



บทที่ 2 ทฤษฎีเกี่ยวกับฮีตไพป์

2.1 การถ่ายเทความร้อนในช่วงการระเหย

ที่ฟลักซ์ความร้อนต่ำๆ ความร้อนที่บ้อนเข้าส่วนหนึ่งของฮีตไพป์จะไหลผ่านผนังท่อไปยังผิวอิสระ (ผิวบน) ของของเหลวโดยการนำความร้อน และอีกส่วนหนึ่งไหลผ่านชั้นของเหลวไปยังผิวอิสระ โดยการพาอย่างอิสระ (free convection) การระเหยแทบทั้งหมดจะเกิดขึ้นที่ผิวของของเหลว เมื่อฟลักซ์ความร้อนสูงขึ้น ของเหลวที่สัมผัสอยู่กับผนังท่อจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น และจะระเหยเป็นฟอง (Bubble) ขึ้นที่ Nucleation site ของผนังท่อ เมื่อฟองเหล่านี้หลุดขึ้น จะพาความร้อนส่วนหนึ่งไปยังผิวของของเหลวในรูปความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ ในขณะที่เดียวกันการส่งผ่านความร้อนโดยการพา (convection) ก็จะมีมากขึ้นด้วย ถ้าเพิ่มฟลักซ์ความร้อนให้สูงขึ้นไปอีกจนถึงจุดวิกฤตก็จะเกิด "การแห้งเหือด" ได้ (burn out) ในกรณีของฮีตไพป์ที่มีวิกค์ วิกค์จะแห้งทำให้ฮีตไพป์ไม่สามารถทำงานต่อไปได้

2.2 การเดือดแบบนิวเคลียเอทและการเกิดฟอง (Nucleate boiling and bubble formation)

โดยการทำสมดุลย์ของแรงตึงผิวและแรงเนื่องจากความดัน

$$2\pi R \cdot \delta_L = \Delta P \cdot \pi R^2$$

ดังนั้น ผลต่างความดันระหว่างผิวโค้งที่มีรัศมี R คือ

$$\Delta P = \frac{2\delta_L}{R} \quad (2.1)$$

การเกิดฟองจะต้องเริ่มที่ nucleation center ซึ่งจำต้องมีรัศมีที่จำกัดค่าหนึ่ง ของเหลวที่จะเกิดฟองจะต้องได้รับความร้อนอย่างยิ่งยวด (Superheat) ทั้งนี้เพื่อก่อให้เกิดผลต่างความดัน ΔP

ปริมาณความร้อนที่จะทำให้เกิดความร้อนยิ่งยวด สอดคล้องกับอุณหภูมิในสมการของ Clausius-Clapeyron

$$\frac{dP}{dT} = \frac{L}{T(v_v - v_l)} \quad (2.2)$$

v_l คือ ปริมาตรของของเหลวหนึ่งหน่วยมวล

ตามปกติแล้ว $v_l \ll v_v$

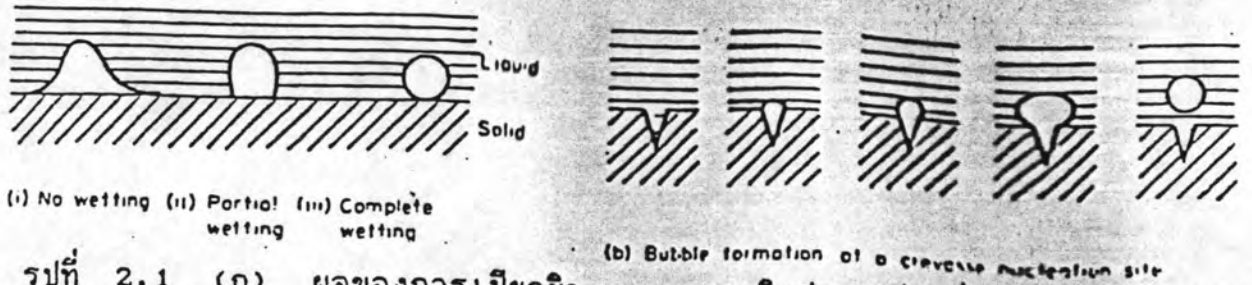
$$\text{ดังนั้น} \quad \frac{dP}{dT} = \frac{L}{Tv_v}$$

เมื่อรวมสมการ (2.1) และ (2.2) เข้าด้วยกันจะได้

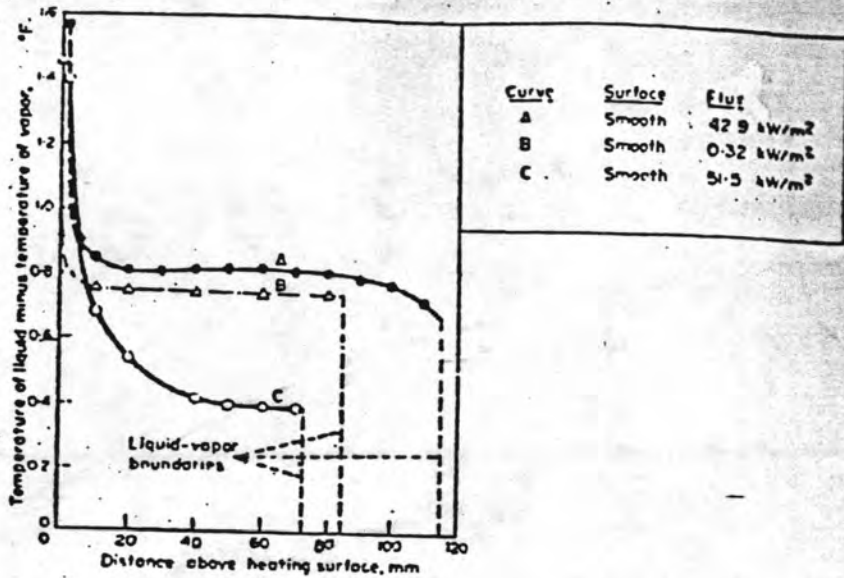
$$\Delta T = \frac{2\sigma_l Tv_v}{LR} = \frac{2\sigma_l T}{\rho LR} \quad (2.3)$$

กลไกการเกิดฟองขึ้นอยู่กับลักษณะสมบัติการเปียกผิวของพื้นผิวรับความร้อนเป็นอย่างมาก รูปที่ 2.1 (ก) แสดงการสัมผัสแบบเปียก (wetting) และไม่เปียก (non-wetting) ของของเหลวบนผนังผิวเรียบ ฟองจะเกิดขึ้นได้ง่ายถ้าผิวสัมผัสไม่เปียก ยิ่งไปกว่านั้นการเกิดฟองจำเป็นต้องมี Nucleation site ด้วย

การสร้าง Nucleation site อาจทำได้โดยการทำให้ผิวเรียบให้ขรุขระหรือโดยการปลดปล่อยแก๊สที่ผิวเรียบดูดซับไว้ รูปที่ 2.1 (ข) แสดงให้เห็นการเกิดฟองจากร่องที่เจาะไว้บนผิวเรียบ ในการทำให้เกิดฟองบนผิวที่เรียบสะอาดจำเป็นต้องใช้ความร้อนมากกว่ากรณีที่ผิวขรุขระรูปที่ 2.2 แสดงให้เห็นถึงความแปรเปลี่ยนของอุณหภูมิ กับระยะทางจากผิวอิสระของของเหลว (น้ำ) ไปยัง nucleation site ในสถานะที่กำลังเกิด Nucleate boiling บนผิวของสแตนเลสที่ความดันบรรยากาศ จะเห็นได้ว่าฟลักซ์ความร้อนที่ผ่านผิวเรียบไม่มีความสัมพันธ์กับผลต่างอุณหภูมิระหว่างของเหลวกับไอ กล่าวคือ Curve B ซึ่งมีฟลักซ์ความร้อนผ่านผิวเรียบน้อยมาก (0.32 kW/m^2) เมื่อเปรียบเทียบกับ Curve A (42.9 kW/m^2) และ Curve C (51.5 kW/m^2) แต่ก็ยังให้ผลต่างอุณหภูมิระหว่างของเหลวและไอสูงใกล้เคียงกับ Curve A และมากกว่าผลต่างอุณหภูมิของ Curve B



รูปที่ 2.1 (ก) ผลของการเปียกผิว (ข) การเกิดฟองบนร่องที่เป็น Nucleation site เมื่อสัมผัสกับฟองอากาศเป็นมุมต่างๆ



รูปที่ 2.2 ความแปรเปลี่ยนของอุณหภูมิกับระยะทางจากผิวของของเหลวในสถานะที่กำลังเกิด Nucleate boiling

ซิน (Schins) (6) ได้รายงานผลการทดลองที่คล้ายคลึงกัน โดยศึกษาจากการเดือดของโซเดียมที่ 785-875 °C ในหม้อต้มสแตนเลส เขาพบว่า การเปียกผิวของสแตนเลสโดยโซเดียม ทำให้เกิด Nucleation ได้ยากมาก จำเป็นต้องให้ผลต่างอุณหภูมิของของเหลวและไอสูงถึง 100 °C แต่หลังจากเวลาผ่านไปชั่วขณะหนึ่งผลต่างอุณหภูมิที่ทำให้เกิด Nucleation จะตกลงมาเหลือเพียง 20 °C เท่านั้น ปรากฏการณ์นี้เป็นเรื่องที่แปลกมากและยังอธิบายไม่ได้

ซู (Hsu) (7) ได้หาสมการสำหรับผลต่างอุณหภูมิระหว่างของเหลวกับไอ โดยมีรูปแบบคล้ายคลึงกับสมการ (2.3) คือ

$$\Delta T = \frac{12.8 \delta_f T_s}{J \rho L \delta}$$

$$= \frac{3.06 \delta_f T_s}{\rho L \delta} \quad [\text{SI Unit}] \quad (2.4)$$

โดยที่ δ เป็นความหนาของชั้นความร้อน (Thermal boundary layer thickness) ซึ่งอาจประมาณได้ว่าเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของร่องบนผิวเรียบ สำหรับพื้นผิวทั่วไปจะมีค่าประมาณ 10^{-3} นิ้ว หรือ 2.5×10^{-3} ซม. ค่าผลต่างอุณหภูมิระหว่างของเหลวกับไอ (ΔT) สำหรับของเหลวบางชนิดมีแสดงไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ผลต่างอุณหภูมิระหว่างของเหลวกับไอ (ΔT) ที่สอดคล้องกับจุดเดือด ณ ความดันบรรยากาศ (เมื่อ $\delta = 2.5 \times 10^{-3}$ ซม.) สำหรับของเหลวบางชนิดโดยใช้สูตรของ ชู

Fluid	Boiling point K	Vapour density kg/m ³	Latent heat kJ/kg	Surface tension N/m	ΔT °C
Ammonia (NH ₃)	239.7	0.3	1350	0.028	2.0
Ethyl alcohol (C ₂ H ₅ OH)	338	2.0	840	0.021	0.51
Water	373	0.60	2258	0.059	1.9
Potassium	1047	0.486	1938	0.067	8.9
Sodium	1156	0.306	3913	0.113	26.4
Lithium	1613	0.057	19700	0.26	44.8

2.3 สหสัมพันธ์ของข้อมูลการเดือดแบบนิวคลีเอท (Correlation of nucleate boiling data)

การเดือดแบบนิวคลีเอทขึ้นอยู่กับพื้นผิวรับความร้อนเป็นอย่างมาก (8) นอกจากนั้น องค์ประกอบอื่นๆ เช่น การปลดปล่อยแก๊สที่พื้นผิวดูดซับไว้, ความหยาบของพื้นผิว, การเกิดออกซิเดชันบนพื้นผิว, สภาพการเปียกของพื้นผิว ต่างก็มีความสำคัญต่อผลต่างอุณหภูมิที่จะทำให้เกิดฟองทั้งสิ้น ธรรมชาติของพื้นผิว รับความร้อนอาจเปลี่ยนแปลงไป เมื่อเวลาผ่านไป กระบวนการนี้รู้จักกันในชื่อ "Conditioning" จากเหตุผลต่างๆ ที่กล่าวมานี้ ทำให้การทดลองซ้ำเนี่ย ยันผลการทดลองเป็นไปได้ยาก อย่างไรก็ตามมีนักวิจัยหลายคน ได้พยายาม เสนอสหสัมพันธ์ต่างๆ ซึ่งมีทั้งในแบบการทดลอง (empirical) และแบบที่มีพื้นฐานทางทฤษฎี (physical model) ดังต่อไปนี้

2.4 การเดือดแบบนิวคลีเอทในน้ำและของไหลอินทรีย์

(Nucleate boiling in water and organic liquid)

Rosenhow (9) ได้เสนอสหสัมพันธ์ที่ใช้กับของเหลวประเภทนี้ โดยใช้แบบจำลองที่พิจารณาถึง การถ่ายเทความร้อนแบบการพา เนื่องจากฟอง ของไ

$$Nu_b = f(Re_b, Pr_1)$$

โดยที่ Nu_b = ตัวเลขนัสเซลท์ของฟอง = $q / K_f \Delta T$
= ความร้อนที่ถ่ายเทโดยการพา / ความร้อนที่ถ่ายเทโดยการนำ

$$Pr_1 = \text{ตัวเลขแพรนด์ทัลของของเหลว} = \frac{C_p \mu_1}{K_f}$$

$$Re_b = \text{ตัวเลขเรย์โนลด์ของฟอง} = \frac{\rho V_f D_f}{\mu_1}$$

$$D_f = \text{เส้นผ่าศูนย์กลางของฟอง}$$

Rosenhow ได้หาความสัมพันธ์ของตัวแปรข้างต้นนี้ในรูป

$$\frac{Re_b Pr_f}{Nu_b} = C Re_b^n Pr_f^m$$

และได้ทำการทดลองโดยการให้ความร้อนกับหลอดทองคำขาว (platinum) เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.024 นิ้ว ในน้ำกลั่น ในที่สุดก็ได้ความสัมพันธ์

$$\frac{C_p \Delta T}{L} = 0.013 \left[\frac{q \sqrt{g_c b}}{\mu_f L \sqrt{g (\rho_f - \rho_s)}} \right]^{0.33} \left[\frac{C_p \mu_f}{K_f} \right]^{1.7} \quad (2.5)$$

สหสัมพันธ์ข้อมูลการเดือดของ Rosenhow ใช้ได้ดีกับของเหลวและพื้นผิวรับความร้อนคู่อื่น ๆ เมื่อเปลี่ยนค่าคงที่ 0.013 ให้เหมาะสมตามแต่คู่ของของเหลวและพื้นผิว ตาราง 2.2 แสดงค่าคงที่สำหรับคู่ของเหลวพื้นผิวชนิดต่างๆ

ตาราง 2.2 ค่าคงที่สำหรับคู่ของเหลวพื้นผิวชนิดต่างๆ

Surface fluid combination	C
Water-nickel	0.006
Water-platinum	0.013
Water-copper	0.013
Water-brass	0.006
Water-nickel and stainless steel	0.013
Water-stainless steel	0.014
Carbon tetrachloride-copper	0.013
Benzene-chromium	0.010
n-pentane-chromium	0.015
Ethyl alcohol-chromium	0.0027
Isopropyl alcohol-copper	0.0025
n-butyl alcohol-copper	0.0030

นักวิจัยหลายคนพยายามที่จะหาความสัมพันธ์ที่สามารถทำนายฟลักซ์ความร้อนวิกฤต (Critical heat flux) (q_c) Rosenhow และ Griffith (10) ได้เสนอความสัมพันธ์ในรูป

$$\frac{q_c}{L\rho} = 0.012 \left[\frac{P_l - P_v}{\rho} \right]^{0.6} \quad (2.6)$$

Caswell และ Balzhieser (11) ได้เสนอความสัมพันธ์

$$\frac{q C_p^3 Pr^{-0.71}}{L^2 \rho K_f} = 1.02 \times 10^{-6} \left[\frac{P_l - P_v}{\rho} \right]^{0.65} \quad (2.7)$$

อนึ่ง ผู้สนใจอาจหาอ่านเพิ่มเติมได้จากรายงานของ Subbotin (12) และ Dwyer (13)

2.5 ผลลดความดันที่ผิวสัมผัสระหว่างของเหลวกับไอ

(Liquid-vapor interface pressure drop)

พิจารณาผิวนอกของของเหลว ซึ่งโมเลกุลของไอกำลังเคลื่อนที่ออกจากพื้นผิวอย่างสม่ำเสมอโดยการระเหย ถ้าของเหลวอยู่ในสภาวะสมดุลกับไอที่อยู่รอบๆ ฟลักซ์ของโมเลกุลของไอในจำนวนเท่ากันจะเคลื่อนกลับเข้าไปในของเหลว ดังนั้นจึงไม่มีมวลสุทธิที่หายไป แต่ในกรณีที่ผิวของของเหลวกำลังสูญเสียมวลโดยการระเหย ความดันและอุณหภูมิของไอเหนือผิวของเหลวจะมีค่าน้อยกว่าของสภาวะสมดุล ขนาดของผลลดความดันที่เกิดขึ้นสามารถประมาณได้ดังต่อไปนี้

จากทฤษฎีจลนศาสตร์ ความเร็วเฉลี่ย v_{av} ของไอน้ำหนักโมเลกุล m ที่อุณหภูมิ T_v คือ

$$v_{av} = \sqrt{\frac{8kT_v}{\pi m}}$$

โดยที่ k = ค่าคงที่ของโบลต์zman (Boltzman constant)

อัตราการไหลเฉลี่ยของโมเลกุลในทิศทางใด คือ $\frac{nV_{av}}{4}$ /หน่วยพื้นที่ และอัตราการไหลของความร้อนที่สมนัยกันต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่คือ

$$\frac{mLnV_{2v}}{4}$$

โดยที่ n เป็นจำนวนโมเลกุลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร

และ L เป็นความร้อนแฝงของการระเหยต่อหน่วยมวล

สำหรับก๊าซอุดมคติ ความดันไอ $P_v = nkT_v$ ($k = \text{Boltzmann constant}$)

$$\text{ดังนั้น ฟลักซ์ความร้อน} = P_v L \sqrt{\frac{m}{2\pi kT_v}}$$

ฟลักซ์ความร้อนนี้ไหลเข้าไปยังผิวของของเหลว ในทำนองเดียวกัน ฟลักซ์ความร้อนที่หนีออกจากผิวของของเหลว กำหนดโดย

$$P_1 L \sqrt{\frac{m}{2\pi kT_1}}$$

ดังนั้น ฟลักซ์ความร้อนสุทธิที่ออกจากผิวหน้าของของเหลว

$$\begin{aligned} q &= (P_1 - P_v) L \sqrt{\frac{m}{2\pi kT_s}} \\ &= \frac{P_1 - P_v}{\sqrt{2\pi RT_s}} \end{aligned} \quad (2.8ก)$$

โดยที่ $T_s \approx T_v \approx T_1$

ค่าของ $q/(P_1 - P_v)$ สำหรับของเหลวบางชนิดมีแสดงไว้ในตาราง 2.3

– โดยการแทนค่าสมการ (2.2), สมการ (2.8ก) อาจเขียนได้ดังนี้

$$q = \frac{\Delta T L^2 P}{(2\pi RT_s)^{3/2}} \cdot \frac{1}{RT_s^2} \quad (2.8ข)$$

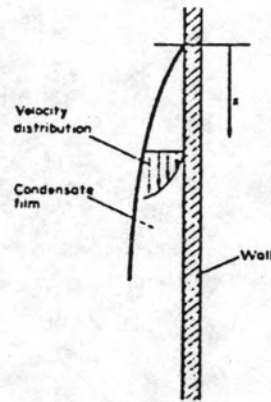
ตาราง 2.3 ค่า $q/(P_1 - P_v)$ ที่จุดเดือดปกติของของเหลว

Fluid	T_b (K)	$q/(P_1 - P_v)$ (kW/cm ² atm)
Lithium	1613	55
Zinc	1180	18
Sodium	1156	39
Water	373	21.5
Ethanol	351	13.5
Ammonia	238	15.2

2.6 การถ่ายเทความร้อนในช่วงการควบแน่น (Heat transfer in the condenser section)

การควบแน่นแบบฟิล์มทฤษฎีของนัสเซลท์

ทฤษฎีที่จะกล่าวถึงนี้พิจารณาการควบแน่นบนพื้นผิวที่วางตัวในแนวตั้ง ผลของการควบแน่นก่อให้เกิดฟิล์มของของเหลวซึ่งไหลลงมาด้วยแรงโน้มถ่วง ในที่นี้จะสมมติว่าการไหลที่ผิวสัมผัสเป็นแบบชั้นๆ (laminar) และไม่คำนึงถึงแรงเค้นเฉือน (Viscous shear) ที่ผิวสัมผัสระหว่างไอและของเหลว อัตราการไหลเชิงมวลของของเหลวจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อระยะห่างจากจุดบนสุดเพิ่มขึ้น โปรไฟล์ของการไหลเป็นดังแสดงในรูป 2.3



รูปที่ 2.3 การควบนแน่นแบบฟิล์มบนผิวเรียบในแนวตั้ง

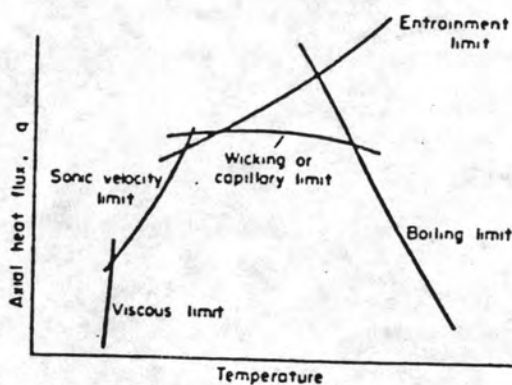
สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย h ที่ระยะห่าง x จากจุดบนสุดหาได้จาก

$$h = 0.943 \left[\frac{L \rho^2 g k_f^3}{x \mu_f (T_s - T_w)} \right]^{1/4} \quad (2.9)$$

โดยที่ $T_s - T_w$ เป็นผลต่างอุณหภูมิระหว่างผิวของฟิล์มต้านที่สัมผัสกับไอและต้านที่สัมผัสกับผนัง

2.7 ขีดจำกัดการถ่ายเทความร้อน (Limits to heat transport)

ปัจจัย (factors) ที่กำหนดขีดจำกัดด้านบนของสมรรถนะการส่งถ่ายความร้อนของฮีทไปป์ มีหลายอย่าง (ดูรูป 2.4)



รูปที่ 2.4 ขีดจำกัดสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของอีทไพบ์

1. ขีดจำกัดของความหนืด (Viscous Limit)

ในกรณีอุณหภูมิต่ำ ความหนืดของไออาจเป็นตัวหลักที่กำหนดอัตราการไหลของไอภายในอีทไพบ์

2. ขีดจำกัดของความเร็วเสียง (Sonic Limit)

ในตอนเริ่มใช้งาน หรือในกรณีที่ใช้อีทไพบ์ที่มีของไหลใช้งานเป็นโลหะเหลวอุณหภูมิสูง ความเร็วไอที่ปลายสุดของช่องของการระเหยอาจมีค่าใกล้เคียงกับความเร็วเสียง ซึ่งจะทำให้เกิด Compressibility Effect ก่อให้เกิดขีดจำกัดของสมรรถนะการส่งถ่ายความร้อน

3. ขีดจำกัดของการหลุดลอย (Entrainment Limit)

เมื่อไอมีความเร็วสูงขึ้น แรงเฉือนที่ไอกระทำต่อของเหลวใช้งานภายในวิก์ที่ผิวสัมผัสระหว่างไอกับผิววิก์อาจมีขนาดโตกว่า แรงต้านที่เกิดจากแรงตึงผิวของของเหลวใช้งาน ทำให้หยดของเหลวหลุดลอยไปกับไอไปยังช่องการควบแน่น ปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้จะขัดขวางการทำงานของอีทไพบ์และเป็นขีดจำกัดอันหนึ่งของสมรรถนะของอีทไพบ์

4. ขีดจำกัดของท่อรูเข็ม (ขีดจำกัดของวิกค์)

ถ้าความดันลดยุติที่วิกค์เกิดขึ้นได้โดยแรงท่อรูเข็ม มีขนาดเล็กกว่าความดันลดยุติที่เกิดจากการไหลเวียนของของไหลใช้งานเมื่อไร ของไหลใช้งานจะไม่สามารถไหลกลับถึงช่วงการระเหยได้ ผลก็คือ เกิดการแห้งตัว (Dry out) ของวิกค์ และฮีตไพป์จะหยุดทำงาน

รูป 2.4 แสดงตัวอย่างหนึ่งของขีดจำกัดดังกล่าวข้างต้นที่มีต่ออัตราการล่งถ่ายความร้อนสูงสุดในแนวแกนของฮีตไพป์ เราจำต้องเลือกจุดใช้งาน (เงื่อนไขใช้งาน) ที่อยู่ด้านล่างของกลุ่มเส้นขีดจำกัดเหล่านี้ รูปร่างที่แท้จริงของเส้นขีดจำกัดจะเปลี่ยนแปลงได้ตามชนิดของของไหลใช้งาน, วัสดุของวิกค์และรูปร่างของฮีตไพป์ เป็นต้น