

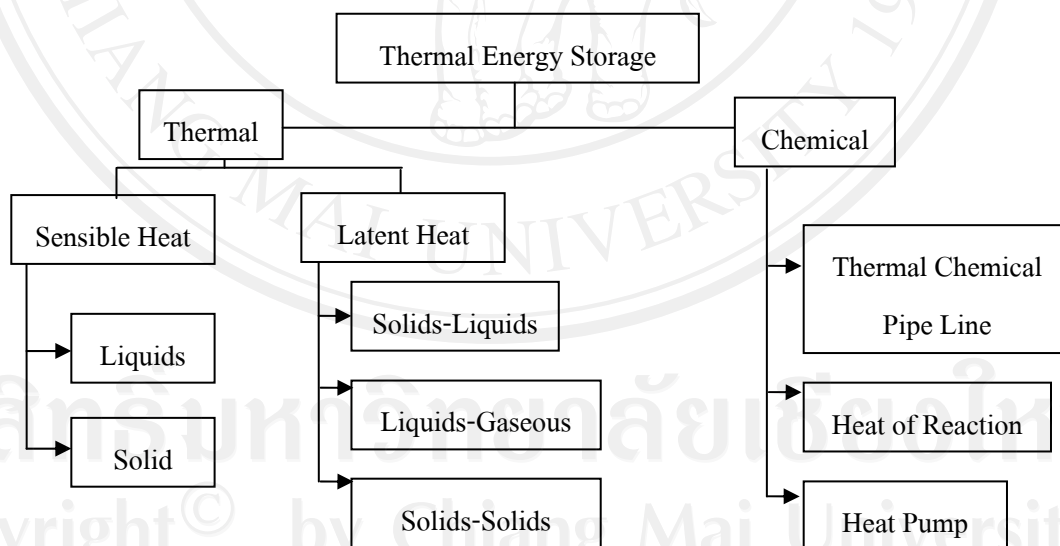
บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในงานวิจัย

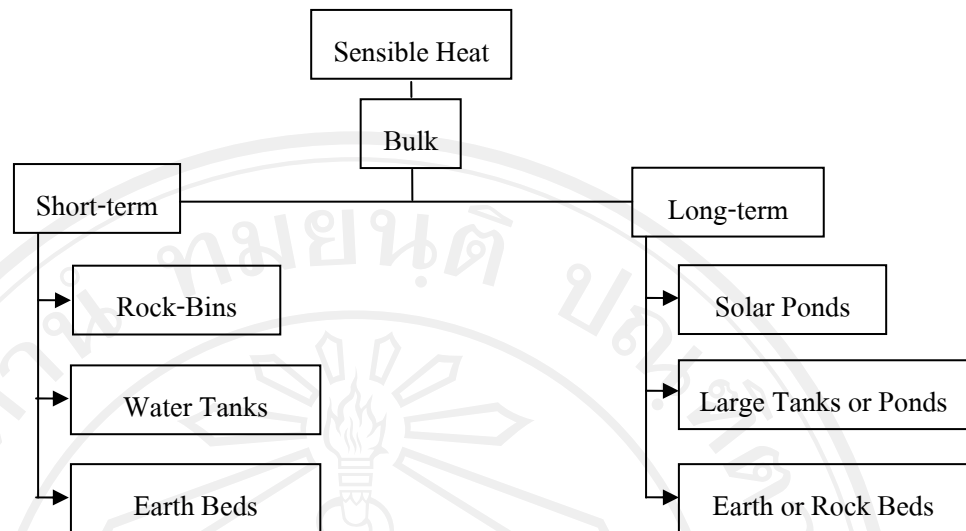
งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสมรรถนะของระบบเก็บสะสมพลังงานความร้อน โดยใช้ตัวกลางของแข็ง ซึ่งได้แก่ ลูกบดเซรามิกและหินภูเขาไฟ เป็นตัวประจุและคายพลังงานความร้อน ดังนั้น ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับระบบเก็บสะสมพลังงานความร้อนที่ทำการศึกษาดังต่อไปนี้

2.1 ระบบสะสมพลังงานความร้อน

ระบบสะสมพลังงานความร้อน (Thermal Energy Storage ; TES) คือ ชุดอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ดึงเอาพลังงานความร้อนที่มีอยู่ในของไหลที่ได้จากกระบวนการผลิตแล้วนำมาสะสมไว้เพื่อนำมาใช้สำหรับกระบวนการอื่น ๆ ที่เหมาะสมในโอกาสต่อไป ระบบสะสมพลังงานความร้อนสามารถเขียนแสดงภาพรวมของระบบ ดังรูปที่ 2. 1 และรูปที่ 2.2 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.1 ไคอะแกรมแสดงระบบการสะสมพลังงานทางความร้อน (T. Kiatsiriroat et al.,2000)



รูปที่ 2.2 ไคอะแกรมแสดงการสะสมความร้อนสัมผัส (T. Kiatsiriroat et al.,2000)

ระบบเก็บสะสมพลังงานความร้อน แบ่งเป็น 3 แบบ คือ

1) ระบบสะสมพลังงานโดยอาศัยการประจุความร้อนจากการเพิ่มอุณหภูมิหรือใช้ความร้อนสัมผัส (Sensible heat storage)

2) ระบบสะสมความร้อนโดยอาศัยความร้อนจากการเปลี่ยนสถานะ (Latent heat storage) หรือใช้วัสดุที่เปลี่ยนสถานะได้ เรียกว่า PCM (Phase change material)

3) ระบบสะสมความร้อนแบบเคมี (Chemical energy storage) เป็นระบบที่การประจุหรือคายพลังงานความร้อนต้องอาศัยกระบวนการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีหรือกระบวนการดูดซับ

การเก็บสะสมพลังงานแบบต่าง ๆ มีข้อดี ข้อด้อยแตกต่างกัน ดังสรุปไว้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ข้อดี ข้อด้อยของการสะสมพลังงานแบบต่าง ๆ (T. Kiatsiriroat et al.,2000)

คุณลักษณะ	ระบบเก็บพลังงานแบบความร้อนสัมผัส	ระบบเก็บพลังงานแบบความร้อนแฝง	ระบบเก็บพลังงานแบบความร้อนเคมี
ความจุ	ต่ำ	ต่ำ	สูง
พลังงานที่สูญเสีย	มาก	ปานกลาง	น้อย
อุณหภูมิทำงาน	ต่ำ	ต่ำ	สูง
อายุการใช้งาน	นาน	จำกัด	ไม่จำกัด(ทางทฤษฎี)
ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม	ไม่มี	ไม่มี	บางครั้งเกิดอันตราย
การเคลื่อนย้าย	เล็กน้อย	เล็กน้อย	ได้ไกล
เทคโนโลยี	ง่าย	ง่าย	ยุ่งยาก

2.2 ระบบสะสมพลังงานความร้อนแบบสัมผัส

ระบบประเภทนี้จะอาศัยการสะสมพลังงานความร้อนแบบสัมผัส (Sensible heat) ในตัวกลางที่มีค่าความจุความร้อนค่อนข้างสูง ระหว่างการประจุความร้อนอุณหภูมิของสารตัวกลางจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อต้องการดึงพลังงานไปใช้ พลังงานความร้อนที่ดึงออกจะทำให้อุณหภูมิของตัวกลางลดลงเรื่อยๆ ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific heat capacity) และระดับอุณหภูมิใช้งานจะเป็นตัวแปรสำคัญที่กำหนดขนาดของถังบรรจุสารตัวกลางของระบบ TES เช่น ถังเก็บน้ำร้อน ถังกรวด เป็นต้น

2.3 การเลือกสารตัวกลาง

สารตัวกลางที่นิยมใช้กับระบบประเภทนี้ อาทิ น้ำ (Water) และก้อนกรวด (Pebble bed) สำหรับกรณีที่อุณหภูมิใช้งานไม่สูงนัก เนื่องจากหาได้ง่ายและราคาถูก สำหรับที่อุณหภูมิใช้งานปานกลางถึงค่อนข้างสูง นิยมใช้น้ำมันที่ทนความร้อนได้ดี (Thermal oil หรือ Heat transfer oil) โดยค่าความจุความร้อนจำเพาะของตัวกลางที่เก็บสะสมพลังงานแสดงดังตารางที่ 2.2 และ สมบัติที่ใช้ในการพิจารณาสารตัวกลางแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.2 ค่าความจุความร้อนจำเพาะของตัวกลางที่เก็บสะสมพลังงาน (ชนาคม และอดิศักดิ์, 2528)

สารตัวกลาง	ความหนาแน่น (kg/m ³)	ความจุความร้อนจำเพาะ (kJ/kg.K)	ความจุความร้อนจำเพาะเชิงปริมาตร (kJ/m ³ K)
น้ำ	1,000	4.18	4,180
เศษเหล็ก	7,830	0.46	2,530 (30% voids)
เศษคอนกรีต	2,240	1.13	1,780 (30% voids)
ก้อนกรวด	2,680	0.88	1,630 (30% voids)
อิฐ	2,240	0.88	2,026 (30% voids)

ตารางที่ 2.3 สมบัติที่ใช้ในการพิจารณาเลือกสารตัวกลาง (ชนาคม และอดิศักดิ์, 2528)

สมบัติ	สิ่งที่พิจารณา
1) ความจุความร้อน (Specific heat)	เป็นค่าที่แสดงความสามารถในการเก็บสะสมพลังงานความร้อน ค่านี้ควรมีค่าสูง เพราะจะทำให้ปริมาตรของสารตัวกลางที่จะใช้มีค่าน้อย และอุปกรณ์มีขนาดเล็กกะทัดรัด
2) อุณหภูมิทำงาน (Working temperature)	หมายถึง อุณหภูมิที่การเก็บรักษาพลังงานและคายพลังงาน ซึ่งอุณหภูมิในระหว่างการประจุ (Charge) และการคายพลังงานความร้อนออกไปใช้งาน (Discharge) ควรจะอยู่ในช่วงของแหล่งพลังงานและภาระงานที่ต้องการนำไปใช้
3) ระยะเวลาประจุพลังงาน (Charging/Discharging period)	ในการประจุพลังงานให้และการคายพลังงานความร้อนออกจากระบบ TES ควรจะใช้ระยะเวลาที่เหมาะสม และควรทำได้อย่างรวดเร็ว
4) ความเสถียร (Stability)	สารตัวกลางจะต้องถูกบรรจุอยู่ในระบบ TES เพื่อการใช้งานเป็นเวลายาวนาน จึงควรจะรักษาสภาพไว้ได้ดีแม้ว่าจะผ่านรอบการใช้งานไปนาน สารตัวกลางจึงควรมีเสถียรภาพสูงหรือไม่เสื่อมสภาพได้ง่าย ประกอบกับต้องให้อัตราการดึงพลังงานออกมาค่อนข้างคงที่ตลอดระยะเวลาใช้งานนั้น
5) ความร้อนสูญเสีย (Losses)	สารตัวกลางของระบบ ควรเอื้อต่อการออกแบบเพื่อให้ตัวระบบมีความร้อนสูญเสียน้อย หรือพลังงานสูญเสียในรูปแบบอื่นๆ ต่ำ
6) ความเป็นพิษ (Toxicity)	สารตัวกลางควรจะไม่เป็นพิษหรือไม่ทำปฏิกิริยาในการกัดกร่อน
7) ราคาและแหล่งที่มา (Cost/Availability)	เนื่องจากระบบ TES อาจต้องใช้สารตัวกลางเป็นปริมาณมาก ดังนั้นสารนั้นควรหาได้ง่ายในประเทศและมีราคาไม่สูงจนเกินไปนัก

2.4 สมบัติของวัสดุตัวกลางที่นำมาทดสอบ

การเลือกวัสดุที่ใช้สำหรับอุปกรณ์ความร้อนที่กลับมาใช้ใหม่เป็นพื้นฐานที่สำคัญต่อระบบการนำความร้อนที่กลับมาใช้ใหม่ เพราะการเลือกวัสดุเก็บสะสมความร้อนจะเป็นตัวกำหนดอายุการใช้งานและค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง แต่ทั้งนี้ต้องพิจารณาอุณหภูมิ ลักษณะทางเคมีและกายภาพของก๊าซด้วย วัสดุเก็บสะสมความร้อนที่ใช้ในการวิจัยนี้มี 2 ประเภทคือ ลูกบดเซรามิกและหินภูเขาไฟ ซึ่งมีสมบัติดังต่อไปนี้

2.4.1 เซรามิก (Ceramics)

เซรามิกเป็นวัสดุที่ไม่ไวต่อสารเคมีเพราะต้านทานต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันและการกัดกร่อน เซรามิกบางชนิดสามารถใช้งานได้อย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิสูงถึง $2,000^{\circ}\text{C}$ โดยวัสดุเซรามิกที่ทนความร้อนสูงที่มีใช้ทั่วไปในภาคอุตสาหกรรม โดยลูกบดที่ใช้ในการทดสอบแสดงดังรูปที่ 2.3

ข้อเสียที่สำคัญของเซรามิกคือ สภาพการนำความร้อนที่มีค่าต่ำ (โดยทั่วไปประมาณ 10% ของโลหะ) ในการนำมาใช้งานเป็นวัสดุตัวกลางบางครั้งอาจก่อให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิที่ผิวและเนื้อด้านในมาก ก่อให้เกิดความเค้นเนื่องจากความร้อน (Thermal stress) ขึ้นส่งผลให้เกิดรอยร้าวบนพื้นผิวของเซรามิกได้



รูปที่ 2.3 ลูกบดเซรามิกที่ใช้ในการทดสอบ

2.4.2 หินภูเขาไฟ (Pumice Stone)

หินภูเขาไฟ (Pumice stone) ที่นำมาทดสอบในงานวิจัยนี้ (แสดงในรูปที่ 2.4) เป็นวัสดุที่เกิดจากการระเบิดของภูเขาไฟได้มหาสมุทรส่งผลทำให้เกิดการหลอมตัวเนื่องจากความร้อนของทรายในทะเล มีลักษณะคล้ายลาวาและเกิดการเย็นตัวลงทันที ทำให้วัสดุประเภทนี้มีความพรุนและน้ำหนักเบา โดยมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลัก ตารางที่ 2.4 แสดงองค์ประกอบของหินภูเขาไฟที่นำมาทดสอบ



รูปที่ 2.4 หินภูเขาไฟที่ใช้ในการทดสอบ

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบทางเคมีของหินภูเขาไฟ

Material (Content)	Percentage
SiO ₂	62.53 %
Al ₂ O ₃	24.57 %
CaO	3.88 %
Fe ₂ O ₃	3.51 %
Na ₂ O	1.14 %
K ₂ O	0.58 %
MgO	0.43 %
MnO ₂	0.12 %
TiO ₂	Less than 0.05

หินภูเขาไฟ เป็นวัสดุทนไฟ ที่มีสมบัติในการเก็บกักความร้อน และช่วยเพิ่มความร้อนได้ เหมาะอย่างยิ่งสำหรับใช้เป็นวัสดุเผาไฟในเตาถ่าน หรือเตาอย่างบาร์บิคิว กรวดภูเขาไฟ สามารถเก็บกักความร้อนไว้ได้นาน มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน ไม่ผุกร่อน

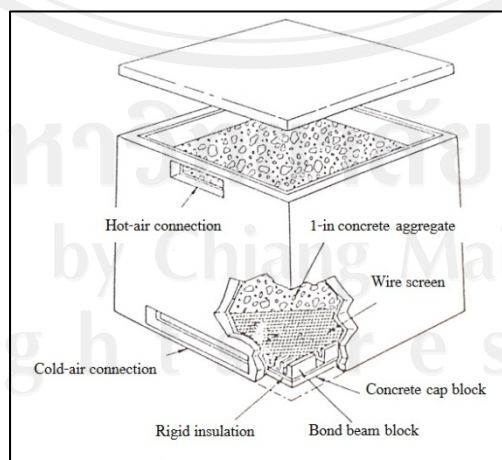
สมบัติเฉพาะของวัสดุเก็บสะสมความร้อนทั้งสองชนิดได้รับการทดสอบและสรุปผลดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 สมบัติเฉพาะของวัสดุเก็บสะสมความร้อน (ผลจากการทดลอง)

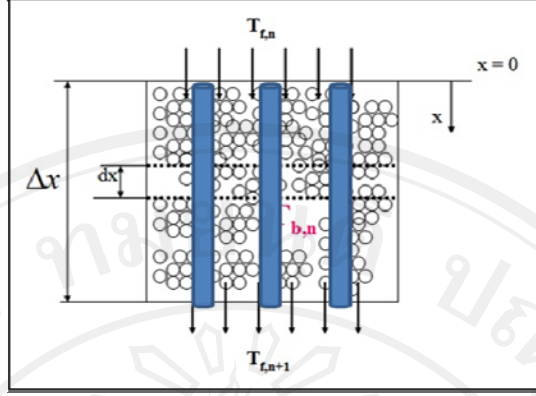
Material	Diameter (m)	Density (kg/m ³)	Cp(J/kg.K)
Stone	0.0075	0.914	1,350
	0.02	0.882	
	0.04	0.864	
Ceramic	0.015	3.667	2,690
	0.02	3.500	
	0.03	3.143	
	0.04	3.000	

2.5 ระบบสะสมพลังงานความร้อนแบบถังกรวด

ตัวอย่างระบบสะสมพลังงานความร้อนแบบถังกรวด ดังแสดงในรูปที่ 2.5 และ 2.6 รับความร้อนจากอากาศร้อนหรือแก๊สไอเสียไหลเข้าทางด้านบนของชั้นสะสมความร้อนและอากาศเย็นไหลเข้าทางด้านล่างของชั้นสะสมความร้อน



รูปที่ 2.5 ระบบการสะสมพลังงานแบบถังกรวด (Pebble bed) (Dunkle and Ellul , 1972)



รูปที่ 2.6 สมดุลพลังงานในระบบการสะสมพลังงานแบบถังกรวดที่มีการไหลแบบบายพาส

จากรูปที่ 2.6 แสดงการสมดุลพลังงานความร้อนเมื่อมีการไหลของอากาศเข้าสู่ชั้นสะสมความร้อนที่มีความหนา Δx โดยอากาศที่ไหลเข้าสู่ชั้นสะสมความร้อนมีอุณหภูมิ ($T_{a,i}$) และชั้นสะสมความร้อนที่พิจารณาอุณหภูมิ ($T_{b,t}$) สามารถคำนวณหาอุณหภูมิของอากาศที่ไหลออกจากชั้นสะสมความร้อน ($T_{a,o}$) และอุณหภูมิภายในชั้นสะสมความร้อนที่เวลา $t + \Delta t$ ($T_{b,t+\Delta t}$) ได้ดังสมการ

$$T_{a,o} = T_{b,t} + (T_{a,i} - T_{b,t}) \cdot \exp\left(-\frac{h_v A_{bed} \Delta x}{\dot{m}_a C_{p,a}}\right) \quad (2.1)$$

$$T_{b,t+\Delta t} = T_{b,t} + \frac{\dot{m}_a C_{p,a} (T_{a,i} - T_{a,o}) \Delta t}{m_b C_{p,b}} \quad (2.2)$$

อนึ่งเพื่อให้สมการที่คำนวณค่าเข้าหาคำตอบ ช่วงเวลาที่พิจารณาต้องมีค่าน้อยกว่าเวลาที่คำนวณจากสมการ

$$\Delta t \leq \frac{\rho_b (A_{bed} \Delta x) C_{p,a}}{\dot{m}_a C_{p,a} \left[1 - \exp\left(-\frac{h_v A_{bed} \Delta x}{\dot{m}_a C_{p,a}}\right) \right]} \quad (2.3)$$

ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร (h_v) โดยการแทนค่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองในสมการที่ 2.1 และคำนวณหาค่า h_v ออกมา ค่าดังกล่าวนี้จะถูกนำมาสร้างแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรในรูปของความสัมพันธ์ดังนี้ โดยที่ค่า a และ b เป็นค่าคงที่ที่ได้จากการทดลอง

$$h_v = a \left(\frac{G}{D_b} \right)^b \quad (2.4)$$

ในทำนองเดียวกัน ค่าความดันอากาศที่คร่อมเบดจากการทดลอง สามารถนำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบของความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้ (Jansun, 1985)

$$\begin{aligned}\Delta p &= \rho_a V_b^2 \left(\frac{L_v}{D_b} \right) \left[\frac{C_1}{\text{Re}} + C_2 \right] \\ \frac{\Delta p}{\rho_a V_b^2} &= \left(\frac{L_v}{D_b} \right) \text{Re}^{-2} [C_1 \text{Re} + C_2 \text{Re}^2] \\ \Delta p &= \frac{\Delta x G^2}{D_b \rho_b} \left[C_2 + C_1 \frac{\mu}{G D_b} \right]\end{aligned}\quad (2.5)$$

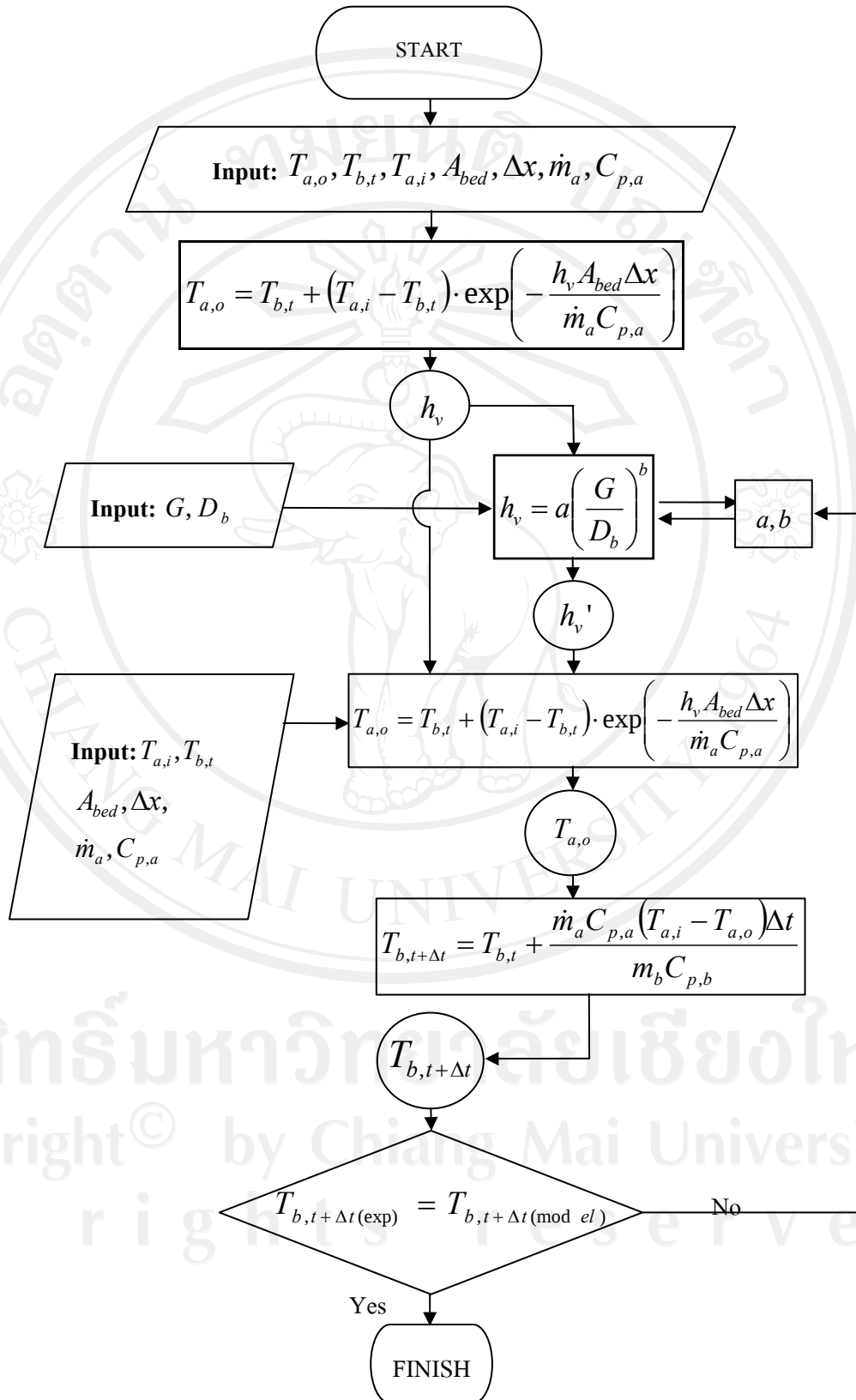
โดยแต่ละสมการมีการแสดงที่มาของสมการไว้ในภาคผนวก ข.1 การแสดงที่มาของสมการที่ใช้ในการคำนวณ

2.6 แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนของชั้นสะสมความร้อน

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อแสดงการถ่ายเทความร้อนจากอากาศสู่วัสดุสะสมความร้อนในชั้นสะสมความร้อน มีการตั้งสมมติฐานดังนี้ (สมศรีและวิทยา, 2528)

1. มีการไหลของอากาศในทิศทางเดียวกัน
2. การไหลของอากาศสม่ำเสมอ
3. ไม่มีการนำความร้อนในทิศทางการไหล
4. อุณหภูมิในก้อนหินเท่ากันตลอดทั้งชั้นสะสมความร้อน
5. ไม่มีการสูญเสียความร้อนให้แก่สิ่งแวดล้อม
6. ไม่มีการถ่ายเทมวล
7. ไม่คิดถึงอิทธิพลจากขอบถัง
8. อากาศและวัสดุสะสมความร้อนมีสมบัติไม่เปลี่ยนแปลง
9. ไม่มีการผลิตความร้อนขึ้นภายในชั้นสะสมความร้อน

โดยการคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีขึ้นในการคำนวณตามแผนผังในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แผนผังการคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์