

การออกแบบระบบส่งจ่ายน้ำเย็นในแง่การใช้พลังงาน



นาย ธีรชัย ตันติมงคลสุข

ศูนย์วิทยพัทยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย


ปีการศึกษา 2545

ISBN 974 - 17 - 2412 - 8

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I20831298

AN ENERGY ASPECT OF CHILLED WATER SYSTEM DESIGN



Mr. Terachai Tuntimongkolsuk

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2002

ISBN 974 – 17 – 2412 – 8

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การออกแบบระบบส่งจ่ายน้ำเย็นในแง่การใช้พลังงาน

โดย

นายธีรชัย ตันติมงคลสุข


สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

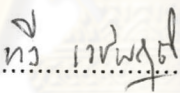
อาจารย์ที่ปรึกษา

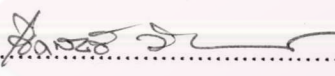
อาจารย์ ดร.เชิดพันธ์ วิฑูราภรณ์

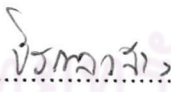
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

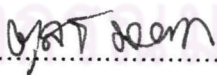

..... คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการสอบ
(รองศาสตราจารย์ ทวี เวชพฤติ)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร.เชิดพันธ์ วิฑูราภรณ์)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ฤชกร จีรกาลวาน)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ตุลย์ มณีวัฒนา)

นายธีรชัย ตันติมงคลสุข : การออกแบบระบบส่งจ่ายน้ำเย็นในแง่การใช้พลังงาน
(AN ENERGY ASPECT OF CHILLED WATER SYSTEM DESIGN),

อาจารย์ที่ปรึกษา : ดร.เชิดพันธ์ วิฑูราภรณ์, 166 หน้า. ISBN 974 - 17 - 2412 - 8

ในปัจจุบันการออกแบบระบบส่งจ่ายน้ำเย็นแบบวงจรปฐมภูมิ - ทูตียมเป็นรูปแบบที่ถูกออกแบบและใช้งานอย่างแพร่หลาย เครื่องสูบน้ำในวงจรทูตียมเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญในระบบทำความเย็นแบบส่วนกลาง เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ส่งน้ำเย็นไปยังพื้นที่บริการหรือบริเวณที่ต้องการความเย็น การใช้งานเครื่องสูบน้ำเพื่อให้ได้เปรียบทางด้านการใช้พลังงานสูงสุดนั้นต้องพยายามให้ระบบส่งจ่ายน้ำเย็นมีประสิทธิภาพโดยรวมของระบบดีที่สุดทุกขณะเวลาที่เครื่องสูบน้ำต้องทำงาน

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้เป็นเครื่องมือสำหรับจำลองหาระบบส่งจ่ายน้ำเย็นที่มีความได้เปรียบทางด้านการใช้พลังงานสูงสุด เพื่อเป็นข้อมูลประกอบการพิจารณาสำหรับการออกแบบระบบ และได้ทดสอบโปรแกรมโดยจำลองระบบส่งจ่ายน้ำเย็น 2 ระบบ ระบบแรกเป็นระบบที่มีภาระความเย็นสูงสุด 500 ตันความเย็นที่มีค่าตัวประกอบภาระต่าง ๆ กัน 4 ค่า ดังนี้ 0.455, 0.655, 0.860 และ 1.000 ระบบมีอุปกรณ์ส่งลมเย็นขนาด 50 ตันความเย็น 10 เครื่อง โดยที่ความต้องการความเย็นของอุปกรณ์ส่งลมเย็นทั้งหมดเปลี่ยนแปลงเหมือนกันหมดทุกเวลา และได้ทดลองเปลี่ยนจำนวนเครื่องสูบน้ำที่ใช้ในระบบตั้งแต่ 1 ถึง 3 เครื่อง ส่วนระบบที่สองนั้นได้ทดลองจำลองระบบส่งจ่ายน้ำเย็นที่มีภาระความเย็นสูงสุด 1000 ตันความเย็นที่มีค่าตัวประกอบภาระ 0.555 ระบบมีอุปกรณ์ส่งลมเย็น 10 เครื่องขนาด 150, 120, 100, 80 และ 60 ตันความเย็นอย่างละ 2 เครื่อง โดยที่ความต้องการความเย็นที่อุปกรณ์ส่งลมเย็นมีค่าแตกต่างกันไปสำหรับอุปกรณ์ส่งลมเย็นแต่ละขนาด และได้ทดลองเปลี่ยนจำนวนเครื่องสูบน้ำในระบบตั้งแต่ 1 ถึง 4 เครื่อง ระบบที่ทดสอบเป็นแบบน้ำเย็นกลับโดยตรง และใช้ค่าผลต่างของอุณหภูมิน้ำเย็นส่งและกลับมีค่าเป็น 10 °F ในการทดสอบระบบทั้ง 2 กรณี

