



วิทยานิพนธ์

การวิเคราะห์การทำงานของวัฏจักรร่วมของปั๊มความร้อนที่ใช้สารทำความเย็นอาร์-123 และการทำความเย็นแบบดูดซึมที่ใช้สารทำความเย็นลิเทียมโบรไมด์-น้ำ

**ANALYSIS ON THE OPERATIONS OF A COMBINED CYCLE
OF AN R-123 HEAT PUMP AND A LiBr-H₂O ABSORPTION
REFRIGERATION**

นายสุพจน์ สูดกรยุทธ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ. 2551



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

ปริญญา

วิศวกรรมเครื่องกล

วิศวกรรมเครื่องกล

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การวิเคราะห์การทำงานของวัฏจักรร่วมของปั๊มความร้อนที่ใช้สารทำความเย็นอาร์-123
และการทำความเย็นแบบดูดซึมที่ใช้สารทำความเย็นลิเทียมโบรไมด์-น้ำ

Analysis on the Operations of a Combined Cycle of an R-123 Heat Pump and a LiBr-
H₂O Absorption Refrigeration

นามผู้วิจัย นายสุพจน์ สุตกรยุทธ์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการ

(อาจารย์ณรงค์ อรุณศรีโสภณ, Ph.D.)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิชัย กฤษไมตรี, Ph.D.)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์พัฒน์ ฐิธิปัญญาคุณ, วศ.ม.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ชวลิต กิตติชัยการ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การวิเคราะห์การทำงานของวัฏจักรร่วมของปั๊มความร้อนที่ใช้สารทำความเย็นอาร์-123 และ
การทำความเย็นแบบดูดซึมที่ใช้สารทำความเย็นลิเทียมโบรไมด์-น้ำ

Analysis on the Operations of a Combined Cycle of an R-123 Heat Pump and a LiBr-H₂O
Absorption Refrigeration

โดย

นายสุพจน์ สุกฤษฎ์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

พ.ศ. 2551

สุพจน์ สุตกรยุทธ์ 2551: การวิเคราะห์การทำงานของวัฏจักรร่วมของปั๊มความร้อนที่ใช้สารทำความเย็นอาร์-123 และการทำความเย็นแบบดูดซึมที่ใช้สารทำความเย็นลิเทียมโบรไมด์-น้ำ ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ประชานกรรมการที่ปรึกษา: อาจารย์ ธเนศ อรุณศรีโสภณ, Ph.D. 127 หน้า

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการจำลองวัฏจักรร่วมปั๊มความร้อนและการทำความเย็นแบบดูดซึม ซึ่งระบบจะเริ่มจากการใส่พลังงานไฟฟ้าไปที่เครื่องอัดของวัฏจักรปั๊มความร้อน ที่ใช้ R-123 เป็นสารทำงาน โดยจะนำความร้อนส่วนหนึ่งที่ระบายออกจากคอยล์ร้อนของปั๊มความร้อนป้อนเข้าสู่เครื่องผลิตของการทำความเย็นแบบดูดซึม ที่ใช้ลิเทียมโบรไมด์-น้ำเป็นคู่สารทำความเย็น โดยมีขนาดการทำความเย็นที่เครื่องระเหยเท่ากับ 12,000 บีทียู/ชั่วโมง หรือขนาด 1 ตันความเย็น และความร้อนส่วนที่เหลือจากคอยล์ร้อนของปั๊มความร้อนก็จะถูกนำไปใช้ทำน้ำร้อน ทั้งนี้ความร้อนที่ระบายออกจากเครื่องดูดซึมและเครื่องควบแน่นในการทำความเย็นแบบดูดซึมจะถูกระบายความร้อนให้กับคอยล์เย็นของปั๊มความร้อนเพื่อให้เกิดการใช้พลังงานได้อย่างคุ้มค่า

ผลจากการใช้โปรแกรม EES ในการวิเคราะห์หาค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของวัฏจักรร่วม พบว่าอุณหภูมิที่คอยล์ร้อนและคอยล์เย็นของปั๊มความร้อน ควรมีค่าเท่ากับ 194 °F และ 86 °F ตามลำดับ และอุณหภูมิที่เครื่องผลิต, เครื่องควบแน่น, เครื่องระเหย และ เครื่องดูดซึม ควรมีค่าเท่ากับ 176 °F, 95 °F, 55 °F และ 95 °F ตามลำดับ ซึ่งจะมีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของเครื่องทำความเย็นแบบดูดซึมมีค่าเท่ากับ 0.834 ค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของปั๊มความร้อนมีค่าเท่ากับ 4.76 ค่าสัมประสิทธิ์การทำความเย็นและการทำความร้อนมีค่าเท่ากับ 1.71 และ 2.71 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของวัฏจักรร่วมนั้นมีค่าเท่ากับ 4.42 ซึ่งจะเห็นได้ว่าระบบนี้จะได้ประโยชน์จากการทำความเย็นและการทำน้ำร้อนได้โดยเสียพลังงานไฟฟ้าที่เครื่องอัดของปั๊มความร้อนเพียงอย่างเดียว ซึ่งจะเป็นการใช้พลังงานได้อย่างคุ้มค่า

Supoch Sudkornrayuth 2008: Analysis on the Operations of a Combined Cycle of an R-123 Heat Pump and a LiBr-H₂O Absorption Refrigeration. Master of Engineering (Mechanical Engineering), Major Field: Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering. Thesis Advisor: Mr. Tanet Aroonsrisopon, Ph.D. 127 pages.

This thesis studied on the simulation of a combined cycle for a heat pump and an absorption chiller. The cycle started by putting in an electrical power to drive a compressor in an R-123 heat pump cycle. After that a hot coil would release heat output in which only some of it would be transferred to a generator in the LiBr-H₂O absorption chiller with a 12,000 Btu/hr absorption chiller. The remaining heat output was used for making hot water. Moreover, the heat output that release from the absorber and the condenser of the absorption chiller, would then be transferred to the cold coil of heat pump for maximizing the benefit from total energy input.

In this research, EES program had been used to analyse the maximum coefficient of performance of combined cycle. From the simulation results, the temperatures at the hot coil and cold coil should be 194 °F and 86 °F, respectively. Whereas temperatures at the generator, the condenser, the evaporator and the absorber would be 176 °F, 95 °F, 55 °F and 95 °F, respectively. This resulted in the COP values for the absorption chiller at 0.834, the heat pump at 4.76, the cooling at 1.71, the heating at 2.71 and the combined cycle at 4.42. The key advantage of this combined cycle is that the electricity from the compressor alone could generate both cooling and heating within one system. This result in heat and power saving. Thus, the concept is good in financial and environmental stand point of view.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

____ / ____ / ____

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ อ.ดร.ชนศ อรุณศรีโสภณ ประธานกรรมการที่ปรึกษา ผศ.ดร.พิชัย กฤษไมตรี กรรมการวิชาเอก และ ผศ.พิพัฒน์ ภูมิปัญญาคุณ กรรมการวิชาการ ที่ได้ให้คำปรึกษา และตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

งานวิจัยฉบับนี้จะสำเร็จไปไม่ได้ ถ้าไม่ได้รับการสนับสนุนที่ดีจากครอบครัวสุครยูทท์ทุกคน รวมถึงคุณนพมาศ เจริญพรวัฒนาที่คอยให้กำลังใจและความช่วยเหลือต่างๆ ขอขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือกันเป็นอย่างดีในการทำวิทยานิพนธ์นี้

สำหรับความดีและคุณค่าทั้งหลายของวิทยานิพนธ์นี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้แก่คณาจารย์ทุกท่านที่อบรมสั่งสอนข้าพเจ้ามา รวมถึงผู้มีพระคุณของข้าพเจ้าทุกคน ทำให้ข้าพเจ้ามีปัญญาและความสามารถในการทำวิทยานิพนธ์ชิ้นนี้

สุพจน์ สุครยูทท์

เมษายน 2551

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(11)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	29
อุปกรณ์	29
วิธีการ	29
ผลและวิจารณ์	40
สรุปและข้อเสนอแนะ	83
สรุป	83
ข้อเสนอแนะ	85
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	86
ภาคผนวก	88
ภาคผนวก ก แสดงคุณสมบัติของสารทำความเย็น R-123 และสารละลายลิเทียมโบรไมด์-น้ำ	89
ภาคผนวก ข การใช้โปรแกรม EES	97
ภาคผนวก ค การจำลองวัฏจักรร่วมปั๊มความร้อนและการทำความเย็นแบบดูดซึม	109
ภาคผนวก ง ตัวอย่างการวิเคราะห์ประสิทธิภาพวัฏจักรร่วมปั๊มความร้อนและการทำความเย็นแบบดูดซึม	114
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	128

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ระดับประสิทธิภาพของเครื่องปรับอากาศ	5
2	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องผลิตของการทำความเย็นแบบดูดซึม (T_{gen}) เทียบกับอัตราการไหลของสารทำความเย็นต่างๆ	41
3	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องผลิตของการทำความเย็นแบบดูดซึม (T_{gen}) เทียบกับปริมาณความร้อนที่อุปกรณ์ต่างๆ ของการทำความเย็นแบบดูดซึมและปั๊มความร้อน	43
4	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องผลิตของการทำความเย็นแบบดูดซึม (T_{gen}) เทียบกับค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะต่างๆ	46
5	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องควบแน่นของการทำความเย็นแบบดูดซึม (T_{cond}) เทียบกับอัตราการไหลของสารทำความเย็นต่างๆ	48
6	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องควบแน่นของการทำความเย็นแบบดูดซึม (T_{cond}) เทียบกับปริมาณความร้อนที่อุปกรณ์ต่างๆ ของการทำความเย็นแบบดูดซึมและปั๊มความร้อน	50
7	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องควบแน่นของการทำความเย็นแบบดูดซึม (T_{cond}) เทียบกับค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะต่างๆ	53
8	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องดูดซึมของการทำความเย็นแบบดูดซึม (T_{abs}) เทียบกับอัตราการไหลของสารทำความเย็นต่างๆ	55
9	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องดูดซึมของการทำความเย็นแบบดูดซึม (T_{abs}) เทียบกับปริมาณความร้อนที่อุปกรณ์ต่างๆ ของการทำความเย็นแบบดูดซึมและปั๊มความร้อน	57
10	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องดูดซึมของการทำความเย็นแบบดูดซึม (T_{abs}) เทียบกับค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะต่างๆ	60
11	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องระเหยของการทำความเย็นแบบดูดซึม (T_{evap}) เทียบกับอัตราการไหลของสารทำความเย็นต่างๆ	62

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
12	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องระเหยของการทำความเย็นแบบดูดซึม (T_{evap}) เทียบกับปริมาณความร้อนที่อุปกรณ์ต่างๆ ของการทำความเย็นแบบดูดซึมและปั๊มความร้อน	64
13	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องระเหยของการทำความเย็นแบบดูดซึม (T_{evap}) เทียบกับค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะต่างๆ	67
14	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่คอยล์ร้อนของปั๊มความร้อน ($T_{\text{hot coil}}$) เทียบกับอัตราการไหลของสารทำความเย็นต่างๆ	69
15	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่คอยล์ร้อนของปั๊มความร้อน ($T_{\text{hot coil}}$) เทียบกับปริมาณความร้อนที่อุปกรณ์ต่างๆ ของการทำความเย็นแบบดูดซึมและปั๊มความร้อน	71
16	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่คอยล์ร้อนของปั๊มความร้อน ($T_{\text{hot coil}}$) เทียบกับค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะต่างๆ	74
17	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่คอยล์เย็นของปั๊มความร้อน ($T_{\text{cold coil}}$) เทียบกับอัตราการไหลของสารทำความเย็นต่างๆ	76
18	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่คอยล์เย็นของปั๊มความร้อน ($T_{\text{cold coil}}$) เทียบกับปริมาณความร้อนที่อุปกรณ์ต่างๆ ของการทำความเย็นแบบดูดซึมและปั๊มความร้อน	78
19	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่คอยล์เย็นของปั๊มความร้อน ($T_{\text{cold coil}}$) เทียบกับค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะต่างๆ	81

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า	
ก1	แสดงคุณสมบัติของสารทำความเย็น R-123	90
ก2	คุณสมบัติของสารละลายลิเทียมโบรไมด์-น้ำ (ตาราง อุณหภูมิ-เอนทัลปี-ความเข้มข้น: T-h-x)	94
ค1	ตารางสมดุลมวลและพลังงานของวัฏจักรการทำความเย็นแบบดูดซึม	111
ค2	ตารางสมดุลมวลและพลังงานของวัฏจักรปั๊มความร้อน	112
ค3	ตารางสมดุลพลังงานของวัฏจักรรวม	112
ง1	สภาวะต่างๆของระบบการทำความเย็นแบบดูดซึมที่ใช้สารทำความเย็นลิเทียมโบรไมด์-น้ำ	126
ง2	สภาวะต่างๆของปั๊มความร้อนที่ใช้สารทำความเย็น R-123	126
ง3	สมดุลพลังงานของระบบการทำความเย็นแบบดูดซึม	127
ง4	สมดุลพลังงานของปั๊มความร้อน	127
ง5	สมดุลพลังงานของวัฏจักรรวม	127

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แสดงวัฏจักรการทำความเย็นแบบอัดไอ	6
2	การทำงานของการทำงานเย็นแบบดูดซึมที่เครื่องระเหย	9
3	การทำงานของการทำงานเย็นแบบดูดซึมที่เครื่องดูดซึม	10
4	การทำงานของการทำงานเย็นแบบดูดซึมที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน	11
5	การทำงานของการทำงานเย็นแบบดูดซึมที่เครื่องผลิต	12
6	การทำงานของการทำงานเย็นแบบดูดซึมที่เครื่องควบแน่น	13
7	วัฏจักรการทำงานของการทำความเย็นแบบดูดซึม 2 ชั้น	14
8	เปรียบเทียบวัฏจักรการทำงานของการดูดซึมแบบชั้นเดียวและสองชั้น	15
9	ผังแสดงคุณภาพของสารละลายลิเทียมโบรไมด์-น้ำ	17
10	กราฟแสดงค่าเอนทัลปีและความเข้มข้นของสารละลายลิเทียมโบรไมด์-น้ำ	18
11	การทำงานของระบบปั๊มความร้อนแบบอัดไอ	20
12	วัฏจักรของปั๊มความร้อนที่ใช้สารทำความเย็น R-123	30
13	วัฏจักรการทำความเย็นแบบดูดซึมที่ใช้สารทำความเย็นลิเทียมโบรไมด์-น้ำ	32
14	ภาพแสดงวัฏจักรร่วมของปั๊มความร้อนและการทำความเย็นแบบดูดซึม	40
15	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องผลิต (T_{gen}) เทียบกับอัตราการไหลของสารละลายเจือจาง ($\dot{m}_{dil}$) อัตราการไหลของสารละลายเข้มข้น ($\dot{m}_{conc}$) และอัตราการไหลของสารทำความเย็นน้ำ ($\dot{m}_{steam}$)	42
16	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องผลิต (T_{gen}) เทียบกับอัตราการไหลของสารทำความเย็น R-123 ($\dot{m}_{R-123}$)	42
17	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องผลิต (T_{gen}) เทียบกับปริมาณความร้อนที่เครื่องผลิต (Q_{gen}) เครื่องดูดซึม (Q_{abs}) เครื่องควบแน่น (Q_{cond}) และเครื่องระเหย (Q_{evap})	44
18	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องผลิต (T_{gen}) เทียบกับปริมาณความร้อนที่เครื่องอัดในปั๊มความร้อน (Q_{comp})	44

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
19	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องผลิต (T_{gen}) เทียบกับปริมาณความร้อนที่คอยล์ร้อนในปั๊มความร้อน ($Q_{hot\ coil}$)	45
20	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องผลิต (T_{gen}) เทียบกับปริมาณความร้อนที่หล่อไปใช้ทำน้ำร้อน ($Q_{hot\ water}$)	45
21	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องผลิต (T_{gen}) เทียบกับค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะต่างๆ	47
22	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องควบแน่น (T_{cond}) เทียบกับอัตราการไหลของสารละลายเจือจาง ($\dot{m}_{dil}$) อัตราการไหลของสารละลายเข้มข้น ($\dot{m}_{conc}$) และอัตราการไหลของสารทำความเย็นน้ำ ($\dot{m}_{steam}$)	49
23	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องควบแน่น (T_{cond}) เทียบกับอัตราการไหลของสารทำความเย็น R-123 ($\dot{m}_{R-123}$)	49
24	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องควบแน่น (T_{cond}) เทียบกับปริมาณความร้อนที่เครื่องผลิต (Q_{gen}) เครื่องดูดซึม (Q_{abs}) เครื่องควบแน่น (Q_{cond}) และเครื่องระเหย (Q_{evap})	51
25	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องควบแน่น (T_{cond}) เทียบกับปริมาณความร้อนที่เครื่องอัดในปั๊มความร้อน (Q_{comp})	51
26	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องควบแน่น (T_{cond}) เทียบกับปริมาณความร้อนที่คอยล์ร้อนในปั๊มความร้อน ($Q_{hot\ coil}$)	52
27	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องควบแน่น (T_{cond}) เทียบกับปริมาณความร้อนที่หล่อไปใช้ทำน้ำร้อน ($Q_{hot\ water}$)	52
28	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องควบแน่น (T_{cond}) เทียบกับค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะต่างๆ	54
29	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องดูดซึม (T_{abs}) เทียบกับอัตราการไหลของสารละลายเจือจาง ($\dot{m}_{dil}$) อัตราการไหลของสารละลายเข้มข้น ($\dot{m}_{conc}$) และอัตราการไหลของสารทำความเย็นน้ำ ($\dot{m}_{steam}$)	56

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
30	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องดูดซึม (T_{abs}) เทียบกับอัตราการไหลของสารทำความเย็น R-123 ($\dot{m}_{R-123}$)	56
31	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องดูดซึม (T_{abs}) เทียบกับปริมาณความร้อนที่เครื่องผลิต (Q_{gen}) เครื่องดูดซึม (Q_{abs}) เครื่องควบแน่น (Q_{cond}) และเครื่องระเหย (Q_{evap})	58
32	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องดูดซึม (T_{abs}) เทียบกับปริมาณความร้อนที่เครื่องอัดในปั๊มความร้อน (Q_{comp})	58
33	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องดูดซึม (T_{abs}) เทียบกับปริมาณความร้อนที่คอยล์ร้อนในปั๊มความร้อน ($Q_{hot\ coil}$)	59
34	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องดูดซึม (T_{abs}) เทียบกับปริมาณความร้อนที่หล่อไปใช้ทำน้ำร้อน ($Q_{hot\ water}$)	59
35	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องดูดซึม (T_{abs}) เทียบกับค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะต่างๆ	61
36	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องระเหย (T_{evap}) เทียบกับอัตราการไหลของสารละลายเจือจาง ($\dot{m}_{dil}$) อัตราการไหลของสารละลายเข้มข้น ($\dot{m}_{conc}$) และอัตราการไหลของสารทำความเย็นน้ำ ($\dot{m}_{steam}$)	63
37	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องระเหย (T_{evap}) เทียบกับอัตราการไหลของสารทำความเย็น R-123 ($\dot{m}_{R-123}$)	63
38	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องระเหย (T_{evap}) เทียบกับปริมาณความร้อนที่เครื่องผลิต (Q_{gen}) เครื่องดูดซึม (Q_{abs}) เครื่องควบแน่น (Q_{cond}) และเครื่องระเหย (Q_{evap})	65
39	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องระเหย (T_{evap}) เทียบกับปริมาณความร้อนที่เครื่องอัดในปั๊มความร้อน (Q_{comp})	65
40	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องระเหย (T_{evap}) เทียบกับปริมาณความร้อนที่คอยล์ร้อนในปั๊มความร้อน ($Q_{hot\ coil}$)	66

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
41	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องระเหย (T_{evap}) เทียบกับปริมาณความร้อนที่เหลือนำไปใช้น้ำร้อน ($Q_{\text{hot water}}$)	66
42	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องระเหย (T_{evap}) เทียบกับค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะต่างๆ	68
43	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่คอยล์ร้อนของปั๊มความร้อน ($T_{\text{hot coil}}$) เทียบกับอัตราการไหลของสารละลายเจือจาง ($\dot{m}_{\text{dil}}$) อัตราการไหลของสารละลายเข้มข้น ($\dot{m}_{\text{conc}}$) และอัตราการไหลของสารทำความเย็นน้ำ ($\dot{m}_{\text{steam}}$)	70
44	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่คอยล์ร้อนของปั๊มความร้อน ($T_{\text{hot coil}}$) เทียบกับอัตราการไหลของสารทำความเย็น R-123 ($\dot{m}_{\text{R-123}}$)	70
45	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่คอยล์ร้อนของปั๊มความร้อน ($T_{\text{hot coil}}$) เทียบกับปริมาณความร้อนที่เครื่องผลิต (Q_{gen}) เครื่องดูดซึม (Q_{abs}) เครื่องควบแน่น (Q_{cond}) และเครื่องระเหย (Q_{evap})	72
46	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่คอยล์ร้อนของปั๊มความร้อน ($T_{\text{hot coil}}$) เทียบกับปริมาณความร้อนที่เครื่องอัดในปั๊มความร้อน (Q_{comp})	72
47	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่คอยล์ร้อนของปั๊มความร้อน ($T_{\text{hot coil}}$) เทียบกับปริมาณความร้อนที่คอยล์ร้อนในปั๊มความร้อน ($Q_{\text{hot coil}}$)	73
48	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่คอยล์ร้อนของปั๊มความร้อน ($T_{\text{hot coil}}$) เทียบกับปริมาณความร้อนที่เหลือนำไปใช้น้ำร้อน ($Q_{\text{hot-water}}$)	73
49	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่คอยล์ร้อนของปั๊มความร้อน ($T_{\text{hot coil}}$) เทียบกับค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะต่างๆ	75
50	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่คอยล์เย็นของปั๊มความร้อน ($T_{\text{cold coil}}$) เทียบกับอัตราการไหลของสารละลายเจือจาง ($\dot{m}_{\text{dil}}$) อัตราการไหลของสารละลายเข้มข้น ($\dot{m}_{\text{conc}}$) และอัตราการไหลของสารทำความเย็นน้ำ ($\dot{m}_{\text{steam}}$)	77
51	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่คอยล์เย็นของปั๊มความร้อน ($T_{\text{cold coil}}$) เทียบกับอัตราการไหลของสารทำความเย็น R-123 ($\dot{m}_{\text{R-123}}$)	77

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
52	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่คอยล์เย็นของปั๊มความร้อน ($T_{\text{cold coil}}$) เทียบกับปริมาณความร้อนที่เครื่องผลิต (Q_{gen}) เครื่องดูดซึม (Q_{abs}) เครื่องควบแน่น (Q_{cond}) และเครื่องระเหย (Q_{evap})	79
53	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่คอยล์เย็นของปั๊มความร้อน ($T_{\text{cold coil}}$) เทียบกับปริมาณความร้อนที่เครื่องอัดในปั๊มความร้อน (Q_{comp})	79
54	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่คอยล์เย็นของปั๊มความร้อน ($T_{\text{cold coil}}$) เทียบกับปริมาณความร้อนที่คอยล์ร้อนในปั๊มความร้อน ($Q_{\text{hot coil}}$)	80
55	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่คอยล์เย็นของปั๊มความร้อน ($T_{\text{cold coil}}$) เทียบกับปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปใช้ทำน้ำร้อน ($Q_{\text{hot-water}}$)	80
56	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่คอยล์เย็นของปั๊มความร้อน ($T_{\text{cold coil}}$) เทียบกับค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะต่างๆ	82
ภาพผนวกที่		
ก1	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเอนทัลปีและความดันของสารทำความเย็น R-123	93
ก2	กราฟแสดงค่าเอนทัลปีและความเข้มข้นของสารละลายลิเทียมโบรไมด์-น้ำ	95
ก3	ผังแสดงคุณภาพของสารละลายลิเทียมโบรไมด์-น้ำ	96
ข1	แสดงหน้าต่างของโปรแกรม EES	98
ข2	แสดงส่วนของเมนูคำสั่ง	98
ข3	แสดงส่วนของคำสั่ง File	99
ข4	แสดงส่วนของคำสั่ง Edit	100
ข5	แสดงส่วนของคำสั่ง Search	100
ข6	แสดงส่วนของคำสั่ง Option	101
ข7	แสดงหน้าต่างของ Function Info	101

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ข8	แสดงหน้าต่างของ Unit Conversion Info
ข9	แสดงหน้าต่างของ Constants
ข10	แสดงหน้าต่างของ Unit System
ข11	แสดงหน้าต่างของ Stop Criteria
ข12	แสดงส่วนของคำสั่ง Calculate
ข13	แสดงส่วนของคำสั่ง Tables
ข14	แสดงหน้าต่างของ New Parametric Table
ข15	แสดงส่วนของคำสั่ง Plots
ข16	แสดงส่วนของคำสั่ง Windows
ข17	แสดงส่วนของคำสั่ง Help
ค1	แสดงการจำลองวัฏจักรร่วมปั๊มความร้อนและการทำความเย็นแบบดูดซึม
ง1	แสดงข้อมูลที่เขียนลงในโปรแกรม EES
ง2	แสดงข้อมูลที่เขียนลงในโปรแกรม EES (ต่อ)
ง3	แสดงผลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม EES

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์

COP_{abs}	=	ค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของการทำความเย็นแบบดูดซึม
$COP_{combined}$	=	ค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของวัฏจักรร่วม
COP_{cool}	=	ค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของการทำความเย็นของวัฏจักรร่วม
COP_{heat}	=	ค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของการทำความร้อนของวัฏจักรร่วม
$COP_{heat\ pump}$	=	ค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของปั๊มความร้อน
EF	=	ค่าประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน
h	=	เอนทาลปีจำเพาะ (Btu/lb _m)
k	=	ค่าคงที่
$\dot{m}$	=	อัตราการไหล (gpm)
$\dot{m}_{R-123}$	=	อัตราการไหลของสารทำความเย็น R-123 (gpm)
P	=	ความดัน (psia)
P_H	=	ความดันด้านสูงของการทำความเย็นแบบดูดซึม (psia)
P_L	=	ความดันด้านต่ำของการทำความเย็นแบบดูดซึม (psia)
Q	=	ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเท (Btu/hr)
s	=	เอนโทรปี (Btu/lb _m -R)
T	=	อุณหภูมิ (°F)
W	=	งาน (Btu/hr)
x	=	อัตราส่วนโดยมวลของของเหลว
x_{conc}	=	ความเข้มข้นของสารละลายลิเทียมโบรไมด์-น้ำเข้มข้น (%) คิดเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก
x_{dil}	=	ความเข้มข้นของสารละลายลิเทียมโบรไมด์-น้ำเจือจาง (%) คิดเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก

ดรรชนีล่าง

0, 1, 2,...,n	=	ตำแหน่งต่างๆ, สภาวะต่างๆ, ลำดับที่ของการทำความเย็นแบบดูดซึม
a, b, c, d	=	ตำแหน่งต่างๆ, สภาวะต่างๆ, ลำดับที่ของปั๊มความร้อน
abs	=	เครื่องดูดซึมของการทำความเย็นแบบดูดซึม (Absorber)
cold coil	=	เครื่องระเหยของปั๊มความร้อน
combined	=	วัฏจักรรวม
comp	=	เครื่องอัด (Compressor)
conc	=	สารละลายเข้มข้นลิเทียมโบรไมด์
cond	=	เครื่องควบแน่นของการทำความเย็นแบบดูดซึม (Condenser)
dil	=	สารละลายเจือจางลิเทียมโบรไมด์
evap	=	เครื่องระเหยของการทำความเย็นแบบดูดซึม (Evaporator)
f	=	ของเหลวอิ่มตัว
g	=	ไออิ่มตัว
gen	=	เครื่องผลิตของการทำความเย็นแบบดูดซึม (Generator)
hot coil	=	เครื่องควบแน่นของปั๊มความร้อน
hot water	=	น้ำร้อน
max	=	ค่าสูงสุด
R-123	=	สารทำความเย็น R-123
shx-c	=	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้านเย็น
shx-h	=	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้านร้อน
steam	=	สารทำความเย็นน้ำ

การวิเคราะห์การทำงานของวัฏจักรร่วมของปั๊มความร้อนที่ใช้สารทำความเย็นอาร์-123 และการทำความเย็นแบบดูดซึมที่ใช้สารทำความเย็นลิเทียมโบรไมด์-น้ำ

Analysis on the Operations of a Combined Cycle of an R-123 Heat Pump and a LiBr-H₂O Absorption Refrigeration

คำนำ

ในสภาวะปัจจุบันที่ปัญหาการขาดแคลนพลังงานเป็นปัญหาหนึ่งที่สำคัญ เนื่องจากความต้องการพลังงานนับวันมีแต่จะสูงขึ้น ขณะที่แหล่งพลังงานมีอยู่จำกัด ดังนั้นจึงได้มีการนำพลังงานความร้อนที่ใช้งานแล้วกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งนอกจากจะเป็นการประหยัดพลังงานแล้ว ยังช่วยลดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย โดยประเทศไทยเป็นประเทศที่มีภูมิอากาศร้อน ดังนั้นการทำความเย็นและการปรับอากาศจึงเข้าไปมีบทบาทในทุกอุตสาหกรรมของประเทศ ซึ่งการทำความเย็นและการปรับอากาศนั้นมีการใช้พลังงานสูง จึงทำให้มีการค้นคว้าเพื่อพัฒนาให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นอยู่ตลอดเวลา

ระบบการทำความเย็นและการปรับอากาศในปัจจุบันมีหลายระบบด้วยกัน เช่น การทำความเย็นระบบอัดไอซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย และการทำความเย็นแบบดูดซึมที่สามารถนำพลังงานความร้อนมาใช้แทนพลังงานไฟฟ้าในการทำความเย็นได้ โดยงานวิจัยชิ้นนี้จะทำการวิเคราะห์การทำงานของวัฏจักรร่วมปั๊มความร้อนและการทำความเย็นแบบดูดซึม ซึ่งการรวมเอาสองระบบนี้เข้าด้วยกันเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการใช้พลังงานสูงขึ้น โดยจะนำความร้อนที่ถ่ายเทสู่สิ่งแวดล้อมของระบบทั้งสองมาทำการถ่ายเทความร้อนกันเพื่อให้เกิดการนำพลังงานที่เหลือทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์มากที่สุด โดยระบบนี้จะสามารถทำความเย็นได้จากเครื่องทำความเย็นแบบดูดซึมและสามารถทำน้ำร้อนได้จากปั๊มความร้อน

งานวิจัยนี้จะทำการจำลองวัฏจักรร่วมของปั๊มความร้อนและการทำความเย็นแบบดูดซึม ซึ่งหลักการทำงานของระบบจะเริ่มจากการใส่พลังงานไปที่เครื่องอัดของวัฏจักรปั๊มความร้อน ซึ่งใช้สารทำความเย็นชนิด R-123 เป็นสารทำงาน และจะนำความร้อนส่วนหนึ่งที่ระบายออกมาจากเครื่องควบแน่นในปั๊มความร้อนป้อนเข้าสู่เครื่องผลิตของระบบการทำความเย็นแบบดูดซึม ซึ่งจะ

ส่วนความร้อนที่เหลือจะนำไปใช้ทำน้ำร้อน จากนั้นจะทำการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของวัฏจักรร่วม และหาค่าพารามิเตอร์ในสถานะต่างๆของระบบ ด้วยโปรแกรม EES เพื่อที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบระบบของวัฏจักรร่วมของปั๊มความร้อนและการทำความเย็นแบบดูดซึมได้อย่างเหมาะสมต่อไป

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาหลักการทำงานของวัฏจักรร่วมของปั๊มความร้อนและการทำความเย็นแบบดูดซึม
2. เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ เมื่อสถานะต่างๆของวัฏจักรร่วมเปลี่ยนแปลงไป ด้วยโปรแกรม EES
3. เพื่อวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของวัฏจักรร่วมของระบบปั๊มความร้อนและการทำความเย็นแบบดูดซึม

ขอบเขตการวิจัย

1. ในงานวิจัยนี้ จะจำลองการทำความเย็นแบบดูดซึมที่ใช้สารละลายลิเทียมโบรไมด์-น้ำ เป็นสารทำงาน และปั๊มความร้อนที่ใช้ R-123 เป็นสารทำความเย็น
2. ทำการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลกระทบเมื่อเปลี่ยนแปลงสถานะในอุปกรณ์ของระบบปั๊มความร้อนที่ต่อร่วมกับการทำความเย็นแบบดูดซึมขนาด 12,000 บีทียู/ชั่วโมง
3. ค่าคุณสมบัติต่างๆของสารทำความเย็น จะใช้ค่าที่มีอยู่ในโปรแกรม EES เพื่อช่วยในการวิเคราะห์

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เข้าใจการทำงานของวัฏจักรร่วมปั๊มความร้อนและการทำความเย็นแบบดูดซึม
2. สามารถหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของวัฏจักรร่วมที่ต้องการทราบได้อย่างสะดวกและประหยัดเวลาในการคำนวณมากขึ้น
3. สามารถนำค่าที่ได้ไปใช้ในการออกแบบวัฏจักรร่วมปั๊มความร้อนและการทำความเย็นแบบดูดซึมได้อย่างเหมาะสม

การตรวจเอกสาร

การเกิดความเย็น (Principle of refrigeration)

การเกิดความเย็นในเครื่องทำความเย็น รวมทั้งในเครื่องปรับอากาศที่มีใช้อยู่ทั่วไปไม่ว่าจะเป็นตู้เย็น ตู้แช่ เครื่องปรับอากาศรถยนต์ เครื่องปรับอากาศในบ้าน หรือในโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไปก็ตาม มีหลักการเบื้องต้นในการทำให้เกิดความเย็นเหมือนกันหมด คือการทำให้สารซึ่งเป็นตัวกลางในการทำความเย็น (Refrigerant) เปลี่ยนสถานะ เพราะขณะเปลี่ยนสถานะสารทุกชนิดต้องการความร้อนแฝงเข้ามาช่วยเสมอ ดังนั้นถ้าเราทำให้สารนี้เปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นไอ จะเกิดการดูดความร้อนจากบริเวณใกล้เคียง ซึ่งจะทำให้บริเวณนั้นมีอุณหภูมิลดลงจึงเกิดความเย็นขึ้น (ชูชัย, 2546)

หน่วยและพื้นฐานทั่วไป

1. ขนาดของเครื่องทำความเย็นจะบอกเป็น Btu/hr (หน่วยอังกฤษ), kcal/h (หน่วยเมตริก), kW (หน่วย SI) หรือบอกขนาดเป็นตัน โดย 1 ตันความเย็นมีค่า 12,000 บีทียู/ชั่วโมง ซึ่งมีที่มาจากคำจำกัดความคือ 1TR (Ton of Refrigeration) = heat required to melt 1 ton of ice (2000 lb) at 0°C per 24 hr. ซึ่งมีความหมายคือ 1 ตันความเย็น เป็นความเย็นที่ได้จากการเสียความร้อนไปใช้ในการหลอมละลายน้ำแข็งหนัก 1 ตัน ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส หมดในเวลา 24 ชั่วโมง หรือสรุปได้ว่าจะให้น้ำแข็งละลายหมดก่อน บริเวณรอบๆจะต้องส่งความร้อนให้กับน้ำแข็งคิดเป็นปริมาณความร้อนเท่ากับ 12,000 บีทียู/ชั่วโมง หรือก็คือบริเวณนั้นจะเกิดความเย็นขึ้นคิดเป็นค่าเท่ากับ 12,000 บีทียู/ชั่วโมง และเรียกขนาดความเย็นที่เกิดขึ้นนี้ว่าความเย็นขนาด 1 ตัน

2. สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะ- COP (Coefficient of Performance) คือค่าที่ใช้แสดงประสิทธิภาพของการทำความเย็น โดยเป็นค่าเปรียบเทียบระหว่างผลของความเย็นที่ได้ต่องานที่ให้กับระบบ

$$\text{COP} = \frac{\text{refrigerating effect}}{\text{heat input}} \quad (1)$$

3. ประสิทธิภาพการให้ความเย็น – EER (Energy Efficiency Ratio) เป็นค่าแสดงอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานของเครื่องทำความเย็น ซึ่งใช้อ้างอิงเพื่อเปรียบเทียบความสิ้นเปลืองพลังงานของเครื่องทำความเย็นและเครื่องปรับอากาศ ปัจจุบันในประเทศไทยโดยศูนย์ทดสอบผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (ศท.) ซึ่งมีฐานะเป็นกองสังกัดสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.) กระทรวงอุตสาหกรรม มีการทดสอบเพื่อรับรองมาตรฐานของเครื่องทำความเย็นและเครื่องปรับอากาศจากค่า EER ซึ่งมีหน่วยเป็น บีทียู/ชั่วโมง-วัตต์ ในระบบอังกฤษ หรือเป็นวัตต์/วัตต์ (ไม่มีหน่วย) ในระบบ SI โดยสัดส่วนดังกล่าวยังมีค่าสูงจะยิ่งแสดงถึงการประหยัดพลังงาน โดยมีการกำหนดระดับแสดงประสิทธิภาพออกเป็น 5 ระดับ ตัวอย่างที่ใช้สำหรับกำหนดระดับประสิทธิภาพของเครื่องปรับอากาศจะกำหนดเป็นมาตรฐานไว้ดังนี้

ตารางที่ 1 ระดับประสิทธิภาพของเครื่องปรับอากาศ

ระดับ (เบอร์)	ระดับประสิทธิภาพ	ค่า EER (บีทียู/ชั่วโมง-วัตต์)	ค่ากิโวลต์/ตัน
1	ต่ำ	≥ 6.6	≤ 1.82
2	พอใช้	≥ 7.6	≤ 1.58
3	ปานกลาง	≥ 8.6	≤ 1.40
4	ดี	≥ 9.6	≤ 1.25
5	ดีมาก	≥ 10.6	≤ 1.13

ที่มา : ชุชัย (2546)

ระบบต่างๆ ในการทำความเย็น (Refrigeration system)

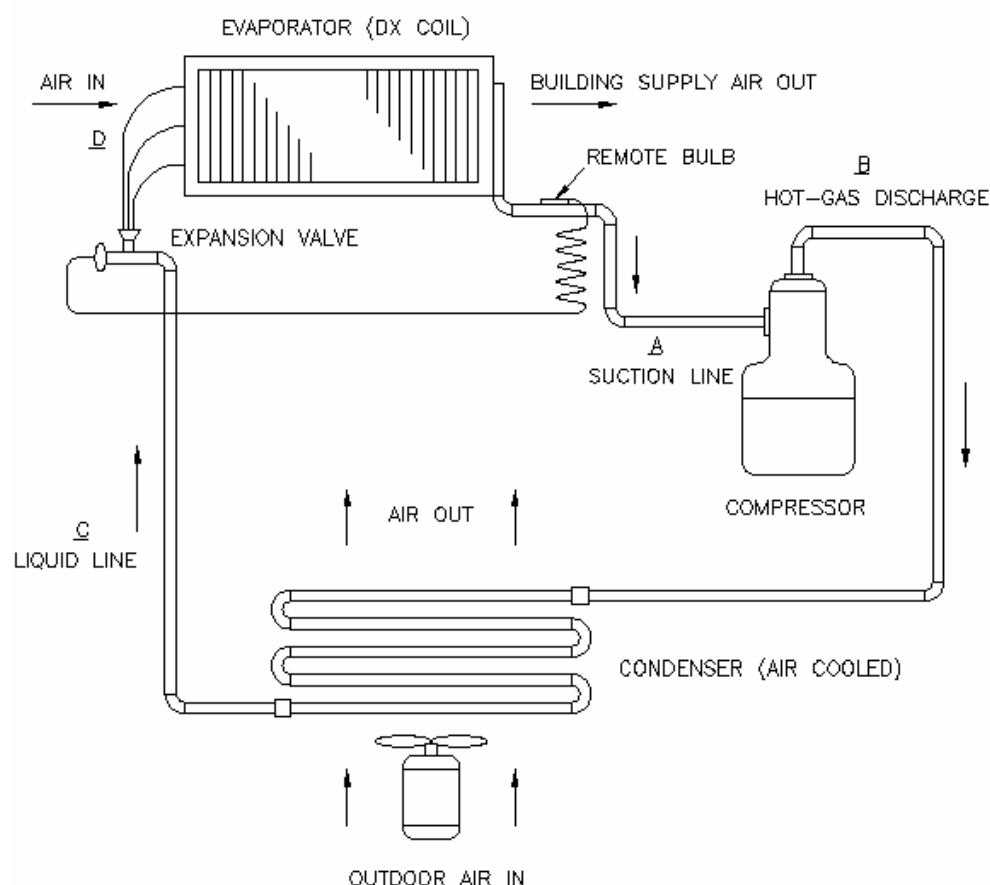
ในเครื่องทำความเย็นและเครื่องปรับอากาศที่มีใช้อยู่ทั่วไปอาจจะทำงานโดยอาศัยระบบทำความเย็นระบบใดระบบหนึ่งดังนี้

1. ระบบใช้กลไก (Mechanical) เป็นระบบที่สร้างความเย็นขึ้น โดยอาศัยการทำงานของกลไกต่างๆ เป็นที่นิยมแพร่หลายที่สุด ซึ่งเรียกกันทั่วไปว่า การทำความเย็นแบบอัดไอ (Vapor compression)

2. ระบบไม่ใช้กลไก (Non-mechanical) เป็นระบบที่สร้างหรือทำความเย็นให้เกิดขึ้นโดยไม่ต้องอาศัยการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนหรือกลไกใดๆ การทำความเย็นระบบนี้ที่มีใช้ในปัจจุบันได้แก่ การทำความเย็นแบบดูดซึม (Absorption) แบบใช้ไอน้ำ (Steam jet) และแบบการใช้การขยายตัวของอากาศ (Air expansion)

ระบบการทำความเย็นแบบอัดไอ (Vapor compression)

ระบบอัดไอเป็นระบบที่ทำให้เกิดความเย็นขึ้นได้โดยอาศัยการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ ร่วมกันดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แสดงวัฏจักรการทำความเย็นแบบอัดไอ
ที่มา : Grimm (1990)

หน้าที่และการทำงานของอุปกรณ์หลักในระบบการทำความเย็นแบบอัดไอ

1. เครื่องอัดไอ (Compressor)

เครื่องอัดไอทำหน้าที่ดูดน้ำยาในสภาพที่เป็นไอจากเครื่องระเหย เพื่อทำให้ความดันในเครื่องระเหยลดต่ำลง จนสามารถทำให้น้ำยากลายเป็นไอและสร้างความเย็นได้ พร้อมทั้งทำการอัดให้น้ำยาที่มีความดันสูงและอุณหภูมิสูงขึ้น จนสามารถควบแน่นเป็นของเหลวในเครื่องควบแน่นและส่งน้ำยาผ่านอุปกรณ์ต่างๆ ในวงจร เครื่องอัดไอเป็นส่วนสำคัญของระบบทำความเย็นแบบอัดไอ โดยจะใช้กำลังงานจากภายนอก (ส่วนใหญ่มักใช้มอเตอร์ไฟฟ้า) เพื่อขับเคลื่อนอุปกรณ์

2. เครื่องควบแน่น (Condenser)

เครื่องควบแน่น ทำหน้าที่ระบายความร้อนออกจากน้ำยาเพื่อให้น้ำยาซึ่งถูกอัดออกจากเครื่องอัดไอในสภาพไอที่มีอุณหภูมิและความดันสูงควบแน่นเป็นของเหลวได้

3. วาล์วลดความดัน (Expansion valve)

วาล์วลดความดันหรืออุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหล (Refrigerant control) ทำหน้าที่ควบคุมปริมาณน้ำยาที่จะส่งเข้าเครื่องระเหย ลักษณะการทำงานคือน้ำยาที่ผ่านจะถูกลดความดันลงเพื่อให้น้ำยาสามารถเดือดได้ในเครื่องระเหย จึงเรียกวาล์วลดความดัน หรือในเครื่องทำความเย็นและเครื่องปรับอากาศขนาดเล็กจะใช้แทนด้วยท่อรูเข็ม (Capillary tube)

4. เครื่องระเหย (Evaporator)

เครื่องระเหยทำหน้าที่รับน้ำยาที่ถูกลดความดันจากวาล์วลดความดัน โดยขณะที่น้ำยาผ่านเครื่องระเหยจะดูดความร้อนจากบริเวณรอบๆ เพื่อใช้ในการเปลี่ยนสถานะทำให้บริเวณใกล้เคียงเกิดความเย็นขึ้น

วัฏจักรการทำความเย็นแบบดูดซึม (Absorption Refrigeration cycle)

เครื่องทำความเย็นแบบดูดซึมชั้นเดียว

เนื่องจากระบบการทำความเย็นแบบอัดไอ ต้องใช้พลังงานในรูปของพลังงานกลเพื่อไปขับเคลื่อนให้ระบบทำงานโดยผ่านเครื่องอัดสารทำความเย็น ดังนั้นจึงได้มีการคิดค้นวิธีการใหม่เพื่อลดการใช้พลังงานดังกล่าว โดยเรียกระบบนี้ว่า ระบบการทำความเย็นแบบดูดซึม พลังงานที่ต้องการในระบบเพื่อให้เกิดการทำงานจะอยู่ในรูปของพลังงานความร้อนเป็นส่วนใหญ่

การทำงานของวัฏจักรการทำความเย็นแบบดูดซึมอาศัยหลักการทางธรรมชาติของน้ำ โดยจุดเดือดของน้ำจะแปรเปลี่ยนไปตามความดันหรือความกดอากาศที่ความดันบรรยากาศ จุดเดือดของน้ำจะอยู่ที่อุณหภูมิ 100°C (212°F) และน้ำจะเดือดที่อุณหภูมิต่ำลง เมื่อความดันบรรยากาศลดลง โดยจุดเดือดของน้ำที่ความกดอากาศ 6 มิลลิเมตรของปรอท (mmHg) จะอยู่ที่อุณหภูมิเพียง 3.7°C (38.6°F) ซึ่งเพียงพอต่อการทำน้ำเย็น (Chilled Water) ในระบบปรับอากาศ

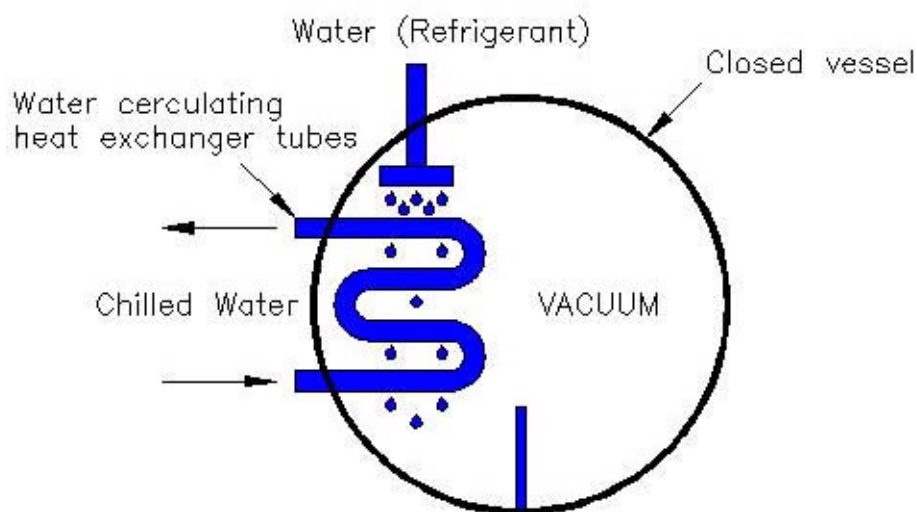
สารทำความเย็นในวัฏจักรส่วนมากจะใช้สารละลายลิเทียมโบรไมด์ (Lithium Bromide, LiBr) ซึ่งลิเทียมโบรไมด์ มีคุณสมบัติเป็นเกลือ สามารถดูดซึมและละลายในน้ำได้ดี ยิ่งสารละลายลิเทียมโบรไมด์เข้มข้นขึ้นเท่าใด ปฏิกริยาในการดูดซึมต่อน้ำก็จะยิ่งสูงขึ้นตาม ในทางกลับกันหากเพิ่มอุณหภูมิให้กับสารละลายลิเทียมโบรไมด์ ปฏิกริยาในการละลายหรือจับตัวกับน้ำก็จะลดลง

อุปกรณ์ในระบบการทำความเย็นแบบดูดซึมประกอบด้วย

1. ตัวถัง (Shelf) ประกอบด้วย เครื่องดูดซึม (Absorber) และ เครื่องระเหย (Evaporator)
2. ขดท่อทำความเย็น (Chilled Water Tube)
3. ขดท่อน้ำหล่อเย็น (Cooling Water Tube)
4. เครื่องผลิต (Generator)
5. เครื่องควบแน่น (Condenser)
6. เครื่องสูบลำสารทำความเย็น (น้ำ)
7. เครื่องสูบลำสารละลาย (Absorbent Pump)
8. สารทำความเย็น (น้ำ)
9. สารละลายลิเทียมโบรไมด์ (LiBr)

ทั้งนี้กระบวนการทำความเย็นแบบดูดซึมจะมีอยู่ 5 กระบวนการดังต่อไปนี้

1. การระเหย (Evaporation)

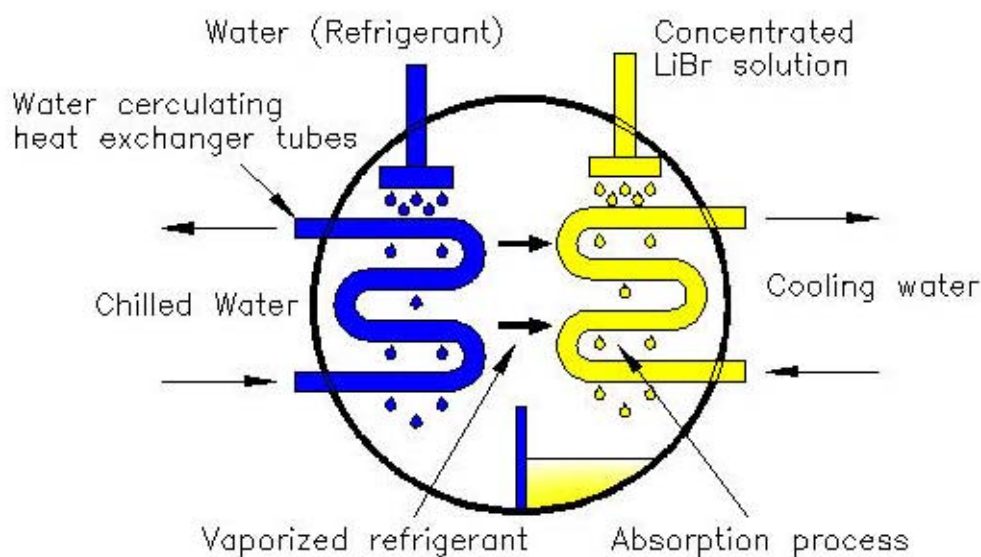


ภาพที่ 2 การทำงานของการทำความเย็นแบบดูดซึมที่เครื่องระเหย

สารทำความเย็นน้ำในเครื่องระเหยจะถูกเครื่องสูบลำทำความเย็นจากปั๊มหมุนเวียนสารทำความเย็น ซึ่งอยู่ด้านล่างของเครื่องระเหยสูบและฉีดกระจายจ่ายลงบนขดท่อทำความเย็น ที่มีน้ำเย็นหมุนเวียนไหลผ่านอย่างสม่ำเสมอเพื่อทำความเย็น สารทำความเย็นน้ำจะระเหยกลายเป็นไอโดยดูดเอาความร้อนแฝงของการระเหยจากน้ำเย็นที่ไหลหมุนเวียนอยู่ในขดท่อทำความเย็น ไอน้ำที่ระเหยออกมานั้นจะถูกดูดเข้าไปในเครื่องดูดซึมที่ติดตั้งอยู่บริเวณส่วนล่างของเครื่องระเหย

ภายในเครื่องระเหยจะต้องเป็นสุญญากาศที่ความดัน 6-7 mmHg (0.116 - 0.135 PSI) ซึ่งน้ำที่ใช้เป็นสารทำความเย็นจะระเหยที่อุณหภูมิประมาณ 5 °C (41 °F) โดยน้ำเย็นที่ไหลหมุนเวียนผ่านขดท่อทำความเย็นจะถูกลดอุณหภูมิจากอุณหภูมิ 12 °C (53.6 °F) มาเป็น 7 °C (44.6 °F)

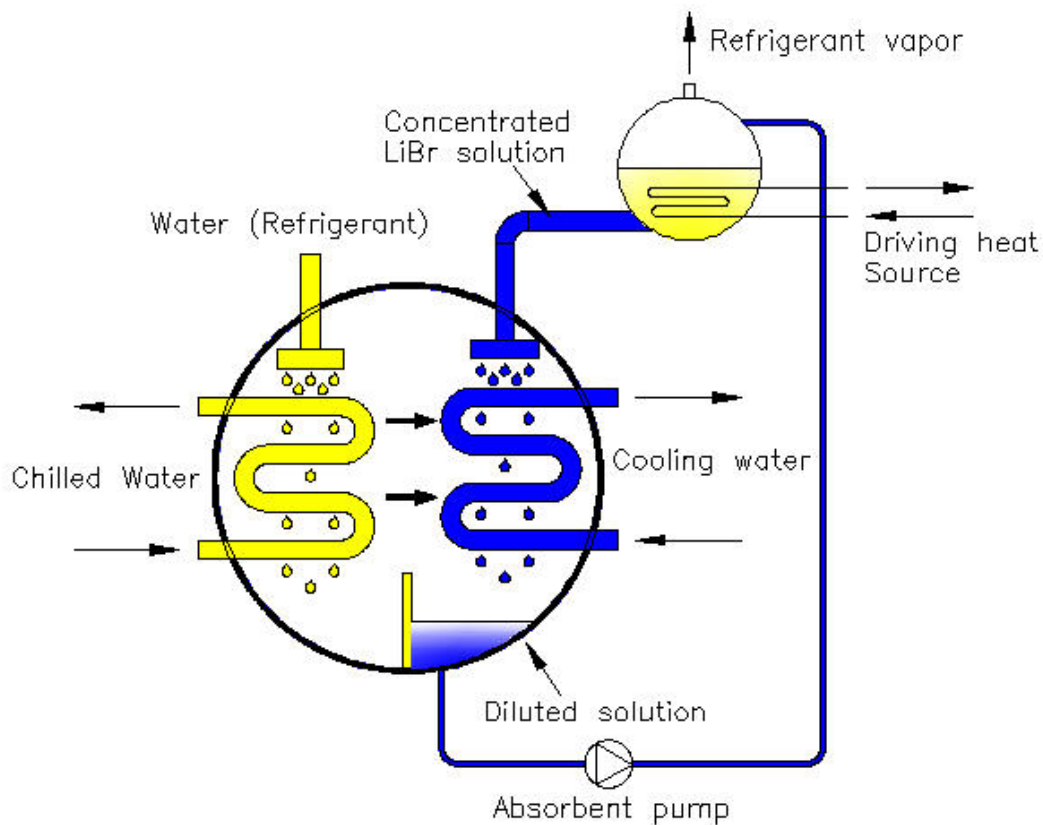
2. การดูดซึม (Absorption)



ภาพที่ 3 การทำงานของการทำความเย็นแบบดูดซึมที่เครื่องดูดซึม

ภายในเครื่องดูดซึมสารละลายเข้มข้นของลิเทียมโบรไมด์ (Concentrated Lithium Bromide) จะถูกเครื่องสูบลำลายสูบและฉีดกระจายลงบนท่อน้ำหล่อเย็นซึ่งมีน้ำหล่อเย็นไหลหมุนเวียนอยู่ตลอดเวลา โดยสารละลายเข้มข้นของลิเทียมโบรไมด์จะดูดซึมไอระเหยจากน้ำในกระบวนการการระเหยตลอดเวลาเพื่อรักษาสุญญากาศในเครื่องระเหยไว้ ระหว่างกระบวนการนี้ สารละลายลิเทียมโบรไมด์ จะถูกเจือจางลงด้วยไอระเหยของน้ำและความร้อนของการดูดซึมจะระบายออกมา เครื่องดูดซึมที่ร้อนจากความร้อนของการดูดซึมจะถูกทำให้เย็นลงด้วยน้ำหล่อเย็นหมุนเวียน

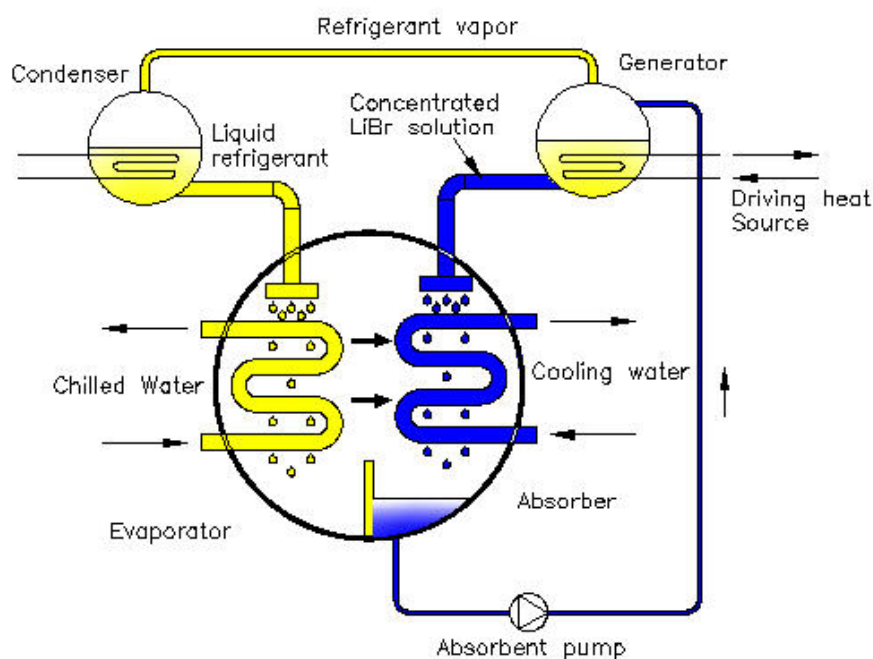
3. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger)



ภาพที่ 4 การทำงานของการทำความเย็นแบบดูดซึมที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

สารละลายลิเทียมโบรไมด์เจือจางภายในเครื่องดูดซึม จะถูกเครื่องสูบสารละลายสูบผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยสารละลายลิเทียมโบรไมด์เจือจางจะแลกเปลี่ยนความร้อนกับสารละลายลิเทียมโบรไมด์เข้มข้นที่มีอุณหภูมิสูง ทำให้สารละลายลิเทียมโบรไมด์เจือจางดังกล่าวมีอุณหภูมิสูงขึ้น เพื่อเป็นการประหยัดปริมาณความร้อนที่ต้องการในเครื่องผลิตและเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของวัฏจักรการทำความเย็นแบบดูดซึม

4. เครื่องผลิต (Generator)

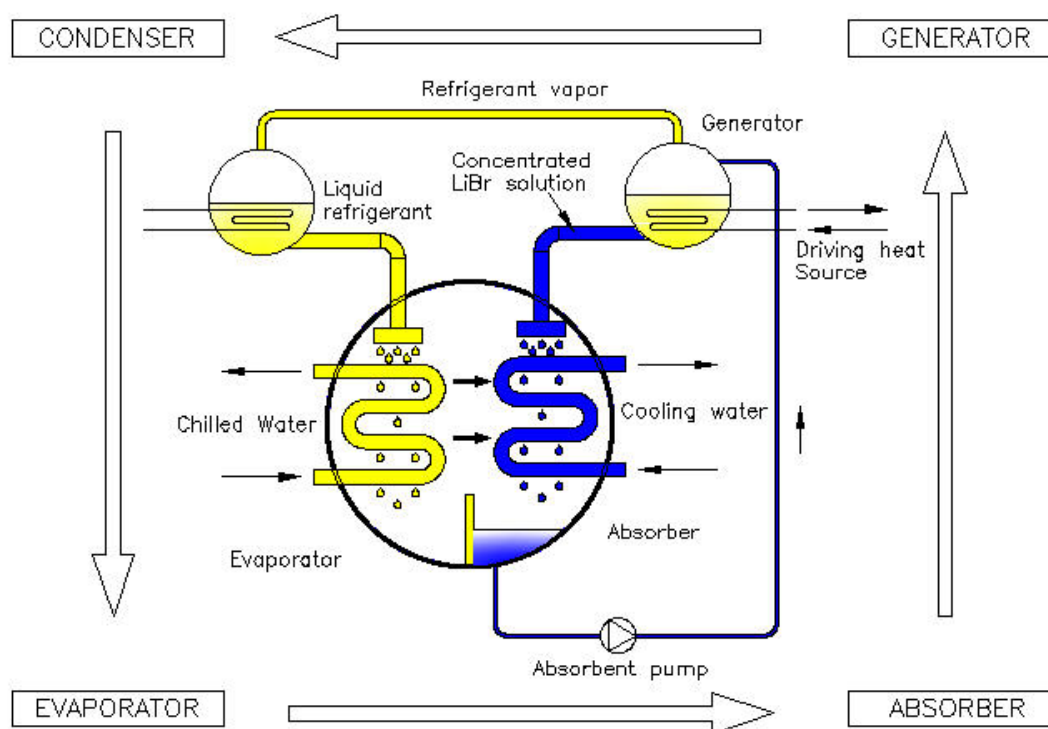


ภาพที่ 5 การทำงานของการทำความเย็นแบบดูดซึมที่เครื่องผลิต

สารละลายลิเทียมโบรไมด์เจือจางจะสะสมอยู่บริเวณด้านล่างของเครื่องผลิต ซึ่งติดตั้งอยู่เหนือเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน จะถูกทำให้ร้อนโดยท่อทำความร้อนที่ติดตั้งอยู่ในเครื่องผลิต เมื่อได้รับความร้อนสารทำความเย็นน้ำที่ผสมอยู่ในสารละลายลิเทียมโบรไมด์เจือจางจะระเหยออกไป ทำให้สารละลายที่เหลือเข้มข้นขึ้น แหล่งให้ความร้อนที่เครื่องผลิต อาจใช้น้ำความดันต่ำ น้ำร้อน ไอเสีย หรือแก๊สร้อน จากแหล่งให้ความร้อนภายนอก

สารละลายเข้มข้นของลิเทียมโบรไมด์จะไหลไปที่บริเวณของเครื่องดูดซึมผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยอาศัยความถ่วงและความแตกต่างของความดัน จากนั้นก็จะถูกเครื่องสูบลำลายให้หมุนเวียนเป็นวัฏจักรในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยความร้อนจะแลกเปลี่ยนระหว่างสารละลายลิเทียมโบรไมด์เข้มข้นและเจือจางที่เครื่องสูบลำลายสารละลายสูบลำลายเข้าไป เพื่อเป็นการประหยัดความร้อนในเครื่องผลิต ขณะเดียวกันอุณหภูมิของสารละลายลิเทียมโบรไมด์ที่เข้มข้นที่ถูกสูบลำลายเข้าไปในเครื่องดูดซึมก็จะลดลง

5. การควบแน่น (Condensation)



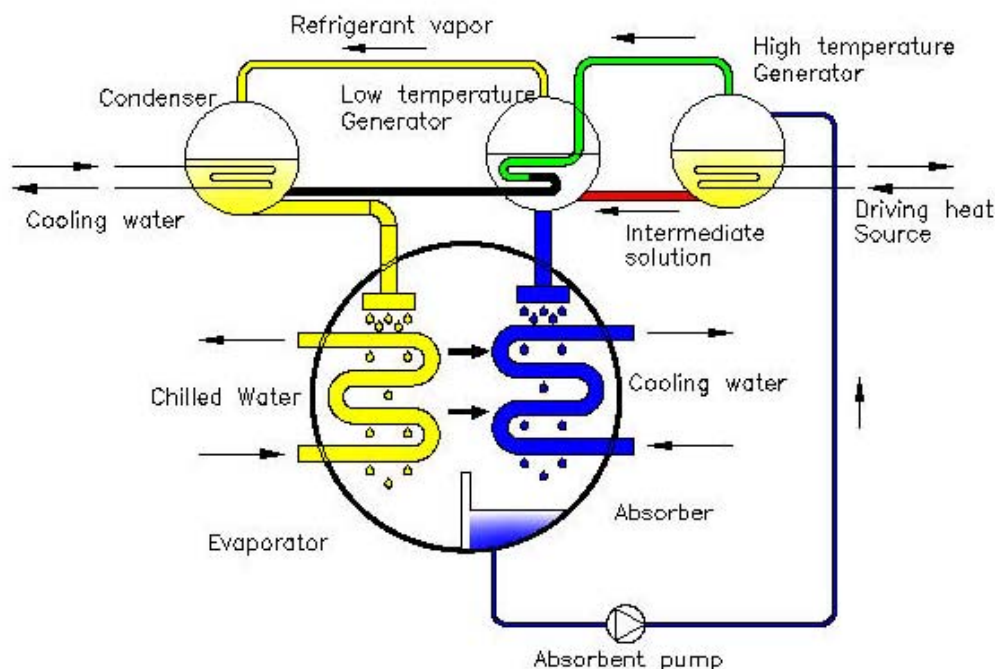
ภาพที่ 6 การทำงานของการทำความเย็นแบบดูดซึมที่เครื่องควบแน่น

ไอสารทำความเย็นน้ำที่ระเหยในเครื่องผลิตจะถูกทำให้เย็นลงและควบแน่น โดยใช้ น้ำ ไหลผ่านท่อในเครื่องควบแน่นที่ติดตั้งอยู่ส่วนบนเครื่องผลิต สารทำความเย็นที่ควบแน่นแล้วจะไหลกลับไปยังเครื่องระเหย โดยอาศัยความถ่วงและความแตกต่างของความดัน แล้วจะถูกปั๊มให้หมุนเวียนโดยเครื่องสูบลำทำความเย็น โดยความดันในส่วนบนของถังถูกคุมให้อยู่กับที่ประมาณ 70-75 mmHg (1.353 - 1.450 PSD)

ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของการทำความเย็นแบบดูดซึม (COP_{abs}) หาได้ดังนี้

$$COP_{abs} = \frac{Q_{evap}}{Q_{gen}} = \frac{\text{Cooling Capacity at Evaporator}}{\text{Heat input at Generator}} \quad (2)$$

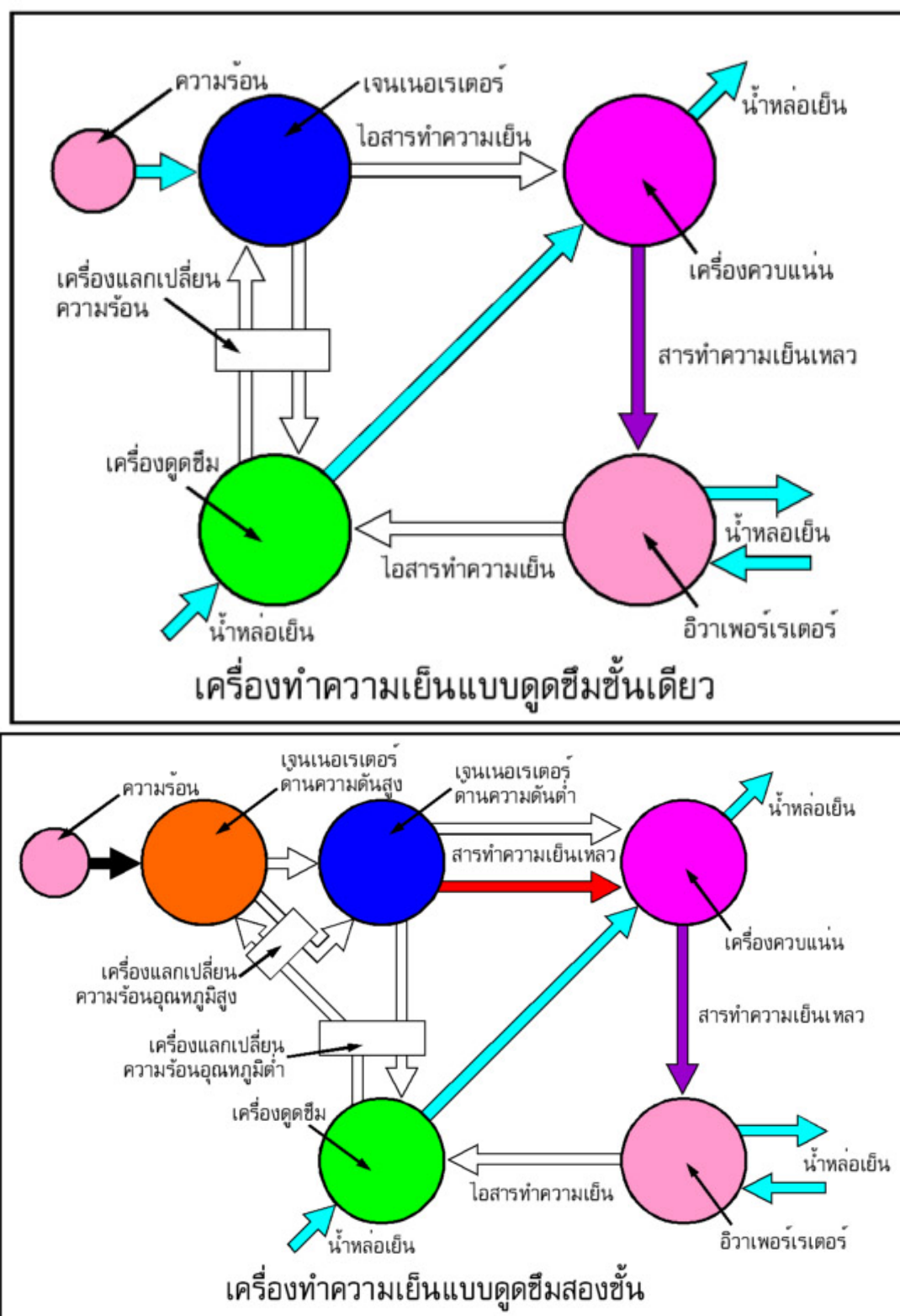
เครื่องทำความเย็นแบบดูดซึมสองชั้น



ภาพที่ 7 วัฏจักรการทำงานของเครื่องทำความเย็นแบบดูดซึม 2 ชั้น

ในเครื่องทำความเย็นแบบดูดซึมชั้นเดียว ไอสารทำความเย็นที่ระเหยออกมาจากเครื่องผลิตจะกลายเป็นสารทำความเย็นเหลว หลังจากได้ระบายความร้อนให้กับน้ำหล่อเย็นในเครื่องควบแน่น ส่วนในระบบทำความเย็นแบบดูดซึม 2 ชั้น ความร้อนแฝงของไอสารทำความเย็นที่ระเหยออกมาจากเครื่องผลิตซึ่งมีอุณหภูมิสูง จะถูกนำไปใช้สำหรับทำให้สารละลายลิเทียมโบรไมด์ในเครื่องผลิตอุณหภูมิต่ำร้อนขึ้น ดังนั้นระบบนี้จึงมีความต้องการความร้อน หรือใช้เชื้อเพลิงน้อยกว่าในการแยกสารทำความเย็นออกจากสารละลายลิเทียมโบรไมด์ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนจะดีขึ้นประมาณ 65% ของระบบทำความเย็นแบบดูดซึมชั้นเดียว

นอกจากนี้ระบบการทำความเย็นแบบดูดซึม 2 ชั้น ยังต้องการปริมาณสารทำความเย็นที่ควบแน่นในเครื่องควบแน่นน้อยกว่า ดังนั้นปริมาณความร้อนที่ระบายให้กับน้ำหล่อเย็นในเครื่องควบแน่นจะน้อยกว่าจึงทำให้สามารถใช้หอทำน้ำเย็นเล็กน้อย คือมีความสามารถในการทำน้ำเย็นประมาณ 75% ของหอทำน้ำเย็นสำหรับเครื่องทำความเย็นแบบดูดซึมชั้นเดียว (ไพบูลย์, 2543)



ภาพที่ 8 เปรียบเทียบวัฏจักรการทำงานของการดูดซึมแบบชั้นเดียวและสองชั้น

คุณสมบัติของสารทำความเย็นและสารดูดซึม (ชาญชัย, 2549)

1. สารทั้งสองสามารถรวมตัวกันได้ดี คือสารดูดซึมสามารถที่จะดูดซึมไอของสารทำความเย็นได้ดี ซึ่งเป็นผลจากการเกิดพันธะทางเคมี (Chemical Bonding) โดยทั่ว ๆ ไปจะเป็นพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen Bonding) แต่สารทั้งสองสามารถแยกออกจากกันได้เมื่อให้ความร้อนเข้าไป
2. สารต้องอยู่ในสถานะสารละลายคือ สารดูดซึมและสารทำความเย็นจะต้องอยู่ในสถานะละลายตลอดสภาพการทำงานในระบบดูดซึม
3. สารดูดซึมจะต้องไม่ระเหยกลายเป็นไอในเครื่องผลิต เพื่อให้สารทำความเย็นที่บริสุทธิ์แยกออกมา
4. สารต้องมีคุณสมบัติที่ไม่เสื่อมสภาพตลอดอายุการใช้งาน เพราะสารทั้งสองจะต้องแยกและผสมกันตลอดเวลาในการทำงาน
5. ไม่มีการกัดกร่อนต่อภาชนะที่ใช้งาน เพื่อการใช้งานที่ยาวนาน
6. ความดันในการใช้งานเหมาะสม ซึ่งในทางอุดมคติแล้วควรมีความดันต่ำ หรือสูงใกล้เคียงกับความดันบรรยากาศ เพื่อป้องกันการรั่วซึม
7. มีความปลอดภัยในการใช้งาน ไม่เป็นพิษและไม่ติดไฟง่าย
8. มีความหนืดต่ำ เพื่อการใช้งานในการไหลเวียนในระดับน้อยลง และการถ่ายเทความร้อนได้ดีขึ้น
9. มีความร้อนแฝงในการกลายเป็นไอสูง ทั้งนี้เพื่อให้สารที่ใช้ไหลเวียนในระบบน้อยลง
10. มีแรงดึงดูดต่ำ ทำให้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีขึ้น

EQUATIONS

1. $t = At' + B$
2. $t' = (t - B)/A$
3. $A = -2.00755 + 0.16976X - (3.133362E-3)X^2 + (1.97668E-5)X^3$
4. $B = 321.128 - 19.322X + 0.374382X^2 - (2.0637E-3)X^3$
5. $\log_{10}P = C + D/(t' + 459.72)^2 + E/(t' + 459.72)^2$
6. $t' = \frac{-2E}{D + [D^2 - 4E(C - \log_{10}P)]^{0.5}} - 459.72$

Temperature Range (Refrigerant) $0 < t' \leq 230^\circ\text{F}$
 Temperature Range (Solution) $40 < t \leq 350^\circ\text{F}$
 Concentration Range $45\% < X \leq 70\%$

$C = 6.21147$

$D = -2886.373$

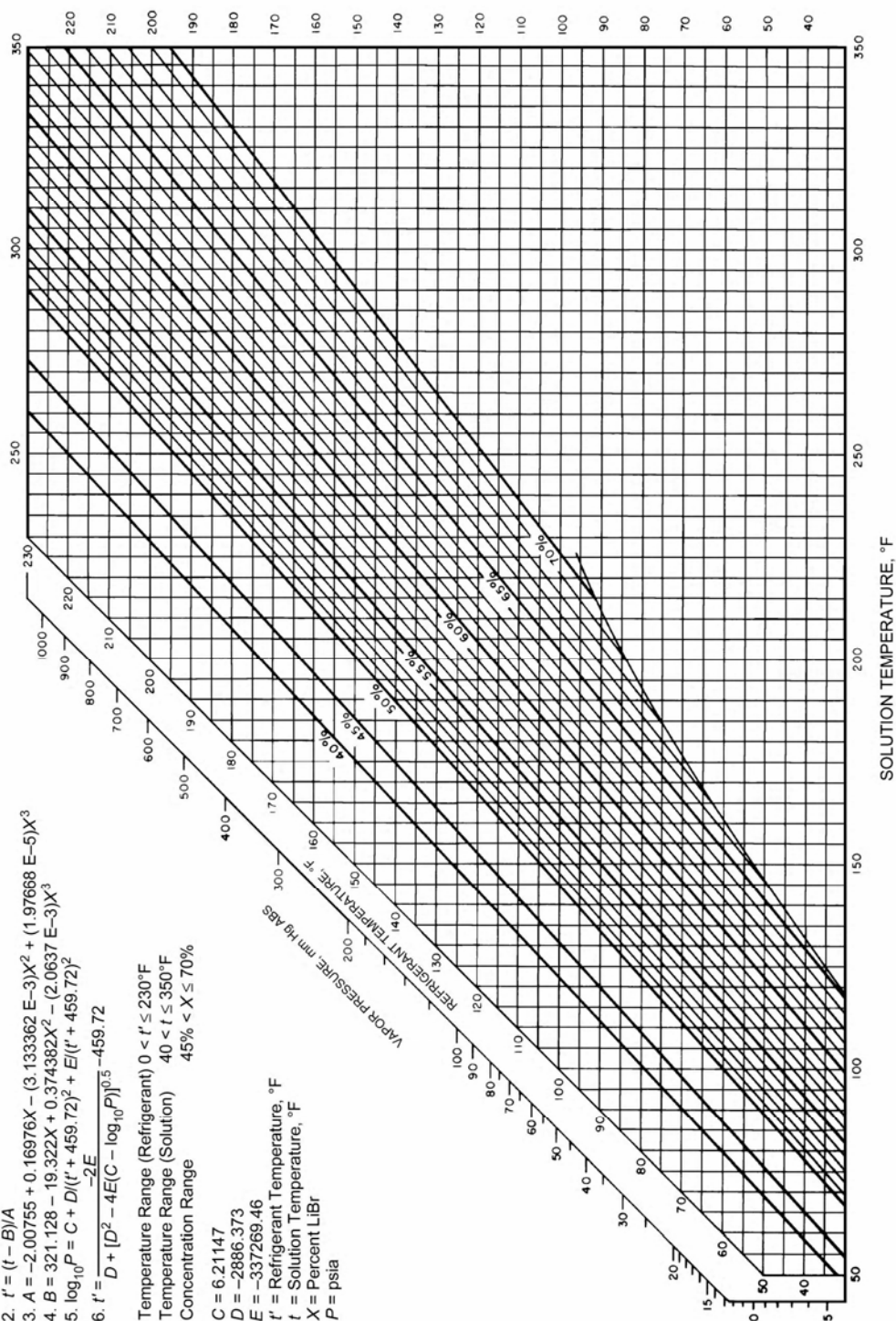
$E = -337269.46$

$t' = \text{Refrigerant Temperature, } ^\circ\text{F}$

$t = \text{Solution Temperature, } ^\circ\text{F}$

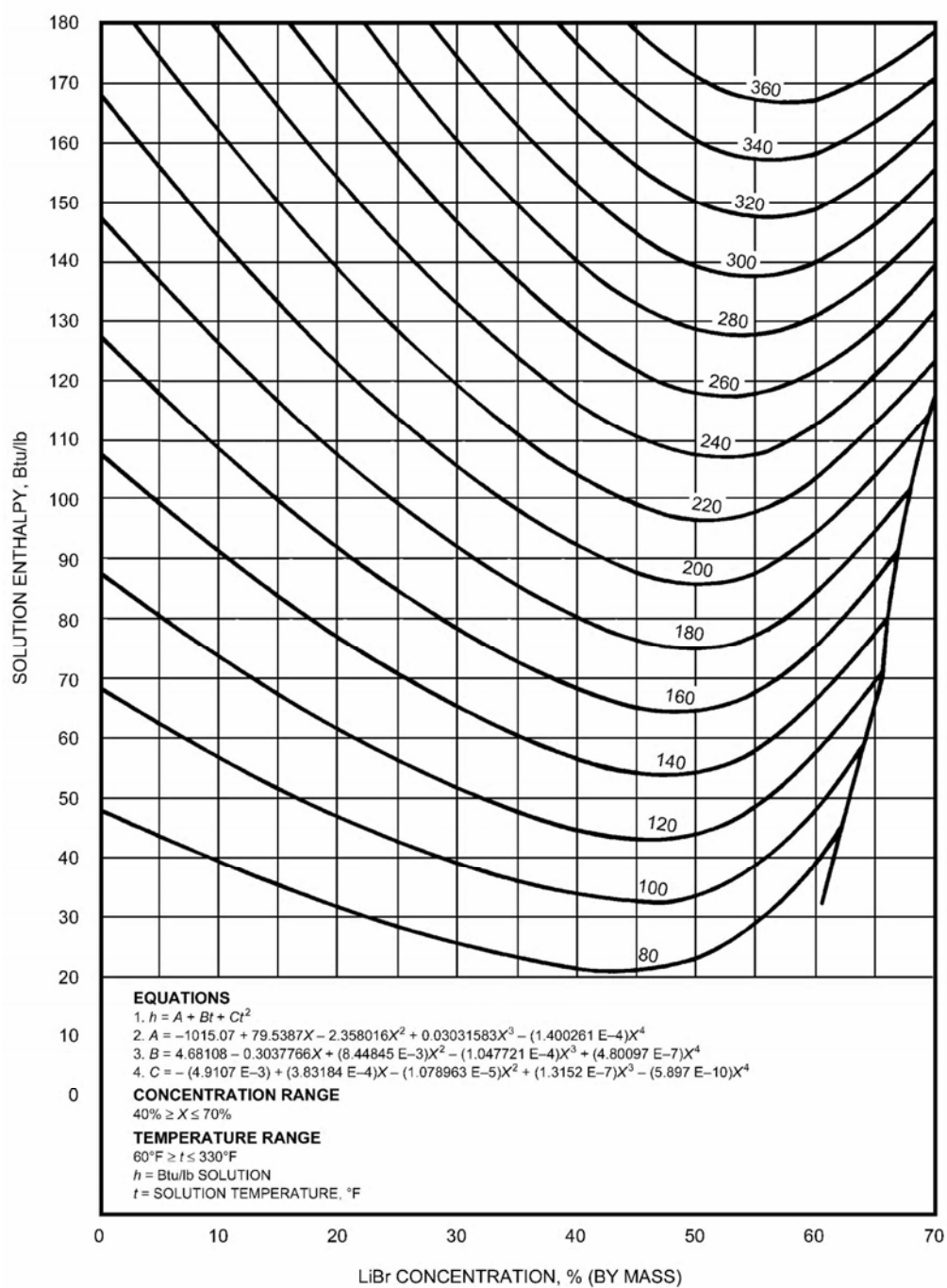
$X = \text{Percent LiBr}$

$P = \text{psia}$



ภาพที่ 9 แสดงคุณสมบัติของสารละลายลิเทียมโบรไมด์-น้ำ

ที่มา : ASHRAE (1993)



ภาพที่ 10 กราฟแสดงค่าเอนทาลปีและความเข้มข้นของสารละลายลิเทียมโบรไมด์-น้ำ
 ที่มา : ASHRAE (1993)

จากคุณสมบัติของสารละลายลิเทียมโบรไมด์และน้ำ โดยในภาพที่ 10 พบว่าทางด้านขวาของกราฟจะแสดงเส้นตกผลึกไว้ พื้นที่ที่อยู่ทางด้านใต้เส้นการตกผลึกนี้ สารละลายลิเทียมโบรไมด์-น้ำ จะมีสถานะเป็นของแข็ง ซึ่งจะมีผลเสียต่อระบบการทำงาน คือเมื่อมีการตกผลึก ของแข็งจะทำให้เกิดการปิดกั้นการไหลในท่อที่ทำงานอยู่ในส่วนของเครื่องดูดซึม จึงมีการทำงานที่ผิดพลาด การป้องกันการเกิดของแข็งนี้ทำได้โดยการลดความเข้มข้นของสารละลายเหลวไม่ให้ทำงานต่ำกว่าเส้นตกผลึก โดยความเข้มข้นของสารละลายลิเทียมโบรไมด์-น้ำ ควรมีค่าอยู่ระหว่าง $40\% \leq x \leq 70\%$ (ASHRAE, 1993)

ปั๊มความร้อน

ปั๊มความร้อนเป็นอุปกรณ์ทำความร้อนที่ใช้เครื่องอัดแบบเดียวกับที่ใช้ในเครื่องปรับอากาศ โดยดึงความร้อนจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ มาจ่ายให้แก่แหล่งความร้อนที่อุณหภูมิสูง ระบบปั๊มความร้อนที่ใช้กันมากที่สุดจะเป็นแบบระบบอัดไอ

ความเป็นมาในการใช้ปั๊มความร้อน

ปั๊มความร้อนไม่ใช่เรื่องใหม่เพราะ ได้ถูกคิดค้นมากกว่า 50 ปีมาแล้ว ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1947 และพัฒนาเรื่อยมาอย่างมากจนปัจจุบันเกือบจะเรียกได้ว่าพัฒนาสมบูรณ์แล้ว โดยมีมาตรฐานรองรับโดย ARI (Air Condition and Refrigeration Institute) ในปี ค.ศ. 1961 ซึ่งได้ระบุไว้ทั้งภาคความร้อนและความเย็น โดยตัวระบบมีความหลากหลายในส่วนประกอบและการประยุกต์ใช้งาน

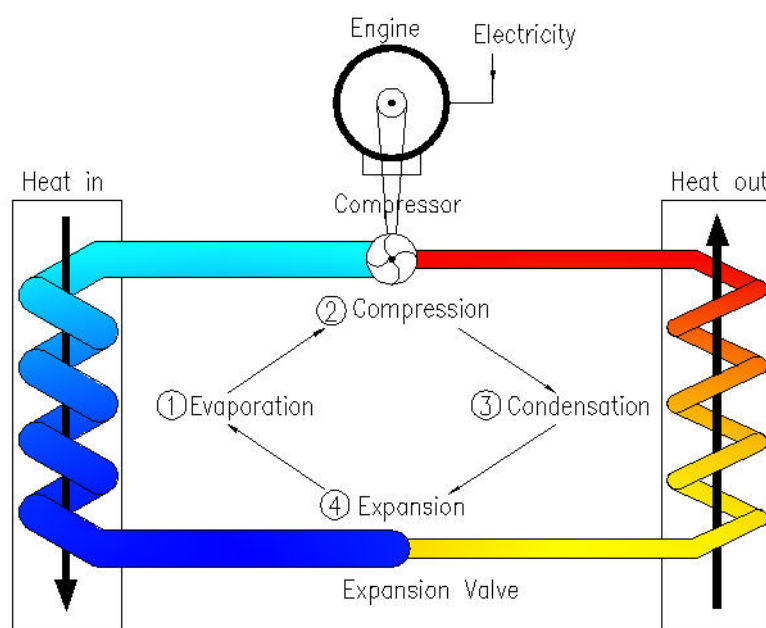
ปั๊มความร้อนเป็นเทคโนโลยีที่ยังไม่แพร่หลายในประเทศไทย เพราะมักจะสนใจแต่การทำ ความเย็นเนื่องจากสภาพภูมิอากาศในบ้านเรานั้นไม่หนาวมาก แต่ในความเป็นจริงแล้วปั๊มความร้อนจะใช้งานได้ดีในเขตเมืองร้อนมากกว่าเขตเมืองหนาว และถ้าออกแบบให้ดีจะสามารถใช้ อุปกรณ์ชุดเดียวกันนี้ในการทำความร้อนและการทำความเย็นตามแต่ฤดูกาล

ผลการทดสอบจากห้องทดลองและการวิเคราะห์ทางทฤษฎียืนยันได้ว่าเทคโนโลยีนี้เป็น เทคโนโลยีที่ดีในด้านเทคนิค ซึ่งช่วยลดการใช้พลังงานหลักลงได้ แต่อย่างไรก็ตามแบบดังกล่าวมี ข้อด้อย คือต้นทุนมีราคาสูง และผู้ดูแลต้องเป็นผู้ที่ต้องได้รับการฝึกฝนมาอย่างดี นอกจากนี้การ ทำงานที่อุณหภูมิสูงมากๆจะมีปัญหาเกี่ยวกับการเลือกสารทำงาน ดังนั้นผู้ที่ต้องการจะนำปั๊มความร้อน

มาใช้ประโยชน์จะต้องคำนึงถึงช่วงอุณหภูมิที่ใช้งานและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ประกอบด้วย ซึ่งในประเทศสหรัฐอเมริกามีการใช้ปั๊มความร้อนสูงถึง 38% ของความต้องการใช้เครื่องทำน้ำร้อน โดยในปี 1988 ได้มีการขายอุปกรณ์ปั๊มความร้อนในตลาดเป็นครั้งแรก (ทนงเกียรติ, 2543)

หลักการทำงานของปั๊มความร้อน

หลักการทำงานของปั๊มความร้อนคือการถ่ายเทความร้อนไม่ใช่การสร้างความร้อน กล่าวคือ ปั๊มความร้อนทำงานโดยการดึงความร้อนจากแหล่งความร้อน (Heat Source) แล้วนำไปถ่ายเทในบริเวณที่ต้องการความร้อน (Heat Sink) ส่วนเหตุนี้จึงถูกเรียกว่าปั๊มความร้อน ซึ่งวัฏจักรการทำงานก็ไม่ได้แตกต่างจากระบบทำความเย็นทั่วไปที่มีใช้กันอยู่ซึ่งเป็นระบบอัดไอ (Mechanical Vapor Compression Refrigeration System) ต่างกันเพียงแต่ปั๊มความร้อนจะเลือกใช้ประโยชน์จากด้านความร้อนเป็นหลัก และควบคุมอุณหภูมิด้านความร้อนแทนด้านความเย็น ส่วนความเย็นที่ได้จะเป็นผลพลอยได้ของระบบ



ภาพที่ 11 การทำงานของระบบปั๊มความร้อนแบบอัดไอ

อุปกรณ์หลักของระบบปั๊มความร้อนแบบอัดไอประกอบด้วย เครื่องอัดไอ (Compressor), คอยล์ร้อน (Condenser), คอยล์เย็น (Evaporator) และวาล์วลดความดัน (Expansion Valve) ในวงจรการทำงานจะมีสารทำความเย็นที่ระเหยง่ายรับความร้อนในคอยล์เย็นจากแหล่งความร้อน ทำให้สาร

ทำความเย็นเดือดกลายเป็นไอที่อุณหภูมิต่ำ ไอที่ได้จะถูกอัดตัวโดยเครื่องอัดไอให้มีอุณหภูมิและความดันสูง และไปควบแน่นในคอยล์ร้อน โดยสารทำความเย็นจะคายความร้อนออกไปให้กับน้ำ ทำให้ได้น้ำร้อน จากนั้นสารทำความเย็นจะกลายเป็นของเหลวความดันสูง และจะถูกลดความดันอย่างรวดเร็วผ่านวาล์วลดความดันจนสารทำงานบางส่วนกลายเป็นไอหรือพร้อมที่จะระเหยเมื่อได้รับความร้อนที่คอยล์เย็นอีกครั้ง

ค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของปั๊มความร้อน ($COP_{\text{heat pump}}$) หาได้ดังนี้

$$COP_{\text{heat pump}} = \frac{Q_{\text{hot coil}}}{Q_{\text{comp}}} = \frac{\text{Heat reject at hot coil}}{\text{Work input at Compressor}} \quad (3)$$

ชนิดของปั๊มความร้อน

1. ปั๊มความร้อนในอุตสาหกรรม

1. Mechanical Vapor Recompression System (MVRs) แบ่งได้เป็นปั๊มความร้อนแบบเปิดและกึ่งเปิด แบบเปิดนั้นไอของสารทำงานจะถูกอัดจนความดันสูงและอุณหภูมิสูงแล้วควบแน่นเมื่อคายความร้อนออก โดยสารทำงานสัมผัสโดยตรงกับแหล่งความร้อนและแหล่งปล่อยความร้อน แบบกึ่งเปิดนั้นความร้อนจากไอจะถ่ายเทให้กับกระบวนการผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน บริเวณแหล่งความร้อนหรือแหล่งปล่อยความร้อน ปกติแล้วสมรรถนะการทำงานของปั๊มความร้อนชนิดนี้จะค่อนข้างสูง ซึ่งดูได้จากค่า COP ที่มีค่าระหว่าง 10-30 ส่วนการทำงานของปั๊มความร้อนชนิดนี้จะได้รับความร้อนมาจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิ 70-80 °C และทำความร้อนได้สูงถึง 120-150 °C และบางกรณีอาจสูงถึง 200 °C โดยมักจะใช้น้ำเป็นสารทำงานซึ่งใช้กันมากในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี

2. Closed Cycle Compression Heat Pump ปั๊มความร้อนแบบปิดคือการที่สารทำงานอยู่ในระบบปิด กล่าวคือแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งในเครื่องระเหยและเครื่องควบแน่น สารทำงานจำกัดอุณหภูมิความร้อนที่ได้ 120 °C

3. Absorption Heat Pump ป้อนความร้อนแบบนี้ไม่มีการใช้งานในอุตสาหกรรมมากนัก มักใช้เพื่อนำความร้อนกลับมาใช้ โดยอุณหภูมิที่ได้ออกมาประมาณ $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ และทำอุณหภูมิสูงขึ้นได้ $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ ค่า COP มีค่าอยู่ระหว่าง 1.2 ถึง 1.4 แต่ป้อนความร้อนแบบใหม่ให้อุณหภูมิที่ได้สูงถึง $260\text{ }^{\circ}\text{C}$

4. Heat Transformers จะมีส่วนประกอบเหมือนกับแบบ Absorption Heat Pump สามารถนำความร้อนทิ้งที่เหลือใช้ที่อุณหภูมิต่ำกลาง (ระหว่างระดับความร้อนที่ต้องการกับระดับความร้อนของสภาพแวดล้อม) มาใช้กับระบบนี้ได้โดยไม่ต้องใช้พลังงานจากภายนอก ความร้อนระดับกลางจะถูกส่งให้กับเครื่องระเหยและเครื่องผลิต ความร้อนส่วนที่ใช้ประโยชน์ได้ก็จะส่งต่อไปยังเครื่องดูดซึม ในปัจจุบันจะใช้ลิเทียมโบรไมด์-น้ำเป็นสารทำความเย็นคู่กัน อุณหภูมิที่ได้จากระบบนี้จะสูงถึง $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ และทำอุณหภูมิสูงขึ้นมาได้ $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ มีค่า COP ระหว่าง 0.45-0.48

5. Reversed Brayton-Cycled Heat Pump ใช้หลักการในการนำกลับของสารละลายจากแก๊สในกระบวนการผลิต อากาศที่มีสารละลายจะถูกอัดแล้วขยายตัว จากนั้นจะควบแน่นและวนในกระบวนการนี้ซ้ำอีกครั้ง การขยายตัวและการวนกลับที่กล่าวมาจะเกิดในกังหันซึ่งขับเคลื่อนอัด

2. ป้อนความร้อนในที่พักอาศัยและอาคารพาณิชย์

1. Heating Only เป็นแบบที่ใช้งานโดยเน้นภาคความร้อนเป็นหลักโดยจะทำความร้อนให้แก่บ้านหรืออาคารก็ได้

2. Heating and Cooling แบบที่ง่ายที่สุดคือ Reversible air-to-air Heat Pump ซึ่งในอาคารใหญ่ๆ มักจะใช้วงจรน้ำเป็นตัวส่งถ่ายความร้อนและความเย็น จึงสามารถทำได้พร้อมกัน

3. Integrated System คือการทำทั้งความร้อนและความเย็น ซึ่งทำให้กับน้ำหรืออากาศรวมทั้งมีการนำไอร้อนกลับมาใช้งาน

4. Water Only มักใช้อากาศภายนอกเป็นแหล่งความร้อน แต่หากมีความร้อนจากแหล่งอื่นที่สูงกว่าก็ใช้ได้เช่นกัน ในกรณีที่ยึดการใช้งานด้านใดด้านหนึ่งเป็นหลัก ก็จะถูกเรียกว่า

เป็นแบบโมโนวาเลนต์ (Monovalent) แต่ถ้าต้องการทั้งสองด้านก็จะเป็นแบบไบวาเลนต์ (Bivalent) ในกรณีของโมโนวาเลนต์ขนาดของปั๊มความร้อนจะมีขนาดเป็น 20-60% ของภาระสูงสุด ซึ่งจะรองรับความต้องการได้ถึง 50-95% ของความต้องการตลอดปี แต่ในช่วงการใช้งานสูงสุดอาจต้องใช้ความร้อนจากแก๊สหรือหม้อน้ำช่วย ในอาคารขนาดใหญ่อาจต้องร่วมกับระบบความร้อนร่วม

สารทำความเย็นที่ใช้ในปั๊มความร้อน

สารคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (CFCs) และสารไฮโดรคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (HCFCs) ได้ถูกนำมาใช้เป็นสารทำงานในปั๊มความร้อนในรอบ 20 ปีที่ผ่านมา ซึ่งมีคุณสมบัติตรงกับความต้องการที่สุดของสารทำงานทั้งทางด้านอุณหภูมิและความมีเสถียรภาพทางเคมี แต่สาร CFCs มีผลต่อการทำลายโอโซนในชั้นบรรยากาศสตราโตสเฟียร์ ซึ่งมีความสำคัญเนื่องจากเป็นเสมือนเกราะป้องกันไม่ให้รังสีอัลตราไวโอเลต (ยูวี) ซึ่งเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตบนโลกตกลงมาในบรรยากาศโลกได้ ประกอบกับการค้นพบรูรั่วของชั้นโอโซนที่แอนตาร์กติกในปลายปี พ.ศ. 2528 ทำให้หลายส่วนตระหนักถึงภัยของปัญหานี้และเห็นว่าจำเป็นต้องมีมาตรการลดการใช้สารทำลายโอโซนอย่างเข้มงวดขึ้น ในปีเดียวกันนี้จึงได้เกิดอนุสัญญาเวียนนา (Vienna Convention) ซึ่งเป็นอนุสัญญาที่ว่าด้วยเรื่องการป้องกันชั้นโอโซนในบรรยากาศโลก โดยโครงการสิ่งแวดล้อมแห่งสหประชาชาติ หลังจากนั้นอีก 2 ปี พิธีสารมอนทรีออล จึงถูกจัดทำขึ้นเมื่อ 16 กันยายน พ.ศ. 2530

เป้าหมายของอนุสัญญาเวียนนานั้นในเรื่องการประสานความร่วมมือด้านการวิจัย การเฝ้าสังเกตการณ์ชั้นโอโซนอย่างเป็นระบบ การติดตามการผลิตสาร CFCs และการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างกัน ส่วนพิธีสารมอนทรีออลมีเป้าหมายเพื่อให้ประเทศต่าง ๆ ร่วมกันจัดทำแผนดำเนินการกำหนดมาตรการควบคุมการผลิต การใช้ การจำกัด การลดหรือเลิกใช้สารเคมีที่ทำลายชั้นโอโซน ได้แก่ คลอโรฟลูออโรคาร์บอน ฮาโลน คาร์บอนเตตระคลอไรด์ เมทิลคลอโรฟอร์ม และเมทิลโบรไมด์ รวมทั้งติดตามตรวจสอบและประสานงานเพื่อดำเนินการลดและเลิกใช้สารเคมีที่ทำลายชั้นโอโซนตามวัตถุประสงค์อย่างเป็นรูปธรรมและที่มีผลบังคับทางกฎหมาย

โปรแกรม EES

โปรแกรม EES (EES หรือย่อมาจาก Engineering Equation solver) เป็นโปรแกรมที่ใช้แก้ปัญหาทางพีชคณิตโดยใช้แก้ปัญหасмการอนุพันธ์ สมการปริพันธ์ และสามารถวิเคราะห์สมการเชิงเส้น และไม่เชิงเส้นได้ รวมถึงแปลงหน่วยและตรวจสอบหน่วยให้ถูกต้อง นอกจากนี้ยังสามารถเขียนกราฟเพื่อให้ง่ายต่อการเข้าใจได้

โปรแกรม EES มีความแตกต่างกับโปรแกรมคำนวณอื่น 2 อย่างหลักคือ อย่างที่หนึ่งคือ สามารถใส่ตัวแปรที่ไม่รู้ค่าจำนวนเท่าไรก็ได้ ซึ่งต้องสัมพันธ์กับจำนวนสมการ ไว้ที่ใดก็ได้ไม่จำเป็นต้องเรียงในสมการ โปรแกรมจะทำคำสั่งซ้ำอย่างอัตโนมัติ อย่างที่สอง คือ EES ได้ใส่ค่าทางคณิตศาสตร์และคุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ เพื่อใช้คำนวณในทางวิศวกรรมศาสตร์ ตัวอย่างเช่น ตารางคุณสมบัติของไอน้ำ ซึ่งสามารถหาค่าทางอุณหพลศาสตร์ของไอน้ำโดยการป้อนค่าในฟังก์ชันสำเร็จรูปเพียงแค่ทราบค่าคุณสมบัติเพียง 2 อย่างของไอน้ำ ในทำนองเดียวกันสามารถใช้ได้กับสารทำความเย็นส่วนมาก รวมทั้ง แอมโมเนีย มีเทน คาร์บอนไดออกไซด์ และของเหลวอื่นๆ อีก

นอกจากนี้โปรแกรม EES ยังมีประโยชน์มากสำหรับการออกแบบที่มีปัญหาซึ่งขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์หลายๆตัว โดยสามารถแสดงในรูปของตาราง โดยเมื่อผู้ใช้เขียนโปรแกรมการทำงานเสร็จ สามารถระบุตัวแปรตามที่ต้องการทราบค่าในตาราง แล้วทำการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรอิสระ โปรแกรมจะทำการคำนวณแล้วแสดงผลในรูปของตารางที่ได้กำหนดไว้ ทั้งยังสามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรได้อีกด้วย

งานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง

มนตรี (2535) ได้ทำการจำลองระบบทำความเย็นแบบอัดไอเพื่อศึกษาตัวแปรในสภาวะการทำงาน of ระบบ ตามค่ากำหนดของตัวแปรป้อนเข้า (Input variables) และตัวแปรตรึง (Fix variables) โดยเน้นศึกษาเกี่ยวกับระบบที่ทำงานต่อเนื่องภายใต้สภาวะคงตัว (Steady state) ซึ่งจะอาศัยเทคนิคของการวิเคราะห์ด้วยกราฟ และวิธีการแทนค่าสืบเนื่อง (Successive substitution) โดยการสร้างสมการจากกราฟหรือแผนภูมิแสดงสมรรถนะของแต่ละอุปกรณ์นั้น พบว่าการสร้างสมการจากกราฟหรือแผนภูมิแสดงสมรรถนะของแต่ละอุปกรณ์นั้น ในทางปฏิบัติจะอาศัยคอมพิวเตอร์ช่วยซึ่งมีโปรแกรมสำเร็จรูปไว้ใช้แล้ว ดังนั้นการกำหนดคิกริชของโพลีโนเมียลอย่างเหมาะสม จะเป็นผลให้ค่าความคลาดเคลื่อนจากของมูลในแผนภูมิมิมีค่าต่ำลง

ชล่ำ (2538) ได้จำลองและทดสอบเครื่องทำความเย็นแบบดูดซึม เป็นการออกแบบสร้างและทดสอบเครื่องทำความเย็นแบบดูดซึม ซึ่งใช้น้ำเป็นสารทำความเย็นและลิเทียมโบรไมด์เป็นสารดูดซึม โดยให้สารละลายนี้มีความเข้มข้น 55% โดยน้ำหนัก ให้ความสามารถในการทำ ความเย็นของอุปกรณ์มีขนาด 1 ตันความเย็น โดยใช้ชุดลดไฟฟ้าเป็นแหล่งให้ความร้อนแก่เครื่องผลิต ให้มีอุณหภูมิระหว่าง 85°C ถึง 95°C ผลการทดสอบพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การทำงาน of ระบบ (Coefficient Of Performance) อยู่ในช่วง 0.15-0.45 และอุณหภูมิของสารทำความเย็นต่ำสุดที่ได้มีค่า 14°C เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การทำงาน of ระบบจะถูกจำกัดด้วยค่าประสิทธิผล (Effectiveness) ของเครื่องดูดซึม และความดันสุญญากาศในเครื่องระเหย ดังนั้นจึงทำให้สมรรถนะของเครื่องทำความเย็นที่สร้างนี้มีเพียง 0.5 ตันความเย็น เท่านั้น

วุฒิชัย และคณะ (2546) ได้ออกแบบสมรรถนะของระบบทำความเย็นแบบดูดซึม โดยใช้ความร้อนที่จากไอเสียเครื่องยนต์ 4 สูบ 4 จังหวะ 2,500 ซีซี เป็นแหล่งความร้อนของเครื่องผลิตซึ่งมีอุณหภูมิระหว่าง $142-267^{\circ}\text{C}$ ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1,500-3,000 รอบต่อนาที และใช้ลิเทียมโบรไมด์-น้ำเป็นสารทำงาน การทดลองสามารถหาอัตราการทำความเย็นสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะ และประสิทธิภาพของอุปกรณ์ในระบบได้ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะ 0.82 และมีอัตราการทำความเย็น 0.5-0.6 กิโลวัตต์

จารุวัฒน์ และคณะ (2548) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะปั๊มความร้อนร่วมระบบผลิตน้ำร้อนแสงอาทิตย์ ที่ใช้ R-134a และ R-22 เป็นสารทำงาน โดยมีอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

แบบแผ่นทำน้ำที่เป็นคอยล์ร้อนในระบบปั้มความร้อน ทำงานร่วมกับถึงสะสมพลังงานปริมาตร 100 ลิตร สำหรับผลิตน้ำร้อนอุณหภูมิ 50-550 °C ในรูปแบบต่าง ๆ จากการทดสอบพบว่าปั้มความร้อนสามารถถ่ายเทความร้อนที่คอยล์ร้อนได้ 1.0-1.9 kW สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของระบบที่ใช้ R-22 มี COP = 5.28-3.24 สูงกว่าระบบที่ใช้ R-134a เป็นสารทำงาน ที่มี COP = 4.52-3.12 แปรผันตามอัตราการระบายความร้อนที่คอยล์ร้อน ในขณะที่ระบบที่ใช้ปั้มความร้อนทำน้ำที่เป็นแหล่งความร้อนเสริมในระบบทำน้ำร้อนแสงอาทิตย์ มีประสิทธิภาพของการทำน้ำร้อนสูงสุดเท่ากับ $(\eta_{system})_{R-22} = 2.05$ และ $(\eta_{system})_{R-134a} = 1.97$ และอัตราส่วนประสิทธิภาพทางพลังงาน (EER) ของระบบปั้มความร้อนร่วมระบบผลิตน้ำร้อนแสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับ $EER_{R-22} = 2.17$ และ $EER_{R-134a} = 2.00$ โดยอัตราการใช้พลังงานของปั้มความร้อนร่วมระบบผลิตน้ำร้อนแสงอาทิตย์ มีค่าประมาณ 1.37 kW ต่ำกว่าระบบทำน้ำร้อนด้วยแผงความร้อนไฟฟ้า ที่ใช้พลังงานประมาณ 3.25 kW

ชาญชัย (2549) ได้ทำการศึกษาค่าพารามิเตอร์ ที่มีผลต่อสมรรถนะของระบบทำความเย็นแบบดูดซึม โดยการจำลองระบบทำความเย็นแบบดูดซึมขนาด 12,000 Btu/hr โดยใช้สารละลายลิเทียมโบรไมด์-น้ำ กำหนดให้น้ำเป็นของไหลทำงาน และลิเทียมโบรไมด์เป็นสารดูดซึม โดยสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม Matlab เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของสมรรถนะของระบบโดยมีพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลง เช่น ประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน อุณหภูมิของเครื่องผลิต อุณหภูมิของเครื่องระเหย อุณหภูมิของเครื่องควบแน่นและอุณหภูมิของเครื่องดูดซึม จาก ผลการวิเคราะห์พบว่า ค่าประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ที่เหมาะสมมีค่าประมาณ 0.8 และ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของ 4 ส่วนประกอบหลัก ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ของสมรรถนะเปลี่ยนแปลงอย่างมาก และผลจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์พบว่า สภาพะการการทำงานที่เหมาะสมสำหรับค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 0.8 คือ อุณหภูมิที่เครื่องผลิตเท่ากับ 90 °C อุณหภูมิที่เครื่องระเหยเท่ากับ 7 °C อุณหภูมิที่เครื่องควบแน่นเท่ากับ 45 °C อุณหภูมิที่เครื่องดูดซึมเท่ากับ 33 °C ซึ่งทำให้ ค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของระบบมีค่าเท่ากับ 0.78

Mohanty and Paloso (1995) ได้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้ากังหันก๊าซ โดย ประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้ากังหันและโรงไฟฟ้าพลังความร้อนรวมขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของอากาศที่เข้าเครื่องอัดอากาศ โดยประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้าจะสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิของอากาศที่เข้าเครื่องอัดอากาศลดลง โดยงานวิจัยนี้เสนอแนวทางการทำความเย็นให้กับอากาศที่เข้าเครื่องอัดอากาศของโรงไฟฟ้ากังหันก๊าซที่ตั้งอยู่ในเขตร้อน ซึ่งผู้วิจัยใช้ข้อมูลสภาวะอากาศของกรุงเทพเป็นตัวอย่าง โดยติดตั้งเครื่องทำความเย็นแบบดูดซึมเข้ากับ HRSG (Heat Recovery Steam Generator) โดยใช้

ความร้อนจากก๊าซไอเสียของกังหันก๊าซผลิตไอน้ำขับเคลื่อนกังหันไอน้ำ และไอน้ำส่วนหนึ่งจะถูกนำไปใช้เป็นแหล่งความร้อนของเครื่องทำความเย็นแบบดูดซึม เพื่อผลิตความเย็นให้กับอากาศที่เข้าเครื่องปรับอากาศจนอุณหภูมิลดลงเป็น 15°C ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจากเดิม 8 – 13% กำลังผลิตไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจากเดิม 11% เมื่อคิดเงินลงทุนติดตั้งระบบทำความเย็นแบบดูดซึมคิดเปรียบเทียบกับเงินลงทุนก่อสร้างโรงไฟฟ้ากังหันก๊าซจาก 100 MW เพิ่มอีก 13 % (13 MW) ซึ่งเป็นค่าประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้ากังหันก๊าซที่เพิ่มขึ้น เมื่อติดตั้งระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนแล้วพบว่า ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนใช้เงินลงทุนเพียง 0.25 เท่าของเงินลงทุนก่อสร้างโรงไฟฟ้ากังหันก๊าซ

Talbi and Agnew (2000) ได้ทำการออกแบบระบบการทำความเย็นแบบดูดซึม (Single Effect Absorption Refrigeration Cycle) โดยใช้ลิเทียมโบรไมด์-น้ำ เป็นสารคู่ทำงาน โดยใช้ความร้อนเหลือทิ้งจากก๊าซอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นแหล่งความร้อนให้กับระบบ แล้วทำการหาพารามิเตอร์ต่างๆ ในแต่ละอุปกรณ์และค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของระบบ จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์โดยนำหลักการหลักการพื้นฐานทางอุณหพลศาสตร์ร่วมกับกฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์มาเขียนในโปรแกรม FORTRAN77 เพื่อใช้ในวิเคราะห์ จากผลการทดสอบโปรแกรมสามารถแสดงประสิทธิภาพในแต่ละอุปกรณ์ของระบบได้ และพบว่าปริมาณความร้อนในเครื่องควบแน่นจะสูงกว่าในเครื่องระเหยเล็กน้อย เนื่องจากเกิดไอร้อนยิ่งยวดในเครื่องควบแน่น และปริมาณความร้อนในเครื่องควบแน่นและเครื่องระเหยจะมีค่าน้อยกว่าปริมาณความร้อนในเครื่องผลิตและเครื่องดูดซึมประมาณ 27.8% ซึ่งความแตกต่างนี้มีสาเหตุหลักมาจากความร้อนของการผสมสารละลาย โดยจะไม่พบในของเหลวบริสุทธิ์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการทำความเย็นแบบดูดซึมมีผลเนื่องจากวิธีทางกฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์ เพราะว่าเกิดการสูญเสียแบบย้อนกลับไม่ได้ในกระบวนการถ่ายเทความร้อนที่ไม่ได้ถูกรวมในกระบวนการสมดุลพลังงาน ซึ่งค่าดังกล่าวพบว่ามีค่ามาก

Florides et al. (2003) ได้นำเสนอวิธีการหาค่าลักษณะเฉพาะของระบบ และสมรรถนะของเครื่องทำความเย็นแบบดูดซึม ที่ใช้สารลิเทียมโบรไมด์-น้ำ เป็นคู่สารทำงาน จากนั้นจึงนำเสนอผลการถ่ายเทความร้อน และสมการที่เหมาะสมมาใช้อธิบายคุณสมบัติของสารทำงานที่กำหนดไว้ โดยนำค่าจากการคำนวณทางทฤษฎีมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้มากจากเครื่องทำน้ำเย็นขนาด 1 kW จากการทดสอบโปรแกรมคอมพิวเตอร์ พบว่าถ้าสัดส่วนเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของสารละลายลิเทียมโบรไมด์ที่ทางเข้าและทางออกของเครื่องดูดซึมมีค่ามาก จะทำให้อัตราการไหล

ของสารละลายมีค่าน้อย และเพื่อให้ระบบสามารถทำงานได้ในสภาวะดังกล่าว จึงจำเป็นที่จะต้องรักษาอุณหภูมิที่ออกจากเครื่องดูดซึมให้ต่ำกว่าเดิม เมื่อกำหนดให้ความดันและอุณหภูมิที่จุดอื่นคงที่ ค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของการทำความเย็นแบบดูดซึมจะมีค่าลดลง เมื่ออุณหภูมิที่เครื่องผลิตเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบโดยเมื่อเพิ่มพื้นที่ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ทั้งนี้อุณหภูมิของสารละลายที่ออกจากเครื่องดูดซึมควรมีค่าประมาณ $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งจะทำให้เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของสารละลายลิเทียมโบรไมด์ที่ทางออกมีค่ามากกว่า 58%

Adewusi and Zubair (2004) ได้ทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพระบบทำความเย็นแบบดูดซึมแบบชั้นเดียวและ 2 ชั้น ที่ใช้สารละลายแอมโมเนีย-น้ำเป็นสารทำงาน โดยทำการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ แล้วคำนวณ หาค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะ (COP) และเอนโทรปีก่อก่เกิด ($\dot{S}_{tot}$) จากคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิค เมื่อสภาวะต่างๆเปลี่ยนแปลง โดยผลการวิจัยพบว่าการทำความเย็นแบบ 2 ชั้น จะมีค่าเอนโทรปีก่อก่เกิดและสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะสูงกว่าการทำความเย็นแบบชั้นเดียว โดยใช้โปรแกรม EES ช่วยในการวิเคราะห์หาค่าต่างๆ

Zhao (2004) ได้ทำการทดลองติดตั้งปั๊มความร้อนโดยใช้สารทำความเย็น R290-50%, R600a-10% และ R123-40% ที่ Tianjin Geothermal Research and Training Center โดยต่อกับท่อน้ำร้อนที่จากอาคารที่มีความร้อนประมาณ $40\text{--}46\text{ }^{\circ}\text{C}$ มาทำความร้อน จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของปั๊มความร้อนที่ใช้สารทำความเย็นดังกล่าวมีค่า COP มากกว่า 3.5 และมีอุณหภูมิการควบแน่นมากกว่า $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ และความดันของการควบแน่นต่ำกว่า 18 บาร์ ในขณะที่อุณหภูมิจากแหล่งน้ำลดลงจาก $40\text{--}46\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็น $31\text{--}36\text{ }^{\circ}\text{C}$

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่องคอมพิวเตอร์ติดตั้งระบบปฏิบัติการ Window XP
2. เครื่องพิมพ์ชนิดใช้แสงเลเซอร์ (Laser Printer)
3. โปรแกรม EES
4. โปรแกรม Microsoft Word

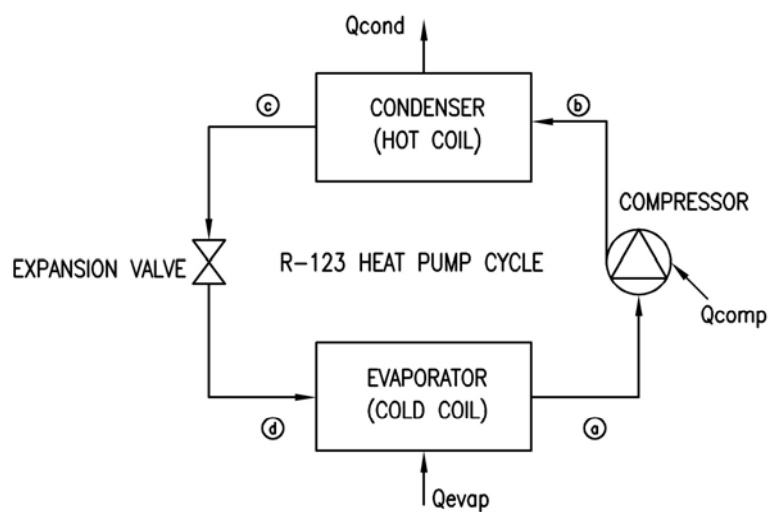
วิธีการ

1. ศึกษาและรวบรวมทฤษฎี ข้อมูล เอกสารต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาความร้อนและการทำความเย็นแบบดูดซึม
2. ศึกษาการใช้งานโปรแกรม EES
3. สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุปกรณ์หลัก ด้วยการสมมูลมวล และพลังงาน
4. หาความสัมพันธ์ในพารามิเตอร์ที่สำคัญของระบบ
5. เขียนโปรแกรมวิเคราะห์สภาวะการทำงานและสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของวัฏจักรร่วมโดยใช้โปรแกรม EES
6. วิเคราะห์ผลที่ได้จากการทำงานของโปรแกรม
7. สรุปผลและจัดทำวิทยานิพนธ์

สมการทางคณิตศาสตร์และสมมติฐาน

ในการวิเคราะห์สภาวะการทำงานและสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของวัฏจักรร่วมเราจำเป็นต้องทราบสมการทางคณิตศาสตร์ในแต่ละอุปกรณ์เพื่อนำมาช่วยในการวิเคราะห์ดังนี้

1. สมการทางคณิตศาสตร์ของปฏิกิริยาความร้อน ซึ่งจะมีอุปกรณ์หลักซึ่งจำเป็นในการวิเคราะห์อยู่ 4 อย่างด้วยกันดังนี้



ภาพที่ 12 วัฏจักรของปั๊มความร้อนที่ใช้สารทำความเย็น R-123

1.1 เครื่องอัด (Compressor)

สมการสมดุลพลังงาน

$$Q_{comp} + \dot{m}_a h_a = \dot{m}_b h_b \quad (4)$$

1.2 ชุดคอยล์ร้อน (Hot coil) หรือ เครื่องควบแน่น (Condenser)

สมการสมดุลพลังงาน

$$\dot{m}_b h_b = \dot{m}_c h_c + Q_{hot\ coil} \quad (5)$$

1.3 วาล์วลดความดัน (Expansion valve)

สมการสมดุลพลังงาน

$$\dot{m}_c h_c = \dot{m}_d h_d \quad (6)$$

1.4 ชุดคอยล์เย็น (Cold coil) หรือ เครื่องระเหย (Evaporator)

สมการสมดุลพลังงาน

$$Q_{cold\ coil} + \dot{m}_d h_d = \dot{m}_a h_a \quad (7)$$

2. สมมติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ระบบปั๊มความร้อนที่ใช้สารทำความเย็น R-123

2.1 อุณหภูมิเฉลี่ยในการทำงานของ เครื่องควบแน่น และเครื่องระเหย มีค่าสม่ำเสมอตลอดการทำงาน

2.2 อัตรามวลไหลของสารทำความเย็นมีค่าคงที่ ดังนั้น

$$\dot{m}_a = \dot{m}_b = \dot{m}_c = \dot{m}_d \quad (8)$$

2.3 กระบวนการอัดเป็นแบบไอเซนโทรปิก (Isentropic process)

$$s_a = s_b \quad (9)$$

2.4 กระบวนการขยายตัวเป็นแบบอะเดียบาติกคือไม่มีการถ่ายเทความร้อนกับสิ่งแวดล้อม

$$h_c = h_d \quad (10)$$

2.5 สารทำความเย็นหลังการอัดมีสถานะเป็นไออิ่มตัว

$$x_b = 1 \quad (11)$$

2.6 สารทำความเย็นหลังการควบแน่นมีสถานะเป็นของเหลวอิ่มตัว

$$x_c = 0 \quad (12)$$

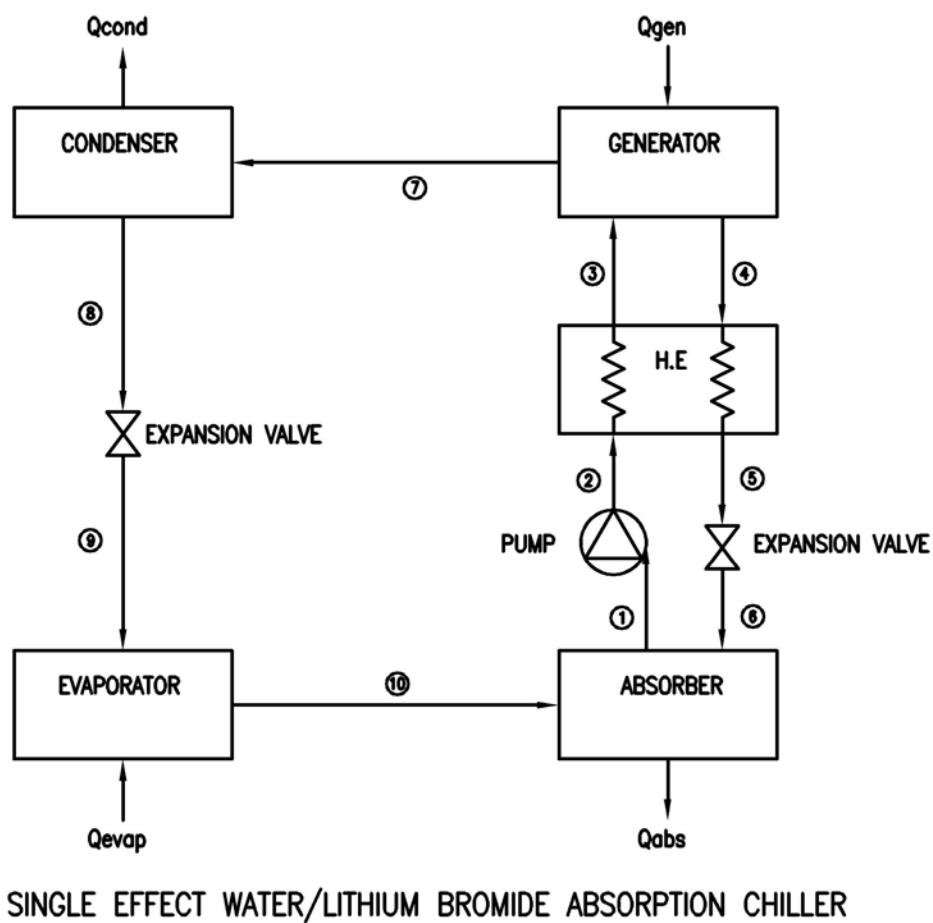
2.7 ความดันสูญเสียเนื่องจากความฝืดและเหตุอื่นในแต่ละอุปกรณ์ถือว่าเล็กน้อยมาก

3. สมการทางคณิตศาสตร์ของการทำความเย็นแบบดูดซึม โดยจะมีอุปกรณ์หลักซึ่งจำเป็นในการวิเคราะห์ดังนี้

3.1 เครื่องดูดซึม (Absorber)

สมการสมดุลมวล

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_6 + \dot{m}_{10} \quad (13)$$



ภาพที่ 13 วัฏจักรการทำความเย็นแบบดูดซึมที่ใช้สารทำความเย็นลิเทียมโบรไมด์-น้ำ

สมการสมดุลพลังงาน

$$Q_{abs} + \dot{m}_1 h_1 = \dot{m}_6 h_6 + \dot{m}_{10} h_{10} \quad (14)$$

สมการสมดุลมวลสารละลาย

$$\dot{m}_1 x_1 = \dot{m}_6 x_6 + \dot{m}_{10} x_{10} \quad (15)$$

3.2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger)

สมดุลมวลของสารละลายเจือจาง

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_3 = \dot{m}_{dil} \quad (16)$$

สมการสมดุลของสารละลายเข้มข้น

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_5 = \dot{m}_{conc} \quad (17)$$

สมการสมดุลพลังงาน โดยไม่มีการถ่ายเทความร้อนเข้าและออกจากระบบ

$$Q_{shx-h} = \dot{m}_4 h_4 - \dot{m}_5 h_5 \quad (18)$$

$$Q_{shx-c} = \dot{m}_3 h_3 - \dot{m}_2 h_2 \quad (19)$$

$$\dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_4 h_4 = \dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_5 h_5 \quad (20)$$

ค่าความเข้มข้นของสารละลายเจือจาง

$$x_1 = x_2 = x_3 = x_{dil} = x(T_{abs}, P_L) \quad (21)$$

ค่าความเข้มข้นของสารละลายเข้มข้น

$$x_4 = x_5 = x_6 = x_{conc} = x(T_{gen}, P_H) \quad (22)$$

ค่าประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

$$EF = \frac{T_4 - T_5}{T_4 - T_2} \quad (23)$$

3.3 เครื่องผลิต (Generator)

สมการสมดุลมวล

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_4 + \dot{m}_7 \quad (24)$$

สมการสมดุลพลังงาน

$$Q_{gen} + \dot{m}_3 h_3 = \dot{m}_4 h_4 + \dot{m}_7 h_7 \quad (25)$$

สมการสมดุลมวลสารละลาย

$$\dot{m}_3 x_3 = \dot{m}_4 x_4 + \dot{m}_7 x_7 \quad (26)$$

3.4 เครื่องควบแน่น (Condenser)

สมการสมดุลมวล

$$\dot{m}_7 = \dot{m}_8 \quad (27)$$

สมการสมดุลพลังงาน

$$\dot{m}_7 h_7 = \dot{m}_8 h_8 + Q_{cond} \quad (28)$$

3.5 วาล์วลดความดัน (Expansion valve)

สมการสมดุลมวล

$$\dot{m}_8 = \dot{m}_9 \quad (29)$$

สมการสมดุลพลังงาน

$$h_8 = h_9 \quad (30)$$

ค่าความดันด้านสูงของสารทำความเย็น

$$P_H = \text{Pressure}(T_{cond}) \quad (31)$$

ค่าความดันด้านต่ำของสารทำความเย็น

$$P_L = \text{Pressure}(T_{evap}) \quad (32)$$

3.6 เครื่องระเหย (Evaporator)

สมการสมดุลมวล

$$\dot{m}_9 = \dot{m}_{10} \quad (33)$$

สมการสมดุลพลังงาน

$$Q_{evap} + \dot{m}_9 h_9 = \dot{m}_{10} h_{10} \quad (34)$$

4. สมมติฐานที่ใช้ในการออกแบบระบบการทำความเย็นแบบดูดซึมที่ใช้สารทำความเย็น ลิเทียมโบรไมด์-น้ำ

4.1 อุณหภูมิเฉลี่ยในการทำงานของเครื่องดูดซึม เครื่องผลิต เครื่องควบแน่น และ เครื่องระเหย มีค่าสม่ำเสมอตลอดการทำงาน

4.2 อัตราการไหลของสารละลายเจือจาง อัตราการไหลของสารละลายเข้มข้น และ อัตราการไหลของสารทำความเย็นมีค่าคงที่

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_3 = \dot{m}_{dil} \quad (35)$$

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_5 = \dot{m}_6 = \dot{m}_{conc} \quad (36)$$

$$\dot{m}_7 = \dot{m}_8 = \dot{m}_9 = \dot{m}_{10} = \dot{m}_{steam} \quad (37)$$

4.3 ไม่มีการถ่ายเทความร้อนระหว่างสารทำความเย็นและสิ่งที่อยู่รอบๆ นอกเหนือไปจากที่เครื่องระเหยและที่เครื่องควบแน่น เนื่องจากมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทในอุปกรณ์หลัก

4.4 กระบวนการขยายตัวเป็นแบบอะเดียบาติกคือ ไม่มีการถ่ายเทความร้อนให้กับ สิ่งแวดล้อม

$$h_5 = h_6 \text{ และ } h_8 = h_9 \quad (38)$$

4.5 ความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบถือว่าน้อยมาก

$$P_L = P_1 = P_6 = P_9 = P_{10} \quad (39)$$

$$P_H = P_2 = P_3 = P_4 = P_5 = P_7 = P_8 \quad (40)$$

4.6 สารละลายเจือจางที่ออกจากเครื่องดูดซึมที่สภาวะ (1) เป็นสภาวะของเหลวอิ่มตัว ซึ่งมีอุณหภูมิและความดันเท่ากับสภาวะในเครื่องดูดซึม

$$T_{abs} = T_1 \text{ และ } P_{abs} = P_1 = P_L \quad (41)$$

$$h_1 = Enthalpy(T_{abs}, x_{dil}) \quad (42)$$

4.7 สารละลายเข้มข้นที่ออกจากเครื่องผลิตที่สภาวะ (4) เป็นสภาวะของเหลวอิ่มตัว ซึ่งมีอุณหภูมิและความดันเท่ากับสภาวะในเครื่องผลิต

$$T_{gen} = T_4 \text{ และ } P_{gen} = P_4 = P_H \quad (43)$$

$$h_4 = \text{Enthalpy}(T_{gen}, x_{conc}) \quad (44)$$

4.8 สารทำความเย็นที่ออกจากเครื่องผลิตที่สภาวะ (7) เป็นสภาวะไออิ่มตัว ซึ่งมีอุณหภูมิและความดันเท่ากับสภาวะในเครื่องผลิต

$$T_{gen} = T_7 \text{ และ } P_{gen} = P_7 = P_H \quad (45)$$

$$h_7 = \text{Enthalpy}(T_{gen}, x_g) \quad (46)$$

4.9 สารทำความเย็นที่ออกจากเครื่องควบแน่นที่สภาวะ (8) เป็นสภาวะของเหลวอิ่มตัว ซึ่งมีอุณหภูมิและความดันเท่ากับสภาวะในเครื่องควบแน่น

$$T_{cond} = T_8 \text{ และ } P_{cond} = P_8 = P_H \quad (47)$$

$$h_8 = \text{Enthalpy}(T_{cond}, x_f) \quad (48)$$

4.10 สารทำความเย็นที่ออกจากเครื่องระเหยที่สภาวะ (10) เป็นสภาวะไออิ่มตัว ซึ่งมีอุณหภูมิและความดันเท่ากับสภาวะในเครื่องระเหย

$$T_{evap} = T_{10} \text{ และ } P_{evap} = P_{10} = P_L \quad (49)$$

$$h_{10} = \text{Enthalpy}(T_{evap}, x_g) \quad (50)$$

4.11 ค่า Overall heat transfer coefficient มีค่าคงที่

5. สมการทางคณิตศาสตร์ของวัฏจักรรวมของปั๊มความร้อนและการทำความเย็นแบบดูดซึมมีดังนี้

5.1 ค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของการทำความเย็นแบบดูดซึม

$$COP_{abs} = \frac{Q_{evap}}{Q_{gen}} \quad (2)$$

5.2 ค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของปั๊มความร้อน

$$COP_{\text{heat pump}} = \frac{Q_{\text{hot coil}}}{Q_{\text{comp}}} \quad (3)$$

5.3 ค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของวัฏจักรรวม

$$COP_{\text{combined}} = \frac{Q_{\text{evap}} + Q_{\text{hot water}}}{Q_{\text{comp}}} \quad (51)$$

5.4 ค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของการทำความเย็นของวัฏจักรรวม

$$COP_{\text{cool}} = \frac{Q_{\text{evap}}}{Q_{\text{comp}}} \quad (52)$$

5.5 ค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของการทำความร้อนของวัฏจักรรวม

$$COP_{\text{heat}} = \frac{Q_{\text{hot water}}}{Q_{\text{comp}}} \quad (53)$$

6. สมมติฐานที่ใช้ในการออกแบบวัฏจักรรวมของปั๊มความร้อนและการทำความเย็นแบบดูดซึมมีดังนี้

6.1 ความร้อนที่ถ่ายเทให้กับสิ่งแวดล้อมอื่น ๆ นอกจากที่กำหนดให้จะไม่พิจารณาเนื่องจากมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทในอุปกรณ์หลัก

$$Q_{\text{cold coil}} = Q_{\text{cond}} + Q_{\text{abs}} \quad (54)$$

$$Q_{\text{hot coil}} = Q_{\text{hot water}} + Q_{\text{gen}} \quad (55)$$

6.2 ความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบถือว่ามิต่ำน้อยมาก

6.3 ค่า Overall heat transfer coefficient มีค่าคงที่

ขอบข่ายการวิเคราะห์ของวัฏจักรร่วมของปั๊มความร้อนและการทำความเย็นแบบดูดซึม

ในงานวิจัยชิ้นนี้เราได้ทำการจำลองระบบของวัฏจักรร่วมของปั๊มความร้อนที่ใช้สารทำความเย็น R-123 และการทำความเย็นแบบดูดซึมที่ใช้สารทำความเย็นลิเทียมโบรไมด์-น้ำ โดยการนำสมการต่างๆ และสมมติฐานที่ได้จากการศึกษาค้นคว้ามาเขียนฟังก์ชันการทำงานของวัฏจักรร่วมในโปรแกรม EES ซึ่งวิธีการใช้และตัวอย่างได้แสดงไว้ในภาคผนวกที่ ๓

หลังจากทำการเขียนฟังก์ชันจำลองระบบการทำงานของวัฏจักรร่วม ลงในโปรแกรม EES จากนั้นจะทำการวิเคราะห์สภาวะการทำงานที่อุปกรณ์ต่างๆ ของระบบดังนี้

1. อัตราการไหลของสารละลายเจือจาง ($\dot{m}_{dil}$)
2. อัตราการไหลของสารละลายเข้มข้น ($\dot{m}_{conc}$)
3. อัตราการไหลของสารทำความเย็นน้ำ ($\dot{m}_{steam}$)
4. อัตราการไหลของสารทำความเย็น R-123 ($\dot{m}_{R-123}$)
5. ปริมาณความร้อนที่ต้องการของเครื่องผลิตในการทำความเย็นแบบดูดซึม (Q_{gen})
6. ปริมาณความร้อนที่คายออกของเครื่องควบแน่นในการทำความเย็นแบบดูดซึม (Q_{cond})
7. ปริมาณความร้อนที่คายออกของเครื่องดูดซึมในการทำความเย็นแบบดูดซึม (Q_{abs})
8. ปริมาณความร้อนที่ต้องการของเครื่องอัดในปั๊มความร้อน (Q_{comp})
9. ปริมาณความร้อนที่คายออกของคอยล์ร้อนในปั๊มความร้อน ($Q_{hot\ coil}$)
10. ปริมาณความร้อนที่เหลือไปใช้สำหรับทำน้ำร้อน ($Q_{hot\ water}$)
11. สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของเครื่องทำความเย็นแบบดูดซึม (COP_{abs})
12. สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของปั๊มความร้อน ($COP_{heat\ pump}$)
13. สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะการทำความเย็นของวัฏจักรร่วม (COP_{cool})
14. สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะการทำความร้อนของวัฏจักรร่วม (COP_{heat})
15. สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของวัฏจักรร่วม ($COP_{combined}$)

โดยจะทำการกำหนดสภาวะที่อุปกรณ์ต่างๆ ในขณะเริ่มต้นดังนี้

1. ขนาดทำความเย็นที่เครื่องระเหย (Q_{evap}) มีค่าเท่ากับ 12,000 บีทียู/ชม. หรือการทำความเย็นขนาด 1 ตัน คงที่ตลอดการทดลอง
2. ประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในการทำความเย็นแบบดูดซึม (EF) มีค่าเท่ากับ 0.8 คงที่ตลอดการทดลอง

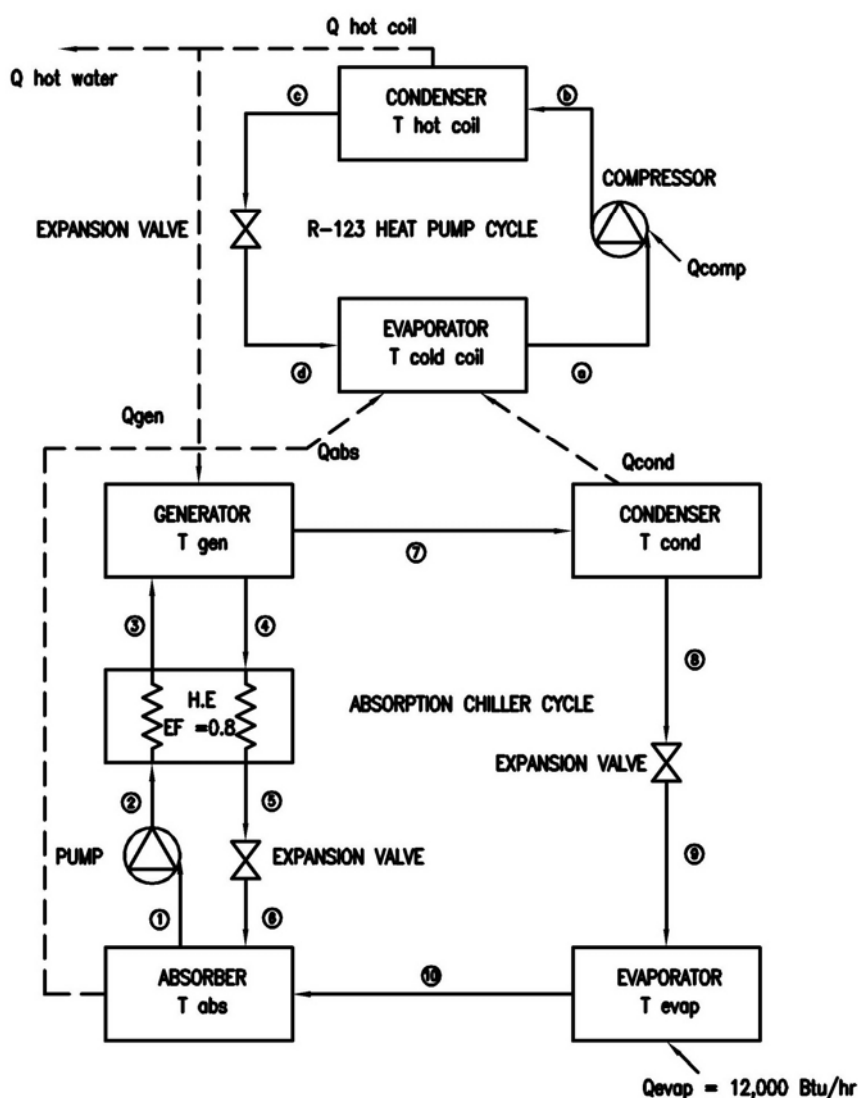
จากนั้นจึงทำการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิของอุปกรณ์ต่างๆในวัฏจักรร่วม เพื่อทำการวิเคราะห์หาสภาวะการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆของระบบเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดดังนี้

1. ปรับอุณหภูมิเครื่องผลิตของการทำความเย็นแบบดูดซึม (T_{gen}) จาก 176 °F ถึง 194 °F
2. ปรับอุณหภูมิเครื่องควบแน่นของการทำความเย็นแบบดูดซึม (T_{cond}) จาก 95 °F ถึง 113 °F
3. ปรับอุณหภูมิเครื่องดูดซึมของการทำความเย็นแบบดูดซึม (T_{abs}) จาก 95 °F ถึง 113 °F
4. ปรับอุณหภูมิเครื่องควบแน่นของการทำความเย็นแบบดูดซึม (T_{evap}) จาก 37 °F ถึง 55 °F
5. ปรับอุณหภูมิคอยล์ร้อนของปั๊มความร้อน ($T_{\text{hot coil}}$) จาก 194 °F ถึง 212 °F
6. ปรับอุณหภูมิคอยล์เย็นของปั๊มความร้อน ($T_{\text{cold coil}}$) จาก 68 °F ถึง 86 °F

โดยการปรับอุณหภูมิขึ้นทีละ 2 °F จากนั้นจึงนำผลที่ได้มาทำการเขียนกราฟเพื่อช่วยในการวิเคราะห์ต่อไป

ผลและวิจารณ์

การวิเคราะห์ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทำงานที่อุปกรณ์ต่างๆ ของวัฏจักรร่วมของปั๊มความร้อนที่ใช้สารทำความเย็น R-123 และการทำความเย็นแบบดูดซึมที่ใช้สารทำความเย็นลิเทียมโบรไมด์-น้ำ ซึ่งจะกำหนดให้มีขนาดทำความเย็นคงที่เท่ากับ 12,000 บีทียู/ชั่วโมง และประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในการทำความเย็นแบบดูดซึม (EF) มีค่าเท่ากับ 0.8 โดยจะแสดงผลในรูปแบบของตารางและกราฟเพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่างๆ



ภาพที่ 14 ภาพแสดงวัฏจักรร่วมปั๊มความร้อนและการทำความเย็นแบบดูดซึม

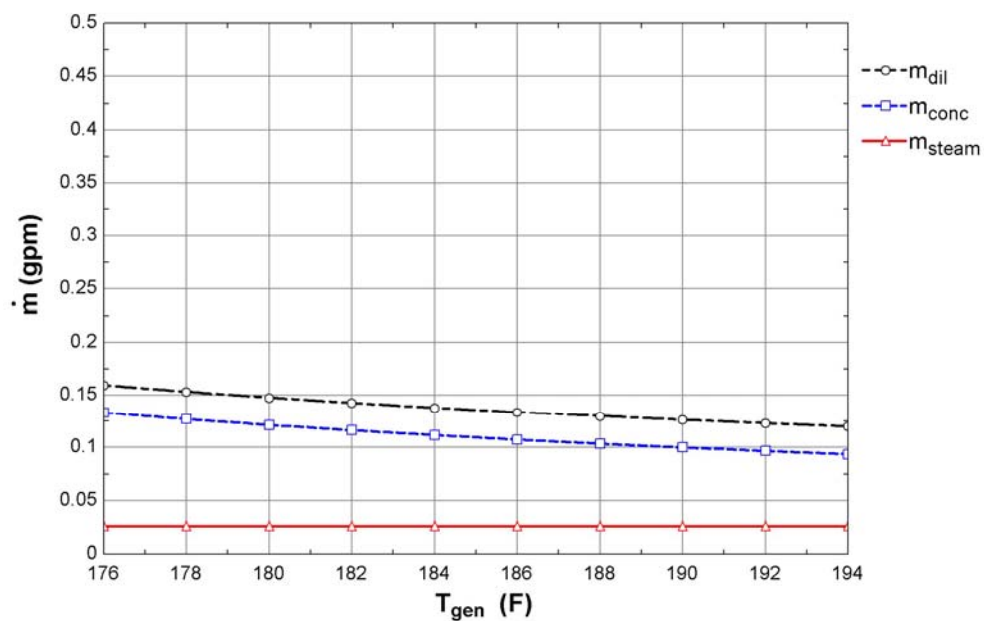
ผลการวิเคราะห์เมื่ออุณหภูมิที่เครื่องผลิตของการทำความเย็นแบบดูดซึม (T_{gen}) เปลี่ยนแปลง โดยกำหนดให้ $T_{\text{cond}} = 95\text{ }^{\circ}\text{F}$, $T_{\text{abs}} = 95\text{ }^{\circ}\text{F}$, $T_{\text{evap}} = 55\text{ }^{\circ}\text{F}$, $T_{\text{hot coil}} = 194\text{ }^{\circ}\text{F}$ และ $T_{\text{cold coil}} = 86\text{ }^{\circ}\text{F}$ คงที่

