

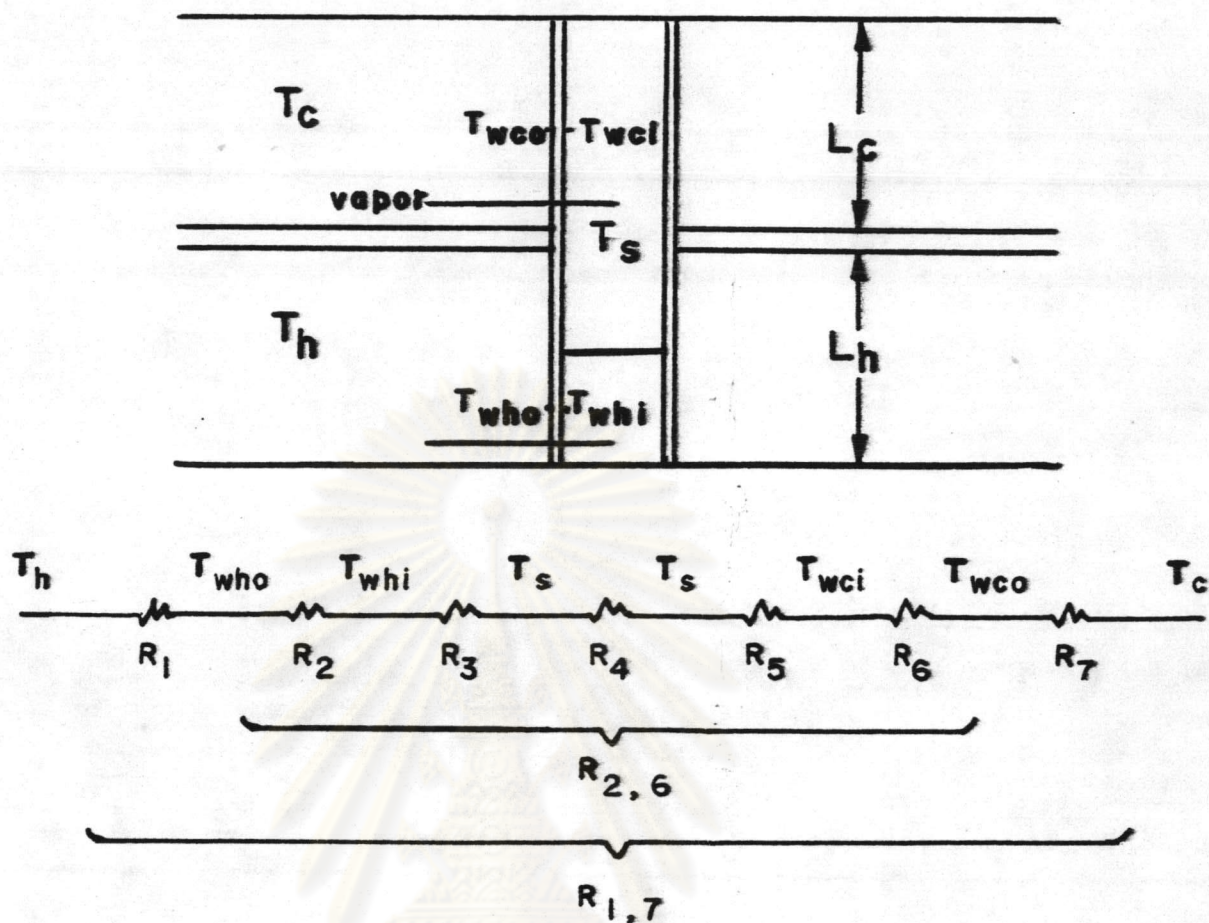
การวิเคราะห์ผลการทดลองของอิทไปป์ไร้วิกค์ 1 แท่ง

5.1 ทฤษฎีสำหรับวิเคราะห์สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของอิทไปป์ไร้วิกค์ 1 แท่ง

5.1.1 การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของอิทไปป์ไร้วิกค์
1 แท่ง

พลังงานความร้อนจากขดลวดไฟฟ้าจะถูกส่งผ่านจากช่วงการระเหย
ไปสู่ช่วงการควบแน่น ในอิทไปป์ไร้วิกค์ ดังขั้นตอนต่อไปนี้

1. ผ่านฟิล์มความต้านทานด้านนอกของผนังช่วงการระเหย (R_1)
2. ผ่านผนังแก้วของช่วงการระเหย (R_2)
3. ผ่านฟิล์มความต้านทานด้านในของผนังช่วงการระเหยและผ่าน
ของไหลที่กำลังเดือดระเหยเป็นไอ (R_3)
4. การไหลของไอจากช่วงการระเหยไปยังช่วงการควบแน่น (R_4)
5. ไอกลับตัวเป็นของเหลวที่ผนังด้านในของช่วงการระเหยและ
ความร้อนผ่านฟิล์มด้านในของช่วงการควบแน่น (R_5)
6. ผ่านผนังแก้วของช่วงการควบแน่น (R_6)
7. ผ่านฟิล์มความต้านทานด้านนอกของช่วงการควบแน่น (R_7)



รูป 5.1 แบบจำลองการส่งผ่านความร้อน

สมมติฐานการวิเคราะห์ ให้

- (ก) ไม่มีการส่งผ่านความร้อนตามแนวแกนในเนื้อผนังแก้ว
- (ข) ความต้านทานการส่งผ่านความร้อนจากไอด้านระเหยสู่ด้านกลั่นตัวมีค่าน้อยมาก ในกรณีการทำงานไม่ถึงจุด Limit (นั่นคือ $R_4 = 0$)

ในกรณีที่วัดอุณหภูมิผิวนอกของช่วงการระเหย เราไม่ต้องคิดมีสัมความต้านทานด้านนอกของช่วงการระเหย (R_2) ในทำนองเดียวกันในกรณีที่วัดอุณหภูมิผิวนอกของช่วงการควบแน่น เราไม่ต้องคิดความต้านทานด้านนอกของช่วงการควบแน่น (R_7)

ที่สภาวะคงที่ (Steady State)

$$\begin{aligned}
 Q_p &= \frac{1}{R_t} (T_h - T_c) \\
 &= \frac{1}{R_1} (T_h - T_{who}) = \frac{1}{R_2} (T_{who} - T_{whi}) \\
 &= \frac{1}{R_3} (T_{whi} - T_m) = \frac{1}{R_5} (T_m - T_{wci}) \\
 &= \frac{1}{R_6} (T_{wci} - T_{wco}) = \frac{1}{R_7} (T_{wco} - T_c) \quad (5.1)
 \end{aligned}$$

$$R_t = \sum_{j=1}^7 R_j \quad ; \quad (R_4 = 0) \quad (5.2)$$

$$R_1 = \frac{1}{h_{oh} A_{oh}} \quad (5.3)$$

$$R_2 = \frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi k L_h} \quad (5.4)$$

$$R_3 = \frac{1}{h_{ih} A_{ih}} \quad (5.5)$$

$$R_5 = \frac{1}{h_{ic} A_{ic}} \quad (5.6)$$

$$R_6 = \frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi k L_c} \quad (5.7)$$

$$R_7 = \frac{1}{h_{oc} A_{oc}} \quad (5.8)$$

ความต้านทาน R_1 และ R_7 เป็นฟิล์มความต้านทานของของไหลที่ไหลผ่านท่อฮีทไปป์ไร่วิคค์ R_1 เป็นฟิล์มความต้านทานด้านนอกของช่วงระเหย ในกรณีนี้เป็นฟิล์มของอากาศซึ่งจะไม่คิดเพราะมีการวัดอุณหภูมิที่ผิวท่อด้านนี้ แต่ถ้าเป็นน้ำร้อนไหลผ่านจะคิดแบบเดียวกับ R_7 R_7 เป็นฟิล์มความต้านทานด้านนอกของช่วงการควบแน่นที่เกิดจากน้ำหล่อเย็นที่ไหลมารับเอาความร้อนไป

การหาลัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผ่านฟิล์มที่ด้านนอกของท่อ
(h_{oh} , h_{oc}) จากการทดลองหาได้ดังนี้

$$h_{oh} = \frac{Q_p}{(T_h - T_{wco}) A_{oh}} \quad (5.9)$$

$$h_{oc} = \frac{Q_p}{(T_{wco} - T_c) A_{oc}} \quad (5.10)$$

การหาลัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผ่านฟิล์มด้านนอกของท่อทรง
กระบอกที่มีช่องไหลไหลตัดตั้งฉาก สามารถหาจากการคำนวณ ตามสมการ
ของ Whitaker (21), (22) ต่อไปนี้

$$Nu = hD/k = (0.4Re^{0.5} + 0.06Re^{2/3}) Pr^{0.4} (\mu/\mu_w)^{0.5} \quad (5.11)$$

ความต้านทาน R_2 และ R_3 เป็นความต้านทานที่ความร้อนผ่าน
เนื้อวัสดุที่ใช้ทำท่อฮีทไปป์ไรวิคค์ สมการ (5.4), (5.7) เป็นสมการที่ใช้
กับฮีทไปป์ซึ่งทำเป็นท่อทรงกระบอกเท่านั้น ถ้าเป็นฮีทไปป์ที่มีรูปทรงแตกต่างไป
สามารถหาได้จากทฤษฎีการนำความร้อน

ความต้านทาน R_3 ของช่วงการระเหย การหาค่า h_{1h} ที่อยู่ใน
สมการ (5.5) เพื่อหาค่า R_3 นั้น ยังเป็นปัญหาที่ค่อนข้างยุ่งยากซับซ้อน
มีรายงาน (14) ว่าจากการสังเกตด้วยตาเปล่า ลักษณะของของเหลวซึ่งงานจาก
ช่วงการควบแน่นไหลกลับสู่ช่วงการระเหยในฮีทไปป์ไรวิคค์มี 4 แบบ คือ

- (1) ที่ฟลักซ์ความร้อนต่ำ ๆ ของเหลวจะไหลกลับลงมาเป็นแผ่นฟิล์ม
ที่เรียบเสมอลอดทั้งช่วง
- (2) ที่ฟลักซ์ความร้อนสูงขึ้น แผ่นฟิล์มของเหลวจะแยกออกเป็นสายน้ำ
เล็ก ๆ ไหลลงมาอย่างคงที่
- (3) ที่ฟลักซ์ความร้อนสูงขึ้นไปอีก สายน้ำเล็ก ๆ เหล่านี้จะไหลลงมา
แบบไม่เสถียร
- (4) ที่ฟลักซ์ความร้อนสูง ๆ จะมีปริมาณของเหลวไหลกลับลงมา
อย่างมากและเกิดคลื่นขึ้นที่ผิวสายน้ำ เนื่องจากไหลสวนทางกับ
ไอที่วิ่งขึ้นไป และเกิดการเดือดระเหยขึ้นที่สายน้ำที่ไม่เสถียรนี้

จากความซับซ้อนเช่นนี้ วิธีการประมาณหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในแท่งฮีทไปป์ไร้วิกค์ที่ช่วงการระเหย ($h_{i,n}$) จึงมีผู้เสนอ (11) (14), (23), (24), (25), (26) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไว้หลายแบบ ในที่นี้การหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในแท่งฮีทไปป์ไร้วิกค์ที่ช่วงการระเหย ($h_{i,n}$) จะพิจารณาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเป็น 2 ส่วน ส่วนที่หนึ่งเป็นส่วนที่มีของเหลวใช้งานบรรจุอยู่ การหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในช่วงนี้จะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในลักษณะเดียวกับการเดือด ส่วนที่สองในส่วนที่อยู่เหนือระดับของเหลวใช้งาน ขึ้นมาจนถึงปลายบนสุดของช่วงการระเหย การหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในช่วงนี้จะใช้ทฤษฎีฟิล์มของนัสเซลท์ (Nusselt Film Theory)

การหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในส่วนที่มีของเหลวใช้งานบรรจุอยู่ ในที่นี้จะใช้สมการการถ่ายเทความร้อนแบบการเดือด (pool boiling) ของ Rohsenow (11), (14), (21), (27) ดังต่อไปนี้

$$\frac{C_{p1}(T_{wh1} - T_w)}{H_{fs} Pr^n} = C_{sf} \left[\frac{Q/A}{\mu_l H_{fs}} \sqrt{\frac{g_c \sigma}{g(\rho_l - \rho_v)}} \right]^r \quad (5.12)$$

$$h_{i,nd} = \frac{Q^{1-r} C_{p1}}{A C_{sf} H_{fs} Pr^n} \left[\frac{1}{A_{i,h} \mu_l H_{fs}} \sqrt{\frac{g_c \sigma}{g(\rho_l - \rho_v)}} \right]^{-r} \quad (5.13)$$

$$h_{i,nd} = \frac{\mu_l H_{fs}}{(T_{wh1} - T_w)} \sqrt{\frac{g(\rho_l - \rho_v)}{g_c \sigma}} \left[\frac{C_{p1}(T_{wh1} - T_w)}{H_{fs} Pr^n C_{sf}} \right]^{1/r} \quad (5.14)$$

คุณสมบัติทางกายภาพนั้น ใช้คุณสมบัติค่าเฉลี่ยระหว่าง T_{wh1} และ T_w ยกเว้นค่า H_{fs} และ ใช้ที่อุณหภูมิ T_w

- $h_{i,nd}$ = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบการเดือดที่ช่วงการระเหยภายในแท่งฮีทไปป์ไร้วิกค์ ($\text{Watt/m}^2 - ^\circ\text{C}$)
- C_{p1} = ความร้อนจำเพาะของของเหลวอิมตัว ($\text{J/Kg} - ^\circ\text{C}$)
- C_{sf} = ค่าคงที่ที่ได้จากการทดลองซึ่งเป็นค่าเฉพาะของคู่ผิวของแข็ง-ของเหลว (Surface-fluid combination)
- H_{fs} = ความร้อนแฝงของการระเหย (J/kg)
- g = ความเร่งภายใต้แรงโน้มถ่วง (9.8 m/sec^2)

- ρ_c = ตัวคูณแปลงหน่วย ((1 Kg-m)/(N-sec²))
 Pr = $C_{p1} \mu_1 / k_1$ = ตัวเลขแพรนด์ตัล (Prandtl number) ของของเหลวใช้งาน
 Q = อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ก่อให้เกิดการเดือด (Watt)
 A = พื้นที่การถ่ายเทความร้อนของด้านกรระเหย (m²)
 μ_1 = ความหนืดของของเหลวใช้งาน (kg/m-sec)
 $\rho_l - \rho_v$ = ความหนาแน่นของของเหลว และของไอตามลำดับ (kg/m³)
 σ = แรงตึงผิวของของเหลวใช้งาน (N/m)
 S = ค่าคงที่มีค่า 1 สำหรับน้ำ และ 1.7 สำหรับของเหลวอื่น
 r = ค่าคงที่จากการทดลองซึ่งขึ้นกับจำนวนและขนาดของ nucleation site บนผิวถ่ายเทความร้อน

การหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของฟิล์มในส่วนที่อยู่เหนือระดับของเหลวขึ้นไปในช่วงการระเหย สามารถใช้ทฤษฎีฟิล์มของนัสเซิลท์ (14), (23) ดังนี้

$$h_{inf} = 0.943 \left[\frac{\rho_l (\rho_l - \rho_v) H_{fg} k_1^3}{\mu_1 (T_{win} - T_w) L_f} \right]^{1/4} \quad (5.15)$$

$$h_{inf} = 1.47 k_1 \left[\frac{H_{fg} A_{if} \rho_l^2}{4 Q L_f \mu_1} \right]^{1/3} \quad (5.16)$$

- h_{inf} = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผ่านฟิล์มด้านในของช่วงการระเหย (Watt/m² - °C)
 k_1 = ค่าความนำความร้อนของของเหลว (Watt/kg - °C)
 H_{fg} = ความร้อนแฝงของการระเหย (J/Kg)
 ρ_l, ρ_v = ความหนาแน่นของของเหลว และไอ ตามลำดับ (Kg/m³)
 μ_1 = ความหนืดของของเหลว (Kg/m-sec)
 σ = ความแรงภายใต้แรงโน้มถ่วง (9.8 ๓/sec²)
 Q = อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านฟิล์มของช่วงการระเหย (Watt)

A_{1f} = พื้นที่ผิวการถ่ายเทความร้อนของฟิล์มด้านในของช่วงการระเหย (m^2)

L_{hp} = ความสูงของส่วนที่มีของเหลวใช้งานอยู่ในช่วงการระเหย (m)

L_f = ความยาวของส่วนที่เป็นฟิล์มตั้งแต่เหนือระดับของเหลวใช้งานจนถึงปลายบนสุดช่วงการระเหย (m)

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผ่านฟิล์มด้านใน ของบริเวณช่วงการระเหยมีค่าค่อนข้างสูง ดังนั้น สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมภายในแท่งฮีทไปป์ไว้วิคส์ที่ช่วงการระเหย (h_{1c}) จึงมีค่าค่อนข้างสูง ทำให้ค่าของ R_{1c} มีค่าค่อนข้างต่ำ จึงทำให้ R_{1c} มิได้เป็นตัวกำหนดการถ่ายเทความร้อนผ่านแท่งฮีทไปป์มากนัก

อนึ่ง มีผู้รายงาน (29) พบว่า ในกรณีที่มี ฮีทฟลักส์สูง ๆ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผ่านฟิล์มด้านในของช่วงการระเหย สามารถใช้สมการของการเดือดแทนได้

ความต้านทาน R_{1c} เป็นความต้านทานที่เกิดจากการที่ไอของไหลใช้งานกลั่นตัวเป็นหยดแล้วจับเป็นแผ่นฟิล์มอยู่บนผิวในของช่วงการควบแน่นของแท่งฮีทไปป์ไว้วิคส์ การหาค่า R_{1c} อาจทำได้โดยหาค่า h_{1c} ตามสมการ (5.6) ค่า h_{1c} เป็นสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากไอของไหลใช้งานควบแน่นเป็นของเหลว หาได้โดยใช้ทฤษฎีฟิล์มของนัสเซิลท์ (Nusselt Film Theory) (14), (21), (23) ดังสมการต่อไปนี้

$$h_{1c} = 1.47 k_1 \left[\frac{H_{fg} A_{1c} g \rho_l^2}{4 Q_c L_c \mu_l} \right]^{1/3} \quad (5.17)$$

h_{1c} = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผ่านฟิล์มด้านในของช่วงการควบแน่น ($Watt/m^2 - ^\circ C$)

k_1 = ค่าความนำความร้อนของของเหลว ($Watt/Kg - ^\circ C$)

H_{fg} = ความร้อนแฝงของการระเหย (J/Kg)

A_{1c} = พื้นที่การถ่ายเทความร้อนด้านในของช่วงการควบแน่น (m^2)

- Q_c = อัตราการถ่ายเทความร้อนของช่วงการควบแน่น (Watt)
 ϵ = ความเร่งภายใต้แรงโน้มถ่วง (9.8 m/sec^2)
 ρ_l, ρ_v = ความหนาแน่นของของเหลวที่ควบแน่นและไอ ตามลำดับ (Kg/m^3)
 μ_l = ความหนืดของของเหลว (Kg/m-sec)

5.1.2 ตัวอย่างการคำนวณหาค่า $UA_{2.6}$

ตัวอย่างต่อไปนี้สาธิตวิธีวิเคราะห์ผลการทดลองฮีทไปป์ไร้วิกค์ 1 แท่ง (ใช้ข้อมูลจริง)

ตัวอย่าง 5.1

อุณหภูมิผิวเฉลี่ยของช่วงการระเหย (T_{wbo})	80.33 °C
อุณหภูมิผิวเฉลี่ยของช่วงการควบแน่น (T_{wco})	40.05 °C
อัตราการถ่ายเทความร้อน (Q_p)	8.36 Watt
$T_{wbo} - T_{wco}$	$= 80.33 - 40.05 = 40.28 \text{ °C}$
Q_p	$= UA_{2.6} (T_{wbo} - T_{wco})$
$UA_{2.6}$	$= \frac{Q_p}{T_{wbo} - T_{wco}}$
	$= \frac{8.36}{40.28}$
	$= 0.2075 \text{ Watt/°C}$

ตัวอย่างต่อไปนี้สาธิตวิธีวิเคราะห์จากการคำนวณค่า $UA_{2.6}$ ของฮีทไปป์ไร้วิกค์ 1 แท่ง ทางทฤษฎี

ตัวอย่าง 5.2

อุณหภูมิผิวเฉลี่ยของช่วงการระเหย (T_{wbo})	80.33 °C
อุณหภูมิผิวเฉลี่ยของช่วงการควบแน่น (T_{wco})	40.05 °C
อัตราการถ่ายเทความร้อน (Q_p)	8.36 Watt
ความยาวช่วงระเหย	0.105 m.
ความยาวช่วงควบแน่น	0.117 m.

เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 0.01 m. เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.008 m. ก่อนอื่น สมมติค่า Q_p ที่เหมาะสม (ในที่นี้ให้ $Q_p = 8.36$ Watt) แล้วคำนวณหาอุณหภูมิผิวภายในของช่วงการระเหยโดยอาศัยสมการ (5.4), (5.1)

$$T_{whi} = T_{who} - \frac{\ln(r_o/r_i) \cdot Q_p}{2\pi k L_n}$$

$$\begin{aligned} T_{whi} &= 80.33 - \frac{\ln(0.01/0.008)}{2\pi(1.15)(0.105)} \cdot 8.36 \\ &= 77.87 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_{wci} &= T_{wco} + \frac{\ln(r_o/r_i) \cdot Q_p}{2\pi k L_c} \\ &= 40.05 + \frac{\ln(0.01/0.008)}{2\pi(1.15)(0.117)} \cdot 8.36 \\ &= 42.26 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

ต่อไป หา h_{1c} (5.17)

$$h_{1c} = 1.47 k_1 \left[\frac{H_{fg} A_{1c} g \rho_1^2}{4 Q_c L_c \mu_1} \right]^{1/3}$$

ในที่นี้คุณสมบัติทางกายภาพใช้ที่อุณหภูมิ 42.26

$$k = 0.627 \text{ Watt/m} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$H_{fg} = 2,406,000 \text{ J/Kg}$$

$$A_{1c} = D_1 L_c = (0.08)(0.117) = 0.000294 \text{ m}^2$$

$$g = 9.8 \text{ m/sec}^2$$

$$\rho_1 = 992.247 \text{ Kg/m}^3$$

$$Q_c = 8.36 \text{ Watt}$$

$$\mu_1 = 0.0006529 \text{ Kg/m-sec}$$

$$\begin{aligned} h_{1c} &= 1.47 (0.627) \left[\frac{(2,401,000)(0.00294)(9.8)(992.247)^2}{4(8.36)(0.117)(0.0006529)} \right]^{1/3} \\ &= 27535.1 \text{ Watt/m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

$$h_{1c} A_{1c} = (27535.1)(\pi)(0.008)(0.117) = 80.968 \text{ Watt}/^{\circ}\text{C}$$

หา T_w

$$\begin{aligned} T_w &= T_{wci} + \frac{Q}{h_{1c} A_{1c}} \\ &= 42.26 + \frac{8.36}{173.389} \\ &= 42.31 \text{ }^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$



จากนั้น หา h_{1h} โดยใช้สมการ (5.12)

$$h_{1h} = \frac{Q^{1-r} C_{p1}}{A_{1h} C_{sf} H_{fs} Pr^m} \left[\frac{1}{A_{1h} \mu_1 H_{fs} \sqrt{g(\rho_1 - \rho_v)}} \right]^{-r}$$

ในที่นี้คุณสมบัติต่าง ๆ ใช้ที่อุณหภูมิ $(77.87 + 42.31)/2 = 60.09^{\circ}\text{C}$
ยกเว้นค่า H_{fs} และ ρ_v ใช้ที่อุณหภูมิ 42.31°C

$$C_{sf} = 0.242$$

$$r = 0.498 \quad ; \quad 1-r = 1-0.498 = 0.502$$

$$n = 1.0$$

$$C_{p1} = 4184.4 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$$

$$A_{1h} = 2\pi r_1 L_h = \pi(0.008)(0.105) = 0.002639 \text{ m}^2$$

$$H_{fs} = 2,401,000 \text{ J/Kg}$$

$$\mu_1 = 0.0004665 \text{ Kg/m-sec}$$

$$\rho_1 = 983.226 \text{ Kg/m}^3$$

$$\rho_v = 0.05653 \text{ Kg/m}^3$$

$$\rho_1 - \rho_v = 983.226 - 0.05653 = 983.169 \text{ Kg/m}^3$$

$$\sigma = 0.0662 \text{ N/m}$$

$$g = 9.8 \text{ m/sec}^2$$

$$g_c = 1 \text{ (Kg - m)/(N - sec}^2\text{)}$$

$$Pr = \frac{C_p \mu_1}{k} = \frac{(4184.4)(0.0004665)}{0.651} = 2.998$$

$$\frac{Q^{1-r} C_{p1}}{A_{1h} C_{sf} H_{fs} Pr^1} = \frac{(8.36)^{0.502} (4184.4)}{(0.002639)(0.242)(2,401,000)(2.998)}$$

$$= 2.643$$

$$\left[\frac{1}{A_{1h} \mu_f H_{fs} \sqrt{g(\rho_f - \rho_v)}} \right]^{-r} = \left[\frac{1}{(0.002639)(0.0004665)(2,406,000)} \right]$$

$$\left[\frac{0.0662}{(9.8)(983.169)} \right]^{-0.498}$$

$$= 33.112$$

$$h_{1h} = (2.643)(33.112) = 87.515$$

$$h_{1h} A_{1h} = (87.515)(\pi)(0.008)(0.105) = 0.2309 \text{ Watt}/^{\circ}\text{C}$$

$$\frac{1}{UA_{2,e}} = \frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi K L_h} + \frac{1}{h_{1h} A_{1h}} + \frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi K L_c} + \frac{1}{h_{1c} A_{1c}}$$

$$= \frac{\ln(0.005/0.004)}{2\pi(1.15)(.105)} + \frac{1}{0.2309} + \frac{\ln(0.005/0.004)}{2(1.15)(0.117)\pi} + \frac{1}{80,968}$$

$$= 0.2941 + 4.3309 + 0.2639 + 0.0123$$

$$= 4.9012$$

$$UA_{2,e} = 0.2040 \text{ Watt}/^{\circ}\text{C}$$

เนื่องจาก $Q_p = UA_{2,e} (T_{who} - T_{wco}) = (0.204)(80.33 - 40.05) = 8.22$ มีค่าใกล้เคียงกับค่า Q_p ที่สมมติไว้ ดังนั้นการประเมินค่า $UA_{2,e}$ โดยทฤษฎีจึงถือว่าสิ้นสุดลงได้

จะเห็นได้ว่าค่า $UA_{2,e}$ จากการทดลองและจากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกัน

อนึ่ง ในกรณีนี้จะไม่คิดสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผ่านฟิล์มด้านในของช่วงการระเหย เนื่องจากว่าอุณหภูมิของช่วงการระเหยที่ใช้เป็นอุณหภูมิเฉลี่ยของเฉพาะช่วงที่มีของเหลวใช้งานบรรจุอยู่เท่านั้น ส่วนความยาว L_h ก็ใช้ของตลอดช่วงการระเหย

จากตัวอย่างนี้จะพิจารณาค่าความต้านทานการถ่ายเทความร้อนทีละชั้น ดังนี้

$$R_2 = \frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi k l_h}$$

$$= \frac{\ln(0.005/0.004)}{2\pi(1.15)(0.105)} = 0.2941$$

$$R_3 = \frac{1}{h_{1h} A_{1h}}$$

$$= \frac{1}{0.2309} = 4.3309$$

$$R_5 = \frac{1}{h_{1c} A_{1c}}$$

$$= \frac{1}{81.024} = 0.0123$$

$$R_6 = \frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi k L_c}$$

$$= \frac{\ln(0.005/0.004)}{2\pi(1.15)(0.117)} = 0.2639$$

จากค่าความต้านทาน R_2 ถึง R_6 จะพบว่า R_3 เป็นค่าที่มากที่สุด นั่นคือ ลักษณะการถ่ายเทความร้อนถูกกำหนดด้วย R_3 ซึ่งเป็นฟิล์มด้านในของช่วงระเหยมีลักษณะเป็นการเดือด

5.2 การวิเคราะห์ผลการทดสอบสมรรถนะของฮีทไปป์ไร้วิกค์ 1 แห่ง

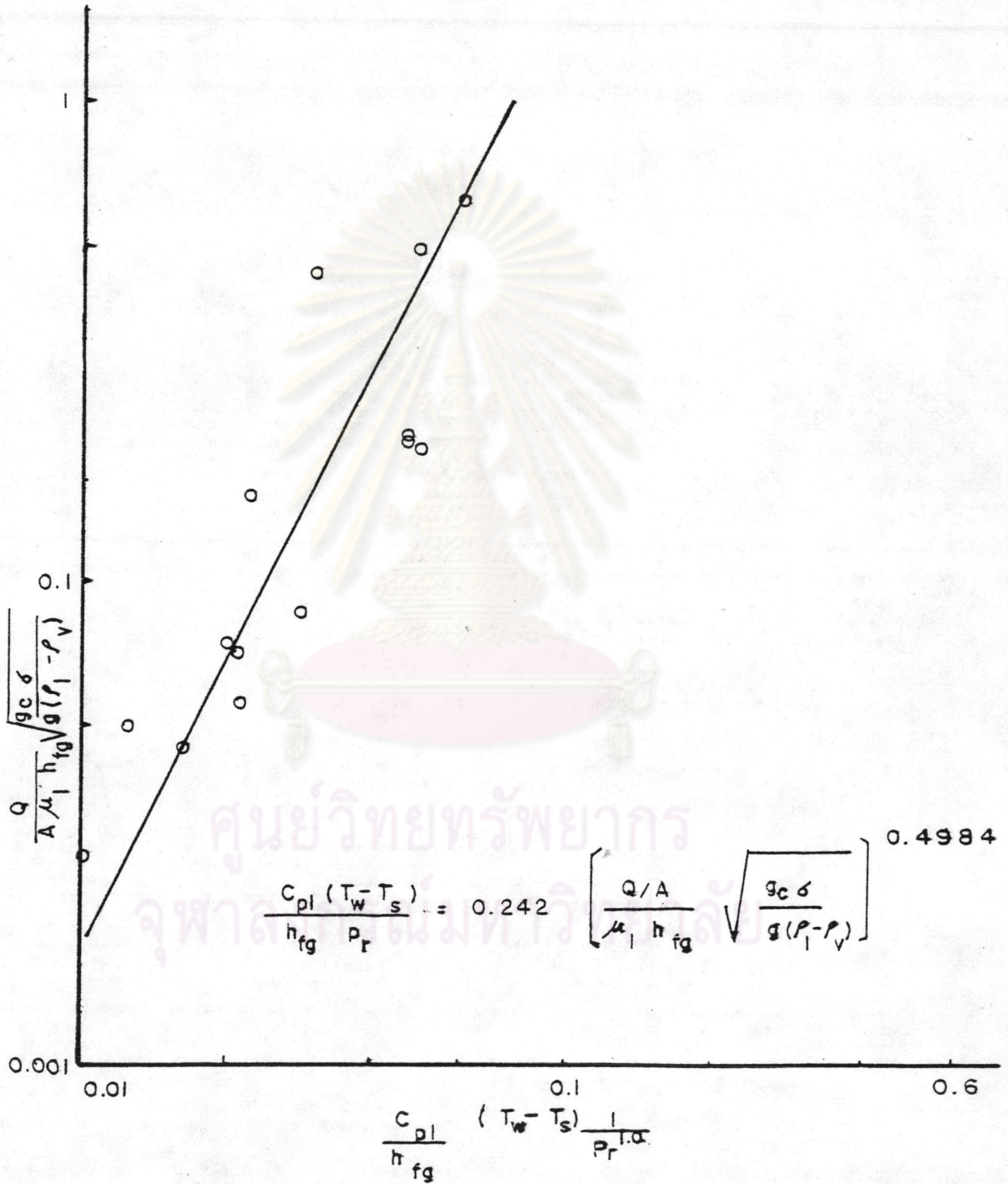
จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบสมรรถนะของฮีทไปป์ไร้วิกค์ 1 แห่ง โดยใช้ฮีทไปป์ไร้วิกค์ยาว 36 ซม. ใส่น้ำเป็นของเหลวในถังงานสูง 6 ซม. ช่วงการระเหยยาว 10.5 ซม. โดยใช้เตาหลอดความร้อนให้ความร้อนแบบแผ่รังสี ช่วงการควบแน่นยาว 11.7 ซม. โดยใช้น้ำเย็นดึงเอาความร้อนออกจากถังฮีทไปป์ ช่วงคั่นกลางที่หุ้มฉนวน (adiabatic) ยาว 14.8 ซม. และวางในแนวตั้ง (มุม 90°) เมื่อใช้อุณหภูมิผิวนอกช่วงการระเหยบริเวณที่มีของไหลในถังบรรจุอยู่ อุณหภูมิของช่วงการควบแน่น และปริมาณความร้อนที่ส่งผ่านถังฮีทไปป์ (ดังตัวอย่าง 5.2) พบว่า ความต้านทานการส่งความร้อนผ่านฟิล์มด้านในของช่วงการระเหยมีค่าสูงสุด นอกจากนี้การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของฟิล์มชั้นนี้ ก็อาจใช้สมการการถ่ายเทความร้อนของการเดือด (pool boiling) ของ Rohsenow เมื่อนำผลการทดลองหลาย ๆ ครั้ง ไปหาค่าคงที่ของสมการของการเดือด โดย Least Square Method (รูป 5.2) จะได้ค่าคงที่ $r = 0.498$, $C_{\text{eff}} = 0.242$ นั่นคือ

$$\frac{C_{\text{eff}} (T_{\text{whi}} - T_{\text{w}})}{H_{\text{fg}} \text{Pr}} = 0.242 \left[\frac{Q/A}{\mu_1 H_{\text{fg}}} \sqrt{\frac{\epsilon_c \sigma}{g(\rho_1 - \rho_v)}} \right]^{0.498} \quad (5.18)$$

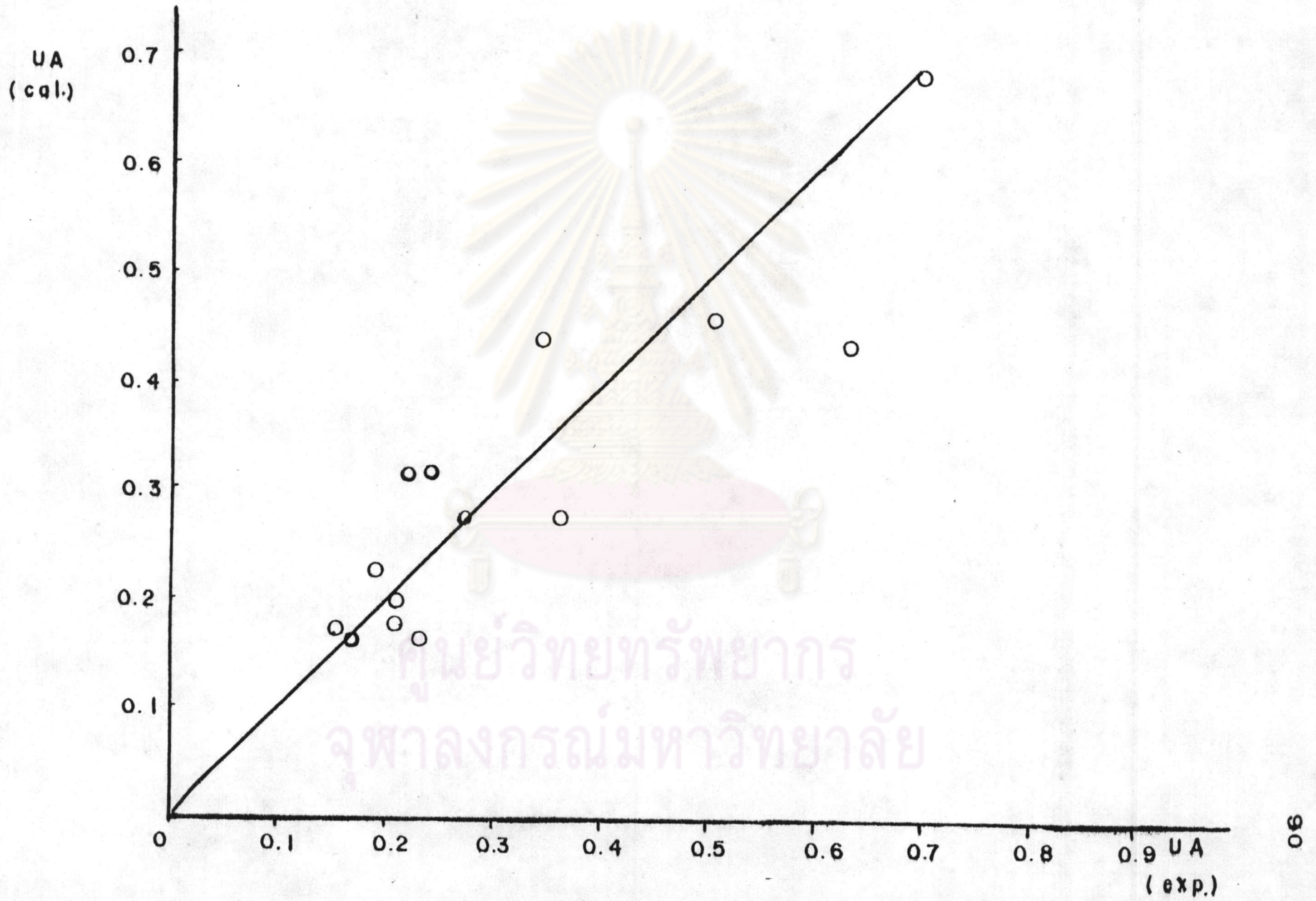
อนึ่ง เมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม $UA_{2,6}$ (หรือ $1/R_{2,6}$) ที่คำนวณได้โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (ตัวอย่าง 5.2) และที่ได้จากผลการทดลอง (ตัวอย่าง 5.1) พบว่า ทฤษฎีข้างต้นให้ผลการทำนายค่อนข้างดี โดยมีค่า Variance ของผลต่างระหว่าง $UA_{2,6}$ ที่ได้จากการทดลองและจากการคำนวณ = 0.077 (ดูรูป 5.2)

เนื่องจากฟิล์มด้านในของช่วงการระเหยซึ่งเป็นแบบการเดือด (pool boiling) เป็นตัวจำกัดสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน เราสามารถสร้างสมการการทดลองระหว่างปริมาณความร้อนที่ส่งผ่านกับผลต่างอุณหภูมิผิวนอกของทั้ง 2 ช่วงได้ ดังนี้ (ดูรูป 5.4)

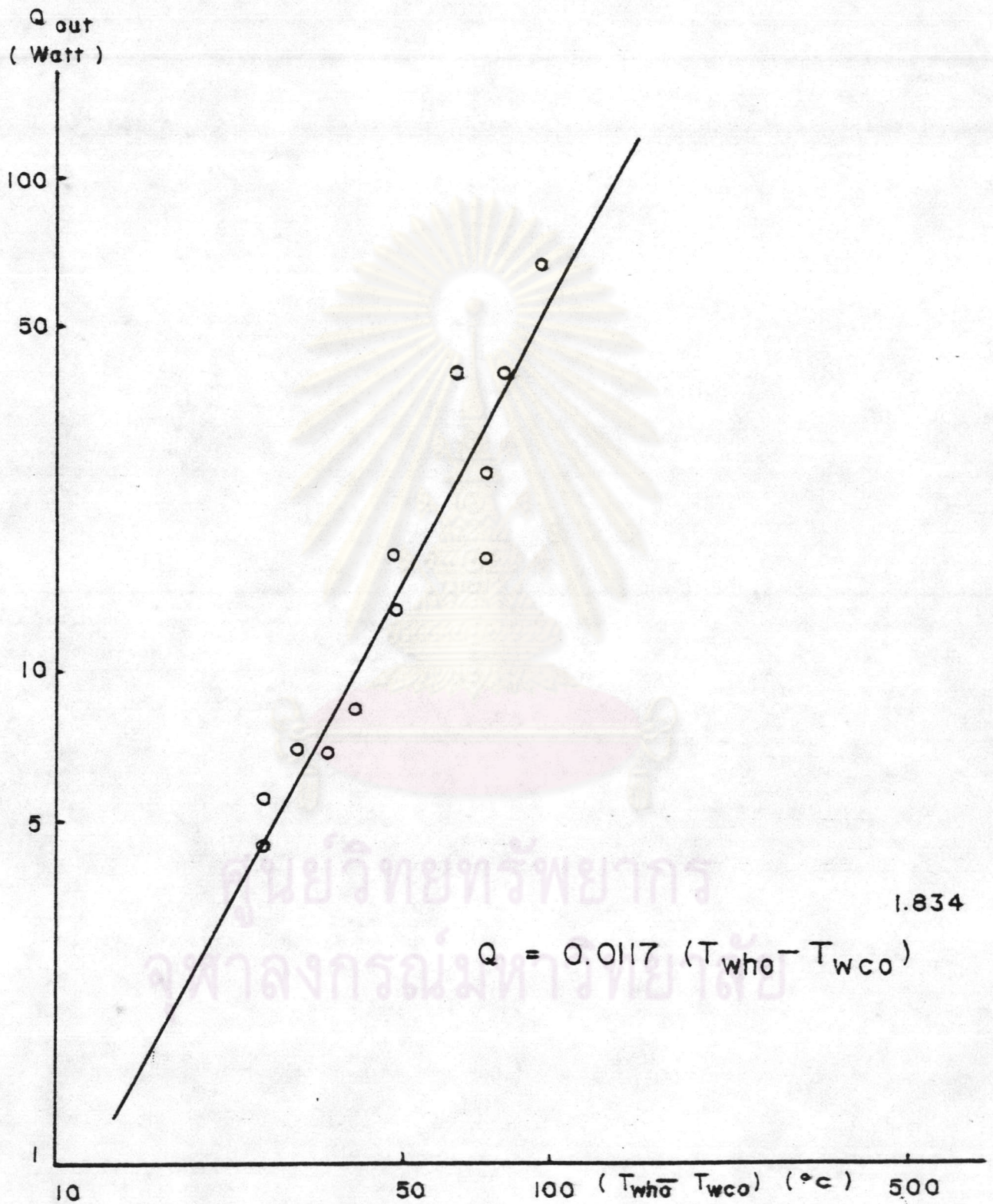
$$Q_{\text{cond}} = 0.0117 (T_{\text{who}} - T_{\text{wco}})^{1.034} \quad (5.19)$$



รูป 5.2 ความสัมพันธ์ของข้อมูลจากการทดลองระหว่างน้ำกับแก้วไนแทงอิกไปป์ไรริคค์



รูป 5.3 $UA_{2.6}$ จากการทดลอง และ $UA_{2.6}$ จากการคำนวณ



รูป 5.4 ความสัมพันธ์ของอัตราการถ่ายเทความร้อน (Q_{out}) กับผลต่างอุณหภูมิที่ผิวช่วงการระเหยและช่วงการควบแน่น

สมการ (5.19) นี้ใช้ได้เฉพาะกับเงื่อนไขการทดลองดังกล่าวเท่านั้น
อนึ่ง ต้องใช้หน่วยของอุณหภูมิ และ q_{conv} ตามที่กำหนดในบทนี้เท่านั้น

แม้ว่าในการทดลองนี้ต้องการหาสมรรถนะของแท่งฮีทไปป์ไร่วิกค์เท่านั้น
แต่เนื่องจากมีการวัดอุณหภูมิที่ผิวด้านนอกของช่วงการควบแน่นและอุณหภูมิของน้ำ
หล่อเย็นที่ไหลเข้าออก จึงทำให้สามารถหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของ
ฟิล์มด้านนอกได้ รูป 5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขนัสเซลส์
($Nu = hD/k$) กับตัวเลขเรย์โนลด์ ($Re = D\rho v/\mu$) ที่ได้จากการ
ทดลอง เมื่อทำการหารูปสมการโดยวิธี Least Square Method ปรากฏว่าได้

$$Nu = 1.97 Re^{0.504} \quad (5.20)$$

จะเห็นได้ชัดจากรูป 5.5 ว่า ค่า Nu ที่ได้จากการทดลองมีค่า
สูงกว่าค่า Nu ที่ได้จากการคำนวณตามสมการของ Whitaker (สมการ 5.11)
สาเหตุสำคัญเชื่อว่าเป็นเพราะค่า Re ที่ใช้ในการคำนวณในสมการ (5.11) มีค่า
น้อยกว่าค่า Re ที่แท้จริงของระบบ เนื่องจากในกล่องหล่อเย็นมีแผ่น
baffle กั้นอยู่เป็นห้อง ๆ ที่แผ่นกั้นนี้มีรูที่เจาะให้สอดท่อผ่านได้ แต่รูเปิดนี้มี
ขนาดค่อนข้างใหญ่ทำให้น้ำไหลลัดทางผ่านรูนี้ได้ด้วยความเร็วสูง ดังนั้น ค่า Re
ของระบบจึงมีค่าสูงกว่าค่า Re ที่ประเมินจากวิธีที่ไม่คิดการไหลลัดทางของ
น้ำนี้ แต่คิดว่าเกิดการไหลตั้งฉากกับท่อเท่านั้น

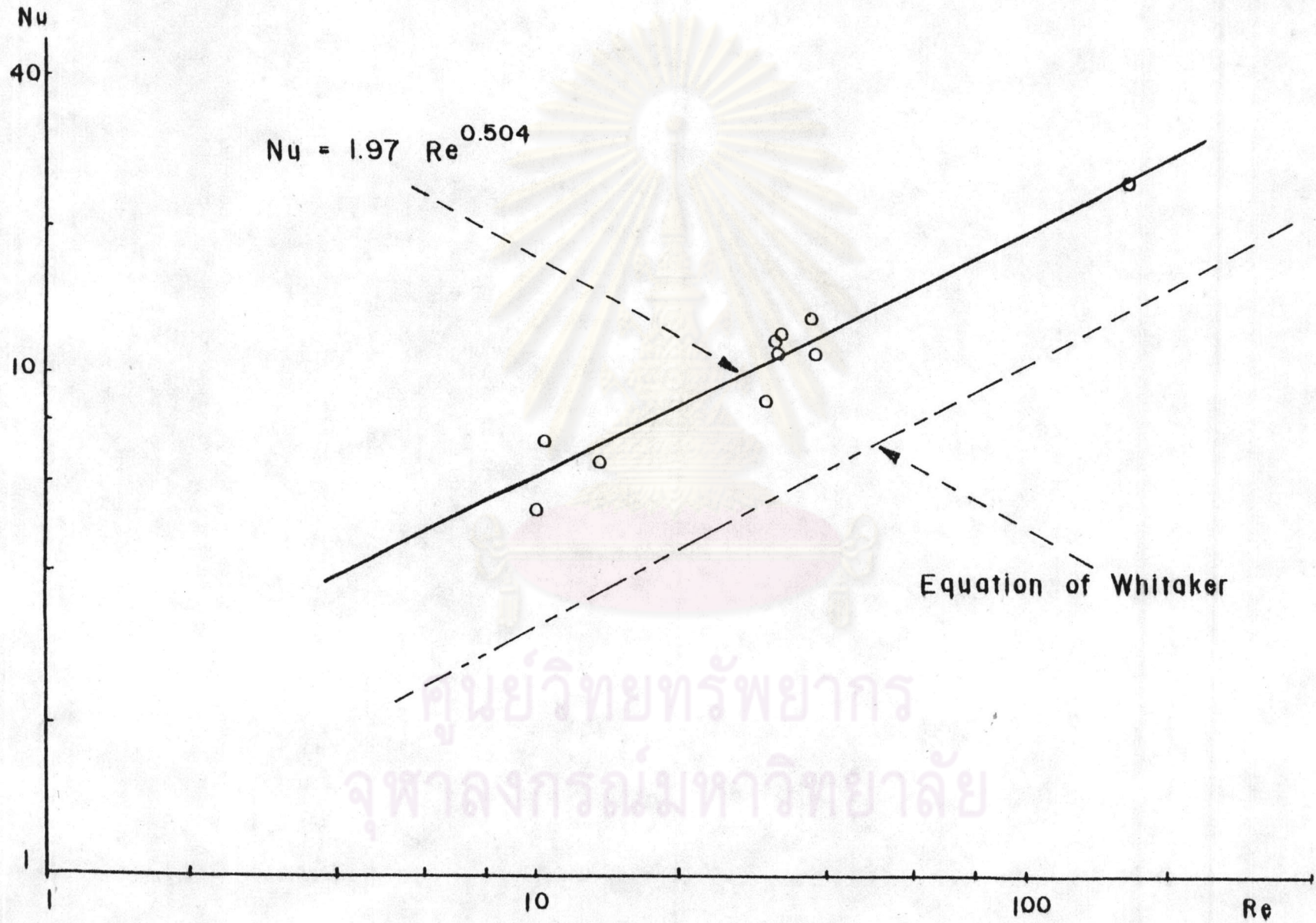
จากการวิเคราะห์ผลการทดลองในรูป 5.5 อาจสรุปได้ว่า ถ้า
ประเมินค่า Re ที่เกิดขึ้นจริงได้จากค่าคำนวณ ดังนี้

$$Re_{ระบบ} = 4.33 (Re_{คำนวณ})^{0.935} \quad (5.21)$$

จะสามารถใช้สมการของ Whitaker ทำนายผลการทดลองได้อย่างถูกต้อง

ในทางกลับกัน เราอาจใช้ค่าคำนวณของ Re ไปคำนวณค่า Nu
จากสมการของ Whitaker ก่อน แล้วประเมินค่า Nu ที่แท้จริงของ
ระบบ จากสมการต่อไปนี้

$$Nu_{ระบบ} = 2.188 (Nu_{คำนวณ})^{0.935} \quad (5.22)$$



รูป 5.5 ความสัมพันธ์ของ Nu กับ Re ที่ได้จากการทดลอง

5.3 ลักษณะการถ่ายเทความร้อนของฮีทไปป์ไร้วิกค์ 1 แท่งกับมมเอียง

จากรูป 2.21 และ 2.22 จะเห็นได้ว่า อัตราการถ่ายเทความร้อน จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามมุมเอียงของแท่งฮีทไปป์ โดยเมื่อป้อนกำลังไฟฟ้าเท่ากัน ฮีทไปป์ไร้วิกค์ที่วางอยู่ในแนวระดับจะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำ และมีค่ามากขึ้นเมื่อมุมเอียงโตขึ้น จนถึงอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่มุมเอียง 70° และจะมีค่าต่ำลงเมื่อมุมเอียงโตขึ้นอีกจนถึง 90 องศา

5.4 การกระจายอุณหภูมิผิวนอกของฮีทไปป์ไร้วิกค์ 1 แท่ง

จากรูป 2.12 - 2.20 จะเห็นได้ว่าโดยทั่วไปที่มุมวาง 90 องศา อุณหภูมิปลายล่างของช่วงการระเหยส่วนที่บรรจุของไหลใช้งานอยู่จะมีค่าค่อนข้างสูง ถัดขึ้นมาที่บริเวณระดับความสูงของของไหลใช้งานอุณหภูมิจะต่ำลง ทั้งนี้เนื่องจากที่บริเวณนี้มีช่องไหลเวียนไหลจากช่วงการควบแน่นกลับมาช่วงการระเหย และมีการระเหยของไอออกจากผิวน้ำซึ่งจะนำความร้อนออกจากบริเวณนี้ไปด้วย อนึ่ง ในบริเวณย่านที่เป็นไอ (ไม่มีช่องไหล) ของช่วงการระเหย จะเห็นว่าบางจุดมีอุณหภูมิสูงมากและบางจุดจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าค่อนข้างมาก แต่มีลักษณะไม่แน่นอน ทั้งนี้เป็นเพราะมีสายของเหลวไหลลงมาเป็นสาย ๆ กลับมาช่วงการระเหย โดยมีลักษณะไม่แน่นอน บริเวณที่มีสายของเหลวไหลผ่านจะมีอุณหภูมิต่ำ ส่วนบริเวณที่ไม่มีสายของเหลวไหลผ่านจะแห้งและมีอุณหภูมิสูง

ที่มุมเอียงอื่น ๆ เนื่องจากสายของเหลวมีแนวโน้มที่จะไหลไปรวมกัน อยู่ที่ซีกล่างของแนวรัศมี จึงพบว่าอุณหภูมิซีกล่างของแท่งฮีทไปป์ไร้วิกค์จะค่อนข้างต่ำ ตลอดทั้งช่วงการระเหย ส่วนซีกบนจะมีอุณหภูมิสูงกว่า โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณซีกบนของช่วงการระเหย ในส่วนที่มีไออยู่จะมีอุณหภูมิสูงขึ้นไปอีก

5.5 การหาขีดจำกัดการถ่ายเทความร้อนจากทฤษฎี

ในการทดลองพยายามหาขีดจำกัดการถ่ายเทความร้อน พบว่า เมื่อให้พลังงานเข้าไปในขดลวดเกิน 80 Watt ความดันไอที่เพิ่มสูงขึ้นได้ทำให้แท่งแก้วระเบิดทะลุที่ปลายบนซึ่งเป็นจุดที่เปราะบาง เนื่องจากเป็นจุดที่หลอมเชื่อมปิด

ทั้ง ๆ ที่ท่อแก้วแข็ง (Pyrex) เส้นผ่าศูนย์กลางและความหนาขนาดนี้ควรจะทนความดันได้ประมาณ 10 Bars ซึ่งเท่ากับ ความดันไอน้ำที่อุณหภูมิอิ่มตัว 150 ° C ดังนั้น การศึกษาเรื่องนี้จึงไม่อาจหาค่าขีดจำกัดการถ่ายเทความร้อนโดยการทดลองได้

จากสมการสำหรับหาขีดจำกัดการถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่เสนอโดย Imura (17) ดังต่อไปนี้

$$q_{cr} = \frac{0.64 d_1 H_{fg} (\rho_l / \rho_v)^{0.12} [\sigma g \rho_l^2 (\rho_l - \rho_v)]^{1/4}}{4 L_n} \quad (5.23)$$

ในสมการนี้เมื่อใช้อุณหภูมิน้ำที่ 30 - 80 ° พบว่า อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดจะมีค่าตั้งแต่ 270 ถึง 570 Watt ต่อแท่ง ดังนั้นจะเห็นได้ว่า อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ทดลองอยู่ยังห่างไกลจากขีดจำกัดของแท่งอิทไปป์ ไร้ริคซ์ขนาดนี้อยู่มาก อนึ่ง สมการของ Imura นี้ มีความคลาดเคลื่อนในช่วง $\pm 30 \%$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย