สภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่ดีที่สุดสำหรับระบบการทำความเย็นแบบอัดไอสองขั้นตอนในกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์นม

Thermodynamics Optimization for Two Stage Vapor Compression System in Milk Pasteurizing Process

ชัยวัฒน์ แสงเพ็ง[1]* ธีระชาติ พรพิบูลย์[2]
[1, 2] สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
จังหวัดนครราชสีมา 30000 โทร 044 224 498 โทรสาร 044 224 613 E-mail: chaiwat_sut@hotmail.com

Chaiwat Seangpeng[1]* Teerachart Pornpibul[2]
[1, 2] School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering,
Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand
Tel: 044 224 498 Fax: 044 224 613 E-mail: chaiwat_sut@hotmail.com

บทคัดย่อ

การศึกษาวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอวิธีการสร้างแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับระบบการทำความเย็นแบบอัดไอสองขั้นตอนซึ่งทำความร้อนร่วมกับขดลวดความร้อนในกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์นมเพื่อการประหยัดพลังงาน โดยทำการศึกษาสภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็น R 134a ที่ดีที่สุดได้แก่ อุณหภูมิระเหยของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันต่ำ อุณหภูมิกลั่นตัวของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันสูง และอุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรของสารทำความเย็น ภายใต้เงื่อนไขและข้อกำหนดการออกแบบต่าง ๆ ผลการศึกษาวิจัยพบว่า สภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็นที่ดีที่สุดคือ 1. อุณหภูมิระเหยของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันต่ำมีแนวโน้มเข้าใกล้อุณหภูมินมต่ำสุดเพื่อการทำความเย็นให้ได้ตามที่ต้องการ 2. อุณหภูมิกลั่นตัวของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันสูงมีแนวโน้มเข้าใกล้อุณหภูมินมสูงสุดแสดงให้เห็นว่าควรจำกัดการทำความร้อนด้วยขดลวดความร้อนให้น้อยที่สุดและทำความร้อนด้วยเครื่องควบแน่นให้มากที่สุด และ 3. อุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรของสารทำความเย็นมีแนวโน้มเป็นค่าเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิระเหยของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันต่ำและอุณหภูมิกลั่นตัวของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันสูง

คำสำคัญ : สภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่ดีที่สุด/ ระบบทำความเย็นแบบอัดไอสองขั้นตอน/ กระบวนการพาสเจอร์ไรซ์นม

Abstract

The objective of this research is to present the method and to create the Thermodynamics Models for Two Stage Vapor Compression System with auxiliary heater in Milk Pasteurizing Process for energy saving. In order to find the optimal Thermodynamics conditions of R134a. There are Evaporating temperature, Condensing temperature and Intermediate temperature in the various design condition. The results of this research can be concluded into the following issues: (1) for the optimal Thermodynamics conditions, Evaporating temperature tends to approach the lowest milk temperature for desired cooling load; (2) Condensing temperature tends to approach the highest milk temperature imply that should reduce the lowest heating by auxiliary heater and should increase the highest heating by condenser and (3) Intermediate temperature tends to the average of the optimal Evaporating and Condensing conditions.

Keywords : Thermodynamics Optimization/ Two Stage Vapor Compression System/ Milk Pasteurizing Process

1. บทนำ

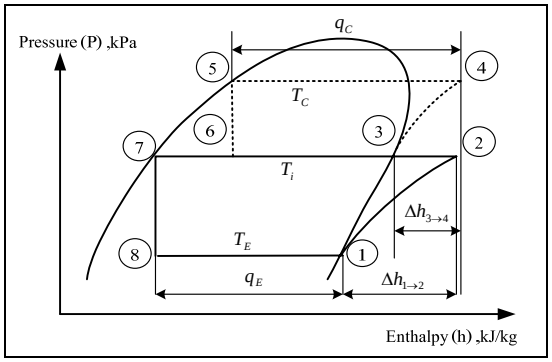
กระบวนการพาสเจอร์ไรซ์นมแบบบรรจุร้อน [1] มีความต้องการทำความร้อนที่อุณหภูมิสูงสำหรับกระบวนการพาสเจอไรซ์ และมีความต้องการความเย็นที่อุณหภูมิต่ำสำหรับกระบวนการเก็บรักษาน้ำนมดิบและกระบวนการทำความเย็นเพื่อการเก็บบรรจุ โดยการประยุกต์หลักการของวัฏจักรอัดไอขั้นตอนเดียว ซึ่งอาศัยกระบวนดูดความร้อนเพื่อทำความเย็นที่อุณหภูมิต่ำเป็นหลักและอาศัยขดลวดความร้อนเพื่อการความร้อน บทความนี้จะนำเสนอแนวทางการนำความร้อนจากกระบวนการคายความร้อนของระบบอัดไอในกระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรซ์แบบบรรจุร้อนเพื่อการประหยัดพลังงาน เนื่องจากอุณหภูมิน้ำนมสูงสุดที่ต้องการในการทำความร้อนและอุณหภูมิน้ำนมต่ำสุดที่ต้องการในการทำความเย็นมีความแตกต่างกันมาก จึงทำให้ระบบอัดไอแบบขั้นตอนเดียวไม่เหมาะสมด้วยเหตุผล 2 ประการคือ

1. ขีดความสามารถในการอัดของเครื่องอัดไอในปัจจุบัน และ 2.ในช่วงอุณหภูมิของสารทำความเย็นต่ำสุดและอุณหภูมิของสารทำความเย็นสูงสุดมีช่วงอุณหภูมิกว้างมาก จะทำให้เครื่องอัดไอต้องการพลังงานต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็นที่ค่อนข้างมาก ซึ่งสามารถแก้ปัญหาโดยการประยุกต์หลักการของวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอน (Two Stage Vapor Compression Cycle) ซึ่งโดยทั่วไปมีวัตถุประสงค์เพื่อการทำความเย็นที่อุณหภูมิต่ำมาก บทความนี้จะนำเสนอแนวทางการประยุกต์หลักการของวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอนที่มีวัตถุประสงค์เพื่อการทำความร้อนที่อุณหภูมิสูงและทำความเย็นที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งประกอบด้วย 1.วัฏจักรอัดไอสองขั้นตอนโดยอาศัยแฟลชแทงค์ และ 2.วัฏจักรอัดไอแบบแคสเคด

การศึกษาวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอวิธีการสร้างสมการทางเทอร์โมไดนามิกส์ในรูปแบบของความต้องการพลังงานสุทธิซึ่งประกอบด้วยพลังงานของระบบการทำความเย็นแบบอัดไอสองขั้นตอนและพลังงานความร้อนของขดลวดความร้อน สำหรับข้อกำหนดของศึกษาวิจัยขนาดกำลังการผลิตน้ำนมดิบ 1-10 ตันต่อวัน และทำการแก้ปัญหาออพติไมเซชันด้วยวิธีการแลตทิซเสิร์ช (Lattice Search) ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะทำให้ทราบถึงสภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็นที่ดีที่สุดสำหรับข้อกำหนดของการศึกษาวิจัยข้างต้น ภายใต้หลักการของวัฏจักรอัดไอสองขั้นตอนของสารทำความเย็นชนิด R 134a บนวัฏจักรอัดไอมาตรฐาน (Standard Vapor Compression Cycle) งานวิจัยที่เกี่ยวข้องมีดังนี้คือ [3] การนำเสนอวิธีการสร้างสมการทางความร้อน-เศรษฐศาสตร์เพื่อหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมของระบบการทำความเย็นแบบอัดไอแบบขั้นตอนเดียวซึ่งทำความร้อนร่วมกับขดลวดความร้อนในรูปแบบของค่าใช้จ่ายสุทธิของกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์นมแบบบรรจุเย็น ภายใต้การกำหนดสภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็น [4] การนำเสนอวิธีการสร้างสมการทางเทอร์โมไดนามิกส์ของระบบการทำความเย็นแบบอัดไอสองขั้นตอนโดยอาศัยแฟลชแทงค์ในรูปแบบของสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะโดยการวิเคราะห์ตัวแปรของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนภายในระบบและ [5] การนำเสนอวิธีการสร้างสมการสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะจากการสมดุลพลังงานและสมดุลเอนโทรปี

2. ความสัมพันธ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์

แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์เป็นฟังก์ชันซึ่งประกอบด้วยฟังก์ชันข้อกำหนดของการพาสเจอร์ไรซ์นมที่กำลังการผลิตต่าง ๆกันและความสัมพันธ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ดังแสดงในรูปที่ 1 ได้มาจากการสร้างสมการโพลีโนเมียลสองตัวแปร [6, 7] เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิสารทำความเย็นชนิด R 134a บนแผนภาพความดัน-เอนทาลปี (P - h diagram)



รูปที่ 1 การสร้างสมการสองตัวแปรซึ่งเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิสารทำความเย็นชนิด R 134a

2.1 ความร้อนต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็นเนื่องจากกระบวนการรับความร้อนที่ความดันคงที่

ความร้อนต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็นเนื่องจากกระบวนการรับความร้อนที่ความดันคงที่ที่เครื่องทำระเหยในวัฏจักรความดันต่ำเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิระเหยของสารทำความเย็นและอุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรของสารทำความเย็น แสดงได้ดังนี้

$$q_E = q_E(T_E, T_i) \tag{1}$$

เมื่อ q_E แทน ความร้อนหน่วยมวลของสารทำความเย็นเนื่องจากกระบวนการรับความร้อนที่ความดันคงที่ kJ/kg

T_E แทน อุณหภูมิระเหยของสารทำความเย็น $^{\circ}$C

T_i แทน อุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรของสารทำความเย็น $^{\circ}$C

2.2 ความร้อนต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็นเนื่องจากกระบวนการคายความร้อนที่ความดันคงที่

ความร้อนต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็นเนื่องจากกระบวนการคายความร้อนที่ความดันคงที่ที่เครื่องควบแน่นในวัฏจักรความดันสูงเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิกลั่นตัวของสารทำความเย็นและอุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรของสารทำความเย็น แสดงได้ดังนี้

$$q_C = q_C(T_C, T_i) \tag{2}$$

เมื่อ q_C แทน ความร้อนหน่วยมวลของสารทำความเย็นเนื่องจากกระบวนการคายความร้อนที่ความดันคงที่ kJ/kg

T_C แทน อุณหภูมิกลั่นตัวของสารทำความเย็น $^{\circ}$C

2.3 สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะ

สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของเครื่องทำความเย็นในวัฏจักรความดันต่ำเป็นสัดส่วนระหว่างความร้อนต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็นเนื่องจากกระบวนการรับความร้อนที่ความดันคงที่ต่องานในการอัดเนื่องจากกระบวนการอัดแบบไอเซนโทรปิก ซึ่งเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิระเหยของสารทำความเย็นและอุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรของสารทำความเย็น แสดงได้ดังนี้

$$COP_R = \frac{q_E(T_E, T_i)}{\Delta h_{1\to2}(T_E, T_i)} \tag{3}$$

เมื่อ COP_R แทน สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของเครื่องทำความเย็น

$\Delta h_{1\to2}$ แทน งานในการอัดเนื่องจากกระบวนการอัดแบบไอเซนโทรปิกในวัฏจักรความดันต่ำ kJ/kg

สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของปั๊มความร้อนในวัฏจักรความดันสูงเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิกลั่นตัวของสารทำความเย็นและอุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรของสารทำความเย็น แสดงได้ดังนี้

$$COP_{HP} = \frac{q_C(T_C, T_i)}{\Delta h_{3\to4}(T_C, T_i)} \tag{4}$$

เมื่อ COP_{HP} แทน สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของปั๊มความร้อน

$\Delta h_{3\to4}$ แทน งานในการอัดเนื่องจากกระบวนการอัดไอแบบ

ไอเซนโทรปิกในวัฏจักรความดันสูง kJ/kg

3. แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับระบบการทำความเย็นแบบอัดไอสองขั้นตอน

แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับระบบการทำความเย็นแบบอัดไอสองขั้นตอนที่ทำการศึกษาวิจัยนี้ [2] ประกอบด้วยวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอนดังนี้ คือ 1. วัฏจักรอัดไอสองขั้นตอนโดยอาศัยแฟลชแทงค์ 2. วัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดอุดมคติ และ 3. วัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดจริง

แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ดังกล่าวแสดงในรูปแบบของความต้องการพลังงานสุทธิซึ่งประกอบด้วยพลังงานของระบบการทำความเย็นแบบอัดไอสองขั้นตอนและพลังงานความร้อนของขดลวดความร้อนภายในปริมาตรควบคุม รูปที่ 2 แสดงได้ดังนี้

$$E_{net} = E_{LS} + E_{HS} + E_{heater} \quad (5)$$

เมื่อ E_{net} แทน ความต้องการพลังงานสุทธิ kW

E_{LS} แทน ความต้องการพลังงานในวัฏจักรความดันต่ำ kW

E_{HS} แทน ความต้องการพลังงานในวัฏจักรความดันสูง kW

E_{heater} แทน ความต้องการพลังงานขดลวดความร้อน kW

ความต้องการพลังงานสุทธิสามารถแสดงในรูปปริพันธ์ของกำลังงานและเวลาการผลิตได้ดังนี้

$$E_{net} = \int \dot{W}_{net}\,dt = \int \dot{W}_{1\to2}^{LS}\,dt + \int \dot{W}_{3\to4}^{HS}\,dt + \int \dot{W}_{heater}\,dt \quad (6)$$

เมื่อ $\dot{W}_{net}$ แทน ความต้องการกำลังงานสุทธิ kW

$\dot{W}_{1-2}^{LS}$ แทน งานเนื่องจากการอัดในวัฏจักรความดันต่ำ kW

$\dot{W}_{3-4}^{HS}$ แทน งานเนื่องจากการอัดในวัฏจักรความดันสูง kW

$\dot{W}_{heater}$ แทน งานทางไฟฟ้าของขดลวดความร้อน kW

t แทน เวลาการผลิต วินาที

จากสมการที่ (6) ความต้องการพลังงานสุทธิเป็นฟังก์ชันของกำลังงานและเวลาการผลิต ซึ่งกำลังงานได้จากการวิเคราะห์สมดุลพลังงานสำหรับวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอนโดยอาศัยแฟลชแทงค์ รูปที่ 2 วัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดอุดมคติ รูปที่ 5 และวัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดจริง รูปที่ 7 สำหรับกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์นม จะได้สมการกำลังงานสุทธิของระบบการทำความเย็นแบบอัดไอสองขั้นตอนและกำลังงานไฟฟ้าของขดลวดความร้อน ในรูปทั่วไปดังนี้

$$\begin{aligned}\dot{W}_{net} &= \dot{W}_{1\to2}^{LS} + \dot{W}_{3\to4}^{HS} + \dot{W}_{heater} \\ &= \frac{\dot{m}_L q_E}{COP_R} + \frac{\dot{m}_H q_C}{COP_{HP}} + \dot{m}_m C_p (T_{m,hot} - T_{m,ph})\end{aligned} \quad (7)$$

เมื่อ $\dot{m}_L$ แทน อัตราการไหลโดยมวลของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันต่ำ kg/s

$\dot{m}_H$ แทน อัตราการไหลโดยมวลของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันสูง kg/s

$\dot{m}_m$ แทน อัตราการไหลโดยมวลของนม kg/s

C_p แทน ความร้อนจำเพาะ kJ/kg.K

$T_{m,hot}$ แทน อุณหภูมิของนมร้อน °C

$T_{m,ph}$ แทน อุณหภูมิของนมทำความร้อนเบื้องต้น °C

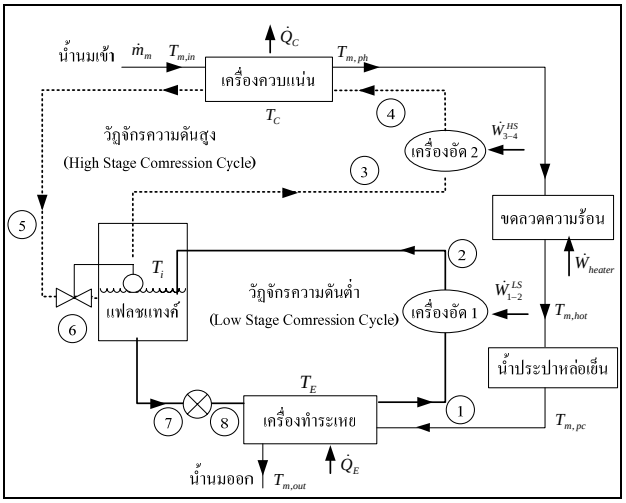
3.1 แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับวัฏจักรอัดไอสองขั้นตอนโดยอาศัยแฟลชแทงค์

จากการวิเคราะห์สมดุลมวลและสมดุลพลังงานระบบแฟลชแทงค์ รูปที่ 3 พบว่าอัตราการไหลโดยมวลของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันต่ำและอัตราการไหลโดยมวลของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันสูงมีความสัมพันธ์ดังนี้

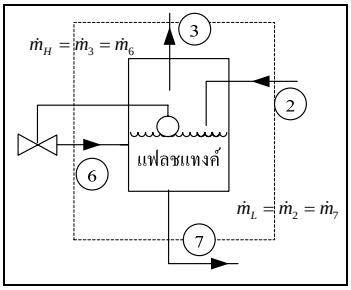
$$\dot{m}_H = \dot{m}_L \frac{(h_7 - h_2)}{(h_3 - h_6)} \quad (8)$$

จากการวิเคราะห์สมดุลพลังงานเครื่องทำระเหยในวัฏจักรความดันต่ำ รูปที่ 4 สำหรับกระบวนการทำความเย็นนม พบว่าอัตราการไหลโดยมวลของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันต่ำเป็นฟังก์ชันของอัตราการไหลโดยมวลของนม อุณหภูมินมภายหลังการทำความเย็นเบื้องต้นและอุณหภูมินมเย็นออกดังนี้

$$\dot{m}_L = \frac{\dot{m}_m C_p (T_{m,pc} - T_{m,out})}{q_E} \quad (9)$$



รูปที่ 2 วัฏจักรอัดไอสองขั้นตอนโดยอาศัยแฟลชแทงค์



รูปที่ 3 สมดุลมวลและสมดุลพลังงานระบบแฟลชแทงค์

แทนสมการที่ (8) และสมการที่ (9) ในสมการที่ (7) กำลังงานสุทธิของวัฏจักรอัดไอสองขั้นตอนโดยอาศัยแฟลชแทงค์และกำลังงานไฟฟ้าของขดลวดความร้อน แสดงได้ดังนี้

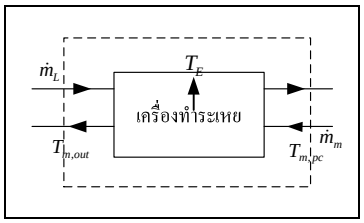
$$\dot{W}_{net,FT} = \frac{\dot{m}_L q_E}{COP_R} + \frac{\dot{m}_H q_C}{COP_{HP}} + \dot{m}_m C_p (T_{m,hot} - T_{m,ph}) \quad (10)$$

เมื่อแทนสมการที่ (10) ในสมการที่ (6) ความต้องการพลังงานสุทธิของวัฏจักรอัดไอสองขั้นตอนโดยอาศัยแฟลชแทงค์และกำลังงานไฟฟ้าของขดลวดความร้อน แสดงได้ดังนี้

$$E_{net,FT} = \int \dot{W}_{net,FT}\,dt = \int \dot{W}_{1\to 2}^{LS}\,dt + \int \dot{W}_{3\to 4}^{HS}\,dt + \int \dot{W}_{heater}\,dt \quad (11)$$

เมื่อ $\dot{m}_H = \dot{m}_L \dfrac{(h_7 - h_2)}{(h_3 - h_6)}$

และ $\dot{m}_L = \dfrac{\dot{m}_m C_p (T_{m,pc} - T_{m,out})}{q_E}$



รูปที่ 4 สมดุลพลังงานเครื่องทำระเหยในวัฏจักรความดันต่ำ

3.2 แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดอุดมคติ

จากการวิเคราะห์สมดุลพลังงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนกลางวัฏจักร รูปที่ 6 พบว่าอัตราการไหลโดยมวลของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันต่ำและอัตราการไหลโดยมวลของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันสูงมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\dot{m}_H = \dot{m}_L \frac{(h_7 - h_2)}{(h_3 - h_6)} \quad (12)$$

สมการที่ (8) และสมการที่ (12) พบว่าความสัมพันธ์ของอัตราการไหลโดยมวลของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันต่ำและอัตราการไหลโดยมวลของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันสูง สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอนโดยอาศัยแฟลชแทงค์และวัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดอุดมคติมีความสมมูลกัน

จากสมการที่ (12) สามารถแสดงในรูปของความร้อนต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็นและสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะดังนี้

$$\dot{m}_H = \dot{m}_L . \{ q_E (\frac{1}{COP_R} + 1) / q_C (1 - \frac{1}{COP_{HP}}) \}$$

(13)

จากการวิเคราะห์สมดุลพลังงานเครื่องทำระเหยในวัฏจักรความดันต่ำ รูปที่ 4 สำหรับกระบวนการทำความเย็นนม พบว่าอัตราการไหลโดยมวลของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันต่ำ มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (9) เมื่อแทนสมการที่ (9) และสมการที่ (13) ในสมการที่ (7) กำลังงานสุทธิของวัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดอุดมคติและกำลังงานไฟฟ้าของขดลวดความร้อน แสดงได้ดังนี้

$$\dot{W}_{net,IC} = \frac{\dot{m}_L q_E}{COP_R} + \frac{\dot{m}_H q_C}{COP_{HP}} + \dot{m}_m C_p (T_{m,hot} - T_{m,ph}) \quad (14)$$

เมื่อแทนสมการที่ (14) ในสมการที่ (6) ความต้องการพลังงานสุทธิของวัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดอุดมคติและกำลังงานไฟฟ้าของขดลวดความร้อน แสดงได้ดังนี้

$$E_{net,IC} = \int \dot{W}_{net,IC}\,dt = \int \dot{W}_{1\to 2}^{LS}\,dt + \int \dot{W}_{3\to 4}^{HS}\,dt + \int \dot{W}_{heater}\,dt \quad (15)$$

เมื่อ $\dot{m}_H = \dot{m}_L . \{ q_E (\dfrac{1}{COP_R} + 1) / q_C (1 - \dfrac{1}{COP_{HP}}) \}$

และ $\dot{m}_L = \dfrac{\dot{m}_m C_p (T_{m,pc} - T_{m,out})}{q_E}$

3.3 แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดจริง

จากการวิเคราะห์สมดุลพลังงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนกลางวัฏจักรและการวิเคราะห์สมดุลพลังงานเครื่องทำระเหย รูปที่ 4 ด้วยวิธีการเดียวกันกับการวิเคราะห์แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดอุดมคติ กำลังงานสุทธิของวัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดจริงและกำลังงานไฟฟ้าของขดลวดความร้อน แสดงได้ดังนี้

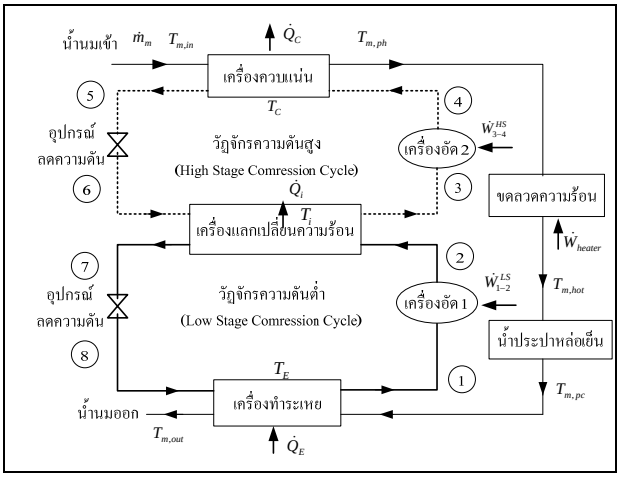
$$\dot{W}_{net,RC} = \frac{\dot{m}_L q_E (T_E, T_i + \Delta T')}{COP_R} + \left(\frac{1}{COP_{HP}} - 1 \right) \left(\dot{m}_H q_C (T_C, T_i - \Delta T'') \right) + \dot{m}_m C_p (T_{m,pc} - T_{m,out}) \quad (16)$$

เมื่อแทนสมการที่ (16) ในสมการที่ (6) ความต้องการพลังงานสุทธิของวัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดจริงและกำลังงานไฟฟ้าของขดลวดความร้อน แสดงได้ดังนี้

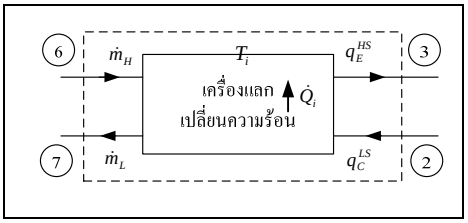
$$E_{net,RC} = \int \dot{W}_{net,RC}\,dt = \int \dot{W}_{1\to 2}^{LS}\,dt + \int \dot{W}_{3\to 4}^{HS}\,dt + \int \dot{W}_{heater}\,dt \quad (17)$$

เมื่อ $\dot{m}_H = \dot{m}_L . \{ q_E (\dfrac{1}{COP_R} + 1) / q_C (1 - \dfrac{1}{COP_{HP}}) \}$

และ $\dot{m}_L = \dfrac{\dot{m}_m C_p (T_{m,pc} - T_{m,out})}{q_E}$

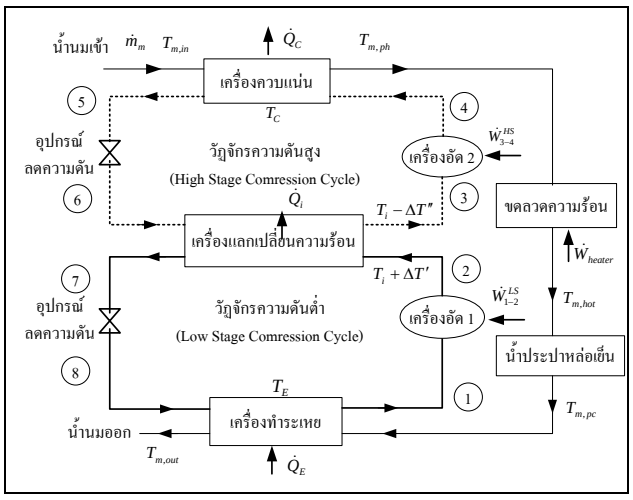


รูปที่ 5 วัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดอุดมคติ



รูปที่ 6 สมดุลพลังงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนกลางวัฏจักรของวัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดอุดมคติ

จากรูปที่ 5 และรูปที่ 7 จะเห็นว่า $\Delta T'$ และ $\Delta T''$ มีอิทธิพลต่อแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นของการใช้กำลังงานของวัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดจริงเมื่อเทียบกับวัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดอุดมคติ



รูปที่ 7 วัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดจริง

4. การออพติไมเซชัน

ปัญหาออพติไมเซชันสำหรับการศึกษาวิจัยนี้เป็นปัญหาออพติไมเซชันโดยไม่มีเงื่อนไข (Unconstrained Optimization Problem) โดยสมการจุดประสงค์กล่าวถึง

$$E_{net} = f(T_E, T_i, T_C) \quad \rightarrow \text{minimize} \qquad (18)$$

สมการจุดประสงค์คือความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันของระบบอัดไอแบบสองขั้นตอน และมีตัวแปรอิสระเป็นสภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็นคือ อุณหภูมิระเหยของสารทำความเย็น T_E อุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรของสารทำความเย็น T_i และอุณหภูมิกลั่นตัวของสารทำความเย็น T_C

วิธีการออพติไมเซชันสำหรับการแก้ปัญหาออพติไมเซชันในการศึกษาวิจัยนี้คือ วิธีการแลตทิซเสิร์ช เนื่องจากมีระเบียบวิธีการออพติไมเซชันมีความง่ายและสะดวกต่อการโปรแกรมคอมพิวเตอร์

5. ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัย

การศึกษาวิจัยนี้ทำการศึกษาโดยมีข้อกำหนดสภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็น แสดงดังตารางที่ 1 ข้อกำหนดของกระบวนการทำความร้อนและกระบวนการทำความเย็น แสดงดังตารางที่ 2 และข้อกำหนดของกระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรซ์แบบบรรจุร้อน แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 1 ข้อกำหนดสภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็น

ลำดับที่	ข้อกำหนดสภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็น	ช่วงที่พิจารณา
1	T_E ^{O}C	(-6) - (-2)
2	T_i ^{O}C	20 - 60
3	T_C ^{O}C	65 - 90

ตารางที่ 2 ข้อกำหนดของกระบวนการทำความร้อนและกระบวนการทำความเย็น

ข้อกำหนดของกระบวนการทำความร้อน	ค่าที่พิจารณา
อุณหภูมินมเข้ากระบวนการทำความร้อน ^{O}C	35
อุณหภูมินมออกจากเครื่องควบแน่น ^{O}C	$T_{m,ph}=T_C$ - 10
อุณหภูมินมภายหลังจากการทำความร้อน ^{O}C	85
ข้อกำหนดของกระบวนการทำความเย็น	
อุณหภูมินมเข้ากระบวนการทำความเย็น ^{O}C	35
อุณหภูมินมลดความร้อนเบื้องต้น ^{O}C	50
อุณหภูมินมภายหลังจากการทำความเย็น ^{O}C	4

ตารางที่ 3 ข้อกำหนดของกระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรซ์แบบบรรจุร้อน

ข้อกำหนดของกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์นมแบบบรรจุร้อน	ขอบเขตการศึกษา
ปริมาณการรับน้ำนมดิบ ตัน/วัน	1 - 10
กำลังการผลิต ตัน/วัน	1 - 20
สัดส่วนโดยปริมาตรการรับน้ำนมกลุ่ม A และน้ำนมกลุ่ม B (A:B) เปอร์เซนต์	100:0
	80:20
	60:40
	50:50
	40:60
เวลาการผลิตของกระบวนการ A ชั่วโมง/วัน	$\leq$4
เวลาการทำความเย็นกระบวนการ B2 ชั่วโมง	2
เวลาการผลิต ชั่วโมง/วัน	$\leq$8

หมายเหตุ น้ำนมกลุ่ม A หมายถึง กลุ่มของน้ำนมดิบที่โรงงานได้รับในช่วงเช้าและทำการผลิตทันที
น้ำนมกลุ่ม B หมายถึง กลุ่มของน้ำนมดิบที่โรงงานได้รับในช่วงบ่ายและเก็บรักษาคุณภาพน้ำนมดิบด้วยการทำความเย็นเพื่อทำการผลิตในช่วงบ่ายของวันรุ่งขึ้น

6. วิเคราะห์ผลการศึกษาวิจัย

การศึกษาวิจัยพบว่า ผลลัพธ์การออพติไมเซชันจากข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยข้างต้นนั้นผลคำตอบมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน การศึกษาวิจัยนี้จะแสดงการวิเคราะห์ผลจากตัวอย่างข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยตารางที่ 4 ดังนี้

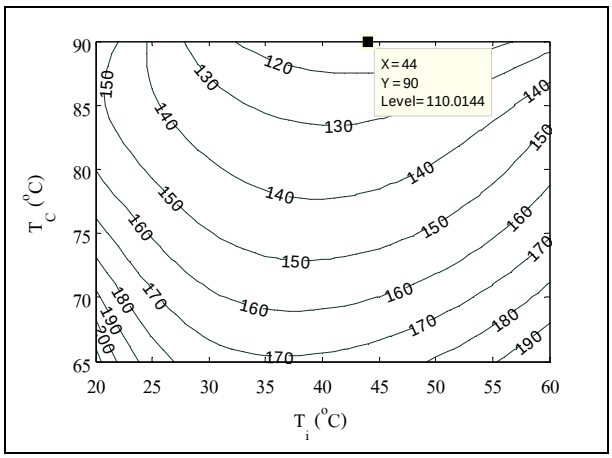
จากกราฟแสดงเส้นความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันคงที่กับอุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรของสารทำความเย็นและอุณหภูมิกลั่นตัวของสารทำความเย็น รูปที่ 8 และกราฟแสดงความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันกับอุณหภูมิกลั่นตัวของสารทำความเย็นที่อุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรของสารทำความเย็นระหว่าง 20^{O}C - 60^{O}C รูปที่ 9

ตารางที่ 4 ตัวอย่างข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัย

ข้อกำหนดของกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์นมแบบบรรจุร้อน	ขอบเขตการศึกษา
ปริมาณการรับน้ำนมดิบ ตัน/วัน	1
กำลังการผลิต ตัน/วัน	2
สัดส่วนโดยปริมาตรการรับน้ำนมกลุ่ม A และน้ำนมกลุ่ม B (A:B) เปอร์เซนต์	100:0
เวลาการผลิตของกระบวนการ A ชั่วโมง/วัน	4
เวลาการทำความเย็นกระบวนการ B2 ชั่วโมง	2
เวลาการผลิต ชั่วโมง/วัน	4
อุณหภูมิระเหยของสารทำความเย็น ^{O}C	-6

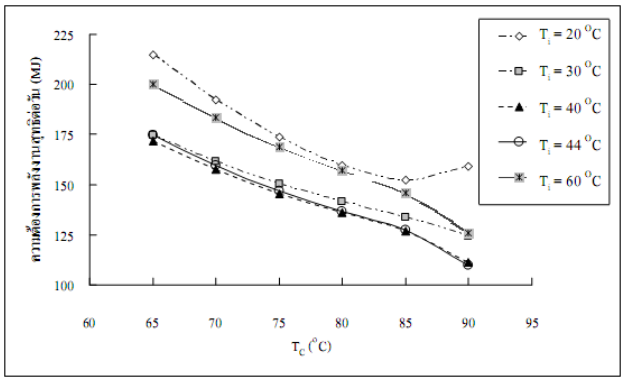
พบว่า สภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็นที่ดีที่สุด ซึ่งทำให้ความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันของระบบทำความเย็นแบบอัดไอสองขั้นตอน (วัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอนโดยอาศัยแฟลชแทงค์และวัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดอุดมคติ) มีแนวโน้มต่ำสุดคือ อุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรของสารทำความเย็น 44^{O}C (1.2 MPa) และอุณหภูมิกลั่นตัวของสารทำความเย็น 90^{O}C (3.3 MPa) เมื่อกำหนดอุณหภูมิระเหยของสารทำความเย็น -6^{O}C (250 kPa)

สภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็นที่ดีที่สุดจากกราฟแสดงความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันกับอุณหภูมิกลั่นตัวของสารทำความเย็นที่มีอุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรของสารทำความเย็น 44^{O}C รูปที่ 10 พบว่า ความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันมีแนวโน้มลดลงตามอุณหภูมิกลั่นตัวของสารทำความเย็นที่สูงขึ้น เนื่องจากความต้องการพลังงานของขดลวดความร้อนมีอิทธิพลต่อความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันสูงสุดที่ช่วงอุณหภูมิกลั่นตัวของสารทำความเย็น 65^{O}C - 80^{O}C และความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันมีแนวโน้มต่ำสุดที่ช่วงอุณหภูมิกลั่นตัวของสารทำความเย็น 80^{O}C - 90^{O}C โดยที่ความต้องการพลังงานของวัฏจักรความดันต่ำและความต้องการพลังงานของวัฏจักรความดันสูงมีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ ในขณะที่ความต้องการพลังงานของขดลวดความร้อนมีแนวโน้มลดลงต่ำกว่าความต้องการพลังงานของวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอน

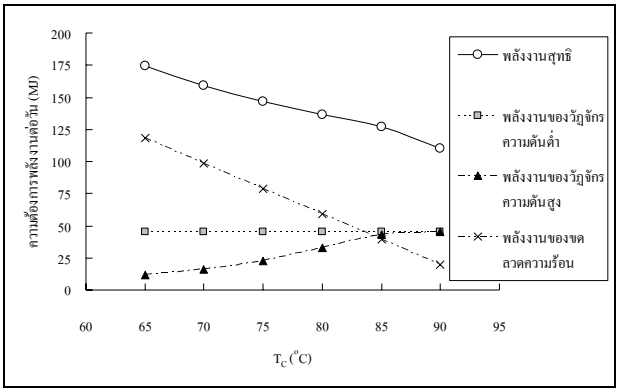


รูปที่ 8 กราฟแสดงเส้นความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันคงที่

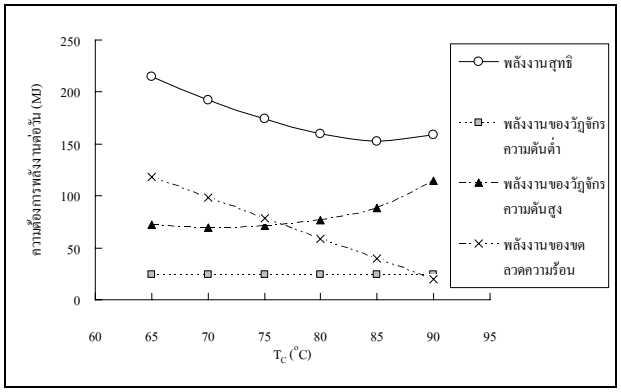
สภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็นที่มีอุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรของสารทำความเย็นต่ำกว่าอุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรของสารทำความเย็นที่ดีที่สุด จากกราฟแสดงความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันกับอุณหภูมิกลั่นตัวของสารทำความเย็นที่อุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรของสารทำความเย็น 20^{O}C รูปที่ 11 พบว่า ความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันมีแนวโน้มลดลงตามอุณหภูมิกลั่นตัวของสารทำความเย็นที่สูงขึ้น เนื่องจากความต้องการพลังงานของขดลวดความร้อนมีอิทธิพลต่อความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันสูงสุดที่ช่วงอุณหภูมิกลั่นตัวของสารทำความเย็น 65^{O}C - 80^{O}C โดยความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันมีแนวโน้มต่ำสุดที่อุณหภูมิกลั่นตัวของสารทำความเย็นประมาณ 80^{O}C และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอีกครั้งที่ช่วงอุณหภูมิกลั่นตัวของสารทำความเย็น 80^{O}C - 90^{O}C เนื่องจากความต้องการพลังงานของวัฏจักรความดันสูงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งมีอิทธิพลต่อความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันที่เพิ่มขึ้นในช่วงดังกล่าว



รูปที่ 9 กราฟแสดงความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันที่อุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรระหว่าง 20^{O}C - 60^{O}C



รูปที่ 10 กราฟแสดงความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันที่สภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่ดีที่สุด

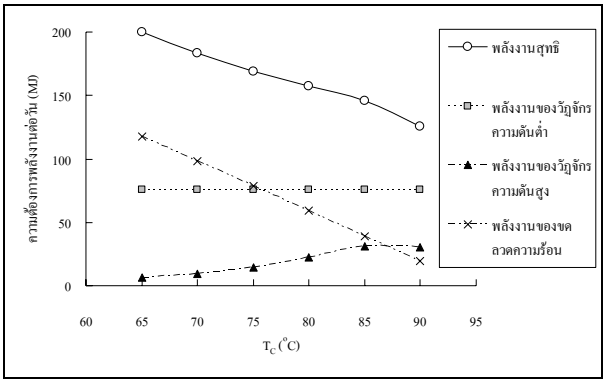


รูปที่ 11 กราฟแสดงความต้องการพลังงานต่อวันกับอุณหภูมิกลั่นตัวที่อุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักร 20^{O}C

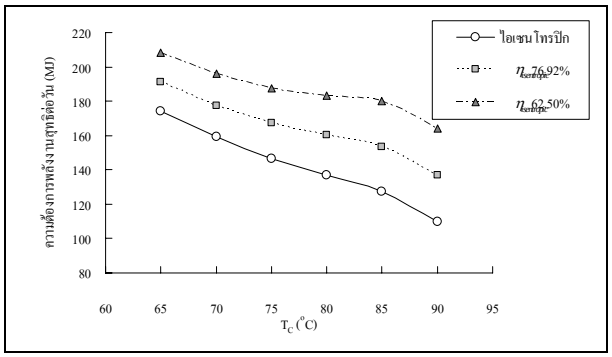
สภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็นที่มีอุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรของสารทำความเย็นสูงกว่าอุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรของ

สารทำความเย็นที่ดีที่สุด จากกราฟแสดงความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันกับอุณหภูมิกลั่นตัวของสารทำความเย็นที่อุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรของสารทำความเย็น 60^{O}C รูปที่ 12 พบว่า ความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันมีแนวโน้มลดลงตามอุณหภูมิกลั่นตัวที่สูงขึ้น เนื่องจากความต้องการพลังงานของขดลวดความร้อนมีอิทธิพลต่อความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันสูงสุดที่ช่วงอุณหภูมิกลั่นตัวของสารทำความเย็น 65^{O}C - 75^{O}C และความต้องการพลังงานของวัฏจักรความดันต่ำมีอิทธิพลต่อความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันสูงสุดที่ช่วงอุณหภูมิกลั่นตัวของสารทำความเย็น 75^{O}C - 90^{O}C โดยความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันมีแนวโน้มต่ำสุดที่อุณหภูมิกลั่นตัวของสารทำความเย็นประมาณ 90^{O}C

จากรูปที่ 13 และรูปที่ 14 กระบวนการอัดจริงที่มีประสิทธิภาพการอัดแบบไอเซนโทรปิก (Isentropic Efficiency $\eta_{isentropic}$) เท่ากับ 76.92% และ 62.50% พบว่า กระบวนการอัดจริงมีแนวโน้มความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกระบวนการอัดแบบไอเซนโทรปิก โดยสภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็นที่ดีที่สุดสำหรับกระบวนการอัดจริงมีแนวโน้มสอดคล้องกับสภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็นที่ดีที่สุดสำหรับกระบวนการอัดแบบไอเซนโทรปิก เนื่องจากขดลวดความร้อนยังคงเป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันมากกว่าเมื่อเทียบกับกระบวนการอัดจริง



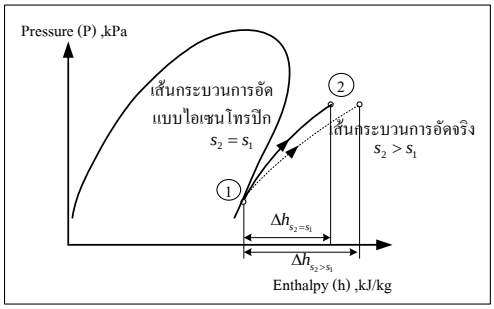
รูปที่ 12 กราฟแสดงความต้องการพลังงานต่อวันกับอุณหภูมิกลั่นตัวที่อุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักร 60^{O}C



รูปที่ 13 กราฟแสดงความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันของกระบวนการอัดแบบไอเซนโทรปิกและกระบวนการอัดจริง

7. สรุปผลการศึกษาวิจัย

จากผลการศึกษาวิจัยนี้พบว่ากระบวนการผลิตควรจำกัดน้ำนมกลุ่ม B ให้น้อยที่สุด และรับน้ำนมกลุ่ม A เข้าสู่กระบวนการผลิตให้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เนื่องจากต้องการลดภาระการทำความเย็นในกระบวนการเก็บรักษา



รูปที่ 14 เส้นกระบวนการอัดแบบไอเซนโทรปิกและเส้นกระบวนการอัดจริง

สภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็นที่ดีที่สุดสามารถสรุปได้ดังนี้คือ

1. อุณหภูมิระเหยของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันต่ำมีแนวโน้มเข้าใกล้อุณหภูมินมต่ำสุดเพื่อการทำความเย็นให้ได้ตามที่ต้องการ

2. อุณหภูมิกลั่นตัวของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันสูงมีแนวโน้มเข้าใกล้อุณหภูมินมสูงสุดแสดงให้เห็นว่าควรจำกัดการทำความร้อนด้วยขดลวดความร้อนให้น้อยที่สุดและทำความร้อนด้วยเครื่องควบแน่นให้มากที่สุด

3. อุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรของสารทำความเย็นมีแนวโน้มเป็นค่าเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิระเหยของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันต่ำและอุณหภูมิกลั่นตัวของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันสูง

ผลลัพธ์จากการออพติไมเซชันทำให้ได้สภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่ดีที่สุดสำหรับความต้องการพลังงานสุทธิของระบบต่ำสุด ในการออกแบบวิศวกรสามารถนำสภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่ดีที่สุดที่นำเสนอจากการศึกษาวิจัยนี้เป็นสภาวะอ้างอิง แต่อย่างไรก็ตามด้วยขีดความสามารถด้านการแลกเปลี่ยนความร้อนของอุปกรณ์ทางวิศวกรรมต่าง ๆ จะทำให้ระบบมีความต้องการพลังงานสุทธิที่มีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อเทียบกับความต้องการพลังงานสุทธิที่ดีที่สุดของระบบ

เอกสารอ้างอิง

1. ธีระชาติ พรพิบูลย์ และคณะ.(2551).รายงานความก้าวหน้าโครงการครั้งที่ 1 การออกแบบระบบอัดไอสำหรับอุตสาหกรรมนม.โครงการ ITAP เครือข่ายภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนบน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
2. ชัยวัฒน์ แสงเพ็ง และธีระชาติ พรพิบูลย์ (2552).แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับระบบการทำความเย็นแบบอัดไอสองขั้นตอนในกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์นม.การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 5.
3. Soylemez, M.S, 2005. Optimum heat pump in milk pasteurizing for dairy. Journal of Food Engineering, pp.546-551.
4. Khan J.U.R. and Zubair S.M, 2000. Thermodynamic optimization of finite time vapor compression refrigeration systems. Energy Conversion and Management 42, pp.1457-1475.
5. Jeffrey M. Gordon and Kim Choon Ng, 2000. Cool Thermodynamics. Cambridge International Science Publishing.
6. Stoecker W.F., 1989. Design and Thermal systems. (3th edition), McGrawHill.

7. Stoecker W.F., 1982. Refrigeration and Air conditioning. (2th edition), McGrawHill.
8. Jaluria Y., 1998. Design and optimization of Thermal Systems. McGrawHill.
9. Rao S.S, 1978. Optimization theory and applications. Wiley Eastern Limited.
10. Cengel Y.A., 2003. Heat transfer a practical approach. (2th edition), McGrawHill.
11. Cengel Y.A. and Boles M.A., 2003. Thermodynamics an engineering approach. (4th edition), McGrawHill.
12. Kays W.M. and London A.L.,1964. Compact heat exchangers. (2th edition), McGrawHill.
13. Ozisik M.N., 1985. Heat Transfer a basic approach. McGrawHill.
14. ASHRAE Handbook Fundamental ,2001., chapter 19, American Society of Heating , Refrigerating, and Air-Conditioning , Atlanta.