

## บทที่ 7 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และผลการศึกษาของระบบโดยใช้ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในบทนี้จะกล่าวถึงการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ทางผู้วิจัยนำเสนอในบทนี้จะ เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบหมุนเวียนน้ำด้วยพลังงานความร้อนใช้ไฟฟ้าเป็นแหล่งพลังงานความร้อน (ระบบที่ 2) ที่มีขนาดของถังจับคั้นน้ำ 4 L เนื่องจากเป็นเครื่องต้นแบบอีกทั้งระบบได้ใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าเป็นแหล่งพลังงานความร้อนให้แก่ระบบ ทำให้มีความสะดวกและง่ายต่อการกำหนดเงื่อนไขของตัวแปรในสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยสมมุติฐานในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ มีดังนี้

1. ระบบจะเริ่มจับคั้นน้ำออกจากระบบเมื่อความดันไอน้ำภายในถังจับคั้นน้ำมากกว่าความดันเสียด้านส่งน้ำ
2. ไม่เกิดการสูญเสียความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสี เนื่องจากมีค่าน้อยมาก
3. ค่าความหนาแน่นของน้ำเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ
4. ค่าความจุความร้อนของน้ำมีค่าคงที่
5. อุณหภูมิน้ำมีค่าเท่ากับอุณหภูมิถัง
6. ไม่มีการรั่วไหลภายในระบบ

### 7.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระบบหมุนเวียนน้ำด้วยพลังงานความร้อนใช้ไฟฟ้าเป็นแหล่งพลังงานความร้อน (ระบบที่ 2)

ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ผู้วิจัยได้แบ่งขั้นตอนการจำลองระบบออกเป็น 4 ขั้นตอน คือ

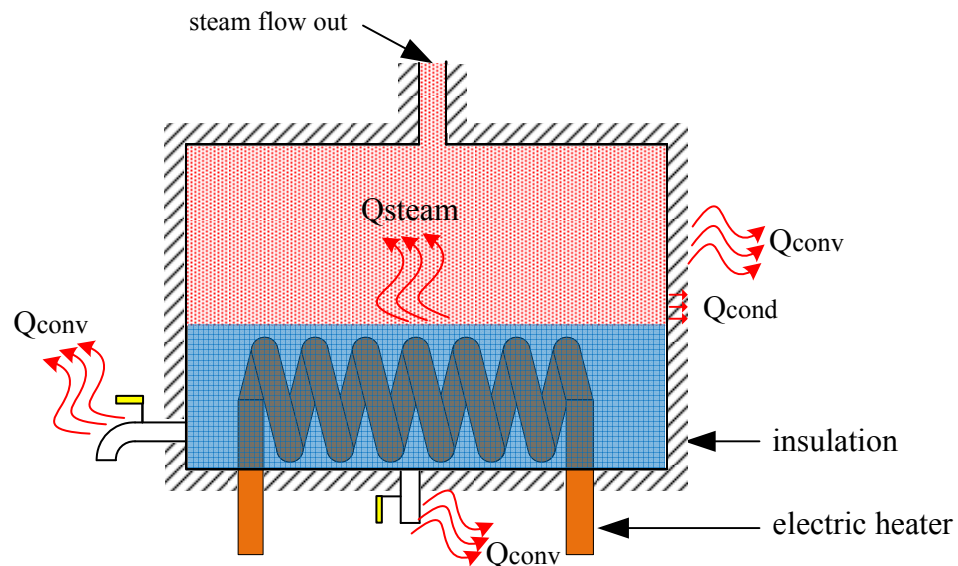
1. ช่วงการให้ความร้อน (Heating stage) 2. ช่วงการหมุนเวียนน้ำออกจากระบบหรือช่วงการปั๊ม (Water pumping stage) 3. ช่วงการระบายไอน้ำในระบบ (Vapor circulating stage) และ 4. ช่วงการสูบน้ำ (Water suction stage) โดยมีสมการต่างๆ ดังนี้

#### 7.1.1 การให้ความร้อน Heating stage

ขั้นตอนการให้ความร้อน (Heating stage) ช่วงเริ่มต้นของขั้นตอนนี้ น้ำภายในถังผลิตไอน้ำได้รับความร้อนจากฮีตเตอร์ทำให้มีความร้อนเพิ่มขึ้นจึงเกิดไอน้ำขึ้นภายในถังผลิตไอน้ำส่งผลทำให้อุณหภูมิ

และความดันภายในถังผลิตไอน้ำมีค่าสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งในขณะเดียวกันนี้เองไอน้ำบางส่วนก็จะไหลเข้าสู่ถังจับคั้นน้ำอย่างต่อเนื่องเช่นกัน ระบบจะเข้าสู่การทำงานในขั้นตอนต่อไป

### 7.1.1.1 สมดุลพลังงานภายในถังผลิตไอน้ำ



รูปที่ 7.1 สมดุลพลังงานของถังผลิตไอน้ำช่วงการให้ความร้อนของระบบ

#### วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในถังผลิตไอน้ำ

สถานะที่ 1 ของ Heating stage เริ่มต้นให้ความร้อนกับน้ำภายในถังผลิตไอน้ำ น้ำภายในถังผลิตไอน้ำจะมีอุณหภูมิจาก  $0 - 100^{\circ}\text{C}$  (ยังไม่เกิดการเดือดภายในถังผลิตไอน้ำ)

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในถังผลิตไอน้ำ เนื่องมาจากการถ่ายโอนความร้อนในระบบพิจารณาได้จากสมการ [31, 32]

$$Q_{in} = m_w \times c_{p,w} \frac{dT_w}{dt} + m_{HT} \times c_{p,HT} \frac{dT_{HT}}{dt} + Q_{loss,HT} \quad (7.1)$$

เมื่อ

- $Q_{in}$  = อัตราพลังงานความร้อนจากฮีตเตอร์ไฟฟ้า, kW
- $m_w$  = มวลของน้ำภายในถังผลิตไอน้ำ, kg
- $c_{p,w}$  = ค่าความจุความร้อนของน้ำภายในถังผลิตไอน้ำ, kJ/kg  $^{\circ}\text{C}$

$dT_w$	=	ผลต่างของอุณหภูมิน้ำภายในถังผลิตไอในช่วงเวลาที่พิจารณา, °C/s
$m_{HT}$	=	มวลของถังผลิตไอ, kg
$c_{p,HT}$	=	ค่าความจุความร้อนของถังผลิตไอ, kJ/kg °C
$dT_{HT}$	=	ผลต่างของอุณหภูมิของถังผลิตไอในช่วงเวลาที่พิจารณา (= อุณหภูมิน้ำภายในถังผลิตไอ), °C/s
$Q_{loss,HT}$	=	ปริมาณความร้อนสูญเสียที่ถังผลิตไอ, kW

การสูญเสียความร้อนที่ถังผลิตไอหาได้จากสมการ [33]

$$Q_{loss,HT} = U \times A_{trans,HT} \times (T_{w,HT} - T_a) \quad (7.2)$$

คำนวณหาผลรวมของสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อน ได้จากสมการ [33]

$$\frac{1}{U} = \left( \frac{1}{U_1} + \frac{1}{h_{conv}} \right) \quad (7.3)$$

คำนวณหาสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ได้จากสมการ [32]

$$U_1 = \frac{k_i}{L_i} \quad (7.4)$$

คำนวณหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ได้จากสมการ [32]

$$h_{conv} = \left( \frac{Nu \times k}{D} \right) \quad (7.5)$$

เมื่อ

$U$	=	ผลรวมสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อน, kW/m <sup>2</sup> .K
$U_1$	=	สัมประสิทธิ์การสูญเสียการนำความร้อนโดยฉนวน, kW/m <sup>2</sup> .K
$A_{trans,HT}$	=	พื้นที่ผิวในการถ่ายโอนความร้อนของถังผลิตไอ, m <sup>2</sup>
$T_{w,HT}$	=	อุณหภูมิน้ำภายในถังผลิตไอ, °C
$T_a$	=	อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม, °C
$k_i$	=	ค่าการนำความร้อนของฉนวน, kW/m.K

$L_i$	=	ความหนาของฉนวน, m
$h_{conv}$	=	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน, kW/m <sup>2</sup> .K
Nu	=	Nusselt number
k	=	ค่าการนำความร้อนของอากาศ, kW/m.K
D	=	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อที่เกิดการพาความร้อน, m

การคำนวณหาค่า Rayleigh number สามารถหาได้จากสมการ [32]

$$Ra_D = \frac{g \times \beta \times (T_{HT} - T_a) \times D^3}{\nu \alpha} \quad (7.6)$$

โดยที่

$$\beta = 1/(T_f + 273)$$

$$T_f = (T_{HT} + T_a)/2$$

เมื่อ

$Ra_D$	=	Rayleigh number ของทรงกระบอกนอน
g	=	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก, 9.81 m/s <sup>2</sup>
$\beta$	=	สัมประสิทธิ์การขยายตัวโดยปริมาตรของของไหล, <sup>-1</sup> K
$T_a$	=	อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม, °C
D	=	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อที่เกิดการพาความร้อน, m
$\nu$	=	ค่าความหนืดของอากาศ, m <sup>2</sup> /s
$\alpha$	=	ค่าความแพร่ความร้อนในอากาศ, m <sup>2</sup> /s
$T_f$	=	อุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างถังผลิตไอน้ำกับอากาศ, °C

โดยที่เงื่อนไขการใช้ Nusselt number (Nu) คือ

เมื่อ  $10^{-6} < Ra_D < 10^9$  สามารถหา Nu ได้จากสมการ [34]

$$Nu = 0.36 + \frac{0.518 Ra_D^{1/4}}{\left[1 + (0.559 / Pr)^{9/16}\right]^{4/9}} \quad (7.7)$$

เมื่อ  $10^{12} \leq Ra_D$  สามารถหา  $Nu$  ได้จากสมการ [32]

$$Nu = \left[ 0.6 + \frac{0.387 Ra_D^{1/6}}{\left[ 1 + (0.559 / Pr)^{9/16} \right]^{8/27}} \right]^2 \quad (7.8)$$

เมื่อ

$$Pr = \text{Prandtl number of air}$$

สภาวะที่ 2 ของ Heating stage เมื่ออุณหภูมิไอน้ำภายในถังผลิตไอน้ำมากกว่า  $100^\circ\text{C}$  (เกิดการเดือดภายในถังผลิตไอน้ำ) แต่ความดันไอน้ำที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำกว่าความดันเสดความสูงด้านส่งน้ำ

การวิเคราะห์การถ่ายโอนความร้อนของถังผลิตไอน้ำ เนื่องจากการเดือดของน้ำภายในถังผลิตไอน้ำสามารถคำนวณได้จากสมการ [31, 32]

$$Q_{in} = m_w \times c_{p,w} \frac{dT_w}{dt} + m_{HT} \times c_{p,HT} \frac{dT_{HT}}{dt} + Q_{loss,HT} + Q_{steam} \quad (7.9)$$

$$Q_{steam} = q'' \times A_e \quad (7.10)$$

$$q'' = h_{conv} \times (T_s - T_{sat}) \quad (7.11)$$

$$h_{conv} = \frac{k_v \times C}{D_h} \left[ \frac{g \times (\rho_l - \rho_v) h'_{fg,HT} \times D_h^3}{\nu_v \times k_v \times (T_s - T_{sat})} \right]^{1/4} \quad (7.12)$$

$$h'_{fg,HT} = h_{fg} + (0.80 \times c_{p,v,Tf}) \times (T_s - T_{sat}) \quad (7.13)$$

$$T_{f,steam} = \frac{(T_s - T_{sat})}{2} \quad (7.14)$$

เมื่อ

$$Q_{steam} = \text{ปริมาณความร้อนที่สูญเสียจากระเหยกลายเป็นไอน้ำที่ถังผลิตไอน้ำ, kW}$$

$$A_e = \text{พื้นที่การระเหย, m}^2$$

$$h_{conv} = \text{สัมประสิทธิ์การพาความร้อน, kW/m}^2 \cdot \text{K}$$

$D_h$	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของฮีทเตอร์, m
$k_v$	=	ค่าการนำความร้อนของไอน้ำ ที่อุณหภูมิ Film Temperature, kW/m.K
$C$	=	ค่าคงที่ของทรงกระบอกนอน (= 0.62)
$g$	=	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก, 9.81 m/s <sup>2</sup>
$\rho_w$	=	ค่าความหนาแน่นของน้ำ, kg/m <sup>3</sup>
$\rho_v$	=	ค่าความหนาแน่นของไอน้ำที่อุณหภูมิ Film Temperature, kg/m <sup>3</sup>
$v_v$	=	ความเร็วของไอน้ำที่อุณหภูมิ Film Temperature, m/s
$T_s$	=	อุณหภูมิผิวฮีทเตอร์, °C
$T_{sat}$	=	อุณหภูมิน้ำอิ่มตัว, °C
$c_{p,v,Tf}$	=	ค่าความจุความร้อนของไอน้ำที่อุณหภูมิ Film Temperature, kJ/kg.°C
$T_{f,steam}$	=	Film Temperature, °C
$q''$	=	อัตราการถ่ายโอนความร้อนเนื่องจากการเดือด, kW/m <sup>2</sup>

### 7.1.1.2 สมดุลพลังงานภายในถังจับคั้นน้ำ

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในถังจับคั้นน้ำ เนื่องมาจากการถ่ายโอนความร้อนในระบบสามารถสมดุลได้ ดังนี้ [31, 32]

$$Q_{steam} = c_{p,w} \times \frac{d(m_{w,DT} \times T_{w,DT})}{dt} + m_{DT} \times c_{p,DT} \frac{dT_{DT}}{dt} + Q_{loss,DT} \quad (7.15)$$

เมื่อ

$m_{w,DT}$	=	มวลของน้ำภายในถังจับคั้นน้ำ, kg
$T_{w,DT}$	=	อุณหภูมิน้ำภายในถังจับคั้นน้ำ, °C
$m_{DT}$	=	มวลของถังจับคั้นน้ำ, kg
$c_{p,DT}$	=	ค่าความจุความร้อนของถังจับคั้นน้ำ, kJ/kg °C
$dT_{DT}$	=	ผลต่างของอุณหภูมิตั้งจับคั้นน้ำในช่วงเวลาที่พิจารณา (= อุณหภูมิน้ำภายในถังจับคั้นน้ำ), °C/s
$Q_{loss,DT}$	=	ปริมาณความร้อนสูญเสียที่ถังจับคั้นน้ำ, kJ

การสูญเสียความร้อนที่ถังขັบคั้นน้ำหาได้จากสมการ

$$Q_{loss,DT} = Q_{conv,DT} \quad (7.16)$$

เมื่อ

$$Q_{conv,DT} = \text{ปริมาณความร้อนที่สูญเสียเนื่องจากการพาความร้อนของถังขັบคั้นน้ำ, kW}$$

การวิเคราะห์การถ่ายโอนความร้อนของถังขັบคั้นน้ำ เนื่องจากการพาความร้อนสามารถคำนวณได้จากสมการ [32]

$$Q_{conv,DT} = h \times A_{conv,DT} \times (T_{DT} - T_a) \quad (7.17)$$

โดยสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสามารถหาได้จากสมการ [32]

$$h_{conv} = \left( \frac{Nu \times k}{L_{DT}} \right) \quad (7.18)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} h_{conv} &= \text{สัมประสิทธิ์การพาความร้อน, kW/m}^2 \text{ K} \\ A_{conv,DT} &= \text{พื้นที่การพาความร้อนที่ผิวข้อต่อ, m}^2 \\ T_{DT} &= \text{อุณหภูมิถังขັบคั้นน้ำ (= อุณหภูมิน้ำภายในถังขັบคั้นน้ำ), } ^\circ\text{C} \\ Nu &= \text{Nusselt number} \\ k &= \text{ค่าการนำความร้อนของอากาศ, kW/m}^2 \text{ K} \\ L_{DT} &= \text{ความสูงของถังขັบคั้นน้ำ, m} \end{aligned}$$

การคำนวณหาค่า Rayleigh number สามารถหาได้จากสมการ [32]

$$Ra_L = \frac{g \times \beta \times (T_{DT} - T_a) \times L_{DT}^3}{\nu \alpha} \quad (7.19)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} \beta &= 1/(T_f + 273) \\ T_f &= (T_{DT} + T_a)/2 \end{aligned}$$

เมื่อ

$Ra_L$	=	Reyleigh number ทรงกระบอกตั้ง
$g$	=	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก, $9.81 \text{ m/s}^2$
$\beta$	=	สัมประสิทธิ์การขยายตัวโดยปริมาตรของของไหล, $^{-1}\text{K}$
$T_a$	=	อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม, $^{\circ}\text{C}$
$L_{DT}$	=	ความสูงของถังขั้บคั้นน้ำ, m
$\nu$	=	ค่าความหนืดของอากาศ, $\text{m}^2/\text{s}$
$\alpha$	=	ค่าความแพร่ความร้อนในอากาศ, $\text{m}^2/\text{s}$
$T_f$	=	อุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างถังขั้บคั้นน้ำกับอากาศ, $^{\circ}\text{C}$

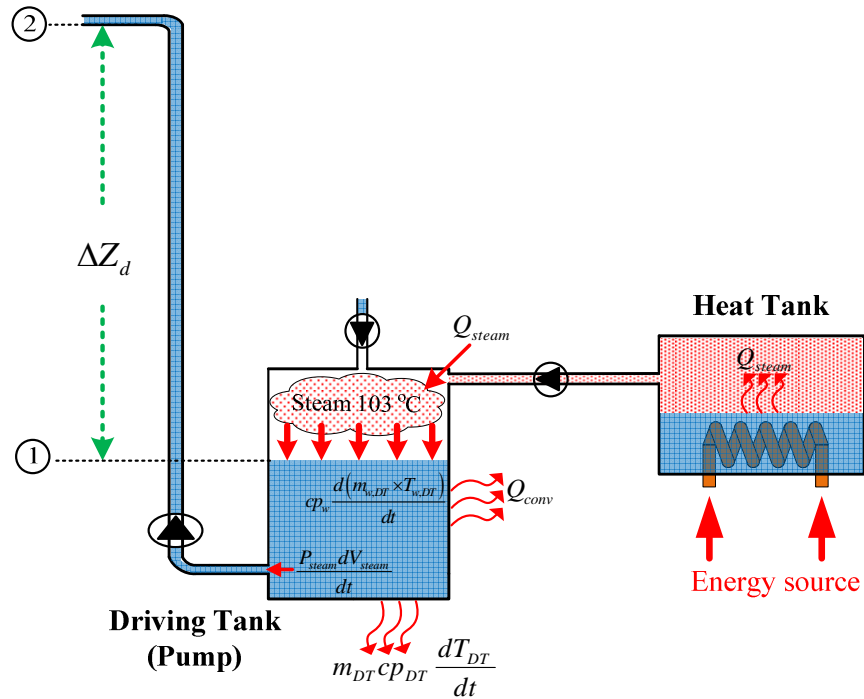
โดยที่เงื่อนไขการใช้ Nusselt number (Nu) คือ

เมื่อ  $10^{-1} < Ra_L < 10^{12}$  สามารถหา Nu ได้จากสมการ [34]

$$Nu = \left[ 0.825 + \frac{0.387 Ra_L^{1/6}}{\left[ 1 + (0.492 / Pr)^{9/16} \right]^{8/27}} \right]^2 \quad (7.20)$$

### 7.1.2 การหมุนเวียนน้ำออกจากระบบหรือช่วงการปั้ม Water pumping stage

เมื่อความดันภายในถังขั้บคั้นน้ำ สูงเนื่องจากไอน้ำที่ผลิตได้จากถังผลิตไอ เข้าไปขั้บคั้นน้ำในถังขั้บคั้นน้ำ ให้ไหลออกไปเก็บยังถังเก็บน้ำ และวาล์วกันกลับที่ติดตั้งอยู่ด้านข้างถังขั้บคั้นน้ำ จะปิดกั้นไม่ให้ไอน้ำภายในถังขั้บคั้นน้ำ ไหลออกสู่ถังเติมน้ำด้านบน ซึ่งช่วงการขั้บคั้นน้ำภายในถังขั้บคั้นน้ำ จะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งระดับน้ำภายในถังขั้บคั้นน้ำ ลดลงต่ำกว่าท่อส่งน้ำ ระบบจึงเข้าสู่การทำงานในขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 7.2 สมดุลพลังงานของถังขั้ต้นน้ำช่วงการหมุนเวียนน้ำออกจากระบบหรือช่วงการปั้ม

เมื่อความดันภายในถังขั้ต้นน้ำ สามารถเอาชนะเสดความสูงในการส่งน้ำของระบบได้จะเกิดการหมุนเวียนน้ำไปสู่ถังเก็บน้ำ โดยสามารถคำนวณความเร็วในการส่งน้ำได้จากการสมดุล Bernoulli's equation [31]

$$\frac{P_1}{\gamma_w} + Z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma_w} + Z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + loss_d \tag{7.21}$$

เมื่อ

- $P_1$  = ความดันไอกภายในถังขั้ต้นน้ำ, kPa
- $v_1$  = ความเร็วของของไหลในถังขั้ต้นน้ำ (= 0 ที่ระดับอ้างอิง), m/s
- $P_2$  = ความดันที่ปลายท่อด้านส่งน้ำ (= ความดันบรรยากาศ  $P_{atm}$ ), kPa
- $v_2$  = ความเร็วที่ปลายท่อด้านส่งน้ำ, m/s
- $loss_d$  = การสูญเสียเสดของของไหลในด้านส่งน้ำ, m
- $Z_2 - Z_1$  = ผลต่างระหว่างความสูงในการส่งน้ำของระบบ, m

โดยการสูญเสียเนื่องจากเสดความสูงของของไหลสามารถหาได้จากสมการ

$$loss_d = \frac{v_2^2}{2g} \times k_d \quad (7.22)$$

เมื่อ

$k_d$  = คือสัมประสิทธิ์การสูญเสียสำหรับความสูงในการส่งน้ำ, (หาได้จากกราฟทดลอง)

ดังนั้นจากสมการที่ 7.21 สามารถคำนวณความเร็วในการส่งน้ำได้ดังนี้

$$\frac{P_1}{\gamma_w} + Z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{v_2^2}{2g} \times k_d + Z_2 \quad (7.23)$$

$$\frac{P_1}{\gamma_w} + Z_1 - Z_2 = \frac{v_2^2}{2g} (1 + k_d) \quad (7.24)$$

$$v_2 = \sqrt{\left( \frac{P_1}{\gamma_w} - \Delta Z_d \right) \times \frac{2g}{(1 + k_d)}} \quad (7.25)$$

สามารถคำนวณหาปริมาตรของน้ำภายในถังจับคั้นน้ำที่เปลี่ยนแปลง ได้จากสมการ

$$V_{flow,d} = v_2 \times A_{tube,d} \quad (7.26)$$

$$m_{flow,d} = V_{flow,d} \times \rho_{w,d} \quad (7.27)$$

$$m_{w,DT}^2 = m_{w,DT}^1 - m_{flow,d} \times dt \quad (7.28)$$

$$V_{w,DT} = \frac{m_{w,DT}}{\rho_{w,DT}} \quad (7.29)$$

เมื่อ

$dt$  = เวลา, s

$$\begin{aligned}
\Delta Z_{d1} &= \text{ผลต่างของความสูงในการส่งน้ำ, } (Z_2 - Z_1) \text{ m} \\
\Delta Z_{d,2} &= \Delta Z_{d,1} + \left( 0.245 - \frac{V_{w,DT}}{A_{DT}} \right) \\
A_{DT} &= \text{พื้นที่ของถังจับคั้นน้ำ, m}^2 \\
V_{w,DT} &= \text{ปริมาตรของน้ำภายในถังจับคั้นน้ำ, m}^3 \\
V_{\text{flow},d} &= \text{ปริมาตรของน้ำภายในท่อด้านส่งน้ำ, m}^3/\text{s} \\
A_{\text{tube},d} &= \text{พื้นที่ของท่อส่งน้ำ, m}^2 \\
m_{\text{flow},d} &= \text{มวลของน้ำภายในท่อด้านส่งน้ำ, kg/s} \\
\rho_{w,d} &= \text{ค่าความหนาแน่นของน้ำภายในท่อด้านส่งน้ำ, kg/m}^3 \\
m_{w,DT,d}^2 &= \text{มวลของน้ำภายในถังจับคั้นน้ำ (หลังจับคั้นน้ำ), kg} \\
m_{w,DT,d}^1 &= \text{มวลของน้ำภายในถังจับคั้นน้ำ (ก่อนจับคั้นน้ำ), kg} \\
\Delta Z_{d2} &= \text{ผลต่างระหว่างความสูงในการส่งน้ำ (หลังจับคั้นน้ำ), m} \\
\Delta Z_{d1} &= \text{ผลต่างระหว่างความสูงในการส่งน้ำ (ก่อนจับคั้นน้ำ), m}
\end{aligned} \tag{7.30}$$

### 7.1.2.1 สมดุลพลังงานในถังผลิตไอ

การวิเคราะห์การถ่ายโอนความร้อนของถังผลิตไอ เนื่องจากการเดือดของน้ำภายในถังสามารถคำนวณได้จากสมการ [31, 32]

$$Q_{in} = m_w \times c_{p,w} \frac{dT_w}{dt} + m_{HT} \times c_{p,HT} \frac{dT_{HT}}{dt} + Q_{loss,HT} + Q_{steam} \tag{7.31}$$

### 7.1.2.2 สมดุลพลังงานในถังจับคั้นน้ำ

เมื่ออุณหภูมิภายในถังผลิตไ้มากกว่า 100°C (เกิดการเดือดภายในถังผลิตไอ) และความดันไอน้ำที่เกิดขึ้นภายในถังจับคั้นน้ำมีค่าสูงกว่าความดันเสดความสูงด้านส่งน้ำ

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในถังจับคั้นน้ำ เนื่องมาจากการถ่ายโอนความร้อนในระบบสามารถสมดุลได้ ดังนี้

$$Q_{steam} = c_{p,w} \times \frac{d(m_{w,DT} \times T_{w,DT})}{dt} + m_{DT} \times c_{p,DT} \frac{dT_{DT}}{dt} + Q_{loss,DT} + P_{DT} \frac{dV_{\text{vapor},DT}}{dt} \tag{7.32}$$

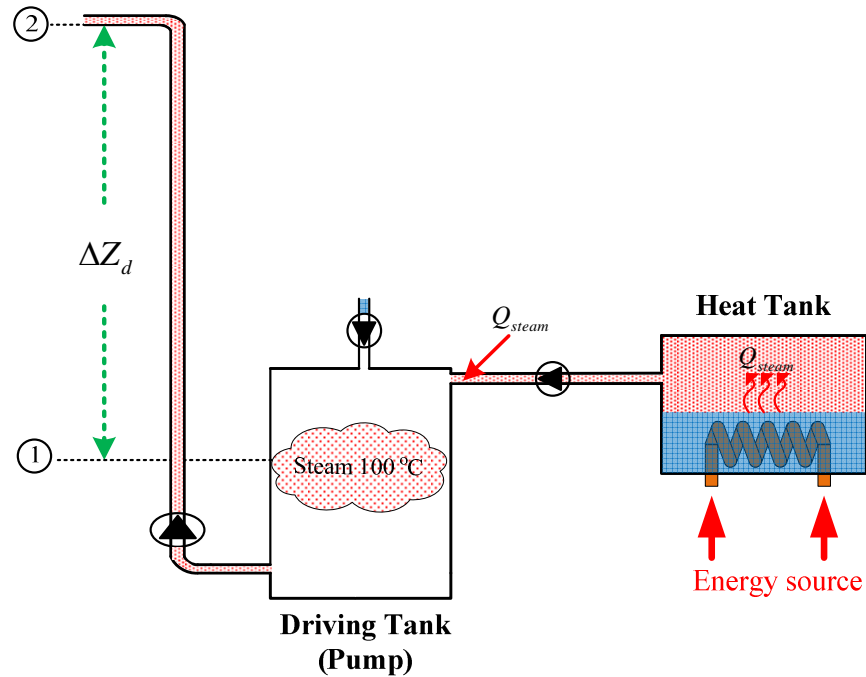
เมื่อ

$m_{w,DT}$	=	มวลของน้ำภายในถังจับคั้นน้ำ, kg
$T_{w,DT}$	=	อุณหภูมิน้ำภายในถังจับคั้นน้ำ, °C
$m_{DT}$	=	มวลของถังจับคั้นน้ำ, kg
$c_{p,DT}$	=	ค่าความจุความร้อนของถังจับคั้นน้ำ, kJ/kg °C
$dT_{DT}$	=	ผลต่างของอุณหภูมิตั้งจับคั้นน้ำในช่วงเวลาที่พิจารณา (= อุณหภูมิน้ำภายในถังจับคั้นน้ำ), °C/s
$Q_{loss,DT}$	=	ปริมาณความร้อนสูญเสียที่ถังจับคั้นน้ำ, kW
$V_{vapor,DT}$	=	ปริมาตรของไอน้ำภายในถังจับคั้นน้ำ, m <sup>3</sup>
$P_{DT}$	=	ความดันของไอน้ำภายในถังจับคั้นน้ำ, kPa
$dt$	=	เวลา, s

### 7.1.3 การระบายไอน้ำในระบบ Vapor circulating stage

เมื่อระดับน้ำภายในถังจับคั้นน้ำลดลงต่ำกว่าท่อส่งน้ำ ไอน้ำที่มีความดันภายในถังจับคั้นน้ำ จะไหลออกไประบายที่ถังแยกไอและน้ำ ดังนั้นอุณหภูมิและความดันภายในถังจับคั้นน้ำลดลง ช่วงการระบายไอน้ำภายในถังจับคั้นน้ำ (Vapor circulating stage) จะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งความดันไอน้ำภายในถังจับคั้นน้ำ มีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศภายนอก ระบบจึงเข้าสู่การทำงานในขั้นตอนต่อไป

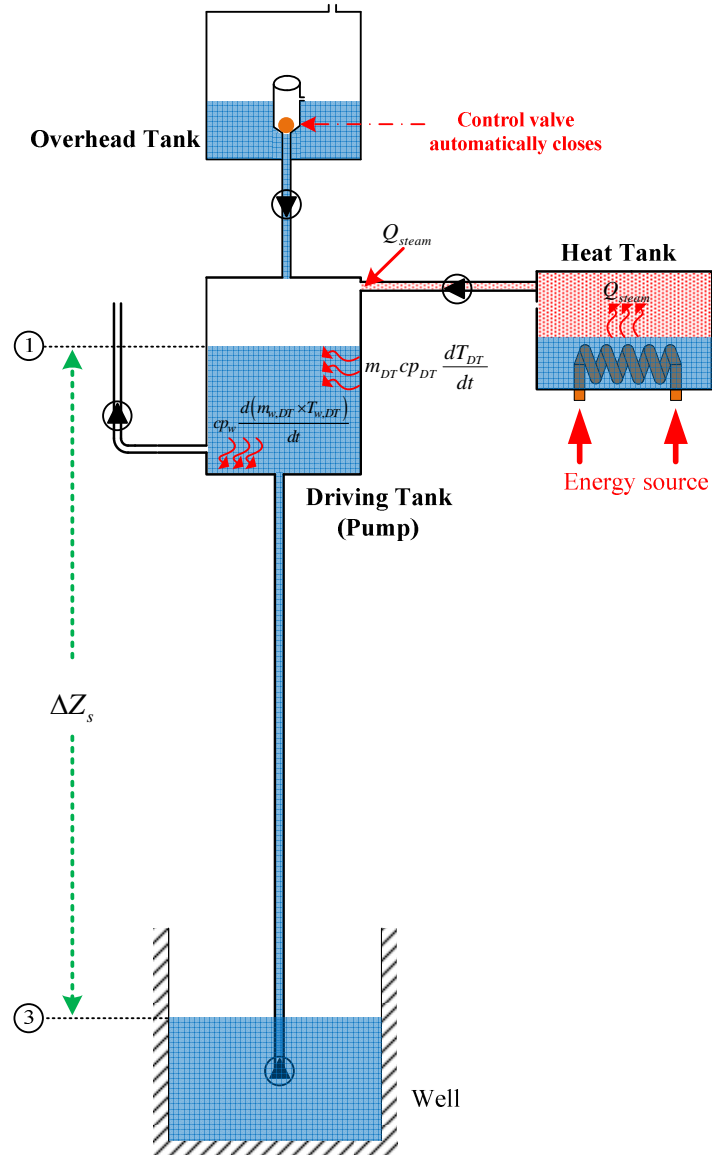
ซึ่งในสภาวะนี้ความดันไอน้ำภายในถังจับคั้นน้ำถูกระบายออกสู่บรรยากาศภายนอกอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งความดันไอน้ำภายในถังจับคั้นน้ำมีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศ  $P_{DT} = 0$  ( $P_{gauge}$ ) ซึ่งในขณะเดียวกันอุณหภูมิภายในถังจับคั้นน้ำและถังผลิตไอน้ำมีค่าประมาณ 100°C



รูปที่ 7.3 การระบายไอภายในถึงขั้วคั่นน้ำของระบบที่ 2

#### 7.1.4 การสูบน้ำเข้าสู่ระบบ Water suction stage

เมื่อความดันไอน้ำภายในถึงขั้วคั่นน้ำมีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศภายนอก น้ำจากถังเติมน้ำด้านบน ซึ่งมีอุณหภูมิต่ำและอยู่สูงกว่าถึงขั้วคั่นน้ำ สามารถไหลผ่านวาล์วควบคุมปริมาณน้ำ (Control valve) ซึ่งติดตั้งอยู่ภายในถังเติมน้ำด้านบนไหลเข้าถึงขั้วคั่นน้ำ ได้โดยอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลก ทำให้เกิดแรงดันสุญญากาศขึ้นภายในถึงขั้วคั่นน้ำ น้ำจากบ่อน้ำที่อยู่ด้านล่างจะถูกสูบเข้าสู่ถึงขั้วคั่นน้ำ เมื่อขั้นตอนการสูบน้ำเสร็จสิ้น จะครบ 1 รอบการทำงาน ระบบพร้อมที่จะทำงานในรอบต่อไปได้



รูปที่ 7.4 สมดุลพลังงานของถังขับเคลื่อนน้ำช่วงการสูบน้ำเข้าสู่ระบบ

#### 7.1.4.1 สมดุลพลังงานในถังขับเคลื่อนน้ำ

การสมดุลพลังงานขณะเกิดสภาวะวิกฤตในระบบ ไอน้ำที่อุณหภูมิ ( $100^{\circ}\text{C}$ ) ภายในถังขับเคลื่อนน้ำจะมีการถ่ายโอนความร้อนให้แก่น้ำเย็น ( $30^{\circ}\text{C}$ ) ที่ไหลมาจากถังเติมน้ำด้านบน ทำให้ไอทั้งหมดกลั่นตัว ส่วนอากาศและน้ำร้อนที่เหลือภายในถังขับเคลื่อนน้ำจากขั้นตอนนี้จะลดอุณหภูมิลง และน้ำเย็นบางส่วนจะกลายเป็นไออิมตัวที่อุณหภูมิผสม ดังนั้นสมดุลของพลังงานจะเกิดขึ้น สามารถอธิบายได้จากสมการ

2.7

ความดันในการสูบน้ำเข้าสู่ถังขັบคั้นน้ำ สามารถหาได้จากสมการ

$$P_{DT} = P_s - 101.325 \quad (7.33)$$

เมื่อ

$$P_s = \text{ความดันน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิผสม } (T_{\text{mix}}), \text{ kPa}$$

#### 7.1.4.2 สมดุลความดันระหว่างความดันภายในถังขັบคั้นน้ำและถังผลิตไอ

การเปลี่ยนแปลงความดันภายในถังขັบคั้นน้ำ เนื่องมาจากการถ่ายโอนความร้อนในระบบสามารถสมดุลได้ ดังนี้ [27]

$$P_{\text{vapor}} = \frac{m_{\text{vapor}} \times R_{\text{vapor}} \times T_{\text{vapor}}}{V_{\text{vapor}}} \quad (7.34)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} P_{\text{vapor}} &= \text{ความดันของไอน้ำ kPa} \\ m_{\text{vapor}} &= \text{มวลของไอน้ำ, kg} \\ R_{\text{vapor}} &= \text{ค่าคงที่ของไอน้ำ, } 0.4615 \text{ kPa m}^3/\text{kg K} \\ T_{\text{vapor}} &= \text{อุณหภูมิของไอน้ำ, K} \\ V_{\text{vapor}} &= \text{ปริมาตรของไอน้ำ, m}^3 \end{aligned}$$

สามารถคำนวณหามวลของไอน้ำ ได้จากสมการ

$$m_{\text{vapor}} = m_{\text{vapor,HT}} + m_{\text{vapor,DT}} \quad (7.35)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} m_{\text{vapor,HT}} &= \text{มวลของไอน้ำภายในถังผลิตไอ, kg} \\ m_{\text{vapor,DT}} &= \text{มวลของไอน้ำภายในถังขັบคั้นน้ำ, kg} \end{aligned}$$

คำนวณหาปริมาตรของไอน้ำ ได้จากสมการ

$$V_{\text{vapor}} = V_{\text{vapor,HT}} + V_{\text{vapor,DT}} \quad (7.36)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} V_{\text{vapor,HT}} &= \text{ปริมาตรของไอน้ำภายในถังผลิตไอ, m}^3 \\ V_{\text{vapor,DT}} &= \text{ปริมาตรของไอน้ำภายในถังขับเคลื่อนน้ำ, m}^3 \end{aligned}$$

คำนวณหาอุณหภูมิของไอน้ำ ได้จากสมการ

$$T_{\text{vapor}} = \frac{T_{\text{vapor,HT}} + T_{\text{vapor,DT}}}{2} \quad (7.37)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} T_{\text{vapor,HT}} &= \text{อุณหภูมิของไอน้ำภายในถังผลิตไอ, } ^\circ\text{C} \\ T_{\text{vapor,DT}} &= \text{อุณหภูมิของไอน้ำภายในถังขับเคลื่อนน้ำ, } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

คำนวณหาความดันของไอน้ำ ได้จากสมการ

$$P_{\text{vapor,g}} = P_{\text{vapor}} - 101.325 \quad (7.38)$$

เมื่อ

$$P_{\text{vapor,g}} = \text{ความดันของไอน้ำ, kPa (Pgage)}$$

$$P_{DT} = P_{\text{vapor,g}} \quad (7.39)$$

#### 7.1.4.3 สมดุลพลังงานความดันภายในถังขับเคลื่อนน้ำ

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในถังขับเคลื่อนน้ำ เนื่องมาจากการถ่ายโอนความร้อนในระบบสามารถสมดุลได้ ดังนี้ [31, 32]

$$Q_{\text{steam}} + m_{DT} \times c_{p,DT} \frac{dT_{DT}}{dt} = c_{p,w} \times \frac{d(m_{w,DT} \times T_{w,DT})}{dt} \quad (7.40)$$

เมื่อความดันภายในถังขับเคลื่อนน้ำ สามารถเอาชนะเสถียรภาพสูงในการสูบน้ำของระบบได้ สามารถคำนวณความเร็วในการสูบน้ำได้จากการสมมูล Bernoulli's equation [31]

$$\frac{P_3}{\gamma_w} + Z_3 + \frac{v_3^2}{2g} = \frac{P_1}{\gamma_w} + Z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + loss_s \quad (7.41)$$

เมื่อ

- $P_3$  = ความดันบรรยากาศที่บ่อน้ำ (= ความดันบรรยากาศ Patm), kPa (Pgage)
- $v_3$  = ความเร็วของของไหลที่บ่อน้ำ (= 0 ที่ระดับอ้างอิง), m/s
- $loss_s$  = การสูญเสียเสถียรภาพของของไหลในด้านสูบน้ำ, m
- $Z_1 - Z_3$  = ผลต่างระหว่างความสูงในการสูบน้ำของระบบ, m

โดยการสูญเสียเนื่องจากเสถียรภาพสูงของของไหลสามารถหาได้จากสมการ

$$loss_s = \frac{v_1^2}{2g} \times k_s \quad (7.42)$$

เมื่อ

- $k_s$  = คือสัมประสิทธิ์การสูญเสียสำหรับความสูงในการสูบน้ำ, (หาได้จากการทดลอง)

ดังนั้นจากสมการที่ 7.41 สามารถคำนวณความเร็วในการสูบน้ำเข้าสู่ถังขับเคลื่อนน้ำได้ดังนี้

$$v_1 = \sqrt{\left( -\frac{P_1}{\gamma_w} - \Delta Z_s \right) \times \frac{2g}{(1+k_s)}} \quad (7.43)$$

สามารถคำนวณหาปริมาตรของน้ำภายในถังขับเคลื่อนน้ำที่เปลี่ยนแปลงได้จากสมการ

$$V_{flow,s} = v_1 \times A_{tube,s} \quad (7.44)$$

$$m_{flow,s} = V_{flow,s} \times \rho_{w,s} \quad (7.45)$$

$$m_{w,DT}^2 = m_{w,DT}^1 - m_{flow,s} \times dt \quad (7.46)$$

$$V_{w,DT} = \frac{m_{w,DT}}{\rho_{w,DT}} \quad (7.47)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} \Delta Z_s &= \text{ผลต่างระหว่างความสูงในการสูบน้ำ, } (Z_3 - Z_1) \text{ m} \\ \Delta Z_{s,2} &= \Delta Z_{s,1} - \left( 0.245 - \frac{V_{w,DT}}{A_{DT}} \right) \quad (7.48) \\ V_{\text{flow},s} &= \text{ปริมาตรของน้ำภายในท่อด้านสูบน้ำ, m}^3/\text{s} \\ A_{\text{tube},s} &= \text{พื้นที่ของท่อสูบน้ำ, m}^2 \\ m_{\text{flow},s} &= \text{มวลของน้ำภายในท่อด้านสูบน้ำ, kg/s} \\ \rho_{w,s} &= \text{ค่าความหนาแน่นของน้ำภายในท่อด้านสูบน้ำ, kg/m}^3 \\ m_{w,DT,s}^2 &= \text{มวลของน้ำภายในถังจับคั้นน้ำ (หลังสูบน้ำ), kg} \\ m_{w,DT,s}^1 &= \text{มวลของน้ำภายในถังจับคั้นน้ำ (ก่อนสูบน้ำ), kg} \\ \Delta Z_{s2} &= \text{ผลต่างระหว่างความสูงในการสูบน้ำ (หลังสูบน้ำ), m} \\ \Delta Z_{s1} &= \text{ผลต่างระหว่างความสูงในการสูบน้ำ (ก่อนสูบน้ำ), m} \end{aligned}$$

## 7.2 ผลการศึกษาของระบบหมุนเวียนน้ำด้วยพลังงานความร้อนใช้ไฟฟ้าเป็นแหล่งพลังงานความร้อน (ระบบที่ 2) โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

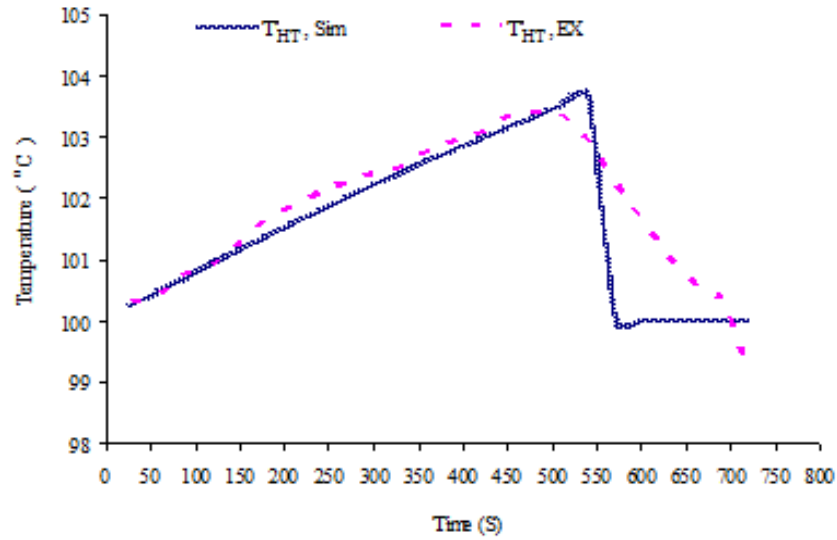
การศึกษาระบบหมุนเวียนน้ำด้วยพลังงานความร้อนใช้ไฟฟ้าเป็นแหล่งพลังงานความร้อน (ระบบที่ 2) โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ผู้วิจัยจะทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาการทำงานของระบบ โดยมีตัวแปรที่ต้องการศึกษาคือ

1. อุณหภูมิน้ำและไอน้ำภายในถังผลิตไอน้ำ
2. อุณหภูมิน้ำภายในถังจับคั้นน้ำ
3. ความดันไอน้ำภายในถังจับคั้นน้ำ

ในการศึกษานั้นผู้วิจัยเลือกศึกษาการทำงานของระบบที่ 1 โดยพิจารณาที่ 1 รอบการทำงาน เนื่องจากการทำงานในทุกๆ รอบค่อนข้างคงที่ โดยระดับความสูงในการศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยเลือกที่ระดับความสูงในการสูบน้ำ 1 m

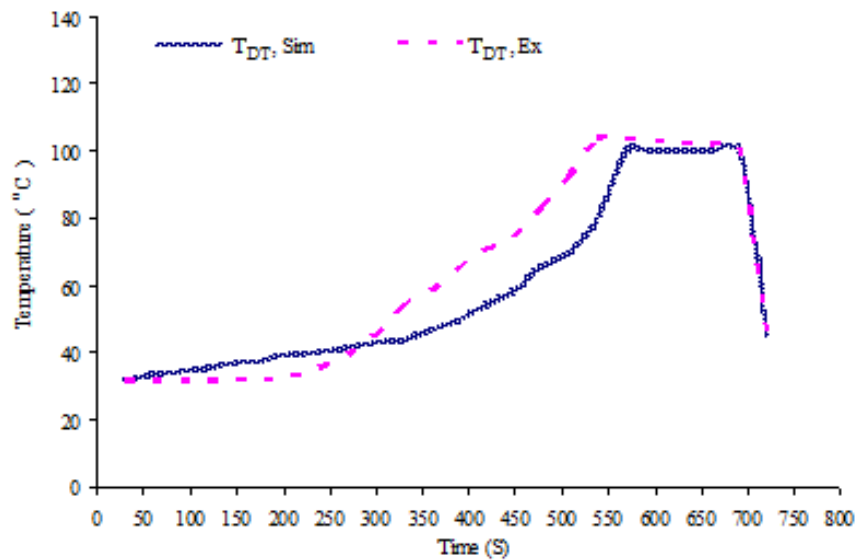
7.2.1 ผลการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองและค่าจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ผลของการทดลองเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ผลการศึกษาแสดงในรูปที่ 7.5 - 7.7



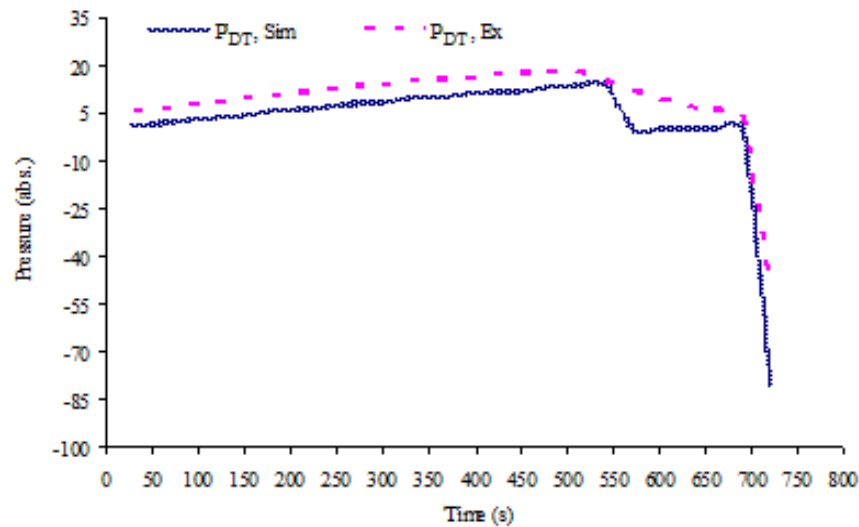
รูปที่ 7.5 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำและไอน้ำภายในถังผลิตไอรระหว่างผลการทดลอง

(T<sub>HT,Ex</sub>) และ ผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (T<sub>HT,Sim</sub>)  $\frac{RMSE}{X} \times 100 = 0.66\%$



รูปที่ 7.6 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำภายในถังขับเคลื่อนน้ำระหว่างผลการทดลอง (T<sub>DT,Ex</sub>)

และ ผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (T<sub>DT,Sim</sub>)  $\frac{RMSE}{X} \times 100 = 5\%$



รูปที่ 7.7 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความดันไอน้ำภายในถังขับเคลื่อนน้ำระหว่างผลการทดลอง

$$(P_{DT}, Ex) \text{ และ ผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ } (P_{DT}, Sim) \frac{RMSE}{X} \times 100 = 8.01\%$$

รูปที่ 7.5 แสดงเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำและไอน้ำภายในถังผลิตไอรระหว่างผลการทดลอง ( $T_{HT}, Ex$ ) และ ผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ( $T_{HT}, Sim$ ) พบว่า ในช่วงการให้ความร้อนและช่วงการขับเคลื่อนของระบบมีค่าของแบบจำลองกับผลการทดลองค่อนข้างใกล้เคียงกัน แต่เมื่อระบบเข้าสู่ช่วงการระบายไอน้ำเป็นต้นไปมีค่าไม่ใกล้เคียงกันเนื่องจากการทดลองท่อด้านส่งน้ำของระบบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางค่อนข้างเล็ก (0.4 mm) ทำให้การระบายไอน้ำในการทดลองจะใช้ระยะเวลา นานกว่าในแบบจำลอง โดยผลจากการทดลองเปรียบเทียบกับผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่า  $\frac{RMSE}{X} \times 100 = 0.66\%$  และจากรูปที่ 7.6 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำภายในถังขับเคลื่อนน้ำระหว่างผลการทดลอง ( $T_{DT}, Ex$ ) และผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ( $T_{DT}, Sim$ ) พบว่า ในช่วงการให้ความร้อนและช่วงการหมุนเวียนน้ำออกจากระบบในการทดลองมีผลไม่ใกล้เคียงกับผลของแบบจำลองเนื่องจากค่าอุณหภูมิภายในถังขับเคลื่อนน้ำของการทดลอง ( $T_{DT}, Ex$ ) เป็นค่าเฉลี่ยระหว่างไอน้ำและน้ำจึงมีอุณหภูมิสูงกว่าผลของอุณหภูมิของแบบจำลอง ( $T_{DT}, Sim$ ) ซึ่งเป็นค่าของอุณหภูมิ น้ำ โดยผลจากการทดลองเปรียบเทียบกับผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่า  $\frac{RMSE}{X} \times 100 = 5\%$

รูปที่ 7.7 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความดันไอน้ำภายในถังขับเคลื่อนน้ำระหว่างผลการทดลอง ( $P_{DT}, Ex$ ) และผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ( $P_{DT}, Sim$ ) พบว่า ผลจากการทดลองเปรียบเทียบกับผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่า  $\frac{RMSE}{X} \times 100 = 8.01\%$

### 7.3 สรุป

จากการศึกษาผลการเปรียบเทียบของผลจากการทดลองกับผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระบบ หมุนเวียนน้ำด้วยพลังงานความร้อนใช้ไฟฟ้าเป็นแหล่งพลังงานความร้อน (ระบบที่ 2) พบว่าผลการ จำลองอุณหภูมิน้ำและไอน้ำภายในถังผลิตไอ ความดันไอน้ำภายในถังจับดันท้ำ อุณหภูมิน้ำภายในถัง จับดันท้ำ โดยมีความผิดพลาดไม่เกิน  $\pm 10\%$