

**การวิเคราะห์พารามิเตอร์และประเมินศักยภาพของระบบการนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่
จากคอนเดนเสท และแฟลชสตีม กรณีศึกษา : กระบวนการผลิตแผ่นเหล็กชุบสังกะสี
ของบริษัท กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน)**

**Parameter Analysis and Potential Evaluation of Heat Recovery System from
Condensate and Flash Steam Case Study : Galvanized Steel Plate Process of
Bangkok Steel Industry (Public) Co., Ltd.**

ธนาคม สุนทรชัยนาคแสง และ สานิตย์ จันทโร
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพฯ 10800
โทร 913-2500-24 ต่อ 8319, E-mail : tss@kmitnb.ac.th

Thanakom Soontornchainacksaeng and Sanit Jantaro
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok.
Bangkok 10800, Thailand
Tel. 913-2500-24 ext 8319

บทคัดย่อ

ระบบก่อนการปรับปรุงมีคอนเดนเสทจำนวน 1,590 kg/h ที่อุณหภูมิ 100°C (666 MJ/h) และมีปริมาณแฟลชสตีมปล่อยทิ้ง จำนวน 194 kg/h (438 MJ/h) การปรับปรุงระบบได้นำพลังงานความร้อนจากแฟลชสตีมและบางส่วน ของคอนเดนเสทกลับมาทดแทนการใช้ไอน้ำอิ่มตัวที่ 7 bar, 165°C (718 MJ/h) เพื่อใช้ล้างทำความสะอาดแผ่นเหล็ก ซึ่งการวิจัยใช้น้ำจากภายนอกมาเติมเข้าถึงคอนเดนเสท และวิเคราะห์พารามิเตอร์ โดยการจำลองระบบเพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมด้วยการสมดุลมวลและพลังงาน ผลการดำเนินการพบว่าได้คอนเดนเสทและแฟลชสตีมที่ผสมน้ำได้เป็นน้ำร้อน จำนวน 2,844 kg/h ที่ 97°C เพิ่มขึ้นจากเดิม 1,254 kg/h (510 MJ/h) ผลจากการนำความร้อนส่วนนี้กลับมาใช้สามารถทดแทนไอน้ำได้ 71% ทำให้ประหยัดเชื้อเพลิงของหม้อไอน้ำลงได้จำนวน 12.63 liter/h ผลการ

วิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ ใช้เงินลงทุนรวม 400,000 บาท มีผลตอบแทนสุทธิ 1,212,250 บาท มีระยะเวลาคืนทุน 1.65 ปี มีมูลค่าเงินปัจจุบันสุทธิ 923,755 บาท และมีอัตราผลตอบแทนการลงทุนที่มากกว่าค่าเสียโอกาสของทุน

Abstract

The system before development have condensate mass flow rate 1,590 kg/h at temperature 100°C or convert in term of energy as 666 MJ/h and flash steam mass flow rate at 194 kg/h vent to atmosphere or convert in term of energy as 438 MJ/h. The consider of development and keep energy from flash steam and some parts of condensate to give in return use the saturated steam at 7 bar, 165°C

(718 MJ/h) for clean steel plate by make up water in condensate tank and has parameter analysis through simulate the system for optimum volume of condensate and flash steam by mass and energy balance. The result shows that they can keep condensate and flash steam mixing with the make up water to hot water have the mass flow rate 2,844 kg/h, 97°C. They have more than before development system amount 1,254 kg/h (510 MJ/h) to give in return use the saturated steam and steam equivalent at 71%. A boiler can reduce the fuel consumption at 12.63 liter/h. The economics analysis result have the total investment cost about 400,000 Baht, Compensation 1,212,250 Baht, Payback period at 1.65 years, Net Present Value (NPV) amount 923,755 Baht and also the Internal Rate of Return (IRR) from investment more than the opportunity cost.

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

- b = ผลตอบแทนในปีที่ (บาท)
 c = ค่าใช้จ่ายในปีที่ (บาท)
 D = อัตราการประหยัดเชื้อเพลิง (kg/h)
 E = พลังงาน (kJ)
 FS = ปริมาณแฟลชสตีม (Flash Steam) ที่ความดันบรรยากาศ (kg)
 g = แรงโน้มถ่วงของโลก (m/s²)
 h = เอนทัลปี (Enthalpy) (kJ/kg)
 H = ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (kJ/kg)
 i = อัตราดอกเบี้ยต่อปี (%)
 IRR = อัตราผลตอบแทนการลงทุน (%)
 m = อัตราการไหลของมวล (kg/s)
 n = ระยะเวลาคืนทุน (ปี)
 NPV = มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (บาท)
 P = ความดัน (bar)
 PWF = ตัวประกอบมูลค่าเงินปัจจุบัน (Single Payment Present Worth Factor) (%)

- Q = ความร้อน (kJ/s)
 t = เวลา (s)
 T = อุณหภูมิ (°C)
 TS = ค่าใช้จ่ายในการลงทุนทั้งหมด (บาท)
 V = ความเร็ว (m/s)
 W = งานสุทธิ (kJ/s)
 Yi = ผลตอบแทนเฉลี่ยสุทธิต่อปี (บาท)
 z = ระดับความสูง (m)
 สัญลักษณ์กำกับล่าง
 0 = สภาวะที่บรรยากาศ
 1 = คอนเดนเสทและแฟลชสตีมหลังจากผ่านอุปกรณ์ดักไอน์
 2 = น้ำที่ใช้เติมเข้าถังระบบ
 3 = คอนเดนเสทและแฟลชสตีมที่ผสมน้ำแล้ว(น้ำร้อน)
 B = หม้อไอน้ำ
 C = คอนเดนเสท (Condensate)
 CV = ปริมาตรควบคุม
 d = ค่าความแตกต่างของเอนทัลปี
 f = สภาวะเป็นของเหลว
 fg = สภาวะอิ่มตัว
 F = แฟลชสตีม
 FC = การประหยัดเชื้อเพลิง
 g = สภาวะไออิ่มตัว
 L = ค่าความร้อนด้านต่ำ
 n = อายุของโครงการ
 s = การใช้ไอน้ำ
 t = ปีของโครงการ
 W = น้ำ
 i = ทางไหลเข้า
 c = ทางไหลออก

