

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

พลังงานเป็นสิ่งจำเป็นอย่างมากในการพัฒนาประเทศ ทำให้มีการใช้พลังงานในเชิงอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลายมากขึ้นแม้ว่าพลังงานมีปริมาณจำกัด ประเทศไทยมีการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นทุกปี โดยมากกว่าร้อยละ 95 ถูกนำมาใช้ในภาคเศรษฐกิจ 3 ประเภท คือ อุตสาหกรรม คมนาคม และที่อยู่อาศัย (ศูนย์อนุรักษ์พลังงานแห่งประเทศไทย, 2541) การประหยัดการใช้ การนำพลังงานกลับมาใช้ใหม่ และการปรับปรุงอุปกรณ์ที่ใช้ให้มีประสิทธิภาพ เป็นหลายแนวทางในการอนุรักษ์พลังงาน

การนำความร้อนทิ้งมาใช้ประโยชน์ (Waste heat recovery) ทำได้หลายวิธี อาทิ การประยุกต์ใช้ท่อความร้อนเทอร์โมไซฟอน (Thermosyphon Heat pipe) เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนหรือที่เรียกว่า “เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเทอร์โมไซฟอน (Thermosyphon heat exchanger)” ท่อความร้อนเทอร์โมไซฟอนอาศัยหลักของความร้อนแฝงและแรงโน้มถ่วงของโลก มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูง ทำงานโดยอาศัยความแตกต่างของอุณหภูมิเพียงเล็กน้อย ทั้งง่ายต่อการผลิตและติดตั้ง มีอัตราการคืนทุนที่สูง และมีความสะดวกในการดูแลรักษา จึงมีการนำมาใช้เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เช่น การควบคุมอุณหภูมิของถังเก็บข้าวเปลือก (Dussadee, 2007) การใช้ท่อเทอร์โมไซฟอนในระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ (T.T.Chow, 2007) และ การแลกเปลี่ยนความร้อนของอากาศ (H.Hagens et al., 2007)

ภายในท่อความร้อนเทอร์โมไซฟอนมีสภาวะเป็นสุญญากาศ ทำให้สารทำงานภายในมีจุดเดือดที่ต่ำลง เกิดการเดือดได้ง่าย และมีการถ่ายเทความร้อนที่สูง แต่ในกรณีที่แหล่งให้ความร้อนมีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเดือดของสารทำงานภายในท่อ จะทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของท่อความร้อนเทอร์โมไซฟอนลดลง (ประดิษฐ์ เทอดทูล, 2538) และการนำคลื่นอัลตราโซนิกมาใช้ สามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนได้ (ศิริศักดิ์ ศรีวิชัย, 2550) แต่อย่างไรก็ตามจากการทดสอบของศิริศักดิ์ยังไม่ได้ศึกษาผลของอัตราส่วนการเติมสารทำงาน และมุมเอียงของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่ทำงานภายใต้คลื่นอัลตราโซนิก ดังนั้นงานวิจัยนี้ จะทำการศึกษาในประเด็นดังกล่าวข้างต้น รวมทั้งจัดทำแบบจำลองจากการทดลอง เพื่อทำนายสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน

1.2 ตารางสำคัญจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับการทดสอบการถ่ายเทความร้อนของเทอร์โมไซฟอนแบบท่อเดี่ยว และลักษณะคลื่นอุลตราโซนิกที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน มีรายละเอียดดังนี้

1.2.1 ลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนเทอร์โมไซฟอน

Shiraishi et al. (1987) ศึกษาความสัมพันธ์การถ่ายเทความร้อนในส่วนต่างๆ ของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน ดังนี้

- การถ่ายเทความร้อนในส่วนควบแน่น พิจารณาจากสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของฟิล์มของเหลวควบแน่น โดยมีสมมุติฐานว่าการไหลของฟิล์มควบแน่นเป็นแบบราบเรียบ (Laminar flow) และไหลลงตามรัศมีท่อด้านใน ซึ่งสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยหาได้ดังสมการ (1.1)

$$h_c = (4/3)^{4/3} k_l Re_c^{-1/3} (\nu^2 / g)^{-1/3} \quad (1.1)$$

โดย

h_c = สัมประสิทธิ์การพาความร้อนส่วนควบแน่น ($W/m^2.K$)

k_l = ค่าการนำความร้อนของของเหลว ($W/m.K$)

μ_l = ค่าความหนืดของของเหลว ($N.s/m^2$)

g = ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก ($9.81 m/s^2$)

q_{latent} = ค่าความร้อนแฝงกลายเป็นไอ (J/kg)

ν = ค่าความหนืดสัมบูรณ์ (kinematic viscosity of the liquid) ของของเหลว ($Pa.s$)

q'_c = ฟลักซ์ความร้อนในส่วนควบแน่น (W/m^2)

Re_c = ค่าเรย์โนลด์สในส่วนของควบแน่น สามารถคำนวณจากสมการที่ (1.2)

$$Re_c = (4q'_c L_c) / (q_{latent} \mu_l) \quad (1.2)$$

- การถ่ายเทความร้อนในแอ่งของเหลว (Liquid pool) ลักษณะการถ่ายเทความร้อนในแอ่งของเหลวพิจารณาที่จุดเริ่มต้นของการเดือด โดยการเดือดในแอ่งของเหลวจะแตกต่างจากการเดือดที่พบเห็นทั่วไป เนื่องจากเทอร์โมไซฟอนจะทำงานในระบบท่อบีบ และอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลกทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของสารทำงาน โดยความดันมีผลต่อการถ่ายเทความร้อน ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของการเดือดจะพิจารณาจากความคล้ายคลึงกันของการเดือดใน

ระบบปิดและระบบเปิด โดยมีอัตราส่วนความดันเป็นตัวแปรที่สำคัญที่สุด ซึ่งมีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$h_p(\text{closed}) \propto h_p(\text{open}) \times (P_i / P_a)^n \quad (1.3)$$

โดย

h_p = สัมประสิทธิ์การพาความร้อนในแอ่งของเหลว ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$)

P_i = ความดันในท่อเทอร์โมไซฟอน (Pa)

P_a = ความดันบรรยากาศ (Pa)

n = ค่าคงที่

จากผลการทดลองในงานวิจัยของ Shraishi et al. (1987) สมการสำหรับหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในแอ่งของเหลว (h_p) คือ

$$h_p = 0.32 \left(\frac{\rho_l^{0.65} k_l^{0.3} C_p^{0.7} g^{0.2}}{\rho_v^{0.25} q_{\text{latent}}^{0.4} \mu_l^{0.1}} \right) (P_i / P_a)^{0.23} \times q_e'^{0.4} \quad (1.4)$$

โดย

q_e' = ฟลักซ์ความร้อนบริเวณส่วนทำระเหย (W/m^2)

ρ_v = ความหนาแน่นไอสารทำงาน (kg/m^3)

ρ_l = ความหนาแน่นสารทำงานเหลว (kg/m^3)

C_p = ความจุความร้อนสารทำงาน ($\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$)

- การถ่ายเทความร้อนในฟิล์มของเหลว (Liquid film) เป็นพฤติกรรมเหนือแอ่งของเหลว โดยที่ Andros and Florschuetz (1985) ได้สังเกตพฤติกรรมการไหลของฟิล์มของเหลวในช่วงการระเหยไว้ 4 ลักษณะ คือ

- 1) ฟิล์มของเหลวจะไหลแบบราบเรียบกับผิวช่องภายในการระเหย
- 2) เกิดการแตกตัวอย่างราบเรียบและต่อเนื่องเป็นสายน้ำเล็กๆ อย่างคงที่
- 3) เกิดคลื่นบนฟิล์มของสายน้ำเล็กๆ
- 4) เริ่มเกิดฟองและคลื่นบนฟิล์มบนสายน้ำเล็กๆ

จากการสังเกตฟลักซ์ความร้อนที่ป้อนไปในช่วงความถี่ต่ำๆ จะเกิดฟิล์มการไหลของของเหลวอย่างต่อเนื่องและราบเรียบ สำหรับที่ฟลักซ์ความร้อนสูงๆ จะเกิดการเดือดในสายของไหล และส่วนที่ปกคลุมของเหลวเป็นการผสม 2 เฟสเกิดขึ้น Shraishi et al. (1987) จึงเสนอให้ใช้สมการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเช่นเดียวกับในแง่ของเหลว ดังนี้

$$h_f = (4/3)^{1/3} k_l \text{Re}_f^{-1/3} (v^2/g)^{-1/3} q_e' q_e'^* \quad (1.5)$$

$$h_f = h_p \quad q_e' q_e'^* \quad (1.6)$$

โดย

$$h_f = \text{สัมประสิทธิ์การพาความร้อนฟิล์มของเหลว (W/m}^2\text{.K)}$$

$$q_e'^* = 1.1 \times 10^4 \text{ W/m}^2$$

$$L_p = \text{ความยาวท่อส่วนแอ่งของเหลว (m)}$$

$$L_f = \text{ความยาวท่อส่วนฟิล์มของเหลว (m)}$$

$$\text{Re}_f = \text{ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของฟิล์มของเหลว สามารถคำนวณจากสมการ ดังนี้}$$

$$\text{Re}_f = \left[4q_e' \left(L_p + \frac{1}{2} L_f \right) \right] / L \mu \quad (1.7)$$

เมื่อทราบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ส่วนต่างๆ จากผลการทดสอบ สามารถแสดงการกระจายอุณหภูมิที่ผนังภายในได้ดังรูปที่ 1.1 และสามารถหาค่าอุณหภูมิผนังได้ดังสมการที่ (1.8) ถึง (1.11)

$$T_w(x) = T_i(x) + \frac{q_e'}{h_p} \quad ; 0 \leq x \leq L_p \quad (1.8)$$

$$T_w(x) = T_i(x) + \frac{q_e'}{h_f} \quad ; L_p < x \leq L_e \quad (1.9)$$

$$T_w(x) = T_i(x) \quad ; L_e < x \leq (L_e + L_a) \quad (1.10)$$

$$T_w(x) = T_i(x) - \frac{q_c'}{h_c} \quad ; (L_e + L_p) < x \quad (1.11)$$

โดย

$$h_c = \text{สัมประสิทธิ์การพาความร้อนในส่วนควบแน่น (W/m}^2\text{.K)}$$

q'_c = ฟลักซ์ความร้อนบริเวณส่วนควบแน่น (W/m^2)

L_e = ความยาวท่อส่วนทำระเหย (m)

L_a = ความยาวท่อส่วนอะเดียแบติก (m)

จากรูปที่ 1.1 ค่าความดันที่อ่านได้จากเกจวัดความดัน แสดงว่าความดันสารทำงานในท่อจากส่วนควบแน่นถึงส่วนอะเดียแบติกมีค่าเท่ากัน แต่ส่วนบริเวณทำระเหยความดันจะเพิ่มขึ้น ซึ่งมีความสัมพันธ์กับระดับความลึกของสารทำงานในท่อนี้เนื่องจากค่าหัวน้ำ (Hydrostatic Head) ดังนั้นความดันของสารทำงานบริเวณด้านใต้ท่อส่วนทำระเหย สามารถหาได้จากสมการ (1.12)

$$P_{bottom} = P_g + \rho_l g F L_e \sin \beta \quad (1.12)$$

โดย

P_g = ความดันเกจ (kPa)

F = อัตราส่วนการเติมสารทำงานในส่วนรับความร้อน

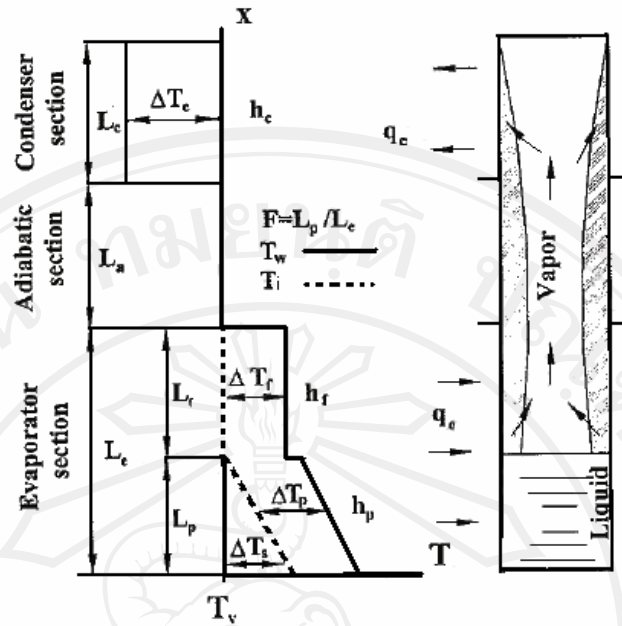
β = มุมของท่อความร้อนเทอร์โมไซฟอนที่ทำกับแนวระดับ

อุณหภูมิของสารทำงานบริเวณก้นท่อของส่วนทำระเหย สามารถหาได้จากสมการ (1.13)

$$T_i = T_{sat@P_{bottom}} \quad (1.13)$$

โดย

$T_{sat@P_{bottom}}$ = อุณหภูมิอิ่มตัวที่ความดันส่วนล่างท่อส่วนทำระเหย ($^{\circ}\text{C}$)



รูปที่ 1.1 แบบจำลองที่ใช้ทำนายการกระจายอุณหภูมิที่ผิวภายในท่อเทอร์โมไซฟอน
(Shraishi et al., 1987)

งานวิจัยข้างต้นของ Shraishi et al. (1987) เป็นสมการที่ใช้ได้กับสารทำงานทุกชนิดและทุกช่วงอุณหภูมิแหล่งความร้อน อย่างไรก็ตาม ค่าที่ได้จะมีความแม่นยำต่ำในบางช่วงอุณหภูมิแหล่งความร้อนและชนิดสารทำงาน Nuntaphan et al. (2000) ได้ทำการศึกษาหาแบบจำลองคณิตศาสตร์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของเทอร์โมไซฟอนที่ทำงานในระดับอุณหภูมิแหล่งความร้อนปานกลาง (40°C-120°C) ของสารทำงาน 4 ชนิด ประกอบด้วย น้ำ เอทานอล เมทานอล และอะซิโตน โดยแบบจำลองคณิตศาสตร์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณส่วนทำระเหย (h_e) ได้พัฒนามาจากสมการการเดือดของ Rohsenow ดังสมการที่ (1.14) ซึ่งเขียนในรูปของฟังก์ชันของค่าตัวเลขเทย์เลอร์ (Nu) ค่าเรย์โนลด์สจำนวนเบอร์ (Re) และค่าพรันท์จำนวนเบอร์ (Pr) เมื่อ C_1 และ C_2 คือค่าคงที่ที่ได้จากการทำ Empirical modeling ของผลการทดสอบ

$$Nu = C_1 Re^{C_2} Pr^{0.4} \quad (1.14)$$

โดย

$$Nu = \frac{h_{ei}}{k_l} \left[\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_g)} \right]^{1/2} \quad (1.15)$$

$$\text{Re} = \frac{q_e}{L\mu_l} \left[\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_g)} \right]^{1/2} \quad (1.16)$$

$$\text{Pr} = \frac{C_p \mu_l}{k_l} \quad (1.17)$$

แบบจำลองคณิตศาสตร์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนส่วนควบแน่น (h_{ci}) ได้พัฒนา มาจากสมการความสัมพันธ์การควบแน่นของ Nusselt ดังสมการที่ (1.18) โดย C_3 และ C_4 คือค่าคงที่ จากผลการทดสอบ

$$h_{ci} = C_3 \left(\frac{\rho_l(\rho_l - \rho_v) g k^3 q_{latent} h_{ci} A_{ci}}{\mu_l q_{latent,e} \dot{Q}} \right)^{C_4} \quad (1.18)$$

โดย

$q_{latent,e}$ = ค่าความร้อนแฝงกลายเป็นไอบริเวณส่วนทำระเหย (J/kg)

$\dot{Q}$ = อัตราการถ่ายเทความร้อน (W)

และค่าคงที่ C_1, C_2, C_3 และ C_4 ของสารทำงานแต่ละชนิดแสดงในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 ค่าคงที่ของสารทำงานแต่ละชนิดในสมการที่ (1.14) และ (1.15)

Working Fluids	C_1	C_2	C_3	C_4
Water	41.27	0.37	0.94	0.245
Ethanol	14.64	0.15	0.94	0.275
Methanol	24.09	0.20	0.96	0.270
Acetone	27.44	0.22	0.95	0.280

ที่มา ; Nuntaphan et al. (2002)

นอกจากนี้ Shiraishi et al. (1987) ได้ทำการศึกษาเชิงพรรณ (สัดส่วนความยาวของส่วนทำ ระเหยต่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายในส่วนทำระเหย) และปริมาณสารทำงานที่มีต่อขีดจำกัดการทำงาน ของเทอร์โมไซฟอน ซึ่งขีดจำกัดที่พิจารณาคือ ขีดจำกัดการท่วมและขีดจำกัดการเดือด โดยในการ ทดสอบจะใช้ท่อเทอร์โมไซฟอนที่ทำจากท่อแก้ว และใช้สารทำงาน คือ R113 จากการทดลอง พบว่า ที่อัตราส่วนการเติมต่ำกว่า 25% จะเกิดขีดจำกัดการเดือด แสดงว่าถ้าอัตราส่วนการเติมน้อย

จะเกิดขีดจำกัดการเดือดก่อนขีดจำกัดการท่วม ดังนั้นเพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงขีดจำกัดการเดือดซึ่งเกิดได้ง่ายกว่าก็ควรใช้อัตราส่วนการเดิมที่มากกว่า 50% ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทดสอบที่อัตราการเดิมสารเท่ากับ 50% และ 100% เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงการเกิดขีดจำกัดการเดือด และ ธวัช พัยคุณรักษ์ (2540) นำเสนอตัวแปรไร้มิติที่เกี่ยวข้องกับการเดือดและผลกระทบต่อคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเทอร์โมไฮฟอนแบบเอียง พบว่าตัวเลขของคูทาทেলাดเซ และชนิดของสารทำงานมีผลต่ออัตราส่วนค่าการถ่ายเทความร้อนที่มุมเอียงใดๆ ต่อค่าที่แนวดิ่ง (Q/Q_0) โดยสารที่มีความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอต่ำจะให้ค่า (Q/Q_0) สูง

1.2.2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อเทอร์โมไฮฟอน

Dube et al. (1996) ได้ทำการศึกษาเครื่องอุ่นอากาศเพื่อทดสอบค่าประสิทธิภาพของเครื่องอุ่นอากาศแบบท่อความร้อน พบว่าประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายตัว คือ ชนิด ขนาด คุณสมบัติที่ใช้ทำท่อ ชนิด และปริมาณสารทำงานภายในท่อความร้อน รูปแบบการจัดวางของท่อ และปริมาณท่อที่ใช้ โดยทั่วไปจะนิยมใช้ทองแดงเป็นวัสดุในการผลิต ซึ่งท่อทองแดงจะให้ค่าประสิทธิภาพสูงกว่าเหล็กที่สภาวะเดียวกัน ทวีศักดิ์ ทวีวิทยาการ (2541) ศึกษาการออกแบบ สร้าง และทดสอบสมรรถนะเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบท่อความร้อน จัดวางท่อแบบวางเหลื่อมกันเป็น 5 แถวๆ ละ 16 ท่อ และให้น้ำป้อนไหลตามทางบังคับภายในส่วนควบแน่น ทำการทดสอบสมรรถนะโดยการแปรค่าอัตราความเร็วของน้ำป้อน ควคุมอุณหภูมิของน้ำป้อน พบว่าหากอัตราส่วนตัวเลขเรย์โนลด์ Re_c/Re_c มีค่าเพิ่มขึ้น ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ได้จากส่วนควบแน่นจะลดลง แต่ถ้าอุณหภูมิก๊าซร้อนสูงขึ้นค่าประสิทธิภาพก็จะสูงขึ้นด้วย และ ญัฐพล จันทรรอด (2543) ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ตัวแปรที่ใช้ทดสอบได้แก่ อัตราการไหล ชนิดสารทำงาน จำนวนแถว และอุณหภูมิของอากาศร้อน ในการไหลแบบสวนทางกันและไหลตามกัน เพื่อหาค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน อุณหภูมิขาเข้าและขาออกในกระแสนร้อนและกระแสนเย็น เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับแบบจำลอง พบว่า

- (1) อัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองเทียบกับค่าที่ได้จากแบบจำลอง มีค่าคลาดเคลื่อน $\pm 15\%$
- (2) อัตราการถ่ายเทความร้อนและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมในแต่ละแถวแตกต่างกัน
- (3) เมื่อเพิ่มอุณหภูมิกระแสนร้อน หรือเมื่อลดอุณหภูมิกระแสนเย็นลง หรือเมื่อเพิ่มอัตราการไหล อัตราการถ่ายเทความร้อนมากขึ้น

- (4) ทิศทางการไหลสวนทางกันจะได้อัตราการถ่ายเทความร้อนมากกว่าการไหลแบบขนานกัน

จากงานวิจัยข้างต้นเป็นการใช้สารทำงานในท่อเทอร์โมไฮฟอนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพียงชนิดเดียว แต่มีงานวิจัยของ Nuntaphan et al. (2002) ใช้สารทำงานสองชนิด เพื่อเป็นแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพของการแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไฮฟอน โดยได้ศึกษาการทำงานของสารทำงานสองชนิด คือ น้ำ และแอมโมเนีย ในช่วงอุณหภูมิต่ำ (75°C - 125°C) ในการไหลแบบสวนทางกันและไหลตามกัน โดยบางแถวใช้แอมโมเนียที่เหลือใช้น้ำเป็นสารทำงาน พบว่าในการไหลแบบสวนทางกันอัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และในช่วงอุณหภูมิสูง (350°C - 375°C) โดยใช้สารทำงานสองชนิด คือ น้ำ และ Dowtherm A ในบางแถวของท่อความร้อน พบว่าการไหลแบบสวนทางกันอัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น 15%-19% เทียบกับการใช้ Dowtherm A เพียงอย่างเดียว

1.2.3 ผลของคลื่นอุลตราโซนิกที่มีต่อคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อน

Oh et al.(2002) นำเสนอการสั่นของคลื่นอุลตราโซนิกที่มีผลต่อลักษณะการถ่ายเทความร้อนในกระบวนการเปลี่ยนสถานะของวัสดุประเภทเปลี่ยนสถานะไปมาระหว่างของเหลวและของแข็ง (Phase Change Material , PCM) ในการทดสอบจะทำการเปลี่ยนสถานะของขี้ผึ้งโดยตัวให้ความร้อนจะติดบริเวณด้านข้างภาชนะที่ใช้ใส่ขี้ผึ้ง ส่วนหัวอุลตราโซนิกถูกติดตั้งบริเวณด้านล่างของภาชนะ ผลการทดลองพบว่าคลื่นอุลตราโซนิกทำให้อนุภาคของสารเกิดการสั่นและมีการเคลื่อนที่ของอนุภาคมากขึ้น จึงส่งผลให้กระบวนการหลอมละลายของสารเร็วขึ้น 2.5 เท่าเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีการติดระบบอุลตราโซนิก นอกจากนี้อุณหภูมิและตัวเลข Nusselt ที่เวลาผ่านไปนานๆจะเป็นตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อกระบวนการเปลี่ยนสถานะของ PCM ขณะมีการสั่นของคลื่นอุลตราโซนิก ต่อมา Kim et al. (2004) ศึกษาการสั่นของคลื่นอุลตราโซนิกในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนของการเดือดแบบแอ่งและการพาความร้อนตามธรรมชาติ ในการทดสอบใช้เส้นลวดที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางแตกต่างกันต่อกับวงจรไฟฟ้าเพื่อเป็นตัวให้ความร้อนกับน้ำ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1.19)

$$h = \frac{q'}{T_s - T_o} \quad (1.19)$$

โดย

q' = ฟลักซ์ความร้อน (W/m^2)

T_s = อุณหภูมิผิวของเส้นลวดด้านนอกท่อ ($^{\circ}\text{C}$)

T_o = อุณหภูมิของเหลวในแอ่ง (°C)

พบว่า การสั่นเนื่องจากคลื่นอัลตราโซนิคจะเกิดฟองไอในสารอย่างรวดเร็ว โดยอัตราส่วนการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนหาจากสมการที่ (1.20)

$$\eta = \frac{h_{ul} - h_{noul}}{h_{noul}} \quad (1.20)$$

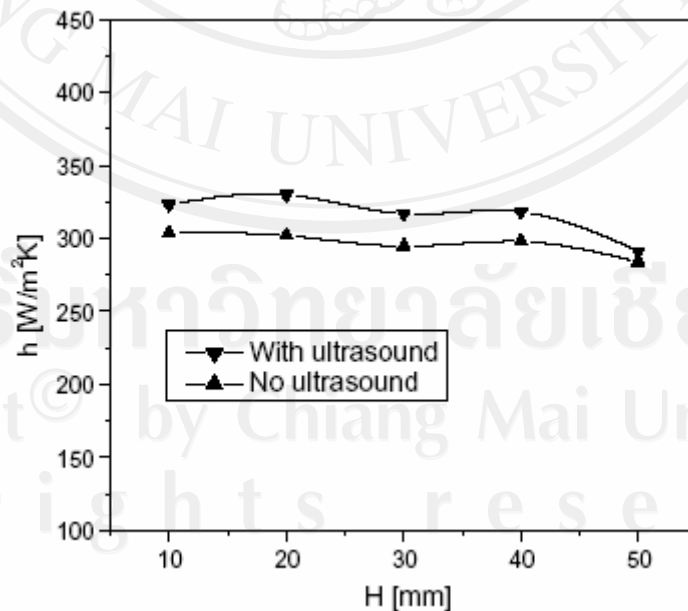
โดย

η = อัตราส่วนการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน

h_{ul} = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนขณะติดคลื่นอัลตราโซนิค (W/m².K)

h_{noul} = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนไม่มีคลื่นอัลตราโซนิค (W/m².K)

กรณีการเดือดแบบอ้อมตัวคลื่นอัลตราโซนิคสามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนได้ โดยอัตราส่วนการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนสูงสุดพบบริเวณที่เกิดการพาความร้อนตามธรรมชาติ ซึ่งเป็นบริเวณที่ได้รับผลจากการสั่นของคลื่นอัลตราโซนิค โดยทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของฟองไอในของเหลวอย่างรุนแรง การเพิ่มขึ้นของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแสดงดังรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในกรณีที่มีการใช้และไม่ใช้คลื่นอัลตราโซนิค (Kim et al., 2004)

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้คลื่นอุลตราโซนิกเพื่อเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนในหลายแง่มุม จะเห็นว่าการนำคลื่นอุลตราโซนิกมาช่วยเสริมการทำงานของท่อความร้อนมีศักยภาพสูงมาก และจำเป็นต้องศึกษาถึงผลกระทบของการจัดวางท่อความร้อนตลอดจนอัตราส่วนการเติม เพื่อให้สามารถใช้คลื่นอุลตราโซนิกกับการแลกเปลี่ยนความร้อนที่เปล่งกลับมาใช้ใหม่ทำได้กว้างขวางยิ่งขึ้น

1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

วิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของการเดือด (h_c) ภายในท่อความร้อนเทอร์โมไซฟอน กรณีใช้ร่วมกับระบบอุลตราโซนิก ทั้งในกรณีของท่อที่วางในแนวดิ่งและแนวเอียงที่สารถทำงานต่างชนิด และอัตราส่วนการเติมต่างกัน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

- 1.4.1 ข้อมูลผลกระทบจากการใช้คลื่นอุลตราโซนิกกับท่อความร้อนเทอร์โมไซฟอน
- 1.4.2 ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของการเดือด ภายในท่อเทอร์โมไซฟอนส่วนทำระเหย กรณีใช้ร่วมกับระบบอุลตราโซนิก
- 1.4.3 สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบดึงความร้อนที่กลับมาใช้ประโยชน์ได้

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

การศึกษาการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนเทอร์โมไซฟอนร่วมกับเครื่องกำเนิดอุลตราโซนิก มีขอบเขตของการวิจัย ดังนี้

- 1.5.1 ช่วงความถี่ของระบบอุลตราโซนิกที่ใช้ในกระบวนการทดสอบ คือ 8 kHz - 14 kHz
 - 1.5.2 สารทำงานที่ใช้คือ น้ำ อะซิโตน และ เมทานอล
 - 1.5.3 เติมสารทำงานที่ร้อยละ 50 และ 100 ของส่วนทำระเหย
 - 1.5.4 ช่วงอุณหภูมิที่ทำการทดลองคือ 50 ถึง 80 องศาเซลเซียส
 - 1.5.5 เทอร์โมไซฟอนทำมาจากท่อทองแดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 27.75 mm หนา 1.3 mm ยาว 1.2 m ส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นยาว 0.5 m ส่วนอะเดียเบติกยาว 0.20 m
 - 1.5.6 แหล่งความร้อนจากขดลวดไฟฟ้าที่อัตราจ่าย 6 kW
- มุมเอียงที่ทดสอบคือ 18, 30, 45, 60 75 และ 90 องศาจากแนวระดับ