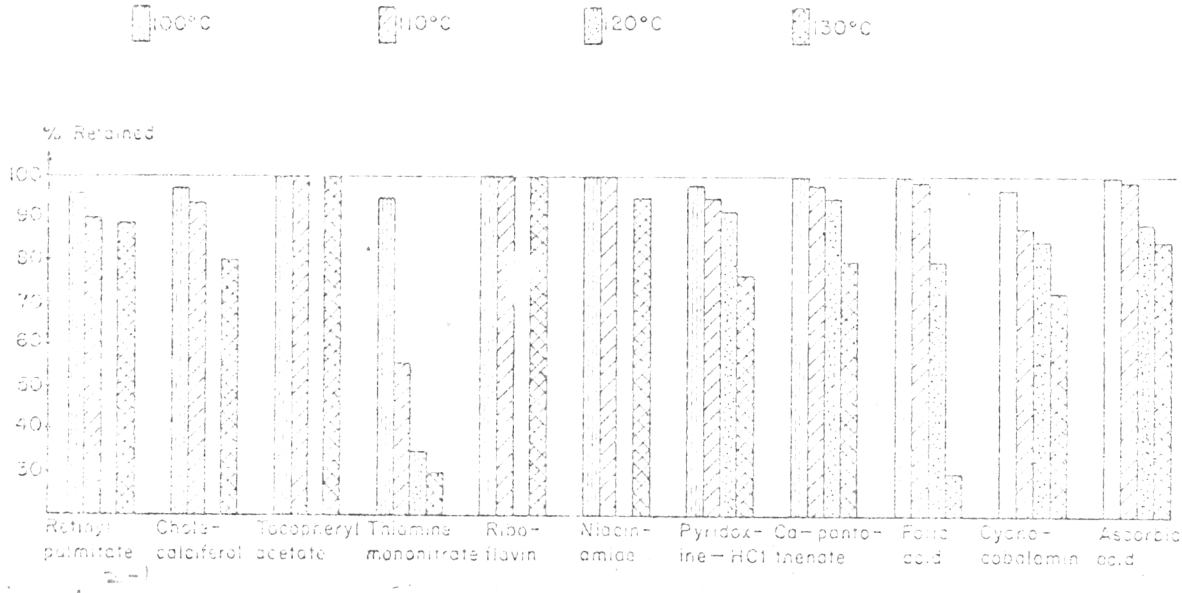
หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

2.1 สารที่ไวต่อความร้อน

สารที่ไวต่อความร้อนกล่าวโดยทั่วไปก็คือ สารที่ถูกทำลายได้ง่ายที่อุณหภูมิต่ำ สารพวกนี้มีหลายชนิด อาทิเช่น วิตามิน โปรตีน เอ็นไซม์ ฯลฯ.

Harris and Loesecke[3] & Bender[4] ได้ศึกษาการสูญเสียของวิตามินสังเคราะห์ในน้ำตาลเหลวที่อุณหภูมิคงที่โดยเริ่มต้น 100 อาศาเซลเซียสถึง 130 องศาเซลเซียส โดยแต่ละครั้งของการทดลองใช้เวลา 15 นาที จากผลการทดลองพบว่าวิตามินแต่ละชนิดจะสูญเสียต่างกันขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ดังรูปที่ 2-1

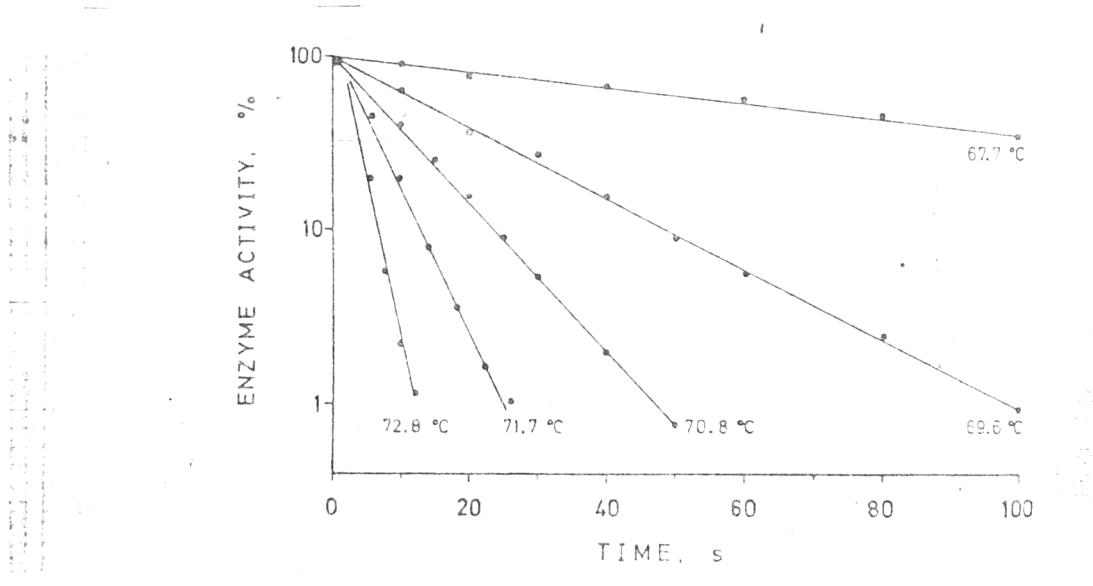


รูปที่ 2-1 การถูกทำลายของวิตามินสังเคราะห์ด้วยความร้อน

จากรูปที่ 2-1 พบว่าไทอามีน โมโนไนเตรต (Thiamine mononitrate) กับกรดโฟลิก (Folic acid) จะถูกทำลายประมาณ 70 เปอร์เซนต์ ที่อุณหภูมิ 130 อาศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียสนี้ วิตามินชนิดต่าง ๆ จะถูกทำลายมากที่สุด การทดลองเพื่อทำให้สารละลายบางชนิดที่มีวิตามินประกอบอยู่มีความเข้มข้นสูง ควรจะเลือกอุณหภูมิที่เหมาะสม เช่น

สารละลายบางชนิดอาจเลือกที่ต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส

Svensson and Eriksson[5] ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อเอ็นไซม์ชนิดต่าง ๆ เช่นโปตาโต ไลโปลายติก อะกริล ไฮโดรเลส(Potato lypolytic acyl hydrolase) ไลโปซิจีเนส (Lypoxygenase) โปลิฟีนอล ออกซิเดส (Polyphenol oxidase) และได้สรุปผลไว้ดังรูป 2-2



รูปที่ 2-2 โปตาโต ไลโปลายติก อะซิล ไฮโดรเลส ถูกทำลายโดยความร้อน ซึ่งแปรตามเวลาและอุณหภูมิในสารละลายบัฟเฟอร์ โปตาโต สกัด

จากรูป 2-2 เขาได้ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 67.7 องศาเซลเซียสถึงอุณหภูมิ 72.8 องศาเซลเซียส โดยทำการทดลองที่เวลาและที่อุณหภูมิต่าง ๆ พบว่า เอ็นไซม์ ไฮโดรเลส จะถูกทำลายน้อยที่สุดที่อุณหภูมิ 67.7 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการทดลอง 100 นาที เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิอื่น ๆ ที่เวลาน้อยกว่า เช่น 70.8 องศาเซลเซียส เมื่อใช้เวลาในการทดลอง 50 นาที พบว่าเอ็นไซม์ถูกอินแอกติเวตต์ประมาณ 99 เปอร์เซนต์ ฉนั้นเมื่อต้องการให้สารต่าง ๆ ที่มีเอ็นไซม์ชนิดนี้ประกอบอยู่มีความเข้มข้นสูงขึ้น ควรทำที่อุณหภูมิต่ำกว่า 67.7 องศาเซลเซียส

๒.๒ การระเหยของสารทำละลายในเครื่องระเหยแบบแผ่นฟิล์มบางหมุน

๒.๒.๑ การระเหย

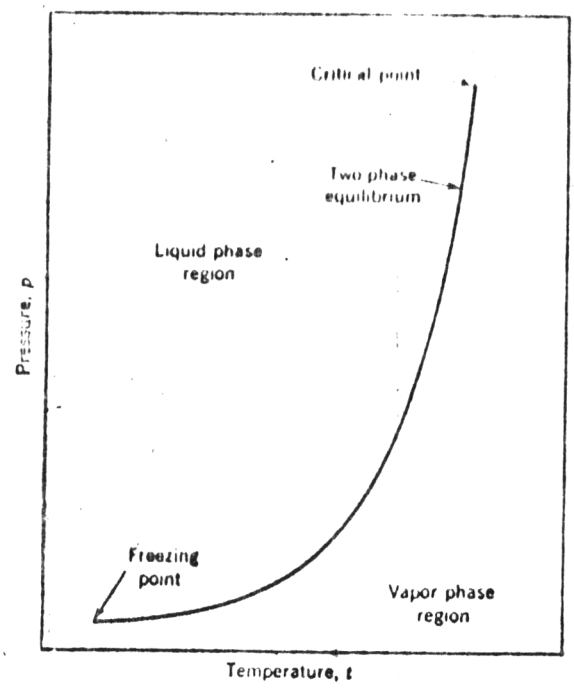
Borgstrom[6] & Earle[7] ได้กล่าวไว้ว่า การระเหยคือ การแยกน้ำออกจากสารละลายซึ่งมีน้ำเป็นจำนวนมากกว่าที่ต้องการในผลิตผลขั้นสุดท้าย การระเหยเกิดขึ้นในขณะที่ความดันไอของของเหลวมีค่ามากกว่าความดันย่อยในที่ว่างเหนือบริเวณของเหลวนั้น ความดันไอเป็นคุณสมบัติเฉพาะของสารซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิและส่วนประกอบของสารละลายนั้น ถ้าสารละลาย ประกอบด้วยตัวถูกทำลายที่ระเหยได้ยาก สารละลายก็จะมีจุดเดือดสูงขึ้น

Bielig[8] & Earle[7] ได้กล่าวไว้ว่าการระเหยมีหลักใหญ่อยู่ ๒ อย่างคือการแลกเปลี่ยนความร้อน และการแยกตัวของไอน้ำที่เกิดขึ้นออกจากสารละลาย

การแลกเปลี่ยนความร้อน เกิดขึ้นจากสารละลายสัมผัสกับแผ่นให้ความร้อน ที่บริเวณผิวแผ่นให้ความร้อนจะเกิดเป็นฟองของไอน้ำติดอยู่เพราะของเหลวมีอุณหภูมิใกล้กับจุดเดือด จากนั้นฟองก็จะค่อย ๆ โตขึ้น และหลุดลอยไปยังผิวหน้าของของเหลว จากนั้นการเดือดอย่างรุนแรงก็เกิดขึ้น ขณะนี้เองเป็นเวลาที่ไอน้ำจากฟองแยกตัวออกจากสารละลายของเหลวเกิดเป็นฟองไอน้ำ ซึ่งเป็นกลไกที่ซับซ้อนอย่างหนึ่งจะไม่ขอนำมากล่าว ณ ที่นี้

๒.๒.๒ ความสัมพันธ์ของความดันไอกับอุณหภูมิและสมดุลย์ของสถานะ

ความดันไอของสารบริสุทธิ์แปรเปลี่ยนเป็นสัดส่วนกับอุณหภูมิดังรูป ๒-๓ เส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของความดันกับอุณหภูมิของของเหลวที่บริสุทธิ์ ถ้าเป็นสารละลายที่มีตัวถูกละลายที่ไม่ระเหย (nonvolatile) อยู่ รูปกราฟจะค่อนไปทางขวา ตัวถูกละลายนี้มีผลต่อความดันไอไม่มากนัก.



รูปที่ ๒-๓ เส้นกราฟแสดงความดันไอและอุณหภูมิของของเหลวบริสุทธิ์หรือรูปแบบของสมดุลย์ของสถานะ

กราฟ p-t (ความดัน-อุณหภูมิ) นี้ ได้จากการทดลองจุดต่าง ๆ ที่แทนข้อมูลของความดันไอกับอุณหภูมินั้น จะเป็นเส้นสมดุลย์ระหว่างของเหลวกับไอ ดังนั้นกราฟ p-t นอกจากจะบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับอุณหภูมิแล้ว ยังเป็นกราฟสมดุลย์ของของเหลวกับไออีกด้วย จุดใด ๆ บนเส้นกราฟจะแสดงลักษณะสองเฟสซึ่งอยู่สมดุลย์กันและขณะที่มีการระเหยเกิดขึ้น สมดุลย์ของเฟสยังหมายถึงอุณหภูมิของของเหลวและไอเท่ากัน เพราะถ้าไม่เท่ากัน การระเหยย่อมเกิดไม่สมบูรณ์ ในการระเหยในระบบที่เปิด ไอจะหายไปยังบรรยากาศ การระเหยก็จะเกิดขึ้นได้ตลอดเวลา ส่วนการระเหยในระบบปิด ไอจะถูกผ่านไปยังเครื่องควบแน่น และด้วยวิธีนี้ไอก็จะถูกกำจัดออกไปได้ การระเหยยังคงมีอยู่ได้ตลอดไป การที่จะควบแน่นไอนั้น ไอจะต้องทำให้อิ่มตัวและถึงจุดควบแน่น อุณหภูมิที่อิ่มตัวที่ความดันที่กำหนดให้นั้นก็หาได้จากกราฟ p-t ที่มีของเหลวนั้นบริสุทธิ์ ถ้าสารละลายมีตัวถูกละลายที่ไม่สามารถกลายเป็นไอได้ กราฟ p-t จะค่อนไปทางขวาของกราฟ

p-t ของของเหลวบริสุทธิ์ ดังนั้น จึงต้องมีการเพิ่มอุณหภูมิเพราะจุดเดือดเพิ่มขึ้น แต่ถ้ายังคงอุณหภูมิเดิมแล้ว ต้องมีการทำให้ไอบางส่วนเย็นเพื่อควบแน่น เพราะอุณหภูมินี้เป็นอุณหภูมิที่ไอยังไม่อิ่มตัวของสารละลายนั้น ถ้าของเหลวไม่มีการเดือดเราก็สามารถแทนของเหลวนั้นด้วยจุดที่อยู่ในเฟสของของเหลวของกราฟ p-t

2.3 วัสดุที่สร้างเครื่องระเหย

เครื่องระเหยแบบแผ่นฟิล์มบางหมุนนี้สร้างโดยใช้ เหล็กปราศจากสนิม (Stainless steel) และอาจสร้างโดยใช้วัสดุอย่างอื่นก็ได้ เช่น ทองแดง นิเกิล อลูกมิเนียม ถึงแม้ว่าจะแพงซึ่งทำให้ค่าลงทุนครั้งแรกสูง แต่ก็ทนทานและสามารถใช้งานได้นาน และที่สำคัญคือ โลหะพวกนี้สามารถส่งถ่ายความร้อนได้ดี ถ้าเครื่องระเหยถูกสร้างโดยใช้เหล็ก โอกาสที่สารละลายจะไม่บริสุทธิ์ก็มีมาก เพราะเหล็กเมื่อถูกความชื้นก็เกิดสนิมได้ง่าย จึงไม่นิยมใช้

2.4 การส่งถ่ายความร้อนไปยังของไหลโดยการพา

การส่งถ่ายความร้อนของของไหลนั้น ความร้อนจะผ่านของไหล 3 แบบ ด้วยกันคือ ของไหลที่มีลักษณะ laminar layer ความร้อนจะผ่านด้วยวิธีการนำความร้อน ของไหลที่มีลักษณะ buffer layer ผ่านด้วยวิธีการนำและการพา และผ่านตัวของของไหลด้วยวิธีการพาความร้อนอย่างเดียว เนื่องจากการส่งถ่ายความร้อนเหมือนกับการส่งถ่ายมวลสาร ดังนั้นพอจะสรุปได้ว่า ความร้อนที่ส่งถ่ายผ่าน laminar layer นั้น เป็นลักษณะการเหนี่ยวนำให้โมเลกุลข้างเคียงเคลื่อนไหวตามไปด้วย และเมื่อผ่านถึงชั้นของของไหล การถ่ายเทความร้อนจึงเป็นลักษณะการพา

สัมประสิทธิ์การส่งถ่ายความร้อน

ความร้อนจะผ่านขอบเขตของของไหล และผ่านเข้า laminar layer เข้า buffer layer ก่อน แล้วจึงเข้าตัวของของไหล วงจรของการไหลของความร้อนจึงเหมือนมี ๓ ตัว ต้านทานต่ออนุกรมกัน และอัตราการส่งถ่ายความร้อนแต่ละชั้นของของไหล สามารถคำนวณได้ในเทอมของความต้านทาน และความแตกต่างของอุณหภูมิในชั้นนั้น หรืออาจจะคำนวณอัตราการส่งถ่ายความร้อนในเทอมของ ความต้านทานทั้งหมด และอุณหภูมิแตกต่างของชั้นทั้ง ๓ ได้ ความต้านทานทั้งหมดกำหนด ดังนี้

$$\text{ความต้านทานทั้งหมดของของไหล} = \frac{1}{h_0 A} \qquad (2\text{-}1)$$

และได้สมการของการส่งถ่ายความร้อน ดังนี้

$$q = h_0 A \Delta t \qquad (2\text{-}2)$$

โดย A = พื้นที่ผิวส่งถ่ายความร้อน, เมตร^2

h_0 = สัมประสิทธิ์การส่งถ่ายความร้อน, คาลอรี/นาที.เมตร^2. ซ

q = อัตราการส่งถ่ายความร้อน, คาลอรี/วินาที

Δt = อุณหภูมิแตกต่างระหว่าง interface กับตัวของของไหล, ซ

จากสมการ ๒-๒ นี้ สามารถคำนวณอัตราการส่งถ่ายความร้อนได้ ค่าความต้านทานความร้อน (thermal resistance) ของ laminar layer นี้ ขึ้นอยู่กับลักษณะการเคลื่อนที่ของของไหล ถ้าของไหลมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง ความต้านทานความร้อนจะลดลง ตลอดจนความร้อนก็จะลดลงเช่นกัน ในกรณีทั่ว ๆ ไปการส่งถ่ายความร้อนแบบการพา ที่ชั้นเหนือจากผิวสัมผัสจะมีความต้านทานของ laminar layer คอยควบคุมอัตราการส่งถ่ายความร้อน ถ้าความต้านทานจำนวนนี้ลดลงจะทำให้ความต้านทานทั้งหมดลดลงตามไปด้วย ซึ่งจะมีผลทำให้สัมประสิทธิ์การส่งถ่ายความร้อนสูงขึ้น การส่งถ่ายความร้อนจากภายในท่อทรงกระบอกให้กับของไหล ที่ผิวภายนอกทรงกระบอกนั้น สามารถพิจารณากลไกที่เกิดขึ้น ได้จากรูปที่ ๒-๔ การหาค่าสัมประสิทธิ์การส่งถ่ายความร้อน จึงมีการกำหนดได้ดังต่อไปนี้

$$Q = h_1(\pi DL)\ (T_{01}-T_{b1}) \qquad (2\text{-}3)$$

$$Q = h_a(\pi DL)\left[\frac{(T_{01}-T_{b1}) + (T_{02}-T_{b2})}{2}\right] \qquad (2\text{-}4)$$

$$Q = h_{ln}(\pi DL)\left[\frac{(T_{01}-T_{b1}) - (T_{02}-T_{b2})}{\ln\left[(T_{01}-T_{b1})/(T_{02}-T_{b2})\right]}\right] \qquad (2\text{-}5)$$

h_1 = ขึ้นกับความแตกต่างของอุณหภูมิที่ตำแหน่ง "1"

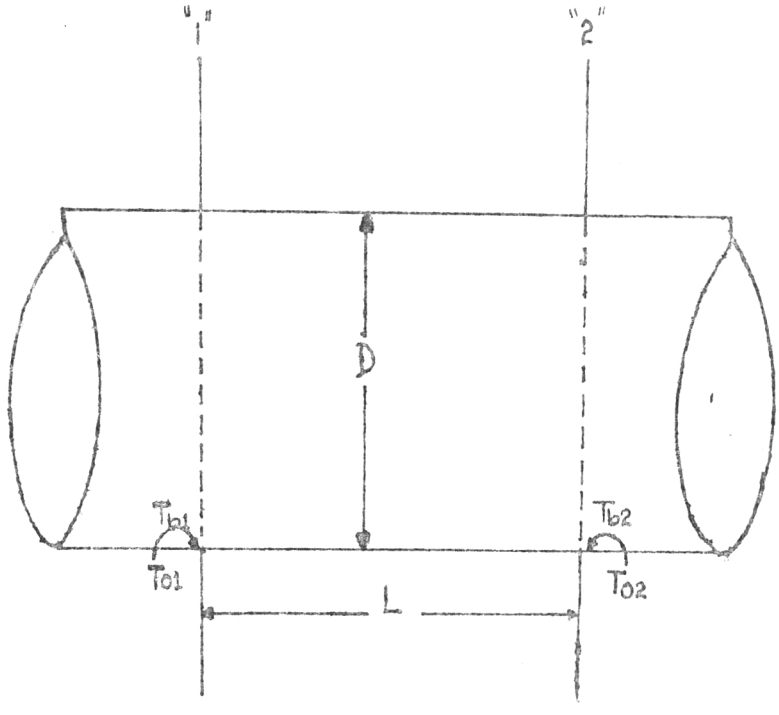
h_a = ขึ้นกับความแตกต่างของอุณหภูมิที่เป็นค่าเฉลี่ยของตัวกลางเลขคณิต

h_{ln} = ขึ้นกับความแตกต่างของอุณหภูมิในรูปค่าเฉลี่ยลอการีธึม

ค่าสัมประสิทธิ์การส่งถ่ายความร้อนแบบ h_{ln} นี้จะไม่ขึ้นกับค่า L/D มากนัก[10] ส่วน h_1, h_a จะขึ้นกับ L/D มากกว่า h_{ln} ดังนั้น h_{ln} จึงเหมาะที่จะใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การส่งถ่ายความร้อนอย่างดี

กรณีการส่งผ่านความร้อนบนผิวลูกกลิ้งดังรูป ๒-๕ การส่งถ่ายความร้อนจะส่งถ่ายจากภายในลูกกลิ้งมายังภายนอก ของเหลวที่อยู่บนผิวลูกกลิ้ง ของเหลวที่อยู่บนผิวลูกกลิ้ง จะมีอุณหภูมิต่ำอยู่ เมื่อลูกกลิ้งเคลื่อนที่ไปอุณหภูมิของของเหลวนั้นจะค่อย ๆ สูงขึ้น จนถึงจุดเดือดแล้วจะคงที่ สมการของการส่งถ่ายความร้อนที่เกิดขึ้นบนผิวลูกกลิ้ง โดยมีของเหลวอยู่บนผิวนั้น จากสมการ ๒-๕ ควรจะมีความสัมพันธ์ดังนี้

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



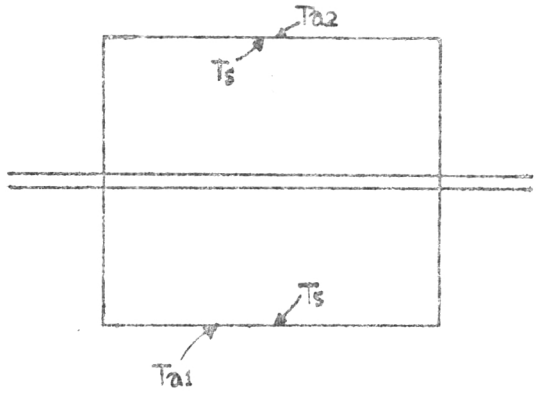
รูปที่ 2-4 การส่งถ่ายความร้อนของท่อ

T_{01} = อุณหภูมิที่ผิวภายในท่อที่ตำแหน่ง "1"

T_{02} = อุณหภูมิที่ผิวภายในท่อที่ตำแหน่ง "2"

T_{b1} = อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลที่ตำแหน่ง "1"

T_{b2} = อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลที่ตำแหน่ง "2"



รูปที่ 2-5 การส่งถ่ายความร้อนบนผิวลูกกลิ้ง

T_s = อุณหภูมิบนผิวลูกกลิ้ง

T_{a1} = อุณหภูมิของสารละลายเมื่อแตะผิวลูกกลิ้ง

T_{a2} = อุณหภูมิของสารละลายขณะระเหย

2.5 ลูกกลิ้งกลมหมุน (Rotary drum)

ลูกกลิ้งมีลักษณะเป็นทรงกระบอกปิดหัวท้าย มีการให้ไอน้ำผ่านเข้าทางด้านในเพื่อทำให้ลูกกลิ้งร้อน สารละลายที่จะทำให้แห้ง หรือมีความเข้มข้นสูงขึ้นจะเคลื่อนอยู่บนผิวของลูกกลิ้ง การติดของสารละลายบนผิวลูกกลิ้งที่พบมีอยู่ 3 วิธี คือ

- จุ่มลูกกลิ้งส่วนหนึ่งอยู่ในสารละลาย (รูปที่ 2-6)
- ปล่อยสารละลายลงในช่องระหว่างลูกกลิ้ง 2 ลูก (รูปที่ 2-7)
- วักหรือตีสารละลายจากด้านล่างให้กระจายติดบนผิวลูกกลิ้ง (รูปที่ 2-8)

การยึดติดของของเหลวอยู่บนผิวลูกกลิ้งขึ้นอยู่กับ แฟคเตอร์หลายอย่างอาทิ ความหนืด แรงตึงผิว ความเร็วรอบของลูกกลิ้ง โดยเฉพาะในกรณีที่ใช้วักสารละลายติดกับผิวลูกกลิ้งนั้น ค่าแรงตึงผิวมีความสำคัญมาก เพราะถ้าสารละลายเคลือบเป็นฟิล์มหนามากเกินไป การระเหยน้ำจากภายในไปยังผิวก็ทำได้ยาก ถ้าบางเกินไปทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนมากเกินไปโดยให้

กับไอน้ำที่แยกตัวออกไป

ดังนั้นประสิทธิภาพของการระเหยจึงขึ้นอยู่กับระบบการถ่ายเทความร้อนจากผิวลูกกลิ้งให้กับสารละลาย ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยสมการ

$$\frac{dw}{dt} = UA\Delta T\ (\Delta H_w)^{-1} \qquad 2\text{-}7$$

U = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนทั้งหมด

เนื่องจากผนัง ลูกกลิ้งปกติบางมาก เมื่อเทียบกับเส้นผ่าศูนย์กลางลูกกลิ้ง ดังนั้น พื้นที่ผิว (A) จึงแทนด้วยพื้นที่ผิวภายนอกของลูกกลิ้ง เมื่อให้ความร้อนภายในลูกกลิ้งด้วยไอน้ำ ทำให้อุณหภูมิของสารละลายที่อยู่ในระบบใกล้กับจุดเดือด เมื่อปริมาตรของสารละลายลดลง จะทำให้อุณหภูมิของระบบเริ่มสูงขึ้น

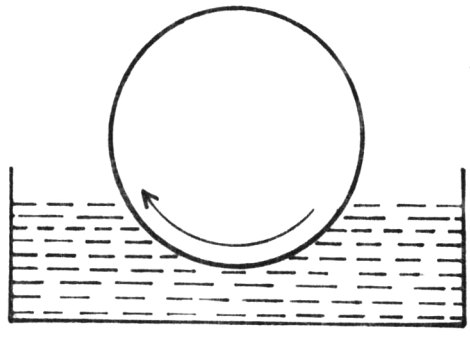
ΔT = อุณหภูมิเฉลี่ยที่ได้จากความแตกต่างของอุณหภูมิภายในและภายนอก

ΔH_w = ความร้อนแฝงสำหรับการระเหยของน้ำ

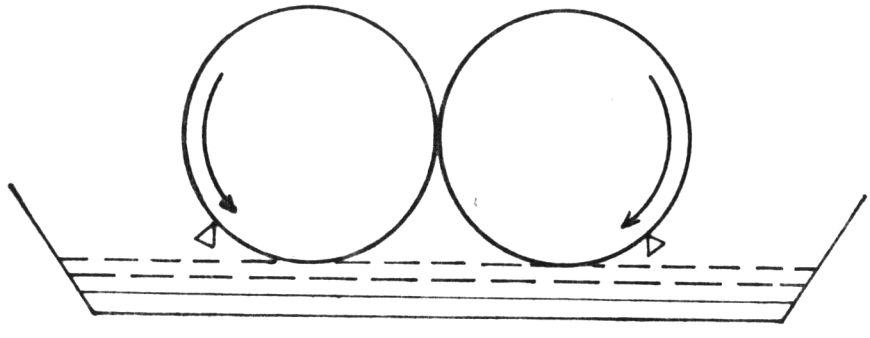
ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนทั้งหมดจึงเป็นสัดส่วนกับ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของฟิล์มของไอน้ำ (h_v) สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k_w) ความหนาของชั้นลูกกลิ้ง Δx_w และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของสารละลายบนผิวลูกกลิ้ง (h_1) ซึ่งเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h} + \frac{\Delta X_w}{k_w} + \frac{1}{h_1}} \qquad 2\text{-}8$$

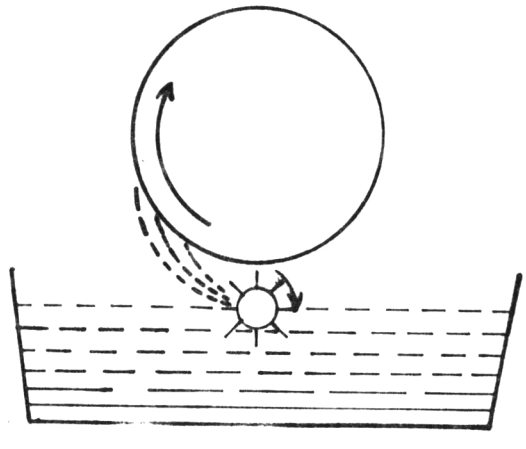
ยังมีตัวแปรอย่างอื่นที่ผลต่อต้าน เช่นกันคือ ความหนาของฟิล์มบนผิวลูกกลิ้ง เช่น ถ้าบางอัตราการระเหยน้ำจะมาก เช่นเดียวกับสารละลายที่มีฟิล์มสม่ำเสมอ และมีความหนืดต่ำ



รูปที่ 2-6 ลูกอบแบบจุ่ม



รูปที่ 2-7 ลูกอบแบบมีใบมีด



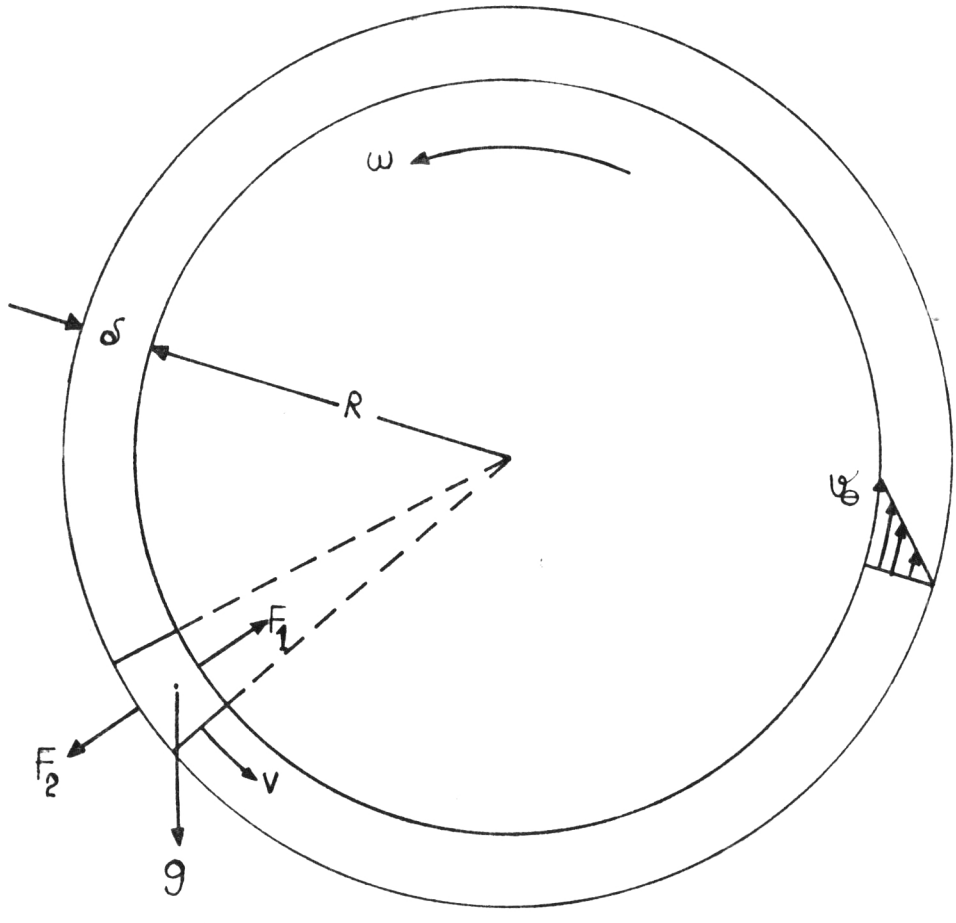
รูปที่ 2-8 ลูกอบแบบวัสดุละลาย

2.5.1 ลักษณะการเคลื่อนที่ของสารละลายบนลูกกลิ้ง

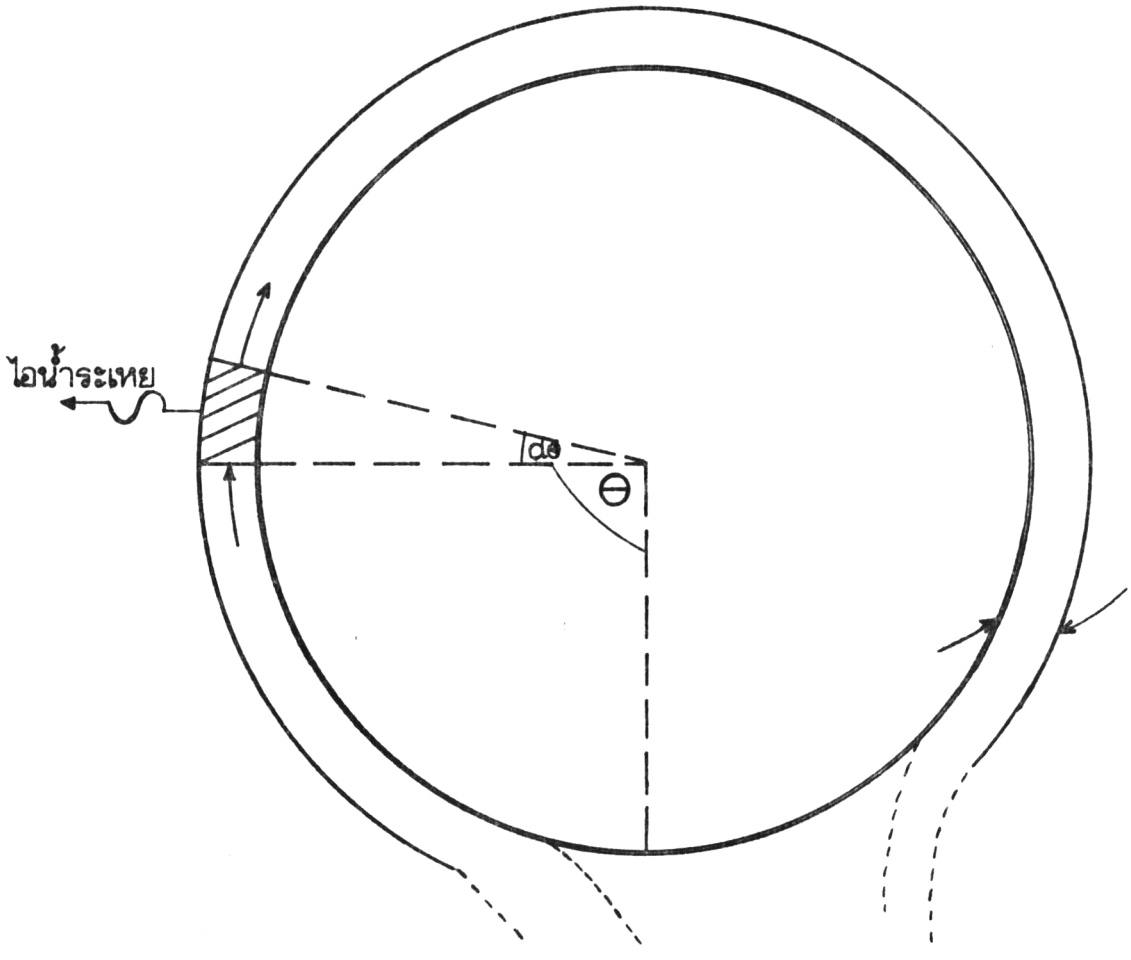
ขณะที่ลูกกลิ้งหมุนไปด้วยความเร็วขนาดหนึ่ง สารละลายที่ติดกับผิวลูกกลิ้งจะมีความเร็วเท่ากับความเร็วของลูกกลิ้ง เพราะไม่มีความลื่นระหว่างผิวและชั้นของสารละลาย ในชั้นถัดไปความเร็วก็จะน้อยลง ไปจนถึงผิวของชั้นสารละลายจะมีความเร็วที่สุด จึงมีแนวเส้นความเร็วดังแสดงไว้ใน รูป 2-9

2.5.2 ลักษณะของการระเหยบนแผ่นฟิล์มบาง

ของเหลวเมื่อได้รับความร้อนจากลูกกลิ้ง อุณหภูมิค่อย ๆ สูงขึ้นจนถึงจุดเดือด น้ำส่วนหนึ่งกลายเป็นไอระเหยออกไป ความหนาของฟิล์มค่อย ๆ บางลง พร้อมกับความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้นจนกระทั่งหลุดจากผิวลูกกลิ้งไป ดังตัวอย่างในรูปที่ 2-10



รูปที่ 2-9 ลักษณะการเคลื่อนที่ของสารละลายบนลูกกลิ้ง



รูปที่ 2-10 ลักษณะการระเหยบนแผ่นฟิล์มบาง

007639