บทที่ 2

ทฤษฎี

ในการทดสอบเตาหุงต้ม ได้แบ่งประสิทธิภาพที่เกี่ยวข้องออกเป็นสามส่วน [2] ได้แก่ ประสิทธิภาพของเตา (Stove efficiency) ประสิทธิภาพของภาชนะ (Pot efficiency) ประสิทธิภาพของการหุงต้ม (Overall efficiency) การหาค่าประสิทธิภาพเหล่านี้อาจกระทำได้ลำบากถ้าลำดับการหุงต้มยุ่งยาก โดยปกติเพื่อให้ได้ผลที่แน่นอนเป็นมาตรฐานเดียวกัน และสามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเตาหุงต้มแต่ละรูปแบบได้ การหาประสิทธิภาพของเตาหุงต้มจึงมักนิยามในเทอมของขบวนการง่าย ๆ เช่น การต้มน้ำให้เดือดหรือต้มน้ำให้เดือดและเคี่ยว (Simmer) ในระยะเวลาหนึ่ง

เนื่องจากการทดสอบเตาต้องใช้น้ำเป็นตัวรับความร้อน คุณสมบัติของน้ำทั่ว ๆ ไปจะระเหยเป็นไอบางส่วนก่อนที่จะถึงจุดเดือดของน้ำ (100^{o}ซ.) ดังนั้นจึงต้องตั้งสมมติฐานเพื่อสะดวกในการหาประสิทธิภาพของเตาหุงต้มคือ น้ำไม่ระเหยเป็นไอก่อนที่จะถึงจุดเดือดของน้ำ

2.1 ประสิทธิภาพของเตา (Stove efficiency)

ประสิทธิภาพของเตาหมายถึงอัตราส่วนระหว่างพลังงานทั้งหมดที่ภาชนะได้รับ ต่อพลังงานที่เชื้อเพลิงสามารถให้ได้ในช่วงเวลาเดียวกัน เมื่อเขียนให้อยู่ในรูปทั่วไปจะได้ดังนี้

$$E_s = \frac{\sum_{i=1}^{n} Q_i \Delta t_i + \sum_{i=1}^{n} Q_{si} \Delta t_{si}}{MH - W_c H_c} \times 100 \qquad (2\text{-}1)$$

โดยที่ E_s = ประสิทธิภาพของเตา, %

Q = ความร้อนที่ให้แก่ภาชนะหุงต้มขณะที่ต้มน้ำ, วัตต์

Q_s = ความร้อนที่ให้แก่ภาชนะหุงต้มขณะที่น้ำเดือด, วัตต์

Δt = ระยะเวลาที่ใช้ในการต้มน้ำ, วินาที

Δt_s = ระยะเวลาที่น้ำเดือดจนสิ้นสุดการทดลอง, วินาที

i = ดัชนีแสดงการรวม

M = น้ำหนักของเชื้อเพลิงที่ใช้ทดลอง, กิโลกรัม

H = ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่ใช้ทดลองต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนัก, จูล/กิโลกรัม

W_c = น้ำหนักของถ่านที่เหลือจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง, กิโลกรัม

H_c = ค่าความร้อนของถ่านที่เหลือจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง, จูล/กิโลกรัม

n = จำนวนภาชนะหุงต้มที่ใช้ในการทดลอง

2.2 ประสิทธิภาพของภาชนะ (Pot efficiency)

ประสิทธิภาพของภาชนะหมายถึงอัตราส่วนระหว่างพลังงานที่ใช้เป็นประโยชน์ ต่อพลังงานทั้งหมดที่ภาชนะได้รับในช่วงเวลาเดียวกัน เมื่อเขียนให้อยู่ในรูปทั่วไปจะได้ดังนี้

$$E_H = \frac{\sum_{i=1}^{n} m_i C_{pw} \Delta T_i + \sum_{i=1}^{n} W_{ei} L}{\sum_{i=1}^{n} Q_i \Delta t_i + \sum_{i=1}^{n} Q_{si} \Delta t_{si}} \times 100 \qquad (2-2)$$

โดยที่ E_H = ประสิทธิภาพของภาชนะ, %

m = น้ำหนักของน้ำในภาชนะหุงต้มที่ใช้ทดลอง, กิโลกรัม

C_{pw} = ความร้อนจำเพาะ (Specific heat) ของน้ำ, จูล/(กิโลกรัม-^{o}ซ.)

ΔT = อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในการต้มน้ำ, ^{o}ซ.

W_e = น้ำหนักน้ำที่ระเหยกลายเป็นไอเมื่อน้ำเดือดจนสิ้นสุดการทดลอง, กิโลกรัม

L = ความร้อนแฝง (latent heat) ของน้ำที่กลายเป็นไอ, จูล/กิโลกรัม

2.3 ประสิทธิภาพของการหุงต้ม (Overall efficiency)

ประสิทธิภาพของการหุงต้มหมายถึงอัตราส่วนระหว่างพลังงานที่ใช้ประโยชน์ ต่อพลังงานที่เชื้อเพลิงสามารถให้ได้ เมื่อเขียนให้อยู่ในรูปทั่วไปจะได้ดังนี้

$$E = \frac{\sum_{i=1}^{n} m_i C_{pw} \Delta T_i + \sum_{i=1}^{n} W_{ei} L}{MH - W_c H_c} \times 100 \qquad (2-3)$$

ประสิทธิภาพของการหุงต้มนี้ อาจหาได้จากผลคูณของประสิทธิภาพของเตากับประสิทธิภาพของภาชนะดังนี้

$$E = E_S \times E_H \tag{2-4}$$

2.4 การหาค่าความร้อนที่ให้แก่ภาชนะ

เมื่อภาชนะได้รับความร้อนจากเชื้อเพลิงในเตา ความร้อนส่วนหนึ่งจะถูกสะสมอยู่ในน้ำภายในภาชนะ และความร้อนอีกส่วนหนึ่งจะสูญเสียไปให้กับอากาศที่อยู่รอบ ๆ ภาชนะนั้น ปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปนี้ประกอบด้วยการสูญเสียโดยการพาความร้อนกับการสูญเสียโดยการแผ่รังสีความร้อน ดังนั้นสมการหาค่าความร้อนที่ให้แก่ภาชนะเขียนได้เป็น

$$Q = mC_{pw}\frac{\Delta T}{\Delta t} + h_c A(T_s - T_a) + \varepsilon\sigma A(T_s^4 - T_a^4) \tag{2-5}$$

และ

$$Q_s = \frac{W_e L}{\Delta t_s} + h_c A(T_s - T_a) + \varepsilon\sigma A(T_s^4 - T_a^4) \tag{2-6}$$

โดยที่ h_c = สัมประสิทธิ์การพาความร้อน

A = พื้นที่ของภาชนะที่สูญเสียความร้อน

T_s = อุณหภูมิของผิวภาชนะ

T_a = อุณหภูมิของอากาศ

ε = สัมประสิทธิ์การปล่อยรังสีความร้อน

σ = ค่าคงที่ของสเตเฟน-บอลทซ์มาน (Stefan-Boltzmann constant)

สมการ (2-5) เป็นสมการหาค่าความร้อนที่ให้แก่ภาชนะขณะที่ต้มน้ำจนเดือด และสมการ (2-6) เป็นสมการหาค่าความร้อนที่ให้แก่ภาชนะขณะที่น้ำเดือดระเหยกลายเป็นไอ

ถ้าให้ $\varepsilon\sigma A(T_s^4 - T_a^4) = h_r A(T_s - T_a)$

หรือ $$h_r = \varepsilon\sigma(T_s^2 + T_a^2)(T_s + T_a) \tag{2-7}$$

โดยที่ h_r = สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน

สมการ (2-5) และสมการ (2-6) เขียนใหม่ได้เป็น

$$Q = mC_{pw}\frac{\Delta T}{\Delta t} + A(h_c + h_r)(T_s - T_a) \qquad (2\text{-}8)$$

$$Q_s = \frac{W_e L}{\Delta t_s} + A(h_c + h_r)(T_s - T_a) \qquad (2\text{-}9)$$

เมื่อคิดแยกการสูญเสียความร้อนของภาชนะออกเป็นสองส่วน คือความร้อนที่สูญเสียทางด้านข้างกับด้านบนของภาชนะ จากสมการ (2-8) และสมการ (2-9) จะได้

$$Q = mC_{pw}\frac{\Delta T}{\Delta t} + A_p(h_{cn} + h_{rn})(T_{sn} - T_a) + A_L(h'_{cn} + h'_{rn})(T'_{sn} - T_a) \qquad (2\text{-}10)$$

$$Q_s = \frac{W_e L}{\Delta t_s} + A_p(h_{cn} + h_{rn})(T_{sn} - T_a) + A_L(h'_{cn} + h'_{rn})(T'_{sn} - T_a) \qquad (2\text{-}11)$$

โดยที่ A_p = พื้นที่ด้านข้างของภาชนะที่สูญเสียความร้อน

A_L = พื้นที่ด้านบนของภาชนะที่สูญเสียความร้อน

h_{cn} = สัมประสิทธิ์การพาความร้อนด้านข้างของภาชนะ

h'_{cn} = สัมประสิทธิ์การพาความร้อนด้านบนของภาชนะ

h_{rn} = สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนด้านข้างของภาชนะ

h'_{rn} = สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนด้านบนของภาชนะ

T_{sn} = อุณหภูมิของผิวภาชนะด้านข้าง

T'_{sn} = อุณหภูมิของผิวภาชนะด้านบน

2.5 สัมประสิทธิ์การพาความร้อน

ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ได้แยกออกเป็นการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนทางด้านข้างของภาชนะกับการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนทางด้านบนของภาชนะ

2.5.1 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนทางด้านข้างของภาชนะ

สัมประสิทธิ์การพาความร้อนทางด้านข้างของภาชนะ สามารถหาได้จากสูตร

ของการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของรูปทรงกระบอกในแนวดิ่ง (Vertical cylinder)[7] คือ

$$Nu = C(Gr.Pr)^{P} \tag{2-12}$$

$$Nu = \frac{h_{cn}\ell}{k_a} \tag{2-13}$$

$$Gr = \frac{\rho_a^2 \ell^3 \beta g \Delta T_{pa}}{\mu_a^2} \tag{2-14}$$

$$Pr = \frac{\mu_a C_{pa}}{k_a} \tag{2-15}$$

C และ P เป็นค่าคงที่ขึ้นอยู่กับผลคูณของ Gr กับ Pr ดังนี้

เมื่อ $10^4 < Gr.Pr < 10^9$: $C = 0.59$, $P = 0.25$

เมื่อ $10^9 < Gr.Pr < 10^{12}$: $C = 0.129$, $P = 0.33$

โดยที่ Nu = นัสเซลท์ นัมเบอร์ (Nusselt Number)

Gr = แกรสฮอฟ นัมเบอร์ (Grashof Number)

Pr = แพรนด์เทิล นัมเบอร์ (Prandtl Number)

h_{cn} = สัมประสิทธิ์การพาความร้อนทางด้านข้างของภาชนะ

k_a = ค่าสภาพนำความร้อนของอากาศ (thermal conductivity)

ρ_a = ความหนาแน่นของอากาศ

β = ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของอากาศทางปริมาตร (volumetric coefficient of expansion of air)

g = ค่าคงตัวของแรงดึงดูดของโลก (gravitational constant)

ΔT_{pa} = ความแตกต่างของอุณหภูมิผิวภาชนะทางด้านข้างและอุณหภูมิของอากาศ

μ_a = ค่าความหนืดของอากาศ (viscosity)

C_{pa} = ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศ (specific heat)

ℓ = ความสูงของภาชนะส่วนที่สัมผัสกับอากาศ

2.5.2 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนทางด้านบนของภาชนะ

สัมประสิทธิ์การพาความร้อนทางด้านบนของภาชนะ สามารถหาได้จากสูตรของการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของระนาบระดับ (horizontal flat surface)[7] คือ

$$Nu = C(Gr.Pr)^{P} \tag{2-16}$$

$$Nu = \frac{h'_{cn} d}{k_a} \tag{2-17}$$

$$Gr = \frac{\rho_a^2 d^3 \beta g \Delta T_{La}}{\mu_a^2} \tag{2-18}$$

$$Pr = \frac{\mu_a C_{pa}}{k_a} \tag{2-19}$$

C และ P เป็นค่าคงที่ขึ้นอยู่กับผลคูณของ Gr กับ Pr ดังนี้

เมื่อ $10^5 < Gr.Pr < 2x10^7$: C = 0.54 , P = 0.25

เมื่อ $2x10^7 < Gr.Pr < 3x10^{10}$: C = 0.14 , P = 0.33

โดยที่ h'_{cn} = สัมประสิทธิ์การพาความร้อนทางด้านบนของภาชนะ

d = เส้นผ่าศูนย์กลางของภาชนะ

ΔT_{La} = ความแตกต่างของอุณหภูมิผิวภาชนะทางด้านบนและอุณหภูมิของอากาศ

2.6 สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน

จากสมการ (2-7) ได้

$$h_r = \varepsilon\sigma(T_s^2 + T_a^2)(T_s + T_a)$$

เพื่อความสะดวกในการคำนวณ สมการหาค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนสามารถลดรูปให้อยู่ในรูปของสมการเชิงเส้นได้สมการลดรูปนี้มีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 1.25%[8] คือ

$$h_r = 4\varepsilon\sigma T_m^3 \qquad (2\text{-}20)$$

เมื่อ $$T_m = \frac{T_s + T_a}{2}$$

ดังนั้นจากสมการ (2-20) สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนทางด้านข้างของภาชนะสามารถเขียนได้เป็น

$$h_{rn} = 4\varepsilon\sigma T_{mp}^3 \qquad (2\text{-}21)$$

ในทำนองเดียวกัน สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนทางด้านบนของภาชนะสามารถเขียนได้เป็น

$$h'_{rn} = 4\varepsilon\sigma T_{mL}^3 \qquad (2\text{-}22)$$

เมื่อ

$$T_{mp} = \frac{T_{sn} + T_a}{2} \qquad (2\text{-}23)$$

$$T_{mL} = \frac{T'_{sn} + T_a}{2} \qquad (2\text{-}24)$$

โดยที่ h_{rn} = สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนทางด้านข้างของภาชนะ

h'_{rn} = สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนทางด้านบนของภาชนะ