ผลที่ได้จากการทดสอบโปรแกรมนั้นเป็นข้อมูลที่เป็นประโยชน์สำหรับการตัดสินใจเลือกระบบส่งจ่ายน้ำเย็นที่เหมาะสมและมีความได้เปรียบด้านการใช้พลังงานสูงสุด นอกจากนี้โปรแกรมยังได้เสนอรูปแบบการทำงานของเครื่องสูบน้ำที่เหมาะสมเพื่อทำให้ระบบส่งจ่ายน้ำเย็นมีประสิทธิภาพสูงสุด

ภาควิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....

ปีการศึกษา.....2545.....

ลายมือชื่อผู้จัดทำ.....ธีรชัย ตันติมงคลสุข.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....ดร.เชิดพันธ์.....

4270360721 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORD : PUMPING DISTRIBUTION SYSTEM / CHILLED WATER SYSTEM / PUMP
TERACHAI TUNTIMONGKOLSUK : AN ENERGY ASPECT OF CHILLED WATER
SYSTEM DESIGN, THESIS ADVISOR : Dr. CHIRDPUN VITOORAPORN , 166 pp.
ISBN 974 – 17 – 2412 – 8

The primary – secondary chilled water distribution system is at present the most widely used type of design for the chilled water system. Secondary pumps in the chilled water distribution system play an important role as they pump the required chilled water flow rate to serve in the service areas. In order to minimize energy consumption as low as possible in the secondary pumping system, the overall efficiency of the secondary pumping system must be maintained as high as possible for each specific cooling load occurred during the operating hours.

In this reseach, a computer program was developed. The objective is to provide a tool in searching for the appropriate formation of the chilled water pumping distribution system with the least energy consumption. The developed program was tested with 2 simulated chilled water systems. One simulation was characterized by the maximum cooling loads of 500 tons with 4 different load factors of 0.455, 0.655, 0.860 and 1.000, respectively. 10 air handling units of 50 tons each along with identical load profile were used in the system. The pumping system was tested by varying the number of seconday pumps from 1 to 3 pumps. The other simulation system was characterized by the 1000 tons maximum cooling load of 0.555 load factor. In this system, 2 units of 150, 120, 100, 80 and 60 tons with different cooling load profiles were simulated. The number of secondary pumps in the system were varied from 1 to 4 pumps. Temperature difference between supply and return chilled water was kept at 10 F for all cases.

Results from the program provides a useful information in deciding the appropriate chilled water distribution system to be used with the least energy consumption. The program also provides the appropriate operating pattern for pumps used in the system in order to maintain high efficiency of the chilled water distribution system.

Department.....Mechanical Engineering.....
Field of study.....Mechanical Engineering.....
Academic year.....2002.....

Student's Signature.....Terachai Tuntimongkolsuk.....
Advisor's Signature.....*Chirapun Vitooraporn*.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยดี โดยได้รับความช่วยเหลือ และความอนุเคราะห์จากหลายฝ่ายด้วยกัน ข้าพเจ้าขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ทวี เวชพฤติ ที่มอบความรักและเมตตาอบรมสั่งสอน ตลอดจนให้ความรู้แก่ข้าพเจ้าตลอดเวลาที่ข้าพเจ้าศึกษาอยู่ในสถาบันแห่งนี้ รวมถึง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ฤชากร จิรกาลวสาน และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ตุลย์ มณีวัฒนา ที่กรุณาให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอาจารย์ ดร.เชิดพันธ์ วิฑูรภรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่กรุณาสละเวลาอันมีค่าช่วยเหลือให้คำปรึกษา และแนะนำแนวทางในการวิจัย รวมถึงแนวทางแก้ปัญหาและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ที่นำมาซึ่งความสมบูรณ์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ อีกทั้งตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จเป็นรูปเล่มที่สมบูรณ์

