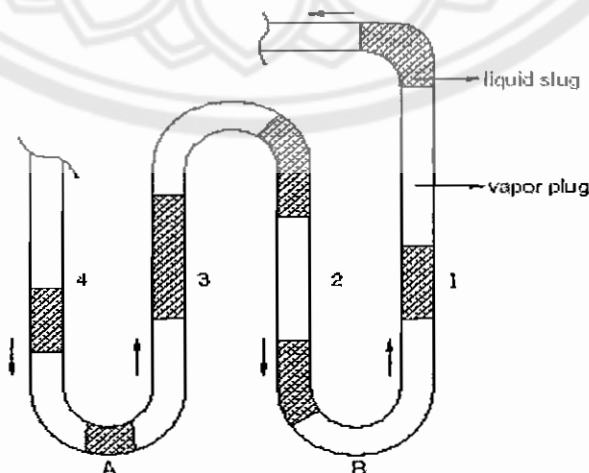


## บทที่ 2

### หลักการและทฤษฎี

#### 2.1 ความเป็นมาและชนิดของท่อความร้อนแบบสั่น

ท่อความร้อนแบบสั่น เป็นวิวัฒนาการล่าสุดของเทคโนโลยีเกี่ยวกับท่อความร้อน สร้างจากท่อคาปิลลารียาวมากนำมาขดทำให้เกิดจำนวนโค้งเลี้ยวหลายโค้ง ภายในท่อต้องดูดอากาศออกเป็นสูญญากาศ แล้วเติมสารทำงานลงในท่อ ซึ่งชนิดและปริมาณของสารทำงานที่เติมเข้าไปขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของช่วงอุณหภูมิการทำงานของสารทำงาน วัสดุที่ใช้ทำท่อ และปัจจัยพื้นฐานอื่นๆ อีก เมื่อเติมสารทำงานเข้าภายในท่อสารทำงานจะเรียงตัวอยู่ในรูปแท่งของเหลว (Liquid slug) และฟองไอ (Vapor bubble) เนื่องจากผลของแรงตึงผิว ดังรูปที่ 2.1 ท่อความร้อนแบบสั่นมีหลักการทำงานดังนี้ เมื่อส่วนทำระเหยได้รับความร้อน ทำให้แท่งของเหลวกับฟองไอที่อยู่ภายในท่อได้รับพลังงานความร้อน แท่งของเหลวจะระเหยกกลายเป็นไอ ทำให้ฟองไอเกิดการขยายตัวดันให้แท่งของเหลว ไหลไปทางด้านส่วนควบแน่น ซึ่งเป็นส่วนที่เย็นกว่าและถ่ายเทความร้อนออกที่ส่วนนี้ แท่งของเหลวและฟองไอเมื่อมาถึงส่วนควบแน่นฟองไอจะควบแน่นกลายเป็นของเหลว เมื่อฟองไอด้านส่วนทำระเหยดันแท่งของเหลวอีกแท่งหนึ่งขึ้นมา ก็จะทำให้แท่งของเหลวนี้ถูกดันไปสู่ส่วนทำระเหยของท่อความร้อนแบบสั่น ในส่วนโค้งถัดไป และทำงานในลักษณะนี้เป็นวัฏจักร ท่อความร้อนแบบสั่นจะมีการถ่ายเทความร้อนด้วยความร้อนแฝงและความร้อนสัมผัสทำให้มีค่าการถ่ายเทความร้อนได้สูงมาก



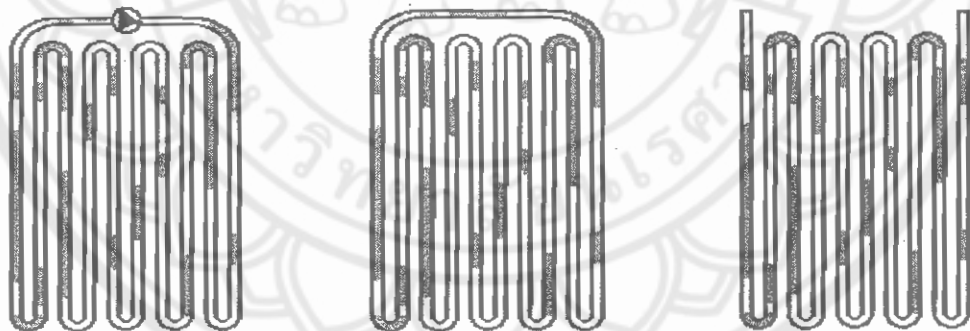
รูปที่ 2.1 แสดงการเรียงตัวของสารทำงานภายในท่อความร้อนแบบสั่น [10]

ท่อความร้อนแบบสั้นมี 3 ชนิด ดังรูปที่ 2.2 คือท่อความร้อนชนิดสั้นแบบวงรอบที่มีวาล์วกันกลับ (Close-loop pulsating heat pipe with check valves) ท่อความร้อนชนิดสั้นแบบวงรอบ (Close-loop pulsating heat pipe) และท่อความร้อนชนิดสั้นแบบปลายปิด (Close-end pulsating heat pipe)

**ท่อความร้อนชนิดสั้นแบบวงรอบที่มีวาล์วกันกลับ** (Closed-loop oscillating heat pipe with check valves) ทำจากท่อคาปิลลารีที่มีความยาวมากและมีการต่อปลายท่อทั้งสองเข้าด้วยกันเป็นวงรอบ โดยมีการติดวาล์วกันกลับไว้ในวงจรตั้งแต่ 1 ตัวขึ้นไป เพื่อให้สารทำงานนำความร้อนไหลเวียนไปในทิศทางที่กำหนดได้อย่างรวดเร็ว

**ท่อความร้อนชนิดสั้นแบบวงรอบ** (Closed-loop oscillating heat pipe) ทำจากท่อคาปิลลารีที่ยาวมาก และมีการต่อปลายท่อทั้งสองด้านเข้าด้วยกันเป็นวงรอบ แต่ไม่มีวาล์วกันกลับในวงจร ดังนั้นในกรณีนี้การถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้นจากการสั่นของสารทำงานในแนวแกนของท่อจึงเป็นเหตุให้เกิดการไหลเวียนที่ช้าลงในทิศทางหนึ่ง

**ท่อความร้อนชนิดสั้นแบบปลายปิด** (Closed-end oscillating heat pipe) ทำจากท่อคาปิลลารีที่ยาว โดยไม่มีการต่อปลายท่อทั้งสองข้างเข้าด้วยกันและไม่มีวาล์วกันกลับในวงจร กรณีการถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้นจากการสั่นที่ถูกขับ โดยคลื่นความดันที่แกว่งอย่างรวดเร็ว เกิดจากการเดือดแบบฟอง (Nucleate boiling) ในสารทำงาน



