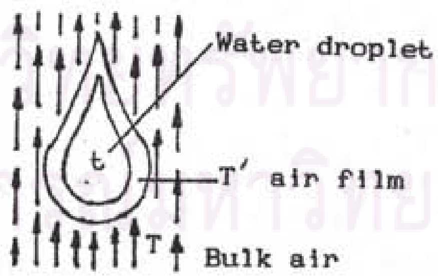
บทที่ 2

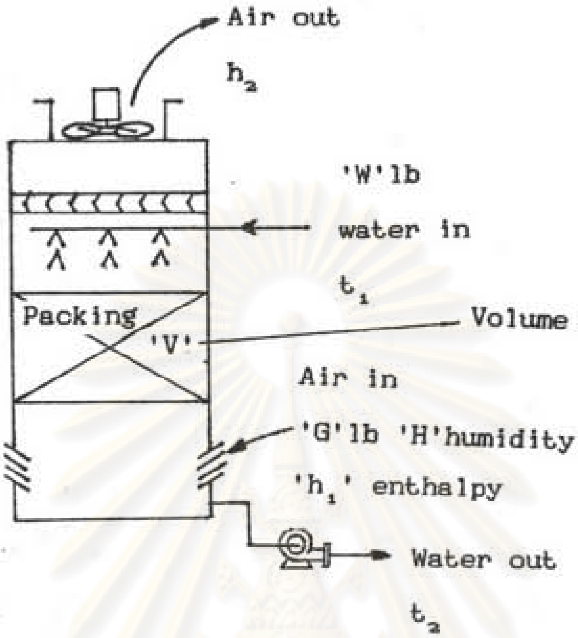
หอผึ่งน้ำชนิดพัดลมดูด

ทฤษฎีการออกแบบหอผึ่งน้ำ

การที่น้ำในหอผึ่งน้ำ มีอุณหภูมิลดลงนั้น ส่วนใหญ่เนื่องจากการที่น้ำบางส่วนระเหย และดูดความร้อนแฝง (latent heat) จากน้ำส่วนที่เหลือ เพื่อใช้ในการระเหย นอกจากนี้ น้ำยังถ่ายเทความร้อนสัมผัส (sensible heat) ให้อากาศ ทำให้อุณหภูมิลดลง ไอน้ำที่เกิด-จากการระเหยจะถูกอากาศที่ไหลผ่านหอผึ่งน้ำพาออกไป ฉะนั้นอากาศที่ไหลออกมาจากหอผึ่งน้ำ จึงมีอุณหภูมิและความชื้นสูง ดังนั้น สมการที่ใช้ในการออกแบบหอผึ่งน้ำ จึงเกี่ยวกับ สมการสมดุลของความร้อน, สมการแสดงอัตราการถ่ายเทความร้อน, สมการแสดงอัตราการถ่ายเทมวลของน้ำสู่อากาศ, สมการแสดงสภาพสมดุลของน้ำ, และสมการแสดงค่าเอ็นทัลปีของอากาศชื้น



รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะผิวหน้าน้ำ



รูป 2.2 แสดงลักษณะโดยทั่วไปของหอผึ่งน้ำชนิดพัดลมดูด

จากรูป 2.1 และ 2.2 สามารถเขียนสมการสมดุลของความร้อน ถ้าไม่คิดการระเหยของน้ำ ได้ว่า

ค่าความร้อนที่น้ำสูญเสียไป = ความร้อนที่อากาศได้รับ

(Heat loss by water = Heat gain by air)

$$W\,C_{pw}\,(t_1 - t_2) = G\,(h_2 - h_1)$$

โดยที่	C_{pw}	=	ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ
	G	=	อัตราการไหลของอากาศ
	h_1	=	เอ็นทัลปีของอากาศอิ่มตัวที่เข้าหอผึ่งน้ำ
	h_2	=	เอ็นทัลปีของอากาศอิ่มตัวที่ออกจากหอผึ่งน้ำ
	t_1	=	อุณหภูมิน้ำเข้าหอผึ่งน้ำ
	t_2	=	อุณหภูมิน้ำออกจากหอผึ่งน้ำ
	W	=	อัตราการไหลของน้ำ

ซึ่งสามารถจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\frac{W\ C_{pw}\ (t_1 - t_2)}{G} = h_2 - h_1 \qquad (2.1)$$

เพื่อให้ง่ายในการคำนวณ ดังนั้นจึงได้กำหนดข้อสมมุติ ไว้ดังต่อไปนี้

1. ไม่คิดการสูญเสียมวลเนื่องจากการระเหยของน้ำ
2. ไม่มีความต้านทานการถ่ายเทมวลของน้ำไปยังอากาศรอบ ๆ ผิวน้ำ
3. ความร้อนแฝงในการระเหยมีค่าคงที่
4. ความร้อนจำเพาะของน้ำ (specific heat of water) เท่ากับ 1
5. ค่า Lewis Relationship หรือ อัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนอากาศ กับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของน้ำคูณด้วยค่าความร้อนจำเพาะของอากาศชื้นมีค่าเป็น 1
6. อุณหภูมิที่ผิวหน้าน้ำมีค่าเท่ากับอุณหภูมิน้ำ และเท่ากับอุณหภูมิของอากาศรอบ ๆ ผิวน้ำ ($t = T'$)
7. สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรอบ ๆ ผิวน้ำ เท่ากับ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมทั้งหมด

หอผึ่งน้ำโดยทั่วไปมีพื้นฐานการคำนวณขึ้นกับค่า Packing โดยกำหนดคุณสมบัติของ Packing ไว้คือ

a = ค่าคงที่พื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรของ Packing

V = ปริมาตรของ Packing (operating pack volume)

โดยพื้นที่ผิวของ Packing มีคุณสมบัติการถ่ายเทความร้อนสม่ำเสมอ ซึ่งสามารถนำไปหาค่าความร้อนสัมผัส และความร้อนแฝงได้

โดยทั่วไป สมการแสดงอัตราการถ่ายเทความร้อนทั้งหมดของน้ำไปที่อากาศรอบ ๆ ผิวน้ำ (Rate of total heat transfer from the water to the interface) ได้ดังนี้

$$dQ_w = W\ C_{pw}\ dt = K_L\ a\ dV\ (t - T') \qquad (2.2)$$

กำหนดให้

dQ_w = อัตราการถ่ายเทความร้อนทั้งหมดของน้ำไปที่อากาศรอบ ๆ ผิวน้ำ

C_{pw} = ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ

dt = ผลต่างของอุณหภูมิของน้ำ

W = อัตราการไหลของน้ำ

a	=	ค่าคงที่พื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรของ Packing
V	=	ปริมาตรของ Packing (operating pack volume)
K_L	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของน้ำ ไปที่อากาศรอบ ๆ ผิวน้ำ
t	=	อุณหภูมิน้ำ
T'	=	อุณหภูมิของอากาศรอบ ๆ ผิวน้ำ (air film)

โดยทั่วไปจะกล่าวได้ว่า $t > T' > T$

เมื่อ T = อุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศที่เข้าหอผึ่งน้ำ

สมการแสดงปริมาณการถ่ายเทความร้อนสัมผัสไปสู่กระแสอากาศ (Heat transfer as sensible heat to the main air stream) เขียนได้ดังนี้

$$dQ_s = K_g \, a \, dV \, (T' - T) \qquad (2.3)$$

โดย	dQ_s	=	สมการแสดงปริมาณการถ่ายเทความร้อนสัมผัสไปสู่กระแสอากาศ
	a	=	ค่าคงที่พื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรของ Packing
	V	=	ปริมาตรของ Packing (operating pack volume)
	K_g	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสัมผัสของอากาศรอบ ๆ ผิวน้ำ ไปสู่กระแสอากาศ
	T	=	อุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศที่เข้าหอผึ่งน้ำ

Mc Adams (1954) ได้เสนอแนวคิดในการหาค่าอัตราการถ่ายเทมวลของน้ำ โดยไม่มีผลกระทบต่อข้อสมมุติ ในกรณีของอากาศที่เข้าหอผึ่งน้ำนี้ สามารถเขียนสมการของอัตราการถ่ายเทมวลของไอน้ำรอบ ๆ ผิวน้ำสู่กระแสอากาศภายนอก (The rate of mass transfer of the vapour in the film to the air) ได้ดังนี้

$$dm = K' \, a \, dV \, (H' - H) \qquad (2.4)$$

โดย	dm	=	อัตราการถ่ายเทมวลของไอน้ำรอบ ๆ ผิวน้ำ สู่กระแสอากาศภายนอก
	K'	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของอากาศรอบ ๆ ผิวน้ำ สู่อากาศภายนอก
	H	=	ความชื้นสัมบูรณ์ (ปอนด์ของไอน้ำต่อปอนด์ของอากาศแห้ง)
	H'	=	ความชื้นสัมบูรณ์ ของอากาศรอบ ๆ ผิวน้ำ

จาก ค่าความร้อนแฝงในการระเหย * อัตราการถ่ายเทมวลของน้ำ = อัตราการถ่ายเทความร้อนแฝง

โดยนำ q คูณสมการ (2.4) เมื่อ q และ K′ เป็นค่าคงที่ จะได้

$$q\,dm = dQ_L = q\,K'\,a\,dV\,(H' - H) \qquad (2.5)$$

โดย q = ค่าความร้อนแฝงของการระเหย

Q_L = อัตราการถ่ายเทความร้อนแฝง

สภาพสมดุลของน้ำในหอผึ่งน้ำ เขียนเป็นสมการได้ดังนี้ คือ

น้ำที่สูญเสียไปในการระเหย = อากาศที่รับไอน้ำ

(The water loss by evaporation = The moisture received by the air)

$$dm = G\,dH \qquad (2.6)$$

โดย dm = อัตราการเปลี่ยนแปลงมวลของน้ำ

G = อัตราการไหลของอากาศ

dH = อัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมบูรณ์

จาก สมการสมดุลของความร้อน และจาก ข้อสมมุติที่ว่า ไม่คิดมวลของน้ำที่ระเหย จะเขียนสมการได้ว่า

ความร้อนที่น้ำสูญเสียไป = ความร้อนที่อากาศได้รับ

(The heat loss by the water = The heat gain by the air)

$$W\,C_{pw}\,dt = G\,dh \qquad (2.7)$$

โดย C_{pw} = ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ

dt = ค่าความแตกต่างอุณหภูมิ

W = อัตราการไหลของน้ำ

dh = ค่าความแตกต่างเอ็นทัลปี

G = อัตราการไหลของอากาศ

ค่าเอ็นทัลปีของอากาศชื้น (Enthalpy of moist air) = ค่าเอ็นทัลปีของอากาศแห้ง + ค่าเอ็นทัลปีของไอน้ำ เขียนได้ว่า

$$h = C_{pa}(T - T_o) + H[q + C_{pv}(T - T_o)] \quad (2.8)$$

โดย h = เอ็นทัลปีของอากาศชื้น

C_{pa} = ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศ

C_{pv} = ค่าความร้อนจำเพาะของไอน้ำ

H = ความชื้นสัมบูรณ์

q = ความร้อนแฝงของการระเหย

T = อุณหภูมิของอากาศ

T_o = อุณหภูมิอ้างอิง

จากสมการ (2.8) เทอมแรกทางขวาเป็นค่าเอ็นทัลปีของอากาศแห้ง เทอมที่สองทางขวาเป็นค่าเอ็นทัลปีของไอน้ำ ถ้า diff. โดย H และ T เป็นตัวแปร จะได้

$$dh = C_{pa}\,dT + H\,C_{pv}\,dT + [q + C_{pv}(T - T_o)]\,dH \quad (2.9)$$

$$dh = (C_{pa} + H\,C_{pv})\,dT + [q + C_{pv}(T - T_o)]\,dH \quad (2.10)$$

ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศชื้น (The specific heat of moist air) สามารถเขียนได้ว่า

$$C_{pM} = C_{pa} + C_{pv}\,H \quad (2.11)$$

โดย C_{pM} = ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศชื้น

C_{pa} = ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศ

C_{pv} = ค่าความร้อนจำเพาะของไอน้ำ

H = ความชื้นสัมบูรณ์

แทนค่า C_{pM} จากสมการ (2.11) ลงในสมการ (2.10) จะได้

$$dh = C_{PM}\,dT + [q + C_{PV}\,(T - T_o)]\,dH \qquad (2.12)$$

แทนค่า dh จากสมการ (2.12) ลงในสมการ (2.7)

$$W\,C_{PW}\,dt = G\,C_{PM}\,dT + [q + C_{PV}\,(T - T_o)]\,G\,dH \qquad (2.13)$$

$$W\,C_{PW}\,dt = \text{sensible heat} + \text{latent heat}$$

sensible heat; $dQ_s = G\,C_{PM}\,dT$

เมื่อเทียบกับสมการ (2.3)

$$dQ_s = K_s\,a\,dV\,(T' - T) = G\,C_{PM}\,dT \qquad (2.14)$$

จาก สมการ (2.6) $dm = G\,dH$

จาก สมการ (2.5) $q\,dm = dQ_L = q\,K'\,a\,dV\,(H' - H)$

นำ q หารสมการ (2.5) ได้; $dm = K'\,a\,dV\,(H' - H)$

เมื่อเทียบกับสมการ (2.6); $dm = K'\,a\,dV\,(H' - H) = G\,dH \qquad (2.15)$

สมการแสดงการถ่ายเทความร้อน (equation of heat transfer) มี-รูปทั่ว ๆ ไปคือ

$$dQ = U\,A\,dT$$

โดย dQ = อัตราการถ่ายเทความร้อน
U = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน
A = พื้นที่การถ่ายเทความร้อน
dT = ค่าแตกต่างของอุณหภูมิ

W.K. Lewis (1922) ได้สร้างสมการไร้หน่วยของ air/water mixes เรียกว่า Lewis relationship ไว้ดังนี้

$$\frac{K_s}{K' \; C_{PM}} = 1$$

โดย K_s = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสัมผัสของอากาศรอบ ๆ ผิวน้ำไปสู่กระแสอากาศ

K' = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของอากาศรอบ ๆ ผิวน้ำ สู่อากาศภายนอก

C_{PM} = ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศชื้น

จัดรูปใหม่จะได้ $K_s = K' \, C_{PM}$ แทนค่าลงในสมการ (2.14)

จะได้ $dQ_s = K' \, C_{PM} \, a \, dV \, (T' - T) = G \, C_{PM} \, dT$

จาก สมการ (2.13)

$$W \, C_{PW} \, dt = G \, C_{PM} \, dT + [q + C_{PV} \, (T - T_o)] \, G \, dH$$

จาก สมการ (2.15) $dm = K' \, a \, dV \, (H' - H) = G \, dH$

เมื่อรวมสมการที่ (2.13) , (2.14) , (2.15) จะได้

$$W \, C_{PW} \, dt = K' \, C_{PM} \, a \, dV \, (T' - T) + [q + C_{PV} \, (T - T_o)] \, K' \, a \, dV \, (H' - H) \qquad (2.16)$$

จากสมการ (2.16) นี้เมื่อจัดรูปใหม่จะได้

$$W \, C_{PW} \, dt = K' \, a \, dV \, \{C_{PM} \, (T' - T) + [q + C_{PV} \, (T - T_o)](H' - H)\} \qquad (2.17)$$

จาก สมการเอ็นทัลปี ของกระแสอากาศชื้น, สมการ (2.8)

$$h = C_{Pm} \, (T - T_o) + H \, [q + C_{PV} \, (T - T_o)]$$

จัดรูปใหม่ จะได้

$$h = C_{Pa} T + H C_{PV} T - C_{Pa} T_o + H (q - C_{PV} T_o)$$

จาก สมการ (2.11) $C_{PM} = C_{Pa} + H C_{PV}$ แทนค่า จะได้

$$h = C_{PM} T - C_{Pa} T_o + H (q - C_{PV} T_o) \qquad (2.18)$$

โดย h = เอ็นทัลปีของอากาศชื้น
C_{PM} = ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศชื้น
C_{Pa} = ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศ
C_{PV} = ค่าความร้อนจำเพาะของไอน้ำ
H = ความชื้นสัมบูรณ์
q = ความร้อนแฝงของการระเหย
T = อุณหภูมิของอากาศ
T_o = อุณหภูมิอ้างอิง

ในทำนองเดียวกัน, ค่าเอ็นทัลปีของอากาศรอบ ๆ ผิวน้ำ

$$h' = C_{PM} T' - C_{Pa} T_o + H' (q - C_{PV} T_o) \qquad (2.19)$$

โดย h' = เอ็นทัลปีของอากาศรอบ ๆ ผิวน้ำ
H' = ความชื้นสัมบูรณ์ ของอากาศรอบ ๆ ผิวน้ำ
T' = อุณหภูมิของอากาศรอบ ๆ ผิวน้ำ

ซึ่งสามารถหาค่า T และ T' จากสมการ (2.18), (2.19) ได้คือ

$$h + C_{Pa} T_o - H (q - C_{PV} T_o) = C_{PM} T$$

และ

$$h' + C_{Pa} T_o - H' (q - C_{PV} T_o) = C_{PM} T'$$

แทนค่า T , T' ลงในสมการ (2.17)

ได้ $W\ C_{pw}\ dt = K'\ a\ dV\ (h' - h) + C_{pv}\ (H' - H)$

จากสมการข้างต้น เทอมที่ 2 ทางขวา มีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับ เทอมแรก ทาง-ขวา จึงตัดทิ้ง เนื่องจาก เทอมที่ 2 ทางขวา เป็นค่าความแตกต่างของความชื้นสัมบูรณ์ $(H' - H)$ มีค่าน้อยมาก คูณด้วยค่าคงที่ (C_{pv}) ที่มีค่าน้อย ทำให้เทอมที่ 2 ทางขวามีค่า มีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับ เทอมแรกทางขวา ที่เป็นค่าความแตกต่างของเอ็นทัลปี $(h' - h)$ คูณ ค่าคงที่ ที่มีค่ามาก $(K'\ a\ dV)$ จึงให้ผลคูณที่มีค่ามาก ดังนั้น จึงตัดเทอมที่ 2 ทางขวาทิ้ง

ดังนั้นจะได้ $W\ C_{pw}\ dt = K'\ a\ dV\ (h' - h)$ เมื่อเทียบกับสมการ (2.7) จะได้

$$W\ C_{pw}\ dt = K'\ a\ dV\ (h' - h) = G\ dh$$

จากสมการข้างต้น จะเห็นได้ว่าสมการนี้ เทียบกับอากาศที่อยู่รอบ ๆ ผิวน้ำ, และจากข้อสมมุติฐานที่ว่า อุณหภูมิน้ำมีค่าเท่ากับอุณหภูมิของอากาศรอบ ๆ ผิวน้ำ สัมประสิทธิ์การ-ถ่ายเทมวลของอากาศรอบ ๆ ผิวน้ำ (K') = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมทั้งหมด (K) และ ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ $(C_{pw}) = 1$ ดังนั้นจึงเขียนสมการใหม่ได้ว่า

$$W\ dt = K\ a\ dV\ (h' - h) = G\ dh$$

ซึ่งเขียนแยกเทอม และจัดรูปใหม่ จะได้

$$\frac{K\ a\ dV}{W} = \frac{dt}{(h' - h)}$$

และ

$$\frac{K\ a\ dV}{G} = \frac{dh}{(h' - h)}$$

นำสมการทั้งสอง มาอินทิเกรตได้

$$\frac{K\,a\,V}{W} = \int_{t_2}^{t_1} dt \,/\, (h' - h) \qquad (2.20)$$

$$\frac{K\,a\,V}{G} = \int_{H_1}^{H_2} dh \,/\, (h' - h) \qquad (2.21)$$

จากข้อที่ว่า ปริมาตรของ Packing = พื้นที่ฐานของ Packing * ความสูง

$$V = A * L$$

โดย V = ปริมาตรของ Packing

A = พื้นที่ฐานของ Packing

L = ความสูง

จาก สมการข้างต้น และจากสมการ (2.21) จะได้ว่า

$$\frac{[\,K\,a\,(A * L)\,]}{G} = \int_{H_1}^{H2} dh \,/\, (h' - h)$$

ดังนั้น

$$L = \frac{G}{K\,a\,A} \int_{H_1}^{H_2} dh \,/\, (h' - h) \qquad (2.22)$$

Packing นั้น จะมีค่า Transfer unit ที่แน่นอน จึงได้มีการคิดสมการที่เกี่ยวข้องกับความสูงของ Packing ดังนั้นจากสมการ (2.22) จึงเรียกว่า

$$\int_{H_1}^{H_2} [dh \,/\, (h' - h)] = \text{number of transfer units (N.T.U.)}$$

และ

$$G \,/\, (K\,a\,A) = \text{height of transfer unit (H.T.U.)}$$

ค่า Transfer unit ได้นำไปใช้เสมอ ๆ จากสมการที่ (2.20) , (2.21) ซึ่งค่า number of transfer units สามารถหาค่าจากสมการเหล่านี้ได้เมื่อ W/G = 1 เท่านั้นสำหรับค่าอื่น ๆ จะใช้วิธีเขียนกราฟของ Transfer units

Kern (1950) เรียกสมการ (2.21) ว่า "diffusion unit" การอินทิเกรตไม่สามารถหาค่าจากสมการนี้ได้ เพราะค่าแตกต่างระหว่าง h′ กับ h ไม่สามารถหาค่าด้วยสมการง่าย ๆ ของอุณหภูมิได้ และจะได้สมการที่ยุ่งยากมากเมื่อจะหาค่าโดยการอินทิเกรตสมการ ดังนั้นจึงใช้วิธีหาค่าจากกราฟแทน สมการ (2.20)

จากสมการ (2.20)

$$(K\ a\ V) / W = \int_{t_2}^{t_1} [dt / (h' - h)] = (N.T.U.)_t$$

ค่า $(N.T.U.)_t$ จะเป็นค่าคงที่ของ Packing ซึ่งมีสมการทั่ว ๆ ไปคือ

$$(N.T.U.)_t = c * (W/G)^{-n}$$

ค่า W/G โดยปกติจะอยู่ระหว่าง 0.8 ถึง 1.3 (Gurner and Cotter, 1966)
เมื่อ c และ n เป็นค่าคงที่ และเรียกค่า

$c * (W/G)^{-n}$ ว่า Packing Characteristic Curve. (วิภาค อรรจนกุล, 2528 ASHARE, 1966)

ซึ่งค่า n จะอยู่ระหว่าง 0.25 ถึง 1

ดังนั้น $$c * (W/G)^{-n} = \Delta t / (MDF.) \qquad (2.23)$$

เมื่อ Δt = ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ
MDF. = แรงขับ (mean driving force)

ในการคำนวณหา แรงขับ (MDF.) ได้ยึดหลักการคำนวณแบบ logarithmic mean temperature difference ดังนั้น จึงสามารถเขียนได้ว่า

$$MDF. = \frac{(h_2' - h_2) - (h_1' - h_1)}{\ln [(h_2' - h_2) / (h_1' - h_1)]} \qquad \text{(Stoecker, 1980)}$$

จาก $(N.T.U.)_a = \int_{h_1}^{h_2} [dh / (h' - h)] = \Delta h / MDF.$

โดย Δh = ค่าความแตกต่างของเอ็นทัลปี

จาก $f = MDF. / Arith.\ MDF.$

โดย f = Values of factor
MDF. = แรงขับ (Mean Driving Force)
Arith. MDF. = Arithmetic Mean Driving Force

ซึ่งสามารถหาค่า f ได้ จากรูป 2.4 และจะใช้ค่า f ที่ได้นี้ไปใช้หาค่า MDF. ต่อไป

จากสมการ $(N.T.U.)_a = \Delta h / MDF.$

เมื่อนำสมการข้างต้น แทนค่าลงไป จะได้

$$(N.T.U.)_a = \Delta h / (Arith.\ MDF. * f)$$

จากรูป (2.5) จะได้ $t_3 = t_2 + \dfrac{(t_1 - t_2)}{2}$

โดย t_1 = อุณหภูมิน้ำเข้าหอผึ่งน้ำ
t_2 = อุณหภูมิน้ำออกจากหอผึ่งน้ำ
t_3 = อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำที่เข้าหอผึ่งน้ำ และออกจากหอผึ่งน้ำ

จากรูป (2.4) กำหนดให้ $y_1 = h_1' - h_1$

โดย y_1 = ค่าความแตกต่างระหว่างเอ็นทัลปีของน้ำที่ออกจากหอผึ่งน้ำกับอากาศอิ่มตัวที่เข้าหอผึ่งน้ำ
h_1' = เอ็นทัลปีของน้ำที่ออกจากหอผึ่งน้ำ
h_1 = เอ็นทัลปีของอากาศอิ่มตัวที่เข้าหอผึ่งน้ำ

จากรูป (2.4) กำหนดให้ $y_2 = h_2' - h_2$

โดย y_2 = ค่าความแตกต่างระหว่างเอ็นทัลปี่ของน้ำที่เข้าหอผึ่งน้ำกับอากาศอิ่มตัวที่ออกจากหอผึ่งน้ำ

h_2' = เอ็นทัลปี่ของน้ำที่เข้าหอผึ่งน้ำ

h_2 = เอ็นทัลปี่ของอากาศอิ่มตัวที่ออกจากหอผึ่งน้ำ

และ กำหนดให้ Arith. MDF. = $y_m = h_m' - h_3$

โดย y_m = ค่าเฉลี่ยทางเรขาคณิตของแรงขับ

h_m' = เอ็นทัลปี่เฉลี่ยของน้ำที่เข้าหอผึ่งน้ำ และน้ำที่ออกจากหอผึ่งน้ำ

h_3 = เอ็นทัลปี่เฉลี่ยของอากาศที่เข้าหอผึ่งน้ำ และอากาศที่ออกจากหอผึ่งน้ำ

จาก f = MDF. / Arith. MDF.

แต่ Arith. MDF. = y_m

ดังนั้น

$$\text{MDF.} = f * y_m$$

จากสมการ (2.22) จะได้

(L) height of packing = $(\text{H.T.U.})_g * (\text{N.T.U.})_g$

อัตราการถ่ายเทความร้อน = ค่าความร้อนที่น้ำสูญเสียไป

$$dQ = W * C_{pw} * (t_1 - t_2)$$

โดย dQ = อัตราการถ่ายเทความร้อน

W = อัตราการไหลของน้ำ

C_{pw} = ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ

t_1 = อุณหภูมิน้ำเข้าหอผึ่งน้ำ

t_2 = อุณหภูมิน้ำออกจากหอผึ่งน้ำ

แต่ $R = t_1 - t_2$

โดย R = ผลต่างระหว่างอุณหภูมิของน้ำขาเข้ากับอุณหภูมิน้ำขาออกของหอผึ่งน้ำ

แทนค่า R ลงในสมการ อัตราการถ่ายเทความร้อน จะได้

$$dQ = W * C_{pw} * R$$

ถ้า W_m = อัตราการไหลของน้ำ มีหน่วย เป็น ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ($m^3/hr.$)

R_m = ผลต่างระหว่างอุณหภูมิของน้ำขาเข้ากับอุณหภูมิน้ำขาออกของหอผึ่งน้ำ มีหน่วยเป็น °C

C_{pw} = 1 Btu/lb - °F

1 Ton refrigeration = 12,000 Btu/hr.

น้ำ 1 ลูกบาศก์เมตร มีน้ำหนัก 1,000 กิโลกรัม

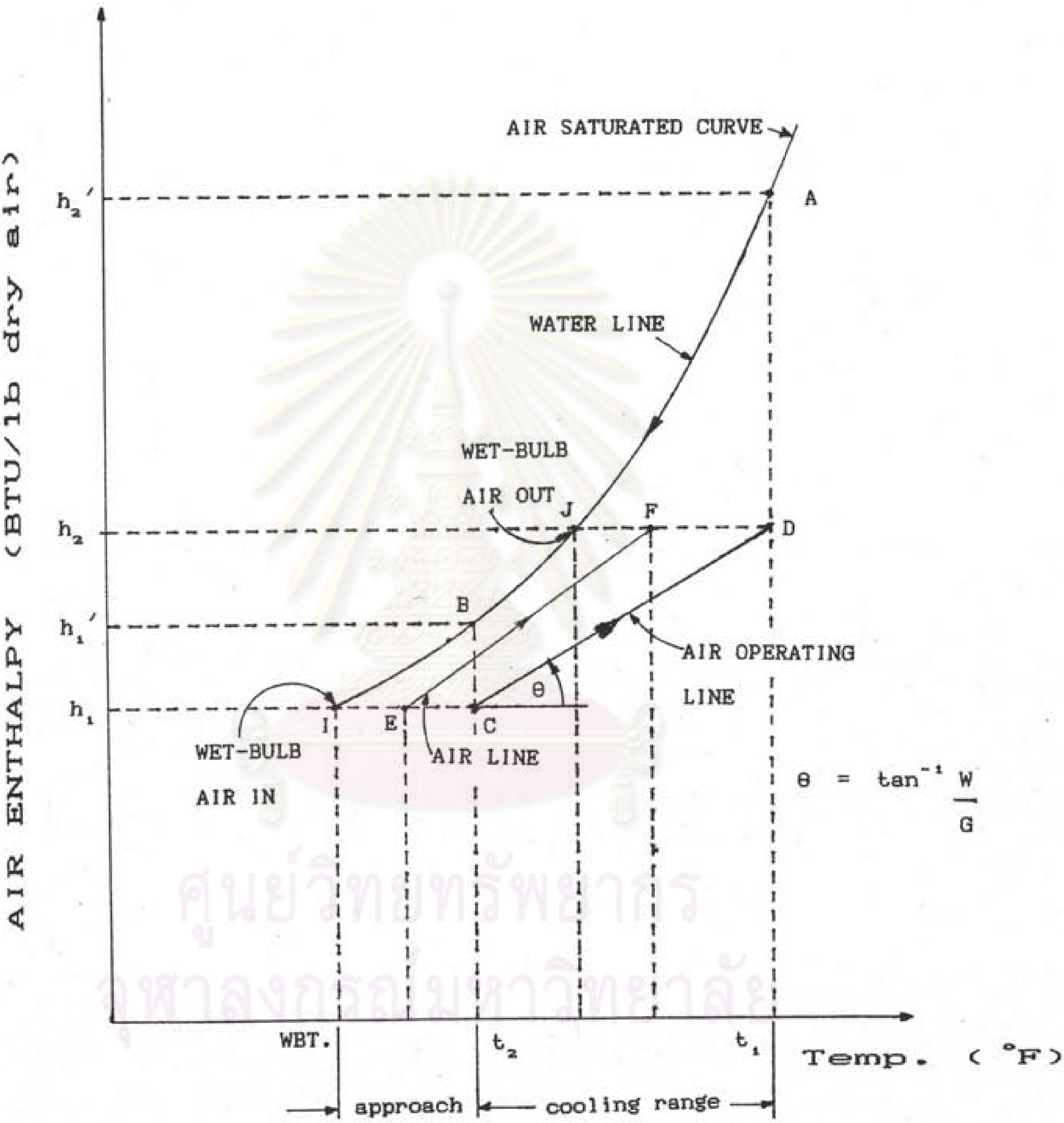
จาก สมการเมื่อแปลงหน่วย จะได้

$$dQ \frac{Btu}{hr.} = W_m \frac{m^3}{hr.} * 1000 \frac{Kg}{m^3} * \frac{1}{0.4536} \frac{lb.}{Kg.} * 1 \frac{Btu}{lb-{}^\circ F} * R_m {}^\circ C * \frac{9}{5} \frac{{}^\circ F}{{}^\circ C}$$

แต่ 1 Ton refrigeration = 12,000 Btu/hr.

เมื่อจัดรูปใหม่ จะได้

$$Ton = 0.3307\ W_m\ R_m \quad (Ton*hr./m^3-{}^\circ C * m^3/hr. * {}^\circ C) \qquad (2.24)$$



รูป 2.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิ กับ เอ็นทัลปี สำหรับใช้ออกแบบ

Mickley (1949) ได้เสนอรูปของกราฟ ดังรูป 2.3 โดย

เส้น AB คือ water line

เส้น EF คือ air line

เส้น CD คือ air operating line

จุด A คือ water inlet point

จุด B คือ water outlet point

จุด C คือ interfacial film of inlet air

จุด D คือ interfacial film of outlet air

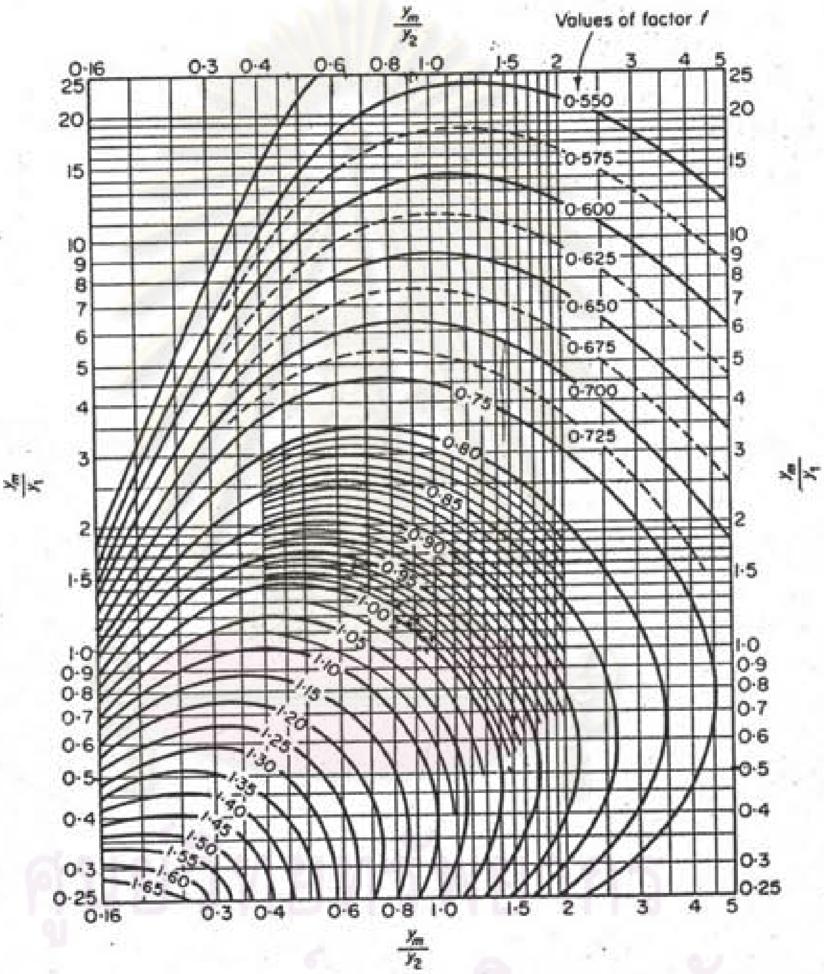
จุด E คือ air inlet point

จุด F คือ air outlet point

จุด I คือ WET-BULB air inlet point

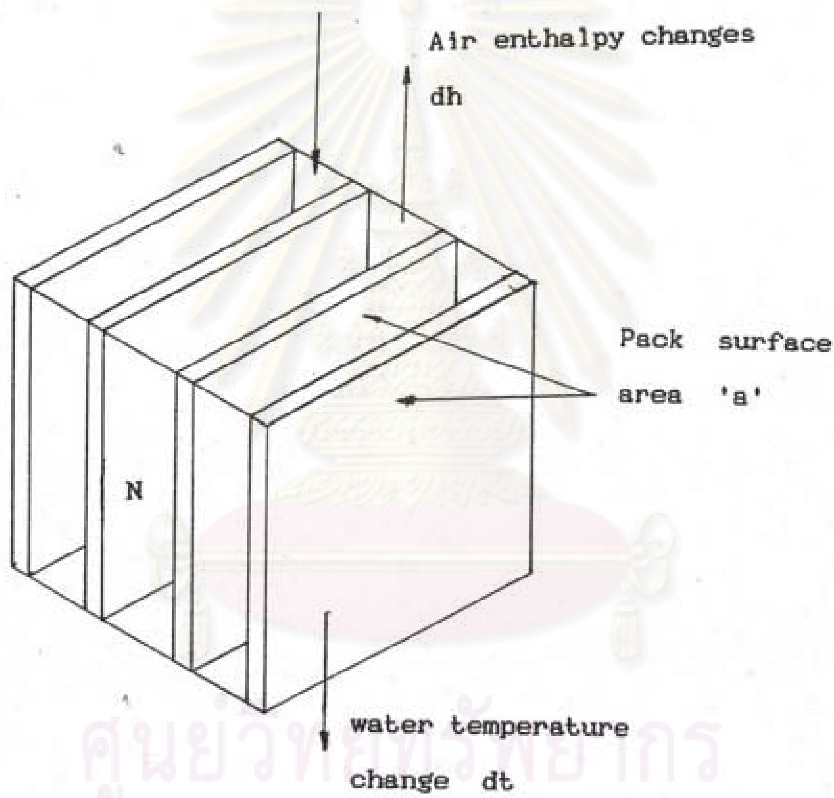
จุด J คือ WET-BULB air outlet point

จากกราฟ รูป (2.3) นี้ จะเห็นว่า น้ำเข้าหอผึ่งน้ำที่จุด A ผ่าน Packing ทำให้อุณหภูมิลดลง จนกระทั่งออกจากหอผึ่งน้ำที่จุด B โดยกระบวนการถ่ายเทความร้อน และการระเหยของน้ำ สำหรับ อากาศ จะเข้าหอผึ่งน้ำที่จุด E และจะออกจากหอผึ่งน้ำที่จุด F โดย-กระบวนการเพิ่มอุณหภูมิและความชื้น เส้น EF จึงเป็นเส้นตรง ที่จุด E และ F นี้เป็นสภาวะจริงของอากาศที่เข้าและออกจากหอผึ่งน้ำ (air line) ส่วนสภาวะการทำงานของอากาศนั้น อากาศจะเริ่มสัมผัสกับผิวหน้าของน้ำที่จุด C (จากสมมุติฐาน อุณหภูมิน้ำมีค่าเท่ากับอุณหภูมิของอากาศรอบ ๆ ผิวน้ำ) และจะออกจากหอผึ่งน้ำที่จุด D ที่เส้น CD นี้ เรียกว่าเส้น air operating line



–Carey and Williamson chart for determination of mean driving force: gas cooling and humidification packed tower design.

รูป 2.4 Carey and Williamson chart สำหรับหาค่า mean driving force ของหอผึ่งน้ำ (Gurner and Cotter, 1966)



รูป 2.5 แสดงลักษณะของ Packing

<u>สมการทางทฤษฎี</u>

การคำนวณหาค่าที่สภาวะต่าง ๆ ของหอผึ่งน้ำนั้น จะใช้สมการที่ (2.23) และจากรูป 2.6 เป็นหลัก แต่เนื่องจากสมการหาค่า เอ็นทัลปี และ แรงขับ (MDF.) นั้นมีสมการที่ยุ่งยาก เพื่อให้อยู่ในรูปที่ง่ายขึ้น จึงตั้งข้อสมมุติไว้ดังนี้

1. $h_{sm} = 30.144\ e^{0.0455 t_m}$

   เมื่อ $18.3\,^{\circ}C < t_m < 56.6\,^{\circ}C$ (ดูที่มาในภาคผนวก ง. หน้า 168)

2. MDF. = Arith. MDF. = Δh

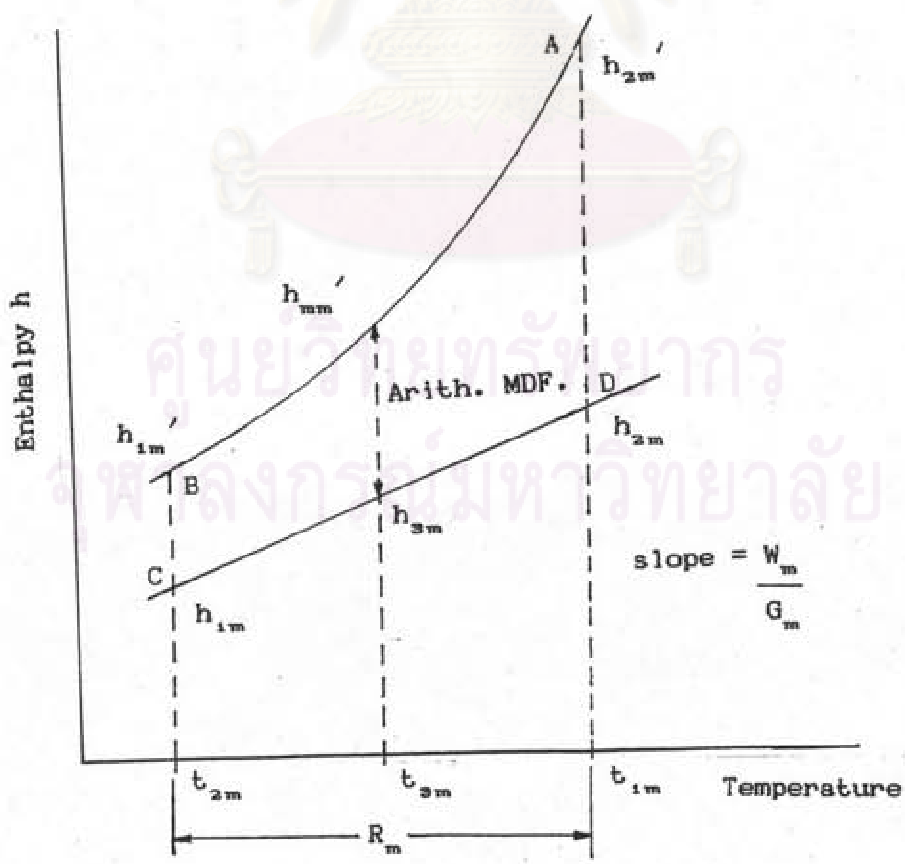
โดย h_{sm} = เอ็นทัลปีของอากาศอิ่มตัว ในหน่วย KJ/Kg

t_m = อุณหภูมิ ในหน่วย °C

MDF. = แรงขับ (mean driving force)

Arith. MDF. = ค่าเฉลี่ยทางเลขคณิตของแรงขับ

Δh = ค่าความแตกต่างของเอ็นทัลปี



รูปที่ 2.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิ กับ เอ็นทัลปี

จากรูป (2.6) ความชันของเส้น (slope) h_{1m} h_{2m} = W_m/G_m

โดย h_{1m} = เอ็นทัลปีของอากาศอิ่มตัวที่เข้าหอผึ่งน้ำ ในหน่วย KJ/Kg
h_{2m} = เอ็นทัลปีของอากาศอิ่มตัวที่ออกจากหอผึ่งน้ำ ในหน่วย KJ/Kg
W_m = อัตราการไหลของน้ำ ในหน่วย Kg/sec.
G_m = อัตราการไหลของอากาศ ในหน่วย Kg/sec.

จากรูป (2.6) h_{1m} คือค่าเอ็นทัลปี ที่อุณภูมิ WBT_m
โดยที่ WBT_m = อุณหภูมิกระเปาะเปียกของสิ่งแวดล้อม ในหน่วย °C

นั่นคือ $$h_{1m} = 30.144e^{0.0455WBTm} \quad (2.25)$$

$$h_{3m} = h_{1m} + (W_m/G_m)*(t_{1m} - t_{2m})/2 \quad (2.26)$$

โดยที่ h_{3m} = เอ็นทัลปีเฉลี่ยของอากาศอิ่มตัวที่เข้าหอผึ่งน้ำ และอากาศอิ่มตัวที่ออกจากหอผึ่งน้ำ ในหน่วย KJ/Kg.
t_{1m} = อุณหภูมิน้ำเข้าหอผึ่งน้ำ ในหน่วย °C
t_{2m} = อุณหภูมิน้ำที่ออกจากหอผึ่งน้ำ ในหน่วย °C
WBT_m = อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศที่เข้าหอผึ่งน้ำ ในหน่วย °C

แทนค่าสมการ (2.25) ลงในสมการ (2.26) จะได้

$$h_{3m} = 30.144e^{0.0455WBTm} + (W_m/G_m)*(t_{1m} - t_{2m})/2 \quad (2.27)$$

จากข้อสมมุติ จะได้ $$h_{mm}' = 30.144e^{0.0455(t1m+t2m)/2} \quad (2.28)$$

โดย h_{mm}' = เอ็นทัลปี<u>เฉลี่ย</u>ของน้ำที่เข้าหอผึ่งน้ำ และน้ำที่ออกจากหอผึ่งน้ำ ในหน่วย °C

จากรูป (2.6) จะได้ $$\Delta h_m = h_{mm}' - h_{3m} \quad (2.29)$$

โดย Δh_m = ความแตกต่างของเอ็นทัลปี ในหน่วย °C

แทนค่า สมการ (2.26) , (2.28) ลงในสมการ (2.29) จะได้

$$\Delta h_m = 30.144e^{0.0455(t1m+t2m)/2} - (30.144e^{0.0455WBTm} + (W_m/G_m)*(t_{1m} - t_{2m})/2) \qquad (2.30)$$

จาก $R_m = t_{1m} - t_{2m}$

โดย R_m = ผลต่างระหว่างอุณหภูมิของน้ำขาเข้า กับอุณหภูมิของน้ำขาออกจากหอผึ่งน้ำ (Range) ในหน่วย °C

ดังนั้น $t_{1m} = R_m + t_{2m}$ แทนค่า ลงในสมการ (2.30) จะได้

$$\Delta h_m = 30.144e^{0.0455(t2m+Rm/2)} - (30.144e^{0.0455WBTm} + (W_m/G_m)*(R_m/2)) \qquad (2.31)$$

จาก สมการ (2.23) $c * (W_m/G_m)^{-n} = \Delta t_m / (MDF.)$

โดย c และ n = ค่าคงที่

$R_m = \Delta t_m$ = ผลต่างระหว่างอุณหภูมิของน้ำขาเข้า กับอุณหภูมิของน้ำขาออกจากหอผึ่งน้ำ ในหน่วย °C

ซึ่ง $\Delta t_m = t_{1m} - t_{2m} = R_m \qquad (2.32)$

จากข้อสมมุติ $MDF. = \Delta h_m$

แทนค่า สมการ (2.31), (2.32) ลงในสมการ (2.23) จะได้

$$c*(W_m/G_m)^{-n} = R_m/[30.144e^{0.0455(t2m+Rm/2)} - (30.144e^{0.0455WBTm} + (W_m/G_m)*(R_m/2))] \qquad (2.33)$$

จัดรูปใหม่ จะได้

$$R_m = c*(W_m/G_m)^{-n}\,[30.144e^{0.0455(t2m+Rm/2)} - (30.144e^{0.0455WBTm} + (W_m/G_m)*(R_m/2))] \qquad (2.34)$$

จากสมการ (2.34) เมื่อกระจายเทอม และจัดรูป จะได้

$$R_m + c*(W_m/G_m)^{-n}\,(W_m/G_m)(R_m/2) + c*(W_m/G_m)^{-n}\,30.144e^{0.0455WBTm} = c*(W_m/G_m)^{-n}\,30.144e^{0.0455(t2m + Rm/2)} \qquad (2.35)$$

จาก สมการ (2.35) นำ $30.144c(W_m/G_m)^{-n}$ หารทั้งสองข้าง จะได้

$$\frac{R_m\,[1 + (c/2)(W_m/G_m)^{1-n}\,]}{30.144c(W_m/G_m)^{-n}} + e^{0.0455WBTm} = e^{0.0455(t2m + Rm/2)} \qquad (2.36)$$

จาก สมการ (2.36) ใส่ ln ทั้งสองข้าง จะได้

$$\ln\left(\frac{R_m\,[1 + (c/2)(W_m/G_m)^{1-n}\,]}{30.144c(W_m/G_m)^{-n}} + e^{0.0455WBTm}\right) = 0.0455t_{2m} + \frac{0.0455R_m}{2}$$

จัดรูปให้อยู่ในเทอม t_{2m} จะได้

$$t_{2m} = \frac{1}{0.0455} * \ln\left(\frac{R_m\,[1 + (c/2)(W_m/G_m)^{1-n}\,]}{30.144c(W_m/G_m)^{-n}} + e^{0.0455WBTm}\right) - \frac{R_m}{2} \qquad (2.37)$$

สมการข้างต้นนี้ เป็น**สมการทางทฤษฎี** ซึ่งมี c และ n เป็นค่าคงที่

สำหรับการหาค่าคงที่ c และ n หาได้โดยการทดลอง โดยมีการบันทึกค่า t_{2m} , R_m , W_m , WBT_m และ G_m ที่สภาวะต่าง ๆ ของหอผึ่งน้ำ โดยมีการเปลี่ยนค่าตัวแปรบางอย่างไป และนำมาคำนวณ โดยใช้สมการ (2.33) ดังนี้ คือ

จากสมการ (2.33) $c*(W_m/G_m)^{-n} = R_m/[30.144e^{0.0455(t2m+Rm/2)} - (30.144e^{0.0455WBTm} + (W_m/G_m)*(R_m/2))]$

เนื่องจากเทอมทางขวามือของสมการ สามารถหาค่าได้จากการทดลองดังที่กล่าวมาแล้ว ส่วนเทอมทางซ้ายมือของสมการ ก็ทราบค่า W_m และ G_m เช่นกัน ดังนั้น ก็เหลือค่า c และ n เป็นตัวแปรที่ต้องการหาค่า แต่สมการ (2.33) นี้ เป็นสมการที่ยาว และ เทอมทางขวามือของสมการก็ทราบค่าแล้ว เพื่อให้อยู่ในรูปง่ายในการหาค่าต่อไป จึงสมมุติค่าตัวแปรมาแทนเทอมทางขวามือของสมการ ดังนี้

กำหนดให้ $$Y_1 = R_m/[30.144e^{0.0455(t2m+Rm/2)} - (30.144e^{0.0455WBTm} + (W_m/G_m)*(R_m/2))] \quad (2.38)$$

ดังนั้น จากสมการ (2.33) จะได้ $$Y_1 = c*(W_m/G_m)^{-n} \quad (2.39)$$

ซึ่งสามารถหาค่าคงที่ c และ n ได้โดยวิธี the method of least squares