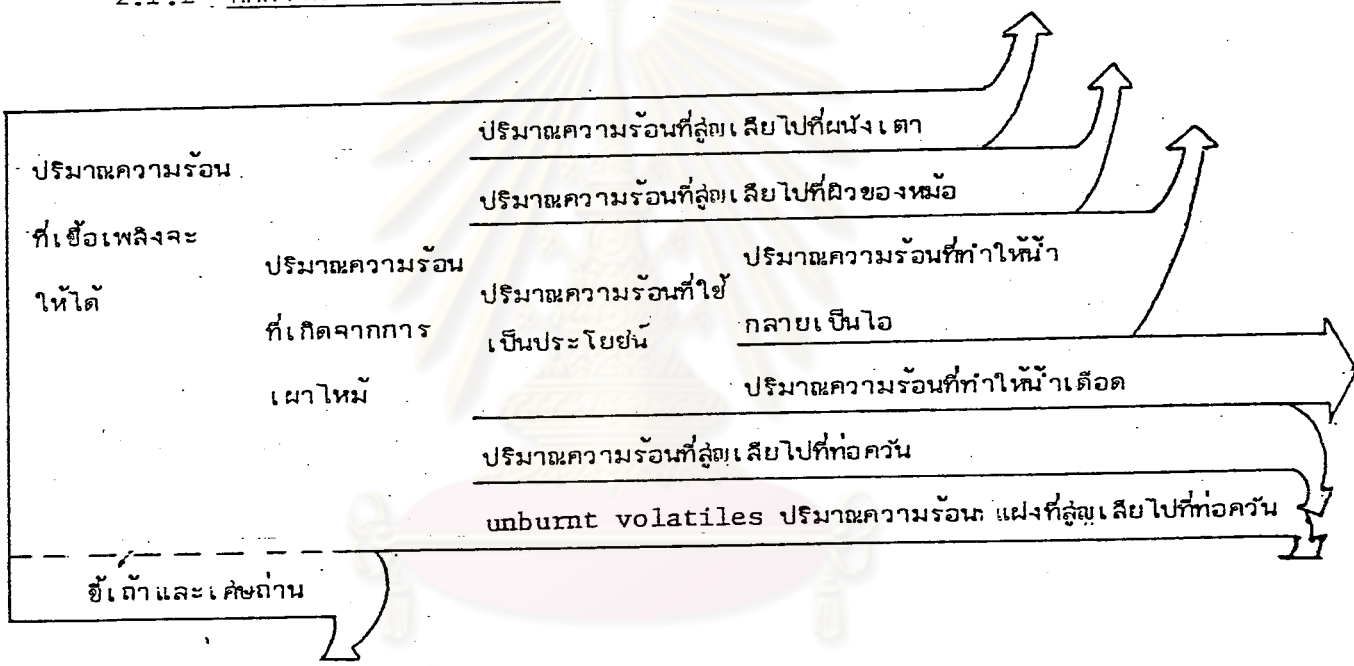
หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎีและการคำนวณเพื่อหาค่าประสิทธิภาพการหุงต้ม

2.1 ทฤษฎี

2.1.2 ทิศทางการไหลของพลังงาน



รูปที่ 2-1 แสดงทิศทางการไหลของพลังงาน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากรูปที่แสดงไว้จึงสรุปได้ว่า

ปริมาณความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ = ปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปที่ผนังเตา+ปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปที่ผิวยองหม้อ+ปริมาณความร้อนที่ใช้เป็นประโยชน์+ปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปที่ท่อควัน+ปริมาณความร้อนแฝงที่สูญเสียไปที่ท่อควัน

ปริมาณความร้อนที่ใช้เป็นประโยชน์ = ปริมาณความร้อนที่ทำให้น้ำกลายเป็นไอ+ปริมาณความร้อนที่ทำให้น้ำเดือด

ปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปเนื่องจาก = ปริมาณความร้อนแฝงที่สูญเสียไปที่ท่อควัน

จำพวก unburnt volatiles

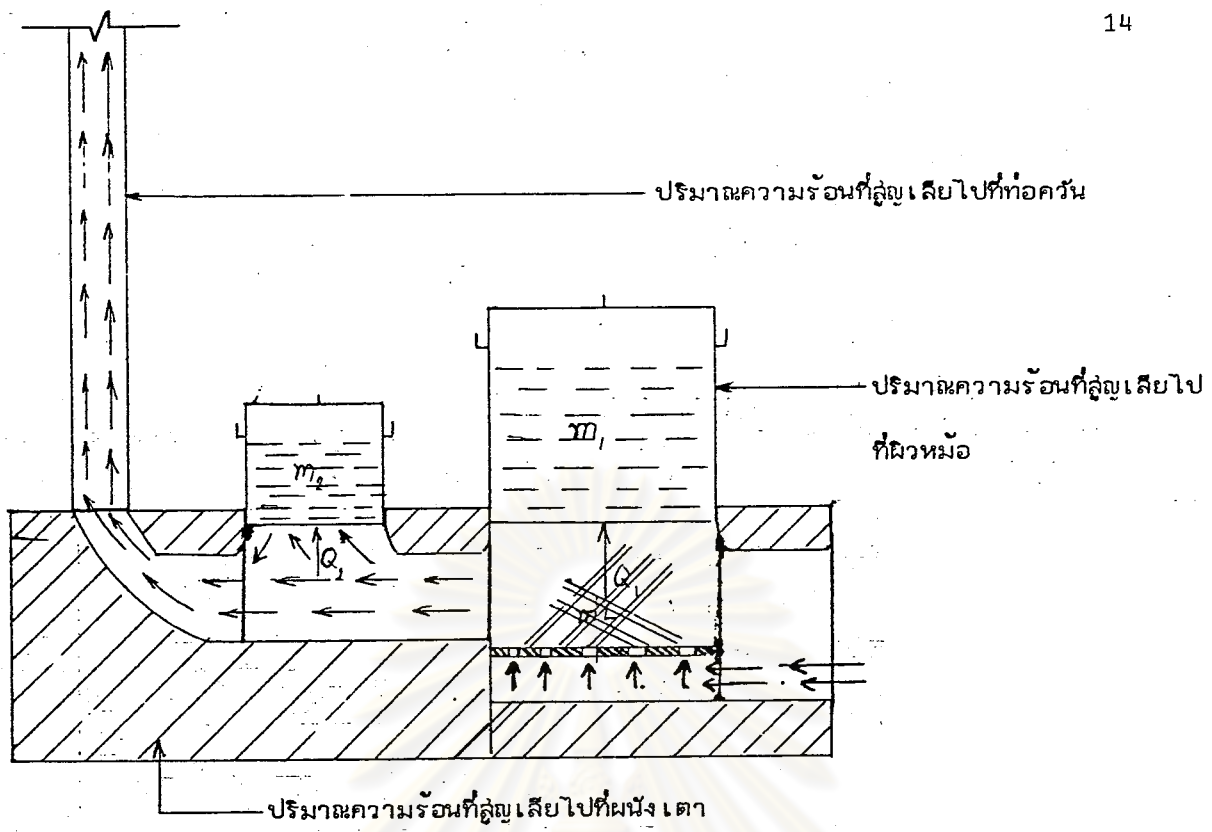
จากรูปข้างบนจะเห็นได้ว่า ปริมาณความร้อนที่ใช้เป็นประโยชน์คือปริมาณความร้อนที่ทำให้น้ำกลายเป็นไอ และปริมาณความร้อนที่ทำให้น้ำเดือด ส่วนปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปเกิดขึ้นเนื่องจาก

- การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์
- ความร้อนที่สูญเสียไปเนื่องจากผนังเตาถ่ายเทความร้อนให้แก่อากาศรอบ ๆ เตา
- ความร้อนที่สูญเสียไปเนื่องจากผิวหม้อถ่ายเทความร้อนให้แก่อากาศรอบ ๆ หม้อ
- ความร้อนที่สูญเสียไปที่ท่อควัน

2.2 การคำนวณ

2.2.1 แสดงวิธีการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความร้อน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2-2 แสดงวิธีการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความร้อน

จากรูปข้างบนนี้ จะเห็นได้ว่า

m'L คือปริมาณความร้อนที่เชื้อเพลิงจะให้ได้ จะให้ความร้อนจำนวนหนึ่งแก่หม้อใหญ่และหม้อเล็ก ปริมาณความร้อนจำนวนนี้คือปริมาณความร้อน (Q_1+Q_2) นอกจากนั้นก็จะเป็นปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปที่ท่อควันและผนังเตา ปริมาณความร้อน (Q_1+Q_2) จะถ่ายเทให้แก่น้ำในหม้อใหญ่และหม้อเล็กส่วนหนึ่ง อีกส่วนหนึ่งคือปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปที่ผิวหม้อ

2.2.2 วิธีการหาประสิทธิภาพการหุงต้ม (E)

หาได้จากสูตร

$$E = E_S \cdot E_H$$

E_S = ประสิทธิภาพเตา

E_H = ประสิทธิภาพภาชนะ

ประสิทธิภาพเตา (E_S) คืออัตราส่วนระหว่างพลังงานทั้งหมดที่หม้อได้รับต่อพลังงานที่เชื้อเพลิงจะให้ได้ในช่วงเวลาเดียวกัน

ประสิทธิภาพภาชนะ (E_H) คืออัตราส่วนระหว่างพลังงานที่ใช้เป็นประโยชน์ต่อพลังงานทั้งหมดที่หม้อได้รับในช่วงเวลาเดียวกัน

ประสิทธิภาพการหุงต้ม (E) คืออัตราส่วนระหว่างพลังงานที่ใช้เป็นประโยชน์ต่อพลังงานที่เชื้อเพลิงจะให้ได้

วิธีคำนวณ

1. ประสิทธิภาพภาชนะ (E_H)

จากสมการ Differential Equation

$$Q = mC_P\frac{dT}{dt} + h_cA\,(T-T_o) + \sum A\sigma\,(T^4-T_o^4) \qquad (1)$$

โดยที่

m	= น้ำหนักของน้ำ	kg
C_P	= ความร้อนจำเพาะของน้ำ	J/kg-K
T	= อุณหภูมิของน้ำและหม้อที่ขณะใดขณะหนึ่ง	K
t	= ระยะเวลาตั้งแต่เริ่มทดลองจนกระทั่งเสร็จสิ้นการทดลอง	sec
T_o	= อุณหภูมิของอากาศรอบหม้อ = อุณหภูมิของน้ำเริ่มแรก	K
A	= พื้นที่ผิวทั้งหมดของผนังและฝาของหม้อ	m^2
h_c	= สัมประสิทธิ์การพาความร้อน	W/m^2-K
Q	= ปริมาณความร้อนที่ให้แก่หม้อขณะใดขณะหนึ่ง ที่อุณหภูมิเปลี่ยนตามเวลา	W W

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

013176

ε = สัมประสิทธิ์การปล่อยรังสีความร้อน

σ = Stefan-Boltzman Constant $W/m^2 \cdot K$

และเทอม

$mC_P\frac{dT}{dt}$ คือปริมาณความร้อนที่ใช้เป็นประโยชน์

$h_cA(T-T_o)$ คือปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปโดยการพาความร้อน

$\varepsilon A\sigma (T^4-T_o^4)$ คือปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปโดยการแผ่รังสีความร้อน

เนื่องจากว่า

$$\varepsilon A\sigma (T^4-T_o^4) = h_rA(T-T_o) \quad \text{(หนังสือ Heat transfer, fifth edition ของ J.P. Holman หน้า 394)} \quad \ldots (2)$$

h_r = สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน $\simeq 4\varepsilon\sigma (T^*)^3$

และ T^* = อุณหภูมิเฉลี่ย $= \frac{T + To}{2}$

แทนค่า (2) ใน (1) จะได้

$$Q = mC_P\frac{d}{dt}(T-T_o)+h_cA(T-T_o)+h_rA(T-T_o)$$

$$= mC_P\frac{d}{dt}(T-T_o) + A(T-T_o)(h_c+h_r)$$

ให้ $h = h_c + h_r$

$T' = T-T_o$

$\therefore Q = mC_P\frac{dT'}{dt} + hAT'$

เอาเทอม mC_P หารตลอด

$$\frac{Q}{mC_P} = \frac{dT'}{dt} + \frac{hA}{mC_P}T'$$

สมมุติให้เทอม

$$\frac{hA}{mC_P} = R$$

$$\frac{Q}{mC_P} = \frac{dT'}{dt} + RT'$$

หรือ

$$\frac{dT'}{dt} + RT' = \frac{Q}{mC_P} \qquad (3)$$

สมการ (3) คือสมการ Ordinary First-Order Differential Equation

วิธีหาสมการทั่วไป

จากสูตร $T' = e^{-k}\left[\int e^{k} r dt + C\right]$

โดยที่

$f(t) = R$

e^{k} = Integrating factor

$k = \int f(t)\,dt = \int R dt = Rt$ (R = ค่าคงที่)

$r = \frac{Q}{mC_P}$

แทนค่า

$$T' = e^{-Rt}\left[\int e^{Rt} \frac{Q}{mC_P}\, dt + C\right]$$

$$= e^{-Rt}\left[\frac{e^{Rt}Q}{mC_P R} + C\right]$$

$$= e^{-Rt}\left[\frac{e^{Rt}Q}{hA} + C\right]$$

$$= \frac{Q}{hA} + Ce^{-Rt}$$

สมการทั่วไป

$$T' = \frac{Q}{hA} + Ce^{-Rt} \qquad (4)$$

หาค่า C

จาก Boundary Condition $t = 0, T = T_o$ แทนในสมการ (4)

$$0 = \frac{Q}{hA} + C$$

$$C = -\frac{Q}{hA}$$

แทนค่า C ในสมการ (4)

$$T' = \frac{Q}{hA} - \frac{Q}{hA}e^{-Rt}$$

$$= \frac{Q}{hA}(1-e^{-Rt})$$

หรือ $e^{-Rt} = 1 - \frac{hAT'}{Q}$

ใส่ ln ทั้งสองข้าง

$$\ln e^{-Rt} = \ln\left[1 - \frac{hAT'}{Q}\right]$$

$$-Rt = \ln\left[1 - \frac{hA}{Q}(T-T_o)\right]$$

$$t = \frac{1}{R}\ln\left[1 - \frac{hA}{Q}(T-T_o)\right] \qquad (5)$$

จากสมการที่ (5) หาค่า Q ได้เพราะทราบค่า R, h, A, T_o, t และ T

ข้อจำกัดในการใช้สูตรนี้ สมการที่ (5) จะใช้ก็ต่อเมื่ออุณหภูมิของน้ำมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาในการทดลอง แต่ถ้าอุณหภูมิของน้ำไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา จะใช้สูตรนี้ไม่ได้

2.2.3 การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ช่วง

1. ช่วงที่อุณหภูมิของน้ำเปลี่ยนแปลงตามเวลา
2. ช่วงที่อุณหภูมิของน้ำไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

2.2.3.1 ช่วงที่อุณหภูมิของน้ำเปลี่ยนแปลงตามเวลา

สำหรับหม้อขนาดใหญ่

จากสมการที่ (5) เขียนได้อีกรูปหนึ่ง

$$t_1 = -\frac{1}{R_1} \ln\left[1 - \frac{h_1 A_1}{Q_1}(T_1 - T_o)\right] \qquad (6)$$

t_1 หาได้โดยการจับเวลาตั้งแต่เริ่มทดลอง จนกระทั่งน้ำในหม้อขนาดใหญ่มีอุณหภูมิ 100°C หรือ 373°K นำ t_1, T_1 ไปแทนในสมการ (6) จะได้ Q_1

∴ พลังงานที่หม้อขนาดใหญ่ได้รับ $= Q_1 t_1$ J (7)

พลังงานที่ใช้เป็นประโยชน์ $= m_1 C_p (T_1 - T_o)$ J (8)

สำหรับหม้อขนาดเล็ก

จากสมการที่ (5) เขียนได้อีกรูปหนึ่ง

$$t_2 = -\frac{1}{R_2} \ln\left[1 - \frac{h_2 A_2}{Q_2}(T_2 - T_o)\right] \qquad (9)$$

t_2 หาได้โดยการจับเวลาตั้งแต่เริ่มทดลอง จนกระทั่งเสร็จสิ้นการทดลอง แทน t_2, T_2 ที่ได้ในสมการ (9) จะได้ Q_2

แต่ถ้าน้ำในหม้อขนาดเล็กเดือดคืออุณหภูมิของน้ำ 100°C หรือ 373°K t_2 ที่ได้ก็ตั้งแต่เริ่มทดลอง จนกระทั่งน้ำเดือด แทน t_2, T_2 ในสมการ (9) จะได้ Q_2

∴ พลังงานที่หม้อขนาดเล็กได้รับ $= Q_2 t_2$ J (10)

พลังงานที่ใช้เป็นประโยชน์ $= m_2 C_P (T_2 - T_o)$ J (11)

2.2.3.2 ช่วงที่อุณหภูมิของน้ำไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

สำหรับหม้อขนาดใหญ่

1. หาปริมาณความร้อนที่ทำให้น้ำกลายเป็นไอ

เมื่อน้ำในหม้อขนาดใหญ่มีอุณหภูมิ 100°C หรือ 373°K แล้ว แต่เชื้อเพลิงยังสามารถให้ความร้อนต่อไปได้ ก็ให้จับเวลาต่อไปจนกระทั่งอุณหภูมิของน้ำในหม้อขนาดใหญ่เริ่มลดลง จึงเสร็จสิ้นการทดลอง

ระยะเวลาที่จับได้ $= t_3$ sec

น้ำหนักน้ำที่กลายเป็นไอ $= W_1$ kg

ความร้อนแฝงที่ทำให้น้ำกลายเป็นไอ $= h_{fg}$ J/kg

ปริมาณความร้อนที่ทำให้น้ำกลายเป็นไอ $= W_1 h_{fg}$ J (12)

2. ปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปเนื่องจากการพาและการแผ่รังสีที่ผิวของหม้อ

$$Q_3 = h_{c1} A_1 (T_1 - T_o) + h_{r1} A_1 (T_1 - T_o)$$

$$= h_1 A_1 (T_1 - T_o) \quad (13)$$

โดยที่

Q_3 คือปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปโดยการพาและการแผ่รังสีที่ผิวหม้อ

∴ ปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปโดยการพาและการแผ่รังสีที่ผิวหม้อ

$= Q_3 t_3$ J (14)

สำหรับหม้อขนาดเล็ก

1. หาปริมาณความร้อนที่ทำให้น้ำกลายเป็นไอ

ดำเนินวิธีการทดลองเช่นเดียวกับหม้อขนาดใหญ่

ระยะเวลาที่จับได้ $= t_4$ sec

น้ำหนักน้ำที่กลายเป็นไอ $= W_2$ kg

ความร้อนแฝงที่ทำให้น้ำกลายเป็นไอ $= h_{fg}$ J/kg

ปริมาณความร้อนที่ทำให้น้ำกลายเป็นไอ $= W_2 h_{fg}$ J (15)

2. หาปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปเนื่องจากการพาและการแผ่รังสีที่ผิวของหม้อ

$$Q_4 = h_{c2}A_2(T_2-T_o) + h_{r2}A_2(T_2-T_o)$$

$$= h_2A_2(T_2-T_o) \quad (16)$$

โดยที่

Q_4 = ปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปเนื่องจากการพาและการแผ่รังสีที่ผิวหม้อ

∴ ปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปโดยการพาและการแผ่รังสีที่ผิวหม้อ

$$= Q_4t_4 \quad \text{J} \quad (17)$$

2.2.4 กล่าวถึงวิธีการหาประสิทธิภาพสองชนิดประสิทธิภาพเตาและประสิทธิภาพการหุงต้ม เมื่อน้ำในหม้อขนาดเล็กไม่เดือด

ประสิทธิภาพภาชนะ (E_H)

$$E_H = \frac{\text{พลังงานที่ใช้เป็นประโยชน์}}{\text{พลังงานทั้งหมดที่ภาชนะได้รับ}}$$

$$= \frac{m_1C_P(T_1-T_o)+ m_2C_P(T_2-T_o)+W_1h_{fg}}{Q_1t_1+Q_2t_2+Q_3t_3+W_1h_{fg}} \quad (18)$$

$$= \frac{\sum_{i=1}^{n} m_iC_P\Delta T_i + \sum_{i=1}^{n} W_ih_{fg}}{\sum_{i=1}^{n} Q_it_i + \sum_{i=1}^{n} W_ih_{fg}} \quad (19)$$

ประสิทธิภาพเตา (E_s)

$$E_s = \frac{\text{พลังงานทั้งหมดที่หม้อได้รับ}}{\text{พลังงานทั้งหมดที่เชื้อเพลิงจะให้ได้}}$$

$$= \frac{Q_1 t_1 + Q_2 t_2 + Q_3 t_3 + W_1 h_{fg}}{m'L}$$

$$= \frac{\sum_{i=1}^{n} Q_i t_i + \sum_{i=1}^{n} W_i h_{fg}}{m'L} \qquad (19)$$

ประสิทธิภาพการหุงต้ม (E)

$$E = E_H \cdot E_s$$

$$= \left[\frac{\sum_{i=1}^{n} m_i C_p \Delta T_i + \sum_{i=1}^{n} W_i h_{fg}}{\sum_{i=1}^{n} Q_i t_i + \sum_{i=1}^{n} W_i h_{fg}}\right] \left[\frac{\sum_{i=1}^{n} Q_i t_i + \sum_{i=1}^{n} W_i h_{fg}}{m'L}\right]$$

$$= \frac{\sum_{i=1}^{n} m_i C_p \Delta T_i + \sum_{i=1}^{n} W_i h_{fg}}{m'L} \qquad (20)$$

2.2.5 กล่าวถึงการหาประสิทธิภาพรวมที่ขนะ ประสิทธิภาพเตา และประสิทธิภาพการหุงต้มเมื่อน้ำในหม้อขนาดเล็กเดือดด้วย

ประสิทธิภาพการส่งผ่านความร้อน (E_H)

$$E_H = \frac{\text{พลังงานที่ใช้เป็นประโยชน์}}{\text{พลังงานทั้งหมดที่หม้อได้รับ}}$$

$$= \frac{m_1 C_P (T_1 - T_o) + m_2 C_P (T_2 - T_o) + W_1 h_{fg} + W_2 h_{fg}}{Q_1 t_1 + Q_2 t_2 + Q_3 t_3 + W_1 h_{fg} + W_2 h_{fg} + Q_4 t_4} = \frac{\sum_{i=1}^{n} m_i C_P \Delta T_i + \sum_{i=1}^{n} W_i h_{fg}}{\sum_{i=1}^{n} Q_i t_i + \sum_{i=1}^{n} W_i h_{fg}} \qquad (21)$$

ประสิทธิภาพเตา (E_s)

$$E_s = \frac{\text{พลังงานทั้งหมดที่หม้อได้รับ}}{\text{พลังงานทั้งหมดที่เชื้อเพลิงจะให้ได้}}$$

$$= \frac{Q_1 t_1 + Q_2 t_2 + Q_3 t_3 + Q_4 t_4 + W_1 h_{fg} + W_2 h_{fg}}{m'L} = \frac{\sum_{i=1}^{n} Q_i t_i + \sum_{i=1}^{n} W_i h_{fg}}{m'L} \qquad (22)$$

ประสิทธิภาพการหุงต้ม (E)

$$E = E_s \cdot E_H$$

$$= \frac{\left[\sum_{i=1}^{n} Q_i t_i + \sum_{i=1}^{n} W_i h_{fg}\right]}{m'L} \cdot \frac{\sum_{i=1}^{n} m_i C_P \Delta T_i + \sum_{i=1}^{n} W_i h_{fg}}{\left[\sum_{i=1}^{n} Q_i t_i + \sum_{i=1}^{n} W_i h_{fg}\right]}$$

$$= \frac{\sum_{i=1}^{n} m_i C_P \Delta T_i + \sum_{i=1}^{n} W_i h_{fg}}{m'L} \qquad (23)$$

หมายเหตุ สูตร E_s, E_H, E สำหรับน้ำเดือดหม้อเดียวหรือสองหม้อ จากที่พิสูจน์ได้จะเหมือนกัน

สรุป ไม่ว่าน้ำจะเดือดหม้อเดียวหรือสองหม้อ หรือกี่หม้อก็ตาม สูตรที่ใช้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$E_H = \frac{\sum_{i=1}^{n} m_i C_p \Delta T_i + \sum_{i=1}^{n} W_i h_{fg}}{\sum_{i=1}^{n} Q_i t_i + \sum_{i=1}^{n} W_i h_{fg}}$$

$$E_s = \frac{\sum_{i=1}^{n} Q_i t_i + \sum_{i=1}^{n} W_i h_{fg}}{m'L}$$

$$E \qquad \frac{\sum_{i=1}^{n} m_i c_p \Delta T_i + \sum_{i=1}^{n} W_i h_{fg}}{m'L}$$

2.2.6 วิธีหาปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปที่ผนังเตาและท่อควัน

ปริมาณความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ = ปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปที่ผนังเตา
+ ปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปที่ผิวหม้อ
+ ปริมาณความร้อนที่ใช้เป็นประโยชน์
+ ปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปที่ท่อควัน
+ ปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปเนื่องจาก
จำพวก unburnt valatiles ____(24)

ปริมาณความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ = $m'L$ kJ kJ

ปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปที่ผิวหม้อ
+ ปริมาณความร้อนที่ใช้เป็นระโยชน์ = $\sum_{i=1}^{n} Q_i t_i + \sum_{i=1}^{n} W_i h_{fg}$ kJ

ปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปที่ท่อควัน = $Q_T = \dot{m}_e C_{Pm} (T_e - T_o)$ kJ

จากสมการ (24)

ปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปที่ผนังเตา
รวมกับปริมาณความร้อนที่สูญเสีย
เนื่องจากจำพวก unburnt valatile = $m'L - \sum_{i=1}^{n} Q_i t_i - \sum_{i=1}^{n} W_i h_{fg} -$

$\dot{m}_e C_{Pm} (T_e - T_o)$ ____(25)