



บทที่ 3

แบบจำลองคณิตศาสตร์ของเครื่องระเหยหยดน้ำ เครื่องเพิ่ม/ลดความชื้น และเครื่องลดอุณหภูมิน้ำ

3.1 Configuration ของระบบ

3.1.1 พิจารณาการแลกเปลี่ยนความร้อนของหยดน้ำและลมร้อนเฉพาะช่วงที่เป็นทรงกระบอกของเครื่องเท่านั้น ไม่พิจารณาส่วนที่อยู่เหนือทรงกระบอกที่หยดน้ำวิ่งในแนวเฉียงและไม่พิจารณาส่วนที่เป็นกรวยด้านล่าง ดังรูป 3.1

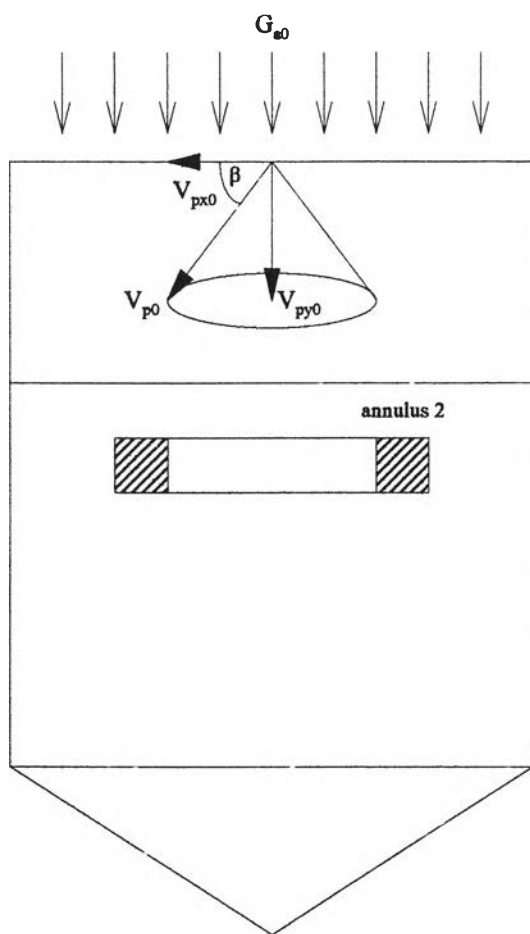
3.1.2 แบ่งพื้นที่หน้าตัดของทรงกระบอกเป็นวงแหวน(annulus) โดยมีพื้นที่ในแต่ละวงแหวนเท่าๆ กัน ดังรูป 3.2

3.1.3 แบ่งความสูงของทรงกระบอกให้มีความสูงเล็กๆ ΔZ และจะอินทิเกรตตัวแปรต่างๆ เทียบกับค่า ΔZ ดังรูป 3.3

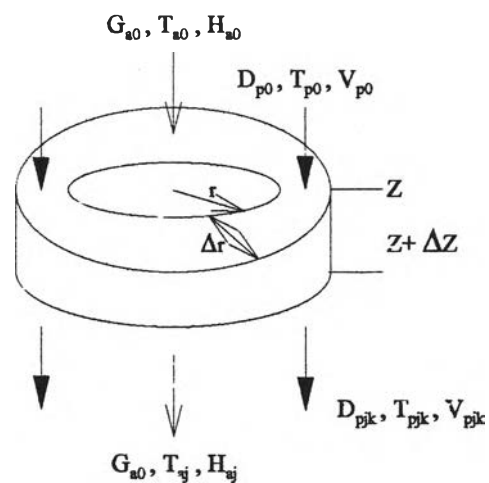
3.1.4 ทิศทางการไหลของหยดน้ำและลมร้อน จะไหลในทิศทางเดียวกันจากบนลงล่าง (Co-current flow)

3.1.5 จำนวนและการกระจายขนาดของหยดน้ำที่เข้าสู่เครื่องและในแต่ละวงแหวนไม่จำเป็นต้องเท่ากัน แต่การจำลองจะแบ่งการกระจายขนาดของหยดน้ำที่เข้าสู่แต่ละวงแหวนเป็นช่วงๆ ขนาดช่วงละเท่าๆ กัน ดังรูป 3.4 และตาราง 3.1

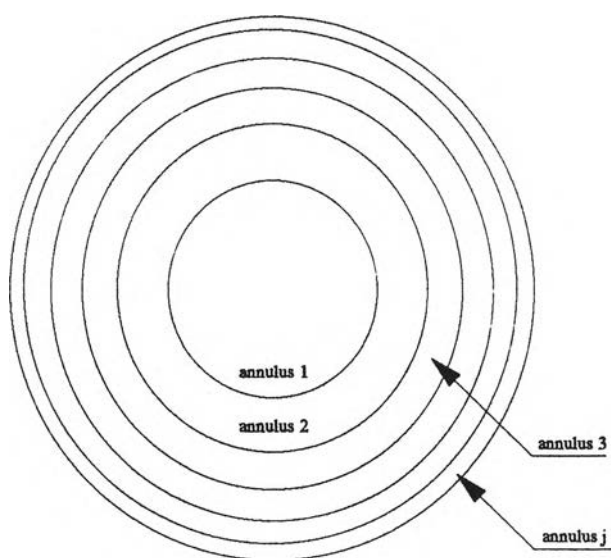
3.1.6 การจำลองจะใช้วิธีรันจ์- คัตตา ออเดอร์ที่ 4 (Fourth order Runge-Kutta) ในการคำนวณ



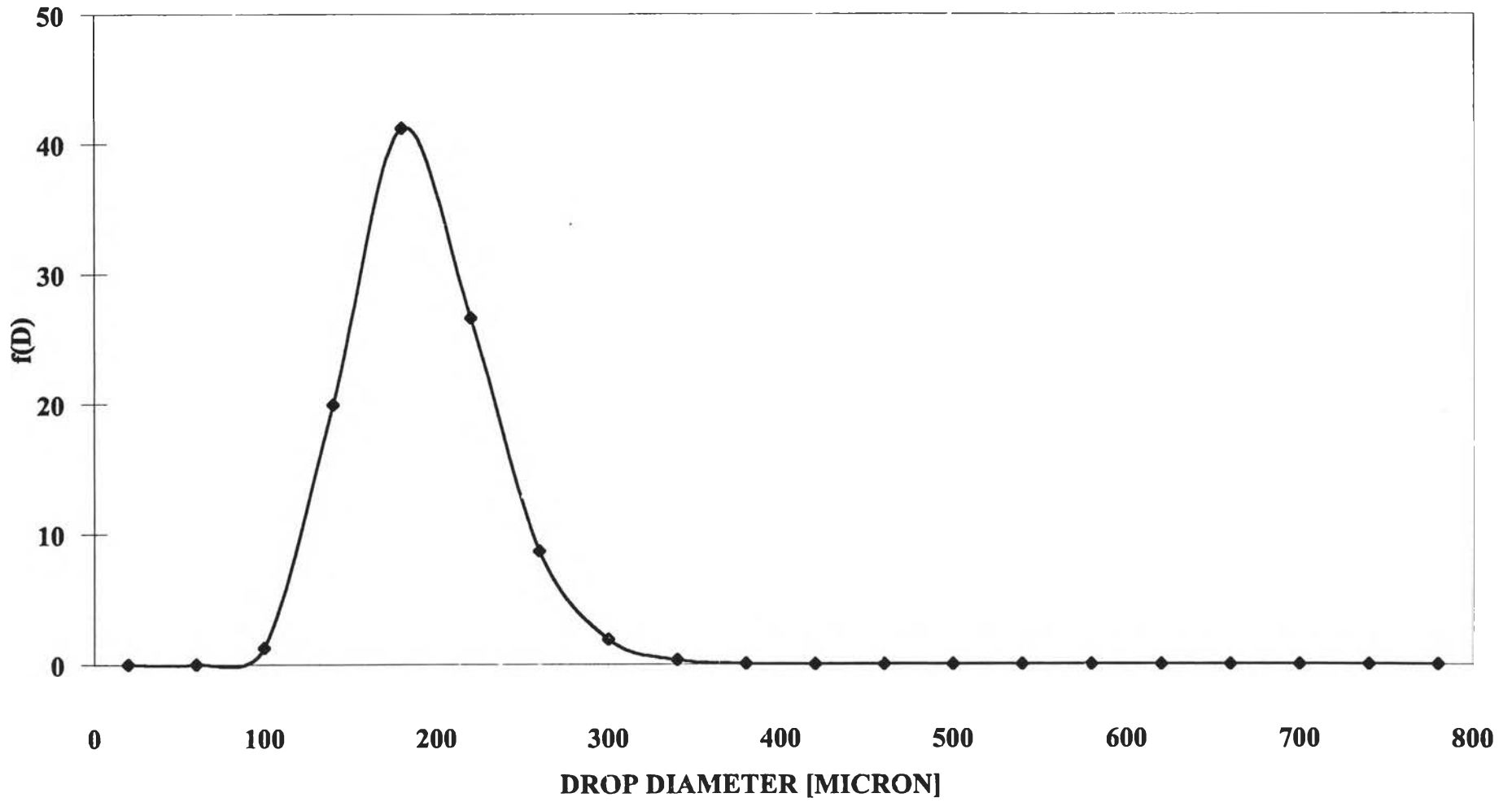
รูป 3.1 ลักษณะของเครื่อง



รูป 3.3 ลักษณะของวงแหวน



รูป 3.2 พื้นที่หน้าตัดของเครื่อง



รูป 3.4 ตัวอย่างการกระจายขนาดของหยดน้ำแบบ log-normal, $\sigma=0.2$ ขนาดเฉลี่ย 200 ไมครอน

ตาราง 3.1 ตัวอย่างจำนวนและการกระจายขนาดของหยดน้ำที่เข้าสู่เครื่อง

Class number (k)	Droplets class size (mm)	Diameter representing (micron)	Number droplets of annulus 1	Number droplets of annulus 2	Number droplets of annulus 3	Total Number of droplets
1	0-40	20	2.66E-09	1.60E-09	1.07E-09	5.33E-09
2	40-80	60	4.99E+00	2.99E+00	2.00E+00	9.98E+00
3	80-120	100	6.30E+03	3.78E+03	2.52E+03	1.26E+04
4	120-160	140	9.97E+04	5.98E+04	3.99E+04	1.99E+05
5	160-200	180	2.06E+05	1.24E+05	8.24E+04	4.12E+05
6	200-240	220	1.33E+05	7.99E+04	5.32E+04	2.66E+05
7	240-280	260	4.35E+04	2.61E+04	1.74E+04	8.70E+04
8	280-320	300	9.50E+03	5.70E+03	3.80E+03	1.90E+04
9	320-360	340	1.64E+03	9.81E+02	6.54E+02	3.27E+03
10	360-400	380	2.45E+02	1.47E+02	9.78E+01	4.89E+02
11	400-440	420	3.38E+01	2.03E+01	1.35E+01	6.76E+01
12	440-480	460	4.48E+00	2.69E+00	1.79E+00	8.96E+00
13	480-520	500	5.84E-01	3.50E-01	2.34E-01	1.17E+00
14	520-560	540	7.62E-02	4.57E-02	3.05E-02	1.52E-01
15	560-600	580	1.01E-02	6.04E-03	4.02E-03	2.01E-02
16	600-640	620	1.35E-03	8.12E-04	5.41E-04	2.71E-03
17	640-680	660	1.86E-04	1.12E-04	7.45E-05	3.73E-04
18	680-720	700	2.64E-05	1.58E-05	1.05E-05	5.27E-05
19	720-760	740	3.84E-06	2.30E-06	1.54E-06	7.68E-06
20	760-800	780	5.76E-07	3.46E-07	2.30E-07	1.15E-06
			5.00E+05	3.00E+05	2.00E+05	1.00E+06



3.2 สมมุติฐาน (Assumption)

เนื่องจากปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจริงภายในเครื่องระเหยหยดน้ำ เครื่องเพิ่ม/ลดความชื้น และเครื่องลดอุณหภูมิมีความซับซ้อนมาก จำเป็นต้องอธิบายแบบจำลองหรือกระบวนการที่เกิดขึ้นในอุดมคติด้วยสมการคณิตศาสตร์ ที่ซึ่งสามารถประมาณค่าคุณสมบัติที่เกิดขึ้นได้จริง ดังนั้นวิชานิพนธ์ฉบับนี้จะอ้างถึงสมมุติฐานดังต่อไปนี้

3.2.1 ระบบเป็น steady state และ ไม่มีการสูญเสียพลังงานจากระบบ

3.2.2 หยดน้ำเป็นน้ำบริสุทธิ์มีลักษณะทรงกลมและกระจายตัวเพียงพอ ดังนั้นการเคลื่อนที่และการระเหยจะเป็นอิสระต่อกัน ไม่มีการชนกันระหว่างหยดน้ำ

3.2.3 ทิศทางการเคลื่อนที่ของหยดน้ำจะเคลื่อนเฉพาะในแนวตั้งเท่านั้น นั่นคือหยดน้ำไม่ออกนอกวงแหวนของมัน

3.2.4 หยดน้ำวิ่งด้วยความเร็วแรกเริ่มเท่ากันและมีอุณหภูมิเท่ากันตลอดหน้าตัดของเครื่อง

3.2.5 ลมร้อนที่เข้าสู่ระบบมีลักษณะเป็น plug flow นั่นคือลมร้อนมีความเร็ว อุณหภูมิ และความชื้นสม่ำเสมอเท่ากันตลอดหน้าตัดของเครื่อง

3.2.6 อิทธิพลจากผนังเครื่อง การแพร่ผสม และอัตราการถ่ายเทความร้อนในแนวระดับมีน้อย

3.2.7 ระบบทำงานที่ความดันบรรยากาศ (1 atm)

3.3 สมการสมดุลสารและพลังงาน และสมการการเคลื่อนที่

3.3.1 สมดุลสารในเฟสของอากาศ (Gas-phase water balance), [kg/sec]

$$G_{a0} = [\text{kg dry air} / \text{m}^2 \text{sec}] , \quad n = [- / \text{m}^2 \text{sec}]$$

steady state : accumulation = 0

$$0 = 2\pi r \Delta r G_{a0} H \Big|_{z=z} - 2\pi r \Delta r G_{a0} H \Big|_{z=z+\Delta z} + \frac{h_c \pi D_p^2}{\lambda_p} (T_a - T_p) \left(n \cdot 2\pi r \Delta r \frac{\Delta Z}{V_p} \right)$$

หารด้วย $\Delta r \Delta Z$ ตลอดและ take $\lim_{\Delta z \rightarrow 0}$

$$0 = -2\pi r G_{a0} \frac{dH}{dZ} + \frac{h_c \pi D_p^2}{\lambda_p V_p} (T_a - T_p) (n \cdot 2\pi r)$$

$$\frac{dH}{dZ} = \frac{nh_c \pi D_p^2 (T_a - T_p)}{G_{a0} \lambda_p V_p} \quad (3.1)$$

