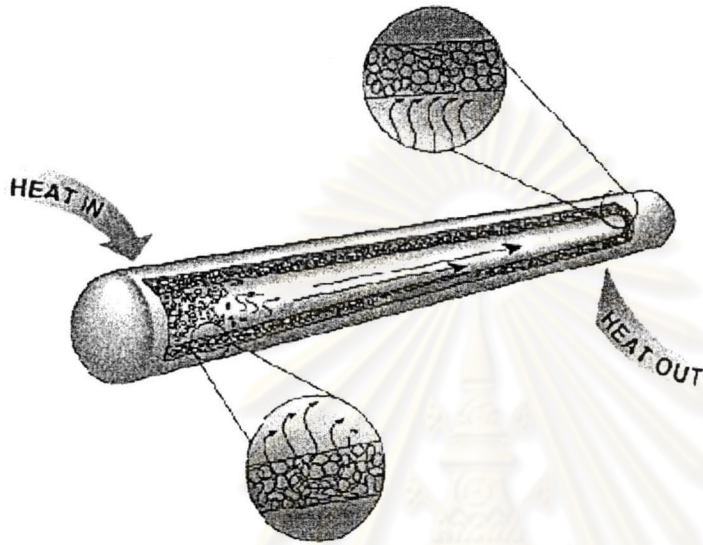


บทที่ 3 ทฤษฎีเกี่ยวกับฮีทไปป์

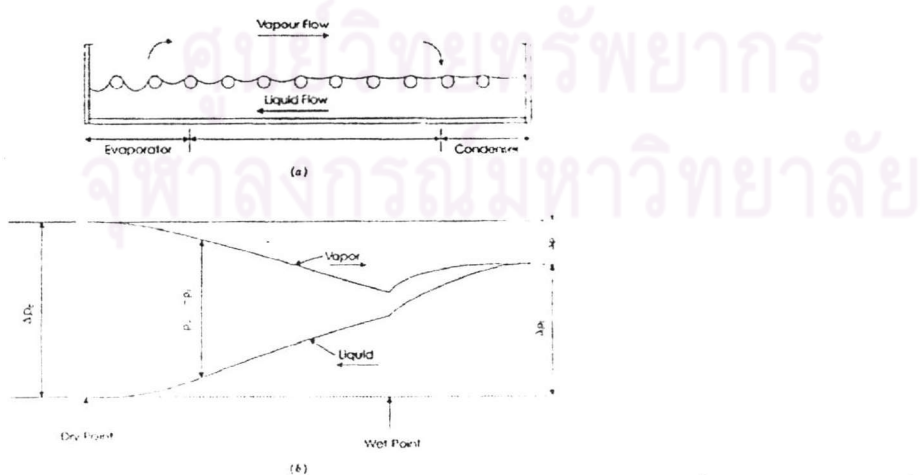
ฮีทไปป์ ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน คือ ท่อ วิก และ ของไหลทำงาน



รูปที่ 3.1 แสดงการทำงานภายในของฮีทไปป์

3.1 Capillary pressure balance

แม้ว่าประสิทธิภาพ และ การทำงานของฮีทไปป์ ขึ้นอยู่กับ รูปร่าง ของไหลทำงาน และ วิก



รูปที่ 3.2 แสดงความดันของของเหลว และ ไอ ที่จุดต่างๆในฮีทไปป์

3.2 ผลต่างความดันคาปิลารีสูงสุดระหว่างส่วนเปียกกับส่วนแห้ง (Capillary pressure at the liquid-vapor interface)

จากสมการของ Laplace และ Young

$$P_c = \sigma (1/r_1 + 1/r_2) \quad (3.2)$$

โดย ผลของความดันสูงสุด สามารถเขียนในรูปของแรงคาปิลารีที่จุดเปียกและจุดแห้ง ดังสมการ

$$\Delta P_{c,m} = 2\sigma/r_{c,e} - 2\sigma/r_{c,c} \quad (3.3)$$

โดยทั่วไปในทางปฏิบัติ สมการ 3.5 เขียนเป็น

$$P_{cm} = 2\sigma/r_c \quad (3.4)$$

โดยนิยาม $2/r_c = (1/r_1 + 1/r_2)$

r_c = รัศมีท่อรูเข็ม (effective capillary radius)

r_1, r_2 = รัศมีของส่วนโค้ง

ตารางที่ 3.1 แสดงรัศมีท่อรูเข็ม สำหรับวิกแบบต่างๆ ซึ่งจะนำมาแทนสูตรในการคำนวณ ซึ่ง Chi(1976) (5) เป็นผู้สรุป ดังตารางข้างล่าง

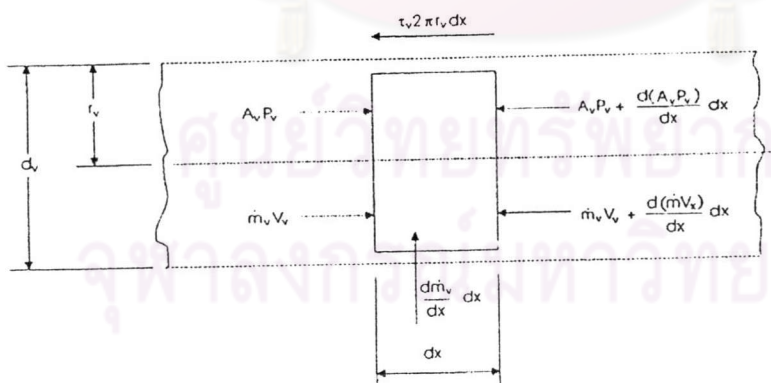
ตารางที่ 3.1 แสดงค่ารัศมีท่อรูเข็มเชิงประสิทธิผลของวิกแบบต่างๆ (Chi, 1976)

Wick structures	r_c Expressions
Circular cylinder	$r_c = r$
Rectangular groove	$r_c = w$ $w =$ groove width
Triangular groove	$r_c = \frac{w}{\cos \beta}$ $w =$ groove width $\beta =$ half included angle
Parallel wires	$r_c = w$ $w =$ wire spacing
Wire screens	$r_c = \frac{w + d}{2}$ $w =$ wire spacing $d =$ wire diameter
Packed spheres	$r_c = 0.41 r_s$ $r_s =$ sphere radius

^aMaximum capillary pressure, $\bar{p}_{cm} = 2\sigma/r_c$

3.3 การสูญเสียความดันไอ (vapor pressure drop)

การสูญเสียความดันของไอ หาได้จากการอินทิเกรตเกรเดียนต์ความดันไอ ในที่นี้ จะประมาณค่าโดยใช้โมเดล แบบหนึ่งมิติ จากรูปที่ 3.4 แสดงภาพของ Control Volume สามารถนำมาสร้างเป็นสมการดังวิธีต่อไปนี้



รูปที่ 3.4 แสดง โมเดล แบบหนึ่งมิติ

$$F_s + F_b = \frac{\partial}{\partial t} \int_{c_v} u_{xyz} \rho dv + \int_{c_x} u_{xyz} \rho \bar{V}_{xyz} d\bar{A} \tag{3.5}$$

$$(P_v \frac{dA_v}{dx} + A_v \frac{dP_v}{dx})dx - \tau_v 2\pi r_v dx = \frac{d}{dx} \int_A \rho_v v_v^2(r) dA dx \quad (3.6)$$

ซึ่งสามารถจัดรูปได้เป็น

$$\frac{dP_v}{dx} = -\frac{\tau_v 2\pi r_v}{A_v} - \frac{1}{A_v} \frac{d}{dx} \int_A \rho_v v_v^2(r) dA \quad (3.7)$$

เมื่อพิจารณาที่ เทอมที่สอง ข้างขวา ของสมการที่ 3.7

$$\text{อัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัม} = \frac{1}{A_v} \frac{d}{dx} \int_A \rho_v v_v^2(r) dA \quad (3.8)$$

อัตราเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัม ตลอดพื้นที่หน้าตัด จะไม่เท่ากับโมเมนตัมที่คำนวณโดยทั่วไปไป เราแก้วิธีนี้โดย กำหนดค่า momentum calculate factor (β) โดยมีค่าเท่ากับ

$$\beta = \frac{\int_A \rho_v v_v^2(r) dA}{\rho_v v_v^2 A_v} = \text{actual momentum / momentum calculated by average } v_v \quad (3.9)$$

ถ้าความเร็วของไอมีค่าคงที่ ค่า $\beta = 1$

เมื่อแทนค่า β ในสมการที่ 3.9 จัดรูปสมการ จะได้สมการของการสูญเสียความดันไอคือ

$$\Delta P_v = \left(\frac{C(f_v \text{Re}_v) \mu_v}{2(r_{h,v})^2 A_v \rho_v \lambda} \right) L_{eff} q \quad (3.10)$$

โดย

$$\text{Re}_v = \frac{2(r_{h,v})q}{A_v \mu_v \lambda} \quad (3.11)$$

Ma_v = ตัวเลขแมคห์ของไอ (vapour Mach number)

$$= \frac{q}{A_v \rho_v \lambda \sqrt{\gamma_v R_v T_v}} \quad (3.12)$$

γ_v = อัตราส่วนความร้อนจำเพาะของไอ มีค่าเป็น 1.67 1.4 และ 1.33 สำหรับก๊าซอะตอมเดี่ยว สองอะตอม และ สามอะตอม ตามลำดับ

$$R_v = \text{ค่าคงที่ของก๊าซ}$$

สำหรับการไหลแบบชั้นๆ และไม่ยืดตัว

$$Re_v \leq 2300$$

$$Ma_v \leq 0.2$$

ค่า $f_v Re_v = 16$ และ $C = 1$ สำหรับการไหลของไอในท่อกลม

$$\begin{aligned} \beta &= 1.25 \text{ สำหรับการไหลผ่านท่อวงแหวนที่มีอัตราส่วนรัศมีเข้าใกล้ 1} \\ &= 1.33 \text{ สำหรับการไหลในท่อกลม} \\ &= 1.44 \text{ สำหรับการไหลในท่อสี่เหลี่ยม} \end{aligned}$$

3.4 การสูญเสียความดันของของเหลว (Liquid pressure drop)

การสูญเสียความดันของของเหลวในวิก หาได้จาก อินทิเกรตเกรเดียนท์ ความดันของของเหลว จากรูปที่ 3.3 จะได้ว่า

$$\Delta P_1(x_{\min} - x) = P_1(x_{\min}) - P_1(x)$$

$$= - \int_{x_{\min}}^x \frac{dP_1}{dx} dx \quad (3.13)$$

ในที่นี้ถือว่าความดันเชิงจลน์ (dynamic pressure) ของของเหลวมีค่าน้อยมากเนื่องจากความเร็วของของเหลวมีค่าน้อย ที่สภาวะการทำงานคงที่ เกรเดียนต์ของความดันของของเหลวในทิศทางการไหลมีความสัมพันธ์กับความเสียดทาน และแรงโน้มถ่วงของโลก ตามสมการ

$$\frac{dP_l}{dx} = -2\tau_l / (r_{h,l}) \quad (3.14)$$

โดยที่ τ_l = ความเค้นเฉือน ที่ผิวสัมผัสระหว่างของเหลวและของแข็ง

$r_{h,l}$ = รัศมีเชิงไฮดรอลิกซึ่งเท่ากับสองเท่าของพื้นที่หน้าตัดหารด้วยความยาวเส้นรอบรูป

นั่นคือ $r_{h,l} = 2 A_l / C_l$

ตัวเลข เรย์โนลด์ (Reynolds number); Re_l และสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (friction coefficient) ; f

$$Re_l = \frac{2(r_{h,l})\rho_l V_l}{\mu_l}$$

และ

$$f_l = \frac{2\tau_l}{\rho_l v_l^2} \quad (3.15)$$

V_l = ความเร็วของของเหลว ซึ่งสัมพันธ์กับฟลักซ์ความร้อนในแนวแกน ดังนี้

$$V_l = \frac{q}{\varepsilon A_w \rho_l \lambda} \quad (3.16)$$

โดยที่ λ = ความร้อนแฝงของการระเหย

A_w = พื้นที่หน้าตัดของวิก

ε = ความพรุนของวิก

เมื่อแทนค่าต่างๆ และจัดรูปใหม่ จะได้

$$\frac{dP_l}{dx} = \left(\frac{\mu_l}{KA_w \lambda \rho_l} \right) q \quad (3.17)$$

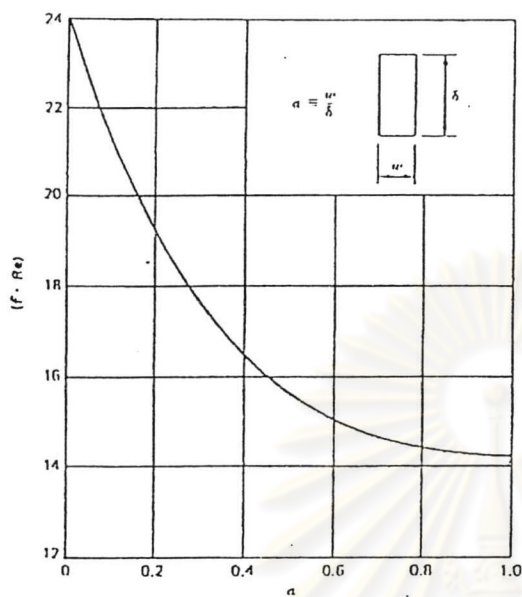
และค่า permeability ของวิก (wick permeability ,K)

$$K = \frac{2\epsilon r_{h,l}^2}{f_l Re_l} \quad (3.18)$$

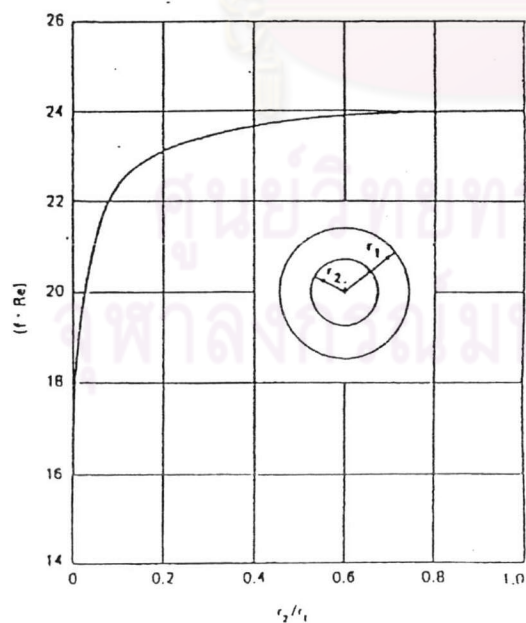
สำหรับการไหลแบบ ลามิน่า ค่า $f_l Re_l$ จะมีค่าคงที่ขึ้นอยู่กับ ลักษณะการไหล ดังนั้น ค่า permeability ของวิก (wick permeability ,K) ก็ไม่ขึ้นอยู่กับการไหลในแนวแกน จึงมีค่าคงที่

ตารางที่ 3.2 แสดงค่า wick permeability ,K ของวิกแบบต่างๆ (chi ,1976)

Wick structures	K Expressions
Circular artery	$K = \frac{r^2}{8}$
Open rectangular grooves	$K = \frac{2\epsilon r_{h,l}^2}{(f_l Re_l)}$ $r_{h,l} = \frac{2w\delta}{w + 2\delta}$ $\epsilon = \text{porosity} = \frac{w}{s}$ $s = \text{groove pitch}$ $w = \text{groove width}$ $\delta = \text{groove depth}$ $(f_l Re_l)$ from Fig. 3.2
Circular annular wick	$K = \frac{2r_{h,l}^2}{(f_l Re_l)}$ $r_{h,l} = r_1 - r_2$ $(f_l Re_l)$ from Fig. 3.3 $d = \text{wire diameter}$
Wrapped screen wick	$K = \frac{d^2 \epsilon^2}{122(1 - \epsilon)^2}$ $\epsilon = 1 - \frac{1.05\pi N d}{4}$ $N = \text{mesh number}$
Backed sphere	$K = \frac{r_s^2 \epsilon^2}{37.5(1 - \epsilon)^2}$ $r_s = \text{sphere radius}$ $\epsilon = \text{porosity (value depends on packing mode)}$



รูปที่ 3.5 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสำหรับการไหลแบบชั้นๆ ในท่อสี่เหลี่ยม



รูปที่ 3.6 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสำหรับการไหลแบบชั้นๆ ในท่อกลม

จากสมการที่ 3.17 สามารถเขียนในรูปการสูญเสียความดันได้ว่า

$$\Delta P_l = \left(\frac{\mu_l}{KA_w \lambda \rho_l} \right) L_{eff} q \quad (3.19)$$

โดย L_{eff} เป็นความยาวประสิทธิผลของฮีทไปป์ สามารถหาค่าได้ตามสมการ

$$L_{eff} = 0.5L_e + L_a + 0.5L_c \quad (3.20)$$

3.5 Normal Hydrostatic Pressure

ค่าความดันที่เกิดขึ้นเฉพาะในฮีทไปป์ เป็นแรงของของเหลวที่เกิดขึ้นในท่อ โดยแทนด้วยสมการคือ

$$\Delta P_{\perp} = \rho_l g d_v \text{Cos}\psi \quad (3.21)$$

โดยที่ ρ_l = ความหนาแน่นของของเหลว
 g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก
 d_v = รัศมีของฮีทไปป์
 ψ = มุมเอียงของฮีทไปป์ ที่ทำกับแนวระดับ

3.6 Axial Hydrostatic Pressure

ค่าความดันเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก จะมีค่าเป็นศูนย์ บวก หรือ ลบ ย่อมขึ้นกับตำแหน่งการวางของช่วงการระเหยและช่วงการควบแน่น ของท่อ ฮีทไปป์ สมการความดันเนื่องจาก แรงโน้มถ่วงของโลกคือ

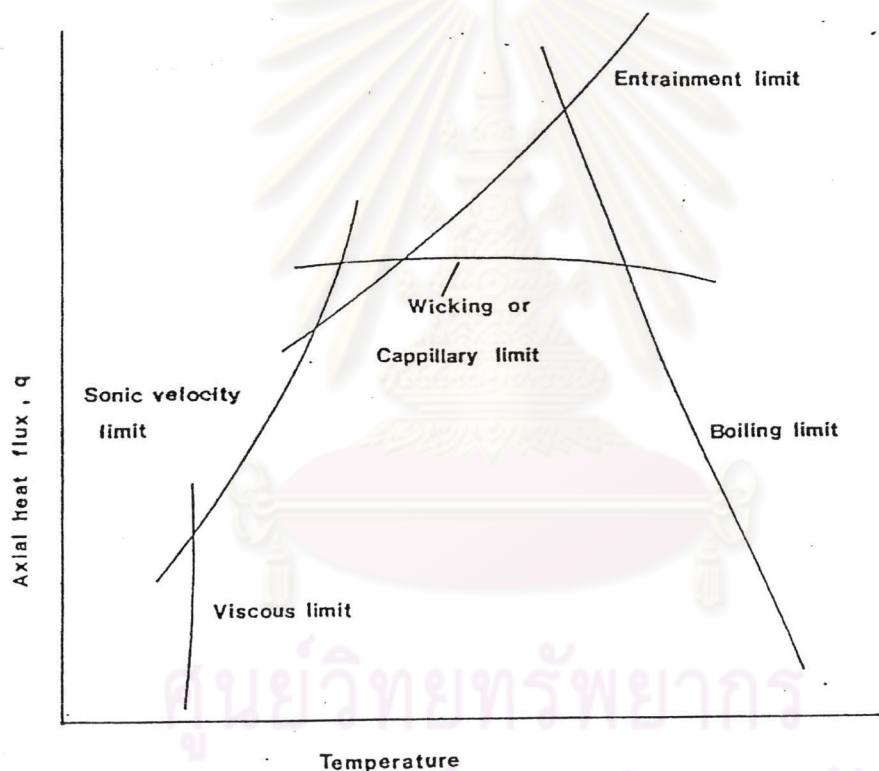
$$\Delta P_{\parallel} = \rho_l g l \text{Sin}\psi \quad (3.22)$$

โดยที่ ρ_l = ความหนาแน่นของของเหลว
 g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก
 l = ความยาวของฮีทไปป์
 ψ = มุมเอียงของฮีทไปป์ ที่ทำกับแนวระดับ

กรณีที่ฮีทไปป์ วางทำมุมกับแนวระดับ แรงโน้มถ่วงของโลกจะมีผลต่อสมรรถนะการทำงานของฮีทไปป์ โดยจะเสริมหรือต้านการไหลกลับของของเหลวควบแน่นจากช่วงการควบแน่นสู่ช่วงการระเหย

3.7 ซีดจำกัดการถ่ายเทความร้อนของฮีทไปป์

ดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้น การหมุนเวียนของของเหลวใช้งานเป็นกระบวนการสำคัญอย่างหนึ่งของการทำงานของฮีทไปป์ เพื่อให้ได้การถ่ายเทความร้อนสูงสุด แต่คุณสมบัติและขีดจำกัดต่างๆ เป็นตัวแปรที่กำหนดขอบเขตที่ใช้งาน



รูปที่ 3.7 ซีดจำกัดการถ่ายเทความร้อนของฮีทไปป์

การทำงานของฮีทไปป์เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ก็ต่อเมื่อการใช้งานอยู่ในขอบเขตพื้นที่ที่ได้อ่านค่าของขีดจำกัดต่างๆ สำหรับฮีทไปป์แต่ละชนิด รูปร่างลักษณะของขอบเขตต่างๆ ขึ้นอยู่กับของเหลวใช้งาน อุณหภูมิที่ใช้งาน วัสดุที่ทำวิก เป็นต้น

3.7.1 ซีดจำกัดการถ่ายความร้อนเนื่องจากความหนืด

เกิดขึ้นเนื่องจากความหนืดของๆเหลวใช้งาน ซึ่งจะมีผลมากกว่าที่ อุณหภูมิต่ำๆ ความหนืดนี้จะมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนของไอ Busse ได้แสดงให้เห็นว่า ฟลักซ์ความร้อนในแนวแกน จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วขณะที่ความดันที่ช่วงการควบแน่นลดลง และจะให้ค่าสูงสุดเมื่อค่าความดันเป็นศูนย์ และพบว่าความเร็วในแนวแกนมีผลสำคัญ

$$q_v = \frac{A_v r_o^2 \lambda \rho_v P_v}{16 \mu_v L_e} \quad (3.29)$$

โดย

- q_v = ซีดจำกัดความหนืด
- A_v = พื้นที่ส่วนของไอ
- r_o = Outer radius
- λ = Latent heat of vaporization
- ρ_v = ความหนาแน่นของไอ
- P_v = ความดันไอ
- μ_v = ความหนืด
- L_e = ความยาวส่วน evaporator

3.7.2 ซีดจำกัดการถ่ายความร้อนเนื่องจากความเร็วเสียง

จะเกิดเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิโซติก คือความเร็วในการไหลของของไหลสูงกว่าความเร็วเสียง ซึ่งจะมีผลกระทบต่อ การถ่ายเทความร้อน ของท่อความร้อน

$$q_s = 0.47 \lambda A_v (\rho_v P_v)^{\frac{1}{2}} \quad (3.30)$$

โดย

- q_s = ซีดจำกัดความเร็วเสียง
- λ = Latent heat of vaporization
- A_v = พื้นที่ส่วนของไอ
- ρ_v = ความหนาแน่นของไอ
- P_v = ความดันไอ

3.7.3 ซีดจำกัดการถ่ายความร้อนเนื่องจากการดึงของเหลวกลับ

สภาวะการเกิดการดึงกลับของของเหลว เมื่อไอมีความเร็วสูงขึ้น แรงเฉือนที่ไอกระทำกับของเหลวใช้งานภายในวิกที่ผิวสัมผัส ระหว่างไอกับผิววิก อาจมีขนาด โตกว่าแรงต้านที่เกิดจากแรงดึงผิวของของไหลใช้งาน ทำให้หยดของเหลวหลุดลอยไปกับไอในช่วงการควบแน่น ปรากฏการณ์ดังกล่าวขัดขวางการทำงานของฮีทไปป์

$$q_e = A_v \lambda \left(\frac{8\sigma\rho_v}{l} \right)^{0.5} \quad (3.31)$$

โดย	q_e	=	ขีดจำกัดการถ่ายความร้อนเนื่องจากการดึงของเหลวกลับ
	A_v	=	พื้นที่ส่วนของไอ
	λ	=	Latent heat of vaporization
	σ	=	แรงดึงผิว
	ρ_v	=	ความหนาแน่นของไอ
	l	=	Characteristic length of wick

ค่า l เป็นค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับ ขนาดของร่องตาข่าย โดย เป็นค่าซึ่งหาค่าที่ถูกต้องยาก โดยทั่วไปอาจใช้การประมาณเอาจาก สองเท่าของรัศมีของหยดของเหลวที่ใหญ่ที่สุด ที่เกิดขึ้นส่วนในสุดของลวดตาข่าย

3.7.4 ซีดจำกัดการถ่ายความร้อนเนื่องจากการเดือด

เป็นการถ่ายเทความร้อนในช่วงการระเหย เมื่อของไหลทำงานได้รับความร้อนมากพอจนเกิดการอิมตัว และเดือดเป็นไอน้ำในช่วงการกลั่นตัว จะเกิดฟองของเหลวขึ้น ซึ่งฟองนี้จะไปติดอยู่ตามวิก ซึ่งจะทำให้ของเหลว ไม่สามารถไหลไปยังส่วน คอนเดนเซอร์ ได้

$$q_b = \left(\frac{2\pi L_e k_{eff} T_v}{\lambda \rho_v \ln\left(\frac{r_i}{r_v}\right)} \right) \left(\frac{2\sigma}{r_n} - \Delta P_{c,m} \right) \quad (3.25)$$

โดย	q_b	=	ขีดจำกัดการถ่ายความร้อนเนื่องจากการเดือด
	L_e	=	ความยาวส่วน evaporator
	k_{eff}	=	Effective thermal conductivity
	T_v	=	อุณหภูมิไอ
	λ	=	Latent heat of vaporization

ρ_v = ความหนาแน่นของไอ

σ = แรงตึงผิว

r_i = รัศมีในท่อ

r_v = รัศมีช่วงไอไหลผ่าน

r_n = รัศมี nucleation

$\Delta P_{c,m}$ = ผลต่างความดันสูงสุดช่วง คอนเดนเซอร์

โดยค่า k_{eff} แสดงสูตรการหาได้จากตารางที่ อย่างไรก็ตาม การหาค่าคงที่ต่างๆในสมการนี้ สามารถทำได้ยาก และ เนื่องจาก ชัดจำกัดการถ่ายความร้อนเนื่องจากการเดือด มักจะมีค่าสูง ฮีทไปป์ทั่วไปจะมีขีดจำกัดอื่นๆต่ำกว่า ดังนั้น จึงไม่นิยมนำ ชัดจำกัดเนื่องจากการเดือดมาคิด



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย