



รายงานสหกิจศึกษาฉบับสมบูรณ์

การลดค่าใช้จ่ายในการทำน้ำเย็น

Chilled water supply operating cost minimization

นางสาวสุภัทสรดา มหาสระโร

ภาควิชา เครื่องกล สาขา เครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560



รายงานสหกิจศึกษาฉบับสมบูรณ์

การลดค่าใช้จ่ายในการทำน้ำเย็น

Chilled water supply operating cost minimization

นางสาวสุภัทสรดา มหาสะโร

ภาควิชา เครื่องกล สาขา เครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2560

ชื่อโครงการสหกิจศึกษา การลดค่าใช้จ่ายในการทำน้ำเย็น

ชื่อ-สกุล นักศึกษา นางสาวสุภัทสรมา มหาสะโร

คณะ วิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชา เครื่องกล

ชื่อ-สกุล อาจารย์นิเทศ ผศ.ดร.อนุรัตน์ พิณโสภณ

ชื่อ-สกุล ผู้นิเทศงาน นายทรงยศ บุญมาสูงทรง

สถานประกอบการ บริษัท ซีเกท (ประเทศไทย) จำกัด โรงงานโคราช

บทคัดย่อ

โครงการนี้ศึกษากระบวนการทำความเย็นแบบรวมศูนย์ ประเภทระบายความร้อนด้วยน้ำ จุดประสงค์คือลดค่าใช้จ่ายในการทำน้ำเย็นโดยทำการศึกษาวงจรที่ส่งผลกระทบต่อพลังงานที่ใช้ในเครื่องทำความเย็นด้วยวิธีการวิเคราะห์ความถดถอยซึ่งจากการศึกษานี้พบว่าวงจรที่ส่งผลกระทบต่อพลังงานที่ใช้ในการทำความเย็น ได้แก่ จำนวนการดำเนินการของหอระบายความร้อน อัตราการไหลของน้ำที่เครื่องควบแน่น และ อัตราการไหลของน้ำที่เครื่องระเหยภาระทำความเย็น และ อุณหภูมิกระเปาะเปียก โดยอุณหภูมิกระเปาะเปียกนั้นมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิน้ำเข้าเครื่องควบแน่น นั่นก็คือถ้าอุณหภูมิกระเปาะเปียกมีค่าต่ำ อุณหภูมิของน้ำที่เข้าเครื่องควบแน่นก็จะต่ำตามไปด้วยซึ่งสามารถที่จะบังคับให้มีอุณหภูมิต่ำได้โดยเพิ่มจำนวนการใช้งานหอระบายความร้อนแต่การดำเนินการนั้นต้องคำนึงถึงค่าใช้จ่ายด้านอื่นอีกซึ่งก็คือค่าใช้จ่ายในด้านของไฟฟ้าของหอระบายความร้อน ถึงแม้ว่าเราต้องการอุณหภูมิน้ำเข้าเครื่องควบแน่นที่ต่ำแต่การที่จะเปิดดำเนินการหอระบายความร้อนมากไปก็อาจจะเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่าย ดังนั้นจึงมีการเอาเครื่องมือเข้ามาเพื่อช่วยในการทำงานผลการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิน้ำเข้าเครื่องควบแน่นระหว่าง 86- 92 องศาฟาเรนไฮต์เมื่อสามารถควบคุมพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อพลังงานที่ใช้ในการทำความเย็น จะสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายทางด้านไฟฟ้าในได้ 0.09% -7.91%ต่อปี

คำสำคัญ: เครื่องทำความเย็น, หอระบายความร้อน, พลังงานที่ใช้ในเครื่องทำความเย็น

Cooperative Title: Chilled water supply operating cost minimization

Student intern name: SupatsaraMahasaro

Faculty: Engineering **Department:** Mechanical

Advisor name: Asst.Prof.Dr.UnnatPinsopon

Mentor name: SongyotBoonmasongsong

Company: Seagate technology (Thailand) co ltd. – Plant Korat

ABSTRACT

The objective of the study was to minimize energy consumption of water-cooled chiller in electronic manufacturing companies by determining suitable operating conditions. In operation of chiller has many parameters that affected to energy consumption. So regression analysis was used for finding the parameter that have relations with energy consumption. The parameters that affected to energy consumption were as follows: the number of the cooling tower, water flow rate through the tubes of evaporator, water flow rate through the tubes of condenser, capacity of chiller, wet bulb temperature and condenser entering water temperature. However decreasing condenser entering water temperature is possible to apply in manufacturing by increasing the number of cooling tower but it would lead to a higher cost. Therefore, the suitable operating condition of chiller create the program that helps to minimize energy consumption. The result of the operating machine that have data of condenser entering water temperature is between 86-93 Fahrenheit. Cost of electricity consumption was lower approximately in the range of 0.09% to 7.91% per year.

Keywords: Chiller, Cooling tower, Energy consumption

กิตติกรรมประกาศ

การปฏิบัติงานสหกิจศึกษา ณ บริษัทซีเกท เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด โรงงานโคราช สำเร็จ ลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดีจากผู้ร่วมงาน ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณบุคลากรของ บริษัทซีเกท เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด โรงงานโคราช ที่ได้ให้คำปรึกษาและคำแนะนำในการ ปฏิบัติงานและการแก้ไขปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นระหว่างการปฏิบัติงานสหกิจศึกษาขอขอบพระคุณบิดา มารดาญาติพี่น้องที่อบรมสั่งสอนให้กำลังใจ และส่งเสริมด้านการศึกษาเป็นอย่างดีเสมอมา ขอขอบพระคุณ ครูอาจารย์ทุกคนที่อบรมสั่งสอนและถ่ายทอดวิชาความรู้ ขอขอบพระคุณผศ.ดร.อุจน์นัต พิณโสภณ อาจารย์ ที่ได้ให้คำปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่คอยให้คำปรึกษา และนายทรงยศ บุญมาสูงทรง ผู้นิเทศงาน ทำให้ การศึกษาการลดค่าใช้จ่ายในการทำน้าเย็นสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญภาพ	VII
บทที่	
1. บทนำ	
1.1 เหตุผลและความเป็นมาของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	3
2. แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 หลักการทำงานของระบบปรับอากาศ	4
2.2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบหอระบายความร้อน	6
2.3 สมดุลพลังงานที่สำคัญที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน	9
2.4 หลักการทำงานของระบบทำความเย็นแบบอัดไอ	12
2.5 หลักการทำงานของระบบทำความเย็นแบบรวมศูนย์โดยเครื่องทำความเย็นแบบระบายความร้อนด้วยน้ำ	13
2.6 การอนุรักษ์พลังงานในระบบทำความเย็น	
2.6.1 การลดอุณหภูมิทำงานของเครื่องควบแน่น	14
2.6.2 การเพิ่มอุณหภูมิทำงานของเครื่องระเหย	16
2.7 วิธีผลต่างกำลังน้อยสุด	16
2.8 วิธีการกำจัดแบบเกาส์	
2.8.1 การกำจัดไปข้างหน้า	17
2.8.2 การแทนค่าย้อนกลับ	18

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
2.9สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ	18
2.10การวัดความถูกต้อง	19
2.11การประมาณค่า	20
3.ขั้นตอนการดำเนินงาน	
3.1ขั้นเตรียมการรวบรวมข้อมูลรายละเอียดเครื่องทำความเย็นและหอระบายความร้อน	22
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน	23
3.3ขั้นตอนการสร้างสมการการวิเคราะห์ความถดถอย	24
3.4 ขั้นตอนการหาสภาวะการณืใช้งาน	25
4.วิเคราะห์การใช้พลังงาน และ ผลการควบคุมประสิทธิภาพ	
4.1 สมการถดถอยของการประมาณค่าพลังงานที่ใช้ในเครื่องทำความเย็น	26
4.2 สมการถดถอยของการประมาณค่าอุณหภูมิน้ำเข้าเครื่องควบแน่น	28
4.3 ผลการควบคุมพารามิเตอร์ของเครื่องทำความเย็น	29
5.สรุปผลการวิจัย และ ข้อเสนอแนะ	
สรุปผลการวิจัย	33
ข้อเสนอแนะ	34
เอกสารอ้างอิง	35
ภาคผนวก	38

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1 ตารางสรุปการแจกแจงของค่าสถิติและขีดจำกัดของการประมาณ	21
ตารางที่ 4.1 แสดงความคลาดเคลื่อนของการประมาณค่าระหว่างค่า kW regression 1 และ kW regression 2 โดยเทียบกับค่า kW ที่เก็บค่าจริงโดยใช้ข้อมูลระหว่างวันที่ 26/6/2017 ถึง 20/9/2017	28
ตารางที่ 4.2 แสดงความคลาดเคลื่อนของการประมาณค่าระหว่างค่า CWS regression เทียบกับค่า CWS ที่เก็บค่าจริงโดยใช้ข้อมูลระหว่างวันที่ 26/6/2017 ถึง 20/9/2017	29
ตารางที่ 5.1 แสดงเปอร์เซ็นต์ค่าใช้จ่ายที่ลดได้หลังจากมีการควบคุมพารามิเตอร์ โดยเทียบกับประสิทธิภาพต่ำสุดที่อุณหภูมินั้นๆ เมื่อไม่ได้ควบคุมพารามิเตอร์	32
ตารางที่ ก.1 ข้อมูลตรวจวัดที่ใช้ในการศึกษาเครื่องทำความเย็น	38
ตารางที่ ก.2 ข้อมูลตรวจวัดที่ได้จากการทดลองปรับค่า	39
ตารางที่ ข.1 ข้อมูลแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์	40
ตารางที่ ข.2 การประมาณค่าพลังงานที่ใช้ในเครื่องทำน้ำเย็นของสมการที่ 14	41
ตารางที่ ข.3 การประมาณค่าอุณหภูมิน้ำเข้าเครื่องควบแน่นสมการที่ 15	42
ตารางที่ ข.4 ข้อมูลการคำนวณค่าพลังงานที่ใช้ในเครื่องทำความเย็นตามสมการที่ 14	43
ตารางที่ ข.5 ข้อมูลการคำนวณค่า CWS regression ของสมการที่ 15	44

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 เครื่องระเหย	4
รูปที่ 2.2 เครื่องควบแน่นแบบเปลือกและท่อ	5
รูปที่ 2.3 อุปกรณ์ลดความดัน	5
รูปที่ 2.4 คอมเพรสเซอร์ ชนิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง	6
รูปที่ 2.5 คอมเพรสเซอร์ ชนิดแบบ สกู	6
รูปที่ 2.6 แผนภาพระหว่างเอนทัลปีกับอุณหภูมิของน้ำและอากาศ ในกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน	7
รูปที่ 2.7 หอระบายความร้อนแบบการไหลสวนทาง	8
รูปที่ 2.8 หอระบายความร้อนแบบการไหลตั้งฉาก	8
รูปที่ 2.9 หอระบายความร้อนพัดลมดูด แบบการไหลตั้งฉาก	9
รูปที่ 2.10 แผนภาพการทำงานระบบปรับอากาศแบบรวมศูนย์โดยใช้เครื่องทำความเย็น เป็นแบบระบายความร้อนด้วยน้ำ	10
รูปที่ 2.11 P-h Diagram ของระบบอัดไอแบบน้ำยาอัดชั้นเดียว	11
รูปที่ 2.12 ระบบอัดไอแบบน้ำยาอัดชั้นเดียว	12
รูปที่ 2.13 ส่วนประกอบของเครื่องทำความเย็น	13
รูปที่ 2.14 แผนภาพ P-h เมื่อลดอุณหภูมิของเครื่องควบแน่น	15
รูปที่ 2.15 แผนภาพ P-h เมื่อลดอุณหภูมิของเครื่องระเหย	16
รูปที่ 3.1 ระบบปรับอากาศแบบรวมศูนย์โดยเครื่องทำความเย็นเป็นแบบระบายความร้อนด้วยน้ำ	22
รูปที่ 3.2 แผนภาพแสดงขั้นตอนดำเนินงาน	24
รูปที่ 3.3 แผนภาพแสดงขั้นตอนการสร้างสมการ	25
รูปที่ 3.4 แผนภาพโครงสร้างการหาสมการกรณีใช้งาน	26
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่าง kW, kW _{regression1} และ kW _{regression 2}	28
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่าง CWS และ CWS regression	29
รูปที่ 4.3 ประสิทธิภาพของเครื่องทำความเย็นที่อุณหภูมิน้ำเข้าเครื่องควบแน่น 88 °F ซึ่งควบคุมอัตราการไหลของน้ำที่เครื่องควบแน่น	30
รูปที่ 4.4 ประสิทธิภาพของเครื่องทำความเย็นที่อุณหภูมิน้ำเข้าเครื่องควบแน่น 91 °F ซึ่งควบคุมอัตราการไหลของน้ำที่เครื่องระเหย	31

บทที่ 1

บทนำ

1.1 เหตุผลและความเป็นมาของโครงการ

ประเทศต่าง ๆ มีการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อความสะดวกรวดเร็วมากยิ่งขึ้น ให้ทันต่อความต้องการของประชากรโลกซึ่งเพิ่มจำนวนเช่นเดียวกัน เครื่องทำความเย็นเป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่มีความจำเป็นในการดำเนินกิจการของโรงงานอุตสาหกรรม ธุรกิจการศูนย์ค้า รวมถึงการใช้งานในระดับครัวเรือนของประชากรหลายประเทศเขตร้อน ในระดับโรงงานอุตสาหกรรมและธุรกิจการค้าต่างๆจึงมีค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่มาจากการใช้เครื่องทำความเย็นเป็นต้นทุนส่วนหนึ่ง การลดต้นทุนการประกอบการจะทำให้มีผลกำไรมากขึ้น การทำให้ระบบเครื่องทำความเย็นทำงานอย่างมีประสิทธิภาพมีการใช้พลังงานน้อยจะช่วยลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานให้กับโรงงานอุตสาหกรรม ธุรกิจการศูนย์ค้า รวมถึงการใช้งานในระดับครัวเรือนของประชากร

ในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์นั้นจะมีการเกิดความร้อน ซึ่งความร้อนส่วนนี้จะต้องถูกระบายทิ้งเนื่องจากภายในห้องประกอบชิ้นส่วนหรือห้องดำเนินงานต้องมีการควบคุมสภาวะของอากาศให้เป็นไปตามความต้องการ โดยทั่วไปปัจจัยของอากาศที่ต้องควบคุมประกอบด้วย อุณหภูมิ ความชื้น ความสะอาด การกระจายลม และปริมาณลม เพื่อให้เครื่องจักรทำงานได้เต็มประสิทธิภาพหน้าที่หลักของระบบปรับอากาศ คือ การทำความเย็นหรือการถ่ายเทความร้อนออกจากพื้นที่ โดยมีน้ำยาหรือสารทำความเย็นที่อยู่ในระบบปรับอากาศทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการขนถ่ายความร้อนเพื่อออกไประบายทิ้งภายนอกผ่านเครื่องควบแน่น และแหล่งที่รับความร้อนจากส่วนนี้คือบรรยากาศ การทำงานก็คือ เมื่อน้ำหล่อเย็นได้รับความร้อนจากสารทำความเย็น น้ำหล่อเย็นจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น จากนั้นน้ำหล่อเย็นนี้จะถูกส่งไปยังหอระบายความร้อนแล้วถ่ายเทความร้อนให้กับอากาศโดยอาศัยการระเหยของน้ำ จากนั้นน้ำที่เหลือจะมีอุณหภูมิต่ำลงแล้วไหลกลับไปรับความร้อนจากสารทำความเย็นที่เครื่องควบแน่น จากนั้นสารทำความเย็นที่ถ่ายเทความร้อนแล้วก็จะเข้าสู่เครื่องระเหยเพื่อถ่านทำความเย็นให้น้ำเย็นเพื่อที่จะนำไปปรับอากาศในห้องต่างๆที่ใช้งาน

บริษัทซีเกท เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด โรงงานโคราช นั้นมีการใช้ระบบทำความเย็นแบบรวมศูนย์ (Central Air-Conditioning System) โดยเครื่องทำความเย็น(Chiller)เป็นแบบระบายความร้อนด้วยน้ำ ซึ่งจำนวนใช้งานของเครื่องทำความเย็นในโรงงานนี้มีมากกว่า 20 เครื่อง ซึ่งกระบวนการควบคุมเครื่องทำความเย็นมีพารามิเตอร์หรือตัวแปรที่เกี่ยวข้องหลายตัวที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องทำความเย็น ดังนั้นผู้ศึกษาจึงสนใจศึกษาการลดค่าใช้จ่ายในการทำน้ำเย็นโดยศึกษาค่าพารามิเตอร์ซึ่งส่งผลต่อพลังงานที่ใช้ในเครื่องทำความเย็น โดยนำมาวิเคราะห์หาค่าความถดถอย

(Regression analysis) เพื่อประมาณค่าการใช้พลังงาน ซึ่งเป็นแนวทางในการดำเนินการควบคุมเครื่องทำความเย็นให้เกิดการใช้พลังงานอย่างประหยัดและเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการทำน้ำเย็นได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. ศึกษาการลดค่าใช้จ่ายในการทำน้ำเย็นโดยอาศัยค่าพารามิเตอร์ ที่ส่งผลกระทบต่อพลังงานที่ใช้ในเครื่องทำความเย็น โดยนำมาวิเคราะห์ความถดถอย (Regression analysis) เพื่อประมาณค่าการใช้พลังงาน

2. เพื่อศึกษาการประหยัดพลังงานและควบคุมการเดินเครื่องเพื่อที่จะทำให้เกิดการใช้พลังงานของระบบอย่างเหมาะสมที่สุด

1.3 ขอบเขตของโครงการ

ระบบที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย

- | | |
|--|---------------|
| - เครื่องทำความเย็น ชนิด Centrifugal water chiller | ขนาด 1100 ตัน |
| - หอระบายความร้อน ยี่ห้อ LIANG CHI รุ่น LRC-SAS | ขนาด 800 ตัน |
| - ปั๊มน้ำเย็น | ขนาด 90 kW |
| - ปั๊มน้ำหล่อเย็น | ขนาด 90 kW |

ปริมาณที่ทำการตรวจวัดในการศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วย

- | | |
|---|--------|
| - อุณหภูมิน้ำเย็นขาเข้าเครื่องควบแน่น (CWS) | (°F) |
| - อุณหภูมิน้ำเย็นขาออกเครื่องควบแน่น (CWR) | (°F) |
| - อุณหภูมิน้ำเย็นขาเข้าเครื่องระเหย (CHR) | (°F) |
| - อุณหภูมิน้ำเย็นขาออกเครื่องระเหย (CHS) | (°F) |
| - อุณหภูมิกระเปาะเปียก | (°F) |
| - อัตราการไหลของน้ำของเครื่องควบแน่นและเครื่องระเหย | (gpm) |
| - พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในเครื่องทำความเย็น | (kW) |
| - ความสามารถในการทำความเย็น | (tons) |
| - จำนวนหอระบายความร้อนที่เปิดใช้ | (Unit) |

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อพลังงานที่ใช้ในเครื่องทำความเย็น
2. ได้ทราบการประมาณค่าการใช้พลังงานที่ป้อนเข้าเครื่องทำความเย็นโดยการวิเคราะห์ความถดถอย (Regression analysis)
3. ได้แนวทางการประหยัดพลังงานและควบคุมการเดินเครื่องทำความเย็นให้เกิดการใช้พลังงานของระบบอย่างเหมาะสม
4. ได้แนวทางในการศึกษาเกี่ยวกับการหาสภาพที่เหมาะสมสำหรับการเดินเครื่องทำความเย็นใน Utility อื่นๆ

บทที่ 2

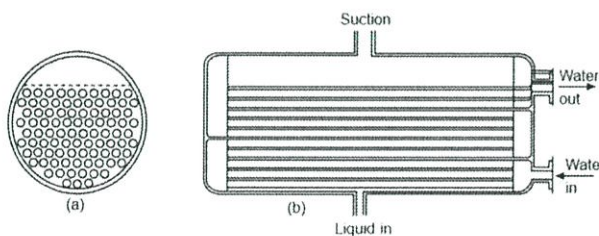
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องของระบบทำความเย็นแบบรวมศูนย์ (Central Air-Conditioning System) โดยเครื่องทำความเย็น (Chiller) เป็นแบบระบายความร้อนด้วยน้ำ หลักการของระบบที่เกี่ยวข้อง รวมไปถึงรูปแบบที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล ดังนี้

2.1 หลักการทำงานของระบบปรับอากาศ

ระบบปรับอากาศแบบรวมศูนย์ (Central Air-Conditioning System) โดยเครื่องทำความเย็น (Chiller) เป็นแบบระบายความร้อนด้วยน้ำ ซึ่งมีประสิทธิภาพการทำงานสูงกว่าแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ เครื่องทำความเย็นแบบอัดไอน์นั้นจะประกอบไปด้วยคอมเพรสเซอร์ (Compressor) เครื่องควบแน่น (Condenser) เครื่องระเหย (Evaporator) และอุปกรณ์ลดความดัน (Expansion valve) โดยแต่ละอุปกรณ์ทำหน้าที่แตกต่างกันดังนี้

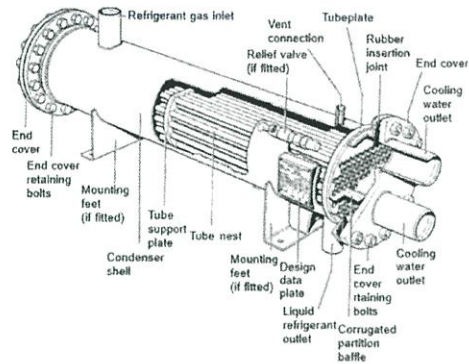
1. เครื่องระเหย (Evaporator) ตามรูปที่ 2.1 คือ อุปกรณ์ชุดท่อทองแดงที่ทำหน้าที่แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำเย็นที่ไหลผ่านเข้าเครื่องทำความเย็นกับสารทำความเย็นภายในตัวเครื่องน้ำเย็นที่อุณหภูมิต่ำกว่าจนวนสารทำความเย็นเดือดและเปลี่ยนจากสถานะจากของเหลวกลายเป็นก๊าซความดันต่ำ



รูปที่ 2.1 เครื่องระเหย (Evaporator) [17]

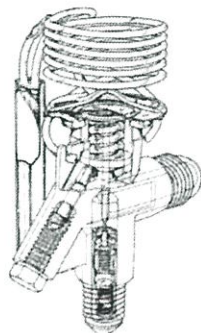
2. เครื่องควบแน่น (Condenser) ตามรูปที่ 2.2 คือ อุปกรณ์ชุดท่อทองแดงจำนวนหนึ่งที่ทำหน้าที่แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำที่ไหลจากหอระบายความร้อนซึ่งมีอุณหภูมิต่ำ กับสารทำความเย็นที่ปล่อย

นอกจากคอมเพรสเซอร์ที่สภาวะก๊าซอุณหภูมิสูงความดันสูงจนสารทำความเย็นควบแน่นเป็นของผสมอีก
ครั้งหนึ่ง



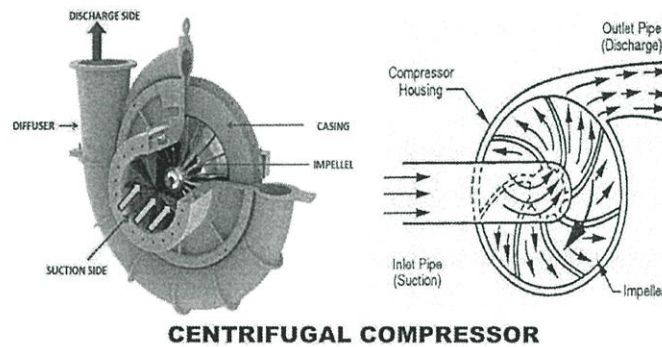
รูปที่ 2.2 เครื่องควบแน่นแบบเปลือกและท่อ (Shell-and-tube condenser) [17]

3. อุปกรณ์ลดความดัน (Expansion valve) ตามรูปที่ 2.3 คือ อุปกรณ์ที่ช่วยให้ปริมาณสารทำความเย็นไหลผ่านเครื่องระเหยตามจำนวนที่เหมาะสมและง่ายต่อการเดือดหรือการระเหยในขดท่อของเครื่องระเหยเพื่อดูดซับความร้อนจากภายใน สารทำความเย็นที่ไหลเข้าไปยังเครื่องระเหยจึงจำเป็นต้องมีความดันต่ำ แต่เนื่องจากสถานะของสารทำความเย็นที่ไหลจากเครื่องควบแน่นเป็นของเหลวที่มีความดันสูงจึงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์สำหรับลดความดันและควบคุมปริมาณของสารทำความเย็นก่อนที่จะถูกส่งเข้าสู่แผงของเครื่องระเหย

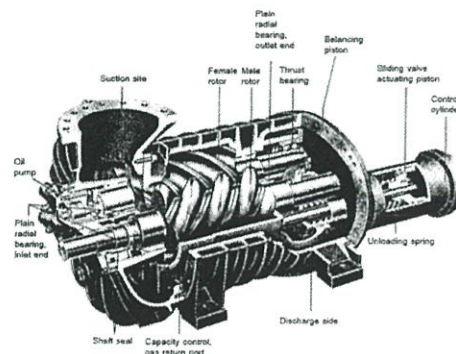


รูปที่ 2.3 อุปกรณ์ลดความดัน (Expansion valve) [17]

4.คอมเพรสเซอร์ (Compressor) คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ดูดสารทำความเย็นในสภาพที่เป็นก๊าซเข้ามาอัดทำให้ก๊าซมีความดันมากขึ้นและมีความร้อนเพิ่มขึ้น คอมเพรสเซอร์ที่ใช้งานมีหลายชนิดตามขนาดพิกัดของเครื่องทำความเย็น โดยใช้หลักการเปลี่ยนพลังงานจลน์เป็นความดัน มีหลายแบบตามรูปที่ 2.4 และรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.4 คอมเพรสเซอร์ ชนิดแบบ แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal compressor) [15]



รูปที่ 2.5 คอมเพรสเซอร์ ชนิดแบบ สกรู (Screw compressor) [17]

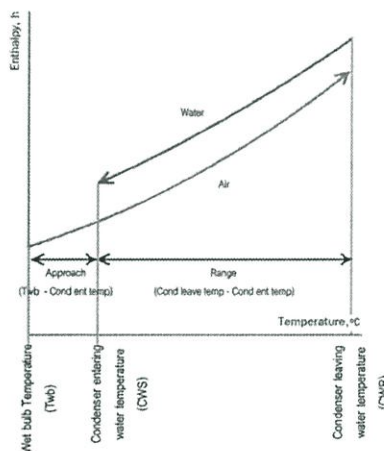
2.2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบหอระบายความร้อน

หอระบายความร้อนเป็นอุปกรณ์ที่ช่วยในการฉีบน้ำซึ่งเป็นน้ำที่มีอุณหภูมิสูงที่ได้รับความร้อนจากเครื่องควบแน่นโดยจะเป็นในลักษณะกระบวนการคือทำให้เป็นฝอยแล้วปล่อยให้ไหลลงมาจากด้านบนของหอระบายความร้อน ขณะที่น้ำไหลลงมานั้นอุณหภูมิของน้ำจะลดลง น้ำที่อุณหภูมิลดลงแล้วรวมกันที่ด้านล่างนั้นจะถูกนำไปใช้ระบายความร้อนในระบบ

การที่อุณหภูมิของน้ำที่ลดลงนั้น ส่วนใหญ่เนื่องมาจากการที่มีน้ำบางส่วนระเหยแล้วดูดความร้อนเพื่อใช้ในการระเหย น้ำส่วนที่เหลือจึงมีอุณหภูมิน้ำลดลงและการลดลงของอุณหภูมิของน้ำนั้นส่วนหนึ่ง

เกิดขึ้นเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนสัมผัสระหว่างหยดน้ำที่มีอุณหภูมิสูงกับอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าไอน้ำที่เกิดจากการระเหยจะถูกอากาศที่ไหลผ่านหอระบายความร้อนพาออกไป ดังนั้นอากาศที่ไหลออกมาจากหอระบายความร้อนจึงมีอุณหภูมิและปริมาณความชื้นสูงตามรูปที่ 2.6 กล่าวได้ว่าประสิทธิภาพของหอระบายความร้อนนั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิกระเปาะเปียก (Wet-bulb temperature) ของอากาศขณะเข้าหอระบายความร้อนเป็นส่วนใหญ่ ประสิทธิภาพของหอระบายความร้อนจะสูงขึ้นเนื่องจากสามารถพาไอน้ำที่เกิดการระเหยออกไปได้มากกว่า

หอระบายความร้อนเป็นอุปกรณ์ทางด้านปลายทางของระบบน้ำหล่อเย็น ซึ่งทำหน้าที่ลดอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นสู่บรรยากาศ ดังนั้นปริมาณของน้ำหล่อเย็นที่ผ่านหอระบายความร้อนจะมีปริมาณลดลงจากการระเหยและ Drift loss จึงต้องมีการเติมน้ำจากแหล่งน้ำภายนอกเข้าสู่ตัวหอระบายความร้อนเพื่อรักษาปริมาณน้ำในระบบให้คงที่ หอระบายความร้อนมีหลายแบบแบ่งได้ตามลักษณะการทำงานต่างๆ



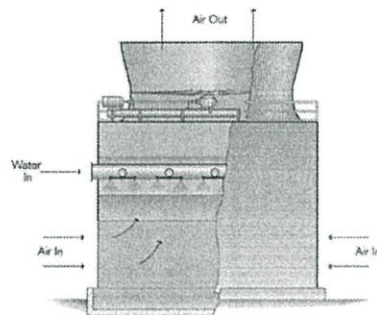
รูปที่ 2.6 แผนภาพระหว่างเอนทาลปีกับอุณหภูมิของน้ำและอากาศ
ในกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน [13]

ลักษณะของหอระบายความร้อน

1. แบ่งตามลักษณะทิศทางการไหลระหว่างอากาศและน้ำ จะสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ
 - ก) การไหลแบบสวนทาง (Counter Flow)

หอระบายความร้อนประเภทนี้ตามรูปที่ 2.7 เป็นชนิดที่อากาศมีทิศทางการเคลื่อนที่สวนกับการเคลื่อนที่ของน้ำ กล่าวคือ น้ำอาจจะถูกดูดจากด้านข้างขึ้นไปสู่ด้านบน หรืออาจจะถูกเป่าจากด้านข้างของหอระบายความร้อนขึ้นไปในขณะที่น้ำมีอุณหภูมิสูงได้ตกผ่านตัวแผงกระจายน้ำลงมา เนื่องจากน้ำและอากาศต้องเคลื่อนที่สวนกันซึ่งจะก่อให้เกิดความต้านทานต่อการเคลื่อนที่ของอากาศมากกว่าชนิดที่อากาศ

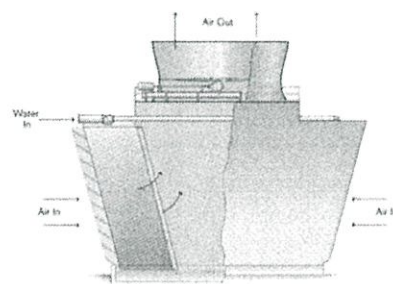
และน้ำเคลื่อนที่ตัดกัน ดังนั้นจึงจะสามารถเป่าลมผ่านหอระบายความร้อนได้เป็นปริมาณน้อยกว่าแต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากทิศทางการเคลื่อนที่สวนทางกัน จึงทำให้ประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนของน้ำและอากาศเป็นไปได้ดีกว่า แต่ขณะเดียวกันเนื่องจากอากาศเคลื่อนที่สวนขึ้นด้านบน ดังนั้นการที่จะฉีดน้ำลงมาจึงจำเป็นต้องใช้หัวฉีดและต้องสิ้นเปลืองความดันที่หัวฉีด



รูปที่ 2.7 หอระบายความร้อนแบบการไหลสวนทาง [9]

ข) แบบการไหลตั้งฉาก (Cross Flow)

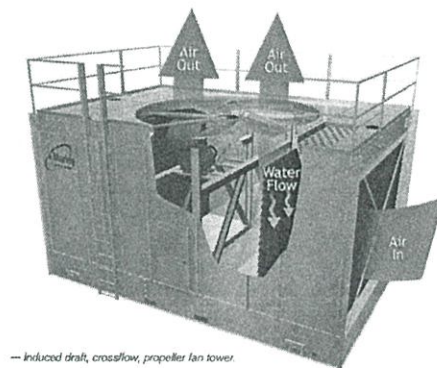
หอระบายความร้อนประเภทนี้ตามรูปที่ 2.8 จะมีทิศทางการเคลื่อนที่ของอากาศกับน้ำเป็นเส้นตัดกัน กล่าวคือน้ำจะถูกปล่อยให้ตกสู่แผงกระจายละอองน้ำด้วยแรงดึงดูดเป็นแนวตั้งและอากาศจะเคลื่อนที่ผ่านตัวหอระบายความร้อนในแนวนอน การที่น้ำไม่ได้เคลื่อนที่สวนกับอากาศโดยตรงทำให้มีความต้านทานของการเคลื่อนที่ของอากาศในแนวนอนน้อยกว่า จึงสามารถทำให้ตัวหอระบายความร้อนนั้นดูดหรือเป่าอากาศผ่านได้มากกว่าและใช้แรงของพัดลมน้อยกว่าหอระบายความร้อนแบบอากาศเคลื่อนที่สวนกับน้ำซึ่งการที่มีปริมาณของอากาศเคลื่อนที่ผ่านหอระบายความร้อนมากกว่านี้จะชดเชยประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนซึ่งมีน้อยกว่าแบบอากาศเคลื่อนที่สวนกับน้ำ



รูปที่ 2.8 หอระบายความร้อนแบบการไหลตั้งฉาก [9]

2. แบ่งตามวิธีการหมุนเวียนของอากาศ ตามที่ได้ศึกษา คือ ชนิดการไหลอากาศทางกล (Mechanical draft) ซึ่งจะใช้พัดลมเป็นตัวที่ทำให้อากาศหมุนเวียน

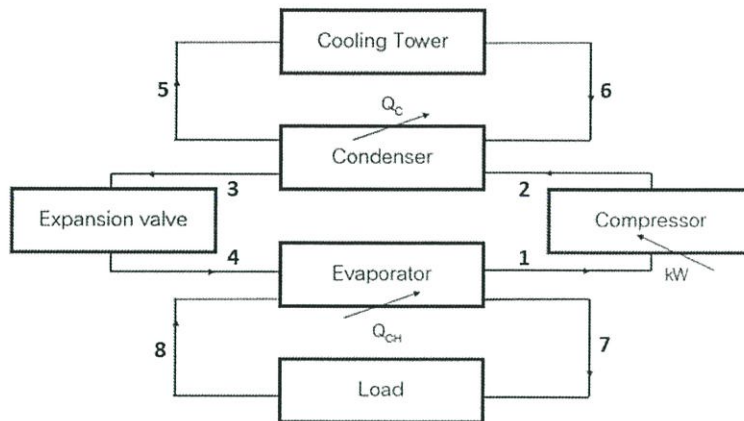
ชนิดพัดลมดูด (Induced draft) ประเภทดูดลมออกจากตัวหอระบายความร้อนตามรูปที่ 2.9 ปกติแล้วพัดลมที่ใช้ดูดอากาศจะติดอยู่บริเวณส่วนบนของหอระบายความร้อน อากาศจะถูกดูดผ่านทางด้านข้างและผ่านตัวแผงกระจายละอองน้ำในขณะที่น้ำที่มีอุณหภูมิสูงตกลงจากด้านบน หอระบายความร้อนประเภทนี้มีข้อดีในลักษณะที่ว่า การกระจายของอากาศเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ เนื่องจากอากาศถูกดูดเข้าอากาศจึงเข้าหอระบายความร้อนอย่างสม่ำเสมอในทุกๆ ด้าน ทำให้การแลกเปลี่ยนความร้อนของน้ำกับอากาศเป็นไปได้ดีกว่า อากาศที่ออกจากหอระบายความร้อนจะเคลื่อนที่ออกไปอย่างรวดเร็วจึงมีโอกาสน้อยที่อากาศได้รับความร้อนและความชื้นจะกลับเข้ามาหอระบายความร้อนอีก ส่วนข้อเสียของหอระบายความร้อนประเภทนี้คือ เสียงดัง



รูปที่ 2.9 หอระบายความร้อนพัดลมดูด แบบการไหลตั้งฉาก [9]

2.3 สมดุลพลังงานที่สำคัญที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

ความสัมพันธ์ระหว่างการถ่ายเทความร้อนภายในเครื่องระเหย (Q_{CH}) และเครื่องควบแน่น (Q_C) กับพลังงานที่ต้องใช้ในเครื่องทำความเย็น (W_{net}) ที่เกิดขึ้นภายในระบบทำความเย็นดัง จะสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 2.1 เมื่ออธิบายด้วยรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แผนภาพการทำงานของระบบปรับอากาศแบบรวมศูนย์โดยใช้เครื่องทำความเย็นเป็นแบบระบายความร้อนด้วยน้ำ

$$Q_C - Q_{CH} = W_{net} \quad (2.1)$$

เมื่อ Q_C = ความร้อนที่ระบายออกที่เครื่องควบแน่น (kJ/s)

Q_{CH} = ภาระโหลดในการทำความเย็นที่เครื่องระเหย (kJ/s)

W_{net} = งานที่ใช้ขับเคลื่อนกระบวนการอัดไอ (kW, kJ/s)

จากสมการที่ 2.1 นั้นจะเห็นได้ว่าพลังงานที่ใช้ในคอมเพรสเซอร์นั้นจะขึ้นกับทั้ง Q_C และ Q_{CH} โดยปริมาณของพลังงานที่ใช้ในเครื่องทำความเย็นนั้นสามารถถูกใช้นำเสนอในรูปแบบของสมการแสดงความสัมพันธ์กับภาระโหลดในการทำความเย็น กับ อุณหภูมิของน้ำเข้าเครื่องทำความเย็น หรือก็คือ อุณหภูมิจุดที่ 6 โดยอ้างอิงตามรูปที่ 2.10 ซึ่งจะแสดงในรูปแบบของสมการดังนี้ ฉัตรชัย[2]

$$kW = a_1 + a_2(\text{Ton}) + a_3(\text{CWS}) + a_4(\text{Ton})^2 \quad (2.2)$$

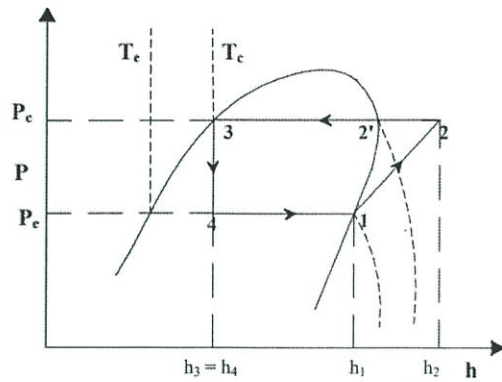
เมื่อ kW เป็นพารามิเตอร์ที่แสดงถึงพลังงานที่ใช้ในเครื่องทำความเย็น (kW)

Ton เป็นพารามิเตอร์ที่แสดงถึงภาระโหลดการทำความเย็นที่เครื่องระเหย (Ton)

CWS เป็นพารามิเตอร์ที่แสดงถึงอุณหภูมิของน้ำเข้าเครื่องทำความเย็น ($^{\circ}\text{F}$)

a_1 ถึง a_4 เป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่สามารถหาได้ด้วยวิธีผลต่างกำลังน้อยสุด

ซึ่งความสามารถของเครื่องทำความเย็นสามารถคำนวณได้โดยใช้ข้อมูลคุณสมบัติของสารทำความเย็นที่สภาวะต่างๆบนแผนภูมิ P-h ตามรูปที่ 2.11 ดังนี้



รูปที่ 2.11 P-h Diagram ของระบบอัดไอแบบน้ำยาอัดชั้นเดียว [11]

$$\text{ภาระโหลดการทำความเย็นที่เครื่องระเหย } Q_{CH} = m(h_1 - h_4) \quad (2.3)$$

$$\text{พลังงานที่ใช้ในเครื่องทำความเย็น } W_{net} = m(h_2 - h_1) \quad (2.4)$$

$$\text{ความร้อนที่ระบายออกที่เครื่องควบแน่น } Q_C = m(h_2 - h_3) \quad (2.5)$$

เมื่อ m = อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำความเย็น (kg/s)

h = เอนทาลปีของสารทำความเย็นที่สภาวะต่างๆ (kJ/kg)

ประสิทธิภาพเครื่องทำความเย็น

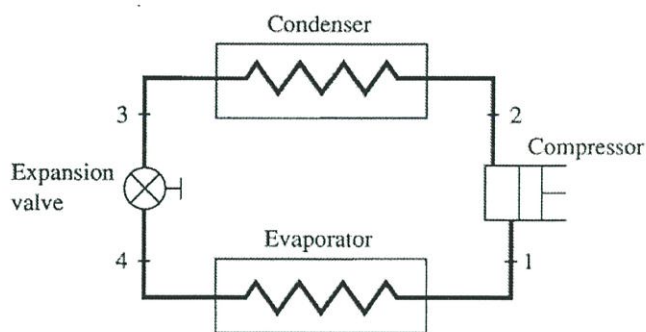
การหาประสิทธิภาพเครื่องทำความเย็น เป็นอัตราส่วนของงานที่ใช้ในเครื่องทำความเย็นต่อภาระโหลดในการทำ ความเย็น หาได้จากสมการดังนี้

$$\text{ประสิทธิภาพเครื่องทำความเย็น } (\eta) = \frac{W_{net}}{Q_{CH}} \quad (2.6)$$

โดยที่ W_{net} คือ งานที่ใช้ในเครื่องทำความเย็น หาได้จากสมการที่ 2.2

Q_{CH} คือ ภาระโหลดในการทำ ความเย็น หาได้จากสมการที่ 2.5

2.4 หลักการทำงานของระบบทำความเย็นแบบอัดไอ



รูปที่ 2.12 ระบบอัดไอแบบน้ำยาอัดชั้นเดียว [11]

การทำงานของระบบทำความเย็นจะเริ่มจากสารทำความเย็นที่มีสถานะเป็นของเหลว ซึ่งมีอุณหภูมิและความดันต่ำถูกส่งไปยังเครื่องระเหย ในขณะที่สารทำความเย็นภายในเครื่องระเหยเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอก็จะดูดความร้อนจากภายนอกระบบทำให้บริเวณที่ต้องการทำความเย็นมีอุณหภูมิลดลง ไอที่มีอุณหภูมิและความดันต่ำนั้นจะถูกส่งไปยังคอมเพรสเซอร์และอัดออกมาเป็นไอร้อนยิ่งยวดที่มีอุณหภูมิและความดันสูง เพื่อส่งไปกลั่นตัวจนเป็นของเหลวที่เครื่องควบแน่นโดยการระบายความร้อนออกเพื่อให้สารทำความเย็นนี้ถูกนำมาใช้ได้อีก สารทำความเย็นที่มีอุณหภูมิและความดันสูงจะถูกลดความดันโดยการถูกส่งเข้าไปยังอุปกรณ์ลดความดัน ซึ่งอุปกรณ์ลดความดันนี้จะควบคุมการไหลของสารทำความเย็นที่จะถูกส่งเข้าไปยังเครื่องระเหยอีกครั้ง เพื่อให้มีความดันและอุณหภูมิที่ต่ำ สังเกตได้จากรูปที่ 2.11 ที่สามารถอธิบายถึงแผนภาพที่ 2.10 ได้ดังนี้

ที่สภาวะที่ 4 >> 1 สารทำความเย็นไหลผ่านเครื่องระเหย จะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นไอโดยดูดความร้อนในเครื่องระเหย ทำให้อุณหภูมิลดลงหรืออุณหภูมิต่ำลงและให้ความเย็นออกมา

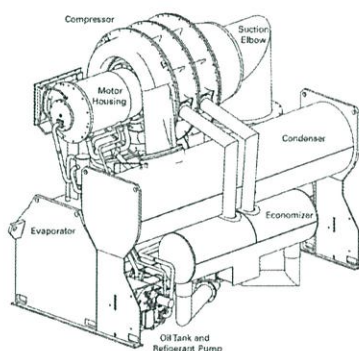
ที่สภาวะที่ 1 >> 2 สารทำความเย็นในสถานะไออิ่มตัวถูกอัดตัวจนกลายเป็นไอร้อนยิ่งยวดที่คอมเพรสเซอร์

ที่สภาวะที่ 2 >> 3 สารทำความเย็นสถานะไอร้อนยิ่งยวดไหลเข้าเครื่องควบแน่น และถูกหล่อเย็นภายใต้กระบวนการความดันคงที่ โดยสารทำความเย็นที่มีสถานะเป็นไอร้อนยิ่งยวดจะคายความร้อนให้กับเครื่องควบแน่นจนกระทั่งควบแน่นเป็นของเหลว

ที่สภาวะที่ 3 >> 4 สารทำความเย็นไหลผ่านอุปกรณ์ลดความดัน ซึ่งจะขยายตัวแบบสม่ำเสมอภายใต้กระบวนการเอนทาลปีคงที่จนทำให้อุณหภูมิลดลง

2.5 หลักการทำงานของระบบทำความเย็นแบบรวมศูนย์โดยเครื่องทำความเย็นแบบระบายความร้อนด้วยน้ำ

โดยทั่วไปเครื่องปรับอากาศที่ใช้ในอาคารขนาดใหญ่จะเป็นเครื่องปรับอากาศแบบรวมศูนย์ที่เรียกว่า เครื่องทำความเย็น (Chiller) ตามรูปที่ 2.13 เครื่องทำความเย็นจะอาศัยน้ำเป็นตัวนำพาความร้อนไปยังห้องหรือจุดต่างๆ โดยน้ำเย็นจะไหลไปยังเครื่องทำลมเย็น (Air Handling Unit : AHU หรือ Fan Coil Unit : FCU) ที่ติดตั้งอยู่ในบริเวณที่จะปรับอากาศ จากนั้นน้ำที่ไหลออกจากเครื่องทำลมเย็นจะถูกปั๊มเข้าไปในเครื่องทำความเย็นขนาดใหญ่ ที่ติดตั้งอยู่ในห้องเครื่องและไหลเวียนกลับไปยังเครื่องทำลมเย็นอยู่เช่นนี้ตามรูปที่ 2.10 โดยแบบที่ศึกษาคือ แบบระบายความร้อนด้วยน้ำ



รูปที่ 2.13 ส่วนประกอบของเครื่องทำความเย็น (Chiller) [16]

หลักการทำงาน

ซึ่งอธิบายตามรูปที่ 2.10 เมื่อป้อนพลังงานไฟฟ้าให้เครื่องทำความเย็น คอมเพรสเซอร์จะดูดไอสารทำความเย็นจากเครื่องระเหยแล้วอัดส่งไปที่เครื่องควบแน่น ($1 >> 2$) ที่เครื่องระเหยสารทำความเย็นจะมีความดันและอุณหภูมิสูง ความร้อนจากสารทำความเย็นจะถ่ายเทให้กับน้ำหล่อเย็นทำให้สารทำความเย็นกลั่นตัวกลายเป็นของเหลวที่มีความดันสูง ($2 >> 3$) เมื่อสารทำความเย็นไหลผ่านอุปกรณ์ลดความดัน ความดันก็จะลดลงเท่ากับความดันที่เครื่องระเหย ($3 >> 4$) สารทำความเย็นก็จะไหลครบ วงจรสารทำความเย็นเหมือนกับที่กล่าวไปข้างต้นในหัวข้อที่ 2.4

น้ำหล่อเย็นเมื่อได้รับความร้อนจากสารทำความเย็นที่เครื่องควบแน่นจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น จากนั้นก็จะส่งน้ำที่มีอุณหภูมิสูงขึ้นไปที่หอระบายความร้อน (หมายเลข 5) แล้วก็จะถ่ายเทความร้อนให้กับอากาศ

โดยอาศัยการระเหยของน้ำ ซึ่งจะทำให้น้ำที่เหลือเย็นลงแล้วไหลกลับไปปรับความชื้นที่เครื่องควบแน่นอีก (หมายเลข 6) ทำให้ครบ วงจรน้ำหล่อเย็น

สารทำความเย็นเมื่อถ่ายเทความร้อนที่เครื่องควบแน่นแล้วจะมีอุณหภูมิต่ำลงจากนั้นจะเข้าสู่เครื่องระเหยเพื่อถ่ายเทความเย็นให้กับน้ำ (หมายเลข 8) ที่จะถูกส่งไปให้กับเครื่องส่งลมเย็น (Air handing Unit) ซึ่งถูกใช้ปรับอากาศมาก่อนแล้ว น้ำเย็นที่ได้ก็จะอาศัยปั๊มน้ำเย็นเพื่อส่งไปให้กับเครื่องส่งลมเย็น(หมายเลข 7) ทำให้ครบ วงจรน้ำเย็น

เครื่องส่งลมเย็นจะดูดอากาศร้อนจากห้องปรับอากาศผ่านระบบท่อลมไปถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำเย็น ทำให้อากาศมีอุณหภูมิต่ำลงแล้วส่งกลับไปห้องปรับอากาศทำให้ครบ วงจรลมเย็น

- ข้อดี :
1. ระบบทำความเย็นแบบรวมศูนย์นี้สามารถทำความเร็วได้อย่างรวดเร็ว
 2. สามารถทำความเย็นได้หลายจุดพร้อมกัน เนื่องจากใช้ท่อซึ่งเดินบนผนังหรือเพดานง่ายต่อการกระจายความเย็นไปยังจุดหรือห้องที่ต้องการ

- ข้อจำกัด :
1. เป็นระบบที่มีขนาดใหญ่ จึงมีข้อจำกัดเรื่องของพื้นที่ที่ใช้ในการติดตั้ง และเลือกสถานที่ที่มีความเหมาะสมในการติดตั้งอุปกรณ์แต่ละตัว
 2. มีความยุ่งยากในการติดตั้ง ซึ่งจะต้องจัดเตรียมโครงสร้างในการวางเครื่อง
 3. เคลื่อนย้ายหรือเปลี่ยนตำแหน่งได้ลำบาก เนื่องจากเป็นระบบที่มีขนาดใหญ่และมีความซับซ้อน ดังนั้นจึงต้องวางแผนในการติดตั้งให้ดีกว่าก่อน
 4. ราคาแพง ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสูง

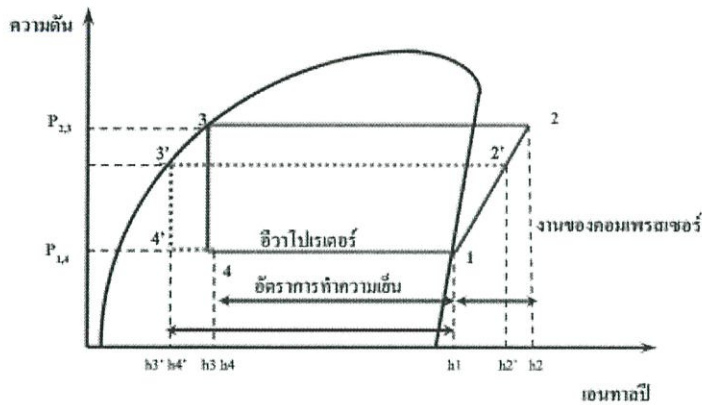
2.6 การอนุรักษ์พลังงานในระบบทำความเย็น

แนวคิดหลักในการอนุรักษ์พลังงานในระบบทำความเย็น คือ การปรับปรุงสภาวะการทำงานของคอมเพรสเซอร์ให้เหมาะสม โดยการลดอุณหภูมิทำงานของเครื่องควบแน่นและการเพิ่มอุณหภูมิทำงานของเครื่องระเหย

2.6.1 การลดอุณหภูมิทำงานของเครื่องควบแน่น

ตามรูปที่ 2.14 การควบแน่นของสารทำความเย็นในระบบทำความเย็นจะเกิดขึ้นตามเส้น 2>>3 ถ้าสามารถลดอุณหภูมิและความดันของสารทำความเย็นที่เครื่องควบแน่นลงได้ การควบแน่นจะเกิดขึ้นตามเส้น 2'>>3' แทน และการทำงานของคอมเพรสเซอร์จะเปลี่ยนจากเส้น 1>>2 มาเป็น 1>>2' ส่วนอัตรา

ทำความเย็นของเครื่องระเหยจะเปลี่ยนจากเส้น $4 > > 1$ เป็น $4' > > 1$ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้คือจะสามารถลดพลังงานที่ต้องป้อนให้กับเครื่องทำความเย็นลงและเพิ่มอัตราการทำความเย็น



รูปที่ 2.14 แผนภาพ P-h เมื่อลดอุณหภูมิของเครื่องควบแน่น [6]

ซึ่งสามารถอธิบายด้วยสมการ

$$Q = U \times A \times (\text{LMTD}) \quad (2.7)$$

เมื่อ Q = ปริมาณความร้อนที่ระบายออกที่เครื่องควบแน่น (W)

U = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ($\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)

A = พื้นที่การถ่ายเทความร้อน (m^2)

LMTD = Log mean temperature difference ($^\circ\text{C}$)

โดยนำมาใช้กับเครื่องควบแน่นโดยอ้างอิงตามรูปที่ 2.10 เมื่อให้ปริมาณการถ่ายเทความร้อนคงที่ และทำการลดอุณหภูมิน้ำออกจากเครื่องควบแน่นลงหรือจุดที่ 5 ดังนั้นเพื่อที่จะทำให้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ย (LMTD) มีค่าคงที่ จะต้องลดอุณหภูมิของสารทำความเย็นในเครื่องควบแน่นหรือจุดที่ 2 ด้วย และยังสามารถหาได้จากสูตร

$$Q_c = K \times m_w \times \Delta T \quad (2.8)$$

เมื่อ Q_c = ปริมาณความร้อนที่ระบายออกที่เครื่องควบแน่น (kW)

K = ค่าคงที่ ($\text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$)

m_w = ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านเครื่องควบแน่น (kg/s)

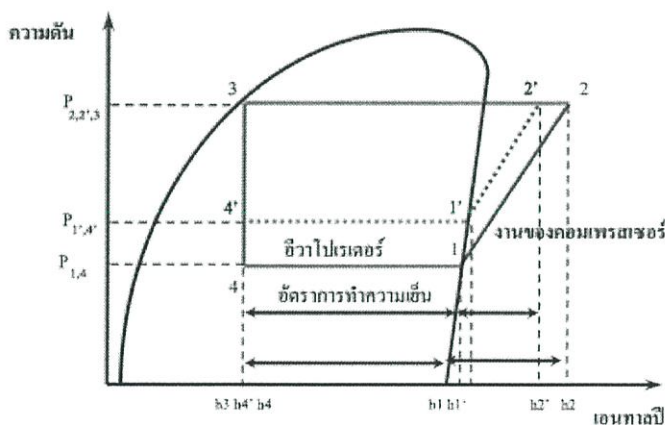
ΔT = ค่าความต่างของอุณหภูมิมระหว่างจุดที่ 5 และ จุดที่ 6 ($^\circ\text{C}$)

จากสมการที่ 2.8 นี้จะเห็นว่า ถ้าให้ความร้อนและปริมาณน้ำคงที่ ค่าความต่างของอุณหภูมิระหว่างจุดที่ 5 และ จุดที่ 6 จะคงที่ด้วย ดังนั้นถ้าลดอุณหภูมิจุดที่ 5 ลงจึงต้องลดอุณหภูมิจุดที่ 6 ด้วย ในกรณีที่ใช้หอระบายความร้อน อุณหภูมิจุดที่ 6 สามารถจะควบคุมได้โดยการควบคุมนั้นจะขึ้นอยู่กับ

- อุณหภูมิกระเปาะเปียก (Wet bulb temperature)
- ปริมาณของอากาศที่ผ่านเข้าหอระบายความร้อน
- อุณหภูมิของน้ำที่เข้าหอระบายความร้อน
- ปริมาณของน้ำที่เข้าหอระบายความร้อน
- จำนวนการใช้งานหอระบายความร้อน

2.6.2 การเพิ่มอุณหภูมิทำงานของเครื่องระเหย

ตามรูปที่ 2.15 กระบวนการระเหยของสารทำความเย็นนั้นเกิดขึ้นภายในเครื่องระเหยตามเส้น $4 \gg 1$ โดยเมื่อสารทำความเย็นที่ถูกส่งไปที่แลกเปลี่ยนความเย็นกับน้ำที่เครื่องระเหยแล้วจะมีค่าเอนทาลปีสูงขึ้นโดยที่ความดันยังคงที่ ถ้าเพิ่มอุณหภูมิและความดันในเครื่องระเหยให้สูงขึ้นจากเส้น $4 \gg 1$ เป็น $4' \gg 1'$ งานของคอมเพรสเซอร์ที่ทำการจะเปลี่ยน จากเส้น $1 \gg 2$ เป็น $1' \gg 2'$ ผลที่ได้คืองานที่จะต้องป้อนให้กับคอมเพรสเซอร์จะลดลง



รูปที่ 2.15 แผนภาพ P-h เมื่อลดอุณหภูมิของเครื่องระเหย [6]

2.7 วิธีผลต่างกำลังน้อยสุด (Least square method)

วิธีผลต่างกำลังน้อยสุดเป็นวิธีประดิษฐ์เส้นโค้งที่เป็นมาตรฐานสำหรับข้อมูลที่มีอยู่ ซึ่งข้อมูลส่วนมากนั้นจะเป็นข้อมูลที่ได้มาจากการทดลอง โดยฟังก์ชันที่สร้างขึ้นมานั้นต้องสอดคล้องกับลักษณะการ

กระจายของข้อมูล โดยในการศึกษานี้มีลักษณะการกระจายของข้อมูลที่ไม่เป็นเชิงเส้นและเป็นฟังก์ชันพหุนามแบบที่เรียกว่า การถดถอยแบบพหุนาม กล่าวคือ จำนวนตัวแปรจะมีมากกว่าสองตัวขึ้นไป จากสมการที่ 2.2 สามารถทำการหาอนุพันธ์เทียบค่าคงที่ตั้งแต่ a_1 ถึง a_4 จะทำให้เกิดระบบสมการ 4 สมการซึ่งสามารถจัดให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ได้ดังสมการที่ 2.9 โดยเมตริกซ์จัตุรัสขนาด (4x4) สามารถหาค่าได้โดยใช้วิธีการกำจัดแบบเกาส์ (Gaussian Elimination) แก่ระบบสมการดังกล่าวออกมาได้ และเมื่อนำค่าที่ได้กลับไปแทนค่าลงในสมการที่ 2.2 ก็จะทำให้เกิดฟังก์ชันของ kW

$$\begin{bmatrix} n & \sum cws & \sum ton^2 & \sum cws * ton \\ \sum cws & \sum cws^2 & \sum cws * ton & \sum cws^2 * ton \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \sum cws * ton & \sum cws^2 * ton & \sum cws * ton^2 & \sum cws^2 * ton^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum kW_i \\ \sum ton * kW_i \\ \vdots \\ \sum cws * ton * kW_i \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

2.8 วิธีการกำจัดแบบเกาส์ (Gaussian Elimination)

การกำจัดแบบเกาส์ จัดเป็นวิธีแก้ระบบสมการที่ได้รับความนิยมมากวิธีหนึ่ง เป็นวิธีที่ปกติจะนิยมใช้ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ขนาดใหญ่ ซึ่งสามารถแบ่งเป็น 2 วิธีคือ การกำจัดไปข้างหน้าและ การแทนค่าย้อนกลับ หากพิจารณาระบบสมการที่ประกอบด้วย n สมการย่อย

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + \dots + a_{1n}x_n = b_1 \quad (2.10a)$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 + \dots + a_{2n}x_n = b_2 \quad (2.10b)$$

....

$$a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + a_{n3}x_3 + \dots + a_{nn}x_n = b_n \quad (2.10c)$$

2.8.1 การกำจัดไปข้างหน้า

โดยทำการหารสมการ 2.10a นี้ด้วยสัมประสิทธิ์ของ x_1

$$x_1 + \frac{a_{12}}{a_{11}}x_2 + \frac{a_{13}}{a_{11}}x_3 + \dots + \frac{a_{1n}}{a_{11}}x_n = \frac{b_1}{a_{11}} \quad (2.10d)$$

จากนั้นจึงคูณด้วยสมการ 2.10d ที่ได้นี้ด้วยสัมประสิทธิ์ของ x_1 ของสมการ 2.10b

$$a_{21}x_1 + a_{21}\frac{a_{12}}{a_{11}}x_2 + a_{21}\frac{a_{13}}{a_{11}}x_3 + \dots + a_{21}\frac{a_{1n}}{a_{11}}x_n = a_{21}\frac{b_1}{a_{11}} \quad (2.10e)$$

แล้วจึงนำสมการที่ได้นี้ลบออกจากสมการ 2.10a และสามารถเขียนใหม่เป็นสมการ 2.11a แล้วทำเช่นเดียวกันไปจนถึง 2.10c ทำให้ระบบสมการเดิมเปลี่ยนมาอยู่ในรูปแบบดังนี้

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + \dots + a_{1n}x_n = b_1 \quad (2.11a)$$

$$a'_{22}x_2 + a'_{23}x_3 + \dots + a'_{2n}x_n = b'_1 \quad (2.12a)$$

.....

$$a'_{n2}x_2 + a'_{n3}x_3 + \dots + a'_{nn}x_n = b'_n \quad (2.12b)$$

จะเห็นได้ว่า จากวิธีการกำจัดไปข้างหน้าหนึ่งรอบแรกในทุกๆค่าในแนวแถวตั้งแรกของระบบสมการที่ 2.10 ยกเว้นในสมการแรกนั้นต่างมีค่าเท่ากับ 0 ดังนั้นจะต้องทำการกำจัดไปข้างหน้าซ้ำกันอีกเป็นรอบที่สอง แต่คราวนี้เริ่มจากสมการ 2.12a ซึ่งเป็นสมการที่สองโดยหารสมการนี้ด้วย a'_{22} แล้วคูณด้วยสัมประสิทธิ์ a'_{32} ของ x_2 จากนั้นทำไปเรื่อยๆสุดท้ายกระบวนการดังกล่าวจะมีลักษณะดังนี้

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + \dots + a_{1n}x_n = b_1 \quad (2.11a)$$

$$a'_{22}x_2 + a'_{23}x_3 + \dots + a'_{2n}x_n = b'_1 \quad (2.12a)$$

$$a'_{33}x_3 + \dots + a'_{3n}x_n = b''_3 \quad (2.13a)$$

.....

$$a^{(n-1)}_{nn}x_n = b^{(n-1)}_n \quad (2.13b)$$

โดยจำนวนขีดเครื่องหมาย (') หมายถึงจำนวนรอบของการกำจัดไปข้างหน้า

2.8.2 การแทนค่าย้อนกลับ

จากสมการที่ 2.13b ค่าของ x_n สามารถคำนวณได้โดยตรงนั่นคือ

$$x_n = \frac{b_n^{(n-1)}}{a_{nn}^{(n-1)}} \quad (2.14)$$

และจากนั้นก็สามารหาค่าของ $x_n, x_{n-1}, \dots, x_2, x_1$ โดยการแทนค่ากลับไปทีละสมการ

2.9 สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination: R^2)

สมการที่สามารถนำไปคาดคะเนค่า Y โดยมีโอกาสที่จะตรงกับค่า Y ที่แท้จริงนั้น จะต้องสามารถอธิบายการกระจายที่เกิดขึ้นในค่า Y ได้มากที่สุด จึงได้มีการวัดอัตราส่วนระหว่างผลรวมกำลังสองของการ

กระจายที่อธิบายได้กับผลรวมกำลังสองของการกระจายทั้งหมด ซึ่งเรียกว่า สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2)

$$R^2 = \frac{\sum(x-\bar{x})(y-\bar{y})}{\sum(y-\bar{y})^2} \quad (2.15)$$

คุณสมบัติของสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ มีดังนี้

1. มีค่าเป็นบวกเสมอ
2. ตั้งแต่ 0 - 1 หรือ 0% - 100%

ประโยชน์ของสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ คือ

1. เป็นเครื่องวัดความใกล้เคียงระหว่างเส้นถดถอยกับค่า Y คือ
 - $R^2 = 1$ แสดงว่า Y จะอยู่บนเส้นสมการถดถอยทุกจุด
 - $R^2 > 0$ แสดงว่า Y จะอยู่ใกล้เคียงกับเส้นถดถอย
 - $R^2 = 0$ แสดงว่า Y จะกระจายห่างกับเส้นการถดถอยมากจนหาแนวโน้มที่ถูกต้องไม่ได้
2. เป็นเครื่องวัดความเหมาะสมของเส้นถดถอยว่าจะแสดงแนวโน้มของข้อมูลได้มากน้อยเพียงใด คือ
 - R^2 ใกล้เคียง 1 แสดงว่าแนวโน้มของข้อมูลจะมีลักษณะเป็นแนวเส้นตรงมากที่สุด
 - R^2 ใกล้เคียง 0 แสดงว่าแนวโน้มของข้อมูลจะมีลักษณะไม่เป็นเส้นตรง

2.10 การวัดความถูกต้อง

ความถูกต้องของการประมาณค่าเป็นสิ่งที่ต้องการ ความถูกต้องนั้นจะมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับความคลาดเคลื่อนของการประมาณค่า ความคลาดเคลื่อนจะมากถ้าค่าสังเกตห่างจากค่าประมาณมาก และจะน้อยถ้าค่าสังเกตห่างจากค่าประมาณน้อย ซึ่งจะใช้ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (Mean square error : MSE) ในการวัดความถูกต้องของการประมาณค่า และใช้เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Percent Error : MAPE) เป็นตัวบ่งบอกค่าความคลาดเคลื่อนจากค่าสังเกตในรูปแบบของเปอร์เซ็นต์

1. ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง (Mean Square Error, MSE) เป็นวิธีวัดความแม่นยำโดยแก้ปัญหาวิธีค่าเฉลี่ยความผิดพลาดโดยพิจารณาความแตกต่างระหว่างค่าจริงกับค่าประมาณ โดยวิธียกกำลังสอง

$$MSE = \frac{\sum(A_t - F_t)^2}{N} \quad (2.16)$$

โดย F_t หมายถึง ค่าประมาณค่าที่ t
 A_t หมายถึง ค่าที่เกิดขึ้นจริงในช่วงเวลา t
 N หมายถึง จำนวนข้อมูล

2. ค่าเฉลี่ยของร้อยละความผิดพลาดสัมบูรณ์ (Mean Absolute Percentage Error, MAPE) เป็นวิธีวัดความแม่นยำโดยคำนวณเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดในการประมาณค่าโดยไม่คำนึงถึงเครื่องหมาย ถ้าค่าที่ได้ต่ำแสดงว่ามีความแม่นยำสูง เช่น ถ้า MAPE = 4% แสดงว่าวิธีที่เลือกมีความคลาดเคลื่อนในการประมาณค่าเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 4

$$MAPE = \frac{\sum \left[\frac{|A_t - F_t|}{A_t} \right] \times 100}{N} \quad (2.17)$$

โดย F_t หมายถึง ค่าประมาณที่ t
 A_t หมายถึง ค่าที่เกิดขึ้นจริงในช่วงเวลา t
 N หมายถึง จำนวนข้อมูล

2.11 การประมาณค่า

การประมาณค่า คือ การประมาณสิ่งที่เราสนใจ โดยที่เราไม่ทราบค่าพารามิเตอร์มีค่าเป็นเท่าใด การประมาณสามารถประมาณโดยใช้ค่าเพียงค่าเดียว ในการประมาณซึ่งเรียกว่าการประมาณแบบจุด หรือการประมาณแบบช่วงซึ่งได้จากการสร้างช่วงมาหนึ่งช่วง การประมาณเป็นการประมาณค่าพารามิเตอร์ เช่น ค่าเฉลี่ย ค่าสัดส่วน และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เป็นต้น

ชนิดของการประมาณค่า การประมาณค่าสำหรับค่าพารามิเตอร์ มี 2 ชนิดคือ

1. การประมาณค่าแบบจุด คือ การใช้ค่าจากตัวอย่างเพียงค่าเดียวทำการประมาณค่าพารามิเตอร์ ซึ่งค่าที่ได้จะขึ้นกับตัวอย่างสุ่มที่สุ่มได้ ทำให้การประมาณแบบจุดมีความคลาดเคลื่อนได้ เพราะค่าของการประมาณขึ้นกับตัวอย่างสุ่มถึงแม้ตัวประมาณจะมีคุณสมบัติที่ดีก็ตาม

2. การประมาณแบบช่วงคือการสร้างช่วงของตัวเลขช่วงหนึ่งโดยอาศัย ค่าที่ได้จากตัวอย่าง ช่วงเชื่อมั่นของการประมาณประกอบด้วย ขีดจำกัดของการประมาณสร้างโดยอาศัยการแจกแจงของค่าสถิติที่ได้จากตัวอย่าง ดังนั้นในการประมาณค่าพารามิเตอร์จะต้องอาศัยการแจกแจงค่าสถิติของตัวอย่างเสมอ

การประมาณค่าจะบอกถึงขีดจำกัดของการประมาณซึ่งประกอบด้วยขีดจำกัดล่างและขีดจำกัดบน ระดับความเชื่อมั่น การสร้างช่วงเชื่อมั่นต้องบอกว่าช่วงที่สร้างมีโอกาสของความถูกต้องร้อยละเท่าใด กำหนดโดยใช้โอกาสของความถูกต้องเป็น $1 - \alpha$ และมีโอกาสผิดพลาดเป็น α ความผิดพลาด α เรียกว่าระดับนัยสำคัญ

ขั้นตอนของการประมาณค่า

- กำหนดพารามิเตอร์ที่ต้องการประมาณว่าเป็นค่าใด
- กำหนดโอกาสของการผิดพลาดหรือ ระดับนัยสำคัญ α
- พิจารณาการแจกแจงค่าสถิติที่มีการแจกแจงแบบใด ในบทการแจกแจงค่าที่ได้จาก ตัวอย่าง และ เขียนช่วงเชื่อมั่น โดยอาศัยข้อมูลจากตัวอย่าง

ตาราง 2.1 ตารางสรุปการแจกแจงของค่าสถิติและขีดจำกัดของการประมาณ

ค่าพารามิเตอร์	ค่าสถิติ	กรณีและการแจกแจงค่าสถิติ	ขีดจำกัดของการประมาณ
μ	\bar{X}	สุ่มจากตัวอย่างประชากรที่มีการแจกแจงปกติ	$\mu = \bar{X} \pm z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$
		สุ่มจากตัวอย่างประชากรที่ไม่ทราบการแจกแจงแต่มีขนาดตัวอย่างใหญ่ ($n \geq 30$)	
		การประมาณค่าเฉลี่ยกรณีไม่ทราบส่วนเบี่ยงเบนของกรณีมาตรฐานของประชากร (σ)	$\mu = \bar{X} \pm t_{\frac{\alpha}{2}, n-1} \frac{S}{\sqrt{n}}$

บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงาน

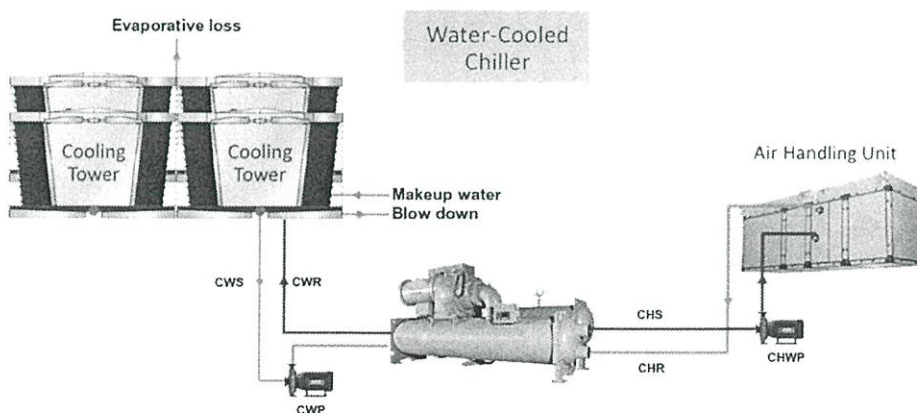
บทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการเตรียมการเก็บรวบรวมข้อมูล ขั้นตอนการดำเนินงาน ขั้นตอนการ
สร้างสมการการวิเคราะห์ความถดถอยและขั้นตอนการหาสมการถดถอยใช้งาน โดยทำการศึกษาที่ Utility
11 เครื่องทำความเย็นหมายเลข 2 ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของระบบทำความเย็นของบริษัท ซีเกท เทคโนโลยี
(ประเทศไทย) จำกัด โรงงานโคราช

3.1 ขั้นเตรียมการรวบรวมข้อมูลรายละเอียดเครื่องทำความเย็นและหอบายความร้อน

การศึกษาค้างนี้ ผู้ศึกษาได้ศึกษาและสำรวจข้อมูลเบื้องต้น วางแผนเก็บรวบรวมข้อมูล เครื่อง
ทำความเย็นภายใน บริษัท ซีเกท เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด โรงงานโคราช โดยทำการศึกษาเครื่อง
ทำความเย็นหมายเลข 2 ที่ Utility 11 ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของระบบทำความเย็นทั้งหมดของเครื่องทำความ
เย็นในบริษัท ซีเกท เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด โรงงานโคราช โดยมีรายละเอียดการใช้งานในส่วน
ที่ศึกษาดังนี้

- เครื่องทำความเย็นจำนวนทั้งหมด 2 เครื่อง ซึ่งมีพิกัดทำความเย็นแต่ละเครื่องที่ 1100 ตัน
ความเย็น และจะทำการศึกษาโดยเปิดใช้งานจำนวน 1 เครื่องจากทั้งหมด เพื่อใช้ในการ
ผลิตและจ่ายน้ำเย็นให้กับระบบปรับอากาศและหล่อเย็นเครื่องจักร และตัวเครื่องทำความ
เย็นนี้ถูกตั้งค่าอุณหภูมิด้านน้ำเย็นขาออกเครื่องระเหยไว้ที่ 40.0 °F
- หอบายความร้อน (Cooling tower) มีทั้งหมด 4 ตัว แต่ละตัวมีความจุ 800 ตันของหอบาย
ความร้อน

ซึ่งรายละเอียดของเครื่องทำความเย็นแบบระบายความร้อนด้วยน้ำที่ทำการศึกษาขึ้นแสดง
ตามรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ระบบปรับอากาศแบบรวมศูนย์โดยเครื่องทำความเย็นเป็นแบบระบายความร้อนด้วยน้ำ [14]

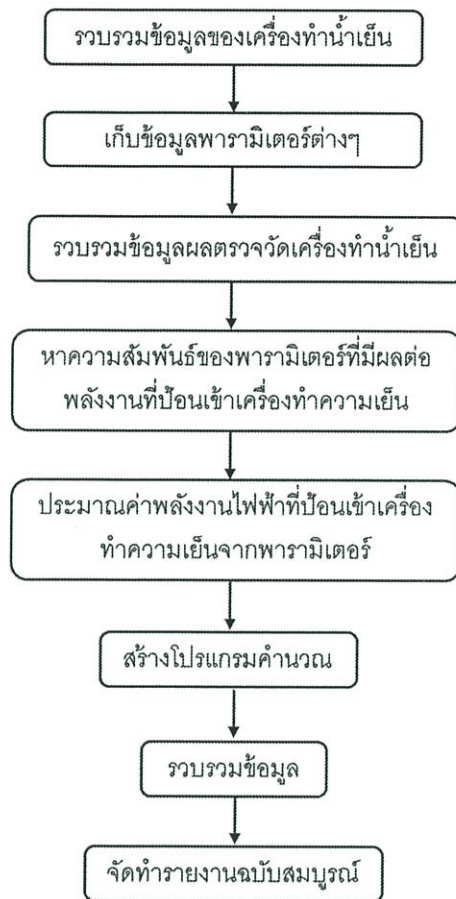
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน

สำหรับขั้นตอนการดำเนินงานในกรณีศึกษาเครื่องทำความเย็นแบบระบายความร้อนด้วยน้ำได้จัดทำเป็นแผนรูปที่อธิบายประกอบไว้ดังรูปที่ 3.2 ซึ่งจะประกอบไปด้วยขั้นตอนต่างๆดังนี้

1. รวบรวมข้อมูลของเครื่องทำความเย็นที่จะทดสอบ
2. เก็บข้อมูลตรวจวัดค่าประสิทธิภาพเครื่องทำความเย็น ซึ่งทำการเก็บข้อมูลตรวจวัดทุกวันวัน

ละ 2 ช่วงเวลา รวมระยะเวลา 4 เดือน ประกอบด้วย

- ค่าอุณหภูมิของน้ำทั้งฝั่งขาเข้าและขาออกเครื่องระเหย ($^{\circ}\text{F}$)
 - ค่าอุณหภูมิของน้ำทั้งฝั่งขาเข้าและขาออกเครื่องควบแน่น ($^{\circ}\text{F}$)
 - อัตราการไหลของน้ำที่เครื่องระเหยและที่เครื่องควบแน่น (gpm)
 - ภาระโหลดการทำความเย็น (Tons)
 - พลังงานไฟฟ้า (kW)
 - ค่าอุณหภูมิกระเปาะแห้ง ($^{\circ}\text{F}$) และ ค่าความชื้น (%) บริเวณหอระบายความร้อนเพื่อนำมาหาอุณหภูมิกระเปาะเปียก ($^{\circ}\text{F}$)
 - จำนวนการเปิดใช้งานหอระบายความร้อนในแต่ละวัน (unit)
3. รวบรวมข้อมูลผลตรวจวัดเครื่องทำความเย็น
 4. หาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ที่มีผลต่อพลังงานที่ป้อนเข้าเครื่องทำความเย็น
 5. ทำการประมาณค่าพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนเข้าเครื่องทำความเย็นจากพารามิเตอร์
 6. สร้างโปรแกรมคำนวณ
 7. รวบรวมข้อมูล
 8. จัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์

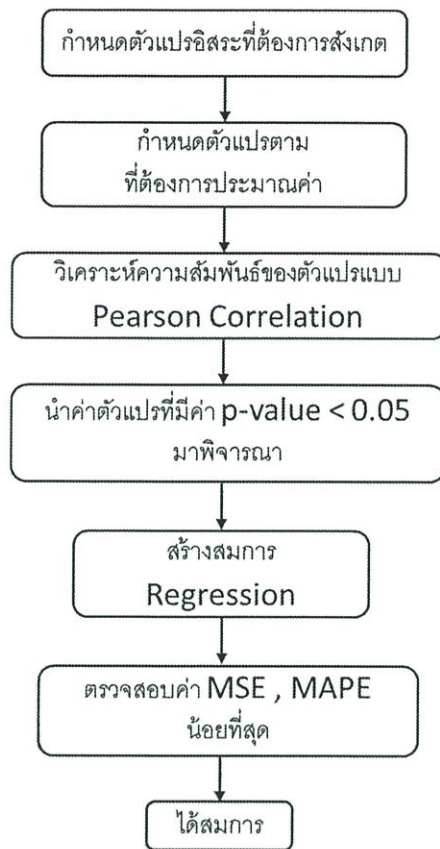


รูปที่ 3.2 แผนภาพแสดงขั้นตอนดำเนินงาน

3.3 ขั้นตอนการสร้างสมการการวิเคราะห์ความถดถอย

สำหรับขั้นตอนการสร้างสมการนั้นได้ใช้วิธีวิเคราะห์การถดถอยมาใช้ ซึ่งสุดท้ายแล้วจะนำสมการที่ได้มาเปรียบเทียบกับเพื่อคำนวณหาค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง (MSE) และ คำนวณหาค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (MAPE) ที่น้อยที่สุด เพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปรตามที่ต้องการ ซึ่งได้จัดทำเป็นแผนภาพอธิบายไว้ในรูปที่ 3.3 ซึ่งจะประกอบไปด้วยขั้นตอนต่างๆดังนี้

1. กำหนดตัวแปรอิสระที่ต้องการสังเกต
2. กำหนดตัวแปรตามที่ต้องการประมาณค่า
3. นำตัวแปรไปวิเคราะห์สหสัมพันธ์ (Correlation) แบบ Pearson ซึ่งเป็นการหาความสัมพันธ์ของตัวแปรระหว่างตัวแปร
4. นำค่าตัวแปรที่มีค่า p-value ต่ำกว่า 0.05 พิจารณา
5. สร้างสมการ regression
6. นำสมการที่ได้มาแทนค่าตัวแปรเพื่อตรวจสอบค่า MSE และ MAPE ตามสมการที่ 2.16 และสมการที่ 2.17
7. ได้สมการความสัมพันธ์ที่มีค่าแม่นยำ

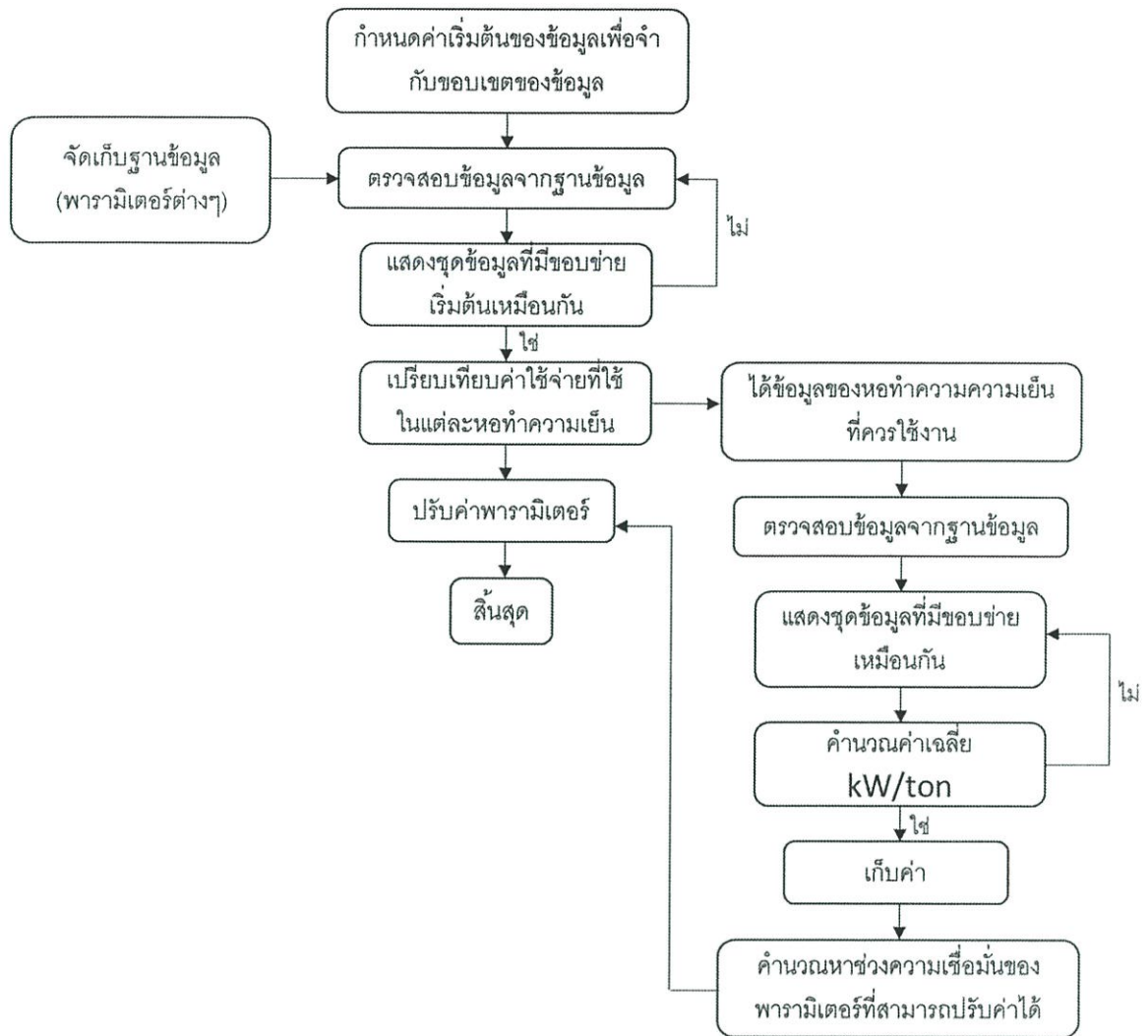


รูปที่ 3.3 แผนภาพแสดงขั้นตอนการสร้างสมการ

3.4 ขั้นตอนการหาสมการกรณีใช้งาน

สำหรับขั้นตอนการหาสมการกรณีใช้งาน ได้ใช้การประมาณค่าซึ่งได้ถูกกล่าวถึงในหัวข้อ 2.11 ซึ่งพารามิเตอร์ที่ใช้ในการหาช่วงความเชื่อมั่นคือพารามิเตอร์ที่สามารถควบคุมได้ได้จัดทำเป็นแผนภาพอธิบายไว้ในรูปที่ 3.4 ซึ่งจะประกอบไปด้วยขั้นตอนต่างๆดังนี้

- 1.รับข้อมูล ได้แก่ อุณหภูมิ น้ำเข้าเครื่องควบแน่น
2. แสดงชุดข้อมูลที่อยู่ในขอบข่าย เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายที่ประสิทธิภาพสูงสุดในแต่ละหอระบายความร้อน
- 3.คำนวณค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพของการเปิดใช้งานหอระบายความร้อนนั้นๆจากชุดข้อมูลทั้งหมด
- 4.ที่ประสิทธิภาพของเครื่องทำความเย็นสูงกว่าค่าเฉลี่ย นำพารามิเตอร์ที่ปรับค่าได้มาหาประมาณค่าแบบช่วงตามสมการในตารางที่ 2.1
- 5.นำช่วงประมาณค่าที่ได้ไปใช้งาน



รูปที่ 3.4 แผนภาพโครงสร้างการหาสภาวะการณ์ใช้งาน

บทที่ 4

วิเคราะห์การใช้พลังงาน และ ผลการควบคุมประสิทธิภาพ

บทนี้จะกล่าวถึงสมการถดถอยของประมาณค่าพลังงานที่ใช้ในเครื่องทำความเย็นและสมการถดถอยของการประมาณค่าอุณหภูมิน้ำเข้าเครื่องควบแน่น รวมไปถึงผลการควบคุมพารามิเตอร์ที่ส่งผลไปถึงพลังที่ใช้ในเครื่องทำความเย็นที่ถูกลำมาแสดงในรูปของประสิทธิภาพของเครื่องทำความเย็น

4.1 สมการถดถอยของการประมาณค่าพลังงานที่ใช้ในเครื่องทำความเย็น

จากที่ได้กล่าวถึงความสัมพันธ์ในรูปแบบของสมการของพลังงานที่ใช้ในเครื่องทำความเย็นในสมการที่ 2.2 ซึ่งก็คือ

$$kW = a_1 + a_2(\text{Ton}) + a_3(\text{CWS}) + a_4(\text{Ton})^2$$

จึงได้ทำการหาค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปร พบว่าเมื่อหาสัมประสิทธิ์จากข้อมูลที่เก็บแล้วได้จะได้ตามสมการที่ 4.1 ซึ่งข้อมูลที่เก็บค่านั้นแสดงอยู่ในภาคผนวก ก

$$kW \text{ regression 1} = -1682.988 + (5.451 * \text{CWS}) + (4.399 * \text{Ton}) - 0.003(\text{Ton})^2 \quad (4.1)$$

กำหนดให้ CWS คือ ค่าอุณหภูมิจุด 6 อ้างอิงตามรูปที่ 2.10

Ton คือ ความสามารถในการทำความเย็น

และเนื่องจากเห็นว่าค่าพลังงานที่ป้อนเข้าเครื่องทำความเย็นนั้นมีความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์อื่นๆอีก ซึ่งค่าความสัมพันธ์นั้นได้แสดงอยู่ในภาคผนวก ข นำมาซึ่งสมการที่ 4.2

kW regression 2

$$= -374.031 + (6.419 * \text{CWS}) + (0.626 * \text{Ton}) + (0.07 * \text{Evap flow}) - (0.064 * \text{Cond flow}) \quad (4.2)$$

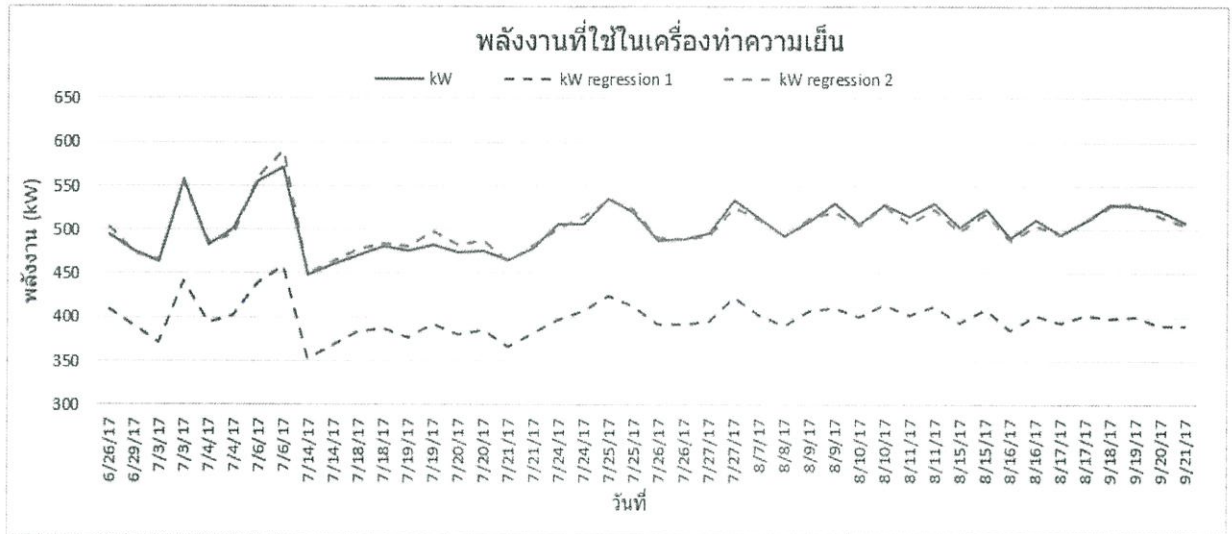
กำหนดให้ CWS คือ ค่าอุณหภูมิจุด 6 อ้างอิงตามรูปที่ 2.10

Ton คือ ความสามารถในการทำความเย็น

Evap flow คือ อัตราการไหลของน้ำในเครื่องระเหย

Cond flow คือ อัตราการไหลของน้ำในเครื่องควบแน่น

จากสมการที่ 4.1 และสมการที่ 4.2 เมื่อนำมาสร้างกราฟเปรียบเทียบกับค่าพลังงานที่ใช้ในเครื่องทำความเย็นจะได้ตามรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่าง kW, kW regression 1 และ kW regression 2

ซึ่งการวัดความถูกต้องหรือความคลาดเคลื่อนของการประมาณค่านั้นเป็นไปตามตารางที่ 4.1 โดยใช้สมการที่ 2.16 และสมการที่ 2.17 ในการหาค่าความถูกต้อง

ตารางที่ 4.1 แสดงความคลาดเคลื่อนของการประมาณค่าระหว่างค่า kW regression 1 และ kW regression 2 โดยเทียบกับค่า kW ที่เก็บค่าจริงโดยใช้ข้อมูลระหว่างวันที่ 26/6/2017 ถึง 20/9/2017

	MSE	MAPE (%)
kW regression 1	11093.510	20.777
kW regression 2	37.116	0.933

4.2 สมการถดถอยของการประมาณค่าอุณหภูมิน้ำเข้าเครื่องควบแน่น

จากที่ได้กล่าวถึงการลดอุณหภูมิน้ำเข้าเครื่องควบแน่น ในหัวข้อที่ 2.6.1 ซึ่งได้กล่าวถึงปัจจัยต่างๆที่ทำให้สามารถควบคุมอุณหภูมิของน้ำได้นั้น จึงได้ความสัมพันธ์ในสมการที่ 4.3

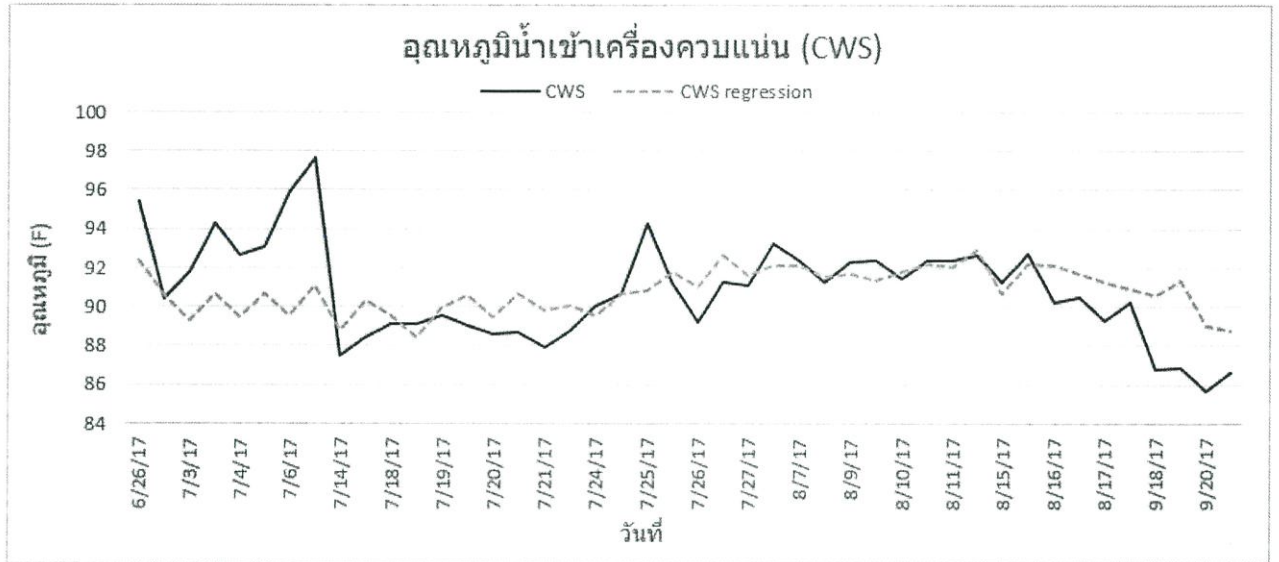
$$\text{CWS regression} = 93.693 - (0.237 \cdot \text{WB} \cdot \text{CT}) - (19.247 \cdot \text{CT}) \quad (4.3)$$

กำหนดให้ CWS คือ ค่าอุณหภูมิจุด 6 อ้างอิงตามรูปที่ 2.10

WB คือ ค่าอุณหภูมิกระเปาะเปียก

CT คือ จำนวนหอระบายความร้อนที่เปิดใช้งาน

จากสมการที่ 4.3 ได้นำมาสร้างกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าที่เก็บได้จริง กับค่าคำนวณที่ได้จากสมการตามรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่าง CWS และ CWS regression

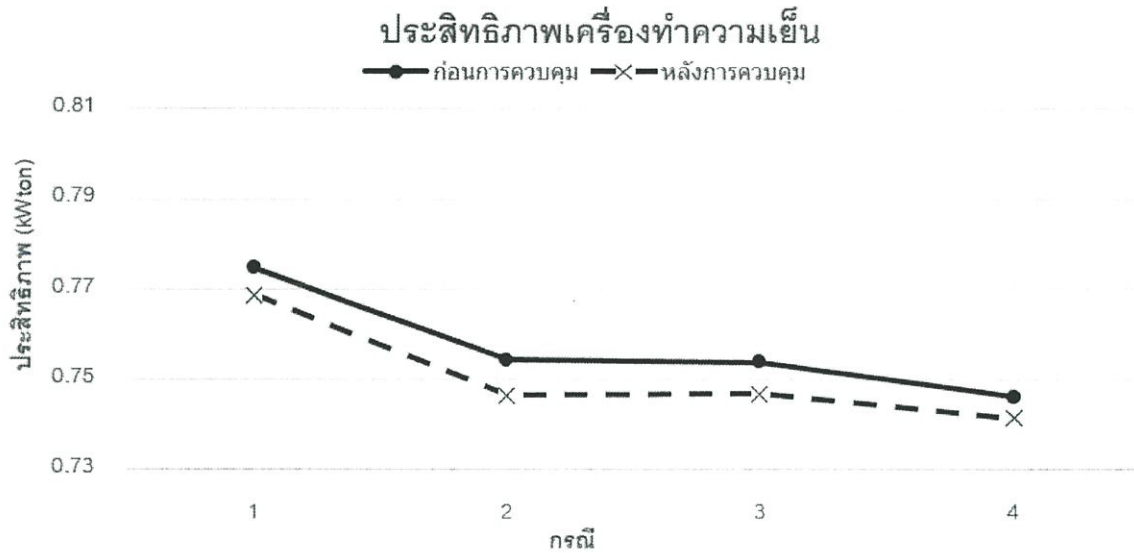
ซึ่งการคำนวณความคลาดเคลื่อนของการประมาณค่าของอุณหภูมิน้ำเข้าเครื่องควบแน่น ในรูปที่ 4.2 นั้นจะเป็นไปตามตารางที่ 4.2 โดยใช้สมการที่ 2.16 และสมการที่ 2.17 โดยจะได้ค่าตามตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงความคลาดเคลื่อนของการประมาณค่าระหว่างค่า CWS regression เทียบกับค่า CWS ที่เก็บค่าจริงโดยใช้ข้อมูลระหว่างวันที่ 26/6/2017 ถึง 20/9/2017

	MSE	MAPE (%)
CWS regression	5.152	1.829

4.3 ผลการควบคุมพารามิเตอร์ของเครื่องทำความเย็น

จากที่ได้กล่าวถึงพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อพลังงานที่ใช้ในการทำความเย็นในหัวข้อที่ 4.1 แล้ว จึงทำให้เห็นว่าพารามิเตอร์ที่สามารถควบคุมได้คือ อัตราการไหลของน้ำในเครื่องควบแน่น และอัตราการไหลของน้ำในเครื่องระเหย โดยการควบคุมคือ ทำการล้างเครื่องกรอง (strainer) เมื่อมีการไหลต่ำ และปรับอัตราการไหลลงเมื่อมีการไหลสูงหรือทำการตรวจเช็คความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับเครื่องจักร ซึ่งการกำหนดความสูงต่ำของอัตราการไหลนั้นใช้การประมาณค่าแบบช่วง ที่อาศัยค่าที่ได้จากการเก็บข้อมูลโดยคำนวณจากสมการในตารางที่ 2.1 ใช้ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ซึ่งพลังงานที่ใช้ในการทำความเย็นนี้จะถูกทำให้อยู่ในรูปของประสิทธิภาพของเครื่องทำความเย็นตามสมการที่ 2.6 โดยรูปที่ 4.3 และ 4.4 คือตัวอย่างผลการทดลองที่ควบคุมพารามิเตอร์ต่างๆ



รูปที่ 4.3 ประสิทธิภาพของเครื่องทำความเย็นที่อุณหภูมิน้ำเข้าเครื่องควบแน่น 88 °F ซึ่งควบคุมอัตราการไหลของน้ำที่เครื่องควบแน่น

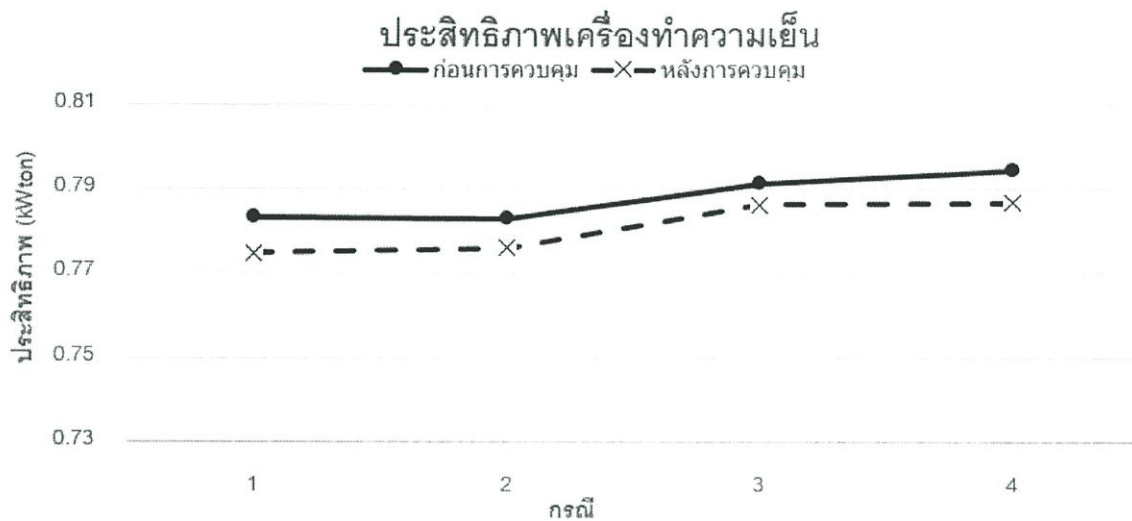
จากรูปที่ 4.3 เป็นการแสดงประสิทธิภาพของเครื่องทำความเย็นที่อุณหภูมิน้ำเข้าเครื่องควบแน่น 88 °F โดยการควบคุมอัตราการไหลของน้ำที่เครื่องควบแน่นให้มีค่าอยู่ระหว่าง 3450 - 3720 gpm

1. ในกรณีที่ 1 (18/9/2017) ทำการควบคุมอัตราการไหลที่เครื่องควบแน่นเนื่องจากมีค่าสูงซึ่งอยู่ที่ 3820 gpm โดยได้ทำการควบคุมให้อยู่ในช่วง 3470 – 3520 gpm ทำให้ค่าพลังงานที่ใช้ในเครื่องทำความเย็นลดลงจาก 548 kW เป็น 545 kW และค่าภาระไหลในการทำควมเย็นมีค่าใกล้เคียงกับค่าก่อนทำการควบคุม นั่นคือจาก 708 tons เป็น 709 tons ทำให้ค่าประสิทธิภาพของเครื่องทำความเย็นมีประสิทธิภาพมากขึ้นจาก 0.775 kW/ton เป็น 0.769 kW/ton

2. ในกรณีที่ 2 (20/7/2017) ทำการควบคุมอัตราการไหลที่เครื่องควบแน่นเนื่องจากมีค่าที่สูงซึ่งอยู่ที่ 3844 gpm โดยได้ทำการควบคุมให้อยู่ในช่วง 3500 – 3550 gpm ทำให้ค่าพลังงานที่ใช้ในเครื่องทำความเย็นลดลงจาก 474 kW เป็น 471 kW และค่าภาระไหลในการทำควมเย็นมีค่าใกล้เคียงกับค่าก่อนทำการควบคุม นั่นคือจาก 629 tons เป็น 631 tons ทำให้ค่าประสิทธิภาพของเครื่องทำความเย็นมีประสิทธิภาพมากขึ้นจาก 0.754 kW/ton เป็น 0.746 kW/ton

3. ในกรณีที่ 3 (22/6/2017) ทำการควบคุมอัตราการไหลที่เครื่องควบแน่นเนื่องจากมีค่าที่สูงซึ่งอยู่ที่ 3907 gpm โดยได้ทำการควบคุมให้อยู่ในช่วง 3580 – 3620 gpm ทำให้ค่าพลังงานที่ใช้ในเครื่องทำความเย็นลดลงจาก 463 kW เป็น 460 kW และค่าภาระไหลในการทำควมเย็นมีค่าใกล้เคียงกับค่าก่อนทำการควบคุม นั่นคือจาก 614 tons เป็น 616 tons ทำให้ค่าประสิทธิภาพของเครื่องทำความเย็นมีประสิทธิภาพมากขึ้นจาก 0.754 kW/ton เป็น 0.747 kW/ton

4. ในกรณีที่ 4 (20/7/2017) ทำการควบคุมอัตราการไหลที่เครื่องควบแน่นเนื่องจากมีค่าที่ต่ำซึ่งอยู่ที่ 3347 gpm โดยได้ทำการควบคุมให้อยู่ในช่วง 3520 – 3570 gpm ทำให้ค่าพลังงานที่ใช้ในเครื่องทำความเย็นลดลงจาก 475 kW เป็น 473 kW และค่าภาระโหลดในการทำความเย็นมีค่าใกล้เคียงกับค่าก่อนทำการควบคุม นั่นคือจาก 637 tons เป็น 638 tons ทำให้ค่าประสิทธิภาพของเครื่องทำความเย็นมีประสิทธิภาพมากขึ้นจาก 0.746 kW/ton เป็น 0.741 kW/ton



รูปที่ 4.4 ประสิทธิภาพของเครื่องทำความเย็นที่อุณหภูมิน้ำเข้าเครื่องควบแน่น 91 °F ซึ่งควบคุมอัตราการไหลของน้ำที่เครื่องระเหย

จากรูปที่ 4.4 เป็นการแสดงประสิทธิภาพของเครื่องทำความเย็นที่อุณหภูมิน้ำเข้าเครื่องควบแน่น 91 °F โดยการควบคุมอัตราการไหลของน้ำที่เครื่องระเหยให้มีค่าอยู่ระหว่าง 1710-1830 gpm

1. ในกรณีที่ 1 (26/7/2017) ทำการควบคุมอัตราการไหลที่เครื่องระเหยเนื่องจากมีค่าที่ต่ำซึ่งอยู่ที่ 1620 gpm โดยได้ทำการควบคุมให้อยู่ในช่วง 1740 – 1790 gpm เนื่องจากการปรับวาล์วส่งผลให้ค่าภาระโหลดในการทำความเย็นมีค่าเพิ่มขึ้น นั่นคือจาก 637 tons เป็น 638 tons ทำให้ค่าพลังงานที่ใช้ในเครื่องทำความเย็นเพิ่มขึ้นจาก 489 kW เป็น 492 kW แต่ค่าประสิทธิภาพของเครื่องทำความเย็นนั้นมีประสิทธิภาพมากขึ้นจาก 0.783 kW/ton เป็น 0.775 kW/ton

2. ในกรณีที่ 2 (27/7/2017) ทำการควบคุมอัตราการไหลที่เครื่องระเหยเนื่องจากมีค่าที่ต่ำซึ่งอยู่ที่ 1601 gpm โดยได้ทำการควบคุมให้อยู่ในช่วง 1730 – 1780 gpm ทำให้ค่าพลังงานที่ใช้ในเครื่องทำความเย็นลดลงจาก 495 kW เป็น 492 kW และค่าภาระโหลดในการทำความเย็นมีค่าใกล้เคียงกับค่าก่อนทำการควบคุม นั่นคือจาก 633 tons เป็น 634 tons ทำให้ค่าประสิทธิภาพของเครื่องทำความเย็นมีประสิทธิภาพมากขึ้นจาก 0.783 kW/ton เป็น 0.776 kW/ton

3. ในกรณีที่ 3 (8/8/2017) ทำการควบคุมอัตราการไหลที่เครื่องระเหยเนื่องจากมีค่าที่ต่ำซึ่งอยู่ที่ 1588 gpm โดยได้ทำการควบคุมให้อยู่ในช่วง 1780 – 1830 gpm เนื่องจากการปรับวาล์วส่งผลให้ค่าภาระไหลในการทำความเย็นมีค่าเพิ่มขึ้น นั่นคือจาก 623 tons เป็น 641 tons ทำให้ค่าพลังงานที่ใช้ในเครื่องทำความเย็นเพิ่มขึ้นจาก 493 kW เป็น 497 kW แต่ค่าประสิทธิภาพของเครื่องทำความเย็นนั้นมีประสิทธิภาพมากขึ้นจาก 0.791 kW/ton เป็น 0.786 kW/ton

4. ในกรณีที่ 4 (10/8/2017) ทำการควบคุมอัตราการไหลที่เครื่องระเหยเนื่องจากมีค่าที่ต่ำซึ่งอยู่ที่ 1613 gpm โดยได้ทำการควบคุมให้อยู่ในช่วง 1690 – 1740 gpm ทำให้ค่าพลังงานที่ใช้ในเครื่องทำความเย็นลดลงจาก 506 kW เป็น 502 kW และค่าภาระไหลในการทำความเย็นมีค่าใกล้เคียงกับค่าก่อนทำการควบคุม นั่นคือจาก 637 tons เป็น 638 tons ทำให้ค่าประสิทธิภาพของเครื่องทำความเย็นมีประสิทธิภาพมากขึ้นจาก 0.795 kW/ton เป็น 0.787 kW/ton

สรุปความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์

1. อัตราการไหลของน้ำที่เครื่องควบแน่น มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิน้ำที่ออกจากเครื่องควบแน่นซึ่งส่งผลถึงค่าพลังงานที่ใช้ในเครื่องทำความเย็นโดยสืบเนื่องมาจาก Part Lift ที่มีผลต่อการประหยัดพลังงานในเครื่องทำความเย็นแบบแรงเหวี่ยงที่อาศัยหลักการทำงานของ VSD ซึ่ง Part Lift, Lift คือ ผลต่างของระดับแรงดันหรือผลต่างของอุณหภูมิน้ำที่ออกจากเครื่องควบแน่นและเครื่องระเหย ทศพล [4]

2. อัตราการไหลของน้ำที่เครื่องระเหย มีความสัมพันธ์กับภาระไหลในการทำความเย็นซึ่งแปรผันตามผลคูณระหว่างอัตราการไหลของน้ำที่เครื่องระเหยและผลต่างอุณหภูมิน้ำที่เข้าออกเครื่องระเหย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และ ข้อเสนอแนะ

บทนี้จะกล่าวถึงการสรุปผลศึกษาการประมาณค่าการใช้พลังงานของระบบทำความเย็น นอกจากนี้ยังมีข้อเสนอแนะในการปรับปรุงรูปแบบของเครื่องจักรของระบบทำความเย็น รวมถึงแนวทางการศึกษาในระบบทำความเย็น ดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

1. การประมาณค่าพลังงานที่ใช้งานเครื่องทำความเย็นที่มีค่า MAPE ต่ำที่สุดซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.933% คือ ค่าประสิทธิภาพที่คำนวณจากสมการ $kW \text{ regression } 2 = -374.031 + (6.419 * CWS) + (0.626 * \text{Ton}) + (0.07 * \text{Evap flow}) - (0.064 * \text{Cond flow})$

2. พารามิเตอร์ที่มีผลต่อพลังงานที่ใช้ในการเครื่องทำความเย็นคือ อุณหภูมิน้ำเข้าเครื่องควบแน่น, ความสามารถในการทำความเย็น, อัตราการไหลของน้ำในเครื่องควบแน่น, อัตราไหลของน้ำในเครื่องระเหย, อุณหภูมิกระเปาะเปียก และ จำนวนการใช้หอบระบายความร้อน

3. ผลการประหยัดการใช้พลังงานไฟฟ้าสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายทางด้านไฟฟ้าในส่วนของเครื่องทำความเย็นเป็นไปตามตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 แสดงเปอร์เซ็นต์ค่าใช้จ่ายที่ลดได้หลังจากมีการควบคุมพารามิเตอร์โดยเทียบกับประสิทธิภาพต่ำสุดที่อุณหภูมินั้นๆเมื่อไม่ได้ควบคุมพารามิเตอร์

อุณหภูมิ (°F)	ค่าใช้จ่ายที่ลดได้	
	MAX	MIN
86	7.91%	4.31%
87	2.99%	1.08%
88	2.11%	0.47%
89	5.83%	2.05%
90	1.38%	0.09%
91	1.90%	0.44%
92	3.44%	0.49%

5.2 ข้อเสนอนี้

จากการศึกษาสภาพการณ์ทำงานของระบบทำความเย็นนี้ มีข้อเสนอนี้เพิ่มเติมเกี่ยวกับการวิจัยซึ่งสามารถนำไปพัฒนาต่อซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. การนำเอาโปรแกรมนี้ไปใช้กับเครื่องทำความเย็นจะเหมาะสมสำหรับระบบทำความเย็นแบบเดี่ยว ซึ่งก็คือ ระบบที่มีเครื่องทำความเย็น 1 เครื่อง, เครื่องสูบน้ำเย็น 1 เครื่อง, เครื่องสูบน้ำหล่อเย็น 1 เครื่อง การที่จะนำไปใช้กับระบบที่มีเครื่องทำความเย็นมากกว่า 1 เครื่อง หรือมีเครื่องจักรอย่างอื่นมากกว่าที่กำหนด ผู้ใช้ต้องมีความรู้เกี่ยวกับระบบเป็นอย่างดี เนื่องจากตัวแปรที่วัดอาจขึ้นกับเครื่องทำความเย็นหรือเครื่องจักรอื่นได้

2. การประมาณค่าพลังงานการป้อนเข้าเครื่องทำความเย็นอาจมีตัวแปรอิสระตัวแปรอื่นที่มีอิทธิพลต่อค่าพลังงานนอกเหนือจากค่าที่สามารถเก็บได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] กัลยา วาณิชย์บัญชา. 2542. การใช้ SPSS for windows ในการวิเคราะห์ข้อมูล. ภาควิชาสถิติ คณะวิทยาศาสตร์และการบัญชี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ
- [2] ฉัตรชัย เปล่งสะอาด. 2545. การหาสภาพที่เหมาะสมของลำดับการเดินเครื่องทำน้ำเย็น. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [3] ดร.อิศรวิญญู รินไธสง. การวิเคราะห์ค่า
สหสัมพันธ์ Website: <http://www.edu.tsu.ac.th/major/administration/Data/FE511> ค้นหา
เมื่อ 22/9/2560
- [4] ทศพล สถิตสูงศักดิ์กุล. VSD Chiller ทำงานที่ Part lift หรือ Part load?. Website:
http://servicecare.tranethailand.com/main.php?show=content&cat_id=2&cont_id=13
ค้นหาเมื่อ 12/11/2560
- [5] นฤมล นิลรัตน์สุวรรณ. 2556. สภาวะการทำงานที่เหมาะสมของระบบทำความเย็นและโหลด
อุณหภูมิ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงานและ
สิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาลัยธรรมศาสตร์.
- [6] ระบบทำความเย็น (Refrigeration system). คู่มือผู้รับผิดชอบด้านพลังงาน(อาคาร) พ.ศ.
2553. Website: http://www2.dede.go.th/bhrd/old/Download/file_handbook/Pre_Build/Build_15.pdf ค้นหาเมื่อ 10/9/2560
- [7] ระบบปรับอากาศ (Air conditioning system). คู่มือผู้รับผิดชอบด้านพลังงาน(อาคาร) พ.ศ. 2553.
Website:
http://www2.dede.go.th/bhrd/old/Download/file_handbook/Pre_Build/Build_14.pdf.
ค้นหาเมื่อ 29/9/2560

- [8] วราภรณ์ เหลือสินทรัพย์. 2542. **สรุปคำบรรยายการวิเคราะห์การถดถอย**. คณะวิทยาศาสตร์.
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. กรุงเทพฯ
- [9] Hensley, J. C. (Ed.). 1983. **Cooling tower fundamentals**. Marley Cooling Tower Company.
- [10] Hydeman, M., & Zhou, G. (2007). **Optimizing chilled water plant control**. ASHRAE
Journal, 49(6), 44.
- [11] IIT Kharagpur. **Vapor Compression Refrigeration Systems**.
Website: <http://nptel.ac.in/courses/112105129/pdf/RAC%20Lecture%2010.pdf> ค้นหา
เมื่อ 5/1/2561
- [12] John C. Hensley. (2009). **Cooling Tower Fundamentals**. Second edition. Overland Park,
Kansas USA. SPX Cooling Technologies, Inc.
- [13] MINLP optimization of mechanical draft counter flow wet-cooling towers Website:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263876209002548> ค้นหาเมื่อ
21/11/2560
- [14] Mitesh Bairwa. **Centrifugal Compressor: Principle, Construction, Working, Types, Advantages, Disadvantages with its Application**.
Website: <http://www.mech4study.com/2017/11/centrifugal-compressor.html>
compressor ค้นหาเมื่อ 20/12/2560
- [15] Nam Trinh. **Comparison of water chiller and VRF systems**.
Website: <http://kienthucmep.thebimhouse.com/2017/08/so-sanh-he-thong-water-chiller-va-vrf.html> ค้นหาเมื่อ 2/12/2560
- [16] Trane. **Operation Maintenance**.
Website:
https://www.trane.com/Commercial/Uploads/Pdf/1050/cvhesvu01een_405.pdf ค้นหา
เมื่อ 18/9/2560

- [17] Trott, A. R., & Welch, T. C. 1999 . *Refrigeration and air conditioning*. Third edition. Butterworth-Heinemann.
- [18] Wang, S. K., & Wang, S. K. 2000. *Handbook of air conditioning and refrigeration*.
- [19] Yunus A. Cengel and Afshin J. Ghajar. 2015. *Heat and mass transfer: fundamentals & applications*. Fifth edition. New York, NY McGraw Hill Education.

ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลตรวจวัดที่ใช้ในการศึกษาเครื่องทำความเย็น

Date	CWR	CWS	Cond water flow	WB temp	CHR	CHS	Evap water flow	Power	Capacity	kW-ton	CT
6/26/17	102.9	95.4	3,878	78.4	48.0	39.8	1,808	495	616	0.804	2
6/29/17	95.4	90.4	3,894	76.8	48.4	39.9	1,763	476	630	0.756	3
7/3/17	96.5	91.8	3,784	75.0	48.3	40.0	1,707	463	594	0.780	3
7/3/17	100.0	94.3	3,781	77.0	49.2	39.8	1,790	557	703	0.793	3
7/4/17	97.6	92.6	3,789	75.2	48.4	39.9	1,744	482	616	0.783	3
7/4/17	98.2	93.1	3,792	77.0	48.6	40.1	1,757	502	625	0.803	3
7/6/17	101.8	95.9	3,487	75.4	49.2	40.1	1,757	556	670	0.830	3
7/6/17	103.8	97.6	3,496	77.5	49.2	39.8	1,775	572	697	0.820	3
7/14/17	92.6	87.5	3,612	74.3	48.4	39.9	1,694	449	600	0.748	3
7/14/17	93.5	88.4	3,624	76.5	48.6	40.0	1,702	461	613	0.752	3
7/18/17	94.4	89.1	3,668	75.4	48.7	39.9	1,716	470	630	0.746	3
7/18/17	94.5	89.1	3,653	73.8	48.7	40.0	1,760	481	635	0.758	3
7/19/17	95.0	89.5	3,505	75.9	48.7	40.1	1,713	476	616	0.774	3
7/19/17	94.6	89.0	3,517	76.8	48.8	40.0	1,745	483	646	0.748	3
7/20/17	94.2	88.6	3,544	75.2	48.7	40.0	1,728	474	629	0.754	3
7/20/17	94.3	88.7	3,548	77.0	48.8	39.9	1,726	476	637	0.746	3
7/21/17	93.3	87.9	3,592	75.7	48.7	40.0	1,697	465	615	0.756	3
7/21/17	94.4	88.8	3,598	76.1	48.7	40.0	1,754	480	630	0.761	3
7/24/17	95.8	90.1	3,590	75.4	48.8	40.1	1,762	506	645	0.784	3
7/24/17	96.6	90.7	3,598	77.0	48.8	40.0	1,782	507	658	0.771	3
7/25/17	100.3	94.3	3,580	75.2	49.0	40.0	1,740	535	654	0.818	2
7/25/17	97.2	91.2	3,580	77.2	49.0	40.0	1,775	520	666	0.781	2
7/26/17	94.9	89.2	3,603	75.6	49.1	40.0	1,690	487	646	0.754	2
7/26/17	96.9	91.3	3,610	79.0	48.9	40.0	1,670	489	624	0.783	2
7/27/17	96.9	91.1	3,615	76.8	49.2	40.1	1,663	495	633	0.783	2
7/27/17	99.2	93.2	3,620	77.9	49.3	40.0	1,700	534	661	0.808	2
8/7/17	98.3	92.4	3,563	77.9	48.5	40.0	1,784	514	632	0.813	2
8/8/17	96.3	91.3	3,563	76.6	48.7	40.0	1,705	493	623	0.791	2
8/9/17	98.1	92.3	3,553	77.0	48.8	39.9	1,723	511	641	0.796	2
8/9/17	98.3	92.4	3,548	76.3	48.8	40.0	1,777	531	645	0.822	2
8/10/17	97.2	91.4	3,549	77.2	48.8	40.0	1,726	506	637	0.795	2
8/10/17	98.3	92.4	3,554	78.1	48.8	40.0	1,780	529	655	0.807	2
8/11/17	98.2	92.4	3,550	77.7	48.8	40.0	1,724	515	630	0.817	2
8/11/17	98.6	92.6	3,566	79.5	48.8	40.1	1,789	530	648	0.817	2
8/15/17	97.0	91.3	3,552	74.8	48.5	39.9	1,735	502	626	0.802	2
8/15/17	98.5	92.7	3,545	78.1	48.7	40.0	1,774	523	639	0.818	2
8/16/17	95.9	90.2	3,554	77.9	48.7	40.0	1,700	490	624	0.786	2
8/16/17	96.3	90.5	3,552	77.0	49.0	39.9	1,703	512	649	0.788	2
8/17/17	95.0	89.3	3,548	76.1	49.0	39.9	1,692	494	645	0.766	2
8/17/17	96.1	90.2	3,553	75.4	48.9	39.9	1,746	510	654	0.780	2
9/18/17	93.2	86.8	3,420	76.8	49.3	40.0	1,811	528	697	0.758	3
9/19/17	93.3	86.9	3,426	77.9	49.2	39.9	1,812	527	701	0.752	3
9/20/17	92.0	85.7	3,441	74.7	49.2	40.1	1,816	521	690	0.756	3
9/21/17	98.2	86.6	3,440	74.3	49.1	39.9	1,757	509	670	0.759	3

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลตรวจวัดที่ได้จากการทดลองปรับค่า

	CWS	Date	Condenser Water Flow	Evap Water Flow	Power	Capacity	kW/ton
86	86.8	13/09/17	3526	1711	507	694	0.73
	86	18/09/17	3574	1802	529	712	0.743
	86.6	19/09/17	3469	1809	526	721	0.729
	86.1	21/09/17	3477	1758	507	683	0.743
87	87.6	15/08/17	3695	1742	442	585	0.756
	87.6	17/08/17	3539	1834	451	604	0.747
	87.7	13/09/17	3541	1826	464	618	0.750
	87.9	18/09/17	3608	1807	534	710	0.752
88	88.6	18/09/17	3490.1	1821.6	545	709	0.769
	88.7	19/09/17	3671	1809	491	652	0.753
	88.6	20/07/17	3544	1727.8	471	631	0.746
	88.6	22/06/17	3607	1764	460	616	0.747
	88.7	20/07/17	3547.6	1726.2	473	638	0.741
	88.9	21/09/17	3650	1821	491	648	0.758
89	89.2	16/08/17	3571	1762	477	636	0.750
	89.5	17/08/17	3564	1802	497	651	0.764
	89.3	22/08/17	3579	1820	481	638	0.754
	89.8	19/09/17	3654	1760	498	671	0.742
	89.3	20/09/17	3594	1731	484	646	0.749
90	90.8	16/08/17	3627	1801	493	627	0.786
	90	17/08/17	3702	1798	511	653	0.783
	90.1	15/09/17	3558	1821	508	650	0.781
	90	19/09/17	3669	1804	573	730	0.785
91	91.3	26/07/17	3609.8	1770	492	635	0.775
	91.1	27/07/17	3614.6	1762.7	492	634	0.776
	91.3	08/08/17	3563	1804.5	497	632	0.786
	91.4	10/08/17	3549.4	1725.8	502	638	0.787
	91.3	13/09/17	3466	1783	476	611	0.778
	91.7	18/09/17	3452	1736	478	619	0.771
92	92.7	16/08/17	3412	1739	504	626	0.805
	92.9	17/08/17	3505	1725	489	597	0.819
	92.3	22/08/17	3556	1799	500	630	0.794
	92.3	20/09/17	3682	1811	506	642	0.788

ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์

		Correlations									
		CWR	CWS	CONDFLOW	WB	CHR	CHS	EVAPFLOW	KW	CAPACITY	CT
CWR	Pearson Correlation	1	.926**	0.213	.369*	0.028	-0.218	0.227	.653**	0.191	-.354*
	Sig. (2-tailed)		0	0.165	0.014	0.856	0.156	0.139	0	0.214	0.018
	N	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44
CWS	Pearson Correlation	.926**	1	.346*	.396**	-0.079	-0.145	0.116	.554**	0.043	-.355*
	Sig. (2-tailed)	0		0.021	0.008	0.611	0.349	0.455	0	0.784	0.018
	N	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44
CONDFLOW	Pearson Correlation	0.213	.346*	1	0.033	-.608**	-0.25	-0.072	-.326*	-.460**	0.081
	Sig. (2-tailed)	0.165	0.021		0.831	0	0.101	0.642	0.031	0.002	0.601
	N	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44
WB Temp	Pearson Correlation	.369*	.396**	0.033	1	0.059	-0.015	0.152	.351*	0.138	-.455**
	Sig. (2-tailed)	0.014	0.008	0.831		0.704	0.922	0.325	0.019	0.372	0.002
	N	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44
CHR	Pearson Correlation	0.028	-0.079	-.608**	0.059	1	0.145	0.062	.619**	.807**	-0.034
	Sig. (2-tailed)	0.856	0.611	0	0.704		0.347	0.69	0	0	0.825
	N	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44
CHS	Pearson Correlation	-0.218	-0.145	-0.25	-0.015	0.145	1	-0.095	-0.048	-0.144	-0.014
	Sig. (2-tailed)	0.156	0.349	0.101	0.922	0.347		0.54	0.755	0.352	0.927
	N	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44
EVAPFLOW	Pearson Correlation	0.227	0.116	-0.072	0.152	0.062	-0.095	1	.541**	.588**	0.219
	Sig. (2-tailed)	0.139	0.455	0.642	0.325	0.69	0.54		0	0	0.154
	N	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44
KW	Pearson Correlation	.653**	.554**	-.326*	.351*	.619**	-0.048	.541**	1	.799**	-0.253
	Sig. (2-tailed)	0	0	0.031	0.019	0	0.755	0		0	0.097
	N	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44
CAPACITY	Pearson Correlation	0.191	0.043	-.460**	0.138	.807**	-0.144	.588**	.799**	1	0.1
	Sig. (2-tailed)	0.214	0.784	0.002	0.372	0	0.352	0	0		0.519
	N	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44
CT	Pearson Correlation	-.354*	-.355*	0.081	-.455**	-0.034	-0.014	0.219	-0.253	0.1	1
	Sig. (2-tailed)	0.018	0.018	0.601	0.002	0.825	0.927	0.154	0.097	0.519	
	N	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44

** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

* Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

สัญลักษณ์ของตารางที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์

B = สัมประสิทธิ์ความถดถอยตัวแปรอิสระ

SE หรือ Standard Error= ค่าที่แสดงว่าโดยเฉลี่ยแล้วค่าเฉลี่ยของตัวอย่างแต่ละตัวแตกต่างจากค่าเฉลี่ยมากน้อยเพียงใด

Beta = บอกถึงตัวแปรอิสระตัวใดมีอิทธิพลต่อตัวแปรตามมากหรือน้อยกว่ากัน ถ้าBeta ของตัวแปรอิสระใดมีค่ามากกว่า (โดยไม่คิดเครื่องหมาย) แสดงว่า ตัวแปรอิสระตัวนั้นมีอิทธิพลต่อตัวแปรตามมาก

t = สัดส่วนระหว่าง B/SEt มีค่าสูง แสดงว่า สามารถนำไปใช้ในสมการพยากรณ์ได้

R² (ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ) =ซึ่งจะแสดงถึงอิทธิพลของตัวแปรอิสระ (X) ที่มีต่อตัวแปรตาม (Y)

Sig of F = ถ้า sig. เท่ากับ 0.000 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 นั่นคือ ค่าความชันของ regression line ที่ดีที่สุดต่างจาก 0 อย่างมีนัยสำคัญหรือ ตัวแปรอิสระและตัวแปรตามมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

P (P-value) = ความน่าจะเป็นที่จะได้ผลลัพธ์เท่ากับหรือเกินกว่าที่สังเกตได้ เช่น กำหนดระดับนัยสำคัญไว้ที่ 0.05 หมายความว่า มีโอกาส 5% ที่ค่าที่ได้จะไม่เป็นอย่างที่ทำการประมาณค่าไว้

ตารางที่ ข.2 การประมาณค่าพลังงานที่ใช้ในเครื่องทำความเย็นของสมการที่ 14

Factor	B	SE	Beta	t
CWS	6.419	.421	.604	15.259**
CAPACITY	.626	.056	.597	11.236**
EVAPFLOW	.070	.032	.102	2.201
CONDFLOW	-.064	.012	-.253	-5.486**
Constant	-374.031	61.457		-6.086**

R² = .949, F = 182.538, Sig of F = 0.000, *P<0.05, **P<0.01

ตารางที่ ข.3การประมาณค่าอุณหภูมิน้ำเข้าเครื่องควบแน่นสมการที่ 15

Factor	B	SE	Beta	t
CT	-19.247	8.969	-3.784	-2.146*
WB*CT	.237	0.122	3.440	1.951
Constant	93.693	2.021		46.358**

$R^2 = 0.200$, $F = 5.133$, Sig of $F = 0.010$, * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$

ตารางที่ ข.4 ข้อมูลการคำนวณค่าพลังงานที่ใช้ในเครื่องทำความเย็นตามสมการที่ 14

Power	kW regression 1	MSE	MAPE	kW regression 2	MSE	MAPE
495	408.31268	7514.691	17.513	502.17	51.44332	1.449
476	390.26643	7367.402	18.028	474.61	2.212954	0.312
463	372.07868	8303.095	19.672	464.51	1.72502	0.284
557	440.82005	13474.55	20.844	554.32	6.654852	0.463
482	393.33108	7897.685	18.430	485.68	12.13965	0.723
502	401.87018	9946.037	19.882	495.00	43.53756	1.315
556	440.50633	13361.9	20.786	561.00	24.02862	0.881
572	457.66208	12959.07	19.919	589.17	312.342	3.092
449	353.3745	9106.026	21.262	450.67	3.495778	0.417
461	368.23247	8568.748	20.088	464.40	12.96288	0.781
470	383.18013	7503.002	18.438	477.44	58.29781	1.625
481	386.50378	8986.323	19.696	484.94	13.23577	0.756
476	376.08133	10063.84	21.058	481.50	26.00898	1.071
483	391.74732	8272.39	18.842	498.47	248.5983	3.266
474	379.95607	8919.656	19.908	482.51	65.83375	1.710
476	385.60202	8099.636	18.923	488.13	157.1087	2.635
465	367.00658	9641.948	21.108	464.25	0.90117	0.204
480	381.97792	9549.605	20.371	483.11	11.6554	0.712
506	397.58553	11732.02	21.410	501.86	16.32726	0.799
507	407.11277	9997.446	19.717	514.61	56.33553	1.480
535	424.88677	12191.08	20.626	533.42	3.537785	0.351
520	413.24947	11374.34	20.514	523.48	12.80781	0.688
487	392.78495	8876.476	19.346	490.30	10.85834	0.677
489	391.66718	9473.678	19.904	488.65	0.125528	0.072
495	395.91753	9896.762	20.081	491.86	12.49835	0.714
534	421.93448	12491.53	20.942	525.20	72.17182	1.592
514	402.51967	12338.84	21.628	511.54	4.237011	0.401
493	390.8783	10428.84	20.714	493.30	0.092842	0.062
511	407.36578	10636.67	20.203	513.01	6.30261	0.492
531	410.12283	14538.85	22.720	520.31	107.8732	1.957
506	400.20468	11256.22	20.955	505.20	1.216168	0.218
529	414.81343	12924.64	21.511	526.13	5.613109	0.448
515	401.3544	12892.6	22.052	506.93	63.51134	1.548
530	412.76763	13673.18	22.075	523.18	42.4739	1.230
502	392.96278	11976.51	21.783	498.12	18.31754	0.852
523	408.43058	13126.15	21.906	518.46	20.56895	0.867
490	385.47467	10946.46	21.348	487.09	9.037238	0.613
512	401.87702	12127.07	21.508	505.32	44.59168	1.304
494	393.11917	10237.56	20.470	494.36	0.003612	0.012
510	402.4902	11536.87	21.065	509.20	0.493928	0.138
528	398.85647	16703.89	24.473	527.37	0.530858	0.138
527	400.10265	16128.33	24.094	529.93	8.003807	0.537
521	391.06862	16908.16	24.953	514.68	41.19714	1.232
509	389.58463	14164.66	23.401	503.89	22.19729	0.926
		11093.51	20.77659		37.11607	0.933

ตารางที่ ข.5 ข้อมูลการคำนวณค่า CWSregression ของสมการที่ 15

CWS	CWS regression	MSE	MAPE
95.4	92.37956	9.123	3.166
90.4	90.57102	0.029	0.189
91.8	89.29122	6.294	2.733
94.3	90.699	12.967	3.819
92.6	89.4192	10.117	3.435
93.1	90.699	5.765	2.579
95.9	89.54718	40.358	6.624
97.6	91.08294	42.472	6.677
87.5	88.7793	1.637	1.462
88.4	90.31506	3.667	2.166
89.1	89.54718	0.200	0.502
89.1	88.39536	0.497	0.791
89.5	89.93112	0.186	0.482
89.0	90.57102	2.468	1.765
88.6	89.4192	0.671	0.925
88.7	90.699	3.996	2.254
87.9	89.80314	3.622	2.165
88.8	90.0591	1.585	1.418
90.1	89.54718	0.306	0.614
90.7	90.699	0.000	0.001
94.3	90.8438	11.945	3.665
91.2	91.78232	0.339	0.639
89.2	91.01444	3.292	2.034
91.3	92.63552	1.784	1.463
91.1	91.61168	0.262	0.562
93.2	92.1236	1.159	1.155
92.4	92.1236	0.076	0.299
91.3	91.52636	0.051	0.248
92.3	91.697	0.364	0.653
92.4	91.35572	1.091	1.130
91.4	91.78232	0.146	0.418
92.4	92.20892	0.037	0.207
92.4	92.03828	0.131	0.391
92.6	92.89148	0.085	0.315
91.3	90.67316	0.393	0.687
92.7	92.20892	0.241	0.530
90.2	92.1236	3.700	2.133
90.5	91.697	1.433	1.323
89.3	91.2704	3.882	2.206
90.2	90.92912	0.532	0.808
86.8	90.57102	14.221	4.344
86.9	91.3389	19.704	5.108
85.7	89.03526	11.124	3.892
86.6	88.7793	4.749	2.517
		5.152	1.829