



การศึกษาประสิทธิภาพการใช้ไอน้ำในโรงงานน้ำตาลแบบดั้งเดิมของไทยโดยการจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ : กรณีศึกษาโรงงานน้ำตาลทรายขาวเริ่มอุดม จังหวัดอุดรธานี

ประพนธ์ ชูประเสริฐ เกรียงไกร รายนะสุข และ กิรติ สุกัญจน์*

สาขาวิชาวิศวกรรมจัดการพลังงานและโลจิสติกส์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปรีชา ทูมมู

สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08 9765 6526 อีเมล: keerati@sut.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2022.07.001

รับเมื่อ 29 มิถุนายน 2563 แก้ไขเมื่อ 4 มกราคม 2564 ตอรับเมื่อ 11 มีนาคม 2564 เผยแพร่ออนไลน์ 1 กรกฎาคม 2565

© 2023 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการใช้ไอน้ำในโรงงานน้ำตาลแบบดั้งเดิมของไทยโดยการจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ เพื่อเป็นแนวทางในการประเมินและพยากรณ์ความต้องการใช้ไอน้ำในกระบวนการผลิตน้ำตาลทรายดิบและไฟฟ้าในโรงงานน้ำตาลแบบดั้งเดิมของไทย โดยใช้กรณีศึกษาของโรงงานน้ำตาลทรายขาวเริ่มอุดม จังหวัดอุดรธานี โดยการวิเคราะห์สมดุลพลังงานและมวล และเปรียบเทียบผลค่านอกกับค่าความต้องการไอน้ำจริง ตัวแปรที่ใช้ในการประเมินความต้องการใช้ไอน้ำประกอบด้วยปริมาณอ้อยที่เข้าหีบ ปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตใช้ในโรงงาน และปริมาณไฟฟ้าเพื่อขาย โดยได้ทำการคำนวณเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการคำนวณและค่าจริงจากข้อมูลของโรงงาน ผลที่ได้พบว่า ค่าที่ได้จากการคำนวณและค่าที่ใช้จริงมีความใกล้เคียงกันมาก โดยมีความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 0.52–7.57% ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปเป็นต้นแบบในการประเมินหาความต้องการการใช้ไอน้ำในโรงงานน้ำตาลแบบดั้งเดิมของไทย และช่วยในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการผลิตและใช้ไอน้ำได้

คำสำคัญ: การสมดุลพลังงาน การจำลองระบบพลังงาน โรงงานน้ำตาล

การอ้างอิงบทความ: ประพนธ์ ชูประเสริฐ, เกรียงไกร รายนะสุข, กิรติ สุกัญจน์ และ ปรีชา ทูมมู, “การศึกษาประสิทธิภาพการใช้ไอน้ำในโรงงานน้ำตาลแบบดั้งเดิมของไทยโดยการจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ : กรณีศึกษาโรงงานน้ำตาลทรายขาวเริ่มอุดม จังหวัดอุดรธานี,” *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 33, ฉบับที่ 1, หน้า 81–91, ม.ค.-มี.ค. 2566.



A Study of Steam Consumption Efficiency of Thai Traditional Sugar Factory Using Thermodynamic Simulation Method: A Case Study of Rermudom Sugar Factory

Praphon Chooprasert, Kriengkrai Rayanasuk and Keerati Suluksna*

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

Preecha Tummu

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

* Corresponding Author, Tel. 08 9765 6526, E-mail: keerati@sut.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2022.07.001

Received 29 June 2020; Revised 4 January 2021; Accepted 11 March 2021; Published online: 1 July 2022

© 2023 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

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

Please cite this article as: P. Chooprasert, K. Rayanasuk, K. Suluksna, and P. Tummu, "A study of steam consumption efficiency of thai traditional sugar factory using thermodynamic simulation method: A case study of Rermudom sugar factory," *The Journal of KMUTNB*, vol. 33, no. 1, pp. 81–91, Jan.–Mar. 2023 (in Thai).

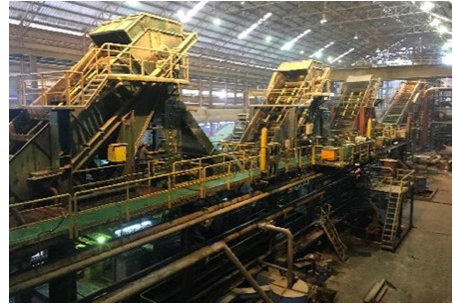
1. บทนำ

ประเทศไทยมีชีวมวลเหลือหลังการเก็บเกี่ยวจำนวนมาก โดยเฉพาะอ้อยมีการเก็บเกี่ยวเกือบ 8 ล้านตันต่อปี [1] ปัจจุบันได้นำมาผลิตไฟฟ้าเพื่อใช้เองในโรงงาน รวมถึงผลิตเพื่อส่งจำหน่ายแก่การไฟฟ้า จากการสำรวจโรงงานน้ำตาล 47 แห่ง ในประเทศไทยพบว่า การผลิตไฟฟ้าของโรงงานน้ำตาลสมัยใหม่มีประสิทธิภาพสูงกว่าโรงงานน้ำตาลแบบดั้งเดิมมาก [2] ที่ผ่านมามีการนำมาตรการอนุรักษ์พลังงานมาใช้พบว่า สามารถช่วยลดการใช้พลังงานได้กว่า 70% ในบางกระบวนการ [3]–[6] จากแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558–2579 มีเป้าหมายเพิ่มสัดส่วนการใช้พลังงานทางเลือกให้เป็น 30% ภายใน พ.ศ. 2579 [7] นอกจากนี้ แผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2561–2580 มีเป้าหมายเพิ่มกำลังการผลิตไฟฟ้าจากชีวมวลให้ได้ 500 เมกะวัตต์ [8]

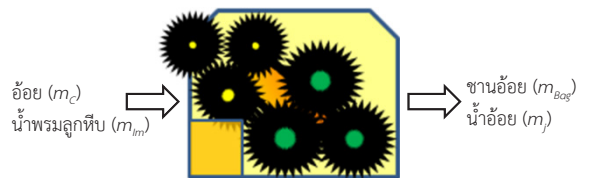
การใช้ไอน้ำในโรงงานน้ำตาลมีความสำคัญต่อการผลิตน้ำตาลทรายเป็นอย่างมาก งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาการจำลองระบบทางความร้อน การวิเคราะห์ระบบการระเหยไอน้ำของน้ำอ้อย และการวิเคราะห์สมรรถนะของเครื่องระเหยไอน้ำที่ได้นำพลังงานทางความร้อนมาใช้ในกระบวนการผลิตน้ำตาลทราย [9] ในขณะเดียวกัน [10] ได้ศึกษาการจำลองระบบทางเทอร์โมไดนามิกส์ และประเมินประสิทธิภาพการใช้ไอน้ำในโรงงานน้ำตาล และ [11] ได้ศึกษาการใช้สมการที่สามารถอธิบายถึงผลกระทบจากความร้อนของเครื่องระเหยไอน้ำในโรงงานน้ำตาล

บริษัทโรงงานน้ำตาลทรายขาวเริ่มอุดม จำกัด ตั้งอยู่ที่อำเภอหนองหาน จังหวัดอุดรธานี ผลิตน้ำตาลทรายขาวและน้ำตาลทรายดิบ มีการใช้ชานอ้อยกว่าปีละ 280,000 ตัน เผาเป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำ ขนาด 200 ตันต่อชั่วโมง ทำงานที่ความดัน 29 บาร์ จำนวน 2 ชุด ผลิตไฟฟ้าทั้งใช้เองราว 50% ที่เหลือส่งจำหน่าย อย่างไรก็ตาม เนื่องจากเป็นโรงงานแบบดั้งเดิม ดังนั้น จึงมีความสนใจจะเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าและลดการใช้พลังงานในกระบวนการผลิตให้ได้มากขึ้น

งานวิจัยนี้สนใจประเมินความต้องการใช้ไอน้ำใน



รูปที่ 1 เครื่องจักรลูกทึบอ้อย



รูปที่ 2 ผังกระบวนการหีบอ้อย

กระบวนการผลิตน้ำตาลทรายดิบ และการผลิตไฟฟ้าในโรงงานน้ำตาลทรายขาวเริ่มอุดม เพื่อนำไปสู่การทำนายพลังงานที่ใช้ต่อการผลิตที่เหมาะสม โดยการวิเคราะห์สมดุลพลังงานและมวล และเปรียบเทียบผลค่านวมที่ได้จากแบบจำลองกับค่าการใช้ไอน้ำจริงในกระบวนการผลิต ผลลัพธ์ที่ได้จะสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางแก่โรงงานน้ำตาลอื่นในระดับการผลิตใกล้เคียงกันในประเทศไทยเพื่อการอนุรักษ์พลังงานได้ต่อไป

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้การวิเคราะห์สมดุลมวล และพลังงานในการผลิตน้ำตาลทรายดิบและไฟฟ้า บนหลักการทางเทอร์โมไดนามิกส์แบบสภาวะคงตัว เพื่อคำนวณหาความต้องการใช้ไอน้ำในกระบวนการผลิตของโรงงาน 3 กระบวนการหลักได้แก่ การหีบอ้อย การอุ่นและต้มน้ำอ้อย และการเคี้ยวน้ำตาลทราย โดยการคำนวณแต่ละขั้นตอนเป็นดังต่อไปนี้

2.1 การจำลองกระบวนการหีบอ้อย

การหีบอ้อยประกอบด้วยเครื่องจักรหีบอ้อย (รูปที่ 1) และมีผังกระบวนการหีบอ้อย ดังรูปที่ 2 ซึ่งอัตราอัตราการไหลชานอ้อยออกลูกทึบคำนวณได้ตามสมการที่ (1) [12]



รูปที่ 3 กังหันขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 9 เมกะวัตต์



รูปที่ 4 กังหันขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 12 เมกะวัตต์

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

เมื่อ

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

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

%Bag คือ เปอร์เซ็นต์ของน้ำร้อนที่ปล่อยออกมาต่อที่เข้า (%)

อัตราการไหลของน้ำร้อนที่ปล่อยออกมาและอัตราการไหลของน้ำร้อนที่เข้าจากชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (2) และ (3) ตามลำดับ

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

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

เมื่อ

\dot{m}_{Im} คือ อัตราการไหลของน้ำร้อนที่ปล่อยออกมา (T/day)

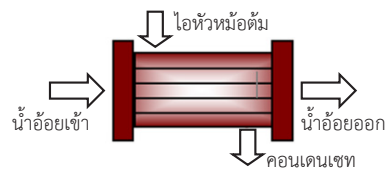
%Im คือ เปอร์เซ็นต์ของน้ำร้อนที่ปล่อยออกมาต่อที่เข้า (%)

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

2.2 การจำลองกระบวนการผลิตไฟฟ้า

การผลิตไฟฟ้าใช้กังหันไอน้ำชนิด Backpressure ขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 2 ชุด ขนาด 9 เมกะวัตต์ สำหรับผลิตไฟฟ้าใช้ในโรงงาน (รูปที่ 3) และขนาด 12 เมกะวัตต์ สำหรับผลิตไฟฟ้าจำหน่ายแก่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค แบบ 1 Feeder ไม่เกิน 8 เมกะวัตต์ แรงดัน 22 กิโลโวลต์ (รูปที่ 4)

อัตราการไหลของน้ำร้อนของกังหันไอน้ำขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 9 เมกะวัตต์ และขนาด 12 เมกะวัตต์ คำนวณได้ตาม



รูปที่ 5 ผังกระบวนการควบแน่นน้ำอ้อย

สมการที่ (4) และ (5) ตามลำดับ ซึ่งเป็นสมการสมรรถนะจากผู้ผลิต

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

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

เมื่อ

\dot{m}_s คือ อัตราการไหลของน้ำร้อนที่เข้ากังหัน (T/day)

P_e คือ กำลังไฟฟ้าที่ผลิต (kW)

2.3 การจำลองกระบวนการอุ่นและต้มน้ำอ้อย

หม้ออุ่นน้ำอ้อย (Heater) เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ (Shell and Tube) ทำหน้าที่เพิ่มอุณหภูมิให้น้ำอ้อยก่อนส่งไปยังหม้อต้ม โดยใช้ไอหัวหม้อ (Bleeding Vapor) จากหม้อต้มมาแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำอ้อย (รูปที่ 5) สมดุลพลังงานและมวลของระบบเป็นตามสมการที่ (6) [4]

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

เมื่อ

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

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

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

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

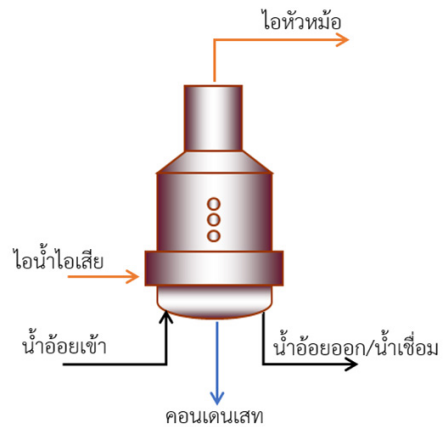
$h_{jg@T_{Heat}}$ คือ ความร้อนแฝงไอน้ำเข้าหม้ออุ่น (kJ/kg °C)

Cp_j คือ ความจุความร้อนน้ำอ้อยเข้าหม้ออุ่น (kJ/kg °C)

หม้อต้มระเหยน้ำอ้อย (Evaporator) ทำหน้าที่ให้น้ำอ้อย

เดือดระเหยเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอหัวหม้อ ทำให้น้ำอ้อยส่วนที่เหลือเข้มข้นขึ้น กระบวนการนี้เป็นการต้มแบบเรียงลำดับทั้งหมด 4 ชั้น เรียกว่า Effect โดย Effect-1 ใช้ไอน้ำที่ออกจากกังหันไอน้ำ (Exhaust Steam) ส่วน Effect-2 ถึง Effect-4 ใช้ไอน้ำจากหัวหม้อในการให้ความร้อน น้ำอ้อยที่ออกจาก Effect สุดท้าย จะกลายเป็นน้ำเชื่อม (Syrup) ที่จะถูกส่งต่อไปยังกระบวนการเคี้ยวตกลูกต่อไป ดังรูปที่ 6

รูปที่ 7 แสดงระบบการใช้ไอน้ำในส่วนกระบวนการผลิตน้ำตาลโรงงานน้ำตาลทรายขาวเริ่มอุดม อัตราการไหลของ

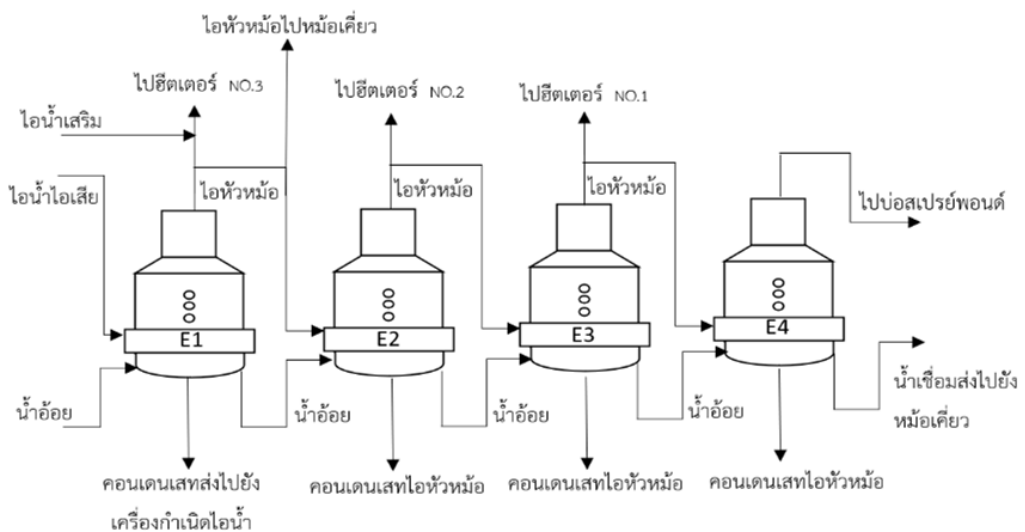


รูปที่ 6 ผังกระบวนการต้มระเหยน้ำอ้อย

น้ำอ้อยออกจากหม้อต้มคำนวณจากการสมดุลมวลของแข็งตามสมการที่ (7) [10]

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

อัตราการเดือดระเหยของน้ำอ้อยเกิดเป็นไอหัวหม้อคำนวณได้โดยใช้การสมดุลมวลตามสมการที่ (8) ส่วนอัตราการใช้ไอน้ำในการต้มระเหยน้ำอ้อยใน Effect-1 คำนวณจากสมดุลพลังงานตามสมการที่ (9) [13]



รูปที่ 7 ระบบการใช้ไอน้ำส่วนกระบวนการผลิต

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

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

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)

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

$h_{fg@T_{Evap}}$ คือ ความร้อนแฝงไอน้ำเข้าหม้อต้ม (kJ/kg °C)

$h_{f@j,i}$ คือ เอนทัลปีน้ำอ้อยเข้าหม้อต้ม (kJ/kg °C)

Bx_i คือ ความเข้มข้นน้ำอ้อยเข้าหม้อต้ม (°Bx)

Bx_o คือ ความเข้มข้นน้ำอ้อย/น้ำเชื่อมออกหม้อต้ม (°Bx)

(°Bx)

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

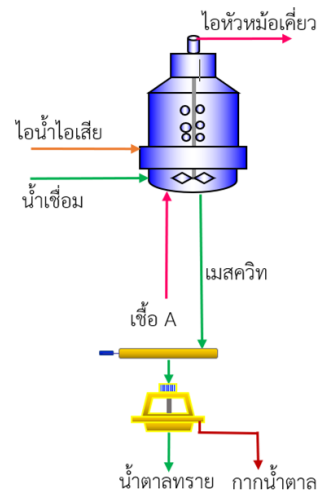
(kJ/kg °C)

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

(kJ/kg °C)



รูปที่ 8 หม้อเคี้ยวน้ำตาล



รูปที่ 9 การเคี้ยวน้ำตาล

2.4 การจำลองกระบวนการเคี้ยวและการตกผลึก

หม้อเคี้ยวน้ำตาล (รูปที่ 8) มีผังกระบวนการเคี้ยวจากน้ำเชื่อมให้เกิดผลึกน้ำตาล ผลผลิตที่ได้จากกระบวนการนี้คือ เมสคิวท (ผลึกน้ำตาลทรายรวมกับน้ำโมลาส) แสดงดังรูปที่ 9 การคำนวณหาอัตราการใช้ไอน้ำในการเคี้ยวน้ำตาลโดยใช้ไอหัวหม้อจากหม้อต้มมาให้ความร้อนในการเคี้ยว หากไอน้ำในการเคี้ยวที่มาจากไอหัวหม้อต้มไม่เพียงพอจะต้องชดเชยด้วยไอน้ำเสริม (Make up Steam) จากหม้อไอน้ำ

สมมูลมวลของแข็งในหม้อเคี้ยวน้ำตาลตามสมการที่ (10)

[14] ส่วนอัตราการตกผลึกน้ำตาลทรายคำนวณได้จากสมการที่ (11)

[15] และอัตราการใช้ไอน้ำในการเคี้ยวน้ำตาลคำนวณจากการสมมูลพลังงานได้ดังสมการที่ (12) [14]

เมื่อ

\dot{m}_{syrup} คือ อัตราการไหลน้ำเชื่อมเข้า (T/day)

Bx_{mass} คือ ความเข้มข้นน้ำเชื่อมเข้า (°Bx)

Bx_{syrup} คือ ความเข้มข้นเมสคิวทออก (°Bx)

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

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

$$\dot{m}_{vp} = \frac{\dot{m}_v h_v - \dot{m}_v h_{f@m,i} + \dot{m}_{m,o} C_{p,m,o} T_{m,o} - (\dot{m}_{m,i} - \dot{m}_v) C_{p,m,i} T_{m,i}}{\eta_{vp} \times h_{fg@T_{vp}}} \quad (12)$$

- \dot{m}_{sugar} คือ อัตราการไหลน้ำตาลทราย (T/day)
- $\dot{m}_{m,i}$ คือ อัตราการไหลแมสสึควิห้เข้า (T/day)
- $\dot{m}_{m,o}$ คือ อัตราการไหลแมสสึควิห้ออก (T/day)
- $Crystal\%omass$ คือ เปอร์เซ็นต์การเกิดผลึกน้ำตาล (%)
- \dot{m}_{vp} คือ อัตราการใช้ไอน้ำของหม้อต้ม (T/day)
- T_{mass} คือ อุณหภูมิแมสสึควิห้ (°C)
- T_{syrup} คือ อุณหภูมิน้ำเชื่อม (°C)
- $h_{fg@VP}$ คือ ความร้อนแฝงไอน้ำเข้าที่อุณหภูมิหม้อเคียว (kJ/kg °C)
- Cp_{mass} คือ ความจุความร้อนของแมสสึควิห้ (kJ/kg °C)
- Cp_{syrup} คือ ความจุความร้อนของน้ำเชื่อม (kJ/kg °C)

2.5 การจำลองกระบวนการผลิตไอน้ำ

อัตราการใช้เชื้อเพลิงขานอ้อยของหม้อไอน้ำคำนวณได้จากสมการที่ (13) [16]

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

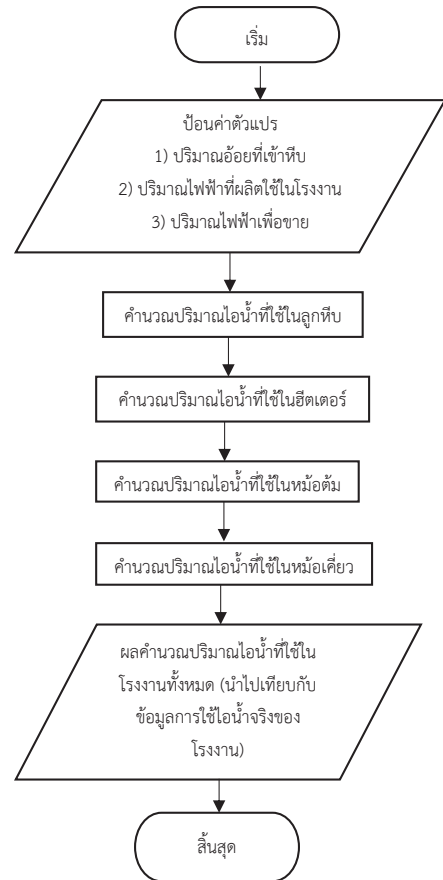
เมื่อ

- \dot{m}_f คือ อัตราการใช้เชื้อเพลิงขานอ้อย (T/day)
 - \dot{m}_s คือ อัตราการผลิตไอน้ำของหม้อไอน้ำ (T/day)
 - h_s คือ เอนทัลปีไอน้ำจากหม้อไอน้ำ (kJ/kg)
 - h_w คือ เอนทัลปีน้ำป้อนเข้าหม้อไอน้ำ (kJ/kg)
 - η คือ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนหม้อไอน้ำ (%)
 - LHV คือ ความร้อนจำเพาะเชื้อเพลิงขานอ้อย (kJ/kg)
- สำหรับงานวิจัยครั้งนี้ใช้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของหม้อไอน้ำและค่า LHV เท่ากับ 81.14% และ 7,156 กิโลจูล/กิโลกรัม ตามลำดับ [17]

2.6 สัดส่วนการใช้ไอน้ำต่อปริมาณอ้อย

สำหรับสัดส่วนการใช้ไอน้ำต่อปริมาณอ้อยที่เข้าหีบสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (14)

$$R_{S/C} = \frac{\dot{m}_s}{\dot{m}_c} \quad (14)$$



รูปที่ 10 ขั้นตอนการจำลองระบบพลังงานในโรงงาน

เมื่อ

$R_{S/C}$ 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 และ 3) ปริมาณไฟฟ้าเพื่อขาย จากนั้น

จะนำผลคำนวณที่ได้ นำไปเทียบกับข้อมูลการใช้ไอน้ำจริงของโรงงาน

2.8 การเก็บข้อมูลทดลอง

โรงงานน้ำตาลเดินเครื่องจักรตามปกติและมีการเก็บข้อมูลทั้งวัน 24 ชั่วโมง โดยอัตราการไหลไอน้ำไอเสียวัดจากไอน้ำที่เข้ากังหันไอน้ำแทนเนื่องจากไอน้ำเป็นสถานะ Superheated ท่อทางเข้ามีขนาดเล็ก จึงมีการติดตั้ง Orifice Flow เพื่อวัดอัตราการไหล สำหรับไอน้ำที่ออกจากกังหันยังไม่เป็นไอเปียก (Saturated Steam) ต้องมีการ Spay น้ำเข้าเพื่อ De-superheated จึงต้องรวมปริมาณน้ำ Spay เข้าด้วยโดยน้ำจะถูกวัดอัตราการไหลโดยผ่าน Flow Meter ก่อนเข้าห้องผสม

3. ผลการทดลอง

ในส่วนนี้จะแสดงตัวอย่างการคำนวณ โดยใช้ข้อมูลการเดินเครื่องจักรของโรงงานในวันที่ 25 มกราคม 2563 จำนวน 24 ชั่วโมงต่อเนื่อง ทำการเก็บข้อมูลมีตัวแปรองค์ประกอบ ได้แก่ อัตราการหีบอ้อย อัตราการผลิตไฟฟ้าเพื่อใช้เอง และเพื่อจำหน่าย แสดงในตารางที่ 1-7 ข้อมูลนี้จะใช้เป็นข้อมูลป้อนเข้าสำหรับการจำลองในโปรแกรม เพื่อคำนวณหาอัตราการใช้น้ำทั้งหมดของโรงงาน ก่อนนำไปเปรียบเทียบกับค่าการใช้น้ำจริง โดยจะทำการเปรียบเทียบกับการใช้น้ำจริงจำนวน 44 วัน ในหน้าหีบอ้อยของ พ.ศ. 2562

ตารางที่ 1 การใช้กังหันไอน้ำขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เครื่องกำเนิดไฟฟ้า	TG.9 MW (จำหน่าย)	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 การใช้กังหันไอน้ำขับเคลื่อนเครื่องจักรลูกหีบ

เครื่องจักร	เครื่องย่อย	ลูกหีบ
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

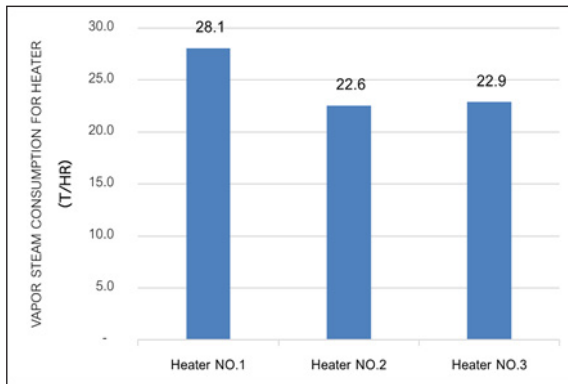
ตารางที่ 6 ข้อมูลการต้มน้ำอ้อย

หม้อต้ม	E-1	E-2	E-3	E-4
\dot{m}_j (T/day)	14,971	10,972	8,216	5,998
\dot{m}_v (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

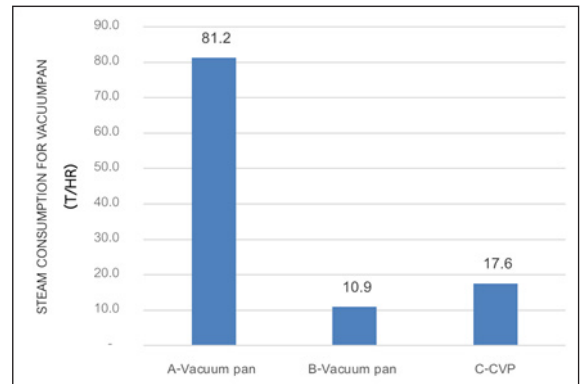
ตารางที่ 7 ข้อมูลการเคี้ยวน้ำตาล

หม้อเคี้ยว	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

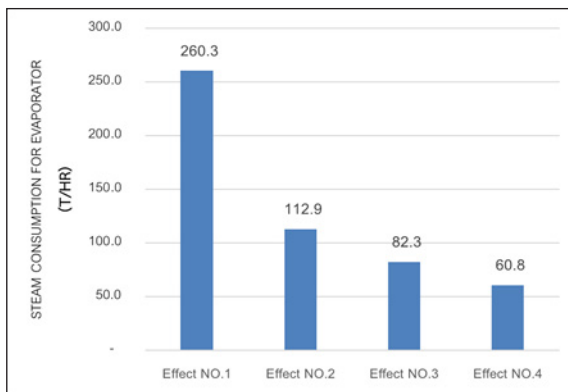
สำหรับผลการจำลองหม้ออุ่นพบว่า ได้ปริมาณการใช้ไอน้ำของหม้ออุ่นทั้ง 3 ชุด ดังรูปที่ 11 หม้ออุ่นชุด H-1, H-2 และ H-3 ใช้ไอน้ำเท่ากับ 28.1, 22.6 และ 22.9 ตัน/ชั่วโมง ตามลำดับ ดังที่แสดงในรูปที่ 11 โดยใช้ไอน้ำที่เป็นไอหัวหม้อต้ม E-1



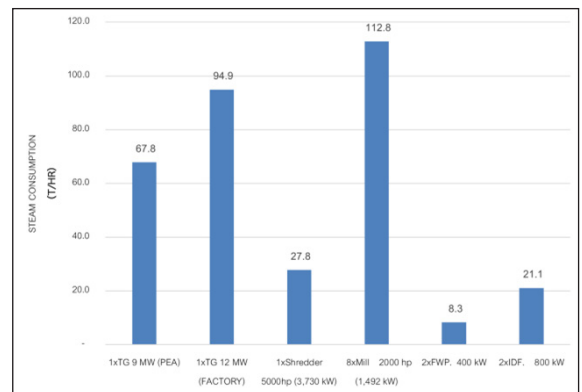
รูปที่ 11 ปริมาณการใช้ไอน้ำของหม้ออุ่น



รูปที่ 13 ปริมาณการใช้ไอน้ำของหม้อเคี้ยว



รูปที่ 12 ปริมาณการใช้ไอน้ำของหม้อต้ม



รูปที่ 14 ปริมาณการใช้ไอน้ำของกังหันไอน้ำ

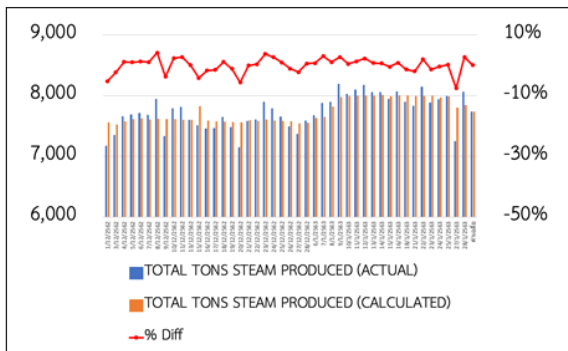
กระบวนการต้มเพื่อระเหยน้ำอ้อยเพิ่มความเข้มข้น (Bx) ให้กับน้ำอ้อย จากหม้อต้ม E-1, E-2, E-3 และ E-4 จนกลายเป็นน้ำเชื่อมเมื่อออกจากหม้อต้มสุดท้าย E-4 จากการจำลองผลได้ปริมาณการใช้ไอน้ำของหม้อต้มทั้ง 4 ชุด ดังรูปที่ 12 หม้อต้มทั้ง 4 ชุด ใช้ไอน้ำเท่ากับ 260.3, 112.9, 82.3 และ 60.8 ตัน/ชั่วโมง ตามลำดับ โดยที่หม้อต้ม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

กระบวนการเคี้ยวน้ำตาลให้เกิดผลึกใช้หม้อเคี้ยว 3 ชุด (Vacuum Pan; VP) โดยใช้ไอน้ำหัวหม้อของหม้อต้ม E-1 ดังรูปที่ 14 การจำลองพบว่าปริมาณการใช้ไอน้ำของหม้อเคี้ยว VP-1, VP-2 และ VP-3 ใช้ไอน้ำเท่ากับ 81.2, 10.9 และ 17.6

T/hr ตามลำดับ ดังรูปที่ 13

การใช้อุปกรณ์ขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพื่อผลิตไฟฟ้า ใช้กับเครื่องย่อยอ้อย เครื่องจักรที่บดอ้อย เครื่องสูบน้ำป้อน และพัดลมดูดฟลูแก๊ส (แก๊สไอเสียจากการเผาไหม้) ออกจากหม้อไอน้ำสำหรับโรงงานน้ำตาลแบบดั้งเดิม ผลการคำนวณด้วยแบบจำลองพบว่า กังหันไอน้ำขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อจำหน่ายและเพื่อใช้เองในโรงงานน้ำตาล เท่ากับ 67.8 และ 94.9 ตัน/ชั่วโมงตามลำดับ ดังรูปที่ 14 กังหันขับเคลื่อนย่อยอ้อยและเครื่องจักรที่บดอ้อย เท่ากับ 27.8 และ 112.8 ตัน/ชั่วโมงตามลำดับ เครื่องสูบน้ำป้อนและพัดลมดูดฟลูแก๊สเท่ากับ 8.3 และ 21.1 ตัน/ชั่วโมง ตามลำดับ

สำหรับการจำลองระบบพลังงานทั้งหมดมีตัวแปรต้นที่ต้องป้อนทุกครั้ง ได้แก่ อัตราการที่บดอ้อย และอัตราการผลิต



รูปที่ 15 ผลเปรียบเทียบปริมาณไอน้ำที่ใช้ในโรงงานทั้งหมดจากการคำนวณกับข้อมูลการใช้ไอน้ำจริงของโรงงาน

ไฟฟ้า ซึ่งเป็นข้อมูลจริงจำนวน 44 วัน ของหน้าทึบอ้อยของ พ.ศ. 2562 ของโรงงาน หลังจากทำการป้อนข้อมูลเข้าไปในโปรแกรม เพื่อทำการคำนวณหาปริมาณไอน้ำที่ใช้ในโรงงานทั้งหมดผลที่ได้พบว่า ค่าที่ได้จากการคำนวณและค่าที่ใช้จริงมีความใกล้เคียงกันมาก ดังรูปที่ 15 โดยมีความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 0.52–7.57%

4. อภิปรายผลและสรุป

งานวิจัยนี้จำลองระบบพลังงานสำหรับโรงงานน้ำตาลแบบดั้งเดิมที่ใช้ความดันไอน้ำไม่เกิน 40 บาร์ บนพื้นฐานสมมูลพลังงานและมวล จากการศึกษาพบว่า ปริมาณการใช้ไอน้ำที่คำนวณได้จากแบบจำลองใกล้เคียงกับการใช้งานจริงมาก เนื่องจากการจำลองได้คำนึงถึงองค์ประกอบที่มีผลจากการใช้ไอน้ำจริง คือ อัตราการทึบ และปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้อย่างไรก็ตาม เนื่องจากปริมาณการใช้ไอน้ำของโรงงานไม่ได้ขึ้นอยู่กับการทึบอ้อยเพียงอย่างเดียว หากมีการผลิตไฟฟ้าเพื่อจำหน่ายเพิ่มขึ้นก็จะทำให้ความต้องการใช้ไอน้ำเพิ่มขึ้นตามไปด้วย อีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้แบบจำลองมีความแม่นยำ คือ งานวิจัยนี้ได้จำลองหาปริมาณการใช้ไอน้ำจากสมการสมรรถนะของกังหันไอน้ำ ของผู้ผลิต (Steam Consumption Curve) แต่ละตัวมาผนวกเข้าด้วยกันจากการจำลองยังพบอีกว่า ปริมาณการใช้ไอน้ำจริงมากกว่าจากการจำลอง เนื่องจากในการจำลองไม่ได้มีการ By Pass

ไอน้ำเสริมเข้าไป แต่ในการเดินเครื่องจริงอาจจะต้องมีการ By Pass ไอน้ำเสริมเข้าไปเพื่อรักษาความดันและอุณหภูมิภายในหม้อต้ม เมื่อปริมาณน้ำอ้อย และค่า Brix ไม่คงที่ ซึ่งจากการสืบค้นพบว่า งานวิจัยทั่วๆไปยังไม่ได้นำส่วนนี้มาพิจารณา รวม ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปเป็นต้นแบบในการประเมินหาความต้องการการใช้ไอน้ำในโรงงานน้ำตาลแบบดั้งเดิมของไทย และช่วยในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการผลิตและใช้ไอน้ำได้

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดีด้วยความกรุณาจาก บจก.โรงงานน้ำตาลทรายขาวเริ่มอุดม จังหวัดอุดรธานี ในการให้เข้าไปศึกษาและเก็บข้อมูลต่าง ๆ

เอกสารอ้างอิง

- [1] The Department of Alternative Energy Development and Efficiency (DEDE). (2009), *Biomass Database Potential in Thailand*. [Online] (in Thai). Available: <http://webenede.de.go.th/webmax/content/biomass-database-potential-thailand>
- [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.
- [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.
- [4] A. Khodaruth, "Optimisation of a cogenerated energy systems: The cane biomass flexi-factory

- case study,” *Energy Procedia*, vol. 62, pp. 656–665, 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.
- [6] Q. Zhang, H. Yi, Z. Yu, J. Gao, X. Wang, H. Lin, and B. Shen, “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.
- [7] Department of Renewable Energy Development and Energy Efficiency, (2015, September). *Alternative Energy Development Plan: AEDP2015*. [Online]. Available: <https://policy.asiapacificenergy.org/sites/default/files/AEDP2015ENG.pdf>
- [8] The Energy Policy and Planning Office (EPPO). (2019, April). *Thailand Power Development Plan 2018–2037*. [Online] (in Thai). Available: <http://www.eppo.go.th/images/POLICY/PDF/PDP2018.pdf>
- [9] L. M. M. Jorge, A. R. Righetto, P. A. Polli, O. A. A. Santos, and R. M. Filho, “Simulation and analysis of a sugarcane juice evaporation system,” *Journal of Food Engineering*, vol. 99, pp. 351–359, 2010.
- [10] A.E. Lewis, F. Khodabocus, V. Dhokun, and 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.
- [11] M. Higa, A. J. Freitas, A. C. Bannwart, and R. J. Zemp, “Thermal integration of multiple effect evaporator in sugar plant,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 29, pp. 515–522, 2009.
- [12] J. Coombs, *Handbook of Cane Sugar Engineering, Third completely revised edition*, Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1986.
- [13] B. Seegudthong, S. Pripem, and C. Sookkumnerd, “Development of model for designing of evaporator and heater system of sugar processing,” presented at *the 23rd Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand, Chiang Mai, 2009 (in Thai)*.
- [14] A. Buathong, S. Pripem, and C. Sookkumnerd, “The model development of mass and energy balance for a sugar mill,” in *Proceedings the 28th Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand, Khon Kaen, 2014*, pp. 1233–1241 (in Thai).
- [15] P. Rein, *Cane Sugar Engineering*, 3 ed. Verlas Dr. Albert Bartens KG, Berlin, Germany, 2007.
- [16] P. K. Nag, *Power Plant Engineering*, New York: McGraw Hill, 2008.
- [17] P. Chooprasert, K. Suluksna, and P. Tummu, “Improvement of boiler efficiency for Ruemudom sugar factory,” in *the 13th Thai Society of Agricultural Engineering International Conference (TSAE 2020)*, 2020, vol. 187, pp. 1–8.