

แนวทางการปรับปรุงพลังงานในโรงงานน้ำตาลแบบดั้งเดิมของไทย :
กรณีศึกษาโรงงานน้ำตาลทรายเริ่มอุดม



นายประพนธ์ ชูประเสริฐ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการพลังงานและโลจิสติกส์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2563

**IMPROVEMENT GUIDELINE OF ENERGY SAVING
IN THAI TRADITIONAL SUGAR FACTORY:
A CASE STUDY OF RERM-UDOM
SUGAR FACTORY**



Praphon Chooprasert

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the
Degree of Doctor of Philosophy of Engineering in Energy and
Logistics Management Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2020**

แนวทางการปรับปรุงพลังงานในโรงงานน้ำตาลแบบดั้งเดิมของไทย : กรณีศึกษา
โรงงานน้ำตาลทรายเริ่มอุดม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาคุณวุฒิบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ. ดร. บัณฑิต เกตุาคม)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร. กิรติ สุตักษณ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(อ. ดร. สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์)

กรรมการ



(ผศ. ดร. สุกกิจ รูปจันทร์)

กรรมการ



(อ. ดร. ธีทัต ดลวิชัย)

กรรมการ



(รศ. ร.อ. ดร. กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ดร. พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ประพนธ์ ชูประเสริฐ : แนวทางการปรับปรุงพลังงานในโรงงานน้ำตาลแบบดั้งเดิม
ของไทย : กรณีศึกษาโรงงานน้ำตาลทรายเริ่มอุดม (IMPROVEMENT GUIDELINE
OF ENERGY SAVING IN THAI TRADITIONAL SUGAR FACTORY : A CASE
STUDY OF RERM-UDOM SUGAR FACTORY) อาจารย์ที่ปรึกษา :
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิริติ สุลักษณ์, 139 หน้า.

โรงงานน้ำตาลแบบดั้งเดิมโดยทั่วไปมักประสบปัญหาด้านประสิทธิภาพการจัดการพลังงาน งานวิจัยนี้จึงมุ่งสำรวจ ตรวจสอบ และวิเคราะห์สาเหตุของการสูญเสียพลังงานในระบบเพื่อหามาตรการที่เหมาะสมในการแก้ปัญหาที่สามารถช่วยประหยัดพลังงาน กรณีศึกษา คือ โรงงานน้ำตาลทรายขาวเริ่มอุดม จังหวัดอุดรธานี ผลจากการวิเคราะห์พบว่า ในกระบวนการผลิตมีการสูญเสียหลัก ๆ ได้แก่ ก๊าซไอเสีย การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ การเผาไหม้ไม่หมด การแผ่รังสีและการโบลว์ดาวน์ มีค่าเท่ากับ 17.2, 0.2, 0.3, 0.3 และ 0.9% ตามลำดับ โดยหม้อไอน้ำมีประสิทธิภาพ 81.1% ข้อมูลที่วิเคราะห์ได้นำไปสู่ข้อเสนอ 4 มาตรการ คือ (1) ติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำป้อนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพหม้อไอน้ำพบว่า สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพได้ 3.8% เทียบเป็นไฟฟ้าที่ผลิตได้ 292,716 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อปี คิดเป็นเงิน 1,229,409 บาทต่อปี ระยะเวลาคืนทุน 5.86 ปี (2) ติดตั้งชุดควบคุมการโบลว์ดาวน์อัตโนมัติพบว่า สามารถลดน้ำโบว์ดาวน์ที่เกิน 2.72 ตัน/ชั่วโมงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพได้ 0.3% คิดเป็นไฟฟ้าที่ผลิตได้ 85,738 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อปี คิดเป็นเงิน 360,098 บาทต่อปี ระยะเวลาคืนทุน 3.05 ปี (3) หุ้มฉนวนหนา 2 นิ้ว รอบถังน้ำคอนเดนเสททำให้ไฟฟ้าที่ผลิตได้เพิ่มขึ้น 79,454 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อปี คิดเป็นเงิน 333,708 บาทต่อปี ระยะเวลาคืนทุน 1.28 ปี และ (4) นำไอน้ำทั้งหมดที่ผลิตได้จากหม้อไอน้ำไปใช้ที่กังหันไอน้ำที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าก่อนแล้วจึงนำไอน้ำที่ออกจากกังหันไอน้ำไปใช้ในกระบวนการผลิต แนวทางนี้จะได้ไฟฟ้าที่ผลิตได้เพิ่ม 820,829 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อปี คิดเป็นเงิน 3,447,481 บาทต่อปี

สาขาวิชา วิศวกรรมการจัดการพลังงานและโลจิสติกส์
ปีการศึกษา 2563

ลายมือชื่อนักศึกษา อรุณพร
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา กศิริ

PRAPHON CHOOPRASERT : IMPROVEMENT GUIDELINE OF
ENERGY SAVING IN THAI TRADITIONAL SUGAR FACTORY :
A CASE STUDY OF RERM-UDOM SUGAR FACTORY.
THESIS ADVISOR : ASST. PROF. KEERATI SULUKSNA, Ph.D.,
139 PP.

SUGAR FACTORY/STEAM BOILER/ENERGY CONSERVATION

Generally, traditional sugar factories face the problems of energy efficiency and management issues. The aims of this research were to explore, measure, and analyze the causes of energy loss in the system for suitable measures to solve problems that can save energy in the case study of Rerm Udom sugar factory, Udon Thani Province. The result of the analysis shows that the main energy losses in the production process, including exhaust gases, incomplete combustion, burn residue, the radiation, and the blowdown were equal to 17.2, 0.2, 0.3, 0.3, and 0.9%, respectively. The boiler efficiency was 81.1%. From the data analysis, four energy conservation measures can be proposed as follows: (1) The installation of the economizer found that it can increase the boiler efficiency of 3.8% equivalent to the electricity produced 292,716 kWh/year corresponding to 1,229,409 Baht/year, and the payback period is 5.86 years; (2) The installation of the automatic blowdown found that it can decrease blowdown 2.72 tons/hr and can increase the efficiency of 0.3% equivalent to the electricity produced 85,738 kWh/year corresponding to 360,098 Baht/year, and the payback period is 3.05 years; (3) The insulation of 2 inches thick around the condensate tank results in increased power generation 79,454 kWh/year corresponding to 333,708 Baht/year, and the payback period is 1.28 years; and (4) The produced steam from the boiler was preliminarily used for

power generation from the steam turbine after that the lower temperature steam from steam turbine was sent to other production processes. The last approach to improve the system efficiency can increase the electricity approximately 820,829 kWh/year corresponding to 3,447,481 Baht/year.



School of Energy and Logistics Management Engineering Student's Signature Praphon Ch.
Academic year 2020 Student Advisor's Signature K. Subak

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ประสบความสำเร็จตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ได้ด้วยดีทุกประการ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคลและคณะบุคคลต่าง ๆ ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำต่าง ๆ ตลอดจนการให้ความช่วยเหลือต่าง ๆ ทั้งทางด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิติ สุกฤษณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำเรื่องการทำวิจัยในส่วนต่าง ๆ

ขอขอบพระคุณ คุณธาดา ชัยรัตน์ รองกรรมการผู้จัดการ และคุณเกียรติศักดิ์ ภาจำปา ผู้อำนวยการโรงงาน และพนักงาน บจก. โรงงานน้ำตาลทรายขาวเริ่มอุดม ที่ได้สละเวลาให้ความช่วยเหลือด้านสถานที่ ตลอดจนการทดลองเก็บข้อมูล และให้คำแนะนำในการดำเนินงานวิจัยจนวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วง รวมถึงรุ่นพี่และรุ่นน้องในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่คอยให้กำลังใจมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา ทumm อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองและเก็บข้อมูลทำวิจัยในภาคสนาม

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์ และบุคลากร ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการพลังงานและโลจิสติกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้ให้คำปรึกษาจนศึกษาสำเร็จ

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวที่ให้กำลังใจมาโดยตลอด และสนับสนุนทุนทรัพย์ต่าง ๆ ให้ผู้วิจัยใช้ตลอดการศึกษานี้จนประสบความสำเร็จ

ประพนธ์ ชูประเสริฐ

สารบัญ

หน้า

| | |
|---|----------|
| บทคัดย่อ (ภาษาไทย)..... | ก |
| บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)..... | ข |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ง |
| สารบัญ..... | จ |
| สารบัญตาราง..... | ช |
| สารบัญรูป..... | ญ |
| บทที่ | |
| 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... | 3 |
| 1.3 ขอบเขตของการวิจัย..... | 3 |
| 1.4 สถานที่ทำงานวิจัย..... | 3 |
| 1.5 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย..... | 4 |
| 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 4 |
| 2 ปรัชญาบรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 5 |
| 2.1 กระบวนการผลิตน้ำตาลทราย..... | 5 |
| 2.2 ระบบพลังงานในโรงงานน้ำตาล..... | 7 |
| 2.3 การวิเคราะห์พลังงานสำหรับระบบที่มีการไหลแบบคงตัว..... | 8 |
| 2.4 วิธีหาความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยแบบล็อก..... | 9 |
| 2.5 อีโคโนไมเซอร์..... | 12 |
| 2.6 ดัชนีการใช้พลังงานจำเพาะ..... | 13 |
| 2.7 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์..... | 13 |
| 2.7.1 ระยะเวลาคืนทุน..... | 13 |
| 2.7.2 มูลค่าปัจจุบันสุทธิ..... | 14 |

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

| | | |
|----------|---|-----------|
| 2.7.3 | อัตราผลตอบแทนคิดลด..... | 14 |
| 2.8 | งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 15 |
| 3 | วิธีดำเนินงานวิจัย | 20 |
| 3.1 | ศึกษาและรวบรวมข้อมูลของโรงงาน | 21 |
| 3.2 | วิเคราะห์ระบบการผลิตพลังงานและการใช้พลังงานของโรงงาน..... | 22 |
| 3.2.1 | ลำดับขั้นตอนการดำเนินงาน..... | 23 |
| 3.2.2 | เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย | 24 |
| 3.3 | การตรวจวัดประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ..... | 26 |
| 3.4 | การสำรวจตรวจวัดเพื่อหาจุดที่มีการสูญเสียความร้อนในกระบวนการผลิต..... | 31 |
| 3.5 | การวิเคราะห์ระบบพลังงานและการสมดุลพลังงาน | 33 |
| 3.5.1 | การวิเคราะห์การใช้พลังงานส่วนกระบวนการผลิตน้ำตาล | 33 |
| 3.5.2 | การวิเคราะห์การใช้พลังงานส่วนกระบวนการผลิตไฟฟ้า..... | 42 |
| 3.6 | กำหนดมาตรการประหยัดพลังงานในโรงงาน | 45 |
| 3.6.1 | การติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำป้อน | 46 |
| 3.6.2 | การควบคุมอัตราน้ำไบล์ดาวน์ | 48 |
| 3.6.3 | การหุ้มฉนวนถังเก็บน้ำคอนเดนเสท | 49 |
| 3.6.4 | เพิ่มประสิทธิภาพการใช้ไอน้ำในกระบวนการผลิต | 50 |
| 3.7 | ขั้นตอนการจำลองระบบพลังงาน..... | 50 |
| 3.8 | เปรียบเทียบการใช้พลังงานที่สามารถประหยัดได้ และวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ | 51 |
| 4 | ผลการวิจัยและการอภิปรายผล..... | 52 |
| 4.1 | ผลการตรวจวัดและวิเคราะห์ความร้อนสูญเสียและประสิทธิภาพ หม้อไอน้ำ..... | 52 |
| 4.2 | ผลการตรวจวัดและวิเคราะห์ความร้อนสูญเสียในกระบวนการผลิต | 54 |
| 4.2.1 | ความร้อนสูญเสียจากอุปกรณ์ที่ไม่ได้หุ้มฉนวน (ถังเก็บน้ำคอนเดนเสท) | 54 |

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

| | | |
|-------|--|-----|
| 4.2.2 | ความร้อนสูญเสียเนื่องจากการบริหารจัดการไอน้ำในโรงงาน (ใช้ไอน้ำเสริมโดยการ Desuperheater) เพื่อนำไปใช้ใน กระบวนการผลิต | 54 |
| 4.3 | ผลของมาตรการอนุรักษ์พลังงานที่เสนอแนะโดยการติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำ ป้อนและผลการคำนวณความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ | 56 |
| 4.4 | ผลของมาตรการอนุรักษ์พลังงานที่เสนอแนะโดยการควบคุม อัตราน้ำ boiler และผลการคำนวณความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ | 57 |
| 4.5 | ผลของมาตรการอนุรักษ์พลังงานที่เสนอแนะโดยการหุ้มฉนวนถังเก็บน้ำ คอนเดนเสทและผลการคำนวณความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ | 59 |
| 4.6 | ผลของมาตรการอนุรักษ์พลังงานที่เสนอแนะโดยการเพิ่มประสิทธิภาพ การใช้ไอน้ำในกระบวนการผลิต และผลการคำนวณความคุ้มค่า ทางเศรษฐศาสตร์ | 59 |
| 4.7 | ผลการจำลองระบบพลังงาน | 60 |
| 5 | สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ | 66 |
| 5.1 | สรุปผลการวิจัย | 66 |
| 5.2 | ข้อเสนอแนะ | 68 |
| | รายการอ้างอิง | 69 |
| | ภาคผนวก | |
| | ภาคผนวก ก. บทความวิชาการที่ได้ตอบรับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา | 70 |
| | ภาคผนวก ข. การคำนวณประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ ผลการคำนวณประสิทธิภาพ หม้อไอน้ำและผลการวิเคราะห์เชื้อเพลิงและจีดีเอ | 108 |
| | ภาคผนวก ค. การคำนวณแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกของกระบวนการ ผลิตน้ำตาลและกระบวนการผลิตไฟฟ้า | 118 |
| | ภาคผนวก ง. การคำนวณมาตรการประหยัดพลังงาน | 132 |
| | ประวัติผู้เขียน | 139 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|--|------|
| 3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บข้อมูล | 24 |
| 3.2 ปัจจัยในการคำนวณชุดลูกหีบ | 34 |
| 3.3 ปัจจัยในการคำนวณชุดหม้อต้มระเหย | 36 |
| 3.4 ปัจจัยในการคำนวณชุดหม้อต้มอุ่นน้ำอ้อย | 39 |
| 3.5 ปัจจัยในการคำนวณชุดหม้อเคี้ยวและปั่นน้ำตาล | 41 |
| 3.6 ปัจจัยในการคำนวณอัตราการผลิตไอน้ำ | 43 |
| 3.7 ปัจจัยในการคำนวณเครื่องกำเนิดไฟฟ้า | 43 |
| 3.8 เงื่อนไขในการคำนวณหาขนาดเครื่องอุ่นน้ำป้อน | 46 |
| 4.1 ค่าที่ได้จากการตรวจวัด | 53 |
| 4.2 พลังงานความร้อนสูญเสียและประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำเฉลี่ยที่ตรวจวัดได้ | 53 |
| 4.3 ผลการทำสมดุลพลังงานด้านแรงดัน 29 บาร์ ของโรงงาน | 54 |
| 4.4 ผลการทำสมดุลพลังงานด้านความดันต่ำของโรงงาน | 55 |
| 4.5 ผลคำนวณความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์จากการติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำป้อน | 56 |
| 4.6 พลังงานความร้อนสูญเสียและประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ หลังติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำป้อน | 57 |
| 4.7 ผลคำนวณความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์จากการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมน้ำ โบล์วดาวน้อตโนมติ | 58 |
| 4.8 พลังงานความร้อนสูญเสียและประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำหลังติดตั้ง โบล์วดาวน้อตโนมติ | 58 |
| 4.9 ผลการคำนวณความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์จากการหุ้มฉนวนถังเก็บน้ำ คอนเดนเสท | 59 |
| 4.10 การใช้กังหันไอน้ำขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า | 60 |
| 4.11 การใช้กังหันไอน้ำขับเครื่องจักรหม้อน้ำ | 60 |
| 4.12 การใช้กังหันไอน้ำขับเครื่องจักรลูกหีบ | 60 |

สารบัญตาราง (ต่อ)

| ตารางที่ | หน้า |
|---|------|
| 4.13 ข้อมูลการหีบอ้อย | 60 |
| 4.14 ข้อมูลการอุ่นน้ำอ้อย | 61 |
| 4.15 ข้อมูลการต้มน้ำอ้อย | 61 |
| 4.16 ข้อมูลการเกี่ยวน้ำตาล..... | 61 |
| 4.17 ค่าป้อนเข้าที่ปรับเปลี่ยนในแต่ละวัน | 64 |
| 5.1 การประเมิน โครงการปรับปรุงตามมาตรการประหยัดพลังงาน | 67 |
| 5.2 สรุปข้อเสนอแนะมาตรการที่ควรทำโดยเรียงลำดับและข้อดี-ข้อจำกัด ของแต่ละมาตรการ | 68 |
| ข.1 บันทึกผลการตรวจวัดการเผาไหม้ของหม้อไอน้ำ | 110 |
| ข.2 บันทึกผลการตรวจวัดอัตราการไหลและอุณหภูมิของหม้อไอน้ำ | 110 |
| ข.3 บันทึกผลการตรวจวัดอุณหภูมิของผิวของหม้อไอน้ำ | 111 |
| ข.4 บันทึกผลของการคำนวณหาประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ..... | 113 |
| ค.1 บันทึกอัตราการหีบอ้อยจากรายงานประจำวันของทางโรงงาน..... | 127 |
| ค.2 บันทึกปริมาณไอน้ำและไฟฟ้าที่ผลิตได้จากรายงานประจำวันของทางโรงงาน..... | 128 |
| ค.3 บันทึกปริมาณขานอ้อยที่ได้จากรายงานประจำวันของทางโรงงาน | 129 |
| ค.4 บันทึกเปอร์เซ็นต์น้ำอ้อยที่ได้จากรายงานประจำวันของทางโรงงาน | 130 |
| ค.5 บันทึกสัดส่วนการใช้พลังงานเทียบกับอัตราการหีบที่ได้จากรายงานประจำวัน ของทางโรงงาน..... | 131 |

สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 1.1 สถานที่ตั้งของโรงงานน้ำตาล บจก. โรงงานน้ำตาลทรายเริ่มอุดม | 2 |
| 1.2 ปริมาณการใช้พลังงานจำเพาะต่อหน่วยผลผลิตย้อนหลัง 3 ปี | 3 |
| 2.1 แผนผังกระบวนการผลิตน้ำตาลของโรงงานน้ำตาลทรายเริ่มอุดม | 5 |
| 2.2 แผนผังระบบพลังงานในโรงงานน้ำตาลแบบดั้งเดิม | 7 |
| 2.3 แผนผังระบบพลังงานในโรงงานน้ำตาลแบบใหม่ | 8 |
| 2.4 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ของไหล ที่ไหลสวนทางกัน | 10 |
| 2.5 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลราบเรียบ | 11 |
| 2.6 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลสวนทาง | 11 |
| 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย | 20 |
| 3.2 กระบวนการผลิตของโรงงานกรณีศึกษา | 21 |
| 3.3 แผนภูมิแสดงสาเหตุและเหตุผล (Fishbone diagram) | 23 |
| 3.4 การวัดอุณหภูมิผนังหม้อไอน้ำ | 26 |
| 3.5 การเก็บขี้เถ้าหนักเพื่อส่งวิเคราะห์ | 27 |
| 3.6 การวัดอุณหภูมิและองค์ประกอบฟลูแก๊ส ออกซิเจน (O ₂), คาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO), คาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂) และเก็บขี้เถ้าเพื่อส่งวิเคราะห์ | 28 |
| 3.7 การวัดความร้อนสูญเสียจากท่อ Super heat steam | 31 |
| 3.8 การวัดความร้อนสูญเสียจากท่อ Exhaust steam | 32 |
| 3.9 การวัดความร้อนสูญเสียจากถังเก็บน้ำคอนเดนเสท | 32 |
| 3.10 แผนผังการสมดุลพลังงานและมวลทั้งระบบ | 33 |
| 3.11 เครื่องจักรลูกหีบอ้อย | 34 |
| 3.12 กระบวนการทำงานของลูกหีบ | 34 |
| 3.13 กระบวนการต้มระเหย | 36 |
| 3.14 กระบวนการอุ่นน้ำอ้อย | 38 |
| 3.15 หม้อเคี่ยวน้ำตาล | 40 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--------|---|
| 3.16 | กระบวนการเคี้ยวน้ำตาล 40 |
| 3.17 | กระบวนการผลิตไอน้ำ..... 42 |
| 3.18 | กระบวนการผลิตไฟฟ้า 43 |
| 3.19 | กังหันขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 9 MW 44 |
| 3.20 | กังหันขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 12 MW 45 |
| 3.21 | ลักษณะของเครื่องอุ่นน้ำป้อนที่ได้รับการออกแบบ 47 |
| 3.22 | ขั้นตอนการจำลองระบบพลังงานในโรงงาน 51 |
| 4.1 | แผนผังการสูญเสียความร้อนและประสิทธิภาพหม้อไอน้ำเดิม..... 53 |
| 4.2 | แผนผังการใช้ไอน้ำของโรงงานในปัจจุบัน..... 56 |
| 4.3 | แผนผังประสิทธิภาพหม้อไอน้ำเมื่อติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำป้อน..... 57 |
| 4.4 | แผนผังประสิทธิภาพหม้อไอน้ำเมื่อติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมน้ำโบล์วดาวน์อัตโนมัติ 59 |
| 4.5 | ปริมาณการใช้ไอน้ำของหม้ออุ่น 62 |
| 4.6 | ปริมาณการใช้ไอน้ำของหม้อต้ม 62 |
| 4.7 | ปริมาณไอหัวหม้อต้มที่ระเหยจากน้ำอ้อย 63 |
| 4.8 | ปริมาณการใช้ไอน้ำของหม้อเคี้ยว 63 |
| 4.9 | ปริมาณการใช้ไอน้ำของกังหันไอน้ำ 64 |
| 4.10 | ผลเปรียบเทียบปริมาณไอน้ำที่ใช้ในโรงงานทั้งหมดจากการคำนวณกับข้อมูล การใช้ไอน้ำจริงของโรงงาน..... 65 |
| ข.1 | ผลการวิเคราะห์เชื้อเพลิงของหม้อไอน้ำ..... 114 |
| ข.2 | ผลการวิเคราะห์ขี้เถ้าหม้อไอน้ำ (ชุดที่ 1) 115 |
| ข.3 | ผลการวิเคราะห์ขี้เถ้าหม้อไอน้ำ (ชุดที่ 2) 116 |
| ข.4 | ตรวจวัดอุณหภูมิผิวของหม้อไอน้ำ..... 117 |
| ข.5 | ตรวจวัดส่วนประกอบและอุณหภูมิก๊าซเผาไหม้ 117 |
| ข.6 | เก็บตัวอย่างขี้เถ้า..... 117 |
| ค.1 | Curve Turbine (กังหันไอน้ำ) 126 |
| ง.1 | Curve Turbine (หม้อต้ม)..... 137 |
| ง.2 | การเก็บข้อมูลและการตรวจวัดค่าต่าง ๆ 138 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย

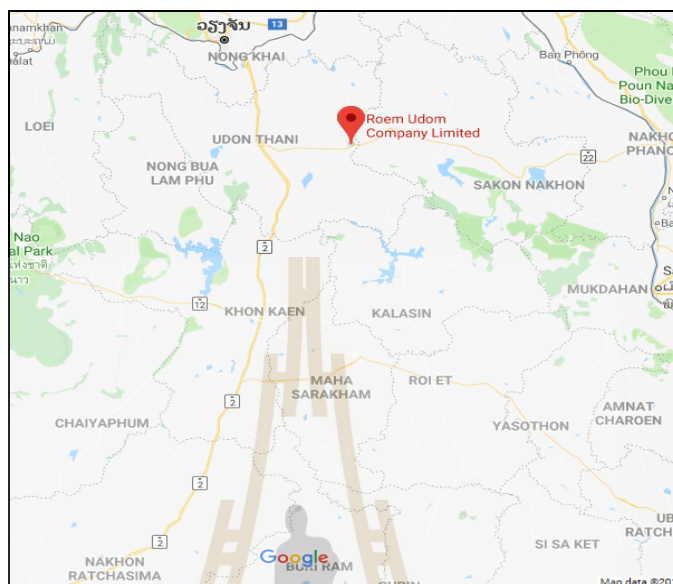
ประเทศไทยถือว่าเป็นประเทศเกษตรกรรมทำการปลูกพืชเศรษฐกิจหลักที่สำคัญ 5 อันดับ ได้แก่ ข้าว มันสำปะหลัง อ้อย ยางพารา และปาล์ม (ศูนย์วิเคราะห์เศรษฐกิจทีเอ็มบี, 2561) มีโรงงานอุตสาหกรรมที่แปรรูปผลิตผลทางการเกษตรอยู่เป็นจำนวนมากทั่วประเทศ ได้แก่ โรงสีข้าว โรงงานผลิตแป้งมัน โรงงานน้ำตาล โรงงานยางพารา และโรงงานน้ำมันปาล์ม

การผลิตน้ำตาลเป็นอุตสาหกรรมแปรรูปผลิตผลทางการเกษตรหลักของประเทศ โดยมีอ้อยเป็นวัตถุดิบป้อนให้กับโรงงานผลิตน้ำตาล และได้มีการขยายพื้นที่การปลูกอ้อยเพิ่มขึ้นมาเรื่อยๆ ในเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศ เนื่องจากอ้อยเป็นพืชไร่ที่เหมาะสมกับสภาพภูมิประเทศที่เป็นราบสูง โดยจะมีการปลูกในฤดูฝนและเก็บเกี่ยวในฤดูหนาวของปีถัดไป จะได้ผลผลิตน้ำตาลต่ออ้อยสูง (CCS) จากเหตุผลดังกล่าวกลุ่มผู้ผลิตน้ำตาลจึงขยายโรงงานมาทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง

ปัจจุบัน โรงงานน้ำตาลในประเทศไทยในปี พ.ศ. 2562 มีจำนวนทั้งหมด 58 โรงงานทั่วประเทศ กระจายตามภูมิภาค โรงงานน้ำตาลในเขตภาคเหนือ 12 โรงงาน ภาคกลาง 18 โรงงาน ภาคตะวันออก 6 โรงงาน และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 22 โรงงาน (www.thaisugarmiller.com) โดยจำแนกโรงงานออกเป็น 2 รุ่น ได้แก่ โรงงานรุ่นแรก (แบบดั้งเดิม) ใช้ระบบไอน้ำในกระบวนการผลิตไฟฟ้าและน้ำตาลทราย ความดันใช้งานในระบบค่อนข้างต่ำ โดยมีความดันไม่เกิน 40 บาร์ และในโรงหีบสกัดน้ำตาลอ้อยนั้นใช้กังหันไอน้ำความดันต่ำขับเคลื่อนหีบอ้อย ส่วนโรงงานรุ่นใหม่มีการใช้ระบบไอน้ำในกระบวนการผลิตไฟฟ้าและน้ำตาลทราย ความดันใช้งานสูงขึ้น โดยมีความดันตั้งแต่ 40 บาร์ ขึ้นไป และใช้มอเตอร์ไฟฟ้าในการขับเคลื่อนหีบอ้อย โรงงานน้ำตาลยุคแรกนี้มีจำนวน 46 โรงงาน (สมบัติ ขอทวิวัฒนา, 2546) คิดเป็น 79 เปอร์เซ็นต์ ของโรงงานทั้งหมดในประเทศ โรงงานในยุคแรกยังมีการใช้พลังงานค่อนข้างสิ้นเปลือง ซึ่งโรงงานน้ำตาลทรายขาวเริ่มอุดม ตั้งอยู่เลขที่ 11 หมู่ที่ 6 ตำบลหนองสระปลา อำเภอหนองหาน จังหวัดอุดรธานี เป็นโรงงานน้ำตาลแบบดั้งเดิม แสดงสถานที่ตั้งดังรูปที่ 1.1

ปัจจุบันมีการแข่งขันเรื่องการผลิตสินค้าและส่งออกขายมากขึ้น ผู้ประกอบการด้านการผลิตและส่งออกจึงต้องเพิ่มขีดความสามารถและประสิทธิภาพด้านคุณภาพและลดต้นทุนใน

การผลิตเพื่อให้แข่งขันกับตลาดได้ ต้นทุนเกิดจากองค์ประกอบหลายประเภท ยกตัวอย่างเช่น
พลังงานถือว่าเป็นต้นทุนในการผลิตประเภทหนึ่ง



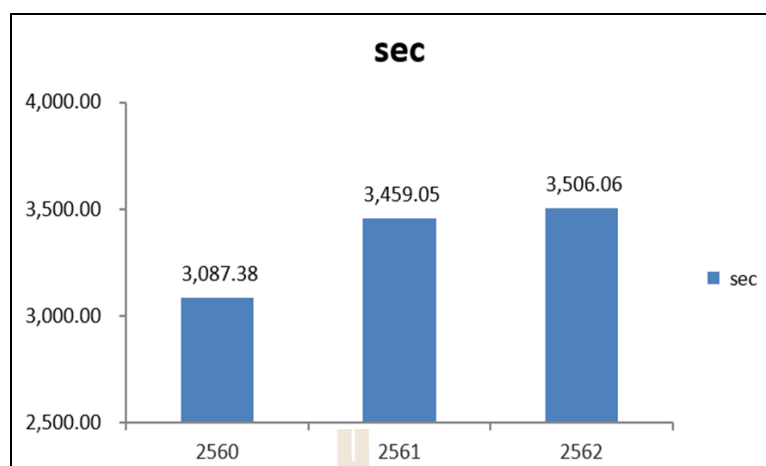
รูปที่ 1.1 สถานที่ตั้งของโรงงานน้ำตาล บจก. โรงงานน้ำตาลทรายขาวเริ่มอุดม

โรงงานผลิตน้ำตาลใช้พลังงานในกระบวนการผลิตน้ำตาลค่อนข้างมาก ดังนั้นพลังงานถือว่าเป็นต้นทุนหลักในกระบวนการผลิต และโรงงานน้ำตาลที่ใช้ระดับความดันไอน้ำในกระบวนการผลิตต่ำกว่า 40 บาร์ จะใช้พลังงานความร้อนมากกว่าโรงงานที่ใช้ไอน้ำตั้งแต่ 40 บาร์ ขึ้นไป

ข้อมูลเบื้องต้นของโรงงาน

1. ขนาดอัตรากาบริบออย 15,000 ton of cane / day
2. ผลิตน้ำตาลทราย 1,700 tons/day
3. ผลิตไฟฟ้า 387,000 kWh/day
4. จำหน่ายไฟฟ้า 144,000 kWh/day
5. หม้อไอน้ำขนาด 200 tons/hr จำนวน 2 ชุด
6. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขับเคลื่อนด้วยกังหันไอน้ำขนาด 10 MW และ 12 MW

ซึ่งปริมาณการใช้พลังงานจำเพาะ (SEC) ย้อนหลัง 3 ปีการผลิต ตั้งแต่ พ.ศ. 2560-2562 เพื่อลดต้นทุนการผลิต ซึ่งการจัดการด้านพลังงานเป็นจุดที่ต้องปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง แสดงข้อมูล
ดังรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 ปริมาณการใช้พลังงานจำเพาะต่อหน่วยผลผลิตย้อนหลัง 3 ปี
(รายงานการจัดการพลังงาน บจก. โรงงานน้ำตาลทรายขาวเริ่มอุดม)

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อวิเคราะห์ระบบพลังงานและประสิทธิภาพเครื่องกำเนิดไอน้ำของโรงงานน้ำตาลแบบดั้งเดิมของไทย : กรณีศึกษาโรงงานน้ำตาลทรายขาวเริ่มอุดม
2. เพื่อหาแนวทางและมาตรการประหยัดพลังงานในกระบวนการผลิตน้ำตาลทรายและผลิตไฟฟ้า รวมถึงการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ โรงงานน้ำตาลแบบดั้งเดิมของไทย : กรณีศึกษาโรงงานน้ำตาลทรายขาวเริ่มอุดม
3. เพื่อจำลองปริมาณความต้องการไอน้ำในโรงงานน้ำตาลแบบดั้งเดิมของไทย : กรณีศึกษาโรงงานน้ำตาลทรายขาวเริ่มอุดม

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ทำการศึกษาวิเคราะห์การผลิตพลังงานและการใช้พลังงานในกระบวนการผลิตน้ำตาลทรายดิบ ช่วงฤดูหีบอ้อย ของโรงงานน้ำตาลทรายขาวเริ่มอุดม
2. ประเมินศักยภาพการประหยัดพลังงานในกระบวนการผลิตน้ำตาลทราย ช่วงฤดูหีบอ้อย และช่วงฤดูละลายน้ำตาลของโรงงานน้ำตาลทรายขาวเริ่มอุดม

1.4 สถานที่ทำงานวิจัย

1. โรงงานน้ำตาลทรายขาวเริ่มอุดม สถานที่ตั้ง เลขที่ 11 หมู่ที่ 6 ตำบลหนองสระปลา อำเภอนงนุช จังหวัดอุดรธานี

1.5 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1. เครื่องวัดการเผาไหม้ รุ่น TESTO 330 สำหรับวัดประสิทธิภาพการเผาไหม้
2. ก๊าซออกซิเจนอินฟราเรด รุ่น TESTO 865 สำหรับวัดอุณหภูมิผิวของอุปกรณ์
3. Pressure Gage สำหรับวัดความดันที่จุดต่าง ๆ
4. Amp meter ยี่ห้อ METREL รุ่น MI 2883 สำหรับวัดกำลังไฟฟ้า
5. Flow meter ยี่ห้อ Dynaflo รุ่น DMTF H-12-D สำหรับวัดอัตราการไหลของไหล
6. Orifice flow สำหรับวัดอัตราการไหลของไอน้ำ
7. Hot Wire Anemometer ยี่ห้อ DIGICON รุ่น DA-47 สำหรับวัดวัดความเร็วลม
8. เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้น ยี่ห้อ PROTROS รุ่น TH-303C สำหรับวัดอุณหภูมิและความชื้นของอากาศ

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบรายละเอียดการผลิตพลังงาน การใช้พลังงาน และการสูญเสียพลังงานของโรงงานน้ำตาลแบบดั้งเดิมของประเทศไทย : กรณีศึกษาโรงงานน้ำตาลทรายเริ่มอุดม
2. ทราบแนวทางปรับปรุงและมาตรการประหยัดพลังงานของโรงงานน้ำตาลแบบดั้งเดิมของประเทศไทย : กรณีศึกษาโรงงานน้ำตาลทรายเริ่มอุดม
3. ทราบงบประมาณลงทุน ระยะเวลาคืนทุน และ NPV กรณีที่ต้องปรับปรุงเครื่องจักรเพื่อประหยัดพลังงานของโรงงานน้ำตาลแบบดั้งเดิมของประเทศไทย : กรณีศึกษาโรงงานน้ำตาลทรายเริ่มอุดม
4. สามารถพยากรณ์การใช้ปริมาณไอน้ำในกระบวนการผลิตน้ำตาลทรายด้วยแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับโรงงานน้ำตาลแบบดั้งเดิมของประเทศไทยที่ใช้ความดันไอน้ำใกล้เคียงกัน

1. กระบวนการสกัดน้ำอ้อย (Juice Extraction) ทำการสกัดน้ำอ้อยโดยผ่านอ้อยเข้าไปในลูกหีบ 5 ชุด และกากอ้อยที่ผ่านการสกัดน้ำอ้อยจากลูกหีบชุดสุดท้ายจะถูกนำไปเป็นเชื้อเพลิงเผาไหม้ภายในเตาหม้อไอน้ำ เพื่อผลิตไอน้ำมาใช้ในกระบวนการผลิตและน้ำตาลทราย

2. การทำความสะอาดน้ำอ้อยหรือการทำใส่น้ำอ้อย (Juice Purification) น้ำอ้อยที่สกัดได้ทั้งหมดจะเข้าสู่กระบวนการทำใส เนื่องจากน้ำอ้อยมีสิ่งสกปรกต่าง ๆ จึงต้องแยกเอาส่วนเหล่านี้ ออกโดยผ่านวิธีทางกล เช่น ผ่านเครื่องกรอง และวิธีทางเคมี เช่น ผสมปูนขาวและให้ความร้อน

3. การต้มระเหย (Evaporation) น้ำอ้อยที่ผ่านการทำใสแล้วจะถูกนำเข้าสู่ชุดหม้อต้ม (Multiple Evaporator) เพื่อระเหยเอาน้ำออก (ประมาณ 70%) โดยน้ำอ้อยชั้นที่ออกมาจากหม้อต้มลูกสุดท้าย เรียกว่า “น้ำเชื่อม (Syrup)”

4. การเคี้ยว (Crystallization) น้ำเชื่อมที่ได้จากการต้มจะถูกนำเข้าสู่หม้อเคี้ยวระบบสุญญากาศ (Vacuum Pan) เพื่อระเหยน้ำออกจนน้ำเชื่อมถึงจุดอิ่มตัว ที่จุดนี้ผลึกน้ำตาลจะเกิดขึ้นมา โดยที่ผลึกน้ำตาล และกากน้ำตาลที่ได้จากการเคี้ยวนี้รวมเรียกว่า “แมสคิวท (Massecuite)”

5. การปั่นแยกผลึกน้ำตาล (Centrifuging) แมสคิวทที่ได้จากการเคี้ยวจะถูกนำไปปั่นแยกผลึกน้ำตาลออกจากกากน้ำตาล โดยใช้เครื่องปั่นหนีศูนย์กลาง (Centrifugals) ผลึกน้ำตาลที่ได้นี้จะป็นน้ำตาลดิบ

ส่วนกระบวนการผลิตน้ำตาลทรายขาวรี แบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอน ดังนี้

1. การปั่นละลาย (Affinated Centrifuging) นำน้ำตาลดิบมาผสมกับน้ำร้อนหรือกากน้ำตาลจากการปั่นละลาย (Green Molasses) น้ำตาลดิบที่ผสมนี้เรียกว่า แมกม่า (Magma) และแมกมมานี้จะถูกนำไปปั่นละลายเพื่อล้างคราบ โมลาส หรือกากน้ำตาลออก

2. การทำความสะอาด และลดค่าสี (Clarification) น้ำเชื่อมที่ได้จากหม้อปั่นละลาย (Affinated Syrup) จะถูกนำไปละลายอีกครั้งเพื่อละลายผลึกน้ำตาลบางส่วนที่ยังละลายไม่หมดจากการปั่น และผ่านตะแกรงกรองเข้าผสมกับปูนขาว เข้าลดค่าสีโดยผ่านเข้าไปในหม้อลดค่าสี (ปัจจุบันนิยมใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวลดค่าสี) จากนั้นจะผ่านเข้าสู่การกรองโดยหม้อกรองแบบใช้แรงดัน (Pressure Filter) เพื่อแยกตะกอนออก และน้ำเชื่อมที่ได้จะผ่านไปลดค่าสีเป็นครั้งสุดท้ายโดยกระบวนการแลกเปลี่ยนประจุ (Ion Exchange Resin) จะได้น้ำเชื่อมรีไฟน์ (Fine Liquor)

3. การเคี้ยวตกผลึก (Crystallization) น้ำเชื่อมรีไฟน์ที่ได้จะถูกนำเข้าสู่หม้อเคี้ยวระบบสุญญากาศ (Vacuum Pan) เพื่อระเหยน้ำออกจนน้ำเชื่อมถึงจุดอิ่มตัว

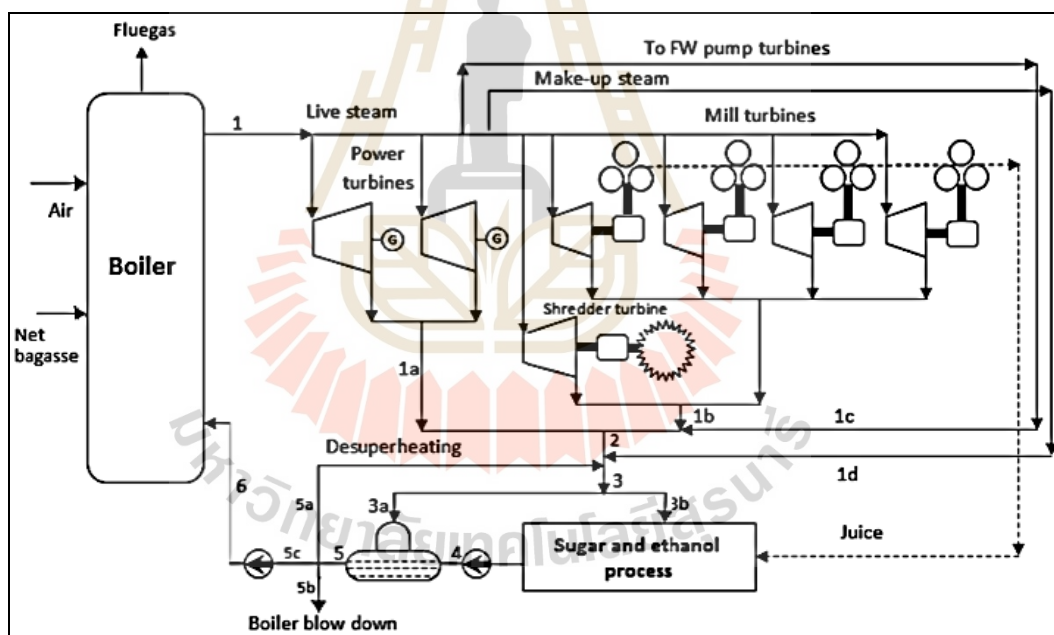
4. การปั่นแยกผลึกน้ำตาล (Centrifuging) แมสคิวทที่ได้จากการเคี้ยวจะถูกนำไปปั่นแยกผลึกน้ำตาลออกจากกากน้ำตาล โดยใช้เครื่องปั่น (Centrifugals) ผลึกน้ำตาลที่ได้นี้จะป็นน้ำตาลรีไฟน์ และน้ำตาลทรายขาว

5. การอบ (Drying) ผลึกน้ำตาลรีไฟน์และน้ำตาลทรายขาวที่ได้จากการปั่นก็จะเข้าหม้ออบ (Dryer) เพื่อไล่ความชื้นออก แล้วบรรจุกระสอบเพื่อจำหน่าย

2.2 ระบบพลังงานในโรงงานน้ำตาล

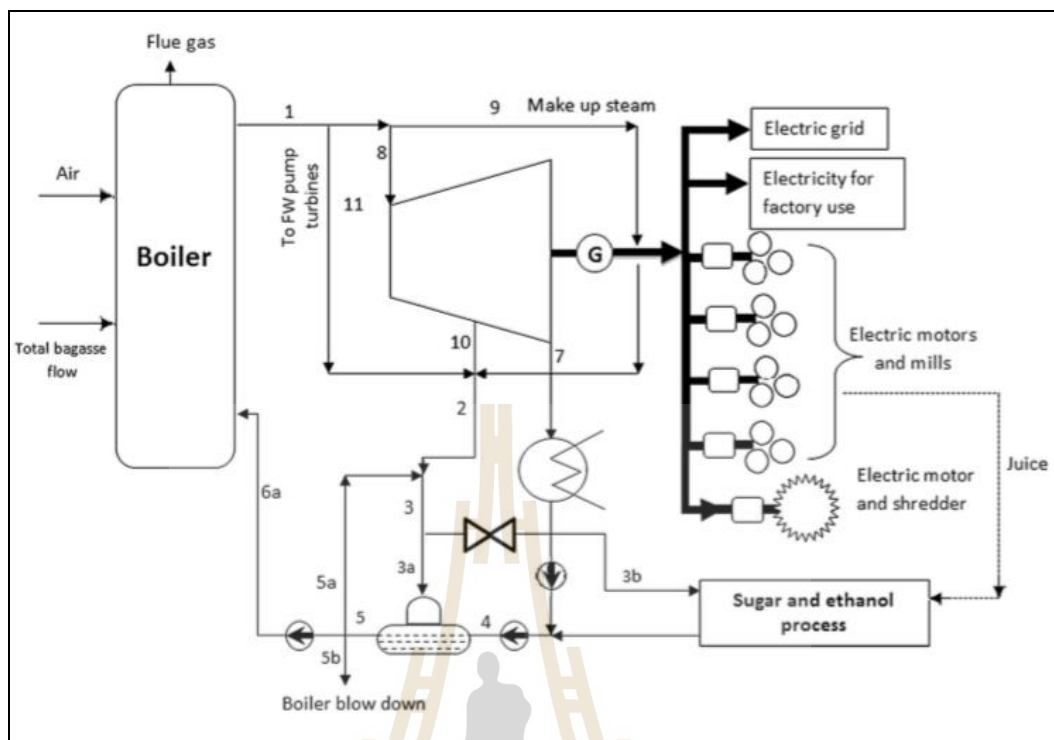
ระบบพลังงานในโรงงานน้ำตาลมี 2 ระบบใหญ่ ๆ ได้แก่ ระบบที่ใช้กังหันไอน้ำขับเคลื่อนหีบอ้อย ซึ่งระบบนี้ใช้ในโรงงานน้ำตาลแบบดั้งเดิม และอีกระบบหนึ่งคือ ระบบที่ใช้มอเตอร์ขับเคลื่อนหีบอ้อยแทนกังหันไอน้ำ

ระบบพลังงานในโรงงานน้ำตาลแบบดั้งเดิมนี้อำหรับในประเทศไทยอยู่ในโรงงานน้ำตาลที่ถูกสร้างขึ้นก่อนปี พ.ศ. 2545 โดยใช้กังหันไอน้ำขับเคลื่อนหีบอ้อยมีระบบผลิตและใช้ไอน้ำที่ความดันต่ำกว่า 40 บาร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งในประเทศไทยมีทั้งหมด 46 โรงงาน คิดเป็น 79% ของโรงงานน้ำตาลทั้งหมดทั่วประเทศไทย



รูปที่ 2.2 แผนผังระบบพลังงานในโรงงานน้ำตาลแบบดั้งเดิม (Eyerusalem Birru, 2015)

สำหรับระบบพลังงานในโรงงานน้ำตาลแบบใหม่ในประเทศถูกสร้างขึ้นหลังปี พ.ศ. 2545 ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าขับเคลื่อนหีบอ้อยแทนการขับเคลื่อนด้วยกังหันไอน้ำ และเป็นระบบที่ใช้ไอน้ำที่ความดันตั้งแต่ 40 บาร์ขึ้นไป ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แผนผังระบบพลังงานในโรงงานน้ำตาลแบบใหม่ (Eyerusalem Birru, 2015)

2.3 การวิเคราะห์พลังงานสำหรับระบบที่มีการไหลแบบคงตัว

ในการวิเคราะห์ทางวิศวกรรมกำหนดให้การไหลที่ผ่าน กังหัน เครื่องอัด เครื่องแลกเปลี่ยน หัวฉีด ปัม เป็นกระบวนการแบบคงตัว สมบัติภายในระบบไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยลักษณะของกระบวนการแบบคงตัวเป็นดังนี้

1. งานขอบเขตของระบบ (Boundary work, W_b) เป็นศูนย์
2. อัตราการไหลเชิงมวลเข้า เท่ากับอัตราการไหลเชิงมวลออก
3. อัตราการถ่ายโอนพลังงานที่เข้าสู่ระบบเท่ากับอัตราการถ่ายโอนพลังงานที่ออกจากระบบ สำหรับการสมดุลมวลในกระบวนการแบบคงตัวเป็นดังนี้

$$\sum_{in} \dot{m} = \sum_{out} \dot{m} \quad (2.1)$$

$$(\rho AV)_{in} = (\rho AV)_{out} \quad (2.2)$$

การสมดุลพลังงานพิจารณาได้จากกฎข้อที่ 1 ทางเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการดังต่อไปนี้

$$\dot{Q} - \dot{W} = \Delta \dot{E}_{\text{sys}} \quad (2.3)$$

$$\dot{Q}_{\text{in}} - \dot{W}_{\text{in}} + \sum_{\text{in}} \dot{m}c = \dot{Q}_{\text{out}} - \dot{W}_{\text{out}} + \sum_{\text{in}} \dot{m}c \quad (2.4)$$

โดยที่

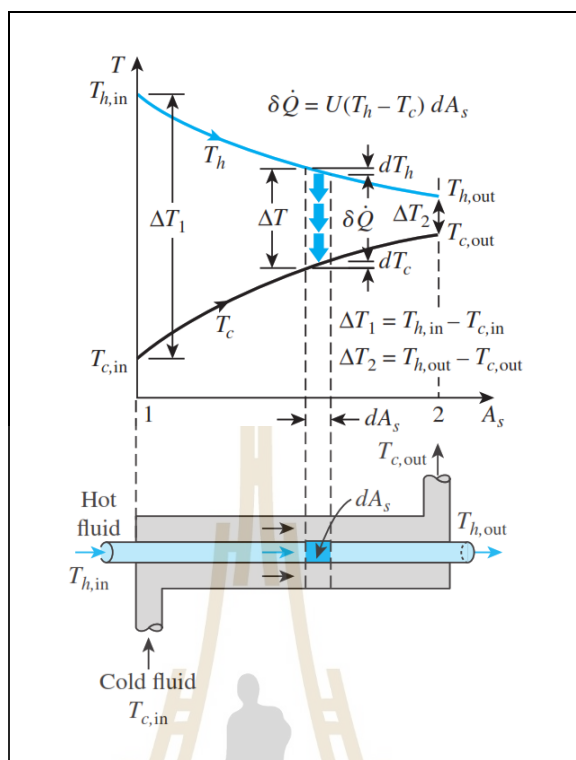
$$c = h + ke + pe = h + V^2/2 + gz \quad (2.5)$$

กรณีของระบบในโรงงานน้ำตาลเป็นระบบหยุดนิ่งที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ และพลังงานศักย์ ดังนั้นจึงมีค่า ke และ pe เท่ากับ 0 ทำให้สมการสมดุลพลังงานลดรูปได้ดังนี้

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m}(h_{\text{out}} - h_{\text{in}}) \quad (2.6)$$

2.4 วิธีหาความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยแบบล็อก

อุณหภูมิของของไหลต่าง ๆ ในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนนั้นปกติแล้วจะมีค่าไม่คงที่ แต่จะแปรค่าจากจุดหนึ่งไปจุดหนึ่งเมื่อมีความร้อนไหลจากของไหลที่ร้อนไปของไหลที่เย็นกว่า ดังนั้นถึงแม้ว่าความต้านทานความร้อนตามทางของไหลจะมีค่าคงที่ก็ตาม อัตราการถ่ายเทความร้อนจะแปรค่าตามเส้นการไหลในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ทั้งนี้เพราะอัตราการถ่ายเทความร้อนจะแปรค่าตามความแตกต่างของอุณหภูมิของไหลร้อนและของไหลเย็นที่แต่หน้าตัด ดังรูปที่ 2.4 ระยะห่างระหว่างเส้นกราฟทั้งสองจะเป็นความแตกต่างของอุณหภูมิ ΔT ระหว่างของไหลทั้งสอง



รูปที่ 2.4 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ของไหล
ที่ไหลสวนทางกัน (Cengel, Y. A., et al., 2015)

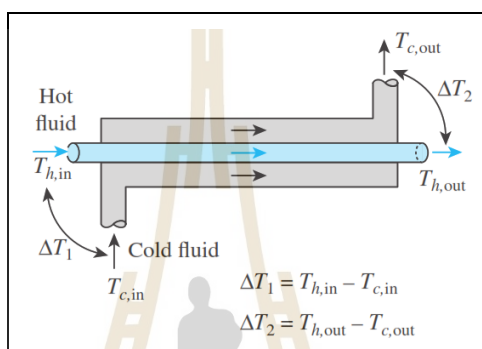
จากรูปที่ 2.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ของไหลที่ไหลสวนทางกัน เมื่อความแตกต่างของ อุณหภูมิ ΔT ระหว่างของไหลร้อนกับของไหลเย็นมีค่าสูงที่ทางเข้าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน แต่จะลดลงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลกับทางออก และอุณหภูมิของของไหลร้อนจะลดลง ขณะที่อุณหภูมิของของไหลเย็นเพิ่มขึ้น แต่อุณหภูมิของของไหลเย็นไม่สามารถเพิ่มสูงเกินอุณหภูมิของของไหลที่ร้อนได้ไม่ว่าจะอยู่ในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนนานแค่ไหนก็ตาม

ในการหาอัตราการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบต่าง ๆ ที่กล่าวมานั้นล้วนแต่ต้องหาโดยการอินทิเกรตจากอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ไหลผ่านพื้นที่ dA ซึ่งเป็นพื้นที่เล็ก ๆ ให้ทั่วพื้นที่ A ที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนตลอดความยาวของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจากสมการที่ 2.7 ในการหาอัตราการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบต่าง ๆ ที่กล่าวมานั้นล้วนแต่ ต้องหาโดยการอินทิเกรตจากอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ไหลผ่านพื้นที่ dA ซึ่งเป็นพื้นที่เล็ก ๆ ให้ทั่วพื้นที่ A ที่ใช้ ในการถ่ายเทความร้อนตลอดความยาวของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจากสมการที่ 2.7

$$\dot{Q} = UA_s \Delta T_{lm} \quad (2.7)$$

เมื่อ

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \quad (2.8)$$



รูปที่ 2.5 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลราบเรียบ (Cengel, Y. A., et al., 2015)

รูปที่ 2.6 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลสวนทาง (Cengel, Y. A., et al., 2015)

ค่า LMTD มีประโยชน์เพียงแค่ใช้ในการคำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อนอย่างหยาบ ๆ ทั้งนี้เพราะโดยปกติแล้วค่าของ U นี้จะไม่คงที่ อย่างไรก็ตาม ในการออกแบบนั้นมักจะนำเอาค่า U ของหน้าตัดที่อยู่กึ่งกลางปลายทั้งสองของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมาใช้ในการคำนวณ โดยถือว่ามีค่าคงที่ แต่ถ้าหากค่า U นี้แปรค่ามากก็จะต้องคำนวณหาทีละขั้นตอน โดยการนำค่า U

นั้นไปแทนค่าลงในสมการแล้วอินทิเกรตหาอัตราการถ่ายเทความร้อนอีกทีหนึ่ง สำหรับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ซับซ้อน เช่น แบบท่อกับเซลล์ที่ของไหลไหลในท่อและในเซลล์ที่ไหลผ่านเครื่องหลายเที่ยวหรือหลายกลับหรืออุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตั้งฉากที่ของไหลมีการคลุกเคล้าปนกันและไม่คลุกเคล้าจะหาความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยโดยวิธีคณิตศาสตร์ได้ยากมาก วิธีที่นิยมใช้กันก็คือให้ตัดแปลงค่า LMTD ที่จะนำไปใช้งาน โดยการคูณด้วยตัวแฟกเตอร์แก้ไข (F) ที่อยู่ในรูปเส้นกราฟ ในการหาความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยที่แท้จริงของอุปกรณ์และเปลี่ยนความร้อนที่ไหลซับซ้อนนั้นให้คูณค่า LMTD ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลสวนทางกันที่ใช้ข้อมูลอุณหภูมิของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ไหลซับซ้อนนั้นด้วยแฟกเตอร์แก้ไข (F) ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแต่ละระบบดังนั้น

$$\Delta T_{lm} = F \Delta T_{lm,CF} \quad (2.9)$$

เมื่อ F คือ ค่าแฟกเตอร์แก้ไข
 $\Delta T_{lm,CF}$ คือ ค่าความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยแบบลี้กของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลสวนทาง
 ΔT_{lm} คือ ค่าความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยแบบลี้กจริงของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

2.5 อีโคโนไมเซอร์

อีโคโนไมเซอร์ เป็นอุปกรณ์ที่ทำงานโดยรับความร้อนจากแหล่งความร้อน (ก๊าซทิ้งจากกระบวนการผลิตหรือหม้อไอน้ำ) และถ่ายเทให้กับน้ำที่ต้องใช้ในอุปกรณ์หรือกระบวนการผลิต สำหรับระบบหม้อไอน้ำนั้นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซกับของเหลวทำงาน โดยรับความร้อนจากก๊าซไอเสียทิ้งจากหม้อไอน้ำ โดยส่วนใหญ่และถ่ายเทให้กับน้ำ (Preheating) ก่อนเข้าหม้อไอน้ำ การแลกเปลี่ยนความร้อนนี้อาศัยหลักการนำความร้อนและพาความร้อนผ่านตัวกลางวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูง

โดยทั่วไปการนำความร้อนของก๊าซทิ้งจากหม้อไอน้ำไปใช้อุ่นน้ำป้อนจะทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของหม้อไอน้ำเพิ่มขึ้นประมาณ 1% ทุก 22 องศาเซลเซียส ของก๊าซที่สามารถดึงกลับมาได้ หรือในทำนองเดียวกันสำหรับทุก 6 องศาเซลเซียส ที่เพิ่มขึ้นของน้ำป้อนเข้าหม้อไอน้ำจาก Economizer หรืออุณหภูมิอากาศก่อนการสันดาปเพิ่มขึ้น 20 องศาเซลเซียส จากการอุ่นอากาศจะทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของหม้อไอน้ำเพิ่มขึ้นประมาณ 1% เช่นกัน

ก๊าซร้อนที่ออกจากหม้อไอน้ำจะมีอุณหภูมิประมาณ 200-250 องศาเซลเซียส ถ้ามีการติดตั้งเครื่องอีโคโนไมเซอร์ที่รอบนอกปล่อง บางส่วนของความร้อนในก๊าซร้อนที่จะถูกนำ กลับคืนมาเพื่ออุ่นน้ำป้อนหรือผลิตน้ำร้อนได้ ในทางปฏิบัติจริงต้องคำนวณการประหยัดออกมาเป็นกรณี ๆ ไป การประหยัดจะได้อधिकที่สุดก็ต่อเมื่ออุณหภูมิก๊าซร้อนที่สูงและไม่มี การเก็บคืน คอนเดนเสทกลับเข้าไปในหม้อไอน้ำหรือก็มีน้อยมาก

2.6 ดัชนีการใช้พลังงานจำเพาะ

ดัชนีการใช้พลังงานจำเพาะเป็นค่าดัชนีการใช้พลังงานต่อหน่วยการผลิตของโรงงาน คำนี้นี้มีประโยชน์ที่จะช่วยบอกว่าโรงงานหนึ่ง ๆ ใช้พลังงานเฉลี่ยเท่าใดในการผลิตสินค้า 1 หน่วย การติดตามและควบคุมค่า SEC ของโรงงาน เป็นวิธีการจัดการการอนุรักษ์พลังงานที่ได้ผลดีที่สุดวิธีหนึ่ง

$$SEC = \frac{\text{Energy}}{\text{Product}} \quad (2.10)$$

เมื่อ SEC คือ การใช้พลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption) (MJ/Tons)
 Energy คือ การใช้พลังงาน (MJ)
 Product คือ ผลผลิตน้ำตาล (Tons of Sugar) หรือปริมาณอ้อย (Tons of Cane)

2.7 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

2.7.1 ระยะเวลาคืนทุน

ระยะเวลาคืนทุน หมายถึง ระยะเวลาของการลงทุนที่กระแสเงินสดรับสุทธิจากโครงการเท่ากับกระแสเงินสดจ่ายสุทธิพอดีหรือกล่าวได้ว่าการลงทุนไม่มีกำไรและไม่ขาดทุนนั่นเอง ระยะเวลาคืนทุนเป็นเครื่องมือในการประเมินความเป็นไปได้ของการลงทุนอย่างง่ายและไม่ซับซ้อน เป็นการประเมินคร่าว ๆ และรวดเร็วเหมาะกับเม็ดเงินลงทุนจำนวนไม่มาก ระยะเวลาคืนทุนสามารถคำนวณได้จากสูตรต่อไปนี้

$$\text{ระยะเวลาคืนทุนของโครงการ} = \frac{\text{เงินลงทุนของโครงการ}}{\text{รายได้ของโครงการ}} \quad (2.11)$$

วิธีการคำนวณระยะเวลาคืนทุนนี้เป็นการพิจารณาอย่างคร่าว ๆ และมีความสะดวกในการเปรียบเทียบหรือจัดลำดับโครงการ โดยเฉพาะโครงการขนาดเล็ก การคืนทุนเร็วจะช่วยให้

โครงการมีสภาพคล่องดีขึ้นและมีความเสี่ยงน้อยลง แต่ก็มีจุดอ่อนตรงที่ไม่ได้นำเรื่องค่าของเงินตามเวลามาพิจารณาและไม่ให้ความสำคัญกับกระแสเงินสดที่ได้รับภายหลังระยะเวลาคืนทุน

2.7.2 มูลค่าปัจจุบันสุทธิ

มูลค่าปัจจุบันสุทธิ คือ ผลต่างระหว่างมูลค่าปัจจุบันรวมของกระแสเงินสดรับสุทธิตลอดอายุโครงการกับมูลค่าปัจจุบันของเงินลงทุน โดยใช้อัตราคิดลด (Discount Rate) ตัวใดตัวหนึ่งมาปรับมูลค่าของกระแสเงินสดที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลาให้มาอยู่ที่จุดเดียวกัน คือ ณ ปัจจุบันวิธีมูลค่าปัจจุบันสุทธิหรือ NPV นับเป็นเครื่องมือในการประเมินความเป็นไปได้ของการลงทุนที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีการนำเรื่องค่าของเงินตามเวลามาร่วมพิจารณา และเป็น การคำนวณกระแสเงินสดที่เกิดขึ้นตลอดอายุโครงการ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ หรือ NPV สามารถคำนวณได้จากสูตรต่อไปนี้

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+k)^t} - I \quad (2.12)$$

| | | |
|-------|----|--|
| เมื่อ | CF | คือ กระแสเงินสดรับสุทธิ ณ ปีที่ t |
| | I | คือ เงินสดจ่ายลงทุนของโครงการ |
| | k | คือ ค่าของทุนหรืออัตราผลตอบแทนที่ต้องการ |
| | n | คือ อายุของโครงการ |

เกณฑ์การตัดสินใจ คือ ถ้า NPV ที่คำนวณได้ของโครงการมีค่ามากกว่า 0 ก็ตัดสินใจลงทุนหรือยอมรับโครงการนั้น หากมีค่าน้อยกว่า 0 หรือ มีค่าเป็นลบก็ไม่ลงทุนในโครงการดังกล่าว เนื่องจากไม่คุ้มค่าที่จะลงทุน สำหรับในกรณีที่มีโครงการลงทุนที่น่าสนใจมากกว่า 1 โครงการ จะต้องจัดอันดับโครงการโดยเรียงลำดับตามมูลค่าปัจจุบันสุทธิที่คำนวณได้จากค่ามากไปหาค่าน้อย

2.7.3 อัตราผลตอบแทนคิดลด

อัตราผลตอบแทนคิดลด คือ อัตราคิดลด (Discount Rate) ที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดรับสุทธิตลอดอายุโครงการเท่ากับเงินสดจ่ายลงทุนสุทธิพอดี หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ อัตราคิดลดที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการเท่ากับศูนย์ เป็นอัตราผลตอบแทนเฉลี่ยต่อปีที่ผู้ลงทุนจะได้รับจากการลงทุนตลอดอายุโครงการนั่นเอง ในทางปฏิบัติ IRR นิยมนำมาใช้เป็นเกณฑ์ในการประเมินโครงการอย่างแพร่หลาย เนื่องจากวิธี IRR นี้มีการแสดงค่าผลตอบแทนเป็นร้อยละซึ่งทำให้เข้าใจง่ายและมีความสะดวกในการเปรียบเทียบระหว่างโครงการต่างๆที่เป็นทางเลือกของการลงทุนที่มีอยู่ขณะนั้น

สูตรการคำนวณ IRR คือ อัตราคิดลดที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการเท่ากับศูนย์

จากสมการที่ 2.13

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+k)^t} - I = 0 \quad (2.13)$$

เมื่อ $NPV = 0$ จะได้

$$I = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+k)^t} \quad (2.14)$$

เมื่อ k คือ อัตราผลตอบแทนคิดลด หรือ IRR นั้นเอง
 I คือ เงินสดจ่ายลงทุนของโครงการ
 NPV คือ มูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดรับสุทธิ
 CF_t คือ กระแสเงินสดรับสุทธิ ณ ปีที่ t
 n คือ อายุโครงการ

เกณฑ์การตัดสินใจ

สำหรับเกณฑ์ตัดสินใจว่าจะลงทุนหรือไม่นั้นจะพิจารณา ดังนี้

หาก $IRR > r$ ก็ตัดสินใจลงทุน

หาก $IRR < r$ ก็ตัดสินใจไม่ลงทุน

โดย r คือ ต้นทุนเงินทุน (Cost of capital) ของโครงการ

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Eyerusalem Birru et al., (2016) ได้ศึกษาเปรียบเทียบพัฒนาเทคโนโลยีการใช้พลังงานและน้ำในโรงงานน้ำตาลแบบดั้งเดิม 4 รูปแบบ ได้แก่ เทคโนโลยีที่ 1 การนำน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตกลับมาใช้พรมชุดลูกทึบอ้อย เทคโนโลยีที่ 2 การนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ทำความเย็น เทคโนโลยีที่ 3 การนำขานอ้อยมาอัดเม็ดเป็นเชื้อเพลิง และเทคโนโลยีที่ 4 การอบแห้งเชื้อเพลิงขานอ้อย การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบตัวเลือกทางเทคโนโลยี 4 ตัวเลือกที่เสนอให้กับโรงงานน้ำตาลแห่งหนึ่งและแนะนำว่าตัวเลือกใดเหมาะสมที่จะนำไปใช้ สำหรับสิ่งนี้ปัจจัย

ที่แตกต่างกันถือเป็นพารามิเตอร์เปรียบเทียบและการดำเนินการปรับปรุงเทคโนโลยี 3 และ 4 มีความไวต่อการปรับปรุงประสิทธิภาพของวัฏจักร ประสิทธิภาพที่คำนวณสำหรับตัวเลือก 3 และตัวเลือก 4 คือ 37.9% และ 36.8% ตามลำดับ อย่างไรก็ตามสิ่งนี้เพียงอย่างเดียวไม่จำเป็นต้องนำไปสู่ข้อสรุปว่าตัวเลือกเหล่านี้จำเป็นต้องจัดลำดับความสำคัญเมื่อเทียบกับตัวเลือก 1 และตัวเลือก 2 จัดลำดับความสำคัญของ 4 ตัวเลือกได้รับการตรวจสอบด้วยประเด็นต่าง ๆ ดังนี้ ได้แก่ (1) ผลประโยชน์ทางการเงิน (2) DPBP และ (3) การประหยัดพลังงาน, การปล่อย CO₂ ตัวเลือก 4 สูงที่สุด (21,528 ตัน/ปี) และสำหรับตัวเลือก 2 ต่ำสุด (94.5 ตัน/ปี) การประหยัดต้นทุนค่าใช้จ่ายของการปล่อย CO₂ ที่บันทึกไว้สำหรับตัวเลือก 2 (สูงสุด) และตัวเลือก 3 (ต่ำสุด) คาดว่าจะถูกบันทึกไว้ที่ 423 และ 41 USD/ตันต่อการปล่อย CO₂ ตามลำดับ

Eyerusalem Birru et al., (2015) ได้ศึกษาประเมินศักยภาพการประหยัดพลังงานในโรงงานน้ำตาลแบบดั้งเดิมแห่งหนึ่งมีอัตราการหีบอ้อย 12,000 ตัน/วัน โดยทำการศึกษา 3 กรณี ได้แก่ กรณีที่ 1 สภาวะหีบอ้อยปกติใช้ชานอ้อยเป็นเชื้อเพลิงอย่างเดียว กรณีที่ 2a สภาวะหีบอ้อยมีการหยุดหีบชั่วคราว และมีการใช้น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิงขณะที่หยุดหีบ และ กรณีที่ 2b สภาวะหีบอ้อยมีการหยุดหีบชั่วคราว และมีการใช้ชานอ้อยกับน้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิงขณะที่หยุดหีบ ผลการศึกษาพบว่ากรณีที่ 1 หม้อไอน้ำทำงานได้ประสิทธิภาพ 70% กรณีที่ 2a หม้อไอน้ำทำงานได้ประสิทธิภาพ 92% และกรณีที่ 2b หม้อไอน้ำทำงานได้ประสิทธิภาพ 88%

Eyerusalem Birru et al., (2015) ได้ศึกษาประเมินศักยภาพการประหยัดพลังงานในโรงงานน้ำตาลปรับปรุงให้เป็นแบบใหม่แห่งหนึ่ง โดยทดลองหีบอ้อยที่ 4,264 ตัน/วัน ทำการศึกษา 4 กรณี ได้แก่ กรณีที่ 1a สภาวะหีบอ้อยปกติ ใช้ชานอ้อยเป็นเชื้อเพลิง กรณีที่ 1b สภาวะหีบอ้อยปกติใช้ชานอ้อยอบแห้งเป็นเชื้อเพลิง กรณีที่ 2a สภาวะหีบอ้อยมีการหยุดหีบชั่วคราวและใช้ชานอ้อยเป็นเชื้อเพลิง และกรณีที่ 2b สภาวะหีบอ้อยมีการหยุดหีบชั่วคราว และใช้ชานอ้อยอบแห้งเป็นเชื้อเพลิง ผลการศึกษาพบว่า กรณีที่ 1a สามารถผลิตไฟฟ้าจำหน่ายเข้ากริดได้ 3.2 MW ระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 6.1 ปี กรณีที่ 1b ที่ความชื้นชานอ้อย 30%, 35% และ 45% สามารถผลิตไฟฟ้าจำหน่ายเข้ากริดได้ 7.8, 7.2 และ 5.6 MW ระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 2.9, 3.3 และ 4.9 ปี ตามลำดับ กรณีที่ 2a ได้ผลเหมือนกับ 1a กรณีที่ 2b ที่ความชื้นชานอ้อย 30% และ 35% สามารถผลิตไฟฟ้าจำหน่ายเข้ากริดทั้งคู่เท่ากับ 3.8 MW ระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 5.9 ปี

Moises Alves et al., (2015) ได้ศึกษาการผลิตไฟฟ้าในโรงงานน้ำตาล ทำการวิเคราะห์ระบบพลังงานไฟฟ้าส่วนเกินสำหรับระบบ Cogeneration ที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ โดยพิจารณาจากชานอ้อยและฟางอ้อยเป็นเชื้อเพลิงทั้ง 3 รูปแบบที่แตกต่างกัน ได้แก่ ระบบ BPST (Backpressure Steam-Turbine system), ระบบ CEST (Condensing Extraction Steam Turbine) และระบบ BPST-C ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าระบบ CEST สามารถมีไฟฟ้าจำหน่ายได้สูงกว่าระบบ BPST ถึง 4 เท่า และ

เมื่อผสมฟางอ้อยในสัดส่วน 10% และ 50% ตามลำดับ สามารถผลิตไฟฟ้าได้มากขึ้น 23% และ 102% และระบบ BPST-C เหมาะกับการเดินเครื่องได้ทั้งทุกฤดูกาล

Bocci, E. et al., (2009) ได้ศึกษาระบบพลังงานในโรงงานน้ำตาลแห่งหนึ่ง โรงงานแห่งนี้ใช้เชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานโดยใช้ชานอ้อยคิดเป็น 47.93 ktoe ร่วมกับน้ำมันดีเซลคิดเป็น 7.22 ktoe ผลิตไอน้ำที่ระดับความดัน 28 bar อุณหภูมิ 338 °C คิดเป็นพลังงานความร้อนเท่ากับ 32.84 ktoe สูญเสียพลังงานความร้อนในระหว่างหีบอ้อยเท่ากับ 1.55 ktoe และช่วงหยุดหีบอ้อยเท่ากับ 3.39 ktoe จะได้พลังงานความร้อนส่งไปยังกังหันไอน้ำขับเคลื่อนอ้อยเท่ากับ 12.43 ktoe กังหันไอน้ำขับเคลื่อน Generator ผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 12.94 ktoe พลังงานที่ถูกส่งไปยังกระบวนการผลิต ได้แก่ พลังงานความร้อนเท่ากับ 25.37 ktoe พลังงานกลเท่ากับ 1.23 ktoe และพลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 1.25 ktoe ประสิทธิภาพของระบบประมาณ 50% จะเห็นว่าประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำเนื่องจาก เป็นโรงงานแบบดั้งเดิม หม้อไอน้ำมีประสิทธิภาพเพียง 59% และขาดระบบการจัดการพลังงานที่ดีในกระบวนการผลิต

Karate et al., (2009) ได้ศึกษาอเนกประสงค์ของระบบโคเจนเนอเรชันในโรงงานน้ำตาลขนาดอัตราการหีบอ้อย 2,500 ตัน/วัน โดยใช้ชานอ้อยเป็นเชื้อเพลิงทำการศึกษาระบบ Back Pressure Steam Turbine (BPST) และระบบ Condensing Extraction Steam Turbine (CEST) โดยศึกษาที่ความดันและอุณหภูมิไอน้ำทั้งหมด 6 สถานะ ผลการศึกษาพบว่า สถานะที่เหมาะสมที่สุดคือ ความดัน 61 บาร์ อุณหภูมิ 475 °C โดยระบบโคเจนเนอเรชันแบบ BPST จะมีประสิทธิภาพเท่ากับ 86.3% และระบบโคเจนเนอเรชันแบบ CEST จะมีประสิทธิภาพ เท่ากับ 68.2%

Tuula Savala et CF., (2006) ได้ศึกษาการเพิ่มกำลังการผลิตไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วมขนาดเล็ก โดยศึกษาระบบขนาดเล็กจำนวน 4 ระบบ ได้แก่ ระบบขนาด 1.8 MW, ขนาด 6 MW, ขนาด 11 MW และขนาด 14.7 MW ทำการดัดแปลงเพิ่มอุปกรณ์ 2 Stage heat exchanger, Re-heater และ High pressure pre-heater และทำการเดินเครื่องที่สถานะความดัน 170 บาร์ อุณหภูมิ 600 °C อัตราส่วนการผลิตไฟฟ้าต่อความร้อนเพิ่มขึ้นจาก 0.23-0.48 เป็น 0.26-0.56 ขึ้นอยู่กับขนาดของระบบ เมื่อทำการเพิ่มเครื่องยนต์ใช้ก๊าซเป็นเชื้อเพลิงเข้าไปกับระบบ สามารถเพิ่มอัตราส่วนการผลิตไฟฟ้าต่อความร้อนได้ถึง 0.35-0.65

Jorge Barroso et al., (2003) ได้ศึกษาการปรับปรุงประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำขนาด 45 ton/hr ที่ใช้ชานอ้อยเป็นเชื้อเพลิงความดัน 19 บาร์ ทำการดัดแปลงนำความร้อนทิ้งจากปล่องไอเสียของหม้อไอน้ำกลับมาใช้ โดยการติดตั้ง Economizer, Air pre-heater และ Bagasse dryer ซึ่งทำการออกแบบอุปกรณ์ให้เหมาะสมกับการลงทุน จากการศึกษาพบว่า การติดตั้ง Economizer เป็นรูปแบบที่มีค่าใช้จ่ายรวมต่อปีน้อยที่สุด รองลงมาคือ รูปแบบติดตั้ง Air pre-heater และราคาเชื้อเพลิงมีผลค่อนข้างมากในการพิจารณาการลงทุนติดตั้งอุปกรณ์และเปลี่ยนความร้อน

Therdyothin A., (1992) ได้ศึกษาศักยภาพของระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วมในโรงงานน้ำตาลของประเทศไทยพบว่า สามารถผลิตไฟฟ้าได้ปีละประมาณ 214 GWh โดยใช้ชานอ้อยส่วนเกินเป็นเชื้อเพลิงประมาณ 102 ล้านตัน โดยแนะนำมาตรการประหยัดพลังงานได้ 3 มาตรการ ได้แก่ ควบคุมอากาศส่วนเกิน ออบชานอ้อย และนำคอนเดนเสทกลับมาใช้ใหม่

Balakrishnan, et al., (1988) ได้ศึกษาการวิเคราะห์พลังงานของระบบผลิตร่วมในโรงงานน้ำตาล ที่มีอัตราการหีบอ้อยได้ 10,000 ตัน/วัน ความต้องการไอน้ำของโรงงานเท่ากับ 80 ton/hr มีหม้อไอน้ำจำนวน 4 เครื่อง ไอน้ำที่ผลิตมีความดัน 23 bar อุณหภูมิ 360 °C ส่งจ่ายไอน้ำไปยังกังหันไอน้ำขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เครื่อง ขนาดรวมกันเท่ากับ 5 MW ผลิตและใช้ในโรงงานประมาณ 3.6 MW และไอน้ำอีกส่วนหนึ่งถูกส่งไปยังกังหันไอน้ำขับเคลื่อนชุดลูกหีบอ้อยขนาดรวมกันเท่ากับ 3,500 hp ผลการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพหม้อไอน้ำสูงสุดเท่ากับ 62.74% และต่ำสุดเท่ากับ 60.25% ตามลำดับ ได้เสนอการประหยัดพลังงาน โดยการลดความชื้นเชื้อเพลิงชานอ้อย และควบคุมการทำงานของกังหันไอน้ำขับเคลื่อนชุดลูกหีบอ้อย การใช้พลังงานร่วมของโรงงานสามารถผลิตและส่งจ่ายให้กับโรงงานได้อย่างเพียงพอ โดยไม่ต้องซื้อไฟฟ้าจากการไฟฟ้า คิดเป็นเงินประมาณ 3.2 ล้านบาท/เดือน

จิรตล สันวิลาศ และคณะ (2558) ได้ศึกษาการสูญเสียด้านพลังงานของกระบวนการหีบสกัดอ้อยของโรงงานน้ำตาลมิตรผลภูเขียว จากการศึกษาพบว่า กระบวนการหีบอ้อยขึ้นกับตัวแปรคือ ปริมาณอ้อยเข้าหีบต่อวัน เบอร์เซ็นต์การสกัดน้ำตาล เบอร์เซ็นต์ชานอ้อยในอ้อย โดยใช้ Regression เป็นเครื่องมือในการหาความสัมพันธ์ของตัวแปรดังกล่าว และได้สมการ SEC ของกระบวนการหีบอ้อย สามารถนำไปใช้ในการปรับกระบวนการหีบให้เกิดประสิทธิภาพและใช้พลังงานที่เหมาะสมได้

ธีรวัฒน์ คลับคล้าย และคณะ (2553) ได้ศึกษาแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ของกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อย แบบหลายขั้นตอนในกระบวนการผลิตน้ำตาลที่มีความสัมพันธ์ร่วมกับมางเทอร์โมไดนามิกส์ เพื่อทราบถึงปริมาณการจ่ายไอหัวหม้อที่จ่ายไปยังหม้ออุ่นและหม้อต้มชุดถัดไปและมีความสอดคล้องต่อความต้องการที่แท้จริงของกระบวนการถ่ายเทความร้อนและเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าบริคซ์ของแบบจำลองและค่าบริคซ์จริงที่ได้จากการวัด พบว่ามีความใกล้เคียงกัน แต่ต่างกันเล็กน้อยเนื่องจากประสิทธิภาพของหม้อต้มลดถอยลง

บันเทิง สิกุกทอง และคณะ (2552) ได้ศึกษาพัฒนาแบบจำลองการออกแบบระบบหม้ออุ่นและหม้อต้ม โรงงานน้ำตาล โดยการใช้ไอหัวหม้อต้มและคอนเดนเสทเป็นตัวให้ความร้อนกับหม้ออุ่น เพื่อประเมินความต้องการไอเสียของไอน้ำในหม้อต้ม โดยใช้หม้อต้มจำนวน 5 ปัจจัย จากการศึกษาพบว่า ไอหัวหม้อมีปริมาณมากกว่าความต้องการของหม้อต้มในปัจจุบัน ถัดไปจึงสามารถนำไอหัวหม้อที่เกินไปใช้ในการอุ่นน้ำอ้อยได้

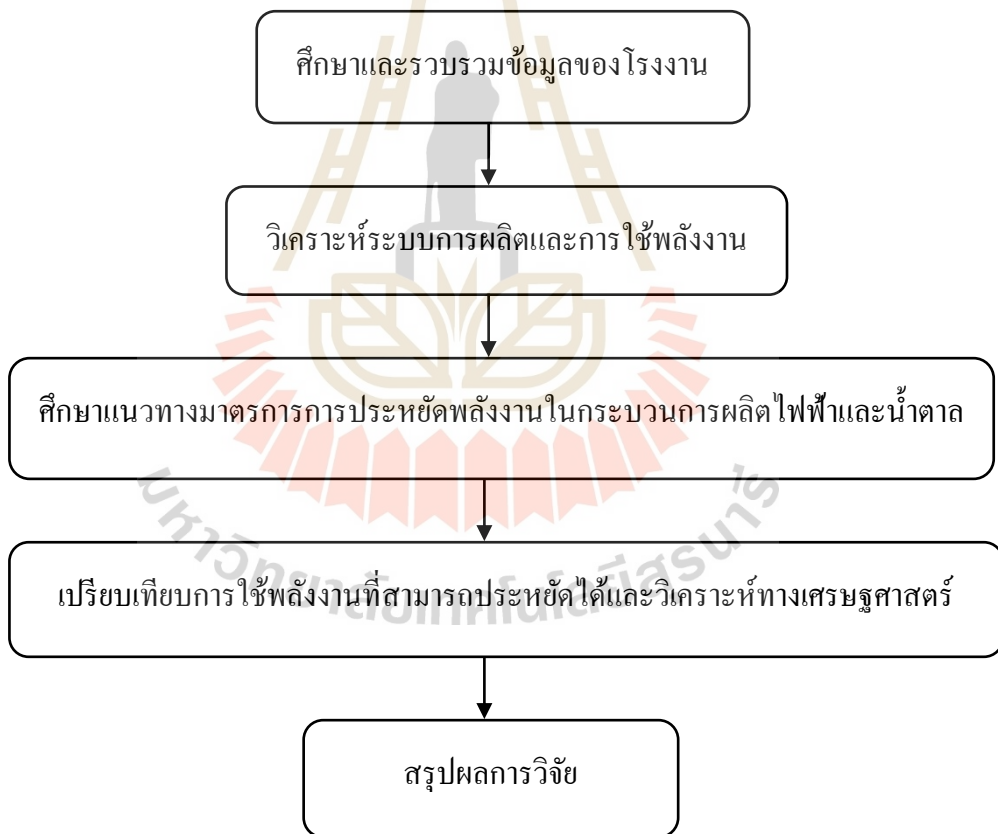
จากงานวิจัยที่ผ่านมาสรุปลงได้ว่า ในต่างประเทศมีการศึกษาประเมินการประหยัดพลังงานของโรงงานน้ำตาลหลายรูปแบบ ได้แก่ โรงงานน้ำตาลแบบดั้งเดิม โรงงานน้ำตาลแบบใหม่ เปรียบเทียบเทคโนโลยีแนวทางการประหยัดพลังงาน ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของโรงงานศึกษาวิเคราะห์การผลิตไฟฟ้าร่วมในโรงงานน้ำตาลในรูปแบบต่าง ๆ ซึ่งงานวิจัยในประเทศไทยปัจจุบันมุ่งเน้นศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพเฉพาะอุปกรณ์หรือเครื่องจักร ยังไม่มีการศึกษาแนวทางในการลดการใช้พลังงานโรงงานน้ำตาลภาพรวมทั้งระบบ โดยเฉพาะโรงงานน้ำตาลแบบดั้งเดิมที่มีอยู่ถึง 79% ยังคงมีการใช้พลังงานอย่างสิ้นเปลือง ด้วยเหตุผลดังกล่าวงานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายศึกษาหาแนวทางในการลดการใช้พลังงานจำเพาะหรือพลังงานต่อหน่วยผลผลิตของโรงงานน้ำตาลแบบดั้งเดิม



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

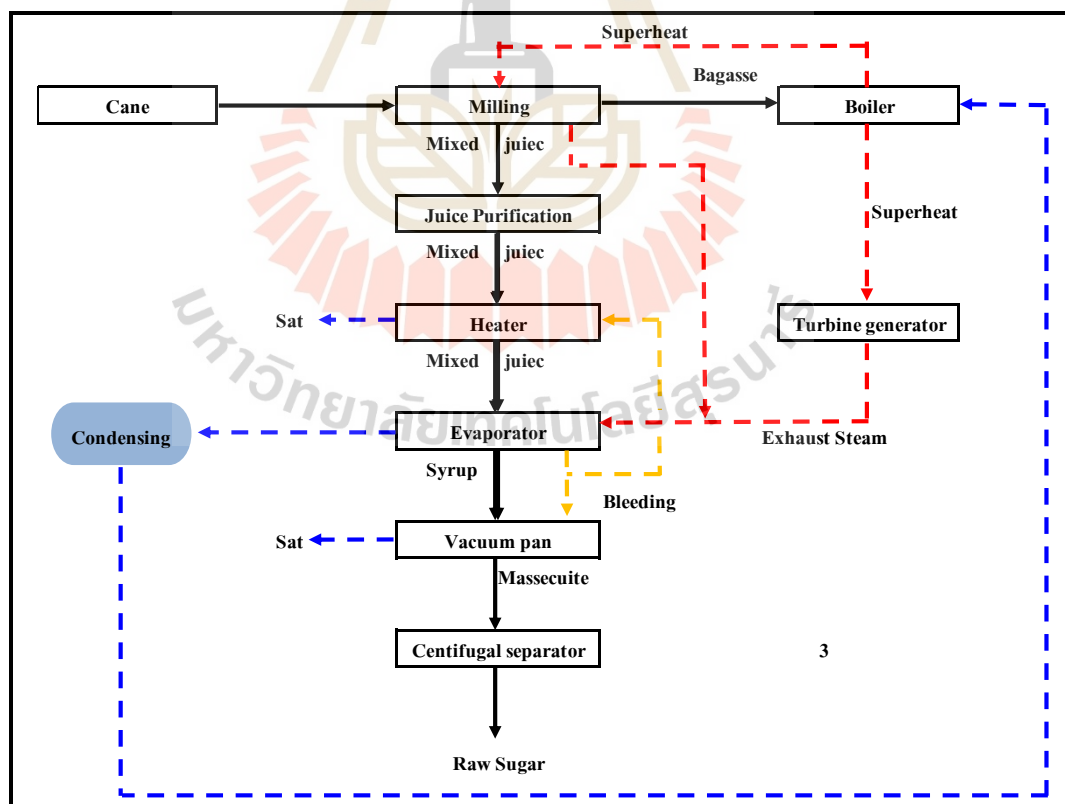
ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย ซึ่งประกอบไปด้วย การศึกษาและรวบรวมข้อมูลของโรงงาน การวิเคราะห์ระบบการผลิตและการใช้พลังงาน ศึกษาแนวทางมาตรการประหยัดพลังงานในกระบวนการผลิตไฟฟ้าและน้ำตาล และการใช้พลังงานในโรงงานน้ำตาลแบบดั้งเดิม เพื่อหามาตรการที่เหมาะสมในการแก้ปัญหาสำหรับช่วยประหยัดพลังงาน ในกรณีศึกษา คือ โรงงานน้ำตาลทรายขาวเริ่มอุดม จังหวัดอุดรธานี โดยแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลของโรงงาน

ในกระบวนการผลิตน้ำตาล เริ่มจากกระบวนการสกัดน้ำอ้อย โดยนำอ้อยเข้าสู่ชุดลูกหีบ 5 ชุด และกากอ้อยที่ผ่านการสกัดน้ำอ้อยจากลูกหีบชุดสุดท้ายจะถูกนำไปเป็นเชื้อเพลิงเผาไหม้ภายในเตาของเครื่องกำเนิดไอน้ำ เพื่อผลิตไอน้ำมาใช้ในกระบวนการผลิตไฟฟ้าและน้ำตาลทราย จากนั้นผ่านกระบวนการ Juice Purification เพื่อทำใส่น้ำอ้อยที่สกัดได้เนื่องจากน้ำอ้อยมีสิ่งสกปรกต่าง ๆ ปนอยู่จึงต้องแยกเอาส่วนนั้นออกโดยผ่านวิธีทางกล เช่น ผ่านเครื่องกรองต่าง ๆ และวิธีทางเคมี เช่น โดยให้ความร้อนและผสมปูนขาว จากนั้นน้ำอ้อยใสจะผ่านหม้ออุ่นแล้วส่งเข้าสู่ชุดหม้อต้มระเหย (Evaporator) เพื่อระเหยเอาน้ำออก โดยน้ำอ้อยข้นที่ออกมาจากหม้อต้มระเหยชุดสุดท้ายจะเรียกว่า “น้ำเชื่อม (Syrup)” น้ำเชื่อมที่ได้จากการต้มจะถูกนำเข้าหม้อเคี่ยวระบบสุญญากาศ (Vacuum Pan) เพื่อระเหยน้ำออกทำให้น้ำเชื่อมถึงจุดอิ่มตัวจนเกิดผลึกน้ำตาลขึ้นมา ผลึกน้ำตาลและกากน้ำตาลที่ได้จากการเคี่ยวนี้ เรียกว่า “แมสเสคิวทิต (Massecuite)” และจะถูกนำไปปั่นแยกผลึกน้ำตาล ออกจากกากน้ำตาลโดยใช้เครื่องปั่น (Centrifugals) ผลึกน้ำตาลที่ได้นี้จะเป็นน้ำตาลดิบ ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 กระบวนการผลิตของโรงงานกรณีศึกษา

จากรูปที่ 3.2 แสดงถึงลำดับของกระบวนการการผลิตน้ำตาลที่เริ่มจากกระบวนการเตรียมอ้อย การหีบอ้อย การทำน้ำอ้อยใส การต้มระเหยน้ำอ้อย การเคี้ยวสร้างผลึกน้ำตาล การปั่นแยกน้ำตาล ออกจากกากน้ำตาลล้วนเป็นกระบวนการผลิตที่มีความเกี่ยวข้องกับการใช้พลังงานไอน้ำ นอกจากนี้ กระบวนการผลิตน้ำตาลแล้วยังมีส่วนของการผลิตพลังงานไอน้ำและไฟฟ้าเพื่อนำมาใช้ในกระบวนการผลิต โดยส่วนของการผลิตพลังงานไอน้ำจะประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก ๆ คือ หม้อไอน้ำ (Boiler) และส่วนของการผลิตไฟฟ้าจะประกอบด้วยอุปกรณ์ กังหันไอน้ำ (Turbine) และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator)

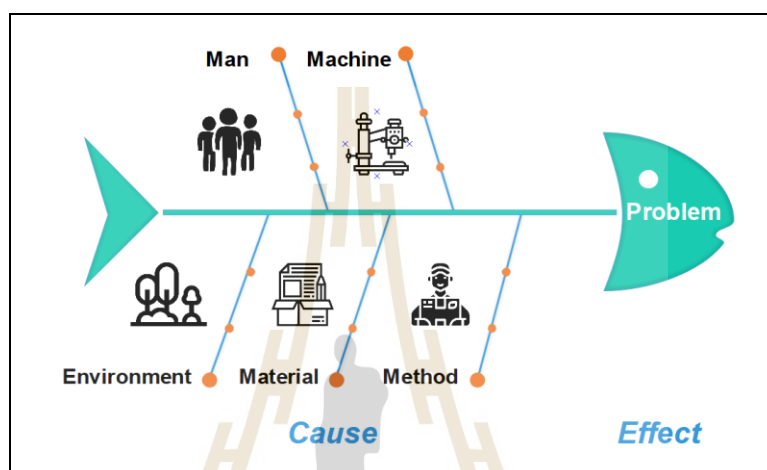
การเก็บรวบรวมข้อมูลย้อนหลังจะทำให้ทราบถึงสภาพการใช้พลังงานของกระบวนการผลิตในอดีต โดยการเข้าไปสำรวจและบันทึกข้อมูลการใช้พลังงานแต่ละรูปแบบ ได้แก่ เอกสาร ใบเสร็จค่าใช้จ่ายพลังงานประจำเดือนของโรงงาน รายงานการจัดการพลังงานประจำปี ใบรายงานผลการผลิตประจำเดือน รวบรวมข้อมูลการใช้พลังงานและผลผลิตของแต่ละกระบวนการผลิตภายใน โรงงาน โดยรูปแบบของพลังงานที่ใช้ในโรงงานสามารถแบ่งได้ เป็น 2 รูปแบบด้วยกันคือ พลังงานไฟฟ้าสำหรับเดินเครื่องจักรต่าง ๆ ในกระบวนการผลิตและพลังงานความร้อน ซึ่งได้มาจากหม้อไอน้ำเป็นอุปกรณ์สำหรับผลิตไอน้ำ โดยแหล่งเชื้อเพลิงที่ใช้ในโรงงานก็คือ ชานอ้อย

ดังนั้นจากการเก็บรวบรวมข้อมูลย้อนหลังจึงทำให้ทราบถึงปริมาณพลังงานที่ใช้และ ปริมาณผลผลิตที่ได้ในกระบวนการผลิต เพื่อนำข้อมูลดังกล่าวไปทำการวิเคราะห์หาค่าดัชนี สมรรถนะการใช้พลังงานต่อไป

3.2 วิเคราะห์ระบบการผลิตพลังงานและการใช้พลังงานของโรงงาน

การสำรวจและตรวจวัดพลังงานทำให้ทราบข้อมูลการใช้พลังงานของโรงงาน จากนั้นนำ ข้อมูลดังกล่าวมาวิเคราะห์สมดุลมวลและสมดุลพลังงาน เพื่อหาประเภทของพลังงานที่ใช้มากที่สุด จากนั้นทำการวิเคราะห์ดัชนีสมรรถนะการใช้พลังงาน นำมาเริ่มทำการวิเคราะห์หาสาเหตุของการใช้พลังงานที่สิ้นเปลืองของเครื่องจักรที่มีนัยสำคัญ โดยการวิเคราะห์หาวิธีแก้ไขปัญหานั้นที่เรียกว่า “แผนภูมิแสดงสาเหตุและเหตุผล (Fishbone diagram)” ดังรูปที่ 3.3 มาช่วยในการวิเคราะห์หาสาเหตุ ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างปัญหากับสาเหตุทั้งหมดที่เป็นไปได้ที่อาจก่อให้เกิดปัญหานั้น โดยเริ่มจากผลที่ได้รับคือ ประเภทของพลังงานที่มีการใช้พลังงานมากเป็นหัวปลาอยู่ทางขวามือ ส่วนการกำหนดสาเหตุของปัญหาต่าง ๆ นั้น ต้องคิดอย่างเป็นระบบและสมเหตุสมผลกัน โดยส่วนมากมักจะใช้หลักการของ 4M+1E ในการแยกแยะสาเหตุต่าง ๆ ในการแก้ปัญหาเรื่อง การลดการใช้พลังงาน เพื่อนำไปสู่การหามาตรการที่เหมาะสมและมีความเป็นไปได้ในการลด การใช้พลังงาน ซึ่ง 4M+1E ได้แก่

| | |
|---------------|---|
| M-Man | พนักงานหรือบุคลากร |
| M-Machine | เครื่องจักรหรืออุปกรณ์ |
| M-Material | วัตถุดิบหรืออะไหล่ อุปกรณ์อื่นๆที่ใช้ในกระบวนการ |
| M-Method | กระบวนการทำงาน |
| E-Environment | สภาพอากาศ อุณหภูมิ ความชื้น และอื่นๆที่เกี่ยวข้อง |



รูปที่ 3.3 แผนภูมิแสดงสาเหตุและเหตุผล (Fishbone diagram)

โดยการพิจารณาทีละประเด็นเริ่มจากพนักงาน (Man) วัสดุที่ใช้ (Material) เครื่องจักร/อุปกรณ์ (Machine) วิธีการทำงาน (Method) และสิ่งแวดล้อมในการปฏิบัติงาน (Environment) ซึ่งจะเห็นได้ว่าทุกประเด็นสามารถนำมาเป็นสาเหตุที่ทำให้มีการใช้พลังงานสูงได้ ดังนั้นเมื่อทราบสาเหตุที่ก่อให้เกิดการใช้พลังงานสูงแล้ว ลำดับถัดไปก็คือ การหามาตรการที่เหมาะสมและมีความเป็นไปได้ ในการลดการใช้พลังงานและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานของกระบวนการผลิตให้เกิดประโยชน์สูงสุด

3.2.1 ลำดับขั้นตอนการดำเนินงาน

ภายหลังจากทำการศึกษาข้อมูลของโรงงานแล้ว เพื่อให้การทำงานเป็นไปตามแผนที่กำหนด เนื่องจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโรงงานน้ำตาลมีช่วงเวลาที่ชัดเจน มีฤดูกาลเก็บเกี่ยวอ้อย และผลิตที่จำกัด ต้องทำงานให้ทันกับเวลา ดังนั้นจึงกำหนดหัวข้อในการปฏิบัติงานได้ดังนี้

- 1) การตรวจวัดประสิทธิภาพหม้อไอน้ำเนื่องจากเป็นเครื่องจักรที่มีนัยสำคัญ
- 2) การสำรวจตรวจวัดหาจุดที่มีการสูญเสียความร้อนในกระบวนการผลิต

3) วิเคราะห์ระบบพลังงานและจัดทำสมดุลพลังงานและมวลทั้งระบบเพื่อหาจุดที่สามารถลดการใช้ไอน้ำได้

4) จัดทำการจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์เพื่อใช้พยากรณ์การใช้ไอน้ำสำหรับโรงงานน้ำตาลแบบดั้งเดิม

3.2.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

การเข้าไปสำรวจ ตรวจสอบ และทำการวิเคราะห์หาสภาพการใช้พลังงานและการสูญเสียพลังงานที่เกิดขึ้นในโรงงาน โดยมีอุปกรณ์เครื่องมือวัดที่ใช้ในการเก็บข้อมูล ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บข้อมูล

| อุปกรณ์และเครื่องมือวัด | ภาพเครื่องมือวัด | ข้อมูลที่เก็บ |
|--|--|--------------------------|
| เครื่องวัดการเผาไหม้ ยี่ห้อ TESTO รุ่น TESTO 330 |  | วัดประสิทธิภาพการเผาไหม้ |
| กล้องกล้องอินฟราเรด ยี่ห้อ TESTO รุ่น TESTO 865 |  | อุณหภูมิผิวของอุปกรณ์ |
| Pressure Gage |  | ความดันที่จุดต่าง ๆ |

ตารางที่ 3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บข้อมูล (ต่อ)

| อุปกรณ์และเครื่องมือวัด | ภาพเครื่องมือวัด | ข้อมูลที่เก็บ |
|--|---|---------------------------------|
| Amp meter / ข้อมูลบันทึก ของโรงงาน ยี่ห้อ METREL รุ่น MI 2883 |  | กำลังไฟฟ้า |
| Flow meter / ข้อมูลบันทึก ของโรงงาน ยี่ห้อ Dynaflo รุ่น DMTF H-12-D |  | อัตราการไหลของไหล |
| Orific flow / ข้อมูลบันทึก ของโรงงาน |  | อัตราการไหลของไอน้ำ |
| Hot Wire Anemometer ยี่ห้อ DIGICON รุ่น DA-47 |  | วัดความเร็วลม |
| เครื่องวัดอุณหภูมิและ ความชื้น ยี่ห้อ PROTOS รุ่น TH-303C |  | อุณหภูมิและความชื้นของ อากาศ |

3.3 การตรวจวัดประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ

การคำนวณประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไอน้ำโดยวิธีทางอ้อม (Indirect method) ดังแสดงในภาคผนวก ก.

คำนวณหาอัตราการใช้เชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดไอน้ำ

$$\dot{m}_f = \% \dot{m}_{Bagasse} \times \dot{m}_{Bagasse} \quad (3.1)$$

คำนวณหาอัตราการผลิตไอน้ำของเครื่องกำเนิดไอน้ำได้จาก

$$\dot{m}_s = \frac{\dot{m}_f (LHV \times \eta_b)}{\Delta h} \quad (3.2)$$

| | | |
|-------|-------------|---|
| เมื่อ | \dot{m}_f | คือ อัตราการใช้เชื้อเพลิงชานอ้อย (tons/day) |
| | \dot{m}_s | คือ อัตราการผลิตไอน้ำของเครื่องกำเนิดไอน้ำ (tons/day) |
| | h_s | คือ เอนทาลปีไอน้ำจากเครื่องกำเนิดไอน้ำ (kJ/kg) |
| | h_w | คือ เอนทาลปีน้ำป้อนเข้าเครื่องกำเนิดไอน้ำ (kJ/kg) |
| | η | คือ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเครื่องกำเนิดไอน้ำ (%) |
| | LHV | คือ ความร้อนจำเพาะเชื้อเพลิงชานอ้อย (kJ/kg) |

(1) วิธีการตรวจวัดประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ

วิธีการตรวจวัดประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำใช้วิธีวัดค่าอุณหภูมิพื้นผิวของหม้อไอน้ำเพื่อคำนวณหาอัตราการสูญเสียความร้อน วัดอุณหภูมิ และองค์ประกอบฟลูแกสออกซิเจน (O₂), คาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ของหม้อไอน้ำเพื่อนำมาคำนวณหาความร้อนสูญเสียที่ปล่องไอเสีย และเก็บจี้เต้าส่งให้ทางบริษัท SGS เพื่อวิเคราะห์หาค่า Unburned Carbon จากนั้นทำการเก็บข้อมูลสถานะของน้ำขาเข้าและไอน้ำขาออกจากหม้อไอน้ำเป็นการคำนวณประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำแบบทางอ้อม ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 การวัดอุณหภูมิผนังหม้อไอน้ำ



รูปที่ 3.5 การเก็บชิ้นส่วนเพื่อส่งวิเคราะห์



รูปที่ 3.6 การวัดอุณหภูมิและองค์ประกอบฟลูแก๊ส ออกซิเจน (O_2), คาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO), คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)

จากการตรวจวัดประสิทธิภาพหม้อไอน้ำพบว่า มีการสูญเสียความร้อนจากการแผ่รังสี และการสูญเสียความร้อนที่ปล่องไอเสียซึ่งมีอุณหภูมิสูงประมาณ $196\text{ }^{\circ}\text{C}$ จึงได้นำการสูญเสียความร้อนมาคำนวณประสิทธิภาพเชิงความร้อนหม้อไอน้ำดังต่อไปนี้

(2) วิธีการคำนวณการประเมินประสิทธิภาพเชิงความร้อนหม้อไอน้ำ

หลักการประเมินประสิทธิภาพหม้อไอน้ำโดยทั่วไปแล้วทำการประเมินตามมาตรฐาน Japanese; JIS B8222 : 1993 Land Boilers and Heat Balance ซึ่งมีรายละเอียดการคำนวณดังนี้

- *Heat-loss Method*

การตรวจวัดประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำได้ทำในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ของปี พ.ศ. 2563 เป็นการตรวจวัดด้วยวิธีทางอ้อมที่เรียกว่า “Heat-loss method” ซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลาย วิธีดังกล่าวนี้เป็นการใส่พลังงานเข้าหม้อไอน้ำ 100% แล้วหักลบการสูญเสียพลังงานต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นออก เช่น จากก๊าซไอเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ จากการเผาไหม้ไม่หมด การสูญเสียจากการแผ่รังสี และจากการโบลด์วอร์น โดยทำการวัดอุณหภูมิผิวหม้อไอน้ำ โดยใช้กล้องอินฟราเรด องค์ประกอบและอุณหภูมิก๊าซเผาไหม้ (ปริมาณก๊าซ O_2 , CO และ CO_2) โดยใช้เครื่องวัดการเผาไหม้ และวัดคาร์บอนที่เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ (เก็บตัวอย่างขี้เถ้า) โดยการส่ง

วิเคราะห์ที่ห้องปฏิบัติการเป็นการตรวจวัดและวิเคราะห์ประสิทธิภาพตามมาตรฐาน JIS B8222 : 1993 ซึ่งการวัดอุณหภูมิผิวหม้อไอน้ำ วัดผนังทั้ง 4 ด้าน คือ ด้านหน้า ด้านข้างทั้งสอง และด้านหลัง จำนวน 3 จุด วัดเป็นกิริตระยะห่างจุดละ 1 เมตร นำค่าเฉลี่ยมาใช้คำนวณการวัดองค์ประกอบ และอุณหภูมิก๊าซเผาไหม้นั้น โดยการนำเครื่องวัดการเผาไหม้วัดที่ปล่องควันของหม้อไอน้ำ ซึ่งผู้ผลิตกำหนดตำแหน่งจุดวัดมาให้ทำการวัดจำนวน 3 จุด และนำค่าเฉลี่ยมาใช้ สำหรับซีเอ็นจะเก็บตัวอย่างที่บริเวณใต้ถังซีเอ็นหนักใต้ห้องเผาไหม้ เก็บใส่ถุงซิบ 0.5 กิโลกรัม จำนวน 10 ถุง ส่งไปวิเคราะห์ตามมาตรฐาน EN 114774 และ EN 14775 ที่ห้องปฏิบัติการ บจก. เอสจีเอส (ประเทศไทย)

เมื่อได้ค่าตรวจวัดแล้วจะนำผลไปคำนวณหาความสูญเสียที่เกิดขึ้น ได้แก่ การสูญเสียทางปล่องไอเสีย (L_1) การสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (L_2) การสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่หมด (L_3) การสูญเสียจากการแผ่รังสี (L_4) และการสูญเสียจากการโบลว์ดาวน์ (L_5) คำนวณได้ตามสมการที่ 3.3 ถึงสมการที่ 3.7 ตามลำดับ

การสูญเสียทางปล่องไอเสีย (Stack loss, L_1)

การสูญเสียทางปล่องไอเสียสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.3

$$L_1 = Gc_g(t_g - t_o) \quad (3.3)$$

| | | |
|--------|-------|--|
| โดยที่ | L_1 | คือ พลังงานที่สูญเสียจากปล่องไอเสีย (kJ/kg) |
| | G | คือ อัตราการไหลของก๊าซไอเสีย (m^3/kg) |
| | c_g | คือ ค่าความจุความร้อนของก๊าซไอเสีย (1.38 kJ/m-K) |
| | t_g | คือ อุณหภูมิก๊าซไอเสีย ($^{\circ}C$) |
| | t_o | คือ อุณหภูมิอากาศ ($^{\circ}C$) |

การสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (CO loss, L_2)

การสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.4

$$L_2 = 126.1[G_o + (m-1)A_o](CO) \quad (3.4)$$

| | | |
|--------|-------|---|
| โดยที่ | L_2 | คือ พลังงานที่สูญเสียจากก๊าซเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (kJ/kg) |
| | m | คือ อัตราส่วนอากาศเกิน |
| | A_o | คือ ปริมาณอากาศโดยทฤษฎี (m^3/kg) |
| | CO | คือ ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (%vol) |

การสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่หมด (Unburned loss, L_3)

การสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่หมดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.5

$$L_3 = 339c_2 \quad (3.5)$$

โดยที่ L_3 คือ พลังงานที่สูญเสียจากก๊าซเผาไหม้ไม่หมด (kJ/kg)
 c_2 คือ ปริมาณก๊าซคาร์บอนที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (%mass)

การสูญเสียจากการแผ่รังสี (Radiation loss, L_4)

การสูญเสียจากการแผ่รังสีสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.6

$$L_4 = (1/100)l_i H_i \quad (3.6)$$

โดยที่ L_4 คือ พลังงานที่สูญเสียจากการแผ่รังสี (kJ/kg)
 l_i คือ เปอร์เซนต์การสูญเสียเนื่องจากการแผ่รังสีจากผนังหม้อไอน้ำ (%)

การสูญเสียจากการโบลด์าวน์ (Blowdown loss, L_5)

การสูญเสียจากการโบลด์าวน์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.7

$$L_5 = \dot{m}_{bd} \frac{(h_{bd} - h_{FW})}{\dot{m}_f} \quad (3.7)$$

โดยที่ L_5 คือ พลังงานที่สูญเสียจากการโบลด์าวน์ (kJ/kg)
 \dot{m}_{bd} คือ อัตราการโบลด์าวน์ (kg/h)
 h_{bd} คือ ค่าเอนทาลปีของน้ำโบลด์าวน์ (kJ/kg)
 h_{FW} คือ ค่าเอนทาลปีน้ำป้อนโบลด์าวน์ (kJ/kg)

ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำคำนวณได้จากสมการที่ 3.8

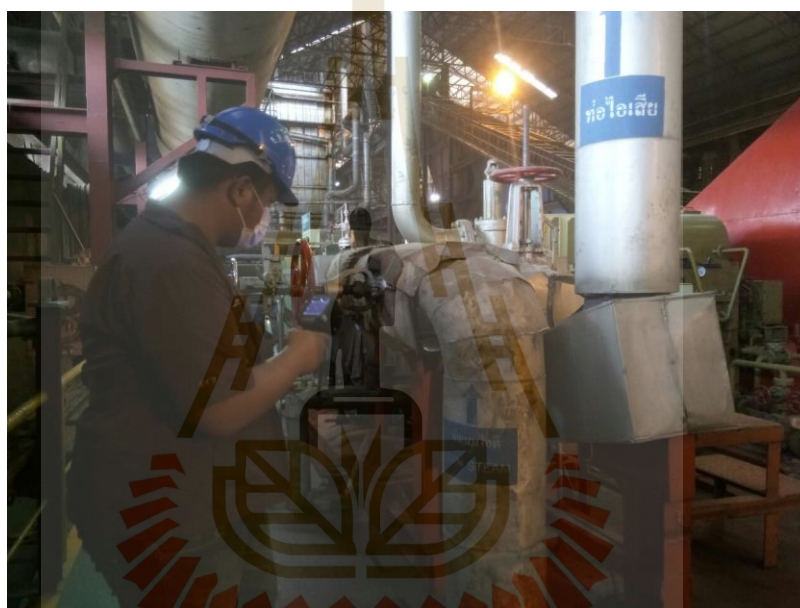
$$\eta_b = \left[1 - \left(\frac{L_1}{H_i + Q} \right) \right] \times 100\% \quad (3.8)$$

โดยที่ L_i คือ ผลรวมพลังงานที่สูญเสียขาออก (kJ/kg)

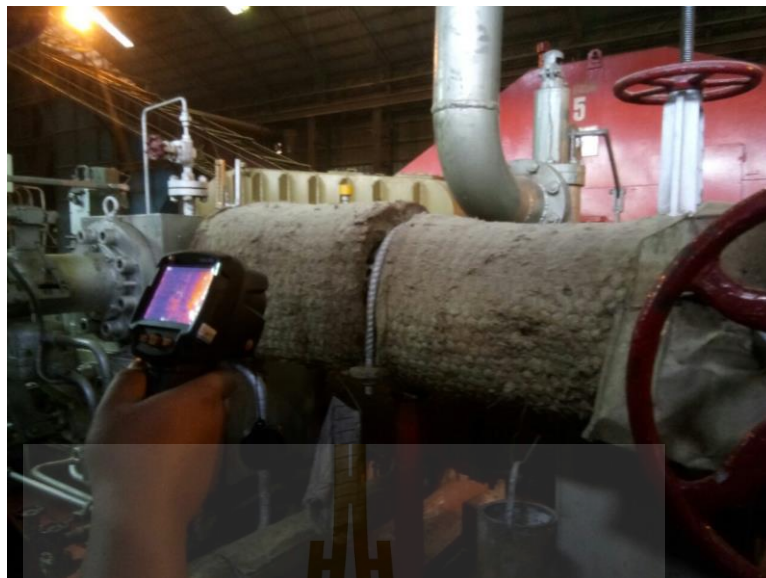
$H_i + Q$ คือ ผลรวมพลังงานที่สูญเสียขาเข้า (kJ/kg)

3.4 การสำรวจตรวจวัดเพื่อหาจุดที่มีการสูญเสียความร้อนในกระบวนการผลิต

การตรวจวัดหาความร้อนที่สูญเสียในทุก ๆ จุดกระบวนการผลิต โดยใช้เกณฑ์อุณหภูมิเฉลี่ยที่วัดได้ต้องไม่เกิน $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ ทำการตรวจวัดท่อไอน้ำแรงดันสูง (Super heat steam) และท่อไอน้ำแรงดันต่ำที่ออกจากกังหันไอน้ำ (Exhaust steam) ดังแสดงในรูปที่ 3.7 และรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.7 การวัดความร้อนสูญเสียจากท่อ Super heat steam



รูปที่ 3.8 การวัดความร้อนสูญเสียจากท่อ Exhaust steam

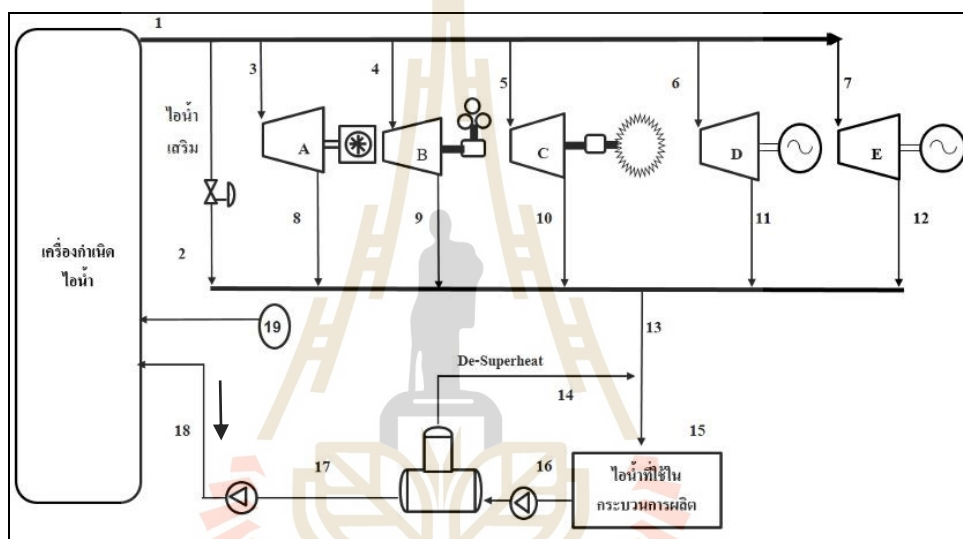
ทำการตรวจวัดถังบรรจุน้ำคอนเดนเสทขนาดใหญ่ ซึ่งเป็นถังเก็บน้ำร้อนที่กลั่นตัวจากกระบวนการต้มระเหยน้ำอ้อย Effect ที่ 1 ส่งมาเพื่อเตรียมที่จะส่งป้อนเข้าหม้อไอน้ำของโรงงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 การวัดความร้อนสูญเสียจากถังเก็บน้ำคอนเดนเสท

3.5 การวิเคราะห์ระบบพลังงานและการสมดุลพลังงาน

หลักการวิเคราะห์อัตราการการผลิตและอัตราการใช้พลังงานที่สามารถทราบทั้งระบบได้ คือ การจัดทำการสมดุลพลังงานและมวลที่เกิดขึ้นในระบบ แสดงดังรูปที่ 3.10 ซึ่งจะมีการกำหนดสถานะต่าง ๆ ของระบบตั้งแต่ สถานะที่ 1 ไปจนถึง สถานะที่ 19 โดยจะทราบความดันได้จาก Pressure gage และอุณหภูมิ ได้จาก Thermo couple หรือ RTD ที่ถูกติดตั้งไว้จุดต่าง ๆ จะสามารถค่าเอนทาลปี ในสถานะต่าง ๆ ได้ ส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของไอน้ำสามารถรู้ได้จาก Orifice flow และอัตราการไหลเชิงมวลของของเหลวรู้ได้จาก Flow meter



รูปที่ 3.10 แผนผังการสมดุลพลังงานและมวลทั้งระบบ

3.5.1 การวิเคราะห์การใช้พลังงานส่วนกระบวนการผลิตน้ำตาล

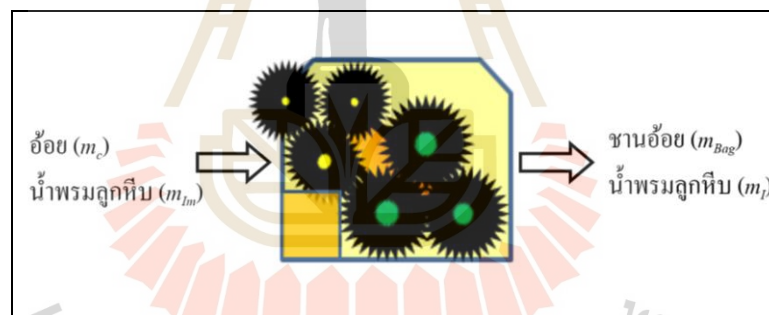
ระบบการผลิตแบ่งเป็น 4 กระบวนการ ซึ่งประกอบด้วย (1) กระบวนการหีบอ้อย (2) กระบวนการต้มน้ำตาล (3) กระบวนการเคี้ยวน้ำตาล และ (4) กระบวนการปั่นน้ำตาล ซึ่งทั้ง 4 กระบวนการใช้พลังงานในรูปแบบต่าง ๆ ดังนี้

1) การวิเคราะห์การใช้พลังงานในกระบวนการหีบอ้อย

การหีบอ้อยเป็นกระบวนการแรกของการวิเคราะห์สมดุลมวลและพลังงาน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงมวลในระบบ โดยมีมวลขาเข้าคือ อ้อย และน้ำพรมลูกหีบ มวลขาออกคือน้ำอ้อยผสม (mix juice) และขานอ้อย และมีพลังงานความร้อนเป็นตัวขับเคลื่อนเครื่องจักร ในขั้นตอนการวิเคราะห์กระบวนการหีบอ้อย มีวัตถุประสงค์เพื่อหาปริมาณน้ำอ้อยผสม และปริมาณของขานอ้อย ที่ออกจากเครื่องจักรลูกหีบอ้อย แสดงดังรูปที่ 3.11 และรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.11 เครื่องจักรลูกหีบอ้อย



รูปที่ 3.12 กระบวนการทำงานของลูกหีบ

ตารางที่ 3.2 ปัจจัยในการคำนวณชุดลูกหีบ

| ขาเข้า (Input) | ขาออก (Output) |
|---|---|
| 1) ปริมาณอ้อยเข้าหีบ (ตัน/วัน), (\dot{m}_c) | 1) ปริมาณน้ำอ้อยผสม, (\dot{m}_j) |
| 2) เปอร์เซ็นต์ชานอ้อยที่ได้, (%Bag) | 2) ปริมาณชานอ้อย, (\dot{m}_{Bag}) |
| 3) เปอร์เซ็นต์น้ำพรมลูกหีบ, (%Im) | 3) ปริมาณน้ำพรมลูกหีบ, (\dot{m}_{lm}) |
| 4) ชั่วโมงการนำอ้อยเข้าหีบ | - |

สมดุลมวลแสดงดังสมการที่ 3.9

มวลเข้า = มวลออก

$$\text{ปริมาณอ้อยเข้าหีบ} + \text{น้ำพรหมลูกหีบ} = \text{ประมาณชานอ้อยที่ได้} + \text{น้ำอ้อยที่ได้} \quad (3.9)$$

สามารถคำนวณหาปริมาณชานอ้อยได้จากสมการที่ 3.10

$$\dot{m}_{Bag} = \dot{m}_C (\%Bag) \quad (3.10)$$

เมื่อ \dot{m}_{Bag} คือ อัตราการไหลชานอ้อยออกลูกหีบ (tons/day)
 \dot{m}_C คือ อัตราการหีบอ้อยเข้า (tons/day)
 $\%Bag$ คือ เปอร์เซ็นต์ชานอ้อยต่ออ้อยที่หีบ (%)

สามารถคำนวณหาปริมาณน้ำพรหมลูกหีบได้จากสมการที่ 3.11

$$\dot{m}_{Im} = \dot{m}_C (\%Im/100) \quad (3.11)$$

เมื่อ \dot{m}_{Im} คือ อัตราการไหลน้ำพรหมลูกหีบ (tons/day)
 $\%Im$ คือ เปอร์เซ็นต์น้ำพรหมลูกหีบที่ใช้ (%)
 \dot{m}_j คือ อัตราการไหลน้ำพรหมลูกหีบ (tons/day)

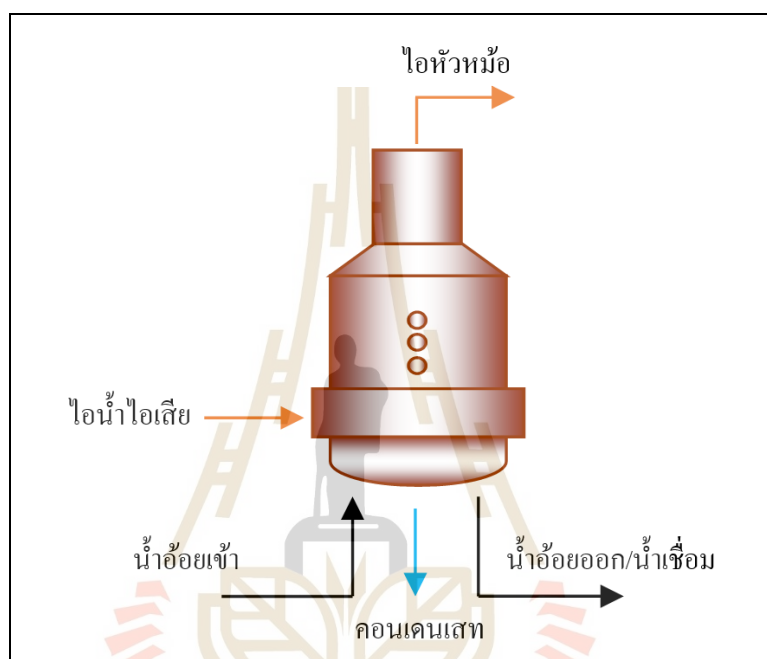
จากสมดุลมวลและพลังงานสามารถคำนวณหาปริมาณน้ำอ้อยผสมได้จากสมการที่ 3.12

$$\dot{m}_j = \dot{m}_C + \dot{m}_{Im} - \dot{m}_{Bag} \quad (3.12)$$

เมื่อ \dot{m}_j คือ อัตราการไหลน้ำพรหมลูกหีบ (tons/day)
 \dot{m}_C คือ อัตราการหีบอ้อยเข้า (tons/day)
 \dot{m}_{Im} คือ อัตราการไหลน้ำพรหมลูกหีบ (tons/day)
 \dot{m}_{Bag} คือ อัตราการไหลชานอ้อยออกลูกหีบ (tons/day)

2) การวิเคราะห์การใช้พลังงานในกระบวนการหม้อต้มระเหย

การวิเคราะห์หาปริมาณน้ำเชื่อมที่ได้และปริมาณการใช้ไอน้ำเพื่อให้ความร้อนในการต้มระเหยน้ำอ้อยให้กลายเป็นน้ำเชื่อมแก่หม้อต้มระเหยแต่ละผลกระทบ โดยหม้อต้มระเหยที่ได้ศึกษามีจำนวน 4 Effect หม้อต้มระเหย Effect ที่ 1 ใช้ไอน้ำเสียจากกังหันไอน้ำ และหม้อต้มระเหย Effect ที่ 2, 3 และ 4 จะใช้ไอน้ำหัวหม้อจากหม้อต้มระเหย Effect ก่อนหน้า



รูปที่ 3.13 กระบวนการต้มระเหย

ตารางที่ 3.3 ปัจจัยในการคำนวณชุดหม้อต้มระเหย

| ขาเข้า (Input) | ขาออก (Output) |
|---|----------------------------------|
| 1) อุณหภูมิไอน้ำเข้าหม้อต้มระเหย | 1) อัตราการใช้ไอน้ำ |
| 2) อุณหภูมิ น้ำอ้อยผสม | 2) น้ำเชื่อมที่ได้จากการต้มระเหย |
| 3) ค่า Brix ของน้ำอ้อยผสมขาเข้าแต่ละผลกระทบ | 3) ปริมาณไอหัวหม้อ |
| 4) ค่า Purity ของน้ำอ้อยผสมแต่ละผลกระทบ | |
| 5) ค่า Brix ของน้ำอ้อยผสมขาออกแต่ละผลกระทบ | |
| 6) ความดันไอน้ำที่ทางออกผลกระทบสุดท้าย | |

จากรูปกระบวนการต้มระเหยน้ำอ้อยจะเห็นได้ว่า ของไหลที่เข้าไปยังกระบวนการมี 2 ชนิด คือ ไอน้ำเสียจากกังหันไอน้ำ และน้ำอ้อยที่ผ่านอุ่นและพักใสมากแล้ว เมื่อไอน้ำทำการแลกเปลี่ยนความร้อนให้แก่ น้ำอ้อยจะทำให้มีการระเหยไอน้ำออกจากน้ำอ้อยเรียกว่า “ไอหัวหม้อ (Bleeding)” เมื่อมีการระเหยของไอน้ำออกไปจะทำให้ น้ำอ้อยจะมีความหนืดมากขึ้นจะเรียกว่า “น้ำเชื่อม (Syrup)” และไอน้ำเสียจะกลับเข้าสู่กระบวนการคอนเดนเสท ดังนั้นจึงสามารถคำนวณหาอัตราการผลิตน้ำเชื่อมได้จากสมการที่ดังต่อไปนี้

$$\dot{m}_{j,o} = \frac{\dot{m}_{j,i} Bx_i}{Bx_o} \quad (3.13)$$

ซึ่งสามารถหาปริมาณของ ไอหัวหม้อที่เกิดขึ้นได้จากสมการที่ 3.14

$$\dot{m}_v = \dot{m}_{j,i} - \dot{m}_{j,o} \quad (3.14)$$

สามารถคำนวณปริมาณไอน้ำที่หม้อต้มระเหยต้องการได้จากสมการที่ 3.15

$$\dot{m}_{evap} = \frac{\dot{m}_v h_v + \dot{m}_{j,o} C_{p,j,o} T_{j,o} - \dot{m}_{j,i} C_{p,j,i} T_{j,i}}{\eta_{Evap} \times h_{fg @ T_{Evap}}} \quad (3.15)$$

และ (Albert Bartens, 1995)

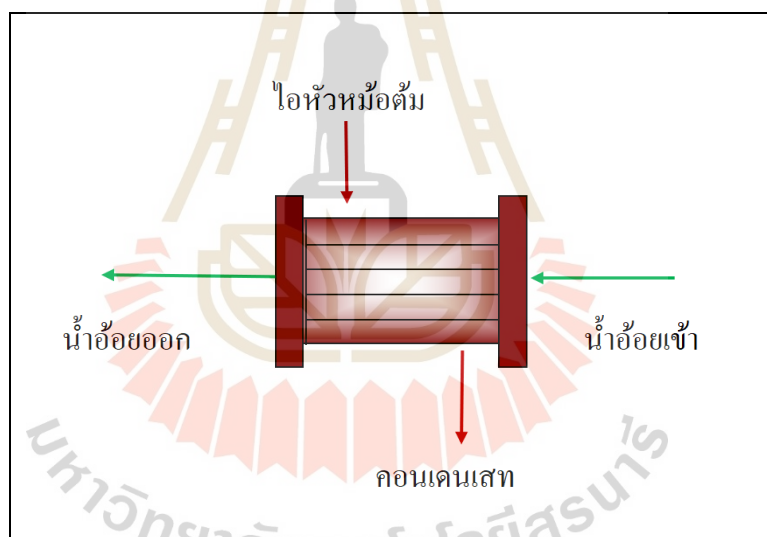
$$C_{p,ji} = 4.1868 - (Bx)(0.0297 - 4.6 \times 10^{-5} P) + (7.5 \times 10^{-5})(Bx)(T) \quad (3.16)$$

| | | |
|-------|---------------------|---|
| เมื่อ | \dot{m}_{evap} | คือ อัตราการใช้ไอน้ำของหม้อต้ม (tons/day) |
| | \dot{m}_v | คือ อัตราการไหลของไอหัวหม้อต้ม (tons/day) |
| | $\dot{m}_{j,i}$ | คือ อัตราการไหลของน้ำอ้อยเข้าหม้อต้ม (tons/day) |
| | $\dot{m}_{j,o}$ | คือ อัตราการไหลของน้ำอ้อยออกหม้อต้ม (tons/day) |
| | $T_{j,i}$ | คือ อุณหภูมิ น้ำอ้อยเข้าหม้อต้ม (°C) |
| | $T_{j,o}$ | คือ อุณหภูมิ น้ำอ้อยออกหม้อต้ม (°C) |
| | $h_{fg @ T_{Evap}}$ | คือ ความร้อนแฝงไอน้ำเข้าหม้อต้ม (kJ/kg-°C) |

| | |
|------------|--|
| Bx_i | คือ ความเข้มข้นน้ำอ้อยเข้าหม้อต้ม ($^{\circ}\text{Bx}$) |
| Bx_o | คือ ความเข้มข้นน้ำอ้อย/น้ำเชื่อมออกหม้อต้ม ($^{\circ}\text{Bx}$) |
| $C_{pj,i}$ | คือ ความจุความร้อนน้ำอ้อยเข้าหม้อต้ม ($\text{kJ/kg-}^{\circ}\text{C}$) |
| $C_{pj,o}$ | คือ ความจุความร้อนน้ำอ้อยออกหม้อต้ม ($\text{kJ/kg-}^{\circ}\text{C}$) |
| P | คือ ความบริสุทธิ์ของน้ำอ้อย/น้ำเชื่อม (%) |

3) การวิเคราะห์การใช้พลังงานในกระบวนการอุ่นน้ำอ้อย

ในกระบวนการอุ่นน้ำอ้อยนั้นจะเป็นการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำอ้อยผสมก่อนที่จะส่งเข้ากระบวนการทำน้ำอ้อยใส เพื่อให้ได้การพักใสที่มีประสิทธิภาพจึงต้องทำการกำหนดอุณหภูมิ น้ำอ้อย และการอุ่นน้ำอ้อยก่อนเข้าหม้อต้มระเหยเพื่อที่จะลดการใช้พลังงานความร้อนในการต้มระเหยน้ำให้น้ำอ้อยผสม จึงถือได้ว่าการอุ่นน้ำอ้อยเป็นการประหยัดพลังงานอีกวิธีหนึ่ง



รูปที่ 3.14 กระบวนการอุ่นน้ำอ้อย

ตารางที่ 3.4 ปัจจัยในการคำนวณชุดหม้อต้มอุ่นน้ำอ้อย

| ขาเข้า (Input) | ขาออก (Output) |
|--|-------------------------|
| 1) อุณหภูมิไอหัวหม้อเข้า-ออกหม้ออุ่น 2) อุณหภูมิน้ำอ้อยผสมเข้าออกหม้ออุ่น 3) ค่า Brix ของน้ำอ้อยผสมขาเข้า 4) ค่า Purity ของน้ำอ้อยผสมขาเข้า-ออก 5) ค่า Brix ของน้ำอ้อยผสมขาออก | 1) อัตราการใช้ไอหัวหม้อ |

คำนวณหาอัตราการใช้ไอหัวหม้อของหม้ออุ่นน้ำอ้อยได้จากสมมูลมวลและพลังงาน
จะได้ว่า

$$\dot{m}_{vh,j} = \frac{\dot{m}_j C_{p_j} (T_{j,o} - T_{j,i})}{\eta_{Heater} \times h_{fg@T_{Heater}}} \quad (3.17)$$

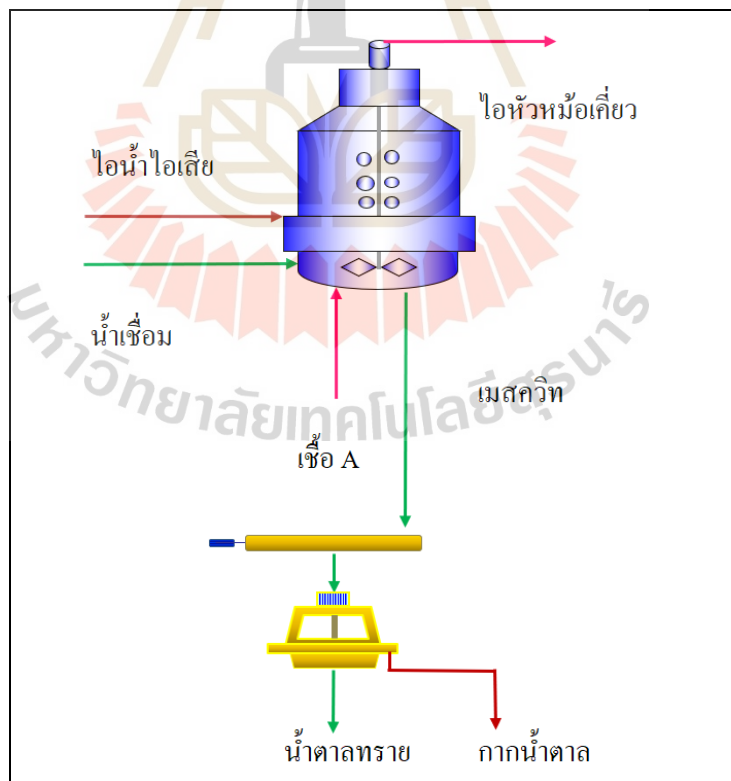
| | | |
|-------|---------------------|--|
| เมื่อ | $\dot{m}_{vh,j}$ | คือ อัตราการไหลของไอน้ำเข้าหม้ออุ่น (tons/day) |
| | \dot{m}_j | คือ อัตราการไหลของน้ำอ้อยเข้าหม้ออุ่น (tons/day) |
| | $T_{j,i}$ | คือ อุณหภูมิน้ำอ้อยเข้าหม้ออุ่น (°C) |
| | $T_{j,o}$ | คือ อุณหภูมิน้ำอ้อยออกหม้ออุ่น (°C) |
| | $h_{fg@T_{Heater}}$ | คือ ความร้อนแฝงไอน้ำเข้าหม้ออุ่น (kJ/kg °C) |
| | C_{p_j} | คือ ความจุความร้อนน้ำอ้อยเข้าหม้ออุ่น (kJ/kg °C) |

4) การวิเคราะห์การใช้พลังงานในกระบวนการเคี้ยวและปั่นน้ำตาล

กระบวนการหาปริมาณน้ำตาลทรายดิบที่เกิดขึ้นและอัตราการใช้ไอหัวหม้อที่มาจากหม้อต้มระเหย Effect ที่ 1 เพื่อวิเคราะห์ความต้องการใช้ไอน้ำที่เพียงพอกับกระบวนการเคี้ยว ซึ่งทำการวิเคราะห์สมมูลมวลและพลังงาน ดังรูปที่ 3.15 และรูปที่ 3.16 โดยแสดงให้เห็นถึงหม้อเคี้ยวน้ำตาล และกระบวนการเคี้ยวน้ำตาล ตามลำดับ



รูปที่ 3.15 หม้อเคี้ยวน้ำตาล



รูปที่ 3.16 กระบวนการเคี้ยวน้ำตาล

ตารางที่ 3.5 ปัจจัยในการคำนวณชุดหม้อเคี้ยวและปั่นน้ำตาล

| ขาเข้า (Input) | ขาออก (Output) |
|---|---|
| 1) อุณหภูมิไอหัวหม้อเข้า-ออกหม้ออุ่น | 1) อัตราการใช้ไอหัวหม้อ, $\dot{m}_{Evaporated}$ |
| 2) อุณหภูมิน้ำอ้อยผสมเข้าออกหม้ออุ่น | 2) ปริมาณน้ำตาลทรายดิบที่ผลิตได้, $\dot{m}_{A,Sugar}$ |
| 3) ค่า Brix ของน้ำเชื่อมขาเข้า Bx_{Syrup} | 3) ปริมาณแมสคิวทิตที่เกิดขึ้น, \dot{m}_{massA} |
| 4) ค่า Brix ของแมสคิวทิตขาออก, Bx_{massA} | |
| 5) เปอร์เซ็นต์ผลึกแมสคิวทิต, (Crystal%massecuite A) | |

การคำนวณหาปริมาณแมสคิวทิตเมื่อพิจารณาจากสมดุลมวลและพลังงานของหม้อเคี้ยวน้ำตาลจะได้ว่า

$$\dot{m}_{mass} = \frac{\dot{m}_{syrup} Bx_{syrup}}{Bx_{mass}} \quad (3.18)$$

เมื่อทราบอัตราการไหลของแมสคิวทิตสามารถคำนวณหาปริมาณน้ำตาลได้จากสมการที่ 3.19

$$\dot{m}_{sugar} = \dot{m}_{mass} (Crystal\%mass) \quad (3.19)$$

จากสมดุลมวลและพลังงานสามารถคำนวณหาอัตราการระเหยของไอน้ำจากหม้อเคี้ยวได้จากสมการที่ 3.20

$$\dot{m}_{Evaporated} = \dot{m}_{Syrup} - \dot{m}_{Maa,A} \quad (3.20)$$

อัตราการใช้น้ำในการเคี้ยวน้ำตาลคำนวณจากการสมดุลพลังงานได้จากสมการดังนี้

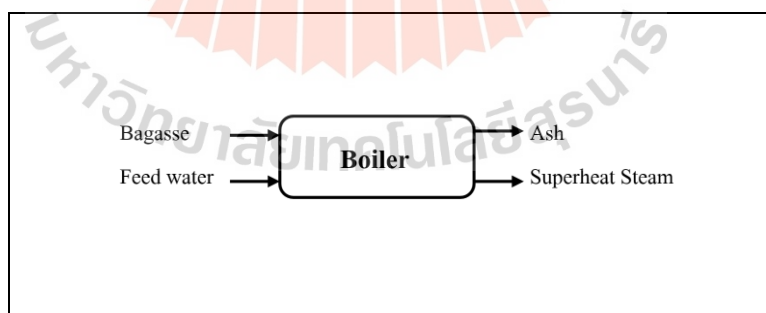
$$\dot{m}_{vp} = \frac{\dot{m}_v h_v + (\dot{m} Cp T)_{mass} - (\dot{m} Cp T)_{syrup}}{\eta_{vp} \times h_{fg@T_{vp}}} \quad (3.21)$$

| | | |
|-------|-------------------|---|
| เมื่อ | \dot{m}_{syrup} | คือ อัตราการไหลน้ำเชื่อมเข้าหม้อเคี้ยว (tons/day) |
| | Bx_{mass} | คือ ความเข้มข้นน้ำเชื่อมเข้าหม้อเคี้ยว ($^{\circ}Bx$) |
| | Bx_{syrup} | คือ ความเข้มข้นแมสตีควิทออกหม้อเคี้ยว ($^{\circ}Bx$) |
| | \dot{m}_{sugar} | คือ อัตราการไหลน้ำตาลทราย (tons/day) |
| | $Crystal\%mass$ | คือ เปอร์เซ็นต์การเกิดผลึกน้ำตาล (%) |
| | \dot{m}_{vp} | คือ อัตราการใช้น้ำของหม้อต้ม (tons/day) |
| | T_{mass} | คือ อุณหภูมิแมสตีควิท ($^{\circ}C$) |
| | T_{syrup} | คือ อุณหภูมิน้ำเชื่อม ($^{\circ}C$) |
| | $h_{fg@VP}$ | คือ ความร้อนแฝงไอน้ำเข้าหม้อเคี้ยวที่อุณหภูมิหม้อเคี้ยว ($kJ/kg-^{\circ}C$) |
| | Cp_{mass} | คือ ความจุความร้อนของแมสตีควิท ($kJ/kg-^{\circ}C$) |
| | Cp_{syrup} | คือ ความจุความร้อนของน้ำเชื่อม ($kJ/kg-^{\circ}C$) |

3.5.2 การวิเคราะห์การใช้พลังงานส่วนกระบวนการผลิตไฟฟ้า

1) การวิเคราะห์การใช้พลังงานของหม้อไอน้ำ

เครื่องกำเนิดไอน้ำมีหน้าที่ผลิตไอน้ำเพื่อส่งไปยังกระบวนการที่ใช้พลังงานด้านความร้อน โดยการผลิตไอน้ำใช้พลังงานความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง ซึ่งเชื้อเพลิงที่ใช้คือ กากอ้อยจากการหีบเพื่อลดค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิง ดังนั้นจึงทราบอัตราการผลิตไอน้ำได้จากอัตราการใช้เชื้อเพลิง



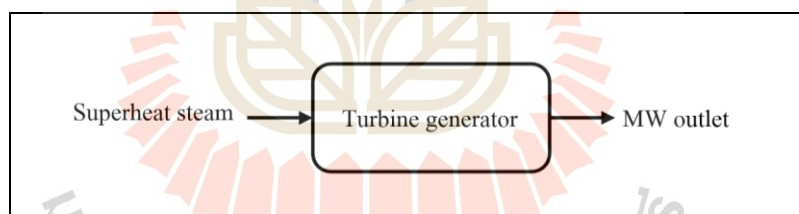
รูปที่ 3.17 กระบวนการผลิตไอน้ำ

ตารางที่ 3.6 ปัจจัยในการคำนวณอัตราการผลิตไอน้ำ

| ขาเข้า (Input) | ขาออก (Output) |
|---|--|
| 1) ประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ 2) ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง, LHV 3) สภาพของไอน้ำ 4) สภาพของน้ำป้อน 5) % อัตราการใช้เชื้อเพลิง, $\%m_{Bagasse}$ | 1) อัตราการผลิตไอน้ำ, m_s 2) อัตราการใช้เชื้อเพลิง, m_f |

2) การวิเคราะห์การใช้พลังงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

Turbine generator เป็นผลิตกระแสไฟฟ้าเพื่อส่งจ่ายให้แก่กระบวนการผลิตน้ำตาล และส่งขายให้กับทางไฟฟ้า ซึ่งกังหันไอน้ำจะเป็นตัวส่งกำลังจากแหล่งพลังงานคือ ไอน้ำ ความดันสูง ส่งผลให้เพลลาที่เชื่อมต่ออยู่กับกังหันเกิดการหมุนและขับเคลื่อนที่ต้องการนั้น ๆ เมื่อไอน้ำความดันสูงที่ผ่านกังหันแล้วจะกลายเป็นไอน้ำเสีย (Exhaust steam) ที่พลังงานลดลงจะถูกส่งไปยังกระบวนการต้มระเหยน้ำอ้อยผสม



รูปที่ 3.18 กระบวนการผลิตไฟฟ้า

ตารางที่ 3.7 ปัจจัยในการคำนวณเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

| ขาเข้า (Input) | ขาออก (Output) |
|--------------------|-------------------------|
| 1) ไอน้ำเข้ากังหัน | 2) กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ |

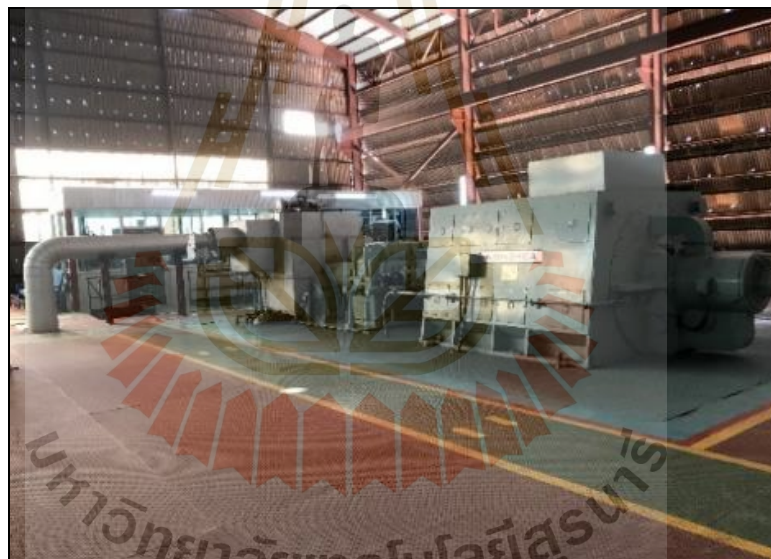
การผลิตไฟฟ้าใช้กังหันไอน้ำชนิด Backpressure ขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 2 ชุด ขนาด 9 MW สำหรับผลิตไฟฟ้าใช้ในโรงงาน (รูปที่ 3.19) และขนาด 12 MW สำหรับผลิตไฟฟ้าจำหน่ายแก่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค แบบ 1 Feeder ไม่เกิน 8 MW แรงดัน 22 kV (รูปที่ 3.20)

อัตราการใช้น้ำของกังหันไอน้ำขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 9 MW และขนาด 12 MW คำนวณได้ตามสมการที่ 3.22 และสมการที่ 3.23 ตามลำดับ ซึ่งเป็นสมการสมรรถนะจากผู้ผลิต

$$\dot{m}_s = 27 + 0.0068P_e \quad (3.22)$$

$$\dot{m}_s = 23 + 0.0071P_e \quad (3.23)$$

เมื่อ \dot{m}_s คือ อัตราการไหลไอน้ำเข้ากังหัน (tons/day)
 P_e คือ กำลังไฟฟ้าที่ผลิต (kW)



รูปที่ 3.19 กังหันขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 9 MW



รูปที่ 3.20 กังหันขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 12 MW

3.6 กำหนดมาตรการประหยัดพลังงานในโรงงาน

จากการวิเคราะห์หาค่าดัชนีสมรรถนะการใช้พลังงานข้างต้นทำให้ทราบถึงรูปแบบของพลังงานที่มีการใช้พลังงานสูง และนำรูปแบบพลังงานที่ได้มาพิจารณหาเครื่องจักรหรืออุปกรณ์ที่มีนัยสำคัญในการใช้พลังงานเพื่อนำมาหามาตรการที่เป็นไปได้ รวมถึงเทคโนโลยีในการลดการใช้พลังงาน โดยการจัดการใช้พลังงานให้เหมาะสม และเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานของกระบวนการผลิตให้เกิดประโยชน์สูงสุด โดยไม่มีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตและไม่ทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนแปลงไป

เมื่อเข้าไปสำรวจและทำการเก็บบันทึกข้อมูลต่าง ๆ เพื่อนำข้อมูลที่ได้เหล่านี้ไปคำนวณหาพลังงานที่สามารถประหยัดได้ จากทฤษฎีการวิเคราะห์ระบบความร้อนทั่วไป โดยเปรียบเทียบพลังงานก่อนดำเนินการกับพลังงานที่ได้จากการประเมินภายหลังดำเนินการตามมาตรการดังกล่าว ในการลดการใช้พลังงานหรือลดการสูญเสียเชื้อเพลิงลง เพื่อปรับปรุงการใช้พลังงานและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน ณ ปัจจุบันของกระบวนการผลิตให้เกิดประโยชน์สูงสุดและส่งผลให้กระบวนการผลิตมีค่าใช้จ่ายของต้นทุนในการผลิต และต้นทุนด้านพลังงานลดลง

มาตรการอนุรักษ์พลังงานที่จะเสนอแนะให้แก่โรงงานน้ำตาลทรายขาวเริ่มอุดม จังหวัดอุดรธานี และโรงงานน้ำตาลอื่น ๆ ที่เป็นลักษณะโรงงานน้ำตาลแบบดั้งเดิมในประเทศไทย และใช้ระดับแรงดันไอน้ำใกล้เคียงกัน เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ พร้อมการคำนวณผลประหยัดที่ได้ ตลอดจนเงินลงทุนโดยประมาณ และกำหนดหาระยะเวลาดำเนินทุน

จากการตรวจวัดประสิทธิภาพหม้อไอน้ำสามารถกำหนดได้ 2 มาตรการ ได้แก่ มาตรการที่ 1 การติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำป้อน และมาตรการที่ 2 การติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมการโบว์ควันอัตโนมัติ ซึ่งทั้ง 2 มาตรการสามารถเพิ่มประสิทธิภาพหม้อไอน้ำเช่นกัน จากการสำรวจตรวจวัดความร้อนที่สูญเสียของอุปกรณ์ในกระบวนการผลิต สามารถกำหนดมาตรการได้ 1 อย่าง คือ มาตรการหุ้มฉนวนอุปกรณ์ที่ใช้ความร้อน ซึ่งกำหนดให้เป็นมาตรการที่ 3 และจากการทำสมดุลพลังงานและมวลในกระบวนการผลิต สามารถที่กำหนดมาตรการลดการใช้ไอน้ำลงได้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ไอน้ำในกระบวนการผลิต กำหนดให้เป็นมาตรการที่ 4 ซึ่งมาตรการดังกล่าวมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.6.1 การติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำป้อน

จากการศึกษาความร้อนสูญเสียและประสิทธิภาพพลังงานของหม้อไอน้ำในภาคผนวก ก. พบว่า ความสูญเสียที่มีสัดส่วนสูงที่สุดคือ ความร้อนสูญเสียจากก๊าซไอเสีย นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิของก๊าซเผาไหม้ค่อนข้างสูงมาก ดังนั้นมาตรการแรกที่จะเสนอจึงเป็นการติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำป้อน ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่นำเอาความร้อนสูญเสียของก๊าซไอเสียกลับมาใช้แลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อเพิ่มอุณหภูมิของน้ำป้อน ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ รายละเอียดของมาตรการเป็นดังนี้

1) การคำนวณออกแบบเครื่องอุ่นน้ำป้อน

สำหรับการคำนวณออกแบบเพื่อกำหนดขนาดของเครื่องอุ่นน้ำป้อน จำเป็นต้องเก็บข้อมูลอุณหภูมิของน้ำป้อน และอุณหภูมิของก๊าซเผาไหม้ ซึ่งพบว่าอยู่ที่ 105 °C และอุณหภูมิของก๊าซเผาไหม้อยู่ที่ 196 °C หลังจากนั้นทำการคำนวณหา Log Mean Temperature Difference, LMTD โดยใช้สมการที่ 3.24 และเงื่อนไขในการคำนวณแสดงในตารางที่ 3.8 จากนั้นทำการคำนวณหาการถ่ายเทความร้อนของเครื่องอุ่นน้ำป้อน (Q_{ECO}) โดยใช้สมการที่ 3.25 และพื้นที่การแลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องอุ่นน้ำป้อน (A_o) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.26

ตารางที่ 3.8 เงื่อนไขในการคำนวณหาขนาดเครื่องอุ่นน้ำป้อน

| ตัวแปร | อักษรย่อ | หน่วย |
|---|-------------------|-------------------------|
| สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม | U_o | W. (m ⁻² °C) |
| Log Mean Temperature Difference (LMTD) | $\Delta T_{l.m.}$ | °C |
| อุณหภูมิน้ำเข้าเครื่องอุ่นน้ำป้อน (จากการตรวจวัด) | T_{g1} | °C |
| อุณหภูมิน้ำออกเครื่องอุ่นน้ำป้อน (ค่าออกแบบ) | T_{g2} | °C |

$$\Delta T_{l.m.} = \frac{\Delta T_i - \Delta T_e}{\ln\left(\frac{\Delta T_i}{\Delta T_e}\right)} \quad (3.24)$$

โดยที่ $\Delta T_{l.m.}$ คือ Log Mean Temperature Difference, LMTD ($^{\circ}\text{C}$)

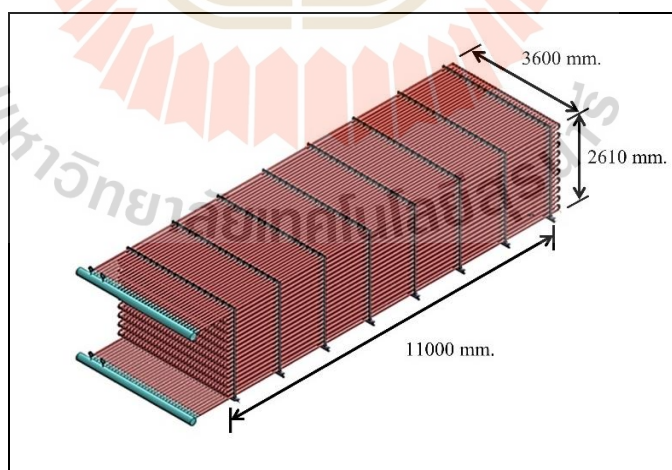
ΔT_i คือ อุณหภูมิแตกต่างระหว่างน้ำป้อนและก๊าซเผาไหม้ ($^{\circ}\text{C}$)

ΔT_e คือ อุณหภูมิแตกต่างระหว่างอุณหภูมิน้ำขาออกเครื่องอุ่นน้ำป้อนและอุณหภูมิ
ก๊าซเผาไหม้ที่ออกจากเครื่องอุ่นน้ำป้อน

$$Q_{ECO} = \dot{m}_s c_g (t_{g1} - t_{g2}) = U_o A_o \Delta T_{l.m.} \quad (3.25)$$

$$A_o = \frac{\dot{Q}_{ECO}}{U_o \Delta T_{l.m.}} \quad (3.26)$$

จากข้อมูลที่ทำการบันทึกตามภาคผนวก ค. และการคำนวณตามสมการที่ 3.24 ถึงสมการที่ 3.26 จะสามารถออกแบบเครื่องอุ่นน้ำป้อนได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.21 หลังจากนั้นจะสามารถคำนวณหาประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำหลังติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำป้อนได้จากสมการที่ 3.27



รูปที่ 3.21 ลักษณะของเครื่องอุ่นน้ำป้อนที่ได้รับการออกแบบ

$$\eta = \frac{\dot{m}_s (h_s - h_w)}{(Q_{old} - Q_{ECO})} \quad (3.27)$$

โดย h_s คือ ค่าเอนทัลปีของไอน้ำ (kJ/kg)
 h_w คือ ค่าเอนทัลปีของน้ำป้อน (kJ/kg)
 Q_{old} คือ ความร้อนที่ให้หม้อไอน้ำก่อนการติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำป้อน (kJ/kg)

ในการคำนวณหาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์จะต้องคำนวณหาปริมาณเชื้อเพลิงที่ประหยัดได้โดยใช้สมการที่ 3.28 และหลังจากนั้นจะทำการคำนวณหาปริมาณไอน้ำที่ผลิตได้จากเชื้อเพลิงดังกล่าวจากสมการที่ 3.29 ไอน้ำที่ผลิตได้ดังกล่าวจะสามารถนำไปประเมินหาปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้ โดยใช้ข้อมูลจากคู่มือของกังหันไอน้ำและเครื่องกำเนิดไฟฟ้ายี่ห้อ SHINKO ขนาด 9 MW โดยกำหนดราคาขายไฟฟ้าหน่วยละ 4.2 บาท ซึ่งทั้งหมดจะสามารถนำไปคำนวณหาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ได้

$$\dot{m}_f = \frac{Q_{ECO}}{LHV} \quad (3.28)$$

โดยที่ \dot{m}_f คือ อัตราการป้อนเชื้อเพลิง (ชานอ้อย) (kg/s)
 LHV คือ ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง (ชานอ้อย) (J/kg)

$$m_s = \frac{\dot{m}_f \times \eta \times LHV}{h_s - h_w} \quad (3.29)$$

3.6.2 การควบคุมอัตราน้ำโบลว์ดาวน์

การโบลว์ดาวน์ (Blowdown) เป็นการสูญเสียพลังงานหม้อไอน้ำที่สำคัญอีกอย่างหนึ่ง รองจากการสูญเสียไปกับฟลูแก๊ส จากผลการศึกษาประสิทธิภาพพลังงานของหม้อไอน้ำยังพบว่า สามารถลดความร้อนสูญเสียให้กับหม้อไอน้ำได้อีก คือ การสูญเสียจากการโบลว์ดาวน์ (L5) การควบคุมการโบลว์ดาวน์สามารถทำได้โดยการควบคุมค่าของแข็งแขวนลอยและแร่ธาตุต่าง ๆ ที่เจือปนอยู่เรียกว่า “TDS (Total Dissolved Solids)” หรือควบคุมค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) ของน้ำในหม้อไอน้ำแทน สามารถคำนวณจากสมการดังนี้

$$R_{BD} = \frac{TDS_W}{TDS_B - TDS_W} \quad (3.30)$$

หรือ

$$R_{BD} = \frac{Con_W}{Con_B - Con_W} \quad (3.31)$$

$$\dot{m}_{BD} = \dot{m}_W \times \frac{R_{BD}}{1 - R_{BD}} \quad (3.32)$$

| | | |
|-----|----------------|--|
| โดย | \dot{m}_{BD} | คือ อัตราน้ำโบลัวคาวน์ (ton/hr) |
| | \dot{m}_W | คือ อัตราน้ำป้อน (ton/hr) |
| | R_{BD} | คือ สัดส่วนการ โบลัวคาวน์ |
| | TDS_W | คือ ค่า TDS ของน้ำป้อน (ppm) |
| | TDS_B | คือ ค่า TDS ของน้ำในหม้อไอน้ำ (ppm) |
| | Con_W | คือ ค่า Conductivity ของน้ำป้อน ($\mu\text{s}/\text{cm}$) |
| | Con_B | คือ ค่า Conductivity ของน้ำในหม้อไอน้ำ ($\mu\text{s}/\text{cm}$) |

3.6.3 การหุ้มฉนวนถังเก็บน้ำคอนเดนเสท

ถังเก็บน้ำคอนเดนเสทยังไม่มีฉนวนหุ้มฉนวนกันความร้อน ซึ่งจากการวัดอุณหภูมิผิวของถังเก็บน้ำคอนเดนเสทพบว่า มีค่าอยู่ที่ 45 °C ซึ่งมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิอากาศในขณะที่ทำวัดอยู่ที่ 35 °C ค่อนข้างมาก

ความร้อนสูญเสียจากถังเก็บน้ำคอนเดนเสทสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.33 ซึ่งจากการคำนวณพบว่าค่าความร้อนสูญเสียจากถังเก็บน้ำคอนเดนเสทมีค่าเท่ากับ 430.52 kW

$$Q_{loss} = 0.548 \left[\left(\frac{T_s}{55.55} \right)^4 - \left(\frac{T_a}{55.55} \right)^4 \right] + 1.957(T_s - T_a)^{1.25} \sqrt{\frac{196.85V_m + 68.9}{68.9}} \quad (3.33)$$

| | | |
|-----|------------|--|
| โดย | Q_{loss} | คือ ความร้อนสูญเสียจากถังเก็บน้ำคอนเดนเสท (kW) |
| | T_s | คือ อุณหภูมิผิวของถังเก็บน้ำคอนเดนเสท (°C) |

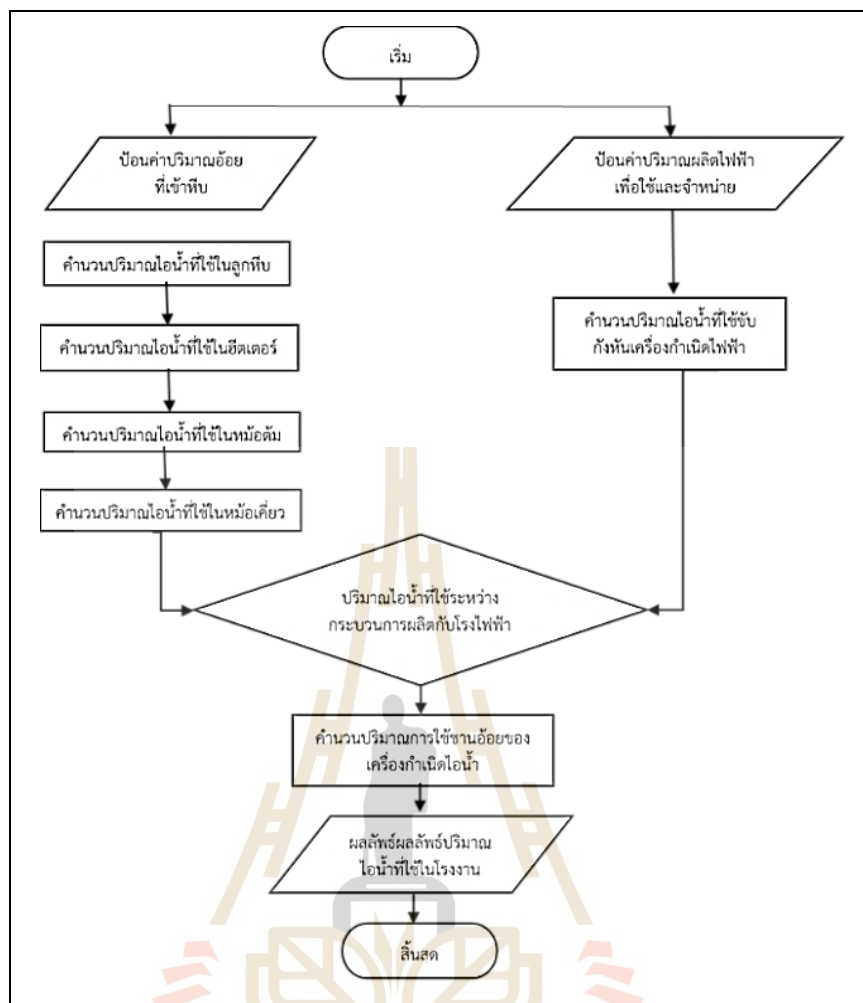
| | |
|-------|---|
| T_a | คือ อุณหภูมิอากาศ ($^{\circ}\text{C}$) |
| V_m | คือ ความเร็วลมของอากาศ (m/s) (ในการคำนวณนี้ใช้ 2 m/s) |

3.6.4 เพิ่มประสิทธิภาพการใช้ไอน้ำในกระบวนการผลิต

โดยปกติแล้วไอน้ำที่ใช้ในกระบวนการต้มน้ำอ้อยจะเป็นไอน้ำที่ออกจากกังหันไอน้ำ (Exhaust steam) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกระบวนการผลิตไฟฟ้าของโรงงาน แต่ปัจจุบันทางฝ่ายผลิตมีการแจ้งให้ผลิตไอน้ำเพิ่มขึ้นเนื่องจากไอน้ำไม่เพียงพอ จึงมีการนำเอาไอน้ำจากหม้อต้มไอน้ำไปลดอุณหภูมิที่เครื่องเครื่องลดอุณหภูมิไอน้ำ (Desuperheater) เพื่อนำไปใช้เสริมในกระบวนการผลิต ซึ่งเป็นการสูญเสียพลังงานความร้อนโดยไม่จำเป็นอย่างมาก จากการทำสมดุลพลังงานตามในกระบวนการต้มระเหย ซึ่งในความเป็นจริงแล้ว ไอน้ำทั้งหมดที่ออกจากหม้อต้มควรนำไปใช้ที่กังหันไอน้ำที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด จากนั้นจึงนำไอน้ำที่ออกจากกังหันไปใช้ในกระบวนการผลิต ซึ่งจะทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องลดอุณหภูมิไอน้ำ (Desuperheater) และจะทำให้เกิดการประหยัดพลังงานเป็นอย่างมาก ดังแสดงในภาคผนวก ก.3

3.7 ขั้นตอนการจำลองระบบพลังงาน

การจำลองระบบพลังงานของโรงงานน้ำตาลในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม MS Excel ประกอบด้วยแบบจำลองย่อย 5 ส่วน จากนั้นนำมารวมกันเป็นระบบพลังงานในโรงงานน้ำตาล มีลำดับขั้นตอนแสดงในรูปที่ 3.22 การจำลองใช้ข้อมูลพื้นฐานจากโรงงานมาเป็นค่าป้อนเข้า เช่น อัตราการหีบอ้อยต่อวัน ปริมาณการผลิตไฟฟ้าใช้เองและส่งจำหน่าย จากนั้นทำการจำลองด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมา แล้วนำผลลัพธ์ที่จำลองได้มาเปรียบเทียบกับค่าจริงจากการเดินเครื่องที่เงื่อนไขเดียวกัน



รูปที่ 3.22 ขั้นตอนการจำลองระบบพลังงานในโรงงาน

3.8 เปรียบเทียบการใช้พลังงานที่สามารถประหยัดได้และวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

การวิเคราะห์และประเมินแต่ละมาตรการดังกล่าวด้วยเทคนิคเชิงเศรษฐศาสตร์การเงิน เพื่อหามาตรการที่มีความเหมาะสมที่สุดในการลงทุน โดยจะต้องมีความเป็นไปได้ในการนำมาตรการดังกล่าวไปปฏิบัติจริงเชิงวิศวกรรมและมีความคุ้มค่าในการลงทุน ซึ่งใช้เกณฑ์ในการตัดสินใจจาก ระยะเวลาคืนทุน (Pay back period) ต้องอยู่ในช่วงที่เหมาะสมคือ ระยะเวลาคืนทุนมีค่าน้อยกว่าระยะเวลาดำเนินงานของโครงการแสดงว่าการลงทุนของโครงการให้ผลที่คุ้มค่า มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net present value) ถ้ามูลค่าปัจจุบันมีค่ามากกว่าศูนย์ แสดงว่าคุ้มค่าในการดำเนินโครงการและอัตราผลตอบแทนผลภายใน (Internal required rate of return) ถ้าอัตราผลตอบแทนภายในมีค่ามากกว่าอัตราคิดลดแสดงว่าการลงทุนของโครงการมีความคุ้มค่า จึงถือว่ามีค่าคุ้มค่าในการลดการใช้พลังงานของโรงงาน

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

จากวิธีการดำเนินงานวิจัยที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 ซึ่งได้แสดงรายละเอียดเกี่ยวกับวิธีการดำเนินงานวิจัยในขั้นตอนต่าง ๆ เพื่อมุ่งสำรวจ ศึกษา ตรวจสอบ และวิเคราะห์สาเหตุของการสูญเสียพลังงานในระบบ เพื่อหามาตรการที่เหมาะสมในการแก้ปัญหา กรณีศึกษาคือ โรงงานน้ำตาลทรายขาวเริ่มอุดม จังหวัดอุดรธานี ซึ่งผลลัพธ์จากการดำเนินงานวิจัยสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

- 4.1 ผลการตรวจวัดและวิเคราะห์ความร้อนสูญเสียและประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ
 - 4.2 ผลการตรวจวัดและวิเคราะห์ความร้อนสูญเสียในกระบวนการผลิต
 - 4.3 ผลของมาตรการอนุรักษ์พลังงานที่เสนอแนะ โดยการติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำป้อนและผลการคำนวณความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์
 - 4.4 ผลของมาตรการอนุรักษ์พลังงานที่เสนอแนะ โดยการควบคุมควบคุมอัตราน้ำ boiler draft และผลการคำนวณความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์
 - 4.5 ผลของมาตรการอนุรักษ์พลังงานที่เสนอแนะ โดยการหุ้มฉนวนถังเก็บน้ำคอนเดนเสท และผลการคำนวณความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์
 - 4.6 ผลของมาตรการอนุรักษ์พลังงานที่เสนอแนะ โดยการลดความร้อนสูญเสียจากการใช้เครื่องลดอุณหภูมิไอน้ำ (Desuperheater) และผลการคำนวณความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์
 - 4.7 ผลการจำลองระบบพลังงาน
- ผลการดำเนินงานวิจัยตามหัวข้อวิจัยข้างต้นแสดงรายละเอียดผลการตรวจวัดและวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

4.1 ผลการตรวจวัดและวิเคราะห์ความร้อนสูญเสียและประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ

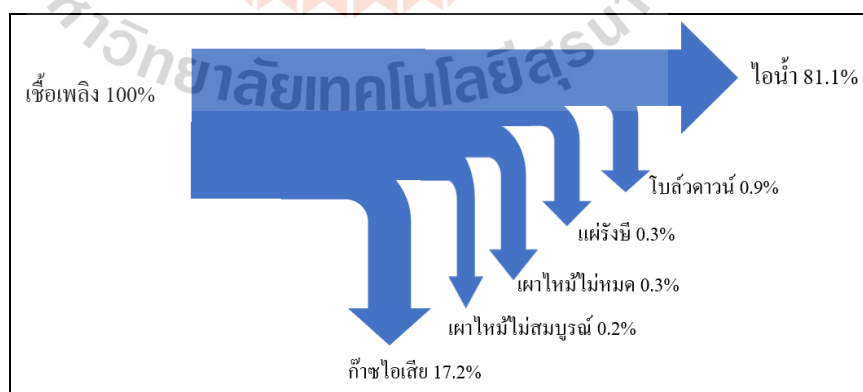
ผลการสำรวจและตรวจวัดประสิทธิภาพพลังงานของหม้อไอน้ำ พร้อมทั้งคำนวณหาความสูญเสียต่าง ๆ พบว่า L_1-L_5 มีค่าเท่ากับ 17.2, 0.2, 0.3, 0.3 และ 0.9% และประสิทธิภาพหม้อไอน้ำเท่ากับ 81.10% รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ค่าที่ได้จากการตรวจวัด

| ค่า | อักษรย่อ | ค่า | หน่วย |
|------------------------|----------|--------|--------------------|
| อัตราการไหลของไอน้ำ | ms | 314.37 | tons/hr |
| ความดันของไอน้ำ | P | 29 | bar |
| อุณหภูมิของไอน้ำ | t_s | 400 | $^{\circ}\text{C}$ |
| อุณหภูมิของก๊าซเผาไหม้ | t_g | 196 | $^{\circ}\text{C}$ |
| อัตราการโบลั่วคาวน | m_{bd} | 5.03 | tons/hr |
| ชั่วโมงการทำงาน | hr | 2,640 | hr/year |

ตารางที่ 4.2 พลังงานความร้อนสูญเสียและประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำเฉลี่ยที่ตรวจวัดได้

| ค่า | อักษรย่อ | ค่า | หน่วย |
|--------------------------------|----------|-----------------|-------|
| สูญเสียจากก๊าซไอเสีย | L1 | 1,041.9 (17.2%) | kJ/kg |
| สูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ | L2 | 12.2 (0.2%) | kJ/kg |
| สูญเสียจากการเผาไหม้ไม่หมด | L3 | 15.2 (0.3%) | kJ/kg |
| สูญเสียจากการแผ่รังสี | L4 | 19.7 (0.3%) | kJ/kg |
| สูญเสียจากการโบลั่วคาวน | L5 | 56.6 (0.9%) | kJ/kg |
| ประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ | η | 81.10 | % |



รูปที่ 4.1 แผนผังการสูญเสียความร้อนและประสิทธิภาพหม้อไอน้ำเดิม

ผลการสำรวจและตรวจวัดประสิทธิภาพหม้อไอน้ำของโรงงาน แสดงดังตารางที่ 4.2 และพบว่า L1 , L2 , L3 , L4 และ L5 มีค่าเท่ากับ 17.2, 0.2, 0.3, 0.3, 0.9 % ตามลำดับ และประสิทธิภาพหม้อไอน้ำเท่ากับ 81.1% สามารถเขียนในรูปแบบผังพลังงานความร้อนของหม้อไอน้ำ ดังรูปที่ 4.1

4.2 ผลการตรวจวัดและวิเคราะห์ความร้อนสูญเสียในกระบวนการผลิต

จากการสำรวจพลังงานสูญเสียและการทำสมดุลพลังงานพบว่า มีพลังงานความร้อนที่สูญเสียอย่างเห็นได้ชัด 2 ส่วน คือ

4.2.1 ความร้อนสูญเสียจากอุปกรณ์ที่ไม่ได้หุ้มฉนวน (ถังเก็บน้ำคอนเดนเสท)

ความร้อนสูญเสียจากเก็บน้ำคอนเดนเสทที่ยังไม่มีการหุ้มฉนวนกันความร้อนจากการวัดพบว่า มีค่าอุณหภูมิผิวเฉลี่ย 45°C ซึ่งมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิอากาศแวดล้อมที่ 35°C ความร้อนสูญเสียจากถังเก็บน้ำคอนเดนเสทมีค่าเท่ากับ 515.1 kW ซึ่งนับว่ามีปริมาณความร้อนสูญเสียค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณพลังงานที่ผลิตจากหม้อไอน้ำ

4.2.2 ความร้อนสูญเสียเนื่องจากการบริหารจัดการไอน้ำในโรงงาน (ใช้ไอน้ำเสริมโดยการ Desuperheater) เพื่อนำไปใช้ในกระบวนการผลิต

โดยปกติแล้วไอน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตจะเป็นไอน้ำที่ออกจากกังหันไอน้ำของโรงงาน อย่างไรก็ตาม กรณี โรงงานน้ำตาลนี้ต้องมีการผลิตไอน้ำเพิ่มเนื่องจากไม่เพียงพอต่อความต้องการใช้งาน โดยหลักถือว่าเป็นพฤติกรรมการใช้ไอน้ำที่เกินความจำเป็น จึงต้องนำไอน้ำจากหม้อไอน้ำไปลดอุณหภูมิ (Desuperheater) (สภาวะที่ 2) เพื่อนำไปใช้เสริมในกระบวนการผลิตถือเป็นการสูญเสียพลังงานความร้อนโดยไม่จำเป็นอย่างมาก จากการทำสมดุลพลังงานสำหรับการใช้ไอน้ำที่กระบวนการต่าง ๆ

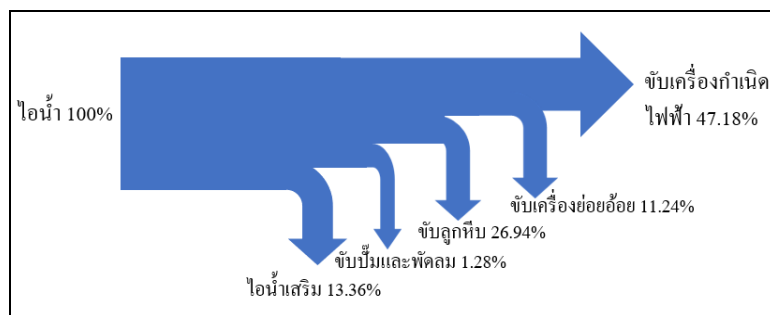
ตารางที่ 4.3 ผลการทำสมดุลพลังงานด้านแรงดัน 29 บาร์ ของ โรงงาน

| สภาวะ | อัตราการไหล/อัตราการป้อน (tons/hr) | ความดัน (bar _g) | อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) | เอนทัลปี (kJ/kg) |
|-------|---------------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|---------------------|
| 1 | 314.37 | 29 | 380 | 3,185.8 |
| 2 | 42.00 | 29 | 380 | 3,185.8 |
| 3 | 5.46 | 29 | 380 | 3,185.8 |
| 4 | 84.69 | 29 | 380 | 3,185.8 |
| 5 | 35.35 | 29 | 380 | 3,185.8 |
| 6 | 94.20 | 29 | 380 | 3,185.8 |
| 7 | 55.39 | 29 | 380 | 3,185.8 |

ตารางที่ 4.4 ผลการทำสมดุลพลังงานด้านความดันต่ำของโรงงาน

| สภาวะ | อัตราการไหล/อัตราการป้อน (tons/hr) | ความดัน (bar _g) | อุณหภูมิ (°C) | เอนทัลปี (kJ/kg) |
|-------|---------------------------------------|--------------------------------|------------------|---------------------|
| 8 | 5.46 | 2.5 | 203 | 2,821.6 |
| 9 | 84.69 | 2.5 | 269 | 2,821.6 |
| 10 | 35.35 | 2.5 | 269 | 2,821.6 |
| 11 | 94.2 | 2.5 | 180 | 2,821.6 |
| 12 | 55.39 | 2.5 | 180 | 2,821.6 |
| 13 | 272.37 | 2.5 | 180 | 2,821.6 |
| 14 | 12.98 | 3.0 | 105 | 440.2 |
| 15 | 327 | 1.0 | 130 | 2,727.1 |
| 16 | 310.98 | 2.21 | 114 | 477.9 |
| 17 | 332.38 | 1.21 | 105 | 440.2 |
| 18 | 319.4 | 35.0 | 105 | 440.2 |
| 19 | 146.59 | | | |

จากผลการทำสมดุลพลังงานในตารางที่ 4.3 และตารางที่ 4.4 พบว่า กระบวนการผลิตต้องการใช้น้ำจริงเพียง 327 tons/hr (สภาวะที่ 15) ในความเป็นจริงแล้วไอน้ำทั้งหมดที่ออกจากหม้อต้มควรนำไปใช้ที่กังหันขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จากนั้นจึงนำไอน้ำที่ออกจากกังหันไปใช้ในกระบวนการผลิต ซึ่งจะช่วยให้ไม่ต้องใช้เครื่องลดอุณหภูมิไอน้ำเป็นการช่วยประหยัดพลังงาน และนำผลการสมดุลพลังงานมาสร้างแผนผังการใช้ไอน้ำของโรงงานดังที่แสดงในรูปที่ 4.2 โดยพลังงานความร้อนในรูปไอน้ำทั้งหมดถูกส่งไปยังกังหันขับเคลื่อนปั๊มน้ำและพัดลม 1.28% ขับลูกหีบ 26.94% ขับเครื่องย่อยอ้อย 11.24% ขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อผลิตไฟฟ้า 47.18% และส่งจ่ายไอน้ำเสริมให้กระบวนการผลิต 13.36%



รูปที่ 4.2 แผนผังการใช้ไอน้ำของโรงงานในปัจจุบัน

4.3 ผลของมาตรการอนุรักษ์พลังงานที่เสนอแนะโดยการติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำป้อนและผลการคำนวณความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

การหาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เริ่มจากคำนวณปริมาณเชื้อเพลิงที่ประหยัดได้ จากนั้นคำนวณหาปริมาณไอน้ำที่ผลิตได้จากเชื้อเพลิง นำค่าไอน้ำที่ผลิตได้ไปประเมินหาปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้โดยใช้ข้อมูลจากคู่มือกักกันไอน้ำ และเครื่องกำเนิดไฟฟ้ายี่ห้อ SHINKO ขนาด 9 MW ซึ่งมีประสิทธิภาพ 79.1% ราคาขายไฟฟ้า ณ วันที่เก็บข้อมูลหน่วยละ 4.2 บาท นำไปคำนวณความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ดังแสดงในตารางที่ 4.5 พบว่า การติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำป้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 105 °C เป็น 135 °C สามารถเพิ่มประสิทธิภาพหม้อไอน้ำได้ 3.8% และสามารถผลิตไฟฟ้าได้เพิ่ม 292,716 kWh/yr คิดเป็นเงิน 1,229,409 บาทต่อปี ใช้เงินลงทุน 7,200,000 บาท คิดเป็นระยะเวลาคืนทุน 5.86 ปี

ตารางที่ 4.5 ผลคำนวณความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์จากการติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำป้อน

| รายการ | อักษรย่อ | ค่า | หน่วย |
|--|----------|-----------|--------|
| ประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ (หลังติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำป้อน) | η | 84.9 | % |
| การนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ที่เครื่องอุ่นน้ำป้อน | QECO | 11.14 | MWt |
| พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้เพิ่มเติม | - | 292,716 | kWh/yr |
| กำไรที่ได้เพิ่มจากการขายไฟฟ้า (4.2 บาท/kWh) | - | 1,229,409 | บาท/ปี |
| เงินลงทุนในการติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำป้อน | - | 7,200,000 | บาท |
| ระยะเวลาคืนทุน | PB | 5.86 | ปี |

ตารางที่ 4.6 พลังงานความร้อนสูญเสียและประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำหลังติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำป้อน

| ค่า | อักษรย่อ | ค่า | หน่วย |
|--------------------------------|----------|---------------|-------|
| สูญเสียจากก๊าซไอเสีย | L1 | 811.7 (13.4%) | kJ/kg |
| สูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ | L2 | 12.2 (0.2%) | kJ/kg |
| สูญเสียจากการเผาไหม้ไม่หมด | L3 | 15.2 (0.3%) | kJ/kg |
| สูญเสียจากการแผ่รังสี | L4 | 19.7 (0.3%) | kJ/kg |
| สูญเสียจากการโบลว์ดาวน์ | L5 | 56.6 (0.9%) | kJ/kg |
| ประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ | η | 84.9 | % |

พลังงานความร้อนสูญเสียและประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ หลังติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำป้อน สามารถแสดงผังประสิทธิภาพและการสูญเสียความร้อนดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ผังประสิทธิภาพหม้อไอน้ำเมื่อติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำป้อน

4.4 ผลของมาตรการอนุรักษ์พลังงานที่เสนอแนะโดยการการควบคุมอุณหภูมิ โบลว์ดาวน์และผลการคำนวณความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

โดยทำการทดลองและเก็บข้อมูลน้ำป้อนหม้อไอน้ำทุก 2 ชั่วโมง จำนวน 5 วัน พบว่ามีค่า Conductivity เฉลี่ยเท่ากับ $42.8 \mu\text{s}/\text{cm}$ กรณีความดันของหม้อไอน้ำ 29 bar_g ค่าควบคุมคุณภาพน้ำโบลว์ดาวน์ เท่ากับ $6,000 \mu\text{s}/\text{cm}$ ซึ่งคำนวณสัดส่วนการโบลว์ดาวน์ (R_{BD}) จากสมการที่ 3.30 และสมการที่ 3.31 ได้เท่ากับ 0.007 และอัตราน้ำโบลว์ดาวน์ที่เหมาะสมเท่ากับ 2.28 tons/hr แต่ปัจจุบัน โรงงานมีการโบลว์ดาวน์อยู่ที่ 5.0 tons/hr ซึ่งอัตราการโบลว์ดาวน์เกินเท่ากับ 2.72 tons/hr ถ้าลดการโบลว์ดาวน์ในส่วนที่เกินจะสามารถเปลี่ยนเป็นไอน้ำได้พลังงานความร้อน

เท่ากับ 761.4 kW_t เทียบเป็นการผลิตไฟฟ้าได้เพิ่ม $85,738 \text{ kWh/yr}$ คิดเป็นเงิน $360,098$ บาทต่อปี ต้นทุนติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมน้ำโบล์ควานอัตโนมัติเท่ากับ $1,100,000$ บาท จึงได้ระยะเวลาคืนทุนเป็น 3.05 ปี รายละเอียดดังตารางที่ 4.7

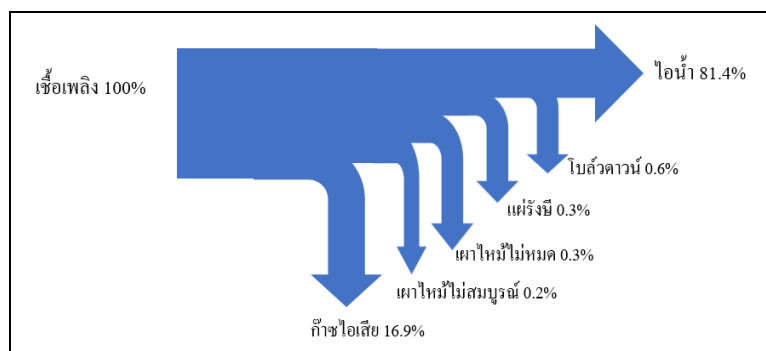
ตารางที่ 4.7 ผลคำนวณความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์จากการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมน้ำโบล์ควานอัตโนมัติ

| รายการ | อักษรย่อ | ค่า | หน่วย |
|--|----------|-----------|-----------------|
| ประสิทธิภาพหม้อไอน้ำหลังติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมน้ำโบล์ควานอัตโนมัติ | η | 81.4 | % |
| ความร้อนที่ไปกับการ โบล์ควานกลับมาใช้ใหม่ | Q_{BD} | 761.4 | kW_t |
| พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้เพิ่มเติม | - | 85,738 | kWh/yr |
| รายได้เพิ่มจากการขายไฟฟ้า (4.2 บาท/kWh) | - | 360,098 | บาทต่อปี |
| เงินลงทุนในการติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำป้อน | - | 1,100,000 | บาท |
| ระยะเวลาคืนทุน | PB | 3.05 | ปี |

ตารางที่ 4.8 พลังงานความร้อนสูญเสียและประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำหลังติดตั้งโบล์ควานอัตโนมัติ

| ค่า | อักษรย่อ | ค่า | หน่วย |
|--------------------------------|----------|-----------------|----------------|
| สูญเสียจากก๊าซไอเสีย | L1 | 1,023.7 (16.9%) | kJ/kg |
| สูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ | L2 | 12.2 (0.2%) | kJ/kg |
| สูญเสียจากการเผาไหม้ไม่หมด | L3 | 15.2 (0.3%) | kJ/kg |
| สูญเสียจากการแผ่รังสี | L4 | 19.7 (0.3%) | kJ/kg |
| สูญเสียจากการ โบล์ควาน | L5 | 56.6 (0.9%) | kJ/kg |
| ประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ | η | 81.4 | % |

แผนผังประสิทธิภาพและการสูญเสียความร้อนของหม้อไอน้ำหลังติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมน้ำโบล์ควานอัตโนมัติ แสดงได้ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แผนผังประสิทธิภาพหม้อไอน้ำเมื่อติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมน้ำโบลิวคานน์อัตโนมัติ

4.5 ผลของมาตรการอนุรักษ์พลังงานที่เสนอแนะโดยการหุ้มฉนวนถังเก็บน้ำคอนเดนเสท และผลการคำนวณความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

จากข้อมูลในหัวข้อ 4.1 ความร้อนสูญเสียที่ถังน้ำคอนเดนเสทเท่ากับ 515.1 kW หากหุ้มฉนวนหนา 2 นิ้ว (ระบุชื่อและสมบัติของฉนวนที่จะหุ้ม) จะลดการสูญเสียลงได้ 430.5 kW สามารถเทียบเป็นการผลิตไฟฟ้าได้เพิ่ม 79,454 kWh/yr คิดเป็นเงิน 333,708 บาท/ปี ต้นทุนหุ้มฉนวนเท่ากับ 426,600 บาท จึงได้ระยะเวลาคืนทุนเป็น 1.28 ปี รายละเอียดดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ผลการคำนวณความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์จากการหุ้มฉนวนถังเก็บน้ำคอนเดนเสท

| รายการ | อักษรย่อ | ค่า | หน่วย |
|---|------------|---------|--------|
| การลดความร้อนสูญเสียหลังหุ้มฉนวน | Q_{save} | 430.5 | kW |
| พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้เพิ่มเติม | - | 79,454 | kWh/yr |
| กำไรที่ได้เพิ่มจากการขายไฟฟ้า (4.2 บาท/kWh) | - | 333,708 | บาท/ปี |
| เงินลงทุนในการหุ้มฉนวนถังเก็บน้ำคอนเดนเสท | - | 426,600 | บาท |
| ระยะเวลาคืนทุน | PB | 1.28 | ปี |

4.6 ผลของมาตรการอนุรักษ์พลังงานที่เสนอแนะโดยการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ไอน้ำในกระบวนการผลิต และผลการคำนวณความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

เนื่องจากหัวข้อ 4.2.2 ความร้อนสูญเสียเนื่องจากการบริหารจัดการไอน้ำในโรงงาน (ใช้ไอน้ำเสริมโดยการ Desuperheater) เพื่อนำไปใช้ในกระบวนการผลิตได้กล่าวไว้ว่า ไอน้ำทั้งหมดที่ผลิตได้จากหม้อไอน้ำควรนำไปใช้ที่กังหันไอน้ำเพียงอย่างเดียว จากนั้นจึงนำไอน้ำที่ออกจากกังหันไปใช้

ในกระบวนการผลิต จึงจะเป็นการจัดการพลังงานที่เหมาะสม หากพิจารณาว่าไอน้ำที่นำไปลดอุณหภูมิไอน้ำในสถานะที่ 2 อยู่ที่ 42 tons/hr หากนำไอน้ำนี้ไปใช้ในการผลิตไฟฟ้า พบว่าจะผลิตไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้นปีละ 820,829 kWh คิดเป็นเงิน 3,447,482 บาทต่อปี โดยไม่ต้องมีเงินลงทุนเพิ่ม แต่อย่างไร

4.7 ผลการจำลองระบบพลังงาน

จากการเดินเครื่องทดลองในวันที่ 25 มกราคม พ.ศ. 2563 จำนวน 24 ชั่วโมงต่อเนื่อง ทำการเก็บข้อมูลมีตัวแปรองค์ประกอบ ได้แก่ อัตราการหีบอ้อย อัตราการผลิตไฟฟ้าเพื่อใช้เอง และเพื่อจำหน่าย แสดงในตารางที่ 4.10-4.12 ข้อมูลนี้จะใช้เป็นข้อมูลป้อนเข้าสำหรับการจำลองในโปรแกรม เพื่อคำนวณหาอัตราการใช้ไอน้ำทั้งหมดของโรงงาน ก่อนนำไปเปรียบเทียบกับค่าการใช้ไอน้ำจริง

ตารางที่ 4.10 การใช้กังหันไอน้ำขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

| เครื่องกำเนิดไฟฟ้า | TG.9 MW (จำหน่าย) | TG.12 MW (ใช้เอง) |
|--------------------|-------------------|-------------------|
| P_e (kWh/day) | 144,000 | 243,000 |

ตารางที่ 4.11 การใช้กังหันไอน้ำขับเคลื่อนเครื่องจักรหม้อน้ำ

| เครื่องจักร | ปั๊มน้ำ (FWP) | พัดลม (IDF) |
|-------------|---------------|-------------|
| P_m (hp) | 200 | 400 |

ตารางที่ 4.12 การใช้กังหันไอน้ำขับเคลื่อนเครื่องจักรลูกหีบ

| เครื่องจักร | เครื่องย่อย | ลูกหีบ |
|-------------|-------------|--------|
| P_m (hp) | 2,500 | 1,000 |

ตารางที่ 4.13 ข้อมูลการหีบอ้อย

| ลูกหีบอ้อย | ค่า |
|------------------------------|--------|
| อัตราการไหล m_c (tons/day) | 15,350 |
| ชานอ้อย %Bag (%) | 25.34 |
| น้ำพรหม %Im (%) | 27.81 |

ตารางที่ 4.14 ข้อมูลการอุ่นน้ำอ้อย

| หม้ออุ่น | H-1 | H-2 | H-3 |
|--------------------------------------|--------|--------|--------|
| อัตราการไหล m_j (tons/day) | 14,971 | 14,971 | 14,971 |
| อุณหภูมิไอเสีย T_{Heater} (°C) | 96 | 102 | 109 |
| อุณหภูมิน้ำอ้อยขาเข้า $T_{j,i}$ (°C) | 35 | 60 | 80 |
| อุณหภูมิน้ำอ้อยขาออก $T_{j,o}$ (°C) | 59 | 79 | 99 |
| ค่าบริกซ์ Bx_i (°Bx) | 15.5 | 15.5 | 15.5 |
| ประสิทธิภาพ η_{vp} (%) | 90 | 90 | 90 |

ตารางที่ 4.15 ข้อมูลการต้มน้ำอ้อย

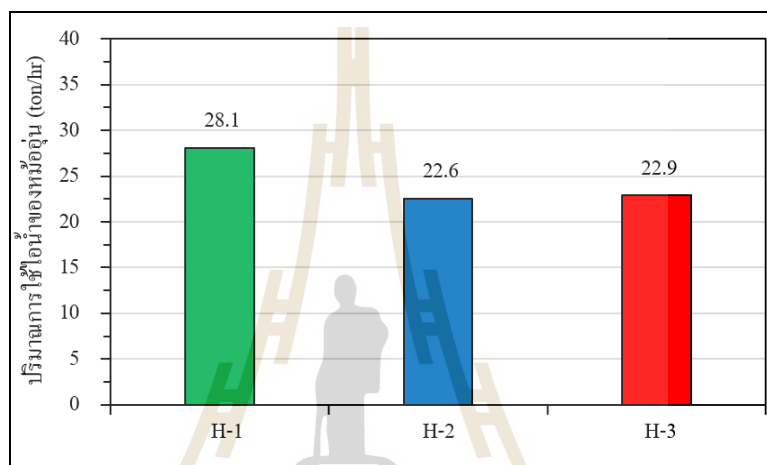
| หม้อต้ม | E-1 | E-2 | E-3 | E-4 |
|--------------------------------------|--------|--------|-------|-------|
| อัตราการไหลน้ำอ้อย m_j (tons/day) | 14,971 | 10,972 | 8,216 | 5,998 |
| อัตราการไหลหัวหม้อ m_v (tons/day) | 109 | 102 | 96 | 74 |
| อุณหภูมิหัวหม้อ T_{Evap} (°C) | 140 | 109 | 102 | 96 |
| อุณหภูมิน้ำอ้อยขาเข้า $T_{j,i}$ (°C) | 100 | 114 | 113 | 102 |
| อุณหภูมิน้ำอ้อยขาออก $T_{j,o}$ (°C) | 110 | 102 | 90 | 62 |
| ค่าบริกซ์เข้า Bx_i (°Bx) | 15.5 | 23.6 | 32.2 | 43.0 |
| ค่าบริกซ์ออก Bx_o (°Bx) | 23.6 | 32.2 | 43.0 | 58.9 |
| ประสิทธิภาพ η_{Evap} (%) | 90 | 90 | 90 | 90 |

ตารางที่ 4.16 ข้อมูลการเคี้ยวน้ำตาล

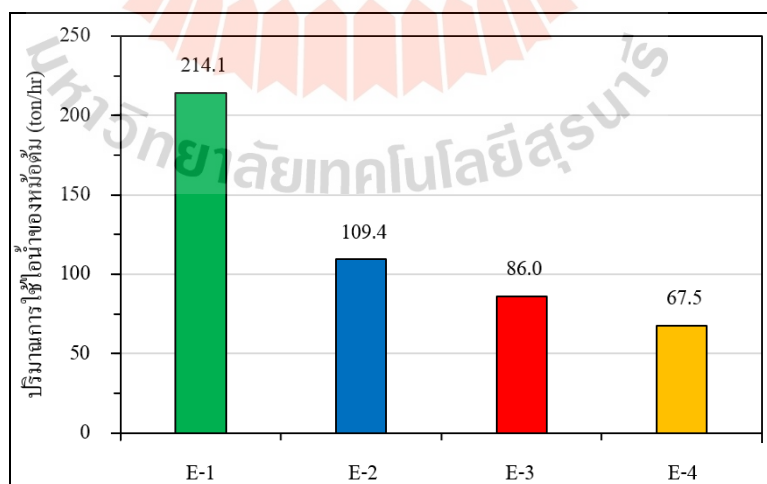
| หม้อเคี้ยว | VP-1 | VP-2 | VP-3 |
|---|-------|-------|-------|
| อัตราการไหลน้ำเชื่อม m_{syrup} (tons/day) | 4,379 | 2,776 | 2,601 |
| อุณหภูมิไอน้ำ T_{vapor} (°C) | 109 | 109 | 109 |
| อุณหภูมิน้ำเชื่อม T_{syrup} (°C) | 61.2 | 60.0 | 60.0 |

สำหรับผลการจำลองหม้ออุ่นพบว่า ได้ปริมาณการใช้ไอน้ำของหม้ออุ่นทั้ง 3 ชุด ดังรูปที่ 4.5 หม้ออุ่นชุด H-1, H-2 และ H-3 ใช้ไอน้ำเท่ากับ 29.3, 23.7 และ 24.1 tons/hr ตามลำดับ โดยใช้ไอน้ำที่

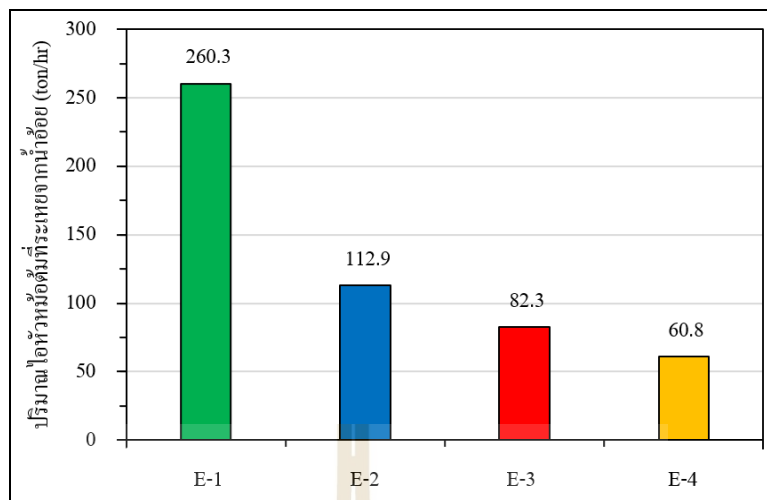
เป็นไอหัวหม้อต้ม E-1 กระบวนการต้มเพื่อระเหยน้ำอ้อยเพิ่มความเข้มข้น (Bx) ให้กับน้ำอ้อยจากหม้อต้ม E-1, E-2, E-3 และ E-4 จนกลายเป็นน้ำเชื่อมเมื่อออกจากหม้อต้มสุดท้าย E-4 จากการจำลองผลได้ปริมาณการใช้ไอน้ำของหม้อต้มทั้ง 4 ชุด ดังรูปที่ 4.6 หม้อต้มทั้ง 4 ชุด ใช้ไอน้ำเท่ากับ 260.3, 112.9, 82.3 และ 60.8 tons/hr ตามลำดับ โดยที่หม้อต้ม E-1 ใช้ไอน้ำที่ออกจากกังหันไอน้ำเพียงหม้อเดียว ส่วนหม้อต้ม E-2, E-3 และ E-4 ใช้หัวหม้อที่ออกจากหม้อต้ม E-1, E-2 และ E-3 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.7



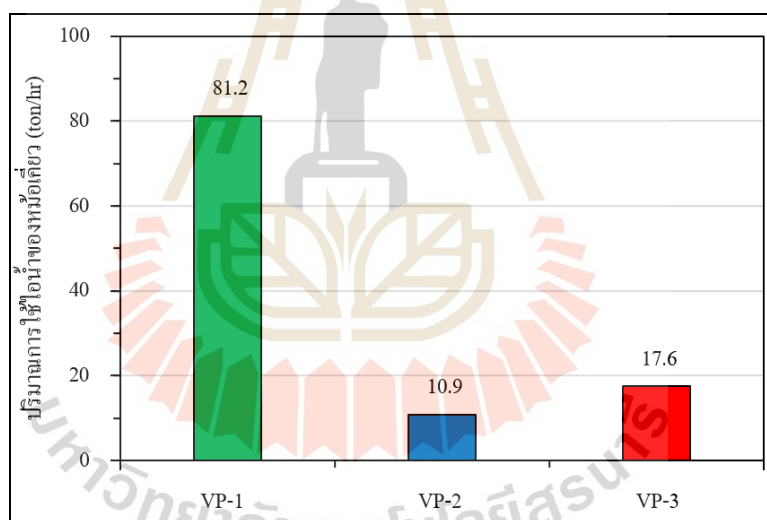
รูปที่ 4.5 ปริมาณการใช้ไอน้ำของหม้ออุ่น



รูปที่ 4.6 ปริมาณการใช้ไอน้ำของหม้อต้ม

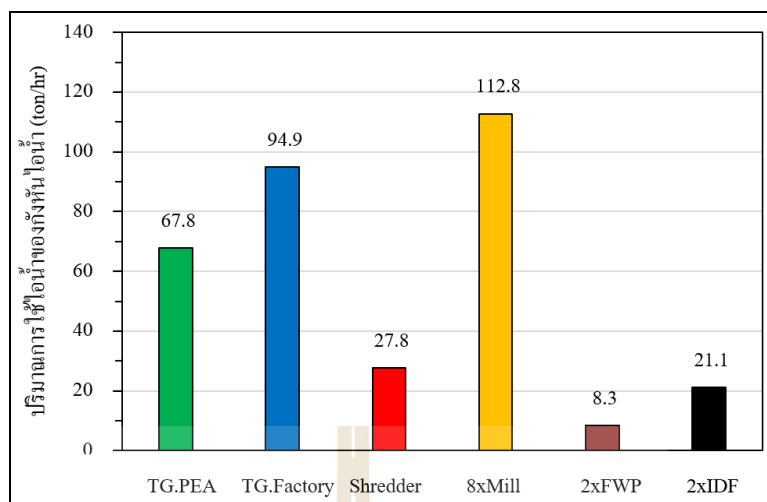


รูปที่ 4.7 ปริมาณไอหัวหม้อต้มที่ระเหยจากน้ำอ้อย



รูปที่ 4.8 ปริมาณการใช้ไอน้ำของหม้อเคี้ยว

กระบวนการเคี้ยวน้ำตาลให้เกิดผลึกใช้หม้อเคี้ยว 3 ชุด (Vacuum Pan: VP) โดยใช้ไอน้ำหัวหม้อของหม้อต้ม E-1 ดังรูปที่ 4.8 การจำลองพบว่า ปริมาณการใช้ไอน้ำของหม้อเคี้ยว VP-1, VP-2 และ VP-3 ใช้ไอน้ำเท่ากับ 81.2, 10.9 และ 17.6 tons/hr ตามลำดับ



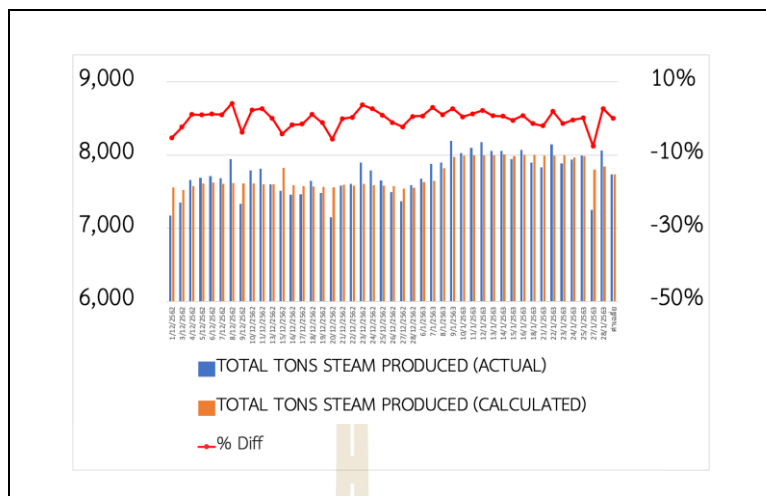
รูปที่ 4.9 ปริมาณการใช้ไอน้ำของกังหันไอน้ำ

การใช้กังหันไอน้ำขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพื่อผลิตไฟฟ้าใช้กับเครื่องย่อยอ้อย เครื่องจักรหีบอ้อย เครื่องสูบน้ำป้อน และพัดลมดูดฟลูแก๊สออกจากเครื่องกำเนิดไอน้ำ สำหรับโรงงานน้ำตาลแบบตั้งเดิม ผลการคำนวณด้วยแบบจำลองพบว่า กังหันไอน้ำขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อจำหน่ายและเพื่อใช้เองในโรงงานน้ำตาลเท่ากับ 67.8 และ 94.9 tons/hr ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.9 กังหันขับเคลื่อนเครื่องย่อยอ้อยและเครื่องจักรหีบอ้อย เท่ากับ 27.8 และ 112.8 tons/hr ตามลำดับ เครื่องสูบน้ำป้อน และพัดลมดูดฟลูแก๊สเท่ากับ 8.3 และ 21.1 tons/hr ตามลำดับ

ตารางที่ 4.17 ค่าป้อนเข้าที่ปรับเปลี่ยนในแต่ละวัน

| ตัวแปรป้อนเข้า | 16/01/63 | 22/01/63 | 25/01/63 |
|-----------------------------------|----------|----------|----------|
| อัตราการหีบอ้อย (tons/day) | 14,553 | 15,054 | 15,350 |
| ผลิตไฟฟ้าใช้เองในโรงงาน (kWh/day) | 246,000 | 243,000 | 243,000 |
| ผลิตไฟฟ้าเพื่อจำหน่าย (kWh/day) | 144,960 | 145,080 | 144,000 |

สำหรับการจำลองระบบพลังงานทั้งหมดมีตัวแปรต้นที่ต้องป้อนทุกครั้ง ได้แก่ อัตราการหีบอ้อย และอัตราการผลิตไฟฟ้า (ตารางที่ 4.17) ซึ่งเป็นข้อมูลจริงจำนวน 44 วัน ในช่วงฤดูหีบอ้อยของปี พ.ศ. 2562/2563 ของโรงงาน หลังจากทำการป้อนข้อมูลเข้าไปในโปรแกรมเพื่อทำการคำนวณหาปริมาณไอน้ำที่ใช้ในโรงงานทั้งหมด ผลที่ได้พบว่าค่าที่ได้จากการคำนวณและค่าที่ใช้จริงมีความใกล้เคียงกันมาก ดังรูปที่ 4.10 โดยมีความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 0.52-7.57%



รูปที่ 4.10 ผลเปรียบเทียบปริมาณไอน้ำที่ใช้ในโรงงานทั้งหมดจากการคำนวณกับข้อมูลการใช้ไอน้ำจริงของโรงงาน

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสำรวจและวิเคราะห์ประสิทธิภาพการใช้พลังงานความร้อนของโรงงานน้ำตาลแบบดั้งเดิม (โรงงานน้ำตาลทรายขาวเริ่มอุดม จังหวัดอุดรธานี) เพื่อหาศักยภาพของระบบและแนวทางการอนุรักษ์พลังงานที่เป็นไปได้ ในการนี้จะมีการคำนวณผลประหยัดที่ได้เงินลงทุนโดยประมาณ คำนวณหาระยะเวลาคืนทุน และจำลองระบบพลังงานแบบดั้งเดิมที่ใช้ความดันไอน้ำไม่เกิน 40 barg บนพื้นฐานสมดุลพลังงานและมวล เพื่อเป็นแนวทางให้แก่โรงงานน้ำตาลดังกล่าวนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป ซึ่งผลการศึกษสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 มาตรการลดการสูญเสียพลังงานไปกับก๊าซไอเสียของหม้อไอน้ำ โดยติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำป้อนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพหม้อไอน้ำพบว่า สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพได้ 3.8% คิดเป็นไฟฟ้าที่ผลิตได้ 292,716 kWh/yr คิดเป็นเงิน 1,229,409 บาทต่อปี ระยะเวลาคืนทุน 5.86 ปี

5.1.2 มาตรการลดการสูญเสียพลังงานไปกับน้ำโบล์ดวอร์นของหม้อไอน้ำ โดยการติดตั้งชุดควบคุมการโบล์ดวอร์นอัตโนมัติเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพหม้อไอน้ำพบว่า สามารถลดน้ำโบล์ดวอร์นที่เกิน 2.72 ตัน/ชั่วโมง ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพได้ 0.3% คิดเป็นไฟฟ้าที่ผลิตได้ 85,738 kWh/yr คิดเป็นเงิน 360,098 บาทต่อปี ระยะเวลาคืนทุน 3.05 ปี

5.1.3 มาตรการลดการสูญเสียพลังงานไปกับถังเก็บน้ำคอนเดนเสทมีฉนวนด้วยการหุ้มฉนวนหนา 2 นิ้ว รอบถังน้ำคอนเดนเสท คิดเป็นไฟฟ้าที่ผลิตได้ 79,454 kWh/yr คิดเป็นเงิน 333,708 บาท/ปี ระยะเวลาคืนทุน 1.28 ปี

5.1.4 มาตรการการบริหารจัดการเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้ไอน้ำสำหรับกระบวนการผลิต โดยการนำไอน้ำทั้งหมดที่ผลิตได้จากหม้อไอน้ำไปใช้ที่กังหันไอน้ำที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว จากนั้นจึงนำไอน้ำที่ออกจากกังหัน ไปใช้ในกระบวนการผลิต คิดเป็นไฟฟ้าที่ผลิตได้เพิ่ม 820,829 kWh/yr คิดเป็นเงิน 3,447,481 บาทต่อปี

5.1.5 ปริมาณการใช้ไอน้ำที่คำนวณได้จากแบบจำลองใกล้เคียงกับการใช้งานจริงมาก เนื่องจากการจำลองได้คำนึงถึงองค์ประกอบที่มีผลจากการใช้ไอน้ำจริงคือ อัตราการหีบ และปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากปริมาณการใช้ไอน้ำของโรงงานไม่ได้ขึ้นอยู่กับอัตรา

การหีบอ้อยเพียงอย่างเดียว หากมีการผลิตไฟฟ้าเพื่อจำหน่ายเพิ่มขึ้นก็จะทำให้ความต้องการใช้ไอน้ำเพิ่มขึ้นตามไปด้วย อีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้แบบจำลองมีความแม่นยำสูง คือ งานวิจัยนี้ได้นำสมการอัตราการการใช้ไอน้ำของกังหันไอน้ำจากผู้ผลิต (Steam Consumption Curve) แต่ละตัวมาผนวกเข้าด้วย ซึ่งจากการสืบค้นพบว่างานวิจัยทั่วไปยังไม่ได้นำส่วนนี้มาพิจารณา

จากผลการศึกษาที่ได้กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปการประเมินโครงการตามมาตรการประหยัดพลังงานทั้ง 4 มาตรการได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 การประเมินโครงการปรับปรุงตามมาตรการประหยัดพลังงาน

| มาตรการ | รายละเอียด | เงินลงทุน (บาท) | รายได้ต่อปี (บาท) | PB (ปี) | NPV (บาท) |
|---------|-----------------------------|--------------------|----------------------|------------|--------------|
| 1 | ติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำป้อน | 7,200,000 | 1,229,437 | 5.86 | 3,959,649 |
| 2 | ติดตั้งโบลว์ดาวน์อัตโนมัติ | 1,100,000 | 360,137 | 3.05 | 41,586 |
| 3 | หุ้มฉนวนกันความร้อน | 426,600 | 333,746 | 1.28 | 631,339 |
| 4 | เพิ่มประสิทธิภาพการใช้ไอน้ำ | - | 3,447,482 | - | 10,928,054 |

หมายเหตุ การคำนวณ NPV กำหนดอายุโครงการ 25 ปี และอัตราผลตอบแทนภายในเท่ากับ 10%

เนื่องจากการปรับปรุงการประหยัดพลังงานใน โรงงานน้ำตาลนั้นแบ่งออกได้ 2 แบบ คือแบบต้องลงทุนดังมาตรการที่ 1-3 และแบบไม่ต้องลงทุน ดังมาตรการที่ 4 สำหรับการพิจารณาเลือกโครงการมาตรการประหยัดพลังงานตามหลักทางเศรษฐศาสตร์การเงินนั้นต้องพิจารณาทั้งระยะเวลาคืนทุน (Payback period; PB) และมูลค่าเงินปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value; NPV) ควบคู่กันไป ซึ่งนักลงทุนจะไม่ได้พิจารณาเฉพาะ PB เพียงอย่างเดียว แต่จะให้ความสำคัญกับรายได้และ NPV มากกว่า เนื่องจากนักลงทุนอาจจะมีการใช้เงินจากแหล่งเงินทุนเพื่อนำมาลงทุน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสามารถสรุปข้อเสนอแนะไว้ดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 สรุปข้อเสนอแนะมาตรการที่ควรทำโดยเรียงลำดับและข้อดี-ข้อจำกัดของแต่ละ มาตรการ

| ลำดับ | มาตรการ | รายละเอียด | ข้อดี | ข้อจำกัด |
|-------|---------|-----------------------------|---|---|
| 1 | 4 | เพิ่มประสิทธิภาพการใช้ไอน้ำ | - ไม่ต้องลงทุน - ผลตอบแทนมากที่สุด (NPV มากที่สุด) | - ต้องอาศัยเวลาเนื่องจากการปรับปรุงพฤติกรรมการใช้ไอน้ำของพนักงาน ในกระบวนการผลิต |
| 2 | 1 | ติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำป้อน | - ผลตอบแทนเป็นลำดับที่ 2 * NPV มากเป็นลำดับที่ 2 | - ลงทุนสูง |
| 3 | 3 | หุ้มฉนวนกันความร้อน | - ลงทุนต่ำ - ระยะเวลาคืนทุนเร็ว (PB น้อยที่สุด) | - ต้องมีการดูแลรักษาอยู่เป็นประจำ |
| 4 | 2 | ติดตั้งโบลว์ดาวน์อัตโนมัติ | - มีเสถียรภาพในการเดินเครื่องจักร | - ลงทุนค่อนข้างสูง |

5.2 ข้อเสนอแนะ

ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าองค์ความรู้ที่ได้ในการศึกษา แนวทางการปรับปรุงพลังงาน ในโรงงานน้ำตาลแบบดั้งเดิมของไทย : กรณีศึกษาโรงงานน้ำตาลทรายเริ่มอุดม ประกอบด้วย การปรับปรุงประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ การลดความร้อนสูญเสีย และการลดการใช้ไอน้ำเสริมสำหรับ กระบวนการผลิต ซึ่งสามารถเป็นแนวทางในการปรับปรุงการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพของ โรงงานน้ำตาลที่มีระบบการผลิตและการใช้ความดันไอน้ำที่ใกล้เคียงกัน ถ้าหากระดับความดันไอน้ำแตกต่างกันไปควรมีการศึกษาเพิ่มเติม

รายการอ้างอิง

- จิรพล ถันวิลาส และคณะ (2558). การศึกษาการสูญเสียด้านพลังงานของกระบวนการหีบสกัดอ้อยของโรงงานน้ำตาลมิตรผลภูเขียว (Energy Loss in Milling Process of Mitrphol Phu keaw Sugar Cane Plant).
- ธีรวัฒน์ คลับคล้าย และคณะ (2553). แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ของกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยแบบหลายขั้นตอนในกระบวนการผลิตน้ำตาล (Thermodynamics Model of Multiple Boiling and Heating in Production Sugar Process).
- บันเทิง สีกุดทอง และคณะ (2552). การพัฒนาแบบจำลองสำหรับการออกแบบระบบหม้ออุ่นและหม้อต้มโรงงานน้ำตาล (Development of Model for Designing of Evaporator and Heater System of Sugar Processing).
- สุนันท์ ศรีฉนิตย์, (2545). การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer).
- Alves, M., Ponce, G., Silva, M., & Ensinas, A. (2015). Surplus electricity production in sugarcane mills using residual bagasse and straw as fuel. **Energy**, 91, 751-757.
- Barroso, J., Barreras, F., Amaveda, H., & Lozano, A. (2003). On the optimization of boiler efficiency using bagasse as fuel. **Fuel**, 82, 1451-1463.
- Birru, E., Erlich, C., Moya, I., Martin, A., Feychting, S., Vitez, M., .Puskoriute, L. (2016). A Comparison of Various Technological Options for Improving Energy and Water Use Efficiency in a Traditional Sugar Mill. **Sustainability**, 8, 1227.
- Birru, E., Erlich, C., Bekele, G., & Martin, A. (2015). Assessing the potential of energy saving in a traditional sugar cane mill during steady state and transient conditions-part I: base case plant model. **Biomass Conversion and Biorefinery**, 6.
- Birru, E., Erlich, C., Bekele, G., & Martin, A. (2015). Upgrading of a traditional sugar cane mill to a modern mill and assessing the potential of energy saving during steady state and transient conditions- part II: models for a modified cogeneration unit. **Biomass Conversion and Biorefinery**, 6.
- Bocci, E., Di Carlo, A., & Marcelo, D. (2009). Power plant perspectives for sugarcane mills. **Energy**, 34, 689-698.

- Bubník, Z., Kadlec, P., Urban, D., & Bruhns, M. (1995). Sugar technologists manual: Chemical and physical data for sugar manufacturers and users. **Zuckerindustrie**, 120, 574-575.
- Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2015). **Heat and mass transfer: Fundamentals & applications**. New York: McGraw-Hill.
- Kamate, S., & Gangavati, P. B. (2009). Exergy analysis of cogeneration power plants in sugar industries. **Applied Thermal Engineering-APPL THERM ENG**, 29, 1187-1194.
- Savola, T., & Fogelholm, C.-J. (2006). Increased power to heat ratio of small-scale CHP plants using biomass fuels and natural gas. **Energy Conversion and Management**, 47(18), 3105-3118.
- Therdyothin A., (1992), Assessment of Cogeneration Potential of Thailand's Sugar mills, **Doctor of Engineering Dissertation**, Energy Technology Program, Asian Institute of technology.
- Wibulswas, P., Balakrishnan, S.V. and Bhattacharya, S.C. Energy Analysis of Cogeneration Using Bagasse as Fuel. **Advances in Solar Energy Technology**, Pergamon, Oxford, 1988, pp. 2307-2311
- Yanus A.C. and Michael A. Eight Edition, (2007). **Thermodynamics and Engineering Approach**.

ภาคผนวก ก

บทความวิชาการที่ได้ต่อบริการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความที่ได้ตอบรับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

Praphon Chooprasert, Keerati Suluksna, and Preecha Tummu. (2020). Improvement of boiler efficiency for Rerm-Udom sugar factory. **the 13th TSAE International Conference (TSAE 2020)**. 30-31 July 2020, Nakorn Ratchasima, Thailand.

ประพนธ์ ชูประเสริฐ, กิรติ สุลักษณ์, ปรีชา ทุมมู และอุคร นามเสน. (2022). การอนุรักษ์พลังงานสำหรับโรงงานน้ำตาลแบบดั้งเดิมของไทย : กรณีศึกษาโรงงานน้ำตาลทรายเริ่มอุดม. วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย. ปีที่ 14 ฉบับที่ 2 ประจำเดือน พฤษภาคม-สิงหาคม พ.ศ. 2565

ประพนธ์ ชูประเสริฐ, เกรียงไกร ราชณะสุข และกิรติ สุลักษณ์. (2023). การศึกษาประสิทธิภาพการใช้ไอน้ำในโรงงานน้ำตาลแบบดั้งเดิมของไทยโดยการจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ : กรณีศึกษาโรงงานน้ำตาลทรายเริ่มอุดม จังหวัดอุดรธานี. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 33 ฉบับที่ 2 ประจำเดือน เมษายน-มิถุนายน พ.ศ. 2566

Improvement of boiler efficiency for Rerm-Udom sugar factory

Praphon Chooprsert^{1*}, *Keerati Suluksna*¹, and *Preecha Tummu*²

¹Suranaree University of Technology, Institute of Engineering School of Energy and Logistics Management Engineering, Nakhon Ratchasima, Thailand

²Udon Thani Rajabhat University, Faculty of Technology, Department of Energy Engineering, Udon Thani, Thailand

Abstract. The objective of this study is to conduct a field survey, including data collection and measurements to study the potential of energy conservation measure of Rerm-Udom sugar factory in Udon Thani. The boiler efficiency is measured and calculated using the indirect method. The results of this study show that the most significant loss of the boilers is heat loss due to exhaust gas, which is 17.2%, while the rest heat loss is around 2%. The proposed energy conservation measure to improve the performance of the boiler is to install the economizer, which helps to increase the boiler efficiency for 1.5% and helps to produce additional electricity for 2,362,800 kWh per year or 7,088,400 Baht per year. The investment cost of the economizer is 7,200,000 Baht and the maintenance cost is around 1,000,000 Baht per year. Therefore, the payback period of the energy conservation measure is 1.2 years.

1 Introduction

Thailand is an agricultural country. There is a large amount of biomass energy from agricultural waste after harvesting. The Department of Alternative Energy Development and Efficiency (DEDE) reports that sugar cane harvested in Thailand was 7.8 Mtons/year, equivalent to electrical energy 6,717 GWh/year [1]. Thailand Alternative Energy Development Plan (AEDP2015) indicates that the share of renewable energy in electricity generation is 9.9% in the year 2014, and the target of the use of renewable energy is 30% in the year 2035 [2]. Thailand Power Development Plan (PDP2018) plans to increase electricity generation capacity from biomass powerplant for 520 MW. [3]

Rerm-Udom sugar factory is located in Nonghan district, Udon Thani province. The production capacity of the factory is around 15,000 ton sugarcane per day, and operating time is 110 days per year. The main products of the factory are sugar production and electricity generation, as shown in Figure 1. More than 90 percent of energy use in the factory is in the form of thermal energy in boilers. Bagasse, which is a waste of sugar production is used as biomass energy for steam generation in two boilers, which both capacities are 200 Ton/hr. Steam production from the boilers is around 314.37 Ton/hr, which is used for both sugar

* Corresponding author: chooprasert@gmail.com

production process (The boiling process of sugar cane juice) and supply to a steam turbine for electricity production.

The objective of this study is to conduct a field survey including data collection and measurements to study the potential of energy conservation measures of the boilers and the factory.

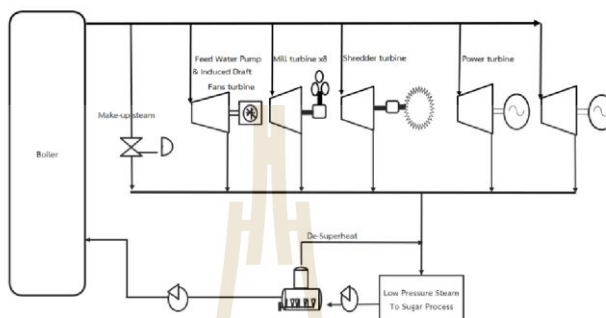


Fig. 1. Process flow of sugar production and electricity generation of Rerm-Udom sugar factory.

2 Research method

The method used in this study is as follows.

2.1 A Survey and measurements of the boilers efficiency

A survey and measurements of the efficiency of the boiler of Rerm-Udom sugar factory were conducted in February 2020. The boiler type is a water tube boiler, and the biomass is fed onto the grate as overfeed in a stoker combustor.

2.2 Equipments and instruments

Equipment and Instruments used in this study are shown in Figure 2, comprise 1) A flue gas analyzer model Testo 330, and 2) A thermal imaging camera model Testo 865.



a) A flue gas analyzer model Testo 865 b) A thermal imaging camera model Testo 330

Fig. 2. Equipment and instruments used for measurement of boiler efficiency.

2.3 Measuring and calculation method for boiler efficiency

Boiler efficiency calculation is typically calculated using the method in [4], Department of Industrial Works [5], [6]. The method used for boiler efficiency measurement in this study is the indirect method called the “Heat-loss method” which is also used in Prangmanee, Prakaew [7], [8]. The measured parameters are shown in Table 1, and measuring methods are shown in Figure 3.

Table 1. Measured parameters for boiler efficiency calculation.

| Parameter | Equipment used/Analysis method |
|--------------------------------------|--------------------------------|
| O ₂ , CO, CO ₂ | Flue gas analyzer |
| Flue gas temperature | Flue gas analyzer |
| Boiler surface temperatures | Thermal imaging camera |
| Boiler blowdown | Daily check sheet |
| Unburned Carbon | Laboratory analysis |



a) Surface temperature measurement b) Flue gas analysis c) Ash sample collection

Fig. 3. Measuring Method (Indirect method) for boiling efficiency.

As mentioned before, the calculation method used in this study is called the “Heat-loss method” which is the indirect method. Therefore, five losses of the boilers were calculated, and boiler efficiency can be calculated as follows.

1) Boiler efficiency

Boiler efficiency can be calculated by using Equation 1.

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

where η_b is boiler efficiency, L_l is summary of heat loss (kJ/kg), $H_i + Q$ is summary of heat input. (kJ/kg)

2) Heat loss due to exhaust gas (L_1)

Heat loss due to exhaust gas can be calculated using Equation 2.

$$L_1 = G c_g (t_g - t_o) \quad (2)$$

where L_1 is heat loss due to exhaust gas (kJ/kg), G is the actual amount of exhaust gas per 1 kg. of fuel (m^3/kg fuel), c_g is mean specific heat of exhaust gas, $1.38 \text{ kJ/m}^3 \text{ K}$, t_g is the temperature of exhaust gas ($^{\circ}\text{C}$), t_o is base temperature ($^{\circ}\text{C}$).

3) Heat loss due to unburned gas (L₂)

Heat loss due to unburned gas can be calculated using Equation 3.

$$L_2 = 126.1 [G_o + (m-1)A_o] (CO) \quad (3)$$

where L_2 is heat loss due to unburned gas (kJ/kg), G_o is the amount of theoretical dry exhaust (m³/kg), m is excess air ratio, A_o is the amount of theoretical (dry) air. (m³/kg).

4) Heat loss due to unburned combustibles in the burnt residue (L₃)

Heat loss due to unburned combustibles in burnt residue can be calculated using Equation 4.

$$L_3 = 339c_2 \quad (4)$$

where L_3 is heat loss due to unburned combustibles in burnt residue (kJ/kg), c_2 is unburned carbon content.

5) Heat loss due to radiation (L₄)

Heat loss due to radiation can be calculated using Equation 5.

$$L_4 = \frac{1}{100} l_r H_1 \quad (5)$$

where L_4 is heat loss due to radiation (kJ/kg), l_r is the heat loss % due to radiation, which corresponds to a low calorific value.

6) Blowdown loss (L₅)

$$L_5 = m_{bd} \frac{(h_{bd} - h_{fw})}{\dot{m}_f} \quad (6)$$

where L_5 is blowdown loss (kJ/kg), m_{bd} is blowdown rate (kg/h), h_{bd} is enthalpy of blowdown water (kJ/kg), h_{fw} is enthalpy of feed water. (kJ/kg).

3 Results and discussion

The results of this study are as follows.

3.1 Boiler efficiency

The surveys and measurements of the efficiency of the boiler of Rerm-Udom sugar factory were conducted, and the results of the analysis are shown in Table 2. And after using the Equation 1-6 to calculate the efficiency of the boilers, it is found that the efficiency of the boiler is 81.14%.

Table 2. Parameters measured from the boilers.

| Parameter | Abbreviation | Value | Unit |
|---|----------------|----------------|-----------|
| Steam flow rate | m_s | 314.37 | Ton/hr |
| Steam pressure | P | 29 | Bar |
| Steam temperature | t_s | 400 | °C |
| Flue gas temperature | t_g | 196 | °C |
| Blow down flow rate | m_{bd} | 5.03 | Ton/hr |
| Yearly operation | hr. | 2,640 | hr/Year |
| Heat loss due to exhaust gas | L ₁ | 1,041.9 (17.2) | kJ/kg (%) |
| Heat loss due to unburned gas | L ₂ | 12.2 (0.2) | kJ/kg (%) |
| Heat loss due to unburned combustibles in burnt residue | L ₃ | 15.2 (0.3) | kJ/kg (%) |
| Heat loss due to radiation | L ₄ | 19.7 (0.3) | kJ/kg (%) |
| Blowdown loss | L ₅ | 56.6 (0.9) | kJ/kg (%) |
| Boiler efficiency | η | 81.14 | % |

3.2 A Proposed energy conservation measure

After calculating heat loss using Equation 2-6, it is found that significant loss of the boilers is heat loss due to exhaust gas (L1) with 17.2% and temperature, and flue gas is 196°C that is very high. Therefore, a proposed energy conservation measure for the boilers of Rerm-Udom sugar factory is to use heat recovery equipment called “Economizer”. The advantages of using economizer include: It recovers more heat of flue gases and heating the boiler feed water for reducing the use of fuel and increasing boiler efficiency.

Design of the economizer

For calculating and designing the economizer size, data from the survey is required includes: 1) feedwater temperature and 2) temperature of flue gas. After that, Log Mean Temperature Difference, LMTD is calculated using Equation 7 (Calculation method is in [9, 10]). And calculation criteria are based on the parameters in Table 3.

Table 3. Parameters for calculation of the economizer.

| Parameter | Abbreviation | Value | Unit |
|--|-----------------|-------|------------------------|
| Overall heat transfer coefficient [6] | U_0 | 31.71 | W. (m ² °C) |
| Log Mean Temperature Difference (LMTD) | ΔT_{lm} | 70.23 | °C |
| Inlet Temperature of Economizer | T_{g1} | 105 | °C |
| Outlet Temperature of Economizer | T_{g2} | 120 | °C |

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_i - \Delta T_e}{\ln \left(\frac{\Delta T_i}{\Delta T_e} \right)} \quad (7)$$

where ΔT_{lm} is Log Mean Temperature Difference (LMTD - °C), ΔT_i is the temperature difference between feed water and flue gas (°C), ΔT_e is the temperature difference between outlet water and outlet flue gas from economizer. (use the value in Table 3.)

Next, rate of heat transfer in the economizer can be calculated using Equation 8.

$$Q_{ECO} = \dot{m}_s c_g (t_{g1} - t_{g2})$$

$$= U_o A_o \Delta T_{l,m} \quad (8)$$

where Q_{ECO} is heat recovery from the economizer (W), U_o is the overall heat transfer coefficient of the economizer. ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)

The heating surface area of the economizer (A_o) is calculated using Equation 9.

$$A_o = \frac{\dot{Q}_{ECO}}{U_o \Delta T_{l,m}} \quad (9)$$

And the economizer configuration from the calculation is shown in Figure 4.

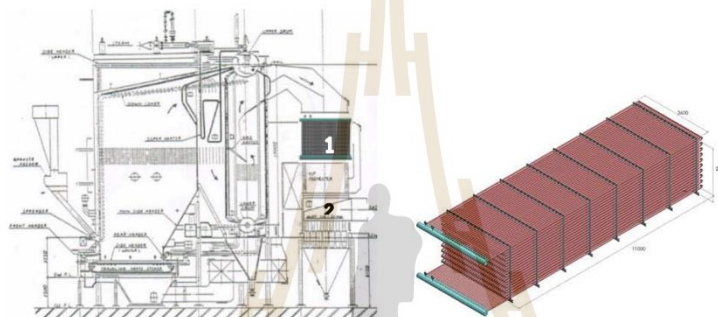


Fig. 4. Configuration of the economizer.

Next, the boiler efficiency after implementing the energy conservation measure (installing the economizer) can be calculated by Equation 10.

$$\eta = \frac{m_s (h_s - h_w)}{(Q_{old} - Q_{ECO})} \quad (10)$$

where h_s is the enthalpy of steam at P and t_s (kJ/kg), h_w is the enthalpy of feed water (kJ/kg), Q_{old} is heat input before implementing the energy conservation measure. (kJ/kg)

After that, fuel conservation, after installing the economizer can be calculated using Equation 11.

$$m_f = \frac{Q_{ECO}}{LHV} \quad (11)$$

where m_f is the mass flow rate of fuel (bagasse - kJ/kg), LHV is the low heating value of fuel (bagasse - kJ/kg)

Next, additional steam produced by the boilers from the recovery heat of the economizer can be calculated using Equation 12

$$m_s = \frac{\dot{m}_f \times \eta \times LHV}{h_s - h_w} \quad (12)$$

The additional steam can be calculated for additional electricity produced from a generator of the factory by using performance curve data of the generator brand SHINKO (As shown in Figure 5) with the capacity of 9 MW. The performance curve data can be regressed using the linear regression least square method. And the relationship of steam flow rate (Ton/hr) and electricity generation (MW) is as Equation 13. Electricity sales price the factory is around 3 Baht per kWh; this data is used to calculate the cost-effectiveness of the energy conservation measure in the next section.



Fig. 5. Steam turbine-generator brand SHINKO with 9 MW capacities.

$$P_e = 6.76m_s + 27 \quad (13)$$

where P_e is power generation from the generator (MW)

The calculation results of the boiler efficiency after installing the economizer (η), heat recovery from the economizer (Q_{ECO}), additional electricity of the factory, additional income from electricity sales, and investment cost of the economizer are shown in Table 4. The boiler efficiency is increased by 1.5% and can produce additional electricity for 2,362,800 kWh per year or 7,088,400 Baht per year. And by considering the maintenance cost of the system is around 1,000,000 Baht per year, therefore the net income is 6,088,400 Baht per year. While the investment cost of the system is 7,200,000 Baht, the payback period of the energy conservation measure is 1.2 years.

Table 4. Boiler performance and cost-effectiveness after implementing the energy conservation measure.

| Item | Abbreviation | Value | Unit |
|---|--------------|-----------|-----------|
| Boiler efficiency after installing the economizer | η | 82.69 | % |
| Heat recovery from the economizer | Q_{ECO} | 5.57 | MWt |
| Additional electricity | - | 2,362,800 | kWh/year |
| Additional income (3 Baht/kWh) | - | 7,088,400 | Baht/year |
| Investment cost (Installing the economizer) | - | 7,200,000 | Baht |
| Payback period | PB | 1.2 | Year |

4 Conclusions

This study aims to investigate the method to improve the boiler efficiency in Rerm-Udom sugar factory in Udon Thani. A field survey and data collection and measurements were conducted in this research. The boiler efficiency is measured and calculated using the indirect method. The results of this study show that the most significant loss of the boilers is heat loss due to exhaust gas, which is 17.2%, and the rest is around 2%. Installing the economizer is the proposed energy conservation measure to improve the performance of the boiler. After calculation the boiler performance after installing the economizer and cost-effectiveness, it

is found that the boiler efficiency is increased for 1.5% and can produce additional electricity for 2,362,800 kWh per year or 7,088,400 Baht per year and from the investment cost of 7,200,000 Baht and the payback period of 1.2 years.

References

1. The Department of Alternative Energy Development and Efficiency (DEDE), Biomass Database Potential in Thailand, (2009)
2. Department of Renewable Energy Development and Energy Efficiency, *Alternative Energy Development Plan: AEDP2015* (The Energy Policy and Planning Office (EPPO), 2015)
3. The Energy Policy and Planning Office (EPPO), *Thailand Power Development Plan 2018*, (2018)
4. Association, J.S., *JIS B8222: 1993 Land boilers-Heat balancing*, Tokyo, Japan (1993)
5. Department of Industrial Works, *Guide to improving the efficiency of very small biomass power plants*, D.o.F. industry, Editor, Bangkok, Thailand (2018)
6. Banpong Engineering, Boiler Plant. (Sukhothai Bio Energy, 2008)
7. E.A. Prangmanee, R. Prakaew and M. Pimsarn, *Study of Increasing Efficiency of Economizer for Energy Saving of Boiler*, in Proceedings of The 25th Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand 2011, 19 - 21 October 2011, Krabi, Thailand (2011)
8. T. Chummontien and P. Sujumnongtokun, *Study of the Efficiency of a Fluidized Boiler*, in Proceedings of The 23rd Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand 2009, 4 -7 November 2009, Chiang Mai, Thailand (2009)
9. P.K. Nag, *Power Plant Engineering* (McGraw Hill Education Private Limited, New York, 2008)
10. Y.A. Cengel, and A.J. Ghajar, *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications* (McGraw Hill Education Private Limited, New York, 2015)

การอนุรักษ์พลังงานสำหรับโรงงานน้ำตาลแบบดั้งเดิมของไทย:
กรณีศึกษาโรงงานน้ำตาลทรายเริ่มอุดม

Energy Conservation of Traditional Sugar Factory:
A Case Study of Rerm-Udom sugar factory

ประพนธ์ ชูประเสริฐ^{1*} กิรติ สุกฤษณ์¹ ปรีชา ทุมมุ² และ อุดร นามแสน³
Praphon Chooprasert^{1*}, Kreerati Sukluk¹, Preecha Tummu² and Udon Namsaen³

บทคัดย่อ

โรงงานน้ำตาลแบบดั้งเดิมโดยทั่วไปมักประสบปัญหาด้านประสิทธิภาพการจัดการพลังงาน งานวิจัยนี้จะสำรวจ ตรวจสอบ และวิเคราะห์สาเหตุของการสูญเสียพลังงานในระบบ เพื่อหามาตรการที่เหมาะสมในการแก้ปัญหาที่สามารถช่วยประหยัดพลังงาน กรณีศึกษาคือ โรงงานน้ำตาลทรายเริ่มอุดม จังหวัดอุดรธานี ผลจากการวิเคราะห์พบว่าในโรงงานมีการสูญเสียหลักๆ 4 อย่าง และงานวิจัยนี้ได้มีการเสนอมาตรการเพื่อลดการใช้พลังงาน คือ (1) การสูญเสียไปกับก๊าซไอเสียหม้อไอน้ำ มาตรการคือ การติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำบ่อน พบว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพหม้อไอน้ำได้ 3.8% เทียบเป็นไฟฟ้าที่ผลิตได้ 292,716 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อปี คิดเป็นเงิน 1,229,409 บาทต่อปี ระยะเวลาคืนทุน 5.86 ปี (2) การสูญเสียไปกับการไหลเวียนหม้อไอน้ำ มาตรการคือ การติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมน้ำไหลเวียนอัตโนมัติ พบว่า สามารถเพิ่มประสิทธิภาพหม้อไอน้ำได้ 0.3% เทียบเป็นไฟฟ้าที่ผลิตได้ 85,738 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อปี คิดเป็นเงิน 360,098 บาทต่อปี ระยะเวลาคืนทุน 3.05 ปี (3) การสูญเสียไปกับอุปกรณ์ที่ไม่หุ้มฉนวน มาตรการคือ หุ้มฉนวนถังน้ำคอนเดนเสท สามารถผลิตไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้น 79,454 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อปี คิดเป็นเงิน 333,708 บาทต่อปี ระยะเวลาคืนทุน 1.28 ปี และ (4) การสูญเสียเนื่องจากการจัดการการใช้ไอน้ำในกระบวนการผลิต มาตรการคือ การเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้ไอน้ำในโรงงาน โดยการนำไอน้ำทั้งหมดที่ผลิตได้จากหม้อไอน้ำไปใช้ที่กังหัน ไอน้ำขับเคลื่อนกังหันไฟฟ้าก่อน แล้วจึงนำไอน้ำที่ออกจากกังหันไอน้ำไปใช้ในกระบวนการผลิต มาตรการนี้จะผลิตไฟฟ้าได้เพิ่ม 820,829 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อปี คิดเป็นเงิน 3,447,481 บาทต่อปี

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมจัดการพลังงานและโลจิสติกส์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

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

² สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุดรธานี อ.เมือง จ.อุดรธานี 41000

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

³ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย อ.เมือง จ.สงขลา 90000

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

* ผู้มีพันธะประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, email): chooprasert@gmail.com, Tel.: 061-952-9993,080-480-1040

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 as follows: (1) Heat loss due to exhaust gas. The measure is the installation of the economizer for increasing boiler efficiency. This can increase the boiler efficiency of 3.8% equivalent to the electricity produced 292,716 kWh/year corresponding to 1,229,409 Baht per year, and the payback period is 5.86 years; (2) Heat loss from blowdown, the measure is the installation of blowdown controller which helps increasing the boiler efficiency for 0.3% which equates to the electricity produced 85,738 kWh/year corresponding to 360,098 Baht per year. The payback period is 3.05 years (3) Radiation heat loss of the condensate tank. The measure is the installation of 2 inches thick insulation around the condensate tank. This helps increasing 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 due to improper steam management in the factory. The measure is to preliminarily use produced steam from the boiler for power generation. After that, the lower temperature steam from the steam turbine was supplied to production processes. This helps to increase the electricity by approximately 820,829 kWh/year, corresponding to 3,447,481 Baht per year.

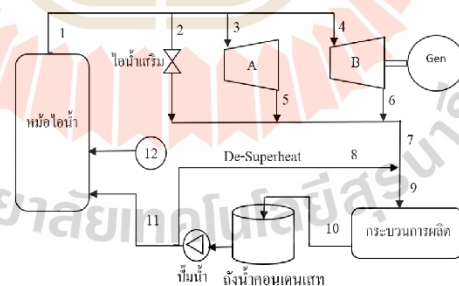
Keywords: sugar factory, steam boiler, energy conservation

บทนำ

ประเทศไทยมีชีวมวลเหลือเป็นจำนวนมากหลังการเก็บเกี่ยวผลผลิตที่ยังไม่ถูกนำไปใช้ประโยชน์ เช่น ทะลายปาล์ม (Sungkaew, 2015) ฟางข้าว (Ekburanawat & Thongsongyod, 2013; Rahman & Paatero, 2012) ไม้กระถินยักษ์ เหง้ามันสำปะหลัง (Arjhan, 2010) และกากอ้อย (Chooprasert & Limpiteeprakarn, 2011) แต่ละปี มีการเก็บเกี่ยวอ้อยในประเทศไทยประมาณ 8 ล้านตันต่อปี เทียบเท่าเป็นการผลิตไฟฟ้าประมาณ 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 (EPPPO), 2018) โดยในปัจจุบันมีโรงไฟฟ้าชีวมวลที่จ่ายไฟเข้าระบบแล้วจำนวน 220 แห่ง (The Energy Policy and Planning Office (EPPPO), 2020) อย่างไรก็ตาม จากงานวิจัยที่ทำการสำรวจโรงงานน้ำตาลจำนวน 47 แห่งในประเทศไทยชี้ให้เห็นว่าโรงไฟฟ้าพลังงานชีวมวลของโรงงานน้ำตาลแบบดั้งเดิมมีประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำ (Sathitbun-anan, Fungtammasan, Barz, Sajjakulnukit, & Pathumsawad, 2014) เนื่องจากในสมัยก่อน โรงงานถูก

ออกแบบโดยไม่ได้คำนึงถึงเรื่องการประหยัดพลังงานชีวมวล ได้แก่ ชานอ้อย หรือ แกลบ เป็นวัสดุเหลือใช้ทางเกษตรที่ไม่มีมูลค่า เพราะนโยบายรัฐบาลในสมัยนั้นยังไม่ได้รับซื้อไฟฟ้าจากเอกชน ปัจจุบันก็มีความพยายามหามาตรการเพื่อช่วยลดการใช้พลังงานแก่โรงงานน้ำตาล ซึ่งพบว่าบางกระบวนการมีความเป็นไปได้ที่จะลดลงได้กว่า 70% (Gul & Harasek, 2012; Khoodaruth, 2014; Sergeevich, Valerevna, & Dmitrievna, 2018) ในประเทศไทยเองก็มีมาตรการที่หาความเปลี่ยนแปลงในการใช้พลังงานของโรงงานน้ำตาลโดยใช้วิธีทำสมดุลพลังงานเพื่อจำลองการใช้พลังงาน ซึ่งสามารถช่วยให้หาสภาวะการณ์ทำงานของหม้อไอน้ำที่ดีที่สุดและสร้างอัตราผลตอบแทนภายในประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ (Wongrat & Sookkumnerd, 2015) ซึ่งจะเห็นได้ว่า มาตรการอนุรักษ์พลังงานสำหรับโรงงานน้ำตาลแบบดั้งเดิมของไทยยังมีน้อยมาก ขณะที่ประสิทธิภาพของการใช้พลังงานก็ค่อนข้างต่ำมาเช่นกัน

งานวิจัยนี้จึงสนใจสำรวจและวิเคราะห์ประสิทธิภาพการใช้พลังงานความร้อนของโรงงานน้ำตาลแบบดั้งเดิม (โรงงานน้ำตาลทรายขาวเริ่มอุดม จังหวัดอุดรธานี) เพื่อหาศักยภาพของระบบและแนวทางการอนุรักษ์พลังงานที่เป็นไปได้ ในการนี้จะมีการคำนวณผลประหยัดที่ได้ เงินลงทุน โดยประมาณ และคำนวณหาระยะเวลาคืนทุนเพื่อเป็นแนวทางให้แก่โรงงานน้ำตาลดังกล่าวนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป โดยโรงงานน้ำตาลทรายขาวเริ่มอุดม จำกัด ตั้งอยู่เลขที่ 11 หมู่ที่ 6 ต.หนองสระปลา อ.หนองหาน จ.อุดรธานี โดยถูกจัดให้อยู่ในประเภทโรงงานควบคุมขนาดใหญ่ ในประเภทอุตสาหกรรมอาหาร ผลิตภัณฑ์หลักของโรงงาน คือ น้ำตาลทรายประมาณ 1,600-1,700 ตันต่อวัน และผลิตไฟฟ้าประมาณ 17-18 MW ต่อวัน โดยในการผลิตไฟฟ้าจะมีการใช้ชานอ้อยเป็นเชื้อเพลิงประมาณปีละ 280,000 ตัน เผาเป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำขนาด 200 ตันต่อชั่วโมง ทำงานที่ความดัน 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 กังหันไอน้ำขับเคลื่อนลูกสูบ กังหันไอน้ำขับเคลื่อนสับอ้อยและเครื่องย่อยอ้อย (ชุดกังหัน A) และใช้ในการผลิตไฟฟ้าโดยส่งไปที่กังหันไอน้ำ (ชุดกังหัน B) ขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 12 MW และ 9 MW ตามลำดับ



ภาพที่ 1 สภาวะไอน้ำในโรงงานน้ำตาล

วิธีดำเนินการวิจัย

จากข้อมูลรายงานการจัดการพลังงานของโรงงานน้ำตาลทรายขาวเริ่มอุดม ฤดูหีบอ้อย พ.ศ. 2562 โดยมีระยะเวลาเดินเครื่อง 110 วัน พบว่าพลังงานความร้อนเป็นรูปแบบที่ใช้ในโรงงานมากที่สุดกว่า 90% การวิเคราะห์การใช้พลังงานจึงมุ่งเน้นการใช้พลังงานความร้อนเป็นหลัก โดยแบ่ง 2 ส่วน ได้แก่ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของหม้อไอน้ำ และการสูญเสียความร้อนในกระบวนการผลิต สำหรับการวิเคราะห์ประสิทธิภาพหม้อไอน้ำนั้นตัวแปรต้นที่ตรวจวัดค่าต่างๆ เพื่อนำไปคำนวณประสิทธิภาพ ดังตารางที่ 1 ในส่วนการวิเคราะห์การสูญเสียความร้อนในกระบวนการผลิต พิจารณาจากการสูญเสียความร้อนของอุปกรณ์ใช้น้ำที่ไม่ได้หุ้มฉนวน ซึ่งโรงงานแห่งนี้มีถังเก็บน้ำคอนเดนเสทขนาดใหญ่ มีตัวแปรต้นที่ต้องตรวจวัดค่า คือ อุณหภูมิผิวของถังน้ำคอนเดนเสท เพื่อใช้คำนวณความร้อนสูญเสีย และการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการใช้น้ำในโรงงาน โดยการทำสมดุลพลังงานและมวลของกระบวนการผลิตน้ำตาลและผลิตไฟฟ้า เพื่อให้ทราบถึงอัตราการใช้น้ำของระบบ

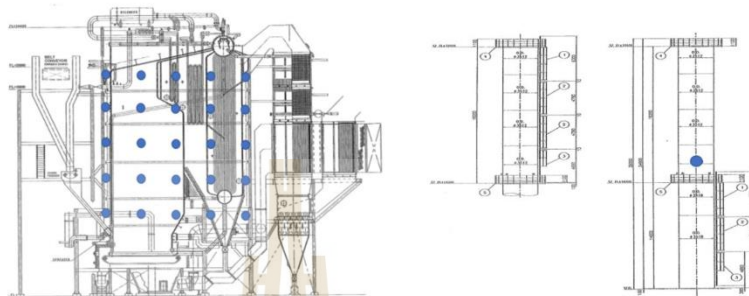
ตารางที่ 1 ค่าที่ทำการตรวจวัดเพื่อใช้คำนวณหาประสิทธิภาพพลังงานของหม้อไอน้ำ

| ลำดับ | ค่าที่ทำการตรวจวัด | เครื่องมือหรือวิธีการที่ใช้ |
|-------|---|---|
| 1 | ปริมาณก๊าซ O ₂ , CO, CO ₂ | เครื่องวัดการเผาไหม้ ซีห้อ Testo รุ่น 330 |
| 2 | อุณหภูมิก๊าซเผาไหม้ (Flue gas) | เครื่องวัดการเผาไหม้ ซีห้อ Testo รุ่น 330 |
| 3 | อุณหภูมิผิวของหม้อไอน้ำ | กล้องถ่ายภาพความร้อน ซีห้อ Testo รุ่น 865 |
| 4 | การ ไบลด์ดาวน์ (Blowdown) | เอกสารตรวจสอบรายวัน |
| 5 | คาร์บอนจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ (Unburned carbon) | ส่งวิเคราะห์ที่ห้องปฏิบัติการ |

1. การวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของหม้อไอน้ำ

การตรวจวัดประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำได้ทำในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ของปี พ.ศ. 2563 เป็นการตรวจวัดด้วยวิธีทางอ้อมที่เรียกว่า “Heat-loss method” ซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลาย (Association, 1993; Chooprsert, Suluksna, & Tumm, 2020) วิธีดังกล่าวนี้เป็นการใส่พลังงานเข้าหม้อไอน้ำ 100% แล้วหักลบการสูญเสียพลังงานต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นออก โดยใช้เครื่องมือตรวจวัด ได้แก่ กล้องถ่ายภาพความร้อน ซีห้อ Testo รุ่น 865 ช่วงการวัด -20 ถึง 280 °C ความถูกต้อง ± 2% ตรวจวัดองค์ประกอบและอุณหภูมิก๊าซเผาไหม้ (ปริมาณก๊าซ O₂, CO และ CO₂) โดยใช้เครื่องวัดการเผาไหม้ ซีห้อ Testo รุ่น 330, โดย O₂ ช่วงการวัด 0 ถึง 21 %vol. ความถูกต้อง ± 0.2% และ CO ช่วงการวัด 0 ถึง 8000 ppm ความถูกต้อง ± 10 ppm ส่วนค่า CO₂ เครื่องวัดการเผาไหม้จะนำค่า O₂ ที่วัดได้มาคำนวณ และทำการวัดคาร์บอนที่เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ (เก็บตัวอย่างซีแฉ่) โดยการส่งวิเคราะห์ที่ห้องปฏิบัติการ เป็นการตรวจวัดและวิเคราะห์ประสิทธิภาพตามมาตรฐาน JIS B8222: 1993 (Association, 1993) ซึ่งวัดอุณหภูมิผิวผนังหม้อไอน้ำ ทั้ง 4 ด้าน คือ ด้านหน้า ด้านข้างทั้งสอง และด้านหลัง จำนวน 3 จุด วัดเป็นกิริยะห่างจุดละ 1 เมตร นำค่าเฉลี่ยมาใช้คำนวณ การวัดองค์ประกอบและอุณหภูมิก๊าซเผาไหม้นั้น โดยการนำเครื่องวัดการเผาไหม้ วัดที่ปล่องควันของหม้อไอน้ำซึ่งผู้ผลิตกำหนดตำแหน่งจุดวัดมาให้ ทำการวัดจำนวน 3 ซี้า และนำค่าเฉลี่ยมาใช้ ตัวอย่างจุดวัดแสดงในภาพที่ 2

สำหรับชี้นำจะเก็บตัวอย่างที่บริเวณใต้ถังชี้นำใต้ห้องเผาไหม้ ไล่ลงชั้น 0.5 kg จำนวน 10 จุด ส่งไปวิเคราะห์ตามมาตรฐาน EN 14774 และ EN 14775 ที่ห้องปฏิบัติการ บจก. เอสจีเอส (ประเทศไทย) (SGS (THAILAND) LIMITED, 2020)



ภาพที่ 2 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิที่ผนังและก๊าซไอเสียที่ปล่องควัน

เมื่อได้ค่าตรวจวัดแล้วก็นำผลไปคำนวณหาความร้อนสูญเสียที่เกิดขึ้นได้แก่ การสูญเสียจากก๊าซไอเสีย (L1) การสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (L2) การสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่หมด (L3) การสูญเสียจากการแผ่รังสี (L4) และ การสูญเสียจากการ โบลว์คาวน์ (L5) คำนวณได้ตามสมการที่ (1)-(5) ตามลำดับ (Gul & Harasek, 2012; Sathitbun-anan et al., 2014) และประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำคำนวณได้ตามสมการที่ (6)

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

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

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

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

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

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

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, $^{\circ}\text{C}$
 t_o คือ อุณหภูมิอากาศ, $^{\circ}\text{C}$
 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}_{hd} | คือ อัตราการ ไบโวลิวคาน์, kg/h |
| h_{hd} | คือ ค่าเอนทัลปีของน้ำ ไบโวลิวคาน์, kJ/kg |
| h_{FW} | คือ ค่าเอนทัลปีของน้ำป้อน, kJ/kg |
| L_1 | คือ ผลรวมของความสูญเสียทั้งหมด, kJ/kg |
| $HL + Q$ | คือ ผลรวมของความร้อนป้อนเข้าสู่ระบบ, kJ/kg |

2. การสำรวจพลังงานสูญเสียและการทำสมดุลพลังงาน

งานวิจัยนี้ได้สำรวจหาความสูญเสียของระบบบนหัวข้อแสดงดังตารางที่ 2 จากนั้นจึงนำเอาข้อมูลที่ได้จากการสำรวจมาวิเคราะห์สมดุลพลังงานดังที่แสดงในภาพที่ 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, $kJ/(kg^\circ C)$ |
| | C_{p_o} | คือ ค่าความจุความร้อนของไหลออกจากระบบ, $kJ/(kg^\circ C)$ |

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 และการนำเสนอมาตรการอนุรักษ์พลังงาน ได้มีการนำเสนอผลการศึกษาลើใน (Choopser et al., 2020) พร้อมทั้งคำนวณหาความสูญเสียต่าง ๆ 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 ถังเก็บน้ำคอนเดนเสทยังไม่มีการหุ้มฉนวน พบว่า มีอุณหภูมิผิวเฉลี่ยเท่ากับ 45°C อุณหภูมิอากาศแวดล้อมเท่ากับ 35°C ความร้อนสูญเสียจากถังเก็บน้ำคอนเดนเสท โดยการแผ่รังสีและการพาความร้อน สามารถคำนวณด้วยสมการที่ได้จากการทดลอง (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 อุณหภูมิผิวของถังเก็บน้ำคอนเดนเสท, K

T_a คือ อุณหภูมิอากาศ, K

V_m คือ ความเร็วลมของอากาศ, m/s (ในการคำนวณนี้ใช้ 2 m/s)

2.2 ความร้อนสูญเสียเนื่องจากการใช้น้ำในโรงงาน (ใช้น้ำเสริมส่งตรงจากหม้อไอน้ำ) เพื่อนำไปใช้ใน

กระบวนการผลิต

โดยปกติแล้วไอน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตจะเป็นไอน้ำความดันต่ำ (Sat. steam) ที่ออกจากกังหันไอน้ำ (สภาวะที่ 5-6) ในภาพที่ 1 อย่างไรก็ตาม กรณีโรงงานน้ำตาลแบบดั้งเดิมนี้มีการผลิตและส่งจ่ายไอน้ำส่งตรงเข้าไปในกระบวนการผลิต เนื่องจากมีความสะดวกสบายในการใช้งาน โดยหลักถือว่าเป็นพฤติกรรมการใช้ไอน้ำที่เกินความจำเป็น จึงต้องนำไอน้ำจากหม้อไอน้ำ (Superheated steam) ไปลดอุณหภูมิ (Desuperheater) (สภาวะที่ 2) เพื่อนำไปใช้เสริมในกระบวนการผลิต ถือเป็น การสูญเสียพลังงานโดยไม่จำเป็นอย่างมาก จากการทำสมดุลพลังงานตามขั้นตอนที่ 2 สำหรับการใช้น้ำที่กระบวนการต่างๆ ตามภาพที่ 1 จะได้ผลการคำนวณดังตารางที่ 3-4 ซึ่งพบว่ากระบวนการผลิตต้องการใช้น้ำจริงเพียง 327 ton/hr (สภาวะที่ 9) ในความเป็นจริงแล้วไอน้ำทั้งหมดที่ออกจากหม้อไอน้ำควรนำไปใช้ที่กังหันขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จากนั้นจึงนำไอน้ำที่ออกจากกังหันไปใช้ในกระบวนการผลิต ซึ่งเป็นการประหยัดพลังงานเป็นอย่างมาก

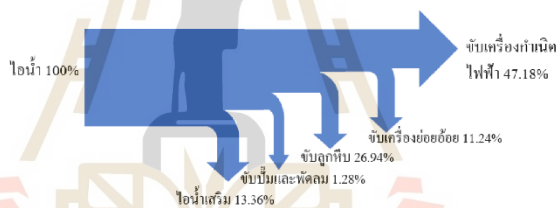
ตารางที่ 3 ผลการทำสมดุลพลังงานด้านแรงดัน 29 bar_g ของโรงงาน

| 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 โดยพลังงานความร้อนในรูปไอน้ำทั้งหมดถูกส่งไปยังกังหันขับเคลื่อนปั๊มน้ำและพัดลม 1.28% ขับลูกทึบ 26.94% ขับเครื่องย่อยอ้อย 11.24% ขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อผลิตไฟฟ้า 47.18% และส่งจ่ายไอน้ำเสริมให้กระบวนการผลิต 13.36%



ภาพที่ 6 แผนผังการใช้ไอน้ำของโรงงานในปัจจุบัน

มาตรการอนุรักษ์พลังงานที่เสนอแนะ

1. การติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำป้อน (Economizer)

สิ่งที่ได้กล่าวมาแล้วว่ามาตรการนี้ได้นำเสนอใน (Chooprsert et al., 2020) โดยผลการศึกษาความร้อนสูญเสียและประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ พบว่าความร้อนสูญเสียจากก๊าซไอเสียสูงสุด 17.2% และยังพบว่าก๊าซไอเสียที่ปล่องมีอุณหภูมิสูงถึง 196°C ดังนั้น การติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำป้อนเพื่อนำเอาความร้อนทิ้งมาแลกเปลี่ยนให้กับน้ำป้อน เพื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 105 °C เป็น 135 °C ประสิทธิภาพหม้อไอน้ำจะเพิ่มขึ้น สามารถผลิตไอน้ำเพิ่มขึ้น โดยความร้อนที่ประหยัดได้ ประสิทธิภาพหม้อไอน้ำหลังปรับปรุง อัตราการใช้เชื้อเพลิง และอัตราการผลิตไอน้ำที่ผลิตได้ สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

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

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

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

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

โดย Q_{swe} 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

Cp_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

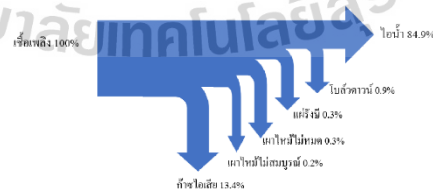
สำหรับไฟฟ้าที่ผลิตได้เมื่อส่งจ่ายไอน้ำเข้ากังหันขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จากสมการสมรรถนะของกังหันที่ติดตั้งในโรงงาน ยี่ห้อ SHINKO ขนาด 9 MW (Chooprsert et al., 2020)

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

โดย P_e คือ พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้, MW

m_s คือ อัตราการไหลของไอน้ำ, Ton/hr

การประเมินทางเศรษฐศาสตร์เริ่มจากคำนวณปริมาณความร้อนและเชื้อเพลิงที่ประหยัด (สมการที่ 10 และ 11) จากนั้นคำนวณหาปริมาณไอน้ำที่ผลิตได้จากเชื้อเพลิง (สมการที่ 12) นำค่าไอน้ำที่ผลิตได้ไปประเมินหาปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้ (สมการที่ 13) (Chooprsert et al., 2020) ราคาขายไฟฟ้า ณ วันที่เก็บข้อมูลหน่วยละ 4.2 บาท (คณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน, 2558) นำไปคำนวณความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ดังแสดงใน ตารางที่ 5 และ แสดงแผนผังประสิทธิภาพและการสูญเสียความร้อนได้ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 แผนผังประสิทธิภาพหม้อไอน้ำเมื่อติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำป้อน

2. การติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมอัตราน้ำโบว์คาวน์ (Blowdown)

การโบว์คาวน์ เป็นการสูญเสียพลังงานหม้อไอน้ำที่สำคัญอีกอย่างหนึ่ง รองจากการสูญเสียไปกับก๊าซไอเสีย จากผลการศึกษาประสิทธิภาพหม้อไอน้ำของโรงงาน พบว่า สามารถลดความร้อนสูญเสียจากการโบว์คาวน์ (L_5) การควบคุมการโบว์คาวน์ทำได้โดยการควบคุมค่า TDS (Total Dissolved Solids) หรือ ควบคุมค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) ของน้ำในหม้อไอน้ำ สามารถคำนวณจากสมการที่ 14-15 (Eiamworawutthikul, 2018)

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

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

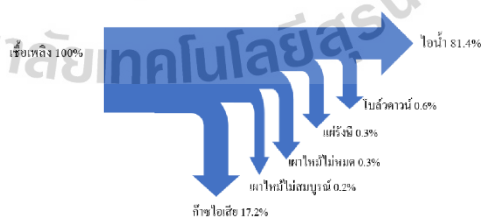
โดย

- m_{BD} คือ อัตราน้ำโบว์คาวน์, Ton/hr
- m_W คือ อัตราน้ำป้อน, Ton/hr
- R_{BD} คือ สัดส่วนการโบว์คาวน์
- 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 ค่าควบคุมคุณภาพน้ำโบว์คาวน์ เท่ากับ $6,000 \mu\text{s/cm}$ (Ahmed & Babiker, 2017) ซึ่งคำนวณสัดส่วนการโบว์คาวน์ จากสมการที่ (14) ได้เท่ากับ 0.007 และอัตราน้ำโบว์คาวน์ที่เหมาะสม เท่ากับ 2.28 Ton/hr แต่ปัจจุบันโรงงานมีการโบว์คาวน์อยู่ที่ 5.0 Ton/hr ซึ่งโบว์คาวน์เกิน 2.72 Ton/hr (m_{NBD}) เนื่องจากการโบว์คาวน์นี้เป็น การปล่อยน้ำเดือดทิ้ง ความร้อนที่ประหยัดสามารถคำนวณ ได้ดังสมการ

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

ความดัน 29 bar-g จะได้ h_f เท่ากับ 1007.8 kJ/kg จำนวนตามสมการที่ 16 ได้ความร้อนเท่ากับ 761.4 kW และจำนวนตามสมการที่ 11-14 จะได้พลังงานไฟฟ้าเพิ่ม $85,747 \text{ kWh/ปี}$ คิดเป็นเงิน $360,137$ บาทต่อปี คำนวณติดตั้ง อุปกรณ์ควบคุมน้ำโบว์คาวน์อัตโนมัติเท่ากับ $1,100,000$ บาท จึงได้ระยะเวลาคืนทุนเป็น 3.05 ปี ดังรายละเอียดใน ตารางที่ 5 และ แสดงแผนผังประสิทธิภาพและการสูญเสียความร้อน ได้ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 แผนผังประสิทธิภาพหม้อไอน้ำเมื่อติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมน้ำโบว์คาวน์อัตโนมัติ

ตารางที่ 5 ผลประเมินตามมาตรการติดตั้งเครื่องสูบน้ำป้อนและติดตั้งโบลว์ดาวน์อัตโนมัติ

| รายการ | สัญลักษณ์ | หน่วย | ติดตั้งเครื่องสูบน้ำป้อน | ติดตั้งโบลว์ดาวน์อัตโนมัติ |
|---|------------|-----------------|--------------------------|----------------------------|
| 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 ดังรายละเอียดในตารางที่ 7 แผนผังการใช้ไอน้ำดังแสดงในภาพที่ 9



ภาพที่ 9 แผนผังการใช้ไอน้ำของโรงงานเมื่อหุ้มฉนวนถังคอนเดนเสท

4. การเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ไอน้ำในโรงงาน

ดังที่กล่าวในหัวข้อ 3.2.2 ว่าไอน้ำทั้งหมดที่ผลิตได้จากหม้อไอน้ำควรนำไปใช้ที่กังหันไอน้ำเพียงอย่างเดียว จากนั้นจึงนำไอน้ำที่ออกจากกังหัน ไปใช้ในกระบวนการผลิต จึงจะเป็นการจัดการพลังงานที่เหมาะสม หากพิจารณาว่าไอน้ำที่นำไปลดอุณหภูมิไอน้ำในสภาวะที่ 2 (รูปที่ 1) อยู่ที่ 42 Ton/hr (ตารางที่ 3) หากนำไอน้ำนี้ไปใช้ในการผลิตไฟฟ้า จำนวนตามสมการที่ 10-14 พบว่าจะผลิตไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้นปีละ 820,829 kWh คิดเป็นเงิน 3,477,482 บาทต่อปี โดยไม่ต้องมีเงินลงทุนเพิ่มแต่อย่างใด ดังรายละเอียดในตารางที่ 7 หลังใช้มาตรการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ไอน้ำแล้ว ไอน้ำจะถูกส่งไปยังกังหันผลิตไฟฟ้าเพิ่มเป็น 60.54% เนื่องจากไม่ส่งไอน้ำเสริมไป

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

(2) มาตรการติดตั้งชุดควบคุมการ โบลว์ควานอัตโนมัติเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ พบว่า สามารถลดน้ำโบลว์ควานที่เกิน 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 โดยการนำไอน้ำทั้งหมดที่ผลิตได้จากหม้อไอน้ำไปใช้ที่กังหันไอน้ำขับเคลื่อนกำเนิดไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว จากนั้นจึงนำไอน้ำที่ออกจากกังหันไปใช้ในกระบวนการผลิต คิดเป็นไฟฟ้าที่ผลิตได้เพิ่ม 820,829 kWh/year คิดเป็นเงิน 3,447,482 บาทต่อปี

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ด้วยความกรุณาอย่างสูงจาก บริษัท โรงงานน้ำตาลทรายขาวเริ่มอุดม จำกัด จ. อุตรดิตถ์ 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.
- Arjhan, W. 2010. **Research Report Study of a biomass feedstock production plant for rural**. Suranaree University of Technology, Thailand.
- Association, J.S. 1993. **Land boilers-Heat balancing**. JIS B8222:1993. Tokyo, Japan.
- Chooprasert, P. and Limpiteprakarn, 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, Thailand.
- 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, Thailand.
- Department of Renewable Energy Development and Energy Efficiency. 2015. **Alternative Energy Development Plan: AEDP2015**. The Energy Policy and Planning Office (EPPO). Bangkok, Thailand.

- Eiamworawutthikul, C. 2018. **Energy Saving Estimation Template (EnSET)**. Available Source: <https://WWW.sites.google.com/spu.ac.th/enset/home>, November 17, 2018.
- 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.
- 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.
- Khooaruth, 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.
- SGS (THAILAND) LIMITED. 2020. **Report No: MIN 2020-2002574-002**. February 27, 2020.
- Sungkaew, W. 2015. Potential of Oil Palm Biomass Residues for Electricity Generation in Southern Thailand. Master thesis, Prince of Songkla University.
- 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.
- The Energy Policy and Planning Office (EPPO). 2018. **Thailand Power Development Plan 2018**. Available Source: <http://WWW.eppo.go.th>, March 30, 2018.
- The Energy Policy and Planning Office (EPPO). 2020. **Renewable Energy Power Plant Information**. Available Source: <https://www.dede.go.th>, August 1, 2020.
- Wongrat, W., & Sookkumnerd, C. 2015. A Model of System Improvement for Electricity Cogeneration Sugar Factories. **Farm Engineering and Automation Technology Journal**, 1(1), 33-41.



การศึกษาประสิทธิภาพการใช้น้ำในโรงงานน้ำตาลแบบดั้งเดิมของไทยโดยการจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ : กรณีศึกษาโรงงานน้ำตาลทรายเริ่มอุดม จังหวัดอุดรธานี

ประพนธ์ ชูประเสริฐ, เกริญไกร رایณะสุข และ กิรติ สุกข์ณัฒน์*

สาขาวิชาวิศวกรรมจัดการพลังงานและโลจิสติกส์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา
ปรีชา ทูมมู

สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี อุดรธานี

* ผู้รับผิดชอบประสานงาน โทรศัพท์ 089-765-6526 อีเมล: keerati@sut.ac.th

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการใช้น้ำในโรงงานน้ำตาลแบบดั้งเดิมของไทยโดยการจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ เพื่อเป็นแนวทางในการประเมินและพยากรณ์ความต้องการใช้น้ำในกระบวนการผลิตน้ำตาลทรายดิบและไฟฟ้าในโรงงานน้ำตาลแบบดั้งเดิมของไทย โดยใช้กรณีศึกษาของโรงงานน้ำตาลทรายเริ่มอุดม จ.อุดรธานี โดยการวิเคราะห์สมดุลพลังงานและมวล และเปรียบเทียบผลค่านอกกับค่าความต้องการไอน้ำจริง ตัวแปรที่ใช้ในการประเมินความต้องการใช้น้ำประกอบด้วยปริมาณไอที่เข้าที่บ ปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตใช้ในโรงงาน และปริมาณไฟฟ้าเพื่อขาย โดยได้ทำการคำนวณเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการคำนวณและค่าจริงจากข้อมูลของโรงงาน ผลที่ได้พบว่า ค่าที่ได้จากการคำนวณและค่าที่ใช้จริงมีความใกล้เคียงกันมาก โดยมีความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 0.52-7.57% ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปเป็นต้นแบบในการประเมินหาความต้องการการใช้น้ำในโรงงานน้ำตาลแบบดั้งเดิมของไทย และช่วยในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการผลิตและใช้น้ำได้

คำสำคัญ: การสมดุลพลังงาน การจำลองระบบพลังงาน โรงงานน้ำตาล



A Study of Steam Consumption Efficiency of Thai Traditional Sugar Factory Using Thermodynamic Simulation Method: A Case Study of Rerm-udom sugar factory

Praphon Chooprasert, Kriengkrai Rayanasuk and Keerati Suluksna*

Energy and Logistics Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology,
Nakhon Ratchasima, Thailand

Preecha Tummua

Energy Engineering, Faculty of Technology, Udon Thani Rajabhat University, Udon Thani, Thailand

*Corresponding Author, Tel. 089-765-6526, E-mail: keerati@sut.ac.th

Abstract

This study aims to study steam consumption efficiency of Thai Traditional Sugar Factory by using the thermodynamic simulation method. To be a guideline for assessing and forecasting the demand for steam in the production of raw sugar and electricity in traditional Thai sugar factories using a case study of the sugar factory in Udon Thani province. The method uses analyzing the energy and mass balance method. After that, the calculation results and the actual demand for steam is compared. The variables used in the calculations to assess the demand for steam consisted of the amount of cane crushed, the amount of electricity produced for use in the factory, and the amount of electricity for sale to PEA. The results are found that the calculation results and the actual values are very close. The tolerance is 0.52-7.57%. Therefore, it is concluded that the results of this study could be used as a model for assessing the demand for steam in traditional Thai sugar factories. And help in the analysis of production and using the efficiency of steam.

Keywords: Energy Balance, Energy Simulation, Sugar Factory



1. บทนำ

ประเทศไทยมีชีวมวลเหลือหลังการเก็บเกี่ยวจำนวนมาก โดยเฉพาะอ้อยมีการเก็บเกี่ยวเกือบ 8 ล้านตันต่อปี [1] ปัจจุบันได้นำมาผลิตไฟฟ้าเพื่อใช้เองในโรงงาน รวมถึงผลิตเพื่อส่งจำหน่ายแก่การไฟฟ้า จากการสำรวจโรงงานน้ำตาล 47 แห่งในประเทศไทย พบว่าการผลิตไฟฟ้าของโรงงานน้ำตาลสมัยใหม่มีประสิทธิภาพสูงกว่าโรงงานน้ำตาลแบบดั้งเดิมมาก [2] ที่ผ่านมามีการนำมาตรการอนุรักษ์พลังงานมาใช้ พบว่าสามารถช่วยลดการใช้พลังงานได้กว่า 70% ในบางกระบวนการ [3-6] จากแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ.2558-2579 มีเป้าหมายเพิ่มสัดส่วนการใช้พลังงานทางเลือกให้เป็น 30% ภายในปี พ.ศ. 2579 [7] นอกจากนี้ แผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2561 - 2580 มีเป้าหมายเพิ่มกำลังการผลิตไฟฟ้าจากชีวมวลให้ได้ 500 MW [8]

การใช้ไอน้ำในโรงงานน้ำตาลมีความสำคัญต่อการผลิตน้ำตาลทรายเป็นอย่างมาก งานวิจัยที่ผ่านมา ได้มีการศึกษาการจำลองระบบทางความร้อน การวิเคราะห์ระบบการระเหยไอน้ำของน้ำอ้อย และการวิเคราะห์สมรรถนะของเครื่องระเหยไอน้ำที่ได้ นำพลังงานทางความร้อนมาใช้ในกระบวนการผลิตน้ำตาลทราย [14] ในขณะเดียวกัน [15] ได้ศึกษาการจำลองระบบทางเทอร์โมไดนามิกส์ และประเมินประสิทธิภาพการใช้ไอน้ำในโรงงานน้ำตาล และ [16] ได้ศึกษาการใช้สมการที่สามารถอธิบายถึงผลกระทบจากความร้อนของเครื่องระเหยไอน้ำในโรงงานน้ำตาล

บริษัทโรงงานน้ำตาลทรายขาวเริ่มอุดม จำกัด ตั้งอยู่ที่อำเภอหนองหาน จังหวัดอุดรธานี ผลิตน้ำตาลทรายขาว และน้ำตาลทรายดิบ มีการใช้ชานอ้อยกว่าปีละ 280,000 ตัน เผาเป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำ ขนาด 200 ตันต่อชั่วโมง ทำงานที่ความดัน 29 bar-g จำนวน 2 ชุด ผลิตไฟฟ้าทั้งใช้เองราว 50% ที่เหลือส่งจำหน่าย อย่างไรก็ตาม เนื่องจากเป็นโรงงานแบบดั้งเดิม ดังนั้น จึงมีความสนใจจะเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าและลดการใช้พลังงานในกระบวนการผลิตให้ได้มากขึ้น

งานวิจัยนี้สนใจประเมินความต้องการใช้ไอน้ำในกระบวนการผลิตน้ำตาลทรายดิบและการผลิตไฟฟ้าในโรงงานน้ำตาลทรายขาวเริ่มอุดม เพื่อนำไปสู่การทำนายพลังงานที่ใช้ต่อการผลิตที่เหมาะสม โดยการวิเคราะห์สมดุลพลังงานและมวล และเปรียบเทียบผลคำนวณที่ได้จากแบบจำลองกับค่าการใช้ไอน้ำจริงในกระบวนการผลิต ผลลัพธ์ที่ได้จะสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางแก่โรงงานน้ำตาลอื่นในระดับการผลิตใกล้เคียงกันในประเทศไทยเพื่อการอนุรักษ์พลังงานได้ต่อไป

2. วิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้การวิเคราะห์สมดุลมวลและพลังงานในการผลิตน้ำตาลทรายดิบและไฟฟ้า บนหลักการทางเทอร์โมไดนามิกส์แบบสภาวะคงตัว เพื่อคำนวณหาความต้องการใช้ไอน้ำในกระบวนการผลิตของโรงงาน 3 กระบวนการหลัก ได้แก่ การหีบอ้อย การอุ่นและต้มน้ำอ้อย การเคี้ยวน้ำตาลทราย โดยการคำนวณแต่ละขั้นตอนเป็นดังต่อไปนี้

2.1 การจำลองกระบวนการหีบอ้อย

การหีบอ้อยประกอบด้วยเครื่องจักรหีบอ้อย (รูปที่ 1) และมีฝั่งกระบวนการหีบอ้อย ดังรูปที่ 2 ซึ่งอัตราอัตราการไหลชานอ้อยออกลูกหีบคำนวณได้ตามสมการที่ (1) [9]

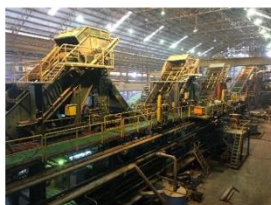
$$\dot{m}_{Bag} = \dot{m}_C (\% \text{ Bag} / 100) \quad (1)$$

เมื่อ

\dot{m}_{Bag} คือ อัตราการไหลชานอ้อยออกลูกหีบ (T/day)

\dot{m}_C คือ อัตราการหีบอ้อยเข้า (T/day)

$\% \text{ Bag}$ คือ เปอร์เซนต์ชานอ้อยต่ออ้อยที่หีบ (%)



รูปที่ 1 เครื่องจักรลูกทึบอ้อย



รูปที่ 3 กังหันขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 9 MW



รูปที่ 2 ผังกระบวนการที่บอ้อย



รูปที่ 4 กังหันขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 12 MW

อัตราน้ำพรมลูกทึบและอัตราการไหลน้ำอ้อยที่ออกจากชุดลูกทึบคำนวณได้ตามสมการที่ (2) และ (3) ตามลำดับ

$$\dot{m}_{im} = \dot{m}_c (\%Imv / 100) \quad (2)$$

$$\dot{m}_j = \dot{m}_c + \dot{m}_{im} - \dot{m}_{bo} \quad (3)$$

อัตราการใช้น้ำของกังหันไอน้ำขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 9 MW และขนาด 12 MW คำนวณได้ตามสมการที่ (4) และ (5) ตามลำดับ ซึ่งเป็นสมการสมรรถนะจากผู้ผลิต

เมื่อ \dot{m}_{im} คือ อัตราการไหลน้ำพรมลูกทึบ (T/day)
%Im คือ เปอร์เซ็นต์น้ำพรมลูกทึบที่ใช้ (%)
 \dot{m}_j คือ อัตราการไหลน้ำพรมลูกทึบ (T/day)

$$\dot{m}_s = 27 + 0.0068P_e \quad (4)$$

$$\dot{m}_s = 23 + 0.0071P_e \quad (5)$$

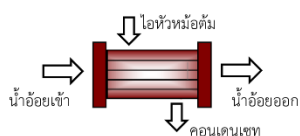
เมื่อ \dot{m}_s คือ อัตราการไหลไอน้ำเข้ากังหัน (T/day)
 P_e คือ กำลังไฟฟ้าที่ผลิต (kW)

2.2 การจำลองกระบวนการผลิตไฟฟ้า

การผลิตไฟฟ้าใช้กังหันไอน้ำชนิด Backpressure ขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 2 ชุด ขนาด 9 MW สำหรับผลิตไฟฟ้าใช้ในโรงงาน (รูปที่ 3) และขนาด 12 MW สำหรับผลิตไฟฟ้าจำหน่ายแก่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค แบบ 1 feeder ไม่เกิน 8 MW แรงดัน 22 kV (รูปที่ 4)

2.3 การจำลองกระบวนการอุ่นและต้มน้ำอ้อย

หม้ออุ่นน้ำอ้อย (heater) เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ (shell and tube) ทำหน้าที่เพิ่มอุณหภูมิให้น้ำอ้อยก่อนส่งไปยังหม้อต้มโดยใช้ไอหัวหม้อ (bleeding vapor) จากหม้อต้มมาแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำอ้อย (รูปที่ 5) สมดุลพลังงานและมวลของระบบเป็นตามสมการที่ (6) [4]



รูปที่ 5 ผังกระบวนการอุ่นน้ำอ้อย

$$\dot{m}_{h,j} = \frac{\dot{m}_j C_{p,j} (T_{j,o} - T_{j,i})}{\eta_{\text{Heater}} \times h_{fg @ T_{\text{Heater}}} } \quad (6)$$

เมื่อ

$\dot{m}_{h,j}$ คือ อัตราการไหลของไอน้ำเข้าหม้ออุ่น (T/day)

\dot{m}_j คือ อัตราการไหลของน้ำอ้อยเข้าหม้ออุ่น (T/day)

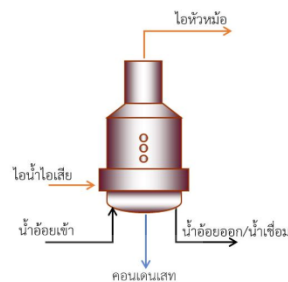
$T_{j,i}$ คือ อุณหภูมิน้ำอ้อยเข้าหม้ออุ่น (°C)

$T_{j,o}$ คือ อุณหภูมิน้ำอ้อยออกหม้ออุ่น (°C)

$h_{fg @ T_{\text{Heater}}}$ คือ ความร้อนแฝงไอเข้าหม้ออุ่น (kJ/kg °C)

$C_{p,j}$ คือ ความจุความร้อนน้ำอ้อยเข้าหม้ออุ่น (kJ/kg °C)

หม้อต้มระเหยน้ำอ้อย (evaporator) ทำหน้าที่ให้น้ำอ้อยเดือดระเหยเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอหัวหม้อ ทำให้น้ำอ้อยส่วนที่เหลือเข้มข้นขึ้น กระบวนการนี้เป็นการต้มแบบเรียงลำดับทั้งหมด 4 ชั้น เรียกว่า Effect โดย Effect-1 ใช้ไอน้ำที่ออกจากกังหันไอน้ำ (exhaust steam) ส่วน Effect-2 ถึง Effect-4 ใช้ไอน้ำจากหัวหม้อในการให้ความร้อน น้ำอ้อยที่ออกจาก Effect สุดท้าย จะกลายเป็นน้ำเชื่อม (syrup) ที่จะถูกส่งต่อไปยังกระบวนการเคี้ยวตกผลึกต่อไป ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ผังกระบวนการต้มระเหยน้ำอ้อย

รูปที่ 7 แสดงระบบการใช้ไอน้ำในส่วนกระบวนการผลิตน้ำตาลโรงงานน้ำตาลทรายเริ่มอุดม อัตราการไหลของน้ำอ้อยออกจากหม้อต้มคำนวณจากการสมดุลมวลของแข็งตามสมการที่ (7) [10]

$$\dot{m}_{j,o} = \frac{\dot{m}_{j,i} Bx_i}{Bx_o} \quad (7)$$

อัตราการเดือดระเหยของน้ำอ้อยเกิดเป็นไอหัวหม้อคำนวณได้โดยใช้การสมดุลมวลตามสมการที่ (8) ส่วนอัตราการใช้น้ำในการต้มระเหยน้ำอ้อยใน Effect-1 คำนวณจากสมดุลพลังงานตามสมการที่ (9) [10]

$$\dot{m}_v = \dot{m}_{j,i} - \dot{m}_{j,o} \quad (8)$$

$$\dot{m}_{\text{evap}} = \frac{\dot{m}_v h_v - \dot{m}_v h_{f @ T_{j,i}} + \dot{m}_{j,o} C_{p,j} T_{j,o} - (\dot{m}_{j,i} - \dot{m}_v) C_{p,j} T_{j,i}}{\eta_{\text{Evap}} \times h_{fg @ T_{\text{Evap}}}} \quad (9)$$

เมื่อ

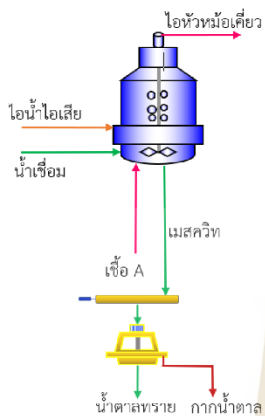
\dot{m}_{evap} คือ อัตราการใช้ไอน้ำของหม้อต้ม (T/day)

\dot{m}_v คือ อัตราการไหลของไอหัวหม้อต้ม (T/day)

$\dot{m}_{j,i}$ คือ อัตราการไหลของน้ำอ้อยเข้าหม้อต้ม (T/day)

$\dot{m}_{j,o}$ คือ อัตราการไหลของน้ำอ้อยออกหม้อต้ม (T/day)

$T_{j,i}$ คือ อุณหภูมิน้ำอ้อยเข้าหม้อต้ม (°C)



รูปที่ 9 การเคี้ยวน้ำตาล

สมดุลมวลของแข็งในหม้อเคี้ยวน้ำตาลตามสมการที่ (10) [11] ส่วนอัตราการตกผลึกน้ำตาลทรายคำนวณได้จากสมการที่ (11) [12] และอัตราการใช้น้ำในการเคี้ยวน้ำตาลคำนวณจากการสมดุลพลังงานได้ดังสมการที่ (12) [11]

$$\dot{m}_{mass} = \frac{\dot{m}_{syrup} Bx_{syrup}}{Bx_{mass}} \quad (10)$$

$$\dot{m}_{sugar} = \dot{m}_{mass} (Crystal\%mass) \quad (11)$$

$$\dot{m}_p = \frac{\dot{m}_i h_i - \dot{m}_f h_f + \dot{m}_{m,o} C_{p,m,o} T_{m,o} - (\dot{m}_{m,i} - \dot{m}_v) C_{p,m,i} T_{m,i}}{\eta_p \times h_{fg@T_p}} \quad (12)$$

- เมื่อ
- \dot{m}_{syrup} คือ อัตราการไหลน้ำเชื่อมเข้า (T/day)
 - Bx_{mass} คือ ความเข้มข้นน้ำเชื่อมเข้า (°Bx)
 - Bx_{syrup} คือ ความเข้มข้นเมสคิวทออก (°Bx)
 - \dot{m}_{sugar} คือ อัตราการไหลน้ำตาลทราย (T/day)

- $\dot{m}_{m,i}$ คือ อัตราการไหลเมสคิวทเข้า (T/day)
- $\dot{m}_{m,o}$ คือ อัตราการไหลเมสคิวทออก (T/day)
- $Crystal\%mass$ คือ เปอร์เซ็นต์การเกิดผลึกน้ำตาล (%)
- \dot{m}_{vp} คือ อัตราการใช้น้ำของหม้อต้ม (T/day)
- T_{mass} คือ อุณหภูมิเมสคิวท (°C)
- T_{syrup} คือ อุณหภูมิน้ำเชื่อม (°C)
- $h_{fg@vp}$ คือ ความร้อนแฝงไอน้ำเข้าที่อุณหภูมิหม้อเคี้ยว (kJ/kg °C)
- $C_{p,mass}$ คือ ความจุความร้อนของเมสคิวท (kJ/kg °C)
- $C_{p,syrup}$ คือ ความจุความร้อนของน้ำเชื่อม (kJ/kg °C)

2.5 การจำลองกระบวนการผลิตไอน้ำ

อัตราการใช้เชื้อเพลิงชานอ้อยของหม้อไอน้ำคำนวณได้จากสมการ (13) [13]

$$\dot{m}_f = \frac{\dot{m}_i (h_i - h_w)}{\eta \times LHV} \quad (13)$$

- เมื่อ
- \dot{m}_f คือ อัตราการใช้เชื้อเพลิงชานอ้อย (T/day)
 - \dot{m}_i คือ อัตราการผลิตไอน้ำของหม้อไอน้ำ (T/day)
 - h_i คือ เอนทาลปีไอน้ำจากหม้อไอน้ำ (kJ/kg)
 - h_w คือ เอนทาลปีน้ำป้อนเข้าหม้อไอน้ำ (kJ/kg)
 - η คือ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนหม้อไอน้ำ (%)
 - LHV คือ ความร้อนจำเพาะเชื้อเพลิงชานอ้อย (kJ/kg)

สำหรับงานวิจัยครั้งนี้ใช้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของหม้อไอน้ำและค่า LHV เท่ากับ 81.14% และ 7,156 kJ/kg ตามลำดับ [17]

2.6 สัดส่วนการใช้น้ำต่อปริมาณอ้อย

สำหรับสัดส่วนการใช้น้ำต่อปริมาณอ้อยที่เข้าหีบสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (14)



$$R_{SIC} = \frac{\dot{m}_s}{\dot{m}_c} \quad (14)$$

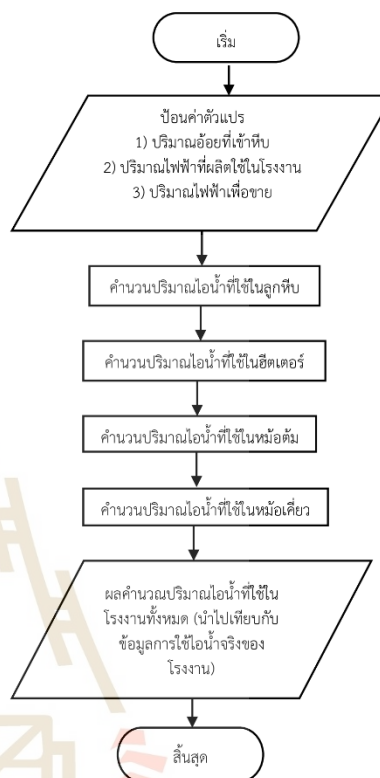
เมื่อ
 R_{SIC} คือ ค่าสัดส่วนการใช้ไอน้ำต่อปริมาณอ้อยที่เข้าหีบ (Ts/Tc)

2.7 ขั้นตอนการจำลอง

การจำลองระบบพลังงานของโรงงานน้ำตาลในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม MS Excel ประกอบด้วยการคำนวณโดยใช้แบบจำลองย่อย 5 ส่วน ตามสมการในหัวข้อ 2.1 – 2.5 ซึ่งจะได้ปริมาณไอน้ำที่ใช้ในอุปกรณ์ต่างๆ จากนั้นนำมารวมกันเป็นปริมาณไอน้ำรวมที่ใช้ในโรงงานทั้งหมด ซึ่งลำดับขั้นตอนดังรูปที่ 10 โดยตัวแปรป้อนในการคำนวณประกอบด้วยข้อมูลพื้นฐานจากโรงงาน คือ 1) ปริมาณอ้อยที่เข้าหีบ 2) ปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตใช้ในโรงงาน 3) ปริมาณไฟฟ้าเพื่อขาย จากนั้นจะนำผลคำนวณที่ได้ นำไปเทียบกับข้อมูลการใช้ไอน้ำจริงของโรงงาน

2.8 การเก็บข้อมูลทดลอง

โรงงานน้ำตาลเดินเครื่องจักรตามปกติและมีการเก็บข้อมูลทั้งวัน 24 ชั่วโมง โดยอัตราการไหลไอน้ำไอเสียวัดจากไอน้ำที่เข้ากังหันไอน้ำแทนเนื่องจากไอน้ำเป็นสภาวะ superheated ท่อทางเข้ามีขนาดเล็ก จึงมีการติดตั้ง Orifice flow เพื่อวัดอัตราไหล สำหรับไอน้ำที่ออกจากกังหันยังไม่เป็นไอเปียก (saturated steam) ต้องมีการ spray น้ำเข้าเพื่อ de-superheated จึงต้องรวมปริมาณน้ำ spray เข้าด้วยโดยน้ำจะถูกวัดอัตราการไหลโดยผ่าน flow meter ก่อนเข้าห้องผสม



รูปที่ 10 ขั้นตอนการจำลองระบบพลังงานในโรงงาน

3. ผลการทดลอง

ในส่วนนี้จะแสดงตัวอย่างการคำนวณ โดยใช้ข้อมูลการเดินเครื่องจักรของโรงงานในวันที่ 25 มกราคม 2563 จำนวน 24 ชั่วโมงต่อเนื่อง ทำการเก็บข้อมูลมีตัวแปรองค์ประกอบ ได้แก่ อัตราการหีบอ้อย อัตราการผลิตไฟฟ้าเพื่อใช้เองและเพื่อจำหน่าย แสดงในตารางที่ 1-7 ข้อมูลนี้จะใช้เป็นข้อมูลป้อนเข้าสำหรับการจำลองในโปรแกรม เพื่อคำนวณหาอัตราการใช้ไอน้ำทั้งหมดของโรงงาน ก่อนนำไปเปรียบเทียบกับค่าการใช้ไอน้ำจริง โดยจะทำการเปรียบเทียบกับการใช้ไอน้ำจริงจำนวน 44 วันในหน้าหีบอ้อยของปี พ.ศ. 2562



ตารางที่ 1 การใช้กังหันไอน้ำขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

| เครื่องกำเนิดไฟฟ้า | TG.9 MW (จำนวน) | TG.12 MW (ใช้เอง) |
|--------------------|--------------------|----------------------|
| P_e (kWh/day) | 144,000 | 243,000 |

ตารางที่ 2 การใช้กังหันไอน้ำขับเคลื่อนเครื่องจักรหม้อไอน้ำ

| เครื่องจักร | ปั๊มน้ำ (FWP) | พัดลม (IDF) |
|-------------|---------------|-------------|
| P_m (hp) | 200 | 400 |

ตารางที่ 3 การใช้กังหันไอน้ำขับเคลื่อนเครื่องจักรลูกสูบ

| เครื่องจักร | เครื่องย่อย | ลูกสูบ |
|-------------|-------------|--------|
| P_m (hp) | 2,500 | 1,000 |

ตารางที่ 4 ข้อมูลการหีบอ้อย

| ลูกหีบอ้อย | ค่า |
|---------------------|--------|
| \dot{m}_C (T/day) | 15,350 |
| % Bag (%) | 25.34 |
| % Im (%) | 27.81 |

ตารางที่ 5 ข้อมูลการอุ่นน้ำอ้อย

| หม้ออุ่น | H-1 | H-2 | H-3 |
|---------------------|--------|--------|--------|
| \dot{m}_j (T/day) | 14,971 | 14,971 | 14,971 |
| T_{Heater} (°C) | 96 | 102 | 109 |
| $T_{j,i}$ (°C) | 35 | 60 | 80 |
| $T_{j,o}$ (°C) | 59 | 79 | 99 |
| Bx_i (°Bx) | 15.5 | 15.5 | 15.5 |
| η_{vp} (%) | 90 | 90 | 90 |

ตารางที่ 6 ข้อมูลการต้มน้ำอ้อย

| หม้อต้ม | E-1 | E-2 | E-3 | E-4 |
|---------------------|--------|--------|-------|-------|
| \dot{m}_j (T/day) | 14,971 | 10,972 | 8,216 | 5,998 |
| \dot{m}_i (T/day) | 109 | 102 | 96 | 74 |
| T_{Evap} (°C) | 140 | 109 | 102 | 96 |
| $T_{j,i}$ (°C) | 100 | 114 | 113 | 102 |
| $T_{j,o}$ (°C) | 110 | 102 | 90 | 62 |
| Bx_i (°Bx) | 15.5 | 23.6 | 32.2 | 43.0 |
| Bx_o (°Bx) | 23.6 | 32.2 | 43.0 | 58.9 |
| η_{Evap} (%) | 90 | 90 | 90 | 90 |

ตารางที่ 7 ข้อมูลการเคี่ยวน้ำตาล

| หม้อเคี่ยว | VP-1 | VP-2 | VP-3 |
|---------------------------|-------|-------|-------|
| \dot{m}_{syrup} (T/day) | 4,379 | 2,776 | 2,601 |
| T_{vapor} (°C) | 109 | 109 | 109 |
| T_{syrup} (°C) | 61.2 | 60.0 | 60.0 |

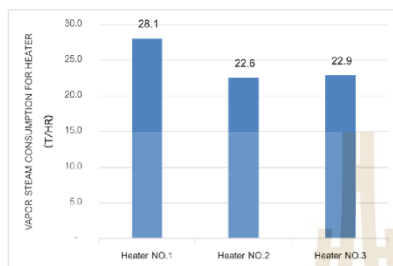
สำหรับผลการจำลองหม้ออุ่น พบว่าได้ปริมาณการใช้ไอน้ำของหม้ออุ่นทั้ง 3 ชุด ดังรูปที่ 11 หม้ออุ่นชุด H-1, H-2 และ H-3 ใช้ไอน้ำเท่ากับ 28.1, 22.6 และ 22.9 T/hr ตามลำดับ ดังที่แสดงในรูปที่ 11 โดยใช้ไอน้ำที่เป็นไอหัวหม้อต้ม E-1

กระบวนการต้มเพื่อระเหยน้ำอ้อยเพิ่มความเข้มข้น (Bx) ให้กับน้ำอ้อย จากหม้อต้ม E-1, E-2, E-3 และ E-4 จนกลายเป็นน้ำเชื่อมเมื่อออกจากหม้อต้มสุดท้าย E-4 จากการจำลองผลได้ปริมาณการใช้ไอน้ำของหม้อต้มทั้ง 4 ชุด ดังรูปที่ 12 หม้อต้มทั้ง 4 ชุด ใช้ไอน้ำเท่ากับ 260.3, 112.9, 82.3 และ 60.8 T/hr ตามลำดับ โดยที่หม้อต้ม E-1 ใช้ไอน้ำที่ออกจากกังหันไอน้ำเพียงหม้อเดียว ส่วนหม้อต้ม E-2, E-3 และ E-4 ใช้หัวหม้อที่ออกจากหม้อต้ม E-1, E-2 และ E-3 ตามลำดับ ดังรูปที่ 12

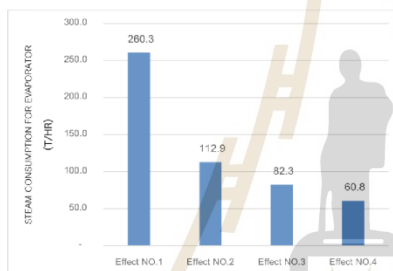
กระบวนการเคี่ยวน้ำตาลให้เกิดผลึกใช้หม้อเคี่ยว 3 ชุด (Vacuum Pan: VP) โดยใช้ไอน้ำหัวหม้อของหม้อต้ม E-1 ดังรูปที่ 14 การจำลองพบว่าปริมาณการใช้ไอน้ำของหม้อเคี่ยว



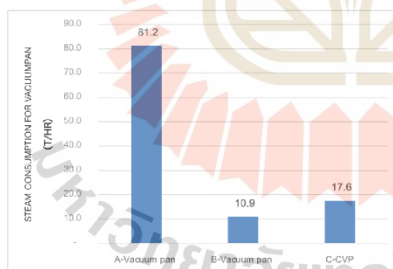
VP-1, VP-2 และ VP-3 ใช้ไอน้ำเท่ากับ 81.2, 10.9 และ 17.6 T/hr ตามลำดับ ดังรูปที่ 13



รูปที่ 11 ปริมาณการใช้ไอน้ำของหม้อไอน้ำ



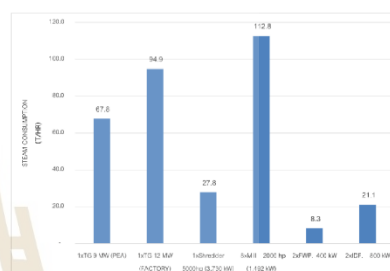
รูปที่ 12 ปริมาณการใช้ไอน้ำของหม้อต้ม



รูปที่ 13 ปริมาณการใช้ไอน้ำของหม้อเคี้ยว

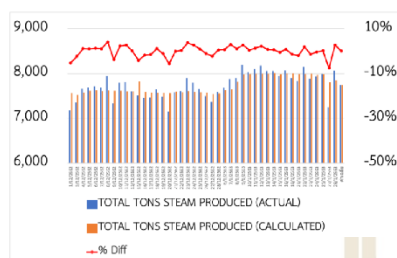
การใช้กังหันไอน้ำขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพื่อผลิตไฟฟ้า ใช้กับเครื่องย่อยย่อย เครื่องจักรที่บดย่อย เครื่องสูบน้ำป้อน และพัดลมดูดฝุ่นแก๊ส(แก๊สไอเสียจากการเผาไหม้) ออกจาก

หม้อไอน้ำสำหรับโรงงานน้ำตาลแบบดั้งเดิม ผลการคำนวณด้วยแบบจำลองพบว่ากังหันไอน้ำขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อจำหน่ายและเพื่อใช้เองในโรงงานน้ำตาล เท่ากับ 67.8 และ 94.9 T/hr ตามลำดับ ดังรูปที่ 14 กังหันขับเคลื่อนย่อยย่อยและเครื่องจักรที่บดย่อย เท่ากับ 27.8 และ 112.8 T/hr ตามลำดับ เครื่องสูบน้ำป้อนและพัดลมดูดฝุ่นแก๊สเท่ากับ 8.3 และ 21.1 T/hr ตามลำดับ



รูปที่ 14 ปริมาณการใช้ไอน้ำของกังหันไอน้ำ

สำหรับการจำลองระบบพลังงานทั้งหมดมีตัวแปรต้นที่ต้องป้อนทุกครั้ง ได้แก่ อัตราการที่บดย่อย และอัตราการผลิตไฟฟ้า ซึ่งเป็นข้อมูลจริงจำนวน 44 วัน ของหน้าที่บดย่อยของปี พ.ศ. 2562 ของโรงงาน หลังจากทำการป้อนข้อมูลเข้าไปในโปรแกรมเพื่อทำการคำนวณหาปริมาณไอน้ำที่ใช้ในโรงงานทั้งหมด ผลที่ได้พบว่าค่าที่ได้จากการคำนวณและค่าที่ใช้จริงมีความใกล้เคียงกันมาก ดังรูปที่ 15 โดยมีความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 0.52-7.57%



รูปที่ 15 ผลเปรียบเทียบปริมาณไอน้ำที่ใช้ในโรงงานทั้งหมดจากการคำนวณกับข้อมูลการใช้ไอน้ำจริงของโรงงาน

4. สรุปและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้จำลองระบบพลังงานสำหรับโรงงานน้ำตาลแบบดั้งเดิมที่ใช้ความดันไอน้ำไม่เกิน 40 bar-g บนพื้นฐานสมดุลพลังงานและมวล จากการศึกษาพบว่า ปริมาณการใช้ไอน้ำที่คำนวณได้จากแบบจำลองใกล้เคียงกับการใช้งานจริงมาก เนื่องจากการจำลองได้คำนึงถึงองค์ประกอบที่มีผลจากการใช้ไอน้ำจริง คือ อัตราการหีบ และปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้อย่างไรก็ตาม เนื่องจากปริมาณการใช้ไอน้ำของโรงงานไม่ได้ขึ้นอยู่กับอัตราการหีบอย่างเดียว หากมีการผลิตไฟฟ้าเพื่อจำหน่ายเพิ่มขึ้นก็จะทำให้ความต้องการใช้ไอน้ำเพิ่มขึ้นตามไปด้วย อีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้แบบจำลองมีความแม่นยำ คือ งานวิจัยนี้ได้จำลองหาปริมาณการใช้ไอน้ำจากสมการสมรรถนะของกังหันไอน้ำของผู้ผลิต (steam consumption curve) แต่ละตัวมาผนวกเข้าด้วยกัน จากการจำลองยังพบอีกว่า ปริมาณการใช้ไอน้ำจริงมากกว่าจากการจำลอง เนื่องจากการจำลองไม่ได้มีการ by pass ไอน้ำเสริมเข้าไป แต่ในการเดินเครื่องจริงอาจจะต้องมีการ by pass ไอน้ำเสริมเข้าไปเพื่อรักษาความดันและอุณหภูมิภายในหม้อต้ม เมื่อปริมาณน้ำอ้อยและค่า brix ไม่คงที่ ซึ่งจากการสืบค้นพบว่างานวิจัยทั่วไปยังไม่ได้นำส่วนนี้มาพิจารณา รวม ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปเป็นต้นแบบในการประเมินหาความต้องการการใช้ไอน้ำในโรงงานน้ำตาลแบบดั้งเดิมของไทย และช่วยในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการผลิตและใช้ไอน้ำได้

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดีด้วยความกรุณาจาก บจก.โรงงานน้ำตาลทรายขาวเริ่มอุดม จ.อุดรธานี ใน การให้เข้าไปศึกษาและเก็บข้อมูลต่างๆ

เอกสารอ้างอิง

- [1] The Department of Alternative Energy Development and Efficiency (DEDE), "Biomass Database Potential in Thailand," 2009.
- [2] S. Sathitbun-anan, B. Fungtammasan, M. Barz, B. Sajjakulnukit, and S. Pathumsawad, "Energy efficiency and greenhouse gas emission reduction potentials in sugar production processes in Thailand," Energy for Sustainable Development, vol. 23, pp. 266-274, 2014/12/01/ 2014.
- [3] S. Gul and M. Harasek, "Energy saving in sugar manufacturing through the integration of environmental friendly new membrane processes for thin juice pre-concentration," Applied Thermal Engineering, vol. 43, pp. 128-133, 2012/10/01/ 2012.
- [4] A. Khoodaruth, "Optimisation of a Cogenerated Energy Systems: The Cane Biomass Flexifactory Case Study," Energy Procedia, vol. 62, pp. 656-665, 2014/01/01/ 2014.
- [5] K. L. Sergeevich, K. O. Valerevna, and T. A. Dmitrievna, "A Method for Steam Boilers Load Optimization," IFAC-PapersOnLine, vol. 51, pp. 765-769, 2018/01/01/ 2018.
- [6] Q. Zhang, H. Yi, Z. Yu, J. Gao, X. Wang, H. Lin, et al., "Energy-exergy analysis and energy efficiency improvement of coal-fired industrial boilers based on thermal test data," Applied



- Thermal Engineering, vol. 144, pp. 614-627, 2018/11/05/ 2018.
- [7] Department of Renewable Energy Development and Energy Efficiency, "Alternative Energy Development Plan: AEDP2015," ed. The Energy Policy and Planning Office (EPPO), 2015.
- [8] The Energy Policy and Planning Office (EPPO), "Thailand Power Development Plan 2018," ed, 2018.
- [9] J.Coombs, "Handbook of cane sugar engineering, Third completely revised edition. E. Hugot. Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 1986. xx + 1186 pp. ISBN 0-444-42438-5. Price: \$268.50/Dft 725.00" *Biomass*, vol. 155-156, 1986/01/01/ 1986.
- [10] B. Seegudthong, S. Priprem, and C. Sookkumnerd, "Development of Model for Designing of Evaporator and Heater System of Sugar Processing," in *The 23rd Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand*, Chiang mai, 2009.
- [11] A. Buathong, S. Priprem, and C. Sookkumnerd, "The Model Development of Mass and Energy Balance for a Sugar Mill," in *The 28th Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand*, Khon kaen, 2014, pp. 1233-1241.
- [12] P. Rein, *Cane Sugar Engineering*, 3 ed. Verlas Dr. Albert Bartens KG, Berlin, Germany, 2007.
- [13] P. K. Nag, *Power Plant Engineering*, McGraw Hill Education Private Limited, New York, 2008.
- [14] L.M.M. Jorge, A.R. Righetto, P.A. Polli, O.A.A. Santos, R. Maciel Filho, "Simulation and analysis of a sugarcane juice evaporation system," *Journal of Food Engineering*, vol. 99, pp. 351-359, 2010/03/19 2010.
- [15] A.E. Lewis, F. Khodabocus, V. Dhokun, M. Khalife, "Thermodynamic simulation and evaluation of sugar refinery evaporators using a steady state modelling approach," *Applied Thermal Engineering*, vol. 30, pp. 2180-2186, 2010/06/2 2010.
- [16] M. Higa, A.J. Freitas, A.C. Bannwart, R.J. Zemp, "Thermal integration of multiple effect evaporator in sugar plant," *Applied Thermal Engineering*, vol. 29, pp. 515-522, 2008/03/2 2009.
- [17] P. Chooprasert, K. Suluksna, P. Tumm, "Improvement of boiler efficiency for Ruem-udom sugar factory," *e3s Web Conf.*, 187, 2020.

ภาคผนวก ข

การคำนวณประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ ผลการคำนวณประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ
และผลการวิเคราะห์เชื้อเพลิงและขี้เถ้า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ข.1 ตัวอย่างการคำนวณประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ

การคำนวณประสิทธิภาพหม้อไอน้ำโดยวิธี “Heat-loss method”

การคำนวณหาประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำสามารถคำนวณได้จากสมการ

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

โดยที่ $Q = L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5$ (ข.2)

ความร้อนสูญเสียจากก๊าซไอเสียสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\begin{aligned} L_1 &= Gc_g(t_g - t_0) & (\text{ข.3}) \\ &= (4.412 \text{ m}^3/\text{kg}) (1.38 \text{ kJ/m}^3\text{-K}) (196.6 - 30 \text{ }^\circ\text{C}) \\ &= 1,014.35 \text{ kJ/kg (17.2\%)} \end{aligned}$$

ความสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\begin{aligned} L_2 &= 126.1[G_0 + (m-1)A_0] (\text{CO}) & (\text{ข.4}) \\ &= 126.1[(1.879 \text{ m}^3/\text{kg}) + (1.758-1) \times (1.896 \text{ m}^3/\text{kg})] \times (0.024) \\ &= 10.10 \text{ kJ/kg (0.2\%)} \end{aligned}$$

ความสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่หมดสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\begin{aligned} L_3 &= 339c_2 & (\text{ข.5}) \\ &= 339 \times (0.050) \\ &= 16.95 \text{ kJ/kg (0.3\%)} \end{aligned}$$

ความสูญเสียจากการแผ่รังสีสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\begin{aligned} L_4 &= (1/100) lr & (\text{ข.6}) \\ &= (1/100) \times 1,970 \text{ kJ/kg} \\ &= 19.7 \text{ kJ/kg (0.3\%)} \end{aligned}$$

ความสูญเสียจากการโบลด์วาน์สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\begin{aligned} L_5 &= \dot{m}_{bd} (h_{bd} - h_{FW} / \dot{m}_f) & (\text{ข.7}) \\ &= (2) \times [(3,193 - 461)/95.94] \\ &= 56.95 \text{ kJ/kg (0.9\%)} \end{aligned}$$

เมื่อแทนค่าในสมการที่ (ข.1) และ (ข.2) หาประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำมีค่าเท่ากับ 81.1%

ข.2 ตารางบันทึกผลการคำนวณประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ

ตารางที่ ข.1 บันทึกผลการตรวจวัดการเผาไหม้ของหม้อไอน้ำ

| ลำดับ การทดสอบ | เวลา | ออกซิเจน | คาร์บอนมอนอกไซด์ | คาร์บอนไดออกไซด์ |
|-------------------|-------|-------------------|------------------|--------------------|
| | | (O ₂) | (CO) | (CO ₂) |
| | | % | PPM | % |
| 1 | 13.30 | 9.8 | 151 | 11 |
| 2 | 13.45 | 8.9 | 274 | 11.7 |
| 3 | 14.00 | 8.6 | 300 | 12 |
| 4 | 14.15 | 8.4 | 320 | 12.1 |
| 5 | 14.30 | 8.5 | 289 | 11.5 |
| 6 | 14.45 | 8.3 | 296 | 12.7 |
| 7 | 15.00 | 8.8 | 320 | 12.8 |

ตารางที่ ข.2 บันทึกผลการตรวจวัดอัตราการไหลและอุณหภูมิของหม้อไอน้ำ

| เวลา | อัตราการ ป้อนน้ำ | อุณหภูมิน้ำ | อัตราการไหล ไอน้ำ | อุณหภูมิ ไอน้ำ | ความดัน ไอน้ำ | อุณหภูมิของ ก๊าซไอเสีย |
|-------|---------------------|-------------|----------------------|-------------------|------------------|---------------------------|
| | tons/hr | °C | tons/hr | °C | barg | °C |
| 13.30 | 170.00 | 98.00 | 164.00 | 408.00 | 27.10 | 197.00 |
| 13.45 | 169.21 | 101.30 | 165.00 | 400.20 | 26.96 | 196.20 |
| 14.00 | 167.05 | 103.40 | 174.30 | 401.30 | 26.63 | 197.60 |
| 14.15 | 168.75 | 100.90 | 167.77 | 403.17 | 26.90 | 196.60 |
| 14.30 | 168.34 | 101.87 | 169.02 | 401.56 | 26.83 | 196.10 |
| 14.45 | 168.05 | 102.06 | 170.36 | 402.01 | 26.79 | 195.60 |
| 15.00 | 168.38 | 101.61 | 169.05 | 402.24 | 26.84 | 195.10 |

ตารางที่ ข.3 บันทึกผลการตรวจวัดอุณหภูมิของผิวของหม้อไอน้ำ

| ลำดับ | เวลา | เตาเผา | | | | | | | | | เครื่องอุ่นอากาศ | | | |
|-------|-------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | | ตรงกลาง | | | ด้านซ้าย | | | ด้านขวา | | | ด้านซ้าย | | ด้านขวา | |
| | | 1 st FL. | 2 nd FL. | 3 rd FL. | 1 st FL. | 2 nd FL. | 3 rd FL. | 1 st FL. | 2 nd FL. | 3 rd FL. | 1 st FL. | 2 nd FL. | 1 st FL. | 2 nd FL. |
| 1 | 13.30 | 55 | 51.7 | 53.1 | 49 | 49.2 | 63.5 | 82.9 | 50.7 | 52.8 | 51 | 54.7 | 43 | 50.6 |
| | | 48.6 | 50.6 | 53 | 47.5 | 48.4 | 63.7 | 79 | 50.5 | 52.3 | 50 | 52.9 | 45.6 | 55.2 |
| | | 48.4 | 63.7 | 54.3 | 46.7 | 63.5 | 52.9 | 48.4 | 52.9 | 52.9 | 46 | 51.2 | 41.6 | 46.2 |
| 2 | 13.45 | 51 | 54.7 | 55.6 | 49.2 | 63.5 | 57.8 | 49.2 | 63.5 | 57.8 | 49.2 | 63.5 | 48.4 | 63.7 |
| | | 50 | 52.9 | 57.8 | 48.4 | 63.7 | 52.9 | 48.4 | 63.7 | 52.9 | 48.4 | 63.7 | 48.4 | 63.7 |
| | | 46 | 51.2 | 56.7 | 63.5 | 57.8 | 52.9 | 52.9 | 48.4 | 52.9 | 47.5 | 52.9 | 49.2 | 63.5 |
| 3 | 14.00 | 47.5 | 48.4 | 51.7 | 53.1 | 63.5 | 49.2 | 63.5 | 82.9 | 50.7 | 51.7 | 53.1 | 48.4 | 63.7 |
| | | 47.5 | 48.4 | 50.6 | 53 | 47.5 | 48.4 | 63.7 | 79 | 50.5 | 50.6 | 53 | 63.5 | 57.8 |
| | | 51.7 | 53.1 | 52.9 | 47.5 | 52.9 | 47.5 | 52.9 | 48.4 | 47.5 | 63.5 | 52.9 | 48.4 | 63.7 |

ตารางที่ ข.3 บันทึกผลการตรวจวัดอุณหภูมิของผิวของหม้อไอน้ำ (ต่อ)


| ลำดับ | เวลา | เตาเผา | | | | | | | | | เครื่องอุ่นอากาศ | | | | |
|-------|-------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------|
| | | ตรงกลาง | | | ด้านซ้าย | | | ด้านขวา | | | ด้านซ้าย | | ด้านขวา | | |
| | | 1 st FL. | 2 nd FL. | 3 rd FL. | 1 st FL. | 2 nd FL. | 3 rd FL. | 1 st FL. | 2 nd FL. | 3 rd FL. | 1 st FL. | 2 nd FL. | 1 st FL. | 2 nd FL. | |
| 4 | 14.15 | 50.6 | 53 | 47.5 | 47.5 | 50.5 | 49.2 | 63.5 | 50.5 | 51 | 54.7 | 52.9 | 49.2 | 63.5 | |
| | | 48.4 | 63.7 | 50.5 | 48.4 | 63.7 | 48.4 | 63.7 | 63.7 | 52.9 | 50 | 52.9 | 48.4 | 48.4 | 63.7 |
| | | 63.5 | 48.4 | 50.6 | 51 | 54.7 | 48.4 | 48.4 | 47.5 | 46 | 51.2 | 52.9 | 57.8 | 52.9 | |
| 5 | 14.30 | 49.2 | 63.5 | 47.5 | 48.4 | 52.9 | 48.4 | 51.7 | 53.1 | 47.5 | 51 | 51.7 | 53.1 | 63.5 | |
| | | 48.4 | 63.7 | 48.4 | 46 | 51.2 | 52.9 | 50.6 | 53 | 49.2 | 63.5 | 50.6 | 53 | 52.9 | |
| | | 50.5 | 47.5 | 48.4 | 48.4 | 63.7 | 48.4 | 47.5 | 47.5 | 48.4 | 63.7 | 63.5 | 48.4 | 63.7 | |
| 6 | 14.45 | 52.9 | 51.7 | 53.1 | 52.9 | 48.4 | 63.7 | 51.7 | 53.1 | 57.8 | 51 | 52.9 | 49.2 | 63.5 | |
| | | 47.5 | 50.6 | 53 | 57.8 | 52.9 | 47.5 | 50.6 | 53 | 51 | 51 | 57.8 | 48.4 | 63.7 | |
| | | 47.5 | 48.4 | 47.5 | 48.4 | 48.4 | 63.7 | 52.9 | 47.5 | 52.9 | 48.4 | 63.7 | 63.5 | 52.9 | |
| 7 | 15.00 | 47.5 | 47.5 | 51 | 54.7 | 51.7 | 53.1 | 47.5 | 51 | 54.7 | 63.5 | 49.2 | 63.5 | 51 | |
| | | 49.2 | 63.5 | 50 | 52.9 | 50.6 | 53 | 52.9 | 50 | 52.9 | 51 | 48.4 | 63.7 | 52.9 | |
| | | 48.4 | 63.7 | 46 | 51.2 | 47.5 | 52.9 | 57.8 | 46 | 51.2 | 52.9 | 52.9 | 47.5 | 52.9 | |

ตารางที่ ข.4 บันทึกผลของการคำนวณหาประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ

| ค่า | อักษรย่อ | ค่า | หน่วย |
|------------------------------------|----------|-----------------|-----------|
| อัตราการไหลของไอน้ำ | m_s | 314.37 | tons/hr |
| ความดันของไอน้ำ | P | 29 | bar |
| อุณหภูมิของไอน้ำ | t_s | 400 | °C |
| อุณหภูมิของก๊าซเผาไหม้ | t_g | 196 | °C |
| อัตราการโบลิวคาวน์ | m_{bd} | 5.03 | tons/hr |
| ชั่วโมงการทำงาน | hr | 2,640 | hr/year |
| ความร้อนสูญเสียจากก๊าซไอเสีย | L_1 | 1,014.35 (17.2) | kJ/kg (%) |
| ความสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ | L_2 | 10.10 (0.2) | kJ/kg (%) |
| ความสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่หมด | L_3 | 16.95 (0.3) | kJ/kg (%) |
| ความสูญเสียจากการแผ่รังสี | L_4 | 19.7 (0.3) | kJ/kg (%) |
| ความสูญเสียจากการโบลิวคาวน์ | L_5 | 56.6 (0.9) | kJ/kg (%) |
| ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ | η | 81.1 | % |

ข.3 ผลการวิเคราะห์เชื้อเพลิงและขี้เถ้า

1. ผลการวิเคราะห์เชื้อเพลิงของหม้อไอน้ำ



Report No: MIN 2018-00518 - 001

BANGKOK: March 2, 2018

ANALYSIS REPORT

We determined the analysis results as per the request of Chote Chotinucht which Hand Sample was submitted to our laboratory by applicant on February 21, 2018 and we hereby report as under;

Sample designated as : BIOMASS
Applicant's marks/references :

The analysis results (our reference Sample No. 18-00518 /1) were found by our laboratory.

1. Moisture and Quality Results
The analysis results were found by our laboratory as follows:-

| No. | Descriptions | Standard/Method | As received basis | As determined basis |
|-----|-----------------------|-----------------|-------------------|---------------------|
| 1 | Total Moisture | EN 14774-1 | 51.47 % | - % |
| 2 | Analysis Moisture | EN 14774-3 | - % | 9.01 % |
| 3 | Ash Content | EN 14775 | 1.89 % | 3.54 % |
| 4 | Volatile Matter | EN 15148 | 39.79 % | 74.61 % |
| 5 | Fixed Carbon | By calculation | 6.65 % | 12.84 % |
| 6 | Sulfur | EN 15269 | 0.05 % | 0.09 % |
| 7 | Gross Calorific Value | EN 14918 | 2,152 Kcal/kg | 4,034 Kcal/kg |

2. Ultimate Analysis

| No. | Elements | Standard/Method | As determined basis |
|-----|--------------------|-----------------|---------------------|
| 1 | Carbon | EN 15104 | 43.07 % |
| 2 | Hydrogen in sample | EN 15104 | 5.31 % |
| 3 | Nitrogen | EN 15104 | 0.17 % |
| 4 | Oxygen | EN 15104 | 38.81 % |
| 5 | Ash | EN 14775 | 3.54 % |
| 6 | Sulfur | EN 15269 | 0.09 % |
| 7 | Moisture | EN 14774-3 | 9.01 % |

3. Net Calorific Value (Standard EN 14918) = 1,709 Kcal/kg (As received basis)

This report represented our findings basing upon the sample as described above only and not represented any shipment.

SGS (THAILAND) LIMITED
Jitawana S

SC/TO/PK

*WARNING: The sample to which the findings recorded herein (the Findings) relate was drawn and/or provided by the client or by a third party acting at the Client's direction. The Findings constitute no warranty of the sample's representativeness of any goods and strictly relate to the sample. The Company accepts no liability with regard to the origin or source from which the sample is said to be extracted.

This document is issued by the Company under its General Conditions of Service printed hereon. Attention is drawn to the limitation of liability, indemnification and jurisdiction issues defined therein.

Any holder of this document is advised that information contained herein reflects the Company's findings of the time of its issuance only and within the limits of Client's inducement, if any. The Company's sole responsibility is to its Client and this document does not constitute parties to a transaction both exercising all their rights and obligations under the transaction documents. Any unauthorized alteration, forgery or falsification of the content or appearance of this document is unlawful and offenders may be prosecuted to the fullest extent of the law.

M 128888

SGS (Thailand) Limited | Minerals Services | 100 Nangirchoe Road | Chongrassee | Yomvitha Bangkok 10120
t +66 (0)2 678 18 13 f +66 (0)2 678 15 45 www.sgs.com

Member of the SGS Group

รูปที่ ข.1 ผลการวิเคราะห์เชื้อเพลิงของหม้อไอน้ำ

2. ผลการวิเคราะห์หี้อ่างหม้อไอน้ำ (ชุดที่ 1)

Report No: MIN 2020-2002574 - 001

BANGKOK: February 27, 2020

ANALYSIS REPORT

We determined the analysis results as per the request of Rermudom Sugar Factory Co.,Ltd which Hand Sample was submitted to our laboratory by applicant on February 24, 2020 and we hereby report as under;

Sample designated as : ASH
Applicant's marks/references :

The analysis results (our reference Sample No. 20-2002574 /2) were found by our laboratory.

The analysis results were found by our laboratory as followings:-

| No. | Descriptions | Standard/Method | As determined basis |
|-----|-------------------|-----------------|---------------------|
| 1 | Analysis Moisture | EN 14774-3 | 0.31 % |
| 2 | Ash Content | EN 14775 | 95.74 % |
| 3 | Volatile Matter | EN 15148 | 2.36 % |
| 4 | Fixed Carbon | By calculation | 1.63 % |

This report represented our findings basing upon the sample as described above only and not represented any shipment.

SGS (THAILAND) LIMITED

SC/TO/ch

WARNING: The sample to which the findings recorded herein (the Findings) relate was drawn and / or provided by the client or by a third party acting at the Client's direction. The Findings constitute no warranty of the sample's representativeness of any goods and strictly relate to The sample. The Company accepts no liability with regard to the origin or source from which the sample is said to be extracted

รูปที่ ข.2 ผลการวิเคราะห์หี้อ่างหม้อไอน้ำ (ชุดที่ 1)

3. ผลการวิเคราะห์หี้อ้ำหม้อไอน้ำ (ชุดที่ 2)

Report No: MIN 2020-2002574 - 002

BANGKOK: February 27, 2020

ANALYSIS REPORT

We determined the analysis results as per the request of Rermudom Sugar Factory Co.,Ltd which Hand Sample was submitted to our laboratory by applicant on February 24, 2020 and we hereby report as under;

Sample designated as : ASH
Applicant's marks/references :

The analysis results (our reference Sample No. 20-2002574 /2) were found by our laboratory.

The analysis results were found by our laboratory as follows:-

| No. | Descriptions | Standard/Method | As determined basis |
|-----|-------------------|-----------------|---------------------|
| 1 | Analysis Moisture | EN 14774-3 | 0.29 % |
| 2 | Ash Content | EN 14775 | 96.41 % |
| 3 | Volatile Matter | EN 15148 | 2.02 % |
| 4 | Fixed Carbon | By calculation | 1.28 % |

This report represented our findings basing upon the sample as described above only and not represented any shipment.

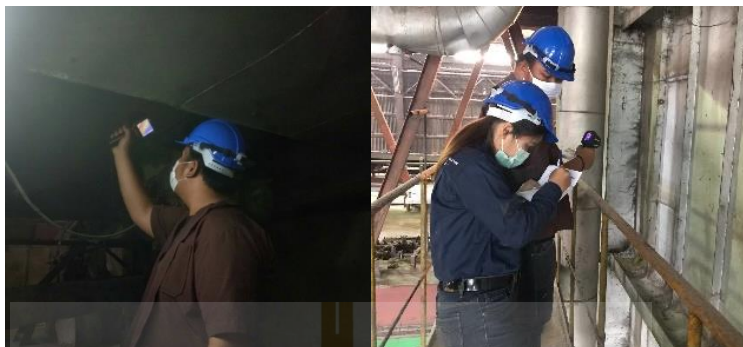
SGS (THAILAND) LIMITED

SC/TO/ch

*WARNING: The sample to which the findings recorded herein (the Findings") relate was drawn and / or provided by the client or by a third party acting at the Client's direction. The Findings constitute no warranty of the sample's representativeness of any goods and strictly relate to The sample. The Company accepts no liability with regard to the origin or source from which the sample is said to be extracted"

รูปที่ ข.3 ผลการวิเคราะห์หี้อ้ำหม้อไอน้ำ (ชุดที่ 2)

ข.4 การตรวจวัดประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ



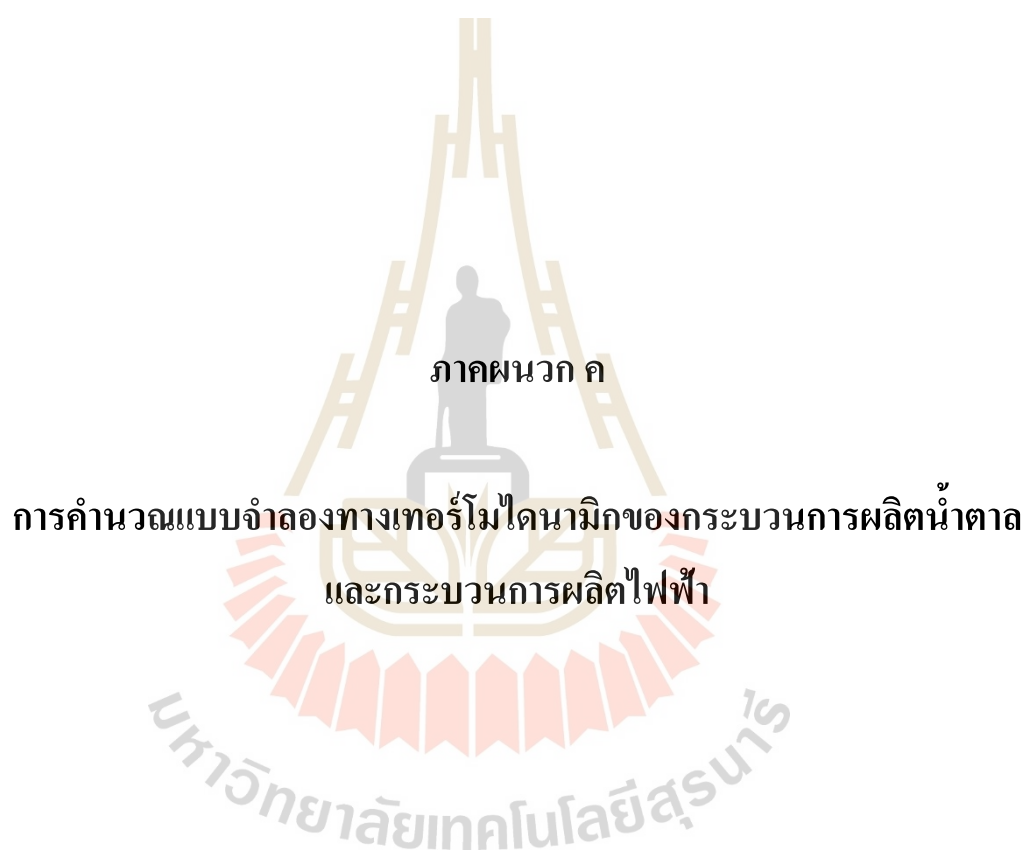
รูปที่ ข.4 ตรวจวัดอุณหภูมิผิวของหม้อไอน้ำ



รูปที่ ข.5 ตรวจวัดส่วนประกอบและอุณหภูมิก๊าซเผาไหม้



รูปที่ ข.6 เก็บตัวอย่างน้ำ



ค.1 ตัวอย่างการคำนวณแบบจำลองกระบวนการผลิตน้ำตาล

1. การคำนวณแบบจำลองย่อยชุดลูกหีบ

| | | | |
|-------------------------------------|---------|-----------|---------|
| ปริมาณอ้อยที่ป้อนเข้าลูกหีบชุดที่ 1 | เท่ากับ | 13,464.98 | ตัน/วัน |
| เปอร์เซ็นต์น้ำพรหมที่ลูกหีบ | เท่ากับ | 27.28 | % อ้อย |
| เปอร์เซ็นต์ขานอ้อยที่ได้จากการหีบ | เท่ากับ | 28.21 | % อ้อย |

จากสมการ

$$\dot{m}_{Bag} = \dot{m}_C (\% \text{ Bag} / 100) \quad (\text{ค.1})$$

ดังนั้น สามารถคำนวณหาปริมาณขานอ้อยที่ได้จากการหีบ $13,464.98 \times (28.21/100)$ เท่ากับ 3,798.47 ตัน/วัน

จากสมการ

$$\dot{m}_{Im} = \dot{m}_C (\% \text{ Im} / 100) \quad (\text{ค.2})$$

ดังนั้น สามารถคำนวณหาปริมาณน้ำพรหมที่ลูกหีบเท่ากับ 3,673.25 ตัน/วัน

จากสมการ

$$\dot{m}_j = \dot{m}_C + \dot{m}_{Im} - \dot{m}_{Bag} \quad (\text{ค.3})$$

ดังนั้น สามารถคำนวณหาปริมาณน้ำอ้อยผสมที่ได้จากการหีบเท่ากับ 13,339.25 ตัน/วัน

สำหรับการคำนวณของลูกหีบชุดอื่นก็ใช้วิธีคำนวณเดียวกันเพียงเปลี่ยนตัวแปรบางตัวเท่านั้น

2. การคำนวณแบบจำลองย่อยหม้อไอน้ำ

ตัวอย่างการคำนวณแบบจำลองย่อยหม้อไอน้ำชุดที่ 1

| | | |
|------------------------------------|---------|----------------|
| ประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ | เท่ากับ | 81.60 % |
| อุณหภูมิของไอน้ำ | เท่ากับ | 400 °C |
| เอนทาลปีจำเพาะของไอน้ำที่ 400 °C | เท่ากับ | 3,231.55 kJ/kg |
| ความดันของไอน้ำ | เท่ากับ | 29 bar |
| อุณหภูมิน้ำป้อน | เท่ากับ | 105 °C |
| เอนทาลปีจำเพาะของน้ำป้อนที่ 105 °C | เท่ากับ | 440.213 kJ/kg |
| ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง | เท่ากับ | 7,150 kJ/kg |

จากสมการหาปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ได้จาก

$$\begin{aligned} \dot{m}_f &= \% \dot{m}_{Bagasse} \times \dot{m}_{Bagasse} \\ &= 0.88 \times 3775.95 \\ &= 3,322.836 \text{ ตัน/วัน} \end{aligned} \quad (\text{ค.4})$$

จากสมการคำนวณหาปริมาณการผลิตไอน้ำ

$$\begin{aligned} \dot{m}_s &= \frac{\dot{m}_f (LHV \times \eta_b)}{\Delta h} \\ &= \frac{138.45(7,150 \times 0.8161)}{(3,231.55 - 440.231)} \\ &= 289.42 \text{ ตัน/ชั่วโมง} \end{aligned} \quad (\text{ค.5})$$

สำหรับการคำนวณของหม้อไอน้ำชุดอื่นก็ใช้วิธีคำนวณเดียวกันเพียงเปลี่ยนตัวแปรบางตัวเท่านั้น

3. การคำนวณแบบจำลองย่อยมอเตอร์ไฟฟ้าเพื่อขับอุปกรณ์

ตัวอย่างการคำนวณแบบจำลองย่อยมอเตอร์ไฟฟ้าเพื่อขับอุปกรณ์ชุดที่ 1

| | | | |
|--|---------|------|--------------------|
| ค่า kWh/t _c ของมอเตอร์ (ค่าเฉลี่ยจากโรงงาน) | เท่ากับ | 0.59 | kWh/t _c |
| จำนวนอ้อยที่หีบ | เท่ากับ | 24 | ชั่วโมง |

จากสมการ

$$kW = \frac{(kWh / t_c) \times t_c}{hr} \quad (ค.6)$$

ดังนั้น สามารถคำนวณหา kW ของมอเตอร์ไฟฟ้าใด ๆ ได้ $(0.59 \times 13,464.98) / 24$ เท่ากับ 331.01 kW

สำหรับการคำนวณของหม้อไอน้ำชนิดอื่นก็ใช้วิธีคำนวณเดียวกัน เพียงเปลี่ยนตัวแปรบางตัวเท่านั้นและกรณีที่ใช้มอเตอร์หลายขนาด การหาผลรวมของกำลังไฟฟ้าที่ต้องใช้ไปกับมอเตอร์ทั้งหมดนั้น สามารถหาได้จากผลรวมของกำลังไฟฟ้าที่ต้องใช้ไปกับมอเตอร์ไฟฟ้าแต่ละชนิดนั่นเอง

4. การคำนวณแบบจำลองย่อยของหม้อต้มระเหย

ตัวอย่างการคำนวณแบบจำลองย่อยหม้อต้มระเหยเพื่อขับอุปกรณ์ชุดที่ 1

| | | | |
|--|---------|----------|-------------|
| อัตราการไหลของน้ำอ้อยขาเข้าหม้อต้มชุดแรก | เท่ากับ | 556.81 | ตัน/ชั่วโมง |
| ค่า Brix ของน้ำอ้อยที่เข้าหม้อต้ม | เท่ากับ | 15.3 | °Bx |
| ค่า Brix ของน้ำอ้อยที่ออกหม้อต้ม | เท่ากับ | 23.3 | °Bx |
| ค่า Purity ของน้ำอ้อยขาเข้า | เท่ากับ | 84.43 | |
| อุณหภูมิน้ำอ้อยที่เข้าหม้อต้ม | เท่ากับ | 102 | °C |
| อุณหภูมิน้ำอ้อยที่ออกหม้อต้ม | เท่ากับ | 110 | °C |
| อุณหภูมิไอน้ำที่เข้าหม้อต้ม | เท่ากับ | 130 | °C |
| อุณหภูมิไอน้ำที่ออกหม้อต้ม (ไอหัวหม้อ) | เท่ากับ | 110 | °C |
| อุณหภูมิน้ำคอนเดนเสท | เท่ากับ | 120 | °C |
| เอนทาลปีไอน้ำที่ 120 °C | เท่ากับ | 2,705.9 | kJ/kg |
| เอนทาลปีไอน้ำที่ 110 °C | เท่ากับ | 2,684.76 | kJ/kg |
| เอนทาลปีไอน้ำอิ่มตัวที่ 120 °C | เท่ากับ | 477.9 | kJ/kg |

จากสมการ

$$C_{pji} = 4.1868 - (Bx)(0.0297 - 4.6 \times 10^{-5}P) + (7.5 \times 10^{-5})(Bx)(T) \quad (ค.7)$$

ดังนั้น สามารถหาค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำอ้อยขาเข้าและขาออกได้ว่า

- ค่าความความร้อนจำเพาะของน้ำอ้อยขาเข้า

$$C_{pji} = 4.1868 - (15.3)(0.0297 - 4.6 \times 10^{-5} \times (84.43)) + (7.5 \times 10^{-5})(15.3)(102)$$

ดังนั้น $C_{pji} = 3.91 \text{ kJ/kg-K}$

- ค่าความความร้อนจำเพาะของน้ำอ้อยขาออก

$$C_{pjo} = 4.1868 - (23.3)(0.0297 - 4.6 \times 10^{-5} \times (84.43)) + (7.5 \times 10^{-5})(23.3)(110)$$

ดังนั้น $C_{pjo} = 3.77 \text{ kJ/kg-K}$

จากสมการสมดุลมวลของแข็ง

$$\dot{m}_{j1} = \dot{m}_{jo} Bx_0 / Bx_1 \quad (\text{ก.8})$$

ดังนั้น สามารถหาอัตราการไหลของน้ำอ้อยขาออกหม้อต้ม $(556.81 \times 15.3)/23.3$ เท่ากับ 364.26 ตัน/ชั่วโมง

จากสมการสมดุลมวล

$$\dot{m}_{v1} = \dot{m}_{jo} - \dot{m}_{j1} \quad (\text{ก.9})$$

ดังนั้น สามารถหาอัตราการไหลของไอน้ำหม้อได้ว่า $556.81 - 364.26$ เท่ากับ 192.55 ตัน/ชั่วโมง จากสมการสมดุลพลังงานของหม้อต้ม

$$\dot{m}_{s2} = \frac{(\dot{m}_{v1}h_{v1} + \dot{m}_{j1}Cp_{j1}T_{j1} - \dot{m}_{jo}Cp_{jo}T_{jo})}{(h_1 - h_2)} \quad (\text{ก.10})$$

ดังนั้น สามารถหาอัตราการไหลของไอน้ำไอเสียที่เข้าหม้อต้มชุดแรกได้ว่า

$$\dot{m}_{s2} = \frac{(192.55 \times 2684.76) + (364.26 \times 3.77 \times 110) - (556.81 \times 3.91 \times 102)}{(2705.9 - 477.9)}$$

$$\dot{m}_{s2} = 200.15 \text{ ตัน/ชั่วโมง}$$

สำหรับการคำนวณของหม้อไอน้ำชุดอื่นก็ใช้วิธีคำนวณเดียวกัน เพียงเปลี่ยนตัวแปรบางตัว

เท่านั้น

5. การคำนวณแบบจำลองย่อยของหม้ออุ่นน้ำอ้อย

ตัวอย่างการคำนวณแบบจำลองย่อยของหม้ออุ่นน้ำอ้อยที่ 1

| | | |
|-------------------------------------|------------------|-------------|
| อัตราการไหลของน้ำอ้อยเข้าหม้ออุ่น | เท่ากับ 556.81 | ตัน/ชั่วโมง |
| อัตราการไหลของน้ำอ้อยออกหม้ออุ่น | เท่ากับ 556.81 | ตัน/ชั่วโมง |
| อุณหภูมิน้ำอ้อยที่เข้าหม้ออุ่น | เท่ากับ 35 | °C |
| อุณหภูมิน้ำอ้อยที่ออกหม้ออุ่น | เท่ากับ 60 | °C |
| ค่า Brix ของน้ำอ้อยที่เข้าหม้ออุ่น | เท่ากับ 15.3 | °Bx |
| ค่า Brix ของน้ำอ้อยที่ออกหม้ออุ่น | เท่ากับ 15.3 | °Bx |
| ค่า Purity ของน้ำอ้อยขาเข้าหม้ออุ่น | เท่ากับ 84.43 | |
| ค่า Purity ของน้ำอ้อยขาออกหม้ออุ่น | เท่ากับ 84.43 | |
| อุณหภูมิไอหัวหม้อที่เข้าหม้ออุ่น | เท่ากับ 90 | °C |
| อุณหภูมิไอหัวหม้อที่ออกหม้ออุ่น | เท่ากับ 90 | °C |
| เอนทาลปีไอน้ำอิ่มตัวที่ 90 °C | เท่ากับ 2,659.53 | kJ/kg |
| เอนทาลปีของเหลวอิ่มตัวที่ 90 °C | เท่ากับ 376.96 | kJ/kg |

ดังนั้น สามารถหาค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำอ้อยได้จาก

$$C_{pji} = 4.1868 - (Bx)(0.0297 - 4.6 \times 10^{-5}P) + (7.5 \times 10^{-5})(Bx)(T) \quad (ก.11)$$

จากสมการจะได้ว่า

$$C_{pji} = 4.1868 - (15.3)(0.0297 - 4.6 \times 10^{-5} \times (84.43)) + (7.5 \times 10^{-5})(15.3)(35)$$

$$C_{pji} = 3.83 \text{ kJ/kg-K}$$

จากสมการสมดุลพลังงานของระบบหม้ออุ่น

$$\dot{m}_{vhi} = \frac{\dot{m}_{j,i} C_{p_j} (T_{j,out} - T_{j,in})}{(h_1 - h_2)_{vhi}} \quad (ก.12)$$

ดังนั้น สามารถหาอัตราการใช้หัวหม้อของหม้ออุ่นชุดที่ 1 ได้

$$\dot{m}_{vhi} = \frac{[(556.81 \times 3.83)(60 - 35)]}{(2659.53 - 376.96)}$$

$$\dot{m}_{vhi} = 23.35 \text{ ตัน/ชั่วโมง}$$

สำหรับการคำนวณของหม้อไอน้ำชุดอื่นก็ใช้วิธีคำนวณเดียวกัน เพียงเปลี่ยนตัวแปรบางตัวเท่านั้น

6. การคำนวณแบบจำลองย่อยของหม้อเคียวน้ำอ้อย

| | | | |
|---|---------|---------|-------------|
| อัตราการไหลของน้ำเชื่อมที่เข้าหม้อเคียว | เท่ากับ | 147.51 | ตัน/ชั่วโมง |
| ค่า Brix ของน้ำเชื่อมที่เข้าหม้อเคียว | เท่ากับ | 58.9 | °Bx |
| ค่า Purity ของน้ำเชื่อม | เท่ากับ | 85.26 | |
| อุณหภูมิของน้ำเชื่อม | เท่ากับ | 62 | °C |
| อุณหภูมิของแมสตีควิท A | เท่ากับ | 75 | °C |
| ค่า Brix ของแมสตีควิท A | เท่ากับ | 92.91 | °Bx |
| ค่า Purity ของแมสตีควิท A | เท่ากับ | 83.5 | |
| ค่า Purity ของโมลาส | เท่ากับ | 64.06 | |
| อุณหภูมิของไอหัวหม้อจากหม้อต้มระเหย ที่ 1 | เท่ากับ | 110 | °C |
| เอนทัลปีไอน้ำที่ 110 °C | เท่ากับ | 2,689.5 | kJ/kg |
| เอนทัลปีของเหลวอิ่มตัวที่ 110 °C | เท่ากับ | 461.36 | kJ/kg |
| จากสมการสมดุลของแข็ง | | | |

$$\dot{m}_{massA} = \dot{m}_{Syrup} Bx_{Syrup} / Bx_{massA} \quad (ก.13)$$

ดังนั้น สามารถคำนวณจากสมการที่ ข.13 ได้ดังนี้

$$\dot{m}_{massA} = 147.51 \times (58.92/92.91)$$

$$\dot{m}_{massA} = 93.54 \text{ ตัน/ชั่วโมง}$$

เปอร์เซ็นต์การตกผลึกของน้ำตาลทรายดิบ (จากโรงงาน) เท่ากับ 0.52%

จากความสัมพันธ์

$$\dot{m}_{A,Sugar} = (Crystal\%mas\ secuiteA) \times \dot{m}_{massA} \quad (ก.14)$$

สามารถคำนวณหาอัตราการไหลของน้ำตาลทรายดิบ 0.52×93.82 เท่ากับ 48.78 ตัน/ชั่วโมง

ดังนั้น สามารถคำนวณหาอัตราการไหลของน้ำตาลทรายดิบที่เกิดขึ้นได้จากสมการ

จากสมการสมดุลมวล

$$\dot{m}_{\text{Evaporated}} = \dot{m}_{\text{Syrup}} - \dot{m}_{\text{Mass A}} \quad (\text{ก.15})$$

ดังนั้น สามารถคำนวณหาอัตราการระเหยของไอน้ำจากหม้อเคียว 147.51 – 93.82 เท่ากับ 54.18 ตัน/ชั่วโมง

7. การหาอัตราการใช้อุณหภูมิของหม้อเคียว

สมดุลพลังงานจากสมการ

$$\dot{m}_{\text{Vapor}} = \frac{\left[(\dot{m}h_g)_{\text{Evaporated}} + (\dot{m}CpT + PV)_{\text{Mass A}} - (\dot{m}CpT)_{\text{Syrup}} \right]}{(h_{fg})_{\text{Vapor}}} \quad (\text{ก.16})$$

เมื่อพิจารณา $T_{\text{evaporated}} = T_{\text{mass A}}$:

เอนทาลปีไอน้ำตัวที่ระเหยจากหม้อเคียวที่ 62 °C $h_{g,\text{evaporated}} = 2,612.32 \text{ kJ/kg}$

จากสมการ $C_{p_{ji}} = 4.1868 - (Bx)(0.0297 - 4.6 \times 10^{-5}P) + (7.5 \times 10^{-5})(Bx)(T)$

สามารถคำนวณหาค่าความจุความร้อนจำเพาะของแมสสิควิส A และน้ำเชื่อมได้ว่า

$$C_{p_{\text{Mass A}}} = 4.1868 - (92.91)(0.0297 - 4.6 \times 10^{-5} \times (84.43)) + (7.5 \times 10^{-5})(92.91)(62)$$

$$C_{p_{\text{Mass A}}} = 2.216 \text{ kJ/kg-K}$$

$$C_{p_{\text{Syrub}}} = 4.1868 - (58.9)(0.0297 - 4.6 \times 10^{-5} \times (85.26)) + (7.5 \times 10^{-5})(58.9)(62)$$

$$C_{p_{\text{Syrub}}} = 2.942 \text{ kJ/kg K}$$

จากสมดุลพลังงานในสมการที่ ข.16 อัตราการใช้อุณหภูมิ \dot{m}_{Vapor} ในกรณีนี้จะได้

$$\dot{m}_{\text{Vapor}} = \frac{\left[(54.18 \times 2617.5) + (93.82 \times 2.216 \times 62) - (148 \times 2.942 \times 62) \right]}{(2689.5 - 376.96)}$$

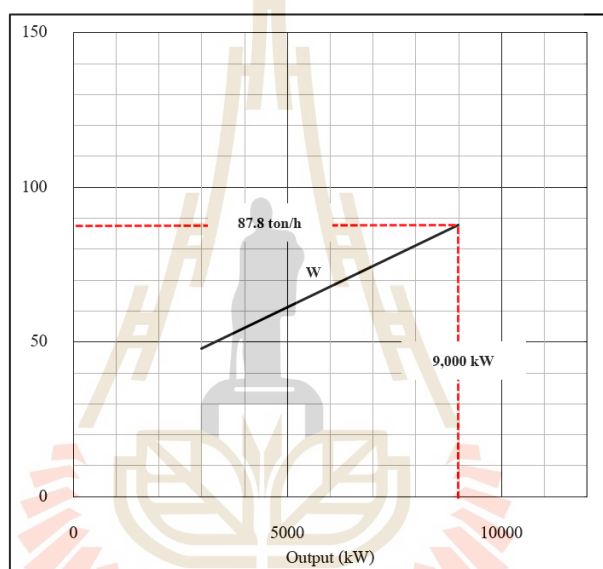
$$\dot{m}_{\text{Vapor}} = 55.225 \text{ ตัน/ชั่วโมง}$$

ค.2 ตัวอย่างการคำนวณแบบจำลองโรงไฟฟ้า

1. การคำนวณแบบจำลองย่อยกังหันไอน้ำเพื่อผลิตไฟฟ้า

สำหรับการคำนวณในส่วนของแบบจำลองย่อยกังหันไอน้ำเพื่อผลิตไฟฟ้านั้นมีการคำนวณเหมือนกันกับการคำนวณแบบจำลองย่อยกังหันไอน้ำเพื่อขับอุปกรณ์ โดยซึ่งหาได้จากนำไปคำนวณหา Steam Rate ที่ใช้แต่ละอุปกรณ์โดยใช้ Curve Turbine ดังนี้

ซึ่งคำนวณได้สมการ $P_e = 6.76 \times m_s + 27$ เทียบกับ Curve Turbine โดยใช้ Steam Turbine ขับ Generator 9 MWe



รูปที่ ค.1 Curve Turbine (กังหันไอน้ำ)

| | |
|---|------------------------|
| อุณหภูมิของไอน้ำขาเข้ากังหันไอน้ำ | เท่ากับ 400 °C |
| อุณหภูมิของไอน้ำขาออกกังหันไอน้ำ | เท่ากับ 180 °C |
| เอนทาลปีจำเพาะของไอน้ำเข้าที่ 400 °C | เท่ากับ 3,231.55 kJ/kg |
| เอนทาลปีจำเพาะของไอน้ำเข้าที่ 180 °C | เท่ากับ 2,777.2 kJ/kg |
| ความดันของไอน้ำขาเข้ากังหันไอน้ำ | เท่ากับ 29 bar |
| ความดันของไอน้ำขาออกกังหันไอน้ำ | เท่ากับ 2.5 bar |
| คิดเป็นไฟฟ้าที่ผลิตได้จากสมการ $P_e = 6.76 \times m_s + 27$ | |

สำหรับการคำนวณของกังหันไอน้ำชุดอื่นก็ใช้วิธีคำนวณเดียวกัน เพียงเปลี่ยนตัวแปรบางตัวเท่านั้น

ค.3 ตารางบันทึกข้อมูลผลแบบจำลอง

ตารางที่ ข.1 บันทึกอัตราการหนี้ออกจากโรงงานประจำวันของทางโรงงาน

| ลำดับ | ว/ด/ป | อัตรา การหนี้อ้อย | น้ำตาลทรายดิบ | น้ำตาลทรายขาว | น้ำตาลทรายรวม |
|-------|------------|----------------------|---------------|---------------|---------------|
| | | tons/hr | tons/hr | tons/hr | tons/hr |
| 4 | 14/12/2562 | 14,127.33 | 1,202.10 | 286.50 | 1,488.60 |
| 6 | 25/12/2562 | 14,581.26 | 1,386.28 | 112.50 | 1,498.78 |
| 9 | 10/01/2563 | 14,809.76 | 1,541.20 | 223.50 | 1,764.70 |
| 11 | 13/01/2563 | 14,511.35 | 1,460.21 | 182.50 | 1,642.71 |
| 12 | 16/01/2563 | 14,533.32 | 1,338.36 | 258.00 | 1,596.36 |
| 13 | 17/01/2563 | 13,785.40 | 1,209.88 | 256.50 | 1,466.38 |
| 14 | 19/01/2563 | 13,233.88 | 1,256.01 | 256.50 | 1,512.51 |
| 15 | 21/01/2563 | 14,759.53 | 1,350.50 | 334.50 | 1,685.00 |
| 18 | 27/01/2563 | 14,538.84 | 1,301.05 | 343.50 | 1,644.55 |
| 19 | 28/01/2563 | 14,215.10 | 1,232.50 | 289.50 | 1,522.00 |
| 20 | 29/01/2563 | 14,005.96 | 1,364.23 | 294.00 | 1,658.23 |
| 21 | 30/01/2563 | 13,207.08 | 1,140.46 | 334.50 | 1,474.96 |
| 22 | 31/01/2563 | 13,633.57 | 1,226.68 | 352.50 | 1,579.18 |
| 23 | 1/02/2563 | 12,379.13 | 1,040.89 | 387.00 | 1,427.89 |
| 24 | 2/02/2563 | 11,609.17 | 940.31 | 387.00 | 1,327.31 |
| 25 | 3/02/2563 | 12,103.57 | 983.53 | 385.50 | 1,369.03 |
| 26 | 4/02/2563 | 11,395.27 | 927.69 | 385.50 | 1,313.19 |
| 27 | 5/02/2563 | 11,637.23 | 920.40 | 321.00 | 1,241.40 |
| 28 | 6/02/2563 | 11,102.01 | 997.44 | 306.00 | 1,303.44 |
| 29 | 11/02/2563 | 8,219.06 | 664.75 | 276.00 | 940.75 |
| 30 | 12/02/2563 | 8,513.52 | 1,009.18 | 112.50 | 1,121.68 |

ตารางที่ ค.2 บันทึกปริมาณไอน้ำและไฟฟ้าที่ผลิตได้จากรายงานประจำวันของทางโรงงาน

| ว/ด/ป | Total Steam Produced | Total kWh for Factory | Total kWh for PEA | Tons Steam for PEA | Tons Steam for Factory |
|------------|-------------------------|--------------------------|----------------------|-----------------------|---------------------------|
| | tons/hr | kWh/day | kWh/day | tons/hr | tons/hr |
| 14/12/2562 | 7,357.00 | 232,000.00 | 84,240.00 | 31.70 | 274.85 |
| 25/12/2562 | 7,654.00 | 231,000.00 | 97,800.00 | 36.02 | 282.12 |
| 10/01/2563 | 8,029.00 | 243,000.00 | 145,440.00 | 54.72 | 275.82 |
| 13/01/2563 | 8,057.00 | 244,000.00 | 145,080.00 | 54.59 | 281.12 |
| 16/01/2563 | 8,070.00 | 246,000.00 | 144,960.00 | 54.54 | 281.71 |
| 17/01/2563 | 7,825.00 | 243,000.00 | 141,840.00 | 53.37 | 272.27 |
| 19/01/2563 | 7,806.00 | 239,000.00 | 105,360.00 | 39.64 | 285.61 |
| 21/01/2563 | 7,833.00 | 243,000.00 | 145,200.00 | 54.63 | 217.74 |
| 27/01/2563 | 7,252.00 | 242,000.00 | 118,200.00 | 44.47 | 257.29 |
| 28/01/2563 | 8,062.00 | 239,000.00 | 127,630.00 | 48.02 | 287.90 |
| 29/01/2563 | 8,174.00 | 241,000.00 | 146,400.00 | 55.08 | 285.50 |
| 30/01/2563 | 7,891.00 | 236,000.00 | 148,440.00 | 55.85 | 272.94 |
| 31/01/2563 | 8,054.00 | 239,000.00 | 146,200.00 | 55.01 | 280.58 |
| 1/02/2563 | 7,480.00 | 234,000.00 | 136,320.00 | 51.29 | 260.38 |
| 2/02/2563 | 7,434.00 | 231,000.00 | 138,720.00 | 52.19 | 257.56 |
| 3/02/2563 | 7,802.00 | 234,000.00 | 151,080.00 | 56.84 | 268.24 |
| 4/02/2563 | 7,420.00 | 228,000.00 | 154,200.00 | 58.02 | 251.15 |
| 5/02/2563 | 7,359.00 | 231,000.00 | 155,880.00 | 58.65 | 247.98 |
| 6/02/2563 | 7,426.00 | 231,000.00 | 153,720.00 | 57.84 | 251.58 |
| 11/02/2563 | 6,792.00 | 220,000.00 | 163,920.00 | 61.67 | 221.33 |
| 12/02/2563 | 6,442.00 | 215,000.00 | 158,400.00 | 59.60 | 208.82 |

ตารางที่ ค.3 บันทึกปริมาณขานอ้อยที่ได้จากรายงานประจำวันของทางโรงงาน

| ลำดับ | ว/ด/ป | Bagasse | | Bagasse | Bagasse used | % Bagasse |
|-------|------------|---------|-----------|----------|--------------|-----------|
| | | % Cane | %Moisture | | | |
| 4 | 14/12/2562 | 26.73 | 51.27 | 3,776.23 | 3,144.66 | 83.27 |
| 6 | 25/12/2562 | 25.82 | 48.94 | 3,764.88 | 3,076.85 | 81.73 |
| 9 | 10/01/2563 | 27.28 | 48.75 | 4,040.10 | 3,211.98 | 79.50 |
| 11 | 13/01/2563 | 27.07 | 47.89 | 3,928.22 | 3,153.48 | 80.28 |
| 12 | 16/01/2563 | 28.34 | 50.01 | 4,118.74 | 3,335.46 | 80.98 |
| 13 | 17/01/2563 | 27.57 | 48.79 | 3,800.63 | 3,133.16 | 82.44 |
| 14 | 19/01/2563 | 28.40 | 50.10 | 3,758.42 | 3,237.21 | 86.13 |
| 15 | 21/01/2563 | 28.56 | 49.86 | 4,215.32 | 3,224.77 | 76.50 |
| 18 | 27/01/2563 | 27.88 | 49.11 | 4,053.43 | 2,928.00 | 72.24 |
| 19 | 28/01/2563 | 28.41 | 50.21 | 4,038.51 | 3,349.35 | 82.94 |
| 20 | 29/01/2563 | 27.87 | 49.24 | 3,903.46 | 3,311.33 | 84.83 |
| 21 | 30/01/2563 | 28.46 | 50.10 | 3,758.73 | 3,269.25 | 86.98 |
| 22 | 31/01/2563 | 28.40 | 49.83 | 3,871.93 | 3,313.15 | 85.57 |
| 23 | 1/02/2563 | 27.86 | 49.02 | 3,448.82 | 3,012.89 | 87.36 |
| 24 | 2/02/2563 | 27.70 | 48.55 | 3,215.74 | 2,958.58 | 92.00 |
| 25 | 3/02/2563 | 28.52 | 49.87 | 3,451.94 | 3,212.64 | 93.07 |
| 26 | 4/02/2563 | 28.77 | 49.91 | 3,278.42 | 3,058.44 | 93.29 |
| 27 | 5/02/2563 | 28.87 | 49.72 | 3,359.67 | 3,418.55 | 101.75 |
| 28 | 6/02/2563 | 28.59 | 49.45 | 3,174.06 | 3,024.50 | 95.29 |
| 29 | 11/02/2563 | 29.87 | 50.91 | 2,455.03 | 2,875.33 | 117.12 |
| 30 | 12/02/2563 | 29.26 | 49.92 | 2,491.05 | 2,656.11 | 106.63 |

ตารางที่ ค.4 บันทึกเปอร์เซ็นต์น้ำอ้อยที่ได้จากรายงานประจำวันของทางโรงงาน

| ลำดับ | ว/ด/ป | Mixed juice | Imbibition | Crystal A | Crystal B |
|-------|------------|-------------|------------|-----------|-----------|
| | | % Cane | % Cane | % | % |
| 4 | 14/12/2562 | 98.01 | 24.74 | 50.71 | 38.07 |
| 6 | 25/12/2562 | 99.24 | 25.06 | 51.82 | 45.5 |
| 9 | 10/01/2563 | 97.84 | 25.15 | 53.04 | 40.45 |
| 11 | 13/01/2563 | 93.48 | 20.55 | 51.94 | 41.57 |
| 12 | 16/01/2563 | 96.72 | 25.06 | 49.25 | 38.37 |
| 13 | 17/01/2563 | 59.10 | 22.70 | 52.41 | 37.14 |
| 14 | 19/01/2563 | 99.50 | 27.91 | 53.84 | 35.72 |
| 15 | 21/01/2563 | 97.07 | 25.63 | 52.95 | 37.31 |
| 18 | 27/01/2563 | 100.14 | 28.02 | 50.34 | 37.16 |
| 19 | 28/01/2563 | 101.08 | 29.50 | 52.27 | 38.60 |
| 20 | 29/01/2563 | 101.66 | 29.52 | 53.02 | 37.9 |
| 21 | 30/01/2563 | 101.10 | 29.56 | 50.95 | 35.43 |
| 22 | 31/01/2563 | 100.53 | 28.93 | 51.13 | 36.22 |
| 23 | 1/02/2563 | 98.81 | 26.66 | 51.45 | 35.59 |
| 24 | 2/02/2563 | 99.57 | 27.27 | 50.21 | 36.75 |
| 25 | 3/02/2563 | 102.57 | 31.09 | | |
| 26 | 4/02/2563 | 96.31 | 25.08 | 53.38 | 34.89 |
| 27 | 5/02/2563 | 98.30 | 27.17 | 50.9 | 33.99 |
| 28 | 6/02/2563 | 99.04 | 27.63 | 54.1 | 37.72 |
| 29 | 11/02/2563 | 96.95 | 26.82 | 53.76 | 36.4 |
| 30 | 12/02/2563 | 97.30 | 26.56 | 55.41 | 37.97 |

ตารางที่ ค.5 บันทึกสัดส่วนการใช้พลังงานเทียบกับอัตราการหีบที่ได้จากรายงานประจำวันของทาง
โรงงาน

| ลำดับ | ว/ด/ป | Overall | Overall | Factory |
|-------|------------|---------------|----------------------|---------------|
| | | kWh/Tons Cane | Tons Steam/Tons Cane | kWh/Tons Cane |
| 4 | 14/12/2562 | 22.38 | 0.52 | 16.4 |
| 6 | 25/12/2562 | 22.55 | 0.52 | 15.8 |
| 9 | 10/01/2563 | 26.23 | 0.54 | 16.4 |
| 11 | 13/01/2563 | 26.81 | 0.56 | 16.8 |
| 12 | 16/01/2563 | 26.9 | 0.56 | 16.9 |
| 13 | 17/01/2563 | 27.92 | 0.57 | 17.6 |
| 14 | 19/01/2563 | 26.02 | 0.59 | 18.1 |
| 15 | 21/01/2563 | 26.3 | 0.53 | 16.5 |
| 18 | 27/01/2563 | 24.78 | 0.5 | 16.6 |
| 19 | 28/01/2563 | 25.79 | 0.57 | 16.8 |
| 20 | 29/01/2563 | 27.66 | 0.58 | 17.2 |
| 21 | 30/01/2563 | 29.11 | 0.6 | 17.9 |
| 22 | 31/01/2563 | 28.25 | 0.59 | 17.5 |
| 23 | 1/02/2563 | 29.91 | 0.60 | 18.9 |
| 24 | 2/02/2563 | 31.85 | 0.64 | 19.9 |
| 25 | 3/02/2563 | 31.82 | 0.64 | 19.3 |
| 26 | 4/02/2563 | 33.54 | 0.63 | 20.0 |
| 27 | 5/02/2563 | 33.25 | 0.63 | 19.9 |
| 28 | 6/02/2563 | 34.65 | 0.67 | 20.8 |
| 29 | 11/02/2563 | 46.71 | 0.83 | 26.8 |
| 30 | 12/02/2563 | 43.86 | 0.76 | 25.3 |



ง.1 การคำนวณมาตรการการติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำป้อน

กรณีการคำนวณมาตรการการติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำป้อน (Economizer)

| | | |
|---|---------|-------------------------------|
| สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม | เท่ากับ | 31.71 W. (m ⁻² °C) |
| อุณหภูมิน้ำขาเข้าเครื่องอุ่นน้ำป้อน (จากการตรวจวัด) | เท่ากับ | 105 °C |
| อุณหภูมิน้ำขาออกเครื่องอุ่นน้ำป้อน (ค่าออกแบบ) | เท่ากับ | 135 °C |
| ประสิทธิภาพหม้อไอน้ำก่อนปรับปรุง | เท่ากับ | 81.14 % |

จากสมการหาค่า Log Mean Temperature Difference, LMTD,

$$\Delta T_{l.m.} = \frac{\Delta T_i - \Delta T_e}{\ln\left(\frac{\Delta T_i}{\Delta T_e}\right)} = 61.8 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{ง.1})$$

การคำนวณหาการถ่ายเทความร้อนของเครื่องอุ่นน้ำป้อน

$$Q_{ECO} = \dot{m}_s c_g (t_{g1} - t_{g2}) = 11,114 \text{ kW} \quad (\text{ง.2})$$

นำความร้อนที่หยัดได้มา คำนวณหาขนาดพื้นที่ติดตั้ง Economizer ดังนี้

$$A_o = \frac{\dot{Q}_{ECO}}{U_o \Delta T_{l.m.}} = 5,668 \text{ m}^2 \quad (\text{ง.3})$$

หาประสิทธิภาพหลังติดตั้ง Economizer จะได้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น

$$\eta = \frac{\dot{m}_s (h_s - h_w)}{(Q_{old} - Q_{ECO})} = 84.9 \% \quad (\text{ง.4})$$

จากสมการคิดเป็นปริมาณเชื้อเพลิง

$$\dot{m}_f = \frac{Q_{ECO}}{LHV} = 1.5 \text{ kg/s} \quad (\text{ง.5})$$

คิดเป็นปริมาณไอน้ำจากสมการ
$$m_s = \frac{\dot{m}_f \times \eta \times LHV}{h_s - h_w} = 12.4 \text{ tons/hr}$$

คิดเป็นปริมาณไฟฟ้าที่ได้เพิ่มเติมได้จากเทียบกับ Curve Turbine จากสมการ $P_e = 6.76m_s + 27$

ซึ่งจะคิดปริมาณไฟฟ้าที่ได้เพิ่มเติมโดยแทนใน Curve Turbine $P = 11.88 \text{ kW}$

คิดเป็นหน่วยไฟฟ้า
$$E_t = 2,661 \text{ kWh/d} = 292,716 \text{ kWh/y}$$

คิดเป็นมูลค่าจำหน่ายไฟฟ้าได้ต่อปี 1,229,409 บาท/ปี (ราคาหน่วยละ 4.2 บาท/kWh)

ลงทุน 7,200,000 บาท ซึ่งคิดความคุ้มค่าจะได้

Payback Period (PB) เท่ากับ 5.86 ปี

ง.2 การคำนวณมาตรการติดตั้งอุปกรณ์โบลว์ดาวน์อัตโนมัติ

กรณีการคำนวณมาตรการติดตั้งอุปกรณ์โบลว์ดาวน์อัตโนมัติ

อัตราการบำบัด, เท่ากับ 391.63 Ton/hr

ค่า Conductivity ของน้ำป้อน เท่ากับ 42.8 $\mu\text{s/cm}$

ค่า Conductivity ของน้ำในหม้อไอน้ำ เท่ากับ 6,000 $\mu\text{s/cm}$

หาสัดส่วนการโบลว์ดาวน์ จากสมการ

$$R_{BD} = \frac{Con_w}{Con_B - Con_w}$$

แทนค่า

$$R_{BD} = 42.8 / (6,000 - 42.8)$$

$$R_{BD} = 0.007$$

หาอัตราการบำบัดน้ำโบลว์ดาวน์ที่เหมาะสม จากสมการ

$$m_{BD} = m_w \times \frac{R_{BD}}{1 + R_{BD}}$$

แทนค่า

$$m_{BD} = 319.63 \times (0.007 / 1 + 0.007)$$

$$m_{BD} = 2.28 \text{ ton/hr}$$

เนื่องจากการ ไบโกลว์ดาว์นนี้เป็นการปล่อยน้ำเดือดทิ้ง ความร้อนที่ประหยัดสามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$Q_{save} = m_{NBD} (h_f)$$

แทนค่า

$$Q_{save} = 85 \times 1,007.8$$

$$Q_{save} = 85,747 \text{ kWh/ปี}$$

คิดเป็นมูลค่าจำหน่ายไฟฟ้าได้ต่อปี 360,137 บาท/ปี (ราคาหน่วยละ 4.2 บาท/kWh)

ลงทุน 1,100,000 บาท ซึ่งคิดความคุ้มค่าจะได้

Payback Period (PB) เท่ากับ 3.05 ปี

ง.3 การคำนวณมาตรการการหุ้มฉนวนถังเก็บน้ำคอนเดนเสท

กรณีการคำนวณมาตรการการหุ้มฉนวนถังเก็บน้ำคอนเดนเสท

| | |
|--------------------------------|------------------------------|
| ความเร็วลมจุดที่วัด | เท่ากับ 2 m/s |
| พื้นที่ผิวของถังน้ำ Condensate | เท่ากับ 472.5 m ² |
| อุณหภูมิผิวถังก่อนปรับปรุง | เท่ากับ 83.7 °C |
| อุณหภูมิผิวถังหลังปรับปรุง | เท่ากับ 45 °C |
| อุณหภูมิอากาศ | เท่ากับ 34 °C |
| Lower Heating Value (LHV) | เท่ากับ 7,360 kJ/kg |

หาการสูญเสียความร้อนจากถัง Condensate จากสมการ

$$Q_{loss} = 0.548 \left[\left(\frac{T_s}{55.55} \right)^4 - \left(\frac{T_a}{55.55} \right)^4 \right] + 1.957 (T_s - T_a)^{1.25} \sqrt{\frac{196.85 V_m + 68.9}{68.9}} \quad (3.6)$$

ก่อนหุ้มฉนวน

$$= 0.548 \left[\left(\frac{356.85}{55.55} \right)^4 - \left(\frac{307.15}{55.55} \right)^4 \right] + 1.957 (356.85 - 307.15)^{1.25} \sqrt{\frac{196.85 \times 2 + 68.9}{68.9}}$$

$$Q_{loss} = 515.10 \text{ kW}_t$$

หลังหุ้มฉนวน

$$= 0.548 \left[\left(\frac{318.15}{55.55} \right)^4 - \left(\frac{307.15}{55.55} \right)^4 \right] + 1.957(318.15 - 307.15)^{1.25} \sqrt{\frac{196.85 \times 2 + 68.9}{68.9}}$$

$$Q_{los} = 84.57 \text{ kW}_t$$

สามารถประหยัดพลังงานความร้อนได้เท่ากับ $Q = 515.1 - 84.57 = 430.5 \text{ kW}$

$$\text{จากสมการคิดเป็นปริมาณเชื้อเพลิง } \dot{m}_f = \frac{Q_{save}}{LHV} = \frac{430.5}{7,360} = 0.06 \text{ kg/s}$$

$$\text{คิดเป็นปริมาณไอน้ำจากสมการ } m_s = \frac{\dot{m}_f \times \eta \times LHV}{h_s - h_w} = \frac{0.06 \times 0.8114 \times 7,360}{3,185.28 - 440} = 0.46 \text{ tons/hr}$$

คิดเป็นปริมาณไฟฟ้าที่ได้เพิ่มเติมได้จากเทียบกับ Curve Turbine จากสมการ $P_e = 6.76m_s + 27$

ซึ่งจะคิดปริมาณไฟฟ้าที่ได้เพิ่มเติมโดยแทนใน Curve Turbine $P = 30.1 \text{ kW}$

คิดเป็นหน่วยไฟฟ้า $E_t = 79,464 \text{ kWh/ปี}$

คิดเป็นมูลค่าจำหน่ายไฟฟ้าได้ต่อปี 333,749 บาท/ปี (ราคาหน่วยละ 4.2 บาท/kWh)

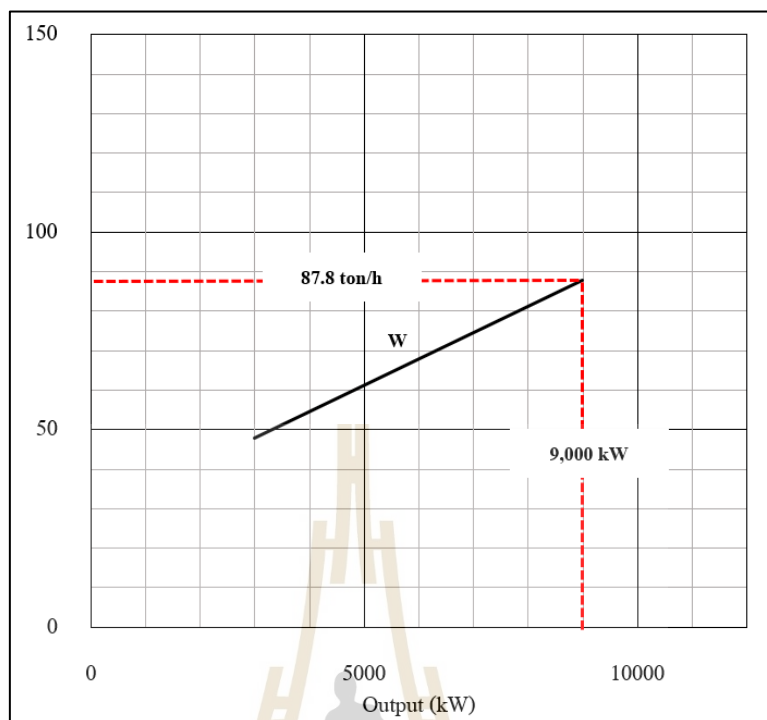
ลงทุน 426,600 บาท ซึ่งคิดความคุ้มค่าจะได้

Payback Period (PB) เท่ากับ 1.28 ปี

ง.4 การคำนวณมาตรการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ไอน้ำในกระบวนการผลิต โดยการนำ Make up steam ไปผลิตไฟฟ้าเพื่อจำหน่าย

กรณีการคำนวณมาตรการนำ Make up steam ไปผลิตไฟฟ้า

จากการทำสมดุลพลังงานของหม้อต้มพบว่า มีการใช้ปริมาณไอน้ำเกินความจำเป็น สิ้นเปลืองพลังงานอยู่เท่ากับ 42 ton/hr ดังในตารางที่ 4.3 (สถานะที่ 2) ภายหลังจากการทำสมดุลการใช้พลังงานหม้อต้มน้ำอ้อยในส่วนกระบวนการผลิต และนำเอาไอน้ำแรงดันสูง ดังกล่าวส่งเข้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 9 MW_e ผลิตไฟฟ้าส่งจำหน่ายเข้ากริดให้กับการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จะได้ปริมาณการผลิตไฟฟ้าและส่งจำหน่ายที่เพิ่มขึ้น จาก Consumption Curve Turbine เท่ากับ 310.9 kW หรือสามารถคำนวณได้จากสมการเส้นตรง $P_e = 6.76m_s + 27$ ซึ่งได้ค่าเท่ากัน



รูปที่ ง.1 Curve Turbine (หม้อต้ม)

ซึ่งจะคิดปริมาณไฟฟ้าที่ได้เพิ่มขึ้นจากการผลิต $P = 310.9 \text{ kW}$

คิดเป็นหน่วยไฟฟ้า $E_t = 820,829 \text{ kWh/Year}$

คิดเป็นมูลค่าจำหน่ายไฟฟ้าได้ต่อปี 3,447,481 บาท/ปี (ราคาหน่วยละ 4.2 บาท/kWh)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ง.5 การเก็บข้อมูลตรวจวัดต่าง ๆ



รูปที่ ง.2 การเก็บข้อมูลและการตรวจวัดค่าต่าง ๆ

ประวัติผู้เขียน

นายประพนธ์ ชูประเสริฐ เกิดเมื่อวันที่ 20 ธันวาคม พ.ศ. 2515 ที่อำเภอกุมภวาปี จังหวัดอุดรธานี ปัจจุบันมีภูมิลำเนาอยู่ที่ อำเภอเมืองอุดรธานี จังหวัดอุดรธานี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น เมื่อ ปี พ.ศ. 2540 โดยหลังจากสำเร็จการศึกษาได้รับใบอนุญาตประกอบวิชาชีพวิศวกรรมควบคุม ระดับภาคีวิศวกร สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล และเริ่มทำงานที่ บจก.อุตสาหกรรมโคราช (โรงงานน้ำตาลพิมาย) บจก.สหเรือง (โรงงานน้ำตาลสหเรือง) บจก.น้ำตาลกุมภวาปี บจก.บัวใหญ่ไบโอเพาเวอร์ และ บจก.กลีสตอลล่า (ฝ่ายโครงการสร้างโรงงานน้ำตาลทิพย์สุโขทัย และ โรงไฟฟ้าสุโขทัยไบโอเอ็นเนอจี) และได้เลื่อนระดับใบอนุญาตวิศวกรรมควบคุม เป็นระดับสามัญวิศวกร และวุฒิวิศวกร ตามลำดับ ปัจจุบันประกอบธุรกิจส่วนตัว บจก.ไทยเมคคานิคอล เอนจิเนียริง แอนด์ คอนซัลแทนต์ ธุรกิจประเภทรับเหมา ประกอบ ติดตั้ง ซ่อมแซม หม้อไอน้ำ ท่อไอน้ำ และระบบขนถ่ายลำเลียง และ บจก.วิศวกรรมเครื่องกลและพลังงาน ธุรกิจประเภทตรวจและทดสอบงานด้านวิศวกรรมเครื่องกล เช่น หม้อไอน้ำ ปั่นจั่น ระบบดับเพลิง และระบบพลังงาน

ปี พ.ศ. 2558 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี

ปี พ.ศ. 2560 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาเอก วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการพลังงานและโลจิสติกส์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา โดยมีผลงานวิจัยในระหว่างศึกษาดังนี้

1. ได้เข้าร่วมเสนอบทความในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ The 13th TSAE International Conference 2020, Title “Improvement of Boiler Efficiency for Rem-Udom sugar factory”
2. ได้รับการตอบรับตีพิมพ์บทความวิจัยเผยแพร่ในวารสารวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีศรีวิชัย ปีที่ 14 ฉบับที่ 2 ประจำเดือน พฤษภาคม-สิงหาคม พ.ศ. 2565 เรื่อง “การอนุรักษ์พลังงานสำหรับโรงงานน้ำตาลแบบดั้งเดิมของไทย : กรณีศึกษาโรงงานน้ำตาลทรายเริ่มอุดม”
3. ได้รับการตอบรับตีพิมพ์บทความวิจัยเผยแพร่ในวารสารวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 33 ฉบับที่ 2 ประจำเดือน เมษายน-มิถุนายน พ.ศ. 2566 เรื่อง “การศึกษาประสิทธิภาพการใช้ไอน้ำแบบดั้งเดิมของไทยโดยการจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ : กรณีศึกษาโรงงานน้ำตาลทรายเริ่มอุดม จังหวัดอุดรธานี”