

ตารางที่ 24 แสดงค่าเฟวริงแพคเตอร์ (ต่อ)

ชนิดของของไหล	ค่าเฟวริงแพคเตอร์	
	($Wm^{-2} K^{-1}$)	($Btu ft^{-2} h^{-1} ^\circ F^{-1}$)
ของเหลว		
น้ำเกลือ	3, 700	700
สารอินทรีย์	5, 600	1, 000
น้ำมันเชื้อเพลิง	1, 000	200
ก๊าซ		
อากาศ	2,000 – 4,000	300- 700
ไอของสาร	7, 000	1, 300

การออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

เมื่อกำหนดให้ปริมาณความร้อนที่มีการไหลเข้าออกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนั้นไม่มีการสูญเสียความร้อน ดังนั้นปริมาณความร้อนที่ของไหลร้อนให้ จะเท่ากับปริมาณความร้อนที่ของไหลเย็นได้รับ

จากสมดุลของพลังงาน

ปริมาณความร้อนทั้งหมดที่เข้าระบบต่อเวลา - ปริมาณความร้อนทั้งหมดที่ออกจากระบบต่อเวลา

$$- \text{อัตราการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้น} = 0$$

$$M_i h_i - M_o h_o - Q = 0$$

เมื่อ M_i และ M_o เป็นอัตราการไหลของของไหลที่ไหลเข้าและออกจากระบบตามลำดับ

h_i และ h_o เป็นเอนทัลปีจำเพาะของของไหลที่ไหลเข้าและออก ตามลำดับ

Q เป็นอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้น

$$M_h (h_{hi} - h_{ho}) - Q_h = 0$$

หรือ $M_h (h_{hi} - h_{ho}) = Q_h$

เมื่อตัวห้อย h หมายถึง ของไหลร้อน

c หมายถึง ของไหลเย็น

ในทำนองเดียวกัน

$$M_c (h_{ci} - h_{co}) + Q_c = 0$$

หรือ $M_c (h_{ci} - h_{co}) = Q_c$

$$M_h C_{ph} (T_{hi} - T_{ho}) = M_c C_{pc} (T_{co} - T_{ci}) = Q$$

เมื่อ C_{ph} , C_{pc} เป็นความจุความร้อนของของไหลร้อนและของไหลเย็นตามลำดับ

T_h , T_c เป็นอุณหภูมิของของไหลร้อนและของไหลเย็นตามลำดับ

M_h , M_c เป็นอัตราการไหลของของไหลร้อนและของไหลเย็นตามลำดับ

ตัวอย่างที่ 34 อาหารเลี้ยงเชื้อที่ผ่านการทำลายเชื้อโดยมีอุณหภูมิเป็น 121 องศาเซลเซียส ถ้าจำเป็นต้องลดอุณหภูมิลงโดยการผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบทอสองชั้น โดยการไหลผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยอัตราการไหลเท่ากับ 10 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง เพื่อให้อุณหภูมิของอาหารที่ออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีอุณหภูมิเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส โดยการใช้น้ำที่มีอุณหภูมิเท่ากับ 15 องศาเซลเซียส และไหลผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยอัตราการไหลเท่ากับ 25 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง เมื่อกำหนดให้คุณสมบัติของอาหารเลี้ยงเชื้อเหมือนกับคุณสมบัติของน้ำ โดยที่ความหนาแน่นของน้ำเท่ากับ 1,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และความจุความร้อนของน้ำเท่ากับ 75.4 จูลต่อกรัมไมล์ต่อองศาเซลเซียส

1. จงคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อน
 2. จงคำนวณอุณหภูมิของน้ำที่ไหลออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
- วิธีทำ

$$M_h = \frac{10^3 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \cdot 1 \text{ h} \cdot 1,000 \text{ kg}}{3600 \text{ s} \cdot 1 \text{ m}^3}$$

$$= 2.78 \text{ kg s}^{-1}$$

$$M = \frac{25 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \cdot 1 \text{ h} \cdot 1,000 \text{ kg}}{3600 \text{ s} \cdot 1 \text{ m}^3}$$

$$= 6.94 \text{ kg s}^{-1}$$

$$C_{ph} = C_{pc}$$

$$= 75.4 \text{ J mol}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \cdot \frac{1 \text{ gmol} \cdot 1,000 \text{ g}}{18 \text{ g} \cdot 1 \text{ kg}}$$

$$= 4.19 \times 10^3 \text{ J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}$$

เนื่องจาก $Q = M_h C_{ph} (T_{hi} - T_{ho})$

$$= (2.78 \text{ kg s}^{-1})(4.19 \times 10^3 \text{ J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1})(121-30)^\circ\text{C}$$

$$= 1.06 \times 10^6 \text{ Js}^{-1}$$

$$= 1060 \text{ kW}$$

$$Q = M_c C_{pc} (T_{co} - T_{ci})$$

$$2. \quad T_{co} = T_{ci} + \frac{Q}{M_c C_{pc}}$$

$$T_{co} = 15^\circ\text{C} + \frac{1.06 \times 10^6 \text{ Js}^{-1}}{(6.94 \text{ kg s}^{-1})(4.19 \times 10^3 \text{ J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C})}$$

$$= 51.5^\circ\text{C}$$

ตัวอย่างที่ 35 น้ำหนักปริมาตร 150 ลูกบาศก์เมตร ที่อยู่ในถังหมักที่มีการควบคุมอุณหภูมิที่ 37 องศาเซลเซียส เพื่อผลิตเซลล์ยีสต์โดยการใช้น้ำตาลกลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอน จากอัตราการใช้ออกซิเจนของเชื้อดังกล่าว พบว่ามีค่าเป็น 1.5 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง เมื่อการกวน น้ำหนักในถังหมักทำให้เกิดความร้อนเท่ากับ 1 กิโลวัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร ถ้าน้ำเย็นที่ไหลล่อเป็น น้ำจากแม่น้ำที่มีอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส และไหลผ่านขดท่อที่อยู่ภายในถังหมักด้วยอัตราการไหลเท่ากับ 60 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง จงคำนวณอุณหภูมิของน้ำเย็นที่ไหลออกจากถังหมัก เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ เมื่อกำหนดให้อัตราการถ่ายเทความร้อนของเชื้อที่เกิดจากการใช้ออกซิเจน เป็น 460 กิโลจูลต่อกรัมโมล

วิธีทำ อัตราการถ่ายเทความร้อนจากการเพาะเลี้ยง สามารถคำนวณได้โดยตรงจากปริมาณ ออกซิเจนที่ใช้ โดยที่

$$\begin{aligned} \Delta H_{rxn} &= \frac{-460 \text{ kJ}}{\text{gmol}} \frac{1 \text{ gmol}}{32 \text{ g}} \times \frac{1,000 \text{ g}}{1 \text{ kg}} (1.5 \text{ kg m}^{-3} \text{ h}^{-1}) \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \times 150 \text{ m}^3 \\ &= -898 \text{ kJs}^{-1} \\ &= -898 \text{ kW} \end{aligned}$$

ปริมาณความร้อนที่เกิดจากการกวน

$$(1 \text{ kW m}^{-3})(150 \text{ m}^3) = 150 \text{ kW}$$

$$\begin{aligned} Q &= (898 \times 150) \text{ kW} \\ &= 1048 \text{ kW} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_c &= 60 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \frac{1,000 \text{ kg}}{1 \text{ m}^3} \\ &= 16.7 \text{ kg s}^{-1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_{pc} &= 75.4 \text{ J gmol}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \frac{1 \text{ gmol}}{18 \text{ g}} \frac{1,000 \text{ g}}{1 \text{ kg}} \\ &= 4.19 \times 10^3 \text{ J kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
T_{co} &= T_{ci} + \frac{Q}{M_c C_{pc}} \\
&= 10^\circ\text{C} + \frac{1048 \times 10^3 \text{ J s}^{-1}}{(16.7 \text{ kg s}^{-1})(4.19 \times 10^3 \text{ J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1})} \\
&= 25.0^\circ\text{C}
\end{aligned}$$

ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ย

โดยทั่วไปแล้วผลต่างระหว่างอุณหภูมิของของไหลร้อนกับอุณหภูมิของของไหลเย็นที่ปากทางเข้าและที่ปากทางออกของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ทั้งกรณีที่เป็นการไหลในทิศทางเดียวกันหรือการไหลที่สวนทางกัน จะพบว่ามีค่าที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงได้กำหนดผลต่างอุณหภูมิดังกล่าวในเทอมอุณหภูมิเฉลี่ยเชิงลอการิทึม (logarithmic mean temperature difference, ΔT_L) จากข้อกำหนดที่ว่า

1. สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (U) มีค่าคงที่ตลอดระยะทางของการไหลในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
2. ค่าความร้อนจำเพาะของของไหลตลอดระยะทางการไหลมีค่าคงที่
3. ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะของของไหลจากของเหลวเป็นกาซ หรือจากกาซเป็นของเหลว
4. ไม่มีการสูญเสียความร้อนออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

$$\begin{aligned}
\text{โดยที่ } \Delta T_L &= \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2/\Delta T_1)} \\
&= \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{2.303 \log(\Delta T_2/\Delta T_1)}
\end{aligned}$$

เมื่อ ΔT_1 และ ΔT_2 เป็นผลต่างของอุณหภูมิระหว่างของไหลร้อนและของไหลเย็นที่ปลายของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

กรณีที่เป็นการไหลแบบทิศทางเดียวกัน

$$\Delta T_L = \frac{(\Delta T_{h,i} - \Delta T_{c,i}) - (\Delta T_{h,o} - \Delta T_{c,o})}{\ln((\Delta T_{h,i} - \Delta T_{c,i}) / (\Delta T_{h,o} - \Delta T_{c,o}))}$$

กรณีที่เป็นการไหลแบบสวนทางกัน

$$\Delta T_L = \frac{(\Delta T_{h,o} - \Delta T_{c,i}) - (\Delta T_{h,i} - \Delta T_{c,o})}{\ln((\Delta T_{h,o} - \Delta T_{c,i}) / (\Delta T_{h,i} - \Delta T_{c,o}))}$$

ในกรณีที่ของไหลหนึ่งมีค่าค่อนข้างคงที่ เช่นกรณีการควบคุมอุณหภูมิในถังหมัก สามารถใช้ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยเชิงเลขคณิต (arithmetic mean temperature different, ΔT_m) แทนได้ โดยที่

$$\Delta T_m = \frac{2 T_F - (T_1 + T_2)}{2}$$

เมื่อ T_F เป็นอุณหภูมิของของไหลในถังหมัก

T_1 และ T_2 เป็นอุณหภูมิที่ทางเข้าและที่ทางออกของของไหลอีกชนิด ตามลำดับ

ตัวอย่างที่ 36 จงคำนวณผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยเชิงลอการิทึม เมื่อน้ำมีอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ถูกทำให้เย็นลงที่อุณหภูมิ 32 องศาเซลเซียส ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น โดยลักษณะการไหลของของไหลทั้งสองเป็นแบบสวนทางกัน ถ้าน้ำเย็นที่ใช้หล่อเย็นมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 20 เป็น 44 องศาเซลเซียส

วิธีทำ

$$\Delta T_L = \frac{(\Delta T_{h,o} - \Delta T_{c,i}) - (\Delta T_{h,i} - \Delta T_{c,o})}{\ln((\Delta T_{h,o} - \Delta T_{c,i}) / (\Delta T_{h,i} - \Delta T_{c,o}))}$$

$$\Delta T_L = \frac{(70 - 44)^\circ\text{C} - (32 - 20)^\circ\text{C}}{\ln \frac{(70 - 44)}{(32 - 20)}} = 18.1^\circ\text{C}$$

ตัวอย่างที่ 37 ในถังหมักเพนนิซิลิน ซึ่งต้องมีการควบคุมอุณหภูมิที่ 27 องศาเซลเซียส หลังจากพิจารณาถึงปริมาณออกซิเจนที่เชื้อต้องการ และปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นจากการกวนแล้ว พบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดนั้น ประมาณ 550 กิโลวัตต์ ถ้าน้ำที่ใช้ในการหล่อเย็นนั้นมีอุณหภูมิเป็น 10 องศาเซลเซียส โดยสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อนของน้ำหมักเท่ากับ 2,150 วัตต์ต่อตารางเมตรต่อองศาเซลเซียส สัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อนของน้ำหล่อเย็นเท่ากับ 14,000 วัตต์ต่อตารางเมตรต่อองศาเซลเซียส ถ้าต้องการควบคุมอุณหภูมิในถังหมัก โดยการใช้ชุดท่อระบายความร้อน โดยเส้นผ่านศูนย์กลางของชุดท่อเท่ากับ 8 เซนติเมตร ความหนาของชุดท่อเท่ากับ 5 มิลลิเมตร และค่าการนำความร้อนของเหล็กที่ใช้ทำชุดท่อมีค่าเท่ากับ 60 วัตต์ต่อเมตรต่อองศาเซลเซียส แผงเตอร์ของเฟอวาลิ่ง เป็น 8,500 วัตต์ต่อตารางเมตร ต่อองศาเซลเซียส จงคำนวณความยาวของชุดท่อที่ต้องใช้

วิธีทำ

$$Q = 550 \times 10^3 \text{ W}$$

$$T = \frac{2(T_F - (T_1 + T_2))}{2}$$

$$= \frac{2(27 - (10 + 25))^\circ\text{C}}{2}$$

$$= 9.5^\circ\text{C}$$

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_m} + \frac{1}{h_h} + \frac{EI}{k} + \frac{1}{h_c} + \frac{1}{h_{fc}}$$

$$= \left(\frac{1}{2,150} + \frac{5 \times 10^{-3}}{60} + \frac{1}{14,000} + \frac{1}{8,500} \right) \text{ m}^2\text{C W}^{-1}$$

$$\begin{aligned}
&= (4.65 \times 10^{-4} + 8.33 \times 10^{-5} + 7.14 \times 10^{-5} + 1.18 \times 10^{-4}) \text{ m}^2 \text{ } ^\circ\text{C W}^{-1} \\
&= 7.38 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ } ^\circ\text{C W}^{-1} \\
U &= 1,355 \text{ w m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \\
A &= \frac{550 \times 10^3 \text{ w}}{(9.5 \text{ } ^\circ\text{C}) (1,355 \text{ w m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})} \\
&= 42.7 \text{ m}^2 \\
A &= 2 \pi R L
\end{aligned}$$

เมื่อ R เป็นรัศมีของท่อ

L เป็นความยาวของท่อ

$$\begin{aligned}
L &= \frac{A}{2 \pi R} \\
L &= \frac{42.7 \text{ m}^2}{\frac{2 \pi (8 \times 10^{-2} \text{ m})}{2}} \\
&= 169.9 \text{ m}
\end{aligned}$$

ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ไร้หน่วยที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อน

เนื่องจากความซับซ้อนของระบบและพารามิเตอร์ต่างๆที่ขึ้นกับคุณสมบัติทางกายภาพ และรูปร่างของถังหมัก จึงทำให้มีการใช้วิธี dimensional analysis มาวิเคราะห์ระบบ โดยการกำหนดความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่างๆในรูปของกลุ่มไร้หน่วย (dimensionless groups) โดยที่

นัสเซิลท์นัมเบอร์ (Nusselt number, Nu) เป็นกลุ่มตัวเลขไร้หน่วยที่เกี่ยวข้องกับสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ความเร็วของของไหล ตลอดจนคุณสมบัติของของไหล และรูปทรงของวัตถุ

โดยที่
$$Nu = f(Re, Pr, Gr, D, \mu_b)$$

$L \quad \mu_w$

เมื่อ Nu = นัสเซิลท์นัมเบอร์ (Nusselt number)

และ
$$= \frac{h D}{k}$$

เรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds number, Re) เป็นกลุ่มตัวเลขไร้หน่วยที่แสดงลักษณะของของไหลที่เกิดขึ้น

กรณีที่เป็นการไหลของของไหลในท่อ

$$Re = \frac{D u \rho}{\mu_b}$$

กรณีที่เป็นการไหลในระบบที่มีการกวน

$$Re_i = \frac{N_i D_i^2 \rho}{\mu_b}$$

พรานเดิลนัมเบอร์ (Prandtl number, Pr) เป็นกลุ่มตัวเลขไร้หน่วยที่แสดงสัดส่วนของโมเมนตัมกับการถ่ายเทความร้อน

โดยที่
$$Pr = \frac{C_p \mu_b}{k}$$

กราชอฟนัมเบอร์ (Grashof number, Gr) เป็นกลุ่มตัวเลขไร้มิติที่เป็นอัตราส่วนระหว่างแรงลอยตัวกับแรงจากความต้านทาน

$$\text{โดยที่ } Gr = \frac{D^3 g \rho^2 \beta \Delta T}{\mu_b^2}$$

เมื่อ h เป็นสัมประสิทธิ์ของการพาความร้อน

L เป็นความยาวของท่อ

k เป็นสภาพการนำความร้อนของก้อนของไหล

C_p เป็นความจุความร้อนเฉลี่ยของของไหล

μ_b เป็นความหนืดไดนามิกส์หรือความหนืดสมบูรณ์ของของไหล

μ_w เป็นความหนืดไดนามิกส์หรือความหนืดสมบูรณ์ที่ผิวท่อ

D เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อหรือถัง

u เป็นความเร็วเชิงเส้นของของไหลในท่อ

ρ เป็นความหนาแน่นโดยเฉลี่ยของของไหล

N_i เป็นความเร็วรอบของใบกวน

D_i เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของใบกวน

g เป็นความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

β เป็นสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงปริมาตร (coefficient of volume expansion) เนื่องจากความร้อน

$$\text{ดังนั้น } Nu = C Re^a Pr^b$$

เมื่อ C , a และ b เป็นค่าที่ได้จากการทดลอง ซึ่งต้องพิจารณาเป็นกรณี

สัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อนของของไหลในท่อ โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลง

กรณีการไหลแบบปั่นป่วน ที่มีค่า Re อยู่ในช่วง 10^4 ถึง 1.2×10^5 Pr มีค่าอยู่ในช่วง 0.7 ถึง 120 และสัดส่วนของ L/D ควรมีค่ามากกว่า 60 สามารถแสดงค่าตัวเลขสัมประสิทธิ์ได้ดังนี้

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad \text{สมการที่ 68}$$

กรณีที่ของเหลวมีความหนืด สมการที่ 68 จะถูกดัดแปลงเป็น

$$Nu = 0.027 Re^{0.8} Pr^{0.33} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad \text{สมการที่ 69}$$

เมื่อ μ_b เป็นความหนืดที่ได้จากอุณหภูมิเฉลี่ย

μ_w เป็นความหนืดของของไหลที่ออกจากระบบ

ตัวอย่างที่ 38 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อกับเซลล์ที่ใช้ในกระบวนการแยกโปรตีน โดยการป้อนสารละลายเกลือ 25.5 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ให้ไหลผ่านท่อที่วางเรียงขนานกันอยู่ 42 ท่อภายในเซลล์ โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อเท่ากับ 1.5 เซนติเมตร ความยาวเท่ากับ 4 เมตร และคุณสมบัติของสารละลายเกลือ นั้น มีความหนืดเป็น 10^{-3} กิโลกรัมต่อเมตรต่อวินาที ความหนาแน่นเป็น 1,010 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความจุความร้อนเฉลี่ยของสารละลายเกลือเท่ากับ 4 กิโลจูลต่อกิโลกรัมต่อองศาเซลเซียส สัมประสิทธิ์ของการนำความร้อนเท่ากับ 0.4 วัตต์ต่อเมตรต่อองศาเซลเซียส จงคำนวณสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อน

วิธีทำ

พื้นที่ของการแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งหมด = จำนวนท่อ x พื้นที่ของท่อ

$$= 42 (\pi R^2)$$

$$= 42 \pi \left(\frac{1.5 \times 10^{-2} \text{ m}}{2} \right)^2$$

$$= 7.42 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$u = \frac{\text{อัตราการไหล}}{\text{พื้นที่}}$$

$$= \frac{25.5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \quad \mathbf{Ih}}{7.42 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \quad \mathbf{3,600 s}}$$

$$= 0.95 \text{ m s}^{-1}$$

$$\mathbf{Re} = \frac{D u \rho}{\mu_b}$$

$$= \frac{(1.5 \times 10^{-2} \text{ m}) (0.95 \text{ m s}^{-1}) (1,010 \text{ kg m}^{-3})}{\text{kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}}$$

$$= 1.44 \times 10^4$$

$$\mathbf{Pr} = \frac{C_p \mu_b}{k}$$

$$= \frac{(4 \times 10^3 \text{ J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}) (10^{-3} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1})}{0.64 \text{ J s}^{-1} \text{ m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}}$$

$$= 6.25$$

$$\text{จาก } L/D = 267 > 60$$

$$10^4 < \text{Re} = 1.44 \times 10^4 < 1.2 \times 10^5$$

$$0.7 < \text{Pr} = 6.25 < 120$$

จึงสามารถใช้สมการที่ 68 ในการคำนวณหาค่า Nu ได้

$$\text{จาก } \text{Nu} = 0.023 \text{Re}^{0.8} \text{Pr}^{0.4}$$

$$\text{จะได้ } \text{Nu} = 0.023 (1.44 \times 10^4)^{0.8} (6.25)^{0.4}$$

$$= 101.6$$

$$h = \frac{101.6 (0.64 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1})}{1.5 \times 10^{-2} \text{ m}}$$

$$= 4335 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

สัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อนของของไหลที่ไหลผ่านกลุ่มท่อ โดยไม่มีการเปลี่ยนเฟส

ในกรณีของไหลที่ไหลผ่านกลุ่มท่อ จะพบว่า การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้น จะขึ้นอยู่กับความเร็วของของไหลที่วิ่งผ่าน ลักษณะการจัดวางแนวท่อ ซึ่งอาจวางในแนวเดียวกัน (aligned) หรือวางในแนวสลับหรือเยื้องกัน (staggered) โดยที่

$$\text{Nu} = C \text{Re}_{\text{max}}^{0.6} \text{Pr}^{0.33}$$

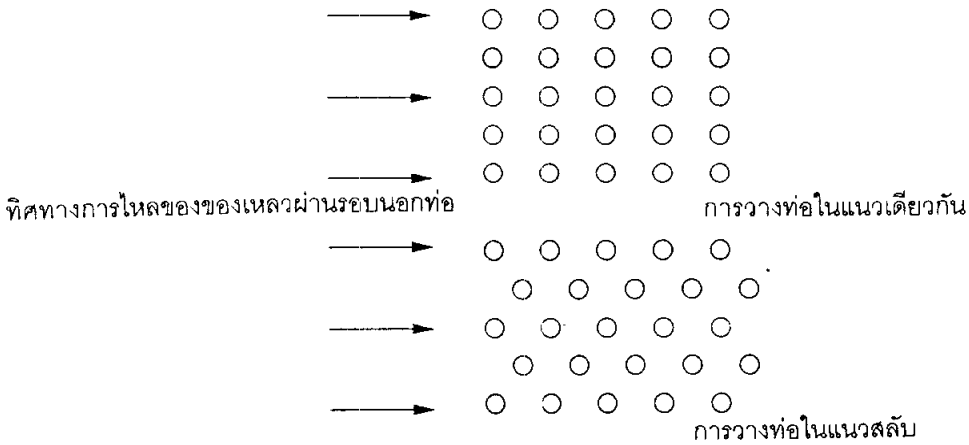
สมการที่ 70

เมื่อ $C = 0.26$ กรณีการวางท่อในแนวเดียวกัน

$C = 0.33$ กรณีการวางท่อในแนวสลับ

D เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อ

Re_{max} เป็น Re ที่ความเร็วสูงสุดของของไหล



รูปที่ 38 แสดงการจัดวางแนวท่อ

สัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อนในถังที่มีการกวน

การพิจารณาสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อนในถังที่มีการกวน จะขึ้นกับชนิดและความเร็วในการกวน ตลอดจนคุณสมบัติของของไหลนั้น ในกรณีที่มีการถ่ายเทความร้อนในระบบที่เป็นขดท่อภายในถังกวน สามารถคำนวณค่า h ได้โดย

$$Nu = 0.87 Re_i^{0.62} Pr^{0.33} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad \text{สมการที่ 71}$$

$$= \frac{h D_i}{k}$$

เมื่อ

Re_i = ความเร็วรอบของใบกวน

h = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ผิวด้านนอกของขดท่อ

D_i = เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของใบกวน

ในกรณีที่น้ำหมักมีความหนืดน้อย เช่น น้ำ จะถือค่า μ_b มีค่าที่ไม่แตกต่างจากค่า μ_w

ในกรณีการถ่ายเทความร้อนในระบบที่เป็นการหล่อเย็นรอบถัง สามารถ
คำนวณค่า h ได้โดย

$$Nu = 0.34 Re_i^{0.67} Pr^{0.33} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad \text{สมการที่ 72}$$

ตัวอย่างที่ 39 ในถังหมักแบบกวนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถังกวน เป็น 5 เมตร โดย
ภายในถังหมักมีขดเกลียวที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อน ใบกวนที่ใช้เป็นชนิดเทอร์โบที่มีเส้นผ่าน
ศูนย์กลางเท่ากับ 1.8 เมตร และมีการกวนด้วยความเร็ว 60 รอบต่อนาที โดยลักษณะของน้ำหมัก
มีความหนืด เท่ากับ 5×10^{-3} พาสคัล วินาที ความหนาแน่นเป็น 1,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์
เมตร ความจุความร้อนเป็น 4.2 กิโลจูลต่อกิโลกรัมต่อองศาเซลเซียส สัมประสิทธิ์การนำความ
ร้อนของของเหลวเท่ากับ 0.70 วัตต์ต่อเมตรต่อองศาเซลเซียส จงคำนวณสัมประสิทธิ์ของการ
ถ่ายเทความร้อน

วิธีทำ

$$\begin{aligned} Re_i &= \frac{N_i D_i^2 \rho}{\mu_b} \\ &= \frac{(60 \text{ min}^{-1}) \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} (1.8 \text{ m})^2 (1,000 \text{ kg m}^{-3})}{5 \times 10^{-3} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}} \\ &= 6.48 \times 10^5 \\ Pr &= \frac{C_p \mu_b}{k_b} \\ &= \frac{(4.2 \times 10^3 \text{ J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1})(5 \times 10^{-3} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1})}{0.70 \text{ J s}^{-1} \text{ m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 30 \\
 \text{Nu} &= \frac{h D}{k} \\
 &= 0.87 (6.48 \times 10^5)^{0.33} (30)^{0.66} \\
 &= 1.07 \times 10^4 \\
 h &= \frac{\text{Nu } k}{D} \\
 &= \frac{(1.07 \times 10^4) (0.70 \text{ Wm}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1})}{5 \text{ m}} \\
 &= 1,501 \text{ Wm}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \\
 &= 1.5 \text{ kWm}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}
 \end{aligned}$$

ความสัมพันธ์ระหว่างการถ่ายเทความร้อน และปริมาณเซลล์ในถังหมักที่มีการกวน

จากสมการของการถ่ายเทความร้อนและสมดุลพลังงาน มีส่วนที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบกระบวนการหมัก เนื่องจากเมแทบอลิซึมของเซลล์ มักทำให้เกิดความร้อนในปริมาณที่มากกว่าความร้อนที่เกิดจากการกวน ดังนั้นปริมาณความร้อนที่ต้องถูกถ่ายเทออกไปจากถังหมักส่วนใหญ่ จึงเกี่ยวข้องกับปริมาณเซลล์ที่มีในถังหมัก

โดยที่
$$q = -AH_{rxn}$$

ในกระบวนการหมักที่ต้องการออกซิเจน ปฏิกริยาที่คายความร้อนของเซลล์ จะมีความสัมพันธ์กับการใช้ออกซิเจน โดยทั่วไปปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นจากเมแทบอลิซึมของเซลล์ต่อการใช้ออกซิเจน 1 กรัมโมล จะมีค่าประมาณ 460 กิโลจูล

ถ้า Q_o เป็นอัตราการใช้ออกซิเจนต่อปริมาณน้ำหมัก ($\text{gmol m}^{-3} \text{s}^{-1}$)

จะได้
$$\Delta H_{\text{rxn}} = (-460 \text{ kJ gmol}^{-1}) Q_o V$$
 สมการที่ 73

เมื่อ V เป็นปริมาตรของน้ำหมัก

ดังนั้น
$$Q = (460 \text{ kJ gmol}^{-1}) Q_o V$$

ถ้าให้ q_o เป็นอัตราการใช้ออกซิเจนจำเพาะ (specific oxygen uptake rate, $\text{gmol g}^{-1} \text{s}^{-1}$)

ดังนั้น
$$Q_o = q_o X$$

เมื่อ x เป็นปริมาณเซลล์

ดังนั้น
$$Q = (460 \text{ kJ gmol}^{-1}) q_o X V$$

$$(460 \text{ kJ gmol}^{-1}) q_o X V = U A \Delta T$$

$$x_{\text{max}} = \frac{U A (T_F - T_{ci})}{(460 \text{ kJ gmol}^{-1}) q_o V}$$
 สมการที่ 74

เมื่อ T_F อุณหภูมิของการหมัก

T_{ci} อุณหภูมิของน้ำทางเข้าเครื่อง