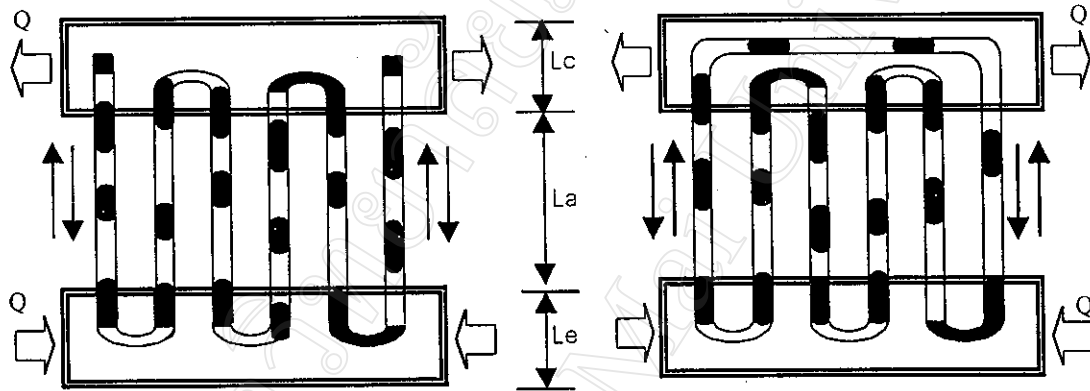


## บทที่ 2

### หลักการและทฤษฎี

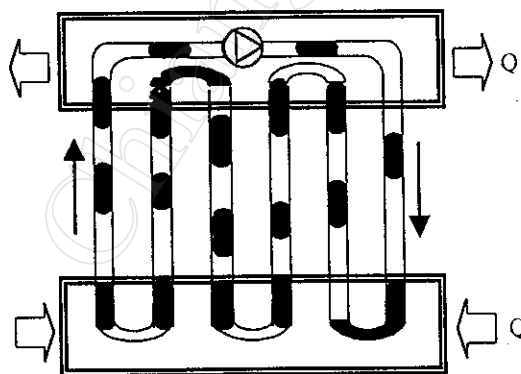
#### 2.1 หลักการและทฤษฎีของท่อความร้อนแบบสั่น (Oscillating heat pipe, OHP)

OHP สามารถแบ่งออกได้ 3 ชนิดหลักๆ ดังแสดงในรูป 2.1 โดย รูป 2.1(a) เป็น Close – end oscillating heat pipe, (CEOHP) รูป 2.1(b) เป็น Close – loop oscillating heat pipe,



2.1(a) Closed – End Oscillating Heat Pipe

2.1(b) Closed – Loop Oscillating Heat Pipe



2.1(c) Closed – Loop Oscillating Heat Pipe with Check Valve

รูป 2.1 ท่อความร้อนแบบสั่น  
ที่มา: Akachi (1996)

(CLOHP) และ รูป 2.1(c) เป็น Closed – loop oscillating heat pipe with check valve, (CLOHPW/CV) โดยในรูป 2.1(a) ทำขึ้นมาจากท่อความร้อนแบบคาปิลารีที่ยาวๆเส้นหนึ่งที่ยึดไปตามรูป โดยที่ไม่มีการต่อปลายทั้งสองข้างเข้าด้วยกัน และไม่มีเช็ควาล์ว การถ่ายเทความร้อนจะปรากฏในรูปการสั่นสะเทือนที่เกิดมาจากคลื่นความดันที่สั่นไปมาอย่างรุนแรง โดยเกิดจากการเดือดฟุ้งของสารทำงานนั่นเองในรูป 2.1(b) นั้นทำขึ้นมาจากท่อความร้อนแบบคาปิลารีที่ยาวๆเส้นหนึ่งที่ถูกยึดไปมาและเชื่อมต่อปลายทั้งสองข้างติดกันให้เป็นวงรอบโดยไม่มีเช็ควาล์ว ดังนั้นในกรณีนี้การถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้นจากการสั่นของสารในแนวแกนของท่อจึงเป็นเหตุให้เกิดการไหลเวียนในทิศใดทิศทางหนึ่ง และในแบบสุดท้ายคือ รูป 2.1(c) ทำมาจากท่อคาปิลารีที่ยาวจำนวนหนึ่งท่อหรือมากกว่านั้น ที่ยึดไปมาและเชื่อมให้เป็นวงรอบตามรูป ในวงรอบของท่อความร้อนนั้นจะมีเช็ควาล์วคอยบังคับทิศทางของสารทำงานไปในทิศทางที่กำหนด ซึ่งจะทำให้หน้าที่พาความร้อนไหลเวียนอย่างรวดเร็วเนื่องจากคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของ CEOHP ขึ้นกับรูปแบบการไหลภายในท่ออย่างมาก และรูปแบบการไหลภายในจะแปรเปลี่ยนไปกับค่าความเสียดทานภายในท่อ การศึกษาครั้งนี้จึงมุ่งเน้นที่จะทำการศึกษาเชิงทฤษฎีถึงผลของความเสียดทานที่มีต่อรูปแบบการไหลภายในของ CEOHP

## 2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในงานวิจัย

### 2.2.1 คุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของ CEOHP

คุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของ CEOHP นั้นสามารถชี้ชัดได้โดยค่าการถ่ายเทความร้อนที่สภาวะต่างๆกัน ซึ่งจะอยู่ในรูปของความสัมพันธ์ของค่าการถ่ายเทความร้อนจริง (Q) ค่าความต้านทานความร้อนรวม และผลต่างระหว่างอุณหภูมิของแหล่งให้ความร้อนกับแหล่งรับความร้อน ดังสมการที่ 2.1

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

ในการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนนั้น ยังมีคุณสมบัติอีกประการหนึ่งที่เป็นตัวควบคุมการส่งถ่ายความร้อนซึ่งถือได้ว่าเป็นคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนด้วย คือ ค่าความต้านทานความร้อน แสดงไว้ในสมการที่ 2.2

$$Z = \frac{(T_{\text{evap}} - T_{\text{cond}})}{Q} \quad (2.2)$$

หากใช้น้ำเป็นสารรับความร้อนที่ส่งผ่าน CEOHP และต้องการหาค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่น้ำได้รับที่ส่วนควบแน่นหาได้โดยวัดค่าอุณหภูมิของน้ำทั้งขาเข้าและขาออก จากนั้นนำมาคำนวณโดยใช้สูตรดังสมการที่ 2.3

$$Q = \dot{m} C_p (T_{out} - T_{in}) \quad (2.3)$$

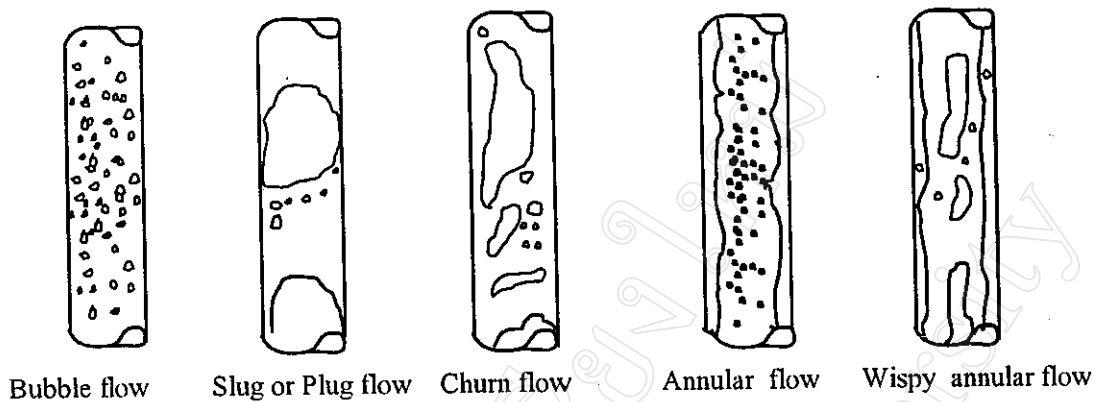
คุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของ CEOHP ขึ้นอยู่กับรูปแบบการไหลภายในท่อความร้อนเป็นอย่างมาก เพราะว่ารูปแบบการไหลแต่ละรูปแบบจะมีความสามารถในการให้ค่าการถ่ายเทความร้อนต่างกัน

## 2.2.2 รูปแบบการไหลภายในท่อ

รูปแบบการไหลภายในของไหลสองสถานะในท่อสามารถแยกได้ดังนี้

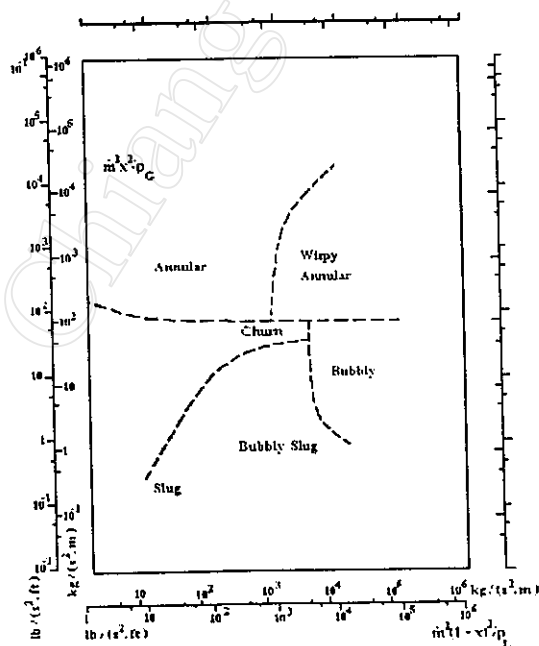
ก. รูปแบบการไหลภายในท่อหน้าตัดกลมในแนวดิ่ง จะมีรูปแบบการไหลทั้งไอและของเหลวไหลขึ้นด้านบนซึ่งแบ่งได้ 5 รูปแบบ ดังแสดงในรูป 2.2

- Bubble flow รูปแบบการไหลที่มีฟองไอลอยตัวในของเหลวไหลขึ้นสู่ด้านบน
- Slug flow or Plug flow รูปแบบการไหลที่มีฟองไอที่มีรูปร่างคล้ายกระสุนไหลขึ้นสู่ด้านบนโดยมีของเหลวชั้นกลางพร้อมกับมีไอปะปนบ้าง โดยขณะเดียวกันก็มีฟิล์มของเหลวล้อมรอบฟองไอรูปร่างกระสุน
- Churn flow รูปแบบการไหลที่มีรูปร่างของฟองไอบิดเบี้ยวไป เนื่องจากฟองไอมิความเร็วในการไหลเพิ่มขึ้น โดยที่รูปแบบการไหลนี้จะไม่ปรากฏให้เห็นเมื่อท่อมีขนาดเล็กๆ
- Annular flow รูปแบบการไหลที่มีการไหลของไออยู่ในแกนกลางท่อมีหยดของเหลวเล็กๆ ปะปนไปด้วย และขณะเดียวกันก็มีการไหลเป็นฟิล์มที่ผิวท่อ
- Wispy annular flow รูปแบบการไหลที่มีการไหลขึ้นของไออยู่แกนกลางท่อ โดยที่หยดของเหลวได้ปะปนไปกับไอรวมตัวกันเป็นริวปนกันไปด้วยและขณะเดียวกันก็มีการไหลของของเหลวเป็นฟิล์มที่ผิวท่อ ซึ่งการเกิดการรวมตัวของหยดของเหลวเล็กๆ นั้นก็เนื่องจากอัตราการไหลของฟิล์มของเหลวเพิ่มขึ้นทำให้ความหนาแน่นของหยดของเหลวมากขึ้นด้วย



รูป 2.2 แสดงรูปแบบการไหลในท่อหน้าตัดกลมในแนวดิ่ง  
ที่มา: Hewitt (1994)

แผนภูมิรูปแบบการไหล ( Flow pattern map ) ภายในท่อในแนวดิ่ง รูปแบบการไหลที่รู้จักกันโดยส่วนมากจัดทำโดย Hewitt and Robert (1969) ดังแสดงในรูป 2.3 แกนอ้างอิงที่นำมาใช้คืออัตราเร่งการไหลโดยมวลต่อระยะทาง ( Superficial momentum flux,  $\text{kg} / \text{s}^2 \cdot \text{m}$  ) ของแต่ละสถานะ ซึ่งแผนภูมินี้จะสามารถบอกถึงรูปแบบการไหลที่เกิดขึ้น ณ อัตราการไหลต่างๆ ได้



รูป 2.3 แผนภูมิรูปแบบการไหลภายในท่อในแนวดิ่ง  
ที่มา: Hewitt (1994)

ข. รูปแบบการไหลภายในท่อหน้าตัดกลมในแนวระดับจะแบ่งออก 5 แบบ ดังแสดง  
ในรูป 2.4

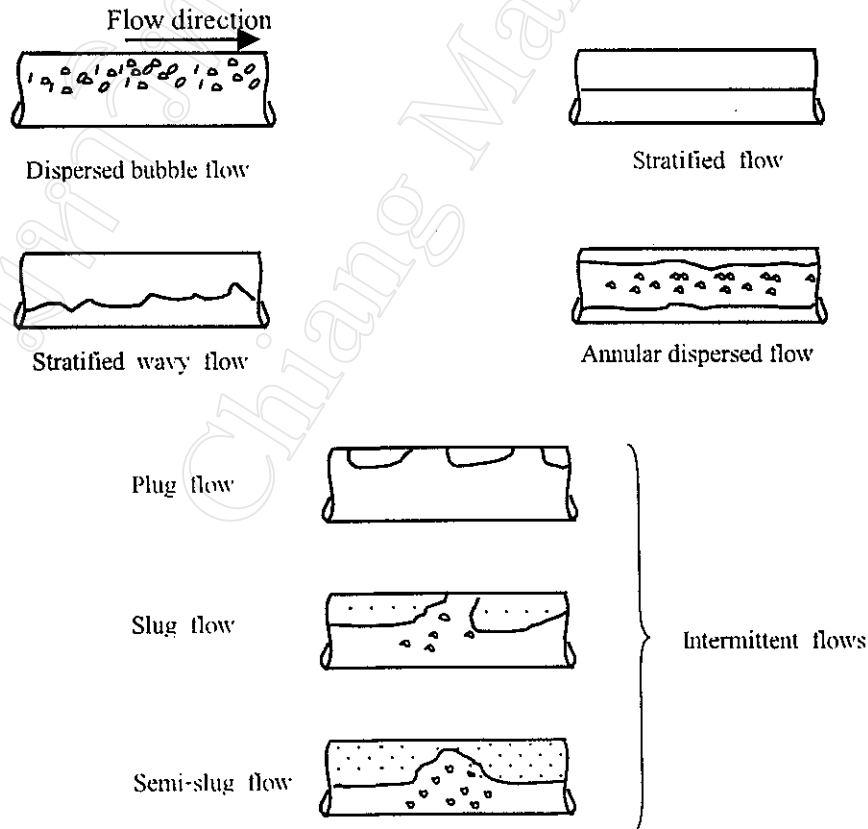
- Dispersed bubble flow รูปแบบการไหลที่มีฟองแพร่กระจายปะปนในของเหลวที่มีแนวโน้มของฟองไอจะรวมกันที่ด้านบนของท่อ เมื่อระบบมีความเร็วในการไหลมากขึ้น ฟองไอก็จะกระจายตัวได้สม่ำเสมอมากขึ้น

- Stratified flow รูปแบบการไหลที่มีการแยกชั้นอย่างชัดเจนโดยที่ไอลอยด้านบนของเหลวอยู่ด้านล่าง

- Stratified wavy flow รูปแบบการไหลที่ความเร็วไอเพิ่มขึ้นจากรูปแบบการไหล Stratified flow ทำให้เกิดคลื่นขึ้น

- Annular dispersed flow รูปแบบการไหลที่คล้ายกับท่อที่อยู่ในแนวตั้ง แต่ความหนาของฟิล์มสม่ำเสมอเท่ากัน โดยความหนาของฟิล์มจะมากกว่าที่ด้านล่างของท่อ

- Intermittent flow รูปแบบการไหลจะแบ่งออกได้ 3 รูปแบบด้วยกันคือ Plug flow, Slug flow, Semi-slug flow



รูป 2.4 แสดงรูปแบบการไหลในท่อหน้าตัดกลมในระดับ  
ที่มา: Hewitt (1994)

แผนภูมิรูปแบบการไหลภายในท่อในแนวระดับ การทำนายรูปแบบการไหลที่อยู่ในแนวระดับวิธีของ Taitel and Dukler (1976) เป็นวิธีที่ทฤษฎีที่ได้แนะนำไว้ แผนภูมิรูปแบบการไหลได้แสดงอยู่ในเทอมตัวแปรไร้มิติและแผนภูมิรูปแบบการไหลได้แสดงไว้ในรูป 2.5

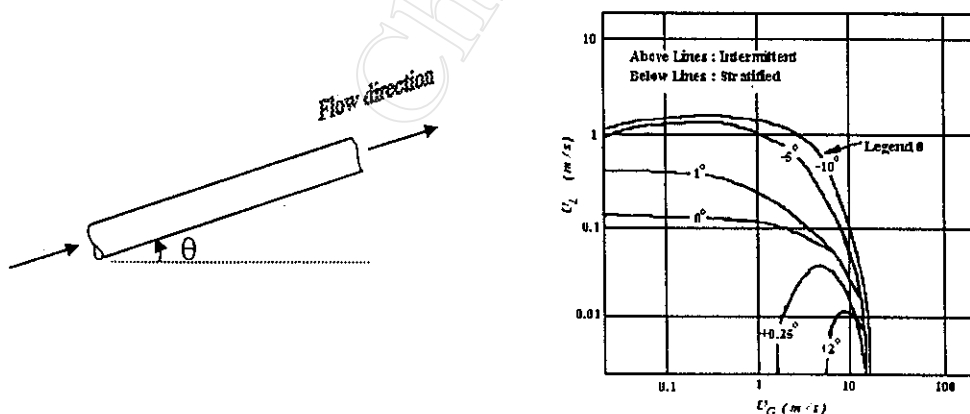
$$F = \frac{U_G}{\sqrt{Dg \cos \theta}} \sqrt{\frac{\rho_G}{(\rho_L - \rho_G)}} \quad (2.4)$$

$$K = F \left[ \frac{DU_L}{U_L} \right] \quad (2.5)$$

$$T = \left[ \frac{(dp/dz)_L}{(\rho_L - \rho_G)g \cos \theta} \right]^{1/2} \quad (2.6)$$

$$X = \sqrt{\frac{(dp/dz)_L}{(dp/dz)_G}} \quad (2.7)$$

ค. ท่อที่อยู่ในแนวเอียง รายละเอียดของรูปแบบการไหลดังกล่าวไว้โดย มณฑะเชียร. (2540) ความเปลี่ยนแปลง ซึ่งไวต่อการเอียงของท่อมาก ก็คือ รูปแบบการไหลแบบไม่ต่อเนื่อง (Intermittent flow) และ Lee et al.(1999) ได้กล่าวว่าท่อที่อยู่ในแนวเอียง รูปแบบการไหล จะเป็นแบบ Slug flow การไหลจะเร็วขึ้น และการสั่นก็จะรุนแรงขึ้นด้วย ซึ่งจะมีแผนภูมิรูปแบบการไหล ดังแสดงไว้ในรูป 2.5



รูป 2.5 แผนภูมิรูปแบบการไหลภายในท่อในแนวเอียง

ที่มา: Hewitt (1994)

