

การอนุรักษ์พลังงานสำหรับโรงงานน้ำตาลแบบดั้งเดิมของไทย:

กรณีศึกษาโรงงานน้ำตาลทรายเริ่มอุดม

Energy Conservation of Traditional Sugar Factory:

A Case Study of Rerm-Udom Sugar Factory

ประพนธ์ ชูประเสริฐ^{1*}, กิรติ สุลักษณ์¹, ปรีชา ทุมม² และ อุดร นามเสน³

Prapphon Chooprasert^{1*}, Kreerati Suluksna¹, Preecha Tummu² and Udon Namsaen³

Received: 5 November 2020, Revised: 15 January 2021, Accepted: 5 February 2021

บทคัดย่อ

โรงงานน้ำตาลแบบดั้งเดิมโดยทั่วไปมักประสบปัญหาด้านประสิทธิภาพการจัดการพลังงาน งานวิจัยนี้จึงสำรวจ ตรวจสอบ และวิเคราะห์สาเหตุของการสูญเสียพลังงานในระบบ เพื่อหามาตรการที่เหมาะสมในการแก้ปัญหาที่สามารถช่วยประหยัดพลังงาน กรณีศึกษาคือโรงงานน้ำตาลทรายเริ่มอุดม จังหวัดอุดรธานี ผลจากการวิเคราะห์พบว่าในโรงงานมีการสูญเสียหลักๆ 4 อย่าง และงานวิจัยนี้ได้มีการเสนอมาตรการเพื่อลดการใช้พลังงาน คือ (1) การสูญเสียไปกับก๊าซไอเสียหม้อไอน้ำ มาตรการคือ การติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำป้อน พบว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพหม้อไอน้ำได้ 3.8% เทียบเป็นไฟฟ้าที่ผลิตได้ 292,716 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อปี คิดเป็นเงิน 1,229,409 บาทต่อปี ระยะเวลาคืนทุน 5.86 ปี (2) การสูญเสียไปกับการโบว์ลควานหม้อไอน้ำ มาตรการคือ การติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมน้ำโบว์ลควานอัตโนมัติ พบว่า สามารถเพิ่มประสิทธิภาพหม้อไอน้ำได้ 0.3% เทียบเป็นไฟฟ้าที่ผลิตได้ 85,738 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อปี คิดเป็นเงิน 360,098 บาทต่อปี ระยะเวลาคืนทุน 3.05 ปี (3) การสูญเสียไปกับอุปกรณ์ที่ไม่หุ้มฉนวน มาตรการคือ หุ้มฉนวนถึงน้ำคอนเดนเสท สามารถผลิตไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้น 79,454 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อปี คิดเป็นเงิน 333,708 บาทต่อปี ระยะเวลาคืนทุน 1.28 ปี และ (4) การสูญเสียเนื่องจากการจัดการการใช้ไอน้ำในกระบวนการผลิต มาตรการคือ การเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้ไอน้ำในโรงงาน โดยการนำไอน้ำทั้งหมดที่ผลิตได้

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการพลังงานและโลจิสติกส์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

¹ Energy and Logistics Management Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Muang, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand.

² สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี อำเภอเมือง จังหวัดอุดรธานี 41000

² Energy Engineering, Faculty of Technology, Udon Thani Rajabhat University, Muang, Udon Thani 41000, Thailand.

³ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000

³ Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Muang, Songkhla 90000, Thailand.

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, email): chooprasert@gmail.com Tel: 06 1952 9993, 08 0480 1040

จากหม้อไอน้ำไปใช้ที่กังหันไอน้ำขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าก่อน แล้วจึงนำไอน้ำที่ออกจากกังหันไอน้ำไป
ในกระบวนการผลิต มาตรการนี้จะผลิตไฟฟ้าได้เพิ่ม 820,829 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อปี คิดเป็นเงิน 3,447,481 บาทต่อปี

คำสำคัญ: โรงงานน้ำตาล, หม้อไอน้ำ, การอนุรักษ์พลังงาน

ABSTRACT

The energy efficiency of traditional sugar factories is relatively low. This research aims to explore, measure, and analyze the causes of energy loss in the factory to propose energy conservation measures for Rerm Udom Sugar Factory, Udon Thani Province. The result shows that the most significant loss can be categorized into four sections. Therefore, four energy conservation measures are proposed. (1) The economizer for increasing boiler efficiency was installed due to heat loss through exhaust gas. This can increase boiler efficiency by 3.8% - equivalent to electricity produced of 292,716 kWh/year and corresponding to 1,229,409 Baht per year. The payback period is 5.86 years; (2) The blowdown controller was installed because of heat loss from blowdown. This helps to increase boiler efficiency by 0.3% which equates to the electricity produced of 85,738 kWh/year and corresponding to 360,098 Baht per year. The payback period is 3.05 years; (3) The installation of 2 inches thick insulation around the condensate tank was done due to radiation heat loss from the condensate tank. This helps to increase power generation by 79,454 kWh/year, corresponding to 333,708 Baht/year, and the payback period is 1.28 years; and (4) Heat loss was due to improper steam management in the factory. The measure was to preliminarily use produced steam from the boiler for power generation. After that, the lower temperature steam from the steam turbine was supplied to the production processes. This helps to increase the electricity generation by approximately 820,829 kWh/year, corresponding to 3,447,481 Baht per year.

Key words: sugar factory, steam boiler, energy conservation

บทนำ

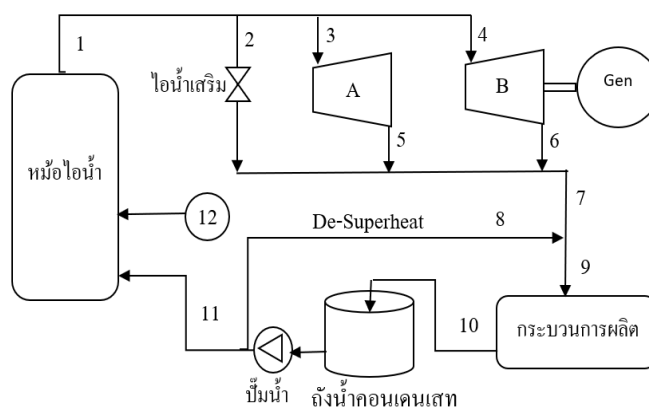
ประเทศไทยมีชีวมวลเหลือเป็นจำนวนมาก หลังการเก็บเกี่ยวผลผลิตที่ยังไม่ถูกนำไปใช้ประโยชน์ เช่น ทะลายปาล์ม (Sungkaew, 2015) ฟางข้าว (Ekburanawat and Thongsongyod, 2013; Rahman and Paatero, 2012) ไม่มีการถนอมรักษาเห้งมันสำปะหลัง (Arjarn, 2010) และกากอ้อย (Chooprasert and Limpitprakarn, 2011) แต่ละปีมีการเก็บเกี่ยวอ้อยในประเทศไทยประมาณ 8 ล้านตันต่อปี เทียบเท่าเป็น

การผลิตไฟฟ้าประมาณ 6,700 จิกะวัตต์-ชั่วโมงต่อปี (The Department of Alternative Energy Development and Efficiency (DEDE), 2009) แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกของไทยระบุว่า สัดส่วนการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนสำหรับประเทศไทยอยู่ที่ประมาณ 10% โดยมีเป้าหมายที่จะเพิ่มสัดส่วนดังกล่าวให้เป็น 30% ในอีก 20 ปีข้างหน้า (Department of Renewable Energy Development and Energy Efficiency, 2015) นอกเหนือจากนี้

แผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทยได้วางแผนเพิ่มกำลังการผลิตไฟฟ้าจากชีวมวลให้ได้ 520 เมกะวัตต์ (The Energy Policy and Planning Office (EPPO), 2018) โดยในปัจจุบันมีโรงไฟฟ้าชีวมวลที่จ่ายไฟเข้าระบบแล้วจำนวน 220 แห่ง (The Energy Policy and Planning Office (EPPO), 2020) อย่างไรก็ตาม จากงานวิจัยที่ทำการสำรวจโรงงานน้ำตาลจำนวน 47 แห่งในประเทศไทยชี้ให้เห็นว่าโรงไฟฟ้าพลังงานชีวมวลของโรงงานน้ำตาลแบบดั้งเดิมมีประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำ (Sathitbun-anan *et al.*, 2014) เนื่องจากในสมัยก่อนโรงงานถูกออกแบบโดยไม่ได้คำนึงถึงเรื่องการประหยัดพลังงาน ชีวมวลได้แก่ ชานอ้อย หรือ แกลบ เป็นวัสดุเหลือใช้ทางเกษตรที่ไม่มีมูลค่า เพราะนโยบายรัฐบาลในสมัยนั้นยังไม่ได้รับซื้อไฟฟ้าจากเอกชน ปัจจุบันก็มีความพยายามหามาตรการเพื่อช่วยลดการใช้พลังงานแก่โรงงานน้ำตาล ซึ่งพบว่าบางกระบวนการมีความเป็นไปได้ที่จะลดลงได้กว่า 70% (Gul and Harasek, 2012; Khoodaruth, 2014; Sergeevich *et al.*, 2018) ในประเทศไทยเองก็มีมาตรการที่หาความสิ้นเปลืองในการใช้พลังงานของโรงงานน้ำตาลโดยใช้วิธีทำสมดุลพลังงานเพื่อจำลองการใช้พลังงาน ซึ่งสามารถช่วยให้หาสถานการณ์ทำงานของหม้อไอน้ำที่ดีที่สุดและสร้างอัตราผลตอบแทนภายในประมาณ 25% (Wongrat and Sookkumnerd, 2015) ซึ่งจะเห็นได้ว่ามาตรการอนุรักษ์พลังงานสำหรับโรงงานน้ำตาลแบบดั้งเดิมของไทยยังมีน้อยมาก ขณะที่ประสิทธิภาพของการใช้พลังงานก็ค่อนข้างต่ำมากเช่นกัน

งานวิจัยนี้จึงสนใจสำรวจและวิเคราะห์ประสิทธิภาพการใช้พลังงานความร้อนของโรงงาน

น้ำตาลแบบดั้งเดิม (โรงงานน้ำตาลทรายขาวเริ่มอุดม จังหวัดอุดรธานี) เพื่อหาศักยภาพของระบบและแนวทางการอนุรักษ์พลังงานที่เป็นไปได้ ในการนี้จะมีการคำนวณผลประหยัดที่ได้ เงินลงทุนโดยประมาณ และคำนวณหาระยะเวลาคืนทุนเพื่อเป็นแนวทางให้แก่โรงงานน้ำตาลดังกล่าวนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป โดยโรงงานน้ำตาลทรายขาวเริ่มอุดม จำกัด ตั้งอยู่เลขที่ 11 หมู่ที่ 6 ต.หนองสระปลา อ.หนองหาน จังหวัดอุดรธานี โดยถูกจัดให้อยู่ในประเภทโรงงานควบคุมขนาดใหญ่ ในประเภทอุตสาหกรรมอาหาร ผลิตภัณฑ์หลักของโรงงาน คือ น้ำตาลทรายประมาณ 1,600-1,700 ตันต่อวัน และผลิตไฟฟ้าประมาณ 17-18 MW ต่อวัน โดยในการผลิตไฟฟ้าจะมีการใช้ชานอ้อยเป็นเชื้อเพลิงประมาณปีละ 280,000 ตัน เผาเป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำขนาด 200 ตันต่อชั่วโมงทำงานที่ความดัน 29 Bar gauge (barg) จำนวน 2 ชุด จากรายงานไอน้ำที่ผลิตได้ทั้งหมดในปี พ.ศ. 2562 มีจำนวนกว่า 660,000 ตันไอน้ำแบ่งไปใช้ในกระบวนการผลิตบางส่วน ส่วนที่เหลือถูกนำไปใช้ในการผลิตไฟฟ้า โดยในปี พ.ศ. 2562 สามารถผลิตไฟฟ้าได้กว่า 72,000 เมกะวัตต์-ชั่วโมง (MWh) เพื่อใช้เองในโรงงานและเพื่อจำหน่ายอย่างละประมาณ 50% การผลิตไอน้ำและการนำไปใช้ในส่วนต่างๆ แสดงในรูปที่ 1 ไอน้ำทั้งหมดที่ผลิตได้จะถูกส่งไปใช้ในกระบวนการผลิตสำหรับกังหันไอน้ำขับเคลื่อนของหม้อไอน้ำและปั๊มน้ำป้อนหม้อไอน้ำ กังหันไอน้ำขับเคลื่อน กังหันไอน้ำขับเคลื่อนด้วยอ้อยและเครื่องย่อยอ้อย (ชุดกังหัน A) และใช้ในการผลิตไฟฟ้าโดยส่งไปที่กังหันไอน้ำ (ชุดกังหัน B) ขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 12 MW และ 9 MW ตามลำดับ



ภาพที่ 1 สภาวะไอน้ำในโรงงานน้ำตาล

วิธีดำเนินการวิจัย

จากข้อมูลรายงานการจัดการพลังงานของโรงงานน้ำตาลทรายขาวเริ่มอุดม ถุดูหีบอ้อย พ.ศ. 2562 โดยมีระยะเวลาเดินเครื่อง 110 วัน พบว่าพลังงานความร้อนเป็นรูปแบบที่ใช้ในโรงงานมากที่สุดกว่า 90% การวิเคราะห์การใช้พลังงานจึงมุ่งเน้นการใช้พลังงานความร้อนเป็นหลัก โดยแบ่ง 2 ส่วน ได้แก่ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของหม้อไอน้ำ และการสูญเสียความร้อนในกระบวนการผลิต สำหรับการวิเคราะห์ประสิทธิภาพหม้อไอน้ำนั้นตัวแปรต้นที่ตรวจวัดค่าต่างๆ เพื่อนำไปคำนวณประสิทธิภาพ

ดังตารางที่ 1 ในส่วนการวิเคราะห์การสูญเสียความร้อนในกระบวนการผลิต พิจารณาจากการสูญเสียความร้อนของอุปกรณ์ใช้ไอน้ำที่ไม่ได้หุ้มฉนวน ซึ่งโรงงานแห่งนี้มีถังเก็บน้ำคอนเดนเสทขนาดใหญ่ มีตัวแปรต้นที่ต้องตรวจวัดค่า คือ อุณหภูมิผิวของถังน้ำคอนเดนเสท เพื่อใช้คำนวณความร้อนสูญเสีย และการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการใช้ไอน้ำในโรงงาน โดยการทำสมดุลพลังงานและมวลของกระบวนการผลิตน้ำตาลและผลิตไฟฟ้า เพื่อให้ทราบถึงอัตราการใช้ไอน้ำของระบบ

ตารางที่ 1 ค่าที่ทำการตรวจวัดเพื่อใช้คำนวณหาประสิทธิภาพพลังงานของหม้อไอน้ำ

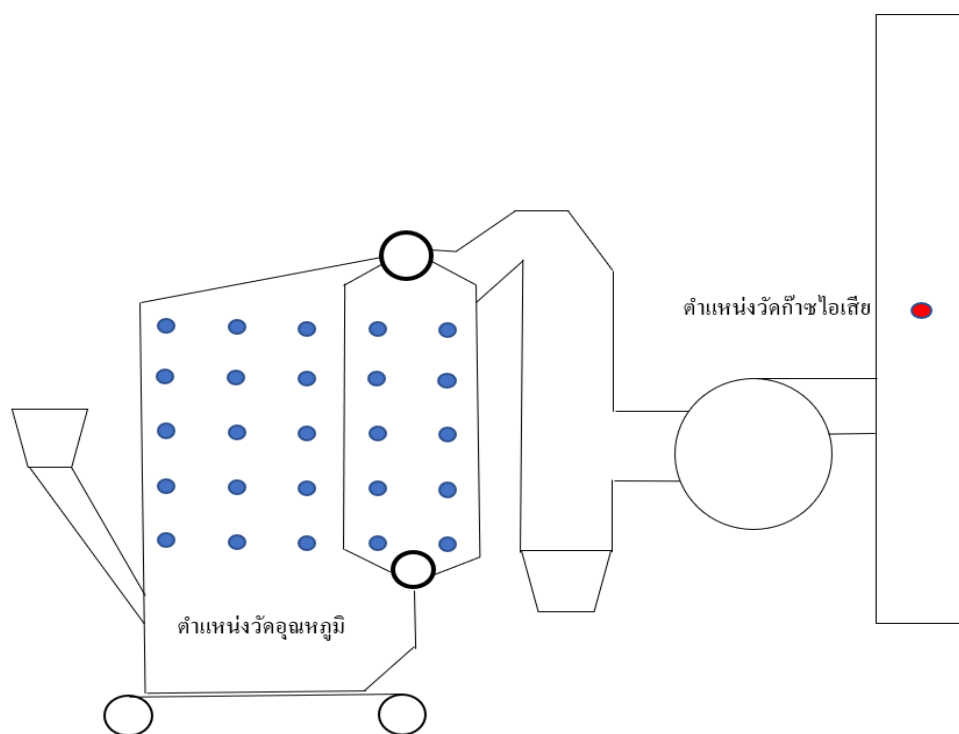
ลำดับ	ค่าที่ทำการตรวจวัด	เครื่องมือหรือวิธีการที่ใช้
1	ปริมาณก๊าซ O_2 , CO , CO_2	เครื่องวัดการเผาไหม้ ยี่ห้อ Testo รุ่น 330
2	อุณหภูมิก๊าซเผาไหม้ (Flue gas)	เครื่องวัดการเผาไหม้ ยี่ห้อ Testo รุ่น 330
3	อุณหภูมิผิวของหม้อไอน้ำ	กล้องถ่ายภาพความร้อน ยี่ห้อ Testo รุ่น 865
4	การโบลว์ดาวน์ (Blowdown)	เอกสารตรวจสอบรายวัน
5	คาร์บอนจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ (Unburned carbon)	ส่งวิเคราะห์ที่ห้องปฏิบัติการ

1. การวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของหม้อไอน้ำ

การตรวจวัดประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำได้ทำในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ของปี พ.ศ. 2563 เป็นการตรวจวัดด้วยวิธีทางอ้อมที่เรียกว่า “Heat-loss method” ซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลาย (Association, 1993; Chooprsert *et al.*, 2020) วิธีดังกล่าวนี้เป็นการใส่พลังงานเข้าหม้อไอน้ำ 100% แล้วหักลบการสูญเสียพลังงานต่างๆที่เกิดขึ้นออก โดยใช้เครื่องมือตรวจวัด ได้แก่ กล้องถ่ายภาพความร้อน ยี่ห้อ Testo รุ่น 865 ช่วงการวัด -20 ถึง 280 °C ความถูกต้อง $\pm 2\%$ ตรวจวัดองค์ประกอบและอุณหภูมิก๊าซเผาไหม้ (ปริมาณก๊าซ O_2 , CO และ CO_2) โดยใช้เครื่องวัดการเผาไหม้ยี่ห้อ Testo รุ่น 330, โดย O_2 ช่วงการวัด 0 ถึง 21 %vol. ความถูกต้อง $\pm 0.2\%$ และ CO ช่วงการวัด 0 ถึง 8000 ppm ความถูกต้อง ± 10 ppm ส่วนค่า CO_2 เครื่องวัดการเผาไหม้จะนำค่า O_2 ที่วัดได้มาคำนวณ

และทำการวัดคาร์บอนที่เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ (เก็บตัวอย่างขี้เถ้า) โดยการส่งวิเคราะห์ที่ห้องปฏิบัติการ เป็นการตรวจวัดและวิเคราะห์ประสิทธิภาพตามมาตรฐาน JIS B8222: 1993 (Association, 1993) ซึ่งวัดอุณหภูมิผิวผนังหม้อไอน้ำ ทั้ง 4 ด้าน คือ ด้านหน้า ด้านข้างทั้งสอง และด้านหลัง จำนวน 3 จุด วัดเป็นกริด ระยะห่างจุดละ 2 เมตร นำค่าเฉลี่ยมาใช้คำนวณ การวัดองค์ประกอบและอุณหภูมิก๊าซเผาไหม้นั้น โดยการนำเครื่องวัดการเผาไหม้ วัดที่ปล่องควันของหม้อไอน้ำซึ่งผู้ผลิตกำหนดตำแหน่งจุดวัดมาให้ ทำการวัดจำนวน 3 จุด และนำค่าเฉลี่ยมาใช้ตัวอย่างจุดวัดแสดงในภาพที่ 2

สำหรับขี้เถ้าจะเก็บตัวอย่างที่บริเวณใต้ขี้เถ้าใต้ห้องเผาไหม้ ใส่ถุงซิปล็อก 0.5 กิโลกรัม จำนวน 10 ถุง ส่งไปวิเคราะห์ตามมาตรฐาน EN 14774 และ EN 14775 ที่ห้องปฏิบัติการ บจก. เอสจีเอส (ประเทศไทย)



ภาพที่ 2 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิที่ผนังหม้อไอน้ำและวัดก๊าซไอเสียที่ปล่องควัน

เมื่อได้ค่าตรวจวัดแล้วก็จะนำไปคำนวณหาความร้อนสูญเสียที่เกิดขึ้นได้แก่ การสูญเสียจากก๊าซไอเสีย (L1) การสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (L2) การสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่หมด (L3) การสูญเสียจากการแผ่รังสี (L4) และ การ

สูญเสียจากการโบลว์ดาวน์ (L5) คำนวณได้ตามสมการที่ (1)-(5) ตามลำดับ (Gul and Harasek, 2012; Sathitbun-anan *et al.*, 2014) และประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำคำนวณได้ตามสมการที่ (6)

$$L_1 = G \cdot C_g (t_g - t_o) \quad (1)$$

$$L_2 = 126.1 [G_o + (m-1)A_o] (CO) \quad (2)$$

$$L_3 = 339C_2 \quad (3)$$

$$L_4 = \frac{1}{100} l_r H_l \quad (4)$$

$$L_5 = \dot{m}_{bd} \frac{(h_{bd} - h_{FW})}{\dot{m}_f} \quad (5)$$

$$\eta_b = \left[1 - \left(\frac{L_l}{H_l + Q} \right) \right] \times 100\% \quad (6)$$

โดย	G	คือ ปริมาณก๊าซไอเสียต่อ 1 kg. ของเชื้อเพลิง, m ³ /kg เชื้อเพลิง
	C_g	คือ ค่าความจุความร้อนของก๊าซไอเสีย, 1.38 kJ-K/m ³
	t_g	คือ อุณหภูมิก๊าซไอเสีย, °C
	t_o	คือ อุณหภูมิอากาศ, °C
	G_o	คือ ปริมาณไอเสีย (แห้ง) ตามทฤษฎี, m ³ /kg
	m	คือ อัตราส่วนอากาศส่วนเกิน
	A_o	คือ ปริมาณอากาศ (แห้ง) ตามทฤษฎีอากาศ, m ³ /kg
	C_2	คือ ปริมาณก๊าซคาร์บอนที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (%โดยมวล)
	l_r	คือ %การสูญเสียเนื่องจากการแผ่รังสีจากผนังหม้อไอน้ำ
	$\dot{m}_{bd}$	คือ อัตราการโบลว์ดาวน์, kg/h
	h_{bd}	คือ ค่าเอนทัลปีของน้ำโบลว์ดาวน์, kJ/kg
	h_{FW}	คือ ค่าเอนทัลปีของน้ำป้อน, kJ/kg
	L_l	คือ ผลรวมของความสูญเสียทั้งหมด, kJ/kg
	$H_l + Q$	คือ ผลรวมของความร้อนป้อนเข้าสู่ระบบ, kJ/kg

2. การสำรวจพลังงานสูญเสียและการทำสมดุลพลังงาน
งานวิจัยนี้ได้สำรวจหาความสูญเสียของ
ระบบบนหัวข้อแสดงดังตารางที่ 2 จากนั้นจึงนำเอา

ข้อมูลที่ได้จากการสำรวจมาวิเคราะห์สมดุลพลังงาน
ดังที่แสดงในภาพที่ 3 ตามสมการที่ (7)-(8) (Association,
1993; Department of Industrial Works, 2018)

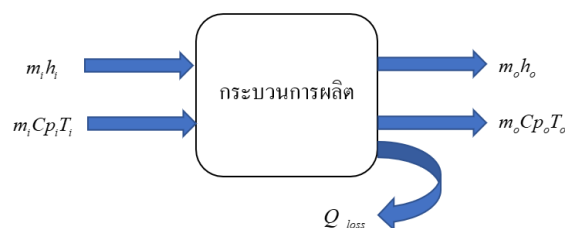
$$Q_{in} = Q_{out} + Q_{loss} \quad (7)$$

$$m_i h_i + m_i C_{p_i} T_i = m_o h_o + m_o C_{p_o} T_o + Q_{loss} \quad (8)$$

โดย Q คือ อัตราความร้อนไหลผ่านระบบ, kW
 m_i คือ อัตราการไหลเชิงมวลเข้าระบบ, kg/s
 m_o คือ อัตราการไหลเชิงมวลออกจากระบบ, kg/s
 h_i คือ เอนทัลปีของไหลเข้าระบบ, kJ/kg
 h_o คือ เอนทัลปีของไหลออกจากระบบ, kJ/kg
 C_{p_i} คือ ค่าความจุความร้อนของไหลเข้าระบบ, kJ/(kg°C)
 C_{p_o} คือ ค่าความจุความร้อนของไหลออกจากระบบ, kJ/(kg°C)

ตารางที่ 2 หัวข้อการสำรวจเพื่อหาความสูญเสียในกระบวนการผลิต

ลำดับ	หัวข้อ	เครื่องมือหรือวิธีการที่ใช้
1	การนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่	ตรวจวัดอุณหภูมิความร้อนทิ้งและทำสมดุลพลังงาน
2	ความร้อนสูญเสียในระบบท่อ	ตรวจวัดอุณหภูมิความร้อนและคำนวณ
3	ความร้อนสูญเสียในอุปกรณ์ต่างๆ	ตรวจวัดอุณหภูมิความร้อนและคำนวณ
4	ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของอุปกรณ์	ตรวจวัดประสิทธิภาพ



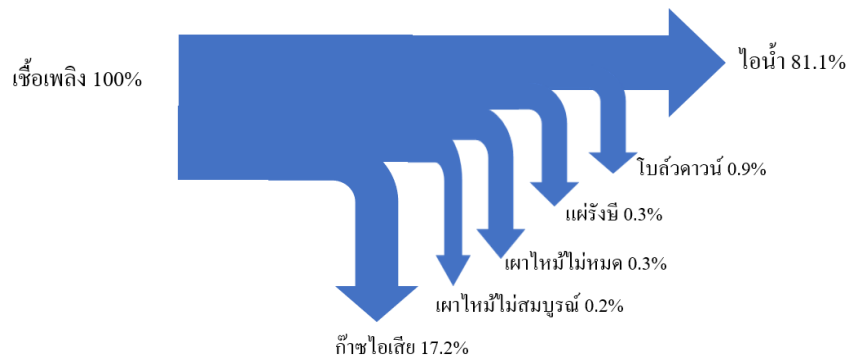
ภาพที่ 3 แนวคิดในการทำสมดุลพลังงาน

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. ความร้อนสูญเสียและประสิทธิภาพพลังงานของหม้อไอน้ำ

ผลการสำรวจและตรวจวัดประสิทธิภาพหม้อไอน้ำของโรงงาน และการนำเสนอมาตรการอนุรักษ์พลังงานได้มีการนำเสนอผลการศึกษาแล้วใน

(Chooprsert *et al.*, 2020) พร้อมทั้งคำนวณหาความสูญเสียต่างๆ ในขั้นตอนที่ 1 พบว่า L_1 , L_2 , L_3 , L_4 และ L_5 มีค่าเท่ากับ 17.2, 0.2, 0.3, 0.3, 0.9 % ตามลำดับ และประสิทธิภาพหม้อไอน้ำเท่ากับ 81.1 % สามารถเขียนในรูปแบบผังพลังงานความร้อนของหม้อไอน้ำ ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 แผนผังการสูญเสียความร้อนและประสิทธิภาพหม้อไอน้ำเดิม

2. ความร้อนสูญเสียในกระบวนการผลิต

จากการสำรวจพลังงานสูญเสียและการทำสมดุลพลังงานในขั้นตอนที่ 2 พบว่า มีพลังงานความร้อนที่สูญเสียอย่างเห็นได้ชัด 2 ส่วน คือ

2.1 ความร้อนสูญเสียจากอุปกรณ์ที่ไม่ได้หุ้มฉนวน (ถังเก็บน้ำคอนเดนเสท)

ความร้อนสูญเสียส่วนนี้แสดงการตรวจวัดในภาพที่ 5 ถังเก็บน้ำคอนเดนเสทยังไม่มีหุ้มฉนวนพบว่า มีอุณหภูมิผิวเฉลี่ยเท่ากับ 45 °C อุณหภูมิอากาศ

แวดล้อมเท่ากับ 35 °C ความร้อนสูญเสียจากถังเก็บน้ำคอนเดนเสทโดยการแผ่รังสีและการพาความร้อนสามารถคำนวณด้วยสมการที่ได้จากการทดลอง (Empirical equation) ตามมาตรฐาน IS8753 ดังสมการที่ 9 (Department of Industrial Works, 2018) พบว่า มีค่าเท่ากับ 515.1 kW ซึ่งนับว่ามีปริมาณความร้อนสูญเสียค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณพลังงานที่ผลิตจากหม้อไอน้ำ



ภาพที่ 5 วัดความร้อนของถังเก็บน้ำคอนเดนเสท

$$Q_{loss} = 0.548 \left[\left(\frac{T_s}{55.55} \right)^4 - \left(\frac{T_a}{55.55} \right)^4 \right] + 1.957(T_s - T_a)^{1.25} \sqrt{\frac{196.85V_m + 68.9}{68.9}} \quad (9)$$

โดย

- Q_{loss} คือ ความร้อนสูญเสียจากถังเก็บน้ำคอนเดนเสท, W/m²
 T_s คือ อุณหภูมิผิวของถังน้ำคอนเดนเสท, K
 T_a คือ อุณหภูมิอากาศ, K
 V_m คือ ความเร็วลมของอากาศ, m/s (ในการคำนวณนี้ใช้ 2 m/s)

2.2 ความร้อนสูญเสียเนื่องจากการใช้ไอน้ำในโรงงาน (ใช้ไอน้ำเสริมส่งตรงจากหม้อไอน้ำ) เพื่อนำไปใช้ในกระบวนการผลิต

โดยปกติแล้วไอน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตจะเป็นไอน้ำความดันต่ำ (Sat. steam) ที่ออกจากกังหันไอน้ำ (สภาวะที่ 5-6) ในภาพที่ 1 อย่างไรก็ตาม กรณีโรงงานน้ำตาลแบบดั้งเดิมนี้มีการผลิตและส่งจ่ายไอน้ำส่งตรงเข้าไปในกระบวนการผลิต เนื่องจากมีความสะดวกสบายในการใช้งาน โดยหลักถือว่าเป็นพฤติกรรมการใช้ไอน้ำที่เกินความจำเป็น จึงต้องนำไอน้ำจากหม้อไอน้ำ (Superheated steam) ไปลด

อุณหภูมิ (Desuperheater) (สภาวะที่ 2) เพื่อนำไปใช้เสริมในกระบวนการผลิต ถือเป็นการสูญเสียพลังงานโดยไม่จำเป็นอย่างมาก จากการทำสมดุลพลังงานตามขั้นตอนที่ 2 สำหรับการใช้ไอน้ำที่กระบวนการต่างๆ ตามภาพที่ 1 จะได้ผลการคำนวณดังตารางที่ 3-4 ซึ่งพบว่ากระบวนการผลิตต้องการใช้ไอน้ำจริงเพียง 327 ton/hr (สภาวะที่ 9) ในความเป็นจริงแล้วไอน้ำทั้งหมดที่ออกจากหม้อไอน้ำควรนำไปใช้ที่กังหันขับเคลื่อนกำเนิดไฟฟ้า จากนั้นจึงนำไอน้ำที่ออกจากกังหันไปใช้ในกระบวนการผลิต ซึ่งเป็นการประหยัดพลังงานเป็นอย่างมาก

ตารางที่ 3 ผลการทำสมดุลพลังงานด้านแรงดัน 29 bar_g ของโรงงาน

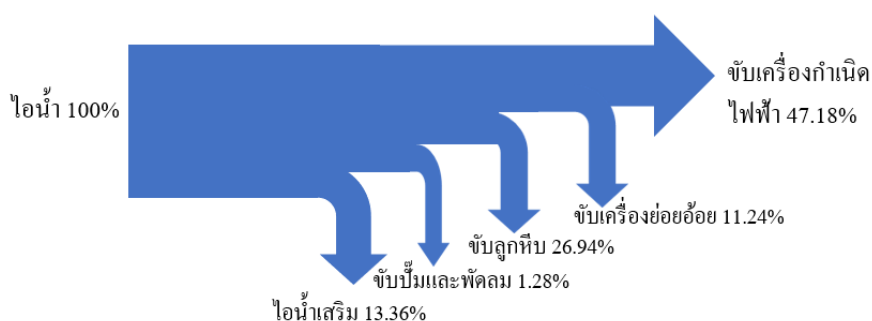
สภาวะ	อัตราการไหล/อัตราการป้อน (ton/hr)	ความดัน (bar _g)	อุณหภูมิ (°C)	เอนทัลปี (kJ/kg)
1	314.37	29	380	3,185.8
2	42.00	29	380	3,185.8
3	125.5	29	380	3,185.8
4	149.59	29	380	3,185.8

ตารางที่ 4 ผลการทำสมดุลพลังงานด้านความดันต่ำของโรงงาน

สภาวะ	อัตราการไหล/อัตราการป้อน (ton/hr)	ความดัน (bar _g)	อุณหภูมิ (°C)	เอนทัลปี (kJ/kg)
5	125.5	2.5	269	2,821.6
6	149.59	2.5	180	2,821.6
7	272.37	2.5	180	2,821.6
8	12.98	3.0	105	440.2
9	327	1.0	130	2,727.1
10	311	2.21	114	477.9
11	319.4	35.0	105	440.2
12	146.59	-	-	-

จากการทำสมดุลพลังงาน สามารถนำมาสร้างแผนผังการใช้ไอน้ำของโรงงานดังที่แสดงในภาพที่ 6 โดยพลังงานความร้อนในรูปไอน้ำทั้งหมดถูกส่งไปยังกังหันขับเคลื่อนและพัดลม 1.28% ขับลูก

หีบ 26.94% ขับเครื่องย่อยอ้อย 11.24% ขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อผลิตไฟฟ้า 47.18% และส่งจ่ายไอน้ำเสริมให้กระบวนการผลิต 13.36%



ภาพที่ 6 แผนผังการใช้ไอน้ำของโรงงานในปัจจุบัน

มาตรการอนุรักษ์พลังงานที่เสนอแนะ

1. การติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำป้อน (Economizer)

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่ามาตรการนี้ได้นำเสนอ

ใน (Chooprsert *et al.*, 2020) โดยผลการศึกษาความ

ร้อนสูญเสียและประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ พบว่า ความร้อนสูญเสียจากก๊าซไอเสียสูงสุด 17.2% และยังพบว่าก๊าซไอเสียที่ปล่องมีอุณหภูมิสูงถึง 196°C ดังนั้น การติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำป้อนเพื่อนำเอาความร้อนทิ้งมาแลกเปลี่ยนให้กับน้ำป้อน เพื่อเพิ่มอุณหภูมิ

จาก 105 °C เป็น 135 °C ประสิทธิภาพหม้อไอน้ำจะเพิ่มขึ้น สามารถผลิตไอน้ำเพิ่มด้วย โดย ความร้อนที่ประหยัดได้ ประสิทธิภาพหม้อไอน้ำหลังปรับปรุง อัตราการใช้เชื้อเพลิง และอัตราการผลิตไอน้ำที่ผลิตได้ สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$Q_{save} = m_w C_{p_w} (\Delta T) \quad (10)$$

$$\eta = \frac{m_s (h_s - h_w) + Q_{save}}{\dot{m}_f \times LHV} \quad (11)$$

$$m_f = \frac{Q_{save}}{LHV} \quad (12)$$

$$m_s = \eta \times \left(\frac{m_f \times LHV}{h_s - h_w} \right) \quad (13)$$

โดย	Q_{save}	คือ ความร้อนที่ได้, kW
	η	คือ ประสิทธิภาพหม้อไอน้ำหลังปรับปรุง, %
	m_w	คือ อัตราการนำป้อน, kg/s
	m_f	คือ อัตราการป้อนเชื้อเพลิง (ชานอ้อย), kg/s
	m_s	คือ อัตราการการผลิตไอน้ำ, kg/s
	C_{p_w}	คือ ค่าความจุความร้อนของน้ำป้อน, kJ/kg
	ΔT	คือ ผลต่างอุณหภูมิน้ำป้อนระหว่างเข้าและออก, °C
	LHV	คือ ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง (ชานอ้อย), kJ/kg
	h_s	คือ เอนทัลปีของไอน้ำ, kJ/kg
	h_w	คือ เอนทัลปีของน้ำป้อน, kJ/kg

สำหรับไฟฟ้าที่ผลิตได้เมื่อส่งจ่ายไอน้ำเข้า
กังหันขับเคลื่อนกังหันไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จาก

สมการสมรรถนะของกังหันที่ติดตั้งในโรงงาน ยี่ห้อ
SHINKO ขนาด 9 MW (Chooprsert *et al.*, 2020)

$$P_e = 27 + 6.76(\dot{m}_s) \quad (14)$$

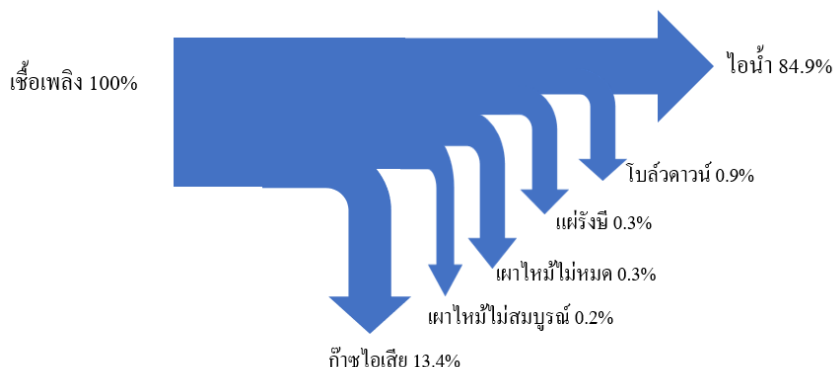
โดย	P_e	คือ พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้, MW
	$\dot{m}_s$	คือ อัตราการไหลของไอน้ำ, Ton/hr

การประเมินทางเศรษฐศาสตร์เริ่มจาก
คำนวณปริมาณความร้อนและเชื้อเพลิงที่ประหยัด
(สมการที่ 10 และ 11) จากนั้นคำนวณหาปริมาณ

ไอน้ำที่ผลิตได้จากเชื้อเพลิง (สมการที่ 12) นำค่าไอน้ำที่ผลิตได้ไปประเมินหาปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้ (สมการที่ 13) (Chooprsert *et al.*, 2020) ราคาขาย

ไฟฟ้า ณ วันที่เก็บข้อมูลหน่วยละ 4.2 บาท (The Energy Policy and Planning Office (EPPO), 2020) ไปคำนวณความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ดังแสดงใน

ตารางที่ 5 และ แสดงแผนผังประสิทธิภาพและการสูญเสียความร้อนได้ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 แผนผังประสิทธิภาพหม้อไอน้ำเมื่อติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำป้อน

2. การติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมอัตราน้ำโบล์ดาวน์ (Blowdown)

การโบล์ดาวน์ เป็นการสูญเสียพลังงานหม้อไอน้ำที่สำคัญอีกอย่างหนึ่ง รองจากการสูญเสียไปกับก๊าซไอเสีย จากผลการศึกษาประสิทธิภาพหม้อไอน้ำของโรงงาน พบว่า สามารถลดความร้อน

สูญเสียจากการโบล์ดาวน์ (L_s) การควบคุมการโบล์ดาวน์ทำได้โดยการควบคุมค่า TDS (Total Dissolved Solids) หรือ ควบคุมค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) ของน้ำในหม้อไอน้ำ สามารถคำนวณจากสมการที่ 14-15 (Eiamworawutthikul, 2018)

$$R_{BD} = \frac{Con_W}{Con_B - Con_W} \quad (15)$$

$$m_{BD} = m_W \times \frac{R_{BD}}{1 + R_{BD}} \quad (16)$$

โดย

m_{BD} คือ อัตราน้ำโบล์ดาวน์, Ton/hr

m_W คือ อัตราน้ำป้อน, Ton/hr

R_{BD} คือ สัดส่วนการโบล์ดาวน์

Con_W คือ ค่า Conductivity ของน้ำป้อน, $\mu\text{s/cm}$

Con_B คือ ค่า Conductivity ของน้ำในหม้อไอน้ำ, $\mu\text{s/cm}$

จากการเก็บข้อมูลน้ำป้อนทุก 2 ชั่วโมง จำนวน 5 วัน พบว่า Conductivity เฉลี่ย $42.8 \mu\text{s/cm}$ กรณีความดัน 29 bar_g ค่าควบคุมคุณภาพน้ำโบล์ดาวน์ เท่ากับ $6,000 \mu\text{s/cm}$ (Ahmed and Babiker,

2017) ซึ่งคำนวณสัดส่วนการโบล์ดาวน์ จากสมการที่ (14) ได้เท่ากับ 0.007 และอัตราน้ำโบล์ดาวน์ที่เหมาะสม เท่ากับ 2.28 Ton/hr แต่ปัจจุบันโรงงานมีการโบล์ดาวน์อยู่ที่ 5.0 Ton/hr ซึ่งโบล์ดาวน์เกิน

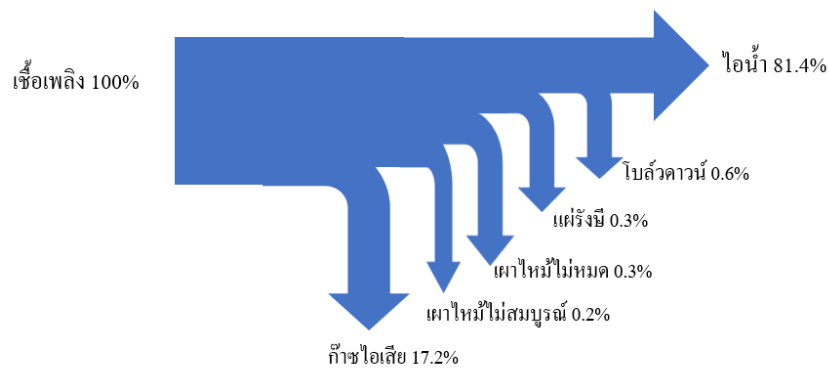
2.72 Ton/hr (m_{NBD}) เนื่องจากการไหลเวียนนี้เป็น
การปล่อยน้ำเดือดทิ้ง ความร้อนที่ประหยัดสามารถ

คำนวณได้ดังสมการ

$$Q_{save} = m_{NBD} (h_f) \quad (17)$$

ความดัน 29 bar-g จะได้ h_f เท่ากับ 1007.8
kJ/kg คำนวณตามสมการที่ 16 ได้ความร้อนเท่ากับ
761.4 kW_t และคำนวณตามสมการที่ 11-14 จะได้
พลังงานไฟฟ้าเพิ่ม 85,747 kWh/ปี คิดเป็นเงิน
360,137 บาทต่อปี ต้นทุนติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมน้ำ

โบลว์ดาวน์อัตโนมัติเท่ากับ 1,100,000 บาท จึงได้
ระยะเวลาคืนทุนเป็น 3.05 ปี ดังรายละเอียดใน ตาราง
ที่ 5 และ แสดงแผนผังประสิทธิภาพและการสูญเสีย
ความร้อนได้ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 แผนผังประสิทธิภาพหม้อไอน้ำเมื่อติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมน้ำโบลว์ดาวน์อัตโนมัติ

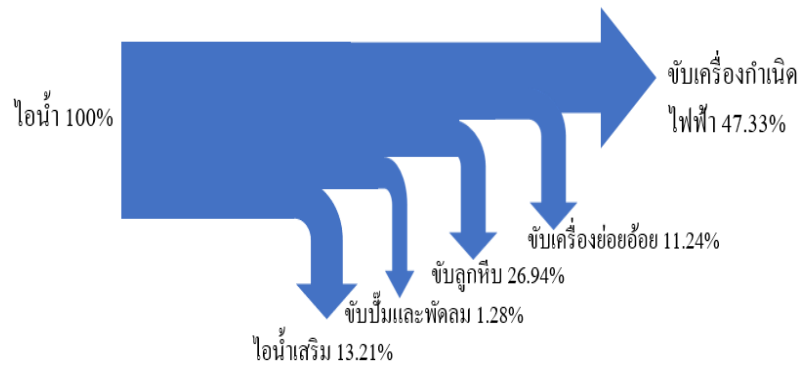
ตารางที่ 5 ผลประเมินตามมาตรการติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำป้อนและติดตั้งโบลว์ดาวน์อัตโนมัติ

รายการ	สัญลักษณ์	หน่วย	ติดตั้งเครื่องอุ่น น้ำป้อน	ติดตั้งโบลว์ ดาวน์อัตโนมัติ
ประสิทธิภาพหม้อไอน้ำหลังปรับปรุง	η	%	84.9	81.4
ความร้อนที่ได้	Q_{save}	kW _t	11,140.0	761.4
ปริมาณเชื้อเพลิง	m_f	T/hr	5.5	0.37
ปริมาณไอน้ำส่งเข้ากังหัน	m_s	T/hr	12.4	0.81
ไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเครื่องกำเนิด	P_e	kW	110.88	32.48
ระยะเวลาเดินเครื่อง (110 วัน)	-	Hr/year	2,640	2,640
พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้เพิ่มเติม	-	kWh/year	292,723	85,747
จำหน่ายไฟฟ้าได้เพิ่ม (ราคา 4.2 บาท/kWh)	-	บาทต่อปี	1,229,437	360,137
เงินลงทุน	-	บาท	7,200,000	1,100,000
ระยะเวลาคืนทุน	PB	ปี	5.86	3.05

3. การหุ้มฉนวนถังเก็บน้ำคอนเดนเสท

จากข้อมูลในหัวข้อ 3.2.1 ความร้อนสูญเสียที่ถังน้ำคอนเดนเสทเท่ากับ 515.1 kW หากหุ้มฉนวนหนา 50 mm ชนิดใยหินทนไฟ (Rockwool) ค่าการนำความร้อน (k) 0.034 W/mK จะลดการสูญเสียลงได้

430.5 kW จำนวนโดยใช้สมการที่ 10-14 ได้ไฟฟ้าที่ผลิตเพิ่ม 79,464 kWh/ปี คิดเป็นเงิน 333,749 บาทต่อปี ต้นทุน 426,600 บาท ระยะเวลาคืนทุน 1.28 ปี ดังรายละเอียดใน ตารางที่ 7 แผนผังการใช้ไอน้ำดังแสดงในภาพที่ 9

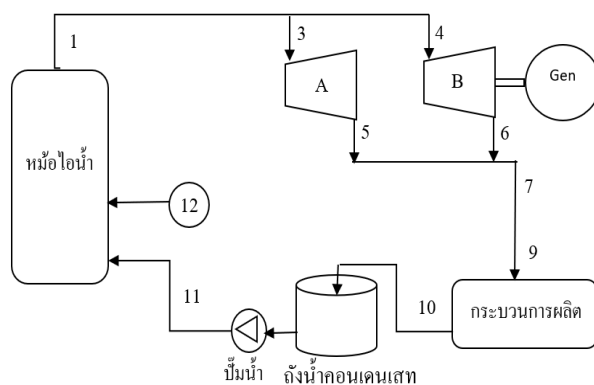


ภาพที่ 9 แผนผังการใช้ไอน้ำของโรงงานเมื่อหุ้มฉนวนถังคอนเดนเสท

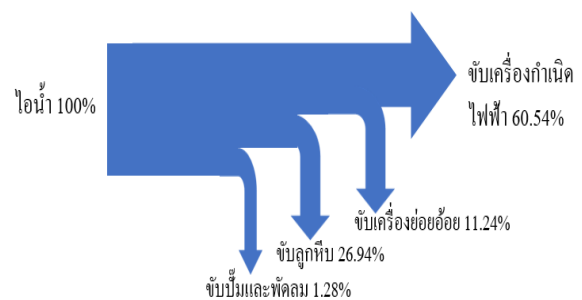
4. การเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ไอน้ำในโรงงาน

ดังที่กล่าวในหัวข้อ 3.2.2 ว่าไอน้ำทั้งหมดที่ผลิตได้จากหม้อไอน้ำควรนำไปใช้ที่กังหันไอน้ำเพียงอย่างเดียว จากนั้นจึงนำไอน้ำที่ออกจากกังหันไปใช้ในกระบวนการผลิต จึงจะเป็นการจัดการพลังงานที่เหมาะสม หากพิจารณาว่าไอน้ำที่นำไปลดอุณหภูมิไอน้ำในสภาวะที่ 2 (รูปที่ 1) อยู่ที่ 42 Ton/hr (ตารางที่ 3) หากนำไอน้ำนี้ไปใช้ในการผลิตไฟฟ้า จำนวนตามสมการที่ 10-14 พบว่าจะผลิตไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้นปี

ละ 820,829 kWh คิดเป็นเงิน 3,477,482 บาทต่อปี โดยไม่ต้องมีเงินลงทุนเพิ่มแต่อย่างใด ดังรายละเอียดใน ตารางที่ 7 หลังใช้มาตรการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ไอน้ำแล้ว ไอน้ำจะถูกส่งไปจับกังหันผลิตไฟฟ้าเพิ่มเป็น 60.54% เนื่องจากไม่ส่งไอน้ำเสริมไปยังกระบวนการผลิต ซึ่งกระบวนการผลิตยังคงได้รับไอน้ำในปริมาณเท่าเดิม แต่เป็นการรับไอน้ำความดันต่ำจากกังหันทุกตัวในโรงงาน ดังแสดงในภาพที่ 10



ภาพที่ 10 แผนผังการใช้ไอน้ำของโรงงานเมื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งาน



ตารางที่ 7 ผลประเมินตามมาตรการหุ้มฉนวนถังเก็บน้ำคอนเดนเสทและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ไอน้ำในโรงงาน

รายการ	สัญลักษณ์	หน่วย	หุ้มฉนวนถังเก็บน้ำ คอนเดนเสท	เพิ่มประสิทธิภาพ การใช้ไอน้ำ
ลดการสูญเสียความร้อน	Q_{save}	kW _t	430.5	-
ปริมาณเชื้อเพลิง	m_f	T/hr	0.21	-
ปริมาณไอน้ำส่งเข้ากังหัน	m_s	T/hr	0.46	42.0
ไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเครื่องกำเนิด	P_e	kW	30.10	310.92
ระยะเวลาเดินเครื่อง (110 วัน)	-	Hr/year	2,640	2,640
พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้เพิ่มเติม	-	kWh/year	79,464	820,829
จำหน่ายไฟฟ้าได้เพิ่ม (ราคา 4.2บาท/kWh)	-	บาทต่อปี	333,749	3,447,482
เงินลงทุน	-	บาท	426,600	-
ระยะเวลาคืนทุน	PB	ปี	1.28	-

สรุป

งานวิจัยนี้ได้ทำการสำรวจ ตรวจสอบ และวิเคราะห์ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของโรงงานน้ำตาลแบบดั้งเดิม เพื่อใช้เป็นแนวทางแก่โรงงานอื่นๆ ในประเทศไทย ผลจากการศึกษาพบว่าการสูญเสียหลักๆ ได้แก่ การสูญเสียไปกับก๊าซไอเสียของหม้อไอน้ำ การสูญเสียไปกับการโบว์ลควานซ์ของหม้อไอน้ำ การสูญเสียไปกับถังเก็บน้ำคอนเดนเสทไม่หุ้มฉนวน และการสูญเสียเนื่องจากการใช้ไอน้ำในกระบวนการผลิตไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร ผลการศึกษานำไปสู่ข้อเสนอ 4 มาตรการ ดังนี้

(1) มาตรการติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำป้อนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ พบว่า สามารถเพิ่มอุณหภูมิ น้ำป้อนได้ 30 °C ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพได้ 3.8% คิดเป็นไฟฟ้าที่ผลิตได้ 292,723 kWh/year คิดเป็นเงิน 1,229,437 บาทต่อปี ระยะเวลาคืนทุน 5.86 ปี

(2) มาตรการติดตั้งชุดควบคุมการโบว์ลควานซ์อัตโนมัติเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ พบว่า สามารถลดน้ำโบว์ลควานซ์ที่เกิน 2.72 Ton/hr ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพได้ 0.3% คิดเป็นไฟฟ้าที่ผลิตได้ 85,747 kWh/year

คิดเป็นเงิน 360,137 บาทต่อปี ระยะเวลาคืนทุน 3.05 ปี

(3) มาตรการหุ้มฉนวนถังเก็บน้ำคอนเดนเสท โดยการหุ้มฉนวนหนา 50 mm รอบถังน้ำคอนเดนเสท คิดเป็นไฟฟ้าที่ผลิตได้ 79,464 kWh/year คิดเป็นเงิน 333,749 บาทต่อปี ระยะเวลาคืนทุน 1.28 ปี

(4) มาตรการการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ไอน้ำในโรงงาน โดยการนำไอน้ำทั้งหมดที่ผลิตได้จากหม้อไอน้ำไปใช้ที่กังหันไอน้ำขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว จากนั้นจึงนำไอน้ำที่ออกจากกังหันไปใช้ในกระบวนการผลิต คิดเป็นไฟฟ้าที่ผลิตได้เพิ่ม 820,829 kWh/year คิดเป็นเงิน 3,447,482 บาทต่อปี

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ด้วยความกรุณาอย่างสูงจาก บริษัท โรงงานน้ำตาลทรายขาวเริ่มอุดม จำกัด จ.อุตรธานี ซึ่งได้ให้ความช่วยเหลือในการทำวิจัยครั้งนี้ให้เสร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- Ahmed, M. and Babiker, M. 2017. Effect of Boiler Feed Water Quality in Textile and Other Industries. **Gezira Journal of Engineering & Applied Science** 12(1): 16-30.
- Arjharn, W. 2010. **Research Report on Study of a biomass feedstock production plant for rural**. Suranaree University of Technology. (in Thai)
- Association, J.S. 1993. **Land boilers-Heat balancing**. JIS B8222:1993, Tokyo, Japan.
- Chooprasert, P. and Limpiteeprakarn, T. 2011. Potential Assessment for Bagasse Drying using Heat Recovery in Sugar Factory, pp. 508-514. **In Proceedings of the 7th Conference On Energy Network of Thailand (E-NETT); 2011**. Phuket. (in Thai)
- Chooprasert, P. Suluksna, K. and Tumm, P. 2020. Improvement of boiler efficiency for Rerm-Udom sugar factory. pp. 1-8. **In Proceeding of the 13th International Conferences Thai Society of Agricultural Engineering (TSAE2020)**. Nakhon Ratchasima, Thailand.
- Department of Industrial Works. 2018. **Guide to improving the efficiency of very small biomass power plants**. The Energy Policy and Planning Office (EPPO), Bangkok. (in Thai)
- Department of Renewable Energy Development and Energy Efficiency. 2015. **Alternative Energy Development Plan: AEDP2015**. The Energy Policy and Planning Office (EPPO), Bangkok. (in Thai)
- Eiamworawutthikul, C. 2018. **Energy Saving Estimation Template (EnSET)**. Available Source: <https://WWW.sites.google.com/spu.ac.th/enset/home>, November 17, 2018. (in Thai)
- Ekburanawat, J. and Thongsongyod, C. 2013. **Mixed straw biomass electrical power generation system by using gasification technology**. Available Source: <https://WWW.repository.rmutr.ac.th/bitstream/handle/123456789/503/Fulltext.pdf?sequence=1&isAllowed=y>, August 23, 2013. (in Thai)
- Gul, S. and Harasek, M. 2012. Energy saving in sugar manufacturing through the integration of environmental friendly new membrane processes for thin juice pre-concentration. **Applied Thermal Engineering** 43: 128-133.
- Khoodaruth, A. 2014. Optimisation of a Cogenerated Energy Systems, The Cane Biomass Flexi-factory Case Study. **Energy Procedia** 62: 656-665.
- Rahman, M.M. and Paatero, J.V. 2012. A methodological approach for assessing potential of sustainable agricultural residues for electricity generation, South Asian perspective. **Biomass and Bioenergy** 47: 153-163.
- Sathitbun-anan, S., Fungtammasan, B., Barz, M., Sajjakulnukit, B. and Pathumsawad, S. 2014. Energy efficiency and greenhouse gas emission reduction potentials in sugar production processes in Thailand. **Energy for Sustainable Development** 23: 266-274.
- Sergeevich, K.L., Valerevna, K.O. and Dmitrievna, T.A. 2018. A Method for Steam Boilers

- Load Optimization. **IFAC-PapersOnLine** 51(32): 765-769.
- Sungkaew, W. 2015. Potential of Oil Palm Biomass Residues for Electricity Generation in Southern Thailand. Master of Engineering (Mechanical Engineering), Prince of Songkla University. (in Thai)
- The Department of Alternative Energy Development and Efficiency (DEDE). 2009. **Biomass Database Potential in Thailand**. Available Source: <http://WWW.dede.go.th>, October 15, 2009. (in Thai)
- The Energy Policy and Planning Office (EPPO). 2018. **Thailand Power Development Plan 2018**. Available Source: <http://WWW.eppo.go.th>, March 30, 2018. (in Thai)
- The Energy Policy and Planning Office (EPPO). 2020. **Renewable Energy Power Plant Information**. Available Source: <https://www.dede.go.th>, August 1, 2020. (in Thai)
- Wongrat, W. and Sookkumnerd, C. 2015. A Model of System Improvement for Electricity Cogeneration Sugar Factories. **Farm Engineering and Automation Technology Journal** 1(1): 33-41. (in Thai)