การศึกษาผลกระทบของการพรมน้ำในกระบวนการหีบสกัดน้ำอ้อยต่อกระบวนการผลิตน้ำตาลและระบบพลังงานร่วม

The Study of Imbibition Effects in Sugar Milling Process on Sugar Processing and Cogeneration System.

ปารเมศ ศรีบุญวงษ์[1*] และชนกนันท์ สุขกำเนิด[2]

Paramade Sriboonwong[1*] and Chanoknun Sookkumnerd[2]

[1] สาขาวิชาวิศวกรรมนวัตกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น 40002

[2] สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น 40002

[1]Innovation Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University 40002

[2]Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University 40002

[1]Corresponding author: Tel.: 092-7364996. E-mail address: paramade_s@kkumail.com

Received: 24 November 2021, Revised: 17 January 2022, Accepted: 25 January 2022, Published online: 30 April 2022

Abstract

The objective of this study was to study the effects of imbibition of water in the milling process on energy consumption, loss in bagasse and total losses. Data from actual production was collected and analyzed; accordingly, the empirical models were developed for data analysis. Consequently imbibition of water effects on manufacturing process of sugar in several aspects including loss in bagasse, mixed juice brix and bagasse moisture (relating to of bagasse consumption as fuel) were illustrated. The quantity of imbibition water variation was varied between 24 – 36 % to see its effects. Subsequently, the fuel consumption, loss in bagasse and total loss were finally investigated and analyzed. Increasing the amount of Imbibition reduces the loss in bagasse, but it caused the increases in the energy consumption of steam for evaporator due to the low of mixed juice brix. In addition, the fuel consumption was also increased due to higher moisture in bagasse as the imbibition increases. The results showed that at 27% of imbibition water, the energy consumption was equal to the sugar loss, however total loss became similar in data point of quantity of imbibition water. At the total loss, it's not much different. This is because increasing fuel consumption is offset by lower sugar losses. Therefore, the results from this study are able to be used as economic guidelines for decision making of optimized quantity of imbibition water in the milling process of sugar factory. However, the results of analysis probably vary according to price of sugar and bagasse.

Keywords: Steam, Bagasse, Mass and Energy Balance, Simulation

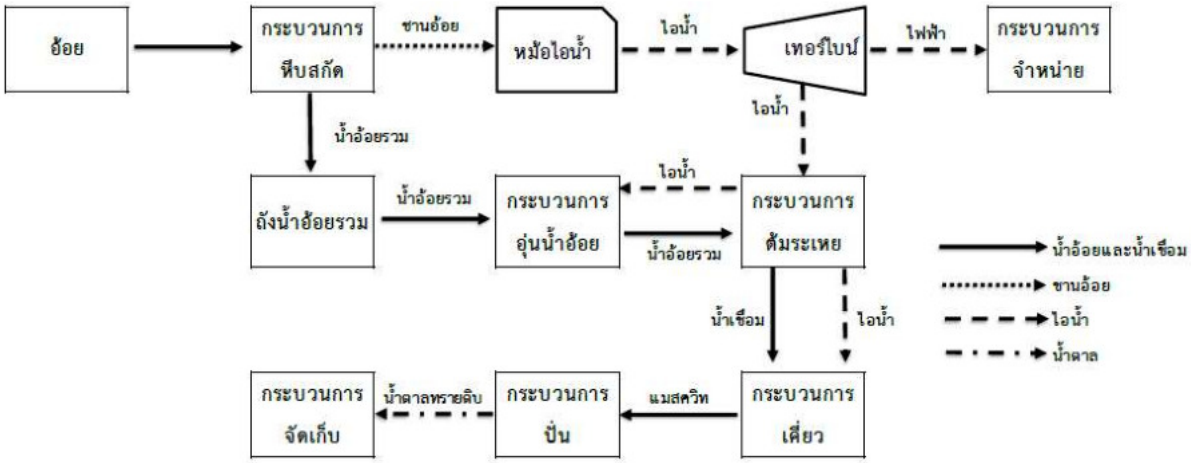
บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของการพรมน้ำในกระบวนการหีบสกัดน้ำอ้อย เพื่อใช้เปรียบเทียบถึงผลกระทบในด้านต่างๆทั้งด้านการใช้พลังงาน ด้านการสูญเสียน้ำตาลไปกับชานอ้อย และด้านการสูญเสียรวม ซึ่งผู้วิจัยได้นำข้อมูลการผลิตจริงมาร่วมวิเคราะห์กับแบบจำลองในโปรแกรม Microsoft Excel พบว่าการพรมน้ำนั้นมีผลกระทบในกระบวนการผลิตน้ำตาลหลายด้าน เช่น ส่งผลต่อการสูญเสียน้ำตาลไปกับชานอ้อย ค่าความเข้มข้นของน้ำอ้อย (Mixed Juice Brix), ค่าความชื้นชานอ้อยซึ่งส่งผลต่อปริมาณการใช้ชานอ้อยเป็นเชื้อเพลิง โดยได้ทำการวิเคราะห์ผลกระทบทางด้านต่างๆจากปริมาณน้ำพรมที่แตกต่างกันตั้งแต่ 24 – 36 % ต่อปริมาณอ้อยที่เข้ากระบวนการหีบ ซึ่งผู้วิจัยได้วิเคราะห์ผลกระทบทั้งด้านประสิทธิภาพ ด้านคุณภาพของวัตถุดิบและผลผลิตที่ได้ของแต่ละกระบวนการ จากนั้นจึงนำมาคำนวณการสูญเสียในเชิงมูลค่าทั้งด้านการใช้เชื้อเพลิง ด้านการสูญเสียน้ำตาลไปกับชานอ้อยและด้านการสูญเสียรวม ซึ่งการเพิ่มปริมาณน้ำพรมจะช่วยลดการสูญเสียน้ำตาลที่ติดไปกับชานอ้อยแต่จะมีการใช้พลังงานไอน้ำในการต้มระเหยเพิ่มขึ้นเนื่องจากน้ำอ้อยจะมีความเข้มข้นต่ำรวมถึงจะมีการใช้เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นเนื่องจากความชื้นชานอ้อยที่สูงขึ้นตามการเพิ่มปริมาณน้ำพรม โดยผู้วิจัยพบว่าปริมาณน้ำพรมที่ 27% ต่อปริมาณอ้อยเข้าหีบนั้นเป็นจุดที่ข้อมูลในการใช้เชื้อเพลิงและการสูญเสียน้ำตาลทั้ง 2 จุดมีค่าเท่ากัน แต่หากมองทางด้านการสูญเสียรวมทั้งหมดนั้นมีค่าไม่แตกต่างกันมาก เพราะการเพิ่มปริมาณการใช้เชื้อเพลิงจะถูกชดเชยด้วยการสูญเสียน้ำตาลที่ลดลง ดังนั้นข้อมูลจากงานวิจัยนี้ จึงเป็นแนวทางประกอบการตัดสินใจเรื่องปริมาณการใช้น้ำพรมในกระบวนการหีบอ้อยของโรงงานน้ำตาล ทั้งนี้ผลการวิเคราะห์จะเปลี่ยนแปลงไปตามราคาน้ำตาลและราคาชานอ้อย

คำสำคัญ: ไอน้ำ ชานอ้อย สมดุลมวลและพลังงาน การจำลอง

บทนำ

การผลิตน้ำตาลนั้นเริ่มแรกอ้อยจะถูกลำเลียงเข้าสู่ชุดมีดเพื่อสับอ้อยให้เป็นชิ้นเล็กๆและจะถูกลำเลียงต่อไปยังกระบวนการทุบอ้อยให้ชิ้นอ้อยแตกเพื่อให้เหมาะสมกับการสกัดเอาน้ำอ้อย จากนั้นอ้อยจะถูกลำเลียงเข้าสู่กระบวนการหีบสกัด โดยทั่วไปนั้นกระบวนการหีบสกัดของโรงงานน้ำตาลจะมีชุดลูกหีบที่ใช้หีบสกัดน้ำอ้อยประมาณ 5 - 6 ชุด โดยกระบวนการหีบสกัดนี้มีจุดประสงค์เพื่อสกัดน้ำอ้อยออกจากชานอ้อยด้วยการดึงน้ำตาลซูโครสในอ้อยออกมาให้มากที่สุด ปัจจัยหนึ่งซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการหีบสกัดนี้คือจะมีการใช้น้ำร้อนพรมชานอ้อยในชุดลูกหีบชุดสุดท้าย จากนั้นก็จะนำน้ำอ้อยจากชุดสุดท้ายมาพรมยังชุดก่อนหน้ายกเว้นชุดหนึ่ง ซึ่งการพรมน้ำร้อนนี้นอกจากจะเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดแล้วจะช่วยลดการสูญเสียน้ำตาลที่ติดไปกับชานอ้อยได้ [1] แต่ปริมาณการพรมน้ำนั้นก็เป็นปัจจัยสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการใช้พลังงานไอน้ำในการต้มระเหยน้ำอ้อย กล่าวคือ หากพรมน้ำในปริมาณมากจะช่วยเรื่องการเพิ่มประสิทธิภาพในการหีบสกัดและลดการสูญเสียน้ำตาลไปกับชานอ้อยแต่จะใช้ปริมาณพลังงานไอน้ำในการต้มระเหยน้ำอ้อยมากขึ้น เนื่องจากเมื่อพรมน้ำมากน้ำอ้อยก็จะเจือจางจึงต้องใช้พลังงานไอน้ำในปริมาณที่เพิ่มขึ้นในการต้มระเหยน้ำอ้อย [2] รวมถึงเมื่อใช้ปริมาณน้ำพรมที่มากขึ้นนั้นจะส่งผลกระทบต่อความชื้นชานอ้อยเช่นเดียวกัน [3] มีผลให้การใช้เชื้อเพลิงในการผลิตไอน้ำมากขึ้น



ภาพที่ 1 กระบวนการผลิตน้ำตาลและระบบพลังงานร่วม

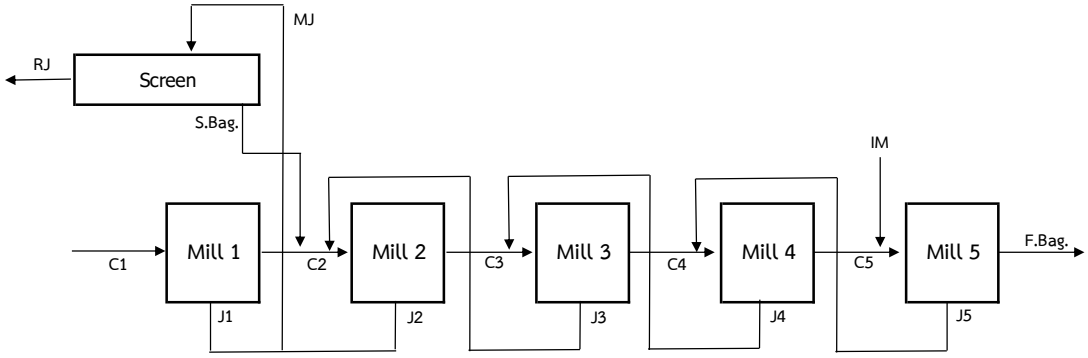
ซึ่งในปัจจุบันมีความต้องการไอน้ำและไฟฟ้าเพื่อใช้ในกระบวนการผลิตน้ำตาลจำนวนมาก โรงงานได้นำเอาชานอ้อยที่ได้จากกระบวนการหีบสกัดมาใช้เป็นเชื้อเพลิงหลักในการผลิตไอน้ำและไฟฟ้าใช้ในโรงงาน [4] ทดแทนการนำเข้าเชื้อเพลิงจากภายนอก เริ่มแรกการผลิตไฟฟ้าเน้นแค่เพียงพอสำหรับใช้ในโรงงานเป็นหลักเท่านั้นแต่ในปัจจุบันได้มีการเพิ่มศักยภาพของโรงงานส่งผลให้มีไฟฟ้าเหลือจากการใช้ภายในโรงงานสามารถเพิ่มรายได้จากการขายไฟฟ้าเข้าสู่ระบบได้อีกด้วย [5]

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นว่าปริมาณการใช้น้ำพรมในกระบวนการหีบสกัดนั้น ส่งผลต่อการสูญเสียน้ำตาล การใช้พลังไอน้ำและปริมาณการใช้เชื้อเพลิงซึ่งจะเกี่ยวข้องกับศักยภาพการผลิตไฟฟ้าเพื่อจำหน่ายนอกฤดูผลิตน้ำตาล ดังนั้นจึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ ซึ่งผู้วิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์หาจุดเหมาะสมในการใช้ปริมาณน้ำพรมสำหรับกระบวนการหีบสกัดเพื่อไม่ให้เกิดการใช้ปริมาณน้ำพรมมากเกินไปจนทำให้เกิดการใช้พลังงานไอน้ำรวมถึงการใช้เชื้อเพลิงที่ไม่เหมาะสม และเพื่อไม่ให้เกิดการใช้ปริมาณน้ำพรมที่น้อยจนเกินไปจนทำให้เกิดการสูญเสียน้ำตาลไปกับชานอ้อยในปริมาณที่สูง โดยผู้วิจัยได้วิเคราะห์ผลกระทบในด้านต่างๆ ด้วยวิธีสมดุลมวลและพลังงานร่วมกับการใช้แบบจำลองในกระบวนการผลิตน้ำตาลในการวิเคราะห์ต่อไป

วิธีการวิจัย

ปริมาณการพรมน้ำอ้อยนั้นจะคิดปริมาณการใช้งานเป็นสัดส่วนร้อยละเมื่อเทียบกันอัตราการหีบอ้อย ตัวอย่างเช่น เมื่อหีบอ้อย 500 ตัน/ชั่วโมง หากทางโรงงานฯกำหนดว่าจะใช้ปริมาณน้ำ 30% ก็จะมีปริมาณน้ำที่ใช้งานคือ 150 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง โดยการพรมน้ำอ้อย (Imbibition, IM) ที่นิยมใช้กันในโรงงานน้ำตาลคือวิธีการพรมน้ำแบบผสม (Compound Imbibition) [6] (ภาพที่ 2) ด้วยการนำน้ำพรมลงไปยังชานอ้อย (C5) ก่อนที่จะทำการหีบในชุดลูกหีบชุดสุดท้ายและนำน้ำอ้อยที่ได้จากลูกหีบชุดสุดท้าย (J5) มาพรมยังชานอ้อยหน้าลูกหีบชุดก่อนหน้า (C4) น้ำอ้อยที่ได้จากลูกหีบชุดที่ 4 (J4) ก็จะถูกส่งมาพรมชานอ้อยหน้าลูกหีบชุด 3 (C3) น้ำอ้อยที่ได้จากลูกหีบชุด 3 (J3) จะถูกส่งมาพรมชานอ้อยหน้าลูกหีบชุด 2 (C2) ส่วนน้ำอ้อยที่ได้จากลูกหีบชุด 2 (J2) จะถูกนำมารวมกับน้ำอ้อยที่ได้จากลูกหีบชุดแรก (J1) ซึ่งในจุดนี้น้ำอ้อยทั้งหมดในกระบวนการหีบสกัดจะรวมกัน (Mixed Juice, MJ) เพื่อจะนำน้ำอ้อยไปผ่านกระบวนการกรอง (Screen) เพื่อแยกเอาชานอ้อยที่ติดมากับน้ำอ้อยออกจากกัน เมื่อน้ำอ้อยผ่านการคัดแยกแล้วจะได้เป็นน้ำอ้อยดิบ (Raw Juice, RJ) น้ำอ้อยดิบนี้ (RJ) ก็จะถูกส่งไปกระบวนการต้มระเหยต่อ ส่วนชานอ้อยที่ได้จากกระบวนการกรอง (Screen Bagasse, S.Bag) ก็จะถูกส่งมาหีบสกัดในชุดลูกหีบ

ชุดที่ 2 ต่อ สำหรับชานอ้อยที่ได้จากกระบวนการหีบชุดสุดท้าย (Final Bagasse , F.Bag) ก็จะถูกลำเลียงไปเป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อไอน้ำเพื่อผลิตไอน้ำและกระแสไฟฟ้า



ภาพที่ 2 การลำเลียงวัตถุดิบต่างๆในกระบวนการหีบสกัด

จากที่กล่าวมาในกระบวนการเหล่านี้จะมีการวัดประสิทธิภาพการหีบสกัด (Pol Extraction) รวมถึงคุณภาพของวัตถุดิบที่ได้จากกระบวนการนี้ได้แก่ ชานอ้อยและน้ำอ้อย คุณภาพของชานอ้อยที่ผู้วิจัยพิจารณาคือ 1.ค่าความชื้น 2.ร้อยละของน้ำตาลที่ติดไปกับชานอ้อย (Pol in Bagasse) ส่วนคุณภาพของน้ำอ้อยที่พิจารณาคือค่าความเข้มข้นของน้ำอ้อย (Brix)

(1) การคำนวณหาประสิทธิภาพการหีบสกัด (Pol Extraction)

$$\text{Pol Extraction} = \frac{(100 - \text{Pol\%Cane}) - (\text{Bagasse\%Cane} \times \text{Pol in Bagasse})}{\text{Pol\%Cane}} \quad (\%) \quad (1)$$

เมื่อ Pol % Cane = ค่าความหวานในอ้อย , (Pol)

Bagasse % Cane = สัดส่วนของชานอ้อยกับอ้อยเข้าหีบ, (%)

Pol % Bagasse = ค่าความหวานของชานอ้อยหลังผ่านกระบวนการหีบสกัด, (Pol)

(2) การคำนวณหาค่าความเข้มข้นน้ำอ้อยผสม (Mixed Juice Brix)

$$\text{Mixed Juice Brix} = \frac{(\text{Juice\%Cane}/100) \times \dot{m}_c \times \text{Brix}_{\text{Firstjuice}}}{(\text{Juice\%Cane}/100) \times \dot{m}_c + (\%\text{Im}/100) \times \dot{m}_c} \quad (\text{Brix}) \quad (2)$$

เมื่อ $\dot{m}_c$ = ปริมาณอ้อยที่ป้อยเข้าหีบ, (t/h)

Juice % Cane = สัดส่วนระหว่างน้ำอ้อย/ปริมาณอ้อย, (%)

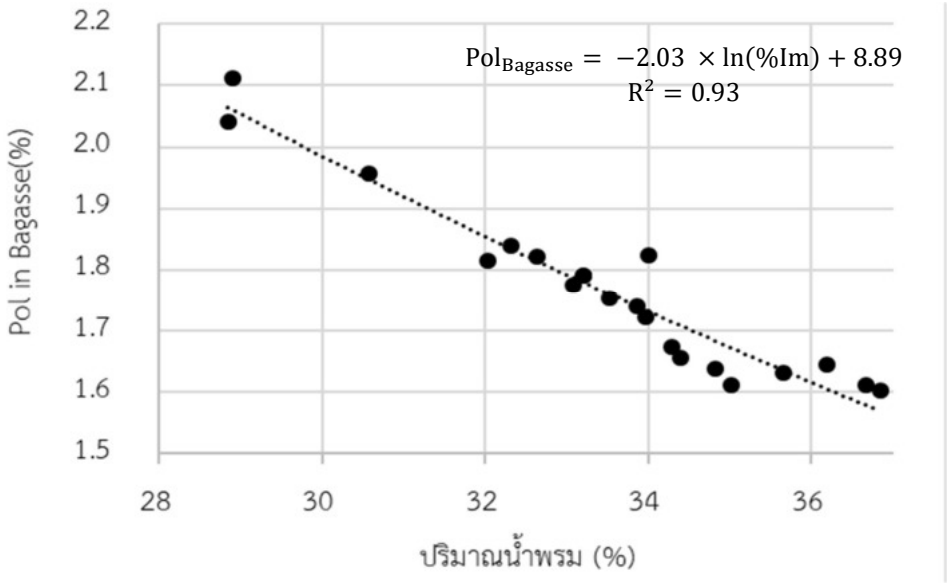
%Im = เปอร์เซ็นต์น้ำพรมที่ลูกหีบโดยเทียบจากปริมาณอ้อยที่เข้าหีบ, (%)

$\text{Brix}_{\text{Fristjuice}}$ = ค่าความเข้มข้นของน้ำอ้อยชุดแรก

(3) การคำนวณหาร้อยละของน้ำตาลที่ติดไปกับชานอ้อย Pol in Bagasse

ในการคำนวณหาค่า Pol in Bagasse นั้นอ้อยนั้นผู้วิจัยได้นำข้อมูลการผลิตจริงมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างการปริมาณน้ำพรมกับค่า Pol in Bagasse ซึ่งในการเก็บข้อมูลค่า Pol in Bagasse นี้ หากเครื่องจักรทำงานไม่สมบูรณ์ค่า Pol in Bagasse จะค่อนข้างไม่คงที่ ผู้วิจัยจึงได้เลือกช่วงเวลาที่เครื่องจักรในกระบวนการหีบสกัดสมบูรณ์ไม่มีการหยุดผลิตเนื่องจาก

เครื่องจักรเสีย โดยได้คัดเลือกข้อมูลเฉลี่ยมาจำนวน 21 วัน ซึ่งในแต่ละวันนั้นจะมีการเก็บตัวอย่างชานอ้อยไปวิเคราะห์ทุก 2 ชั่วโมง จากนั้นจึงได้นำข้อมูลเฉลี่ยในแต่ละวันมาเขียนกราฟและวิเคราะห์สมการจากเส้นแนวโน้มได้ดังแสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Pol in Bagasse กับปริมาณน้ำพรม

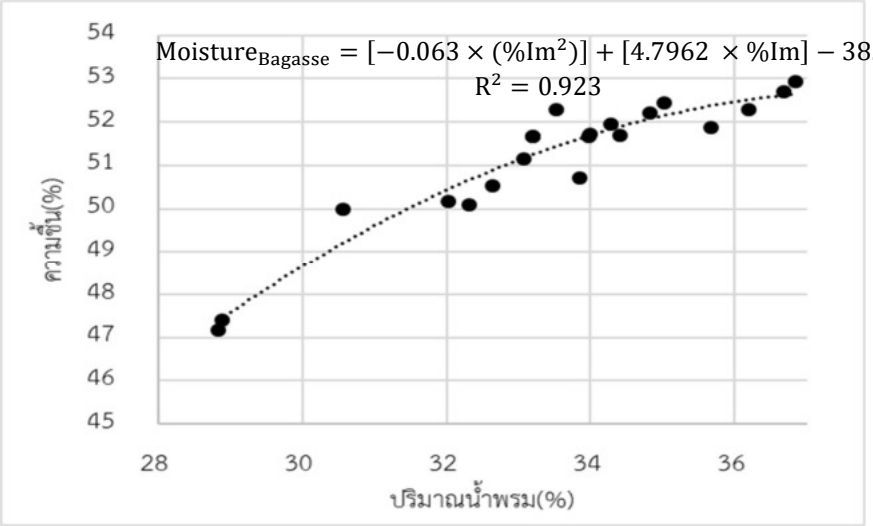
จากภาพที่ 3 จะได้สมการเส้นแนวโน้มมาผู้วิจัยจึงนำสมการนี้มาวิเคราะห์ค่า Pol in Bagasse ที่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณน้ำพรมดังนี้

$$\text{Pol in Bagasse} = -2.30 \times \ln(\%\text{Im}) + 8.89 \quad (\%) \qquad (3)$$

เมื่อ %Im = เปอร์เซ็นต์น้ำพรมที่ลูกหีบโดยเทียบจากปริมาณอ้อยที่เข้าหีบ, (%)

(4) การคำนวณหาความชื้นชานอ้อย (Moisture in Bagasse)

ในการคำนวณหาความชื้นชานอ้อยนั้น ผู้วิจัยได้นำข้อมูลการผลิตจริงมาวิเคราะห์โดยได้เลือกช่วงเวลาที่เครื่องจักรในกระบวนการหีบสกัดทำงานสมบูรณ์และมีการทดลองปรับปริมาณน้ำพรมขณะเดินเครื่อง ซึ่งผู้วิจัยได้คัดเลือกข้อมูลเฉลี่ยในแต่ละวันมาเช่นเดียวกันกับการหาค่าร้อยละของน้ำตาลที่ติดไปกับชานอ้อย Pol in Bagasse จากนั้นจึงได้นำข้อมูลมาเขียนกราฟและวิเคราะห์สมการจากเส้นแนวโน้มได้ดังนี้



ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นชานอ้อยกับปริมาณน้ำพรม

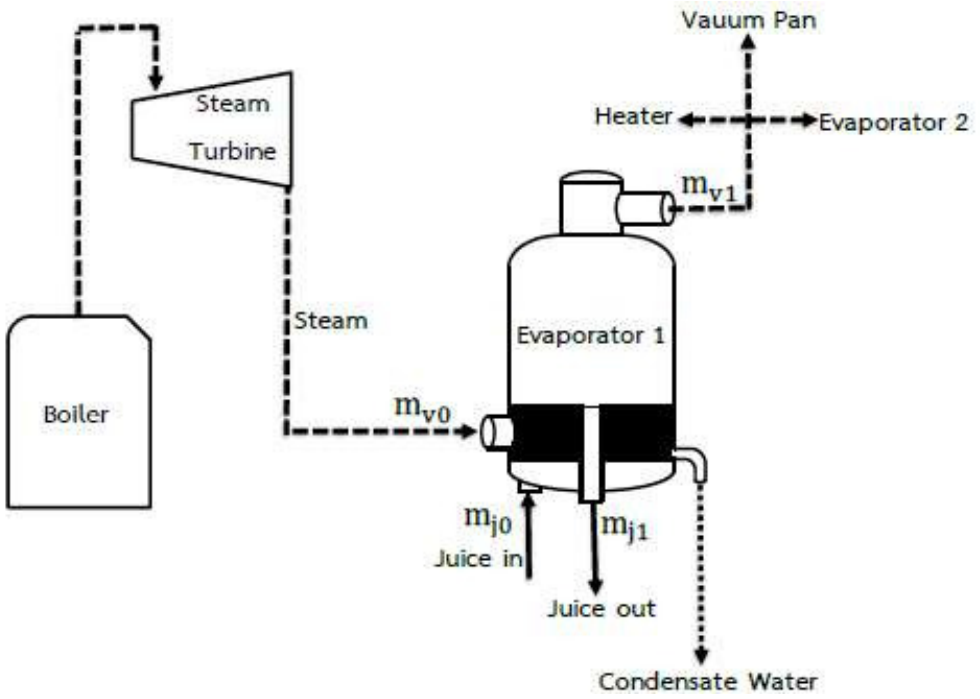
จากภาพที่ 4 จะได้สมการเส้นแนวโน้มมาผู้วิจัยจึงนำสมการนี้มาวิเคราะห์ความชื้นชานอ้อยที่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณน้ำพรมดังนี้

$$\text{Moisture in Bagasse} = \left(-0.063 \times (\%\text{Im}^2)\right) + (4.7962 \times \%\text{Im}) - 38.506 \quad (\%) \quad (4)$$

เมื่อ %Im = เปอร์เซ็นต์น้ำพรมที่ลูกหีบโดยเทียบจากปริมาณอ้อยที่เข้าหีบ, (%)

(5) การคำนวณหาความต้องการการใช้ไอน้ำในกระบวนการผลิตน้ำตาล $\dot{m}_s$

ในการคำนวณหาความต้องการการใช้ไอน้ำในกระบวนการผลิตน้ำตาลจะคิดที่อัตราการไหลของไอน้ำไอเสียที่เข้าหม้อต้มชุดแรก [7] ซึ่งจำเป็นต้องทราบอัตราการไหลของน้ำอ้อยขาออกหม้อต้มชุดแรกและอัตราการไหลของไอหัวหม้อที่หม้อต้มชุดแรกเสียก่อน เพื่อสามารถคำนวณหาอัตราการไหลของไอน้ำไอเสียที่เข้าหม้อชุดแรกได้



ภาพที่ 5 การไหลของไอน้ำในกระบวนการผลิตน้ำตาล

การคำนวณหาอัตราการไหลของน้ำอ้อยขาออกหม้อต้มชุดแรก (Juice flow outlet) , $\dot{m}_{j1}$ จากสมการสมดุลมวลของแข็ง

$$\dot{m}_{j1} = \dot{m}_{j0} Bx_0 / Bx_1 \quad (t/h) \quad (5)$$

การคำนวณหาอัตราการไหลของไอหัวหม้อ, $\dot{m}_{v1}$. เมื่อพิจารณาการไหลของมวลเข้าเท่ากับมวลออก

$$\dot{m}_{v1} = \dot{m}_{j1} - \dot{m}_{j0} \quad (t/h) \quad (6)$$

การคำนวณหาอัตราการไหลของไอน้ำไอเสียที่เข้าหม้อต้มชุดแรก , $\dot{m}_s$.

เนื่องจากความต้องการใช้ไอน้ำไอเสียในระบบหม้อต้มจะขึ้นอยู่กับความต้มการใช้ของหม้อต้มใบแรกเท่านั้นดังนั้นเมื่อพิจารณาสมดุลพลังงานของหม้อต้มชุดแรก อัตราการใช้ไอน้ำจะได้ว่า

$$\dot{m}_s = \left[\frac{\dot{m}_{v1} h_{v1} + m_{j1} C_{p.j1} T_{j1} - \dot{m}_{j0} C_{p.j0} T_{j0}}{h_v - h_L} \right] \quad (t/h) \quad (7)$$

โดย $C_{Pj} = 4.1868 - (Bx)(0.0297 - 4.6 \times 10^{-5}\ P) + (7.5 \times 10^{-5})(Bx)(T)$ (kJ/kg. k)(8)

เมื่อ $\dot{m}_{j0}$ = อัตราการไหลของน้ำอ้อยขาเข้าหม้อต้ม (t/h)

$\dot{m}_{j1}$ = อัตราการไหลของน้ำอ้อยขาออกหม้อต้ม (t/h)

Bx_0 = ค่าความเข้มข้น(Brix)ของน้ำอ้อยที่ขาเข้าหม้อต้ม (Bx)

Bx_1 = ค่าความเข้มข้น(Brix)ของน้ำอ้อยที่ขาออกหม้อต้ม (Bx)

h_{V1} = เอนทาลปีจำเพาะของไอหัวหม้อ (kj/kg)

h_V = เอนทาลปีจำเพาะของไอน้ำอิ่มตัวที่ขาเข้าหม้อ (kj/kg)

$C_{p,j0}$ = ค่าจุความร้อนจำเพาะของน้ำอ้อยที่ขาเข้าหม้อต้ม (kj/kg K)

$C_{p,j1}$ = ค่าจุความร้อนจำเพาะของน้ำอ้อยที่ขาออกหม้อต้ม (kj/kg K)

T_{j0} = อุณหภูมิน้ำอ้อยขาเข้าหม้อต้ม (C)

T_{j1} = อุณหภูมิน้ำอ้อยขาออกหม้อต้ม (C)

P = ค่า Purity ของน้ำอ้อย

การคำนวณหาอัตราการไหลของ Syrup ที่ได้จากหม้อต้มชุดสุดท้าย , $\dot{m}_{Syrup}$

$$\dot{m}_{Syrup} = \dot{m}_{j0} Bx_0 / Bx_{Syrup} \quad (t/h) \quad (9)$$

เมื่อ $\dot{m}_{j0}$ = อัตราการไหลของน้ำอ้อยขาเข้าหม้อต้มชุดแรก (t/h)

$\dot{m}_{Syrup}$ = อัตราการไหลของ Syrup ขาออกหม้อต้มชุดสุดท้าย (t/h)

Bx_0 = ค่าความเข้มข้น(Brix)ของน้ำอ้อยที่ขาเข้าหม้อต้มชุดแรก (Bx)

Bx_{Syrup} = ค่าความเข้มข้น(Brix)ของ Syrup ที่ขาออกหม้อต้มชุดสุดท้าย (Bx)

(6) การคำนวณหาอัตราการใช้เชื้อเพลิงของหม้อไอน้ำ (Fuel Consumption) , $\dot{m}_f$

หม้อน้ำ(Boiler) มีหน้าที่ผลิตไอน้ำความดันสูง (Superheated steam) โดยความร้อนที่ใช้ผลิตไอน้ำได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงในกระบวนการของโรงงานน้ำตาลสิ่งที่เหลือจากกระบวนการคือ ชานอ้อยจากการหีบสกัดจึงได้มีการนำเอาชานอ้อยมาใช้ให้เกิดประโยชน์เป็นเชื้อเพลิง สามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายในการนำเข้าเชื้อเพลิงจากภายนอก ค่าความร้อนของการเผาไหม้เชื้อเพลิงค่าความร้อนจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง (ชานอ้อย) คือปริมาณความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิงที่อุณหภูมิบรรยากาศ ค่าความร้อนแบ่งได้ 2 ประเภทคือค่าความร้อนสูงและค่าความร้อนต่ำ ในที่นี่ผู้วิจัยได้ใช้ค่าความร้อนต่ำ [8] ในการคำนวณ ซึ่งมีค่าลดลงเมื่อความชื้นเชื้อเพลิงมีค่าสูงขึ้นตามสมการที่ 11

การคำนวณหาอัตราการใช้เชื้อเพลิง (Fuel Consumption) , $\dot{m}_f$

$$\dot{m}_f = \left[\frac{(\dot{m}_s h_s - \dot{m}_w h_w) \times 100}{LHV \times \eta_b}\right] \quad (t/h) \quad (10)$$

โดย LHV = (4250 – 12s – 48.5w) × 4.186 (kJ/kg) (11)

การคำนวณหาปริมาณเชื้อเพลิงที่เหลือใช้, (Surplus bagasse), $\dot{m}_B$

$$\dot{m}_B = \dot{m}_{Bag} - \dot{m}_f \quad (t/h) \quad (12)$$

เมื่อ

	$\dot{m}_s$	=	อัตราการผลิตไอน้ำจากหม้อไอน้ำ	(t/h)
	$\dot{m}_{bl}$	=	อัตราการโบว์ดาวน้ำจากหม้อไอน้ำ	(t/h)
	$\dot{m}_w$	=	ปริมาณน้ำป้อน	(t/h)
	h_s	=	เอนทาลปีจำเพาะของไอน้ำที่ผลิตออกจากหม้อไอน้ำ	(kj/kg)
	h_w	=	เอนทาลปีจำเพาะของน้ำป้อนเข้าหม้อไอน้ำ	(kj/kg)
	LHV	=	ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง	(kj/kg)
	η_b	=	ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ	(%)
	s	=	เปอร์เซ็นต์ซูโครสในชานอ้อย	(%)
	w	=	เปอร์เซ็นต์ความชื้นในชานอ้อย	(%)
	$\dot{m}_{Bag}$	=	ชานอ้อยที่ได้จากการหีบ	(t/h)

(7) การคำนวณหาการสูญเสียน้ำตาลไปกับชานอ้อย

จากสมการที่ 3 ผู้วิจัยสามารถคำนวณค่า Pol in Bagasse ที่ปริมาณน้ำพรมแตกต่างกัน ดังนั้นผู้วิจัยจะทราบถึงปริมาณน้ำตาลที่ติดไปกับชานอ้อยได้ดังนี้

$$\text{Sugar Loss} = \frac{\text{Pol in Bagasse} \times \dot{m}_{Bag}}{\text{Pol in Sugar}} \quad (t/h) \quad (13)$$

เมื่อ

	$\dot{m}_{Bag}$	=	ชานอ้อยที่ได้จากการหีบ	(t/h)

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

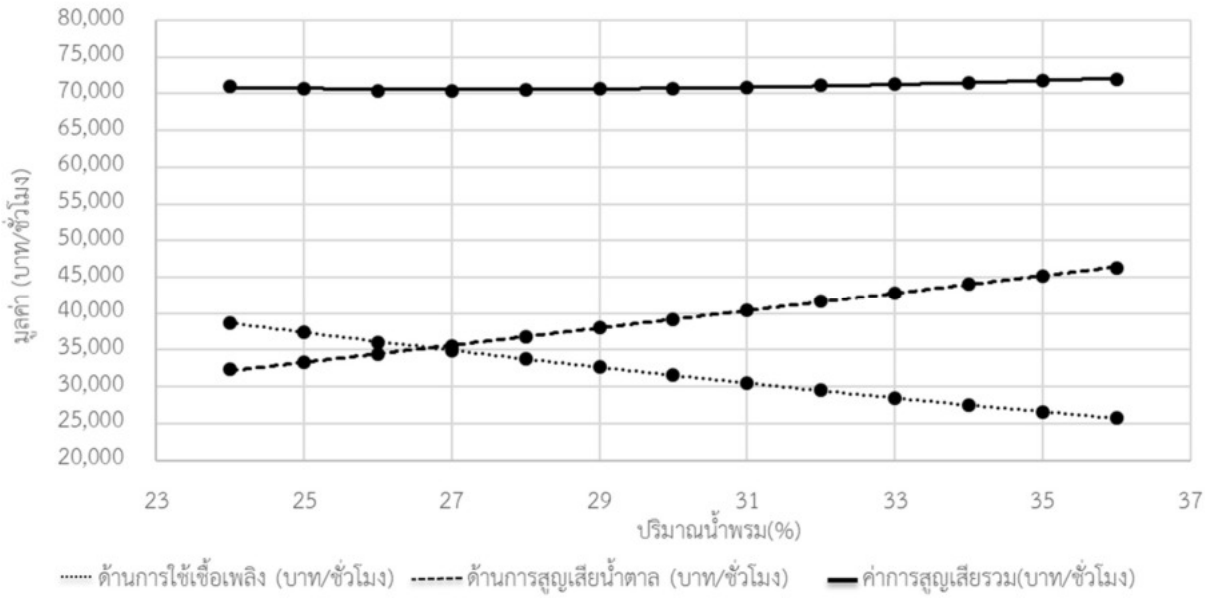
เมื่อพิจารณาข้อมูลแล้วจะเห็นว่าปริมาณการใช้น้ำพรมในกระบวนการหีบสกัดนั้น ส่งผลต่อการสูญเสียน้ำตาล, การใช้พลังไอน้ำและปริมาณการใช้เชื้อเพลิง ผู้วิจัยจึงได้คำนวณผลกระทบด่านต่างๆ จากสมการข้างต้น ทั้งด้านประสิทธิภาพการหีบสกัด ด้านคุณภาพของวัตถุดิบและผลผลิตที่ได้ของแต่ละกระบวนการ จากนั้นจะนำมาสู่การคำนวณการสูญเสียในเชิงมูลค่าทั้งด้านการใช้เชื้อเพลิง ด้านการสูญเสียน้ำตาลไปกับชานอ้อย และด้านการสูญเสียรวมโดยการคำนวณได้ดังนี้

ตารางที่ 1 การคำนวณประสิทธิภาพและคุณภาพของผลผลิตจากกระบวนการหีบสกัด

ปริมาณการใช้น้ำพรม (%)	ประสิทธิภาพการหีบสกัด (%)	ค่าความหวานชานอ้อย (%)	การสูญเสียน้ำตาลไปกับชานอ้อย(%)	ค่าความชื้นชานอ้อย (%)	ค่าความเข้มข้นน้ำอ้อยรวม (Brix)	อัตราการใช้ไอน้ำ (ตัน/ชั่วโมง)	ปริมาณการใช้เชื้อเพลิง (ตัน/ชั่วโมง)	เป็นเงิน (บาท/ชั่วโมง)	ปริมาณน้ำตาลที่สูญเสีย (ตัน/ชั่วโมง)	เป็นเงิน (บาท/ชั่วโมง)	ค่าการสูญเสียรวม (บาท/ชั่วโมง)
24	95.12	2.44	4.88	40.31	14.67	158.53	64.59	32,299	3.44	38,760	71,060
26	95.45	2.28	4.55	43.61	14.39	167.41	68.78	34,390	3.19	35,978	70,369
28	95.75	2.13	4.25	46.40	14.13	177.02	73.46	36,731	3.00	33,786	70,518
30	96.03	1.99	3.97	48.68	13.88	187.59	78.39	39,196	2.80	31,560	70,756
32	96.29	1.85	3.71	50.46	13.63	198.13	83.25	41,624	2.61	29,478	71,102
34	96.54	1.73	3.46	51.74	13.40	208.63	88.01	44,002	2.44	27,521	71,524
36	96.77	1.62	3.23	52.51	13.17	219.10	92.64	46,321	2.28	25,677	71,998

หมายเหตุ ราคาน้ำตาลคิดราคาเฉลี่ย 5 ปี ราคา 11,278.60 บาท/ตัน
ราคาชานอ้อยคิดที่ราคา 500 บาท/ตัน

จากตารางที่ 1 จะสามารถคำนวณผลกระทบของประสิทธิภาพการหีบสกัดรวมถึงคุณภาพของวัตถุดิบได้เมื่อปริมาณน้ำพรมเปลี่ยนแปลงโดยได้คำนวณปริมาณการใช้น้ำพรมตั้งแต่ 24 – 36 % ต่อปริมาณอ้อยที่เข้ากระบวนการหีบสกัด จะเห็นว่ายิ่งใช้ปริมาณน้ำพรมสูงประสิทธิภาพการหีบสกัด (Pol Extraction) ก็จะสูงตามร้อยละของน้ำตาลที่ติดไปกับชานอ้อย (Pol in Bagasse) ก็จะน้อยซึ่งค่าความหวานนี้สามารถคำนวณกลับมาเป็นปริมาณน้ำตาลได้ แต่ในด้านของการใช้เชื้อเพลิงนั้นค่าความชื้นชานอ้อย (Moisture in Bagasse) จะสูงขึ้นตามปริมาณการใช้น้ำพรม รวมถึงค่าความเข้มข้นของน้ำอ้อย (Brix Mixed Juice) ก็จะต่ำลงตามปริมาณน้ำพรมที่สูงขึ้นตามลำดับ ดังนั้นจะสามารถคิดผลกระทบในด้านต่าง ๆเป็นมูลค่าได้ ซึ่งจะเห็นว่าการใช้ปริมาณน้ำพรมเยอะจะช่วยลดการสูญเสียน้ำตาลที่ติดไปกับชานอ้อยได้แต่จะมีการใช้พลังงานไอน้ำเพิ่มขึ้นเนื่องจากค่าความเข้มข้นของน้ำอ้อย (Brix Mixed Juice) จะต่ำลง รวมถึงจะมีการใช้ปริมาณเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากใช้ปริมาณน้ำพรมเยอะจะทำให้ชานอ้อยมีความชื้นสูงซึ่งจะส่งผลต่อปริมาณเชื้อเพลิงที่เหลือหลังฤดูผลิตน้ำตาลที่จะนำไปเป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตไฟฟ้าเพื่อจำหน่ายนอกฤดูผลิตน้ำตาล นับเป็นการสูญเสียโอกาสในการผลิตไฟฟ้าเพื่อจำหน่ายดังนั้นจากข้อมูลทางผู้วิจัยจึงได้วิเคราะห์หาจุดเหมาะสมในการใช้ปริมาณน้ำพรมได้



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ผลกระทบของการพรมน้ำด้านต่าง ๆ

สรุปผลการวิจัย

ด้านการใช้เชื้อเพลิง เมื่อมีการพรมน้ำในปริมาณมากความชื้นของชานอ้อยก็จะสูงขึ้นตามลำดับเมื่อชานอ้อยมีความชื้นสูงค่าความร้อนของชานอ้อยจะต่ำลงทำให้มีการใช้ปริมาณเชื้อเพลิงที่สูงขึ้น ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับศักยภาพการผลิตไฟฟ้าเพื่อจำหน่ายนอกฤดูผลิตน้ำตาล

ด้านการใช้พลังงานไอน้ำ ปริมาณน้ำพรมที่สูงจะส่งผลให้ค่าความเข้มข้นของน้ำอ้อย (Brix) ต่ำเมื่อน้ำอ้อยมีค่าความเข้มข้นต่ำจึงต้องใช้พลังงานไอน้ำที่มากขึ้นในการต้มระเหยน้ำอ้อย เมื่อต้องผลิตไอน้ำที่มากขึ้นจึงต้องใช้เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นจึงส่งผลต่ออัตราการใช้เชื้อเพลิงของหม้อไอน้ำ

ด้านการสูญเสียน้ำตาล การใช้ปริมาณน้ำพรมที่สูงนั้นจะช่วยลดร้อยละของน้ำตาลที่ติดไปกับชานอ้อยได้ (Pol in Bagasse) ซึ่งร้อยละของน้ำตาลที่ติดไปกับชานอ้อยนี้สามารถคำนวณกลับเป็นปริมาณน้ำตาลที่สูญเสียได้ตามสมการที่ 13 เช่นเดียวกันหากใช้ปริมาณน้ำพรมน้อยก็จะมีการสูญเสียน้ำตาลที่ติดไปกับชานอ้อยเช่นเดียวกัน

เมื่อพิจารณาผลกระทบทั้งหมดแล้ว พบว่า ปริมาณน้ำพรมที่ 27% ต่อปริมาณอ้อยเข้าหีบนั้นเป็นจุดที่ข้อมูลในการใช้เชื้อเพลิงและการสูญเสียน้ำตาลนั้นทั้ง 2 จุดมีค่าเท่ากัน แต่หากมองทางด้านการสูญเสียรวมทั้งหมดนั้นมีค่าไม่แตกต่างกันมาก เพราะการเพิ่มปริมาณการใช้เชื้อเพลิงจะถูกชดเชยด้วยการสูญเสียน้ำตาลที่ลดลง ดังนั้นข้อมูลจากงานวิจัยนี้จึงเป็นแนวทางประกอบการตัดสินใจเรื่องปริมาณการใช้น้ำพรมในกระบวนการหีบอ้อยของโรงงานน้ำตาล ทั้งนี้ผลการวิเคราะห์จะเปลี่ยนแปลงไปตามราคาน้ำตาลและราคาชานอ้อย

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณโครงการเครือข่ายอุดมศึกษาเพื่ออุตสาหกรรม (Hi-Fi) โครงการแพลตฟอร์มการศึกษาครบวงจรเพื่อการพัฒนานักศึกษาปริญญาโทและการวิจัยพัฒนานวัตกรรมของภาคอุตสาหกรรม ซึ่งได้รับการสนับสนุนงบประมาณจากหน่วยบริหารและจัดการลงทุนด้านการพัฒนากำลังคน และทุนการศึกษาพัฒนาสถาบันอุดมศึกษาการวิจัยและสร้างนวัตกรรม (บพค.) สำนักสภานโยบายการอุดมศึกษาวิทยาศาสตร์วิจัยและนวัตกรรมแห่งชาติ (สวทช.)

เอกสารอ้างอิง

[1] สมบัติ ขอทวีวัฒนา. (2003), **เทคโนโลยีน้ำตาล**, หน้า 156 – 163, ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร.

[2] Peter Rein. (2017), **Cane Sugar Engineering**. Second Edition, Berlin, Germany., pp. 150–156.

[3] สมชาติ ฉันทศิริวรรณ. (2014), การจำลองผลกระทบของการผสมแบบไม่เอกพันธ์ที่มีต่อสมรรถนะของกระบวนการหีบอ้อย, **วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ.**. 37 (3), 399-410.

[4] เอกวรพงศ์ โชติคุณวัฒน์. (2020), การศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดจากฝุ่นชานอ้อยและฝุ่นใบอ้อย กรณีศึกษา : โรงไฟฟ้าชีวมวล, **วารสารวิชาการพลังงานทดแทนสู่ชุมชน**. 3(2), 43-57.

[5] อัจฉริยา บัวทอง. (2014), **การพัฒนาแบบจำลองสมดุลมวลและพลังงานสำหรับโรงงานน้ำตาล**, วิทยานิพนธ์หลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล : มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

[6] E. Hugot. (1986), **Handbook of Sugar Engineering**, 3rd ed. Elsevier, Amsterdam : Elsevier Science.

[7] บันเทิง สีกุดทอง สมหมาย ปรีเปรม ชนกนันท์ สุขกำเนิด. (2009), “การพัฒนาแบบจำลองสำหรับการออกแบบระบบหม้ออุ่นและหม้อต้มโรงงานน้ำตาล”, ใน **การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23**, 4 – 7 พฤศจิกายน 2552 ณ จังหวัดเชียงใหม่

[8] ยุทธนา คงจีน ธีรภัทร ดำรงธรรม รุ่งเพชร ก่องนอก กฤติเดช บัวใหญ่ กาณฑ์ เกิดชื่น. (2021), การศึกษาการผลิตไฟฟ้าจากขยะชุมชน ในพื้นที่ จังหวัดนครราชสีมา, **วารสารวิชาการพลังงานทดแทนสู่ชุมชน**. 4(2), 50-56.