บทที่ 3

ทฤษฎีประกอบการวิเคราะห์การใช้พลังงานในเตาเผาเซรามิค

3.1 ความหมายของการอนุรักษ์พลังงาน

การอนุรักษ์พลังงานในอุตสาหกรรมหมายถึง การจัดการด้านการใช้พลังงานจำนวนหนึ่งเพื่อให้ได้ประโยชน์สูงสุดโดยไม่มีผลเสียต่อกิจกรรมการผลิต โดยการพยายามใช้อุปกรณ์ที่ใช้พลังงานต่างๆ ให้มีประสิทธิภาพสูง ลดการสูญเสียพลังงาน เกิดผลดีด้านการลดต้นทุนการผลิตเพิ่มอายุใช้งานของอุปกรณ์ การหยุดเครื่องจักรในขณะทำงานและลดปัญหาด้านมลภาวะ ซึ่งเป็นผลดีทางอ้อม

หลักพิจารณาในการอนุรักษ์พลังงานในอุตสาหกรรม โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 4 ข้อคือ

1. การเลือกใช้พลังงาน และเชื้อเพลิงอย่างเหมาะสม
2. การเลือกวิธีแปลงพลังงาน และกระบวนการผลิตอย่างเหมาะสม
3. การลดการสูญเสีย และการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ
4. การนำพลังงานเหลือทิ้งที่มีคุณภาพกลับมาใช้ประโยชน์

3.1.1 การเลือกใช้พลังงานและเชื้อเพลิงอย่างเหมาะสม

การเลือกชนิดของพลังงานและเชื้อเพลิงใดๆที่จะนำมาใช้ควรพิจารณาถึงลักษณะของคุณสมบัติทั้งกายภาพ ทางเศรษฐกิจ และเลือกใช้พลังงานที่เหมาะสมกับงานมากที่สุดโดยพิจารณาในแง่ของประสิทธิภาพรวมที่จะได้

3.1.2 การเลือกใช้วิธีแปลงพลังงานและกระบวนการผลิตอย่างเหมาะสม

ในกรณีที่กระบวนการผลิต เป็นตัวกำหนดรูปแบบของพลังงานที่จะใช้ หากกระบวนการใดสามารถใช้พลังงานได้มากกว่าหนึ่งรูปแบบ ควรพิจารณาใช้พลังงานรูปแบบที่มีความเหมาะสมทั้งทางด้านเทคนิคและทางด้านเศรษฐศาสตร์

3.1.3 การลดการสูญเสียและการใช้พลังงานอย่างประสิทธิภาพ

การใช้พลังงานในโรงงานทั้งพลังงานไฟฟ้าและความร้อน ควรศึกษาสภาพการใช้งานและรายละเอียดของอุปกรณ์ใช้พลังงานในโรงงาน ศึกษาและวิเคราะห์หาแนวทางลดการ

สูญเสีย เนื่องจากสาเหตุต่างๆ เช่นการเดินมอเตอร์ตัวเปล่า ลมรั่ว ท่อไอน้ำรั่ว ฉนวนความร้อนเสื่อมสภาพเป็นต้น เพื่อให้ใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

3.1.4 การนำพลังงานเหลือทิ้งที่มีคุณภาพกลับมาใช้ประโยชน์

เป็นการศึกษาวิเคราะห์นำพลังงานเหลือทิ้งเนื่องจากสาเหตุต่างๆ กลับมาใช้ให้เป็นประโยชน์ เพื่อให้ประสิทธิภาพการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นโดยคำนึงถึงความเหมาะสมในด้านเศรษฐศาสตร์

3.2 ประเภทของมาตรการประหยัดพลังงาน

มาตรการต่างๆ ในการประหยัดพลังงาน หากพิจารณาในแง่ของการปรับปรุงหรือระดับการลงทุน โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 3 ประเภทคือ

3.2.1 มาตรการที่ไม่ต้องลงทุนหรือลงทุนน้อย

เป็นมาตรการที่ไม่ต้องลงทุนเลยหรือลงทุนน้อยมาก ดำเนินการได้ง่าย เช่นการควบคุมอากาศส่วนเกิน การปรับความตึงสายพาน ปิดไฟในตำแหน่งที่ไม่ใช้งาน ทำความสะอาด Cooling tower ที่สกปรก เป็นต้น

3.2.2 มาตรการที่มีการลงทุนปรับปรุงอุปกรณ์พอควร

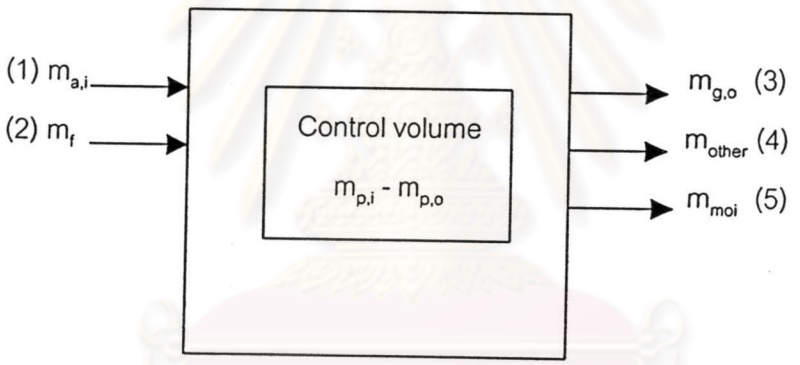
เป็นมาตรการที่ต้องมีการลงทุนแต่ลงทุนไม่มาก เช่นการหุ้มฉนวน การนำคอนเดนเสทกลับมาใช้ประโยชน์ การเปลี่ยนหัวเผา (Burner) ในหม้อไอน้ำ การติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน การติดตั้งกับดักไอน้ำเป็นต้น

3.2.3 มาตรการที่มีการลงทุนสูง ระยะเวลาคืนทุนนาน

เป็นมาตรการที่ต้องมีการลงทุนสูง โดยการเปลี่ยนหรือปรับปรุงเครื่องจักรอุปกรณ์หรือกระบวนการผลิตใหม่เช่น เปลี่ยนหม้อไอน้ำ ติดตั้งระบบนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์ ติดตั้งระบบ Cogeneration เป็นต้น

3.3 ทฤษฎีการวิเคราะห์พลังงานและประสิทธิภาพของเตาเผาเซรามิค

ขั้นตอนแรกต้องทำการตรวจสอบบัญชีพลังงาน คือการตรวจสอบและวิเคราะห์การใช้พลังงานเพื่อที่จะหาแนวทางในการประหยัดพลังงาน โดยทั่วไปการตรวจสอบบัญชีพลังงานกระทำโดยวิธีการตรวจสอบและการวิเคราะห์การใช้พลังงานอย่างละเอียด โดยการศึกษากระบวนการผลิตและอุปกรณ์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการผลิตที่มีการใช้พลังงาน จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาทำการตรวจสอบและวิเคราะห์โดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์เข้าช่วยในการวิเคราะห์ ซึ่งเตาเผาเซรามิคที่ทำการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพทางพลังงานนั้นต้องทำการพิจารณาตั้งแต่เริ่มต้นการเผาจนถึงสิ้นสุดการเผาหรือเรียกว่า 1 รอบการเผา และกำหนดให้เตาเผาเซรามิคเป็นระบบควบคุมปริมาตร (Control volume) จากนั้นทำการสมดุลมวลและสมดุลพลังงานดังนี้



รูปที่ 3.1 การสมดุลมวลในระบบเตาเผาเซรามิค

3.3.1 สมดุลมวล

มวลเข้าสู่ระบบ = มวลออกจากระบบ

$$m_f + m_a + m_{p,i} = m_f + m_{p,o} + m_{other}$$

เมื่อ m_f = มวลของเชื้อเพลิงที่เข้าสู่เตาเผา , kg

m_a = มวลของอากาศที่เข้าสู่เตาเผา , kg

$m_{p,i}$ = มวลของผลิตภัณฑ์ที่เข้าสู่เตาเผา , kg

$m_{g,o}$ = มวลของแก๊สที่เสียออกจากเตาเผา , kg

$m_{p,o}$ = มวลของผลิตภัณฑ์ที่ออกจากเตาเผา , kg

m_{moi} = มวลของความชื้นในผลิตภัณฑ์

m_{other} = มวลของอากาศที่สูญเสียออกไปทางช่องเปิดต่างๆ , kg

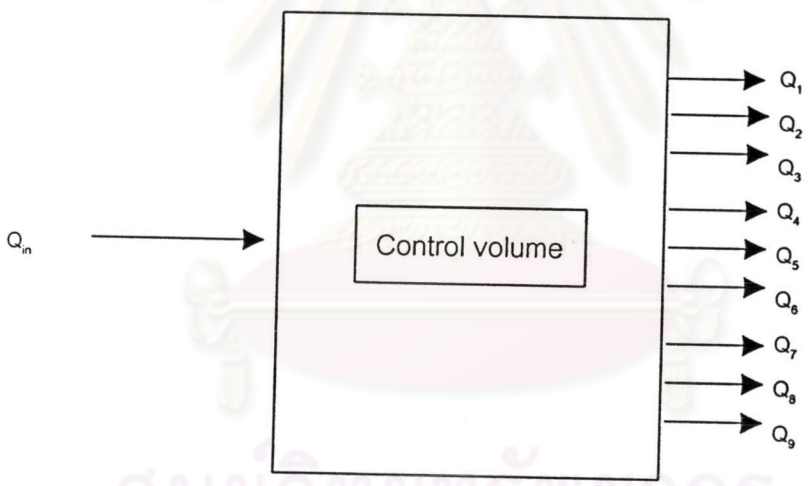
3.3.2 ปริมาณอากาศส่วนเกิน (m)

$$m = \frac{21}{21 - \%O_2} \times 100\% \qquad (3.1)$$

3.3.3 สมดุลพลังงาน

สมดุลพลังงานตามกฎข้อ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับเตาเผาเซรามิคประสิทธิภาพสูงมีดังนี้

พลังงานเข้าสู่ระบบ = พลังงานออกจากระบบ



รูปที่ 3.2 การสมดุลพลังงานในระบบเตาเผาเซรามิค

พลังงานเข้าสู่ระบบประกอบด้วย

1.พลังงานจากเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ (LPG)

2. พลังงานที่ใช้อุ่นอากาศก่อนเข้าเตาเผา (กรณีที่มีอุปกรณ์อุ่นอากาศ)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พลังงานออกจากระบบประกอบด้วย

1. พลังงานที่สะสมในเปลือกเตา (hull)
2. พลังงานที่สะสมในพื้นเตา (kiln floor)
3. พลังงานที่สะสมในเฟอร์นิเจอร์ (kiln furniture)
4. พลังงานที่ใช้เผาผลิตภัณฑ์ (product)
5. พลังงานที่เสียไปจากการแผ่รังสี (radiation loss)
6. พลังงานที่เสียไปจากการพาความร้อน (convection loss)
7. พลังงานที่สูญเสียไปกับความชื้นในอากาศ
8. พลังงานที่สะสมในก๊าซเสีย
9. หลังงานที่สูญเสียตามช่องเปิดและที่ไม่สามารถวัดค่าได้

ซึ่งพลังงานทั้งหมดที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้นนี้มีรายละเอียดของสมการในการหาค่าพลังงานดังนี้

พลังงานที่เข้าสู่ระบบ

1.พลังงานจากเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ (LPG)

Q_{in} (LPG) = น้ำหนักแก๊สที่ใช้ x ค่าความร้อนของแก๊ส LPG

$$= W_g \times LHV \qquad (3.2)$$

เมื่อ W_g คือ น้ำหนักแก๊สที่ใช้ , kg

LHV คือ ค่าความร้อนของแก๊ส LPG , kJ / kg

2. พลังงานที่ใช้อุ่นอากาศก่อนเข้าเตาเผา

$$Q_{re} = m_a \times Cp_a \times (T_{re} - T_a) \qquad (3.3)$$

เมื่อ m_a คือ มวลของอากาศที่เข้าสู่ระบบ , kg

Cp_a คือ ค่าความร้อนจำเพาะเฉลี่ยจาก T_{re} ถึง T_a , kJ / kg

T_{re} คือ อุณหภูมิของอากาศที่ออกจาก Recuperator , °c

T_a คือ อุณหภูมิบรรยากาศ , °c

พลังงานที่ออกจากระบบ

1. พลังงานที่สะสมในเปลือกเตา (hull)

Q_1 (hull) = พลังงานที่สะสมในเปลือกเตา

= พลังงานที่สะสมในไฟเบอร์ (Q_{11}) +พลังงานที่สะสมในตัวโครงเตาเผา (Q_{12})

โดยที่

$$Q_{11}(\text{Fiber}) = W_{11} \times Cp_1 \times Dt_{11} \quad (3.4)$$

$$Q_{12}(\text{Body Frame}) = W_{12} \times Cp_5 \times Dt_{12} \quad (3.5)$$

$$\therefore Q_1 \text{ (hull)} = Q_{11}(\text{Fiber}) + Q_{12}(\text{Body Frame})$$

เมื่อ W_{11} คือ น้ำหนักของไฟเบอร์ , kg

Cp_1 คือ ค่าความร้อนจำเพาะของไฟเบอร์ , kJ / kg

Dt_{11} คือ ผลต่างระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยของเปลือกเตากับอุณหภูมิของบรรยากาศ ($T_s(ave)_1 - T_a$) , °c

W_{12} คือ น้ำหนักของโครงตัวเตา , kg

Cp_5 คือ ค่าความร้อนจำเพาะของเหล็ก , kJ / kg

Dt_{12} คือ ผลต่างระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยของผิวเปลือกเตาสูงสุดในการเผากับอุณหภูมิของบรรยากาศ ($Ts_1 + T_a$) , °c

2. พลังงานที่สะสมในพื้นเตา (kiln floor)

Q_2 (kiln floor) = พลังงานที่สะสมในพื้นเตา (ตัวรถและแนวหัวพ่นไฟ)

= พลังงานที่สะสมในอิฐพื้นเตา(E_{21})+พลังงานที่สะสมในโครงรถ(E_{22})

โดยที่

$$Q_{21}(\text{Brick}) = W_{21} \times Cp_5 \times Dt_{21} \quad (3.6)$$

$$Q_{22}(\text{Car frame}) = W_{22} \times Cp_5 \times Dt_{22} \quad (3.7)$$

$$\therefore Q_2 \text{ (kiln floor)} = Q_{21}(\text{Brick}) + Q_{22}(\text{Car Frame})$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อ W_{21} คือ น้ำหนักอิฐพื้นเตา , kg

Cp_2 คือ ค่าความร้อนจำเพาะของอิฐพื้นเตา , kJ / kg

Dt_{21} คือ ผลต่างระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยของพื้นเตากับอุณหภูมิของบรรยากาศ $(T_s(ave)_2 - T_a)$, °c

W_{22} คือ น้ำหนักของโครงรถเตา , kg

Cp_5 คือ ค่าความร้อนจำเพาะของเหล็ก , kJ / kg

Dt_{22} คือ ผลต่างระหว่างอุณหภูมิผิวใต้พื้นเตาสูงสุดในการเผากับอุณหภูมิของบรรยากาศ $(Ts_2 + T_a)$, °c

3. พลังงานที่สะสมในเฟอร์นิเจอร์ (kiln furniture)

$$Q_3(\text{furniture}) = \text{พลังงานที่สะสมในเฟอร์นิเจอร์}$$
$$= W_3 \times Cp_3 \times Dt_3 \qquad (3.8)$$

เมื่อ W_3 คือ น้ำหนักเฟอร์นิเจอร์ , kg

Cp_3 คือ ค่าความร้อนจำเพาะของเฟอร์นิเจอร์ , kJ / kg

Dt_3 คือ ผลต่างระหว่างอุณหภูมิสูงสุดในเตากับอุณหภูมิบรรยากาศ $(Tmax - T_a)$, °c

4. พลังงานที่ใช้เผาผลิตภัณฑ์ (product)

$$Q_4(\text{product}) = \text{พลังงานที่ใช้เผาผลิตภัณฑ์}$$
$$= m_p \times Cp_4 \times Dt_4 \qquad (3.9)$$

