

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

ระบบสูบน้ำแสงอาทิตย์โดยใช้หลักการซาเวรีได้ถูกพัฒนาโดย Kiatsiriroat et al. (2000) ระบบมีหลักการทำงานคือ เมื่อรังสีแสงอาทิตย์ตกบนตัวรับรังสี ความร้อนจากแสงอาทิตย์จะถ่ายเทสู่ของไหลภายในตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ ทำให้ของไหลกลายเป็นไอซึ่งไอน้ำส่วนนี้จะถูกปล่อยเข้าไปแทนที่น้ำในถังควบแน่นโดยน้ำที่ถูกแทนที่จะถูกดันออกไป และไอน้ำในถังควบแน่นจะเกิดการควบแน่นเป็นผลให้ความดันภายในถังควบแน่นลดลงต่ำกว่าความดันบรรยากาศ ดังนั้นน้ำจากแหล่งภายนอกจึงถูกความดันบรรยากาศดันขึ้นสู่ถัง โดยหลักการนี้ก็จะสามารถสูบน้ำและจ่ายน้ำได้ งานวิจัยนี้จะพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ระบบสูบน้ำรังสีแสงอาทิตย์ที่ใช้เทคนิคซาเวรี โดยการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายการทำงานของระบบที่ใช้ตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบและตัวรับรังสีแบบท่อสูญญากาศ พร้อมทั้งเปรียบเทียบผลที่ได้กับการทดลองเก็บข้อมูลจริง และทำการจำลองการทำงานของระบบตลอดทั้งปีในจังหวัดเชียงใหม่

2.1 การคำนวณรังสีแสงอาทิตย์

ในการคำนวณรังสีแสงอาทิตย์นั้นเวลาที่ใช้ในการคำนวณจะเป็นค่าเวลาสุริยะ (Solar time) ซึ่งมีค่าแตกต่างจากเวลามาตรฐานท้องถิ่น (Standard time) ทั้งนี้เนื่องจากเหตุผลหลักสองประการ ประการแรกคือ ความแตกต่างของลองจิจูด (Longitude) ที่ใช้คำนวณเวลามาตรฐานท้องถิ่นกับเส้นลองจิจูดของเมริเดียนของตำแหน่งที่ต้องการพิจารณา ประการที่สอง เนื่องจากวงโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์มีค่าแตกต่างกับไปทั้งปีจึงทำให้เวลามาตรฐานท้องถิ่นและเวลาสุริยะแตกต่างกัน ซึ่งจะมีค่าชดเชยที่เรียกว่าสมการเวลา (Equation of time, E) และความสัมพันธ์ระหว่างเวลาสุริยะและเวลามาตรฐานท้องถิ่นจะสามารถคำนวณได้จากสมการที่รวบรวมโดย Duffie and Beckman (1980) ดังนี้

$$\text{Solar time} - \text{Standard time} = 4(L_{st} - L_{loc}) + E, \text{ min} \quad (2.1)$$

$$E = 9.87 \sin 2B - 7.53 \cos B - 1.5 \sin B, \text{ min} \quad (2.2)$$

$$B = \frac{360(n-8)}{364} \quad (2.3)$$

E คือสมการเวลา n คือวันที่ของปี L_{st} คือตำแหน่งเส้นลองจิจูดที่ใช้คำนวณเวลามาตรฐานท้องถิ่นและ L_{loc} คือตำแหน่งเส้นลองจิจูดของบริเวณที่พิจารณา

ค่ารังสีแสงอาทิตย์เมื่ออยู่นอกชั้นบรรยากาศของโลกในแต่ละวันจากพระอาทิตย์ขึ้นจนถึงพระอาทิตย์ตกสามารถคำนวณได้จากสมการที่รวบรวมโดย Duffie and Beckman (1980) ดังนี้

$$H_o = \frac{24 \times 3600}{\pi} G_{sc} \left[1 + 0.033 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right] \left[\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{2\pi\omega_s}{360} \sin \phi \sin \delta \right] \quad (2.4)$$

$$\cos \omega_s = -\frac{\sin \phi \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta} = -\tan \phi \tan \delta \quad (2.5)$$

$$\delta = 23.45 \sin \left(\frac{284 + n}{365} \right) \quad (2.6)$$

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega \\ & + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \end{aligned} \quad (2.7)$$

H_o คือค่ารังสีแสงอาทิตย์เมื่ออยู่นอกชั้นบรรยากาศของโลก G_{sc} คือค่าคงที่สุริยะซึ่งมีค่าประมาณ 1353 วัตต์ต่อตารางเมตร n คือวันที่ของปี ϕ คือมุมละติจูด ω คือมุมชั่วโมง (hour angle) กำหนดเป็น 15 องศาในแต่ละ 1 ชั่วโมง ที่เที่ยงสุริยะเป็นศูนย์ ในตอนเช้ามีค่าเป็นลบ และในตอนบ่ายมีค่าเป็นบวก ω_s คือมุมชั่วโมงที่พระอาทิตย์ตกดิน (Sunset hour angle) ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อมุมตกกระทบระหว่างค่ารังสีตรงกับ พื้นในแนวระดับ β คือมุมเอียงของระนาบที่พิจารณาจากพื้นที่ในแนวระดับ γ คือมุมอะซิมูท (Azimuth angle) ของระนาบเอียงมีค่าเป็นศูนย์ในทิศใต้ มีค่าเป็นลบในทิศตะวันออก และมีค่าเป็นบวกในทิศตะวันตก δ คือมุมระหว่างตำแหน่งของดวงอาทิตย์ที่เที่ยงสุริยะกระทำกับระนาบเอียงหรือเรียกมุมดังกล่าวว่า มุมเดคลิเนชัน (Declination angle) และ θ คือมุมตกกระทบระหว่างค่ารังสีตรงกับพื้นที่ในแนวระดับ

ค่ารังสีกระจายเฉลี่ยสำหรับประเทศไทยจะพิจารณาค่ารังสีแสงอาทิตย์รายวันที่เฉลี่ยในแต่ละเดือนจากข้อมูลทางสถิติของประเทศไทย ซึ่งค่ารังสีกระจายเฉลี่ยจะคำนวณได้จากสมการที่รวบรวมโดย Naris Pratinthong (1996) ดังนี้

$$\frac{H_d}{H} = -4.6408 + 26.5495 \left(\frac{H}{H_0} \right) - 28.3422 \left(\frac{H}{H_0} \right)^2 - 31.4546 \left(\frac{H}{H_0} \right)^3 + 46.4421 \left(\frac{H}{H_0} \right)^4 \quad (2.8)$$

โดยที่ H_d คือค่ารังสีกระจายรวมรายวันเฉลี่ย H_0 คือค่ารังสีแสงอาทิตย์รวมรายวันที่นอกชั้นบรรยากาศและ H คือค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ย ซึ่งค่าอัตราส่วนของรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อค่ารังสีรวมรายวันที่นอกชั้นบรรยากาศของโลกเรียกว่าดัชนีความใสรายวัน (Daily clearness index)

ตาราง 2.1 วันที่ที่เป็นตัวแทนของแต่ละเดือน(กำหนดวันที่ค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่นอกบรรยากาศของโลกมีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยของค่ารังสีดังกล่าวเฉลี่ยตลอดเดือน)

เดือน	วันที่	วันที่ของเดือน (n)
มกราคม	17	17
กุมภาพันธ์	16	47
มีนาคม	16	75
เมษายน	15	105
พฤษภาคม	15	135
มิถุนายน	11	162
กรกฎาคม	17	198
สิงหาคม	16	228
กันยายน	15	258
ตุลาคม	15	288
พฤศจิกายน	14	318
ธันวาคม	10	344

ที่มา: Naris Pratinthong (1996)

ค่ารังสีแสงอาทิตย์รายชั่วโมงสามารถคำนวณได้โดยกำหนดค่าอัตราส่วนรังสีรวมรายชั่วโมงต่อรังสีรวมรายวันดังนี้

$$r_t = \frac{I}{H} \quad (2.9)$$

$$r_t = \frac{\pi}{24} (a + b \cos \omega) \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \left(\frac{2\pi\omega_s}{360} \right) \cos \omega_s} \quad (2.10)$$

โดยที่ $a = a_1 + a_2 \sin(\omega_s - 60)$ (2.11)

$$b = b_1 + b_2 \sin(\omega_s - 60) \quad (2.12)$$

1 คือค่ารังสีแสงอาทิตย์รายชั่วโมง H คือค่ารังสีรวมรายวัน ω คือมุมชั่วโมง (Hour angle) กำหนดเป็น 15 องศาในแต่ละ 1 ชั่วโมง ที่เที่ยงสุริยะเป็นศูนย์ ในตอนเช้ามีค่าเป็นลบ และในตอนบ่ายมีค่าเป็นบวก ω_s คือมุมชั่วโมงที่พระอาทิตย์ตกดิน (Sunset hour angle) ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อมุมตกกระทบระหว่างค่ารังสีตรงกับ พื้นในแนวระดับ a_1 a_2 b_1 และ b_2 ที่สถานีต่าง ๆ ของประเทศไทย แสดงในตาราง 2.2

ตาราง 2.2 ค่าสัมประสิทธิ์ a_1 a_2 b_1 และ b_2 ของสถานีต่าง ๆ ในประเทศไทย

สถานี	a_1	a_2	b_1	b_2
KMITT	0.792	-0.250	0.189	0.471
เชียงใหม่	0.514	0.228	0.512	0.033
อุบลราชธานี	0.760	-0.031	0.207	0.238
หาดใหญ่	0.307	-0.124	0.417	0.007

ที่มา: Naris Pratinthong (1996)

ค่ารังสีกระจายรายชั่วโมงคำนวณได้โดยกำหนดค่าอัตราส่วนของรังสีกระจายรายชั่วโมงต่อค่ารังสีกระจายรายวันดังนี้

$$r_d = \frac{I_d}{H_d} \quad (2.13)$$

$$r_d = \frac{\pi}{24} \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \left(\frac{2\pi\omega_s}{360} \right) \cos \omega_s} \quad (2.14)$$

ดังนั้นเราจะได้อำนาจรังสีตรงรายชั่วโมงดังนี้

$$I_b = I - I_d \quad (2.15)$$

I_b คืออำนาจรังสีตรงรายชั่วโมง H_d คืออำนาจรังสีกระจายรายวันและ I_d คืออำนาจรังสีกระจายรายชั่วโมง I คืออำนาจรังสีแสงอาทิตย์รวมรายชั่วโมง

สำหรับตัวรับรังสีที่วางเอียงเพื่อรับรังสี จะต้องคำนวณอำนาจรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกบนระนาบเอียงโดยอำนาจรังสีแสงอาทิตย์บนระนาบเอียงจะประกอบด้วยอำนาจรังสีตรง รังสีกระจายและรังสีแสงอาทิตย์ที่สะท้อนมาจากสิ่งแวดล้อม ซึ่งสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$I_T = I_b R_b + I_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + (I_b + I_d) \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \rho \quad (2.16)$$

โดยที่

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (2.17)$$

$$\cos \theta_z = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta \quad (2.18)$$

I_T คืออำนาจรังสีแสงอาทิตย์รายชั่วโมงบนระนาบเอียง I_b คืออำนาจรังสีตรงรายชั่วโมง I_d คืออำนาจรังสีกระจายรายชั่วโมง β คือมุมที่ตัวรับรังสีเอียงทำมุมกับแนวระดับ θ คือมุมตกกระทบระหว่างอำนาจรังสีตรงกับพื้นในระนาบเอียง θ_z คือมุมตกกระทบระหว่างอำนาจรังสีตรงกับพื้นในแนวระดับและ ρ คือแฟกเตอร์ของรังสีแสงอาทิตย์ที่สะท้อนมาจากสิ่งแวดล้อม

2.2 ความร้อนสูญเสียที่ตัวรับรังสีแสงอาทิตย์

เมื่อรังสีแสงอาทิตย์ตกกระทบบนตัวรับรังสีความร้อนจากตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ส่วนหนึ่งจะถ่ายเทไปสู่ของไหลภายในตัวรับรังสีและทำให้ของไหลร้อนขึ้น ความร้อนอีกส่วนหนึ่งจะสูญเสียสู่สิ่งแวดล้อมทั้งด้านบนและด้านล่างของตัวรับรังสี ซึ่งค่าความร้อนสูญเสีย (Q_{loss}) จากตัวรับรังสีแสงอาทิตย์สามารถคำนวณได้จากสมการของ Duffie and Beckman (1980) ดังนี้

$$Q_{loss} = U_L A_c (T_c - T_a) \quad (2.19)$$

A_c คือพื้นที่รับรังสีแสงอาทิตย์ของตัวรับรังสี U_L คือสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนจาก
ผิวดูดรังสีสู่สิ่งแวดล้อม T_c คืออุณหภูมิเฉลี่ยของผิวดูดรังสี T_a คืออุณหภูมิสิ่งแวดล้อม

สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวม (U_L) คำนวณได้จากสมการของ Hsieh (1968)
ดังนี้

$$U_L = U_{top} + U_{bottom} \quad (2.20)$$

ค่า U_{top} คือค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนจากด้านบนของตัวรับรังสีและ U_{bottom} คือค่า
สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนจากด้านล่างของตัวรับรังสี สามารถคำนวณได้จากสมการที่
Hsieh (1968) รวบรวมไว้ดังนี้

$$U_{top} = \left[\frac{N}{\frac{A}{T_p} \left(\frac{T_p - T_a}{N+B} \right)^{0.33}} + \frac{1}{h_w} \right]^{-1} + \frac{\sigma(T_p - T_a)(T_p^2 - T_a^2)}{\left[\epsilon_p + 0.05N(1 - \epsilon_p) \right]^{-1} + \left(\frac{2N+B-1}{\epsilon_g} \right) - N} \quad (2.21)$$

$$U_{bottom} = \frac{K_{ins}}{l_{ins}} \quad (2.22)$$

เมื่อ

$$A = 250[1 - 0.0044(S - 90)] \quad (2.23)$$

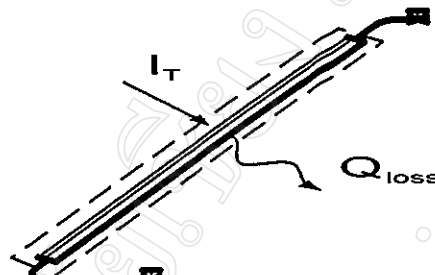
$$B = (1 - 0.04h_w + 0.0005h_w^2)(1 + 0.091N) \quad (2.24)$$

$$h_w = 2.8 + 3.0v \quad (2.25)$$

N คือจำนวนของชั้นกระจกที่ตัวรับรังสี T_p คืออุณหภูมิที่ผิวรับรังสี T_a คืออุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ϵ_p คือ Emissivity ของแผ่นดูดกลืน ϵ_g คือ Emissivity ของแผ่นกระจก S คือมุมเอียงของตัว
รับรังสี h_w คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเนื่องจากลม K_{ins} คือค่าสภาพนำความร้อนของ
ฉนวน l_{ins} คือความหนาของฉนวน v คือความเร็วลม และ σ คือค่าคงที่ของ Stefan-Boltzmann ซึ่ง
มีค่าเท่ากับ $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$

2.3 อุณหภูมิแต่ละช่วงเวลาของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ

ในขณะที่ความร้อนถูกถ่ายเทไปสู่ของไหลภายในตัวรับรังสี โดยอุณหภูมิของของไหลจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงขึ้นอยู่กับปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกบนตัวรับรังสีและอุณหภูมิเริ่มต้นของตัวรับรังสี การคำนวณอุณหภูมิสุดท้ายแต่ละช่วงเวลาที่ยาวนานของตัวรับรังสี สามารถพัฒนาได้จากสมการของ Duffie and Beckman (1980) โดยพิจารณาปริมาณความร้อนที่ตัวรับรังสีดังรูป 2.1



รูป 2.1 แสดงการควบคุมปริมาณที่ตัวรับรังสี

โดยการสมดุลพลังงานที่ตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ พลังงานที่ตัวรับรังสีได้รับจะมีค่าเท่ากับความร้อนที่สูญเสียจากตัวรับรังสีแสงอาทิตย์รวมกับพลังงานสะสมภายในตัวรับรังสี ในกรณีของไหลไม่เปลี่ยนเฟสซึ่งเขียนสมการได้ดังนี้

$$I_T A_c (\tau \alpha) = U_L A_c (T_c - T_a) + (m C_p)_c \frac{dT}{dt} \quad (2.26)$$

การคำนวณอุณหภูมิสุดท้ายแต่ละช่วงเวลาที่ยาวนานของตัวรับรังสีจากสมการ(2.26) สามารถจัดเรียงใหม่ในรูปของสมการเชิงเลข (Numerical form) ได้ดังนี้

$$T_{p2} = T_{p1} + \frac{A_c \Delta t}{(m C_p)_c} [I_T (\tau \alpha) - U_L (T_{p1} - T_a)] \quad (2.27)$$

เมื่อ T_{p1} คืออุณหภูมิเริ่มต้นในช่วงเวลาที่คำนวณ T_{p2} คืออุณหภูมิสุดท้ายในช่วงเวลาที่คำนวณ A_c คือพื้นที่รับรังสีแสงอาทิตย์ของตัวรับรังสี Δt คือช่วงเวลาที่พิจารณา $(m C_p)_c$ คือผลคูณระหว่างมวลกับค่าความจุความร้อนของท่อ ฝวดูดกลืนรังสี และของไหลภายในตัวรับรังสี I_T คือปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ τ คือค่าการส่งผ่านของแผ่นกระจก α คือค่าดูดกลืนของแผ่นดูดกลืน

T_u คืออุณหภูมิสิ่งแวดล้อม และ U_u คือสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวม โดยการคำนวณจะใช้ อุณหภูมิสุดท้ายในช่วงเวลาที่คำนวณเป็นอุณหภูมิเริ่มต้นในการคำนวณของช่วงเวลาถัดไป

2.4 ความดันในตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ

ความร้อนที่ผิวดูดกลืนได้รับจากรังสีแสงอาทิตย์ จะถูกถ่ายเทสู่ของไหลภายในท่อและทำให้ของไหลมีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นหรือลดลงนั้นจะส่งผลให้ความดันภายในตัวรับรังสีเปลี่ยนแปลงด้วย กล่าวคือความดันภายในตัวรับรังสีจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของของไหลภายในตัวรับรังสี โดยระบบที่ศึกษาใช้ตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบและใช้น้ำเป็นของไหลทำงาน ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ผิวดูดกลืนและความดันภายในตัวรับรังสีสามารถพัฒนาได้จากสมการของแมกซ์เวลล์ (Maxwell equation) ดังนี้

$$\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v = \left(\frac{\partial s}{\partial v}\right)_T \quad (2.28)$$

จากสมการ (2.28) สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความดันภายในตัวรับรังสีได้ดังนี้

$$du = Tds - Pd v \quad (2.29)$$

ที่อุณหภูมิกคงที่ $du \approx 0 (du = C_v dT)$

$$Pd v = Tds \quad (2.30)$$

$$\left(\frac{ds}{dv}\right)_T = \frac{P}{T} \quad (2.31)$$

$$\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v = \frac{P}{T} \quad (2.32)$$

$$\int_1^2 \frac{1}{P} dP = \int_1^2 \frac{1}{T} dT \quad (2.33)$$

$$\ln \frac{P_2}{P_1} = \ln \frac{T_2}{T_1} \quad (2.34)$$

$$\text{ดังนั้น} \quad \frac{P_2}{P_1} = \frac{T_2}{T_1}, T \text{ in K} \quad (2.35)$$

จากการทดลองพบว่า สามารถปรับปรุงความสัมพันธ์ดังกล่าวเนื่องจากการสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมเพื่อให้ผลการคำนวณใช้ได้กับระบบที่ศึกษาดังนี้

$$\left(\frac{P_{c2}}{P_{c1}} \right)^\gamma = \left(\frac{T_{p2}}{T_{p1}} \right) \quad (2.36)$$

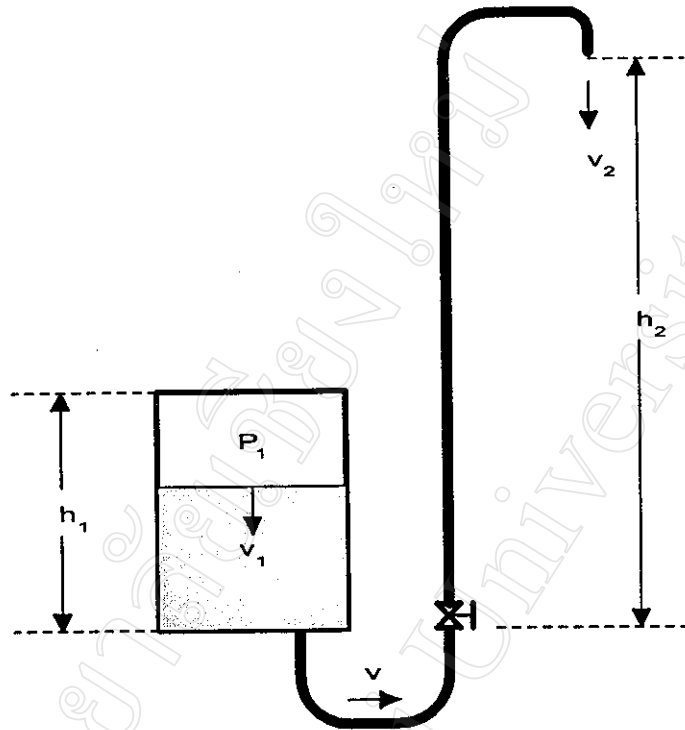
โดย γ เป็นค่าความสัมพันธ์ที่หาได้จากการทดลองดังนี้

$$\gamma = 352.93 \left(\log \left(\frac{T_{p2}}{T_{p1}} \right) \right)^2 + 5.3232 \left(\log \left(\frac{T_{p2}}{T_{p1}} \right) \right) + 0.0516 \quad (2.37)$$

T_{p1} คืออุณหภูมิเริ่มต้นในช่วงเวลาที่คำนวณ T_{p2} คืออุณหภูมิสุดท้ายในช่วงเวลาที่คำนวณ P_{c1} คือความดันเริ่มต้นภายในตัวรับรังสีในช่วงเวลาที่คำนวณ P_{c2} คือความดันสุดท้ายภายในตัวรับรังสีในช่วงเวลาที่คำนวณ

2.5 การคำนวณปริมาณน้ำช่วงจ่าย

ปริมาณน้ำในช่วงจ่ายสามารถพัฒนาได้จากสมการการไหลไม่คงตัวของเบอร์นูลลี (Unsteady flow Bernoulli's equation) โดยการไหลไม่คงตัวนั้นจะพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำภายในถัง การเปลี่ยนแปลงความดันที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง และการเปลี่ยนแปลงความเร็วภายในท่อ ซึ่งค่าต่าง ๆ ที่กล่าวมาจะเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องขึ้นกับเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป โดยปริมาณน้ำที่จ่ายจะเท่ากับผลรวมของการคูณอัตราการไหลกับเวลาในช่วงสั้นๆ ที่พิจารณาดังแต่เริ่มต้นจนกระทั่งความเร็วของการไหลลดลงเข้าใกล้หรือเท่ากับศูนย์



รูป 2.2 แสดงตำแหน่งต่าง ๆ ในช่วงจ่ายน้ำ

จากสมการการไหลไม่คงตัวของเบอร์นูลลี (Unsteady flow Bernoulli's equation) สำหรับของไหลอัดตัวไม่ได้ (Incompressible fluid) พิจารณารูป 2.2 จะได้

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + h_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + h_2 + h_L + \frac{L}{g} \frac{dv}{dt} \quad (2.38)$$

$$\left(\frac{P_1}{\rho g} + h_1 \right) + \frac{v_1^2}{2g} - \left(\frac{P_2}{\rho g} + h_2 \right) - \frac{v_2^2}{2g} - h_L = \frac{L}{g} \frac{dv}{dt} \quad (2.39)$$

จากสมการความต่อเนื่อง (Continuity equation)

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad (2.40)$$

$$v_2 = v \quad (2.41)$$

v คือความเร็วของน้ำภายในท่อขณะจ่ายน้ำ

เนื่องจากขนาดถึงมีขนาดใหญ่มากเมื่อเทียบกับท่อจ่ายน้ำ ดังนั้น

$$v_1 = \frac{A_2 v_2}{A_1} \approx 0 \quad (2.42)$$

$$h_L = \left(f \frac{L}{D} + \sum K \right) \frac{v^2}{2g} \quad (2.43)$$

กำหนดให้ความดัน p_1 และความสูง h_1 เปลี่ยนแปลงลดลงตามเวลาแบบเอกซโพเนนเชียล
จะได้สมการ

$$\left(\frac{p_1}{\rho g} + h_1 \right) e^{-at} - \left(\frac{p_2}{\rho g} + h_2 \right) - \frac{v_1^2}{2g} - \left(f \frac{L}{D} + \sum K \right) \frac{v^2}{2g} = \frac{L}{g} \frac{dv}{dt} \quad (2.44)$$

ดังนั้นสามารถหาค่าความเร็วของน้ำที่ไหลออกจากถังด้วยการแก้สมการแบบเชิงเลข
โดยคิดการไหลในช่วงเวลาสั้น ๆ Δt จะได้

$$v_f = v_i + \left[\left(\frac{p_1}{\rho g} + h_1 \right) e^{-at} - \left(\frac{p_2}{\rho g} + h_2 \right) - \frac{v_i^2}{2g} - \left(f \frac{L}{D} + \sum K \right) \frac{v_i^2}{2g} \right] \frac{g}{L} \Delta t \quad (2.45)$$

เมื่อ P_2 คือความดันบรรยากาศ P_1 คือความดันที่ใช้สำหรับดันน้ำออก L คือความยาวของ
ท่อ D คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ ρ คือความหนาแน่นของน้ำ

คำนวณ v_f โดยที่ $t_f = t_i + \Delta t$ จนกระทั่ง v เข้าใกล้ศูนย์ และจะสามารถหาค่าปริมาณน้ำที่
จ่ายได้ดังนี้

$$\text{Volume} = \sum A v_f \Delta t \quad (2.46)$$

ความดันที่ใช้ดันน้ำในช่วงจ่ายนั้นพบว่าจะลดลงจากความดันที่กำหนดไว้โดยความดันที่
ลดลงนั้นจะมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่ตัวรับรังสีขณะทำการเปิดวาล์วเพื่อให้ไอน้ำเข้าไปดันน้ำภายใน
ถังควบแน่น ซึ่งสามารถหาความสัมพันธ์ดังกล่าวได้จากการทดลองดังนี้

$$\ln(\Delta P) = (a_1 + b_1 P_{set} + c_1 P_{set}^2) + (a_2 - b_2 P_{set} + c_2 P_{set}^2) T + (a_3 + b_3 P_{set} + c_3 P_{set}^2) T^2 \quad (2.47)$$

เมื่อ

$$a_1 = 22.312, b_1 = -0.0776, c_1 = 0.0089$$

$$a_2 = -0.0859, b_2 = 0.0011, c_2 = -4 \times 10^{-5}$$

$$a_3 = 0, b_3 = 0, c_3 = 6 \times 10^{-5}$$

นั่นคือ

$$P_i = P_{set} - \Delta P \quad (2.48)$$

T คืออุณหภูมิผิวชุดกลั่นขณะทำการเปิดวาล์ว P_i คือความดันที่ใช้สำหรับดันน้ำออก P_{set} คือความดันในตัวรับรังสีที่กำหนดสำหรับการทดลองก่อนเปิดวาล์วให้ไอน้ำเข้าไปดันน้ำออกจากถังความดัน และ ΔP คือความดันที่ลดลงหลังจากทำการเปิดวาล์ว

สำหรับระบบสูบน้ำรังสีแสงอาทิตย์แบบพาเวรี ความดัน P_i จะต้องมากกว่าความดันบรรยากาศรวมกับความดันที่เกิดจากความสูงทางด้ายจึงจะสามารถดันน้ำออกจากถังความดันได้ จากการทดลองพบว่าความดันดังกล่าวมีความสัมพันธ์กับความสูงทางด้าย ดังนี้

$$P_s = 1.5h_d + 14.7 \quad (2.49)$$

โดยที่ P_s คือความดันต่ำสุดที่จะสามารถจ่ายน้ำได้ h_d คือความสูงทางด้ายของระบบ

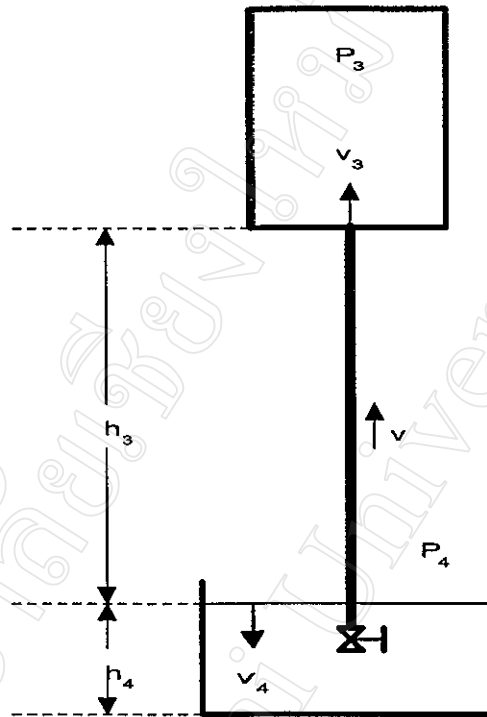
2.6 การคำนวณความดันที่ลดลงในถังควบแน่น

ไอน้ำที่เข้าไปดันน้ำและแทนที่น้ำภายในถังควบแน่นจะเกิดการควบแน่นโดยการระบายความร้อนด้วยอากาศเป็นผลให้ความดันภายในถังลดลงต่ำกว่าความดันบรรยากาศ ซึ่งค่าความดันที่ลดลงนั้นจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณไอน้ำที่เข้าไปแทนที่น้ำภายในถังควบแน่น ดังนั้นค่าความดันภายในถังควบแน่นจะขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำที่จ่ายออกโดยความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถหาได้จากการทดลองดังนี้

$$P_i = -4.0573 \ln(V_d) + 39.367 \quad (2.50)$$

โดยที่ P_i คือความดันที่ลดลงภายในถังควบแน่น และ V_d คือปริมาณน้ำในช่วงจ่าย

2.7 การคำนวณปริมาณน้ำช่วงดูด



รูป 2.3 แสดงตำแหน่งต่าง ๆ ในช่วงสูบน้ำ

การคำนวณปริมาณน้ำในช่วงดูดสามารถทำได้ในลักษณะเดียวกันกับการคำนวณปริมาณน้ำในช่วงจ่าย การพิจารณาจะพิจารณาการไหลเป็นแบบไม่คงตัวโดยปริมาณน้ำช่วงดูดจะเท่ากับผลรวมของการคูณอัตราการไหลกับเวลาในช่วงสั้นๆ ที่พิจารณาตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งความเร็วของการไหลลดลงเข้าใกล้หรือเท่ากับศูนย์

จากสมการการไหลไม่คงตัวของเบอร์นูลลี (Unsteady flow Bernoulli's equation) สำหรับของไหลอัดตัวไม่ได้ (Incompressible liquid) พิจารณารูป 2.3 จะได้

$$\frac{P_4}{\rho g} + \frac{v_4^2}{2g} + h_4 = \frac{P_3}{\rho g} + \frac{v_3^2}{2g} + h_3 + h_L + \frac{L}{g} \frac{dv}{dt} \quad (2.51)$$

$$\frac{P_4}{\rho g} + \frac{v_4^2}{2g} + h_4 - \frac{P_3}{\rho g} - h_3 - \frac{v_3^2}{2g} - h_L = \frac{L}{g} \frac{dv}{dt} \quad (2.52)$$

จากสมการความต่อเนื่อง (Continuity equation)

$$A_4 v_4 = A_3 v_3 \quad (2.53)$$

$$v_3 = v \quad (2.54)$$

v คือความเร็วของน้ำภายในท่อขณะสูบน้ำ

เนื่องจากขนาดถังบรรจุน้ำข้างล่างมีขนาดใหญ่ หมายความว่าเทียบกับท่อสูบน้ำ ดังนั้น

$$v_4 = \frac{A_3 v_3}{A_4} \approx 0 \quad (2.55)$$

$$h_L = \left(f \frac{L}{D} + \sum K \right) \frac{v^2}{2g} \quad (2.56)$$

กำหนดให้ความดัน p_3 และความสูง h_3 เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นตามเวลาแบบเอกซ์โปเนนเชียล และ h_4 เท่ากับศูนย์ จะได้สมการ

$$\frac{p_4}{\rho g} - \left(\frac{p_3}{\rho g} + h_3 \right) e^{\alpha} - \frac{v^2}{2g} - \left(f \frac{L}{D} + \sum K \right) \frac{v^2}{2g} = \frac{L}{g} \frac{dv}{dt} \quad (2.57)$$

ดังนั้นสามารถหาค่าความเร็วของน้ำที่ไหลออกจากถังด้วยการแก้สมการแบบเชิงเลข โดยคิดการไหลในช่วงเวลาสั้น ๆ Δt จะได้

$$v_f = v_i + \left[\frac{p_4}{\rho g} - \left(\frac{p_3}{\rho g} + h_3 \right) e^{\alpha_f} - \frac{v_i^2}{2g} - \left(f \frac{L}{D} + \sum K \right) \frac{v_i^2}{2g} \right] \frac{g}{L} \Delta t \quad (2.58)$$

เมื่อ p_4 คือความดันบรรยากาศ p_3 คือความดันที่ใช้ในสำหรับสูบน้ำ L คือความยาวของท่อ D คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ ρ คือความหนาแน่นของน้ำ

คำนวณ v_f โดยที่ $t_f = t_i + \Delta t$ จนกระทั่ง v เข้าใกล้ศูนย์ และจะสามารถหาค่าปริมาณน้ำที่ดูดได้ดังนี้

$$\text{Volume} = \sum A v_f \Delta t \quad (2.59)$$

2.8 การคำนวณปริมาณน้ำที่เติมเข้าสู่ตัวรับรังสี

ปริมาณน้ำที่เติมกลับเข้าสู่ตัวรับรังสีนั้นจะมีปริมาณมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับภาระกลายเป็นไอของน้ำเพื่อเข้าไปแทนที่น้ำภายในถังควบแน่น นั่นก็คือน้ำที่ถูกลดแทนที่กับปริมาณน้ำที่เติมเข้าสู่ตัวรับรังสีจะมีความสัมพันธ์กัน โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถหาได้จากการทดลองดังนี้

$$V_{in} = 0.1746 V_d + 589.02 \quad (2.60)$$

เมื่อทำการเติมน้ำเข้าสู่ตัวรับรังสีไอน้ำบางส่วนจากตัวรับรังสีจะเข้าไปแทนที่น้ำในถังควบแน่นที่เข้าไปเติมในตัวรับรังสี ซึ่งไอน้ำในส่วนนี้จะควบแน่นและสามารถสูบน้ำขึ้นสู่ถังได้อีก โดยปริมาณน้ำที่สูบได้ในแต่ละครั้งจะมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับปริมาณน้ำที่เติมเข้าสู่ตัวรับรังสี

2.9 การคำนวณอุณหภูมิภายในตัวรับรังสีที่ลดลงหลังจากเติมน้ำ

อุณหภูมิภายในตัวรับรังสีที่ลดลงหลังจากเติมน้ำหาได้โดยพิจารณาน้ำที่เติมเข้าสู่ตัวรับรังสีจะได้รับความร้อนจากแผ่นดูดกลืนรังสี ท่อทองแดงและปริมาณน้ำที่อยู่ภายในตัวรับรังสี ดังนั้นอุณหภูมิภายในตัวรับรังสีที่ลดลงจะหาได้จากสมการดังนี้

$$Q_p + Q_{wc} + Q_{cu} = Q_w \quad (2.61)$$

$$Q_p = (mC_p)_p (T_{pi} - T_{pf}) \quad (2.62)$$

$$Q_{wc} = (mC_p)_{wc} (T_{wci} - T_{wcf}) \quad (2.63)$$

$$Q_{cu} = (mC_p)_{cu} (T_{cui} - T_{cuf}) \quad (2.64)$$

$$Q_w = (mC_p)_w (T_{wi} - T_{wrf}) \quad (2.65)$$

$$\text{เมื่อ } T_{pi} - T_{pf} \cong T_{wci} - T_{wcf} \cong T_{cui} - T_{cuf}$$

$$T_{pf} = \frac{[(mC_p)_p + (mC_p)_{wc} + (mC_p)_{cu}]T_{pi} + (mC_p)_w T_{wi}}{(mC_p)_p + (mC_p)_{wc} + (mC_p)_{cu} + (mC_p)_w} \quad (2.66)$$

Q_p คือค่าความร้อนที่ผิวผูดกลืนรังสีแสงอาทิตย์ Q_{wc} คือค่าความร้อนของน้ำที่เหลือภายในตัวรับรังสี Q_{cu} คือค่าความร้อนของท่อทองแดง Q_w คือค่าความร้อนของน้ำที่เดิมเข้าสู่ตัวรับรังสี T_{pi} คืออุณหภูมิที่ผิวผูดกลืนเริ่มต้น T_{pf} คืออุณหภูมิที่ผิวผูดกลืนสุดท้าย T_{wci} คืออุณหภูมิน้ำที่เหลือภายในตัวรับรังสีเริ่มต้น T_{wcf} คืออุณหภูมิน้ำที่เหลือภายในตัวรับรังสีสุดท้าย T_{cui} คืออุณหภูมิท่อทองแดงเริ่มต้น T_{cuf} คืออุณหภูมิท่อทองแดงสุดท้าย T_{wi} คืออุณหภูมิน้ำที่เดิมเข้าสู่ตัวรับรังสีเริ่มต้น T_{wrf} คืออุณหภูมิน้ำที่เดิมเข้าสู่ตัวรับรังสีสุดท้าย

หลังจากเติมน้ำเข้าไปจะพิจารณาให้ของไหลภายในตัวรับรังสีอยู่ในสภาวะอิ่มตัว ดังนั้นความดันภายในตัวรับรังสีที่ลดลงหลังจากเติมน้ำสามารถหาได้จากสมการของ ASHRAE Fundamental Handbook 1993 ดังนี้

$$\ln(P) = \frac{C_1}{T} + C_2 + C_3 T + C_4 T^2 + C_5 T^3 + C_6 \ln(T) \quad (2.67)$$

โดยที่

$$C_1 = -5.8002206 \times 10^3$$

$$C_2 = -5.5162560 \times 10^0$$

$$C_3 = -4.8640239 \times 10^{-2}$$

$$C_4 = 4.1764768 \times 10^{-5}$$

$$C_5 = -1.4452093 \times 10^{-8}$$

$$C_6 = 6.5459673$$

2.10 อุณหภูมิแต่ละช่วงเวลาของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศ

การทำงานของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศนั้น สารทำงานจะไม่อยู่ตรงส่วนรับรังสีแสงอาทิตย์ของตัวรับรังสีโดยตรง เมื่อรังสีแสงอาทิตย์ตกบนตัวรับรังสีความร้อนจะถูกถ่ายเทในลักษณะการทำงานเป็น Heat pipe และถ่ายเทความร้อนสู่สารทำงานอีกต่อหนึ่ง โดยความร้อนที่สารทำงานได้รับแสดงดังสมการดังนี้

$$Q_{ui} = m \frac{du}{dt} \quad (2.68)$$

จากการทดลองพบว่าความแห้งของไอน้ำมีค่าน้อยมากดังนั้นพลังงานภายในของน้ำภายในตัวรับรังสีจึงมีค่าใกล้เคียงกับค่าพลังงานภายในในสถานะเฟสของของเหลว

$$Q_{u1} = m \frac{du}{dt} \approx m \frac{du_f}{dt} = mC \frac{dT}{dt} \quad (2.69)$$

ประสิทธิภาพรวมสำหรับการถ่ายเทความร้อนจากตัวรับรังสีสู่สารทำงานและทำให้สารทำงานมีอุณหภูมิสูงขึ้นสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\eta = \frac{Q_{u1}}{A_c I_T} \quad (2.70)$$

ดังนั้นอุณหภูมิแต่ละช่วงเวลาของสารทำงานภายในตัวรับรังสีสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$T_{c2} = T_{c1} + \frac{\eta A_c I_T \Delta t}{(mC)} \quad (2.71)$$

จากการทดลองจะได้

$$\eta = -1.579 \left(\frac{T_c - T_a}{I_T} \right) + 0.2704 \quad (2.72)$$

เมื่อ T_{c1} คืออุณหภูมิเริ่มต้นในช่วงเวลาที่คำนวณ T_{c2} คืออุณหภูมิสุดท้ายในช่วงเวลาที่คำนวณ A_c คือพื้นที่รับรังสีแสงอาทิตย์ของตัวรับรังสี Δt คือช่วงเวลาที่พิจารณา (mC) คือผลคูณระหว่างมวลกับค่าความจุความร้อนของท่อ และของไหลภายในตัวรับรังสี I_T คือปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ โดยการคำนวณจะใช้อุณหภูมิสุดท้ายในช่วงเวลาที่คำนวณเป็นอุณหภูมิเริ่มต้นในการคำนวณของช่วงเวลาถัดไป

2.11 ความดันภายในตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบทอสุญญากาศ

พิจารณาของไหลภายในตัวรับรังสีอยู่ในสถานะอิ่มตัว ดังนั้นความดันภายในตัวรับรังสีจะความสัมพันธ์กับอุณหภูมิภายในตัวรับรังสี โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถหาได้จากสมการของ ASHRAE Fundamental Handbook 1993 ดังสมการ (2.60)

2.12 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม

อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมจะคำนวณได้จากอุณหภูมิสูงสุดและอุณหภูมิต่ำสุดของวันนั้นๆ ซึ่งสามารถคำนวณจากสมการที่ Naris Pratinthong (1996) รวบรวมไว้ดังนี้

$$T_a(t) = \frac{1}{2} \times \left((T_{\max} + T_{\min}) + (T_{\max} - T_{\min}) \sin\left(\frac{2\pi}{24}t\right) \right) \quad (2.73)$$

$$t = \text{hr} - 9 \quad (2.74)$$

$T_a(t)$ คืออุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ณ เวลา t ที่พิจารณา $T_{\max}$ คืออุณหภูมิสูงสุดของวันที่พิจารณา $T_{\min}$ คืออุณหภูมิต่ำสุดของวันที่พิจารณา

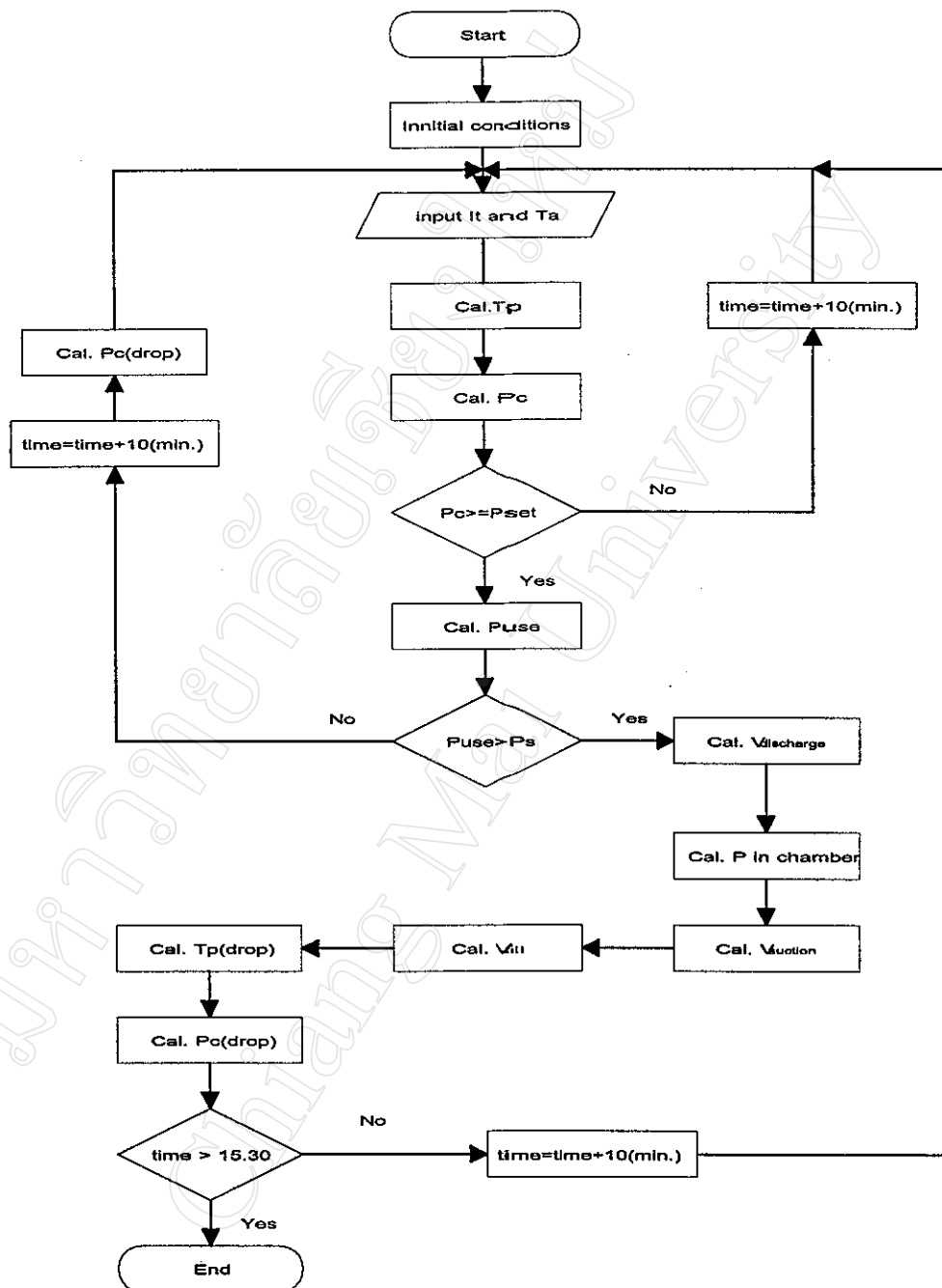
2.13 ประสิทธิภาพของระบบ

ประสิทธิภาพของระบบสูบน้ำแสงอาทิตย์ คืออัตราส่วนของพลังงานที่ได้ออกมาจากระบบกับพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตัวรับรังสีได้รับตลอดช่วงที่ระบบทำงาน โดยสามารถคำนวณได้จากสมการ

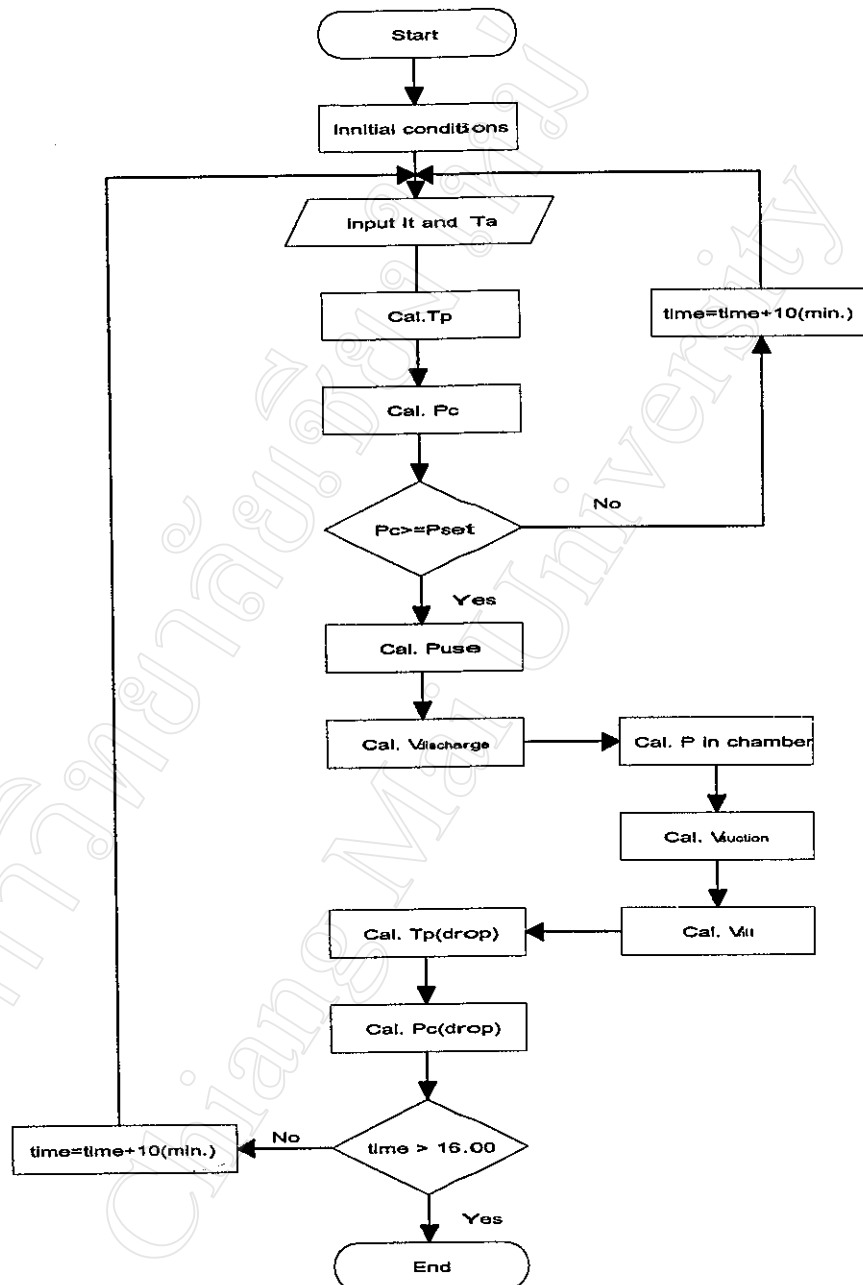
$$\eta_{\text{sys}} = \frac{\rho_w g (h_d V_d + h_s V_s)}{H_T A_c} \quad (2.75)$$

η_{sys} คือประสิทธิภาพของระบบ ρ_w คือความหนาแน่นของน้ำ h_d คือความสูงทางด้านจ่าย V_d คือปริมาณน้ำที่จ่ายตลอดทั้งวัน h_s คือความสูงทางด้านดูด V_s คือปริมาณน้ำที่ดูดได้ตลอดทั้งวัน H_T คือค่ารังสีแสงอาทิตย์รวมตลอดช่วงเวลาที่ระบบทำงาน A_c คือพื้นที่ตัวรับรังสี

รูป 2.5 และ รูป 2.6 แสดงขั้นตอนในการคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบสูบน้ำรังสีแสงอาทิตย์แบบซาเวอรีที่ใช้ตัวรับรังสีแบบแผ่นเรียบ และแบบทอสุญญากาศตามลำดับ



รูป 2.4 แผนผังการคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบสูบน้ำรังสีแสงอาทิตย์ที่ใช้
ตัวรับรังสีแบบแผ่นเรียบ



รูป 2.5 แผนผังการคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบสูบน้ำรังสีแสงอาทิตย์ที่ใช้
ตัวรับรังสีแบบท่อสุญญากาศ