การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 19 19-21 ตุลาคม 2548 จังหวัดสงขลา

## การวิเคราะห์เชิงทฤษฎีและทดลองสำหรับปัญหาการทำละลายในวัสดุพรุนที่ไม่อิ่มตัวขณะ มีการถ่ายเทความร้อนและมวลสารข้ามขอบเขตที่เคลื่อนที่

## Theoretical and Experimental Analysis of Melting Process in Unsaturated Porous

Media considered Heat and Mass Transport across Moving Boundaries

ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ คลองหลวง ปทุมธานี 12120 \*E-mail: <u>ratphadu@engr.tu.ac.th</u>

Phadungsak Rattanadecho

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University (Rangsit Campus), Pathumthani, 12120 \*E-mail: <u>ratphadu@engr.tu.ac.th</u>

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้จะทำการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีและทดลองสำหรับปัญหา การทำละลายในวัสดุพรุนไม่อิ่มตัว ขณะมีการถ่ายเทความร้อนและมวล สารข้ามขอบเขตที่เคลื่อนที่ โดยวัสดุพรุนไม่อิ่มตัวที่นำมาศึกษาจะ ประกอบไปด้วยเม็ดแก้ว น้ำ โพรงอากาศ และน้ำแข็ง งานวิจัยเริ่มต้น จากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปสมการอนุพันธ์ย่อยซึ่ง ประกอบไปด้วยสมการดาร์ซี่ สมการอนุรักษ์มวล และสมการอนุรักษ์ พลังงาน และสมการสเตฟานสำหรับกระบวนการทำละลายที่มีขอบเขต ้เคลื่อนที่ 2 ตำแหน่ง โดยที่การหาคำตอบของกลุ่มสมการดังกล่าวใช้วิธี ้ไฟในท์วอลลุมร่วมกับวิธีแปลงพิกัดแกน ผลลัพธ์ที่ได้จากการทำนายค่า ้ความอิ่มตัว และการกระจายของอุณหภูมิในวัสดุ และตำแหน่งของ ขอบเขตที่เคลื่อนที่ จะถูกตรวจสอบกับผลที่ได้จากการทดลองจริงใน ห้องปฏิบัติการ อิทธิพลของค่าความอิ่มตัวเริ่มต้น และ อุณหภูมิของการ ทำละลาย ที่มีผลต่อจลน์ศาสตร์ของการทำละลายจะทำการศึกษาอย่าง ละเอียด องค์ความรู้ที่ได้จากงานวิธีวิเคราะห์จะเป็นประโยชน์ต่องาน ทางวิศวกรรมที่หลากหลาย เช่น การหลอมละลายโลหะ อุตสาหกรรม อาหาร การถนอมเนื้อเยื่อทางการแพทย์ การหลอมละลายของแมกมา ในชั้นใต้พิภพและการออกแบบอากาศยาน

**คำหลัก** ปัญหาการทำละลาย วัสดุพรุนไม่อิ่มตัว สมการดาร์ซี่

#### Abstract

In this paper, the melting process in unsaturated porous media during heat and mass transport across moving boundary has been investigated theoretically and experimentally. The unsaturated porous media are composed of glass beads, water, air pocket and ice. The governing partial-differential equations are Darcy, conservation of mass, conservation of energy and Stefan equations for melting process having two locations of moving boundary. The simulated results are obtained via finite volume method together with coordinate transformation technique. The predicted water saturation and temperature distributions in the material and the location of moving boundary are compared with experimental results. The influences of the initial water saturation and melting temperature on the melting kinetics are clarified in details. Further quantitative validation of results could be very useful for various kinds of engineering work such as melting of alloy, food, preservation of tissue, magma melting and aerospace designed.

**Keywords:** Melting Problem, Unsaturated Porous Media, Darcy Equation

### 1. บทนำ

ในอดีตที่ผ่านมา รายงานการวิจัยในการศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายเท ความร้อนและมวลสารในวัสดุพรุน (porous media) ในระดับ ้นานาชาติยังจำกัดอยู่กับวัสดุ พรุนชนิดอิ่มตัว (saturated porous media) ในขณะที่ การวิจัยเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนและมวลสารใน วัสดุพรุนชนิดไม่อิ่มตัว (unsaturated porous media) ยังมีการวิจัยกัน น้อย โดยเฉพาะในภาคทฤษฎีในโครงสร้างระดับจุลภาค (microscopic level) ด้วยเหตุผลของความซับซ้อนในปรากฏการณ์ อันเนื่องมาจาก การเปลี่ยนสถานะของสสารหลายชนิด คุณสมบัติด้านความร้อน ประสิทธิผล (effective thermal property) ของวัสดุพรุน คุณสมบัติด้าน ชลศาสตร์ (hydrodynamic property) และคุณลักษณะการเคลื่อนย้าย มวลสาร (ของเหลวและก๊าซ) ในวัสดุพรุน รวมถึงปัญหาของการเคลื่อน ์ ตัวของขอบเขต (moving boundary problem) ซึ่งที่ผ่านมายังไม่มี นอกจากนี้ศาสตร์ดังกล่าวนี้ต้องอาศัยองค์ การศึกษาอย่างเป็นระบบ ความรู้ในหลายสาขาเข้าด้วยกัน กล่าวคือ ความรู้ทางด้านการถ่ายเท ความร้อนและมวลสาร, กลศาสตร์ของไหลในระบบที่มีความซับซ้อน และวัสดุศาสตร์ รวมจนถึงระเบียบวิธีเชิงคำนวณทางตัวเลขชั้นสูง เพื่อ หาคำตอบของปัญหาที่มีความเป็นไม่เชิงเส้นสูง (strongly non-linear problem) และการประดิษฐ์โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่มีความแม่นยำและ มีสมรรถนะสง

ด้วยเหตุดังกล่าวนี้ทำให้การวิจัยในสาขาดังกล่าวข้างต้นนี้ยังไม่ แพร่หลายในระดับนานาชาติและประเทศไทย ในความเป็นจริงแล้ว ประเทศที่พัฒนาแล้วจะให้ความสนใจในการวิจัยและพัฒนาในสาขานี้ เป็นอันมาก การวิจัยในสาขาการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุ พรุนมีประโยชน์อย่างสูงในศาสตร์วิศวกรรมทุกสาขา ทั้งนี้เพราะวัสดุ ส่วนใหญ่ที่ใช้งานในทางวิศวกรรมจัดเป็นวัสดุพรุน กล่าวคือตัววัสดุ ประกอบด้วย 3 สถานะ คือ สถานะของแข็งหรือ matrix และของเหลว และก๊าช ที่อยู่ในช่องว่างหรือรูพรุน (void)

เป็นที่ทราบกันดีว่าในทางวิศวกรรมแล้ววัสดุส่วนใหญ่จะเป็น วัสดุพรุน ตัวอย่างวัสดุพรุนที่ใช้งานในทาวิศวกรรม เช่น ดินและ คอนกรีตในงานวิศวกรรมปฐพี, Ceramic ในงานวิศวกรรมโลหะ, catalyst ในงานวิศวกรรมเคมี ฉนวนความร้อนในงาน วิศวกรรมเครื่องกลและเคมี, เนื้อเยื่อต่างๆ ผิว หรือ membrane ใน งานวิศวกรรมชีวภาพและการแพทย์ รวมจนถึงอาหารและผลิตภัณฑ์ ทางการเกษตรในงานวิศวกรรมการเกษตร จึงพูดได้ว่าความรู้ทางด้าน การถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพรุนมีความสำคัญต่องาน วิศวกรรมทุกสาขา อย่างไรก็ตามประเทศไทยก็ยังขาดแคลนนักวิจัยใน สาขาการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในวัสดุพรุนชนิดอิ่มตัวและชนิด ไม่อิ่มตัว รวมถึง เทคโนโลยีวัสดุพรุน ในด้านอื่นๆ

สำหรับรายงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับกระบวนการทำละลาย มักจะพิจารณาให้วัสดุตัวอย่างทดสอบเป็นก้อนน้ำแข็ง (ice block) หรือ เพคเบดของวัสดุพรุนชนิดอิ่มตัว (packed bed of saturated porous media: ซึ่งเป็นองค์ประกอบของน้ำแข็งที่อิ่มตัวในช่องรูพรุนและอนุภาค ของแข็ง) โดยจะแบ่งลักษณะการให้โหลดความร้อนหลายรูปแบบอาทิ เช่น การให้โหลดที่ผิวด้านข้างของระนาบแนวดิ่งของเพคเบดโดยที่ผิว ด้านอื่นๆทำการหู้มฉนวนไว้และจะทำการวิเคราะห์อัตราการละลายตัว ของน้ำแข็งและรูปร่างและลักษณะการเคลื่อนตัวของขอบเขตผิวละลาย (melting front หรือ moving boundary) ตัวอย่างงานวิจัยเด่นๆที่เคยทำ มาเกี่ยวกับกระบวนการทำละลายในลักษณะที่กล่าวข้างต้นได้แก่งาน ของ Murray and Landis [1] ซึ่งได้นำเสนอวิธีการคำนวณโดยอาศัย เทคนิคการเปลี่ยนพิกัดของแกน transformation (coordinate technique based on boundary fixing method) ในปัญหาการ กระบวนการทำละลายในก้อนน้ำแข็ง ซึ่งเป็นวิธีที่คลาสิค ที่ นักวิจัย นำมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการต่าง ๆที่เกี่ยวข้องกับปัญหาที่มีขอบเขต ้เคลื่อนที่ (moving boundary problem) เช่นการวิเคราะห์เกี่ยวกับ กระบวนการอบแห้ง (drying process) กระบวนการแช่แข็ง (freezing process) หรือกระบวนการทำละลาย (melting process) เป็นต้น Viskanta et. al. [2] ได้ศึกษาทั้งเชิงทฤษฎีและการทดลอง ผล การศึกษาพบว่าอิทธิพลของฟลักซ์ความร้อนที่ป้อนและลักษณะโหมด ของการถ่ายเทความร้อน (การนำและการพา) มีผลต่ออัตราการละลาย ์ตัวของน้ำแข็งและรูปร่างและลักษณะการเคลื่อนตัวของขอบเขตผิว ละลาย Gong and Mujumdar [3] ได้ดัดแปลงลักษณะการให้โหลด โดยทำการให้โหลดที่ผิวด้านล่างของระนาบ ความร้อนจากกรณีแรก แนวระดับแทนโดยที่ผิวด้านอื่นๆทำการหุ้มฉนวนไว้ จากการศึกษา พบว่าอิทธิพลของ Rayleigh number และอัตราฟลักซ์ความร้อนที่ ป้อนเข้าไปมีผลต่อรูปร่างและลักษณะการเคลื่อนตัวของขอบเขตผิว ละลายรวมถึงความไม่เสถียรภาพของ การพาความร้อนแบบอิสระ อย่างไรก็ตามงานวิจัยฉบบับนี้เน้นเฉพาะการทำนายโดยอาศัยระเบียบ วิธี Finite element โดยไม่มีการทดลองเปรียบเทียบ

ลักษณะการให้โหลดความร้อนในรูปแบบอื่นเช่น การละลายตัว ของบล๊อกน้ำแข็งทรงกระบอกที่อยู่ที่วางขวางทิศทางการไหล (forced ของของไหลภายใต้โหลดความร้อนที่เป็นลักษณะการพาแบบ flow) ธรรมชาติ (natural convection) และการพาแบบบังคับ (force convection) ตัวอย่างงานที่ศึกษาเช่น Carrey and Gebhart [4] และ Huppert and Turner [5] ได้ทำการศึกษาการละลายตัวของบล๊อก ้น้ำแข็งทรงกระบอกที่อยู่ที่วางขวางทิศทางการไหลโดยการพาแบบ ธรรมชาติ Fukusako et.al [6] ได้ศึกษาถึงผลกระทบของ การให้โหลด ความร้อนที่มีลักษณะการการพาแบบธรรมชาติ ขนาดรูปทรงของบล๊อก ้น้ำแข็งทรงกระบอก และอัตราความเข้มของสารละลายที่นำมาเป็นของ ใหลในระบบ ที่มีต่อรูปร่างของผิวละลาย (melting shape) และ ผลงานวิจัยล่าสุดของผู้วิจัยเอง Ratanadecho et.al. [7] ได้ศึกษาการ การละลายตัวของบล๊อกน้ำแข็งทรงกระบอกที่อยู่ที่วางขวางทิศทางการ ใหล โดยให้โหลดความร้อนที่มีลักษณะการการพาแบบบังคับ ในที่นี้จะ ศึกษาถึงอิทธิพลของความเร็วของการไหล อุณหภูมิของของไหล และ ชนิดของวัสดุตัวอย่าง บล๊อกน้ำแข็งทรงกระบอก (ทำจากน้ำธรรมดา) และบล็อกน้ำแข็งที่ทำจาก sodium carbonate aqueous solution of eutectic concentration ที่มีต่อที่มีต่อรูปร่างของผิวละลายของวัสดุ ตัวอย่าง

นอกเหนือจากนี้ รายงานวิจัยเกี่ยวกับกระบวนการทำละลายโดย อาศัยพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟก็มีการนำเสนอ เช่น Pangrle and Ayappa [8] ได้ทำการศึกษากระบวนการทำละลายโดยอาศัยพลังงาน จากคลื่นไมโครเวฟบนวัสดุตัวอย่างรูปทรงกระบอก โดยพารามิเตอร์ที่

สำคัญที่วิเคราะห์คือ อัตราการดูดกลืนพลังงานไมโครเวฟ รูปร่างการ กระจายอุณหภูมิในวัสดุตัวอย่าง และอัตราการละลายตัว ต่อมา Basak and Ayappa [9] ก็ขยายผลการวิจัยจากงานที่ผ่านมา [8] โดย ทำการศึกษาในวัสดุตัวอย่างที่เป็นแผ่น (slab) รายงานวิจัยล่าสุดของ ผู้วิจัยเอง (Ratanadecho et.al [10] และ (Ratanadecho [11]) ได้ ทำการศึกษากระบวนการทำละลายเชิงทฤษฎีและทดลองโดยอาศัย พลังงานจากคลื่นไมโครเวฟในวัสดุตัวอย่างที่มีโครงสร้างเป็นชั้นๆ (multi-layered material) ในท่อน้ำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม (rectangular wave guide) โดยพารามิเตอร์ที่สำคัญที่วิเคราะห์คือ อัตราการดูดกลืน พลังงานไมโครเวฟ รูปร่างการกระจายอุณหภูมิในวัสดุตัวอย่าง อัตรา การละลายตัว ลักษณะโครงสร้างของชั้นวัสดุตัวอย่าง และการเคลื่อนตัว ของขอบเขตผิวละลาย (melting front) งานวิจัยชิ้นนี้ถือว่าเป็นตันแบบ ที่สำคัญในรายงานวิจัยระดับนานาชาติที่มีการนำเทคนิคการคำนวณ รูปแบบใหม่มาแก้ปัญหาลักษณะโดเมนที่มีการเคลื่อนตัวของขอบเขต เป็นลักษณะรูปร่างที่ไม่เฉพาะ (arbitrary moving front) ขณะวัสดุ ตัวอย่างอยู่ภายใต้พลังงานจากคลื่นไมโครเวฟ

อย่างไรก็ตามที่ผ่านมางานวิจัยทั้งหมดอยู่บนพื้นฐานที่ว่าวัสดุ ทดสอบตัวอย่างเป็นก้อนน้ำแข็งธรรมดา หรือเป็นวัสดุพรุนชนิดอิ่มตัว สำหรับรายงานการวิจัยเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนและมวลสารใน วัสดุพรุนชนิดไม่อิ่มตัว (unsaturated porous media) ในกระบวนการ ทำละลายหรือกระบวนการทำแข็ง (solidification process) ยังมีการ วิจัยกันน้อยมาก โดยเฉพาะในภาคทฤษฏิในโครงสร้างระดับจุลภาค (microscopic level) ด้วยเหตุผลของความซับซ้อนในปรากฏการณ์ ยกเว้นในส่วนของรายงานวิจัยเกี่ยวกับกระบวนการทำแข็งในวัสดุพรุน ชนิดไม่อิ่มตัวได้มีการนำเสนอครั้งแรกในปีที่ผ่านมาโดยผู้วิจัยเอง (Ratanadecho [12]) สำหรับรายงานงานวิจัยเกี่ยวกับปัญหาการทำ ละลายที่ได้รวบรวมเอกสารอ้างอิงไว้เป็นอย่างดี ผู้อ่านสามารถดูได้จาก รายงานของ Yao and Prusa [13]

ในงานวิจัยครั้งนี้จะเน้นศึกษาทั้งในรูปแบบการวิเคราะห์เชิง ทฤษฎีโดยอาศัยระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขชั้นสูง และทดลอง ของกระบวนการทำละลายในวัสดุพรุนที่ไม่อิ่มตัวในโครงสร้างระดับ โดยเริ่มต้นจากการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่ จลภาค สามารถครอบคลุมและอธิบายปรากฏการณ์ในปัญหาของของ กระบวนการทำละลายในวัสดุพรุนที่ไม่อิ่มตัว และยืนยันความถกต้อง งานวิจัยนี้จะทำการศึกษา โดยตรวจสอบจากผลจากการทดลองจริง อิทธิพลของฟลักซ์ความร้อนที่ป้อน ดีกรีความอิ่มตัวเริ่มต้น (initial saturation) ขนาดของอนุภาค (particle size) ที่มีผลต่ออัตราการ ละลายตัวของน้ำแข็งในวัสดุพรุน และลักษณะการเคลื่อนตัวของ ของเหลวที่ขอบเขตผิวละลาย (melting front) และขอบเขตของการไหล ซึม ()infiltration front) ที่แปรเปลี่ยนไปกับเวลา

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และ Numerical Schemes (และ Computer code) รูปแบบใหม่ที่จะพัฒนาขึ้นจากการโครงการวิจัยครั้ง นี้จะเป็นประโยชน์อย่างสูงในการทำนายปรากฏการณ์การถ่ายเท ความร้อนและและมวลสารในวัสดุพรุนที่ไม่อิ่มตัวในงานต่างๆ ดังที่ กล่าวมาข้างต้น รวมถึงปัญหาที่มีลักษณะการเคลื่อนตัวของขอบเขต 2. การวิเคราะห์เชิงทฤษฏีและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ งานวิจัยครั้งนี้เน้นศึกษาทั้งเชิงทฤษฎีโดยอาศัยระเบียบวิธีการคำนวณ เชิงตัวเลขชั้นสูง และการทดลองของกระบวนการละลายในเพคเบดวัสดุ พรุนที่ไม่อิ่มตัว โดยเริ่มต้นเพคเบดวัสดุพรุนที่ไม่อิ่มตัวซึ่งผ่านการ freeze จะเป็นองค์ประกอบของน้ำแข็ง โพรงอากาศและอนุภาคของแข็ง เมื่อนำไปผ่านกระบวนการทำละลาย (melting) จะมีการให้โหลดความ ร้อนที่ผิวด้านข้างของระนาบแนวดิ่งของเพคเบดโดยที่ผิวด้านอื่นๆทำ การหุ้มฉนวนไว้ โดยในการวิเคราะห์จะถือว่าองค์ประกอบของทุก เพคเบดมีความสมดุลย์ทางเทอร์โมไดนามิคส์ในทุกๆจุดที่ สถานะใน พิจารณา และสมมุติให้ค่า porosity กระจายเท่ากันในทุกๆจุด การ ขยายตัวหรือการหดตัวของเพคเบดจะไม่นำมาพิจารณา กลไกที่สำคัญ ของการเคลื่อนย้ายมวลสารที่เป็นของเหลวหรือน้ำอยู่ภายใต้อิทธิพล ของแรงดันแคปปิลารี่ (capillary force) และสมการหลักที่ใช้คำนวณ ฟลักซ์การเคลื่อนตัวของน้ำในวัสดุพรุนเรียกว่าสมการดาร์ซี่ (Darcy's equation) ซึ่งสมการเหล่านี้ derive มาจากหลักการของ volume averaging technique (Ratanadecho [12]).



รูปที่ 1 แบบจำลองทางกายภาพของกระบวนการทำละลายในวัสดุพรุน ชนิดไม่อิ่มตัว

จากรูปที่ 1 การวิเคราะห์เกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนและมวลสาร ในระหว่างกระบวนการทำละลายในวัสดุพรุนชนิดไม่อิ่มตัวจะต้องทำ พิจารณาโดเมนออกเป็น 3 โซนที่เรียงอนุกรมกัน กล่าวคือ โซนแรกคือ โซนละลาย (melting layer: ประกอบด้วยของเหลวและอนุภาคของแข็ง) ซึ่งผิวอีกด้านหนึ่งสัมผัสกับแหล่งโหลดความร้อน ถัดออกไปจะเป็นโซน หลายสถานะ (mushy layer หรือ water-ice layer: ประกอบด้วย ของเหลว อนุภาคของแข็ง น้ำแข็งและโพรงอากาศ) ในโซนนี้จะเกิด ปรากฏการณ์ refreezing เกิดขึ้นหากที่ด้านปลายของเพคเบดมีการ หล่อเย็น ถัดออกไปสุดท้ายจะเป็นโซนของแข็ง (frozen layer: ประกอบด้วยน้ำแข็ง อนุภาคของแข็งและโพรงอากาศ ) ซึ่งวัสดุตัวอย่าง ยังคงรูปเป็นของแข็งเหมือนสถานะก่อนรับโหลดความร้อน ในที่นี้ รอยต่อระหว่างโซนแรกและโซนที่สอง (melting front) และรอยต่อ ระหว่างโซนสองและโซนที่สาม (infiltration front) จะเคลื่อนตัวไปกับ คาบเวลาของการทำละลาย ซึ่งจะต้องพิจารณาเป็นปัญหาที่มีขอบเขต เคลื่อนที่พร้อมกันสองตำแหน่ง (simultaneous moving boundary problem) พร้อมกับมีการถ่ายเทมวลของเหลวผ่านขอบเขตที่เคลื่อนที่ ภายใต้อิทธิพลของแรงดันแคปปิลารี่ ซึ่งรายงานวิจัยในหัวข้อวิจัยที่ กล่าวมานี้ยังไม่เคยมีการวิจัยในระดับนานาชาติ อันเนื่องมาจากความ ซึ่งการ ซับซ้อนของปรากฏการณ์และความยุ่งยากในการคำนวณ ้ คำนวณปรากฏการณ์ทางกายภาพดังกล่าวนี่จะต้องอาศัยองค์ความรู้ใน หลายสาขาเข้าด้วยกันมาแก้ปัญหา กล่าวคือ ความรู้ทางด้านการถ่ายเท ้ความร้อนและมวลสาร, การเปลี่ยนสถานะ รวมจนถึงระเบียบวิธีเชิง ้คำนวณทางตัวเลขชั้นสูง เพื่อหาคำตอบของปัญหาที่มีความเป็นไม่เชิง เส้นสูง (strongly non-linear problem) และการประดิษฐ์โปรแกรม คอมพิวเตอร์ที่มีความแม่นยำและมีสมรรถนะสูง

### สมการพื้นฐานในโซนละลาย

พิจารณาโซนละลาย จากที่กล่าวมาข้างต้น สมการหลักที่ใช้คำนวณ ฟลักซ์การเคลื่อนตัวของน้ำจะอยู่บนพื้นฐานของสมการดาร์ซี่

$$\rho_{w}\frac{\partial s_{m}}{\partial t} = -\frac{\partial f_{m}}{\partial x} = -\frac{\partial}{\partial x} \left[ \rho_{w}\frac{K_{m}K_{rm}}{\mu_{w}}\frac{\partial p_{cm}}{\partial x} \right]$$
[1]

อุณหภูมิภายในโซนละลายสามารถหาได้จากสมการส่งถ่ายความร้อน คือ

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[ \left( \rho c_p \right)_{T_m} T_m \right] = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda_m \frac{\partial T_m}{\partial x} \right] - \frac{\partial \left( c_{pw} f_m T_m \right)}{\partial x}$$
[2]

ในที่นี้ค่าความจุความร้อนประสิทธิผลของน้ำและอนุภาคของแข็งที่อยู่ ในโซนละลาย

## สมการพื้นฐานในโซนหลายสถานะ

พิจารณาโซนหลายสถานะซึ่งประกอบไปด้วยของเหลว อนุภาคของแข็ง น้ำแข็งและโพรงอากาศ ในที่นี้สมการหลักที่ใช้คำนวณ

ฟลักซ์การเคลื่อนตัวของน้ำจะอยู่บนพื้นฐานของสมการดาร์ซี่ เช่นกัน

$$\rho_{w}\frac{\partial s_{wt}}{\partial t} = -\frac{\partial f_{wt}}{\partial x} = -\frac{\partial}{\partial x} \left[ \rho_{w}\frac{K_{wt}K_{r,wt}}{\mu_{wt}}\frac{\partial p_{ct}}{\partial x} \right]$$
[4]

[5]

สำหรับอุณหภูมิภายในโซนหลายสถานะถือว่าคงทีเพราะไม่มีการ ถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้น

$$T = T$$

## สมการพื้นฐานในโซนของแข็ง

พิจารณาโซนของแข็งซึ่งประกอบไปด้วย อนุภาคของแข็ง น้ำแข็งและ โพรงอากาศ ซึ่งจะไม่มีการเคลื่อนตัวของน้ำเกิดขึ้น จะมีเฉพาะการ เปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในโซน และสามารถหาได้จากสมการส่ง ถ่ายความร้อนคือ

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[ \left( \rho c_p \right)_{Tf} T_f \right] = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda_f \frac{\partial T_f}{\partial x} \right]$$
[6]

ในที่นี้ค่าความจุความร้อนประสิทธิผลของน้ำแข็งและอนุภาคของแข็งที่ อยู่ในโซนละลาย

$$\rho c_p \Big|_{Tf} = \rho_i c_{pi} s_i + \rho_p c_{pp} (1 - \varepsilon)$$
<sup>[7]</sup>

โดยที่ค่าความอิ่มตัวของน้ำแข็งก็จะยังคงสภาพเดิม <sub>S<sub>i</sub></sub> = S<sub>0</sub> สำหรับสมการสัมพันธ์อื่นๆที่เกี่ยวข้องกับสมการที่ข้างต้น อาทิเช่น ความดันแคปปิลารี่, <sub>p<sub>c</sub></sub> และค่าการไหลซึม, K เป็นต้น ผู้อ่านสามารถ คันคว้าเพิ่มเติมได้ในงานวิจัยของผู้วิจัยที่ผ่านมา(Ratanadecho [12]) *เงื่อนไขขอบเขต* 

พิจารณาจากแบบจำลองทางกายภาพของกระบวนการทำละลายในวัสดุ พรุนชนิดไม่อิ่มตัวในรูปที่ 1 เงื่อนไขขอบเขตจะประกอบไปด้วย *เงื่อนไขขอบเขตเคลื่อนที่ (moving boundary)* 

ทำการสมดุลพลังงานและมวลที่ขอบเขตผิวละลาย(melting front), <sub>X = X ,,,</sub> ก็จะได้สมการที่ [8] และ [9] ตามลำดับ

$$\frac{dX_{mt}}{dt} = -\frac{\lambda_m}{L\rho_w s_{it}} \frac{\partial T_m}{\partial x}\Big|_{x=X_{mt}}$$
[8]

$$\rho_{w}(s_{wt} + s_{it})\frac{dX_{mt}}{dt} = f_{m}\big|_{x = X_{mt}} + f_{t}\big|_{x = X_{mt}}$$
[9]

ทำการสมดุลพลังงานที่ขอบเขตการไหลซึม (infiltration front),  $X = X_{rr}$  ก็จะได้

$$\frac{dX_{tf}}{dt} = \frac{1}{\rho_w s_{sc}} \left( \left( f_t \right)_{x=X_{tf}} + \frac{\lambda_f}{L} \frac{\partial T_f}{\partial x} \bigg|_{x=X_{tf}} \right)$$
[10]

เงื่อนไขขอบเขตที่ตำแหน่งอื่นๆ

$$t = 0, x \ge 0 \quad : s_i = s_0, T_m = T_{mp}$$
  

$$t > 0, x = 0 : f_m = 0, q_{hot} = h_h (T_{sh} - T_{bh})$$
  

$$t > 0, x = X_{end} : s_i = s_0, q_{cold} = h_c (T_{sc} - T_{bc})$$
  

$$t > 0, x = X_{end} : s_i = s_0, \frac{\partial q}{\partial x} = 0$$

3 เทคนิคการแปลงพิกัดแกนและระเบียบวิธีเชิงตัวเลข เนื่องจากปัญหาที่ทำการศึกษาครั้งนี้ จะเกี่ยวข้องกับปัญหาที่มีขอบเขต เคลื่อนตัวไปกับคาบเวลาของการทำละลายสองตำแหน่งพร้อมกับมีการ เปลี่ยนแปลงสถานะ ซึ่งการหาคำตอบโดยวิธีแม่นตรงจึงเป็นไปไม่ได้

[11]

ในที่นี้การหาคำตอบจะใช้เทคนิคการแปลงพิกัดแกนซึ่งอยู่บน พื้นฐานของวิธี boundary fixing method ร่วมกับระเบียบวิธีเชิงตัวเลข โดยผ่านวิธีไฟในต์วอลลุม (finite volume method) ดังนั้นสมการที่ [1], [2], [4] และ [6] หลังจากใช้เทคนิคการแปลงพิกัดแกนแล้วจะเป็น

$$\rho_{w}\frac{\partial s_{m}}{\partial t} = \rho_{w}\frac{\eta X_{mt}}{X_{mt}}\frac{\partial s_{m}}{\partial \eta} - \frac{1}{X_{mt}^{2}}\frac{\partial}{\partial \eta}\left[\rho_{w}\frac{K_{m}K_{rm}}{\mu_{w}}\frac{\partial p_{cm}}{\partial \eta}\right]$$
[12]  
$$\frac{\partial}{\partial t}\left[\left(\rho c_{p}\right)_{Tm}T_{m}\right] = \frac{\eta X_{mt}}{X_{mt}}\frac{\partial}{\partial \eta}\left[\left(\rho c_{p}\right)_{Tm}T_{m}\right] + \frac{1}{X_{mt}^{2}}\frac{\partial}{\partial \eta}\left[\lambda_{m}\frac{\partial T_{m}}{\partial \eta}\right] - \frac{1}{X_{mt}}\frac{\partial\left(c_{pw}f_{m}T_{m}\right)}{\partial \eta}$$
[13]

$$\rho_{w} \frac{\partial s_{wt}}{\partial t} = \rho_{w} \frac{\left\{ \left(1-\zeta\right) \dot{X}_{mt} + \zeta \dot{X}_{tf} \right\}}{\left(X_{tf} - X_{mt}\right)^{2}} \frac{\partial s_{wt}}{\partial \zeta} - \frac{1}{\left(X_{tf} - X_{mt}\right)^{2}} \frac{\partial}{\partial \zeta} \left[ \rho_{w} \frac{K_{t} K_{tf}}{\mu_{w}} \frac{\partial p_{ct}}{\partial \zeta} \right]$$

$$\begin{bmatrix} 14] \\ \frac{\partial}{\partial t} \left[ \left(\rho c_{p}\right)_{tf} T_{f} \right] = \frac{\left(1-\zeta\right) \dot{X}_{tf}}{\left(X_{end} - X_{tf}\right)^{2}} \frac{\partial}{\partial \zeta} \left[ \left(\rho c_{p}\right)_{tf} T_{f} \right] + \frac{1}{\left(X_{end} - X_{tf}\right)^{2}} \frac{\partial}{\partial \zeta} \left[ \lambda_{f} \frac{\partial T_{f}}{\partial \zeta} \right]$$

$$\begin{bmatrix} 15] \end{bmatrix}$$

หลังจากนั้นสมการที่ [12]-[15] สามารถ discretize โดยวิธีไฟไนต์ วอลลุมก็จะได้

$$\rho_{w} \frac{s_{wt,i}^{n+1} - s_{wt,i}^{n}}{\Delta t} = \rho_{w} \frac{\left\{ (1 - \zeta) \dot{X}_{mt} + \zeta \dot{X}_{tf} \right\}}{\left( X_{tf} - X_{mt} \right)} \frac{s_{wt,i+1/2}^{n+1} - s_{wt,i-1/2}^{n+1}}{\Delta \zeta} - \frac{1}{\left( X_{tf} - X_{mt} \right)} \frac{1}{\Delta \zeta} \left[ \frac{K_{t} K_{rt,i+1/2}^{n+1}}{\mu_{w}} \left( \frac{p_{ct,i+1}^{n+1} - p_{ct,i}^{n+1}}{\left( X_{tf} - X_{mt} \right) \Delta \zeta} \right) - \frac{K_{t} K_{rt,i-1/2}^{n+1}}{\mu_{w}} \left( \frac{p_{ct,i}^{n+1} - p_{ct,i-1}^{n+1}}{\left( X_{tf} - X_{mt} \right) \Delta \zeta} \right) - \frac{K_{t} K_{rt,i-1/2}^{n+1}}{\mu_{w}} \left( \frac{p_{ct,i-1}^{n+1} - p_{ct,i-1}^{n+1}}{\left( X_{tf} - X_{mt} \right) \Delta \zeta} \right) - \frac{K_{t} K_{rt,i-1/2}^{n+1}}{\mu_{w}} \left( \frac{p_{ct,i-1}^{n+1} - p_{ct,i-1}^{n+1}}{\left( X_{tf} - X_{mt} \right) \Delta \zeta} \right) - \frac{K_{t} K_{rt,i-1/2}^{n+1}}{\mu_{w}} \left( \frac{p_{ct,i-1}^{n+1} - p_{ct,i-1}^{n+1}}{\left( X_{tf} - X_{mt} \right) \Delta \zeta} \right) - \frac{K_{t} K_{rt,i-1/2}^{n+1}}{\mu_{w}} \left( \frac{p_{ct,i-1}^{n+1} - p_{ct,i-1}^{n+1}}{\left( X_{tf} - X_{mt} \right) \Delta \zeta} \right) - \frac{K_{t} K_{rt,i-1/2}^{n+1}}{\mu_{w}} \left( \frac{p_{ct,i-1}^{n+1} - p_{ct,i-1}^{n+1}}{\left( X_{tf} - X_{mt} \right) \Delta \zeta} \right) - \frac{K_{t} K_{rt,i-1/2}^{n+1}}{\mu_{w}} \left( \frac{p_{ct,i-1}^{n+1} - p_{ct,i-1}^{n+1}}{\left( X_{tf} - X_{mt} \right) \Delta \zeta} \right) - \frac{K_{t} K_{rt,i-1/2}^{n+1}}{\mu_{w}} \left( \frac{p_{ct,i-1}^{n+1} - p_{ct,i-1}^{n+1}}{\left( X_{tf} - X_{mt} \right) \Delta \zeta} \right) - \frac{K_{t} K_{tt} K_{rt,i-1/2}^{n+1}}{\mu_{w}} \left( \frac{p_{ct,i-1}^{n+1} - p_{ct,i-1}^{n+1}}{\left( X_{tf} - X_{mt} \right) \Delta \zeta} \right) - \frac{K_{t} K_{tt} K_{rt,i-1/2}^{n+1}}{\mu_{w}} \left( \frac{p_{ct,i-1}^{n+1} - p_{ct,i-1}^{n+1}}{\left( X_{tf} - X_{mt} \right) \Delta \zeta} \right) - \frac{K_{t} K_{tt} K_{tt} K_{tt} - \frac{K_{tt} K_{tt} K_{tt} - \frac{K_{tt} K_{tt} - K_{tt$$

 $\frac{\left(\rho c_{p}\right)_{lfj}^{n+1} T_{f,i}^{n+1} - \left(\rho c_{p}\right)_{lfj,i}^{n} T_{f,i}^{n}}{\Delta t} = \frac{(1-\xi) \dot{X}_{if}}{(X_{end} - X_{if})} \frac{\left(\rho c_{p}\right)_{lfj,i+1/2}^{n+1} T_{f,i+1/2}^{n+1} - \left(\rho c_{p}\right)_{lfj,i-1/2}^{n+1} T_{f,i-1/2}^{n+1}}{\Delta \xi} + \frac{1}{(X_{end} - X_{if})} \frac{1}{\Delta \xi} \left[ \lambda_{f,i+1/2}^{n+1} \left( \frac{T_{f,i+1}^{n+1} - T_{f,i}^{n+1}}{(X_{end} - X_{if})\Delta \xi} \right) - \lambda_{f,i-1/2}^{n+1} \left( \frac{T_{f,i-1}^{n+1} - T_{f,i-1}^{n+1}}{(X_{end} - X_{if})\Delta \xi} \right) \right]$ [18]

ในที่นี้กระบวนการทำซ้ำในแต่ละรอบเพื่อเร่งการลู่เข้าของคำตอบ จะ อาศัยวิธี Newton-Raphson

#### 4 การทดลอง

ส่วนประกอบของอุปกรณ์ทดลองดังแสดงในรูปที่ 2 วัสดุทดสอบเริ่มต้น คือเพคเบดวัสดุพรุนที่ไม่อิ่มตัวซึ่งเป็นองค์ประกอบของน้ำแข็ง โพรง อากาศ และอนุภาคของแข็งซึ่งฟอร์มตัวจากเม็ดแก้ว (glass beads) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.15 mm ที่บรรจุไว้ใน test cell ที่ทำจาก แผ่นอะครีลิคที่มีมิติขนาด 110×130×50 มม. ในระหว่างกระบวนการ ทดลองจะมีการให้โหลดความร้อนที่อุณหภูมิคงที่ที่ผิวด้านข้างของ ระนาบแนวดิ่งของเพคเบด สำหรับแหล่งกำเนิดความร้อนจะใช้อ่างน้ำ ร้อน (hot water bath) ที่ควบคุมอุณหภูมิได้ โดยที่ผิวที่ปลายเพคเบด อีกด้านจะทำการหุ้มฉนวนไว้ หรือควบคุมอุณหภูมิไว้ให้ด่ำกว่าอุณหภูมิ เยือกแข็ง (freezing temperature) ในกรณีที่พิจารณาการเกิด refreezing ที่บริเวณดังกล่าวดังรูป สำหรับแหล่งกำเนิดความเย็นจะไช้ อ่างน้ำเย็น (cooling water bath) ที่ควบคุมอุณหภูมิได้ต่ำสุด -20 <sup>0</sup>C

สำหรับอุณหภูมิในเพคเบตระหว่างกระบวนการทดลอง จะวัดโดยใช้ เทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด Cu-Co ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 0.2 มม ซึ่งติดตั้งห่างกันในแต่ละตำแหน่งเท่ากับ 10 มม ในแนวระดับ การหา ดำแหน่งของขอบเขตที่เคลื่อนที่ (moving boundary) ทำได้โดยการ interpolation ของอุณหภูมิที่วัดได้นี้ สำหรับการหาค่าการอิ่มตัวในแต่ ละตำแหน่ง สามารถทำได้โดยการตัดชั้นของเพคเบดที่ปริมาตรค่าหนึ่ง ในแต่ละคาบเวลา แล้วนำไปซั่งกับตาชั่งเพื่อหาน้ำหนักมวลเปียก และ แห้ง (หลังจากผ่านการอบในเตาอบควบคุม) แล้วค่อยนำค่ามวลทั้งสอง มาใส่ในสมการสหสัมพันธ์ เพื่อคำนวณหาค่าการอิ่มตัว (Ratanadecho [12])



①packed beds ②heat exchanger ③container ④insulator
⑤recorder ⑥valve ⑦cooling temperature tank
⑧hot temperature tank ⑨pump

รูปที่ 2 องค์ประกอบของอุปกรณ์ทดลอง

### 5 ผลลัพธ์และการวิเคราะห์

พิจารณารูปที่ 3 แสดงการกระจายตัวของค่าความอิ่มตัวของน้ำและ ้น้ำแข็งตลอดช่วงความยาวเพคเบด และการเคลื่อนตัวของขอบเขตที่ ้เคลื่อนที่กรณีไม่มีการหล่อเย็นที่ด้านปลาย (ไม่เกิด refreezing) และอยู่ ภายใต้สภาวะทดสอบที่อุณหภูมิเริ่มต้น T₀ เท่ากับ -4<sup>0</sup>C สัดส่วนความ ้อิ่มตัวเริ่มต้น s<sub>o</sub> เท่ากับ 0.4 และอุณหภูมิของการทำละลาย T<sub>bh</sub> คือ 3<sup>0</sup>C เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของค่าความอิ่มตัว ในขอบเขตของ การละลายตัว พบว่าค่าความอิ่มตัวก็จะมีค่าลดลง (ต่ำกว่าค่าความ อิ่มตัวเริ่มต้น) และจะมีค่าเพิ่มขึ้นทันทีทันใดที่ตำแหน่งหนึ่งซึ่ง สังเกตุ ได้จากการที่เกิดความไม่ต่อเนื่องของค่าความอิ่มตัวที่บริเวณรอยต่อ ระหว่างโซนละลายและโซนหลายสถานะ ซึ่งก็คือตำแหน่ง melting front นั่นเอง ที่เป็นเช่นนี้เพราะน้ำที่เกิดจากการละลายของน้ำแข็งจาก โซนการละลายได้เคลื่อนตัวซึมผ่าน melting front ภายใต้อิทธิพลของ แรงดันแคปปิลารี่ ผ่านไปยังโซนโซนหลายสถานะ ผลทำให้ปริมาณ ้น้ำแข็งที่อยู่ในชั้นโซนหลายสถานะเกิดการละลายตัวทำให้ค่าความ อิ่มตัวของน้ำเพิ่มขึ้นในโซนนี้ เมื่อกระบวนการทำละลายดำเนินต่อไป จะเห็นว่าขอบเขตของโซนหลายสถานะจะเคลื่อนตัวไปทางขวามือโดยมี melting front และ infiltration front เป็นตัวกำหนดขอบเขตของโซน ้ดังกล่าว อย่างไรก็ตามพบว่าภายใต้สภาวะทดสอบดังกล่าว เนื่องจาก เกรเดียนของอุณหภูมิภายในโซนของแข็ง (frozen layer) มีน้อยมาก

ทำให้ไม่เกิดปรากฏการณ์ refreezing ของน้ำที่บริเวณตอนปลายของ โซนหลายสถานะ

ในส่วนของความสัมพันธ์ระหว่าง melting front และ infiltration front เมื่อเทียบกับเวลา จะเห็นได้ชัดเจนว่าเมื่อเวลาผ่านไประยะห่าง ของขอบเขตของโซนหลายสถานะจะเพิ่มขึ้น จึงเป็นกลไกเฉพาะตัว ของกระบวนการทำละลายในวัสดุพรุนชนิดไม่อิ่มตัว จากรูปที่แสดง พบว่าผลที่ได้จากการคำนวณจะสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลอง เป็นอย่างดี



รูปที่ 3 แสดงการกระจายตัวของค่าความอิ่มตัวของน้ำและน้ำแข็งตลอด ช่วงความยาวเพคเบด และการเคลื่อนตัวของขอบเขตที่เคลื่อนที่ (กรณี ไม่มีการหล่อเย็นที่ด้านปลาย)

ฐปที่ 4 แสดงการกระจายตัวของค่าความอิ่มตัวของน้ำและน้ำแข็ง ตลอดช่วงความยาวเพคเบด และการเคลื่อนตัวของขอบเขตที่เคลื่อนที่ กรณีมีการหล่อเย็นที่ด้านปลาย (เกิด refreezing) และอยู่ภายใต้สภาวะ ทดสอบที่อุณหภูมิเริ่มต้น T<sub>0</sub> เท่ากับ -4<sup>0</sup>C สัดส่วนความอิ่มตัวเริ่มต้น ึ s<sub>∩</sub> เท่ากับ 0.4 และอุณหภูมิของการทำละลาย T<sub>bh</sub> คือ 10<sup>0</sup>C ในกรณีนี้ จะต่างจากกรณีที่แล้ว คือ มีปรากฏการณ์ refreezing เกิดขึ้นที่โซน หลายสถานะ จากรูปที่ 4 พบว่า การกระจายของค่าความอิ่มตัวใน ขอบเขตของโซนหลายสถานะจะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาของการทำละลายผ่าน ไป โดยที่กระบวนการทำละลายในช่วงแรก อัตราเร็วของการละลายสง กว่าอัตราเร็วของการเคลื่อนตัวของน้ำในโซนละลายที่ซึมไปยังโซน หลายสถานะโดยผ่าน melting front ทำให้ค่าความอิ่มตัวในโซนหลาย สถานะมีค่าเริ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับค่าความอิ่มตัวเริ่มต้น แต่เมื่อเวลา ผ่านไประยะหนึ่งอัตราเร็วของการละลายมีค่าลดลง ผลทำให้การ เคลื่อนตัวของน้ำในโซนละลายที่ซึมไปยังโซนหลายสถานะมีค่าเพิ่มขึ้น

มากขึ้นเมื่อเทียบกับช่วงเวลาแรกๆ พร้อมทั้งขอบเขตของโซนหลาย สถานะจะขยายตัวมากขึ้นด้วย นอกจากนี้พบว่าอิทธิพลของ refreezing มีผลต่อการขยายตัวขอบเขตโซนหลายสถานะอย่างชัดเจน

กล่าวคือมันเป็นสาเหตุทำให้ขอบเขตของโซนหลายสถานะลดลงเมื่อ เทียบกับกรณีไม่เกิดปรากฏการณ์ refreezing เหมือนกรณีก่อนหน้านี้ ที่เป็นเช่นนี้เพราะการซึมผ่านของน้ำถูกควบคุมโดยการเกิด refreezing ็นอกเหนือจากนี้เมื่อ infiltration front เคลื่อนตัวไปที่ตำแหน่งประมาณ 70 mm ปรากฏการณ์การซึมผ่านก็จะหยุด ทั้งนี้เพราะเกรเดียนของ อุณหภูมิภาในโซนของแข็งที่เปลี่ยนไปกับเวลามีค่าน้อยมาก เมื่อทำ การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณกับผลที่ได้จากการทดลอง พบว่า ผลที่ได้จากการคำนวณใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลอง แต่ ้ค่าการคำนวณของชั้นความหนาของขอบเขตโซนหลายสถานะจะแคบ กว่าค่าจากการทดลอง ิสาเหตุอาจเป็นเพราะที่อุณหภูมิ 0⁰C ไม่ สามารถทำให้น้ำเกิดการแข็งตัวได้ทั้งหมดในระหว่างกระบวนการ freezing ของแพคเบดในตอนเริ่มแรก น้ำในส่วนที่ไม่เกิดการแข็งตัวนี้ จะมีอิทธิพลต่อการกระจายตัวของค่าความอิ่มตัวและอุณหภูมิ จึงเป็น สาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างผลที่ได้จากการคำนวณ และผลจากการทดลอง



รูปที่ 4 แสดงการกระจายตัวของค่าความอิ่มตัวของน้ำและน้ำแข็ง และ อุณหภูมิตลอดช่วงความยาวเพคเบด และการเคลื่อนตัวของขอบเขตที่ เคลื่อนที่ (กรณีมีการหล่อเย็นที่ด้านปลาย)

รูปที่ 5 แสดงถึงกระบวนการทำละลายในกรณีมีการหล่อเย็นที่ ปลายอีกด้านหนึ่งและอยู่ภายใต้สภาวะทดสอบที่ค่าความอิ่มตัวเริ่มต้น ี่ s<sub>∩</sub> เท่ากับ 0.4 อุณหภูมิของการหล่อเย็น T<sub>bc</sub> เท่ากับ 10<sup>0</sup>C และ อุณหภูมิของการทำละลาย T<sub>bb</sub> เท่ากับ 50<sup>0</sup>C ที่สภาวะดังกล่าวนี้ การ เคลื่อนตัวของน้ำในโซนละลายจะมีน้อยมาก ที่เป็นเช่นนี้เพราะใน กระบวนการ อุณหภูมิของการทำละลายสูงมาก ทำให้อัตราเร็วของการ ละลายสูงกว่าอัตราเร็วของการเคลื่อนตัวของน้ำในโซนละลายที่ซึมไป ้ยังโซนหลายสถานะโดยผ่าน melting front มากๆ ดังนั้นในกรณีนี้การ ฟอร์มตัวของขอบเขตโซนหลายสถานะจึงไม่เกิดขึ้น เช่นกัน ปรากฏการณ์ refreezing ไม่ส่งผลใดๆ ต่อกระบวนการทำละลายใน อย่างไรก็ตามผลที่ได้จากการคำนวณจะมีการฟอร์มตัวของ สภาวะนี้ ทั้งนี้เป็นเพราะในแบบจำลอง ขอบเขตโซนหลายสถานะอย่างชัดแจ้ง ทางคณิตศาสตร์ได้กำหนดให้มีผลของการเกิดโซนหลายสถานะไว้ ตั้งแต่ต้น จากรูปที่แสดงพบว่าผลที่ได้จากการคำนวณจะสอดคล้องกับ ผลที่ได้จากการทดลอง



รูปที่ 5 แสดงการกระจายตัวของค่าความอิ่มตัวของน้ำและน้ำแข็ง (กรณี มีอุณหภูมิการทำละลายสูงและมีการหล่อเย็นที่ด้านปลาย)

รูปที่ 6 แสดงถึงกระบวนการทำละลายในกรณีมีการหล่อเย็นที่ ้ปลายอีกด้านหนึ่งและอยู่ภายใต้สภาวะทดสอบที่ค่าความอิ่มตัวเริ่มต้น ิs<sub>0</sub> เท่ากับ 0.6 อุณหภูมิของการหล่อเย็น T<sub>bc</sub> เท่ากับ 10<sup>0</sup>C และ ้อุณหภูมิของการทำละลาย T<sub>bh</sub> เท่ากับ 10<sup>0</sup>C ในกรณีนี้การเคลื่อนตัว ของน้ำจากโซนละลายไปยังโซนหลายสถานะมีไม่มากนัก ทั้งนี้อาจเป็น เพราะค่าความอิ่มตัวเริ่มต้นของน้ำแข็งมีค่าสูงทำให้ช่องว่าง (air gap) ภายในโซนหลายสถานะมีลักษณะแคบลง (narrow) ทำให้การเคลื่อนตัว ของน้ำไปยังโซนหลายสถานะมีน้อยลงดังที่กล่าวข้างต้น เมื่อพิจารณา ในส่วนของความสัมพันธ์ระหว่าง melting front และ infiltration front ้เทียบกับเวลา จะเห็นได้ชัดเจนว่าเมื่อเวลาผ่านไประยะห่างของขอบเขต ของโซนหลายสถานะจะไม่เพิ่มขึ้นมากนัก ด้วยเหตุผลของค่าการไหล ชึม (absolute permeability) ภายในโซนหลายสถานะมีค่าน้อยซึ่งส่งผล ต่อการเคลื่อนตัวของน้ำในโซนดังกล่าว เมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จาก การคำนวณและการทดลอง พบว่ามีความแตกต่างกันบ้างโดยเฉพาะผล ของการกระจายตัวของค่าความอิ่มตัว สาเหตุที่สำคัญอาจเป็นเพราะที่ ้อุณหภูมิ 0<sup>0</sup>C ไม่สามารถทำให้น้ำเกิดการแข็งตัวได้ทั้งหมดในระหว่าง กระบวนการ freezing ของแพคเบดในตอนเริ่มแรก น้ำในส่วนที่ไม่เกิด การแข็งตัวนี้จะมีอิทธิพลต่อการกระจายตัวของค่าความอิ่มตัวและ อุณหภูมิ จึงเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างผลที่ได้ จากการคำนวณและผลจากการทดลอง แต่สำหรับตำแหน่งของ melting front และ infiltration front เมื่อเทียบกับเวลาให้ผลที่สอดคล้องกัน



รูปที่ 6 แสดงการกระจายตัวของค่าความอิ่มตัวของน้ำและน้ำแข็งตลอด ช่วงความยาวเพคเบด และการเคลื่อนตัวของขอบเขตที่เคลื่อนที่ (กรณี มีค่าความอิ่มตัวเริ่มต้นสูงและมีการหล่อเย็นที่ด้านปลาย)

### **5**. สรุป

งานวิจัยฉบับนี้ได้ศึกษาถึงปรากฏการณ์พื้นฐานของกระบวนการ ทำละลายในวัสดุพรุนที่ไม่อิ่มตัว ทั้งในภาคทฤษฎีและการทดลอง ผล จากการศึกษาทำให้เราทราบปรากฏการณ์พื้นฐานของกระบวน การ ดังกล่าว โดยพารามิเตอร์สำคัญที่ศึกษาคือ ค่าความอิ่มตัวของน้ำและ น้ำแข็ง ลักษณะการเคลื่อนตัวของน้ำที่ผ่าน melting front และ iinfiltration front รวมจนถึงอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงภายในวัสดุทดสอบ

## สัญลักษณ์

$\mathbf{c}_{\mathrm{p}}$	:	ความจุความร้อน(J/kgK)
f	:	ฟลักซ์การไหลของน้ำ (kg/m²s)
h	:	ค่าการถ่ายเทความร้อน(W/ m²K)
К	:	ค่าการไหลซึม (m <sup>2</sup> )
L	:	ความร้อนแฝง (J/kg)
Ρ	:	ความดัน (Pa)
q	:	ฟลักซ์ความร้อน (W/m²)
S	:	ค่าความอิ่มตัว (-)
t	:	เวลา (min)
Т	:	อุณหภูมิ ( <sup>0</sup> C)
x	:	พิกัดในแกน x (m)

Х	:	ระยะ (m)
λ	:	ค่าการนำความร้อน (W/mK)
ε	:	ค่าความพรุน (-)
ρ	:	ความหนาแน่น (kg/m²)
μ	:	ค่าความหนืดจลน์ (Pa s)
$\eta$ , $arsigma$	ξ:	การแปลงพิกัด
ตัวห้อย		
end	:	ปลายเพคเบด
f	:	โซนของแข็ง
i	:	น้ำแข็ง
w	:	น้ำ
m	:	โซนละลาย
mp	:	จุดหลอมละลาย
mt	:	ขอบเขตผิวละลาย
o	:	เริ่มต้น
tf	:	ขอบเขตผิวการไหลซึม
wc	:	เกิด refreezing
wt	:	โซนหลายสถานะ

#### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก สำนักงานกองทุนสนับสนุน การวิจัย (สกว) ภายใต้ทุนเมธีวิจัย สัญญาหมายเลข 123456789

#### เอกสารอ้างอิง

 Murray, W.D and Landis, F., "Numerical and machine solutions of transient heat conduction problem involving melting or freezing," ASME J. Heat Transfer, 81, 1959, pp. 106-112.
 Viskanta, R., "Heat transfer during melting and solidification of metals," ASME J. Heat Transfer 110, 1998, pp. 1205-1219.
 Gong, Z.F. and Mujumdar, A.S.. " Flow and heat transfer in convection-dominated melting in a rectangular cavity heated from below," Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 41(17), 1998, pp. 2573-2580.

[4] Carrey, V.P. and Gebhart, B., "Transport near a vertical ice surface melting in saline water: experiments at low salintities," J. of Fluid Mechanics 117, 1982, pp. 403-423.

[5] Huppert, H.E. and Turner, J.S., "Ice blocks melting into a salinity gradient," J. Fluid Mechanics. 100, 1980, pp. 367-384.
[6] Fukusako, S., Tago, M., Yamada, M., Kitayama, K. and Watanabe, C., "Melting heat transfer from horizontal ice cylinder immersed in quiescent saline water," ASME J. Heat Transfer. 114, 1992, pp. 34-40.

[7] Ratanadecho, P, "The analysis of force-convection melting on phase change cylinder," Int. J. Thermal Sciences (Review).
[8] Pangrle, B.J. and Ayappa, K.G., "Microwave melting of cylinders," AIChE J., 37, 1991, pp. 1789-1800.

[9] Basak, T. and Ayappa, K.G., "Analysis of microwave melting of slab with the effective heat capacity method," AIChE J., 43, 1997, pp. 1662-1674.

[10] Ratanadecho, P., Aoki, K. and Akahori, M., "Characteristics of microwave melting of frozen packed bed using a rectangular wave guide, IEEE Trans. of Microwave Theory and Techniques," 50 (6), 2002, pp. 1487-1494.

[11] Ratanadecho, P. "The Theoretical and experimental Investigation of microwave melting of frozen layer using microwave oven (Effects of layered configurations and layered thickness)" Int. J. Heat Mass Transfer, 47 (5), , 2004,bpp. 937-945.

[12] Ratanadecho, P. "Experimental and numerical study of melting process in unsaturated granular packed bed." AIAA J. Thermophysics and Heat Transfer, 18 (1), 2004, pp. 87-93.

[13] Yao, L.S and Prusa, J. Melting and freezing, Advances in Heat Transfer 19 (1990) 1- 95.