บทที่ 2
หลักการและทฤษฎี

2.1 ชนิดและหลักการทำงานท่อความร้อนแบบสั่น (Oscillating or pulsating heat pipe)

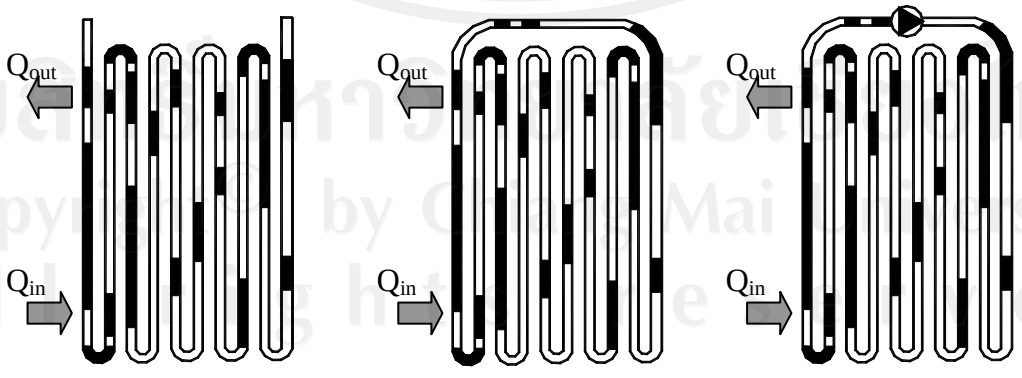
2.1.1 ชนิดของท่อความร้อนแบบสั่น

ท่อความร้อนแบบสั่น (Oscillating heat pipe; OHP) สามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิด ตามลักษณะโครงสร้างของท่อ (Maezawa., 1995) คือ

2.1.1.1 ท่อความร้อนแบบสั่นชนิดปลายปิด (Closed-end oscillating heat pipe; CEOHP) ที่ทำมาจากท่อคาปิลลารี่ขดกลับไปมาและเชื่อมปิดที่ปลายทั้งสองข้าง โดยแยกปลายทั้งสองข้างออกจากกัน สำหรับกรณีการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นจากการสั่นที่ขับด้วยคลื่นความดันที่กวัดแกว่งอย่างรวดเร็ว ซึ่งเกิดจากการเดือดแบบฟอง (Nucleate boiling)

2.1.1.2 ท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบ (Closed-loop oscillating heat pipe; CLOHP) ที่ทำมาจากท่อคาปิลลารี่ขดกลับไปมาเช่นเดียวกับท่อความร้อนแบบสั่นชนิดปลายปิด แต่ต่างกันตรงที่มีการต่อปลายท่อทั้งสองข้างเข้าด้วยกันเป็นวงรอบ ดังนั้นในกรณีการถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้นจากการสั่นของสารทำงานในแนวแกน

2.1.1.3 ท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบที่มีวาล์วกันกลับ (Closed-loop oscillating heat pipe with check valves; CLOHP/CV) ทำจากท่อคาปิลลารี่เช่นเดียวกับสองชนิดข้างต้น แต่ต่างกันที่การต่อปลายท่อทั้งสองข้างเข้าด้วยกันเป็นวงรอบโดยมีการติดวาล์วกันกลับไว้ในท่อตั้งแต่ 1 ตัวขึ้นไป เพื่อให้สารทำงานนำความร้อนไหลเวียนไปในทางเดียว ซึ่งรูปแสดงโครงสร้างของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดต่าง ๆ แสดงไว้ดังรูปที่ 2.1



Closed-end OHP | Closed-loop OHP | CLOHP with check valve

รูปที่ 2.1 โครงสร้างของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดต่าง ๆ ทั้ง 3 ชนิด (Maezawa., 1995)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.1.2 หลักการทำงานและการเริ่มต้นการทำงานได้ของท่อความร้อนแบบสั่น

นอกจากนี้ยังได้มีการกล่าวถึงกลไกพื้นฐานในการส่งผ่านความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่น ว่าเกิดจากการเคลื่อนที่กลับไปมาของสารทำงานร่วมกันกับการเปลี่ยนสถานะของสารทำงานของท่อความร้อนแบบสั่น (Akachi et al. ,1996) ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อมีก้อนของเหลว (Liquid plug) และฟองไอ (Vapor bubbles) เกิดร่วมกันในท่อความร้อนตลอดความยาวท่อ การทำให้เกิดสภาวะดังกล่าวทำได้โดยการทำท่อให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในน้อยกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางวิกฤต ให้เป็นสุญญากาศแล้วเติมสารทำงานลงไปภายในท่อ โดยเติมด้วยปริมาตรบางส่วนของปริมาตรภายในท่อความร้อนทั้งหมด เมื่อท่อความร้อนแบบสั่นทำงานจะเกิดการระเหยในส่วนที่ได้รับความร้อน ทำให้ความดันไอสูงขึ้นและขนาดฟองไอจะโตขึ้นด้วย ซึ่งฟองไอที่โตขึ้นนี้จะเกิดแรงขับดัน (Driving force) ผลักเอาของเหลวให้เคลื่อนที่ต่อไปยังส่วนระบายความร้อน โดยการควบแน่นนี้ที่เกิดขึ้นจะยิ่งช่วยทำให้เกิดความดันแตกต่างของความดันระหว่างปลายทั้งสองข้างมีค่าที่มากขึ้น เนื่องจากท่อความร้อนทั้งหมดเป็นชิ้นเดียวกัน ดังนั้นเมื่อฟองไอผลักให้ของเหลวเคลื่อนที่เข้าสู่ส่วนควบแน่น มันก็จะทำให้ก้อนของเหลวและฟองไอในแถวถัดไปเคลื่อนที่เข้าสู่ส่วนทำระเหยและก็จะมีความเร็วสูงขึ้นด้วย ซึ่งก็มีผลทำให้เกิดแรงผลักกลับ (Restoring force) การทำงานร่วมกันระหว่างแรงขับดันและแรงผลักกลับทำให้เกิดการสั่นตามแนวแกนท่อ การส่งผ่านความร้อนเกิดขึ้นจากการไหลกลับไปกลับมาของสารทำงานในส่วนทำระเหย กับส่วนควบแน่น

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในงานวิจัย

2.2.1 คุณลักษณะการส่งถ่ายความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่น

เมื่อท่อความร้อนทำงาน สารทำงานจะรับความร้อนจากส่วนทำระเหยและระเหยพาความร้อนไประบายทิ้งที่ส่วนควบแน่นโดยการกลั่นตัวจึงเกิดการส่งถ่ายความร้อนขึ้นซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์ของผลต่างระหว่างอุณหภูมิของแหล่งให้ความร้อนกับแหล่งรับความร้อน (ΔT) ต่อค่าความต้านทานความร้อนรวม (Z) ซึ่งในที่นี้ เรียกว่า คุณลักษณะการส่งถ่ายความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นดังสมการที่ (2.1)

$$Q = \frac{\Delta T}{Z} \qquad (2.1)$$

ในการส่งถ่ายความร้อนของท่อความร้อนนั้น คุณสมบัติอีกประการหนึ่งที่เป็นตัวควบคุมการส่งถ่ายความร้อนซึ่งถือว่าเป็นคุณลักษณะการส่งถ่ายความร้อนของท่อความร้อนด้วยคือค่าความต้านทานความร้อน แสดงไว้ในสมการที่ (2.2)

$$Z = \frac{\left(T_{evap} - T_{cond}\right)}{Q} \qquad (2.2)$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

และในการที่จะหาค่าอัตราการส่งถ่ายความร้อนที่สารหล่อเย็นได้รับที่ส่วนควบแน่นโดยวัดค่าอุณหภูมิของสารหล่อเย็นทั้งขาเข้า ขาออก และอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น จากนั้นนำมาคำนวณโดยใช้สมการที่ (2.3)

$$Q = \dot{m}\, Cp\left(T_{out} - T_{in}\right) \qquad (2.3)$$

2.2 ขีดจำกัดการทำงานของท่อความร้อน (Performance limits)

เมื่อท่อความร้อนแบบทั่วไปทำงาน สารทำงานที่บรรจุอยู่ภายในท่อความร้อนก็จะเกิดการระเหย ควบแน่น และไหลเวียนไปมาภายในท่อความร้อน แต่อย่างไรก็ตามเมื่อท่อความร้อนส่งผ่านความร้อนที่ค่าความร้อนค่าหนึ่ง จะเกิดปรากฏการณ์บางอย่างที่ทำให้สารทำงานไม่สามารถรับความร้อนจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงได้ ทำให้การส่งผ่านความร้อนจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงผ่านตัวท่อความร้อนเกิดขึ้นไม่ได้ ค่าความร้อนที่ทำให้เกิดเหตุการณ์ข้างต้น เรียกว่า ขีดจำกัดการทำงานของท่อความร้อน โดยขีดจำกัดการทำงานของท่อความร้อนธรรมดาเกิดขึ้นจากขีดจำกัดความหนืด (Viscous limit) ขีดจำกัดความเร็วเสียง (Sonic limit) ขีดจำกัดการหอบพา (Entrainment limit) ขีดจำกัดคาปิลลารี่ (Capillary limit) และขีดจำกัดการเดือด (Boiling limit) โดยเงื่อนไขการทำงาน โครงสร้างและชนิดของสารทำงานของท่อความร้อนจะเป็นตัวกำหนดว่าขีดจำกัดการทำงานของท่อความร้อนจะเกิดเนื่องจากขีดจำกัดใด โดยขีดจำกัดแต่ละประเภทมีรายละเอียดดังนี้

- ขีดจำกัดความหนืด ขีดจำกัดนี้จะเกิดขึ้นเมื่อท่อความร้อนแบบธรรมดาทำงานที่อุณหภูมิต่ำ โดยที่อุณหภูมิต่ำ ความดันตกคร่อมในการไหลเนื่องจากความหนืดของไอจะมีผลสำคัญทำให้ไอไม่สามารถไหลได้ เนื่องจากความดันไอในส่วนทำระเหยนั้นน้อยกว่าความดันตกคร่อม ทำให้การไหลเวียนของสารทำงานไม่เกิดขึ้น และการส่งผ่านความร้อนยังไม่สามารถเกิดขึ้นได้ด้วย การทำนายค่าขีดจำกัดความหนืดหาจากความสัมพันธ์

$$q = \frac{r_v^2 h_{fg} \rho_v P_v}{16 \mu_v L_{eff}} \qquad (2.4)$$

- ขีดจำกัดความเร็วเสียง จะเกิดขึ้นต่อเมื่อเริ่มเดินท่อความร้อนแบบธรรมดาด้วยอุณหภูมิสูงๆ ที่เงื่อนไขการทำงานนี้ความเร็วไอจะมีค่าสูงมากเมื่อเทียบความเร็วเสียงในไอ ซึ่ง การส่งผ่านความร้อนจะไม่เพิ่มขึ้นตามอัตราการไหล เมื่อความเร็วไอมีค่าใกล้กับความเร็วเสียง ดังนั้นการส่งผ่านความร้อนจึงถูกจำกัดที่ค่าความเร็วไอค่าหนึ่งซึ่งไม่เกินความเร็วเสียง โดยขีดจำกัดความเร็วเสียงหาจาก

$$q = 0.474 h_{fg} \left(\rho_v P_v\right)^{1/2} \qquad (2.5)$$

- ขีดจำกัดคาปิลลารี่ จะเกิดขึ้นต่อเมื่อแรงดันคาปิลลารี่มีไม่เพียงพอที่จะผลักดันให้ของเหลวในส่วนควบแน่นไหลกลับมายังส่วนทำระเหย ก็จะทำให้ของเหลวที่ส่วนทำระเหยไม่เพียงพอในการ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ระเหย ทำให้เกิดการแห้ง (Dry out) ที่ส่วนทำระเหย และทำให้อุณหภูมิผิวท่อในส่วนทำระเหยสูงขึ้นจนเข้าใกล้อุณหภูมิแหล่งความร้อน ค่าขีดจำกัดการทำงานในกรณีนี้ทำนายได้จากความสัมพันธ์

$$Q_{wick} = \left(\frac{\rho_l \sigma_l h_{fg}}{\mu_l}\right)\left(\frac{KA}{L}\right)\left(\frac{2}{r_e} - \frac{\rho_l g L}{\sigma_l}\sin\theta\right) \tag{2.6}$$

- ขีดจำกัดการหอบพาและการท่วม เมื่อเพิ่มค่าความร้อนเข้าไปในตัวของท่อความร้อน ไอสารทำงานจะมีความเร็วสูงขึ้น เมื่อไอมีความเร็วสูงขึ้น แรงเฉือนที่ผิวสัมผัสไอ-ของเหลวก็จะมีค่าสูงขึ้น ขีดจำกัดการทำงานของท่อความร้อนเนื่องจากขีดจำกัดการหอบพาและการท่วม เกิดขึ้นเมื่อไอมีความเร็วสูงขึ้น จนแรงเฉือนที่ผิวสัมผัสไอ-ของเหลวมีค่าเพียงพอที่จะต้านการไหลกลับของของเหลว กรณีที่เป็นท่อความร้อนธรรมดา แรงเฉือนจะเกิดขึ้นที่บริเวณผิวของโครงสร้างวัสดุพรุนทำให้ของเหลวไม่สามารถไหลกลับไปยังส่วนทำระเหยได้ และเกิดการแห้งขึ้นในที่สุดการส่งผ่านความร้อนก็ไม่สามารถทำได้อีกต่อไป โดยในการทำนายค่าขีดจำกัดนี้หาได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$Q_{ent} = A_v h_{fg}\sqrt{\frac{\rho_v \sigma_l}{d}} \tag{2.7}$$

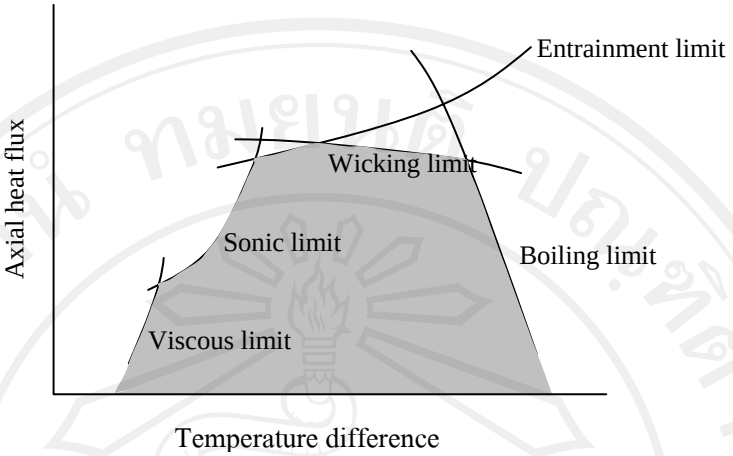
- **ขีดจำกัดการเดือด** จากที่ทราบในตอนต้นว่ากลไกการส่งผ่านความร้อนในท่อความร้อนเกิดจากการระเหย และควบแน่นของสารทำงาน ดังนั้นจะพบว่ามีการเดือดของสารทำงานเกิดขึ้นในส่วนทำระเหยเสมอ เมื่อเพิ่มค่าความร้อนเข้าไปในท่อความร้อน การเดือดก็จะรุนแรงขึ้น และจะพบว่ามีฟิล์มไอเคลือบที่ผิวส่วนทำระเหย ฟิล์มไอนี้จะเป็นชั้นระหว่างผิวแลกเปลี่ยนความร้อนและของเหลวในส่วนทำระเหย ทำให้ของเหลวในส่วนทำระเหยไม่สามารถสัมผัสกับผิวแลกเปลี่ยนความร้อนได้ และการส่งผ่านความร้อนจากผิวแลกเปลี่ยนความร้อนในส่วนทำระเหยไปยังสารทำงานก็จะลดลงอย่างมาก เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของไอน้อยกว่าของเหลวมาก ทำให้ผิวแลกเปลี่ยนความร้อนในบริเวณนั้นมีอุณหภูมิสูงขึ้น สำหรับท่อความร้อนที่มีโครงสร้างวัสดุพรุนนั้น ฟองไอก็จะเกิดขึ้นที่วัสดุพรุนในส่วนทำระเหยและแทนที่ของเหลวในวัสดุพรุนทำให้เกิดการแห้งขึ้น เช่นกัน การทำนายขีดจำกัดการเดือดหาได้จาก

$$Q_{boil} = \left[\frac{2\pi L_l k_{eff} T_v}{h_{fg}\rho_v \ln\left(r_w / r_v\right)}\right]\left[\frac{2\sigma_l}{r_n}\right] \tag{2.8}$$

ดังนั้นในการออกแบบท่อความร้อน จึงต้องมีการพิจารณาในเรื่องขีดจำกัดดังกล่าวด้วย เพื่อตรวจสอบสภาวะที่ท่อความร้อนนั้น ๆ ไปใช้งานจริงว่าเกินค่าขีดจำกัดใดในการถ่ายเทความร้อน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

หรือไม่ จากความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและความหนาแน่นความร้อนตามแนวแกน พบว่าการออกแบบท่อความร้อนต้องออกแบบให้อยู่ในพื้นที่ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ขีดจำกัดการส่งถ่ายความร้อนของท่อความร้อน (Dunn and Reay., 1982)

2.2.3 รูปแบบการไหลสองสถานะ

2.2.3.1 รูปแบบการไหลภายในท่อหน้าตัดกลมในแนวดิ่ง จะมีรูปแบบการไหล ทั้งก๊าซและของเหลวไหลขึ้นด้านบนดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งแบ่งเป็น 5 รูปแบบ ได้แก่

- การไหลแบบเป็นฟอง (Bubble flow) เป็นรูปแบบการไหลที่มีทั้งฟองก๊าซเล็กๆกระจายเป็นจุดๆ ไหลปะปนกับของเหลว และสถานะของเหลวจะต่อเนื่อง

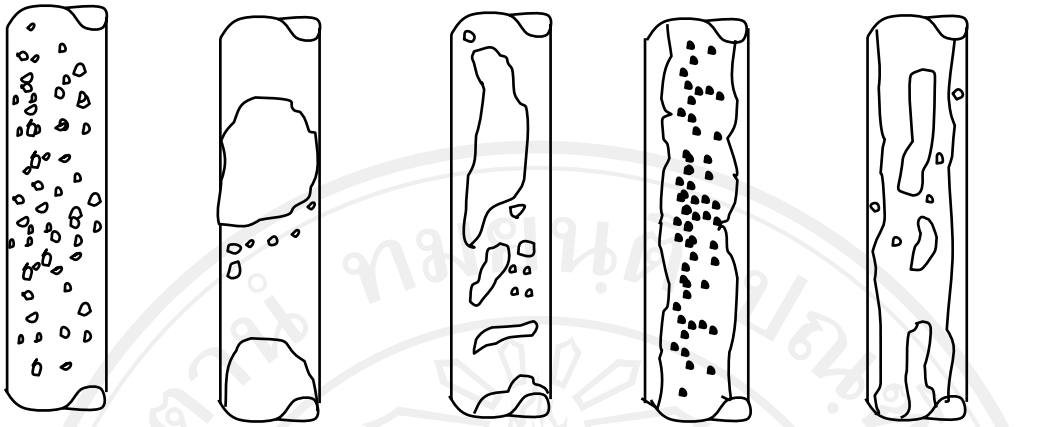
- การไหลแบบเป็นก้อน (Slug flow or Plug flow) เป็นรูปแบบการไหลที่มีฟองก๊าซที่มีรูปร่างคล้ายกระสุนไหลขึ้นสู่ด้านบน โดยมีของเหลวขั้นกลางพร้อมกับมีก๊าซปะปนบ้าง โดยขณะเดียวกันมีฟิล์มของเหลวล้อมรอบฟองก๊าซรูปกระสุน

- การไหลแบบเป็นโพรง (Churn flow) เป็นรูปแบบการไหลที่มีรูปร่างของฟองก๊าซบิดเบี้ยวไป เนื่องจากฟองก๊าซมีความเร็วในการไหลเพิ่มขึ้น โดยที่รูปแบบการไหลแบบนี้อาจจะไม่มีการสั่นของของเหลวให้เห็นเมื่อท่อมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อย ๆ

- การไหลแบบวงแหวน (Annular flow) เป็นรูปแบบการไหลที่มีการไหลของก๊าซอยู่ในแกนกลางท่อมีหยดของเหลวเล็กๆ ปะปนไปด้วย และขณะเดียวกันก็มีการไหลเป็นฟิล์มที่ผิวท่อ

- การไหลแบบวงแหวนแทรก (Wispy annular flow) รูปแบบการไหลที่มีการไหลขึ้นของก๊าซอยู่แกนกลางท่อ โดยที่หยดของเหลวได้ปะปนไปกับก๊าซนั้นได้รวมตัวกันเป็นริ้วปนกันไปด้วย และขณะเดียวกันก็มีการไหลของของเหลวเป็นฟิล์มที่ผิวท่อ ซึ่งการเกิดการรวมตัวของหยดของเหลวเล็กๆ เนื่องจากอัตราการไหลของฟิล์มของเหลวเพิ่มขึ้นทำให้ความหนาแน่นของหยดของเหลวมากขึ้นด้วย

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 2.3 รูปแบบการไหลในท่อหน้าตัดกลมในแนวดิ่ง (Hewitt., 1994)

2.2.3.2 รูปแบบการไหลภายในท่อหน้าตัดกลมในแนวระดับ จะแบ่งออกได้ 5 รูปแบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.4

- การไหลแบบแยกชั้น (Stratified flow) เป็นรูปแบบการไหลจะมีการแยกตัวออกจากกัน เนื่องจากแรงดึงดูดโดยที่ก๊าซจะไหลไปตามด้านบนท่อและของเหลวจะไหลไปที่แนวด้านล่างของท่อ

- การไหลแบบแยกชั้นผิวคลื่น (Stratified wavy flow) เป็นรูปแบบการไหลที่มีความเร็วของก๊าซเพิ่มขึ้นจากรูปแบบการไหลแบบแยกชั้น ทำให้เกิดคลื่นขึ้นที่ผิวรอยต่อระหว่างก๊าซกับของเหลว

- การไหลแบบฟองฟุ้ง (Dispersed bubble flow) เป็นรูปแบบการไหลที่มีฟองก๊าซกระจายปะปนในของเหลว มีแนวโน้มของฟองก๊าซจะรวมกันที่ด้านบนของท่อ เมื่อระบบมีความเร็วในการไหลมากขึ้นฟองก๊าซจะกระจายตัวได้สม่ำเสมอมากขึ้น

