

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

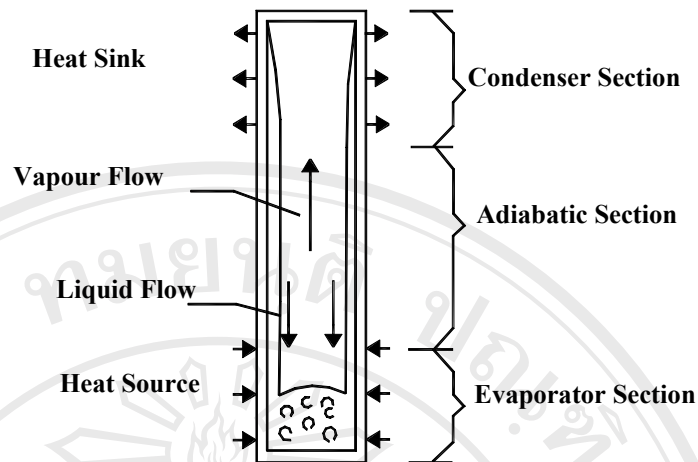
2.1 หลักการและทฤษฎีของท่อความร้อนแบบธรรมดา (Thermosyphon)

2.1.1 ท่อความร้อนแบบธรรมดา

ท่อความร้อนแบบธรรมดาหรือท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนนั้น จัดเป็นอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนชนิดหนึ่ง ที่สามารถถ่ายเทความร้อนได้ดี โดยไม่ต้องอาศัยพลังงานจากภายนอกสามารถทำงานได้โดยใช้หลักการของการถ่ายเทความร้อนจากความร้อนแฝงของสารทำงานภายในท่อความร้อน ซึ่งสารทำงานจะระเหยตัวโดยการรับความร้อนจากแหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงและถ่ายเทความร้อนโดยการควบแน่นโดยการถ่ายเทความร้อนให้กับแหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยรูป 2.1 ได้แสดงถึงส่วนประกอบของท่อความร้อนแบบธรรมดา ซึ่งมีลักษณะเป็นท่อสุญญากาศที่มีสารทำงานอยู่ภายใน มีลักษณะเป็นท่อระบบปิด ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ ส่วนทำระเหยส่วนกันความร้อน และส่วนควบแน่น

หลักการทำงานของท่อความร้อนแบบธรรมดา คือ เมื่อท่อความร้อนได้รับความร้อนจากส่วนทำระเหย จะทำให้สารทำงานภายในท่อความร้อนซึ่งมีสภาวะเป็นของเหลวอิ่มตัว เปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอและลอยขึ้นสู่ด้านบนไปยังส่วนควบแน่น ซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่า เมื่อสารทำงานถ่ายเทความร้อนออก จะทำให้เกิดการควบแน่นของสารทำงาน และไหลกลับลงสู่ส่วนทำระเหยด้วยแรงโน้มถ่วง เพื่อกลับมารับความร้อนในส่วนทำระเหยอีกครั้งหนึ่ง และจะทำงานเป็นวัฏจักรแบบนี้เรื่อยไป เนื่องจากความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของสารทำงานภายในท่อความร้อนมีค่าสูงมาก ดังนั้นสารทำงานจึงสามารถถ่ายเทความร้อนจากปลายด้านหนึ่งไปสู่ปลายอีกด้านหนึ่งได้ โดยที่อุณหภูมิต่างระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นของท่อความร้อนนั้น มีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย

โดยทั่วไปแล้วความสามารถในการส่งถ่ายความร้อนของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนนั้น ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยด้วยกัน สามารถแยกออกได้ดังนี้ เช่น ขนาดความโตความยาวของท่อความร้อน ชนิดหรือวัสดุที่ใช้ทำท่อความร้อน ลักษณะการติดตั้งท่อความร้อน ชนิดของสารทำงาน อุณหภูมิของแหล่งความร้อนและแหล่งความเย็น รวมถึงขีดจำกัดการทำงานต่างๆของท่อความร้อน เป็นต้น



รูป 2.1 ลักษณะส่วนประกอบของเทอร์โมไซฟอน

ที่มา : Engineering Science Data Unit

2.1.2 การถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบธรรมชาติ

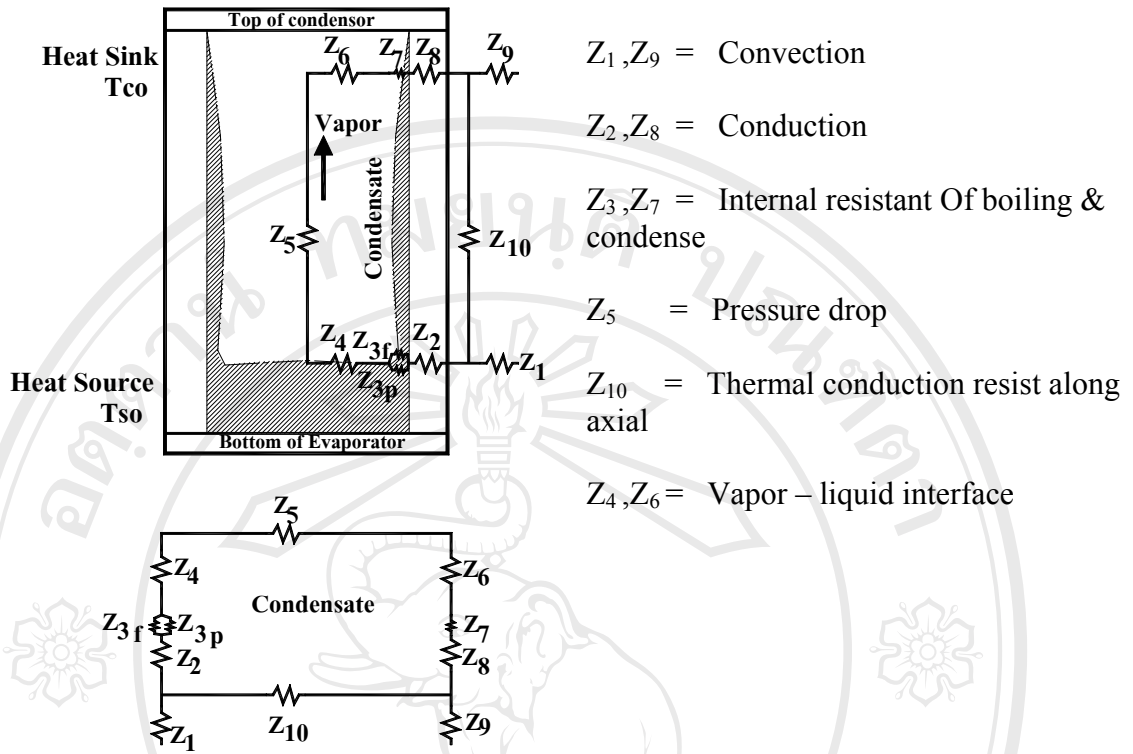
ค่าความร้อนที่ท่อความร้อนสามารถส่งผ่านได้สามารถหาได้จากการหาค่าความต้านทานทั้งหมด (Z) ที่เกิดในระบบ โดยพิจารณาจากรูปที่ 2.2

เมื่อ Z_1 , Z_9 คือ ความต้านทานที่เกิดจากการพาความร้อนโดยรอบผนังภายนอกท่อ ซึ่งหาได้จากสมการ

$$Z_1 = \frac{1}{h_{co} A_{co}} \quad (2.1)$$

$$Z_9 = \frac{1}{h_{co} A_{co}} \quad (2.2)$$

Z_2 , Z_8 คือ ค่าความต้านทานความร้อนที่เกิดจากการนำความร้อนผ่านผนังท่อความร้อน ซึ่งหาได้จากสมการ



รูป 2.2 ความต้านทานในส่วนต่างๆ ที่เกิดในท่อความร้อน
ที่มา : Engineering Science Data Unit

$$Z_2 = \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi L_c k_x} \tag{2.3}$$

$$Z_8 = \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi L_c k_x} \tag{2.4}$$

Z_3, Z_7 คือ ความต้านทานภายในเนื่องจากของเหลวที่เป็นสารทำงานภายในท่อความร้อน โดยแยกเป็น

Z_{3p} คือ ความต้านทานของของเหลวที่เกิดจากแรงแห่งของเหลวหาได้จากสมการ

$$Z_{3p} = \frac{1}{\Phi_3 g^{0.2} Q^{0.4} (\pi D_i L_c)^{0.6}} \tag{2.5}$$

เมื่อ

$$\Phi_3 = 0.325 \times \frac{\rho_1^{0.5} k_1^{0.3} C_{p1}^{0.7} \left[\frac{p_v}{p_a} \right]^{0.23}}{\rho_v^{0.25} L^{0.4} \mu^{0.1}} \quad (2.6)$$

Z_{3f} คือ ความต้านทานของของเหลวที่เกิดจากฟิล์มของเหลวที่ส่วนแอ่งของเหลวในส่วนรับความร้อน หาได้จากสมการ

$$Z_{3f} = \frac{CQ^{1/3}}{D_i^{4/3} g^{1/3} L_e \Phi_2^{4/3}} \quad (2.7)$$

เมื่อ

$$\Phi_2 = \left(\frac{L k_1^3 \rho_1^2}{\mu_1} \right)^{1/4} \quad (2.8)$$

และเงื่อนไขในการใช้ค่า Z_{3p} และ Z_{3f} เพื่อใช้เป็นค่า Z_3 คือ ถ้า $Z_{3p} > Z_{3f}$ แล้ว

$$Z_3 = Z_{3p} \quad (2.9)$$

ถ้า $Z_{3p} < Z_{3f}$ แล้ว

$$Z_3 = Z_{3p} F + Z_{3f} (1 - F) \quad (2.10)$$

เมื่อ F คือ อัตราการเติมสารทำงาน โดย

$$F = \frac{V_1}{AL_e} \quad (2.11)$$

Z_7 คือ ความต้านทานของของเหลวที่เกิดจากฟิล์มของเหลวที่ไหลกลับในส่วนคายความร้อน หาได้จากสมการ

$$Z_7 = \frac{CQ^{1/3}}{D_i^{4/3} g^{1/3} L_c \Phi_2^{4/3}} \quad (2.12)$$

Z_4, Z_6 คือ ความต้านทานที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงสถานะของสารทำงาน ในส่วนรับความร้อนและในส่วนคายความร้อน

Z_5 คือ ค่าความต้านทานซึ่งเกิดจากความดันที่ลดลงในส่วนคายความร้อน ซึ่ง Z_4, Z_5 และ Z_6 โดยปกติจะมีค่าน้อยมาก และไม่นำมาคิดในการคำนวณ

Z_{10} คือ ค่าการนำความร้อนของท่อความร้อนตามแนวความยาวท่อ ซึ่งหาค่าประมาณจากสมการ

$$Z_{10} = \frac{0.5L_c + L_a + 0.5L_c}{A_x \lambda_x} \quad (2.13)$$

โดยที่ A_x คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อความร้อน

λ_x คือ ค่าการนำความร้อนของวัสดุที่ใช้ทำท่อ

เงื่อนไขการกำหนดค่าความร้อน คือ

$$\frac{Z_{10}}{Z_2 + Z_3 + Z_5 + Z_7 + Z_8} > 20 \quad (2.14)$$

ถ้าเป็นไปตามสมการ 2.14 ค่าความต้านทานความร้อนรวมจะมีค่าเท่ากับ

$$Z = Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_7 + Z_8 + Z_9 \quad (2.15)$$

ถ้าไม่เป็นไปตามสมการ (2.14) ค่าความต้านทานความร้อนรวมจะมีค่าเท่ากับ

$$Z = Z_1 + \left(\frac{1}{Z_2 + Z_3 + Z_5 + Z_7 + Z_8} \right)^{-1} + Z_9 \quad (2.16)$$

หลังจากได้ค่าความต้านทานความร้อนรวมแล้ว สามารถหาค่าความร้อนที่ต่อความร้อนสามารถส่งถ่ายได้โดย

$$Q = \frac{\Delta T}{Z} \quad (2.17)$$

เมื่อ ΔT คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างแหล่งความร้อนกับแหล่งความเย็น หาได้จากสมการ

$$\Delta T = T_{so} - T_{si} - \Delta T_h \quad (2.18)$$

เมื่อ T_{so} อุณหภูมิของแหล่งให้ความร้อน

T_{si} อุณหภูมิของแหล่งรับความร้อน

ΔT_h อุณหภูมิเฉลี่ยเนื่องจากหัวน้ำ (Hydrostatic head)

2.2 หลักการทำงานของท่อความร้อนแบบสั้นปลายปิด (CEOHP)

ท่อความร้อนแบบสั้นจัดเป็นอุปกรณ์ที่สามารถแลกเปลี่ยนความร้อนได้โดยไม่ต้องอาศัยพลังงานจากภายนอกเหมือนกับเทอร์โมไซฟอน มีลักษณะเป็นระบบปิด ประกอบด้วย 3 ส่วนเหมือนกับเทอร์โมไซฟอน คือ ส่วนทำระเหย (Le) ส่วนกั้นความร้อน (La) และส่วนควบแน่น (Lc) สามารถทำงานได้โดยเมื่อสารทำงานถูกบรรจุลงในท่อที่ทำมาจากท่อคาปิลลารีที่ขุดไปมา ภายในเป็นสถานะสุญญากาศ เมื่อให้ความร้อนในส่วนทำระเหย จะทำให้สารทำงานซึ่งอยู่ในสถานะของเหลวอิมิตัวเกิดการเดือดแบบฟองและรวมตัวเป็นก้อนไอ (Vapor slug) โดยความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ และลอยผ่านส่วนกั้นความร้อนไปสู่ส่วนควบแน่นซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่า ก้อนไอยังจะเกิดการควบแน่นและยุบตัวลงไปในส่วนที่ต่ำสุด ดังนั้นสารทำงานที่เป็นก้อนไอยังสามารถถ่ายเทความร้อนจากปลายด้านหนึ่งไปสู่ปลายอีกด้านหนึ่งได้ ถ้าอุณหภูมิระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นมีค่าแตกต่างกัน และเมื่ออุณหภูมิส่วนทำระเหยเพิ่มขึ้นก้อนไอยังจะมีความยาวลดลงแต่จะมีความถี่ของการสั่นที่สูงขึ้น ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสั้นนั้นขึ้นอยู่กับขนาดของท่อ จำนวนโค้งเลี้ยว ความยาวส่วนทำระเหย โดยที่คุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสั้นจะเพิ่มขึ้นเมื่อ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อความร้อนมีค่าสูงขึ้น แต่ต้องไม่เกินค่าเส้นผ่านศูนย์กลางวิกฤต ความยาวส่วนทำระเหยรวมทั้งจำนวนโค้งเลี้ยวที่

มากจะทำให้ท่อความร้อนแบบสันสามารถทำงานในมุมการทำงาน 0 องศา หรือในมุมการทำงาน ติดลบ (ส่วนที่ระเหยอยู่ด้านบน) ได้ โดยมุมเอียงที่ทำให้ได้ค่าคุณลักษณะการส่งถ่ายความร้อนที่ดี ที่สุดอยู่ระหว่าง 80-85 องศาจากแนวระดับในกรณีของ CEOHP และ อยู่ระหว่าง 80-90 องศาจาก แนวระดับในกรณี CLOHP ทั้งนี้ สารทำงานที่มีค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอสูง จะให้ค่า คุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่า

2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในงานวิจัย

2.3.1 คุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของ OHP

คุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของ OHP หมายถึง เมื่อท่อความร้อนทำงาน สารทำงาน จะรับความร้อนจากส่วนที่ระเหย และระเหยพาความร้อนไปคายให้กับส่วนควบแน่นโดยการกลั่น ตัว จึงเกิดการถ่ายเทความร้อนขึ้น ซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์ของ ผลต่างระหว่างอุณหภูมิของ แหล่งให้ความร้อนกับแหล่งรับความร้อน (ΔT) ต่อค่าความต้านทานความร้อนรวม (R) ดัง สมการ ที่ 2.19

$$Q = \frac{\Delta T}{R} \quad (2.19)$$

ในการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนนั้น คุณสมบัติอีกประการหนึ่งที่เป็นตัวควบคุม การส่งถ่ายความร้อนซึ่งถือได้ว่าเป็นคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนด้วย คือค่า ความต้านทานความร้อน แสดงไว้ในสมการที่ 2.20 ดังนี้

$$R = \frac{(T_{\text{evap}} - T_{\text{cond}})}{Q} \quad (2.20)$$

และในการที่จะหาค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่สารหล่อเย็นได้รับที่ส่วนควบแน่น โดย วัดค่าอุณหภูมิของสารหล่อเย็นทั้งขาเข้าและขาออก จากนั้นนำมาคำนวณโดยใช้สมการที่ 2.21

$$Q = \dot{m} C_p (T_{\text{out}} - T_{\text{in}}) \quad (2.21)$$

2.3.2 ตัวแปรไร้มิติ

คือ กลุ่มของตัวแปรที่ไม่มีหน่วย ซึ่งตัวแปรที่เกี่ยวข้อง ที่สำคัญมีดังนี้

2.3.2.1 ตัวเลขบอนด์ (Bond number, Bo) เป็นอัตราส่วนของแรงลอยตัวต่อแรงตึงผิวของของไหลใดๆสามารถนิยามได้ดังนี้

$$Bo = d \left[g \left(\frac{\rho_i - \rho_v}{\sigma} \right) \right]^{1/2} \quad (2.22)$$

2.3.2.2 ตัวเลขคูทาเทลาดเซ (Kutateladze number, Ku) เป็นอัตราส่วนของฟลักซ์ความร้อนที่ให้ต่อ ฟลักซ์ความร้อนวิกฤตของของไหลนั้น สามารถนิยามได้ดังนี้

$$Ku = \frac{q_e}{\rho_v h_{fg} \left[\sigma g \left(\frac{\rho_i - \rho_v}{\rho_v^2} \right) \right]^{1/4}} \quad (2.23)$$

นอกจากนี้อาจมีตัวแปร ไร้มิติอื่นที่เกี่ยวข้องด้วย เช่น ตัวแปรไร้มิติที่เกี่ยวข้องกับความเร็วของสารทำงาน คือ ตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number, Re)

2.3.3 รูปแบบการไหลภายในท่อ

2.3.3.1 รูปแบบการไหลภายในท่อหน้าตัดกลมในแนวดิ่ง จะมีรูปแบบการไหล ทั้งก๊าซและของเหลวไหลขึ้นด้านบนดังแสดงในรูป 2.3 ซึ่งแบ่งได้ 5 รูปแบบ ดังนี้

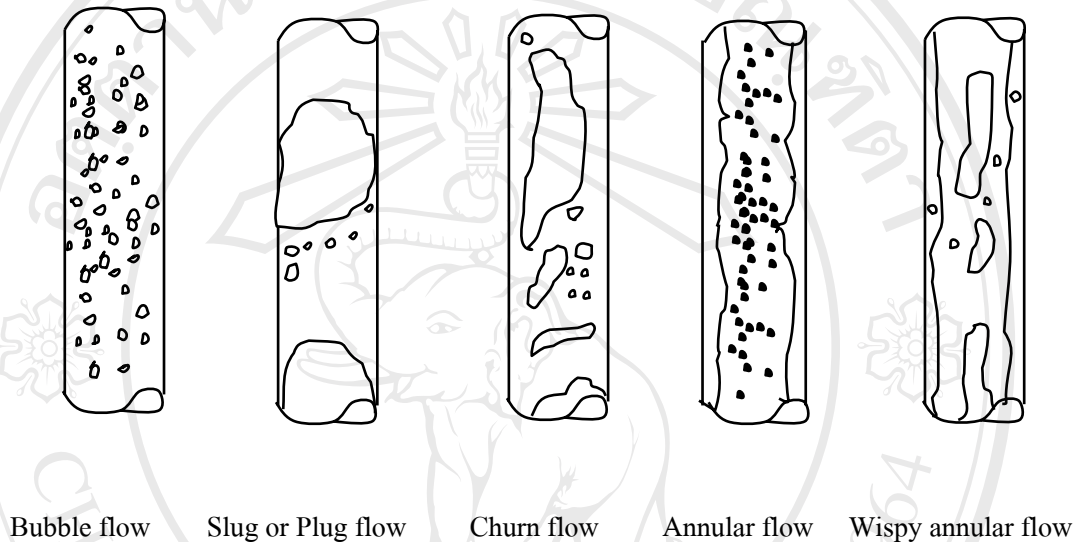
การไหลแบบเป็นฟอง (Bubble flow) รูปแบบการไหลที่มีทั้งฟองก๊าซเล็กๆกระจายเป็นจุดๆ ไหลปะปนกับของเหลว และสถานะของเหลวจะต่อเนื่อง

การไหลแบบเป็นก้อน (Slug flow or Plug flow) รูปแบบการไหลที่มีฟองก๊าซที่มีรูปร่างคล้ายกระสุนไหลขึ้นสู่ด้านบน โดยมีของเหลวชั้นกลางพร้อมกับมีก๊าซปะปนบ้าง โดยขณะเดียวกันมีฟิล์มของเหลวล้อมรอบฟองก๊าซรูปกระสุน

การไหลแบบเป็นโพรง (Churn flow) รูปแบบการไหลที่มีรูปร่างของฟองก๊าซบิดเบี้ยวไปเนื่องจากฟองก๊าซมีความเร็วในการไหลเพิ่มขึ้น โดยที่รูปแบบการไหลแบบนี้อาจจะไม่มีการสัมผัสของของเหลวให้เห็นเมื่อท่อมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยๆ

การไหลแบบวงแหวน (Annular flow) รูปแบบการไหลที่มีการไหลของก๊าซอยู่ในแกนกลางท่อ มีหยดของเหลวเล็กๆ ปะปนไปด้วย และขณะเดียวกันก็มีการไหลเป็นฟิล์มที่ผิวท่อ

การไหลแบบวงแหวนแทรก (Wispy annular flow) รูปแบบการไหลที่มีการไหลขึ้นของก๊าซอยู่แกนกลางท่อ โดยที่หยดของเหลวได้ปะปนไปกับก๊าซนั้นได้รวมตัวกันเป็นริ้วปนกันไปด้วย และขณะเดียวกันก็มีการไหลของของเหลวเป็นฟิล์มที่ผิวท่อ ซึ่งการเกิดการรวมตัวของหยดของเหลวเล็กๆ เนื่องจากอัตราการไหลของฟิล์มของเหลวเพิ่มขึ้นทำให้ความหนาแน่นของหยดของเหลวมากขึ้นด้วย



รูป 2.3 รูปแบบการไหลในท่อหน้าตัดกลมในแนวตั้ง
ที่มา : Hewitt (1994)

2.3.3.2 รูปแบบการไหลภายในท่อหน้าตัดกลมในแนวระดับ จะแบ่งออกได้ 5 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.4

การไหลแบบแยกชั้น (Stratified flow) รูปแบบการไหลจะมีการแยกตัวออกจากกันเนื่องจากแรงดึงดูด โดยที่ก๊าซจะไหลไปตามด้านบนท่อ และของเหลวจะไหลไปที่แนวด้านล่างของท่อ

การไหลแบบแยกชั้นผิวคลื่น (Stratified wavy flow) รูปแบบการไหลที่มีความเร็วของก๊าซเพิ่มขึ้นจากรูปแบบการไหลแบบแยกชั้น ทำให้เกิดคลื่นขึ้นที่ผิวรอยต่อระหว่างก๊าซกับของเหลว

การไหลแบบฟองฟุ้ง (Dispersed bubble flow) รูปแบบการไหลที่มีฟองก๊าซกระจายปะปนในของเหลวมีแนวโน้มของฟองก๊าซจะรวมกันที่ด้านบนของท่อ เมื่อระบบมีความเร็วในการไหลมากขึ้นฟองก๊าซจะกระจายตัวได้สม่ำเสมอมากขึ้น

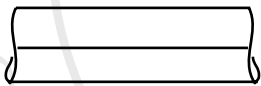
การไหลแบบวงแหวนฟุ้ง (Annular - dispersed flow) รูปแบบการไหลที่คล้ายกับท่อที่อยู่
ในแนวตั้ง แต่ความหนาของแผ่นฟิล์มจะสม่ำเสมอ โดยที่ด้านล่างของท่อความหนาของแผ่นฟิล์มก็
จะมากกว่า

การไหลแบบเป็นช่วง (Intermittent flow) รูปแบบการไหลนี้แบ่งออกได้ 3 รูปแบบด้วยกัน

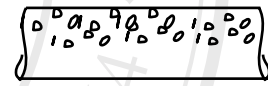
ก. การไหลแบบเป็นก้อน (Plug flow) รูปแบบการไหลที่คล้ายกับท่อในแนวตั้งแต่จะแนบ
ชิดกับผิวท่อด้านบน

ข. การไหลแบบเป็นห้วง (Slug flow) รูปแบบการไหลที่มีของเหลวที่มีสภาพเป็นชั้นไปอุด
หน้าท่อนั้นจะมีฟองก๊าซปะปนไปด้วย

ค. การไหลแบบกึ่งห้วง (Semi-slug flow) เป็นรูปแบบการไหลที่มีฟองก๊าซเกิดขึ้นที่คลื่น
โดยคลื่นไม่สามารถที่จะก่อตัวเป็นก้อนของเหลวไปปิดกั้นท่อหรือสัมผัสกับผนังท่อด้านบนได้



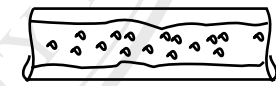
การไหลแบบแยกชั้น



การไหลแบบฟองฟุ้ง



การไหลแบบแยกชั้นผิวคลื่น



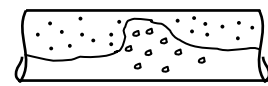
การไหลแบบวงแหวนฟุ้ง



การไหลแบบเป็นก้อน



การไหลแบบเป็นห้วง



การไหลแบบกึ่งห้วง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Copyright © by Chiang Mai University

All rights reserved

รูป 2.4 รูปแบบการไหลในท่อหน้าตัดกลมในแนวระดับ

ที่มา : Hewitt (1994)