

การศึกษาเชิงทดลองการทำให้แข็งของวัสดุพรุนแบบอิ่มตัวโดยใช้เม็ดเหล็กเป็นวัสดุพรุน Experimental Study of Solidification of Saturated Porous Media Using Eteel

พิรสิทธิ์ ทวยนาค^{1*} ภาณุพันธ์ พรหมสวัสดิ์ และมนชล ชูโชนาค²

¹ นักศึกษา, ² อาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
เลขที่ 2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพฯ 10120

* E-mail: pirasit_me07@hotmail.com, โทรศัพท์: 087-2794815

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาเชิงทดลองการทำให้แข็งของวัสดุพรุนแบบอิ่มตัวบรรจุในภาชนะรูปทรงสี่เหลี่ยม วัสดุพรุนแบบอิ่มตัวประกอบด้วยอนุภาคของแข็งรูปทรงกลม(เม็ดเหล็ก) และน้ำอิ่มตัวภายในรูพรุน โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ อุณหภูมิในการทำให้แข็ง และอิทธิพลของอนุภาคของแข็ง ที่มีผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิและการเคลื่อนที่ของผิวทำให้แข็งภายในวัสดุพรุนแบบอิ่มตัว จากการศึกษาพบว่าที่อุณหภูมิทำให้แข็ง -5°C การกระจายตัวของอุณหภูมิและการเคลื่อนที่ของผิวทำให้แข็งภายในเซลล์ทดสอบที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคขนาดโตจะดีกว่าที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคขนาดเล็กกว่า และที่อุณหภูมิทำให้แข็ง -10°C การกระจายตัวของอุณหภูมิและการเคลื่อนที่ของผิวทำให้แข็งภายในเซลล์ทดสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคขนาดเล็กจะดีกว่าที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคขนาดโตกว่า

คำหลัก: การทำให้แข็ง, วัสดุพรุนแบบอิ่มตัว, อนุภาคของแข็ง, ผิวทำให้แข็ง

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(steel) and water fulfill in the voids. The effect of solidification temperature and the particle size on temperature distribution and solidification front are discussed. The results show that at solidification temperature -5°C the temperature distribution and solidification front inside test cell with big particle size are greater than small particle size and at solidification temperature -10°C the temperature distribution and solidification front inside test cell with small particle size are greater than big particle size.

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

1. บทนำ

ในธรรมชาติสสารแต่ละชนิดจะปรากฏอยู่ในสถานะใดสถานะหนึ่ง นั่นคือ ของแข็ง ของเหลว หรือแก๊ส เราสามารถทำให้สสารเปลี่ยนจากสถานะหนึ่งไปเป็นอีกสถานะหนึ่งได้ และสามารถทำให้กลับมามีอยู่ในสถานะเดิมได้อีก การเปลี่ยนแปลงสถานะของสสารเกี่ยวข้องโดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงพลังงานซึ่งการเปลี่ยนสถานะของสสารจากของแข็งเป็นของเหลว และจากของเหลวเป็นแก๊ส จะต้องทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคลดลง ทำได้โดยใช้พลังงานความร้อนแก่สสารในสถานะของแข็ง

และจะทำให้ของแข็งหลอมเหลวกลายเป็นของเหลว และเมื่อให้ความร้อนแก่ของเหลวจะทำให้ของเหลวกลายเป็นแก๊ส ในทางกลับกันการเปลี่ยนสถานะของสสารจากแก๊สกลับมาเป็นของเหลว และจากของเหลวกลายเป็นของแข็งนั้นจะต้องทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคเพิ่มขึ้น ซึ่งทำได้โดยให้สสารคายความร้อนออกมา เมื่อลดอุณหภูมิของสสารในสถานะแก๊สลงจะทำให้แก๊สควบแน่นกลายเป็นของเหลว และเมื่อลดอุณหภูมิของเหลวลงอีกจะทำให้ของเหลวกลายเป็นของแข็งได้ พลังงานความร้อนที่ใช้ไปเพื่อเปลี่ยนสถานะของสสารเรียกว่า ความร้อนแฝง

ถ้าเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นไอเรียกว่า ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ ถ้าเปลี่ยนสถานะของแข็งเป็นของเหลวเรียกว่า ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว ความร้อนแฝงของสสารแต่ละชนิดมีค่าเฉพาะตัว เช่น ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำมีค่า 540 แคลอรีต่อกรัม ความร้อนแฝงของการหลอมเหลวของน้ำมีค่า 80 แคลอรีต่อกรัม

โดยทั่วไปในชีวิตประจำวันเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงสถานะของสสารอยู่เสมอ เช่น การเปลี่ยนสถานะของน้ำในธรรมชาติหมุนเวียนเป็น วัฏจักรทำให้มีแหล่งน้ำสะอาดให้มนุษย์ได้ใช้หมุนเวียนอยู่เสมอ นอกจากนี้มนุษย์ยังใช้ประโยชน์จากการเปลี่ยนสถานะของสสารในด้านต่าง ๆ เช่น

1. การเปลี่ยนสถานะของสสารจากของแข็งเป็นของเหลวก่อนจะนำสสารไปใส่แบบพิมพ์หรือเป่าให้มีรูปร่างตามต้องการ เช่น โลหะ แก้ว เทียน พลาสติก
2. การเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นไอ เช่น การใช้ประโยชน์จากแรงดันไอน้ำเดือดในการหมุนกังหันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
3. การเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็ง เช่น การทำไอศกรีม การทำน้ำแข็ง

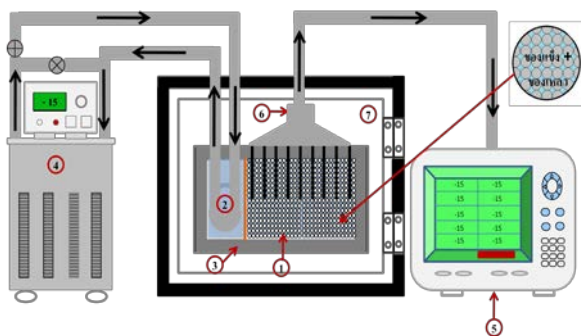
การเปลี่ยนแปลงสถานะของวัสดุพูนแบบอิมตัวเป็นปัญหาทางกายภาพที่มีความซับซ้อน นั่นคือมีการเคลื่อนที่ของขอบเขตเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสถานะของสสาร ซึ่งปัญหาดังกล่าวสามารถพบเห็นอยู่ทั่วไปในธรรมชาติและในทางด้านวิศวกรรมต่าง ๆ การที่นำวัสดุพูนมาศึกษาทดลองเนื่องจากวัสดุพูนเป็นวัสดุพื้นฐานที่ใช้ในด้านวิศวกรรม ดังนั้นถ้าเราสามารถทำความเข้าใจถึงกลไกของการเปลี่ยนแปลงในปรากฏการณ์ต่าง ๆ เหล่านี้ได้จะช่วยให้สามารถออกแบบหรือพัฒนาปรับปรุงกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการทำแข็งของวัสดุต่าง ๆ ให้ดียิ่งขึ้น ดังนั้นได้นักวิจัยจำนวนมากพยายามที่จะทำการศึกษถึงปัญหาดังกล่าวโดยเริ่มจาก ในปี ค.ศ. 1959 Murray และ Landis[1] ได้ทำการเปรียบเทียบระหว่างวิธีแปรผันระยะกริด (Variable space grid method) กับวิธีกำหนดระยะกริดแบบคงที่ (Fixed space grid method) พบว่าวิธีแรกจะมีความแม่นยำกว่า เนื่องจากมีค่าความคลาดเคลื่อนขณะเริ่มต้นน้อยกว่า ในปี พ.ศ. 2549 จิตติน แดงเที่ยง[2] ได้นำระเบียบวิธีเชิงตัวเลขมาประยุกต์ใช้กับปัญหาการแข็งตัวของน้ำแข็งของเพื่อทำนายอัตราการผลิตของน้ำแข็งและสามารถนำไปปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

และผลการคำนวณเชิงตัวเลขที่ได้เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลเฉลยแม่นยำตรง พบว่ามีค่าที่ใกล้เคียงกัน ในปี พ.ศ. 2551 มณฑล ชูโซนา และผดุงศักดิ์ รัตนเดโช[3] ใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อทำนายการกระจายของอุณหภูมิภายในวัสดุและการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็ง (Freezing front) ที่เวลาต่างๆ ในระบบหนึ่งมิติและทำการเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งที่ได้จากการทำนายด้วยวิธีแปรผันระยะกริด วิธีการกำหนดขอบเขตแบบคงที่และผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact solution) พบว่าอัตราการเกิดผิวทำแข็งมีลักษณะเป็นแบบไม่เชิงเส้นสูงในช่วงแรกของกระบวนการ นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทำนายกับค่าที่ได้จากสมการแม่นยำตรง พบว่ามีค่าที่สอดคล้องกัน ในปีเดียวกัน วีระศักดิ์ คงแก้ว และคณะ[4] ได้ศึกษาเชิงตัวเลขและเชิงทดลองของกระบวนการทำแข็งในวัสดุที่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะ 1 มิติ โดยนำผลที่ได้เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากวิธีเชิงตัวเลขซึ่งพบว่าแนวโน้มของการกระจายอุณหภูมิและอัตราการเกิดน้ำแข็งที่ได้จากระเบียบวิธีเชิงตัวเลขกับผลที่ได้จากการทดลองไปในทิศทางเดียวกัน ในปี พ.ศ. 2553 ยุทธนา สุโจะ และคณะ[5] ได้ศึกษาเชิงทดลองของกระบวนการทำแข็งของวัสดุพูนแบบอิมตัว 1 มิติ โดยใช้เม็ดแก้วเป็นวัสดุพูนและน้ำเป็นสารทำงานในการเปลี่ยนแปลงสถานะ โดยจะทำการศึกษาอิทธิพลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคและอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแข็งที่มีผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิและการเคลื่อนตัวของผิวทำแข็ง พบว่าการกระจายอุณหภูมิในเซลล์ทดสอบที่เม็ดแก้วขนาดใหญ่จะมีค่าสูงกว่าเม็ดแก้วขนาดเล็ก การเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งช่วงแรกของเม็ดแก้วที่มีขนาดใหญ่จะมีอัตราเคลื่อนที่ได้เร็วกว่า แต่ในช่วงปลายที่ขนาดเม็ดแก้วเล็กกว่าจะมีอัตราการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งที่เร็วกว่า ในปีเดียวกัน อติยะ ประคองเกื้อ และคณะ[6] ได้ศึกษาเชิงทดลองกระบวนการทำละลายของวัสดุพูนแบบอิมตัว 1 มิติ โดยใช้เม็ดแก้วเป็นวัสดุพูนและน้ำเป็นสารทำงานในการเปลี่ยนแปลงสถานะ โดยจะทำการศึกษาอิทธิพลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคและอุณหภูมิที่ใช้ในการทำละลายที่มีผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิและการเคลื่อนที่ของผิวทำละลาย พบว่าที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่าจะมีอัตราการเคลื่อนที่ของผิวทำละลายที่สูงกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่โตกว่าและที่อุณหภูมิทำละลายเพิ่มขึ้น ผิวทำละลายจะเคลื่อนที่ได้อย่างรวดเร็ว และในปี 2553 เช่นกัน วีระศักดิ์ คงแก้ว และคณะ[7] ได้ศึกษาเชิงทดลองของกระบวนการ

ทำแข็งของวัสดุที่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะ 1 มิติ พบว่าแนวโน้มของการกระจายอุณหภูมิและอัตราการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งที่ได้จากการทดลองกับผลเฉลยแม่นยำตรงมีค่าไปในทิศทางเดียวกัน ในปี 2554 พิริสิทธิ์ ทวายนาค และคณะ[8] ได้ศึกษาเชิงทดลองการทำแข็งของวัสดุพูนแบบอิมิตัวภายในรูปทรงสี่เหลี่ยมปิด: อิทธิพลของชนิดของวัสดุ โดยใช้เม็ดแก้ว เม็ดเหล็ก เม็ดสแตนเลสเป็นวัสดุพูน และน้ำเป็นสารทำงานในการเปลี่ยนแปลงสถานะ พบว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิและการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งของวัสดุพูนแบบอิมิตัวชนิดเม็ดเหล็กจะดีกว่าชนิดเม็ดสแตนเลส และเม็ดแก้วตามลำดับ ในปี 2555 พิริสิทธิ์ ทวายนาค และคณะ[9] ได้ศึกษาเชิงทดลองการทำแข็งของวัสดุพูนแบบอิมิตัว โดยใช้เม็ดสแตนเลสเป็นวัสดุพูน และน้ำเป็นสารทำงานในการเปลี่ยนแปลงสถานะ พบว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิและการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งภายในเซลล์ทดสอบที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคขนาดเล็กจะดีกว่าที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคขนาดใหญ่โตกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าที่อุณหภูมิทำแข็ง -10°C การเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งภายในเซลล์ทดสอบจะดีกว่าที่อุณหภูมิทำแข็ง -5°C

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาเชิงทดลองกระบวนการการทำแข็งของวัสดุพูนแบบอิมิตัวโดยใช้เม็ดเหล็กเป็นวัสดุพูน และใช้น้ำเป็นสารทำงานในการเปลี่ยนแปลงสถานะ เพื่อที่จะศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่ใช้ในการทำแข็งที่มีผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิและการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็ง

2. การทดลอง



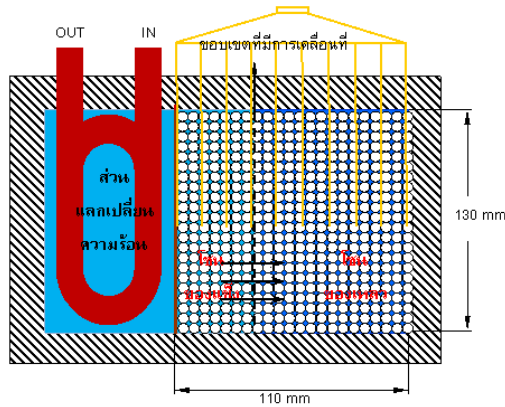
รูปที่ 1 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 1) เซลล์ทดสอบ 2) อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน
- 3) ฉนวนความร้อน 4) เครื่องทำความเย็น
- 5) อุปกรณ์บันทึกอุณหภูมิ 6) เทอร์โมคัปเปิล
- 7) ตัวควบคุมอุณหภูมิ

จากรูปที่ 1 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองสำหรับการทำแข็งของวัสดุพูนแบบอิมิตัว ซึ่งประกอบไปด้วยเซลล์ทดสอบรูปทรงสี่เหลี่ยมที่มีขนาดภายในสูง 130 mm กว้าง 110 mm และลึก 50 mm ผึ่งในแนวราบทั้งด้านบนและด้านล่าง ผึ่งในแนวตั้งทั้งด้านหน้าและด้านหลังทำจากอะครีลิคเรซิน (Acrylic resin) ทุกด้านของเซลล์ทดสอบหุ้มฉนวน Styrofoam หนา 25.4 mm ยกเว้นด้านที่ให้ไหลเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน และการควบคุมความชื้นที่ผนังของเซลล์ทดสอบ โดยที่ภายในเซลล์ทดสอบบรรจุเม็ดเหล็กทรงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสม่ำเสมอ (Porous matrix) ขนาด 0.15, 0.25 และ 0.30 mm เป็นวัสดุพูนและใช้น้ำเป็นสารทำงานในการเปลี่ยนแปลงสถานะ ที่ผนังในแนวตั้งด้านข้างซ้ายได้มีการระบายความร้อนจากแหล่งให้ความร้อนอุณหภูมิต่ำโดยใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบหลายกลับ ซึ่งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะถูกต่อเข้ากับแหล่งอุณหภูมิต่ำโดยใช้วาล์วเปิด-ปิด แหล่งอุณหภูมิต่ำจะประกอบไปด้วยสารละลายเอทิลีนไกลคอลและน้ำมีความเข้มข้น 50 % ซึ่งใช้เป็นสารตัวกลางในการระบายความร้อน (เนื่องจากที่ความดันบรรยากาศน้ำจะแข็งตัวที่ 0°C แต่ในแหล่งความร้อนคงที่นั้นอุณหภูมิจะต่ำกว่าศูนย์ ดังนั้นจึงต้องเติมสาร Ethylene Glycol เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำแข็งตัว)

การเตรียมเซลล์ทดสอบโดยเริ่มจากนำเม็ดเหล็กขนาดที่ต้องการมาตวงให้ได้ปริมาตรเท่ากับเซลล์ทดสอบ เติมน้ำให้อิมิตัวโดยไม่มีช่องว่างภายในรูปพูน แล้วนำไปบรรจุให้เต็มเซลล์ทดสอบ จากนั้นนำไปประกอบเข้ากับชุดทดลอง

ระหว่างทำการทดลอง เซลล์ทดสอบจะติดตั้งไว้ในห้องควบคุมอุณหภูมิและควบคุมอุณหภูมิภายในห้อง 10°C ใช้เทอร์โมคัปเปิล type K ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6 mm จำนวน 10 ตัว เพื่อหาค่าการกระจายของอุณหภูมิและการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งภายในเซลล์ทดสอบซึ่งตำแหน่งของเทอร์โมคัปเปิลทั้งหมดที่ใช้วัดอุณหภูมิจะถูกติดตั้งที่ตำแหน่งศูนย์กลางในระนาบของเซลล์ทดสอบและมีระยะห่างเท่า ๆ กัน 10 mm โดยที่เทอร์โมคัปเปิลทุกตัวจะต่อเข้ากับอุปกรณ์บันทึกอุณหภูมิ (Data logger) เพื่อเก็บและวิเคราะห์ข้อมูลในช่วงเวลาต่าง ๆ โดยที่ตำแหน่งของผิวทำแข็งภายในเซลล์ทดสอบหาได้จากการประมาณค่าในช่วง (Interpolate) ของอุณหภูมิที่อ่านได้จากเทอร์โมคัปเปิล



รูปที่ 2 แสดงขอบเขตที่มีการเคลื่อนที่

จากรูปที่ 2 เมื่อมีการแลกเปลี่ยนความร้อนโดยชุดแลกเปลี่ยนความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งจะเกิดโซนของแข็งในเซลล์ทดสอบ ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนภายในเซลล์ทดสอบและจากนั้นทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งภายในเซลล์ทดสอบขึ้น

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

จากกฎการอนุรักษ์พลังงานเมื่อพิจารณาเฉพาะการนำความร้อนที่ถ่ายเทผ่านปริมาตรควบคุมใด ๆ ในที่นี้จะพิจารณาเป็นกรณีการถ่ายเทความร้อนแบบหนึ่งมิติ สามารถเขียนสมการเชิงอนุพันธ์เพื่อใช้อธิบายการถ่ายเทความร้อนทั้งภายในบริเวณโซนของเหลวและภายในบริเวณโซนของแข็งในกรณีหนึ่งมิติ ได้ดังนี้

3.1) สำหรับโชนของแข็ง(frozen layer)($0 < x < \epsilon(t)$)

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

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 ($x = \varepsilon$)

จากรูปที่ 3 เมื่อพิจารณาตำแหน่งของผิวเชื่อมต่อระหว่างเฟสที่ $x = \varepsilon$ อุณหภูมิ 0°C จากนั้น ทำการสร้างแถบเล็กๆ มีความหนา $d\varepsilon$ ที่เวลา dt ซึ่งที่ตำแหน่งนี้การถ่ายเทความร้อนเป็นไปแบบต่อเนื่อง ซึ่งความร้อนที่ถ่ายเทจากโซนของแข็งโดยการนำผ่านพื้นผิวที่มีอุณหภูมิคงที่ไปยังโซนของเหลวของสารทำงานที่มีการเปลี่ยนแปลงเฟส จากกฎของการอนุรักษ์พลังงาน จะได้

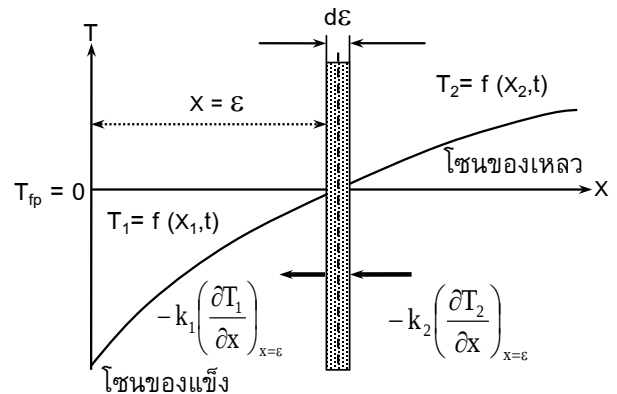
$$L\rho \frac{d\varepsilon}{dt} = q_1 - q_2 \quad (3)$$

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

อัตราการเคลื่อนที่ของขอบเขตของผิวทำเชิงหาได้

จาก

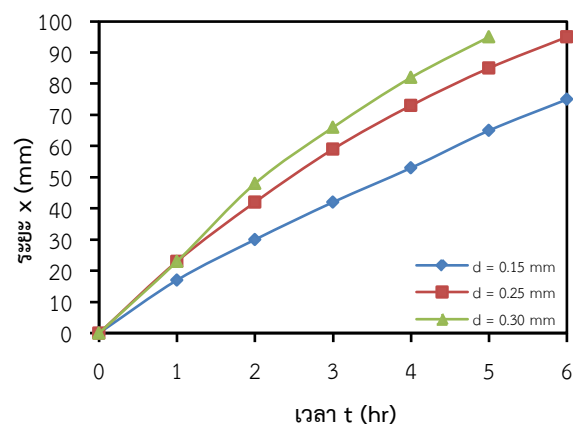
$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{Lp} \left[k_1 \left(\frac{\partial T_1}{\partial x} \right)_{x=\varepsilon} - k_2 \left(\frac{\partial T_2}{\partial x} \right)_{x=\varepsilon} \right] \quad (4)$$



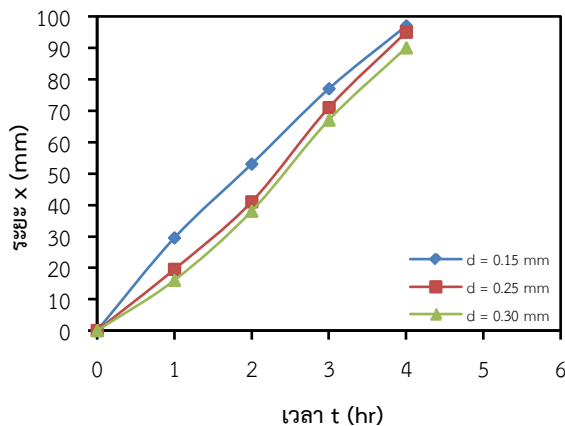
รูปที่ 3 แสดงการสมดุลพลังงานที่ผิวทำแข็ง

4. ผลการวิเคราะห์และวิจารณ์ผล

จากการทดลองที่สภาวะต่าง ๆ แล้วนำผลที่ได้มา
วิเคราะห์เปรียบเทียบจะได้กราฟดังต่อไปนี้



(ก) การทำแข็งที่อุณหภูมิ -5°C

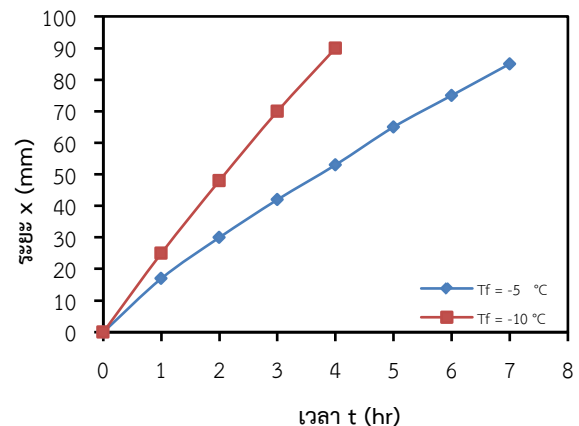


(ข) การทำแข็งที่อุณหภูมิ -10 °C

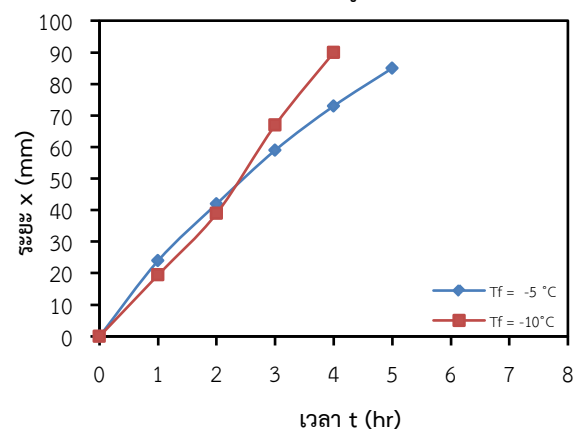
รูปที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบแนวโน้มการเคลื่อนที่ของ
ผิวทำแข็งของเม็ดเหล็ก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง
0.15 mm, 0.25 mm และ 0.30 mm

จากรูปที่ 4 ก แสดงการเปรียบเทียบแนวโน้มการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งที่ใช้เม็ดเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15, 0.25 และ 0.30 mm สำหรับอุณหภูมิทำแข็ง -5 °C พบว่าแนวโน้มการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งที่เกิดขึ้นในช่วงแรกจะมีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากอิทธิพลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแข็ง แต่เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น การเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งที่ใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ ๆ จะเคลื่อนที่ได้สูงกว่าที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็ก ๆ เนื่องจากอิทธิพลของค่าความพูนและค่าการนำความร้อนของเม็ดเหล็ก

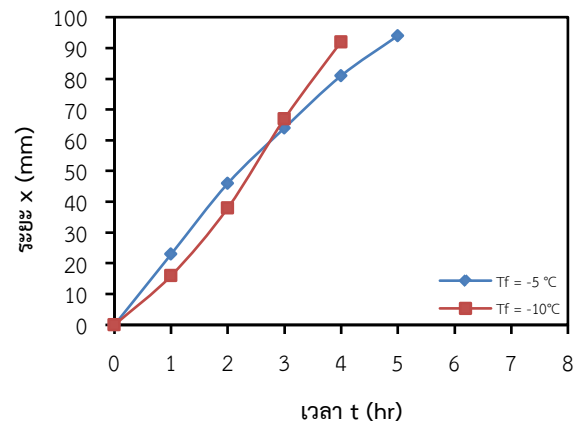
จากรูปที่ 4 ข แสดงการเปรียบเทียบแนวโน้มการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งที่ใช้เม็ดเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15, 0.25 และ 0.30 mm สำหรับอุณหภูมิทำแข็ง -10 °C พบว่าแนวโน้มการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งไปในทิศทางเดียวกันคือ อนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็ก การเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งจะเคลื่อนที่ได้ดีกว่าอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ เนื่องจากอนุภาคที่มีขนาดเล็กการเคลื่อนตัวของความร้อนจากโซนของเหลวได้ดีกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ และเม็ดเหล็กมีค่าการนำความร้อนที่สูงกว่าน้ำมากจะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิยิ่งต่ำมาก ๆ จะทำให้ค่าการนำความร้อนของเม็ดเหล็กจะยังมีค่าสูงขึ้น



(ก) การทำแข็งที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 mm



(ข) การทำแข็งที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 mm

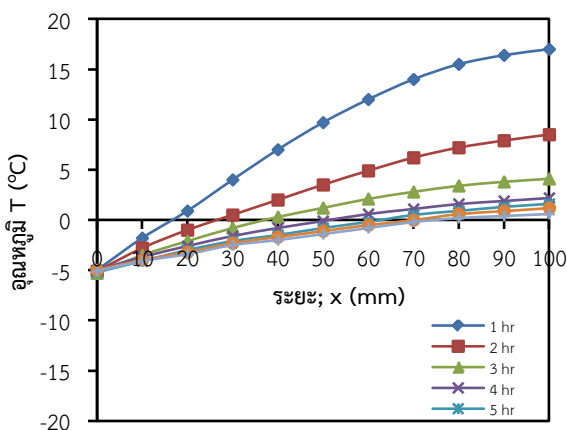
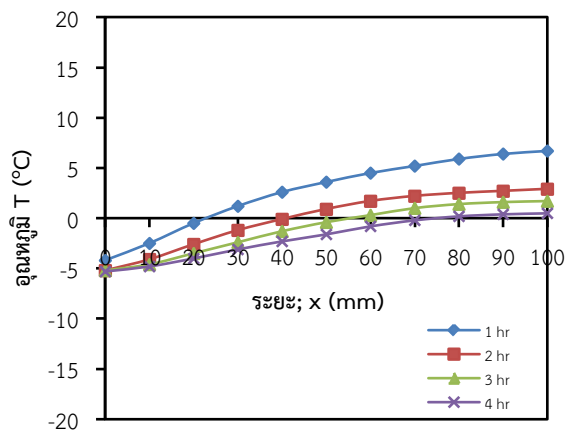
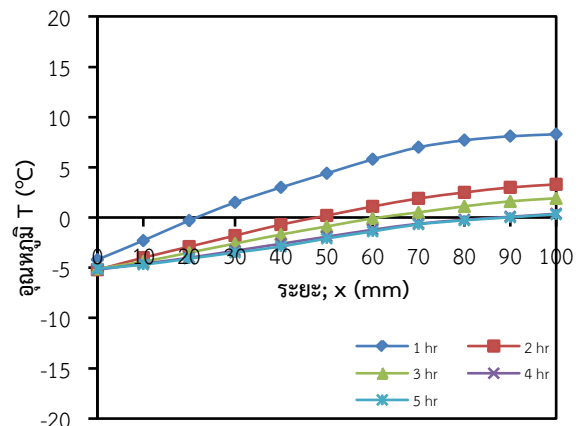
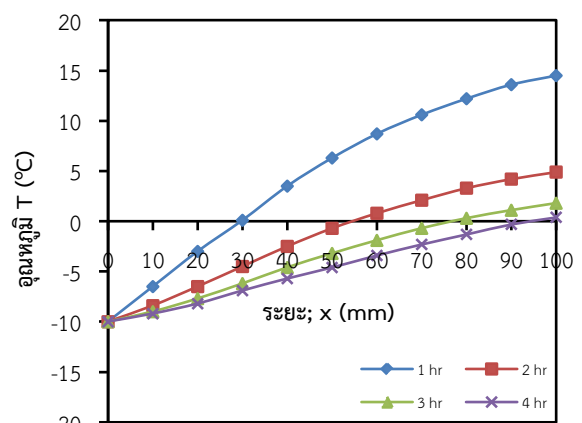
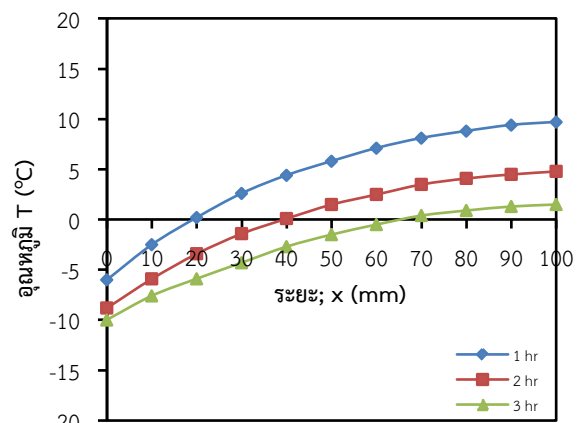


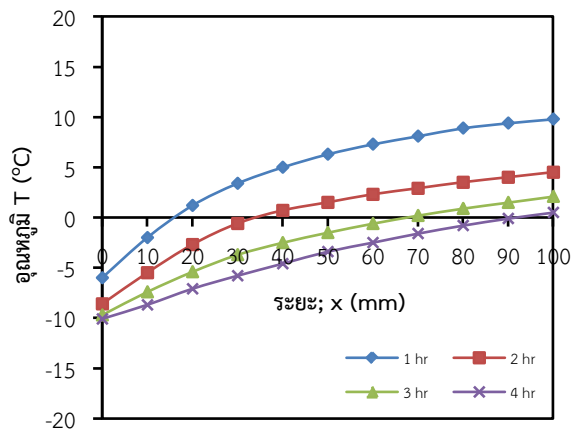
(ค) การทำแข็งที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.30 mm

รูปที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบแนวโน้มการเคลื่อนที่ของ
ผิวทำแข็งของเม็ดเหล็กที่อุณหภูมิทำแข็ง
-5 °C และ -10 °C

จากรูปที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบแนวโน้มการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งที่ใช้อุณหภูมิทำแข็ง -5 °C และ -10 °C สำหรับเม็ดเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเดียวกัน พบว่าเม็ดเหล็กที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 mm การเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งที่อุณหภูมิทำแข็ง -5 °C

และ -10°C จะมีผลไปในทิศทางเดียวกัน คือการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งที่อุณหภูมิทำแข็ง -10°C จะเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าที่อุณหภูมิทำแข็ง -5°C ที่เม็ดเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 mm ในช่วงแรก ที่อุณหภูมิทำแข็ง -5°C จะเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าที่อุณหภูมิทำแข็ง -10°C เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 2.3 ชั่วโมง การเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งที่อุณหภูมิทำแข็ง -10°C จะเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าที่อุณหภูมิทำแข็ง -5°C และที่เม็ดเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.30 mm ในช่วงแรก การเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งที่อุณหภูมิทำแข็ง -5°C จะเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าที่อุณหภูมิทำแข็ง -10°C เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 2.8 ชั่วโมง การเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งที่อุณหภูมิทำแข็ง -10°C จะเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าที่อุณหภูมิทำแข็ง -5°C จากภาพที่ 5 ก,ข,ค สังเกตได้ว่าการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งที่อุณหภูมิทำแข็ง -5°C และ -10°C มีผลที่ต่างกัน เนื่องจากอิทธิพลของอนุภาคและอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแข็งที่ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็ง

(ก) การทำแข็งที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 mm (ข) การทำแข็งที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 mm (ค) การทำแข็งที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.30 mm รูปที่ 6 แสดงลักษณะการกระจายตัวและการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งของเม็ดเหล็กที่อุณหภูมิทำแข็ง -5°C (ง) การทำแข็งที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 mm (จ) การทำแข็งที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 mm



(ค) การทำแข็งที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.30 mm รูปที่ 7 แสดงลักษณะการกระจายตัวและการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งของเม็ดเหล็กที่อุณหภูมิทำแข็ง -10°C

จากรูปที่ 6 และ 7 แสดงลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิและการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งที่ใช้อุณหภูมิทำแข็ง -5°C และ -10°C สำหรับเม็ดเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15, 0.25 และ 0.3 mm ที่เวลาต่าง ๆ พบว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิในโซนของแข็งจะลดลงอย่างรวดเร็ว และเวลาที่ใช้ในการทำแข็งนั้นน้อยมาก หลังจากนั้นจะนำไปสู่โซนของเหลวซึ่งอุณหภูมิจะสูงกว่าอุณหภูมิที่จุดเยือกแข็ง เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นอัตราการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งจะเพิ่มขึ้น และเมื่อเวลามาก ๆ อัตราการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งก็จะเพิ่มขึ้นในอัตราที่ลดลง เนื่องจากโซนของแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้เกิดความต้านทานการเคลื่อนตัวของความร้อนภายในเซลล์ทดสอบ นอกจากนี้พบว่าการกระจายของอุณหภูมิภายในเซลล์ทดสอบได้ดี เนื่องจากเม็ดเหล็กมีค่าการนำความร้อนที่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำซึ่งเป็นสารทำงานในการเปลี่ยนแปลงสถานะ

5.สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาเชิงทดลองกระบวนการทำแข็งของวัสดุพูนแบบอิมิตัวโดยใช้เม็ดเหล็กเป็นวัสดุพูนในการทดลอง เพื่อศึกษาอิทธิพลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคและอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแข็งที่มีผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิและการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งของเม็ดเหล็กภายในเซลล์ทดสอบที่เวลาต่าง ๆ ในระบบ 1 มิติ พบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแข็งและที่เวลาใด ๆ ภายในเซลล์ทดสอบอุณหภูมิจะลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นอัตราการเคลื่อนที่ของผิว

ทำแข็งก็จะเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามที่เวลาในการทำแข็งเพิ่มขึ้นมาก ๆ อัตราการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งก็จะเพิ่มขึ้นในอัตราที่ลดลง เนื่องจากโซนของแข็งเพิ่มขึ้นทำให้เกิดความต้านทานการเคลื่อนตัวของความร้อนภายในเซลล์ทดสอบ และยังพบว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิและการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งของเม็ดเหล็กที่อุณหภูมิทำแข็ง -5°C การเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งของเม็ดเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.30 mm จะเคลื่อนที่ได้ดีกว่าที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 mm และ 0.15 mm ตามลำดับ และที่อุณหภูมิทำแข็ง -10°C การเคลื่อนที่ของผิวทำแข็งของเม็ดเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 mm จะเคลื่อนที่ได้ดีกว่าที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 mm และ 0.30 mm ตามลำดับเนื่องจากอิทธิพลของอุณหภูมิทำแข็งและค่าการนำความร้อนของเม็ดเหล็กที่มีค่าต่างจากน้ำมากจึงส่งผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิและการเคลื่อนที่ของผิวทำแข็ง

6.กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ ผศ.ดร.จิระพล กลิ่นบุญ อาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ที่ได้สนับสนุนการทำงานวิจัยในครั้งนี้

7.อักษรย่อและสัญลักษณ์

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

7.1 ตัวห้อย

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

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Murray W.D. and Landis F. (1959). "Numerical and machine solutions of transient

heat conduction problem involving melting or freezing", ASME J. Heat Transfer, 81, pp. 106-112.

[2] จิตติน แดงเที่ยง (2549). “การทำนายการแข็งตัวของน้ำแข็งในสองมิติโดยใช้วิธีผลต่างสลับเนื่องแบบกริดคงตัว”, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 20 วันที่ 18-20 ตุลาคม 2549 จังหวัดนครราชสีมา.

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

[4] วีระศักดิ์ คงแก้ว และคณะ (2552). “การศึกษาเชิงตัวเลขและเชิงทดลองของกระบวนการทำแข็งในวัสดุที่มีการเปลี่ยนแปลงเฟส 1 มิติ”, จัดการประชุมวิชาการการถ่ายทอดพลังงานความร้อนและมวล ในอุปกรณ์ด้านความร้อน ครั้งที่ 8 ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ วันที่ 12-13 มีนาคม 2552 ณ โพธิ์วัดล ธีรธรรมมณเฑียร จ.เชียงราย.

[5] ยุทธนา สุโจะ และคณะ. 2553. “การศึกษาเชิงทดลองของกระบวนการทำแข็งของวัสดุพูนแบบอิมิตัว 1 มิติ (ใช้เม็ดแก้วเป็นวัสดุพูนในการทดสอบ)”, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24 วันที่ 20-22 ตุลาคม 2553 จังหวัดอุบลราชธานี.

[6] อติยะ ประคองเกื้อ และคณะ (2553). “การศึกษาเชิงทดลองของกระบวนการทำละลายในวัสดุพูนแบบอิมิตัว 1 มิติ (ใช้เม็ดแก้วเป็นวัสดุพูนในการทดสอบ)”, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24 วันที่ 20-22 ตุลาคม 2553 จังหวัดอุบลราชธานี.

[7] วีระศักดิ์ คงแก้ว และคณะ (2553). “การศึกษาเชิงทดลองของกระบวนการทำแข็งของวัสดุที่มีการเปลี่ยนแปลงเฟส 1 มิติ”, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24 วันที่ 20-22 ตุลาคม 2553 จังหวัดอุบลราชธานี.

[8] พิรสิทธิ์ ทวยนาค และคณะ (2554). “การศึกษาเชิงทดลองการทำแข็งของวัสดุพูนแบบอิมิตัวภายในรูปทรงสี่เหลี่ยมปิด: อิทธิพลของชนิดของวัสดุ”, การประชุม

วิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25 วันที่ 19-21 ตุลาคม 2554 จังหวัดกระบี่.

[9] พิรสิทธิ์ ทวยนาค, ภาณุพันธ์ พรหมสวัสดิ์, ทวีศักดิ์ จินดาวงศ์ และมณฑล ชูโชนาค (2555). “การศึกษาเชิงทดลองการทำแข็งของวัสดุพูนแบบอิมิตัว”, การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 8, วันที่ 2-4 พฤษภาคม พ.ศ. 2555 จังหวัดมหาสารคาม.