- การไหลแบบวงแหวนฟุ้ง (Annular - dispersed flow) เป็นรูปแบบการไหลที่คล้ายกับท่อที่อยู่ในแนวดิ่งแต่ความหนาของแผ่นฟิล์มจะสม่ำเสมอ โดยที่ด้านล่างของท่อความหนาของแผ่นฟิล์มก็จะมากกว่า

- การไหลแบบเป็นช่วง (Intermittent flow) เป็นรูปแบบการไหลนี้แบ่งออกได้ 3 รูปแบบด้วยกัน

ก. การไหลแบบเป็นก้อน (Plug flow) เป็นรูปแบบการไหลที่คล้ายกับท่อในแนวดิ่งแต่จะแนบชิดกับผิวท่อด้านบน

ข. การไหลแบบเป็นห้วง (Slug flow) เป็นรูปแบบการไหลที่ของเหลวที่มีสภาพเป็นชั้นไปอุดหน้าท่อนั้นจะมีฟองก๊าซปะปนไปด้วย

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ค. การไหลแบบกึ่งห้วง (Semi-slug flow) เป็นรูปแบบการไหลที่มีฟองก๊าซเกิดขึ้น ที่บริเวณคลื่น โดยคลื่นไม่สามารถที่จะก่อตัวเป็นก้อนของเหลวไปปิดกั้นท่อหรือสัมผัสกับผนังท่อด้านบนได้

รูปที่ 2.4 รูปแบบการไหลในท่อหน้าตัดกลมในแนวระดับ (Hewitt., 1994)

2.2.4 สารทำงานที่เป็นสารผสมแบบ Azerotropes และ Non- azerotropes

สารทำงานผสมเป็นสารทำงานที่เมื่อทำการผสมกันจะมีลักษณะทางกายภาพเป็นเนื้อเดียวกัน แต่มีคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิคส์ต่างกัน โดยสารผสมจะแยกออกเป็น 2 ประเภท ดังต่อไปนี้คือ

- **สารทำงานแบบ Azerotropes** เป็นของผสมของสารทำความเย็นตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป มาผสมกันจะรวมตัวกัน และไม่สามารถที่จะแยกสารที่เป็นส่วนผสมออกจากกันได้โดยวิธีการกลั่นไม่ว่าจะเปลี่ยนอุณหภูมิและความดันใด ๆ ก็ตาม สารทำงานประเภทนี้จะมีคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่แตกต่างออกไปจากคุณสมบัติของสารผสมแต่ละชนิดที่นำมาผสมกัน โดยสารผสมงานในกลุ่มนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 อย่าง คือ ในกรณีที่สารทำงานที่นำมาผสมกันแล้วเกิดสารผสมชนิดใหม่ที่มีค่าจุดเดือดสูงขึ้นกว่าจุดเดือดเดิมของสารทำงานเดิมแต่ละชนิด เรียกสารผสมประเภทนี้ว่า Negative azeotropes แต่สำหรับในกรณีที่สารผสมตัวใหม่ที่เกิดขึ้นมีค่าจุดเดือดใหม่ต่ำกว่าสารทำงานเดิมแต่ชนิด เรียกสารผสมประเภทนี้ว่า Positive azeotropes

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

- **สารทำงานแบบ Non-azerotropes** เป็นสารผสมตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป ที่มีจุดเดือดใกล้เคียงกัน มารวมตัวกัน ไม่ได้มีการรวมตัวของโมเลกุลเป็นเนื้อเดียวกัน มีลักษณะเหมือนสารละลายเท่านั้น โดยสารทำงานในกลุ่มนี้เมื่อผสมกันจะได้สารผสมตัวใหม่ที่มีจุดเดือดอยู่ในช่วงจุดเดือดเดิมของตัวสารแต่ละชนิดก่อนนำมาผสมกัน ซึ่งสามารถแยกออกจากกันได้โดยวิธีการทางเคมีอย่างง่าย เช่น การกลั่น

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved