

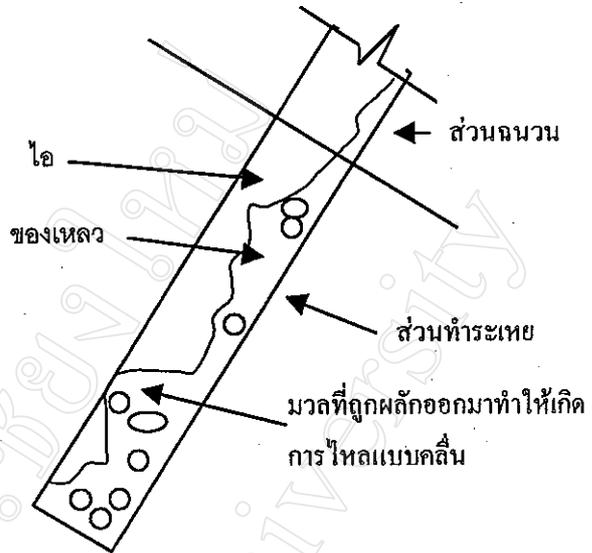
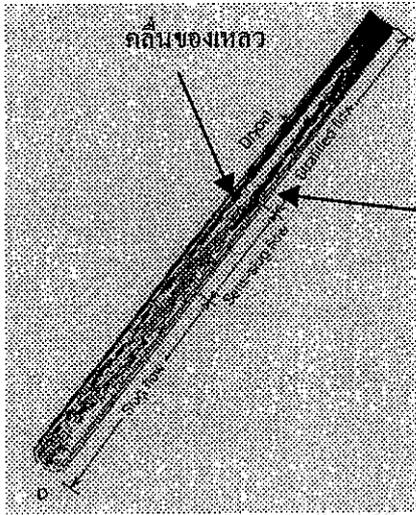
บทที่ 3

การสร้างแบบจำลองขีดจำกัดสมรรถนะ

3.1 โครงสร้างการทำแบบจำลอง

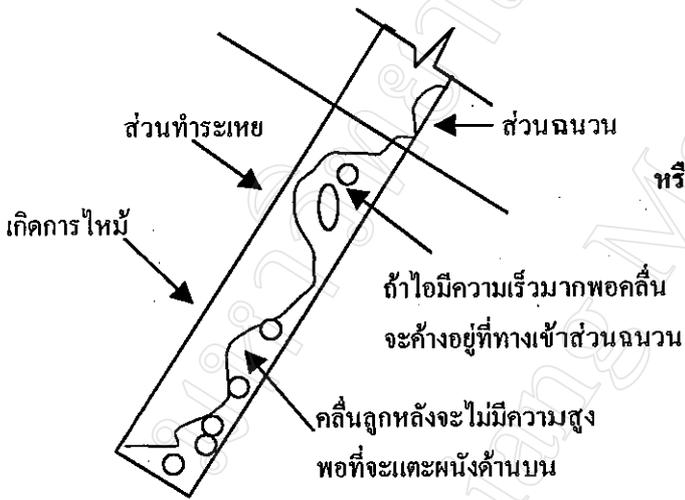
ในการวิเคราะห์ค่าอัตราการส่งผ่านความร้อนสูงสุดหรือขีดจำกัดสมรรถนะนั้นวิธีการวิเคราะห์ที่ได้ผลแม่นยำก็คือ การวิเคราะห์การส่งผ่านความร้อนและอัตราการผลิตไอในส่วนทำระเหย รวมทั้งการส่งผ่านไอไปยังส่วนควบแน่นเนื่องจากส่วนทำระเหยเป็นส่วนที่ได้รับความร้อนโดยตรง แต่เนื่องจากการวิเคราะห์ดังกล่าวสามารถกระทำได้ยาก เพราะปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในส่วนทำระเหยเป็นผลรวมของปรากฏการณ์หลายปรากฏการณ์ที่มีความซับซ้อนมากเช่นการเดือดแบบฟอง การเดือดแบบฟิล์ม ปรากฏการณ์การพา ปรากฏการณ์การท่วม รวมทั้งสารทำงานที่อยู่ในส่วนแอ่งของเหลวยังมีลักษณะเป็นของไหลสองสถานะทำให้การวิเคราะห์สามารถทำได้ยากขึ้นไปอีก ดังนั้นเพื่อที่จะหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าว วิธีการหนึ่งที่เหมาะสมก็คือการวิเคราะห์การส่งผ่านความร้อนจากการคำนวณผ่านความหนาฟิล์มควบแน่นที่ด้านควบแน่น ทั้งนี้เนื่องจากในเทอร์โมไซฟอนเปิดสองสถานะนั้นอัตราการไหลของไอที่เข้าสู่ส่วนควบแน่นจะเท่ากับอัตราการไหลของของเหลวไหลกลับที่ออกจากส่วนควบแน่น ซึ่งการหาอัตราการไหลของเหลวไหลกลับและความหนาฟิล์มของเหลวควบแน่นในส่วนควบแน่นนั้นสามารถย่อปัญหาลงมาเป็นปัญหาในหนึ่งมิติได้ ดังที่พบในการวิเคราะห์ความหนาฟิล์มควบแน่นบนแผ่นระนาบขนาดใหญ่ของ Nusselt แต่การวิเคราะห์ของ Nusselt เป็นการวิเคราะห์ปัญหาในหนึ่งมิติและใช้ฟังก์ชันที่เขียน ซึ่งเมื่อนำไปใช้แก้ปัญหาในฟังก์ชันชั่ว-สองมิติในเทอร์โมไซฟอนดังที่นักวิจัยหลายท่านนำไปใช้ก็จะเกิดค่าผิดพลาดขึ้น ดังนั้นในการศึกษานี้จะอาศัยวิธีการวิเคราะห์การส่งผ่านความร้อนผ่านฟิล์มของเหลวด้านควบแน่นในฟังก์ชันชั่ว-สองมิติในการสร้างแบบจำลอง โดยพิจารณาว่ามีปรากฏการณ์การแห้งเหือดและปรากฏการณ์การท่วมเท่านั้นที่ควบคุมขีดจำกัดการส่งผ่านความร้อนโดยมีกลไกดังนี้

เมื่อเทอร์โมไซฟอนแบบเอียงที่มีอัตราการเติมมากเกินพอทำงานในสถานะคงตัว ไอที่เกิดขึ้นในส่วนทำระเหยจะลอยขึ้นไปควบแน่นที่ส่วนควบแน่น และไอที่ลอยขึ้นไปนี้จะผลักมวลของเหลวส่วนหนึ่งที่อยู่ในแอ่งของเหลวในส่วนทำระเหยให้ออกไปยังปากทางเข้าส่วนฉนวน ทำให้เกิดรูปแบบการไหลแบบคลื่นดังในรูป 3.1 (ก) และ (ข) หากมวลของเหลวส่วนนี้มีเสถียรภาพมากพอที่จะเอาชนะแรงเนื่องจากน้ำหนักตัวของของเหลวเองได้ มวลของเหลวส่วนนี้จะไม่ตกกลับไปยังแอ่งของเหลว แต่จะค้างอยู่ที่ปากทางเข้าส่วนฉนวนและมีผลทำให้ของเหลวไหลกลับจากส่วนควบแน่นไม่สามารถไหล



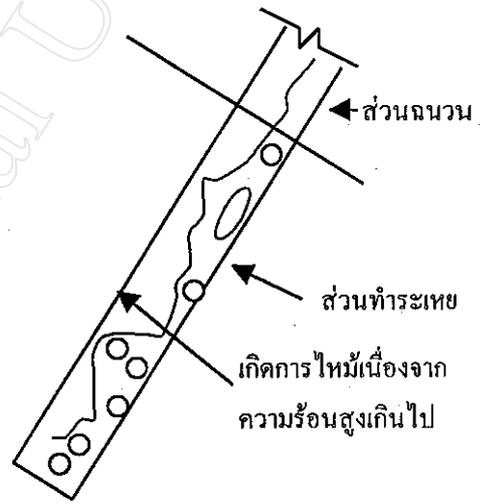
(ก) ภาพถ่ายรูปแบบการไหลใน

(ข) มวลที่ถูกผลักออกมาทำให้เกิดคลื่น



(ค) เกิดการไหม้เนื่องจากการท่วม

หรือ



(ง) เกิดการไหม้เองเนื่องจากความร้อนสูงเกินไป

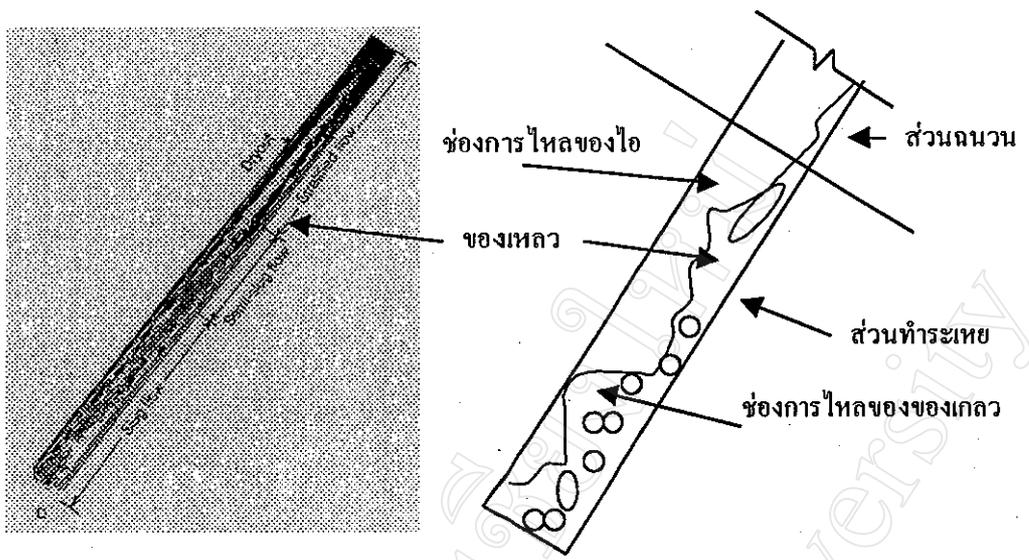
รูป 3.1 แสดงรูปแบบการไหลในเทอร์โมโซโฟนปิดสองสถานะแบบเอียง

กลับไปที่แอ่งของเหลวทางด้านล่างได้ ทำให้คลื่นของเหลวถูกหลังๆ มีความสูงไม่มากพอที่จะแตะผนังด้านบนของเทอร์โมไซโฟนเพื่อทำให้ผิวด้านบนของเทอร์โมไซโฟนเปียกอยู่ได้เนื่องจาก ไม่มีมวลของเหลวในแอ่งของเหลวมากพอ ผิวแลกเปลี่ยนความร้อนด้านบนของเทอร์โมไซโฟนก็จะเกิดการไหม้ขึ้น ซึ่งเป็นที่รู้จักกันดีในชื่อขีดจำกัดการท่วมดังรูป 3.1(ค) แต่หากของเหลวที่ปากทางเข้าส่วนฉนวนไม่มีเสถียรภาพเพียงพอ ของเหลวที่ปากทางเข้าส่วนฉนวนนี้ก็จะตกกลับมาที่ส่วนทำระเหยอีกครั้งด้วยแรงโน้มถ่วงมวลของเหลวในแอ่งจะไม่ลดลง ดังนั้นคลื่นถูกหลังๆ ที่เกิดขึ้นก็จะมีความสูงมากพอที่จะแตะผนังด้านบนของเทอร์โมไซโฟนเพื่อทำให้ผิวด้านบนของเทอร์โมไซโฟนเปียกอยู่ได้ ทำให้ไม่เกิดการไหม้ขึ้นในเทอร์โมไซโฟนเนื่องจากปรากฏการณ์การท่วม

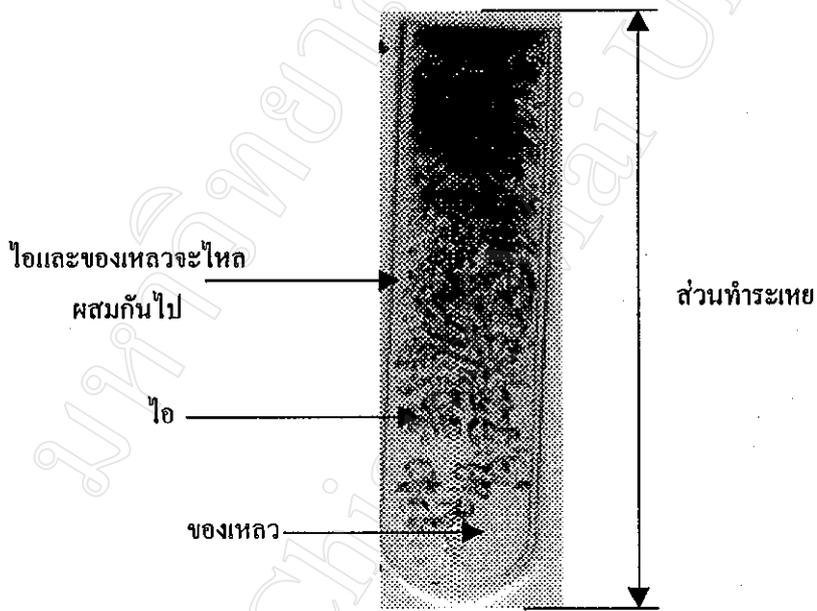
ในขณะที่การเกิดคลื่นและการท่วมปรากฏอยู่ในเทอร์โมไซฟอนนั้น การไหม้จากปรากฏการณ์การแห้งก็สามารถเกิดขึ้นได้เช่นกันดังนี้ เมื่อความหนาแน่นความร้อนที่ส่งผ่านเข้ามาที่ส่วนทำระเหยมีค่ามากเกินไปและฟิล์มที่ไหลกลับจากส่วนควบแน่นบางเกินไปก็จะทำให้ฟิล์มของเหลวที่เคลือบอยู่ที่ผิวด้านบนของเทอร์โมไซโฟนระเหยไปอย่างรวดเร็วแม้ว่าจะมีคลื่นของเหลวแตะผนังด้านบนของเทอร์โมไซโฟนอยู่ก็ตามดังรูป 3.1(ง) ทำให้ผิวด้านบนของเทอร์โมไซโฟนเกิดการแห้งและมีอุณหภูมิสูงขึ้นจนเกิดการไหม้ ซึ่งรู้จักกันดีในชื่อขีดจำกัดการแห้งเพื่อ

ปรากฏการณ์ทั้งสองมีโอกาสที่จะเกิดก่อนและควบคุมขีดจำกัดการส่งผ่านความร้อนในเทอร์โมไซโฟนได้เท่าๆกัน แต่อย่างไรก็ตามที่ตำแหน่งมุมเอียงใกล้แนวราบ ปรากฏการณ์การแห้งเพื่อมีโอกาสที่จะเกิดขึ้นได้ก่อน เพราะรูปแบบการไหลที่มุมเอียงใกล้แนวราบจะเป็นการไหลแบบคลื่นแยกชั้นดังแสดงในรูป 3.2 โดยไอจะไหลแยกออกจากของเหลวอย่างชัดเจนทำให้การท่วมเกิดขึ้นได้ยาก เพราะไอออกแรงกระทำกับของเหลวที่บริเวณผิวยอดต่อ ไอ-ของเหลวเท่านั้น ซึ่งแรงดังกล่าวมีค่าไม่มากพอที่จะเอาชนะแรงเนื่องจากน้ำหนักตัวของเหลวได้ ในขณะที่ที่มุมเอียงใกล้แนวตั้งปรากฏการณ์การท่วมก็จะมีโอกาสเกิดขึ้นก่อนเนื่องจากรูปแบบการไหลภายในเป็นแบบฟอง (Bubble flow) ของเหลวในแอ่งของเหลวจะมีโอกาสสัมผัสทั่วทั้งผิวด้านบนทำระเหยได้ดีกว่าการไหลแบบแยกชั้น การแห้งของฟิล์มของเหลวเนื่องจากความร้อนจึงเกิดขึ้นได้ยาก และไอ-ของเหลวจะไหลผสมกันไปทำให้แรงที่ไอกระทำกับของเหลวมีค่ามากพอที่จะดันของเหลวให้ค้างอยู่ที่ปากทางเข้าส่วนฉนวนได้ทำให้เกิดปรากฏการณ์การท่วมและขีดจำกัดการส่งผ่านความร้อนจากการท่วมก่อนปรากฏการณ์การแห้ง

จากกลไกข้างต้นทำให้สามารถคำนวณหาค่าขีดจำกัดการส่งผ่านความร้อนวิกฤติในเทอร์โมไซโฟนปิดสองสถานะแบบเอียงได้ ดังขั้นตอนต่อไปนี้



(ก) รูปแสดงการไหลแบบคลื่นแยกชั้น



(ข) รูปแสดงแบบการไหลแบบฟอง

รูป 3.2 แสดงรูปแบบการไหลแบบแยกชั้นและแบบฟองในส่วนทำระเหย

3.1.1 หาค่าความหนาฟิล์มเฉลี่ยของของเหลวควบแน่นที่เกิดขึ้นในส่วนควบแน่น ดังแสดงในรูป 3.3 เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าอัตราการส่งผ่านความร้อนผ่านฟิล์มของเหลวสู่แหล่งรับความร้อน (Heat sink) ด้วยวิธีการนำความร้อน

3.1.2 หาเงื่อนไขของอุณหภูมิแหล่งให้ความร้อน (Heat source) และอุณหภูมิแหล่งรับความร้อนที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์การแห้งเหือดขึ้นในเทอร์โมไซฟอนแบบเอียง เพื่อหาค่าอัตราการส่งผ่านความร้อนวิกฤติตามเงื่อนไขการแห้งเหือดซึ่งมักจะเป็นค่าอัตราการส่งผ่านความร้อนวิกฤติที่มุมเอียงใกล้เคียง 90 องศา ด้วยกฎการนำความร้อนของฟูเรียร์ (Fourier law) ดังนี้

$$Q = k_1 A_c \frac{\Delta T_c}{\delta} \quad (3.1)$$

เมื่อ ΔT_c คือความแตกต่างของอุณหภูมิไอน์เทอร์โมไซฟอนและอุณหภูมิรับแหล่งความร้อนที่เป็นไปตามเงื่อนไขการแห้งเหือด

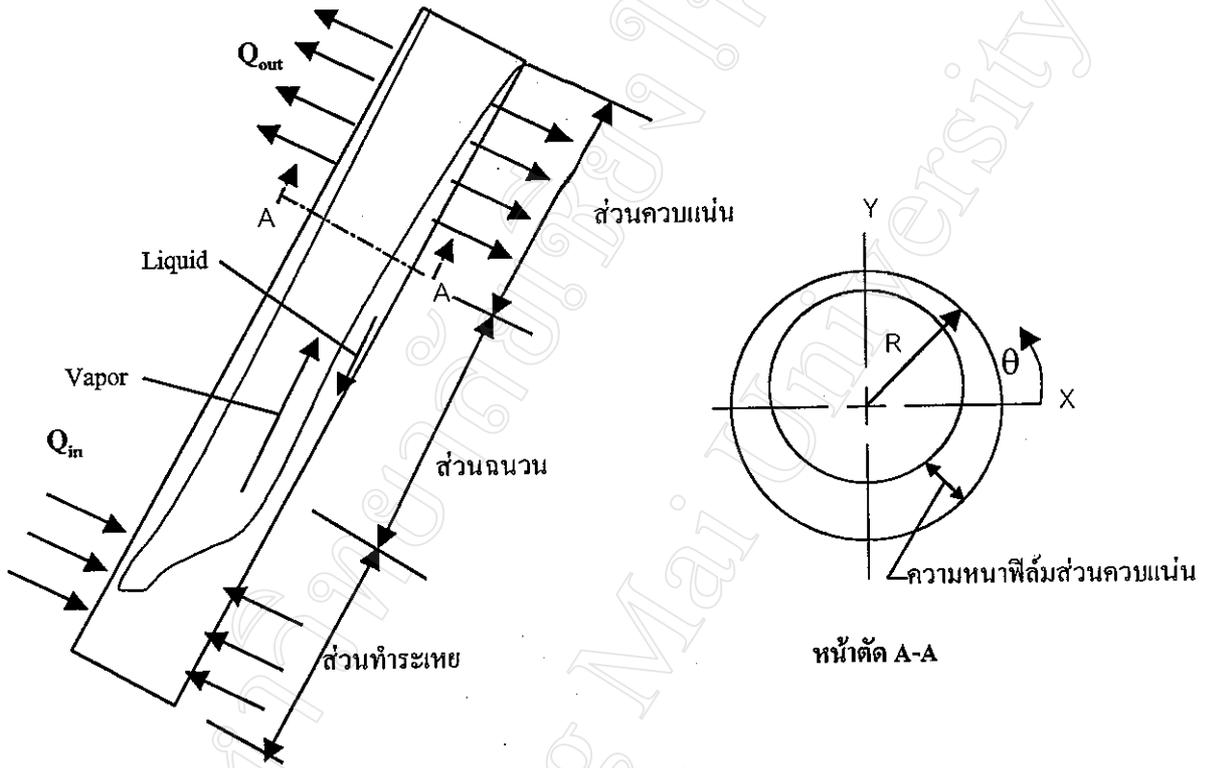
δ คือความหนาฟิล์มเฉลี่ยที่ได้จากข้อ 3.1.1

3.1.3 หาเงื่อนไขอัตราการไหล และความเร็วไอน์ในส่วนควบแน่นที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์การท่วม ขึ้นในเทอร์โมไซฟอนแบบเอียง เพื่อหาค่าอัตราการส่งผ่านความร้อนวิกฤติตามเงื่อนไขการท่วมซึ่งมักจะเป็นค่าอัตราการส่งผ่านความร้อนวิกฤติที่มุมเอียงใกล้เคียง 90 องศา ดังนี้

$$Q = \rho_v A_v v * h_{fg} \quad (3.2)$$

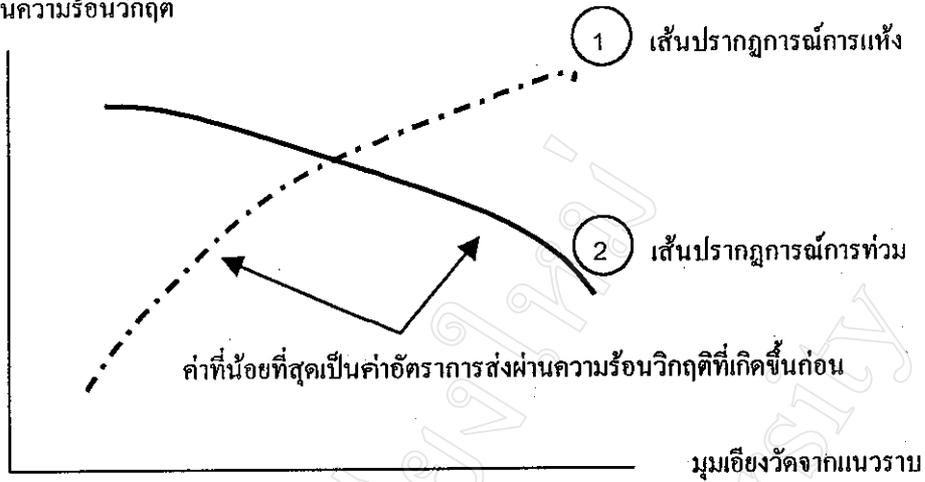
เมื่อ v คือความเร็วในส่วนท่าระเหยที่ทำให้เกิดการท่วมในเทอร์โมไซฟอน

ปรากฏการณ์ที่ควบคุมอัตราการส่งผ่านความร้อนวิกฤติที่มุมเอียงใดๆ จะเป็นค่าน้อยที่สุดของค่าที่ทำจากข้อ 3.1.2 และ 3.1.3 เปรียบเทียบกันที่มุมเอียงนั้นๆ ดังแสดงในรูป 3.4 และค่าอัตราการส่งผ่านความร้อนวิกฤติและมุมเอียงที่เหมาะสม (มุมที่ทำให้เกิดค่าอัตราการส่งผ่านความร้อนวิกฤติสูงสุด) จะหาได้จากจุดที่ปรากฏการณ์การแห้งเหือด และปรากฏการณ์การท่วมตัดกัน ซึ่งจะได้อธิบายรายละเอียดวิธีการหาค่าเหล่านี้ต่อไป



รูป 3.3 แสดงความหนาฟิล์มที่ส่วนควบแน่น

อัตราการส่งผ่านความร้อนวิกฤติ



Line	Internal Phenomena	Description
1	ปรากฏการณ์การแห้งที่หือค 	-มีโอกาสดเกิดได้ก่อนปรากฏการณ์การท่วม ในกรณีที่เทอร์โมไซฟอนอยู่ในตำแหน่งมุมเอียงใกล้แนวราบ -เมื่อเกิดปรากฏการณ์การแห้งฟิล์มของเหลวที่ขอบแ่งของเหลวในส่วนที่ระเหยจะแห้งหมดพอดี -ใช้ความหนาฟิล์มของเหลวที่ส่วนควบแน่นในการคำนวณค่าอัตราการส่งผ่านความร้อนวิกฤติ
2	ปรากฏการณ์การท่วม 	-มีโอกาสดเกิดได้ก่อนปรากฏการณ์การท่วม ในกรณีที่เทอร์โมไซฟอนอยู่ในตำแหน่งมุมเอียงใกล้แนวตั้ง -การท่วมจะเกิดเมื่อความเร็วไอในส่วนที่ระเหยมีค่าเหมาะสม และผลจากความเร็วไอจะทำให้เกิดครีมีวิกฤติที่ทำให้ของเหลวไม่สามารถไหลกลับแ่งของเหลวได้ -การส่งผ่านความร้อนวิกฤติที่เกิดขึ้นจริงจะเท่ากับการส่งผ่านความร้อนที่ทำให้เกิดการท่วม

รูป 3.4 การหาค่าอัตราการส่งผ่านความร้อนวิกฤติที่เกิดขึ้นจริงในเทอร์โมไซฟอนแบบเอียง

3.2 การหาค่าความหนาเฉลี่ยในส่วนควบแน่น

3.2.1 สมมติฐานในการคำนวณหาความหนาเฉลี่ยในส่วนควบแน่น

3.2.1.1 การพิจารณาความหนาฟิล์มของเหลวในส่วนควบแน่นจะไม่คิดผลของความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นที่ผิวรอยต่อ ไอ-ของเหลว เนื่องจากอิทธิพลของความเร็วไอ

3.2.1.2 จะพิจารณาว่าระบบ ไอ-ของเหลว ที่เกิดขึ้นในเทอร์โมไซฟอนมีความเร็วต่ำมากจนไม่คิดผลของความเฉื่อยของของเหลว ซึ่งปกติจะปรากฏในรูปการคลของของเหลว (Mass advective force)

3.2.1.3 พิจารณาว่าแหล่งความร้อนที่เทอร์โมไซฟอนทำงานอยู่เป็นแหล่งความร้อนที่ใหญ่มาก และอุณหภูมิของแหล่งความร้อนมีค่าเท่ากับผิวแลกเปลี่ยนความร้อนด้านนอกของเทอร์โมไซฟอน ดังนั้นความยาวส่วนทำระเหยที่มีค่ามากกว่าความยาวส่วนควบแน่นก็เสมือนว่ามีความยาวเท่ากับส่วนควบแน่น เพราะส่วนทำระเหยจะผลิตไอได้มากกว่าอัตราการควบแน่นที่ส่วนควบแน่นไม่ได้

3.2.1.4 ไม่คิดผลของค่าความต้านทานความร้อนที่เกิดจากวัสดุที่ใช้ทำท่อบรรจุเทอร์โมไซฟอน

3.2.1.5 ไม่มีการไหลข้ามชั้นระหว่างชั้นของเหลวด้วยกัน (ความเร็วของเหลวตามแนวรัศมีเท่ากับศูนย์)

3.2.2 การวิเคราะห์หาความหนาฟิล์มส่วนควบแน่น

พิจารณาสมการโมเมนต์ตามแนวเทอร์โมไซฟอนจากรูป 3.5 จะได้

$$\sum F_z = 0; \quad P\delta(rd\theta) - (P + \partial P)\delta(rd\theta) - \tau_2 rd\theta dz + \rho_l g \delta rd\theta dz \sin\beta = 0 \quad (3.3)$$

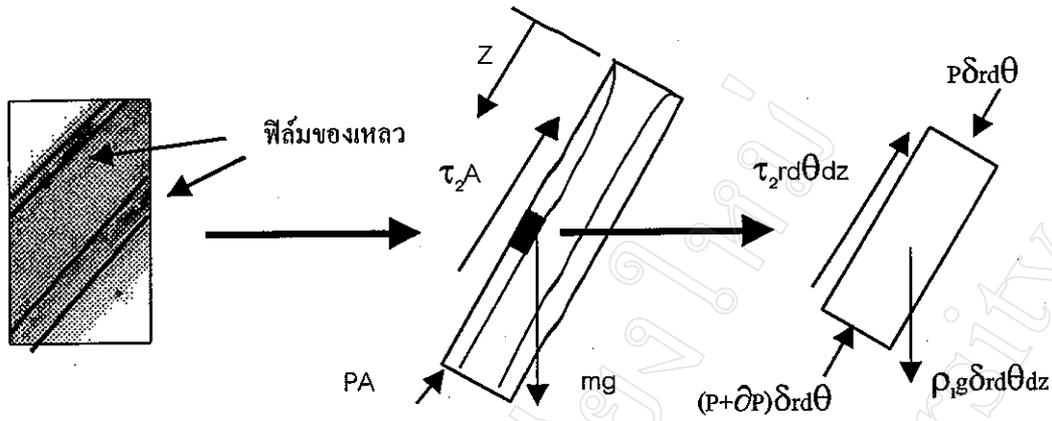
โดยการพิจารณาว่า

$$\frac{\partial P}{\partial z} \approx \rho_v g \sin\beta \quad (3.4)$$

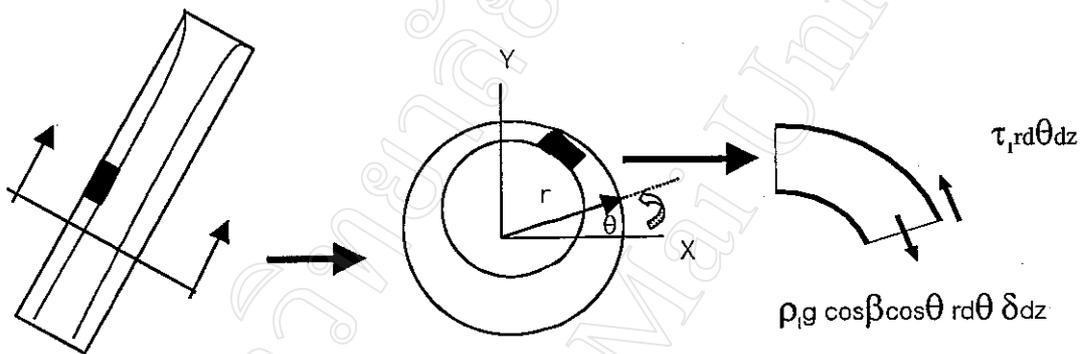
จะได้

$$\tau_2 = (\rho_l - \rho_v)\delta g \sin\beta \quad (3.5)$$

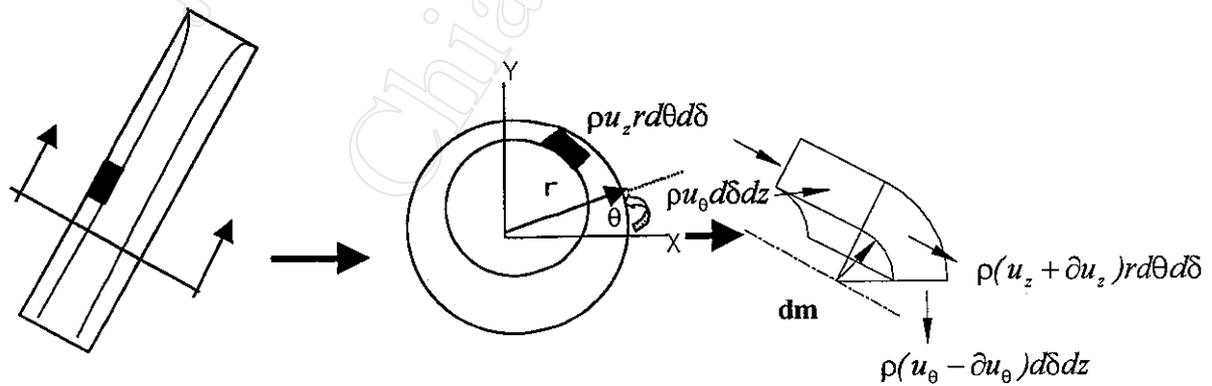
เมื่อ τ_2 คือ ความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นโดยผนังเทอร์โมไซฟอนกระทำกับฟิล์มของเหลว



รูป 3.5 แสดงแผนภูมิของแรงในส่วนควมแน่นตามแนวยาวท่อ



รูป 3.6 แสดงแผนภูมิของแรงในส่วนควมแน่นตามแนวสัมผัส



รูป 3.7 แสดงสมดุลย์มวลที่เกิดขึ้นในฟิล์มของเหลว

จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนที่ผิวกับความเร็วดตามแนวแกน z

$$\tau_2 = -\mu_l \frac{\partial}{\partial r}(u_z) \quad (3.6)$$

แทนลงใน (3.5) จะได้

$$\delta = \frac{-\mu_l \frac{\partial}{\partial r}(u_z)}{(\rho_l - \rho_v)g \sin \beta} \quad (3.7)$$

พิจารณาสมการโมเมนต์ตามแนวสัมผัส ดังรูป 3.6 จะได้

$$\Sigma F_\theta = 0; \quad \tau_1 (r_c d\theta) dz = \rho_l g (\cos \beta) (\cos \theta) \delta (r_c dz) dz \quad (3.8)$$

จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนที่ผิวกับความเร็วดตามแนวสัมผัส

$$\tau_1 = -\mu_l r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{u_\theta}{r} \right) \quad (3.9)$$

แทนลงในสมการ (3.8) จะได้

$$\delta = \frac{-\mu_l r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{u_\theta}{r} \right)}{\rho_l g \cos \beta \cos \theta} \quad (3.10)$$

จาก (3.7) และ (3.10) จะได้

$$r \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{u_\theta}{r} \right) = \frac{\rho_l}{(\rho_l - \rho_v)} \cot \beta \sin \theta \frac{\partial u_z}{\partial r} \quad (3.11)$$

พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วตามแนวแกนสัมผัสเทียบกับรัศมีและมุมภายในท่อจะสัมพันธ์กันดังนี้

$$r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{u_\theta}{r} \right) = \frac{\rho_l}{(\rho_l - \rho_v)} \cot \beta \cos \theta \frac{\partial u_z}{\partial r} \quad (3.12)$$

เนื่องจากตั้งสมมติฐานว่าระบบมีความเร็วต่ำ ดังนั้นก็มีเหตุผลที่จะกล่าวว่า

$$\frac{\partial u_z}{\partial z} = - \frac{\partial u_z}{\partial r} \quad (3.13)$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$\frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} = - \frac{\rho_l}{(\rho_l - \rho_v)} \cot \beta \sin \theta \frac{\partial u_z}{\partial z} \quad (3.14)$$

พิจารณาสมการความต่อเนื่อง จากรูป 3.7 พบว่า

$$d\dot{m} + \rho_l u_\theta d\delta dz + \rho_l u_z r d\theta d\delta - \{ \rho_l u_\theta - \partial(\rho_l u_\theta) d\delta dz \} - \{ \rho_l u_z + \partial(\rho_l u_z) r d\theta d\delta \} = 0$$

$$d\dot{m} = \rho \partial u_z d\delta r d\theta - \rho \partial u_\theta d\delta dz \quad (3.15)$$

พิจารณาสมการฟูเรียร์

$$dQ = h_{fg} d\dot{m} = k_1 \frac{\partial T}{\partial r} r d\theta dz \quad (3.16)$$

พบว่าหากเราย่อปัญหาลงให้เป็นการนำความร้อนในหนึ่งมิติ ตั้งแกนอ้างอิงวัดจากผนังท่อจะได้

$$d\dot{m} = \frac{k_1}{h_{fg}} \frac{\partial T}{\partial \delta} r_c d\theta dz \quad (3.17)$$

จาก (3.15) และ (3.17) จะได้

$$\rho_l \partial u_z d\delta r d\theta - \rho_l \partial u_z d\delta dz = \frac{k_l}{h_{fg}} \frac{\partial T}{\partial \delta} r_c d\theta dz \quad (3.18)$$

แทน (3.14) ลงใน (3.18) จะได้

$$\frac{k_l}{h_{fg}} \frac{\partial^2 T}{\partial \delta^2} = \rho_l \frac{\partial u_z}{\partial z} \left[1 + \frac{\rho_l}{r_c (\rho_l - \rho_v)} \cot \beta \sin \theta \right] \quad (3.19)$$

พิจารณาเพื่อหาฟังก์ชันความเร็วตามความยาวท่อ จาก (3.7) จะได้ว่า

$$-\mu_l \frac{\partial u_z}{\partial r} = (\rho_l - \rho_v) \delta g \sin \beta \quad (3.20)$$

จากความสัมพันธ์ของระบบพิกัดเรขาคณิตว่า

$$\delta = r_c - r \quad (3.21)$$

ดังนั้นเขียน (3.7) ใหม่จะได้

$$-\mu_l \frac{\partial u_z}{\partial r} = (\rho_l - \rho_v) g \sin \beta (r_c - r) \quad (3.22)$$

ทำการอินทิเกรตโดยใช้เงื่อนไขที่ขอบคือ $u_z = 0$ ที่ $r = r_c$

$$u_z = \frac{(\rho_l - \rho_v)}{2\mu_l} g \sin \beta (r_c - r)^2 \quad (3.23)$$

แทนพิกัดกลับ ไปจากพิกัดรัศมีเป็นพิกัดความหนาจะได้

$$u_z = \frac{(\rho_l - \rho_v)}{2\mu_l} g \sin\beta (\delta)^2 \quad (3.24)$$

แทน (3.24) ลงใน (3.19) และทำการอินทิเกรตโดยมีเงื่อนไขที่ขอบดังนี้

$$z = 0 \Rightarrow \delta = 0$$

$$\frac{\partial T}{\partial \delta} = 0 \Rightarrow \delta = 0$$

$$(T_v, \delta) \leftrightarrow (T_c, 0)$$

จะได้สมการความหนาฟิล์มในส่วน Condenser (δ) ที่ตำแหน่งใดๆดังนี้

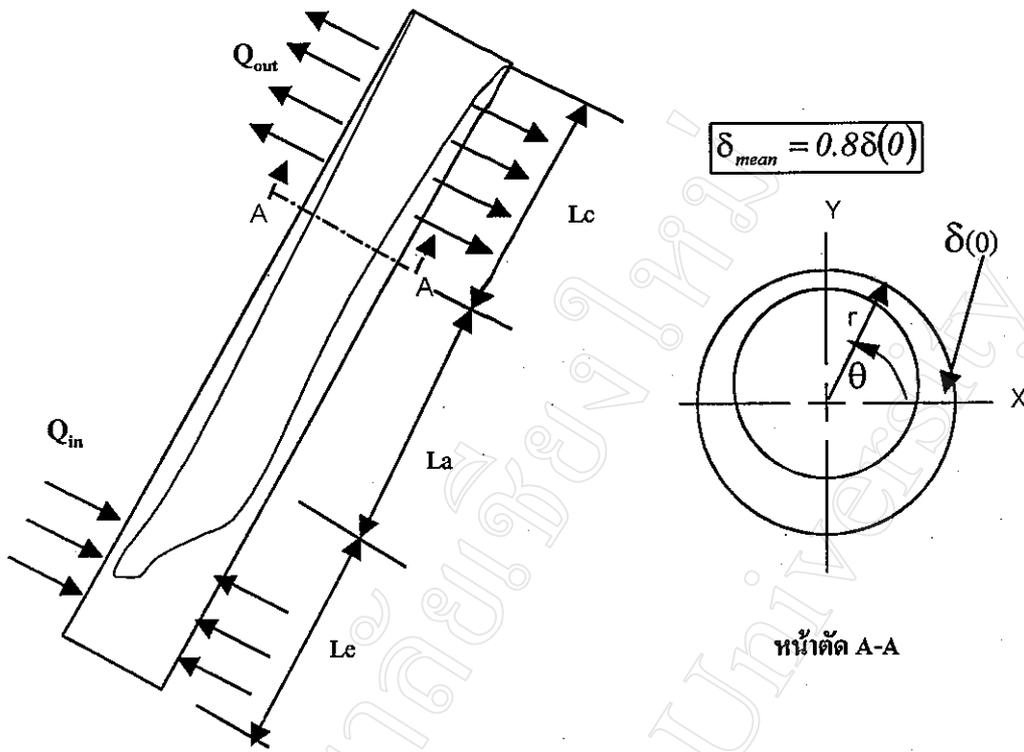
$$\delta = \sqrt{\frac{24k_l (T_v - T_c) z_c \mu_l}{h_{fg} \rho_l (\rho_l - \rho_v) g \sin\beta \left[1 + \frac{\rho_l}{r_c (\rho_l - \rho_v)} \cot\beta \sin\theta \right]}} \quad (3.25)$$

สมการ (3.25) นี้จะใช้ได้ตลอดค่ามุมภายในตั้งแต่ 0-90 องศาเท่านั้น เนื่องจากที่บริเวณด้านล่าง 0 ถึง (-90) ลักษณะของแรงที่กระทำจะเปลี่ยนไปจากที่วิเคราะห์ไว้ข้างต้น

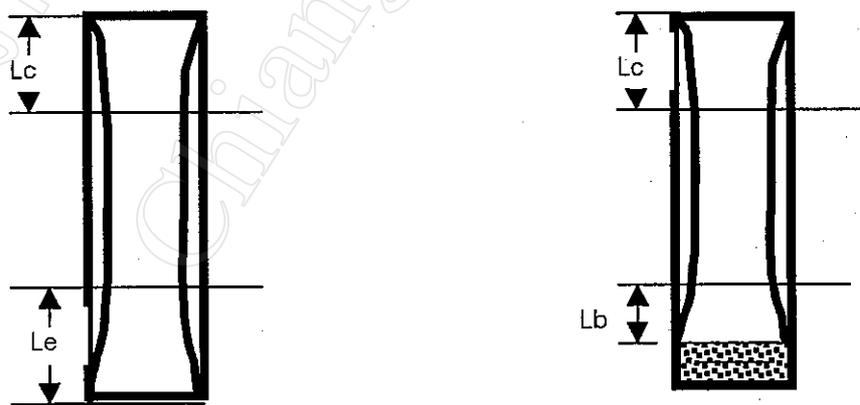
เมื่อพิจารณาสมการ (3.25) จะพบว่าความหนาฟิล์มของของเหลวที่ส่วนควบแน่นในตำแหน่งต่างๆในส่วนควบแน่นมีค่าต่างกัน ค่าความหนาเฉลี่ยที่จะนำมาใช้ในการคำนวณค่าอัตราการส่งผ่านความร้อนวิกฤติในกรณีที่ปรากฏการณ์การแห้งควบคลุมชนิดจำกัดจะหาจาก

$$\delta_{mean} = 0.8\delta(0) \quad (3.26)$$

เมื่อ $\delta(0)$ คือค่าความหนาฟิล์มของเหลวที่ตำแหน่งปลายทางออกส่วนควบแน่น และมุมในหน้าตัด 0 องศา ดังแสดงในรูป 3.8