ข้าพเจ้าขอขอบคุณ บริษัทเทรน (ประเทศไทย) จำกัด บริษัทสหพีร์ เอ็นจีเนียริง จำกัด บริษัทโรจน์ไพบุลย์อิคิวปเมนต์ จำกัด และบริษัท Grunfos Thailand ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบ

นอกจากนี้ข้าพเจ้าขอขอบคุณคุณคุณวัฒนา ศรีวาจนะ และอาจารย์ศิษย์กัณฑ์ แคนลา ที่ให้คำปรึกษาด้านการออกแบบระบบส่งจ่ายน้ำเย็น รวมถึงนายกวิน นิมไศละ และนายกวี วัฒนะวิรุณ ที่ได้ให้คำปรึกษาเกี่ยวกับการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ตลอดจนเพื่อน ๆ ของข้าพเจ้าที่คอยเป็นกำลังใจให้เสมอ รวมถึงเพื่อน ๆ และน้อง ๆ ในห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีอาคารที่ช่วยเหลือในยามที่ต้องการเป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขออุทิศวิทยานิพนธ์นี้ให้แก่บิดา-มารดา และพี่ชายของข้าพเจ้า ซึ่งอบรมสั่งสอน และเป็นกำลังใจที่สำคัญที่ทำให้ข้าพเจ้าพากเพียรจนสำเร็จการศึกษา

คุณยิวทิพย์ทรัพย์ากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผู้จัดทำงานวิจัย

นายธีรชัย ตันติมงคลสุข

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อวิทยานิพนธ์	ง
บทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฅ
สารบัญภาพ	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์	ณ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและผลงานวิจัยในอดีต.....	4
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	8
3.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบท่อน้ำเย็น.....	8
3.2 คุณสมบัติของเครื่องสูบน้ำเย็น.....	18
3.3 รูปแบบของระบบท่อน้ำเย็น.....	27
3.4 การกระจายน้ำเย็นของระบบ.....	28
บทที่ 4 แบบจำลองของระบบส่งจ่ายน้ำเย็น.....	33
4.1 แบบจำลองของอุปกรณ์.....	33
4.2 การประยุกต์กฎทรงมวลสำหรับการไหลภายในระบบท่อน้ำเย็น.....	37
4.3 การสร้างระบบสมการเพื่อใช้ในการจำลองระบบ.....	38
4.4 ระเบียบวิธีนิวตัน - ราฟสัน.....	42

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 การทดสอบโปรแกรม.....	46
5.1 ภาวะความเย็นและตัวประกอบภาวะความเย็นที่ใช้ทดสอบ.....	46
5.2 รูปแบบของระบบส่งจ่ายน้ำเย็นและข้อมูลเข้า (Inputs) ที่ใช้ในการ ทดสอบโปรแกรม.....	54
5.3 ผลจากการทดสอบโปรแกรม.....	68
5.4 สรุปผลจากการทดสอบโปรแกรม.....	77
บทที่ 6 อภิปรายและเสนอแนะ.....	82
6.1 อภิปรายและสรุป.....	82
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	83
รายการอ้างอิง	85
ภาคผนวก	87
ภาคผนวก ก คุณสมบัติของน้ำตามอุณหภูมิ.....	88
ภาคผนวก ข อัตราค่าไฟฟ้า.....	89
ภาคผนวก ค ภาระการทำความเย็นของระบบ.....	91
ภาคผนวก ง ระเบียบวิธีกำจัดแบบเกาส์.....	94
ภาคผนวก จ การถดถอยแบบกำลังสองน้อยสุด.....	97
ภาคผนวก ฉ ฐานข้อมูลของอุปกรณ์ที่ใช้ในโปรแกรม.....	100
ภาคผนวก ช ผลที่ได้จากการทดสอบโปรแกรม.....	108
ภาคผนวก ซ แผนภาพลำดับการทำงานของโปรแกรม.....	141
ภาคผนวก ฌ โปรแกรม Pumping Energy Consumption Simulation (PECS).....	146
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	166