ก. วงรอบแบบมีวาล์วกันกลับ

ข. วงรอบ

ค. ปลายปิด

รูปที่ 2.2 แสดงท่อความร้อนแบบสั้น [10]

กลไกพื้นฐานในการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสั้นคือ การเคลื่อนที่แบบสั้นของสารทำงานร่วมกับการเปลี่ยนสถานะ นั่นคือเมื่อเกิดการระเหยที่ปลายด้านที่มีอุณหภูมิสูงจะเพิ่มความดันไอ ซึ่งเป็นสาเหตุให้ฟองไอในส่วนทำระเหยใหญ่ขึ้น แล้วดันแท่งของเหลวไปยังส่วนควบแน่น แรงดันที่เกิดจากการระเหยนี้เรียกว่า แรงขับ (Driving force) ของท่อความร้อน หลังจากนั้นจะเกิดการควบแน่นในส่วนควบแน่น ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มความแตกต่างระหว่างความดันของทั้งสองปลาย เนื่องจากท่อจะต่อกันไปเป็นวงรอบ เมื่อเกิดการเคลื่อนที่ของแท่งของเหลวและฟองไอที่ส่วนหนึ่งของท่อไปสู่

ส่วนความแน่น ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของแท่งของเหลวและฟองไอในส่วนถัดไปของท่อเคลื่อนที่ไปยังส่วนทำระเหยของส่วนถัดไปของท่อด้วย โดยเรียกที่ทำให้เกิดการทํางานนี้ว่า แรงส่งคืน (Restoring force) ดังนั้นแรงขับและแรงส่งคืนทำให้เกิดการสั่นของฟองไอและแท่งของเหลวในแนวแกน

จากรูปที่ 2.2 สังเกตได้ว่าการไหลของสารทํางานในท่อความร้อนแบบวงรอบที่มีวาล์วก้นกลับ ถูกบังคับให้ไหลได้ในทิศทางเดียวทำให้สารทํางานสามารถไหลเวียนในท่อได้อย่างต่อเนื่องจากวงรอบหนึ่งไปยังอีกวงรอบหนึ่ง ทำให้มีการถ่ายเทความร้อนได้อย่างต่อเนื่องด้วย สำหรับการไหลของสารทํางานในท่อความร้อนชนิดสันแบบวงรอบ ไม่ถูกบังคับให้ไหลไปทิศทางใดทิศทางหนึ่ง ทำให้สารทํางานอาจจะเคลื่อนที่เข้ามาในวงรอบเดียวกัน ทำให้การเคลื่อนที่ของของไหลและการถ่ายเทความร้อนอาจจะไม่ต่อเนื่องกันด้วย หากว่าสารทํางานไหลเข้ามาชนกัน การไหลของสารทํางานในท่อความร้อนสันแบบปลายปิด สารทํางานจะต้องเคลื่อนที่เข้ามาชนกันในวงรอบใดวงรอบหนึ่งจึงทำให้การถ่ายเทความร้อนเกิดได้อย่างไม่ต่อเนื่องด้วย จะเห็นได้ว่าท่อความร้อนชนิดสันแบบวงรอบที่มีวาล์วก้นกลับจะสามารถถ่ายเทความร้อนได้ดีที่สุด แต่เนื่องจากท่อมักมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กมาก ทำให้การผลิตเป็นไปได้อย่างยาก ทำให้การใช้งานส่วนใหญ่จึงใช้ท่อความร้อนชนิดสันแบบวงรอบมากกว่า

เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อคาปิลลารีต้องมีขนาดเล็กเพียงพอ นั่นคือ [1]

$$D_i = 2 \sqrt{\frac{\sigma}{\rho_L g}} \quad (2.1)$$

- $D_i$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ  
 $\sigma$  คือ ความตึงผิวของสารทํางาน  
 $\rho_L$  คือ ความหนาแน่นของสารทํางาน  
 $g$  คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

ผลกระทบต่างๆ ที่มีต่อสมรรถนะของท่อความร้อนแบบสัน

อัตราการเติมสารทํางาน 30 - 50 % ของปริมาตรภายในท่อจะเป็นปริมาณที่แท่งของเหลวและฟองไอจะกระจายตัวอย่างเหมาะสม รูปแบบการไหลไม่แตกต่างกันมากนัก ถ้าเติมสารทํางานมากกว่านี้จะทำให้แท่งของเหลวและฟองไอไม่เป็นเนื้อเดียวกันและในบางท่อจะไม่มีแท่งไออยู่เลย

ตำแหน่งของการวางตัวของท่อความร้อน คือ มุมเอียงของท่อความร้อนที่ทำกับแนวระดับ โดยให้ส่วนความแน่นอยู่สูงกว่าส่วนทำระเหยจะทำให้การถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น เนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกจะช่วยดึงของเหลวกลับคืนสู่ส่วนทำระเหย ทั้งนี้ต้องขึ้นอยู่กับมุมเอียงที่ทำกับแนวระดับ

ถ้าท่อความร้อนวางตัวประมาณ  $60^\circ$  กับแนวระดับ กับท่อความร้อนที่วางตัวในแนวตั้ง จะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่เท่ากัน และที่มุมเอียงน้อยกว่านี้ค่าการถ่ายเทความร้อนก็จะน้อยกว่าตามลำดับ

**รูปแบบโครงสร้างของการเรียงตัวของท่อความร้อน** ขึ้นอยู่กับการออกแบบวางท่อความร้อนกับแรงโน้มถ่วงของโลก

เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อความร้อน ถ้าท่อมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในใหญ่ค่าความตึงผิวจะมีน้อยทำให้เมื่อเติมสารทำงานเข้าภายในท่อ สารทำงานจะเข้าไปกองรวมกันอยู่ด้านล่างของท่อ ทำให้เมื่อได้รับความร้อนแล้ว จะไม่เกิดการถ่ายเทความร้อนจากการเคลื่อนที่ของฟองไอ และแท่งของเหลว อาจทำให้ท่อความร้อนแบบส้นนั้นทำงานเหมือนเป็นท่อความร้อนแบบธรรมดา

สารทำงาน ต้องมีคุณสมบัติในการถ่ายเทความร้อนได้ทั้งแบบความร้อนแฝง (Latent heat) และความร้อนสัมผัส (Sensible heat) ค่าความตึงผิวของสารทำงานจะต้องเหมาะสมกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อความร้อน ค่าความหนืดต้องต่ำทั้งในสถานะของเหลวและก๊าซ

## 2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับท่อความร้อนแบบส้น

2.2.1 อัตราการเติมสารทำงาน (Fill rate) การเติมสารทำงานจะส่งผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากท่อความร้อนวางตัวในแนวตั้งทำให้แรงโน้มถ่วงของโลกมีผลมาก

อัตราการเติมสารทำงานสามารถคำนวณได้จาก

$$FR = \text{ปริมาณสารทำงานที่เติม} / \text{ปริมาตรภายในของท่อความร้อน} \quad (2.2)$$

โดยที่ FR คือ อัตราการเติมสารทำงาน

### 2.2.2 ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน

ค่าการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนทั้งหมดสามารถหาได้จาก การถ่ายเทความร้อนออกจากส่วนควบแน่นไปยังอากาศที่ไหลผ่านท่อความร้อนดังรูปที่ 2.3 โดยที่พิจารณาส่วนควบแน่นเป็นปริมาตรควบคุม (Control volume) ในกระบวนการไหลอย่างคงตัว ดังนั้นสมการอนุรักษ์พลังงานคือ

$$Q + m(h_1 + \frac{V_1^2}{2} + gz_1) = W + m(h_2 + \frac{V_2^2}{2} + gz_2)$$

เนื่องจากไม่มีการป้อนงานระหว่างการเกิดกระบวนการถ่ายเทความร้อนและการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์และพลังงานศักย์มีค่าน้อยมากจึงไม่นำมาคิดในกระบวนการ และสมมติว่าส่วนที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อนมีการหุ้มฉนวนเป็นอย่างดีจึงไม่มีการสูญเสียความร้อนในส่วนนี้ ดังนั้นสมการอนุรักษ์พลังงานคือ

$$\begin{aligned} Q_{in} &= Q_{out} = Q \\ Q &= m(h_o - h_i) \end{aligned} \quad (2.3)$$

โดยที่  $Q$  คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน ( $kW$ )

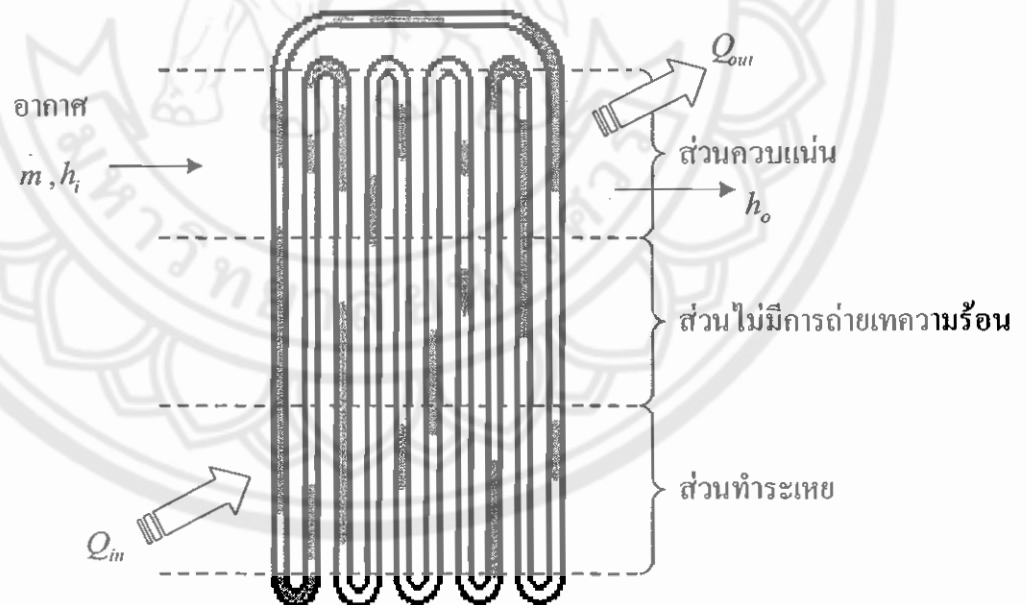
$m$  คือ อัตราการไหลเชิงมวล,  $m = As/v$  ( $kg/s$ ),

$A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของอุโมงค์ลม

$v$  คือ ปริมาตรจำเพาะของอากาศ

$s$  คือ ความเร็วของลมในอุโมงค์ลม

$(h_o - h_i)$  คือ ค่าความแตกต่างของเอนทาลปีที่ทางออกและทางเข้า ( $kJ/kg$ )



รูปที่ 2.3 แสดงการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อน

การถ่ายเทความร้อนแบบการนำคือ การเคลื่อนที่ของพลังงานความร้อนผ่านการสั่นของโมเลกุลของวัตถุ วัตถุแต่ละชนิดจะมีค่าการนำความร้อนแตกต่างกันโดยวัตถุที่มีค่าการนำความร้อน สูงจะถ่ายเทความร้อนได้ดี แต่วัตถุที่มีค่าการถ่ายเทความร้อนน้อยก็จะถ่ายเทความร้อนได้น้อยหรือเรียกว่า

จนวน สำหรับท่อความร้อนนั้นนอกจากจะมีการถ่ายเทความร้อนของสารทำงานแล้วยังมีการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนผ่านผนังของท่อทองแดงในแนวแกน จากส่วนทำระเหยไปยังส่วนควบแน่นด้วย และสามารถหาค่าการถ่ายเทความร้อนจากการนำความร้อนได้จากสมการ

$$Q_c = kA \frac{T_e - T_c}{L_{eff}} \quad (2.4)$$

โดยที่  $Q_c$  คือ อัตราการนำความร้อนตามแนวแกนท่อ (Watt)

$k$  คือ ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity)

สำหรับทองแดง มีค่า  $k$  เท่ากับ  $401 \text{ W/m.K}$

$A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของผนังท่อของ VCLPHP,  $A = 2\pi N(r_o^2 - r_i^2) \text{ m}^2$

$N$  คือ จำนวนโค้งเกลียวของ VCLPHP,  $r_o$  และ  $r_i$  คือ รัศมีภายนอกและภายในของ VCLPHP

$T_e - T_c$  คือ ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิการทำงานและส่วนควบแน่น ( $^{\circ}\text{C}$ )

$L_{eff}$  คือ ความยาวประสิทธิผล (Effective Length),  $L_{eff} = L_e/2 + L_a + L_c/2$

อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ในแนวรัศมี ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่การถ่ายเทความร้อน สามารถหาได้จากสมการ

$$Q'' = \left( Q / 2\pi D_i N L_e \right) \quad (2.5)$$

โดยที่  $D_i$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของ VCLPHP

$L_e$  คือ ความยาวส่วนทำระเหย

2.2.3 ค่าความผิดพลาดของอัตราการถ่ายเทความร้อน ( $Q$ ) โดยที่  $Q = \dot{m}(h_o - h_i)$  หาได้จาก

$$dQ = \sqrt{\left( \left( \frac{\partial Q}{\partial \dot{m}} \right) d\dot{m} \right)^2 + \left( \left( \frac{\partial Q}{\partial h_o} \right) dh_o \right)^2 + \left( \left( \frac{\partial Q}{\partial h_i} \right) dh_i \right)^2} \quad (2.6)$$

โดยที่  $dQ$  คือ ค่าความผิดพลาดของอัตราการถ่ายเทความร้อน จากเครื่องมือวัด

- $m$  คือ อัตราการไหลของสารทำงานภายในท่อความร้อน  
 $h_i$  คือ เอนทาลปีของอากาศที่ทางเข้าของอุโมงค์ลม  
 $h_o$  คือ เอนทาลปีของอากาศที่ทางออกของอุโมงค์ลม  
 $dm$  คือ ค่าความผิดพลาดของอัตราการไหล จากเครื่องมือวัด  
 $dh_o$  คือ ค่าความผิดพลาดของเอนทาลปีที่ทางออก จากเครื่องมือวัด  
 $dh_i$  คือ ค่าความผิดพลาดของเอนทาลปีที่ทางเข้า จากเครื่องมือวัด

โดยสามารถหาค่าต่างๆ ได้ดังนี้

$$\frac{\partial Q}{\partial m} dm = \frac{\partial m(h_o - h_i)}{\partial m} = (h_o - h_i) dm$$

$$\frac{\partial Q}{\partial h_o} dh_o = \frac{\partial m(h_o - h_i)}{\partial h_o} = m dh_o$$

$$\frac{\partial Q}{\partial h_i} dh_i = \frac{\partial m(h_o - h_i)}{\partial h_i} = -m dh_i$$

เงื่อนไขการพิจารณาว่าท่อความร้อนสามารถทำงานได้หรือไม่ นั่นคือ อัตราการถ่ายเทความร้อนรวมจะต้องมากกว่าค่าการถ่ายเทความร้อนแบบนำความร้อนของท่อความร้อน และค่าความผิดพลาดของอัตราการถ่ายเทความร้อนจากเครื่องมือวัด ต้องไม่เกินร้อยละ 30 ของอัตราการถ่ายเทความร้อนรวม เนื่องจากเป็นค่ามาตรฐานที่ใช้ในงานวิจัยที่ได้ศึกษามา

### 2.3 ทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง

จากงานวิจัย Close Loop Pulsating Heat Pipe: Part A Parametric Experimental Investigations ของ Charoensawan et al. (2003) กล่าวว่า ท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบ (CLPHP) เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่การทำงานซับซ้อน มีการเคลื่อนที่ของสารทำงานภายในท่อเป็นตัวควบคุมประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน งานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อหาตัวแปรที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนของ CLPHP โดยศึกษาตัวแปรของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ จำนวนโค้งเลี้ยว สารทำงานภายในท่อ ความร้อนและมุมเอียงของท่อความร้อน (ตั้งแต่ 0 – 90 องศา จากแนวระดับ) CLPHP สร้างขึ้นจากท่อทองแดงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน คือ 2mm และ 1mm ให้ความร้อนอุณหภูมิคงที่ด้วย อ่างน้ำร้อนและระบายความร้อนด้วยสารผสมระหว่างน้ำกับ เอทีลิน ไกลโคล (ชนิดละ 50%)

จำนวนโค้งเดี่ยวของส่วนทำระเหยตั้งแต่ 5 ถึง 23 โค้งเดี่ยว สารทำงานคือ น้ำ เอทานอลและสารทำความเย็น R-123 โดยผลแสดงให้เห็นได้ว่าจำนวนโค้งเดี่ยว แรงโน้มถ่วงของโลกและคุณสมบัติทางความร้อนของสารทำงานมีผลต่อประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อนมาก

#### **การตั้งค่าการทดลองและผลการทดลอง**

ท่อความร้อนโดยทั่วไป การทดสอบประสิทธิภาพของ CLPHP สามารถทำได้สองวิธีคือ 1) ควบคุม Heat Flux และอุณหภูมิที่ส่วนควบแน่น โดยเปลี่ยนอุณหภูมิที่ส่วนทำระเหย 2) ควบคุมอุณหภูมิการทำงานและส่วนควบแน่น โดยค่าการถ่ายเทความร้อนเปลี่ยนแปลง การจัดตั้งค่างาน วิจัยนี้มีตัวแปรที่สำคัญ 3 ตัว ดังนี้ ก) อุณหภูมิการทำงานตั้งไว้ที่  $80^{\circ}\text{C}$  ข) ที่ส่วนควบแน่นระบายความร้อนด้วยส่วนผสมของน้ำและเอทานอล-ไกลโคล ที่อุณหภูมิ  $20^{\circ}\text{C}$  ในอ่างน้ำเย็น ค) อัตราส่วนการเติมสารทำงาน (ปริมาตรสารทำงานในอุปกรณ์/ปริมาตรภายในท่อทั้งหมด) เต็มที่ 50% ในทุกการทดสอบ ส่วนประกอบของชุดการทดลองมีดังนี้ อ่างน้ำร้อนและน้ำเย็น Temperature Data Logger อุปกรณ์วัดอัตราการไหลสำหรับวัดการไหลของสารหล่อเย็น สาย Chromel-Alumel Thermo Couple (OMEGA, Type "K") ติดตั้งที่จุดทางเข้าและที่ทางออกส่วนควบแน่นด้านละ 2 เส้น (ในอ่างน้ำเย็น) ส่วนทำระเหย 2 เส้น และส่วนที่ไม่มีการควบแน่น 4 เส้น และบนส่วนควบแน่นอีก 2 เส้น

การสร้างท่อความร้อน เริ่มจากการดูดอากาศภายในท่อออก ( $0.01\text{ Pa}$ ) เติมสารทำงาน 50% ของปริมาตรภายในท่อ ตั้งอุณหภูมิที่อ่างน้ำร้อนและน้ำเย็นให้คงที่ อ่างน้ำร้อนจะให้ความร้อนกับส่วนทำระเหยและอ่างน้ำเย็นจะใช้ระบายความร้อนในส่วนควบแน่น เมื่อท่อทำงานได้ค่อนข้างคงที่ ให้บันทึกค่าอุณหภูมิและอัตราการไหล และค่าตัวแปรต่างๆ ตามเงื่อนไขที่ต้องการสำหรับอัตราการถ่ายเทความร้อนสามารถหาได้จากการทดลอง แต่ค่าที่ได้นี้จะยังมีค่าความผิดพลาดอยู่ด้วย

#### **ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง**

ความเที่ยงตรงของข้อมูล เมื่อหาค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของ CLPHP จากการวัดค่าอัตราการไหล อุณหภูมิที่ทางเข้าและทางออกของสารทำความเย็นที่ผ่านส่วนควบแน่น ความเที่ยงตรงของข้อมูลก็จะถูกตรวจสอบ หลังจากวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดของอุปกรณ์การวัดและความร้อนสูญเสีย ประสิทธิภาพทางความร้อนสูงสุดจะถูกแสดงออกมาเมื่ออุปกรณ์มีความเที่ยงตรงมากกว่า 30% ค่าความผิดพลาดจากผลต่างระหว่างอุณหภูมิที่ทางเข้าและออกจากส่วนควบแน่นไม่เกิน 10%

ผลกระทบจากตำแหน่งการวางท่อความร้อน (มุมเอียง) ประสิทธิภาพของท่อความร้อนจะแปรผันตามมุมเอียงของท่อความร้อน ท่อความร้อนจะให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเมื่อวางในแนวตั้ง โดยขึ้นอยู่กับแรงโน้มถ่วงของโลก

ผลกระทบของโครงสร้าง ท่อความร้อนนอกจากประสิทธิภาพจะขึ้นอยู่กับ แรงโน้มถ่วงแล้ว การจัดเรียงตัวของท่อความร้อนในแต่ละ โค้งเดียวนั้นก็มีผลต่อประสิทธิภาพด้วยเช่นกัน



ผลกระทบจากเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ ขนาดของท่อนั้นมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อน โดยท่อความร้อนที่มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในใหญ่กว่าจะให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงกว่า เนื่องจากความดันตกคร่อมน้อยกว่า

ผลกระทบจากสารทำงาน ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารทำงานกับลักษณะทางกายภาพของท่อความร้อน ดังนี้

- ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความร้อนแฝงและความร้อนสัมผัสของสารทำงาน
- ความแตกต่างของรูปแบบการไหลระหว่างการเคลื่อนที่
- ค่าความเร็วเฉลี่ยและความดันตกคร่อม (ผลจากแรงโน้มถ่วงของโลก)
- รูปร่างของหยดของเหลว การแตกตัวของของเหลว

จากงานวิจัย Close Loop Pulsating Heat Pipe: Part B: Visualization and semi-empirical modeling. ของ Charoensawan et al. (2003) กล่าวว่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนจะขึ้นอยู่กับตัวแปรต่างๆ คือ มุมเอียง จำนวนโค้งเลี้ยว สารทำงานและขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ

ตัวแปรไร้มิติที่สนใจ

Karman Number ( $Ka$ ) คือ ผลคูณของตัวประกอบความเสียดทาน (Friction factor,  $f$ ) ของการไหลแบบพัฒนาเต็มรูป (Fully developed flow) ในท่อ และ  $Re$  แสดงถึงอัตราส่วนของแรงขับเคลื่อนความแตกต่างของความดันไอน้ำภายในท่อระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นกับแรงเสียดทาน (Friction force) ในการเคลื่อนที่ของของไหลทำงาน

$$Ka = f \cdot Re_l^2 = \frac{\rho_{liq} \cdot (\Delta P) \cdot D_l^3}{\mu_l^2 \cdot L_{eff}} \quad (2.7)$$

โดยที่  $Re_l$  คือ ค่า Reynolds Number ของของเหลว

$\Delta P$  คือ ความแตกต่างของความดันของของเหลวที่ส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่น

$\mu_l$  คือ ค่าความหนืดของของเหลว

$L_{eff}$  คือ ความยาวประสิทธิผล ( $L_{eff} = 0.5(L_c + L_c) + L_a$ )

Prandtl Number ( $Pr$ ) คือ อัตราส่วนระหว่างการแพร่ของโมเมนตัมและความร้อนที่เกิดขึ้น ซึ่งมีค่าตั้งในสมการ

$$\text{Pr} = \left( \frac{C_p \cdot \mu}{k} \right)_l \quad (2.8)$$

โดยที่  $C_p$  คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของสารทำงาน

Jakob Number ( $Ja$ ) คือ อัตราส่วนการดูดซับพลังงานความร้อนจากความร้อนแฝงและความร้อนสัมผัสระหว่างการเปลี่ยนสถานะระหว่างของเหลวและก๊าซ ดังแสดงในสมการ

$$Ja = \frac{h_{fg}}{C_{p,l} \cdot (\Delta T)_{e,c}} \quad (2.9)$$

โดยที่  $\Delta T_{e,c}$  คือ ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างส่วนที่ระเหยและส่วนควบแน่น

$h_{fg}$  คือ ค่าเอนทัลปีของการเปลี่ยนแปลงสถานะของสารทำงาน

Bond Number ( $Bo$ ) คือ อัตราส่วนระหว่างแรงโน้มถ่วงของโลกกับแรงตึงผิวของของเหลว ดังแสดงในสมการ

$$Bo = D_l \sqrt{g(\rho_l - \rho_v) / \sigma} \quad (2.10)$$

โดยที่  $\sigma$  คือ แรงตึงผิวของสารทำงาน

สามารถหาค่าการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ (Heat flux) ที่ได้จากการทดลองจาก  $Q'' = \left( \dot{Q} / 2\pi D_l N L_e \right)$  เมื่อทำการหาค่าความสัมพันธ์เชิงการทดลองเมื่อค่าความผิดพลาดของข้อมูลไม่เกิน 30% จะได้สมการการทำนายค่าการถ่ายเทความร้อนดังนี้

$$Q'' = \left( \dot{Q} / 2\pi D_l N L_e \right) = 0.54 (\exp(\beta))^{0.48} Ka^{0.47} Pr_l^{0.27} Ja^{1.43} N^{-0.27}$$

## 2.4 การวิเคราะห์มิติ (Dimensional Analysis)

จากทฤษฎีของ Buckingham pi ค่าการถ่ายเทความร้อนจะเป็นฟังก์ชันของตัวแปรต่างๆ ดังสมการ

$$Q = f(Le, Di, N, Te, Tc, FR, Working \ fluid)$$

สามารถจัดสมการให้อยู่ในรูปของตัวแปรไร้มิติได้ดังนี้

$$\pi_1 = f(\pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5) \quad (2.11)$$

เนื่องจากการหาตัวแปรไร้มิติที่เหมาะสมและสามารถอธิบายถึงปรากฏการณ์การทำงานภายในของ VCLPHP นั้นทำได้ยุ่งยาก จากการทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง สามารถสรุปตัวแปรไร้มิติที่น่าสนใจได้ดังนี้

1. ค่า  $Ka$  ดังสมการที่ 2.7
2. ค่า  $Pr$  ดังสมการที่ 2.8
3. ค่า  $Bo$  ดังสมการที่ 2.10

ตัวแปรไร้มิติอื่นๆ ที่สนใจคือ

1. Kutateladze Number ( $Ku$ ) เป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่ประยุกต์ใช้ในความสัมพันธ์ของการเดือดชั้นวิกฤติ และจะแสดงอยู่ในรูปของอัตราส่วนระหว่าง Heat flux กับคุณสมบัติต่างๆของสารทำงาน การเดือดชั้นวิกฤตินี้เกิดจากการเดือดเมื่อมีการแผ่ขยายของฟองไอน้ำที่บริเวณผิวที่ได้รับความร้อน ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ในการทำงานของ VCLPHP ดังนั้นเราสามารถประยุกต์ค่า  $Ku$  เพื่อหาความสัมพันธ์เชิงการทดลองของ VCLPHP ได้

$$Ku = \frac{Q''}{h_{fg} \rho_v \left( \frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\rho_v^2} \right)^{1/4}} \quad (2.12)$$

โดยที่  $Q''$  คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ในแนวนอน

$h_{fg}$  คือ ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ

$\rho_l, \rho_v$  คือ ความหนาแน่นของสารทำงานในสถานะของเหลวและก๊าซตามลำดับ

$\sigma$  คือ แรงดึงผิวของสารทำงาน

$g$  คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

2. Modified Jakob Number ( $Ja^*$ ) คือ ตัวเลข  $Ja$  ที่ประยุกต์ใช้ในงานนี้โดยรวมผลของ อัตราการเติมสารทำงานไว้ด้วย ดังแสดงในสมการ

$$Ja^* = \frac{(FR)C_{p,l}\Delta T_{e,c}}{(1-FR)h_{fg}} \quad (2.13)$$

โดยที่  $FR$  คือ อัตราการเติมสารทำงานภายในท่อความร้อน

คุณสมบัติต่างๆ ของสารทำงานที่ใช้คำนวณคือ อุณหภูมิเฉลี่ยของส่วนที่ระเหยกับส่วน ความเย็น ( $T_{ave} = (T_e + T_c)/2$ )

## 2.5 การสร้าง Empirical Correlation

เนื่องจากค่าการถ่ายเทความร้อนที่ได้จากการทดลองส่วนใหญ่ มีการกระจายกระจายไม่อยู่ใน รูปแบบเชิงเส้น การกระจายของข้อมูลมีการเบี่ยงเบนไปมาในลักษณะไม่เชิงเส้น ซึ่งเราสามารถ ประยุกต์สมการให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันยกกำลัง (Power function) เพื่อจะให้ผลลัพธ์ที่มีค่าเที่ยงตรง เพิ่มขึ้น

เมื่อหาค่าตัวแปรต่างๆ แล้วเราจะนำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้วิธีการถดถอย แบบพหุนาม (Polynomial Regression) ได้ดังสมการ

$$\pi_1 = a\pi_2^b\pi_3^c\pi_4^d\pi_5^e \quad (2.14)$$

ใส่ ลอการิทึมทั้งสองข้าง จะได้  $\log \pi_1 = \log(a\pi_2^b\pi_3^c\pi_4^d\pi_5^e)$

$$\log \pi_1 = \log a + b \log \pi_2 + c \log \pi_3 + d \log \pi_4 + e \log \pi_5$$

$$\log \pi_1 = \log a + b \log \pi_2 + c \log \pi_3 + d \log \pi_4 + e \log \pi_5$$

ซึ่งอาจจะเขียนให้อยู่ในรูปแบบดังนี้

$$y = a_0 + bx_1 + cx_2 + dx_3 + ex_4 \quad (2.15)$$

โดยที่  $y = \log \pi_1$ ,  $a_0 = \log a$ ,  $x_1 = \log \pi_2$ ,  $x_2 = \log \pi_3$ ,  $x_3 = \log \pi_4$ ,  $x_4 = \log \pi_5$

จากสมการพหุนามที่กำหนดขึ้นมา (2.15) จะสามารถหาค่าความผิดพลาด (E) ทั้งหมดที่เกิดขึ้นได้ดังนี้

$$\begin{aligned} E &= \sum_{i=1}^n [d(x_i)]^2 \\ E &= \sum_{i=1}^n (y_{\text{exp}} - y_{\text{pre}})^2 \\ E &= \sum_{i=1}^n (y_{\text{exp}} - (a_0 + bx_2 + cx_3 + dx_4 + ex_5))^2 \end{aligned} \quad (2.16)$$

ในการหาค่าตัวแปรที่ไม่ทราบค่า ( $a_0$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  และ  $e$ ) นั้นสามารถใช้วิธีการกำลังสองน้อยสุด (Least-squares) ซึ่งทำได้จากวิธีหาค่าต่ำสุด (Minimization) ของค่าความผิดพลาดจากเครื่องมือวัด (E) ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial a_0} &= 0 \\ \frac{\partial E}{\partial b} &= 0 \\ \frac{\partial E}{\partial c} &= 0 \\ \frac{\partial E}{\partial d} &= 0 \\ \frac{\partial E}{\partial e} &= 0 \end{aligned}$$

จาก  $\frac{\partial E}{\partial a_0} = 0$  สามารถประดิษฐ์สมการได้ดังนี้

$$2 \sum_{i=1}^n [y - (a_0 + bx_1 + cx_2 + dx_3 + ex_4)](-1) = 0$$

$$\sum_{i=1}^n y - \sum_{i=1}^n a_0 - \sum_{i=1}^n bx_1 - \sum_{i=1}^n cx_2 - \sum_{i=1}^n dx_3 - \sum_{i=1}^n ex_4 = 0$$

$$na_0 + \left(\sum_{i=1}^n x_1\right)b + \left(\sum_{i=1}^n x_2\right)c + \left(\sum_{i=1}^n x_3\right)d + \left(\sum_{i=1}^n x_4\right)e = \sum_{i=1}^n y \quad (2.17a)$$

จาก  $\frac{\partial E}{\partial b} = 0$  สามารถประดิษฐ์ได้สมการดังนี้

$$2 \sum_{i=1}^n [y - (a_0 + bx_1 + cx_2 + dx_3 + ex_4)](-x_1) = 0$$

$$\sum_{i=1}^n yx_1 - \sum_{i=1}^n a_0x_1 - \sum_{i=1}^n bx_1x_1 - \sum_{i=1}^n cx_2x_1 - \sum_{i=1}^n dx_3x_1 - \sum_{i=1}^n ex_4x_1 = 0$$

$$\left(\sum_{i=1}^n x_1\right)a_0 + \left(\sum_{i=1}^n x_1^2\right)b + \left(\sum_{i=1}^n x_1x_2\right)c + \left(\sum_{i=1}^n x_1x_3\right)d + \left(\sum_{i=1}^n x_1x_4\right)e = \sum_{i=1}^n x_1y \quad (2.17b)$$

จาก  $\frac{\partial E}{\partial c} = 0$  สามารถประดิษฐ์ได้สมการดังนี้

$$2 \sum_{i=1}^n [y - (a_0 + bx_1 + cx_2 + dx_3 + ex_4)](-x_2) = 0$$

$$\sum_{i=1}^n yx_2 - \sum_{i=1}^n a_0x_2 - \sum_{i=1}^n bx_1x_2 - \sum_{i=1}^n cx_2x_2 - \sum_{i=1}^n dx_3x_2 - \sum_{i=1}^n ex_4x_2 = 0$$

$$\left(\sum_{i=1}^n x_2\right)a_0 + \left(\sum_{i=1}^n x_1x_2\right)b + \left(\sum_{i=1}^n x_2^2\right)c + \left(\sum_{i=1}^n x_2x_3\right)d + \left(\sum_{i=1}^n x_2x_4\right)e = \sum_{i=1}^n x_2y \quad (2.17c)$$

จาก  $\frac{\partial E}{\partial d} = 0$  สามารถประดิษฐ์ได้สมการดังนี้

$$2 \sum_{i=1}^n [y - (a_0 + bx_1 + cx_2 + dx_3 + ex_4)](-x_3) = 0$$

$$\sum_{i=1}^n yx_3 - \sum_{i=1}^n a_0x_3 - \sum_{i=1}^n bx_1x_3 - \sum_{i=1}^n cx_2x_3 - \sum_{i=1}^n dx_3x_3 - \sum_{i=1}^n ex_4x_3 = 0$$

$$\left(\sum_{i=1}^n x_3\right)a_0 + \left(\sum_{i=1}^n x_1x_3\right)b + \left(\sum_{i=1}^n x_2x_3\right)c + \left(\sum_{i=1}^n x_3^2\right)d + \left(\sum_{i=1}^n x_3x_4\right)e = \sum_{i=1}^n x_3y \quad (2.17d)$$

และจาก  $\frac{\partial E}{\partial e} = 0$  สามารถประดิษฐ์ได้สมการดังนี้

$$2 \sum_{i=1}^n [y - (a_0 + bx_1 + cx_2 + dx_3 + ex_4)](-x_4) = 0$$

$$\sum_{i=1}^n yx_4 - \sum_{i=1}^n a_0x_4 - \sum_{i=1}^n bx_1x_4 - \sum_{i=1}^n cx_2x_4 - \sum_{i=1}^n dx_3x_4 - \sum_{i=1}^n ex_4x_4 = 0$$

$$\left(\sum_{i=1}^n x_4\right)a_0 + \left(\sum_{i=1}^n x_1x_4\right)b + \left(\sum_{i=1}^n x_2x_4\right)c + \left(\sum_{i=1}^n x_3x_4\right)d + \left(\sum_{i=1}^n x_4^2\right)e = \sum_{i=1}^n x_4y \quad (2.17e)$$

จากทั้งห้าสมการที่ประดิษฐ์ขึ้นได้นี้สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_1 & \sum_{i=1}^n x_2 & \sum_{i=1}^n x_3 & \sum_{i=1}^n x_4 \\ \sum_{i=1}^n x_1 & \sum_{i=1}^n x_1^2 & \sum_{i=1}^n x_1x_2 & \sum_{i=1}^n (x_1x_3) & \sum_{i=1}^n (x_1x_4) \\ \sum_{i=1}^n x_2 & \sum_{i=1}^n (x_1x_2) & \sum_{i=1}^n x_2^2 & \sum_{i=1}^n (x_2x_3) & \sum_{i=1}^n (x_2x_4) \\ \sum_{i=1}^n x_3 & \sum_{i=1}^n (x_1x_3) & \sum_{i=1}^n (x_2x_3) & \sum_{i=1}^n x_3^2 & \sum_{i=1}^n (x_3x_4) \\ \sum_{i=1}^n x_4 & \sum_{i=1}^n (x_1x_4) & \sum_{i=1}^n (x_2x_4) & \sum_{i=1}^n (x_3x_4) & \sum_{i=1}^n x_4^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ b \\ c \\ d \\ e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n y \\ \sum_{i=1}^n x_1y \\ \sum_{i=1}^n x_2y \\ \sum_{i=1}^n x_3y \\ \sum_{i=1}^n x_4y \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

จากสมการที่ได้นี้จะสังเกตเห็นได้ว่า เป็นเมทริกซ์จัตุรัสที่สมมาตร เราสามารถหาค่าตัวแปร  $a_0$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  และ  $e$  โดยใช้วิธีการกำจัดแบบเกาส์ (Gauss elimination method) โดยการเริ่มแทนค่าไปข้างหน้าโดยการนำค่า  $\frac{\sum x_1}{n}$  (ค่าสัมประสิทธิ์ของ  $a_0$  ในสมการ 2.17b / ค่าสัมประสิทธิ์ของ  $a_0$  ในสมการ 2.17a) ไปคูณสมการที่ 2.17a จะได้สมการ

$$a_0 \sum_{i=1}^n x_1 + \left(\sum_{i=1}^n x_1^2\right) \frac{b}{n} + \left(\sum_{i=1}^n x_1x_2\right) \frac{c}{n} + \left(\sum_{i=1}^n x_1x_3\right) \frac{d}{n} + \left(\sum_{i=1}^n x_1x_4\right) \frac{e}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_1y)}{n}$$

นำสมการที่ได้นี้ไปลบออกจากสมการ 2.17b จะได้สมการ

$$0 + \left( \sum_{i=1}^n x_1^2 - \frac{\sum_{i=1}^n x_1^2}{n} \right) b + \left( \sum_{i=1}^n x_1 x_2 - \frac{\sum_{i=1}^n x_1 x_2}{n} \right) c + \left( \sum_{i=1}^n x_1 x_3 - \frac{\sum_{i=1}^n x_1 x_3}{n} \right) d + \left( \sum_{i=1}^n x_1 x_4 - \frac{\sum_{i=1}^n x_1 x_4}{n} \right) e = \sum_{i=1}^n (x_1 y) - \frac{\sum_{i=1}^n (x_1 y)}{n}$$

$$\text{หรือ } \left( \sum_{i=1}^n x_1^2 \right)' b + \left( \sum_{i=1}^n x_1 x_2 \right)' c + \left( \sum_{i=1}^n x_1 x_3 \right)' d + \left( \sum_{i=1}^n x_1 x_4 \right)' e = \left( \sum_{i=1}^n x_1 y \right)' \quad (2.18a)$$

ทำเช่นเดียวกันกับสมการที่ 2.17c โดยการนำค่า  $\frac{\sum x_2}{n}$  ไปสมการที่ 2.17a และนำสมการที่ได้ไปลบออกจากสมการที่ 2.17c ทำเช่นเดียวกันกับสมการที่ 2.17d และ 2.17e จะทำให้ระบบสมการที่ 2.17 เปลี่ยนมาอยู่ในรูปแบบดังนี้

$$n a_0 + \left( \sum_{i=1}^n x_1 \right) b + \left( \sum_{i=1}^n x_2 \right) c + \left( \sum_{i=1}^n x_3 \right) d + \left( \sum_{i=1}^n x_4 \right) e = \sum_{i=1}^n y \quad (2.18a)$$

$$\left( \sum_{i=1}^n x_1^2 \right)' b + \left( \sum_{i=1}^n x_1 x_2 \right)' c + \left( \sum_{i=1}^n x_1 x_3 \right)' d + \left( \sum_{i=1}^n x_1 x_4 \right)' e = \left( \sum_{i=1}^n x_1 y \right)' \quad (2.18b)$$

$$\left( \sum_{i=1}^n x_1 x_2 \right)' b + \left( \sum_{i=1}^n x_2^2 \right)' c + \left( \sum_{i=1}^n x_2 x_3 \right)' d + \left( \sum_{i=1}^n x_2 x_4 \right)' e = \left( \sum_{i=1}^n x_2 y \right)' \quad (2.18c)$$

$$\left( \sum_{i=1}^n x_1 x_3 \right)' b + \left( \sum_{i=1}^n x_2 x_3 \right)' c + \left( \sum_{i=1}^n x_3^2 \right)' d + \left( \sum_{i=1}^n x_3 x_4 \right)' e = \left( \sum_{i=1}^n x_3 y \right)' \quad (2.18d)$$

$$\left( \sum_{i=1}^n x_1 x_4 \right)' b + \left( \sum_{i=1}^n x_2 x_4 \right)' c + \left( \sum_{i=1}^n x_3 x_4 \right)' d + \left( \sum_{i=1}^n x_4^2 \right)' e = \left( \sum_{i=1}^n x_4 y \right)' \quad (2.18e)$$

ทำการกำจัดไปข้างหน้าเรื่อยไป จนกระทั่งสมการจนถึงรอบที่ 4 จะทำให้ระบบสมการอยู่ในรูปแบบที่พร้อมที่จะแทนค่าย้อนกลับเพื่อหาผลลัพธ์ของตัวแปรต่างๆ โดยสามารถแสดงให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ดังนี้



$$\begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_1 & \sum_{i=1}^n x_2 & \sum_{i=1}^n x_3 & \sum_{i=1}^n x_4 \\ 0 & (\sum_{i=1}^n x_1^2)' & (\sum_{i=1}^n x_1 x_2)' & (\sum_{i=1}^n x_1 x_3)' & (\sum_{i=1}^n x_1 x_4)' \\ 0 & 0 & (\sum_{i=1}^n x_2^2)'' & (\sum_{i=1}^n x_2 x_3)'' & (\sum_{i=1}^n x_2 x_4)'' \\ 0 & 0 & 0 & (\sum_{i=1}^n x_3^2)''' & (\sum_{i=1}^n x_3 x_4)''' \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (\sum_{i=1}^n x_4^2)'''' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ b \\ c \\ d \\ e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n y \\ \sum_{i=1}^n (x_1 y)' \\ \sum_{i=1}^n (x_2 y)'' \\ \sum_{i=1}^n (x_3 y)''' \\ \sum_{i=1}^n (x_4 y)'''' \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

จากเมทริกซ์ที่ได้ ให้แทนค่าย้อนกลับ โดยเริ่มจากสมการสุดท้ายดังนี้

$$e = \frac{(\sum_{i=1}^n x_4 y)''''}{(\sum_{i=1}^n x_4^2)''''}$$

$$d = \frac{(\sum_{i=1}^n x_3 y)''' - e(\sum_{i=1}^n x_3 x_4)''''}{(\sum_{i=1}^n x_3^2)'''}$$

$$c = \frac{(\sum_{i=1}^n x_2 y)'' - d(\sum_{i=1}^n x_2 x_3)'' - e(\sum_{i=1}^n x_2 x_4)''}{(\sum_{i=1}^n x_2^2)''}$$

$$b = \frac{(\sum_{i=1}^n x_1 y)' - c(\sum_{i=1}^n x_1 x_2)' - d(\sum_{i=1}^n x_1 x_3)' - e(\sum_{i=1}^n x_1 x_4)'}{(\sum_{i=1}^n x_1^2)'}$$

$$a_0 = \frac{(\sum_{i=1}^n y) - b \sum_{i=1}^n x_1 - c \sum_{i=1}^n x_2 - d \sum_{i=1}^n x_3 - e \sum_{i=1}^n x_4}{n}$$

จาก  $a_0 = \log a$  ทำการหาค่า  $a$  โดยที่  $a = 10^{a_0}$

เมื่อทำการแทนค่าย้อนกลับแล้วจะทราบค่าตัวแปร  $a$   $b$   $c$   $d$  และ  $e$  นำค่าที่ได้ไปแทนในสมการที่ 2.11 จะได้ความสัมพันธ์เชิงการทดลอง

การหาความแม่นยำของการถ่ายเทความร้อนที่หาได้จากสมการความสัมพันธ์เชิงการทดลองแบ่งได้เป็น 2 แบบดังนี้

1) ค่า Standard Deviation (SD) คือค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลการถ่ายเทความร้อนของ VCLPHP ที่ทำนายได้จากสมการความสัมพันธ์เชิงการทดลอง สามารถหาได้จากสมการ

$$(SD) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Ku_{pre,i} - Ku_{exp,i})^2}{n}} \quad (2.20)$$

เมื่อ  $n$  คือ จำนวนชุดข้อมูลการทดลอง

2) ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) คือ ค่าที่ใช้วัดความเหมาะสมของสมการที่ใช้ทำนายค่าการถ่ายเทความร้อนของ VCLPHP สามารถหาได้จากสมการ

$$R^2 = \frac{\left( \sum (Ku_{exp} \cdot Ku_{pre}) - \frac{\sum Ku_{exp} \cdot \sum Ku_{pre}}{n} \right)^2}{\left( \sum Ku_{exp}^2 - \frac{(\sum Ku_{exp})^2}{n} \right) \left( \sum Ku_{pre}^2 - \frac{(\sum Ku_{pre})^2}{n} \right)} \quad (2.21)$$