เนื่องจากรูปแบบการไหลภายในท่อความร้อน CEOHP มีผลทำให้คุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนเปลี่ยนแปลงไป มณเฑียร. (2540) ได้แสดงให้เห็นว่ารูปแบบการไหลแบบไม่ต่อเนื่อง (Intermittent flow) ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนมีค่าสูงสุด ซึ่งรูปแบบการไหลภายในท่อ CEOHP จะแปรเปลี่ยนไปกับค่าความเสียดทานภายในท่อความร้อน เนื่องจากจะทำให้รูปทรงของฟองอากาศแปรเปลี่ยนไปจากเดิม จึงสมควรที่จะได้มีการพิจารณารายละเอียดของความเสียดทานในท่อให้ละเอียด

### 2.2.3 ความเสียดทานการไหลในท่อ

รูปแบบการไหลภายในจะแปรเปลี่ยนไปตามค่าของความเสียดทาน ในการศึกษาครั้งนี้ จะทำการศึกษาถึงผลของความเสียดทานจากการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของผิวด้านในของวัสดุที่ใช้ทำท่อที่มีผิวต่างกัน และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน สามารถพิจารณาได้ดังนี้

ก. สัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถานะเดียว (  $f$  ) ซึ่งของไหลภายในท่อจะเป็นการไหลแบบสถานะเดียวและจะหาสัมประสิทธิ์ความเสียดทานได้จากสมการของ Darcy ดังสมการที่ 2.8

$$f = \frac{2d_h \Delta p}{\rho L v^2} \quad (2.8)$$

ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจะเป็นฟังก์ชันของตัวเลขเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ (Re) คือ

$$Re = \frac{\rho v d_h}{\mu} \quad (2.9)$$

ข. สัมประสิทธิ์ความเสียดทานสองสถานะ (  $f_{TP}$  ) เนื่องจากระบบท่อความร้อนเป็นระบบปิดและจะมีการไหลเป็นแบบสองสถานะ ดังนั้นจะถือว่าทั้งสองสถานะจะมีการเคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วที่เท่ากัน สามารถหาสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสองสถานะได้จากสมการที่ 2.10

$$f_{TP} = \frac{\tau_o}{\frac{1}{\rho_{II}} \left( \frac{.2}{m} \right)} \quad (2.10)$$

เมื่อ

$$\tau_o = \left( -\frac{dp}{dz} \right) \frac{4}{d_h} \quad (2.11)$$

ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจะเป็นฟังก์ชันของตัวเลขเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์แบบสองสถานะ ( $Re_{TP}$ ) คือ

$$Re_{TP} = \frac{m d_h}{\eta_{TP}} \quad (2.12)$$

เมื่อค่าของความหนืดของสองสถานะ ( $\eta_{TP}$ ) สามารถหาจากสมการที่ 2.13

$$\frac{1}{\eta_{TP}} = \frac{x}{\eta_G} + \frac{(1+x)}{\eta_L} \quad (2.13)$$

เนื่องจากการศึกษาในลักษณะเชิงเปรียบเทียบเท่านั้น มิได้ศึกษาเชิงปริมาณจึงจะทำการหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ( $f$ ) ของผิวท่อ โดยทำการทดสอบการไหลที่สถานะเดียวก่อน โดยใช้ของไหลชนิดเดียวกับสารทำงานที่จะใช้จริง

ซึ่งผลของความเสียดทานที่พิจารณาในรูปของสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ทำให้เราทราบว่า การส่งถ่ายความร้อนสูงสุดจะมีรูปแบบการไหลและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานอยู่ช่วงใด เพื่อที่จะนำไปใช้ในการออกแบบ CEOHP ให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

#### 2.2.4 ตัวแปรไร้มิติ

คือ กลุ่มของตัวแปรที่ไม่มีหน่วย ซึ่งตัวแปรที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการเดือดภายใน ได้แก่ กุทาเทลลาซนัมเบอร์ (Kutateladze number) เป็นอัตราส่วนของฟลักซ์ความร้อนที่ให้ต่อฟลักซ์ความร้อนวิกฤตของของไหล สามารถนิยามได้ดังนี้

$$Ku = \frac{q_c}{\rho_v h_{fg} \left[ \sigma g \left( \frac{\rho_l - \rho_v}{\rho_v^2} \right) \right]^{\frac{1}{4}}} \quad (2.14)$$