บทที่ 2 หลักการทำงานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการทำงานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในแต่ละขั้นตอนของระบบหมุนเวียนน้ำด้วยพลังงานความร้อน โดยในการออกแบบระบบหมุนเวียนน้ำด้วยพลังงานความร้อน ผู้วิจัยได้ทำการสร้างอุปกรณ์ทดลองแบ่งเป็น 3 ชุด คือ

1. ระบบหมุนเวียนน้ำด้วยพลังงานความร้อนโดยใช้รังสีอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานความร้อน
2. ระบบหมุนเวียนน้ำด้วยพลังงานความร้อนโดยใช้ไฟฟ้าเป็นแหล่งพลังงานความร้อน โดยที่ปริมาตรของถังขับดันน้ำ 4 L
3. ระบบหมุนเวียนน้ำด้วยพลังงานความร้อนโดยใช้ไฟฟ้าเป็นแหล่งพลังงานความร้อน โดยที่ปริมาตรของถังขับดันน้ำ 10 L

2.1 ทฤษฎีของระบบหมุนเวียนน้ำด้วยพลังงานความร้อน โดยใช้กำลังไอน้ำเป็นตัวหมุนเวียนน้ำในระบบ

สมการพลังงาน (Energy equation) เป็นสมการที่ได้จากการใช้หลักการทรงพลังงาน (Principle of conservation of energy) กับของไหลเคลื่อนที่ พลังงานที่เกิดจากของไหลเคลื่อนที่ประกอบด้วยพลังงานจากความดัน ความเร็ว และตำแหน่ง นอกจากนี้แล้วยังอาจมีพลังงานที่เพิ่มให้กับของไหลหรือพลังงานที่สูญเสียเกิดขึ้นอีกด้วย

ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากสมการ Bernoulli's equation กรณีของไหลอัดตัวไม่ได้และมีการสูญเสียพลังงานที่เกิดจากการไหลของของไหล

$$\frac{P_1}{\gamma_w} + Z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma_w} + Z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + loss \qquad (2.1)$$

เมื่อ

P_1	=	ความดันไอภายในระบบสำหรับการหมุนเวียนน้ำ, kPa
γ_w	=	น้ำหนักจำเพาะของน้ำ, N/m^3
Z_1	=	ความสูงที่จุด 1 (ระดับอ้างอิง), m
v_1	=	ความเร็วของของไหลในระบบ (ระดับอ้างอิง), m/s
g	=	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง, 9.81 m/s^2

P_2 = ความดันที่ปลายท่อด้านส่งน้ำ, kPa

Z_2 = ความสูงที่ปลายท่อด้านส่งน้ำ, m

v_2 = ความเร็วที่ปลายท่อด้านส่งน้ำ, m/s

loss = การสูญเสียเนื่องจากเฮดของของไหล, kJ

Z_2-Z_1 = ผลต่างระหว่างความสูงในการส่งน้ำของระบบ, m

โดยที่

$\frac{P_1}{\gamma_w}$ เรียกว่า Pressure head แทนพลังงานความดันต่อหน่วยน้ำหนักของของไหล อันเนื่องมาจากความดันในของไหล

$\frac{v_1^2}{2g}$ เรียกว่า Velocity head แทนพลังงานจลน์ต่อหน่วยน้ำหนักของของไหล อันเนื่องมาจากความเร็วของของไหล

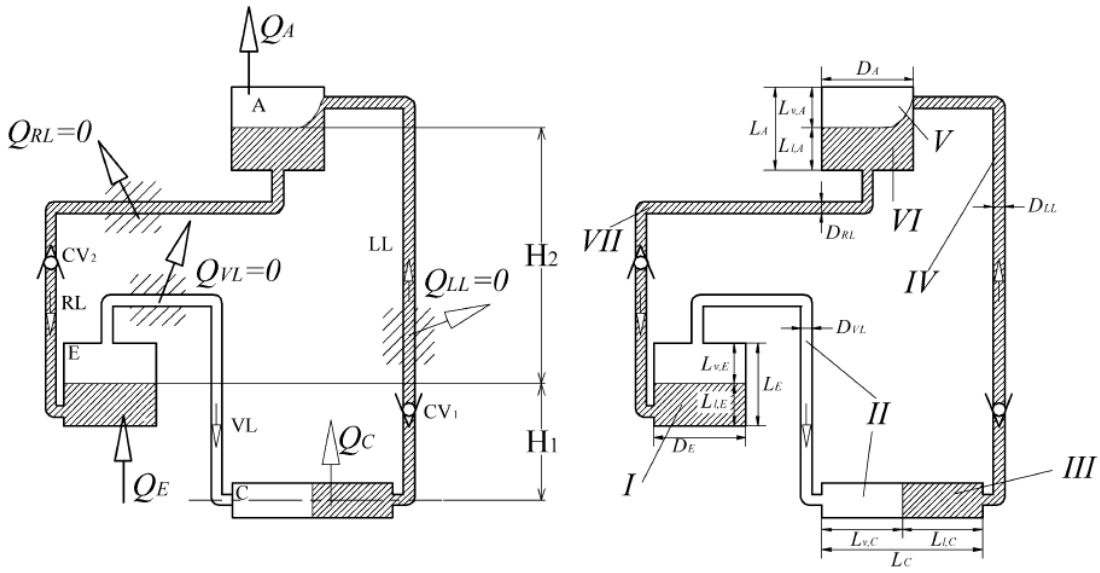
z_1 เรียกว่า Elevation head แทนพลังงานศักย์ต่อหน่วยน้ำหนักของของไหล อันเนื่องมาจากระดับความสูงในด้านส่งน้ำ

ซึ่งการทำงานของระบบหมุนเวียนน้ำด้วยพลังงานความร้อนโดยใช้กำลังไอน้ำเป็นตัวหมุนเวียนน้ำในระบบ ได้มีการทดลองอย่างมากมายตั้งแต่อดีต [21] โดยมีหลักการในการออกแบบจากพื้นฐานของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความดันของวัฏจักร ทำให้เกิดกระบวนการส่งความร้อนและหมุนเวียนน้ำด้วย Pressurizing water และ Pressurizing vapor และมีการไหลเวียนความร้อนจากด้านบนสู่ด้านล่างโดยธรรมชาติ (Self pumping) มีแหล่งผลิตความร้อนด้วยฮีทเตอร์เป็นระบบที่มีขนาดเล็ก ข้อดีของระบบนี้ คือ สามารถทำงานได้โดยไม่ต้องควบคุม (Self controlling) ไม่มีการใช้ปั๊มด้วยไฟฟ้าและไม่มีการใช้ไฟฟ้าควบคุมวาล์วต่างๆ

2.1.1 ระบบหมุนเวียนน้ำด้วยพลังงานความร้อนแบบสองสถานะ [22]

ระบบที่มีการหมุนเวียนน้ำในระบบแบบธรรมชาติที่ต้านแรงโน้มถ่วงมีนักวิจัยสนใจตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน จึงทำให้มีการศึกษาที่หลากหลาย เช่น บทความ สิทธิบัตร และเอกสารอื่นๆ สามารถพบได้ในงานวิจัยและอุปกรณ์ 2 สถานะ (น้ำและไอน้ำ) ซึ่งมีการเสนอสำหรับการประยุกต์ใช้ต่างๆ เช่น ความร้อนจากรังสีอาทิตย์ การควบคุมความร้อนบนผิวดินและอวกาศ กำลังความร้อนใต้พิภพ การกักเก็บน้ำอุ่นและการทำความเย็นด้วยรังสีอาทิตย์

แม้ว่าอุปกรณ์นี้จะสามารถประยุกต์ใช้ได้หลากหลาย แต่บางเทคนิคเฉพาะของอุปกรณ์และวิธีการทำงานนั้นเหมือนกัน ในอดีตได้มีการเรียกชื่ออุปกรณ์นี้อย่างมากมาย เช่น Down-pumping heat pipes, Reverse thermosyphon, Passive vapour transport systems, Spontaneous downward heat transport systems และอื่นๆ โดยในความคิดของผู้แต่งชื่อที่ดีที่สุดสำหรับอุปกรณ์นี้ คือ ระบบหมุนเวียนน้ำด้วยธรรมชาติแบบสองสถานะ (Periodic two phase thermosyphons) เนื่องจากอุปกรณ์นี้สามารถทำงานร่วมกับอีวาพอเรเตอร์ซึ่งติดตั้งอยู่สูงหรือต่ำกว่าคอนเดนเซอร์ โดยอุปกรณ์นี้ทำให้เห็นเวอร์ชั่นพิเศษของท่อนำความร้อนซึ่งแม่นยำกว่าระบบหมุนเวียนน้ำด้วยธรรมชาติแบบสองสถานะ แต่ในท้ายที่สุดอุปกรณ์ทั้งหมดก็ทำงานด้วยหลักการการถ่ายโอนความร้อนเป็นรอบการทำงาน ซึ่งระบบประกอบด้วยอุปกรณ์สำคัญๆ คือ อีวาพอเรเตอร์ (E) คอนเดนเซอร์ (C) และ ถังเก็บสะสม (A) อุปกรณ์เหล่านี้จะเชื่อมต่อกันและประกอบกันเป็นวงจร ช่องทางที่เชื่อมต่อกันมีการหุ้มฉนวนกันความร้อนและถูกเรียกว่าช่องทางไอน้ำ VL (อีวาพอเรเตอร์-คอนเดนเซอร์) ช่องทางของเหลว LL (คอนเดนเซอร์-ถังเก็บสะสม) และช่องทางไหลกลับ RL (ถังเก็บสะสม-อีวาพอเรเตอร์) นอกจากนี้ในวงจร ยังมีวาล์วกันกลับ 2 ตัวถูกติดตั้งอยู่ด้วย โดยวาล์วตัวที่ 1 (CV_1) ถูกติดตั้งในช่องทางของเหลว และวาล์วตัวที่ 2 (CV_2) ถูกติดตั้งในช่องทางที่ไหลกลับ ดังแสดงในรูปที่ 2.1

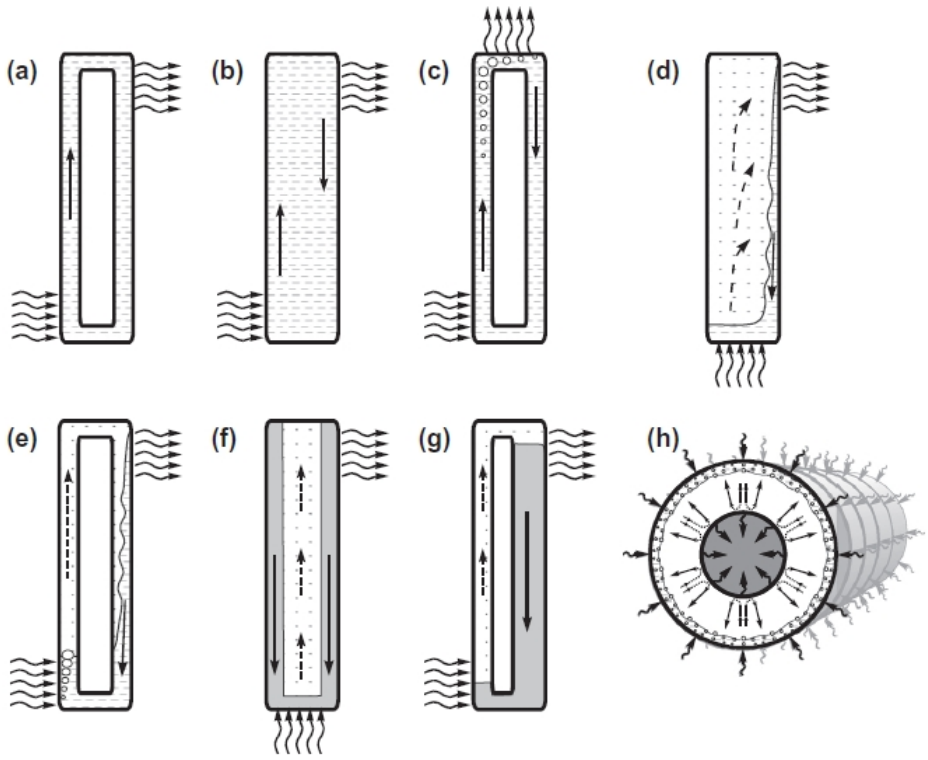


รูปที่ 2.1 แผนภาพอุปกรณ์โดยทั่วไปของระบบหมุนเวียนน้ำด้วยธรรมชาติแบบสองสถานะ (น้ำและไอน้ำ) ร่วมกับคำจำกัดความในรูปด้านขวามือ [22]

2.1.2 ระบบหมุนเวียนน้ำด้วยพลังงานความร้อน โดยระบบหมุนเวียนด้วยตัวเอง [7]

รูปแบบการไหลของของไหลในระบบหมุนเวียนน้ำพลังงานความร้อนมีความแตกต่างกันทั้งในโครงสร้างและหลักการ ดังนั้นจึงควรพิจารณาการทำงานของระบบเป็นหลัก นอกจากนี้สิ่งสำคัญที่ทำให้จำได้ว่ากระบวนการพื้นฐานสองอย่างที่เกิดขึ้นในรอบของการหมุนเวียนน้ำในระบบ คือ การกักเก็บความร้อน และการเคลื่อนที่ของความร้อน โดยแต่ละกระบวนการจะได้รับผลกระทบในหลากหลายวิธีดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งนำเสนอรูปแบบการไหลของระบบหมุนเวียนน้ำพลังงานความร้อน แบบหมุนเวียนด้วยตัวของระบบเอง ซึ่งรูปแบบการไหลทั่วไปด้วยตนเองสามารถแบ่งได้ตามเกณฑ์ดังต่อไปนี้

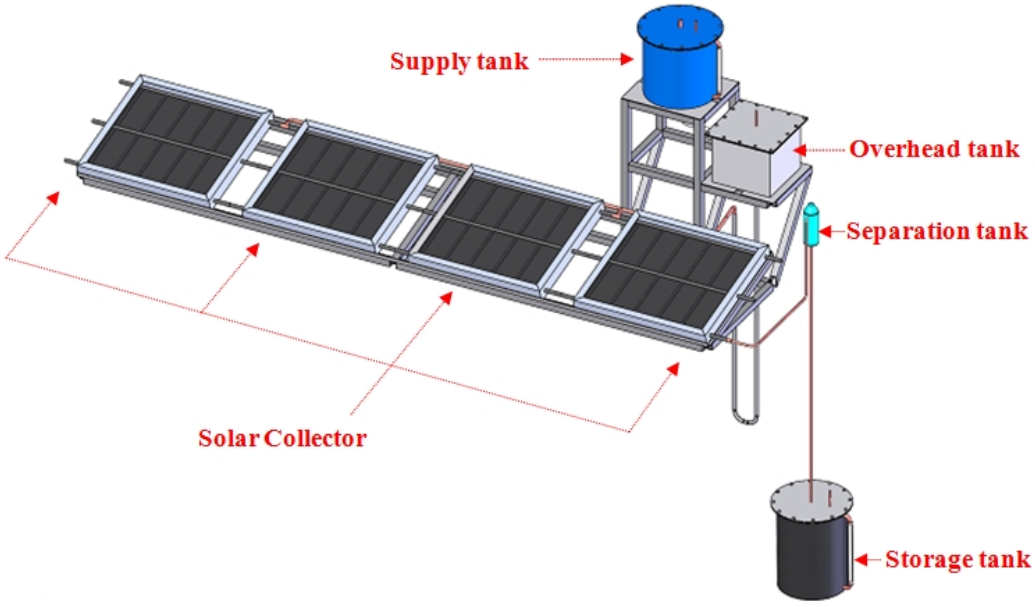
1. จำนวนชนิดของสารทำงานในระบบ:
    - ชนิดเดียว (ของเหลว) (รูป 2.2 a และ b)
    - สองชนิด (ของเหลวและไอ) (รูป 2.2 c - h)
2. สถานะของสารทำงานที่ใช้ส่งความร้อน
    - ของเหลว (รูป 2.2 a -c)
    - ไอ (รูป 2.2 d - h)
3. ลักษณะของการเคลื่อนที่ของการถ่ายโอนความร้อน
    - การยกตัวของความร้อนตามแรงโน้มถ่วง, ของเหลวเบา (รูปที่ 2.2 a และ b)
    - การยกตัวของของเหลวร้อนร่วมกับฟองไอตามแรงโน้มถ่วงในแนวตั้ง (รูปที่ 2.2 c)
    - การบังคับการไหลของไอให้อยู่ภายใต้ความแตกต่างของความดันของไอน้ำอิ่มตัวระหว่างพื้นที่ให้ความร้อนและพื้นที่ระบายความร้อน (รูปที่ 2.2 d-h)
4. ลักษณะของการถ่ายโอนความร้อนของสารทำงานที่วนกลับไปแหล่งให้ความร้อน: ตามแรงโน้มถ่วง (รูปที่ 2.2 a-e)
    - แรงดึงตามรูเล็กในวัสดุที่มีรูพรุน, แรงโน้มถ่วงช่วยในการหมุนเวียน (รูป 2.2 f และ g)
    - แรงดึงตามที่เกิดขึ้นในร่องขนาดเล็ก, แรงโน้มถ่วงช่วยในการหมุนเวียน (รูป 2.2 f และ g)
    - แรงเหวี่ยง (รูปที่ 2.2 h)
5. ประเภทของชนิดของการเคลื่อนที่ในการถ่ายเทความร้อนของความร้อนและความเย็น
    - ลำดับภายในวงปิด (รูปที่ 2.2 a, c, e และ g)
    - ความไม่เป็นระเบียบ (ปราศจากการแบ่งแยกระหว่างการส่งความร้อนและความเย็น) (รูปที่ 2.2 b, d, f และ h)



รูปที่ 2.2 รูปแบบการไหลในระบบของระบบหมุนเวียนน้ำพลังงานความร้อน แบบหมุนเวียนด้วยตัวของระบบเอง; ⇝ การไหลของความร้อน → – การไหลของของเลว ⇢ การไหลของไอ [7]

2.2 ระบบหมุนเวียนน้ำด้วยพลังงานความร้อนโดยใช้รังสีอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานความร้อน

ระบบหมุนเวียนน้ำด้วยพลังงานความร้อนโดยใช้รังสีอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานความร้อน ระบบจะประกอบด้วยอุปกรณ์หลักๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ระบบหมุนเวียนน้ำด้วยพลังงานความร้อนโดยใช้รังสีอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานความร้อน

2.2.1 การวิเคราะห์ระบบหมุนเวียนน้ำด้วยพลังงานความร้อนใช้รังสีอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานความร้อน

การคำนวณหาปริมาณความร้อนที่สะสมภายในถังเก็บน้ำสามารถหาได้จากสมการ [23 - 25]

$$Q_s = m_{w,s} \times c_{p,w} \times \left(T_{end} - T_{initial}\right) \tag{2.2}$$

เมื่อ

Q_s = พลังงานความร้อนที่ตกกระทบบนตัวเก็บรังสีอาทิตย์, kW

$m_{w,s}$ = มวลของน้ำทั้งหมดภายในถังเก็บน้ำ, kg

$c_{p,w}$ = ค่าความจุความร้อนของน้ำ, kJ/kg.^{o}C

$(T_{end} - T_{initial})$ = อุณหภูมิของน้ำที่เปลี่ยนไปภายในถังเก็บน้ำ, ^{o}C

การคำนวณหาประสิทธิภาพทางความร้อนของระบบสามารถหาได้จากสมการ [23 - 26]

$$\eta_t(\%) = \frac{\int Q_s dt}{A_c \int I_T dt} \times 100 \tag{2.3}$$

หรือสามารถเขียนได้เป็น

$$\eta_t(\%) = \frac{Q_s}{H_{tot}} \times 100 \tag{2.4}$$

เมื่อ

η_t = ประสิทธิภาพทางความร้อนของระบบ, %

A_c = พื้นที่รับแสงของตัวเก็บรังสีอาทิตย์, m^2

I_T = ค่าความเข้มของรังสีอาทิตย์, kW/m^2

H_{tot} = ผลรวมรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ใน 1 วัน, kJ

สามารถคำนวณหาประสิทธิภาพการหมุนเวียนน้ำของระบบ ได้จากสมการ [23-26]

$$\eta_P(\%) = \frac{N \times W_h}{H_{tot}} \times 100 \tag{2.5}$$

เมื่อ

η_p = ประสิทธิภาพการหมุนเวียนน้ำของระบบ, %

N = จำนวนรอบการหมุนเวียนน้ำของระบบใน 1 วัน, cycle

W_h = งานที่ใช้ในการหมุนเวียนน้ำต่อรอบ, kJ

งานที่ใช้ในการหมุนเวียนน้ำต่อรอบหาได้จากสมการ [23 - 26]

$$W_h = V_c \times \rho_w \times g \times Z \tag{2.6}$$

เมื่อ

V_c = ปริมาตรของน้ำที่ระบบสามารถหมุนเวียนได้ต่อรอบ, m^3

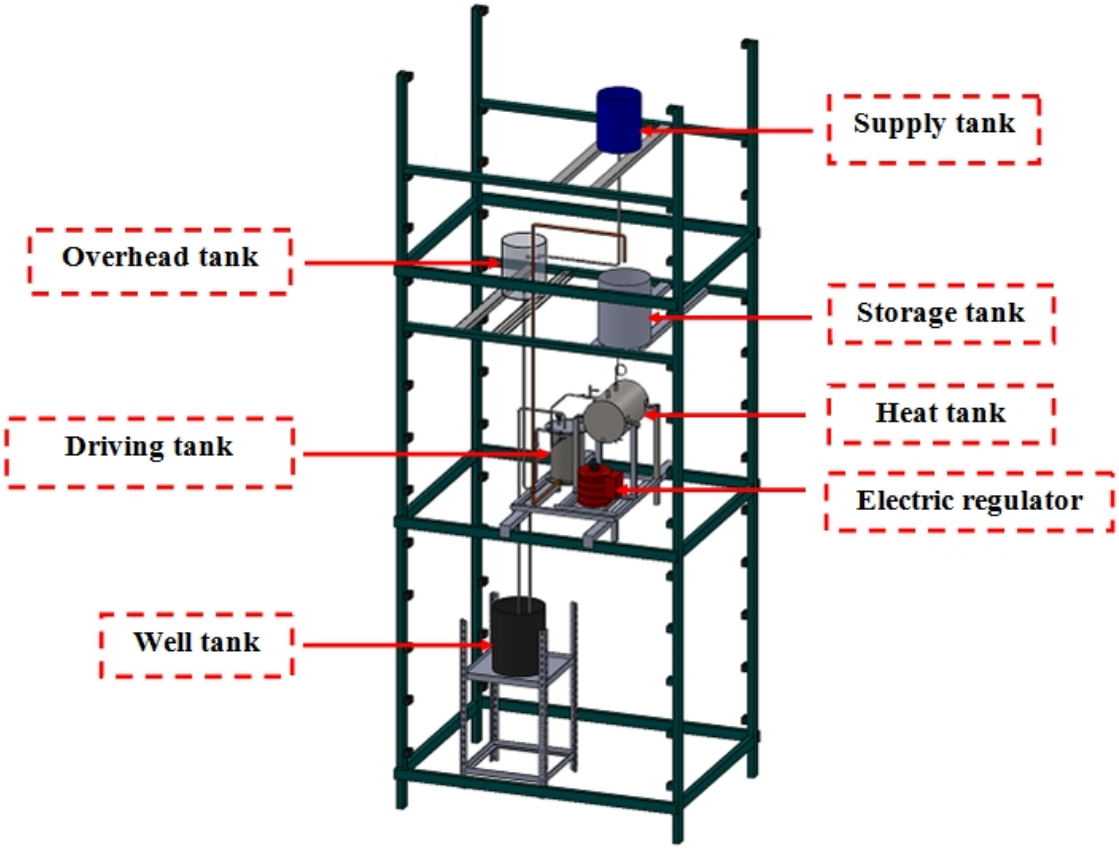
ρ_w = ค่าความหนาแน่นของน้ำ, kg/m^3

g = ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก, (9.81 m/s^2)

Z = เฮดความสูงในการหมุนเวียนน้ำของระบบ, m

2.3 ระบบหมุนเวียนน้ำด้วยพลังงานความร้อนโดยใช้ไฟฟ้าเป็นแหล่งพลังงานความร้อน (ปริมาตรของถังขับดันน้ำ 4 L)

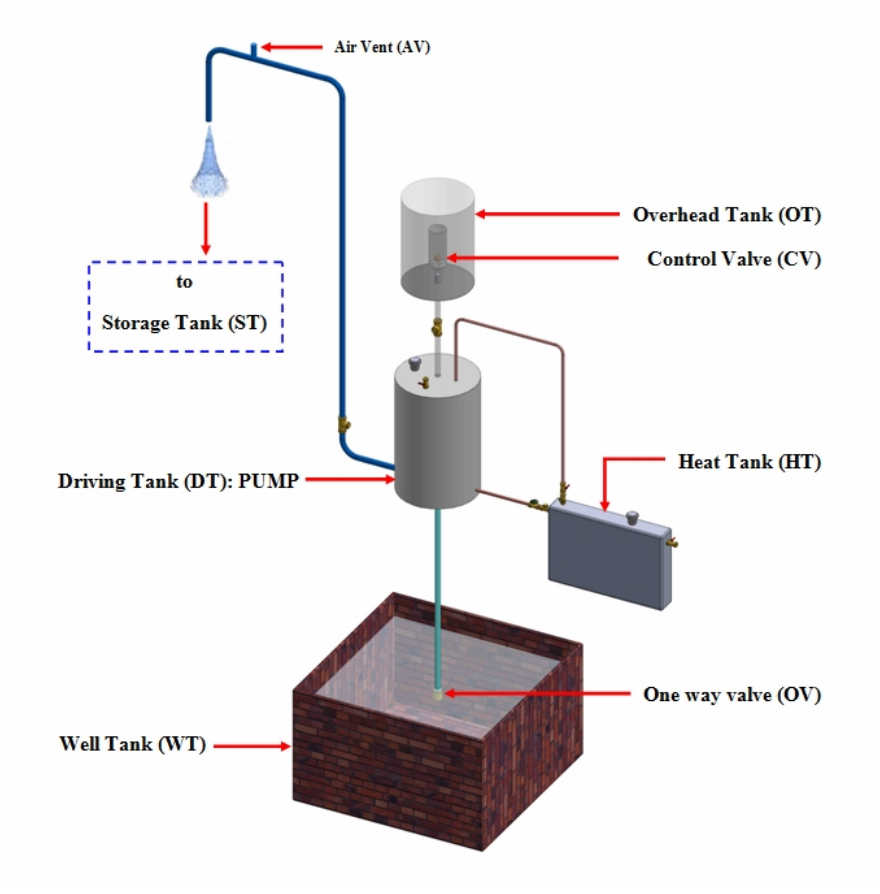
ระบบหมุนเวียนน้ำด้วยพลังงานความร้อนโดยใช้ไฟฟ้าเป็นแหล่งพลังงานความร้อน (ปริมาตรของถังขับดันน้ำ 4 L) ระบบจะประกอบด้วยอุปกรณ์หลักๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ระบบหมุนเวียนน้ำด้วยพลังงานความร้อนโดยใช้ไฟฟ้าเป็นแหล่งพลังงานความร้อน (ปริมาตรของถังขับดันน้ำ 4 L)

2.4 ระบบหมุนเวียนน้ำด้วยพลังงานความร้อนโดยใช้ไฟฟ้าเป็นแหล่งพลังงานความร้อน (ปริมาตรของถังขับดันน้ำ 10 L)

ระบบหมุนเวียนน้ำด้วยพลังงานความร้อนใช้ไฟฟ้าเป็นแหล่งพลังงานความร้อน (ปริมาตรของถังขับดันน้ำ 10 L) ระบบจะประกอบด้วยอุปกรณ์หลักๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ระบบหมุนเวียนน้ำด้วยพลังงานความร้อนโดยใช้ไฟฟ้าเป็นแหล่งพลังงานความร้อน (ปริมาตรของถังขับดันน้ำ 10 L)

2.4.1 การวิเคราะห์ระบบหมุนเวียนน้ำด้วยพลังงานความร้อนโดยใช้ไฟฟ้าเป็นแหล่งพลังงานความร้อน

ระบบหมุนเวียนน้ำด้วยพลังงานความร้อนใช้ไฟฟ้าเป็นแหล่งพลังงานความร้อน ทั้งที่ปริมาตรของถังขับดันน้ำ 4 และ10 L มีขั้นตอนในการวิเคราะห์ระบบดังนี้

การคำนวณหาการให้ความร้อนกับน้ำภายในถังผลิตไอสามารถหาได้จากสมการ [26, 27]

$$Q_{in} = m_{w,HT} \times c_{p,w} \times \frac{dT_{HT}}{dt} + loss \tag{2.7}$$

เมื่อ

Q_{in}	=	อัตราพลังงานความร้อนจากฮีทเตอร์ไฟฟ้า, kJ
$m_{w,HT}$	=	มวลของน้ำและไอน้ำภายในถังผลิตไอ, kg
$c_{p,w}$	=	ค่าความจุความร้อนของน้ำ, kJ/kg.^{o}C
dT_{HT}	=	ผลต่างของอุณหภูมิของถังผลิตไอในช่วงเวลาที่พิจารณา, ^{o}C/s
dt	=	เวลา, s

การคำนวณการสมดุลพลังงานขณะเกิดสุญญากาศในระบบ ไอน้ำที่อุณหภูมิ (100^{o}C) ภายในถังขับดันน้ำจะมีการถ่ายโอนความร้อนให้แก่น้ำเย็น (30^{o}C) ที่ไหลมาจากถังเติมน้ำด้านบน ทำให้ไอทั้งหมดกลั่นตัว ส่วนอากาศและน้ำร้อนที่เหลือภายในถังขับดันน้ำจากขั้นตอนก่อนจะลดอุณหภูมิลง และน้ำเย็นบางส่วนจะกลายเป็นไออิ่มตัวที่อุณหภูมิผสม ดังนั้นสมดุลของพลังงานจะเกิดขึ้นดังนี้ [27]

$$\begin{aligned} &m_{v,DT}\left(h_{g,100} - h_{f,Tmix}\right) + \left(m_{w,DT,end} \times c_{p,w} + m_{a,DT} \times c_{p,a}\right)\left(100 - T_{mix}\right) = \\ &m_f\left(h_{f,Tmix} - h_{f,30}\right) + m_e \times h_{fg,Tmix} \end{aligned} \tag{2.8}$$

เมื่อ

$m_{v,DT}$	=	มวลของไอน้ำภายในถังขับดันน้ำที่อุณหภูมิ 100^{o}C, kg
$m_{w,DT,end}$	=	มวลของน้ำที่คงเหลือภายในถังขับดันน้ำที่อุณหภูมิ 100^{o}C, kg
$m_{a,DT}$	=	มวลของอากาศภายในถังขับดันน้ำที่อุณหภูมิ 100^{o}C, kg
m_f	=	มวลของน้ำที่ไหลเข้าถังขับดันน้ำที่อุณหภูมิ 30^{o}C, kg
m_e	=	มวลของน้ำที่ระเหยเป็นไอ, kg
h_g	=	เอนทัลปีของไอน้ำภายในถังขับดันน้ำที่อุณหภูมิ 100^{o}C, kJ/kg
h_f	=	เอนทัลปีของน้ำภายในถังขับดันน้ำที่อุณหภูมิ 30^{o}C, kJ/kg
h_{fg}	=	ค่าความร้อนแฝงของการเปลี่ยนสถานะจากน้ำเป็นไอ kJ/kg
$c_{p,w}$	=	ค่าความจุความร้อนของน้ำ, kJ/kg.^{o}C
$c_{p,a}$	=	ค่าความจุความร้อนของอากาศ, kJ/kg.^{o}C
T_{mix}	=	อุณหภูมิผสม, ^{o}C

สามารถคำนวณหาประสิทธิภาพการหมุนเวียนน้ำของระบบ ได้จากสมการ [23 - 26]

$$\eta_P(\%) = \frac{N \times W_h}{E_{tot}} \times 100 \tag{2.9}$$

$$\eta_P = f(N, Z) \tag{2.10}$$

$$N = f(Z) \tag{2.11}$$

$$Z = Z_d + Z_s \tag{2.12}$$

เมื่อ

η_p	=	ประสิทธิภาพการหมุนเวียนน้ำของระบบ, %
N	=	จำนวนรอบการหมุนเวียนน้ำของระบบใน 1 วัน, cycle
W_h	=	งานที่ใช้ในการหมุนเวียนน้ำต่อรอบ, kJ
E_{tot}	=	พลังงานรวมทั้งหมดที่ป้อนให้กับฮีทเตอร์ไฟฟ้า, kJ
Z_d	=	เฮดความสูงในการส่งน้ำของระบบ, m
Z_s	=	เฮดความสูงในการสูบน้ำของระบบ, m

งานที่ใช้ในการหมุนเวียนน้ำต่อรอบหาได้จากสมการ [23 - 26]

$$W_h = V_c \times \rho_w \times g \times Z \tag{2.13}$$

เมื่อ

V_c	=	ปริมาตรของน้ำที่ระบบสามารถหมุนเวียนได้ต่อรอบ, m^3
ρ_w	=	ค่าความหนาแน่นของน้ำ, kg/m^3
g	=	ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก, (9.81 m/s^2)
Z	=	เฮดความสูงรวมในการหมุนเวียนน้ำของระบบ, m