึ่งมิติ สามารถเขียนสมการเชิงอนุพันธ์เพื่อใช้อธิบายการถ่ายเทความร้อนทั้งภายในบริเวณโซนของเหลวและภายในบริเวณโซนของแข็งในกรณีหนึ่งมิติ ได้ดังนี้

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

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

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

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

3.3) สำหรับที่ตำแหน่งของผิวทำแข็ง($x = \varepsilon$)

จากรูปที่ 3 เมื่อพิจารณาตำแหน่งของผิวเชื่อมต่อระหว่างเฟสที่ $x = \varepsilon$ อุณหภูมิ 0 °C จากนั้น ทำการสร้างแถบเล็กๆ มีความหนา $d\varepsilon$ ที่เวลา dt ซึ่งที่ตำแหน่งนี้การถ่ายเทความร้อนเป็นไปแบบต่อเนื่องซึ่งความร้อนที่ถ่ายเทจากโซนของแข็งโดยการนำผ่าน

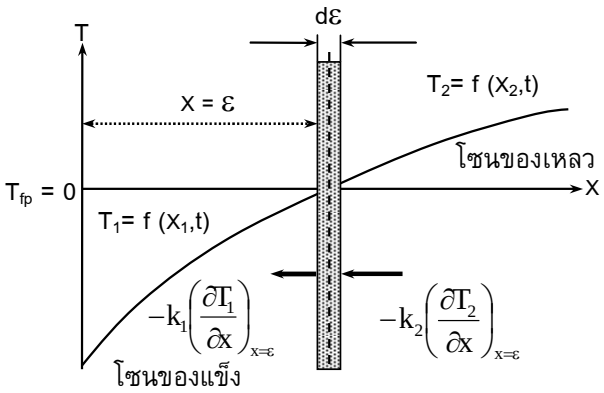
พื้นผิวที่มีอุณหภูมิคงที่ไปยังโซนของเหลวของสารทำงานที่มีการเปลี่ยนแปลงเฟส จากกฎของการอนุรักษ์พลังงาน จะได้

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

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

อัตราการเคลื่อนที่ของขอบเขตของผิวทำแข็งหาได้จาก

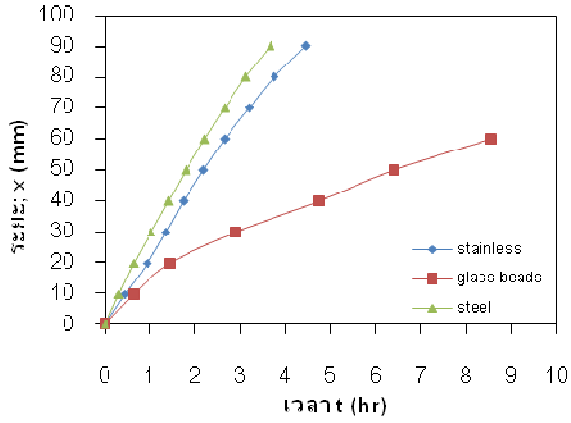
$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{L\rho}\left[k_1\left(\frac{\partial T_1}{\partial x}\right)_{x=\varepsilon} - k_2\left(\frac{\partial T_2}{\partial x}\right)_{x=\varepsilon}\right] \qquad (4)$$



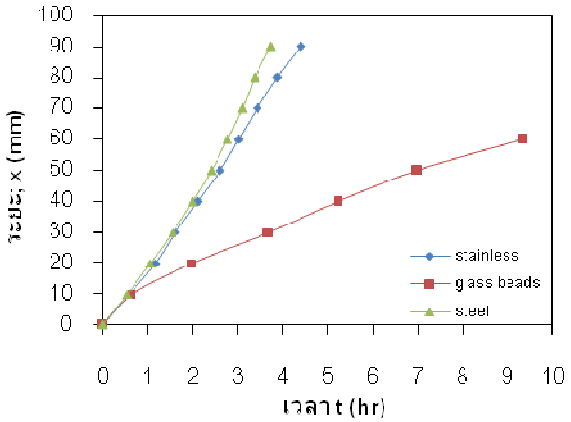
รูปที่ 3 แสดงการสมดุลพลังงานที่ผิวทำแข็ง

4. ผลการวิเคราะห์และวิจารณ์ผล

จากการทดลองที่สภาวะต่าง ๆ แล้วนำผลที่ได้มาวิเคราะห์เปรียบเทียบจะได้กราฟดังต่อไปนี้



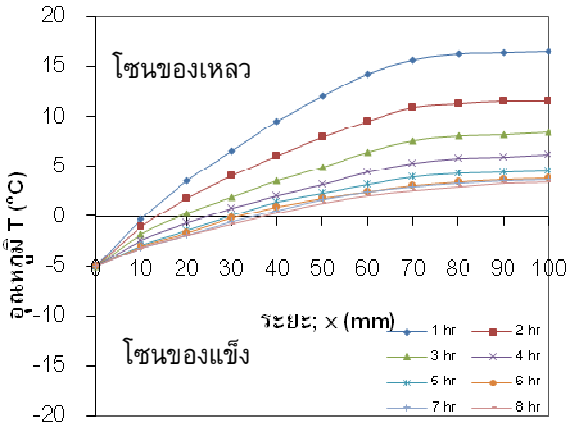
(ก) การทำแข็งที่อุณหภูมิ -5 °C



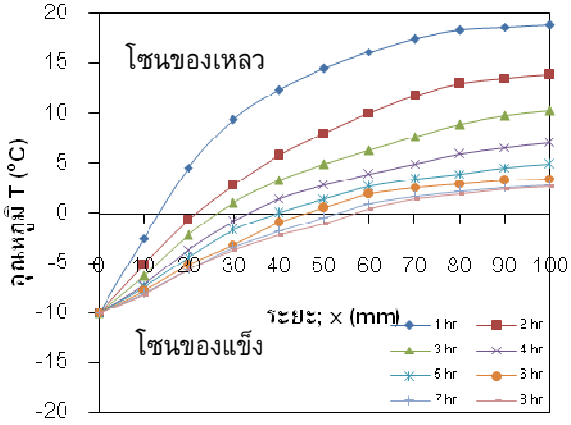
(ข) การทำแข็งที่อุณหภูมิ -10 °C

ภาพที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบแนวโน้มการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งที่ใช้วัสดุพรุนต่างชนิดกันที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 mm

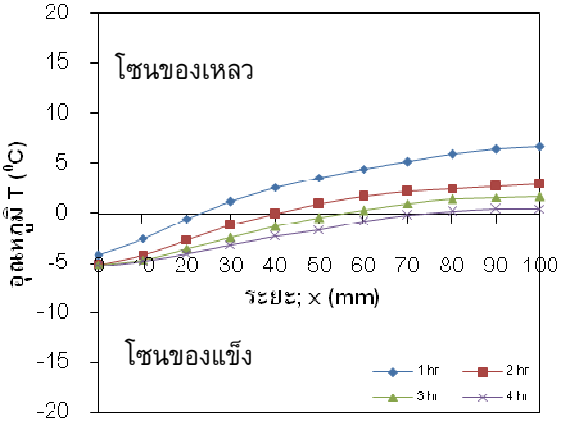
จากภาพที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบแนวโน้มการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งของวัสดุพรุนต่างชนิดกัน ที่อุณหภูมิทำแข็ง -5 °C และ -10 °C ตามลำดับ ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 mm พบว่าแนวโน้มการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งของเม็ดเหล็กจะเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าเม็ดสเตนเลสและเม็ดแก้วตามลำดับ เนื่องจากอิทธิพลของค่าการนำความร้อนส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็ง โดยที่ค่าการนำความร้อนของเหล็กมีค่ามากกว่าเม็ดสเตนเลสและเม็ดแก้ว ซึ่งทำให้การถ่ายเทความร้อนจากโซนของเหลวไปยังอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนของเม็ดเหล็กได้ดีกว่าเม็ดสเตนเลสและเม็ดแก้ว



(ก) การทำแข็งที่อุณหภูมิ -5 °C



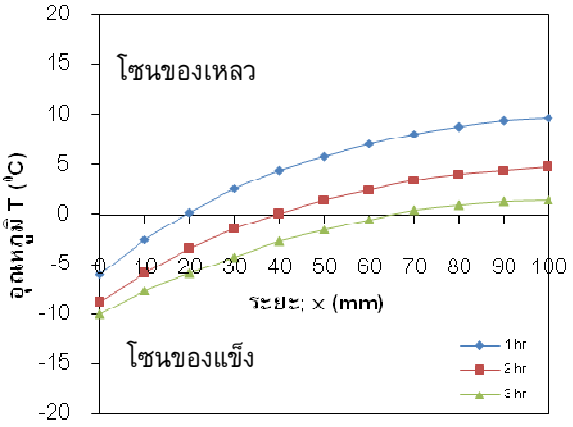
(ข) การทำแข็งที่อุณหภูมิ -10 °C



(ก) การทำแข็งที่อุณหภูมิ -5 °C

ภาพที่ 6 แสดงลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิและการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งสำหรับเม็ดแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 mm

จากภาพที่ 6 แสดงลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิและการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งที่ใช้อุณหภูมิทำแข็ง -5 °C และ -10 °C สำหรับเม็ดแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 mm ที่เวลาต่าง ๆ พบว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในโซนของแข็งจะลดลงอย่างรวดเร็วและต่ำกว่าอุณหภูมิในจุดเยือกแข็ง หลังจากนั้นจะนำไปสู่โซนของเหลวซึ่งอุณหภูมิจะสูงกว่าอุณหภูมิที่จุดเยือกแข็ง เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นอัตราการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งจะเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามกันที่เวลาในการทำแข็งมาก ๆ อัตราการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งก็จะเพิ่มขึ้นในอัตราที่ลดลง เนื่องจากโซนของแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้เกิดความต้านทานการเคลื่อนตัวของความร้อนภายในเซลล์ทดสอบ โดยที่อุณหภูมิทำแข็ง -10°C การเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งจะเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าที่อุณหภูมิทำแข็ง -5 °C เมื่อพิจารณาที่เวลา 3 ชั่วโมง จะเห็นว่าที่อุณหภูมิทำแข็ง -10°C ผิวทำแข็งจะเคลื่อนที่ได้ประมาณ 27 mm และที่อุณหภูมิทำแข็ง -5 °C ผิวทำแข็งจะเคลื่อนที่ได้ประมาณ 18 mm แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแข็งต่างกันนั้นมีผลต่อการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งของเม็ดแก้ว

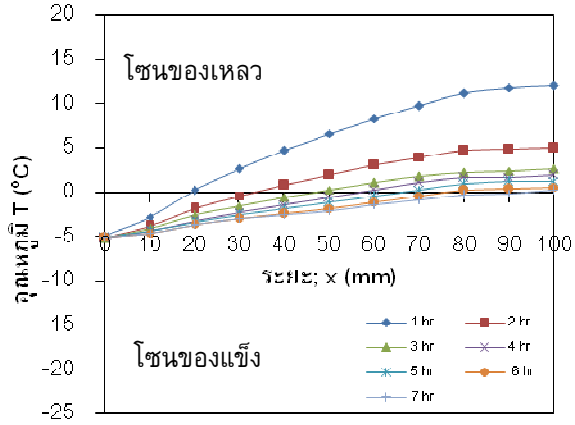


(ข) การทำแข็งที่อุณหภูมิ -10 °C

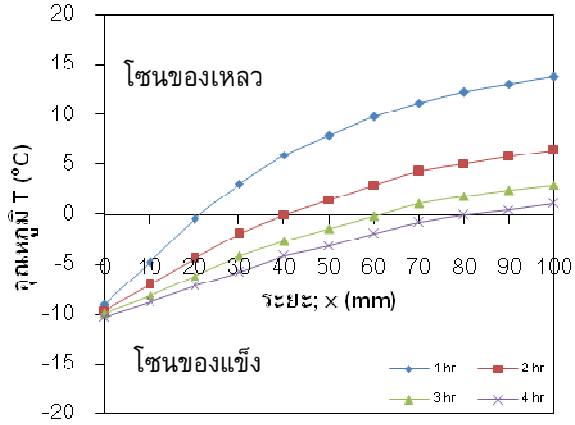
ภาพที่ 7 แสดงลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิและการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็ง สำหรับเม็ดเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 mm

จากภาพที่ 7 แสดงลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิและการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งที่อุณหภูมิทำแข็ง -5 °C และ -10 °C สำหรับเม็ดเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 mm ที่เวลาต่าง ๆ พบว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นอัตราการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งจะเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามกันที่เวลามาก ๆ อัตราการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งก็จะเพิ่มขึ้นในอัตราที่ลดลง เนื่องจากโซนของแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้เกิดความต้านทานการเคลื่อนตัวของความร้อนภายในเซลล์ทดสอบ โดยที่เม็ดเหล็กมีค่าการนำความร้อนที่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำซึ่งเป็นสารทำงานในการเปลี่ยนแปลงเฟสทำให้การกระจายของอุณหภูมิ

ภายในเซลล์ทดสอบได้ดี โดยที่อุณหภูมิทำแข็ง -10°C การเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งจะเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าที่อุณหภูมิทำแข็ง -5 °C เมื่อพิจารณาที่เวลา 3 ชั่วโมง จะเห็นว่าที่อุณหภูมิทำแข็ง -10°C ผิวทำแข็งจะเคลื่อนที่ได้ประมาณ 66 mm และที่อุณหภูมิทำแข็ง -5 °C ผิวทำแข็งจะเคลื่อนที่ได้ประมาณ 56 mm แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแข็งต่างกันนั้นมีผลต่อการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งของเม็ดเหล็ก



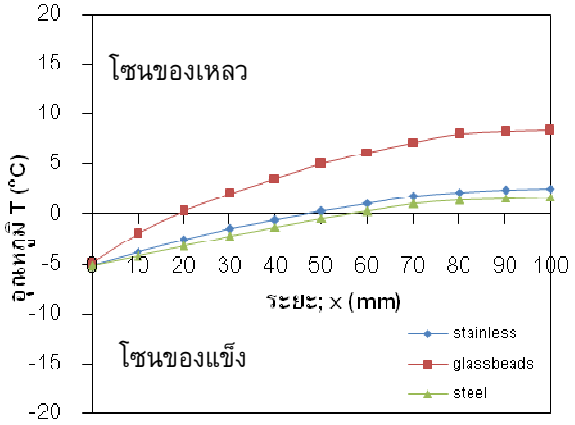
(ก) การทำแข็งที่อุณหภูมิ -5 °C



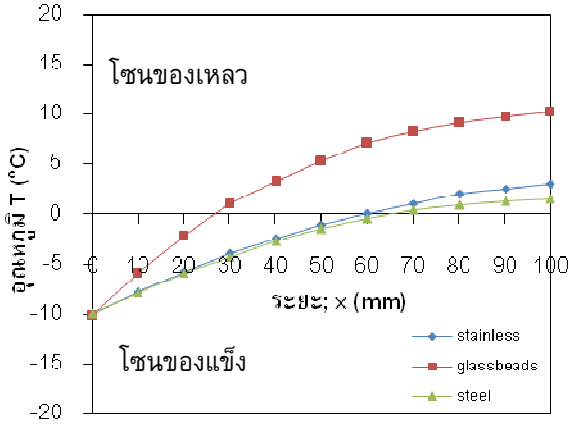
(ข) การทำแข็งที่อุณหภูมิ -10 °C

ภาพที่ 8 แสดงลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิและการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็ง สำหรับเม็ดสเตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 mm

จากภาพที่ 8 แสดงลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิและการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งที่ใช้อุณหภูมิทำแข็ง -5 °C และ -10 °C สำหรับเม็ดสเตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 mm ที่เวลาต่าง ๆ พบว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเซลล์ทดสอบจะคล้ายกับเม็ดแก้วและเม็ดเหล็กดังที่กล่าวมา เมื่อพิจารณาที่เวลา 3 ชั่วโมง จะเห็นว่าที่อุณหภูมิทำแข็ง -10°C ผิวทำแข็งจะเคลื่อนที่ได้ประมาณ 62 mm และที่อุณหภูมิทำแข็ง -5 °C ผิวทำแข็งจะเคลื่อนที่ได้ประมาณ 47 mm แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแข็งต่างกันนั้นมีผลต่อการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งของเม็ดสเตนเลส



(ก) การทำแข็งที่อุณหภูมิ -5 °C



(ข) การทำแข็งที่อุณหภูมิ -10 °C

ภาพที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิและการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งของวัสดุพรุนต่างชนิดกันและมีขนาดเดียวกัน เมื่อพิจารณาที่ 3 ชั่วโมง

จากภาพที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิและการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งของวัสดุพรุนต่างชนิดกันและมีขนาดเดียวกันที่ใช้

อุณหภูมิทำแข็ง -5 °C และ -10 °C ตามลำดับสำหรับวัสดุพรุนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 mm เมื่อพิจารณาที่เวลา 3 ชั่วโมง พบว่าการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งของเม็ดเหล็กจะเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าเม็ดสเตนเลสและเม็ดแก้วตามลำดับ เนื่องจากอิทธิพลของค่าการนำความร้อนของเม็ดเหล็กจะมีค่าสูงกว่าเม็ดสเตนเลสและเม็ดแก้ว จึงส่งผลให้การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเซลล์ทดสอบได้ดี จากภาพจะเห็นว่าที่เวลา 3 ชั่วโมง อุณหภูมิทำแข็ง -5 °C การเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งของเม็ดแก้ว เม็ดสเตนเลส และเม็ดเหล็ก เป็น 18 mm, 47 mm และ 56 mm ตามลำดับ และที่อุณหภูมิทำแข็ง -10 °C การเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งของเม็ดแก้ว เม็ดสเตนเลสและเม็ดเหล็ก เป็น 27 mm, 62 mm และ 66 mm ตามลำดับและยังพบว่าที่อุณหภูมิทำแข็งต่ำ ๆ (-10 °C) การเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งของเม็ดเหล็กและเม็ดสเตนเลสจะมีผลใกล้เคียงกัน เนื่องจากอิทธิพลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแข็ง

5.สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาเชิงทดลองการทำแข็งของวัสดุพรุนแบบอิ่มตัวภายในรูปทรงสี่เหลี่ยมปิด: ศึกษาอิทธิพลของชนิดของวัสดุ โดยศึกษาอิทธิพลของวัสดุต่างชนิดกันและอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแข็งที่มีผลต่อการกระจายของอุณหภูมิและการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งภายในเซลล์ทดสอบที่เวลาต่าง ๆ ในระบบ 1 มิติ พบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแข็งและที่เวลาใด ๆ ภายในเซลล์ทดสอบอุณหภูมิจะลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นอัตราการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งก็จะเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามที่เวลาในการทำแข็งเพิ่มขึ้นมาก ๆ อัตราการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งก็จะเพิ่มขึ้นในอัตราที่ลดลง เนื่องจากโซนของแข็งเพิ่มขึ้นทำให้เกิดความต้านทานการเคลื่อนตัวของความร้อนภายในเซลล์ทดสอบและที่อุณหภูมิทำแข็งมีค่าต่ำ ๆ อัตราการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งจะสูงกว่าที่อุณหภูมิในการทำแข็งสูง ๆ เนื่องจากอิทธิพลของความร้อนจากโซนของเหลวที่ส่งผ่านไปยังผิวทำแข็งและการทำแข็งของวัสดุพรุนต่างชนิดนั้นจะมีผลที่ต่างกัน พบว่าการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งของเม็ดเหล็กจะสูงกว่าเม็ดสเตนเลสและเม็ดแก้วตามลำดับ เนื่องจากอิทธิพลของค่าการนำความร้อนของเหล็กมีค่ามากกว่าสเตนเลส และเม็ดแก้วตามลำดับ

6.กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ ศ.ดร.ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช หน่วนวิจัยเพื่อการใช้ประโยชน์จากไมโครเวฟในงานวิศวกรรม (R.C.M.E.) ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ศูนย์รังสิต) และ ดร.จิระพล กลิ่นบุญ อาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ที่ได้สนับสนุนการทำงานวิจัยในครั้งนี้

7.อักษรย่อและสัญลักษณ์

k ค่าการนำความร้อน (W/m•K)

L ความร้อนแฝงของการทำแข็ง (J/kg)

T อุณหภูมิ (^{o}C)

t เวลา (hr)

ρ ความหนาแน่น (kg/m^3)

α สัมประสิทธิ์การแผ่กระจายของความร้อน (m^2/s)

ε ระยะการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็ง (m)

ตัวห้อย

1 โซนของเหลว

2 โซนของแข็ง

f ทำแข็ง

fp จุดเยือกแข็ง

o ที่สภาวะเริ่มต้น

8. เอกสารอ้างอิง

[1] Neumann.ค.ศ. 1860. การศึกษาปัญหาการเปลี่ยนแปลงเฟส.

[2] Stefan (L.I.Rubinstein,1971).ค.ศ. 1889.การเปรียบเทียบระหว่างวิธีแปรผันระยะกริด (Variable space grid method) กับวิธีกำหนดระยะกริดแบบคงที่ (Fixed space grid method)

[3] Weaver J.A.and Viskanta R. ค.ศ. 1986. การศึกษาเชิงทดลองและเชิงวิเคราะห์ของการทำ

ละลายของน้ำแข็งในวัสดุพรุนแช่แข็งในแคปซูลทรงกระบอกที่วางในแนวนอนหรือแนวดิ่ง.

[4] Zhang X.และคณะ.ค.ศ. 1999. การศึกษาเชิงตัวเลขของการทำแข็งของของไหลซุปเปอร์ฮีทในวัสดุพรุนที่บรรจุอยู่ในคาวิตี้รูปทรงสี่เหลี่ยม.

[5] Ismail K.A.R. และคณะ. ค.ศ. 2000. การศึกษาเชิงตัวเลขของการทำแข็งของวัสดุที่มีการเปลี่ยนแปลงเฟสภายในแคปซูลทรงกลม แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อยู่บนพื้นฐานของการนำความร้อนเพียงอย่างเดียว.

[6] ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช. 2547. การศึกษาเชิงทดลองและเชิงระเบียบวิธีเชิงตัวเลขของกระบวนการทำแข็งในเกรนูลาร์แพคเบดที่ไม่อิ่มตัว โดยทำการศึกษาการเคลื่อนที่ของน้ำไปยังผิวเชื่อมต่อระหว่างเฟสเนื่องจากแรงดันคาพิวลารี.

[7] จิตติน แตงเที่ยง. 2549. “การทำนายการแข็งตัวของน้ำแข็งในสองมิติโดยใช้วิธีผลต่างสืบเนื่องแบบกริดคงตัว” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 20 วันที่ 18-20 ตุลาคม 2549 จังหวัดนครราชสีมา.

[8] ชยานนท์ เสริฐธิกุล และผดุงศักดิ์ รัตนเดโช. 2550. การศึกษาระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแก้ปัญหาการทำละลาย (กรณีวัสดุพรุนแบบอิ่มตัว) โดยใช้เทคนิควิธีแปรผันระยะกริดและทำการเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ผลเฉลยแม่นตรง.

[9] มณฑล ชูโชนาค และผดุงศักดิ์ รัตนเดโช. 2551. “การวิเคราะห์เชิงทฤษฎีสำหรับปัญหาที่มีการเคลื่อนตัวของขอบเขตด้วยวิธีแปรผันระยะกริด และวิธีการกำหนดขอบเขตแบบคงที่ (กรณีศึกษา:กระบวนการทำแข็ง)” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22 วันที่ 15-17 ตุลาคม 2551 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต.

[10] วิระศักดิ์ คงแก้ว และคณะ. 2552. “การศึกษาเชิงตัวเลขและเชิงทดลองของกระบวนการทำแข็งในวัสดุที่มีการเปลี่ยนแปลงเฟส 1 มิติ” จัดการประชุมวิชาการ การถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวล ในอุปกรณ์ด้านความร้อน ครั้งที่ 8 ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่วันที่ 12-13 มีนาคม 2552 ณ โพธิ์วดล รีสอร์ทแอนด์สปา จ.เชียงราย.

[11] ยุทธนา สุโง๊ะ และคณะ. 2553. “การศึกษาเชิงทดลองของกระบวนการทำแข็งของวัสดุพรุนแบบอิ่มตัว 1 มิติ” (ใช้เม็ดแก้วเป็นวัสดุพรุนในการทดสอบ) การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24 วันที่ 20-22 ตุลาคม 2553 จังหวัดอุบลราชธานี.

[12] อดิยะ ประคองเกื้อ และคณะ. 2553. “การศึกษาเชิงทดลองของกระบวนการทำละลายในวัสดุพรุนแบบอิ่มตัว 1 มิติ” (ใช้เม็ดแก้วเป็นวัสดุพรุนในการทดสอบ) การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24 วันที่ 20-22 ตุลาคม 2553 จังหวัดอุบลราชธานี.

[13] วิระศักดิ์ คงแก้ว และคณะ. 2553. “การศึกษาเชิงทดลองของกระบวนการทำแข็งของวัสดุที่มีการเปลี่ยนแปลงเฟส 1 มิติ” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24 วันที่ 20-22 ตุลาคม 2553 จังหวัดอุบลราชธานี.