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
ตารางที่ 3.1	แสดงค่าความขรุขระโดยเฉลี่ยของผิวท่อ.....	11
ตารางที่ 3.2	แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อเหล็กกล้า Schedule 40....	13
ตารางที่ 3.3	แสดงค่าความยาวเทียบเท่าของวาล์วและข้อต่อชนิดต่าง ๆ.....	14
ตารางที่ 3.4	แสดงค่าความยาวเทียบเท่าของข้อต่อที่มีการเพิ่มหรือลดขนาดพื้นที่ หน้าตัดและความยาวเทียบเท่าท่อของสเตรนเนอร์ (หน่วย ft).....	15
ตารางที่ 5.1	รายละเอียดของระบบส่งจ่ายน้ำเย็นทดสอบที่ 1.....	58
ตารางที่ 5.2	รายละเอียดของระบบส่งจ่ายน้ำเย็นทดสอบที่ 2.....	64
ตารางที่ 5.3	รายละเอียดของเครื่องสูบน้ำที่ใช้ในการทดสอบโปรแกรม.....	66
ตารางที่ 5.4	ภาวะความเป็นรายชั่วโมงของอุปกรณ์ส่งลมเย็น.....	67
ตารางที่ 5.5	สรุปการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบส่งจ่ายน้ำเย็นทดสอบที่ 1.....	78
ตารางที่ 5.6	สรุปการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบส่งจ่ายน้ำเย็นทดสอบที่ 2.....	80
ตารางที่ ก.1	คุณสมบัติของน้ำตามอุณหภูมิ (หน่วย SI).....	88
ตารางที่ ก.2	คุณสมบัติของน้ำตามอุณหภูมิ (หน่วยอังกฤษ).....	88
ตารางที่ ข.1	อัตราค่าไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัยแบบ TOU Tariff 2.....	89
ตารางที่ ฉ.1	รายละเอียดของเครื่องสูบน้ำ Grundfos ISO Line	100
ตารางที่ ฉ.2	มาตรฐานกิโลวัตต์ต่อตันความเย็นของเครื่องทำน้ำเย็นชนิดระบาย ความร้อนด้วยน้ำ.....	104
ตารางที่ ฉ.3	รายละเอียดของเครื่องทำน้ำเย็นจากกะตะลือกผู้ผลิต.....	105
ตารางที่ ฉ.4	รายละเอียดของเครื่องทำน้ำเย็นจาก Selection Program.....	105
ตารางที่ ฉ.5	รายละเอียดของอุปกรณ์ส่งลมเย็นจากกะตะลือกผู้ผลิต.....	106
ตารางที่ ฉ.6	รายละเอียดของอุปกรณ์ส่งลมเย็นจาก Selction Program.....	106
ตารางที่ ฉ.7	ค่า Cv จากผู้ผลิตวาล์วต่าง ๆ.....	106
ตารางที่ ฉ.8	ข้อมูลพื้นฐานของวาล์วควบคุม 2 ทิศทางและ Actuator ของผู้ผลิต 6....	107

