



2.1 การระเหยของสารละลายในเครื่องระเหยหมุน

2.1.1 การระเหย

Earle⁽²⁾ และ Borgstrom⁽³⁾ ใกล้เคียงไว้ว่า การระเหย คือ การแยกน้ำออกจากสารละลาย ซึ่งมีน้ำเป็นจำนวนมากกว่าที่ต้องการในผลิตภัณฑ์สุดท้าย Earle ยังได้ให้ข้อเสนอแนะไว้สำหรับการระเหยสารละลายที่มีสารไวต่อความร้อน หรือ สารอาหารว่า มีแปดตัวแปรพื้นฐานดังนี้

- อัตราการถ่ายเทความร้อนจากผนังความร้อนไปยังของเหลว
- ปริมาณความร้อนที่ต้องการสำหรับระเหยน้ำ 1 หน่วยน้ำหนัก
- อุณหภูมิสูงสุดที่ใช้งานกับของเหลว
- ความกักเก็บที่ใช้ในการระเหย
- การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นใกล้กับสารไวต่อความร้อนหรือสารอาหาร ในระหว่างขบวนการระเหย

พิจารณาทางเทอร์โมไดนามิก การระเหยเกิดขึ้นในขณะที่ความดันไอของของเหลวมีค่ามากกว่าความดันย่อยในที่ว่างเหนือบริเวณของของเหลว นั้น ความดันไอเป็นคุณสมบัติเฉพาะของสารซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิกับส่วนประกอบของสารละลายนั้นว่า สารละลายประกอบด้วยตัวถูกละลายที่ระเหยได้ยาก สารละลายนี้ก็จะมีความดันไอสูง

Earle, Biolig และ Werner⁽⁴⁾ ใกล้เคียงไว้ว่า การระเหยมีหลักใหญ่อยู่ 2 อย่าง คือ การแลกเปลี่ยนความร้อน และการแยกตัวของไอน้ำที่เกิดขึ้นออกจากสารละลาย

การแลกเปลี่ยนความร้อน เกิดขึ้นจากสารละลายสัมผัสกับแผ่นให้ความร้อนที่บริเวณผิวแผ่นให้ความร้อนจะเกิดเป็นฟองของไอน้ำคิที่อยู่เพราะของเหลวมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับจุดเดือด จากนั้นฟองก็จะค่อย ๆ โตขึ้น และหลุดลอยไปยังผิวหน้าของของเหลว จากนั้นการเดือดอย่างรุนแรงก็เกิดขึ้น ขณะนี้เองเป็นเวลาไอน้ำจากฟองแยกตัวออกจากสารละลาย

ของเหลวเกิดเป็นฟองไอน้ำ ซึ่งเป็นกลไกที่ซับซ้อนอย่างหนึ่งจะไม่ขอนำมากล่าว ณ ที่นี้

2.1.2 ความสัมพันธ์ของความดันไอกับอุณหภูมิและสมคูลย์ของสถานะ

ความดันไอของสารบริสุทธิ์แปรเปลี่ยนเป็นสัดส่วนกับอุณหภูมิดังในรูปที่ 2-1 เส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของความดันกับอุณหภูมิของของเหลวที่บริสุทธิ์ ถ้าเป็นสารละลายที่มีตัวถูกละลายที่ไม่ระเหย (nonvolatile) อยู่รูปกราฟจะค่อนข้างขวา ตัวถูกละลายนี้มีผลต่อความดันไอไม่มากนัก

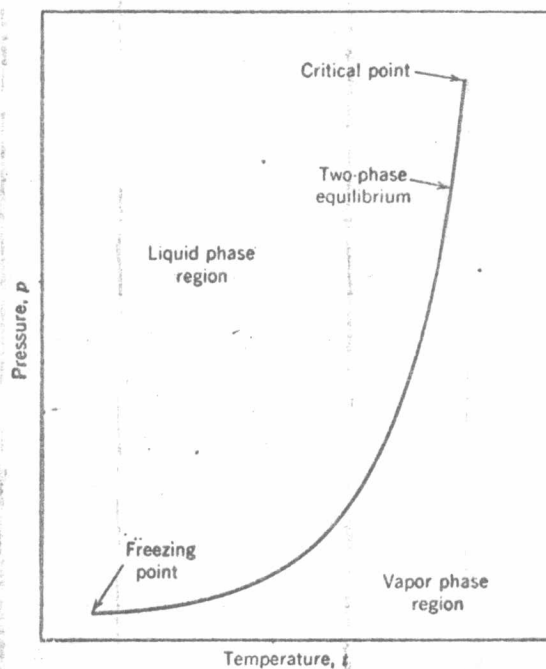


Fig2-1 Vapor pressure-temperature curve of a pure liquid. Also phase equilibrium diagram. (11)

กราฟ $p-t$ (ความดัน - อุณหภูมิ) นี้ ได้จากการทดลองจุดต่าง ๆ ที่แทนข้อมูลของความดันไอกับอุณหภูมินั้น จะเป็นเส้นสมคูลย์ระหว่างของเหลวกับไอ ดังนั้น กราฟ $p-t$ นอกจากจะบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับอุณหภูมิแล้ว ยังเป็นกราฟสมคูลย์ของของเหลวกับไออีกด้วย จุดใด ๆ บนเส้นกราฟจะแสดงลักษณะสองเฟสซึ่งอยู่สมคูลย์กัน และขณะที่มีการระเหยเกิดขึ้น สมคูลย์ของเฟสยังหมายถึงอุณหภูมิของของเหลวและไอเท่ากัน เพราะถ้าไม่เท่ากันการระเหยย่อมเกิดไม่สมบูรณ์ ในการระเหยในระบบที่เปิด ไอจะหายไปยังบรรยากาศ การระเหยก็เกิดขึ้นได้ตลอดเวลา ส่วนการ

ระเหยในระบบปิด ไอจะถูกดันไปยังเครื่องควบแน่น และด้วยวิธีนี้อิก็ถูกกำจัดออกไปได้ การระเหยก็ยังคงมีอยู่ไต่ตลอดไป การที่จะควบแน่นไอนั้น ไอจะต้องทำให้อิ่มตัวหรือถึงจุดควบแน่น อุณหภูมิที่อิ่มตัวที่ความดันที่กำหนดใหนั้นก็หาได้จากกราฟ $p - t$ ที่มีของเหลว นั้นบริสุทธิ์ ถ้าสารละลายมีตัวถูกละลายที่ไม่สามารถกลายเป็นไอได้ กราฟ $p - t$ จะคอนไปทางขวาของกราฟ $p - t$ ของของเหลวบริสุทธิ์ ดังนั้น จึงต้องมี การเพิ่มอุณหภูมิเพราะจุดเดือดเพิ่มขึ้น แต่ถายังคงอุณหภูมิเดิมแล้ว ต้องมีการทำให้ไอบางส่วนเย็นเพื่อควบแน่น เพราะอุณหภูมินี้เป็นอุณหภูมิที่ไอยังไม่อิ่มตัวของสารละลายนั้น ถ้าของเหลวไม่มีการเดือด เราก็สามารถแทนของเหลวนี้ด้วยจุดที่อยู่ในเฟสของของเหลวของกราฟ $p - t$

2.2 วัสดุที่สร้างเครื่องระเหย

ถ้าเครื่องระเหยสร้างโดยใช้เหล็ก โอกาสที่สารละลายจะไม่บริสุทธิ์ก็มีมาก เพราะ เหล็กเมื่อถูกความชื้นจะเกิดสนิมได้ง่าย จึงควรหันมาใช้วัสดุที่ทนน้อย เช่น ทองแดง นิกเกิล เหล็กปลอดสนิม (stainless steel) อลูมิเนียม ถึงแม้มันจะแพงซึ่งทำให้ค่าลงทุนครั้งแรกสูง แต่มันก็สามารถทนทานใช้เวลานาน และที่สำคัญก็คือ โลหะพวกนี้สามารถส่งถ่ายความร้อนได้ดี

2.3 การเกิดฟอง (Foaming)

สารบางอย่างโดยเฉพาะสารอินทรีย์ มักจะเกิดฟองขณะมีการระเหยน้ำมาก ถ้าฟองไม่ถูกทำลาย หรือฟองมันอยู่มากแล้ว ทั้งนี้อาจเกิดจากแรงตึงผิวที่มีค่าน้อยจะมีผลทำให้เกิดการสูญเสียสารนั้นซึ่งมันอาจจะลนออกมา หรือถูกดูดออกไปในขณะที่ทำวับริเวณรอบ ๆ ลุกอบเป็นสูญญากาศ

2.4 สารที่มีความไวต่ออุณหภูมิ

สารเคมีบางอย่าง อาทิ ผลิตภัณฑ์ยา และอาหาร จะถูกทำลายลงเมื่อตัวมันถูกทำให้ร้อนระดับปานกลาง (moderate temperature) ในช่วงเวลาหนึ่ง ดังนั้น ในการทำความเข้มข้นสารละลายประเภทนี้จำต้องมีเทคนิคที่พิเศษ เพื่อทำให้อุณหภูมิขณะระเหยนั้นต่ำ และให้ช่วงเวลาสัมผัสกับความร้อนสั้น ๆ เนื่องจากคุณสมบัติของสารละลายที่ไวต่อความร้อน

2.5 การส่งถ่ายความร้อนไปยังของไหล โดยการพา

การส่งถ่ายความร้อนของของไหลนั้น ความร้อนจะผ่านของไหล 3 แบบ ควบคู่กัน คือ ของไหลที่มีลักษณะ laminar layer, buffer layer และผ่านตัวของของไหล (main body of the fluid) ความร้อนที่ถูกส่งผ่าน laminar layer ควบวิธีการนำความร้อน ผ่าน buffer layer ควบวิธีการนำและการพาความร้อน และผ่านตัวของของไหลควบวิธีการพาความร้อนอย่างเกี่ยวเนื่อง เนื่องจากการส่งถ่ายความร้อนเหมือนกับการส่งถ่ายมวลสาร ดังนั้น พอจะสรุปได้ว่า ความร้อนที่ส่งถ่ายผ่าน laminar layer นั้น เป็นลักษณะการเหนี่ยวนำให้โมเลกุลข้างเคียงเคลื่อนไหวตามไปควบ และเมื่อผ่านถึงชั้นของของไหล การถ่ายเทความร้อนจึงเป็นลักษณะการพา

สัมประสิทธิ์การส่งถ่ายความร้อน

ความร้อนจะผ่านขอบเขตของของไหล และผ่านเข้า laminar layer เข้า buffer layer ก่อน แล้วจึงเข้าตัวของของไหล วงจรของการไหลของความร้อนจึงเหมือนมี 3 ตัว คานทานต่อกัน และอัตราการส่งถ่ายความร้อนแต่ละชั้นของของไหล สามารถคำนวณได้ในเทอมของความคานทาน และความแตกต่างของอุณหภูมิในชั้นนั้น หรืออาจจะคำนวณอัตราการส่งถ่ายความร้อนในเทอมของความคานทานทั้งหมด และอุณหภูมิแตกต่างของชั้นทั้งสามได้ ความคานทานทั้งหมดกำหนด ดังนี้

$$\text{ความคานทานทั้งหมดของของไหล} = \frac{1}{h_o A} \quad 2-1$$

และโคสมการของการส่งถ่ายความร้อน ดังนี้

$$q = h_o A \Delta t \quad 2-2$$

โดย A = พื้นที่ผิวส่งถ่ายความร้อน, เมตร²

h_o = สัมประสิทธิ์ส่งถ่ายความร้อน, คาลอรี/วินาที . เมตร².^oซ



q = อัตราการส่งถ่ายความร้อน, คาลอรี/วินาที

Δt = อุณหภูมิแตกต่างระหว่าง interface กับตัวของของไหล, °C

จากสมการ 2-2 นี้ สามารถคำนวณอัตราการส่งถ่ายความร้อนได้ ค่าความต้านทานความร้อน (thermal resistance) ของ laminar layer นี้ขึ้นอยู่กับลักษณะการเคลื่อนที่ของของไหล ถ้าของไหลมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง ความต้านทานความร้อนจะลดลง ตลอดจนความร้อนก็จะลดลงเช่นกัน ในกรณีทั่วไป การส่งถ่ายความร้อนแบบการพา ที่ชั้นเหนือจากผิวสัมผัส จะมีความต้านทานของ laminar layer คอยควบคุมอัตราการส่งถ่ายความร้อน ถ้าความต้านทานจำนวนนี้ลดลง ก็จะทำให้ความต้านทานทั้งหมดลดลงตามไปด้วย ซึ่งจะมีผลทำให้สัมประสิทธิ์การส่งถ่ายความร้อนสูงขึ้น การส่งถ่ายความร้อนจากภายในท่อทรงกระบอกให้กับของไหล ที่อยู่ผิวภายนอกทรงกระบอกนั้น สามารถพิจารณาจากที่เก็เกิดขึ้น ได้จากรูปที่ 2-2 การหาค่าสัมประสิทธิ์การส่งถ่ายความร้อน จึงมีการกำหนดไว้ดังต่อไปนี้

$$Q = h_1 (\pi DL) (T_{b1} - T_{o1}) \quad 2-3$$

$$Q = h_a (\pi DL) \left[\frac{(T_{b1} - T_{o1}) (T_{b2} - T_{o2})}{2} \right] \quad 2-4$$

$$Q = h_{ln} (\pi DL) \left[\frac{(T_{b1} - T_{o1}) - (T_{b2} - T_{o2})}{\ln \left[(T_{o1} - T_{b1}) / (T_{o2} - T_{b2}) \right]} \right] \quad 2-5$$

h_1 = ขึ้นกับความแตกต่างของอุณหภูมิที่ตำแหน่ง " 1 "

h_a = ขึ้นกับความแตกต่างของอุณหภูมิที่เป็นค่าเฉลี่ยของตัวกลาง เลขคณิต

h_{ln} = ขึ้นกับความแตกต่างของอุณหภูมิในรูปค่าเฉลี่ยลอการิทึม

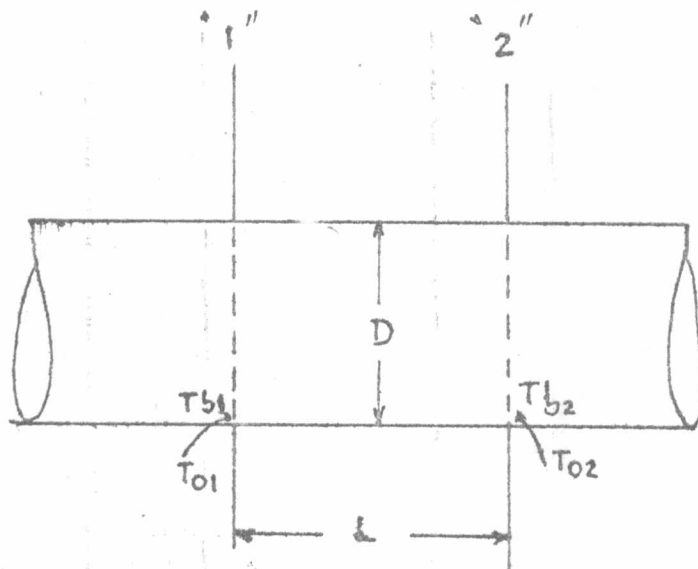
ค่าสัมประสิทธิ์การส่งถ่ายความร้อนแบบ h_{ln} นี้ จะไม่ขึ้นกับค่า L/D มากนัก⁽⁸⁾ ส่วน h_1, h_a จะขึ้นกับ L/D มากกว่า h_{ln} ดังนั้น h_{ln} จึงเหมาะที่จะใช้ในการหาค่าสัมประ-

สิทธิการส่งถ่ายความร้อนอย่างคี่

กรณีการส่งถ่ายความร้อนบนผิวของลูกบอล ดังรูป 2-4 การส่งถ่ายความร้อนจะส่งถ่ายจากภายในลูกบอลมายังภายนอก ของเหลวที่อยู่บนผิวลูกบอล จะมีอุณหภูมิค่าอยู่ เมื่อลูกบอลเคลื่อนที่ไป อุณหภูมิของของเหลวนั้นจะค่อย ๆ สูงขึ้น จนถึงจุดเดือดแล้ว จะคงที่ สมการของการส่งถ่ายความร้อนที่เกิดขึ้นบนผิวลูกบอล โดยมีของของเหลวอยู่บนผิววนั้น อาศัยสมการ 2-5 ควรจะมีความสัมพันธ์ ดังนี้

$$Q = h_{ln} A \left[\frac{(T_s - T_{a1}) - (T_s - T_{a2})}{\ln[(T_s - T_{a1}) / (T_s - T_{a2})]} \right] \quad 2-6$$

เมื่อสารละลายบนผิวลูกบอลเริ่มมีการระเหยน้ำ จะทำให้ความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น แล้วจึงหลุดจากผิวลูกบอล ไปผสมกับสารละลายที่อยู่ในระบบต่อไป



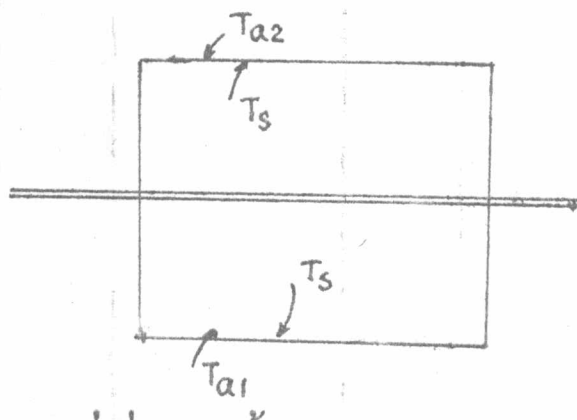
รูป 2-2 การส่งถ่ายความร้อนของท่อ

T_{o1} = อุณหภูมิที่ผิวภายนอกท่อที่ตำแหน่ง "1"

T_{o2} = อุณหภูมิที่ผิวภายนอกท่อที่ตำแหน่ง "2"

T_{b1} = อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลที่ตำแหน่ง "1"

T_{b2} = อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลที่ตำแหน่ง "2"



รูป 2-3 การส่งถ่ายความร้อนบนผิวDUCT

T_s = อุณหภูมิบนผิวDUCT

T_{a1} = อุณหภูมิของสารละลายเมื่อแตะผิวDUCT

T_{a2} = อุณหภูมิของสารละลายขณะระเหย

2.6 ลูกอบกลมหมุน (Rotary drum dryer)

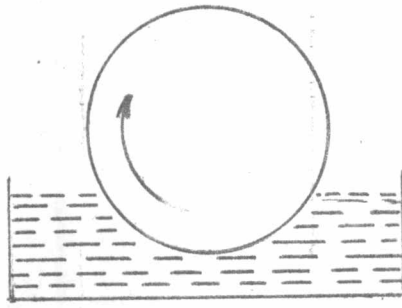
ลูกอบมีลักษณะเป็นทรงกระบอกปิดหัวท้าย มีการให้อินเนอร์เจอร์เข้าปทางด้านใน เพื่อทำให้ลูกอบรอน สารละลายที่จะให้แห้ง หรือมีความเข้มข้นสูงขึ้นจะเคลือบอยู่บนผิวของลูกอบ การติดของสารละลายบนผิวลูกอบที่พบมีอยู่สามวิธี คือ

- จุ่มลูกอบส่วนหนึ่งอยู่ในสารละลาย (รูปที่ 2-4)
- ปล่อยให้สารละลายลงในช่องระหว่างลูกอบ 2 ลูก (รูปที่ 2-5)
- รั่วหรือที่สารละลายจากคานกลางให้กระจายติดบนผิวลูกอบ (รูปที่ 2-6)

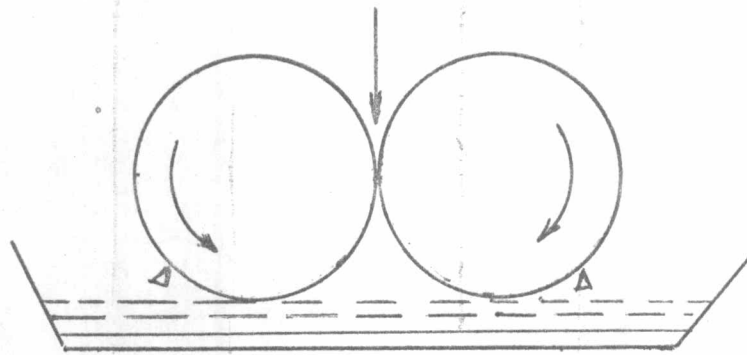
ของเหลวสามารถยักติดอยู่บนผิวลูกอบได้นั้น ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง อาทิ ความหนืด แรงตึงผิว ความเร็วรอบของลูกอบ โดยเฉพาะในกรณีที่ลูกอบจุ่มอยู่ในสารละลาย ความมุมระหว่างของเหลวและผิวลูกอบมีความสำคัญมาก เพราะสารละลายจะติดโคไซน์หรือบางก็ขึ้นอยู่กับมุมนี้ หรือ $f \cos \theta$ ส่วนกรณีที่ใช้รั่วติดนั้น ค่าแรงตึงผิวมีความสำคัญมาก เพราะวาสารละลายเคลือบเป็นฟิล์มหนาเกินไป การระเหยของอินเนอร์เจอร์ภายในไปยังผิวก็ทำได้ยาก ถ้ามุมเกินไปยอมเกิดความเสี่ยงความรอนมากเกินไปโดยให้กับอินเนอร์เจอร์ที่แยกตัวออกไป

ดังนั้นประสิทธิภาพของการระเหยจึงขึ้นกับระบบการถ่ายเทความร้อนจากผิวลูกอบให้กับสารละลาย ซึ่งสามารถอธิบายด้วยสมการ

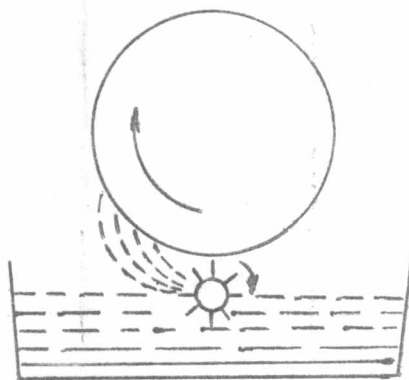
$$\frac{dW}{dt} = UA \Delta T (\Delta H_w)^{-1} \quad (2-21)$$



รูปที่ 2-4 ลูกอบแบบจุ่ม



รูปที่ 2-5 ลูกอบแบบมีใบมีด



รูปที่ 2-6 ลูกอบแบบฉีดสารละลาย

U เป็นสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนทั้งหมด

เนื่องจากความหนาผนังลูกอบปกคียบางมาก เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นผ่าศูนย์กลางของลูกอบ ดังนั้น พื้นที่ผิว (A) จึงแทนด้วยพื้นที่ผิวภายนอกของลูกอบ เมื่อให้ความร้อนภายในลูกอบด้วยไอน้ำ อุณหภูมิของสารละลายที่ทำการระเหยน้ำจะคงที่ใกล้กับค่าจกเคือกของสารละลายนั้น จนกระทั่งปริมาณน้ำลดลงมาก ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิของระบบเริ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ΔT เป็นอุณหภูมิเฉลี่ยที่ได้จากความแตกต่างของอุณหภูมิภายนอกและภายใน ΔH_w คือความร้อนแฝงสำหรับการระเหยของน้ำ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนทั้งหมดจึงเป็นสัดส่วนกับ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของฟิล์มของไอน้ำ (h_v) สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k_w) ความหนาของชั้นลูกอบ ΔX_w และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของสารละลายบนผิวลูกอบ h_1 เขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_v} + \frac{\Delta X_w}{k_w} + \frac{1}{h_1}} \quad (2-8)$$

ตัวแปรอันหนึ่งที่มีผลต่อค่า U เช่นกัน คือ ความหนาของฟิล์มบนผิวลูกอบ เช่น ถ้าบาง อัตราการระเหยจะมาก เช่นเดียวกับสารละลายที่มีฟิล์มสม่ำเสมอ และมีความหนาค่าค้ำวย เพื่อให้การระเหยเป็นไปอย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ บริเวณเหนือลูกอบมีการกำจัดเอาไอน้ำออกบาง เช่น การผานอากาศแห้งผานไปทำให้อากาศแห้งคั้งเอาไอน้ำออกมา หรืออาจจะใช้สูญญากาศคั้งเอาไอน้ำออกมา การนำเอาสารละลายที่เข้มข้นออกบางก็จำเป็น ถ้าสารละลายอยู่บนลูกอบหลาย ๆ ครั้งจะทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น ต่อจากนั้น เมื่อสารละลายเริ่มหนึคแล้ว มันก็เริ่มคิคบนผิวของลูกอบเหมือนพลาสติกเหลว ๆ มีวิธีแก้ไคโดยการผานอากาศแห้งไปยั้งสารละลายบาง แล้วคิมสารละลายเริ่มคินเขาไปคิม การทำให้อากาศแห้งเข้มข้นโดยวิธีนี้ นอกจากจะไคอัตราการระเหยของน้ำมากแล้ว การลงทุนและค้ำไชจ่ายการคินเครื่องยั้งค้ำวย

2.6.1 ลักษณะการเคลื่อนที่ของสารละลายบนลูกอบ

ขณะที่ลูกอบหมุนไปค้ำวยความเร็วขนาดหนึง สารละลายที่เกาะคิค

ไปบนผิวลูกบอล ความเร็วของสารละลายชั้นที่ติดกับผิวลูกบอลจะมีขนาดเท่ากับความเร็วของลูกบอล เพราะไม่มีความลื่นระหว่างผิวและชั้นของสารละลาย (slip velocity) ในชั้นถัดไปความเร็วก็จะน้อยลงไปจนถึงผิวของชั้นสารละลายจะมีความเร็วต่ำสุด จึงมีแนวเส้นความเร็วดังในรูปที่ 2-7

เพื่อความสะดวกในการพิจารณา ให้คิดว่าสารละลายในชั้นส่วนเล็ก ๆ ขนาดปริมาตร $dA \cdot \delta$ มีความเร็วเฉลี่ยสม่ำเสมอตลอดทั้งก้อน ชั้นส่วนนี้เกาะติดอยู่บนผิวลูกบอล ไค้ควยแรงดึงผิว ขณะที่หมุนไป ชั้นส่วนนี้ย่อมมีแนวโน้มที่จะหนีออกไปจากผิวของลูกบอล และแรงซึ่งเกิดจากแรงโน้มถ่วงของโลก แรงทั้งสามสมดุลกันพอดีจึงทำให้ชั้นส่วนของสารละลายนี้อยู่บนผิวลูกบอลไค้พอดีโดยไม่ตกลงมา ถ้าลูกบอลหมุนด้วยความเร็วเชิงมุมเท่ากับ ω แล้ว สมการของแรงที่เกิดขึ้นควรเป็น

$$F_1 = \overrightarrow{dA \cdot \delta \cdot \rho \cdot g} + F_2 \quad (2-9)$$

$$F_1 = \text{เวกเตอร์ของแรงดึงผิว} = \sigma \cdot dA$$

$$F_2 = \text{เวกเตอร์ของแรงหนีศูนย์กลาง} = dA \cdot \delta \cdot \rho \omega^2 R$$

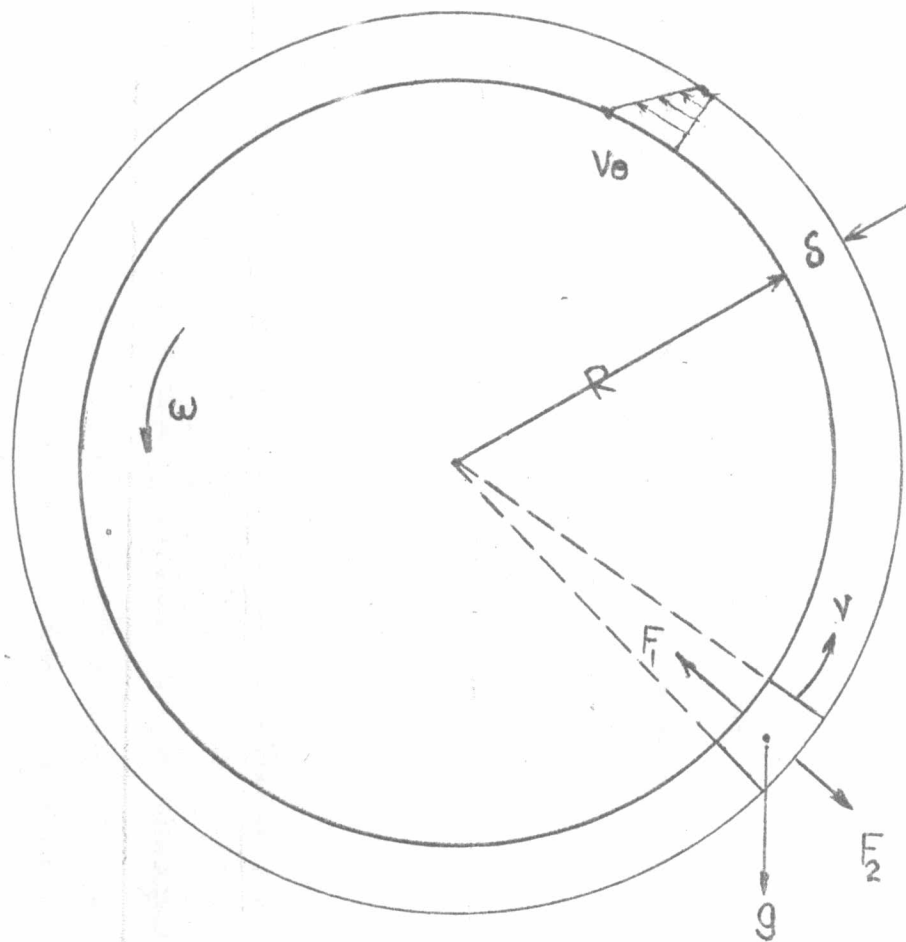
เมื่อเขียนใหม่ไค้

$$\overrightarrow{\sigma \cdot dA} = \overrightarrow{dA \cdot \delta \cdot \rho g} + \overrightarrow{dA \cdot \delta \cdot \rho \omega^2 R} \quad (2-10)$$

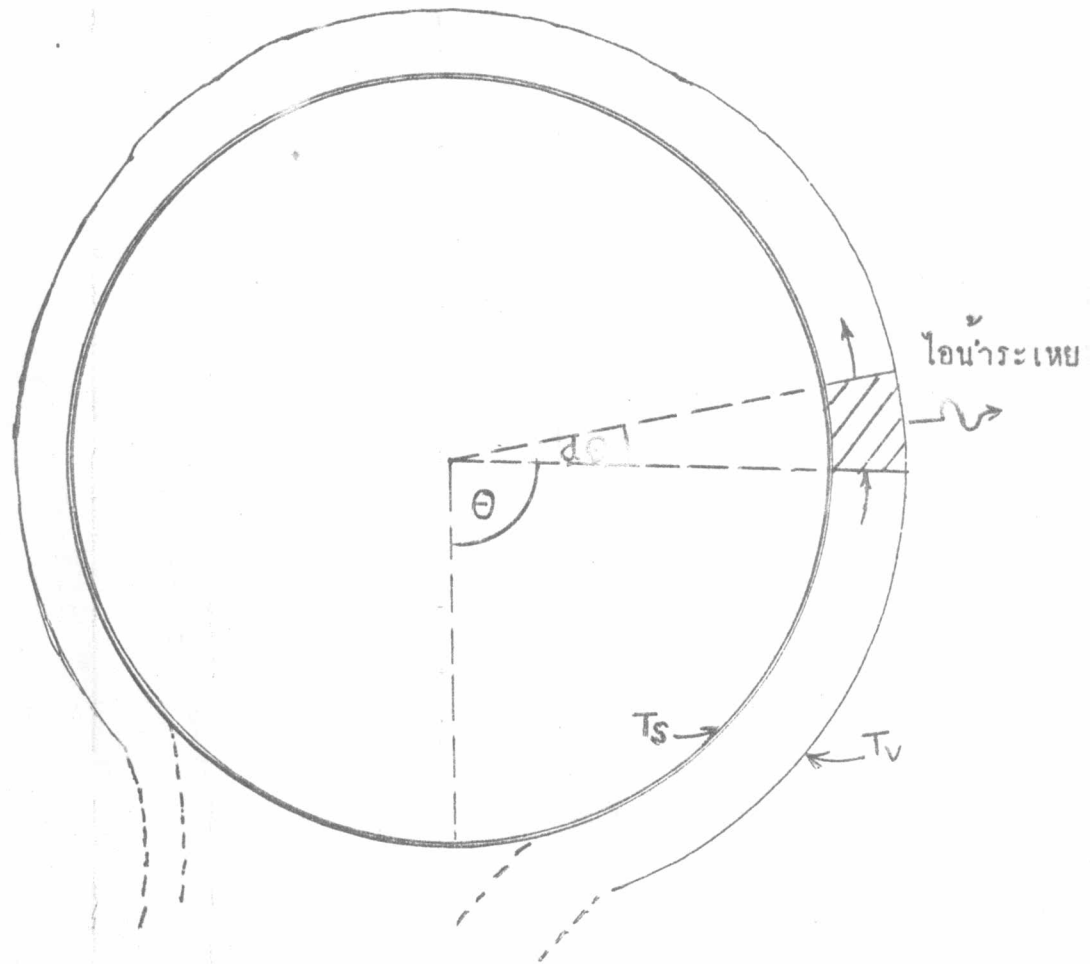
2.6.2 การระเหยบนแผ่นฟิล์ม

ของเหลวเมื่อไค้รับความร้อนจากลูกบอล อุณหภูมิไค้ค่อย ๆ สูงขึ้นจนถึงจุดไค้เดือด น้ำส่วนหนึ่งกลายเป็นไค้ระเหยออกไป ความหนาของฟิล์มไค้ค่อย ๆ บางลงพร้อมกับความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้นจนกระทั่งหลุดจากผิวลูกบอลออกไป ดังตัวอย่างในรูปที่ 2-8 ความร้อนที่ขึ้นไค้ตัวอย่างไค้รับเป็นความร้อนที่มาจากผิวของลูกบอลในแนวรัศมีและไค้ไค้ไค้ระเหยออกไป ส่วนการถ่ายเทความร้อนในทิศทางที่อยู่บนแนวขนานกับผิวหรือตั้งฉากกับชั้นส่วนในระบบนี้ไม่เกิดขึ้น สมมุติว่า ฟิล์มของเหลวมีความเร็วเท่ากับลูกบอลและฟิล์มมีขนาดบาง การถ่ายเทความร้อนจึงเป็นแบบการนำ

สมดุลย์ของพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นบนชั้นส่วน เขียนไค้เป็น



รูปที่ 2-7 ลักษณะการเกาะติดบนผิววงกลม



รูปที่ 2-8 สักขณะของฟิล์มเมื่อมีการระเหย

004235

$$dq = kdA \frac{T_s - T_v}{\delta} \quad (2-11)$$

$$dA = \text{พื้นที่สัมผัสระหว่างชั้นสวอนของเหลวกับผิวลูกอบ}$$

$$= Rd\theta L$$

$$L = \text{ความกว้างของลูกอบ}$$

สมการที่ 2-11 กลายเป็น

$$dq = kRd\theta L \frac{T_s - T_v}{\delta} \quad (2-12)$$

$$q = \text{อัตราความร้อนที่สารละลายได้รับ}$$

$$k = \text{การนำความร้อนของสารละลาย}$$

$$T_s = \text{อุณหภูมิที่ผิวลูกอบ}$$

$$T_v = \text{อุณหภูมิที่ผิวของสารละลาย}$$

$$\delta = \text{ความหนาของฟิล์ม}$$

ปริมาณความร้อนจำนวนนี้เป็นจำนวนที่ทำให้หน้าระเหย

$$dq = -\lambda d\omega \quad (2-13)$$

$$d\omega = \text{น้ำหนักของน้ำที่ระเหยไป}$$

$$\lambda = \text{ความร้อนแฝงสำหรับการระเหยของน้ำ}$$

ดังนั้น

$$\text{หรือ } \frac{k}{\delta} = - \frac{\lambda}{T_s - T_v} \cdot \frac{d\Gamma}{Rd\theta} \quad (2-14)$$

Γ = อัตราการระเหยของน้ำตอหนึ่งหน่วยความกว้างของลูกอบ
ตลอดผิวของลูกอบความหนาของฟิล์มไม่เท่ากันตลอด จึงให้ค่าเฉลี่ยของสัม-
ประสิทธิ์การถ่ายเทเท่ากับ h_w ซึ่งกำหนดได้เป็น

$$q = h_m 2\pi RL (T_s - T_v) = \lambda (w_o - w_t) \quad (2-15)$$

w_o = อัตราการป้อนของสารละลาย

w_t = อัตราสารละลายเข้มข้นหลุดจากลูกอบ

ผลต่างของอัตราทั้งสองเขียนได้เป็น Δw

$$T_s - T_v = \frac{\lambda \Delta w}{h_m 2\pi RL} = \frac{\lambda \Delta \Gamma}{h_m 2\pi R} \quad (2-16)$$

จากสมการ 2-14

$$T_s - T_v = - \frac{\delta \lambda}{k} \cdot \frac{d\Gamma}{Rd\theta} \quad (2-17)$$

รวมสมการ 2-16 และ 2-17

$$Rd\theta = - \frac{\delta h_m 2\pi R}{k \Delta \Gamma} d\Gamma \quad (2-18)$$

สมการต่อเนื่องของการไหล

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho v_r}{\partial r} + \frac{\partial \rho v_\theta}{r \partial \theta} + \frac{\partial \rho v_z}{\partial z} = 0 \quad (2-19)$$

สารละลายเป็นของเหลวที่มีปริมาตรไม่เปลี่ยนแปลงตามความกดดัน ดังนั้น ความหนาแน่น
จึงคงที่ เราจะได้อีก

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$$

และความเร็วในแนวรัศมีกับแนวความกว้างของผิว

$$v_r = 0$$

$$v_z = 0$$

ดังนั้น

$$\frac{\rho \partial v_\theta}{\partial \theta} = 0 \quad (2-20)$$

นำสมการของการเคลื่อนที่ของ Navier-Stoke มาประยุกต์กับของไหล
บนผิวของลูกอบ ซึ่งไหลในทิศทาง θ ทิศทางเดียว

$$\frac{\partial^2 v_\theta}{\partial r^2} + \frac{\partial v_\theta}{r \partial r} = - \frac{g \theta}{\nu} \quad (2-21)$$

ν = ความหนืดทางจลศาสตร์

เมื่อทราบค่า ν ในฟังก์ชันของ r ก็จะได้ว่า ปริมาตรของฟิล์มเป็น

$$\omega = \int_0^{\delta} v_\theta \rho L dr \quad (2-22)$$

สมการที่ 2-22 นี้ จะสามารถแก้ได้อาทราบค่าพรมแดนที่จะใช้หาค่าคงที่ของสมการนี้ แต่
ค่าพรมแดนนี้หาได้ยาก เนื่องจากความหนาของฟิล์มเปลี่ยนไปตลอดเวลา คิวเหตุผลนี้
เอกสารอ้างอิงต่าง ๆ ไม่ได้ออกไปถึงการคำนวณเรื่องนี้เอาไว้เลย

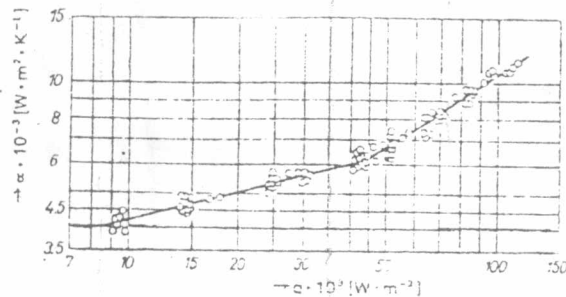
2.7 เครื่องระเหยหมุนแบบแผ่นฟิล์มบาง

อาศัยหลักการของลูกอบหมุน ถ้านำมาดัดแปลงโดยให้ลูกอบหมุนนี้หมุนอยู่ใน
ภาชนะที่มีรูปร่างเหมือนลูกอบ โดยภาชนะนี้มีขนาดใหญ่กว่า ช่องว่างระหว่างผิวลูกอบและ
ภาชนะ ของว่างสามารถบรรจุสารละลายที่จะใช้ทำให้เข้มข้นขึ้น เหนือชั้นของสารละลาย
เป็นช่องว่าง เมื่อทำให้ความกดดันคงบริเวณนี้ที่อยู่ภายใต้สภาวะสูญญากาศ จุดเดือดของ
สารละลายลดลง เมื่อลูกอบหมุนไปจะพาเอาสารละลายตามไปด้วย การระเหยก็จะมีมาก
ขึ้น เพราะเหลือชั้นบางของสารละลายบนผิวลูกอบ ซึ่งอยู่ภายใต้สูญญากาศเช่นกัน ขบวนการ
การนี้เหมาะสมกับการทำสารละลายที่ไวต่อความร้อนให้เข้มข้นมากขึ้น เพราะจะใช้ความ
ร้อนเป็นจำนวนเพียงเล็กน้อย ซึ่งเมื่อปี พ.ศ. 2523 นาย จงคิด ชินวินิจกุล⁽⁵⁾ และ
นาย กมล โสภณพันธ์ และใน พ.ศ. 2524 นาย พิภพ ธรรมชาวี⁽⁶⁾ และนางสาว



ภาวดี เอี่ยมทัศนาศึกษา ใ้ทำการศึกษาการระเหยของน้ำในเครื่องมือประเภทนี้ แต่การทดลองไม่ประสบผลตามเป้าหมาย เพราะมีอุปสรรคหลายประการเกี่ยวกับเครื่องมือและเทคนิคการทดลอง

เมื่อเร็ว ๆ นี้ Frank และผู้ร่วมงาน⁽⁷⁾ ได้พยายามศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนแผ่นฟิล์มบางของสารละลายในเครื่องมือแบบทรงกระบอก มีเครื่องกลี่ยให้ความหนาของแผ่นฟิล์มสม่ำเสมอ จากการศึกษาเขาได้สรุปผลไว้ว่า ถ้าอัตราการส่งถ่ายความร้อน



รูปที่ 2-9 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเป็นฟังก์ชันของอัตราการส่งถ่ายความร้อนต่อพื้นที่ ซึ่งการระเหยเป็นแบบแผ่นฟิล์มบาง ทดลองโดยไซน่ากูดัน⁽⁷⁾

ร้อนต่อพื้นที่ (specific heat flux) มีค่าต่ำ จะเป็นการส่งถ่ายความร้อนแบบการนำ (Conduction) ซึ่งการส่งถ่ายความร้อนจะเกิดไม่ค่อยคึก ส่วนการระเหยจะเกิดตรงบริเวณรอยต่อระหว่างสารละลายกับไอน้ำ ในทางตรงกันข้าม ถ้าเพิ่มความหนาของฟิล์มให้มากขึ้น และมีอัตราการส่งถ่ายความร้อนต่อพื้นที่มากด้วย จะมีผลทำให้เกิดเป็นฟองเกิดขึ้นมาในชั้นของฟิล์มนั้น การส่งถ่ายความร้อนจากภายในลูกบอออกมาภายนอกผ่านสารละลายออกมาที่หนึ่งคึกขึ้น การส่งถ่ายความร้อนแบบนี้เป็นแบบการพา (Convection) และจากข้อมูลที่ใ้ทำการทดลอง เขาสามารถสรุปเป็นกราฟดังรูปที่ 2-9 ซึ่งเป็นกราฟที่เขียนระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งถ่ายความร้อนกับอัตราการส่งถ่ายความร้อนต่อพื้นที่ ซึ่งจากกราฟพอที่จะพิจารณาได้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์การส่งถ่ายความร้อนจะมากขึ้นเมื่ออัตราการส่งถ่ายความร้อนต่อพื้นที่มากขึ้นเช่นกัน แต่จากกราฟจะเห็นว่า กราฟมีลักษณะเป็นเส้นสอง

เส้นมีความชันต่างกัน ตรงจุดที่เปลี่ยนความชันเป็นจุดวิกฤตของอัตราการส่งถ่ายความร้อน
 ต่อพื้นที่ (Critical value of specific heat flux) กราฟช่วงแรกแสดง
 ถึงมีการส่งถ่ายความร้อนแบบการนำ ช่วงที่สองเป็นการส่งถ่ายความร้อนแบบการพา จะ
 เห็นว่ากราฟช่วงที่สองจะมีการส่งถ่ายความร้อนไค้สูงกว่าช่วงแรก เมื่อทราบดังนี้ ควร
 จะให้เครื่องมือทำงานอยู่ในช่วงของกราฟช่วงที่สอง เมื่อทราบค่าอัตราการส่งถ่ายความ
 ร้อนต่อพื้นที่แล้ว หันมาพิจารณาว่าความหนาของฟิล์มจะเป็นเท่าไร จะพอเหมาะทำให้
 การมีการส่งถ่ายความร้อนและให้ค่าอัตราการส่งถ่ายความร้อนต่อพื้นที่ตามต้องการ จาก
 กราฟ จุดวิกฤตจะอยู่ที่อัตราการส่งถ่ายความร้อนต่อพื้นที่ประมาณ 40×10^{-3} วัตต์/เมตร²
 ซึ่งฟิล์มควรมีความหนาประมาณ 0.5 มิลลิเมตร ฉะนั้น ควรจะออกแบบใหม่มีความหนามาก
 กว่านี้ การส่งถ่ายความร้อนจึงจะมากขึ้นกว่าเดิม

2.8 อีเจกเตอร์ (Ejector)

เครื่องมือที่ประกอบด้วยหัวฉีด (nozzle) มีพื้นที่ภาคตัดขวางขนาดเล็กเพื่อ
 ไหลของไหล ไหลผ่านด้วยความเร็วสูงเมื่อผ่านออกจากหัวฉีดของไหลก็ไหลสู่คอคอหรือเวน
 ทูรี (Venturi) ความเร็วที่เปลี่ยนไปทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความกดดันตรงบริเวณ
 ตรงหัวฉีดตามกฎของไหลโดยทั่ว ๆ ไป ของไหลมีความเร็วสูงจะมีความดันตรงบริเวณใต้
 หัวฉีดต่ำมาก จึงสามารถนำอีเจกเตอร์มาประยุกต์ใช้กับงานได้หลายแบบ

- ลดความดันภายในระบบ (Vacuum)
- ผสมของไหลสองอย่างเข้าด้วยกัน
- คุกก๊าซหรือไอน้ำออกจากระบบ

การศึกษารั้ครั้งนี้ เราจะใช้ประโยชน์สองอย่างพร้อมกัน คือ ลดความดันและ
 คุกกไอน้ำออกจาก ระบบ

2.8.1 ลักษณะและการทำงานของหัวฉีด

การทำงานของหัวฉีดนั้นขึ้นกับ พื้นที่หน้าตัดของหัวฉีด คอของเวน
 ทูรี ความดันของไอน้ำ ความดันที่ต้องการทำสูญญากาศ ความดันที่ผ่านคอเวนทูรี และ
 อัตราส่วนระหว่างความร้อนจำเพาะ (specific heat ratio) ของไอน้ำกับก๊าซใน

ระบบ นอกจากนี้ยังขึ้นกับน้ำหนักโมเลกุลของก๊าซที่ใช้ทำสูญญากาศ รวมทั้งอุณหภูมิด้วย รูปที่ 2-10 จากรูป โทปบริเวณที่ผสมกันของก๊าซจากหัวฉีด และก๊าซจากผิวลูกสูบ ของ เวนทูรีมีขนาดคงที่ (constant area mixing) และเมื่อใช้อีเจกเตอร์เคียวทำ สูญญากาศ มักจะออกแบบให้อัตราส่วนของความดันของก๊าซที่ออกจากหัวฉีดต่อความดันใน ระบบที่ต้องการ (compression ratio) ใหม้น้อยกว่า 10 ส่วนอัตราส่วนของ พื้นที่หน้าตัดของคอบริเวณที่ผสมกันของก๊าซต่อพื้นที่หน้าตัดของหัวฉีดก๊าซมีค่าต่ำกว่า 100 ยกตัวอย่างเช่น สมมติว่าต้องการทำสูญญากาศ ภายในทรงกระบอกทั้งสองเท่ากับ 0.21 กก./ซม² โดยที่ไอน้ำผ่านจากคอเวนทรี แล้วความดันเท่ากับ 1.03 กก./ซม² อาศัย กราฟรูป 2-11 ซึ่งใช้สำหรับออกแบบอีเจกเตอร์จะได้ว่า $P_{ob}/P_{ob} = 5.0$ และ $P_{ob}/P_{oa} = 2.94/100$ เท่ากับ 0.0294 อัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดที่เหมาะสม (optimum) ซึ่งได้จากกราฟจะเท่ากับ 12 และค่า w_b/w_a ซึ่งเป็นน้ำหนักเป็นปอนด์ของ อากาศต่อน้ำหนักเป็นปอนด์ของไอน้ำมีค่าประมาณ 0.15 แต่ค่านี้จะคงมีการแก้ไขบ้าง เนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ และน้ำหนักโมเลกุลของก๊าซทั้งสอง โดยใช้สูตร

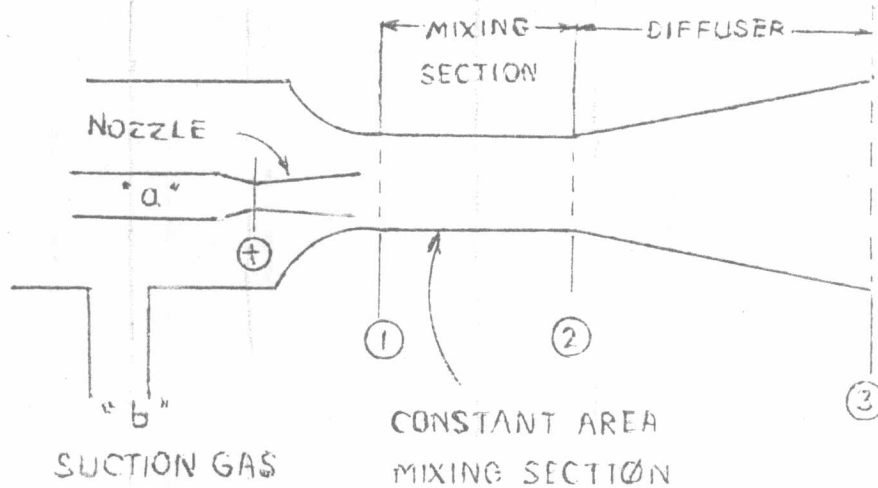
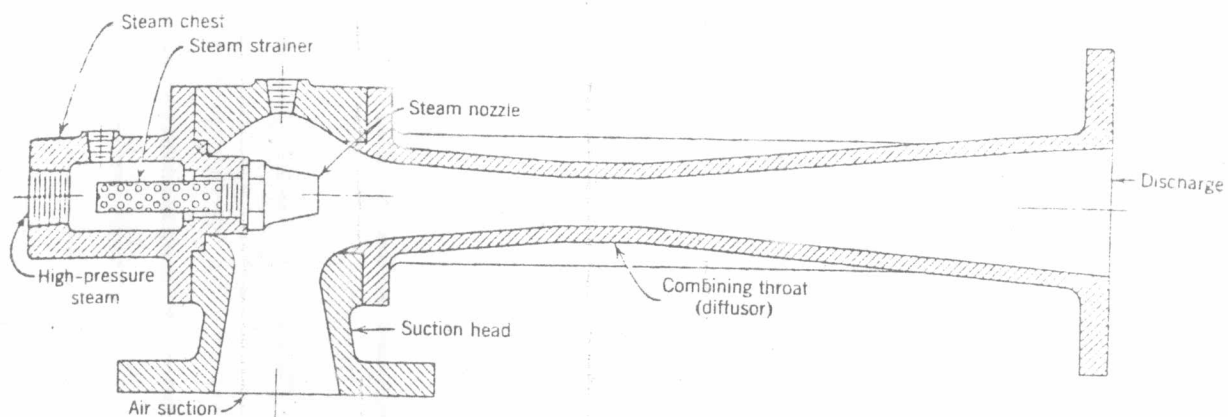
$$\left(\frac{w}{w_a}\right) = \frac{w_b}{w_a} \sqrt{\frac{T_{oa} M_b}{T_{ob} M_a}} \quad (2-41)$$

ได้มีการทดลองในห้องปฏิบัติการเพื่อทดสอบค่าอัตราส่วนของความดันที่หัวฉีดกับที่ระบบปร่า กฎว่าค่าที่วัดได้จะมีค่าประมาณ 90 % ของค่าที่ได้จากการคำนวณ ซึ่งพอจะอธิบายได้ว่า ค่าที่ได้จากการทดลองที่น้อยไปนี้จะคงใช้ในการคำนวณความฝืดของผนัง (wall friction) ในบริเวณส่วนผสมของเวนทรี จากกราฟรูปที่ 2-11 เป็นกราฟที่ใช้ในการออกแบบอีเจก- ตอร์ และออกแบบค่าแต่ละค่าอาจจะมีหนทางให้เลือกมาก ฉะนั้นหนทางที่ดีที่สุด ต้องให้ ค่าต่าง ๆ แล้วทำให้เครื่องมือทำงาน ตลอดจนการสร้างสะดวก

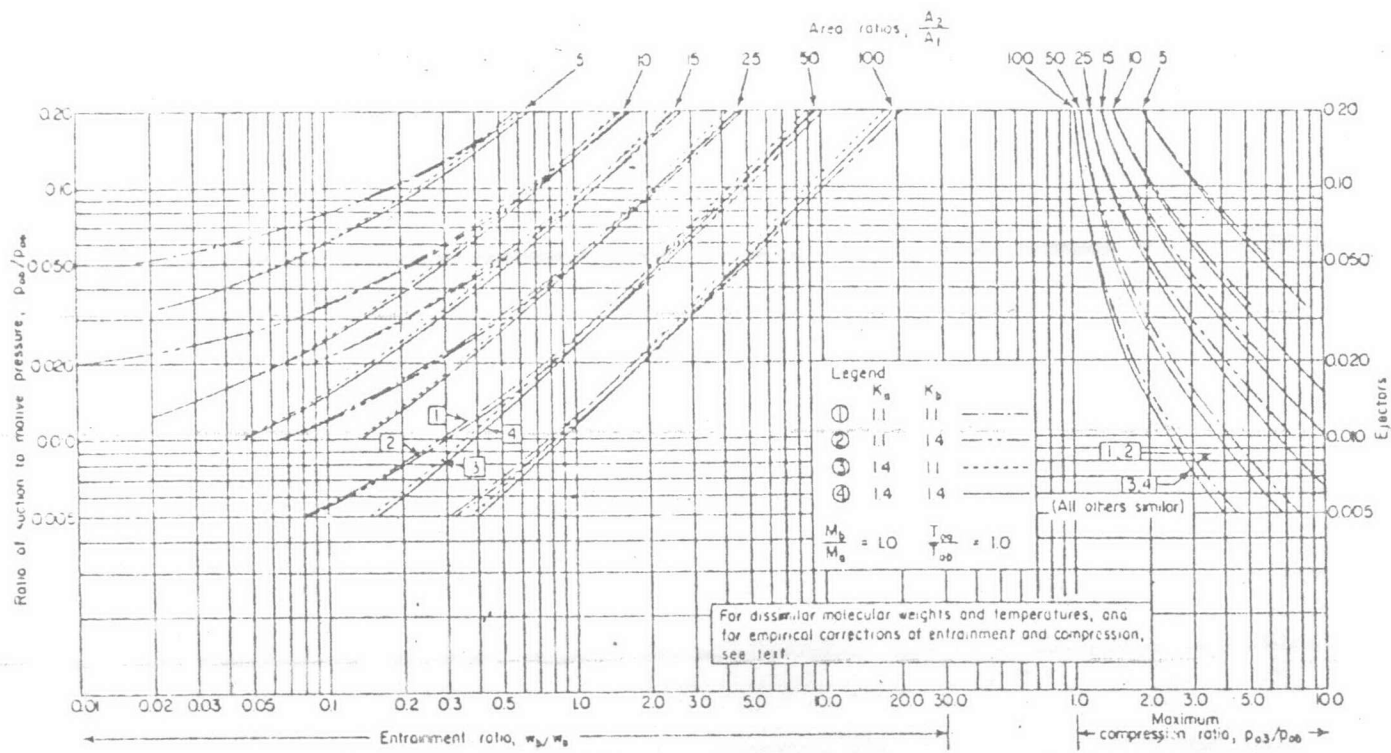
2.8.2 การใช้อีเจกเตอร์ (Use of ejector)

การใช้อีเจกเตอร์แบบไอน้ำในการทำสูญญากาศนั้น ควรจะคำนึง ถึงตัวแปรเหล่านี้

1. ความดันไอน้ำ (steam pressure) การเลือกอีเจกเตอร์ จะต้องขึ้นกับความดันที่ค่าที่สุดที่ใช้ในการฉีกเพื่อทำให้เกิดสูญญากาศตามที่ต้องการได้



รูปที่ 2-10 อีเจกเตอร์ และ เวนทรี



รูปที่ 2-11 กราฟสำหรับออกแบบอีเจกเตอร์ (16)

2. อุณหภูมิของน้ำ การเลือกขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของน้ำที่สูงที่สุด

3. ความดันเนื่องจากสุญญากาศ (Suction Pressure) และอุณหภูมิ
ค่าเหล่านี้เป็นค่าที่ต้องการทำ ฉะนั้นการเลือกอีเจคเตอร์มักจะให้มันทำงานเพื่อให้ได้
สูญญากาศมากที่สุด ซึ่งจะมีผลทำให้อุณหภูมิค่าเช่นกัน

4. ปริมาณความจุที่ต้องการ (Capacity Required) ขึ้นกับ
ความดันในระบบที่ค่าที่สุดว่า ถ้าใช้ความดันค่าสุดเท่านี้ ความจุจะเป็นเท่าไร

การใช้อีเจคเตอร์ทำไคงาย การบำรุงรักษาที่ไม่ต้องมาก ค่าติดตั้งก็ต่ำ ก็
เนื่องจากมันไม่มีชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่นั่นเอง และยังใช้งานได้นาน แต่การติดตั้งอีเจคเตอร์
จำเป็นต้องมีฐานคอยค้ำจุนที่แข็งแรง อีเจคเตอร์ใช้ไค้ทั้งของผสมที่แห้ง หรือเปียก และ
เป็นกาซก็ไค้ การเลือกวัสดุมาทำอีเจคเตอร์นั้น ก็ควรเลือกวัสดุที่ทนความร้อน การกัด
กร่อน เช่น ไซสเทนเลส สตีล นอกจากนี้อาจจะสร้างควยคาร์บอน หรืออาจจะสร้างควย
แก้วก็ไค้