

# การประหยัดไอน้ำในโรงงานยาสูบ

## STEAM CONSERVATION IN A TOBACCO FACTORY

อภิรักษ์ สวัสดิ์กิจ

จุลละพจน์ จุลละโพธิ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

คณะพลังงานและวัสดุ

มหาวิทยาลัยศรีปทุม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

61 ถนนพหลโยธิน เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

### บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการศึกษามาตรการประหยัดไอน้ำในกระบวนการผลิตของโรงงานยาสูบ ซึ่งประกอบด้วยโรงงานผลิตยาสูบจำนวน 3 โรงงาน โดยมีกำลังผลิตเฉลี่ย 160,000 กิโลกรัมยาสูบต่อวัน ระยะเวลาทำงาน 4,121 ชั่วโมงต่อปี ในการศึกษาได้พิจารณามาตรการประหยัดไอน้ำ 3 มาตรการ คือ การหุ้มฉนวนเครื่องจักรเพื่อลดการสูญเสียความร้อน การนำคอนเดนเสทกลับมาผสมน้ำป้อนหม้อไอน้ำ และการผลิตไอน้ำแฟลชจากคอนเดนเสทเพื่อใช้ในกระบวนการผลิต ผลการประเมินทางด้านเศรษฐศาสตร์ให้ผลว่า มาตรการแรกเมื่อนำมาใช้กับโรงงานทั้ง 3 โรง จะประหยัดไอน้ำได้ 13.22% โดยมีระยะเวลาคืนทุน 0.13-0.36 ปี และอัตราผลตอบแทนภายใน 295-794% ส่วนมาตรการที่สองเมื่อนำมาใช้กับโรงงาน 2 โรงแรกจะประหยัดไอน้ำได้ 9% โดยมีระยะเวลาคืนทุน 1.41-1.42 ปี และอัตราผลตอบแทนภายใน 76.8-80% สำหรับมาตรการสุดท้าย จะช่วยประหยัดไอน้ำได้ 6% ใน 2 โรงงาน โดยมีระยะเวลาคืนทุน 2.38-2.82 ปี และมีอัตราผลตอบแทนภายใน 34-43%

### Abstract

This paper reports the study of steam saving measures in the production processes of a tobacco factory, which consists of 3 production plants. The average production capacity is 160,000 kg of tobacco per day, with 4,121 operating hours per year. In the study, 3 steam saving measures have been considered, namely, insulation of the production machinery to reduce heat losses, the use of condensate return to mix with the boiler feed water, and the production of flash steam, from high pressure condensate, to be used in the production processes. The results of financial evaluation indicate a steam saving of 13.22% in the 3 plants considered with a payback period of 0.13-0.36 year, and an internal rate of return between 295-794% for the first measure. For the second measure, 9% of steam saving would be obtained in 2 plants with pay back period ranging between 1.41-1.42 year,

and 76.8-80% internal rate of return. Finally, for the last measure, 6% steam saving is expected in 2 plants with a payback period between 2.38-2.82 years and 34-43% internal rate of return.

### 1. บทนำ

ในอุตสาหกรรมการผลิตโดยทั่วไป ไม่ว่าจะเป็นอุตสาหกรรมสิ่งทอ อาหาร เครื่องอุปโภค ฯลฯ มักอาศัยความร้อนจากไอน้ำ เพื่อใช้ในกระบวนการผลิตเป็นส่วนใหญ่ การตรวจสอบบำรุงรักษา ซ่อมแซมอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในระบบไอน้ำอย่างสม่ำเสมอ นอกจากจะทำให้ประสิทธิภาพทางความร้อนของระบบดีขึ้นแล้วยังสามารถประหยัดไอน้ำและเชื้อเพลิงที่ใช้ได้ นอกจากนี้การใช้เทคโนโลยีประหยัดไอน้ำเสริมมาตรการซ่อมบำรุงข้างต้นก็สามารถช่วยให้ได้ผลการประหยัดเพิ่มมากขึ้น

มาตรการประหยัดไอน้ำมีหลายแบบ วิธีที่สำคัญๆ ได้แก่ การหุ้มฉนวนอุปกรณ์การผลิตและใช้ไอน้ำ การนำคอนเดนเสทกลับมาใช้ใหม่ และการทำไอน้ำแฟลช (flash steam) จากคอนเดนเสท แต่ปัญหาที่ประสบในปัจจุบันคือ การขาดการเผยแพร่ตัวอย่างของขั้นตอน วิธีการวิเคราะห์คำนวณอย่างละเอียด เพียงพอที่จะนำไปเป็นแบบอย่างสำหรับการดำเนินงาน ด้วยเหตุผลดังกล่าว จึงได้จัดทำกรณีศึกษานี้ขึ้น โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะสาธิตขั้นตอน และวิธีการดังกล่าว ในแต่ละมาตรการประหยัดข้างต้น เพื่อส่งเสริมให้มีการพิจารณานำไปใช้แพร่หลายต่อไป

ในการศึกษาได้เลือกเอากระบวนการผลิตของโรงงานยาสูบแห่งหนึ่งเป็นตัวอย่าง เนื่องจากการผลิตบุหรี่ เป็นอุตสาหกรรมที่ต้องใช้ความร้อนจากไอน้ำค่อนข้างมาก โรงงานที่พิจารณาประกอบด้วยอาคารผลิตยาสูบ 3 อาคาร ซึ่งจะให้ชื่อว่าโรงงาน 3, 4 และ 5 ตามลำดับ ดังจะกล่าวละเอียดต่อไป

### 2. ขั้นตอนการผลิตยาสูบและการใช้ไอน้ำในโรงงาน

การผลิตยาสูบหรือบุหรี่เป็นการนำส่วนที่เป็นใบและก้านของต้นยาสูบมาผ่านกรรมวิธีทางเทคนิค และความร้อนโดยการหั่น อบ คั่ว ฉีดพรมน้ำปรุงแต่ง ฯลฯ เพื่อให้ได้ลักษณะและรสชาติของยาสูบที่

ต้องการ วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตประกอบด้วย ไบโธ และก้านไบโธชาบอร์เลซ์ ไบโธชาและก้านไบโธชาเวอร์จินีส์ และไบโธชาตอร์กิช ผลผลิตขั้นสุดท้ายของโรงงานจะประกอบด้วยขุมนหรือที่ชื่อต่างๆ ปริมาณการผลิตขั้นต้นเฉลี่ยของโรงงานที่พิจารณาทั้ง 3 โรงงาน 160,000 กิโลกรัมต่อวัน โดยมีจำนวนชั่วโมงทำงาน 4,121 ชั่วโมงต่อปี ในแต่ละขั้นตอนการผลิตจะคำนึงถึงความชื้นของไบโธชาเป็นสำคัญ เพราะถ้าไบโธชาความชื้นน้อยเกินไปอาจทำให้ไบโธชาแตกหักได้ ขั้นตอนที่ 1

ลักษณะของการผลิตและใช้ไอน้ำของโรงงาน 3 และ 4 มีลักษณะใกล้เคียงกัน สำหรับโรงงาน 5 การผลิตและใช้ไอน้ำจะมากที่สุดเนื่องจากมีปริมาณการผลิตมากกว่า ไอน้ำที่ผลิตได้จากหม้อไอน้ำที่มีพิกัด 18 บาร์ 12 ตัน/ชั่วโมง เป็นชนิดไอน้ำอิ่มตัวมีความดันไอน้ำใช้งาน 11 บาร์ ปริมาณการผลิตเฉลี่ย 5 ตัน/ชั่วโมงจะถูกส่งไปในระบบท่อส่งไอน้ำผ่านวาล์วลดความดัน (reducing valve) เพื่อให้ได้ความดันเท่ากับความต้องการของเครื่องจักรนั้นๆ น้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้กับหม้อไอน้ำเป็นน้ำมันเตาชนิดที่ 2 ราคา 3.5 บาท/ลิตร (ราคาเมื่อปี 2540) มีค่าความร้อนสูง (HHV) 39,893.6 กิโลจูล/ลิตร รูปที่ 2 แสดงแผนผังการผลิตและส่งจ่ายไอน้ำให้กับเครื่องจักรในกระบวนการผลิตที่ใช้ในโรงงาน 3

### 3. กรรรมวิธีการศึกษา

จากการศึกษาถึงระบบการผลิตและเครื่องจักรอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ไอน้ำในโรงงานชาพบว่ามีความเป็นไปได้ที่จะใช้มาตรการประหยัดไอน้ำ โดยการหุ้มฉนวน การนำคอนเดนเสทกลับมาสวมน้ำป้อน และผลิตไอน้ำแฟลช (flash steam) จากคอนเดนเสท ซึ่งทั้งสามแนวทางมีขั้นตอนและกรรมวิธีในการศึกษาดังนี้

#### 3.1 การหุ้มฉนวนเครื่องจักร

กระบวนการผลิตของโรงงานมีการใช้เครื่องจักรสำเร็จรูป เช่นเครื่องให้ความชื้นไบโธ เครื่องคั่วชาเส้น ฯลฯ ขณะเดินเครื่องทำงานอุณหภูมิของผิวเครื่องจักรจะสูงกว่าบรรยากาศโดยรอบจากการตรวจวัดพบว่าอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 78-156 °C ส่วนบรรยากาศบริเวณทำงานมีอุณหภูมิประมาณ 32 °C จึงทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนออกจากผิวของเครื่องจักร โดยการพาและแผ่รังสี ในการนี้สามารถแก้ไขได้ โดยการหุ้มฉนวน

##### 3.1.1 การวิเคราะห์หาอัตราความร้อนสูญเสีย

กรอบและเงื่อนไขที่ใช้ในการวิเคราะห์มีดังนี้

1. เนื่องจากบริเวณภายในโรงงานไม่มีการใช้พัดลมระบายความร้อน ดังนั้นสมมติให้ความเร็วลมมีค่าเท่ากับ 0
2. ฉนวนที่พิจารณาเป็นฉนวนใยแก้วซึ่งมีค่า emittance เท่ากับ 0.5 [1]
3. ลักษณะผิวของเครื่องจักรทำด้วยโลหะเคลือบสีเขียว ซึ่งจาก

ตารางสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของวัสดุ [2] ได้ค่า emittance เท่ากับ 0.8

4. ค่าความต้านทานต่อการไหลของความร้อน โดยการนำความร้อนในฉนวน (insulation-resistance,  $R_s$ ) หากจากตารางค่า  $R_s$  มาตรฐาน [2]

สมการที่ใช้คำนวณหาอัตราความร้อนสูญเสียจากผิวเครื่องจักรก่อนการหุ้มฉนวน ประกอบด้วย [2]

##### 1. การสูญเสียความร้อนโดยการพา ( $Q_{cv}$ )

$$\frac{Q_{cv}}{A} = h (T_s - T_\alpha)^{1/4}, \text{ W/m}^2 \quad \dots(1)$$

โดยที่  $h$  = สัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติ

$$= 1.957 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

$T_s$  = อุณหภูมิผิวเครื่องจักร, K

$T_\alpha$  = อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม, K

$A$  = พื้นที่ผิวถ่ายเทความร้อน (จากขนาดมิติของเครื่อง),  $\text{m}^2$

##### 2. การสูญเสียความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อน ( $Q_{ra}$ )

$$\frac{Q_{ra}}{A} = \sigma \epsilon (T_s^4 - T_\alpha^4), \text{ W/m}^2 \quad \dots(2)$$

โดยที่  $\sigma$  = ค่าคงที่ของสเตฟานและโบลซ์แมน

$$= 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$$

$\epsilon$  = Emittance ของผิวเครื่องจักร

##### 3. การสูญเสียความร้อนรวม ( $Q_t$ )

$$Q_t = Q_{cv} + Q_{ra}, \text{ Watt} \quad \dots(3)$$

ในการหุ้มฉนวนเครื่องจักร ได้เลือกใช้ฉนวนใยแก้วชนิดหุ้มด้วยฟอยล์ที่มีความหนาแน่น 24  $\text{kg/m}^3$  โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน,  $k$  จาก [3] อัตราการสูญเสียความร้อนภายหลังการหุ้มฉนวน  $Q_L$  สามารถคำนวณหาได้จากสมการ (4) ดังนี้

$$\frac{Q_L}{A} = \frac{T_s - T_\alpha}{R_i + R_s} \quad \dots(4)$$

ทั้งนี้  $R_i$  = ความต้านทานต่อการไหลของความร้อนผ่านฉนวน

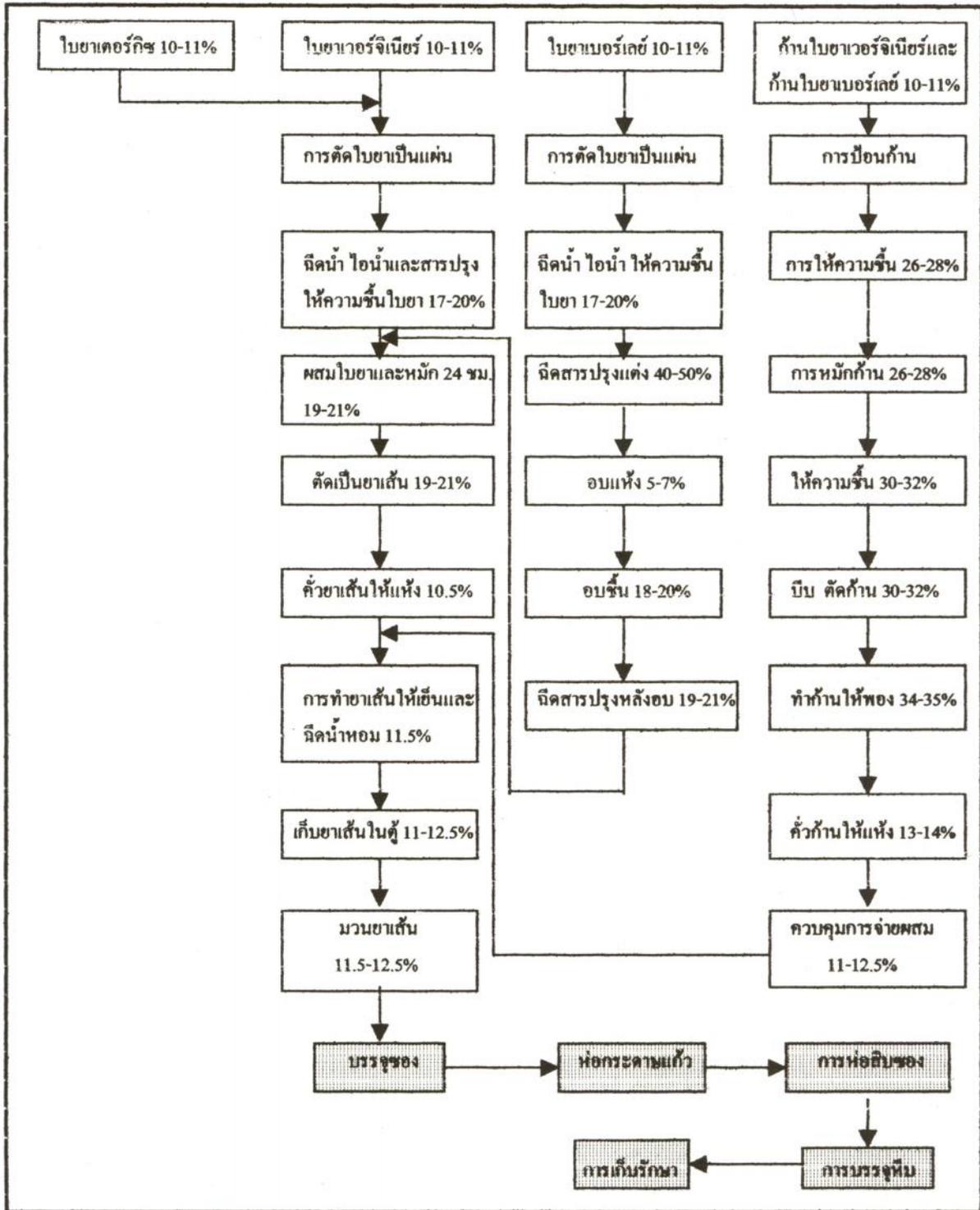
$$= \frac{L}{k}$$

โดยที่  $L$  เป็นความหนาของฉนวน

ในการคำนวณสมมติให้  $T_s$  มีค่าคงเดิม และ  $R_s$  หากจากตารางมาตรฐานที่ค่า emittance = 0.5 [2] ถ้าหาค่า  $k$  ของฉนวน ให้หาค่าที่อุณหภูมิเฉลี่ยของฉนวน

อัตราการสูญเสียความร้อน ที่เกิดขึ้นทั้งก่อนและหลังการหุ้มฉนวนสามารถคิดเทียบเป็นอัตราการสูญเสียไอน้ำ โดยใช้สูตรต่อไปนี้

$$Q_L = m_s (h_g - h_f) \quad \dots(5)$$



รูปที่ 1 กระบวนการผลิตนุหรีและเปอร์เซนต์ควมข้นของใบชาที่แต่ละขันตอน

โดยที่  $m_u$  เป็นอัตราการสูญเสียไอน้ำ

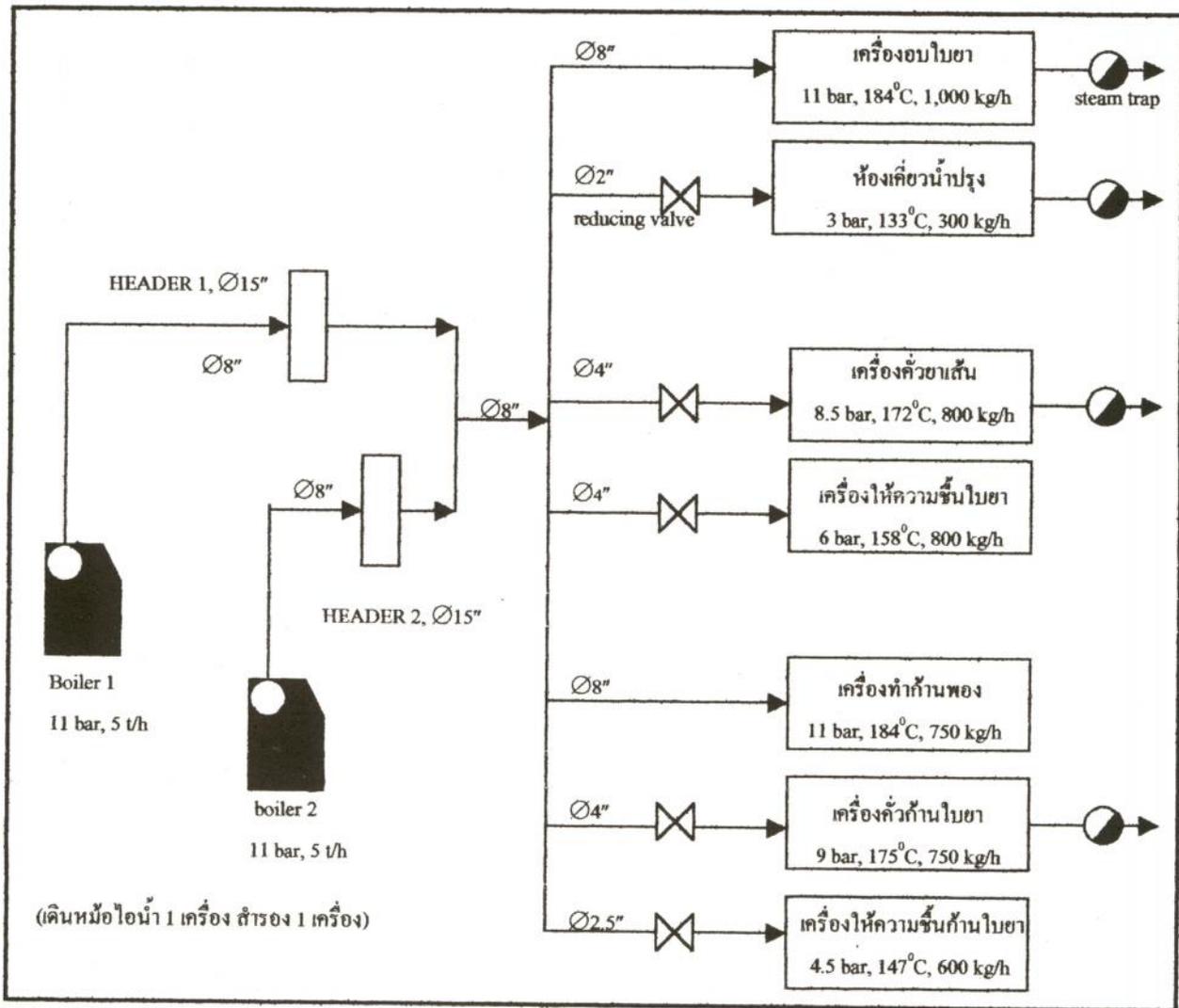
$h_g$  และ  $h_c$  เป็นค่าเอนธิลปีจำเพาะของไอน้ำที่ออกจากหม้อ  
ไอน้ำและน้ำป้อนที่เข้าหม้อไอน้ำสมมุติที่ 90 °C ตามลำดับ  
ควมร้อนที่สูญเสียข้างคั้นสามารถคิดเป็นปริมาณเชื้อเพลิงที่  
สูญเสียไปได้โดยอาศัยสมการ

$$\eta_b = \frac{Q_L}{m_f \text{ HHV}} \quad \dots(6)$$

โดยที่  $\eta_b$  = ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ สมมุติให้เท่ากับ 85%

$m_f$  = อัตราการสูญเสียเชื้อเพลิง

HHV = ค่าควมร้อนสูงของเชื้อเพลิง



รูปที่ 2 แผนผังระบบการผลิตและใช้ไอน้ำในโรงงาน 3

ต่อจากนั้นสามารถคำนวณหาอัตราค่าใช้จ่ายที่สูญเสียไปได้ เมื่อรู้ราคาเชื้อเพลิง (3.5 บาท/ลิตร)

### 3.1.2 การหาความหนาที่เหมาะสมของฉนวน

ในการหุ้มฉนวนเครื่องจักร ได้ใช้ขนาดความหนาที่เหมาะสมเชิงเศรษฐศาสตร์ (economic thickness) ซึ่งเป็นขนาดความหนาที่ให้ผลรวมของค่าใช้จ่ายในการหุ้มฉนวนและค่าความร้อนสูญเสียต่ำสุดดังที่กล่าวใน [4] โดยอาศัยสมการคำนวณดังต่อไปนี้

ก. ค่าใช้จ่ายในการหุ้มฉนวน ( $S_1$ ) ซึ่งประกอบด้วยราคาคำนวนรวมค่าติดตั้ง ( $P$ ) ซึ่งหาได้จาก [5] และค่าบำรุงรักษาในแต่ละปี ( $C_m$ ) ซึ่งสมมุติให้เท่ากับ 10% ของราคาคำนวน เมื่อปรับเป็นมูลค่าเงินปัจจุบันจะได้ดังนี้

$$S_1 = P + F_n \quad \dots(7)$$

$$\text{โดยที่ } F_n = C_m \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \quad \dots(8)$$

= มูลค่าปัจจุบันของค่าบำรุงรักษาในแต่ละปี

$i$  = อัตราดอกเบี้ย สมมุติ 12.5% ต่อปี

$n$  = อายุการใช้งานของฉนวน สมมุติ 5 ปี

ข. ค่าความร้อนที่สูญเสียจากฉนวน ( $S_2$ ) ซึ่งคิดจากค่าพลังงานที่สูญเสียไปในแต่ละปี ( $M$ ) ปรับเป็นมูลค่าปัจจุบัน ดังนี้

$$S_2 = M \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \quad \dots(9)$$

ค. ค่าใช้จ่ายรวม ( $S_3$ )

$$\text{หาได้จาก } S_3 = S_1 + S_2 \quad \dots(10)$$

สำหรับเครื่องจักรแต่ละเครื่อง พิจารณาความหนาของฉนวน  
หลายๆ ขนาด โดยที่แต่ละขนาดคำนวณหาค่า  $S_3$  หลังจากนั้นเลือก  
ความหนาที่ให้ค่า  $S_3$  ต่ำสุด ค่าที่ได้จะเป็นความหนาที่เหมาะสม  
เชิงเศรษฐศาสตร์ สำหรับเครื่องจักรนั้น

### 3.1.3 การประเมินผลตอบแทนการลงทุน

ดัชนีที่ใช้ในการประเมินผลตอบแทน ได้แก่

1. ระยะเวลาคืนทุน (payback period, n) ซึ่งหาได้จากสมการ

$$P \frac{(1+i)^n}{i(1+i)^n - 1} = A \quad \dots(11)$$

โดยที่ P เป็นเงินลงทุนคำนวณรวมค่าติดตั้ง, บาท

i เป็นอัตราดอกเบี้ย

n เป็นระยะเวลาคืนทุน, ปี

A เป็นเงินที่ประหยัดได้ต่อปี, บาท/ปี ซึ่งหาได้จากปริมาณ  
ความร้อนสูญเสียที่ลดลงเนื่องจากการใช้ฉนวนที่มีความ  
หนาเชิงเศรษฐศาสตร์ที่เหมาะสม

2. อัตราผลตอบแทนภายใน (internal rate of return, IRR)

ซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$$\sum_{t=1}^N \frac{A}{[1+IRR]^t} - P = 0 \quad \dots(12)$$

โดยที่ t เป็นปีที่พิจารณา

N เป็นอายุการใช้งานของฉนวน, ปี

IRR เป็นอัตราผลตอบแทนภายใน, ทศนิยม

ผลตอบแทนที่เข้าเกณฑ์ ควรมีระยะเวลาคืนทุนต่ำกว่า 7 ปี หรือ  
มีอัตราผลตอบแทนภายในสูงกว่า 25%

### 3.2 การนำคอนเดนเสทกลับมามาผสมน้ำป้อน

สำหรับโรงงานที่ศึกษา มีการนำคอนเดนเสทกลับมามาผสมน้ำป้อน  
หม้อไอน้ำโดยใช้วงจรเปิดในโรงงาน 5 ส่วน โรงงาน 3 และ 4 ปล่อง  
คอนเดนเสทลงท่อระบายน้ำ จึงได้ทำการศึกษาศักยภาพในการนำ  
คอนเดนเสทกลับมามาผสมน้ำป้อน คอนเดนเสทในโรงงานเกิดจากการ  
ให้ความร้อน โดยใช้ไอน้ำในเครื่องอบใบชา ห้องเคี้ยวน้ำตาล  
เครื่องคั่วชาเส้น และก้านใบชา ดังจะเห็นได้ในรูปที่ 2 คอนเดนเสท  
เหล่านี้ยังมีความดันและอุณหภูมิสูง ซึ่งเมื่อนำมาผสมน้ำป้อนหม้อ  
ไอน้ำก็จะช่วยประหยัดไอน้ำ (และเชื้อเพลิง) ที่ใช้ในการอุ่นน้ำป้อน  
ได้ รูปที่ 3 แสดงระบบการผลิตไอน้ำ เมื่อมีการนำคอนเดนเสทกลับ  
มาผสมน้ำป้อน

จากรูป สามารถคำนวณหาความร้อนที่ประหยัดได้เป็น ร้อยละ  
ดังนี้

ค่าความร้อนที่ประหยัดได้เป็นร้อยละ

$$= \frac{m_x (h_x - h_g)}{m_s (h_s - h_g)} \times 100 \quad \dots(13)$$

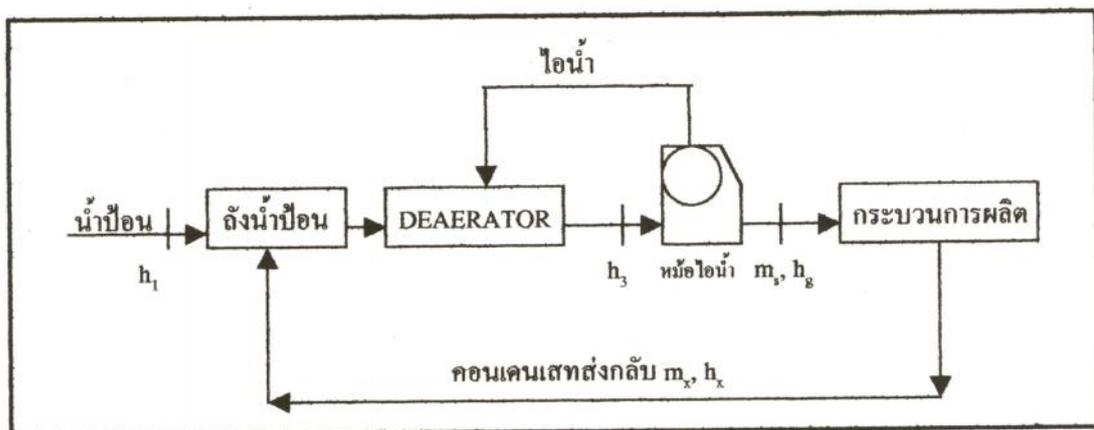
โดยที่  $m_x$  เป็นปริมาณคอนเดนเสทที่นำกลับมามาผสมน้ำป้อน, kg/h

$m_s$  เป็นปริมาณไอน้ำที่ผลิตจากหม้อไอน้ำ, kg/h

$h_x$  เป็นเอนทัลปีจำเพาะของคอนเดนเสท, kJ/kg

$h_g$  เป็นเอนทัลปีจำเพาะของน้ำป้อน (อุณหภูมิ 30 °C) ก่อน  
ผสมกับคอนเดนเสท, kJ/kg

$h_s$  เป็นเอนทัลปีจำเพาะของไอน้ำที่ผลิตได้ (ที่ความดัน 11  
บาร์ ในกรณีนี้), kJ/kg



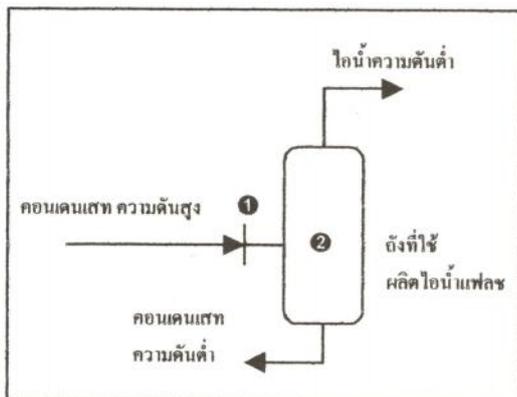
รูปที่ 3 การนำคอนเดนเสทผสมน้ำป้อนในระบบวงจรเปิด

$h_3$  เป็นเอนทัลปีจำเพาะของน้ำป้อนที่อุณหภูมิภายหลังที่ผสมกับคอนเดนเสท (กำหนดเป็น  $90^\circ\text{C}$  ในกรณีนี้),  $\text{kJ/kg}$

ปริมาณความร้อนที่ประหยัดได้นี้สามารถนำไปคำนวณหาปริมาณไอน้ำ และเชื้อเพลิงที่ประหยัดได้ โดยใช้สมการ (5) และ (6) ที่ได้แสดงรายละเอียดไว้แล้ว [6] โดยสมมุติอายุการใช้งาน และอัตราดอกเบี้ยเหมือนในกรณีของถนนวน ก็จะสามารรถคำนวณหาผลตอบแทนการลงทุนได้

### 3.3 การนำคอนเดนเสทมาผลิตไอน้ำแฟลช

คอนเดนเสทที่ได้จากกระบวนการผลิตคิงที่กล่าวไว้ในข้อก่อน บางแห่งมีความดันค่อนข้างสูง สามารถนำมาผลิตไอน้ำแฟลชหรือไอน้ำความดันต่ำ แล้วนำไปใช้ในกระบวนการผลิตที่ต้องการไอน้ำความดันต่ำได้ ซึ่งจะช่วยประหยัดไอน้ำ (และเชื้อเพลิง) สำหรับโรงงานทั้ง 3 โรง มีคอนเดนเสทความดัน 8.5-11 บาร์ ที่สามารถนำมาผลิตไอน้ำ 3 บาร์ เพื่อใช้ในห้องไอน้ำป้อน (ดูรูปที่ 2) การผลิตไอน้ำความดันต่ำจากคอนเดนเสทความดันสูงอาศัยถึงแฟลช ที่แสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ระบบผลิตไอน้ำแฟลช

โดยอาศัยกฎข้อที่ 1 ทาง thermodynamics ได้สมการความสัมพันธ

$$h_1 = h_{f2} + x_2 h_{fg2} \quad \dots(14)$$

โดยที่  $h_1$  เป็นเอนทัลปีจำเพาะของคอนเดนเสทความดันสูง,  $\text{kJ/kg}$

$h_{f2}$  เป็นเอนทัลปีจำเพาะของน้ำอิ่มตัวที่ความดันของถังแฟลช,  $\text{kJ/kg}$

$x_2$  เป็นอัตราส่วนความแห้งของไอน้ำเปียกในถังแฟลช

$h_{fg2}$  เป็นความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอที่ความดันของถังแฟลช,  $\text{kJ/kg}$

จากนั้น คำนวณหาปริมาณไอน้ำแฟลชที่ผลิตได้ต่อ  $\text{kg}$  คอนเดนเสทที่ไหลเข้าจากสมการ

$$m_f = x_2 m_c \quad \dots(15)$$

โดยที่  $m_f$  เป็นปริมาณไอน้ำแฟลชที่ได้,  $\text{kg/h}$

$m_c$  เป็นปริมาณคอนเดนเสทที่ไหลเข้าถัง,  $\text{kg/h}$

ไอน้ำแฟลชที่ได้เมื่อนำไปใช้ในกระบวนการผลิตแทนไอน้ำที่ผลิตจากหม้อไอน้ำ จะช่วยประหยัดไอน้ำ (และเชื้อเพลิง) ซึ่งสามารถคำนวณหาเงินที่ประหยัดได้จากต้นทุนราคาไอน้ำ โดยอาศัยสมการ (5) และ (6) โดยสมมุติให้ไอน้ำมีราคาเท่ากันที่ทุกระดับความดัน สำหรับค่าใช้จ่ายในการลงทุนติดตั้งระบบ อาศัยข้อมูลจากผู้รับเหมา ซึ่งเมื่อนำไปเทียบกับเงินที่ประหยัดได้ก็สามารถคำนวณหาผลตอบแทนการลงทุนได้ ซึ่งในกรณีนี้ได้สมมุติอายุการใช้งานของระบบ และอัตราดอกเบี้ยเหมือนกับ 2 กรณีแรก

รายละเอียดต่างๆ อาจพิจารณาได้ใน [6]

## 4. ผลการศึกษา

### 4.1 การหุ้มฉนวนเครื่องจักร

โดยอาศัยกรรมวิธีที่ได้กล่าวมาแล้วในข้อ 3.1 ประกอบกับข้อมูลและสมมุติฐานที่กล่าวมาแล้ว ได้ขนาดความหนาฉนวนที่เหมาะสมเชิงเศรษฐศาสตร์ ค่าเชื้อเพลิงที่ประหยัดได้ และผลตอบแทนการลงทุนของเครื่องจักรแต่ละชนิดในโรงงานแต่ละแห่ง ดังที่แสดงในตารางที่ 1.

### 4.2 การนำคอนเดนเสทกลับมาผสมน้ำป้อน

มาตรการนี้จะพิจารณาเฉพาะโรงงาน 3 และ 4 เนื่องจากโรงงาน 5 ได้ปฏิบัติตามมาตรการนี้แล้ว การประเมินศักยภาพการประหยัดได้อาศัยกรรมวิธีที่แสดงในข้อ 3.2 ประกอบกับค่าอัตราการไหล และอุณหภูมิที่วัดได้จริง ที่ปลายท่อคอนเดนเสทของเครื่องจักรแต่ละเครื่องก่อนปล่อยออกของน้ำที่ความดันบรรยากาศ ซึ่งสรุปได้ดังนี้

โรงงาน 3

เครื่องอบใบยา	0.23 $\text{kg/s}$ , $81^\circ\text{C}$
ห้องไอน้ำป้อน	0.07 $\text{kg/s}$ , $78^\circ\text{C}$
เครื่องคว่ำเต็น	0.20 $\text{kg/s}$ , $76^\circ\text{C}$
เครื่องคว่ำก้านใบยา	0.18 $\text{kg/s}$ , $75^\circ\text{C}$

โรงงาน 4

เครื่องอบใบยา 1	0.2 $\text{kg/s}$ , $82^\circ\text{C}$
เครื่องอบใบยา 2	0.24 $\text{kg/s}$ , $85^\circ\text{C}$
ห้องไอน้ำป้อน	0.05 $\text{kg/s}$ , $71^\circ\text{C}$
เครื่องคว่ำเต็น 1	0.16 $\text{kg/s}$ , $78^\circ\text{C}$
เครื่องคว่ำเต็น 2	0.15 $\text{kg/s}$ , $76^\circ\text{C}$

ตารางที่ 1. สรุปผลการหุ้มฉนวนเครื่องจักร

โรงงาน	เครื่องจักร	อุณหภูมิผิวเฉลี่ย (°C)	พื้นที่ผิว (m <sup>2</sup> )	อัตราความร้อนสูญเสีย (kW)	การหุ้มฉนวน				
					ความหนาที่เหมาะสม (mm)	ค่าเชื้อเพลิงที่ประหยัดได้ (บาท/ปี)	เงินลงทุน (บาท)	ระยะเวลาคืนทุน (ปี)	อัตราผลตอบแทน (%)
3	เครื่องคั่วยาเส้น	101	23.00	20.33	76	29,740	6,725	0.24	442
	เครื่องให้ความชื้นใบยา	154	29.00	55.36	100	81,926	10,585	0.15	774
	เครื่องคั่วก้านใบยา	118	34.55	40.72	76	59,633	10,102	0.19	591
	เครื่องให้ความชื้นก้านใบยา	78	34.50	18.30	50	26,088	10,088	0.29	361
	เครื่องทำก้านพอง	87	34.40	20.92	50	29,680	10,059	0.36	295
						227,067	47,559		
4	เครื่องคั่วยาเส้น 1	96	23.00	18.46	76	26,980	6,725	0.27	400
	เครื่องคั่วยาเส้น 2	98	23.00	19.20	76	28,070	6,725	0.26	416
	เครื่องให้ความชื้นใบยา 1	141	29.00	47.25	100	69,978	10,585	0.16	661
	เครื่องให้ความชื้นใบยา 2	151	29.00	53.44	100	79,187	10,585	0.14	748
						204,215	34,620		
5	เครื่องคั่วยาเส้น 1	96	23.00	18.46	76	26,980	6,725	0.27	400
	เครื่องคั่วยาเส้น 2	89	23.00	15.94	76	22,751	6,725	0.32	338
	เครื่องให้ความชื้นใบยา 1	153	29.00	54.71	100	81,089	10,585	0.14	766
	เครื่องให้ความชื้นใบยา 2	156	29.00	56.66	100	83,981	10,585	0.13	794
	เครื่องคั่วก้านใบยา 1	121	34.55	42.69	76	62,509	10,102	0.17	618
	เครื่องคั่วก้านใบยา 2	119	34.55	41.41	76	60,627	10,102	0.17	600
	เครื่องให้ความชื้นก้านใบยา 1	81	34.50	19.79	50	28,221	7,242	0.27	390
	เครื่องให้ความชื้นก้านใบยา 2	79	34.50	18.79	50	26,795	7,242	0.29	370
	เครื่องให้ความชื้นก้านใบยา 3	83	34.50	20.79	50	29,667	7,242	0.26	409
	เครื่องทำก้านพอง 1	86	34.40	22.27	50	31,783	7,221	0.34	316
เครื่องทำก้านพอง 2	90	34.40	24.36	76	34,793	34,793	0.31	345	
						489,196	93,830		

สำหรับรายละเอียดการคำนวณดูได้ใน [6]

คอนเดนเสทของแต่ละโรงงาน เมื่อรวมเก็บในถังคอนเดนเสทแล้วป้อนเข้าผสมถึงน้ำป้อน ดังที่แสดงในรูปที่ 3 จะทำให้ประหยัดไอน้ำและเชื้อเพลิง รวมทั้งน้ำที่ใช้ป้อนหม้อไอน้ำด้วย โดยการใช้สมการ (13) ทั้งนี้หา  $m_3$  และ  $h_3$  ได้จากการทำสมดุลมวล และพลังงานที่ระบบคอนเดนเสท ส่วน  $m_3 = 5,000 \text{ kg/h}$  และ  $h_3$  หาที่  $90^\circ\text{C}$  ได้ผลสรุปในตารางที่ 2

#### 4.3 การนำคอนเดนเสทกลับมาผลิตไอน้ำเฟลช

มาตรการนี้ เป็นทางเลือกอีกแนวทางหนึ่งของการนำคอนเดนเสทมาใช้ประโยชน์ ในการพิจารณาได้เลือกเฉพาะคอนเดนเสทความดันสูง เพื่อให้ได้ผลตอบแทนคุ้มกับการลงทุน โดยอาศัยหลักการนี้ กระแสคอนเดนเสทที่นำมาผลิตไอน้ำเฟลช 3 บาร์ เพื่อนำไปใช้ในห้องคั่วยาสูบสำหรับโรงงาน 3 และ 4 มีดังนี้

## ตารางที่ 2. สรุปผลการนำคอนเดนเสทกลับมามีอุณหภูมิ

โรงงาน	คอนเดนเสทที่นำกลับมา		การประหยัดที่ได้			เงินลงทุน	ค่าใช้จ่ายในการเดินเครื่องและบำรุงรักษา	ระยะเวลา	อัตราผลตอบแทนภายใน
	อัตราการไหล (kg/h)	อุณหภูมิ (°C)	ไอน้ำ (kg/h)	ค่าเชื้อเพลิง (บาท/ปี)	ค่าน้ำ (บาท/ปี)				
3	2,448	77.6	200	201,929	104,009	308,345	54,350	1.41	76.8
4	2,880	80	250	255,296	122,364	391,569	59,630	1.42	76.5

สำหรับรายละเอียดการประเมินการลงทุน และค่าใช้จ่ายในการเดินเครื่องและบำรุงรักษา ดูได้จาก [6]

## ตารางที่ 3. สรุปผลการนำคอนเดนเสทมาผลิตไอน้ำเฟลซ

โรงงาน	คอนเดนเสทที่เก็บรวบรวมได้		ไอน้ำเฟลซ 3 บาร์ ที่ผลิตได้ (kg/h)	เงินที่ประหยัดได้ (บาท/ปี)	เงินลงทุน (บาท)	ค่าใช้จ่ายในการเดินเครื่องและบำรุงรักษา (บาท/ปี)	ระยะเวลาดำเนินการ (ปี)	อัตราผลตอบแทนภายใน
	อัตราการไหล (kg/h)	อุณหภูมิ (°C)						
3	0.43	178.9	140.9	162,750	300,000	30,000	2.82	34
4	0.44	184.1	160	183,615.5	300,000	30,000	2.38	43

สำหรับรายละเอียดการประเมินการลงทุน และค่าใช้จ่ายในการเดินเครื่องและบำรุงรักษา ดูได้จาก [6]

### โรงงาน 3

เครื่องอบใบชา คอนเดนเสทมีความดัน 11 บาร์ และอัตราการไหล 0.23 kg/s

เครื่องคั่วชาเต็น คอนเดนเสทมีความดัน 8.5 บาร์ และอัตราการไหล 0.2 kg/s

### โรงงาน 4

เครื่องอบใบชา 2 เครื่อง คอนเดนเสทมีความดัน 11 บาร์

อัตราการไหลรวม 0.44 kg/s

โดยพิจารณาวิธีที่แสดงในข้อ 3.3 และกำหนดให้รวมคอนเดนเสทในโรงงาน 3 ก่อน นำเข้าถังเฟลซ ได้ผลสรุปดังที่แสดงในตารางที่ 3

## 5. สรุป และวิจารณ์ผล

การวิเคราะห์ศึกษาสภาพการประหยัดพลังงานในโรงงานยาสูบ โดยใช้มาตรการประหยัด 3 แบบ คือ การหุ้มฉนวนเครื่องจักร การนำคอนเดนเสทกลับมามีอุณหภูมิ และผลิตไอน้ำเฟลซเพื่อใช้ในเครื่องจักรที่ต้องการไอน้ำความดันต่ำ ได้ผลสรุปดังที่แสดงในตารางที่ 4

ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า มาตรการประหยัดทั้ง 3 วิธี มีความคุ้มค่าต่อการลงทุนมาก โดยที่การหุ้มฉนวนจะใช้เงินลงทุนน้อยสุด แต่ให้ผลตอบแทนสูงสุด ส่วนการนำคอนเดนเสทกลับมามีอุณหภูมิ วิธี การนำมาผลิตไอน้ำเฟลซจะใช้เงินลงทุนน้อยกว่าการนำมามีอุณหภูมิ

และให้ผลตอบแทนน้อยกว่าด้วย แต่ข้อสรุปนี้ยังไม่ชัดเจน เนื่องจากผลตอบแทนของทั้ง 2 กรณี สามารถปรับปรุงให้สูงขึ้นได้ถ้ามีการหุ้มฉนวนท่อคอนเดนเสทในกรณีของการนำมามีอุณหภูมิ ซึ่งจะทำได้คอนเดนเสทและน้ำป้อนมีอุณหภูมิสูงขึ้น ส่งผลให้ได้การประหยัดมากขึ้น ในกรณีของการนำคอนเดนเสทมาผลิตไอน้ำเฟลซก็เช่นกัน การวิเคราะห์คำนวณไม่ได้ครอบคลุมถึงการนำคอนเดนเสทความดันต่ำที่เกิดขึ้นในถังเฟลซไปใช้ประโยชน์ เช่น ผลิตน้ำป้อน ซึ่งถ้ามีการดำเนินการ ก็จะช่วยให้ได้ผลตอบแทนดีขึ้นเช่นกัน

## 6. เอกสารอ้างอิง

1. ตรีการ ก้าวกสิกรรม, 2537, คู่มือฉนวนความร้อน, นำอักษรการพิมพ์
2. Turner, W.C., and Malloy, J.F., 1981, Thermal Insulation Handbook, 2 nd Ed., Robert E. Krieger Publishing Co., New York
3. Hess, L.Y., 1979, Insulation Guide for Buildings and Industrial Processes, Noyes Date Corporation, New Jersey
4. ลินดา จามกลาง, 2538, การกำหนดมาตรฐานการใช้พลังงานความร้อนของระบบไอน้ำในโรงงานอุตสาหกรรม, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพลังงาน, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
5. บริษัท ไมโคร ไฟเบอร์อุตสาหกรรม จำกัด, 2540, ราคาฉนวนใย

**ตารางที่ 4. สรุปผลการศึกษา**

มาตรการ	จำนวนเครื่องจักรที่ดำเนินการ (เครื่อง)	เงินลงทุน (บาท)	ไอน้ำที่ประหยัดได้		เงินที่ประหยัด ได้ทั้งหมด (บาท/ปี)	ระยะเวลา คืนทุน (ปี)	อัตราผลตอบแทน ภายใน (%)
			(kg/h)	% ของไอน้ำ ที่ผลิตได้			
<b>1. การหุ้มนวนเครื่องจักร</b>							
โรงงาน 3	5	47,559	222.28	4.45	227,067	0.15-0.36	295-774
โรงงาน 4	4	34,620	199.65	3.99	204,214	0.14-0.27	400-748
โรงงาน 5	11	93,830	478.25	4.78	489,196	0.13-0.34	316-794
<b>2. การนำคอนเดนเสท กลับมาผสมน้ำป้อน</b>							
โรงงาน 3	4	308,345	200.00	4.00	305,938	1.41	76.8
โรงงาน 4	5	391,569	250.00	5.00	377,660	1.42	80.0
<b>3. การนำคอนเดนเสท มาผลิตไอน้ำแฟลช</b>							
โรงงาน 3	2	300,000	140.90*	2.80	162,750	2.82	34.0
โรงงาน 4	2	300,000	160.00*	3.20	183,615.5	2.38	43.0

\* ไอน้ำแฟลช 3 บาร์

แก้วชนิดม้วนและแผ่น ชนิดมือลูมิเนียมฟอยล์, ประกาศเมื่อวันที่

1 กรกฎาคม 2539

6. อภิรักษ์ สวัสดิ์กิจ, 2541, ศักยภาพการใช้ระบบ cogeneration และเครื่องทำความชื้นแบบดูดกลืนในโรงงานยาสูบ, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีการจัดการพลังงาน, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี