

บทที่ 8

เปรียบเทียบผลการทดลองและแบบจำลองเชิงทฤษฎี

ในบทนี้เราจะมาดูว่า แบบจำลองเชิงทฤษฎีที่เสนอสามารถทำนายลักษณะอุณหภูมิของฮีทไปป์ได้ดีหรือไม่ โดยแสดงตัวอย่างการคำนวณ นอกจากนี้ยังได้สาธิตตัวอย่างการคำนวณที่จำกัดการถ่ายเทความร้อนของฮีทไปป์ประเภทต่าง ๆ เพื่ออธิบายผลการทดลอง

8.1 ตัวอย่างการคำนวณโดยใช้แบบจำลองเชิงทฤษฎี

8.1.1 ขั้นตอนการคำนวณ

ในที่นี้ การคำนวณจะเริ่มที่ปลายด้านช่วงการควบแน่นดังนี้

ก. คำนวณค่า $h_{f,c}$ จากสมการ (6.31) ดังนี้

1. หาค่า Re_f จากสมการ (6.30)

2. หาค่า Pr_f จากสมการ (6.29)

แล้วแทนค่า Re_f และ Pr_f ลงในสมการ (6.31) เมื่อได้ค่า $h_{f,c}$ แล้วก็คำนวณหาอุณหภูมิผิวท่อที่ช่วงการควบแน่น, $T_{p,c}$ ได้ จากนั้นก็คำนวณอุณหภูมิบริเวณต่าง ๆ ตลอดแนวความยาวของฮีทไปป์ โดยอาศัยสมการ (6.21), (6.22), (6.23), (6.24), (6.25) และสมการ (6.32) ได้ดังนี้

ข. ผลต่างของอุณหภูมิต่างกันระหว่างผิวนอกและในของท่อ

ค. อุณหภูมิของวิกค์ที่อิมตัวด้วยของเหลวที่ช่วงการควบแน่น

ง. ผลต่างของอุณหภูมิในแนวแกนที่ไอไหลผ่าน

จ. อุณหภูมิผิวท่อที่ช่วงการระเหย

8.1.2 ผลการคำนวณ

ข้อมูลเกี่ยวกับฮีทไปป์ B

วัสดุที่ใช้ทำตัวท่อ	ทองแดง	
ความยาวของท่อฮีทไปป์	300	มิลลิเมตร
เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของท่อ	8	มิลลิเมตร
เส้นผ่าศูนย์กลางภายในของท่อ	6.4	มิลลิเมตร
เส้นผ่าศูนย์กลางที่ไอไหลผ่าน	5.6	มิลลิเมตร
ความหนาของท่อ	0.8	มิลลิเมตร
วัสดุที่ใช้ทำวิกค์	ทองเหลือง	
จำนวนชั้นของวิกค์	3	ชั้น
เมช (mesh) ของวิกค์	150	นิ้ว ⁻¹

รูปร่างของวิกค์	แบบตาข่าย	
เส้นผ่าศูนย์กลางของลวด # 150	0.066	มิลลิ เมตร
ความหนาของวิกค์	0.396	มิลลิ เมตร
ความพรุนของวิกค์ (การคำนวณ)	0.678	
ความยาวช่วงการควบแน่น	110	มิลลิ เมตร
ความยาวช่วงคั่นกลาง	100	มิลลิ เมตร
ความยาวช่วงการระเหย	90	มิลลิ เมตร
ของเหลวใช้งาน	น้ำ	
ปริมาณ	1.47	กรัม
ตำแหน่ง เทอร์โมคัป เบิ้ล	7	
มุม เอียงของฮีทไปป์	10	องศา
(ช่วงการระเหยอยู่เหนือช่วงการควบแน่น)		

จากผลการทดลอง กรณีที่อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ให้ออกมา 3.4 W
อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำ 1.50 kg/sec - m² อุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างผิวท่อที่ช่วง
การควบแน่นกับแหล่งรับความร้อนภายนอก(น้ำ) 35°C อุณหภูมิของน้ำที่ไหลผ่านท่อฮีทไปป์
 $T_f = 33.55^\circ\text{C}$

คุณสมบัติของของเหลวใช้งาน(น้ำ)ที่ 35°C, Appendix 1	
ความหนาแน่นของของเหลว ρ_1 (kg/m ³)	993.8
ความนำความร้อนของของเหลว k_1 (W/m - K)	0.626
ความหนืดของของเหลว μ_1 (kg/m - sec)	7.38×10^{-4}

การคำนวณ

1. หาค่า Re_f จากสมการ(6.30)

$$Re_f = \frac{(v_{\max, f} \rho_f) d_o}{\mu_f} = 16.3$$

2. หาค่า Pr_f จากสมการ(6.29)

ความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ $C_{p, f} = 1 \text{ cal/gm}^\circ\text{C} (4184 \text{ J/kg} - \text{K})$

$$Pr_f = \frac{\mu_f C_{p, f}}{k_f} = 4.93$$

จากตาราง 10 - 5 ,Chemical Engineerings' Handbook
by Robert H.Perry and Cecil H.Chilton, Fifth Edition, McGraw-Hill
Kokakusha Ltd., 1973, pp. 10-13

ที่ $4 < Re < 40, Pr > 0.6$

$$C = 0.911, \quad m = 0.385$$

3. ทาค่า $h_{f,c}$
จากสมการ(6.31) เขียนสมการเป็น

$$\begin{aligned} h_{f,c} &= 0.911 \left(\frac{k_f}{d_o} \right) (Re_f)^{0.385} (Pr_f)^{1/3} \\ &= 355.40 \text{ W/m}^2 \text{ - K} \end{aligned}$$

4. อุณหภูมิผิวท่อในช่วงการควบแน่น, $T_{p,c}$
พื้นที่ผิวสัมผัส $A_c = \pi d_o L_c = \pi (8 \times 10^{-3})(0.11)$

$$= 2.76 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$T_{p,c} = T_f + \frac{Q_{out}}{A_c h_{f,c}}$$

$$= 306.70 + 3.4 / (2.76 \times 10^{-3})(355.40)$$

$$= 310.17 \text{ K}(37.02^\circ \text{ C})$$

เมื่อได้ค่า $T_{p,c}$ สามารถคำนวณหาอุณหภูมิบริเวณต่าง ๆ ของท่อ
ฮีทไปป์ได้ ในที่นี้ การคำนวณค่าความต้านทานการถ่ายเทความร้อนขึ้นกับพื้นที่หน้าตัด
ของท่อฮีทไปป์, A_p และใช้สมการ(6.32) หาผลลดอุณหภูมิ

$$\Delta T = \frac{QR}{A_p} \quad (6.32)$$

$$\text{พื้นที่หน้าตัดของท่อ } A_p = \frac{\pi}{4} d_o^2 = 5.03 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

5. ความต้านทานการถ่ายเทความร้อนของผนังท่อที่ช่วงการควบแน่น
สมการ (6.25)

$$\begin{aligned} R_{p,c} &= \frac{r_{o,p}}{2L k_{c,p}} \\ &= 3.69 \times 10^{-8} \quad \text{m}^2 - \text{K/W} \end{aligned}$$

ผลลตอุณหภูมิต $\Delta T_{p,c} = \frac{Q R_{p,c}}{A_p} = 0.0025 \text{ K}$

อุณหภูมิตที่ผิวสัมผัสระหว่างวิกค์และผนังท่อที่ช่วงการควบแน่น

$$\begin{aligned} T_{pw,c} &= 310.17 + 0.0025 \\ &= 310.17\text{K} \quad (37.02^\circ\text{C}) \end{aligned}$$

6. ความต้านทานการถ่ายเทความร้อนของวิกค์ที่อิมตัวที่ช่วงการควบแน่น
สมการ (6.24)

$$R_{w,c} = \frac{r_{o,w}^2}{2L r_{i,c} k_{e,c}}$$

ความนำความร้อนเชิงประสิทธิผลที่ช่วงการควบแน่น

$$\begin{aligned} k_{e,c} &= \frac{k_l (k_l + k_w) - (1 - \epsilon)(k_l - k_w)}{(k_l + k_w) + (1 - \epsilon)(k_l - k_w)} \\ &= 1.21 \quad \text{W/m} - \text{K} \end{aligned}$$

$$R_{w,c} = 7.44 \times 10^{-6} \quad \text{m}^2 - \text{K/W}$$

ผลลตอุณหภูมิต $\Delta T_{w,c} = 0.50 \text{ K}$

อุณหภูมิตไอที่ช่วงการควบแน่น

$$\begin{aligned} T_{v,c} &= 310.17 + 0.50 \\ &= 310.67\text{K} \quad (37.52^\circ\text{C}) \end{aligned}$$

7. ความต้านทานการถ่ายเทความร้อน เนื่องจากไอไหลผ่าน
สมการ(6.23)

$$F_v = \frac{(f_v Re_v) \mu_v}{2A_v r_{h,v}^2 \rho_v \lambda}$$

พื้นที่หน้าตัดที่ไอไหลผ่าน $A_v = \frac{\pi}{4} d_v^2 = 2.46 \times 10^{-5} \text{ m}^2$

รัศมีเชิงไฮดรอลิกที่ไอไหลผ่าน $r_{h,v} = \frac{d_v}{2} = 2.8 \times 10^{-3} \text{ m}$

ความหนืดของไอที่ 37.52°C $\mu_v = 1.03 \times 10^{-5} \text{ kg/m -sec}$

ความร้อนแฝงการระเหยที่ 37.52°C $\lambda = 2.408 \times 10^6 \text{ J/kg}$

ความหนาแน่นของไอที่ 37.52°C $\rho_v = 0.044 \text{ kg/m}^3$

$$(f_v Re_v) = 16$$

$$F_v = 4.03 (\text{N/m}^2) / (\text{W} - \text{m})$$

$$R_v = \frac{r_{0v}^2 F_v \left(\frac{1}{6} L_c + L_a + \frac{1}{6} L_e \right) T_v}{\rho_v \lambda J}$$

$$= 7.90 \times 10^{-8} \text{ m}^2 - \text{K/W}$$

ผลลดอุณหภูมิ $\Delta T_v = 0.0053 \text{ K}$

อุณหภูมิไอในช่วงการระเหย

$$T_{v,e} = 310.67 + 0.0053$$

$$= 310.67 \text{ K } (37.52^\circ\text{C})$$

8. ความต้านทานการถ่ายเทความร้อนของวิกต์ที่อิมิต์ที่ช่วงการระเหย

(สมการ 6.22)

$$\begin{aligned}
 R_{w,e} &= r_{o,w}^2 / 2L_e r_i k_{e,e} \\
 k_{e,e} &\approx k_{e,c} \\
 R_{w,e} &= R_{w,c} \left(\frac{L_c}{L_e} \right) \\
 &= 9.09 \times 10^{-6} \text{ m}^2 - \text{K/W}
 \end{aligned}$$

ผลลดอุณหภูมิ $\Delta T_{w,e} = 0.61 \text{ K}$

อุณหภูมิที่ผิวสัมผัสระหว่างผนังท่อและวิกต์ที่ช่วงการระเหย

$$\begin{aligned}
 T_{pw,e} &= 310.67 + 0.61 \\
 &= 311.28 \text{ K } (38.13^\circ \text{C})
 \end{aligned}$$

9. ความต้านทานการถ่ายเทความร้อนของผนังท่อที่ช่วงการระเหย

(สมการ 6.21)

$$\begin{aligned}
 R_{p,e} &= r_{o,p} / 2L_e k_p \\
 &= R_{p,c} \left(\frac{L_c}{L_e} \right) \\
 &= 4.51 \times 10^{-8} \text{ m}^2 - \text{K/W}
 \end{aligned}$$

ผลลดอุณหภูมิ $\Delta T_{p,e} = 0.0031 \text{ K}$

อุณหภูมิผิวท่อที่ช่วงการระเหย

$$\begin{aligned}
 T_{p,e} &= 311.28 + 0.0031 \\
 &= 311.28 \text{ K } (38.13^\circ \text{C})
 \end{aligned}$$

ทำนองเดียวกัน กรณีอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ให้ออกมา 6 W
อัตราการไหลของน้ำเชิงมวล 1.50 kg/sec - m² อุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างผิวท่อที่ช่วง
การควบแน่นและแหล่งรับความร้อนภายนอก (น้ำ) 35.3⁰C อุณหภูมิของน้ำที่ไหลผ่าน
ท่อฮีทไปป์ 33.45⁰C

ผลการเปรียบเทียบแบบจำลองเชิงทฤษฎีและผลการทดลองดังแสดง
ในรูปที่ 8.1 และรูปที่(8.3) สำหรับรูปที่(8.3) ใช้อุณหภูมิผิวท่อที่ช่วงการควบแน่น
 $T_{p,c} = 36.4^{\circ}\text{C}$ และ 37.0°C ที่ได้จากการทดลอง เป็นจุดเริ่มต้น (ขั้นตอน
ที่ 4) การคำนวณ

8:2 การปรับปรุงแบบจำลองเชิงทฤษฎี

สมการ(6.22)และ(6.24) ที่ใช้คำนวณค่าความต้านทานการถ่ายเท
ความร้อนของวิกค์ จะให้ผลที่ถูกต้องก็ต่อเมื่อของเหลวใช้งานเป็นโลหะเหลว(liquid
metal) เท่านั้น⁽⁸⁾ (Yoshio,Ikeda.,et.al. Heat Pipe Application for
Users, Gakkencha, Tokyo, 1981) ซึ่งฮีทไปป์ที่ใช้ในการทดลองของเหลวใช้งาน
ไม่ใช่โลหะเหลว แต่เป็นน้ำ ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงได้เสนอการใช้ตัวคูณชดเชย m เพื่อ
หาค่า $R_{w,e}$ และ $R_{w,c}$ ที่ถูกต้อง โดยอาศัยข้อมูลจากการทดลองเพียงเงื่อนไขเดียว
สมมุติฐานที่ใช้คือ

$$R_{w,e}^* = (R_{w,e})_{\text{สมการ(6.22)}} \times m \quad (8.1)$$

$$R_{w,c}^* = (R_{w,c})_{\text{สมการ(6.24)}} \times m \quad (8.2)$$

โดยที่ $R_{w,e}^*$ = ความต้านทานการถ่ายเทความร้อนของวิกค์ที่ปรับค่าแล้ว
ที่ช่วงการระเหย
 $R_{w,c}^*$ = ความต้านทานการถ่ายเทความร้อนของวิกค์ที่ปรับค่าแล้ว
ที่ช่วงการระเหย
m = ตัวคูณชดเชยค่า ซึ่งไม่ขึ้นกับเงื่อนไขการทำงานของฮีทไปป์
แต่ขึ้นกับลักษณะเฉพาะของฮีทไปป์เท่านั้น

ในการคำนวณหาค่า m ใช้วิธี trial - error เพื่อให้ได้ค่า
 $R_{w,e}^*$ และ $R_{w,c}^*$ ที่ทำให้ $T_{p,e}$ ทฤษฎี กับ $T_{p,e}$ การทดลอง เท่ากัน เพื่อ
พิจารณาความเป็นไปได้ของวิธีการที่เสนอมานี้ เราจะมาลองคำนวณหาค่า m

กรณี 3.4 วัดแล้วใช้ค่า m ที่ได้กับกรณี 6 วัด ผลที่ได้ดังแสดงในรูปที่(8.2)

1. จากการคำนวณหาค่า m ของกรณีแรก เมื่อ $m = 1.25$
 $R_{w,c}^* = 9.3 \times 10^{-6} \text{ m}^2 - \text{K/W}$ และ $R_{w,e}^* = 1.14 \times 10^{-5} \text{ m}^2 - \text{K/W}$
 อุณหภูมิผิวท่อที่ช่วงการระเหย $T_{p,e} = T_{p,e} = 38.4 \text{ } ^\circ\text{C}$
 ทฤษฎี การทดลอง

2. ใช้ค่า $m = 1.25$ กับกรณี 6 วัด พบว่า $R_{w,c}^* = 9.3 \times 10^{-6} \text{ m}^2 - \text{K/W}$ และ $R_{w,e}^* = 1.14 \times 10^{-5} \text{ m}^2 - \text{K/W}$ อุณหภูมิผิวท่อที่ช่วงการระเหย $T_{p,e} = 41.54 \text{ } ^\circ\text{C}$, $T_{p,e} = 40.6 \text{ } ^\circ\text{C}$ มีผลต่าง $\pm 2.3\%$
 ทฤษฎี การทดลอง

ในรูป(8.4) ก็เช่นเดียวกันใช้ค่า $m = 1.25$

อนึ่ง ถ้าเราตั้งสมมุติฐานความนำความร้อนของวิกค์และของของเหลวใช้งานวางตัวอย่างอนุกรมหรือตัวอย่างขนาน จะพบว่า

ก. ถ้าวิกค์และของเหลววางตัวอย่างอนุกรม (wick and liquid in series)

$$\text{ความนำความร้อนเชิงประสิทธิผล } k_e = \frac{k_l k_w}{\epsilon k_w + k_l (1 - \epsilon)}$$

$$= 0.92 \text{ W/m - K}$$

ข. ถ้าวิกค์และของเหลววางตัวอย่างขนาน (wick and liquid in parallels)

$$\text{ความนำความร้อนเชิงประสิทธิผล, } k_e = \epsilon k_l + (1 - \epsilon)k_w$$

$$= 36.8 \text{ W/m - K}$$

มีค่าต่างกันกว้างมาก อย่างไรก็ตามการวางตัวของวิกค์และของเหลวจะไม่ใช้แบบอนุกรม 100% หรือแบบขนาน 100% ดังนั้นจึงคาดว่าได้ว่า ค่าที่ถูกต้องจะต้องอยู่ระหว่าง 2 ค่าดังกล่าว

$$k_e^* = (1.21)(1.25)$$

$$= 1.51 \text{ W/m - K}$$

นั่นคือ $k_{e \text{ series}} < k_e^* < k_{e \text{ parallel}}$

อยู่ภายในขอบเขต แสดงว่า k_e^* ที่ปรับค่าใช้ได้

ดังนั้นอาจสรุปได้ว่า การใช้ตัวคูณชดเชย m ที่เสนอข้างต้นใช้งานได้แน่นอนทีเดียว วิธีการที่เสนอนี้ ควรมีการเปรียบเทียบ (ทดสอบ) กับข้อมูลที่มีมากกว่านี้

8.3 การคำนวณขีดจำกัดการถ่ายเทความร้อนของฮีทไปป์

ขีดจำกัดการถ่ายเทความร้อนของฮีทไปป์มีดังนี้

1. ขีดจำกัดเนื่องจากท่อรูเข็มหรือวิกค์ : $Q_{c,max}$
2. ขีดจำกัดเนื่องจากความเร็วเสียง : $Q_{s,max}$
3. ขีดจำกัดเนื่องจากของเหลวหลุดลอยตามไอ : $Q_{e,max}$
4. ขีดจำกัดเนื่องจากการเดือด : $Q_{b,max}$

การคำนวณต่อไปนี้ ใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองในการวิจัยนี้ พิจารณา รูปที่ 8.5 จะเห็นว่าเกิดการแห้งของวิกค์ (dry - out) ที่ฟลักซ์ความร้อน 17.4 วัตต์ เนื่องจาก พลังงานที่ป้อนมีมากเกินไปเกินความสามารถของวิกค์ที่จะส่งของเหลวควบแน่นกลับไปยังช่วงการระเหย เป็นผลให้การหมุนเวียนของของเหลวและไอไม่ต่อเนื่อง และทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของอุณหภูมิในช่วงการระเหย เมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณอื่น

8.3.1 การคำนวณ

อ่านค่าจากรูปที่ 8.5 อุณหภูมิที่เกิดการแห้งของวิกค์ 44.2°C

คุณสมบัติของน้ำที่ 44.2°C Appendix 1		
ความร้อนแฝงการระเหย	λ (J/kg)	2.393×10^6
ความหนาแน่นของของเหลว	ρ_l (kg/m^3)	990.3
ความหนาแน่นของไอ	ρ_v (kg/m^3)	0.069
ความนำความร้อนของของเหลว	k_l ($\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$)	0.634
ความหนืดของของเหลว	μ_l ($\text{kg}/\text{m} \cdot \text{sec}$)	6.12×10^{-4}
ความหนืดของไอ	μ_v ($\text{kg}/\text{m} \cdot \text{sec}$)	1.06×10^{-5}
ความตึงผิว	σ (N/m)	6.89×10^{-2}

ความนำความร้อนของตัวท่อ (ทองแดง) k_p ($\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$) 394

ความนำความร้อนของวิกค์ (ทองเหลือง) k_w ($\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$) 113

1. ขีดจำกัดการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากท่อรูเข็มความดันสูงสุดเชิงประสิทธิผล, P_{pm}

$$\text{รัศมีท่อรูเข็มเชิงประสิทธิผล, } r_c = \frac{1}{2N}$$

$$\text{จำนวนเส้นลวด } N = 5.91 \times 10^3 \text{ m}^{-1}$$

$$\begin{aligned} \text{ความดันสูงสุดท่อรูเข็ม } P_{cm} &= \frac{2\sigma}{r_c} = (4)(6.89 \times 10^{-2})(5.91 \times 10^3) \\ &= 1628.80 \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ความดันไฮโดรสแตติกปกติ, } \Delta P_L &= \rho_l g d_v \cos \psi \\ &= (990.3)(9.81)(5.6 \times 10^{-3}) \cos 10 \\ &= 53.58 \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ความดันไฮโดรสแตติกตามแนวแกน} &= \rho_l g L_t \sin \psi \\ &= (990.3)(9.81)(0.3) \sin 10 \\ &= 506.09 \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{pm} &= P_{cm} - \Delta P_L - \rho_l g L_t \sin \psi \\ &= 1069.13 \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดของของเหลว, F_1

$$F_1 = \mu_l / K A_w \lambda \rho_l$$

ค่า Permeability ของวิกค์ จากตารางที่ 3.2

$$\begin{aligned} K &= \epsilon^3 d^2 / 122 (1 - \epsilon)^2 \\ &= \frac{(0.678)^3 (6.604 \times 10^{-5})^2}{122 (1 - 0.678)^2} \\ &= 1.07 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \end{aligned}$$

พื้นที่หน้าตัดของวิกค์

$$A_w = \frac{\pi}{4} (d_i^2 - d_v^2)$$

$$= 7.54 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$F_l = \frac{6.12 \times 10^{-4}}{(1.07 \times 10^{-10})(7.54 \times 10^{-6})(990.3)(2.393 \times 10^6)}$$

$$= 320.10 \text{ (N/m}^2\text{) / (W - m)}$$

ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน เนื่องจากการไหลของไอ, F_v

$$\text{รัศมีเชิงไฮดรอลิกที่ไอไหลผ่าน, } r_{h,v} = d_v/2 = 2.8 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$\text{พื้นที่หน้าตัดที่ไอไหลผ่าน, } A_v = \frac{\pi}{4} d_v^2 = 2.46 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$(f_v Re_v) = 16$$

$$F_v = \frac{(f_v Re_v) \mu_v}{2 A_v r_{h,v}^2 \rho_v \lambda}$$

$$= 2.66 \text{ (N/m}^2\text{) / (W - m)}$$

$$\text{ขีดจำกัดเนื่องจากท่อรูเข็ม, } Q_{c,max} = \frac{(QL)_{c,max}}{\frac{1}{2} L_c + L_a + \frac{1}{2} L_e}$$

$$(QL)_{c,max} = \frac{P_{pm}}{F_l + F_v}$$

$$= 3.31 \text{ W - m}$$

$$Q_{c,max} = 16.6 \text{ W}$$

2. ขีดจำกัดการถ่ายเทความร้อน เนื่องจากความเร็วเสียง

$$\text{อัตราส่วนความร้อนจำเพาะ } \gamma_v = 4/3 = 1.33$$

ค่าคงที่สากลของก๊าซ $\bar{R} = 8.314 \cdot 10^3 \text{ J/kg} \cdot \text{mol} \cdot \text{K}$

น้ำหนักโมเลกุลของน้ำ $M = 18$

ค่าคงที่ของไอ $R_v = \bar{R}/M = 461.89 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$

อุณหภูมิของไอ $T_v = 315.25 \text{ K}$

$$Q_{s,\max} = A_v p_v \lambda \left[\frac{\gamma_v R_v T_v}{2(\gamma_v + 1)} \right]^{1/2}$$

$$= 828 \text{ W}$$

3. ขีดจำกัดการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากของเหลวหลุดลอยตามไอ

รัศมีเชิงไฮดรอลิกของรูที่ผิววิกต์, $r_{h,s} = \frac{1}{2N} - \frac{d}{2} = 5.16 \times 10^{-5} \text{ m}$

$$Q_{e,\max} = A_v \lambda \left[\frac{\sigma \rho_v}{2 r_{h,s}} \right]^{1/2}$$

$$= 400 \text{ W}$$

4. ขีดจำกัดการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือด

ความนำความร้อนของวิกต์ที่อิมตัวเชิงประสิทธิผล, k_e

$$k_e = \frac{k_l (k_l + k_w) - (1 - \epsilon)(k_l - k_w)}{(k_l + k_w) + (1 - \epsilon)(k_l - k_w)}$$

$$= 1.22 \text{ W/m} \cdot \text{K}$$

รัศมีฟองการเดือด $r_n = 2.54 \times 10^{-7} \text{ m}$

ความดันวิกฤติ $\frac{2\sigma}{r_n} = 5.43 \times 10^5 \text{ N/m}^2$

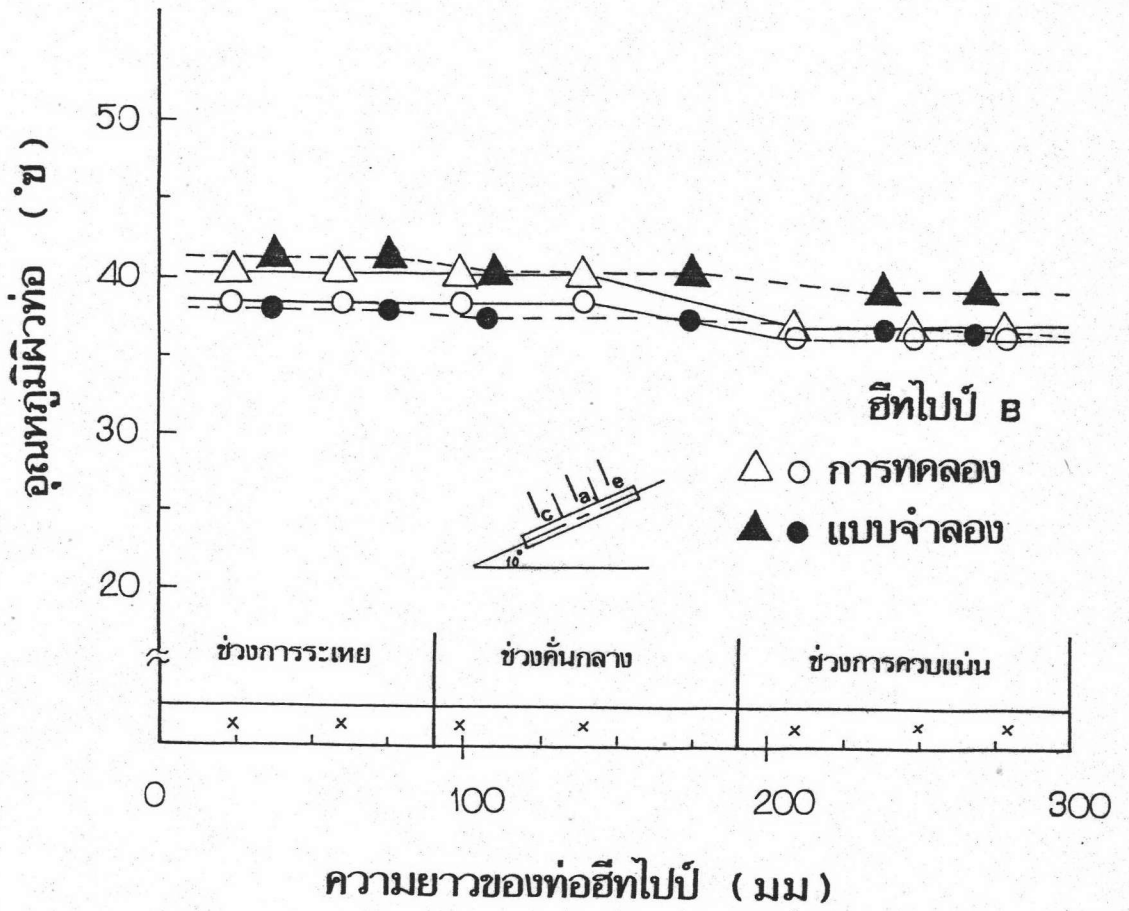
$$\begin{aligned}
 Q_{b,max} &= \frac{2 \pi L k_e T_e}{\lambda \rho_v \ln(r_i/r_v)} \left(\frac{2\theta}{r_n} - P_c \right) \\
 &= \frac{2 \pi L k_e T_e}{\lambda \rho_v \ln(r_i/r_v)} \left(\frac{2\theta}{r_n} \right) \\
 &= \frac{2 \pi (.09)(1.22)(315.25)}{2.393 \times 10^6 (.069) \ln(3.2/2.8)} \quad (5.43 \times 10^5) \\
 &= 5356 \text{ W}
 \end{aligned}$$

สรุป ขีดจำกัดการถ่ายเทความร้อนของฮีทไปป์ B ที่อุณหภูมิใช้งาน 44.2°C มุม $\psi = 10^\circ$ (ช่วงการระเหยอยู่เหนือช่วงการควบแน่น)

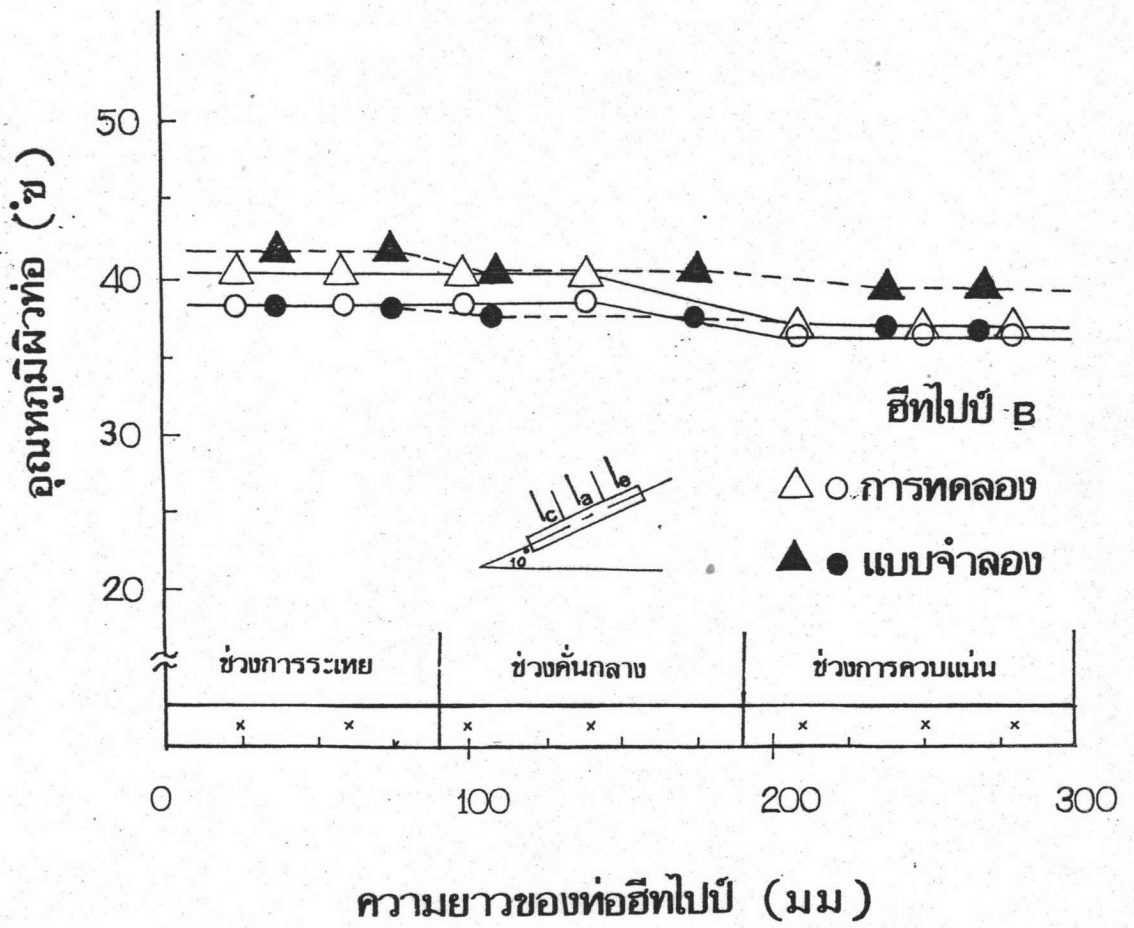
ขีดจำกัด เนื่องจากท่อรูเข็ม	16.6	W
ขีดจำกัด เนื่องจากความเร็วเสียง	828	W
ขีดจำกัด เนื่องจากของเหลวหลุดลอยตามไอ	400	W
ขีดจำกัด เนื่องจากการเดือด	5356	W

8.3.2 การเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณ

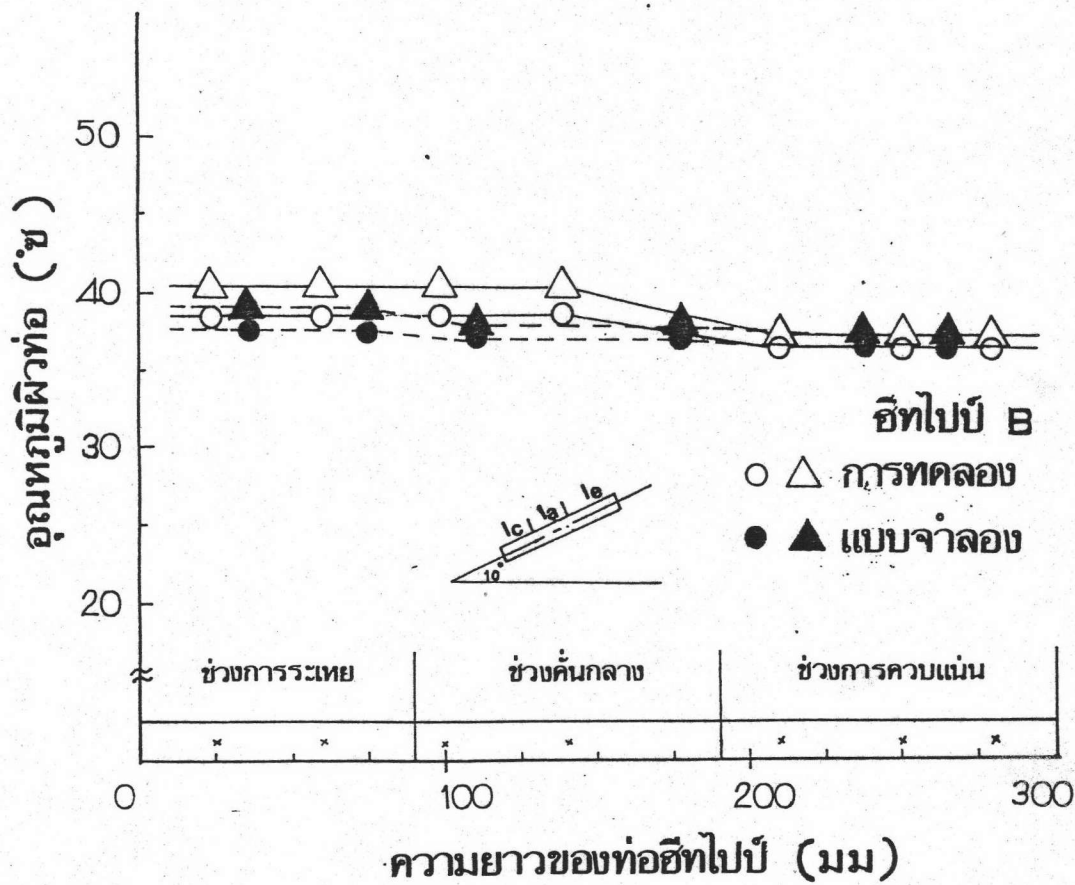
จากผลการคำนวณขีดจำกัดการถ่ายเทความร้อนของฮีทไปป์ ที่อุณหภูมิ 44.2°C , $\psi = 10^\circ$ จะเห็นได้ว่า ขีดจำกัด เนื่องจากท่อรูเข็มหรือวิกค์ ให้ค่าต่ำสุดและมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองที่ 17.4 วัตต์ มีค่าต่างกัน $\pm 5\%$ ดังนั้นสรุปได้ว่า ขีดจำกัดเนื่องจากท่อรูเข็มหรือวิกค์ เป็นค่าที่กำหนดขอบเขตการใช้งานของฮีทไปป์ นั่นคือ ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูงสุด ได้ประมาณ 17 วัตต์ ที่สภาวะการใช้งานที่อุณหภูมิ 44.2°C มุมที่ฮีทไปป์วางจากแนวระดับ $\psi = 10$ องศา โดยที่ช่วงการระเหยอยู่เหนือช่วงการควบแน่น ผลการทดลองมีดังแสดงในรูปที่ 8.5



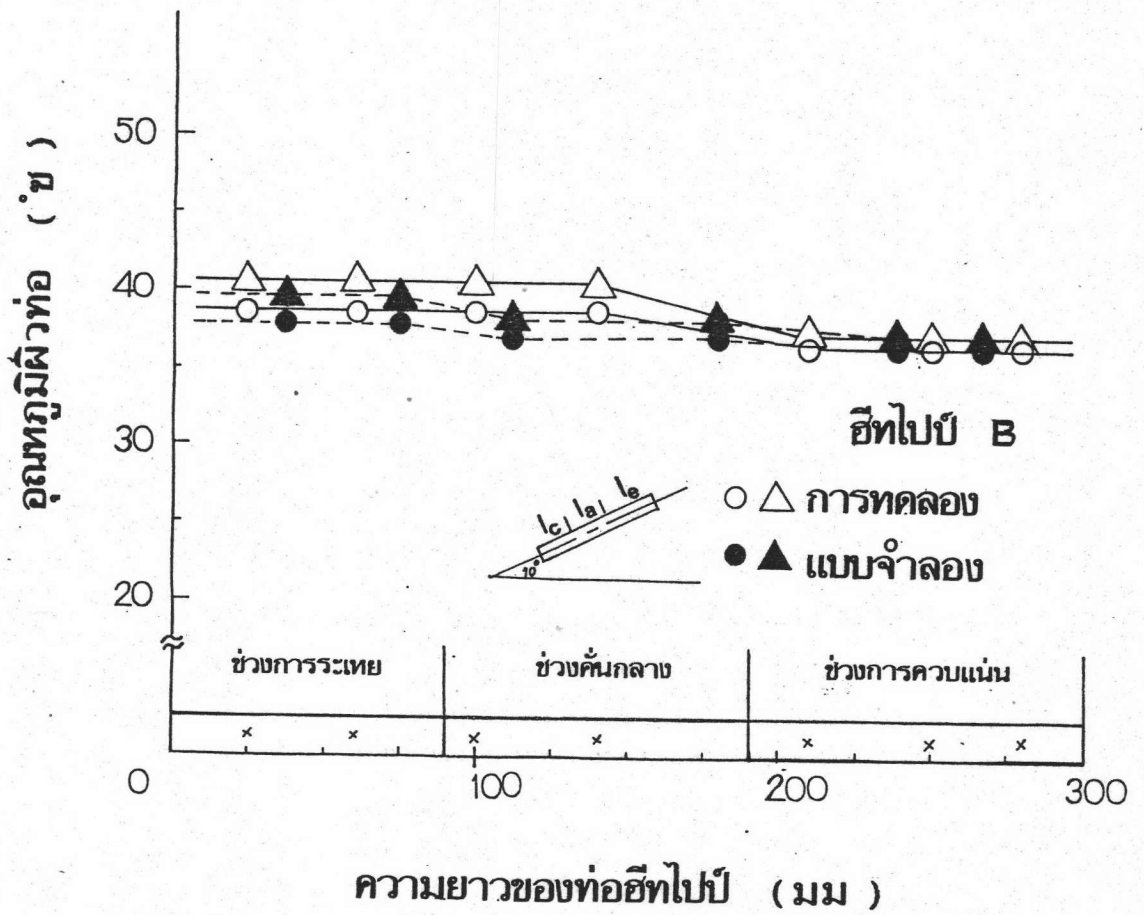
รูปที่ 8.1 เปรียบเทียบผลการทดลองและทฤษฎี



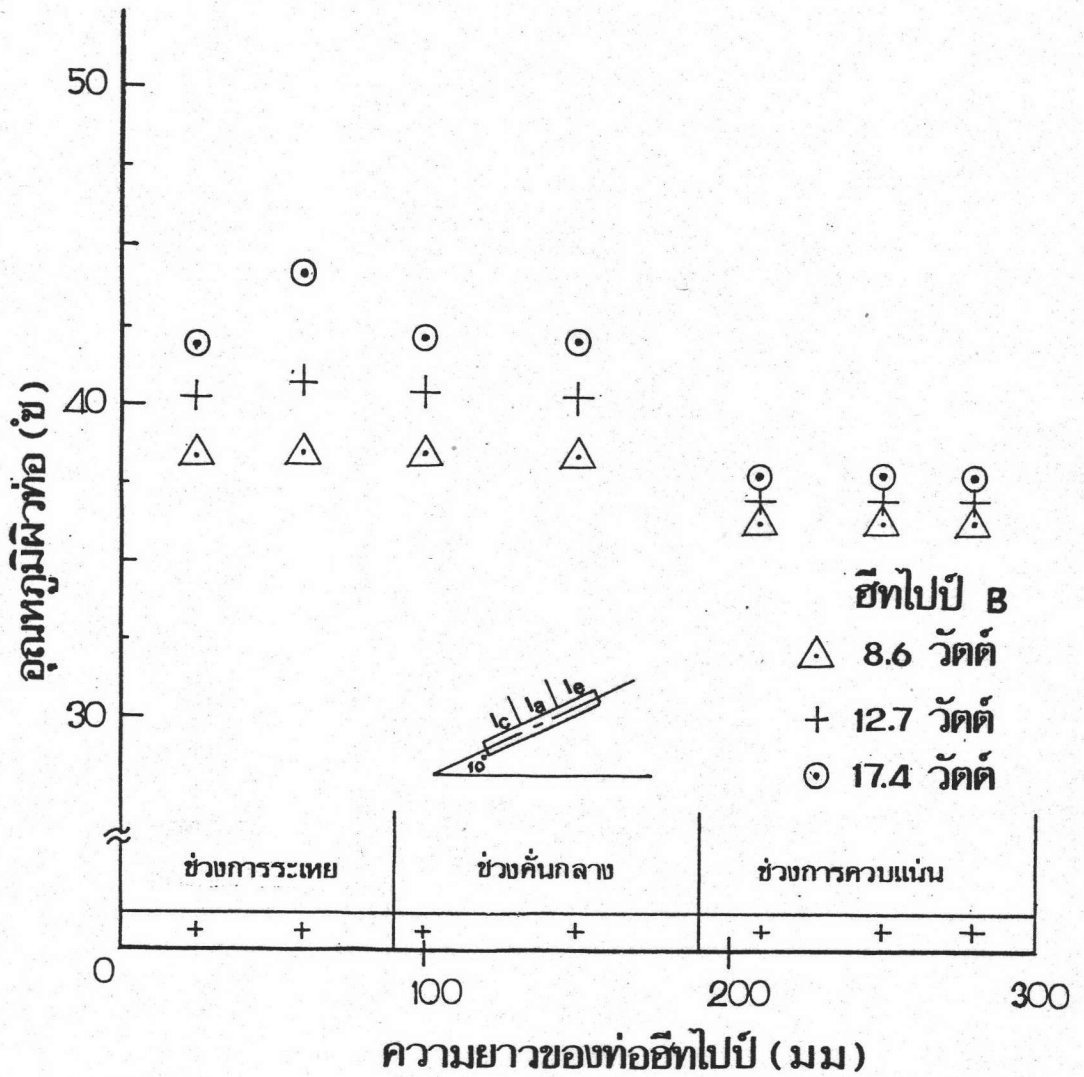
รูปที่ 8.2 เปรียบเทียบผลการทดลองและทฤษฎีที่ปรับค่าแล้ว



รูปที่ 8.3 เปรียบเทียบผลการทดลองและทฤษฎี



รูปที่ 8.4 เปรียบเทียบผลการทดลองและทฤษฎีที่ปรับค่าแล้ว



รูปที่ 8.5 ลักษณะอุณหภูมิของฮีทไปป์