3.3.2 สมดุลสารรวม (Overall water balance), [kg/sec]

steady state : accumulation = 0

$$0 = 2\pi r \Delta r G_{a0} H \Big|_{z=z} - 2\pi r \Delta r G_{a0} H \Big|_{z=z+\Delta z} \\ + \left(\frac{n\pi D_p^3 \rho_p}{6} \right) (2\pi r \Delta r) \Big|_{z=z} - \left(\frac{n\pi D_p^3 \rho_p}{6} \right) (2\pi r \Delta r) \Big|_{z=z+\Delta z}$$

หารด้วย $\Delta r \Delta Z$ ตลอดและ take $\lim_{\Delta z \rightarrow 0}$

$$0 = -2\pi G_{a0} \frac{dH}{dZ} - 2\pi \frac{n\pi \rho_p}{6} \frac{dD_p^3}{dZ} \\ 0 = G_{a0} \frac{dH}{dZ} + \frac{3D_p^2 n\pi \rho_p}{6} \frac{dD_p}{dZ} \\ \frac{dH}{dZ} = - \frac{D_p^2 n\pi \rho_p}{2G_{a0}} \frac{dD_p}{dZ} \quad (3.2)$$

สมการ (3.1) = (3.2)

$$\frac{nh_c \pi D_p^2 (T_a - T_p)}{G_{a0} \lambda_p V_p} = \frac{-n\pi \rho_p D_p^2}{2G_{a0}} \frac{dD_p}{dZ} \\ \frac{dD_p}{dZ} = \frac{-2h_c (T_a - T_p)}{\lambda_p V_p \rho_p} \quad (3.3)$$

3.3.3 ดุลพลังงานในเฟสของน้ำ (Water-phase energy balance), [kJ/sec]

steady state : accumulation = 0

$$0 = \frac{n\pi D_p^3 \rho_p}{6} (2\pi r \Delta r C_p) (T_p - T_r) \Big|_{z=z} - \frac{n\pi D_p^3 \rho_p}{6} (2\pi r \Delta r C_p) (T_p - T_r) \Big|_{z=z+\Delta z} \\ + n2\pi r \Delta r \frac{\Delta Z}{V_p} h_c \pi D_p^2 (T_a - T_p) - n2\pi r \Delta r \frac{\Delta Z}{V_p} k_g \pi D_p^2 (H_p - H) [\lambda_p + C_v (T_a - T_p)]$$

หารด้วย $\Delta r \Delta Z$ ตลอดและ take $\lim_{\Delta z \rightarrow 0}$

$$0 = \frac{-n\pi \rho_p (2\pi r C_p)}{6} \frac{d[D_p^3 (T_p - T_r)]}{dZ} + \frac{n2\pi r h_c \pi D_p^2}{V_p} (T_a - T_p) \\ - \frac{n2\pi r k_g \pi D_p^2}{V_p} (H_p - H) [\lambda_p + C_v (T_a - T_p)]$$

$$\begin{aligned} & \frac{D_p^2}{V_p} \left[k_g \lambda_p (H_p - H) + k_g C_v (H_p - H) (T_a - T_p) \right] - h_c (T_a - T_p) \\ &= \frac{-\rho_p C_p}{6} \left[D_p^3 \frac{dT_p}{dZ} + 3D_p^2 (T_p - T_r) \frac{dD_p}{dZ} \right] \end{aligned} \quad (3.4)$$

จากความสัมพันธ์ (Lewis relation)

$$k_g = \frac{h_c}{C_h}$$

โดยที่ $C_h = 4.1868(0.24 + 0.46H)$

และแทนค่าสมการ (3.3) ใน (3.4) และจัดรูปสมการ

$$\frac{dT_p}{dZ} = \left(\frac{-6h_c}{\rho_p D_p V_p C_p} \right) \left[\frac{\lambda_p (H_p - H)}{C_h} + \frac{C_v (H_p - H) (T_a - T_p)}{C_h} \right] - (T_a - T_p) - \frac{C_p (T_p - T_r) (T_a - T_p)}{\lambda_p} \quad (3.5)$$

3.3.4 ดุลพลังงานรวม (Overall energy balance), [kJ/sec]

steady state : accumulation = 0

$$\begin{aligned} 0 &= \frac{n\pi D_p^3 \rho_p}{6} (2\pi r \Delta r C_p) (T_p - T_r) \Big|_{z=z} - \frac{n\pi D_p^3 \rho_p}{6} (2\pi r \Delta r C_p) (T_p - T_r) \Big|_{z=z+\Delta z} \\ &+ 2\pi r \Delta r G_{a0} C_h (T_a - T_r) \Big|_{z=z} - 2\pi r \Delta r G_{a0} C_h (T_a - T_r) \Big|_{z=z+\Delta z} \\ &+ 2\pi r \Delta r G_{a0} \lambda_r H \Big|_{z=z} - 2\pi r \Delta r G_{a0} \lambda_r H \Big|_{z=z+\Delta z} \end{aligned}$$

หารด้วย $\Delta r \Delta Z$ ตลอดและ take lim $\Delta z \rightarrow 0$

$$\begin{aligned} 0 &= \frac{-n\pi \rho_p C_p}{6} \frac{d[D_p^3 (T_p - T_r)]}{dZ} - G_{a0} \frac{d[C_h (T_a - T_r)]}{dZ} - G_{a0} \lambda_r \frac{dH}{dZ} \\ 0 &= \frac{-n\pi \rho_p C_p D_p^3}{6} \frac{dT_p}{dZ} - \frac{3n\pi \rho_p C_p D_p^2 (T_p - T_r)}{6} \frac{dD_p}{dZ} \\ &- G_{a0} C_h \frac{dT_a}{dZ} - (4.1868 * 0.46) G_{a0} (T_a - T_r) \frac{dH}{dZ} - G_{a0} \lambda_r \frac{dH}{dZ} \\ \frac{dT_a}{dZ} &= \frac{-n\pi \rho_p C_p D_p^3}{6G_{a0} C_h} \frac{dT_p}{dZ} - \frac{n\pi \rho_p C_p D_p^2 (T_p - T_r)}{2G_{a0} C_h} \frac{dD_p}{dZ} \\ &- \left[\frac{(4.1868 * 0.46)(T_a - T_r) + \lambda_r}{C_h} \right] \frac{dH}{dZ} \end{aligned} \quad (3.6)$$

แทนค่าสมการ (3.1),(3.3),(3.5) ใน (3.6) และจัดรูปสมการ

$$\begin{aligned} \frac{dT_a}{dZ} = & \left(\frac{nh_c \pi D_p^2}{V_p G_{a0} C_h} \right) \left[\frac{\lambda_p (H_p - H)}{C_h} + \frac{C_v (H_p - H)(T_a - T_p)}{C_h} \right] \\ & + \left(\frac{nh_c C_p \pi D_p^2}{V_p G_{a0} C_h \lambda_p} \right) (T_p - T_r)(T_a - T_p) \\ & - \left(\frac{nh_c \pi D_p^2}{V_p G_{a0} C_h \lambda_p} \right) (T_a - T_p) [(4.1868 * 0.46)(T_a - T_r) + \lambda_r] \end{aligned} \quad (3.7)$$

3.3.5 ความเร็วของหยดของเหลว [m/sec]

$$\text{ความเร็วสัมพัทธ์, } V_r = \sqrt{V_{px}^2 + (V_{py} - V_a)^2}$$

สมมติให้มีการเคลื่อนที่ที่แกน Y อย่างเดียว, $V_{px} = 0$ ดังนั้น $V_r = V_{py} - V_a$

$$\text{แรงต้านทานการไหล, } R = C_D \frac{\pi D_p^2}{4} \frac{\rho_a V_r^2}{2}$$

สัมประสิทธิ์ความต้านทานการไหล, C_D

$$= \frac{24}{\text{Re}_p} \quad (\text{Re}_p \leq 2)$$

$$= \frac{10}{\text{Re}_p^{0.5}} \quad (2 \leq \text{Re}_p \leq 500)$$

$$= 0.44 \quad (\text{Re}_p \geq 500)$$

โดยที่ $\text{Re}_p = \frac{D_p V_r \rho_a}{\mu_a}$ ดังนั้น

$$R_{py} = R \sin \beta = \left(\frac{\pi D_p^2 C_D \rho_a V_r}{8} \right) (V_{py} - V_a)$$

ดังนั้นสมการการเคลื่อนที่ของหยดของเหลว คือ

$$\frac{\rho_p \pi D_p^3}{6} \frac{dV_{py}}{dt} = \frac{\rho_p \pi D_p^3}{6} \left(\frac{\rho_p - \rho_a}{\rho_p} \right) g - \left(\frac{\pi D_p^2 C_D \rho_a V_r}{8} \right) (V_{py} - V_a)$$

$$\frac{dV_{py}}{dt} = \left(\frac{\rho_p - \rho_a}{\rho_p} \right) g - \left(\frac{3C_D \rho_a}{4D_p \rho_p} \right) (V_{py} - V_a)^2$$

$$\left(\frac{dZ}{dt} \right) \left(\frac{dV_{py}}{dZ} \right) = \left(\frac{\rho_p - \rho_a}{\rho_p} \right) g - \left(\frac{3C_D \rho_a}{4D_p \rho_p} \right) (V_{py} - V_a)^2$$

$$\frac{dV_{py}}{dZ} = \left(\frac{\rho_p - \rho_a}{\rho_p} \right) \frac{g}{V_{py}} - \left(\frac{3C_D \rho_a}{4D_p \rho_p V_{py}} \right) (V_{py} - V_a)^2 \quad (3.8)$$

3.4 การทำเป็นตัวเลขไร้มิติ (Dimensionless)

$$\begin{aligned} D_{p0ave} &= \frac{\sum f_n(D_p)(D_p)}{100} & D_{pj}^* &= \frac{D_{pj}}{D_{p0ave}} \\ \Delta Z^* &= \frac{\Delta Z}{D_t} & T_{pj}^* &= \left(\frac{T_{pj} - T_{p0}}{T_{a0} - T_{p0}} \right) \\ T_{aj}^* &= \left(\frac{T_{aj} - T_{p0}}{T_{a0} - T_{p0}} \right) & T_r^* &= \left(\frac{T_r - T_{p0}}{T_{a0} - T_{p0}} \right) \\ V_{pj}^* &= \frac{V_{pj}}{V_{p0}} & V_{a0}^* &= \frac{V_{a0}}{V_{p0}} \\ H_{aj}^* &= H_{aj} & H_{pj}^* &= H_{pj} \\ n_k^* &= \frac{n_k D_{p0ave}^3}{V_{p0}} & \alpha_{jk}^* &= \frac{C_{pp}(T_{a0} - T_{p0})}{\lambda_{pj}} \\ \beta_{jk}^* &= \frac{\lambda_{pj}}{C_h(T_{a0} - T_{p0})} & \gamma_{jk}^* &= \frac{h_{jk}(T_{a0} - T_{p0})}{\lambda_{pj} G_{a0}} \end{aligned}$$

3.5 สรุปสมการแบบจำลองคณิตศาสตร์

จากสมการ (3.1),(3.3),(3.5),(3.7) และ (3.8) ทำเป็นรูปไร้มิติและจัดรูปจะได้

$$\frac{dH_{aj}^*}{dZ^*} = \pi \left(\frac{D_t}{D_{p0ave}} \right) \sum_{k=1}^{kclass} \left[\gamma_{jk}^* \left(\frac{n_k^* D_{pj}^{*2}}{V_{pj}^*} \right) (T_{aj}^* - T_{pj}^*) \right] \quad (3.9)$$

$$\frac{dD_{pj}^*}{dZ^*} = -2 \left(\frac{D_t}{D_{p0ave}} \right) \left(\frac{h_{jk}(T_{a0} - T_{p0})}{\rho_{pj} \lambda_{pj} V_{p0}} \right) \left(\frac{T_{aj}^* - T_{pj}^*}{V_{pj}^*} \right) \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned} \frac{dT_{pj}^*}{dZ^*} &= -6 \left(\frac{D_t}{D_{p0ave}} \right) \left(\frac{h_{jk}}{\rho_{pj} C_{pp} V_{p0}} \right) \left(\frac{1}{D_{pj}^* V_{pj}^*} \right) \\ &\left[\beta_{jk}^* (H_{pj}^* - H_{aj}^*) + \left(\frac{C_v}{C_h} \right) (T_{aj}^* - T_{pj}^*) (H_{pj}^* - H_{aj}^*) \right. \\ &\left. - (T_{aj}^* - T_{pj}^*) - \alpha_{jk}^* (T_{aj}^* - T_{pj}^*) (T_{pj}^* - T_r^*) \right] \quad (3.11) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{dT_{aj}^*}{dZ^*} = & \pi \left(\frac{D_t}{D_{p0ave}} \right) \sum_{k=1}^{kclass} \left[\begin{array}{l} \left[\beta_{jk}^* (H_{pj}^* - H_{aj}^*) + \left(\frac{C_v}{C_h} \right) (T_{aj}^* - T_{pj}^*) (H_{pj}^* - H_{aj}^*) \right] \\ \left[- (T_{aj}^* - T_{pj}^*) - \alpha_{jk}^* (T_{aj}^* - T_{pj}^*) (T_{pj}^* - T_r^*) \right] \\ \left[\beta_{jk}^* \gamma_{jk}^* \left(\frac{n_k^* D_{pj}^{*2}}{V_{pj}^*} \right) \right] \end{array} \right] \\
& + \pi \left(\frac{D_t}{D_{p0ave}} \right) \sum_{k=1}^{kclass} \left[\gamma_{jk}^* \left(\frac{C_{pp}}{C_h} \right) \left(\frac{n_k^* D_{pj}^{*2}}{V_{pj}^*} \right) (T_{aj}^* - T_{pj}^*) (T_{pj}^* - T_r^*) \right] \\
& - \pi \left(\frac{D_t}{D_{p0ave}} \right) \left[\left(\frac{4.1868 * 0.46}{C_h} \right) (T_{aj}^* - T_r^*) + \frac{\lambda_r (T_{a0} - T_{p0})}{C_h} \right] \\
& \sum_{k=1}^{kclass} \left[\gamma_{jk}^* \left(\frac{n_k^* D_{pj}^{*2}}{V_{pj}^*} \right) (T_{aj}^* - T_{pj}^*) \right]
\end{aligned} \tag{3.12}$$

เนื่องจาก $V_{px} = 0$ ดังนั้น $V_p = V_{py}$

$$\frac{dV_{pj}^*}{dZ^*} = \left(\frac{\rho_{pj} - \rho_{aj}}{\rho_{pj}} \right) \left(\frac{gD_t}{V_{p0}^2} \right) \left(\frac{1}{V_{pj}^*} \right) - \left(\frac{3C_D}{4} \right) \left(\frac{D_t}{D_{p0ave}} \right) \left(\frac{\rho_{aj}}{\rho_{pj}} \right) \frac{(V_{pj}^* - V_{a0}^*)^2}{V_{pj}^* D_{pj}^*} \tag{3.13}$$

โดย

$$h_{cjk} = \frac{k_{dj}}{D_{p0ave} D_{pj}^*} \left\{ 2.0 + 0.60 \sqrt{D_{pj}^* |V_{pj}^* - V_{a0}^*|} \left(\frac{C_{pa} \mu_{aj}}{k_{dj}} \right)^{0.33} \left(\frac{D_{p0ave} V_{p0} \rho_{aj}}{\mu_{aj}} \right)^{0.5} \right\} \tag{3.14}$$

ซึ่งค่า k_{dj} , C_{pa} , μ_{aj} และ ρ_{aj} คำนวณ ณ อุณหภูมิของฟิล์ม, $T_f = \frac{(T_a + T_p)}{2}$

3.6 วิธีการคำนวณ

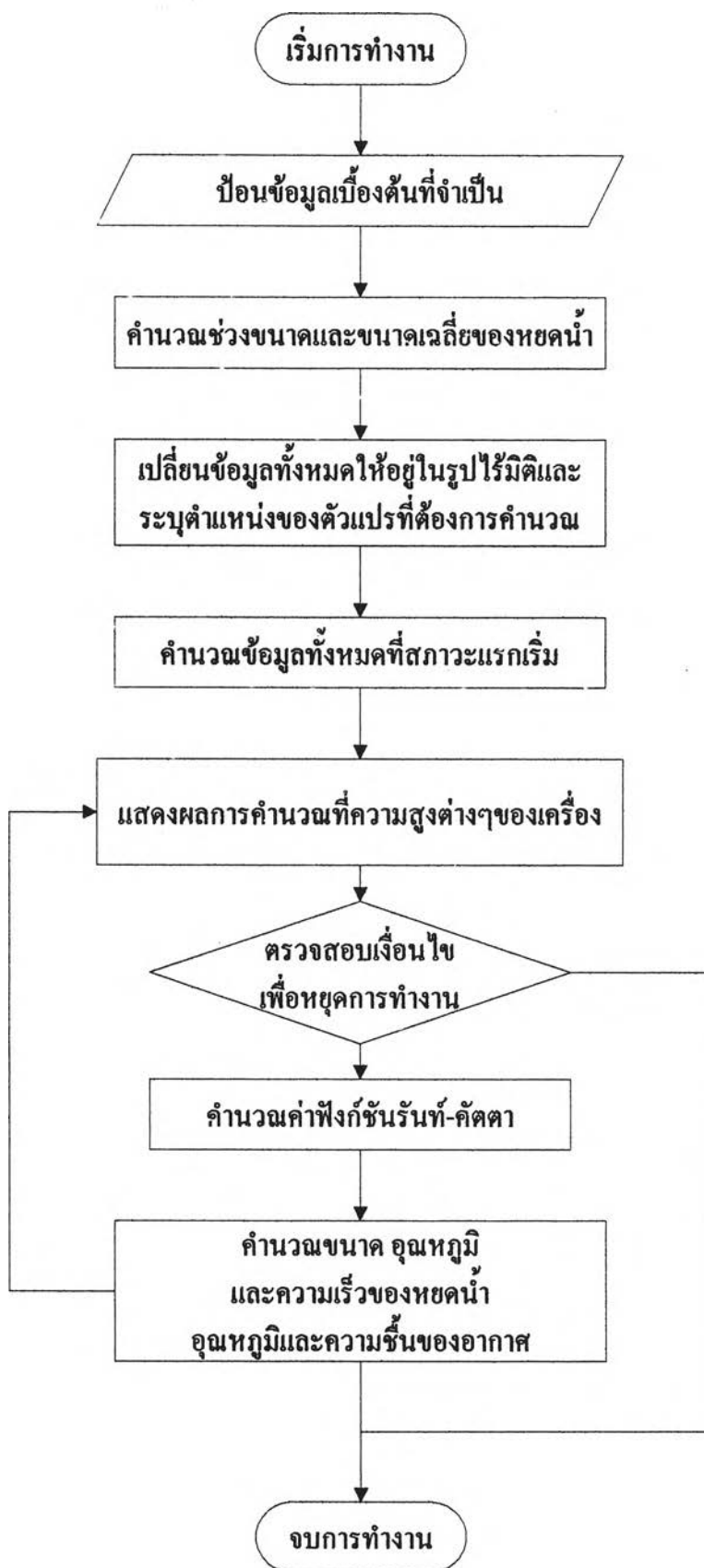
การคำนวณการเปลี่ยนแปลงขนาด อุณหภูมิ และความเร็วของหยดน้ำ การเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิและความชื้นของอากาศที่ความสูงต่างๆ ภายในเครื่องระเหยหยดน้ำ เครื่องเพิ่ม/ลดความ ชื้นอากาศ และเครื่องลดอุณหภูมิ น้ำ จะคำนวณได้จากการแก้สมการดิฟเฟอเรนเชียลหลัก 5 สมการ คือสมการ (3.9),(3.10),(3.11),(3.12) และ (3.13) ซึ่งจะทำการคำนวณพร้อมๆ กันโดยใช้วิธีรันที - คัตตา ออเคอร์ที่ 4 จำนวนสมการที่ใช้ในการคำนวณจะขึ้นกับจำนวนวงแหวนของเครื่องและ จำนวนช่วงขนาดของหยดน้ำ ตัวอย่างเช่น กรณีที่เครื่องถูกแบ่งออกเป็น 5 วงแหวน และหยดน้ำมี 20 ช่วงขนาดหรืออันตรภาคชั้น จำนวนสมการที่ใช้คำนวณพร้อมๆ กันจะเท่ากับ $(3*5*20) + (2*5) = 310$ สมการ ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการทั่วไปได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{จำนวนสมการ} &= (3 * \text{จำนวนวงแหวนของเครื่อง} * \text{จำนวนช่วงขนาดของหยดน้ำ}) \\ &+ (2 * \text{จำนวนวงแหวนของเครื่อง}) \end{aligned} \quad (3.15)$$

ค่าในวงเล็บแรกด้านขวาของสมการ (3.15) คือ จำนวนสมการที่ใช้คำนวณการเปลี่ยนแปลง ขนาด อุณหภูมิ และความเร็วของหยดน้ำ ค่าในวงเล็บที่สอง คือ จำนวนสมการที่ใช้คำนวณการ เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้นของอากาศ

การคำนวณสมการหลักทั้ง 5 จำเป็นต้องใช้ค่าคุณสมบัติต่างๆของน้ำและอากาศเป็นข้อมูลใน การคำนวณ ค่าคุณสมบัติต่างๆนี้จะทำการคำนวณใหม่ทุกครั้งขึ้นกับสภาวะในขณะนั้น (ดูวิธีการ คำนวณคุณสมบัติต่างๆในภาคผนวก)

เมื่อทำการคำนวณการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของหยดน้ำและอากาศที่ความสูงแรกเสร็จ ข้อมูลที่คำนวณได้ที่ความสูงแรกจะใช้ในการคำนวณการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของหยดน้ำและ อากาศที่ความสูงถัดไป และจะทำการคำนวณเช่นนี้เรื่อยไปจนกว่าการคำนวณจะเสร็จสมบูรณ์ดัง แสดงในรูป 3.5



รูป 3.5 ผังการคำนวณอย่างง่ายของโปรแกรมหลัก

3.7 ผลการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

3.7.1 กรณีที่หยดน้ำและลมร้อนไม่มีความเร็วสัมพัทธ์

รูป 3.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีการระเหย (Evaporation index, y) กับสัดส่วนของปริมาตรหยดน้ำที่ยังไม่ระเหย (Volume fraction unevaporated, F) ของหยดน้ำที่มีการกระจายขนาดแบบ log-normal โดยมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน, $\sigma = 0, 0.2$ และ 0.4 เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากผลงานวิจัยของ Dickinson และ Marshall (23), ค่าของตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการจำลองแสดงไว้ในตาราง 3.2

จากรูป 3.6 พบว่าหยดน้ำที่มีการกระจายขนาดแคบกว่าจะระเหยเสร็จสมบูรณ์เร็วกว่าหยดน้ำที่มีการกระจายขนาดกว้างกว่า เนื่องจากหยดน้ำขนาดใหญ่ที่มีอยู่จำนวนมากจะมีพื้นที่ผิวน้อย จึงเกิดอัตราการระเหยที่น้อยกว่า

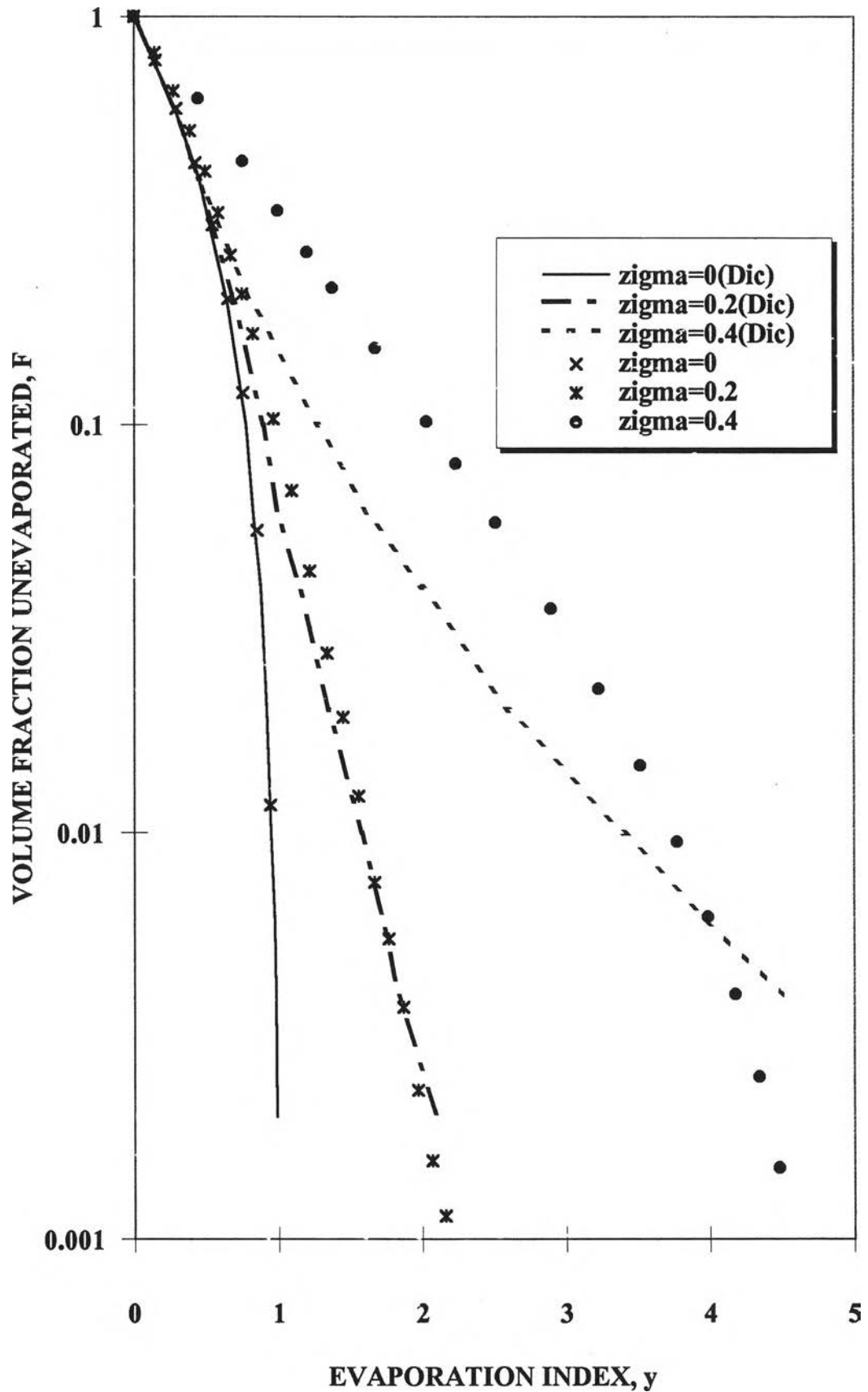
เมื่อเปรียบเทียบแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับผลงานวิจัย (23) พบว่ากรณีที่หยดน้ำมีขนาดเดียว ค่าที่ได้จากแบบจำลองจะมีค่าเท่ากัน ส่วนกรณีที่หยดน้ำมีหลายขนาด ค่าที่ได้จากแบบจำลองจะมีค่าแตกต่างกันบ้างแต่มีแนวโน้มเดียวกัน ซึ่งอาจเนื่องมาจากสาเหตุดังต่อไปนี้

- การใช้ค่ากึ่งกลางในแต่ละช่วงขนาดของหยดน้ำเป็นตัวแทนหยดน้ำขนาดต่างๆ ในช่วงขนาดนั้น อาจไม่สามารถเป็นตัวแทนหยดน้ำขนาดต่างๆ ได้ทั้งหมดในสภาวะที่เกิดขึ้นจริง
- การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของแบบจำลองจะใช้ค่าอุณหภูมิฟิล์มของอากาศที่ได้จากการคำนวณใหม่ทุกครั้งตามอุณหภูมิของหยดน้ำและอากาศที่เปลี่ยนไป ต่างจากผลงานวิจัย (23) ซึ่งจะใช้เป็นค่าประมาณโดยคำนวณที่อุณหภูมิเฉลี่ยคงที่ค่าหนึ่งเท่านั้น
- ค่าความหนืดและค่าความนำความร้อนของอากาศชั้นที่ใช้ในแบบจำลองจะคำนวณโดยพิจารณาอากาศชั้นเป็นของผสมระหว่างไอน้ำและอากาศแห้ง ค่าความหนืดและค่าความนำความร้อนจะคำนวณใหม่ทุกครั้งขึ้นกับสัดส่วนของไอน้ำกับอากาศแห้งที่เปลี่ยนไป ต่างจากผลงานวิจัย (23) ซึ่งจะใช้เป็นค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ
- ค่าคุณสมบัติต่างๆ ของน้ำ ไอน้ำ และอากาศ เช่น ความจุความร้อนจำเพาะ ความหนาแน่น ความร้อนจำเพาะชั้นของอากาศ ความร้อนแฝงของการระเหย ในแบบจำลองจะคำนวณใหม่ทุกครั้งขึ้นกับอุณหภูมิของน้ำ ไอน้ำ และ อากาศที่เปลี่ยนไป ต่างจากผลงานวิจัย (23) ซึ่งจะใช้เป็นค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ

ตาราง 3.2 ค่าของตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองในเครื่องระเหยหยดน้ำ กรณีที่หยดน้ำและลมร้อนไม่มีความเร็วสัมพัทธ์ โดยที่หยดน้ำมีการกระจายขนาดแบบ log-normal, $\sigma = 0, 0.2$ และ 0.4 โดยมีขนาดเฉลี่ย 200 ไมครอน

	$\sigma = 0$	$\sigma = 0.2$	$\sigma = 0.4$	
<u>ขนาดของเครื่อง</u>				
ความสูงของเครื่อง	10	10	10	m
เส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่อง	4	4	4	m
<u>ลักษณะสมบัติของหยดน้ำ</u>				
จำนวนหยดน้ำทั้งหมด	8767245	8256530	6919913	drop/m ² s
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่ที่สุด	200	800	800	micron
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กที่สุด	200	50	50	micron
อุณหภูมิของหยดน้ำ	333.16	333.16	333.16	K
ความเร็วของหยดน้ำ	0.8	0.8	0.8	m/s
<u>ลักษณะสมบัติของลมร้อน</u>				
อุณหภูมิของลมร้อน	533.16	533.16	533.16	K
ความชื้นของลมร้อน	0.0	0.0	0.0	kg vapor/kg dry air
อัตราการไหลเชิงมวลของลมร้อน	0.5298	0.5298	0.5298	kg dry air/m ² s
<u>เงื่อนไขของการจำลอง</u>				
จำนวนวงแหวนของเครื่อง	1	1	1	annulus
จำนวนช่วงขนาดของหยดน้ำ	1	20	20	class
ความสูงเริ่มต้นของการจำลอง	0.0	0.0	0.0	m
สัดส่วนหยดน้ำที่ใช้หยุดการจำลอง	0.001	0.001	0.001	
Step size ที่ใช้ในการจำลอง	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$	m
ความถี่ที่แสดงผลของการจำลอง	2500	2500	10000	
จำนวนหยดน้ำในวงแหวนที่ 1	100.00	100.00	100.00	%
จำนวนหยดน้ำในช่วงขนาดที่ 1	100.00	0.00179	1.9117	%
จำนวนหยดน้ำในช่วงขนาดที่ 2		0.93684	10.061	%
จำนวนหยดน้ำในช่วงขนาดที่ 3		14.0200	18.185	%
จำนวนหยดน้ำในช่วงขนาดที่ 4		35.0420	19.815	%

จำนวนหยดน้ำในช่วงขนาดที่ 5	30.4900	16.627	%
จำนวนหยดน้ำในช่วงขนาดที่ 6	13.9440	12.076	%
จำนวนหยดน้ำในช่วงขนาดที่ 7	4.28360	8.0706	%
จำนวนหยดน้ำในช่วงขนาดที่ 8	1.02560	5.1371	%
จำนวนหยดน้ำในช่วงขนาดที่ 9	0.20989	3.1785	%
จำนวนหยดน้ำในช่วงขนาดที่ 10	0.03895	1.9361	%
จำนวนหยดน้ำในช่วงขนาดที่ 11	0.00682	1.1704	%
จำนวนหยดน้ำในช่วงขนาดที่ 12	0.00115	0.70593	%
จำนวนหยดน้ำในช่วงขนาดที่ 13	0.00019	0.42627	%
จำนวนหยดน้ำในช่วงขนาดที่ 14	$.32004 \cdot 10^{-4}$	0.25832	%
จำนวนหยดน้ำในช่วงขนาดที่ 15	$.53541 \cdot 10^{-5}$	0.15733	%
จำนวนหยดน้ำในช่วงขนาดที่ 16	$.90646 \cdot 10^{-6}$	0.09641	%
จำนวนหยดน้ำในช่วงขนาดที่ 17	$.15596 \cdot 10^{-6}$	0.05948	%
จำนวนหยดน้ำในช่วงขนาดที่ 18	$.27348 \cdot 10^{-7}$	0.03696	%
จำนวนหยดน้ำในช่วงขนาดที่ 19	$.48974 \cdot 10^{-8}$	0.02314	%
จำนวนหยดน้ำในช่วงขนาดที่ 20	$.89679 \cdot 10^{-9}$	0.01460	%



รูป 3.6 เปรียบเทียบค่าที่คำนวณจากแบบจำลองกับผลงานวิจัยของ Dickenson และ Marshall กรณีที่หยดน้ำมีการกระจายขนาดแบบ log-normal และไม่มีความเร็วสัมพัทธ์กับลมร้อน

3.7.2 กรณีที่หยดน้ำและลมร้อนมีความเร็วสัมพัทธ์

รูป 3.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีการระเหยกับสัดส่วนของปริมาตรหยดน้ำที่ยังไม่ระเหย ของหยดน้ำที่มีการกระจายขนาดแบบ log-normal โดยมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน, $\sigma = 0.4$ ที่ขนาดเฉลี่ยของหยดน้ำ 50 100 และ 200 ไมครอน เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากผลงานวิจัยของ Dickinson และ Marshall (23), ค่าของตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการจำลอง แสดงไว้ในตาราง 3.3

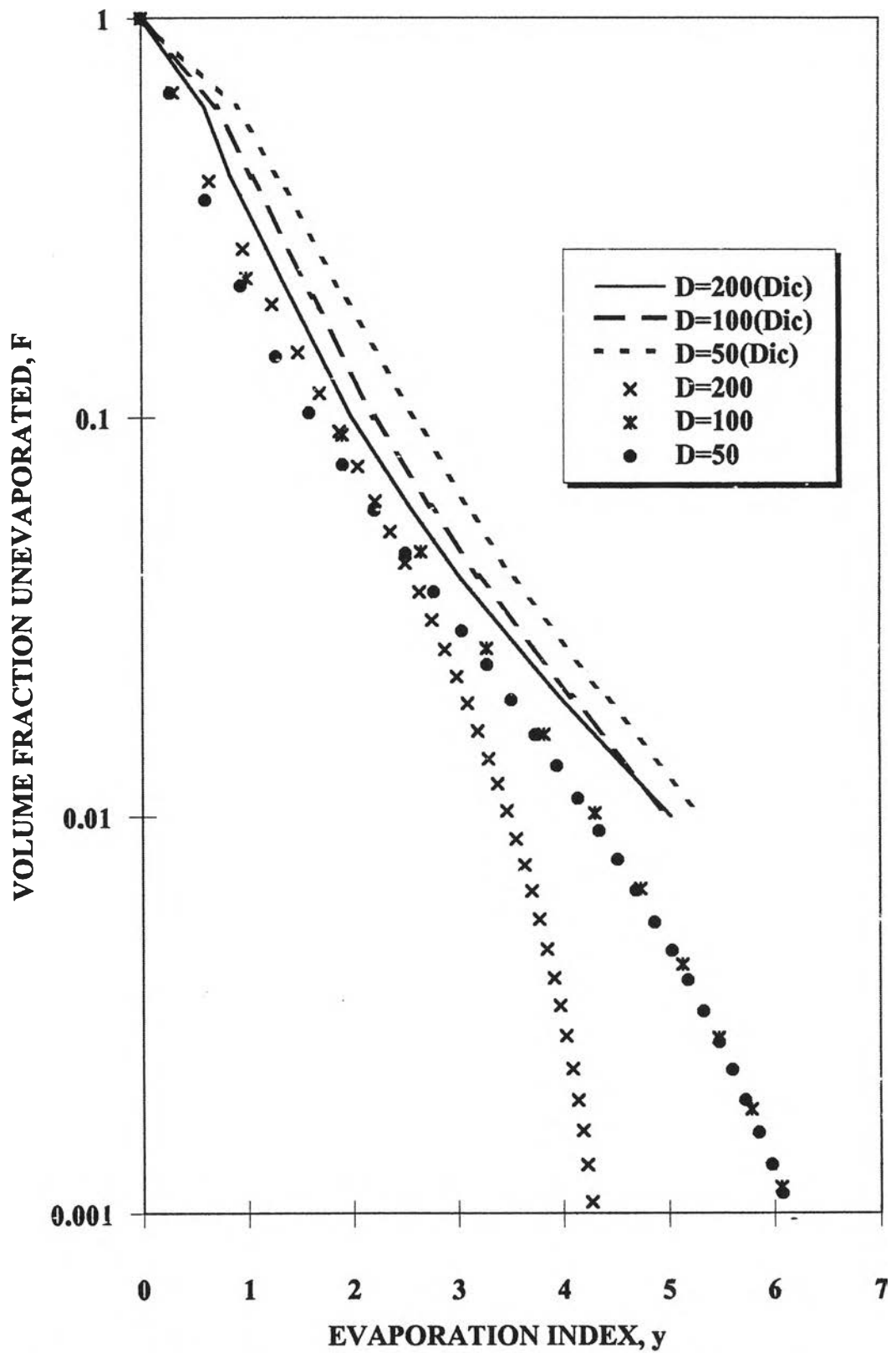
จากรูป 3.7 พบว่าหยดน้ำที่มีความเร็วแรกเริ่มเท่ากัน ผลของความเร็วสัมพัทธ์จะเด่นชัดที่สุดกับหยดน้ำที่มีขนาดเล็ก เมื่อหยดน้ำมีขนาดเล็กลง ทั้งระยะทางที่ใช้ในการระเหยและระยะทางที่ใช้ในการลดความเร็วจะมีค่าลดลง อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับระยะทางที่ลดลงกับหยดน้ำขนาดใหญ่ พบว่าหยดน้ำขนาดเล็กจะมีการลดลงของระยะทางมากกว่า หยดน้ำขนาดเล็กจะมีสัดส่วนในช่วงที่ลดความเร็วเมื่อเทียบกับช่วงที่ความเร็วคงที่(ความเร็วปั่นป่วน)มากกว่า และมีความเร็วเฉลี่ยมากกว่าหยดน้ำขนาดใหญ่ ดังนั้นหยดน้ำขนาดเล็กจึงใช้ระยะทางมากกว่าหยดน้ำขนาดใหญ่ในการที่จะระเหยน้ำในปริมาณเท่าๆกัน

เมื่อเปรียบเทียบแบบจำลองกับผลงานวิจัย (23) พบว่ามีแตกต่างกันบ้างแต่มีแนวโน้มเดียวกัน ซึ่งอาจเนื่องจากสาเหตุเดียวกันกับข้อ 3.7.1 ดังได้กล่าวมาแล้ว

ตาราง 3.3 ค่าของตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองในเครื่องระเหยหยดน้ำ กรณีที่หยดน้ำและลมร้อนมีความเร็วสัมพัทธ์ โดยที่หยดน้ำมีการกระจายขนาดแบบ log-normal, $\sigma = 0.4$ และมีขนาดเฉลี่ย 50, 100 และ 200 ไมครอน

	$D_p = 50$	$D_p = 100$	$D_p = 200$	
<u>ขนาดของเครื่อง</u>				
ความสูงของเครื่อง	10	10	10	m
เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของเครื่อง	4	4	4	m
<u>ลักษณะสมบัติของหยดน้ำ</u>				
จำนวนหยดน้ำทั้งหมด	441591405	55198772	6919060	drop/m ² s
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่ที่สุด	250	500	800	micron
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กที่สุด	0.0	0.0	0.0	micron
อุณหภูมิของหยดน้ำ	333.16	333.16	333.16	K
ความเร็วของหยดน้ำ	40.8	40.8	40.8	m/s
<u>ลักษณะสมบัติของลมร้อน</u>				
อุณหภูมิของลมร้อน	533.16	533.16	533.16	K9
ความชื้นของลมร้อน	0.0	0.0	0.0	kg vapor/kg dry air
อัตราการไหลเชิงมวลของลมร้อน	0.5298	0.5298	0.5298	kg dry air/m ² s
<u>เงื่อนไขของการจำลอง</u>				
จำนวนวงแหวนของเครื่อง	1	1	1	annulus
จำนวนช่วงขนาดของหยดน้ำ	20	20	20	class
ความสูงเริ่มต้นของการจำลอง	0.0	0.0	0.0	m
สัดส่วนหยดน้ำที่ใช้หยุดการจำลอง	0.001	0.001	0.001	
Step size ที่ใช้ในการจำลอง	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$	m
ความถี่ที่แสดงผลของการจำลอง	2500	25000	25000	
จำนวนหยดน้ำในวงแหวนที่ 1	100.00	100.00	100.00	%
จำนวนหยดน้ำในช่วงขนาดที่ 1	0.02644	0.02644	0.00287	%
จำนวนหยดน้ำในช่วงขนาดที่ 2	4.1295	4.1295	1.0961	%
จำนวนหยดน้ำในช่วงขนาดที่ 3	19.445	19.445	8.9800	%
จำนวนหยดน้ำในช่วงขนาดที่ 4	26.399	26.399	18.768	%

จำนวนหยดน้ำในช่วงขนาดที่ 5	21.153	21.153	21.153	%
จำนวนหยดน้ำในช่วงขนาดที่ 6	13.310	13.310	17.573	%
จำนวนหยดน้ำในช่วงขนาดที่ 7	7.4471	7.4471	12.414	%
จำนวนหยดน้ำในช่วงขนาดที่ 8	3.9341	3.9341	8.0128	%
จำนวนหยดน้ำในช่วงขนาดที่ 9	2.0245	2.0245	4.9142	%
จำนวนหยดน้ำในช่วงขนาดที่ 10	1.0325	1.0325	2.9294	%
จำนวนหยดน้ำในช่วงขนาดที่ 11	0.52702	0.52702	1.7206	%
จำนวนหยดน้ำในช่วงขนาดที่ 12	0.27079	0.27079	1.0043	%
จำนวนหยดน้ำในช่วงขนาดที่ 13	0.14052	0.14052	0.58581	%
จำนวนหยดน้ำในช่วงขนาดที่ 14	0.07379	0.07379	0.34264	%
จำนวนหยดน้ำในช่วงขนาดที่ 15	0.03925	0.03925	0.20144	%
จำนวนหยดน้ำในช่วงขนาดที่ 16	0.02115	0.02115	0.11920	%
จำนวนหยดน้ำในช่วงขนาดที่ 17	0.01155	0.01155	0.07107	%
จำนวนหยดน้ำในช่วงขนาดที่ 18	0.00640	0.00640	0.04272	%
จำนวนหยดน้ำในช่วงขนาดที่ 19	0.00359	0.00359	0.02589	%
จำนวนหยดน้ำในช่วงขนาดที่ 20	0.00204	0.00204	0.01583	%



รูป 3.7 เปรียบเทียบค่าที่คำนวณจากแบบจำลองกับผลงานวิจัยของ Dickenson และ Marshall กรณีที่หยดน้ำมีการกระจายขนาดแบบ log-normal, $\sigma=0.4$ และมีความเร็วสัมพัทธ์กับลมร้อน