เมื่อ m_p คือ น้ำหนักผลิตภัณฑ์ , kg

Cp_4 คือ ค่าความร้อนจำเพาะของผลิตภัณฑ์ , kJ / kg

Dt_4 คือ ผลต่างระหว่างอุณหภูมิสูงสุดในเตากับอุณหภูมิบรรยากาศ $(Tmax - T_a)$, °c

5. พลังงานที่เสียไปจากการแผ่รังสี (radiation loss)

$$Q_5(\text{rad loss of klin}) = Q_{5.1}(\text{rad loss of hull}) +$$
$$Q_{5.2}(\text{rad loss of klin floor})$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$Q_{5.1}$(rad loss of hull) = พลังงานที่เสียไปจากการแผ่รังสีของเปลือกเตา

$$= A_1 \times e_1 \times 5.67\left[\left(\frac{T_s(ave)_1 + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_a + 273}{100}\right)^4\right] \times hr \times 3.6 \quad (3.10)$$

เมื่อ A_1 คือ พื้นที่เปลือกเตา , m^2

e_1 คือ ค่า Emissivity ของอะลูมิเนียม, Oxidized (ใช้ค่า 0.40)

$T_s(ave)_1$ คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของเปลือกเตา , °c

T_a คือ อุณหภูมิของบรรยากาศ , °c

hr คือ จำนวนชั่วโมงที่เผา

$Q_{5.2}$(rad loss of klin floor) = พลังงานที่เสียไปจากการแผ่รังสีพื้นเตา

$$= A_2 \times e_2 \times 5.67 \times \left[\left(\frac{T_s(ave)_2 + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_a + 273}{100}\right)^4\right] \times hr \times 3.6 \quad (3.11)$$

เมื่อ A_2 คือ พื้นที่ใต้พื้นเตา , m^2

e_2 คือ ค่า Emissivity ของเหล็ก, Oxidized (ใช้ค่า 0.85)

$T_s(ave)_2$ คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของพื้นเตา , °c

6. พลังงานที่เสียไปจากการพาความร้อน (convection loss)

Q_6(Conv. loss of klin) = $Q_{6.1}$(Conv. loss of hull) + $Q_{6.2}$(Conv loss of klin floor)

$Q_{6.1}$(Conv. Loss of hull) = พลังงานที่เสียไปจากการพาความร้อนที่เปลือกเตา

$$= \quad A_1 \times hc_1 \times \left(T_s(ave)_1 - T_a\right) \times hr \times 3.6 \qquad (3.12)$$

เมื่อ hc_1 คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากผิวเตา

$Q_{6.2}$(Conv. Loss of kiln floor) = พลังงานที่เสียไปจากการพาความร้อนที่พื้นเตา

$$= \quad A_2 \times hc_2 \times \left(T_s(ave)_2 - T_a\right) \times hr \times 3.6 \qquad (3.13)$$

เมื่อ hc_2 คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากผิวใต้พื้นเตา

7. พลังงานที่สูญเสียไปกับความชื้นในอากาศ

$$Q_7 = m_a \times W \times Cp_{st} \times (T_g - T_a) \qquad (3.14)$$

เมื่อ m_a คือ มวลของอากาศที่เข้าสู่ระบบ , kg

W คือ Specific humidity , kg H_2O / kg dry air

Cp_{st} คือ ค่าความร้อนจำเพาะเฉลี่ยของไอน้ำจาก T_g ถึง T_a , kJ / kg

T_g คือ อุณหภูมิก๊าซเสีย , °c

T_a คือ อุณหภูมิของบรรยากาศ , °c

8. พลังงานที่สะสมอยู่ในก๊าซเสีย

$$Q_8 = m_g \times Cp_g \times (T_g - T_a) \qquad (3.15)$$

$$Q_8 = Q(CO_2) + Q(O_2) + Q(CO) + Q(N_2)$$

โดยที่

$$Q(CO_2) = m(CO_2) \times Cp(CO_2) \times (T_g - T_a)$$

$$Q(CO) = m(CO) \times Cp(CO) \times (T_g - T_a)$$

$$Q(O_2) = m(O_2) \times Cp(O_2) \times (T_g - T_a)$$

$$Q(N_2) = m(N_2) \times Cp(N_2) \times (T_g - T_a)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อ $m(CO_2)$ คือ มวลของ CO_2 ที่ใช้ในการเผาไหม้ต่อ 1 รอบการเผา, kg

$m(CO)$ คือ มวลของ CO ที่ใช้ในการเผาไหม้ต่อ 1 รอบการเผา, kg

$m(O_2)$ คือ มวลของ O_2 ที่ใช้ในการเผาไหม้ต่อ 1 รอบการเผา, kg

$m(N_2)$ คือ มวลของ N_2 ที่ใช้ในการเผาไหม้ต่อ 1 รอบการเผา, kg

$Cp(CO_2)$ คือ ค่าความร้อนจำเพาะของ CO_2 , kJ / kg

$Cp(CO)$ คือ ค่าความร้อนจำเพาะของ CO , kJ / kg

$Cp(O_2)$ คือ ค่าความร้อนจำเพาะของ O_2 , kJ / kg

$Cp(O_2)$ คือ ค่าความร้อนจำเพาะของ N_2 , kJ / kg

T_g คือ อุณหภูมิก๊าซเสีย , $^{\circ}c$

T_a คืออุณหภูมิของบรรยากาศ , $^{\circ}c$

9. พลังงานที่สูญเสียตามช่องเปิดและที่ไม่สามารถวัดค่าได้

การสูญเสียพลังงานชนิดนี้เป็นการสูญเสียพลังงาน ที่ไม่สามารถวัดค่าได้ซึ่งจะมีสมการดังต่อไปนี้

$$Q_9 = Q_{in} - [Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_8] \quad (3.16)$$

3.3.4 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาเผาเซรามิค

$$\eta = \frac{\text{ความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์}}{\text{ความร้อนที่เข้าสู่เตาเผา}}$$

$$= \frac{Q_4}{Q_{in}} \times 100\% \quad (3.17)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4 วิธีการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

การประเมินศักยภาพในการปรับปรุงระบบ จะใช้วิธีวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์เป็นตัวประเมินว่ามีศักยภาพมากน้อยเพียงใด ซึ่งวิธีวิเคราะห์ได้แก่ ระยะเวลาคืนทุน (Pay-back - period) และผลตอบแทนภายใน (Internal rate of return)

3.4.1 ระยะเวลาคืนทุน (Pay-back period, n)

คือเวลาที่ต้องการเพื่อให้การลงทุนเริ่มต้นได้รับการคืนทุนสามารถคำนวณได้จากสมการทั้งสองสมการที่จะกล่าวดังต่อไปนี้

$$CRF = [i(1 + i)^n / ((1 + i)^n - 1)] \qquad (3.18)$$

เมื่อ CRF คือ (ค่าเงินที่ประหยัดได้/ราคาอุปกรณ์) Capital recovery factor

i คือ Annual rate of interest

n คือ Pay back period

A_s คือ ค่าเงินที่ประหยัดได้

TIC คือ ราคาค่าใช้จ่ายในการติดตั้งอุปกรณ์

โดยที่ ค่าเงินที่ประหยัดได้ = ราคาค่าใช้จ่ายในการติดตั้งอุปกรณ์-ค่าใช้จ่ายในการเดินอุปกรณ์-ค่าบำรุงรักษา

$$A_s = TIC \times CRF \qquad (3.19)$$

หรืออาจหาค่า Pay-back period ได้โดยตรงจากสมการ

$$\text{Pay-back period} = \frac{\text{first cost}}{\text{yearly benefit} - \text{yearly cost}}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4.2 อัตราผลตอบแทนการลงทุน (Internal rate of return, IRR)

หมายถึงการคำนวณหาอัตราคิดลด(Discount rate) ที่มีผลทำให้มูลค่าปัจจุบันของเงินสดที่ได้รับในอนาคต เท่ากับเงินลงทุนที่จ่ายในปัจจุบัน นั่นคือมูลค่าปัจจุบันของเงินสดรับเท่ากับมูลค่าปัจจุบันของเงินสดจ่าย โดยมีสูตรการคำนวณดังนี้

$$TIC = A_s\left[\frac{1}{1+IRR^1}+\frac{1}{1+IRR^2}+\ldots\frac{1}{1+IRR^m}\right] \qquad (3.20)$$

เมื่อ m คือ อายุการใช้งานของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I20358490