รูป 3.8 แสดงความหนาฟิล์มของเหลวเฉื่อย



รูป 3.9 แสดงตำแหน่ง L_e , L_b และ L_c ในแบบจำลอง

3.3 ปฏิกิริยาการแห้งเหือด

3.3.1 การหาเงื่อนไขที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์การแห้งเหือด

หากพิจารณาเทอร์โมไซฟอนที่มีขนาดความยาวส่วนควบแน่นเท่ากับความยาวส่วนทำระเหย ในขณะที่จะเกิดการไหม้จะพบว่า ที่อัตราส่วนการเติมที่เหมาะสมค่าหนึ่ง ฟิล์มของเหลวจะเคลือบผิวแลกเปลี่ยนความร้อนของเทอร์โมไซฟอนพอดี โดยไม่มีแอ่งของเหลวเกิดขึ้นที่ส่วนควบแน่น ดังแสดงในรูป 3.9 โดยพิจารณาว่าฟิล์มของเหลวมีความหนาน้อยมากเมื่อเทียบกับรัศมี ซึ่งทำให้สามารถย่อปัญหาลงเป็นปัญหาในพิกัดคาร์ทีเซียน หนึ่งมิติ ซึ่งสามารถเขียนสมการสมดุลความร้อนในส่วนทำระเหย และส่วนควบแน่นได้เป็น

อัตราการส่งผ่านความร้อนที่ส่วนทำระเหย = อัตราการส่งผ่านความร้อนที่ส่วนควบแน่น

ดังนั้นจะได้

$$Q_{\text{Evaporator}} = Q_{\text{Condenser}} \quad (3.27)$$

$$q_e * 2\pi r_e L_e = q_c * 2\pi r_c L_c \quad (3.28)$$

เมื่อเขียนค่าความหนาแน่นความร้อนเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิจะได้

$$k_1 \frac{\partial T_H}{\partial \delta_e} * 2\pi r_e L_e = k_1 \frac{\partial T_c}{\partial \delta_c} * 2\pi r_c L_c \quad (3.29)$$

ในกรณีที่ ค่ารัศมีมีค่าเท่ากันทั้งสองส่วน และความหนาฟิล์มมีค่าเท่ากันเนื่องจากฟิล์มของเหลวเคลือบปลายสุดของส่วนทำระเหยพอดี ดังนั้นจะได้

$$(T_H - T_v) * L_e = (T_c - T_v) * L_c \quad (3.30)$$

ในกรณีที่เกิดการไหม้ที่ส่วนใดจะพิจารณาเสมือนว่าเทอร์โมไซฟอนมีความยาวส่วนทำระเหยเท่ากับจุดที่เกิดการไหม้โดยวัดจากจุดบนสุดของส่วนทำระเหย (Lb) ทั้งนี้เนื่องจากแนวคิดที่ว่า การส่งผ่านความร้อนผ่านฟิล์มของเหลวมีค่ามากกว่าที่แอ่งของเหลวมากๆ ดังนั้นเมื่อความยาวส่วนควบแน่นมีค่า

เป็น n เท่าของความยาวส่วนทำระเหยโดยเงื่อนไขอุณหภูมิทำงานเท่ากัน ส่วนความหนาแน่นจะลดปริมาณความหนาแน่นความร้อน (Heat flux) ลง n เท่าจากกรณีที่ $L_e = L_c$ เพื่อรักษาสมดุลความร้อน ดังนั้นจะได้

$$\left[\frac{(T_H - T_v)}{\delta} \right] * L_e = \frac{1}{n} \left[\frac{(T_c - T_v)}{\delta} \right] * nL_e \quad (3.31)$$

เนื่องจากในสภาวะนี้ไม่มีการเพิ่มหรือลดมวลในฟิล์มของเหลว ดังนั้น ความหนาฟิล์มที่ปากทางออก ส่วนความหนาแน่น และปากทางเข้าส่วนทำระเหยจะมีค่าเท่ากัน ซึ่งหากพิจารณาว่าความหนาฟิล์มเฉลี่ยไม่เปลี่ยนแปลงมากนักจะได้

$$(T_H - T_v) * L_b = (T_c - T_v) * L_e \quad (3.32)$$

โดยค่า L_b เป็นฟังก์ชันของรัศมีส่วนทำระเหย และความยาวส่วนทำระเหยดังนี้

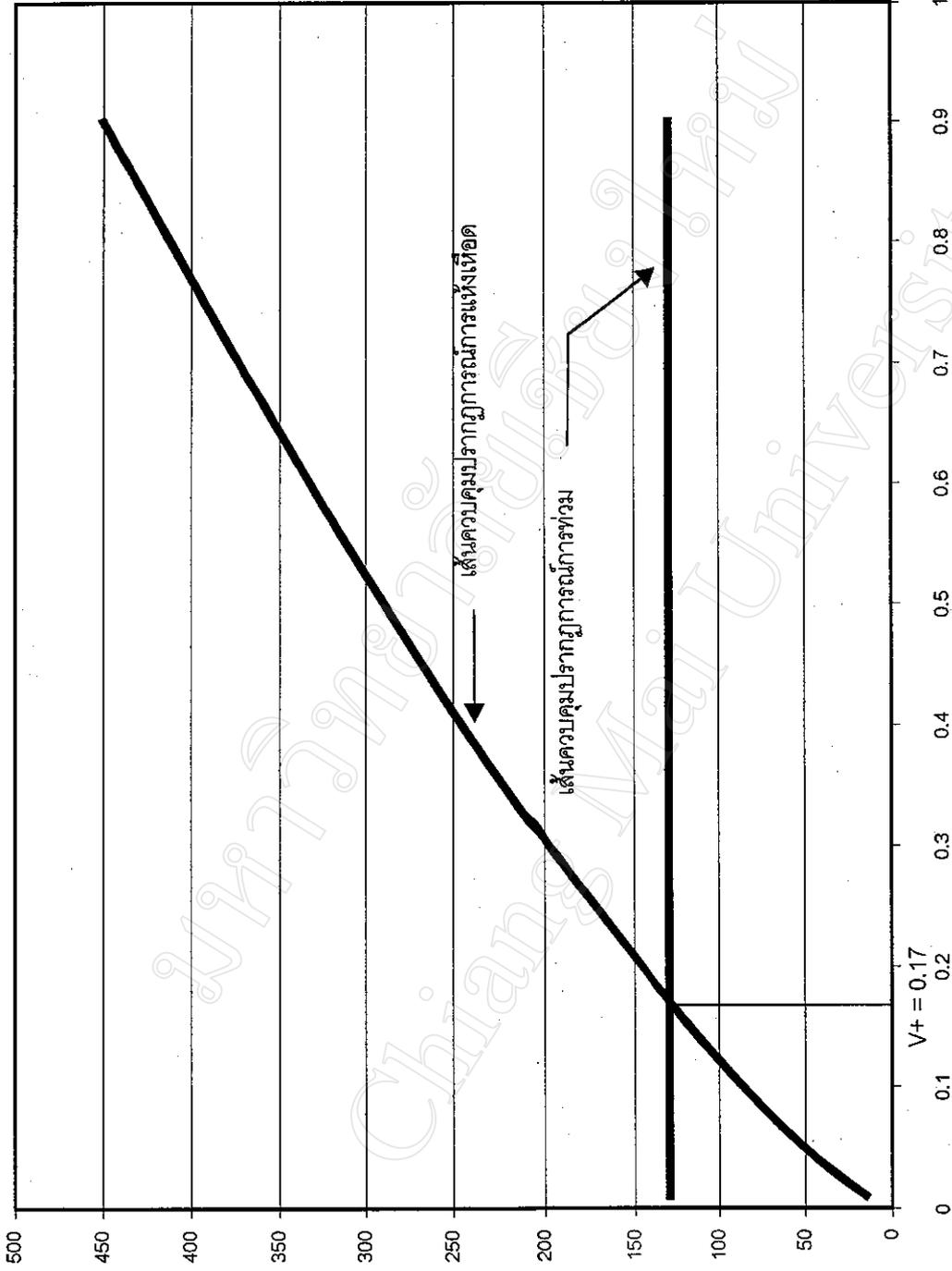
$$L_b = L_e - (F * L_e) + \frac{2r_e}{3 \tan \beta} \quad (3.33)$$

โดย F คืออัตราส่วนปริมาตรของเหลวประสิทธิผลต่อปริมาตรส่วนทำระเหย

Shiraishi et al. [14] ได้แสดงวิธีการหาอัตราส่วนการเติมที่เคลือบผิวเทอร์โมไซฟอนได้ทั้งหมด โดยไม่มีการท่วมเกิดขึ้นเลยในกรณีเทอร์โมไซฟอนแนวตั้ง โดยวิธีหาจุดตัดระหว่างปรากฏการณ์การแห้ง และปรากฏการณ์การท่วมดังแสดงในรูป 3.10 ในกรณีที่มีการเติมสารทำงานมากเกินไป Shiraishi et al. [14] กล่าวว่าของเหลวที่เติมไปจะเป็นฟิล์มเคลือบผิวเทอร์โมไซฟอนหมดพอดี และมีบางส่วนเคลื่อนที่ขึ้นไปท่วมที่ปากทางเข้าส่วนจนวน ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าปริมาตรของเหลวที่เหลือจากการเคลือบผิว ส่วนหนึ่งคงค้างอยู่ในแอ่งของเหลวและอีกส่วนหนึ่งขึ้นไปท่วมที่ปากส่วนทำระเหย ปริมาตรของเหลวทั้งหมดที่ค้างในแอ่งของเหลวและเคลือบผิวเทอร์โมไซฟอนก็คือ ปริมาตรของเหลวประสิทธิผล และเมื่อคิดเป็นจำนวนเชิงตัวเลข F จะมีค่า

$$F = 1.4 * V^+ \quad (3.34)$$

โดย V^+ คือค่าอัตราส่วนการเติมที่เคลือบผิวเทอร์โมไซฟอนพอดีโดยไม่มีการท่วมเกิดขึ้น การหาค่าดังกล่าวแสดงไว้ในรูป 3.10 ค่าอัตราส่วนการเติมที่เคลือบผิวเทอร์โมไซฟอนพอดีโดยไม่มีการท่วม



รูป 3.10 การหาค่าอัตราส่วนการเติมที่สัมพันธ์กับฟังก์ชันโพลิโนเมียล (V+)

(๒๗๔) คู่มือวิชาการก่อสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

เกิดขึ้นนี้จะไม่ขึ้นกับความยาวส่วนทำระเหย แต่จำเป็นต้องหาทุกครั้งที่รูปร่างของส่วนควบแน่น และ รัศมีท่อเปลี่ยนไป

จากสมการ (3.32) มีตัวไม่ทราบค่าสองตัว ซึ่งจำเป็นต้องหาสมการความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ มาช่วยแก้ปัญหาก็ได้จากการใช้กฎข้อที่สองทางเทอร์โมไดนามิกส์ โดยคิดว่ากระบวนการควบแน่น และกระบวนการระเหยมีค่าการผลิตเอนโทรปีเท่ากันดังนั้นเมื่อพิจารณาส่วนควบแน่นจะพบว่า

$$S_{gen} = Q * \left(\frac{1}{T_c} - \frac{1}{T_v} \right) \quad (3.35)$$

ดังนั้น

$$\dot{m} s_{gen} = \dot{m} h_{fg} \left(\frac{1}{T_c} - \frac{1}{T_v} \right) \quad (3.36)$$

$$S_{gen} = h_{fg} \left(\frac{1}{T_c} - \frac{1}{T_v} \right) \quad (3.37)$$

ในทำนองเดียวกันในส่วน Evaporator พบว่า

$$S_{gen} = Q * \left(\frac{1}{T_v} - \frac{1}{T_H} \right) \quad (3.38)$$

ดังนั้น

$$\dot{m} s_{gen} = \dot{m} h_{fg} \left(\frac{1}{T_v} - \frac{1}{T_H} \right) \quad (3.39)$$

$$S_{gen} = h_{fg} \left(\frac{1}{T_v} - \frac{1}{T_H} \right) \quad (3.40)$$

เนื่องจากปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในทั้ง 2 ส่วนนั้นเป็นขบวนการที่กลับทางกัน และต่างฝ่ายต่างควบคุม อัตราการส่งผ่านความร้อน และมวล ดังนั้น Entropy generate น่าจะมีค่าไม่ต่างกันมากนัก ในที่นี้คิดว่า อัตราการเกิด Entropy generate มีค่าเท่ากันดังนั้น

$$h_{fg} \left(\frac{1}{T_c} - \frac{1}{T_v} \right) = h_{fg} \left(\frac{1}{T_v} - \frac{1}{T_H} \right) \quad (3.41)$$

จัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\frac{2}{T_v} = \frac{1}{T_c} + \frac{1}{T_H} \quad (3.42)$$

แก้สมการ (3.32) และสมการ (3.42) จะได้ผลลัพธ์ของ $(T_v - T_c)$ และ $(T_H - T_v)$ ซึ่งเป็นเงื่อนไขอุณหภูมิของ แหล่งความร้อนที่ทำให้เกิดอัตราการส่งผ่านความร้อนวิกฤติจากปรากฏการณ์การแห้งเหือด

3.3.2 การหาอัตราการส่งผ่านความร้อนวิกฤติจากปรากฏการณ์การแห้ง

การหาค่าอัตราการส่งผ่านความร้อนวิกฤติในกรณีปรากฏการณ์การแห้งควบคุมชนิดจำกัด

สมรรถนะหาจาก

$$Q = k_i \frac{(T_v - T_c)}{\delta_{mean}} * 2\pi r l_c \quad (3.43)$$

ในสมการ (3.43) ความหนาฟิล์มเฉลี่ยหาจากสมการ (3.25) โดยแทนค่า $Z_c = L_c$ และ

$$\delta = 0.8 * \sqrt{\frac{24k_i(T_v - T_c)L_c\mu_l}{h_{fg}\rho_l(\rho_l - \rho_v)g \sin\beta \left[1 + \frac{\rho_l}{r_c(\rho_l - \rho_v)} \cot\beta \sin\theta \right]}} \quad (3.44)$$

ในกรณีที่ความยาวส่วนควบแน่นไม่เท่ากับความยาวส่วนทำระเหย ส่วนทำระเหยจะมีบทบาทสำคัญในการควบคุมการผลิตไอ และจากสมการ (3.15) จะพบว่า อัตราการผลิตไอจะเป็นฟังก์ชันของ $L_c^{0.75}$

ดังนั้นในกรณีที่ความยาวส่วนทำระเหยมีค่าน้อยกว่าความยาวส่วนควบแน่น ค่าอัตราการส่งผ่านความร้อนวิกฤติในกรณีปรากฏการณ์การแห้งควบคุมขีดจำกัดสมรรถนะหาจาก

$$Q = k_1 \frac{(T_v - T_c)}{\delta_{mean}} * 2\pi r l_c * \left(\frac{L_e}{L_c}\right)^{0.75} \quad (3.45)$$

ในกรณีที่ความยาวส่วนทำระเหยมีค่ามากกว่าส่วนควบแน่น การหาค่าอัตราการส่งผ่านความร้อนวิกฤติจะไม่นิยามตามแบบจำลองนี้ ดังที่กล่าวไว้ในสมมติฐานข้างต้น เรื่องแหล่งความร้อนที่ให้กับเทอร์โมไซฟอน ซึ่งในการออกแบบจริงสารที่รับ และให้ความร้อนกับเทอร์โมไซฟอนจะมีค่าความจุความร้อนจำเพาะต่างกัน ทำให้มีบางกรณีที่ส่วนทำระเหยยาวกว่าส่วนควบแน่น การใช้แบบจำลองนี้ทำนายค่าอาจทำได้โดยการหาความยาวสมมูล ซึ่งนิยามโดยการเปลี่ยนความยาวส่วนควบแน่นเป็นความยาวสมมูลที่ค่า Pr เท่ากับสารทำงานฝั่งทำระเหยโดย

$$L_{c,eq} = \frac{Pr_e}{Pr_c} * L_c \quad (3.46)$$

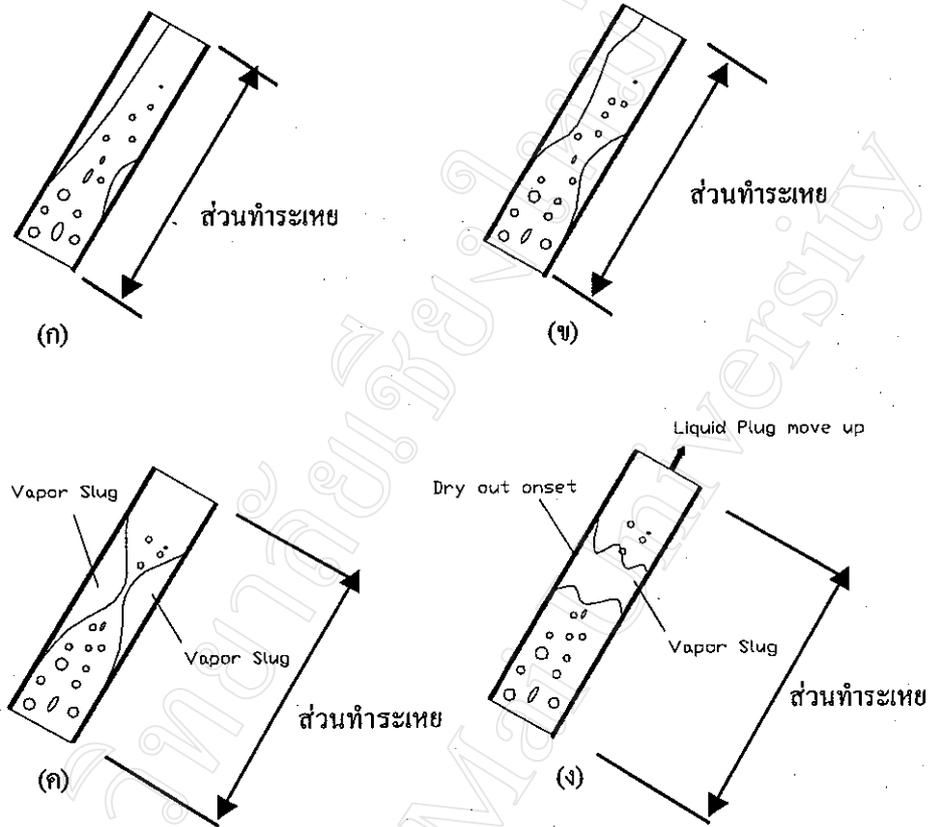
3.4 ปรากฏการณ์การท่วม

3.4.1 ลักษณะการเกิดปรากฏการณ์การท่วม

การเกิดปรากฏการณ์การท่วมในเทอร์โมไซฟอนปิดแบบเอียง สามารถอธิบายได้ดังนี้

3.4.1.1 เมื่อเทอร์โมไซฟอนทำงานในภาวะคงตัวจะเกิดการเดือดขึ้นในแอ่งของเหลว ฟองไอที่เกิดขึ้นจะพยายามไหล ไปสู่ส่วนควบแน่น ซึ่งในสภาวะวิกฤติฟองไอบางจุดจะเกิดการรวมตัวกันก่อนที่จะไหลไปยังส่วนควบแน่นเกิดเป็นแผ่นไอขึ้น ดังรูป 3.11(ก)

3.4.1.2 ไอที่เกิดขึ้นตามหลังมาที่ด้านหลังแผ่นไอจะดันให้แผ่นไอก่อตัวโตขึ้น ดังรูป 3.11(ข) การส่งผ่านความร้อนยังเกิดขึ้นได้ในช่วงนี้จากการไหลที่ครึ่งบนของผนังแลกเปลี่ยนความร้อน และด้านหลังแผ่นไอยังมีของเหลวมากพอที่จะไม่ทำให้ผิวแลกเปลี่ยนความร้อนเกิดการไหม้



รูป 3.11 แสดงกลไกการเกิดปรากฏการณ์การท่วมในส่วนที่ระเหยตามแบบจำลองที่สร้างขึ้น

- (ก) แสดงการก่อตัวของแผ่นไอในส่วนที่ระเหย
- (ข) แผ่นไอที่ก่อตัวเริ่มก่อตัวโตขึ้นทั้งด้านบนและด้านล่าง
- (ค) ก้อนของเหลวเริ่มขาดจากกัน
- (ง) ก้อนของเหลวถูกผลักขึ้นไปทางด้านบน และเกิดการไหม้อย่างสมบูรณ์

3.4.1.3 ไอมีปริมาณมากพอที่จะครอบครองช่องว่างในส่วนทำระเหยทำให้ก้อนของเหลวเริ่มขาดออกจากกัน และของเหลวไหลกลับจากส่วนควบแน่นจะไม่สามารถไหลมายังแอ่งของเหลวด้านล่างได้ ดังรูป 3.11(ค)

3.4.1.4 ก้อนของเหลวถูกผลักให้เคลื่อนที่ไปยังด้านบน ในช่วงนี้จะเกิดการไหม้ที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อนโดยสมบูรณ์ และผิวไหม้จะแผ่กว้างออกไป ดังรูป 3.11(ง)

3.4.2 การสร้างสมการทำนายค่าอัตราการส่งผ่านความร้อนวิกฤติจากปรากฏการณ์การท่วม

หากพิจารณาช่องไอที่โตขึ้นดังรูป 3.11ค มีลักษณะเป็นทรงส่วนของทรงกระบอก รัศมี R ดังรูป 3.12 สมดุลแรงตามแนวรัศมีจะสามารถเขียนได้ดังนี้

$$P * 2ds * \cos(dy) * dl = \sigma_1 \sin(dy) * dl + \sigma_2 \sin(dy) * dl + 2ds * h * dl * \rho_l * g \cos \beta \sin \theta \quad (3.47)$$

จัดรูปใหม่จะได้

$$P = \frac{\sigma_1 \tan(dy)}{2ds} + \frac{\sigma_2 \tan(dy)}{2ds} + \frac{h \rho_l g \cos \beta \sin \theta}{\cos(dy)} \quad (3.48)$$

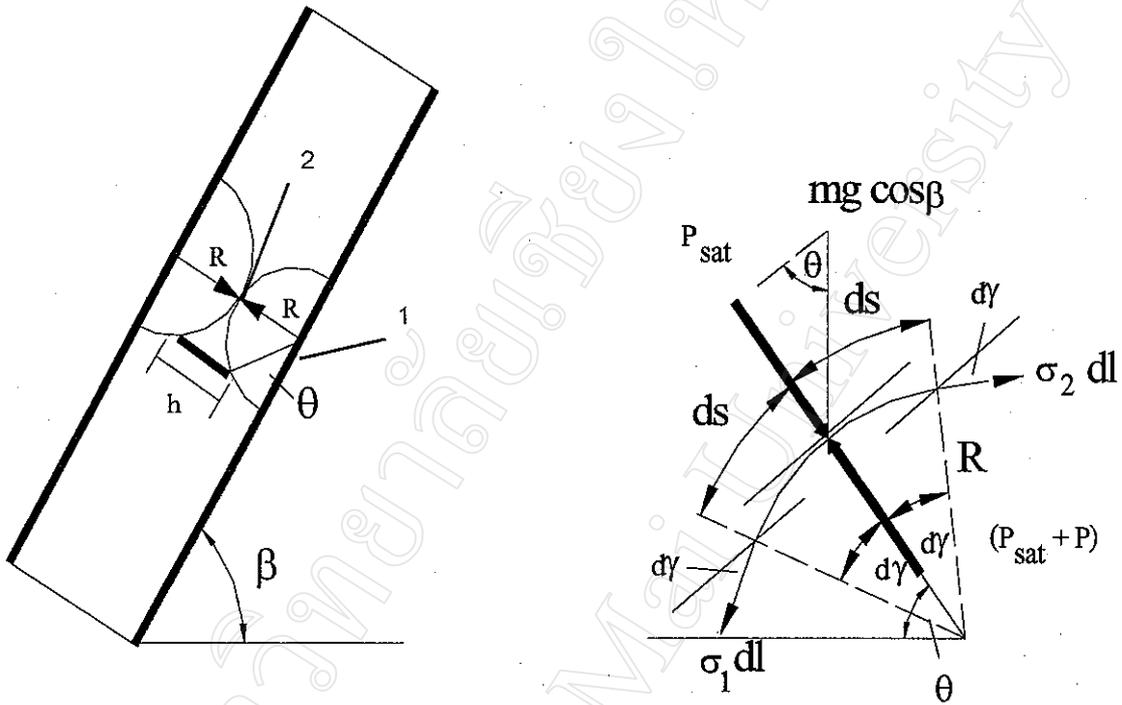
ในกรณีนี้ dy มีค่าเล็กน้อย $\tan(dy) \approx dy$ และ $\cos(dy) \approx 1$

นอกจากนี้ ยังพบว่า $\frac{dy}{ds} = \frac{1}{R}$

$$\text{ดังนั้นจะได้} \quad P = \frac{\sigma_1}{2R} + \frac{\sigma_2}{2R} + h \rho_l g \cos \beta \sin \theta \quad (3.49)$$

โดย $h = 2 [R - R \sin \theta]$

พบว่าความดันที่ได้เป็นความดันเฉพาะจุด ดังนั้นจำเป็นต้องหาค่าเฉลี่ยน้ำหนักที่กดลงบนฟองโดย



รูป 3.12 แสดงแรงที่กระทำบนผิวรอยต่อไอ-ของเหลว

$$\begin{aligned}
 M &= h\sigma_1 g \cos \beta \sin \theta \\
 &= (2R - 2R \sin \theta) \sin \theta \rho_1 g \cos \beta \\
 &= (2R \sin \theta - 2R \sin^2 \theta) \rho_1 g \cos \beta
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_{mean} &= \frac{\int_0^{\frac{\pi}{2}} M d\theta}{\frac{\pi}{2}} \\
 M_{mean} &= \frac{\int_0^{\frac{\pi}{2}} (2R \sin \theta - 2R \sin^2 \theta) \rho_1 g \cos \beta d\theta}{\frac{\pi}{2}} \\
 &= \frac{2R \rho_1 g \cos \beta \left[\int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin \theta d\theta - \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^2 \theta d\theta \right]}{\frac{\pi}{2}}
 \end{aligned}$$

ทราบว่า $\sin^2 \theta = \frac{1 - \cos 2\theta}{2}$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{2R \rho_1 g \cos \beta \left[-\cos \theta \Big|_0^{\frac{\pi}{2}} - \left(\frac{\theta}{2} - \frac{\sin 2\theta}{4} \right) \Big|_0^{\frac{\pi}{2}} \right]}{\frac{\pi}{2}} \\
 &= \frac{2R \rho_1 g \cos \beta [-(0 - 1) - \{(0.785 - 0) - 0\}]}{\frac{\pi}{2}}
 \end{aligned}$$

ดังนั้นน้ำหนักเฉลี่ยจะมีค่า

$$M_{mean} = \frac{(2 * 0.215)}{1.57} R \rho_1 g \cos \beta = 0.2737 R \rho_1 g \cos \beta \quad (3.50)$$

ดังนั้นสามารถเขียนความดันเฉลี่ยได้เป็น

$$P_{mean} = \frac{\sigma_1}{2R} + \frac{\sigma_2}{2R} + 0.2737R\rho_1g \cos\beta \quad (3.51)$$

พิจารณาสมดุลแรงตามแนวสัมผัส

$$\sigma_1 \cos(dy)dl + mg \cos\beta \cos\theta = \sigma_2 \cos(dy)dl \quad (3.52)$$

$$\sigma_1 \cos(dy) * dl + 2ds * h * dl * \rho_1 g \cos\beta \cos\theta = \sigma_2 \cos(dy) * dl \quad (3.53)$$

จัดรูปใหม่จะได้

$$\sigma_2 = \sigma_1 + \frac{2ds * h * \rho_1 g \cos\beta \cos\theta}{\cos(dy)} \quad (3.54)$$

เมื่อ dy มีค่าน้อยมากจะได้

$$\sigma_2 = \sigma_1 + 2ds * h * \rho_1 g \cos\beta \cos\theta \quad (3.55)$$

เมื่อพิจารณาเทอม ds พบว่า Order ของ ds มีค่าน้อยมาก ดังนั้นแรงเนื่องจากน้ำหนักตัวจึงมีค่าต่ำกว่าแรงตึงผิวมากจนตัดทิ้งได้

ดังนั้น $\sigma_2 \approx \sigma_1$

และสามารถเขียนสมการ (3.51) ได้เป็น

$$P_{mean} = \frac{\sigma}{R} + 0.27 R\rho_1g \cos\beta \quad (3.56)$$

เนื่องจากของเหลวในแอ่งเป็นของเหลวสองสถานะการใช้ค่าความหนาของเหลวมาคำนวณผลจากน้ำหนักก้อนของเหลวในสมการ (3.56) นั้นจะให้ค่าผิดพลาดสูง ดังนั้นจะใช้ค่าเฉลี่ยเรขาคณิตคำนวณความหนาแน่นเฉลี่ยของก้อนของไหลดังนี้สำหรับสารทำงานทั่วไป

$$\rho_{mean} = \sqrt{\rho_l * \rho_v}$$

แต่สำหรับกรณีสารทำงานเป็นน้ำ เนื่องจากค่าแรงตึงผิวของน้ำมีค่าสูงทำให้ความพรุนของน้ำมีค่าต่ำกว่าสารทำงานอื่นๆ ดังนั้นจะใช้ค่าเฉลี่ยเลขคณิตแทนในกรณีของน้ำโดย

$$\rho_{mean} = \frac{(\rho_v + \rho_l)}{2}$$

หาความเร็วที่ไอออกมาจากผิวแลกเปลี่ยนความร้อนโดยพิจารณาว่าไอเกิดการคลที่ผิวรอยต่อไอ-ของเหลวจนมีความเร็วเป็นศูนย์ ดังนั้นเมื่อใช้สมการเบอร์นูลีจะได้

$$(P_{mean} + P_{sat})_2 = (P_{sat})_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 \quad (3.57)$$

ดังนั้นความเร็วที่ออกจากผิวผลิตไอมี่ค่า

$$v_1 = \sqrt{\frac{2P_{mean}}{\rho_v}} \quad (3.58)$$

ตามที่กล่าวไว้ในกลไกการเกิดการท่วมข้างต้น พื้นที่ช่องการผลิตไอมี่ค่าครึ่งด้านบนของผิวแลกเปลี่ยนความร้อน ดังนั้นช่องผลิตไอมี่ค่า

$$A = \frac{\pi D^2}{2} \quad (3.59)$$

อัตราการไหลเชิงมวลของไอที่ไปยังส่วนควบแน่นมีค่า

$$\dot{m} = \rho_v \frac{\pi D^2}{2} * v \quad (3.60)$$

อัตราการส่งผ่านความร้อนวิกฤติในกรณีที่เกิดปรากฏการณ์การท่วมหาได้โดย

$$Q = \dot{m} h_{fg} \quad (3.61)$$

ในกรณีที่ความยาวส่วนทำระเหยมีค่าน้อยกว่าส่วนควบแน่น จะพิจารณาเช่นเดียวกับกรณีปรากฏการณ์การแห้ง ซึ่งจะหาค่าอัตราการส่งผ่านความร้อนวิกฤติได้ดังนี้

$$Q = \dot{m} h_{fg} * \left(\frac{L_e}{L_c} \right)^{0.75} \quad (3.62)$$

ในกรณีที่ส่วนทำระเหยยาวกว่าส่วนควบแน่นก็จะใช้สมการ (3.46) ในการหาค่าความยาวสมมูล

เป็นที่น่าสังเกตว่าการหาค่าอัตราการส่งผ่านความร้อนวิกฤติในกรณีที่ปรากฏการณ์การท่วมควบคลุมขีดจำกัดนั้น สร้างจากแนวคิดที่ว่าความยาวส่วนทำระเหยไม่มีผลต่ออัตราการส่งผ่านความร้อนวิกฤติ ส่วนเทอม $(L_e/L_c)^{0.75}$ เป็นการปรับปรุงค่าเนื่องจากความยาวส่วนควบแน่น และส่วนทำระเหยไม่เท่ากัน ดังนั้นการหาค่าอัตราส่วนปริมาตรของเหลวประสิทธิผลโดยสมการ (3.34) ในกรณีที่ส่วนทำระเหยยาวมากๆ อาจให้ค่าที่ต่ำกว่าความเป็นจริง เนื่องจากค่าอัตราการส่งผ่านความร้อนวิกฤติจากปรากฏการณ์การท่วมมีค่าต่ำกว่าความเป็นจริง ทำให้ V^* ต่ำกว่าความเป็นจริง ดังนั้นต้องเลือกค่าที่สูงที่สุดจากการหาตามสมการ (3.34) หรือจากอัตราส่วนปริมาตรของเหลวประสิทธิผลต่อปริมาตรส่วนทำระเหยโดยการหาจากปริมาตรฟิล์มของเหลว (F_{film}) โดย

$$\text{ปริมาตรฟิล์มของเหลว } (V_{film}) = 2\pi r(L_c + L_a + L_e)\delta_{mean} \quad (3.63)$$

$$(F_{film}) = 2 * \frac{V_{film}}{\pi r^2 L_e} \quad (3.64)$$

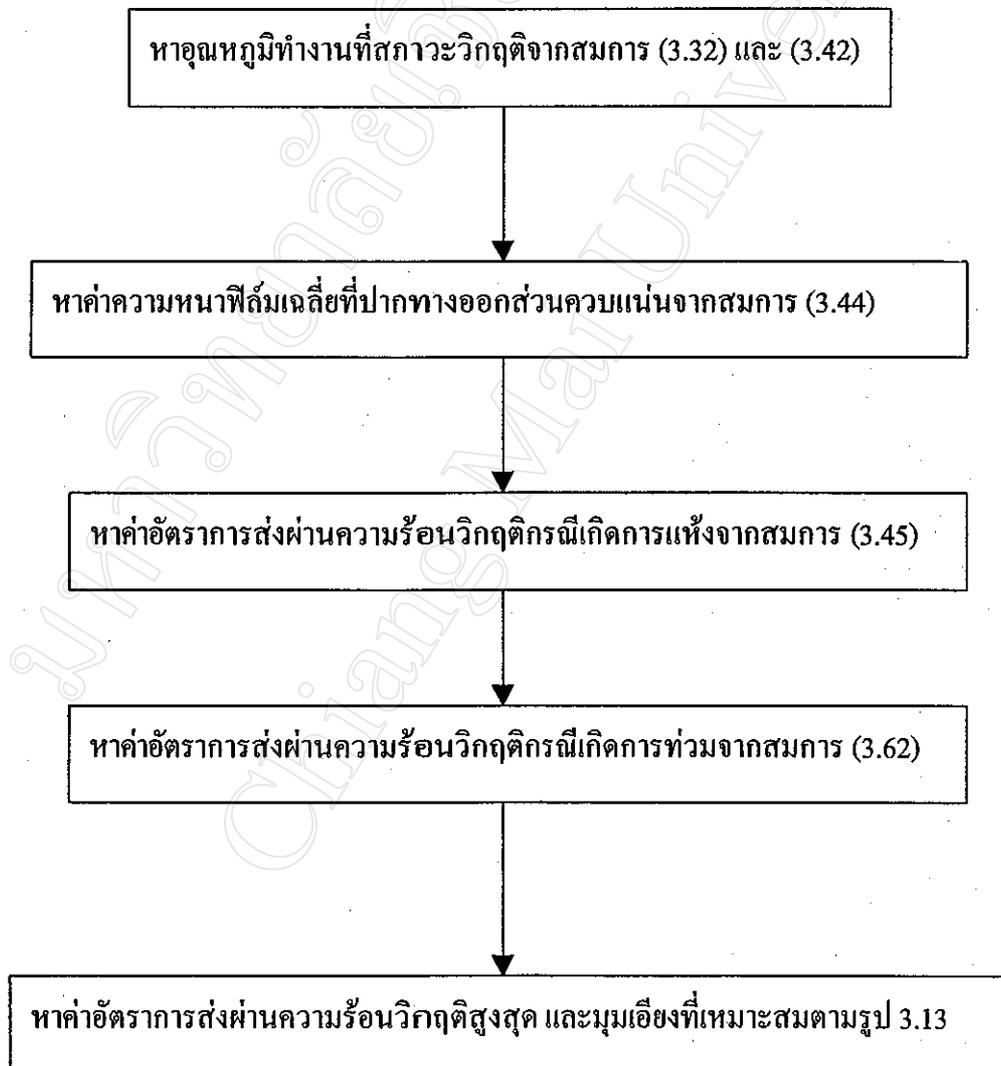
3.5 การหาค่าอัตราการส่งผ่านความร้อนวิกฤติสูงสุด และค่ามุมเอียงที่เหมาะสม

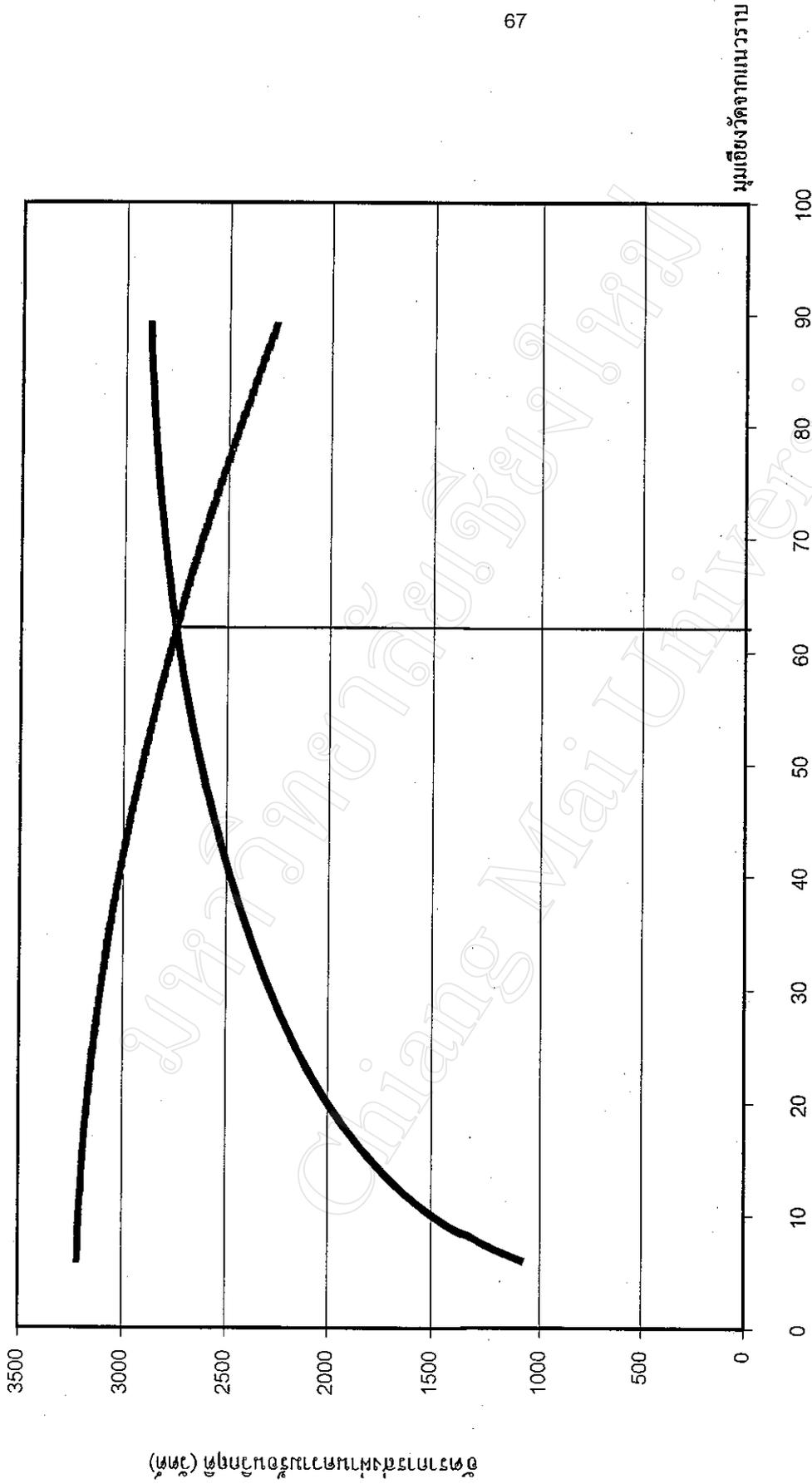
ตามที่กล่าวไว้ในสมมติฐานข้างต้นว่าขีดจำกัดสมรรถนะจะเกิดจากความพยายามที่จะเกิดขึ้นก่อนของปรากฏการณ์การแห้ง และปรากฏการณ์การท่วม ดังนั้นการหาค่าอัตราการส่งผ่านความร้อนวิกฤติสูงสุดจะหาโดย การคำนวณว่าค่าขีดจำกัดใดมีค่าน้อยกว่า ขีดจำกัดนั้นก็จะเกิดขึ้นก่อนที่มุมเอียงนั้นๆ ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนโดยรูป 3.13 จากรูปเส้นทางซ้ายมือคือเส้นที่เกิดอัตราการส่งผ่านความร้อนวิกฤติจากปรากฏการณ์การแห้ง ซึ่งจะพบว่าที่มุมเอียงจากแนวราบน้อย ขีดจำกัดนี้จะมีค่าน้อยกว่าเส้น

ทางด้านขวามือซึ่งก็คือ เส้นที่เกิดอัตราการส่งผ่านความร้อนวิกฤติจากปรากฏการณ์การท่วมซึ่งมีแนวโน้มสูงขึ้นที่มุมเอียงจากแนวราบมีค่าน้อยๆ ดังนั้นที่มุมเอียงน้อยๆ ชัดจำกัดจะเกิดจากปรากฏการณ์การแห้ง ในทำนองเดียวกันที่มุมเอียงจากแนวราบมากกว่า 62 องศา ชัดจำกัดจะเกิดจากปรากฏการณ์การท่วม

นอกจากนี้ยังพบอีกว่าจุดตัดระหว่างเส้นทั้งสองจะเป็นจุดที่เกิดอัตราการส่งผ่านความร้อนวิกฤติสูงสุด และมุมนี้จะเป็นค่ามุมเอียงที่เหมาะสม

ดังนั้นขั้นตอนการคำนวณอัตราการส่งผ่านความร้อนวิกฤติที่มุมเอียงใดๆ และมุมที่เหมาะสม แสดงเป็นแผนภูมิได้ดังนี้





รูป 3.13 การหาค่าอัตราการส่งผ่านความร้อนวิกฤตสูงสุด และค่ามุมเอียงที่เหมาะสม