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ตารางที่ ข.1	ผลการจำลองระบบรูปแบบที่ 1 สำหรับภาวะความเย็นที่มีค่า ตัวประกอบภาระเท่ากับ 0.455.....	109
ตารางที่ ข.2	ผลการจำลองระบบรูปแบบที่ 2 สำหรับภาวะความเย็นที่มีค่า ตัวประกอบภาระเท่ากับ 0.455.....	111
ตารางที่ ข.3	ผลการจำลองระบบรูปแบบที่ 3 สำหรับภาวะความเย็นที่มีค่า ตัวประกอบภาระเท่ากับ 0.455.....	113
ตารางที่ ข.4	ผลการจำลองระบบรูปแบบที่ 1 สำหรับภาวะความเย็นที่มีค่า ตัวประกอบภาระเท่ากับ 0.655.....	115
ตารางที่ ข.5	ผลการจำลองระบบรูปแบบที่ 2 สำหรับภาวะความเย็นที่มีค่า ตัวประกอบภาระเท่ากับ 0.655.....	117
ตารางที่ ข.6	ผลการจำลองระบบรูปแบบที่ 3 สำหรับภาวะความเย็นที่มีค่า ตัวประกอบภาระเท่ากับ 0.655.....	119
ตารางที่ ข.7	ผลการจำลองระบบรูปแบบที่ 1 สำหรับภาวะความเย็นที่มีค่า ตัวประกอบภาระเท่ากับ 0.860.....	121
ตารางที่ ข.8	ผลการจำลองระบบรูปแบบที่ 2 สำหรับภาวะความเย็นที่มีค่า ตัวประกอบภาระเท่ากับ 0.860.....	123
ตารางที่ ข.9	ผลการจำลองระบบรูปแบบที่ 3 สำหรับภาวะความเย็นที่มีค่า ตัวประกอบภาระเท่ากับ 0.860.....	125
ตารางที่ ข.10	ผลการจำลองระบบรูปแบบที่ 1 สำหรับภาวะความเย็นที่มีค่า ตัวประกอบภาระเท่ากับ 0.100.....	127
ตารางที่ ข.11	ผลการจำลองระบบรูปแบบที่ 2 สำหรับภาวะความเย็นที่มีค่า ตัวประกอบภาระเท่ากับ 0.100.....	129
ตารางที่ ข.12	ผลการจำลองระบบรูปแบบที่ 3 สำหรับภาวะความเย็นที่มีค่า ตัวประกอบภาระเท่ากับ 0.100.....	131
ตารางที่ ข.13	ผลการจำลองระบบทดสอบที่ 2 ภาวะความเย็นที่มีค่า ตัวประกอบภาระเท่ากับ 0.555 รูปแบบที่ 1.....	133

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ตารางที่ ข.14	ผลการจำลองระบบทดสอบที่ 2 ภาวะความเย็นที่มีค่า ตัวประกอบภาระเท่ากับ 0.555 รูปแบบที่ 2.....	135
ตารางที่ ข.15	ผลการจำลองระบบทดสอบที่ 2 ภาวะความเย็นที่มีค่า ตัวประกอบภาระเท่ากับ 0.555 รูปแบบที่ 3.....	137
ตารางที่ ข.16	ผลการจำลองระบบทดสอบที่ 2 ภาวะความเย็นที่มีค่า ตัวประกอบภาระเท่ากับ 0.555 รูปแบบที่ 4.....	139



ศูนย์วิทยพัทยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
รูปที่ 3.1	แผนภาพแสดงสมการของเบอร์นูลลีที่ปรับแก้แล้วสำหรับการไหลในท่อ....	10
รูปที่ 3.2	เขตสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานสำหรับการไหลของน้ำในท่อ เหล็กกล้าเบอร์ 40.....	12
รูปที่ 3.3	เครื่องทำน้ำเย็นลักษณะของวาล์วควบคุมแบบ 2 ทางชนิดต่าง	16
รูปที่ 3.4	ตัวอย่างข้อมูลเขตสูญเสียของเครื่องทำความเย็นหรืออุปกรณ์ส่งลมเย็น จากผู้ผลิต.....	18
รูปที่ 3.5	ตัวอย่างเส้นโค้งสมรรถนะของเครื่องสูบน้ำที่ความเร็วรอบ 1430 rpm.....	19
รูปที่ 3.6	ตัวอย่างเส้นโค้งสมรรถนะของเครื่องสูบน้ำที่ความเร็วรอบต่าง ๆ.....	20
รูปที่ 3.7	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพและอัตราการไหลของเครื่องสูบน้ำ.....	20
รูปที่ 3.8	ตัวอย่างระบบส่งจ่ายน้ำเย็นอย่างง่าย.....	21
รูปที่ 3.9	เส้นลักษณะของระบบของระบบท่อน้ำเย็น.....	22
รูปที่ 3.10	จุดทำงานของระบบ.....	23
รูปที่ 3.11	สมรรถนะของเครื่องสูบน้ำที่ต่ออนุกรมกัน 2 เครื่อง.....	24
รูปที่ 3.12	สมรรถนะของเครื่องสูบน้ำที่ต่อขนานกัน 3 เครื่อง.....	24
รูปที่ 3.13	รูปแบบท่อน้ำเย็นแบบนำน้ำหมุนเวียนกลับโดยตรง.....	27
รูปที่ 3.14	รูปแบบท่อน้ำเย็นแบบนำน้ำหมุนเวียนกลับโดยทางอ้อม.....	28
รูปที่ 3.15	การกระจายน้ำเย็นแบบปฐมภูมิที่มีอัตราการไหลคงที่.....	29
รูปที่ 3.16	การกระจายน้ำเย็นแบบปฐมภูมิอัตราการไหลแปรเปลี่ยน.....	30
รูปที่ 3.17	การกระจายน้ำเย็นแบบปฐมภูมิและทุติยภูมิ.....	31
รูปที่ 3.18	การกระจายน้ำเย็นแบบใช้เครื่องสูบน้ำเฉพาะที่.....	31
รูปที่ 4.1	การไหลของน้ำเย็นผ่านจุดต่อ i	38
รูปที่ 4.2	ตัวอย่างระบบท่อน้ำเย็นที่ต้องการจำลอง.....	39
รูปที่ 5.1	ภาระการทำความเย็นที่มีค่าตัวประกอบภาระ $LF = 0.455$	47
รูปที่ 5.2	ภาระการทำความเย็นที่มีค่าตัวประกอบภาระ $LF = 0.655$	48
รูปที่ 5.3	ภาระการทำความเย็นที่มีค่าตัวประกอบภาระ $LF = 0.860$	49

สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
รูปที่ 5.4	ภาระการทำความเย็นที่มีค่าตัวประกอบภาระ LF = 1.000.....	49
รูปที่ 5.5	ภาระการทำความเย็นสูงสุด 1000 ตันที่มีค่าตัวประกอบภาระ LF = 0.555.....	50
รูปที่ 5.6	ภาระความเย็นของ AHU เครื่องที่ 1 และ 7 (150 Tons).....	51
รูปที่ 5.7	ภาระความเย็นของ AHU เครื่องที่ 2 และ 9 (120 Tons).....	52
รูปที่ 5.8	ภาระความเย็นของ AHU เครื่องที่ 3 และ 5 (80 Tons).....	52
รูปที่ 5.9	ภาระความเย็นของ AHU เครื่องที่ 4 และ 8 (60 Tons).....	53
รูปที่ 5.10	ภาระความเย็นของ AHU เครื่องที่ 6 และ 10 (100 Tons).....	54
รูปที่ 5.11	รูปแบบของระบบส่งจ่ายน้ำเย็นทดสอบที่ 1 ใช้เครื่องสูบน้ำ 1 เครื่อง ในวงจรถุติยภูมิ.....	55
รูปที่ 5.12	รูปแบบของระบบส่งจ่ายน้ำเย็นทดสอบที่ 1 ใช้เครื่องสูบน้ำ 2 เครื่อง ในวงจรถุติยภูมิ.....	56
รูปที่ 5.13	รูปแบบของระบบส่งจ่ายน้ำเย็นทดสอบที่ 1 ใช้เครื่องสูบน้ำ 3 เครื่อง ในวงจรถุติยภูมิ.....	57
รูปที่ 5.14	รูปแบบของระบบส่งจ่ายน้ำเย็นทดสอบที่ 2 ใช้เครื่องสูบน้ำ 1 เครื่อง ในวงจรถุติยภูมิ.....	60
รูปที่ 5.15	รูปแบบของระบบส่งจ่ายน้ำเย็นทดสอบที่ 2 ใช้เครื่องสูบน้ำ 2 เครื่อง ในวงจรถุติยภูมิ.....	61
รูปที่ 5.16	รูปแบบของระบบส่งจ่ายน้ำเย็นทดสอบที่ 2 ใช้เครื่องสูบน้ำ 3 เครื่อง ในวงจรถุติยภูมิ.....	62
รูปที่ 5.17	รูปแบบของระบบส่งจ่ายน้ำเย็นทดสอบที่ 2 ใช้เครื่องสูบน้ำ 4 เครื่อง ในวงจรถุติยภูมิ.....	63
รูปที่ 5.18	ประสิทธิภาพขดลวดสูบน้ำของระบบที่ใช้เครื่องสูบน้ำ 1 เครื่อง (LF = 0.455)	68
รูปที่ 5.19	ประสิทธิภาพขดลวดสูบน้ำของระบบที่ใช้เครื่องสูบน้ำ 2 เครื่อง (LF = 0.455)	69
รูปที่ 5.20	ประสิทธิภาพขดลวดสูบน้ำของระบบที่ใช้เครื่องสูบน้ำ 3 เครื่อง (LF = 0.455)	70

สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
รูปที่ 5.21	ประสิทธิภาพขดลวดสูบน้ำของระบบที่ใช้เครื่องสูบน้ำ 1 เครื่อง (LF = 0.655)	70
รูปที่ 5.22	ประสิทธิภาพขดลวดสูบน้ำของระบบที่ใช้เครื่องสูบน้ำ 2 เครื่อง (LF = 0.655)	71
รูปที่ 5.23	ประสิทธิภาพขดลวดสูบน้ำของระบบที่ใช้เครื่องสูบน้ำ 3 เครื่อง (LF = 0.655)	72
รูปที่ 5.24	ประสิทธิภาพขดลวดสูบน้ำของระบบที่ใช้เครื่องสูบน้ำ 1 เครื่อง (LF = 0.860)	73
รูปที่ 5.25	ประสิทธิภาพขดลวดสูบน้ำของระบบที่ใช้เครื่องสูบน้ำ 2 เครื่อง (LF = 0.860)	73
รูปที่ 5.26	ประสิทธิภาพขดลวดสูบน้ำของระบบที่ใช้เครื่องสูบน้ำ 3 เครื่อง (LF = 0.860)	74
รูปที่ 5.27	ประสิทธิภาพขดลวดสูบน้ำของระบบที่ใช้เครื่องสูบน้ำ 1 เครื่อง.....	75
รูปที่ 5.28	ประสิทธิภาพขดลวดสูบน้ำของระบบที่ใช้เครื่องสูบน้ำ 2 เครื่อง.....	75
รูปที่ 5.29	ประสิทธิภาพขดลวดสูบน้ำของระบบที่ใช้เครื่องสูบน้ำ 3 เครื่อง.....	76
รูปที่ 5.30	ประสิทธิภาพขดลวดสูบน้ำของระบบที่ใช้เครื่องสูบน้ำ 4 เครื่อง.....	77
รูปที่ 5.31	หน่วยของพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ขับเครื่องสูบน้ำแบบต่าง ๆ (ระบบทดสอบที่ 1)	79
รูปที่ 5.32	ค่าไฟฟ้าต่อเดือนโดยประมาณที่ต้องจ่ายเมื่อใช้ระบบส่งจ่าย น้ำเย็นแบบต่าง ๆ (ระบบทดสอบที่ 1)	79
รูปที่ 5.33	หน่วยของพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ขับเครื่องสูบน้ำแบบต่าง ๆ (ระบบทดสอบที่ 2)	80
รูปที่ 5.34	ค่าไฟฟ้าต่อเดือนโดยประมาณที่ต้องจ่ายเมื่อใช้ระบบส่งจ่าย น้ำเย็นแบบต่าง ๆ (ระบบทดสอบที่ 2)	81
รูปที่ ๗.1	แผนภาพการไหลของการเลือกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง.....	141
รูปที่ ๗.2	แผนภาพการไหลของการเลือกค่าสัมประสิทธิ์การไหลของวาล์วควบคุม....	142

สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
รูปที่ ข.3	แผนภาพการไหลของการเลือกเครื่องสูบน้ำที่สามารถทำงานได้ที่ภาวะออกแบบ.....	142
รูปที่ ข.4	แผนภาพการไหลของการวิเคราะห์การใช้พลังงาน.....	143
รูปที่ ฉ.1	หน้าจอเริ่มต้นการทำงานของโปรแกรม.....	146
รูปที่ ฉ.2	หน้าจอรับค่าข้อมูลเบื้องต้น.....	147
รูปที่ ฉ.3	หน้าจอรับค่าข้อมูลของเครื่องทำน้ำเย็น.....	148
รูปที่ ฉ.4	หน้าจอรับค่าข้อมูลของอุปกรณ์ส่งลมเย็น.....	149
รูปที่ ฉ.5	หน้าจอรับค่าหมายเลขช่วงของวาล์วควบคุมที่ใช้ในระบบ.....	150
รูปที่ ฉ.6	หน้าจอรับค่าความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อตรง.....	151
รูปที่ ฉ.7	หน้าจอรับค่าสัมประสิทธิ์การไหลของวาล์วควบคุม.....	152
รูปที่ ฉ.8	หน้าจอรับค่าสมรรถนะของเครื่องสูบน้ำในวงจรปฐมภูมิ.....	153
รูปที่ ฉ.9	หน้าจอรับค่าสมรรถนะของเครื่องสูบน้ำในวงจรทุติยภูมิ.....	154
รูปที่ ฉ.10	หน้าจอรับค่าอัตราค่าไฟฟ้า.....	155
รูปที่ ฉ.11	หน้าจอแสดงสถานะของการคำนวณ.....	156
รูปที่ ฉ.12	หน้าจอแสดงว่าการจำลองระบบเสร็จสมบูรณ์.....	157
รูปที่ ฉ.13	หน้าจอแสดงข้อความให้ผู้ผู้ใช้เปิดโปรแกรม RDP.....	158
รูปที่ ฉ.14	หน้าจอเริ่มต้นของโปรแกรม RDP.....	159
รูปที่ ฉ.15	แสดงขั้นตอนการแสดงผลพาร์ท (1).....	160
รูปที่ ฉ.16	แสดงขั้นตอนการแสดงผลพาร์ท (2).....	161
รูปที่ ฉ.17	หน้าจอแสดงผลพาร์ท.....	162
รูปที่ ฉ.18	จุดต่อสำหรับระบบที่มีเครื่องทำน้ำเย็น 1 เครื่อง.....	163
รูปที่ ฉ.19	จุดต่อสำหรับระบบที่มีเครื่องทำน้ำเย็น 2 เครื่อง.....	163
รูปที่ ฉ.20	จุดต่อสำหรับระบบที่มีเครื่องทำน้ำเย็น 3 เครื่อง.....	163
รูปที่ ฉ.21	จุดต่อสำหรับระบบที่มีเครื่องทำน้ำเย็น 4 เครื่อง.....	164

คำอธิบายสัญลักษณ์

สัญลักษณ์		หน่วย
q	ภาระความเย็นของระบบปรับอากาศ	BTU/Hr , Tons
Q	อัตราการไหลของน้ำเย็น	gpm
Δt	ความแตกต่างของอุณหภูมิของน้ำเย็น (Supply และ Return Water)	F
sg	ความถ่วงจำเพาะของน้ำเย็น ≈ 1.0	-
H	เฮดรวมของน้ำเย็นในท่อ	ft
H_L	เฮดสูญเสียของน้ำเย็นในท่อตรง	ft
ΔP	ความดันสูญเสียของน้ำเย็นในท่อ	lb_f / ft^2
Z	เฮดสถิต	ft
P	คามดันของน้ำเย็นในท่อ	lb_f / ft^2
ρ	ความหนาแน่นของน้ำเย็นในท่อ	slugs / ft ³
g	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก = 32.2	ft / s^2
g_c	ตัวปัจจัยของการแปลงหน่วย (Units Conversion Factor) = 32.2	$ft \cdot lb_m / lb_f \cdot s^2$
V	ความเร็วเฉลี่ยของน้ำเย็นในท่อ	ft / s
Re_D	เลขเรโนลด์	-
μ	ความหนืดของน้ำเย็น (Dynamic Viscosity)	$lb_m - sec / ft^2$
e	ความขรุขระของผิวในของท่อน้ำเย็น	ft
D	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อน้ำเย็น	ft
f	ตัวประกอบความเสียดทาน	-
L	ความยาวของท่อตรง	ft
L_e	ความยาวเทียบเท่าท่อตรงของข้อต่อ ข้อต่อ และวาล์ว	ft
h_L	เฮดสูญเสียของน้ำในข้อต่อ ข้อต่อ และวาล์ว	ft
ΔH_{CV}	เฮดสูญเสียของน้ำในวาล์วควบคุม	ft
C_V	สัมประสิทธิ์การไหลของวาล์วควบคุม	gpm

<i>RPM</i>	ความเร็วรอบของเครื่องสูบน้ำ	rpm
<i>WHP</i>	Water horsepower	hp
<i>BHP</i>	Brake horsepower	hp
<i>kW_m</i>	กำลังไฟฟ้าที่มอเตอร์ต้องการเพื่อใช้ขับเครื่องสูบน้ำ	kW
η_p	ประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำ	-
η_m	ประสิทธิภาพของมอเตอร์	-
η_{VSD}	ประสิทธิภาพของ Variable Speed Drive	-



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย