# การวิเคราะห์ระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วมในโรงงานกระดาษ

จุลละพงษ์ จุลละโพธิ
อาษา ประทีปเสน
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

---

## บทคัดย่อ

ในการศึกษาระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วมของโรงงานกระดาษแห่งหนึ่ง ซึ่งเป็นแบบกังหันไอน้ำความดันต้าน ขนาด 3.56 MW ใช้ลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิง อุปกรณ์ประกอบด้วยหม้อไอน้ำซุปเปอร์ฮีท ขนาดพิกัด 34.5 ตัน/ชั่วโมง สามารถผลิตไอน้ำที่ความดันและอุณหภูมิสูงสุด 67 บาร์ และ 475 °ซ. ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์พบว่า ประสิทธิภาพของระบบและอุปกรณ์โดยทั่วไปอยู่ในเกณฑ์ดี โดยที่หม้อไอน้ำมีค่าประสิทธิภาพตามกฎข้อที่ 1 เท่ากับ 75% ส่วนชุดกังหันเครื่องปั่นไฟมีค่า 88.73% สำหรับระบบผลิตร่วมทั้งระบบ ได้ว่าประสิทธิภาพมีค่า 84.18 % โดยที่การสูญเสียส่วนใหญ่เป็นผลจากการย้อนกลับไม่ได้ด้วยสาเหตุต่าง ๆ ในระบบในการคำนวณต้นทุนค่าไฟฟ้าที่ผลิตได้ พบว่ามีค่า 1.14 บาทต่อ kWh ซึ่งต่ำกว่าราคาของการไฟฟ้าประการนี้ทำให้โรงงานสามารถประหยัดค่าไฟฟ้าได้ปีละ 38.25 ล้านบาท ซึ่งเมื่อเทียบกับเงินลงทุนในระบบผลิตร่วมทั้งหมด 165.5 ล้านบาท แล้วจะช่วยให้คืนทุนได้ภายในระยะเวลา 4.3 ปี ส่วนไอน้ำที่ผลิตได้มีราคาต้นทุน 210.5 บาทต่อตัน ซึ่งจัดว่าค่อนข้างต่ำเช่นกัน ในการศึกษาครั้งนี้ได้วิเคราะห์ปริมาณ $SO_2$ ที่ออกไปกับไอเสียด้วย ซึ่งมีค่าเท่ากับ 446 ppm เกินกว่าเกณฑ์ที่กระทรวงอุตสาหกรรมกำหนด (400 ppm)

---

การประชุมใหญ่ทางวิชาการประจำปี 2538 ของ วสท. 18-21 สิงหาคม 2538
ศูนย์ประชุมแห่งชาติสิริกิติ์ /๔๐

## บทนำ

ระบบการผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วม (Cogeneration) เป็นเทคโนโลยีการประหยัดพลังงานที่สำคัญแบบหนึ่ง ที่สามารถให้ผลตอบแทนการลงทุนได้คุ้มค่า เมื่อนำไปใช้ในสภาพการณ์ที่เหมาะสม สำหรับประเทศไทย ได้มีการใช้เทคโนโลยีชนิดนี้มานาน และมีจำนวนผู้ใช้ค่อนข้างมาก โดยที่การใช้ส่วนใหญ่อยู่ในอุตสาหกรรมน้ำตาล โรงสีข้าว น้ำมันปาล์ม กระดาษ และสิ่งทอตามลำดับ [1] ชนิดของระบบที่ใช้เกือบทั้งหมด เป็นแบบที่ใช้กังหันไอน้ำความดันต้าน (back - pressure, steam - turbine cogeneration system) เนื่องจากมีรูปแบบที่ง่ายต่อการควบคุมดูแล และราคาถูกกว่า

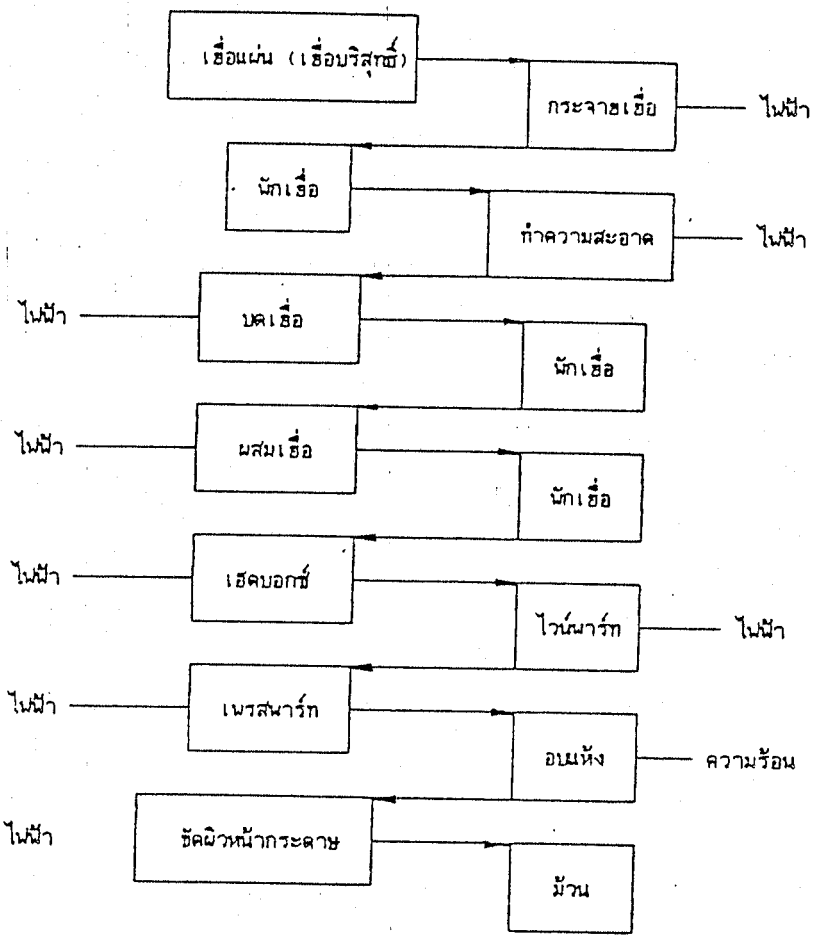
ในอุตสาหกรรมกระดาษที่มีการผลิต หรือใช้เยื่อกระดาษ มักมีความต้องการไฟฟ้าและไอน้ำ เพื่อใช้ในการผลิต ในสัดส่วนที่เหมาะสมต่อการใช้ระบบผลิตไฟฟ้า และความร้อนร่วม ดังเช่น ตัวอย่างการใช้ในออสเตรเลียของ Porter [2] สำหรับในประเทศ การศึกษาของประยุทธ [3], Mora [4] และสุรพงษ์ [5] ล้วนชี้ให้เห็นว่า มีความเป็นไปได้มาก ที่จะใช้เทคโนโลยีชนิดนี้ในอุตสาหกรรมกระดาษ โดยให้ผลตอบแทนที่คุ้มค่าด้วยสภาพการณ์ ดังกล่าว ที่มีแนวโน้มว่าจะมีผู้ใช้เพิ่มมากขึ้น จึงเห็นเหมาะสมที่จะทำการศึกษาละเอียด ถึงข้อมูล สมรรถนะ และประสบการณ์ ของโรงงานกระดาษ ที่มีการใช้ระบบดังกล่าวอยู่แล้ว เพื่อเป็นแนวทางสำหรับผู้ใช้รายใหม่ ที่จะศึกษาวิเคราะห์ หรือออกแบบระบบที่เหมาะสมต่อไป ทั้งนี้การศึกษาที่จะนำเสนอต่อไปนี้ จะครอบคลุมทั้งทางด้าน ประสิทธิภาพทางเทคนิค การวิเคราะห์ต้นทุนราคาไฟฟ้า และไอน้ำ และปริมาณ $SO_2$ ที่เกิดจากระบบโดยได้เลือกศึกษากรณีของโรงงานกระดาษ ขนาดใหญ่แห่งหนึ่งเป็นตัวอย่าง

## กระบวนการผลิต

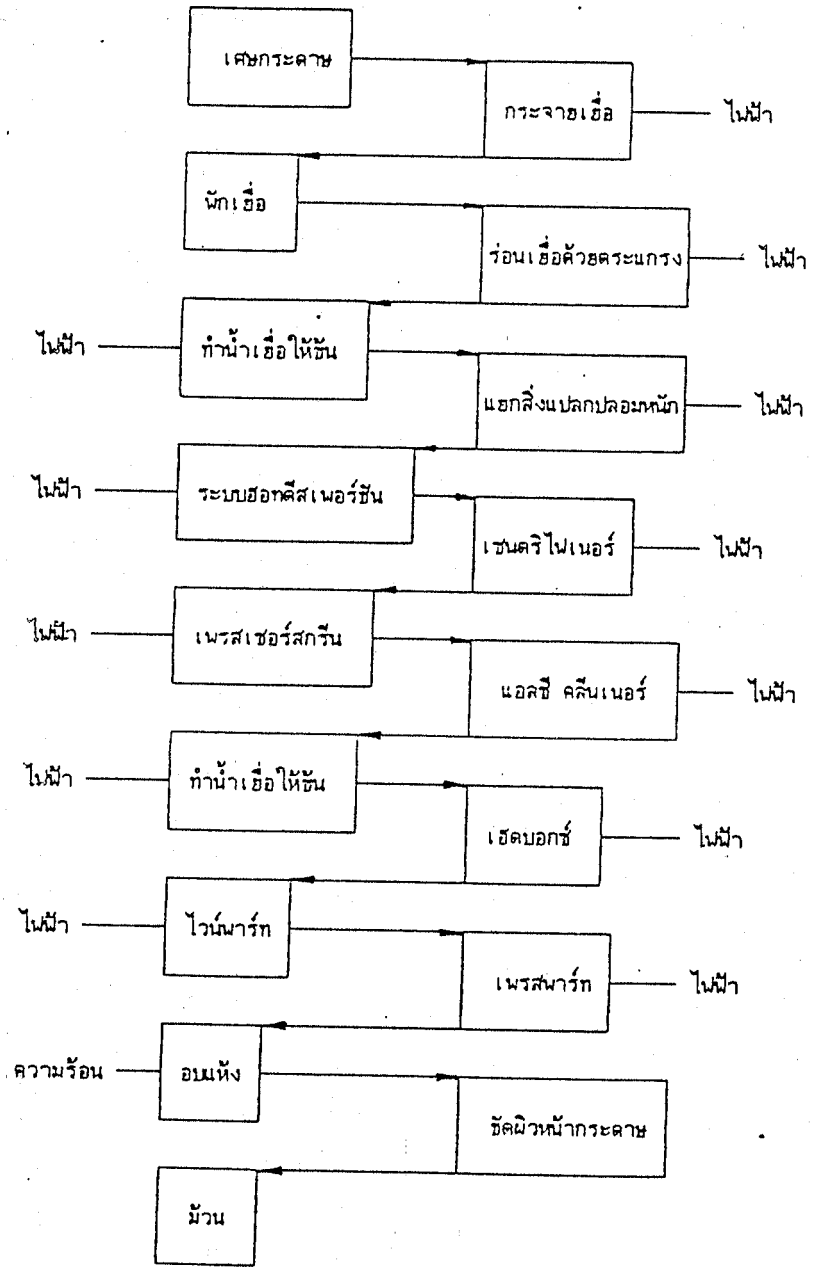
โรงงานกระดาษที่เลือกศึกษามีกำลังผลิต 93,000 ตัน/ปี ทำงานตลอด 24 ชั่วโมง ผลิตกระดาษหลายชนิด เช่น กระดาษคราฟต์ อาร์ท การ์ด ปอนด์ กล่อง เป็นต้น กระบวนการผลิตมี 2 แบบ ขึ้นกับว่าวัตถุดิบเริ่มต้น ที่นำมาใช้เป็นเยื่อ หรือเศษกระดาษใช้แล้ว ดังที่แสดงในรูปที่ 1 และ 2

## ระบบการผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วม

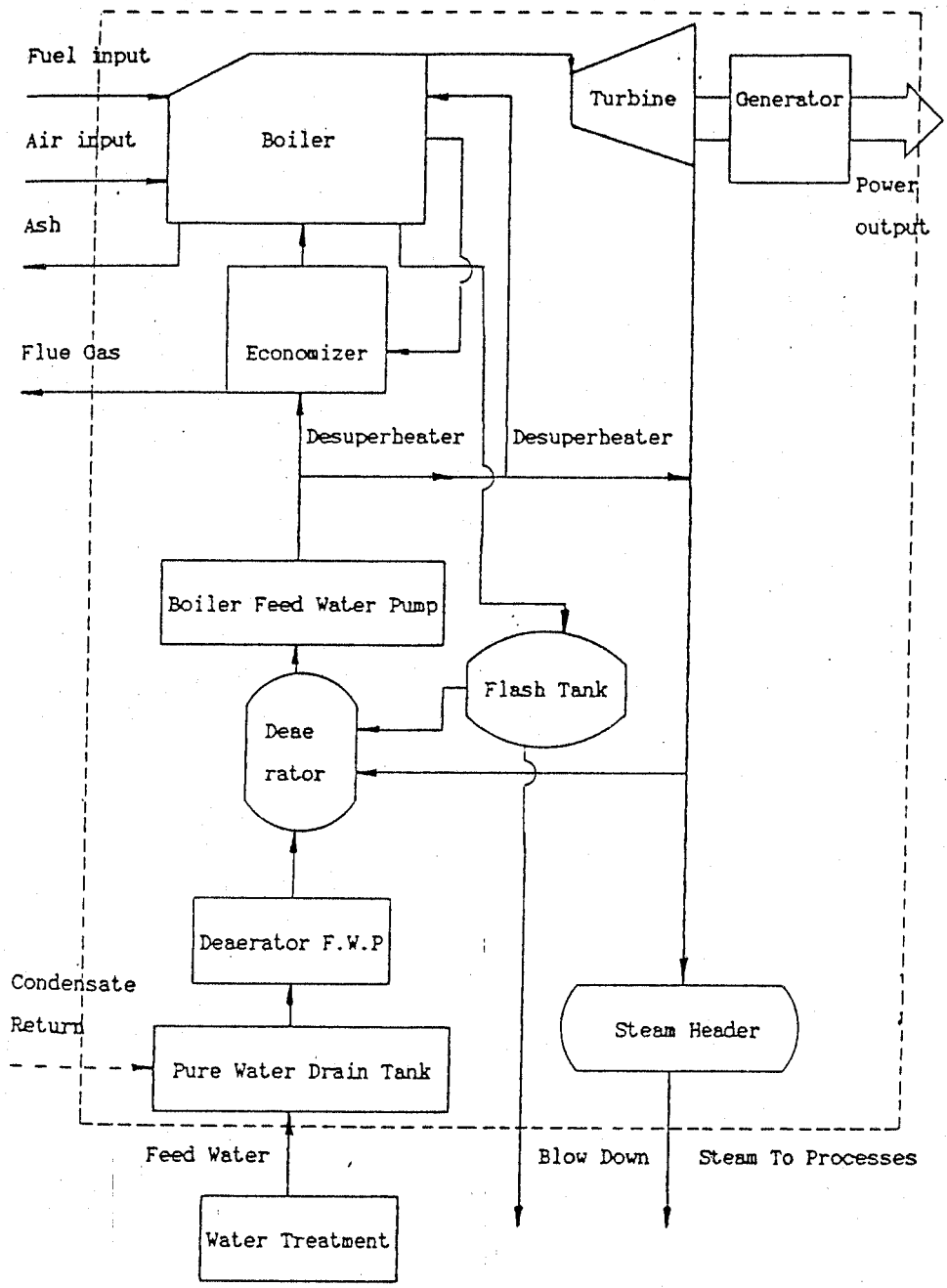
ระบบที่ใช้เป็นแบบกังหันไอน้ำความดันต้าน ซึ่งประกอบด้วยหม้อไอน้ำ แบบหลอดน้ำใช้ลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิง สามารถผลิตไอน้ำ superheated ได้ถึง 67 บาร์ 475°ซ. ด้วยอัตรา 34.5 ตัน/ชั่วโมง ตัวกังหันเป็นแบบหลายตอน (stage) ทำงานที่ความดันต้าน 8 บาร์ ไอน้ำที่ออกจากกังหัน ถูกนำไปใช้ในกระบวนการผลิต รายละเอียดต่าง ๆ จะเห็นได้ในรูปที่ 3 ในการทำงานลิกไนต์ถูกป้อนเข้าเตาโดยผ่าน belt conveyor, bucket elevator, screw feeder และ travelling grate stoker ตามลำดับ




รูปที่ 1 แผนผังกระบวนการผลิตกระดาษจากเยื่อบริสุทธิ์




รูปที่ 2 แผนผังกระบวนการผลิตกระดาษโดยเตรียมเยื่อจากเศษกระดาษ




รูปที่ 3 แผนผังระบบการผลิตร่วม

**การใช้พลังงาน**

พลังงานที่ใช้มี 2 ชนิด คือ ไฟฟ้า และไอน้ำ ระบบการผลิตร่วมที่มีอยู่ไม่สามารถให้พลังงานทั้ง 2 ชนิด ช้างต้นได้เพียงพอ ต่อความต้องการ ดังนั้น โรงงานจึงจำเป็นต้อง ซื้อไฟฟ้าจากการไฟฟ้ามาเพิ่มเติมประมาณร้อยละ 60 ของที่ใช้ทั้งหมด ในส่วนของไอน้ำก็เช่นกัน โรงงานจำเป็นต้องเดินหม้อไอน้ำสำรองอีก 4 ลูก ซึ่งมีขนาด 8 ตัน/ชั่วโมง และ 10 ตัน/ชั่วโมง อย่างละ 2 ลูกเท่ากัน โดยใช้น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิง

## ทฤษฎีการวิเคราะห์ระบบ

### ดัชนีการใช้พลังงานจำเพาะ

จากข้อมูลการใช้พลังงาน และผลผลิตที่ได้ บันทึกไว้ในช่วงระยะเวลาเดียวกัน สามารถคำนวณหาค่าดัชนีการใช้พลังงานจำเพาะได้ดังนี้

$$\text{ดัชนีการใช้พลังงานจำเพาะ} = \frac{\text{ปริมาณการใช้พลังงานทั้งหมด}}{\text{ผลผลิตที่ได้ในช่วงเวลาเท่ากัน}} \qquad \text{----- (1)}$$

### ระบบหม้อไอน้ำ

ระบบหม้อไอน้ำสามารถจัดได้ว่าเป็นระบบย่อยของระบบผลิตร่วมสามารถวิเคราะห์หาสมรรถนะโดยการทำสมดุลพลังงาน ที่ทางเข้าและออกของระบบ ตามกรรมวิธีของ Sorensen [6] ได้ดังนี้

$$m_l\,(HV) = \sum_{1}^{9} Q_i \qquad \text{----- (2)}$$

โดยที่ $m_l$ กับ HV เป็นอัตราการใช้ลิกไนต์ (kg/นาที) และค่าความร้อนสูงของมัน ส่วน $Q_1$ ถึง $Q_9$ หาได้จากสมการต่อไปนี้

$$Q_1 = m_s(h_s - h_w) \qquad \text{----- (3)}$$

$$Q_2 = m_l\,(A/F)\,c_{pg}\,(T_g - T_a) \qquad \text{----- (4)}$$

$$Q_3 = m_l\,m_m\,(h_v - h_f) \qquad \text{----- (5)}$$

$$Q_4 = m_l\,m_h\,(h_v - h_f) \qquad \text{----- (6)}$$

$$Q_5 = m_l\,(A/F)\,\omega\,c_{pv}\,(T_g - T_a) \qquad \text{----- (7)}$$

$$Q_6 = \frac{CO}{CO + CO_2}\,m_l\,m_{cb}\,(23{,}560) \qquad \text{----- (8)}$$

$$Q_7 = m_l\,m_{cub}\,(32{,}750) \qquad \text{----- (9)}$$

$$Q_8 = m_b (h_b - h_w) \qquad \text{----- (10)}$$

$$Q_9 = m_l(HV) - \sum_{1}^{8} Q_i \qquad \text{----- (11)}$$

โดยที่ $m_s$, $m_l$ และ $m_b$ เป็นอัตราการไหล เชิงมวล ของไอน้ำ ที่ผลิตได้ อัตราการป้อนลิกไนต์ และการ blow down ตามลำดับ

$m_m$, $m_h$, $m_{cb}$, และ $m_{cub}$ เป็นอัตราส่วนน้ำหนักความชื้นในเชื้อเพลิง, น้ำหนักไฮโดรเจ็นในเชื้อเพลิง, น้ำหนักคาร์บอนที่เผาไหม้ และน้ำหนักคาร์บอนที่เผาไหม้ไม่หมด ต่อน้ำหนักเชื้อเพลิงตามลำดับ

$m_b$ เป็นอัตราการ blow down, A/F เป็นอัตราส่วนผสมอากาศเชื้อเพลิงที่เข้าเผาไหม้ และ $\omega$ เป็นค่าความชื้นจำเพาะของอากาศที่ใช้

$c_{pg}$ และ $c_{pv}$ เป็นค่าความร้อนจำเพาะของไอเสีย และความชื้นในไอเสียตามลำดับ

$h_s$, $h_w$, $h_v$, $h_b$ และ $h_f$ เป็นค่าเอ็นธัลปีของไอน้ำที่ผลิตได้, ของน้ำป้อนเข้าหม้อไอน้ำ, ของความชื้นในไอเสีย, ของน้ำในหม้อไอน้ำและของน้ำที่สภาวะแวดล้อมตามลำดับ

$T_g$ และ $T_a$ เป็นอุณหภูมิไอเสีย และสภาวะแวดล้อมตามลำดับ

CO และ $CO_2$ เป็นปริมาณร้อยละเชิงปริมาตรของ CO และ $CO_2$ ในไอเสียแห้ง

สำหรับประสิทธิภาพตามกฎข้อที่ 1 ของหม้อไอน้ำ ($\eta_b$) อาจหาได้จาก

$$\eta_b = \frac{Q_1}{m_l(HV) + W_e} \qquad \text{----- (12)}$$

โดยที่ We เป็นพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ขับอุปกรณ์เสริมต่าง ๆ ในระบบ เช่น ปั๊ม พัดลม เป็นต้น

**ระบบกังหันไอน้ำและเครื่องปั่นไฟ**

กำลังที่ผลิตได้ในกังหัน จะถูกส่งต่อไปยังเครื่องปั่นไฟโดยผ่านชุดเกียร์ทด ซึ่งหล่อเย็นด้วยน้ำ โดยการทำสมดุลพลังงานของระบบ จะได้

$$m_s \Delta h = P + m_w c_{pw} (T_o - T_i) + m_L H_L + E_l \qquad \text{----- (13)}$$

โดยที่ $\Delta h$ เป็นค่าเอ็นธัลปีตกคร่อมตัวกังหัน

P เป็นพลังไฟฟ้าที่ผลิตได้

$m_w$, $c_{pw}$, $T_o$ และ $T_i$ เป็นอัตราการไหล ความร้อนจำเพาะ อุณหภูมิออกและเข้าของน้ำหล่อเย็นตามลำดับ

$m_L$ และ $h_L$ เป็นอัตราการรั่วของไอน้ำ และค่าเอ็นธัลปีของมัน

$E_l$ เป็นพลังงานสูญเสียอื่น ๆ

สำหรับประสิทธิภาพตามกฎข้อที่ 1 ของระบบ ($\eta_{tg}$) อาจหาได้จากสมการ (14)

$$\eta_{tg} = \frac{P}{m_s \Delta h} \qquad \text{----- (14)}$$

**ระบบการผลิตร่วม**

โดยอาศัยรูปของระบบควบคุมที่แสดงในรูปที่ 3 สมการสมดุลพลังงานของระบบจะอยู่ในรูป

$$m_l (HV) + W_e = m_p h_p + P + E_L \qquad \text{----- (15)}$$

$m_p$ และ $h_p$ เป็นอัตราไอน้ำ และค่าเอ็นธัลปี ที่ออกจากกังหัน ส่วน $E_L$ เป็นค่าการสูญเสียพลังงานจากระบบ สมการ (16) ถัดไป จะให้ค่าประสิทธิภาพตามกฎข้อที่ 1 ของระบบ ($\eta_{cg}$) ดังนี้

$$\eta_{cg} = \frac{P + m_p h_p}{m_l (HV) + W_e} \qquad \text{----- (16)}$$

**ปริมาณ $SO_2$ ที่ออกไปกับไอเสีย**

ในการเผาไหม้ลิกไนต์ S ที่มีอยู่ในเชื้อเพลิง จะรวมตัวกับ $O_2$ เป็น $SO_2$ โดยที่บางส่วนจะทำปฏิกริยาต่อไปได้ $SO_3$ แก๊สดังกล่าว จะทำปฏิกริยากับความชื้นในอากาศได้กรดกำมะถัน ซึ่งมีสมบัติการกัดกร่อนสูง และเป็นอันตรายต่อระบบทางเดินหายใจของมนุษย์ ดังนั้นเพื่อตรวจสอบปริมาณ $SO_2$ ที่ออกไปกับไอเสีย ว่ามีค่าเกินมาตรฐานที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดหรือไม่ จึงได้วิเคราะห์หาค่าดังกล่าวโดยการทำสมดุล S ที่เข้า-ออก ระบบหม้อไอน้ำดังนี้

S ในเชื้อเพลิง = S ในขี้เถ้า + S ในไอเสีย

โดยที่ 2 เทอมแรก หาโดยการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ จากนั้นอาศัยสมการเคมีของ $SO_2$ ประกอบ ซึ่งจะช่วยให้สามารถคำนวณหาปริมาณ $SO_2$ ที่เกิดขึ้นได้ ซึ่งเมื่อนำไปพิจารณารวมกับปริมาณไอเสียที่เกิดขึ้น ก็จะได้ค่าสัดส่วน หรือ ppm ของ $SO_2$ ในไอเสียได้

**ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าจากระบบการผลิตร่วม**

เนื่องจากผลผลิตของระบบมี 2 ชนิด คือไอน้ำ และไฟฟ้า ดังนั้นในการคิดต้นทุนการผลิตไฟฟ้า จึงได้แบ่งเงินลงทุนออกเป็น 2 ส่วน ตามกรรมวิธีของปรีดา [7] คือ ส่วนที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้า และส่วนที่ใช้ผลิตไอน้ำ สำหรับส่วนแรกจะประกอบด้วยค่าอุปกรณ์การผลิตไฟฟ้า รวมกับส่วนหนึ่งของค่าอุปกรณ์ผลิตไอน้ำ ซึ่งแบ่งตามอัตราส่วนของค่า exergy ของไฟฟ้าที่ผลิตได้กับไอน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิต ดังนี้

$$\text{เงินลงทุนที่ใช้ผลิตไฟฟ้า} = \text{ค่าอุปกรณ์การผลิตไฟฟ้า} + \text{ค่าอุปกรณ์ผลิตไอน้ำ} \times \frac{\text{ค่า exergy ของไฟฟ้าที่ผลิตได้}}{\text{ค่า exergy ของไอน้ำที่ออกจากหม้อไอน้ำ}}$$

นอกจากเงินลงทุนแล้ว ยังมีค่าใช้จ่ายอื่น ๆ อีก ซึ่งประกอบด้วยค่าใช้จ่ายส่วนที่คงที่ กับส่วนที่แปรกับปริมาณผลผลิต ดังนี้

<u>ค่าใช้จ่ายส่วนที่คงที่</u> ซึ่งไม่ขึ้นกับปริมาณผลผลิต จะประกอบด้วยค่าเสื่อมราคาของอุปกรณ์ ซึ่งในที่นี้ สมมุติให้เป็นแบบเส้นตรง โดยมีมูลค่าซากเทากับ 10% ของเงินลงทุน ส่วนที่เกี่ยวข้องกับการผลิตไฟฟ้า ส่วนอายุการใช้งานของระบบกำหนดให้เป็น 25 ปี นอกจากนี้ ยังมีค่าบำรุงรักษา และค่าแรงงาน ซึ่งสมมุติให้มีค่าเป็น 2 และ 1% ของเงินลงทุนส่วนที่ผลิตไฟฟ้า ตามลำดับ

<u>ค่าใช้จ่ายส่วนที่แปรผัน</u> ประกอบด้วย ค่าเชื้อเพลิง และค่าไฟฟ้า ที่ใช้ในการขับเคลื่อนอุปกรณ์เสริมต่าง ๆ เช่น ปั๊ม พัดลม เป็นต้น ซึ่งในกรณีการคิดต้นทุนค่าไฟฟ้า ก็จะแบ่งค่าใช้จ่ายดังกล่าวตามสัดส่วนของ exergy เช่นเดียวกับกรณีของเงินลงทุน

<u>ต้นทุนเฉลี่ยต่อหน่วย</u>

เมื่อสมมุติอายุการใช้งานของระบบแล้ว สามารถหาผลรวมของต้นทุนค่าใช้จ่ายต่าง ๆ (รวมเงินลงทุน) ในแต่ละปี ตลอดอายุการใช้งาน แล้วปรับค่าให้เป็นเงินปัจจุบัน และเงินที่เท่า ๆ กันเป็นรายปี ต้นทุนเฉลี่ยต่อหน่วยจะเท่ากับอัตราส่วนของต้นทุนรายปีที่ปรับให้เท่ากัน (levelized total cost) กับปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้ในแต่ละปี ดังนี้

$$P_w = \sum_{j=1}^{n} \frac{F_j}{(1+i)^n} \qquad \text{----- (17)}$$

$$A = \frac{P_w[i(1+i)^n}{[(1+i)^n - 1]} \qquad \text{----- (18)}$$

โดยที่ $P_w$ และ A เป็นต้นทุนที่ปรับเป็นปัจจุบัน และที่ปรับให้เท่ากันทุกปี ตามลำดับ

Fj เป็นต้นทุนที่ปี j

i และ n เป็นอัตราดอกเบี้ย และจำนวนปีที่พิจารณา

ดังนี้ ต้นทุนต่อหน่วย $= \frac{A}{\text{kWh ที่ผลิตได้ใน 1 ปี}}$

## ผลการศึกษา

<u>ดัชนีการใช้พลังงานจำเพาะ</u>

จากปริมาณไฟฟ้าที่ซื้อ ซึ่งมีค่าประมาณ เดือนละ 3.3 ล้าน kWh ผนวกกับปริมาณลิกไนต์ที่ใช้กับระบบผลิตร่วม และน้ำมันเตาที่ใช้กับหม้อไอน้ำเสริม ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเดือนละ 5,284.4 และ 240 ตัน ตามลำดับ ดังที่แสดงในภาคผนวก ก. สามารถวิเคราะห์หาค่าดัชนีการใช้พลังงานจำเพาะได้เทากับ 13.69 GJ/ตันกระดาษ หรือ 1,206.5 บาท/ตันกระดาษ

<u>หม้อไอน้ำ</u>

ผลการทดสอบ ได้ข้อมูลการเดินเครื่อง ดังที่แสดงในภาคผนวก ค. ส่วนรายละเอียดอื่น ๆ อาจหาดูได้จากเอกสารอ้างอิง [8] จากข้อมูลที่แสดง ผนวกกับผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบของลิกไนต์ที่ใช้ที่แสดงในภาคผนวก ข. สามารถวิเคราะห์ปริมาณอากาศส่วนเกินที่ใช้ในการเผาไหม้ได้ 86.1 % ซึ่งจัดว่าปกติสำหรับเชื้อเพลิงแข็ง จากนั้นคำนวณหาค่าประสิทธิภาพหม้อไอน้ำตามสมการ (12) ได้เท่ากับ 75% ซึ่งค่อนข้างต่ำเล็กน้อย พลังงานสูญเสียสำคัญที่น่าจะปรับลดได้ คือ การสูญเสียเนื่องจากความชื้นในเชื้อเพลิง และการสูญเสียความร้อนออกจากระบบ ซึ่งมีค่าเทียบได้เป็น 5.33 และ 3.66% ของพลังงานที่ส่งเข้าระบบทั้งหมด รายละเอียดต่าง ๆ ได้สรุปแสดงไว้ในตารางการทำสมดุลพลังงานของระบบ ข้างล่าง

**ตารางที่ 1.** สมดุลพลังงานของหม้อไอน้ำ

| รายการ | อัตราพลังงาน (MW) | ร้อยละของพลังงานป้อนเข้า (%) |
|---|---|---|
| พลังงานจากลิกไนต์ | 29.19 | 99.05 |
| พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ขับอุปกรณ์เสริม | 0.28 | 0.95 |
| รวมพลังงานเข้าระบบ | 29.47 | 100.00 |
| พลังงานที่ใช้ทำน้ำป้อนเป็นไอน้ำ | 22.11 | 75.03 |
| พลังงานที่สูญเสียไปกับไอเสียแห้ง | 2.91 | 9.87 |
| พลังงานสูญเสียเนื่องจากความชื้นในเชื้อเพลิง | 1.57 | 5.33 |

| รายการ | อัตราพลังงาน (MW) | ร้อยละของพลังงานป้อนเข้า (%) |
|---|---|---|
| พลังงานสูญเสียเนื่องจาก $H_2$ ในเชื้อเพลิง | 1.38 | 4.68 |
| พลังงานสูญเสียเนื่องจากความชื้นในอากาศ | 0.09 | 0.31 |
| พลังงานสูญเสียเนื่องจากเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ | 0 | 0 |
| พลังงานสูญเสียเนื่องจากเผาไหม้ไม่หมด | 0.27 | 0.92 |
| พลังงานสูญเสียเนื่องจาก blow down | 0.06 | 0.20 |
| ความร้อนสูญเสียจากระบบ | 1.08 | 3.66 |
| | 29.47 | 100.00 |

ชุดถังหันไอน้ำและเครื่องปั่นไฟ

จากสมการ (13) ประกอบกับข้อมูลในภาคผนวก ค. คำนวณได้ พลังงานที่สูญเสีย ($E_l$) = 0.187 MW และประสิทธิภาพ ($\eta_{tg}$) ได้ = 88.73% ซึ่งค่อนข้างดี

ระบบการผลิตร่วม

โดยอาศัยกรรมวิธีดังที่แสดงมาแล้วรวมกับผลการคำนวณในตารางที่ 1 และข้อมูลในภาคผนวก ค. สามารถวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของระบบร่วม ($\eta_{cg}$) ได้เท่ากับ 84.18% ซึ่งจัดว่าค่อนข้างดี

ปริมาณ $SO_2$ ในไอเสีย

ตามวิธีการที่ได้อธิบายไปแล้ว วิเคราะห์หามวลของ S ที่ออกไปกับไอเสียได้ 0.664 kg/min หรือ $SO_2$ = 1.328 kg/min. ซึ่งเมื่อนำมาใช้ประกอบกับอัตราการไหลของไอเสีย แล้วคำนวณเป็นค่า ppm ของ $SO_2$ ในไอเสีย ได้เท่ากับ 446.6 ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์ที่กรมโรงงานฯ กำหนดไว้ (400 ppm)

**ต้นทุนค่าไฟฟ้าจากระบบการผลิตร่วม**

เงินลงทุน

ราคาระบบผลิตไอน้ำ 125.5 ล้านบาท ระบบผลิตไฟฟ้า 40 ล้านบาท ต้นทุนระบบการผลิตร่วมเฉพาะส่วนที่ผลิตไฟฟ้า 83.19 ล้านบาท

ค่าเสื่อมราคา

เมื่อสมมุติให้อัตราการเสื่อมมีลักษณะเป็นเส้นตรง โดยมีมูลค่าซาก 10% ของเงินลงทุน และอายุการใช้งาน 25 ปี จะได้ค่าเสื่อมราคาเฉพาะส่วนที่ผลิตไฟฟ้า 2.995 ล้านบาท/ปี

ค่าบำรุงรักษา

สมมุติให้มีค่าเป็น 2% ของเงินลงทุน = 1.664 ล้านบาท/ปี

ค่าแรงงาน

สมมุติให้มีค่าเป็น 1% ของเงินลงทุน = 0.832 ล้านบาท/ปี

ค่าเชื้อเพลิง

ไฟฟ้าที่ผลิตได้ใน 1 ปี สมมุติ load factor 87%

= 3,560 x 0.87 x 340 x 24 = 25.273 ล้าน kWh/ปี

ค่าเชื้อเพลิง = 12.504 ล้านบาท/ปี

ค่าไฟฟ้าที่ใช้ขับอุปกรณ์เสริม

คิดเฉพาะส่วนที่ใช้ผลิตไฟฟ้า 1.161 ล้านบาท/ปี

ต้นทุนรวม (ไม่รวมเงินลงทุน) 19.155 ล้านบาท/ปี

เมื่อสมมุติอัตราการเพิ่มของค่าซ่อมบำรุง แรงงาน ไฟฟ้า และเชื้อเพลิงมีค่า 4, 8, 8, และ 7% ต่อปีตามลำดับ

จะได้ต้นทุนรวมตลอดอายุการใช้งาน เมื่อปรับเป็นปัจจุบัน 186.335 ล้านบาท

(คิดอัตราส่วนลด 15 %)

ได้ต้นทุนเฉลี่ยรายปี (A) = 28.826 ล้านบาท

และต้นทุนต่อหน่วย = 1.14 บาท/kWh

ในทำนองเดียวกัน สามารถวิเคราะห์หาต้นทุนไอน้ำที่ผลิตจากระบบร่วมได้ = 210.5 บาท/ตัน

## สรุปและวิจารณ์ผล

ผลการวิเคราะห์ศึกษาระบบการผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วมในโรงงานกระดาษขนาดใหญ่แห่งหนึ่ง ขนาด 3.56 MW ใช้ลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิงได้ว่า ประสิทธิภาพของระบบหม้อไอน้ำ และชุดกังหัน-เครื่องปั่นไฟ มีค่า 75 และ 88.73% ตามลำดับ ส่วนระบบการผลิตร่วม มีค่าประสิทธิภาพ 84.18% ซึ่งจัดว่าค่อนข้างดี ยกเว้นหม้อไอน้ำที่มีค่าต่ำกว่ามาตรฐานเล็กน้อย สาเหตุสำคัญเป็น

เพราะใช้ลิกไนต์ที่มีความชื้นสูง ซึ่งถ้าหากลดลงได้ ก็จะช่วยให้ประสิทธิภาพดีขึ้น สำหรับไฟฟ้าที่ผลิตได้มีราคาต้นทุน 1.14 บาท/kWh ซึ่งถูกกว่าราคาที่ซื้อ 0.36 บาท/kWh เช่นนี้ จะช่วยประหยัดค่าไฟฟ้าได้ 38.25 ล้านบาท/ปี ซึ่งเมื่อเทียบกับเงินลงทุนทั้งหมด 165.5 ล้านบาท จะคืนทุนภายใน 4.3 ปี ซึ่งใกล้เคียงกับข้อมูลของทางโรงงาน ส่วนการวิเคราะห์ปริมาณ $SO_2$ ที่ออกไปกับไอเสีย ได้ค่า ppm เท่ากับ 446 ซึ่งเกินเกณฑ์ที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด (400 ppm) ทั้ง ๆ ที่ใช้ลิกไนต์ชนิด blend ผสมระหว่างลิกไนต์ในประเทศและที่นำเข้า ซึ่งมีปริมาณ S ต่ำกว่าลิกไนต์ในประเทศ จุดนี้ควรจะได้รับการแก้ไข โดยอาจใช้ลิกไนต์ที่มีปริมาณ S ต่ำลง

## เอกสารอ้างอิง


1. จุลละพงษ์ จุลละโพธิ, 2536, "Overview of Cogeneration ในประเทศไทย", การสัมมนาเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกล ครั้งที่ 7, มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 21-22 ตุลาคม.
2. Porter, J., 1981, "Energy Conservation in the Paper Industries", Electric Energy Conference, Melbourne, 4-6 October.
3. ประยุทธ ทองนิมิตร, 2535, "ศักยภาพการใช้ระบบการผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วมในอุตสาหกรรมกระดาษของประเทศไทย", วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
4. Mora, J.C., 1990, "Cogeneration and Integrated Use of Electricity in a Pulp and Paper Industry", AIT 7th Asian School, Industrial Power Production, Bangkok, January
5. Chiraratananon, S., 1990, "Case Study of Cogeneration Feasibility in a Tissue Paper Factory", 7th Asian School, Industrial Power Production, AIT, Bangkok
6. Sorensen, H.A., 1983, Energy Conversion Systems, John Wiley & Sons, USA.
7. Wibulswas, P., 1991, "Feasibility of Cogeneration in Par-Boiled Rice Mills, Asia Energy'91 Conference, Bangkok, 25 November
8. อาษา ประทีปเสน, 2534, การวิเคราะห์ระบบการผลิตร่วมในโรงงานกระดาษ, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ภาคผนวก ก. ปริมาณการใช้พลังงานและผลผลิต

| เดือน/ปี | ปริมาณการใช้พลังงาน | | | ผลผลิต (ตัน) | ดัชนีการใช้พลังงานจำเพาะ (บาท/ตัน) |
|---|---|---|---|---|---|
| | ไฟฟ้า (ล้าน kWh) | ลิกไนต์ (ตัน) | น้ำมันเตา (ตัน) | | |
| มิย. 33 | 6.006 | 6,938 | 191 | 9,821 | 1,120 |
| กค. | 4.652 | 3,949 | 321 | 7,257 | 1,162 |
| สค. | 5.040 | 4,926 | 139 | 7,298 | 1,169 |
| กย. | 6.075 | 6,281 | 316 | 8,778 | 1,341 |
| ตค. | 5.219 | 5,376 | 177 | 7,355 | 1,237 |
| พย. | 5.366 | 4,974 | 138 | 7,729 | 1,173 |
| ธค. | 6.016 | 6,275 | 158 | 9,215 | 1,120 |
| มค. 34 | 4.704 | 4,296 | 154 | 6,442 | 1,274 |
| กพ. | 5.203 | 4,244 | 172 | 7,531 | 1,132 |
| มีค. | 6.583 | 5,579 | 220 | 9,649 | 1,187 |
| เม.ย. | 5.120 | 4,792 | 159 | 7,226 | 1,271 |
| พค. | 5.082 | 5,351 | 224 | 7,578 | 1,292 |
| รวม | 64.886 | 62,981 | 2,880 | 95,879 | 14,478 |
| เฉลี่ย/เดือน | 5.407 | 5,248.4 | 240 | 7,990 | 1,206.5 |

หมายเหตุ

1. ไฟฟ้ารวมทั้งที่ซื้อและที่ผลิตได้
2. ในการคิดค่าดัชนีนับเฉพาะ ไฟฟ้าส่วนที่ซื้อซึ่งมีราคาเฉลี่ย 1.5 บาท/kWh
3. ราคาเฉลี่ยของลิกไนต์ และน้ำมันเตา 784.08 และ 3,020.32 บาทต่อตัน ตามลำดับ
4. ค่าความร้อนของไฟฟ้า ลิกไนต์ และน้ำมันเตา มีค่า 3.6 MJ/kWh, 16.68 MJ/kg และ 42.48 MJ/l ตามลำดับ

**ภาคผนวก ข.** ส่วนประกอบของถ่านลิกไนต์

| ส่วนประกอบ | ร้อยละ โดยน้ำหนัก |
|---|---|
| C | 44.10 |
| H | 3.20 |
| O | 10.30 |
| N | 0.30 |
| S | 0.70 |
| ความชื้น | 32.90 |
| Ashes | 8.50 |
| รวม | 100.00 |

**ภาคผนวก ค.** ข้อมูลการเดินเครื่องระบบการผลิตร่วม

| | | |
|---|---|---|
| อัตราไอน้ำที่ผลิตได้ | 495 | kg/min |
| ความดันไอน้ำ | 64.4 | bar |
| อุณหภูมิไอน้ำ | 475.1 | $^{o}C$ |
| อัตราน้ำป้อน | 515.0 | kg/min |
| ความดันน้ำป้อน | 75.5 | bar |
| อุณหภูมิน้ำป้อน | 159 | $^{o}C$ |
| $O_2$ ในไอเสีย | 9.83 | % |
| อุณหภูมิไอเสีย | 187 | $^{o}C$ |
| อัตราการ blow down | 5.9 | kg/min |
| ความดันที่ทางเข้ากังหัน | 63.6 | bar |
| อุณหภูมิที่ทางเข้ากังหัน | 475.1 | $^{o}C$ |
| ความดันที่ทางออกกังหัน | 7.5 | bar |
| อุณหภูมิที่ทางออกกังหัน | 231.6 | $^{o}C$ |
| อัตราการรั่วของไอน้ำที่กังหัน | 2.5 | kg/min |
| อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นเข้ากระปุกเกียร์ | 32 | $^{o}C$ |
| อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นออก | 34 | $^{o}C$ |
| อัตราไอน้ำเข้ากระบวนการผลิต | 451.8 | kg/min |
| อุณหภูมิไอน้ำเข้ากระบวนการผลิต | 209 | $^{o}C$ |
| พลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ | 195,000 | kJ/min |
| อัตราการป้อนเชื้อเพลิง | 105 | kg/min |