

## บทที่ 1

### บทนำ

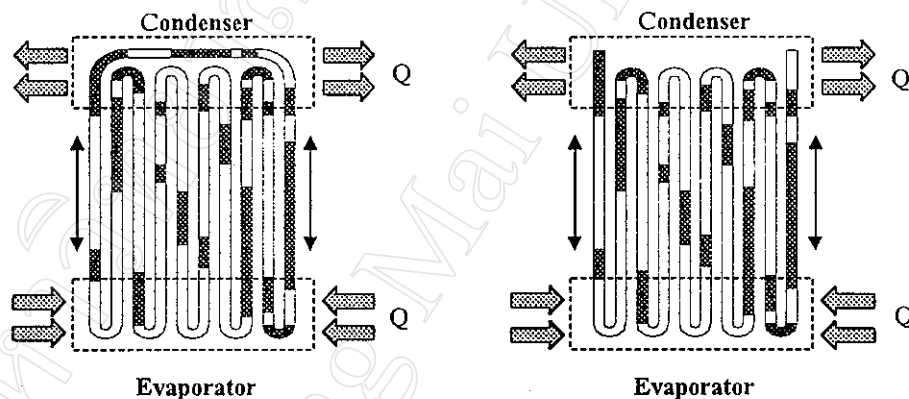
#### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

พลังงานนับเป็นปัจจัยหลักที่สำคัญอย่างยิ่งในการพัฒนาประเทศ โดยเฉพาะในกระบวนการผลิตของภาคอุตสาหกรรมและการบริการ นอกจากนี้ยังเป็นปัจจัยสำคัญในการดำรงชีวิตประจำวันของมนุษย์ แต่เนื่องจากเชื้อเพลิงมีราคาสูงขึ้น และแหล่งพลังงานสำรองลดลงเรื่อยๆ วงการอุตสาหกรรมก็ได้เริ่มมุ่งความสนใจและความพยายามในการอนุรักษ์พลังงานมากขึ้น วิธีหนึ่งที่สามารถช่วยให้เกิดการอนุรักษ์พลังงาน คือ การนำความร้อนทิ้งจากขบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนต่างๆ ในอุตสาหกรรมกลับมาใช้ประโยชน์อีก เช่น ความร้อนจากการเผาไหม้ของหัวเผาหม้อไอน้ำ หรือความร้อนทิ้งจากระบบหล่อเย็น การพัฒนาระบบดึงความร้อนทิ้งกลับคืนจากความร้อนทิ้งทางอุตสาหกรรม ได้รับการศึกษาและพัฒนาอย่างมากมายทั่วโลก ท่อความร้อน (Heat pipe) ก็เป็นอุปกรณ์หนึ่งในการพัฒนานั้น

ท่อความร้อน คือ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดหนึ่งที่สามารถถ่ายเทความร้อนได้โดยไม่ต้องอาศัยพลังงานจากภายนอก (ประดิษฐ์ เทอดคุณ, 2538) ทำงานโดยใช้หลักการส่งถ่ายความร้อนจากความร้อนแฝงของสารทำงานภายในท่อ ซึ่งระเหยโดยการรับความร้อนจากแหล่งความร้อนแล้วถ่ายเทความร้อนโดยการควบแน่น เนื่องจากความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของสารทำงานมีค่าสูงมาก จึงสามารถถ่ายเทความร้อนจากปลายด้านหนึ่งไปสู่ปลายอีกด้านหนึ่งโดยมีอุณหภูมิแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย

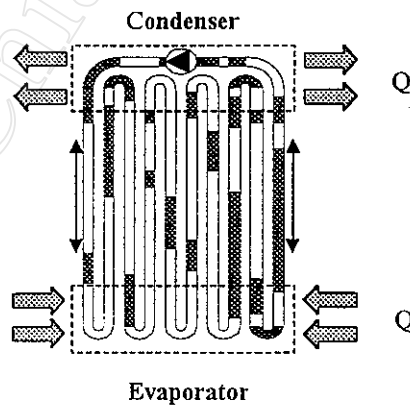
อย่างไรก็ตาม อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อความร้อนแบบธรรมดาที่ภาระความร้อนสูงๆ นั้น จะถูกจำกัดโดยแรงดันไอ (Vapor pressure) และขีดจำกัดที่เกี่ยวข้องกับค่าสมรรถนะของท่อความร้อน เช่น ขีดจำกัดคาปิลลารี (Capillary limit) ซึ่งเกิดเมื่อวัสดุพรม (Wicks) ไม่สามารถนำเอาของเหลวที่เกิดจากการกลั่นตัวกลับมายังส่วนทำระเหยได้ ขีดจำกัดการพา (Entrainment limit) ซึ่งเป็นผลมาจากการไหลที่สวนทางกัน (Counter current flow) ของไอลงจากส่วนทำระเหยกับของเหลวที่กลั่นตัวจากส่วนควบแน่นของท่อความร้อน และอีกปัญหาหนึ่ง คือ การประยุกต์ใช้ท่อความร้อนในอุปกรณ์ที่ต้องการการระบายความร้อนแต่มีพื้นที่จำกัดมาก จึงจำเป็นต้องใช้ท่อความร้อนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กลงมากๆ โดยจะเห็นได้ชัดในการระบายความร้อนให้กับอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์หรืออุปกรณ์การสื่อสารต่างๆ

จากปัญหาที่เกิดขึ้นดังกล่าว จึงได้มีการพัฒนาสร้างท่อความร้อนชนิดใหม่ขึ้นอย่างต่อเนื่อง เช่น ท่อความร้อนแบบสั่น หรือ Oscillating Heat Pipe (OHP) เป็นท่อความร้อนชนิดใหม่ที่มีการส่งถ่ายความร้อนนั้นแตกต่างจากท่อความร้อนแบบธรรมดา คือ การเกิดแห้งของเหลวและก้อนไอในท่อ จะช่วยเพิ่มการเคลื่อนที่แบบสั่นของของไหลทำงานซึ่งเกิดขึ้นด้วยตัวมันเอง(Self-excited oscillating) โดยเกิดขึ้นจากแรงขับของคลื่นแรงดันที่ไม่คงที่อย่างรุนแรง สาเหตุมาจากการเดือดแบบฟองและการควบแน่นของสารทำงานภายในท่อ มีคุณสมบัติที่สำคัญ คือ สามารถส่งถ่ายความร้อนได้อย่างรวดเร็ว โดย Oscillating Heat Pipe สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดหลักๆ ดังแสดงในรูปที่ 1.1 โดยรูปที่ 1.1(ก) คือ Closed-Loop Oscillating Heat Pipe (CLOHP) รูปที่ 1.1(ข) คือ Closed-End Oscillating Heat Pipe (CEOHP) รูปที่ 1.1(ค) คือ Closed-Loop Oscillating Heat Pipe แบบมีเช็ควาล์ว (CLOHP with check valve)



(ก) Closed - Loop Oscillating Heat Pipe

(ข) Closed - End Oscillating Heat Pipe



(ค) Closed - Loop Oscillating Heat Pipe with check valve

รูปที่ 1.1 ชนิดของท่อความร้อนแบบสั่น

โดยในรูป 1.1(ก) นั้นทำขึ้นมาจากท่อความร้อนแบบคาปิลลารียาวจำนวนหนึ่งท่อหรือมากกว่านั้นที่ถูกขุดและเชื่อมติดกันให้เป็นวงรอบโดยไม่มีเชื้อเพลิง ในรูป 1.1(ข) นั้นทำขึ้นมาจากท่อความร้อนแบบคาปิลลารีที่ทำปลายปิดทั้งสองข้างโดยไม่มีเชื้อเพลิงและไม่ใช้วงรอบจะประกอบด้วยท่อคาปิลลารียาวจำนวนหนึ่งท่อขุดไปตามรูป และในแบบสุดท้าย คือ รูป 1.1(ค) ทำมาจากท่อคาปิลลารียาวจำนวนหนึ่งท่อหรือมากกว่านั้นขุดไปมาและเชื่อมให้เป็นวงตามรูป ในวงของท่อความร้อนนั้นจะมีเชื้อเพลิงคอยบังคับทิศทางของสารทำงานซึ่งทำหน้าที่พาความร้อนไหลเวียนอย่างรวดเร็ว แต่ในการศึกษาครั้งนี้จะมุ่งเน้นถึงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบ CLOHP เท่านั้น เนื่องจากเป็นชนิดที่มีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนได้มากที่สุด (Gi et al., 1999)

อย่างไรก็ตาม สารทำงานส่วนใหญ่ที่ใช้ในท่อความร้อน คือ สารจำพวก Chlorofluorocarbons (CFCs) ซึ่งมีผลกระทบต่อชั้นบรรยากาศและเป็นสาเหตุของปัญหาสิ่งแวดล้อม จึงเกิดแนวคิดที่จะใช้สารที่ปราศจาก CFCs มาเป็นสารทำงานแทน งานวิจัยที่ใช้สารที่ปราศจาก CFCs มาเป็นสารทำงานในท่อความร้อนนั้น มีค่อนข้างน้อยมาก ตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ ชัยชาญและบุญฤทธิ์ (1995) ที่ใช้สาร R134a และ R123 เป็นสารทำงานภายในท่อความร้อนเพื่อศึกษาคุณสมบัติการถ่ายเทความร้อน และงานวิจัยของ Terdtoon et al. (1999) ได้ศึกษาถึงคุณสมบัติการถ่ายเทความร้อนของเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะ โดยใช้สารทำงานเป็นน้ำยาทำความเย็นผสมโดยสารทำงานที่เลือกใช้ คือ HP62 (สารที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับ Azeotropic blend ของ HFC125 / HFC143a / HFC134a อัตราส่วนโดยมวล 44 / 52 / 4 เปอร์เซนต์) และ MP39 (สารผสมของ HPFC22 / HFC152a / HCFC124 อัตราส่วนโดยมวล 53 / 13 / 34 เปอร์เซนต์) พบว่าสารทั้งสองสามารถให้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่ดี มีอุณหภูมิการทำงานที่เหมาะสม และเนื่องจากสาร HP62 และ MP39 มีค่าการทำลายโอโซน (Ozone Depletion Potential, ODP) เท่ากับ 0 และ 0.03 ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่าสารผสมชนิดอื่นๆ เช่น R-409A และ R-500 ซึ่งมีค่า ODP เท่ากับ 0.05 และ 0.758 ตามลำดับ จึงเชื่อมั่นได้ว่าเมื่อทำการทดลองหรือนำ CLOHP ที่ใช้สารดังกล่าวไปใช้งานจะมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยมาก ดังนั้นงานวิจัยที่กล่าวมานี้จึงเป็นแนวทางในการวิจัยเพื่อศึกษาถึงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของ CLOHP โดยใช้สารทำงาน HP62 และ MP39

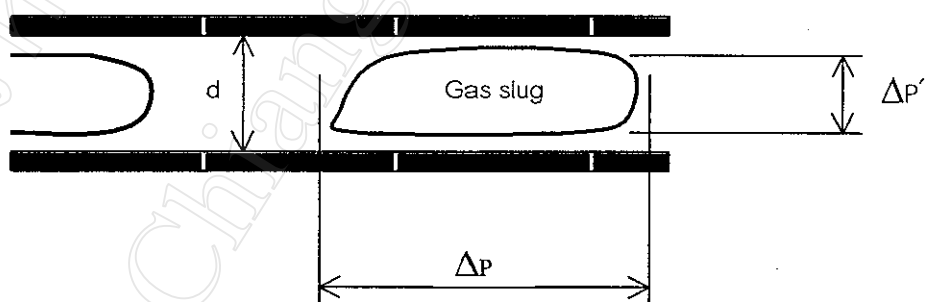
## 1.2 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ OHP นั้นในปัจจุบันมีจำนวนไม่มากนัก จากจำนวนที่มีอยู่ทั้งหมดเป็นการศึกษาวิจัยที่ไม่ได้กล่าวถึงรูปแบบจำลองทางกายภาพ (Physical modeling) เลย แต่จะกล่าวถึงเฉพาะหลักการพื้นฐานเบื้องต้นเท่านั้น ซึ่งมีดังต่อไปนี้

### 1.2.1 การศึกษาถึงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสั้น

Akachi et al. (1996) กล่าวถึงหลักการการทำงานเบื้องต้นของ OHP โดยจะเกิดจากการส่งถ่ายความร้อนจากแหล่งให้ความร้อนไปยังแหล่งรับความร้อน โดยความร้อนจะถูกส่งผ่านโดยการสั่น (Oscillation) ในทิศทางตามแนวแกนท่อตามยาว

Maesawa et al. (1996) ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาถึงสมรรถนะทางความร้อนของท่อเทอร์โมไซฟอนแบบคาปิลลารี โดยชุดทดสอบเป็นท่อเทอร์โมไซฟอนแบบคาปิลลารี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 1 มิลลิเมตร มีจำนวนโค้งทั้งหมด 20 โค้งและมีความยาวทั้งหมด 24 เมตร ใช้สารทำงานเป็น R142b ผลของการทดสอบที่น่าสนใจ คือ ท่อเทอร์โมไซฟอนนั้นมีการส่งถ่ายความร้อนโดยปรากฏการณ์การสั่น การสั่นนั้นเกิดจากคลื่นของแรงดันของสารทำงานที่แกว่งไปมาอย่างรุนแรงที่เป็นผลมาจากการเดือดแบบฟองของสารทำงาน โดยฟองนั้นจะเกิดขึ้นในท่อที่ส่วนทำระเหย ฟองนั้นจะโตขึ้นเรื่อยๆ และจะหายไปเมื่ออยู่ในส่วนควบแน่น โดยลักษณะที่กล่าวมานี้จะขึ้นอยู่กับอัตราการถ่ายเทความร้อน อัตราการเติมสารทำงาน สภาวะการทำงาน (Heating modes) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อและจำนวนรอบของการขดไปมา และยังกล่าวอีกว่ารูปแบบการไหลภายในของท่อเทอร์โมไซฟอนนั้นมีการไหลแบบ Slug ดังแสดงในรูปที่ 1.2 โดย Gas slug หรือฟองนั้นสามารถไหลได้โดยความแตกต่างของความดัน



รูปที่ 1.2 การไหลแบบ Slug ภายในท่อเทอร์โมไซฟอนแบบคาปิลลารี

ที่มา: Maesawa et al. (1996)

โดยในรูปที่ 1.2 แสดงค่าความดันตามแนวรัศมีและค่าความดันตามแนวแกนของท่อเมื่อสารทำงานในท่ออยู่ในสภาวะที่  $\Delta P \geq \Delta P'$  Gas slug สามารถคงอยู่ในท่อได้ โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อเป็นไปตามสมการที่ (1.1)

$$d \leq 2 \sqrt{\frac{\sigma}{\rho g}} \quad (1.1)$$

**Dobson and Harms (1999)** ได้อ้างถึงบทความทางวิชาการของ **Akachi et al. (1996)** ในส่วนของท่อความร้อนแบบคาปิลลารี แต่ในที่นี้ได้ศึกษาถึงรูปแบบทางคณิตศาสตร์อย่างง่าย เพื่อแสดงพฤติกรรมของสารทำงานที่อยู่ภายในท่อ เช่น แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อน แรงกระทำต่อสารทำงานในส่วนที่เป็นของเหลวและของแข็งเป็นต้น อีกทั้งยังกล่าวถึงค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่ที่สุดที่ท่อความร้อนแบบคาปิลลารีสามารถทำงานได้อย่างเหมาะสม โดยมีค่าแสดงไว้ตามสมการที่ (1.1) ซึ่งในสภาพที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตามสมการดังกล่าวจะทำให้สารทำงานนั้นอยู่ในสภาพการไหลแบบ Gas slug โดยเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งในการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนชนิดนี้

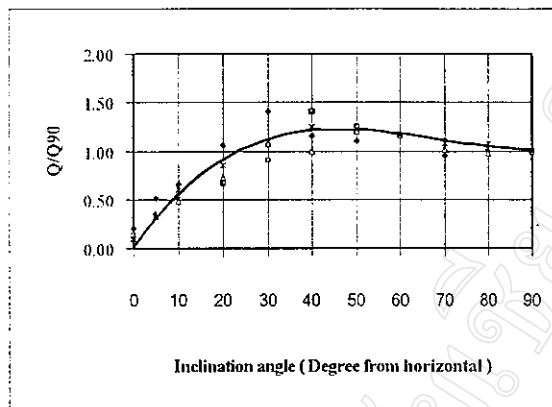
#### 1.2.2 การศึกษาถึงพฤติกรรมของการส่งถ่ายความร้อนของสารทำงาน

**Maezawa et al. (1996)** ได้ศึกษาถึงคุณลักษณะของการถ่ายเทความร้อนของ OHP โดยการทดลองนั้นทำที่ตำแหน่งการให้ความร้อนต่างๆ เครื่องมือที่ใช้ทำการศึกษาดทดลอง คือ ท่อความร้อนที่ทำจากท่อคาปิลลารีมีความยาวทั้งหมด 48 เมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2 มิลลิเมตร จำนวนโค้ง 40 โค้ง และมีการปิดหัวท้ายทั้งสองข้างของท่อ ตามรูปที่ 1.1(ข) ใช้น้ำและ R142b เป็นสารทำงาน ผลของการทดลอง คือ ในตำแหน่งการให้ความร้อนด้านบน OHP จะทำงานโดยการกระตุ้นการสั่นด้วยตัวมันเอง โดยไม่ต้องใช้วัสดุพรม การสั่นสมมติว่าเป็นพฤติกรรมที่เกิดจาก Chaotic คือ ผลที่ปรากฏจะเห็นเป็น Attractor แบบประหลาด (Strange attractor) และเป็นกลุ่มของแถบพลังงาน และขนาดมิติของ Attractor จะคำนวณได้จากการสังเกตอนุกรมเวลาที่เป็นตัวแปรเดียว

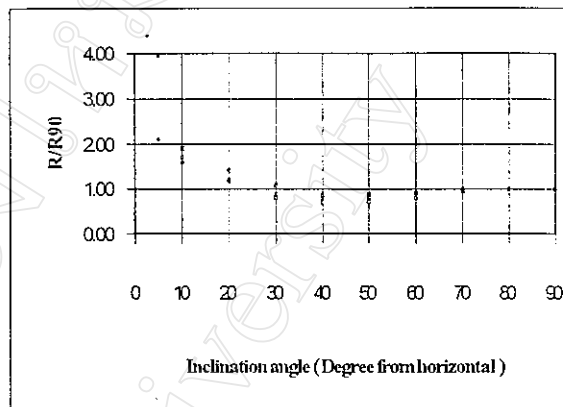
#### 1.2.3 การศึกษาถึงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อเทอร์โมไซฟอนที่ใช้สารทำงานที่ไม่มี CFCs

**Terdtoon et al. (1999)** ได้ศึกษาคุณสมบัติการถ่ายเทความร้อนของเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะ โดยใช้สารทำงานเป็นสารผสม คือ HP62 (หรือ R-404a ซึ่งมีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับ Azeotropic blend ของ HFC125 / HFC143a / HFC134a อัตราส่วนโดยมวล 44 / 52 / 4 เปอร์เซ็นต์) และ MP39 (สารผสมของ HPFC22 / HFC152a / HCFC124 อัตราส่วนโดยมวล 53 / 13 / 34 เปอร์เซ็นต์) มีอัตราส่วนการเติม 50 เปอร์เซ็นต์ โดยผลจากการทดลองส่วนหนึ่ง ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมเอียงของท่อเทอร์โมไซฟอนและค่าอัตราส่วนของอัตราการถ่าย

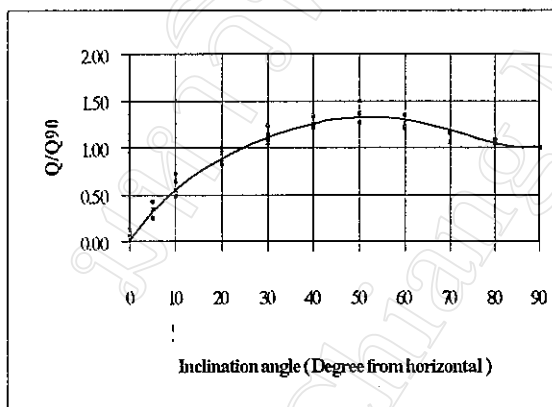
เทความร้อนกับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มุม 90 องศา และค่าอัตราส่วนของค่าความต้านทานความร้อนกับค่าความต้านทานความร้อนที่มุม 90 องศา ดังแสดงจากรูปที่ 1.3



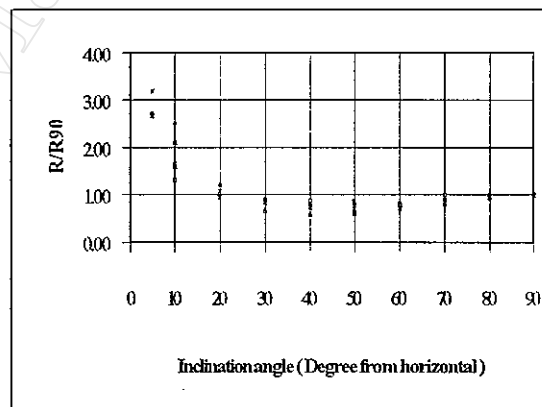
(ก) ผลของมุมเอียงที่มีต่อค่า  $Q/Q_{90}$  ของท่อความร้อนที่ใช้ MP39 เป็นสารทำงาน



(ข) ผลของมุมเอียงที่มีต่อค่า  $R/R_{90}$  ของท่อความร้อนที่ใช้ MP39 เป็นสารทำงาน



(ค) ผลของมุมเอียงที่มีต่อค่า  $Q/Q_{90}$  ของท่อความร้อนที่ใช้ HP62 เป็นสารทำงาน



(ง) ผลของมุมเอียงที่มีต่อค่า  $R/R_{90}$  ของท่อความร้อนที่ใช้ HP62 เป็นสารทำงาน

รูปที่ 1.3 ผลของมุมเอียงที่มีต่อค่า  $Q/Q_{90}$  และ  $R/R_{90}$  ของท่อความร้อนที่ใช้ MP39 และ HP62 เป็นสารทำงาน

ที่มา: Terdtoon et al. (1999)

#### 1.2.4 การศึกษาถึงผลของตัวแปรไร้มิติที่มีต่อคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อน

ธวัช พัยภรณ์ (2540) ได้ศึกษาถึงผลของตัวแปรไร้มิติที่มีต่อคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเทอร์โมไซฟอนแบบเอียง โดยทำการศึกษาผลของตัวแปรไร้มิติ คือ ตัวเลขของบอนด์ (Bond number) ตัวเลขของฟรูด (Froude number) ตัวเลขของเวเบอร์ (Weber number) และตัวเลขของคูทาเทลัดเซ (Kutateladze number) ที่มีผลต่อค่าการถ่ายเทความร้อนและค่าความต้านทานความร้อนรวม โดยใช้ท่อเทอร์โมไซฟอนที่ทำด้วยท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 7.5, 11.1 และ 25.4 มิลลิเมตร ใช้ น้ำ เอทานอล และ R123 เป็นสารทำงาน ผลที่ได้จากการทดลองพบว่าตัวเลขของคูทาเทลัดเซมีผลต่ออัตราส่วนค่าการถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่มุมเอียงต่อค่าที่แนวตั้ง ( $Q_m/Q_{90}$ ) ตามความสัมพันธ์

$$\frac{Q_m}{Q_{90}} = 1.678 Ku^{*0.0196} \quad 2.95 \times 10^{-9} < Ku^* < 1.29 \times 10^4 \quad (1.2)$$

โดยที่

$$Ku^* = Ku \times \frac{d}{L_e} \times \frac{\rho_v}{\rho_l}$$

และตัวเลขของคูทาเทลัดเซมีผลต่ออัตราส่วนค่าความต้านทานความร้อนรวมต่ำสุดที่มุมเอียงต่อค่าที่แนวตั้ง ( $R_m/R_{90}$ ) ตามความสัมพันธ์

$$\frac{R_{min}}{R_{90}} = 0.647 Ku^{**0.0297} \quad 1.9 < Ku^{**} < 2.36 \times 10^4 \quad (1.3)$$

โดยที่

$$Ku^{**} = Ku \times \frac{L_e}{d} \times \frac{\rho_l}{\rho_v}$$

#### 1.2.5 การศึกษาถึงแบบจำลองทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสั้น

Mohammad et al. (2001) ได้ศึกษาหาแบบจำลองทางความร้อนเพื่อใช้ในการทำนายพฤติกรรมของก้อนไอและแท่งของเหลวที่อยู่ภายในท่อความร้อนแบบสั้นปลายปิดและท่อความร้อนแบบสั้นชนิดวงรอบ และยังได้พิจารณาถึงผลของขนาดท่อ อัตราการเติมสารทำงาน และอุณหภูมิที่ผนังท่อที่มีต่อประสิทธิภาพของท่อความร้อนทั้งสองชนิดนี้อีกด้วย เขาพบว่า ความยาวของแท่งของเหลวที่อยู่ภายในท่อความร้อนแบบสั้นนั้นจะอยู่ในรูปสมการ

$$L = \frac{2\sigma}{R(\rho_l - \rho_v)g} (\cos\theta_{min} - \cos\theta_{max}) \quad \text{สำหรับ CLOHP} \quad (1.4)$$

$$L = \sqrt{8\pi a} \quad \text{สำหรับ CEOHP} \quad (1.5)$$

เมื่อเพิ่มขนาดท่อและอุณหภูมิผนังท่อแล้ว อัตราการถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มอัตราการเติมเป็น 90 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้ท่อความร้อนไม่สามารถทำงานได้

จากงานวิจัยที่ผ่านมาทั้งหมดจะพบว่า ยังไม่มีนักวิจัยท่านใดที่สนใจศึกษาถึงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนชนิดสันแบบวงรอบที่ใช้สารทำความเย็นผสมเป็นสารทำงาน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจจะศึกษาถึงผลของตัวแปรต่างๆที่มีต่อคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนชนิดสันแบบวงรอบที่ใช้ HP62 และ MP39 ซึ่งเป็นสารผสมเป็นสารทำงาน

### 1.3 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.3.1 เพื่อศึกษาถึงผลของมุมเอียงการทำงาน ขนาดท่อ ความยาวรวมของส่วนทำระเหย และความยาวรวม ที่มีผลต่อคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบ CLOHP โดยใช้ HP62 และ MP39 เป็นสารทำงาน

1.3.2 เพื่อศึกษาถึงผลของตัวแปร ไร้มิติที่มีผลต่อคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของ CLOHP

### 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการศึกษาเชิงทฤษฎี

1.4.1 ได้ทราบผลของมุมเอียงการทำงาน ขนาดท่อ ความยาวรวมของส่วนทำระเหย และความยาวรวม ที่มีผลต่อคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบ CLOHP โดยใช้ HP62 และ MP39 เป็นสารทำงาน

1.4.2 ได้ทราบตัวแปร ไร้มิติ ที่มีผลต่อคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของ CLOHP

### 1.5 ขอบเขตของการวิจัย

1.5.1 ท่อความร้อน CLOHP ทำจากทองแดงที่มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.66, 1.06 และ 2.03 มิลลิเมตร

1.5.2 ความยาวรวมของท่อที่ทดสอบ คือ 5, 10 และ 15 เมตร

1.5.3 ความยาวของส่วนทำระเหยของท่อความร้อน คือ 50, 100 และ 150 มิลลิเมตร

1.5.4 มุมเอียงกำหนดให้อยู่ระหว่าง  $-90$  ถึง  $90$  องศาจากแนวระดับ (ไม่น้อยกว่า 10 ค่า)

1.5.5 สารทำงานที่ใช้ คือ HP62 และ MP39

1.5.6 อุณหภูมิอ่างร้อนที่ให้ความร้อนแก่ส่วนทำระเหย คือ  $80^{\circ}\text{C}$

1.5.7 สารที่ให้ความร้อนแก่ส่วนทำระเหย คือ น้ำ

1.5.8 อุณหภูมิอ่างเย็นที่รับความร้อนแก่ส่วนควบแน่น คือ  $20^{\circ}\text{C}$

1.5.9 สารที่รับความร้อนที่ส่วนควบแน่น คือ สารละลาย Ethylene glycol 50% โดยปริมาตร

1.5.10 อัตราการเติมสารทำงานจะอยู่ในช่วง 50% - 70% โดยปริมาตรทั้งหมดของท่อ เพราะเป็นช่วงที่ท่อ CLOHP สามารถถ่ายเทความร้อนได้ดีที่สุด (Chareonsawan et al., 2000)