

แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ของกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อย แบบหลายขั้นตอน ในกระบวนการผลิตน้ำตาล

Thermodynamics Model of Multiple Boiling and Heating in Production Sugar Process

ธีรวัฒน์ คลับคล้าย,¹ ธีระชาติ พรพิบูลย์,²

Teerawat Klaklay,¹ Teerachart Pornpibul,²

Received : 15 October 2012 ; Accepted : 10 December 2012

บทคัดย่อ

ปัจจุบันการทำนายการใช้ไอน้ำของกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยในกระบวนการผลิตน้ำตาลต้องอาศัยการวัดค่าความเข้มข้นของน้ำอ้อย(ค่าบrix)ที่หม้อต้มขั้นตอนต่างๆ และทำการวิเคราะห์การใช้ไอน้ำของระบบรวมถึงไอน้ำหม้อที่เกิดขึ้นโดยการสมดุลมวลและสมดุลพลังงาน โดยปราศจากการพิจารณาถึงความสัมพันธ์ระหว่างหม้อต้มและหม้ออุ่นในขั้นตอนต่างๆ ร่วมกัน จึงเป็นสาเหตุให้อัตราการจ่ายไอน้ำหม้อให้กับหม้อต้มและหม้ออุ่นไม่เพียงพอหรือมากเกินไปต่อความต้องการในกระบวนการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์เหล่านั้น บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ของกระบวนการต้มและอุ่นแบบหลายขั้นตอนที่มีความสัมพันธ์ร่วมกันทางเทอร์โมไดนามิกส์ เพื่อให้ทราบถึงปริมาณไอน้ำหม้อที่จ่ายไปยังหม้ออุ่นและหม้อต้มชุดถัดไปและมีความสอดคล้องต่อความต้องการที่แท้จริงของกระบวนการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์เหล่านั้น และเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าบrixที่ได้จากแบบจำลองกับค่าบrixที่ได้จากการวัด พบว่ามีแนวโน้มใกล้เคียงกัน ในส่วนที่แตกต่างกันเล็กน้อยของค่าบrixที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากความถดถอยของประสิทธิภาพของหม้อต้มหรือหม้ออุ่นที่เกิดขึ้น

คำสำคัญ: การวิเคราะห์ทางความร้อน กระบวนการผลิตน้ำตาล กระบวนการต้มระเหย

Abstract

Currently, the steam consumption of multiple effect evaporation and juice heating in the sugar production process is predicted by mass and heat balance methods from a concentration of juice (brix), which is measured from each effect of an evaporator. There is no consideration of the thermodynamic of relation of each effect causing the steam flow rate from each evaporator being insufficient or appropriate for heat transfer supplied to heater and the next evaporator. The objective of this paper is to present the thermodynamics model for finding the necessary steam consumption and the proper brix pattern of the multiple effect evaporation and juice heating considered for the thermodynamics relation of each effect. The brix pattern from simulation trends to near the brix pattern from measurement. On the other hand, there is still a part of a different brix caused by the efficiency reduction of the evaporator or the heater.

Keywords: Thermal processing, Production sugar process, Evaporation process

¹ นิสิตปริญญาโท, ² อาจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

¹ Master degree student, ² Lecturer, School of mechanical engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Meuang District, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand.

บทนำ

ปัจจุบันได้มีการศึกษาวิจัยและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหม้อต้มระเหยแบบหลายขั้นตอนและหม้ออุ่นร่วมในกระบวนการผลิตน้ำตาล ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ทำนายปริมาณการใช้ไอน้ำ และปริมาณไอหัวหม้อของระบบหม้อต้มระเหยที่เกิดขึ้น โดยใช้ค่าปริมาตรจากการวัด^{1,2,3} เพียงแต่ขาดการพิจารณาถึงความสัมพันธ์ของหม้อต้มและหม้ออุ่นร่วมกันทั้งระบบ ซึ่งในบางกรณีพบว่าอัตราการจ่ายไอหัวหม้อของหม้อต้มไม่เพียงพอหรือมากเกินไปต่อความต้องการของหม้ออุ่นและหม้อต้มชุดถัดไป จากวิธีการดังกล่าวเป็นการทำนายเพื่อหาปริมาณการใช้ไอน้ำของระบบจริง ซึ่งมีความหมายเป็นนัยว่า ผลเฉลยนั้นได้รับผลกระทบจากการชดเชยพลังงานส่วนหนึ่งให้กับอิทธิพลของประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของหม้อต้มที่มีความถดถอยจากการใช้งานมาเป็นระยะเวลาหนึ่งด้วย ซึ่งส่งผลต่อค่าปริมาตรของน้ำเชื่อมที่หม้อต้มในแต่ละขั้นตอนที่ได้ทำการวัด ดังนั้นบทความนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ของกระบวนการต้มและอุ่นทั้งกระบวนการโดยพิจารณาความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระของหม้อต้มแต่ละขั้นตอนร่วมกันโดยไม่คิดการชดเชยพลังงานส่วนหนึ่งให้กับหม้อต้มและหม้ออุ่นที่ประสิทธิภาพมีความถดถอยลง และแสดงการเปรียบเทียบค่าปริมาตร และปริมาณการใช้ไอน้ำที่ได้จากแบบจำลองกับกระบวนการต้มระเหยจริง โดยจะใช้ข้อมูลจริงจากโรงงานตัวอย่าง 3 โรงงานใช้เป็นตัวแปรควบคุมในการวิเคราะห์ผลเฉลยจากแบบจำลอง

วิธีการศึกษา

1. การจำลองอุปกรณ์ทางความร้อนของหม้ออุ่น

จากการสมดุลพลังงานภายใต้สมมุติฐานกระบวนการจะไม่มีพลังงานถ่ายเทระหว่างระบบกับสิ่งแวดล้อมและกระบวนการอยู่ในสภาวะคงตัว (Steady state) ของหม้ออุ่นดัง Figure 1 ดังนั้น $\sum E_{in} = \sum E_{out}$ จะได้

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

ค่าความจุความร้อนน้ำอ้อย⁴

$$c_p = (1 - 0.006B) \times 4.1866 \quad (\text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}) \quad (2)$$

โดยที่

$$c_p = (1 - 0.006B) \times 4.1866 \quad (\text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}) \quad (2)$$

โดยที่

$\dot{m}_{vn}$ แทน อัตราการไหลของไอหัวหม้อที่หม้อต้ม

ระเหยขั้นตอน n ที่แยกไหลเข้าสู่หม้ออุ่น (kg/s)

$\dot{m}_{j,in}$ แทน อัตราการไหลของน้ำอ้อยเข้าสู่หม้ออุ่นซึ่งมี

ค่าเท่ากับอัตราการไหลน้ำอ้อยขาออก (kg/s)

$T_{j,in}$ แทน อุณหภูมิน้ำอ้อยขาเข้าหม้ออุ่น ($^\circ\text{C}$)

$T_{j,out}$ แทน อุณหภูมิน้ำอ้อยขาออกหม้ออุ่น ($^\circ\text{C}$)

T_{vn} แทน อุณหภูมิไอหัวหม้อที่เกิดขึ้นของหม้อต้ม

ระเหยขั้นตอน n ($^\circ\text{C}$)

$h_{fg@T_{vn}}$ แทน ความร้อนแฝงในการเปลี่ยนสถานะของ

ไอหัวหม้อที่เข้าหม้ออุ่นที่อุณหภูมิ T_{vn} (kJ/kg)

B แทน ค่าปริมาตรของน้ำอ้อย ($^\circ\text{Brix}$)

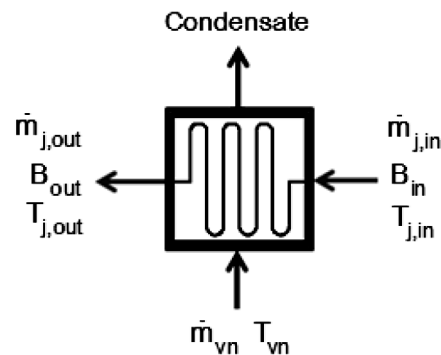


Figure 1 Juice and steam direction at the heater

2. การจำลองอุปกรณ์ทางความร้อนของหม้อต้ม

จากการสมดุลมวลและสมดุลพลังงานของหม้อต้มดัง Figure 2 จะได้

$$\dot{m}_{j,in} B_{in} = \dot{m}_{j,out} B_{out} \quad (3)$$

สมดุลมวลน้ำอ้อย(น้ำเชื่อม)

$$\dot{w}_n = \dot{m}_{j,in} - \dot{m}_{j,out} \quad (4)$$

สมดุลมวลทางแยกไหลของไอหัวหม้อ

$$\dot{F}_n = \dot{w}_n - \dot{m}_{vn} - \dot{m}_{vacuumpan} \quad (5)$$

*ในกรณีที่มีการส่งจ่ายไอหัวหม้อไปยังหม้อเดี่ยว

สมดุลพลังงาน

จากสมดุลพลังงานภายใต้สมมุติฐานกระบวนการจะไม่มีพลังงานถ่ายเทระหว่างระบบและสิ่งแวดล้อมและกระบวนการอยู่ในสภาวะคงตัว (Steady state)

ดังนั้น $\sum E_{in} = \sum E_{out}$ จะได้

$$\dot{m}_{s,in} = \frac{\dot{w}_n h_{g@T_{vn}} + \dot{m}_{j,out} c_{p,out} T_{j,out} - \dot{m}_{j,in} c_{p,in} T_{j,in}}{h_{fg@T_{s,in}}} \quad (6)$$

ค่าความจุความร้อนน้ำอ้อย⁴

$$c_p = (1 - 0.006B) \times 4.1866 \quad (\text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}) \quad (2)$$

โดยที่

$\dot{m}_{s,in}$ แทน อัตราการไหลของไอน้ำจากกังหันไอน้ำที่เข้าหม้อต้มระเหย (kg/s)

$\dot{m}_{j,in}$ แทน อัตราการไหลของน้ำอ้อย(น้ำเชื่อม)ที่เข้าหม้อต้มระเหย (kg/s)

$\dot{m}_{j,out}$ แทน อัตราการไหลของน้ำอ้อย(น้ำเชื่อม)ที่ออกหม้อต้มระเหย (kg/s)

$\dot{w}_n$ แทน อัตราการไหลของไอหัวหม้อที่เกิดขึ้นในหม้อต้มระเหยขั้นตอนที่ n (kg/s)

B_{in} แทน ค่าบrixซ์ของน้ำอ้อยที่เข้าหม้อต้ม (°Brix)

B_{out} แทน ค่าบrixซ์ของน้ำอ้อย(น้ำเชื่อม)ที่ออกจากหม้อต้มระเหย (°Brix)

$\dot{F}_n$ แทน อัตราการไหลของไอหัวหม้อขั้นตอนที่ n แยกไหลไปสู่หม้อต้มระเหยชุดถัดไป (kg/s)

$h_{g@T_{vn}}$ แทน เอนทาลปีของไอหัวหม้อที่อุณหภูมิไอน้ำอ้อมตัวของหม้อต้มระเหยขั้นตอนที่ n (kJ/kg)

$h_{fg@T_{s,in}}$ แทน ความร้อนแฝงของการเปลี่ยนสถานะของไอน้ำจากกังหันไอน้ำที่อุณหภูมิ $T_{s,in}$ (kJ/kg)

$T_{s,in}$ แทน อุณหภูมิไอน้ำอ้อมตัวจากกังหันไอน้ำที่ความดันสมบูรณ์ประมาณ 2 บาร์ (°C)

$T_{j,in}$ แทน อุณหภูมิน้ำอ้อยขาเข้าหม้อต้ม (°C)

$T_{j,out}$ แทน อุณหภูมิน้ำอ้อยขาออกหม้อต้ม (°C)

$$T_{j,out} = T_{vn} + \text{BPE} \quad (7)$$

BPE แทน ระดับจุดเดือดที่เพิ่มขึ้น (°C)

BPE หาได้จากการทดลองของ Thieme⁴ ดังนี้

$$\text{BPE} = \frac{2B_{out}}{100 - B_{out}} \quad (8)$$

T_{vn} แทน อุณหภูมิไอน้ำอ้อมตัวที่ความดันสมบูรณ์ของหม้อต้มระเหยขั้นตอน n (°C)

P_{abs} แทน ความดันสมบูรณ์ของหม้อต้มระเหยจะมีลักษณะที่ลดหลั่นลงไปตามพฤติกรรมที่ได้จากการประมาณค่า⁴ ดัง Table 1

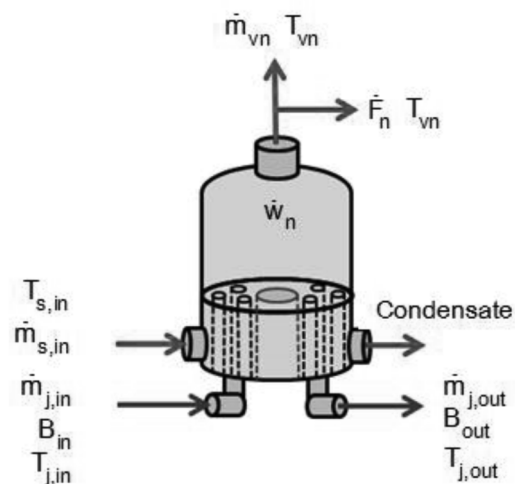


Figure 2 Juice and steam direction at the evaporator

Table 1 Distribution of pressure drop between vessels

Distribution of pressure drop between vessels for multiple effect evaporation	
3 Effect	$\frac{11}{30} + \frac{10}{30} + \frac{9}{30}$
4 Effect	$\frac{11}{40} + \frac{10.3}{40} + \frac{9.7}{40} + \frac{9}{40}$
5 Effect	$\frac{11}{50} + \frac{10.5}{50} + \frac{10}{50} + \frac{9.5}{50} + \frac{9}{50}$

3. การสร้างแบบจำลอง

3.1 การกำหนดตัวแปรควบคุมในกระบวนการผลิต

$\dot{m}_{j,in}$ แทน อัตราการไหลของน้ำอ้อยเข้าสู่หม้ออุ่นซึ่งมีค่าเท่ากับอัตราการไหลน้ำอ้อยขาออก (kg/s)

T_n แทน อุณหภูมิน้ำอ้อยเข้า-ออกที่หม้ออุ่น (°C)

$\dot{m}_{\text{vacuumpan}}$ แทน อัตราการไหลของไอหัวหม้อที่จ่ายไปยังหม้อเดี่ยวสุญญากาศ (kg/s)
 $T_{s,\text{in}}$ แทน อุณหภูมิไอน้ำอิ่มตัวจากกังหันไอน้ำ ($^{\circ}\text{C}$)
 $\dot{m}_{j,0}$ แทน อัตราการไหลของน้ำอ้อยเข้าสู่หม้อต้มขั้นตอนแรก (kg/s)
 B_0 แทน ค่าบrix ของน้ำอ้อยเริ่มต้นที่เข้าสู่หม้อต้มขั้นตอนแรก ($^{\circ}\text{Brix}$)
 $T_{j,0}$ แทน อุณหภูมิ น้ำอ้อยเข้าสู่หม้อต้มขั้นตอนแรก ($^{\circ}\text{C}$)
 B_5 แทน ค่าบrix ของน้ำอ้อยสุดท้ายที่ออกจากหม้อต้มขั้นตอนสุดท้าย ($^{\circ}\text{Brix}$)

$\dot{m}_{\text{vn}}$ แทน อัตราการไหลของไอหัวหม้อที่หม้อต้มระเหยขั้นตอนใด ๆ ที่แยกไหลเข้าสู่หม้ออุ่น (kg/s)
 P_{abs} แทน ความดันสัมบูรณ์ของหม้อต้มระเหยแต่ละขั้นตอน (kPa)

3.2 ตัวแปรอิสระในการวิเคราะห์มีดังนี้

$\dot{F}_n$ แทน อัตราการไหลไอหัวหม้อขั้นตอนที่ n ที่แยกไหลไปสู่ม้อต้มระเหยชุดถัดไป (kg/s)
 B_n แทน ค่าบrix ของน้ำอ้อยที่หม้อต้มระหว่างหม้อต้มขั้นตอนแรกและหม้อต้มขั้นตอนสุดท้าย ($^{\circ}\text{Brix}$)
 $\dot{m}_{s,\text{in}}$ แทน อัตราการไหลของไอน้ำจากกังหันไอน้ำที่เข้าสู่หม้อต้มระเหย (kg/s)

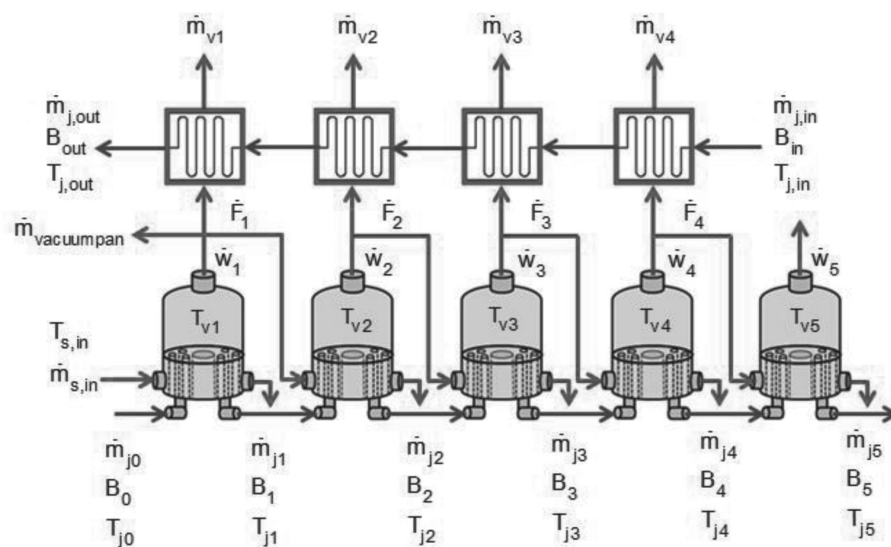


Figure 3 Juice direction, steam direction, and variable position of heating and evaporation process

3.3 สมดุลพลังงานที่หม้ออุ่น

คำนวณปริมาณการใช้ไอหัวหม้อของหม้ออุ่นแต่ละขั้นตอน ($\dot{m}_{\text{vn}}$) ที่ใช้ในกระบวนการอุ่นน้ำอ้อยได้จากสมการที่ (1) และใช้ข้อมูลใน Table 4 จะได้ผลลัพธ์ออกมาดังแสดงใน Table 2

3.4 สมดุลมวล และพลังงานที่หม้อต้มระเหย

เพื่อต้องการเชื่อมโยงความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระให้มีความสัมพันธ์กันในทุกๆ ขั้นตอนของหม้อต้มระเหย ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระในรูปของฟังก์ชันดัง Table 3

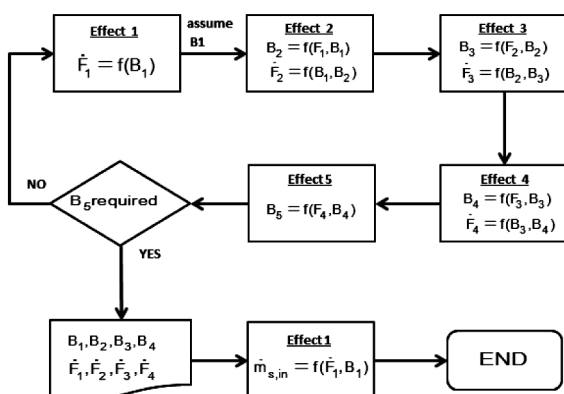
Table 2 Calculation results of the rate of vapor generated ($\dot{m}_{\text{vn}}$) at heaters by energy balance and mass balance

$\dot{m}_{\text{vn}}$	Factory 1	Factory 2	Factory 3
$\dot{m}_{v1}$	5.54	6.30	3.26
$\dot{m}_{v2}$	1.10	10.91	4.03
$\dot{m}_{v3}$	0.99	6.13	5.71
$\dot{m}_{v4}$	7.68	4.21	3.30
$\dot{m}_{v5}$	4.60	N/A	N/A
$\dot{m}_{v6}$	3.32	N/A	N/A
$\dot{m}_{v7}$	11.15	N/A	N/A
$\dot{m}_{v8}$	5.79	N/A	N/A

Table 3 Relation of the free variable in function by energy balance and mass balance at evaporator

Effect of evaporator	Relation of free variable	Equation
1	$\dot{F}_1 = f(B_1)$	(1),(2),(3),(4),(5)
2	$B_2 = f(F_1, B_1)$	(2),(3),(4),(5), (6),(7),(8)
	$F_2 = f(B_1, B_2)$	(1),(2),(3),(4),(5)
3	$B_3 = f(F_2, B_2)$	(2),(3),(4),(5), (6),(7),(8)
	$\dot{F}_3 = f(B_2, B_3)$	(1),(2),(3),(4),(5)
4	$B_4 = f(F_3, B_3)$	(2),(3),(4),(5), (6),(7),(8)
	$\dot{F}_4 = f(B_3, B_4)$	(1),(2),(3),(4),(5)
5	$B_5 = f(F_4, B_4)$	(2),(3),(4),(5), (6),(7),(8)

3.5 การแก้ปัญหาแบบสมการที่ได้จากการสมดุลมวลและพลังงานของอุปกรณ์ทางความร้อนโดยวิธี แทนค่าลำดับ (Sequential Simulation)⁵

**Figure 4** Sequence and direction of calculation by sequential simulation

4. ข้อมูลจากการวัดของโรงงานตัวอย่าง 3 โรงงาน และเงื่อนไขการผลิตอื่นๆ

4.1 อุณหภูมิเข้า-ออกของน้ำอ้อยที่หม้อต้มซึ่งใช้เป็นตัวแปรควบคุมในการสร้างแบบจำลอง

Table 4 The inlet temperature and the outlet temperature of the juice at the heater^{1,2,3}

Juice temperature	Factory 1 (°C)	Factory 2 (°C)	Factory 3 (°C)
Inlet H/T 1	37.0	41.6	50.0
Outlet H/T 1	48.5	51.8	73.1
Inlet H/T 2	48.5	51.8	68.1
Outlet H/T 2	70.3	66.4	76.1
Inlet H/T 3	70.3	66.4	76.1
Outlet H/T 3	76.8	92.1	89.7
Inlet H/T 4	76.8	92.1	89.7
Outlet H/T 4	85.7	106.8	99.2
Inlet H/T 5	85.7	N/A	99.2
Outlet H/T 5	100.4	N/A	106.8
Inlet H/T 6	100.4	N/A	N/A
Outlet H/T 6	102.3	N/A	N/A
Inlet H/T 7	102.3	N/A	N/A
Outlet H/T 7	104.4	N/A	N/A
Inlet H/T 8	97.9	N/A	N/A
Outlet H/T 8	108.5	N/A	N/A

4.2 กำลังการผลิต ค่าปริมาตรของหม้อต้มระเหย และอุณหภูมิน้ำอ้อยที่เข้าหม้อต้ม

กำลังการผลิต ($\dot{m}_0$) ค่าปริมาตรเริ่มต้น (B_0) ค่าปริมาตรของน้ำอ้อยที่หม้อต้มระเหยขั้นตอนสุดท้าย (B_5) และอุณหภูมิน้ำอ้อยที่เข้าหม้อต้ม ($T_{j,in@evap}$) ซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้จากการวัด จะถูกใช้เป็นตัวแปรควบคุมในการสร้างแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ของกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยแบบหลายขั้นตอน ซึ่งได้แสดงดังใน Table 5

ส่วนการทำนายโดยแบบจำลองเดิมจะใช้กำลังการผลิต ($\dot{m}_0$) ค่าปริมาตรทั้งหมดในหม้อต้มระเหย ($B_0, B_1, B_2, B_3, B_4, B_5$) และอุณหภูมิน้ำอ้อยที่เข้าหม้อต้ม ($T_{j,in@evap}$) ซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้จากการวัด จะถูกใช้เป็นตัวแปรควบคุมในการสร้างแบบจำลองซึ่งได้แสดงดังใน Table 5

4.3 เงื่อนไขอื่นๆของกระบวนการผลิต

4.3.1 สภาพของไอน้ำจากกังหันไอน้ำ

ที่ใช้เป็นพลังงานความร้อนในการต้มระเหยน้ำอ้อยซึ่งจะถูกส่งผ่านเข้าหม้อต้มระเหยขั้นตอนแรกเป็นสภาวะไอน้ำอิ่มตัวที่ความดันสัมบูรณ์ 2 บาร์

4.3.2 ความดันสัมบูรณ์ที่หม้อต้มระเหย

ขั้นตอนสุดท้ายอยู่ที่ประมาณ 0.164 บาร์ ซึ่งเป็นข้อจำกัดในกระบวนการต้มระเหยที่มีผลต่อคุณภาพของน้ำเชื่อม จากข้อมูลที่ได้ในข้อที่ 4.3.1 และข้อที่ 4.3.2 ทำให้สามารถคำนวณหาความดันสัมบูรณ์ (P_{abs}) ที่เกิดขึ้นในหม้อต้มระเหยขั้นตอนอื่นๆได้โดยคำนวณจาก Table 1 และใช้ค่าความดันสัมบูรณ์ที่คำนวณได้ดังกล่าวไปคำนวณหาอุณหภูมิไอน้ำอิ่มตัวของไอน้ำหม้อ (T_{vn}) ที่เกิดขึ้นของหม้อต้มขั้นตอนต่างๆ ซึ่งน้ำอ้อยที่ผ่านการต้มจากหม้อต้มแต่ละขั้นตอนจะมีความเข้มข้นมากขึ้นเสมอ (ค่าบrixเพิ่มขึ้น) เนื่องจากมีการระเหยของน้ำในน้ำอ้อยบางส่วนออกไปเป็นไอน้ำหม้อทุก ๆ การต้มในหม้อต้มระเหยแต่ละขั้นตอน

Table 5 Production rate, the brix and the juice inlet temperature for each evaporator ^{1,2,3}

ข้อมูล	โรงงาน 1	โรงงาน 2	โรงงาน 3
$\dot{m}_0$ (kg/s)	302.40	250.00	250.00
B_0 (°Brix)	13.90	15.00	15.00
B_1 (°Brix)	21.89	23.00	22.00
B_2 (°Brix)	27.61	33.00	29.00
B_3 (°Brix)	36.47	45.00	36.00
B_4 (°Brix)	47.20	54.00	43.00
B_5 (°Brix)	62.26	65.00	65.00
$T_{j,in@evap}$	108.50	91.50	95.00

ผลการศึกษา

1. ผลเฉลยของการคำนวณโดยใช้ค่าบrixที่ได้จากการวัดของกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยแบบหลายขั้นตอนในกระบวนการผลิตน้ำตาลระบบจริงของโรงงานที่ 1

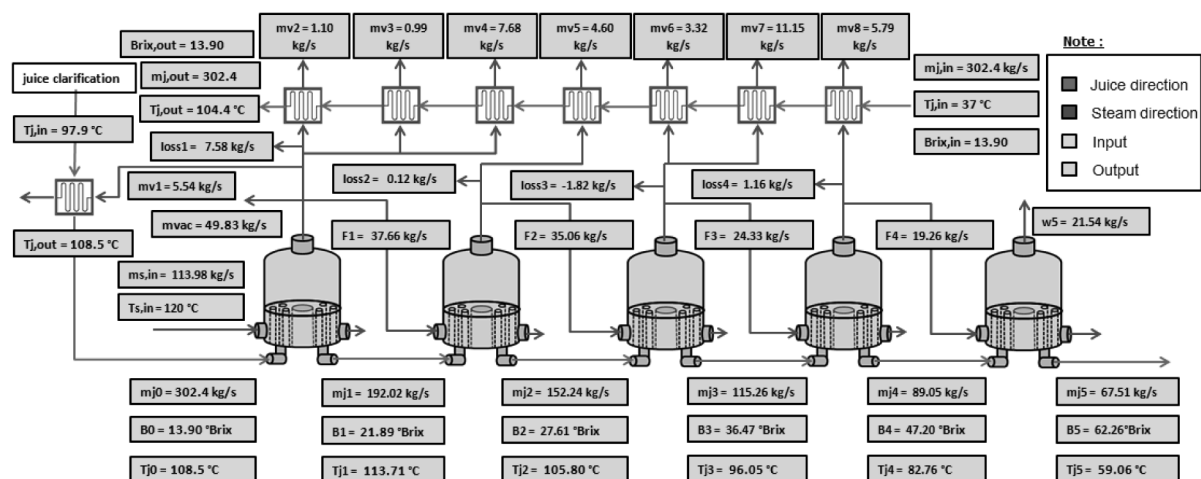


Figure 5 Calculation results from brix for measurement in case of factory 1

2. ผลเฉลยของการคำนวณโดยแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ของกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยแบบหลายขั้นตอนในกระบวนการผลิตน้ำตาลของโรงงานที่ 1

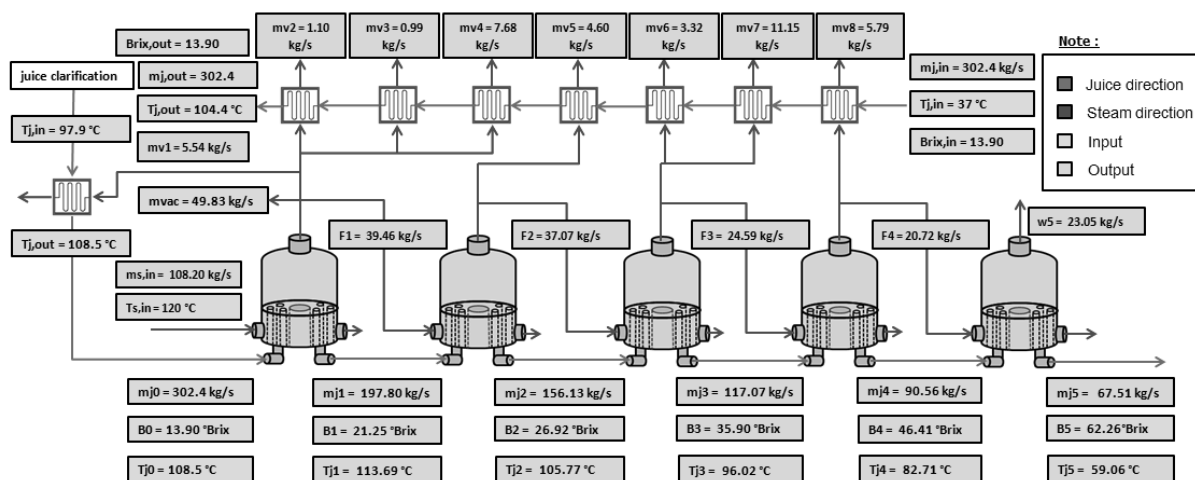


Figure 6 Calculation results by thermodynamics model in case of factory 1

3. ผลเฉลยของการคำนวณโดยใช้ค่าบริกซ์ที่ได้จากการวัดของกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยแบบหลายขั้นตอนในกระบวนการผลิตน้ำตาลระบบจริงของโรงงานที่ 2

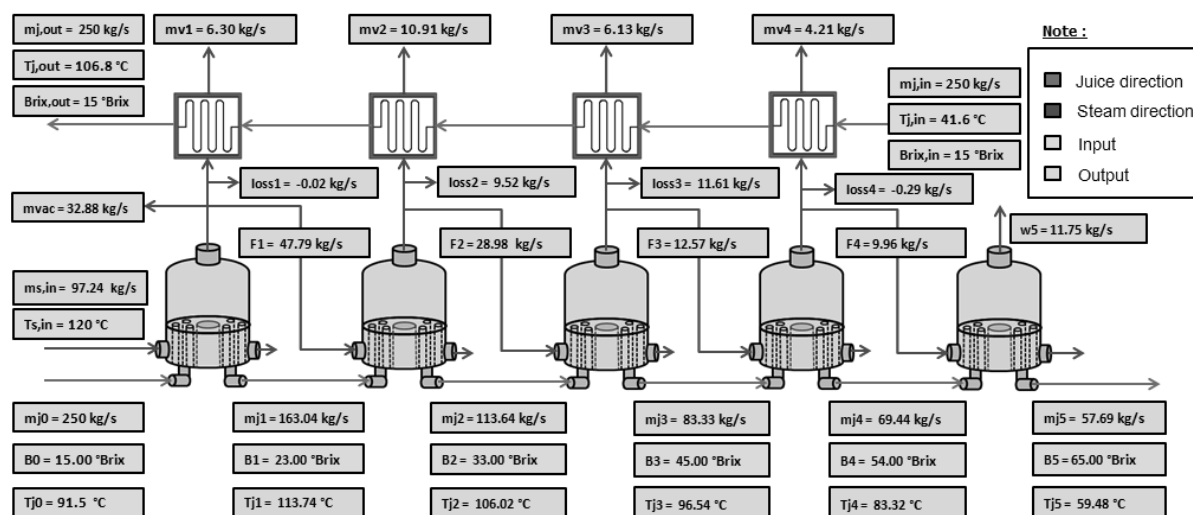


Figure 7 Calculation results from brix for measurement in case of factory 2

4. ผลเฉลยของการคำนวณโดยแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ของกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยแบบหลายขั้นตอนในกระบวนการผลิตน้ำตาลของโรงงานที่ 2

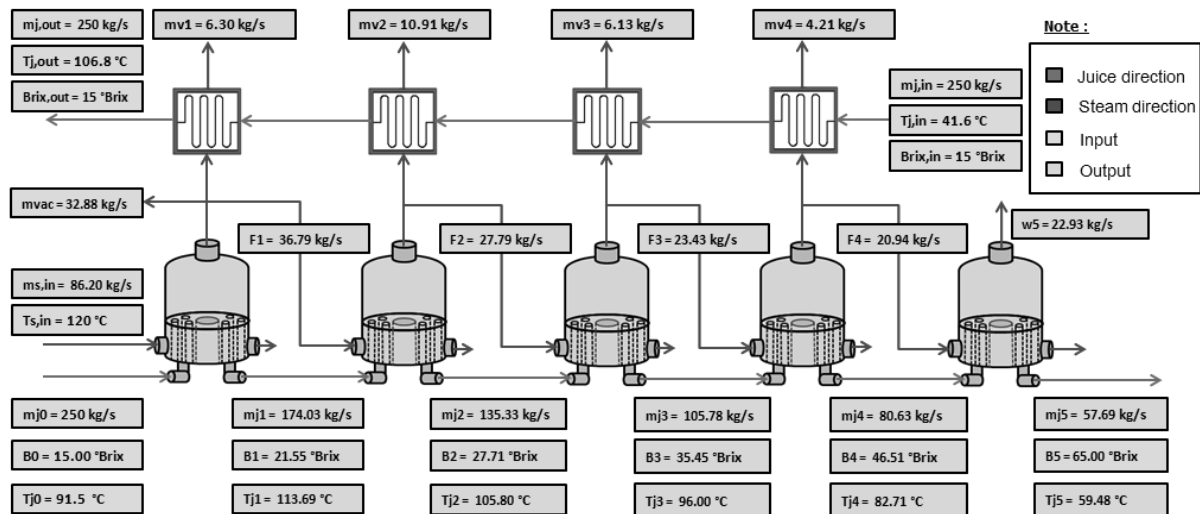


Figure 8 Calculation results by thermodynamics model in case of factory 2

5. ผลเฉลยของการคำนวณโดยใช้ค่าปริกซ์ที่ได้จากการวัดของกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยแบบหลายขั้นตอนในกระบวนการผลิตน้ำตาลระบบจริงของโรงงานที่ 3

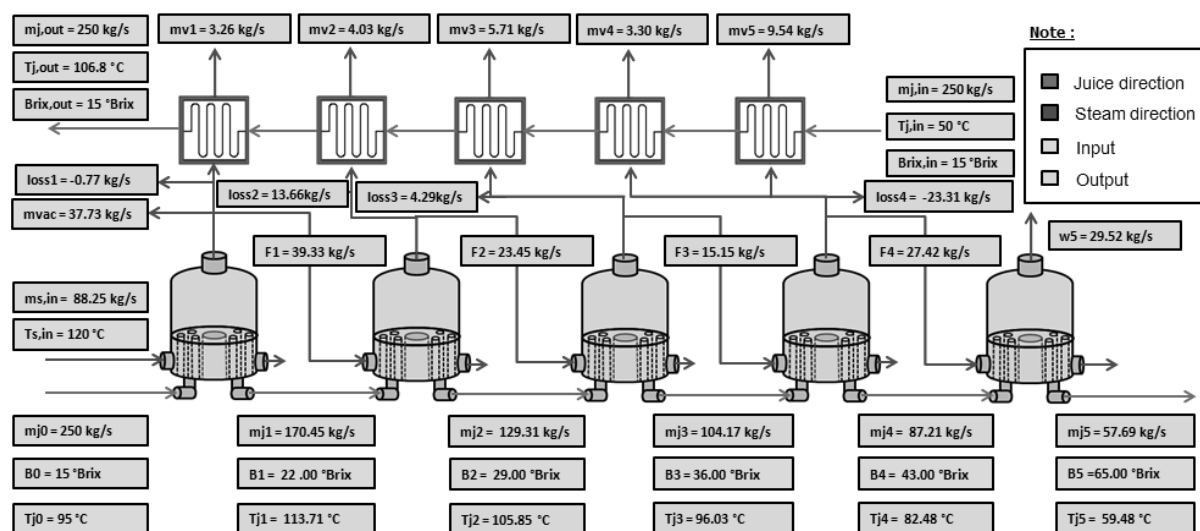


Figure 9 Calculation results from brix for measurement in case of factory 3

6. ผลเฉลยของการคำนวณโดยแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ของกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยแบบหลายขั้นตอนในกระบวนการผลิตน้ำตาลของโรงงานที่ 3

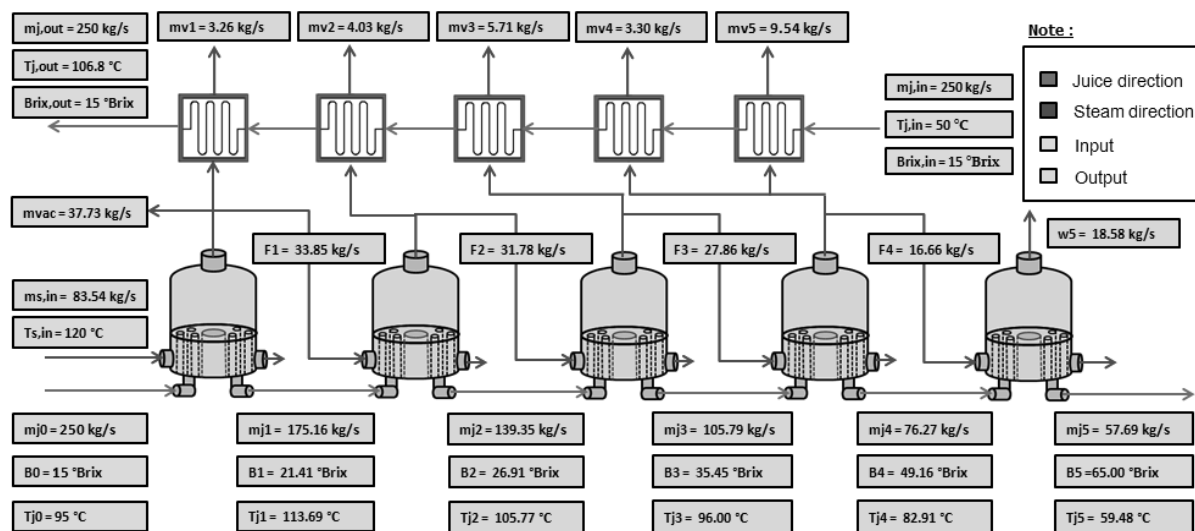


Figure 10 Calculation results by thermodynamics model in case of factory 3

วิจารณ์และสรุปผล

จาก Figure 11 และ Table 6 ซึ่งให้เห็นว่าปริมาณการใช้ไอน้ำที่คำนวณได้จากระบบจริง (โดยคำนวณจากค่าบริกซ์จากการวัด) มีค่าสูงกว่าปริมาณการใช้ไอน้ำที่คำนวณจากแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ของกระบวนการต้มระเหย และอุ่นแบบหลายขั้นตอนที่ได้สร้างขึ้นใหม่นี้ (แบบจำลอง) เล็กน้อย เนื่องจากระบบจริงนั้นจะได้รับผลกระทบจากการชดเชยพลังงานความร้อนส่วนหนึ่งให้กับอิทธิพลของประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของหม้อต้มระเหยและหม้ออุ่นที่มีความถดถอยจากการใช้งานมาเป็นระยะเวลาหนึ่งด้วย จึงทำให้ระบบมีการใช้ปริมาณไอน้ำที่สูงกว่า จาก Figure 12 ค่าบริกซ์ของน้ำเชื่อมที่คำนวณได้ที่หม้อต้มระเหยแต่ละขั้นตอนด้วยแบบจำลองของกระบวนการต้มระเหยและอุ่นมีค่าใกล้เคียงกับการวัดโดยเฉพาะที่โรงงานที่ 1 แสดงถึงความน่าเชื่อถือของแบบจำลองนี้ได้ แต่จะเห็นว่ายังมีบางจุดของค่าบริกซ์ที่ได้จากแบบจำลองต่างกับค่าบริกซ์ที่ได้จากการวัด เช่นที่โรงงานที่ 2 ค่าบริกซ์ที่ได้จากการวัดนั้นมีความสูงกว่าการทำนายด้วยแบบจำลองในทุกๆ ขั้นตอนของหม้อต้ม ทั้งนี้เป็นเพราะว่ามีการจ่ายไอน้ำเข้าหม้อต้มชุดแรกมากเกินไป จนทำให้หม้อต้มชุดแรกผลิตไอหัวหม้อที่สูงเกินความต้องการของหม้ออุ่นและหม้อต้มชุดที่ 2 และเมื่อถึงหม้อต้มขั้นตอนที่ 4 ไอหัวหม้อที่ผลิตได้กลับไม่เพียงพอต่อการจ่ายให้กับหม้ออุ่นและหม้อต้มในขั้นตอนที่ 5 สังเกตได้จาก Figure 13 โรงงานที่ 2 ขั้นตอนที่ 4 เนื่องจากประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของหม้อต้มที่ขั้นตอน 4 ลด

ลงนั่นเอง จาก Figure 12 โรงงานที่ 3 จะเห็นว่าค่าบริกซ์ของหม้อต้มขั้นตอนที่ 4 นั้นลดต่ำลงเล็กน้อยจากค่าบริกซ์ที่ได้จากแบบจำลอง เป็นเพราะประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของหม้อต้มในขั้นตอนที่ 4 และหม้ออุ่นมีความถดถอยลง จนทำให้ไอหัวหม้อที่ผลิตได้จากขั้นตอนที่ 3 ไม่เพียงพอต่อความต้องการที่จะใช้ให้หม้ออุ่นและหม้อต้มในขั้นตอนที่ 4 สังเกตได้จาก Figure 13 โรงงานที่ 3 ขั้นตอนที่ 3 และ ขั้นตอนที่ 4 จากการสร้างแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ของกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยแบบหลายขั้นตอนในกระบวนการผลิตน้ำตาลที่สร้างขึ้นใหม่นี้ สามารถใช้เป็นแนวทางที่ใช้ในการทำนายการใช้ไอน้ำได้อย่างแม่นยำ ซึ่งอยู่ภายใต้สมมุติฐานไม่มีการสูญเสียพลังงานให้กับตะกอนต่าง ๆ ที่เพิ่มขึ้นในท่อส่ง

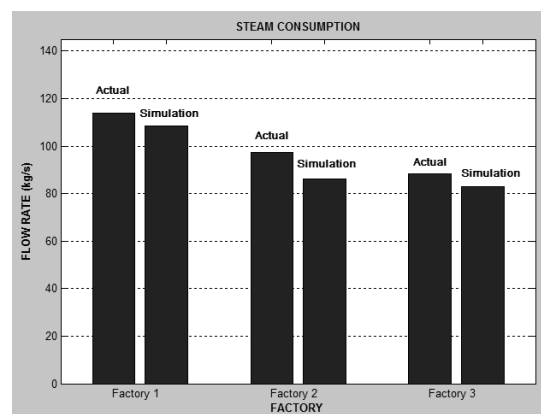


Figure 11 The steam consumption comparison measurement and simulation

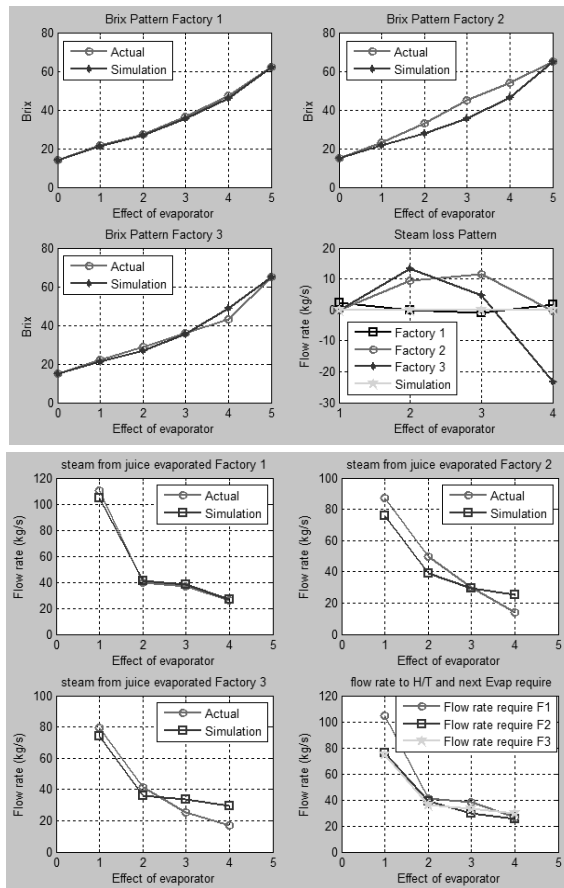


Figure 12 The brix comparison from measurement and simulation

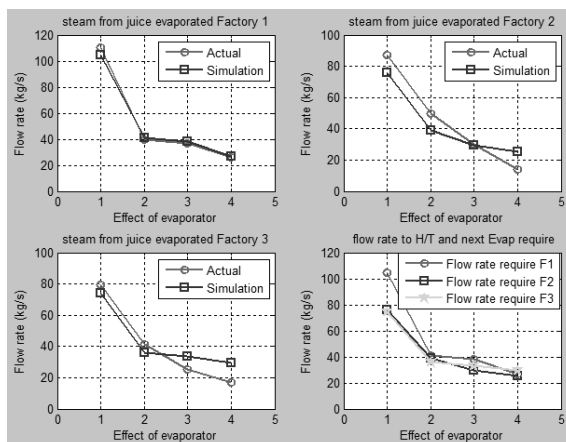


Figure 13 The vapor generated comparison from measurement and simulation

Table 6 Difference of steam consumption between measurement and simulation results by percentage

Factory	Steam consumption	Unit
Factory 1		
Actual	113.98	kg/s
Simulation	108.20	kg/s
Difference	5.07	%
Factory 2		
Actual	97.24	kg/s
Simulation	86.20	kg/s
Difference	11.35	%
Factory 3		
Actual	88.25	kg/s
Simulation	83.54	kg/s
Difference	5.34	%

ผ่านน้ำอ้อยของหม้อต้มระเหยที่ขั้นตอนต่างๆ ที่ทำให้ประสิทธิภาพมีความถดถอยลง ซึ่งจะจัดปัญหาความไม่สอดคล้องของการทำนายอัตราการเกิดไอหัวหม้อที่หม้อต้มขั้นตอนต่างๆ ไม่เพียงพอต่อหรือมากเกินไปต่อการจ่ายให้กับหม้ออุ่น และหม้อต้มระเหยในขั้นตอนถัดไปดังที่เกิดขึ้นจากการทำนายโดยใช้แบบจำลองเดิม และแบบจำลองที่สร้างขึ้นใหม่นี้ไม่จำเป็นต้องใช้ค่าปรับจากการวัดเป็นตัวแปรควบคุมในการวิเคราะห์ระบบ แต่ค่าปรับจะเป็นตัวแปรอิสระที่ได้จากการแก้ระบบสมการของแบบจำลองนี้ ซึ่งเป็นไปตามธรรมชาติของพฤติกรรมของน้ำอ้อยในกระบวนการต้มระเหย นอกจากนี้ผลเฉลยที่ได้จากแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ของกระบวนการต้มและอุ่นน้ำอ้อยแบบหลายขั้นตอนนี้ยังทำให้เห็นถึงความถดถอยของอุปกรณ์ทางความร้อนในทุกขั้นตอนเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากระบบจริง

เอกสารอ้างอิง

1. บันเทิง สีกุดทอง, สมหมาย ปรีเปรม, ชนกนันท์ สุขกำเนิด. การพัฒนาแบบจำลองสำหรับการออกแบบระบบหม้อไอน้ำและหม้อต้มโรงงานน้ำตาล. ใน: เอกสารการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23. โรงแรมอฟีเรียลแม่ปิง. เชียงใหม่; 2552. หน้า 1-7
2. ณัฐนัย มูลศิริ, ชนกนันท์ สุขกำเนิด, สมหมาย ปรีเปรม. การออกแบบหม้อไอน้ำและหม้อต้มแบบเปลือกและท่อในโรงงานน้ำตาล. ใน: เอกสารการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24. โรงแรมสุโขทัยแกรนด์. อุบลราชธานี; 2553. หน้า 1-9
3. จิระพันธ์ เนื่องจากนิล. บูรณาการระบบพลังงานความร้อนและไฟฟ้าในโรงงานน้ำตาล. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงาน. คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี; 2542.
4. Hugot E. Handbook of cane sugar engineering, 2th ed. Elsevier Publishing Company; 1972.
5. STOECKER W.F. Design of thermal systems, 3th ed. Singapore: McGraw-Hill; 1989.
6. ASHRAE. Fundamentals Handbook (SI), Thermophysical Properties Refrigerants; 2001.