การสร้างแบบจำลอง และการออปติไมซ์ของระบบทำความเย็นแบบเปิดด้วยเอทิลีน

นางสาวชิตทิวา กีอำไพ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2543

ISBN 974-346-421-2

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

MODELING AND OPTIMIZATION OF AN OPEN-LOOP ETHYLENE REFRIGERATION SYSTEM

Miss Jhittiwa Keeampai

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2000

ISBN 974-346-421-2

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสร้างแบบจำลอง และการออปติไมซ์ของระบบทำความเย็นแบบเปิดด้วยเอทิลีน
โดย	นางสาวชิตทิวา กีอำไพ
ภาควิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร. มนตรี วงศ์ศรี
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร. คงกระพัน อินทรแจ้ง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร. วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์ ดร. มนตรี วงศ์ศรี)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ดร. คงกระพัน อินทรแจ้ง)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไพศาล กิตติศุภกร)

ชิตทิวา กีอำไพ : การจำลอง และการออปติไมซ์ของระบบทำความเย็นแบบเปิดด้วยเอทิลีน (MODELING AND OPTIMIZATION OF AN OPEN-LOOP ETHYLENE REFRIGERATION SYSTEM)
อ. ที่ปรึกษา: ดร. มนตรี วงศ์ศรี, อ. ที่ปรึกษาร่วม: ดร. คงกระพัน อินทรแจ้ง; 152 หน้า
ISBN 974-346-421-2

อุตสาหกรรมปิโตรเคมี เช่น โรงผลิตโอเลฟินส์ มีระบบทำความเย็นได้แก่ ระบบทำความเย็นด้วยเอทิลีน และโพรพีลีนรวมอยู่ด้วย ระบบทำความเย็นเหล่านี้จะต้องให้พลังงานส่วนหนึ่งกับคอมเพรสเซอร์ในการอัดไอ โดยใช้เครื่องจักรไอน้ำในการขับคอมเพรสเซอร์ ซึ่งจะทำให้มีต้นทุนจากค่าไอน้ำความดันสูงเกิดขึ้น หากสามารถลดการใช้พลังงานของคอมเพรสเซอร์ในระบบทำความเย็นให้น้อยที่สุด ก็จะเป็นการประหยัดค่าไอน้ำความดันสูงลงได้

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาหาสภาวะการดำเนินงานที่เหมาะสมของคอมเพรสเซอร์แบบเซนตริฟูกัล 4 ขั้น และอุปกรณ์อื่นๆ ในระบบทำความเย็นด้วยเอทิลีน เพื่อลดพลังงานที่ใช้ของคอมเพรสเซอร์ และประหยัดการใช้ไอน้ำความดันสูง

โปรแกรมแอสเพ็นพลัส เวอร์ชัน 9.3-1 ถูกนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลอง และการออปติไมซ์ระบบทำความเย็นด้วยเอทิลีน ขั้นแรกสร้างแบบจำลองให้มีความใกล้เคียงกับข้อมูลออกแบบก่อน จากนั้นนำแบบจำลองที่ได้ไปทดลองใช้กับข้อมูลจริงในโรงงาน แต่พบว่าไม่สามารถเลียนแบบกระบวนการจริงได้ดีนัก จึงนำเทคนิคการปรับให้สอดคล้องของข้อมูลมาใช้เพื่อให้แบบจำลองมีความแม่นยำขึ้น เมื่อได้แบบจำลองที่มีความใกล้เคียงกับกระบวนการจริงแล้ว นำแบบจำลองนี้ มาทำการออปติไมซ์ เพื่อหาสภาวะการดำเนินงานที่เหมาะสมที่สุด โดยพิจารณาจากพลังงานที่ใช้ของคอมเพรสเซอร์ต่ำที่สุด พบว่าความดันที่เข้าคอมเพรสเซอร์ขั้นที่ 1 ความเร็วรอบของคอมเพรสเซอร์ และการกระจายอัตราการไหลของเอทิลีนที่เข้าคอมเพรสเซอร์อย่างเหมาะสม สามารถลดการใช้พลังงานของคอมเพรสเซอร์ลงได้ 1.5% และผลจากการใช้ความเร็วรอบต่ำลง ทำให้ปริมาณการใช้ไอน้ำความดันสูงลดลง 1,507 ตันต่อปี คิดเป็นมูลค่า 647,890 บาท

เมื่อทำกรณีศึกษา หาราคาสารทำความเย็นเอทิลีนที่ระดับต่างๆ อันเนื่องจากการใช้สารทำความเย็นเอทิลีน ที่อุณหภูมิการทำความเย็นระดับนั้นๆ เพิ่มขึ้น 1 ตัน/ชั่วโมง พบว่า ราคาสารทำความเย็นเอทิลีน ที่อุณหภูมิระดับที่หนึ่ง (-101 C°) มีราคาแพงที่สุดคือ 142,468 บาท/ตัน/ปี ส่วนราคาสารทำความเย็นเอทิลีนระดับที่สอง (-83 C°) และระดับที่สาม มีราคาลดลงเป็น 59,598 บาท/ตัน/ปี และ 29,464 บาท/ตัน/ปี ตามลำดับ

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี.... ... ลายมือชื่อนิสิต.....ชิตทิวา กีอำไพ.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....M. Wongsri.....
ปีการศึกษา.....2543..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....K. Intrag.....

4070257621 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEY WORD: ASPEN PLUS / SIMULATION / DATA RECONCILATIION / OPTIMIZATION / ETHYLENE REFRIGERANT

JHITTIWA KEEAMPAI: MODELING AND OPTIMIZATION OF AN OPEN-LOOP ETHYLENE REFRIGERATION SYSTEM.

THESIS ADVISOR: MONTREE WONGSRI, D.Sc. THESIS COADVISOR : Dr. KONGKRAPAN INTARAJANG. 152 pp. ISBN 974-346-421-2

In Petrochemical Industries, such as an Olefins Plant, refrigeration systems (both ethylene and propylene refrigeration systems) are included. These refrigeration systems share part of its energy to the compressor to compress vapor of the refrigerant medium. Steam turbines, which are the major energy consumption equipment, are used to drive the compressor shafts. If we can minimize the energy consumption of the compressor-turbine, it will be very cost effective in terms of operation.

This thesis focuses to find the optimum operating conditions for a 4 stage centrifugal compressor and other equipment in the ethylene refrigeration system. The goals are to reduce the compressor energy consumption, resulting in reduction of high pressure steam consumption in steam turbine.

Aspen Plus 9.3-1 is used to create a model and optimize the ethylene refrigeration system. First, we created an accurate model based on design data and then we tested this model with actual plant data. However, we found that it could not represent the process well enough. Therefore, we used actual plant data to perform the data reconciliation. We then used the resulting model to determine the proper operating conditions using the compressor energy consumption as our criteria for optimization. It was discovered that a combination of the 1st stage suction pressure of the compressor, the speed of the compressor, and the proper flow distribution of ethylene in the compressor could reduce the energy consumption down by 1.5%. Moreover, with low rotating speed, the need for high pressure steam would be reduced by 1,507 tons/year (an amount of 647,890 Baht/year)

Case studies, to verify the cost of ethylene refrigeration, are conducted by increasing the flow rate of each refrigerant level by 1 ton/hr. The most expensive (at temperature -101 C^{o}) is level one, nearly 142,468 Baht/ton/year. Level two (at temperature -83 C^{o}) is cheaper, about 59,598 Baht/ton/year and level three (at temperature -65 C^{o}) is the cheapest, around 29,464 Baht/ton/year.

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี..... ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา.....2543..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ ต้องขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. มนตรี วงศ์ศรี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ดร. คงกระพัน อินทรแจ้ง ผู้จัดการส่วนวิจัยและพัฒนา โรงงานไทยโอเลฟินส์ อย่างสูง สำหรับการให้คำปรึกษา การให้โอกาส และคำแนะนำในการพัฒนางานวิจัย ตลอดจนความช่วยเหลือด้านต่างๆ อย่างดียิ่ง

ตลอดจนขอขอบพระคุณพี่ๆ ในส่วนวิจัย และพัฒนาของโรงงานไทยโอเลฟินส์ทุกท่าน โดยเฉพาะ คุณพรวรรณ์ชะลี ทองใหญ่ วิศวกรส่วนวิจัย และพัฒนา ที่ให้ความช่วยเหลือ ความสะดวก ให้คำปรึกษา และแนะนำในทุกๆ ด้าน และขอขอบพระคุณ คุณสมบัติ ศีลสังวรณ์ ผู้จัดการแผนกซ่อมบำรุงอุปกรณ์เครื่องมือวัด และควบคุม (สาธารณูปการ) ที่ถ่ายทอดความรู้ และความช่วยเหลือด้วยดีตลอดมา

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล ประธานกรรมการ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไพศาล กิตติศุภกร ที่กรุณาร่วมเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และให้ข้อคิดที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้

ขอบคุณรุ่นพี่ เพื่อนๆ และน้องๆ สำหรับกำลังใจที่ให้มา และความช่วยเหลือหลายๆ ด้าน

ท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา และพี่ๆ ในครอบครัวทุกคนที่ให้การสนับสนุน และเป็นกำลังใจให้ตลอดมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)..... ง

บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญ..... ช

สารบัญภาพ..... ฎ

สารบัญตาราง..... ฒ

บทที่ 1 บทนำ

1.1 บทนำ..... 1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย..... 3

1.3 ขอบเขต..... 3

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ..... 3

1.5 โครงสร้างวิทยานิพนธ์..... 4

บทที่ 2 ทฤษฎี และผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การเลียนแบบกระบวนการ..... 5

2.2 การปรับให้สอดคล้องของข้อมูล..... 7

2.2.1 การเขียนสูตรสำหรับปัญหาการปรับให้สอดคล้องของข้อมูล..... 9

2.3 การออปติไมซ์..... 11

2.4 ลำดับขั้นการออปติไมซ์..... 12

2.5 องค์ประกอบการทำออปติไมซ์..... 14

2.5.1 แบบจำลองกระบวนการ..... 14

2.5.2 ฟังก์ชันจุดประสงค์..... 16

2.5.3 เงื่อนไขบังคับ..... 17

2.5.4 ขั้นตอนวิธีการออปติไมซ์..... 18

2.6 แพคเกจการเลียนแบบกระบวนการ กับการออปติไมซ์..... 23

หน้า

2.7 สรุป.....25

บทที่ 3 กระบวนการทำความเย็นด้วยเอทิลีน

3.1 การผลิตเอทิลีน.....26

3.2 ระบบทำความเย็นด้วยเอทิลีน.....27

3.3 สรุป.....31

บทที่ 4 การสร้างแบบจำลองของระบบทำความเย็นด้วยเอทิลีน

4.1 บทนำ.....32

4.2 การดำเนินการจำลองกระบวนการ.....32

4.3 การสร้างแบบจำลองระบบทำความเย็นด้วยเอทิลีน.....34

4.3.1 ผลการทดลอง และวิจารณ์.....38

4.4 การทดสอบแบบจำลองโดยใช้ข้อมูลวัด.....45

4.4.1 ผลการทดลอง และวิจารณ์.....45

4.5 การปรับให้สอดคล้องของข้อมูล.....50

4.5.1 บทนำ.....50

4.5.2 การเขียนสูตรสำหรับปัญหา.....51

4.5.3 การปรับให้สอดคล้องของข้อมูลของระบบทำความเย็นด้วยเอทิลีน.....52

4.5.4 ผลการทดลอง และวิจารณ์การปรับให้สอดคล้องของข้อมูล.....54

บทที่ 5 การออปติไมซ์ระบบทำความเย็นด้วยเอทิลีน

5.1 องค์ประกอบของการออปติไมซ์ระบบทำความเย็นด้วยเอทิลีน.....70

5.1.1 แบบจำลองกระบวนการ.....70

5.1.2 ฟังก์ชันจุดประสงค์.....71

5.1.3 เงื่อนไขบังคับ.....71

5.1.4 ขั้นตอนวิธีการออปติไมซ์.....71

5.2 ผลการออปติไมซ์ และวิจารณ์.....73

หน้า

บทที่ 6 กรณีศึกษา: การหาราคาสารทำความเย็นเอทิลีน ที่แต่ละระดับ

6.1 บทนำ.....80

6.2 การหาราคาสารทำความเย็นเอทิลีน ที่อุณหภูมิการทำความเย็นแต่ละระดับ.....81

6.3 คำอธิบายกรณีสมมูล.....82

6.4 กรณีศึกษาที่ 1: การหาราคาสารทำความเย็นเอทิลีน
ที่อุณหภูมิระดับที่หนึ่ง (–101 °C) 85

6.4.1 ผลการทดลอง.....85

6.4.2 วิจารณ์.....92

6.5 กรณีศึกษาที่ 2: การหาราคาสารทำความเย็นเอทิลีน
ที่อุณหภูมิระดับที่สอง (–83 °C) 93

6.5.1 ผลการทดลอง.....93

6.5.2 วิจารณ์.....98

6.6 กรณีศึกษาที่ 3: การหาราคาสารทำความเย็นเอทิลีน
ที่อุณหภูมิระดับที่สาม (–65 °C) 99

6.6.1 ผลการทดลอง.....99

6.6.2 วิจารณ์.....104

บทที่ 7 สรุปผลงานวิจัย

7.1 การสร้างแบบจำลองของระบบทำความเย็นด้วยเอทิลีน.....105

7.2 การออปติไมซ์ระบบทำความเย็นด้วยเอทิลีน.....105

7.3 การหาราคาสารทำความเย็นเอทิลีนที่แต่ละระดับ.....107

7.4 ข้อเสนอแนะ.....110

รายการอ้างอิง.....111

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก ระบบการทำความเย็น

ก.1 ระบบการทำความเย็นแบบอัดไอ.....115

ก.1.1 การทำงานของวัฏจักรการทำความเย็น.....117

หน้า

ก.1.2 อัตราการไหลเวียนของสารตัวกลางในระบบทำความเย็น.....119
ก.1.3 ความจุของระบบ..... 119
ก.2 การเพิ่มสมรรถนะในระบบทำความเย็นแบบอัดไอ.....120
ก.3 ระบบทำความเย็นแบบใช้ความดันหลายขั้นตอน.....120
ก.3.1 แฟลชแก๊ส และการแยกแฟลชแก๊สออก.....120
ก.3.2 การระบายความร้อนในระหว่างการอัดหลายขั้นตอน.....122
ก.4 คอมเพรสเซอร์.....125
ก.5 คอมเพรสเซอร์แบบเซนตริฟูกัล.....126

ภาคผนวก ข สัมประสิทธิ์วาล์ว

ข.1 สัมประสิทธิ์วาล์ว.....129
ข.2 สัมประสิทธิ์วาล์วของของเหลว.....129
ข.3 สัมประสิทธิ์วาล์วของก๊าซ.....130
ข.4 ตัวอย่างการคำนวณ.....131
ข.5 การหาเปอร์เซ็นต์การเปิดวาล์ว.....131

ภาคผนวก ค เส้นโค้งลักษณะเฉพาะของคอมเพรสเซอร์ R-600.....133

ภาคผนวก ง โปรแกรมแอสเพ็นพลัส

ง.1 แบบจำลองอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....140
ง.1.1 แบบจำลอง COMPR.....140
ง.1.2 แบบจำลอง HEATX.....144
ง.1.3 แบบจำลอง MHEATX.....145
ง.1.4 แบบจำลอง HEATER.....146
ง.1.5 แบบจำลอง FLASH2.....147
ง.1.6 แบบจำลอง VALVE.....147
ง.1.7 แบบจำลอง FSPLIT.....148
ง.1.8 แบบจำลอง MIXER.....149

หน้า

ภาคผนวก จ ความแม่นยำ.....150
จ.1 ความแม่นยำสถิตย์.....151

ประวัติผู้เขียน.....152

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 ลำดับต่างๆ ของการออปติไมซ์.....13
รูปที่ 2.2 การออปติไมซ์แบบแบล็คบ๊อกซ์..... 21
รูปที่ 2.3 การออปติไมซ์แบบอินฟีสสิเบิล พาธ.....22
รูปที่ 3.1 แสดงกระบวนการผลิตเอทิลีน และโพรพีลีน.....26
รูปที่ 3.2 ระบบทำความเย็นด้วยเอทิลีน.....28
รูปที่ 4.1 โฟลชีตของกระบวนการทำความเย็นด้วยเอทิลีน โดยโปรแกรมแอสเพ็นพลัส.....37
รูปที่ 4.2 แบบจำลองระบบทำความเย็น โดยโปรแกรมแอสเพ็นพลัส.....39
รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบแบบจำลองกับข้อมูลวัด..... 47
รูปที่ 4.4 ผลการปรับให้สอดคล้องของข้อมูล..... 56
รูปที่ 4.5 ผลการทดสอบแบบจำลองกับข้อมูลวัดชุดที่สอง..... 63
รูปที่ 5.1 กรณีอ้างอิง.....75
รูปที่ 5.2 ผลจากการออปติไมซ์.....76
รูปที่ 5.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไอน้ำความดันสูง และความเร็วรอบ.....79
รูปที่ 6.1 การถ่ายโอนพลังงานที่ใช้เพิ่มขึ้น ของกรณีใช้ C2 เพิ่ม
ไปเป็นความเร็วรอบของแบบจำลองกรณีสมมูล.....83
รูปที่ 6.2 กรณีอ้างอิง.....87
รูปที่ 6.3 กรณีเพิ่มการใช้สารทำความเย็นเอทิลีน ที่อุณหภูมิระดับที่ 1 (-101 C°) 88
รูปที่ 6.4 กรณีคอมเพรสเซอร์สมมูล ที่อุณหภูมิระดับที่ 1 (-101 C°) 89
รูปที่ 6.5 กรณีเพิ่มการใช้สารทำความเย็นเอทิลีน ที่อุณหภูมิระดับที่ 2 (-83 C°) 95
รูปที่ 6.6 กรณีคอมเพรสเซอร์สมมูล ที่อุณหภูมิระดับที่ 2 (-83 C°) 96
รูปที่ 6.7 กรณีเพิ่มการใช้สารทำความเย็นเอทิลีน ที่อุณหภูมิระดับที่ 3 (-65 C°) 101
รูปที่ 6.8 กรณีคอมเพรสเซอร์สมมูล ที่อุณหภูมิระดับที่ 3 (-65 C°) 102
รูปที่ ก.1 การทำความเย็นระบบอัดไอ.....116
รูปที่ ก.2 แผนภูมิความดัน - เอนทัลปี (P-h diagram) ของระบบทำความเย็นแบบอัดไอ.....117
รูปที่ ก.3 (ก) แผนภูมิ ความดัน-เอนทัลปี.....121
รูปที่ ก.3 (ข) แฟลชแทงค์.....122

หน้า

รูปที่ ก.4 แผนภูมิความดัน-ปริมาตร และพื้นที่งานที่ลดลงในการอัด 2 ขั้นตอน.....122
รูปที่ ก.5 แผนภูมิความดัน-เอนทัลปีเมื่อใช้อินเตอร์คูลลิ่งในการอัด 2 ขั้นตอน.....123
รูปที่ ก.6 (ก) Intercooler ใช้น้ำ.....124
รูปที่ ก.6 (ข) Intercooler ใช้สารทำความเย็น.....125
รูปที่ ก.7 (ก) ภาพตัดขวางของคอมเพรสเซอร์แบบเซนตริฟูกัล 4 ขั้น.....126
รูปที่ ก.7 (ข) การไหลของก๊าซในคอมเพรสเซอร์แบบเซนตริฟูกัล.....127
รูปที่ ก.8 อิมเพลเลอร์ 3 ขั้น (3 Stage Centrifugal Compressor Rotor) 127
รูปที่ ก.9 กลีบ (Blade) ภายในอิมเพลเลอร์.....128
รูปที่ ข.1 สัมประสิทธิ์วาล์ว และเปอร์เซ็นต์การเปิดวาล์ว.....132
รูปที่ ค.1 ความดันที่จ่ายออกมา
และอัตราการไหลโดยปริมาตรเข้าคอมเพรสเซอร์ขั้นที่ 1.....133
รูปที่ ค.2 พลังงานที่ใช้
และอัตราการไหลโดยปริมาตรเข้าคอมเพรสเซอร์ขั้นที่ 1.....134
รูปที่ ค.3 ประสิทธิภาพโพลีโทรปิก
และอัตราการไหลโดยปริมาตรเข้าคอมเพรสเซอร์ขั้นที่ 1.....134
รูปที่ ค.4 ความดันที่จ่ายออกมา
และอัตราการไหลโดยปริมาตรเข้าคอมเพรสเซอร์ขั้นที่ 2.....135
รูปที่ ค.5 พลังงานที่ใช้
และอัตราการไหลโดยปริมาตรเข้าคอมเพรสเซอร์ขั้นที่ 2.....135
รูปที่ ค.6 ประสิทธิภาพโพลีโทรปิก
และอัตราการไหลโดยปริมาตรเข้าคอมเพรสเซอร์ขั้นที่ 2.....136
รูปที่ ค.7 ความดันที่จ่ายออกมา
และอัตราการไหลโดยปริมาตรเข้าคอมเพรสเซอร์ขั้นที่ 3.....136
รูปที่ ค.8 พลังงานที่ใช้
และอัตราการไหลโดยปริมาตรเข้าคอมเพรสเซอร์ขั้นที่ 3.....137
รูปที่ ค.9 ประสิทธิภาพโพลีโทรปิก
และอัตราการไหลโดยปริมาตรเข้าคอมเพรสเซอร์ขั้นที่ 3.....137
รูปที่ ค.10 ความดันที่จ่ายออกมา
และอัตราการไหลโดยปริมาตรเข้าคอมเพรสเซอร์ขั้นที่ 4.....138

หน้า

รูปที่ ค.11 พลังงานที่ใช้
และอัตราการไหลโดยปริมาตรเข้าคอมเพรสเซอร์ขั้นที่ 4.....138
รูปที่ ค.12 ประสิทธิภาพโพลีโทรปิก
และอัตราการไหลโดยปริมาตรเข้าคอมเพรสเซอร์ขั้นที่ 4.....139
รูปที่ ง.1 แบบจำลองคอมเพรสเซอร์.....141
รูปที่ ง.2 แบบจำลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 2 สาย.....142
รูปที่ ง.3 แบบจำลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมากกว่า 2 สายขึ้นไป.....145
รูปที่ ง.4 แบบจำลองเครื่องทำความร้อน หรือเครื่องทำความเย็น.....146
รูปที่ ง.5 ถังแฟลชที่มีทางออก 2 ทาง.....147
รูปที่ ง.6 แบบจำลองวาล์ว.....148
รูปที่ ง.7 แบบจำลองตัวแยกสาย.....148
รูปที่ ง.8 แบบจำลองตัวรวมสาย.....149

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 4.1 การสร้างแบบจำลองโดยโปรแกรมแอสเพ็นพลัส.....35
ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบผลที่คำนวณได้จากโปรแกรมแอสเพ็นพลัส
กับข้อมูลออกแบบในแต่ละสาย.....40
ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบค่าจากการวัดกับผลจากแบบจำลองของ
ตัวแปรวัดที่เป็นเอาท์พุตของอุปกรณ์.....48
ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบค่าจากการวัดกับค่าที่ประมาณได้
หลังจากทำการปรับให้สอดคล้องของข้อมูล.....57
ตารางที่ 4.5 การเปรียบเทียบค่าจากการวัดกับผลการเลียนแบบ
ของการทดสอบกับข้อมูลชุดที่สอง.....64
ตารางที่ 5.1 ผลก่อน และหลังการออปติไมซ์.....77
ตารางที่ 5.2 ระดับอุณหภูมิการทำความเย็น และผู้ใช้ (Users)
ก่อน และหลังการทำออปติไมซ์.....78
ตารางที่ 5.3 ผลการทำงานของคอมเพรสเซอร์ก่อน และหลังการออปติไมซ์.....78
ตารางที่ 6.1 ผู้ใช้ และระดับอุณหภูมิการทำความเย็นของเอทิลีน.....81
ตารางที่ 6.2 เปรียบเทียบปริมาณเอทิลีนที่เข้าคอมเพรสเซอร์
และพลังงานที่ใช้ของคอมเพรสเซอร์ แต่ละขั้นของแบบจำลองอ้างอิง
กับกรณีใช้ C2 เพิ่มที่อุณหภูมิการทำความเย็นระดับที่หนึ่ง.....90
ตารางที่ 6.3 ความต้องการการทำความเย็น (Duty) ของผู้ใช้ของแบบจำลองอ้างอิง
และกรณีใช้ C2 เพิ่มที่อุณหภูมิการทำความเย็นระดับที่หนึ่ง.....90
ตารางที่ 6.4 เปรียบเทียบตัวแปรต่างๆ ที่ทางออกของคอมเพรสเซอร์ขั้นที่ 3 และขั้นที่ 4
ในกรณีใช้ C2 เพิ่ม ที่อุณหภูมิการทำความเย็นระดับที่หนึ่ง
กับกรณีสมมูล.....91
ตารางที่ 6.5 เปรียบเทียบปริมาณเอทิลีนที่เข้าคอมเพรสเซอร์
และพลังงานที่ใช้ของคอมเพรสเซอร์แต่ละขั้นของแบบจำลองอ้างอิง
กับกรณีใช้ C2 เพิ่ม ที่อุณหภูมิการทำความเย็นระดับที่สอง.....97

หน้า

ตารางที่ 6.6 ความต้องการการทำความเย็น (Duty) ของผู้ใช้ของแบบจำลองอ้างอิง
และกรณีใช้ C2 เพิ่ม ที่อุณหภูมิการทำความเย็นระดับที่สอง.....97
ตารางที่ 6.7 เปรียบเทียบตัวแปรต่างๆ ที่ทางออกของคอมเพรสเซอร์ขั้นที่ 3 และขั้นที่ 4
ในกรณีใช้ C2 เพิ่ม ที่อุณหภูมิการทำความเย็นระดับที่สอง
กับกรณีสมมูล.....98
ตารางที่ 6.8 เปรียบเทียบปริมาณเอทิลีนที่เข้าคอมเพรสเซอร์
และพลังงานที่ใช้ของคอมเพรสเซอร์แต่ละขั้นของแบบจำลองอ้างอิง
กับกรณีใช้ C2 เพิ่ม ที่อุณหภูมิการทำความเย็นระดับที่สาม.....103
ตารางที่ 6.9 ความต้องการการทำความเย็น (Duty) ของผู้ใช้ของแบบจำลองอ้างอิง
และกรณีใช้ C2 เพิ่ม ที่อุณหภูมิการทำความเย็นระดับที่สาม.....103
ตารางที่ 6.10 เปรียบเทียบตัวแปรต่างๆ ที่ทางออกของคอมเพรสเซอร์ขั้นที่ 3 และขั้นที่ 4
ในกรณีใช้ C2 เพิ่ม ที่อุณหภูมิการทำความเย็นระดับที่สาม
กับกรณีสมมูล.....104