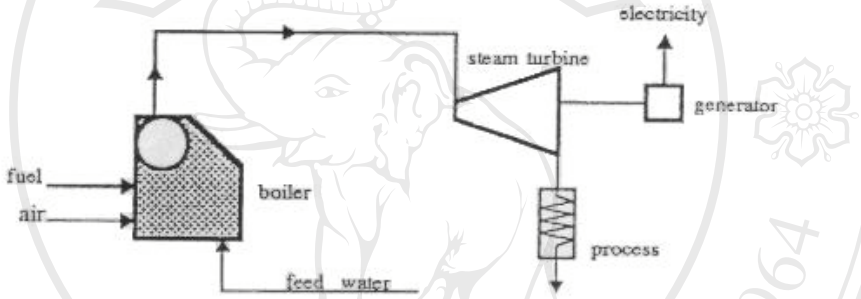
บทที่ 2
หลักการและทฤษฎี

2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับระบบผลิตพลังงานความร้อนร่วม

การผลิตพลังงานความร้อนร่วม(Cogeneration)คือการใช้พลังงานจากแหล่งพลังงานหรือเชื้อเพลิงเพียงแหล่งเดียวผลิตพลังงานที่ต่างกัน 2 ชนิด โดยระบบผลิตพลังงานความร้อนร่วมอาจแบ่งได้เป็น 2 ชนิด โดยดูจากลำดับของการนำพลังงานไปใช้ประโยชน์ดังนี้

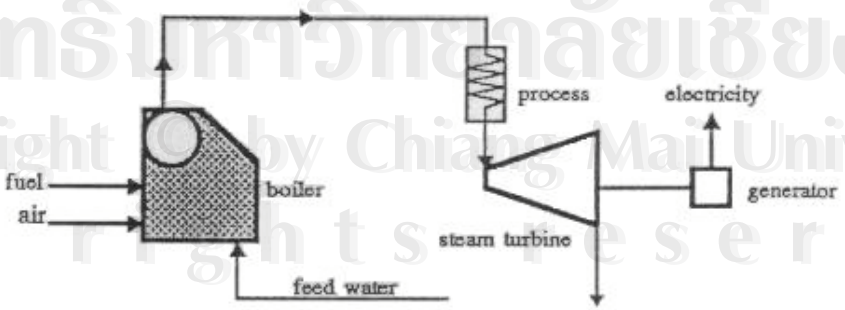
1. Topping Cycle คือระบบผลิตพลังงานความร้อนร่วมที่นำพลังงานไปผลิตเป็นพลังงานกลหรือไฟฟ้าก่อนแล้วจึงนำส่วนที่เหลือไปผลิตความร้อนดังรูป 2.1



รูป 2.1 ระบบผลิตพลังงานความร้อนร่วมแบบ Steam Topping Cycle

ที่มา : อำพรรณ ไชยบุญชู (2544)

2. Bottoming Cycle คือระบบผลิตพลังงานความร้อนร่วมที่นำพลังงานไปใช้ให้ความร้อนก่อนแล้วจึงนำพลังงานส่วนที่เหลือไปผลิตพลังงานกลหรือไฟฟ้าดังรูป 2.2



รูป 2.2 ระบบผลิตพลังงานความร้อนร่วมแบบ Steam Bottoming Cycle

ที่มา : อำพรรณ ไชยบุญชู (2544)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ระบบที่ได้รับความนิยมใช้กันทั่วไปคือระบบ Topping Cycle เพราะมักให้ผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์ดีกว่า ประกอบกับโรงงานอุตสาหกรรมโดยทั่วๆไปมักต้องการความร้อนที่อุณหภูมิไม่สูงนัก

ตาราง 2.1 ข้อพิจารณาระหว่างระบบ Topping Cycle กับระบบ Bottoming Cycle
ที่มา : อำพรรณ ไชยบุญชู (2544)

ข้อพิจารณา	ระบบ Topping Cycle	ระบบ Bottoming Cycle
ระดับอุณหภูมิที่เหมาะสมกับกระบวนการผลิต	ไม่สูงมากนัก	ค่อนข้างสูง
ตัวอย่างอุตสาหกรรมที่เหมาะสม	กระดาษ สิ่งทอ อาหาร	หลอมแก้ว โลหะ ซิเมนต์
พลังงานที่มีความสำคัญอันดับแรก	ไฟฟ้า	ความร้อน
ความซับซ้อนของระบบ	ไม่ซับซ้อน	ซับซ้อน

ข้อดีและข้อเสียของระบบผลิตพลังงานความร้อนร่วม

ข้อดีของระบบผลิตพลังงานความร้อนร่วม

- เงินลงทุนเริ่มแรกของระบบผลิตพลังงานความร้อนร่วมต่ำกว่าโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่มาก
- ระบบผลิตพลังงานความร้อนร่วมสามารถนำเอาความร้อนทิ้งกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์เช่น นำเอาความร้อนทิ้งไปผลิตกระแสไฟฟ้าหรือความร้อนโดยสามารถลดค่าใช้จ่ายและเป็นการประหยัดด้านต่างๆได้มาก
- ปัจจุบันมีการปรับปรุงกฎหมายและระเบียบต่างๆให้เอกชนสามารถขายกระแสไฟฟ้ากับรัฐซึ่งเป็นแรงจูงใจให้ผู้ประกอบการหันมาให้ความสนใจระบบผลิตพลังงานความร้อนร่วมมากขึ้น
- ระบบผลิตพลังงานความร้อนร่วมเป็นการดึงเอาเชื้อเพลิงส่วนที่เหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ มาผลิตกระแสไฟฟ้าและยังช่วยลด Peak Load ของการไฟฟ้าผ่ายผลิตลง ทำให้การไฟฟ้าผ่ายผลิตสามารถลดการใช้งานในโรงต้นกำลังไฟฟ้าที่ประสิทธิภาพต่ำลงได้และเป็นการแก้ปัญหาการลงทุนผลิตกระแสไฟฟ้าของประเทศ

ข้อเสียของระบบผลิตพลังงานความร้อนร่วม

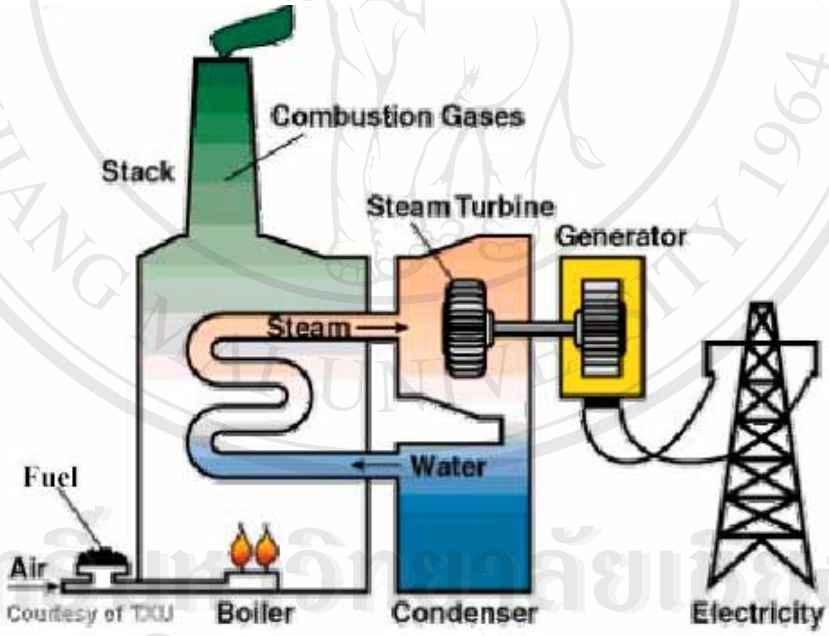
- ระบบผลิตพลังงานความร้อนร่วมเป็นระบบที่ยุ่งยากซับซ้อนในการออกแบบติดตั้งและควบคุม ซึ่งจำเป็นต้องใช้เทคนิคที่ต้องอาศัยความรู้และประสบการณ์มาดำเนินการ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

- เนื่องจากระบบผลิตพลังงานความร้อนร่วมมีอัตราส่วนการผลิตไอน้ำและกระแสไฟฟ้าค่อนข้างคงที่จึงเป็นการเพิ่มข้อบังคับในการทำงานและถ้าต้องการให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด จำเป็นต้องมีไอน้ำหรือกระแสไฟฟ้าเกินไปบ้าง

2.2 กระบวนการผลิตพลังงานโดยใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง

กระบวนการที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงชีวมวลให้เป็นพลังงานโดยทั่วไปมักอาศัยวิธีทางเคมีความร้อน(Thermochemical) โดยกระบวนการผลิตพลังงานจากชีวมวลที่อาศัยกระบวนการทางเคมีความร้อนเรียกกันว่า การเผาไหม้โดยตรง (Direct Combustion) ซึ่งการเผาไหม้เป็นวิธีที่ใช้กันมากในการนำชีวมวลมาใช้ให้เกิดประโยชน์โดยการเผาให้ได้ความร้อนเพื่อเอาก๊าซไปใช้ในกระบวนการผลิตเช่น การอบแห้ง หรือการนำความร้อนที่ได้ไปผลิตไอน้ำร้อนที่มีความดันสูงเพื่อใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยไอน้ำที่ผลิตได้นี้จะถูกนำไปใช้ขับกังหันไอน้ำเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ไอน้ำที่ออกจากกังหันไอน้ำจะเข้าสู่คอนเดนเซอร์(เครื่องควบแน่น)เพื่อให้เย็นลงและกลั่นตัวกลายเป็นน้ำและถูกส่งกลับขึ้นไปป้อนหม้อไอน้ำดังรูป 2.3

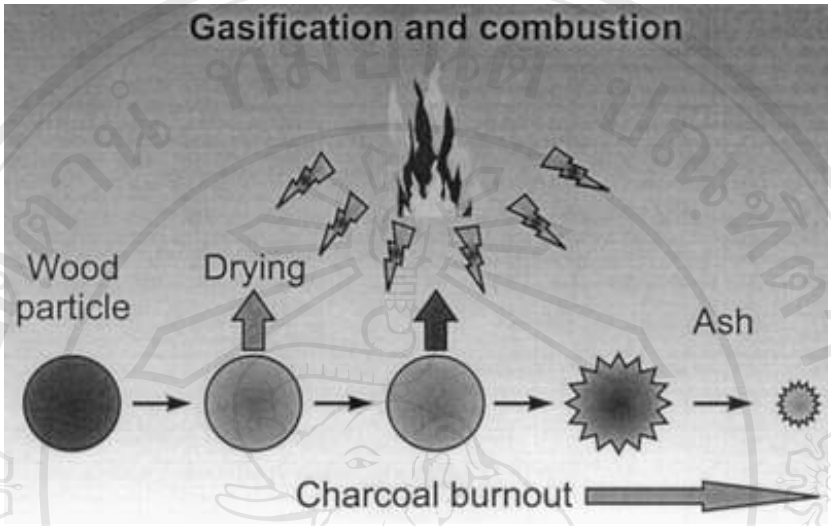


รูป 2.3 กระบวนการทำงานของระบบผลิตพลังงานความร้อนร่วม
ที่มา : Elliott T.C. และ Chen. H. (1999)

ปัญหาสำคัญอันหนึ่งของการเผาไหม้ชีวมวลซึ่งจัดเป็นเชื้อเพลิงแข็ง(Solid fuels) คือ การเผาไหม้ที่ทำได้ค่อนข้างยากและไม่สมบูรณ์ เมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงที่เป็นของเหลวหรือก๊าซ เนื่องจากลักษณะการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแข็งจะเป็นการเผาไหม้แบบ Diffusion คือ ก้อนเชื้อเพลิงจะติดไฟที่

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

ผิวนอกก่อนแล้วจึงค่อยๆลามเข้าไปข้างในก้อนเชื้อเพลิง และเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ไปก่อนก็จะกลายเป็นเถ้า(Ash)ขัดขวางการลามเข้าไปในก้อนเชื้อเพลิงของเปลวไฟ จึงทำให้เชื้อเพลิงมักจะเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ต่างกับการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่เป็นของเหลวหรือก๊าซที่จะมีการผสมกันของเชื้อเพลิงและอากาศก่อนจึงทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์กว่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งดังแสดงในรูป 2.4

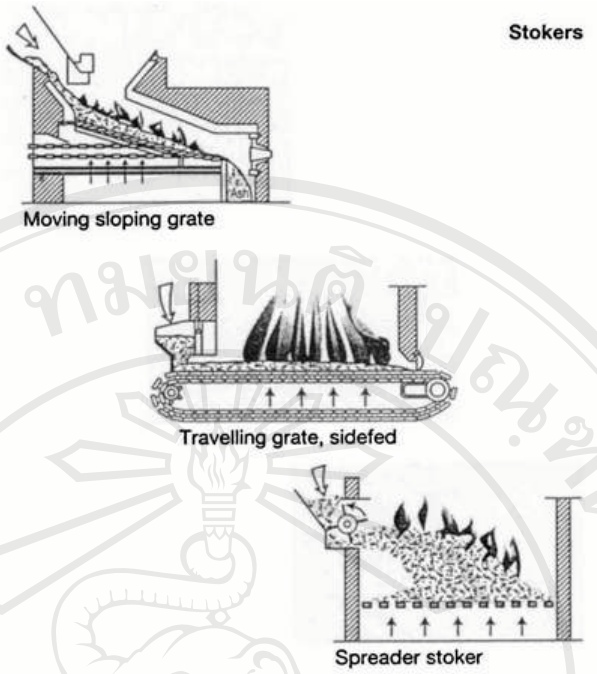


รูป 2.4 การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง
ที่มา : El-Wakil. ,M.M. (1994)

2.2.1 เทคโนโลยีผลิตพลังงานโดยใช้ห้องเผาไหม้แบบสโตกเกอร์

ห้องเผาไหม้แบบสโตกเกอร์เป็นเทคโนโลยีการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งที่ใช้กันอยู่มากในปัจจุบัน เพราะเป็นระบบการเผาไหม้แบบที่ทำให้เชื้อเพลิงมีการเคลื่อนที่มากขึ้นและทำเชื้อเพลิงให้มีขนาดเล็กลงเพื่อที่จะลดปัญหาเถ้าขัดขวางการเผาไหม้เข้าไปในก้อนเชื้อเพลิง ห้องเผาไหม้แบบสโตกเกอร์มีทั้งที่เป็นแบบ Slope grate แบบ Travelling grate และแบบ Spreader (รูป 2.5) โดยเชื้อเพลิงจะถูกเผาไหม้อยู่บนตะแกรงซึ่งเคลื่อนที่ไปตามกลไกที่ออกแบบไว้ อุณหภูมิเผาไหม้อยู่ระหว่าง 1200^0C – 1500^0C ทำให้ห้องเผาไหม้แบบนี้ใช้ได้ไม่ดีนักกับเชื้อเพลิงที่มีปริมาณเถ้า (Ash content)สูงเพราะจะเกิดการหลอมละลายของเถ้า ทำให้ตะแกรงอุดตันขัดขวางการไหลของอากาศสำหรับการเผาไหม้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved



รูป 2.5 ลักษณะเตาเผาเชื้อเพลิงระบบสโตกเกอร์แบบต่างๆ

ที่มา : เกริกชัย สุกาญจนัจที (2538)

จากที่กล่าวมาข้างต้น Barroso. J. และคณะ (2003) ได้ทำการศึกษาและทดลองนำกากอ้อยมาเป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำที่ใช้ห้องเผาไหม้แบบสโตกเกอร์ และจากการศึกษาและทดลองดังกล่าวทำให้สามารถหาประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำที่ใช้ห้องเผาไหม้แบบสโตกเกอร์ได้โดยสมการ

$$\eta_{bs} = 100 - (q_{bs1} + q_{bs2} + q_{bs3} + q_{bs4}) \quad (1)$$

โดยที่ η_{bs} = ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำที่ใช้ห้องเผาไหม้แบบสโตกเกอร์(%)

q_{bs1} = ความร้อนที่สูญเสียไปกับก๊าซร้อน(%)

q_{bs2} = ความร้อนที่สูญเสียไปกับการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์(%)

q_{bs3} = ความร้อนที่สูญเสียไปกับเถ้า(%)

q_{bs4} = ความร้อนที่สูญเสียไปกับการนำพาความร้อนแบบต่างๆ(%)

สมการ 1 สามารถใช้หาความร้อนที่สูญเสียไปในกรณีต่างๆที่อากาศส่วนเกิน 0% - 50% และเมื่อพิจารณาความร้อนที่สูญเสียไปในแต่ละกรณีได้ดังต่อไปนี้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

ความร้อนที่สูญเสียไปกับก๊าซร้อน (q_{bs1})

กระบวนการเผาไหม้โดยตรงจะต้องใช้ปริมาณออกซิเจนที่ถูกป้อนเข้าเตาเผาไหม้ตามทฤษฎี แต่ในทางปฏิบัติเราจะไม่ได้การเผาไหม้ที่สมบูรณ์ด้วยปริมาณออกซิเจนจำนวนพอดี ทั้งนี้เพราะว่าการคลุกเคล้าของกากอ้อยกับออกซิเจนอย่างสม่ำเสมอเป็นไปได้ยาก โดยอนุภาคบางส่วนของกากอ้อยกับออกซิเจนจะมีโอกาสสัมผัสกับออกซิเจนมากเกินพอ แต่อีกบางส่วนของกากอ้อยจะสัมผัสกับออกซิเจนได้ไม่เพียงพอ ดังนั้นในทางปฏิบัติเราต้องป้อนอากาศในปริมาณที่มากกว่าปริมาณที่ต้องการตามทฤษฎีเพื่อให้การเผาไหม้มีอากาศเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ แต่อากาศส่วนเกิน (excess air) ส่วนนี้จะไหลผ่านกองกากอ้อยโดยไม่ทำปฏิกิริยาและถูกปล่อยออกทางปล่องไฟพร้อมก๊าซที่เกิดในเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นจึงต้องใช้ปริมาณอากาศเกินพอให้น้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้เพื่อให้ประสิทธิภาพความร้อนของอุปกรณ์เผาไหม้สูง ซึ่งความร้อนที่สูญเสียไปกับก๊าซร้อนสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$q_{bs1} = \alpha_b (h_2 - h_1)\left(\frac{100 - q_{bs3}}{Q_{\text{กากอ้อย}}}\right) \quad (2)$$

โดยที่ q_{bs1} = Stoichiometric ratio ของหม้อไอน้ำ

h_2 = เอนทาลปี้ของแก๊สร้อนที่ปล่อยออกสู่ปล่อง(kJ/kg)

h_1 = เอนทาลปี้ของอากาศก่อนเข้าหม้อไอน้ำ(kJ/kg)

$Q_{\text{กากอ้อย}}$ = ค่าความร้อนของกากอ้อย(kJ/kg)

และเราสามารถหาค่า α_b ได้จากสมการ

$$\alpha_b = \alpha_f + \Delta\alpha \quad (3)$$

โดยที่ α_f = Stoichiometric ratio ของเตาเผาไหม้

$\Delta\alpha$ = Stoichiometric ratio ของอากาศเข้าที่รั่วในระบบ

ซึ่งค่า $\Delta\alpha$ หาได้จากสมการ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

$$\Delta\alpha = 0.2\sqrt{\frac{D_{sh}^{nom}}{D_{sh}}} \quad (4)$$

โดยที่ D_{sh}^{nom} = steam power ที่45 ตันไอน้ำ

D_{sh} = steam power (ton/hr)

ความร้อนที่สูญเสียไปกับการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (q_{bs2})

จากกระบวนการเผาไหม้โดยตรงโดยใช้กากอ้อยเป็นเชื้อเพลิง ปฏิกริยาเคมีของกากอ้อยและออกซิเจนที่ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์เป็นดังสมการ

$$C + O_2 = CO_2$$
$$H + O_2 = 2H_2O$$

แต่การคลุกเคล้าของกากอ้อยกับออกซิเจนที่ป้อนเข้าในห้องเผาไหม้อย่างเหมาะสมเป็นไปได้ยาก ทำให้กากอ้อยบางส่วนเกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์และทำให้เกิดก๊าซ CO ซึ่งก๊าซ CO เป็นก๊าซที่ยังสามารถใช้ในการเผาไหม้ต่อไปได้ดังสมการ

$$C + O = CO$$
$$2CO + O_2 = 2CO_2$$

ซึ่งค่าความร้อนที่สูญเสียไปกับการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์สามารถหาได้จากสมการ

$$q_{bs2} = \frac{H_{CO}}{Q_{กากอ้อย}} R_{CO/f} \quad (5)$$

โดยที่ H_{CO} = ค่าความร้อนของการเผาไหม้ CO (kJ/kg)

$Q_{กากอ้อย}$ = ค่าความร้อนของกากอ้อย(kJ/kg)

$R_{CO/f}$ = อัตราการเกิด CO ต่อการเผาไหม้กากอ้อย 1 กิโลกรัม

และเราสามารถหา $R_{CO/f}$ ได้จากสมการ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

$$R_{CO/f} = \mu_{CO/C}\left(\frac{C+0.375S}{100}\right)\left(\frac{CO}{CO+CO_2}\right)\left(\frac{100-q_3}{100}\right) \quad (6)$$

โดยที่ $\mu_{CO/C}$ = อัตราส่วนโมเลกุลระหว่าง CO กับ C

C = ปริมาณ C ในกากอ้อย (%)

S = ปริมาณ S ในกากอ้อย (%)

CO = ปริมาณ CO ในกากอ้อย (%)

CO_2 = ปริมาณ CO_2 ในกากอ้อย (%)

และในเทอมของ $\left(\frac{CO}{CO+CO_2}\right)$ สามารถหาได้จากสมการ

$$\left(\frac{CO}{CO+CO_2}\right) = 0.0275 - 0.01485\,\alpha_f - \frac{0.0165}{\sqrt{D_{sh}}} \quad (7)$$

โดยที่ α_f = Stoichiometric ratio ของเตาเผาไหม้

D_{sh} = steam power (ton/hr)

ความร้อนที่สูญเสียไปกับเถ้า (q_{bs3})

กระบวนการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้จะต้องใช้ปริมาณออกซิเจนที่ถูกป้อนเข้าห้องเผาไหม้ตามทฤษฎี แต่ในทางปฏิบัติการคลุกเคล้าของกากอ้อยกับออกซิเจนอย่างสม่ำเสมอเป็นไปได้ยาก ดังนั้นเราจึงต้องป้อนอากาศในปริมาณที่มากกว่าปริมาณที่ต้องการตามทฤษฎีเพื่อให้การเผาไหม้มีอากาศเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ แต่ในขณะเดียวกันอากาศส่วนเกินส่วนนี้จะส่งผลให้ปริมาณคาร์บอนในกากอ้อยไม่สามารถเผาไหม้ได้เนื่องจากถูกพัดพาออกจากห้องเผาไหม้ก่อนเกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งความร้อนที่สูญเสียไปกับเถ้าสามารถหาได้จากสมการ

$$q_{bs3} = \frac{H_C A}{Q_{กากอ้อย}}\left(\frac{C_{uf}}{100-C_{uf}}\right) \quad (8)$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

โดยที่ H_C = ค่าความร้อนของการเผาไหม้ C (kJ/kg)

A = ปริมาณเถ้าในกากอ้อย(%)

C_{uf} = ปริมาณ C ที่ไม่สามารถเผาไหม้

และเราสามารถหาค่า C_{uf} ได้จาก

$$C_{uf} = 0.854965 + 0.002724D_{sh} - 0.592243\sqrt{\alpha_f + \frac{1.3416}{\sqrt{D_{sh}}}} \quad (9)$$

โดยที่ α_f = Stoichiometric ratio ของเตาเผาไหม้

D_{sh} = steam power (ton/hr)

ความร้อนที่สูญเสียไปกับการนำพาความร้อนแบบต่างๆ (q_{bs4})

ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ของหม้อไอน้ำ ซึ่งหม้อไอน้ำได้มีการป้องกันการถ่ายเทความร้อนแบบต่างๆแล้วก็ตาม แต่ก็ยังมีความร้อนส่วนหนึ่งถูกปล่อยออกมาโดยการนำพาความร้อนแบบต่างๆโดยเปล่าประโยชน์ ซึ่งเราสามารถหาความร้อนที่สูญเสียไปกับการถ่ายเทความร้อนแบบต่างๆได้โดย

$$q_{bs4} = \left(\frac{D_{sh}^{nom}}{D_{sh}}\right)\sqrt{\frac{100}{D_{sh}^{nom}}} \quad (10)$$

โดยที่ D_{sh}^{nom} = steam power ที่45 ตันไอน้ำ

D_{sh} = steam power (ton/hr)

โดยอุณหภูมิก๊าซไอเสียของหม้อไอน้ำแบบสโตกเกอร์สามารถหาได้จากสมการ

$$T_{bs} = 172.32 + 24.76\ \alpha_f + \frac{43.22}{\sqrt{D_{sh}}} - 0.213(D_{sh})^{0.33} \quad (11)$$

โดยที่ T_{bs} = อุณหภูมิก๊าซไอเสียของหม้อไอน้ำแบบสโตกเกอร์ (^oC)

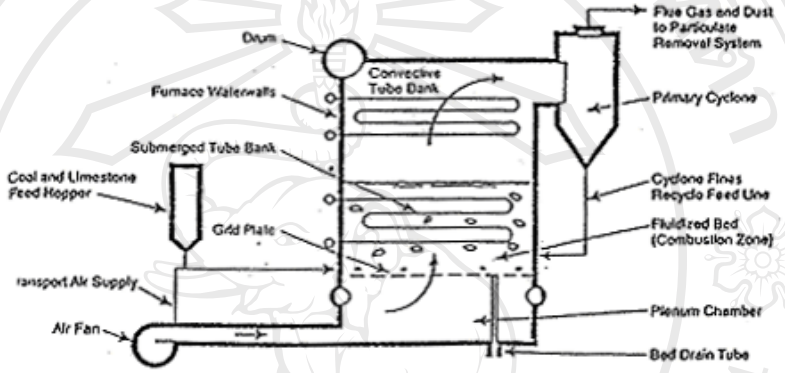
α_f = Stoichiometric ratio ของเตาเผาไหม้

D_{sh} = steam power (ton/hr)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

2.2.2 เทคโนโลยีผลิตพลังงานโดยใช้ห้องเผาไหม้แบบฟลูอิดไดส์เบด

ห้องเผาไหม้แบบฟลูอิดไดซ์เบด(Fluidized Bed)จะให้อากาศไหลผ่านชั้นของเชื้อเพลิง และเมื่อเพิ่มค่าความเร็วของอากาศถึงค่าหนึ่งเชื้อเพลิงที่วางอยู่จะลอยตัวขึ้นมีลักษณะคล้ายของไหล ในตอนเริ่มติดเตานั้นเบดจะได้รับความร้อนจากภายนอกจนอุณหภูมิถึงจุดติดไฟของเชื้อเพลิงหลังจากนั้นเชื้อเพลิงจะถูกป้อนเข้าไปอย่างสม่ำเสมอ การเผาไหม้เชื้อเพลิงจะเกิดขึ้นทั่วๆบริเวณห้องเผาไหม้ โดยปกติในห้องเผาไหม้จะใส่สารเฉื่อย(Inert Material) เช่น ทราย หรือสารที่ทำปฏิกิริยา(Reaction Material)เช่น หินปูน(Limestone) หรือตัวเร่งปฏิกิริยา(Catalyst) ซึ่งสารดังกล่าวจะช่วยในด้านการถ่ายเทความร้อนและช่วยทำความสะอาดภายในห้องเผาไหม้แบบฟลูอิดไดซ์เบดดังรูป 2.6



รูป 2.6 การทำงานของระบบเผาไหม้แบบฟลูอิดไดซ์เบด

ที่มา : เกริกชัย สุกาญจนัจที (2538)

ข้อดีของระบบเผาไหม้แบบฟลูอิดไดซ์เบดคือ อุณหภูมิของการเผาไหม้จะถูกควบคุมให้อยู่ในช่วง 800 – 850 ^{o}C ซึ่งอุณหภูมิไม่สูงมากทำให้ปฏิกริยาระหว่างไนโตรเจนกับออกซิเจนในอากาศที่จะทำให้ก๊าซ NO_x เกิดขึ้นน้อยกว่าเมื่อเทียบกับหม้อไอน้ำประเภทอื่นที่มีอุณหูมิในห้องเผาไหม้สูงมากกว่า 1,000 ^{o}C ระบบฟลูอิดไดซ์เบดนี้ได้รับความสนใจมากในปัจจุบัน เนื่องจากสามารถใช้กับเชื้อเพลิงแข็งได้ทุกชนิดเพราะอุณหภูมิภายในเตาจะมีค่าใกล้เคียงตลอดทั่วเตาเผา ทำให้อัตราการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงสม่ำเสมอและสามารถเผาเชื้อเพลิงที่มีปริมาณความชื้นสูงได้ดี

จากที่กล่าวมาในข้างต้น ทนงค์ ฉายาวัฒนะ และคณะ (2538) ได้ทำการศึกษาและทดลองใช้ซังข้าวโพดมาเป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำที่มีห้องเผาไหม้แบบพลูอิดไดซ์เบด และได้ทำการวัดประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำโดยการทำสมดุลพลังงาน โดยนำเอาพลังงานความร้อนที่สูญเสียในส่วนต่างๆมาหักออกจากความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าหม้อไอน้ำทั้งหมด พลังงานความร้อนที่สูญเสียได้แก่ ความร้อนที่สูญเสียจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงไม่หมดและไม่สมบูรณ์ ความร้อนที่สูญเสียไปกับไอเสีย และความร้อนที่สูญเสียที่ผนังของหม้อไอน้ำ ซึ่งวิธีดังกล่าวเหมือนกับสมการประสิทธิภาพหม้อไอน้ำของ Barroso. J. และคณะ (2003) ดังนั้นจึงทำให้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สามารถประมาณประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำที่ใช้ห้องเผาไหม้แบบฟลูอิดไดซ์เบดที่ใช้กากอ้อยมาเป็นเชื้อเพลิง โดยอาศัยข้อมูลพื้นฐานของหม้อไอน้ำแบบฟลูอิดไดซ์เบดที่ใช้ซังข้าวโพดเป็นเชื้อเพลิง ได้ดังสมการ

$$\eta_{bf} = \frac{Q_{\text{กากอ้อย}} - \left(q_{bf1} + q_{bf2} + q_{bf3} + q_{bf4}\right)}{Q_{\text{กากอ้อย}}} x100 \qquad (12)$$

โดยที่ η_{bf} = ประสิทธิภาพหม้อไอน้ำแบบฟลูอิดไดซ์เบด

q_{bf1} = ความร้อนที่สูญเสียไปกับคาร์บอนในเถ้า (kW)

q_{bf2} = ความร้อนที่สูญเสียไปกับก๊าซ CO (kW)

q_{bf3} = ความร้อนที่สูญเสียไปไอเสีย (kW)

q_{bf4} = ความร้อนที่สูญเสียไปที่ผิวผนังของหม้อไอน้ำ (kW)

สมการ 12 สามารถใช้หาความร้อนที่สูญเสียไปในกรณีต่างๆที่อากาศส่วนเกิน 0% - 50% และเมื่อพิจารณาความร้อนที่สูญเสียไปในแต่ละกรณีได้ดังต่อไปนี้

ความร้อนที่สูญเสียไปกับคาร์บอนในเถ้า (q_{bf1})

กระบวนการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้จะต้องใช้ปริมาณออกซิเจนที่ถูกป้อนเข้าห้องเผาไหม้ตามทฤษฎี แต่ในทางปฏิบัติการคลุกเคล้าของกากอ้อยกับออกซิเจนอย่างสม่ำเสมอเป็นไปได้ยาก ดังนั้นเราจึงต้องป้อนอากาศในปริมาณที่มากกว่าปริมาณที่ต้องการตามทฤษฎีเพื่อให้การเผาไหม้มีอากาศเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ แต่ในขณะเดียวกันอากาศส่วนเกินส่วนนี้จะส่งผลให้ปริมาณคาร์บอนในกากอ้อยไม่สามารถเผาไหม้ได้เนื่องจากถูกพัดพาออกจากห้องเผาไหม้ก่อนเกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งความร้อนที่สูญเสียไปกับเถ้าสามารถหาได้จากสมการ

q_{bf1} = (ปริมาณเถ้าจาก cyclone x ค่าความร้อนของเถ้าจาก cyclone ต่อน้ำหนัก) +
(ปริมาณเถ้าจาก screw drain x ค่าความของร้อนเถ้าจาก screw ต่อน้ำหนัก)+
(ปริมาณเถ้าจาก wet cyclone x ค่าความของร้อนเถ้าจาก wet cyclone ต่อน้ำหนัก)
(13)

โดยที่ ปริมาณเถ้าจาก cyclone ได้จากการเก็บข้อมูล

ปริมาณเถ้าจาก screw drain ได้จากการเก็บข้อมูล

ปริมาณเถ้าจาก wet cyclone ได้จากการเก็บข้อมูล

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ค่าความร้อนของเถ้าจาก cyclone ต่อน้ำหนัก = 2128.55 kJ/kg

ค่าความร้อนของเถ้าจาก screw ต่อน้ำหนัก = 42.08 kJ/kg

ค่าความร้อนของเถ้าจาก wet cyclone ต่อน้ำหนัก = 3812 kJ/kg

ความร้อนที่สูญเสียไปกับก๊าซ CO (q_{bf2})

จากกระบวนการเผาไหม้โดยตรงโดยใช้กากอ้อยเป็นเชื้อเพลิง ปฏิกริยาเคมีของกากอ้อยและออกซิเจนที่ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์เป็นดังสมการ

$$C + O_2 = CO_2$$

$$H + O_2 = 2H_2O$$

แต่การคลุกเคล้าของกากอ้อยกับออกซิเจนที่ป้อนเข้าในห้องเผาไหม้อย่างเหมาะสมเป็นไปได้ยาก ทำให้กากอ้อยบางส่วนเกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์และทำให้เกิดก๊าซ CO ซึ่งก๊าซ CO เป็นก๊าซที่ยังสามารถใช้ในการเผาไหม้ต่อไปได้ดังสมการ

$$C + O = CO$$

$$2CO + O_2 = 2CO_2$$

ซึ่งค่าความร้อนที่สูญเสียไปกับก๊าซ CO สามารถหาได้จากสมการ

$$q_{bf2} = \text{ปริมาณก๊าซ CO ที่ปลดปล่อย} \times Q_{co} \quad (14)$$

โดยที่ ปริมาณก๊าซ CO ที่ปลดปล่อย ได้จากการเก็บข้อมูล

Q_{co} = 9189.91 kJ/kmol

ความร้อนที่สูญเสียไปไอเสีย (q_{bf3})

กระบวนการเผาไหม้โดยตรงจะต้องใช้ปริมาณออกซิเจนที่ถูกป้อนเข้าเตาเผาไหม้ตามทฤษฎี แต่ในทางปฏิบัติเราจะไม่ได้การเผาไหม้ที่สมบูรณ์ด้วยปริมาณออกซิเจนจำนวนพอดี ทั้งนี้เพราะว่าการคลุกเคล้าของกากอ้อยกับออกซิเจนอย่างสม่ำเสมอเป็นไปได้ยาก โดยอนุภาคบางส่วนของกากอ้อยกับออกซิเจนจะมีโอกาสสัมผัสกับออกซิเจนมากเกินพอ แต่อีกบางส่วนของกากอ้อยจะสัมผัสกับออกซิเจนได้ไม่เพียงพอ ดังนั้นในทางปฏิบัติเราต้องป้อนอากาศในปริมาณที่มากกว่าปริมาณที่ต้องการตามทฤษฎีเพื่อให้การเผาไหม้มีอากาศเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ แต่อากาศส่วนเกิน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

(excess air) ส่วนนี้จะไหลผ่านกองกากอ้อยโดยไม่ทำปฏิกิริยาและถูกปล่อยออกทางปล่องไฟพร้อมก๊าซที่เกิดในเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นจึงต้องใช้ปริมาณอากาศเกินพอให้น้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพื่อให้ประสิทธิภาพความร้อนของอุปกรณ์เผาไหม้สูง ซึ่งความร้อนที่สูญเสียไปกับไอเสียสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

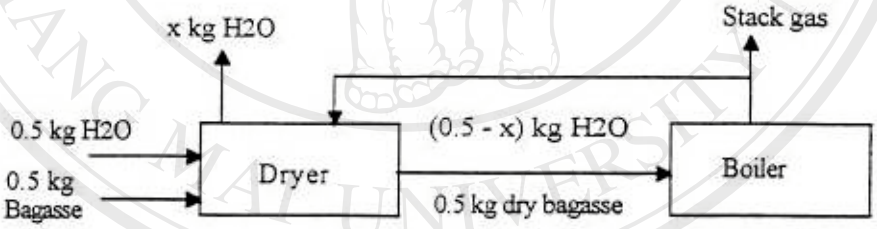
$$q_{bf3} = M_{ไอเสีย} \times C_{ไอเสีย} \times \text{ผลต่างของอุณหภูมิไอเสียกับอุณภูมิแวดล้อม} \quad (15)$$

โดยที่ $M_{ไอเสีย}$ = มวลของไอเสีย

$C_{ไอเสีย}$ = 1.034 kJ/kg^{o}C

2.3 กระบวนการลดความชื้นของกากอ้อยก่อนเข้าสู่หม้อไอน้ำ

ปัญหาสำคัญของการนำชีวมวลไปใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตพลังงานคือ ค่าความชื้น เพราะการใช้ชีวมวลที่มีค่าความชื้นมากเป็นเชื้อเพลิงจะทำให้ประสิทธิภาพหม้อไอน้ำมีค่าลดลง เนื่องจากต้องสูญเสียค่าความร้อนไปกับค่าความร้อนการระเหยเป็นไอของน้ำในชีวมวล จากที่กล่าวมา Kilicaslan. I. และคณะ (1999) ได้ทำการศึกษาการลดความชื้นของกากอ้อยก่อนป้อนเข้าสู่หม้อไอน้ำโดยใช้ก๊าซไอเสียจากหม้อไอน้ำมาลดความชื้นของกากอ้อยดังรูป 2.7



รูป 2.7 การทำงานของห้องอบกากอ้อย
ที่มา : Kilicaslan. I. และคณะ (1999)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

การศึกษาดังกล่าวทำให้สามารถนำพลังงานที่สูญเสียไปกับก๊าซร้อนนำกลับมาใช้ประโยชน์ในกระบวนการผลิต โดยได้กำหนดคุณสมบัติของอุปกรณ์ดังนี้

- หม้อไอน้ำใช้อากาศส่วนเกิน 0 % - 50 %
- กากอ้อยที่เข้าสู่ห้องอบความชื้น 50 %
- อุณหภูมิของก๊าซไอเสีย 200 ^{0}C - 250 ^{0}C
- อุณหภูมิของก๊าซไอเสียลดลงเหลือ 120 ^{0}C หลังจากผ่านห้องอบกากอ้อย

- ค่าความร้อนทั้งหมดที่ก๊าซไอเสียถ่ายเทให้กับกากอ้อยเพื่อลดความชื้นเท่านั้น
- คิดค่าความร้อนจากสมการเผาไหม้เฉพาะ CO_2 และ H_2O เท่านั้น
- กากอ้อยที่ใช้ศึกษามีคุณสมบัติดังตาราง 2.2

ตาราง 2.2 คุณสมบัติของกากอ้อยที่ Kilicaslan. I. และคณะใช้ทำการทดสอบ
ที่มา : Kilicaslan. I. และคณะ (1999)

Ultimate analysis (Dry basis)	เปอร์เซ็นต์
C	51.00
H	5.66
O	39.92
N	0
S	0
Ash	3.42

จากข้อมูลข้างต้นปริมาณ O_2 ที่ต้องใช้ในการเผาไหม้กากอ้อย 1 กิโลกรัม(Dry basis) สามารถเขียนสมการปฏิกิริยาเคมีได้ดังนี้

$C + O_2 = CO_2$ หรือ $0.51 + 1.36 = 1.87$ kg

$2H + 0.5O_2 = H_2O$ หรือ $0.056 + 0.448 = 0.504$ kg

ซึ่งปริมาณ O_2 ที่ต้องการใช้ในการเผาไหม้กากอ้อย 1 กิโลกรัม (Dry basis) ทั้งหมดมีค่า 1.808 กิโลกรัมแต่ในกากอ้อยแห้งมีค่า O_2 เท่ากับ 0.3992 กิโลกรัม ดังที่กล่าวมาปริมาณ O_2 ที่ต้องการจะมีค่า 1.4088 กิโลกรัม และในอากาศที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้จะมี N_2 และ O_2 โดยที่ O_2 มีปริมาณ 23.3% โดยน้ำหนัก ฉะนั้นค่า O_2 1.4088 กิโลกรัมจะมี N_2 4.6344 กิโลกรัม ซึ่งเราจะได้ค่า Stoichiometric เท่ากับ 6.0482 กิโลกรัม จากข้อมูลที่ได้ก๊าซเสียที่ปล่อยออกเมื่อเผากากอ้อยแห้ง 1 กิโลกรัมจะมี

$CO_2 = 1.87$ kg

$H_2O = 0.504$ kg

$N_2 = 4.6394$ kg

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

ผลรวมของก๊าซทั้งหมดมีค่า 7.0134 กิโลกรัมต่อการเผาไหม้กากอ้อยแห้ง แต่ถ้าหากเผาไหม้กากอ้อยที่มีความชื้น 50 % ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้

M	=	50.0	%
C	=	25.4	%
H	=	2.8	%
O	=	20.0	%
Ash	=	1.8	%

จากรูป 2.6 สมมุติให้ค่า x เป็นปริมาณความชื้นที่ระเหยจากกากอ้อย ก๊าซไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้กากอ้อยที่มีความชื้น50%จะมีค่า

CO_2	=	0.935	kg	
H_2O	=	0.252	kg	
N_2	=	2.3197	kg	
H_2O	=	0.5 - x	kg	(จากกากอ้อยที่ผ่านห้องอบ)

และที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน 35 % ค่า N_2 จะเพิ่มขึ้นเป็น 3.1316 กิโลกรัมและจะมีค่า O_2 จากอากาศส่วนเกิน 0.2461 กิโลกรัม ซึ่งจะหาค่าก๊าซร้อนที่ได้จากการเผาไหม้กากอ้อยทีมีความชื้น 50 % และอากาศส่วนเกินได้ดังนี้

CO_2	=	0.935	kg
N_2	=	3.1316	kg
O_2	=	0.2461	kg
H_2O	=	0.252 + (0.5 – x)	kg

ค่าความร้อนจากก๊าซไอเสียที่ถูกถ่ายเทในห้องอบกากอ้อย มีอุณหภูมิลดลงจาก 245 ^{o}C เป็น 120 ^{o}C เราสามารถคำนวณสมการความร้อนได้เป็นสองส่วนดังนี้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

สมการความร้อนสำหรับส่วนแห้ง

$$Q_{dry} = M_{dry} C_{pg} \Delta T \quad (16)$$

โดยที่ Q_{dry} = ค่าความร้อนชนิดแห้ง (kJ/kg)

M_{dry} = มวลของก๊าซไอเสีย(kg)

C_{pg} = 1.015 kJ/kg ^{o}C

ΔT = อุณหภูมิก๊าซไอเสียที่ลดลง(^{o}C)

สมการความร้อนสำหรับเปียก

$$Q_{wet} = M_{wet} C_{ps} \Delta T \quad (17)$$

โดยที่ Q_{wet} = ค่าความร้อนชนิดเปียก (kJ/kg)

M_{wet} = มวลน้ำในก๊าซไอเสีย(kg)

C_{ps} = 1.920 kJ/kg ^{o}C

ΔT = อุณหภูมิก๊าซไอเสียที่ลดลง(^{o}C)

จากการแทนค่าเราจะได้ค่า

Q_{dry} = 547.17 kJ/kg

Q_{wet} = 180.48 - 240x kJ/kg

$Q_{dry} + Q_{wet}$ = 727.65 - 240x kJ/kg

ค่าความร้อนที่ห้องอบกากอ้อยมีค่า 727.65 - 240x kJ/kg ถ้าหากคิดค่าเอนทาลปีของอากาศที่เกิดขึ้นในห้องอบกากอ้อยสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$Q_a = x (h_s - h_w) \quad (18)$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

โดยที่ h_s = เอนทาลปีของอากาศที่อุณหภูมิ $120^{o}C$

h_w = เอนทาลปีของอากาศที่อุณหภูมิ $25^{o}C$

จากสมดุลความร้อนทำให้ทราบว่าค่า x มีค่า 0.2553 กิโลกรัม ซึ่งทำให้เราทราบค่าความชื้นที่ระเหยออกจากห้องอบกากอ้อย 1 กิโลกรัมที่มีความชื้น 50% หลังจากผ่านห้องอบกากอ้อยแล้วจะมีความชื้นเหลือ 0.2447 กิโลกรัม ซึ่งคิดเป็น 32.86% ของกากอ้อย 1 กิโลกรัม จากที่กล่าวมา Barroso. J. และคณะ (2003) ได้ทำการศึกษาหาสมการค่าความร้อนของกากอ้อยโดยใช้คุณสมบัติของกากอ้อยแบบ Ultimate analysis(As-received basis)มาคำนวณ ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$Q_{กากอ้อย} = 339.15C + 1256.10H - 108.86O - 25.12(H+M) \quad (19)$$

โดยที่ $Q_{กากอ้อย}$ = ค่าความร้อนของกากอ้อย(kJ/kg)

C = ปริมาณคาร์บอนในกากอ้อย(%)

H = ปริมาณไฮโดรเจนในกากอ้อย(%)

O = ปริมาณออกซิเจนในกากอ้อย(%)

M = ปริมาณความชื้นในกากอ้อย(%)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

2.4 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

สำหรับการศึกษาความเป็นไปได้ทางการเงินของโรงไฟฟ้าชีวมวลที่ใช้เชื้อเพลิงจากกากอ้อยเป็นแหล่งพลังงาน มีต้นทุนมาจากการก่อสร้างติดตั้งเครื่องจักร ค่าดำเนินการและบำรุงรักษา ซึ่งการลงทุนของโรงไฟฟ้าชีวมวลประกอบด้วยอุปกรณ์หลักๆ คือ หม้อไอน้ำ กังหันไอน้ำ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า หอระบายความร้อน นอกจากนั้นยังมีค่าดำเนินการและบำรุงรักษา (Operation and maintenance) จะหมายความรวมถึงค่าจ้างแรงงาน ค่าดูแลซ่อมแซมอุปกรณ์ตลอดจนค่าใช้จ่ายเบ็ดเตล็ดอื่นๆที่ทำให้โครงการสามารถดำเนินไปได้ ในการศึกษาแต่ละโครงการค่าใช้จ่ายทั้งหมดจะต้องถูกประมาณขึ้น ค่าใช้จ่ายเริ่มแรกก็คือ ค่าอุปกรณ์ ค่าติดตั้งและก่อสร้าง ค่าใช้จ่ายนี้จะทำให้เกิดหนี้ขึ้นมาตลอดช่วงอายุของโครงการ และจะกลายเป็นหนี้สินประจำปีในช่วงอายุของโครงการ เรียกว่าค่าใช้จ่ายที่คงที่ (Fixed cost or Fixed charge or Investment charge) ซึ่งประกอบไปด้วย ค่าภาษีอากร ค่าดอกเบี้ยเงินกู้ ค่าประกันภัยทรัพย์สิน และค่าเสื่อมราคาเครื่องจักรอุปกรณ์ โดยทั่วไปค่าใช้จ่ายคงที่นี้จะคงที่ตลอดทุกปี นอกจากค่าใช้จ่ายคงที่แล้วยังมีค่าใช้จ่ายดำเนินการ (Operating cost) อีกตัวมาพิจารณาร่วมด้วยค่าใช้จ่ายดำเนินการจะประกอบไปด้วย ค่าเชื้อเพลง ค่าแรงงาน ค่าซ่อมแซม ค่าวัสดุ ค่าจ้างที่ปรึกษา โดยทั่วไปค่าใช้จ่ายดำเนินการจะไม่คงที่ขึ้นอยู่กับปริมาณพลังงานที่ผลิต

2.4.1 มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (net present value: NPV)

มูลค่าปัจจุบันสุทธิ คือมูลค่าปัจจุบันของกระแสผลตอบแทนสุทธิที่บ่งชี้ถึงจำนวนผลประโยชน์สุทธิที่ได้รับตลอดระยะเวลาของโครงการ โดยขึ้นอยู่กับขนาดมูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์รวม (present value benefit: PVB) หักลบด้วยมูลค่าปัจจุบันของต้นทุนรวม (present value cost: PVC) ของโครงการ โดยโครงการจะมีความเหมาะสมทางด้านเศรษฐกิจและการเงิน เมื่อ NPV มีค่าเท่ากับหรือมากกว่าศูนย์ โดยคำนวณจาก

$$NPV = PVB-PVC$$

$$= \sum_{t=1}^{n} (B_t-V_t)/(1+r)^t \qquad (20)$$

เมื่อ B_t หมายถึงผลประโยชน์ของโครงการปีที่ t

C_t หมายถึงต้นทุนของโครงการปีที่ t

r หมายถึงอัตราคิดลดที่เหมาะสม

n หมายถึงจำนวนปีทั้งสิ้นของโครงการ

t หมายถึง ระยะเวลาของโครงการ (1,2,….n)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

2.4.2 อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน (benefit-cost ratio: BCR)

อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน คือ อัตราส่วนระหว่างมูลค่าปัจจุบันของกระแสผลประโยชน์กับมูลค่าปัจจุบันของกระแสต้นทุน พบว่าโครงการมีความเหมาะสมและคุ้มค่าทางเศรษฐกิจเมื่อ BCR เท่ากับหรือมากกว่าหนึ่ง โดยคำนวณจาก

$$BCR = PVB/PVC = \frac{\sum_{t=1}^{n} B_t/(1+r)^t}{\sum_{t=1}^{n} C_t/(1+r)^t} \quad (21)$$

2.4.3 อัตราผลตอบแทนภายในของโครงการ (internal rate of return: IRR)

อัตราผลตอบแทนภายในของโครงการ คือ อัตราคิดลดที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการมีค่าเท่ากับศูนย์ โดยโครงการมีความเป็นไปได้ทางด้านเศรษฐกิจเมื่อ IRR มีค่าสูงและต้องสูงกว่าอัตราคิดลด เมื่อกำหนดให้ r คือ IRR แล้วค่าของ r จะสามารถหาได้จากการแก้สมการข้างล่างนี้

$$\sum_{t=1}^{n} (B_t-C_t)/(1+r)^t = 0 \quad ; \text{เมื่อ r หมายถึง IRR} \quad (22)$$

2.4.4 การวิเคราะห์ความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลง

วิเคราะห์ความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลง เป็นการวิเคราะห์เพื่อทราบว่าถ้าสถานการณ์เปลี่ยนไปจากการที่ปัจจัยต้นทุน ผลตอบแทนเปลี่ยนไป จะส่งผลต่อความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์อย่างไร สำหรับการศึกษาครั้งนี้จะทำการวิเคราะห์โดยทดสอบค่าความแปรเปลี่ยนทั้งทางด้านเทคนิคและผลตอบแทน เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงในรูปร้อยละของปัจจัยที่เชื่อว่ามีอิทธิพลต่อผลลัพธ์ของโครงการที่จะทำให้โครงการมีมูลค่าปัจจุบันสุทธิเท่ากับเกณฑ์การตัดสินใจชั้นต่ำที่ยอมรับได้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved