

การพัฒนาแบบจำลองสำหรับการออกแบบระบบหม้ออุ่นและหม้อต้มโรงงานน้ำตาล

Development of Model for Designing of Evaporator and Heater System of Sugar Processing

บันเทิง สีสุตทอง¹, สมหมาย ปรีเปรม² และ ชนกนันท์ สุขกำเนิด³

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40002

ติดต่อ: โทรศัพท์: 043-202845 ต่อ 125, โทรสาร: 043-202849

E-mail: ¹nineded@hotmail.com ²sompri@kku.ac.th and ³chasoo@kku.ac.th

บทคัดย่อ

ในกระบวนการผลิตน้ำตาลจะใช้พลังงานความร้อนระเหยน้ำออกจากน้ำอ้อยเพื่อให้ค่าบrix (Brix) ของน้ำอ้อยสูงขึ้นโดยใช้ไอเสีย (exhaust steam) จากกังหันไอน้ำและไอน้ำแรงดันสูง (live steam) บางส่วนจากหม้อไอน้ำเป็นแหล่งให้พลังงานความร้อน บทความนี้จะนำเสนอการพัฒนาแบบจำลองสมดุลมวลและสมดุลพลังงานของระบบของหม้ออุ่นและหม้อต้มในโรงงานน้ำตาลที่ทำงานร่วมกัน โดยใช้ไอหัวหม้อจากหม้อต้มและคอนเดนเสทเป็นตัวให้ความร้อนกับหม้ออุ่นเพื่อใช้ประเมินความต้องการใช้ไอเสียในหม้อต้ม เมื่อต้องการเพิ่มกำลังการหีบอ้อย โดยใช้ต้นแบบจากโรงงานน้ำตาลที่ใช้หม้อต้ม 5 ผลกระทบ (5 effects) และใช้ไอหัวหม้อกับคอนเดนเสทในการอุ่นน้ำอ้อยในการพัฒนาแบบจำลอง ซึ่งจากแบบจำลองที่ได้ทำให้สามารถประเมินปริมาณไอเสียที่ต้องการใช้ในระบบหม้ออุ่นและหม้อต้มกับปริมาณไอหัวหม้อที่ได้ โดยพบว่าไอหัวหม้อที่ได้มีปริมาณมากกว่าความต้องการของหม้อต้มลำดับถัดไป จึงสามารถนำไอหัวหม้อที่เกินไปใช้อุ่นน้ำอ้อยได้ นอกจากนี้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้ในการออกแบบขนาดพื้นที่ถ่ายเทความร้อนของหม้ออุ่นและหม้อต้มที่เหมาะสมกับความต้องการของกระบวนการผลิตน้ำตาลได้อีกด้วย

คำหลัก: น้ำตาล, หม้ออุ่น, หม้อต้ม, สมดุลมวล, สมดุลพลังงาน

Abstract

In sugar processing, thermal energy is used to evaporate water from cane juice in increasing Brix of cane juice. The heat source is derived from the exhaust steam of steam turbine and live steam from boiler. This paper presents the development of the model for mass and energy balance analysis of heater and evaporator section, which the operation are coupled together. The vapor from evaporator and condensate are used as heat source for heater. The steam consumption of exhaust steam in evaporator can be predicted by the developed model. The steam consumption increases with the crushing rate. The developed model can also predict vapor and condensate from 5-effects evaporator. It was also found that the generated vapor is more than the heat consumption for heating in the next effect evaporator, which

can be used for juice heating. The heating surface of each heater and evaporator can be calculated from the developed model.