บทนำ

ปัจจุบันประเทศไทยประสบปัญหาทางเศรษฐกิจ โดยเฉพาะภาคอุตสาหกรรมผลิตเหล็กที่ต้องนำเข้าวัตถุดิบจากต่างประเทศ รวมทั้งค่าเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิต ส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตสูง การประหยัดพลังงานจึงเป็นทางเลือกที่ช่วยลดต้นทุนการผลิตได้ งานวิจัยนี้จะดำเนินการศึกษาการประหยัดพลังงาน โดยมุ่งเน้นเฉพาะการวิเคราะห์เพื่อนำเอาคอนเดนเสทและแฟลชสตีมกลับมาใช้ทดแทนน้ำร้อนที่ใช้ในกระบวนการผลิตแผ่นเหล็กชุบสังกะสี ซึ่งสามารถทำให้ประหยัดเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำตามมาตรฐานการใช้พลังงานความร้อนในระบบไอน้ำของโรงงานอุตสาหกรรม ตามความในพระราชบัญญัติการส่งเสริมอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ.2535 [1]

การเกิดคอนเดนเสทและแฟลชสตีมในกระบวนการผลิตแผ่นเหล็กชุบสังกะสี

การเกิดคอนเดนเสทและแฟลชสตีม ซึ่งสามารถแยกหาปริมาณได้ดังนี้

1. ปริมาณของคอนเดนเสท

จากภาพที่ 1 พบว่ามีปริมาณของคอนเดนเสทเมื่อผ่านอุปกรณ์ดักไอน้ำแล้วเท่ากับ 1,590 kg/h นำกลับไปใช้งานเป็นน้ำป้อนเข้าหม้อไอน้ำ

2. ปริมาณของแฟลชสตีม

การหาค่าปริมาณของแฟลชสตีมที่ถูกปล่อยทิ้งสู่บรรยากาศสามารถหาได้โดยทำการวิเคราะห์ดังนี้

2.1 ความดันก่อนเข้าอุปกรณ์ดักไอน้ำ 7.013 bar (ความดันสมบูรณ์, 6 bar ความดันเกจ)

2.2 ความดันของแฟลชสตีมที่บรรยากาศ = 1.013 bar (ความดันบรรยากาศ) จากสมการที่ (1) [2]

$$FS = h_d / h_{fg} \quad (1)$$

เมื่อ $h_d = 697.22 - 419.04 \text{ kJ/kg}$

$$h_{fg} = 2,257 \text{ kJ/kg}$$

$$FS = (697.22 - 419.04) / 2,257$$

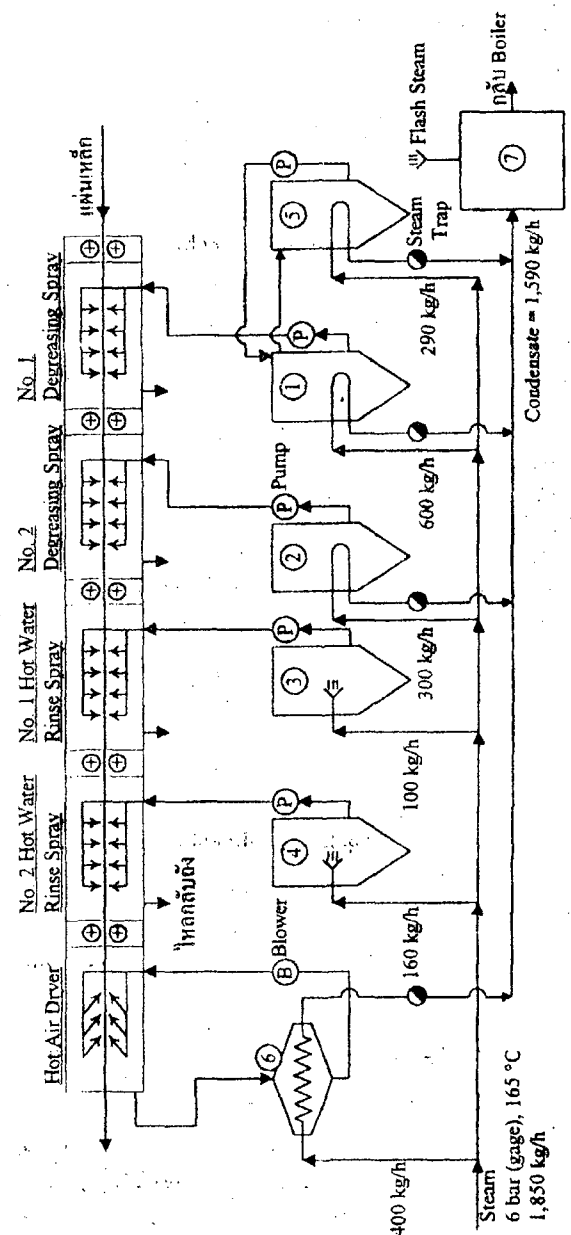
$$= 0.122 \text{ kg/(kg ของคอนเดนเสท)}$$

เมื่อปริมาณของคอนเดนเสทที่ได้ = 1,590 kg/h

ได้ปริมาณของแฟลชสตีม = $1,590 \times 0.122 \text{ kg/h}$

$$= 193.98 \text{ kg/h}$$

ปริมาณของแฟลชสตีมที่ปล่อยทิ้งดังกล่าวจำนวน 193.9 kg/h นี้คือส่วนที่พิจารณานำกลับมาใช้ใหม่



ภาพที่ 1 แสดงการใช้ไอน้ำในกระบวนการผลิตแผ่นเหล็กชุบสังกะสีของบริษัท กรุงเทพมหานครผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน) [3]

1. ถังทำความสะอาดหมายเลข1(No.1 Degreasing Tank)
2. ถังทำความสะอาดหมายเลข2(No.2 Degreasing Tank)
3. ถังล้างด้วยน้ำอุ่นหมายเลข1 (No.1 Hot Water Rinse Tank)
4. ถังล้างด้วยน้ำอุ่นหมายเลข2 (No.2 Hot Water Rinse Tank)
5. ถังแยกน้ำมัน (Oil Separator Tank)
6. เครื่องทำอากาศร้อน (Hot Air Dryer)
7. ถังคอนเดนเสท (Condensate Tank)

การพัฒนาปรับปรุงระบบ

การปรับปรุงระบบเพื่อนำคอนเดนเสทและแฟลชสตีมมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด อุปกรณ์ที่ต้องติดตั้งเพิ่มเติมประกอบด้วย ท่อน้ำเติมเข้าถังเก็บคอนเดนเสท และท่อส่งน้ำร้อนจากถังเก็บไปใช้ในระบบการผลิต ซึ่งมีรายละเอียดตามภาพที่ 2 และประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆ ที่กำกับหมายเลขไว้เหมือนกับภาพที่ 1

หลักการทำงานของระบบ ในการปรับปรุงตามภาพที่ 2 ในช่วงเริ่มแรกของการผลิตจะต้องใช้ไอน้ำจากท่อจ่ายไอน้ำให้ ซึ่งไหลผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน หมายเลข 1, 2, 5 และ 6 และกลับตัวเป็นคอนเดนเสท จากนั้นจะส่งไปเก็บยังถังเก็บคอนเดนเสท หมายเลข 7 ในขณะเดียวกันไอน้ำก็จะถูกจ่ายไปอุ่นน้ำด้วย สำหรับถังล้างซ้ำด้วยน้ำอุ่น หมายเลข 3, 4 ระบบจะทำงานจนกว่าจะมีน้ำคอนเดนเสทออกจากถังเพียงพอ ซึ่งคอนเดนเสทที่ไหลเข้าสู่ถังพักจะมีปริมาณของแฟลชสตีมติดไปด้วย จึงต้องเติมน้ำที่ถังเพื่อควบคุมแฟลชสตีมมิให้ถูกนำความร้อนออกไปจากถังเมื่อได้ปริมาณของคอนเดนเสทที่นำมาผสมเพียงพอแล้วก็จะจ่ายไปใช้ในระบบการล้างด้วยน้ำอุ่นและช่วงจ่ายน้ำร้อนเข้าไปทดแทนนั้นจะลดปริมาณการจ่ายไอน้ำหลักลงด้วย

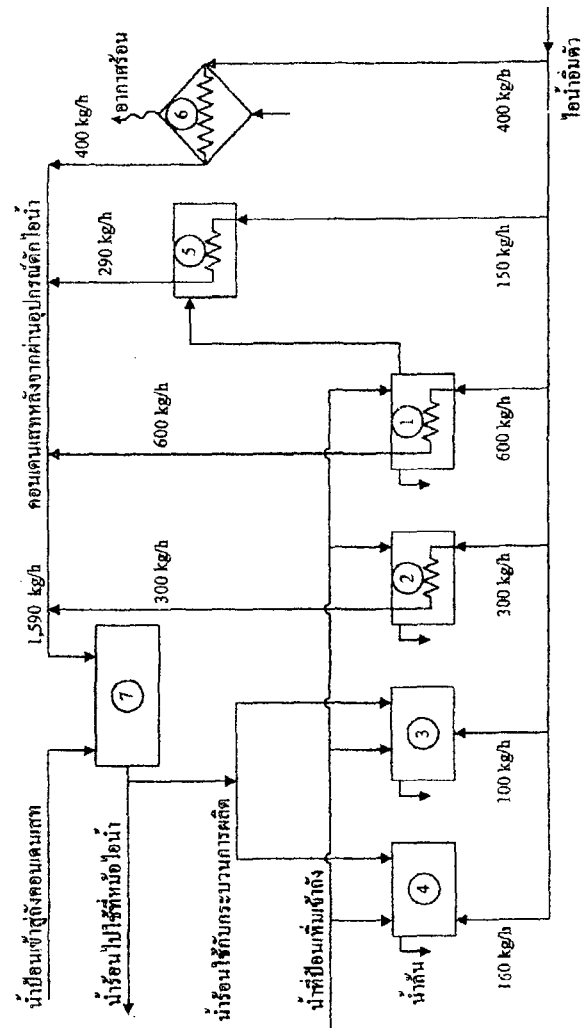
การจำลองแบบของระบบ

การจำลองระบบประกอบด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และใช้วิธีการนิวตัน-ราฟสันกับแบบจำลอง หลังจากนั้นใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังรายละเอียดดังต่อไปนี้

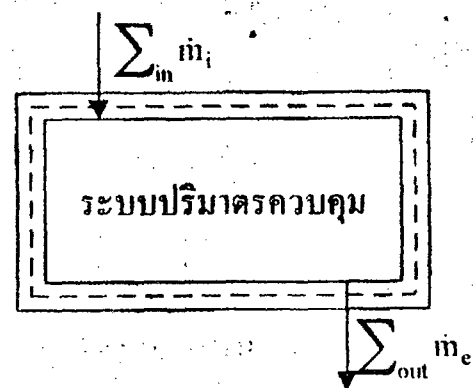
1. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบถังคอนเดนเสทและแฟลชสตีม

กำหนดให้เป็นระบบปริมาตรควบคุม โดยมีสมมติฐานในการวิเคราะห์ดังนี้

1. การทำงานของระบบต้องอยู่ในสภาวะสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกทั้งระบบ
2. การวิเคราะห์ ต้องวิเคราะห์ภายใต้สภาวะการไหลสม่ำเสมอ (Steady State Steady Flow, SSSF)
3. ระบบถังคอนเดนเสทมีการหุ้มฉนวน การสูญเสียพลังงานความร้อนเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนที่ผิวถังมีค่าน้อยมาก จนถือว่าไม่มีการสูญเสียพลังงานความร้อน
4. วิเคราะห์ที่สภาวะตามความดันบรรยากาศ



ภาพที่ 2 แสดงการเก็บคอนเดนเสทและแฟลชสตีมและการพัฒนาปรับปรุงระบบ



ภาพที่ 3 แบบจำลองของถังคอนเดนเสท

$P_0 = 1.013$ bar (ความดันสมบูรณ์) ที่อุณหภูมิ $T_0 = 32^\circ\text{C}$ (คืออุณหภูมิที่ความดันบรรยากาศโดยเฉลี่ยของโรงงานผลิตแผ่นเหล็กชุบสังกะสี)

การวิเคราะห์พารามิเตอร์ของคอนเดนเสทและแฟลชสตีม โดยพิจารณา ดังนี้

1. การสมดุลมวล (Mass Balance) ของระบบ ปริมาตรควบคุม พิจารณาสมการอนุรักษ์มวล [4]

$$\sum_{in} \dot{m}_i - \sum_{out} \dot{m}_e = \frac{dm_{CV}}{dt} \quad (2)$$

เมื่อระบบวิเคราะห์ภายใต้สภาวะการไหลสม่ำเสมอ (Steady State) ทำให้ค่า $dm_{CV} / dt = 0$ ดังนั้นสมการที่ (2) จึงมีค่าดังนี้ [4]

$$\sum_{in} \dot{m}_i = \sum_{out} \dot{m}_e$$

สำหรับระบบถังคอนเดนเสท และแฟลชสตีมพิจารณาจากภาพที่ 3

Σมวลเข้าสู่ระบบ = Σมวลที่ออกจากระบบ

$$\dot{m}_1 + \dot{m}_2 = \dot{m}_3$$

$$\text{เมื่อ} \quad \dot{m}_1 = \dot{m}_C + \dot{m}_F \quad (3)$$

$$\dot{m}_C + \dot{m}_F + \dot{m}_2 = \dot{m}_3$$

2. สมการสมดุลพลังงาน (Energy Balance) ของระบบปริมาตรควบคุม

พิจารณาสมการสมดุลพลังงานกรณีที่มีทางเข้าและทางออกหลายทาง จากสมการต่อไปนี้ [4]

$$Q + W_{shaft} = \sum_{out} \dot{m}_e \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right)_e \quad (4)$$

$$- \sum_{in} \dot{m}_i \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right)_i$$

สำหรับการวิเคราะห์ระบบถังคอนเดนเสทและแฟลชสตีม โดยใช้สมมติฐานที่ข้างต้น ทำให้สมการที่ (4) ลดรูปได้ดังนี้

$$\sum_{in} (\dot{m}h)_i = \sum_{out} (\dot{m}h)_e$$

Σพลังงานเข้าสู่ระบบ = Σพลังงานออกจากระบบ

$$\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2 = \dot{m}_3 h_3 \quad (5)$$

$$\dot{m}_C h_C + \dot{m}_F h_F + \dot{m}_2 h_2 = \dot{m}_3 h_3$$

2. การใช้วิธีนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson) กับแบบจำลองระบบถังคอนเดนเสทและแฟลชสตีม

จากรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะพิจารณานำวิธีการนิวตัน-ราฟสันแบบหลายสมการหลายตัวแปร (Newton - Raphson Method with Multiple Equations and Unknowns) มาใช้ในการคำนวณหาค่าที่เหมาะสมของมวลคอนเดนเสท ($\dot{m}_C$) และมวลของแฟลชสตีม ($\dot{m}_F$) ตามสมการที่ (3), (5)

การทำงานของแบบจำลองด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson) [5]

สมมติว่าสมการสองสมการต่อไปนี้ ถูกแก้เพื่อหาคำตอบของตัวแปร x_1 และ x_2 โดยที่ $x_1 = \dot{m}_C, x_2 = \dot{m}_F$

$$f_1(\dot{m}_C, \dot{m}_F) = 0 \quad (6)$$

$$f_2(\dot{m}_C, \dot{m}_F) = 0 \quad (7)$$

ขั้นตอนในการแก้ปัญหาที่มีดังต่อไปนี้

1. จัดรูปสมการโดยให้ตัวแปรทุกตัวอยู่ทางด้านหนึ่ง ด้านใดของเครื่องหมายเท่ากับ (ตั้งสมการที่ (6),(7))

2. สมมติค่าชั่วคราวของ $\dot{m}_{C,i}, \dot{m}_{F,i}$

3. คำนวณค่าของ f_1, f_2 และแทนค่าชั่วคราวของ $\dot{m}_C, \dot{m}_F$

4. คำนวณ $\frac{\partial f}{\partial \dot{m}}$ (Partial derivative) ของทุกฟังก์ชันเทียบกับทุกตัวแปร

5. ใช้การกระจายอนุกรมของเทเลอร์เพื่อตั้งกลุ่มของสมการ ตัวอย่างการกระจายอนุกรมของเทเลอร์ของสมการ (6) แสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} f_1(\dot{m}_{C,i}, \dot{m}_{F,i}) &= f_1(\dot{m}_{C,c}, \dot{m}_{F,c}) \\ &+ \frac{\partial f_1(\dot{m}_{C,i}, \dot{m}_{F,i})}{\partial \dot{m}_C} (\dot{m}_{C,i}, \dot{m}_{C,c}) \\ &+ \frac{\partial f_1(\dot{m}_{C,i}, \dot{m}_{F,i})}{\partial \dot{m}_F} (\dot{m}_{C,i}, \dot{m}_{C,c}) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\text{หรือ} \quad \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \dot{m}_C} & \frac{\partial f_1}{\partial \dot{m}_F} \\ \frac{\partial f_2}{\partial \dot{m}_C} & \frac{\partial f_2}{\partial \dot{m}_F} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{m}_{C,i} - \dot{m}_{F,c} \\ \dot{m}_{F,i} - \dot{m}_{F,c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

6. แก้สมการที่ (8) เพื่อหาค่า $\dot{m}_{i,j} - \dot{m}_{i,c}$

7. แก้สมการ $\dot{m}$ โดยใช้

$$\dot{m}_{C,new} = \dot{m}_{C,old} - (\dot{m}_{C,i} - \dot{m}_{C,c})$$

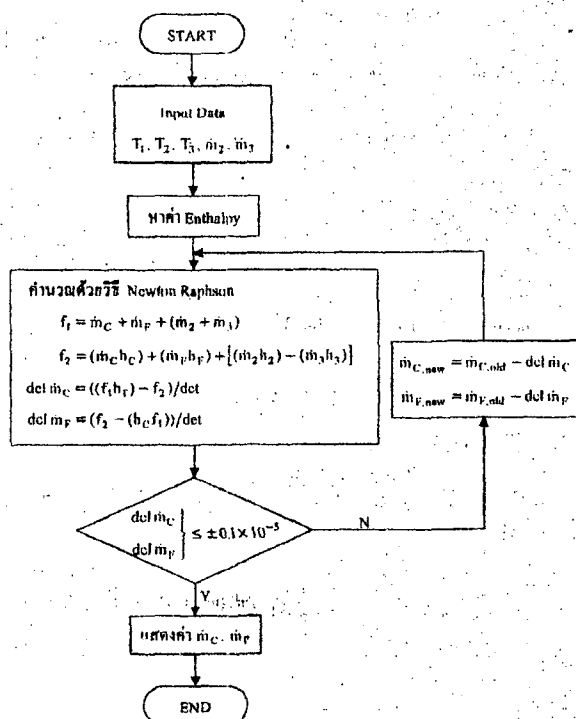
$$\dot{m}_{F,new} = \dot{m}_{F,old} - (\dot{m}_{F,i} - \dot{m}_{F,c})$$

8. ทดสอบสู่เข้า (Convergence) หาก $|f|$ ทุกค่า หรือ $|\Delta \dot{m}|$ ทุกค่า มีค่าน้อยอยู่ในเกณฑ์ก็ให้หยุดทดสอบค่า (Iteration) มิเช่นนั้นให้กลับไปขั้นที่ 3

9. จากการแก้ปัญหาตามขั้นตอนที่ 1-8 จะได้ค่าที่เหมาะสมของมวลคอนเดนเสท ($\dot{m}_C$) และมวลของแฟลชสตีม ($\dot{m}_F$) ในแต่ละสภาวะการทำงานของระบบ

3. หลักการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์

การจำลองระบบโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆของคอนเดนเสทและแฟลชสตีมโดยใช้วิธีนิวตัน-ราฟสัน ซึ่งการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ดังแสดงในแผนภูมิที่ 1



แผนภูมิที่ 1 แสดงหลักการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ผลจากการจำลองระบบ

ผลจากการจำลองระบบโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆของคอนเดนเสทและแฟลชสตีม จะทำให้ทราบถึงปริมาณของคอนเดนเสทและแฟลชสตีมที่สภาวะต่างๆ ซึ่งการทดลองจะทำการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรของ $T_1, T_2, \dot{m}_2, \dot{m}_3$ มีค่าคงที่ และพิจารณาผลของ $\dot{m}_C$ และ $\dot{m}_F$

1. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของคอนเดนเสทและแฟลชสตีม, $T_1(^{\circ}\text{C})$

โดยมีเงื่อนไข : $T_2, T_3, \dot{m}_2, \dot{m}_3$ มีค่าคงที่ และพิจารณาผลของ $\dot{m}_C$ และ $\dot{m}_F$

ตารางที่ 1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของคอนเดนเสทและแฟลชสตีม, T_1

$T_1(^{\circ}\text{C})$	$T_2(^{\circ}\text{C})$	$T_3(^{\circ}\text{C})$	$\dot{m}_2(\text{kg/s})$	$\dot{m}_3(\text{kg/s})$	$\dot{m}_C(\text{kg/s})$	$\dot{m}_F(\text{kg/s})$
102	30	97	0.3	0.8	0.45964	0.04036
101	30	97	0.3	0.8	0.45864	0.04136
100	30	97	0.3	0.8	0.45764	0.04236
99	30	97	0.3	0.8	0.45665	0.04335
98	30	97	0.3	0.8	0.45568	0.04432

2. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำเดิม, $T_2(^{\circ}\text{C})$

โดยมีเงื่อนไข : $T_1, T_3, \dot{m}_2, \dot{m}_3$ มีค่าคงที่ และพิจารณาผลของ $\dot{m}_C$ และ $\dot{m}_F$

ตารางที่ 2 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำเดิม, $T_2(^{\circ}\text{C})$

$T_1(^{\circ}\text{C})$	$T_2(^{\circ}\text{C})$	$T_3(^{\circ}\text{C})$	$\dot{m}_2(\text{kg/s})$	$\dot{m}_3(\text{kg/s})$	$\dot{m}_C(\text{kg/s})$	$\dot{m}_F(\text{kg/s})$
100	31	97	0.3	0.8	0.45832	0.04168
100	30	97	0.3	0.8	0.45764	0.04236
100	29	97	0.3	0.8	0.45696	0.04304
100	28	97	0.3	0.8	0.45627	0.04373
100	27	97	0.3	0.8	0.45559	0.04441

การทดสอบเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำเดิมเพื่อทราบผลการเปลี่ยนแปลงของ $\dot{m}_C$ และ $\dot{m}_F$ แต่ในกรณีที่เป็นจริงสภาวะของโรงงานน้ำเดิมโดยเฉลี่ยมีอุณหภูมิประมาณ 30°C

3. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำร้อน, $T_3(^{\circ}\text{C})$

โดยมีเงื่อนไข : $T_1, T_2, \dot{m}_2, \dot{m}_3$ มีค่าคงที่ และพิจารณาผลของ $\dot{m}_C$ และ $\dot{m}_F$

ตารางที่ 3 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำร้อน, T_3

$T_1(^{\circ}\text{C})$	$T_2(^{\circ}\text{C})$	$T_3(^{\circ}\text{C})$	$\dot{m}_2(\text{kg/s})$	$\dot{m}_3(\text{kg/s})$	$\dot{m}_C(\text{kg/s})$	$\dot{m}_F(\text{kg/s})$
100	30	98	0.3	0.8	0.45580	0.04420
100	30	97	0.3	0.8	0.45764	0.04236
100	30	96	0.3	0.8	0.45947	0.04053
100	30	95	0.3	0.8	0.46131	0.03869
100	30	94	0.3	0.8	0.46314	0.03686

4. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำร้อน, $\dot{m}_2(\text{kg/s})$

โดยมีเงื่อนไข : $T_1, T_2, T_3, \dot{m}_3$ มีค่าคงที่ และพิจารณาผลของ $\dot{m}_C$ และ $\dot{m}_F$

ตารางที่ 4 การเปลี่ยนแปลงมวลของน้ำเดิม, $\dot{m}_2$

$T_1(^{\circ}\text{C})$	$T_2(^{\circ}\text{C})$	$T_3(^{\circ}\text{C})$	$\dot{m}_2(\text{kg/s})$	$\dot{m}_3(\text{kg/s})$	$\dot{m}_C(\text{kg/s})$	$\dot{m}_F(\text{kg/s})$
100	30	97	0.31	0.8	0.44605	0.04395
100	30	97	0.32	0.8	0.43445	0.04555
100	30	97	0.33	0.8	0.42285	0.04715
100	30	97	0.34	0.8	0.41126	0.04874
100	30	97	0.35	0.8	0.39966	0.05034

5. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำร้อน, $\dot{m}_3$ (kg/s)

โดยมีเงื่อนไข : $T_1, T_2, T_3, \dot{m}_2$ มีค่าคงที่ และพิจารณาผลของ $\dot{m}_C$ และ $\dot{m}_F$

ตารางที่ 5 การเปลี่ยนแปลงมวลของน้ำร้อน, $\dot{m}_3$

T_1 (°C)	T_2 (°C)	T_3 (°C)	$\dot{m}_2$ (kg/s)	$\dot{m}_1$ (kg/s)	$\dot{m}_C$ (kg/s)	$\dot{m}_F$ (kg/s)
100	30	97	0.3	0.78	0.43750	0.04250
100	30	97	0.3	0.79	0.44757	0.04243
100	30	97	0.3	0.80	0.45764	0.04236
100	30	97	0.3	0.81	0.46771	0.04229
100	30	97	0.3	0.82	0.47778	0.04222

พารามิเตอร์ของคอนเดนเสทและแฟลชสตีมที่เหมาะสม

จากผลทางทฤษฎี พิจารณาจากคำนวณหาปริมาณแฟลชสตีม ค่าที่เหมาะสมต่อระบบคือกิโลกรัมแฟลชสตีมต่อกิโลกรัมของคอนเดนเสท = 0.122 ซึ่งค่าเปรียบเทียบกับในการจำลองระบบเพื่อหาค่าที่เหมาะสมและระบบหลังการปรับปรุง จากภาพที่ 2 จะพิจารณานำเอาน้ำร้อนที่เพิ่มขึ้นมาใช้ที่ด้านล่างด้วยน้ำอุ่นหมายเลข 1 และด้านล่างด้วยน้ำอุ่นหมายเลข 2 ซึ่งในระบบเดิมก่อนการปรับปรุงมีการใช้น้ำอ้อมตัวจำนวน 260 kg/h

ผลจากการจำลองระบบได้ค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ดังนี้

$$\dot{m}_C = 0.40119 \text{ kg/s} ; \dot{m}_F = 0.04881 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_2 = 0.34 \text{ kg/s} ; \dot{m}_3 = 0.79 \text{ kg/s}$$

$$T_1 = 100^\circ\text{C} ; T_2 = 30^\circ\text{C} ; T_3 = 97^\circ\text{C}$$

$$\text{ปริมาณน้ำร้อนหลังการปรับปรุงระบบ} = 0.79 \times 3,600 = 2,844 \text{ kg/h}$$

$$\text{ปริมาณน้ำร้อนก่อนการปรับปรุงระบบ} = 1,590 \text{ kg/h}$$

$$\therefore \text{ปริมาณน้ำร้อนที่เพิ่มขึ้น} = 2,844 - 1,590 = 1,254 \text{ kg/h}$$

การประเมินศักยภาพของระบบ

การประเมินศักยภาพของระบบด้วยการเปรียบเทียบปริมาณน้ำร้อนที่เพิ่มขึ้นหลังจากระบบถูกปรับปรุงและนำผลที่ได้ไปทดแทนการใช้ไอน้ำในระบบการล้างด้วยน้ำอุ่นของขบวนการผลิตแผ่นเหล็กชุบสังกะสี นำผลที่ได้ไปวิเคราะห์หาอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงในการผลิตไอน้ำและวิเคราะห์ผลทางเศรษฐศาสตร์

1. ผลการเปรียบเทียบเมื่อใช้น้ำร้อนทดแทนไอน้ำ

ปริมาณน้ำร้อนที่เพิ่มขึ้น (ที่ 97°C) มีค่าพลังงาน

$$\text{ความร้อน} (h_f) = 406.37 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{พลังงานความร้อนที่เพิ่มขึ้น} = 1,254 \text{ kg/h} \times 406.37 \text{ kJ/kg} = 509,588 \text{ kJ/h}$$

$$\text{ปริมาณการใช้ไอน้ำในระบบก่อนการปรับปรุง (ที่ 7.013 bar, 165.04}^\circ\text{C) มีค่าพลังงานความร้อน} (h_g) = 2,763.5 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{ระบบใช้พลังงานความร้อนจากไอน้ำ} = 260 \text{ kg/h} \times 2,763.5 \text{ kJ/kg} = 718,510 \text{ kJ/h}$$

$$\text{ปริมาณน้ำร้อนที่ทดแทนไอน้ำ} = \frac{509,588 \text{ kJ/h}}{2,763.5 \text{ kJ/kg}}$$

$$= 184.4 \text{ kg/h}$$

$$\text{พลังงานความร้อนจากน้ำร้อน (ที่ } 97^\circ\text{C)} = 509,588 \text{ kJ/h} \text{ จะนำไปใช้ทดแทนการใช้ไอน้ำ (ที่ 7.013 bar, 165.04}^\circ\text{C) ซึ่งมีค่าพลังงานความร้อน} = 718,510 \text{ kJ/h}$$

$$\text{ดังนั้นระบบจึงจำเป็นต้องใช้ไอน้ำบางส่วน} = 718,510 - 509,588 \text{ kJ/h} = 208,922 \text{ kJ/h}$$

$$\therefore \text{การใช้น้ำร้อนทดแทนสามารถประหยัดพลังงานความร้อนได้} = 509,588 \text{ kJ/h}$$

$$\text{คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของการทดแทนไอน้ำด้วยน้ำร้อน} = 71\%$$

2. ผลการวิเคราะห์หาอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงในการผลิตไอน้ำ

การวิเคราะห์หาอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของหม้อไอน้ำ โดยหม้อไอน้ำใช้น้ำมันเตาเกรด C ในการผลิตไอน้ำ การวิเคราะห์สามารถแบ่งออกได้ 2 ขั้นตอนคือ อัตราการสิ้นเปลืองกรณีน้ำคอนเดนเสทกลับหม้อไอน้ำอุณหภูมิลดลงจาก 100°C เป็น 97°C และอัตราการสิ้นเปลืองกรณีลดปริมาณการใช้ไอน้ำลงจากการใช้น้ำร้อนทดแทนการใช้ไอน้ำ

2.1 กรณีน้ำคอนเดนเสทกลับหม้อไอน้ำอุณหภูมิลดลง

การวิเคราะห์เมื่ออุณหภูมิของน้ำคอนเดนเสทลดลงจาก 100°C เป็น 97°C ถูกป้อนเข้าหม้อไอน้ำ ทำให้หม้อไอน้ำต้องสิ้นเปลืองน้ำมันเพิ่มขึ้น โดยใช้สมการต่อไปนี้, [6]

$$D_{FC} = D_S(h - h_w) / (\eta_B \times H_L) \quad (10)$$

$$\text{เมื่อ } D_S = 1,590 \text{ kg/h} ; h = 419.06 \text{ kJ/kg (ที่ } 100^\circ\text{C, } h_f)$$

$$h_w = 406.37 \text{ kJ/kg (ที่ } 97^\circ\text{C, } h_f) ; \eta_B = 0.80$$

$$H_L = 41,286 \text{ kJ/kg}$$

แทนค่าในสมการที่(10)

$$D_{FC} = 1,590 (419.06 - 406.37) / (0.8 \times 41,286) \\ = 0.6 \text{ kg}_{\text{Fuel}} / \text{h}$$

∴ หม้อไอน้ำจะต้องมีการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นจำนวน 0.60 kg_{Fuel} / h

2.2 กรณีลดปริมาณการใช้ไอน้ำลงโดยใช้น้ำร้อนทดแทน

จากการปรับปรุงระบบ ทำให้สามารถใช้ น้ำร้อนทดแทนไอน้ำในการทำ ความสะอาดแผ่นเหล็ก ซึ่งทำให้ลดปริมาณการใช้ไอน้ำลง ทำให้หม้อไอน้ำลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงลง พิจารณสมการที่ (10), [6]

$$D_{FC} = D_S (h - h_w) / (\eta_B \times H_L)$$

เมื่อ

$$D_S = 184.4 \text{ kg/h}; h = 2,763.5 \text{ kJ/kg (ที่ } 165.04^\circ\text{C, } h_g)$$

$$h_w = 419.06 \text{ kJ/kg (ที่ } 100^\circ\text{C, } h_f); \eta_B = 0.80$$

$$H_L = 41,286 \text{ kJ/kg}$$

แทนค่าในสมการ

$$D_{FC} = 184.4 (2,763.5 - 419.06) / (0.8 \times 41,286) \\ = 13.1 \text{ kg}_{\text{fuel}} / \text{h}$$

∴ หม้อไอน้ำจะต้องลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงลงจำนวน 13.1 kg_{fuel} / h

ดังนั้นอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงในการผลิตไอน้ำ = 13.1 - 0.6 = 12.5 kg_{fuel} / h

หม้อไอน้ำที่วิเคราะห์ใช้น้ำมันเตาที่มีความหนาแน่นที่ 15°C = 0.990 kg / liter

อัตราการประหยัดเชื้อเพลิงต่อปี = (12.5 kg/h X 24h X 24 Day/M X 11 M/Year) / (0.990 kg/liter) = 80,000 ลิตร โดยที่น้ำมันเตาราคาเฉลี่ย 5 บาท (ราคาน้ำมันโดยเฉลี่ยข้อมูลจากบริษัทผู้ขายน้ำมันเตา)

∴ สามารถประหยัดเชื้อเพลิงในหม้อไอน้ำลงได้ = 5 X 80,000 = 400,000 บาท/ปี

3. ผลการวิเคราะห์หาผลตอบแทนเริ่มต้น

การวิเคราะห์หาผลตอบแทนเริ่มต้นโดยคิดเฉพาะความสามารถในการประหยัดเชื้อเพลิงในการผลิตไอน้ำหักด้วยค่าอัตราการสิ้นเปลืองของน้ำจากภายนอกที่นำมาเติมเข้าระบบ ซึ่งน้ำภายนอกที่นำมาเติมคือมวลของน้ำเติมที่เหมาะสม ($\dot{m}_2$)

$$\text{โดยที่ } \dot{m}_2 = 0.34 \text{ kg/s} = 1.224 \text{ m}^3 / \text{h}$$

การวิเคราะห์คิดราคาน้ำที่ = 10 บาท / 1 m³ (ราคาน้ำ

ประปาหลังผ่านเครื่องกรอง, Softenner)

$$\text{อัตราการสิ้นเปลืองน้ำต่อปี} = 1.224 \text{ m}^3 / \text{h} \times 10 \text{ บาท} / \text{m}^3 \\ \times 24 \text{ h/D} \times 24 \text{ D/M} \times 11 \text{ M/Y} = 77,550 \text{ บาท}$$

ผลตอบแทนที่ยังไม่หักค่าใช้จ่าย

$$= \text{การประหยัดเชื้อเพลิง} - \text{การสิ้นเปลืองน้ำเดิม}$$

$$= 400,000 - 77,550 \text{ บาท} / \text{ปี} = 322,450 \text{ บาท} / \text{ปี}$$

∴ ผลตอบแทนเริ่มต้นที่ยังไม่หักต้นทุนและค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน = 322,450 บาท / ปี

4. ผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ เพื่อจะทราบถึงผลตอบแทนสุทธิที่มีต่อระบบ ทั้งนี้เพื่อให้บรรลุถึงประสิทธิภาพของการวิจัย ผลของการวิเคราะห์จะปรากฏในรูปของผลตอบแทนที่ได้จะสูงกว่าหรือต่ำกว่าค่าใช้จ่ายที่ลงทุนไป ถ้าสูงกว่าเป็นระบบที่ดีทางเศรษฐศาสตร์ แต่ถ้าต่ำกว่าจะได้อธิบายเป็นระบบที่ไม่ดีทางเศรษฐศาสตร์ โดยการวิเคราะห์จะหาระยะเวลาคืนทุน (Payback Period, n), การหามูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value, NPV) และอัตราผลตอบแทนการลงทุน (Internal Rate of Return, IRR)

4.1 การหาระยะเวลาคืนทุน (Payback Period, n), [7]

ในงานวิจัยระบบมีค่าเงินลงทุนเริ่มต้นเท่ากับ 70,000 บาท โดยให้ระยะเวลาในการใช้งานที่ 5 ปี และค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน ค่าบำรุงรักษา และผลตอบแทนรายปีตามที่ปรากฏในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ค่าใช้จ่าย ผลตอบแทน และผลตอบแทนสุทธิของโครงการ

ปี	ต้นทุนเริ่มต้น (บาท)	ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน (บาท)	ค่าบำรุงรักษา (บาท)	ผลตอบแทน (บาท)	ผลตอบแทนสุทธิ (บาท)
1	70,000	50,000	-	322,450	202,450
2	-	50,000	20,000	322,450	252,450
3	-	50,000	20,000	322,450	252,450
4	-	50,000	20,000	322,450	252,450
5	-	50,000	20,000	322,450	252,450
รวม	70,000	250,000	80,000	1,612,250	1,212,250

ผลตอบแทนสุทธิจากการดำเนินงานเฉลี่ยต่อปีของระบบจะเท่ากับผลตอบแทนสุทธิตั้งแต่ปีที่ 1 ถึงปีที่ 5 (คือ 1,212,250 บาท)หารด้วยจำนวนปี (คือ 5 ปี) ซึ่งจะเท่ากับ 242,450 บาท ต่อปี และแทนค่าในสมการต่อไปนี้ [7]

$$n = \frac{TS}{Y_i} \quad (11)$$

เมื่อ TS = 70,000+250,000+80,000=400,000 บาท

$$Y_i = 242,450 \text{ บาท}$$

แทนค่าในสมการ

$$n = (400,000 \text{ บาท}) / (242,450 \text{ บาท} / \text{ปี})$$

$$\therefore \text{ระยะเวลาคืนทุน} = 1.65 \text{ ปี}$$

4.2 การหามูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value, NPV)

ตารางที่ 7 การหามูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการ

ปี	ผลตอบแทนสุทธิ (บาท)	PWF 10%, [7]	PV (บาท)
1	202,450	0.909	184,027.0
2	252,450	0.826	208,523.7
3	252,450	0.751	189,589.9
4	252,450	0.683	172,423.3
5	252,450	0.621	156,771.5
ทรัพย์สินคงเหลือ	20,000	0.621	12,420.0
			NPV = 923,755.4

หมายเหตุ : PWF = ตัวประกอบมูลค่าเงินปัจจุบัน, PV = มูลค่าเงินปัจจุบัน

จากการหามูลค่าสุทธิปัจจุบัน (NPV) จำนวน 923,755.40 บาท ดังกล่าวนี้นี้ ก็คือมูลค่ารายได้สุทธิในอนาคต เมื่อคิดลดเป็นค่าปัจจุบันแล้ว มูลค่าของเงินจำนวนนี้แสดงถึงว่า นอกจากการลงทุนนั้นจะได้ผลตอบแทนจากการใช้ทุนหรืออัตราดอกเบี้ยเท่ากับ 10% แล้ว บริษัทยังจะมีรายได้มากถึง 923,755.40 บาท ในรูปของมูลค่าปัจจุบัน หลังจากที่ได้จ่ายคืนเป็นค่าลงทุน และค่าดอกเบี้ยที่เกิดขึ้นแล้ว และเมื่อมูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการตามที่ได้คำนวณออกมาเป็นบวกหรือเกินศูนย์ งานวิจัยนี้จึงให้ผลตอบแทนที่คุ้มค่า สามารถให้การสนับสนุนได้

4.3 อัตราผลตอบแทนการลงทุน (Internal Rate of Return, IRR)

การวิเคราะห์อัตราผลตอบแทนการลงทุนเพื่อช่วยการตัดสินใจโดยใช้วิธี Trial and Error

$$\sum_{t=1}^n \frac{B_t - C_t}{(1+r)^t} = 0, \text{ เมื่อ } r \text{ คืออัตราส่วนลด (IRR)} \quad (12)$$

เมื่อ $B_t - C_t = 923,755.4$ บาท (มูลค่าปัจจุบันสุทธิ)

$$t = 5 \text{ ปี}$$

$$923,755.4 / (1+r)^5 = 0$$

$$0.0001 = 0 ; r = 85$$

$$\therefore \text{IRR} = 85 \%$$

ผลการวิเคราะห์จากการหาค่าอัตราผลตอบแทนการลงทุนของงานวิจัยนี้ ซึ่งมีค่า IRR = 85% เมื่อเปรียบเทียบกับค่าเสียโอกาสของทุนที่ 10% จะเห็นได้ว่าค่า IRR ที่ได้สูงกว่าค่าเสียโอกาสของทุน จึงเป็นการลงทุนที่คุ้มค่า

สรุป

ผลจากการศึกษาวิเคราะห์ในกระบวนการผลิตแผ่นเหล็กชุบสังกะสี ซึ่งมีปริมาณคอนเดนเสท 1,590 kg/h (666 MJ/h) และมีแฟลชสตีมปล่อยทิ้ง 194 kg/h (438 MJ/h) จะนำพลังงานสูญเสียไปใช้ทดแทนไอน้ำอิ่มตัว (Saturated Steam) ที่ 260 kg/h (718 MJ/h) การปรับปรุงระบบด้วยการใช้น้ำจากภายนอกเติมเข้าระบบเพื่อเก็บปริมาณคอนเดนเสทและแฟลชสตีม หลังจากการจำลองระบบด้วยการสมดุลมวลและพลังงาน เพื่อวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่งพบว่าสามารถเก็บคอนเดนเสทและแฟลชสตีมที่ผสมน้ำเป็นน้ำร้อนเพิ่มขึ้นได้ 1,254 kg/h ที่ 97°C (510 MJ/h) นำไปใช้ทดแทนการใช้ไอน้ำอิ่มตัวในส่วนของการล้างแผ่นเหล็กด้วยน้ำอุ่นสามารถทดแทนได้ 71% ผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ ใช้เงินลงทุนรวม 400,000 บาท ที่อายุงาน 5 ปี มีผลตอบแทนสุทธิ 1,212,500 บาท ระยะเวลาคืนทุน 1.65 ปี มีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) 923,755 บาท และอัตราผลตอบแทนการลงทุน (IRR) มากกว่าค่าเสียโอกาสของทุน

เอกสารอ้างอิง

1. กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน, กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, การอนุรักษ์พลังงานในโรงงาน. กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2539
2. McCauley, James F. The Steam Trap Handbook. The United States of America : Prentice-Hall, 1995.
3. Chugai Ro. "Specification of Continuous Galvanizing line for Bangkok Steel Industry Co., Ltd." Yodogawa Steel Work, Ltd., Japan, 30 May 1990. (Mimeographed.)
4. Wark, Kenneth. Advance Thermodynamics of Engineerings. Singapore : McGraw-Hill, 1995
5. Stoecker, W.F. Design of Thermal System. 3rd ed. Singapore : McGraw-Hill, 1989
6. Budin. R and Mihelic Bogdanic A. "Heat Recovery in Polyester Production : A case study." Applied Thermal Engineering 7 (March 1977) : 661-65.

7. ประสิทธิ์ ดงยิ่งศิริ. การวิเคราะห์และประเมินโครงการ. พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์คุรุสภาลาดพร้าว, 2540.