



แบบจำลองการถ่ายโอนความร้อน 1 มิติ ในสถานะไม่คงตัว สำหรับการกลายเป็นของแข็งในวัสดุ  
เปลี่ยนสถานะที่มีครีบทตามแนวยาว

พีรวัชร มินตา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

2566

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

แบบจำลองการถ่ายโอนความร้อน 1 มิติ ในสภาวะไม่คงตัว สำหรับการกลายเป็นของแข็งในวัสดุ  
เปลี่ยนสถานะที่มีครีปตามแนวยาว



พีรวัชร มินตา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

2566

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

1-D TRANSIENT HEAT TRANSFER MODEL OF SOLIDIFICATION OF PHASE CHANGE  
MATERIALS WITH LONGITUDINAL FINS



PHEERAWAT MINTA

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENTS FOR MASTER DEGREE OF ENGINEERING  
IN MECHANICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
BURAPHA UNIVERSITY

2023

COPYRIGHT OF BURAPHA UNIVERSITY

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ได้พิจารณา  
วิทยานิพนธ์ของ พีรวัชร มินตา ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร.วรเชษฐ์ ภิรมย์ภักดี)

..... ประธาน  
(รองศาสตราจารย์ ดร.วีระพันธ์ ดั่งทองสุข)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.วรเชษฐ์ ภิรมย์ภักดี)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติพงษ์ บุญโล่ง)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พุทธา จินคร้าว)

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณยศ คุรุกิจโกศล)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยบูรพา อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ  
การศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ของมหาวิทยาลัย  
บูรพา

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิทวัส แจ่มเยี่ยม)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

64910193: สาขาวิชา: วิศวกรรมเครื่องกล; วศ.ม. (วิศวกรรมเครื่องกล)  
 คำสำคัญ: วัสดุเปลี่ยนสถานะ(พีซีเอ็ม)/ การถ่ายโอนความร้อน/ การแข็งตัว/ ระบบจัดเก็บพลังงาน/ พาราฟิน/ เกลือไฮเดรต/ อีริทริทอล/ กรดลอริก/ กรดปาล์มิติก  
 พีรวัชร มินตา : แบบจำลองการถ่ายโอนความร้อน 1 มิติ ในสภาวะไม่คงตัว สำหรับการกลายเป็นของแข็งในวัสดุเปลี่ยนสถานะที่มีครีปตามแนวยาว. (1-D TRANSIENT HEAT TRANSFER MODEL OF SOLIDIFICATION OF PHASE CHANGE MATERIALS WITH LONGITUDINAL FINS) คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์: วรเชษฐ ภิรมย์ภักดี, วศ.ด ปี พ.ศ. 2566.

ในปัจจุบันระบบจัดเก็บพลังงานและระบบระบายความร้อนโดยมีวัสดุเปลี่ยนสถานะ (พีซีเอ็ม) เป็นตัวกักเก็บพลังงานถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย ไม่ว่าจะเป็นในโรงงานอุตสาหกรรม โรงเรือน การสร้างบ้าน รวมไปถึงการสร้างอาคารต่าง ๆ แต่การเลือกใช้งานพีซีเอ็มจำเป็นต้องเลือกใช้ให้มีคุณสมบัติเหมาะสมกับการใช้งานนั้น ๆ ดังนั้นในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จึงได้ศึกษาแบบจำลองการถ่ายโอนความร้อน 1 มิติของพีซีเอ็มที่มีครีปตามแนวยาวเพื่อศึกษาหาสมรรถนะการถ่ายโอนความร้อนของพีซีเอ็ม โดยใช้หลักอุณหพลศาสตร์ และใช้สมการการถ่ายโอนความร้อน 1 มิติของ Stefan เพื่อสร้างสมการอนุพันธ์สามัญ นอกจากนี้ยังใช้วิธีการเชิงวิเคราะห์ในการหาคำตอบนำไปสู่การเขียนโปรแกรม Microsoft excel โดยจะวิเคราะห์การแข็งตัวของพีซีเอ็ม 5 ชนิดคือ พาราฟิน เกลือไฮเดรต อีริทริทอล กรดลอริกและกรดปาล์มิติก ผลลัพธ์คือ เกลือไฮเดรตสามารถแข็งตัวได้เร็วที่สุดในบรรดาพีซีเอ็มทั้ง 5 ชนิด นอกจากนี้ยังศึกษาถึงอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อการแข็งตัว การกระจายอุณหภูมิ รวมไปถึงปริมาณการถ่ายโอนความร้อนด้วย

64910193: MAJOR: MECHANICAL ENGINEERING; M.Eng. (MECHANICAL ENGINEERING)

KEYWORDS: PHASE CHANGE MATERIALS (PCMS)/ HEAT TRANSFER/ SOLIDIFICATION/ ENERGY STORAGE/ PARAFFIN/ SALT HYDRATE/ ERYTHRITOL/ LAURIC ACID/ PALMITIC ACID

PHEERAWAT MINTA : 1-D TRANSIENT HEAT TRANSFER MODEL OF SOLIDIFICATION OF PHASE CHANGE MATERIALS WITH LONGITUDINAL FINS.

ADVISORY COMMITTEE: WORACHEST PIROMPUGD, D.Eng. 2023.

At present, energy storage systems and cooling systems using phase change materials (PCMs) as energy storage are popular to use in industrial, greenhouse include build the house. But PCMs must be selected with properties to proper application. Therefore, in this thesis, a 1D heat transfer model of PCMs with longitudinal fins has been studied to determine the heat transfer performance of PCMs. It uses the principles of thermodynamics and the Stefan's transient 1D heat transfer equation to crate an ordinary differential equation. In addition, analytical methods are used to find answers. Leads to programming in Microsoft excel. This thesis has been studied 5 PCMs are paraffin, salt hydrate, erythritol, lauric acid and palmitic acid. The results are salt hydrate were fastest solidified in 5 PCMs. In addition, influence of parameters to solidification, temperature distribution including the heat transfer are studied.

## กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.วรเชษฐ์ ภิรมย์ภักดี ที่ให้เกียรติเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์เป็นอย่างสูงที่ให้ความรู้ คำแนะนำ ให้ความช่วยเหลือ ช่วยตรวจสอบ ด้วยความเอาใจใส่ทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยบูรพาที่ได้รับผู้จัดทำเข้าศึกษาในระดับปริญญาโท และอำนวยความสะดวกในการจัดทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดาและครอบครัวของผู้จัดทำที่คอยให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา และให้การสนับสนุนเป็นอย่างดี และสุดท้ายนี้ขอขอบคุณผู้จัดทำเองที่มีความมุ่งมั่น พยายามและอดทนในการจัดทำวิทยานิพนธ์สำเร็จได้ตามเป้าหมาย

พีรวัชร มินตา



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง .....	ฅ
สารบัญภาพ .....	ฉุ
รายการสัญลักษณ์ .....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
ที่มาและความสำคัญ .....	1
วัตถุประสงค์ .....	2
ขอบเขตของการศึกษา .....	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	3
บทที่ 2 ที่มาและความสำคัญ .....	4
การถ่ายโอนความร้อน (HEAT TRANSFER) .....	4
การถ่ายโอนความร้อนผ่านครีบทตามแนวยาว (LONGITUDINAL FINS) .....	6
วัสดุเปลี่ยนสถานะ (PHASE CHANGE MATERIALS หรือ PCMs).....	10
พาราฟิน (PARAFFIN).....	11
เกลือไฮเดรต (SALT HYDRATE).....	12
น้ำตาลแอลกอฮอล์ : อิริทริทอล (SUGAR ALCOHOLS : ERYTHRITOL) .....	12
กรดไขมันลอริกและปาล์มิติก (FATTY ACIDS : LAURIC AND PALMITIC ACIDS).....	13
การสำรวจเอกสารและงานวิจัยในอดีต .....	13



บทที่ 3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ .....	20
การถ่ายโอนความร้อนผ่านวัสดุเปลี่ยนสถานะ (พีซีเอ็ม) และครีป .....	21
การถ่ายโอนความร้อนผ่านวัสดุเปลี่ยนสถานะ (พีซีเอ็ม) บริเวณที่ 1 .....	22
การถ่ายโอนความร้อนผ่านวัสดุเปลี่ยนสถานะ (พีซีเอ็ม) บริเวณที่ 2 .....	27
การถ่ายโอนความร้อนผ่านครีปตามแนวยาว .....	30
คุณสมบัติของพีซีเอ็มและครีปที่ใช้ในการวิเคราะห์ .....	33
บทที่ 4 ผลลัพธ์และการวิเคราะห์.....	35
การเปรียบเทียบแบบจำลองที่พัฒนากับแบบจำลอง 2 มิติ.....	35
การเปรียบเทียบอิทธิพลของวัสดุของครีปต่อการแข็งตัวและการกระจายอุณหภูมิ ของพีซีเอ็ม..	36
อิทธิพลของอุณหภูมิผนังที่มีผลต่อระยะเวลาแข็งตัวสำหรับพีซีเอ็มทั้ง 5 ชนิด .....	37
อิทธิพลของอุณหภูมิผนังที่มีผลต่อการกระจายอุณหภูมิสำหรับพีซีเอ็มทั้ง 5 ชนิด .....	48
การเปรียบเทียบความสามารถในการแข็งตัวและการกระจายอุณหภูมิสำหรับพีซีเอ็ม ทั้ง 5 ชนิด .....	53
อิทธิพลของระยะความสูงของที่จัดเก็บ (L) ที่มีต่อการแข็งตัวและการกระจายอุณหภูมิ .....	55
ระยะเวลาแข็งตัวและอัตราการถ่ายโอนความร้อนของพีซีเอ็มที่เวลาต่างๆ .....	62
บทที่ 5 สรุปผลการวิเคราะห์.....	71
บรรณานุกรม .....	73
ประวัติย่อของผู้วิจัย .....	77

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 ค่าคุณสมบัติของพีซีเอ็ม.....	33
ตารางที่ 2 ค่าคุณสมบัติของกรีบอลูมิเนียมและกรีบทองแดง .....	34



## สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 ตัวอย่างการนำความร้อน (Angelovska, 2018).....	4
ภาพที่ 2 กราฟแสดงเส้นขอบเขตของครีบบมีพื้นที่ด้านข้างเป็นรูปสี่เหลี่ยม .....	7
ภาพที่ 3 ครีบบมีพื้นที่ด้านข้างเป็นรูปสี่เหลี่ยม .....	7
ภาพที่ 4 พาราฟินในสถานะของแข็ง (Morris, 2010) .....	12
ภาพที่ 5 ที่จัดเก็บพีซีเอ็มแบบจำกัดพร้อมครีบบภายใน .....	20
ภาพที่ 6 ที่จัดเก็บพีซีเอ็มแบบจำกัดพร้อมครีบบภายใน เมื่อพีซีเอ็มเกิดการแข็งตัว .....	20
ภาพที่ 7 ที่จัดเก็บพีซีเอ็มแบบจำกัดพร้อมครีบบภายใน 1 เซลล์ .....	21
ภาพที่ 8 เซลล์สมมาตรของที่จัดเก็บพีซีเอ็มพร้อมครีบบภายใน .....	21
ภาพที่ 9 การถ่ายโอนความร้อนผ่านวัสดุเปลี่ยนสถานะ บริเวณที่ 1 (Region 1) .....	22
ภาพที่ 10 การถ่ายโอนความร้อนผ่านวัสดุเปลี่ยนสถานะ บริเวณที่ 2 (Region 2) .....	27
ภาพที่ 11 การถ่ายโอนพลังงานความร้อนของพีซีเอ็มและครีบบ .....	27
ภาพที่ 12 การถ่ายโอนความร้อนผ่านครีบบตามแนวยาว .....	30
ภาพที่ 13 การแข็งตัวของพาราฟินที่เวลา 1,085 วินาที .....	35
ภาพที่ 14 การแข็งตัวของเกลือไฮเดรตโดยใช้ครีบบลูมิเนียมและครีบบทองแดง เมื่อเวลา 2,000 วินาที .....	37
ภาพที่ 15 การแข็งตัวของพาราฟินทั้งหมดที่เวลาต่าง ๆ .....	39
ภาพที่ 16 การแข็งตัวของเกลือไฮเดรตทั้งหมดที่เวลาต่าง ๆ .....	41
ภาพที่ 17 การแข็งตัวของอิทธิทธิทอลทั้งหมดที่เวลาต่าง ๆ .....	43
ภาพที่ 18 การแข็งตัวของกรดไขมันลอริกทั้งหมดที่เวลาต่าง ๆ .....	45
ภาพที่ 19 การแข็งตัวของกรดไขมันปาล์มิติกทั้งหมดที่เวลาต่าง ๆ .....	47
ภาพที่ 20 การกระจายอุณหภูมิของพาราฟิน .....	48

ภาพที่ 21 การกระจายอุณหภูมิของเกลือไฮเดรต .....	49
ภาพที่ 22 การกระจายอุณหภูมิของอีริทริทอล .....	50
ภาพที่ 23 การกระจายอุณหภูมิของกรดลอริก.....	51
ภาพที่ 24 การกระจายอุณหภูมิของกรดปาล์มิติก.....	52
ภาพที่ 25 การแข็งตัวและการกระจายอุณหภูมิของพีซีเอ็มทั้ง 5 ชนิด ที่เวลา 2,000 วินาที .....	54
ภาพที่ 26 การแข็งตัวของเกลือไฮเดรต เมื่อเวลา 500 วินาที.....	55
ภาพที่ 27 การกระจายอุณหภูมิของเกลือไฮเดรตที่แข็งตัวทั้งหมดที่เวลาต่างๆ .....	56
ภาพที่ 28 การกระจายอุณหภูมิของเกลือไฮเดรตที่แข็งตัวของแต่ละความสูง .....	56
ภาพที่ 29 การแข็งตัวของเกลือไฮเดรต เมื่อเวลา 897 วินาที.....	57
ภาพที่ 30 การแข็งตัวของเกลือไฮเดรต เมื่อเวลา 3,511 วินาที.....	58
ภาพที่ 31 การแข็งตัวของเกลือไฮเดรต เมื่อเวลา 7,846 วินาที.....	59
ภาพที่ 32 การแข็งตัวของเกลือไฮเดรต เมื่อเวลา 13,893 วินาที.....	60
ภาพที่ 33 การแข็งตัวของเกลือไฮเดรต เมื่อเวลา 21,121 วินาที.....	61
ภาพที่ 34 ระยะการแข็งตัวตามแนวแกน x ของพีซีเอ็มทั้ง 5 ชนิดเมื่อเวลา 0–2,000 วินาที .....	63
ภาพที่ 35 ระยะการแข็งตัวตามแนวแกน y ของพีซีเอ็มทั้ง 5 ชนิดเมื่อเวลา 0–2,000 วินาที .....	64
ภาพที่ 36 อัตราการถ่ายโอนความร้อนของพีซีเอ็มทั้ง 5 ชนิดเมื่อเวลา 0–2,000 วินาที .....	65
ภาพที่ 37 ระยะการแข็งตัวทั้งหมดของพีซีเอ็มตามแนวแกน x ของพีซีเอ็มทั้ง 5 ชนิด.....	66
ภาพที่ 38 ระยะการแข็งตัวทั้งหมดของพีซีเอ็มตามแนวแกน y ของพีซีเอ็มทั้ง 5 ชนิด.....	67
ภาพที่ 39 การกระจายอุณหภูมิของพีซีเอ็มทั้ง 5 ชนิด ที่ตำแหน่ง 5 มม. ....	67
ภาพที่ 40 อัตราการถ่ายโอนความร้อนของพีซีเอ็มจากจุดเริ่มต้นจนแข็งตัวทั้งหมด .....	69

## รายการสัญลักษณ์

$c_p$	คือ	ความจุความร้อนจำเพาะ (Specific heat), J/kg/K
$D$	คือ	ความหนาครึ่งหนึ่งของครีป (Half thickness of the fin), m
$E$	คือ	ความจุของที่เก็บพลังงาน (Energy storage capacity), J
$E'$	คือ	ความจุที่เก็บพลังงานต่อหน่วยความยาว (Energy storage per unit length), W/m
$E''$	คือ	ความจุที่เก็บพลังงานต่อหน่วยพื้นที่ (Energy storage per unit area), W/m <sup>2</sup>
$k$	คือ	ค่าการนำความร้อน (Heat conductivity), W/m/K
$l$	คือ	ความยาว (Length), m
$L$	คือ	ค่าความร้อนแฝงของการหลอมเหลว (Latent heat of fusion), J/kg
$q$	คือ	การถ่ายโอนความร้อน (Heat flow), W
$q'$	คือ	การถ่ายโอนความร้อนต่อหน่วยความยาว (Heat flow per unit length), W/m
$q''$	คือ	การไหลของพลังงานความร้อน (Heat flux), W/m <sup>2</sup>
$S$	คือ	ตำแหน่งของส่วนต่อประสานในการเปลี่ยนเฟส (Location of the phase change interface), m
$St$	คือ	Stefan number, $St = (c_p \Delta T)/L$
$T$	คือ	อุณหภูมิ (Temperature), °C
$\Delta T_m$	คือ	ช่วงอุณหภูมิการแข็งตัว (Solidification temperature range), °C
$x$	คือ	ระยะตามแนวแกน x (Distance in the x-direction), m
$y$	คือ	ระยะตามแนวแกน y (Distance in the y-direction), m
$\alpha$	คือ	ค่าการแพร่ความร้อน (Thermal diffusivity), m <sup>2</sup> /s
$\rho$	คือ	ค่าความหนาแน่น (Density), kg/m <sup>3</sup>
$\varepsilon$	คือ	อัตราการแข็งตัวของพีซีเอ็ม (Rate of solidified PCM)
$\lambda$	คือ	รากที่สองของสมการเหนือธรรมชาติ (Root of the transcendental equation)
$\theta = \frac{T - T_m}{T_w - T_m}$	คือ	การกระจายอุณหภูมิ (Dimensionless temperature distribution)

$\tau = \frac{k_f t}{(\rho c_p)_f l_f^2}$	คือ	เวลา (Dimensionless time)
$\gamma = \frac{S_y}{l_c}$	คือ	อัตราการแข็งตัวของส่วนต่อประสานระหว่างของแข็งและของเหลว (Dimensionless rate of solid-liquid interface recession)
$\eta = \frac{x}{l_f}$	คือ	ระยะจากแกน x (Dimensionless x-coordinate)
$\lambda = \frac{l_f}{l_c}$	คือ	อัตราส่วนระหว่างแกนแนวตั้งและแนวนอน (Cell aspect ratio)
$\psi = \frac{D}{l_c}$	คือ	ความหนาครึ่งหนึ่งของครีป (Dimensionless half thickness of the fin)
$\kappa = \frac{k_s}{k_f}$	คือ	อัตราส่วนของการนำความร้อน (Ratio of the heat conductivities)
$\xi = \frac{(\rho c_p)_f (T_w - T_m)}{-L \rho_s}$	คือ	ปรับแต่ง Stefan number (Modified Stefan number)

### ตัวห้อยและตัวยก

c	คือ	การนำความร้อน (Convection)
f	คือ	ครีป (Fin)
l	คือ	ของเหลว (Liquid)
m	คือ	การแข็งตัว (Solidification)
p	คือ	วัสดุเปลี่ยนสถานะ (Phase Change Materials)
s	คือ	ของแข็ง (Solid)
w	คือ	ผนัง (Wall)
x	คือ	ทิศทางแนวแกน x (x-Direction)
y	คือ	ทิศทางแนวแกน y (y-Direction)



# บทที่ 1

## บทนำ

### ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันระบบจัดเก็บพลังงานหรือระบบระบายความร้อนโดยมีวัสดุเปลี่ยนสถานะเป็นตัวจัดเก็บพลังงานถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย ไม่ว่าจะเป็นในโรงงานอุตสาหกรรม การทำโรงเรือน การสร้างบ้านและอาคารต่าง ๆ แต่ในการเลือกใช้วัสดุเปลี่ยนสถานะจำเป็นต้องเลือกใช้ให้มีคุณสมบัติเหมาะสมกับการใช้งาน ซึ่งในการใช้งานบางประเภทนั้นจำเป็นต้องมีครีบบาช่วยในการถ่ายโอนความร้อนจากวัสดุเปลี่ยนสถานะไปยังสภาพแวดล้อมภายนอก ครีบบามีข้อดีหลายประการ เช่น ง่ายต่อการขึ้นรูปในกระบวนการผลิต มีความแข็งแรงทนทาน และราคาถูก นักวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาการถ่ายโอนความร้อนผ่านครีบบด้วยวิธีการทดลอง วิธีการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์และวิธีเชิงตัวเลข โดยเป็นการศึกษาใน 1 มิติ ตามแนวความยาวของครีบบ ซึ่งวิธีนี้อาจมีข้อผิดพลาดได้ มีความซับซ้อนในการหาค่าต่าง ๆ และยังมีความแม่นยำน้อยเมื่อเทียบกับการวิเคราะห์ใน 2 และ 3 มิติ (อุทัย ประสพพิงชนะ และคณะ, 2555) แต่ก็ยังมีส่วนที่มีประโยชน์ คือ การวิเคราะห์ 1 มิตินั้นสามารถใช้งานได้ง่าย และมีความซับซ้อนน้อยกว่าแบบ 2 และ 3 มิติ

วัสดุเปลี่ยนสถานะ (Phase Change Materials, PCMs) หรือ พีซีเอ็ม มีคุณสมบัติในด้านการกักเก็บความร้อนในรูปของความร้อนแฝง (Latent heat) และทำหน้าที่รักษาอุณหภูมิให้ระบบเมื่อสภาพแวดล้อมมีอุณหภูมิสูงขึ้น พีซีเอ็มจะดูดซับความร้อนจากสภาพแวดล้อมไว้ในตัวพีซีเอ็ม ในช่วงของการหลอมเหลวจากของแข็งไปเป็นของเหลว เพื่อให้อุณหภูมิของระบบคงที่หรือเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อย ในทางกลับกันเมื่อสภาพแวดล้อมมีอุณหภูมิต่ำลง พีซีเอ็มก็จะถ่ายโอนพลังงานความร้อนเข้าสู่ระบบเมื่อเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็งในช่วงของการแข็งตัวของพีซีเอ็ม เพื่อรักษาอุณหภูมิให้คงที่ ปรากฏการณ์นี้เองทำให้เกิดกระบวนการดูด-คายความร้อน ซึ่งจะส่งผลต่ออุณหภูมิภายนอกของสิ่งแวดล้อม ตัวอย่างเช่น โมดูลของแผงโซลาร์เซลล์ และแบตเตอรี่ จะใช้งานพีซีเอ็มในการดูดซับความร้อนเพื่อลดอุณหภูมิของโมดูล เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานและช่วยยืดอายุในการใช้งานเพิ่มมากขึ้น รวมไปถึงการใช้งานในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังสูงในยานพาหนะและยานอวกาศ

อย่างไรก็ดี ปัญหาหนึ่งของพีซีเอ็มเกิดจากคุณสมบัติหลักของมัน คือ การเปลี่ยนสถานะกลับไปมาระหว่างของแข็งกับของเหลวทำให้การใช้งานพีซีเอ็มโดยตรงมีข้อจำกัดหรืออาจทำให้เกิดปัญหาได้ เช่น การรั่วไหลและการติดไฟได้ รวมไปถึงการถ่ายโอนความร้อนของพีซีเอ็ม



จะมีประสิทธิภาพที่ต่ำเมื่อถูกกักเก็บไว้ในแคปซูลหรือในภาชนะเมื่อเปรียบเทียบกับพีซีเอ็มบริสุทธิ์ นอกจากนี้ในกระบวนการเปลี่ยนเฟสก็จะมีข้อจำกัด เนื่องจากการต่อต้านโดยเฟสที่สร้างขึ้นใหม่ เพื่อเปลี่ยนเฟสนั้นจะมีพื้นที่ที่ขยายออกไป ดังนั้นจึงต้องใช้คริบมาช่วยแก้ไขข้อจำกัดนี้ โดยทั่วไปการใช้คริบไม่จำเป็นต้องช่วยในการถ่ายโอนความร้อนให้ดีขึ้น เพราะนอกจากที่จะเพิ่มพื้นที่ผิวสำหรับการถ่ายโอนความร้อนแล้ว คริบยังมีความต้านทานความร้อนเพิ่มต่อการไหลของความร้อนอีกด้วย ดังนั้นจึงต้องมีการปรับปรุงอัตราการกักเก็บพลังงานที่เก็บไว้ของพีซีเอ็ม (สำหรับการใช้งานการจัดเก็บพลังงาน) หรืออัตราการระบายความร้อนของพีซีเอ็ม (สำหรับการใช้งานการจัดการความร้อน) ไปยังคริบต่อไป (Linquip, 2021)

### วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาสมการการถ่ายโอนความร้อน 1 มิติ สำหรับการกลายเป็นของแข็งในวัสดุเปลี่ยนสถานะ (PCMs) ที่มีคริบตามแนวยาว
2. เพื่อพัฒนาโปรแกรมสำหรับคำนวณหาสมรรถนะของการถ่ายโอนความร้อน 1 มิติ สำหรับการกลายเป็นของแข็งในวัสดุเปลี่ยนสถานะ (PCMs) ที่มีคริบตามแนวยาว
3. เพื่อศึกษาสมรรถนะของการถ่ายโอนความร้อน 1 มิติ สำหรับการกลายเป็นของแข็งในวัสดุเปลี่ยนสถานะ (PCMs) ที่มีคริบตามแนวยาว
4. เพื่อศึกษาวัสดุเปลี่ยนสถานะ (PCMs) ที่นิยมใช้ในงานอุตสาหกรรม และด้านอื่น ๆ

### ขอบเขตของการศึกษา

1. วัสดุสำหรับคริบที่ใช้ในการศึกษา คือ อลูมิเนียมและทองแดง
2. คริบที่ใช้ศึกษาเป็นคริบตามแนวยาวที่มีพื้นที่ด้านข้างเป็นรูปสี่เหลี่ยมที่มีขนาด  $0.01 \times 0.05$  เมตร
3. วัสดุเปลี่ยนสถานะที่ใช้ศึกษาจะมี 5 ชนิด คือ พาราฟิน เกลือไฮเดรต กรดลอริก กรดปาล์มติก และอีริทริทอล
4. ขนาดของที่จัดเก็บพีซีเอ็มที่ใช้ในการศึกษาคือ  $0.05 \times 0.05$  เมตร
5. การศึกษาแบบจำลองการถ่ายโอนความร้อน 1 มิติ สำหรับการกลายเป็นของแข็งในวัสดุเปลี่ยนสถานะ (PCMs) ที่มีคริบตามแนวยาว เป็นการศึกษาเชิงทฤษฎีเท่านั้น

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การถ่ายโอนความร้อน 1 มิติ สำหรับการกลายเป็นของแข็งในวัสดุเปลี่ยนสถานะ ที่มีครีบทตามแนวยาว
2. การวิเคราะห์การถ่ายโอนความร้อนสำหรับวัสดุเปลี่ยนสถานะที่มีครีบทตามแนวยาว ในบางสภาวะจะใช้การวิเคราะห์เพียง 1 มิติเท่านั้นก็สามารถแก้ไขปัญหาได้

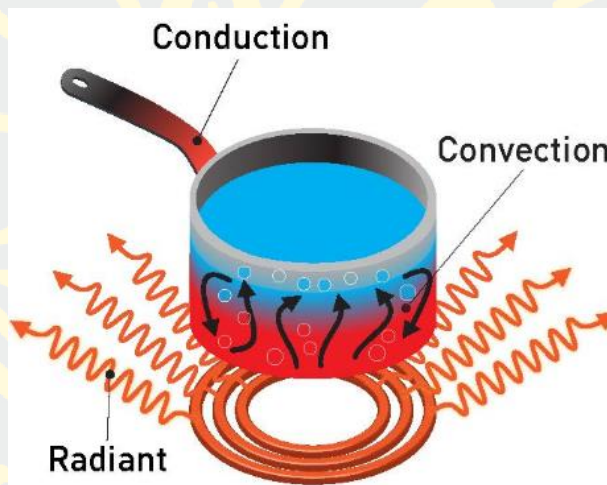


## บทที่ 2

### ที่มาและความสำคัญ

#### การถ่ายโอนความร้อน (HEAT TRANSFER)

การถ่ายโอนความร้อน คือ การถ่ายโอนพลังงานจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ จนกระทั่งอุณหภูมิทั้งสองบริเวณเท่ากัน (วุฒิพงษ์ ทับกระโทก, 2558) ตัวอย่างเช่น ความร้อนจากเตาไฟทำให้หมุกระหะตุกได้ ความร้อนจากเครื่องทำน้ำอุ่นที่ทำให้มีน้ำอุ่นอาบ ในช่วงที่อากาศหนาว การถ่ายโอนความร้อนจะแบ่งออกเป็น 3 วิธี คือ การนำความร้อน การพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน



ภาพที่ 1 ตัวอย่างการนำความร้อน (Angelovska, 2018)

#### 1. การนำความร้อน (Conduction)

การนำความร้อน คือ การถ่ายโอนพลังงานจากอนุภาคของที่มีพลังงานมากไปยังอนุภาคที่มีพลังงานน้อยที่อยู่ติดกัน การนำความร้อนเกิดขึ้นได้ในของแข็ง ของเหลวและก๊าซ ในของเหลวและก๊าซเกิดจากการชนและการแพร่กระจายของโมเลกุลระหว่างการเคลื่อนที่แบบสุ่ม ในของแข็งเกิดจากการสั่นของอนุภาคที่เรียงตัวกันอยู่อย่างหนาแน่นในวัตถุที่เป็นของแข็งและส่งพลังงานกันอย่างต่อเนื่อง ตัวอย่างเช่น เครื่องดื่มกระป๋องเย็นในห้องที่มีอุณหภูมิสูง เมื่อเวลาผ่านไปน้ำดื่มในกระป๋องจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นจนเท่ากับอุณหภูมิของห้อง เนื่องจากการถ่ายโอนความร้อนจากห้องไปยังเครื่องดื่มผ่านกระป๋อง โดยการนำความร้อน อีกหนึ่งตัวอย่าง คือ หากเทน้ำร้อน

ใส่แก้วที่ทำจากวัสดุที่เป็นโลหะ จากนั้นนำไปวางไว้ในแก้วอีกใบที่ใหญ่กว่าที่มีน้ำอุณหภูมิต่ำกว่า อยู่ภายในแก้ว เมื่อเวลาผ่านไปน้ำในแก้วทั้งสองจะมีอุณหภูมิเท่ากัน

ในการนำความร้อนจะมีวัสดุที่เป็นตัวกลาง 2 ชนิด คือ ตัวนำความร้อน (Conductor) เป็นวัสดุที่นำความร้อนได้ดี เพราะมีค่าการนำความร้อนสูง (Thermal conductivity,  $k$ ) ได้แก่ จำพวกโลหะ เช่น อลูมิเนียม ทองแดง เหล็ก และเงิน ตัวกลางอีกหนึ่งชนิด คือ ฉนวนความร้อน (Insulators) เป็นวัสดุที่นำความร้อนไม่ได้ดี เพราะมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำ ได้แก่ จำพวกอโลหะ และก๊าซ เช่น ไม้ ยาง และพลาสติก ซึ่งความรู้ในเรื่องนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการใช้งานจริง เช่น การสร้างบ้าน สามารถนำความรู้ไปใช้ในการเลือกใช้วัสดุในการสร้างให้ระบายนความร้อนได้ดี เช่น ฉนวนใยหิน ไฟเบอร์กลาส วัสดุทั้งสองชนิดนี้คือฉนวนความร้อน จึงทำให้มีการนำความร้อนจากภายนอกเข้าในบ้านได้น้อยกว่าวัสดุชนิดอื่น ๆ อย่างไรก็ตามฉนวนความร้อนนั้นไม่สามารถที่จะหยุดการถ่ายโอนความร้อนได้ทั้งหมด แต่ทำให้การถ่ายโอนความร้อนเป็นไปได้ช้าลง

## 2. การพาความร้อน (Convection)

การพาความร้อนเป็นการถ่ายโอนพลังงานบริเวณพื้นผิวของของแข็งกับของเหลวหรือ ก๊าซที่อยู่ติดกันที่กำลังเคลื่อนที่อยู่ ยิงของเหลวเคลื่อนที่เร็วการถ่ายโอนความร้อนก็ยิ่งมาก ในกรณีที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของของเหลวการถ่ายโอนความร้อนจะเป็นการนำความร้อนที่พื้นผิวนั้น ๆ สารที่ได้รับความร้อนจะมีการขยายตัวทำให้ความหนาแน่นต่ำลงจะทำให้ลอยตัวขึ้น ส่วนสารที่มี อุณหภูมิต่ำกว่า ความหนาแน่นก็จะมีความหนาแน่นกว่าจะลงมาแทนที่ การพาความร้อนสามารถแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

2.1 การพาความร้อนตามธรรมชาติหรือการพาความร้อนแบบอิสระ (Free or Natural convection) เป็นการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยไม่มีปัจจัยใด ๆ มากระตุ้นให้ของไหลถูกบังคับ ให้ไหลผ่านพื้นผิว ซึ่งผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นจากอุณหภูมิของของไหล ที่แตกต่างกันทำให้เกิดแรงลอยตัวขึ้น

2.2 การพาความร้อนแบบบังคับ (Forced convection) เป็นการเคลื่อนที่ของความร้อน โดยมีปัจจัยภายนอกมากระตุ้นให้ของไหลถูกบังคับให้ไหลผ่านพื้นผิว เช่น เครื่องสูบลม หรือพัดลม

ตัวอย่างของการพาความร้อน เช่น การเป่าลมเย็นใส่ผิวของอิฐที่มีอุณหภูมิสูง ความร้อน ภายในอิฐจะถูกถ่ายโอนความร้อนไปยังอากาศพื้นผิวด้วยการนำความร้อน จากนั้นความร้อนจะถูก ลมเย็นพาออกไปจากพื้นผิวโดยการพาความร้อน นั่นคืออากาศที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจะมาแทนที่ อากาศที่มีอุณหภูมิสูงกว่า

### 3. การแผ่รังสีความร้อน (Radiation)

การแผ่รังสีความร้อนจะเป็นการแผ่รังสีความร้อนในรูปแบบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ออกไปในทุกทิศทางรอบจุดกำเนิดหรือวัตถุโดยไม่อาศัยตัวกลาง และเร็วกว่าการนำความร้อน และการพาความร้อน วัตถุที่มีความร้อนมากกว่าจะสามารถแผ่รังสีได้มากกว่า เช่น ดวงอาทิตย์ จะสามารถแผ่รังสีความร้อนได้มากกว่าหลอดไฟฟ้า

ความสามารถในการดูดซับความร้อนก็จะแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับลักษณะและคุณสมบัติของวัตถุนั้น ๆ เช่น วัตถุสีเข้ม ค้าน จะสามารถแผ่และดูดซับความร้อน ได้ดีกว่าวัตถุที่มี สีอ่อนและมันวาว หรือหากวัตถุสองชิ้นทำจากวัสดุชนิดเดียวกัน ปริมาณเท่ากัน วัตถุที่มีลักษณะ แบนและบาง จะสามารถแผ่รังสีความร้อนได้เร็วกว่าวัตถุที่อ้วนหนา (Çengel and Ghajar, 2015)

#### การถ่ายโอนความร้อนผ่านครีบบตามแนวยาว (LONGITUDITAL FINS)

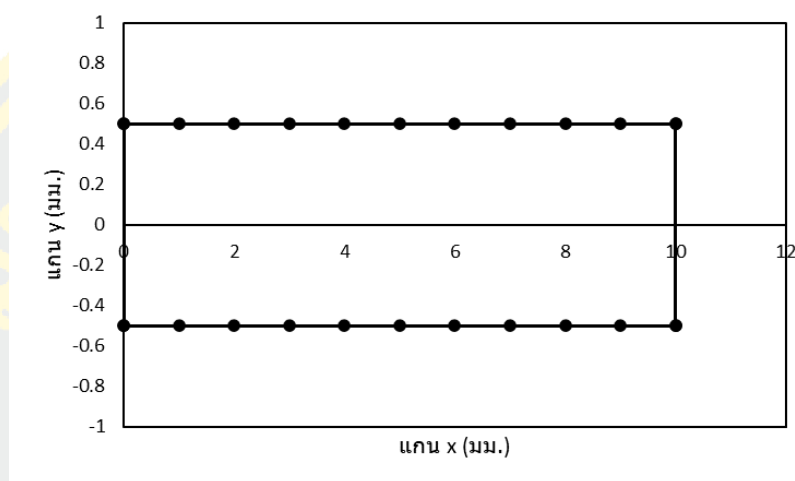
การถ่ายโอนความร้อนผ่านครีบบตามแนวยาว คือ การถ่ายโอนความร้อนผ่านครีบบที่มี พื้นที่ด้านข้างรูปแบบ ๆ หนึ่งที่มีความยาวคงที่เป็น Uniform shape ซึ่งจะแบ่งออกเป็นหลัก ๆ 4 ชนิด ตามลักษณะของพื้นที่ด้านข้างของครีบบ คือ พื้นที่ด้านข้างเป็นรูปสี่เหลี่ยม (Rectangular profile) พื้นที่ด้านข้างเป็นรูปสามเหลี่ยม (Triangular profile) พื้นที่ด้านข้างเป็นแบบโค้งเว้า (Concave parabolic profile) และพื้นที่ด้านข้างเป็นแบบโค้งนูน (Convex parabolic profile) โดยที่มีสมการเส้นขอบเขต คือ

$$f_1(x) = \frac{\delta_0}{2} \left(\frac{x}{b}\right)^{\frac{(1-2n)}{(1-n)}} \quad (2-1)$$

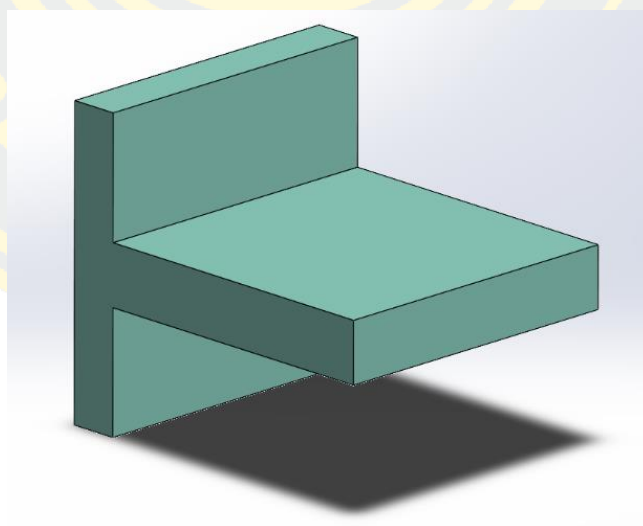
โดยที่	$\delta_0$	=	ความกว้างของฐานครีบบ (มม.)
	x	=	ความยาวตามแกน x (มม.)
	b	=	ความยาวของฐานครีบบ (มม.)
	n	=	$\frac{1}{2}$ เมื่อครีบบเป็นหน้าตัดสี่เหลี่ยม
	n	=	0 เมื่อครีบบเป็นหน้าตัดสามเหลี่ยม
	n	=	$\infty$ เมื่อครีบบเป็นหน้าตัดโค้งเว้า
	n	=	$\frac{1}{3}$ เมื่อครีบบเป็นหน้าตัดโค้งนูน

**การถ่ายโอนความร้อนผ่านครีที่มีพื้นที่ด้านข้างเป็นรูปสี่เหลี่ยม (Longitudinal fins of rectangular profile)**

โดยจะเป็นครีระบายความร้อนที่มีพื้นที่ด้านข้างเป็นรูปสี่เหลี่ยม โดยครีชนิดนี้จะเป็นการถ่ายโอนความร้อนผ่านครีแบบง่ายที่สุด



ภาพที่ 2 กราฟแสดงเส้นขอบเขตของครีที่มีพื้นที่ด้านข้างเป็นรูปสี่เหลี่ยม



ภาพที่ 3 ครีที่มีพื้นที่ด้านข้างเป็นรูปสี่เหลี่ยม



การถ่ายโอนความร้อนผ่านครีปที่มีพื้นที่ด้านข้างเป็นรูปสี่เหลี่ยมจะมีสมการควบคุมเชิงอนุพันธ์ (Governing Differential Equation) คือ

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} - \frac{2h}{k\delta_0}\theta = 0 \quad (2-2)$$

กำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) คือ

$$\theta = C_1e^{mx} + C_2e^{-mx} \quad (2-3)$$

โดยที่ค่า  $m$  สามารถหาได้จาก

$$m = \left(\frac{2h}{k\delta}\right)^{1/2}$$

ในการหาค่า  $C_1$  และ  $C_2$  จำเป็นต้องอาศัยเงื่อนไขขอบเขต 2 เงื่อนไข ดังต่อไปนี้

$$x = 0, \quad \left.\frac{d\theta}{dx}\right|_{x=0} = 0$$

และ

$$x = b, \quad \theta(b) = T(b) - T_s$$

ที่  $x = 0$  จะได้

$$\left.\frac{d\theta}{dx}\right|_{x=0} = 0 = C_1me^{mx} - C_2me^{-mx}$$

$$0 = C_1 - C_2$$

$$C_1 = C_2 = C$$



ที่  $x = b$  จะได้

$$\theta = C(e^{mb} + e^{-mb})$$

$$C = \frac{\theta}{(e^{mb} + e^{-mb})}$$

มีสมการของ Temperature profile คือ

$$\theta(x) = \frac{\theta_b \cosh mx}{\cosh mb} \quad (2-4)$$

ค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนหาได้จาก

$$q_b = kA \left. \frac{d\theta}{dx} \right|_{x=b}$$

พื้นที่หน้าตัดของครีป (A) หาได้จาก  $A = \delta L$  และอนุพันธ์ของสมการที่ (2-4) จะได้

$$q_b = \frac{k\delta L m \theta_b \sinh mb}{\cosh mb}$$

หรือ

$$q_b = k\delta L m \theta_b \tanh mb \quad (2-5)$$

ค่าประสิทธิภาพของครีป (Fin efficiency) หาได้จาก

$$\eta = \frac{q_b}{q_{id}}$$

โดยที่  $q_{id} = hP\theta_b$  และ  $P = 2(L + \delta)$  แต่เนื่องจาก  $L \gg \delta$  ดังนั้น  $q_{id} = 2hL\theta_b$

$$\eta = \frac{k\delta L m \theta_b \tanh mb}{2hL\theta_b}$$

จาก  $m^2 = \frac{2h}{k\delta}$  จะได้

$$\eta = \frac{\tanh mb}{mb} \quad (2-6)$$

### วัสดุเปลี่ยนสถานะ (PHASE CHANGE MATERIALS หรือ PCMs)

วัสดุเปลี่ยนสถานะหรือพีซีเอ็มเป็นสารที่ดูด-คายพลังงานในปริมาณเพียงพอที่จะสร้างความร้อนหรือความเย็นที่มีประโยชน์ในการเปลี่ยนสถานะ ส่วนใหญ่การเปลี่ยนสถานะจะอยู่ระหว่าง 2 สถานะหลักของสาร คือ ของแข็งและของเหลว ในกระบวนการดูด-คายพลังงานจะเกิดจากความร้อนแฝง (Latent heat) และความร้อนสัมผัส (Sensible heat) ของพีซีเอ็ม ซึ่งจะเป็นคุณสมบัติที่เป็นเอกลักษณ์ของพีซีเอ็ม โดยที่ ความร้อนแฝง คือ พลังงานความร้อนที่จะทำให้สารเกิดการเปลี่ยนเฟส และความร้อนสัมผัส คือ พลังงานความร้อนที่อุณหภูมิของสารเปลี่ยนแปลงไป โดยไม่มีการเปลี่ยนเฟส ด้วยเหตุนี้พีซีเอ็มจึงเป็นตัวเลือกที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานได้หลากหลายที่ต้องการการควบคุมและการจัดการอุณหภูมิ ตัวอย่างเช่น การก่อสร้างอาคาร ระบบระบายอากาศ ระบบจัดเก็บพลังงานความร้อน พีซีเอ็มสามารถแบ่งเป็น 3 ชนิดหลัก คือ พีซีเอ็มอินทรีย์ พีซีเอ็มอนินทรีย์ และพีซีเอ็มยูเทคติก

#### 1. พีซีเอ็มอินทรีย์ (Organic PCMs)

พีซีเอ็มอินทรีย์แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ พาราฟินและไม่เป็นพาราฟิน จำพวกพาราฟินเป็นวัสดุที่กักเก็บความร้อนได้ดี สามารถใช้งานได้ในอุณหภูมิที่หลากหลาย แต่พาราฟินบริสุทธิ์นั้นมีความราคาที่สูง จึงมักใช้งานพาราฟินที่ผสมกับพีซีเอ็มชนิดอื่น ๆ เพื่อเพิ่มคุณสมบัติที่ดีให้กับพาราฟิน เช่น มีอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสสูงกว่าพาราฟินบริสุทธิ์ มีความเสถียรทางเคมี แต่ก็ยังมีข้อจำกัด คือ การนำความร้อนที่ต่ำ ราคาสูง และมีความไวไฟ จำพวกไม่เป็นพาราฟิน คือ จำพวกเอสเทอร์และไขมันอิ่มตัว (กรดไขมัน) เช่น กรดลอริก กรดเอซิติค ซึ่งมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไป จำพวกนี้เป็นพีซีเอ็มชีวภาพที่พบในอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องสำอาง มีข้อดี คือ มีความร้อนแฝงที่ดี มีความเป็นพิษต่ำ และสามารถรวมกับกรดไขมันชนิดอื่น ๆ ได้ แต่ก็ยังมีข้อเสีย คือ มีความไวไฟ และมีการนำความร้อนต่ำ

## 2. พีซีเอ็มอนินทรีย์ (Inorganic PCMs)

พีซีเอ็มอนินทรีย์ เช่น เกลือไฮเดรต จำพวกโลหะและโลหะผสม พีซีเอ็มชนิดนี้เป็นพีซีเอ็มที่มีความหนาแน่นสูง มีการนำความร้อนที่ดี และอุณหภูมิหลอมเหลวที่กว้าง เกลือไฮเดรตเป็นพีซีเอ็มที่รู้จักกันดีและผ่านการวิจัยมากมาย และยังเป็นพีซีเอ็มที่นิยมใช้ในระบบจัดเก็บพลังงานความร้อน เพราะมีค่าการนำความร้อนที่ค่อนข้างสูง (2 เท่าของพาราฟินบริสุทธิ์) ราคาไม่แพง มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเล็กน้อยเมื่อเปลี่ยนเฟส แต่ก็ยังมีข้อเสีย คือ มีฤทธิ์กัดกร่อนและสูญเสียพลังงานมาก

## 3. พีซีเอ็มยูเทคติก (Eutectics PCMs)

พีซีเอ็มยูเทคติกเป็นส่วนผสมของพีซีเอ็มอนินทรีย์และพีซีเอ็มอินทรีย์ ทำให้มีคุณสมบัติที่ดีขึ้น ละลายที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิของสารอื่น ๆ ความสามารถในการหลอมเหลวหรือแข็งตัวโดยไม่ต้องมีการแยกกันระหว่างเฟส การใช้งานส่วนใหญ่จะเป็นการระบายความร้อน (Zare and Mikkonen, 2023)

## พาราฟิน (PARAFFIN)

พาราฟินเป็นไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลสูง ประกอบไปด้วยไฮโดรคาร์บอนสายตรงที่มีช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวตั้งแต่ 23–67 °C พาราฟินที่เป็นขี้ผึ้งนั้นจะมีส่วนผสมของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนที่มีตัวเลขคาร์บอนต่าง ๆ ที่มีจุดหลอมเหลวต่ำกว่า และมีความร้อนแฝงที่น้อยกว่าพาราฟินบริสุทธิ์ ซึ่งพาราฟินที่เป็นขี้ผึ้งมักถูกมองว่าเป็นพีซีเอ็มเกรดต่ำ

พาราฟินที่เป็นขี้ผึ้งจะเป็นที่สนใจเนื่องจากมีคุณสมบัติที่มีแนวโน้มที่จะเป็นพีซีเอ็ม เพราะมีคุณสมบัติที่ดี คือ มีความปลอดภัยในการใช้งาน มีฤทธิ์ไม่กัดกร่อน ไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมี และในการละลายจะมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเล็กน้อย แต่ก็ยังไม่ใช่ว่าเรื่องง่ายที่จะนำไปใช้งานจริง เนื่องจากยังมีคุณสมบัติที่ไม่พึงประสงค์ อาทิเช่น มีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำ การนำความร้อนต่ำ และอาจเกิดการรั่วไหลได้ แต่คุณสมบัติไม่พึงประสงค์เหล่านี้สามารถกำจัดได้ โดยการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของพาราฟินและแก้ไขระบบจัดเก็บข้อมูล ซึ่งมีหลายวิธี ตัวอย่างเช่น การรวมพาราฟินเข้ากับพอลิเมอร์โดยตรง การห่อหุ้มพาราฟินด้วยวิธีการไมโครเอนแคปซูลชั้น

พาราฟินที่เป็นขี้ผึ้งถูกนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลายสำหรับการใช้งานระบบจัดเก็บพลังงานความร้อนแฝง เนื่องจากมีความร้อนแฝงขนาดใหญ่และมีลักษณะทางความร้อนที่ต้องการ เช่น การระบายความร้อนเพียงเล็กน้อยหรือไม่มีเลย มีอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงเฟสที่แตกต่างกัน ความดันไอต่ำ ในการละลายจะมีเสถียรภาพทางความร้อนและทางเคมีที่ดี (Mochane, 2011)



ภาพที่ 4 พาราฟินในสถานะของแข็ง (Morris, 2010)

### เกลือไฮเดรต (SALT HYDRATE)

เกลือไฮเดรตเป็นพีซีเอ็มอนินทรีย์ ชนิดหนึ่งที่มีอนุภาคของน้ำอยู่อย่างน้อย 1 อนุภาค ช่วงอุณหภูมิที่การเปลี่ยนเฟสที่เกิดขึ้นอยู่ระหว่าง 40–100 °C หรือมากกว่าเล็กน้อย เกลือไฮเดรตนั้น มีความหนาแน่นที่สูง มีค่าความร้อนแฝงประมาณ 100–300 J/g และมีค่าการนำความร้อนมากกว่า พาราฟินและกรดไขมันถึง 2 เท่า เนื่องจากคุณสมบัติที่ดีเหล่านี้และยังเป็นพีซีเอ็มอนินทรีย์ ทำให้ เกลือไฮเดรตนั้นเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เพราะไม่สามารถติดไฟและย่อยสลายทางชีวภาพได้ นอกจากนี้ยังสามารถรีไซเคิลได้อีกด้วย สิ่งที่เป็นข้อดีอีกหนึ่งอย่าง คือ เกลือไฮเดรตมีราคาที่ถูกกว่า เมื่อเทียบกับพีซีเอ็มชนิดอื่น ๆ แต่พีซีเอ็มชนิดนี้ยังมีข้อจำกัด คือ ในการเปลี่ยนเฟสนั้นจะสูญเสียน้ำ ในอนุภาคทำให้ปริมาตรมีการเปลี่ยนแปลงได้ แต่ก็สามารถแก้ไขได้ เช่น การผสมกันกับพีซีเอ็ม ชนิดอื่น ๆ เพื่อเพิ่มคุณสมบัติของพีซีเอ็ม รวมไปถึงการทำไมโครเอนแคปซูเลชัน (Rathod, 2018)

### น้ำตาลแอลกอฮอล์ : อิริทริทอล (SUGAR ALCOHOLS : ERYTHRITOL)

น้ำตาลแอลกอฮอล์ส่วนประกอบเดียวพบว่าเป็นพีซีเอ็มที่สามารถรับความร้อนได้มาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งอิริทริทอลเป็นน้ำตาลแอลกอฮอล์ที่เป็นพีซีเอ็มที่มีแนวโน้มการใช้งานมากที่สุด ในช่วงอุณหภูมิ 200 °C อิริทริทอลมีอุณหภูมิหลอมเหลวที่เหมาะสม และมีค่าความร้อนแฝงมาก นอกจากนี้ยังเป็นพีซีเอ็มที่ปลอดภัยและไม่ทำให้เป็นสนิม ดังนั้นอิริทริทอลจึงถูกนำมาใช้งานอย่างหลากหลาย และเริ่มมีความนิยมที่จะนำมาใช้งานมากขึ้น ตัวอย่างเช่น เตาพลังงานแสงอาทิตย์ การขนส่งความร้อน รวมไปถึงเป็นแหล่งพลังงานความร้อนสำหรับเครื่องทำความเย็นอีกด้วย (Nomura et al., 2015)

## กรดไขมันลอริกและปาลมิติก (FATTY ACIDS : LAURIC AND PALMITIC ACIDS)

กรดไขมันเป็นฟิซีเอมที่มีแนวโน้มสำหรับการใช้งานการจัดเก็บพลังงานความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ กรดไขมันมีคุณสมบัติที่ต้องการมากกว่าฟิซีเอมอื่น ๆ เพื่อนำมาใช้ งาน เช่น มีความหนาแน่นของพลังงานสูง พฏิกิริยาการละลายและการแข็งตัวที่ต้องมีความสอดคล้องกัน และความเสถียรทางความร้อนทางเคมีที่ดี นอกจากนี้ยังไม่มีความเป็นพิษ ไม่มีฤทธิ์การกัดกร่อน มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเล็กน้อยในระหว่างการเปลี่ยนเฟส และมีความสะดวกในการผลิต ซึ่งสามารถผลิตจากน้ำมันพืชและสัตว์

มีการตรวจสอบว่ากรดลอริกและกรดปาลมิติกมีลักษณะการถ่ายโอนความร้อนและการนำความร้อนที่ดี เป็นฟิซีเอมที่มีศักยภาพสำหรับการใช้ต้มน้ำจากพลังงานแสงอาทิตย์และการทำความร้อนในอาคาร อย่างไรก็ตามจุดหลอมเหลวของกรดลอริกและกรดปาลมิติกนั้นมีค่าค่อนข้างสูงสำหรับความต้องการในการจัดเก็บพลังงานแสงอาทิตย์ แต่ก็ยังสามารถลดลงได้เนื่องจากความร้อนแฝงของฟิวชั่นของส่วนผสมสามารถรักษาได้ที่ค่าที่เพียงพอ ดังนั้นส่วนผสมของกรดลอริกและกรดปาลมิติกที่มีองค์ประกอบของยูเทคติกจึงมีศักยภาพเป็นวัสดุเก็บพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับการใช้งานความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ (Tuncbilek et al., 2005)

### การสำรวจเอกสารและงานวิจัยในอดีต

#### 1. การประเมินผลกระทบของครีบทามยาวต่อกระบวนการหลอมในหน่วยเก็บพลังงานความร้อน (Ao et al., 2023)

หน่วยจัดเก็บพลังงานความร้อนแฝง (LHTES) เป็นวิธีการทางเทคนิคที่มีประสิทธิภาพในการสร้างสมดุลระหว่างการรับและการใช้พลังงาน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายโอนความร้อนของฟิซีเอมในหน่วย LHTES มีการออกแบบชุดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบสามท่อแบบใหม่ที่มีครีบทามยาว โดยจะศึกษาผลกระทบของความยาว ความหนาและการจัดเรียงของครีบท่อต่อประสิทธิภาพการถ่ายโอนความร้อน ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงความหนาของครีบท่อมีผลอย่างมากต่ออัตราการเวลาของการหลอมเหลวของฟิซีเอมทั้งหมด ครีบทามบางจะมีอัตราการหลอมเหลวที่สูงกว่า ระยะเวลาของการหลอมละลายที่สมบูรณ์ของครีบทามบางนั้นเร็วกว่าครีบทหนาสั้น 10.6% จากการศึกษาผลกระทบของความยาวครีบท่อต่อประสิทธิภาพการกักเก็บความร้อนพบว่าที่ความยาว 30 มม. ลดระยะเวลาในการกักเก็บความร้อนสั้นลง 18.0% นอกจากนี้ การจัดเรียงโดยใช้ครีบทามด้านล่างและใช้ครีบทามด้านบนจะสามารถเสริมสร้างการถ่ายโอนความร้อนได้และเมื่อพิจารณาปริมาณความจุในการกักเก็บความร้อนจะมีค่าลดลงเมื่อจำนวนครีบทามเพิ่มขึ้น ครีบท 20 ชั้น



ถือเป็นจำนวนครีบบัต์ที่ดีที่สุด ดังนั้นพารามิเตอร์ในการออกแบบครีบบัต์ (ครีบบัต์ 20 ชั้น ความยาว 30 มม. ความหนา 1 มม.) จะช่วยลดระยะเวลาการหลอมเหลวของพีซีเอ็มลงถึง 71.2% จึงสามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มจำนวนครีบบัต์จะเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายโอนความร้อน และเป็นประโยชน์มากกว่าการไม่ใช้ครีบบัต์ และยังช่วยประหยัดเวลาในการชาร์จพลังงาน ได้มากขึ้น

## 2. เทคโนโลยีเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายโอนความร้อนสำหรับครีบบัต์ในการจัดเก็บพลังงานแบบเปลี่ยนเฟส (Zhu et al., 2022)

ในกระบวนการนำความร้อนจากอุตสาหกรรมขยะกลับมาใช้ใหม่ เทคโนโลยีการจัดเก็บความร้อนแบบเปลี่ยนเฟสได้กลายเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีในการกักเก็บความร้อนที่ได้รับความนิยมมากที่สุดในอุตสาหกรรม เนื่องจากความหนาแน่นของการจัดเก็บความร้อนสูงและกระบวนการในการดูด-คายอุณหภูมิก่อนที่ ในการใช้งานจริงการนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่และความเร็วในการใช้งานจะเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง ดังนั้นการพัฒนาครีบบัต์ให้มีโครงสร้างที่เหมาะสมหรือการปรับครีบบัต์เดิมให้เหมาะสมก็สามารถเร่งกระบวนการกักเก็บความร้อนและใช้ประโยชน์ได้ในระดับหนึ่ง เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของการออกแบบการถ่ายโอนความร้อนของครีบบัต์และขยายการใช้งานการวิเคราะห์การเสริมสร้างความแข็งแกร่งของการเพิ่มประสิทธิภาพของการถ่ายโอนความร้อน ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า โครงสร้างย่อยของครีบบัต์เป็นทิศทางการวิจัยของการออกแบบครีบบัต์ใหม่ในอนาคต การเรียงครีบบัต์ที่ไม่สม่ำเสมอมีประสิทธิภาพการถ่ายโอนความร้อนได้ดีกว่าการเรียงครีบบัต์แบบมีรูปแบบ การจัดเรียงครีบบัต์สามารถเพิ่มการถ่ายโอนความร้อนสูงสุดได้ นั่นคือ กำหนดจำนวนครีบบัต์ที่เหมาะสมในตัวสะสมความร้อน โดยพารามิเตอร์ของครีบบัต์ เช่น ขนาด จำนวนครีบบัต์ และพารามิเตอร์ของขนาดของตัวสะสมความร้อนจะไม่เป็นอิสระจากกัน แต่จะส่งผลต่อกัน ดังนั้นกระบวนการออกแบบต้องได้รับการพิจารณาอย่างครอบคลุม เช่น วิธีการทดสอบมุลจาก วิธีการเพิ่มประสิทธิภาพโทโพโลยี ซึ่งมักจะเป็นการปรับปรุงรูปร่างและขนาดของครีบบัต์ให้เหมาะสมซึ่งมีความง่ายและมีประสิทธิภาพ

## 3. การศึกษาทดลองเกี่ยวกับผลของการเติมโฟมทองแดงในการจัดเก็บความร้อนของพีซีเอ็มที่ใช้พาราฟิน (Hou et al., 2022)

พีซีเอ็มที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการจัดเก็บพลังงานความร้อนแฝงนั้นมีข้อเสียอยู่ คือ การนำความร้อนต่ำและเวลาในการเก็บความร้อนใช้เวลานาน การเติมโฟมทองแดงเล็กน้อยนั้นจะเป็นการแก้ปัญหานี้ได้ โดยผลของการเพิ่มประสิทธิภาพของโฟมทองแดงที่เติมลงไปต่อประสิทธิภาพการจัดเก็บความร้อนของพีซีเอ็มนั้น ประเมินโดยการทดลองเพื่อการใช้พลังงานหมุนเวียน โดยที่โฟมทองแดงที่เติมจะเติมเป็น 3 รูปแบบ คือ แบบสองแถวและกระจายในวงแหวน

(รูปแบบที่ 1) แบบวงแหวนตั้งฉากกับทิศทางของขดลวด (รูปแบบที่ 2) และสุดท้าย แบบวงแหวนในทิศทางที่ขนานกับแกนนอน (รูปแบบที่ 3) ผลคือระยะเวลาในการเข้าถึงอุณหภูมิหลอมเหลวของสามรูปแบบจะลดลง 30–40% เมื่อเทียบกับใช้พาราฟินเพียงอย่างเดียว และในรูปแบบที่ 1 จะช่วยลดเวลาได้ 40% เมื่อเทียบกับรูปแบบอื่น ๆ รูปแบบที่ 1 ยังสามารถช่วยเพิ่มความสม่ำเสมอของการกระจายอุณหภูมิจากศูนย์กลางซึ่งได้รับอุณหภูมิในทิศทางอื่นที่มีค่าน้อยกว่ารูปแบบอื่น ๆ 19–21% ในรูปแบบที่ 2 สามารถเพิ่มความสม่ำเสมอของการกระจายอุณหภูมิตามทิศทางรอบนอกซึ่งได้รับอุณหภูมิในทิศทางอื่นที่มีค่าน้อยกว่ารูปแบบอื่น ๆ 35–67% สรุปผลคือ รูปแบบที่ 1 นั้นจะมีประสิทธิภาพการถ่ายโอนความร้อนที่ดีที่สุด ซึ่งประสิทธิภาพการจัดเก็บจะสูงกว่าเคสอื่น ๆ 0.65–2.79%

#### 4. การกำหนดลักษณะทางความร้อนของพีซีเอ็มที่ใช้พาราฟินสำหรับการใช้งานจัดเก็บพลังงานความร้อนที่อุณหภูมิต่ำสำหรับอาคาร (Soares et al., 2023)

ข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติทางความร้อนของพีซีเอ็มมีความสำคัญต่อการออกแบบระบบกักเก็บพลังงานความร้อนที่อุณหภูมิต่ำสำหรับอาคารและสำหรับการสร้างแบบจำลองพฤติกรรมทางความร้อน อย่างไรก็ตามข้อมูลที่จัดทำโดยผู้ผลิตนั้นมองแต่ในทางที่ดี ซึ่งไม่เพียงพอสำหรับการพัฒนาวิธีการเชิงตัวเลขที่เชื่อถือได้ซึ่งต้องมีการตรวจสอบเพิ่มเติม บทความนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อประเมินคุณสมบัติทางความร้อนที่สำคัญของพีซีเอ็มที่ใช้พาราฟิน 10 ชนิด ซึ่งเป็นพาราฟินขนาดเล็กและจำนวนมาก อุณหภูมิสูงสุดในการหลอมละลายและแข็งตัว เอนทัลปีของฟิวชันและการแข็งตัว และความจุความร้อนจำเพาะจะถูกวัดโดยเครื่องวิเคราะห์คุณสมบัติทางความร้อนเชิงพลังงาน (Modulated Differential Scanning Calorimetry) วิธีการ Transient Plane Source method จะถูกใช้เพื่อประเมินความผันแปรของการนำความร้อนและการกระจายของอุณหภูมิเสถียรภาพทางความร้อนได้รับการประเมินโดยการวิเคราะห์จากการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อนความละเอียดสูง โครงสร้างจุลภาคของพีซีเอ็มที่ถูกหุ้มจะได้รับการตรวจสอบผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง สรุปได้ว่าข้อมูลบางอย่างที่ให้ไว้ในเอกสารข้อมูลนั้นถูกได้รับการยืนยันอย่างคร่าว ๆ จากผลการทดลอง อย่างไรก็ตาม ในบางกรณีโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ค่าเอนทัลปีของการฟิวชันและการแข็งตัวไม่สอดคล้องกัน (ส่วนใหญ่จะเป็นอุณหภูมิสูงสุดในการหลอมเหลวและแข็งตัว) หรือหาได้ยาก เช่น ค่าการนำความร้อนและความร้อนจำเพาะของเฟสที่เป็นของแข็งและของเหลว ผลงานที่สำคัญของบทความนี้คือ ชุดข้อมูลที่เชื่อถือได้สำหรับการสร้างแบบจำลองตัวเลขที่จะเกิดขึ้นช่วยประหยัดเวลา ทรัพยากร และผลลัพธ์ยังสามารถใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับการศึกษาเปรียบเทียบในอนาคตได้ด้วย



## 5. ลักษณะการหลอมละลายของระบบกักเก็บพลังงานความร้อนแฝงในแนวนอนที่มีครีบทามยาว (Modi et al., 2021)

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของรูปทรงครีบท่อประสิทธิภาพการระบายความร้อนของระบบกักเก็บพลังงานความร้อนแฝงในแนวนอนที่มีครีบทามยาว (LHTES) ครีบทามยาวที่มีความสูง ความหนาและจำนวนของครีบท่างกันจะถูกนำไปใช้ในระบบ LHTES แบบท่อในแนวนอน และพาราฟินเป็นฟิซีเอ็มถูกบรรจุอยู่ในแอนนูลัส เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการดูดความร้อน การหลอมเหลวทางด้านหน้ามีอุณหภูมิเฉลี่ยและเวลาในการหลอมเหลวของฟิซีเอ็ม พบว่าครีบทามยาวในปริมาณน้อย (2.85% ของปริมาตรทั้งหมด) สามารถลดระยะเวลาในการหลอมเหลวที่สมบูรณ์ได้ 34% เมื่อเทียบกับการกำหนดค่าครีบท่อ เมื่อเปรียบเทียบกับลักษณะการหลอมเหลวโดยใช้เศษส่วนของเหลวเฉลี่ย อุณหภูมิเฉลี่ยของฟิซีเอ็มและพลังงานที่เก็บไว้ แนะนำว่าความสูงของครีบท่อไม่ควรเกินครึ่งหนึ่งของช่องว่างแอนนูลัส ปริมาณของครีบท่อที่เหมาะสมถูกระบุโดยการเปรียบเทียบอัตราส่วนการเพิ่มประสิทธิภาพของค่าที่ตรวจสอบไว้แล้ว นอกจากนี้สำหรับการกำหนดค่าปริมาณของครีบท่อ การศึกษานี้ยังเปรียบเทียบครีบท่อจำนวนมากหรือครีบท่อจำนวนน้อยอีกด้วย จากผลการเปรียบเทียบพบว่าครีบท่อจำนวนน้อยมีประโยชน์มากกว่าครีบท่อจำนวนมาก และลักษณะการหลอมละลายของครีบท่อบางนั้นเหนือกว่าครีบท่อสั้นหนา ดังนั้นการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของครีบท่อที่เหมาะสมและถูกต้อง จะสามารถออกแบบระบบกักเก็บพลังงานแบบท่อครีบทามยาวได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## 6. การจัดการความร้อนของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ การตรวจสอบพารามเมตริกของครีบท่อระบายความร้อนที่เต็มไปด้วยฟิซีเอ็ม (Arshad et al., 2021)

การศึกษานี้จะนำเสนอการตรวจสอบพารามเมตริกของฟิซีเอ็มที่เติมแผ่นระบายความร้อนที่ใช้สำหรับการจัดการความร้อนในชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ การจำลองเชิงตัวเลขที่ไม่เสถียร 2 มิติ ดำเนินการโดยใช้วิธีจำกัดปริมาตร แผ่นระบายความร้อนซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเพิ่มการนำความร้อน ถูกนำมาใช้กับฟิซีเอ็มเพื่อปรับปรุงการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายโอนความร้อน มีการเลือกสัดส่วนของปริมาตรที่แตกต่างกันสองส่วนคือ 10% และ 20% ของแผ่นระบายความร้อนแบบครีบท่อ ซึ่งครีบท่อมีความสูง 10, 15 และ 20 มม. และใช้พาราฟิน RT-35HC เป็นฟิซีเอ็มเพื่อดูดซับความร้อนภายในชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ พลังงานขาเข้าจะมีค่าคงที่เพื่อเลียนแบบพลังงานความร้อนจริงของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างขึ้นที่ฐานของแผ่นระบายความร้อน และการเปลี่ยนแปลงชั่วคราวของการกระจายอุณหภูมิ สัดส่วนการหลอมละลาย สนามการเปลี่ยนแปลงสถานะ สนามการไหลของอุณหภูมิ และเฟสความร้อนแฝงจะถูกวิเคราะห์ รวมไปถึงประสิทธิภาพในการระบายความร้อนของแผ่นระบายความร้อนก็จะได้รับการตรวจสอบเพิ่มเติมโดยใช้การวิเคราะห์มิติและอุณหภูมิที่จุดวิกฤติ

ผลการวิจัยพบว่าแผ่นระบายความร้อนแบบแผ่นครีบบและพีซีเอ็มจะช่วยลดอุณหภูมิที่ฐานของแผ่นระบายความร้อนและปรับปรุงความสม่ำเสมอของการหลอมเหลวพีซีเอ็ม เมื่อทำการเปรียบเทียบกับแผ่นระบายความร้อนที่ไม่มีครีบบแต่เต็มไปด้วยพีซีเอ็มอุณหภูมิที่ต่ำกว่าของฐานของแผ่นระบายความร้อนทำได้ด้วยการเพิ่มความสูงของครีบบและจำนวนครีบบ สำหรับสัดส่วนปริมาตรของครีบบเมื่อเทียบกับสัดส่วนปริมาตรพีซีเอ็มที่เติมครีบบระบายความร้อนความสูงครีบบ 20 มม. ปริมาตร 20% ของครีบบแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิฐานของแผ่นระบายความร้อนลดลง อย่างไรก็ตามเวลาเสร็จสิ้นของเฟสที่สูงขึ้นในระหว่างการละลายถูกคาดการณ์ความสูงครีบบ 20 มม. ที่ 10% ของปริมาตรสัดส่วนของครีบบ การลดเวลาในการหลอมละลายจะได้รับความสูงของครีบบและจำนวนครีบบที่สูงขึ้น

#### 7. การเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายโอนความร้อนโดยครีบบตามยาวที่ไม่สม่ำเสมอ

ซึ่งประกอบขึ้นภายในท่อวงกลม (Hajmohammadi et al., 2020)

ท่อวงกลมเป็นหนึ่งในเครื่องมือที่ใช้ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนหลายประเภท เมื่อพลังงานที่มีอยู่สำหรับการจ่ายพลังงานสูบน้ำมีข้อจำกัด การปรับปรุงการออกแบบองค์ประกอบของการถ่ายโอนความร้อน เช่น ครีบบตามยาว จะมีความสำคัญในบทความนี้ การเรียงครีบบแบบใหม่ซึ่งครีบบตามยาวจะเรียงตัวกันไม่สม่ำเสมอตามแนวเส้นรอบวงภายในของท่อวงกลม แบบจำลองเชิงตัวเลขจะใช้สำหรับการหาค่าแรงดันที่ลดลง กำลังสูบน้ำที่ต้องการ และการถ่ายโอนความร้อนของการไหลแบบลามินาร์แบบท่อครีบบ ทั้งครีบบสม่ำเสมอและครีบบที่ไม่สม่ำเสมอซึ่งใช้กำลังสูบน้ำที่เท่ากันจะถูกนำมาเปรียบเทียบกันตามความสามารถในการถ่ายโอนความร้อน ผลการเปรียบเทียบคือ การกำหนดค่าพารามิเตอร์ครีบบที่ไม่สม่ำเสมอช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการระบายความร้อนได้ถึง 46% เมื่อเทียบกับครีบบแบบดั้งเดิมที่สม่ำเสมอ ทั้งนี้ยังขึ้นอยู่กับขนาดของกำลังสูบน้ำที่ต้องการ สรุปคือพารามิเตอร์ทางเรขาคณิตที่มีผลต่อการถ่ายโอนความร้อนของครีบบ เช่น จำนวนของครีบบ ความสูงของครีบบ และอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางต่อประสิทธิภาพของการระบายความร้อนของการประกอบครีบบ

#### 8. แพลตตีเอมีน/กราไฟนรูปแบบคงที่ วัสดุเปลี่ยนสถานะแบบคอมโพสิตที่มีอัตรา

การไหลสูงเป็นพิเศษและความหนาแน่นของพลังงานสำหรับการจัดเก็บพลังงานความร้อน (Chen et al., 2020)

การพัฒนาพีซีเอ็มที่เสถียร (FSPCMs) ที่มีค่าความร้อนแฝงขนาดมาก มีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีเยี่ยม และสามารถรีไซเคิลได้เป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการใช้งานจริง เพื่อประหยัดพลังงานความร้อนหรือพลังงานแสงอาทิตย์ ในบทความนี้จะรายงานการใช้ประโยชน์จากไขมันเอมีน (FAs) คือ เตตราเดซิลามีน (TDA) และออกตาเดซิลามีน (ODA) เป็นพีซีเอ็มอินทรีย์แบบใหม่ สำหรับการผลิตคอมโพสิตพีซีเอ็มที่เสถียรที่มีพลังงานความหนาแน่นสูงเป็นพิเศษ

โดยใช้กราฟีน 3 มิติที่มีรูพรุน (GS) เป็นวัสดุเสริม สารประกอบไขมันเอมีน/กราฟีนจะมีค่าของความร้อนแฝงสูงตั้งแต่ 293–303 kJ/kg และมีอุณหภูมิต่ำ 7–9 °C นำแปลกที่พบว่าอัตราการไหลของไขมันเอมีนทั้งสองนี้ที่รวมเข้ากับกับกราฟีนสูงถึง 7,063–10,660 wt% ซึ่งเกือบจะสูงกว่าพีซีเอ็มเสถียรที่รายงานถึง 3 เท่า นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบกับไขมันเอมีน การมีกราฟีนส่งผลให้มีการนำความร้อนดีขึ้น หลังจากวงจรความร้อนครบ 200 รอบ ปริมาณของความร้อนแฝง ยังคงสูงถึง 93.34% (เตตราเดซิลามีน/กราฟีน) และ 93.83% (ออกตาเดซิลามีน/กราฟีน) ซึ่งหมายถึงมีความเสถียรภาพทางความร้อนที่ดี การใช้ประโยชน์จากข้อดีที่กล่าวถึงข้างต้นและการค้นพบของงานนี้ยังไม่เพียงแต่เปิดวิธีใหม่ในการใช้ประโยชน์จากไขมันเอมีนในฐานะพีซีเอ็มอินทรีย์ใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูง แต่ยังเพิ่มความเป็นไปได้ในการสร้างสารประกอบไขมันเอมีนและกราฟีนให้มีศักยภาพเพิ่มสูงขึ้นได้อีกด้วย เพื่อในการใช้งานประหยัดพลังงานจริง ภายใต้อุปกรณ์ความหนาแน่นที่สูงเป็นพิเศษ ในระดับของ supercooling ต่ำ ที่มีค่าไหลสูงเป็นพิเศษ มีเสถียรภาพทางความร้อนที่ขอดีเยี่ยมและสามารถนำกลับมาใช้งานได้

#### **9. การวิเคราะห์ความสมมาตรของแบบจำลองของการนำความร้อนสำหรับการถ่ายโอนความร้อนในคริสตัลเหลวตามแนวยาวของวัสดุที่แตกต่างกัน (Moitsheki and Bradshaw–Hajek, 2013)**

การพิจารณารูปแบบการนำความร้อนที่เกิดขึ้นในการถ่ายโอนความร้อนแบบชั่วคราวผ่านคริสตัลตามยาวของวัสดุที่แตกต่างกัน ในกรณีนี้การนำความร้อนจะขึ้นอยู่กับตัวแปรเชิงพื้นที่ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและได้รับจากฟังก์ชันของกฎพลังงานสมการเชิงอนุพันธ์บางส่วนที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่เกิดขึ้นจะถูกวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคความสมมาตรทั้งแบบดั้งเดิมและแบบไม่ดั้งเดิม ทั้งสถานะแบบชั่วคราวและแบบสถานะคงที่ ซึ่งจะส่งผลให้ความสมมาตรแปลกใหม่จำนวนหนึ่งได้รับการยอมรับจากสมการควบคุม นอกจากนี้ยังยอมรับความสมมาตรที่ไม่ใช่ดั้งเดิมอีกด้วย ผลการวิเคราะห์ความสมมาตรทั้งแบบดั้งเดิมและแบบไม่ดั้งเดิมมีบางอย่างที่มีประโยชน์ และมีการสร้างผลเฉลยแม่นยำตรงที่ถูกต้องด้วย

#### **10. ส่วนผสมยูเทคติกกรดลอริกและปาล์มิติกเป็นวัสดุกักเก็บความร้อนแฝงสำหรับการใช้งานความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ (Tuncbilek et al., 2005)**

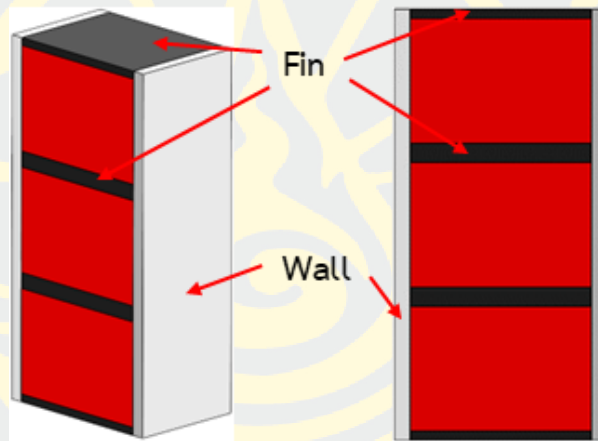
กรดไขมันปาล์มิติก (PA, 59.8 °C) และกรดไขมันลอริก (LA, 42.6 °C) เป็นพีซีเอ็มที่มีอุณหภูมิหลอมเหลวค่อนข้างสูง ซึ่งสามารถจำกัดการใช้งานในการใช้งานพลังงานแสงอาทิตย์ที่อุณหภูมิต่ำ เช่น ระบบผลิตความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์และเรือนกระจก อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิหลอมละลายของมันสามารถปรับแต่งให้เหมาะสมได้ โดยการเตรียมส่วนผสมยูเทคติกของกรดลอริกและกรดปาล์มิติก ในการศึกษาปัจจุบันการวิเคราะห์เชิงความร้อนโดยใช้เทคนิค

การวัดความร้อนด้วยการสแกนดิฟเฟอเรนเชียล แสดงให้เห็นว่าส่วนผสมยูเทคติก 69.0 wt% ของกรดไขมันลอริก และ 31 wt% ของกรดปาล์มิติก รวมกันเป็นส่วนผสมยูเทคติกของกรดลอริก และกรดปาล์มิติกที่มีอุณหภูมิหลอมเหลว 35.2 °C และมีค่าความร้อนแฝงของการฟิวชั่น 166.3 J/g ในการศึกษาที่ยังพิจารณาถึงการกำหนดลักษณะทางความร้อนของส่วนผสมยูเทคติกในระหว่างกระบวนการดูด-คายความร้อน การกระจายอุณหภูมิจากศูนย์กลางและตามแนวแกน รวมไปถึงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนระหว่างท่อระบายความร้อนกับพีซีเอ็ม นั่นคือ อัตราการนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่ และอัตราส่วนการดูด-คายความร้อนได้รับการคิดค้นขึ้นโดยใช้ระบบจัดเก็บพลังงานในท่อแนวตั้ง การเปลี่ยนแปลงของลักษณะเหล่านี้จะได้รับการประเมินโดยคำนึงถึงผลกระทบของอุณหภูมิ HTF ขาเข้า อัตราการไหลของมวล รวมไปถึงการวิเคราะห์เชิงความร้อนสแกนดิฟเฟอเรนเชียล จากผลการทดลองพบว่าส่วนผสมของยูเทคติกของกรดลอริก และกรดปาล์มิติกนั้นสามารถเป็นวัสดุที่มีศักยภาพสำหรับการใช้งานจัดเก็บพลังงานความร้อนที่อุณหภูมิต่ำในแง่ของลักษณะทางความร้อนทางกายภาพ

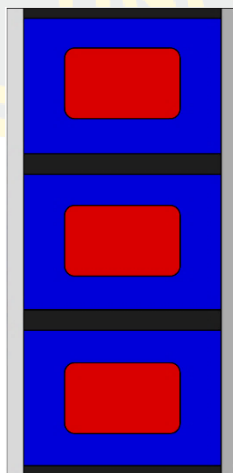
### บทที่ 3

#### แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในการวิเคราะห์การถ่ายโอนพลังงานความร้อนของฟิชีเอ็มในที่จัดเก็บซึ่งมีครีบบภายใน มีความซับซ้อนอย่างมากซึ่งอาจไม่เหมาะสมต่อการพิจารณาในสถานการณ์ที่ต้องการความรวดเร็ว ดังนั้น แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการถ่ายโอนความร้อน 1 มิติ จึงเป็นทางเลือกที่พิจารณาใช้ได้เบื้องต้น เนื่องจากมีความง่ายขึ้นและรวดเร็ว อีกทั้งสามารถป้อนเข้าสู่เครื่องคำนวณและสามารถนำไปใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ



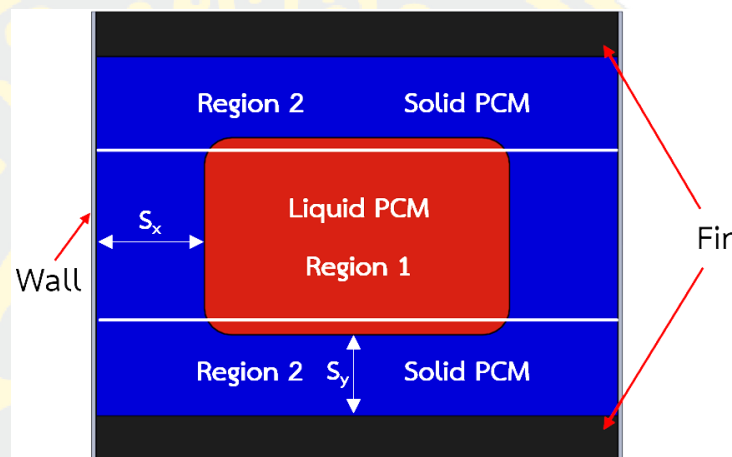
ภาพที่ 5 ที่จัดเก็บฟิชีเอ็มแบบจำกัดพร้อมครีบบภายใน



ภาพที่ 6 ที่จัดเก็บฟิชีเอ็มแบบจำกัดพร้อมครีบบภายใน เมื่อฟิชีเอ็มเกิดการแข็งตัว



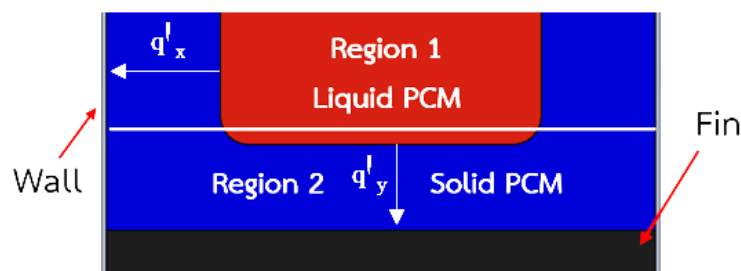
จากภาพที่ 5 จะเป็นภาพที่จัดเก็บพีซีเอ็ม โดยเริ่มต้น พีซีเอ็มจะเป็นของเหลว (อุณหภูมิของพีซีเอ็มสูงกว่าอุณหภูมิการแข็งตัว) เมื่อลดอุณหภูมิผนังให้มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับอุณหภูมิการแข็งตัวของพีซีเอ็มจะทำให้พีซีเอ็มเกิดการแข็งตัวทั้งตามแนวแกน x และแกน y เป็นดังภาพที่ 6 โดยจะมีทั้งพีซีเอ็มที่เป็นของแข็ง (บริเวณสีน้ำเงิน) และของเหลว (บริเวณสีแดง) และเมื่อพิจารณาเซลล์ 1 เซลล์ของที่จัดเก็บพีซีเอ็มจะเป็นดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 ที่จัดเก็บพีซีเอ็มแบบจำกัดพร้อมครีบริบภายใน 1 เซลล์

### การถ่ายโอนความร้อนผ่านวัสดุเปลี่ยนสถานะ (พีซีเอ็ม) และครีบริบ

ที่จัดเก็บพีซีเอ็มมีโครงสร้างที่สมมาตร ดังนั้นเพื่อที่จะลดการวิเคราะห์ที่ซับซ้อนและให้ง่ายต่อการคำนวณจึงคิดเซลล์สมมาตรเพียงเซลล์เดียวที่อยู่ในระนาบของการสมมาตรที่อยู่ตรงกลางของครีบริบและตรงกลางระหว่างครีบริบทั้งสองที่อยู่ติดกันตามภาพที่ 8 เซลล์สมมาตรนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน



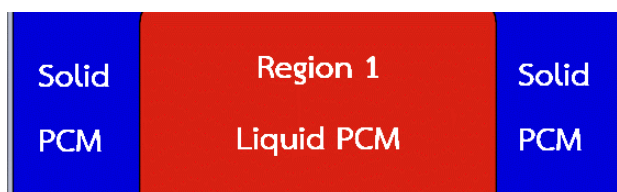
ภาพที่ 8 เซลล์สมมาตรของที่จัดเก็บพีซีเอ็มพร้อมครีบริบภายใน

เนื่องจากปัญหาอยู่ในสภาวะไม่คงตัวหรือไม่เป็นเชิงเส้น (ไม่คงที่) จึงมีการตั้งสมมติฐาน เพื่อลดความซับซ้อนของปัญหาการถ่ายโอนความร้อนแบบ 2 มิติ ดังนี้

1. เริ่มแรกพีซีเอ็มที่เป็นของเหลวและครีบบจะมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิการแข็งตัวของพีซีเอ็ม ( $T_m = T_l = T_f$ ) ดังนั้นการนำความร้อนและการพาความร้อนตามธรรมชาติในพีซีเอ็มที่เป็นของเหลวจึงถือว่ามีค่าน้อยมาก การถ่ายโอนความร้อน คือ การนำความร้อนในพีซีเอ็มที่เป็นของแข็งเพียงอย่างเดียว
2. อุณหภูมิการแข็งตัว ( $T_m$ ) จะถือว่ามีค่าคงที่ แต่ในความเป็นจริงพีซีเอ็มมีช่วงในการแข็งตัว ( $\Delta T_m$ )
3. การกระจายอุณหภูมิของครีบบจะเป็นมิติเดียว คือ ในทิศทางตามแนวแกน x เนื่องจากครีบบมีความบางและค่าการนำความร้อนของวัสดุครีบบที่สูง
4. ในบริเวณที่ 1 การถ่ายโอนความร้อนจะเกิดขึ้นมิติเดียว คือ ในทิศทางแนวแกน x ครีบบจะไม่มีผลต่อการถ่ายโอนความร้อนในส่วนนี้
5. ในบริเวณที่ 2 บริเวณส่วนต่อระหว่างของแข็งกับของเหลวการถ่ายโอนความร้อนจะเกิดขึ้นเพียงมิติเดียว คือ ในทิศทางแนวแกน y เนื่องจากความร้อนส่วนใหญ่ถูกถ่ายโอนผ่านครีบบไปยังสิ่งแวดล้อมภายนอก
6. ในบริเวณที่ 2 ความร้อนที่รับได้จากพีซีเอ็มที่เป็นของแข็งจะถือว่ามีค่าน้อยมาก ความร้อนแฝงของการหลอมเหลวจะถือเป็นส่วนใหญ่ของการจัดเก็บพลังงาน ในบริเวณที่ 1 ความร้อนที่รับได้ของพีซีเอ็มจะถูกนำมาพิจารณาด้วย
7. คุณสมบัติทางกายภาพ เช่น การนำความร้อน ความจุความร้อน และความหนาแน่นของพีซีเอ็มและครีบบจะถือว่าคงที่

### การถ่ายโอนความร้อนผ่านวัสดุเปลี่ยนสถานะ (พีซีเอ็ม) บริเวณที่ 1

การถ่ายโอนความร้อนของพีซีเอ็มในที่จัดเก็บบริเวณที่ 1 จะเป็นการถ่ายโอนความร้อนตามแนวแกน x โดยพีซีเอ็มจะเกิดการแข็งตัวตามแนวแกน x เท่านั้น ดังแสดงในภาพที่ 9



ภาพที่ 9 การถ่ายโอนความร้อนผ่านวัสดุเปลี่ยนสถานะ บริเวณที่ 1 (Region 1)



มีเงื่อนไขเริ่มต้นและขอบเขต คือ มีอุณหภูมิที่ผนังคงที่ คุณสมบัติการนำความร้อนของวัสดุมีค่าคงที่

$$\frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha_s} \frac{\partial T_s}{\partial t}, \quad 0 < x < l_f, \quad t > 0 \quad (3-1)$$

$$(\rho L)_s \frac{\partial S_x(t)}{\partial t} = k_s \frac{\partial T_s(S_x, t)}{\partial x}, \quad T > 0 \quad (3-2)$$

$$S_x(0) = 0 \quad (3-3)$$

อุณหภูมิของผนังมีค่าเท่ากับอุณหภูมิของฟลูอิเดียมที่เป็นของแข็ง

$$T_s(S_x, t) = T_m \quad (3-4)$$

$$T_s(0, t) = T_s(l_f, t) = T_w \quad (3-5)$$

ให้  $U_s = \frac{T_s - T_m}{T_w - T_m}$  ดังนั้นสมการที่ (3-1) จะได้

$$\frac{\partial^2 U_s}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha_s} \frac{\partial U_s}{\partial t} \quad \text{หรือ} \quad U_{s,t} = \alpha_s U_{s,xx} \quad (3-6)$$

กำหนดให้  $\gamma = \frac{x}{\sqrt{t}}$  จะได้

$$U_s(x, t) = F_s(\gamma(x, t))$$

$$\frac{\partial U_s}{\partial t} = \frac{dF_s}{d\gamma} \frac{\partial \gamma}{\partial t} = -\frac{x}{2t\sqrt{t}} \frac{dF_s}{d\gamma}$$

$$\frac{\partial U_s}{\partial x} = \frac{dF_s}{d\gamma} \frac{\partial \gamma}{\partial x} = \frac{1}{\sqrt{t}} \frac{dF_s}{d\gamma}$$

$$\alpha_s \frac{\partial^2 U_s}{\partial x^2} = \alpha_s \frac{1}{\sqrt{t}} \frac{d}{dy} \left[ \frac{dF}{dy} \right] \frac{dy}{dx} = \alpha_s \frac{1}{t} \frac{d^2 F}{dy^2}$$

แทนค่าในสมการที่ (3-6) จะได้

$$-\frac{x}{2t\sqrt{t}} \frac{dF_s}{dy} = \alpha_s \frac{1}{t} \frac{d^2 F}{dy^2}$$

$$\frac{d^2 F}{dy^2} + \frac{\gamma}{2\alpha_s} \frac{dF_s}{dy} = 0$$

คูณ  $e^{\frac{\gamma^2}{4\alpha_s}}$  ตลอดสมการ จะได้

$$e^{\frac{\gamma^2}{4\alpha_s}} \frac{d^2 F}{dy^2} + \frac{\gamma}{2\alpha_s} e^{\frac{\gamma^2}{4\alpha_s}} \frac{dF}{dy} = \frac{d}{dy} \left[ e^{\frac{\gamma^2}{4\alpha_s}} \frac{dF}{dy} \right] = 0$$

$$e^{\frac{\gamma^2}{4\alpha_s}} \frac{dF}{dy} = C_1$$

$$F = C_1 \int e^{-\frac{\gamma^2}{4\alpha_s}} dy + C_2$$

$$F = C_1 \int_0^{\frac{\gamma}{2\sqrt{\alpha_s}}} e^{-t^2} dt + C_2$$

จาก Error function,  $\text{erf } z = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-t^2} dt$  จะได้

$$F = C_3 \text{erf} \left( \frac{\gamma}{2\sqrt{\alpha_s}} \right) + C_2$$

$$U_s(x, t) = F\left(\frac{x}{\sqrt{t}}\right) = A \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha_s t}}\right) + D$$

จากสมการ (3-5) เมื่อ  $x = 0$  จะได้  $U_s = 1$  ดังนั้น  $D = 1$  และจากสมการ (3-4) เมื่อ  $x = S_x$  จะได้  $U_s = 0$  ดังนั้น

$$0 = A \operatorname{erf}\left(\frac{S_x}{2\sqrt{\alpha_s t}}\right) + 1$$

$$A = -\frac{1}{\operatorname{erf}\left(\frac{S_x}{2\sqrt{\alpha_s t}}\right)}$$

ให้  $\lambda = \frac{S_x}{2\sqrt{\alpha_s t}}$  หรือ  $S_x = 2\lambda\sqrt{\alpha_s t}$  จะได้

$$A = -\frac{1}{\operatorname{erf}(\lambda)}$$

$$U_s(x, t) = 1 - \frac{1}{\operatorname{erf}(\lambda)} \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha_s t}}\right) \quad (3-7)$$

จากสมการที่ (3-2) จะได้

$$(\rho L)_s \frac{\partial S_x(t)}{\partial t} = k_s \frac{\partial T_s(S_x, t)}{\partial x}$$

และ

$$\frac{dS_x(t)}{dt} = \lambda \sqrt{\frac{\alpha_s}{t}}$$

$$\frac{\partial T_s}{\partial x} = \frac{(T_w - T_m)}{\text{erf}(\lambda)} \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{d}{dx} \int_0^{x/2\sqrt{\alpha_s t}} e^{-t^2} dt$$

$$\frac{\partial T_s}{\partial x} = \frac{(T_w - T_m)}{\text{erf}(\lambda)} \frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{e^{-\frac{x^2}{4\alpha_s t}}}{\sqrt{\alpha_s t}}$$

เมื่อ  $x = S_x$  จะได้

$$\frac{\partial T_s}{\partial x} = - \frac{(T_w - T_m)}{\text{erf}(\lambda)} \frac{e^{-\lambda^2}}{\sqrt{\pi \alpha_s t}}$$

ดังนั้น

$$(\rho L)_s \lambda \sqrt{\frac{\alpha_s}{t}} = -k_s \frac{(T_w - T_m)}{\text{erf}(\lambda)} \frac{e^{-\lambda^2}}{\sqrt{\pi \alpha_s t}}$$

$$\lambda e^{\lambda^2} \text{erf}(\lambda) = -k_s \frac{T_w - T_m}{\sqrt{\pi \alpha_s t}} \sqrt{\frac{t}{\alpha_s}} \frac{1}{(\rho L)_s}$$

$$\lambda e^{\lambda^2} \text{erf}(\lambda) = -k_s \frac{T_w - T_m}{\sqrt{\pi \alpha_s \rho_s L_s}}$$

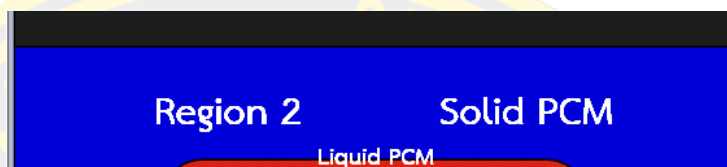
$$\lambda e^{\lambda^2} \text{erf}(\lambda) = -k_s \frac{\rho_s C_{p,s} (T_w - T_m)}{\sqrt{\pi} k_s \rho_s L_s}$$

เมื่อ  $St = \frac{C_{p,s} \Delta T}{L_s}$  จะได้

$$\lambda e^{\lambda^2} \text{erf}(\lambda) = \frac{St_s}{\sqrt{\pi}} = \frac{C_{p,s} (T_w - T_m)}{-L_s \sqrt{\pi}} \quad (3-8)$$

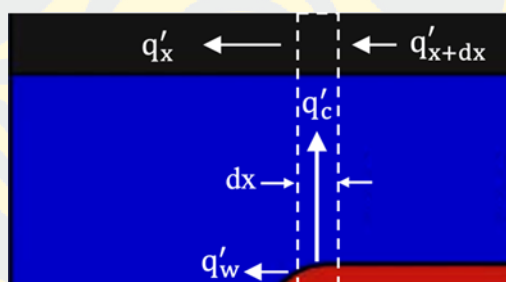
## การถ่ายโอนความร้อนผ่านวัสดุเปลี่ยนสถานะ (พีซีเอ็ม) บริเวณที่ 2

การถ่ายโอนความร้อนของพีซีเอ็มในบริเวณที่ 2 จะเป็นการถ่ายโอนความร้อนโดยที่พีซีเอ็มมีสถานะเป็นทั้งของเหลวและของแข็ง เริ่มจากพีซีเอ็มที่เป็นของเหลวถ่ายโอนความร้อนมาสู่พีซีเอ็มที่เป็นของแข็ง และพีซีเอ็มที่เป็นของแข็งก็จะถ่ายโอนความร้อนสู่ครีบบระบายความร้อน



ภาพที่ 10 การถ่ายโอนความร้อนผ่านวัสดุเปลี่ยนสถานะ บริเวณที่ 2 (Region 2)

ในการพิจารณาการถ่ายโอนความร้อนของพีซีเอ็มในบริเวณที่ 2 จะมองเป็นสองส่วน คือ พีซีเอ็มที่เป็นของเหลวและพีซีเอ็มที่เป็นของแข็ง สามารถแก้ไขปัญหาโดยใช้กฎสมดุลพลังงาน



ภาพที่ 11 การถ่ายโอนพลังงานความร้อนของพีซีเอ็มและครีบบ

สมดุลพลังงานของพีซีเอ็ม คือ

$$E'_p = q'_w + q'_c \quad (3-9)$$

ความร้อนที่ปล่อยออกมาเนื่องจากการแข็งตัวของพีซีเอ็ม

$$E'_p = -(\rho L)_s l_f \frac{\partial S_y}{\partial t} dx \quad (3-10)$$

การถ่ายโอนความร้อนจากส่วนต่อประสานของพีซีเอ็มระหว่างของแข็งและของเหลว  
ไปยังกรีบ

$$q'_c = k_s \frac{l_f}{S_y} (T_f - T_m) dx \quad (3-11)$$

อัตราการถ่ายโอนความร้อนต่อหน่วยความยาวจากส่วนต่อประสานของพีซีเอ็มระหว่าง  
ของแข็งกับของเหลวไปยังผนัง ( $q'_w$ ) ที่อุณหภูมิคงที่ ขึ้นอยู่กับค่าการนำความร้อนผ่านของแข็ง

$$q'_w = k_s \frac{l_f}{x} (T_w - T_m) \frac{\partial S_y}{\partial x} dx \quad (3-12)$$

เนื่องจากวิเคราะห์เป็น 1 มิติทำให้สมการที่ (3-12) มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับสมการที่  
(3-1) จึงไม่นำมาวิเคราะห์ จากนั้นนำสมการที่ (3-10) และ (3-11) แทนลงในสมการ (3-9) จะได้

$$-(\rho L)_s l_f \frac{\partial S_y}{\partial t} = k_s \frac{l_f}{S_y} (T_f - T_m)$$

นำ  $\frac{C_{p,f} l_f \rho_f}{L_s l_s k_f \rho_s}$  คูณทั้งสมการ

$$(\rho L)_s l_f \frac{C_{p,f} l_f \rho_f}{L_s l_s k_f \rho_s} \frac{\partial S_y}{\partial t} = -k_s \frac{l_f}{S_y} \frac{C_{p,f} l_f \rho_f}{L_s l_s k_f \rho_s} (T_f - T_m)$$

จะได้

$$\frac{\frac{\partial S_y}{l_c}}{\frac{\partial}{\rho_f C_{p,f} l_f^2}} = -k_s \frac{l_f}{S_y} \frac{C_{p,f} l_f \rho_f}{L_s l_s k_f \rho_s} (T_f - T_m) \frac{(T_w - T_m)}{(T_w - T_m)} \quad (3-13)$$

จากสมการที่ (3-13) กำหนดให้มีเงื่อนไขเริ่มต้น คือ

$$S_y = (y, 0) \quad (3-14)$$



จากสมการที่ (3-13) จัดให้อยู่ในรูปอย่างง่ายโดยทำให้เป็นตัวแปรไร้มิติ

$$\theta = \frac{T - T_m}{T_w - T_m}$$

$$\tau = \frac{k_f t}{(\rho c_p)_f l_f^2}$$

$$\gamma = \frac{S_y}{l_c}$$

$$\eta = \frac{x}{l_f}$$

$$\lambda = \frac{l_f}{l_c}$$

$$\psi = \frac{D}{l_c}$$

$$\kappa = \frac{k_s}{k_f}$$

$$\xi = \frac{(\rho c_p)_f (T_w - T_m)}{-L \rho_s}$$

จะได้

$$\frac{\partial \gamma}{\partial \tau} = \xi \kappa \lambda^2 \frac{\theta}{\gamma} \quad (3-15)$$

จากสมการที่ (3-15) กำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น คือ

$$\gamma(\eta, 0) = 0 \quad (3-16)$$

จากสมการที่ (3-15) จะสามารถหาคำตอบได้ดังนี้

$$\gamma = \sqrt{2\xi k \lambda^2 \theta \tau} \quad (3-17)$$

ในสถานะที่ฟิชีเอ็มแข็งตัวนั้นจะใช้พลังงานของความร้อนแฝงของการหลอมเหลว เพื่อถ่ายโอนความร้อน เนื่องจากการหลอมเหลวและการแข็งตัวของฟิชีเอ็มจะใช้พลังงานเท่ากัน การกระจายอุณหภูมิของครีบบนและระยะห่างของส่วนต่อประสานระหว่างฟิชีเอ็มที่เป็นของเหลวและของแข็งกับครีบบนทิศทางแนวแกน  $y$  คือ

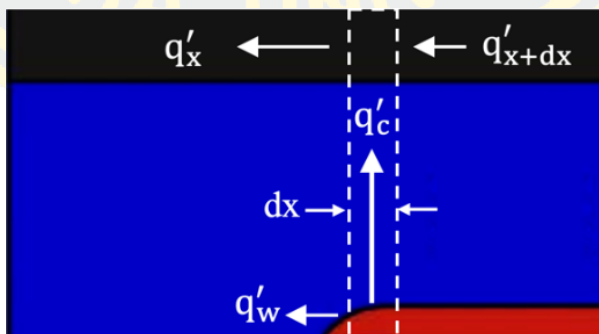
$$T_f = \theta_f(T_w + T_m) \quad (3-18)$$

และ

$$S_y = l_c \gamma \quad (3-19)$$

### การถ่ายโอนความร้อนผ่านครีบบตามแนวยาว

ฟิชีเอ็มจะมีสถานะเป็นของเหลว เนื่องจากได้รับพลังงานความร้อนจากการถ่ายโอนความร้อนจากแหล่งความร้อน และเพื่อให้ฟิชีเอ็มระบายความร้อนออกนั้น จะต้องอาศัยครีบบมาช่วยระบายความร้อนเพื่อถ่ายโอนความร้อนจากฟิชีเอ็มออกไปสู่สิ่งแวดล้อม



ภาพที่ 12 การถ่ายโอนความร้อนผ่านครีบบตามแนวยาว

การถ่ายโอนความร้อนของครีบบจะเท่ากับอัตราการนำความร้อนผ่านครีบรวมกับ  
อัตราการพาความร้อนออกจากครีบบ โดยใช้หลักการสมดุลพลังงานของครีบบจะได้สมการหลัก  
สองสมการ ดังนี้

$$E_f'' = q_x'' + q_{x+dx}'' - q_c'' \quad (3-20)$$

$$(\rho c_p)_f D \frac{\partial T_f}{\partial t} = k_f D \frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2} - \frac{k_s}{S_y} (T_f - T_m), t > 0 \quad (3-21)$$

ในการแก้ปัญหาจะกำหนดให้เงื่อนไขเริ่มต้น คือ

$$T_f(x, 0) = T_m \quad (3-22)$$

มีเงื่อนไขขอบเขต ดังนี้

$$T_f(0, t) = T_w \quad (3-23)$$

$$T_f(l_f, t) = T_w \quad (3-24)$$

จากสมการที่ (3-21) จัดให้อยู่ในรูปอย่างง่าย โดยใช้เงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขต  
จากนั้นทำให้เป็นตัวแปรไร้มิติ จะได้

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial \eta^2} - \frac{\lambda^2 \kappa \theta}{\psi \gamma}, t > 0 \quad (3-25)$$

จากสมการที่ (3-25) กำหนดให้เงื่อนไขเริ่มต้น คือ

$$\theta(\eta, 0) = 0 \quad (3-26)$$

และมีเงื่อนไขขอบเขต ดังนี้

$$\theta(0, \tau) = 1 \quad (3-27)$$

$$\theta(1, \tau) = 1 \quad (3-28)$$

จากสมการที่ (3-25) จะได้

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial \eta^2} \quad (3-29)$$

จากสมการที่ (3-29) ใช้เงื่อนไขเริ่มต้นจากสมการที่ (3-26) และเงื่อนไขขอบเขตจากสมการที่ (3-27) และ (3-28) จะได้

$$\theta = \frac{\cosh((\eta - 0.5)\sqrt{v})}{\cosh(0.5\sqrt{v})} - \frac{4}{\pi e^{v\tau}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n e^{-(2n+1)^2 \pi^2 \tau}}{(2n+1)[1 + \{v/((2n+1)^2 \pi^2)\}]} \cos((2n+1)\pi(\eta - 0.5)) \quad (3-30)$$

โดยที่

$$v = \frac{(\lambda^2 \kappa)}{\Psi \gamma}$$

### คุณสมบัติของพีซีเอ็มและครีปที่ใช้ในการวิเคราะห์

ในการคำนวณสมการข้างต้นจำเป็นต้องใช้ค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของพีซีเอ็มทั้ง 5 ชนิด ครีปอคูมิเนียม และครีปทองแดง สามารถดูได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 1 ค่าคุณสมบัติของพีซีเอ็ม

	Paraffin RT-35	Salt Hydrate (CaCl <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O)	Erythritol (C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>4</sub> )	Lauric acid (C <sub>12</sub> H <sub>24</sub> O <sub>2</sub> )	Palmitic acid (C <sub>16</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub> )
Melting Temperature (°C)	35	29	117	43.5	61.88
Latent Heat (kJ/kg)	157	170	339.8	187.21	180.96
Specific heat Capacity (kJ/kg/K)	1.8	2.06	2.25	2.18	2.03
Thermal Conductivity (W/m/K)	0.2	1.09	0.733	0.16	0.18
Density (kg/m <sup>3</sup> )	880	1,706	1,480	940	955.29
อ้างอิง	(Yang et al., 2016)	(Pan et al., 2018)	(Raymundo et al., 2015)	(Huang et al., 2021)	(Uma Maheswararao et al., 2022), (Streicher et al., 2005)

ตารางที่ 2 ค่าคุณสมบัติของครีบอลูมิเนียมและครีบทองแดง

	Aluminum fin	Copper fin
Specific heat Capacity (kJ/kg/K)	960	380
Thermal Conductivity (W/m/K)	180	400
Density (kg/m <sup>3</sup> )	2,713	8,920
อ้างอิง	(Lamberg and Siren, 2003)	(Mahdi et al., 2019)



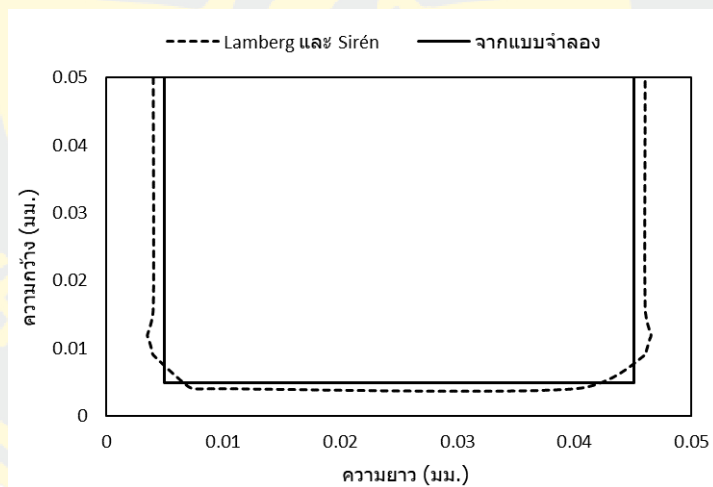
## บทที่ 4

### ผลลัพธ์และการวิเคราะห์

จากผลการถ่ายภาพอินฟราเรด 1 มิติของพีซีเอ็มในบทที่ 3 สามารถนำมาเขียนโปรแกรมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในโปรแกรม Microsoft excel ซึ่งจะได้ผลลัพธ์ ดังต่อไปนี้

#### การเปรียบเทียบแบบจำลองที่พัฒนากับแบบจำลอง 2 มิติ

จากแบบจำลองที่ได้พัฒนาขึ้นจะนำไปตรวจสอบความถูกต้อง โดยเปรียบเทียบกับแบบจำลอง 2 มิติ (Lamberg and Siren, 2003b) ขนาดของที่จัดเก็บพีซีเอ็ม คือ  $0.05 \times 0.05$  เมตร เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $13^\circ\text{C}$  และ  $T_m$  เท่ากับ  $28^\circ\text{C}$  เมื่อเวลาผ่านไป 1,085 วินาที ใช้พาราฟินและครีบอลูมิเนียมในการวิเคราะห์ ซึ่งจะได้ผลลัพธ์ดังนี้



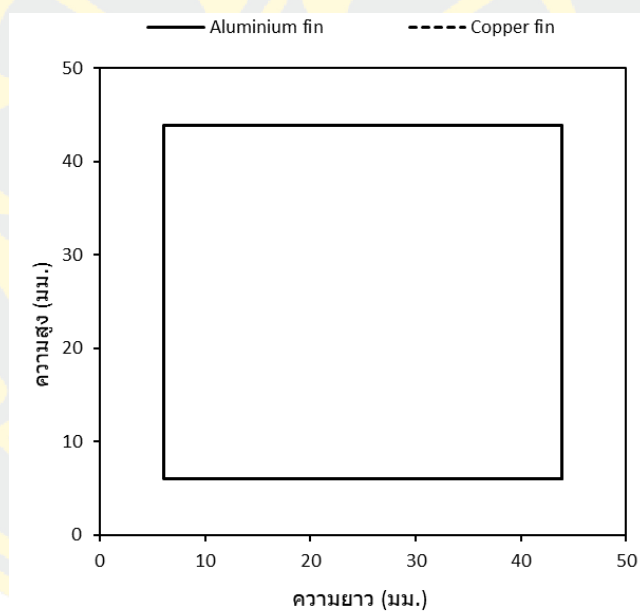
ภาพที่ 13 การแข็งตัวของพาราฟินที่เวลา 1,085 วินาที

จากภาพที่ 13 พบว่าค่า  $S_x$  ของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นและแบบจำลอง 2 มิติ มีค่าเท่ากับ 4.95 และ 4.2 มม. ตามลำดับ และ  $S_y$  มีค่าเท่ากับ 4.84 และ 4 มม. ตามลำดับ มีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 17.86% และ 21% ตามลำดับ ซึ่งจะมีค่าความคลาดเคลื่อนมากในระดับหนึ่ง เนื่องจากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นจะเป็นการวิเคราะห์การถ่ายอินฟราเรด 1 มิติจึงมีค่าความคลาดเคลื่อนมากกว่าแบบจำลองที่วิเคราะห์การถ่ายอินฟราเรดแบบ 2 มิติ ซึ่งจะมีความแม่นยำมากกว่า แต่แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นนั้นเป็นการวิเคราะห์แบบ 1 มิติ ซึ่งสามารถใช้งานได้ง่าย และได้ผลลัพธ์

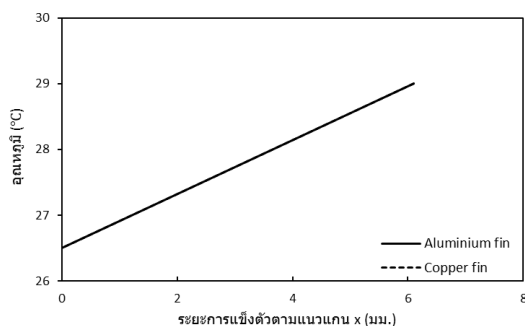
ในเบื้องต้นที่มีประโยชน์ในการพิจารณาและตัดสินใจบางอย่าง นอกจากนี้แบบจำลองและวิธีการแก้สมการเหล่านี้ สามารถป้อนเข้าสู่เครื่องคิดเลขระดับสูง รวมถึงป้อนใน โปรแกรม Microsoft excel ก็สามารถที่จะใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

### การเปรียบเทียบอิทธิพลของวัสดุของครีบท่อการแข็งตัวและการกระจายอุณหภูมิของพีซีเอ็ม

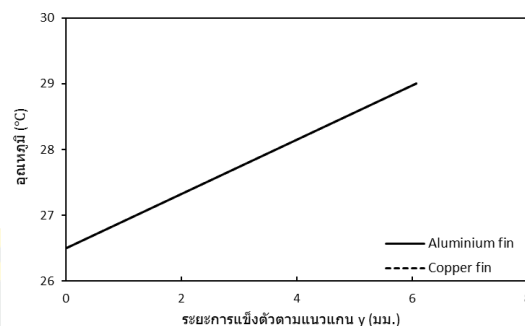
การเปรียบเทียบอิทธิพลของครีบท่อที่ทำจากวัสดุแตกต่างกันต่อการแข็งตัวและการกระจายอุณหภูมิของพีซีเอ็ม โดยวัสดุของครีบท่อที่ใช้ในการเปรียบเทียบ คือ ครีบท่อที่ทำจากอลูมิเนียมและครีบท่อที่ทำจากทองแดง และใช้เกลือไฮเดรตเป็นพีซีเอ็มในการวิเคราะห์ กำหนด  $T_w$  เท่ากับ  $26.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  เมื่อเวลาผ่านไป 2,000 วินาที จะได้ผลลัพธ์ดังนี้



(ก) การแข็งตัวของเกลือไฮเดรต



(ข) การกระจายอุณหภูมิตามแนวแกน x



(ค) การกระจายอุณหภูมิตามแนวแกน y

ภาพที่ 14 การแข็งตัวของเกลือไฮเดรตโดยใช้ครีบอลูมิเนียมและครีบทองแดง เมื่อเวลา 2,000 วินาที

โดยเมื่อพิจารณาภาพที่ 14(ก), 14(ข) และ 14(ค) พบว่าระยะการแข็งตัวของเกลือไฮเดรตมีค่า  $S_x$  เท่ากันทั้ง 2 ชนิด คือ 6.0999 มม. เนื่องจากค่า  $S_x$  จะเกิดขึ้นในบริเวณที่ 1 ซึ่งได้รับอิทธิพลจากอุณหภูมิผนังเท่านั้น และค่า  $S_y$  มีค่าที่ใกล้เคียงกัน คือ 6.0719 มม. สำหรับครีบอลูมิเนียม และ 6.0709 มม. สำหรับครีบทองแดง ซึ่งจะมีค่าความแตกต่างเท่ากับ 0.016 % ซึ่งมีค่าน้อยมาก โดยอิทธิพลของครีบทองแดงจะมีผลจากค่าการนำความร้อน ( $k$ ) ค่าความจุความร้อนจำเพาะ ( $c_p$ ) และค่าความหนาแน่น ( $\rho$ ) ของครีบทองแดงแต่ละชนิด โดยที่ทั้ง 3 ตัวแปรจะอยู่ในตัวแปร  $\alpha$  เมื่อค่า  $k$  สูง จะทำให้ค่า  $\alpha$  สูงขึ้นตามไปด้วย นั่นคือ มีการแพร่ความร้อนได้มากขึ้น ทำให้มีการกระจายอุณหภูมิในครีบทองแดงที่ดีขึ้น แต่เมื่อค่า  $\rho$  หรือ  $c_p$  มีค่าสูง จะทำให้ค่า  $\alpha$  ลดลง ทำให้การกระจายอุณหภูมิในครีบอลูมิเนียมและเนื่องจากผลลัพธ์ของอิทธิพลของครีบอลูมิเนียมและครีบทองแดงที่ได้จากแบบจำลองนั้นมีค่าใกล้เคียงกันมาก นอกจากนี้ครีบอลูมิเนียมยังมีราคาที่ถูกและเป็นที่ยอมรับในการใช้งานมากกว่า ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ครีบอลูมิเนียมในการวิเคราะห์

### อิทธิพลของอุณหภูมิผนังที่มีผลต่อระยะการแข็งตัวสำหรับพีซีเอ็มทั้ง 5 ชนิด

อิทธิพลของอุณหภูมิผนังต่อระยะการแข็งตัวของพีซีเอ็มทั้ง 5 ชนิดนั้น คำนวณจากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น โดยที่กำหนด  $T_w$  ห่างกัน  $2.5^\circ\text{C}$  เป็นจำนวน 6 อุณหภูมิ และเริ่มต้นจะใช้ค่า  $T_w$  เท่ากับ  $T_m - 2.5^\circ\text{C}$  จะได้ผลลัพธ์ดังนี้

#### 1. พาราฟิน (Paraffin RT-35)

จากภาพที่ 15 จะเป็นการแข็งตัวทั้งหมดของพาราฟินที่เวลาต่าง ๆ โดยเริ่มต้นจากภาพที่ 15(ก) จะเป็นการแข็งตัวที่เวลา 15,199 วินาที เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $20^\circ\text{C}$  พีซีเอ็มจะเกิดการแข็งตัวทั้งหมด

ตามแนวแกน x เป็นเส้นตรงในแนวตั้ง เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $22.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะมีระยะการแข็งตัวเป็นลำดับที่ 2 โดยจะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 22.92 และ 22.45 มม. ตามลำดับ เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะมีระยะการแข็งตัวเป็นลำดับที่ 3 โดยมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 20.59 และ 20.24 มม. ตามลำดับ เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $27.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะมีระยะการแข็งตัวเป็นลำดับที่ 4 โดยจะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 17.91 และ 17.68 มม. ตามลำดับ เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะมีระยะการแข็งตัวเป็นลำดับที่ 5 โดยจะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 14.69 และ 14.59 มม. ตามลำดับ และเมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $32.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะมีระยะการแข็งตัวเป็นลำดับสุดท้าย โดยจะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 10.44 และ 10.39 มม. ตามลำดับ

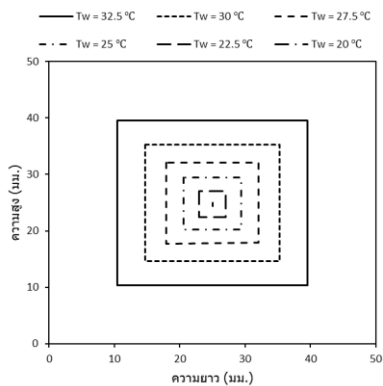
ในเวลาต่อมา จะเป็นดังภาพที่ 15(ข) จะเป็นการแข็งตัวที่เวลา 18,081 วินาที เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $22.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  พีซีเอ็มจะเกิดการแข็งตัวทั้งหมดตามแนวแกน x โดยที่จะแข็งตัวทับกราฟการแข็งตัวของพาราฟินที่เวลา 15,199 วินาที ที่  $T_w$  เท่ากับ  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  ที่เกิดการแข็งตัวไปก่อนหน้า เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 22.46 และ 22.08 มม. ตามลำดับ เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $27.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 19.54 และ 19.29 มม. ตามลำดับ เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 16.03 และ 15.88 มม. ตามลำดับ และเมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $32.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 11.39 และ 11.33 มม. ตามลำดับ

ในเวลาต่อมา จะเป็นดังภาพที่ 15(ค) จะเป็นการแข็งตัวที่เวลา 22,401 วินาที เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  พีซีเอ็มจะเกิดการแข็งตัวทั้งหมดตามแนวแกน x เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $27.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 21.75 และ 21.47 มม. ตามลำดับ เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 17.84 และ 17.68 มม. ตามลำดับ และเมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $32.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 12.67 และ 12.62 มม. ตามลำดับ

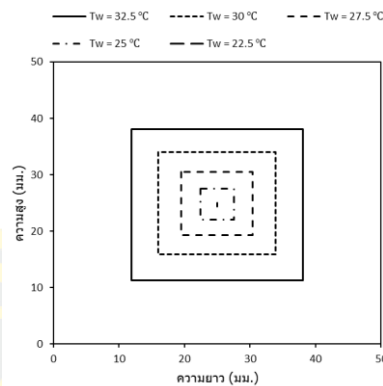
ในเวลาต่อมา จะเป็นดังภาพที่ 15(ง) จะเป็นการแข็งตัวที่เวลา 29,600 วินาที เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $27.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  พีซีเอ็มจะเกิดการแข็งตัวทั้งหมดตามแนวแกน x เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 20.51 และ 20.33 มม. ตามลำดับ และเมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $32.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 14.57 และ 14.5 มม. ตามลำดับ

ในเวลาต่อมา จะเป็นดังภาพที่ 15(จ) จะเป็นการแข็งตัวที่เวลา 43,994 วินาที เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  พีซีเอ็มจะเกิดการแข็งตัวทั้งหมด โดยจะแข็งตัวตามแนวแกน x และเมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $32.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 17.76 และ 17.68 มม. ตามลำดับ

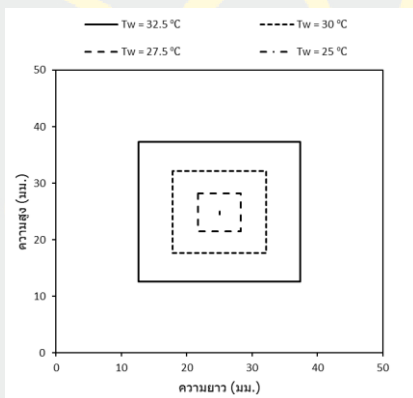
ในเวลาต่อมา จะเป็นดังภาพที่ 15(ฉ) จะเป็นการแข็งตัวที่เวลา 87,172 วินาที เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $32.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  พีซีเอ็มจะเกิดการแข็งตัวทั้งหมด



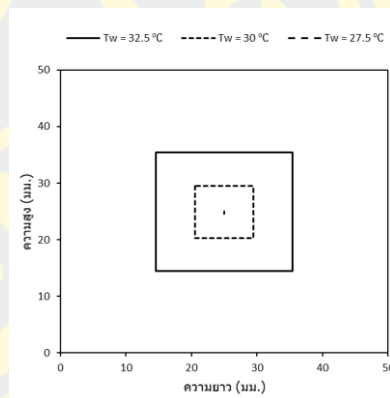
(ก) ที่เวลา 15,199 วินาที



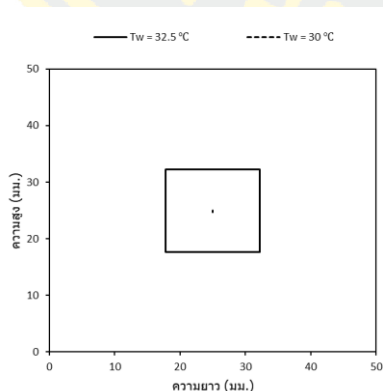
(ข) ที่เวลา 18,081 วินาที



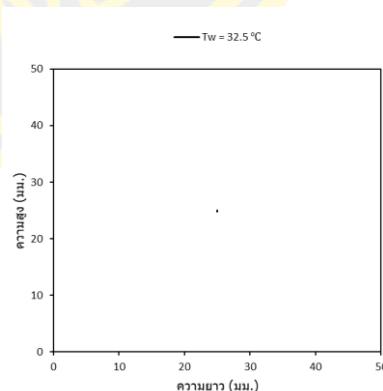
(ค) ที่เวลา 22,401 วินาที



(ง) ที่เวลา 29,600 วินาที



(จ) ที่เวลา 43,994 วินาที



(ฉ) ที่เวลา 87,172 วินาที

ภาพที่ 15 การแข็งตัวของพาราฟินทั้งหมดที่เวลาต่าง ๆ

## 2. เกลือไฮเดรต (Salt hydrate)

จากภาพที่ 16 จะเป็นการแข็งตัวทั้งหมดของเกลือไฮเดรตที่เวลาต่าง ๆ จะพบว่าเวลาในการแข็งตัวของเกลือไฮเดรตจะน้อยกว่าพาราฟิน โดยเริ่มต้นจากภาพที่ 16(ก) จะเป็นการแข็งตัวที่เวลา 5,872 วินาที เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $14\text{ }^{\circ}\text{C}$  พีซีเอ็มจะเกิดการแข็งตัวทั้งหมดตามแนวแกน x เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $16.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะมีระยะการแข็งตัวเป็นลำดับที่ 2 โดยจะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 22.93 และ 22.45 มม. ตามลำดับ เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $19\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะมีระยะการแข็งตัวเป็นลำดับที่ 3 โดยจะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 20.6 และ 20.25 มม. ตามลำดับ เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $21.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะมีระยะการแข็งตัวเป็นลำดับที่ 4 โดยจะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 17.93 และ 17.69 มม. ตามลำดับ เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $24\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะมีระยะการแข็งตัวเป็นลำดับที่ 5 โดยจะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 14.71 และ 14.58 มม. ตามลำดับ และเมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $26.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะมีระยะการแข็งตัวเป็นลำดับสุดท้าย โดยจะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 10.45 และ 10.41 มม. ตามลำดับ

ในเวลาต่อมา จะเป็นดังภาพที่ 16(ข) จะเป็นการแข็งตัวที่เวลา 6,982 วินาที เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $16.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  พีซีเอ็มจะเกิดการแข็งตัวทั้งหมดตามแนวแกน x เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $19\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 22.47 และ 22.09 มม. ตามลำดับ เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $21.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 19.55 และ 19.3 มม. ตามลำดับ เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $24\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 16.04 และ 15.89 มม. ตามลำดับ และเมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $26.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 11.4 และ 11.35 มม. ตามลำดับ

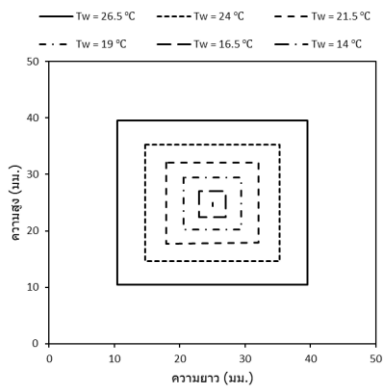
ในเวลาต่อมา จะเป็นดังภาพที่ 16(ค) จะเป็นการแข็งตัวที่เวลา 8,646 วินาที เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $19\text{ }^{\circ}\text{C}$  พีซีเอ็มจะเกิดการแข็งตัวทั้งหมดตามแนวแกน x เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $21.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 21.85 และ 21.48 มม. ตามลำดับ เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $24\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 17.85 และ 17.69 มม. ตามลำดับ และเมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $26.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 12.68 และ 12.63 มม. ตามลำดับ

ในเวลาต่อมา จะเป็นดังภาพที่ 16(ง) จะเป็นการแข็งตัวที่เวลา 11,419 วินาที เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $21.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  พีซีเอ็มจะเกิดการแข็งตัวทั้งหมดตามแนวแกน x เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $24\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 20.51 และ 20.34 มม. ตามลำดับ และเมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $26.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 14.58 และ 14.51 มม. ตามลำดับ

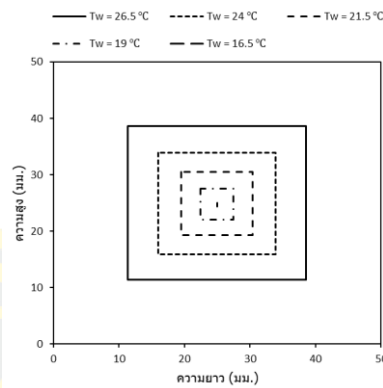
ในเวลาต่อมา จะเป็นดังภาพที่ 16(จ) จะเป็นการแข็งตัวที่เวลา 16,963 วินาที เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $24\text{ }^{\circ}\text{C}$  พีซีเอ็มจะเกิดการแข็งตัวทั้งหมด โดยจะแข็งตัวตามแนวแกน x และเมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $26.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 17.76 และ 17.69 มม. ตามลำดับ

ในเวลาต่อมา จะเป็นดังภาพที่ 16(ฉ) จะเป็นการแข็งตัวที่เวลา 33,594 วินาที เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $26.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  พีซีเอ็มจะเกิดการแข็งตัวทั้งหมด

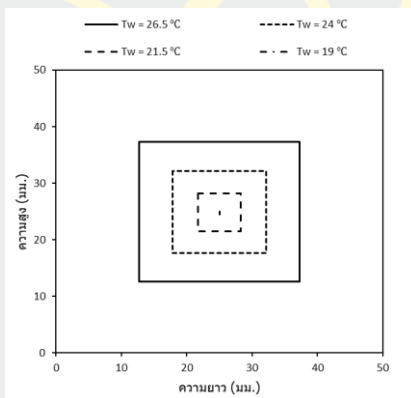




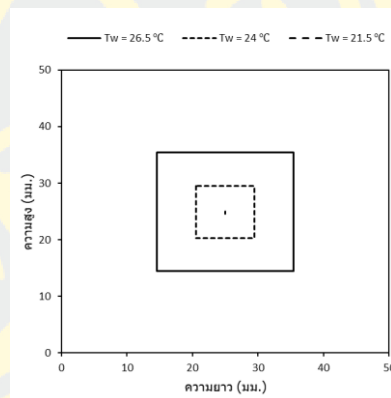
(ก) ที่เวลา 5,872 วินาที



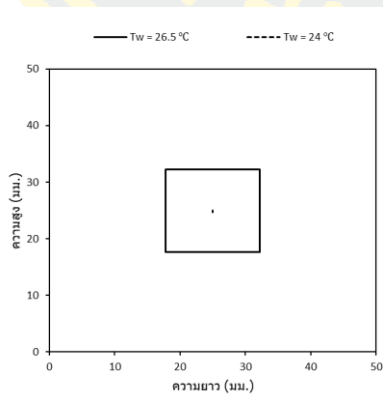
(ข) ที่เวลา 6,982 วินาที



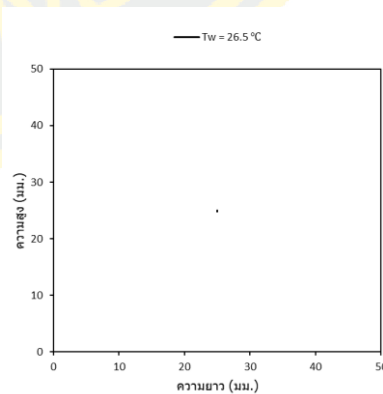
(ค) ที่เวลา 8,646 วินาที



(ง) ที่เวลา 11,419 วินาที



(จ) ที่เวลา 16,963 วินาที



(ฉ) ที่เวลา 33,594 วินาที

ภาพที่ 16 การแข็งตัวของเกลือไฮเดรตทั้งหมดที่เวลาต่าง ๆ

### 3. น้ำตาลแอลกอฮอล์ : อิริทริทอล (Sugar Alcohols : Erythritol)

จากภาพที่ 17 จะเป็นการแข็งตัวทั้งหมดของอิริทริทอลที่เวลาต่าง ๆ จะพบว่าระยะเวลาในการแข็งตัวจะใช้น้อยกว่าพาราฟินแต่มากกว่าเกลือไฮเดรต โดยเริ่มต้นจากภาพที่ 17(ก) จะเป็นการแข็งตัวที่เวลา 14,761 วินาที เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $102^{\circ}\text{C}$  โดยที่พีซีเอ็มจะเกิดการแข็งตัวทั้งหมดตามแนวแกน x เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $104.5^{\circ}\text{C}$  จะมีระยะการแข็งตัวเป็นลำดับที่ 2 โดยจะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 22.88 และ 22.61 มม. ตามลำดับ เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $107^{\circ}\text{C}$  จะมีระยะการแข็งตัวเป็นลำดับที่ 3 โดยจะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 20.52 และ 20.32 มม. ตามลำดับ เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $109.5^{\circ}\text{C}$  จะมีระยะการแข็งตัวเป็นลำดับที่ 4 โดยจะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 17.82 และ 17.69 มม. ตามลำดับ เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $112^{\circ}\text{C}$  จะมีระยะการแข็งตัวเป็นลำดับที่ 5 โดยมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 14.59 และ 14.52 มม. ตามลำดับ และเมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $114.5^{\circ}\text{C}$  จะมีระยะการแข็งตัวเป็นลำดับสุดท้าย โดยจะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 10.34 และ 10.32 มม. ตามลำดับ

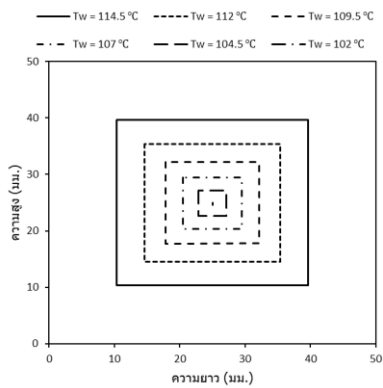
ในเวลาต่อมา จะเป็นดังภาพที่ 17(ข) จะเป็นการแข็งตัวที่เวลา 17,621 วินาที เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $104.5^{\circ}\text{C}$  พีซีเอ็มจะเกิดการแข็งตัวทั้งหมดตามแนวแกน x เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $107^{\circ}\text{C}$  จะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 22.42 และ 22.02 มม. ตามลำดับ เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $109.5^{\circ}\text{C}$  จะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 19.47 และ 19.33 มม. ตามลำดับ เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $112^{\circ}\text{C}$  จะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 15.94 และ 15.86 มม. ตามลำดับ เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $114.5^{\circ}\text{C}$  จะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 11.3 และ 11.27 มม. ตามลำดับ

ในเวลาต่อมา จะเป็นดังภาพที่ 17(ค) จะเป็นการแข็งตัวที่เวลา 21,910 วินาที เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $107^{\circ}\text{C}$  พีซีเอ็มจะเกิดการแข็งตัวทั้งหมดตามแนวแกน x เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $109.5^{\circ}\text{C}$  จะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 21.71 และ 21.55 มม. ตามลำดับ เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $112^{\circ}\text{C}$  จะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 17.77 และ 17.69 มม. ตามลำดับ และเมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $114.5^{\circ}\text{C}$  จะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 12.6 และ 12.57 มม. ตามลำดับ

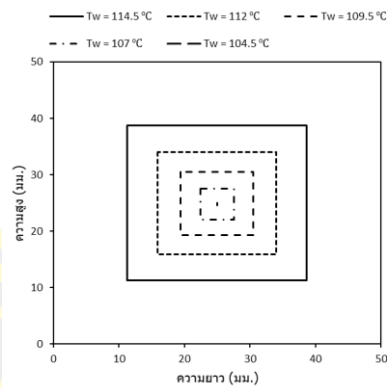
ในเวลาต่อมา จะเป็นดังภาพที่ 17(ง) จะเป็นการแข็งตัวที่เวลา 29,058 วินาที เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $109.5^{\circ}\text{C}$  พีซีเอ็มจะเกิดการแข็งตัวทั้งหมดตามแนวแกน x เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $112^{\circ}\text{C}$  จะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 20.47 และ 20.37 มม. ตามลำดับ และเมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $114.5^{\circ}\text{C}$  จะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 14.51 และ 14.48 มม. ตามลำดับ

ในเวลาต่อมาจะเป็นดังภาพที่ 17(จ) จะเป็นการแข็งตัวที่เวลา 43,352 วินาที เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $112^{\circ}\text{C}$  พีซีเอ็มจะเกิดการแข็งตัวทั้งหมดโดยจะแข็งตัวตามแนวแกน x และเมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $114.5^{\circ}\text{C}$  จะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 17.73 และ 17.69 มม. ตามลำดับ

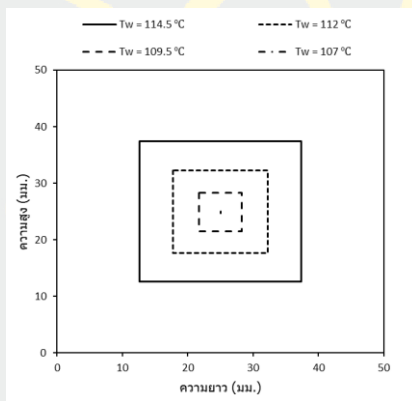
ในเวลาต่อมาจะเป็นดังภาพที่ 17(ฉ) จะเป็นการแข็งตัวที่เวลา 86,234 วินาที เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $114.5^{\circ}\text{C}$  พีซีเอ็มจะเกิดการแข็งตัวทั้งหมด



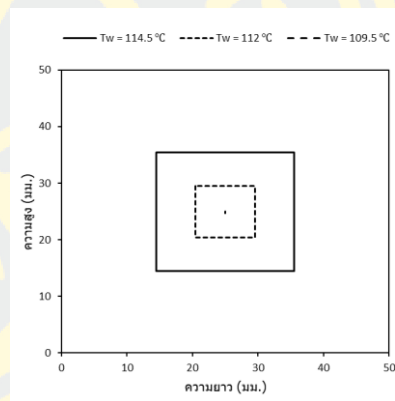
(ก) ที่เวลา 14,761 วินาที



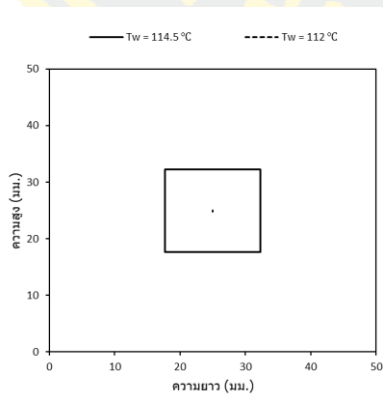
(ข) ที่เวลา 17,621 วินาที



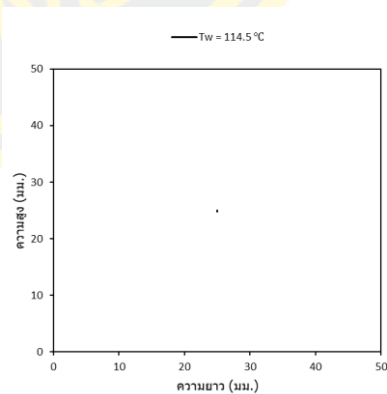
(ค) ที่เวลา 21,910 วินาที



(ง) ที่เวลา 29,058 วินาที



(จ) ที่เวลา 43,352 วินาที



(ฉ) ที่เวลา 86,234 วินาที

ภาพที่ 17 การแข็งตัวของอิทธิทรินทอลทั้งหมดที่เวลาต่าง ๆ

#### 4. กรดไขมันลอริก (Lauric acid)

จากภาพที่ 18 จะเป็นการแข็งตัวทั้งหมดของกรดไขมันลอริกที่เวลาต่าง ๆ พบว่าใช้เวลาในการแข็งตัวมากที่สุด โดยเริ่มต้นจากภาพที่ 18(ก) จะเป็นการแข็งตัวที่เวลา 24,219 วินาที เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $28.5^{\circ}\text{C}$  พีซีเอ็มจะเกิดการแข็งตัวทั้งหมดตามแนวแกน x เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $31^{\circ}\text{C}$  จะมีระยะการแข็งตัวเป็นลำดับที่ 2 โดยจะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 22.92 และ 22.44 มม. ตามลำดับ เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $33.5^{\circ}\text{C}$  จะมีระยะการแข็งตัวเป็นลำดับที่ 3 โดยจะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 20.6 และ 20.24 มม. ตามลำดับ เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $36^{\circ}\text{C}$  จะมีระยะการแข็งตัวเป็นลำดับที่ 4 โดยจะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 17.92 และ 17.68 มม. ตามลำดับ เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $38.5^{\circ}\text{C}$  จะมีระยะการแข็งตัวเป็นลำดับที่ 5 โดยจะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 14.7 และ 14.57 มม. ตามลำดับ และเมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $41^{\circ}\text{C}$  จะมีระยะการแข็งตัวเป็นลำดับสุดท้าย โดยจะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 10.44 และ 10.39 มม. ตามลำดับ

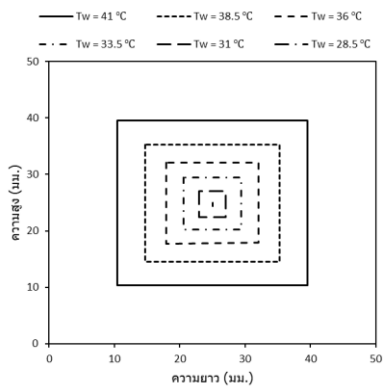
ในเวลาต่อมา จะเป็นดังภาพที่ 18(ข) จะเป็นการแข็งตัวที่เวลา 28,807 วินาที เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $31^{\circ}\text{C}$  พีซีเอ็มจะเกิดการแข็งตัวทั้งหมดตามแนวแกน x เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $33.5^{\circ}\text{C}$  จะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 22.46 และ 22.08 มม. ตามลำดับ เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $36^{\circ}\text{C}$  จะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 19.54 และ 19.28 มม. ตามลำดับ เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $38.5^{\circ}\text{C}$  จะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 16.03 และ 15.89 มม. ตามลำดับ และเมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $41^{\circ}\text{C}$  จะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 11.39 และ 11.34 มม. ตามลำดับ

ในเวลาต่อมาจะเป็นดังภาพที่ 18(ค) จะเป็นการแข็งตัวที่เวลา 35,685 วินาที เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $33.5^{\circ}\text{C}$  พีซีเอ็มจะเกิดการแข็งตัวทั้งหมดตามแนวแกน x เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $36^{\circ}\text{C}$  จะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 21.75 และ 21.46 มม. ตามลำดับ เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $38.5^{\circ}\text{C}$  จะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 17.84 และ 17.68 มม. ตามลำดับ และเมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $41^{\circ}\text{C}$  จะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 12.68 และ 12.62 มม. ตามลำดับ

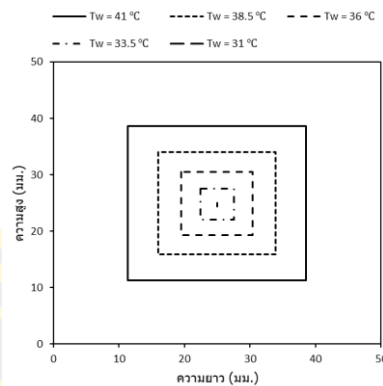
ในเวลาต่อมาจะเป็นดังภาพที่ 18(ง) จะเป็นการแข็งตัวที่เวลา 47,147 วินาที เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $36^{\circ}\text{C}$  พีซีเอ็มจะเกิดการแข็งตัวทั้งหมดตามแนวแกน x เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $38.5^{\circ}\text{C}$  จะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 20.51 และ 20.32 มม. ตามลำดับ และเมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $41^{\circ}\text{C}$  จะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 14.57 และ 14.5 มม. ตามลำดับ

ในเวลาต่อมาจะเป็นดังภาพที่ 18(จ) จะเป็นการแข็งตัวที่เวลา 70,066 วินาที เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $38.5^{\circ}\text{C}$  พีซีเอ็มจะเกิดการแข็งตัวทั้งหมดโดยจะแข็งตัวตามแนวแกน x และเมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $41^{\circ}\text{C}$  จะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 17.76 และ 17.68 มม. ตามลำดับ

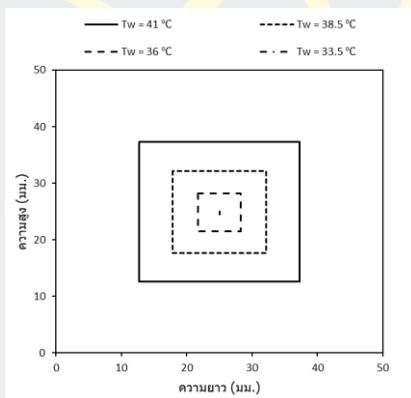
ในเวลาต่อมาจะเป็นดังภาพที่ 18(ฉ) จะเป็นการแข็งตัวที่เวลา 138,812 วินาที เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $41^{\circ}\text{C}$  พีซีเอ็มจะเกิดการแข็งตัวทั้งหมด



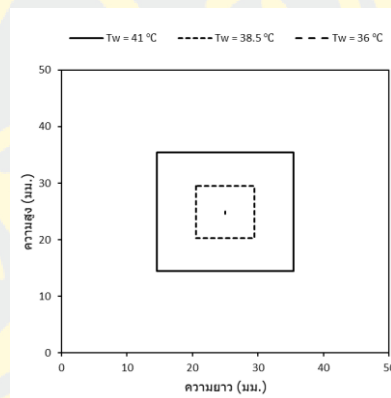
(ก) ที่เวลา 24,219 วินาที



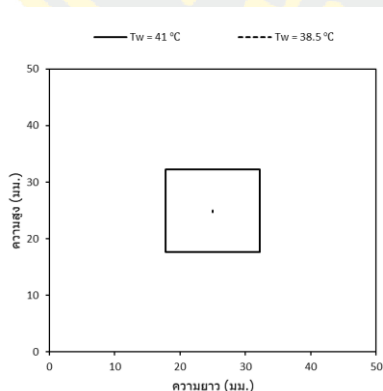
(ข) ที่เวลา 28,807 วินาที



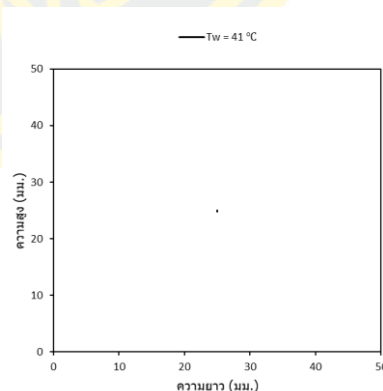
(ค) ที่เวลา 35,685 วินาที



(ง) ที่เวลา 47,147 วินาที



(จ) ที่เวลา 70,066 วินาที



(ฉ) ที่เวลา 138,812 วินาที

ภาพที่ 18 การแข็งตัวของกรดไขมันลอริกทั้งหมดที่เวลาต่าง ๆ

### 5. กรดไขมันปาล์มิติก (Palmitic acid)

จากภาพที่ 19 จะเป็นการแข็งตัวทั้งหมดของกรดไขมันปาล์มิติกที่เวลาต่าง ๆ จะพบว่า เวลาในการแข็งตัวจะใช้เวลามากกว่าพาราฟิน เกลือไฮเดรตและอีริทริทอล แต่น้อยกว่ากรดลอริก โดยเริ่มจากภาพที่ 19(ก) จะเป็นการแข็งตัวที่เวลา 21,107 วินาที เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $46.88\text{ }^{\circ}\text{C}$  พีซีเอ็ม จะเกิดการแข็งตัวทั้งหมดตามแนวแกน x เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $49.38\text{ }^{\circ}\text{C}$  มีระยะการแข็งตัวเป็นลำดับที่ 2 โดยจะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 22.92 และ 22.46 มม. ตามลำดับ เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $51.88\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะมีระยะการแข็งตัวเป็นลำดับที่ 3 โดยจะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 20.59 และ 20.25 มม. ตามลำดับ เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $54.38\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะมีระยะการแข็งตัวเป็นลำดับที่ 4 โดยจะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 17.79 และ 17.68 มม. ตามลำดับ เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $56.88\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะมีระยะการแข็งตัวเป็นลำดับที่ 5 โดยจะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 14.69 และ 14.56 มม. ตามลำดับ และเมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $59.38\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะมีระยะการแข็งตัวเป็นลำดับสุดท้าย โดยจะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 10.43 และ 10.39 มม. ตามลำดับ

ในเวลาต่อมา จะเป็นดังภาพที่ 19(ข) เป็นการแข็งตัวที่เวลา 25,112 วินาที เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $49.38\text{ }^{\circ}\text{C}$  พีซีเอ็มจะเกิดการแข็งตัวทั้งหมดตามแนวแกน x เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $51.88\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 22.46 และ 22.09 มม. ตามลำดับ เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $54.38\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 19.54 และ 19.29 มม. ตามลำดับ เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $56.88\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 16.02 และ 15.88 มม. ตามลำดับ เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $59.38\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 11.38 และ 11.33 มม. ตามลำดับ

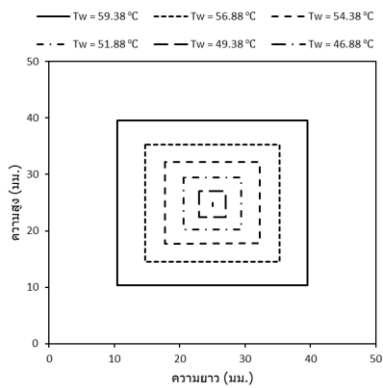
ในเวลาต่อมา จะเป็นดังภาพที่ 19(ค) จะเป็นการแข็งตัวที่เวลา 31,119 วินาที เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $51.88\text{ }^{\circ}\text{C}$  พีซีเอ็มจะเกิดการแข็งตัวทั้งหมดตามแนวแกน x เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $54.38\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 21.75 และ 21.47 มม. ตามลำดับ เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $56.88\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 17.84 และ 17.68 มม. ตามลำดับ และเมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $59.38\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 12.67 และ 12.61 มม. ตามลำดับ

ในเวลาต่อมา จะเป็นดังภาพที่ 19(ง) จะเป็นการแข็งตัวที่เวลา 41,127 วินาที เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $54.38\text{ }^{\circ}\text{C}$  พีซีเอ็มจะเกิดการแข็งตัวทั้งหมดตามแนวแกน x เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $56.88\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 20.5 และ 20.33 มม. ตามลำดับ และเมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $59.38\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 14.57 และ 14.5 มม. ตามลำดับ

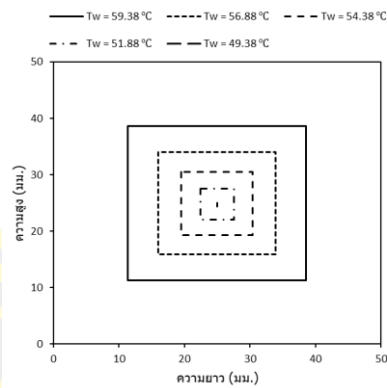
ในเวลาต่อมา จะเป็นดังภาพที่ 19(จ) จะเป็นการแข็งตัวที่เวลา 61,139 วินาที เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $56.88\text{ }^{\circ}\text{C}$  พีซีเอ็มจะเกิดการแข็งตัวทั้งหมดโดยจะแข็งตัวตามแนวแกน x เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $59.38\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 17.76 และ 17.68 มม. ตามลำดับ

ในเวลาต่อมา จะเป็นดังภาพที่ 19(ฉ) จะเป็นการแข็งตัวที่เวลา 121,167 วินาที เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $59.38\text{ }^{\circ}\text{C}$  พีซีเอ็มจะเกิดการแข็งตัวทั้งหมด

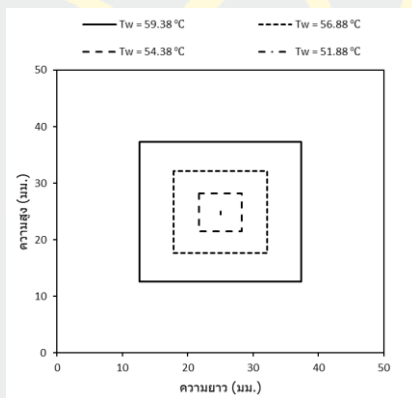




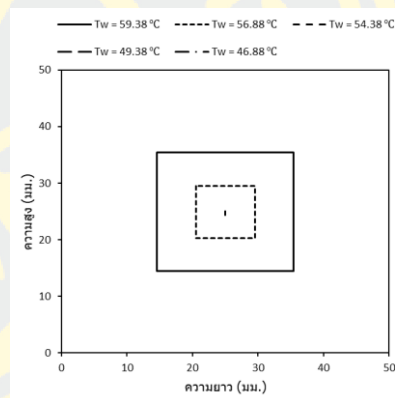
(ก) ที่เวลา 21,107 วินาที



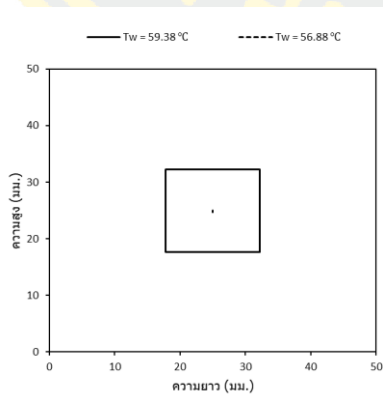
(ข) ที่เวลา 25,112 วินาที



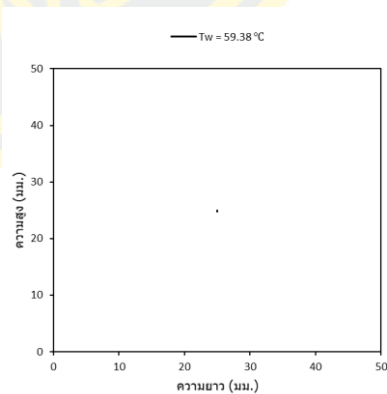
(ค) ที่เวลา 31,119 วินาที



(ง) ที่เวลา 41,127 วินาที



(จ) ที่เวลา 61,139 วินาที



(ฉ) ที่เวลา 121,167 วินาที

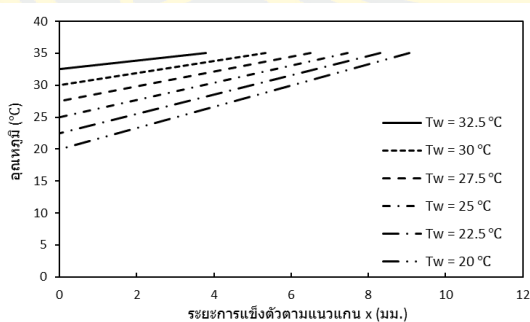
ภาพที่ 19 การแข็งตัวของกรดไขมันปาล์มติกทั้งหมดที่เวลาต่าง ๆ

## อิทธิพลของอุณหภูมิผนังที่มีผลต่อการกระจายอุณหภูมิสำหรับพีซีเอ็มทั้ง 5 ชนิด

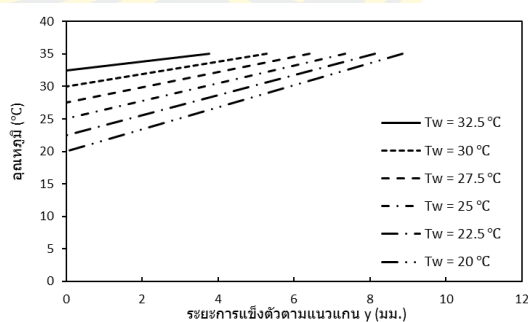
การกระจายอุณหภูมิสำหรับพีซีเอ็มทั้ง 5 ชนิดจะได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิผนัง ทั้งตามแนวแกน x และแกน y โดยจะวิเคราะห์ที่เมื่อเวลาผ่านไป 2,000 วินาที  $T_w$  เท่ากับ  $T_m = 2.5^\circ\text{C}$  เป็นจำนวน 6 อุณหภูมิ จะได้ผลลัพธ์ดังนี้

### 1. พาราฟิน (Paraffin RT-35)

การกระจายอุณหภูมิของพาราฟินที่เวลา 2,000 วินาที จะเป็นดังภาพที่ 20 โดยภาพที่ 20(ก) จะเป็นการกระจายตัวตามแนวแกน x และภาพที่ 20(ข) จะเป็นการกระจายตัวตามแนวแกน y เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $20^\circ\text{C}$  จะเกิดการกระจายตัวของอุณหภูมิมากที่สุด ทำให้เกิดการแข็งตัวมากที่สุด ทั้งในแกน x และ y นั่นคือ มีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 9.07 และ 8.85 มม. ตามลำดับ เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $22.5^\circ\text{C}$  จะเกิดการกระจายตัวของอุณหภูมิเป็นลำดับที่ 2 นั่นคือ มีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 8.31 และ 8.14 มม. ตามลำดับ เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $25^\circ\text{C}$  จะเกิดการกระจายตัวของอุณหภูมิเป็นลำดับที่ 3 นั่นคือ มีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 7.47 และ 7.34 มม. ตามลำดับ เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $27.5^\circ\text{C}$  จะเกิดการกระจายตัวของอุณหภูมิเป็นลำดับที่ 4 นั่นคือ มีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 6.5 และ 6.41 มม. ตามลำดับ เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $30^\circ\text{C}$  จะเกิดการกระจายตัวของอุณหภูมิเป็นลำดับที่ 5 นั่นคือ มีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 5.33 และ 5.28 มม. ตามลำดับ และเมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $32.5^\circ\text{C}$  เกิดการกระจายตัวของอุณหภูมิเป็นลำดับที่ 6 นั่นคือ มีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 3.79 และ 3.77 มม. ตามลำดับ



(ก) ตามแนวแกน x

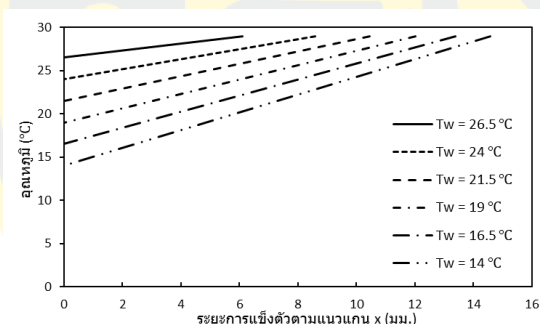


(ข) ตามแนวแกน y

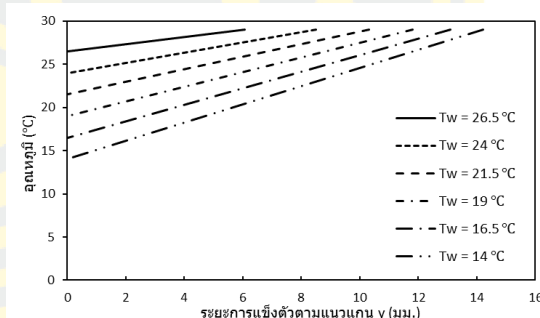
ภาพที่ 20 การกระจายอุณหภูมิของพาราฟิน

## 2. เกลือไฮเดรต (Salt Hydrate)

การกระจายอุณหภูมิของเกลือไฮเดรตที่เวลา 2,000 วินาที จะเป็นดังภาพที่ 21 โดยภาพที่ 21(ก) จะเป็นการกระจายตัวตามแนวแกน x และภาพที่ 21(ข) จะเป็นการกระจายตัวตามแนวแกน y เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $14\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะเกิดการกระจายตัวของอุณหภูมิมากที่สุด ทำให้เกิดการแข็งตัวมากที่สุด ทั้งในแกน x และ y นั่นคือ มีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 14.59 และ 14.23 มม. ตามลำดับ เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $16.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะเกิดการกระจายตัวของอุณหภูมิเป็นลำดับที่ 2 นั่นคือ มีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 13.38 และ 13.1 มม. ตามลำดับ เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $19\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะเกิดการกระจายตัวของอุณหภูมิเป็นลำดับที่ 3 นั่นคือ มีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 12.02 และ 11.82 มม. ตามลำดับ เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $21.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะเกิดการกระจายตัวของอุณหภูมิเป็นลำดับที่ 4 นั่นคือ มีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 10.46 และ 10.32 มม. ตามลำดับ เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $24\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะเกิดการกระจายตัวของอุณหภูมิเป็นลำดับที่ 5 นั่นคือ มีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 8.58 และ 8.51 มม. ตามลำดับ และเมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $26.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะเกิดการกระจายตัวของอุณหภูมิเป็นลำดับที่ 6 นั่นคือ มีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 6.1 และ 6.07 มม. ตามลำดับ



(ก) ตามแนวแกน x

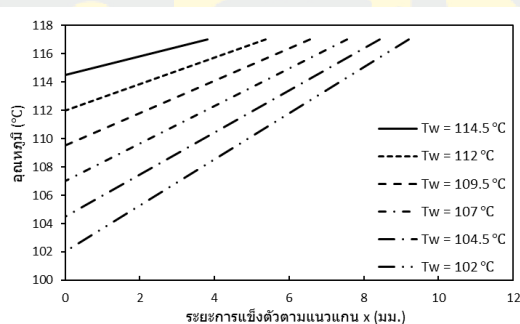


(ข) ตามแนวแกน y

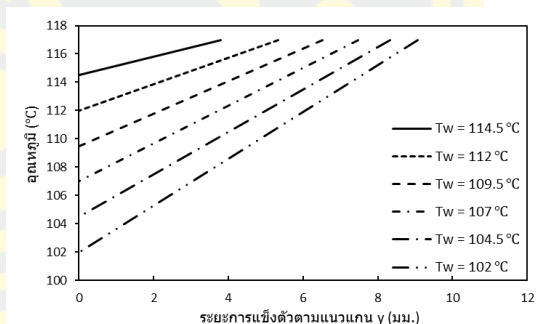
ภาพที่ 21 การกระจายอุณหภูมิของเกลือไฮเดรต

### 3. น้ำตาลแอลกอฮอล์ : อีริทริทอล (Sugar Alcohols : Erythritol)

การกระจายอุณหภูมิของอีริทริทอลที่เวลา 2,000 วินาที จะเป็นดังภาพที่ 22 โดยภาพที่ 22(ก) จะเป็นการกระจายตัวตามแนวแกน x และภาพที่ 22(ข) จะเป็นการกระจายตัวตามแนวแกน y เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $102\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะเกิดการกระจายตัวของอุณหภูมิมากที่สุด ทำให้เกิดการแข็งตัวมากที่สุด ทั้งในแกน x และ y นั่นคือ มีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 9.2 และ 9.07 มม. ตามลำดับ เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $104.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะเกิดการกระจายตัวของอุณหภูมิเป็นลำดับที่ 2 นั่นคือ มีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 8.42 และ 8.32 มม. ตามลำดับ เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $107\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะเกิดการกระจายตัวของอุณหภูมิเป็นลำดับที่ 3 นั่นคือ มีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 7.55 และ 7.48 มม. ตามลำดับ เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $109.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะเกิดการกระจายตัวของอุณหภูมิเป็นลำดับที่ 4 นั่นคือ มีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 6.56 และ 6.51 มม. ตามลำดับ เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $112\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะเกิดการกระจายตัวของอุณหภูมิเป็นลำดับที่ 5 นั่นคือ มีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 5.37 และ 5.34 มม. ตามลำดับ และเมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $114.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะเกิดการกระจายตัวของอุณหภูมิเป็นลำดับที่ 6 นั่นคือ มีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 3.81 และ 3.8 มม. ตามลำดับ



(ก) ตามแนวแกน x

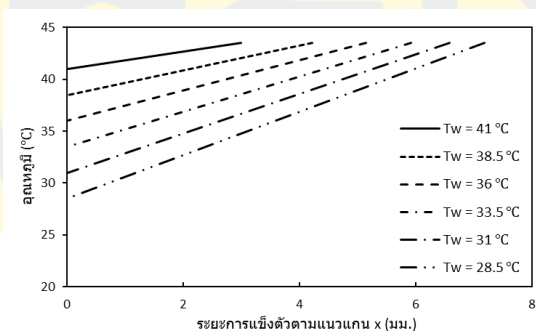


(ข) ตามแนวแกน y

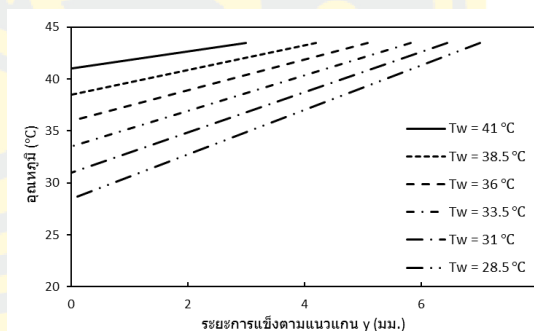
ภาพที่ 22 การกระจายอุณหภูมิของอีริทริทอล

#### 4. กรดไขมันลอริก (Lauric Acid)

การกระจายอุณหภูมิของกรดลอริกที่เวลา 2,000 วินาที จะเป็นดังภาพที่ 23 โดยภาพที่ 23(ก) จะเป็นการกระจายตัวตามแนวแกน x และภาพที่ 23(ข) จะเป็นการกระจายตัวตามแนวแกน y เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $28.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะเกิดการกระจายตัวของอุณหภูมิมากที่สุด ทำให้เกิดการแข็งตัวมากที่สุด ทั้งในแกน x และ y นั่นคือ มีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 7.18 และ 7.01 มม. ตามลำดับ เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $31\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะเกิดการกระจายตัวของอุณหภูมิเป็นลำดับที่ 2 นั่นคือ มีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 6.59 และ 6.45 มม. ตามลำดับ เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $33.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะเกิดการกระจายตัวของอุณหภูมิเป็นลำดับที่ 3 นั่นคือ มีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 5.92 และ 5.82 มม. ตามลำดับ เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $36\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะเกิดการกระจายตัวของอุณหภูมิเป็นลำดับที่ 4 นั่นคือ มีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 5.15 และ 5.08 มม. ตามลำดับ เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $38.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะเกิดการกระจายตัวของอุณหภูมิมากเป็นลำดับที่ 5 นั่นคือ มีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 4.22 และ 4.19 มม. ตามลำดับ และเมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $41\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะเกิดการกระจายตัวของอุณหภูมิเป็นลำดับที่ 6 นั่นคือ มีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 3 และ 2.99 มม. ตามลำดับ



(ก) ตามแนวแกน x

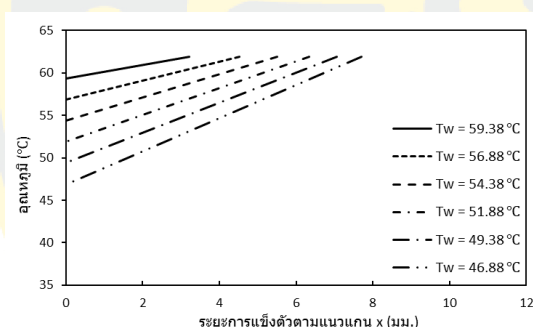


(ข) ตามแนวแกน y

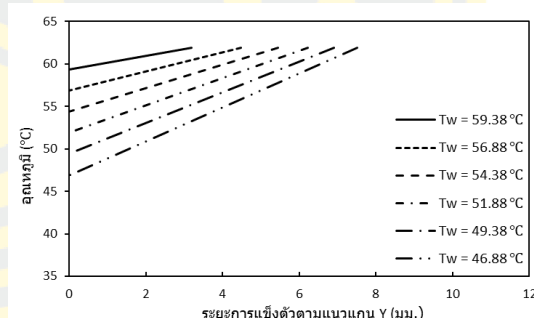
ภาพที่ 23 การกระจายอุณหภูมิของกรดลอริก

### 5. กรดไขมันปาล์มติก (Palmitic Acid)

การกระจายอุณหภูมิของกรดปาล์มติกที่เวลา 2,000 วินาที จะเป็นดังภาพที่ 24 โดยภาพที่ 24(ก) จะเป็นการกระจายตัวตามแนวแกน x และภาพที่ 24(ข) จะเป็นการกระจายตัวตามแนวแกน y เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $46.88^\circ\text{C}$  จะเกิดการกระจายตัวของอุณหภูมิมากที่สุด ทำให้เกิดการแข็งตัวมากที่สุด ทั้งในแกน x และ y นั่นคือ มีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 7.7 และ 7.51 มม. ตามลำดับ เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $49.38^\circ\text{C}$  จะเกิดการกระจายตัวของอุณหภูมิเป็นลำดับที่ 2 นั่นคือ มีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 7.06 และ 6.91 มม. ตามลำดับ เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $51.88^\circ\text{C}$  จะเกิดการกระจายตัวของอุณหภูมิเป็นลำดับที่ 3 นั่นคือ มีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 6.34 และ 6.23 มม. ตามลำดับ เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $54.38^\circ\text{C}$  จะเกิดการกระจายตัวของอุณหภูมิเป็นลำดับที่ 4 นั่นคือ มีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 5.51 และ 5.44 มม. ตามลำดับ เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $56.88^\circ\text{C}$  จะเกิดการกระจายตัวของอุณหภูมิมากเป็นลำดับที่ 5 นั่นคือ มีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 4.52 และ 4.48 มม. ตามลำดับ และเมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $59.38^\circ\text{C}$  จะเกิดการกระจายตัวของอุณหภูมิเป็นลำดับที่ 6 นั่นคือ มีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 3.21 และ 3.2 มม. ตามลำดับ



(ก) ตามแนวแกน x



(ข) ตามแนวแกน y

ภาพที่ 24 การกระจายอุณหภูมิของกรดปาล์มติก

เมื่อพิจารณาภาพที่ 15, 16, 17, 18 และ 19 จะพบว่าอุณหภูมิผนัง ( $T_w$ ) จะมีผลกระทบต่อ การแข็งตัวของพีซีเอ็ม โดยเมื่ออุณหภูมิผนังลดลง จะใช้ระยะเวลาในการแข็งตัวน้อยลงเช่นกัน เมื่อ พิจารณาจากสมการที่ (3-8) เมื่อแทนค่าตัวแปรในสมการ จะเห็นได้ว่าเมื่อ  $T_w$  มีค่าลดลง ทำให้ค่า  $t$  (เวลา) ลดลงด้วย

เมื่อพิจารณาภาพที่ 20, 21, 22, 23 และ 24 พบว่าเมื่ออุณหภูมิผนังลดลง จะทำให้เกิด การแข็งตัวได้มากขึ้น เป็นไปตามสมการที่ (3-8) นั่นคือ เมื่อ  $T_w$  มีค่าต่ำ จะทำให้ ค่าของ  $S_x$  และ  $S_y$

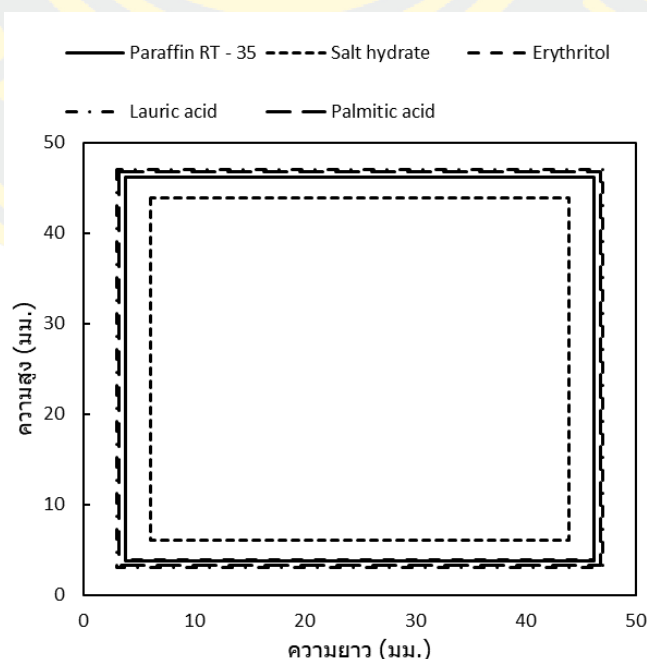


มีค่าสูง และจากภาพที่ 24 จะพบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความชันของกราฟซึ่งแสดงถึง  $dT/dx$  จะมีค่าลดลง ซึ่งจะมีผลโดยตรงต่ออัตราการระบายความร้อนอีกด้วย

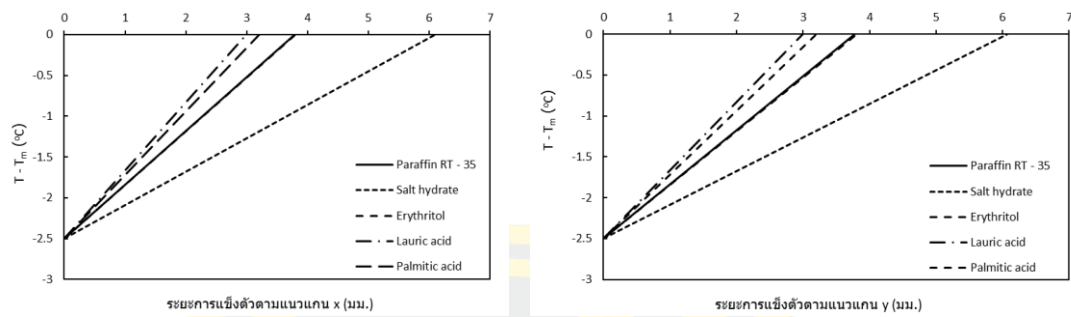
เมื่อพิจารณาเวลาในการแข็งตัวที่มีผลต่อการแข็งตัวของพีซีเอ็ม จะพบว่า ระยะเวลาการแข็งตัวของพีซีเอ็มจะมีค่าเพิ่มขึ้นค่อนข้างคงที่ (เป็นแบบเชิงเส้น) แต่ในทางกลับกันระยะเวลาในการแข็งตัวจะเพิ่มขึ้นแบบไม่คงที่ (ไม่เป็นเชิงเส้น) เนื่องจาก ปัจจัยที่มีผลต่อเวลาในการแข็งตัวคือ ปริมาณความร้อน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับพื้นที่ที่ใช้ในการแข็งตัวของพีซีเอ็ม เมื่อเริ่มเกิดการแข็งตัวแล้ว จะทำให้พื้นที่ของพีซีเอ็มที่เป็นของเหลวลดลงเรื่อย ๆ ทำให้การคำนวณหาพื้นที่ที่เหลือนั้นไม่คงที่ตามเวลา ดังนั้น ในตอนเริ่มต้นของกระบวนการแข็งตัวของพีซีเอ็มจึงใช้เวลาในการแข็งตัวนาน จากนั้นเวลาที่ใช้ในการแข็งตัวจะเพิ่มขึ้น แต่พื้นที่ของพีซีเอ็มที่เป็นของเหลวจะลดลงเกือบที่จะเป็นกำลังสองเมื่อเทียบกับการแข็งตัว

### การเปรียบเทียบความสามารถในการแข็งตัวและการกระจายอุณหภูมิสำหรับพีซีเอ็มทั้ง 5 ชนิด

การเปรียบเทียบความสามารถในการแข็งตัวและการกระจายอุณหภูมิของพีซีเอ็มนั้น จะเปรียบเทียบที่เวลาเท่ากัน นั่นคือ เมื่อเวลาผ่านไป 2,000 วินาที และ  $T_w$  ของแต่ละพีซีเอ็มเท่ากับ  $T_m - 2.5 \text{ } ^\circ\text{C}$  จะได้ผลลัพธ์ดังนี้



(ก) การแข็งตัวของพีซีเอ็มทั้ง 5 ชนิด



(ข) การกระจายอุณหภูมิตามแนวแกน x

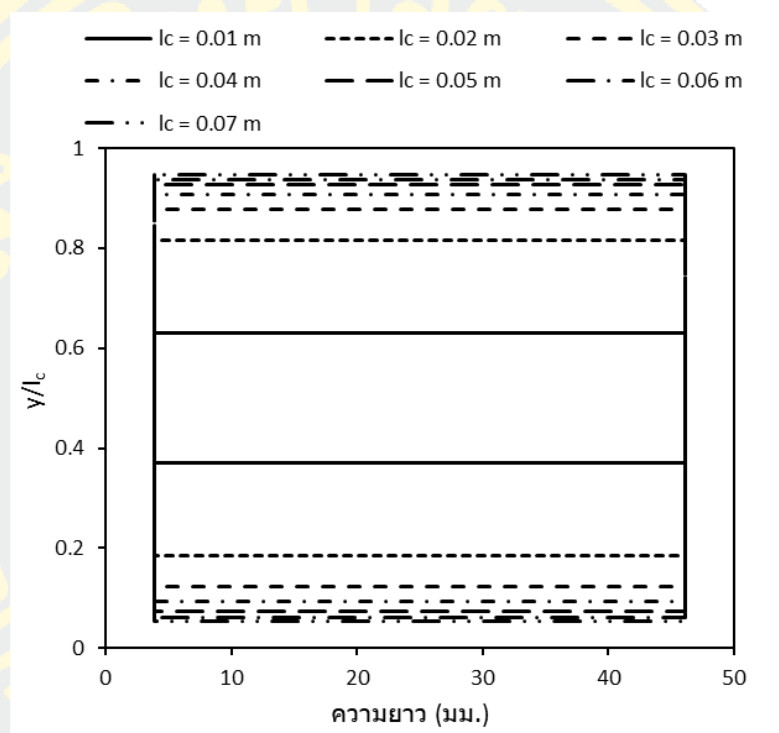
(ค) การกระจายอุณหภูมิตามแนวแกน y

ภาพที่ 25 การแข็งตัวและการกระจายอุณหภูมิของพีซีเอ็มทั้ง 5 ชนิด ที่เวลา 2,000 วินาที

การแข็งตัวและการกระจายอุณหภูมิตามแนวแกน x และ y สำหรับพีซีเอ็มทั้ง 5 ชนิดที่เวลา 2,000 วินาที จะเป็นดังภาพที่ 25 โดยการแข็งตัวจะเป็นดังภาพที่ 25(ค) และการกระจายอุณหภูมิจะเป็นดังภาพที่ 25(ข) และ 25(ค) โดยที่พีซีเอ็มจะเกิดการแข็งตัวมากที่สุดคือเกลือไฮเดรต จะมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 6.1 และ 6.07 มม. ตามลำดับ เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $26.5^\circ\text{C}$  ลำดับที่ 2 คือ อิริทริทอลมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 3.81 และ 3.8 มม. ตามลำดับ เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $114.5^\circ\text{C}$  ลำดับที่ 3 คือ พาราฟินมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 3.79 และ 3.77 มม. ตามลำดับ เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $32.5^\circ\text{C}$  ลำดับที่ 4 คือ กรดปาล์มิติกมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 3.21 และ 3.2 มม. ตามลำดับ เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $59.38^\circ\text{C}$  และลำดับที่ 5 เป็นพีซีเอ็มที่เกิดการแข็งตัวน้อยที่สุด นั่นคือ กรดลอริกมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  เท่ากับ 3 และ 2.99 มม. ตามลำดับ เมื่อ  $T_w$  เท่ากับ  $41^\circ\text{C}$

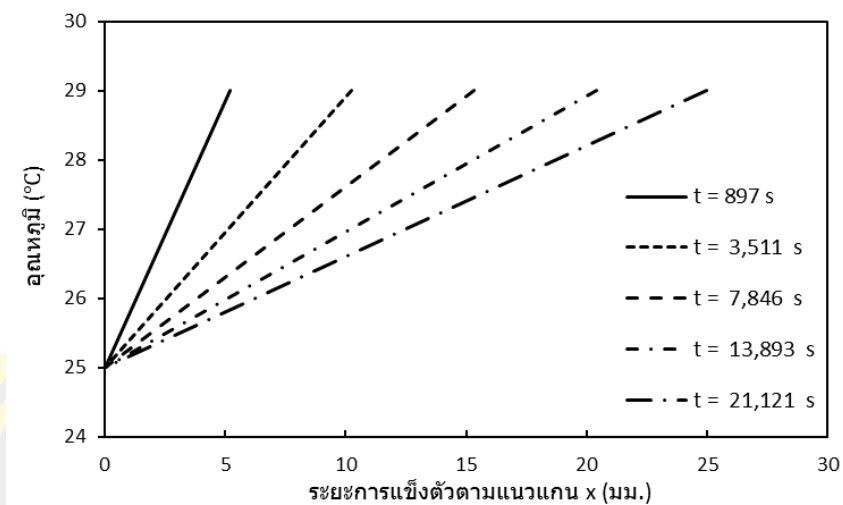
### อิทธิพลของระยะความสูงของที่จัดเก็บ ( $l_c$ ) ที่มีต่อการแข็งตัวและการกระจายอุณหภูมิ

ความสูงของที่จัดเก็บพีซีเอ็ม ( $l_c$ ) จะมีอิทธิพลต่อการแข็งตัวและการกระจายอุณหภูมิของพีซีเอ็ม โดยจะใช้เกลือไฮดรตเป็นพีซีเอ็มในการวิเคราะห์ ใช้ความสูงของที่จัดเก็บพีซีเอ็มทั้งหมด 7 ขนาด คือ 0.01–0.07 เมตร จากนั้นกำหนดให้  $T_w$  เท่ากับ  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  และ  $l_f$  เท่ากับ 0.05 เมตร จะได้ผลลัพธ์ดังต่อไปนี้



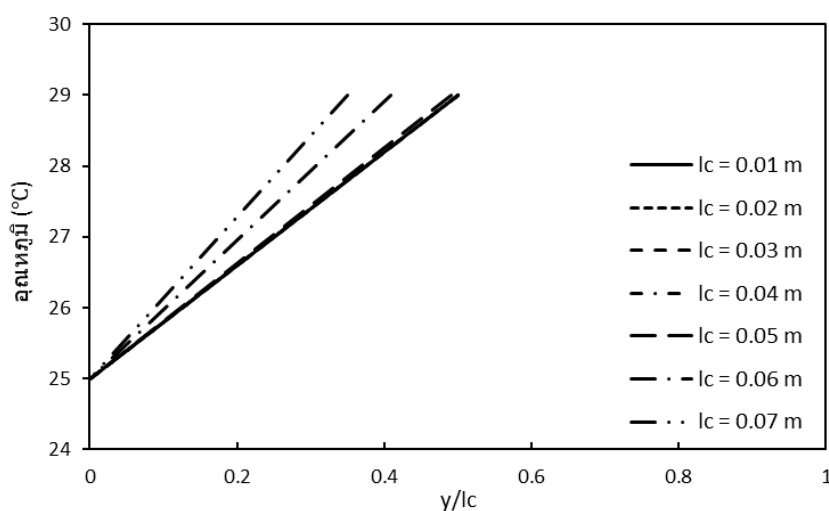
ภาพที่ 26 การแข็งตัวของเกลือไฮดรต เมื่อเวลา 500 วินาที

จากภาพที่ 26 แสดงสัดส่วนของระยะการแข็งตัวต่อความสูงของเกลือไฮดรตเมื่อเวลา 500 วินาที สำหรับพีซีเอ็มที่มีขนาดความสูงต่าง ๆ จากผลลัพธ์ พบว่า  $S_x$  จะมีค่าเท่ากับ 3.85 มม. เท่ากันทุกความสูง ในขณะที่  $S_y/l_c$  สำหรับ  $l_c$  เท่ากับ 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06 และ 0.07 เมตรจะมีค่าเท่ากับ 0.37, 0.185, 0.123333, 0.0925, 0.074, 0.061667 และ 0.052857 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า พีซีเอ็มที่มีขนาด  $l_c$  ต่ำกว่า จะมีสัดส่วนการแข็งตัวที่เร็วกว่า ดังนั้น หากต้องการการระบายความร้อนที่รวดเร็ว จึงควรเลือกใช้พีซีเอ็มที่มี  $l_c$  ต่ำ ในขณะที่  $l_c$  สูง จะเหมาะสำหรับการระบายความร้อนอย่างช้า ๆ และใช้เวลานานกว่า



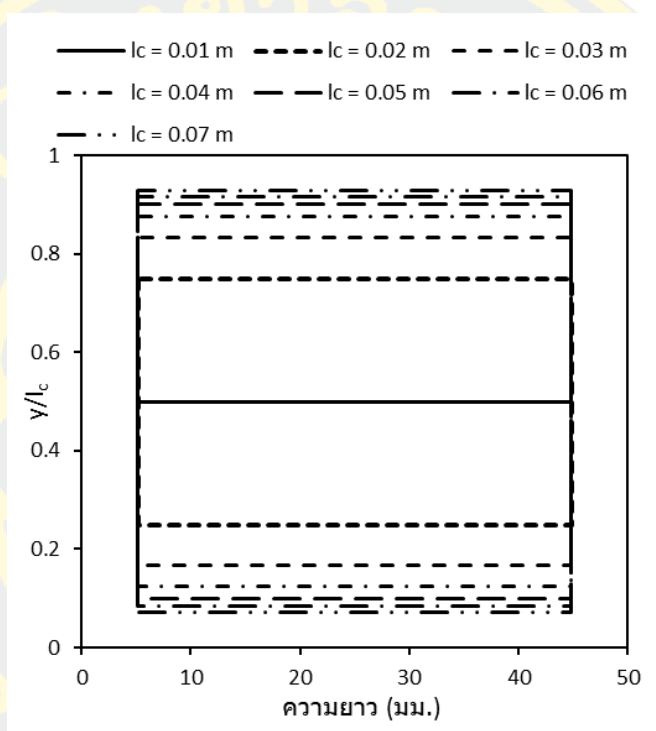
ภาพที่ 27 การกระจายอุณหภูมิของเกลือไฮเดรตที่แข็งตัวทั้งหมดที่เวลาต่างๆ

จากภาพที่ 27 แสดงการกระจายอุณหภูมิของพีซีเอ็มที่เวลาต่าง ๆ โดยจะพบว่า เมื่อเวลา 897 วินาที  $S_x$  จะมีค่า 5.18 มม. เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นเป็น 3,511 วินาที  $S_x$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 10.19 มม. เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นเป็น 7,846 วินาที  $S_x$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 15.24 มม. เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นเป็น 13,893 วินาที  $S_x$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 20.28 มม. เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นเป็น 21,121 วินาที  $S_x$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 25 มม. และจากภาพจะพบว่า เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ความชันของกราฟซึ่งแสดงถึง  $dT/dx$  จะมีค่าลดลง ซึ่งจะมีผลโดยตรงต่ออัตราการระบายความร้อน



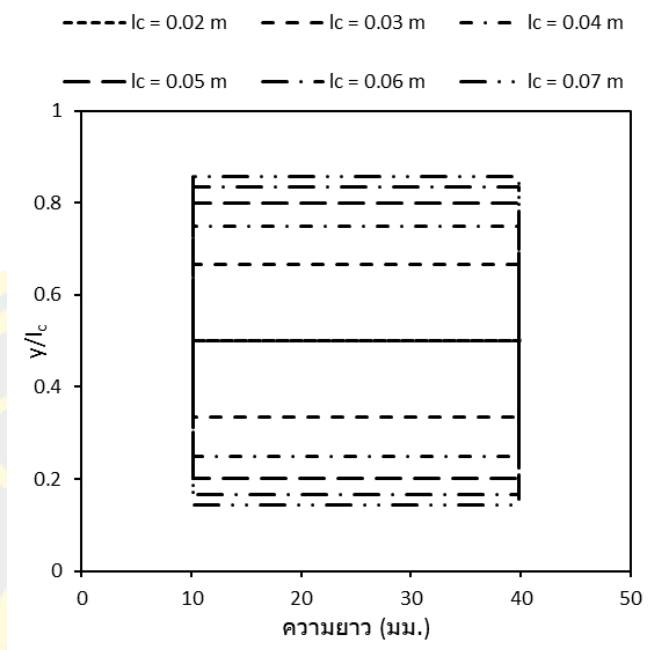
ภาพที่ 28 การกระจายอุณหภูมิของเกลือไฮเดรตที่แข็งตัวของแต่ละความสูง

จากภาพที่ 28 จะเห็นได้ว่ากราฟที่ค่า  $l_c$  เท่ากับ 0.01, 0.02, 0.03 และ 0.04 เมตร  $S_y/l_c$  จะมีค่าเท่ากัน คือ 0.5 เนื่องจาก  $l_y$  มีค่ามากกว่า  $l_c$  ทำให้เกิดการแข็งตัวของพีซีเอ็มตามแนวแกน  $y$  จนเต็มทั้งหมดก่อนการแข็งตัวตามแนวแกน  $x$  แต่สำหรับ  $l_c$  เท่ากับ 0.05, 0.06 และ 0.07 เมตรนั้น พีซีเอ็มจะเกิดการแข็งตัวทั้งหมดตามแนวแกน  $x$  ก่อนแกน  $y$  นั่นคือ  $S_x$  เท่ากับ 25 มม. และจะพบว่า เมื่อ  $l_c$  มีค่าเพิ่มขึ้น  $S_y/l_c$  จะมีค่าลดลง



ภาพที่ 29 การแข็งตัวของเกลื่อไฮดรต เมื่อเวลา 897 วินาที

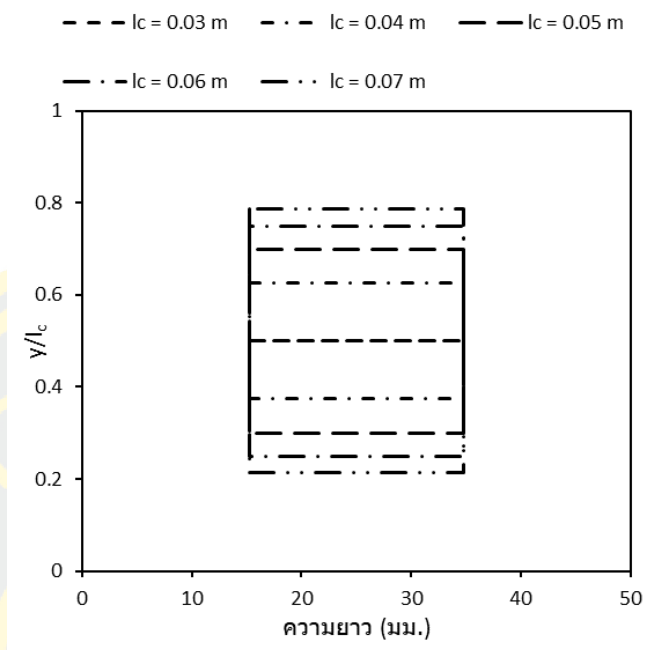
จากภาพที่ 29 จะพบว่า เมื่อเวลา 897 วินาที  $S_x$  จะมีค่าเท่ากับ 5.16 มม. และเมื่อ  $l_c$  เท่ากับ 0.01 เมตร พีซีเอ็มจะแข็งตัวหมดทั้งก้อน โดยเป็นการแข็งตัวตามแนวแกน  $y$  ในขณะที่  $l_c$  เท่ากับ 0.02–0.07 เมตร จะพบว่า  $y/l_c$  เท่ากับ 0.815 , 0.12333, 0.0925, 0.074, 0.061667 และ 0.052857 ตามลำดับ



ภาพที่ 30 การแข็งตัวของเกลื่อไฮเดรต เมื่อเวลา 3,511 วินาที

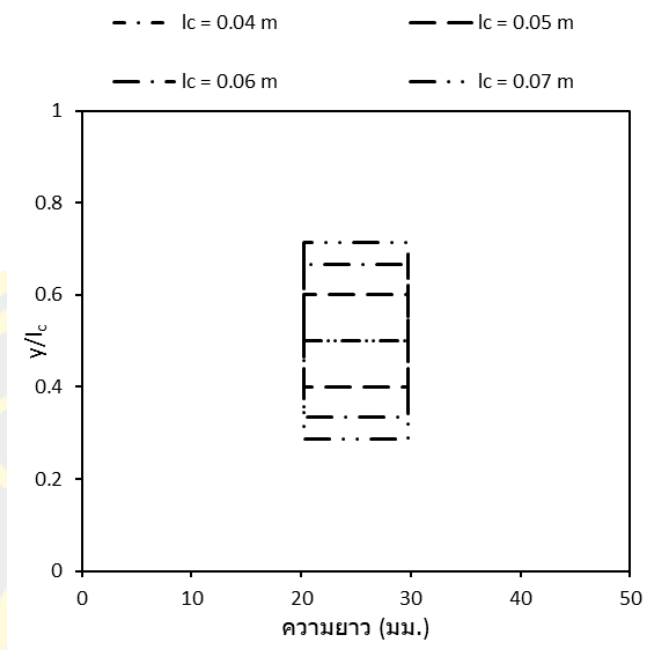
จากภาพที่ 30 จะพบว่า เมื่อเวลา 3,511 วินาที  $S_x$  จะมีค่าเท่ากับ 10.19 มม. และเมื่อ  $l_c$  เท่ากับ 0.02 เมตร จะเกิดการแข็งตัวจนเต็มทั้งหมดตามแนวแกน  $y$  ทำให้ได้กราฟเป็นรูปเส้นตรง ในแนวนอนที่ตำแหน่งกึ่งกลางรูป ทับกับกราฟการแข็งตัวที่  $l_c = 0.01$  เมตร ที่แข็งตัวจนเต็มไปก่อนหน้านี้แล้ว นอกจากนี้ จะพบว่า เมื่อ  $l_c$  เท่ากับ 0.03–0.07 เมตร  $S_y/l_c$  เท่ากับ 0.12333, 0.0925, 0.074, 0.061667 และ 0.052857 ตามลำดับ





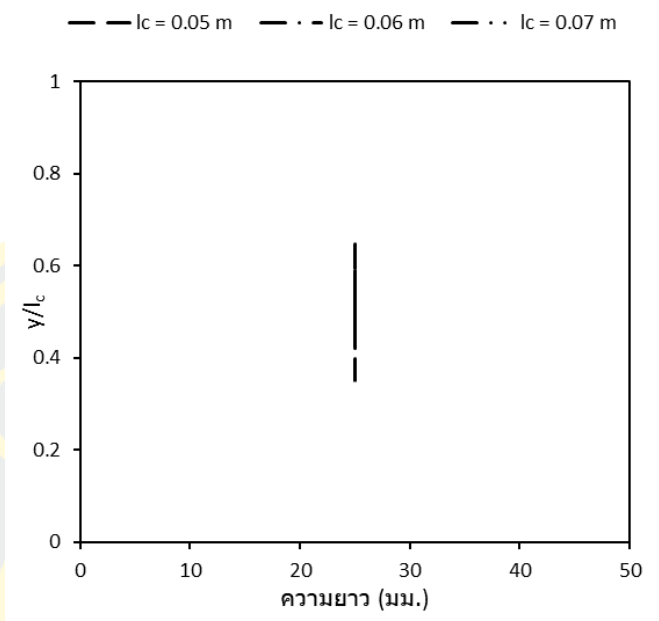
ภาพที่ 31 การแข็งตัวของเกลื่อไฮเดรต เมื่อเวลา 7,846 วินาที

จากภาพที่ 31 จะพบว่า เมื่อเวลา 7,846 วินาที  $S_x$  จะมีค่าเท่ากับ 15.24 มม. โดยสำหรับ  $l_c$  เท่ากับ 0.03 เมตร จะเกิดการแข็งตัวจนเต็มทั้งหมดตามแนวแกน  $y$  ทำให้ได้กราฟเป็นรูปเส้นตรง ที่ตำแหน่งกึ่งกลางรูป นอกจากนี้ สำหรับ  $l_c$  เท่ากับ 0.04–0.07 เมตร  $S_y/l_c$  จะมีค่าเท่ากับ 0.0925, 0.074, 0.061667 และ 0.052857 ตามลำดับ



ภาพที่ 32 การแกว่งตัวของเกลื่อไฮดรต เมื่อเวลา 13,893 วินาที

จากภาพที่ 32 จะพบว่า เมื่อเวลา 13,893 วินาที  $S_x$  จะมีค่าเท่ากับเท่ากับ 20.28 มม. และสำหรับ  $l_c$  เท่ากับ 0.04 เมตร จะเกิดการแกว่งตัวจนเต็มทั้งหมดตามแนวแกน  $y$  นอกจากนี้ สำหรับ  $l_c$  เท่ากับ 0.05–0.07 เมตร  $S_y/l_c$  จะมีค่าเท่ากับ 0.074, 0.061667 และ 0.052857 ตามลำดับ



ภาพที่ 33 การแกว่งตัวของเกลื่อไฮดรต เมื่อเวลา 21,121 วินาที

จากภาพที่ 33 จะพบว่า เมื่อเวลา 21,121 วินาที สำหรับพีซีเอ็มซึ่ง  $l_c$  มีค่าเท่ากับ 0.05, 0.06 และ 0.07 เมตร จะเกิดการแกว่งตัวเต็มทั้งหมดตามแนวแกน x ทำให้ได้กราฟเป็นรูปเส้นตรงแต่เป็นเส้นแนวตั้ง ซึ่งจะต่างจากที่  $l_c$  เท่ากับ 0.01–0.04 เมตร ที่กราฟจะเป็นเส้นแนวนอน

## ระยะการแข็งตัวและอัตราการถ่ายโอนความร้อนของพีซีเอ็มที่เวลาต่างๆ

ระยะการแข็งตัวและอัตราการถ่ายโอนความร้อนของพีซีเอ็มทั้ง 5 ชนิดนั้นเมื่อนำมาพล็อตกราฟเปรียบเทียบกันที่เวลาต่าง ๆ โดยกำหนดให้  $T_w$  ของแต่ละพีซีเอ็มเท่ากับ  $T_m - 2.5^\circ\text{C}$  จะได้ผลลัพธ์ ดังต่อไปนี้

$$(\rho L)_s \frac{\partial S_x(t)}{\partial t} = k_s \frac{\partial T_s(S_{x,t})}{\partial x}, T > 0 \quad (4-1)$$

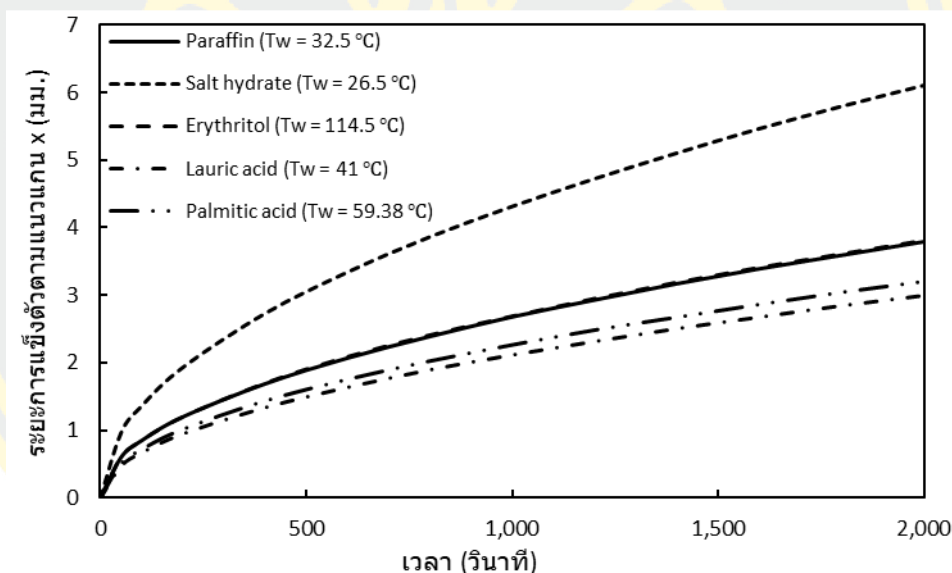
### 1. ระยะการแข็งตัวและอัตราการถ่ายโอนความร้อนของพีซีเอ็ม เมื่อเวลา 0–2,000 วินาที

ระยะการแข็งตัวตามแนวแกน x ของพีซีเอ็มทั้ง 5 ชนิดเมื่อเวลา 0–2,000 วินาที เป็นไปดังภาพที่ 34 โดยการแข็งตัวจะเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ซึ่งเกลือไฮเดรตจะเกิดการแข็งตัวมากเป็นลำดับที่ 1 มี  $S_x$  เท่ากับ 6.1 มม. โดยในช่วงแรก (0–50 วินาที) ของกราฟจะมีอัตราการแข็งตัวที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้เส้นของกราฟมีความชันมาก จากนั้นอัตราการแข็งตัวก็จะค่อย ๆ ลดลงจนถึงเวลา 900 วินาที ต่อมาอัตราการแข็งตัวจะค่อนข้างคงที่จนถึงเวลา 2,000 วินาที ลำดับที่ 2 คือ อีริทริทอล มีค่า  $S_x$  เท่ากับ 3.81 มม. โดยในช่วงแรกของกราฟจะมีอัตราการแข็งตัวที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จากนั้นอัตราการแข็งตัวก็จะค่อย ๆ ลดลงจนถึงเวลา 750 วินาที ต่อมาอัตราการแข็งตัวจะค่อนข้างคงที่จนถึงเวลา 2,000 วินาที ลำดับที่ 3 คือ พาราฟิน มีค่า  $S_x$  เท่ากับ 3.79 มม. ในช่วงแรกของกราฟจะมีอัตราการแข็งตัวที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จากนั้นอัตราการแข็งตัวก็จะค่อย ๆ ลดลงจนถึงเวลา 750 วินาที ต่อมาอัตราการแข็งตัวจะค่อนข้างคงที่จนถึงเวลา 2,000 วินาที ลำดับที่ 4 คือ กรดปาล์มิติก มีค่า  $S_x$  เท่ากับ 3.21 มม. โดยในช่วงแรกของกราฟจะมีอัตราการแข็งตัวที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จากนั้นอัตราการแข็งตัวก็จะค่อย ๆ ลดลงจนถึงเวลา 650 วินาที ต่อมาอัตราการแข็งตัวจะค่อนข้างคงที่จนถึงเวลา 2,000 วินาที และลำดับสุดท้าย คือ กรดลอริก มีค่า  $S_x$  เท่ากับ 3 มม. โดยในช่วงแรกของกราฟจะมีอัตราการแข็งตัวที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จากนั้นอัตราการแข็งตัวก็จะค่อย ๆ ลดลงจนถึงเวลา 550 วินาที ต่อมาอัตราการแข็งตัวจะค่อนข้างคงที่จนถึงเวลา 2,000 วินาที

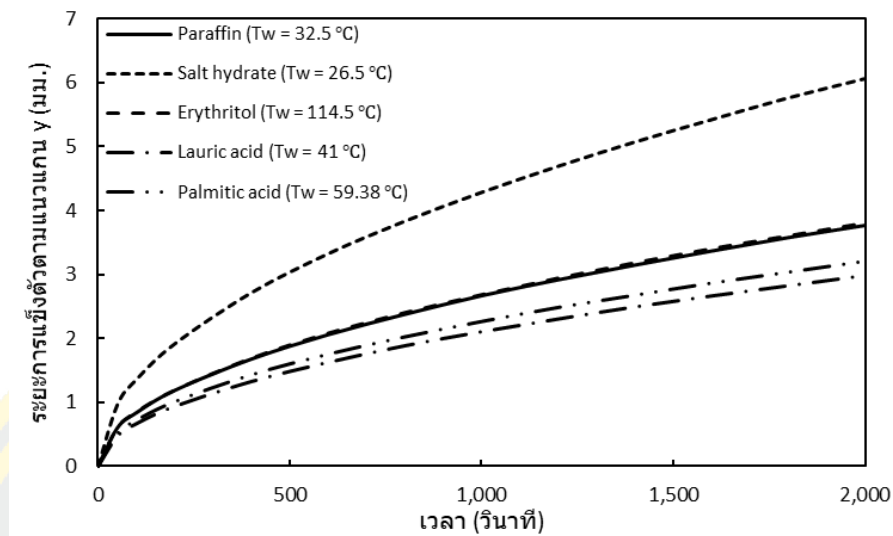
ระยะการแข็งตัวตามแนวแกน y ของพีซีเอ็มทั้ง 5 ชนิดเมื่อเวลา 0–2,000 วินาที เป็นไปดังภาพที่ 35 โดยการแข็งตัวจะเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ซึ่งเกลือไฮเดรตจะเกิดการแข็งตัวมากเป็นลำดับที่ 1 มี  $S_y$  เท่ากับ 6.07 มม. โดยในช่วงแรก (0–50วินาที) ของกราฟจะมีอัตราการแข็งตัวที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้เส้นกราฟมีความชันมาก จากนั้นอัตราการแข็งตัวก็จะค่อย ๆ ลดลงจนถึงเวลา 900 วินาที ต่อมาอัตราการแข็งตัวจะค่อนข้างคงที่จนถึงเวลา 2,000 วินาที ลำดับที่ 2 คือ อีริทริทอล มีค่า  $S_y$  เท่ากับ 3.8 มม. โดยในช่วงแรกของกราฟจะมีอัตราการแข็งตัวที่เพิ่มขึ้น

อย่างรวดเร็ว จากนั้นอัตราการแข็งตัวก็จะค่อย ๆ ลดลงจนถึงเวลา 750 วินาที ต่อมาอัตราการแข็งตัวจะค่อนข้างคงที่จนถึงเวลา 2,000 วินาที ลำดับที่ 3 คือ พาราฟิน มีค่า  $S_y$  เท่ากับ 3.77 มม.

โดยในช่วงแรกของกราฟจะมีอัตราการแข็งตัวที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จากนั้นอัตราการแข็งตัวก็จะค่อย ๆ ลดลงจนถึงเวลา 750 วินาที ต่อมาอัตราการแข็งตัวจะค่อนข้างคงที่จนถึงเวลา 2,000 วินาที ลำดับที่ 4 คือ กรดปาล์มิติก มีค่า  $S_y$  เท่ากับ 3.2 มม. โดยในช่วงแรกของกราฟจะมีอัตราการแข็งตัวที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จากนั้นอัตราการแข็งตัวก็จะค่อย ๆ ลดลงจนถึงเวลา 650 วินาที ต่อมาอัตราการแข็งตัวจะค่อนข้างคงที่จนถึงเวลา 2,000 วินาที ลำดับสุดท้าย คือ กรดลอริก มีค่า  $S_y$  เท่ากับ 2.99 มม. โดยในช่วงแรกของกราฟจะมีอัตราการแข็งตัวที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จากนั้นอัตราการแข็งตัวก็จะค่อย ๆ ลดลงจนถึงเวลา 550 วินาที ต่อมาอัตราการแข็งตัวจะค่อนข้างคงที่จนถึงเวลา 2,000 วินาที



ภาพที่ 34 ระยะเวลาแข็งตัวตามแนวแกน x ของพีซีเอ็มทั้ง 5 ชนิดเมื่อเวลา 0–2,000 วินาที

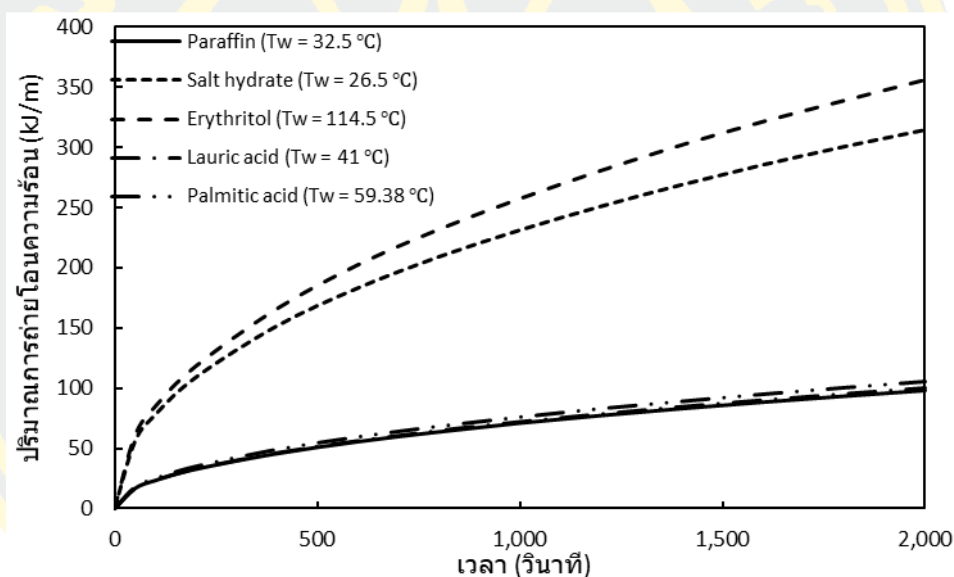


ภาพที่ 35 ระยะเวลาแข็งตัวตามแนวแกน y ของพีซีเอ็มทั้ง 5 ชนิดเมื่อเวลา 0–2,000 วินาที

ปริมาณการถ่ายโอนความร้อนของพีซีเอ็มทั้ง 5 ชนิดเมื่อเวลา 0–2,000 วินาที เป็นไปดังภาพที่ 36 โดยปริมาณการถ่ายโอนความร้อนจะเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ซึ่งอิทธิพลจะมีปริมาณการถ่ายโอนความร้อนรวม มากเป็นลำดับที่ 1 คือ 356.5 kJ/m โดยเมื่อพิจารณาภาพที่ 36 จะพบว่า ในช่วงแรกจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจาก เมื่อพิจารณาสมการที่ (4-1) จะพบว่า  $dT/dx$  มีค่าสูงมาก ทำให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนมีค่าสูง ทำให้ความชันของกราฟในภาพที่ 36 ซึ่งแสดงถึงแนวโน้มของอัตราการถ่ายโอนความร้อนในช่วงแรกก็จะมีค่าสูงเหมือนกัน และนอกจากนี้ จะพบว่า เมื่อ  $dT/dx$  มีค่าสูง จะส่งผลให้  $ds_x/dt$  มีค่าสูงเช่นกัน ทำให้ระยะเวลาแข็งตัวเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว หรืออัตราการแข็งตัวจะมีค่าสูงมากในช่วงแรก ดังแสดงในภาพที่ 34 และ 35 จากนั้นอัตราการถ่ายโอนความร้อนก็จะค่อย ๆ ลดลงจนถึงเวลา 800 วินาที ต่อมาอัตราการถ่ายโอนความร้อนจะค่อนข้างคงที่จนถึงเวลา 2,000 วินาที ลำดับที่ 2 คือ เกลือไฮเดรต มีค่าปริมาณการถ่ายโอนความร้อนเท่ากับ 314.7 kJ/m โดยช่วงแรกจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จากนั้นอัตราการถ่ายโอนความร้อนก็จะค่อย ๆ ลดลงจนเมื่อเวลา 1,000 วินาที ต่อมาอัตราการถ่ายโอนความร้อนจะค่อนข้างคงที่จนถึงเวลา 2,000 วินาที ลำดับที่ 3, 4 และ 5 คือ กรดปาล์มิติก กรดลอริก และพาราฟิน ตามลำดับ โดยมีค่าปริมาณการถ่ายโอนความร้อนเท่ากับ 105.2, 100.5 และ 97.9 kJ/m ตามลำดับ ซึ่งพีซีเอ็ม 3 ชนิดนี้มีลักษณะของกราฟที่คล้ายกัน คือ ในช่วงแรกอัตราการถ่ายโอนความร้อนที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จากนั้นอัตราการถ่ายโอนความร้อนก็จะค่อย ๆ ลดลงจนเมื่อเวลา 1,000 วินาที ต่อมาอัตราการถ่ายโอนความร้อนจะเพิ่มขึ้นค่อนข้างคงที่จนถึงเวลา 2,000 วินาที



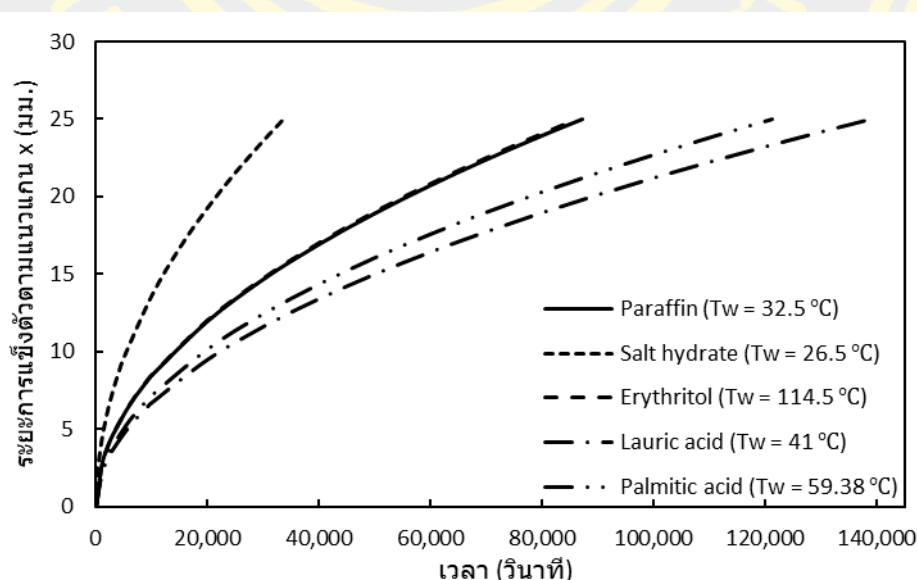
เมื่อพิจารณาภาพที่ 34, 35 และ 36 พบว่าการเลือกใช้งานพีซีเอ็มในเวลา 2,000 วินาทีนั้น อีริทริทอลจะมีค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนที่ดีกว่าพีซีเอ็มอีก 4 ชนิด ซึ่งนั่นเป็นคุณสมบัติที่ดีของพีซีเอ็มในการเลือกใช้งาน แต่เกลือไฮเดรตถึงแม้ว่าจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนที่น้อยกว่า อีริทริทอลแต่มีอัตราการแข็งตัวมากกว่าพีซีเอ็มอีก 4 ชนิด จึงเป็นทางเลือกในการนำไปใช้งานที่ต้องการทำให้ได้อัตราการแข็งตัวที่รวดเร็ว ส่วนพาราฟิน กรดลอริกและกรดปาลมิติกมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนที่มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นในการใช้งานจริงจึงสามารถนำมาเป็นตัวเลือกที่ interchangeable ในการใช้งาน 2,000 วินาทีหรือประมาณ 33 นาที ทั้งนี้เนื่องจากเวลาในการแข็งตัวที่ได้นั้นจะมาจากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น ในการใช้งานค่าอุณหภูมิผนังจะสามารถใช้ค่าที่ต่ำกว่าแบบจำลองได้เพื่อลดระยะเวลาในการแข็งตัวได้



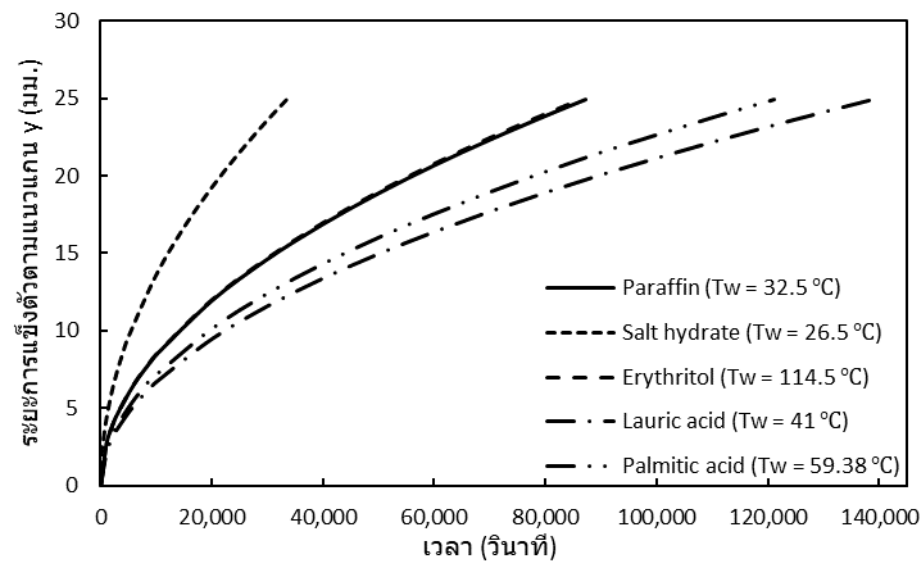
ภาพที่ 36 อัตราการถ่ายโอนความร้อนของพีซีเอ็มทั้ง 5 ชนิดเมื่อเวลา 0–2,000 วินาที

## 2. ระยะเวลาแข็งตัวและอัตราการถ่ายโอนความร้อนของพีซีเอ็มที่เวลาต่าง ๆ ตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งแข็งตัวทั้งหมด

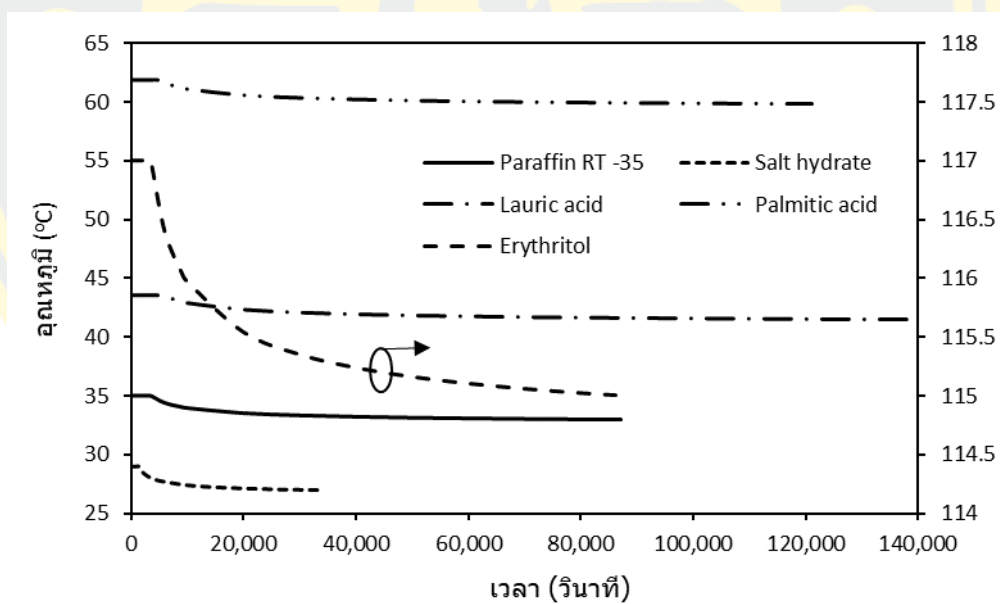
ระยะเวลาแข็งตัวทั้งหมดตามแนวแกน x และ y ของพีซีเอ็มทั้ง 5 ชนิด เป็นไปดังภาพที่ 37 และ 38 ตามลำดับ โดยที่เกลือไฮเดรตจะใช้เวลาในการแข็งตัวเร็วเป็นลำดับที่ 1 นั่นคือ 33,594 วินาที โดยกราฟของเกลือไฮเดรตนั้นจะมีอัตราการแข็งตัวมากที่สุดที่จุด 0 จากนั้นอัตราการแข็งตัวจะค่อย ๆ ลดลงจนที่เวลา 15,000 วินาที ต่อมาอัตราการแข็งตัวก็ค่อนข้างคงที่จนกระทั่งพีซีเอ็มแข็งตัวทั้งหมด ลำดับที่ 2 และ 3 คือ อิริทริทอลและพาราฟิน ซึ่งมีระยะเวลาในการแข็งตัวและอัตราการแข็งตัวใกล้เคียงกัน ระยะเวลาในการแข็งตัวทั้งหมดคือ 86,234 และ 87,172 วินาที ตามลำดับ โดยในช่วงแรกจะมีอัตราการแข็งตัวมากที่สุด จากนั้นอัตราการแข็งตัวจะค่อย ๆ ลดลงจนที่เวลา 35,000 วินาที ต่อมาอัตราการแข็งตัวก็จะค่อนข้างคงที่จนกระทั่งพีซีเอ็มแข็งตัวทั้งหมด ลำดับที่ 4 คือ กรดปาล์มิติก มีระยะเวลาในการแข็งตัวอยู่ที่ 121,167 วินาที โดยในช่วงแรกจะมีอัตราการแข็งตัวมากที่สุด จากนั้นอัตราการถ่ายโอนความร้อนจะค่อย ๆ ลดลงจนถึงเวลา 62,000 วินาที ต่อมาอัตราการแข็งตัวก็จะค่อนข้างคงที่จนกระทั่งพีซีเอ็มแข็งตัวทั้งหมด ลำดับที่สูงสุดท้าย คือ กรดลอริก มีระยะเวลาในการแข็งตัวอยู่ที่ 138,812 วินาที โดยในช่วงแรกจะมีอัตราการแข็งตัวมากที่สุด จากนั้นอัตราการถ่ายโอนความร้อนจะค่อย ๆ ลดลงจนถึงเวลา 65,000 วินาที ต่อมาอัตราการแข็งตัวก็จะค่อนข้างคงที่จนกระทั่งพีซีเอ็มแข็งตัวทั้งหมด



ภาพที่ 37 ระยะเวลาแข็งตัวทั้งหมดของพีซีเอ็มตามแนวแกน x ของพีซีเอ็มทั้ง 5 ชนิด



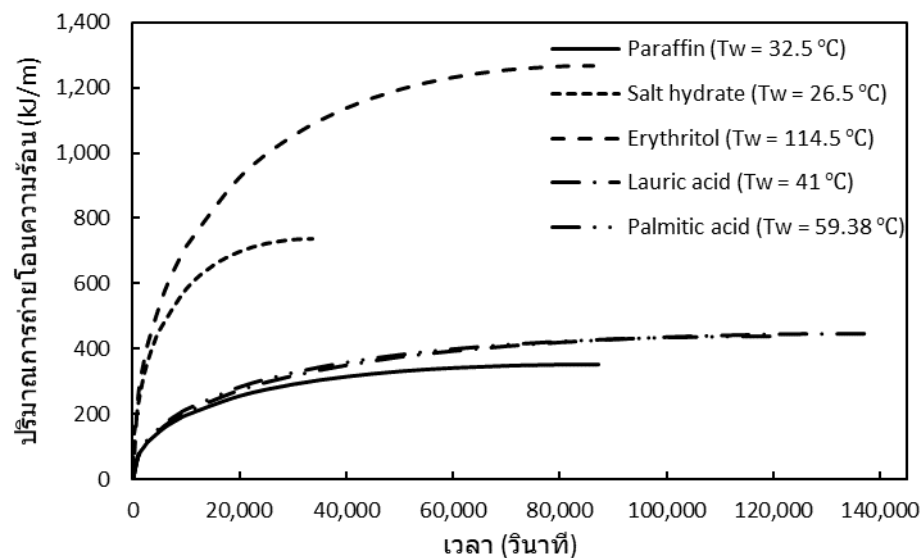
ภาพที่ 38 ระยะการแข็งตัวทั้งหมดของพีซีเอ็มตามแนวแกน y ของพีซีเอ็มทั้ง 5 ชนิด



ภาพที่ 39 การกระจายอุณหภูมิของพีซีเอ็มทั้ง 5 ชนิด ที่ตำแหน่ง 5 มม.

จากภาพที่ 39 พบว่าพีซีเอ็มทั้ง 5 ชนิด มีลักษณะการกระจายอุณหภูมิที่คล้ายกัน นั่นคือ ที่ตำแหน่งของพีซีเอ็มที่ชิดกับผนังจนถึงตำแหน่งที่ 5 มม. (ตำแหน่งที่ 0–5 มม.) เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น จะเกิดการแข็งตัวกลายเป็นพีซีเอ็มที่เป็นของแข็งทั้งหมด โดยที่อุณหภูมิของพีซีเอ็มจะเท่ากับ อุณหภูมิการแข็งตัวของพีซีเอ็มแต่ละชนิด จากนั้นเมื่อเลยตำแหน่งที่ 5 มม. อุณหภูมิจะลดลงจนถึง ตำแหน่งกึ่งกลางของพีซีเอ็ม เมื่อพิจารณาภาพที่ 39 จะพบว่า กราฟในช่วงแรกจะเป็นเส้นตรง ในแนวนอน เนื่องจากอุณหภูมิจะเท่ากันจนถึงตำแหน่งที่ 5 มม. จากนั้นเมื่อตำแหน่งที่ 5 มม. อุณหภูมิจะค่อย ๆ ลดลงถึงตำแหน่งกึ่งกลางของพีซีเอ็ม

ปริมาณการถ่ายโอนความร้อนของพีซีเอ็มทั้ง 5 ชนิด ตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งพีซีเอ็ม แข็งตัวทั้งหมด เป็นไปดังภาพที่ 40 โดยปริมาณการถ่ายโอนความร้อนของพีซีเอ็มจะเปลี่ยนแปลง ตลอดเวลา ซึ่งอิทธิพลจะมีปริมาณการถ่ายโอนความร้อนรวม มากเป็นลำดับที่ 1 นั่นคือ 1,267.7 kJ/m โดยเมื่อพิจารณาภาพที่ 40 จะพบว่า ในช่วงแรก จะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนที่เพิ่มขึ้น อย่างรวดเร็ว เนื่องจาก เมื่อพิจารณาสมการที่ (4-1) จะพบว่า  $dT/dx$  มีค่าสูงมาก ทำให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนมีค่าสูง ทำให้ความชันของภาพที่ 40 ซึ่งแสดงถึงแนวโน้มของอัตราการถ่ายโอนความร้อน ในช่วงแรกมีค่าสูงมากเช่นกัน และนอกจากนี้ จากสมการที่ (4-1) จะพบว่า เมื่อ  $dT/dx$  มีค่าสูง ทำให้  $dS_x/dt$  มีค่าสูงเช่นกัน ดังนั้นในช่วงแรกของการแข็งตัว ระยะการแข็งตัว จึงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว หรืออัตราการแข็งตัวจะมีค่าสูงมาก ดังแสดงในภาพที่ 37 และ 38 จากนั้น อัตราการถ่ายโอนความร้อนก็จะลดลงจนถึงเวลา 48,000 วินาที ต่อมาอัตราการถ่ายโอนความร้อน จะค่อนข้างคงที่จนกระทั่งพีซีเอ็มแข็งตัวทั้งหมด ลำดับที่ 2 คือ เกลือไฮเดรต มีค่าปริมาณ การถ่ายโอนความร้อนเท่ากับ 736 kJ/m โดยในช่วงแรกของกราฟจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อน ที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จากนั้นอัตราการถ่ายโอนความร้อนก็จะลดลงจนเมื่อเวลา 20,000 วินาที ต่อมาอัตราการถ่ายโอนความร้อนจะค่อนข้างคงที่จนกระทั่งพีซีเอ็มแข็งตัวทั้งหมด ลำดับที่ 3 และ 4 คือ กรดลอริกและกรดปาล์มิติก จะมีค่าปริมาณการถ่ายโอนความร้อน 446.3 และ 438.2 kJ/m ตามลำดับ ซึ่งในช่วงแรกปริมาณการถ่ายโอนความร้อนของกรดปาล์มิติกจะมีค่ามากกว่ากรดลอริก แต่เมื่อเวลา 70,000 วินาที ค่าปริมาณการถ่ายโอนความร้อนของกรดลอริกจะกลับมามีค่ามากกว่า กรดปาล์มิติก แต่ก็ยังมีค่าใกล้เคียงกัน ต่อมาอัตราการถ่ายโอนความร้อนจะค่อนข้างคงที่จนกระทั่ง พีซีเอ็มแข็งตัวทั้งหมด และลำดับสุดท้ายคือ พาราฟิน มีค่าปริมาณการถ่ายโอนความร้อนเท่ากับ 350.4 kJ/m โดยในช่วงแรกของกราฟจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จากนั้น อัตราการถ่ายโอนความร้อนก็จะลดลงจนเมื่อเวลา 50,000 วินาที ต่อมาอัตราการถ่ายโอนความร้อน จะค่อนข้างคงที่จนกระทั่งพีซีเอ็มแข็งตัวทั้งหมด



ภาพที่ 40 อัตราการถ่ายโอนความร้อนของพีซีเอ็มจากจุดเริ่มต้นจนแข็งตัวทั้งหมด

เมื่อพิจารณาภาพที่ 37 และ 38 การแข็งตัวของพีซีเอ็ม จะขึ้นอยู่กับ 3 ตัวแปรหลัก นั่นคือ ค่าการนำความร้อน ( $k$ ) ค่าความหนาแน่น ( $\rho$ ) และค่าความจุความร้อนจำเพาะ ( $c_p$ ) ของพีซีเอ็ม แต่ละชนิด โดยที่ทั้ง 3 ตัวแปรจะอยู่ในตัวแปร  $\alpha_s$  เมื่อพิจารณาสมการที่ (3-7) เมื่อค่า  $k$  สูง จะทำให้ค่า  $\alpha_s$  สูงขึ้นไปด้วย นั่นคือ มีการแพร่ความร้อนได้มากขึ้น ทำให้มีระยะในการแข็งตัวมากขึ้น แต่เมื่อค่า  $\rho$  หรือ  $c_p$  มีค่าสูง จะทำให้ค่า  $\alpha_s$  ลดลง ทำให้พีซีเอ็มสามารถแข็งตัวได้น้อย ซึ่งจากภาพที่ 37 และ 38 พบว่าเกลือไฮเดรตจะเกิดการแข็งตัวได้มากที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบกับคุณสมบัติของเกลือไฮเดรตจากตารางที่ 1 โดยจะมีค่า  $k$  มากที่สุดในบรรดาพีซีเอ็มทั้ง 5 ชนิด ลำดับถัดมา คือ อีริทริทอล พาราฟิน กรดปาล์มิติก และกรดลอริก

เมื่อพิจารณาภาพที่ 36 และ 40 ปริมาณการถ่ายโอนความร้อนของพีซีเอ็ม จะขึ้นอยู่กับ 3 ตัวแปรหลัก นั่นคือ ค่าการนำความร้อน ( $k$ ) ความร้อนแฝง ( $L_s$ ) ความจุความร้อนจำเพาะ ( $c_p$ ) และความหนาแน่น ( $\rho$ ) ของพีซีเอ็มแต่ละชนิด โดยพีซีเอ็มที่มีค่าความร้อนแฝงสูง จะมีปริมาณการถ่ายโอนความร้อนสูงเช่นกัน ดังนั้น จากภาพที่ 40 อีริทริทอลจึงมีปริมาณการถ่ายโอนความร้อนสูงที่สุด ลำดับที่ 2 คือ เกลือไฮเดรต มีค่าความร้อนแฝงสูงกว่ากรดลอริกและกรดปาล์มิติก เนื่องจากค่าความหนาแน่นของเกลือไฮเดรตสูงกว่า ลำดับ 3 และ 4 คือ กรดลอริกและกรดปาล์มิติก ซึ่งมีค่าความร้อนแฝงใกล้เคียงกัน ก็จะมีปริมาณการถ่ายโอนความร้อนใกล้เคียงกัน และลำดับสุดท้าย คือ พาราฟิน จะมีค่าความร้อนแฝงต่ำที่สุด จะให้ปริมาณการถ่ายโอนความร้อนต่ำที่สุด

ในส่วนระยะเวลาในการแข็งตัวทั้งหมดของพีซีเอ็ม จะขึ้นอยู่กับค่าการนำความร้อน ( $k$ ) ของพีซีเอ็มเป็นหลัก โดยจะพบว่า แก๊สไฮโดรเจนมีค่าการนำความร้อนสูงที่สุด จึงใช้ระยะเวลาในการแข็งตัวน้อยที่สุด ลำดับ 2 และ 3 คือ อิริทริทอลและพาราฟิน จะใช้ระยะเวลาในการแข็งตัวใกล้เคียงกัน แต่ค่าการนำความร้อนของอิริทริทอลมีค่าสูงกว่าของพาราฟิน เวลาที่ใช้ในการแข็งตัวของอิริทริทอลควรจะน้อยกว่า แต่เนื่องจากค่าความหนาแน่นและค่าความจุความร้อนจำเพาะของพาราฟินมีค่าน้อยกว่าอิริทริทอล ทำให้ปริมาณความร้อนที่ต้องการระบายออกจึงน้อยกว่าด้วย ทำให้เวลาที่ใช้ในการแข็งตัวใกล้เคียงกัน และลำดับสุดท้าย คือ กรดลอริกและกรดปาล์มติก จะใช้ระยะเวลาในการแข็งตัวใกล้เคียงกัน เนื่องจากค่าการนำความร้อนและค่าความจุความร้อนจำเพาะ มีค่าที่สวนทางกัน

เมื่อพิจารณาภาพที่ 37, 38 และ 40 พบว่าการเลือกใช้งานพีซีเอ็มตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งพีซีเอ็มแข็งตัวทั้งหมดนั้น อิริทริทอลมีปริมาณการถ่ายโอนความร้อนที่มากกว่าพีซีเอ็มอีก 4 ชนิด โดยจะใช้เวลาในการแข็งตัวอยู่ที่ 86,234 วินาที หรือประมาณเกือบ 24 ชั่วโมง แต่แก๊สไฮโดรเจนจะมีปริมาณการถ่ายโอนความร้อนน้อยกว่าอิริทริทอล แต่มีข้อดี คือ ใช้เวลาในการแข็งตัวน้อยกว่า คือ 33,594 วินาที หรือประมาณ 9 ชั่วโมง นอกจากนี้อิริทริทอลและพาราฟินยังใช้เวลาในการแข็งตัวทั้งหมดที่ใกล้เคียงกัน แต่อิริทริทอลมีปริมาณการถ่ายโอนความร้อนที่เยอะกว่ามาก จึงเป็นตัวเลือกของพีซีเอ็มที่สามารถนำไปใช้งานได้อีกด้วย ทั้งนี้เนื่องจากค่าระยะเวลาในการถ่ายโอนความร้อนที่ได้นั้นจะมาจากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น ในการใช้งาน ค่าอุณหภูมิผนังจะสามารถใช้ค่าที่ต่ำกว่าแบบจำลองเพื่อลดเวลาในการทำงานของพีซีเอ็มได้



## บทที่ 5

### สรุปผลการวิเคราะห์

จากการวิเคราะห์ผลลัพธ์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรม Microsoft excel ที่ได้จากการสมการการถ่ายโอนความร้อน 1 มิติของพีซีเอ็ม โดยมีคริบภายใน สามารถสรุปได้ดังนี้

การทำโปรแกรม Microsoft excel นั้นจำเป็นที่จะต้องตรวจสอบความถูกต้องของผลลัพธ์ จึงได้มีการนำไปตรวจสอบผลลัพธ์กับแบบจำลอง 2 มิติ โดยในกรณีศึกษา พบว่า มีค่าความแตกต่างเท่ากับ 17.86% ในแกน x และ 21% ในแกน y

จากนั้นจะเป็นการวิเคราะห์อิทธิพลของวัสดุของคริบที่มีผลต่อระยะเวลาแข็งตัวของพีซีเอ็ม โดยจากการวิเคราะห์พบว่า คริบอลูมิเนียมและคริบทองแดงนั้นมีค่า  $S_x$  และ  $S_y$  ที่ใกล้เคียงกันมาก โดยมีค่าความแตกต่างเท่ากับ 0.016% ดังนั้นจึงเลือกใช้คริบอลูมิเนียมที่มีราคาถูกและเป็นที่ยอมรับในการใช้งานมากกว่าเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป

อิทธิพลของอุณหภูมิผนังที่มีต่อการแข็งตัวของพีซีเอ็ม จะพบว่า ยิ่งอุณหภูมิผนังมีค่าน้อย จะทำให้พีซีเอ็มแข็งตัวได้เร็วขึ้น

พาราฟิน เมื่อ  $T_m$  เท่ากับ 32.5, 30, 27.5, 25, 22.5 และ 20 °C จะใช้ระยะเวลาในการแข็งตัวเท่ากับ 87,172, 43,994, 29,600, 22,401, 18,081 และ 15,199 วินาที ตามลำดับ

เกลือไฮเดรต เมื่อ  $T_m$  เท่ากับ 26.5, 24, 21.5, 19, 16.5 และ 14 °C จะใช้ระยะเวลาในการแข็งตัวเท่ากับ 33,594, 16,963, 11,419, 8,646, 6,982 และ 5,872 วินาที ตามลำดับ

อิริทริทอล เมื่อ  $T_m$  เท่ากับ 114.5, 112, 109.5, 107, 104.5 และ 102 °C จะใช้ระยะเวลาในการแข็งตัวเท่ากับ 86,234, 43,352, 29,058, 21,910, 17,621 และ 14,761 วินาที ตามลำดับ

กรดลอริก เมื่อ  $T_m$  เท่ากับ 41, 38.5, 36, 33.5, 31 และ 28.5 °C จะใช้ระยะเวลาในการแข็งตัวเท่ากับ 138,812, 70,066, 47,147, 35,685, 28,807 และ 24,219 วินาที ตามลำดับ

กรดปาล์มติก เมื่อ  $T_m$  เท่ากับ 59.38, 56.88, 54.38, 51.88, 49.38 และ 46.88 °C จะใช้ระยะเวลาในการแข็งตัวเท่ากับ 121,167, 61,139, 41,127, 31,119, 25,112 และ 21,107 วินาที ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการแข็งตัวของพีซีเอ็มทั้ง 5 ชนิด พบว่า เกลือไฮเดรต จะแข็งตัวได้เร็วที่สุด ถัดมาคือ อิริทริทอล พาราฟิน กรดปาล์มติกและกรดลอริก ตามลำดับ ตัวอย่างเช่น เมื่อเวลาผ่านไป 2,000 วินาที จะมีค่า  $S_x$  เท่ากับ 6.1, 3.81, 3.79, 3.21 และ 3 มม. ตามลำดับ

อิทธิพลของ  $I_c$  ต่อการแข็งตัวของพีซีเอ็ม คือ เมื่อ  $I_c$  มีค่าน้อยกว่า  $I_f$  การแข็งตัวของพีซีเอ็มตามแนวแกน  $y$  จะแข็งตัวทั้งหมดก่อน แต่ถ้า  $I_c$  มีค่ามากกว่า  $I_f$  การแข็งตัวของพีซีเอ็มตามแนวแกน  $x$  จะแข็งตัวทั้งหมดก่อน

เมื่อพิจารณาการแข็งตัวของพีซีเอ็ม ในช่วงแรกอัตราการแข็งตัวจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จากนั้นอัตราการแข็งตัวจะลดลง แต่การแข็งตัวยังเพิ่มขึ้นอยู่ ต่อมาอัตราการแข็งตัวก็จะเพิ่มขึ้นค่อนข้างคงที่ โดยที่อัตราการแข็งตัวของเกลือไฮเดรตจะมีค่ามากที่สุด ลำดับถัดไป คือ อิทธิทธิทอลพาราฟิน กรดปาล์มิติกและกรดลอริก ตามลำดับ โดยมีตัวแปร 3 ตัวแปรที่ส่งผลต่อการแข็งตัว คือ การนำความร้อน ความหนาแน่นและความจุความร้อนจำเพาะ

ปริมาณการถ่ายโอนความร้อนและอัตราการถ่ายโอนความร้อนของพีซีเอ็มมีลักษณะคล้ายกับอัตราการแข็งตัวของพีซีเอ็ม โดยในช่วงแรกอัตราการถ่ายโอนความร้อนจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จากนั้นจะลดลง แต่ปริมาณความร้อนยังเพิ่มขึ้นอยู่ ต่อมาอัตราการถ่ายโอนความร้อนก็จะเพิ่มขึ้นค่อนข้างคงที่ โดยที่อัตราการถ่ายโอนความร้อนของอิทธิทธิทอลจะมีค่ามากที่สุด ลำดับถัดมา คือ เกลือไฮเดรต กรดปาล์มิติก กรดลอริก และพาราฟิน ตามลำดับ โดยมีตัวแปร 4 ตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าปริมาณความร้อน คือ การนำความร้อน ความหนาแน่น ค่าความร้อนแฝงและความจุความร้อนจำเพาะ

สำหรับการเลือกใช้พีซีเอ็มจะพบว่า อิทธิทธิทอลจะให้ปริมาณการถ่ายโอนความร้อนมากที่สุดและใช้เวลาในการแข็งตัวปานกลาง โดยมีอุณหภูมิการแข็งตัวเท่ากับ  $117^{\circ}\text{C}$  เกลือไฮเดรตจะให้ปริมาณการถ่ายโอนความร้อนปานกลางและใช้เวลาในการแข็งตัวน้อยที่สุด โดยมีอุณหภูมิการแข็งตัวเท่ากับ  $29^{\circ}\text{C}$  กรดลอริกและกรดปาล์มิติก จะให้ปริมาณการถ่ายโอนความร้อนน้อยและใช้เวลาในการแข็งตัวมากที่สุด โดยมีอุณหภูมิการแข็งตัวเท่ากับ  $43.5$  และ  $61.88^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ และพาราฟินจะให้ปริมาณการถ่ายโอนความร้อนน้อยที่สุด โดยจะน้อยกว่ากรดลอริกและกรดปาล์มิติกประมาณ  $21.48\%$  และจะใช้เวลาในการแข็งตัวปานกลาง โดยมีอุณหภูมิการแข็งตัวเท่ากับ  $35^{\circ}\text{C}$  โดยในการเลือกใช้งานควรเลือกพีซีเอ็มให้เหมาะสมกับการใช้งานนั้น ๆ เพื่อให้เกิดประโยชน์มากที่สุด

## บรรณานุกรม

- Angelovska E. (2018). *Difference Between Conduction and Convection*. Retrieved 18 January 2023 from <http://www.differencebetween.net/technology/difference-between-conduction-and-convection/>
- Ao C., Yan, S., Zhao, L., Wu, Y. (2023). Assessment on the effect of longitudinal fins upon melting process in a latent heat thermal energy storage unit. *Journal of Energy Storage*, 59, 106408.
- Arshad A., Alabdullatif, M.I., Jabbal, M., Yan, Y. (2021). Towards the thermal management of electronic devices: A parametric investigation of finned heat sink filled with PCM. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 129, 105643.
- Çengel Y.A., Ghajar, A.J. (2015). *Heat and mass transfer: fundamentals and applications fifth edition in SI units, 2015. New York, America.*
- Chen T., Liu, C., Mu, P., Sun, H., Zhu, Z., Liang, W., Li, A. (2020). Fatty amines/graphene sponge form-stable phase change material composites with exceptionally high loading rates and energy density for thermal energy storage. *Chemical Engineering Journal*, 382, 122831.
- Hajmohammadi M., Doustahadi, A., Ahmadian-Elmi, M. (2020). Heat transfer enhancement by a circumferentially non-uniform array of longitudinal fins assembled inside a circular channel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 158, 120020.
- Hou Y., Chen, H., Liu, X. (2022). Experimental study on the effect of partial filling of copper foam on heat storage of paraffin-based PCM. *Renewable Energy*, 192, 561-571.
- Huang B., Tian, L.-L., Yu, Q.-H., Liu, X., Shen, Z.-G. (2021). Numerical analysis of melting process in a rectangular enclosure with different fin locations. *Energies*, 14(14), 4091.
- Lamberg P., Siren, K. (2003). Analytical model for melting in a semi-infinite PCM storage with an internal fin. *Heat and mass transfer*, 39(2), 167-176.
- Lamberg P., Siren, K. (2003b). Approximate analytical model for solidification in a finite PCM storage with internal fins. *Applied Mathematical Modelling*, 27(7), 491-513.
- Linquip. (2021). *What is Phase Change Material? Theory, Example and Applications*. Retrieved 4 October 2022 from <https://www.linquip.com/blog/what-is-phase-change-material/#:~:text=A%20Phase%20Change%20Material%20%28PCM%29%20is%20a%20s substance,two%20main%20states%20of%20matter%2C%20solid%20and%20liquid>

- Mahdi J.M., Lohrasbi, S., Ganji, D.D., Nsofor, E.C. (2019). Simultaneous energy storage and recovery in the triplex-tube heat exchanger with PCM, copper fins and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles. *Energy conversion and management*, 180, 949-961.
- Mochane M.J. (2011). *Polymer encapsulated paraffin wax to be used as phase change material for energy storage* University of the Free State (Qwaqwa Campus)].
- Modi N., Wang, X., Negnevitsky, M., Cao, F. (2021). Melting characteristics of a longitudinally finned-tube horizontal latent heat thermal energy storage system. *Solar Energy*, 230, 333-344.
- Moitsheki R.J., Bradshaw-Hajek, B.H. (2013). Symmetry analysis of a heat conduction model for heat transfer in a longitudinal rectangular fin of a heterogeneous material. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 18(9), 2374-2387.
- Morris K. (2010). *Paraffin wax treatment*. Retrieved 20 September 2023 from <https://ic.steadyhealth.com/paraffin-wax-treatment>
- Nomura T., Zhu, C., Sagara, A., Okinaka, N., Akiyama, T. (2015). Estimation of thermal endurance of multicomponent sugar alcohols as phase change materials. *Applied Thermal Engineering*, 75, 481-486.
- Pan C., Charles, J., Vermaak, N., Romero, C., Neti, S., Zheng, Y., Chen, C.-H., Bonner III, R. (2018). Experimental, numerical and analytic study of unconstrained melting in a vertical cylinder with a focus on mushy region effects. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 124, 1015-1024.
- Rathod M.K. (2018). Phase change materials and their applications. *Phase Change Materials and Their Applications*, 37.
- Raymundo J., Borahel, R.d.S., Oliveski, R.d.C. (2015). Numerical study of the erythritol melting process in a tridimensional rectangular cavity. *Revista de Engenharia Térmica*, 14(1), 88-94.
- Soares N., Matias, T., Durães, L., Simões, P., Costa, J. (2023). Thermophysical characterization of paraffin-based PCMs for low temperature thermal energy storage applications for buildings. *Energy*, 126745.
- Streicher W., Cabeza, L., Heinz, A. (2005). A Report of IEA Solar Heating and Cooling programme-Task 32 “Advanced storage concepts for solar and low energy buildings.”.

*Solar Heating & Cooling Programme*, 1-33.

Tuncbilek K., Sari, A., Tarhan, S., Ergüneş, G., Kaygusuz, K. (2005). Lauric and palmitic acids eutectic mixture as latent heat storage material for low temperature heating applications. *Energy*, 30(5), 677-692.

Uma Maheswararao G., Jaya Krishna, D., John, B. (2022). Melting and Solidification Behaviour of Some Organic Phase Change Materials Applicable to Low Temperature Heat Storage Applications. *International Journal of Thermophysics*, 43(7), 113.

Yang X., Li, Y., Lu, Z., Zhang, L., Zhang, Q., Jin, L. (2016). Thermal and fluid characteristics of a latent heat thermal energy storage unit. *Energy Procedia*, 104, 425-430.

Zare M., Mikkonen, K.S. (2023). Phase change materials for life science applications. *Advanced Functional Materials*, 33(12), 2213455.

Zhu X., Li, Y., Zhu, Q. (2022). Heat transfer enhancement technology for fins in phase change energy storage. *Journal of Energy Storage*, 55, 105833.

วุฒิปงษ์ ทับกระโทก. (2558). การถ่ายโอนความร้อน. สไลด์ 17 มกราคม 2566 จาก

<https://www.slideshare.net/wuttipongtubkrathok/ss-51971230>

อุทัย ประสพชิงชนะ, วรเชษฐ์ ภิรมย์ภักดี, กิตติพงษ์ บุญโล่ง, ปราโมทย์ ลายประดิษฐ์. (2555). การวิเคราะห์อัตราการถ่ายเทความร้อนในสถานะคงตัวผ่านแผ่นครีปสี่เหลี่ยมผืนผ้าตรงด้วยวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉพาะจุดและรวมผลของการแผ่รังสีความร้อน. *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, 22(3), 511-525.







## ประวัติย่อของผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นายพีรวัชร มินตา
วัน เดือน ปี เกิด	17 มิถุนายน 2542
สถานที่เกิด	จังหวัดชลบุรี
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	222/53 (หมู่บ้านพรีมิโอ) หมู่ 2 ต.บ้านบึง อ.บ้านบึง จ.ชลบุรี 20170
ตำแหน่งและประวัติการ ทำงาน	นักศึกษา
ประวัติการศึกษา	ปริญญาตรี วิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรวิศวกรรมยานยนต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รางวัลหรือทุนการศึกษา	-

