

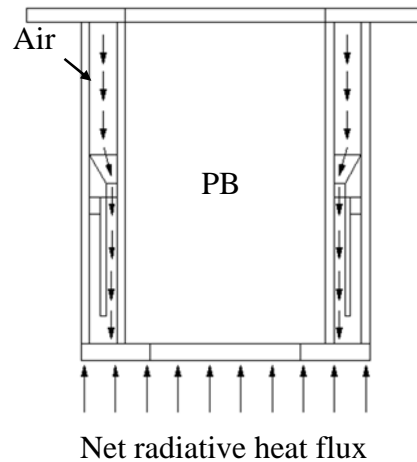
ภาคผนวก จ

การคำนวณสำหรับการออกแบบอุปกรณ์ทดลอง

ฉ.1 ทฤษฎีสำหรับการคำนวณ

ฉ.1.1 ทฤษฎีสำหรับการคำนวณหาอุณหภูมิที่ปลายของหัวเผาวัสดุพอรุนด้านติดกับวัสดุพอรุนแผ่รังสี (T_b) [18]

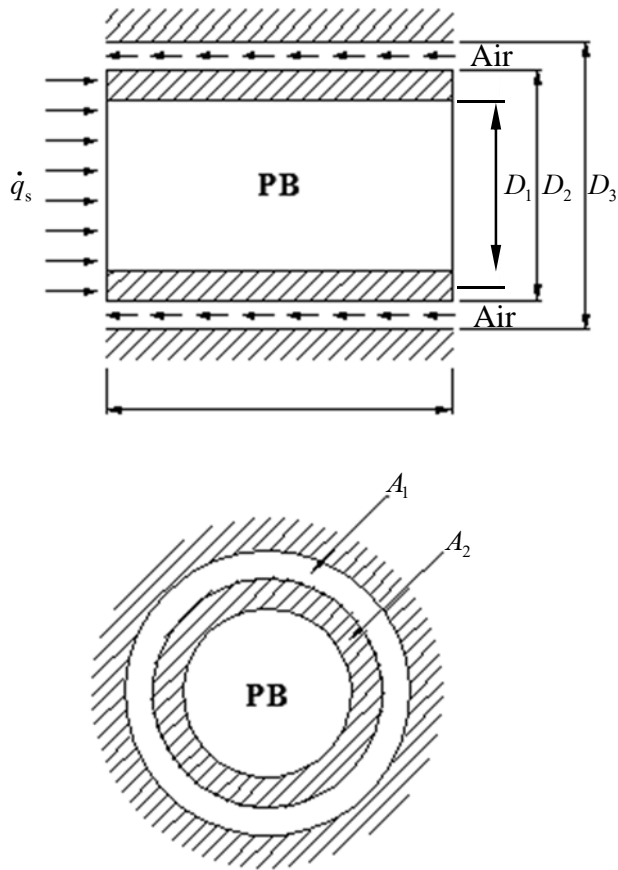
เมื่อพิจารณาที่หัวเผาวัสดุพอรุนจะพบว่าวัสดุพอรุนตัวแผ่รังสีความร้อนจะแผ่รังสีความร้อนเพื่อช่วยในการอุ่นเชื้อเพลิง และความร้อนบางส่วนก็ถูกผนังของท่อสแตนเลสรับไว้ ในขณะที่เดียวกันอากาศก็จะไหลมารับความร้อนที่ผนังท่อเก็บสะสมไว้ เพื่อช่วยระบายความร้อน และช่วยลดปัญหาเนื่องจากการขยายตัวทางความร้อนของหัวเผาวัสดุพอรุน ในการคำนวณหาอุณหภูมิที่ปลายของหัวเผาวัสดุพอรุนจะใช้แบบจำลองรูปที่ ฉ.1 ซึ่งกำหนดข้อสมมติฐานในการคำนวณดังต่อไปนี้



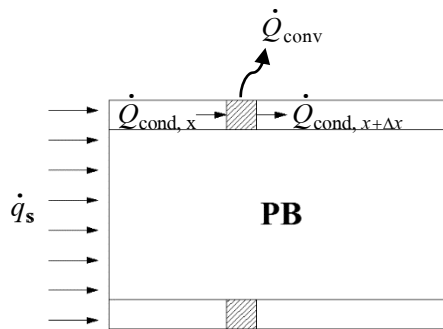
รูปที่ ฉ.1 แสดงภาพการแผ่รังสีจากวัสดุพอรุนตัวแผ่รังสีไปยังหัวเผาวัสดุพอรุน

สมมติฐาน

1. Steady state และ Steady flow
2. ไม่มีการถ่ายเทความร้อนจากตาข่ายสแตนเลสไปยังผนังของท่อ
3. Constant heat flux
4. No heat generation
5. คุณสมบัติของวัสดุและอากาศมีค่าคงที่
6. ไม่มีการสูญเสียความร้อนออกนอกระบบ



รูปที่ ๑.๒ แบบจำลองอย่างง่ายที่ใช้ในการคำนวณหาอุณหภูมิที่ปลายของหัวเผาวัสดุพอรุน



รูปที่ ๑.๓ การถ่ายเทความร้อนที่ผ่านผนังท่อที่ Element เล็กๆ

พิจารณา Element เล็กๆที่ผนังท่อดังรูป ๑.๓ จะได้ว่า

$$\dot{Q}_{cond, x} = \dot{Q}_{cond, x+\Delta x} + \dot{Q}_{conv}$$

$$\dot{Q}_{cond, x} + \dot{Q}_{conv} = 0$$

จากสมการ Convection heat transfer จะได้ว่า

$$\Delta \dot{Q}_{\text{cond}} + h_{\text{PB}} \pi D_2 (T - T_a) \Delta x = 0$$

$$\frac{\Delta \dot{Q}_{\text{cond}}}{\Delta x} + h_{\text{PB}} \pi D_2 (T - T_a) = 0$$

$$\frac{\Delta \dot{Q}_{\text{cond}}}{\Delta x} + h_{\text{PB}} \pi D_2 (T - T_a) = 0$$

$$\frac{d\dot{Q}_{\text{cond}}}{dx} + h_{\text{PB}} \pi D_2 (T - T_a) = 0$$

จากสมการ Conduction heat transfer จะได้ว่า

$$\frac{d}{dx} \left(-k_{\text{ss}} A_c \frac{dT}{dx} \right) + h_{\text{PB}} \pi D_2 (T - T_a) = 0$$

$$-k_{\text{ss}} A_c \frac{d^2 T}{dx^2} + h_{\text{PB}} \pi D_2 (T - T_a) = 0$$

$$\frac{d^2 T}{dx^2} - \frac{h_{\text{PB}} \pi D_2 (T - T_a)}{k_{\text{ss}} A_c} = 0$$

จากสมการข้างต้นจะมีลักษณะคล้ายกับสมการ Fin equation เมื่อค่าอุณหภูมิ T_a มีค่าคงที่ ฉะนั้นจึง

กำหนดให้ $T_\infty = \frac{T_{\text{ai, PB}} - T_{\text{ao, PB}}}{2}$ จะทำให้สามารถจัดรูปสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{d^2 (T - T_\infty)}{dx^2} - \frac{h_{\text{PB}} \pi D_2 (T - T_\infty)}{k_{\text{ss}} A_c} = 0$$

กำหนดให้ $\alpha = T - T_\infty$ และ $m^2 = \frac{h_{\text{PB}} \pi D_2}{k_{\text{ss}} A_c}$ จะสามารถจัดรูปได้ดังนี้

$$\frac{d^2 \alpha}{dx^2} - m^2 \alpha = 0$$

จากสมการข้างต้นสามารถหาคำตอบได้คือ

$$\alpha(x) = c_1 e^{mx} + c_2 e^{-mx} \quad (\text{ฉ.1})$$

เมื่อพิจารณาระบบการถ่ายเทความร้อนข้างต้นจะสามารถกำหนด Boundary condition ได้ดังนี้

- อุณหภูมิที่ปลายของหัวเผาวัสดุพอรุนด้านที่ติดกับตัวแผ่รังสีวัสดุพอรุน

$$\alpha(0) = T_b - T_\infty$$

- ที่ปลายอีกด้านหนึ่งของหัวเผาวัสดุพอรุนไม่มีการถ่ายเทความร้อน (Adiabatic fin tip)

$$\left. \frac{d\alpha}{dx} \right|_{x=L_1} = 0$$

จาก Boundary condition ข้างต้นสามารถแก้สมการที่ ฉ.1 เพื่อหาค่าคงที่ c_1 และ c_2 ซึ่งจะทำได้สมการที่แสดงถึงค่าอุณหภูมิของท่อที่จุดใดๆ ได้คือ

$$\frac{T(x) - T_\infty}{T_b - T_\infty} = \frac{\cosh m(L_1 - x)}{\cosh mL_1}$$

จากนิยามของ Fin efficiency (η_{fin})

$$\eta_{\text{fin}} = \frac{\dot{Q}_{\text{fin}}}{\dot{Q}_{\text{fin, max}}}$$

เมื่อพิจารณาพจน์ \dot{Q}_{fin} และ $\dot{Q}_{\text{fin, max}}$ จะได้ว่า

$$\dot{Q}_{\text{fin}} = -k_{\text{ss}} A_c \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=0} = \sqrt{h_{\text{PB}} \pi D_2 k_{\text{ss}} A_c} (T_b - T_\infty) \tanh mL_1$$

$$\dot{Q}_{\text{fin, max}} = h_{\text{PB}} A_{\text{fin}} (T_b - T_\infty) = h_{\text{PB}} \pi D_2 L_1 (T_b - T_\infty)$$

จากปริมาณความร้อนทั้งสองจะจัดรูปสมการเพื่อหา Fin efficiency ได้คือ

$$\eta_{\text{fin}} = \frac{\tanh mL_1}{mL_1} \quad (\text{ฉ.2})$$

โดยที่ η_{fin} คือ Fin efficiency

L_1 คือ ความยาวของท่อที่อากาศสัมผัสใน PB ก่อนถึงจุดวกกลับ (m)

T_b คือ อุณหภูมิที่ปลายของหัวเผาวัสดุพอรุนด้านติดกับตัวแผ่รังสีวัสดุพอรุน ($^{\circ}\text{C}$)

h_{PB} คือ Heat transfer coefficient ระหว่างอากาศกับผนังท่อ PB ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$)

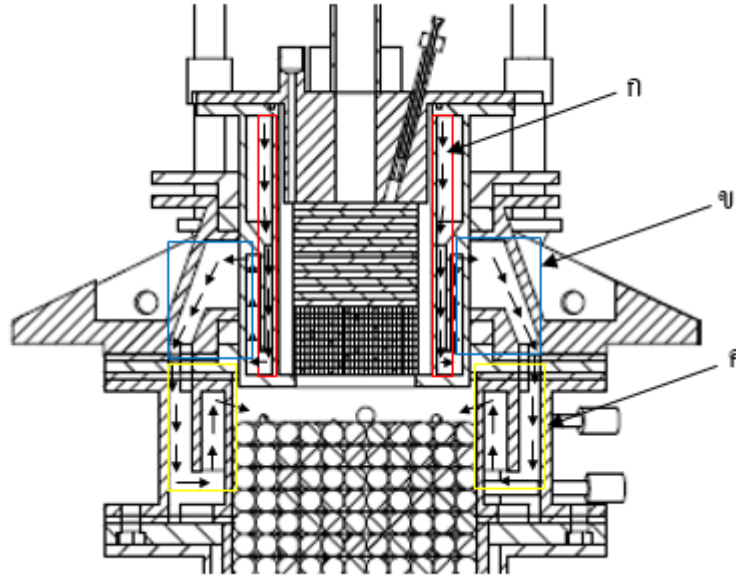
A_{fin} คือ พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนของ Fin (m^2)

A_c คือ พื้นที่หน้าตัดท่อของ PB ที่รับความร้อนจากการแผ่รังสี (m^2)

T_∞ คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศที่ไหลผ่านท่อ PB ($^{\circ}\text{C}$)

m คือ อัตราส่วนของ $\sqrt{\frac{h_{\text{PB}} \pi D_2}{k_{\text{ss}} A_c}} = \sqrt{\frac{4h_{\text{PB}} D_2}{k_{\text{ss}} (D_2^2 - D_1^2)}}$

ฉ.1.2 ทฤษฎีสำหรับการคำนวณหาอุณหภูมิการอุ่นอากาศ (T_{ap}) [18]



รูปที่ ฉ.4 ภาพแสดงทิศทางการไหลของอากาศในส่วนต่างๆภายในหัวเผา

ในการคำนวณหาอุณหภูมิอุ่นอากาศก่อนเข้าไปเผาไหม้ในห้องเผาไหม้จะแบ่งการคำนวณโดยพิจารณาออกเป็น 3 ช่วงดังรูปที่ ฉ.4 ซึ่งมีการพิจารณาดังต่อไปนี้

1. บริเวณที่อากาศรับความร้อนจากการแผ่รังสีความร้อนในหัวเผาวัสดุพูน

ในส่วนนี้อากาศจะรับความร้อนจากวัสดุพูนตัวแผ่รังสีความร้อนที่แผ่รังสีมายังหัวเผาวัสดุพูนเพื่อช่วยในการอุ่นเชื้อเพลิง ซึ่งการถ่ายเทความร้อนในส่วนนี้จะสามารถสร้างแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ได้ดังรูปที่ ฉ.2 และมีข้อสมมติฐานในการคำนวณดังต่อไปนี้

1. Steady state และ Steady flow
2. ไม่มีการถ่ายเทความร้อนจากตาข่ายสแตนเลสไปยังผนังของท่อ
3. Constant heat flux
4. No heat generation
5. คุณสมบัติของวัสดุและอากาศมีค่าคงที่
6. ไม่มีการสูญเสียความร้อนออกนอกระบบ

จากข้อสมมติฐานดังกล่าวจะสามารถหาอุณหภูมิของอากาศที่ออกจากหัวเผาวัสดุพูนได้จากปริมาณความร้อนที่อากาศรับไป = ปริมาณความร้อนที่ผนังท่อรับมาจากการแผ่รังสี

$$\dot{m}_a = \dot{Q}_r$$

$$\begin{aligned} \dot{m}_a c_{pa} (T_{ao, PB} - T_{ai, PB}) &= \dot{q}_s A_c \\ T_{ao, PB} &= T_{ai, PB} + \frac{\dot{q}_s A_c}{\dot{m}_a c_{pa}} \end{aligned} \quad (น.3)$$

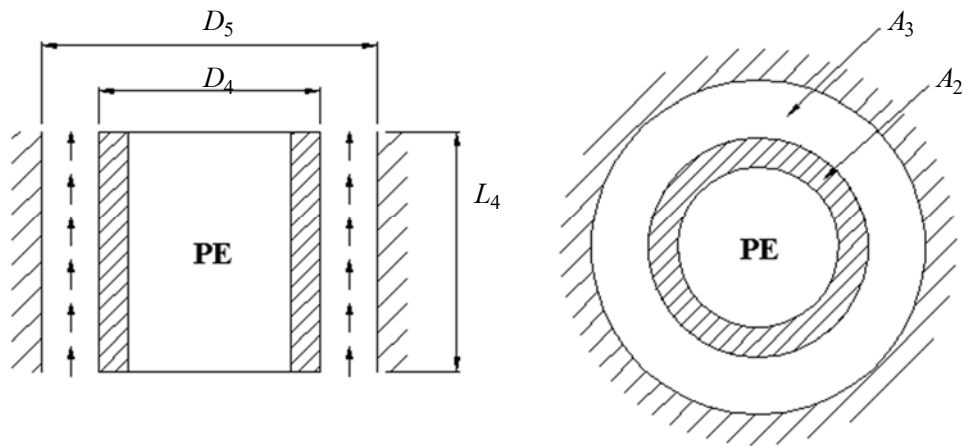
- เมื่อ $T_{ao, PB}$ คือ อุณหภูมิของอากาศเมื่อออกจาก PB ($^{\circ}\text{C}$)
 $T_{ai, PB}$ คือ อุณหภูมิของอากาศเมื่อเข้า PB ($^{\circ}\text{C}$)
 \dot{q}_s คือ Net radiative heat flux (W/m^2)
 A_c คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อ PB ที่ได้รับความร้อนจากการแผ่รังสีความร้อน (m^2)
 \dot{m}_a คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (kg/s)
 c_{pa} คือ Specific heat capacity ของอากาศ ($\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$)

2. บริเวณที่อากาศไหลออกจากหัวเผาวัสดุพอรุนจนถึงบริเวณที่อากาศเริ่มวกกลับเข้าไปหล่อเย็นที่ผนังด้านในของ Combustor block

ในส่วนนี้อากาศจะมีการสูญเสียความร้อนออกสู่บรรยากาศ ซึ่งในการคำนวณการสูญเสียความร้อนในส่วนนี้จะถือว่าปริมาณความร้อนที่สูญเสีย้น้อยมาก จึงสมมติให้อุณหภูมิของอากาศที่ไหลในส่วนนี้มีค่าคงที่ ซึ่งมีค่าเท่ากับอุณหภูมิของอากาศที่ออกจากหัวเผาวัสดุพอรุน ($T_{ao, PB}$)

3. บริเวณที่อากาศหล่อเย็นผนังท่อของ Combustor block ชั้นใน

ในส่วนนี้อากาศจะรับความร้อนจากผนังในรูปของการนำความร้อน และการแผ่รังสีความร้อนจากวัสดุพอรุนตัวแผ่รังสีความร้อน แต่เนื่องจากการคำนวณหาปริมาณการแผ่รังสีความร้อนจากวัสดุพอรุนแผ่รังสีจะค่อนข้างมีความซับซ้อน ฉะนั้นในการคำนวณหาปริมาณความร้อนจากการแผ่รังสีจะข้อยละไว้ และจะคำนวณหาอุณหภูมิของอากาศที่ได้รับการถ่ายเทความร้อนจากผนังเท่านั้น โดยค่าที่สามารถคำนวณได้จะเป็นค่าอุณหภูมิต่ำสุดที่จะเป็นไปได้ ซึ่งการถ่ายเทความร้อนในส่วนนี้จะสามารถสร้างแบบจำลองได้ดังรูปที่ น.5 และมีข้อสมมติฐานดังต่อไปนี้



รูปที่ ๕.๕ แบบจำลองอย่างง่ายที่ใช้ในการคำนวณอุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าไปยังห้องเผาไหม้

สมมติฐาน

1. Steady state และ Steady flow
2. Constant surface temperature
3. No heat generation
4. คุณสมบัติของวัสดุและอากาศมีค่าคงที่

จากการถ่ายเทความร้อนแบบการพาความร้อน โดยที่อุณหภูมิของผิวท่อมีค่าคงที่จะได้ว่า

$$T_{ap} = T_s - (T_s - T_{ao, PB}) e^{-\frac{h_{com} A_2}{\dot{m}_a c_{pa}}} \quad (๕.๔)$$

เมื่อ	T_{ap}	คือ อุณหภูมิอุณหอากาศ ($^{\circ}\text{C}$)
	$T_{ao, PB}$	คือ อุณหภูมิของอากาศเมื่อออกจาก PB ($^{\circ}\text{C}$)
	T_s	คือ อุณหภูมิเฉลี่ยที่ผิวของผนังท่อของ CB ชั้นใน (W/m^2)
	h_{com}	คือ Heat transfer coefficient ระหว่างอากาศกับผนังท่อของ CB ($\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$)
	A_2	คือ พื้นที่ผิวรอบนอกของท่อที่สัมผัสกับอากาศ (m^2)
	\dot{m}_a	คือ อัตราการไหลของอากาศ (kg/s)
	c_{pa}	คือ Specific heat capacity ของอากาศ ($\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$)

ฉ.1.3 ทฤษฎีสำหรับการคำนวณหาการสูญเสียความดันของอากาศ [19]

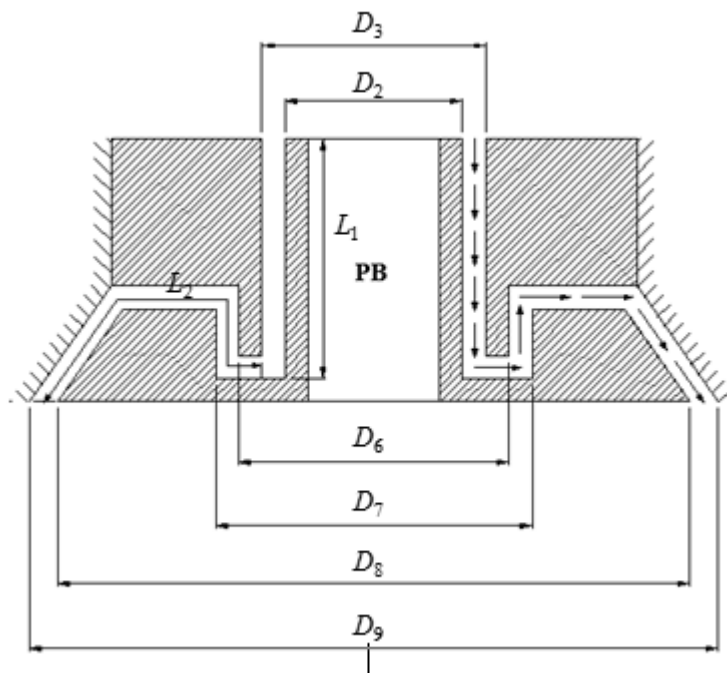
จากรูปที่ ฉ.4 จะแบ่งการคำนวณการสูญเสียความดันออกเป็น 2 ช่วง คือ บริเวณที่อากาศไหลผ่านหัวเผาวัสดุพูนและไหลภายใน PB socket (ΔP_1) และบริเวณที่อากาศไหลภายใน CB จนกระทั่งถูกฉีดเข้าไปยังห้องเผาไหม้ (ΔP_2) ซึ่งความสูญเสียความดันรวมจะสามารถหาได้จากผลรวมของความดันที่สูญเสียของทั้งสองช่วง หรือ $\Delta P_{\text{total}} = \Delta P_1 + \Delta P_2$ ในการคำนวณจะกำหนดข้อสมมติฐานดังต่อไปนี้

1. Steady state และ Steady flow
2. Incompressible fluid
3. คุณสมบัติของอากาศมีค่าคงที่

1. การสูญเสียความดันของอากาศเมื่ออากาศไหลผ่าน PB และ PB socket (ΔP_1)

โดยจะสามารถสร้างแบบจำลองอย่างง่ายเพื่อใช้ในการวิเคราะห์การสูญเสียความดันได้ดังรูปที่ ฉ.6 การสูญเสียความดันในส่วนนี้จะประกอบไปด้วย

- การสูญเสียความดันเนื่องจากความเสียดทาน
- การสูญเสียความดันเนื่องจากการไหลวกกลับของอากาศ
- การสูญเสียความดันเนื่องจากการขยายพื้นที่หน้าตัด
- การสูญเสียความดันเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความเร็ว



รูปที่ ฉ.6 แบบจำลองการไหลของอากาศที่ไหลผ่าน PB และ PB socket

จากการสูญเสียความดันในส่วนต่างๆสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังต่อไปนี้

$$\Delta P_1 = \rho \left\{ \left[f_1 \left(\frac{L_1}{D_{h,1}} \right) \frac{V_1^2}{2} \right] + \left[f_2 \left(\frac{L_2}{D_{h,2}} \right) \frac{V_2^2}{2} \right] + \left[f_1 \left(\frac{L}{D} \right)_{U\text{-turn } 1} \times \frac{V_1^2}{2} \right] \right. \\ \left. + \left[f_2 \left(\frac{L}{D} \right)_{U\text{-turn } 2} \times \frac{V_2^2}{2} \right] + \left[\frac{K_{e1} V_1^2}{2} \right] + \left[\frac{K_{e2} V_2^2}{2} \right] + \left[\frac{V_3^2 - V_1^2}{2} \right] \right\} \quad (จ.5)$$

โดยที่

$D_{h,1}$ คือ Hydraulic diameter 1 มีค่าเท่ากับ $D_3 - D_2$ (m)

$D_{h,2}$ คือ Hydraulic diameter 2 มีค่าเท่ากับ $D_7 - D_6$ (m)

$D_{h,3}$ คือ Hydraulic diameter 3 มีค่าเท่ากับ $D_9 - D_8$ (m)

K_{e1} คือ Expansion loss coefficient ที่เปลี่ยนขนาดพื้นที่หน้าตัดจาก $D_{h,1}$ ไป $D_{h,2}$

K_{e2} คือ Expansion loss coefficient ที่เปลี่ยนขนาดพื้นที่หน้าตัดจาก $D_{h,2}$ ไป $D_{h,3}$

L_1 คือ ความยาวของท่อที่อากาศไหลเข้ามาใน PB จนถึงจุดวกกลับ (m)

L_2 คือ ความยาวของท่อตั้งแต่จุดที่อากาศเริ่มวกกลับที่หัวเผาวัสดุพูนถึงทางออกของ PB Socket (m)

$\left(\frac{L}{D} \right)_{U\text{-turn}}$ คือ Equivalent length ของท่อวกกลับ

V_1 คือ ความเร็วเฉลี่ยของอากาศที่ไหลในท่อ $D_{h,1}$ (m/s)

V_2 คือ ความเร็วเฉลี่ยของอากาศที่ไหลในท่อ $D_{h,2}$ (m/s)

V_3 คือ ความเร็วเฉลี่ยของอากาศที่ไหลในท่อ $D_{h,3}$ (m/s)

Re_1, Re_2 คือ Reynolds number ของอากาศที่ไหลในท่อ $D_{h,1}$ และ $D_{h,2}$ ตามลำดับ

f_1, f_2 คือ Friction factor เมื่ออากาศไหลในท่อ $D_{h,1}$ และ $D_{h,2}$ ตามลำดับซึ่งแบ่งเป็น 2 กรณี ดังนี้

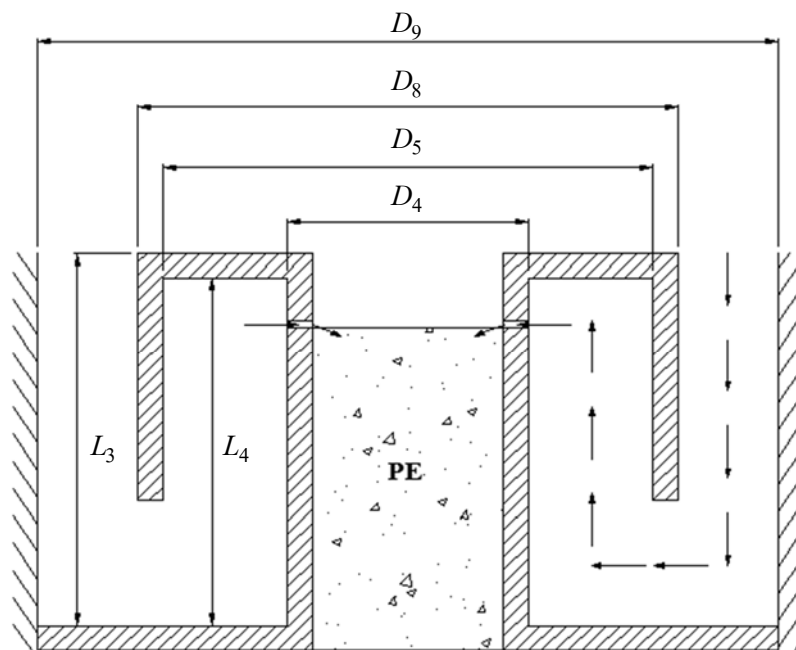
$$f = \frac{64}{Re} \quad ; \text{ สำหรับการไหลแบบ Laminar (Re < 2300)}$$

$$f = \left\{ -1.8 \log \left[\left(\frac{\epsilon/D}{3.7} \right)^{1.11} + \frac{6.9}{Re} \right] \right\}^{-2} \quad ; \text{ สำหรับการไหลแบบ Turbulent (Re > 2300)}$$

2. การสูญเสียความดันของอากาศเมื่ออากาศไหลภายใน Combustor block (ΔP_2)

โดยจะสามารถสร้างแบบจำลองอย่างง่ายเพื่อใช้ในการวิเคราะห์การสูญเสียความดันได้ดังรูปที่ ๓.7 และสามารถวิเคราะห์การสูญเสียความดันได้ดังนี้

- การสูญเสียความดันจากความเสียดทาน
- การสูญเสียความดันจากการวกกลับ
- การสูญเสียความดันจากการลดพื้นที่หน้าตัด
- การสูญเสียความดันจากการเปลี่ยนแปลงความเร็ว



รูปที่ ๓.7 แบบจำลองการไหลของอากาศที่ไหลใน Combustor block

จากการสูญเสียความดันในส่วนต่างๆสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังต่อไปนี้

$$\Delta P_2 = \rho \left\{ \left[f_3 \left(\frac{L_3}{D_{h,3}} \right) \frac{V_3^2}{2} \right] + \left[f_4 \left(\frac{L_4}{D_{h,4}} \right) \frac{V_4^2}{2} \right] + \left[f_4 \left(\frac{L}{D} \right)_{U\text{-turn } 1} \times \frac{V_4^2}{2} \right] \right\} + \left\{ \left[f_4 \left(\frac{L}{D} \right)_{U\text{-turn } 2} \times \frac{V_5^2}{2} \right] + \left[\frac{K_{e1} V_3^2}{2} \right] + \left[\frac{K_{e2} V_5^2}{2} \right] + \left[\frac{V_5^2 - V_3^2}{2} \right] \right\} \quad (๓.6)$$

โดยที่

$D_{h,3}$ คือ Hydraulic diameter 4 มีค่าเท่ากับ $D_9 - D_8$ (m)

$D_{h,4}$ คือ Hydraulic diameter 5 มีค่าเท่ากับ $D_5 - D_4$ (m)

K_{c1} คือ Contraction loss coefficient ที่เปลี่ยนขนาดพื้นที่หน้าตัดจาก $D_{h,3}$ ไป $D_{h,4}$

K_{c2} คือ Contraction loss coefficient ที่เปลี่ยนขนาดพื้นที่หน้าตัดจาก $D_{h,4}$ ไป $D_{h,10}$

L_3 คือ ความยาวของท่อที่อากาศไหลเข้ามาใน Combustor block ชั้นนอก จนถึงจุดววกกลับ (m)

L_4 คือ ความยาวของท่อตั้งแต่จุดที่อากาศเริ่มววกกลับ ถึงทางออกของ Combustor block (m)

$\left(\frac{L}{D}\right)_{U\text{-turn}}$ คือ Equivalent length ของท่อววกกลับ

V_3 คือ ความเร็วเฉลี่ยของอากาศที่ไหลในท่อ $D_{h,3}$ (m/s)

V_4 คือ ความเร็วเฉลี่ยของอากาศที่ไหลในท่อ $D_{h,4}$ (m/s)

V_5 คือ ความเร็วเฉลี่ยของอากาศที่ไหลเข้าไปยังห้องเผาไหม้ (m/s)

Re_3, Re_4 คือ Reynolds number ของอากาศที่ไหลในท่อ $D_{h,3}$ และ $D_{h,4}$ ตามลำดับ

f_3, f_4 คือ Friction factor เมื่ออากาศไหลในท่อ $D_{h,3}$ และ $D_{h,4}$ ตามลำดับซึ่งแบ่งเป็น 2 กรณี ดังนี้

$$f = \frac{64}{Re} \quad ; \text{ สำหรับการไหลแบบ Laminar (Re} < 2300)$$

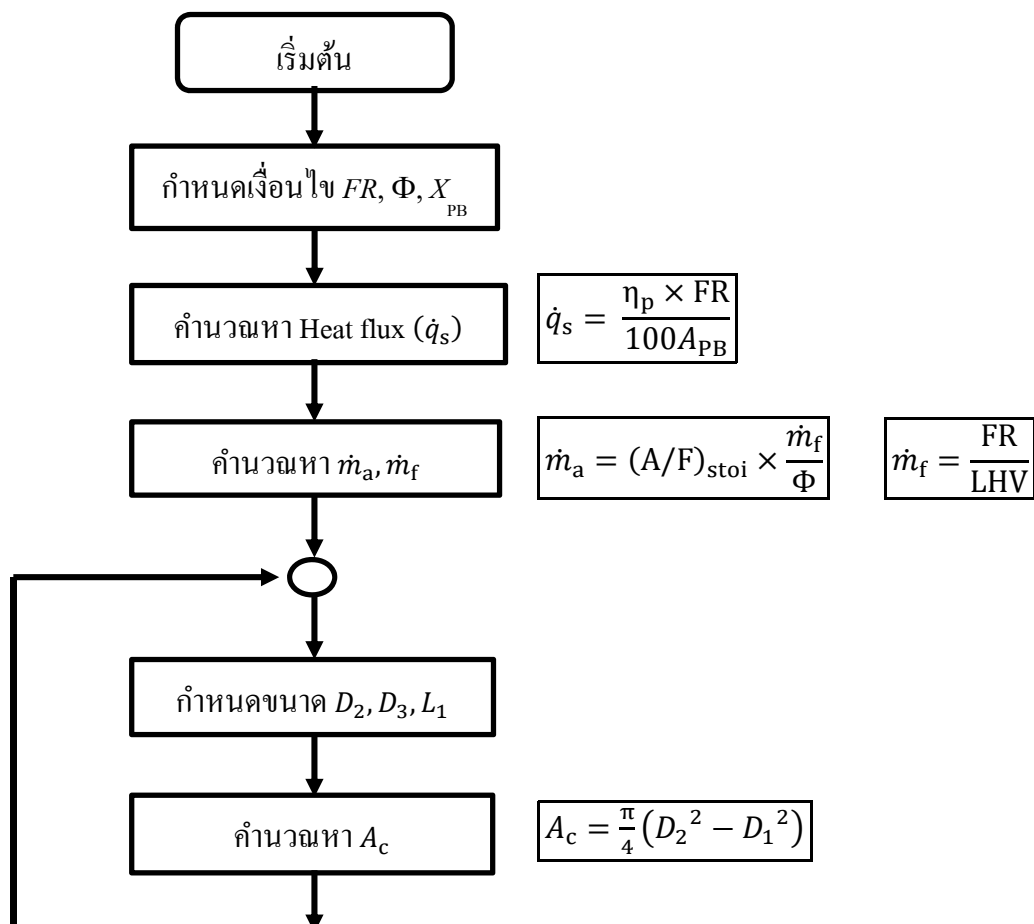
$$f = \left\{ -1.8 \log \left[\left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} \right)^{1.11} + \frac{6.9}{Re} \right] \right\}^{-2} \quad ; \text{ สำหรับการไหลแบบ Turbulent (Re} > 2300)$$

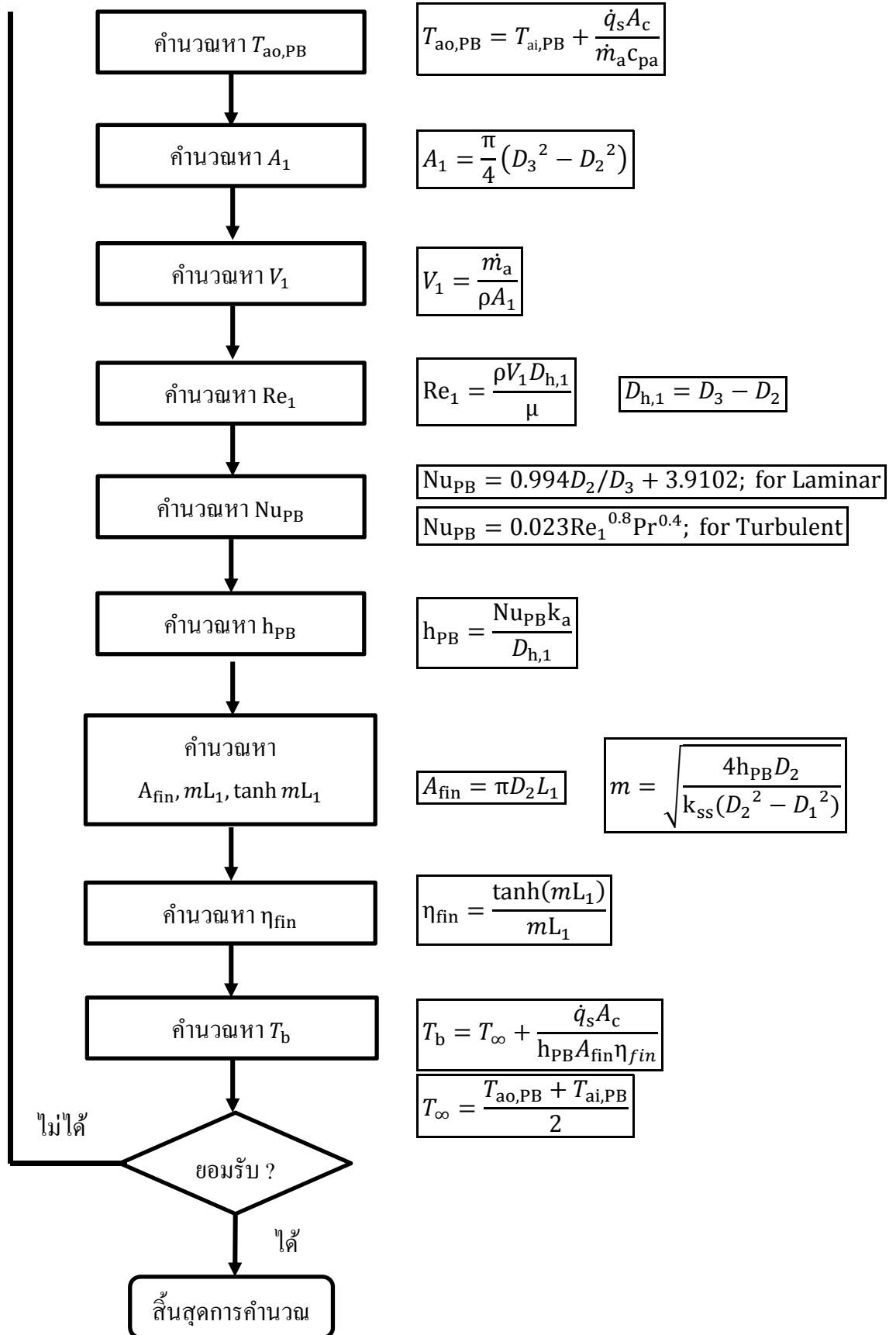
ฉ.2 การคำนวณหาอุณหภูมิที่ปลายของหัวเผาวัสดุพอรุนด้านติดกับวัสดุพอรุนแผ่นรังสี (T_b)

ฉ.2.1 ขั้นตอนการคำนวณหาอุณหภูมิที่ปลายของหัวเผาวัสดุพอรุนด้านติดกับวัสดุพอรุนแผ่นรังสี (T_b)

1. คำนวณหาค่า heat flux (\dot{q}_s) ซึ่งสามารถหาได้จากการคำนวณการแผ่รังสีความร้อน แต่ในการคำนวณนี้จะใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองของ พีระพงษ์ โตขลิบ [14] เพื่อให้สะดวกในการคำนวณ
2. คำนวณหาอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง (\dot{m}_f) และอากาศ (\dot{m}_a)
3. คำนวณหาอุณหภูมิของอากาศที่ออกจากหัวเผาวัสดุพอรุน ($T_{ao,PB}$) จากสมการที่ (ฉ.3)
4. คำนวณหา Nusselt number (Nu_{PB}) เพื่อนำไปหา Heat transfer coefficient (h_{PB})
5. คำนวณหาค่า Reynolds number (Re_1) ของอากาศเมื่ออากาศไหลผ่านผนังท่อของ PB
6. คำนวณหา Fin efficiency (η_{fin}) จากสมการที่ (ฉ.2)
7. คำนวณหาอุณหภูมิที่ปลายของหัวเผาวัสดุพอรุนด้านที่ติดกับตัวแผ่รังสีความร้อน (T_b)

ฉ.2.2 แผนภาพการคำนวณหาอุณหภูมิที่ปลายของหัวเผาวัสดุพอรุน (T_b)





ฉ.2.3 ตัวอย่างการคำนวณหาอุณหภูมิที่ปลายของหัวเผาวัสดุพอร์น (T_b)

1. คำนวณหา Heat flux (\dot{q}_s)

จากผลการทดลองของ พีระพงษ์ โตขลิบ [14] ที่ $FR = 5 \text{ kW}$ $\Phi = 0.47$ และระยะ $X_{PB} = 0 \text{ mm}$ พบว่า $\eta_p = 6.06 \%$ และขนาดพื้นที่หน้าตัดของ PB (A_{PB}) = $2.376 \times 10^{-3} \text{ m}^2$

$$\dot{q}_s = \frac{\eta_{pre} \times FR}{100 A_{PB}} = \frac{6.06 \times 5,000}{100 \times 2.376 \times 10^{-3}} = 127,525.25 \text{ W/m}^2$$

2. คำนวณหาอัตราการไหลของเชื้อเพลิง (\dot{m}_f) และอากาศ (\dot{m}_a)

ค่าความร้อนทางต่ำของ Kerosene (LHV) = $44,532 \text{ kJ/kg}$ และอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่สตอยคิโอมेटรี [(A/F)_{stoi}] = 15.04 [14]

$$\dot{m}_f = \frac{FR}{LHV} = \frac{5}{44,532} = 1.123 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_a = (A/F)_{stoi} \times \frac{\dot{m}_f}{\Phi} = 15.04 \times \frac{1.123 \times 10^{-4}}{0.47} = 3.59 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$$

3. คำนวณหาอุณหภูมิของอากาศเมื่อออกจาก PB ($T_{ao,PB}$) จากสมการที่ (ฉ.3)

อุณหภูมิของอากาศที่ไหลเข้ามายัง PB ($T_{ai,PB}$) = $35 \text{ }^\circ\text{C}$ ขนาดของ $D_2 = 73 \text{ mm}$, $D_1 = 66.9 \text{ mm}$ และค่า Specific heat capacity (c_{pa}) = $1007 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ [15]

$$A_c = \frac{\pi}{4} (D_2^2 - D_1^2) = \frac{\pi}{4} (0.073^2 - 0.0669^2) = 6.70 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$T_{ao,PB} = T_{ai,PB} + \frac{\dot{q}_s A_c}{\dot{m}_a c_{pa}} = 35 + \frac{127525.25 \times 6.70 \times 10^{-4}}{3.594 \times 10^{-3} \times 1007} = 58.61^\circ\text{C}$$

4. คำนวณหา Reynolds number (Re_1) ของอากาศเมื่ออากาศไหลผ่านผนังท่อของ PB

ขนาดของ $D_3 = 80 \text{ mm}$, $D_2 = 73 \text{ mm}$ และค่า Properties ต่างๆของอากาศจะคิดที่ความดัน 7 bar อุณหภูมิ $60 \text{ }^\circ\text{C}$ โดยจะมีค่าความหนาแน่น (ρ) = 7.32 kg/m^3 และมีค่าความหนืด (μ) = $1.963 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ [18]

$$A_1 = \frac{\pi}{4} (D_3^2 - D_2^2) = \frac{\pi}{4} (0.08^2 - 0.073^2) = 8.41 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$V_1 = \frac{\dot{m}_a}{\rho A_1} = \frac{3.594 \times 10^{-3}}{7.32 \times 8.41 \times 10^{-4}} = 0.583 \text{ m/s}$$

$$D_{h,1} = D_3 - D_2 = 80 - 73 = 7 \text{ mm}$$

$$Re_1 = \frac{\rho V_1 D_{h,1}}{\mu} = \frac{7.32 \times 0.583 \times 0.007}{1.963 \times 10^{-5}} = 1523.16 \text{ (Laminar)}$$

5. คำนวณหา Heat transfer coefficient (h_{PB})

ที่ค่า $Re = 1523.16$ จะเป็นการไหลแบบ Laminar [19] และที่อุณหภูมิ 60°C ค่าความนำความร้อนของอากาศ (k_a) = $2.81 \times 10^{-2} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ [18]

$$Nu_{PB} = 0.994 D_2 / D_3 + 3.9102 \text{ (กรณี Laminar)}$$

$$= 0.994 \times \left(\frac{73}{80}\right) + 3.9102 = 4.82$$

$$h_{PB} = \frac{Nu_{PB} \cdot k_a}{D_{h,1}} = \frac{4.82 \times 2.735 \times 10^{-2}}{0.007} = 18.83 \text{ W/m} \cdot \text{K}$$

6. คำนวณหา Fin efficiency จากสมการที่ (จ.2)

ขนาด $L_1 = 104 \text{ mm}$ และค่าการนำความร้อนของสแตนเลส (k_{SS}) = $14.9 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ [18]

$$m = \sqrt{\frac{4h_{PB}D_2}{k_{SS}(D_2^2 - D_1^2)}} = \sqrt{\frac{4 \times 18.83 \times 0.073}{14.9 \times (0.073^2 - 0.0669^2)}} = 20.79$$

$$\eta_{fin} = \frac{\tanh(mL_1)}{mL_1} = \frac{\tanh(20.79 \times 0.104)}{20.79 \times 0.104} = 0.45$$

7. คำนวณหาอุณหภูมิที่ปลายของหัวเผาวัสดุพอรุนด้านติดกับตัวแผ่รังสีวัสดุพอรุน (T_b)

$$A_{fin} = \pi D_2 L_1 = \pi \times 0.073 \times 0.104 = 2.39 \times 10^{-2} \text{ m}^2$$

$$T_\infty = \frac{T_{ao,PB} + T_{ai,PB}}{2} = \frac{58.61 + 35}{2} = 46.81^\circ\text{C}$$

$$T_b = T_\infty + \frac{\dot{q}_s A_c}{h_{PB} A_{fin} \eta_{fin}}$$

$$= 46.81 + \frac{126,525.25 \times 6.70 \times 10^{-4}}{18.83 \times 2.39 \times 10^{-2} \times 0.45}$$

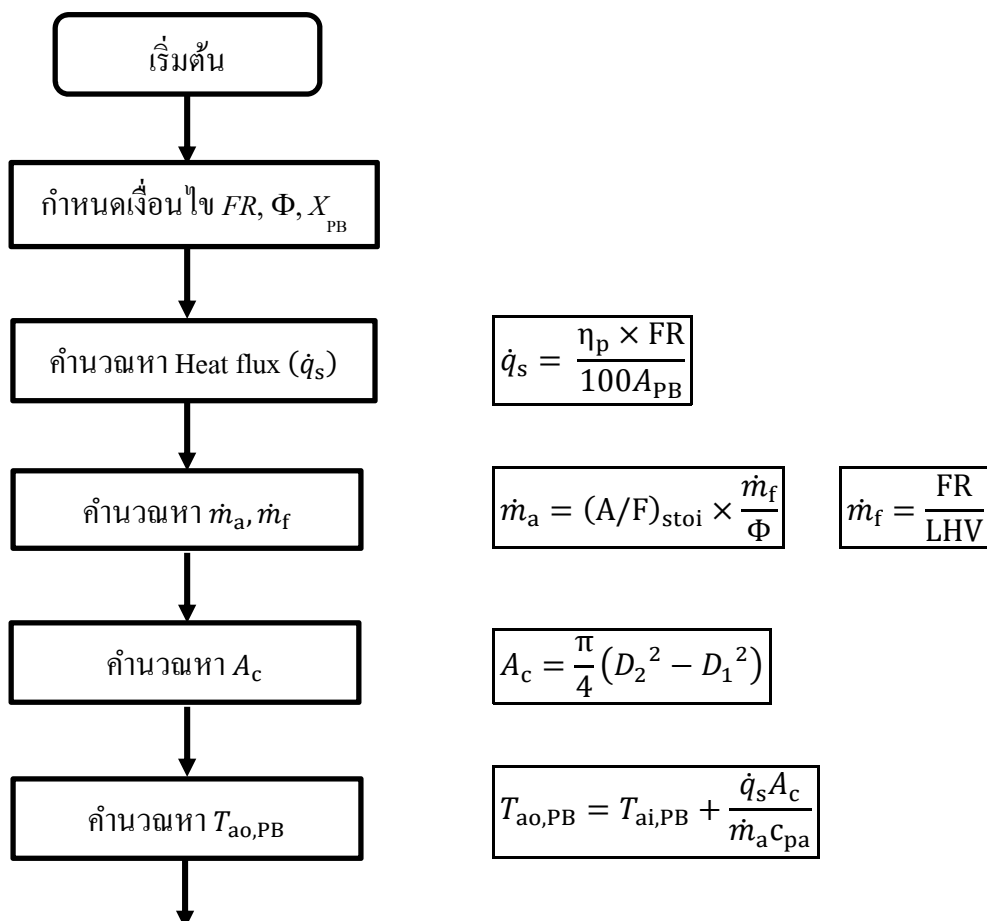
$$= 469.48^\circ\text{C}$$

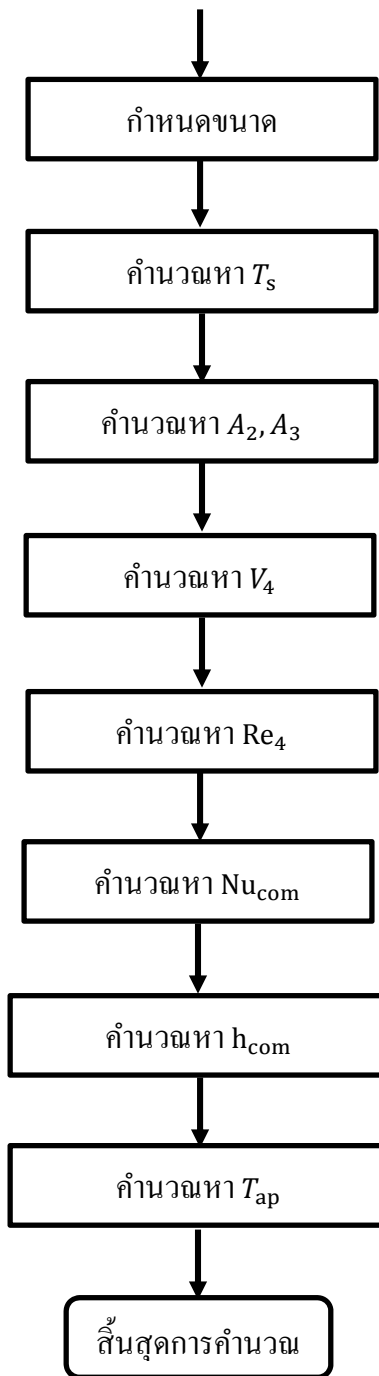
จ.3 การคำนวณหาอุณหภูมิการอุ่นอากาศ [18]

จ.3.1 ขั้นตอนการคำนวณหาอุณหภูมิอุ่นอากาศ (T_{ap})

1. คำนวณหาค่า heat flux (\dot{q}_s) ซึ่งสามารถหาได้จากการคำนวณการแผ่รังสีความร้อน แต่ในการคำนวณนี้จะใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองของ พีระพงษ์ โตขลิบ [14] เพื่อให้สะดวกในการคำนวณ
2. คำนวณหาอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง (\dot{m}_f) และอากาศ (\dot{m}_a)
3. คำนวณหาอุณหภูมิของอากาศที่ออกจากหัวเผาวัสดุพูน ($T_{ao,PB}$) จากสมการที่ (จ.3)
4. คำนวณหาอุณหภูมิของผนังท่อ (T_s) ซึ่งในที่นี้จะใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองของพีระพงษ์ โตขลิบ [14] ที่ทำการวัดอุณหภูมิจุดที่ 6 และ 8 แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย
5. คำนวณหาค่า Reynolds number (Re_4) ของอากาศเมื่ออากาศไหลผ่านผนังท่อของ Combustor block
6. คำนวณหา Nusselt number (Nu_{com}) เพื่อนำไปหา Heat transfer coefficient (h_{com})
7. คำนวณหาอุณหภูมิอุ่นอากาศ (T_{ap}) จากสมการที่ (จ.4)

จ.3.2 แผนภาพการคำนวณหาอุณหภูมิอุ่นอากาศ (T_{ap})





$$T_s = \frac{T_8' + T_6'}{2}$$

$$A_2 = \pi D_4 L_4 \quad A_3 = \frac{\pi}{4} (D_5^2 - D_4^2)$$

$$V_4 = \frac{\dot{m}_a}{\rho A_3}$$

$$Re_4 = \frac{\rho V_4 D_{h,4}}{\mu} \quad D_{h,4} = D_5 - D_4$$

$$Nu_{PB} = 0.994 D_2 / D_3 + 3.9102; \text{ for Laminar}$$

$$Nu_{PB} = 0.023 Re_1^{0.8} Pr^{0.4}; \text{ for Turbulent}$$

$$h_{com} = \frac{Nu_{com} k_a}{D_{h,4}}$$

$$T_{ap} = T_s - (T_s - T_{ao,PB}) e^{-\frac{h_0 A_1}{\dot{m}_a c_{pa}}}$$

$$T_{ap} = T_s - (T_s - T_{ao,PB}) e^{-\frac{h_{com} A_2}{\dot{m}_a c_{pa}}}$$

ฉ.3.3 การคำนวณหาอุณหภูมิอุณหภูมิจนอากาศ (T_{ap})

1. คำนวณหา Heat flux (\dot{q}_s)

จากผลการทดลองของ พีระพงษ์ โตขลิบ [14] ที่ $FR = 5 \text{ kW}$ $\Phi = 0.47$ และระยะ $X_{PB} = 0 \text{ mm}$ พบว่า $\eta_{pre} = 6.06 \%$ และขนาดพื้นที่หน้าตัดของ PB (A_{PB}) = $2.376 \times 10^{-3} \text{ m}^2$

$$\dot{q}_s = \frac{\eta_p \times FR}{100A_{PB}} = \frac{6.06 \times 5,000}{100 \times 2.376 \times 10^{-3}} = 127,525.25 \text{ W/m}^2$$

2. คำนวณหาอัตราการไหลของเชื้อเพลิง (\dot{m}_f) และอากาศ (\dot{m}_a)

ค่าความร้อนทางต่ำของ Kerosene (LHV) = $44,532 \text{ kJ/kg}$ และอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่สตอยคิโอมेटรี [(A/F)_{stoi}] = 15.04 [14]

$$\dot{m}_f = \frac{FR}{LHV} = \frac{5}{44,532} = 1.123 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_a = (A/F)_{stoi} \times \frac{\dot{m}_f}{\Phi} = 15.04 \times \frac{1.123 \times 10^{-4}}{0.47} = 3.59 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$$

3. คำนวณหาอุณหภูมิของอากาศเมื่อออกจาก PB ($T_{ao,PB}$) จากสมการที่ (3.7)

อุณหภูมิของอากาศที่ไหลเข้ามายัง PB ($T_{ai,PB}$) = $35 \text{ }^\circ\text{C}$ ขนาดของ $D_2 = 73 \text{ mm}$, $D_1 = 66.9 \text{ mm}$ และค่า Specific heat capacity (c_{pa}) = $1007 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ [18]

$$A_c = \frac{\pi}{4}(D_2^2 - D_1^2) = \frac{\pi}{4}(0.073^2 - 0.0669^2) = 6.70 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

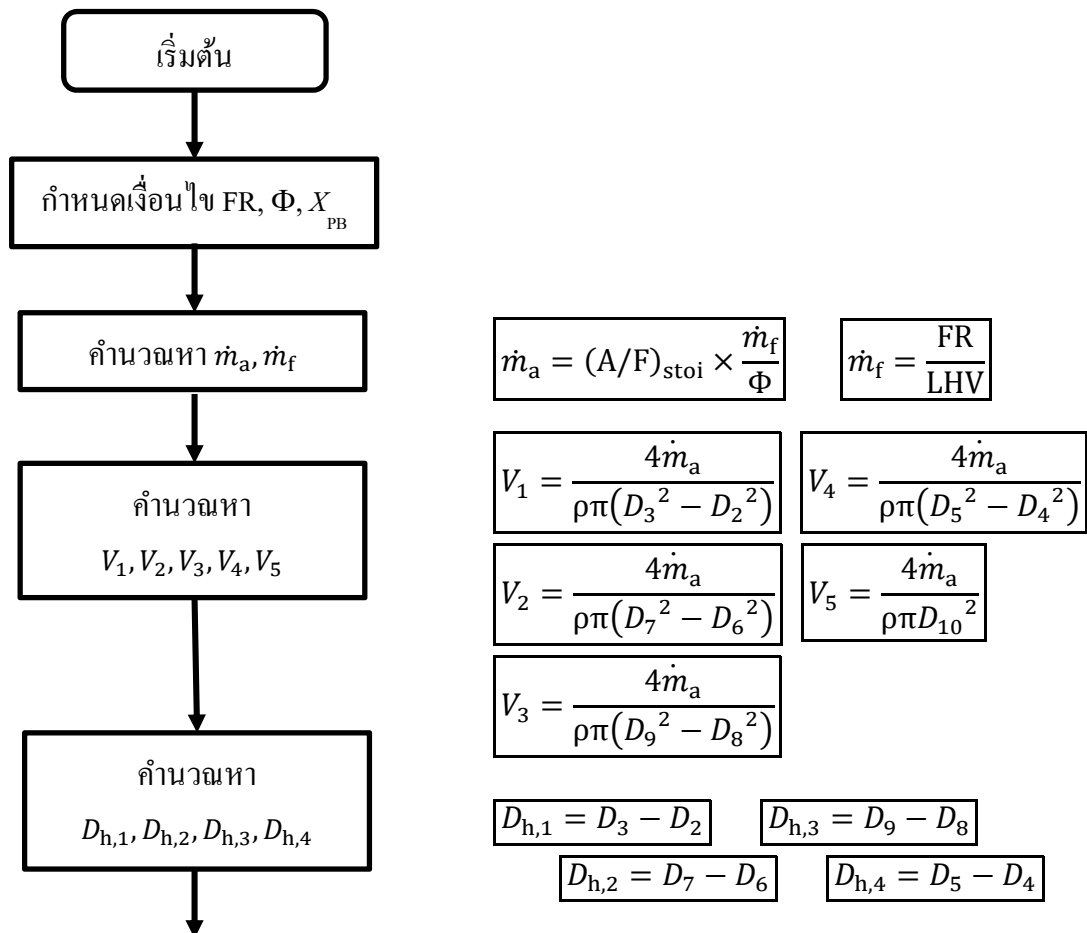
$$T_{ao,PB} = T_{ai,PB} + \frac{\dot{q}_s A_c}{\dot{m}_a c_{pa}} = 35 + \frac{127525.25 \times 6.70 \times 10^{-4}}{3.594 \times 10^{-3} \times 1007} = 58.61 \text{ }^\circ\text{C}$$

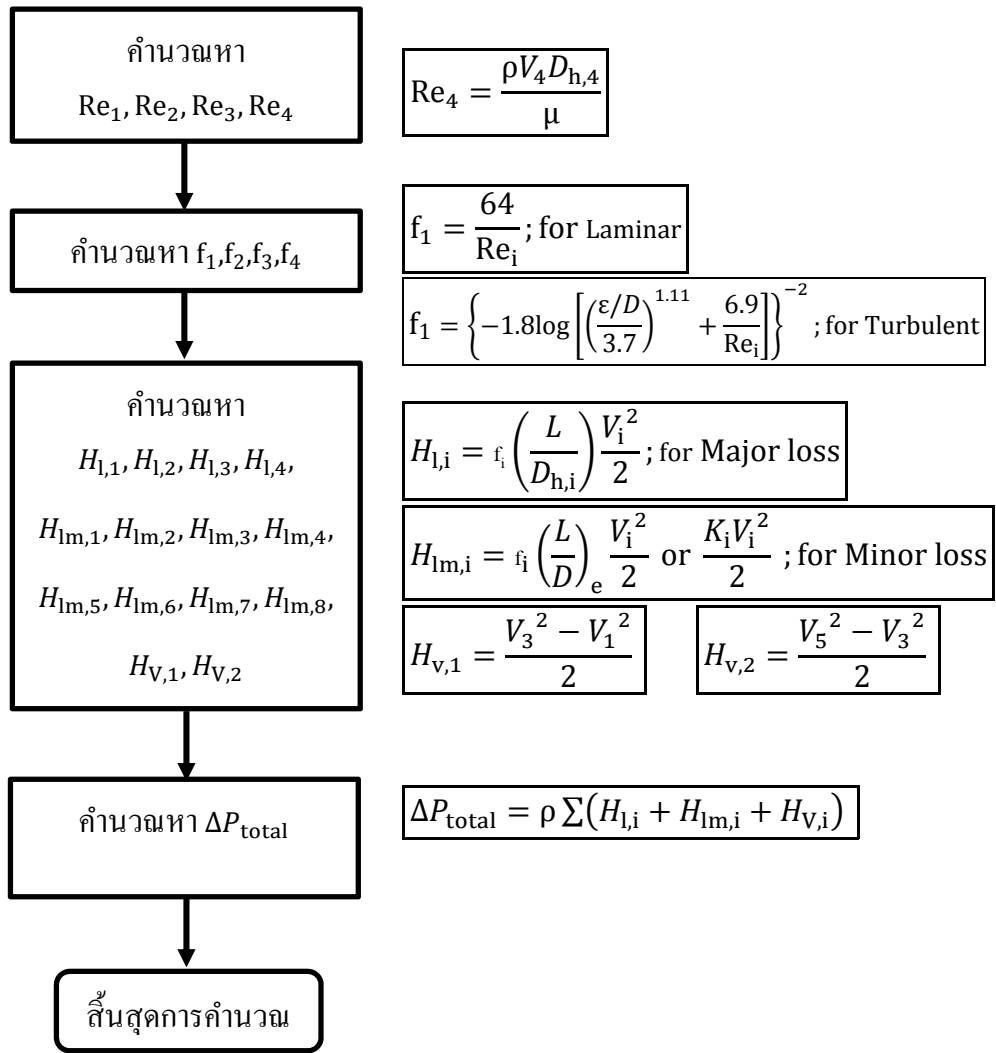
จ.4 การคำนวณหาการสูญเสียความดันของอากาศ (ΔP_{total})

จ.4.1 ขั้นตอนการคำนวณหาการสูญเสียความดันของอากาศ (ΔP_{total})

1. คำนวณหาอัตราการใช้เชื้อเพลิง (\dot{m}_f) และอากาศ (\dot{m}_a)
2. คำนวณหาความเร็วของอากาศที่ไหลในท่อในช่วงต่างๆ (V_1, V_2, V_3, V_4)
3. คำนวณหาค่า Reynolds number (Re_1, Re_2, Re_3, Re_4) ของอากาศที่ไหลในท่อในช่วงต่างๆ
4. คำนวณหา Friction factor ของอากาศที่ไหลในท่อในช่วงต่างๆ (f_1, f_2, f_3, f_4)
5. คำนวณหาความสูญเสียที่เกิดจาก Major losses ($H_{l,1}, H_{l,2}, H_{l,3}, H_{l,4}$), Minor losses ($H_{lm,1}, H_{lm,2}, H_{lm,3}, H_{lm,4}, H_{lm,5}, H_{lm,6}, H_{lm,7}, H_{lm,8}$) และการเปลี่ยนแปลง Velocity head ($H_{V,1}, H_{V,2}$)
6. คำนวณหาความดันที่สูญเสียของระบบ (ΔP_{total})

จ.4.2 การคำนวณหาการสูญเสียความดันของอากาศ (ΔP_{total})





ฉ.4.3 การคำนวณหาการสูญเสียความดันของอากาศ (ΔP_{total})

1. คำนวณหาอัตราการไหลของเชื้อเพลิง (\dot{m}_f) และอากาศ (\dot{m}_a)

ค่าความร้อนทางต่ำของ Kerosene (LHV) = 44,532 kJ/kg และอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่stöยคิโอมตรี $[(A/F)_{stoi}] = 15.04$ [14]

$$\dot{m}_f = \frac{FR}{LHV} = \frac{5}{44,532} = 1.123 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_a = (A/F)_{stoi} \times \frac{\dot{m}_f}{\phi} = 15.04 \times \frac{1.123 \times 10^{-4}}{0.47} = 3.59 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$$

2. คำนวณหาความเร็วของอากาศที่ไหลในท่อในช่วงต่างๆ (V_1, V_2, V_3, V_4)

ที่ความดัน 7 bar อุณหภูมิ 60 °C มีค่าความหนาแน่น (ρ) = 7.32 kg/m³ ขนาด $D_2 = 73$ mm, $D_3 = 80$ mm, $D_4 = 114.3$ mm, $D_5 = 134.3$ mm, $D_6 = 84$ mm, $D_7 = 95.5$ mm, $D_8 = 144$ mm และ $D_{10} = 5$ mm

$$V_1 = \frac{4\dot{m}_a}{\rho\pi(D_3^2 - D_2^2)} = \frac{4 \times 3.594 \times 10^{-3}}{7.32 \times \pi \times (0.08^2 - 0.073^2)} = 0.58 \text{ m/s}$$

$$V_2 = \frac{4\dot{m}_a}{\rho\pi(D_7^2 - D_6^2)} = \frac{4 \times 3.594 \times 10^{-3}}{7.32 \times \pi \times (0.0955^2 - 0.084^2)} = 0.30 \text{ m/s}$$

$$V_3 = \frac{4\dot{m}_a}{\rho\pi(D_9^2 - D_8^2)} = \frac{4 \times 3.594 \times 10^{-3}}{7.32 \times \pi \times (0.164^2 - 0.144^2)} = 0.10 \text{ m/s}$$

$$V_4 = \frac{4\dot{m}_a}{\rho\pi(D_5^2 - D_4^2)} = \frac{4 \times 3.594 \times 10^{-3}}{7.32 \times \pi \times (0.1343^2 - 0.1143^2)} = 0.13 \text{ m/s}$$

$$V_5 = \frac{4\dot{m}_a}{\rho\pi D_{10}^2} = \frac{4 \times 3.594 \times 10^{-3}}{7.32 \times \pi \times 0.005^2} = 6.25 \text{ m/s}$$

3. คำนวณค่า Reynolds number (Re_1, Re_2, Re_3, Re_4) ของอากาศที่ไหลในท่อในช่วงต่างๆ

ที่ความดัน 7 bar, 60 °C จะมีค่าความหนืด (μ) = 1.963 x 10⁻⁵ Pa·s [18]

$$D_{h,1} = D_3 - D_2 = 80 - 73 = 7 \text{ mm}$$

$$D_{h,2} = D_7 - D_6 = 95.5 - 84 = 11.5 \text{ mm}$$

$$D_{h,3} = D_9 - D_8 = 164 - 144 = 20 \text{ mm}$$

$$D_{h,4} = D_5 - D_4 = 134.3 - 114.3 = 20 \text{ mm}$$

$$Re_1 = \frac{\rho V_1 D_{h,1}}{\mu} = \frac{7.32 \times 0.58 \times 0.007}{1.963 \times 10^{-5}} = 1,540.26 \text{ (Laminar)}$$

$$Re_2 = \frac{\rho V_2 D_{h,2}}{\mu} = \frac{7.32 \times 0.30 \times 0.0115}{1.963 \times 10^{-5}} = 1,313.01 \text{ (Laminar)}$$

$$Re_3 = \frac{\rho V_3 D_{h,3}}{\mu} = \frac{7.32 \times 0.10 \times 0.02}{1.963 \times 10^{-5}} = 765.21 \text{ (Laminar)}$$

$$Re_4 = \frac{\rho V_4 D_{h,4}}{\mu} = \frac{7.32 \times 0.13 \times 0.02}{1.963 \times 10^{-5}} = 948.05 \text{ (Laminar)}$$

4. คำนวณหา Friction factor ของอากาศที่ไหลในท่อในช่วงต่างๆ (f_1, f_2, f_3, f_4)

เนื่องจากค่า Re_1, Re_2, Re_3 และ Re_4 จะมีการไหลแบบ Laminar [19] จะได้ว่า

$$f_1 = \frac{64}{Re_1} = \frac{64}{1,540.26} = 0.0415 \text{ (Laminar)}$$

$$f_2 = \frac{64}{\text{Re}_2} = \frac{64}{1,313.01} = 0.0487 \text{ (Laminar)}$$

$$f_3 = \frac{64}{\text{Re}_3} = \frac{64}{765.21} = 0.0836 \text{ (Laminar)}$$

$$f_4 = \frac{64}{\text{Re}_4} = \frac{64}{948.05} = 0.0675 \text{ (Laminar)}$$

5. คำนวณหาค่าความสูญเสียที่เกิดจาก Major losses ($H_{1,1}, H_{1,2}, H_{1,3}, H_{1,4}$), Minor losses

($H_{1m,1}, H_{1m,2}, H_{1m,3}, H_{1m,4}, H_{1m,5}, H_{1m,6}, H_{1m,7}, H_{1m,8}$) และการเปลี่ยนแปลง Velocity head ($H_{V,1}, H_{V,2}$)

ค่าความสูญเสียเนื่องจากการวกกลับ $(L/D)_{U\text{-turn}}$ จะประมาณด้วยค่า 2 เท่าของค่าความสูญเสียเนื่องจากข้องอ $90^\circ C$ มีค่าเท่ากับ 60 ค่าความสูญเสียเนื่องจากการขยายพื้นที่หน้าตัด K_{c1} และ K_{c2} มีค่าเท่ากับ 0.24 และ 0.4 ตามลำดับ ค่าความสูญเสียเนื่องจากการลดพื้นที่หน้าตัด K_{c1} และ K_{c2} มีค่าเท่ากับ 0.04 และ 0.5 ตามลำดับ [16] ขนาดของ $L_1 = 104 \text{ mm}$, $L_2 = 110.25$, $L_3 = 63 \text{ mm}$ และ $L_4 = 82.85 \text{ mm}$

$$H_{1,1} = f_1 \left(\frac{L_1}{D_{h,1}} \right) \frac{V_1^2}{2} = 0.0415 \times \left(\frac{104}{7} \right) \times \frac{0.58^2}{2} = 0.105 \text{ (m/s)}^2$$

$$H_{1,2} = f_2 \left(\frac{L_2}{D_{h,2}} \right) \frac{V_2^2}{2} = 0.0487 \times \left(\frac{110.25}{11.5} \right) \times \frac{0.30^2}{2} = 0.021 \text{ (m/s)}^2$$

$$H_{1,3} = f_3 \left(\frac{L_3}{D_{h,3}} \right) \frac{V_3^2}{2} = 0.0836 \times \left(\frac{63}{20} \right) \times \frac{0.10^2}{2} = 0.001 \text{ (m/s)}^2$$

$$H_{1,4} = f_4 \left(\frac{L_4}{D_{h,4}} \right) \frac{V_4^2}{2} = 0.0675 \times \left(\frac{82.85}{20} \right) \times \frac{0.13^2}{2} = 0.002 \text{ (m/s)}^2$$

$$H_{1m,1} = f_1 \left(\frac{L}{D} \right)_{U\text{-turn } 1} \times \frac{V_1^2}{2} = 0.0415 \times 60 \times \frac{0.58^2}{2} = 0.424 \text{ (m/s)}^2$$

$$H_{1m,2} = f_2 \left(\frac{L}{D} \right)_{U\text{-turn } 2} \times \frac{V_2^2}{2} = 0.0487 \times 60 \times \frac{0.30^2}{2} = 0.134 \text{ (m/s)}^2$$

$$H_{1m,3} = f_4 \left(\frac{L}{D} \right)_{U\text{-turn } 3} \times \frac{V_4^2}{2} = 0.0675 \times 60 \times \frac{0.13^2}{2} = 0.032 \text{ (m/s)}^2$$

$$H_{1m,4} = f_4 \left(\frac{L}{D} \right)_{U\text{-turn } 4} \times \frac{V_5^2}{2} = 0.0675 \times 60 \times \frac{6.25^2}{2} = 79.074 \text{ (m/s)}^2$$

$$H_{1m,5} = \frac{K_{e1} V_1^2}{2} = \frac{0.24 \times 0.58^2}{2} = 0.041 \text{ (m/s)}^2$$

$$H_{1m,6} = \frac{K_{e2} V_2^2}{2} = \frac{0.4 \times 0.30^2}{2} = 0.018 \text{ (m/s)}^2$$

$$H_{1m,7} = \frac{K_{c1} V_3^2}{2} = \frac{0.04 \times 0.10^2}{2} = 0.0003 \text{ (m/s)}^2$$

$$H_{lm,8} = \frac{K_{c2} V_5^2}{2} = \frac{0.5 \times 6.25^2}{2} = 9.761 \text{ (m/s)}^2$$

$$H_{V,1} = \frac{V_3^2 - V_1^2}{2} = \frac{0.10^2 - 0.58^2}{2} = -0.165 \text{ (m/s)}^2$$

$$H_{V,2} = \frac{V_5^2 - V_3^2}{2} = \frac{6.25^2 - 0.10^2}{2} = 19.517 \text{ (m/s)}^2$$

6. คำนวณหาความดันที่สูญเสียของระบบ (ΔP_{total})

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{total}} &= \rho \sum (H_{l,i} + H_{lm,i}) \\ &= \rho \left(\begin{array}{l} H_{l,1} + H_{l,2} + H_{l,3} + H_{l,4} + H_{lm,1} + H_{lm,2} + H_{lm,3} \\ + H_{lm,4} + H_{lm,5} + H_{lm,6} + H_{lm,7} + H_{lm,8} + H_{V,1} + H_{V,2} \end{array} \right) \\ &= 7.32 \times \left(\begin{array}{l} 0.105 + 0.021 + 0.001 + 0.002 + 0.424 \\ + 0.134 + 0.032 + 79.074 + 0.041 + 0.018 \\ + 0.0003 + 9.761 + (-0.165) + 19.517 \end{array} \right) \\ &= 797.76 \text{ Pa} \end{aligned}$$