

พฤติกรรมทางความร้อนบนพื้นฐานของกฎข้อที่ 1 และ 2 ทางเทอร์โมไดนามิกส์ ของระบบต้มฆ่าเชื้อในการบวนการผลิตผลไม้กระป๋อง

Thermal Performance based on the First and Second Law of Thermodynamics of a Cooker in Canned Pine-Apple Production Process

วศกร ดวงประทีป เปรมพงศ์ ยนต์ดิษฐถาวร ณัฐวุฒิ ทองเกลี้ยง อนุชิต ตุลากกร

ฉัตรชัย เปล่งสะอาด ชลธิศ เอี่ยมวรวิฑูรย์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม กรุงเทพฯ

โทร 02-579-1111 ต่อ 1202 อีเมล: Chonlathis@gmail.com

Wasagorn Duangprateep, Prempong Yontaraditthavon, Natthawut Thongklaing, Anoochit Tulakorn,

Chatchai Plengsaard, Chonlathis Eiamworawutthikul

Department of Mechanical Engineering, Sripatum University Bangkok 10900

Tel 02-579-0111 ext 1202 E-mail: Chonlathis@gmail.com

บทคัดย่อ

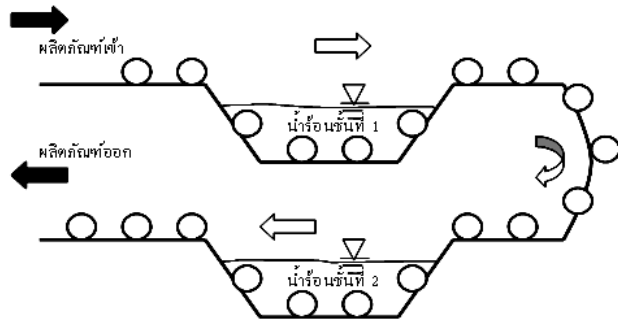
ระบบเครื่องต้มฆ่าเชื้อ ในกระบวนการผลิตสัปรดกระป๋อง ได้ถูกศึกษาพฤติกรรมทางความร้อน บนพื้นฐานของกฎข้อที่ 1 และ 2 ทางเทอร์โมไดนามิกส์ เพื่อการวิเคราะห์การทำงานของระบบทั้งในแง่ของปริมาณและคุณภาพของพลังงาน (energy และ exergy) เพื่อช่วยให้สามารถเข้าใจถึงพฤติกรรมทางความร้อนของระบบ และสามารถที่จะพิจารณาหา มาตรการการประหยัดพลังงานที่เหมาะสมได้ดียิ่งขึ้น การศึกษาจำลองการทำงานทางความร้อน ของเครื่องต้มฆ่าเชื้อ (cooker) บนพื้นฐานข้อมูลจากการทำงานของระบบในโรงงานจริง โดยใช้โปรแกรม Engineering Equation Solver (EES) เพื่อคำนวณพฤติกรรมทางความร้อนในช่วงการทำงานที่สภาวะต่างๆกัน ผลการวิเคราะห์ระบบพื้นฐานพบว่า มีการจ่ายไอน้ำที่มีคุณภาพสูง (หรือ exergy) ในปริมาณที่มากเกินไปจนเกินไป ทำให้ประสิทธิภาพทางกฎข้อที่ 2 มีค่าค่อนข้างต่ำ ส่งผลให้นำไปสู่มาตรการเพื่อลดการสูญเสียพลังงานเนื่องจาก ปริมาณไอน้ำจะเหวี่ยงจากผิวน้ำร้อนโดยการใช้ลูกลอยเพื่อลดพื้นที่ผิวสัมผัสกับอากาศ และ พลังงานความร้อนจากผนังอ่างต้มโดยการทาดนวน ผลการคำนวณแสดงค่าเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางกฎข้อที่ 1 และ 2 ของระบบ สำหรับการดำเนินการลดพลังงานไอน้ำจ่ายเข้าระบบในแต่ละมาตรการ ระหว่างวิธีการ ปรับลดปริมาณอัตราการไหลมวล และการปรับลดความดันของไอน้ำ นอกจากนี้ยังได้ครอบคลุมถึงผลการศึกษาทางเศรษฐศาสตร์ เพื่อระบุอัตราผลตอบแทนการลงทุนดำเนินการที่เหมาะสม อันเนื่องมาจากผลการประหยัดพลังงานที่ได้ในแต่ละปี และ ค่าร้อยละผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return หรือ IRR) เพื่อเป็นข้อแนะนำประกอบการตัดสินใจแก่ผู้ประกอบการ

Abstract

A cooking process in a canned pine-apple production is investigated in order to describe its thermal behavior using the first and the second law of thermodynamics. The study takes into account not only energy but also exergy transfer of the system, so both quantity and quality sides of the energy can be determined and the system thermal behavior can be better understood. By using this means, a more proper energy conservation strategy can be selected. The investigation is carried out through a simulation model using Engineering Equation Solver (EES) program. The model is used to calculate system performances over ranges of different operating conditions. The calculated results of a based system indicate relatively low 2nd law efficiency which leads to conservation strategies to reduce high exergy value of the input steam. The strategies investigated include the reduction of heat loss through evaporation of hot water surface and hot surface of the cooker wall. The strategies provide the choices of input energy reduction by reducing supplied steam mass flow rate or by lowering steam production pressure. The results illustrate comparisons between 1st and 2nd law efficiency of the system among energy conservation strategies applied. The study also investigates the economical values of each strategy through the amount of energy capital saved and the internal rate of return (IRR).

1. บทนำ

ศึกษาที่รายงานในที่นี้เป็นส่วนหนึ่งของ โครงการศึกษาต่อเนื่อง จาก โครงการเดิม [1, 2] ที่ได้รายงานพฤติกรรมทางความร้อนบนพื้นฐานของ กฎข้อที่ 1 ทางเทอร์โมไดนามิกส์ ของระบบ Cooker ในกระบวนการอบฆ่าเชื้อของกระบวนการผลิตสัปรดกระป๋อง สำหรับการ ทำงานในสภาวะปกติ ระบบ cooker แบบระบบเปิด ทำหน้าที่ในการต้ม ปรุงผลิตภัณฑ์เพื่อฆ่าเชื้อ โดยแหล่งความร้อนมาจาก ใช้น้ำอิ่มตัว (saturated steam) ซึ่งจ่ายเข้าสู่อ่างน้ำร้อนโดยตรงจากเครื่องกำเนิดไอน้ำ (boiler) ที่ความดันประมาณ 1.2 bar (gage) โครงสร้างหลักของ cooker ประกอบด้วย อ่างน้ำร้อน และ สายพานลำเลียงผลิตภัณฑ์ ผลิต จากเหล็กสแตนเลส ดังแสดงในรูปที่ 1



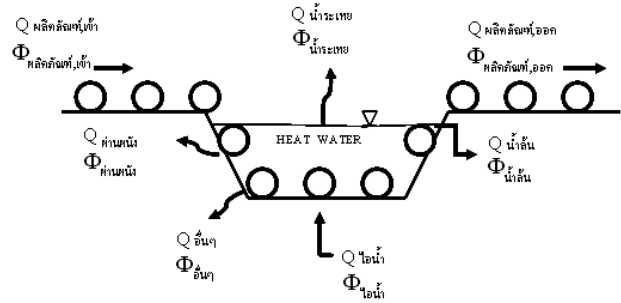
รูปที่ 1 แสดงลักษณะการลำเลียงผลิตภัณฑ์เข้าสู่เครื่อง Cooker

การทำงานของกระบวนการสามารถอธิบายได้ดังนี้ ผลิตภัณฑ์ สับปะรดกระป๋อง ถูกลำเลียงเข้าสู่อ่างน้ำร้อนด้านบนเพื่อต้มและเคลื่อน ที่ผ่านอ่างน้ำร้อนทีละชั้น แต่ละชั้นผลิตภัณฑ์จะใช้เวลาอยู่ในอ่าง ประมาณ 10 นาที กล่าวคือผลิตภัณฑ์ถูกลำเลียงเข้าสู่อ่างน้ำร้อน ประมาณ 10 นาที ทั้ง 2 อ่าง จากนั้นผลิตภัณฑ์จะถูกลำเลียงเข้าสู่อ่าง น้ำเย็นชั้นล่างสุด ซึ่งเป็นชั้นสุดท้ายของกระบวนการ อีกประมาณ 10 นาที รวมแล้วใช้เวลาอยู่ในอ่างประมาณ 30 นาที ในแต่ละอ่างของ เครื่อง Cooker จะมีรูระบายน้ำ เพื่อให้ น้ำล้นออกจากถัง เมื่อระดับน้ำ สูงเกินความต้องการ ความร้อนที่ให้กับน้ำในถังใช้น้ำอิ่มตัวที่ถูกส่ง มาจาก Boiler มีความดัน 1.2 bar (gage) อุณหภูมิของน้ำร้อนในอ่างที่ ใช้ในการต้มฆ่าเชื้ออยู่ที่ประมาณ 97-99 °C ในชั้นที่ 1 และไม่ต่ำกว่า 98-99 °C ในชั้นที่ 2 โดยมีอัตราการป้อนผลิตภัณฑ์เข้าสู่เครื่อง Cooker ประมาณ 800 กระป๋องต่อชั่วโมง

จากรายงานผลการศึกษาที่ผ่านมา [1] สำหรับกระบวนการต้มฆ่า เชื้อผลิตภัณฑ์ผลไม้กระป๋องนั้น ระบบจะมีการสูญเสียความร้อน ออกจากระบบในรูปแบบต่าง ๆ รวมประมาณ 70% และความร้อนที่นำไปใช้ ในผลิตภัณฑ์ประมาณ 30% สำหรับขนาดของ Cooker ที่ใช้เป็นกรณี ศึกษา นี้ ใช้อุปกรณ์ฆ่าเชื้อผลิตภัณฑ์สับปะรดกระป๋องขนาดบรรจุ 30 (0.868 kg) อ่างน้ำแต่ละชั้นมีขนาดความกว้าง 1.62 เมตร ยาว 7.12 เมตร และสูง 0.34 เมตร

2. การวิเคราะห์ทางความร้อนของระบบ

การวิเคราะห์การถ่ายเทพลังงานของระบบ cooker ทั้งในส่วน ของ อัตราการถ่ายเทพลังงานความร้อน ($\dot{Q}$) และ exergy ($\dot{\Phi}$) สามารถ แสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงการถ่ายเทพลังงานของระบบ cooker

ระบบมีการถ่ายเทมวลเป็นไปตามสมการสมดุลด้านล่าง

$$\dot{m}_S = \dot{m}_W + \dot{m}_V \quad (1)$$

เมื่อ $\dot{m}_S$ คือมวลของไอน้ำ, $\dot{m}_W$ คือมวลของน้ำล้น, และ $\dot{m}_V$ คือ มวลของน้ำระเหยจากผิวน้ำร้อน

สำหรับอัตราการการถ่ายเทพลังงานเข้าและออกจากระบบ สามารถอธิบายได้ตามสมการดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\text{ไอน้ำ}} &= (\dot{Q}_{\text{ผลิตภัณฑ์ออก}} - \dot{Q}_{\text{ผลิตภัณฑ์เข้า}}) \\ &+ \dot{Q}_{\text{น้ำล้น}} + \dot{Q}_{\text{น้ำระเหย}} + \dot{Q}_{\text{ผนัง}} + \dot{Q}_{\text{อื่นๆ}} \end{aligned} \quad (2)$$

โดยที่ $\dot{Q}_{\text{ไอน้ำ}}$ คืออัตราพลังงานความร้อนจากไอน้ำอิ่มตัวที่จ่ายให้แก่ ระบบที่ความดัน 1.2 bar (gage) ที่การทำงานปกติ สำหรับทางด้าน ซ้ายของสมการ (2) เป็นพลังงานความร้อนขาออกจากระบบ โดยเป็น ส่วนที่ใช้ไปกับผลิตภัณฑ์ซึ่งก็คือ output ที่ต้องการ และ ส่วนที่สูญเสียไป กับ น้ำที่ล้นออกจากอ่างน้ำร้อน ไอน้ำระเหยจากผิวน้ำร้อน ความร้อน สูญเสียออกจากผนัง cooker และ ส่วนอื่นๆ

การคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อน ในส่วนต่างๆดังกล่าว สามารถทำได้โดยใช้ ค่าจากการวัดจากการทำงานจริงของระบบ ดัง แสดงไว้ในตารางที่ 1 บนพื้นฐานทางเทอร์โมไดนามิกส์ และ การถ่ายเท ความร้อน ตามสมการที่ได้แสดงในตารางที่ 2 โดยมีค่าอ้างอิงในการ คำนวณที่อุณหภูมิสภาพแวดล้อมเท่ากับ 34°C ผลการคำนวณจากการ สมดุลสมการจะให้ค่าความร้อนที่สูญเสียในส่วนอื่นๆ ($\dot{Q}_{\text{อื่นๆ}}$) ที่ไม่ สามารถวัดไม่ได้จากหน่วยงานจริง

ตารางที่ 1 สภาพการทำงานของระบบ cooker

อุณหภูมิแวดล้อม เท่ากับ 34 °C
ปริมาณไอน้ำจ่ายเข้าระบบ เท่ากับ 85 kg/h (0.0236 kg/s)
ความดันไอน้ำที่เข้าเครื่อง Cooker เท่ากับ 1.2 bar.g
ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ไหลเข้าระบบเฉลี่ยเท่ากับ 0.31 kg/s
ปริมาณน้ำล้นเท่ากับ 0.00964 kg/s
อุณหภูมิน้ำร้อนในเครื่อง Cooker เท่ากับ 90 °C
อุณหภูมิผิวผนังเครื่อง Cooker เฉลี่ยเท่ากับ 73 °C
พื้นที่ผนังของเครื่อง Cooker ทั้ง 2 ชั้น รวมทั้งสิ้น 12.16 m ²

ตารางที่ 2 สมการคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนของระบบ cooker

$\dot{Q}_{\text{ไอน้ำ}} = \dot{m}_s \times (h_g - h_{f@34^{\circ}\text{C}})$
$(\dot{Q}_{\text{ผลิตภัณฑ์ออก}} - \dot{Q}_{\text{ผลิตภัณฑ์เข้า}})$ $= \dot{m}_{\text{product}} \times C_p \times (T_{\text{out}} - T_{\text{in}})$
$\dot{Q}_{\text{น้ำล้น}} = \dot{m}_w \times (h_{f@90^{\circ}\text{C}} - h_{f@34^{\circ}\text{C}})$
$\dot{Q}_{\text{น้ำระเหย}} = \dot{m}_v \times (h_{g@90^{\circ}\text{C}} - h_{f@34^{\circ}\text{C}})$
$\dot{Q}_{\text{ผนัง}} = (htc \times A \times (T_s - T_{\infty})) + (\sigma \times \varepsilon \times A \times (T_s^4 - T_{\infty}^4))$
โดยที่ h_f, h_g = enthalpy ของ saturated liquid และ saturated vapor C_p = ค่าความจุความร้อนเฉลี่ยของผลิตภัณฑ์ $T_{\text{in}}, T_{\text{out}}$ = อุณหภูมิผลิตภัณฑ์ก่อนและหลังเข้าระบบ cooker T_s, T_{∞} = อุณหภูมิผนังอ่างน้ำร้อนและอุณหภูมิบรรยากาศ A = พื้นที่รวมผนังอ่างน้ำร้อน, σ = ค่า Stefan Boltzman, ε = emissivity ของผิวผนัง htc = convective heat transfer coefficient

สำหรับการการถ่ายเท exergy ของระบบสามารถวิเคราะห์ได้ตามสมการสมดุลดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{\Phi}_{\text{ไอน้ำ}} = & (\dot{\Phi}_{\text{ผลิตภัณฑ์ออก}} - \dot{\Phi}_{\text{ผลิตภัณฑ์เข้า}}) \\ & + \dot{\Phi}_{\text{น้ำล้น}} + \dot{\Phi}_{\text{น้ำระเหย}} + \dot{\Phi}_{\text{ผนัง}} \\ & + \dot{\Phi}_{\text{อื่นๆ}} + \dot{\Phi}_{\text{destroy}} \end{aligned} \quad (3)$$

โดยที่สมการสำหรับการคำนวณ exergy ในแต่ละส่วนแสดงไว้ในตารางที่ 3 ที่ค่าอุณหภูมิ และความดันสภาพแวดล้อม (T_o, P_o) อ้างอิงเท่ากับ 34°C และ 101 kPa ตามลำดับ ซึ่งผลการคำนวณจากภาวะการทำงานปกติจะ ให้ค่า $\dot{\Phi}_{\text{อื่นๆ}} + \dot{\Phi}_{\text{destroy}}$ ของระบบ

ตารางที่ 3 สมการการคำนวณอัตราการถ่ายเท exergy ของระบบ

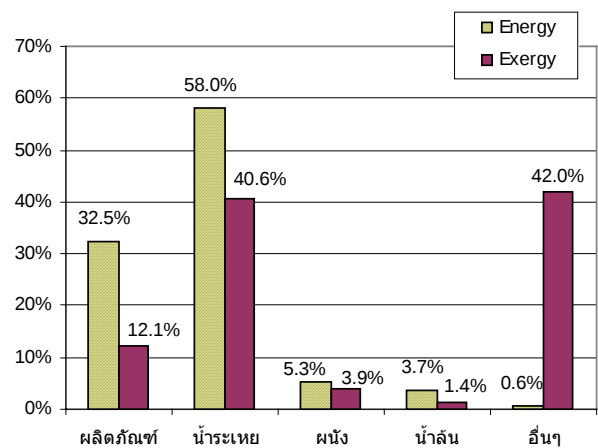
$\dot{\Phi}_{\text{ไอน้ำ}} = \dot{m}_s [h - T_o s] - [h_o - T_o s_o]$
$\dot{\Phi}_{\text{ผลิตภัณฑ์ออก}} - \dot{\Phi}_{\text{ผลิตภัณฑ์เข้า}}$ $= \dot{m}_{\text{product}} \left[C(T_{\text{out}} - T_{\text{in}}) - T_o \times C \times \ln\left(\frac{T_{\text{out}}}{T_{\text{in}}}\right) \right]$
$\dot{\Phi}_{\text{น้ำล้น}} = \dot{m}_w [h - T_o s] - [h_o - T_o s_o]$
$\dot{\Phi}_{\text{น้ำระเหย}} = \dot{m}_v [h - T_o s] - [h_o - T_o s_o]$
$\dot{\Phi}_{\text{ผนัง}} = \dot{Q}_{\text{ผนัง}} \times \left(1 - \frac{T_o}{T}\right)$
โดยที่ h = enthalpy, s = entropy, T = อุณหภูมิ h_o, s_o, T_o = enthalpy, entropy, และ อุณหภูมิที่สภาวะอ้างอิง

การคำนวณการทำงานของระบบพื้นฐาน ในสภาพการทำงานปกติของระบบ cooker ถูกจำลอง โดยใช้ โปรแกรม Engineering Equation Solver (EES) [4] บนพื้นฐานของการสมดุลมวล พลังงาน และ exergy ดังที่อธิบายไว้ข้างต้น โปรแกรม EES ถูกนำมาใช้เป็นเครื่องมือในการคำนวณเนื่องจาก มีคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์รวมอยู่ในฟังก์ชันของโปรแกรม และ สามารถขยายผลการศึกษาวงจรการทำงานของระบบพื้นฐาน ที่สภาวะการทำงานจำลองต่างๆ ที่เบี่ยงเบนไปจากการทำงานปกติได้โดยสะดวก

3. ผลการศึกษาพฤติกรรมทางความร้อน

3.1 ระบบพื้นฐาน

ผลการคำนวณสัดส่วนการถ่ายเท พลังงาน และ exergy จากไอน้ำ อิ่มตัวไปยังส่วนต่างๆของระบบ สามารถแสดงเป็นร้อยละได้ในรูปที่ 3 โดยกราฟแท่งแบบมีเส้นเฉียงแสดงสัดส่วนพลังงาน และ แบบสีพื้นทึบแสดงสัดส่วนของ exergy



รูปที่ 3 สัดส่วนการถ่ายเท พลังงาน และ exergy ไปยังส่วนต่างๆของระบบพื้นฐาน ที่สภาพการทำงานปกติ

จากผลการคำนวณการกระจายพลังงานของระบบพื้นฐาน แสดงให้เห็นว่าในการทำงานปกติ ระบบมีประสิทธิภาพตามกฎข้อที่ 1 ที่ 32.5% คือพลังงานความร้อนเพียงประมาณ 1 ใน 3 ของปริมาณที่ป้อนเข้าสู่ระบบโดยไอน้ำ ถูกใช้ไปกับการให้ความร้อนแก่ผลิตภัณฑ์ตามจุดประสงค์ และมีพลังงานความร้อนสูญเสียไปกับ ไอน้ำที่ระเหยจากผิวน้ำร้อน มีสัดส่วนที่มากที่สุดถึง 58% ในขณะที่ผืน และ น้ำล้น พลังงานสูญเสียไปประมาณ 5.3% และ 3.7% ตามลำดับ สำหรับในส่วนอื่นๆ ที่นอกเหนือจากการวัดข้อมูลหน้างานคิดเป็นเพียง 0.6%

หากวิเคราะห์ในส่วนของการถ่ายเท exergy ของระบบพบว่าผลิตภัณฑ์รับ exergy ของไอน้ำที่ป้อนเข้าระบบ ไปเพียงร้อยละ 12.1 หรือประสิทธิภาพทางกฎข้อที่ 2 ของระบบพื้นฐานมีค่าเท่ากับ 12.1% โดยมีค่าสูญเสียไปกับ น้ำระเหย ผืน และ น้ำล้น ที่ 40.6% 3.9% และ 1.4% ตามลำดับ ซึ่งเป็นสัดส่วนที่ลดหลั่นไปในลักษณะที่คล้ายกับการกระจายพลังงานของระบบ

ในทางตรงข้ามกับสัดส่วนการสูญเสียของพลังงาน ค่าสัดส่วน exergy ในส่วนอื่นๆ มีปริมาณมากที่สุดเท่ากับ 42% ซึ่งส่วนนี้ นอกจากจะประกอบด้วยส่วนอันเนื่องมาจาก พลังงานอื่นๆ ที่วัดไม่ได้จากข้อมูลหน้างาน แต่ยักรวมถึงส่วน exergy ที่ถูกทำลาย (exergy destruction) อย่างไรก็ตาม exergy สูญเสียในส่วนนี้คาดว่ามาจากปริมาณที่ถูกทำลายเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากปริมาณ exergy สูญเสียอันเนื่องมาจากพลังที่วัดไม่ได้จากข้อมูลหน้างาน ควรมีปริมาณที่เล็กน้อย ลดหลั่นไปตามปริมาณพลังงานอื่นๆ เช่นเดียวกับ exergy ของ น้ำระเหย ผืน และ น้ำล้น

การที่ระบบมีค่า exergy ถูกทำลายไปในสัดส่วนที่สูง ประเมินว่าควรเนื่องมาจากการที่ระบบได้รับ พลังงานที่มีคุณภาพสูงจากไอน้ำ (ที่ความดัน 1.2 bar (gage), อุณหภูมิ 124°C) แต่ไม่ได้ถูกใช้ไปอย่างเต็มที่แก่ผลิตภัณฑ์ (ที่อุณหภูมิ 40°C ถึง 79°C) และยังถ่ายเทไปสู่พลังงานคุณภาพต่ำส่วนอื่นๆ ที่ ไอน้ำระเหย (90°C) ผืน (73°C) และ น้ำล้น (90 °C)

จากผลการคำนวณที่ได้ แสดงให้เห็นว่าระบบมีค่าประสิทธิภาพการทำงานที่ค่อนข้างต่ำ โดยเฉพาะประสิทธิภาพทางกฎข้อที่ 2 จึงได้พิจารณาศึกษามาตรการที่เหมาะสมในการปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบ เพื่อให้เกิดประสิทธิผลของการประหยัดพลังงานมากที่สุดจากการลดพลังงานความร้อนที่จ่ายให้แก่ระบบ

การลดปริมาณพลังงานความร้อน จากไอน้ำอ้อมตัวที่ผลิตจาก boiler อาจสามารถทำได้โดยวิธีการลดปริมาณอัตราการจ่ายมวลไอน้ำ หรือ การลดอุณหภูมิ (หรือ ความดัน) ของไอน้ำที่ผลิตจากหม้อต้ม ซึ่งการลดอุณหภูมิไอน้ำประเมินว่าจะสามารถช่วยลด exergy ของไอน้ำจ่ายเข้าระบบ และ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกฎข้อที่ 2 ได้

การศึกษาในที่นี้ ได้จำลองการดำเนินการมาตรการประหยัดพลังงานดังที่ ได้รายงานไว้ในเอกสารอ้างอิง [1-3] โดยคำนวณพฤติกรรมของระบบ เพื่อแสดงประสิทธิภาพทางกฎข้อที่ 1 และ 2 ที่เปลี่ยนไปเมื่อดำเนินการมาตรการประหยัดพลังงานที่ระดับต่างๆ โดยมาตรการที่ได้ศึกษาประกอบด้วย

- 1) มาตรการลดอัตราการระเหยของไอน้ำที่ผิวน้ำร้อน โดยใช้ลูกลอยบนผิวน้ำเพื่อลดพื้นที่สัมผัสระหว่างผิวน้ำร้อนกับอากาศ
- 2) มาตรการลดอัตราการสูญเสียความร้อนที่ผิวน้ำอ่างน้ำ โดยการทากัน

ซึ่งเมื่อดำเนินการตามมาตรการ ระบบสามารถลดอัตราการสูญเสียพลังงานได้ ส่งผลให้สามารถลดอัตราการจ่ายพลังงานไอน้ำเข้าสู่ระบบเพื่อคงสถานะสมดุลของระบบไว้ ในการคำนวณการปรับลดลงของพลังงานจ่ายเข้าสู่ระบบ ทำโดยสองวิธีการคือ ลดอัตราการจ่ายมวลไอน้ำ และ ลดความดัน (หรือ อุณหภูมิ) ไอน้ำอ้อมตัว เพื่อวิเคราะห์ถึงผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบ

3.2 ระบบที่มีมาตรการลดอัตราการระเหยไอน้ำ

ปริมาณไอน้ำระเหยจากผิวน้ำร้อนสามารถทำให้ลดลงได้โดยการลอยลูกลอยบนผิวน้ำเพื่อลดพื้นที่ผิวสัมผัสกับอากาศ ซึ่งอัตราการระเหยลดลงเป็นสัดส่วนตามปริมาณลูกลอย จากการทดลองที่รายงานในเอกสารอ้างอิง [2] ระบุว่าอัตราการระเหยสามารถลดลงได้ 25% เมื่อพื้นที่ผิวสัมผัสลดลง 20%

สำหรับการคำนวณในโปรแกรมระบบจำลอง อัตราการระเหยที่ลดลง (V_{reduct}) สามารถกำหนดเป็นสัดส่วนร้อยละ ได้ ดังนี้

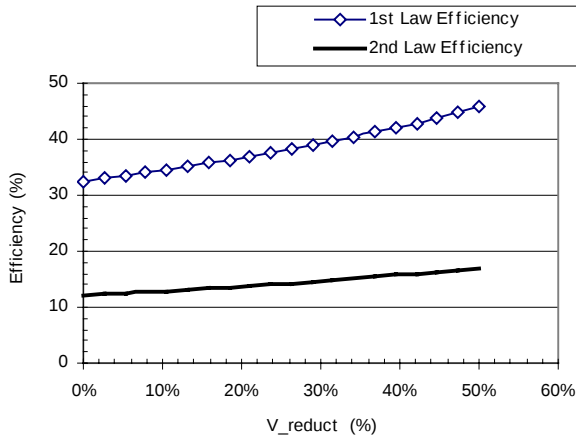
$$V_{reduct} = \frac{\dot{m}_{S_org} - \dot{m}_{S_new}}{\dot{m}_{S_org}} \times 100 \quad (4)$$

โดยที่ $\dot{m}_{S_org}$ คืออัตราการระเหยของระบบพื้นฐาน และ $\dot{m}_{S_new}$ คืออัตราการระเหยของระบบที่มีมาตรการลดการระเหย

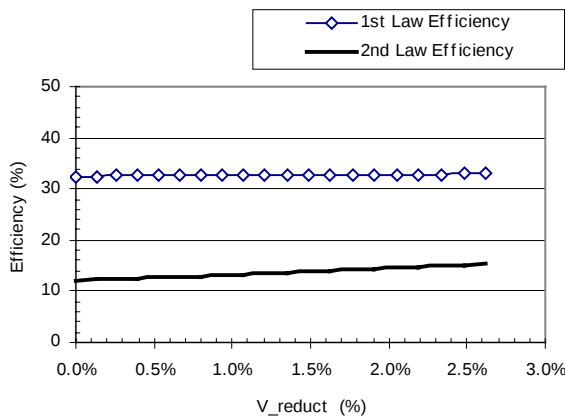
ผลการคำนวณในรูปที่ 4 แสดงเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบระหว่างกฎข้อที่ 1 และ กฎข้อที่ 2 สำหรับมาตรการลดอัตราการระเหยไอน้ำที่ผิว เมื่อพลังงานไอน้ำจ่ายเข้าถูกปรับลดโดย ลดอัตราการไหลของมวลไอน้ำ (รูปที่ 4-a) และ ลดอุณหภูมิไอน้ำ (รูปที่ 4-b)

ผลการคำนวณดังแสดงในรูปที่ 4-a ชี้ให้เห็นว่า ที่การดำเนินการมาตรการลดอัตราการระเหยของไอน้ำร้อนลดลงจาก 0%-50% และปรับลดอัตราการไหลของมวลไอน้ำจ่ายเข้าระบบ ประสิทธิภาพของระบบมีค่าสูงขึ้น โดยที่ประสิทธิภาพทางกฎข้อที่ 1 มีการเพิ่มมากขึ้นในอัตราที่ดีกว่าประสิทธิภาพทางกฎข้อที่ 2 ในทางกลับกัน ประสิทธิภาพทางกฎข้อที่ 2 มีอัตราการเพิ่มขึ้นที่ต่ำกว่าประสิทธิภาพทางกฎข้อที่ 1 หากดำเนินการโดยการปรับลดอุณหภูมิ (หรือความดัน) ของไอน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 4-b

โปรดหมายเหตุไว้ว่าการคำนวณสำหรับการปรับลดอุณหภูมิของไอน้ำแสดงไว้ที่เพียง 0%-2.6% เท่านั้น เนื่องจากจำเป็นต้องรักษาอุณหภูมิไอน้ำอ้อมตัวที่จ่ายเข้าสู่อ่างน้ำร้อน ให้มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิของน้ำร้อนที่ 90°C อยู่ 10° เพื่อรักษาระดับอัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างน้ำและไอน้ำ ดังนั้นการคำนวณจึงสามารถปรับลดอุณหภูมิไอน้ำได้ต่ำที่สุดที่ 100°C (จากการทำงานของระบบพื้นฐานที่ ประมาณ 124°C)



(4-a) ปรับลดอัตราการไหลมวลไอน้ำ



(4-b) ปรับลดความดันไอน้ำ

รูปที่ 4 ประสิทธิภาพการทำงานของระบบ ทางกฎข้อที่ 1 และ 2 ตามมาตรการลดอัตราการระเหยที่ผิวน้ำร้อน

3.3 ระบบที่มีมาตรการลดอัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านผนัง

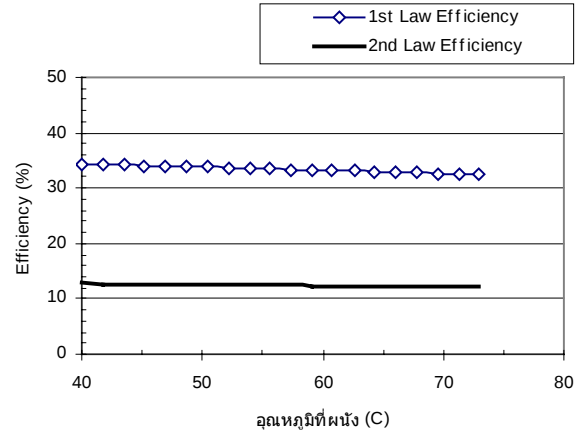
ฉนวนความร้อนแบบบาท ที่มีค่าการนำความร้อน (k) เท่ากับ 0.0283 (W/m-K) ถูกใช้หุ้มผนังภายนอกอ่างน้ำร้อน เพื่อลดอัตราการสูญเสียพลังงานจากผิวผนัง โดยที่อัตราการถ่ายเทความร้อนจากผิวผนัง (Q_{wall}) มีความสัมพันธ์กับความหนาฉนวน (L) และอุณหภูมิผิวผนัง (T_{surf}) ดังสมการด้านล่าง

$$Q_{wall} = \left[\frac{Q_{wall}^*}{(T_w^* - T_{surf}^*)} + \frac{L}{kA} \right] (T_w - T_{surf}) \quad (5)$$

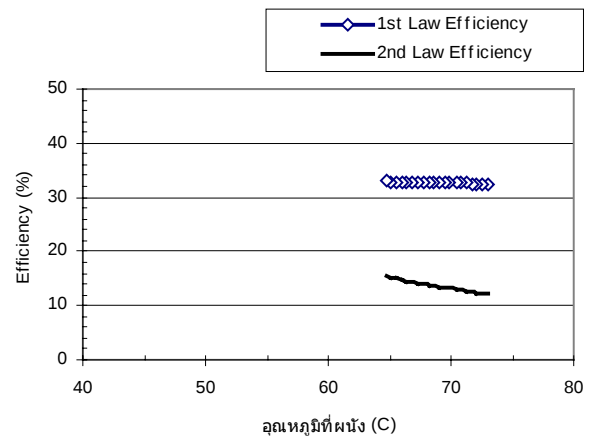
โดยที่ Q_{wall}^* , T_w^* , และ T_{surf}^* คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านผิวผนัง, อุณหภูมิน้ำร้อน, และ อุณหภูมิผิวผนัง ของระบบพื้นฐานที่การทำงานปกติ ตามลำดับ

จากการคำนวณตามสมการที่ (5) สามารถระบุได้ว่าอุณหภูมิผิวผนังสามารถทำให้ลดลงได้จาก 73°C เป็น 40°C จากการทาดานวนที่ความหนาประมาณ 9 mm ซึ่งสามารถลดอัตราการสูญเสียความร้อนได้จาก 218,273 kJ/hr เป็น 206,911 kJ/hr (หรือลดลงประมาณ 5%)

ผลการคำนวณในรูปที่ 5 แสดงเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบระหว่างกฎข้อที่ 1 และ กฎข้อที่ 2 สำหรับมาตรการการทาดานวน เมื่อปรับลดพลังงานไอน้ำจ่ายเข้าโดย ลดอัตราการไหลของมวลไอน้ำ (รูปที่ 5-a) และ ลดอุณหภูมิไอน้ำ (รูปที่ 5-b) ตามอุณหภูมิของผิวผนังที่เปลี่ยนแปลง



(5-a) ปรับลดอัตราการไหลมวลไอน้ำ



(5-b) ปรับลดความดันไอน้ำ

รูปที่ 5 ประสิทธิภาพการทำงานของระบบ ทางกฎข้อที่ 1 และ 2 ตามมาตรการลดทาดานวน

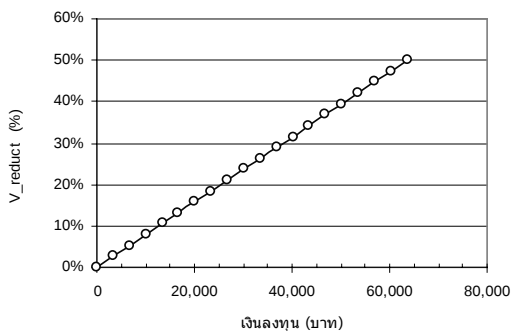
ผลการคำนวณในรูปที่ 5-a แสดงว่าการลดอัตราการไหลมวลของไอน้ำอ้อมตัวเข้าสู่ระบบ เมื่อมีการทาดานวนเพื่อลดอุณหภูมิผิวผนังอ่างน้ำร้อน จาก 73°C เป็น 40°C (ความหนาฉนวนที่ 9 mm) สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพทางกฎข้อที่ 1 เพียง 1.8% และ ประสิทธิภาพทางกฎข้อที่ 2 เพียง 0.66% เท่านั้น หากเปลี่ยนการปรับลดพลังงานจ่ายเข้าระบบเป็นการปรับลดความดันไอน้ำแทนการลดอัตราการไหลมวล ผล

การคำนวณดังแสดงในรูปที่ 5-b ระบุว่า ที่อุณหภูมิผิวน้ำร้อนลดลงจาก 73°C เป็น 65°C (ความหนาแน่นที่ 0.3 mm) ประสิทธิภาพทางกฎข้อที่ 1 เพิ่มขึ้นประมาณ 0.5% แต่ประสิทธิภาพทางกฎข้อที่ 2 เพิ่มขึ้นถึงประมาณ 3%

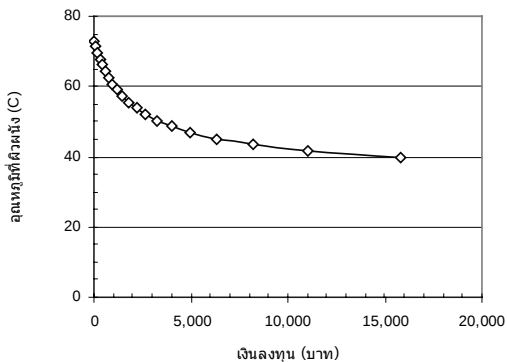
เช่นเดียวกับมาตรการลดอัตราการระเหยที่ผิวน้ำร้อน ที่การปรับลดพลังงานไอน้ำจ่ายเข้าระบบโดยวิธีการปรับลดความดันไอน้ำ ซึ่งถูกจำกัดอุณหภูมิไอน้ำไว้ที่ 100°C เพื่อให้มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิผิวน้ำร้อนในอ่าง ดังนั้นผลการคำนวณในรูปที่ 5-b จึงแสดงค่ามาตรการการทาดนวนที่ส่งผลให้อุณหภูมิผิวน้ำที่ 65°C เท่านั้น

4. ผลการศึกษาการลงทุน

การวิเคราะห์ผลตอบแทนการลงทุนตามมาตรการ ได้ถูกศึกษาเพิ่มเติมจากที่ได้รายงานในเอกสารอ้างอิง [2] เพื่อให้ครอบคลุมตลอดช่วงของระดับการดำเนินการตามมาตรการดังที่ได้แสดงไว้ในหัวข้อที่ 3 สำหรับมาตรการลดอัตราการระเหยที่ผิวน้ำ กำหนดให้จำนวนเงินลงทุนเพิ่มขึ้นตามปริมาณลูกลอย ซึ่งแปรผันเป็นเชิงเส้นกับสัดส่วนที่ลดลงของอัตราการระเหยจากผิวน้ำร้อน และ สำหรับมาตรการลดการสูญเสียความร้อนที่ผิวน้ำร้อน ปริมาณเงินลงทุนสำหรับการทาดนวนแปรผันโดยตรงกับความหนาของฉนวนที่ใช้ทำผิวน้ำร้อน ความสัมพันธ์ระหว่าง พฤติกรรมของระบบ กับ ปริมาณเงินลงทุนตลอดช่วงการดำเนินการที่ศึกษาในที่นี้ สามารถแสดงได้ในรูปที่ 6



(6-a) มาตรการลูกลอยลดอัตราการระเหย

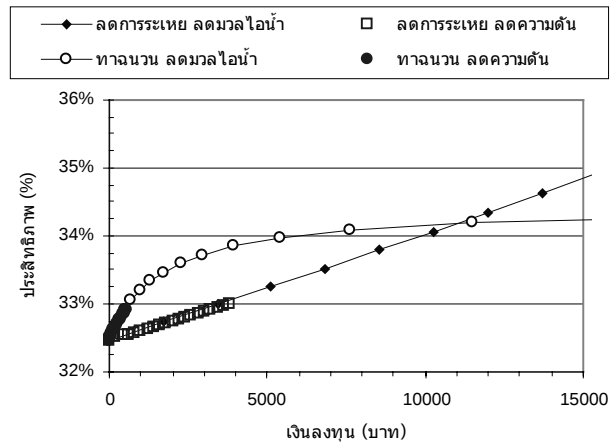


(6-b) มาตรการทาดนวนบนผิวน้ำร้อน

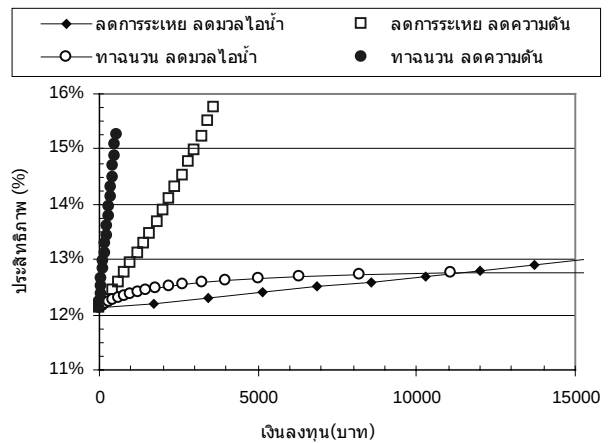
รูปที่ 6 ปริมาณเงินลงทุนในแต่ละระดับการดำเนินการในแต่ละมาตรการประหยัดพลังงาน

ในรูปที่ 6 สามารถเห็นได้ว่า อัตราการระเหยของไอน้ำที่ผิวน้ำร้อนสามารถทำให้ลดลงได้เป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณการลงทุน อย่างไรก็ตามการลงทุนในมาตรการทาดนวน เพื่อลดอัตราการระเหยที่ผิวน้ำร้อนสามารถให้ผลตอบแทนในการลดอุณหภูมิผิวน้ำร้อนได้ดี ในช่วงการเริ่มทาดนวนหรือที่การลงทุนต่ำ แต่แทบจะไม่ให้ผลใดๆ เมื่อฉนวนหนาขึ้นและ อุณหภูมิผิวน้ำมีค่าใกล้เคียงอุณหภูมิบรรยากาศที่ 34°C

จากความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 6 ประสิทธิภาพทางกฎข้อที่ 1 และ 2 ของระบบ ต่อการลงทุนในแต่ละมาตรการ สามารถแสดงได้ในรูปที่ 7



(7-a) ประสิทธิภาพทางกฎข้อที่ 1



(7-b) ประสิทธิภาพทางกฎข้อที่ 2

รูปที่ 7 ประสิทธิภาพของระบบตามปริมาณเงินลงทุน

ในรูปที่ 7-a จะเห็นได้ว่า มาตรการทาดนวน ที่ใช้การลดพลังงานจ่ายเข้าระบบทั้งสองวิธี (ปรับลดอัตราการไหลมวลไอน้ำ หรือ ปรับลดความดันไอน้ำ) สามารถให้ประสิทธิภาพทางกฎข้อที่ 1 ได้ดีกว่าวิธีการใช้ลูกลอย เพื่อลดการระเหยที่ผิวน้ำร้อน ที่การลงทุนเท่ากัน จนกระทั่งปริมาณการลงทุนประมาณ 11,000 บาท หรือที่ความหนาของฉนวน

ประมาณ 6 mm ซึ่งหากพิจารณาลักษณะเส้นกราฟแล้ว เห็นได้ว่าประสิทธิภาพทางกฎข้อที่ 1 เนื่องจากการทาดนวนมีค่าเพิ่มขึ้นน้อยมาก จาก 34% หากมีการลงทุนที่มากกว่า 5,000 บาท หรือ ความหนาแน่นมากกว่า 2.7 mm ในทางตรงข้าม มาตรการลดการสูญเสียความร้อนเพื่อลดอัตราการระเหย สามารถปรับปรุงระบบให้มีประสิทธิภาพทางกฎข้อที่ 1 ได้เพิ่มขึ้นตามสัดส่วนการลงทุน ผลการคำนวณในรูปที่ 7-a ยังแสดงให้เห็นว่าการปรับลดพลังงานไอน้ำจ่ายเข้าระบบในแต่ละมาตรการ โดยวิธีลดอัตราการไหลมวล หรือ ลดความดัน ให้ผลต่อประสิทธิภาพทางกฎข้อที่ 1 ของระบบไม่แตกต่างกัน

การเลือกใช้วิธีการปรับลดพลังงานไอน้ำจ่ายเข้า ส่งผลที่แตกต่างอย่างชัดเจน ต่อประสิทธิภาพทางกฎข้อที่ 2 ของระบบดังแสดงในรูปที่ 7-b โดยที่การปรับลดความดันของไอน้ำจ่ายเข้าระบบ อันเนื่องจากการดำเนินการทั้งสองมาตรการ ให้ผลต่อการปรับปรุงประสิทธิภาพทางกฎข้อที่ 2 ของระบบได้ดีกว่าการปรับลดอัตราการไหลมวลไอน้ำ โดยที่มาตรการทาดนวนให้ประสิทธิผลที่ดีว่า มาตรการลดการสูญเสียความร้อนไอน้ำ ที่ปริมาณการลงทุนเท่ากัน ในช่วงการลงทุนที่ไม่สูงนัก

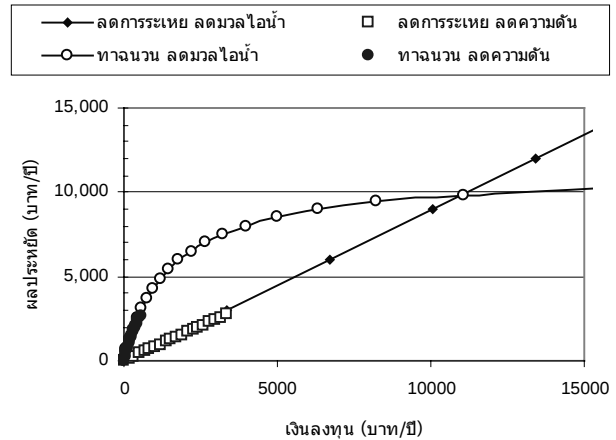
ผลการคำนวณแสดงอัตราการผลตอบแทนต่อปี ต่อการลงทุนในแต่ละมาตรการ อันเนื่องจากการประหยัดพลังงานในการผลิตไอน้ำอ้อมตัว ดังแสดงในรูปที่ 8-a และ 8-b ซึ่งแสดงการตอบแทนการลงทุนในลักษณะที่เป็นจำนวนเงินที่ประหยัดได้ต่อปี และ ร้อยละผลตอบแทนภายใน (internal rate of return หรือ IRR) ตามลำดับ การคำนวณได้กำหนดให้หม้อต้มผลิตไอน้ำใช้น้ำมันเตาเกรดซี ซึ่งมีค่าความร้อนสูง (HHV) เท่ากับ 39,893 kJ/L ที่ราคา 10.9 บาท/ลิตร โดยให้หม้อต้มผลิตไอน้ำทำงาน 2504 ชั่วโมง/ปี ที่ประสิทธิภาพการทำงาน 80%

ในรูปที่ 8-a ชี้ให้เห็นว่า มาตรการการลดพลังงานสูญเสียที่ผิวน้ำร้อน โดยการทำนวน เป็นมาตรการที่ให้ผลตอบแทน มากกว่า มาตรการลดการสูญเสียที่ผิวน้ำร้อน ในการลงทุนเบื้องต้น โดยปรับปรุงประสิทธิภาพทางกฎข้อที่ 1 ไม่มากกว่า 34% (สำหรับในที่นี้ ที่มีค่าการลงทุนไม่สูงกว่า 5,000 บาท และ ให้ผลประหยัดที่ประมาณ 9,000 บาท/ปี) สำหรับการปรับปรุงประสิทธิภาพระบบ เพื่อให้ได้ผลประหยัดที่สูงขึ้น ควรใช้มาตรการลดการสูญเสียเพื่อลดอัตราการระเหย

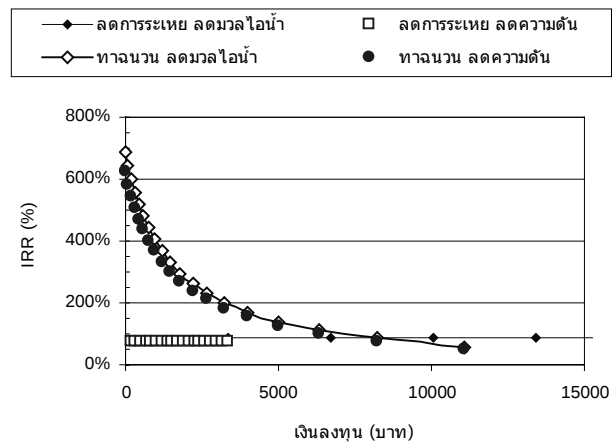
การวิเคราะห์อัตราผลตอบแทนภายใน กำหนดให้ อายุการใช้งานของแต่ละมาตรการและต้องมีการลงทุนใหม่ทั้งหมดอยู่ที่ทุกๆ 5 ปี และ ผลตอบแทนรายปีมีมูลค่าเท่ากับมูลค่าประหยัดพลังงานที่ได้รับจากการดำเนินงานของแต่ละมาตรการ ผลการคำนวณดังแสดงในรูป 8-b แสดงให้เห็นว่า มาตรการลดการสูญเสียของผิวน้ำร้อน ให้ค่า IRR คงที่ ตลอดระดับการลงทุน ที่ประมาณ 80% ในขณะที่มาตรการทาดนวนจะให้ผล IRR ที่ดีกว่ามาตรการลดการสูญเสียเป็นอย่างมาก ในช่วงการลงทุนที่ไม่สูงนัก อย่างไรก็ตามค่า IRR ของมาตรการทาดนวนมีค่าลดลง ตามปริมาณมูลค่าการลงทุนที่เพิ่มมากขึ้น (หรือทาดนวนหนาขึ้น) และมีย่าน้อยกว่าการลงทุนตามมาตรการลดการระเหย เมื่อมูลค่าลงทุนมากกว่าประมาณ 8,000 บาท (หรือความหนาแน่นกว่า 4 mm)

สังเกตได้ว่า ลักษณะการให้ผลตอบแทนการลงทุน ในแต่ละมาตรการในรูปที่ 8-a มีลักษณะเส้นกราฟที่เหมือนกับลักษณะเส้นกราฟ ของประสิทธิภาพทางกฎข้อที่ 1 ที่แสดงในรูปที่ 7-a ซึ่งเนื่องมาจากการคำนวณ

มูลค่าใช้ตามราคาของ ปริมาณพลังงาน แต่ไม่ได้คิดมูลค่าตาม คุณภาพพลังงาน หรือ exergy ดังนั้นผลตอบแทนที่แสดงในที่นี้ เป็นไปบนพื้นฐานของกฎข้อที่ 1 เท่านั้น การศึกษาเพิ่มเติมจึงมีความจำเป็น ในการกำหนดมูลค่าของพลังงานในเชิง คุณภาพ เพื่อสามารถวิเคราะห์ผลตอบแทนที่เป็นไปตามกฎข้อที่ 2 อย่างแท้จริง



(8-a) ผลตอบแทนการลงทุน



(8-b) อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) ต่อช่วงระยะเวลา 5 ปี

รูปที่ 8 ผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์สำหรับแต่ละมาตรการ

5. สรุป

พฤติกรรมทางความร้อนในการทำงานของ ระบบต้มค่าเชื้อใน กระบวนการผลิตสัปรดกระป๋อง ได้ถูกศึกษาโดยใช้แบบจำลองระบบ ภายใต้โปรแกรม Engineering Equation Solver (EES) เพื่อวิเคราะห์ ถึงประสิทธิภาพของระบบ ทั้งบนพื้นฐานทางกฎข้อที่ 1 และ 2 ทาง เทอร์โมไดนามิกส์ เพื่อให้เข้าใจถึงลักษณะการถ่ายเทพลังงานในระบบ ทั้งในแง่ของ ปริมาณ และ คุณภาพ (หรือ exergy) จากการศึกษาบน พื้นฐาน ภายใต้การทำงานในสภาวะปกติ พบว่าระบบมีประสิทธิภาพทาง กฎข้อที่ 2 ค่อนข้างต่ำ เนื่องจากการสูญเสียในส่วน exergy destruction ที่สูงมาก อันเนื่องมาจากพลังงานไอน้ำจ่ายเข้าระบบมี คุณภาพ (ความดัน หรือ อุณหภูมิ) สูงเกิดความจำเป็น การดำเนินการตาม

มาตรการประหยัดพลังงานโดย ใช้ลูกลอยบนผิวน้ำร้อนเพื่อลดการสูญเสียเนื่องจากอัตราการระเหยของน้ำร้อน และ การหาขนาดที่ผิวอ่างน้ำร้อนเพื่อลดการสูญเสียความร้อน ได้ถูกวิเคราะห์เพื่อคำนวณผลประหยัดที่ได้ และ ประสิทธิภาพการทำงานของระบบที่เปลี่ยนไป จากการลดอัตราการจ่ายความร้อนเข้าระบบจากไอน้ำอิ่มตัว โดยศึกษาเปรียบเทียบระหว่างวิธีการ ปรับลดอัตราการไหลมวล หรือ ปรับลดความดันของไอน้ำ ผลคำนวณแสดงได้ว่า การปรับลดพลังงานไอน้ำจ่ายเข้าทั้งสองวิธีให้การปรับปรุงประสิทธิภาพทางกฎข้อที่ 1 ที่ไม่แตกต่างกัน แต่การปรับลดความดันไอน้ำส่งผลต่อการปรับปรุงประสิทธิภาพทางกฎข้อที่ 2 ของระบบได้ดีกว่าการปรับลดอัตราการไหลมวล เมื่อเปรียบเทียบผลประหยัดที่ได้และความคุ้มค่าต่อการลงทุน พบว่ามาตรการหาขนาดให้ผลตอบแทนที่ดีกว่ามาตรการลดอัตราการระเหยที่ผิวน้ำร้อน ที่ระดับการปรับปรุงประสิทธิภาพทางกฎข้อที่ 1 จาก 32.5% เป็น 34% ที่ความหนาแน่นไม่เกิน 2.7 mm อย่างไรก็ตาม มาตรการลดอัตราการระเหยของผิวน้ำร้อนด้วยลูกลอย สามารถนำมาใช้เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานให้สูงมากขึ้น

6 กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของ วิชาโครงงานนักศึกษา คณะวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีปทุม คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ อาจารย์ อภิรักษ์ สวัสดิ์กิจ และ อาจารย์ เกียรติศักดิ์ สกุลพันธ์ สำหรับคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ ตลอดการศึกษาโครงงานนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] อภิรักษ์ สวัสดิ์กิจ และคณะ, 2548, "การประหยัดไอน้ำในกระบวนการผลิตผลไม้กระป๋อง", การประชุมเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 19, 19-21 ตุลาคม 2548, โรงแรมเดอะรอยัลพาราไดส์, กรุงเทพฯ หน้า 803-808
- [2] อภิรักษ์ สวัสดิ์กิจ และคณะ, 2549, "การลดการระเหยของน้ำร้อนในกระบวนการผลิตผลไม้กระป๋อง", การประชุมเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 20, 18-20 ตุลาคม 2549, จังหวัดนครราชสีมา หน้า 957-961
- [3] อนุชิต ตูลากร และคณะ, 2550, "การวิเคราะห์กระบวนการความร้อนบนพื้นฐานของกฎข้อที่ 2 ทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับกระบวนการต้มฆ่าเชื้อ ในการผลิตผลไม้กระป๋อง", โครงการการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, ปีการศึกษา 2549, สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม
- [4] Klein, S.A., 2007, Engineering Equation Solver (EES), Academic Commercial Version 7.847