บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 ระบบสะสมพลังงานความร้อน

พลังงานความร้อนสามารถเก็บสะสมไว้ในวัสดุหลายชนิด ซึ่งการใช้วัสดุสะสมความร้อนชนิดใดนั้นจะต้องให้สอดคล้องกับระบบสะสมความร้อนและการเลือกระบบสะสมพลังงานความร้อนชนิดใดมาใช้งานจะต้องคำนึงถึงสิ่งต่อไปนี้ (2), (4)

- ความจุความร้อนต่อหน่วยปริมาตรหรือต่อหน่วยน้ำหนักของวัสดุสะสมความร้อน
- ช่วงอุณหภูมิที่นำไปใช้งาน
- การแบ่งชั้นอุณหภูมิภายในถังสะสมความร้อน
- กำลังงานที่ใช้ในการนำความร้อนเข้าและออกจากระบบ
- ถังบรรจุและชิ้นส่วนโครงสร้างอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับระบบสะสมความร้อน
- วิธีควบคุมการสูญเสียความร้อนออกจากระบบสะสมพลังงานความร้อน
- ราคาของระบบสะสมความร้อน

ระบบสะสมความร้อนแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ ระบบสะสมความร้อนสัมผัส (Sensible heat storage) และระบบสะสมความร้อนแฝง (Latent heat storage) ระบบสะสมความร้อนสัมผัสเป็นที่นิยมนำมาใช้กันอย่างกว้างขวาง เพราะสร้างง่าย ราคาถูกและใช้งานง่ายกว่าระบบสะสมความร้อนแฝง

2.2 การสะสมความร้อนสัมผัส (Sensible heat storage)

ระบบสะสมความร้อนแบบสัมผัสเป็นระบบสะสมความร้อนที่ใช้งานง่ายและมีสมการที่เกี่ยวข้อง คือ

$$Q = mC_p \Delta T \qquad (2.1)$$

แต่ $m = \rho V$ (2.2)

เมื่อ m = มวลของวัสดุสะสมความร้อน

C_p = ค่าความร้อนจำเพาะของวัสดุสะสมความร้อน

ρ = ความหนาแน่นของวัสดุสะสมความร้อน

ΔT = ผลต่างอุณหภูมิของวัสดุสะสมความร้อน

ดังนั้น $Q = \rho V C_p \Delta T$ (2.3)

เมื่อกำหนดปริมาตรและผลต่างอุณหภูมิของวัสดุไว้แล้วค่าพลังงานความร้อนสัมผัสที่เก็บไว้จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่า ρ และ C_p ถ้าวัสดุมีค่า ρ และ C_p สูง ก็จะสามารถเก็บพลังงานความร้อนได้มาก ดังเช่นตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของวัสดุสะสมความร้อน (2)

วัสดุ	ความร้อนจำเพาะ C_p, kJ/kg^{o}K	ความหนาแน่น ρ, kg/m^3	อุณหภูมิ T, ^{o}C	ความร้อนจำเพาะเชิงปริมาตร, kJ/m^{3o}K
อากาศ	1.011	1.20	20	1.21
อิฐ	1.05	1700	21	1785
คอนกรีต	0.84	2200	21	1848
ก้อนหิน	0.88	2560	20	2251
เหล็ก	0.50	7850	0-200	3944
น้ำ	4.19	1000	4	4196

วัสดุที่นิยมใช้เป็นตัวสะสมความร้อนสัมผัสชนิดหนึ่ง คือ น้ำ แต่การสะสมความร้อนจะต้องต่ำกว่าจุดเดือดของน้ำ (อุณหภูมิ 100^{o}C ที่ความดันบรรยากาศ) เพราะถ้าน้ำมีอุณหภูมิสูงกว่า 100^{o}C น้ำจะเดือดกลายเป็นไอทำให้ระบบมีความดันสูงอาจเกิดการกัดกร่อนเมื่อสัมผัสกับโลหะ วัสดุที่นิยมใช้เป็นตัวสะสมความร้อนสัมผัสมากอีกชนิดหนึ่ง คือ ก้อนหินเพราะ

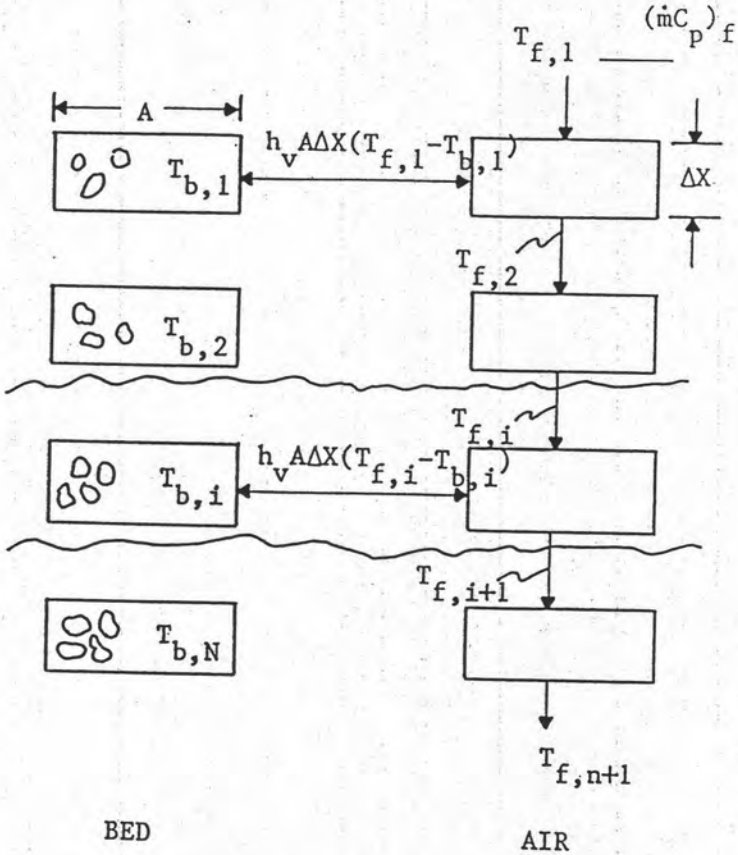
- ก้อนหินไม่ติดไฟและไม่เป็นพิษ
- ราคาถูกและหาได้ง่าย
- ก้อนหินทำหน้าที่เป็นทั้งตัวถ่ายเทความร้อนและสะสมความร้อน
- การถ่ายเทความร้อนระหว่างก้อนหินและของไหลให้ประสิทธิภาพที่ดีเพราะมีพื้นที่การถ่ายเทความร้อนมาก

ในระบบที่ใช้น้ำเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนจะนิยมใช้น้ำเป็นตัวสะสมความร้อน และในระบบที่ใช้อากาศเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนก็จะนิยมใช้ก้อนหินเป็นตัวสะสมความร้อนเพราะเป็นการลดค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับตัวแลกเปลี่ยนความร้อนและก้อนหินมีการแบ่งชั้นอุณหภูมิภายในถังสะสมความร้อนได้ดีกว่าน้ำ และไม่มีปัญหาเกี่ยวกับการผุกร่อน แต่ถังสะสมความร้อนที่ใช้ก้อนหินมีน้ำหนักและปริมาตรมากกว่าถังสะสมความร้อนที่ใช้น้ำเพราะก้อนหินมีค่าความร้อนจำเพาะเชิงปริมาตรต่ำกว่าน้ำ

2.3 การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนในรอคเบด

การสะสมความร้อนแบบรอคเบดอธิบายได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยอาศัยความสมดุลย์ของการถ่ายเทความร้อนของอากาศที่ไหลผ่านรอคเบด ที่เกิดขึ้นภายใต้สมมุติฐานดังต่อไปนี้ (4)

- การไหลของอากาศต้องสม่ำเสมอ
- มีการไหลของอากาศในทิศทางเดียว
- ไม่มีการนำความร้อนในทิศทางการไหล
- อุณหภูมิในก้อนหินเท่ากันตลอดทั้งก้อน
- ไม่มีการสูญเสียความร้อนจากรอคเบดสู่บรรยากาศ



รูปที่ 2.1

จากรูปที่ 2.1 แสดงถังเก็บสะสมความร้อนแบ่งออกเป็น N ชั้น โดยแต่ละชั้นมีความหนา ΔX และให้อุณหภูมิของเบดชั้นที่ i มีค่าอุณหภูมิ $T_{b,i}$ เท่ากันตลอดทั้งชั้น ดังนั้นการหาสมการที่ใช้อธิบายอุณหภูมิของอากาศจะอาศัยความสมดุลย์ทางด้านพลังงานดังนี้

พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทโดยการพา มีค่าเท่ากับผลต่างของพลังงานความร้อนของลมร้อนที่ไหลเข้าและออกจากปริมาตร $A\Delta X$ บวกกับ พลังงานความร้อนสะสมของอากาศ

พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทโดยการพา, $E_c = h_v A\Delta X(T_{f,i} - T_{b,i})$ (2.4)

ผลต่างของพลังงานความร้อนของลมร้อนที่ไหลเข้าและออกจากปริมาตร $A\Delta X$

$$E_f = (\dot{m}C_p)_f(T_{f,i} - T_{f,i+1}) \quad (2.5)$$

พลังงานความร้อนสะสมของอากาศ, $E_s = \varepsilon A\Delta X(\rho C_p)_f \frac{\Delta T_f}{\Delta \tau}$ (2.6)

$$E_c = E_f + E_s \quad (2.7)$$

$$h_v A\Delta X(T_{f,i} - T_{b,i}) = (\dot{m}C_p)_f(T_{f,i} - T_{f,i+1}) + \varepsilon A\Delta X(\rho C_p)\frac{\Delta T_f}{\Delta \tau} \quad (2.8)$$

$$h_v(T_{f,i} - T_{b,i}) = \frac{(\dot{m}C_p)_f}{A} \frac{(T_{f,i} - T_{f,i+1})}{\Delta X} + \varepsilon(\rho C_p)_f \frac{\Delta T_f}{\Delta \tau} \quad (2.9)$$

ใส่ $\lim_{\Delta X \to 0}$, $\lim_{\Delta \tau \to 0}$ ในสมการที่ (2.9)

$$h_v(T_{f,i} - T_{b,i}) = \frac{(\dot{m}C_p)_f}{A} \lim_{\Delta X \to 0} \frac{(T_{f,i} - T_{f,i+1})}{\Delta X}$$

$$+ \varepsilon(\rho C_p)_f \lim_{\Delta \tau \to 0} \frac{\Delta T_f}{\Delta \tau} \quad (2.10)$$

$$h_v(T_{f,i} - T_{b,i}) = \frac{(\dot{m}C_p)_f}{A} \frac{\partial T_f}{\partial X} + \varepsilon(\rho C_p)_f \frac{\partial T_f}{\partial \tau} \quad (2.11)$$

สลับข้าง

$$\varepsilon(\rho C_p)_f \frac{\partial T_f}{\partial \tau} + \frac{(\dot{m}C_p)_f}{A} \frac{\partial T_f}{\partial X} = h_v (T_{f,i} - T_{b,i}) \quad (2.12)$$

ในทำนองเดียวกันจะได้สมการที่ใช้อธิบายอุณหภูมิของเบดดังนี้

พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทโดยการพา มีค่าเท่ากับพลังงานความร้อนที่เก็บสะสมในเบด

พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทโดยการพา, $E_c = h_v A \Delta X (T_{f,i} - T_{b,i})$ (2.12)

พลังงานความร้อนที่เก็บสะสมในเบด, $E_s' = A \Delta X (1-\varepsilon)(\rho C_p)_b \frac{\Delta T_b}{\Delta \tau}$ (2.14)

$$E_c = E_s' \quad (2.15)$$

$$h_v A \Delta X (T_{f,i} - T_{b,i}) = A \Delta X (1-\varepsilon)(\rho C_p)_b \frac{\Delta T_b}{\Delta \tau} \quad (2.16$$

$$h_v(T_{f,i} - T_{b,i}) = (1-\varepsilon)(\rho C_p)_b \frac{\Delta T_b}{\Delta \tau} \quad (2.17)$$

ใส่ $\lim_{\Delta \tau \to 0}$ ในสมการ (2.17)

$$h_v(T_{f,i} - T_{b,i}) = (1-\varepsilon)(\rho C_p)_b \lim_{\Delta \tau \to 0} \frac{\Delta T_b}{\Delta \tau} \quad (2.18)$$

$$= (1-\varepsilon)(\rho C_p)_b \frac{\partial T_b}{\partial \tau} \quad (2.19)$$

สลับข้าง, $(1-\varepsilon)(\rho C_p)_b \frac{\partial T_b}{\partial \tau} = h_v(T_{f,i} - T_{b,i})$ (2.20)

ดังนั้นสมการที่ (2.12) และ (2.20) จะเป็นสมการดิฟเฟอเรนเชียลที่ใช้อธิบายอุณหภูมิของอากาศและอุณหภูมิของเบดตามลำดับ

สำหรับรอคเบดที่ใช้อากาศเป็นของไหลไหลผ่านเบดเทอม $(\rho C_p)_f \frac{\varepsilon \partial T_f}{\partial \tau}$ ในสมการที่ (2.12) มีค่าน้อยมากจึงไม่คิด จัดรูปสมการที่ (2.12) และ (2.20) ใหม่ได้

$$\frac{\partial T_f}{\partial (X/L)} = NTU\ (T_{f,i} - T_{b,i}) \qquad (2.21)$$

$$\frac{\partial T_b}{\partial \Theta} = NTU\ (T_{f,i} - T_{b,i}) \qquad (2.22)$$

เมื่อ T_b, T_f = อุณหภูมิของเบดและอุณหภูมิของอากาศ

Θ = $\tau(\dot{m}C_p)_f / \{(\rho C_p)_f (1-\varepsilon) AL\}$

NTU = $\frac{h_v AL}{(\dot{m}C_p)_f}$

h_v = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรระหว่างอากาศกับก้อนหิน

ε = ค่าความพรุนของรอคเบด

A = พื้นที่หน้าตัดของรอคเบด

L = ความยาวของรอคเบด

$\dot{m}$ = อัตราการไหลมวลของอากาศ

จากรูปที่ (2.1) สำหรับเบดที่มีความหนา ΔX และอุณหภูมิของเบดมีค่าเท่ากันตลอด จะให้สมการสำหรับหาอุณหภูมิของอากาศออกเบดชั้นที่ i ได้ดังนี้ (4)

$$\frac{T_{f,i+1} - T_{b,i}}{T_{f,i} - T_{b,i}} = e^{-NTU(\Delta X/L)} \qquad (2.23)$$

$$(\dot{m}C_p)_f (T_{f,i} - T_{f,i+1}) = (\dot{m}C_p)_f (T_{f,i} - T_{b,i})(1-e^{-NTU/N}) \qquad (2.24)$$

สมการ (2.24) เป็นสมการสมดุลย์พลังงานของเบดภายในช่วง ΔX และเมื่อแทนในสมการ (2.21) และ (2.22) จะได้

$$\frac{dT_{b,i}}{d\theta} = \eta N(T_{f,i} - T_{b,i}) \qquad (2.25)$$

เมื่อ $\eta = 1-e^{-NTU/N}$

$N = L/\Delta X$

สมการที่ (2.25) ให้สมการดิฟเฟอเรนเชียล N สมการและอุณหภูมิ N ค่า

2.4 วิธีการจำลองระบบสะสมความร้อนแบบรอคเบด

การจำลองปัญหาทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์โดยใช้คอมพิวเตอร์ เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพมากสำหรับการทำงานของระบบที่มีการแปรเปลี่ยนไปตามเวลา ระบบการสะสมความร้อนแบบรอคเบดที่พิจารณาในที่นี้ จะเป็นระบบย่อยที่ต่อเข้าด้วยกันเป็นระบบการสะสมความร้อนโดยใช้ความร้อนเสริมซึ่งเป็นระบบย่อยอันหนึ่งแทนระบบย่อยของแผงรับแสงอาทิตย์และเนื่องจากระบบย่อยเป็น module ทำให้การจำลองปัญหาทางคณิตศาสตร์หรือการจำลองระบบง่ายขึ้น เช่น module สำหรับความร้อนเสริม, module สำหรับรอคเบด เป็นต้น ซึ่งสามารถอธิบายการจำลองปัญหาทางคณิตศาสตร์ได้โดยไม่คำนึงถึงระบบย่อยอื่น ๆ เลยและการจำลองปัญหาของระบบเพื่อนำระบบย่อยมาต่อกันข้อมูลสามารถถ่ายทอดให้แก่กันได้

โปรแกรม TRNSYS(5) เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่จำลองฟังก์ชั่นระบบย่อยของระบบพลังงานแสงอาทิตย์ ใช้แก้สมการพลังงานและสมการที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของระบบ นอกจากนี้แต่ละระบบย่อยยังสามารถนำมาใช้ได้มากกว่าหนึ่งครั้งภายในระบบนั้น โครงสร้างของโปรแกรม TRNSYS ประกอบด้วยโปรแกรมหลักและโปรแกรมย่อย โปรแกรมหลักทำหน้าที่ควบคุมการทำงาน โปรแกรมย่อยจะเขียนขึ้นแทนระบบจริง ๆ เช่น ระบบความร้อนเสริม ถังสะสมความร้อนแบบรอคเบด เป็นต้น โปรแกรมย่อยยังได้เขียนขึ้นสำหรับงานที่จำเป็นสำหรับการจำลองปัญหาซึ่งประกอบด้วย การอ่านข้อมูล การอินทิเกรตทางคณิตศาสตร์ การพิมพ์ผลและสามารถพิมพ์ตัวโปรแกรมที่บรรจุอยู่ภายในออกมาได้ด้วย

โปรแกรม TRNSYS ในการนำไปใช้งานจะต้องระบุระบบย่อยที่ต้องใช้และวิธีการที่ระบบย่อยมาต่อกัน ข้อมูลที่ใส่เข้าไปจะเหมือนกับระบบจริง เช่น อุณหภูมิ อัตราการไหลของอากาศ ลักษณะการต่อร่วมกันของข้อมูลที่ใส่เข้าไปและผลที่ได้ออกมาจะเรียกว่า INFORMATION DIAGRAM ซึ่งทำให้เข้าใจในวิธีการใส่ข้อมูล นอกจากนี้โปรแกรม TRNSYS ยังระบุพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบไว้หลายแบบตามแต่จะเลือกนำมาใช้ในการจำลองปัญหา ระบบจะถูกคำนวณโดยโปรแกรมหลักและโปรแกรมย่อย จนกระทั่งค่าผลลัพธ์ของสมการดิฟเฟอเรนเชียลและสมการพีชคณิตอยู่ในช่วงความผิดพลาดที่กำหนด (Tolerance) ผลลัพธ์ของระบบถูกแสดงผลหรือพลอตเป็นกราฟออกมา วิธีการอินทิเกรตสำหรับโปรแกรม TRNSYS จะใช้วิธี MODIFIED-EULER อธิบายได้ดังนี้

ในการแก้สมการดิฟเฟอเรนเชียลของการเปลี่ยนแปลงตัวแปรตาม T ของระบบ ระหว่างเวลา $(t-\Delta t)$ และเวลา t

ที่เวลา t ค่าของตัวแปรตาม T^P จะทำนายจาก T_0 และ $(\frac{dT}{dt})_0$

$$T^P = T_0 + (\Delta t)(\frac{dT}{dt})_0 \qquad (2.26)$$

T^P เป็นค่าทำนายของตัวแปรตามที่เวลา t

T^C เป็นค่าที่ถูกต้องของตัวแปรตามที่เวลา t

T_0 เป็นค่าของตัวแปรตามที่เวลา $(t-\Delta t)$

Δt เป็นช่วงเวลาที่จะหาคำตอบของสมการ

$(\frac{dT}{dt})_0$ เป็นค่าของอนุพันธ์ของตัวแปรตามที่เวลา $(t-\Delta t)$

ค่าทำนายของตัวแปรตาม T^P จะนำไปหาค่า T^C โดยที่ค่า $(\frac{dT}{dt})$ เป็นฟังชั่นของ t , T^Pและคำตอบของสมการพีชคณิตของโมเดล

$$\frac{dT}{dt} = f(t, T^P, \text{คำตอบของสมการพีชคณิต}) \qquad (2.27)$$

ค่าที่ถูกต้องของตัวแปรตาม T^C ได้จากการใช้ Trapezoidal rule

$$T^C = T_0 + \frac{\Delta t}{2} \quad (\frac{dT}{dt})_0 + \frac{dT}{dt} \qquad (2.28)$$

ถ้า $\frac{2(T^C - T^P)}{(T^C + T^P)} > \varepsilon$ เมื่อ ε เป็นค่า Error tolerance

ตรวจสอบค่า T_c ถ้าไม่ได้ค่า Error tolerance ตามที่กำหนด สมการ (2.27) และ (2.28)จะถูกคำนวณซ้ำอีกจนกว่าจะได้ Error tolerance ตามต้องการ เมื่อคำนวณในช่วงเวลานั้นสมบูรณ์ วิธีการทั้งหมดก็จะคำนวณซ้ำอีกในช่วงเวลาต่อไป

2.4.1 ระบบการสะสมความร้อนโดยใช้ความร้อนเสริม

ในการทดลอง พลังงานความร้อนที่ให้แก่รอคเบดจะได้จากฮีตเตอร์ไฟฟ้าแทนพลังงานความร้อนที่ได้รับจากแผงรับแสงอาทิตย์ ซึ่งฮีตเตอร์ไฟฟ้าสามารถให้ค่าพลังงานความร้อนได้อย่างสม่ำเสมอ ส่วนในการคำนวณโดยอาศัยโปรแกรม TRNSYS นั้น พลังงานความร้อนที่ให้แก่ระบบย่อยสำหรับรอคเบด จะได้มาจากระบบย่อยสำหรับแผงรับแสงอาทิตย์และระบบย่อยสำหรับความร้อนเสริม แต่ไม่มีระบบย่อยสำหรับฮีตเตอร์ไฟฟ้าบรรจุอยู่ภายในโปรแกรม TRNSYS ดังนั้นเพื่อที่จะให้มีระบบย่อยสำหรับการสะสมความร้อนที่สอดคล้องกับการทดลอง จึงใช้ระบบย่อยสำหรับความร้อนเสริมที่มีอยู่ในโปรแกรม TRNSYS เป็นตัวให้พลังงานความร้อนแก่รอคเบดแทนฮีตเตอร์ไฟฟ้า

2.5 โมเดลทางคณิตศาสตร์ของระบบย่อย

2.5.1 เครื่องทำความร้อนเสริม

ลักษณะโดยทั่วไป

การเปิดและปิดเครื่องทำความร้อนเสริมจะอาศัยความสัมพันธ์ทางด้านคณิตศาสตร์มาอธิบายการควบคุมอุณหภูมิของอากาศที่นำไปใช้ให้มีอุณหภูมิเท่าที่กำหนดไว้ (T_{set}) อุณหภูมิอากาศที่ออกมา (T_0) จากเครื่องทำความร้อนเสริมจะคำนวณได้จากอุณหภูมิอากาศที่เข้า (T_i) และความจุความร้อนในเครื่องทำความร้อนเสริม

$$Q_{aux} = M_i C_{pf} (T_{set} - T_i) \qquad (2.29)$$

$$T_0 = (Q_{max}/M_i C_{pf}) + T_i \quad \text{ถ้า} \quad Q_{aux} > Q_{max} \qquad (2.30)$$

$$T_0 = (Q_{aux}/M_i C_{pf}) + T_i \quad \text{ถ้า} \quad Q_{aux} < Q_{max} \qquad (2.31)$$

$$M_0 = M_i$$

ถ้าอุณหภูมิของอากาศที่ออกจากเครื่องทำความร้อนเสริมมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิที่กำหนดไว้ เครื่องทำความร้อนเสริมก็จะเปิดทำงาน (γ=1) จนกระทั่งอุณหภูมิอากาศที่ออกมามีค่าเท่ากับอุณหภูมิที่กำหนดไว้เครื่องทำความร้อนเสริมก็จะปิด (γ=0) โดยที่เครื่องทำความร้อนเสริมจะเปิดหรือปิดการทำงานจะอยู่ในช่วงของความแตกต่างของอุณหภูมิ (ΔT) โดยที่ ΔT คือช่วงของความผิดพลาดของอุณหภูมิที่ยอมรับ

ลักษณะทางคณิตศาสตร์ของเครื่องทำความร้อนเสริม

ถ้า $\gamma = 0$ และ $(T_{set} - T_i) > \Delta T$, $\gamma = 1$

ถ้า $\gamma = 0$ และ $(T_{set} - T_i) < \Delta T$, $\gamma = 0$

ถ้า $\gamma = 1$ และ $T_0 < T_{set}$, $\gamma = 1$

ถ้า $\gamma = 1$ และ $T_0 > T_{set}$, $\gamma = 0$

012519 i 10298915

การนำโปรแกรม TRNSYS ไปใช้งานจะต้องระบุระบบย่อยที่ต้องใช้และวิธีการที่ข้อมูลของระบบย่อยมาต่อรวมกัน ซึ่งจะเรียกว่า Information flow diagram โดยแสดงไดอะแกรมเป็นตารางสี่เหลี่ยม และในแต่ละ Information flow diagram จะประกอบไปด้วย INPUT, OUTPUT, PARAMETER, DERIVATIVE

INPUT เป็นการบอกให้ทราบถึงข้อมูลที่ต้องใส่เข้าไปในระบบและจำนวนของข้อมูลโดย INPUT จะแสดงด้วยลูกศรที่เข้าสู่ไดอะแกรม

OUTPUT เป็นผลที่ได้จากการคำนวณ และจำนวนของผลจากการคำนวณ โดย OUTPUT จะแสดงด้วยลูกศรที่ออกจากไดอะแกรม

PARAMETER เป็นค่าคงที่ของตัวแปรในระบบย่อย ซึ่งในแต่ละ Information flow diagram จะบอกให้ทราบถึงค่าคงที่ของตัวแปรเหล่านั้นมีอะไรบ้าง

DERIVATIVE สมการทางด้านคณิตศาสตร์ของระบบย่อยบางระบบจะเป็นสมการดิฟเฟอเรนเชียล ดังนั้นต้องบอกจำนวนของสมการดิฟเฟอเรนเชียลและค่าเริ่มต้นของการจำลองปัญหา

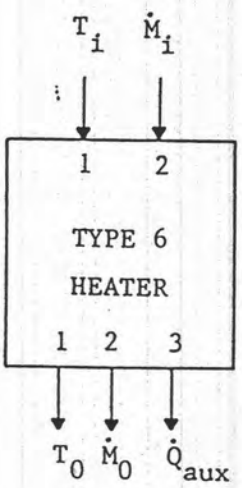
INFORMATION FLOW DIAGRAM

INPUTS 2*

OUTPUTS 3*

PARAMETERS 4*

DERIVATIVES 0



PARAMETERS

1. $\dot{Q}_{max}$
2. T_{set}
3. ΔT
4. C_{pf}

*จำนวนข้อมูล

โดยที่ C_{pf} – ความร้อนจำเพาะของอากาศ

M_i – อัตราการไหลมวลของอากาศที่เข้าเครื่องทำความร้อนเสริม

M_0 – อัตราการไหลมวลของอากาศที่ออกจากเครื่องทำความร้อนเสริม

Q_{max} – ความจุความร้อนสูงสุดของเครื่องทำความร้อนเสริม

Q_{aux} – อัตราความร้อนที่ต้องการ

T_i – อุณหภูมิของอากาศที่เข้าเครื่องทำความร้อนเสริม

T_0 – อุณหภูมิของอากาศที่ออกจากเครื่องทำความร้อนเสริม

T_{set} – อุณหภูมิของเครื่องทำความร้อนเสริมที่ตั้งไว้

γ – ฟังก์ชั่นควบคุมการทำงานของเครื่องทำความร้อนเสริมมีค่าเป็น 0 หรือ 1

$\gamma = 0$ หมายถึง เครื่องทำความร้อนเสริมปิด

$\gamma = 1$ หมายถึง เครื่องทำความร้อนเสริมเปิด

2.5.2 การละลมความร้อนแบบรอคเบด

ลักษณะโดยทั่วไป

การละลมความร้อนแบบรอคเบด สามารถอธิบายได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ของการถ่ายเทความร้อนจากอากาศไปยังแพคเบด มีสมมุติฐานดังนี้คือ ไม่มีการนำความร้อนอุณหภูมิในก้อนหินเท่ากันตลอดทั้งก้อนและการไหลของอากาศภายในเบดต้องสม่ำเสมอ ดังนั้นจะได้สมการดิฟเฟอเรนเชียลสำหรับการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้น คือ

$$\frac{\partial T_r}{\partial t} = \frac{NTU}{\tau} (T - T_r) \qquad (2.32)$$

$$\frac{\partial T}{\partial (X/L)} = NTU\ (T_r - T) - (\frac{UPL}{mC_p})(T - T_{env}) \qquad (2.33)$$

เมื่อ U = สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนจากรอคเบดสู่บรรยากาศ

P = เส้นรอบรูปของรอคเบด

L = ความยาวของรอคเบด

T_{env} = อุณหภูมิบรรยากาศ

คำตอบของสมการสามารถหาได้โดยวิธีไฟไนท์ ดิฟเฟอเรนซ์ (Finite Difference method) ในแง่ของการปฏิบัติจะกำหนดให้ค่า NTU → ∞ (4) ซึ่งได้สมการใหม่ดังนี้

$$A\rho_r C_r \frac{\partial T}{\partial t} = mC_p \frac{\partial T}{\partial t} - UP(T - T_{env}) \qquad (2.34)$$

$$T_r = T \qquad (2.35)$$

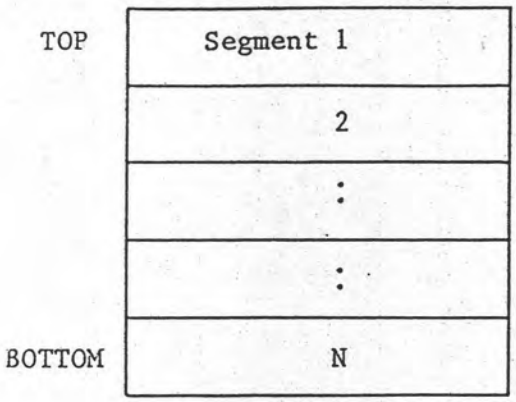
คำตอบที่ได้จากสมการ (2.34) และ (2.35) มีค่าใกล้เคียงกับคำตอบที่ได้จากสมการ (2.32) และ (2.33) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะสมมุติให้มีการนำความร้อนตามทิศทางการไหล ดังนั้นในส่วนต่อไปจะรวมค่าการนำความร้อนตามทิศทางการไหลไว้ด้วย

ลักษณะทางคณิตศาสตร์

สมการดิฟเฟอเรนเชียลที่ใช้อธิบายอุณหภูมิของอากาศและก้อนหิน (รวมการสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมและการนำความร้อนตามทิศทางการไหล) มีดังนี้

$$A\rho_r C_r \frac{\partial T}{\partial t} = mC_p \frac{\partial T}{\partial X} - UP(T-T_{env}) - kA \frac{\partial T}{\partial X^2} \qquad (2.36)$$

การหาคำตอบของสมการ (2.21) ใช้วิธีไฟไนท์ดิฟเฟอเรนซ์ โดยแบ่งถังสะสมออกเป็นส่วน ๆ ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2.2 Rock bed segmentation

เมื่อแบ่งถังออกเป็น N ส่วน จะได้สมการดิฟเฟอเรนเชียล N สมการ ดังนี้

สำหรับอากาศไหลจากด้านบนลงสู่ด้านล่างของถังสะสม (จากส่วนที่ 1 ไปยังส่วนที่ N)

$$\frac{V}{N}\rho_r C_r \frac{dT_1}{dt} = mC_p(T_{in} - T_1) - \frac{UPL}{N}(T_1 - T_{env}) - \frac{kA}{L}(T_1 - T_2) \qquad (2.37)$$

$$\frac{V}{N}\rho_r C_r \frac{dT_i}{dt} = mC_p(T_{i-1} - T_i) - \frac{UPL}{N}(T_i - T_{env}) + \frac{kA}{L}(T_{i-1} - T_i) - \frac{kA}{L}(T_i - T_{i+1}) \; ; \text{ for } i = 2, N-1 \qquad (2.38)$$

$$\frac{V}{N}\rho_r C_r \frac{dT_N}{dt} = mC_p(T_{N-1} - T_N) - \frac{UPL}{N}(T_N - T_{env}) + kA(T_{N-1} - T_N) \qquad (2.39)$$

สำหรับอากาศไหลจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบนของถังสะสม (จากส่วนที่ N ไปยังส่วนที่ 1)

$$\frac{V}{N}\rho_r C_r \frac{dT_N}{dt} = mC_p(T_{in} - T_N) - \frac{UPL}{N}(T_N - T_{env}) - \frac{kA}{L}(T_N - T_{N-1}) \quad (2.40)$$

$$\frac{V}{N}\rho_r C_r \frac{dT_i}{dt} = mC_p(T_{i-1} - T_i) - \frac{UPL}{N}(T_i - T_{env}) + \frac{kA}{L}(T_{i-1} - T_i)$$

$$- \frac{kA}{L}(T_i - T_{i+1}) \; ; \text{ for } i = 2, N-1 \quad (2.41)$$

$$\frac{V}{N}\rho_r C_r \frac{dT_1}{dt} = mC_p(T_2 - T_1) - \frac{UPL}{N}(T_1 - T_{env}) + kA(T_2 - T_1) \quad (2.42)$$

แนะนำ N ควรมีค่าเท่ากับ 5

$$Q_{TANK} = m_b C_p (T_1 - T_N) \quad (2.43)$$

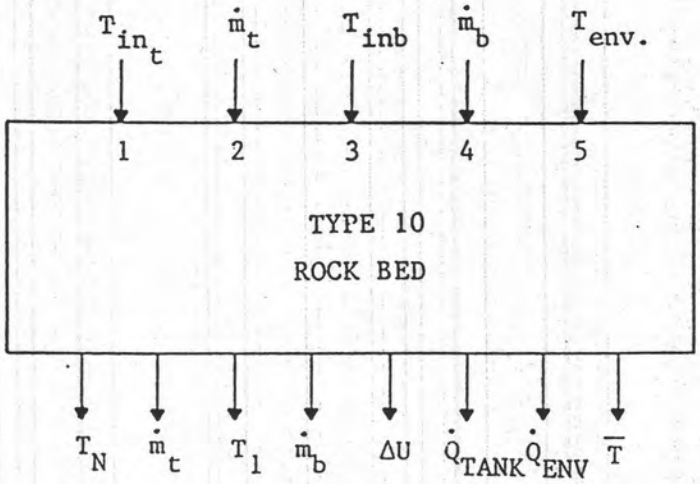
INFORMATION FLOW DIAGRAM

INPUTS 5

OUTPUTS 8

PARAMETERS 8

DERIVATIVES N



PARAMETERS

1. C_p
2. L
3. A
4. P
5. C_r
6. ρ_r
7. U
8. k

โดยที่

C_p – ความจุความร้อนของอากาศ

C_r – ความจุความร้อนของก้อนหิน

k – การนำความร้อนแบบแอฟเฟคตีฟของรอคเบดในทิศทางการไหล

Q_{env} – อัตราพลังงานที่สูญเสียสู่บรรยากาศ

Q_{TANK} – อัตราพลังงานที่ออกจากถังสะสมความร้อนไปยังภาระ

T_{in} – อุณหภูมิอากาศที่เข้าสู่รอคเบด

T_i – อุณหภูมิอากาศและก้อนหินชั้นที่ i

t – เวลา

V – ปริมาตรของรอคเบด = AL

ΔU – การเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของรอคเบด

NTU – $\frac{h_v V}{mC_p}$

ρ_r – ความหนาแน่นของก้อนหิน

τ – $\frac{V\rho_r C_r}{mC_p}$