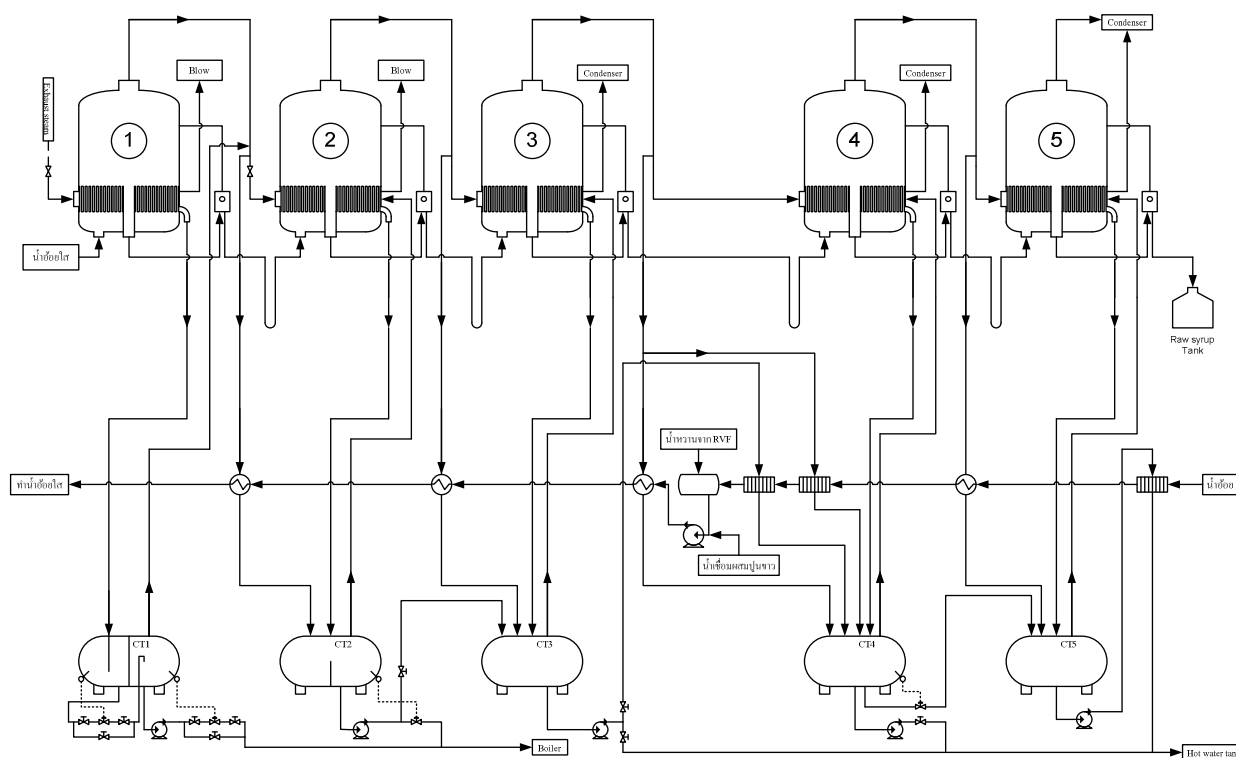
Keywords: sugar, heater, evaporator, mass balance, energy balance

1. บทนำ

การผลิตน้ำตาลในปัจจุบัน โดยทั่วไป กระบวนการพื้นฐานในการผลิตจะคล้ายคลึงกัน กล่าว คือ มีการหีบ อุ่น พักใส่ ต้ม เคี้ยว และบั่น ซึ่งในการ พัฒนาระบวนการผลิตได้มีการนำไอน้ำเสีย (Exhaust steam) ที่ผ่านกังหันไอน้ำมาเป็นแหล่ง ความร้อนในกระบวนการต้มระเหย

ในการทำงานเริ่มต้นจากการที่น้ำอ้อยผสมที่
หีบได้ จะถูกปั๊มส่งมาที่หม้ออุ่นเพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้
สูงขึ้น จาก 45 °C ไปเป็น 103 °C แล้วส่งไปที่
กระบวนการพอกไสน้ำอ้อย จะได้น้ำอ้อยใสส่งไปยัง
หม้อต้มชุดที่แรกซึ่งเป็นหม้อต้มที่ใช้ไอน้ำเสียเป็นตัว
ให้ความร้อนก่อนจะเคี่ยวให้ตกผลึกน้ำตาลต้องผ่าน
การต้มระเหยแบบหลายขั้นก่อน เพื่อให้ใช้พลังงาน
น้อยลง [1] โดยส่วนใหญ่โรงงานน้ำตาลจะใช้ระดับชั้น

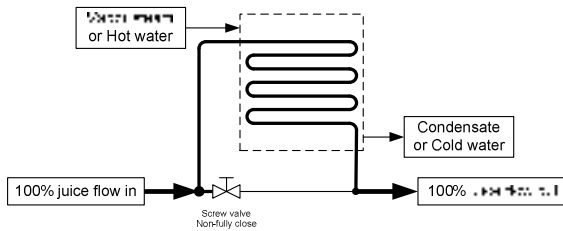
การต้ม 4 ถึง 5 ลำดับชั้น เพราะสามารถใช้ความร้อน
ได้มีประสิทธิภาพสูง [2] เมื่อน้ำในน้ำอ้อยใส่ได้รับความร้อนจะระเหยออกในสถานะไออิ่มตัว เรียกว่าไอน้ำ (Vapor steam) ซึ่งไอน้ำที่เกิดขึ้นนี้สามารถใช้เป็นแหล่งความร้อน เพื่อใช้ในชุดหม้อต้มระเหยในลำดับถัดไป และยังสามารถใช้อุ่นน้ำอ้อยผสมก่อนเข้าพักใส่ได้อีกทางหนึ่ง [3] โดยไอน้ำหม้อจะแยกนำไปใช้ในหม้ออุ่น กับหม้อต้มในลำดับถัดไป แต่ไอน้ำหม้อชุดที่ 1 จะมีการใช้ในอุปกรณ์อื่นด้วย โดยความดันในแต่ละหม้อต้มจะลดลงไปเรื่อยๆ จากปั๊มสุญญากาศที่ลดความดันที่หม้อต้มชุดสุดท้าย เพื่อควบคุมอุณหภูมิต้มระเหยให้ต่ำลง ซึ่งในการสร้างระบบหม้ออุ่นและหม้อต้มระเหยจะต้องทราบถึงปริมาณไอน้ำที่เกิดขึ้น เพื่อนำไปใช้ประเมิณพื้นที่ของหม้ออุ่นและหม้อต้มให้เหมาะสมกับกำลังการผลิต



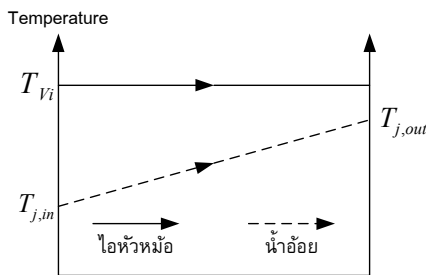
รูปที่ 1 Schematic diagram ของระบบหม้อไอน้ำและหม้อต้ม

2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหม้ออุ่น

หม้ออุ่นจะเพิ่มอุณหภูมิของน้ำอ้อยผสมให้สูงขึ้น โดยไม่เกิดการระเหยของน้ำอ้อยภายในหม้ออุ่นมวลของน้ำอ้อยผสมไหลผ่านเข้าหม้ออุ่นทั้งหมด และใช้ไอหัวหม้อเป็นแหล่งความร้อน สำหรับไอหัวหม้อชุดสุดท้ายจะไม่ใช้ในหม้ออุ่น



รูปที่ 2 Schematic diagram ของหม้ออุ่น



รูปที่ 3 การกระจายตัวของอุณหภูมิในหม้ออุ่น

ซึ่งสามารถหา อัตราการใช้ไอหัวหม้อภายในหม้ออุ่นชุดที่ i ($\dot{m}_{vhi}$) ได้จากการทำสมดุลพลังงาน

$$\sum \dot{m}h_{in} = \sum \dot{m}h_{out}$$

จะได้ว่า

$$\dot{m}_{vhi} = \frac{\dot{m}_{j,in} C_{p,j,in} (T_{j,out} - T_{j,in})}{h_{fg@T_{Vi}}} \quad (1)$$

เมื่อ $\dot{m}_{j,in}$ = อัตราการไหลของน้ำอ้อยผสม

$C_{p,j,in}$ = ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำอ้อย

ผสมเข้าหม้ออุ่น

$T_{j,out}$ = อุณหภูมิน้ำอ้อยผสมที่ออกหม้ออุ่น

$T_{j,in}$ = อุณหภูมิน้ำอ้อยผสมที่เข้าหม้ออุ่น

$h_{fg@T_{Vi}}$ = Latent heat ที่อุณหภูมิ T_{Vi}

T_{Vi} = อุณหภูมิของไอหัวหม้อลำดับ i

โดยที่ค่า $T_{j,out}$ จะประเมินได้จากสมการของ

การถ่ายโอนความร้อนภายในหม้ออุ่น

$$\dot{Q} = \dot{m}_{vhi} h_{fg@T_{Vi}} = U_{hi} A_{hi} \Delta T_m$$

$$T_{j,out} = T_{Vi} - e^{-\left(\frac{U_{hi} A_{hi}}{\dot{m}_{j,in} C_{p,j,in}}\right)} (T_{Vi} - T_{j,in}) \quad (2)$$

เมื่อ U_{hi} = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวมของหม้ออุ่นลำดับ i

A_{hi} = พื้นที่ผิวสัมผัสความร้อนรวมของหม้ออุ่นลำดับ i

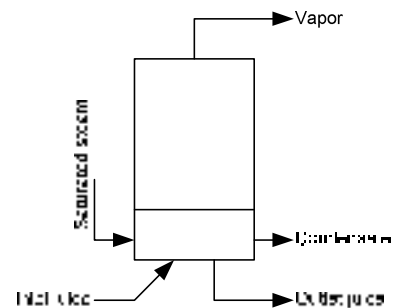
ซึ่งจากการทดลองของ Hugot [7] ได้ประเมินค่า U_{hi} ไว้ตามสมการ

$$U_{hi} = 0.7 \times 10^{-3} T_{Vi} \left(\frac{u_i}{1.8}\right)^{0.8} \quad (3)$$

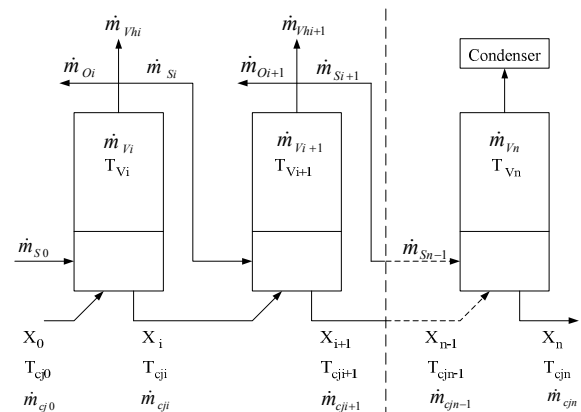
โดยให้ u_i คือความเร็วของน้ำอ้อยผสมที่ไหลภายในท่อในของหม้ออุ่นลำดับ i

3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหม้อต้ม

หม้อต้มเมื่อได้รับความร้อนจากไอน้ำเสียหรือไอหัวหม้อแล้ว จะทำให้น้ำอ้อยระเหยไอหัวหม้อขึ้นมา โดยจะสมมติให้ไอน้ำเสียที่ใช้ให้ความร้อนคายความร้อนแฝงทั้งหมดให้กับน้ำอ้อย และไอหัวหม้อที่เกิดขึ้นจากค่า Brix ที่เปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 4 Schematic diagram ของหม้อต้ม



รูปที่ 5 มวลที่เข้า/ออกจากชุดหม้อต้มชุดที่ i ถึง n

สมดุลมวลของของแข็ง

$$\dot{m}_{c,jn-1} X_{n-1} = \dot{m}_{c,jn} X_n \quad (4)$$

สมดุลมวลของน้ำอ้อย

$$\dot{m}_{c,jn-1} = \dot{m}_{c,jn} + \dot{m}_{Vn} \quad (5)$$

สมดุลของมวลไอน้ำที่แยกไปใช้งาน

$$\dot{m}_{Vi} = \dot{m}_{Oi} + \dot{m}_{Vhi} + \dot{m}_{Si} \quad (6)$$

สมดุลพลังงาน

$$\dot{m}_{Sn-1} = \frac{\sum (\dot{m}h)_{in} - \sum (\dot{m}h)_{out}}{h_{fg@T_{Vn-1}}} \quad (7)$$

เมื่อ $\dot{m}_{c,jn-1}$ = อัตราการไหลของน้ำอ้อยใสเข้าหม้อต้มชุดที่ n

$\dot{m}_{c,jn}$ = อัตราการไหลออกของน้ำอ้อยใสออกจากหม้อต้มชุดที่ n

X_{n-1} = Brix น้ำอ้อยใสเข้าหม้อต้มชุด n

X_n = Brix น้ำอ้อยใสออกหม้อต้มชุด n

$\dot{m}_{Vn}$ = อัตราเกิดไอน้ำหม้อต้มชุด n

$\dot{m}_{Oi}$ = อัตราการใช้ไอน้ำในอุปกรณ์อื่น หรือไอน้ำ

หม้อที่เหลือน้ำจากหม้อต้มชุด i

$\dot{m}_{Si}$ = อัตราการใช้ไอน้ำเพื่อให้ความร้อนแก่หม้อต้ม

ชุด i

$C_{p,c,jn-1}$ = ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำอ้อยใสที่ไหลเข้าหม้อต้ม ชุด n

$C_{p,c,jn}$ = ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำอ้อยใสที่ไหลออกหม้อต้ม ชุด n

$T_{c,jn-1}$ = อุณหภูมิของน้ำอ้อยใสเข้าหม้อต้ม n

$T_{c,jn}$ = อุณหภูมิของน้ำอ้อยใสออกหม้อต้ม n

โดยที่ $i = 1, 2, 3, \dots, n$ และ

$$T_{c,jn} = T_{Vn} + BPE \quad (8)$$

เมื่อ BPE = Boiling point elevation หาได้จาก

$$BPE = \frac{2X}{100 - X} \quad (9)$$

โดยที่ T_{Vn} หาได้จากอุณหภูมิอิ่มตัวของไอน้ำในชุดหม้อต้ม n ที่ความดัน $P_{n,abs}$ ซึ่งหาได้จากสมการความดันลดในชุดหม้อต้ม

$$\Delta P_{drop} = \frac{P_{0,abs} - P_{n,abs}}{n}$$

$$P_{n,abs} = P_{n-1,abs} - \Delta P_{drop} \quad (10)$$

สำหรับค่าความร้อนจำเพาะของน้ำอ้อยผสม และน้ำอ้อยใสสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$C_{p,j} = 4.1868 - X(0.0297 - 4.6 \times 10^{-5} P) + 7.5 \times 10^{-5} X \cdot T \quad (11)$$

โดยที่ P = ค่า Purity ของน้ำอ้อย

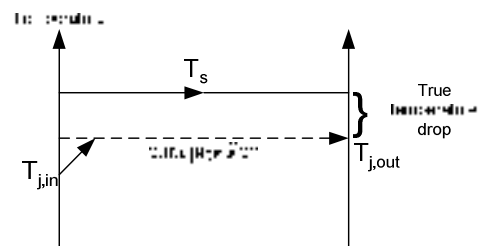
4. การคำนวณเพื่อหาขนาดของพื้นที่ของการถ่าย

โอนความร้อนรวมภายในหม้ออุ่นและหม้อต้ม

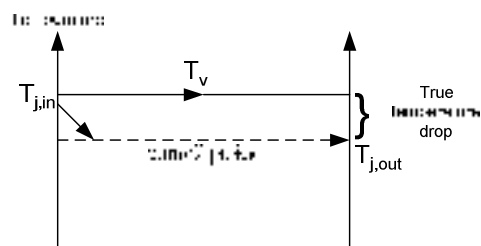
สำหรับหม้ออุ่นสามารถหาพื้นที่การถ่ายโอนความร้อนรวมได้จากการแปลงสมการที่ (2) เพื่อหาค่าพื้นที่ได้ โดยได้ว่า

$$A_{hi} = \frac{\dot{m}_j C_{p,j} \ln \left(\frac{T_{Vi} - T_{ji+1}}{T_{Vi} - T_{ji}} \right)}{U_{hi}} \quad (12)$$

แต่ในส่วนของหม้อต้มจะมีความแตกต่างจากหม้ออุ่นที่มีการระเหยของน้ำในน้ำอ้อยทำให้ การประเมินพื้นที่การถ่ายโอนความร้อนจะต้องใช้ค่า ΔT_m อีกแบบ ซึ่งการกระจายตัวของความร้อนในหม้อต้มจะเป็นตามรูปที่ 6 และ 7



รูปที่ 6 การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในหม้อต้มชุดแรก



รูปที่ 7 การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในของหม้อต้มชุดถัดไป

โดยแสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการระเหยของน้ำในน้ำอ้อยจะทำให้อุณหภูมิของน้ำอ้อยในหม้อต้มคงที่อยู่ที่ค่าหนึ่งตามความดันในหม้อต้มนั้น และเพิ่มขึ้นเมื่อค่า Brix ของน้ำอ้อยเพิ่มขึ้น จึงใช้ค่า ΔT_m เป็นผลต่างระหว่างอุณหภูมิไอที่ใช้ให้ความร้อนกับอุณหภูมิขาออกจากหม้อต้มแทน

$$\Delta T_m = T_{Sn-1} - T_{cjn} \quad (13)$$

จะได้สมการที่ใช้ในการคำนวณหาพื้นที่การถ่ายโอนความร้อนรวมของหม้อต้ม (A_{Vn}) ว่า

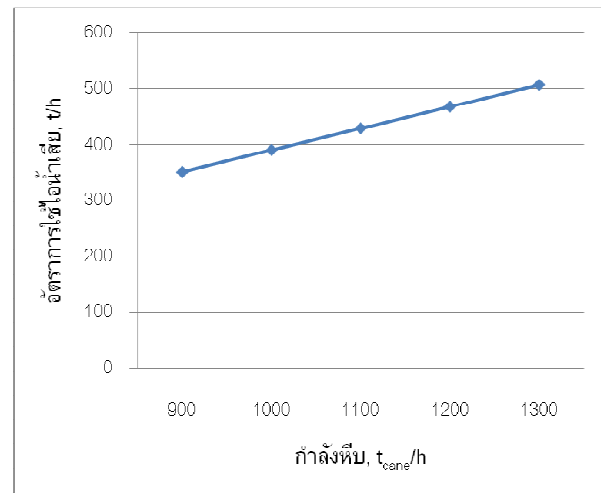
$$A_{Vn} = \frac{\dot{m}_{Sn-1} h_{fg @ T_{Vn-1}}}{U_{Vn} (T_{Sn-1} - T_{cjn})} \quad (14)$$

5. การคำนวณการเกิดไอลดด้วยแบบจำลอง

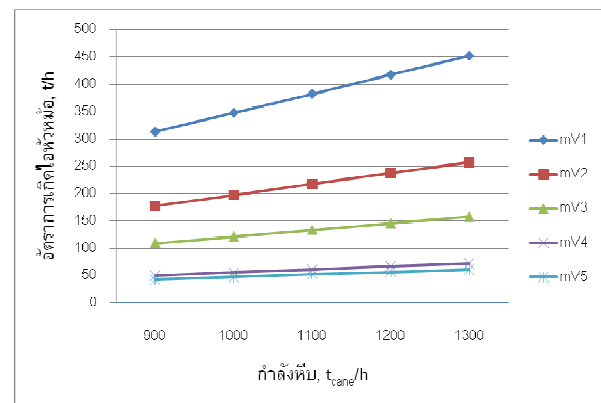
ในการคำนวณด้วยแบบจำลองจะกำหนดช่วงของค่ากำลังหีบตั้งแต่ 900 ถึง 1300 ตันอ้อยต่อชั่วโมง สำหรับค่า Brix จะกำหนดค่าที่เข้าและออกแต่ละหม้อต้มโดยใช้ค่าตัวอย่างจากโรงงานที่ช่วงกำลังหีบ 900 ตันต่อชั่วโมงคือ 15, 23, 33, 45, 54 และ 65 ตามลำดับซึ่งในตัวอย่างผลการคำนวณด้วย Excel และโปรแกรม X-Steam เพื่อช่วยหาคุณสมบัติของไอน้ำในสภาวะต่างๆ จะเห็นได้ในรูปที่ 10

6. ผลการใช้แบบจำลองเพื่อหาไอในแต่ละจุด

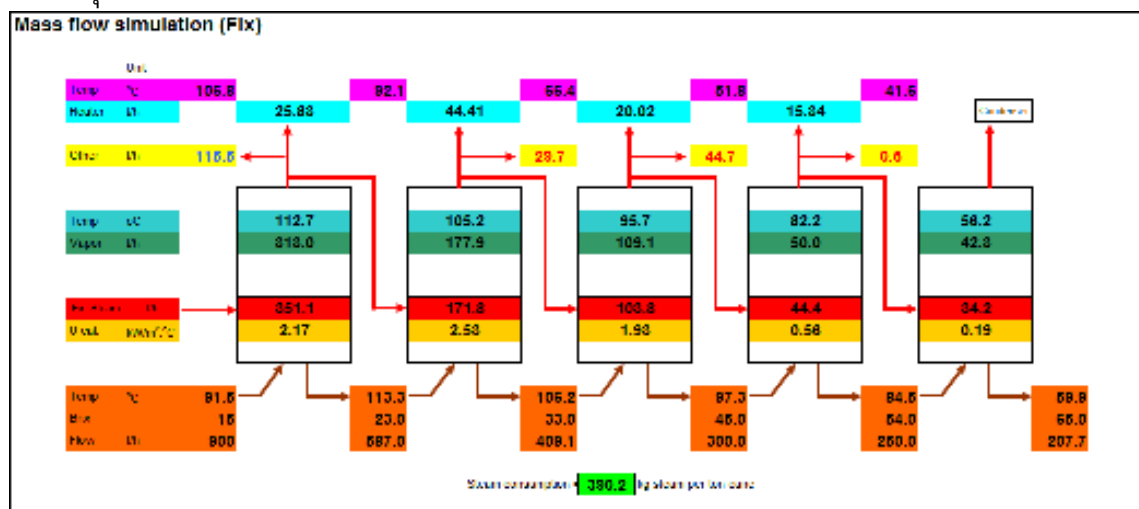
จากการปรับอัตราการไหลเข้าของน้ำอ้อยใส่ที่ไหลเข้าหม้อต้มชุดที่ 1 ในแบบจำลองเพื่อพิจารณาการใช้ไอน้ำเสีย อัตราการเกิดไอลดหัวหม้อ การใช้ไอลดหัวหม้อในหม้ออุ่น และไอลดหัวหม้อที่เหลือจากการใช้งาน



รูปที่ 8 ปริมาณไอน้ำเสียที่ต้องการใช้เพิ่มขึ้นตามกำลังหีบ

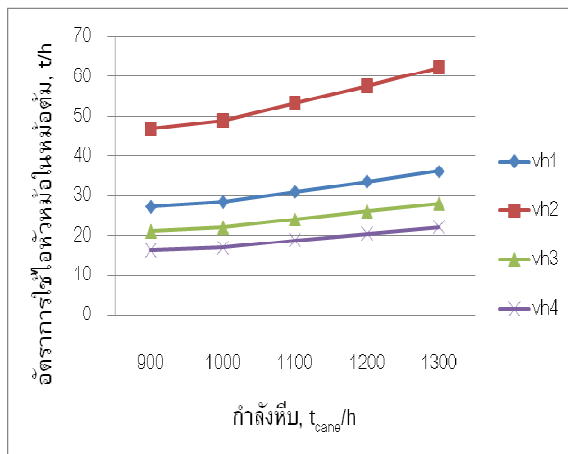


รูปที่ 9 ปริมาณไอลดหัวหม้อที่เกิดในแต่ละชุดหม้อต้มที่เปลี่ยนแปลงไปตามกำลังหีบ

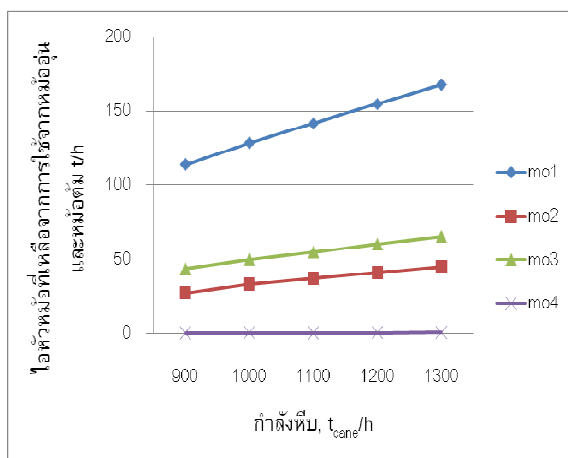


รูปที่ 10 ตัวอย่างผลการคำนวณใน Excel

จากรูปที่ 8 จะแสดงให้เห็นว่าลักษณะการเพิ่มขึ้นของไอหัวหม้อที่เกิดขึ้นจะมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง และไอหัวหม้อที่เกิดขึ้นทุกชุดจะเพิ่มขึ้นทั้งหมดตามกำลังหีบที่เพิ่มขึ้น

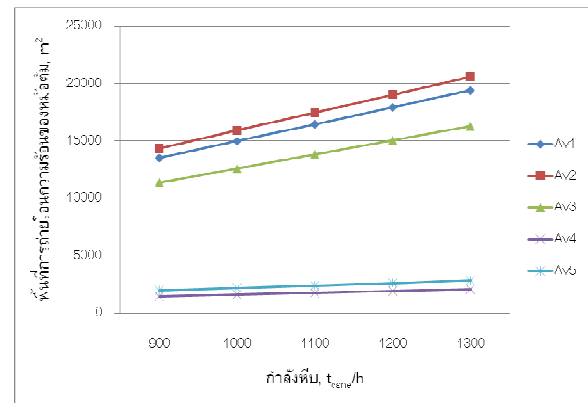


รูปที่ 11 ปริมาณการใช้ไอหัวหม้อที่หม้ออุ่นเมื่อกำลังหีบเปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 12 ปริมาณไอหัวหม้อที่เหลือใช้

โดยเมื่อนำปริมาณไอที่เกิดขึ้น และความ ต้องการปริมาณไอน้ำในแต่ละจุดแล้วจะพบว่าปริมาณไอหัวหม้อชุดที่ 1 จะมีมากที่สุดเพื่อนำไปใช้ในกระบวนการเคี้ยว ซึ่งจะเพิ่มตามกำลังหีบด้วย



รูปที่ 13 ขนาดพื้นที่ถ่ายโอนความร้อนที่เปลี่ยนแปลงไปตามกำลังหีบ

จากรูปที่ 13 เมื่อทราบถึงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนของหม้อต้มแต่ละชุดจะนำไปคำนวณในสมการที่ (14) เพื่อประเมินพื้นที่การถ่ายโอนความร้อนของหม้ออุ่นและหม้อต้มแต่ละชุดได้

6. สรุป

จากแบบจำลองที่ได้พัฒนาขึ้น ทำให้ประเมินความต้องการในการใช้ไอน้ำเสียในกระบวนการอุ่นและต้มน้ำอ้อย และปริมาณไอหัวหม้อที่เกิดขึ้นในระบบเมื่อต้องการเพิ่มกำลังหีบได้ โดยพบว่าความต้องการใช้ไอน้ำเสียเพิ่มมากขึ้นเมื่อกำลังหีบเพิ่ม และสามารถนำไปใช้คำนวณกลับเพื่อหาขนาดพื้นที่การถ่ายโอนความร้อนของหม้อต้มแต่ละชุดได้ ซึ่งพบว่าขนาดของหม้อต้มที่มีความดันใกล้เคียงกับความดันบรรยากาศและมากกว่า จะมีขนาดใหญ่เมื่อคำนวณจากแบบจำลอง เพราะมีการใช้ความร้อนเพื่อระเหยน้ำอ้อยมาก

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนควรมีการทดลองเพื่อหาค่าโดยละเอียดเพราะการต้มระเหยภายในหม้อต้ม น้ำในน้ำอ้อยจะมีการเปลี่ยนแปลงจากของเหลวกลายเป็นไอน้ำ อีกทั้งสารตัวกลางที่รับความร้อนเป็นสารผสมทำให้มีผลกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนมาก ซึ่งจะสังเกตได้จากหม้อต้มชุดหลังที่ค่า Brix สูง (ชุดหม้อต้มที่ 4 และ 5) จะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนที่ต่ำเมื่อเทียบกับ หม้อต้มชุดก่อนหน้า

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ โครงการ U-IRC สำนักงาน
พัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่ให้ทุนสนับสนุน
ในการทำวิจัย

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Grabowski, J. Kleme, K. Urbaniec, G. Vaccari, X. X. Zhu, Minimum energy consumption in sugar production by cooling crystallisation of concentrated raw juice, Applied Thermal Engineering, Volume 21, Issues 13-14, p1319-p1329, 2001
- [2] J. Raghu Ram, Rangan Banerjee, Energy and cogeneration targeting for a sugar factory, Applied Thermal Engineering, Volume 23, Issue 12, p1567-p1575, 2003
- [3] M. Higa, A.J. Freitas, A.C. Bannwart, R.J. Zemp, Thermal integration of multiple effect evaporator in sugar plant, Applied Thermal Engineering, Applied Thermal Engineering, In Press, Corrected Proof, In Press, Corrected Proof, 2008
- [4] จิระพันธ์ เนื่องจกนิล, บูรณาการระบบพลังงานความร้อนและไฟฟ้าในโรงงานน้ำตาล, มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี, 1999
- [5] S.C. Kamate, P.B. Gangavati, Exergy analysis of cogeneration power plants in sugar industries, Applied Thermal Engineering, In Press, Corrected Proof, 2008
- [6] G.H. Jenkins, Introduction to cane sugar technology, Elsevier Publishing company, 1966
- [7] E. Hugot, Handbook of Sugar Engineering, 3rd ed., Elsevier Science Publisher B.Y., 1986
- [8] Cheng Eel, Thermal analysis of a sugar mill in Taiwan, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand, 1989