

## ผลของความต้านทานตะกอนต่อการใช้น้ำในการระเหยน้ำอ้อย

### Effect of Scale Resistance on Steam Consumption of Cane-Juice Evaporation

ขนิษฐา แสนสิทธิ์ (Khanistha Saensit)\* ดร. วรินทร์ไพ เสธฐธณบุตร (Dr. Varinrumpai Seithtanabutara)<sup>1\*\*</sup>

(Received: May 19, 2019; Revised: July 11, 2019; Accepted: July 14, 2019)

#### บทคัดย่อ

จากการศึกษาระบบการต้มระเหยน้ำอ้อยที่ประกอบด้วยหม้ออุ่นและหม้อต้มระเหยต่อเนื่อง 5 ลำดับ ทำงานคู่ขนานกัน (ชุด A และ ชุด B) ที่ใช้ในโรงงานน้ำตาลนครราชสีมา พบว่า ความต้านทานตะกอนที่สะสมในท่อน้ำอ้อยของหม้อต้มอุ่นระเหยตลอดฤดูหีบจะสูงถึง  $73.26 \text{ m}^2\text{C/kW}$  เมื่อสัดส่วนการป้อนน้ำอ้อยเข้าหม้อต้มชุด B ต่อชุดหม้อต้ม A มีค่าสูงขึ้น ที่อัตราการป้อนน้ำอ้อยรวมปัจจุบันคือ 532.82 ตันต่อชั่วโมง โดยใช้ไอน้ำคุณภาพคงที่และคงไว้ซึ่งคุณภาพของน้ำเชื่อมที่ผลิตได้ จากแต่ละหม้อต้มระเหยที่มีพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนเท่าเดิม จะทำให้มีการใช้น้ำในปริมาณลดลงสำหรับหม้อต้มระเหยชุด A เกิดการถ่ายเทความร้อนลดลง ส่งผลให้ความต้านทานตะกอนเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งมีแนวโน้มตรงกันข้ามกับการสะสมตะกอนในหม้อต้มระเหยชุด B ตะกอนจากการต้มระเหยน้ำอ้อยที่สะสมบนผิวท่อน้ำอ้อยประกอบไปด้วยผลึกสารประกอบอินทรีย์ของธาตุที่เป็น ออกซิเจน คาร์บอน แคลเซียม โซเดียม ฟอสฟอรัส เหล็ก แมกนีเซียม และ โพแทสเซียม จากการประเมินราคาต้นทุนการผลิตไอน้ำเป็น 463.56 บาทต่อตันพบว่า ค่าใช้จ่ายด้านไอน้ำรวมของกระบวนการต้มระเหยน้ำอ้อยลดลงเทียบปัจจุบันเมื่อมีการปรับ สัดส่วนการป้อนน้ำอ้อยเข้าหม้อต้มชุด B ต่อสัดส่วนการป้อนน้ำอ้อยเข้าหม้อต้มชุด A เป็น 0.65 และอัตราการป้อนน้ำอ้อยรวมเป็น 520-525 ตันต่อชั่วโมง

#### ABSTRACT

The sugar evaporation process, composing of a pre-evaporator and two-parallel quintuple effects (train A and train B), for this case study was investigated. Results has founded that the scale resistance of deposited fouling on PE throughout the milling season reached to  $73.26 \text{ m}^2\text{C/kW}$ . Based on the present total juice inlet of 532.82 ton/h with the same evaporation area and steam quality usage at maintaining the syrup quality, increasing of juice inlet feed rate ratio of train B to train A gave the decrease of steam consumption for evaporation train A. The heat transfer was then reduced that resulting to an increase of scale resistance which in contrast to the phenomenon in train B. Juice scale deposited on the juice tube composed of organic crystalline of various elements such as O, C, Ca, Na, P, Fe, Mg, and K. Compared to the present cost, based on the calculated steam cost of 463.56 baht/ton at the juice inlet flowrate ratio of train B to train A of 0.65, and the total juice feed rate of 520-525 ton/h, the expense on total steam consumption was decreased.

**คำสำคัญ:** หม้อต้มระเหย น้ำอ้อย ความต้านทานตะกอน อัตราการใช้น้ำ

**Keywords:** Evaporator, Cane juice, Scale resistance, Steam consumption

<sup>1</sup>Correspondent author: tmallika@kku.ac.th

\*นักศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

\*\*ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ (ศูนย์วิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทน) มหาวิทยาลัยขอนแก่น

## บทนำ

กระบวนการต้มระเหยน้ำเชื่อมเป็นหน่วยปฏิบัติการที่มีการใช้พลังงานไอน้ำมากที่สุด จะมีการสะสมตัวของตะกรันอันประกอบด้วยสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และอิมัลชันต่างๆ ที่พื้นผิวการแลกเปลี่ยนความร้อน ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (heat transfer coefficients, HTC) มีค่าลดลง ซึ่งการสะสมตะกรันจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาทำให้มีการถ่ายเทความร้อนระหว่างไอน้ำและน้ำอ้อยจึงลดลง [1] ส่งผลให้ส่งผลต่ออัตราการผลิตที่ลดลงกว่า ดังนั้นจึงต้องมีการใช้ไอน้ำที่เพิ่มขึ้นในการทำให้ได้ความเข้มข้นของน้ำเชื่อมตามเป้าหมาย ทั้งนี้ ปริมาณตะกรันที่เกิดขึ้นในแต่ละสถานประกอบการ จะขึ้นอยู่กับฤดูกาลหีบ และระบบการต้มระเหยแบบหลายขั้นตอน (Multiple effect evaporators, MEE) องค์ประกอบของตะกรันโดยรวมจะมาจากองค์ประกอบของน้ำอ้อย กระบวนการทำใส การออกแบบโรงงาน และ สภาพการทำงาน ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับกลไกการสะสมตัวของตะกรันด้วย ส่วนใหญ่แล้ว น้ำอ้อยระหว่างกระบวนการต้มระเหยจะประกอบด้วยสารทั้งที่แขวนลอย (suspension) และละลายได้ (soluble matter) ในการล้างตะกรันเหล่านี้ทำได้โดยวิธีทางเคมีและเชิงกลขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างของแต่ละกระบวนการ เช่น ธรรมชาติของตะกรัน (scale characteristics) ชนิดของสารเคมีที่ใช้ล้าง (cleaning chemical) ระบบการต้มระเหย (evaporator system) และ ขั้นตอนการล้างตะกรัน (scale cleaning step) [2] โดยส่วนใหญ่ รอบการทำความสะอาดจะอยู่ระหว่าง 10-15 วันต่อรอบของกระบวนการต้ม การล้างตะกรันที่สะสมตัวนี้ในแต่ละช่วงเวลการผลิตด้วยสารเคมีโซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นวิธีที่นิยมที่สุดในกระบวนการต้มน้ำอ้อย [2] เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารซิลิเกต (silicates) โปรตีน (protein) และ สารวัสดุที่มีลักษณะเป็นเจล (gelatinous substances)

## วัตถุประสงค์ของการวิจัย

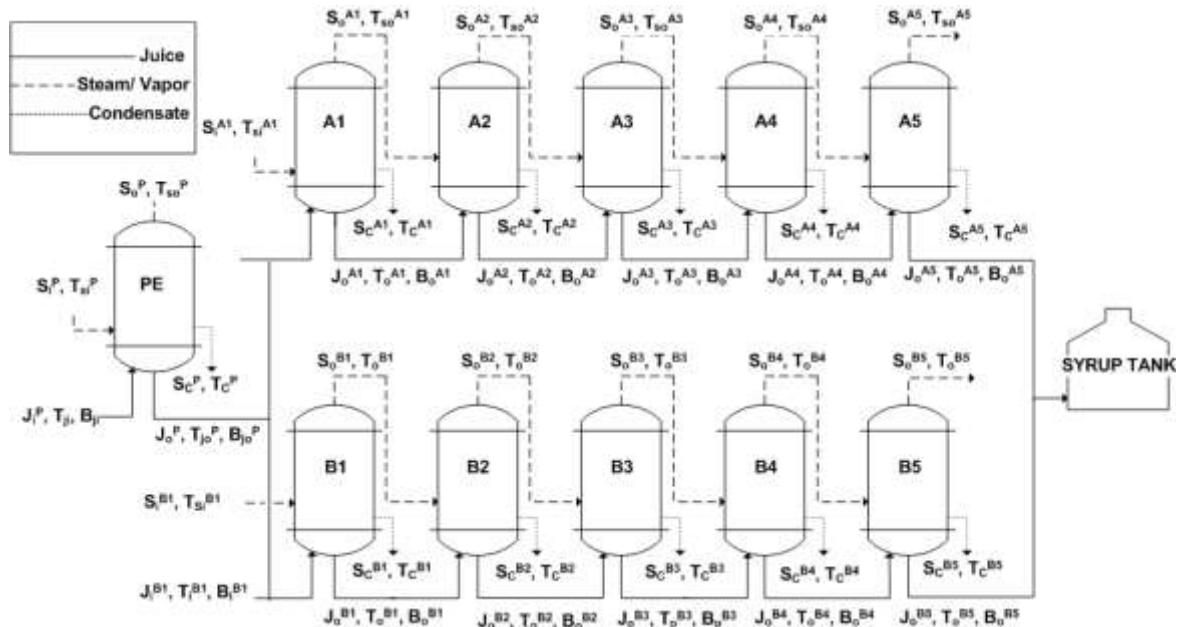
งานวิจัยนี้ จะศึกษาพฤติกรรมการสะสมตะกรัน และวิเคราะห์องค์ประกอบตะกรันที่เกิดขึ้นในกระบวนการต้มระเหยน้ำอ้อยแบบหลายขั้นตอน (Multiple effect evaporators, MEE) ของโรงงานน้ำตาล โดยจะใช้สมการทำนายความต้านทานของตะกรันที่ก่อตัวขึ้นในการประเมินอัตราและเศรษฐศาสตร์การใช้พลังงานไอน้ำ

## วิธีการดำเนินงานวิจัย

การวิเคราะห์องค์ประกอบของตะกรัน กระบวนการต้มระเหยของโรงงานน้ำตาลกรณีศึกษามีแผนผังของกระบวนการ (ภาพที่ 1) เป็นหม้ออุ่นน้ำอ้อย (pre evaporator, PE) ก่อนส่งผ่านยังหม้อต้มระเหยแบบต่อเนื่อง 5 หม้อ (quintuple Effect) ขนานกัน คือ ชุด A และ ชุด B โดยพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนโดยรวมของชุดหม้อต้มระเหยชุด A (4,600 ตารางเมตร) จะมีน้อยกว่าของชุดหม้อต้มระเหยชุด B (10,000 ตารางเมตร) ตะกรันตัวอย่างที่สะสมค้างอยู่ในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนจะถูกเก็บรวบรวมจากหม้อต้มระเหยแต่ละชุดแต่ละช่วงการต้มระเหย (15-20 วัน) หลังทำความสะอาดด้วยโซดาไฟ (NaOH 50 wt.%) ร่วมกับวิธีการเชิงกล (physical cleaning) ตะกรันจะผ่านการอบแห้ง การบดร่อนให้มีขนาด 1-5 ไมครอน แล้วจะถูกนำไปวิเคราะห์โครงสร้างพื้นผิวเชิงกายภาพ (physical textural structure) และองค์ประกอบ (elemental compositions) ด้วยเครื่องวิเคราะห์กล้องจุลทรรศน์ส่องกราดแบบละเอียด (Scanning Electron Microscope Energy Dispersive X-ray Spectrometer, SEM/EDX, Hitachi, S-3000N) โครงสร้างผลึกของตะกรันจะถูกตรวจสอบด้วย เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer, XRD, Bruker, D8 Advance)

สมมูลมวลสารและพลังงานในกระบวนการต้มระเหย ข้อมูลจริงจากกระบวนการผลิตจะถูกรวบรวมมาใช้ในการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม Microsoft Excel เพื่อทำการวิเคราะห์ทั้งด้านสมมูลมวลสารและพลังงาน สมดุล

กระแสน้ำไหลเข้าออกทั้งมวลสารและพลังงานสำหรับหม้ออุ่น PE ที่สภาวะคงตัว (steady state) ได้ถูกสมมติฐานที่ว่าของแข็งที่ละลายได้ (dissolved solids) จะไม่สามารถระเหยได้ และไม่มีการสูญเสียไอน้ำในการควบแน่น ( $S=C$ ) จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (1)-(4) และ ปริมาณไอน้ำที่ใช้ในต้มอุ่นน้ำตาลก่อนป้อนเข้าหม้อต้มระเหยแสดงได้ดังสมการที่ (5)



ภาพที่ 1 หม้อต้มระเหยแบบ quintuple Effect (พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนของ  $A1=A2=A3=1,000$  ตารางเมตร, ของ  $A4=A5= 800$  ตารางเมตร, ของ  $B1=B2=B3=B4=B5=2,000$  ตารางเมตร)

$$I_i^P = S_o^P + J_o^P \quad (1)$$

$$I_i^P B_{ji}^P = J_o^P B_{jo}^P \quad (2)$$

$$I_i^P h_{ji}^P + S_i^P H_{si}^P = J_o^P h_{jo}^P + S_o^P H_{so}^P + C^P h_c^P + Losses \quad (3)$$

$$I_i^P h_{ji}^P + S_i^P \lambda^P = J_o^P h_{jo}^P + S_o^P H_{so}^P + Losses \quad (4)$$

$$S_i^P = \frac{J_o^P h_{jo}^P + S_o^P H_{so}^P + Losses - J_i^P h_{ji}^P}{\lambda^P} = \frac{J_o^P h_{jo}^P + (J_i^P - J_o^P) H_{so}^P - J_i^P h_{ji}^P + Losses}{\lambda^P} \quad (5)$$

เมื่อความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอที่ถ่ายเทความร้อนให้แก่ น้ำอ้อยที่สภาวะอุณหภูมิความดันไอน้ำอิ่มตัว (saturated steam temperature and pressure) คือ สมการที่ (6)-(8) ทั้งนี้ความต้านทานของตะกรันในหม้ออุ่นที่สะสมตัวขึ้นในแต่ละช่วงเวลาก่อนการล้างตะกรันแต่ละรอบ จะประเมินได้จากสมการที่ (9) หากให้  $X_o$  คือสัดส่วนการป้อนน้ำอ้อยที่ออกจากหม้ออุ่นต้ม น้ำอ้อย (Pre-evaporator) เพื่อเข้าสู่หม้อต้มระเหยชุด A จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (10)-(12)

$$\lambda^P = H_{si}^P - h_c^P \quad (6)$$

นั่นคือ  $Q^P = S_i^P (H_{si}^P - h_c^P) - Losses = S_i^P \lambda_{(T_s)}^P - Losses = S_i^P \lambda_{(T_s)}^P \quad (7)$

$$Q^P = S_i^P \lambda^P = k^P A^P \Delta T_{mean}^P = k^P A^P (T_{si}^P - T_{jo}^P) \quad (8)$$

$$k^P = \frac{S_i^P \lambda_{(T_s)}^P}{A^P (T_{si}^P - T_{jo}^P)} \quad (9)$$

$$J_o^P = J_i^{A1} + J_i^{B1} \quad (10)$$

$$J_i^{A1} = X_o J_o^P \quad (11)$$

$$J_i^{B1} = (1 - X_o) J_o^P \quad (12)$$

โดยสมมติฐานที่ไม่เกิดการสูญเสียมวลจากการคอนเดนเสท ( $S_i^n = C^n$ ) และไม่เกิดการสูญเสียไอน้ำ (vapor bleeds  $\sim 0$ ) และ น้ำอ้อยขาออกจากหม้อต้มแต่ละตัวจะเป็นน้ำอ้อยขาเข้าของหม้อต้มตัวถัดไป ( $J_o^n = J_i^{n+1}$ ) เช่นเดียวกัน ไอเสียขาออกของแต่ละหม้อก็จะเป็นไอให้ความร้อนแก่น้ำอ้อยในหม้อถัดไป ( $S_o^n = S_i^{n+1}$ ) สำหรับ ชุดหม้อต้มระเหยแบบ quintuple Effect ทั้งแบบชุด A และ ชุด B จึงได้ความสัมพันธ์กระแสการไหลดังสมการที่ (13)-(15) เนื่องจากมวลสารในน้ำอ้อยเป็นสารที่ไม่ระเหยไปกับกระแสไอเสียขาออกแต่ละหม้อต้ม เมื่อทำสมดุลมวลสาร และวิเคราะห์สมดุลพลังงานหม้อต้มระเหยแบบหลายขั้นตอนนี้ จะแสดงได้ดังสมการ (16-22)

$$J_i^1 + S_i^1 = \sum_{n=1}^5 C^n + J_o^5 + S_o^5 + \text{vapor bleeds} \quad (13)$$

$$J_i^1 = \sum_{n=1}^4 S_i^{n+1} + J_o^5 + S_o^5 \quad (14)$$

$$J_o^n = J_i^{n+1} = J_i^n - S_o^n \quad (15)$$

$$B_{ji}^{n+1} J_i^{n+1} = B_{jo}^n J_o^n \quad (16)$$

$$B_{ji}^{n+1} = \frac{J_o^n B_{jo}^n}{J_i^{n+1}} \quad (17)$$

$$J_i^n h_{ji}^n + Q^n = J_o^n h_{jo}^n + S_o^n H_{so}^n \quad (18)$$

$$Q^n = S_i^n \lambda^n = k^n A^n \Delta T = k^n A^n (T_{si}^n - T_{jo}^n) \quad (19)$$

$$h_{ji}^n = C_{p,ji}^n T_{ji}^n \quad (20)$$

$$h_{jo}^n = C_{p,jo}^n T_{jo}^n \quad (21)$$

$$\lambda_i^n = H_{si}^n - h_c^n \quad (22)$$

การวิเคราะห์ความต้านทานตะกรันหม้อต้มระเหย ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของหม้อต้มระเหย เริ่มต้นขึ้นอยู่ด้วยหลายตัวแปร ในที่นี้จะใช้แบบจำลองของ Van der Pol และคณะ [3] ในการประเมินค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในช่วง 24 ชั่วโมงแรกของการต้มระเหยน้ำอ้อยที่ถูกสมมติว่ายังคงมีความสะอาดเริ่มต้นอยู่ สำหรับ หม้ออุ่น PE และหม้อต้มระเหย ดังสมการที่ (23) และ อุณหภูมิขาออกของน้ำอ้อยใส [4] สามารถหาได้จากสมการ (24) โดยสามารถใช้สมการ BPE (Boiling Point Elevation) [5] และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการสะสมตัวของตะกรัน ดังสมการ (25)-(26) ดังนั้น จะสามารถประเมินอัตราการใช้น้ำของหม้ออุ่นและหม้อต้มได้จากสมการที่ (7) และ (19) ได้ตามลำดับ ในทำนองเดียวกัน ความต้านทานของตะกรันในท่อน้ำอ้อยของหม้อต้มระเหยชุด A และ B ที่ สะสมตัวขึ้นในแต่ละช่วงเวลา [6] จะถูกนำมาอภิปรายในสมการ (27)

$$k_o = \frac{(0.465) T_{jo}^n}{B_{jo}^n} \quad (23)$$

$$T_{jo}^n = T_{so}^n + BPE_{jo}^n \quad (24)$$

$$BPE_{jo}^n = \frac{2 B_{jo}^n}{100 - B_{jo}^n} \quad (25)$$

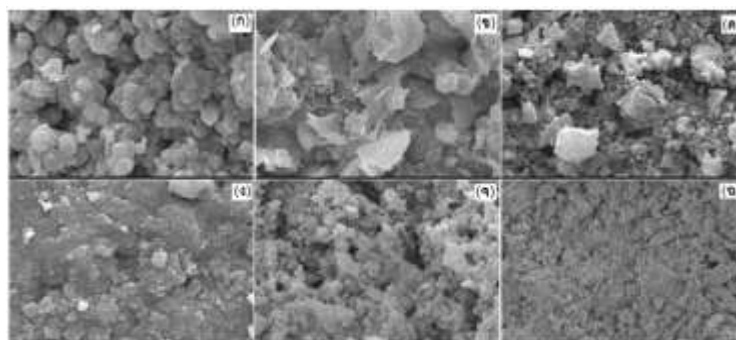
$$k^n = \frac{S_i^n \lambda^n}{A^n (T_{si}^n - T_{jo}^n)} \quad (26)$$

$$R_f = \frac{1}{k} - \frac{1}{k_o} \quad (27)$$

ทั้งนี้ ได้มีการใช้แบบจำลองอัตราการใช้น้ำสำหรับกระบวนการต้มระเหยน้ำตาลของแต่ละกรณีศึกษาเพื่อประเมินค่าใช้จ่ายรวมด้านไอน้ำ ในแต่ละกรณีของกระบวนการต้มระเหยน้ำตาล เมื่อ  $S$  คือ อัตราการไหลของไอน้ำ (ton/h),  $J$  คือ อัตราการไหลของน้ำอ้อย (ton/h),  $C$  คือ อัตราการไหลของน้ำคอนเดนเสท (ton/h),  $B$  คือ ค่าบrix ของน้ำอ้อย (%),  $T$  คือ อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $A$  คือ พื้นที่การถ่ายเทความร้อน ( $\text{m}^2$ ),  $H$  คือ เอนทาลปีของน้ำอ้อย (kJ/kg)  $h$  คือ เอนทาลปีของไอน้ำ (kJ/kg),  $\lambda$  คือ ค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (kJ/kg),  $Q$  คือ ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน (ton/h),  $\Delta T_{mean}^P$  คือ อุณหภูมิแตกต่างเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิไอน้ำและอุณหภูมิจุดเดือดเฉลี่ยของน้ำอ้อย, BPE (Boiling Point Elevation) เป็นค่าจุดเดือดของน้ำอ้อยที่เพิ่มขึ้นตามค่า Brix ของน้ำอ้อยที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายภายในน้ำอ้อยเอง,  $k$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ( $\text{W}/\text{m}^2\text{C}$ ),  $k_0$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเริ่มต้น ( $\text{W}/\text{m}^2\text{C}$ ),  $C_p$  คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำอ้อย ( $\text{W}/\text{m}^2\text{C}$ ),  $R_f$  คือ ค่าความต้านทานของตะกรัน ( $\text{m}^2\text{C}/\text{W}$ ), ด้วย  $P$  แทนหม้ออุ่น (Pre-evaporator), ด้วย  $A1$  แทนหม้อต้มระเหยตัวแรกของชุด A, ด้วย  $B1$  แทนหม้อต้มระเหยตัวแรกของชุด B, ด้วย  $n$  แทนหม้อต้มตัวใดๆ ของชุดหม้อต้มระเหยชุด A หรือ ชุด B ส่วน ตัวห้อย  $i$  แทนขาเข้า, ตัวห้อย  $o$  แทนขาออก, ตัวห้อย  $j$  แทนน้ำอ้อย และ ตัวห้อย  $s$  แทนไอน้ำ

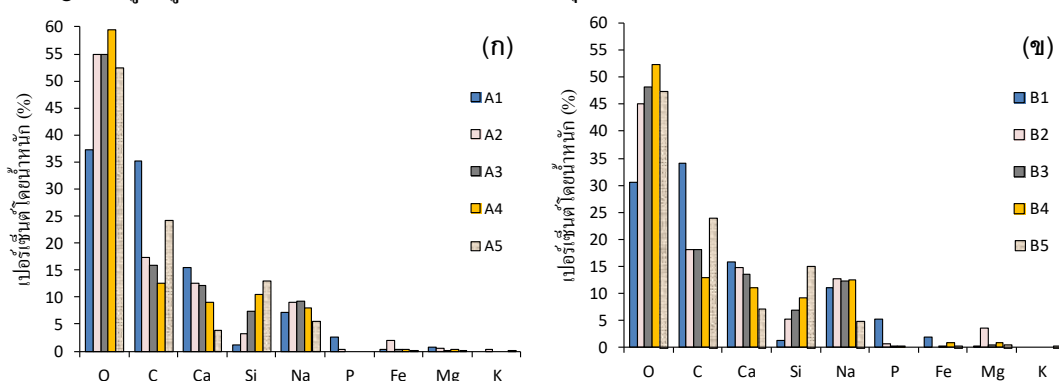
## ผลการวิจัยและอภิปรายผล

องค์ประกอบของตะกรัน ตะกรันที่สะสมก่อตัวบนพื้นผิวการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำอ้อยและไอน้ำจะประกอบด้วยปริมาณสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์แตกต่างกันสำหรับโรงงานน้ำตาลแต่ละแห่ง ตะกรันประกอบด้วยธาตุต่างๆ ที่เป็นจำพวกเกลือละลายน้ำแบบผันกลับได้ (inversely soluble salts) [7-8] ชั้นตะกรันที่ก่อตัวขึ้นมาจะมีความหนาแปรผันตามระยะเวลาของการต้มน้ำอ้อยทำให้เกิดความต้านทานการถ่ายเทความร้อนในที่สุด ในที่นี้ ตะกรันจากหม้อต้มระเหยตัวสุดท้ายจะถูกนำมาตรวจสอบ จากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่กำลังขยาย 5,000 เท่า ดังแสดงในภาพที่ 2 พบว่า ตะกรันในหม้อต้มตัวแรกๆ จะมีการเกาะตัวที่หลวมและมีขนาดใหญ่ไม่สม่ำเสมอปะปนไปด้วยอนุภาคที่มีขนาดเล็กกระจัดกระจายทั่วพื้นผิว เมื่อน้ำอ้อยมีความเข้มข้นมากขึ้นในหม้อต้มตัวถัดไป จะทำให้ตะกรันที่สะสมตัวนั้นมีการเกาะกันที่แน่นมากขึ้นตามลำดับและมีการกระจายอนุภาคที่สม่ำเสมอมากขึ้น มีลักษณะโครงสร้างความเป็นรูพรุนเกาะยึดติดกันเนื่องจากธาตุบางชนิดมีความสามารถในการละลายในน้ำอ้อยได้น้อยลงนั่นเอง สำหรับตะกรันที่รวบรวมมาจากหม้อต้มระเหยทั้งชุด A และชุด B ของหม้อต้มตัวสุดท้ายนี้ (A5 และ B5 ดังแสดงในภาพที่ 2(จ) และ 2(ฉ) ตามลำดับ) จะมีลักษณะที่คล้ายคลึงกันมีการเกาะตัวที่แน่นแข็งแรงและมีพื้นผิวที่มีโครงสร้างรูพรุนเชื่อมต่อกันประกอบด้วยผลึกขนาดเล็ก เป็นที่สังเกตเห็นได้ว่า ชั้นตะกรันด้านในจะประกอบด้วยอนุภาคที่มีขนาดเล็กและแน่นกว่าชั้นด้านนอก ทำให้ชั้นตะกรันที่ติดแน่นกับพื้นผิวทำให้มีความต้านทานการถ่ายเทความร้อนมากขึ้น



ภาพที่ 2 ตะกรันที่สะสมในท่อน้ำอ้อยของหม้อต้มระเหย (ก) A1 (ข) A2 (ค) A3 (ง) A4 (ฉ) A5 และ (จ) B5

ได้มีการรายงานไว้ โดยทั่วไปแล้ว [9] ตะกั่วประกอบด้วย ธาตุ C, O, Na, Mg, Si, Ca, P, K และ Fe สัดส่วนของปริมาณธาตุเหล่านี้ ขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายตัว เช่น ชนิดของอ้อย ชนิดของดินที่ใช้ปลูก การจัดการทางด้านการเกษตรกรรม ชนิดของปุ๋ย ปัจจัยทางด้านสภาวะอากาศ และ กระบวนการผลิตก่อนการต้มระเหยน้ำอ้อย เป็นต้น จากผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วยเครื่อง EDX (ภาพที่ 3) แสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบหลักของตะกั่วคือธาตุ C, O, Na, Si และ Ca ในขณะที่ธาตุ Mg, P, K และ Fe จะมีในปริมาณน้อยซึ่งอาจจะปนมากับปุ๋ยและดินกำเนิดธรรมชาติของอ้อย รวมถึงระหว่างเส้นทางการกระแสน้ำไหลตลอดกระบวนการผ่านท่อเหล็กและเครื่องจักรตามจุดรอยเชื่อมต่างๆ ธาตุที่มีปริมาณสูงสุด ดังแสดงในภาพที่ 3 คือ C และ O ซึ่งจะสะสมตัวในรูปของสารประกอบอินทรีย์หลักๆ ในตะกั่ว ธาตุหลักรองลงมา เช่น Ca, Mg และ Si จะมีความสามารถละลายในน้ำได้ปานกลาง ซึ่งความเข้มข้นของธาตุเหล่านี้ในน้ำอ้อยจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของน้ำอ้อย ทำให้มีแนวโน้มในการตกตะกอนลงมาสะสมตัวเป็นตะกั่วในที่สุด ซึ่ง Ca และ Mg จะอยู่ในรูปตะกั่วคาร์บอเนต ส่วน Si จะเป็นวัสดุเหนียวและแข็ง

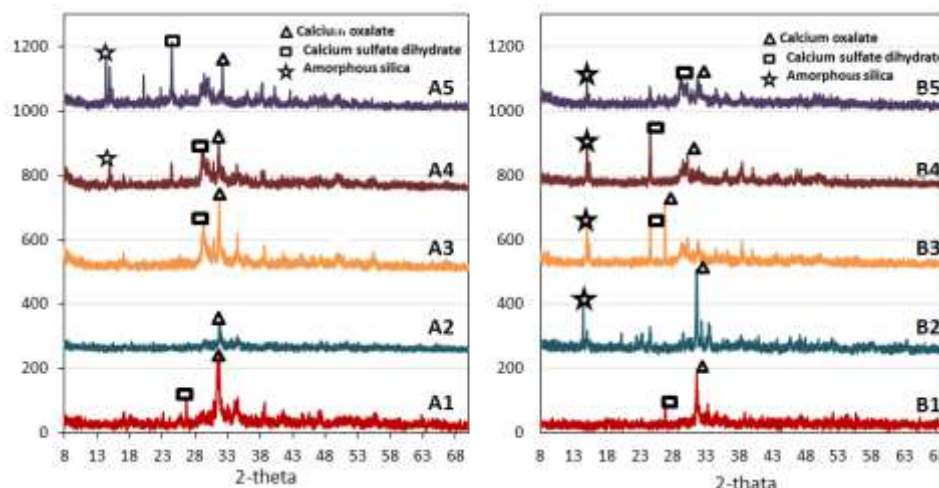


ภาพที่ 3 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักขององค์ประกอบธาตุในตะกั่วของหม้อต้มระเหยชุด A และ ชุด B

จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าจากตะกั่วจากหม้อต้มแรกไปยังหม้อต้มตัวสุดท้าย จะมีปริมาณของธาตุ Ca และ Si เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากความสามารถในการละลายของซิลิกา ในรูป  $\text{SiO}_2$  จะลดลงเมื่อมีความเข้มข้นของซูโครสสูงขึ้นนั่นเอง ซึ่งตะกั่วของหม้อต้มระเหย A1 จะมีปริมาณ Si 1.11% ในขณะที่ ตะกั่วของหม้อต้มระเหย A5 จะมีปริมาณ Si สูงขึ้นเป็น 13.13% ในทำนองเดียวกัน ตะกั่วของหม้อต้มระเหย B1 จะมีปริมาณ Si 1.31% ในขณะที่ ตะกั่วของหม้อต้มระเหย B5 จะมีปริมาณ Si สูงขึ้นเป็น 15.10% ส่วนเกลือ Ca และองค์ประกอบต่างๆ เหล่านี้อยู่ในรูปสารแขวนลอยในน้ำอ้อยที่ผ่านกระบวนการกรองน้ำอ้อย ซึ่งอาจจะเกิดปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์ทำให้เมื่อเข้าสู่กระบวนการต้มระเหยจะทำให้หลงเหลืออยู่แล้วจับตัวเป็นตะกั่ว พบว่า ความเข้มข้นของธาตุแคลเซียมจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นน้ำอ้อยสูงขึ้น เช่นเดียวกันกับที่รายงานไว้ [7] อาจเนื่องมาจากกระบวนการกรองน้ำอ้อยที่ไม่ดีเท่าที่ควร ทำให้ยังคงมีการหลงเหลือของ Si, Na และ Fe มากับสารแขวนลอยในน้ำอ้อยใส โดยตะกั่วของหม้อต้มระเหย AE1 จะมีปริมาณ Ca สูงเป็น 15.38% ในขณะที่ ตะกั่วของหม้อต้มระเหย AE5 จะมีปริมาณ Ca ลดลงเป็น 3.96% ในทำนองเดียวกัน ตะกั่วของหม้อต้มระเหย B1 จะมีปริมาณ Ca สูงเป็น 15.82% ในขณะที่ ตะกั่วของหม้อต้มระเหย B5 จะมีปริมาณ Ca ลดลงเป็น 7.10% ซึ่งมีแนวโน้มเดียวกันกับรายงานที่ผ่านมา [7, 9-11]

นอกจากนี้ ยังพบว่าความเข้มข้นของธาตุ P ที่เป็นตะกั่วในรูปฟอสเฟต ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) มีค่าสูงสุดในตะกั่วหม้อต้มตัวแรกของทั้งชุด A และ B เป็น 2.67 และ 5.31% ตามลำดับ แล้วจะมีค่าลดลงเหลือปริมาณที่น้อยมากๆ สำหรับตะกั่วในหม้อต้มตัวถัดไป ซึ่งสอดคล้องการกับรายงานที่สัมพันธ์กัน [7] ทั้งนี้เนื่องจากหม้อต้มตัวแรกจะมีอุณหภูมิสูงสุดจึงมีอิทธิพลต่อการกระตุ้นให้เกิดตะกั่วสารประกอบดังกล่าวได้มากที่สุด สำหรับกรณีศึกษาครั้งนี้ หม้อต้มระเหยชุด B จะรับภาระปริมาณน้ำอ้อยมากกว่าหม้อต้มชุด A ทำให้มีการกระจายตัวขององค์ประกอบของธาตุที่แตกต่างกันและ ความ

เข้มข้นของ Si และ Ca จึงมีค่าสูงกว่า จำเป็นต้องทำความเข้าใจว่าการเกิดตะกอนสารประกอบนี้เป็นผลต่อเนื่องจากการเติมฟอสเฟตในกระบวนการทำใส่น้ำอ้อยก่อนเข้าหมักต้มระเหย จึงควรใช้ปริมาณที่เหมาะสมในการรวมตะกอนและสิ่งปนเปื้อนต่างๆ ที่แขวนลอยอยู่ในน้ำอ้อย หากใส่น้ำปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้ฟอสเฟตที่ละลายในน้ำอ้อยผ่านเข้าสู่กระบวนการต้มระเหยทำให้เกิดตะกอนของสารประกอบนี้ขึ้นมาในที่สุด

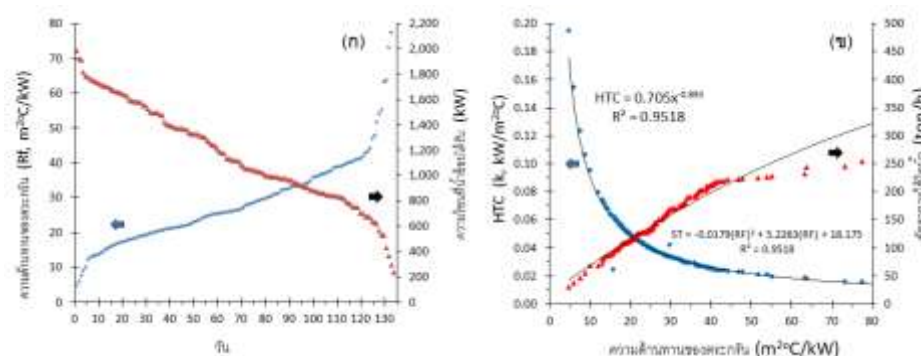


ภาพที่ 4 สเปกตรัม XRD ของตะกอนหมักต้มระเหย

จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ดังแสดงในภาพที่ 4 พบว่า ตะกอนจะประกอบด้วยอะมอร์ฟัสซิลิกา (amorphous silica,  $\text{SiO}_2$ ) แคลเซียมออกซาลาต (calcium oxalate,  $\text{CaOx}$ ) และแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรต (calcium sulfate dehydrate,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) นอกจากนี้ยังมี ไฮดรอกซีอะพาไทต์ (hydroxyapatite, HAP) ปะปนด้วยเล็กน้อย ทั้งนี้ ตะกอนของหมักต้มตัวที่ 4 และ 5 จากหมักต้มระเหยชุด A และ B จะประกอบด้วยอะมอร์ฟัสซิลิกา แคลเซียมออกซาลาต และแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรต ในปริมาณที่สูงโดยเฉพาะตะกอนของหมักต้มระเหยชุด B เนื่องจากรับภาระโหลดมากกว่าหมักต้มระเหยชุด A จึงทำให้เกิดการสะสมตัวขององค์ประกอบเหล่านี้อย่างรวดเร็ว

**อิทธิพลของตะกอนต่อการใช้อุณหภูมิของหมักอ่อน PE** จากการประเมินพฤติกรรมการสะสมตัวของตะกอนหมักอ่อน PE รวมถึงอิทธิพลของตะกอนต่อการถ่ายเทความร้อนและอัตราการใช้อุณหภูมิสำหรับหมักอ่อน PE ตลอดช่วงระยะเวลาการหมัก 134 วัน ดังแสดงในภาพที่ 5 ค่าความต้านทานตะกอน ( $R_p$ ) จึงเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการสะสมตัวอธิบายได้ว่า การสะสมตัวของตะกอนเกิดขึ้นเริ่มแรกจากการที่สารละลายมีความอิ่มตัวยิ่งยวด (super saturation) ทำให้เกิดการก่อนิวเคลียสเล็กๆ (nuclei formation) ของสารแขวนลอยที่มีขนาดอนุภาคเล็กๆ เริ่มตกผลึกออกมาเห็นชัดเจน จึงเริ่มมีอัตราการเติบโตของผลึก (crystal growth) รวมตัวกับสิ่งสกปรกได้มากขึ้น ทำให้เกิดการสะสมตัวเป็นชั้นบนพื้นผิวแล้วเกาะยึดกับพื้นผิวการถ่ายเทความร้อนและระหว่างอนุภาคตะกอนด้วยกันได้แน่นหนาขึ้น ในที่สุด ค่าความต้านทานของตะกอนจะเข้าสู่สภาวะสมดุล (asymptotic phase) ไม่มีค่าเปลี่ยนแปลงเนื่องจากอัตราการสะสมตัวและอัตราการสลายตัวของตะกอนมีค่าเท่ากัน ซึ่งเส้นโค้งจะมีลักษณะเป็นรูปตัวเอสดังอธิบายในงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [11] ซึ่งในการวิเคราะห์ตะกอนหมักอ่อนสำหรับการศึกษากครั้งนี้ จะได้เส้นโค้งการก่อตัวของตะกอนที่แสดงไว้เพียงสองช่วงแรก ดังภาพที่ 5(ก) จะเห็นได้ว่าในระยะเวลา 6 วันแรกของการทำงานของหมักต้ม สารละลายน้ำอ้อยจะมีการเปลี่ยนแปลงเข้าสู่สภาวะการอิ่มตัวยิ่งยวด และมีความต้านทานตะกอนเป็น  $12.2 \text{ m}^2\text{C/kW}$  หลังจากนั้น จะเริ่มการอัตราการเติบโตของผลึกตะกอนที่ค่อนข้างคงที่จนกระทั่งถึงช่วงปลายฤดูหีบ ประมาณวันที่ 125 จะมีแนวโน้มอัตราการเติบโตของผลึกเปลี่ยนแปลงสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว เป็นการบ่งบอกถึงปริมาณตะกอนที่สะสมตัวอย่างต่อเนื่องนี้จะมีผลกระทบต่อการ

ทำงานของหม้ออุ่นน้ำอ้อยนี้มากขึ้น สุดท้ายของวันปิดหีบจะมีความต้านทานตะกรันสูงขึ้นเป็น  $73.26 \text{ m}^2\text{C/kW}$  ซึ่งเมื่อพิจารณาการถ่ายเทความร้อนจากไอน้ำสู่น้ำอ้อย จะเห็นได้ว่า เมื่อความต้านทานตะกรันสูงขึ้นจะทำให้มีการถ่ายเทความร้อนได้ลดลงจึงอาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำอ้อยที่ผ่านกระบวนการต้มระเหยไม่ได้ตามเป้าหมาย ในที่นี้ น้ำอ้อยที่จะเข้ากระบวนการหม้อเคียวในลำดับถัดไปจะต้องมีความเข้มข้นตามเป้าหมายไม่น้อยกว่า 60 บริกซ์ ดังแสดงในภาพที่ 5(ข) ความต้านทานของตะกรันจะมีผลทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (heat transfer coefficient, HTC) จากไอน้ำสู่น้ำอ้อยในท่อน้ำอ้อยของหม้ออุ่นมีค่าลดลงตามไปด้วย และอัตราการใช้อิอน้ำ (steam consumption) มีค่าสูงขึ้นกับความต้านทานที่สูงขึ้นของตะกรันสะสมด้วย ดังสมการความสัมพันธ์ที่ระบุในตารางที่ 1 แสดงว่าการรักษาคุณภาพน้ำเชื่อมผลผลิตให้ได้ในระดับควบคุมต้องใช้ไอน้ำในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ทำให้สิ้นเปลืองพลังงาน



ภาพที่ 5 ความต้านทานของตะกรันที่สะสมตัวและการถ่ายเทความร้อนแก่น้ำอ้อย (ก) และ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและอัตราการใช้อิอน้ำ (ข) สำหรับหม้ออุ่น PE ที่อัตราการป้อนน้ำอ้อยรวม 532.82 ton/h

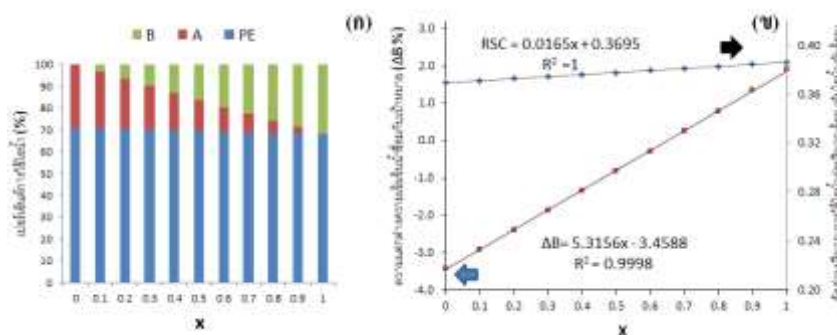
ตารางที่ 1 สมการจำลองสำหรับการทำนายค่าตัวแปรต่างๆ

| สมการจำลอง                                           | คำอธิบาย                                                                                                                                          |
|------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $HTC = 0.705 \cdot RF^{-0.893}$                      | HTC = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของหม้อ PE ( $\text{kW/m}^2\text{C}$ ),<br>RF = ค่าความต้านทานของตะกรันหม้อ PE ( $\text{m}^2\text{C/kW}$ ), |
| $ST = -0.0179 \cdot RF^2 + 5.2263 \cdot RF + 18.175$ | ST=อัตราการใช้อิอน้ำของหม้อต้มระเหย PE (ton/h),                                                                                                   |
| $RSC = 0.0165x + 0.3695$                             | RSC=สัดส่วนปริมาณการใช้อิอน้ำที่ใช้ในกระบวนการต้มระเหยทั้งหมดต่อปริมาณอ้อยป้อนเข้า (ตันไอน้ำ/ตันอ้อย),                                            |
| $\Delta B = 5.3156x - 3.4588$                        | x=สัดส่วนการป้อนน้ำอ้อยเข้าหม้อต้มระเหยชุด B ต่อชุด A,                                                                                            |
| $ST = 29.173 \cdot d^{0.4028}$                       | $\Delta B$ =เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างความเข้มข้นน้ำเชื่อมกับค่าเป้าหมาย,                                                                             |
| $SA = -0.0011d^4 + 0.0401d^3 - 0.5603d^2 + 4.0479d$  | MA=อัตราการใช้อิอน้ำของชุดหม้อต้มระเหย A (ton/h),                                                                                                 |
| $SB = -0.0019d^4 + 0.0693d^3 - 0.9694d^2 + 7.0033d$  | MB=อัตราการใช้อิอน้ำของชุดหม้อต้มระเหย B (ton/h) และ<br>d=ระยะเวลาการต้มระเหยน้ำอ้อย (วัน)                                                        |

**อิทธิพลของการปรับสัดส่วนการป้อนน้ำอ้อย** จากการกระจายตัวของอุณหภูมิของไอน้ำขาเข้าและของน้ำเชื่อมขาออกสำหรับหม้ออุ่นและหม้อต้มระเหยแต่ละชุดในแต่วันตลอดระยะเวลาที่บอ้อย ทำให้ทราบค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิไอน้ำขาเข้าหม้ออุ่นเป็น  $129.44^\circ\text{C}$  มีการถ่ายเทความร้อนแก่น้ำอ้อยที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเฉลี่ยเป็น 16.28 บริกซ์ ด้วยอัตราการป้อน 532.82 ตันน้ำอ้อยต่อชั่วโมง (คิดจาก 98.19% ของอ้อย) ในหม้ออุ่นทำให้น้ำอ้อยมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเฉลี่ยเป็น 21.28 บริกซ์ แล้ว น้ำอ้อยจะถูกส่งต่อไปยังหม้อต้มระเหยด้วยอัตราการป้อนเข้าสู่ชุด A และ B เป็น 40 และ 60 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ในที่นี้  $x = 0.6$  หมายถึง สัดส่วนการป้อนน้ำอ้อยเข้าหม้อต้มชุด B ต่อชุดหม้อต้มชุด A) จากการแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยไอน้ำทำให้ความเข้มข้นน้ำเชื่อมขาออกจากหม้อต้มระเหยชุด A และชุด สูงขึ้นเฉลี่ยเป็น 57.95 และ 61.14 บริกซ์ ตามลำดับ จากการทำสมดุลมวลสารและพลังงานของระบบการต้มระเหยน้ำอ้อยในกรณีศึกษา

ดังแสดงในภาพที่ 1 ด้วยการทำให้แบบจำลองในเอกสารคำนวณของโปรแกรม Microsoft Excel ทำให้ได้ทราบรายละเอียด กระแสการไหลเข้าออกของแต่ละหน่วยปฏิบัติการเพื่อใช้ในการประเมินหาคุณภาพน้ำเชื่อมที่ได้จากกระบวนการต้ม ระเหยนี้ รวมทั้งอัตราการใช้น้ำในการผลิต ทำให้ทราบ อัตราการผลิตน้ำเชื่อมจากหม้อต้มระเหยชุด A และ ชุด B เป็น 59.866 และ 85.116 ตันต่อชั่วโมง ทำให้ได้ผลผลิตน้ำเชื่อมรวมจากกระบวนการต้มระเหย เป็น 144.982 ตันต่อ ชั่วโมง และ ความเข้มข้นน้ำเชื่อมสุดท้ายจากกระบวนการต้มระเหย เป็น 59.82 บริกซ์ ซึ่งเป็นที่ยอมรับใกล้เคียงตามที่ ทางโรงงานได้ตั้งเป้าหมายไว้ และพบว่า ปริมาณไอน้ำที่ใช้ในการต้มระเหยน้ำอ้อยสำหรับหม้อต้มระเหยชุด A และชุด B มีค่าโดยรวมคือ 58.132 ตันต่อชั่วโมง นั่นคือ อัตราการใช้น้ำไอน้ำในกระบวนการต้มระเหย (หม้อต้ม PE + หม้อต้ม ระเหยชุด A + หม้อต้มระเหยชุด B) เป็น 0.3794 ตันไอน้ำต่อตันอ้อย (หรือ 0.3864 ตันไอน้ำต่อตันน้ำอ้อยป้อนทั้งหมด) และ อัตราการใช้น้ำไอน้ำต่อผลผลิตเป็น 1.0420 ตันไอน้ำต่อตันน้ำเชื่อมผลิตภัณฑ์ นั่นเอง

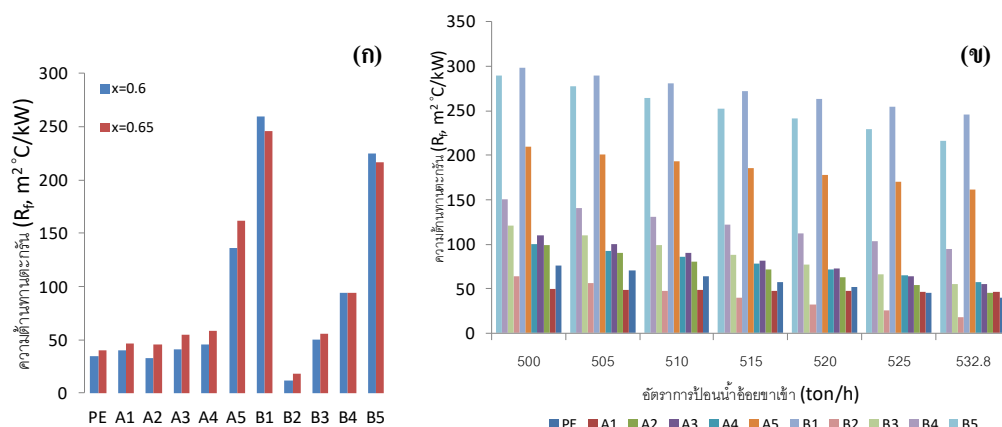
เนื่องจากการสะสมตะกอนขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย คือ อัตราการป้อนน้ำอ้อยเข้า พื้นที่การแลกเปลี่ยนความร้อน คุณภาพน้ำเชื่อม และคุณภาพของไอน้ำแลกเปลี่ยนความร้อน ในการศึกษาครั้งนี้ จึงได้นำแบบจำลองมาพิจารณากรณี มีการปรับเปลี่ยน ค่า  $x$  โดยที่ยังใช้น้ำคุณภาพเดิมและคงไว้ซึ่งคุณภาพของน้ำเชื่อมที่ผลิตได้จากแต่ละหม้อต้มระเหย ที่มีพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนเท่าเดิม พบว่า เมื่อสัดส่วนนี้เพิ่มขึ้น จะทำให้มีการใช้น้ำในปริมาณน้อยลงสำหรับหม้อ ต้มระเหยชุด A ทำให้มีการถ่ายเทความร้อนน้อยขึ้น ส่งผลให้ความต้านทานตะกอนมากขึ้นเนื่องจากการสะสมตะกอน มากขึ้นนั่นเอง ซึ่งมีทิศทางตรงกันข้ามกับการสะสมตะกอนในหม้อต้มระเหยชุด B ที่มีความต้านทานตะกอนน้อยลงเมื่อ  $x$  มีค่าสูงขึ้น พบว่า หม้อต้ม A5 จะมีความต้านทานตะกอนมากที่สุดสำหรับหม้อต้มระเหยชุด A และหม้อต้ม B1 จะมีความ ต้านทานตะกอนมากที่สุดสำหรับหม้อต้มระเหยชุด B ซึ่งความต้านทานตะกอนในแต่ละหม้อต้มจะมีค่าแปรเปลี่ยนไม่เป็น แนวโน้มในทางเดียวกันสำหรับหม้อต้มชุด A และ ชุด B เนื่องจากพื้นที่การแลกเปลี่ยนความร้อนแตกต่างกันส่งผล ปริมาณไอน้ำที่ใช้ในแต่ละหม้อไม่เท่ากันนั่นเอง ค่า  $x$  ที่ต่ำไปหรือสูงไปจะทำให้มีการสะสมตัวตะกอนที่แตกต่างกันอย่าง เห็นได้ชัด จะส่งผลต่อการใช้ปริมาณไอน้ำ และการสิ้นเปลืองต้นทุนในการล้างตะกอน



ภาพที่ 6 การกระจายเปอร์เซ็นต์การใช้น้ำของหม้อต้มระเหยที่ค่า  $x$  ต่างๆ (ก) และ ผลของการปรับเปลี่ยนค่า  $x$  ต่อ คุณภาพน้ำเชื่อมและอัตราการใช้น้ำ (ข) ที่อัตราการป้อนน้ำอ้อยรวม 532.82 ton/h

ดังนั้น จึงต้องมีการพิจารณาค่า  $x$  ที่เหมาะสมกับการควบคุมกระบวนการต้มระเหยน้ำอ้อยในกรณีศึกษาครั้งนี้ เพื่อให้ได้ค่าทั้งทางด้านเชิงคุณภาพและปริมาณภายในการใช้น้ำคุณภาพคงที่ให้ได้มากที่สุด หากมีการการป้อน น้ำอ้อยเข้าหม้อต้มระเหยแต่ละชุด ระหว่างสัดส่วน  $0 < x < 1$  ที่อัตราการป้อนน้ำอ้อยรวมคงตัว 532.82 ตันต่อชั่วโมง โดย ที่ยังใช้น้ำคุณภาพคงที่และคงไว้ซึ่งคุณภาพของน้ำเชื่อมที่ผลิตได้จากแต่ละหม้อต้มระเหยที่มีพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนเท่าเดิม จะทำให้ประเมินอัตราการใช้น้ำสำหรับหม้อต้มทั้งสองชุด ซึ่งหม้อต้มชุด B จะมีอัตราการใช้น้ำ (0.165 ตันไอน้ำต่อตันน้ำอ้อยป้อนเข้าหม้อต้มชุด B) มากกว่าหม้อต้มชุด A (0.143 ตันไอน้ำต่อตันน้ำอ้อยป้อนเข้าหม้อ

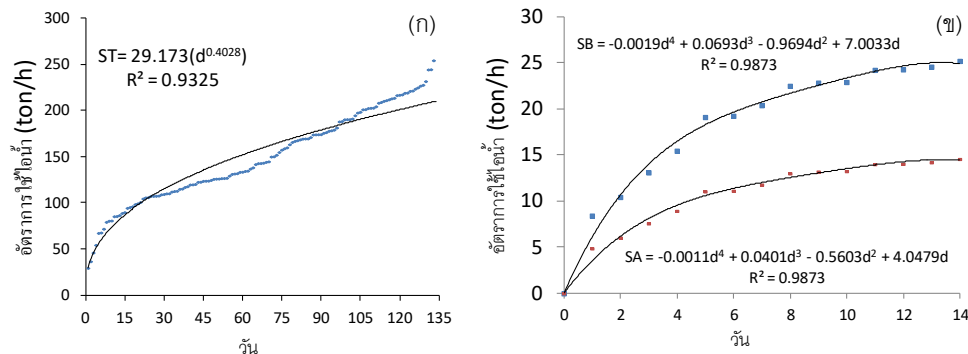
คัมซุด A) เนื่องจาก พื้นที่การแลกเปลี่ยนความร้อนของหม้อคัมซุด B มากกว่าหม้อคัมซุด A อย่างไรก็ดีตาม เปรอร์เซ็นต์การใช้ไอน้ำในการคัมระเหยในหม้อคัม PE หม้อคัมซุด A และหม้อคัมซุด B จะมีค่าผันแปรไปด้วยกับสัดส่วนการป้อนน้ำอ้อย ดังแสดงในภาพที่ 6(ก) เมื่อพิจารณาอัตราการใช้ไอน้ำในกระบวนการคัมระเหยทั้งหมด (หม้อคัม PE + หม้อคัมระเหยซุด A + หม้อคัมระเหยซุด B) ในเชิงปริมาณหน่วยตันไอน้ำต่อตันอ้อย (หรือ ตันไอน้ำต่อตันน้ำอ้อยป้อนทั้งหมด) ปริมาณตันไอน้ำต่อตันน้ำเชื่อมผลิตภัณฑ์ จะมีค่าสูงขึ้นตามสัดส่วน  $x$  อีกทั้งคุณภาพน้ำเชื่อมรวมที่ได้ในถังเก็บจะมีค่าความเข้มข้นที่สูงขึ้นด้วย เมื่อเทียบกับคุณภาพเป้าหมายคือ 60 บริคซ์ ดังแสดงในภาพที่ 6(ข) และความสัมพัทธ์ที่ระบุในตารางที่ 1 ซึ่งหากมีการใช้  $x > 0.65$  จะทำให้ได้น้ำเชื่อมที่มีคุณภาพเทียบเท่ากับเป้าหมาย ดังนั้นช่วงที่เหมาะสมในทางปฏิบัติควรอยู่ระหว่าง 0.65 ถึง 0.7 เพื่อให้ได้ผลผลิตน้ำเชื่อมที่มีคุณภาพใกล้เคียงกับค่าเป้าหมาย นั่นคือ ได้ผลผลิตน้ำเชื่อม 144.585 ลดลงเป็น 144.201 ตันต่อชั่วโมง ที่มีความเข้มข้นเป็น 59.98 เพิ่มขึ้นเป็น 60.15 บริคซ์ และมีการใช้ปริมาณไอน้ำในกระบวนการคัมระเหยทั้งหมดระหว่างเพิ่มขึ้นจาก 206.305 เป็น 206.754 ตันต่อชั่วโมง คิดเป็น สัดส่วนไอน้ำต่อปริมาณอ้อยป้อนเข้าเพิ่มขึ้นจาก 0.3802 เป็น 0.3810 ตันไอน้ำ/ตันอ้อย หรือ จาก 0.3872 เพิ่มขึ้นเป็น 0.3880 ตันไอน้ำ/ตันน้ำอ้อย เนื่องจากปริมาณน้ำอ้อยป้อนเข้าหม้อคัมซุด B มีค่าเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 7 ความต้านทานตะกรันในหม้อคัมระเหย ที่อัตราการป้อนน้ำอ้อยรวม 532.82 ton/h (ก) และ (ข) ความต้านทานตะกรันของหม้อคัมระเหยที่  $x = 0.65$  และ อัตราการป้อนน้ำอ้อยรวมเข้าแตกต่างกัน

**อิทธิพลของการปรับอัตราการป้อนน้ำอ้อยเข้ากระบวนการคัมระเหย** เมื่อเปรียบเทียบความต้านทานตะกรันที่สะสมในแต่ละหม้อคัมระเหยในสภาวะการป้อนน้ำอ้อยเข้าที่หม้อคัมซุด BE เป็น 0.6 และ 0.65 ที่อัตราการป้อนน้ำอ้อยรวมคงตัว 532.82 ตันต่อชั่วโมง พบว่า การเกิดตะกรันในหม้ออุ่น PE จะน้อยสุดถึงแม้ว่าจะถูกใช้งานตลอดช่วงฤดูเก็บเกี่ยว พื้นที่การถ่ายเทความร้อนและอัตราการป้อนไอน้ำเข้าเพื่อคัมระเหยน้ำอ้อยเริ่มต้นมีความเหมาะสม สำหรับหม้อคัมระเหยซุด A จะเกิดการสะสมตะกรันในแต่ละช่วงการใช้งานมากที่สุดที่หม้อตัวสุดท้าย ส่วนหม้อคัมระเหยซุด B จะเกิดการสะสมตะกรันในแต่ละช่วงการใช้งานเรียงลำดับจากมากที่สุดไปน้อยสุด คือ หม้อคัม  $B1 > B5 > B4 > B3 > B2$  ดังแสดงในภาพที่ 7(ก) อย่างไรก็ดีตาม แนวทางในการลดปริมาณไอน้ำสำหรับกระบวนการคัมระเหยน้ำตาลสามารถทำได้โดยการปรับลดอัตราการป้อนเข้าน้ำอ้อยรวม ดังนั้น จากการพิจารณาการใช้สัดส่วนน้ำอ้อยป้อนเข้าหม้อคัมซุด B ที่  $x = 0.65$  แต่มีการลดอัตราการป้อนน้ำอ้อยรวมที่เข้าหม้ออุ่น PE ในช่วง 500-525 ตันต่อชั่วโมง โดยที่ยังใช้น้ำคุณภาพคงที่และคงไว้ซึ่งคุณภาพของน้ำเชื่อมที่ผลิตได้จากแต่ละหม้อคัมระเหยที่มีพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนเท่าเดิม พบว่า สัดส่วนไอน้ำต่อปริมาณอ้อยป้อนเข้ายังคงตัวเช่นเดียวกับการป้อนน้ำอ้อยด้วยอัตรา 532.82 ตันต่อชั่วโมง นั่นคือ มีค่า 0.3802 ตันไอน้ำ/ตันอ้อย หรือ 0.3872 ตันไอน้ำ/ตันน้ำอ้อย โดยที่เปอร์เซ็นต์การใช้ไอน้ำจะคงตัวเป็น 69% 9.86% และ

21.14% สำหรับหม้ออุ่น PE หม้อต้มชุด A และ หม้อต้มชุด B ตามลำดับ อัตราการป้อนน้ำอ้อยรวมที่ลดลง ส่งผลให้ปริมาณการใช้ไอน้ำรวมจะลดลงและผลผลิตน้ำเชื่อมลดลงตามไปด้วย แต่คุณภาพน้ำเชื่อมยังคงเดิมเป็น 59.98 บริกซ์ จะเห็นได้ว่า ค่าความต้านทานตะกอนที่สะสมขึ้นในหม้อต้มแต่ละตัวแต่ละชุดจะแปรผกผันกับอัตราการป้อนเข้าน้ำอ้อยรวม ซึ่งเมื่อมีการวิเคราะห์การสะสมตะกอนในแต่ละหม้อต้มระยะเหี่ย ดังแสดงในภาพที่ 7(ข) พบว่า มีแนวโน้มการสะสมตะกอนไปในทำนองเดียวกันกับกรณีการป้อนน้ำอ้อยเข้าที่หม้อต้มชุด B เป็น 0.6 และ 0.65 ที่อัตราการป้อนน้ำอ้อยรวมคงตัว 532.82 ตันต่อชั่วโมง แต่ปริมาณตะกอนที่เพิ่มขึ้นมากจะมีผลต่อขั้นตอนการล้างตะกอนที่ต้องลงทุนมากขึ้น จากการประเมินครั้งนี้ เพื่อให้ได้มาซึ่งน้ำเชื่อมคุณภาพตามเป้าหมายโดยมีการใช้ไอน้ำในปริมาณที่น้อยลงไม่ส่งผลต่อขั้นตอนการล้างตะกอนมาก จึงควรเป็น  $x = 0.65$  และ อัตราการป้อนน้ำอ้อยรวมเป็น 520-525 ตันต่อชั่วโมง



ภาพที่ 8 อัตราการใช้ไอน้ำของหม้อ PE ตลอดช่วงฤดูหีบ (ก) และ อัตราการใช้ไอน้ำของหม้อต้มระยะเหี่ยชุด A และ ชุด B ในช่วงการต้มระยะเหี่ยน้ำตาลก่อนการความสะอาดตะกอน (15วัน/รอบการล้างตะกอน) (ข)

**ความคุ้มค่าพลังงานและเศรษฐศาสตร์การใช้ไอน้ำ** จากการประเมินราคาของพลังงานไอน้ำที่ผลิตสำหรับใช้ในกระบวนการต้มระยะเหี่ยน้ำตาล ด้วยการใช้เทอร์โบไอน้ำแบบ Non-Condensing (Back-Pressure) Steam Turbine ไม่มีเครื่องควบแน่นและหอระเหยความร้อน พบว่า ราคาต้นทุนการผลิตไอน้ำมีค่าประมาณ 463.56 บาทต่อตันไอน้ำ ดังนั้นจึงได้ทำการเปรียบเทียบปริมาณการใช้ไอน้ำในแต่ละกรณีการต้มระยะเหี่ยน้ำตาลโดยเมื่อพิจารณาการใช้ไอน้ำสำหรับการต้มอุ่นน้ำอ้อยเริ่มต้นที่หม้ออุ่น (PE) ในแต่ละวันตลอดช่วงฤดูหีบ จะมีความสัมพันธ์ดังแสดงในภาพที่ 8(ก) และความสัมพันธ์ที่ระบุในตารางที่ 1 ซึ่งในปัจจุบันได้มีใช้สัดส่วนการป้อนน้ำอ้อยเข้าที่หม้อต้มชุด BE เป็น 0.6 จะทำให้ประเมินเปอร์เซ็นต์การใช้ไอน้ำมีค่าคงตัวเป็น 69.15% 11.30% และ 19.55% สำหรับหม้ออุ่น PE หม้อต้มชุด AE และหม้อต้มชุด BE ตามลำดับ ดังนั้นสามารถแสดงความสัมพันธ์อัตราการการใช้ไอน้ำของหม้อต้มระยะเหี่ยชุด A และ ชุด B สำหรับแต่ละรอบการต้มระยะเหี่ย (ปัจจุบัน 15 วันต่อรอบการล้างตะกอน) ดังแสดงในภาพที่ 8(ข) ) และความสัมพันธ์ที่ระบุในตารางที่ 1 ความสัมพันธ์เหล่านี้ได้ถูกนำมาประเมินอัตราการการใช้ไอน้ำของหม้อต้มระยะเหี่ยทั้งหมด (PE, หม้อต้มระยะเหี่ยชุด A และ B) สำหรับแต่ละกรณีเมื่อมีการปรับลดน้ำอ้อยป้อนเข้ากระบวนการและระยะเวลาการต้มระยะเหี่ยน้ำตาลต่อรอบการล้างตะกอนจาก 15 วัน เป็น 10 วัน ที่สัดส่วน  $x = 0.65$  ซึ่งจากที่รายงานข้างต้น เปอร์เซ็นต์การใช้ไอน้ำที่สัดส่วนนี้จะคงตัวเป็น 69%, 9.86% และ 21.14% สำหรับหม้ออุ่น PE หม้อต้มชุด AE และ หม้อต้มชุด BE ตามลำดับ ทำให้สามารถวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์การใช้ไอน้ำในแต่ละรอบการล้างตะกอนและตลอดฤดูกาลหีบอ้อย 5 เดือน พบว่า เมื่อมีการใช้สัดส่วน  $x = 0.65$  แต่ยังคงอัตราการป้อนน้ำอ้อยรวมเท่าเดิมคือ 532.82 ตันต่อชั่วโมง จะทำให้ค่าใช้จ่ายไอน้ำสูงขึ้นเมื่อเทียบกับการใช้งานในปัจจุบัน แต่หากใช้อัตราการป้อนน้ำอ้อยลดลงที่ 520 และ 525 ตันต่อชั่วโมง จะทำให้ค่าใช้จ่ายด้านไอน้ำรวมลดลงเมื่อเทียบปัจจุบัน โดยเฉพาะในกรณีที่มีการลดระยะเวลาการต้มระยะเหี่ยน้ำตาลต่อรอบการล้างตะกอนเป็น 10 วัน ค่าใช้จ่ายด้านไอน้ำที่ใช้ในกระบวนการต้มระยะเหี่ยน้ำตาลจะลดลงคิดเป็น 14.31-15.12% เทียบกับปัจจุบัน

## สรุปผลการวิจัย

ตะกอนจากการต้มระเหยน้ำอ้อยที่สะสมบนผิวท่อน้ำอ้อยประกอบไปด้วยธาตุหลักที่เป็น O, C, Ca และ Na มีองค์ประกอบส่วนน้อยเป็น P, Fe, Mn และ K มีโครงสร้างผลึกที่เป็น แคลเซียมออกซาลเลต และแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรต โดยมีไฮดรอกซีอะพาไทต์ ปะปนด้วยเล็กน้อย ที่อัตราการป้อนน้ำอ้อยรวมปัจจุบันคือ 532.82 ตันต่อชั่วโมง จะเกิดการสะสมตัวของตะกอนในหม้อต้มระเหย PE ตลอดฤดูหีบส่งผลให้ความต้านทานตะกอนสูงถึง  $73.26 \text{ m}^2\text{C/kW}$  มีอัตราการใช้น้ำรวมทั้งกระบวนการต้มระเหยเป็น 0.3864 ตันไอน้ำต่อตันน้ำอ้อยป้อนทั้งหมด เมื่อพิจารณาการปรับค่า  $x$  สูงขึ้น โดยที่ยังใช้น้ำคุณภาพคงที่และคงไว้ซึ่งคุณภาพของน้ำเชื่อม จะทำให้มีการใช้น้ำในปริมาณน้อยลงสำหรับหม้อต้มระเหยชุด A เกิดการถ่ายเทความร้อนน้อยขึ้น มีความต้านทานตะกอนเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งมีแนวโน้มตรงกันข้ามกับการสะสมตะกอนในหม้อต้มระเหยชุด B โดยการใช้ไอน้ำในการต้มระเหยในหม้อต้ม PE หม้อต้มชุด A และหม้อต้มชุด B ที่ค่า  $x=0.6$  เป็น 69.15% 11.30% และ 19.55% ตามลำดับ ค่าที่เหมาะสมกับการควบคุมกระบวนการต้มระเหยน้ำอ้อยในกรณีศึกษาครั้งนี้ คือ ค่า  $x=0.65$  และ อัตราการป้อนน้ำอ้อยรวมที่ 520-525 ตันต่อชั่วโมง มีการใช้น้ำในการต้มระเหยสำหรับหม้อต้ม PE หม้อต้มชุด A และหม้อต้มชุด B เป็น 69% 9.86% และ 21.14% ตามลำดับ เป็นการใช้น้ำคุณภาพเดิมมีความคุ้มค่ามากที่สุด ไม่กระทบต่อขั้นตอนการล้างตะกอนอย่างมีนัยสำคัญ จากการประเมินราคาค้นทุนการผลิตไอน้ำมีค่าประมาณ 463.56 บาทต่อตันพบว่า ค่าใช้จ่ายด้านไอน้ำรวมของกระบวนการต้มระเหยน้ำอ้อยลดลงเมื่อเทียบกับปัจจุบัน

## เอกสารอ้างอิง

1. Hugot E. Handbook of Cane Sugar Engineering. Vol. 3., Elsevier B.V.; 1986.
2. Doherty W. Chemical cleaning of sugar mill evaporator. Proc Aust Soc Sugar Cane Technol. 2000;22:341–346.
3. Poel PW van der, Schiweck H, Schwartz TK. Beet Sugar Development Foundation (Fort Collins C. Sugar technology: beet and cane sugar manufacture. Berlin: Verlag Dr Albert Bartens KG; 1998.
4. Honig P. Principles of Sugar Technology. Principles of Sugar Technology. Amsterdam [etc.]: Elsevier Publishing Company; 2016.
5. Rein P. Cane Sugar Engineering. Berlin, Germany; 2007.
6. Peel D, Wheeldon P, Virdee GS. Estimation and Control of Fouling in Heat Exchangers. IFAC Proc Vol. 2017;28(5):311–315.
7. Walford S, Walthew D. Preliminary Model for Oxalate Formation in Evaporator Scale. Proc South African Sugar Technol Assoc. 1996;70.
8. East CP, Doherty W, Fellows CM, Yu H. Characterization of sugar juice heat exchanger tube deposit. Surf Interface Anal. 2011 Sep;43(9):1231–1239.
9. Rackemann DW, Doherty W. Development of descriptor tools for the characterization of Australian sugar mill evaporator scale. 2015;
10. Srivastava D, Mohanty B, Bhargava R. Characterization of evaporator scale of Indian sugar industry. Appl Therm Eng [Internet]. 2016;98:894–899.
11. Kahsay A, Gabbiye N. Characterization and Effects of Scale Formation on Heat Transfer System of Multiple-Effect Evaporator Units in Cane Sugar Industry. J Chem Eng Process Technol. 2015;06(05).