ตารางที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องผลิตของการทำความเย็นแบบดูดซึม (T_{gen}) เทียบกับอัตราการไหลของสารทำความเย็นต่างๆ

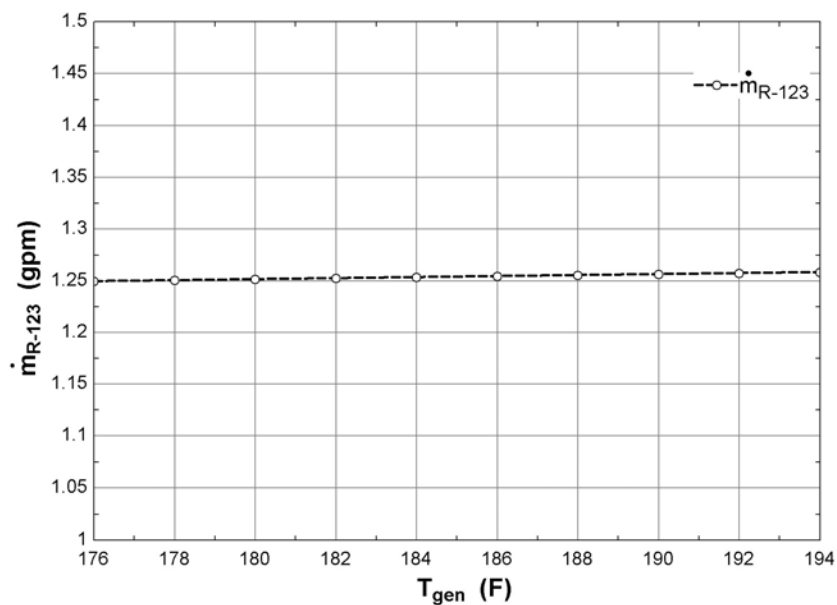
T_{gen} ($^{\circ}\text{F}$)	$\dot{m}_{\text{dil}}$ (gpm)	$\dot{m}_{\text{conc}}$ (gpm)	$\dot{m}_{\text{steam}}$ (gpm)	$\dot{m}_{\text{R-123}}$ (gpm)
176	0.159	0.133	0.026	1.250
178	0.153	0.127	0.026	1.251
180	0.148	0.122	0.026	1.252
182	0.142	0.116	0.026	1.253
184	0.138	0.112	0.026	1.254
186	0.134	0.108	0.026	1.255
188	0.130	0.104	0.026	1.256
190	0.126	0.100	0.026	1.257
192	0.123	0.097	0.026	1.258
194	0.120	0.094	0.026	1.259

จากตารางที่ 2 จะพบว่าเมื่ออุณหภูมิที่เครื่องผลิต (T_{gen}) เพิ่มขึ้นจาก $176\text{ }^{\circ}\text{F}$ เป็น $194\text{ }^{\circ}\text{F}$ จะมีผลต่ออัตราการไหลของสารทำความเย็นต่างๆ ดังนี้

1. อัตราการไหลของสารละลายเจือจางลิเทียมโบรไมด์-น้ำ ($\dot{m}_{\text{dil}}$) มีค่าลดลงจาก 0.159 gpm เป็น 0.12 gpm โดยลดลงคิดเป็น 24.53%
2. อัตราการไหลของสารละลายเข้มข้นลิเทียมโบรไมด์-น้ำ ($\dot{m}_{\text{conc}}$) มีค่าลดลงจาก 0.133 gpm เป็น 0.094 gpm โดยลดลงคิดเป็น 29.85%
3. อัตราการไหลของสารทำความเย็นน้ำ ($\dot{m}_{\text{steam}}$) ไม่มีค่าเปลี่ยนแปลง โดยจะมีอัตราการไหลคงที่เท่ากับ 0.026 gpm
4. อัตราการไหลของทำความเย็น R-123 ($\dot{m}_{\text{R-123}}$) มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1.25 gpm เป็น 1.259 gpm โดยเพิ่มขึ้นคิดเป็น 0.72%



ภาพที่ 15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องผลิต (T_{gen}) เทียบกับอัตราการไหลของสารละลายเจือจาง ($\dot{m}_{dil}$) อัตราการไหลของสารละลายเข้มข้น ($\dot{m}_{conc}$) และอัตราการไหลของสารทำความเย็นน้ำ ($\dot{m}_{steam}$)



ภาพที่ 16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องผลิต (T_{gen}) เทียบกับอัตราการไหลของสารทำความเย็น R-123 ($\dot{m}_{R-123}$)

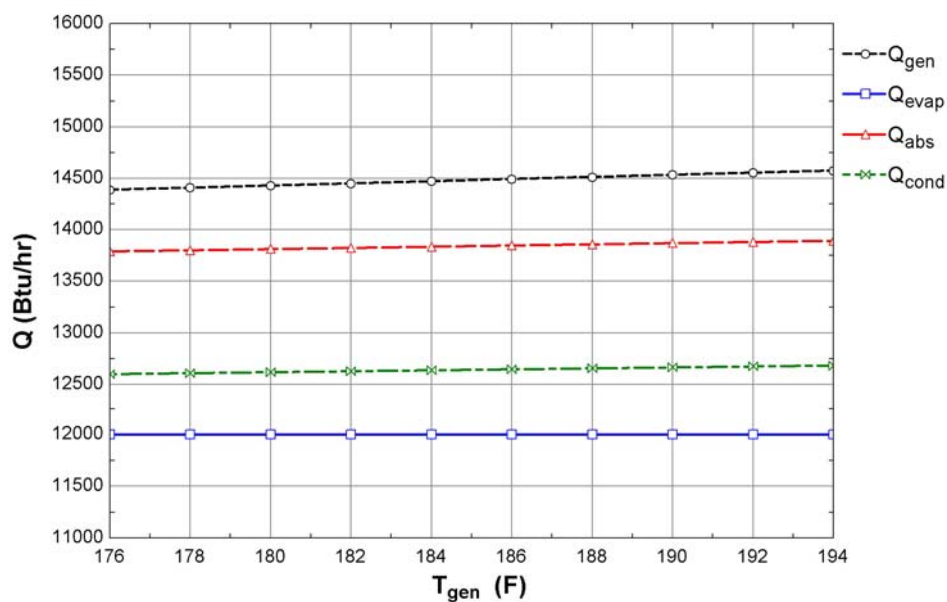
ตารางที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องผลิตของการทำความเย็นแบบดูดซึม (T_{gen}) เทียบกับปริมาณความร้อนที่อุปกรณ์ต่างๆ ของการทำความเย็นแบบดูดซึมและปั๊มความร้อน

T_{gen} (°F)	Q_{gen} (Btu/hr)	Q_{abs} (Btu/hr)	Q_{cond} (Btu/hr)	Q_{comp} (Btu/hr)	$Q_{hot\ coil}$ (Btu/hr)	$Q_{hot\ water}$ (Btu/hr)
176	14,391	13,790	12,601	7,018	33,409	19,018
178	14,411	13,800	12,611	7,024	33,435	19,024
180	14,432	13,812	12,620	7,029	33,461	19,029
182	14,453	13,824	12,629	7,035	33,488	19,035
184	14,474	13,835	12,639	7,040	33,514	19,040
186	14,495	13,847	12,648	7,046	33,541	19,046
188	14,516	13,859	12,657	7,051	33,567	19,051
190	14,537	13,871	12,666	7,057	33,594	19,057
192	14,557	13,881	12,676	7,062	33,619	19,062
194	14,577	13,892	12,685	7,068	33,645	19,068

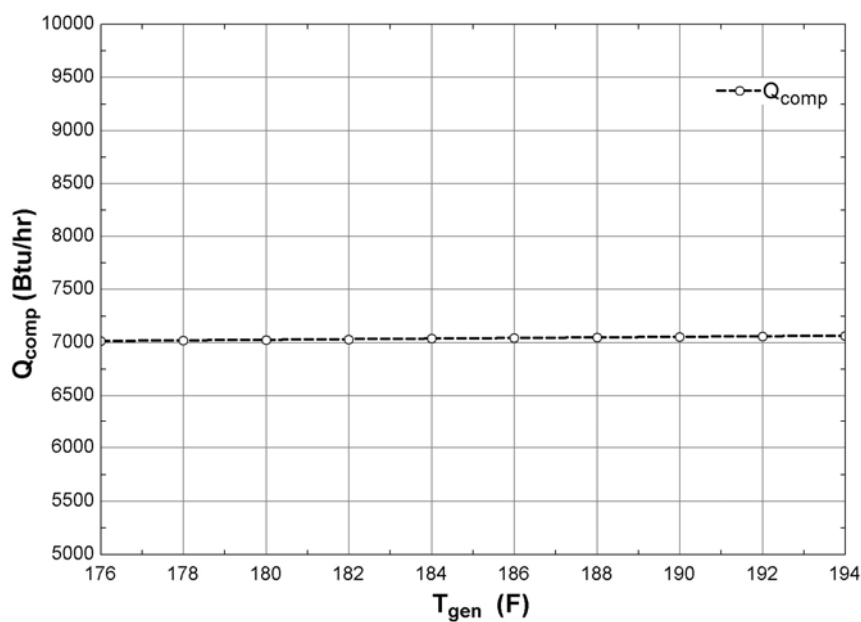
จากตารางที่ 3 จะพบว่าเมื่ออุณหภูมิที่เครื่องผลิต (T_{gen}) เพิ่มขึ้นจาก 176 °F เป็น 194 °F จะมีผลกับปริมาณความร้อนที่อุปกรณ์ต่างๆ ของการทำความเย็นแบบดูดซึมและปั๊มความร้อนดังนี้

1. ปริมาณความร้อนที่ต้องการของเครื่องผลิต (Q_{gen}) เพิ่มขึ้นจาก 14,391 Btu/hr เป็น 14,577 Btu/hr โดยเพิ่มขึ้นคิดเป็น 1.29%
2. ปริมาณความร้อนที่คายออกจากเครื่องดูดซึม (Q_{abs}) เพิ่มขึ้นจาก 13,790 Btu/hr เป็น 13,892 Btu/hr โดยเพิ่มขึ้นคิดเป็น 0.74%
3. ปริมาณความร้อนที่คายออกจากเครื่องควบแน่น (Q_{cond}) เพิ่มขึ้นจาก 12,601 Btu/hr เป็น 12,685 Btu/hr โดยเพิ่มขึ้นคิดเป็น 0.67%
4. ปริมาณความร้อนที่ต้องการของเครื่องอัดในปั๊มความร้อน (Q_{comp}) เพิ่มขึ้นจาก 7,018 Btu/hr เป็น 7,068 Btu/hr โดยเพิ่มขึ้นคิดเป็น 0.71%
5. ปริมาณความร้อนที่คายออกจากคอยล์ร้อนในปั๊มความร้อน ($Q_{hot\ coil}$) เพิ่มขึ้นจาก 33,409 Btu/hr เป็น 33,645 Btu/hr โดยเพิ่มขึ้นคิดเป็น 0.71%

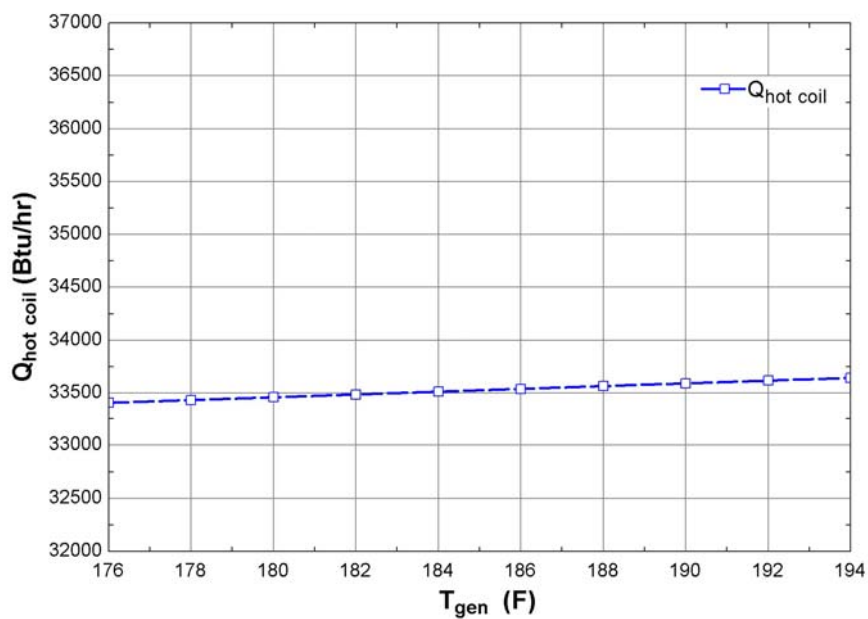
6. ปริมาณความร้อนที่หล่อไปใช้น้ำร้อน ($Q_{\text{hot water}}$) เพิ่มขึ้นจาก 19,018 Btu/hr เป็น 19,068 Btu/hr โดยเพิ่มขึ้นคิดเป็น 0.26%



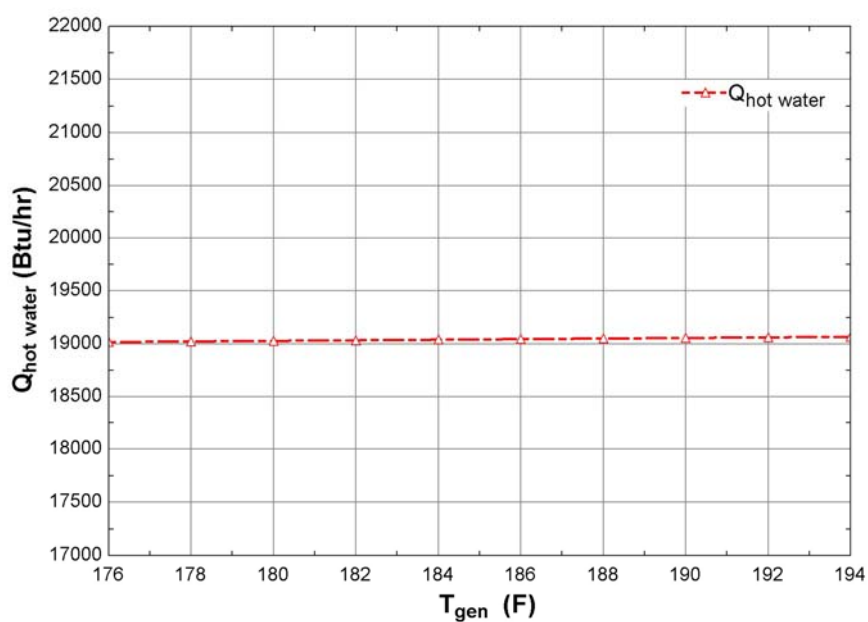
ภาพที่ 17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องผลิต (T_{gen}) เทียบกับปริมาณความร้อนที่เครื่องผลิต (Q_{gen}) เครื่องดูดซึม (Q_{abs}) เครื่องควบแน่น (Q_{cond}) และเครื่องระเหย (Q_{evap})



ภาพที่ 18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องผลิต (T_{gen}) เทียบกับปริมาณความร้อนที่เครื่องอัดในปั๊มความร้อน (Q_{comp})



ภาพที่ 19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องผลิต (T_{gen}) เทียบกับปริมาณความร้อนที่คอยล์ร้อนในปั๊มความร้อน ($Q_{hot coil}$)



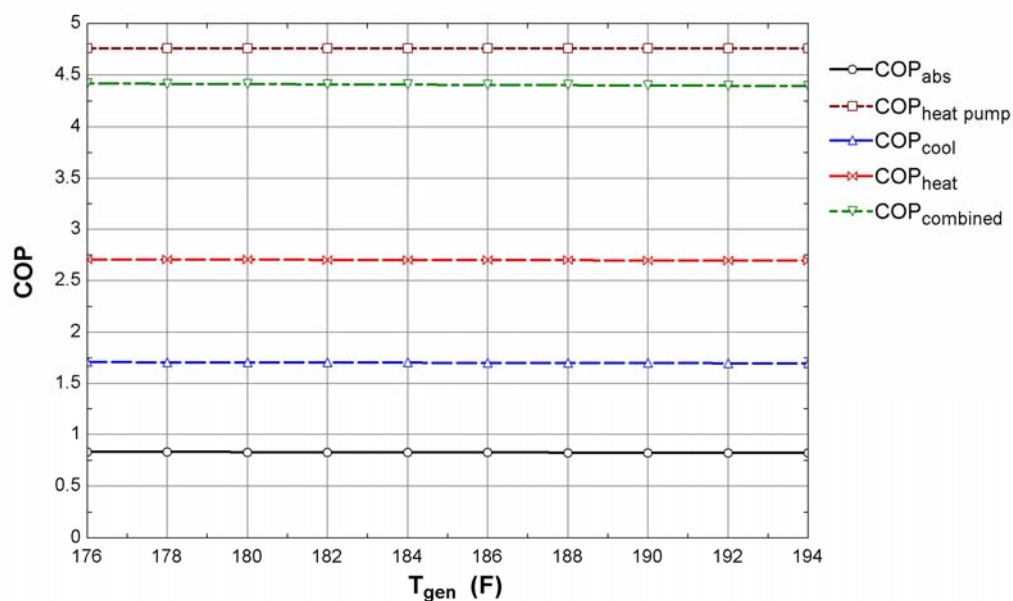
ภาพที่ 20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องผลิต (T_{gen}) เทียบกับปริมาณความร้อนที่หล่อไปใช้น้ำร้อน ($Q_{hot water}$)

ตารางที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องผลิตของการทำความเย็นแบบดูดซึม (T_{gen}) เทียบกับค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะต่างๆ

T_{gen} (°F)	COP_{abs}	$\text{COP}_{\text{heat pump}}$	COP_{cool}	COP_{heat}	$\text{COP}_{\text{combined}}$
176	0.834	4.76	1.710	2.710	4.420
178	0.833	4.76	1.709	2.709	4.418
180	0.831	4.76	1.707	2.707	4.414
182	0.830	4.76	1.706	2.706	4.412
184	0.829	4.76	1.705	2.705	4.410
186	0.828	4.76	1.703	2.703	4.406
188	0.827	4.76	1.702	2.702	4.404
190	0.826	4.76	1.700	2.700	4.400
192	0.824	4.76	1.699	2.699	4.398
194	0.823	4.76	1.698	2.698	4.396

จากตารางที่ 4 จะพบว่าเมื่ออุณหภูมิที่เครื่องผลิต (T_{gen}) เพิ่มขึ้นจาก 176 °F เป็น 194 °F จะมีผลกับค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะต่างๆ ดังนี้

1. สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของการทำความเย็นแบบดูดซึม (COP_{abs}) มีค่าลดลงจาก 0.834 เป็น 0.823 โดยลดลงคิดเป็น 1.32%
2. สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของปั๊มความร้อน ($\text{COP}_{\text{heat pump}}$) ไม่มีค่าเปลี่ยนแปลงโดยจะมีค่าคงที่เท่ากับ 4.76
3. สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะการทำความเย็นของวัฏจักรร่วม (COP_{cool}) มีค่าลดลงจาก 1.710 เป็น 1.698 โดยลดลงคิดเป็น 0.7%
4. สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะการทำความร้อนของวัฏจักรร่วม (COP_{heat}) มีค่าลดลงจาก 2.710 เป็น 2.698 โดยลดลงคิดเป็น 0.44%
5. สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของวัฏจักรร่วม ($\text{COP}_{\text{combined}}$) มีค่าลดลงจาก 4.420 เป็น 4.396 โดยลดลงคิดเป็น 0.54%



ภาพที่ 21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องผลิต (T_{gen}) เทียบกับค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะต่างๆ

จะเห็นว่าเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิที่เครื่องผลิตของการทำความเย็นแบบดูดซึม (T_{gen}) จาก 176 °F เป็น 194 °F จะทำให้ปริมาณความร้อนในแต่ละอุปกรณ์เพิ่มขึ้นเล็กน้อย และสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของวัฏจักรรวมลดลงน้อยมาก แต่จะมีผลมากสำหรับอัตราการไหลของสารละลายลิเทียมโบรไมด์เข้มข้นและสารละลายลิเทียมโบรไมด์เจือจาง โดยจะมีอัตราการไหลลดลง ซึ่งอุณหภูมิที่ทำให้ค่า $COP_{combined}$ สูงสุดสำหรับอุณหภูมิที่เครื่องผลิต (T_{gen}) คือ 176 °F

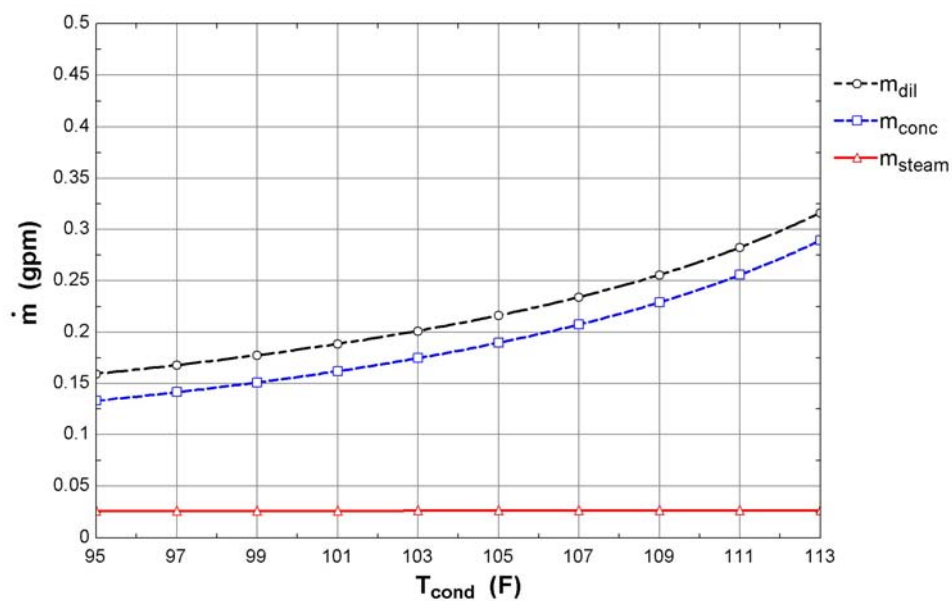
ผลการวิเคราะห์เมื่ออุณหภูมิเครื่องที่ควบคุมแน่นของการทำความเย็นแบบดูดซึม (T_{cond}) เปลี่ยนแปลง โดยกำหนดให้ $T_{\text{gen}} = 176^\circ\text{F}$, $T_{\text{abs}} = 95^\circ\text{F}$, $T_{\text{evap}} = 55^\circ\text{F}$, $T_{\text{hot coil}} = 194^\circ\text{F}$ และ $T_{\text{cold coil}} = 86^\circ\text{F}$ คงที่

ตารางที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องควบคุมแน่นของการทำความเย็นแบบดูดซึม (T_{cond}) เทียบกับอัตราการไหลของสารทำความเย็นต่างๆ

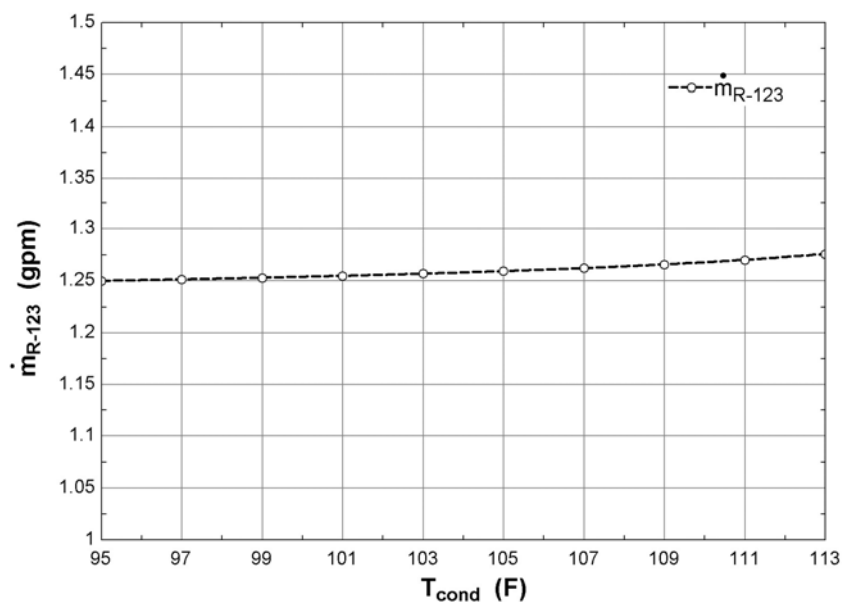
T_{cond} ($^\circ\text{F}$)	$\dot{m}_{\text{dil}}$ (gpm)	$\dot{m}_{\text{conc}}$ (gpm)	$\dot{m}_{\text{steam}}$ (gpm)	$\dot{m}_{\text{R-123}}$ (gpm)
95	0.159	0.133	0.026	1.250
97	0.168	0.142	0.026	1.251
99	0.178	0.151	0.027	1.253
101	0.189	0.162	0.027	1.255
103	0.202	0.175	0.027	1.257
105	0.217	0.190	0.027	1.259
107	0.235	0.208	0.027	1.262
109	0.256	0.229	0.027	1.266
111	0.283	0.256	0.027	1.270
113	0.317	0.290	0.027	1.276

จากตารางที่ 5 จะพบว่าเมื่ออุณหภูมิที่เครื่องควบคุมแน่นของการทำความเย็นแบบดูดซึม (T_{cond}) เพิ่มขึ้นจาก 95°F เป็น 113°F จะมีผลต่ออัตราการไหลของสารทำความเย็นต่างๆ ดังนี้

1. อัตราการไหลของสารละลายเจือจางลิเทียมโบรไมด์-น้ำ ($\dot{m}_{\text{dil}}$) มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.159 gpm เป็น 0.317 gpm โดยเพิ่มขึ้นคิดเป็น 99.37%
2. อัตราการไหลของสารละลายเข้มข้นลิเทียม โบรไมด์-น้ำ ($\dot{m}_{\text{conc}}$) มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.133 gpm เป็น 0.29 gpm โดยเพิ่มขึ้นคิดเป็น 118.05%
3. อัตราการไหลของสารทำความเย็นน้ำ ($\dot{m}_{\text{steam}}$) มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.026 gpm เป็น 0.027 gpm โดยเพิ่มขึ้นคิดเป็น 3.85%
4. อัตราการไหลของทำความเย็น R-123 ($\dot{m}_{\text{R-123}}$) มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1.25 gpm เป็น 1.276 gpm โดยเพิ่มขึ้นคิดเป็น 2.08%



ภาพที่ 22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องควบแน่น (T_{cond}) เทียบกับอัตราการไหลของสารละลายเจือจาง ($\dot{m}_{\text{dil}}$) อัตราการไหลของสารละลายเข้มข้น ($\dot{m}_{\text{conc}}$) และอัตราการไหลของสารทำความเย็นน้ำ ($\dot{m}_{\text{steam}}$)



ภาพที่ 23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องควบแน่น (T_{cond}) เทียบกับอัตราการไหลของสารทำความเย็น R-123 ($\dot{m}_{\text{R-123}}$)

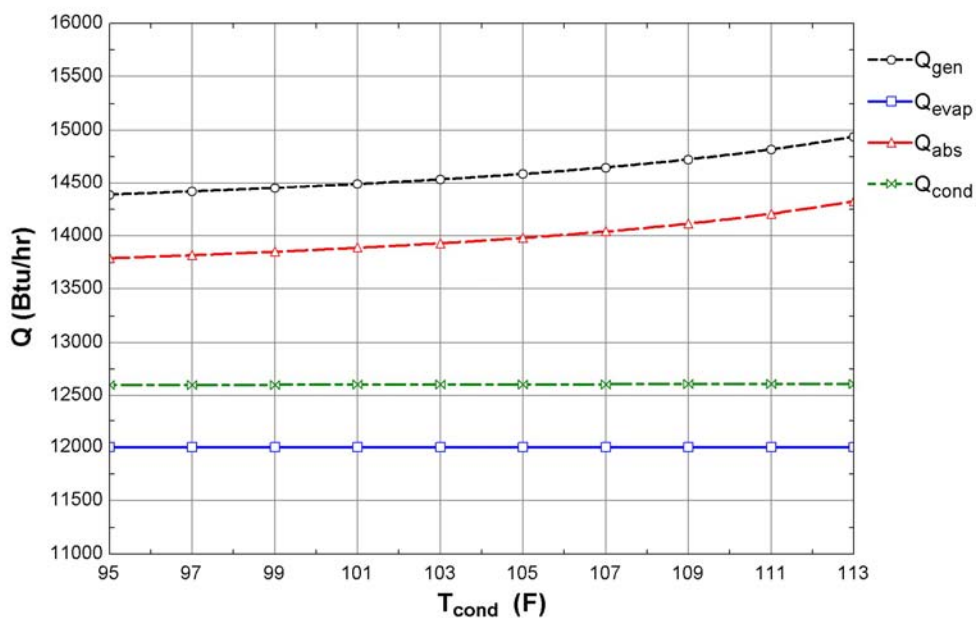
ตารางที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องควบแน่นของการทำความเย็นแบบดูดซึม (T_{cond})
เทียบกับปริมาณความร้อนที่อุปกรณ์ต่างๆ ของการทำความเย็นแบบดูดซึมและปั๊ม
ความร้อน

T_{cond} (°F)	Q_{gen} (Btu/hr)	Q_{abs} (Btu/hr)	Q_{cond} (Btu/hr)	Q_{comp} (Btu/hr)	$Q_{\text{hot coil}}$ (Btu/hr)	$Q_{\text{hot water}}$ (Btu/hr)
95	14,391	13,790	12,601	7,018	33,409	19,018
97	14,421	13,819	12,602	7,026	33,447	19,026
99	14,455	13,852	12,603	7,035	33,490	19,035
101	14,493	13,888	12,605	7,045	33,538	19,045
103	14,537	13,931	12,606	7,057	33,594	19,057
105	14,589	13,982	12,607	7,071	33,660	19,071
107	14,650	14,042	12,608	7,087	33,737	19,087
109	14,726	14,116	12,610	7,107	33,833	19,107
111	14,820	14,209	12,611	7,132	33,952	19,132
113	14,940	14,328	12,612	7,164	34,104	19,164

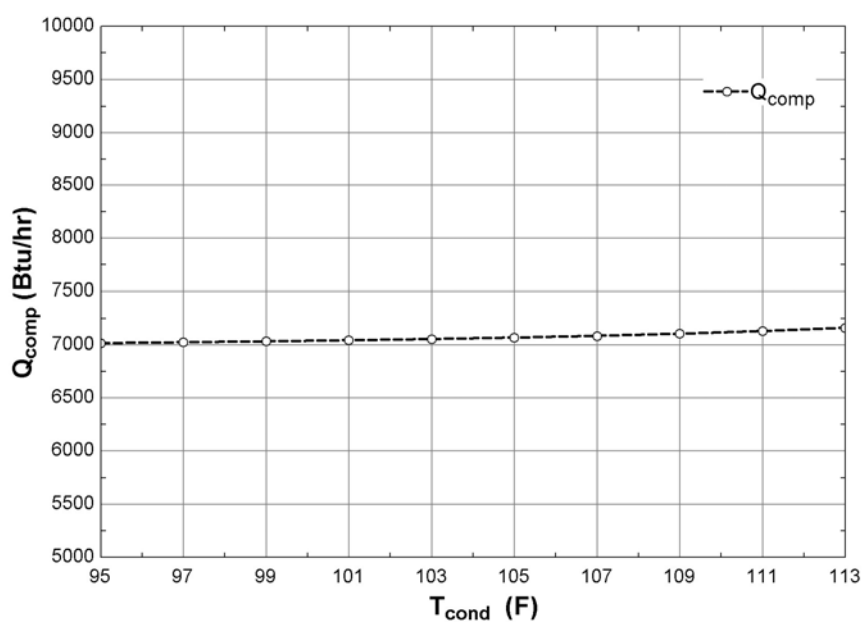
จากตารางที่ 6 จะพบว่าเมื่ออุณหภูมิที่เครื่องควบแน่น (T_{cond}) เพิ่มขึ้นจาก 95 °F เป็น 113 °F จะมีผลกับปริมาณความร้อนที่อุปกรณ์ต่างๆ ของการทำความเย็นแบบดูดซึมและปั๊มความร้อน ดังนี้

1. ปริมาณความร้อนที่ต้องการของเครื่องผลิต (Q_{gen}) เพิ่มขึ้นจาก 14,391 Btu/hr เป็น 14,940 Btu/hr โดยเพิ่มขึ้นคิดเป็น 3.81%
2. ปริมาณความร้อนที่คายออกจากเครื่องดูดซึม (Q_{abs}) เพิ่มขึ้นจาก 13,790 Btu/hr เป็น 14,328 Btu/hr โดยเพิ่มขึ้นคิดเป็น 3.9%
3. ปริมาณความร้อนที่คายออกจากเครื่องควบแน่น (Q_{cond}) เพิ่มขึ้นจาก 12,601 Btu/hr เป็น 12,612 Btu/hr โดยเพิ่มขึ้นคิดเป็น 0.09%
4. ปริมาณความร้อนที่ต้องการของเครื่องอัดในปั๊มความร้อน (Q_{comp}) เพิ่มขึ้นจาก 7,018 Btu/hr เป็น 7,164 Btu/hr โดยเพิ่มขึ้นคิดเป็น 2.08%
5. ปริมาณความร้อนที่คายออกจากคอยล์ร้อนในปั๊มความร้อน ($Q_{\text{hot coil}}$) เพิ่มขึ้นจาก 33,409 Btu/hr เป็น 34,104 Btu/hr โดยเพิ่มขึ้นคิดเป็น 2.08%

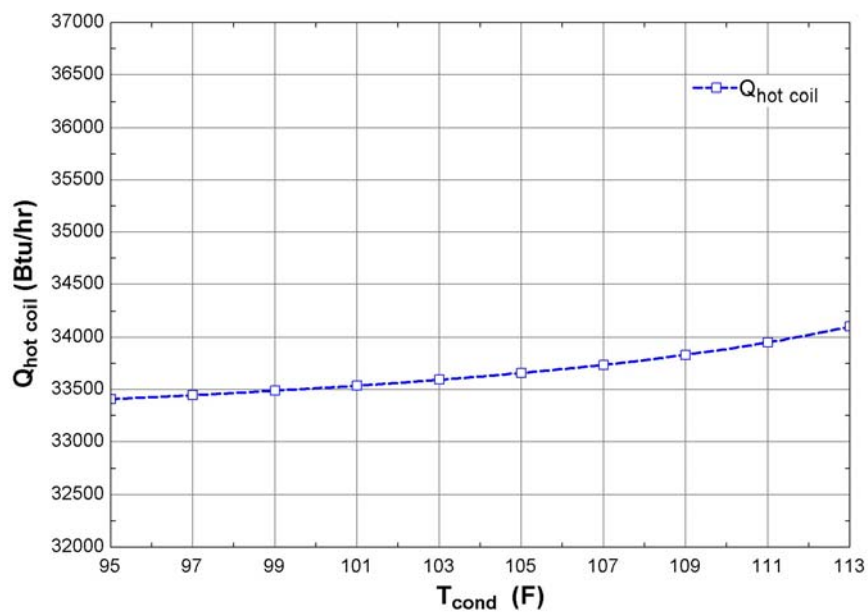
6. ปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปใช้น้ำร้อน ($Q_{\text{hot water}}$) เพิ่มขึ้นจาก 19,018 Btu/hr เป็น 19,164 Btu/hr โดยเพิ่มขึ้นคิดเป็น 0.78%



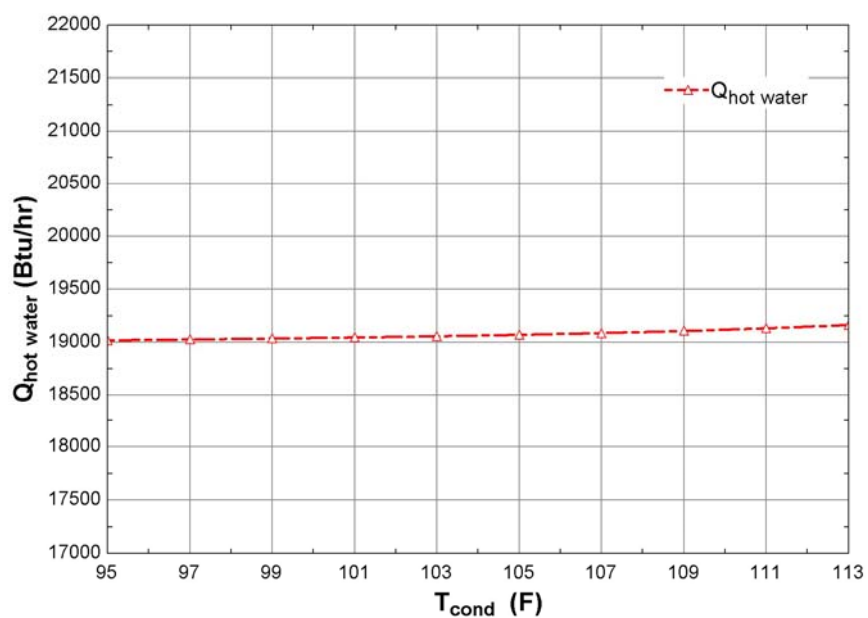
ภาพที่ 24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องควบแน่น (T_{cond}) เทียบกับปริมาณความร้อนที่เครื่องผลิต (Q_{gen}) เครื่องดูดซึม (Q_{abs}) เครื่องควบแน่น (Q_{cond}) และเครื่องระเหย (Q_{evap})



ภาพที่ 25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องควบแน่น (T_{cond}) เทียบกับปริมาณความร้อนที่เครื่องอัดไอน้ำความร้อน (Q_{comp})



ภาพที่ 26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องควบแน่น (T_{cond}) เทียบกับปริมาณความร้อนที่คอยล์ร้อนในปั๊มความร้อน ($Q_{\text{hot coil}}$)



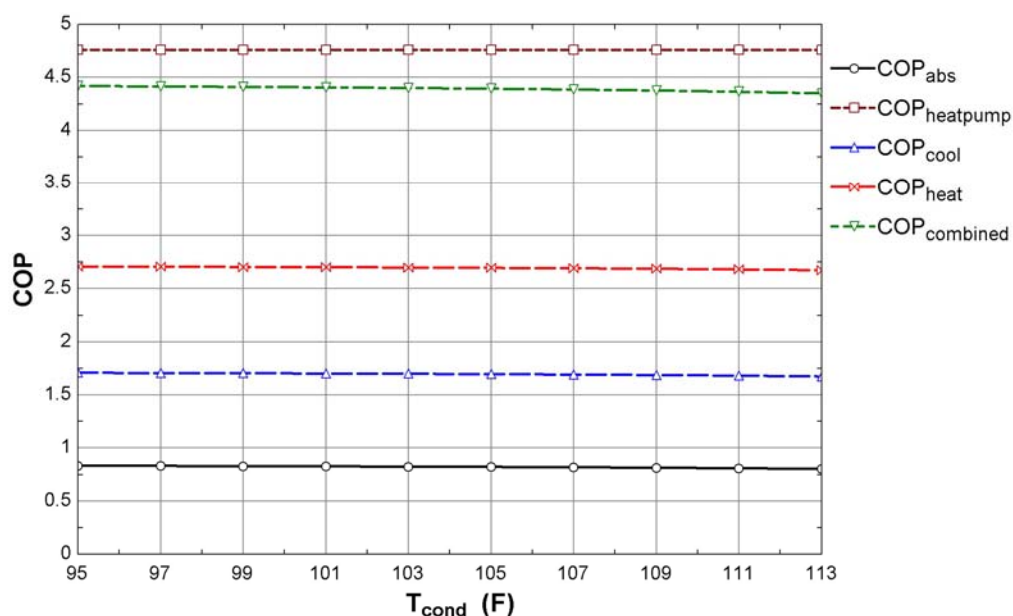
ภาพที่ 27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องควบแน่น (T_{cond}) เทียบกับปริมาณความร้อนที่หล่อไปใช้น้ำร้อน ($Q_{\text{hot water}}$)

ตารางที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องควบแน่นของการทำความเย็นแบบดูดซึม (T_{cond})
เทียบกับค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะต่างๆ

T_{cond} (°F)	COP_{abs}	$\text{COP}_{\text{heat pump}}$	COP_{cool}	COP_{heat}	$\text{COP}_{\text{combined}}$
95	0.834	4.76	1.710	2.710	4.420
97	0.832	4.76	1.708	2.708	4.416
99	0.830	4.76	1.706	2.706	4.412
101	0.828	4.76	1.703	2.703	4.406
103	0.825	4.76	1.700	2.700	4.400
105	0.823	4.76	1.697	2.697	4.394
107	0.819	4.76	1.693	2.693	4.386
109	0.815	4.76	1.688	2.688	4.376
111	0.810	4.76	1.683	2.683	4.366
113	0.803	4.76	1.675	2.675	4.350

จากตารางที่ 7 จะพบว่าเมื่ออุณหภูมิที่เครื่องควบแน่น (T_{cond}) เพิ่มขึ้นจาก 95 °F เป็น 113 °F จะมีผลกับค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะต่างๆ ดังนี้

1. สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของการทำความเย็นแบบดูดซึม (COP_{abs}) ลดลงจาก 0.834 เป็น 0.803 โดยลดลงคิดเป็น 3.72%
2. สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของปั๊มความร้อน ($\text{COP}_{\text{heat pump}}$) ไม่มีค่าเปลี่ยนแปลงโดยจะมีค่าคงที่เท่ากับ 4.76
3. สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะการทำความเย็นของวัฏจักรร่วม (COP_{cool}) ลดลงจาก 1.71 เป็น 1.675 โดยลดลงคิดเป็น 2.05%
4. สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะการทำความร้อนของวัฏจักรร่วม (COP_{heat}) ลดลงจาก 2.71 เป็น 2.675 โดยลดลงคิดเป็น 1.29%
5. สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของวัฏจักรร่วม ($\text{COP}_{\text{combined}}$) ลดลงจาก 4.42 เป็น 4.35 โดยลดลงคิดเป็น 1.58%



ภาพที่ 28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องควบแน่น (T_{cond}) เทียบกับค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะต่างๆ

จะเห็นว่าเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิที่เครื่องควบแน่นของการทำความเย็นแบบดูดซึม (T_{cond}) จาก 95 °F เป็น 113 °F จะทำให้ปริมาณความร้อนในแต่ละอุปกรณ์เพิ่มขึ้นเล็กน้อย และค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของวัฏจักรรวมลดลงเล็กน้อย แต่จะมีผลมากสำหรับอัตราการไหลของสารละลายลิเทียมโบรไมด์เข้มข้นและสารละลายลิเทียมโบรไมด์เจือจาง โดยจะมีอัตราการไหลเพิ่มขึ้น ซึ่งอุณหภูมิที่ทำให้ค่า $COP_{combined}$ สูงสุดสำหรับอุณหภูมิที่เครื่องควบแน่น (T_{cond}) คือ 95 °F

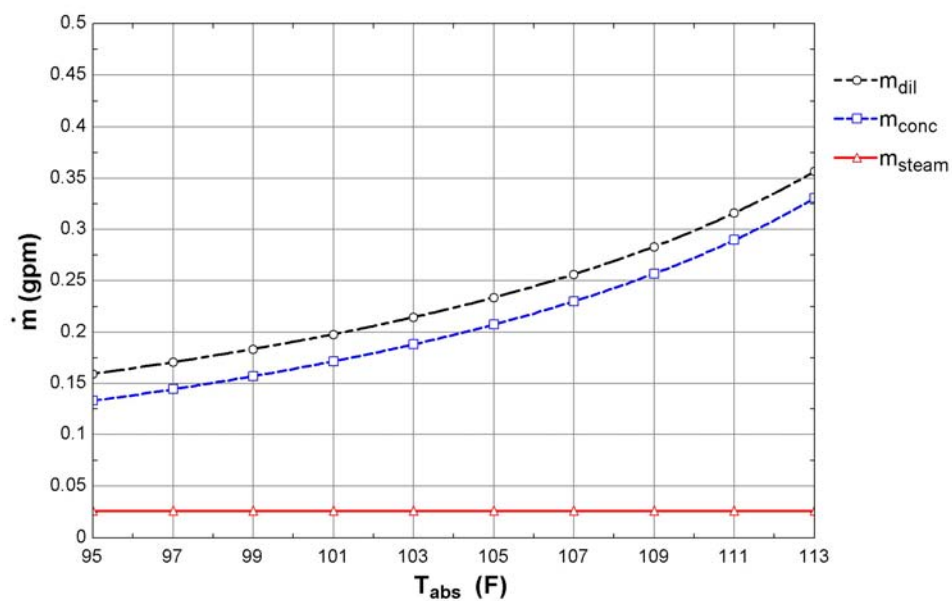
ผลการวิเคราะห์เมื่ออุณหภูมิที่เครื่องดูดซึมของการทำความเย็นแบบดูดซึม (T_{abs}) เปลี่ยนแปลง โดยกำหนดให้ $T_{gen} = 176\text{ }^{\circ}\text{F}$, $T_{cond} = 95\text{ }^{\circ}\text{F}$, $T_{evap} = 55\text{ }^{\circ}\text{F}$, $T_{hot\ coil} = 194\text{ }^{\circ}\text{F}$ และ $T_{cold\ coil} = 86\text{ }^{\circ}\text{F}$ คงที่

ตารางที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องดูดซึมของการทำความเย็นแบบดูดซึม (T_{abs}) เทียบกับอัตราการไหลของสารทำความเย็นต่างๆ

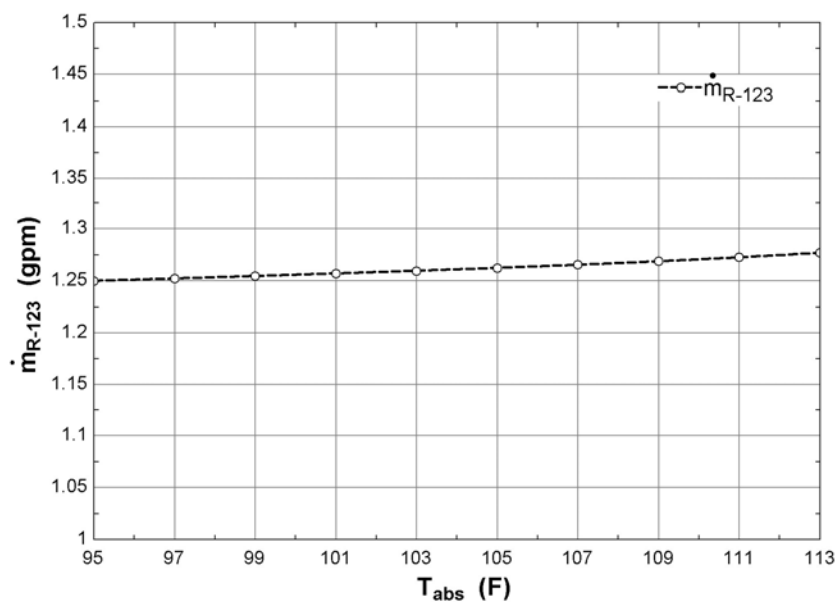
T_{abs} ($^{\circ}\text{F}$)	$\dot{m}_{dil}$ (gpm)	$\dot{m}_{conc}$ (gpm)	$\dot{m}_{steam}$ (gpm)	$\dot{m}_{R-123}$ (gpm)
95	0.159	0.133	0.026	1.250
97	0.171	0.145	0.026	1.252
99	0.183	0.157	0.026	1.255
101	0.198	0.172	0.026	1.257
103	0.214	0.188	0.026	1.260
105	0.234	0.208	0.026	1.262
107	0.256	0.230	0.026	1.265
109	0.283	0.257	0.026	1.269
111	0.316	0.290	0.026	1.273
113	0.357	0.331	0.026	1.277

จากตารางที่ 8 จะพบว่าเมื่ออุณหภูมิที่เครื่องดูดซึมของการทำความเย็นแบบดูดซึม (T_{abs}) เพิ่มขึ้นจาก $95\text{ }^{\circ}\text{F}$ เป็น $113\text{ }^{\circ}\text{F}$ จะมีผลต่ออัตราการไหลของสารทำความเย็นต่างๆ ดังนี้

1. อัตราการไหลของสารละลายเจือจางลิเทียมโบรไมด์-น้ำ ($\dot{m}_{dil}$) มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.159 gpm เป็น 0.357 gpm โดยเพิ่มขึ้นคิดเป็น 124.53%
2. อัตราการไหลของสารละลายเข้มข้นลิเทียมโบรไมด์-น้ำ ($\dot{m}_{conc}$) มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.133 gpm เป็น 0.331 gpm โดยเพิ่มขึ้นคิดเป็น 148.87%
3. อัตราการไหลของสารทำความเย็นน้ำ ($\dot{m}_{steam}$) ไม่มีค่าเปลี่ยนแปลงโดยมีค่าคงที่เท่ากับ 0.026 gpm
4. อัตราการไหลของทำความเย็น R-123 ($\dot{m}_{R-123}$) มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1.25 gpm เป็น 1.277 gpm โดยเพิ่มขึ้นคิดเป็น 2.16%



ภาพที่ 29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องดูดซึม (T_{abs}) เทียบกับอัตราการไหลของสารละลายเจือจาง ($\dot{m}_{dil}$) อัตราการไหลของสารละลายเข้มข้น ($\dot{m}_{conc}$) และอัตราการไหลของสารทำความเย็นน้ำ ($\dot{m}_{steam}$)



ภาพที่ 30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องดูดซึม (T_{abs}) เทียบกับอัตราการไหลของสารทำความเย็น R-123 ($\dot{m}_{R-123}$)

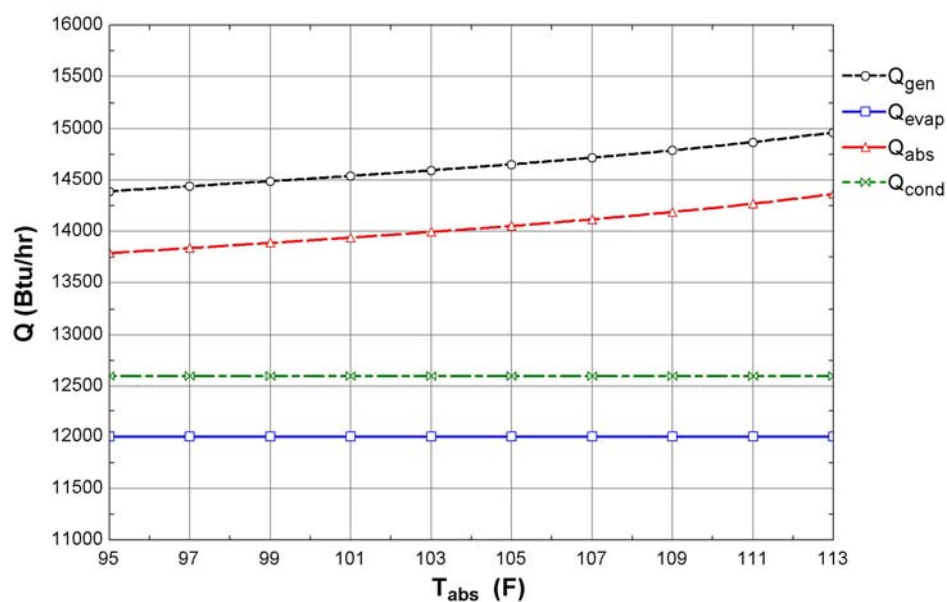
ตารางที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องดูดซึมของการทำความเย็นแบบดูดซึม (T_{abs})
เทียบกับปริมาณความร้อนที่อุปกรณ์ต่างๆ ของการทำความเย็นแบบดูดซึมและปั๊ม
ความร้อน

T_{abs} (°F)	Q_{gen} (Btu/hr)	Q_{abs} (Btu/hr)	Q_{cond} (Btu/hr)	Q_{comp} (Btu/hr)	$Q_{hot\ coil}$ (Btu/hr)	$Q_{hot\ water}$ (Btu/hr)
95	14,391	13,790	12,601	7,018	33,409	19,018
97	14,440	13,839	12,601	7,031	33,471	19,031
99	14,490	13,889	12,601	7,045	33,535	19,045
101	14,542	13,941	12,601	7,058	33,600	19,058
103	14,596	13,995	12,601	7,073	33,669	19,073
105	14,655	14,054	12,601	7,088	33,743	19,088
107	14,719	14,118	12,601	7,106	33,825	19,106
109	14,790	14,189	12,601	7,124	33,914	19,124
111	14,871	14,270	12,601	7,146	34,017	19,146
113	14,966	14,365	12,601	7,171	34,137	19,171

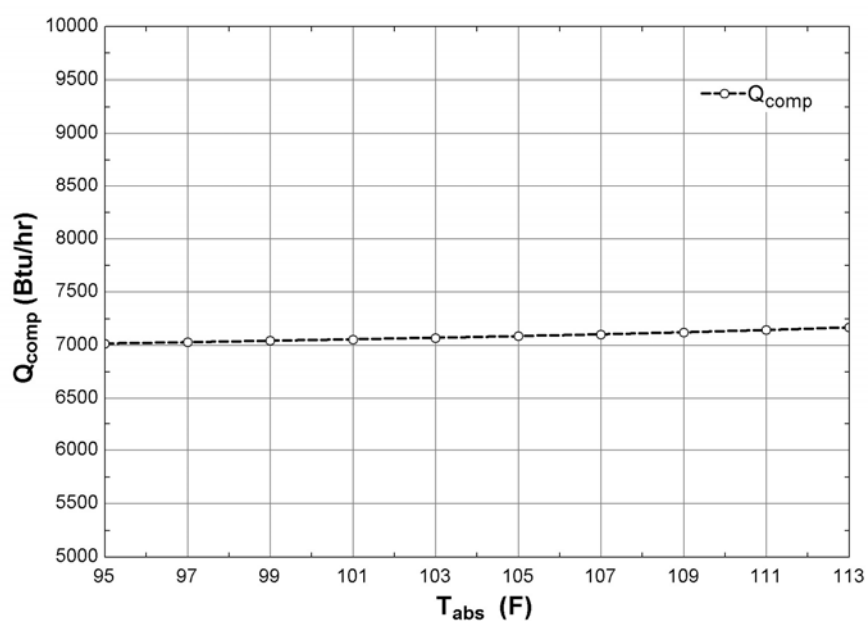
จากตารางที่ 9 จะพบว่าเมื่ออุณหภูมิที่เครื่องดูดซึม (T_{abs}) เพิ่มขึ้นจาก 95 °F เป็น 113 °F จะมีผลกับปริมาณความร้อนที่อุปกรณ์ต่างๆ ของการทำความเย็นแบบดูดซึมและปั๊มความร้อนดังนี้

1. ปริมาณความร้อนที่ต้องการของเครื่องผลิต (Q_{gen}) เพิ่มขึ้นจาก 14,391 Btu/hr เป็น 14,966 Btu/hr โดยเพิ่มขึ้นคิดเป็น 4%
2. ปริมาณความร้อนที่คายออกจากเครื่องดูดซึม (Q_{abs}) เพิ่มขึ้นจาก 13,790 Btu/hr เป็น 14,365 Btu/hr โดยเพิ่มขึ้นคิดเป็น 4.17%
3. ปริมาณความร้อนที่คายออกจากเครื่องควบแน่น (Q_{cond}) ไม่มีค่าเปลี่ยนแปลง โดยจะมีค่าคงที่เท่ากับ 12,601 Btu/hr
4. ปริมาณความร้อนที่ต้องการของเครื่องอัดในปั๊มความร้อน (Q_{comp}) เพิ่มขึ้นจาก 7,018 Btu/hr เป็น 7,171 Btu/hr โดยเพิ่มขึ้นคิดเป็น 2.18%
5. ปริมาณความร้อนที่คายออกจากคอยล์ร้อนในปั๊มความร้อน ($Q_{hot\ coil}$) เพิ่มขึ้นจาก 33,409 Btu/hr เป็น 34,137 Btu/hr โดยเพิ่มขึ้นคิดเป็น 2.18%

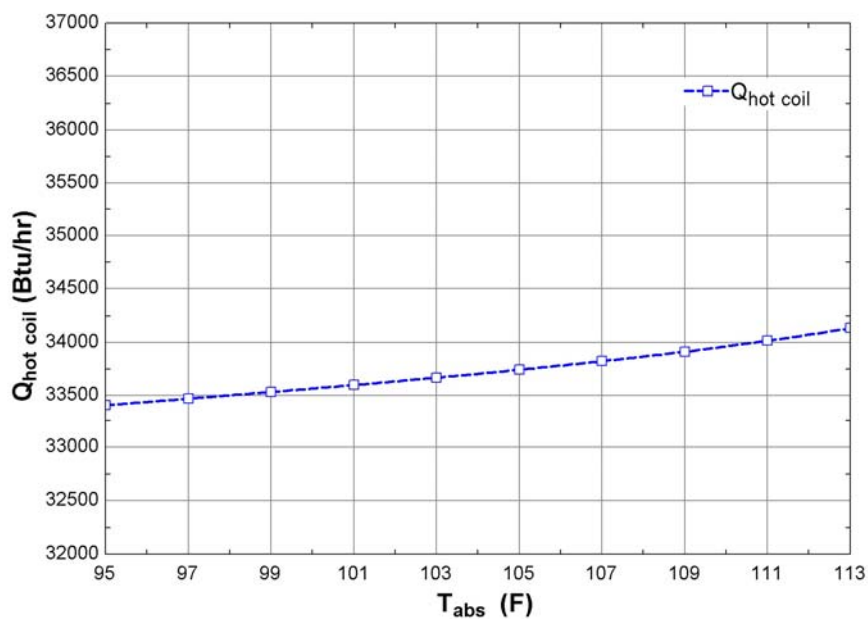
6. ปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปใช้น้ำร้อน ($Q_{\text{hot water}}$) เพิ่มขึ้นจาก 19,018 Btu/hr เป็น 19,171 Btu/hr โดยเพิ่มขึ้นคิดเป็น 0.8%



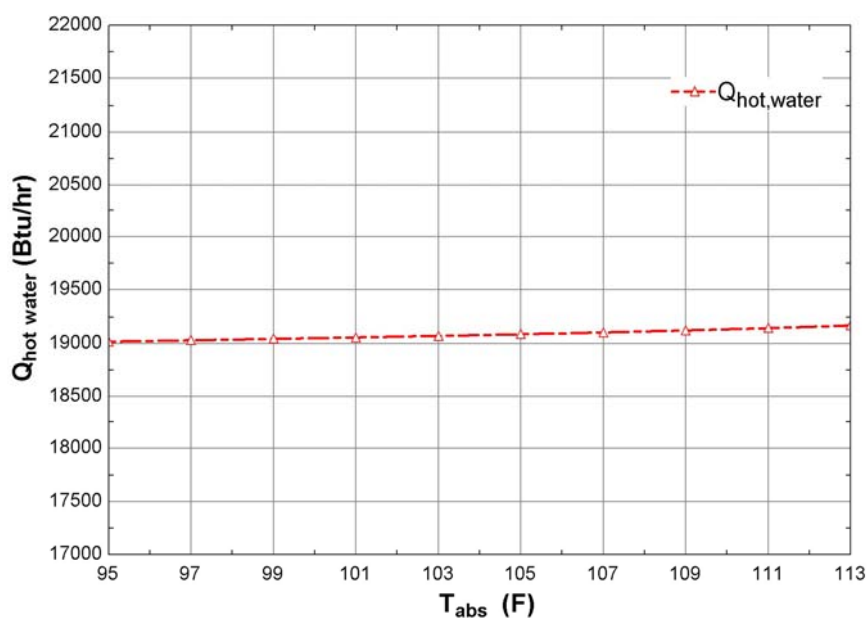
ภาพที่ 31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องดูดซึม (T_{abs}) เทียบกับปริมาณความร้อนที่เครื่องผลิต (Q_{gen}) เครื่องดูดซึม (Q_{abs}) เครื่องควบแน่น (Q_{cond}) และเครื่องระเหย (Q_{evap})



ภาพที่ 32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องดูดซึม (T_{abs}) เทียบกับปริมาณความร้อนที่เครื่องอัดในปั๊มความร้อน (Q_{comp})



ภาพที่ 33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องดูดซึม (T_{abs}) เทียบกับปริมาณความร้อนที่คอยล์ร้อนในปั๊มความร้อน ($Q_{hot\ coil}$)



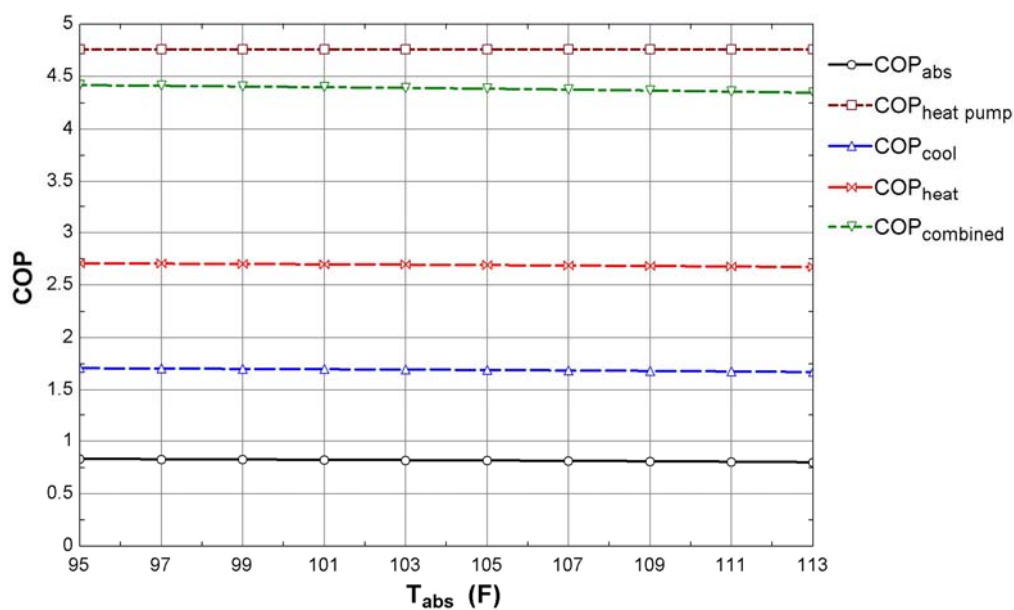
ภาพที่ 34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องดูดซึม (T_{abs}) เทียบกับปริมาณความร้อนที่หล่อไปใช้น้ำร้อน ($Q_{hot\ water}$)

ตารางที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องดูดซึมของการทำความเย็นแบบดูดซึม (T_{abs})
เทียบกับค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะต่างๆ

T_{abs} (°F)	COP_{abs}	$COP_{heat\ pump}$	COP_{cool}	COP_{heat}	$COP_{combined}$
95	0.834	4.76	1.710	2.710	4.420
97	0.831	4.76	1.707	2.707	4.414
99	0.828	4.76	1.703	2.703	4.406
101	0.825	4.76	1.700	2.700	4.400
103	0.822	4.76	1.697	2.697	4.394
105	0.819	4.76	1.693	2.693	4.386
107	0.815	4.76	1.689	2.689	4.378
109	0.811	4.76	1.684	2.684	4.368
111	0.807	4.76	1.679	2.679	4.358
113	0.802	4.76	1.673	2.673	4.346

จากตารางที่ 10 จะพบว่าเมื่ออุณหภูมิที่เครื่องดูดซึม (T_{abs}) เพิ่มขึ้นจาก 95 °F เป็น 113 °F จะมีผลกับค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะต่างๆ ดังนี้

1. สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของการทำความเย็นแบบดูดซึม (COP_{abs}) ลดลงจาก 0.834 เป็น 0.802 โดยลดลงคิดเป็น 3.84%
2. สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของปั๊มความร้อน ($COP_{heat\ pump}$) ไม่มีค่าเปลี่ยนแปลงโดยจะมีค่าคงที่เท่ากับ 4.76
3. สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะการทำความเย็นของวัฏจักรรวม (COP_{cool}) ลดลงจาก 1.71 เป็น 1.673 โดยลดลงคิดเป็น 2.16%
4. สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะการทำความร้อนของวัฏจักรรวม (COP_{heat}) ลดลงจาก 2.71 เป็น 2.673 โดยลดลงคิดเป็น 1.37%
5. สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของวัฏจักรรวม ($COP_{combined}$) ลดลงจาก 4.42 เป็น 4.346 โดยลดลงคิดเป็น 1.67%



ภาพที่ 35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องดูดซึม (T_{abs}) เทียบกับค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะต่างๆ

จะเห็นว่าเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิที่เครื่องดูดซึมของการทำความเย็นแบบดูดซึม (T_{abs}) จาก 95 °F เป็น 113 °F จะทำให้ปริมาณความร้อนในแต่ละอุปกรณ์เพิ่มขึ้นเล็กน้อย และสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของวัฏจักรร่วมมีค่าลดลงเล็กน้อย แต่จะมีผลมากสำหรับอัตราการไหลของสารละลายลิเทียมโบรไมด์เข้มข้นและสารละลายลิเทียมโบรไมด์เจือจาง โดยจะมีอัตราการไหลเพิ่มขึ้น ซึ่งอุณหภูมิที่ให้ค่า $COP_{combined}$ สูงสุดสำหรับอุณหภูมิที่เครื่องดูดซึม (T_{abs}) คือ 95 °F

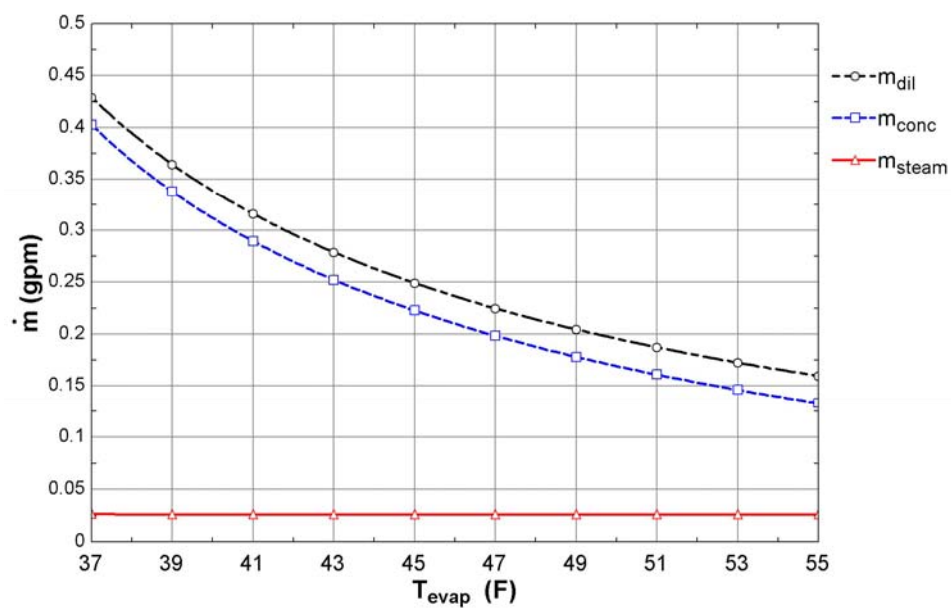
ผลการวิเคราะห์เมื่ออุณหภูมิที่เครื่องระเหยของการทำความเย็นแบบดูดซึม (T_{evap}) เปลี่ยนแปลง โดยกำหนดให้ $T_{\text{gen}} = 176^\circ\text{F}$, $T_{\text{cond}} = 95^\circ\text{F}$, $T_{\text{abs}} = 95^\circ\text{F}$, $T_{\text{hot coil}} = 194^\circ\text{F}$ และ $T_{\text{cold coil}} = 86^\circ\text{F}$ ดังที่

ตารางที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องระเหยของการทำความเย็นแบบดูดซึม (T_{evap}) เทียบกับอัตราการไหลของสารทำความเย็นต่างๆ

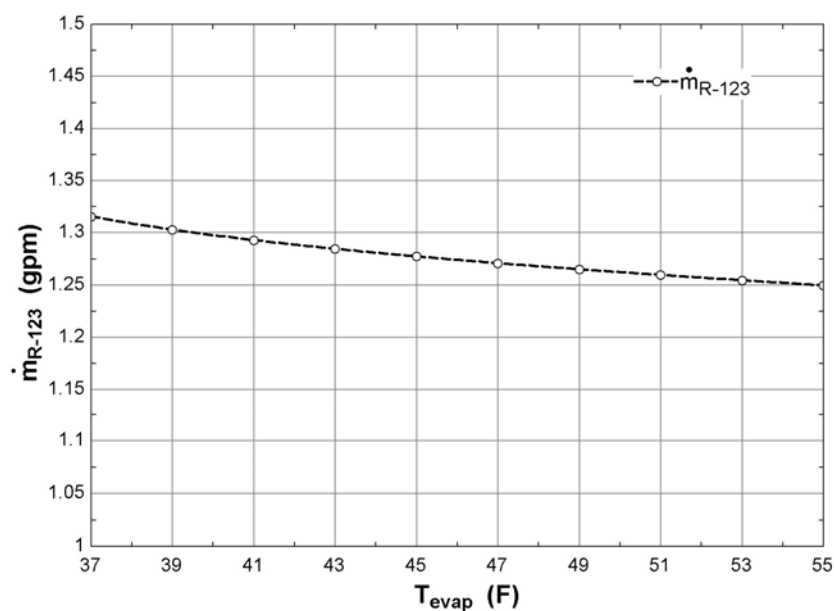
T_{evap} ($^\circ\text{F}$)	$\dot{m}_{\text{dil}}$ (gpm)	$\dot{m}_{\text{conc}}$ (gpm)	$\dot{m}_{\text{steam}}$ (gpm)	$\dot{m}_{\text{R-123}}$ (gpm)
37	0.429	0.402	0.027	1.316
39	0.365	0.338	0.027	1.303
41	0.317	0.290	0.027	1.293
43	0.279	0.252	0.027	1.285
45	0.250	0.223	0.027	1.277
47	0.224	0.198	0.026	1.271
49	0.204	0.178	0.026	1.265
51	0.187	0.161	0.026	1.260
53	0.172	0.146	0.026	1.255
55	0.159	0.133	0.026	1.250

จากตารางที่ 11 จะพบว่าเมื่ออุณหภูมิที่เครื่องระเหยของการทำความเย็นแบบดูดซึม (T_{evap}) เพิ่มขึ้นจาก 37°F เป็น 55°F จะมีผลต่ออัตราการไหลของสารทำความเย็นต่างๆ ดังนี้

1. อัตราการไหลของสารละลายเจือจางลิเทียมโบรไมด์-น้ำ ($\dot{m}_{\text{dil}}$) มีค่าลดลงจาก 0.429 gpm เป็น 0.159 gpm โดยลดลงคิดเป็น 62.94%
2. อัตราการไหลของสารละลายเข้มข้นลิเทียม โบรไมด์-น้ำ ($\dot{m}_{\text{conc}}$) มีค่าลดลงจาก 0.402 gpm เป็น 0.133 gpm โดยลดลงคิดเป็น 66.92%
3. อัตราการไหลของสารทำความเย็นน้ำ ($\dot{m}_{\text{steam}}$) มีค่าลดลงจาก 0.027 gpm เป็น 0.026 gpm โดยลดลงคิดเป็น 3.7%
4. อัตราการไหลของสารทำความเย็น R-123 ($\dot{m}_{\text{R-123}}$) มีค่าลดลงจาก 1.316 gpm เป็น 1.25 gpm โดยลดลงคิดเป็น 5.02%



ภาพที่ 36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องระเหย (T_{evap}) เทียบกับอัตราการไหลของสารละลายเจือจาง ($\dot{m}_{\text{dil}}$) อัตราการไหลของสารละลายเข้มข้น ($\dot{m}_{\text{conc}}$) และอัตราการไหลของสารทำความเย็นน้ำ ($\dot{m}_{\text{steam}}$)



ภาพที่ 37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องระเหย (T_{evap}) เทียบกับอัตราการไหลของสารทำความเย็น R-123 ($\dot{m}_{\text{R-123}}$)

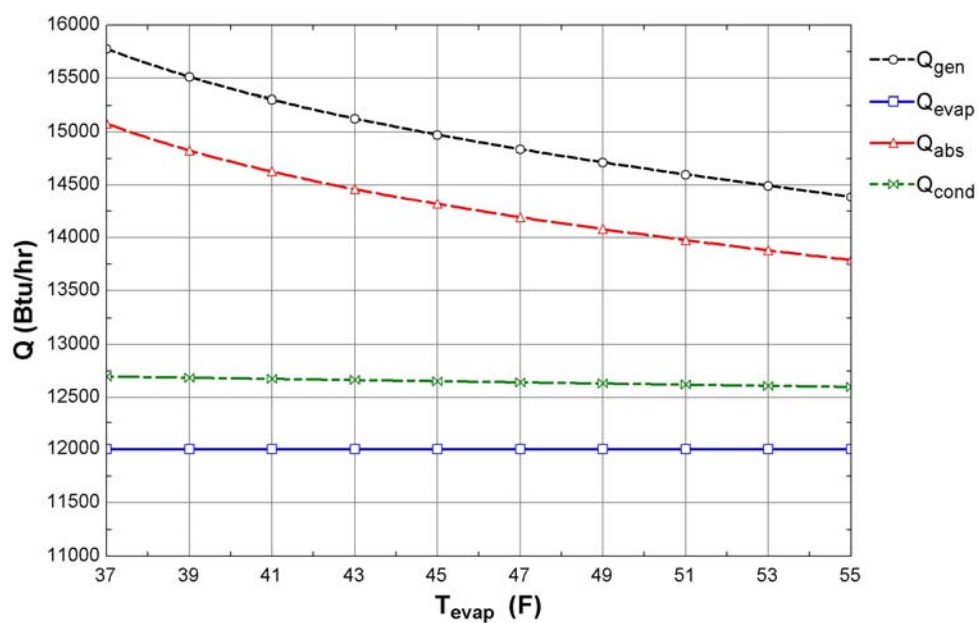
ตารางที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องระเหยของการทำความเย็นแบบดูดซึม (T_{evap})
เทียบกับปริมาณความร้อนที่อุปกรณ์ต่างๆ ของการทำความเย็นแบบดูดซึมและปั๊ม
ความร้อน

T_{evap} (°F)	Q_{gen} (Btu/hr)	Q_{abs} (Btu/hr)	Q_{cond} (Btu/hr)	Q_{comp} (Btu/hr)	$Q_{\text{hot coil}}$ (Btu/hr)	$Q_{\text{hot water}}$ (Btu/hr)
37	15,779	15,080	12,699	7,387	35,166	19,387
39	15,515	14,827	12,688	7,317	34,832	19,317
41	15,304	14,627	12,677	7,261	34,565	19,261
43	15,127	14,461	12,666	7,214	34,341	19,214
45	14,976	14,321	12,655	7,174	34,149	19,173
47	14,839	14,195	12,644	7,137	33,976	19,137
49	14,715	14,081	12,634	7,104	33,820	19,105
51	14,601	13,978	12,623	7,074	33,675	19,074
53	14,493	13,881	12,612	7,045	33,539	19,046
55	14,391	13,790	12,601	7,018	33,409	19,018

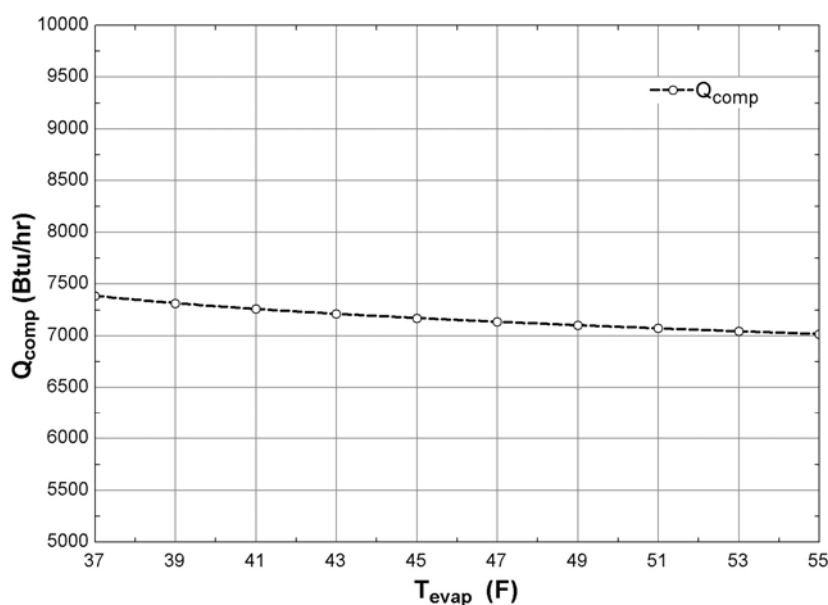
จากตารางที่ 12 จะพบว่าเมื่ออุณหภูมิที่เครื่องระเหย (T_{evap}) เพิ่มขึ้นจาก 37 °F เป็น 55 °F จะมีผลกับปริมาณความร้อนที่อุปกรณ์ต่างๆ ของการทำความเย็นแบบดูดซึมและปั๊มความร้อนดังนี้

1. ปริมาณความร้อนที่ต้องการของเครื่องผลิต (Q_{gen}) ลดลงจาก 15,779 Btu/hr เป็น 14,391 Btu/hr โดยลดลงคิดเป็น 8.8%
2. ปริมาณความร้อนที่คายออกจากเครื่องดูดซึม (Q_{abs}) ลดลงจาก 15,080 Btu/hr เป็น 13,790 Btu/hr โดยลดลงคิดเป็น 8.55%
3. ปริมาณความร้อนที่คายออกจากเครื่องควบแน่น (Q_{cond}) ลดลงจาก 12,699 Btu/hr เป็น 12,601 Btu/hr โดยลดลงคิดเป็น 0.77%
4. ปริมาณความร้อนที่ต้องการของเครื่องอัดในปั๊มความร้อน (Q_{comp}) ลดลงจาก 7,387 Btu/hr เป็น 7,018 Btu/hr โดยลดลงคิดเป็น 5%
5. ปริมาณความร้อนที่คายออกจากคอยล์ร้อนในปั๊มความร้อน ($Q_{\text{hot coil}}$) ลดลงจาก 35,166 Btu/hr เป็น 33,409 Btu/hr โดยลดลงคิดเป็น 5%

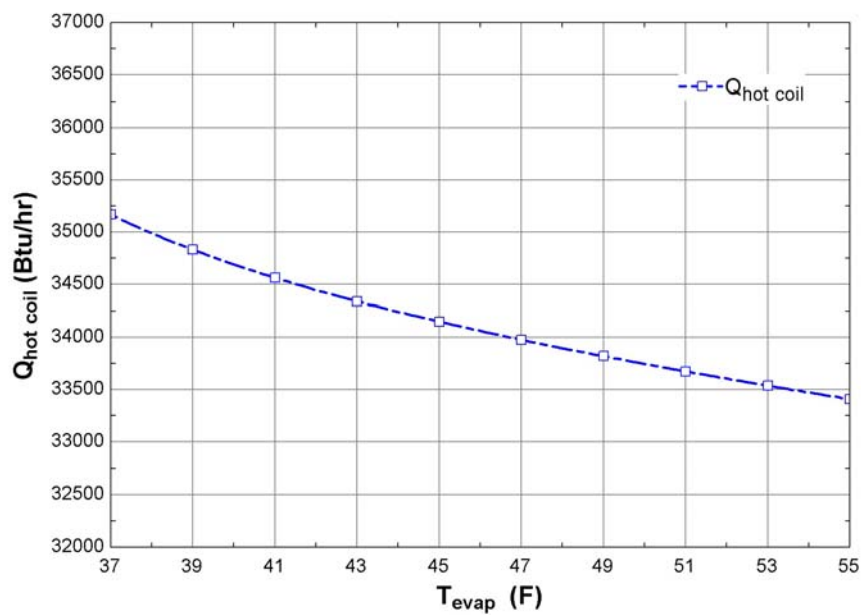
6. ปริมาณความร้อนที่เหลือไปใช้น้ำร้อน ($Q_{\text{hot-water}}$) ลดลงจาก 19,387 Btu/hr เป็น 19,018 Btu/hr โดยลดลงคิดเป็น 1.9%



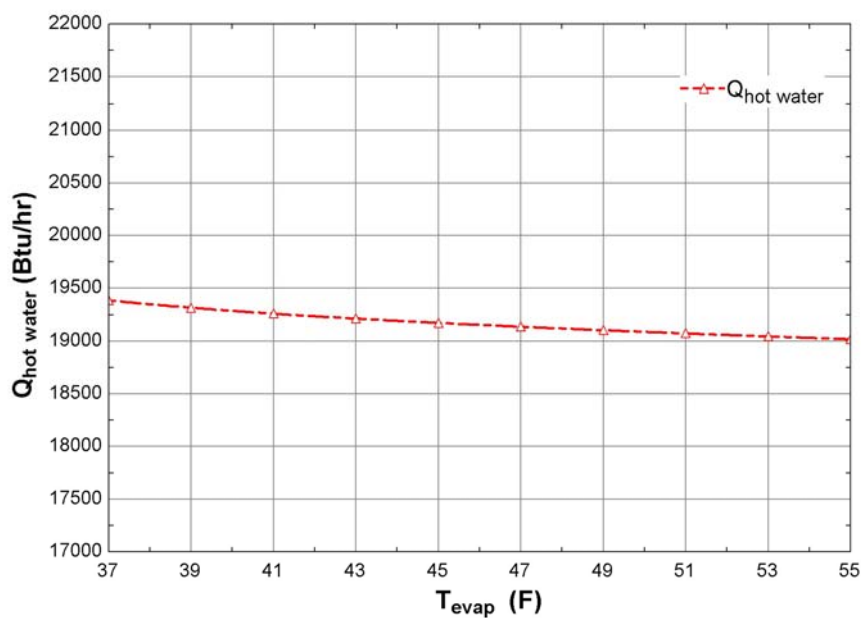
ภาพที่ 38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องระเหย (T_{evap}) เทียบกับปริมาณความร้อนที่เครื่องผลิต (Q_{gen}) เครื่องดูดซึม (Q_{abs}) เครื่องควบแน่น (Q_{cond}) และเครื่องระเหย (Q_{evap})



ภาพที่ 39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องระเหย (T_{evap}) เทียบกับปริมาณความร้อนที่เครื่องอัดไอน้ำความร้อน (Q_{comp})



ภาพที่ 40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องระเหย (T_{evap}) เทียบกับปริมาณความร้อนที่คอยล์ร้อนในปั๊มความร้อน ($Q_{\text{hot coil}}$)



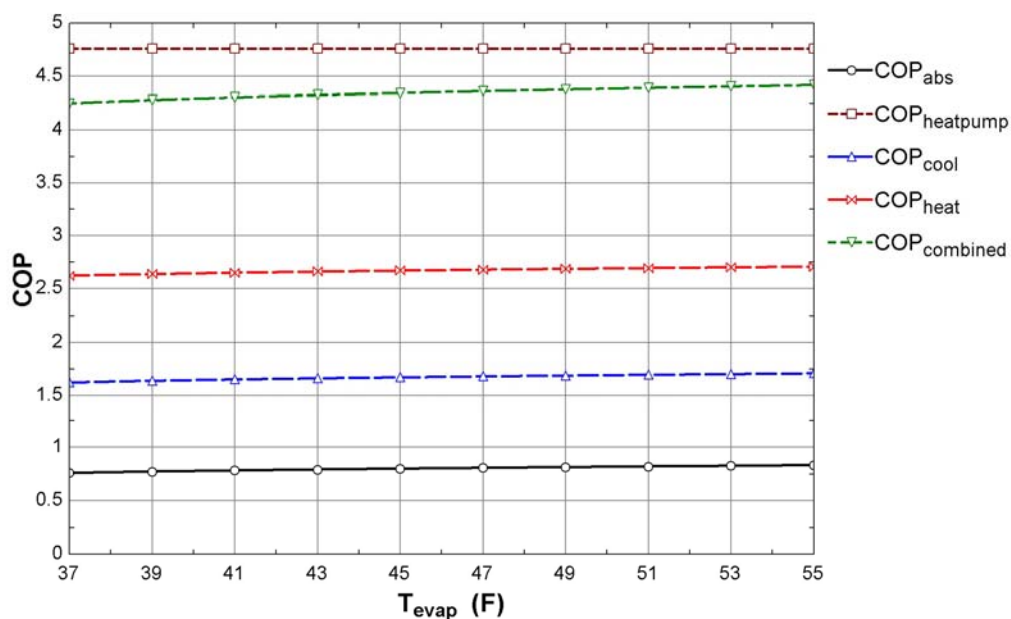
ภาพที่ 41 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องระเหย (T_{evap}) เทียบกับปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปใช้ทำน้ำร้อน ($Q_{\text{hot water}}$)

ตารางที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องระเหยของการทำความเย็นแบบดูดซึม (T_{evap})
เทียบกับค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะต่างๆ

T_{evap} (°F)	COP_{abs}	$\text{COP}_{\text{heat pump}}$	COP_{cool}	COP_{heat}	$\text{COP}_{\text{combined}}$
37	0.760	4.76	1.624	2.624	4.248
39	0.773	4.76	1.640	2.640	4.280
41	0.784	4.76	1.653	2.653	4.306
43	0.793	4.76	1.663	2.663	4.326
45	0.801	4.76	1.673	2.673	4.346
47	0.809	4.76	1.681	2.681	4.362
49	0.815	4.76	1.689	2.689	4.378
51	0.822	4.76	1.696	2.696	4.392
53	0.828	4.76	1.703	2.703	4.406
55	0.834	4.76	1.710	2.710	4.420

จากตารางที่ 13 จะพบว่าเมื่ออุณหภูมิที่เครื่องระเหย (T_{evap}) เพิ่มขึ้นจาก 37 °F เป็น 55 °F จะมีผลกับค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะต่างๆ ดังนี้

1. สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของการทำความเย็นแบบดูดซึม (COP_{abs}) เพิ่มขึ้นจาก 0.76 เป็น 0.834 โดยเพิ่มขึ้นคิดเป็น 9.74%
2. สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของปั๊มความร้อน ($\text{COP}_{\text{heat pump}}$) ไม่มีค่าเปลี่ยนแปลงโดยจะมีค่าคงที่เท่ากับ 4.76
3. สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะการทำความเย็นของวัฏจักรร่วม (COP_{cool}) เพิ่มขึ้นจาก 1.624 เป็น 1.71 โดยเพิ่มขึ้นคิดเป็น 5.3%
4. สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะการทำความร้อนของวัฏจักรร่วม (COP_{heat}) เพิ่มขึ้นจาก 2.624 เป็น 2.71 โดยเพิ่มขึ้นคิดเป็น 3.28%
5. สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของวัฏจักรร่วม ($\text{COP}_{\text{combined}}$) เพิ่มขึ้นจาก 4.248 เป็น 4.42 โดยเพิ่มขึ้นคิดเป็น 4.05%



ภาพที่ 42 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เครื่องระเหย (T_{evap}) เทียบกับค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะต่างๆ

จะเห็นว่าเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิที่เครื่องระเหยของการทำความเย็นแบบดูดซึม (T_{evap}) จาก 37 °F เป็น 55 °F จะทำให้ปริมาณความร้อนในแต่ละอุปกรณ์ลดลง และสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของวัฏจักรรวมมีค่าเพิ่มขึ้น แต่จะมีผลมากสำหรับอัตราการไหลของสารละลายลิเทียมโบรไมด์เข้มข้นและสารละลายลิเทียมโบรไมด์เจือจาง โดยจะมีอัตราการไหลลดลง ซึ่งอุณหภูมิที่ให้ค่า $\text{COP}_{\text{combined}}$ สูงสุดสำหรับอุณหภูมิที่เครื่องระเหย (T_{evap}) คือ 55 °F

ผลการวิเคราะห์เมื่ออุณหภูมิที่คอยล์ร้อนของปั๊มความร้อน ($T_{\text{hot coil}}$) เปลี่ยนแปลง

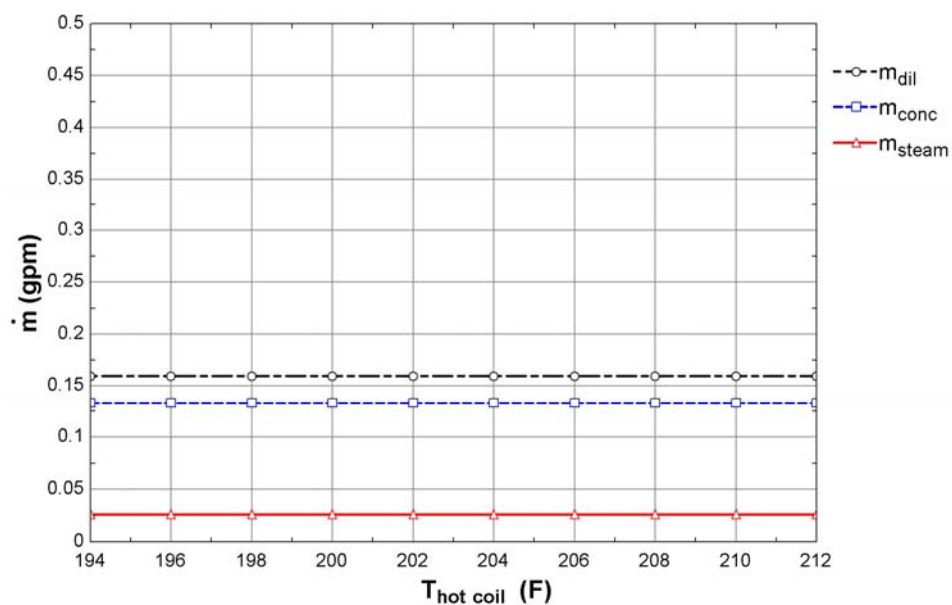
โดยกำหนดให้ $T_{\text{gen}} = 176^\circ\text{F}$, $T_{\text{cond}} = 95^\circ\text{F}$, $T_{\text{abs}} = 95^\circ\text{F}$, $T_{\text{evap}} = 55^\circ\text{F}$ และ $T_{\text{cold coil}} = 86^\circ\text{F}$ คงที่

ตารางที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่คอยล์ร้อนของปั๊มความร้อน ($T_{\text{hot coil}}$) เทียบกับอัตราการไหลของสารทำความเย็นต่างๆ

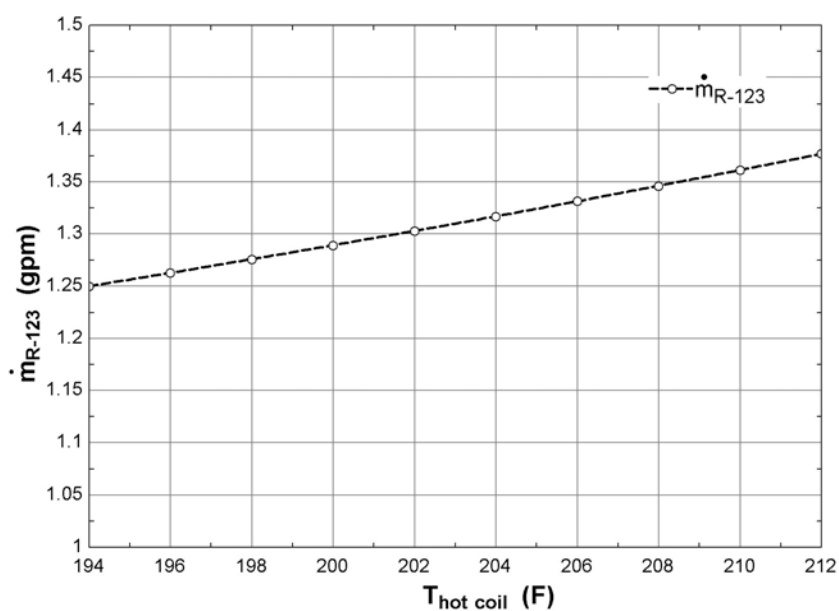
$T_{\text{hot coil}}$ ($^\circ\text{F}$)	$\dot{m}_{\text{dil}}$ (gpm)	$\dot{m}_{\text{conc}}$ (gpm)	$\dot{m}_{\text{steam}}$ (gpm)	$\dot{m}_{\text{R-123}}$ (gpm)
194	0.159	0.133	0.026	1.250
196	0.159	0.133	0.026	1.263
198	0.159	0.133	0.026	1.276
200	0.159	0.133	0.026	1.289
202	0.159	0.133	0.026	1.303
204	0.159	0.133	0.026	1.317
206	0.159	0.133	0.026	1.332
208	0.159	0.133	0.026	1.346
210	0.159	0.133	0.026	1.362
212	0.159	0.133	0.026	1.377

จากตารางที่ 14 จะพบว่าเมื่ออุณหภูมิที่คอยล์ร้อนของปั๊มความร้อน ($T_{\text{hot coil}}$) เพิ่มขึ้นจาก 194°F เป็น 212°F จะมีผลต่ออัตราการไหลของสารทำความเย็นต่างๆ ดังนี้

- อัตราการไหลของสารละลายเจือจางลิเทียมโบรไมด์-น้ำ ($\dot{m}_{\text{dil}}$) ไม่มีค่าเปลี่ยนแปลง โดยจะมีค่าคงที่เท่ากับ 0.159 gpm
- อัตราการไหลของสารละลายเข้มข้นลิเทียมโบรไมด์-น้ำ ($\dot{m}_{\text{conc}}$) ไม่มีค่าเปลี่ยนแปลง โดยมีค่าคงที่เท่ากับ 0.133 gpm
- อัตราการไหลของสารทำความเย็นน้ำ ($\dot{m}_{\text{steam}}$) ไม่มีค่าเปลี่ยนแปลงเช่นกัน โดยมีค่าคงที่เท่ากับ 0.026 gpm
- อัตราการไหลของทำความเย็น R-123 ($\dot{m}_{\text{R-123}}$) มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1.25 gpm เป็น 1.377 gpm โดยเพิ่มขึ้นคิดเป็น 10.16%



ภาพที่ 43 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่คอยล์ร้อนของปั๊มความร้อน ($T_{\text{hot coil}}$) เทียบกับ อัตราการไหลของสารละลายเจือจาง ($\dot{m}_{\text{dil}}$) อัตราการไหลของสารละลายเข้มข้น ($\dot{m}_{\text{conc}}$) และอัตราการไหลของสารทำความเย็นน้ำ ($\dot{m}_{\text{steam}}$)



ภาพที่ 44 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่คอยล์ร้อนของปั๊มความร้อน ($T_{\text{hot coil}}$) เทียบกับ อัตราการไหลของสารทำความเย็น R-123 ($\dot{m}_{\text{R-123}}$)

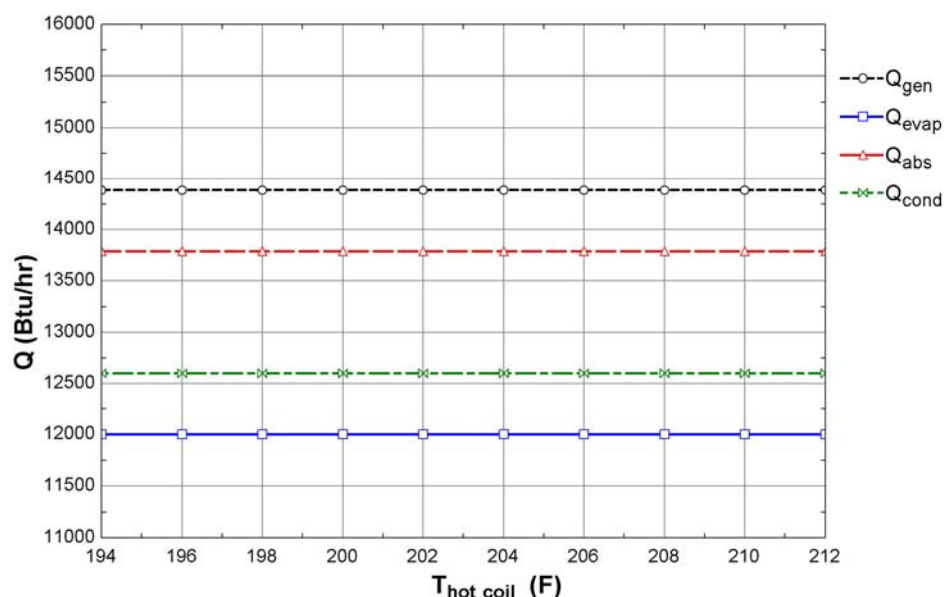
ตารางที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่คอยล์ร้อนของปั๊มความร้อน ($T_{\text{hot coil}}$) เทียบกับ ปริมาณความร้อนที่อุปกรณ์ต่างๆ ของการทำความเย็นแบบดูดซึมและปั๊มความร้อน

$T_{\text{hot coil}}$ (°F)	Q_{gen} (Btu/hr)	Q_{abs} (Btu/hr)	Q_{cond} (Btu/hr)	Q_{comp} (Btu/hr)	$Q_{\text{hot coil}}$ (Btu/hr)	$Q_{\text{hot water}}$ (Btu/hr)
194	14,391	13,790	12,601	7,018	33,409	19,018
196	14,391	13,790	12,601	7,204	33,596	19,205
198	14,391	13,790	12,601	7,394	33,785	19,394
200	14,391	13,790	12,601	7,586	33,978	19,587
202	14,391	13,790	12,601	7,783	34,174	19,783
204	14,391	13,790	12,601	7,983	34,375	19,984
206	14,391	13,790	12,601	8,188	34,579	20,188
208	14,391	13,790	12,601	8,396	34,788	20,397
210	14,391	13,790	12,601	8,609	35,001	20,610
212	14,391	13,790	12,601	8,827	35,218	20,827

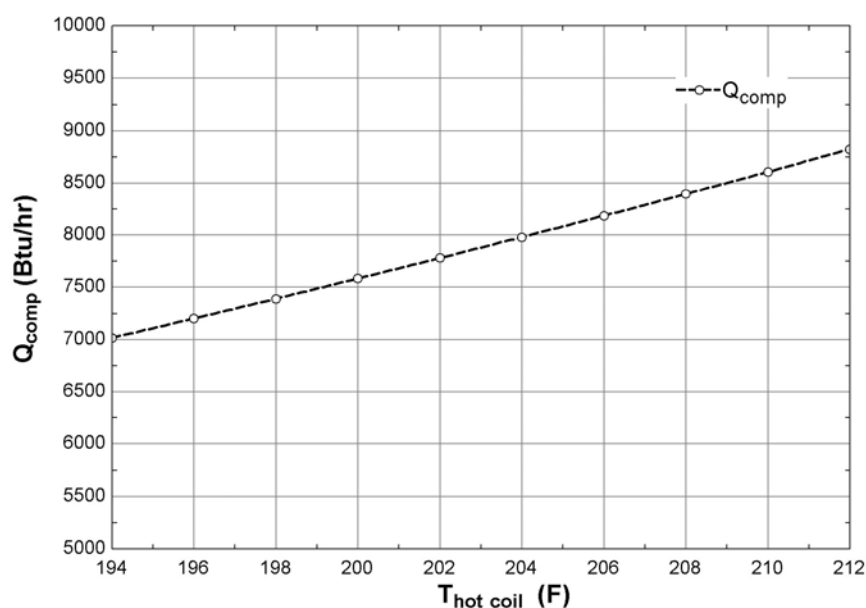
จากตารางที่ 15 จะพบว่าเมื่ออุณหภูมิที่คอยล์ร้อนของปั๊มความร้อน ($T_{\text{hot coil}}$) เพิ่มขึ้นจาก 194 °F เป็น 212 °F จะมีผลกับปริมาณความร้อนที่อุปกรณ์ต่างๆ ของการทำความเย็นแบบดูดซึมและปั๊มความร้อนดังนี้

1. ปริมาณความร้อนที่ต้องการของเครื่องผลิต (Q_{gen}) ไม่มีค่าเปลี่ยนแปลง โดยจะมีค่าคงที่เท่ากับ 14,391 Btu/hr
2. ปริมาณความร้อนที่คายออกจากเครื่องดูดซึม (Q_{abs}) ไม่มีค่าเปลี่ยนแปลง โดยจะมีค่าคงที่เท่ากับ 13,790 Btu/hr
3. ปริมาณความร้อนที่คายออกจากเครื่องควบแน่น (Q_{cond}) ไม่มีค่าเปลี่ยนแปลง โดยจะมีค่าคงที่เท่ากับ 12,601 Btu/hr
4. ปริมาณความร้อนที่ต้องการของเครื่องอัดในปั๊มความร้อน (Q_{comp}) เพิ่มขึ้นจาก 7,018 Btu/hr เป็น 8,827 Btu/hr โดยเพิ่มขึ้นคิดเป็น 25.78%
5. ปริมาณความร้อนที่คายออกจากคอยล์ร้อนในปั๊มความร้อน ($Q_{\text{hot coil}}$) เพิ่มขึ้นจาก 33,409 Btu/hr เป็น 35,218 Btu/hr โดยเพิ่มขึ้นคิดเป็น 5.41%

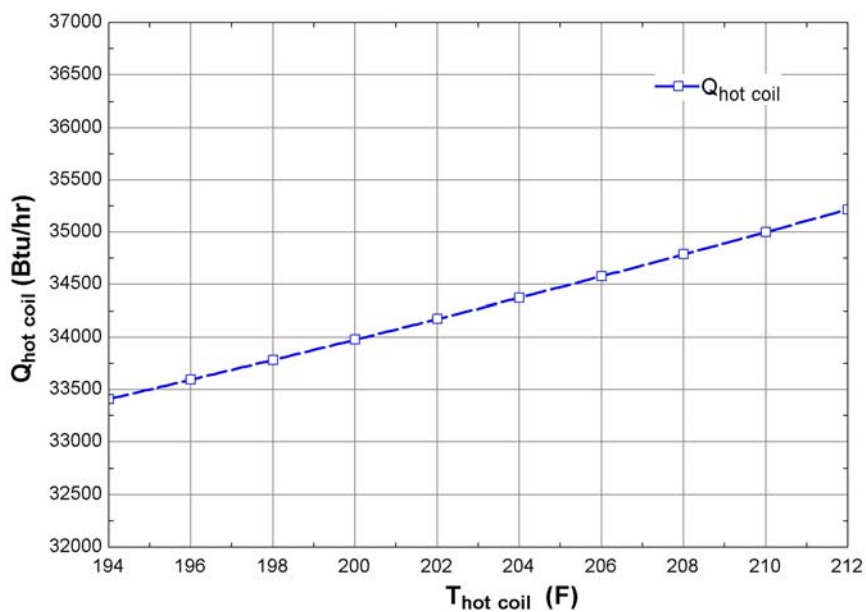
6. ปริมาณความร้อนที่หล่อไปใช้น้ำร้อน ($Q_{\text{hot-water}}$) เพิ่มขึ้นจาก 19,018 Btu/hr เป็น 20,827 Btu/hr โดยเพิ่มขึ้นคิดเป็น 9.51%



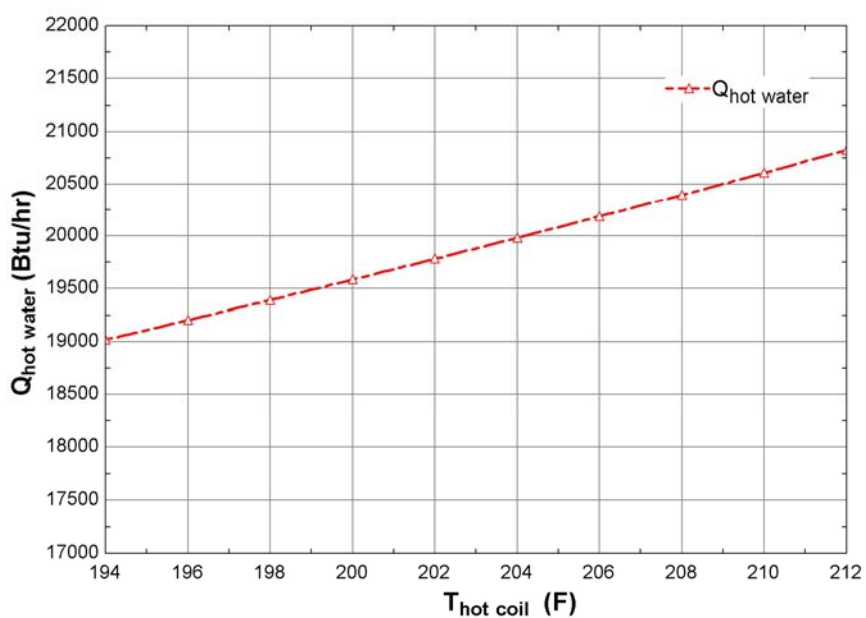
ภาพที่ 45 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่คอยล์ร้อนของปั๊มความร้อน ($T_{\text{hot coil}}$) เทียบกับ ปริมาณความร้อนที่เครื่องผลิต (Q_{gen}) เครื่องดูดซึม (Q_{abs}) เครื่องควบแน่น (Q_{cond}) และ เครื่องระเหย (Q_{evap})



ภาพที่ 46 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่คอยล์ร้อนของปั๊มความร้อน ($T_{\text{hot coil}}$) เทียบ กับปริมาณความร้อนที่เครื่องอัดในปั๊มความร้อน (Q_{comp})



ภาพที่ 47 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่คอยล์ร้อนของปั๊มความร้อน ($T_{\text{hot coil}}$) เทียบกับ ปริมาณความร้อนที่คอยล์ร้อนในปั๊มความร้อน ($Q_{\text{hot coil}}$)



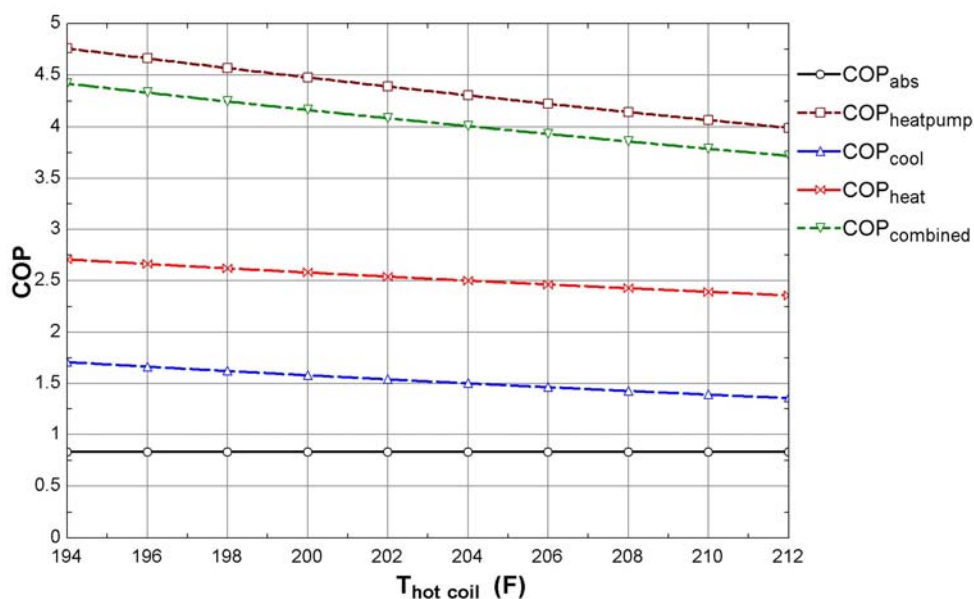
ภาพที่ 48 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่คอยล์ร้อนของปั๊มความร้อน ($T_{\text{hot coil}}$) เทียบกับ ปริมาณความร้อนที่เหลือไปใช้ทำน้ำร้อน ($Q_{\text{hot water}}$)

ตารางที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่คอยล์ร้อนของปั๊มความร้อน ($T_{\text{hot coil}}$) เทียบกับค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะต่างๆ

$T_{\text{hot coil}}$ (°F)	COP_{abs}	$\text{COP}_{\text{heat pump}}$	COP_{cool}	COP_{heat}	$\text{COP}_{\text{combined}}$
194	0.834	4.760	1.710	2.710	4.420
196	0.834	4.663	1.666	2.666	4.332
198	0.834	4.570	1.623	2.623	4.246
200	0.834	4.479	1.582	2.582	4.164
202	0.834	4.391	1.542	2.542	4.084
204	0.834	4.306	1.503	2.503	4.006
206	0.834	4.223	1.466	2.466	3.932
208	0.834	4.143	1.429	2.429	3.858
210	0.834	4.065	1.394	2.394	3.788
212	0.834	3.990	1.359	2.359	3.718

จากตารางที่ 16 จะพบว่าเมื่ออุณหภูมิที่คอยล์ร้อนของปั๊มความร้อน ($T_{\text{hot coil}}$) เพิ่มขึ้นจาก 194 °F เป็น 212 °F จะมีผลกับค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะต่างๆ ดังนี้

1. สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของการทำความเย็นแบบดูดซึม (COP_{abs}) ไม่มีค่าเปลี่ยนแปลง โดยมีค่าคงที่เท่ากับ 0.834
2. สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของปั๊มความร้อน ($\text{COP}_{\text{heat pump}}$) มีค่าลดลงจาก 4.76 เป็น 3.99 โดยลดลงคิดเป็น 16.18%
3. สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะการทำความเย็นของวัฏจักรร่วม (COP_{cool}) ลดลงจาก 1.71 เป็น 1.359 โดยลดลงคิดเป็น 20.53%
4. สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะการทำความร้อนของวัฏจักรร่วม (COP_{heat}) ลดลงจาก 2.71 เป็น 2.359 โดยลดลงคิดเป็น 12.95%
5. สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของวัฏจักรร่วม ($\text{COP}_{\text{combined}}$) ลดลงจาก 4.42 เป็น 3.718 โดยลดลงคิดเป็น 15.88%



ภาพที่ 49 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่คอยล์ร้อนของปั๊มความร้อน ($T_{\text{hot coil}}$) เทียบกับค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะต่างๆ

จะเห็นว่าเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิที่คอยล์ร้อนของปั๊มความร้อน ($T_{\text{hot coil}}$) จาก 194°F เป็น 212°F จะไม่มีผลกับอัตราการไหลของสารทำความเย็นและปริมาณความร้อนในแต่ละอุปกรณ์ของการทำความเย็นแบบดูดซึม แต่จะทำให้อัตราการไหลของสารทำความเย็นและปริมาณความร้อนในแต่ละอุปกรณ์ของปั๊มความร้อนเพิ่มขึ้น และสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของวัฏจักรร่วมลดลง ซึ่งอุณหภูมิที่ทำให้ค่า $\text{COP}_{\text{combined}}$ สูงสุดสำหรับอุณหภูมิที่คอยล์ร้อนของปั๊มความร้อน ($T_{\text{hot coil}}$) คือ 194°F

ผลการวิเคราะห์เมื่ออุณหภูมิที่คอยล์เย็นของปั๊มความร้อน ($T_{\text{cold coil}}$) เปลี่ยนแปลง

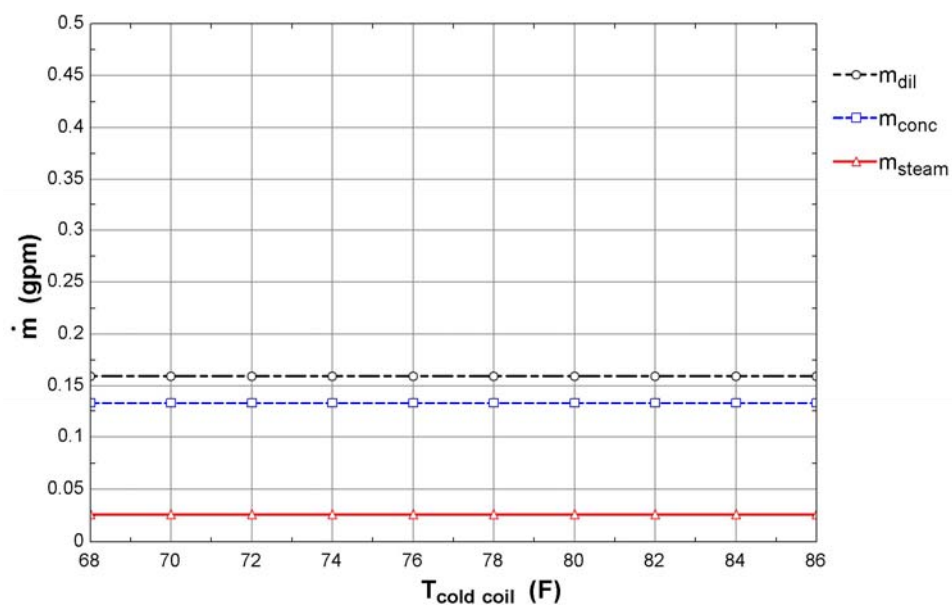
โดยกำหนดให้ $T_{\text{gen}} = 176^\circ\text{F}$, $T_{\text{cond}} = 95^\circ\text{F}$, $T_{\text{abs}} = 95^\circ\text{F}$, $T_{\text{evap}} = 55^\circ\text{F}$ และ $T_{\text{hot coil}} = 194^\circ\text{F}$ คงที่

ตารางที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่คอยล์เย็นของปั๊มความร้อน ($T_{\text{cold coil}}$) เทียบกับอัตรา
การไหลของสารทำความเย็นต่างๆ

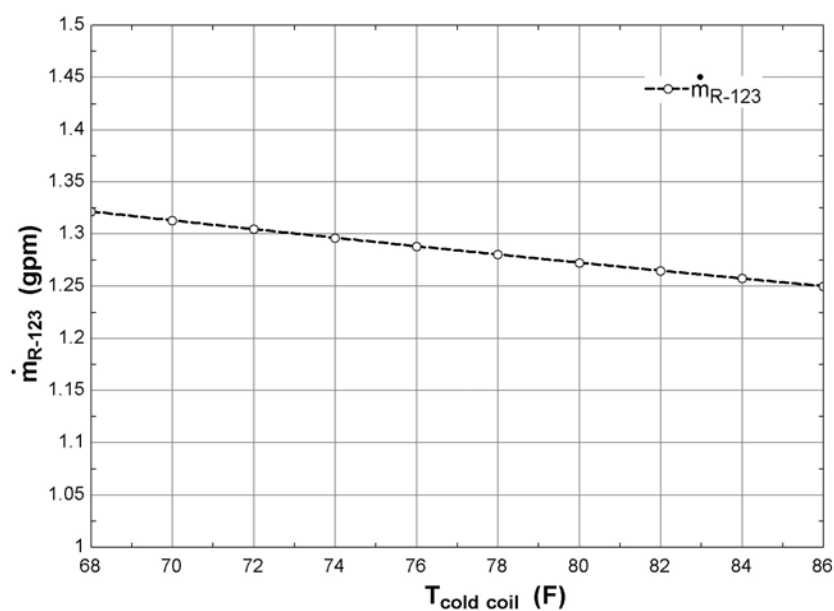
$T_{\text{cold coil}}$ ($^\circ\text{F}$)	$\dot{m}_{\text{dil}}$ (gpm)	$\dot{m}_{\text{conc}}$ (gpm)	$\dot{m}_{\text{steam}}$ (gpm)	$\dot{m}_{\text{R-123}}$ (gpm)
68	0.159	0.133	0.026	1.322
70	0.159	0.133	0.026	1.313
72	0.159	0.133	0.026	1.305
74	0.159	0.133	0.026	1.296
76	0.159	0.133	0.026	1.288
78	0.159	0.133	0.026	1.280
80	0.159	0.133	0.026	1.272
82	0.159	0.133	0.026	1.265
84	0.159	0.133	0.026	1.257
86	0.159	0.133	0.026	1.250

จากตารางที่ 17 จะพบว่าเมื่ออุณหภูมิที่คอยล์เย็นของปั๊มความร้อน ($T_{\text{cold coil}}$) เพิ่มขึ้นจาก 68°F เป็น 86°F จะมีผลต่ออัตราการไหลของสารทำความเย็นต่างๆ ดังนี้

- อัตราการไหลของสารละลายเจือจางลิเทียมโบรไมด์-น้ำ ($\dot{m}_{\text{dil}}$) ไม่มีค่าเปลี่ยนแปลง โดยจะมีค่าคงที่เท่ากับ 0.159 gpm
- อัตราการไหลของสารละลายเข้มข้นลิเทียมโบรไมด์-น้ำ ($\dot{m}_{\text{conc}}$) ไม่มีค่าเปลี่ยนแปลง โดยมีค่าคงที่เท่ากับ 0.133 gpm
- อัตราการไหลของสารทำความเย็นน้ำ ($\dot{m}_{\text{steam}}$) ไม่มีค่าเปลี่ยนแปลง โดยมีค่าคงที่เท่ากับ 0.026 gpm
- อัตราการไหลของทำความเย็น R-123 ($\dot{m}_{\text{R-123}}$) มีค่าลดลงจาก 1.322 gpm เป็น 1.25 gpm โดยลดลงคิดเป็น 5.45%



ภาพที่ 50 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่คอยล์เย็นของปั๊มความร้อน ($T_{\text{cold coil}}$) เทียบกับ อัตราการไหลของสารละลายเจือจาง ($\dot{m}_{\text{dil}}$) อัตราการไหลของสารละลายเข้มข้น ($\dot{m}_{\text{conc}}$) และอัตราการไหลของสารทำความเย็นน้ำ ($\dot{m}_{\text{steam}}$)



ภาพที่ 51 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่คอยล์เย็นของปั๊มความร้อน ($T_{\text{cold coil}}$) เทียบกับ อัตราการไหลของสารทำความเย็น R-123 ($\dot{m}_{\text{R-123}}$)

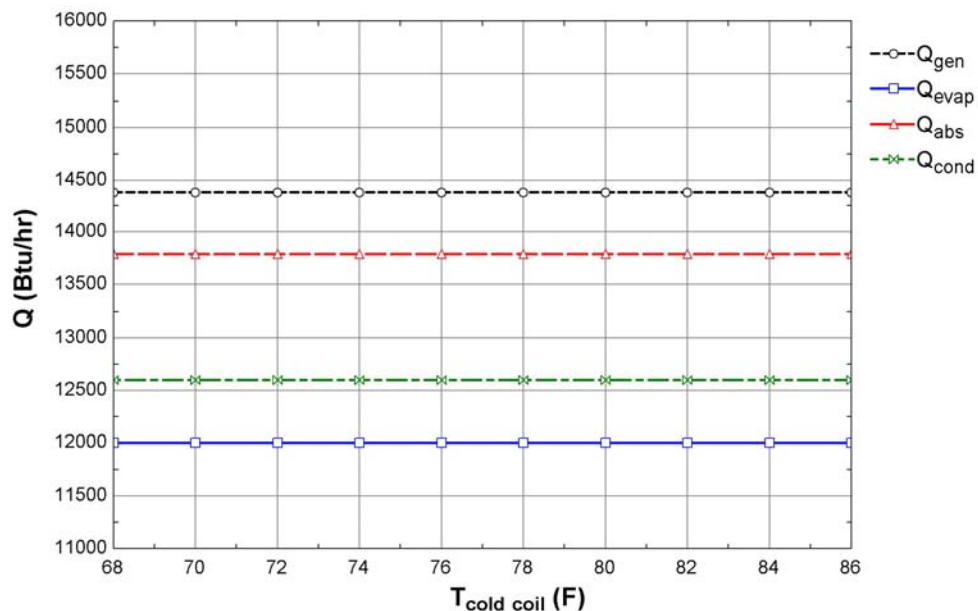
ตารางที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่คอยล์เย็นของปั๊มความร้อน ($T_{\text{cold coil}}$) เทียบกับปริมาณความร้อนที่อุปกรณ์ต่างๆ ของการทำความเย็นแบบดูดซึมและปั๊มความร้อน

$T_{\text{cold coil}}$ (°F)	Q_{gen} (Btu/hr)	Q_{abs} (Btu/hr)	Q_{cond} (Btu/hr)	Q_{comp} (Btu/hr)	$Q_{\text{hot coil}}$ (Btu/hr)	$Q_{\text{hot water}}$ (Btu/hr)
68	14,391	13,790	12,601	8,940	35,332	20,941
70	14,391	13,790	12,601	8,710	35,102	20,711
72	14,391	13,790	12,601	8,485	34,876	20,485
74	14,391	13,790	12,601	8,263	34,655	20,264
76	14,391	13,790	12,601	8,046	34,437	20,046
78	14,391	13,790	12,601	7,833	34,224	19,833
80	14,391	13,790	12,601	7,623	34,015	19,624
82	14,391	13,790	12,601	7,418	33,809	19,418
84	14,391	13,790	12,601	7,216	33,608	19,217
86	14,391	13,790	12,601	7,018	33,409	19,018

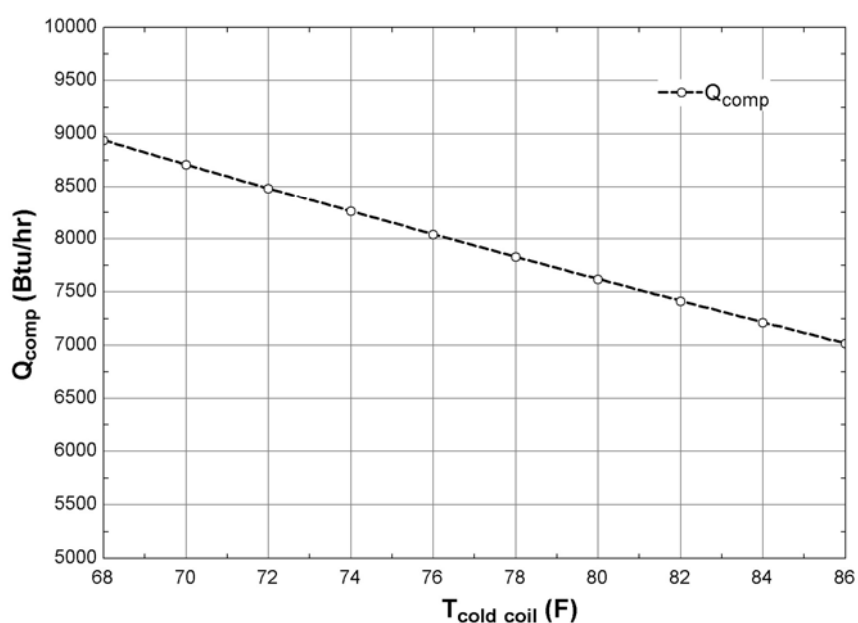
จากตารางที่ 18 จะพบว่าเมื่ออุณหภูมิที่คอยล์เย็นของปั๊มความร้อน ($T_{\text{cold coil}}$) เพิ่มขึ้นจาก 68 °F เป็น 86 °F จะมีผลกับปริมาณความร้อนที่อุปกรณ์ต่างๆ ของการทำความเย็นแบบดูดซึมและปั๊มความร้อนดังนี้

1. ปริมาณความร้อนที่ต้องการของเครื่องผลิต (Q_{gen}) ไม่มีค่าเปลี่ยนแปลง โดยจะมีค่าคงที่เท่ากับ 14,391 Btu/hr
2. ปริมาณความร้อนที่คายออกจากเครื่องดูดซึม (Q_{abs}) ไม่มีค่าเปลี่ยนแปลง โดยจะมีค่าคงที่เท่ากับ 13,790 Btu/hr
3. ปริมาณความร้อนที่คายออกจากเครื่องควบแน่น (Q_{cond}) ไม่มีค่าเปลี่ยนแปลง โดยจะมีค่าคงที่เท่ากับ 12,601 Btu/hr
4. ปริมาณความร้อนที่ต้องการของเครื่องอัดในปั๊มความร้อน (Q_{comp}) ลดลงจาก 8,940 Btu/hr เป็น 7,018 Btu/hr โดยลดลงคิดเป็น 21.5%
5. ปริมาณความร้อนที่คายออกจากคอยล์ร้อนในปั๊มความร้อน ($Q_{\text{hot coil}}$) ลดลงจาก 35,332 Btu/hr เป็น 33,409 Btu/hr โดยลดลงคิดเป็น 5.44%

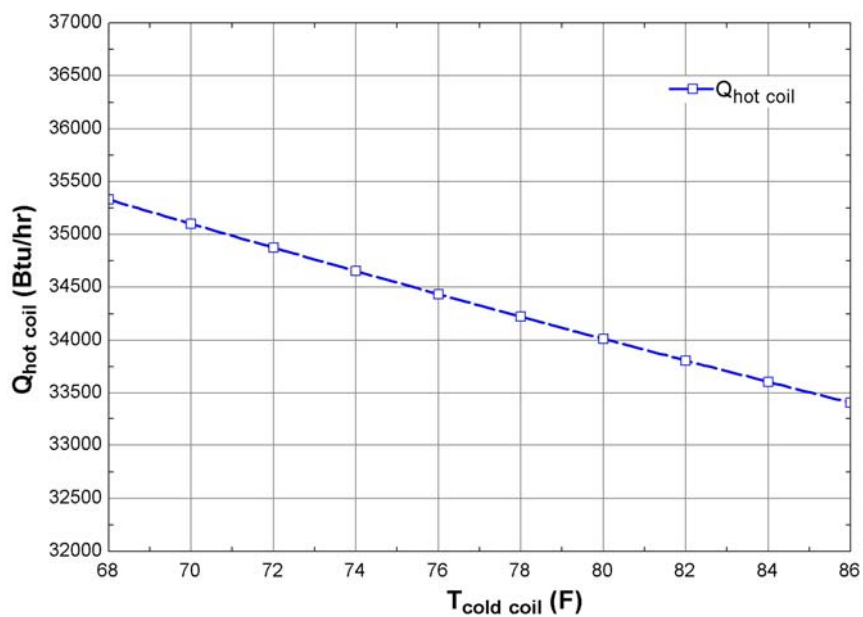
6. ปริมาณความร้อนที่เหลือไปใช้น้ำร้อน ($Q_{\text{hot-water}}$) ลดลงจาก 20,941 Btu/hr เป็น 19,018 Btu/hr โดยลดลงคิดเป็น 9.18%



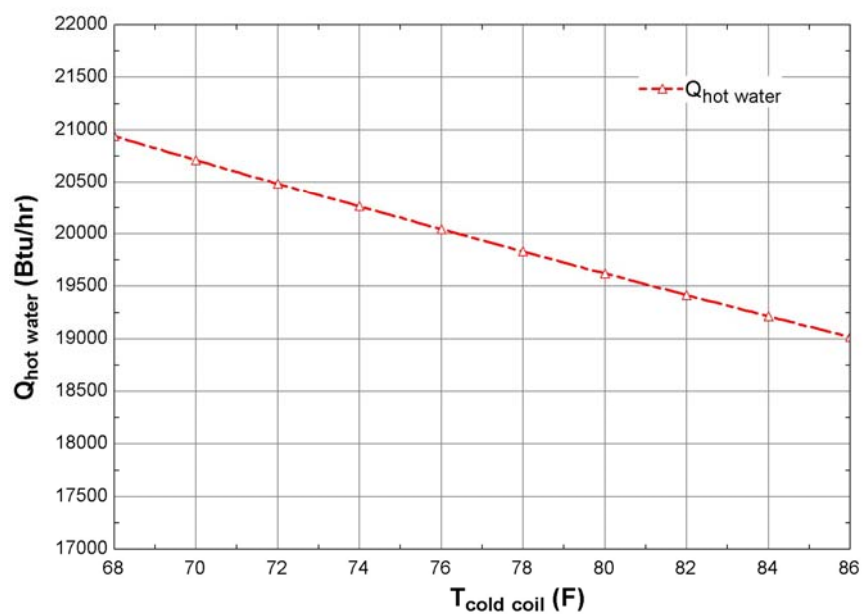
ภาพที่ 52 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่คอยล์เย็นของปั๊มความร้อน ($T_{\text{cold coil}}$) เทียบกับ ปริมาณความร้อนที่เครื่องผลิต (Q_{gen}) เครื่องดูดซึม (Q_{abs}) เครื่องควบแน่น (Q_{cond}) และ เครื่องระเหย (Q_{evap})



ภาพที่ 53 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่คอยล์เย็นของปั๊มความร้อน ($T_{\text{cold coil}}$) เทียบกับ ปริมาณความร้อนที่เครื่องอัดในปั๊มความร้อน (Q_{comp})



ภาพที่ 54 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่คอยล์เย็นของปั๊มความร้อน ($T_{\text{cold coil}}$) เทียบกับ ปริมาณความร้อนที่คอยล์ร้อนในปั๊มความร้อน ($Q_{\text{hot coil}}$)



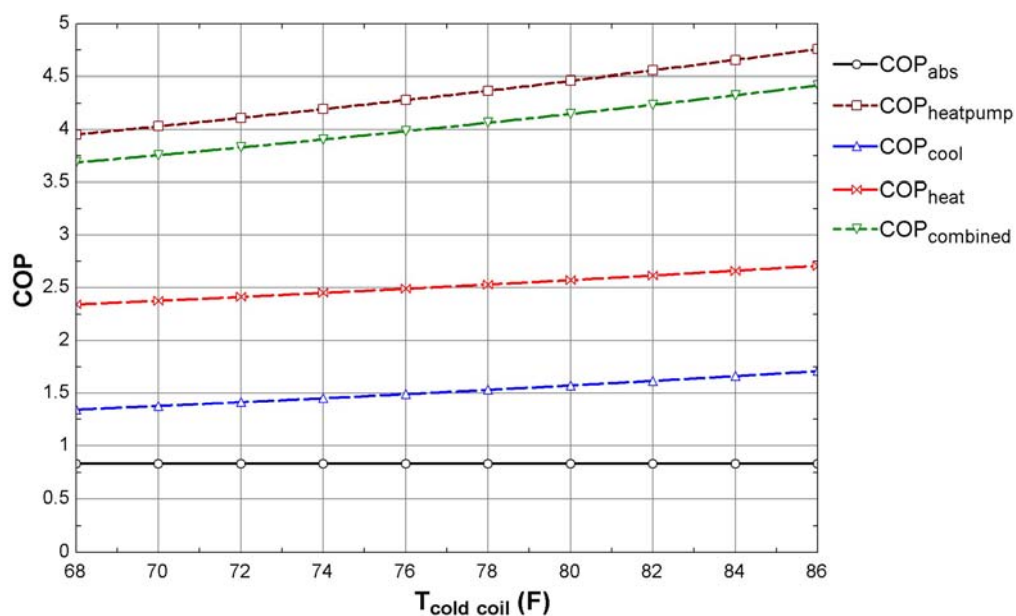
ภาพที่ 55 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่คอยล์เย็นของปั๊มความร้อน ($T_{\text{cold coil}}$) เทียบกับ ปริมาณความร้อนที่เหลือไปใช้ทำน้ำร้อน ($Q_{\text{hot water}}$)

ตารางที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่คอยล์เย็นของปั๊มความร้อน ($T_{\text{cold coil}}$) เทียบกับค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะต่างๆ

$T_{\text{cold coil}}$ (°F)	COP_{abs}	$\text{COP}_{\text{heat pump}}$	COP_{cool}	COP_{heat}	$\text{COP}_{\text{combined}}$
68	0.834	3.952	1.342	2.342	3.684
70	0.834	4.030	1.378	2.378	3.756
72	0.834	4.111	1.414	2.414	3.828
74	0.834	4.194	1.452	2.452	3.904
76	0.834	4.280	1.491	2.491	3.982
78	0.834	4.369	1.532	2.532	4.064
80	0.834	4.462	1.574	2.574	4.148
82	0.834	4.558	1.618	2.618	4.236
84	0.834	4.657	1.663	2.663	4.326
86	0.834	4.760	1.710	2.710	4.420

จากตารางที่ 19 จะพบว่าเมื่ออุณหภูมิที่คอยล์เย็นของปั๊มความร้อน ($T_{\text{cold coil}}$) เพิ่มขึ้นจาก 68 °F เป็น 86 °F จะมีผลกับค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะต่างๆ ดังนี้

1. สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของการทำความเย็นแบบดูดซึม (COP_{abs}) ไม่มีค่าเปลี่ยนแปลง โดยมีค่าคงที่เท่ากับ 0.834
2. สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของปั๊มความร้อน ($\text{COP}_{\text{heat pump}}$) มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 3.952 เป็น 4.76 โดยเพิ่มขึ้นคิดเป็น 20.45%
3. สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะการทำความเย็นของวัฏจักรรวม (COP_{cool}) เพิ่มขึ้นจาก 1.342 เป็น 1.71 โดยเพิ่มขึ้นคิดเป็น 27.42%
4. สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะการทำความร้อนของวัฏจักรรวม (COP_{heat}) เพิ่มขึ้นจาก 2.342 เป็น 2.71 โดยเพิ่มขึ้นคิดเป็น 15.71%
5. สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของวัฏจักรรวม ($\text{COP}_{\text{combined}}$) เพิ่มขึ้นจาก 3.684 เป็น 4.42 โดยเพิ่มขึ้นคิดเป็น 19.98%



ภาพที่ 56 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่คอยล์เย็นของปั๊มความร้อน ($T_{\text{cold coil}}$) เทียบกับค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะต่างๆ

จะเห็นว่าเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิที่คอยล์เย็นของปั๊มความร้อน ($T_{\text{cold coil}}$) จาก 68°F เป็น 86°F จะไม่มีผลกับอัตราการไหลของสารทำความเย็นและปริมาณความร้อนในแต่ละอุปกรณ์ของการทำความเย็นแบบดูดซึม แต่จะทำให้อัตราการไหลของสารทำความเย็นและปริมาณความร้อนในแต่ละอุปกรณ์ของปั๊มความร้อนลดลง และสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของวัฏจักรรวมเพิ่มขึ้น ซึ่งอุณหภูมิที่ให้ค่า $\text{COP}_{\text{combined}}$ สูงสุดสำหรับอุณหภูมิที่คอยล์เย็นของปั๊มความร้อน ($T_{\text{cold coil}}$) คือ 86°F

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการศึกษาเมื่อใช้โปรแกรม EES เพื่อช่วยในการวิเคราะห์วัฏจักรร่วมของปั๊มความร้อนที่ใช้สารทำความเย็น R-123 และการทำความเย็นแบบดูดซึมที่ใช้สารทำความเย็นลิเทียมโบรไมด์-น้ำ ที่ขนาดทำความเย็นของเครื่องระเหยของการทำความเย็นแบบดูดซึม (Q_{evap}) 12,000 บีทียู/ชั่วโมง จะพบว่าการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิในแต่ละอุปกรณ์นั้นมีผลกับค่าอัตราการไหล ปริมาณความร้อนในแต่ละอุปกรณ์ และค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะต่างๆ ดังนี้

1. เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิในแต่ละอุปกรณ์ของการทำความเย็นแบบดูดซึมจะมีผลมากกับอัตราการไหลของสารละลายเจือจางลิเทียมโบรไมด์-น้ำ และสารละลายเข้มข้นลิเทียมโบรไมด์-น้ำ โดยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่เครื่องผลิตและเครื่องระเหย จะพบว่าอัตราการไหลของสารละลายทั้งสองชนิดมีค่าลดลงมาก และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่เครื่องควบแน่นและเครื่องดูดซึม จะพบว่าอัตราการไหลของสารละลายทั้งสองชนิดมีค่าเพิ่มขึ้นมาก ซึ่งอัตราการไหลของสารทำความเย็นน้ำและสารทำความเย็น R-123 จะมีค่าเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ส่วนปริมาณความร้อนที่อุปกรณ์ต่างๆ และค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของวัฏจักรร่วม พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

2. เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิในแต่ละอุปกรณ์ของปั๊มความร้อนจะพบว่าไม่มีผลกับอัตราการไหลของสารต่างๆ และปริมาณความร้อนในแต่ละอุปกรณ์ภายในการทำความเย็นแบบดูดซึม รวมถึงค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของการทำความเย็นแบบดูดซึม แต่จะมีผลกับอัตราการไหลของสารทำความเย็น R-123 และปริมาณความร้อนในแต่ละอุปกรณ์ของปั๊มความร้อน รวมถึงค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะต่างๆ โดยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่คอยล์ร้อนของปั๊มความร้อนจะพบว่าอัตราการไหลของสารทำความเย็น R-123 และปริมาณความร้อนในแต่ละอุปกรณ์ของปั๊มความร้อนจะเพิ่มขึ้น ส่วนค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของวัฏจักรร่วมจะลดลง และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่คอยล์เย็นของปั๊มความร้อนจะพบว่าอัตราการไหลของสารทำความเย็น R-123 และปริมาณความร้อนในแต่ละอุปกรณ์ของปั๊มความร้อนจะลดลง ส่วนค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของวัฏจักรร่วมจะเพิ่มขึ้น

โดยเมื่อพิจารณาสภาวะการทำงานที่ทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของวัฏจักรร่วมสูงสุด ($COP_{combined}$) จะพบว่า

- อุณหภูมิที่เครื่องผลิตของการทำความเย็นแบบดูดซึม (T_{gen}) เท่ากับ $176^{\circ}F$
- อุณหภูมิที่เครื่องควบแน่นของการทำความเย็นแบบดูดซึม (T_{cond}) เท่ากับ $95^{\circ}F$
- อุณหภูมิที่เครื่องระเหยของการทำความเย็นแบบดูดซึม (T_{evap}) เท่ากับ $55^{\circ}F$
- อุณหภูมิที่เครื่องดูดซึมของการทำความเย็นแบบดูดซึม (T_{abs}) เท่ากับ $95^{\circ}F$
- อุณหภูมิที่เครื่องควบแน่นของปั๊มความร้อน ($T_{hot\ coil}$) เท่ากับ $194^{\circ}F$
- อุณหภูมิที่เครื่องระเหยของปั๊มความร้อน ($T_{cold\ coil}$) เท่ากับ $86^{\circ}F$

โดยจะมีค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะต่างๆ ดังนี้

- สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของเครื่องทำความเย็นแบบดูดซึม (COP_{abs}) เท่ากับ 0.834
- สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของปั๊มความร้อน ($COP_{heat\ pump}$) เท่ากับ 4.76
- สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะการทำความเย็นของวัฏจักรร่วม (COP_{cool}) เท่ากับ 1.71
- สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะการทำความร้อนของวัฏจักรร่วม (COP_{heat}) เท่ากับ 2.71
- สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของวัฏจักรร่วม ($COP_{combined}$) เท่ากับ 4.42

จะเห็นว่าเมื่อนำปั๊มความร้อนมาทำงานรวมกับการทำความเย็นแบบดูดซึมมีผลทำให้ได้ประโยชน์จากการทำน้ำร้อนและการทำความเย็นไปได้ 2 ระบบพร้อมกัน โดยจะเสียพลังงานกลที่ใส่เข้าไปในปั๊มความร้อนเพียงอย่างเดียว ซึ่งจะสามารถทำให้เกิดการใช้พลังงานได้คุ้มค่ามากยิ่งขึ้น

ข้อเสนอแนะ

จากผลงานวิจัยชิ้นนี้ ได้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ได้กำหนดไว้ คือสามารถวิเคราะห์การทำงานของวัฏจักรร่วมได้ แต่เพื่อที่จะเพิ่มขีดความสามารถในการวิเคราะห์ระบบของปั๊มความร้อน และการทำความเข้าใจแบบคุณสมบัติ ผู้วิจัยใคร่ขอเสนอแนะบางประการเพื่อเป็นประโยชน์ต่อไปดังนี้

1. ค่าอุณหภูมิที่ได้จากการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ เราได้พิจารณาหาค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของวัฏจักรร่วม ($COP_{combined}$) สูงสุด ซึ่งจะพบว่าอุณหภูมิที่เครื่องระเหยที่ได้จากการวิเคราะห์นั้นมีค่า $55^{\circ}F$ แต่ในการทำความเข้าใจจริงอุณหภูมินี้มีค่าสูงเกินไปไม่เหมาะสมในการทำ ความเย็น ซึ่งอุณหภูมิที่เหมาะสมคือประมาณ $45^{\circ}F$ แต่เนื่องจากงานวิจัยนี้ ต้องการทราบถึงผลกระทบเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิต่างๆ ที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของวัฏจักรร่วมสูงสุด จึงทำให้ได้ผลเช่นนี้
2. ในงานวิจัยชิ้นนี้ได้ทำการวิเคราะห์ระบบที่เป็นแบบอุดมคติ โดยสามารถเพิ่มฟังก์ชันในตัวโปรแกรม เพื่อปรับเปลี่ยนค่าอุณหภูมิที่สถานะต่างๆ และเพิ่มฟังก์ชันการถ่ายเทความร้อนระหว่างปั๊มความร้อนและการทำความเย็นแบบดูดซึม เพื่อให้ใกล้เคียงกับวัฏจักรจริงมากยิ่งขึ้น
3. เพื่อให้ได้ผลที่ถูกต้องมากยิ่งขึ้นจึงควรมีการนำไปทดสอบกับเครื่องทำความเย็นของจริงแล้วเก็บผลที่ได้ทำการปรับปรุงให้มีความสามารถมากขึ้นต่อไป
4. เพื่อเพิ่มความหลากหลายของการวิเคราะห์ สามารถเปลี่ยนคู่สารทำความเย็นเป็นสารอื่นได้ ซึ่งในโปรแกรม EES นั้นมีค่าคุณสมบัติของสารมากมายหลายชนิด

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- จารุวัฒน์ เจริญจิต, จีรวรรณ เตียรต์สุวรรณ, นันทน์ ถาวรังกูร และ วารุณี เตีย. 2548. การเปรียบเทียบสมรรถนะปั๊มความร้อนร่วมระบบผลิตน้ำร้อนแสงอาทิตย์ที่ใช้ R-134a และ R-22 เป็นสารทำงาน. **4th CMU Conference Heat & Mass Transfer.**
- ชล่ำ คำสอน. 2538. การจำลองและทดสอบเครื่องทำความเย็นแบบดูดซึม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ชาญชัย วิรุณฤทธิชัย. 2549. การจำลองระบบการทำความเย็นแบบดูดซึมชนิดปิดที่ใช้ลิเทียมโบรไมด์-น้ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, เกษตรศาสตร์.
- ชูชัย ต.ศิริวัฒนา. 2546. การทำความเย็นและการปรับอากาศ. ครั้งที่ 1. ศ.ศ.ท., กรุงเทพฯ.
- ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์. 2543. การใช้ปั๊มความร้อนในการนำความร้อนทิ้งกลับคืนมาใช้ประโยชน์. วารสารโลกพลังงาน 3 (7):
- ไพบุลย์ หังสพฤกษ์ และ เสอโซ โซโต. 2543. การปรับอากาศ. ครั้งที่ 7. บริษัท สำนักพิมพ์ดวงกมล (2520) จำกัด, กรุงเทพฯ.
- มนตรี พิรุณเกษตร. 2535. การจำลองแบบระบบทำความเย็น. 66 เรื่องนำรู้เทคนิคเครื่องกล : 82-85.
- วุฒิชัย ลิทธิวงษ์, บุญส่ง เหมวัฒน์, ทวีวัฒน์ สุภารส และผจัญ จันทรชานะ. 2546. การวิเคราะห์สมรรถนะระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนโดยใช้ความร้อนทิ้งจากไอเสียเครื่องยนต์ดีเซล. **2nd CMU Conference Heat & Mass Transfer.**
- Adewusi, S.A. and S.M. Zubair. 2004. Second law based thermodynamic analysis of ammonia-water absorption systems. **Energy Conservation & Management** (45): 2355-2369.

- ASHRAE. 1993. **Fundamentals**. I-P Edition. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc., Atlanta.
- Florides, G.A., S.A. Kalogirou, S.A. Tassou, and L.C. Wrobel. 2003. Design and Construction of a LiBr-Water Absorption Machine. **Energy Conservation and Management** (44): 2483-2508.
- Grimm, N.R. and R.C. Rosaler. 1990. **Handbook of HVAC Design**. McGraw-Hill, Inc.,
- Mohanty, B. and G. Paloso. 1995. Enhancing gas turbine performance by intake air cooling using an absorption chiller. **Heat Recovery Systems and CHP** (15): 41-50.
- Talbi, M.M. and B. Agnew. 2000. Exergy Analysis an Absorption Refrigeration using Lithium Bromide and Water as the Working Fluids. **Applied Thermal Energy** (20): 619-630.
- Zhao, L. 2004. Experimental evaluation of a non-azeotropic working fluid for geothermal heat pump system. **Energy Conservation and Management** (45): 1369-1378.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

แสดงคุณสมบัติของสารทำความเย็น R-123 และสารละลายลิเทียมโบรไมด์-น้ำ

ตารางผนวกที่ ก1 แสดงคุณสมบัติของสารทำความเย็น R-123

Temp °F	Pres- sure psia	Density lb/ft ³ Liquid	Volume ft ³ /lb Vapor	Enthalpy Btu/lb		Entropy Btu/lb-°F		Specific Heat c _p Btu/lb-°F		c _p /c _v Vapor
				Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	
-140	0.003	108.90	7431.6	-22.241	71.783	-0.0605	0.23363	0.2210	0.1181	1.1237
-130	0.006	108.12	3871.0	-20.033	72.974	-0.0537	0.22843	0.2207	0.1203	1.1212
-120	0.011	107.35	2111.6	-17.826	74.187	-0.0471	0.22379	0.2206	0.1226	1.1187
-110	0.020	106.57	1201.0	-15.619	75.421	-0.0407	0.21966	0.2208	0.1248	1.1165
-100	0.036	105.80	709.46	-13.410	76.676	-0.0345	0.21600	0.2211	0.1270	1.1144
-90	0.060	105.03	433.83	-11.195	77.950	-0.0284	0.21275	0.2217	0.1291	1.1124
-80	0.097	104.26	273.77	-8.975	79.244	-0.0225	0.20989	0.2224	0.1313	1.1106
-70	0.154	103.48	177.81	-6.746	80.556	-0.0167	0.20737	0.2233	0.1334	1.1090
-60	0.236	102.70	118.57	-4.509	81.885	-0.0110	0.20516	0.2243	0.1356	1.1075
-50	0.354	101.92	80.999	-2.260	83.231	-0.0055	0.20323	0.2254	0.1377	1.1061
-40	0.519	101.13	56.576	0.000	84.592	0.0000	0.20157	0.2266	0.1398	1.1050
-30	0.744	100.34	40.333	2.272	85.967	0.00535	0.20014	0.2279	0.1420	1.1040
-20	1.046	99.54	29.299	4.558	87.355	0.01061	0.19892	0.2292	0.1441	1.1032
-10	1.445	98.73	21.655	6.857	88.754	0.01578	0.19790	0.2306	0.1463	1.1026
0	1.963	97.92	16.264	9.170	90.163	0.02086	0.19706	0.2320	0.1484	1.1022
5	2.274	97.51	14.174	10.332	90.871	0.02337	0.19670	0.2327	0.1495	1.1021
10	2.625	97.10	12.396	11.498	91.582	0.02587	0.19638	0.2334	0.1506	1.1020
15	3.019	96.69	10.878	12.667	92.294	0.02834	0.19609	0.2341	0.1517	1.1020
20	3.460	96.28	9.5779	13.840	93.008	0.03080	0.19585	0.2349	0.1528	1.1020
25	3.952	95.86	8.4595	15.017	93.723	0.03324	0.19563	0.2356	0.1540	1.1021
30	4.499	95.44	7.4943	16.198	94.440	0.03566	0.19544	0.2364	0.1551	1.1023
35	5.106	95.02	6.6586	17.382	95.158	0.03806	0.19529	0.2371	0.1562	1.1025
40	5.778	94.60	5.9327	18.570	95.877	0.04045	0.19517	0.2379	0.1574	1.1028
45	6.519	94.17	5.3002	19.762	96.597	0.04282	0.19507	0.2387	0.1585	1.1031
50	7.334	93.74	4.7474	20.958	97.317	0.04518	0.19500	0.2394	0.1597	1.1035
55	8.229	93.31	4.2629	22.158	98.038	0.04752	0.19495	0.2402	0.1609	1.1040
60	9.208	92.88	3.8371	23.362	98.760	0.04984	0.19493	0.2410	0.1621	1.1046
65	10.278	92.44	3.4617	24.570	99.481	0.05215	0.19493	0.2418	0.1633	1.1052
70	11.445	92.01	3.1301	25.782	100.203	0.05444	0.19495	0.2426	0.1645	1.1059

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Temp °F	Pres- sure psia	Density lb/ft ³ Liquid	Volume ft ³ /lb Vapor	Enthalpy Btu/lb		Entropy Btu/lb-°F		Specific Heat c _p Btu/lb-°F		c _p /c _v Vapor
				Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	
75	12.713	91.56	2.8362	26.998	100.924	0.05673	0.19499	0.2434	0.1657	1.1067
80	14.090	91.12	2.5753	28.218	101.645	0.05899	0.19505	0.2442	0.1669	1.1075
82.08 ^b	14.696	90.94	2.4753	28.728	101.945	0.05993	0.19508	0.2445	0.1675	1.1079
85	15.580	90.67	2.3429	29.443	102.365	0.06124	0.19513	0.2450	0.1682	1.1085
90	17.192	90.22	2.1356	30.671	103.085	0.06348	0.19522	0.2458	0.1695	1.1095
95	18.931	89.77	1.9503	31.904	103.804	0.06571	0.19534	0.2467	0.1707	1.1106
100	20.804	89.31	1.7841	33.141	104.521	0.06792	0.19546	0.2475	0.1720	1.1119
105	22.819	88.85	1.6349	34.383	105.238	0.07012	0.19560	0.2484	0.1734	1.1132
110	24.980	88.39	1.5006	35.628	105.953	0.07231	0.19576	0.2492	0.1747	1.1146
115	27.297	87.92	1.3795	36.879	106.666	0.07449	0.19593	0.2501	0.1761	1.1162
120	29.776	87.45	1.2701	38.134	107.377	0.07665	0.19611	0.2510	0.1775	1.1178
125	32.425	86.98	1.1710	39.393	108.086	0.07881	0.19630	0.2520	0.1789	1.1196
130	35.251	86.50	1.0812	40.657	108.792	0.08095	0.19650	0.2529	0.1803	1.1215
135	38.261	86.01	0.9996	41.926	109.497	0.08308	0.19671	0.2539	0.1818	1.1236
140	41.464	85.52	0.9253	43.200	110.198	0.08520	0.19693	0.2548	0.1833	1.1258
145	44.868	85.03	0.8577	44.479	110.896	0.08732	0.19716	0.2559	0.1848	1.1281
150	48.479	84.53	0.7959	45.763	111.591	0.08942	0.19739	0.2569	0.1863	1.1306
160	56.360	83.52	0.6876	48.347	112.970	0.09359	0.19788	0.2591	0.1896	1.1362
170	65.173	82.49	0.5965	50.953	114.333	0.09773	0.19839	0.2614	0.1929	1.1426
180	74.986	81.43	0.5195	53.583	115.678	0.10184	0.19892	0.2638	0.1965	1.1499
190	85.868	80.34	0.4539	56.237	117.001	0.10592	0.19945	0.2665	0.2004	1.1583
200	97.892	79.23	0.3979	58.918	118.300	0.10997	0.19999	0.2694	0.2045	1.1681
210	111.13	78.08	0.3497	61.627	119.572	0.11400	0.20053	0.2726	0.2089	1.1793
220	125.66	76.89	0.3080	64.367	120.813	0.11801	0.20106	0.2761	0.2138	1.1925
230	141.56	75.66	0.2719	67.141	122.019	0.12201	0.20158	0.2800	0.2191	1.2079
240	158.91	74.38	0.2404	69.952	123.184	0.12599	0.20207	0.2845	0.2251	1.2262
250	177.80	73.04	0.2128	72.805	124.303	0.12997	0.20254	0.2896	0.2319	1.2482
260	198.31	71.64	0.1885	75.704	125.367	0.13396	0.20296	0.2956	0.2398	1.2749
270	220.53	70.16	0.1670	78.655	126.368	0.13795	0.20334	0.3026	0.2490	1.3079

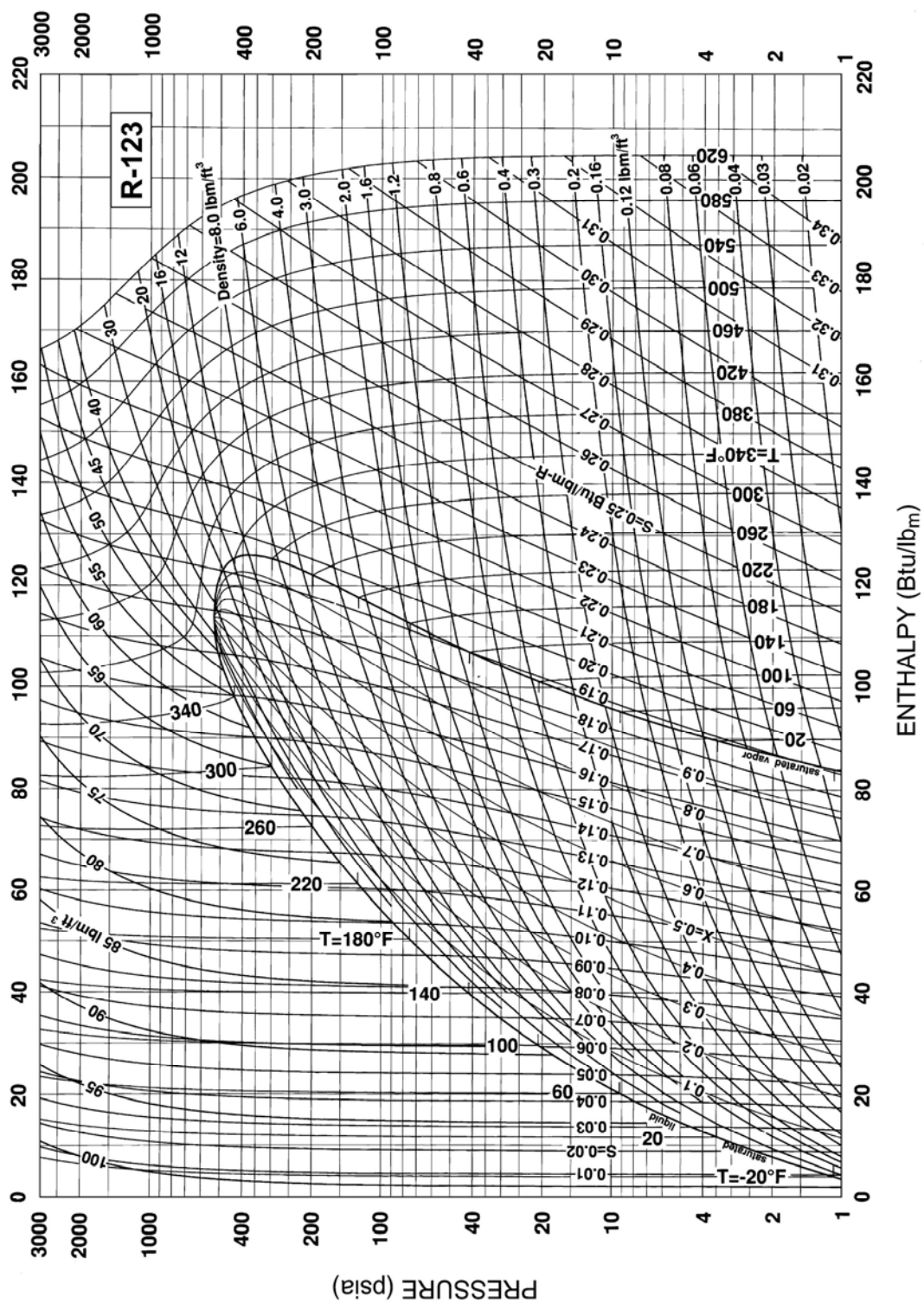
ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Temp °F	Pres- sure psia	Density lb/ft ³ Liquid	Volume ft ³ /lb Vapor	Enthalpy Btu/lb		Entropy Btu/lb-°F		Specific Heat c _p Btu/lb-°F		c _p /c _v Vapor
				Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	
280	244.58	68.60	0.1479	81.666	127.294	0.14196	0.20365	0.3110	0.2603	1.3496
290	270.54	66.92	0.1309	84.749	128.128	0.14600	0.20387	0.3215	0.2742	1.4035
300	298.53	65.11	0.1155	87.916	128.851	0.15010	0.20398	0.3349	0.2922	1.4755
310	328.69	63.12	0.1016	91.188	129.431	0.15426	0.20395	0.3529	0.3166	1.5762
320	361.16	60.91	0.0889	94.594	129.822	0.15853	0.20372	0.3785	0.3520	1.7258
330	396.11	58.37	0.0770	98.186	129.950	0.16297	0.20320	0.4186	0.4084	1.9693
340	433.76	55.33	0.0658	102.059	129.670	0.16769	0.20222	0.4925	0.5138	2.4318
350	474.41	51.32	0.0544	106.459	128.628	0.17298	0.20036	0.6830	0.7861	3.6383
360	518.66	43.97	0.0403	112.667	125.064	0.18039	0.19551	2.507	3.263	14.633
362.63 ^c	531.10	34.34	0.0291	118.800	118.800	0.18779	0.18779	∞	∞	∞

^b - normal boiling point

^c - critical point

ที่มา: ASHRAE (1993)



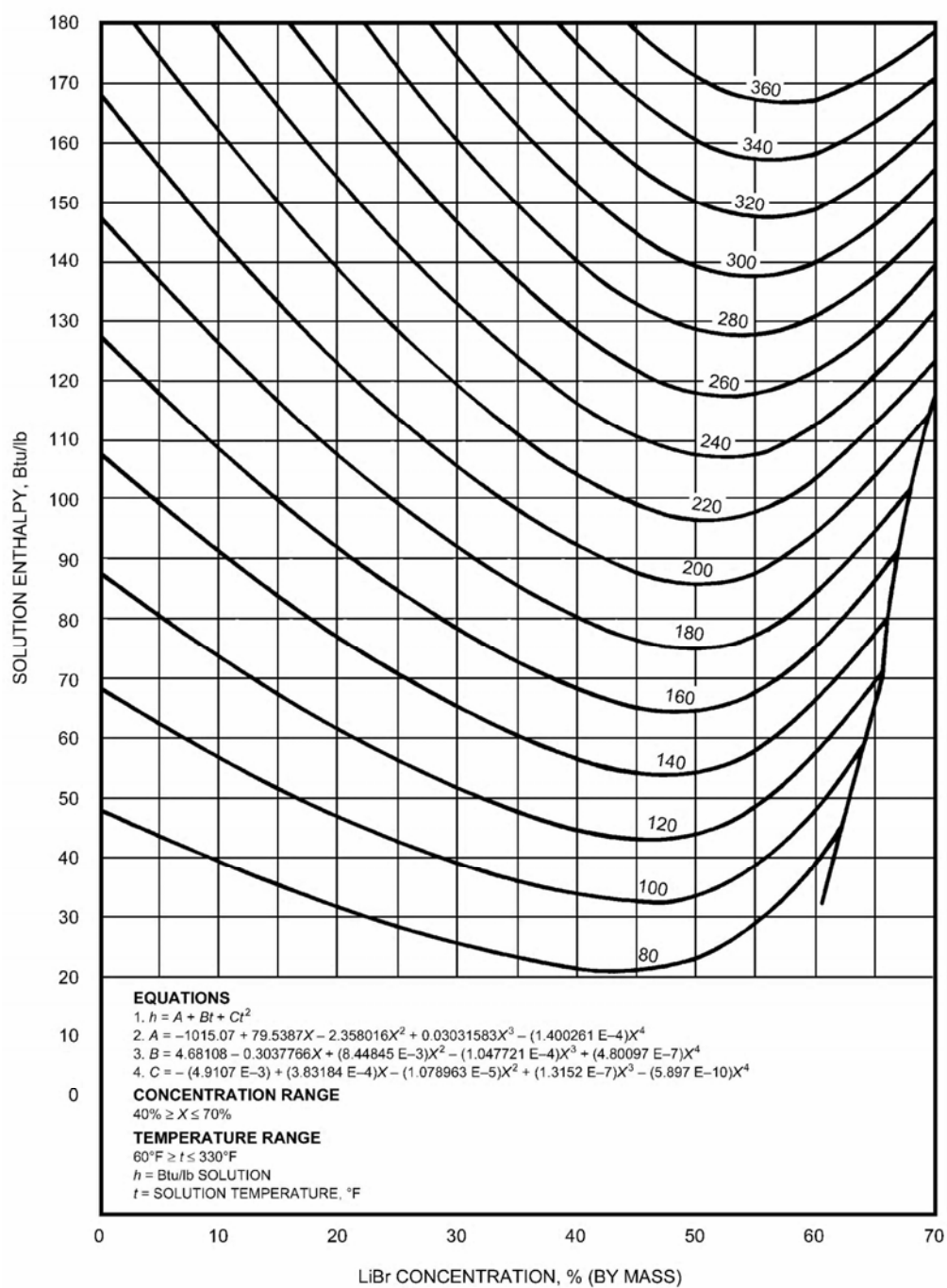
ภาพผนวกที่ ก1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเอนทาลปีและความดันของสารทำความเย็น R-123
ที่มา : ASHRAE (1993)

ตารางผนวกที่ ก2 คุณสมบัติของสารละลายลิเทียมโบรไมด์-น้ำ (ตาราง อุณหภูมิ-เอนทัลปี-ความเข้มข้น :T-h-x)

(Unit : Btu/lb)

Temp	Percent LiBr										
(t = °F)	0	10	20	30	40	45	50	55	60	65	70
80	48.0	39.2	31.8	25.6	21.6	21.2	23.0	28.7	38.9	52.7	67.1
100	68.0	56.6	47.0	38.7	33.2	32.1	33.2	38.2	47.8	61.1	75.1
120	87.9	73.6	61.7	51.7	44.7	43.0	43.6	48.0	56.9	69.4	83.0
140	107.9	91.0	77.0	65.1	56.5	54.1	54.1	57.9	66.1	78.0	91.1
160	127.9	108.2	92.0	78.2	68.1	65.1	64.7	67.9	75.4	86.6	99.2
180	147.9	125.4	107.9	91.9	80.4	76.6	75.3	77.7	84.6	95.1	107.2
200	168.0	143.4	123.3	105.3	92.1	87.4	85.9	87.8	94.1	104.0	115.6
220	188.1	160.7	138.2	119.0	104.1	99.0	96.5	97.8	103.3	112.5	123.6
240	208.3	178.4	154.0	132.6	116.0	110.3	107.1	107.7	112.5	121.1	131.6
260	228.6	195.7	169.1	146.2	128.1	121.6	117.6	117.6	121.6	129.5	139.5
280	249.1	213.8	185.1	159.7	140.0	132.8	128.1	127.5	130.6	137.9	147.6
300	269.6	231.6	200.7	173.5	152.1	144.1	138.9	137.3	139.8	146.5	155.5
320	290.3	249.7	216.3	187.2	164.2	155.3	149.5	147.1	148.8	154.9	163.4
340	311.1	267.9	232.1	201.0	176.1	166.6	160.1	157.0	158.0	163.5	171.0
360	332.2	286.1	248.0	214.9	188.2	178.0	170.6	166.8	167.0	171.9	178.3

ที่มา : ASHRAE (1993)



ภาพผนวกที่ ก2 กราฟแสดงค่าเอนทาลปีและความเข้มข้นของสารละลายลิเทียมโบรไมด์-น้ำ
 ที่มา : ASHRAE (1993)

EQUATIONS

1. $t = At' + B$
2. $t' = (t - B)/A$
3. $A = -2.00755 + 0.16976X - (3.133362E-3)X^2 + (1.97668E-5)X^3$
4. $B = 321.128 - 19.322X + 0.374382X^2 - (2.0637E-3)X^3$
5. $\log_{10}P = C + D/(t' + 459.72)^2 + E/(t' + 459.72)^2$
6. $t' = \frac{-2E}{D + [D^2 - 4E(C - \log_{10}P)]^{0.5}} - 459.72$

Temperature Range (Refrigerant) $0 < t' \leq 230^\circ\text{F}$
 Temperature Range (Solution) $40 < t \leq 350^\circ\text{F}$
 Concentration Range $45\% < X \leq 70\%$

$C = 6.21147$

$D = -2886.373$

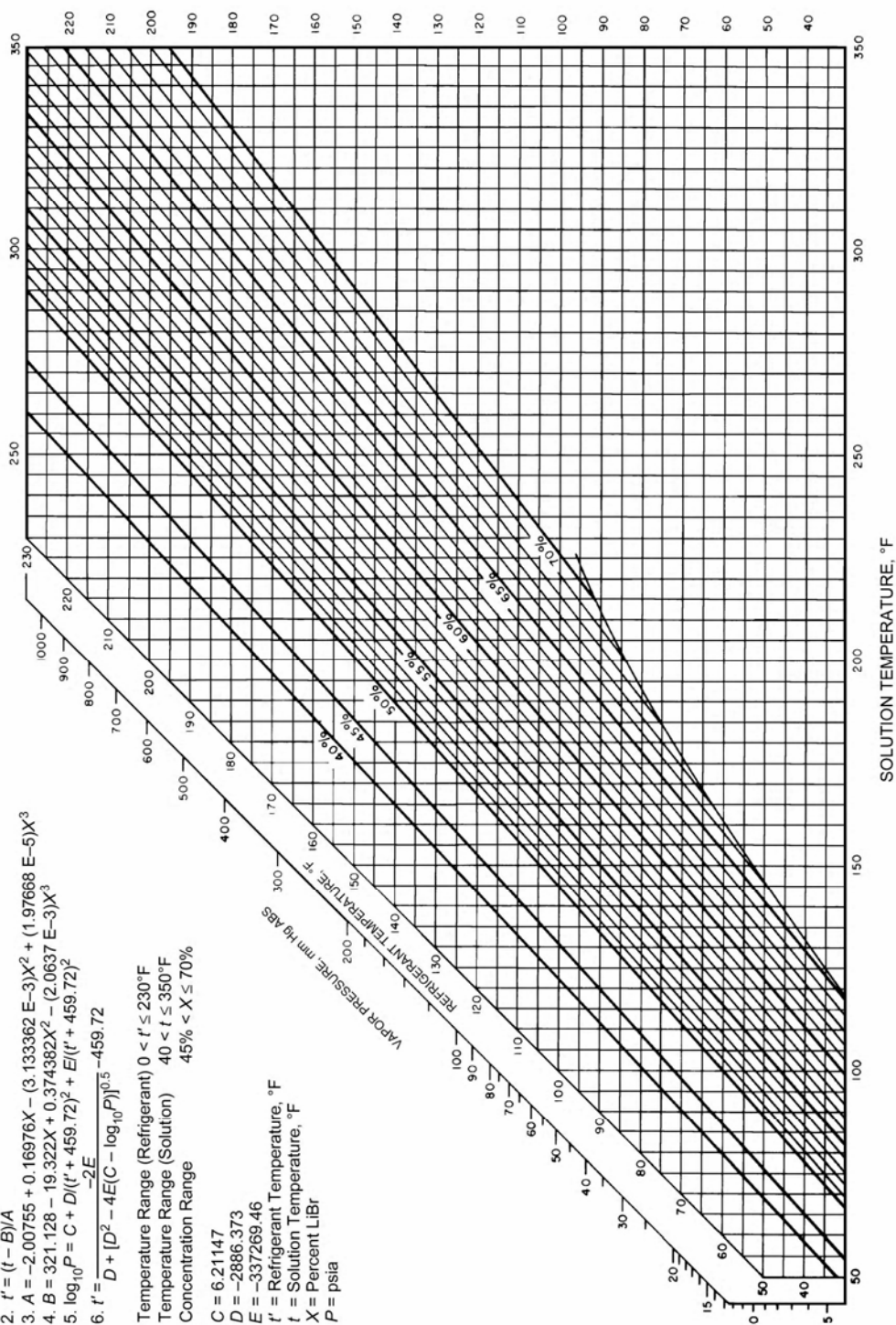
$E = -337269.46$

$t' = \text{Refrigerant Temperature, } ^\circ\text{F}$

$t = \text{Solution Temperature, } ^\circ\text{F}$

$X = \text{Percent LiBr}$

$P = \text{psia}$



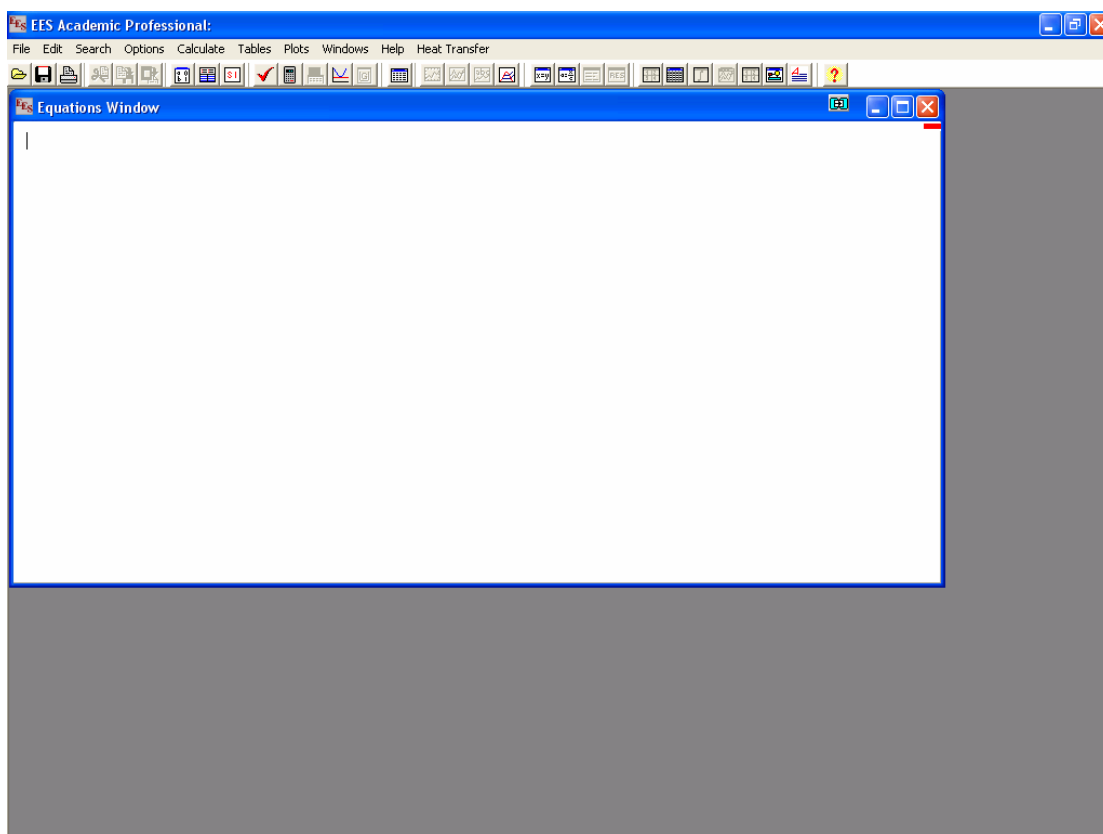
ภาพผนวกที่ 3 แสดงคุณภาพของสารละลายลิเทียมโบรไมด์-น้ำ

ที่มา : ASHRAE (1993)

ภาคผนวก ข
การใช้โปรแกรม EES

การใช้โปรแกรม EES

หลังจากที่ทำการติดตั้งโปรแกรม EES ลงในเครื่องคอมพิวเตอร์ เมื่อทำการเปิดโปรแกรม EES จะมีลักษณะดังภาพผนวกที่ ข1



ภาพผนวกที่ ข1 แสดงหน้าต่างของโปรแกรม



ภาพผนวกที่ ข2 แสดงส่วนของเมนูคำสั่ง

ในหน้าต่างของโปรแกรมจะประกอบไปด้วย ส่วนเมนูคำสั่ง ซึ่งใช้สำหรับจัดการต่างๆ ภายในโปรแกรมและหน้าต่าง Equation window ซึ่งใช้สำหรับเขียนฟังก์ชันการทำงานของโปรแกรม

เมนูคำสั่ง

1. เมนู File เป็นคำสั่งที่ใช้สำหรับจัดการไฟล์ทั่วไป จะประกอบไปด้วย

- Open ใช้สำหรับการเปิดไฟล์งานที่บันทึกไว้
- New ใช้สำหรับสร้างงานไฟล์ใหม่
- Merge ใช้ในการรวมไฟล์งานเข้าด้วยกัน ให้มาในไฟล์ที่เปิดอยู่
- Save ใช้ในการบันทึกไฟล์งานที่ใช้งานล่าสุด
- Save As ใช้ในการบันทึกไฟล์งานในชื่ออื่น
- Print ใช้สำหรับสั่งพิมพ์งาน
- Print Setup ใช้สำหรับตั้งค่าก่อนการพิมพ์
- Load Library ใช้สำหรับโหลดไฟล์สำเร็จรูปที่ได้ทำการเขียนฟังก์ชันเสร็จแล้วโดย

จะเป็นไฟล์ที่มี .LIB ต่อท้ายชื่อไฟล์งานนั้น

- Load Textbook ใช้สำหรับโหลดไฟล์ที่มี .TXB ต่อท้ายชื่อไฟล์นั้น
- Make Distributable Program ใช้สำหรับสร้างโปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับใช้งานได้

โดยไม่จำเป็นต้องเปิดโปรแกรม EES โดยจะเป็นไฟล์ .EXE ซึ่งสามารถนำไปติดตั้งแล้วใช้ได้ทันที

- Open or Create Macro ใช้สำหรับเปิดหรือสร้างไฟล์งานที่ใช้แมโคร
- Create LaTeX/PDF Report คล้ายกับคำสั่งพิมพ์งานแต่เป็นการสร้างไฟล์ .PDF โดย

หน้าการพิมพ์จะอยู่ในรูปเอกสาร PDF

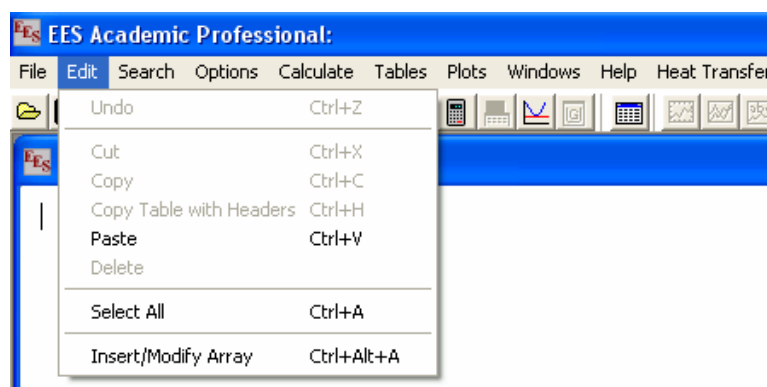
- Exit ใช้สำหรับเมื่อต้องการออกจากโปรแกรม



ภาพผนวกที่ 3 แสดงส่วนของคำสั่ง file

2. เมนู Edit เป็นคำสั่งที่ใช้สำหรับแก้ไขข้อความในไฟล์จะประกอบไปด้วย

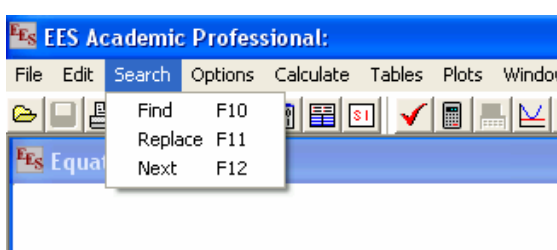
- Undo ใช้สำหรับยกเลิกคำสั่งที่ทำไปล่าสุด
- Cut ใช้สำหรับย้ายข้อความที่ถูกเลือกในหน้าต่างคำสั่ง
- Copy ใช้สำหรับคัดลอกข้อความ
- Copy table with headers ใช้สำหรับคัดลอกตาราง
- Paste ใช้สำหรับการวางข้อความที่ได้ถูกคัดลอก หรือตัดไว้
- Delete ใช้สำหรับการลบข้อความที่เลือก
- Select All ใช้สำหรับการเลือกข้อความทั้งหมด
- Insert/Modify Array ใช้สำหรับแทรกและแก้ไข Array



ภาพผนวกที่ ข4 แสดงส่วนของคำสั่ง Edit

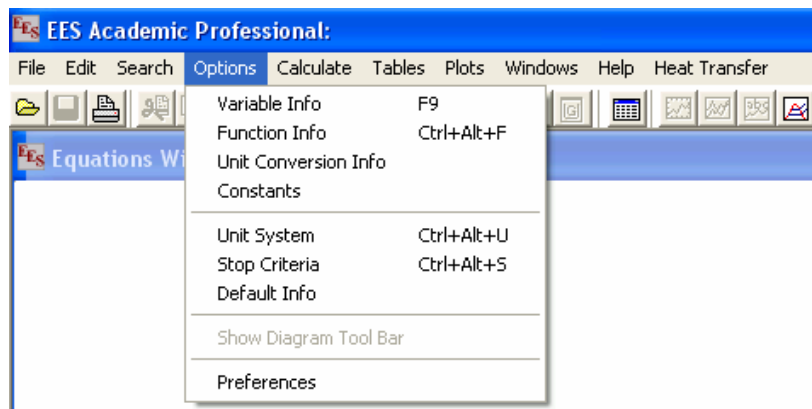
3. เมนู Search เป็นคำสั่งที่ใช้ค้นหาข้อความภายในไฟล์ จะประกอบไปด้วย

- Find ใช้สำหรับค้นหาข้อความที่ต้องการ
- Replace ใช้สำหรับแทนค่าข้อความที่ค้นหาด้วยข้อความอื่น
- Next ใช้สำหรับหาข้อความถัดไป



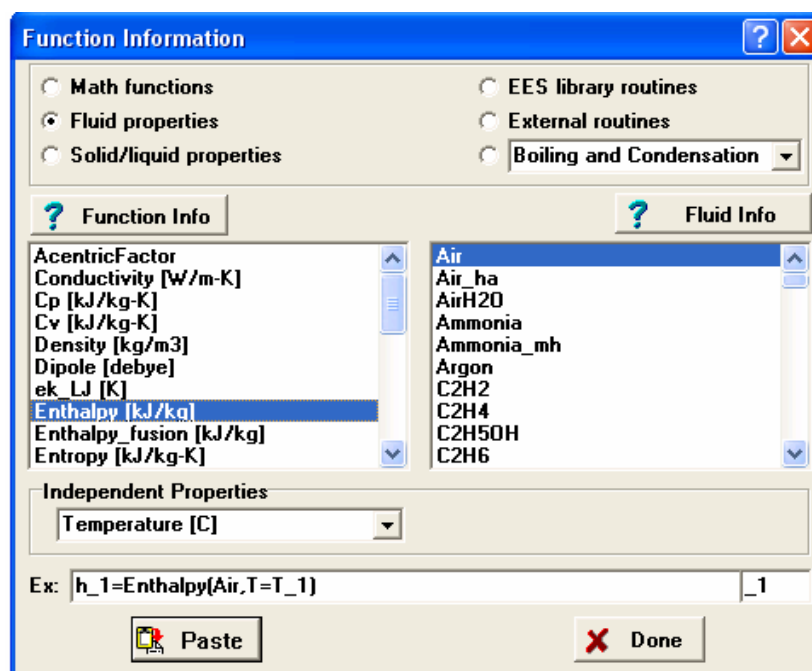
ภาพผนวกที่ ข5 แสดงส่วนของคำสั่ง Search

4. เมนู Option เป็นคำสั่งที่ใช้กำหนดค่าต่างๆ จะประกอบไปด้วย



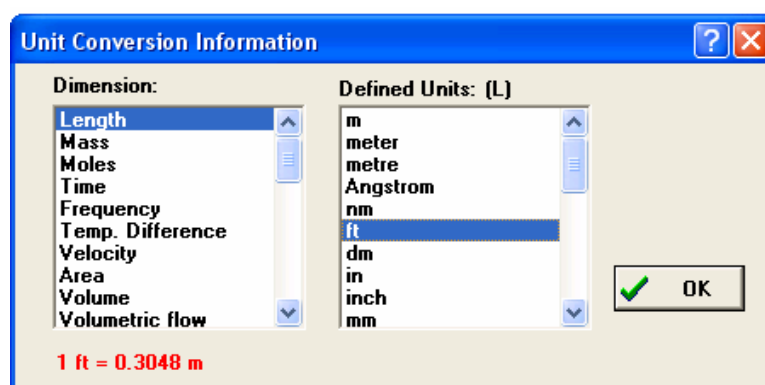
ภาพผนวกที่ ข6 แสดงส่วนของคำสั่ง Option

- Variable Info จะเป็นการสรุปค่าเริ่มต้นของตัวแปร โดยสามารถปรับเปลี่ยนค่าต่างๆ
- Function Info เป็นส่วนที่สำคัญมากของโปรแกรม EES ซึ่งในส่วนนี้จะเป็นการเขียนค่าฟังก์ชันการทำงานของโปรแกรม โดยจะทำการเรียกค่าต่างๆมาใช้งาน ไม่ว่าจะเป็นฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ คุณสมบัติของของสารต่างๆ เป็นต้น



ภาพผนวกที่ ข7 แสดงหน้าต่างของ Function Info

- Unit Conversion Info เป็นส่วนที่ใช้สำหรับการเปลี่ยนแปลงหน่วย โดยสามารถเปลี่ยนหน่วยของการคำนวณได้โดยการพิมพ์ฟังก์ชัน (From, to)



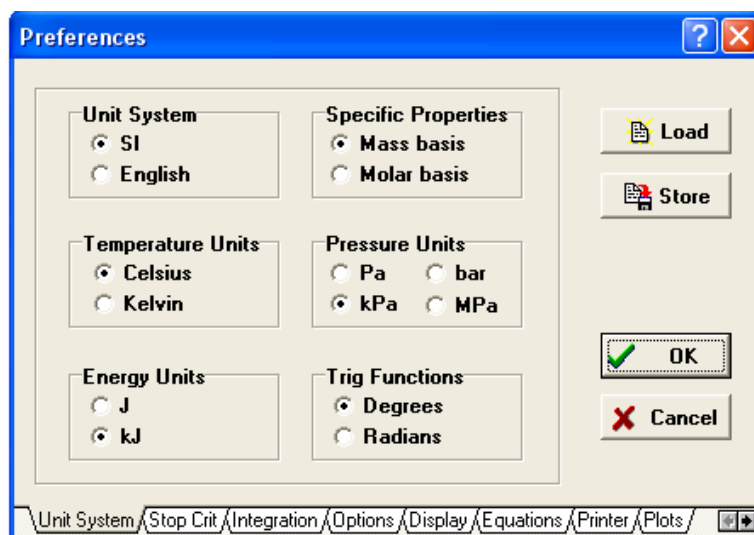
ภาพผนวกที่ ข8 แสดงหน้าต่างของ Unit Conversion Info

- Constants เป็นการแสดงค่าคงที่ที่มีอยู่ในโปรแกรม EES โดยจะเป็นค่าคงที่พื้นฐานที่สำคัญสำหรับการคำนวณ ซึ่งเพียงพิมพ์ตามชื่อ โปรแกรม EES ก็จะตีความหมายถึงค่านั้นเลยซึ่งค่าทั้งหมดนี้ไม่สามารถนำไปใช้เป็นตัวแปรได้อีก

EES Constants			
Name	Description	Value	Units
h_NH3#	Ammonia (gas) enthalpy of formation (25C, 77F)	-46190	kJ/kmol
e#	Electron charge	1.602E-19	Coulomb
NA#	Avogadro's constant	6.022E+26	1/kmol
g#	Gravitational acceleration (sea level)	9.807	m/s^2
F#	Faraday's constant	9.649E+07	Coulomb/kmol
h_C6H6#	Benzene (gas) enthalpy of formation (25C, 77F)	82930	kJ/kmol
h_CH2#	Acetylene enthalpy of formation (25C, 77F)	226730	kJ/kmol
r_e#	Classical electron radius	2.818E-15	m
gc#	Gravitational constant	6.673E-11	N-m^2/kg^2
C1#	Blackbody radiation constant 1	3.742E+08	W-micrometer^4/m^2
k#	Boltzmann's constant	1.381E-26	kJ/K
h_C2H4#	Ethylene enthalpy of formation (25C, 77F)	52290	kJ/kmol

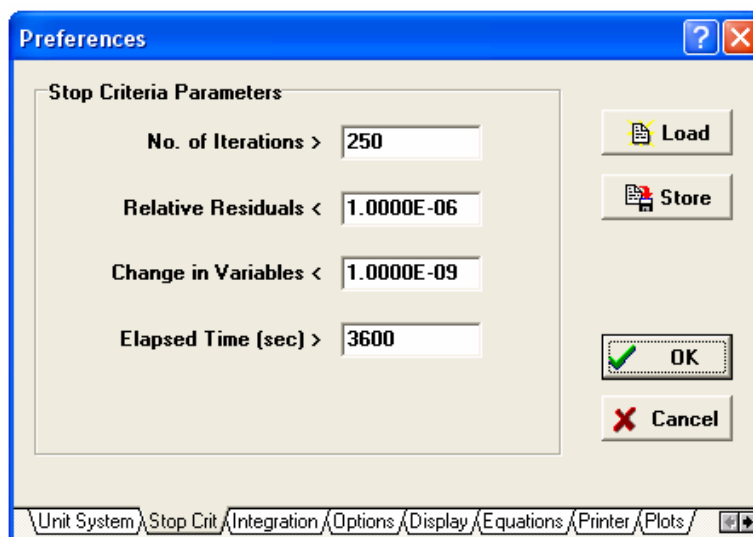
ภาพผนวกที่ ข9 แสดงหน้าต่างของ Constants

- Unit System เป็นการกำหนดหน่วยเริ่มต้นสำหรับการทำงานโดยไม่ต้องทำการใส่ค่าหน่วยในหน้าต่างสมการ โดยโปรแกรมจะตั้งค่าตามหน่วยเริ่มต้นนั้น



ภาพผนวกที่ ข10 แสดงหน้าต่างของ Unit System

- Stop Criteria เป็นการกำหนดการคำนวณซ้ำรวมถึงขอบเขตของการคำนวณซ้ำ



ภาพผนวกที่ ข11 แสดงหน้าต่างของ Stop Criteria

- Default Info เป็นการกำหนดค่าตัวแปรตั้งต้นของโปรแกรม
- Show/Hide Diagram Tool bar เป็นการเลือกให้แสดงหรือซ่อน Diagram Tool Bar
- Preferences เป็นคำสั่งที่ใช้เรียกการตั้งค่าพื้นฐานต่างๆของโปรแกรม

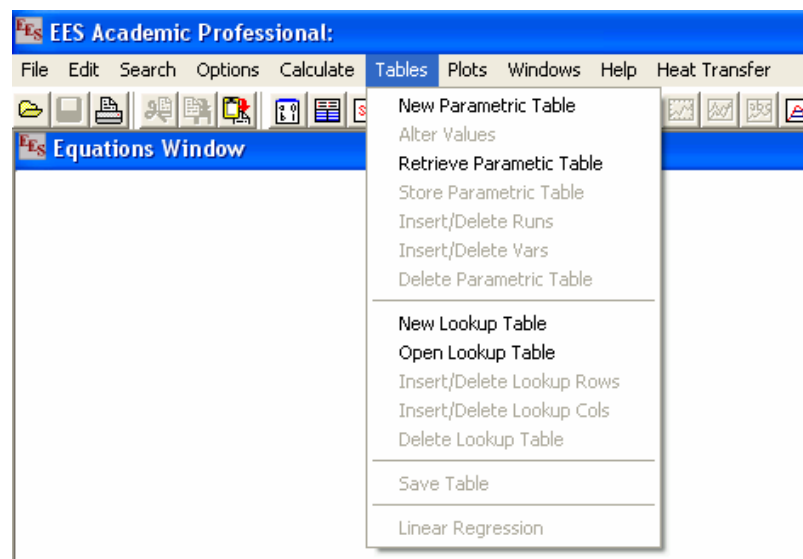
5. เมนู Calculate เป็นคำสั่งที่ใช้คำนวณค่าต่างๆ จะประกอบไปด้วย



ภาพผนวกที่ ข12 แสดงส่วนของคำสั่ง Calculate

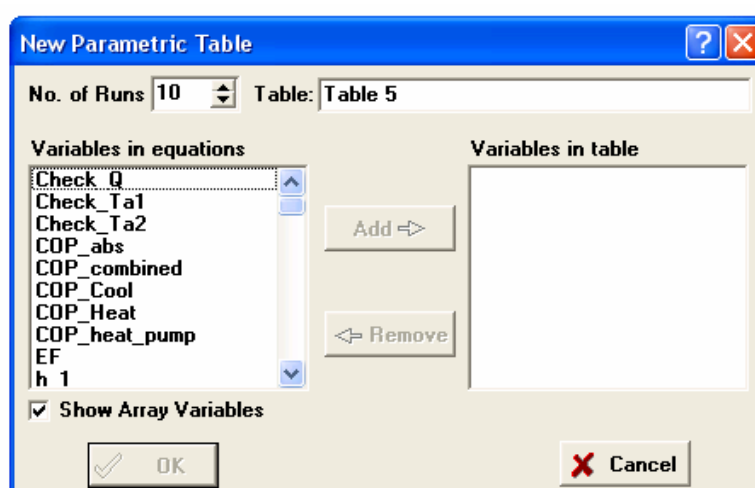
- Check/Format ใช้สำหรับการเช็คค่าตัวแปรกับจำนวนสมการว่าสัมพันธ์กันหรือไม่ ถ้าไม่พอจะฟ้องว่ามีความผิดพลาดเกิดขึ้นตรงไหน
- Solve ใช้สำหรับการรันโปรแกรมเพื่อหาคำตอบของตัวแปร
- Solve Table ใช้สำหรับการหาคำตอบในกรณีที่เป็นตารางเพื่อหาค่าของตัวแปร
- Min/Max ใช้สำหรับหาค่าต่ำสุดและสูงสุดของตัวแปรที่ต้องการ
- Min/Max Table ใช้หาค่าต่ำสุดและสูงสุดของตัวแปร ในกรณีที่เป็นตาราง
- Uncertainty Propagation ใช้สำหรับหาค่าความไม่แน่นอนของตัวแปร
- Uncertainty Propagation Table ใช้สำหรับหาค่าความไม่แน่นอนของตัวแปรในกรณีที่เป็นตาราง
- Check Unit ใช้สำหรับตรวจสอบหน่วยว่าสอดคล้องกับสมการหรือไม่
- Update Guesses ใช้สำหรับคาดคะเนค่าของแต่ละตัวแปรด้วยการคำนวณล่าสุด
- Reset Guesses ใช้ยกเลิกการคาดคะเนค่าของแต่ละตัวแปรให้กลับไปใช้ค่าเริ่มต้น
- Reset Limits ใช้ยกเลิกค่าขอบบนและขอบล่างของตัวแปรให้กลับไปใช้ค่าเริ่มต้น

6. เมนู Tables เป็นคำสั่งที่ใช้สร้างตารางการคำนวณ จะประกอบไปด้วย



ภาพผนวกที่ ข13 แสดงส่วนของคำสั่ง Tables

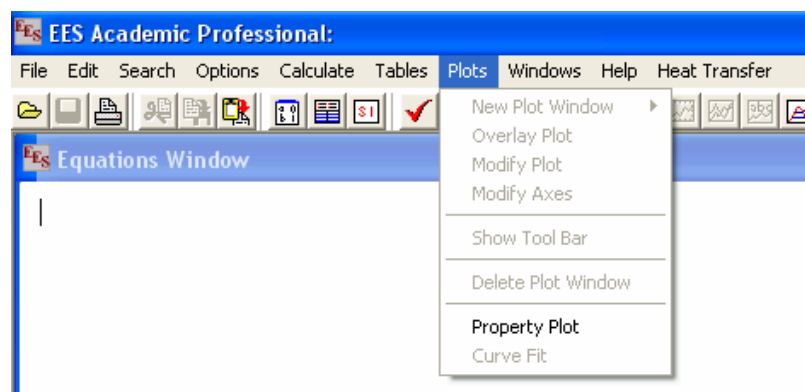
- New Parametric Table ใช้สำหรับการสร้างตารางเพื่อคำนวณค่าที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรต้นเพื่อดูความเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรตามที่ต้องการ โดยสามารถเลือกตัวแปรที่ต้องการได้



ภาพผนวกที่ ข14 แสดงหน้าต่างของ New Parametric Table

- Alter Values ใช้สำหรับแก้ไข เปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรใน Parametric Table
- Retrieve Parametric Table ใช้สำหรับเรียกคืนค่าตัวแปรที่ใช้ใน Parametric Table ที่เคยมีการเก็บค่าเอาไว้
- Store Parametric Table ใช้สำหรับเก็บค่าตัวแปรที่ได้ตั้งค่าไว้ใน Parametric Table
- Insert/Delete Runs ใช้สำหรับเพิ่มหรือลดจำนวนแถวใน Parametric Table
- Insert/Delete Vars ใช้สำหรับเพิ่มหรือลดจำนวนตัวแปรใน Parametric Table
- Delete Parametric Table ใช้สำหรับลบ Parametric Table
- New Lookup Table ใช้สำหรับการสร้างตาราง Lookup Table
- Open Lookup Table ใช้สำหรับโหลดตาราง Lookup Table ที่ได้มีการเซฟไว้
- Insert/Delete Lookup Rows ใช้สำหรับเพิ่มแถวตามแนวนอนของ Lookup Table
- Insert/Delete Lookup Cols ใช้สำหรับเพิ่มแถวตามแนวตั้งของ Lookup Table
- Delete Lookup Table ใช้สำหรับลบ Lookup Table
- Save Table ใช้สำหรับบันทึกตาราง
- Linear Regression ใช้สำหรับการหาสมการจากค่าในตาราง

7. เมนู Plots เป็นคำสั่งที่ใช้เขียนกราฟ จะประกอบไปด้วย

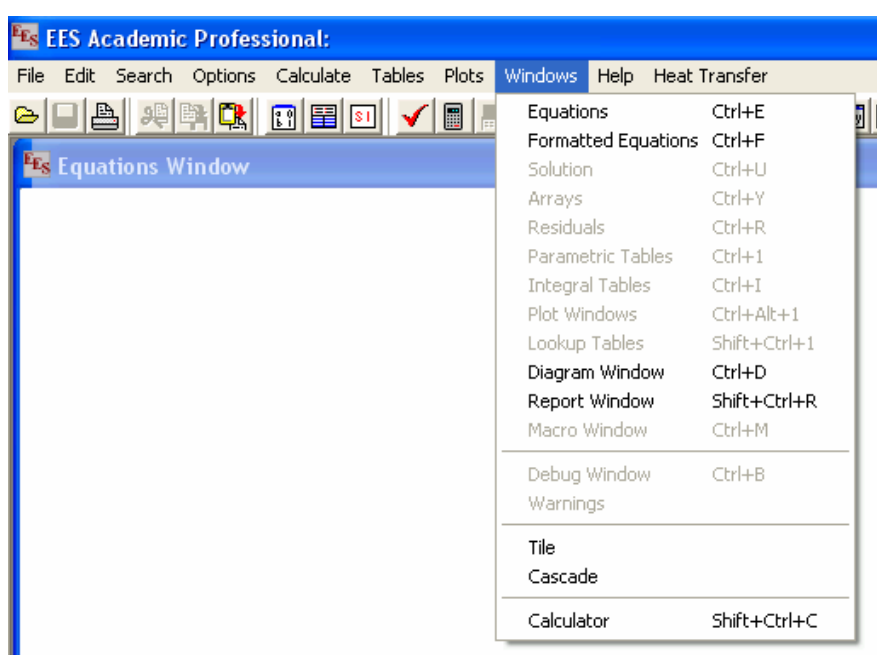


ภาพผนวกที่ ข15 แสดงส่วนของคำสั่ง Plots

- New Plot Window ใช้สำหรับการสร้างกราฟใหม่
- Overlay Plot ใช้สำหรับการเขียนกราฟเพิ่มเข้าไปในกราฟเดิม
- Modify Plot ใช้สำหรับแก้ไขคุณสมบัติต่างๆของกราฟ

- Modify Axes ใช้สำหรับการแก้ไขค่าบนแกนของกราฟ
- Show Tool Bar ใช้สำหรับกำหนดให้แสดง Tool Bar
- Delete Plot Window ใช้สำหรับลบกราฟที่สร้างไว้
- Property Plot ใช้สำหรับเขียนกราฟคุณสมบัติของสารต่างๆที่มีอยู่ในโปรแกรม EES
- Curve Fit ใช้สำหรับหาสมการจากค่าในกราฟ

8. เมนู Windows เป็นคำสั่งที่ใช้แสดงหน้าต่างการทำงาน จะประกอบไปด้วย

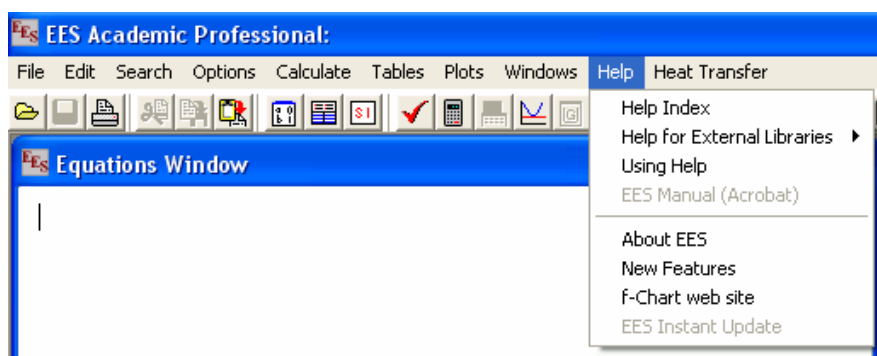


ภาพผนวกที่ ข16 แสดงส่วนของคำสั่ง Windows

- Equations ใช้สำหรับแสดงหน้าต่างในเขียนฟังก์ชันการทำงานของโปรแกรม
- Formatted Equations ใช้สำหรับแสดงหน้าต่างสมการในรูปแบบคณิตศาสตร์
- Solution ใช้สำหรับแสดงหน้าต่างผลของการคำนวณจากสมการที่ได้
- Arrays ใช้สำหรับแสดงหน้าต่างแถวลำดับ
- Residuals ใช้สำหรับแสดงหน้าต่างค่า Residuals
- Parametric Table ใช้สำหรับแสดงหน้าต่างค่าตัวแปรในตาราง
- Integral Table ใช้สำหรับแสดงหน้าต่างตารางอินทิกรัล
- Plot Windows ใช้สำหรับแสดงหน้าต่างการเขียนกราฟ

- Lookup Table ใช้สำหรับแสดงหน้าต่าง Lookup Table
- Diagram Window ใช้สำหรับแสดงหน้าต่างแผนภาพแสดงวิธีการแก้ปัญหา
- Report Window ใช้สำหรับแสดงหน้าต่างรายงาน
- Macro Window ใช้สำหรับแสดงหน้าต่างแมโคร
- Debug Window ใช้สำหรับแสดงหน้าต่างจุดบกพร่องของโปรแกรม
- Warning ใช้สำหรับแสดงหน้าต่างคำเตือนข้อผิดพลาด
- Tile ใช้สำหรับแสดงหน้าต่างในลักษณะแผ่เรียง
- Cascade ใช้สำหรับแสดงหน้าต่างในลักษณะต่อเรียง
- Calculator ใช้สำหรับแสดงหน้าต่างเครื่องคิดเลข

9. เมนู Help เป็นคำสั่งที่ใช้แสดงคำอธิบายโปรแกรม จะประกอบไปด้วย



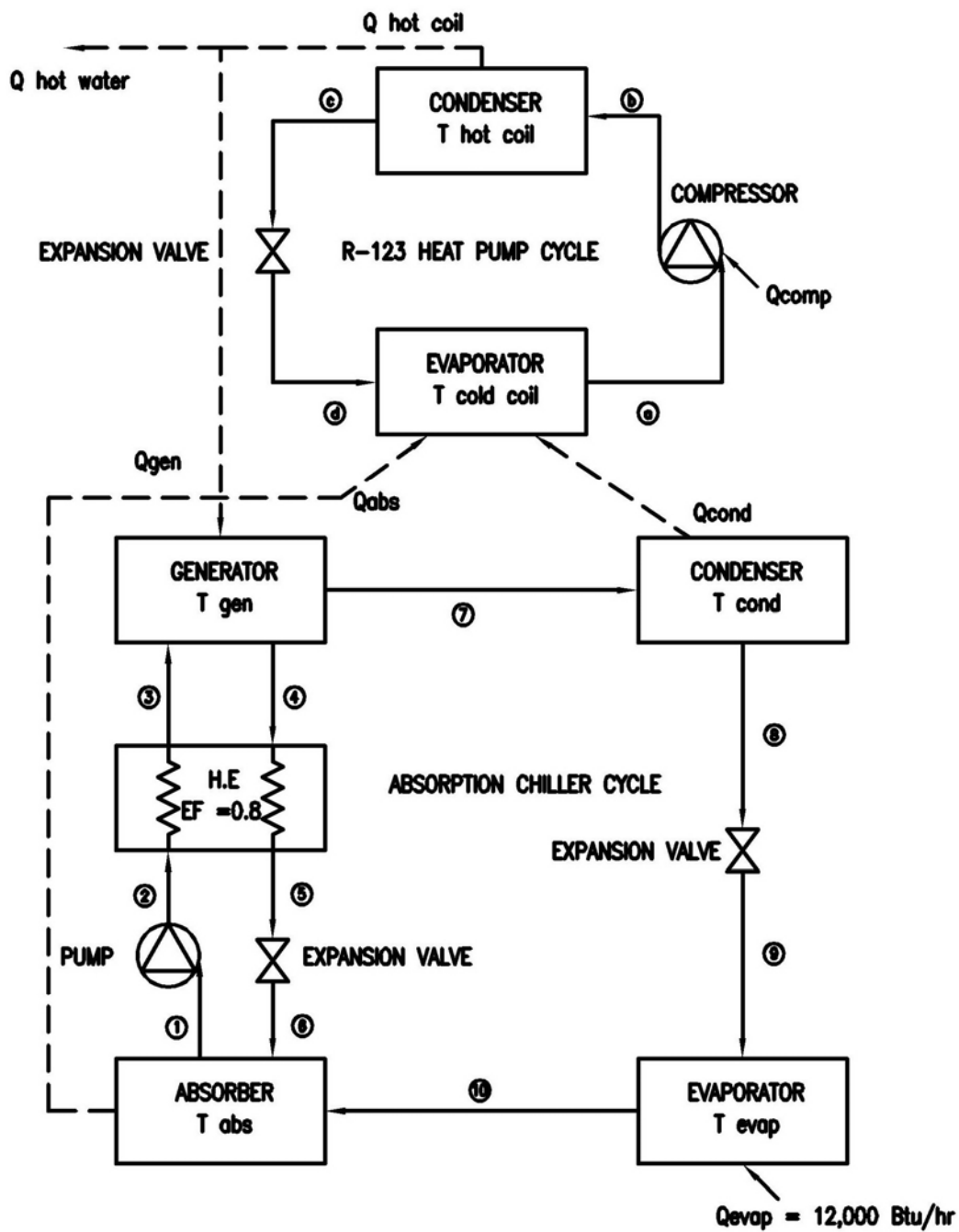
ภาพผนวกที่ ข17 แสดงส่วนของคำสั่ง Help

- Help Index ใช้สำหรับค้นหาคำอธิบายจากคำสำคัญต่างๆ เรียงตามตัวอักษร
- Help for External Libraries ใช้สำหรับค้นหาคำอธิบายสำหรับชุดคำสั่งภายนอกโปรแกรม
- Using Help ใช้สำหรับให้คำแนะนำในการใช้คำอธิบายต่างๆ
- EES Manual ใช้สำหรับอ่านคู่มือการใช้โปรแกรม EES
- About EES แสดงถึงผู้สร้าง EES
- New Features แสดงถึงความเปลี่ยนแปลงของโปรแกรม EES ในเวอร์ชันล่าสุด
- f-Chart web site ใช้สำหรับเข้าถึงเว็บของ โปรแกรม EES

ภาคผนวก ค

การจำลองวัฏจักรร่วมป้อนความร้อนและการทำความเย็นแบบดูดซึม

การจำลองวัฏจักรร่วมปั๊มความร้อนและการทำความเย็นแบบดูดซึม



ภาพผนวกที่ ค1 แสดงการจำลองวัฏจักรร่วมปั๊มความร้อนและการทำความเย็นแบบดูดซึม

จากภาพผนวกที่ ค1 แสดงการจำลองวัฏจักรร่วมปั๊มความร้อนที่ใช้สารทำความเย็น R-123 และการทำความเย็นแบบดูดซึมที่ใช้สารทำความเย็นลิเทียมโบรไมด์-น้ำ ซึ่งมีขนาดการทำความเย็นคงที่ที่ 12,000 Btu/hr หรือการทำความเย็นขนาด 1 ตัน และประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในการทำความเย็นแบบดูดซึม (EF) มีค่าเท่ากับ 0.8 ซึ่งจากสมการสมดุลมวล และสมดุลพลังงานสามารถสรุปได้ดังนี้

ตารางผนวกที่ ค1 ตารางสมดุลมวลและพลังงานของวัฏจักรการทำความเย็นแบบดูดซึม

สมดุลมวล	สมดุลพลังงาน
ปั๊มสารละลาย (Solution Pump) $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \quad x_1 = x_2$	ปั๊มสารละลาย (Solution Pump) $W + \dot{m}_1 h_1 = \dot{m}_2 h_2$
เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน $\dot{m}_2 = \dot{m}_3 \quad x_2 = x_3$ $\dot{m}_4 = \dot{m}_5 \quad x_4 = x_5$	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน $Q_{shx-h} = \dot{m}_4 h_4 - \dot{m}_5 h_5$ $Q_{shx-c} = \dot{m}_3 h_3 - \dot{m}_2 h_2$ $\dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_4 h_4 = \dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_5 h_5$
วาล์วลดความดันของสารละลาย $\dot{m}_5 = \dot{m}_6 \quad x_5 = x_6$	วาล์วลดความดันของสารละลาย $h_5 = h_6$
เครื่องดูดซึม (Absorber) $\dot{m}_6 + \dot{m}_{10} = \dot{m}_1$ $\dot{m}_6 x_6 + \dot{m}_{10} x_{10} = \dot{m}_1 x_1$	เครื่องดูดซึม (Absorber) $\dot{m}_6 h_6 + \dot{m}_{10} h_{10} = Q_{abs} + \dot{m}_1 h_1$
เครื่องผลิต (Generator) $\dot{m}_3 = \dot{m}_4 + \dot{m}_7$ $\dot{m}_3 x_3 = \dot{m}_4 x_4 + \dot{m}_7 x_7$	เครื่องผลิต (Generator) $Q_{gen} + \dot{m}_3 h_3 = \dot{m}_4 h_4 + \dot{m}_7 h_7$
เครื่องควบแน่น (Condenser) $\dot{m}_7 = \dot{m}_8$	เครื่องควบแน่น (Condenser) $\dot{m}_7 h_7 = \dot{m}_8 h_8 + Q_{cond}$
วาล์วลดความดันของสารทำความเย็น $\dot{m}_8 = \dot{m}_9$	วาล์วลดความดันของสารทำความเย็น $h_8 = h_9$
เครื่องระเหย (Evaporator) $\dot{m}_9 = \dot{m}_{10}$	เครื่องระเหย (Evaporator) $Q_{evap} + \dot{m}_9 h_9 = \dot{m}_{10} h_{10}$

และจะสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของการทำความเย็นแบบดูดซึมได้จาก

$$COP_{abs} = \frac{Q_{evap}}{Q_{gen}} \quad (2)$$

ตารางผนวกที่ ค2 ตารางสมดุลมวลและพลังงานของวัฏจักรปั๊มความร้อน

สมดุลมวล	สมดุลพลังงาน
เครื่องอัด $\dot{m}_a = \dot{m}_b$	เครื่องอัด $Q_{comp} + \dot{m}_a h_a = \dot{m}_b h_b$
คอยล์ร้อน (condenser) $\dot{m}_b = \dot{m}_c$	คอยล์ร้อน (condenser) $\dot{m}_b h_b = \dot{m}_c h_c + Q_{hot coil}$
วาล์วลดความดัน $\dot{m}_c = \dot{m}_d$	วาล์วลดความดัน $\dot{m}_c h_c = \dot{m}_d h_d$
คอยล์เย็น (Evaporator) $\dot{m}_d = \dot{m}_a$	คอยล์เย็น (Evaporator) $Q_{cold coil} + \dot{m}_d h_d = \dot{m}_a h_a$

และจะสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของปั๊มความร้อนได้จาก

$$COP_{Heat pump} = \frac{Q_{hot coil}}{Q_{comp}} \quad (3)$$

ตารางผนวกที่ ค3 ตารางสมดุลพลังงานวัฏจักรรวม

สมดุลพลังงาน
การถ่ายเทความร้อนระหว่างอุปกรณ์ $Q_{cold coil} = Q_{cond} + Q_{abs}$ $Q_{hot coil} = Q_{hot water} + Q_{gen}$

และจะสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของวัฏจักรรวมได้จาก

$$COP_{combined} = \frac{Q_{evap} + Q_{hot water}}{Q_{comp}} \quad (51)$$

สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะการทำความเย็นของวัฏจักรร่วมได้จาก

$$COP_{cool} = \frac{Q_{evap}}{Q_{comp}} \quad (52)$$

และสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะการทำความร้อนของวัฏจักรร่วมได้จาก

$$COP_{heat} = \frac{Q_{hot\ water}}{Q_{comp}} \quad (53)$$

ภาคผนวก ง

ตัวอย่างการวิเคราะห์ประสิทธิภาพวัฏจักรร่วมปั๊มความร้อนและการทำความเย็นแบบดูดซึม

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพวัฏจักรร่วม

การวิเคราะห์การทำงานของวัฏจักรร่วมปั๊มความร้อนที่ใช้สารทำความเย็น R-123 และการทำความเย็นแบบดูดซึมที่ใช้สารทำความเย็นลิเทียมโบรไมด์-น้ำ โดยวิทยานิพนธ์นี้จะนำโปรแกรม EES มาช่วยทำการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ต้องการ โดยจะนำสมการจากแบบจำลองมาทำการเขียนลงในโปรแกรม EES โดยในโปรแกรมจะมีค่าคุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของสารทำความเย็นทั้ง R-123 และลิเทียมโบรไมด์-น้ำ ซึ่งทำให้ง่ายต่อการคำนวณมากยิ่งขึ้น

ตัวอย่างการวิเคราะห์

1. ทำการกำหนดสถานะที่จะทำการวิเคราะห์ โดยกำหนดค่าของอุณหภูมิที่อุปกรณ์ต่างๆ และประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน รวมถึงปริมาณความร้อนที่เครื่องระเหย ของการทำความเย็นแบบดูดซึมป้อนเข้าไปในโปรแกรม EES ดังภาพผนวกที่ ง1 และ ง2

1. ขนาดทำความเย็นที่เครื่องระเหย (Q_{evap}) มีค่าเท่ากับ 12,000 Btu/hr
2. ประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในการทำความเย็นแบบดูดซึม (EF) มีค่าเท่ากับ 0.8
3. อุณหภูมิเครื่องผลิตของการทำความเย็นแบบดูดซึม (T_{gen}) มีค่าเท่ากับ 176°F
4. อุณหภูมิเครื่องควบแน่นของการทำความเย็นแบบดูดซึม (T_{cond}) มีค่าเท่ากับ 95°F
5. อุณหภูมิเครื่องดูดซึมของการทำความเย็นแบบดูดซึม (T_{abs}) มีค่าเท่ากับ 95°F
6. อุณหภูมิเครื่องควบแน่นของการทำความเย็นแบบดูดซึม (T_{evap}) มีค่าเท่ากับ 55°F
7. อุณหภูมิเครื่องคอยล์ร้อนของปั๊มความร้อน ($T_{\text{hot coil}}$) มีค่าเท่ากับ 194°F
8. อุณหภูมิเครื่องคอยล์เย็นของปั๊มความร้อน ($T_{\text{cold coil}}$) มีค่าเท่ากับ 86°F

2. ทำการหาค่าความดันในวัฏจักรการทำความเย็นแบบดูดซึมโดยเขียนฟังก์ชันดังนี้

ค่าความดันของระบบด้านต่ำ (P_L) หาได้จาก

$$P_L = \text{Pressure (Steam, } T=T_{\text{evap}}, x=1) = 0.2141 \text{ psia}$$

ค่าความดันของระบบด้านสูง (P_H) หาได้จาก

$$P_H = \text{Pressure (Steam, } T=T_{\text{cond}}, x=1) = 0.8161 \text{ psia}$$

3. ทำการหาค่าเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของสารละลายในวัฏจักรการทำความเย็นแบบดูดซึมโดยเขียนฟังก์ชันดังนี้

ค่าเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของสารละลายเข้มข้น (x_{conc}) หาได้จาก

$$x_{\text{conc}} = X_LIBR ('ENG', T_{\text{gen}}, P_H) = 60.8\%$$

ค่าเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของสารละลายเจือจาง (x_{dil}) หาได้จาก

$$x_{\text{dil}} = X_LIBR ('ENG', T_{\text{abs}}, P_L) = 50.8\%$$

4. ทำการหาค่าเอนทาลปีในวัฏจักรการทำความเย็นแบบดูดซึมโดยเขียนฟังก์ชันดังนี้

เอนทาลปีที่สภาวะ 1 (h_1) หาได้จาก

$$h_1 = H_LIBR ('ENG', T_{\text{abs}}, x_{\text{dil}}) = 31.1 \text{ Btu/lb}_m$$

เอนทาลปีที่สภาวะ 2 (h_2) หาได้จาก

$$h_2 = h_1 = 31.1 \text{ Btu/lb}_m$$

เอนทาลปีที่สภาวะ 3 (h_3) หาได้จาก

$$Q_{\text{shxh}} = m_{\text{dot}_4} \times (h_4 - h_5)$$

$$Q_{\text{shxc}} = m_{\text{dot}_3} \times (h_3 - h_2)$$

$$Q_{\text{shxc}} = Q_{\text{shxh}} ; h_3 = 55.7 \text{ Btu/lb}$$

เอนทาลปีที่สภาวะ 4 (h_4) หาได้จาก

$$h_4 = H_LIBR ('ENG', T_{\text{gen}}, x_{\text{conc}}) = 84.4 \text{ Btu/lb}_m$$

เอนทาลปีที่สภาวะ 5 (h_5) หาได้จาก

$$h_5 = H_LIBR ('ENG', T_5, x_{\text{conc}}) = 54.9 \text{ Btu/lb}_m$$

เอนทาลปีที่สภาวะ 6 (h_6) หาได้จาก

$$h_6 = h_5 = 54.9 \text{ Btu/lb}_m$$

เอนทาลปีที่สภาวะ 7 (h_7) หาได้จาก

$$h_7 = \text{Enthalpy (steam, } P=P_H, X=1) = 1136.3 \text{ Btu/lb}_m$$

เอนทาลปีที่สภาวะ 8 (h_8) หาได้จาก

$$h_8 = \text{Enthalpy (steam, } T=T_{\text{cond}}, X=0) = 63 \text{ Btu/lb}_m$$

เอนทาลปีที่สภาวะ 9 (h_9) หาได้จาก

$$h_9 = h_8 = 63 \text{ Btu/lb}_m$$

เอนทาลปีที่สภาวะ 10 (h_{10}) หาได้จาก

$$h_{10} = \text{Enthalpy (steam, } T=T_{\text{evap}}, X=1) = 1085.1 \text{ Btu/lb}_m$$

5. ทำการหาค่าอัตราการไหลของสารทำความเย็นในวัฏจักรการทำความเย็นแบบดูดซึมโดยเขียนฟังก์ชันดังนี้

อัตราการไหลของสารละลายเจือจาง ($\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_3$) หาได้จาก

$$\dot{m}_{\text{dot}_1} = \dot{m}_{\text{dot}_6} + \dot{m}_{\text{dot}_{10}} = 0.159 \text{ gpm}$$

$$\dot{m}_{\text{dot}_1} = \dot{m}_{\text{dot}_2} = \dot{m}_{\text{dot}_3}$$

อัตราการไหลของสารละลายเข้มข้น ($\dot{m}_4 = \dot{m}_5 = \dot{m}_6$) หาได้จาก

$$\dot{m}_{\text{dot}_6} = \dot{m}_{\text{dot}_{10}} \times (x_{\text{dil}} / (x_{\text{conc}} - x_{\text{dil}})) = 0.133 \text{ gpm}$$

$$\dot{m}_{\text{dot}_4} = \dot{m}_{\text{dot}_5} = \dot{m}_{\text{dot}_6}$$

อัตราการไหลของสารทำความเย็น ($\dot{m}_7 = \dot{m}_8 = \dot{m}_9 = \dot{m}_{10}$) หาได้จาก

$$\dot{m}_{\text{dot}_{10}} = Q_{\text{evap}} / (h_{10} - h_9) = 0.026 \text{ gpm}$$

$$\dot{m}_{\text{dot}_7} = \dot{m}_{\text{dot}_8} = \dot{m}_{\text{dot}_9} = \dot{m}_{\text{dot}_{10}}$$

6. ทำการหาค่าอุณหภูมิในวัฏจักรการทำความเย็นแบบดูดซึมโดยเขียนฟังก์ชันดังนี้

อุณหภูมิที่สภาวะ 1 (T_1) หาได้จาก

$$T_1 = T_{abs} = 95 \text{ }^{\circ}\text{F}$$

อุณหภูมิที่สภาวะ 2 (T_2) หาได้จาก

$$T_2 = T_1 = 95 \text{ }^{\circ}\text{F}$$

อุณหภูมิที่สภาวะ 3 (T_3) หาได้จาก

$$T_3 = T_{LIBR}('ENG', P_H, x_{dil}) = 139.7 \text{ }^{\circ}\text{F}$$

อุณหภูมิที่สภาวะ 4 (T_4) หาได้จาก

$$T_4 = T_{gen} = 176 \text{ }^{\circ}\text{F}$$

อุณหภูมิที่สภาวะ 5 (T_5) หาได้จาก

$$EF = (T_4 - T_5) / (T_4 - T_2)$$

$$T_5 = 111.2 \text{ }^{\circ}\text{F}$$

อุณหภูมิที่สภาวะ 6 (T_6) หาได้จาก

$$T_6 = T_5 = 111.2 \text{ }^{\circ}\text{F}$$

อุณหภูมิที่สภาวะ 7 (T_7) หาได้จาก

$$T_7 = T_{gen} = 176 \text{ }^{\circ}\text{F}$$

อุณหภูมิที่สภาวะ 8 (T_8) หาได้จาก

$$T_8 = T_{cond} = 95 \text{ }^{\circ}\text{F}$$

อุณหภูมิที่สภาวะ 9 (T_9) หาได้จาก

$$T_9 = \text{Temperature}(\text{steam}, h=h_9, P=P_L) = 55 \text{ }^{\circ}\text{F}$$

อุณหภูมิที่สภาวะ 10 (T_{10}) หาได้จาก

$$T_{10} = T_{\text{evap}} = 55^\circ\text{F}$$

7. ทำการหาค่าปริมาณการถ่ายเทความร้อนของแต่ละอุปกรณ์ในวัฏจักรการทำความเย็นแบบดูดซึมโดยเขียนฟังก์ชันดังนี้

ปริมาณการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องผลิต (Q_{gen}) หาได้จาก

$$Q_{\text{gen}} = (m_{\text{dot}_4} \times h_4) + (m_{\text{dot}_7} \times h_7) - (m_{\text{dot}_3} \times h_3) = 14,391 \text{ Btu/hr}$$

ปริมาณการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องควบแน่น (Q_{cond}) หาได้จาก

$$Q_{\text{cond}} = m_{\text{dot}_{10}} \times (h_7 - h_8) = 12,601 \text{ Btu/hr}$$

ปริมาณการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องดูดซึม (Q_{abs}) หาได้จาก

$$Q_{\text{abs}} = (m_{\text{dot}_6} \times h_6) + (m_{\text{dot}_{10}} \times h_{10}) - (m_{\text{dot}_1} \times h_1) = 13,790 \text{ Btu/hr}$$

8. ทำการหาค่าความดันในวัฏจักรทำความร้อนโดยเขียนฟังก์ชันดังนี้

ค่าความดันของระบบที่สภาวะ a (P_a) หาได้จาก

$$P_a = P_d = 15.91 \text{ psia}$$

ค่าความดันของระบบที่สภาวะ b (P_b) หาได้จาก

$$P_b = \text{Pressure (R123, } T=T_b, x=1) = 90.68 \text{ psia}$$

ค่าความดันของระบบที่สภาวะ c (P_c) หาได้จาก

$$P_c = \text{Pressure (R123, } T=T_c, x=0) = 90.68 \text{ psia}$$

ค่าความดันของระบบที่สภาวะ d (P_d) หาได้จาก

$$P_d = \text{Pressure (R123, } T=T_d, h=h_d) = 15.91 \text{ psia}$$

9. ทำการหาค่าอุณหภูมิในวัฏจักรปั๊มความร้อนโดยเขียนฟังก์ชันดังนี้

อุณหภูมิที่สถานะ a (T_a) หาได้จาก

$$T_a = \text{Temperature (R123, P=P_a, s=s_a)} = 102.1 \text{ }^{\circ}\text{F}$$

อุณหภูมิที่สถานะ c (T_c) หาได้จาก

$$T_c = T_b = 194 \text{ }^{\circ}\text{F}$$

10. ทำการหาค่าเอนทัลปีของสารทำความเย็นส่วนที่เป็นไอในวัฏจักรปั๊มความร้อนโดยเขียนฟังก์ชันดังนี้

เอนทัลปีของสารทำความเย็นส่วนที่เป็นไอที่สถานะ b (x_b) หาได้จาก

$$x_b = 1 \text{ เนื่องจากเป็นไออิ่มตัว}$$

เอนทัลปีของสารทำความเย็นส่วนที่เป็นไอที่สถานะ c (x_c) หาได้จาก

$$x_c = 0 \text{ เนื่องจากเป็นของเหลวอิ่มตัว}$$

เอนทัลปีของสารทำความเย็นส่วนที่เป็นไอที่สถานะ d (x_d) หาได้จาก

$$x_d = \text{Quality (R123, T=T_d, h=h_d)} = 0.39$$

11. ทำการหาค่าเอนทัลปีในวัฏจักรปั๊มความร้อนโดยเขียนฟังก์ชันดังนี้

เอนทัลปีที่สถานะ a (h_a) หาได้จาก

$$h_a = \text{Enthalpy (R123, P=P_a, s=s_a)} = 106 \text{ Btu/lb}_m$$

เอนทัลปีที่สถานะ b (h_b) หาได้จาก

$$h_b = \text{Enthalpy (R123, T=T_b, x=x_b)} = 118 \text{ Btu/lb}_m$$

เอนทัลปีที่สถานะ c (h_c) หาได้จาก

$$h_c = \text{Enthalpy (R123, T=T_c, x=x_c)} = 58 \text{ Btu/lb}_m$$

เอนทัลปีที่สภาวะ d (h_d) หาได้จาก

$$h_d = h_c = 58 \text{ Btu/lb}_m$$

12. ทำการหาค่าเอนโทรปีในวัฏจักรปั๊มความร้อนโดยเขียนฟังก์ชันดังนี้

เอนโทรปีที่สภาวะ a (s_a) หาได้จาก

$$s_a = s_b = 0.2006 \text{ Btu/lb}_m \cdot \text{R}$$

เอนโทรปีที่สภาวะ b (s_b) หาได้จาก

$$s_b = \text{Entropy}(\text{R123}, T=T_b, x=x_b) = 0.2006 \text{ Btu/lb}_m \cdot \text{R}$$

เอนโทรปีที่สภาวะ c (s_c) หาได้จาก

$$s_c = \text{Entropy}(\text{R123}, T=T_c, x=x_c) = 0.1086 \text{ Btu/lb}_m \cdot \text{R}$$

เอนโทรปีที่สภาวะ d (s_d) หาได้จาก

$$s_d = \text{Entropy}(\text{R123}, T=T_d, h=h_d) = 0.1136 \text{ Btu/lb}_m \cdot \text{R}$$

13. ทำการหาค่าอัตราการไหลของสารทำความเย็น R-123 ในวัฏจักรปั๊มความร้อนโดยเขียนฟังก์ชันดังนี้

อัตราการไหลของสารทำความเย็น R-123 ($\dot{m}_{\text{R-123}}$) หาได้จาก

$$\dot{m}_{\text{R123}} = Q_{\text{cold_coil}} / (h_a - h_d) = 1.25 \text{ gpm}$$

14. ทำการหาค่าปริมาณการถ่ายเทความร้อนของแต่ละอุปกรณ์ในวัฏจักรปั๊มความร้อนโดยเขียนฟังก์ชันดังนี้

ปริมาณการถ่ายเทความร้อนที่คอยล์ร้อน ($Q_{\text{hot coil}}$) หาได้จาก

$$Q_{\text{hot_coil}} = \dot{m}_{\text{R123}} \times (h_b - h_c) = 33,409 \text{ Btu/hr}$$

ปริมาณการถ่ายเทความร้อนที่คอยล์เย็น ($Q_{\text{cold coil}}$) หาได้จาก

$$Q_{\text{cold coil}} = Q_{\text{cond}} + Q_{\text{abs}} = 26,391 \text{ Btu/hr}$$

ปริมาณการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องอัด (Q_{comp}) หาได้จาก

$$Q_{\text{comp}} = m_{\text{dot R123}} \times (h_b - h_a) = 7,018 \text{ Btu/hr}$$

ปริมาณความร้อนที่เหลืสำหรับทำน้ำร้อน ($Q_{\text{hot-water}}$) หาได้จาก

$$Q_{\text{hot water}} = Q_{\text{hot coil}} - Q_{\text{gen}} = 19,018 \text{ Btu/hr}$$

15. ทำการหาค่าสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะในวัฏจักรร่วมโดยเขียนฟังก์ชันดังนี้

สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของการทำความเย็นแบบดูดซึม (COP_{abs})

$$\text{COP}_{\text{abs}} = Q_{\text{evap}} / Q_{\text{gen}} = 0.834$$

สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของปั๊มความร้อน ($\text{COP}_{\text{heat pump}}$)

$$\text{COP}_{\text{heat pump}} = Q_{\text{hot coil}} / Q_{\text{comp}} = 4.76$$

สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของการทำความเย็นของวัฏจักรร่วม (COP_{cool})

$$\text{COP}_{\text{cool}} = Q_{\text{evap}} / Q_{\text{comp}} = 1.71$$

สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของการทำความร้อนของวัฏจักรร่วม (COP_{heat})

$$\text{COP}_{\text{heat}} = Q_{\text{hot water}} / Q_{\text{comp}} = 2.71$$

สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะของวัฏจักรร่วม ($\text{COP}_{\text{combined}}$)

$$\text{COP}_{\text{combined}} = (Q_{\text{evap}} + Q_{\text{hot water}}) / Q_{\text{comp}} = 4.42$$

16. ทำการตรวจสอบสมดุลพลังงานในระบบ

$$\text{check_}Q_{\text{abs}} = Q_{\text{evap}} + Q_{\text{gen}} - Q_{\text{cond}} - Q_{\text{abs}} = 0$$

$$\text{check_}Q_{\text{R123}} = Q_{\text{hot coil}} - Q_{\text{cold coil}} - Q_{\text{comp}} = 0$$

"Combined Cycle"

"INPUT VALVE"

Q_evap = 12000 [Btu/hr]

EF = 0.8

T_gen = 176[F]

T_cond = 95 [F]

T_abs = 95 [F]

T_evap = 55 [F]

T_b = 194 [F]

T_d = 86 [F]

"Absorption chiller cycle"

"Pressure"

P_L = Pressure (steam,T=T_evap,x=1)

P_H = Pressure (steam,T=T_cond,x=1)

"Mass fraction"

x_conc = X_LIBR('Eng',T_gen,P_H)

x_dil = X_LIBR('Eng',T_abs,P_L)

"Enthalpy"

h_1 = H_LIBR('Eng',T_abs,x_dil)

h_2 = h_1

h_4 = H_LIBR('Eng',T_gen,x_conc)

h_5 = H_LIBR('Eng',T_5,x_conc)

h_6 = h_5

h_7 = enthalpy(steam,T=T_gen,X=1)

h_8 = enthalpy(steam,T=T_cond,X=0)

h_9 = h_8

h_10 = enthalpy(steam,T=T_evap,X=1)

"Mass flow rate"

m_dot_10 = (Q_evap/(h_10-h_9))

m_dot_6 = m_dot_10*(x_dil/(x_conc-x_dil))

m_dot_1 = m_dot_6+m_dot_10

m_dot_1 = m_dot_2

m_dot_1 = m_dot_3

m_dot_4 = m_dot_6

m_dot_5 = m_dot_6

m_dot_7 = m_dot_10

m_dot_8 = m_dot_10

m_dot_9 = m_dot_10

m_dil = m_dot_1*0.002249255

m_conc = m_dot_4*0.002249255

m_steam = m_dot_10*0.002249255

"Temperature"

T_1 = T_abs

T_2 = T_1

T_3 = T_LIBR('ENG',P_H,x_dil)

T_4 = T_gen

T_5 = T_6

T_7 = T_gen

T_8 = T_cond

T_9 = Temperature(Steam,h=h_9,P=P_L)

T_10 = T_evap

"Heat tranfer at Evaporator = 1 Rton"

"Efficiency of Heat exchanger"

"Temperature of Generator"

"Temperature of Condenser"

"Temperature of Absorpber"

"Temperature of Evaporator"

"Temperature of Condenser (Hot coil)"

"Temperature of Evaporator (Cold coil)"

"Low pressure side"

"High Pressure side"

"Mass fraction of the concentrated solutions"

"Mass fraction of the dilute solutions"

"Enthalpy at point 1"

"Enthalpy at point 2"

"Enthalpy at point 4"

"Enthalpy at point 5"

"Enthalpy at point 6"

"Enthalpy at point 7"

"Enthalpy at point 8"

"Enthalpy at point 9"

"Enthalpy at point 10"

```

"Efficiency of Heat Exchanger"
EF = (T_4-T_5)/(T_4-T_2)

"Heat"
Q_shxh = m_dot_4*(h_4-h_5)
Q_shxc = m_dot_3*(h_3-h_2)
Q_shxh = Q_shxc
Q_cond = m_dot_10*(h_7-h_8)
Q_gen = m_dot_4*h_4+m_dot_7*h_7-m_dot_3*h_3
Q_abs = m_dot_6*h_6+m_dot_10*h_10-m_dot_1*h_1
Q_rej = Q_cond+Q_abs

"R123 cycle"
$REFERENCE R123 ASH
T_b = T_c
x_b = 1
x_c = 0
h_c=h_d
s_a=s_b
P_a = P_d

h_a=Enthalpy(R123,P=P_a,s=s_a)
T_a=Temperature(R123,P=P_a,s=s_a)

h_b=Enthalpy(R123,T=T_b,x=x_b)
s_b=Entropy(R123,T=T_b,x=x_b)
P_b=Pressure(R123,T=T_b,x=x_b)

h_c=Enthalpy(R123,T=T_c,x=x_c)
P_c=Pressure(R123,T=T_c,x=x_c)
s_c = Entropy(R123,T=T_c,x=x_c)

x_d=Quality(R123,T=T_d,h=h_d)
P_d=Pressure(R123,T=T_d,h=h_d)
s_d=Entropy(R123,T=T_d,h=h_d)

m_dot_R = Q_cold_coil/(h_a-h_d)
m_dot_R123 = m_dot_R*0.002249255

Q_hot_coil = m_dot_R*(h_b-h_c)
Q_cold_coil = Q_cond+Q_abs
Q_comp = m_dot_R*(h_b-h_a)
Q_hot_water = Q_hot_coil-Q_gen

"COP"
COP_abs = Q_evap/Q_gen
COP_heatpump = Q_hot_coil/Q_comp
COP_Cool = Q_evap/Q_comp
COP_Heat = Q_hot_water/Q_comp
COP_combined = (Q_evap+Q_hot_water)/Q_comp

check_Q_abs = Q_evap+Q_gen-Q_cond-Q_abs
check_Q_R123 = Q_hot_coil-Q_cold_coil-Q_comp

```

"Heat reject at condenser"
 "Heat input at generator"
 "Heat reject at absorber"
 "Heat reject of Absorption chiller"

 "mass flow rate at R123 cycle"

 "Heat reject at hot coil"
 "Heat input at cold coil"
 "Heat input at compressor"
 "Heat for hot water"

 "COP of Absorption chiller"
 "COP of Heat pump"
 "COP of Cool"
 "COP of Heat"
 "COP of Combined Cycle"

ภาพผนวกที่ ๖๒ แสดงข้อมูลที่เขียนลงในโปรแกรม EES (ต่อ)

SOLUTION

Unit Settings: [F]/[psia]/[lbm]/[degrees]

check_{Q,abs} = 0 [Btu/hr]COP_{abs} = 0.834COP_{Cool} = 1.710COP_{heatpump} = 4.760h₁ = 31.1 [Btu/lb_m]h₂ = 31.1 [Btu/lb_m]h₄ = 84.4 [Btu/lb_m]h₆ = 54.9 [Btu/lb_m]h₈ = 63.0 [Btu/lb_m]h_a = 106 [Btu/lb_m]h_c = 58 [Btu/lb_m]m_{conc} = 0.1333 [gpm] $\dot{m}_1$ = 70.986 [lb_m/hr] $\dot{m}_2$ = 70.986 [lb_m/hr] $\dot{m}_4$ = 59.246 [lb_m/hr] $\dot{m}_6$ = 59.246 [lb_m/hr] $\dot{m}_8$ = 11.741 [lb_m/hr] $\dot{m}_R$ = 555.7 [lb_m/hr]m_{steam} = 0.02641 [gpm]P_b = 90.6778 [psia]P_d = 15.9130 [psia]P_L = 0.2141 [psia]Q_{cold,coil} = 26391 [Btu/hr]Q_{cond} = 12601.14 [Btu/hr]Q_{gen} = 14391.43 [Btu/hr]Q_{hot,water} = 19018 [Btu/hr]Q_{shxc} = 1747.79 [Btu/hr]S_a = 0.2006S_c = 0.1086 [Btu/lb_m-R]T₁ = 95 [F]T₂ = 95 [F]T₄ = 176 [F]T₆ = 111.2 [F]T₈ = 95 [F]T_a = 102.1 [F]T_b = 194 [F]T_{cond} = 95 [F]T_{evap} = 55 [F]x_b = 1x_{conc} = 60.8x_{dil} = 50.8check_{Q,R123} = -0.000 [Btu/hr]COP_{combined} = 4.420COP_{Heat} = 2.710

EF = 0.8

h₁₀ = 1085.1 [Btu/lb_m]h₃ = 55.7 [Btu/lb_m]h₅ = 54.9 [Btu/lb_m]h₇ = 1136.3 [Btu/lb_m]h₉ = 63.0 [Btu/lb_m]h_b = 118 [Btu/lb_m]h_d = 58 [Btu/lb_m]m_{dil} = 0.1597 [gpm] $\dot{m}_{10}$ = 11.741 [lb_m/hr] $\dot{m}_3$ = 70.986 [lb_m/hr] $\dot{m}_5$ = 59.246 [lb_m/hr] $\dot{m}_7$ = 11.741 [lb_m/hr] $\dot{m}_9$ = 11.741 [lb_m/hr] $\dot{m}_{R123}$ = 1.25 [gpm]P_a = 15.9130 [psia]P_c = 90.6778 [psia]P_H = 0.8161 [psia]Q_{abs} = 13790.29 [Btu/hr]Q_{comp} = 7018.36 [Btu/hr]Q_{evap} = 12000.00 [Btu/hr]Q_{hot,coil} = 33410 [Btu/hr]Q_{rej} = 26391.43 [Btu/hr]Q_{shxh} = 1747.79 [Btu/hr]S_b = 0.2006 [Btu/lb_m-R]S_d = 0.1136 [Btu/lb_m-R]T₁₀ = 55 [F]T₃ = 139.7 [F]T₅ = 111.2 [F]T₇ = 176 [F]T₉ = 55 [F]T_{abs} = 95 [F]T_c = 194 [F]T_d = 86 [F]T_{gen} = 176 [F]x_c = 0x_d = 0.39

1 potential unit problem was detected.

EES suggested units (shown in purple) for check_Q_abs check_Q_R123 h_10 h_2 h_6 h_7 .

ภาพผนวกที่ 33 แสดงผลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม EES

เมื่อได้ผลจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม EES ดังภาพผนวกที่ ง3 นำมาเขียนลงในตาราง
ได้ดังนี้

ตารางผนวกที่ ง1 สภาวะต่างๆของระบบการทำความเย็นแบบดูดซึมที่ใช้สารทำความเย็นลิเทียม
โบรไมด์-น้ำ

สภาวะ	ความดัน P (psia)	อุณหภูมิ T (°F)	ความเข้มข้น LiBr (x%)	เอนทาลปี h (Btu/lb _m)	อัตราการไหล $\dot{m}$ (gpm)
1	0.2141	95	50.8	31.1	0.159
2	0.8161	95	50.8	31.1	0.159
3	0.8161	139.7	50.8	55.7	0.159
4	0.8161	176	60.8	84.4	0.133
5	0.8161	111.2	60.8	54.9	0.133
6	0.2141	111.2	60.8	54.9	0.133
7	0.8161	176	0	1136.3	0.026
8	0.8161	95	0	63	0.026
9	0.2141	55	0	63	0.026
10	0.2141	55	0	1085.1	0.026

ตารางผนวกที่ ง2 สภาวะต่างๆของปั๊มความร้อนที่ใช้สารทำความเย็น R-123

สภาวะ	ความดัน P (psia)	อุณหภูมิ T (°F)	ความเข้มข้น LiBr (x%)	เอนทาลปี h (Btu/lb _m)	อัตราการไหล $\dot{m}$ (gpm)	เอนโทรปี s(Btu/lb _m -R)
a	15.913	102.1	1	106	1.25	0.2006
b	90.678	194	1	118	1.25	0.2006
c	90.678	194	0	58	1.25	0.1086
d	15.913	86	0.39	58	1.25	0.1136

ตารางผนวกที่ 3 สมดุลพลังงานของระบบการทำความเย็นแบบดูดซึม

อุปกรณ์	ปริมาณความร้อนเข้าสู่ระบบ (Btu/hr)	ปริมาณความร้อนที่ออกจากระบบ (Btu/hr)
Q_{gen}	14,391	
Q_{cond}		12,601
Q_{evap}	12,000	
Q_{abs}		13,790
ผลรวม	26,391	26,391

ตารางผนวกที่ 4 สมดุลพลังงานของปั๊มความร้อน

อุปกรณ์	ปริมาณความร้อนเข้าสู่ระบบ (Btu/hr)	ปริมาณความร้อนที่ออกจากระบบ (Btu/hr)
$Q_{\text{hot coil}}$		33,409
$Q_{\text{cold coil}}$	26,391	
Q_{comp}	7,018	
ผลรวม	33,409	33,409

ตารางผนวกที่ 5 สมดุลพลังงานของวัฏจักรร่วม

อุปกรณ์	ปริมาณความร้อนด้าน อุณหภูมิต่ำ (Btu/hr)	ปริมาณความร้อน ด้านอุณหภูมิสูง (Btu/hr)
Q_{gen}	14,391	
$Q_{\text{hot coil}}$		33,409
$Q_{\text{hot-water}}$	19,018	
ผลรวม	33,409	33,409
Q_{cond}		12,601
Q_{abs}		13,790
$Q_{\text{cold coil}}$	26,391	
ผลรวม	26,391	26,391

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นายสุพจน์ สุดกรยูทธิ์
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 16 สิงหาคม 2523
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	ผู้จัดการ โครงการ
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	หจก.จีทีที เอ็นจิเนียริง