

สถานะทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่ดีที่สุดสำหรับระบบการทำความเย็น
แบบอัดไอสองขั้นตอนในกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์นม

นายชัยวัฒน์ แสงเพ็ญ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2552

**THERMODYNAMICS OPTIMIZATION FOR TWO
STAGE VAPOR COMPRESSION SYSTEM IN
MILK PASTEURIZING PROCESS**

Chaiwat Seangpeng

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2009**

สภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่ดีที่สุดสำหรับระบบการทำความเย็น
แบบอัดไอสองขั้นตอนในกระบวนการพาสเจอร์ไรช์นม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักศึกษานี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.จิระพล ศรีเสวีผล)

ประธานกรรมการ

(อ. ดร.ธีระชาติ พรพิบูลย์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

กรรมการ

(รศ. ดร.ทวิช จิตรสมบูรณ์)

กรรมการ

(ผศ. ดร.วีรชัย อาจหาญ)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. น.อ. ดร.วรพจน์ ขำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ชัยวัฒน์ แสงเพ็ญ : สภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่ดีที่สุดสำหรับระบบการทำความเย็นแบบอัดไอสองขั้นตอนในกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์นม (THERMODYNAMICS OPTIMIZATION FOR TWO STAGE VAPOR COMPRESSION SYSTEM IN MILK PASTEURIZING PROCESS) อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.ธีระชาติ พรพิบูลย์, 157 หน้า

การศึกษาวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอวิธีการสร้างแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์เพื่อหาสภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็น R 134a ที่ดีที่สุดให้แก่ อุณหภูมิระเหยของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันต่ำ อุณหภูมิกลั่นตัวของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันสูง และอุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรของสารทำความเย็น ภายใต้เงื่อนไขและข้อกำหนดของการออกแบบต่าง ๆ โดยผลการศึกษาวิจัยสรุปได้ดังนี้

1. สภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็นที่ดีที่สุดคือ อุณหภูมิระเหยของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันต่ำมีแนวโน้มเข้าใกล้อุณหภูมินต่ำสุด อุณหภูมิกลั่นตัวของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันสูงมีแนวโน้มเข้าใกล้อุณหภูมินสูงสุดและอุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรของสารทำความเย็นมีแนวโน้มเป็นค่าเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิระเหยของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันต่ำและอุณหภูมิกลั่นตัวของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันสูง

2. อัตราการไหลโดยมวลของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันต่ำเป็นฟังก์ชันที่ขึ้นอยู่กับอัตราการผลิต อุณหภูมินเข้าและอุณหภูมินต่ำสุด และอัตราการไหลโดยมวลของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันสูงเป็นฟังก์ชันที่ขึ้นอยู่กับอัตราการไหล โดยมวลของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันต่ำ และอัตราส่วนของผลต่างพลังงานต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็นของกระบวนการระหว่างวัฏจักรทั้งสอง

3. เมื่อพิจารณากระบวนการอัดจริง ภายใต้ความเบี่ยงเบนของพลังงานต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็นจากกระบวนการอัดแบบไอเซนโทรปิก พบว่าสภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่ดีที่สุดสำหรับกระบวนการอัดจริงมีแนวโน้มสอดคล้องกับสภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่ดีที่สุดสำหรับกระบวนการอัดแบบไอเซนโทรปิก

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา 2552

ลายมือชื่อนักศึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

CHAIWAT SEANGPENG : THERMODYNAMICS OPTIMIZATION FOR
TWO STAGE VAPOR COMPRESSION SYSTEM IN MILK
PASTEURIZING PROCESS. THESIS ADVISOR : TEERACHART
PORNPIBUL, Ph.D., 157 PP.

THERMODYNAMICS OPTIMIZATION/ TWO STAGE VAPOR COMPRESSION
SYSTEM/ MILK PASTEURIZING PROCESS

The objective of this research is to present the method and to create the Thermodynamics Models 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, Condensing temperature tends to approach the highest milk temperature and Intermediate temperature tends to the average of the optimal Evaporating and Condensing conditions; (2) mass flow rate of refrigerant in low pressure cycle is function of the capacity rate, inlet milk temperature and lowest milk temperature, meanwhile, mass flow rate of refrigerant in high pressure cycle depends on mass flow rate of refrigerant in low pressure cycle and enthalpy difference ratio of intermediate process between both cycles; and (3) from the enthalpy deviation of the real compression from the isentropic compression, the optimal Thermodynamics conditions of real compression correspond to the optimal Thermodynamics conditions of an isentropic compression.

School of Mechanical Engineering

Academic Year 2009

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากอาจารย์ ดร.ธีระชาติ พรพิบูลย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งกรุณาให้คำแนะนำและถ่ายทอดความรู้ตลอดจนควบคุมการศึกษากันคว้าจนประสบความสำเร็จด้วยดี ผู้ศึกษาวิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ นาวาอากาศเอก ดร.วรรณ ขำพิศ รองศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์ รองศาสตราจารย์ ดร.ทวิช จิตรสมบุญ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล และรองศาสตราจารย์ ดร.เอกชัย จันทสาโร ที่กรุณาถ่ายทอดความรู้ตลอดระยะเวลาในการศึกษา รวมทั้งบุคคลที่ปรากฏตามเอกสารอ้างอิงที่ผู้ศึกษาใช้อ้างอิงทางวิชาการ

ขอขอบพระคุณ คุณจิตติศักดิ์ ภูศรีเมือง คุณวิทย์กานตพล จอมพลาพล คุณสุพจน์ ปลั่งพิมาย และคุณพิจิตร ธิ่องไพโรจน์ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำในการศึกษาวิจัยจนสำเร็จด้วยดี

ประ โยชน์และคุณค่าอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้ศึกษาวิจัยขอมอบเป็นกตัญญูตราบาปแด่ พ่อจำลอง และแม่สายชล แสงเพ็ญ ครูอาจารย์ ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่าน

ชัยวัฒน์ แสงเพ็ญ

สารบัญ

หน้า

| | |
|---------------------------------|---|
| บทคัดย่อ (ภาษาไทย) | ก |
| บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)..... | ข |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ค |
| สารบัญ | ง |
| สารบัญตาราง | ฉ |
| สารบัญรูป | จ |
| คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ | ฉ |

บทที่

| | |
|---|----------|
| 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย | 1 |
| 1.3 ขอบเขตของการศึกษาวิจัย | 2 |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 2 |
| 1.5 การจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์..... | 2 |
| 2 ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 4 |
| 2.1 กระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรซ์แบบบรรจุร้อน | 4 |
| 2.1.1 กระบวนการผลิตของน้ำนมกลุ่ม A | 4 |
| 2.1.2 กระบวนการผลิตของน้ำนมกลุ่ม B..... | 5 |
| 2.2 ความต้องการพลังงานในกระบวนการผลิต | |
| นมพาสเจอร์ไรซ์แบบบรรจุร้อน | 5 |
| 2.2.1 กระบวนการทำความเย็น | 5 |
| 2.2.2 กระบวนการทำความร้อน | 6 |
| 2.3 วัฏจักรอัดไอแบบขั้นตอนเดียว | 7 |

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

| | |
|---|-----------|
| 2.3.1 ระบบทำความเย็นแบบอัดไอ | 7 |
| 2.3.2 กระบวนการทางเทอร์โมไดนามิกส์ของวัฏจักรอัดไอมาตรฐาน | 8 |
| 2.4 วัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอน | 10 |
| 2.4.1 วัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอนโดยอาศัยเฟลชแทงค์ | 10 |
| 2.4.2 วัฏจักรอัดไอแบบแคสเคด | 10 |
| 2.5 ปรีทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง..... | 13 |
| 2.6 การพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างการศึกษาวิจัยและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 16 |
| 3 แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับระบบ | |
| การทำความเย็นแบบอัดไอสองขั้นตอน | 18 |
| 3.1 ความสัมพันธ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ | 18 |
| 3.1.1 ความร้อนต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็นเนื่องจาก กระบวนการรับความร้อนที่ความดันคงที่..... | 18 |
| 3.1.2 ความร้อนต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็นเนื่องจาก กระบวนการคายความร้อนที่ความดันคงที่ | 20 |
| 3.1.3 สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะ | 20 |
| 3.2 แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับระบบ การทำความเย็นแบบอัดไอสองขั้นตอน..... | 22 |
| 3.3 แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับวัฏจักร อัดไอสองขั้นตอนโดยอาศัยเฟลชแทงค์ | 23 |
| 3.4 แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับ วัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดอุดมคติ | 25 |
| 3.5 แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดจริง | 26 |

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.6 | การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ระหว่างค่าอ้างอิง และค่าที่ได้จากแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ | 28 |
| 3.7 | สรุปผลการวิเคราะห์แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ | 31 |
| 4 | การออปติไมเซชัน | 33 |
| 4.1 | องค์ประกอบของปัญหาออปติไมเซชัน | 33 |
| 4.2 | สมการจุดประสงค์ของวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอน | 33 |
| 4.3 | สมการจุดประสงค์ของวัฏจักรอัดไอแบบ สองขั้นตอนโดยอาศัยแฟลชแทงค์ | 34 |
| 4.4 | สมการจุดประสงค์ของวัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดอุดมคติ | 34 |
| 4.5 | สมการจุดประสงค์ของวัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดจริง | 35 |
| 4.6 | การจำแนกตัวแปรจากสมการจุดประสงค์ | 35 |
| 4.6.1 | ตัวแปรอิสระ | 35 |
| 4.6.2 | ตัวแปรตาม | 36 |
| 4.6.3 | ตัวแปรออกแบบ | 37 |
| 4.7 | วิธีการออปติไมเซชัน | 38 |
| 4.7.1 | วิธีการออปติไมเซชันสำหรับการศึกษาวิจัย | 38 |
| 4.7.2 | วิธีการแสดงเชิงเส้น | 38 |
| 4.8 | สรุปแนวทางการออปติไมเซชันในการศึกษาวิจัย | 39 |
| 5 | สรุปและวิเคราะห์ผลการศึกษาวิจัย | 41 |
| 5.1 | ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัย | 41 |
| 5.2 | การวิเคราะห์ผลการศึกษาวิจัย | 41 |
| 5.2.1 | สัดส่วนการรับน้ำนมกลุ่ม A และน้ำนมกลุ่ม B | 42 |
| 5.2.2 | ตัวอย่างข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัย | 43 |
| 5.2.3 | สภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็นที่ดีที่สุด | 43 |

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

| | | |
|-------|---|----|
| 5.2.4 | วัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดจริง | 48 |
| 5.2.5 | อิทธิพลของกระบวนการอัดจริง | 49 |
| 5.2.6 | ขีดจำกัดการอัดของเครื่องอัดไอ..... | 52 |
| 5.2.7 | เปรียบเทียบความต้องการพลังงานสุทธิระหว่างวัฏจักรอัดไอแบบ สองชั้นตอนและวัฏจักรอัดไอแบบชั้นตอนเดียว | 52 |
| 5.2.8 | การวิเคราะห์เชิงทฤษฎีสำหรับความต้องการพลังงานสุทธิใน รูปแบบระหว่างระบบอัดไอแบบสองชั้นตอน และระบบอัดไอแบบชั้นตอนเดียว..... | 56 |
| 5.2.9 | สัดส่วนความต้องการพลังงานสุทธิระหว่างระบบอัดไอแบบ สองชั้นตอนและวัฏจักรอัดไอแบบชั้นตอนเดียว | 58 |
| 5.3 | สรุปผลการศึกษาวิจัย..... | 61 |
| 6 | การนำผลวิจัยมาประยุกต์ใช้งานและข้อเสนอแนะ | 63 |
| 6.1 | การนำผลวิจัยมาประยุกต์ใช้งาน | 63 |
| 6.2 | พารามิเตอร์ออกแบบของเครื่องแลกเปลี่ยน ความร้อนและขดลวดความร้อน | 63 |
| 6.3 | พารามิเตอร์ออกแบบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและขดลวด ความร้อนของตัวอย่างข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัย..... | 64 |
| 6.4 | เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับประยุกต์ใช้งานจริง | 66 |
| 6.5 | พารามิเตอร์ออกแบบของเครื่องแลกเปลี่ยน ความร้อนสำหรับประยุกต์ใช้งานจริง | 67 |
| 6.6 | สรุปผลการศึกษาวิจัย..... | 70 |
| 6.7 | ข้อเสนอแนะ | 72 |
| | รายการอ้างอิง..... | 73 |

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก

| | | |
|-----------------------|---|-----|
| ภาคผนวก ก. | เงื่อนไขและข้อกำหนดสำหรับกระบวนการ ผลิตนมพาสเจอร์ไรซ์แบบบรรจุร้อน | 74 |
| ภาคผนวก ข. | ข้อกำหนดของกรณีศึกษาและตัวอย่างการคำนวณของกรณีศึกษา..... | 77 |
| ภาคผนวก ค. | ฐานข้อมูลการออกแบบสำหรับวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอน (วัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอนโดยอาศัยเฟลชเทงก์ และวัฏจักรอัดไอแบบแกลสเคดอคมคติ)..... | 91 |
| ภาคผนวก ง. | ฐานข้อมูลการออกแบบสำหรับวัฏจักรอัดไอแบบแกลสเคดจริง | 117 |
| ภาคผนวก จ. | โปรแกรมออปติไมเซชัน | 143 |
| ภาคผนวก ฉ. | บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่..... | 149 |
| ประวัติผู้เขียน | | 157 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|----------|--|
| 5.1 | ข้อกำหนดสภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็น 41 |
| 5.2 | ข้อกำหนดสำหรับกระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรซ์แบบบรรจุร้อน..... 42 |
| 5.3 | ข้อกำหนดของกระบวนการทำความร้อนและกระบวนการทำความเย็น 43 |
| 5.4 | ตัวอย่างข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัย..... 44 |
| 5.5 | ข้อกำหนดของวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอน 53 |
| 5.6 | ข้อกำหนดของวัฏจักรอัดไอแบบขั้นตอนเดียว 1 53 |
| 5.7 | ข้อกำหนดของวัฏจักรอัดไอแบบขั้นตอนเดียว 2 54 |
| 6.1 | ตัวอย่างข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัย..... 65 |
| 6.2 | ข้อกำหนดของกระบวนการทำความร้อนและกระบวนการทำความเย็น 65 |
| 6.3 | พารามิเตอร์ออกแบบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและขดลวดความร้อน 66 |
| 6.4 | สรุปสมมติฐานและพารามิเตอร์ออกแบบเครื่องทำระเหย ในวัฏจักรความดันต่ำสำหรับประยุกต์ใช้งานจริง 71 |
| ก.1 | ข้อกำหนดสภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็น 75 |
| ก.2 | ข้อกำหนดสำหรับกระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรซ์แบบบรรจุร้อน..... 75 |
| ก.3 | ข้อกำหนดของกระบวนการทำความร้อนและกระบวนการทำความเย็น 76 |
| ข.1 | ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 1..... 78 |
| ข.2 | ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 2..... 78 |
| ข.3 | ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 3..... 79 |
| ข.4 | ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 4..... 79 |
| ข.5 | ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 5..... 79 |
| ข.6 | ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 6..... 80 |
| ข.7 | ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 7..... 80 |
| ข.8 | ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 8..... 80 |
| ข.9 | ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 9..... 81 |
| ข.10 | ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 10..... 81 |

สารบัญตาราง (ต่อ)

| ตารางที่ | หน้า |
|--|------|
| ข.11 ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 11..... | 81 |
| ข.12 ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 12..... | 82 |
| ข.13 ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 13..... | 82 |
| ข.14 ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 14..... | 82 |
| ข.15 ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 15..... | 83 |
| ข.16 ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 16..... | 83 |
| ข.17 ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 17..... | 83 |
| ข.18 ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 18..... | 84 |
| ข.19 ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 19..... | 84 |
| ข.20 ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 20..... | 84 |
| ข.21 ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 21..... | 85 |
| ข.22 ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 22..... | 85 |
| ข.23 ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 23..... | 85 |
| ข.24 ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 24..... | 86 |
| ข.25 ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 25..... | 86 |
| ข.26 สภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ออกแบบของข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 1..... | 87 |
| ค.1 พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 1 สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอน..... | 92 |
| ค.2 พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 2 สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอน..... | 93 |
| ค.3 พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 3 สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอน..... | 94 |
| ค.4 พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 4 สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอน..... | 95 |
| ค.5 พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 5 สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอน..... | 96 |
| ค.6 พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 6 สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอน..... | 97 |
| ค.7 พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 7 สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอน..... | 98 |
| ค.8 พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 8 สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอน..... | 99 |
| ค.9 พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 9 สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอน..... | 100 |
| ค.10 พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 10 สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอน..... | 101 |

สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|--------|--|
| 2.1 | กระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรซ์แบบบรรจุร้อน 6 |
| 2.2 | ขั้นตอนการผลิตนมพาสเจอร์ไรซ์เทียบต่อช่วงเวลาแต่ละวัน 7 |
| 2.3 | ระบบทำความเย็นแบบอัดไอแบบขั้นตอนเดียว 8 |
| 2.4 | เส้นกระบวนการบนแผนภาพความดัน-เอนทาลปี 9 |
| 2.5 | วัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอนโดยอาศัยเฟลชเทงก์ 11 |
| 2.6 | เส้นกระบวนการของวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอนโดย อาศัยเฟลชเทงก์บนแผนภาพความดัน-เอนทาลปี 11 |
| 2.7 | วัฏจักรอัดไอแบบแอสเทคอดุมคิตี 12 |
| 2.8 | เส้นกระบวนการของวัฏจักรอัดไอแบบแอสเทค อดุมคิตีบนแผนภาพความดัน-เอนทาลปี 13 |
| 2.9 | วัฏจักรอัดไอแบบแอสเทคจริง 14 |
| 2.10 | เส้นกระบวนการของวัฏจักรอัดไอแบบแอสเทคจริง บนแผนภาพความดัน-เอนทาลปี 14 |
| 3.1 | สร้างสมการสองตัวแปรซึ่งเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ สารทำความเย็นบนแผนภาพความดัน-เอนทาลปี 19 |
| 3.2 | ความร้อนต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็นจาก กระบวนการรับความร้อนที่ความดันคงที่ 19 |
| 3.3 | ความร้อนต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็นจาก กระบวนการคายความร้อนที่ความดันคงที่ 20 |
| 3.4 | สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของเครื่องทำความเย็น 21 |
| 3.5 | สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของปั๊มความร้อน 22 |
| 3.6 | วัฏจักรอัดไอสองขั้นตอนแบบอาศัยเฟลชเทงก์ใน กระบวนการพาสเจอร์ไรซ์นมแบบบรรจุร้อน 24 |
| 3.7 | สมดุลมวลและสมดุลพลังงานระบบเฟลชเทงก์ 24 |
| 3.8 | สมดุลพลังงานเครื่องทำระเหยในวัฏจักรความดันต่ำ 25 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--------|---|
| 3.9 | วัฏจักรอัดไอแบบแอสเทดอคมคติในกระบวนการ พาสเจอร์ไรซ์นมแบบบรรจุร้อน 27 |
| 3.10 | สมดุลพลังงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนกลาง วัฏจักรของวัฏจักรอัดไอแบบแอสเทดอคมคติ 27 |
| 3.11 | เปรียบเทียบความร้อนต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็น q_E ระหว่าง ค่าอ้างอิงและค่าจากแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ 29 |
| 3.12 | เปรียบเทียบความร้อนต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็น q_C ระหว่าง ค่าอ้างอิงและค่าจากแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ 30 |
| 3.13 | เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของเครื่องทำความเย็น COP_R ระหว่าง ค่าอ้างอิงและค่าจากแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ 30 |
| 3.14 | เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของปั๊มความร้อน COP_{HP} ระหว่าง ค่าอ้างอิงและค่าจากแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ 31 |
| 3.15 | วัฏจักรอัดไอแบบแอสเทดจริงในกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์นมแบบบรรจุร้อน 32 |
| 3.16 | สมดุลพลังงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนกลางวัฏจักร 32 |
| 4.1 | การแก้ปัญหาค่าต่ำสุดสองตัวแปรด้วยระเบียบวิธีการแลตทิซเซอร์ช 39 |
| 5.1 | กราฟแสดงเส้นความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันคงที่ กับอุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรและอุณหภูมิก้นตัว 45 |
| 5.2 | กราฟแสดงความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันกับอุณหภูมิก้นตัว ที่อุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรระหว่าง $20^{\circ}\text{C} - 60^{\circ}\text{C}$ 46 |
| 5.3 | กราฟแสดงความต้องการพลังงานต่อวันกับอุณหภูมิก้นตัวที่อุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักร 44°C 47 |
| 5.4 | กราฟแสดงความต้องการพลังงานต่อวันกับอุณหภูมิก้นตัวที่อุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักร 20°C 47 |
| 5.5 | กราฟแสดงความต้องการพลังงานต่อวันกับอุณหภูมิก้นตัวที่อุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักร 60°C 48 |
| 5.6 | กระบวนการอัดจริงที่มีประสิทธิภาพการอัดแบบไอเซนโทรปิกเท่ากับ 76.92% 50 |
| 5.7 | กระบวนการอัดจริงที่มีประสิทธิภาพการอัดแบบไอเซนโทรปิกเท่ากับ 62.50% 50 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 5.8 กราฟแสดงความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันของกระบวนการ อัดแบบไอเซนโทรปิกและกระบวนการอัดจริง | 51 |
| 5.9 เส้นกระบวนการอัดแบบไอเซนโทรปิกและเส้นกระบวนการอัดจริง..... | 51 |
| 5.10 การเปรียบเทียบความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันระหว่างวัฏจักร อัดไอแบบสองขั้นตอนและวัฏจักรอัดไอแบบขั้นตอนเดียว | 54 |
| 5.11 ความต้องการพลังงานต่อวันของวัฏจักรอัดไอแบบขั้นตอนเดียว 1 | 55 |
| 5.12 ความต้องการพลังงานต่อวันของวัฏจักรอัดไอแบบขั้นตอนเดียว 2 | 55 |
| 5.13 ระบบอัดไอแบบสองขั้นตอน | 57 |
| 5.14 ระบบอัดไอแบบขั้นตอนเดียว..... | 58 |
| 5.15 แนวโน้มกลุ่มพารามิเตอร์สัดส่วนความต้องการพลังงานสุทธิ กับอุณหภูมิกลั่นตัว | 60 |
| 5.16 แนวโน้มกลุ่มพารามิเตอร์สัดส่วนความต้องการพลังงานสุทธิ กับอุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักร..... | 60 |
| 6.1 การแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับกระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรซ์..... | 68 |
| 6.2 (ก) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีทิศทางการไหลแบบขวาง | |
| (ข) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น | 68 |

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

| | |
|------------------------------|---|
| T_E | อุณหภูมิระเหยของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันต่ำ |
| T_C | อุณหภูมิกักตัวของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันสูง |
| T_i | อุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรของสารทำความเย็น |
| $T_i + \Delta T'$ | อุณหภูมิกักตัวของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันต่ำ |
| $T_i - \Delta T''$ | อุณหภูมิระเหยของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันสูง |
| $T_{m,in}$ | อุณหภูมินมเข้า |
| $T_{m,out}$ | อุณหภูมินมเย็นออก |
| $T_{m,ph}$ | อุณหภูมินมทำความร้อนเบื้องต้น |
| $T'_{m,ph}$ | อุณหภูมินมทำความร้อนเบื้องต้นสำหรับระบบอัดไอแบบสองขั้นตอน |
| $T''_{m,ph}$ | อุณหภูมินมทำความร้อนเบื้องต้นสำหรับระบบอัดไอแบบขั้นตอนเดียว |
| $T_{m,hot}$ | อุณหภูมินมร้อน |
| $T_{m,pc}$ | อุณหภูมินมทำความเย็นเบื้องต้น |
| ΔT_{lm} | ความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยเชิงลอการิทึมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน |
| UA | สัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนความร้อนสุทธิและพื้นที่การถ่ายเทความร้อน |
| ε | ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนสุทธิ |
| \dot{m}_L | อัตราการไหลโดยมวลของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันต่ำ |
| \dot{m}_H | อัตราการไหลโดยมวลของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันสูง |
| \dot{m}_m | อัตราการไหลโดยมวลของนม |
| C_p | ความร้อนจำเพาะของนม |
| C_m | ความจุความร้อนของนม |
| C_w | ความจุความร้อนของน้ำ |
| C_R | ความจุความร้อนของสารทำความเย็น |
| COP_R | สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของเครื่องทำความเย็น |
| COP_{HP} | สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของปั๊มความร้อน |
| $\Delta h_{1 \rightarrow 2}$ | พลังงานในกระบวนการอัดแบบไอเซนโทรปิกต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันต่ำ |

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

| | |
|----------------------------------|---|
| $\Delta h_{3 \rightarrow 4}$ | พลังงานในกระบวนการอัดแบบไอเซนโทรปิกต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันสูง |
| E_{net} | ความต้องการพลังงานสุทธิ |
| E_{LS} | ความต้องการพลังงานการอัดแบบไอเซนโทรปิกในวัฏจักรความดันต่ำ |
| E_{HS} | ความต้องการพลังงานการอัดแบบไอเซนโทรปิกในวัฏจักรความดันสูง |
| E_{heater} | ความต้องการพลังงานความร้อนของขดลวดความร้อน |
| \dot{W}_{net} | กำลังงานสุทธิ |
| $\dot{W}_{1 \rightarrow 2}^{LS}$ | กำลังงานในการอัดแบบไอเซนโทรปิกในวัฏจักรความดันต่ำ |
| $\dot{W}_{3 \rightarrow 4}^{HS}$ | กำลังงานในการอัดแบบไอเซนโทรปิกในวัฏจักรความดันสูง |
| \dot{W}_{heater} | กำลังงานทางไฟฟ้าของขดลวดความร้อน |
| t | เวลาการผลิต |
| \dot{Q}_E | อัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องทำระเหย |
| \dot{Q}_i | อัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนกลางวัฏจักร |
| \dot{Q}_C | อัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องควบแน่น |
| \dot{Q}_{actual} | อัตราการถ่ายเทความร้อนจริง |
| $\dot{Q}_{max, possible}$ | อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่สามารถทำได้ |
| q_C | ความร้อนในกระบวนการคายความร้อนที่ความดันคงที่ต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็น |
| q_E | ความร้อนในกระบวนการรับความร้อนที่ความดันคงที่ต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็น |
| TC | ค่าใช้จ่ายสุทธิของระบบทำความเย็นแบบอัดไอขั้นตอนนี้ |
| IC | ค่าลงทุนเริ่มต้นของระบบทำความเย็นแบบอัดไอขั้นตอนนี้ |
| OC | ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานของระบบทำความเย็นแบบอัดไอขั้นตอนนี้ |
| $comp$ | เครื่องอัดไอ |
| E | เครื่องทำระเหย |
| C | เครื่องควบแน่น |
| CF | เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีทิศทางไหลแบบขวาง |
| P | เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น |

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

| | |
|---------------|--------------------------------------|
| <i>i</i> | เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนกลางวัฏจักร |
| <i>k</i> | เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนใด ๆ |
| <i>Heater</i> | ขดลวดความร้อน |
| <i>HX</i> | เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบรีเจน |
| <i>HS</i> | วัฏจักรความดันสูง |
| <i>LS</i> | วัฏจักรความดันต่ำ |
| <i>TS</i> | การอัดไอแบบสองขั้นตอน |
| <i>SS</i> | การอัดไอแบบขั้นตอนเดียว |
| <i>A6</i> | กระบวนการเก็บบรรจุน้ำนมกลุ่ม A |
| <i>B2</i> | กระบวนการเก็บรักษาน้ำนมกลุ่ม B |
| <i>B7</i> | กระบวนการเก็บบรรจุน้ำนมกลุ่ม B |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

กระบวนการพาสเจอร์ไรซ์นมแบบบรรจุร้อนมีความต้องการทำความร้อนที่อุณหภูมิสูงสำหรับกระบวนการพาสเจอไรซ์ และมีความต้องการความเย็นที่อุณหภูมิต่ำสำหรับกระบวนการเก็บรักษาน้ำนมดิบและกระบวนการทำความเย็นเพื่อการเก็บบรรจุ โดยทั่วไปจะประยุกต์หลักการของวัฏจักรอัดไอขั้นตอนเดียว ซึ่งอาศัยกระบวนการรับความร้อนเพื่อทำความเย็นที่อุณหภูมิต่ำเป็นหลักและอาศัยขดลวดความร้อนเพื่อทำความร้อน เนื่องจากอุณหภูมิน้ำนมสูงสุดที่ต้องการในการทำความร้อนและอุณหภูมิน้ำนมต่ำสุดที่ต้องการในการทำความเย็นมีความแตกต่างกันมาก จึงทำให้ระบบอัดไอแบบขั้นตอนเดียวไม่เหมาะสมด้วยเหตุผล 2 ประการคือ จิตความสามารถในการอัดของเครื่องอัดไอในปัจจุบัน และในช่วงอุณหภูมิของสารทำความเย็นต่ำสุดและอุณหภูมิของสารทำความเย็นสูงสุดมีช่วงอุณหภูมิกว้างมาก จะทำให้เครื่องอัดไอต้องการพลังงานต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็นที่ค่อนข้างมากจึงส่งผลให้ไม่ประหยัดพลังงาน สามารถแก้ปัญหาโดยการประยุกต์หลักการของวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอน (Two Stage Vapor Compression Cycle) ซึ่งโดยทั่วไปจะมีวัตถุประสงค์เพื่อทำความเย็นที่อุณหภูมิต่ำมาก

ดังนั้นการศึกษานี้จะนำเสนอแนวทางการประยุกต์หลักการของวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอนที่มีวัตถุประสงค์เพื่อทำความร้อนที่อุณหภูมิสูงและทำความเย็นที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งประกอบด้วย วัฏจักรอัดไอสองขั้นตอนโดยอาศัยแฟลชแทงก์ วัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดอุดมคติ และวัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดจริงสำหรับกระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรซ์แบบบรรจุร้อน

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัย

1. เพื่อนำเสนอวิธีการสร้างแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ในรูปแบบของความต้องการพลังงานสุทธิซึ่งประกอบด้วยพลังงานของระบบการทำความเย็นแบบอัดไอสองขั้นตอนและพลังงานความร้อนของขดลวดความร้อน

2. เพื่อสร้างฐานข้อมูลสำหรับเป็นแนวทางที่เหมาะสมในการออกแบบระบบการทำความเย็นแบบอัดไอสองขั้นตอนในกระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรซ์ ภายใต้เงื่อนไขและข้อกำหนดของการออกแบบต่าง ๆ

1.3 ขอบเขตของการศึกษาวิจัย

1. ทำการศึกษาความต้องการการใช้พลังงานของระบบการทำความเย็นและระบบทำความร้อนสำหรับกระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรซ์ ภายใต้สภาวะปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการใช้พลังงานของระบบการทำความเย็นและระบบทำความร้อนสำหรับประเทศไทย

2. ทำการศึกษาวิจัยระบบการทำความเย็นแบบอัดไอสองขั้นตอนสำหรับกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์ใน 2 หลักการดังนี้คือ วัฏจักรอัดไอสองขั้นตอนโดยอาศัยแฟลชแทงก์ (Flash tank) และวัฏจักรอัดไอแบบแคสเคด (Cascade Vapor Compression)

3. ทำการศึกษาภายใต้หลักการของวัฏจักรอัดไมาตรฐาน (Standard Vapor-Compression Cycle) ของสารทำความเย็นชนิด R 134a

4. ทำการศึกษาความต้องการพลังงานที่สถานะคงตัว (Steady State) ของระบบการทำความเย็นแบบอัดไอสองขั้นตอนและพลังงานความร้อนของขดลวดความร้อน จากการวิเคราะห์ตัวแปรอิสระดังต่อไปนี้ อุณหภูมิระเหยของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันต่ำ อุณหภูมิกลั่นตัวของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันสูง อุณหภูมิสารทำความเย็นระหว่างกลางวัฏจักร อัตราการไหลโดยมวลของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันต่ำ และอัตราการไหลโดยมวลของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันสูง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้วิธีการสร้างสมการทางเทอร์โมไดนามิกส์ในรูปแบบของความต้องการพลังงานสุทธิซึ่งประกอบด้วยพลังงานของระบบการทำความเย็นแบบอัดไอสองขั้นตอนและพลังงานความร้อนของขดลวดความร้อน

2. ได้สภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็นที่ดีที่สุด สำหรับการออกแบบระบบการทำความเย็นแบบอัดไอสองขั้นตอนในกระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรซ์แบบบรรจุร้อน

3. ได้ฐานข้อมูลสำหรับอ้างอิงหรือเสนอแนะแก่ผู้ออกแบบระบบการทำความเย็นแบบอัดไอสองขั้นตอนในกระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรซ์แบบบรรจุร้อน ภายใต้เงื่อนไขและข้อกำหนดของการออกแบบต่าง ๆ

1.5 การจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 6 บท 6 ภาคผนวก ซึ่งมีรายละเอียดโดยย่อดังนี้

บทที่ 1 บทนำกล่าวถึงความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัย ขอบเขตของการศึกษาวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากศึกษาวิจัยนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวกับกระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรซ์แบบบรรจุร้อน ความต้องการพลังงานในกระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรซ์ วัฏจักรอัดไอแบบขั้นตอนเดียว และวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอน และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาวิจัยนี้

บทที่ 3 กล่าวถึงวิธีการสร้างแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับระบบการทำความเย็นแบบอัดไอสองขั้นตอนในกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์นมแบบบรรจุร้อน

บทที่ 4 กล่าวถึงการออกแบบคอมเพรสเซอร์และวิธีการออกแบบคอมเพรสเซอร์ที่เหมาะสมกับปัญหาการออกแบบคอมเพรสเซอร์สำหรับการศึกษาวิจัย

บทที่ 5 สรุปและวิเคราะห์ผลการออกแบบคอมเพรสเซอร์จากกรณีศึกษา

บทที่ 6 การนำผลวิจัยมาประยุกต์ใช้งานและข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาวิจัยต่อไป

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์นมแบบบรรจุร้อนมีความต้องการพลังงานสำหรับการทำความร้อนที่อุณหภูมิสูงและทำความเย็นที่อุณหภูมิต่ำ จึงมีแนวคิดที่จะประยุกต์ใช้หลักการของวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอนเพื่อแก้ไขข้อจำกัดของวัฏจักรอัดไอแบบขั้นตอนเดียว วัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอนที่จะทำการศึกษาประกอบด้วย 2 หลักการคือ วัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอนโดยอาศัยแฟลชแทงค์และวัฏจักรอัดไอแบบแคสเคด การศึกษาวิจัยนี้จะนำเสนอแนวทางการนำความร้อนจากกระบวนการคายความร้อนของระบบอัดไอแบบสองขั้นตอนในกระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรซ์แบบบรรจุร้อนเพื่อการประหยัดพลังงาน

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับกระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรซ์แบบบรรจุร้อน ความต้องการพลังงานในกระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรซ์ วัฏจักรอัดไอแบบขั้นตอนเดียวและวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอน และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาวิจัยนี้

2.1 กระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรซ์แบบบรรจุร้อน

กระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรซ์แบบบรรจุร้อนในประเทศไทยโดยทั่วไป จะมีขั้นตอนการผลิตดังแสดงในรูปที่ 1.1 โดยเริ่มต้นจากโรงงานรับนํ้านมดิบจากฟาร์มโคนมใน 2 ช่วงเวลาของแต่ละวัน คือ รับนํ้านมดิบบางส่วนในช่วงเช้าและทำการผลิตทันที และรับนํ้านมดิบบางส่วนในช่วงบ่ายและเก็บรักษาคุณภาพนํ้านมดิบด้วยการทำความเย็นเพื่อทำการผลิตในช่วงบ่ายของวันรุ่งขึ้น ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากช่วงเวลาของการรับนํ้านมดิบของโรงงานจึงสามารถแบ่งนํ้านมได้ 2 กลุ่มคือ

1. นํ้านมกลุ่ม A หมายถึง กลุ่มของนํ้านมดิบที่โรงงานได้รับในช่วงเช้าและทำการผลิตทันที
2. นํ้านมกลุ่ม B หมายถึง กลุ่มของนํ้านมดิบที่โรงงานได้รับในช่วงบ่ายและเก็บรักษาคุณภาพ

นํ้านมดิบด้วยการทำความเย็นเพื่อทำการผลิตในช่วงบ่ายของวันรุ่งขึ้น

2.1.1 กระบวนการผลิตของนํ้านมกลุ่ม A

กระบวนการผลิตของนํ้านมกลุ่ม A สามารถสรุปขั้นตอนของการผลิตนมพาสเจอร์ไรซ์เป็น 7 ขั้นตอน พอสังเขปดังนี้

ขั้นตอน A1 นํ้านมเข้าสู่โรงงานในช่วงเช้าของวันผลิต

ขั้นตอน A2 ผ่านกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์

ขั้นตอน A3 ผ่านกระบวนการโฮโมจิไนส์ เพื่อทำให้น้ำมันและไขมันในน้ำมันเป็นเนื้อเดียวกัน

ขั้นตอน A4 บรรจุเข้าบรรจุผลิตภัณฑ์ และตรวจสอบคุณภาพของการบรรจุ

ขั้นตอน A5 การลดอุณหภูมิเบื้องต้น โดยการคายความร้อนให้กับน้ำประปา

ขั้นตอน A6 ทำความเย็นเพื่อการเก็บบรรจุ

ขั้นตอน A7 เก็บรักษาในตู้แช่ เพื่อรอการจำหน่าย

2.1.2 กระบวนการผลิตของน้ำมันกลุ่ม B

กระบวนการผลิตของน้ำมันกลุ่ม B สามารถสรุปขั้นตอนของการผลิตนมพาสเจอร์ไรซ์เป็น 8 ขั้นตอน พอสังเขปดังนี้

ขั้นตอน B1 น้ำมันเข้าสู่โรงงานในช่วงบ่ายของวันก่อนผลิต

ขั้นตอน B2 ผ่านกระบวนการเก็บรักษาคุณภาพน้ำมันดิบด้วยการทำความเย็น

ขั้นตอน B3 ผ่านกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์ในช่วงบ่ายของวันผลิต

ขั้นตอน B4 ผ่านกระบวนการโฮโมจิไนส์ เพื่อทำให้น้ำมันและไขมันในน้ำมันเป็นเนื้อเดียวกัน

ขั้นตอน B5 บรรจุเข้าบรรจุผลิตภัณฑ์ และตรวจสอบคุณภาพของการบรรจุ

ขั้นตอน B6 การลดอุณหภูมิเบื้องต้น โดยการคายความร้อนให้กับน้ำประปา

ขั้นตอน B7 ทำความเย็นเพื่อการเก็บบรรจุ

ขั้นตอน B8 เก็บรักษาในตู้แช่ เพื่อรอการจำหน่าย

2.2 ความต้องการพลังงานในกระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรซ์แบบบรรจุร้อน

จากขั้นตอนการผลิตนมพาสเจอร์ไรซ์ของน้ำมันทั้งสองกลุ่มพบว่า กระบวนการทำความเย็นและกระบวนการทำความร้อนเป็นกระบวนการสำคัญของการใช้พลังงานสำหรับกระบวนการผลิตดังนี้

2.2.1 กระบวนการทำความเย็น

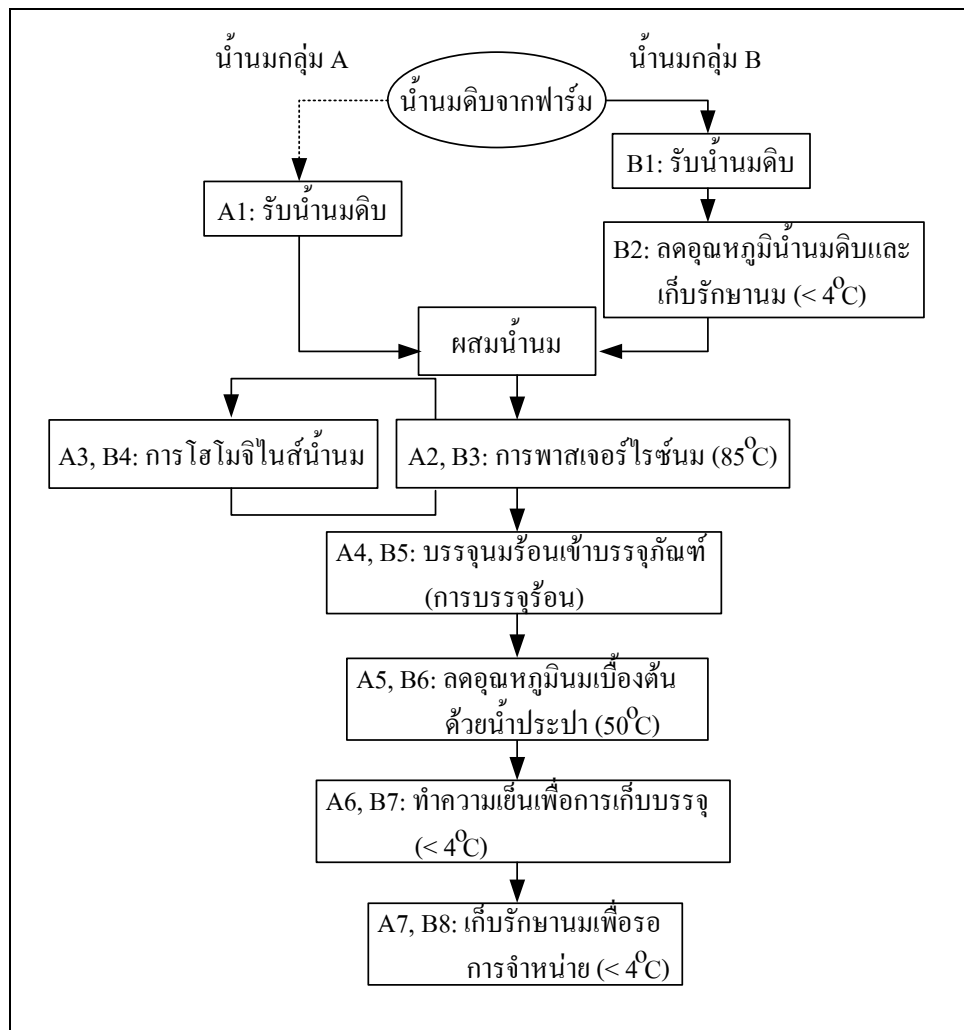
กระบวนการทำความเย็นของน้ำมันทั้งสองกลุ่มประกอบด้วยกระบวนการดังต่อไปนี้

1. กระบวนการเก็บรักษาคุณภาพน้ำมันดิบด้วยการทำความเย็น (กระบวนการ B2) คือ การทำความเย็นโดยลดอุณหภูมิน้ำมันเริ่มต้นประมาณ 35°C เป็น 4°C ภายในเวลาประมาณ 2 ชั่วโมงและเก็บรักษาที่อุณหภูมิคงที่ 4°C

2. กระบวนการทำความเย็นเพื่อการเก็บบรรจุ (กระบวนการ A6 และ B7) คือ การทำความเย็นภายหลังจากการลดอุณหภูมิเบื้องต้น (กระบวนการ A5 และ B6) โดยลดอุณหภูมิน้ำมันเริ่มต้นประมาณ 50°C เป็น 4°C และเก็บรักษาในตู้แช่เพื่อรอการจำหน่าย

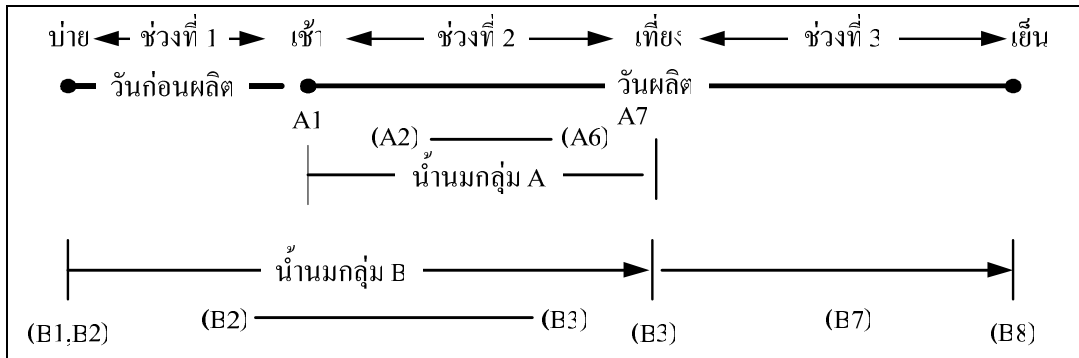
2.2.2 กระบวนการทำความร้อน

กระบวนการทำความร้อนของน้ำนมทั้งสองกลุ่มคือ กระบวนการพาสเจอร์ไรซ์ (กระบวนการ A2 และ B3) คือ การทำความร้อนโดยทำให้น้ำนมมีอุณหภูมิประมาณ 85°C



รูปที่ 2.1 กระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรซ์แบบบรรจุร้อน

จากรูปที่ 2.2 แสดงขั้นตอนของกระบวนการผลิตน้ำนมกลุ่ม A และน้ำนมกลุ่ม B เทียบต่อช่วงเวลาแต่ละวันของการดำเนินการผลิตนมพาสเจอร์ไรซ์



รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการผลิตนมพาสเจอร์ไรซ์เทียบกับต่อช่วงเวลาแต่ละวัน

2.3 วัฏจักรอัดไอแบบขั้นตอนเดียว

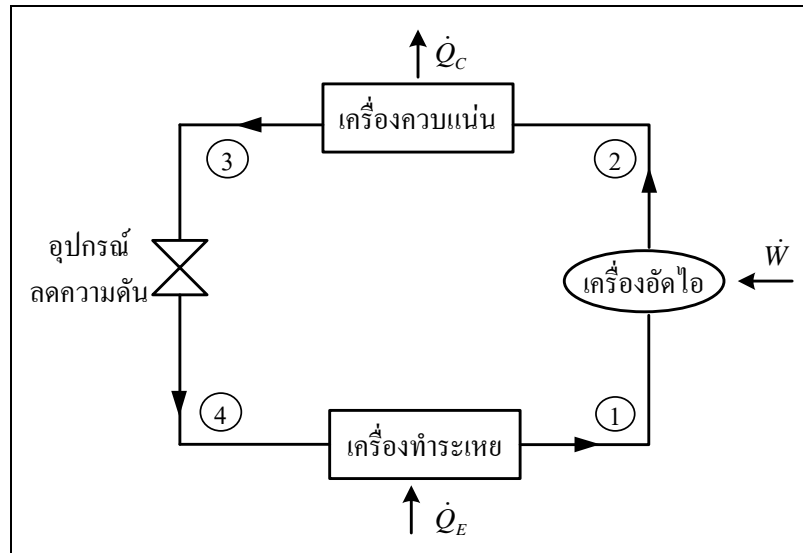
จากการศึกษาขั้นตอนของกระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรซ์แบบบรรจุร้อนพบว่ามีความต้องการความร้อนที่อุณหภูมิสูงสำหรับกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์และมีความต้องการความเย็นที่อุณหภูมิต่ำสำหรับกระบวนการทำความเย็นเพื่อการเก็บบรรจุและสำหรับกระบวนการทำความเย็นเพื่อการเก็บรักษาคุณภาพน้ำนมดิบ โดยทั่วไปจะประยุกต์หลักการทำความเย็นแบบอัดไอมาใช้ ซึ่งอาศัยกระบวนการรับความร้อนเพื่อทำความเย็นที่อุณหภูมิต่ำเป็นหลักและอาศัยขจัดลดความร้อนเพื่อการทำความร้อน

2.3.1 ระบบทำความเย็นแบบอัดไอ

ระบบทำความเย็นแบบอัดไอ (Vapor Compression System) รูปที่ 2.3 จะอาศัยหลักการอัดไอของของไหลทำงาน (Working Fluid) ซึ่งเรียกของไหลทำงานว่า สารทำความเย็น (Refrigerant) ไหลเวียนในระบบเป็นวัฏจักรเรียกว่า วัฏจักรอัดไอ (Vapor Compression Cycle) โดยวัฏจักรอัดไอพื้นฐาน เรียกว่า วัฏจักรอัดไอแบบขั้นตอนเดียว (Single Stage Vapor Compression Cycle) ซึ่งมีอุปกรณ์สำคัญ 4 อุปกรณ์ ดังนี้

1. เครื่องอัด ไอ (Compressor) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่อัดไอของสารทำความเย็น ทำให้สารทำความเย็นในสถานะเป็นไอที่มีความดันต่ำเปลี่ยนเป็นไอที่มีความดันสูงและมีอุณหภูมิสูง
2. เครื่องควบแน่น (Condenser) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แลกเปลี่ยนความร้อนที่ความดันคงที่ระหว่างสารทำความเย็นและแหล่งรับความร้อนที่อุณหภูมิสูง ทำให้สารทำความเย็นในสถานะเป็นไอที่มีความดันสูงและมีอุณหภูมิสูงเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวอิ่มตัว
3. อุปกรณ์ลดความดัน (Expansion Device) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ควบคุมสารทำความเย็นที่มีความดันสูง ให้มีความดันลดลงไปสู่ความดันต่ำ ทำให้สารทำความเย็นในสถานะของเหลวอิ่มตัวที่มีความดันสูงเปลี่ยนสถานะเป็นของผสมที่มีความดันต่ำ

4. เครื่องทำระเหย (Evaporator) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แลกเปลี่ยนความร้อนที่ความดันคงที่ระหว่างสารทำความเย็นและแหล่งให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำซึ่งเรียกว่า พื้นที่ทำความเย็น ทำให้สารทำความเย็นในสถานะของผสมเปลี่ยนสถานะเป็นไอและให้ความเย็นในพื้นที่ทำความเย็น



รูปที่ 2.3 ระบบทำความเย็นแบบอัดไอแบบขั้นตอนเดียว

2.3.2 กระบวนการทางเทอร์โมไดนามิกส์ของวัฏจักรอัดไอมาตรฐาน

จากหลักการทำงานของอุปกรณ์สำคัญ 4 อุปกรณ์ข้างต้น จะทำให้เกิดกระบวนการทางเทอร์โมไดนามิกส์ 4 กระบวนการประกอบเป็นวัฏจักรอัดไอ ซึ่งสามารถแสดงเส้นกระบวนการของวัฏจักรอัดไอบนแผนภาพความดัน-เอนทาลปี (P-h diagram) แสดงในรูปที่ 2.4 สามารถอธิบายเส้นกระบวนการของวัฏจักรอัดไอมาตรฐาน (Standard Vapor Compression Cycle) ได้ดังนี้

1. กระบวนการ 1-2 เป็นกระบวนการอัดแบบไอเซนโทรปิก (Isentropic Compression) โดยอัดสารทำความเย็นในสถานะไออิ่มตัวที่ความดันต่ำเป็นสารทำความเย็นในสถานะไอร้อนยวดยิ่งที่ความดันสูง ซึ่งงานในกระบวนการอัดแบบไอเซนโทรปิกต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็นแสดงดังนี้

$$w = h_2 - h_1 \quad (2.1)$$

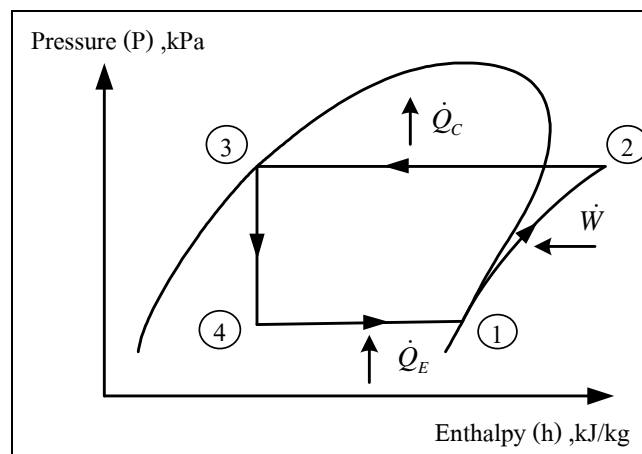
2. กระบวนการ 2-3 เป็นกระบวนการคายความร้อนที่ความดันคงที่ โดยแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสารทำความเย็นในสถานะไอร้อนยวดยิ่งและแหล่งรับความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้

สารทำความเย็นในสถานะไอร้อนยวดยิ่งเปลี่ยนแปลงเป็นสถานะของเหลวอิ่มตัว ซึ่งความร้อนในกระบวนการคายความร้อนที่ความดันคงที่ต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็นแสดงดังนี้

$$q_C = h_3 - h_2 \quad (2.2)$$

3. กระบวนการ 3-4 เป็นกระบวนการลดความดันที่เอนทัลปีคงที่ โดยการควบคุมสารทำความเย็นที่มีความดันสูง ให้มีความดันลดลงไปสู่ความดันต่ำ ทำให้สารทำความเย็นในสถานะของเหลวอิ่มตัวที่มีความดันสูงเปลี่ยนสถานะเป็นของผสมอิ่มตัวที่มีความดันต่ำ ในกระบวนการนี้สารทำความเย็นไม่มีการสูญเสียความร้อนและงาน ดังนั้นเอนทัลปีของสารทำความเย็นตลอดกระบวนการจึงคงที่คือ

$$h_4 = h_3 \quad (2.3)$$



รูปที่ 2.4 เส้นกระบวนการบนแผนภาพความดัน-เอนทัลปี

4. กระบวนการ 4-1 เป็นกระบวนการรับความร้อนที่ความดันคงที่ โดยแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสารทำความเย็นในสถานะของผสมและแหล่งให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้สารทำความเย็นในสถานะของผสมเปลี่ยนเป็นสถานะไออิ่มตัว ซึ่งความร้อนในกระบวนการรับความร้อนที่ความดันคงที่ต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็นแสดงดังนี้

$$q_E = h_1 - h_4 \quad (2.4)$$

2.4 วัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอน

เนื่องจากอุณหภูมิที่ต่ำที่สุดที่ต้องการในการทำความร้อนและอุณหภูมิที่ต่ำที่สุดที่ต้องการในการทำความเย็นมีความแตกต่างกันมาก จึงทำให้ระบบอัดไอแบบขั้นตอนเดียวไม่เหมาะสมด้วยเหตุผล 2 ประการคือ

1. จำกัดความสามารถในการอัดของเครื่องอัดไอในปัจจุบัน เพื่อให้ได้อุณหภูมิที่ต่ำที่สุดและอุณหภูมิที่ต่ำที่สุดที่ต้องการนั้นไม่สามารถทำได้จากการอัดไอเพียงขั้นตอนเดียว

2. ช่วงอุณหภูมิของสารทำความเย็นต่ำสุดและอุณหภูมิของสารทำความเย็นสูงสุดมีช่วงอุณหภูมิกว้างมาก จะทำให้เครื่องอัดไอต้องการพลังงานต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็นที่ค่อนข้างมาก จึงทำให้ไม่ประหยัดพลังงาน

จากข้อจำกัดของระบบอัดไอแบบขั้นตอนเดียวข้างต้น สามารถแก้ปัญหาโดยการประยุกต์หลักการของวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอน (Two Stage Vapor Compression Cycle) ซึ่งโดยทั่วไปมีวัตถุประสงค์เพื่อการทำความเย็นที่อุณหภูมิต่ำมาก การศึกษาวิจัยนี้จะนำเสนอแนวทางการประยุกต์หลักการของวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอนที่มีวัตถุประสงค์เพื่อทำความร้อนที่อุณหภูมิสูงและทำความเย็นที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งประกอบด้วย 2 หลักการดังนี้

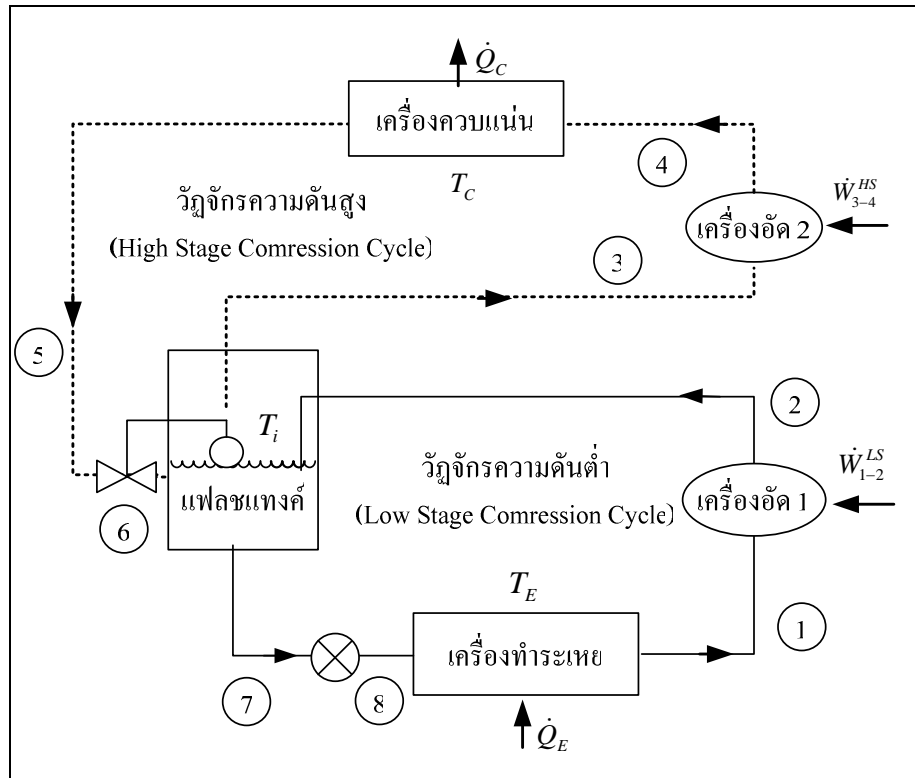
1. วัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอนโดยอาศัยแฟลชแทงก์
2. วัฏจักรอัดไอแบบแคสเคด

2.4.1 วัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอนโดยอาศัยแฟลชแทงก์

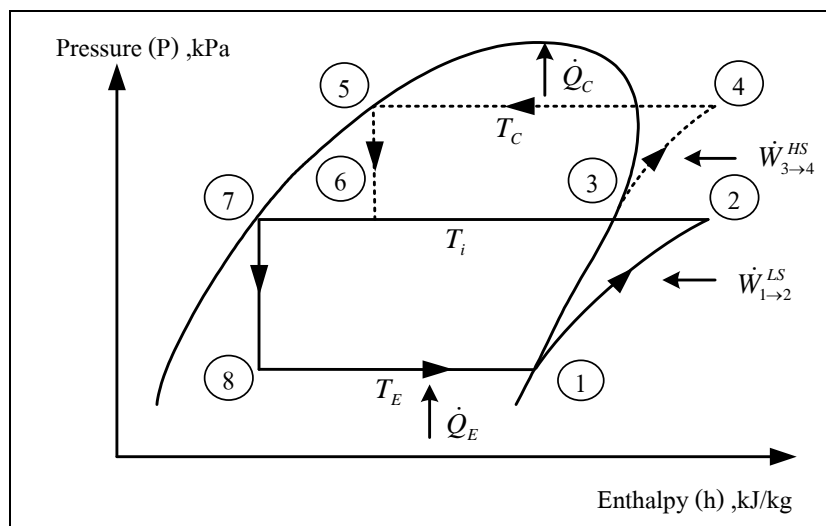
วัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอนโดยอาศัยแฟลชแทงก์ประกอบด้วยวัฏจักรอัดไอแบบขั้นตอนเดียวสองวัฏจักรที่ต่อเนื่องกันด้วยอุปกรณ์แฟลชแทงก์ (Flash Tank) แสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งทำหน้าที่แยกสารทำความเย็นในสถานะของเหลวอิ่มตัวที่ความดันสูงให้กับวัฏจักรความดันต่ำและสารทำความเย็นในสถานะไออิ่มตัวที่ความดันต่ำให้กับวัฏจักรความดันสูง สามารถแสดงเส้นกระบวนการของวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอนโดยอาศัยแฟลชแทงก์บนแผนภาพความดัน-เอนทาลปี (P-h diagram) แสดงในรูปที่ 2.6

2.4.2 วัฏจักรอัดไอแบบแคสเคด

วัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดประกอบด้วยวัฏจักรอัดไอแบบขั้นตอนเดียวที่ต่อเนื่องกันด้วยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนกลางวัฏจักร ซึ่งทำหน้าที่แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสารทำความเย็นที่อุณหภูมิต่ำในวัฏจักรความดันสูงกับสารทำความเย็นที่อุณหภูมิสูงในวัฏจักรความดันต่ำ วัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดที่จะทำการศึกษาประกอบด้วย 2 วัฏจักรคือ

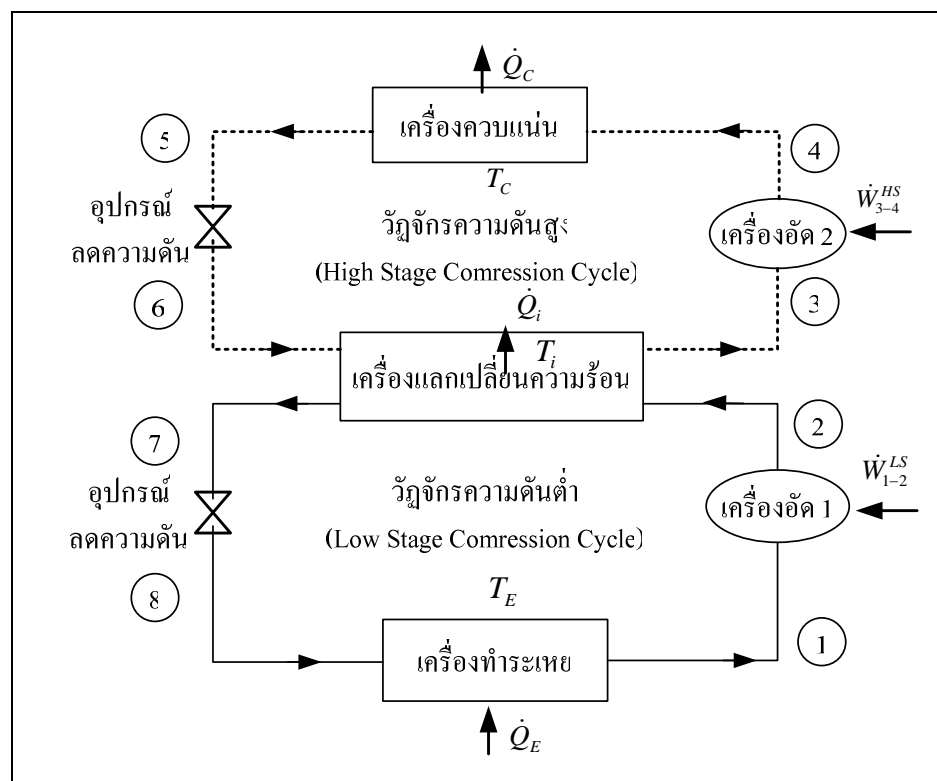


รูปที่ 2.5 วัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอน โดยอาศัยแฟลชแทงค์



รูปที่ 2.6 เส้นกระบวนการของวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอนโดยอาศัยแฟลชแทงค์บนแผนภาพความดัน-เอนทาลปี

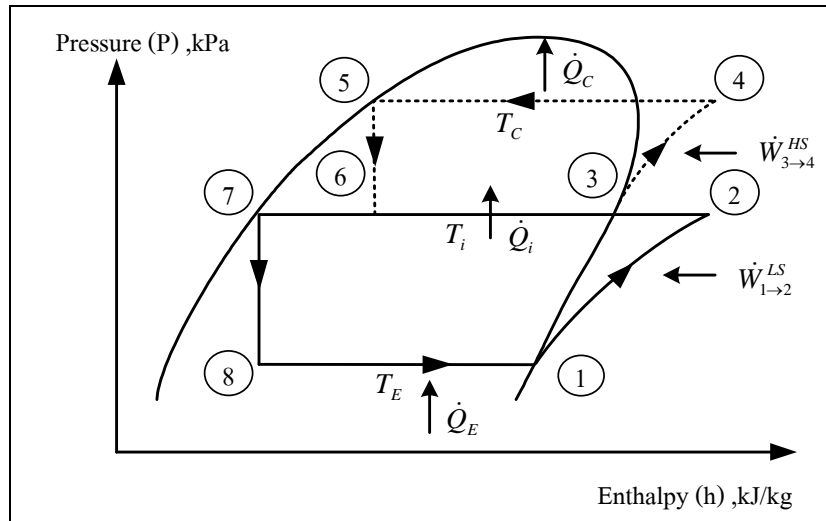
1. วัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดอุดมคติ คือ วัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดที่ไม่มีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิระเหยของวัฏจักรความดันสูงและอุณหภูมิกลั่นตัวของวัฏจักรความดันต่ำ ดังนั้นจึงเป็นวัฏจักรที่ไม่พิจารณาอิทธิพลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนกลางวัฏจักรภายใต้สภาวะการทำงานเดียวกัน แสดงในรูปที่ 2.7 สามารถแสดงเส้นกระบวนการของวัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดอุดมคติบนแผนภาพความดัน-เอนทาลปี (P-h diagram) ในรูปที่ 2.8 การศึกษาวัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดอุดมคติมีวัตถุประสงค์เพื่ออ้างอิงหรือเพื่อการเปรียบเทียบความต้องการพลังงานกับวัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดจริง เนื่องจากความต้องการพลังงานของวัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดอุดมคติมีแนวโน้มน้อยที่สุด



รูปที่ 2.7 วัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดอุดมคติ

2. วัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดจริง คือ วัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดที่พิจารณามีประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนกลางวัฏจักรที่มีผลกระทบของความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิกลั่นตัวของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันต่ำ $T_i + \Delta T'$ และอุณหภูมิระเหยของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันสูง $T_i - \Delta T''$ แสดงในรูปที่ 2.9 ซึ่งความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของ $T_i + \Delta T'$ และ $T_i - \Delta T''$ มีอิทธิพลต่อแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นของความต้องการพลังงานของวัฏจักร

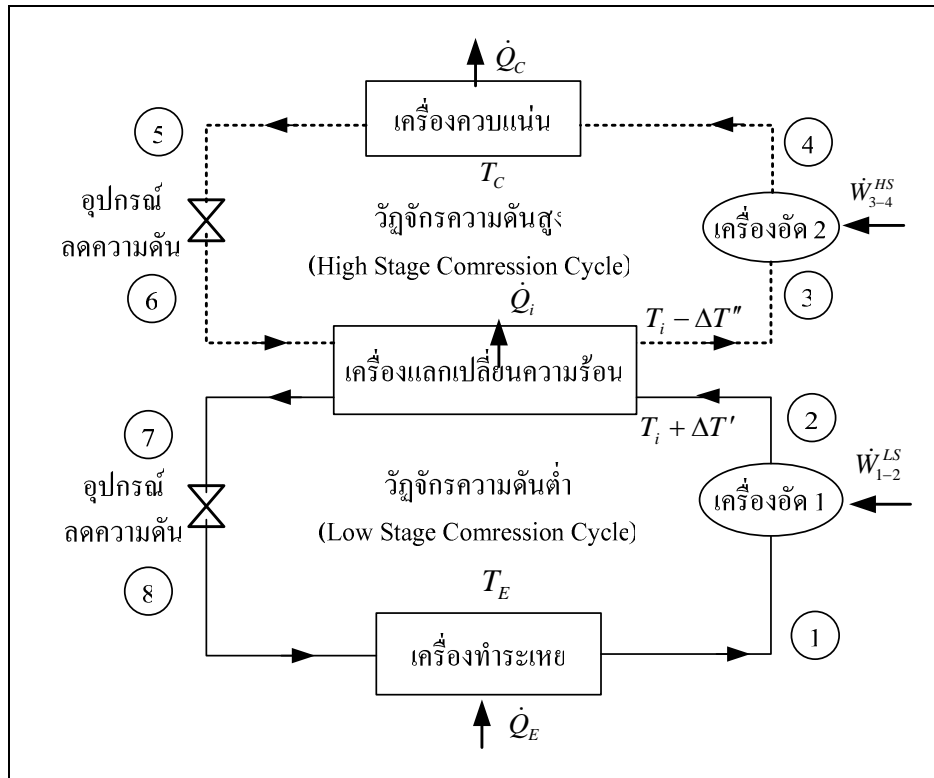
อัดไอแบบแอสเทคจริงเมื่อเทียบกับวัฏจักรอัดไอแบบแอสเทคอุดมคติ ซึ่งสามารถแสดงเส้นกระบวนการของวัฏจักรอัดไอแบบแอสเทคจริงบนแผนภาพความดัน-เอนทาลปี (P-h diagram) ในรูปที่ 2.10



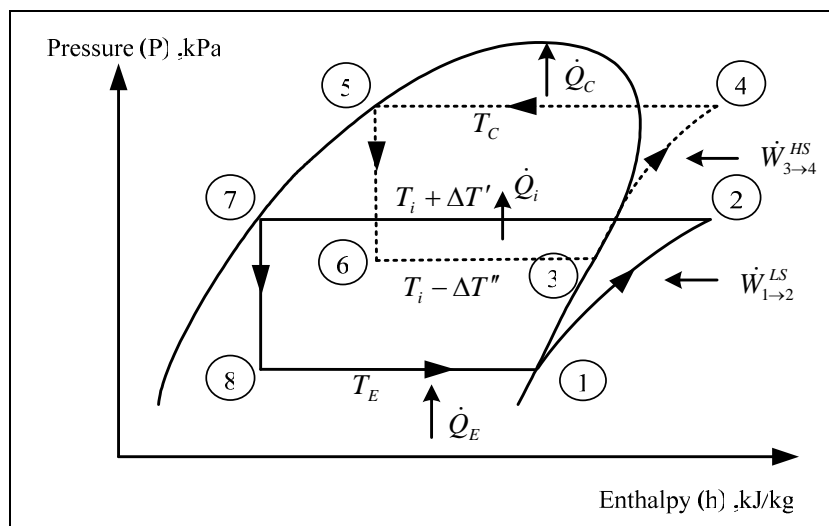
รูปที่ 2.8 เส้นกระบวนการของวัฏจักรอัดไอแบบแอสเทค
อุดมคติบนแผนภาพความดัน-เอนทาลปี

2.5 ปรัชญาวิศวกรรมที่เกี่ยวข้อง

Soylemez (2005) ทำการศึกษาระบบทำความเย็นแบบอัดไอขั้นตอนเดียวและขดลวดความร้อนสำหรับกระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรซ์แบบบรรจุเย็น โดยมีวัตถุประสงค์ของงานวิจัย เพื่อหาสภาวะการทำงานที่ดีที่สุดสำหรับการออกแบบระบบทำความเย็นแบบอัดไอขั้นตอนเดียวและขดลวดความร้อน ภายใต้เงื่อนไขของค่าใช้จ่ายสุทธิต่ำสุด (Minimize Total Costs) ตลอดช่วงอายุการทำงาน โดยทำการพิจารณาระบบที่มีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทำหน้าที่แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างนมร้อนออกจากขดลวดความร้อนและนมเย็นก่อนเข้าเครื่องควบแน่นเพื่อการประหยัดพลังงานด้วยการทำความเย็นในกระบวนการเก็บบรรจุนมด้วยกระบวนการรับความร้อนของสารทำความเย็นที่เครื่องทำระเหย และทำความร้อนนมเบื้องต้นด้วยกระบวนการคายความร้อนของสารทำความเย็นที่เครื่องควบแน่นและทำความร้อนนมเพิ่มเติมที่อุณหภูมิพาสเจอร์ไรซ์ด้วยขดลวดความร้อน



รูปที่ 2.9 วัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดจริง



รูปที่ 2.10 เส้นกระบวนการของวัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดจริง บนแผนภาพความดัน-เอนทาลปี

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอสมการจุดประสงค์จากการวิเคราะห์ทางความร้อนในแต่ละอุปกรณ์ของระบบทำความเย็นแบบอัดไอขั้นตอนเดียว ขดลวดความร้อนและเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจากการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์สำหรับค่าลงทุนเริ่มต้นและค่าใช้จ่ายด้านความต้องการพลังงานของระบบ ซึ่งได้เป็นสมการจุดประสงค์โดยไม่มีเงื่อนไขอยู่ในรูปแบบของค่าใช้จ่ายสุทธิของระบบในช่วงอายุการทำงานที่พิจารณาแสดงได้ดังนี้

$$TC = (IC + OC)_{comp} + (IC + OC)_{Heater} + IC_E + IC_C + IC_{HX} \quad (2.5)$$

ตัวแปรอิสระสำหรับการวิจัยคือ อุณหภูมิหม้อออกจากเครื่องควบแน่น T_2 และอุณหภูมิหม้อก่อนเข้าเครื่องทำระเหย T_3 เนื่องจากเป็นตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพทางความร้อนของระบบโดยตรง โดยกำหนดสถานะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็นคือ อุณหภูมิระเหยของสารทำความเย็น T_E และอุณหภูมิก่อนตัวของสารทำความเย็น T_C เนื่องจากการกำหนดอุณหภูมิของสารทำความเย็นข้างต้นทำให้สามารถเลือกชนิดของสารทำความเย็นที่เหมาะสม และสามารถกำหนดสัดส่วนของความดันที่เหมาะสม (Pressure Ratio) ระหว่างความดันด้านดูดสารทำความเย็น (Suction Pressure) และความดันด้านจ่ายสารทำความเย็น (Discharge Pressure)

Soylemez ใช้วิธีการทางแคลคูลัส (Calculus Method) สำหรับการแก้ปัญหาออปติไมเซชันโดยไม่มีเงื่อนไข (Unconstrained Optimization) ด้วยวิธีการดังกล่าวจะทำการพิจารณาอนุพันธ์ของสมการจุดประสงค์ สมการที่ (2.5) ภายใต้วแปรควบคุม T_2 และ T_3 ตามลำดับดังนี้

$$\frac{\partial TC}{\partial T_2} = 0, \frac{\partial TC}{\partial T_3} = 0 \quad (2.6)$$

ผลที่ได้จากการออปติไมเซชันคือ อุณหภูมิทำงานที่ดีที่สุด T_2^* และ T_3^* เมื่อแทนอุณหภูมิทำงานที่ดีที่สุดดังกล่าวในสมการที่ได้จากการวิเคราะห์ทางความร้อนจะได้สถานะออกแบบสำหรับการทำงานของระบบที่ดีที่สุด ภายใต้เงื่อนไขและข้อกำหนดของกระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรซ์

Khan and Zubair (2000) ทำการออปติไมเซชันทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับระบบทำความเย็นแบบอัดไอสองขั้นตอนโดยอาศัยแฟลชแทงค์ ซึ่งมีจุดประสงค์เพื่อการทำความเย็นที่อุณหภูมิต่ำมากภายใต้สมมติฐานการอัดแบบไอเซนโทรปิก โดยมีวัตถุประสงค์ของงานวิจัยเพื่อหาสถานะการทำงานของระบบที่ดีที่สุดสำหรับการออกแบบระบบทำความเย็นแบบอัดไอภายใต้เงื่อนไขของสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะสุทธิของการทำความเย็นสูงสุด (Maximize $COP_{R,Total}$)

สร้างสมการจุดประสงค์จากวิธีการสมดุลพลังงานและสมดุลเอนโทรปีระบบทำความเย็นแบบอัดไอสองขั้นตอนโดยอาศัยแฟลชแทงค์ ซึ่งได้เป็นสมการจุดประสงค์โดยไม่มีเงื่อนไขแสดงในรูปแบบของสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของการทำความเย็น มีตัวแปรอิสระสำหรับการวิจัยคือประสิทธิภาพของการแลกเปลี่ยนความร้อน ความจุความร้อนของของไหลหล่อเย็นและอุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักร

Khan and Zubair ใช้วิธีการทางแคลคูลัส (Calculus Method) สำหรับการแก้ปัญหาออปติไมเซชันโดยไม่มีเงื่อนไข (Unconstrained Optimization) โดยพิจารณาอนุพันธ์สมการจุดประสงค์ ผลการวิจัยพบว่าอุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรของสารทำความเย็นไม่มีผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะสุทธิของการทำความเย็น ($COP_{R,Total}$) ของระบบการทำความเย็นแบบอัดไอสองขั้นตอนโดยอาศัยแฟลชแทงค์

2.6 การพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างการศึกษาวิจัยและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยของ Soylemez เป็นการศึกษาาระบบทำความเย็นโดยอาศัยหลักการของวัฏจักรอัดไอแบบขั้นตอนเดียวในกระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรซ์แบบบรรจุเย็น ภายใต้เงื่อนไขของค่าใช้จ่ายสุทธิต่ำสุด โดยเสนอวิธีการสร้างแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ด้วยการสมดุลพลังงานและแบบจำลองทางเศรษฐศาสตร์ และนำเสนอแนวทางการนำความร้อนจากกระบวนการคายความร้อนของวัฏจักรอัดไอแบบขั้นตอนเดียวมาใช้ในกระบวนการทำความร้อน มีสมการจุดประสงค์แสดงอยู่ในรูปแบบของค่าใช้จ่ายสุทธิ ตัวแปรอิสระคือ อุณหภูมิหม้ออบจากเครื่องควบแน่นและอุณหภูมิหม้อเข้าเครื่องทำระเหย โดยกำหนดสถานะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็น และใช้วิธีการทางแคลคูลัสสำหรับการแก้ปัญหาออปติไมเซชัน

งานวิจัยของ Khan and Zubair เป็นการศึกษาาระบบทำความเย็นโดยอาศัยหลักการของวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอนโดยอาศัยแฟลชแทงค์มีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้ในการทำความเย็นที่อุณหภูมิต่ำมาก ภายใต้เงื่อนไขสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของการทำความเย็นสูงสุด โดยนำเสนอวิธีการสร้างแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ด้วยการสมดุลพลังงานและสมดุลเอนโทรปีแสดงในรูปแบบของสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของการทำความเย็นเป็นสมการจุดประสงค์ ตัวแปรอิสระคือประสิทธิภาพของการแลกเปลี่ยนความร้อน ความจุความร้อนของของไหลหล่อเย็นและอุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรของสารทำความเย็นและใช้วิธีการทางแคลคูลัสสำหรับการแก้ปัญหาออปติไมเซชัน

สำหรับการศึกษาวิจัยนี้เป็นการศึกษาาระบบทำความเย็นโดยอาศัยหลักการของวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอนได้แก่ วัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอนโดยอาศัยแฟลชแทงค์ วัฏจักรอัดไอแบบแคสเคด อุณหภูมิและวัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดจริงมีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้ในกระบวนการทำความร้อนที่อุณหภูมิสูงและกระบวนการทำความเย็นที่อุณหภูมิต่ำสำหรับกระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรซ์แบบ

บรรจุน้ำมัน ภายใต้เงื่อนไขความต้องการพลังงานสุทธิต่ำสุด โดยนำเสนอวิธีการสร้างแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ด้วยการสมดุลพลังงานและนำเสนอแนวทางการนำความร้อนจากกระบวนการคายความร้อนของวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอนมาใช้ในกระบวนการทำความร้อน แสดงในรูปแบบความต้องการพลังงานสุทธิเป็นสมการจุดประสงค์ ตัวแปรอิสระเป็นสถานะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็นคือ อุณหภูมิระเหยของสารทำความเย็น อุณหภูมิกลั่นตัวของสารทำความเย็นและอุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรของสารทำความเย็น และใช้วิธีการเสิร์ชสำหรับการแก้ปัญหาออปติไมเซชัน

การศึกษาวิจัยนี้และงานวิจัยของ Khan and Zubair มีตัวแปรอิสระเหมือนกันคือ อุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรของสารทำความเย็น ผลการศึกษาวิจัยนี้พบว่า อุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรของสารทำความเย็นมีผลกระทบต่อสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะสุทธิของการทำความเย็น ในขณะที่ผลการวิจัยของ Khan and Zubair พบว่า อุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรของสารทำความเย็นไม่มีผลกระทบต่อสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะสุทธิของการทำความเย็น เนื่องจากการศึกษาวิจัยทั้งสองมีความแตกต่างกันดังนี้คือ ชนิดของสารทำความเย็นและช่วงของอุณหภูมิของสารทำความเย็นที่ทำการศึกษา ทำให้ผลการศึกษาวิจัยทั้งสองไม่มีความสอดคล้องกัน

บทที่ 3

แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับระบบ การทำความเย็นแบบอัดไอสองขั้นตอน

แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับระบบการทำความเย็นแบบอัดไอสองขั้นตอนในกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์นมแบบบรรจุร้อน เป็นสมการทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่แสดงในรูปแบบของความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันของระบบการทำความเย็นแบบอัดไอสองขั้นตอนและพลังงานความร้อนของขดลวดความร้อน ซึ่งแนวโน้มที่ได้จากแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ดังกล่าวจะทำให้ทราบถึงสถานะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็นที่ดีที่สุด โดยระบบที่ทำการศึกษานี้ประกอบด้วย วัฏจักรอัดไอสองขั้นตอน โดยอาศัยแฟลชแทงก์ วัฏจักรอัดไอแบบแกลสเคอคุมคิตและวัฏจักรอัดไอแบบอุดมคติจริง

3.1 ความสัมพันธ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์

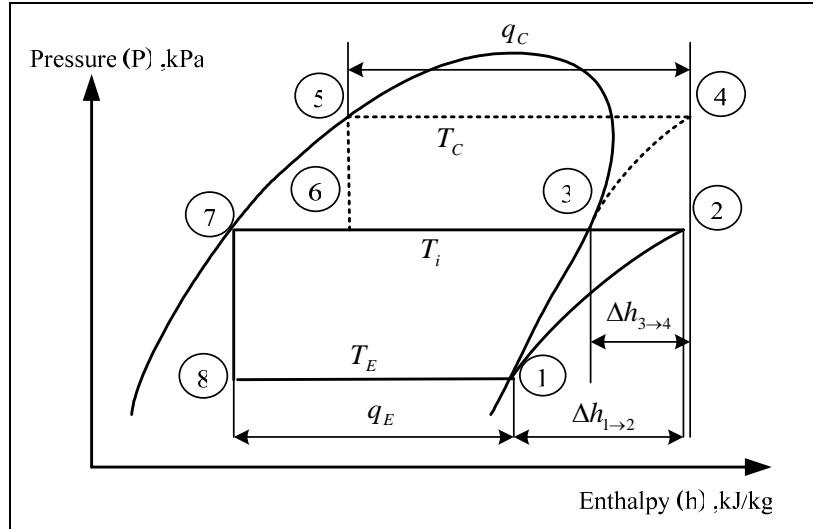
แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์เป็นฟังก์ชันซึ่งประกอบด้วยฟังก์ชันของข้อกำหนดของการพาสเจอร์ไรซ์นมที่กำลังการผลิตต่าง ๆ และความสัมพันธ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ แสดงในรูปแบบที่ 3.1 ได้มาจากการสร้างสมการโพลีโนเมียลสองตัวแปรเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิสารทำความเย็นบนแผนภาพความดัน-เอนทาลปี (P-h diagram) มีสมมติฐานดังนี้

1. ศึกษาภายใต้หลักการของวัฏจักรอัดไอสองขั้นตอนของสารทำความเย็นชนิด R 134a บนวัฏจักรอัดไอมาตรฐาน (standard vapor-compression cycle)
2. ช่วงอุณหภูมิระเหยของสารทำความเย็นระหว่าง $(-15^{\circ}\text{C}) - 5^{\circ}\text{C}$
3. ช่วงอุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรของสารทำความเย็นระหว่าง $20^{\circ}\text{C} - 60^{\circ}\text{C}$
4. ช่วงอุณหภูมิกักตัวของสารทำความเย็นระหว่าง $65^{\circ}\text{C} - 90^{\circ}\text{C}$

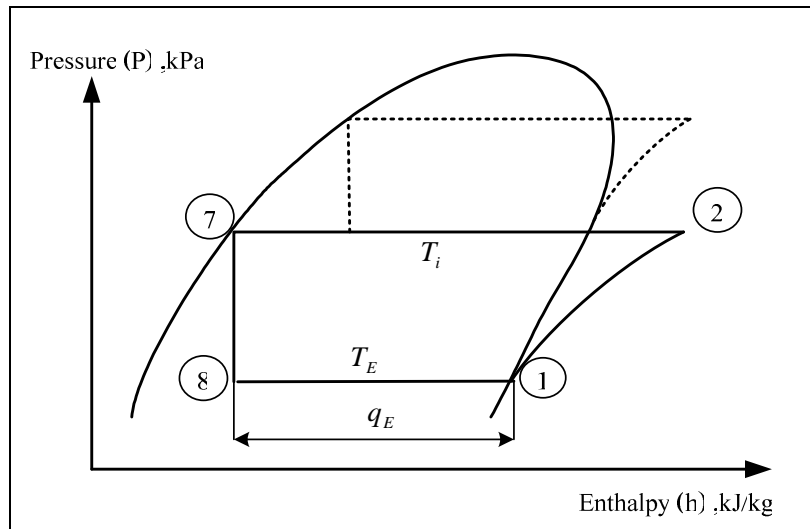
3.1.1 ความร้อนต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็นเนื่องจากกระบวนการรับความร้อนที่ความดันคงที่

ความร้อนต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็น q_E เนื่องจากกระบวนการรับความร้อนที่ความดันคงที่ที่เครื่องทำระเหยในวัฏจักรความดันต่ำ แสดงในรูปแบบที่ 3.2 เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิระเหยของสารทำความเย็นและอุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรของสารทำความเย็น แสดงได้ดังนี้

$$q_E = -0.004444T_i^2 - 1.133333T_i + (0.04T_E^2 + 1.2T_E + 196) \tag{3.1}$$



รูปที่ 3.1 สร้างสมการสองตัวแปรซึ่งเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ
สารทำความเย็นบนแผนภาพความดัน-เอนทาลปี

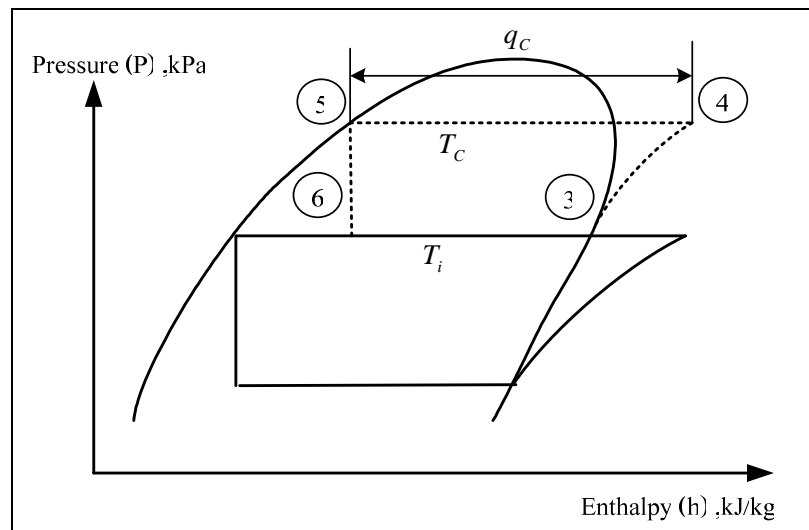


รูปที่ 3.2 ความร้อนต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็นจาก
กระบวนการรับความร้อนที่ความดันคงที่

3.1.2 ความร้อนต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็นเนื่องจากกระบวนการคายความร้อนที่ความดันคงที่

ความร้อนต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็น q_c เนื่องจากกระบวนการคายความร้อนที่ความดันคงที่ที่เครื่องควบแน่นในวัฏจักรความดันสูง แสดงในรูปที่ 3.3 เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิกลั่นตัวของสารทำความเย็นและอุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรของสารทำความเย็น แสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 q_c = & (-0.000013333T_c^2 + 0.002066667T_c - 0.07895238)(T_i^2) \\
 & + (0.0002T_c^2 - 0.031T_c + 1.04142857)(T_i) \\
 & + (0.001428572T_c^2 - 1.70142866T_c + 248.36667)
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

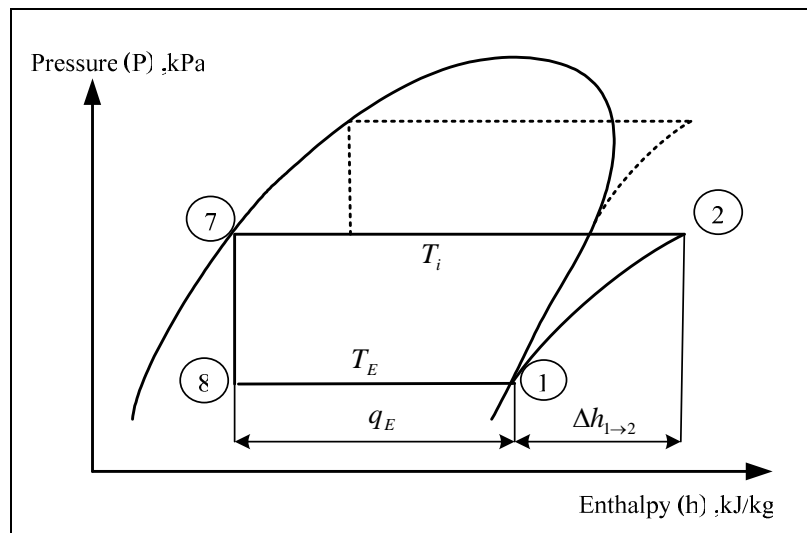


รูปที่ 3.3 ความร้อนต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็นจากกระบวนการคายความร้อนที่ความดันคงที่

3.1.3 สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะ

สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของเครื่องทำความเย็น COP_R แสดงในรูปที่ 3.4 ในวัฏจักรความดันต่ำเป็นสัดส่วนระหว่างความร้อนต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็น q_E เนื่องจากกระบวนการรับความร้อนที่ความดันคงที่ต่องานในการอัด $\Delta h_{1 \rightarrow 2}$ เนื่องจากกระบวนการอัดแบบไอเซนโทรปิก ซึ่งเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิกลั่นตัวของสารทำความเย็นและอุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรของสารทำความเย็น แสดงได้ดังนี้

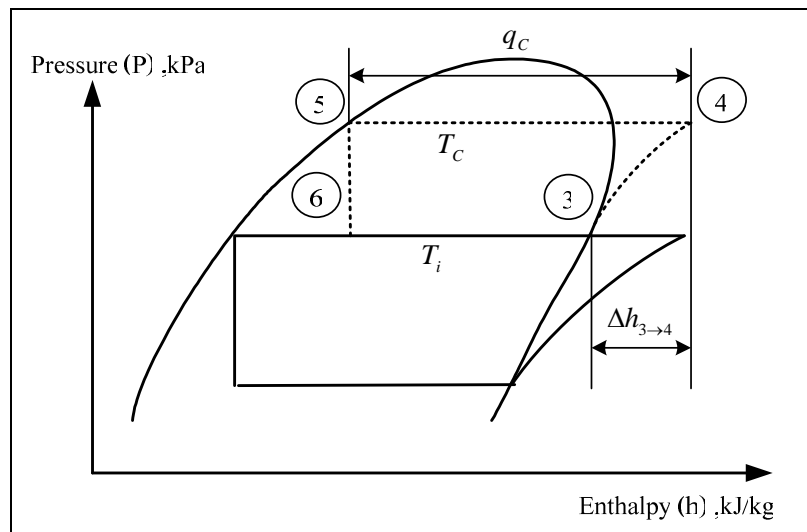
$$\begin{aligned}
COP_R &= \frac{q_E(T_E, T_i)}{\Delta h_{1 \rightarrow 2}(T_E, T_i)} \\
&= (7 \times 10^{-6} T_E^2 + 0.000154 T_E + 0.001759)(T_i^2) \\
&\quad + (-0.001173 T_E^2 - 0.025254 T_E - 0.323351)(T_i) \\
&\quad + (0.049035 T_E^2 + 1.077049 T_E + 16.017895)
\end{aligned} \tag{3.3}$$



รูปที่ 3.4 สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของเครื่องทำความเย็น

สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของปั๊มความร้อน COP_{HP} ในวัฏจักรความดันสูง แสดงในรูปที่ 3.5 เป็นสัดส่วนระหว่างความร้อนต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็น q_C เนื่องจากกระบวนการรับความร้อนที่ความดันคงที่ต่องานในการอัด $\Delta h_{3 \rightarrow 4}$ เนื่องจากกระบวนการอัดแบบไอเซนโทรปิก ซึ่งเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิระเหยของสารทำความเย็นและอุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรของสารทำความเย็น แสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
COP_{HP} &= \frac{q_C(T_C, T_i)}{\Delta h_{3 \rightarrow 4}(T_C, T_i)} \\
&= (0.0000251 T_C^2 - 0.004318 T_C + 0.187234)(T_i^2) \\
&\quad + (-0.0003592 T_C^2 + 0.0600947 T_C - 2.4881672)(T_i) \\
&\quad + (-0.0060676 T_C^2 + 0.9814138 T_C - 37.38347)
\end{aligned} \tag{3.4}$$



รูปที่ 3.5 สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของปั๊มความร้อน

3.2 แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับระบบการทำความเย็นแบบอัดไอสองขั้นตอน

แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับระบบการทำความเย็นแบบอัดไอสองขั้นตอนมีสมมติฐานว่าพิจารณาการทำงานของระบบในสภาวะคงตัว แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่จะนำเสนอในการศึกษาวิจัยนี้ ประกอบด้วยวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอนดังนี้

1. วัฏจักรอัดไอสองขั้นตอน โดยอาศัยแฟลชแทงค์
2. วัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดอุดมคติ
3. วัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดจริง

แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ดังกล่าวแสดงในรูปแบบของความต้องการพลังงานสุทธิซึ่งประกอบด้วยความต้องการพลังงานของระบบการทำความเย็นแบบอัดไอสองขั้นตอนและความต้องการพลังงานความร้อนของขดลวดความร้อน แสดงได้ดังนี้

$$E_{net} = E_{LS} + E_{HS} + E_{heater} \quad (3.5)$$

ความต้องการพลังงานสุทธิสามารถแสดงในรูปปริพันธ์ของกำลังงานและเวลาได้ดังนี้

$$E_{net} = \int \dot{W}_{net} dt = \int \dot{W}_{1 \rightarrow 2}^{LS} dt + \int \dot{W}_{3 \rightarrow 4}^{HS} dt + \int \dot{W}_{heater} dt \quad (3.6)$$

จากสมการที่ (3.6) ความต้องการพลังงานสุทธิเป็นฟังก์ชันของกำลังงานและเวลา ซึ่งเวลาพิจารณาได้จากเวลาการทำงานของระบบการทำความเย็นแบบอัดไอสองขั้นตอนและขดลวดความร้อน และกำลังงานได้จากการวิเคราะห์สมดุลพลังงานสำหรับวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอนโดยอาศัยแฟลชแทงค์ รูปที่ 3.6 วัฏจักรอัดไอแบบแอสเคดอุมคคติ รูปที่ 3.9 และวัฏจักรอัดไอแบบแอสเคดจริง รูปที่ 3.11 สำหรับกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์นม จะได้สมการกำลังงานสุทธิของระบบการทำความเย็นแบบอัดไอสองขั้นตอนและกำลังงานไฟฟ้าของขดลวดความร้อน ในรูปทั่วไปดังนี้

$$\begin{aligned}\dot{W}_{net} &= \dot{W}_{1 \rightarrow 2}^{LS} + \dot{W}_{3 \rightarrow 4}^{HS} + \dot{W}_{heater} = \frac{\dot{Q}_E}{COP_R} + \frac{\dot{Q}_C}{COP_{HP}} + \dot{W}_{heater} \\ &= \frac{\dot{m}_L q_E}{COP_R} + \frac{\dot{m}_H q_C}{COP_{HP}} + \dot{m}_m C_p (T_{m,hot} - T_{m,ph})\end{aligned}\quad (3.7)$$

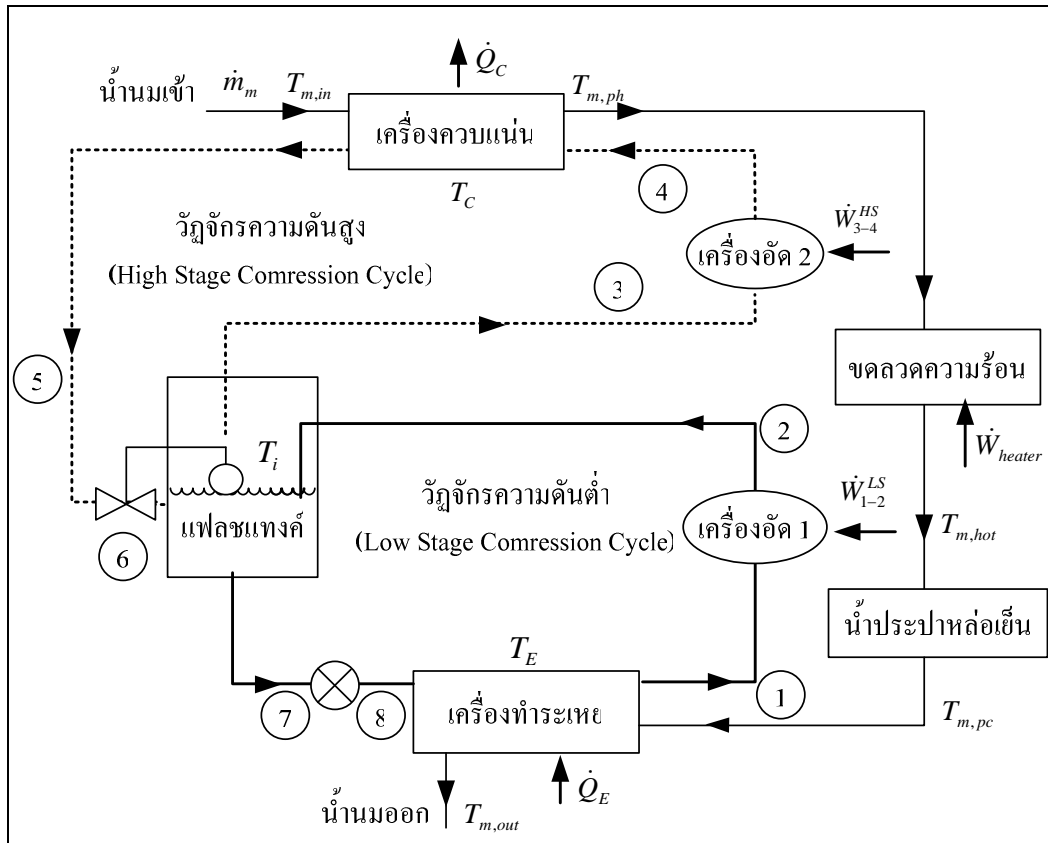
3.3 แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับวัฏจักรอัดไอสองขั้นตอนโดยอาศัยแฟลชแทงค์

จากการวิเคราะห์สมดุลมวลและสมดุลพลังงานระบบแฟลชแทงค์ รูปที่ 3.7 พบว่าอัตราการไหลโดยมวลของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันต่ำและอัตราการไหลโดยมวลของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันสูงมีความสัมพันธ์ดังนี้

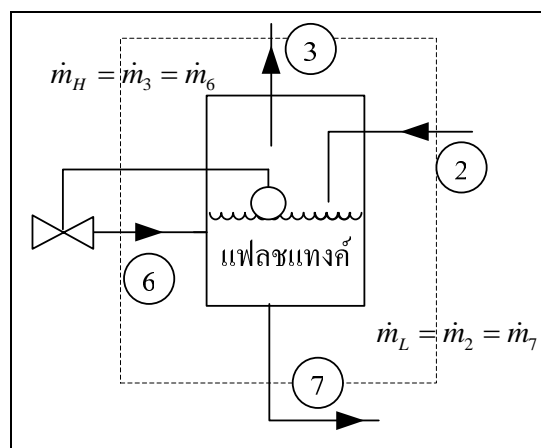
$$\dot{m}_H = \dot{m}_L \frac{(h_7 - h_2)}{(h_3 - h_6)}\quad (3.8)$$

จากการวิเคราะห์สมดุลพลังงานเครื่องทำระเหยในวัฏจักรความดันต่ำ รูปที่ 3.8 สำหรับกระบวนการทำความเย็นนม พบว่าอัตราการไหลโดยมวลของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันต่ำเป็นฟังก์ชันของอัตราการไหลโดยมวลของนม อุณหภูมิในภายหลังการทำความเย็นเบื้องต้นและอุณหภูมินมเย็นออกดังนี้

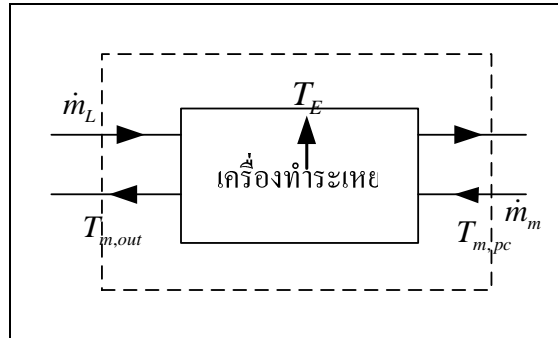
$$\dot{m}_L = \frac{\dot{m}_m C_p (T_{m,pc} - T_{m,out})}{q_E}\quad (3.9)$$



รูปที่ 3.6 วัฏจักรอัดไอสองขั้นตอนแบบอาศัยแฟลชแทงค์ในกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์นมแบบบรรจุร้อน



รูปที่ 3.7 สมดุลมวลและสมดุลพลังงานระบบแฟลชแทงค์



รูปที่ 3.8 สมดุลพลังงานเครื่องทำระเหยในวัฏจักรความดันต่ำ

แทนสมการที่ (3.8) และสมการที่ (3.9) ในสมการที่ (3.7) กำลังงานสุทธิของวัฏจักรอัดไอสองขั้นตอนโดยอาศัยแฟลชแทงค์และกำลังงานไฟฟ้าของขดลวดความร้อน แสดงได้ดังนี้

$$\dot{W}_{net,FT} = \frac{\dot{m}_L q_E}{COP_R} + \frac{\dot{m}_H q_C}{COP_{HP}} + \dot{m}_m C_p (T_{m,hot} - T_{m,ph}) \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ} \quad \dot{m}_H &= \dot{m}_L \frac{(h_7 - h_2)}{(h_3 - h_6)} \\ \text{และ} \quad \dot{m}_L &= \frac{\dot{m}_m C_p (T_{m,pc} - T_{m,out})}{q_E} \end{aligned}$$

3.4 แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดอุดมคติ

จากการวิเคราะห์สมดุลพลังงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนกลางวัฏจักร รูปที่ 3.10 พบว่า อัตราการไหลโดยมวลของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันต่ำและอัตราการไหลโดยมวลของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันสูงมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\dot{m}_H = \dot{m}_L \frac{(h_7 - h_2)}{(h_3 - h_6)} \quad (3.11)$$

สมการที่ (3.8) และสมการที่ (3.11) พบว่าความสัมพันธ์ของอัตราการไหลโดยมวลของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันต่ำและอัตราการไหลโดยมวลของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันสูง สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอน โดยอาศัยเฟลชเทงก์และวัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดอคมคติมีความสมมูลกัน

จากสมการที่ (3.11) สามารถแสดงในรูปของความร้อนต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็นและสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะดังนี้

$$\dot{m}_H = \dot{m}_L \cdot \left\{ q_E \left(\frac{1}{COP_R} + 1 \right) / q_C \left(1 - \frac{1}{COP_{HP}} \right) \right\} \quad (3.12)$$

จากการวิเคราะห์สมดุลพลังงานเครื่องทำระเหยในวัฏจักรความดันต่ำ รูปที่ 3.8 สำหรับกระบวนการทำความเย็นนม พบว่าอัตราการไหลโดยมวลของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันต่ำมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3.9) เมื่อแทนสมการที่ (3.9) และสมการที่ (3.12) ในสมการที่ (3.7) กำลังงานสุทธิของวัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดอคมคติและกำลังงานไฟฟ้าของขดลวดความร้อนแสดงได้ดังนี้

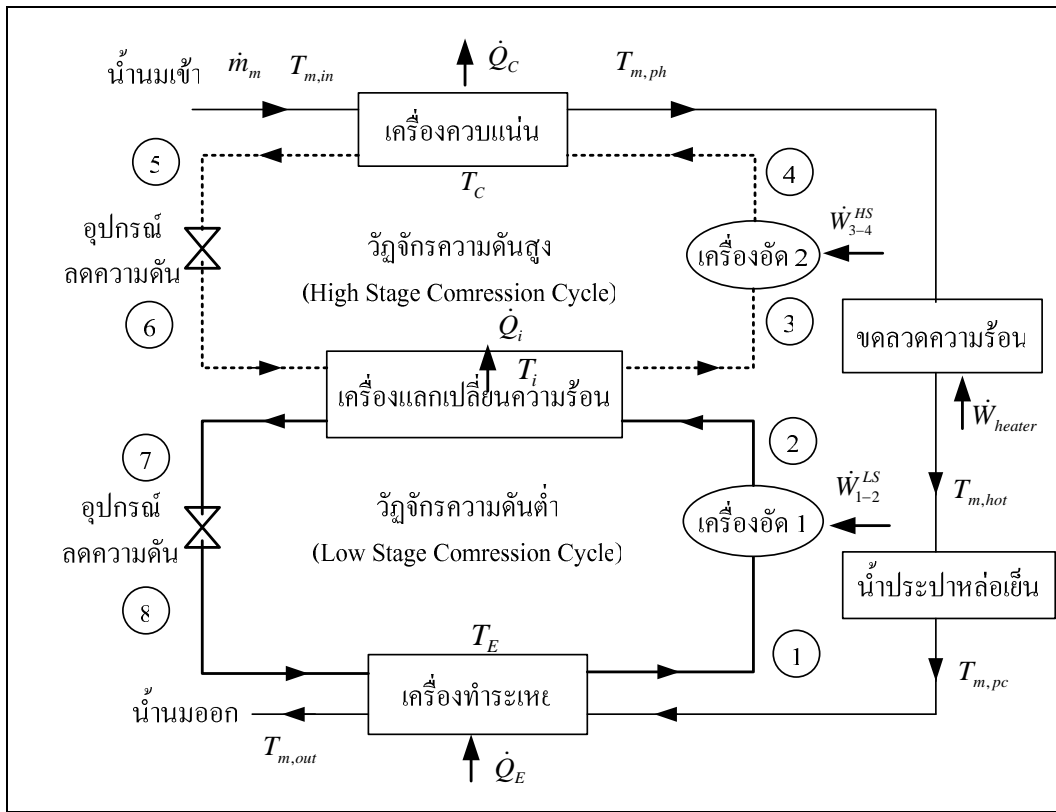
$$\dot{W}_{net,IC} = \frac{\dot{m}_L q_E}{COP_R} + \frac{\dot{m}_H q_C}{COP_{HP}} + \dot{m}_m C_p (T_{m,hot} - T_{m,ph}) \quad (3.13)$$

$$\text{เมื่อ } \dot{m}_H = \dot{m}_L \cdot \left\{ q_E \left(\frac{1}{COP_R} + 1 \right) / q_C \left(1 - \frac{1}{COP_{HP}} \right) \right\}$$

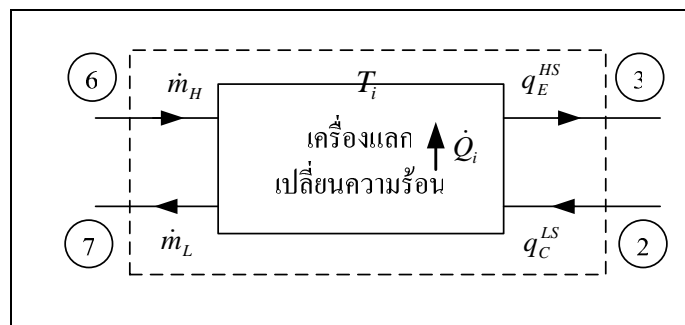
$$\text{และ } \dot{m}_L = \frac{\dot{m}_m C_p (T_{m,pc} - T_{m,out})}{q_E}$$

3.5 แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดจริง

จากการวิเคราะห์สมดุลพลังงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนกลางวัฏจักร รูปที่ 3.10 และการวิเคราะห์สมดุลพลังงานเครื่องทำระเหย รูปที่ 3.8 ด้วยวิธีการเดียวกันกับการวิเคราะห์แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดอคมคติ กำลังงานสุทธิของวัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดจริงและกำลังงานไฟฟ้าของขดลวดความร้อน แสดงได้ดังนี้



รูปที่ 3.9 วัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดอุดมคติในกระบวนการ
พาสเจอร์ไรซ์นมแบบบรรจุร้อน



รูปที่ 3.10 สมดุลพลังงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนกลาง
วัฏจักรของวัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดอุดมคติ

$$\begin{aligned} \dot{W}_{net,RC} = & \frac{\dot{m}_L q_E (T_E, T_i + \Delta T')}{COP_R} + \left(\frac{1}{COP_{HP}} - 1 \right) (\dot{m}_H q_C (T_C, T_i - \Delta T'')) \\ & + \dot{m}_m C_p (T_{m,pc} - T_{m,out}) \end{aligned} \quad (3.13)$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ} \quad \dot{m}_H = & \dot{m}_L \cdot \left\{ q_E \left(\frac{1}{COP_R} + 1 \right) / q_C \left(1 - \frac{1}{COP_{HP}} \right) \right\} \\ \text{และ} \quad \dot{m}_L = & \frac{\dot{m}_m C_p (T_{m,pc} - T_{m,out})}{q_E} \end{aligned}$$

จากรูปที่ 3.9 และรูปที่ 3.11 จะเห็นว่า $\Delta T'$ และ $\Delta T''$ มีอิทธิพลต่อแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นของการใช้กำลังงานของวัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดจริงเมื่อเทียบกับวัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดอุดมคติ

3.6 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ระหว่างค่าอ้างอิงและค่าที่ได้จากแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์

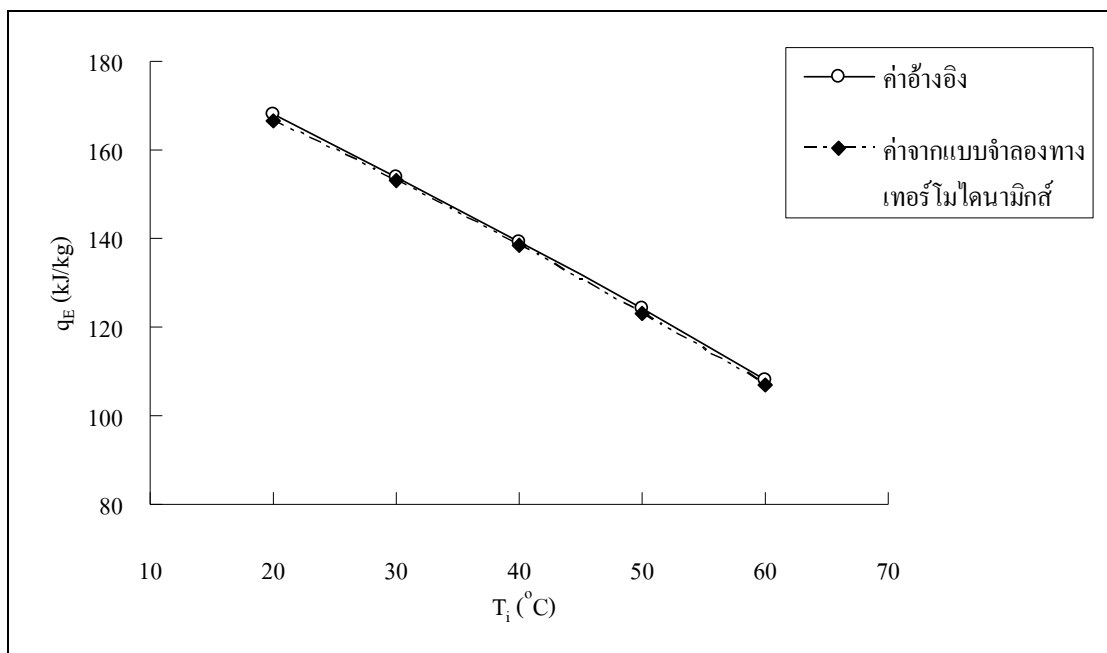
การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ระหว่างค่าอ้างอิงที่ได้จากตารางคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็น R 134a และค่าที่ได้จากแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์เพื่อยืนยันความเชื่อถือของแบบจำลองความสัมพันธ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ในรูปแบบของความผิดพลาดเฉลี่ย ผลที่ได้มีดังนี้

1. ผลการเปรียบเทียบความร้อนต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็น q_E ระหว่างค่าอ้างอิงและค่าจากแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ในช่วงอุณหภูมิที่ทำการศึกษาวิจัยจากกลุ่มตัวอย่าง 15 ตัวอย่างพบว่า ความผิดพลาดเฉลี่ย $\pm 1.7240\%$ จากรูปที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบความร้อนต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็น q_E จากกลุ่มตัวอย่างที่มีอุณหภูมิระเหยของสารทำความเย็น -5°C และช่วงอุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรของสารทำความเย็น $20^\circ\text{C} - 60^\circ\text{C}$

2. ผลการเปรียบเทียบความร้อนต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็น q_C ระหว่างค่าอ้างอิงและค่าจากแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ในช่วงอุณหภูมิที่ทำการศึกษาวิจัยจากกลุ่มตัวอย่าง 20 ตัวอย่างพบว่า ความผิดพลาดเฉลี่ย $\pm 0.8681\%$ จากรูปที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบความร้อนต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็น q_C จากกลุ่มตัวอย่างที่มีอุณหภูมิกั่นตัวของสารทำความเย็น 70°C และช่วงอุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรของสารทำความเย็น $20^\circ\text{C} - 60^\circ\text{C}$

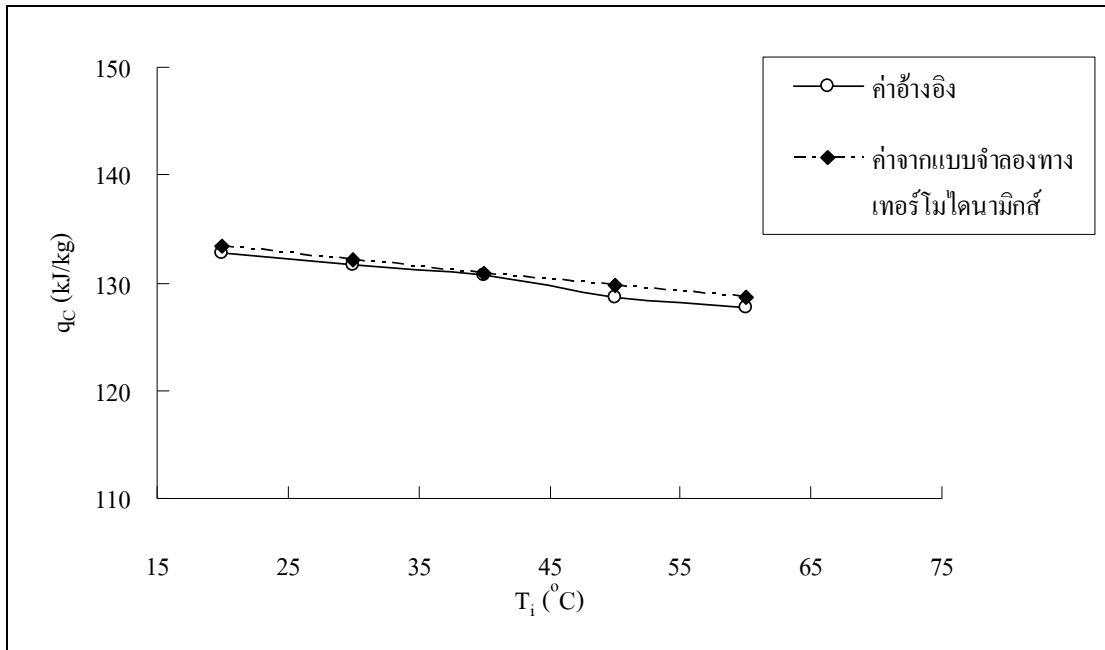
3. ผลการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของเครื่องทำความเย็น COP_R ระหว่างค่าอ้างอิงและค่าจากแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ในช่วงอุณหภูมิที่ทำการศึกษาวิจัยจากกลุ่มตัวอย่าง 15 ตัวอย่างพบว่า ความผิดพลาดเฉลี่ย $\pm 1.9708\%$ จากรูปที่ 3 เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของเครื่องทำความเย็น COP_R จากกลุ่มตัวอย่างที่มีอุณหภูมิระเหยตัว -5°C และช่วงอุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักร $20^\circ\text{C} - 60^\circ\text{C}$

4. ผลการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของปั๊มความร้อน COP_{HP} ระหว่างค่าอ้างอิงและค่าจากแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ในช่วงอุณหภูมิที่ทำการศึกษาวิจัยจากกลุ่มตัวอย่าง 20 ตัวอย่างพบว่า ความผิดพลาดเฉลี่ย $\pm 2.4394\%$ จากรูปที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของปั๊มความร้อน COP_{HP} จากกลุ่มตัวอย่างที่มีอุณหภูมิก้นตัว 70°C และช่วงอุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักร $20^\circ\text{C} - 60^\circ\text{C}$

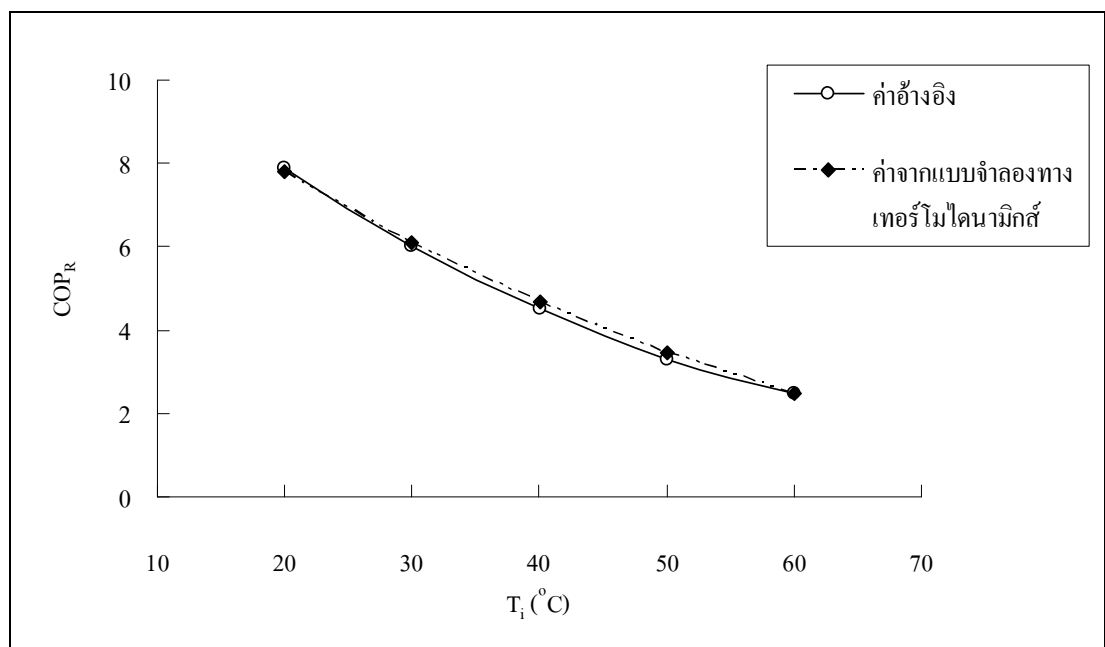


รูปที่ 3.11 เปรียบเทียบความร้อนต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็น q_E ระหว่างค่าอ้างอิงและค่าจากแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์

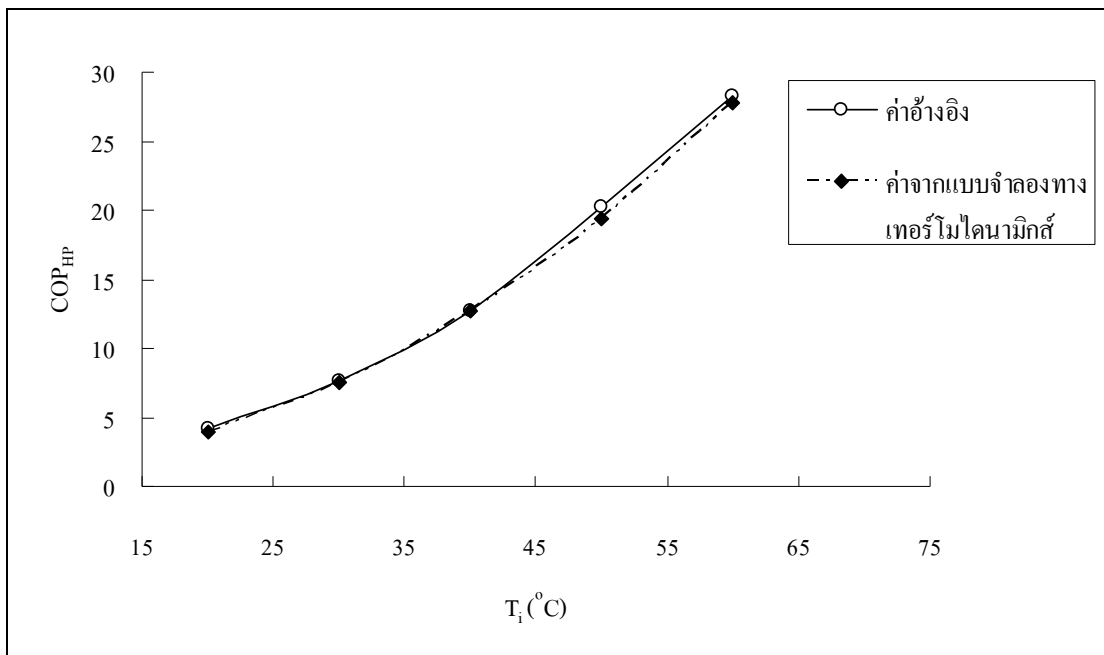
ผลที่ได้จากการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ระหว่างค่าอ้างอิงที่ได้จากตารางคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็น R 134a และค่าที่ได้จากแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ข้างต้นพบว่า แบบจำลองความสัมพันธ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์มีความเชื่อถือในระดับที่สามารถยอมรับได้ภายในช่วงของอุณหภูมิของสารทำความเย็น R 134a ที่ทำการศึกษา



รูปที่ 3.12 เปรียบเทียบความร้อนต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็น q_c ระหว่างค่าอ้างอิงและค่าจากแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์



รูปที่ 3.13 เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของเครื่องทำความเย็น COP_R ระหว่างค่าอ้างอิงและค่าจากแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์



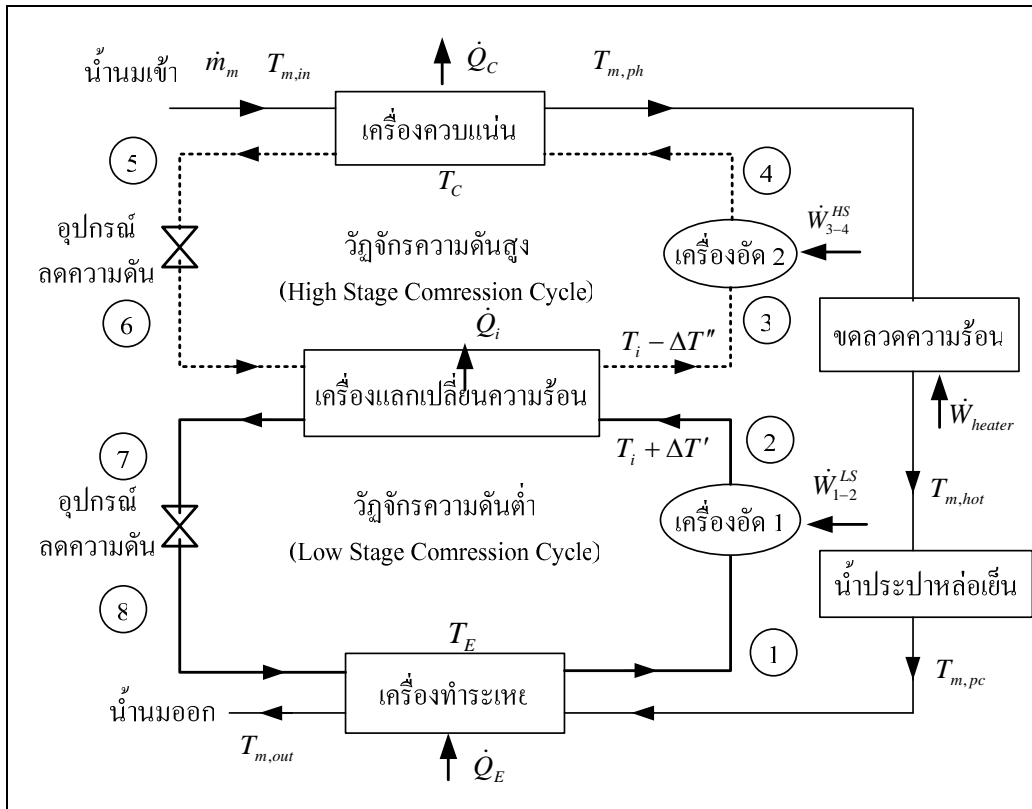
รูปที่ 3.14 เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของปั๊มความร้อน COP_{HP} ระหว่างค่าอ้างอิงและค่าจากแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์

3.7 สรุปผลการวิเคราะห์แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์

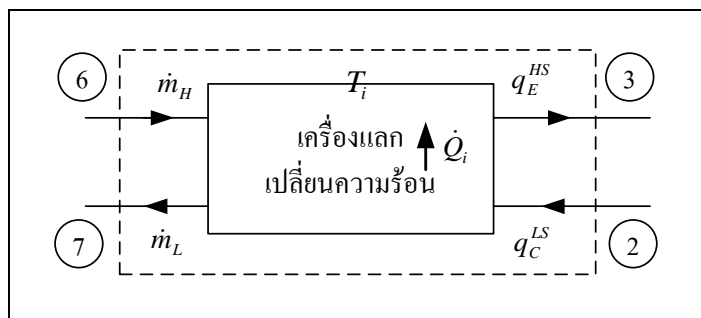
แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ของระบบการทำความเย็นแบบอัดไอสองขั้นตอนสำหรับระบบการทำความเย็นแบบอัดไอสองขั้นตอนในกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์นมแบบบรรจุร้อน เป็นสมการทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่อยู่ในรูปแบบของความต้องกรพลังงานสุทธิของระบบการทำความเย็นแบบอัดไอสองขั้นตอนและพลังงานความร้อนของขดลวดความร้อน ซึ่งความต้องกรพลังงานสุทธิเป็นฟังก์ชันของกำลังงานสุทธิและเวลาการทำงานของระบบ

จากการวิเคราะห์สมดุลมวลและสมดุลพลังงานเพื่อหาสมการกำลังงานสุทธิพบว่าแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ของวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอนโดยอาศัยแฟลชแทงค์ และแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ของวัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดอุดมคติมีความสมมูลกันจากสมการกำลังงานสุทธิ สมการที่ (3.10) และสมการที่ (3.13) เนื่องจากอัตราการใช้โดยมวลของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันต่ำและอัตราการใช้โดยมวลของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันสูงของทั้งสองวัฏจักรมีความสมมูลกัน จากสมการที่ (3.8) และสมการที่ (3.11)

ความต้องกรพลังงานสุทธิของวัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดจริงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากอิทธิพลของอุณหภูมิ $\Delta T'$ และ $\Delta T''$ เมื่อเทียบกับวัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดอุดมคติ



รูปที่ 3.15 วัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดจริงในกระบวนการ พาสเจอร์ไรซ์นมแบบบรรจุร้อน



รูปที่ 3.16 สมดุลพลังงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนกลางวัฏจักร

บทที่ 4

การอพติไมเซชัน

เนื้อหาบทนี้จะกล่าวถึงการอพติไมเซชันและวิธีการอพติไมเซชันที่เหมาะสมกับปัญหาอพติไมเซชันสำหรับการศึกษาวิจัย การอพติไมเซชันเป็นกระบวนการหาเงื่อนไขหรือสภาวะจากตัวแปรควบคุมที่สนใจ ซึ่งทำให้สมการจุดประสงค์สูงสุดหรือต่ำสุดตามเงื่อนไขของแต่ละปัญหาอพติไมเซชัน สำหรับการศึกษาวิจัยนี้เป็นการอพติไมเซชันสมการจุดประสงค์ซึ่งแสดงในรูปแบบของความต้องการพลังงานสุทธิต่อวัน ซึ่งประกอบด้วยความต้องการพลังงานของระบบการทำความเย็นแบบอัดไอสองขั้นตอนและความต้องการพลังงานความร้อนของขดลวดความร้อน ผลจากการอพติไมเซชันจะทำให้ทราบสภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็นชนิด R 134a ที่ดีที่สุด ภายใต้เงื่อนไขความต้องการพลังงานสุทธิต่ำสุด

4.1 องค์ประกอบของปัญหาอพติไมเซชัน

ปัญหาอพติไมเซชัน (Optimization Problem) โดยทั่วไปมีองค์ประกอบสำคัญ 2 ส่วนคือ สมการจุดประสงค์ (Objective Function) และสมการเงื่อนไข (Constrained Function) ปัญหาอพติไมเซชันสำหรับการศึกษาวิจัยนี้เป็นปัญหาอพติไมเซชันโดยไม่มีเงื่อนไข (Unconstrained Optimization Problem) คือ มีสมการจุดประสงค์เพียงสมการเดียวโดยไม่มีสมการเงื่อนไข เนื่องจากสมการเงื่อนไขเกิดจากการตั้งสมมติฐานการสร้างสมการความสัมพันธ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ในหัวข้อ 3.1 สามารถรวมเข้ากับสมการจุดประสงค์ได้เป็นสมการเดียวกล่าวถึง

$$E_{net} = f(T_E, T_i, T_C) \rightarrow \text{minimize} \quad (4.1)$$

4.2 สมการจุดประสงค์ของวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอน

สมการจุดประสงค์ของวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอนสำหรับการศึกษาวิจัยนี้คือแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ซึ่งแสดงในรูปแบบของความต้องการพลังงานสุทธิต่อวัน ประกอบด้วยความต้องการพลังงานของระบบการทำความเย็นแบบอัดไอสองขั้นตอนและความต้องการพลังงานความร้อนของขดลวดความร้อน สมการจุดประสงค์ของวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอนในรูปแบบทั่วไป สามารถแสดงในรูปปริพันธ์ของกำลังงานและเวลาการทำงานต่อวัน ได้ดังนี้

$$E_{net} = \int \dot{W}_{net} dt = \int \dot{W}_{1 \rightarrow 2}^{LS} dt + \int \dot{W}_{3 \rightarrow 4}^{HS} dt + \int \dot{W}_{heater} dt \quad (4.2)$$

4.3 สมการจุดประสงค์ของวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอนโดยอาศัยแฟลชแทงค์

สมการจุดประสงค์ของวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอนโดยอาศัยแฟลชแทงค์ ประกอบด้วย สมการจุดประสงค์ของวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอนในรูปทั่วไป สมการที่ (4.1) และสมการกำลังงานสุทธิของวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอนโดยอาศัยแฟลชแทงค์ สมการที่ (3.10) แสดงได้ดังนี้

$$E_{net,FT} = \int \dot{W}_{net,FT} dt = \int \dot{W}_{1 \rightarrow 2}^{LS} dt + \int \dot{W}_{3 \rightarrow 4}^{HS} dt + \int \dot{W}_{heater} dt \quad (4.3)$$

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

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

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

4.4 สมการจุดประสงค์ของวัฏจักรอัดไอแบบแอสเทคอดุมคติ

สมการจุดประสงค์ของวัฏจักรอัดไอแบบแอสเทคอดุมคติประกอบด้วย สมการจุดประสงค์ของวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอนในรูปทั่วไป สมการที่ (4.1) และสมการกำลังงานสุทธิของวัฏจักรอัดไอแบบแอสเทคอดุมคติ สมการที่ (3.13) แสดงได้ดังนี้

$$E_{net,IC} = \int \dot{W}_{net,IC} dt = \int \dot{W}_{1 \rightarrow 2}^{LS} dt + \int \dot{W}_{3 \rightarrow 4}^{HS} dt + \int \dot{W}_{heater} dt \quad (4.4)$$

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

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

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

4.5 สมการจุดประสงค์ของวัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดจริง

สมการจุดประสงค์ของวัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดจริงประกอบด้วย สมการจุดประสงค์ของวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอนในรูปทั่วไป สมการที่ (4.1) และสมการกำลังงานสุทธิของวัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดจริง แสดงได้ดังนี้

$$E_{net,RC} = \int \dot{W}_{net,RC} dt = \int \dot{W}_{1 \rightarrow 2}^{LS} dt + \int \dot{W}_{3 \rightarrow 4}^{HS} dt + \int \dot{W}_{heater} dt \quad (4.5)$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } \dot{W}_{net,RC} &= \frac{\dot{m}_L q_E (T_E, T_i + \Delta T')}{COP_R} + \left(\frac{1}{COP_{HP}} - 1 \right) (\dot{m}_H q_C (T_C, T_i - \Delta T'')) \\ &\quad + \dot{m}_m C_p (T_{m,pc} - T_{m,out}) \\ \dot{m}_H &= \dot{m}_L \cdot \{ q_E (T_E, T_i + \Delta T') \cdot \left(\frac{1}{COP_R} + 1 \right) / q_C (T_C, T_i - \Delta T'') \cdot \left(1 - \frac{1}{COP_{HP}} \right) \} \\ \text{และ } \dot{m}_L &= \frac{\dot{m}_m C_p (T_{m,pc} - T_{m,out})}{q_E} \end{aligned}$$

4.6 การจำแนกตัวแปรจากสมการจุดประสงค์

จากสมการจุดประสงค์ของวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอน สมการที่ (4.2) สมการที่ (4.3) และสมการที่ (4.4) สามารถจำแนกตัวแปรจากสมการจุดประสงค์ดังนี้

4.6.1 ตัวแปรอิสระ

การศึกษาวิชาญนี้มีสถานะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็นเป็นตัวแปรอิสระคือ

1. อุณหภูมิระเหยของสารทำความเย็น T_E เป็นฟังก์ชันอุณหภูมิซึมเข้า $T_{m,in}$ อุณหภูมิซึมออก $T_{m,out}$ ซึ่งถูกกำหนดด้วยกระบวนการทำความเย็นและความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยเชิงล็อกที่เครื่องทำระเหย $\Delta T_{lm,E}$ ดังนี้

$$T_E = T_E (T_{m,out}, T_{m,in}, \Delta T_{lm,E}) \quad (4.6)$$

2. อุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรของสารทำความเย็น T_i

3. อุณหภูมิกลั่นตัวของสารทำความเย็น T_C

จากสมการที่ (4.5) พบว่า อุณหภูมิระเหยของสารทำความเย็น T_E เป็นตัวแปรควบคุมที่ขึ้นอยู่กับตัวแปรกำหนด ดังนั้นการศึกษาวิจัยนี้จึงมีตัวแปรอิสระเพียงสองตัวแปรคือ อุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรของสารทำความเย็น T_i และอุณหภูมิกลั่นตัวของสารทำความเย็น T_C

4.6.2 ตัวแปรตาม

การศึกษาวิจัยนี้มีตัวแปรตาม ซึ่งเป็นตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับสภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็นและข้อกำหนดของกระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรซ์ คือ

1. ความร้อนจำเพาะของนม C_p เป็นตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับสภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็น เนื่องจากช่วงอุณหภูมินมที่ทำการศึกษามีช่วงแคบ สามารถตั้งสมมติฐานได้ว่า ความร้อนจำเพาะของนมมีค่าคงที่ที่ค่าอุณหภูมินมเฉลี่ย

2. อัตราการไหลโดยมวลของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันต่ำ \dot{m}_L เป็นตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับภาระการทำความเย็นนมและความร้อนต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็นเนื่องจากกระบวนการรับความร้อนที่ความดันคงที่จากการสมดุลพลังงาน สมการที่ (3.9) แสดงดังนี้

$$\dot{m}_L = \frac{\dot{m}_m C_p (T_{m,pc} - T_{m,out})}{q_E} \quad (4.7)$$

3. อัตราการไหลโดยมวลของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันสูง \dot{m}_H เป็นตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับอัตราการไหลโดยมวลของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันสูงจากการสมดุลพลังงานจากสมการที่ (3.8) แสดงดังนี้

$$\dot{m}_H = \dot{m}_L \frac{(h_7 - h_2)}{(h_3 - h_6)} \quad (4.8)$$

จากสมการที่ (3.12) แสดงดังนี้

$$\dot{m}_H = \dot{m}_L \cdot \left\{ q_E \left(\frac{1}{COP_R} + 1 \right) / q_C \left(1 - \frac{1}{COP_{HP}} \right) \right\} \quad (4.9)$$

4. อุณหภูมิในภายหลังการทำความร้อนเบื้องต้น $T_{m,ph}$ เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิก่อนตัวของสารทำความเย็น T_C อุณหภูมิในเข้า $T_{m,in}$ และอุณหภูมิเฉลี่ยเชิงล็อกที่เครื่องควบแน่น $\Delta T_{lm,C}$ แสดงได้ดังนี้

$$T_{m,ph} = T_{m,ph}(T_C, T_{m,in}, \Delta T_{lm,C}) \quad (4.10)$$

4.6.3 ตัวแปรออกแบบ

การศึกษาวิจัยนี้มีข้อกำหนดของกระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรซ์และอุณหภูมิเฉลี่ยเชิงล็อกของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นตัวแปรออกแบบคือ

1. อัตราการไหลโดยมวลของนม \dot{m}_m คือกำลังการผลิตที่เวลาการทำงาน 8 ชั่วโมงต่อวัน ซึ่งเป็นตัวแปรที่ถูกกำหนดด้วยปริมาณการรับน้ำนมดิบต่อวัน และสัดส่วนการรับน้ำนมกลุ่ม A และน้ำนมกลุ่ม B

2. เวลาการผลิต t เป็นตัวแปรที่ถูกกำหนดด้วยกำลังการผลิต ปริมาณการรับน้ำนมดิบต่อวันและสัดส่วนการรับน้ำนมดิบระหว่างกลุ่ม A และกลุ่ม B

3. อุณหภูมิในเข้า $T_{m,in}$ สามารถพิจารณาเป็น 2 ช่วงเวลาคืออุณหภูมินมกลุ่ม A เข้าสู่กระบวนการ A2 ในช่วงเช้าและอุณหภูมินมกลุ่ม B เข้าสู่กระบวนการ B3 ในช่วงบ่าย

4. อุณหภูมิในภายหลังทำความเย็นเบื้องต้น $T_{m,pc}$ จากข้อกำหนดของกระบวนการลดอุณหภูมินมเบื้องต้น กระบวนการ A5 และกระบวนการ B6

5. อุณหภูมิในเย็นออก $T_{m,out}$ จากข้อกำหนดของกระบวนการทำความเย็นเก็บรักษา B2 และกระบวนการทำความเย็นเพื่อเก็บบรรจุ A6

6. อุณหภูมิร้อน $T_{m,hot}$ จากข้อกำหนดของกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์ กระบวนการ A2 และกระบวนการ B3

7. ความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยเชิงล็อก $\Delta T_{lm,k}$ จากประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนคือ เครื่องทำระเหย เครื่องควบแน่นและเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างวัฏจักร ซึ่งแสดงในรูปแบบของอุณหภูมิเฉลี่ยเชิงล็อกดังนี้

$$\Delta T_{lm,k} = \frac{Q_k}{(UA)_k} \quad (4.11)$$

4.7 วิธีการอพติไมเซชัน

วิธีการอพติไมเซชันที่สามารถแก้ปัญหาอพติไมเซชันโดยไม่มีเงื่อนไข สามารถจำแนกออกเป็น 2 วิธีการหลักคือ วิธีการเสิร์ชโดยตรงและวิธีการเดสเซนต์ ดังนี้

1. กลุ่มวิธีการเสิร์ชโดยตรง (Direct Search Methods) วิธีการเสิร์ชเป็นวิธีการที่มีความเหมาะสมสำหรับการแก้ปัญหาอพติไมเซชันที่มีสมการจุดประสงค์ไม่เป็นสมการอนุพันธ์ย่อย (Partial Differential Equation) เป็นสมการที่ง่ายไม่มีความยุ่งยากและมีจำนวนตัวแปรควมุน้อย วิธีการเสิร์ชอาจเรียกว่า วิธีการที่ไม่เป็นเกรเดียนต์ (Nongradient Methods)

2. กลุ่มวิธีการเดสเซนต์ (Descent Methods) วิธีการเดสเซนต์เป็นวิธีการที่มีความเหมาะสมสำหรับการแก้ปัญหาอพติไมเซชันที่มีสมการจุดประสงค์เป็นสมการอนุพันธ์ วิธีการเดสเซนต์อาจเรียกว่า วิธีการเกรเดียนต์ (Gradient Methods) ซึ่งโดยทั่วไปแล้ววิธีการเดสเซนต์มีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาอพติไมเซชันมากกว่าวิธีการเสิร์ชโดยตรง เนื่องจากใช้วิธีการทางแคลคูลัสช่วยในการแก้ปัญหา จึงทำให้วิธีนี้เข้าสู่ผลเฉลยได้รวดเร็วกว่า

4.7.1 วิธีการอพติไมเซชันสำหรับการศึกษาวิจัย

จากสมการจุดประสงค์ของวัฏจักรอัดไอแบบสองชั้นตอน สมการที่ (4.2) สมการที่ (4.3) สมการที่ (4.4) พบว่า เป็นสมการจุดประสงค์เดียวซึ่งเป็นปัญหาอพติไมเซชันโดยไม่มีเงื่อนไข เป็นสมการที่ง่ายไม่มีความยุ่งยากสำหรับการคำนวณ วิธีการอพติไมเซชันเหมาะสมสำหรับการแก้ปัญหาอพติไมเซชันในการศึกษาวิจัยนี้คือ กลุ่มวิธีการเสิร์ชโดยตรงด้วยวิธีการแลตทิซเสิร์ช เนื่องจากมีระเบียบวิธีการอพติไมเซชันมีความง่ายและสะดวกต่อการโปรแกรมคอมพิวเตอร์

4.7.2 วิธีการแลตทิซเสิร์ช

วิธีการแลตทิซเสิร์ช (Lattice Search Method) เป็นวิธีหนึ่งของกลุ่มวิธีการเสิร์ชที่เหมาะสมสำหรับการแก้ปัญหาอพติไมเซชันโดยไม่มีเงื่อนไขหลายตัวแปร (Multivariables Unconstrained Optimization) โดยคำนวณตามทิศทางสูงสุดหรือต่ำสุดของสมการจุดประสงค์ สำหรับการศึกษานี้เป็นปัญหาค่าต่ำสุด ซึ่งมีระเบียบวิธีดังนี้

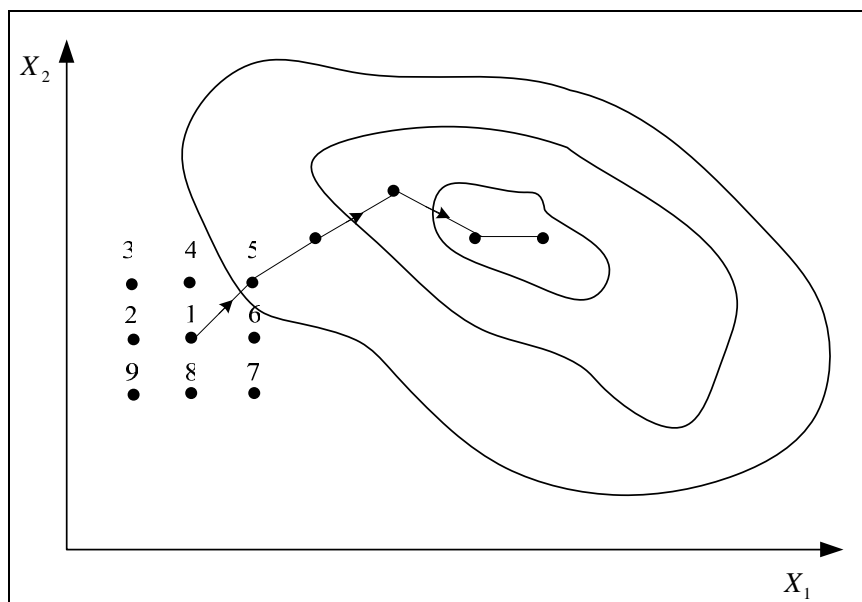
1. กำหนดจุดเริ่มต้นเป็นจุดศูนย์กลางของการคำนวณจุด 1 และกำหนดระยะกระโดด เริ่มต้นการคำนวณรอบจุดศูนย์กลาง ภายในขอบเขตของตัวแปรที่สนใจ

2. ตรวจสอบผลการคำนวณของจุดอื่นรอบจุดศูนย์กลาง เมื่อผลการคำนวณของจุดใด ๆ ให้สมการจุดประสงค์มีค่าต่ำสุด กำหนดจุดนั้นเป็นจุดศูนย์กลางของการคำนวณลำดับถัดไป

3. เมื่อตรวจสอบผลการคำนวณแล้วพบว่า จุดศูนย์กลางของการคำนวณให้สมการจุดประสงค์มีค่าต่ำสุด ทำการลดระยะกระโดดให้มีความละเอียดมากขึ้นและทำการคำนวณตามระเบียบ

วิธีข้อที่ 2 จนพบจุดที่ทำให้สมการจุดประสงค์มีค่าต่ำที่สุด ภายใต้เงื่อนไขความละเอียดของระยะกริดที่ยอมรับได้

จากรูปที่ 4.1 แสดงการแก้ปัญหาค่าต่ำสุดสองตัวแปรคือ X_1 และ X_2 ด้วยระเบียบวิธีการแลตทิซเสิร์ช โดยการกำหนดจุดเริ่มต้นเป็นจุดศูนย์กลางของการคำนวณ จุดที่ 1 และกำหนดระยะกริดเริ่มต้นการคำนวณรอบจุดศูนย์กลาง จุดที่ 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 และ 9 ตามลำดับ เมื่อตรวจสอบผลการคำนวณพบว่า จุดที่ 5 ให้สมการจุดประสงค์มีค่าต่ำสุด ทำการกำหนดจุดที่ 5 เป็นจุดศูนย์กลางของการคำนวณของลำดับถัดไป และทำตามระเบียบวิธีข้อที่ 3 จนพบจุดที่ทำให้สมการจุดประสงค์มีค่าต่ำที่สุด



รูปที่ 4.1 การแก้ปัญหาค่าต่ำสุดสองตัวแปรด้วยระเบียบวิธีการแลตทิซเสิร์ช

4.8 สรุปแนวทางการอพติไมเซชันในการศึกษาวิจัย

ปัญหาอพติไมเซชันสำหรับการศึกษาวิจัยนี้เป็นปัญหาอพติไมเซชันโดยไม่มีเงื่อนไข (Unconstrained Optimization Problem) โดยสมการจุดประสงค์ของวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอน สมการที่ (4.2) สมการที่ (4.3) และสมการที่ (4.4) มีตัวแปรอิสระเป็นสถานะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็น 3 ตัวแปรคือ อุณหภูมิระเหยของสารทำความเย็น T_E อุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรของสารทำความเย็น T_i และอุณหภูมิกักตัวของสารทำความเย็น T_C มีตัวแปรตามซึ่งขึ้นอยู่กับสถานะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็นและขึ้นอยู่กับเงื่อนไขข้อกำหนดของการออกแบบสำหรับ

กระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรซ์ และมีตัวแปรออกแบบเป็นเงื่อนไขข้อกำหนดของการออกแบบ สำหรับกระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรซ์ โดยแก้ไขปัญหาอพติไมเซชันของวัฏจักรอัดไอแบบ สองขั้นตอนดังกล่าวข้างต้นด้วยวิธีการแลตทิซเสิร์ช การโปรแกรมคอมพิวเตอร์ด้วยวิธีการแลตทิซ เสิร์ชแสดงในภาคผนวก จ.

บทที่ 5

สรุปและวิเคราะห์ผลการศึกษาวิจัย

5.1 ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัย

เพื่อแสดงแนวโน้มของสภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็นที่ดีที่สุดจากแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ของระบบอัดไอแบบสองขั้นตอน การศึกษาวิจัยนี้จึงทำการศึกษาดู โดยมีข้อกำหนดสภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็น แสดงดังตารางที่ 5.1 เงื่อนไข และข้อกำหนดสำหรับกระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรซ์แบบบรรจุร้อน แสดงดังตารางที่ 5.2 และข้อกำหนดของกระบวนการทำความร้อนและกระบวนการทำความเย็น แสดงดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.1 ข้อกำหนดสภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็น

| ลำดับที่ | ข้อกำหนดสภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็น | ช่วงที่พิจารณา |
|----------|---|----------------|
| 1 | อุณหภูมิระเหยตัวของสารทำความเย็น $^{\circ}\text{C}$ | (-6) - (-2) |
| 2 | อุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรของสารทำความเย็น $^{\circ}\text{C}$ | 20 - 60 |
| 3 | อุณหภูมิกั่นตัวของสารทำความเย็น $^{\circ}\text{C}$ | 65 - 90 |

5.2 การวิเคราะห์ผลการศึกษาวิจัย

ผลการศึกษาวิจัยที่ได้พบว่าสัดส่วนการรับน้ำนมกลุ่ม A และน้ำนมกลุ่ม B ที่เงื่อนไขของการรับปริมาณน้ำนมดิบใด ๆ คือ สัดส่วน 100:0 เปอร์เซนต์ มีแนวโน้มความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันของระบบทำความเย็นแบบอัดไอสองขั้นตอนต่ำสุด สภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็นที่ดีที่สุดคือ อุณหภูมิระเหยของสารทำความเย็นมีแนวโน้มเข้าใกล้อุณหภูมิต่ำสุด อุณหภูมิกั่นตัวของสารทำความเย็นมีแนวโน้มเข้าใกล้อุณหภูมิต่ำสุดและอุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรของสารทำความเย็นมีแนวโน้มที่ค่าเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิระเหยของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันต่ำและอุณหภูมิกั่นตัวของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันสูง กระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรซ์มีแนวโน้มความต้องการพลังงานความร้อนในวัฏจักรความดันสูงทดแทนพลังงานความร้อนจากขดลวดความร้อนทั้งหมด

ตารางที่ 5.2 ข้อกำหนดสำหรับกระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรซ์แบบบรรจุร้อน

| ลำดับที่ | ข้อกำหนดของกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์นมแบบบรรจุร้อน | ขอบเขตการศึกษา |
|----------|---|----------------|
| 1 | ปริมาณการรับน้ำนมดิบ ต้น/วัน | 1 - 10 |
| 2 | กำลังการผลิต ต้น/วัน | 1 - 20 |
| 3 | สัดส่วนโดยปริมาตรการรับน้ำนมกลุ่ม A และน้ำนมกลุ่ม B (A:B) เปอร์เซ็นต์ | 100:0 |
| | | 80:20 |
| | | 60:40 |
| | | 50:50 |
| | | 40:60 |
| 4 | เวลาการผลิตของกระบวนการ A ชั่วโมง/วัน | ≥ 4 |
| 5 | เวลาการทำความเย็นกระบวนการ B2 ชั่วโมง | 2 |
| 6 | เวลาการผลิต ชั่วโมง/วัน | ≥ 8 |

5.2.1 สัดส่วนการรับน้ำนมกลุ่ม A และน้ำนมกลุ่ม B

สัดส่วนการรับน้ำนมกลุ่ม A และน้ำนมกลุ่ม B มีแนวโน้มความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันของระบบทำความเย็นแบบอัดไอสองขั้นตอน (วัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอนโดยอาศัยแฟลชแทงค์และวัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดอคมคิต) ต่ำสุด ที่เงื่อนไขการรับปริมาณน้ำนมดิบใด ๆ คือ สัดส่วน 100:0 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากการรับน้ำนมกลุ่ม B มีภาระการทำความเย็นในกระบวนการเก็บรักษา (กระบวนการ B2) ดังนั้นความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันจึงมีแนวโน้มลดลงตามสัดส่วนการรับน้ำนมกลุ่ม B

อย่างไรก็ตามจากการรับน้ำนมกลุ่ม B ที่มีสัดส่วนลดลง จะทำให้มีความต้องการของกำลังการผลิตต่อวันที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากข้อกำหนดของเวลาการผลิตต่อวันของกระบวนการ A ตารางที่ 5.2 ซึ่งจำเป็นต้องพิจารณาค่าลงทุนเริ่มต้นที่เหมาะสมของระบบสำหรับรองรับกำลังการผลิตต่อวันที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นร่วมกับความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันของวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอนที่มีแนวโน้มลดลงตามสัดส่วนของการรับน้ำนมกลุ่ม B ดังนั้นจากผลการศึกษาวิจัยนี้ แสดงให้เห็นว่าในกระบวนการผลิตควรจำกัดน้ำนมกลุ่ม B ให้น้อยที่สุด และรับน้ำนมกลุ่ม A เข้าสู่กระบวนการผลิตให้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

ตารางที่ 5.3 ข้อกำหนดของกระบวนการทำความร้อนและกระบวนการทำความเย็น

| ลำดับที่ | ข้อกำหนดของกระบวนการทำความร้อน(กระบวนการ A2, B3) | ค่าที่พิจารณา |
|----------|---|---------------------|
| 1 | อุณหภูมิขั้นต่ำจากกระบวนการ A1 และ B1 °C | 35 |
| 2 | อุณหภูมิขั้นต่ำกระบวนการ A2 และ B3 °C | $T_{m,ph}=T_C - 10$ |
| 3 | อุณหภูมิขั้นต่ำหลังจากการทำความร้อน °C | 85 |
| | ข้อกำหนดของกระบวนการทำความเย็น (กระบวนการ B2 และกระบวนการ A6 และ B7) | |
| 4 | อุณหภูมิขั้นต่ำกระบวนการ B2 °C | 35 |
| 5 | อุณหภูมิมลควรร้อนเบื้องต้น °C | 50 |
| 6 | อุณหภูมิมลควรรเย็นเบื้องต้น °C | 4 |

5.2.2 ตัวอย่างข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัย

เพื่อให้ทราบถึงรายละเอียดที่ชัดเจนของแนวโน้มความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันของระบบทำความเย็นแบบอัดไอสองขั้นตอน (วัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอนโดยอาศัยแฟลชแทงค์และวัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดอุณหภูมิต่ำ) จึงแสดงตัวอย่างข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัย คือข้อกำหนดที่มีเงื่อนไขของการรับปริมาณน้ำนมดิบ 1 ตัน สัดส่วนการรับน้ำนมกลุ่ม A และน้ำนมกลุ่ม B เป็น 100:0 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งตัวอย่างข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยแสดงในตารางที่ 5.4 จากตัวอย่างข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยข้างต้นสามารถสรุปและวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

5.2.3 สถานะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็นที่ดีที่สุด

จากกราฟแสดงเส้นความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันคงที่กับอุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรของสารทำความเย็นและอุณหภูมิกลิ้นตัวของสารทำความเย็น รูปที่ 5.1 และกราฟแสดงความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันกับอุณหภูมิกลิ้นตัวของสารทำความเย็นที่อุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรของสารทำความเย็นระหว่าง 20°C - 60°C รูปที่ 5.2 พบว่า สถานะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็นที่ดีที่สุดของตัวอย่างข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัย ซึ่งทำให้ความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันของระบบทำความเย็นแบบอัดไอสองขั้นตอน (วัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอนโดยอาศัยแฟลชแทงค์และวัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดอุณหภูมิต่ำ) มีแนวโน้มต่ำสุดคือ อุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรของสารทำความเย็น 44°C (1.2 MPa) และอุณหภูมิกลิ้นตัวของสารทำความเย็น 90°C (3.3 MPa) เมื่อกำหนดอุณหภูมิระเหยของสารทำความเย็น -6°C (250 kPa)

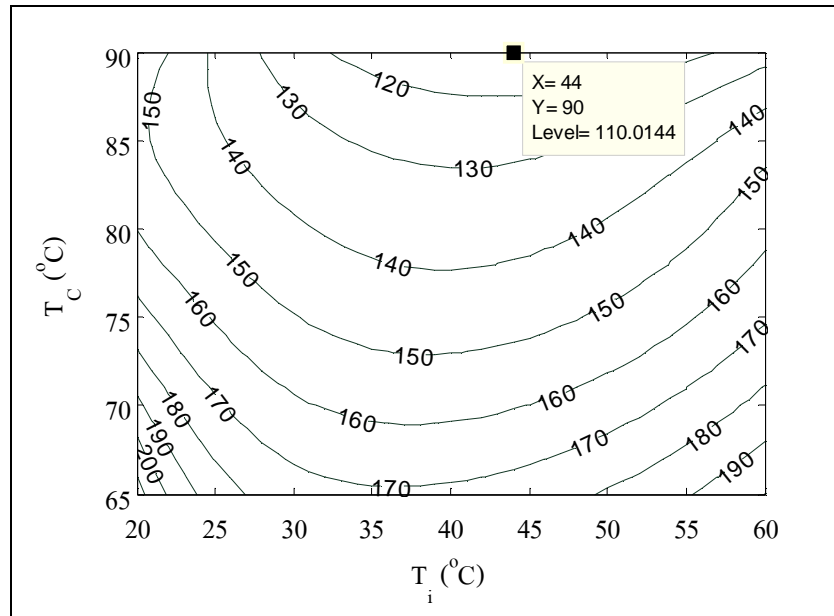
สถานะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็นที่ดีที่สุดของตัวอย่างข้อกำหนดจากกราฟแสดงความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันกับอุณหภูมิกลิ้นตัวของสารทำความเย็นที่มีอุณหภูมิต่ำ

ระหว่างกลางวัฏจักรของสารทำความเย็น 44°C รูปที่ 5.3 พบว่า ความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันมีแนวโน้มลดลงตามอุณหภูมิกลั่นตัวของสารทำความเย็นที่สูงขึ้น เนื่องจากความต้องการพลังงานของขดลวดความร้อนมีอิทธิพลต่อความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันสูงสุดในช่วงอุณหภูมิกลั่นตัวของสารทำความเย็น $65^{\circ}\text{C} - 80^{\circ}\text{C}$ และความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันมีแนวโน้มต่ำสุดในช่วงอุณหภูมิกลั่นตัวของสารทำความเย็น $80^{\circ}\text{C} - 90^{\circ}\text{C}$ โดยที่ความต้องการพลังงานของวัฏจักรความดันต่ำและความต้องการพลังงานของวัฏจักรความดันสูงมีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ ในขณะที่ความต้องการพลังงานของขดลวดความร้อนมีแนวโน้มลดลงต่ำกว่าความต้องการพลังงานของวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอน

ตารางที่ 5.4 ตัวอย่างข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัย

| ลำดับที่ | ตัวอย่างข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัย | ค่าที่พิจารณา |
|----------|---|---------------|
| 1 | ปริมาณการรับน้ำนมดิบ ต้น/วัน | 1 |
| 2 | กำลังการผลิต ต้น/วัน | 2 |
| 3 | สัดส่วนโดยปริมาตรการรับน้ำนมกลุ่ม A และน้ำนมกลุ่ม B (A:B) เปอร์เซ็นต์ | 100:0 |
| 4 | เวลาการผลิตของกระบวนการ A6 ชั่วโมง/วัน | 4 |
| 5 | เวลาการทำความเย็นกระบวนการ B2 ชั่วโมง | 2 |
| 6 | เวลาการผลิตทั้งหมด ชั่วโมง/วัน | 4 |
| 7 | อุณหภูมิระเหยของสารทำความเย็น $^{\circ}\text{C}$ | -6 |

สภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็นที่มีอุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรของสารทำความเย็นต่ำกว่าอุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรของสารทำความเย็นที่ดีที่สุดของตัวอย่างข้อกำหนดการศึกษาวิจัย จากกราฟแสดงความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันกับอุณหภูมิกลั่นตัวของสารทำความเย็นที่อุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรของสารทำความเย็น 20°C รูปที่ 5.4 พบว่า ความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันมีแนวโน้มลดลงตามอุณหภูมิกลั่นตัวของสารทำความเย็นที่สูงขึ้น เนื่องจากความต้องการพลังงานของขดลวดความร้อนมีอิทธิพลต่อความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันสูงสุดในช่วงอุณหภูมิกลั่นตัวของสารทำความเย็น $65^{\circ}\text{C} - 80^{\circ}\text{C}$ โดยความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันมีแนวโน้มต่ำสุดที่อุณหภูมิกลั่นตัวของสารทำความเย็นประมาณ 80°C และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอีกครั้งในช่วงอุณหภูมิกลั่นตัวของสารทำความเย็น $80^{\circ}\text{C} - 90^{\circ}\text{C}$ เนื่องจากความต้องการพลังงานของวัฏจักรความดันสูงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งมีอิทธิพลต่อความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันที่เพิ่มขึ้นในช่วงดังกล่าว

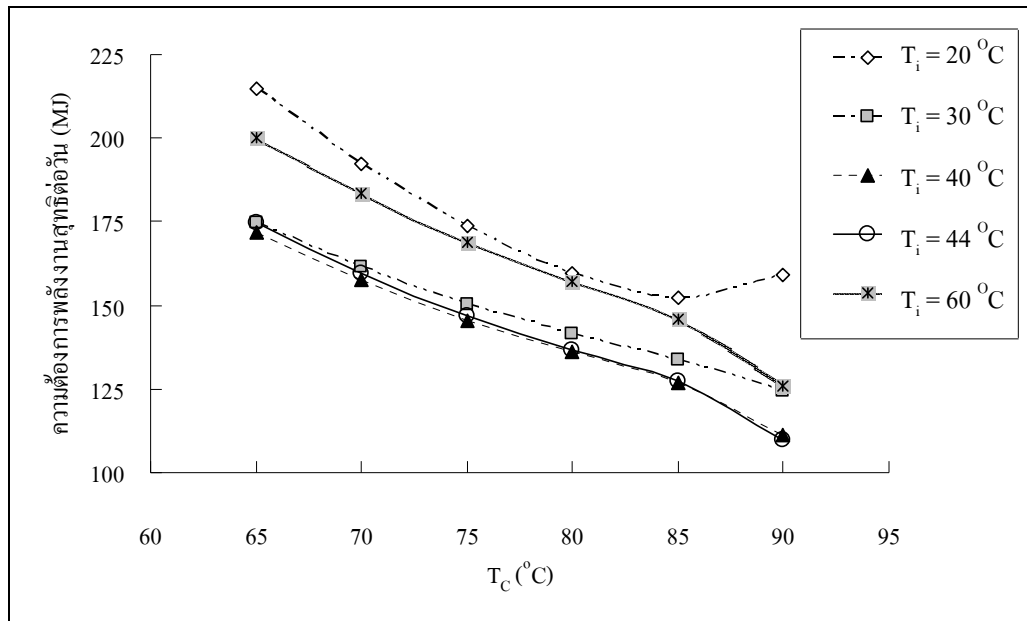


รูปที่ 5.1 กราฟแสดงเส้นความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันคงที่
กับอุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรและอุณหภูมิก้นตัว

ความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันโดยรวมที่มีอุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรของสารทำความเย็น 20°C มีแนวโน้มที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันที่มีสถานะทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่ดีที่สุด เนื่องจากอิทธิพลของความต้องการพลังงานของวัฏจักร ความดันสูงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงอุณหภูมิก้นตัวของสารทำความเย็นสูง

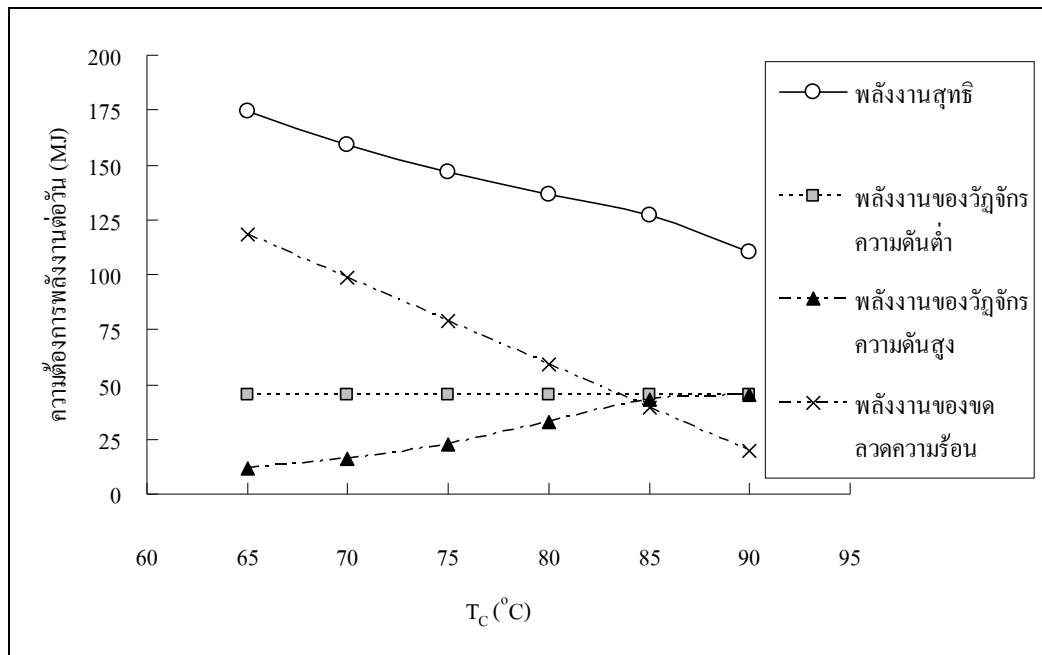
สถานะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็นที่มีอุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรของสารทำความเย็นสูงกว่าอุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรของสารทำความเย็นที่ดีที่สุดของตัวอย่าง ข้อมาหนดสำหรับการศึกษาวิจัย จากกราฟแสดงความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันกับอุณหภูมิก้นตัวของสารทำความเย็นที่อุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรของสารทำความเย็น 60°C รูปที่ 5.5 พบว่าความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันมีแนวโน้มลดลงตามอุณหภูมิก้นตัวที่สูงขึ้น เนื่องจากความต้องการพลังงานของขดลวดความร้อนมีอิทธิพลต่อความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันสูงสุดที่ช่วงอุณหภูมิก้นตัวของสารทำความเย็น $65^{\circ}\text{C} - 75^{\circ}\text{C}$ และความต้องการพลังงานของวัฏจักรความดันต่ำมีอิทธิพลต่อความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันสูงสุดที่ช่วงอุณหภูมิก้นตัวของสารทำความเย็น $75^{\circ}\text{C} - 90^{\circ}\text{C}$ โดยความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันมีแนวโน้มต่ำสุดที่อุณหภูมิก้นตัวของสารทำความเย็นประมาณ 90°C

ความต้องการพลังงานสุทธิต่อวัน โดยรวมที่มีอุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรของสารทำความเย็น 60°C มีแนวโน้มที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันที่มีสภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่ดีที่สุด เนื่องจากอิทธิพลของความต้องการพลังงานของวัฏจักรความดันต่ำที่มีแนวโน้มสูงคงที่

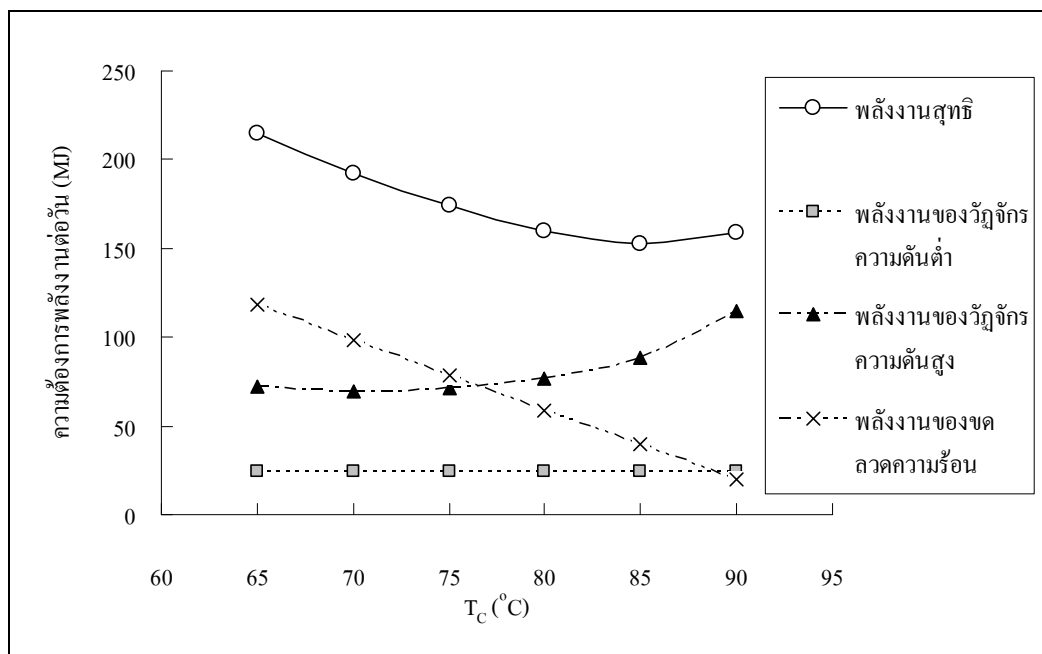


รูปที่ 5.2 กราฟแสดงความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันกับอุณหภูมิกลั่นตัวที่อุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรระหว่าง 20°C - 60°C

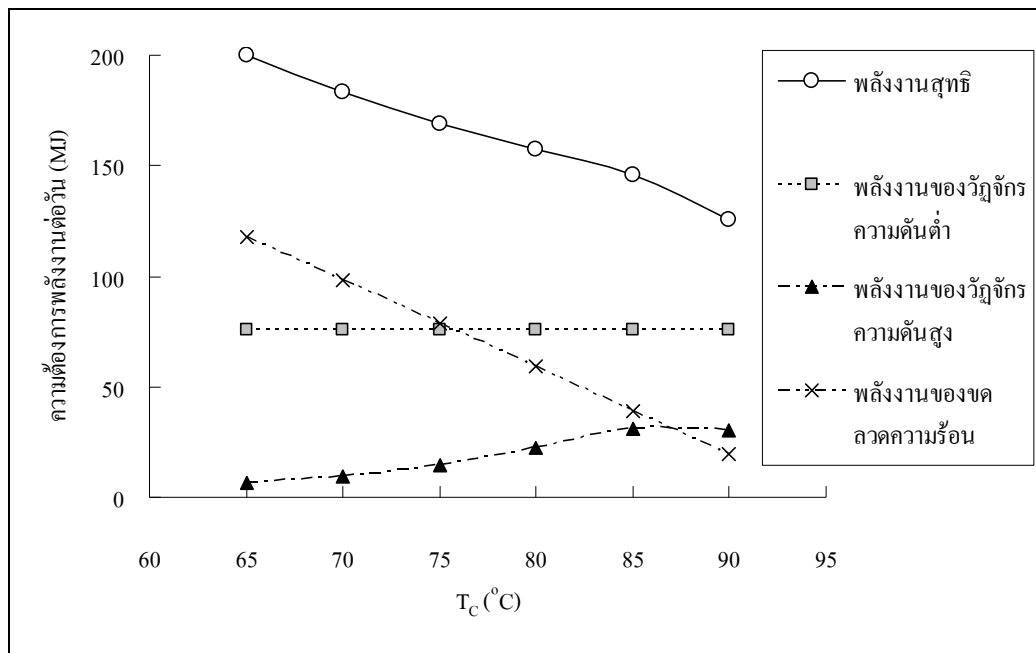
สภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็นที่ดีที่สุดของวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอน (วัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอนโดยอาศัยเฟลชแทงค์และวัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดอุดมคติ) มีแนวโน้มของช่วงอุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรของสารทำความเย็นเป็นค่าเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิระเหยของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันต่ำและอุณหภูมิกลั่นตัวของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันสูง เนื่องจากการอัดไอช่วงอุณหภูมิกว้างมากทำให้กระบวนการอัดมีความต้องการงานในการอัดต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็นมาก การทำอุณหภูมิกลั่นตัวของสารทำความเย็นช่วงอุณหภูมิต่ำทำให้ปัจจัยความต้องการพลังงานของขดลวดความร้อนมีอิทธิพลต่อความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันและกระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรซ์มีแนวโน้มความต้องการพลังงานความร้อนจากอุณหภูมิกลั่นตัวของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันสูงเพื่อทดแทนพลังงานความร้อนจากขดลวดความร้อนทั้งหมด



รูปที่ 5.3 กราฟแสดงความต้องการพลังงานต่อวันกับอุณหภูมิ
กลั่นตัวที่อุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักร 44°C



รูปที่ 5.4 กราฟแสดงความต้องการพลังงานต่อวันกับอุณหภูมิ
กลั่นตัวที่อุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักร 20°C



รูปที่ 5.5 กราฟแสดงความต้องการพลังงานต่อวันกับอุณหภูมิ
กลั่นตัวที่อุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักร 60°C

5.2.4 วัฏจักรอัดไอแบบแอสเคดจริง

วัฏจักรอัดไอแบบแอสเคดจริงมีแนวโน้มของความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับวัฏจักรอัดไอแบบแอสเคดอุดมคติ เนื่องจากอิทธิพลของ $\Delta T'$ และ $\Delta T''$ ที่เกิดขึ้นจากประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างกลางวัฏจักร โดยสภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็นที่ดีที่สุดของวัฏจักรอัดไอแบบแอสเคดจริงควรมีสภาวะใกล้เคียงกับสภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็นที่ดีที่สุดของวัฏจักรอัดไอแบบแอสเคดอุดมคติคืออุณหภูมิ $T_i + \Delta T'$ และอุณหภูมิ $T_i - \Delta T''$ เข้าใกล้อุณหภูมิ T_i

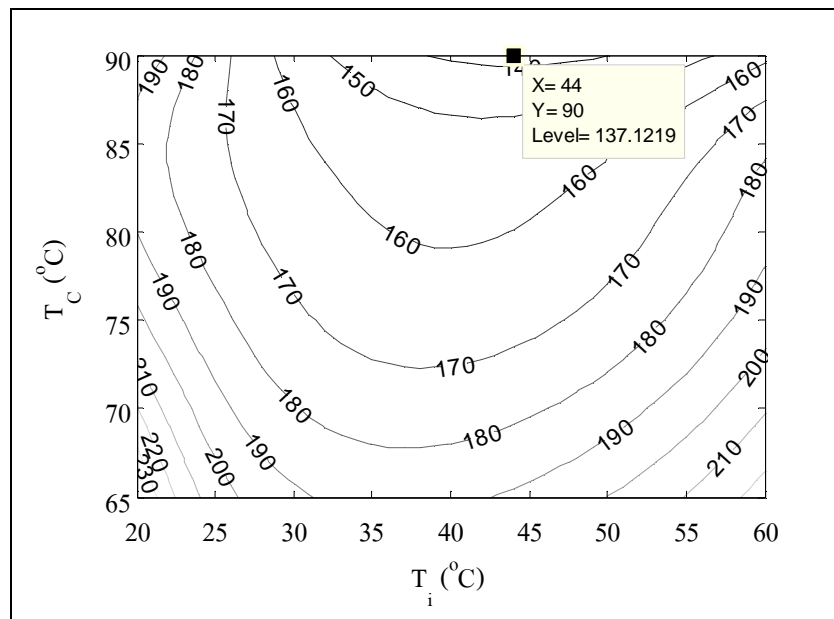
ความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันของวัฏจักรอัดไอแบบแอสเคดจริงจะลดลงตามอิทธิพลของ $\Delta T'$ และ $\Delta T''$ ซึ่งจำเป็นต้องพิจารณาค่าลงทุนเริ่มต้นที่เหมาะสมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างกลางวัฏจักรสำหรับประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนที่เพิ่มขึ้นร่วมกับความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันของวัฏจักรอัดไอแบบแอสเคดจริงที่ลดลงตามอิทธิพลของ $\Delta T'$ และ $\Delta T''$

5.2.5 อิทธิพลของกระบวนการอัดจริง

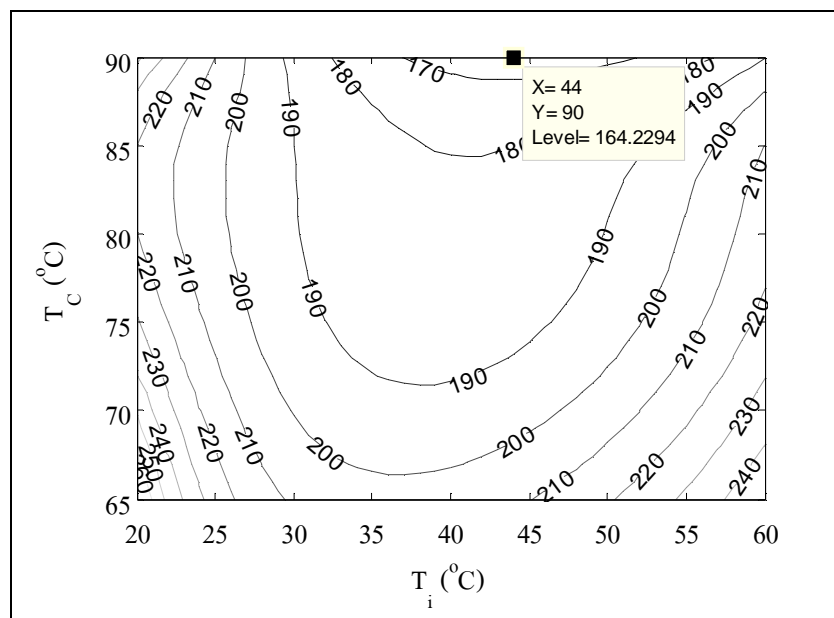
จากกราฟแสดงเส้นความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันคงที่กับอุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรของสารทำความเย็นและอุณหภูมิกลั่นตัวของสารทำความเย็น สำหรับกระบวนการอัดจริงหรือกระบวนการอัดแบบไม่เป็นไอเซนโทรปิกที่มีประสิทธิภาพการอัดแบบไอเซนโทรปิก (Isentropic Efficiency $\eta_{isentropic}$) เท่ากับ 76.92% และ 62.50% จากตัวอย่างกรณีศึกษา รูปที่ 5.6 รูปที่ 5.7 และรูปที่ 5.8 พบว่ากระบวนการอัดจริงมีแนวโน้มความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกระบวนการอัดแบบไอเซนโทรปิก โดยสภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็นที่ดีที่สุดสำหรับกระบวนการอัดจริงมีแนวโน้มสอดคล้องกับสภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็นที่ดีที่สุดสำหรับกระบวนการอัดแบบไอเซนโทรปิก เนื่องจากขดลวดความร้อนยังคงเป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันมากกว่าเมื่อเทียบกับกระบวนการอัดจริง

กระบวนการอัดจริงหรือกระบวนการอัดแบบไม่เป็นไอเซนโทรปิกมีอิทธิพลต่อความต้องการพลังงานของวัฏจักรความดันต่ำและความต้องการพลังงานวัฏจักรความดันสูงที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการอัดแบบไอเซนโทรปิก เนื่องจากปัจจัยของการย้อนกลับไม่ได้ (Irreversibilities) ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการอัดคือ เกิดความเสียดทานและความร้อนสูญเสียสู่สิ่งแวดล้อม และเป็นกระบวนการอัดและขยายตัวอย่างรวดเร็ว (Fast Compression and Fast Expansion) ทำให้สภาวะของสารทำความเย็นไม่เป็นสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Non-Quasi Thermodynamics Equilibrium) ในระหว่างกระบวนการอัด ด้วยปัจจัยย้อนกลับไม่ได้ดังกล่าวทำให้ผลต่างของเอนโทรปี (Δs) ในกระบวนการอัดมีค่ามากกว่าศูนย์ ดังนั้นจึงทำให้เส้นกระบวนการอัดจริงมีแนวโน้ม $s_2 > s_1$ ซึ่งจะเบี่ยงเบนจากกระบวนการอัดแบบไอเซนโทรปิก ($s_2 = s_1$) ดังแสดงรูปที่ 5.9

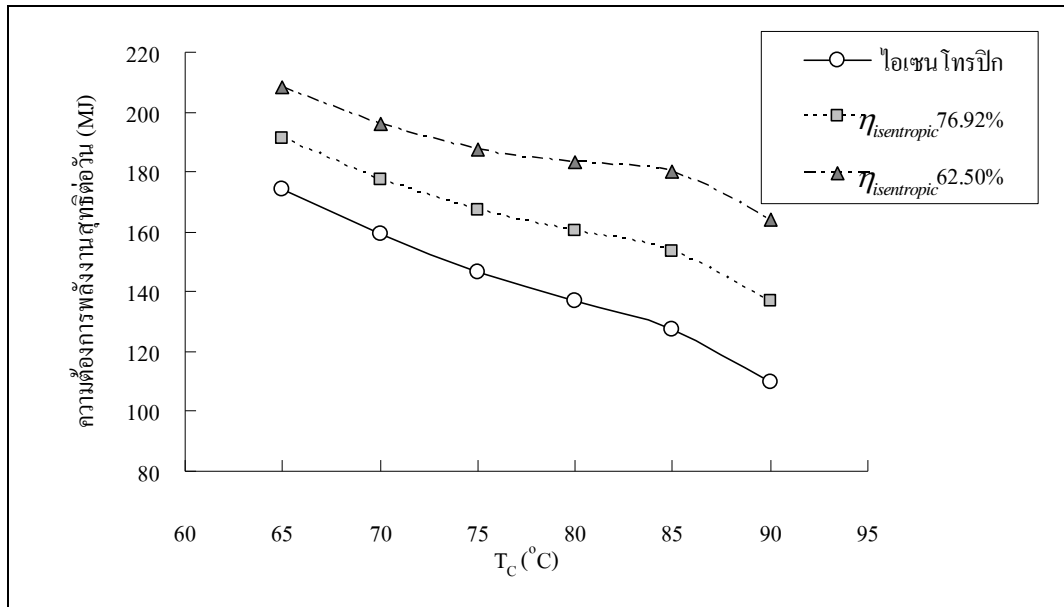
จากรูปที่ 5.9 พบว่า ความต้องการพลังงานต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็นของกระบวนการอัดจริง $\Delta h_{s_2 > s_1}$ มากกว่าความต้องการพลังงานต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็นของกระบวนการอัดแบบไอเซนโทรปิก $\Delta h_{s_2 = s_1}$ ซึ่งการศึกษาวิจัยนี้ได้พิจารณาประสิทธิภาพการอัดแบบไอเซนโทรปิกเท่ากับ 76.92% และ 62.50% ตามลำดับ จากผลการศึกษาวิจัยพบว่า สภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่ดีที่สุดของกระบวนการอัดจริงดังกล่าวมีความสอดคล้องกับสภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่ดีที่สุดของกระบวนการอัดแบบไอเซนโทรปิก



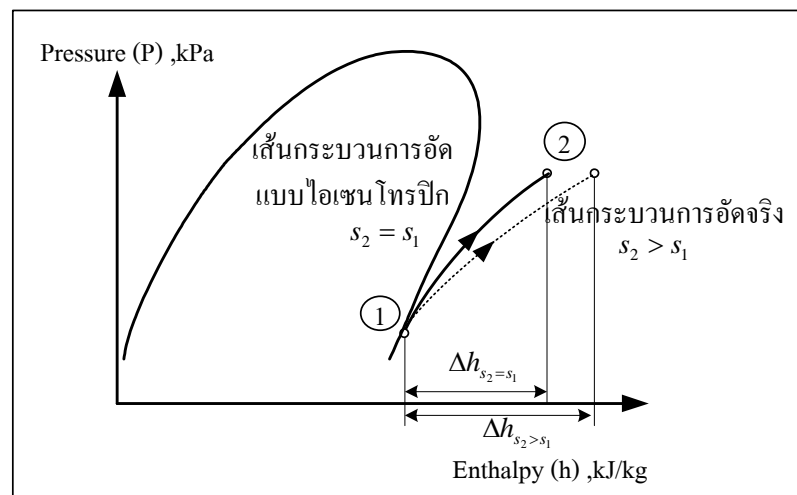
รูปที่ 5.6 กระบวนการอัดจริงที่มีประสิทธิภาพการอัด
แบบไอเซนโทรปิกเท่ากับ 76.92%



รูปที่ 5.7 กระบวนการอัดจริงที่มีประสิทธิภาพการอัด
แบบไอเซนโทรปิกเท่ากับ 62.50%



รูปที่ 5.8 กราฟแสดงความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันของกระบวนการอัดแบบไอเซนโทรปิกและกระบวนการอัดจริง



รูปที่ 5.9 เส้นกระบวนการอัดแบบไอเซนโทรปิกและเส้นกระบวนการอัดจริง

5.2.6 ขีดจำกัดการอัดของเครื่องอัดไอ

การทำความร้อนเพื่อให้อุณหภูมิแน่นสูงสุด โดยทดแทนความต้องการพลังงาน ความร้อนจากขดลวดความร้อนทั้งหมดด้วยกระบวนการคายความร้อนในวัฏจักรความดันสูงเพื่อการประหยัดพลังงานนั้นไม่สามารถทำได้ เนื่องจากขีดความสามารถในการอัดของเครื่องอัดไอในปัจจุบันทำให้มีขีดจำกัดของช่วงอุณหภูมิก่อนตัวของสารทำความเย็น การศึกษาวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาวงอุณหภูมิก่อนตัวของสารทำความเย็นระหว่าง $70^{\circ}\text{C} - 90^{\circ}\text{C}$ ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็นที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษา โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิตั้งแต่กลางวัฏจักรของสารทำความเย็นและอุณหภูมิก่อนตัวของสารทำความเย็น แสดงสมการในรูปแบบของโพลีโนเมียลดังนี้

$$T_E = -6^{\circ}\text{C} : \quad T_i = 0.01T_C^2 - 1.3T_C + 80 \quad (5.1)$$

$$T_E = -4^{\circ}\text{C} : \quad T_i = 0.015T_C^2 - 2.05T_C + 108 \quad (5.2)$$

$$T_E = -2^{\circ}\text{C} : \quad T_i = 0.01T_C^2 - 1.3T_C + 81 \quad (5.3)$$

เมื่อพิจารณาช่วงอุณหภูมิก่อนตัวของสารทำความเย็น $70^{\circ}\text{C} \leq T_C \leq 90^{\circ}\text{C}$

5.2.7 เปรียบเทียบความต้องการพลังงานสุทธิระหว่างวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอนและวัฏจักรอัดไอแบบขั้นตอนเดียว

จากข้อกำหนดของวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอน ตารางที่ 5.5 ซึ่งเป็นระบบที่มีสถานะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็นที่ดีที่สุด ข้อกำหนดของวัฏจักรอัดไอแบบขั้นตอนเดียว 1 ตารางที่ 5.6 ซึ่งเป็นระบบที่ไม่ได้นำความร้อนจากวัฏจักรอัดไอมาใช้ประโยชน์ในกระบวนการทำความร้อน และข้อกำหนดของวัฏจักรอัดไอแบบขั้นตอนเดียว 2 ตารางที่ 5.7 ซึ่งเป็นระบบที่นำความร้อนจากวัฏจักรอัดไอมาใช้ประโยชน์ในกระบวนการทำความร้อน และมีเงื่อนไขและข้อกำหนดของกระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรซ์ดังตัวอย่างข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัย ตารางที่ 5.4

เมื่อเปรียบเทียบความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันระหว่างวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอน วัฏจักรอัดไอแบบขั้นตอนเดียว 1 และวัฏจักรอัดไอแบบขั้นตอนเดียว 2 รูปที่ 5.9 พบว่า วัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอนมีแนวโน้มความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันต่ำสุด เนื่องจากการอัดไอช่วงอุณหภูมิกว้างด้วยการอัดไอแบบสองขั้นตอน ทำให้กระบวนการอัดมีแนวโน้มความต้องการพลังงานใน

การอัดต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็นลดลง และการนำความร้อนจากวัฏจักรความดันสูงมาใช้ประโยชน์ในกระบวนการทำความร้อนทำให้แนวโน้มความต้องการพลังงานของขดลวดความร้อนลดลง และวัฏจักรอัดไอแบบขั้นตอนเดียว 2 มีแนวโน้มความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันที่ลดลงเมื่อเทียบกับวัฏจักรอัดไอแบบขั้นตอนเดียว 1 เนื่องจากวัฏจักรอัดไอแบบขั้นตอนเดียว 2 นำความร้อนจากวัฏจักรอัดไอมาใช้ประโยชน์ในกระบวนการทำความร้อนเป็นการลดความต้องการพลังงานของขดลวดความร้อน

จากรูปที่ 5.10 ความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันของวัฏจักรอัดไอแบบขั้นตอนเดียว 1 มีแนวโน้มความต้องการพลังงานเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิกลั่นตัวของสารทำความเย็นที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากแนวโน้มความต้องการพลังงานของวัฏจักรอัดไอเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิกลั่นตัวของสารทำความเย็นที่เพิ่มขึ้น และแนวโน้มความต้องการพลังงานของขดลวดความร้อนสูงคงที่ โดยความต้องการพลังงานของขดลวดความร้อนมีอิทธิพลสูงสุดต่อความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันของวัฏจักรอัดไอแบบขั้นตอนเดียว 1 เมื่อเทียบกับอิทธิพลของความต้องการพลังงานของวัฏจักรอัดไอ เนื่องจากอุณหภูมิกลั่นตัวมีศักยภาพในการทำความร้อนค่อนข้างต่ำจึงไม่สามารถนำความร้อนจากวัฏจักรอัดไอมาใช้ประโยชน์ในกระบวนการทำความร้อนได้ จึงทำให้ความต้องการพลังงานของขดลวดความร้อนมีอิทธิพลสูงสุด

ตารางที่ 5.5 ข้อกำหนดของวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอน

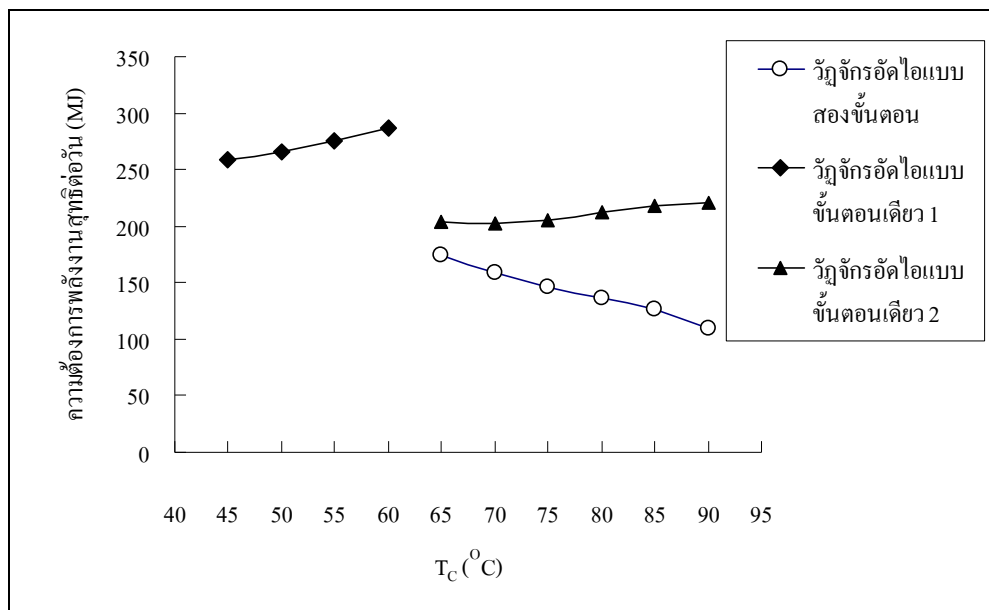
| ลำดับที่ | ข้อกำหนดของวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอน | |
|----------|---|-----------------------|
| 1 | อุณหภูมิระเหยของสารทำความเย็น °C | -6 |
| 2 | อุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรของสารทำความเย็น °C | 44 |
| 3 | ช่วงอุณหภูมิกลั่นตัวของสารทำความเย็น °C | 65 - 90 |
| 4 | อุณหภูมินมเข้ากระบวนการ A2 และ B3 °C | $T_{m,ph} = T_C - 10$ |

ตารางที่ 5.6 ข้อกำหนดของวัฏจักรอัดไอแบบขั้นตอนเดียว 1

| ลำดับที่ | ข้อกำหนดของวัฏจักรอัดไอแบบขั้นตอนเดียว 1 | |
|----------|--|---------|
| 1 | อุณหภูมิระเหยของสารทำความเย็น °C | -6 |
| 2 | ช่วงอุณหภูมิกลั่นตัวของสารทำความเย็น °C | 45 - 60 |
| 3 | อุณหภูมินมเข้ากระบวนการ A2 และ B3 °C | 35 |

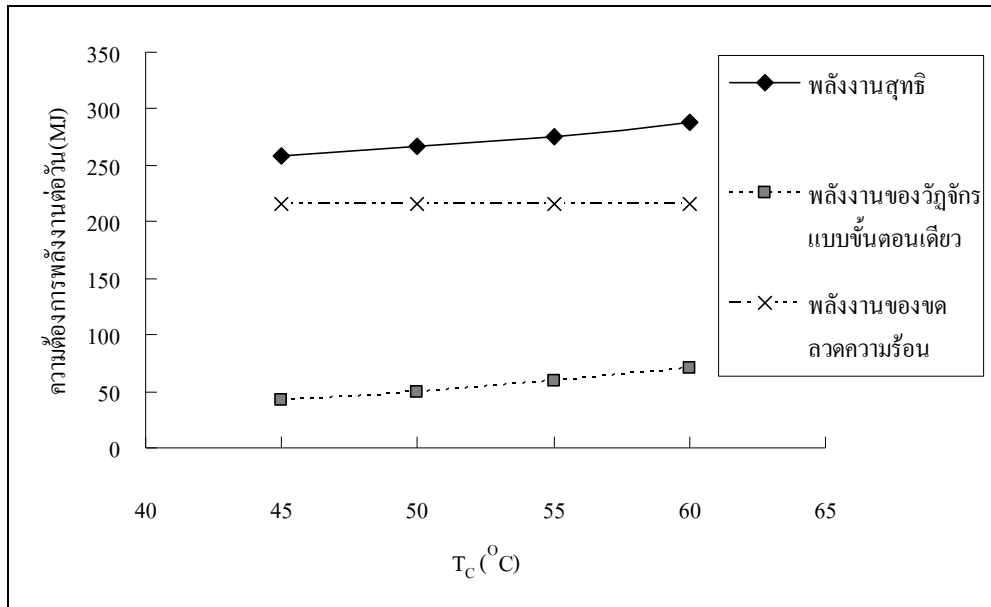
ตารางที่ 5.7 ข้อกำหนดของวัฏจักรอัดไอแบบขั้นตอนเดียว 2

| ลำดับที่ | ข้อกำหนดของวัฏจักรอัดไอแบบขั้นตอนเดียว 2 | |
|----------|--|-----------------------|
| 1 | อุณหภูมิระเหยของสารทำความเย็น °C | -6 |
| 2 | ช่วงอุณหภูมิกลิ้นตัวของสารทำความเย็น °C | 65 - 90 |
| 3 | อุณหภูมินมเข้ากระบวนการ A2 และ B3 °C | $T_{m,ph} = T_c - 10$ |

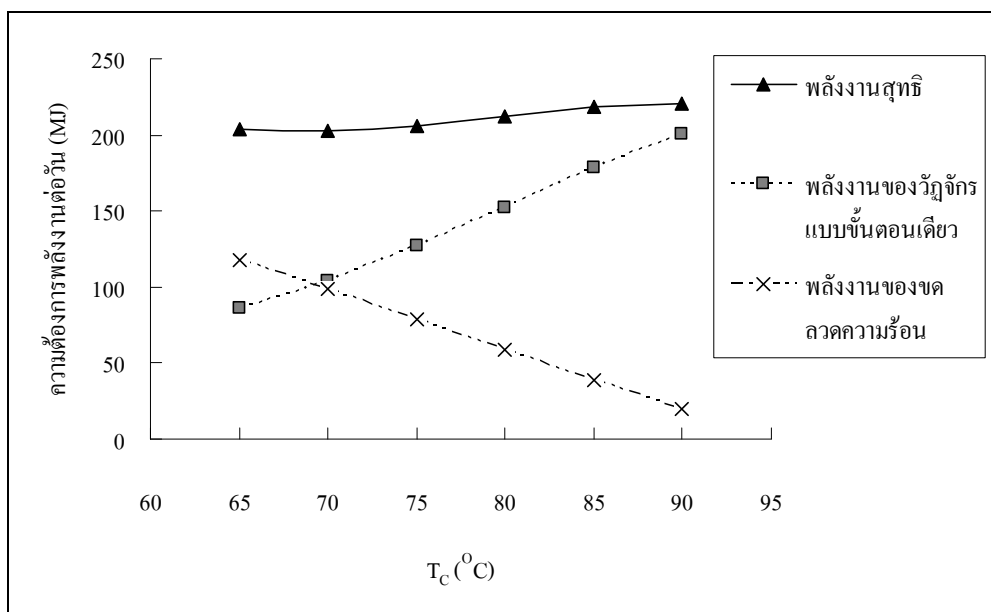


รูปที่ 5.10 กราฟเปรียบเทียบความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันระหว่างวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอน และวัฏจักรอัดไอแบบขั้นตอนเดียว

จากรูปที่ 5.11 ความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันของวัฏจักรอัดไอแบบขั้นตอนเดียว 2 มีแนวโน้มความต้องการพลังงานเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิกลิ้นตัวของสารทำความเย็นที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากแนวโน้มความต้องการพลังงานของวัฏจักรอัดไอเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิกลิ้นตัวของสารทำความเย็นที่เพิ่มขึ้น และแนวโน้มความต้องการพลังงานของขดลวดความร้อนลดลงตามอุณหภูมิกลิ้นตัวของสารทำความเย็นที่เพิ่มขึ้น โดยความต้องการพลังงานของขดลวดความร้อนมีอิทธิพลต่อความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันของวัฏจักรอัดไอแบบขั้นตอนเดียว 2 ใกล้เคียงกับอิทธิพลของความต้องการพลังงานของวัฏจักรอัดไอ เนื่องจากการอัดไอนี้มีอุณหภูมิกลิ้นตัวสูงทำให้มีศักยภาพในการทำความร้อน จึงสามารถนำความร้อนจากวัฏจักรอัดไอมาใช้ประโยชน์ในกระบวนการทำความร้อนได้ เพื่อประหยัดพลังงานของขดลวดความร้อน



รูปที่ 5.11 ความต้องการพลังงานต่อวันของวัฏจักรอัดไอแบบขั้นตอนเดียว 1



รูปที่ 5.12 ความต้องการพลังงานต่อวันของวัฏจักรอัดไอแบบขั้นตอนเดียว 2

อย่างไรก็ตามวัฏจักรอัดไอแบบขั้นตอนเดียว 2 มีแนวโน้มความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอน เนื่องจากการอัดไอที่มีช่วงอุณหภูมิกว้างด้วยการอัดแบบขั้นตอนเดียว ทำให้ความต้องการพลังงานในการอัดต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็นมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการอัดแบบสองขั้นตอน

5.2.8 การวิเคราะห์เชิงทฤษฎีสำหรับความต้องการพลังงานสุทธิในรูปแบบทั่วไประหว่างระบบอัดไอแบบสองขั้นตอนและระบบอัดไอแบบขั้นตอนเดียว

เมื่อพิจารณาความต้องการพลังงานสุทธิภายใต้สมมติฐานว่าอัตราการไหลโดยมวลของนมในกระบวนการทำความร้อนและกระบวนการทำความเย็นเท่ากัน พบว่าสามารถแสดงการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีสำหรับความต้องการกำลังงานสุทธิในกระบวนการผลิตเดียวกัน ซึ่งความต้องการกำลังงานสุทธิระหว่างการอัดไอทั้งสองระบบสามารถแสดงในรูปแบบทั่วไปได้ดังนี้

1. ความต้องการกำลังงานสุทธิของระบบอัดไอแบบสองขั้นตอน จากการวิเคราะห์สมดุลพลังงานรูปที่ 5.13 พบว่าความต้องการกำลังงานสุทธิของระบบอัดไอแบบสองขั้นตอนประกอบด้วยความต้องการกำลังงานของวัฏจักรความดันต่ำ ความต้องการกำลังงานของวัฏจักรความดันสูงและความต้องการกำลังงานของขดลวดความร้อนแสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\dot{W}_{net,TS} &= \dot{W}_{LS,TS} + \dot{W}_{HS} + \dot{W}'_{Heater} \\ &= (\dot{Q}_{C,TS} - \dot{Q}_E) + \dot{W}'_{Heater} \\ &= \dot{m}_H q_{C,TS} - \dot{m}_m C_p \Delta T_{cold} + \dot{m}_m C_p \Delta T'_{hot}\end{aligned}\quad (5.4)$$

จากสมการที่ (3.8) แทนในสมการที่ (5.4) จะได้

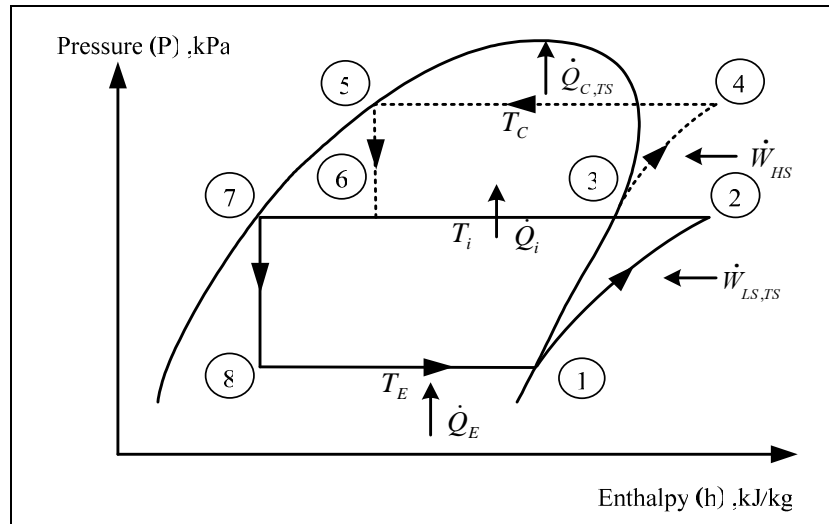
$$\begin{aligned}\dot{W}_{net,TS} &= \left(\frac{\dot{m}_m C_p \Delta T_{cold}}{q_{E,TS}} \right) \left(\frac{h_7 - h_2}{h_3 - h_6} \right) q_{C,TS} - \dot{m}_m C_p \Delta T_{cold} + \dot{m}_m C_p \Delta T'_{hot} \\ &= \dot{m}_m C_p \cdot \left\{ \left[\Delta T_{cold} \left(\frac{h_7 - h_2}{h_3 - h_6} \right) \cdot \left(\frac{q_{C,TS}}{q_{E,TS}} - 1 \right) \right] + \Delta T'_{hot} \right\}\end{aligned}\quad (5.5)$$

เมื่อจัดรูปสมการที่ (5.5) ใหม่จะได้

$$\frac{\dot{W}_{net,TS}}{\dot{m}_m C_p} = \left[\Delta T_{cold} \left(\frac{h_7 - h_2}{h_3 - h_6} \right) \cdot \left(\frac{q_{C,TS}}{q_{E,TS}} - 1 \right) \right] + \Delta T'_{hot}\quad (5.6)$$

$$\text{เมื่อ } \Delta T_{cold} = T_{m,pc} - T_{m,out}$$

$$\text{และ } \Delta T'_{hot} = T_{m,hot} - T'_{m,ph}$$

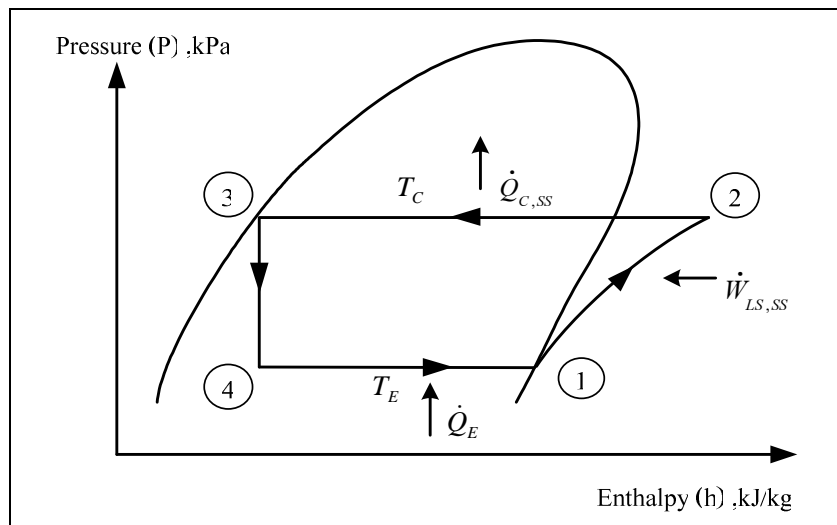


รูปที่ 5.13 ระบบอัดไอแบบสองขั้นตอน

2. ความต้องการกำลังงานสุทธิของระบบอัดไอแบบขั้นตอนเดียว จากการวิเคราะห์สมดุลพลังงานรูปที่ 5.14 และจากสมการที่ (3.8) พบว่าความต้องการกำลังงานสุทธิของระบบอัดไอแบบขั้นตอนเดียว ประกอบด้วยความต้องการกำลังงานของวัฏจักรอัดไอแบบขั้นตอนเดียว และความต้องการกำลังงานของขดลวดความร้อนแฝงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{W}_{net,SS} &= \dot{W}_{SS} + \dot{W}_{Heater}'' \\ &= (\dot{Q}_{C,SS} - \dot{Q}_E) + \dot{W}_{Heater}'' \\ &= \left(\frac{\dot{m}_m C_p \Delta T_{cold}}{q_{E,SS}} \right) \cdot q_{C,SS} - \dot{m}_m C_p \Delta T_{cold} + \dot{m}_m C_p \Delta T_{hot}'' \\ &= \dot{m}_m C_p \cdot \left\{ \left[\Delta T_{cold} \left(\frac{q_{C,SS}}{q_{E,SS}} - 1 \right) \right] + \Delta T_{hot}'' \right\} \end{aligned} \quad (5.7)$$

จากสมการที่ (5.7) จัดรูปใหม่จะได้



รูปที่ 5.14 ระบบอัดไอแบบขั้นตอนเดียว

$$\frac{\dot{W}_{net,SS}}{\dot{m}_m C_p} = \left[\Delta T_{cold} \left(\frac{q_{C,SS}}{q_{E,SS}} - 1 \right) \right] + \Delta T_{hot}'' \quad (5.8)$$

เมื่อ $\Delta T_{hot}'' = T_{m,hot} - T_{m,ph}''$

5.2.9 สัดส่วนความต้องการพลังงานสุทธิระหว่างระบบอัดไอแบบสองขั้นตอนและระบบอัดไอแบบขั้นตอนเดียว

การเปรียบเทียบเชิงตัวแปรสำหรับความต้องการพลังงานสุทธิในรูปแบบของความต้องการกำลังงานสุทธินั้น สามารถแสดงในรูปของพารามิเตอร์สัดส่วนความต้องการพลังงานสุทธิ (Energy Consumption Ratio Φ) ระหว่างระบบอัดไอแบบสองขั้นตอนและระบบอัดไอแบบขั้นตอนเดียว ซึ่งเป็นสัดส่วนระหว่างสมการที่ (5.6) สมการที่ (5.8) แสดงได้ดังนี้

$$\Phi = \frac{\dot{W}_{net,TS}}{\dot{W}_{net,SS}} = \frac{\left[\Delta T_{cold} \left(\frac{h_7 - h_2}{h_3 - h_6} \cdot \frac{q_{C,TS}}{q_{E,TS}} - 1 \right) \right] + \Delta T_{hot}'}{\left[\Delta T_{cold} \left(\frac{q_{C,SS}}{q_{E,SS}} - 1 \right) \right] + \Delta T_{hot}''} \quad (5.9)$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ (5.9) จะพบว่า สัดส่วนความต้องการพลังงานสุทธิ Φ จะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์สองกลุ่มดังนี้

1. พารามิเตอร์ของอุณหภูมิขั้นต่ำ ได้แก่ ΔT_{cold} , $\Delta T'_{hot}$ และ $\Delta T''_{hot}$ ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดของกระบวนการทำความร้อนและกระบวนการทำความเย็นในภาคผนวก ก. เมื่อพิจารณาระบบอัดไอแบบสองขั้นตอนซึ่งทำความร้อนด้วยกระบวนการคายความร้อนเป็นหลักพบว่า การทำความร้อนจากขดลวดความร้อนจะน้อยกว่าเมื่อเทียบกับระบบอัดไอแบบขั้นตอนเดียวจึงทำให้ $\Delta T'_{hot} < \Delta T''_{hot}$

2. พารามิเตอร์ของสัดส่วนผลต่างของเอนทาลปีระหว่างกระบวนการของวัฏจักรความดันสูงและวัฏจักรความดันต่ำ $(h_7 - h_2)/(h_3 - h_6)$ และพารามิเตอร์สัดส่วนความร้อนต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็น ได้แก่ $(q_{C,TS} / q_{E,TS})$ และ $(q_{C,SS} / q_{E,SS})$ ซึ่งพารามิเตอร์กลุ่มนี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของสารทำความเย็นและช่วงอุณหภูมิของสารทำความเย็นที่ทำการศึกษาวิจัย

เมื่อพิจารณาช่วงอุณหภูมิของสารทำความเย็น R 134a ที่ทำการศึกษาวิจัยในหัวข้อที่ 3.1 ผลการศึกษาวิจัยโดยรวมมีแนวโน้มแสดงในรูปที่ 5.15 และรูปที่ 5.16 ดังนี้

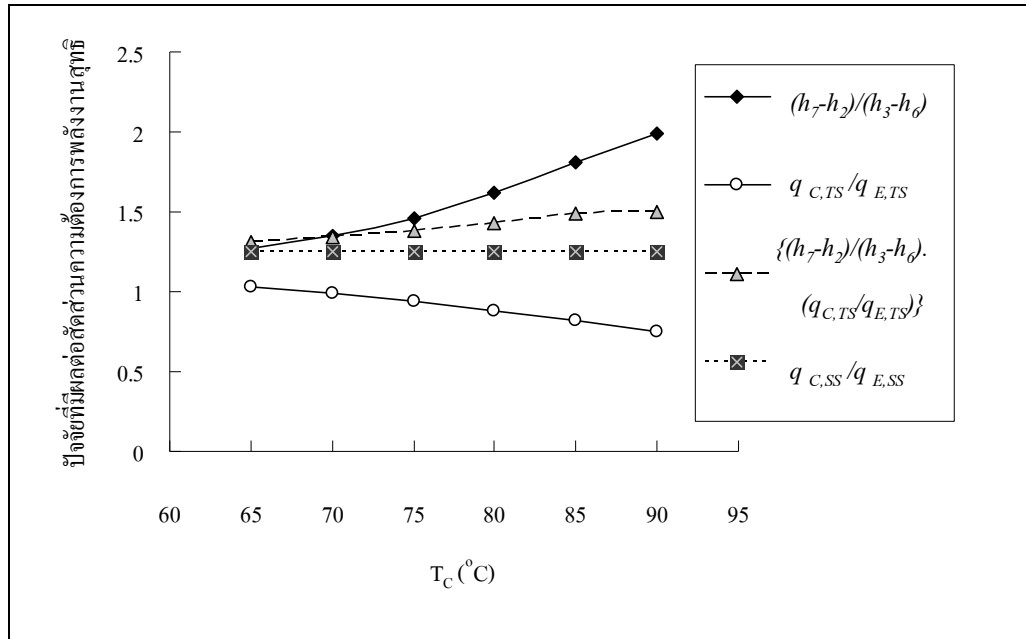
$$1. (h_7 - h_2)/(h_3 - h_6) > 1$$

$$2. (q_{C,TS} / q_{E,TS}) > 0$$

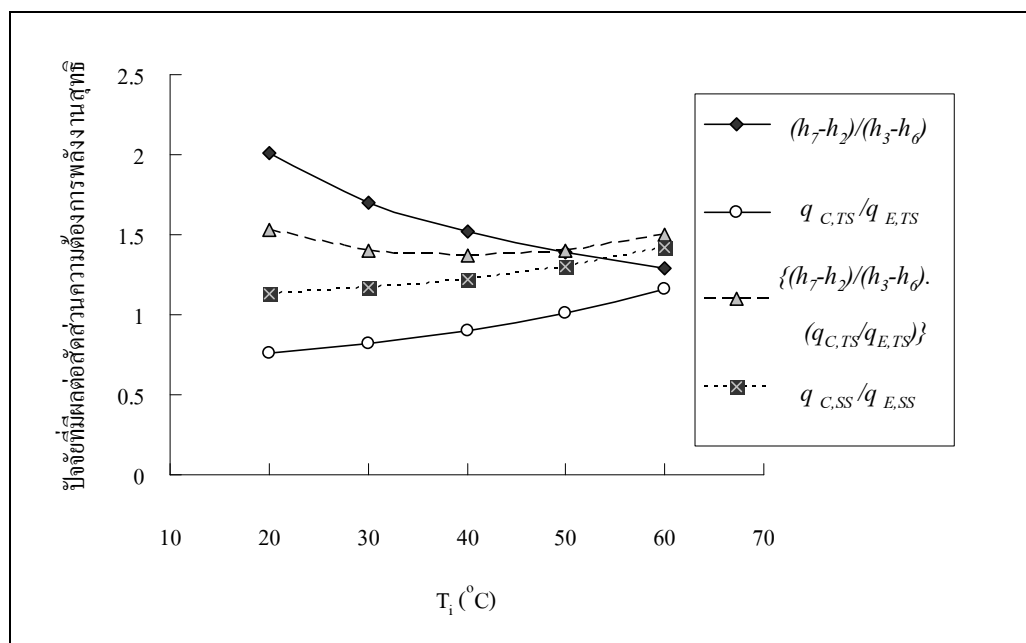
$$3. (q_{C,SS} / q_{E,SS}) > 1$$

4. ผลคูณของพารามิเตอร์ $(h_7 - h_2)/(h_3 - h_6) \cdot (q_{C,TS} / q_{E,TS})$ จะมากกว่า $(q_{C,SS} / q_{E,SS})$ ทำให้วัฏจักรอัดไอสองขั้นตอนมีความต้องการกำลังงานมากกว่าเมื่อเทียบกับวัฏจักรอัดไอแบบขั้นตอนเดียว

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาความต้องการกำลังงานสุทธิพบว่า ระบบอัดไอแบบสองขั้นตอนมีความต้องการกำลังงานสุทธิน้อยกว่าเมื่อเทียบกับระบบอัดไอแบบขั้นตอนเดียว ทำให้พารามิเตอร์สัดส่วนความต้องการพลังงานสุทธิในสมการที่ (5.9) $\Phi < 1$ ตลอดช่วงอุณหภูมิของสารทำความเย็น R 134a ที่ทำการศึกษาวิจัย แต่ถ้าพิจารณาช่วงอุณหภูมิของสารทำความเย็นที่อยู่นอกเหนือจากการศึกษาวิจัยนี้แล้ว อาจมีบางกรณีที่ทำให้พารามิเตอร์ $\Phi > 1$ กล่าวคือ ระบบอัดไอแบบสองขั้นตอนอาจมีความต้องการกำลังงานสุทธิที่มากกว่าเมื่อเทียบกับระบบอัดไอแบบขั้นตอนเดียว



รูปที่ 5.15 แนวโน้มกลุ่มพารามิเตอร์สัดส่วนความต้องการพลังงานสุทธิกับอุณหภูมิกลั่นตัว



รูปที่ 5.16 แนวโน้มกลุ่มพารามิเตอร์สัดส่วนความต้องการพลังงานสุทธิกับอุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักร

5.3 สรุปผลการศึกษาวิจัย

จากผลการศึกษาวิจัยนี้ แสดงให้เห็นว่าในกระบวนการผลิตควรจำกัดน้ำนมกลุ่ม B ให้น้อยที่สุด และรับน้ำนมกลุ่ม A เข้าสู่กระบวนการผลิตให้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เนื่องจากต้องการลดภาระการทำความเย็นในกระบวนการเก็บรักษา (กระบวนการ B2)

สถานะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็นที่ดีที่สุดและอัตราการไหลโดยมวลของสารทำความเย็นที่ดีที่สุด สามารถสรุปได้ดังนี้คือ

1. อุณหภูมิระเหยของสารทำความเย็นที่ดีที่สุดมีแนวโน้มเข้าใกล้อุณหภูมิขั้นต่ำสุด เนื่องจากกระบวนการทำความเย็นต้องการความร้อนต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็น q_E จากกระบวนการรับความร้อนมากที่สุดที่สามารถทำได้เพื่อการประหยัดพลังงาน

2. อุณหภูมิกลั่นตัวของสารทำความเย็นที่ดีที่สุดมีแนวโน้มเข้าใกล้อุณหภูมิขั้นสูงสุด เนื่องจากกระบวนการทำความเย็นต้องการความร้อนจากกระบวนการคายความร้อนของวัฏจักรอัดไอ เพื่อทดแทนความร้อนจากขดลวดความร้อนทั้งหมด

3. อุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรของสารทำความเย็นที่ดีที่สุดมีแนวโน้มที่ค่าเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิระเหยของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันต่ำและอุณหภูมิกลั่นตัวของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันสูง เนื่องจากการอัดไอช่วงอุณหภูมิกว้างมากทำให้กระบวนการอัดมีความต้องการพลังงานมากในการอัดต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็น

4. อัตราการไหลโดยมวลของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันต่ำที่ดีที่สุดเป็นฟังก์ชันที่ขึ้นอยู่กับอัตราการผลิต อุณหภูมิขั้นเข้าและอุณหภูมิขั้นต่ำสุด

5. อัตราการไหลโดยมวลของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันสูงที่ดีที่สุดเป็นฟังก์ชันที่ขึ้นอยู่กับอัตราการไหลโดยมวลของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันต่ำ และอัตราส่วนของผลต่างพลังงานต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็นของกระบวนการระหว่างวัฏจักรทั้งสอง

วัฏจักรอัดไอแบบแอสเคดจริงมีแนวโน้มของความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับวัฏจักรอัดไอแบบแอสเคดอุดมคติ เนื่องจากอิทธิพลของ $\Delta T'$ และ $\Delta T''$ ที่เกิดขึ้นจากประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างกลางวัฏจักร โดยสถานะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็นที่ดีที่สุดของวัฏจักรอัดไอแบบแอสเคดจริงควรมีสถานะใกล้เคียงกับสถานะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็นที่ดีที่สุดของวัฏจักรอัดไอแบบแอสเคดอุดมคติคืออุณหภูมิ $T_i + \Delta T'$ และอุณหภูมิ $T_i - \Delta T''$ เข้าใกล้อุณหภูมิ T_i

กระบวนการอัดจริงมีแนวโน้มความต้องการพลังงานสุทธิที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกระบวนการอัดแบบไอเซนโทรปิก โดยสถานะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็นที่ดีที่สุดสำหรับกระบวนการอัดจริงมีแนวโน้มสอดคล้องกับสถานะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็นที่ดีที่สุด

สำหรับกระบวนการอัดแบบไอเซนโทรปิก เนื่องจากขดลวดความร้อนยังคงเป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันมากกว่าเมื่อเทียบกับกระบวนการอัดจริงภายใต้ข้อกำหนดของการศึกษาวิจัยนี้

การทดแทนความต้องการพลังงานความร้อนจากขดลวดความร้อนทั้งหมดด้วยกระบวนการคายความร้อนในวัฏจักรความดันสูงเพื่อการประหยัดพลังงานนั้นไม่สามารถทำได้ เนื่องจากขีดความสามารถในการอัดของเครื่องอัดไอในปัจจุบันทำให้มีขีดจำกัดของช่วงอุณหภูมิกลั่นตัวของสารทำความเย็น การศึกษาวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาช่วงอุณหภูมิกลั่นตัวของสารทำความเย็นระหว่าง $70^{\circ}\text{C} - 90^{\circ}\text{C}$ ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็นที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษา สมการที่ (5.1) สมการที่ (5.2) และสมการที่ (5.3)

การเปรียบเทียบความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันระหว่างวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอน วัฏจักรอัดไอแบบขั้นตอนเดียว 1 และวัฏจักรอัดไอแบบขั้นตอนเดียว 2 พบว่า วัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอนมีแนวโน้มความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันต่ำสุด เนื่องจากการอัดไอช่วงอุณหภูมิกว้างด้วยการอัดไอแบบสองขั้นตอน ทำให้กระบวนการอัดมีแนวโน้มความต้องการพลังงานในการอัดต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็นลดลง และการนำความร้อนจากวัฏจักรความดันสูงมาใช้ประโยชน์ในกระบวนการทำความร้อนทำให้ความต้องการพลังงานของขดลวดความร้อนมีแนวโน้มลดลง

บทที่ 6

การนำผลวิจัยมาประยุกต์ใช้งานและข้อเสนอแนะ

6.1 การนำผลวิจัยมาประยุกต์ใช้งาน

สถานะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็นที่ดีที่สุดเป็นสถานะออกแบบของวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอน ซึ่งทำให้ระบบทำความเย็นแบบอัดไอสองขั้นตอนสำหรับกระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรซ์มีความต้องการพลังงานสุทธิต่ำสุด นำไปสู่การออกแบบอุปกรณ์สำคัญของระบบทำความเย็นแบบสองขั้นตอนเพื่อการประหยัดพลังงาน ดังนี้

1. เครื่องทำระเหยในวัฏจักรความดันต่ำ
2. เครื่องควบแน่นในวัฏจักรความดันสูง
3. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนกลางวัฏจักรสำหรับวัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดจริง
4. ขดลวดความร้อน

จากอุปกรณ์สำคัญของระบบทำความเย็นแบบสองขั้นตอนข้างต้นนั้นพบว่า เครื่องทำระเหย เครื่องควบแน่นและเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนกลางวัฏจักรสำหรับวัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดจริงล้วนเป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) ที่ได้จากการออกแบบตามสถานะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็นที่ดีที่สุด ซึ่งต้องทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อน รวมถึงประเภทของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีอยู่จริง และการให้ความร้อนของขดลวดความร้อนสำหรับการประยุกต์ใช้งานในกระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรซ์

6.2 พารามิเตอร์ออกแบบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและขดลวดความร้อน

พารามิเตอร์ออกแบบสำคัญที่บ่งชี้ถึงประสิทธิภาพของการแลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยเชิงล็อก (Log Mean Temperature Difference $LMTD$) และวิธีการ $\mathcal{E} - NTU$ มีดังนี้

1. อัตราการแลกเปลี่ยนความร้อน \dot{Q} คือ ขีดความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสุทธิและพื้นที่การถ่ายเทความร้อน UA และความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยเชิงล็อก ΔT_{lm} ดังสมการ

$$\dot{Q} = UA\Delta T_{lm} = \dot{m}C_p(T_o - T_i) \quad (6.1)$$

2. สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสุทธิและพื้นที่การถ่ายเทความร้อน UA คือ ความสามารถในการนำความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของของไหล ความเร็วปะทะ ทิศทางการไหลปะทะ และรูปแบบการวางตัวของท่อ

3. ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อน (Effectiveness \mathcal{E}) คือ อัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนจริงเทียบกับอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนสูงสุดที่สามารถทำได้ดังสมการ

$$\mathcal{E} = \frac{\dot{Q}_{actual}}{\dot{Q}_{max,possible}} = \frac{\dot{Q}_{actual}}{C_{min} (\Delta T_{max})} \quad (6.2)$$

พารามิเตอร์ออกแบบสำคัญของขดลวดความร้อนคือ

4. การให้ความร้อนของขดลวดความร้อน \dot{Q}_{Heater} คือ ความร้อนอุณหภูมิตั้งที่ให้กับนม ภายหลังการทำความร้อนเบื้องต้นดังสมการ

$$\dot{Q}_{Heater} = \dot{m}_m C_p (T_{m,hot} - T_{m,ph}) \quad (6.3)$$

6.3 พารามิเตอร์ออกแบบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและขดลวดความร้อนของตัวอย่างข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัย

จากตัวอย่างข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยมีข้อกำหนดดังนี้คือ การรับปริมาณน้ำนมดิบ 1 ตัน สัดส่วนการรับน้ำนมกลุ่ม A และน้ำนมกลุ่ม B เป็น 100:0 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแสดงข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยในตารางที่ 6.1 และข้อกำหนดของกระบวนการทำความร้อนและกระบวนการทำความเย็นในตารางที่ 6.2

พารามิเตอร์ออกแบบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและขดลวดความร้อนจากสภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็นที่ดีที่สุดสำหรับวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอน (วัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอน โดยอาศัยแฟลชแทงค์และวัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดอุดมคติ) ในกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์นมแบบบรรจุร้อนของตัวอย่างข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยแสดงในตารางที่ 6.3 โดยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนกลางวัฏจักรของวัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดอุดมคติเป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนอุดมคติคือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสุทธิและพื้นที่การถ่ายเทความร้อน UA_i เป็นอนันต์ เนื่องจากเป็นการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างวัฏจักรโดยไม่มีผลกระทบต่อความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างวัฏจักรความดันสูงและวัฏจักรความดันต่ำ

ตารางที่ 6.1 ตัวอย่างข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัย

| ลำดับที่ | ตัวอย่างข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัย | ค่าที่พิจารณา |
|----------|--|---------------|
| 1 | ปริมาณการรับน้ำนมดิบ ต้น/วัน | 1 |
| 2 | กำลังการผลิต ต้น/วัน | 2 |
| 3 | สัดส่วนการรับน้ำนมกลุ่ม A และน้ำนมกลุ่ม B (A:B) เปอร์เซ็นต์ | 100:0 |
| 5 | เวลาการผลิตของกระบวนการ A6 ชั่วโมง/วัน | 4 |
| 6 | เวลาการทำความเย็นกระบวนการ B2 ชั่วโมง | 2 |
| 4 | เวลาการผลิตสุทธิ ชั่วโมง/วัน | 6 |
| 7 | อุณหภูมิระเหยของสารทำความเย็น °C | -6 |

ตารางที่ 6.2 ข้อกำหนดของกระบวนการทำความร้อนและกระบวนการทำความเย็น

| ลำดับที่ | ข้อกำหนดของกระบวนการทำความร้อน(กระบวนการ A2, B3) | ค่าที่พิจารณา |
|----------|--|-----------------------|
| 1 | อุณหภูมินมจากกระบวนการ A1 , B1 °C | 35 |
| 2 | อุณหภูมินมเข้ากระบวนการ A2 , B3 °C | $T_{m,ph} = T_c - 10$ |
| 3 | อุณหภูมินมร้อน °C | 85 |
| | ข้อกำหนดของกระบวนการทำความเย็น (กระบวนการ B2 และกระบวนการ A6, B7) | |
| 4 | อุณหภูมินมเข้ากระบวนการ B2 °C | 35 |
| 5 | อุณหภูมินมลดความร้อนเบื้องต้น °C | 50 |
| 6 | อุณหภูมินมเย็น °C | 4 |

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและขดลวดความร้อนจากสถานะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็นที่ดีที่สุดสำหรับวัฏจักรอัดไอแบบแควสเคจจริงในกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์นมแบบบรรจุร้อนมีพารามิเตอร์ออกแบบเดียวกันกับพารามิเตอร์ออกแบบของวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอน โดยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนกลางวัฏจักรของวัฏจักรอัดไอแบบแควสเคจจริงมีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสุทธิและพื้นที่การถ่ายเทความร้อน UA_i สำหรับตัวอย่างข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยเท่ากับ 0.811 kW/K เมื่อกำหนดผลต่างระหว่าง $T_i + \Delta T'$ และ $T_i - \Delta T''$ เท่ากับ 20°C ในตารางที่ 6.3 เมื่อทำการพิจารณาพื้นที่การถ่ายเทความร้อน A_i เท่ากับ 2 m² พบว่าสัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนความร้อนสุทธิ U_i เท่ากับ 0.406 kJ/m².K ซึ่งสามารถใช้เทคนิคออกแบบการวาง

แนวปะทะของกลุ่มท่อและการควบคุมความเร็วเข้าปะทะของของไหลเพื่อให้ได้สัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนความร้อนออกแบบนั้นตามข้อกำหนดของพื้นที่การถ่ายเทความร้อน

ตารางที่ 6.3 พารามิเตอร์ออกแบบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและขดลวดความร้อน

| ลำดับที่ | พารามิเตอร์ออกแบบ | ผลการศึกษา |
|----------|-----------------------|------------|
| 1 | T_E °C | -6 |
| 2 | T_i °C | 44 |
| 3 | T_c °C | 90 |
| 4 | \dot{Q}_E kW | 12.56 |
| 5 | UA_E kW/K | 0.47 |
| 6 | \mathcal{E}_E | 0.821 |
| 7 | \dot{Q}_C kW | 12.28 |
| 8 | UA_C kW/K | 0.465 |
| 9 | \mathcal{E}_C | 0.818 |
| 10 | \dot{Q}_i kW | 16.21 |
| 11 | UA_i kW/K | 0.811 |
| 12 | \dot{Q}_{Heater} kW | 1.37 |

ผลลัพธ์จากการออปติไมเซชันทำให้เราได้สถานะทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่ดีที่สุดสำหรับความต้องการพลังงานสุทธิของระบบต่ำสุด ในการออกแบบวิศวกรสามารถนำเสนอสถานะทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่ดีที่สุดที่นำเสนอจากการศึกษาวิจัยนี้เป็นสถานะอ้างอิง แต่อย่างไรก็ตามด้วยขีดความสามารถด้านการแลกเปลี่ยนความร้อนของอุปกรณ์ทางวิศวกรรมต่าง ๆ จะทำให้ระบบมีความต้องการพลังงานสุทธิที่มีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อเทียบกับความต้องการพลังงานสุทธิที่ดีที่สุดของระบบ

6.4 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับประยุกต์ใช้งานจริง

หลักการแลกเปลี่ยนความร้อนที่สามารถประยุกต์ใช้งานจริงมีหลายหลักการ ในที่นี้จะพิจารณาหลักการแลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้น้ำไหลเวียนเป็นตัวกลางสำหรับการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างนมและสารทำความเย็น รูปที่ 6.1 แทนการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างนมและสารทำความเย็นโดยตรงเพื่อป้องกันการปนเปื้อนอาหารในกระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรซ์ ซึ่งเป็นหลักการ

แลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้โดยทั่วไปในกระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรซ์มีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 2 ประเภทดังนี้

1. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีทิศทางการไหลแบบขวาง (Crossflow Heat Exchanger) รูปที่ 6.2 (ก) เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสารทำความเย็นและน้ำไหลเวียน โดยน้ำไหลเวียนจะเข้าปะทะกับกลุ่มท่อของสารทำความเย็นในแนวตั้งฉากหรือแนวขวางด้วยป้อนน้ำไหลเวียน

2. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น (Plate Heat Exchanger) รูปที่ 6.2 (ข) เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำไหลเวียนและนม โดยน้ำไหลเวียนและนมมีทิศทางการไหลแบบสวนทางกันผ่านช่องว่างระหว่างแผ่นบางที่วางตัวซ้อนกันเป็นชั้น

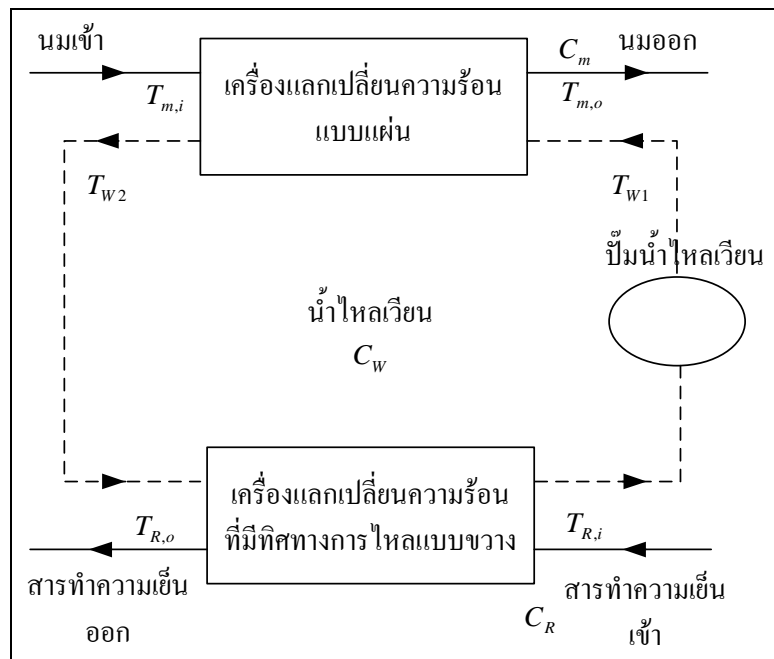
6.5 พารามิเตอร์ออกแบบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับประยุกต์ใช้งานจริง

จากพารามิเตอร์ออกแบบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตารางที่ 6.3 เป็นพารามิเตอร์ออกแบบสุทธิของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งประกอบด้วยพารามิเตอร์ออกแบบร่วมกันระหว่างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีทิศทางการไหลแบบขวาง (Crossflow Heat Exchanger) และพารามิเตอร์ออกแบบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น (Plate Heat Exchanger) สำหรับประยุกต์ใช้งานจริงในกระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรซ์

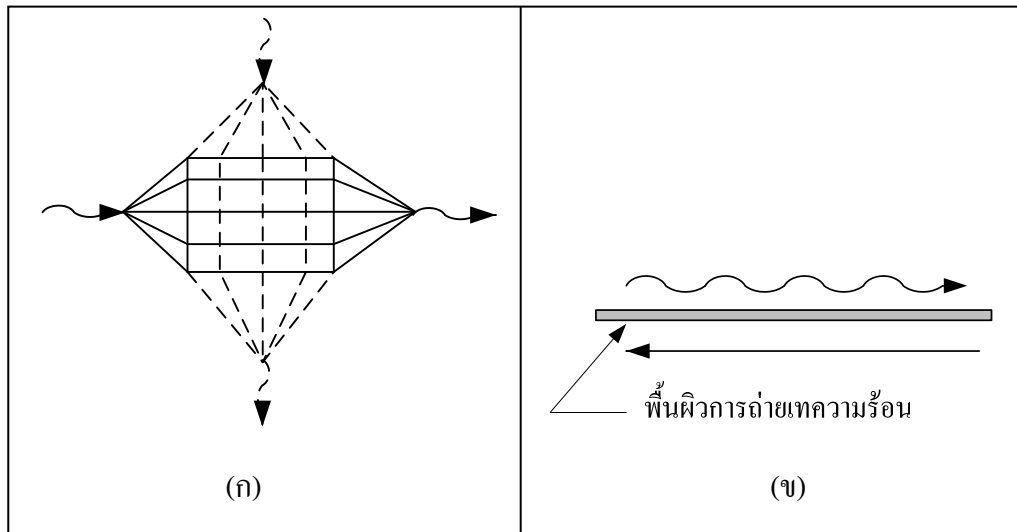
สำหรับประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนสุทธิ (Overall Effectiveness ε) ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีน้ำไหลเวียนเป็นตัวกลางแลกเปลี่ยนความร้อน รูปที่ 6.1 จากการศึกษาวิจัยของ Kays and London (1964) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนสุทธิ ε ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีทิศทางการไหลแบบขวาง ε_{CF} และประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น ε_P สำหรับเงื่อนไขการออกแบบความจุความร้อนของน้ำ C_W ความจุความร้อนของสารทำความเย็น C_R และความจุความร้อนของนม C_m ดังนี้

$$C_W > C_R > C_m : \quad \varepsilon = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_P} + \frac{C_m/C_R}{\varepsilon_{CF}} - \frac{C_m}{C_W}} \quad (6.3)$$

$$C_W > C_m > C_R : \quad \varepsilon = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{CF}} + \frac{C_R/C_m}{\varepsilon_P} - \frac{C_R}{C_W}} \quad (6.4)$$



รูปที่ 6.1 การแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับกระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรซ์



รูปที่ 6.2 (ก) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีทิศทางการไหลแบบขวาง
(จ) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น

$$C_R > C_m > C_W : \quad \varepsilon = \frac{1}{\frac{C_m}{C_W} \left[\frac{1}{\varepsilon_{CF}} + \frac{1}{\varepsilon_P} - 1 \right]} \quad (6.5)$$

$$C_m > C_R > C_W : \quad \varepsilon = \frac{1}{\frac{C_R}{C_W} \left[\frac{1}{\varepsilon_{CF}} + \frac{1}{\varepsilon_P} - 1 \right]} \quad (6.6)$$

$$C_R > C_W > C_m : \quad \varepsilon = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_P} + \frac{C_m}{C_W} \left[\frac{1}{\varepsilon_{CF}} - 1 \right]} \quad (6.7)$$

$$C_m > C_W > C_R : \quad \varepsilon = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{CF}} + \frac{C_R}{C_W} \left[\frac{1}{\varepsilon_P} - 1 \right]} \quad (6.8)$$

พารามิเตอร์ออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับประยุกต์ใช้งานจริงจากตัวอย่างข้อกำหนดของการศึกษาวิจัย มีสมมติฐานของเงื่อนไขการออกแบบที่สอดคล้องตามสมการที่ (6.7) ดังนี้

1. พิจารณาระบบเป็นการแลกเปลี่ยนความร้อนที่เครื่องทำระเหยในวัฏจักรความดันต่ำ
2. ความจุความร้อนของสารทำความเย็นมีค่าเข้าสู่นันต์ $C_R \rightarrow \infty$ เนื่องจากสารทำความเย็นรับความร้อนซึ่งเป็นความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (Latent Heat of Vaporization) โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ $\Delta T \rightarrow 0$ เพื่อให้เป็นการแลกเปลี่ยนความร้อนที่สามารถบอกค่าได้ (Finite Heat Transfer)

3. จากสมมติฐานของเงื่อนไขการออกแบบข้อที่ 2 ทำให้อัตราส่วนระหว่างความจุความร้อนของน้ำและความจุความร้อนของสารทำความเย็นสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีทิศทางการไหลแบบขวางเท่ากับศูนย์ $C_W/C_R = 0$

4. อัตราส่วนระหว่างความจุความร้อนของนมและความจุความร้อนของน้ำสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น $C_m/C_W = 0.5$

5. พิจารณาตัวแปรไร้มิติ NTU ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการไหลแบบขวาง NTU_{CF} และตัวแปรไร้มิติ NTU ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น NTU_P เท่ากับ 3

จากการศึกษาวิจัยของ Kays and London (1964) สามารถหาประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนสุทธิด้วยแผนภาพรูปแบบการวางตัวของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจากสมมติฐานข้างต้น ซึ่งสามารถสรุปสมมติฐานและพารามิเตอร์ออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับ

ประยุกต์ใช้งานจริงของเครื่องทำระเหยจากตัวอย่างกรณีศึกษาดังตารางที่ 6.4 เมื่อนำพารามิเตอร์ ออกแบบที่ได้แทนสมการที่ 6.7 พบว่า ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนสุทธิของเท่ากับ 0.86

จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนสุทธิระหว่างเครื่องทำระเหยสำหรับ ประยุกต์ใช้งานจริงตารางที่ 6.4 และเครื่องทำระเหยจากพารามิเตอร์ออกแบบตารางที่ 6.3 พบว่า เครื่อง แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับประยุกต์ใช้งานจริงของเครื่องทำระเหยจากตัวอย่างข้อกำหนดของ การศึกษาวิจัยสามารถให้ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนได้ตามพารามิเตอร์ออกแบบจาก สภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็นที่ดีที่สุดของวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอน

6.6 สรุปผลการศึกษาวิจัย

การศึกษาวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการสร้างแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์เพื่อหาสภาวะ ทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็นที่ดีที่สุด และสร้างฐานข้อมูลสำหรับเป็นแนว ทางการออกแบบระบบการทำความเย็นแบบอัดไอสองในกระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรซ์ แบบบรรจุร้อนเพื่อการประหยัดพลังงาน ภายใต้เงื่อนไขและข้อกำหนดการออกแบบต่าง ๆ กัน แสดงในภาคผนวก ก. - ง.

แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์แสดงอยู่ในรูปแบบของความต้องการพลังงานสุทธิ ต่อวันประกอบด้วยความต้องการพลังงานของระบบทำความเย็นแบบอัดไอสองขั้นตอนและ ความต้องการพลังงานของขดลวดความร้อน ซึ่งได้จากการวิเคราะห์สมดุลมวล สมดุลพลังงาน และได้จากการสร้างสมการ โพลีโนเมียลสองตัวแปรของความสัมพันธ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ จากแผนภาพความดัน-เอนทาลปี (P-h diagram) ของสารทำความเย็นชนิด R 134a

สำหรับการศึกษาวิจัยนี้เป็นปัญหาออปติไมเซชันโดยไม่มีเงื่อนไขมีสมการจุดประสงค์คือ ความต้องการพลังงานสุทธิต่อวัน ตัวแปรอิสระเป็นสภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็น คือ อุณหภูมิระเหยของสารทำความเย็น อุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรของสารทำความเย็นและ อุณหภูมิกลั่นตัวของสารทำความเย็น และแก้ปัญหาออปติไมเซชันด้วยวิธีการแลตทิซเสิร์ช

ผลลัพธ์จากการออปติไมเซชันทำให้เราได้สภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่ดีที่สุด สำหรับความต้องการพลังงานสุทธิของระบบต่ำสุด ในการออกแบบวิศวกรสามารถนำสภาวะ ทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่ดีที่สุดที่นำเสนอจากการศึกษาวิจัยนี้เป็นสภาวะอ้างอิง แต่อย่างไรก็ ตามด้วยขีดความสามารถด้านการแลกเปลี่ยนความร้อนของอุปกรณ์ทางวิศวกรรมต่าง ๆ จะทำ ให้ระบบมีความต้องการพลังงานสุทธิที่มีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อเทียบกับความต้องการพลังงาน สุทธิที่ดีที่สุดของระบบ ผลการศึกษาวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

ตารางที่ 6.4 สรุปสมมติฐานและพารามิเตอร์ออกแบบเครื่องทำระเหยในวัฏจักรความดันต่ำสำหรับ
ประยุกต์ใช้งานจริง

| ลำดับที่ | สมมติฐาน | ค่าออกแบบ |
|----------|---|-----------|
| 1 | อัตราส่วนความจุความร้อน C_W/C_R | 0 |
| 2 | อัตราส่วนความจุความร้อน C_m/C_W | 0.5 |
| 3 | ตัวแปรไร้มิติ NTU_{CF} | 3 |
| 4 | ตัวแปรไร้มิติ NTU_p | 3 |
| | พารามิเตอร์ที่ได้จากการออกแบบ | |
| 5 | ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนสุทธิ ε | 0.88 |
| 6 | ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อน ε_{CF} | 0.95 |
| 7 | ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนสุทธิ ε_p | 0.86 |
| 7 | UA_p kW/K | 0.819 |
| 8 | UA_{CF} kW/K | 1.638 |

1. สภาพทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็นที่ดีที่สุดและอัตราการไหลโดยมวลของสารทำความเย็นที่ดีที่สุด สามารถสรุปได้ดังนี้คือ อุณหภูมิระเหยของสารทำความเย็นที่ดีที่สุดมีแนวโน้มเข้าใกล้อุณหภูมิขั้นต่ำสุด เนื่องจากกระบวนการทำความเย็นต้องการความร้อนต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็น q_E จากกระบวนการรับความร้อนมากที่สุดที่สามารถทำได้เพื่อการประหยัดพลังงาน อุณหภูมิกลั่นตัวของสารทำความเย็นที่ดีที่สุดมีแนวโน้มเข้าใกล้อุณหภูมิสูงสุด เนื่องจากกระบวนการทำความเย็นต้องการความร้อนจากกระบวนการคายความร้อนของวัฏจักรอัดไอเพื่อทดแทนความร้อนจากขดลวดความร้อนทั้งหมด และอุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรของสารทำความเย็นที่ดีที่สุดมีแนวโน้มที่ค่าเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิระเหยของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันต่ำและอุณหภูมิกลั่นตัวของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันสูง เนื่องจากการอัดไอช่วงอุณหภูมิกว้างมากทำให้กระบวนการอัดมีความต้องการพลังงานมากในการอัดต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็น

2. อัตราการไหลโดยมวลของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันต่ำที่ดีที่สุดเป็นฟังก์ชันที่ขึ้นอยู่กับอัตราการผลิต อุณหภูมิเข้าและอุณหภูมิขั้นต่ำสุด และอัตราการไหลโดยมวลของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันสูงที่ดีที่สุดเป็นฟังก์ชันที่ขึ้นอยู่กับอัตราการไหล โดยมวลของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันต่ำ และอัตราส่วนของผลต่างพลังงานต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็นของกระบวนการระหว่างวัฏจักรทั้งสอง

3. วัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอนมีความต้องการพลังงานสุทธิต่อวันที่ลดลงเมื่อเทียบกับวัฏจักรอัดไอแบบขั้นตอนเดียว ภายใต้เงื่อนไขและข้อกำหนดการออกแบบเดียวกัน

4. เมื่อพิจารณากระบวนการอัดจริง ภายใต้ความเบี่ยงเบนของความต้องการพลังงานต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็นจากกระบวนการอัดแบบไอเซนโทรปิก พบว่าสภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่ดีที่สุดสำหรับกระบวนการอัดจริงมีแนวโน้มสอดคล้องกับสภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่ดีที่สุดสำหรับกระบวนการอัดแบบไอเซนโทรปิก

6.7 ข้อเสนอแนะ

แนวทางการศึกษาวิจัยต่อไปจากการศึกษาวิจัยนี้คือ

1. การนำวิธีการสร้างแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ของศึกษาวิจัยนี้ไปประยุกต์ใช้กับระบบทำความเย็นแบบอัดไอสองขั้นตอนในกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์นมแบบบรรจุเย็น เนื่องจากการพาสเจอร์ไรซ์นมระหว่างแบบบรรจุเย็นและแบบบรรจุร้อนมีความแตกต่างกันของลำดับขั้นตอนกระบวนการผลิต ซึ่งสามารถใช้วิธีการวิเคราะห์เดียวกันกับการศึกษาวิจัยนี้ได้

2. การนำวิธีการวิเคราะห์และสร้างแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ของศึกษาวิจัยนี้ไปประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมอื่นที่มีกระบวนการผลิตใกล้เคียงกับกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์

3. การวิเคราะห์ระบบทางความร้อนที่เหมาะสมสำหรับการแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์นม

4. การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานสุทธิต่อวันของระบบทำความเย็นแบบอัดไอสองขั้นตอน

5. การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายสุทธิประกอบด้วย ค่าลงทุนเริ่มต้นและค่าใช้จ่ายด้านพลังงานตลอดอายุการใช้งานที่กำหนดของระบบทำความเย็นแบบอัดไอสองขั้นตอน

รายการอ้างอิง

ธีระชาติ พรพิบูลย์ และคณะ.(2551).รายงานความก้าวหน้าโครงการ ครั้งที่ 1 การออกแบบระบบอัดไอ
สำหรับอุตสาหกรรมนม.โครงการ ITAP เครือข่ายภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนบน
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

Stoecker W.F., 1989. **Design and Thermal systems.** (3th edition), McGrawHill.

Stoecker W.F., 1982. **Refrigeration and Air conditioning.** (2th edition), McGrawHill.

Jaluria Y., 1998. **Design and optimization of Thermal Systems.** McGrawHill.

Rao S.S, 1978. **Optimization theory and applications.** Wiley Eastern Limited.

Cengel Y.A., 2003. **Heat transfer a practical approach.** (2th edition), McGrawHill.

Cengel Y.A. and Boles M.A., 2003. **Thermodynamics an engineering approach.** (4th edition),
McGrawHill.

Kays W.M. and London A.L.,1964. **Compact heat exchangers.** (2th edition), McGrawHill.

Ozisik M.N., 1985. **Heat Transfer a basic approach.** McGrawHill.

ASHRAE Handbook Fundamental ,2001., **chapter 19**, American Society of Heating ,
Refrigerating, and Air-Conditioning , Atlanta.

Jeffrey M. Gordon and Kim Choon Ng, 2000. **Cool Thermodynamics.** Cambridge International
Science Publishing.

Soylemez, M.S, 2005. Optimum heat pump in milk pasteurizing for dairy. **Journal of Food
Engineering**, pp.546-551.

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.

ภาคผนวก ก

ข้อกำหนดสำหรับกระบวนการผลิตนม

พาสเจอร์ไรซ์แบบบรรจุร้อน

ก.1 ข้อกำหนดของสภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็น

ตารางที่ ก.1 ข้อกำหนดสภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็น

| ลำดับที่ | ข้อกำหนดสภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็น | ขอบเขตการศึกษา |
|----------|---|----------------|
| 1 | ช่วงอุณหภูมิระเหยตัวของสารทำความเย็น °C | (-6) - (-2) |
| 2 | ช่วงอุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรของสารทำความเย็น °C | 20 - 60 |
| 3 | ช่วงอุณหภูมิกลั่นตัวของสารทำความเย็น °C | 65 - 90 |

ก.2 ข้อกำหนดของกระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรซ์แบบบรรจุร้อน

ตารางที่ ก.2 ข้อกำหนดสำหรับกระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรซ์แบบบรรจุร้อน

| ลำดับที่ | ข้อกำหนดของกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์นมแบบบรรจุร้อน | ขอบเขตการศึกษา |
|----------|--|----------------|
| 1 | ปริมาณการรับน้ำนมดิบ ตัน/วัน | 1 - 10 |
| 2 | กำลังการผลิต ตัน/วัน | 1 - 20 |
| 3 | สัดส่วนโดยปริมาตรการรับน้ำนมกลุ่ม A และน้ำนมกลุ่ม B (A:B) เปอร์เซนต์ | 100:0 |
| | | 80:20 |
| | | 60:40 |
| | | 50:50 |
| | | 40:60 |
| 4 | เวลาการผลิตของกระบวนการ A ชั่วโมง/วัน | ≥ 4 |
| 5 | เวลาการทำความเย็นกระบวนการ B2 ชั่วโมง | 2 |
| 6 | เวลาการผลิต ชั่วโมง/วัน | ≥ 8 |

ก.3 ข้อกำหนดของกระบวนการทำความร้อนและกระบวนการทำความเย็น

ตารางที่ ก.3 แสดงข้อกำหนดของกระบวนการทำความร้อนและกระบวนการทำความเย็น

| ลำดับที่ | ข้อกำหนดของกระบวนการทำความร้อน(กระบวนการ A2, B3) | ค่าที่พิจารณา |
|----------|---|-----------------------|
| 1 | อุณหภูมิเริ่มจากกระบวนการ A1 และ B1 °C | 35 |
| 2 | อุณหภูมิมุมเข้ากระบวนการ A2 และ B3 °C | $T_{m,ph} = T_C - 10$ |
| 3 | อุณหภูมิมุมภายหลังจากการทำความร้อน °C | 85 |
| | ข้อกำหนดของกระบวนการทำความเย็น (กระบวนการ B2 และกระบวนการ A6 และ B7) | |
| 4 | อุณหภูมิมุมเข้ากระบวนการ B2 °C | 35 |
| 5 | อุณหภูมิมุมลดความร้อนเบื้องต้น °C | 50 |
| 6 | อุณหภูมิมุมภายหลังจากการทำความเย็น °C | 4 |

ภาคผนวก ข

ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยและตัวอย่างการคำนวณ

ข.1 ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัย

ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยเพื่อการสร้างฐานข้อมูลสำหรับพารามิเตอร์ออกแบบของวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอนแสดงดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ ข.1 ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 1

| ลำดับที่ | ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 1 | ข้อกำหนด |
|----------|---|----------|
| 1 | ปริมาณการรับน้ำนมดิบ ตัน/วัน | 1 |
| 2 | กำลังการผลิต ตัน/วัน | 2 |
| 3 | สัดส่วนการรับน้ำนมกลุ่ม A และน้ำนมกลุ่ม B (A:B) เปอร์เซ็นต์ | 100:0 |
| 4 | เวลาการผลิตของกระบวนการ A6 ชั่วโมง/วัน | 4 |
| 5 | เวลาการทำความเย็นกระบวนการ B2 ชั่วโมง | 2 |
| 6 | เวลาการผลิตทั้งหมด ชั่วโมง/วัน | 4 |

ตารางที่ ข.2 ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 2

| ลำดับที่ | ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 2 | ข้อกำหนด |
|----------|---|----------|
| 1 | ปริมาณการรับน้ำนมดิบ ตัน/วัน | 1 |
| 2 | กำลังการผลิต ตัน/วัน | 2 |
| 3 | สัดส่วนการรับน้ำนมกลุ่ม A และน้ำนมกลุ่ม B (A:B) เปอร์เซ็นต์ | 80:20 |
| 4 | เวลาการผลิตของกระบวนการ A6 และกระบวนการ B7 ชั่วโมง/วัน | 4 |
| 5 | เวลาการผลิตของกระบวนการ A6 ชั่วโมง/วัน | 3.175 |
| 6 | เวลาการทำความเย็นกระบวนการ B2 ชั่วโมง | 2 |
| 7 | เวลาการผลิตทั้งหมด ชั่วโมง/วัน | 6 |

ตารางที่ ข.3 ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 3

| ลำดับที่ | ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 3 | ข้อกำหนด |
|----------|---|----------|
| 1 | ปริมาณการรับน้ำนมดิบ ต้น/วัน | 1 |
| 2 | กำลังการผลิต ต้น/วัน | 1.5 |
| 3 | สัดส่วนการรับน้ำนมกลุ่ม A และน้ำนมกลุ่ม B (A:B) เปอร์เซ็นต์ | 60:40 |
| 4 | เวลาการผลิตของกระบวนการ A6 และกระบวนการ B7 ชั่วโมง/วัน | 5.34 |
| 5 | เวลาการผลิตของกระบวนการ A6 ชั่วโมง/วัน | 3.205 |
| 6 | เวลาการทำความเย็นกระบวนการ B2 ชั่วโมง | 2 |
| 7 | เวลาการผลิตทั้งหมด ชั่วโมง/วัน | 7.34 |

ตารางที่ ข.4 ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 4

| ลำดับที่ | ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 4 | ข้อกำหนด |
|----------|---|----------|
| 1 | ปริมาณการรับน้ำนมดิบ ต้น/วัน | 1 |
| 2 | กำลังการผลิต ต้น/วัน | 1 |
| 3 | สัดส่วนการรับน้ำนมกลุ่ม A และน้ำนมกลุ่ม B (A:B) เปอร์เซ็นต์ | 50:50 |
| 4 | เวลาการผลิตของกระบวนการ A6 และกระบวนการ B7 ชั่วโมง/วัน | 8 |
| 5 | เวลาการผลิตของกระบวนการ A6 ชั่วโมง/วัน | 4 |
| 6 | เวลาการทำความเย็นกระบวนการ B2 ชั่วโมง | 2 |
| 7 | เวลาการผลิตทั้งหมด ชั่วโมง/วัน | 8 |

ตารางที่ ข.5 ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 5

| ลำดับที่ | ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 5 | ข้อกำหนด |
|----------|---|----------|
| 1 | ปริมาณการรับน้ำนมดิบ ต้น/วัน | 1 |
| 2 | กำลังการผลิต ต้น/วัน | 1 |
| 3 | สัดส่วนการรับน้ำนมกลุ่ม A และน้ำนมกลุ่ม B (A:B) เปอร์เซ็นต์ | 40:60 |
| 4 | เวลาการผลิตของกระบวนการ A6 และกระบวนการ B7 ชั่วโมง/วัน | 8 |
| 5 | เวลาการผลิตของกระบวนการ A6 ชั่วโมง/วัน | 3.17 |
| 6 | เวลาการทำความเย็นกระบวนการ B2 ชั่วโมง | 2 |
| 7 | เวลาการผลิตทั้งหมด ชั่วโมง/วัน | 8 |

ตารางที่ ข.6 ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 6

| ลำดับที่ | ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 6 | ข้อกำหนด |
|----------|---|----------|
| 1 | ปริมาณการรับน้ำนมดิบ ตัน/วัน | 2 |
| 2 | กำลังการผลิต ตัน/วัน | 4 |
| 3 | สัดส่วนการรับน้ำนมกลุ่ม A และน้ำนมกลุ่ม B (A:B) เปอร์เซ็นต์ | 100:0 |
| 4 | เวลาการผลิตของกระบวนการ A6 ชั่วโมง/วัน | 4 |
| 5 | เวลาการทำความเย็นกระบวนการ B2 ชั่วโมง | 2 |
| 6 | เวลาการผลิตทั้งหมด ชั่วโมง/วัน | 4 |

ตารางที่ ข.7 ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 7

| ลำดับที่ | ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 7 | ข้อกำหนด |
|----------|---|----------|
| 1 | ปริมาณการรับน้ำนมดิบ ตัน/วัน | 2 |
| 2 | กำลังการผลิต ตัน/วัน | 4 |
| 3 | สัดส่วนการรับน้ำนมกลุ่ม A และน้ำนมกลุ่ม B (A:B) เปอร์เซ็นต์ | 80:20 |
| 4 | เวลาการผลิตของกระบวนการ A6 และกระบวนการ B7 ชั่วโมง/วัน | 4 |
| 5 | เวลาการผลิตของกระบวนการ A6 ชั่วโมง/วัน | 3.175 |
| 6 | เวลาการทำความเย็นกระบวนการ B2 ชั่วโมง | 2 |
| 7 | เวลาการผลิตทั้งหมด ชั่วโมง/วัน | 6 |

ตารางที่ ข.8 ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 8

| ลำดับที่ | ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 8 | ข้อกำหนด |
|----------|---|----------|
| 1 | ปริมาณการรับน้ำนมดิบ ตัน/วัน | 2 |
| 2 | กำลังการผลิต ตัน/วัน | 2.5 |
| 3 | สัดส่วนการรับน้ำนมกลุ่ม A และน้ำนมกลุ่ม B (A:B) เปอร์เซ็นต์ | 60:40 |
| 4 | เวลาการผลิตของกระบวนการ A6 และกระบวนการ B7 ชั่วโมง/วัน | 6.39 |
| 5 | เวลาการผลิตของกระบวนการ A6 ชั่วโมง/วัน | 3.83 |
| 6 | เวลาการทำความเย็นกระบวนการ B2 ชั่วโมง | 2 |
| 7 | เวลาการผลิตทั้งหมด ชั่วโมง/วัน | 6.39 |

ตารางที่ ข.9 ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 9

| ลำดับที่ | ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 9 | ข้อกำหนด |
|----------|---|----------|
| 1 | ปริมาณการรับน้ำนมดิบ ต้น/วัน | 2 |
| 2 | กำลังการผลิต ต้น/วัน | 2 |
| 3 | สัดส่วนการรับน้ำนมกลุ่ม A และน้ำนมกลุ่ม B (A:B) เปอร์เซ็นต์ | 50:50 |
| 4 | เวลาการผลิตของกระบวนการ A6 และกระบวนการ B7 ชั่วโมง/วัน | 8 |
| 5 | เวลาการผลิตของกระบวนการ A6 ชั่วโมง/วัน | 4 |
| 6 | เวลาการทำความเย็นกระบวนการ B2 ชั่วโมง | 2 |
| 7 | เวลาการผลิตทั้งหมด ชั่วโมง/วัน | 8 |

ตารางที่ ข.10 ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 10

| ลำดับที่ | ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 10 | ข้อกำหนด |
|----------|---|----------|
| 1 | ปริมาณการรับน้ำนมดิบ ต้น/วัน | 2 |
| 2 | กำลังการผลิต ต้น/วัน | 2 |
| 3 | สัดส่วนการรับน้ำนมกลุ่ม A และน้ำนมกลุ่ม B (A:B) เปอร์เซ็นต์ | 40:60 |
| 4 | เวลาการผลิตของกระบวนการ A6 และกระบวนการ B7 ชั่วโมง/วัน | 8 |
| 5 | เวลาการผลิตของกระบวนการ A6 ชั่วโมง/วัน | 3.175 |
| 6 | เวลาการทำความเย็นกระบวนการ B2 ชั่วโมง | 2 |
| 7 | เวลาการผลิตทั้งหมด ชั่วโมง/วัน | 8 |

ตารางที่ ข.11 ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 11

| ลำดับที่ | ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 11 | ข้อกำหนด |
|----------|---|----------|
| 1 | ปริมาณการรับน้ำนมดิบ ต้น/วัน | 3 |
| 2 | กำลังการผลิต ต้น/วัน | 6 |
| 3 | สัดส่วนการรับน้ำนมกลุ่ม A และน้ำนมกลุ่ม B (A:B) เปอร์เซ็นต์ | 100:0 |
| 4 | เวลาการผลิตของกระบวนการ A6 ชั่วโมง/วัน | 4 |
| 5 | เวลาการทำความเย็นกระบวนการ B2 ชั่วโมง | 2 |
| 6 | เวลาการผลิตทั้งหมด ชั่วโมง/วัน | 4 |

ตารางที่ ข.12 ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 12

| ลำดับที่ | ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 12 | ข้อกำหนด |
|----------|---|----------|
| 1 | ปริมาณการรับน้ำนมดิบ ต้น/วัน | 3 |
| 2 | กำลังการผลิต ต้น/วัน | 5 |
| 3 | สัดส่วนการรับน้ำนมกลุ่ม A และน้ำนมกลุ่ม B (A:B) เปอร์เซ็นต์ | 80:20 |
| 4 | เวลาการผลิตของกระบวนการ A6 และกระบวนการ B7 ชั่วโมง/วัน | 4.8 |
| 5 | เวลาการผลิตของกระบวนการ A6 ชั่วโมง/วัน | 3.83 |
| 6 | เวลาการทำความเย็นกระบวนการ B2 ชั่วโมง | 2 |
| 7 | เวลาการผลิตทั้งหมด ชั่วโมง/วัน | 6.8 |

ตารางที่ ข.13 ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 13

| ลำดับที่ | ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 13 | ข้อกำหนด |
|----------|---|----------|
| 1 | ปริมาณการรับน้ำนมดิบ ต้น/วัน | 3 |
| 2 | กำลังการผลิต ต้น/วัน | 4 |
| 3 | สัดส่วนการรับน้ำนมกลุ่ม A และน้ำนมกลุ่ม B (A:B) เปอร์เซ็นต์ | 60:40 |
| 4 | เวลาการผลิตของกระบวนการ A6 และกระบวนการ B7 ชั่วโมง/วัน | 5.95 |
| 5 | เวลาการผลิตของกระบวนการ A6 ชั่วโมง/วัน | 3.57 |
| 6 | เวลาการทำความเย็นกระบวนการ B2 ชั่วโมง | 2 |
| 7 | เวลาการผลิตทั้งหมด ชั่วโมง/วัน | 7.95 |

ตารางที่ ข.14 ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 14

| ลำดับที่ | ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 14 | ข้อกำหนด |
|----------|---|----------|
| 1 | ปริมาณการรับน้ำนมดิบ ต้น/วัน | 3 |
| 2 | กำลังการผลิต ต้น/วัน | 3 |
| 3 | สัดส่วนการรับน้ำนมกลุ่ม A และน้ำนมกลุ่ม B (A:B) เปอร์เซ็นต์ | 50:50 |
| 4 | เวลาการผลิตของกระบวนการ A6 และกระบวนการ B7 ชั่วโมง/วัน | 8 |
| 5 | เวลาการผลิตของกระบวนการ A6 ชั่วโมง/วัน | 4 |
| 6 | เวลาการทำความเย็นกระบวนการ B2 ชั่วโมง | 2 |
| 7 | เวลาการผลิตทั้งหมด ชั่วโมง/วัน | 8 |

ตารางที่ ข.15 ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 15

| ลำดับที่ | ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 15 | ข้อกำหนด |
|----------|---|----------|
| 1 | ปริมาณการรับน้ำนมดิบ ต้น/วัน | 3 |
| 2 | กำลังการผลิต ต้น/วัน | 3 |
| 3 | สัดส่วนการรับน้ำนมกลุ่ม A และน้ำนมกลุ่ม B (A:B) เปอร์เซ็นต์ | 40:60 |
| 4 | เวลาการผลิตของกระบวนการ A6 และกระบวนการ B7 ชั่วโมง/วัน | 8 |
| 5 | เวลาการผลิตของกระบวนการ A6 ชั่วโมง/วัน | 3.205 |
| 6 | เวลาการทำความเย็นกระบวนการ B2 ชั่วโมง | 2 |
| 7 | เวลาการผลิตทั้งหมด ชั่วโมง/วัน | 8 |

ตารางที่ ข.16 ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 16

| ลำดับที่ | ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 16 | ข้อกำหนด |
|----------|---|----------|
| 1 | ปริมาณการรับน้ำนมดิบ ต้น/วัน | 5 |
| 2 | กำลังการผลิต ต้น/วัน | 10 |
| 3 | สัดส่วนการรับน้ำนมกลุ่ม A และน้ำนมกลุ่ม B (A:B) เปอร์เซ็นต์ | 100:0 |
| 4 | เวลาการผลิตของกระบวนการ A6 ชั่วโมง/วัน | 4 |
| 5 | เวลาการทำความเย็นกระบวนการ B2 ชั่วโมง | 2 |
| 6 | เวลาการผลิตทั้งหมด ชั่วโมง/วัน | 4 |

ตารางที่ ข.17 ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 17

| ลำดับที่ | ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 17 | ข้อกำหนด |
|----------|---|----------|
| 1 | ปริมาณการรับน้ำนมดิบ ต้น/วัน | 5 |
| 2 | กำลังการผลิต ต้น/วัน | 8 |
| 3 | สัดส่วนการรับน้ำนมกลุ่ม A และน้ำนมกลุ่ม B (A:B) เปอร์เซ็นต์ | 80:20 |
| 4 | เวลาการผลิตของกระบวนการ A6 และกระบวนการ B7 ชั่วโมง/วัน | 5 |
| 5 | เวลาการผลิตของกระบวนการ A6 ชั่วโมง/วัน | 4 |
| 6 | เวลาการทำความเย็นกระบวนการ B2 ชั่วโมง | 2 |
| 7 | เวลาการผลิตทั้งหมด ชั่วโมง/วัน | 7 |

ตารางที่ ข.18 ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 18

| ลำดับที่ | ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 18 | ข้อกำหนด |
|----------|---|----------|
| 1 | ปริมาณการรับน้ำนมดิบ ต้น/วัน | 5 |
| 2 | กำลังการผลิต ต้น/วัน | 6 |
| 3 | สัดส่วนการรับน้ำนมกลุ่ม A และน้ำนมกลุ่ม B (A:B) เปอร์เซ็นต์ | 60:40 |
| 4 | เวลาการผลิตของกระบวนการ A6 และกระบวนการ B7 ชั่วโมง/วัน | 6.68 |
| 5 | เวลาการผลิตของกระบวนการ A6 ชั่วโมง/วัน | 4 |
| 6 | เวลาการทำความเย็นกระบวนการ B2 ชั่วโมง | 2 |
| 7 | เวลาการผลิตทั้งหมด ชั่วโมง/วัน | 6.68 |

ตารางที่ ข.19 ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 19

| ลำดับที่ | ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 19 | ข้อกำหนด |
|----------|---|----------|
| 1 | ปริมาณการรับน้ำนมดิบ ต้น/วัน | 5 |
| 2 | กำลังการผลิต ต้น/วัน | 5 |
| 3 | สัดส่วนการรับน้ำนมกลุ่ม A และน้ำนมกลุ่ม B (A:B) เปอร์เซ็นต์ | 50:50 |
| 4 | เวลาการผลิตของกระบวนการ A6 และกระบวนการ B7 ชั่วโมง/วัน | 8 |
| 5 | เวลาการผลิตของกระบวนการ A6 ชั่วโมง/วัน | 4 |
| 6 | เวลาการทำความเย็นกระบวนการ B2 ชั่วโมง | 2 |
| 7 | เวลาการผลิตทั้งหมด ชั่วโมง/วัน | 8 |

ตารางที่ ข.20 ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 20

| ลำดับที่ | ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 20 | ข้อกำหนด |
|----------|---|----------|
| 1 | ปริมาณการรับน้ำนมดิบ ต้น/วัน | 5 |
| 2 | กำลังการผลิต ต้น/วัน | 5 |
| 3 | สัดส่วนการรับน้ำนมกลุ่ม A และน้ำนมกลุ่ม B (A:B) เปอร์เซ็นต์ | 40:60 |
| 4 | เวลาการผลิตของกระบวนการ A6 และกระบวนการ B7 ชั่วโมง/วัน | 8 |
| 5 | เวลาการผลิตของกระบวนการ A6 ชั่วโมง/วัน | 3.2 |
| 6 | เวลาการทำความเย็นกระบวนการ B2 ชั่วโมง | 2 |
| 7 | เวลาการผลิตทั้งหมด ชั่วโมง/วัน | 8 |

ตารางที่ ข.21 ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 21

| ลำดับที่ | ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 21 | ข้อกำหนด |
|----------|---|----------|
| 1 | ปริมาณการรับน้ำนมดิบ ต้น/วัน | 10 |
| 2 | กำลังการผลิต ต้น/วัน | 20 |
| 3 | สัดส่วนการรับน้ำนมกลุ่ม A และน้ำนมกลุ่ม B (A:B) เปอร์เซ็นต์ | 100:0 |
| 4 | เวลาการผลิตของกระบวนการ A6 ชั่วโมง/วัน | 4 |
| 5 | เวลาการทำความเย็นกระบวนการ B2 ชั่วโมง | 2 |
| 6 | เวลาการผลิตทั้งหมด ชั่วโมง/วัน | 4 |

ตารางที่ ข.22 ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 22

| ลำดับที่ | ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 22 | ข้อกำหนด |
|----------|---|----------|
| 1 | ปริมาณการรับน้ำนมดิบ ต้น/วัน | 10 |
| 2 | กำลังการผลิต ต้น/วัน | 17 |
| 3 | สัดส่วนการรับน้ำนมกลุ่ม A และน้ำนมกลุ่ม B (A:B) เปอร์เซ็นต์ | 80:20 |
| 4 | เวลาการผลิตของกระบวนการ A6 และกระบวนการ B7 ชั่วโมง/วัน | 4.63 |
| 5 | เวลาการผลิตของกระบวนการ A6 ชั่วโมง/วัน | 3.7 |
| 6 | เวลาการทำความเย็นกระบวนการ B2 ชั่วโมง | 2 |
| 7 | เวลาการผลิตทั้งหมด ชั่วโมง/วัน | 6.63 |

ตารางที่ ข.23 ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 23

| ลำดับที่ | ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 23 | ข้อกำหนด |
|----------|---|----------|
| 1 | ปริมาณการรับน้ำนมดิบ ต้น/วัน | 10 |
| 2 | กำลังการผลิต ต้น/วัน | 12 |
| 3 | สัดส่วนการรับน้ำนมกลุ่ม A และน้ำนมกลุ่ม B (A:B) เปอร์เซ็นต์ | 60:40 |
| 4 | เวลาการผลิตของกระบวนการ A6 และกระบวนการ B7 ชั่วโมง/วัน | 6.66 |
| 5 | เวลาการผลิตของกระบวนการ A6 ชั่วโมง/วัน | 4 |
| 6 | เวลาการทำความเย็นกระบวนการ B2 ชั่วโมง | 2 |
| 7 | เวลาการผลิตทั้งหมด ชั่วโมง/วัน | 6.66 |

ตารางที่ ข.24 ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 24

| ลำดับที่ | ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 24 | ข้อกำหนด |
|----------|---|----------|
| 1 | ปริมาณการรับน้ำนมดิบ ต้น/วัน | 10 |
| 2 | กำลังการผลิต ต้น/วัน | 10 |
| 3 | สัดส่วนการรับน้ำนมกลุ่ม A และน้ำนมกลุ่ม B (A:B) เปอร์เซ็นต์ | 50:50 |
| 4 | เวลาการผลิตของกระบวนการ A6 และกระบวนการ B7 ชั่วโมง/วัน | 8 |
| 5 | เวลาการผลิตของกระบวนการ A6 ชั่วโมง/วัน | 4 |
| 6 | เวลาการทำความเย็นกระบวนการ B2 ชั่วโมง | 2 |
| 7 | เวลาการผลิตทั้งหมด ชั่วโมง/วัน | 8 |

ตารางที่ ข.25 ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 25

| ลำดับที่ | ข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 25 | ข้อกำหนด |
|----------|---|----------|
| 1 | ปริมาณการรับน้ำนมดิบ ต้น/วัน | 10 |
| 2 | กำลังการผลิต ต้น/วัน | 10 |
| 3 | สัดส่วนการรับน้ำนมกลุ่ม A และน้ำนมกลุ่ม B (A:B) เปอร์เซ็นต์ | 40:60 |
| 4 | เวลาการผลิตของกระบวนการ A6 และกระบวนการ B7 ชั่วโมง/วัน | 8 |
| 5 | เวลาการผลิตของกระบวนการ A6 ชั่วโมง/วัน | 3.2 |
| 6 | เวลาการทำความเย็นกระบวนการ B2 ชั่วโมง | 2 |
| 7 | เวลาการผลิตทั้งหมด ชั่วโมง/วัน | 8 |

ข.2 ตัวอย่างการคำนวณ

ผลการคำนวณความต้องการพลังงานและพารามิเตอร์ออกแบบสำหรับวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอนแสดงในภาคผนวก ข. และผลการคำนวณความต้องการพลังงานและพารามิเตอร์ออกแบบสำหรับวัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดอุดมคติของข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยแสดงในภาคผนวก ค. ซึ่งสามารถแสดงตัวอย่างการคำนวณจากข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 1 สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอนแสดงในตารางที่ ข.1 และมีข้อกำหนดของกระบวนการทำความร้อนและกระบวนการทำความเย็นในตารางที่ ก.3 ได้ดังนี้

จากสถานะของสารทำความเย็นที่ดีที่สุดมีสถานะออกแบบในตารางที่ ข.26 แสดงผลการคำนวณในตารางที่ ค.1 โดยมีสมการทางเทอร์โมไดนามิกส์ดังนี้

ตารางที่ ข.26 สภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ออกแบบของข้อกำหนดสำหรับการศึกษาวิจัยที่ 1

| ลำดับที่ | สภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ออกแบบ | ผลการศึกษา |
|----------|--------------------------------|------------|
| 1 | $T_E, ^\circ\text{C}$ | -6 |
| 2 | $T_i, ^\circ\text{C}$ | 44 |
| 3 | $T_C, ^\circ\text{C}$ | 90 |

1. ความร้อนต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็น q_E เนื่องจากกระบวนการรับความร้อนที่ความดันคงที่ที่เครื่องทำระเหยในวัฏจักรความดันต่ำ ซึ่งมีความสัมพันธ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ตามสมการที่ (3.1) จะได้ดังนี้

$$\begin{aligned} q_E &= -0.004444T_i^2 - 1.133333T_i + (0.04T_E^2 + 1.2T_E + 196) \\ &= 131.77 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

2. ความร้อนต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็น q_C เนื่องจากกระบวนการคายความร้อนที่ความดันคงที่ที่เครื่องควบแน่นในวัฏจักรความดันสูง ซึ่งมีความสัมพันธ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ตามสมการที่ (3.2) จะได้ดังนี้

$$\begin{aligned} q_C &= (-0.000013333T_C^2 + 0.002066667T_C - 0.07895238)(T_i^2) \\ &\quad + (0.0002T_C^2 - 0.031T_C + 1.04142857)(T_i) \\ &\quad + (0.001428572T_C^2 - 1.70142866T_C + 248.36667) \\ &= 99.31 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

3. สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของเครื่องทำความเย็น COP_R ในวัฏจักรความดันต่ำ ซึ่งมีความสัมพันธ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ตามสมการที่ (3.3) จะได้ดังนี้

$$\begin{aligned} COP_R &= (7 \times 10^{-6}T_E^2 + 0.000154T_E + 0.001759)(T_i^2) \\ &\quad + (-0.001173T_E^2 - 0.025254T_E - 0.323351)(T_i) \\ &\quad + (0.049035T_E^2 + 1.077049T_E + 16.017895) \\ &= 4.01 \end{aligned}$$

4. สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของปั๊มความร้อน COP_{HP} ในวัฏจักรความดันสูง ซึ่งมีความสัมพันธ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ตามสมการที่ (3.4) จะได้ดังนี้

$$\begin{aligned} COP_{HP} &= (0.0000251T_C^2 - 0.004318T_C + 0.187234)(T_i^2) \\ &\quad + (-0.0003592T_C^2 + 0.0600947T_C - 2.4881672)(T_i) \\ &\quad + (-0.0060676T_C^2 + 0.9814138T_C - 37.38347) \\ &= 6.0 \end{aligned}$$

5. อัตราการไหลโดยมวลของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันต่ำ จากสมการที่ (3.9) เมื่อพิจารณาอัตราการไหลโดยมวลของนม \dot{m}_m เท่ากับ 0.07 kg/s และความจุความร้อนจำเพาะของนม C_p เท่ากับ 3.90 kJ/kg.K ซึ่งมีความสัมพันธ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ตามสมการที่ (3.9) จะได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\dot{m}_L &= \frac{\dot{m}_m C_p (T_{m,pc} - T_{m,out})}{q_E} \\ &= 0.095 \text{ kg/s}\end{aligned}$$

6. อัตราการไหลโดยมวลของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันต่ำ ซึ่งมีความสัมพันธ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ตามสมการที่ (3.12) จะได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\dot{m}_H &= \dot{m}_L \cdot \left\{ q_E \left(\frac{1}{COP_R} + 1 \right) / q_C \left(1 - \frac{1}{COP_{HP}} \right) \right\} \\ &= 0.19 \text{ kg/s}\end{aligned}$$

7. ความต้องการพลังงานสุทธิของวัฏจักรอัดไอสองขั้นตอน ซึ่งมีความสัมพันธ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ตามสมการที่ (4.3) จะได้ดังนี้

$$\begin{aligned}E_{net} &= \int \dot{W}_{net} dt = \int \frac{\dot{m}_L q_E}{COP_R} dt + \int \frac{\dot{m}_H q_C}{COP_{HP}} dt + \int \dot{m}_m C_p (T_{m,hot} - T_{m,ph}) dt \\ &= 110.00 \text{ MJ/day}\end{aligned}$$

8. ความต้องการพลังงานของวัฏจักรความดันต่ำ ซึ่งมีความสัมพันธ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ตามสมการที่ (4.3) จะได้ดังนี้

$$\begin{aligned}E_{LS} &= \int \dot{W}_{LS} dt = \int \frac{\dot{m}_L q_E}{COP_R} dt \\ &= 45.13 \text{ MJ/day}\end{aligned}$$

9. ความต้องการพลังงานของวัฏจักรความดันสูง ซึ่งมีความสัมพันธ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ตามสมการที่ (4.3) จะได้ดังนี้

$$\begin{aligned}E_{HS} &= \int \dot{W}_{HS} dt = \int \frac{\dot{m}_H q_C}{COP_{HP}} dt \\ &= 45.21 \text{ MJ/day}\end{aligned}$$

10. ความต้องการพลังงานของขดลวดความร้อน ซึ่งมีความสัมพันธ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ตามสมการที่ (4.3) จะได้ดังนี้

$$\begin{aligned}E_{Heater} &= \int \dot{W}_{Heater} dt = \int \dot{m}_m C_p (T_{m,hot} - T_{m,ph}) dt \\ &= 19.66 \text{ MJ/day}\end{aligned}$$

11. อัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสารทำความเย็นและนมที่เครื่องทำระเหยในกระบวนการ A6 ซึ่งมีความสัมพันธ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ตามสมการความร้อนสัมผัส จะได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{E,(A6)} &= \dot{m}_m C_p (T_{m,pc} - T_{m,out}) \\ &= 12.56 \text{ kW}\end{aligned}$$

12. สัมประสิทธิ์และพื้นที่การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสารทำความเย็นและนมที่เครื่องทำระเหยในกระบวนการ A6 เมื่อพิจารณาความแตกต่างอุณหภูมิเชิงล็อก $\Delta T_{lm,E}$ เท่ากับ 26.72°C ซึ่งมีความสัมพันธ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ตามสมการที่ (4.11) จะได้ดังนี้

$$\begin{aligned}UA_E &= \frac{\dot{Q}_{E,(A6)}}{\Delta T_{lm,E}} \\ &= 0.47 \text{ kW/K}\end{aligned}$$

13. ประสิทธิภาพของการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสารทำความเย็นและนมที่เครื่องทำระเหย ซึ่งมีความสัมพันธ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ตามสมการที่ (6.2) จะได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\mathcal{E}_E &= \frac{T_{m,pc} - T_{m,out}}{T_{m,pc} - T_E} \\ &= 0.821\end{aligned}$$

14. อัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสารทำความเย็นและนมที่เครื่องควบแน่น ซึ่งมีความสัมพันธ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ตามสมการความร้อนสัมผัส จะได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\dot{Q}_C &= \dot{m}_m C_p (T_{m,ph} - T_{m,in}) \\ &= 12.285 \text{ kW}\end{aligned}$$

15. สัมประสิทธิ์และพื้นที่การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสารทำความเย็นและนมที่เครื่องควบแน่น เมื่อพิจารณาความแตกต่างอุณหภูมิเชิงล็อก $\Delta T_{lm,C}$ เท่ากับ 26.42°C ซึ่งมีความสัมพันธ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ตามสมการที่ (4.11) จะได้ดังนี้

$$\begin{aligned}UA_C &= \frac{\dot{Q}_C}{\Delta T_{lm,C}} \\ &= 0.465 \text{ kW/K}\end{aligned}$$

16. ประสิทธิภาพของการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสารทำความเย็นและนมที่เครื่องควบแน่น ซึ่งมีความสัมพันธ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ตามสมการที่ (6.2) จะได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\mathcal{E}_C &= \frac{T_{m,ph} - T_{m,in}}{T_C - T_{m,in}} \\ &= 0.818\end{aligned}$$

17. อัตราการให้ความร้อนของขดลวดความร้อน ซึ่งมีความสัมพันธ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์
สมการความร้อนสัมพันธ์ตามสมการที่ (6.3) จะได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{Heater} &= \dot{m} C_p (T_{m,hot} - T_{m,ph}) \\ &= 1.365 \text{ kW}\end{aligned}$$

ภาคผนวก ก

ฐานข้อมูลการออกแบบสำหรับวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอน
(วัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอนโดยอาศัยเฟลชแทงค์
และวัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดอุดมคติ)

ตารางที่ ค.1 พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 1 สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอน

| ลำดับที่ | พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 1 | ผลการศึกษา | | |
|----------|-----------------------------------|------------|--------|--------|
| 1 | T_E °C | -6 | -4 | -2 |
| 2 | T_i °C | 44 | 45 | 45 |
| 3 | T_C °C | 90 | | |
| 4 | E_{net} MJ/day | 110.00 | 106.11 | 101.82 |
| 5 | E_{LS} MJ/day | 45.13 | 43.20 | 39.61 |
| 6 | E_{HS} MJ/day | 45.21 | 43.25 | 42.56 |
| 7 | E_{Heater} MJ/day | 19.66 | 19.66 | 19.66 |
| 8 | $\dot{Q}_{E,(A6)}$ kW | 12.56 | | |
| 9 | \dot{Q}_C kW | 12.285 | | |
| 10 | \dot{Q}_{Heater} kW | 1.365 | | |
| 11 | $UA_{E,(A6)}$ kW/K | 0.47 | 0.522 | 0.59 |
| 12 | $\varepsilon_{E,(A6)}$ | 0.821 | 0.852 | 0.885 |
| 13 | UA_C kW/K | 0.465 | | |
| 14 | ε_C | 0.818 | | |

ตารางที่ ค.2 พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 2 สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอน

| ลำดับที่ | พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 2 | ผลการศึกษา | | |
|----------|-----------------------------------|------------|--------|--------|
| 1 | T_E °C | -6 | -4 | -2 |
| 2 | T_i °C | 44 | 45 | 45 |
| 3 | T_C °C | 90 | | |
| 4 | E_{net} MJ/day | 122.08 | 117.67 | 112.81 |
| 5 | E_{LS} MJ/day | 51.17 | 48.98 | 44.91 |
| 6 | E_{HS} MJ/day | 51.26 | 49.03 | 48.25 |
| 7 | E_{Heater} MJ/day | 19.66 | 19.66 | 19.66 |
| 8 | $\dot{Q}_{E,(A6,B7)}$ kW | 12.56 | | |
| 9 | $\dot{Q}_{E,(B2)}$ kW | 3.36 | | |
| 10 | \dot{Q}_C kW | 20.748 | | |
| 11 | \dot{Q}_{Heater} kW | 1.365 | | |
| 12 | $UA_{E,(A6,B7)}$ kW/K | 0.47 | 0.522 | 0.59 |
| 13 | $UA_{E,(B2)}$ kW/K | 0.385 | 0.433 | 0.497 |
| 14 | $\varepsilon_{E,(A6,B7)}$ | 0.821 | 0.852 | 0.885 |
| 15 | $\varepsilon_{E,(B2)}$ | 0.756 | 0.795 | 0.838 |
| 16 | UA_C kW/K | 0.588 | | |
| 17 | ε_C | 0.884 | | |

ตารางที่ ค.3 พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 3 สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอน

| ลำดับที่ | พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 3 | ผลการศึกษา | | |
|----------|-----------------------------------|------------|--------|--------|
| 1 | T_E °C | -6 | -4 | -2 |
| 2 | T_i °C | 44 | 45 | 45 |
| 3 | T_C °C | 90 | | |
| 4 | E_{net} MJ/day | 133.25 | 128.35 | 122.95 |
| 5 | E_{LS} MJ/day | 56.83 | 54.39 | 49.87 |
| 6 | E_{HS} MJ/day | 56.93 | 54.46 | 53.59 |
| 7 | E_{Heater} MJ/day | 19.49 | 19.49 | 19.49 |
| 8 | $\dot{Q}_{E,(A6,B7)}$ kW | 9.33 | | |
| 9 | $\dot{Q}_{E,(B2)}$ kW | 6.717 | | |
| 10 | \dot{Q}_C kW | 15.413 | | |
| 11 | \dot{Q}_{Heater} kW | 1.014 | | |
| 12 | $UA_{E,(A6,B7)}$ kW/K | 0.349 | 0.388 | 0.438 |
| 13 | $UA_{E,(B2)}$ kW/K | 0.286 | 0.322 | 0.369 |
| 14 | $\varepsilon_{E,(A6,B7)}$ | 0.821 | 0.852 | 0.885 |
| 15 | $\varepsilon_{E,(B2)}$ | 0.756 | 0.795 | 0.838 |
| 16 | UA_C kW/K | 0.437 | | |
| 17 | ε_C | 0.884 | | |

ตารางที่ ค.4 พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 4 สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอน

| ลำดับที่ | พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 4 | ผลการศึกษา | | |
|----------|-----------------------------------|------------|--------|--------|
| 1 | T_E °C | -6 | -4 | -2 |
| 2 | T_i °C | 44 | 45 | 45 |
| 3 | T_C °C | 90 | | |
| 4 | E_{net} MJ/day | 140.20 | 135.00 | 129.30 |
| 5 | E_{LS} MJ/day | 60.22 | 57.64 | 52.85 |
| 6 | E_{HS} MJ/day | 60.33 | 57.71 | 56.78 |
| 7 | E_{Heater} MJ/day | 19.66 | 19.66 | 19.66 |
| 8 | $\dot{Q}_{E,(A6,B7)}$ kW | 6.28 | | |
| 9 | $\dot{Q}_{E,(B2)}$ kW | 8.4 | | |
| 10 | \dot{Q}_C kW | 10.374 | | |
| 11 | \dot{Q}_{Heater} kW | 0.683 | | |
| 12 | $UA_{E,(A6,B7)}$ kW/K | 0.235 | 0.261 | 0.295 |
| 13 | $UA_{E,(B2)}$ kW/K | 0.385 | 0.426 | 0.49 |
| 14 | $\varepsilon_{E,(A6,B7)}$ | 0.821 | 0.852 | 0.885 |
| 15 | $\varepsilon_{E,(B2)}$ | 0.756 | 0.795 | 0.838 |
| 16 | UA_C kW/K | 0.294 | | |
| 17 | ε_C | 0.884 | | |

ตารางที่ ค.5 พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 5 สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอน

| ลำดับที่ | พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 5 | ผลการศึกษา | | |
|----------|-----------------------------------|------------|--------|--------|
| 1 | T_E °C | -6 | -4 | -2 |
| 2 | T_i °C | 44 | 45 | 45 |
| 3 | T_C °C | 90 | | |
| 4 | E_{net} MJ/day | 146.30 | 140.80 | 134.80 |
| 5 | E_{LS} MJ/day | 65.14 | 60.53 | 55.50 |
| 6 | E_{HS} MJ/day | 61.50 | 60.60 | 59.63 |
| 7 | E_{Heater} MJ/day | 19.66 | 19.66 | 19.66 |
| 8 | $\dot{Q}_{E,(A6,B7)}$ kW | 6.28 | | |
| 9 | $\dot{Q}_{E,(B2)}$ kW | 10.07 | | |
| 10 | \dot{Q}_C kW | 10.374 | | |
| 11 | \dot{Q}_{Heater} kW | 0.683 | | |
| 12 | $UA_{E,(A6,B7)}$ kW/K | 0.235 | 0.261 | 0.295 |
| 13 | $UA_{E,(B2)}$ kW/K | 0.457 | 0.512 | 0.589 |
| 14 | $\varepsilon_{E,(A6,B7)}$ | 0.821 | 0.852 | 0.885 |
| 15 | $\varepsilon_{E,(B2)}$ | 0.756 | 0.795 | 0.838 |
| 16 | UA_C kW/K | 0.294 | | |
| 17 | ε_C | 0.884 | | |

ตารางที่ ค.6 พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 6 สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอน

| ลำดับที่ | พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 6 | ผลการศึกษา | | |
|----------|-----------------------------------|------------|--------|--------|
| 1 | T_E °C | -6 | -4 | -2 |
| 2 | T_i °C | 44 | 45 | 45 |
| 3 | T_C °C | 90 | | |
| 4 | E_{net} MJ/day | 220.00 | 212.21 | 203.64 |
| 5 | E_{LS} MJ/day | 90.26 | 86.40 | 79.21 |
| 6 | E_{HS} MJ/day | 90.43 | 86.50 | 85.11 |
| 7 | E_{Heater} MJ/day | 39.31 | 39.31 | 39.31 |
| 8 | $\dot{Q}_{E,(A6)}$ kW | 25.12 | | |
| 9 | \dot{Q}_C kW | 24.57 | | |
| 10 | \dot{Q}_{Heater} kW | 2.73 | | |
| 11 | $UA_{E,(A6)}$ kW/K | 0.939 | 1.043 | 1.181 |
| 12 | $\varepsilon_{E,(A6)}$ | 0.821 | 0.852 | 0.885 |
| 13 | UA_C kW/K | 0.93 | | |
| 14 | ε_C | 0.818 | | |

ตารางที่ ค.7 พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 7 สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอน

| ลำดับที่ | พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 7 | ผลการศึกษา | | |
|----------|-----------------------------------|------------|--------|--------|
| 1 | T_E °C | -6 | -4 | -2 |
| 2 | T_i °C | 44 | 45 | 45 |
| 3 | T_C °C | 90 | | |
| 4 | E_{net} MJ/day | 244.16 | 235.33 | 225.61 |
| 5 | E_{LS} MJ/day | 102.33 | 97.95 | 89.80 |
| 6 | E_{HS} MJ/day | 102.52 | 98.07 | 96.50 |
| 7 | E_{Heater} MJ/day | 39.31 | 39.31 | 39.31 |
| 8 | $\dot{Q}_{E,(A6,B7)}$ kW | 25.12 | | |
| 9 | $\dot{Q}_{E,(B2)}$ kW | 6.717 | | |
| 10 | \dot{Q}_C kW | 41.496 | | |
| 11 | \dot{Q}_{Heater} kW | 2.73 | | |
| 12 | $UA_{E,(A6,B7)}$ kW/K | 0.939 | 1.043 | 1.181 |
| 13 | $UA_{E,(B2)}$ kW/K | 0.308 | 0.346 | 0.398 |
| 14 | $\varepsilon_{E,(A6,B7)}$ | 0.821 | 0.852 | 0.885 |
| 15 | $\varepsilon_{E,(B2)}$ | 0.756 | 0.795 | 0.838 |
| 16 | UA_C kW/K | 1.176 | | |
| 17 | ε_C | 0.884 | | |

ตารางที่ ค.8 พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 8 สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอน

| ลำดับที่ | พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 8 | ผลการศึกษา | | |
|----------|-----------------------------------|------------|--------|--------|
| 1 | T_E °C | -6 | -4 | -2 |
| 2 | T_i °C | 44 | 45 | 45 |
| 3 | T_C °C | 90 | | |
| 4 | E_{net} MJ/day | 267.06 | 257.24 | 246.42 |
| 5 | E_{LS} MJ/day | 113.90 | 109.01 | 99.94 |
| 6 | E_{HS} MJ/day | 114.09 | 109.14 | 107.39 |
| 7 | E_{Heater} MJ/day | 39.31 | 39.31 | 39.31 |
| 8 | $\dot{Q}_{E,(A6,B7)}$ kW | 15.61 | | |
| 9 | $\dot{Q}_{E,(B2)}$ kW | 13.43 | | |
| 10 | \dot{Q}_C kW | 25.787 | | |
| 11 | \dot{Q}_{Heater} kW | 1.697 | | |
| 12 | $UA_{E,(A6,B7)}$ kW/K | 0.584 | 0.388 | 0.438 |
| 13 | $UA_{E,(B2)}$ kW/K | 0.611 | 0.686 | 0.788 |
| 14 | $\varepsilon_{E,(A6,B7)}$ | 0.821 | 0.852 | 0.885 |
| 15 | $\varepsilon_{E,(B2)}$ | 0.756 | 0.795 | 0.838 |
| 16 | UA_C kW/K | 0.731 | | |
| 17 | ε_C | 0.884 | | |

ตารางที่ ค.9 พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 9 สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอน

| ลำดับที่ | พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 9 | ผลการศึกษา | | |
|----------|-----------------------------------|------------|--------|--------|
| 1 | T_E °C | -6 | -4 | -2 |
| 2 | T_i °C | 44 | 45 | 45 |
| 3 | T_C °C | 90 | | |
| 4 | E_{net} MJ/day | 280.40 | 270.04 | 258.57 |
| 5 | E_{LS} MJ/day | 120.44 | 113.34 | 105.70 |
| 6 | E_{HS} MJ/day | 120.65 | 117.40 | 113.57 |
| 7 | E_{Heater} MJ/day | 39.31 | 39.31 | 39.31 |
| 8 | $\dot{Q}_{E,(A6,B7)}$ kW | 12.56 | | |
| 9 | $\dot{Q}_{E,(B2)}$ kW | 16.79 | | |
| 10 | \dot{Q}_C kW | 20.748 | | |
| 11 | \dot{Q}_{Heater} kW | 1.365 | | |
| 12 | $UA_{E,(A6,B7)}$ kW/K | 0.470 | 0.522 | 0.590 |
| 13 | $UA_{E,(B2)}$ kW/K | 0.765 | 0.859 | 0.987 |
| 14 | $\varepsilon_{E,(A6,B7)}$ | 0.821 | 0.852 | 0.885 |
| 15 | $\varepsilon_{E,(B2)}$ | 0.756 | 0.795 | 0.838 |
| 16 | UA_C kW/K | 0.588 | | |
| 17 | ε_C | 0.884 | | |

ตารางที่ ค.10 พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 10 สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอน

| ลำดับที่ | พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 10 | ผลการศึกษา | | |
|----------|------------------------------------|------------|--------|--------|
| 1 | T_E °C | -6 | -4 | -2 |
| 2 | T_i °C | 44 | 45 | 45 |
| 3 | T_C °C | 90 | | |
| 4 | E_{net} MJ/day | 292.48 | 281.57 | 269.56 |
| 5 | E_{LS} MJ/day | 126.47 | 121.06 | 111.00 |
| 6 | E_{HS} MJ/day | 126.70 | 121.20 | 119.26 |
| 7 | E_{Heater} MJ/day | 39.31 | 39.31 | 39.31 |
| 8 | $\dot{Q}_{E,(A6,B7)}$ kW | 12.56 | | |
| 9 | $\dot{Q}_{E,(B2)}$ kW | 20.15 | | |
| 10 | \dot{Q}_C kW | 20.748 | | |
| 11 | \dot{Q}_{Heater} kW | 1.365 | | |
| 12 | $UA_{E,(A6,B7)}$ kW/K | 0.470 | 0.522 | 0.590 |
| 13 | $UA_{E,(B2)}$ kW/K | 0.919 | 1.032 | 1.185 |
| 14 | $\varepsilon_{E,(A6,B7)}$ | 0.821 | 0.852 | 0.885 |
| 15 | $\varepsilon_{E,(B2)}$ | 0.756 | 0.795 | 0.838 |
| 16 | UA_C kW/K | 0.588 | | |
| 17 | ε_C | 0.884 | | |

ตารางที่ ค.11 พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 11 สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอน

| ลำดับที่ | พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 11 | ผลการศึกษา | | |
|----------|------------------------------------|------------|--------|--------|
| 1 | T_E °C | -6 | -4 | -2 |
| 2 | T_i °C | 44 | 45 | 45 |
| 3 | T_C °C | 90 | | |
| 4 | E_{net} MJ/day | 326.86 | 315.30 | 302.55 |
| 5 | E_{LS} MJ/day | 134.10 | 128.52 | 117.70 |
| 6 | E_{HS} MJ/day | 134.35 | 128.52 | 126.45 |
| 7 | E_{Heater} MJ/day | 58.63 | 58.63 | 58.63 |
| 8 | $\dot{Q}_{E,(A6)}$ kW | 37.32 | | |
| 9 | \dot{Q}_C kW | 36.50 | | |
| 10 | \dot{Q}_{Heater} kW | 4.056 | | |
| 11 | $UA_{E,(A6)}$ kW/K | 1.396 | 1.550 | 1.754 |
| 12 | $\varepsilon_{E,(A6)}$ | 0.821 | 0.852 | 0.885 |
| 13 | UA_C kW/K | 1.382 | | |
| 14 | ε_C | 0.818 | | |

ตารางที่ ค.12 พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 12 สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอน

| ลำดับที่ | พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 12 | ผลการศึกษา | | |
|----------|------------------------------------|------------|--------|--------|
| 1 | T_E °C | -6 | -4 | -2 |
| 2 | T_i °C | 44 | 45 | 45 |
| 3 | T_C °C | 90 | | |
| 4 | E_{net} MJ/day | 364.35 | 351.18 | 336.67 |
| 5 | E_{LS} MJ/day | 152.72 | 146.20 | 134.03 |
| 6 | E_{HS} MJ/day | 153.00 | 146.36 | 144.00 |
| 7 | E_{Heater} MJ/day | 58.63 | 58.63 | 58.63 |
| 8 | $\dot{Q}_{E,(A6,B7)}$ kW | 31.22 | | |
| 9 | $\dot{Q}_{E,(B2)}$ kW | 10.08 | | |
| 10 | \dot{Q}_C kW | 51.574 | | |
| 11 | \dot{Q}_{Heater} kW | 3.393 | | |
| 12 | $UA_{E,(A6,B7)}$ kW/K | 1.167 | 1.296 | 1.468 |
| 13 | $UA_{E,(B2)}$ kW/K | 0.457 | 0.513 | 0.590 |
| 14 | $\varepsilon_{E,(A6,B7)}$ | 0.821 | 0.852 | 0.885 |
| 15 | $\varepsilon_{E,(B2)}$ | 0.756 | 0.795 | 0.838 |
| 16 | UA_C kW/K | 1.462 | | |
| 17 | ε_C | 0.884 | | |

ตารางที่ ค.13 พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 13 สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอน

| ลำดับที่ | พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 13 | ผลการศึกษา | | |
|----------|------------------------------------|------------|--------|--------|
| 1 | T_E °C | -6 | -4 | -2 |
| 2 | T_i °C | 44 | 45 | 45 |
| 3 | T_C °C | 90 | | |
| 4 | E_{net} MJ/day | 402.48 | 387.68 | 371.37 |
| 5 | E_{LS} MJ/day | 171.60 | 164.26 | 150.60 |
| 6 | E_{HS} MJ/day | 171.90 | 164.50 | 161.80 |
| 7 | E_{Heater} MJ/day | 58.97 | 58.97 | 58.97 |
| 8 | $\dot{Q}_{E,(A6,B7)}$ kW | 25.12 | | |
| 9 | $\dot{Q}_{E,(B2)}$ kW | 20.15 | | |
| 10 | \dot{Q}_C kW | 41.50 | | |
| 11 | \dot{Q}_{Heater} kW | 2.73 | | |
| 12 | $UA_{E,(A6,B7)}$ kW/K | 0.940 | 1.043 | 1.181 |
| 13 | $UA_{E,(B2)}$ kW/K | 0.920 | 1.032 | 1.185 |
| 14 | $\varepsilon_{E,(A6,B7)}$ | 0.821 | 0.852 | 0.885 |
| 15 | $\varepsilon_{E,(B2)}$ | 0.756 | 0.795 | 0.838 |
| 16 | UA_C kW/K | 1.176 | | |
| 17 | ε_C | 0.884 | | |

ตารางที่ ค.14 พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 14 สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอน

| ลำดับที่ | พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 14 | ผลการศึกษา | | |
|----------|------------------------------------|------------|--------|--------|
| 1 | T_E °C | -6 | -4 | -2 |
| 2 | T_i °C | 44 | 45 | 45 |
| 3 | T_C °C | 90 | | |
| 4 | E_{net} MJ/day | 418.09 | 402.48 | 385.53 |
| 5 | E_{LS} MJ/day | 179.62 | 171.94 | 157.63 |
| 6 | E_{HS} MJ/day | 179.90 | 172.10 | 169.40 |
| 7 | E_{Heater} MJ/day | 58.52 | 58.52 | 58.52 |
| 8 | $\dot{Q}_{E,(A6,B7)}$ kW | 18.69 | | |
| 9 | $\dot{Q}_{E,(B2)}$ kW | 29.64 | | |
| 10 | \dot{Q}_C kW | 30.885 | | |
| 11 | \dot{Q}_{Heater} kW | 2.032 | | |
| 12 | $UA_{E,(A6,B7)}$ kW/K | 0.700 | 0.776 | 0.880 |
| 13 | $UA_{E,(B2)}$ kW/K | 1.144 | 1.286 | 1.131 |
| 14 | $\varepsilon_{E,(A6,B7)}$ | 0.821 | 0.852 | 0.885 |
| 15 | $\varepsilon_{E,(B2)}$ | 0.756 | 0.795 | 0.838 |
| 16 | UA_C kW/K | 0.875 | | |
| 17 | ε_C | 0.884 | | |

ตารางที่ ค.15 พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 15 สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอน

| ลำดับที่ | พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 15 | ผลการศึกษา | | |
|----------|------------------------------------|------------|--------|--------|
| 1 | T_E °C | -6 | -4 | -2 |
| 2 | T_i °C | 44 | 45 | 45 |
| 3 | T_C °C | 90 | | |
| 4 | E_{net} MJ/day | 436.21 | 419.93 | 402.00 |
| 5 | E_{LS} MJ/day | 188.67 | 180.60 | 165.58 |
| 6 | E_{HS} MJ/day | 189.01 | 180.81 | 177.91 |
| 7 | E_{Heater} MJ/day | 58.52 | 58.52 | 58.52 |
| 8 | $\dot{Q}_{E,(A6,B7)}$ kW | 18.69 | | |
| 9 | $\dot{Q}_{E,(B2)}$ kW | 30.23 | | |
| 10 | \dot{Q}_C kW | 30.885 | | |
| 11 | \dot{Q}_{Heater} kW | 2.031 | | |
| 12 | $UA_{E,(A6,B7)}$ kW/K | 0.700 | 0.776 | 0.880 |
| 13 | $UA_{E,(B2)}$ kW/K | 1.375 | 1.545 | 1.775 |
| 14 | $\varepsilon_{E,(A6,B7)}$ | 0.821 | 0.852 | 0.885 |
| 15 | $\varepsilon_{E,(B2)}$ | 0.756 | 0.795 | 0.838 |
| 16 | UA_C kW/K | 0.875 | | |
| 17 | ε_C | 0.884 | | |

ตารางที่ ค.16 พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 16 สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอน

| ลำดับที่ | พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 16 | ผลการศึกษา | | |
|----------|------------------------------------|------------|--------|--------|
| 1 | T_E °C | -6 | -4 | -2 |
| 2 | T_i °C | 44 | 45 | 45 |
| 3 | T_C °C | 90 | | |
| 4 | E_{net} MJ/day | 545.30 | 526.00 | 504.73 |
| 5 | E_{LS} MJ/day | 223.72 | 214.15 | 196.33 |
| 6 | E_{HS} MJ/day | 224.13 | 214.40 | 210.96 |
| 7 | E_{Heater} MJ/day | 97.44 | 97.44 | 97.44 |
| 8 | $\dot{Q}_{E,(A6)}$ kW | 62.25 | | |
| 9 | \dot{Q}_C kW | 60.90 | | |
| 10 | \dot{Q}_{Heater} kW | 6.767 | | |
| 11 | $UA_{E,(A6)}$ kW/K | 2.328 | 2.586 | 2.927 |
| 12 | $\varepsilon_{E,(A6)}$ | 0.821 | 0.852 | 0.885 |
| 13 | UA_C kW/K | 2.306 | | |
| 14 | ε_C | 0.818 | | |

ตารางที่ ค.17 พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 17 สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอน

| ลำดับที่ | พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 17 | ผลการศึกษา | | |
|----------|------------------------------------|------------|--------|--------|
| 1 | T_E °C | -6 | -4 | -2 |
| 2 | T_i °C | 44 | 45 | 45 |
| 3 | T_C °C | 90 | | |
| 4 | E_{net} MJ/day | 610.40 | 588.33 | 564.03 |
| 5 | E_{LS} MJ/day | 255.83 | 244.88 | 224.51 |
| 6 | E_{HS} MJ/day | 256.30 | 245.17 | 241.24 |
| 7 | E_{Heater} MJ/day | 98.28 | 98.28 | 98.28 |
| 8 | $\dot{Q}_{E,(A6,B7)}$ kW | 50.23 | | |
| 9 | $\dot{Q}_{E,(B2)}$ kW | 16.79 | | |
| 10 | \dot{Q}_C kW | 83 | | |
| 11 | \dot{Q}_{Heater} kW | 5.46 | | |
| 12 | $UA_{E,(A6,B7)}$ kW/K | 1.880 | 2.086 | 2.362 |
| 13 | $UA_{E,(B2)}$ kW/K | 0.765 | 0.860 | 0.987 |
| 14 | $\varepsilon_{E,(A6,B7)}$ | 0.821 | 0.852 | 0.885 |
| 15 | $\varepsilon_{E,(B2)}$ | 0.756 | 0.795 | 0.838 |
| 16 | UA_C kW/K | 2.352 | | |
| 17 | ε_C | 0.884 | | |

ตารางที่ ค.18 พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 18 สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอน

| ลำดับที่ | พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 18 | ผลการศึกษา | | |
|----------|------------------------------------|------------|--------|--------|
| 1 | T_E °C | -6 | -4 | -2 |
| 2 | T_i °C | 44 | 45 | 45 |
| 3 | T_C °C | 90 | | |
| 4 | E_{net} MJ/day | 666.65 | 642.13 | 615.12 |
| 5 | E_{LS} MJ/day | 284.30 | 272.13 | 249.50 |
| 6 | E_{HS} MJ/day | 284.80 | 272.50 | 268.10 |
| 7 | E_{Heater} MJ/day | 97.54 | 97.54 | 97.54 |
| 8 | $\dot{Q}_{E,(A6,B7)}$ kW | 33.38 | | |
| 9 | $\dot{Q}_{E,(B2)}$ kW | 37.32 | | |
| 10 | \dot{Q}_C kW | 61.65 | | |
| 11 | \dot{Q}_{Heater} kW | 4.056 | | |
| 12 | $UA_{E,(A6,B7)}$ kW/K | 1.396 | 1.550 | 1.754 |
| 13 | $UA_{E,(B2)}$ kW/K | 1.530 | 1.718 | 1.973 |
| 14 | $\varepsilon_{E,(A6,B7)}$ | 0.821 | 0.852 | 0.885 |
| 15 | $\varepsilon_{E,(B2)}$ | 0.756 | 0.795 | 0.838 |
| 16 | UA_C kW/K | 1.747 | | |
| 17 | ε_C | 0.884 | | |

ตารางที่ ค.19 พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 19 สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอน

| ลำดับที่ | พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 19 | ผลการศึกษา | | |
|----------|------------------------------------|------------|--------|--------|
| 1 | T_E °C | -6 | -4 | -2 |
| 2 | T_i °C | 44 | 45 | 45 |
| 3 | T_C °C | 90 | | |
| 4 | E_{net} MJ/day | 697.86 | 672.00 | 643.51 |
| 5 | E_{LS} MJ/day | 299.80 | 286.97 | 263.10 |
| 6 | E_{HS} MJ/day | 300.34 | 287.31 | 282.70 |
| 7 | E_{Heater} MJ/day | 97.72 | 97.72 | 97.72 |
| 8 | $\dot{Q}_{E,(A6,B7)}$ kW | 41.97 | | |
| 9 | $\dot{Q}_{E,(B2)}$ kW | 31.22 | | |
| 10 | \dot{Q}_C kW | 51.574 | | |
| 11 | \dot{Q}_{Heater} kW | 3.393 | | |
| 12 | $UA_{E,(A6,B7)}$ kW/K | 1.167 | 1.296 | 1.468 |
| 13 | $UA_{E,(B2)}$ kW/K | 1.910 | 2.145 | 2.463 |
| 14 | $\varepsilon_{E,(A6,B7)}$ | 0.821 | 0.852 | 0.885 |
| 15 | $\varepsilon_{E,(B2)}$ | 0.756 | 0.795 | 0.838 |
| 16 | UA_C kW/K | 1.462 | | |
| 17 | ε_C | 0.884 | | |

ตารางที่ ค.20 พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 20 สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอน

| ลำดับที่ | พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 20 | ผลการศึกษา | | |
|----------|------------------------------------|------------|--------|--------|
| 1 | T_E °C | -6 | -4 | -2 |
| 2 | T_i °C | 44 | 45 | 45 |
| 3 | T_C °C | 90 | | |
| 4 | E_{net} MJ/day | 728.06 | 700.90 | 670.98 |
| 5 | E_{LS} MJ/day | 314.90 | 301.41 | 276.34 |
| 6 | E_{HS} MJ/day | 315.45 | 301.77 | 296.92 |
| 7 | E_{Heater} MJ/day | 97.72 | 97.72 | 97.72 |
| 8 | $\dot{Q}_{E,(A6,B7)}$ kW | 50.38 | | |
| 9 | $\dot{Q}_{E,(B2)}$ kW | 31.22 | | |
| 10 | \dot{Q}_C kW | 51.574 | | |
| 11 | \dot{Q}_{Heater} kW | 3.393 | | |
| 12 | $UA_{E,(A6,B7)}$ kW/K | 1.167 | 1.296 | 1.468 |
| 13 | $UA_{E,(B2)}$ kW/K | 2.294 | 2.577 | 2.960 |
| 14 | $\varepsilon_{E,(A6,B7)}$ | 0.821 | 0.852 | 0.885 |
| 15 | $\varepsilon_{E,(B2)}$ | 0.756 | 0.795 | 0.838 |
| 16 | UA_C kW/K | 1.462 | | |
| 17 | ε_C | 0.884 | | |

ตารางที่ ค.21 พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 21 สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอน

| ลำดับที่ | พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 21 | ผลการศึกษา | | |
|----------|------------------------------------|------------|---------|---------|
| 1 | T_E °C | -6 | -4 | -2 |
| 2 | T_i °C | 44 | 45 | 45 |
| 3 | T_C °C | 90 | | |
| 4 | E_{net} MJ/day | 1100.00 | 1061.07 | 1018.19 |
| 5 | E_{LS} MJ/day | 451.31 | 432.00 | 396.06 |
| 6 | E_{HS} MJ/day | 452.13 | 432.51 | 425.57 |
| 7 | E_{Heater} MJ/day | 196.56 | 196.56 | 196.56 |
| 8 | $\dot{Q}_{E,(A6)}$ kW | 125.58 | | |
| 9 | \dot{Q}_C kW | 122.85 | | |
| 10 | \dot{Q}_{Heater} kW | 13.65 | | |
| 11 | $UA_{E,(A6)}$ kW/K | 4.697 | 5.216 | 5.905 |
| 12 | $\varepsilon_{E,(A6)}$ | 0.821 | 0.852 | 0.885 |
| 13 | UA_C kW/K | 4.651 | | |
| 14 | ε_C | 0.818 | | |

ตารางที่ ค.22 พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 22 สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอน

| ลำดับที่ | พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 22 | ผลการศึกษา | | |
|----------|------------------------------------|------------|---------|---------|
| 1 | T_E °C | -6 | -4 | -2 |
| 2 | T_i °C | 44 | 45 | 45 |
| 3 | T_C °C | 90 | | |
| 4 | E_{net} MJ/day | 1212.20 | 1168.30 | 1120.10 |
| 5 | E_{LS} MJ/day | 508.11 | 486.37 | 445.91 |
| 6 | E_{HS} MJ/day | 509.03 | 486.94 | 479.13 |
| 7 | E_{Heater} MJ/day | 195.02 | 195.02 | 195.02 |
| 8 | $\dot{Q}_{E,(A6,B7)}$ kW | 107.64 | | |
| 9 | $\dot{Q}_{E,(B2)}$ kW | 33.58 | | |
| 10 | \dot{Q}_C kW | 117.84 | | |
| 11 | \dot{Q}_{Heater} kW | 11.7 | | |
| 12 | $UA_{E,(A6,B7)}$ kW/K | 4.026 | 4.471 | 5.061 |
| 13 | $UA_{E,(B2)}$ kW/K | 1.530 | 1.718 | 1.973 |
| 14 | $\varepsilon_{E,(A6,B7)}$ | 0.821 | 0.852 | 0.885 |
| 15 | $\varepsilon_{E,(B2)}$ | 0.756 | 0.795 | 0.838 |
| 16 | UA_C kW/K | 5.041 | | |
| 17 | ε_C | 0.884 | | |

ตารางที่ ค.23 พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 23 สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอน

| ลำดับที่ | พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 23 | ผลการศึกษา | | |
|----------|------------------------------------|------------|---------|---------|
| 1 | T_E °C | -6 | -4 | -2 |
| 2 | T_i °C | 44 | 45 | 45 |
| 3 | T_C °C | 90 | | |
| 4 | E_{net} MJ/day | 1332.65 | 1283.63 | 1229.63 |
| 5 | E_{LS} MJ/day | 586.33 | 544.01 | 498.76 |
| 6 | E_{HS} MJ/day | 569.40 | 544.70 | 535.90 |
| 7 | E_{Heater} MJ/day | 194.96 | 194.96 | 194.96 |
| 8 | $\dot{Q}_{E,(A6,B7)}$ kW | 74.81 | | |
| 9 | $\dot{Q}_{E,(B2)}$ kW | 67.17 | | |
| 10 | \dot{Q}_C kW | 123.60 | | |
| 11 | \dot{Q}_{Heater} kW | 8.132 | | |
| 12 | $UA_{E,(A6,B7)}$ kW/K | 2.798 | 3.107 | 3.517 |
| 13 | $UA_{E,(B2)}$ kW/K | 3.059 | 3.436 | 3.947 |
| 14 | $\varepsilon_{E,(A6,B7)}$ | 0.821 | 0.852 | 0.885 |
| 15 | $\varepsilon_{E,(B2)}$ | 0.756 | 0.795 | 0.838 |
| 16 | UA_C kW/K | 3.503 | | |
| 17 | ε_C | 0.884 | | |

ตารางที่ ค.24 พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 24 สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอน

| ลำดับที่ | พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 24 | ผลการศึกษา | | |
|----------|------------------------------------|------------|---------|---------|
| 1 | T_E °C | -6 | -4 | -2 |
| 2 | T_i °C | 44 | 45 | 45 |
| 3 | T_C °C | 90 | | |
| 4 | E_{net} MJ/day | 1392.58 | 1340.96 | 1284.12 |
| 5 | E_{LS} MJ/day | 598.31 | 572.71 | 525.06 |
| 6 | E_{HS} MJ/day | 599.40 | 573.38 | 564.18 |
| 7 | E_{Heater} MJ/day | 194.88 | 194.88 | 194.88 |
| 8 | $\dot{Q}_{E,(A6,B7)}$ kW | 62.25 | | |
| 9 | $\dot{Q}_{E,(B2)}$ kW | 83.96 | | |
| 10 | \dot{Q}_C kW | 102.85 | | |
| 11 | \dot{Q}_{Heater} kW | 6.767 | | |
| 12 | $UA_{E,(A6,B7)}$ kW/K | 2.328 | 2.586 | 2.927 |
| 13 | $UA_{E,(B2)}$ kW/K | 3.818 | 4.289 | 4.926 |
| 14 | $\varepsilon_{E,(A6,B7)}$ | 0.821 | 0.852 | 0.885 |
| 15 | $\varepsilon_{E,(B2)}$ | 0.756 | 0.795 | 0.838 |
| 16 | UA_C kW/K | 2.915 | | |
| 17 | ε_C | 0.884 | | |

ตารางที่ ค.25 พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 25 สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอน

| ลำดับที่ | พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 25 | ผลการศึกษา | | |
|----------|------------------------------------|------------|---------|---------|
| 1 | T_E °C | -6 | -4 | -2 |
| 2 | T_i °C | 44 | 45 | 45 |
| 3 | T_C °C | 90 | | |
| 4 | E_{net} MJ/day | 1452.98 | 1398.76 | 1339.05 |
| 5 | E_{LS} MJ/day | 628.48 | 601.60 | 551.54 |
| 6 | E_{HS} MJ/day | 629.62 | 602.30 | 592.63 |
| 7 | E_{Heater} MJ/day | 194.88 | 194.88 | 194.88 |
| 8 | $\dot{Q}_{E,(A6,B7)}$ kW | 62.25 | | |
| 9 | $\dot{Q}_{E,(B2)}$ kW | 83.96 | | |
| 10 | \dot{Q}_C kW | 102.85 | | |
| 11 | \dot{Q}_{Heater} kW | 6.767 | | |
| 12 | $UA_{E,(A6,B7)}$ kW/K | 2.328 | 2.586 | 2.927 |
| 13 | $UA_{E,(B2)}$ kW/K | 3.818 | 4.289 | 4.926 |
| 14 | $\varepsilon_{E,(A6,B7)}$ | 0.821 | 0.852 | 0.885 |
| 15 | $\varepsilon_{E,(B2)}$ | 0.756 | 0.795 | 0.838 |
| 16 | UA_C kW/K | 2.915 | | |
| 17 | ε_C | 0.884 | | |

ภาคผนวก ง

ฐานข้อมูลการออกแบบสำหรับวัฏจักรอัดไอแบบแคสเคดจริง

ตารางที่ ง.1 พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 1 สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบแกสเคดจริง

| ลำดับที่ | พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 1 | ผลการศึกษา | |
|----------|-----------------------------------|------------|--------|
| 1 | T_E °C | -4 | |
| 2 | T_i °C | 45 | |
| 3 | $\Delta T'$ และ $\Delta T''$ °C | 5 | 10 |
| 4 | T_C °C | 90 | |
| 5 | E_{net} MJ/day | 123.90 | 147.40 |
| 6 | E_{LS} MJ/day | 50.56 | 59.68 |
| 7 | E_{HS} MJ/day | 53.71 | 68.09 |
| 8 | E_{Heater} MJ/day | 19.66 | 19.66 |
| 9 | $\dot{Q}_{E,(A6)}$ kW | 12.56 | |
| 10 | \dot{Q}_i kW | 16.07 | 16.70 |
| 11 | \dot{Q}_C kW | 12.285 | |
| 12 | \dot{Q}_{Heater} kW | 1.365 | |
| 13 | $UA_{E,(A6)}$ kW/K | 0.522 | |
| 14 | $\varepsilon_{E,(A6)}$ | 0.852 | |
| 15 | UA_C kW/K | 0.465 | |
| 16 | ε_C | 0.818 | |
| 17 | UA_i kW/K | 1.607 | 0.835 |

ตารางที่ ง.2 พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 2 สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบแกสเคดจริง

| ลำดับที่ | พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 2 | ผลการศึกษา | |
|----------|-----------------------------------|------------|--------|
| 1 | T_E °C | -4 | |
| 2 | T_i °C | 45 | |
| 3 | $\Delta T'$ และ $\Delta T''$ °C | 5 | 10 |
| 4 | T_C °C | 90 | |
| 5 | E_{net} MJ/day | 137.81 | 164.51 |
| 6 | E_{LS} MJ/day | 57.32 | 67.66 |
| 7 | E_{HS} MJ/day | 60.89 | 77.20 |
| 8 | E_{Heater} MJ/day | 19.66 | 19.66 |
| 9 | $\dot{Q}_{E,(A6,B7)}$ kW | 12.56 | |
| 10 | $\dot{Q}_{E,(B2)}$ kW | 3.36 | |
| 11 | \dot{Q}_i kW | 16.07 | 16.70 |
| 12 | \dot{Q}_C kW | 20.748 | |
| 13 | \dot{Q}_{Heater} kW | 1.365 | |
| 14 | $UA_{E,(A6,B7)}$ kW/K | 0.522 | |
| 15 | $UA_{E,(B2)}$ kW/K | 0.433 | |
| 16 | $\varepsilon_{E,(A6,B7)}$ | 0.852 | |
| 17 | $\varepsilon_{E,(B2)}$ | 0.795 | |
| 18 | UA_C kW/K | 0.588 | |
| 19 | ε_C | 0.884 | |
| 20 | UA_i kW/K | 1.607 | 0.835 |

ตารางที่ ง.3 พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 3 สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบแกสเคดจริง

| ลำดับที่ | พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 3 | ผลการศึกษา | |
|----------|-----------------------------------|------------|--------|
| 1 | T_E °C | -4 | |
| 2 | T_i °C | 45 | |
| 3 | $\Delta T'$ และ $\Delta T''$ °C | 5 | 10 |
| 4 | T_C °C | 90 | |
| 5 | E_{net} MJ/day | 150.80 | 180.38 |
| 6 | E_{LS} MJ/day | 63.66 | 75.15 |
| 7 | E_{HS} MJ/day | 67.60 | 85.70 |
| 8 | E_{Heater} MJ/day | 19.50 | 19.50 |
| 9 | $\dot{Q}_{E,(A6,B7)}$ kW | 9.33 | |
| 10 | $\dot{Q}_{E,(B2)}$ kW | 6.72 | |
| 11 | \dot{Q}_i kW | 11.94 | 12.41 |
| 12 | \dot{Q}_C kW | 15.413 | |
| 13 | \dot{Q}_{Heater} kW | 1.014 | |
| 14 | $UA_{E,(A6,B7)}$ kW/K | 0.388 | |
| 15 | $UA_{E,(B2)}$ kW/K | 0.322 | |
| 16 | $\varepsilon_{E,(A6,B7)}$ | 0.852 | |
| 17 | $\varepsilon_{E,(B2)}$ | 0.795 | |
| 18 | UA_C kW/K | 0.437 | |
| 19 | ε_C | 0.884 | |
| 20 | UA_i kW/K | 1.194 | 0.651 |

ตารางที่ ง.4 พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 4 สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบแกสเคดจริง

| ลำดับที่ | พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 4 | ผลการศึกษา | |
|----------|-----------------------------------|------------|--------|
| 1 | T_E °C | -4 | |
| 2 | T_i °C | 45 | |
| 3 | $\Delta T'$ และ $\Delta T''$ °C | 5 | 10 |
| 4 | T_C °C | 90 | |
| 5 | E_{net} MJ/day | 158.80 | 190.14 |
| 6 | E_{LS} MJ/day | 67.46 | 79.63 |
| 7 | E_{HS} MJ/day | 71.67 | 90.85 |
| 8 | E_{Heater} MJ/day | 19.66 | 19.66 |
| 9 | $\dot{Q}_{E,(A6,B7)}$ kW | 6.28 | |
| 10 | $\dot{Q}_{E,(B2)}$ kW | 8.4 | |
| 11 | \dot{Q}_i kW | 18.78 | 19.52 |
| 12 | \dot{Q}_C kW | 10.374 | |
| 13 | \dot{Q}_{Heater} kW | 0.683 | |
| 14 | $UA_{E,(A6,B7)}$ kW/K | 0.261 | |
| 15 | $UA_{E,(B2)}$ kW/K | 0.426 | |
| 16 | $\varepsilon_{E,(A6,B7)}$ | 0.852 | |
| 17 | $\varepsilon_{E,(B2)}$ | 0.795 | |
| 18 | UA_C kW/K | 0.294 | |
| 19 | ε_C | 0.884 | |
| 20 | UA_i kW/K | 1.878 | 0.976 |

ตารางที่ ง.5 พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 5 สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบแกสเคดจริง

| ลำดับที่ | พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 5 | ผลการศึกษา | |
|----------|-----------------------------------|------------|--------|
| 1 | T_E °C | -4 | |
| 2 | T_i °C | 45 | |
| 3 | $\Delta T'$ และ $\Delta T''$ °C | 5 | 10 |
| 4 | T_C °C | 90 | |
| 5 | E_{net} MJ/day | 165.76 | 198.68 |
| 6 | E_{LS} MJ/day | 70.84 | 83.62 |
| 7 | E_{HS} MJ/day | 75.26 | 95.40 |
| 8 | E_{Heater} MJ/day | 19.66 | 19.66 |
| 9 | $\dot{Q}_{E,(A6,B7)}$ kW | 6.28 | |
| 10 | $\dot{Q}_{E,(B2)}$ kW | 10.07 | |
| 11 | \dot{Q}_i kW | 20.93 | 21.75 |
| 12 | \dot{Q}_C kW | 10.374 | |
| 13 | \dot{Q}_{Heater} kW | 0.683 | |
| 14 | $UA_{E,(A6,B7)}$ kW/K | 0.261 | |
| 15 | $UA_{E,(B2)}$ kW/K | 0.512 | |
| 16 | $\varepsilon_{E,(A6,B7)}$ | 0.852 | |
| 17 | $\varepsilon_{E,(B2)}$ | 0.795 | |
| 18 | UA_C kW/K | 0.294 | |
| 19 | ε_C | 0.884 | |
| 20 | UA_i kW/K | 2.093 | 1.088 |

ตารางที่ ง.6 พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 6 สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบแกสเคดจริง

| ลำดับที่ | พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 6 | ผลการศึกษา | |
|----------|-----------------------------------|------------|--------|
| 1 | T_E °C | -4 | |
| 2 | T_i °C | 45 | |
| 3 | $\Delta T'$ และ $\Delta T''$ °C | 5 | 10 |
| 4 | T_C °C | 90 | |
| 5 | E_{net} MJ/day | 247.86 | 294.86 |
| 6 | E_{LS} MJ/day | 101.12 | 119.36 |
| 7 | E_{HS} MJ/day | 107.42 | 136.18 |
| 8 | E_{Heater} MJ/day | 39.31 | 39.31 |
| 9 | $\dot{Q}_{E,(A6)}$ kW | 25.12 | |
| 10 | \dot{Q}_i kW | 32.14 | 33.41 |
| 11 | \dot{Q}_C kW | 24.57 | |
| 12 | \dot{Q}_{Heater} kW | 2.73 | |
| 13 | $UA_{E,(A6)}$ kW/K | 1.043 | |
| 14 | $\varepsilon_{E,(A6)}$ | 0.852 | |
| 15 | UA_C kW/K | 0.93 | |
| 16 | ε_C | 0.818 | |
| 17 | UA_i kW/K | 3.214 | 1.671 |

ตารางที่ ง.7 พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 7 สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบแกสเคดจริง

| ลำดับที่ | พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 7 | ผลการศึกษา | |
|----------|-----------------------------------|------------|--------|
| 1 | T_E °C | -4 | |
| 2 | T_i °C | 45 | |
| 3 | $\Delta T'$ และ $\Delta T''$ °C | 5 | 10 |
| 4 | T_C °C | 90 | |
| 5 | E_{net} MJ/day | 275.74 | 329.03 |
| 6 | E_{LS} MJ/day | 114.64 | 135.32 |
| 7 | E_{HS} MJ/day | 121.80 | 154.40 |
| 8 | E_{Heater} MJ/day | 39.31 | 39.31 |
| 9 | $\dot{Q}_{E,(A6,B7)}$ kW | 25.12 | |
| 10 | $\dot{Q}_{E,(B2)}$ kW | 6.717 | |
| 11 | \dot{Q}_i kW | 32.14 | 33.41 |
| 12 | \dot{Q}_C kW | 41.496 | |
| 13 | \dot{Q}_{Heater} kW | 2.73 | |
| 14 | $UA_{E,(A6,B7)}$ kW/K | 1.043 | |
| 15 | $UA_{E,(B2)}$ kW/K | 0.346 | |
| 16 | $\varepsilon_{E,(A6,B7)}$ | 0.852 | |
| 17 | $\varepsilon_{E,(B2)}$ | 0.795 | |
| 18 | UA_C kW/K | 1.176 | |
| 19 | ε_C | 0.884 | |
| 20 | UA_i kW/K | 3.214 | 1.671 |

ตารางที่ ง.8 พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 8 สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบแกสเคดจริง

| ลำดับที่ | พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 8 | ผลการศึกษา | |
|----------|-----------------------------------|------------|--------|
| 1 | T_E °C | -4 | |
| 2 | T_i °C | 45 | |
| 3 | $\Delta T'$ และ $\Delta T''$ °C | 5 | 10 |
| 4 | T_C °C | 90 | |
| 5 | E_{net} MJ/day | 302.21 | 361.51 |
| 6 | E_{LS} MJ/day | 127.60 | 150.60 |
| 7 | E_{HS} MJ/day | 135.54 | 171.82 |
| 8 | E_{Heater} MJ/day | 39.09 | 39.09 |
| 9 | $\dot{Q}_{E,(A6,B7)}$ kW | 15.61 | |
| 10 | $\dot{Q}_{E,(B2)}$ kW | 13.43 | |
| 11 | \dot{Q}_i kW | 37.16 | 38.63 |
| 12 | \dot{Q}_C kW | 25.787 | |
| 13 | \dot{Q}_{Heater} kW | 1.697 | |
| 14 | $UA_{E,(A6,B7)}$ kW/K | 0.388 | |
| 15 | $UA_{E,(B2)}$ kW/K | 0.686 | |
| 16 | $\varepsilon_{E,(A6,B7)}$ | 0.852 | |
| 17 | $\varepsilon_{E,(B2)}$ | 0.795 | |
| 18 | UA_C kW/K | 0.731 | |
| 19 | ε_C | 0.884 | |
| 20 | UA_i kW/K | 3.716 | 1.932 |

ตารางที่ ง.9 พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 9 สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบแกสเคดจริง

| ลำดับที่ | พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 9 | ผลการศึกษา | |
|----------|-----------------------------------|------------|--------|
| 1 | T_E °C | -4 | |
| 2 | T_i °C | 45 | |
| 3 | $\Delta T'$ และ $\Delta T''$ °C | 5 | 10 |
| 4 | T_C °C | 90 | |
| 5 | E_{net} MJ/day | 317.57 | 380.28 |
| 6 | E_{LS} MJ/day | 134.92 | 159.27 |
| 7 | E_{HS} MJ/day | 143.34 | 181.70 |
| 8 | E_{Heater} MJ/day | 39.31 | 39.31 |
| 9 | $\dot{Q}_{E,(A6,B7)}$ kW | 12.56 | |
| 10 | $\dot{Q}_{E,(B2)}$ kW | 16.79 | |
| 11 | \dot{Q}_i kW | 37.56 | 39.04 |
| 12 | \dot{Q}_C kW | 20.748 | |
| 13 | \dot{Q}_{Heater} kW | 1.365 | |
| 14 | $UA_{E,(A6,B7)}$ kW/K | 0.522 | |
| 15 | $UA_{E,(B2)}$ kW/K | 0.859 | |
| 16 | $\varepsilon_{E,(A6,B7)}$ | 0.852 | |
| 17 | $\varepsilon_{E,(B2)}$ | 0.795 | |
| 18 | UA_C kW/K | 0.588 | |
| 19 | ε_C | 0.884 | |
| 20 | UA_i kW/K | 3.756 | 1.952 |

ตารางที่ ง.10 พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 10 สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบแกลสเคดจริง

| ลำดับที่ | พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 10 | ผลการศึกษา | |
|----------|------------------------------------|------------|--------|
| 1 | T_E °C | -4 | |
| 2 | T_i °C | 45 | |
| 3 | $\Delta T'$ และ $\Delta T''$ °C | 5 | 10 |
| 4 | T_C °C | 90 | |
| 5 | E_{net} MJ/day | 331.51 | 397.36 |
| 6 | E_{LS} MJ/day | 141.68 | 167.25 |
| 7 | E_{HS} MJ/day | 150.52 | 190.81 |
| 8 | E_{Heater} MJ/day | 39.31 | 39.31 |
| 9 | $\dot{Q}_{E,(A6,B7)}$ kW | 12.56 | |
| 10 | $\dot{Q}_{E,(B2)}$ kW | 20.15 | |
| 11 | \dot{Q}_i kW | 41.85 | 43.50 |
| 12 | \dot{Q}_C kW | 20.748 | |
| 13 | \dot{Q}_{Heater} kW | 1.365 | |
| 14 | $UA_{E,(A6,B7)}$ kW/K | 0.522 | |
| 15 | $UA_{E,(B2)}$ kW/K | 1.032 | |
| 16 | $\varepsilon_{E,(A6,B7)}$ | 0.852 | |
| 17 | $\varepsilon_{E,(B2)}$ | 0.795 | |
| 18 | UA_C kW/K | 0.588 | |
| 19 | ε_C | 0.884 | |
| 20 | UA_i kW/K | 4.185 | 2.175 |

ตารางที่ ง.11 พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 11 สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบแอสเทดจริง

| ลำดับที่ | พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 11 | ผลการศึกษา | |
|----------|------------------------------------|------------|--------|
| 1 | T_E °C | -4 | |
| 2 | T_i °C | 45 | |
| 3 | $\Delta T'$ และ $\Delta T''$ °C | 5 | 10 |
| 4 | T_C °C | 90 | |
| 5 | E_{net} MJ/day | 368.25 | 438.07 |
| 6 | E_{LS} MJ/day | 150.24 | 177.34 |
| 7 | E_{HS} MJ/day | 159.60 | 202.32 |
| 8 | E_{Heater} MJ/day | 58.41 | 58.41 |
| 9 | $\dot{Q}_{E,(A6)}$ kW | 37.32 | |
| 10 | \dot{Q}_i kW | 47.75 | 49.63 |
| 11 | \dot{Q}_C kW | 36.50 | |
| 12 | \dot{Q}_{Heater} kW | 4.056 | |
| 13 | $UA_{E,(A6)}$ kW/K | 1.550 | |
| 14 | $\varepsilon_{E,(A6)}$ | 0.852 | |
| 15 | UA_C kW/K | 1.382 | |
| 16 | ε_C | 0.818 | |
| 17 | UA_i kW/K | 3.183 | 2.48 |

ตารางที่ ง.12 พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 12 สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบแอสเคดจริง

| ลำดับที่ | พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 12 | ผลการศึกษา | |
|----------|------------------------------------|------------|--------|
| 1 | T_E °C | -4 | |
| 2 | T_i °C | 45 | |
| 3 | $\Delta T'$ และ $\Delta T''$ °C | 5 | 10 |
| 4 | T_C °C | 90 | |
| 5 | E_{net} MJ/day | 411.50 | 491.01 |
| 6 | E_{LS} MJ/day | 171.10 | 201.96 |
| 7 | E_{HS} MJ/day | 181.76 | 230.41 |
| 8 | E_{Heater} MJ/day | 58.63 | 58.63 |
| 9 | $\dot{Q}_{E,(A6,B7)}$ kW | 31.22 | |
| 10 | $\dot{Q}_{E,(B2)}$ kW | 10.08 | |
| 11 | \dot{Q}_i kW | 39.94 | 41.52 |
| 12 | \dot{Q}_C kW | 51.574 | |
| 13 | \dot{Q}_{Heater} kW | 3.393 | |
| 14 | $UA_{E,(A6,B7)}$ kW/K | 1.296 | |
| 15 | $UA_{E,(B2)}$ kW/K | 0.513 | |
| 16 | $\varepsilon_{E,(A6,B7)}$ | 0.852 | |
| 17 | $\varepsilon_{E,(B2)}$ | 0.795 | |
| 18 | UA_C kW/K | 1.462 | |
| 19 | ε_C | 0.884 | |
| 20 | UA_i kW/K | 3.994 | 2.076 |

ตารางที่ ง.13 พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 13 สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบแอสเทดจริง

| ลำดับที่ | พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 13 | ผลการศึกษา | |
|----------|------------------------------------|------------|--------|
| 1 | T_E °C | -4 | |
| 2 | T_i °C | 45 | |
| 3 | $\Delta T'$ และ $\Delta T''$ °C | 5 | 10 |
| 4 | T_C °C | 90 | |
| 5 | E_{net} MJ/day | 455.44 | 544.80 |
| 6 | E_{LS} MJ/day | 192.25 | 226.93 |
| 7 | E_{HS} MJ/day | 204.20 | 258.90 |
| 8 | E_{Heater} MJ/day | 58.97 | 58.97 |
| 9 | $\dot{Q}_{E,(A6,B7)}$ kW | 25.12 | |
| 10 | $\dot{Q}_{E,(B2)}$ kW | 20.15 | |
| 11 | \dot{Q}_i kW | 32.14 | 33.41 |
| 12 | \dot{Q}_C kW | 41.50 | |
| 13 | \dot{Q}_{Heater} kW | 2.73 | |
| 14 | $UA_{E,(A6,B7)}$ kW/K | 1.043 | |
| 15 | $UA_{E,(B2)}$ kW/K | 1.032 | |
| 16 | $\varepsilon_{E,(A6,B7)}$ | 0.852 | |
| 17 | $\varepsilon_{E,(B2)}$ | 0.795 | |
| 18 | UA_C kW/K | 1.176 | |
| 19 | ε_C | 0.884 | |
| 20 | UA_i kW/K | 3.214 | 1.671 |

ตารางที่ ง.14 พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 14 สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบแอสเคดจริง

| ลำดับที่ | พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 14 | ผลการศึกษา | |
|----------|------------------------------------|------------|--------|
| 1 | T_E °C | -4 | |
| 2 | T_i °C | 45 | |
| 3 | $\Delta T'$ และ $\Delta T''$ °C | 5 | 10 |
| 4 | T_C °C | 90 | |
| 5 | E_{net} MJ/day | 473.52 | 567.05 |
| 6 | E_{LS} MJ/day | 201.23 | 237.53 |
| 7 | E_{HS} MJ/day | 213.80 | 271.00 |
| 8 | E_{Heater} MJ/day | 58.52 | 58.52 |
| 9 | $\dot{Q}_{E,(A6,B7)}$ kW | 18.69 | |
| 10 | $\dot{Q}_{E,(B2)}$ kW | 29.64 | |
| 11 | \dot{Q}_i kW | 56.15 | 58.36 |
| 12 | \dot{Q}_C kW | 30.885 | |
| 13 | \dot{Q}_{Heater} kW | 2.032 | |
| 14 | $UA_{E,(A6,B7)}$ kW/K | 0.776 | |
| 15 | $UA_{E,(B2)}$ kW/K | 1.286 | |
| 16 | $\varepsilon_{E,(A6,B7)}$ | 0.852 | |
| 17 | $\varepsilon_{E,(B2)}$ | 0.795 | |
| 18 | UA_C kW/K | 0.875 | |
| 19 | ε_C | 0.884 | |
| 20 | UA_i kW/K | 5.615 | 2.918 |

ตารางที่ ง.15 พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 15 สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบแอสเคดจริง

| ลำดับที่ | พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 15 | ผลการศึกษา | |
|----------|------------------------------------|------------|--------|
| 1 | T_E °C | -4 | |
| 2 | T_i °C | 45 | |
| 3 | $\Delta T'$ และ $\Delta T''$ °C | 5 | 10 |
| 4 | T_C °C | 90 | |
| 5 | E_{net} MJ/day | 494.44 | 592.68 |
| 6 | E_{LS} MJ/day | 211.37 | 249.50 |
| 7 | E_{HS} MJ/day | 224.55 | 284.65 |
| 8 | E_{Heater} MJ/day | 58.52 | 58.52 |
| 9 | $\dot{Q}_{E,(A6,B7)}$ kW | 18.69 | |
| 10 | $\dot{Q}_{E,(B2)}$ kW | 30.23 | |
| 11 | \dot{Q}_i kW | 62.60 | 65.06 |
| 12 | \dot{Q}_C kW | 30.885 | |
| 13 | \dot{Q}_{Heater} kW | 2.031 | |
| 14 | $UA_{E,(A6,B7)}$ kW/K | 0.776 | |
| 15 | $UA_{E,(B2)}$ kW/K | 1.545 | |
| 16 | $\varepsilon_{E,(A6,B7)}$ | 0.852 | |
| 17 | $\varepsilon_{E,(B2)}$ | 0.795 | |
| 18 | UA_C kW/K | 0.875 | |
| 19 | ε_C | 0.884 | |
| 20 | UA_i kW/K | 4.173 | 3.253 |

ตารางที่ ง.16 พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 16 สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบแควสเคดจริง

| ลำดับที่ | พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 16 | ผลการศึกษา | |
|----------|------------------------------------|------------|--------|
| 1 | T_E °C | -4 | |
| 2 | T_i °C | 45 | |
| 3 | $\Delta T'$ และ $\Delta T''$ °C | 5 | 10 |
| 4 | T_C °C | 90 | |
| 5 | E_{net} MJ/day | 614.33 | 730.82 |
| 6 | E_{LS} MJ/day | 250.64 | 295.85 |
| 7 | E_{HS} MJ/day | 266.26 | 337.53 |
| 8 | E_{Heater} MJ/day | 97.44 | 97.44 |
| 9 | $\dot{Q}_{E,(A6)}$ kW | 62.25 | |
| 10 | \dot{Q}_i kW | 79.66 | 82.80 |
| 11 | \dot{Q}_C kW | 60.90 | |
| 12 | \dot{Q}_{Heater} kW | 6.767 | |
| 13 | $UA_{E,(A6)}$ kW/K | 2.586 | |
| 14 | $\varepsilon_{E,(A6)}$ | 0.852 | |
| 15 | UA_C kW/K | 2.306 | |
| 16 | ε_C | 0.818 | |
| 17 | UA_i kW/K | 5.311 | 4.140 |

ตารางที่ ง.17 พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 17 สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบแอสเคดจริง

| ลำดับที่ | พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 17 | ผลการศึกษา | |
|----------|------------------------------------|------------|--------|
| 1 | T_E °C | -4 | |
| 2 | T_i °C | 45 | |
| 3 | $\Delta T'$ และ $\Delta T''$ °C | 5 | 10 |
| 4 | T_C °C | 90 | |
| 5 | E_{net} MJ/day | 689.36 | 822.56 |
| 6 | E_{LS} MJ/day | 286.61 | 338.31 |
| 7 | E_{HS} MJ/day | 304.47 | 385.97 |
| 8 | E_{Heater} MJ/day | 98.28 | 98.28 |
| 9 | $\dot{Q}_{E,(A6,B7)}$ kW | 50.23 | |
| 10 | $\dot{Q}_{E,(B2)}$ kW | 16.79 | |
| 11 | \dot{Q}_i kW | 64.28 | 66.81 |
| 12 | \dot{Q}_C kW | 83 | |
| 13 | \dot{Q}_{Heater} kW | 5.46 | |
| 14 | $UA_{E,(A6,B7)}$ kW/K | 2.086 | |
| 15 | $UA_{E,(B2)}$ kW/K | 0.860 | |
| 16 | $\varepsilon_{E,(A6,B7)}$ | 0.852 | |
| 17 | $\varepsilon_{E,(B2)}$ | 0.795 | |
| 18 | UA_C kW/K | 2.352 | |
| 19 | ε_C | 0.884 | |
| 20 | UA_i kW/K | 4.285 | 3.341 |

ตารางที่ ง.18 พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 18 สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบแอสเคดจริง

| ลำดับที่ | พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 18 | ผลการศึกษา | |
|----------|------------------------------------|------------|--------|
| 1 | T_E °C | -4 | |
| 2 | T_i °C | 45 | |
| 3 | $\Delta T'$ และ $\Delta T''$ °C | 5 | 10 |
| 4 | T_C °C | 90 | |
| 5 | E_{net} MJ/day | 754.40 | 902.43 |
| 6 | E_{LS} MJ/day | 318.50 | 375.96 |
| 7 | E_{HS} MJ/day | 338.36 | 428.92 |
| 8 | E_{Heater} MJ/day | 97.54 | 97.54 |
| 9 | $\dot{Q}_{E,(A6,B7)}$ kW | 33.38 | |
| 10 | $\dot{Q}_{E,(B2)}$ kW | 37.32 | |
| 11 | \dot{Q}_i kW | 90.72 | 94.30 |
| 12 | \dot{Q}_C kW | 61.65 | |
| 13 | \dot{Q}_{Heater} kW | 4.056 | |
| 14 | $UA_{E,(A6,B7)}$ kW/K | 1.550 | |
| 15 | $UA_{E,(B2)}$ kW/K | 1.718 | |
| 16 | $\varepsilon_{E,(A6,B7)}$ | 0.852 | |
| 17 | $\varepsilon_{E,(B2)}$ | 0.795 | |
| 18 | UA_C kW/K | 1.747 | |
| 19 | ε_C | 0.884 | |
| 20 | UA_i kW/K | 6.048 | 4.715 |

ตารางที่ ง.19 พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 19 สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบแอสเทดจริง

| ลำดับที่ | พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 19 | ผลการศึกษา | |
|----------|------------------------------------|------------|--------|
| 1 | T_E °C | -4 | |
| 2 | T_i °C | 45 | |
| 3 | $\Delta T'$ และ $\Delta T''$ °C | 5 | 10 |
| 4 | T_C °C | 90 | |
| 5 | E_{net} MJ/day | 790.39 | 946.50 |
| 6 | E_{LS} MJ/day | 335.87 | 396.46 |
| 7 | E_{HS} MJ/day | 356.80 | 452.31 |
| 8 | E_{Heater} MJ/day | 97.72 | 97.72 |
| 9 | $\dot{Q}_{E,(A6,B7)}$ kW | 41.97 | |
| 10 | $\dot{Q}_{E,(B2)}$ kW | 31.22 | |
| 11 | \dot{Q}_i kW | 93.66 | 97.35 |
| 12 | \dot{Q}_C kW | 51.574 | |
| 13 | \dot{Q}_{Heater} kW | 3.393 | |
| 14 | $UA_{E,(A6,B7)}$ kW/K | 1.296 | |
| 15 | $UA_{E,(B2)}$ kW/K | 2.145 | |
| 16 | $\varepsilon_{E,(A6,B7)}$ | 0.852 | |
| 17 | $\varepsilon_{E,(B2)}$ | 0.795 | |
| 18 | UA_C kW/K | 1.462 | |
| 19 | ε_C | 0.884 | |
| 20 | UA_i kW/K | 6.244 | 4.868 |

ตารางที่ ง.20 พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 20 สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบแอสเคดจริง

| ลำดับที่ | พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 20 | ผลการศึกษา | |
|----------|------------------------------------|------------|--------|
| 1 | T_E °C | -4 | |
| 2 | T_i °C | 45 | |
| 3 | $\Delta T'$ และ $\Delta T''$ °C | 5 | 10 |
| 4 | T_C °C | 90 | |
| 5 | E_{net} MJ/day | 825.24 | 989.20 |
| 6 | E_{LS} MJ/day | 352.77 | 416.41 |
| 7 | E_{HS} MJ/day | 374.76 | 475.07 |
| 8 | E_{Heater} MJ/day | 97.72 | 97.72 |
| 9 | $\dot{Q}_{E,(A6,B7)}$ kW | 50.38 | |
| 10 | $\dot{Q}_{E,(B2)}$ kW | 31.22 | |
| 11 | \dot{Q}_i kW | 104.40 | 108.52 |
| 12 | \dot{Q}_C kW | 51.574 | |
| 13 | \dot{Q}_{Heater} kW | 3.393 | |
| 14 | $UA_{E,(A6,B7)}$ kW/K | 1.296 | |
| 15 | $UA_{E,(B2)}$ kW/K | 2.577 | |
| 16 | $\varepsilon_{E,(A6,B7)}$ | 0.852 | |
| 17 | $\varepsilon_{E,(B2)}$ | 0.795 | |
| 18 | UA_C kW/K | 1.462 | |
| 19 | ε_C | 0.884 | |
| 20 | UA_i kW/K | 6.960 | 5.426 |

ตารางที่ ง.21 พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 21 สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบแอสเทดจริง

| ลำดับที่ | พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 21 | ผลการศึกษา | |
|----------|------------------------------------|------------|---------|
| 1 | T_E °C | -4 | |
| 2 | T_i °C | 45 | |
| 3 | $\Delta T'$ และ $\Delta T''$ °C | 5 | 10 |
| 4 | T_C °C | 90 | |
| 5 | E_{net} MJ/day | 1239.30 | 1474.28 |
| 6 | E_{LS} MJ/day | 505.61 | 596.82 |
| 7 | E_{HS} MJ/day | 537.12 | 680.90 |
| 8 | E_{Heater} MJ/day | 196.56 | 196.56 |
| 9 | $\dot{Q}_{E,(A6)}$ kW | 125.58 | |
| 10 | \dot{Q}_i kW | 160.69 | 167.63 |
| 11 | \dot{Q}_C kW | 122.85 | |
| 12 | \dot{Q}_{Heater} kW | 13.65 | |
| 13 | $UA_{E,(A6)}$ kW/K | 5.216 | |
| 14 | $\varepsilon_{E,(A6)}$ | 0.852 | |
| 15 | UA_C kW/K | 4.651 | |
| 16 | ε_C | 0.818 | |
| 17 | UA_i kW/K | 10.713 | 8.382 |

ตารางที่ ง.22 พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 22 สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบแอสเทดจริง

| ลำดับที่ | พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 22 | ผลการศึกษา | |
|----------|------------------------------------|------------|---------|
| 1 | T_E °C | -4 | |
| 2 | T_i °C | 45 | |
| 3 | $\Delta T'$ และ $\Delta T''$ °C | 5 | 10 |
| 4 | T_C °C | 90 | |
| 5 | E_{net} MJ/day | 1368.98 | 1474.28 |
| 6 | E_{LS} MJ/day | 569.24 | 671.94 |
| 7 | E_{HS} MJ/day | 604.73 | 766.60 |
| 8 | E_{Heater} MJ/day | 195.02 | 195.02 |
| 9 | $\dot{Q}_{E,(A6,B7)}$ kW | 107.64 | |
| 10 | $\dot{Q}_{E,(B2)}$ kW | 33.58 | |
| 11 | \dot{Q}_i kW | 137.74 | 143.17 |
| 12 | \dot{Q}_C kW | 117.84 | |
| 13 | \dot{Q}_{Heater} kW | 11.7 | |
| 14 | $UA_{E,(A6,B7)}$ kW/K | 4.471 | |
| 15 | $UA_{E,(B2)}$ kW/K | 1.718 | |
| 16 | $\varepsilon_{E,(A6,B7)}$ | 0.852 | |
| 17 | $\varepsilon_{E,(B2)}$ | 0.795 | |
| 18 | UA_C kW/K | 5.041 | |
| 19 | ε_C | 0.884 | |
| 20 | UA_i kW/K | 9.183 | 7.159 |

ตารางที่ ง.23 พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 23 สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบแอสเคดจริง

| ลำดับที่ | พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 23 | ผลการศึกษา | |
|----------|------------------------------------|------------|---------|
| 1 | T_E °C | -4 | |
| 2 | T_i °C | 45 | |
| 3 | $\Delta T'$ และ $\Delta T''$ °C | 5 | 10 |
| 4 | T_C °C | 90 | |
| 5 | E_{net} MJ/day | 1508.06 | 1803.98 |
| 6 | E_{LS} MJ/day | 636.70 | 751.57 |
| 7 | E_{HS} MJ/day | 676.40 | 857.45 |
| 8 | E_{Heater} MJ/day | 194.96 | 194.96 |
| 9 | $\dot{Q}_{E,(A6,B7)}$ kW | 74.81 | |
| 10 | $\dot{Q}_{E,(B2)}$ kW | 67.17 | |
| 11 | \dot{Q}_i kW | 181.67 | 188.83 |
| 12 | \dot{Q}_C kW | 123.60 | |
| 13 | \dot{Q}_{Heater} kW | 8.132 | |
| 14 | $UA_{E,(A6,B7)}$ kW/K | 3.107 | |
| 15 | $UA_{E,(B2)}$ kW/K | 3.436 | |
| 16 | $\varepsilon_{E,(A6,B7)}$ | 0.852 | |
| 17 | $\varepsilon_{E,(B2)}$ | 0.795 | |
| 18 | UA_C kW/K | 3.503 | |
| 19 | ε_C | 0.884 | |
| 20 | UA_i kW/K | 12.111 | 9.442 |

ตารางที่ ง.24 พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 24 สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบแอสเทดจริง

| ลำดับที่ | พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 24 | ผลการศึกษา | |
|----------|------------------------------------|------------|---------|
| 1 | T_E °C | -4 | |
| 2 | T_i °C | 45 | |
| 3 | $\Delta T'$ และ $\Delta T''$ °C | 5 | 10 |
| 4 | T_C °C | 90 | |
| 5 | E_{net} MJ/day | 1577.23 | 1888.76 |
| 6 | E_{LS} MJ/day | 670.30 | 791.21 |
| 7 | E_{HS} MJ/day | 712.07 | 902.67 |
| 8 | E_{Heater} MJ/day | 194.88 | 194.88 |
| 9 | $\dot{Q}_{E,(A6,B7)}$ kW | 62.25 | |
| 10 | $\dot{Q}_{E,(B2)}$ kW | 83.96 | |
| 11 | \dot{Q}_i kW | 187.09 | 194.47 |
| 12 | \dot{Q}_C kW | 102.85 | |
| 13 | \dot{Q}_{Heater} kW | 6.767 | |
| 14 | $UA_{E,(A6,B7)}$ kW/K | 2.586 | |
| 15 | $UA_{E,(B2)}$ kW/K | 4.289 | |
| 16 | $\varepsilon_{E,(A6,B7)}$ | 0.852 | |
| 17 | $\varepsilon_{E,(B2)}$ | 0.795 | |
| 18 | UA_C kW/K | 2.915 | |
| 19 | ε_C | 0.884 | |
| 20 | UA_i kW/K | 12.473 | 9.724 |

ตารางที่ ง.25 พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 25 สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบแกลสเคดจริง

| ลำดับที่ | พารามิเตอร์ออกแบบตามข้อกำหนดที่ 25 | ผลการศึกษา | |
|----------|------------------------------------|------------|---------|
| 1 | T_E °C | -4 | |
| 2 | T_i °C | 45 | |
| 3 | $\Delta T'$ และ $\Delta T''$ °C | 5 | 10 |
| 4 | T_C °C | 90 | |
| 5 | E_{net} MJ/day | 1646.95 | 1974.18 |
| 6 | E_{LS} MJ/day | 704.09 | 831.11 |
| 7 | E_{HS} MJ/day | 747.98 | 948.20 |
| 8 | E_{Heater} MJ/day | 194.88 | 194.88 |
| 9 | $\dot{Q}_{E,(A6,B7)}$ kW | 62.25 | |
| 10 | $\dot{Q}_{E,(B2)}$ kW | 100.75 | |
| 11 | \dot{Q}_i kW | 208.58 | 216.80 |
| 12 | \dot{Q}_C kW | 102.851 | |
| 13 | \dot{Q}_{Heater} kW | 6.767 | |
| 14 | $UA_{E,(A6,B7)}$ kW/K | 2.586 | |
| 15 | $UA_{E,(B2)}$ kW/K | 5.148 | |
| 16 | $\varepsilon_{E,(A6,B7)}$ | 0.852 | |
| 17 | $\varepsilon_{E,(B2)}$ | 0.795 | |
| 18 | UA_C kW/K | 2.915 | |
| 19 | ε_C | 0.884 | |
| 20 | UA_i kW/K | 13.905 | 10.840 |

ภาคผนวก จ

โปรแกรมออฟติไมเซชัน

```

*****

% Lattice Search Programming for Thermodynamics Optimization for Two Stage Vapor
Compression System for Milk Pasteurizing Process.

% Programming by Chaiwat Seangpeng

%Write on Matlab

%August 2009

*****

%Lattice Search Programming

*****

raw_milk=input('Enter raw milk (1-10 tons/day): \n');
capacity=input('Enter capacity (1-20 tons/day): \n');
group_A=input('Enter raw milk group A % : \n');
group_B=input('Enter raw milk group B % : \n');
time_A6andB7=input('Enter time of process A6 and B7: \n');
time_B2=2/(3600);
total_time=input('Enter total time: \n');
m=(capacity*1000)/3600;
Te=input('Enter Evaporating Temp. Te<4: \n');
Ti=input('Enter Intermediate Temp. Te<Ti<Tc: \n');
Tc=input('Enter Condensing Temp. Ti<Tc<90: \n');
step=1;
while esp<10^-2
%for center point (point 5)
    f5=obj_TS;% Objective funtion of center point
    f=f5;
%for point 1
    Ti1=Ti-step;
    Tc1=Tc-step;
    f1=obj_TS;% Objective funtion of point 1
    if f1<f

```

```
Ti_new=Ti1;
Tc_new=Tc1;
f=f1;
end
%for point 2
Ti1=Ti-step;
Tc1=Tc;
f2=obj_TS;
if f2<f
    Ti_new=Ti1;
    Tc1_new=Tc1;
    f=f2;
end
%for point 3
Ti1=Ti-step;
Tc1=Tc+step;
f3=obj_TS;
if f3<f
    Ti_new=Ti1;
    Tc_new=Tc1;
    f=f3;
end
%for point 4
Ti1=Ti;
Tc1=Tc-step;
f4=obj_TS;
if f4<f
    Ti_new=Ti1;
    Tc_new=Tc1;
    f=f4;
```

```
end
%for point 6
    Ti1=Ti;
    Tc1=Tc+step;
    f6=obj_TS;
    if f6<f
        Ti_new=Ti1;
        Tc_new=Tc1;
        f=f6;
    end
%for point 7
    Ti1=Ti+step;
    Tc1=Tc-step;
    f7=obj_TS;
    if f7<f
        Ti_new=Ti1;
        Tc_new=Tc1;
        f=f7;
    end
%for point 8
    Ti1=Ti+step;
    Tc1=Tc;
    f8=obj_TS;
    if f8<f
        Ti_new=Ti1;
        Tc_new=Tc1;
        f=f8;
    end
%for point 9
    Ti1=Ti+step;
```

```

Tc1=Tc+step;
f9=obj_TS;
if f9<f
    Ti_new=Ti1;
    Tc_new=Tc1;
    f=f9;
end
Ti=Ti_new;
Tc=Tc_new;
esp=abs(f5-f);
if Tc==90
    break;
end
end
fprintf('The optimum temperature Ti=%d ,Tc=%d where Te=%d.',Ti,Tc,Te);
*****
%Objective Function
*****
function Enet=obj_funcTS(Te,Ti,Tc)
qe=-.004444*(Ti.^2)-1.133333.*Ti+(.04*(Te.^2)+1.2.*Te+196);
qc=(-.000013333*(Tc.^2)+.002066667.*Tc-.07895238).*(Ti.^2)+(.0002*(Tc.^2)...
-.031.*Tc+1.04142857).*Ti+(.001428572*(Tc.^2)-1.70142866.*Tc+248.36667);
COP_R=(.000007*(Te.^2)+.000154.*Te+.001759).*(Ti.^2)+(-.001173*(Te.^2)...
-.025254.*Te-.323351).*Ti+(.049035*(Te.^2)+1.077049.*Te+16.017895);
COP_HP=(.0000251*(Tc.^2)-.004318.*Tc+.187234).*(Ti.^2)+(-.0003592*(Tc.^2)...
+.0600947.*Tc-2.4881672).*Ti+(-.0060676*(Tc.^2)+.9814138.*Tc-37.38347);
Qe_A6andB7=(m*3.9*(50-4));
Qe_B2=(group_B*raw_milk*1000/(time_B2));
Qe=Qe_A6andB7+Qe_B2;
mL_A6andB7=Qe_A6andB7./qe;

```



```

mH_A6andB7=mL_A6andB7.*qe.*((1./COP_R)+1)./(qc.*(1-(1./COP_HP)));
Qc_A6andB7=mH_A6andB7.*qc;
WLS_A6andB7=Qe_A6andB7./COP_R;
WHS_A6andB7=Qc_A6andB7./COP_HP;
mL_B2=Qe_B2./qe;
mH_B2=mL_B2.*qe.*((1./COP_R)+1)./(qc.*(1-(1./COP_HP)));
Qc_B2=mH_B2.*qc;
WLS_B2=Qe_B2./COP_R;
WHS_B2=Qc_B2./COP_HP;
Wh=m*3.9.*(85-(Tc-10));
Enet=(WLS_A6andB7+WHS_A6andB7)*time_A6andB7+(WLS_B2+WHS_B2)*time_B2+...
(Wh)*time_A6andB7;
end

```

```

*****

```

ภาคผนวก ฉ

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 5
29 เมษายน-1 พฤษภาคม 2552 มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ พิษณุโลก

**แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับระบบการทำความร้อน
แบบอัดไอสองขั้นตอนในกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์นม**
**Thermodynamics Modeling for Two Stage Vapor Compression Systems
in Milk Pasteurizing Process**

ชัยวัฒน์ แสงเพ็ง^{1*} ธีระชาติ พรพิบูลย์²

^{1,2} สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
จังหวัดนครราชสีมา 30000 โทร 044 224 498 โทรสาร 044 224 613

Chaiwat Seangpeng^{1*} Teerachart Pornpibul²

^{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 *Corresponding author: Chaiwat_sut@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับระบบการทำความร้อนแบบอัดไอสองขั้นตอนในกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์นมแบบบรรจุร้อน โดยระบบที่ทำการศึกษานี้ประกอบด้วย 1. วัฏจักรอัดไอสองขั้นตอนโดยอาศัยแฟลชแทงก์และ 2. วัฏจักรอัดไอแบบแคสเคด การศึกษาวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอวิธีการสร้างสมการทางเทอร์โมไดนามิกส์ในรูปแบบของความต้องการพลังงานสุทธิของระบบการทำความร้อนแบบอัดไอสองขั้นตอนและพลังงานความร้อนของขดลวดความร้อน สำหรับกรณีศึกษาขนาดกำลังการผลิตน้ำนมดิบ 3 ตันต่อวัน ซึ่งแนวโน้มที่ได้จะทำให้ทราบถึงสภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็นที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาข้างต้น

คำสำคัญ: แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ระบบการทำความร้อนแบบอัดไอสองขั้นตอน วัฏจักรอัดไอสองขั้นตอนโดยอาศัยแฟลชแทงก์ วัฏจักรอัดไอแบบแคสเคด

Abstract

This research presents a Thermodynamics Modeling for Two Stage Vapor compression systems in a Hot-filled milk pasteurizing process. The systems which are applied on a pasteurizing process, can be classified into two concepts. The first concept is the Two Stage Vapor compression cycle with a Flash Tank and the second is a Cascade Vapor compression cycle. An aim of this paper is to present a Thermodynamics modeling method, formed of the total power consumption of the system with an auxiliary heater. Furthermore, this paper shows the thermodynamics models analysis in case of raw milk capacity of 3 tons per day. The optimum states of refrigerant are shown on the result of the study.

Keyword: Thermodynamics Modeling/Two Stage Vapor compression systems/Two Stage Vapor compression cycle with a Flash Tank / Cascade Vapor compression cycle

1. บทนำ

กระบวนการพาสเจอร์ไรซ์นมแบบบรรจุร้อน[1] มีความต้องการทำความร้อนที่อุณหภูมิสูงสำหรับกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์ และมีความต้องการทำความเย็นที่อุณหภูมิต่ำสำหรับกระบวนการเก็บรักษาน้ำนมดิบ และกระบวนการทำความเย็นเพื่อการเก็บบรรจุ โดยการประยุกต์หลักการของวัฏจักรอัดไอขั้นตอนเดียว ซึ่งอาศัยกระบวนการดูดความร้อนเพื่อทำความเย็นที่อุณหภูมิต่ำเป็นหลักและอาศัยขดลวดความร้อนเพื่อทำความร้อน บทความนี้จะนำเสนอแนวทางการนำความร้อนจากกระบวนการคายความร้อนของระบบอัดไอในกระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรซ์แบบบรรจุร้อน เพื่อการประหยัดพลังงาน เนื่องจากอุณหภูมิที่ต่ำที่สุดที่ต้องการในการทำความร้อนและอุณหภูมิที่ต่ำ

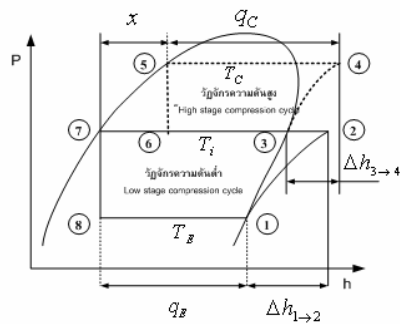
ต่ำที่สุดที่ต้องการในการทำความเย็นมีความแตกต่างกันมาก จึงทำให้ระบบอัดไอแบบขั้นตอนเดียวไม่เหมาะสมด้วยเหตุผล 2 ประการคือ 1. ขีดความสามารถในการอัดของเครื่องอัดไอบัจจุบัน และ 2. ในช่วงอุณหภูมิของสารทำความเย็นต่ำสุดและอุณหภูมิของสารทำความเย็นสูงสุดในช่วงอุณหภูมิที่กว้างมาก จะทำให้เครื่องอัดไอต้องการพลังงานต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็นที่ค่อนข้างมาก ซึ่งสามารถแก้ปัญหาโดยการประยุกต์หลักการของวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอน(two stage vapor compression cycle) ซึ่งโดยทั่วไปมีวัตถุประสงค์เพื่อการทำความร้อนที่อุณหภูมิที่ต่ำมาก บทความนี้จะนำเสนอแนวทางการประยุกต์หลักการของวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอนที่มีวัตถุประสงค์เพื่อการทำความร้อนที่อุณหภูมิสูงและทำความเย็นที่อุณหภูมิที่ต่ำ ซึ่งประกอบด้วย

1. วัฏจักรอัดไอสองขั้นตอนโดยอาศัยแฟลชแทงก์และ 2. วัฏจักรอัดไอแบบแคสเคด

การศึกษาวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอวิธีการสร้างสมการทางเทอร์โมไดนามิกส์ในรูปแบบของความถี่ของพลังงานสุทธิซึ่งประกอบด้วยพลังงานของระบบการทำความเย็นแบบอัดไอสองขั้นตอนและพลังงานความร้อนของขดลวดความร้อน สำหรับกรณีศึกษาขนาดกำลังการผลิตน้ำนมดิบ 3 ตันต่อวัน ซึ่งแนวโน้มที่ได้จะทำให้ทราบถึงสถานะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็นที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาข้างต้น ภายใต้หลักการของวัฏจักรอัดไอสองขั้นตอนของสารทำความเย็นชนิด R 134a บนวัฏจักรอัดไอมาตรฐาน (standard vapor-compression cycle) งานวิจัยที่เกี่ยวข้องมีดังนี้คือ [2] การนำเสนอวิธีการสร้างสมการทางความร้อน-เศรษฐศาสตร์เพื่อหาสถานะการกักเก็บที่เหมาะสมของระบบในรูปแบบของค่าใช้จ่ายสุทธิของกระบวนการพาสเจอร์ไร้นมแบบบรรจุเย็น ภายใต้การกำหนดสถานะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็น [3] การนำเสนอวิธีการสร้างสมการทางเทอร์โมไดนามิกส์ของระบบการทำความเย็นแบบอัดไอสองขั้นตอนโดยอาศัยแฟลชแทงก์ในรูปแบบของสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะโดยการวิเคราะห์ตัวแปรของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนภายในระบบและชุดการนำเสนอวิธีการสร้างสมการสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะจากการสมดุลพลังงานและสมดุลเอนโทรปี

2. ความสัมพันธ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์

แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์เป็นฟังก์ชันซึ่งประกอบด้วยฟังก์ชันของข้อกำหนดของการพาสเจอร์ไร้นมที่กำลังการผลิตต่าง ๆ กันและความสัมพันธ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ดังแสดงในรูปที่ 1 ได้มาจากการสร้างสมการโพลีโนเมียลสองตัวแปร [5, 6] เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิสารทำความเย็นชนิด R 134a บนแผนภาพความดัน-เอนทัลปี (P-h diagram)



รูปที่ 1 การสร้างสมการสองตัวแปรซึ่งเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิสารทำความเย็นชนิด R 134a บนแผนภาพความดัน-เอนทัลปี (P-h diagram)

2.1 ความร้อนต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็นเนื่องจากกระบวนการรับความร้อนที่ความดันคงที่

ความร้อนต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็นเนื่องจากกระบวนการรับความร้อนที่ความดันคงที่ที่เครื่องทำระเหยในวัฏจักรความดันต่ำเป็น

ฟังก์ชันของอุณหภูมิระเหยของสารทำความเย็นและอุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรของสารทำความเย็น แสดงได้ดังนี้

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

เมื่อ q_E แทน ความร้อนหน่วยมวลของสารทำความเย็นเนื่องจากกระบวนการรับความร้อนที่ความดันคงที่, kJ/kg

T_E แทน อุณหภูมิระเหยของสารทำความเย็น, °C

T_i แทน อุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรของสารทำความเย็น, °C

2.2 ความร้อนต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็นเนื่องจากกระบวนการคายความร้อนที่ความดันคงที่

ความร้อนต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็นเนื่องจากกระบวนการคายความร้อนที่ความดันคงที่ที่เครื่องควบแน่นในวัฏจักรความดันสูงเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิก่อนตัวของสารทำความเย็นและอุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรของสารทำความเย็น แสดงได้ดังนี้

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

เมื่อ q_C แทน ความร้อนหน่วยมวลของสารทำความเย็นเนื่องจากกระบวนการคายความร้อนที่ความดันคงที่, kJ/kg

T_C แทน อุณหภูมิก่อนตัวของสารทำความเย็น, °C

2.3 คุณภาพไอภายในแฟลชแทงก์

คุณภาพไอภายในแฟลชแทงก์เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิก่อนตัวของสารทำความเย็นและอุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรของสารทำความเย็น แสดงได้ดังนี้

$$x = x(T_C, T_i) \tag{3}$$

เมื่อ x แทน คุณภาพไอ

2.4 สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะ

สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของเครื่องทำความเย็นในวัฏจักรความดันต่ำเป็นสัดส่วนระหว่างความร้อนต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็นเนื่องจากกระบวนการรับความร้อนที่ความดันคงที่ต่องานในการอัดเนื่องจากกระบวนการอัดแบบไอเซนโทรปิก ซึ่งเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิก่อนตัวของสารทำความเย็นและอุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรของสารทำความเย็น แสดงได้ดังนี้

$$COP_R = \frac{q_E(T_E, T_i)}{\Delta h_{1 \rightarrow 2}(T_E, T_i)} \tag{4}$$

เมื่อ COP_R แทน สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของเครื่องทำความเย็น $\Delta h_{1 \rightarrow 2}$ แทน งานในการอัดเนื่องจากกระบวนการอัดแบบไอเซนโทรปิกในวัฏจักรความดันต่ำ, kJ/kg

สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของปั๊มความร้อนในวัฏจักรความดันสูงเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิระเหยของสารทำความเย็นและอุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรของสารทำความเย็น แสดงได้ดังนี้

$$COP_{HP} = \frac{q_C(T_C, T_i)}{\Delta h_{3 \rightarrow 4}(T_C, T_i)} \tag{5}$$

เมื่อ COP_{HP} แทนสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของปั๊มความร้อน
 Δh_{3-4} แทนงานในการอัดเนื่องจากกระบวนการอัดไอแบบ
 ไอเซนโทรปิกในวัฏจักรความดันสูง, kJ/kg

3.แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับระบบการทำความเย็นแบบอัดไอสองขั้นตอน

แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับระบบการทำความเย็นแบบอัดไอสองขั้นตอนที่ทำการศึกษานี้ ประกอบด้วยวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอนดังนี้ คือ 1. วัฏจักรอัดไอสองขั้นตอนโดยอาศัยแฟลชแทงก์ 2. วัฏจักรอัดไอแบบแกลสเคดอุดมคติและวัฏจักรอัดไอแบบแกลสเคดจริง

แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ดังกล่าวแสดงในรูปแบบของ
 ความเย็นแบบอัดไอสองขั้นตอนและพลังงานความร้อนของขดลวดความร้อนภายในปริมาตรควบคุมจากรูปที่ 2 แสดงได้ดังนี้

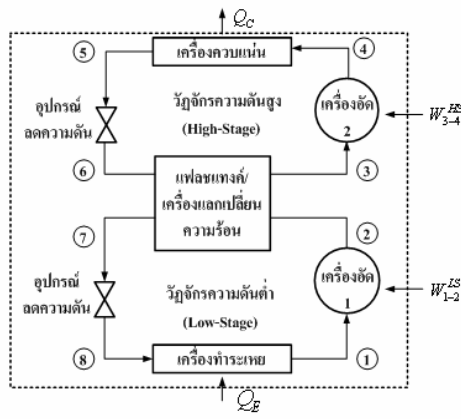
$$\dot{W}_{total} = \dot{W}_{1-2}^{LS} + \dot{W}_{3-4}^{HS} + \dot{W}_{heater} \quad (6)$$

เมื่อ \dot{W}_{total} แทน ความต้องการพลังงานสุทธิของระบบการทำความเย็นแบบอัดไอสองขั้นตอนและพลังงานความร้อนของขดลวดความร้อน, kW

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

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

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



รูปที่ 2 ระบบการทำความเย็นแบบอัดไอสองขั้นตอน

เมื่อพิจารณากฎการอนุรักษ์พลังงานสำหรับวัฏจักรอัดไอแบบสองขั้นตอนโดยอาศัยแฟลชแทงก์ รูปที่ 3 วัฏจักรอัดไอแบบแกลสเคดอุดมคติ รูปที่ 4 และวัฏจักรอัดไอแบบแกลสเคดจริง รูปที่ 5 สำหรับกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์นมแบบบรรจุร้อน

$$\dot{W}_{total} = \frac{\dot{Q}_g}{COP_R} + \frac{\dot{Q}_c}{COP_{HP}} + \dot{W}_{heater}$$

$$\dot{W}_{total} = \frac{\dot{m}_L q_g}{COP_R} + \frac{\dot{m}_H q_c}{COP_{HP}} + \dot{m}_m C_p (T_{m,hot} - T_{m,ph}) \quad (7)$$

เมื่อ \dot{Q}_g แทน อัตราการรับความร้อนที่เครื่องทำระเหย, kW

\dot{Q}_c แทน อัตราการคายความร้อนที่เครื่องควบแน่น, kW

\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

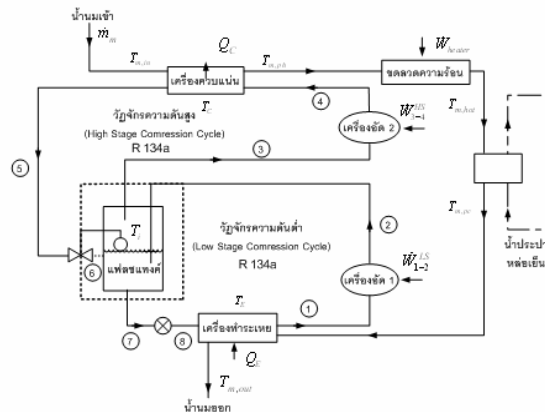
$T_{m,hot}$ แทน อุณหภูมิของนมร้อน, °C

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

3.1แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับวัฏจักรอัดไอสองขั้นตอนโดยอาศัยแฟลชแทงก์

จากรูปที่ 3 วัฏจักรอัดไอสองขั้นตอนโดยอาศัยแฟลชแทงก์ เพื่อทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์แยกสารทำความเย็นในสถานะของเหลวอิ่มตัวให้กับวัฏจักรความดันต่ำและสารทำความเย็นในสถานะไออิ่มตัวให้กับวัฏจักรความดันสูง จากการสมดุลมวลของอัตราการไหลโดยมวลของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันต่ำและอัตราการไหลโดยมวลของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันสูงภายในแฟลชแทงก์ แสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\dot{m}_H = \frac{\dot{m}_L}{\left(\frac{1}{x} - 1\right)} \quad (8)$$



รูปที่ 3 วัฏจักรอัดไอสองขั้นตอนแบบอาศัยแฟลชแทงก์ในกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์นมแบบบรรจุร้อน

เมื่อพิจารณากฎการอนุรักษ์พลังงานสำหรับระบบการทำความเย็นนมสารทำความเย็นจะรับความร้อนจากนมที่เครื่องทำระเหยในวัฏจักรความดันต่ำ ซึ่งจะได้อัตราการไหลโดยมวลของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันต่ำดังนี้

$$\dot{m}_L q_g = \dot{m}_m C_p (T_{m,ph} - T_{m,pu})$$

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

เมื่อ $T_{m,pc}$ แทน อุณหภูมิของนมจากการลดอุณหภูมิเบื้องต้น, °C
 $T_{m,out}$ แทน อุณหภูมิของนมเย็น, °C

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

$$\dot{W}_{total} = \dot{m}_L \left(\frac{q_g}{COP_R} + \frac{q_c}{COP_{HP}} \cdot \left(\frac{x}{1-x} \right) \right) + \dot{m}_m C_p (T_{m,hot} - T_{m,ph}) \quad (10)$$

เมื่อ $\dot{m}_L = \frac{\dot{m}_m C_p (T_{m,pc} - T_{m,out})}{q_g}$

3.2 แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบแคลเซียมคลอไรด์

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4 วัฏจักรอัดไอแบบแคลเซียมคลอไรด์ จะอาศัยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับการแลกเปลี่ยนความร้อนที่อุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรระหว่างสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันสูงและสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันต่ำ จากกฎการอนุรักษ์พลังงาน สารทำความเย็นในวัฏจักรความดันสูงจะรับความร้อนจากสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันต่ำที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่อุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักร ซึ่งจะได้อัตราการไหลโดยมวลของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันสูงดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{m}_L q_c^{LS} &= \dot{m}_H q_g^{HS} \\ \dot{m}_L q_g \left(\frac{1}{COP_R} + 1 \right) &= \dot{m}_H q_c \left(1 - \frac{1}{COP_{HP}} \right) \\ \dot{m}_H &= \dot{m}_L \cdot \left(q_g \left(\frac{1}{COP_R} + 1 \right) / q_c \left(1 - \frac{1}{COP_{HP}} \right) \right) \end{aligned} \quad (11)$$

เมื่อพิจารณาจากอนุรักษ์พลังงานสำหรับการทำความเย็นนม สารทำความเย็นจะรับความร้อนจากนมที่เครื่องทำระเหยในวัฏจักรความดันต่ำ ซึ่งจะได้อัตราการไหลโดยมวลของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันต่ำดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{m}_L q_g &= \dot{m}_m C_p (T_{m,pc} - T_{m,out}) \\ \dot{m}_L &= \frac{\dot{m}_m C_p (T_{m,pc} - T_{m,out})}{q_g} \end{aligned} \quad (12)$$

แทนสมการที่ (11) และสมการที่ (12) ในสมการที่ (7) ดังนั้นความต้องการพลังงานสุทธิซึ่งประกอบด้วยพลังงานของวัฏจักรอัดไอแบบแคลเซียมคลอไรด์และพลังงานความร้อนของขดลวดความร้อน แสดงได้ดังนี้

$$\dot{W}_{total} = \frac{\dot{m}_L q_g}{COP_R} + \frac{\dot{m}_H q_c}{COP_{HP}} + \dot{m}_m C_p (T_{m,hot} - T_{m,ph}) \quad (13)$$

เมื่อ $\dot{m}_H = \dot{m}_L \cdot \left(q_g \left(\frac{1}{COP_R} + 1 \right) / q_c \left(1 - \frac{1}{COP_{HP}} \right) \right)$

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

8.3 แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบแคลเซียมคลอไรด์

แบบแคลเซียมคลอไรด์

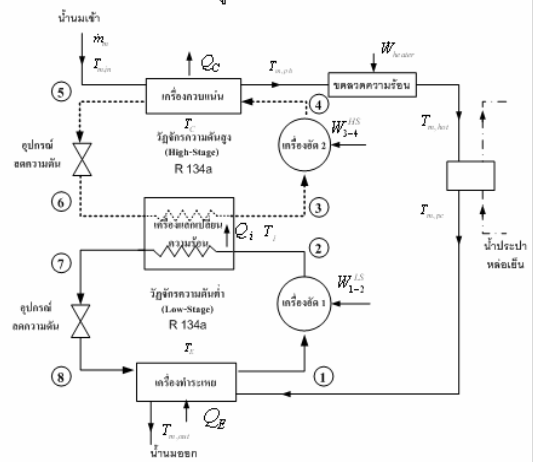
จากรูปที่ 5 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างวัฏจักรความดันสูงและวัฏจักรความดันต่ำของวัฏจักรอัดไอแบบแคลเซียมคลอไรด์นั้น จำเป็นต้องมีความแตกต่างของอุณหภูมิที่สามารถบอกค่าได้ของอุณหภูมิระเหยในวัฏจักรความดันสูงและอุณหภูมิกวมน้ำในวัฏจักรความดันต่ำเพื่อเป็นกลไกการถ่ายเทความร้อนระหว่างทั้งสองวัฏจักร

ด้วยวิธีการเดียวกันกับการวิเคราะห์แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบแคลเซียมคลอไรด์ ดังนั้นความต้องการพลังงานสุทธิซึ่งประกอบด้วยพลังงานของวัฏจักรอัดไอแบบแคลเซียมคลอไรด์และพลังงานความร้อนของขดลวดความร้อน แสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{W}_{total} &= \frac{\dot{m}_L q_g (T_g, T_i + \Delta T')}{COP_R^{HS}} + \left(\frac{1}{COP_{HP}^{HS}} - 1 \right) (\dot{m}_H q_c (T_c, T_i - \Delta T'')) \\ &+ \dot{m}_m C_p (T_{m,hot} - T_{m,ph}) \end{aligned} \quad (14)$$

เมื่อ $T_i + \Delta T'$ แทน อุณหภูมิควมน้ำของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันต่ำ, °C

$T_i - \Delta T''$ แทน อุณหภูมิระเหยของสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันสูง, °C



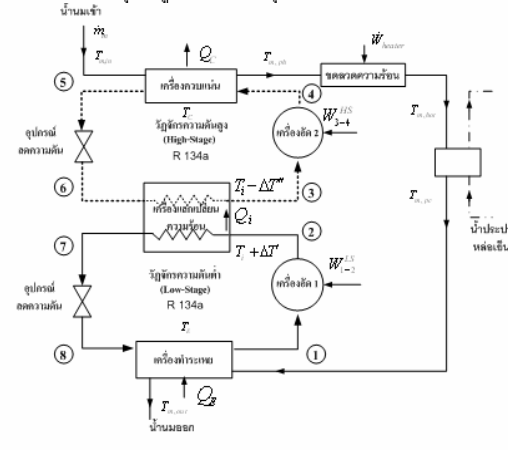
รูปที่ 4 วัฏจักรอัดไอแบบแคลเซียมคลอไรด์ในระบบการพาสเจอร์ไร้นมแบบบรรจุร้อน

จากรูปที่ 4 และรูปที่ 5 จะเห็นว่า $\Delta T'$ และ $\Delta T''$ มีอิทธิพลต่อแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นของการใช้พลังงานของวัฏจักรแคลเซียมคลอไรด์เมื่อเทียบกับวัฏจักรแคลเซียมคลอไรด์

4. กรณีศึกษา

เพื่อต้องการทราบแนวโน้มของสภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็นที่ดีที่สุดจากแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ของ

ระบบอัดไอแบบสองขั้นตอนดังกล่าวข้างต้น การศึกษาวิจัยนี้จึงทำการศึกษานาค่ากำลังการผลิตน้ำเมดิบ 3 ตันต่อวัน พิจารณาช่วงเวลาที่มีความต้องการพลังงานสูงสุดดังก็คือ การทำความเย็นในกระบวนการเก็บรักษาน้ำเมดิบ 1.5 ตัน ลดอุณหภูมิเมมเข้าจาก 35°C ไปยังอุณหภูมินมเก็บรักษาประมาณ 4°C ภายในเวลาประมาณ 2 ชั่วโมง การทำความเย็นนมพาสเจอร์ไรซ์ที่มีอัตราการไหลโดยมวล 0.074 kg/s ลดอุณหภูมิเมมจาก 55°C ไปยังอุณหภูมินมเก็บบรรจุ 4°C และการทำความร้อนใน



รูปที่ 5 วัฏจักรอัดไอแบบแคลเคดจอร์จในกระบวนการพาสเจอร์ไร้นมแบบบรรจุร้อน

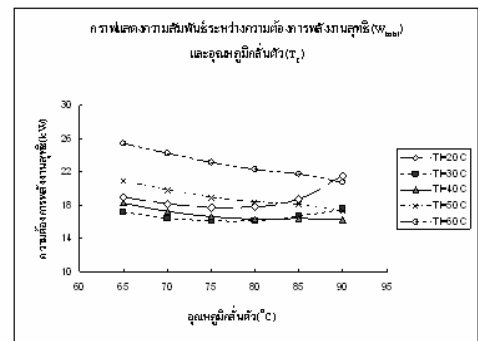
กระบวนการพาสเจอร์ไรซ์ เพิ่มอุณหภูมิเมมเก็บรักษาจาก 4°C ไปยังอุณหภูมิเมมพาสเจอร์ไรซ์ประมาณ 85°C มีสมมติฐานว่าความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างนมและสารทำความเย็นที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน(เครื่องทำระเหยและเครื่องควบแน่น)ที่ 10°C อุณหภูมิระเหยของสารทำความเย็น -8°C (250kPa) ช่วงอุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรระหว่าง 20°C - 60°C (570kPa-1.7MPa) และช่วงอุณหภูมิกลิ้งตัวของสารทำความเย็นระหว่าง 65°C - 90°C (1.8MPa-3.3MPa)

5.การวิเคราะห์ผลและสรุป

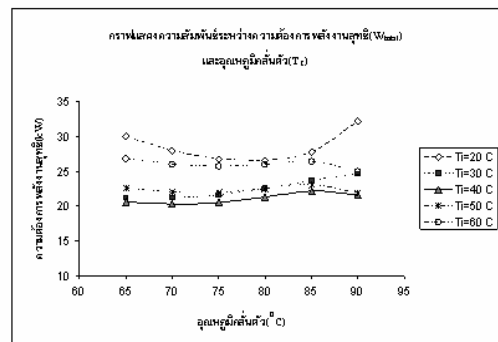
จากสมมติฐานของอุณหภูมิของสารทำความเย็น ข้อกำหนดและเงื่อนไขของกระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรซ์จากกรณีศึกษาข้างต้น แทนในแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ของระบบอัดไอแบบสองขั้นตอน และนำเสนอแนวโน้มในรูปแบบของกราฟแสดงความสัมพันธ์ของความต้องการพลังงานสุทธิและอุณหภูมิกลิ้งตัวของสารทำความเย็นได้ผลดังนี้คือ

จากรูปที่ 6 สำหรับวัฏจักรอัดไอสองขั้นตอนโดยอาศัยแฟลชแทงค์พบว่า สภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่ดีที่สุดที่ทำให้ความต้องการพลังงานสุทธิมีแนวโน้มต่ำที่สุดคือ ช่วงอุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรของสารทำความเย็นระหว่าง 30°C - 40°C (780kPa-1MPa) โดยมีช่วงอุณหภูมิกลิ้งตัวของสารทำความเย็นระหว่าง 75°C - 80°C (2.4MPa-2.7MPa) จากรูปที่ 7 สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบแคลเคดจอร์จ พบว่าสภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็นที่ดีที่สุดที่ทำให้ความต้องการ

พลังงานสุทธิมีแนวโน้มต่ำที่สุดคือ ช่วงอุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรของสารทำความเย็นระหว่าง 30°C - 40°C (780kPa-1MPa) โดยมีช่วงอุณหภูมิกลิ้งตัวของสารทำความเย็นระหว่าง65°C-75°C(1.8MPa-2.4MPa) สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบแคลเคดจอร์จ สภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็นที่ดีที่สุดที่ทำให้ความต้องการพลังงานสุทธิมีแนวโน้มใกล้เคียงกับวัฏจักรอัดไอแบบแคลเคดจอร์จในอุดมคติได้นั้น ขึ้นอยู่กับความสามารถในการแลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวกลางที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันสูงและสารทำความเย็นในวัฏจักรความดันต่ำที่น้อยที่สุด ซึ่งหมายถึงประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะลดอิทธิพลของ $\Delta T'$ และ $\Delta T''$ ที่มีต่อพลังงานที่ใช้ในระบบแคลเคดจอร์จที่มีแนวโน้มสูงกว่าระบบอัดไอแบบแคลเคดจอร์จ



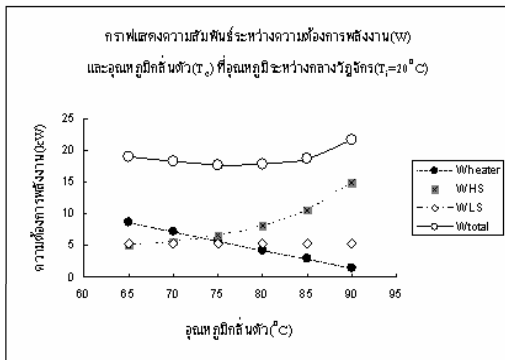
รูปที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้องการพลังงานสุทธิ (Wtotal) ของวัฏจักรอัดไอสองขั้นตอนโดยอาศัยแฟลชแทงค์ และอุณหภูมิกลิ้งตัว (Tc) ช่วงอุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักร (Te) ระหว่าง 20°C - 60°C



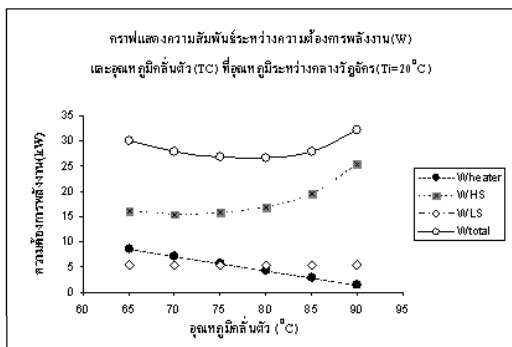
รูปที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้องการพลังงานสุทธิ (Wtotal) สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบแคลเคดจอร์จและอุณหภูมิกลิ้งตัว (Tc) ช่วงอุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักร (Te) ระหว่าง 20°C - 60°C

จากรูปที่ 8 และรูปที่ 9 สำหรับวัฏจักรอัดไอสองขั้นตอนทั้งสองระบบ โดยอุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรที่ค่าต่ำ (Te = 20°C) พบว่า

ความต้องการพลังงานสุทธิ(W_{tot})ที่อุณหภูมิกลั่นตัวต่ำมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องจนต่ำสุดที่ช่วงอุณหภูมิความชื้นประมาณ 75-80°C และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่ช่วงอุณหภูมิกลั่นตัวสูง เนื่องจากมีความต้องการพลังงานความร้อนจากขดลวดความร้อนมาก(W_{heater})ซึ่งมีอิทธิพลต่อความต้องการพลังงานสุทธิมากที่สุดที่ช่วงอุณหภูมิกลั่นตัวต่ำและมีแนวโน้มลดลงที่อุณหภูมิกลั่นตัวสูงขึ้น โดยที่ความต้องการงานเนื่องจากการอัดในวัฏจักรความดันต่ำ(W_{LS})มีค่าต่ำคงที่ตลอดช่วงอุณหภูมิกลั่นตัวที่ทำการพิจารณาและความต้องการงานเนื่องจากการอัดในวัฏจักรความดันสูง(W_{HS})มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิกลั่นตัวสูงซึ่งเป็นปัจจัยมีอิทธิพลต่อความต้องการพลังงานสุทธิมากที่สุดที่ช่วงอุณหภูมิกลั่นตัวสูง



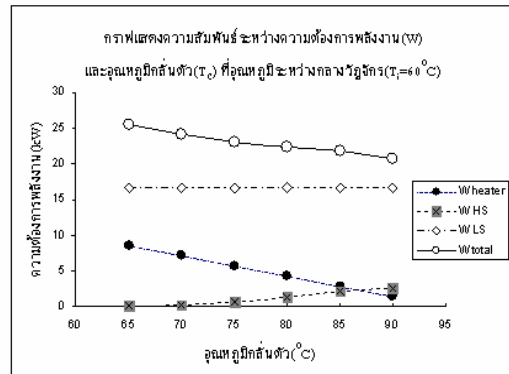
รูปที่ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้องการพลังงาน (W) สำหรับวัฏจักรอัดไอสองขั้นตอนโดยอาศัยแฟลชแชนจ์ และอุณหภูมิกลั่นตัว (T_c) ที่อุณหภูมิ $T_i = 20^\circ C$



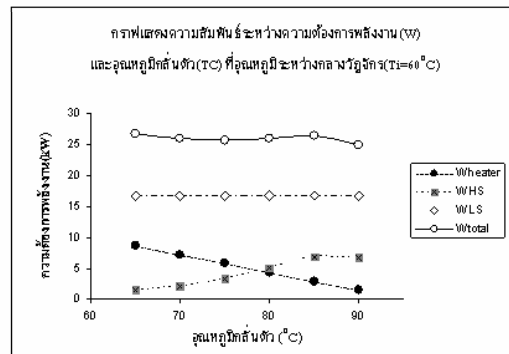
รูปที่ 9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้องการพลังงาน (W) สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบแคลสเคดอุดมคติและอุณหภูมิกลั่นตัว (T_c) ที่อุณหภูมิ $T_i = 20^\circ C$

จากรูปที่ 10 และรูปที่ 11 สำหรับวัฏจักรอัดไอสองขั้นตอนทั้งสองระบบ โดยอุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรที่ค่าสูง ($T_i = 60^\circ C$) พบว่าความต้องการพลังงานมีค่าสูงและมีแนวโน้มต่ำลงอย่างต่อเนื่องเมื่อ

อุณหภูมิกลั่นตัวสูงขึ้น เนื่องจากความต้องการพลังงานความร้อนของขดลวดความร้อนมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิกลั่นตัวสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามความต้องการงานเนื่องจากการอัดในวัฏจักรความดันต่ำ(W_{LS})มีค่าสูงคงที่ตลอดช่วงอุณหภูมิกลั่นตัวที่ทำการพิจารณาจะมีอิทธิพลต่อความต้องการพลังงานสุทธิมากที่สุด



รูปที่ 10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้องการพลังงาน (W) สำหรับวัฏจักรอัดไอสองขั้นตอนโดยอาศัยแฟลชแชนจ์ และอุณหภูมิกลั่นตัว (T_c) ที่อุณหภูมิ $T_i = 60^\circ C$



รูปที่ 11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้องการพลังงาน (W) สำหรับวัฏจักรอัดไอแบบแคลสเคดอุดมคติและอุณหภูมิกลั่นตัว (T_c) ที่อุณหภูมิ $T_i = 60^\circ C$

สภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็นที่ดีที่สุดสำหรับระบบทำความเย็นแบบอัดไอสองขั้นตอนทั้งหมดที่ทำการศึกษามีแนวโน้มของช่วงอุณหภูมิระหว่างกลางวัฏจักรเป็นค่าเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิระเหยในวัฏจักรความดันต่ำและอุณหภูมิกลั่นตัวในวัฏจักรความดันสูง เนื่องจากการอัดไอในช่วงอุณหภูมิกว้างมากทำให้กระบวนการอัดแบบไอเซนโทรปมีความต้องการงานในการอัดต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็นที่มาก และการทำอุณหภูมิกลั่นตัวที่

ค่าต่ำทำให้ปัจจัยความต้องการพลังงานของขดลวดความร้อนมีอิทธิพลต่อความต้องการพลังงานสุทธิมาก

เอกสารอ้างอิง

- [1] ชีระชาติ พรพิบูลย์ และคณะ, "รายงานความก้าวหน้าโครงการครั้งที่ 1 การออกแบบระบบอัดไอสำหรับอุตสาหกรรมนม", โครงการ ITAP เครือข่ายภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนบน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2551
- [2] Soylemez, M.S., "Optimum heat pump in milk pasteurizing for dairy", Journal of Food Engineering, 546-551, 2005
- [3] J.U.R. Khan and S.M. Zubair. "Thermodynamic optimization of finite time vapor compression refrigeration systems". Energy Conversion and Management 42: 1457-1475, 2000
- [4] Jeffrey M. Gordon and Kim Choon Ng. "Cool Thermodynamics". Cambridge International Science Publishing. 2000
- [5] Stoecker, W.F., "Design and Thermal systems", 3th edition, McGrawHill, 1989
- [6] Stoecker, W.F., "Refrigeration and Air conditioning", 2th edition, McGrawHill, 1982

ประวัติผู้เขียน

นายชัยวัฒน์ แสงเพ็ง เกิดวันที่ 11 ธันวาคม 2527 ที่จังหวัดสุรินทร์ เริ่มการศึกษาระดับประถมศึกษาปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนบ้านไทยเดิม และศึกษาระดับมัธยมศึกษาปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนมัธยมศึกษาศรีสำเภานุญ จังหวัดสุรินทร์ สำเร็จการศึกษาวศกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2549 และในปี พ.ศ. 2549 ได้ศึกษาต่อระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ขณะศึกษาได้เป็นผู้สอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล จำนวน 3 รายวิชา ได้แก่

1. ปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล 1
2. เขียนแบบวิศวกรรม 1
3. เขียนแบบวิศวกรรม 2

พ.ศ. 2552 ผู้เขียนได้นำเสนอผลงานวิชาการเรื่อง “แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับระบบการทำความเย็นแบบอัดไอสองขั้นตอนในกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์นม” ในการประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 5 ณ มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก แสดงในภาคผนวก ฉ.