

การศึกษาเชิงทดลองการทำให้แข็งของวัสดุพอร์นแบบอิ่มตัว

Experimental Study of Solidification of Saturated Porous Media

มณฑล ชูโชนาค¹, พิริสัท ทวยนาค²Monthon Chuchonak¹, Pirasit Thauynak²

Received: 15 October 2012 ;Accepted: 10 December 2012

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาเชิงทดลองการทำให้แข็งของวัสดุพอร์นแบบอิ่มตัวบรรจุในภาชนะรูปทรงสี่เหลี่ยมปิด วัสดุพอร์นแบบอิ่มตัวประกอบด้วยอนุภาคของแข็งรูปทรงกลม(เม็ดสแตนเลส) และน้ำอิ่มตัวภายในรูพอร์น โดยตัวแปรที่ศึกษาคือ อิทธิพลของอนุภาคของแข็งและอุณหภูมิในการทำให้แข็ง ที่มีผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิและการเคลื่อนที่ของผิวหน้าแข็งภายในเซลล์ทดสอบจากการศึกษาพบว่ากระจายตัวของอุณหภูมิและการเคลื่อนที่ของผิวหน้าแข็งภายในเซลล์ทดสอบที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคขนาดเล็กจะดีกว่าที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคขนาดใหญ่โตกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าที่อุณหภูมิทำให้แข็ง -10 oC การเคลื่อนที่ของผิวหน้าแข็งภายในเซลล์ทดสอบจะดีกว่าที่อุณหภูมิทำให้แข็ง -5 oC

คำสำคัญ: การทำให้แข็ง วัสดุพอร์นแบบอิ่มตัว อนุภาคของแข็ง ผิวหน้าแข็ง

Abstract

This is an experimental study of solidification in a saturated porous medium filled in a rectangular enclosure. The saturated porous medium consists of spherical solid particle(stainless) and water to fill in the voids. The effect of the particle size and solidification temperature on temperature distribution and solidification front are discussed. The results show that the temperature distribution and solidification front inside the test cell with small particle size are greater than big particle size. Moreover, it was found that the moving rate of the solidification front with lower solidification temperature (-10 oC) is faster than higher solidification temperature (-5 oC)

Keywords: solidification, saturated porous media, solid particle, solidification front

บทนำ

ในธรรมชาติสสารแต่ละชนิดจะปรากฏอยู่ในสถานะใดสถานะหนึ่งนั่นคือ ของแข็ง ของเหลว หรือแก๊สซึ่งสสารสามารถเปลี่ยนจากสถานะหนึ่งไปเป็นอีกสถานะหนึ่งได้และสามารถทำให้กลับมามีอยู่ในสถานะเดิมได้อีกการเปลี่ยนแปลงสถานะของสสารเกี่ยวข้องโดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงพลังงานซึ่งการเปลี่ยนสถานะของสสารจากของแข็งเป็นของเหลวและจากของเหลวเป็นแก๊สจะต้องทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคลดลงทำได้โดยให้พลังงานความร้อนแก่สสารในสถานะของแข็งและจะทำให้ของแข็งหลอมเหลวกลายเป็นของเหลว

และเมื่อให้ความร้อนแก่ของเหลวจะทำให้ของเหลวกลายเป็นแก๊ส ในทางกลับกันการเปลี่ยนสถานะของสสารจากแก๊สกลับมาเป็นของเหลวและจากของเหลวกลายเป็นของแข็งนั้นจะต้องทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคเพิ่มขึ้นซึ่งทำได้โดยให้สสารคายความร้อนออกมาเมื่อลดอุณหภูมิของสสารในสถานะแก๊สลงจะทำให้แก๊สควบแน่นกลายเป็นของเหลวและเมื่อลดอุณหภูมิของเหลวลงอีกจะทำให้ของเหลวกลายเป็นของแข็งได้ พลังงานความร้อนที่ใช้ไปเพื่อเปลี่ยนสถานะของสสารเรียกว่าความร้อนแฝงถ้าเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นไอเรียกว่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอและถ้าเปลี่ยน

¹ อาจารย์, ² นักศึกษา สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพเขตที่ 2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพฯ 10120

¹ Lecturer, 2 Bachelor degree student Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Krungthep. Bangkok 10120

* E-mail: monthon6@hotmail.com, โทรศัพท์: 081-8432096

สถานะของแข็งเป็นของเหลวเรียกว่าความร้อนแฝงของการหลอมเหลวความร้อนแฝงของสสารแต่ละชนิดมีค่าเฉพาะตัว เช่นความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำมีค่า 540 แคลอรีต่อกรัมความร้อนแฝงของการหลอมเหลวของน้ำมีค่า 80 แคลอรีต่อกรัม เป็นต้น

โดยทั่วไปในชีวิตประจำวันเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงสถานะของสสารอยู่เสมอเช่น การเปลี่ยนสถานะของน้ำในธรรมชาติหม่นเวียนเป็นวัฏจักรทำให้มีแหล่งน้ำสะอาดให้มนุษย์ได้ใช้หม่นเวียนอยู่เสมอนอกจากนี้มนุษย์ยังใช้ประโยชน์จากการเปลี่ยนสถานะของสสารในด้านต่าง ๆ เช่น

1. การเปลี่ยนสถานะของสสารจากของแข็งเป็นของเหลวก่อนจะนำสสารไปใส่แบบพิมพ์หรือเป่าให้มีรูปร่างตามต้องการเช่น โลหะ แก้ว เทียน พลาสติก
2. การเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นไอ เช่นการใช้ประโยชน์จากแรงดันไอน้ำเดือดในการหมunkงกันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
3. การเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็ง เช่น การทำไอศกรีม การทำน้ำแข็ง

การเปลี่ยนแปลงสถานะของวัสดุพุนแบบอิมิตัวเป็นปัญหาทางกายภาพที่มีความซับซ้อน นั่นคือมีการเคลื่อนที่ของขอบเขตเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสถานะของสารซึ่งปัญหาดังกล่าวสามารถพบเห็นอยู่ทั่วไปในธรรมชาติและในทางด้านวิศวกรรมต่าง ๆ การที่นำวัสดุพุนมาศึกษาทดลองเนื่องจากวัสดุพุนเป็นวัสดุพื้นฐานที่ใช้ในด้านวิศวกรรม ดังนั้นถ้าเราสามารถทำความเข้าใจถึงกลไกของการเปลี่ยนแปลงในปรากฏการณ์ต่าง ๆ เหล่านี้ได้จะช่วยให้สามารถออกแบบหรือพัฒนาปรับปรุงกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการทำแข็งของวัสดุต่าง ๆ ให้ดียิ่งขึ้น ดังนั้นได้มีนักวิจัยจำนวนมากพยายามที่จะทำการศึกษถึงปัญหาดังกล่าวโดยเริ่มจากในปี พ.ศ. 2549 จิตตินแดงเที่ยง ได้นำระเบียบวิธีเชิงตัวเลขมาประยุกต์ใช้กับปัญหาการแข็งตัวของน้ำแข็งของเพื่อทำนายอัตราการผลิตน้ำแข็งและสามารถนำไปปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นและผลการคำนวณเชิงตัวเลขที่ได้เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลเฉลยแม่นยำ¹ พบว่ามีค่าที่ใกล้เคียงกัน ในปี พ.ศ. 2551 มณฑลซูโซนาและผดุงศักดิ์รัตนเดโชใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อทำนายการกระจายของอุณหภูมิภายในวัสดุและการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็ง (Freezing front) ที่เวลาต่างๆในระบบหนึ่งมิติและทำการเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งที่ได้จากการทำนายด้วยวิธีแปรผันระยะกริด วิธีการกำหนดขอบเขตแบบคงที่และผลเฉลยแม่นยำ (Exact solution)² พบว่าอัตราการเกิดผิวทำแข็งมีลักษณะเป็นแบบไม่เชิงเส้นสูงในช่วงแรก

ของกระบวนการนอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทำนายกับค่าที่ได้จากสมการแม่นยำตรง พบว่ามีค่าที่สอดคล้องกันในปี 2551 เช่นกัน วิระศักดิ์ คงแก้วและคณะ ได้ศึกษาเชิงตัวเลขและเชิงทดลองของกระบวนการทำแข็งในวัสดุที่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะ 1 มิติ³ โดยนำผลที่ได้เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากวิธีเชิงตัวเลข ซึ่งพบว่าแนวโน้มของการกระจายอุณหภูมิและอัตราการเกิดน้ำแข็งที่ได้จากระเบียบวิธีเชิงตัวเลขกับผลที่ได้จากการทดลองไปในทิศทางเดียวกันในปี พ.ศ. 2553 ยุทธนา สุโงะและคณะ ได้ศึกษาเชิงทดลองของกระบวนการทำแข็งของวัสดุพุนแบบอิมิตัว 1 มิติ⁴ โดยใช้เม็ดแก้วเป็นวัสดุพุนและน้ำเป็นสารทำงานในการเปลี่ยนแปลงสถานะ โดยจะทำการศึกษาอิทธิพลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคและอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแข็งที่มีผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิและการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็ง พบว่าที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ เกรเดียนการกระจายอุณหภูมิในเซลล์ทดสอบที่เม็ดแก้วขนาดใหญ่จะมีค่าสูงกว่าเม็ดแก้วขนาดเล็กการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งช่วงแรกของเม็ดแก้วที่มีขนาดโตกว่าจะมีอัตราเคลื่อนที่ได้เร็วกว่า แต่ในช่วงปลายที่ขนาดเม็ดแก้วเล็กกว่าจะมีอัตราการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งที่เร็วกว่าในปีเดียวกัน อติยะ ประคองเกื้อและคณะได้ศึกษาเชิงทดลองกระบวนการทำลายของวัสดุพุนแบบอิมิตัว 1 มิติ⁵ โดยใช้เม็ดแก้วเป็นวัสดุพุนและน้ำเป็นสารทำงานในการเปลี่ยนแปลงสถานะโดยจะทำการศึกษาอิทธิพลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคและอุณหภูมิที่ใช้ในการทำละลายที่มีผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิและการเคลื่อนที่ของผิวทำลาย พบว่าที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่าจะมีอัตราการเคลื่อนที่ของผิวทำลายที่สูงกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่โตกว่าและที่อุณหภูมิทำลายเพิ่มขึ้น ผิวทำลายจะเคลื่อนที่ได้อย่างรวดเร็ว และในปี 2553 เช่นกัน วิระศักดิ์ คงแก้วและคณะ ได้ศึกษาเชิงทดลองของกระบวนการทำแข็งของวัสดุที่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะ 1 มิติ⁶ พบว่าแนวโน้มของการกระจายอุณหภูมิและอัตราการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งที่ได้จากการทดลองกับผลเฉลยแม่นยำตรงมีค่าไปในทิศทางเดียวกัน ในปี 2554 พิรสิทธิ์ ทวยนาค และคณะได้ศึกษาเชิงทดลองการทำแข็งของวัสดุพุนแบบอิมิตัวภายในรูปทรงสี่เหลี่ยมปิด: อิทธิพลของชนิดของวัสดุ⁷ โดยใช้เม็ดแก้ว เม็ดเหล็ก เม็ดสแตนเลสเป็นวัสดุพุน และน้ำเป็นสารทำงานในการเปลี่ยนแปลงสถานะ พบว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิและการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งของวัสดุพุนแบบอิมิตัวชนิดเม็ดเหล็กจะดีกว่าชนิดเม็ดสแตนเลส และเม็ดแก้วตามลำดับในปี 2555 พิรสิทธิ์ ทวยนาค และคณะได้ศึกษาเชิงทดลองการทำแข็งของวัสดุพุนแบบอิมิตัว⁸ โดยใช้เม็ดสแตนเลสเป็นวัสดุ

พูน และน้ำเป็นสารทำงานในการเปลี่ยนแปลงสถานะ พบว่ากระจายตัวของอุณหภูมิและการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งภายในเซลล์ทดสอบที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคขนาดเล็กจะดีกว่าที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคขนาดใหญ่กว่า นอกจากนี้ยังพบว่าที่อุณหภูมิทำแข็ง -10°C การเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งภายในเซลล์ทดสอบจะดีกว่าที่อุณหภูมิทำแข็ง -5°C

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาเชิงทดลองกระบวนการการทำแข็งของวัสดุพูนแบบอิมิตัวโดยใช้เม็ดเหล็กเป็นวัสดุพูนและใช้น้ำเป็นสารทำงานในการเปลี่ยนแปลงสถานะ เพื่อที่จะศึกษาอิทธิพลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคและอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแข็งที่มีผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิและการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็ง

วิธีการวิจัย

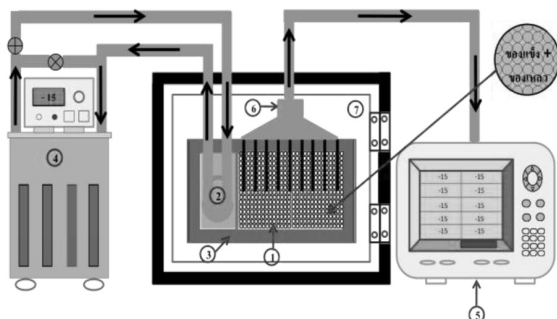


Figure 1 Experimental apparatus setup: 1) test cell, 2) Cooling heat exchanger, 4) Insulator, 5) Recorder, 6) Thermocouples, 7) Temperature control room

จาก Figure 1 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองสำหรับการทำแข็งของวัสดุพูนแบบอิมิตัว ซึ่งประกอบไปด้วยเซลล์ทดสอบรูปทรงสี่เหลี่ยมที่มีขนาดภายในสูง 130 mm กว้าง 110 mm และลึก 50 mm ผนังในแนวราบทั้งด้านบนและด้านล่าง ผนังในแนวตั้งทั้งด้านหน้าและด้านหลังทำจากอะครีลิคเรซิน (Acrylic resin) ทุกด้านของเซลล์ทดสอบหุ้มฉนวน Styrofoam หนา 25.4 mm ยกเว้นด้านที่ให้อากาศเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนและการควบแน่นของความชื้นที่ผนังของเซลล์ทดสอบ โดยที่ภายในเซลล์ทดสอบบรรจุเม็ดสแตนเลสทรงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสม่ำเสมอ (Porous matrix) ขนาด 0.15, 0.25 และ 0.30 mm เป็นวัสดุพูนและใช้น้ำเป็นสารทำงานในการเปลี่ยนแปลงสถานะ ที่ผนังในแนวตั้งด้านข้างซ้ายได้มีการระบายความร้อนจากแหล่งให้ความร้อนอุณหภูมิต่ำโดยใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบหลาย

กลับ ซึ่งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะถูกต่อเข้ากับแหล่งอุณหภูมิต่ำโดยใช้วาล์วเปิด-ปิด แหล่งอุณหภูมิต่ำจะประกอบไปด้วยสารละลายเอทิลีนไกลคอลและน้ำมีความเข้มข้น 50 % ซึ่งใช้เป็นสารตัวกลางในการระบายความร้อน (เนื่องจากที่ความดันบรรยากาศน้ำจะแข็งตัวที่ 0°C แต่ในแหล่งความดันที่นั้นอุณหภูมิจะต่ำกว่าศูนย์ ดังนั้นจึงต้องเติมสาร Ethylene Glycol เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำแข็งตัว)

การเตรียมเซลล์ทดสอบโดยเริ่มจากนำเม็ดสแตนเลสขนาดที่ต้องการมาตวงให้ได้ปริมาตรเท่ากับเซลล์ทดสอบ เติมน้ำให้อิมิตัวโดยไม่มีช่องว่างภายในรูพูน จากนั้นนำไปประกอบเข้ากับชุดทดลอง

ระหว่างทำการทดลองเซลล์ทดสอบจะติดตั้งไว้ในห้องควบคุมอุณหภูมิและควบคุมอุณหภูมิภายในห้อง 10°C ใช้เทอร์โมคัปเปิล type K ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6 mm จำนวน 10 ตัว เพื่อหาอัตราการกระจายของอุณหภูมิและการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งภายในเซลล์ทดสอบซึ่งตำแหน่งของเทอร์โมคัปเปิลทั้งหมดที่ใช้วัดอุณหภูมิจะถูกติดตั้งที่ตำแหน่งศูนย์กลางในระนาบของเซลล์ทดสอบและมีระยะห่างเท่า ๆ กัน 10 mm โดยที่เทอร์โมคัปเปิลทุกตัวจะต่อเข้ากับอุปกรณ์บันทึกอุณหภูมิ (Data logger) เพื่อเก็บและวิเคราะห์ข้อมูลที่ช่วงเวลาต่าง ๆ โดยที่ตำแหน่งของผิวทำแข็งภายในเซลล์ทดสอบหาได้จากการประมาณค่าในช่วง (Interpolate) ของอุณหภูมิที่อ่านได้จากเทอร์โมคัปเปิล

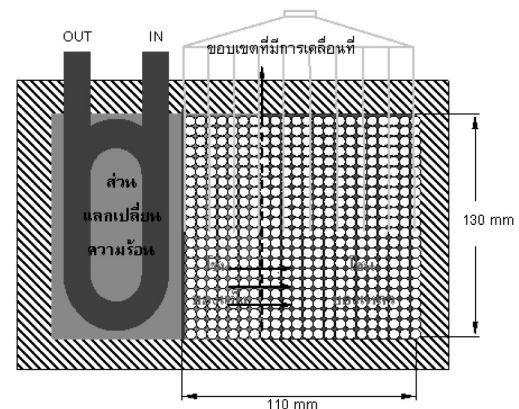


Figure 2 Schematic diagram for the solidification processes

จาก Figure 2 เมื่อมีการแลกเปลี่ยนความร้อนโดยชุดแลกเปลี่ยนความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง จะเกิดโซนของแข็งในเซลล์ทดสอบ ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนภายในเซลล์ทดสอบและจากนั้นทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งภายในเซลล์ทดสอบขึ้น

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

จากกฎการอนุรักษ์พลังงานเมื่อพิจารณาเฉพาะการนำความร้อนที่ถ่ายเทผ่านปริมาตรควบคุมใด ๆ ในที่นี้จะพิจารณาเป็นกรณีการถ่ายเทความร้อนแบบหนึ่งมิติ สามารถเขียนสมการเชิงอนุพันธ์เพื่อใช้อธิบายการถ่ายเทความร้อนทั้งภายในบริเวณโซนของเหลวและภายในบริเวณโซนของแข็งในกรณีหนึ่งมิติได้ดังนี้

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

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

- 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) สำหรับที่ตำแหน่งของผิวทำแข็ง($x = \varepsilon$)

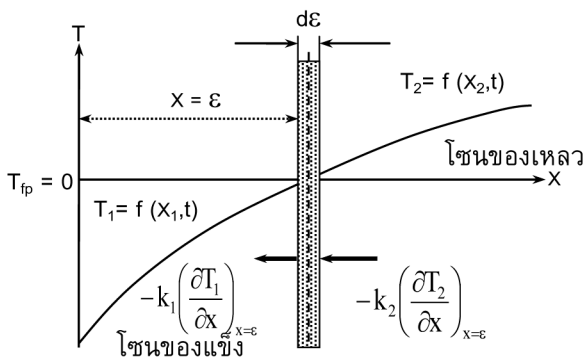


Figure 3 Energy balance at the solidification front

จาก Figure 3 เมื่อพิจารณาดำแหน่งของผิวเชื่อมต่อระหว่างเฟสที่ $x =$ อุณหภูมิ 0oCจากนั้น ทำการสร้างแถบเล็กๆมีความหนา ที่เวลา dt ซึ่งที่ตำแหน่งนี้การถ่ายเทความร้อนเป็นไปแบบต่อเนื่องซึ่งความร้อนที่ถ่ายเทจากโซนของแข็งโดยการนำผ่านพื้นผิวที่มีอุณหภูมิคงที่ไปยังโซนของเหลวของสารทำงานที่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะจากกฎของการอนุรักษ์พลังงานจะได้

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

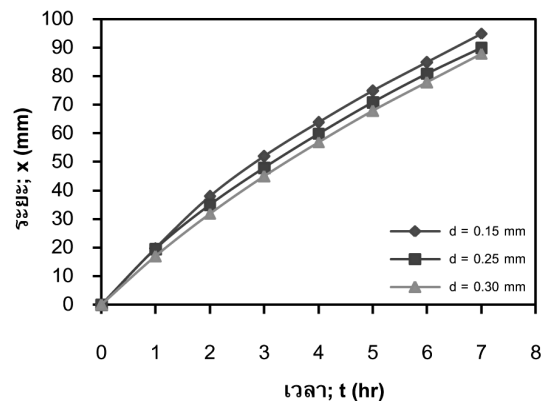
เมื่อ $q = -k \frac{\partial T}{\partial x}$ จะได้

อัตราการเคลื่อนที่ของขอบเขตของผิวทำแข็งหาได้จาก

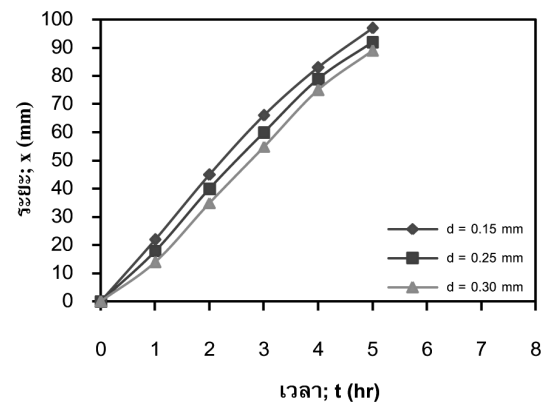
$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{L_p} \left[k_1 \left(\frac{\partial T_1}{\partial x} \right)_{x=\varepsilon} - k_2 \left(\frac{\partial T_2}{\partial x} \right)_{x=\varepsilon} \right] \quad (4)$$

ผลการวิจัย

จากการทดลองที่สภาวะต่าง ๆ แล้วนำผลที่ได้มาวิเคราะห์เปรียบเทียบจะได้กราฟดังต่อไปนี้



(a) $T_f = -5^\circ\text{C}$



(b) $T_f = -10^\circ\text{C}$

Figure 4 Comparison of the solidification front at different particle size : (a) $T_f = -5^\circ\text{C}$ and

จาก Figure 4 แสดงการเปรียบเทียบแนวโน้มการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งที่ใช้เม็ดสแตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15, 0.25 และ 0.30 mm สำหรับอุณหภูมิทำแข็ง -5 และ -10 °Cพบว่าแนวโน้มการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งไปในทิศทางเดียวกันคือ อนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า การเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งจะเคลื่อนที่ได้ดีกว่าอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางโตกว่า เนื่องจากอิทธิพลของอนุภาคที่มีผลต่อการทำแข็ง

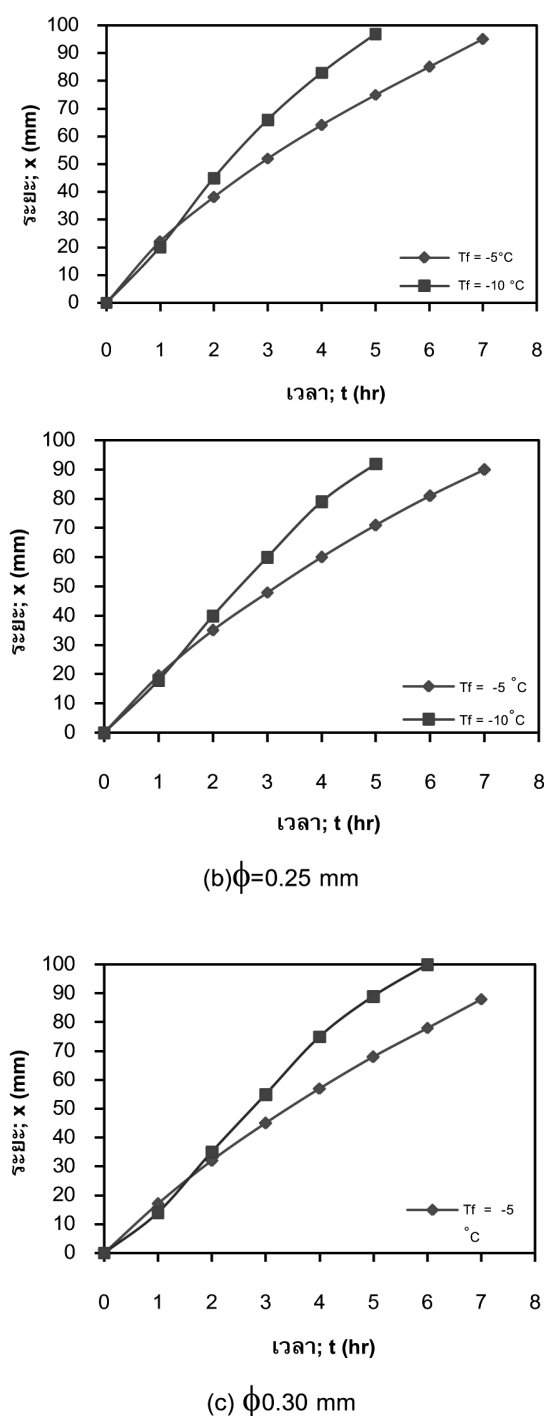


Figure 5 Comparison of the solidification front at different solidification temperature : (a) $\phi = 0.15$ mm , (b) $\phi = 0.25$ mm and (c) $\phi = 0.30$ mm.

จาก Figure 5 แสดงการเปรียบเทียบแนวโน้มการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งที่ใช้อุณหภูมิทำแข็ง -5 และ -10°C สำหรับเม็ดสแตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเดียวกัน พบว่าแนวโน้มการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งที่เกิดขึ้นในช่วงแรก

อุณหภูมิทำแข็ง -5°C การเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งจะเคลื่อนที่ได้ดีกว่าที่อุณหภูมิทำแข็ง -10°C เนื่องจากอิทธิพลของการนำความร้อนของเม็ดสแตนเลสส่งผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิและการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็ง โดยที่อุณหภูมิทำแข็งสูงค่าการนำความร้อนของเม็ดสแตนเลสจะสูงกว่าที่อุณหภูมิทำแข็งต่ำ จึงทำให้ในช่วงนี้ค่าการนำความร้อนของเม็ดสแตนเลสจะมีอิทธิพลมากกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแข็ง แต่เมื่อเวลาผ่านไป ประมาณ 1.5 ชั่วโมง การเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งที่อุณหภูมิทำแข็ง -10°C จะเคลื่อนที่ได้ดีกว่าที่อุณหภูมิทำแข็ง -5°C และเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจะเกิดโซนของแข็งเพิ่มขึ้นทำให้เกิดความต้านทานความร้อนภายในเซลล์ทดสอบ จึงทำให้การเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งที่อุณหภูมิทำแข็ง -10°C นั้นจะเคลื่อนที่ได้ดีกว่าที่อุณหภูมิทำแข็ง -5°C

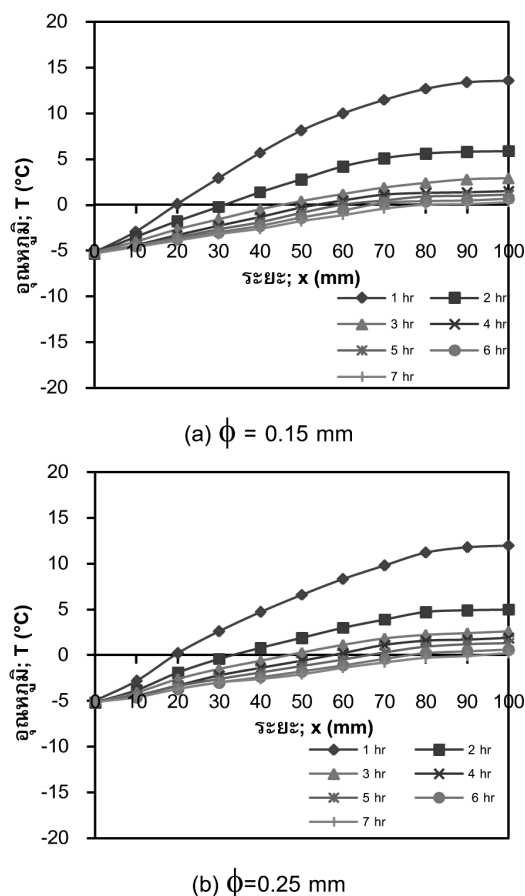


Figure 6 Temperature distribution inside packed bed at various times for case of $T_f = -5^{\circ}\text{C}$: (a) $\phi = 0.15$ mm, (b) $\phi = 0.25$ mm and (c) $\phi = 0.30$ mm

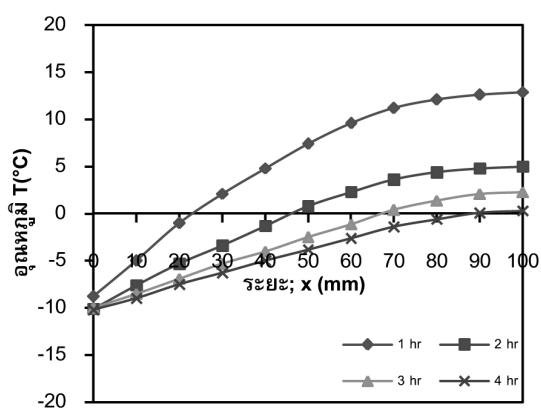
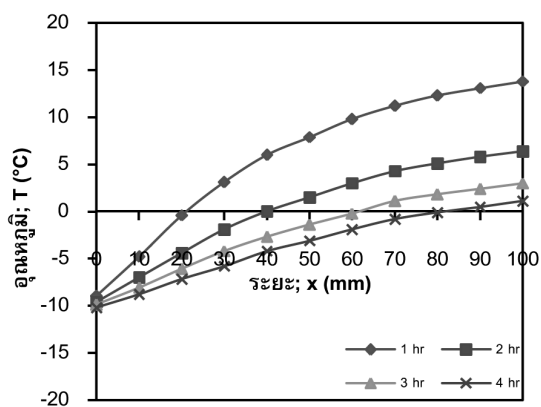
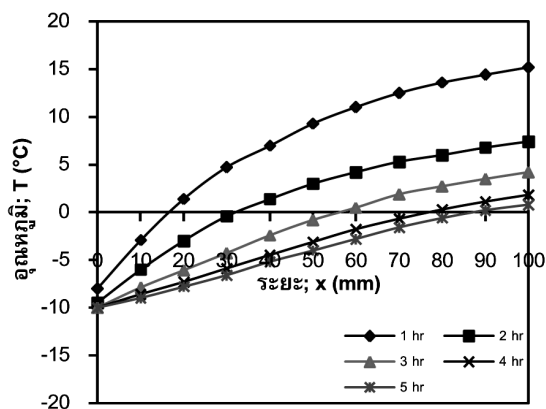
(a) $\phi = 0.15$ mm(b) $\phi = 0.25$ mm(c) $\phi = 0.30$ mm

Figure 7 Temperature distribution inside packed bed at various times for case of $T_f = -10$ °C: (a) $\phi = 0.15$ mm, (b) $\phi = 0.25$ mm and (c) $\phi = 0.30$ mm

จาก Figure 6 และ 7 แสดงลักษณะการกระจาย

ตัวของอุณหภูมิและการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งที่ใช้อุณหภูมิทำแข็ง -5 และ -10 °C สำหรับเม็ดสแตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15, 0.25 และ 0.30 mm ที่เวลาต่าง ๆ พบว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิในโซนของแข็งจะลดลงอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นจะนำไปสู่โซนของเหลวซึ่งอุณหภูมิจะสูงกว่าอุณหภูมิที่จุดทำแข็ง เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นอัตราการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งจะเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามกันที่เวลามาก ๆ อัตราการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งก็จะเพิ่มขึ้นในอัตราที่ลดลงเนื่องจากโซนของแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้เกิดความต้านทานความร้อนภายในเซลล์ทดสอบ

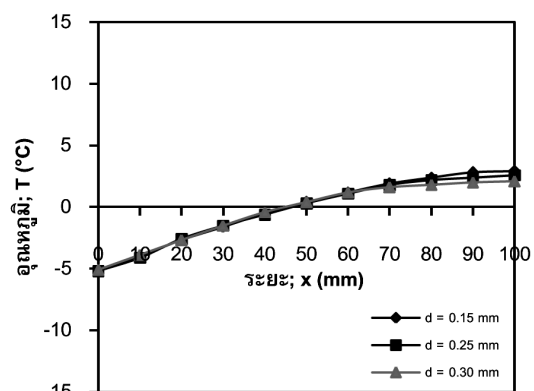
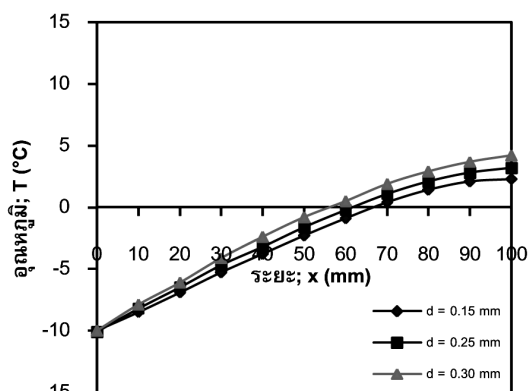
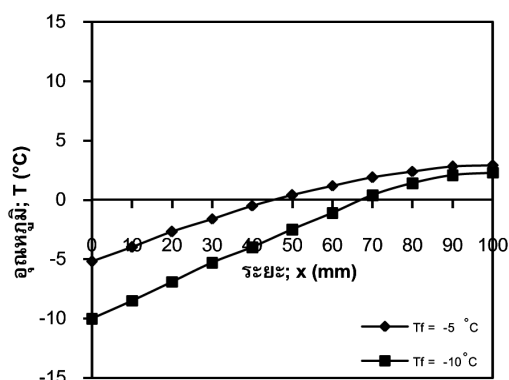
(a) $T_f = -5$ °C(b) $T_f = -10$ °C

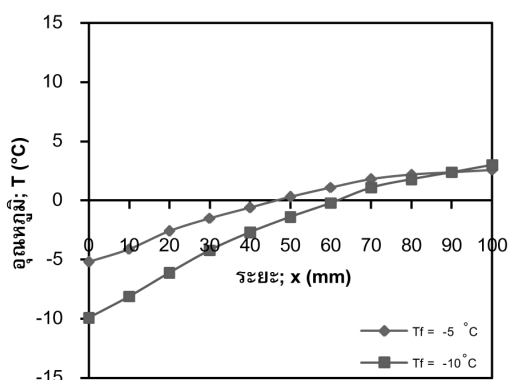
Figure 8 Comparison of the temperature distribution and solidification front with $t = 3$ hr at different particle size : (a) $T_f = -5$ °C and (b) $T_f = -10$ °C

จาก Figure 8a แสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิและการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งที่ใช้อุณหภูมิทำแข็ง -5 °C สำหรับเม็ดสแตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15, 0.25 และ 0.30 mm ตามลำดับ ที่เวลา 3 ชั่วโมง พบว่าอัตราการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งมีผลใกล้เคียงกัน

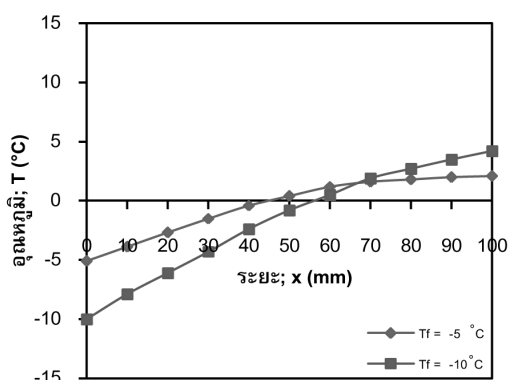
จาก Figure 8b แสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิและการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งที่ใช้อุณหภูมิทำแข็ง -10°C สำหรับเม็ดสแตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15, 0.25 และ 0.30 mm ตามลำดับ ที่เวลา 3 ชั่วโมง พบว่าเม็ดสแตนเลสที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่าจะมีอัตราการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งที่สูงกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่โตกว่า เนื่องจากอิทธิพลของอนุภาคที่มีผลต่อการทำแข็ง



(a) $\phi = 0.15$ mm



(b) $\phi = 0.25$ mm



(c) $\phi = 0.30$ mm

Figure 9 Comparison of the temperature distribution and solidification front for the cases of different solidification temperature with $t = 3$ hr : (a) $\phi = 0.15$ mm, (b) $\phi = 0.25$ mm and (c) $\phi = 0.30$ mm

จาก Figure 9 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิและการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งที่ใช้อุณหภูมิทำแข็ง -5 และ -10°C สำหรับเม็ดสแตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15, 0.25 และ 0.30 mm ที่เวลา 3 ชั่วโมง พบว่าที่อุณหภูมิทำแข็ง -10°C การเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งจะมากกว่าที่อุณหภูมิทำแข็ง -5°C เนื่องจากอิทธิพลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแข็งที่มีผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิและการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็ง

วิจารณ์ผลและสรุปผล

งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาเชิงทดลองกระบวนการการทำแข็งของวัสดุพอร์แบบอัดตัวโดยใช้เม็ดสแตนเลสเป็นวัสดุพอร์และใช้น้ำเป็นสารทำงานในการเปลี่ยนแปลงสถานะ เพื่อศึกษาอิทธิพลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคและอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแข็งที่มีผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิและการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งที่เวลาต่าง ๆ ในระบบ 1 มิติ พบว่าที่อุณหภูมิทำแข็งและที่เวลาใด ๆ อุณหภูมิภายในเซลล์ทดสอบจะลดลงอย่างรวดเร็วและเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นอัตราการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งก็จะเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามที่เวลาในการทำแข็งเพิ่มขึ้นมาก ๆ อัตราการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งก็จะเพิ่มขึ้นในอัตราที่ลดลง เนื่องจากโซนของแข็งเพิ่มขึ้นทำให้เกิดความต้านทานการเคลื่อนตัวของความร้อนภายในเซลล์ทดสอบและพบว่าที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคเล็กกว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเซลล์ทดสอบจะดีกว่าที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคโตกว่าและการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 mm จะเคลื่อนที่ได้ดีกว่าที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 mm และ 0.30 mm ตามลำดับ เนื่องจากอิทธิพลของอนุภาคที่ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนจากโซนของเหลวไปยังโซนของแข็ง นอกจากนี้ยังพบว่าที่อุณหภูมิทำแข็งต่ำ ๆ การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเซลล์ทดสอบจะดีกว่าที่อุณหภูมิทำแข็งสูง ๆ และการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งที่อุณหภูมิทำแข็ง -10°C จะเคลื่อนที่ได้ดีกว่าที่อุณหภูมิทำแข็ง -5°C

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ที่ได้สนับสนุนการทำงานวิจัยในครั้งนี้

อักษรย่อและสัญลักษณ์

- k ค่าการนำความร้อน ($W/m \cdot K$)
- L ความร้อนแฝงของการทำแข็ง (J/kg)
- T อุณหภูมิ ($^{\circ}C$)
- t เวลา (hr)
- ρ ความหนาแน่น (kg/m^3)
- α สัมประสิทธิ์การแผ่กระจายของความร้อน (m^2/s)
- ε ระยะการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็ง (mm)
- ϕ เส้นผ่านศูนย์กลาง (mm)

ตัวห้อย

- 1 โซนของเหลว
- 2 โซนของแข็ง
- f ทำแข็ง
- fp จุดเยือกแข็ง
- o ที่สภาวะเริ่มต้น

เอกสารอ้างอิง

1. จิตติน แดงเที่ยง. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการ เครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 20 เรื่อง การทำนายการแข็งตัวของน้ำแข็งในสองมิติโดยใช้วิธีผลต่างสืบเนื่องแบบกริดคงตัว. 18-20 ตุลาคม 2549 :จังหวัดนครราชสีมา.
2. มณฑล ชูโซนาท, ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22 เรื่อง การวิเคราะห์เชิงทฤษฎีสำหรับปัญหาที่มีการเคลื่อนตัวของขอบเขตด้วยวิธีแปรผันระยะกริดและวิธีการกำหนดขอบเขตแบบคงที่ (กรณีศึกษา:กระบวนการทำแข็ง).15-17 ตุลาคม 2551: มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ศูนย์รังสิต. กรุงเทพฯ.
3. วิระศักดิ์ คงแก้ว, มณฑล ชูโซนาท, จิระพล กลิ่นบุญ. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการ การถ่ายทอดผลงาน ความร้อนและมวล ในอุปกรณ์ด้านความร้อน ครั้งที่ 8 เรื่อง การศึกษาเชิงตัวเลขและเชิงทดลองของกระบวนการทำแข็งในวัสดุที่มีการเปลี่ยนแปลงเฟส 1มิติ. 12-13 มีนาคม 2552:ณ โพธิ์วัดล รีสอร์ทแอนด์สปา. เชียงราย.
4. ยุทธนา สุโงะ, อัฐพลเสนาภัสป์, สุกิจรุ่งอรุณ,มณฑล ชูโซนาท. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการเครือข่าย วิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24 เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองของกระบวนการทำแข็งของวัสดุพูนแบบอิมิตัว 1 มิติ. 20-22 ตุลาคม 2553:ณ ศูนย์แกรนด์ แอนด์คอนเวนชันเซ็นเตอร์. อุบลราชธานี.
5. อติยะ ประคองเกื้อ, วอนศักดิ์ แก้มแย้ม, จิระพลกลิ่น บุญ,มณฑลชูโซนาท. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการ เครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24 เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองของกระบวนการทำละลายใน วัสดุพูนแบบอิมิตัว 1 มิติ. 20-22 ตุลาคม 2553: ณ ศูนย์แกรนด์แอนด์คอนเวนชันเซ็นเตอร์. อุบลราชธานี.
6. วิระศักดิ์ คงแก้ว, ผดุงศักดิ์รัตนเดโช, มณฑลชูโซนาท, จิระพลกลิ่นบุญ. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการ เครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24 เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองของกระบวนการทำแข็งของ วัสดุที่มีการเปลี่ยนแปลงเฟส 1 มิติ. 20-22 ตุลาคม 2553 : ณ ศูนย์แกรนด์แอนด์คอนเวนชันเซ็นเตอร์. อุบลราชธานี.
7. พิรสิทธิ์ ทวยนาท, ภาณุพันธ์ พรหมสวัสดิ์, ทวีศักดิ์ จินดาวงศ์, มณฑล ชูโซนาท. เอกสารประกอบการประชุม วิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25 เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองการทำแข็งของวัสดุ พูนแบบอิมิตัวภายในรูปทรงสี่เหลี่ยมปิด: อิทธิพลของ ชนิดของวัสดุ. 19-21 ตุลาคม 2554: ณอ่าวนางวิลล่า รีสอร์ท. กระบี่.
8. พิรสิทธิ์ ทวยนาท, ภาณุพันธ์ พรหมสวัสดิ์, ทวีศักดิ์ จินดาวงศ์, มณฑล ชูโซนาท. เอกสารประกอบการประชุม วิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 8 เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองการทำแข็งของวัสดุพูนแบบอิมิตัว. 2-4 พฤษภาคม 2555 :ณ ดักสิลา. มหาสารคาม.