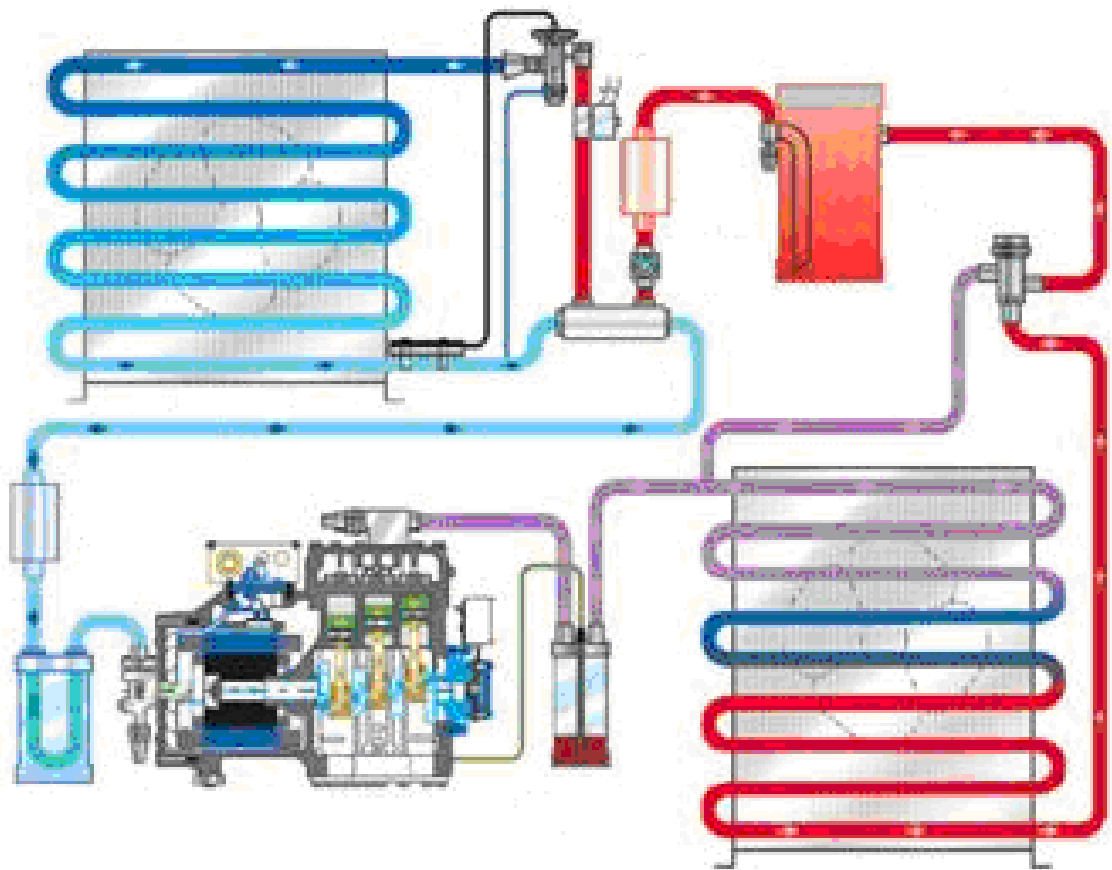


การทำความเย็น

Refrigeration



ผศ. น.อ. ดร.ตระการ ก้าวกสิกรรม

คำนำ

จุดมุ่งหมายในการเรียบเรียงหนังสือ การทำความเย็น เล่มนี้ เพื่อใช้เป็นเอกสารประกอบการเรียนการสอนแก่นิสิต นักศึกษา ในสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ในวิชาการทำความเย็น รวมทั้งเพื่อใช้เป็นคู่มือสำหรับวิศวกรที่ทำงานในระบบการทำความเย็น

สำหรับเนื้อหาแบ่งออกเป็น 6 บท เริ่มจากให้รู้จักกระบวนการพื้นฐานในการทำความเย็น สารทำความเย็น พื้นฐานการออกแบบสมรรถนะระบบการทำความเย็นแบบอัดไอ ระบบการทำความเย็นแบบอัดไอที่พัฒนา อุปกรณ์ในระบบการทำความเย็นแบบอัดไอ และสุดท้ายรู้วิธีการหาภาระการทำความเย็น

ผู้เรียบเรียงหวังว่า เนื้อหาในหนังสือเล่มนี้จะเป็นประโยชน์แก่นิสิต นักศึกษา วิศวกร และผู้สนใจ ในการนำไปใช้ประโยชน์ ท้ายนี้ใคร่ขอขอบคุณท่านเจ้าของเอกสารต่างๆ ที่ผู้เรียบเรียงนำมาใช้ประกอบการเรียบเรียงไว้ ณ โอกาสนี้

ตระการ ก้าวกสิกรรม

พฤษภาคม 2555

สารบัญ

	หน้า
คำนำ	ก
สารบัญ	ข
สารบัญตาราง	จ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 พื้นฐานการทำความเย็น	1
1.1 จุดประสงค์ของการทำความเย็น	1
1.2 ระบบทำความเย็นแบบต่างๆ	1
1.3 วัฏจักรการทำความเย็นแบบอัดไอพื้นฐาน	6
1.4 วัฏจักรการทำความเย็นแบบอัดไอในการทำงานจริง	28
แบบฝึกหัดบทที่ 1	31
บทที่ 2 สารทำความเย็น	33
2.1 วิวัฒนาการของสารทำความเย็น	33
2.2 ผลกระทบของสารทำความเย็นตระกูล CFC ต่อสภาพแวดล้อม	35
2.3 ลักษณะกระบวนการทำลายโอโซน	36
2.4 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในการเลือกใช้สารทำความเย็น	37
2.5 ชนิดของสารทำความเย็น	40
2.6 การจำแนกสารทำความเย็นตามระดับความปลอดภัย	42
2.7 การใช้สัญลักษณ์เรียกชื่อสารทำความเย็น	43
2.8 คุณสมบัติของสารทำความเย็นที่พึงประสงค์	45
2.9 การประยุกต์ใช้งานสารทำความเย็นกับระบบการทำความเย็น	46
2.10 หน้าที่ คุณสมบัติ และชนิดของน้ำมันหล่อลื่น	46
2.11 การเลือกน้ำมันหล่อลื่นให้เข้ากับสารทำความเย็น	50
2.12 ปัญหาความชื้นในน้ำมันชนิด POE	50
2.13 ลักษณะการไหลเวียนกลับของน้ำมันและการถ่ายน้ำมันซ้ำในการรีโทรฟิต	51
2.14 การรีโทรฟิต	52
แบบฝึกหัดบทที่ 2	54

	หน้า
บทที่ 3 พื้นฐานการออกแบบสมรรถนะของระบบการทำความเย็นแบบอัดไอ	55
3.1 ผลกระทบต่อสมรรถนะการทำความเย็น	55
3.2 ผลของอุณหภูมิสารทำความเย็นที่เครื่องระเหยที่ลดลง	56
3.3 ผลของอุณหภูมิสารทำความเย็นที่เครื่องควบแน่นที่สูงขึ้น	60
3.4 ผลของอุณหภูมิสารทำความเย็นก่อนเข้าอุปกรณ์ลดความดันที่ลดลง	64
3.5 ผลของอุณหภูมิสารทำความเย็นก่อนเข้าเครื่องอัดที่สูงขึ้น	69
3.6 ผลของอุณหภูมิสารทำความเย็นก่อนเข้าอุปกรณ์ลดความดันที่ลดลง และผลของอุณหภูมิสารทำความเย็นก่อนเข้าเครื่องอัดที่สูงขึ้นด้วย การใช้การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสารทำความเย็นใน กระบวนการทั้งสอง	75
3.7 ผลของการสูญเสียความดันสารทำความเย็นขณะไหลผ่านอุปกรณ์ต่างๆ	79
3.8 ผลของการสูญเสียประสิทธิภาพเชิงกลในอุปกรณ์ต่างๆ	81
3.9 สรุป	82
แบบฝึกหัดบทที่ 3	83
บทที่ 4 ระบบการทำความเย็นแบบอัดไอที่พัฒนา	84
4.1 ระบบทำความเย็นแบบมีถังแฟลช	84
4.2 ระบบทำความเย็นแบบหลายขั้นตอน	85
4.3 ระบบทำความเย็นแบบเครื่องระเหยหลายเครื่อง	94
4.4 ระบบทำความเย็นแบบหลั่น	101
แบบฝึกหัดบทที่ 4	104
บทที่ 5 อุปกรณ์ในระบบการทำความเย็นแบบอัดไอ	106
5.1 เครื่องอัด	106
5.2 เครื่องควบแน่น	121
5.3 อุปกรณ์ลดความดัน	132
5.4 เครื่องระเหย	139
5.5 อุปกรณ์ส่วนควบ	150
5.6 สรุป	154
แบบฝึกหัดบทที่ 5	156

	หน้า
บทที่ 6 ภาระการทำความเย็น	158
6.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับภาระการทำความเย็น	158
6.2 โครงสร้างของห้องเย็นและห้องแช่แข็ง	159
6.3 การคำนวณภาระการทำความเย็น	162
แบบฝึกหัดบทที่ 6	181
บรรณานุกรม	182
ภาคผนวก	
ผนวก ก ตาราง สมบัติของสารทำความเย็นชนิด R-134a ณ สภาวะอิ่มตัว	184
ผนวก ข ตาราง สมบัติของสารทำความเย็นชนิด R-134a ณ สภาวะไอร้อนยิ่งยวด	188
ผนวก ค แผนภูมิความดัน-เอนทัลปีของสารทำความเย็นชนิด R-134a	205

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขั้นตอนการทำงาน อุณหภูมิ ความดัน สถานะของสาร และอุปกรณ์การทำงาน	11
ตารางที่ 1.2 ค่าอัตราส่วนความร้อนจำเพาะของก๊าซ (c_p / c_v); k ของสารทำความเย็นบางชนิดที่อุณหภูมิ 30°C	20
ตารางที่ 1.3 ตารางแปลงหน่วย	21
ตารางที่ 2.1 รายชื่อสารทำความเย็นที่มีการพัฒนาขึ้นตั้งแต่เริ่มต้นจนถึง ปี ค.ศ.1926	34
ตารางที่ 2.2 แสดงระยะเวลาที่สารทำความเย็นสามารถคงสภาพในชั้นบรรยากาศ รวมทั้ง ค่า ODP และค่า GWP ของสารทำความเย็นบางชนิด	38
ตารางที่ 2.3 ระยะเวลาการควบคุมการใช้สารทำความเย็นตระกูล CFC และ HCFC ในประเทศที่พัฒนาแล้ว	39
ตารางที่ 2.4 แนวทางการเลือกใช้สารทำความเย็นทดแทนสารทำความเย็นตระกูล CFC	39
ตารางที่ 2.5 การจำแนกสารทำความเย็นตามการจัดระดับความปลอดภัย ของสารทำความเย็นบางชนิด	43
ตารางที่ 2.6 ชนิดของสารทำความเย็นและการประยุกต์ใช้งาน	47
ตารางที่ 2.7 ชนิดของน้ำมันหล่อลื่นเครื่องอัดที่เข้ากันได้กับสารทำความเย็น ในตระกูลต่างๆ	50
ตารางที่ 3.1 การเปรียบเทียบผลกระทบในแง่มุมต่างๆ ของวัฏจักร $AB'C'D'$ และ วัฏจักร ABCD	57
ตารางที่ 3.2 การเปรียบเทียบผลกระทบในแง่มุมต่างๆ ของวัฏจักร ABCDE และ วัฏจักร $A'B'CD'E'$	62
ตารางที่ 3.3 การเปรียบเทียบผลกระทบในแง่มุมต่างๆ ของวัฏจักร ABCDE และ วัฏจักร $A'B'CDE$	65
ตารางที่ 3.4 การเปรียบเทียบผลกระทบในแง่มุมต่างๆ ของวัฏจักร ABCDE และ วัฏจักร $ABC'D'E$	71
ตารางที่ 3.5 การเปรียบเทียบผลกระทบในแง่มุมต่างๆ ของวัฏจักร $ABC'D'E$ กรณีออกแบบให้ปลายทางเครื่องระเหยตั้งแต่เส้นท่อทางดูด อยู่นอกพื้นที่ทำความเย็นร้อยละ 100 กับกรณีร้อยละ 50	73

ตารางที่ 3.6	การเปรียบเทียบผลกระทบในแง่มุมต่างๆ ของวัฏจักร ABCDE และวัฏจักร A'B'C'D'E	78
ตารางที่ 3.7	ผลกระทบของการสูญเสียความดันในส่วนต่างๆ ของระบบ (สารทำความเย็น R-134a ที่มีความดันออกจากเครื่องควบแน่นเท่ากับ 1016.4 kPa (อุณหภูมิ 40°C) และมีความดันเฉลี่ยของเครื่องระเหยเท่ากับ 132.99 kPa (อุณหภูมิ -20°C))	81
ตารางที่ 5.1	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุปกรณ์การทำงาน ขั้นตอนการทำงาน อุณหภูมิ ความดัน และสถานะของสารทำความเย็น	107
ตารางที่ 5.2	ค่าตัวประกอบการถ่ายเทความร้อนใช้กับเครื่องอัดแบบเปิด	127
ตารางที่ 5.3	ค่าตัวประกอบการถ่ายเทความร้อนใช้กับเครื่องอัดแบบปิด	128
ตารางที่ 5.4	ค่า TD ในการออกแบบเครื่องระเหย	146
ตารางที่ 5.5	ตัวอย่างรายการเครื่องระเหยแบบแพนคอยล์ยูนิตของบริษัทผู้ผลิตแห่งหนึ่ง	149
ตารางที่ 6.1	การนำความร้อนของวัสดุที่ใช้กับผนังห้องเย็นและค่าการพาความร้อนของอากาศ	161
ตารางที่ 6.2	ค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น สำหรับผนังด้านที่สัมผัสแดด	163
ตารางที่ 6.3	ตัวประกอบเอนทัลปีที่เปลี่ยนแปลงของอากาศภายนอกที่เข้ามาจากการเปิดประตูของห้องเย็น (อุณหภูมิสูงกว่า 0°C), kJ/l	166
ตารางที่ 6.4	ตัวประกอบเอนทัลปีที่เปลี่ยนแปลงของอากาศภายนอกที่เข้ามาจากการเปิดประตูของห้องแช่แข็ง (อุณหภูมิต่ำกว่า 0°C), kJ/l	167
ตารางที่ 6.5	ค่าปริมาณอากาศ (ลิตร/วินาที) ที่เข้ามาจากการเปิดประตูแปรตามขนาดห้อง	168
ตารางที่ 6.6	สมบัติของผลิตภัณฑ์สดจำพวกผัก	171
ตารางที่ 6.7	สมบัติของผลิตภัณฑ์สดจำพวกผลไม้	172
ตารางที่ 6.8	สมบัติของผลิตภัณฑ์สดจำพวกเนื้อสัตว์	173
ตารางที่ 6.9	สมบัติของผลิตภัณฑ์อาหารแปรรูปและอาหารสด	174
ตารางที่ 6.10	อัตราการคายน้ำของผักและผลไม้	176
ตารางที่ 6.11	ค่าความร้อนเทียบเท่าของภาระการทำความเย็นจากคน	177

สารบัญรูป

	หน้า	
รูปที่ 1.1	ลักษณะน้ำแข็งแห้งที่ทำจากคาร์บอนไดออกไซด์	3
รูปที่ 1.2	เครื่องทำน้ำเย็นโดยใช้ไอน้ำพ่น	4
รูปที่ 1.3	ลักษณะการทำความเย็นระบบดูดซึม	5
รูปที่ 1.4	ลักษณะอุปกรณ์ของระบบการทำความเย็นที่ใช้ระบบอัดไอ	6
รูปที่ 1.5	แผนภาพอุปกรณ์การทำความเย็นพื้นฐานของระบบเครื่องทำความเย็นแบบอัด	10
รูปที่ 1.6	แผนภาพความดัน-เอนทัลปีของระบบเครื่องทำความเย็นแบบอัด	10
รูปที่ 1.7	แผนภูมิความดัน-เอนทัลปี แสดงเส้นคงที่ของสมบัติต่างๆ ของสาร	17
รูปที่ 1.8	แผนภูมิความดัน-เอนทัลปี แสดงเส้นแบ่งพื้นที่สถานะ	18
รูปที่ 1.9	แผนภูมิความดัน-เอนทัลปี ของระบบการทำความเย็นแบบอัด	20
รูปที่ 1.10	แผนภูมิความดัน-เอนทัลปี ของสารทำความเย็นชนิด R-134a	21
รูปที่ 1.11	แผนภาพ P - h ของตัวอย่าง 1.1	26
รูปที่ 1.12	แผนภาพ P - h ของวัฏจักรในทางปฏิบัติในการทำงานจริง	29
รูปที่ 3.1	วัฏจักรการทำความเย็นเชิงอุดมคติ	55
รูปที่ 3.2	การเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิสารทำความเย็นที่เครื่องระเหยที่ลดลง สำหรับสารทำความเย็น R-134a	56
รูปที่ 3.3	การเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิสารทำความเย็นที่เครื่องควบแน่นที่สูงขึ้น	61
รูปที่ 3.4	การเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิสารทำความเย็น ก่อนเข้าอุปกรณ์ลดความดันที่ลดลง	64
รูปที่ 3.5	แผนภาพแสดงการลดอุณหภูมิสารทำความเย็นเหลวในเส้นท่อ	67
รูปที่ 3.6	แผนภาพแสดงการเชื่อมต่อท่อระหว่างเครื่องควบแน่นกับ เครื่องลดอุณหภูมิสารทำความเย็นเหลวแบบอนุกรม	68
รูปที่ 3.7	แผนภาพแสดงการเชื่อมต่อท่อระหว่างเครื่องควบแน่นกับ เครื่องลดอุณหภูมิสารทำความเย็นเหลวแบบขนาน	68
รูปที่ 3.8	รูปแสดงผลของอุณหภูมิสารทำความเย็นก่อนเข้าเครื่องอัดที่สูงขึ้น	70
รูปที่ 3.9	การเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิสารทำความเย็นก่อนเข้าเครื่องอัดที่สูงขึ้น	70
รูปที่ 3.10	วัฏจักรการทำความเย็นที่แสดงเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน สารทำความเย็นเหลว	77

รูปที่ 3.11	การเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิสารทำความเย็น เมื่อติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนกับเส้นทางดูด	77
รูปที่ 3.12	แผนภาพความดัน-เอนทัลปีของวัฏจักรการทำความเย็น ที่แสดงผลของการสูญเสียความดัน	80
รูปที่ 4.1	ลักษณะทางกายภาพในการใช้ถังแฟลชกับระบบทำความเย็น	85
รูปที่ 4.2	แผนภูมิความดัน-เอนทัลปี ในการใช้ถังแฟลชกับระบบทำความเย็น	85
รูปที่ 4.3	แผนภูมิความดัน-ปริมาตรจำเพาะ และแผนภูมิความดัน-เอนทัลปี ที่ใช้เครื่องอัดแบบมีกระบวนการอัด 2 ชั้น	86
รูปที่ 4.4	ลักษณะการหล่อเย็นระหว่างกลางด้วยการใช้สารทำความเย็นเหลวในถังแฟลช	87
รูปที่ 4.5	ลักษณะการหล่อเย็นระหว่างกลางด้วยการใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน จากภายนอก	88
รูปที่ 4.6	ระบบการทำความเย็นแบบอัดสองชั้นที่มีการกำจัดก๊าซแฟลช ด้วยการใช้สารทำความเย็นเหลวในถังแฟลชและการหล่อเย็นระหว่างกลาง	90
รูปที่ 4.7	แผนภูมิ P - h ของระบบการทำความเย็นแบบอัดสองชั้น ที่มีการกำจัดก๊าซแฟลชด้วยการใช้สารทำความเย็นเหลวในถังแฟลช และการหล่อเย็นระหว่างกลาง	90
รูปที่ 4.8	ระบบการทำความเย็นที่มีเครื่องทำความเย็นยิงสารทำความเย็นเหลว	91
รูปที่ 4.9	ลักษณะระบบการทำความเย็นแบบอัดสองชั้น ที่มีถังแฟลชใช้กำจัดก๊าซแฟลชเท่านั้น	92
รูปที่ 4.10	แผนภูมิ P - h ของระบบการทำความเย็นแบบอัดสองชั้น ที่มีถังแฟลชใช้กำจัดก๊าซแฟลชเท่านั้น	92
รูปที่ 4.11	ลักษณะระบบการทำความเย็นแบบอัดสองชั้น ที่มีถังแฟลชใช้ในการหล่อเย็นระหว่างกลางเท่านั้น	93
รูปที่ 4.12	แผนภูมิ P - h ของระบบการทำความเย็นแบบอัดสองชั้น ที่มีถังแฟลชใช้ในการหล่อเย็นระหว่างกลางเท่านั้น	93
รูปที่ 4.13	ลักษณะระบบการทำความเย็นแบบเครื่องระเหยสองเครื่อง ที่มีอุณหภูมิของเครื่องระเหยเท่ากัน	94
รูปที่ 4.14	แผนภูมิ P - h ของระบบการทำความเย็นแบบเครื่องระเหยสองเครื่อง ที่มีอุณหภูมิของเครื่องระเหยเท่ากัน	95

รูปที่ 4.15	ลักษณะระบบการทำความเย็นแบบเครื่องระเหยสองเครื่องที่มีอุณหภูมิของเครื่องระเหยไม่เท่ากัน	96
รูปที่ 4.16	แผนภูมิ P – h ของระบบการทำความเย็นแบบเครื่องระเหยสองเครื่องที่มีอุณหภูมิของเครื่องระเหยไม่เท่ากัน	96
รูปที่ 4.17	ลักษณะระบบการทำความเย็นแบบเครื่องระเหยสองเครื่องที่มีวาล์วขยายตัวของเครื่องระเหยแยกจากกัน	97
รูปที่ 4.18	แผนภูมิ P – h ของระบบการทำความเย็นแบบเครื่องระเหยสองเครื่องที่มีวาล์วขยายตัวของเครื่องระเหยแยกจากกัน	98
รูปที่ 4.19	ลักษณะระบบการทำความเย็นแบบเครื่องระเหยสองเครื่องที่มีเครื่องอัดของเครื่องระเหยแยกจากกันและมีถังแฟลชสำหรับการกำจัดก๊าซแฟลชและการหล่อเย็นระหว่างกลาง	99
รูปที่ 4.20	แผนภูมิ P – h ของระบบการทำความเย็นแบบเครื่องระเหยสองเครื่องที่มีเครื่องอัดของเครื่องระเหยแยกจากกันและมีถังแฟลชสำหรับการกำจัดก๊าซแฟลชและการหล่อเย็นระหว่างกลาง	99
รูปที่ 4.21	ลักษณะระบบการทำความเย็นแบบเครื่องระเหยสองเครื่องที่มีเครื่องอัดและวาล์วขยายตัวของเครื่องระเหยแยกจากกัน	100
รูปที่ 4.22	แผนภูมิ P – h ของระบบการทำความเย็นแบบเครื่องระเหยสองเครื่องที่มีเครื่องอัดและวาล์วขยายตัวของเครื่องระเหยแยกจากกัน	101
รูปที่ 4.23	ลักษณะระบบการทำความเย็นแบบหลั่นสองขั้นตอน	102
รูปที่ 4.24	แผนภูมิ P – h ของระบบการทำความเย็นแบบหลั่นสองขั้นตอน	102
รูปที่ 5.1	ลักษณะของอุปกรณ์ที่สำคัญในระบบการทำความเย็นแบบอัด	106
รูปที่ 5.2	เครื่องอัดแบบเปิดซึ่งติดตั้งอยู่บนถังพักสารทำความเย็นและแยกน้ำมันหล่อลื่น	108
รูปที่ 5.3	เครื่องอัดแบบเทอร์เมติกแสดงชิ้นส่วนภายใน	108
รูปที่ 5.4	เครื่องอัดแบบกึ่งปิดสนิท (แบบลูกสูบ)	109
รูปที่ 5.5	แสดงการทำงานและหลักการเบื้องต้นของเครื่องอัดแบบลูกสูบ	109
รูปที่ 5.6	เครื่องอัดแบบโรตารีชนิดทรงกระบอกหมุน	110
รูปที่ 5.7	เครื่องอัดแบบโรตารีชนิดใบพัดหมุนแสดงลักษณะการทำงาน	111
รูปที่ 5.8	เครื่องอัดแบบโรตารีชนิดใบพัดหมุนแสดงส่วนประกอบภายในของเครื่องแบบปิดสนิท	112

รูปที่ 5.9	หลักการทำงานของเครื่องอัดแบบสกรู	113
รูปที่ 5.10	หลักการทำงานของเครื่องอัดแบบสโครล์	113
รูปที่ 5.11	แนวทางการเลือกใช้งานเครื่องอัดขนาดเล็ก (ต่ำกว่า 5 kW ลงมา)	114
รูปที่ 5.12	อินดิเคเตอร์ไดอะแกรมของวัฏจักรการอัดทางอุดมคติ	120
รูปที่ 5.13	อินดิเคเตอร์ไดอะแกรมของวัฏจักรการอัดทางปฏิบัติ	121
รูปที่ 5.14	กระบวนการควบแน่น	122
รูปที่ 5.15	เส้นกราฟการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสำหรับสารทำความเย็น	122
รูปที่ 5.15	เส้นกราฟการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสำหรับสารทำความเย็น	122
รูปที่ 5.17	กราฟความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของสารทำความเย็นและสารหล่อเย็น	123
รูปที่ 5.18	เครื่องควบแน่นชนิดระบายความร้อนด้วยอากาศ	123
รูปที่ 5.19	เครื่องควบแน่นชนิดระบายความร้อนด้วยน้ำ	124
รูปที่ 5.20	เครื่องควบแน่นชนิดระบายความร้อนด้วยการระเหยของน้ำ	125
รูปที่ 5.21	เครื่องควบแน่นชนิดระบายความร้อนด้วยการระเหยของน้ำ 3 รูปแบบ	126
รูปที่ 5.22	เส้นกราฟของอุณหภูมิสารหล่อเย็นในเครื่องควบแน่น	129
รูปที่ 5.23	รูปแบบท่อแคพิลลารีที่ใช้ในระบบการทำความเย็น	133
รูปที่ 5.24	รูปหน้าตัดของวาล์วขยายตัวอัตโนมัติ	134
รูปที่ 5.25	รูปหน้าตัดของวาล์วขยายตัวอัตโนมัติแสดงสมดุลแรง	135
รูปที่ 5.26	วาล์วขยายตัวเทอร์โมสแตติกแสดงการติดตั้งในระบบการทำความเย็น	136
รูปที่ 5.27	วาล์วขยายตัวเทอร์โมสแตติก	136
รูปที่ 5.28	การควบคุมสารทำความเย็นด้วยวาล์วลอยด้านความดันต่ำ	137
รูปที่ 5.29	รูปหน้าตัดแสดงส่วนประกอบวาล์วลอยด้านความดันต่ำ	138
รูปที่ 5.30	รูปหน้าตัดแสดงส่วนประกอบวาล์วลอยด้านความดันสูง	138
รูปที่ 5.31	กลไกในระบบวาล์วลอยด้านความดันสูง	139
รูปที่ 5.32	กระบวนการระเหย	139
รูปที่ 5.33	การกลายเป็นไอในเครื่องระเหยแบบแห้ง	140
รูปที่ 5.34	รูปลักษณะภายนอกและการเรียงตัวของขดท่อของเครื่องระเหยแบบแห้ง	140
รูปที่ 5.35	เครื่องระเหยแบบแห้งที่ใช้น้ำเป็นสารตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน	141
รูปที่ 5.36	เครื่องระเหยแบบท่วมที่ใช้อากาศเป็นสารตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน	142
รูปที่ 5.37	เครื่องระเหยแบบท่วมที่ใช้น้ำเป็นสารตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน	142
รูปที่ 5.38	เครื่องระเหยแบบป้อนสารทำความเย็นเหลวเกินพิกัด	143

รูปที่ 5.39	การแปรเปลี่ยนขีดความสามารถของเครื่องระเหยตามค่า TD	145
รูปที่ 5.40	เส้นกราฟของอุณหภูมิที่ลดลงของอากาศในเครื่องระเหย	145
รูปที่ 5.41	ชดท้อ B และ C มีพื้นที่เป็นสองเท่าของชดท้อ A	147
รูปที่ 5.42	รูปแบบเครื่องระเหยการพาแบบบังคับโดยทั่วไป	148
รูปที่ 5.43	ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องระเหยชนิดการพาแบบบังคับ กรณีติดตั้งกับฝ้าเพดาน	148
รูปที่ 6.1	ลักษณะโครงสร้างโดยทั่วไปของห้องเย็นและห้องแช่แข็ง	160

บทที่ 1

พื้นฐานการทำความเย็น

1.1 จุดประสงค์ของการทำความเย็น

ในปัจจุบันมนุษย์ใช้ประโยชน์จากการทำความเย็นในการดำรงชีวิตมากขึ้น ทั้งในการเก็บรักษาและถนอมอาหาร ทำความเย็นในการปรับอากาศ และรักษาอุณหภูมิและความชื้นทางอุตสาหกรรม ทั้งนี้การทำความเย็นมีจุดประสงค์เพื่อทำให้อุณหภูมิในบริเวณที่ต้องการทำความเย็นมีอุณหภูมิลดลงให้ได้ตามที่ต้องการ ด้วยการถ่ายเทความร้อนออกจากบริเวณที่ต้องการทำความเย็นให้กับบรรยากาศโดยรอบที่มีอุณหภูมิสูงกว่า เช่น นำความร้อนออกจากตู้เย็นที่มีอุณหภูมิเฉลี่ยในช่องแช่แข็งประมาณ -10°C ไปถ่ายเทให้กับบรรยากาศโดยรอบที่มีอุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ 35°C เป็นต้น การทำความเย็นจึงมีลักษณะการทำงานที่ผิดกฎของธรรมชาติการถ่ายเทความร้อนที่ว่า “ความร้อนจะถ่ายเทจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าเสมอ” ดังนั้นหลักการทำความเย็นจึงต้องอาศัยปรากฏการณ์ที่ย้อนกระบวนการทางความร้อน เพื่อให้สามารถถ่ายเทความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำไปสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิสูงกว่าได้ การทำงานในลักษณะนี้คล้ายคลึงกับการใช้ฟองน้ำมาซับน้ำจากกันแล้วนำมาบีบทิ้งนอกถัง นั่นคือต้องอาศัยตัวกลางมาดูดซับความร้อนในตู้เย็นเพื่อลดอุณหภูมิในตู้เย็น (เช่นเดียวกับการใช้ฟองน้ำมาซับน้ำ) จากนั้นนำมาบีบความร้อนทิ้งนอกตู้เย็น (ทำนองเดียวกับการบีบฟองน้ำเพื่อรีดน้ำออก) ตัวกลางดังกล่าวในระบบการทำความเย็นเรียกว่าสารทำความเย็น (Refrigerant) ทั้งนี้การจะทำให้สารทำความเย็นทำหน้าที่ดังกล่าวได้ต้องอาศัยพลังงานมาช่วยในการขับเคลื่อนระบบ (เช่นเดียวกับการใช้พลังงานในการเคลื่อนย้ายฟองน้ำ) ซึ่งสามารถกระทำได้หลายรูปแบบ จึงเป็นที่มาของการออกแบบระบบทำความเย็นในลักษณะต่างๆ

1.2 ระบบทำความเย็นแบบต่างๆ

ในการออกแบบระบบทำความเย็นยุคแรกๆ มนุษย์ใช้รูปแบบการทำความเย็นโดยใช้น้ำแข็ง ในลักษณะทำเป็นตู้บุนวนกันความร้อน มีถาดหรือช่องใส่น้ำแข็งอยู่ด้านบน ถาดนี้จะเจาะรูให้น้ำไหลลงสู่ถังรองน้ำทิ้งใต้ตู้ และมีชั้นสำหรับใส่อาหารอยู่ใต้ถาดน้ำแข็งเป็นชั้นๆ ลักษณะคล้ายคลึงกับชั้นวางของของตู้เย็นในปัจจุบัน หลังจากนั้นได้มีการคิดค้นและพัฒนาระบบทำความเย็นแบบต่างๆ ในอีกหลายลักษณะ ได้แก่ การทำความเย็นโดยใช้การระเหยของน้ำ (Water evaporative refrigeration) การทำความเย็นโดยใช้ของแข็งเป็นตัวดูดซับ (Solid absorbent refrigeration) การทำความเย็นโดยใช้น้ำแข็งแห้ง (Dry ice refrigeration) การทำความเย็นโดยปล่อยสารทำความเย็นให้ระเหยตัว (Expendable refrigerant cooling system) การทำความเย็นโดยใช้ความร้อนไฟฟ้า (Thermoelectric refrigeration) การทำ

ความเย็นโดยใช้ไอน้ำพ่น (Steam jet refrigeration) การทำความเย็นโดยใช้ระบบดูดซึม (Absorption system refrigeration) และการทำความเย็นโดยใช้ระบบอัดไอ (Vapour compression refrigeration) ในที่นี้จะไม่กล่าวรายละเอียดของแต่ละลักษณะ ยกเว้นการทำความเย็นโดยใช้ระบบอัดไอซึ่งเป็นระบบที่ใช้งานกันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน

1.2.1 การทำความเย็นโดยใช้การระเหยของน้ำ

การทำความเย็นลักษณะนี้อาศัยหลักการที่ว่า เมื่อของเหลวระเหยเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอจะดูดซับความร้อนแฝงจากสิ่งแวดล้อมโดยรอบ เพื่อใช้ในการเปลี่ยนสถานะ ดังนั้นถ้านำน้ำมาบรรจุในภาชนะที่มีผิวพรุน เช่น ตุ่มดิน น้ำในตุ่มจะซึมผ่านผิวออกมาได้และเมื่อระเหยไปจะทำให้ที่ที่อยู่ในตุ่มเย็นลง หลักการนี้ถูกนำมาใช้ในการทำความเย็นน้ำหล่อเย็นในหอระบายความร้อน

1.2.2 การทำความเย็นโดยใช้ของแข็งเป็นตัวดูดซับ

การทำความเย็นลักษณะนี้คิดค้นขึ้นมาโดยฟาราเดย์ ในปี พ.ศ.2367 ด้วยการใช้ซิลเวอร์คลอไรด์ซึ่งเป็นของแข็งที่มีสมบัติในการดูดซับแอมโมเนียได้ดีมาผสมรวมกันเป็นสารผสมซิลเวอร์คลอไรด์-แอมโมเนีย จากนั้นนำมาให้ความร้อน ทำให้แอมโมเนียระเหยกลายเป็นไอและแยกตัวออกจากซิลเวอร์คลอไรด์ และหากต่อท่อและนำท่อไอแอมโมเนียนี้ไปผ่านในน้ำเย็นจะทำให้แอมโมเนียกลั่นตัวเป็นแอมโมเนียเหลว หลังจากนั้นถ้านำแอมโมเนียเหลวนี้ส่งผ่านไปตามท่อสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิที่สูงกว่าที่ต้องการลดอุณหภูมิ จะทำให้แอมโมเนียระเหยและดูดซับความร้อนโดยรอบ ช่วงนี้ถือเป็นช่วงการทำความเย็น ส่วนสารซิลเวอร์คลอไรด์ที่เหลืออยู่ถ้านำความร้อนออกจะทำให้ซิลเวอร์คลอไรด์เย็นตัวลงและมีสมบัติในการดูดซับแอมโมเนียได้อีกครั้ง หลักการนี้มีการนำมาพัฒนาเป็นระบบทำความเย็นแบบดูดซึม ซึ่งกล่าวถึงในหัวข้อ 1.2.7

1.2.3 การทำความเย็นโดยใช้น้ำแข็งแห้ง

การทำความเย็นลักษณะนี้ใช้น้ำแข็งแห้งซึ่งทำจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกอัดด้วยความดันสูงให้อยู่ในสถานะของแข็ง ดังรูปที่ 1.1 น้ำแข็งแห้งนี้จะระเหิดเป็นก๊าซที่ความดันบรรยากาศและอุณหภูมิที่ได้เท่ากับ -78.33°C ดังนั้นเมื่อนำน้ำแข็งแห้งใส่ลงในภาชนะที่ต้องการทำความเย็นจะทำให้ภายในภาชนะนั้นมีอุณหภูมิลดลง

1.2.4 การทำความเย็นโดยปล่อยสารทำความเย็นให้ระเหยตัว

การทำความเย็นลักษณะนี้อาศัยหลักการเช่นเดียวกับการทำความเย็น โดยใช้การระเหยของน้ำ เพียงแต่ใช้สารทำความเย็นอื่นแทนน้ำเท่านั้น โดยทั่วไปใช้ในโตรเจนเหลวเนื่องจากมีจุดเดือดต่ำถึง -195.5°C และไม่เป็นสารอันตรายสามารถปล่อยทิ้งสู่บรรยากาศได้โดยตรง



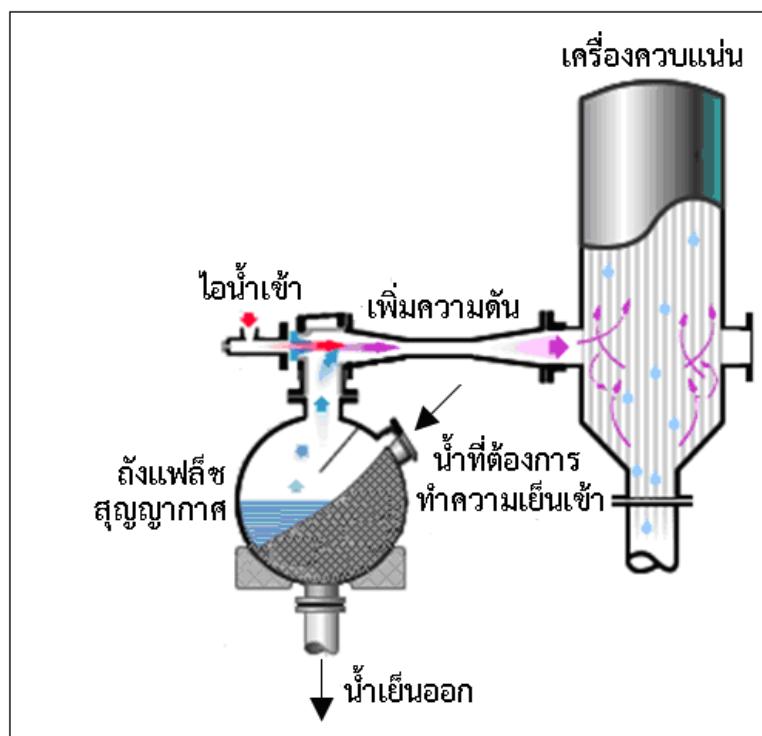
รูปที่ 1.1 ลักษณะน้ำแข็งแห้งที่ทำจากคาร์บอนไดออกไซด์

1.2.5 การทำความเย็นโดยใช้ความร้อนไฟฟ้า

การทำความเย็นลักษณะนี้ใช้หลักการทางฟิสิกส์ซึ่งนักวิทยาศาสตร์ได้ค้นพบเมื่อปี พ.ศ.2377 โดยพบว่าหากนำวัตถุถึงตัวนำสองชนิดที่มีสมบัติการนำความร้อนไม่เท่ากันมาตรงปลายด้านหนึ่งติดกันแล้วต่อวงจรไฟฟ้ากระแสตรงเข้ากับปลายด้านที่เหลือ เนื่องจากวัตถุถึงตัวนำทั้งสองมีระดับพลังงานภายในไม่เท่ากัน เมื่อมีไฟฟ้ากระแสตรงไหลผ่านทำให้ปลายด้านที่ตรงติดกันเย็น ขณะที่ปลายที่เหลือที่ต่อกับวงจรไฟฟ้าร้อน ดังนั้นถ้านำปลายด้านเย็นจัดให้อยู่ภายในบริเวณที่ต้องการทำความเย็นที่มีฉนวนกันความร้อนล้อมรอบ และจัดให้ปลายด้านร้อนอยู่ภายนอกห้อง ส่งผลให้ภายในบริเวณที่ต้องการทำความเย็นมีการดูดซับความเย็นและมาคายออกภายนอกห้อง และถ้ามีการเปลี่ยนทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า ด้านที่เป็นด้านเย็นจะกลับเป็นร้อนและด้านที่เป็นด้านร้อนจะกลับเป็นเย็น อย่างไรก็ตาม ผลความเย็นที่ได้รับน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับระบบทำความเย็นแบบอื่น

1.2.6 การทำความเย็นโดยใช้ไอน้ำพ่น

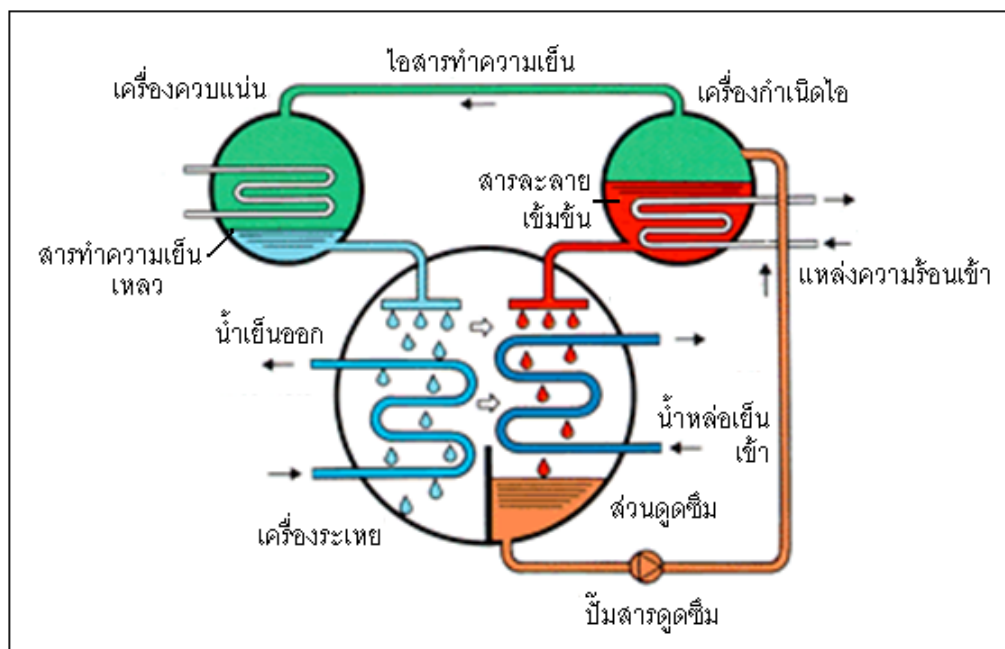
การทำความเย็นลักษณะนี้ใช้ไอน้ำพ่นด้วยความเร็วสูง เป็นตัวกลางในการทำความเย็น ดังรูปที่ 1.2 โดยอาศัยหลักการที่ว่า เมื่อลดความดันที่ผิวหน้าของน้ำที่อยู่ในภาวะปิดมิดชิด น้ำจะระเหยตัวเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอที่อุณหภูมิต่ำได้ อย่างไรก็ตามการใช้น้ำเป็นตัวกลางในการทำความเย็นมีข้อจำกัดเรื่องอุณหภูมิแข็งตัวของน้ำ และเหมาะสมกับโรงงานอุตสาหกรรมที่มีไอน้ำเป็นผลผลิตพลอยได้ที่จะนำมาใช้ในการทำความเย็น



รูปที่ 1.2 เครื่องทำน้ำเย็นโดยใช้ไอ้ น้ำพ่น

1.2.7 การทำความเย็นโดยใช้ระบบดูดซึม

การทำความเย็นลักษณะนี้ใช้หลักการการทำความเย็นเช่นเดียวกับการใช้ของแข็งเป็นตัวดูดซับตามหัวข้อ 1.2.2 แต่ใช้น้ำแทนซิลเวอร์คลอไรด์ กล่าวคือใช้แอมโมเนียเป็นสารทำความเย็นและใช้น้ำเป็นสารดูดซึมแอมโมเนีย เรียกว่าระบบแอมโมเนีย-น้ำ หลักการทำงานเมื่อสารละลายแอมโมเนียเข้มข้นได้รับความร้อนในอุปกรณ์ที่เรียกว่า เครื่องกำเนิดไอ (Generator) ดังแสดงในรูปที่ 1.3 จะทำให้แอมโมเนียระเหยกลายเป็นไอแยกตัวออกมา ก๊าซแอมโมเนียที่ได้จะถูกส่งไปทำให้เย็นตัวลงและควบแน่นเป็นแอมโมเนียเหลวในเครื่องควบแน่น (Condenser) แอมโมเนียเหลวนี้จะถูกส่งไปตามท่อเข้าไปในเครื่องระเหย (Evaporator) เพื่อรับการถ่ายเทความร้อนจากน้ำที่ไหลมาจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งติดตั้ง ณ พื้นที่ที่ต้องการทำความเย็น เมื่อแอมโมเนียเหลวรับการถ่ายเทความร้อนเข้ามาทำให้แอมโมเนียเหลวเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอไหลไปรวมตัวกับน้ำซึ่งเป็นสารที่ดูดซึมแอมโมเนียได้ดี ในส่วนดูดซึม (Absorber) ก่อนถูกส่งไปรับความร้อนในเครื่องกำเนิดไอ เพื่อทำให้ระเหยแยกตัวออกไปอีกครั้ง ดังรูปที่ 1.3 นอกจากการใช้แอมโมเนียเป็นสารทำความเย็นและใช้น้ำเป็นสารดูดซึมแล้ว ยังมีการใช้น้ำเป็นสารทำความเย็นและใช้ลิเทียมโบรไมด์เป็นสารดูดซึม เรียกว่าระบบน้ำ-ลิเทียมโบรไมด์

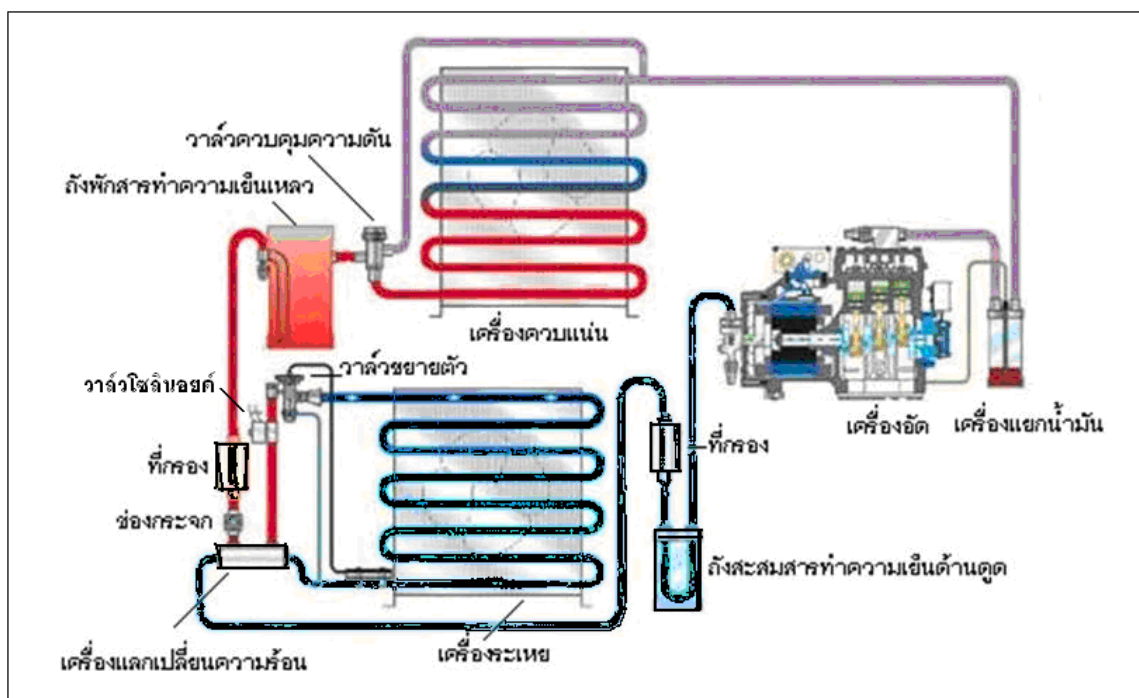


รูปที่ 1.3 ลักษณะการทำความเย็นระบบดูดซึม

(ที่อาจใช้แอมโมเนียเป็นสารทำความเย็นและใช้น้ำเป็นสารดูดซึมแอมโมเนีย หรืออาจใช้น้ำเป็นสารทำความเย็นและใช้ลิเทียมโบรไมด์เป็นสารดูดซึม)

1.2.8 การทำความเย็นโดยใช้ระบบอัดไอ

การทำความเย็นลักษณะนี้อาศัยกระบวนการอัดไอสารทำความเย็น (สารตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน) ที่มีความดันต่ำและอุณหภูมิต่ำให้มีความดันสูงและอุณหภูมิสูงขึ้นด้วยเครื่องอัด (Compressor) ทั้งนี้ต้องทำการอัดให้สารทำความเย็นมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิอากาศโดยรอบเพื่อให้สารทำความเย็นสามารถถ่ายเทความร้อนให้อากาศได้ กระบวนการคายความร้อนจากสารทำความเย็นให้บรรยากาศภายนอกนี้เกิดขึ้นในอุปกรณ์ที่เรียกว่าเครื่องควบแน่น เนื่องจากในขณะที่สารทำความเย็นถ่ายเทความร้อนจะเปลี่ยนแปลงสถานะจากสถานะก๊าซเป็นสถานะของเหลว หลังจากนั้นสารทำความเย็นนี้จะถูกลดความดันให้มีความดันลดต่ำลงด้วยอุปกรณ์ลดความดัน (Pressure reducer) หรือที่มักเรียกว่า วาล์วขยายตัว (Expansion valve) ทั้งนี้ต้องทำให้สารทำความเย็นมีความดันลดลงในระดับที่ทำให้อุณหภูมิของสารทำความเย็นมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิพื้นที่ที่ต้องการทำความเย็น เพื่อให้สารทำความเย็นสามารถรับการถ่ายเทความร้อนจากอากาศหรือวัตถุในบริเวณที่ทำความเย็นได้ กระบวนการดูดซับความร้อนออกจากบริเวณที่ต้องการทำความเย็นสู่สารทำความเย็นเกิดขึ้นในอุปกรณ์ที่เรียกว่าเครื่องระเหย เนื่องจากทำให้สารทำความเย็นเปลี่ยนแปลงสถานะจากสถานะของเหลวเป็นสถานะก๊าซ ก่อนถูกดูดเข้าสู่เครื่องอัดเพื่อเพิ่มความดันต่อไป รูปที่ 1.4 แสดงลักษณะอุปกรณ์ของระบบการทำความเย็นโดยใช้ระบบอัดไอ สำหรับหลักการทำงานและการออกแบบระบบอย่างละเอียดจะได้กล่าวถึงต่อไป



รูปที่ 1.4 ลักษณะอุปกรณ์ของระบบการทำความเย็นโดยใช้ระบบอัดไอ

1.3 วัฏจักรการทำความเย็นแบบอัดไอพื้นฐาน

หลักการทำความเย็นที่กล่าวถึงต่อไป จุดมุ่งหมายหลักเพื่ออธิบายลักษณะการทำความเย็นที่ใช้ระบบอัดไอเป็นหลัก

1.3.1 หลักการเปลี่ยนแปลงสถานะของสาร

หากพิจารณาหลักการทางความร้อนจะพบว่า เมื่อสารได้รับความร้อนจะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น และหากเป็นของแข็ง เมื่อได้รับความร้อนถึงจุดๆ หนึ่งซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ของแข็งกลายเป็นสถานะของเหลวหรือที่เรียกว่า อุณหภูมิ ณ จุดหลอมเหลว อุณหภูมิ ณ จุดนี้จะไม่เพิ่มขึ้นจนกว่าของแข็งจะกลายเป็นของเหลวทั้งหมด จากนั้นอุณหภูมิจึงจะเพิ่มขึ้นใหม่ อย่างไรก็ตามขณะที่สารกำลังเปลี่ยนแปลงสถานะจากของแข็งกลายเป็นของเหลวนั้น สารกลับต้องการพลังงานความร้อนในการเปลี่ยนแปลงสถานะมาก ยกตัวอย่างเช่น หากต้องการทำให้น้ำแข็ง 1 kg ละลายกลายเป็นน้ำหมดต้องใช้ปริมาณความร้อนเท่ากับ 335 kJ (กิโลจูล) ซึ่งเทียบเท่ากับปริมาณความร้อนที่ทำให้ น้ำ 1 kg มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 80°C (ปริมาณความร้อนที่ทำให้ น้ำ 1 kg มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1°C ต้องใช้ปริมาณความร้อนเท่ากับ 4.19 kJ) ในทำนองเดียวกันสารในสถานะของเหลวเมื่อได้รับความร้อนถึงจุดๆ หนึ่ง ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ของเหลวกลายเป็นสถานะไอหรือที่เรียกว่า อุณหภูมิ ณ จุดเดือด อุณหภูมิ ณ จุดนี้จะไม่เพิ่มขึ้นจนกว่าของเหลวจะกลายเป็นไอทั้งหมด จากนั้นอุณหภูมิจึงจะเพิ่มขึ้นใหม่

นอกจากนี้ยังพบความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิจุดหลอมเหลวและจุดเดือดกับความดันด้วยว่า หากสารอยู่ภายใต้ความดันต่ำ เช่นบริเวณเขาสูงซึ่งมีความดันบรรยากาศต่ำกว่าที่ระดับน้ำทะเล

อุณหภูมิจุดหลอมเหลวและจุดเดือดของสารจะลดลง ยกตัวอย่างหากต้มน้ำที่ระดับน้ำทะเล น้ำจะเดือดที่อุณหภูมิประมาณ 100°C แต่หากต้มน้ำบนภูเขา น้ำจะเดือดที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100°C เป็นต้น ในทำนองเดียวกัน หากสารอยู่ภายใต้ความดันสูง เช่นบริเวณอุโมงค์ที่ลึกกว่าที่ระดับน้ำทะเล ทำให้ความดันในบริเวณนั้นสูงกว่าที่ระดับน้ำทะเล อุณหภูมิจุดหลอมเหลวและจุดเดือดของสารจะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้หากต้มน้ำที่บริเวณนี้ น้ำจะเดือดที่อุณหภูมิมากกว่า 100°C แต่จะมากกว่าเท่าไรขึ้นอยู่กับระดับความลึกของอุโมงค์ว่าอยู่ลึกกว่าระดับน้ำทะเลมากน้อยเพียงใด

จากหลักการทางความร้อนดังกล่าว ถ้าสามารถย้อนกระบวนการทางความร้อนด้วยการถ่ายเทความร้อนออกจากสารได้ ย่อมทำให้สารเปลี่ยนสถานะย้อนกลับ กล่าวคือจากสถานะก๊าซกลายเป็นของเหลว และจากสถานะของเหลวกลายเป็นของแข็ง โดยในขณะเปลี่ยนแปลงสถานะอุณหภูมิของสารจะคงที่ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ ด้วย นอกจากนี้จากความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิจุดหลอมเหลวและจุดเดือดกับความดัน ทำให้สามารถเปลี่ยนแปลงสถานะของสารจากสถานะก๊าซกลายเป็นของเหลว หรือจากสถานะของเหลวกลายเป็นของแข็งที่อุณหภูมิต่างๆ ได้ด้วย หากทำการเปลี่ยนแปลงความดัน กล่าวคือที่ความดันสูงอุณหภูมิในการเปลี่ยนแปลงสถานะของสารจะสูงตามไปด้วย และที่ความดันต่ำอุณหภูมิในการเปลี่ยนแปลงสถานะของสารจะต่ำตามไปด้วย

ดังนั้นถ้ามีสารตัวกลางที่สามารถเปลี่ยนแปลงสถานะจากของเหลวไปเป็นสถานะก๊าซได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 0°C หรือต่ำกว่าอุณหภูมิต้องการทำความเย็น และสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะดังกล่าว ณ บริเวณพื้นที่ห้องที่ต้องการทำความเย็น ย่อมทำให้อุณหภูมิต่ำลง จากการที่ความร้อนถูกดูดซับโดยสารขณะที่สารกำลังเปลี่ยนแปลงสถานะจากของเหลวเป็นสถานะก๊าซ และหากนำก๊าซที่ได้นี้ไปอัดเพิ่มความดันและอุณหภูมิให้สูงขึ้น โดยให้มีอุณหภูมิสูงกว่าบรรยากาศ ทำให้สามารถถ่ายเทความร้อนที่ดูดซับไว้ ออกสู่บรรยากาศได้ ด้วยการทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะย้อนกลับจากก๊าซกลับมาเป็นของเหลว ณ บริเวณบรรยากาศปกติ (นอกบริเวณพื้นที่ห้องที่ต้องการทำความเย็น) และหากนำของเหลวที่ได้นี้ไปลดความดันและอุณหภูมิลงสู่สภาวะในตอนเริ่มต้น จะสามารถนำของเหลวนี้กลับมาใช้ใหม่ได้ต่อไป การทำงานก็จะเกิดเป็นวัฏจักร

โดยทั่วไปอุณหภูมิที่ต้องการทำความเย็นจะต่ำในระดับ 5°C ลงมาจนถึงระดับ -20°C หรือหากเป็นการแช่เยือกแข็งอาจถึง -40°C ในขณะที่อุณหภูมิบรรยากาศโดยเฉลี่ยเท่ากับ 35°C ดังนั้นเพื่อให้การถ่ายเทความร้อนในการดูดซับความร้อนออกจากตู้เย็นของสารทำความเย็น และการถ่ายเทความร้อนจากสารทำความเย็นสู่บรรยากาศภายนอกตู้เย็นเป็นไปด้วยดี อุณหภูมิในขณะที่สารทำความเย็นเปลี่ยนแปลงสถานะจากของเหลวเป็นก๊าซในขณะดูดซับความร้อนจึงควรต่ำกว่าอุณหภูมิในตู้เย็นประมาณ $5 - 10^{\circ}\text{C}$ นอกจากนี้อุณหภูมิต้องการทำความเย็นเปลี่ยนแปลงสถานะจากก๊าซเป็นของเหลวในขณะคายความร้อนควรสูงกว่าอุณหภูมิบรรยากาศภายนอกประมาณ $5 - 10^{\circ}\text{C}$ เช่นกัน นั่นคือสารทำความเย็นที่นำมาใช้เป็นสารตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน (ทำนองเดียวกับฟองน้ำที่ใช้ในการดูดซับน้ำ) ต้องมีสมบัติในการเปลี่ยนแปลงสถานะจากของเหลวเป็นก๊าซที่อุณหภูมิต่ำ ความดันต่ำ และมีสมบัติในการเปลี่ยนแปลงสถานะจากก๊าซเป็นของเหลวที่อุณหภูมิสูง ความดันสูง

1.3.2 หลักการพื้นฐานของการทำความเย็นแบบอัด

จากข้อค้นพบเกี่ยวกับสมบัติในการเปลี่ยนแปลงสถานะของสารจึงเป็นที่มาของหลักการพื้นฐานของการทำความเย็นแบบอัด ซึ่งมีลักษณะพื้นฐาน 4 ประการ คือ

- 1) กระบวนการอัดสารทำความเย็น (สารตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน) ในสถานะก๊าซให้มีความดันสูงและอุณหภูมิสูงด้วยเครื่องอัด
- 2) กระบวนการคายความร้อนจากสารทำความเย็นให้บรรยากาศภายนอกในขณะที่สารทำความเย็นเปลี่ยนแปลงสถานะจากสถานะก๊าซเป็นสถานะของเหลว กระบวนการเกิดขึ้นผ่านอุปกรณ์ที่เรียกว่า เครื่องควบแน่น
- 3) กระบวนการลดความดันที่ทำให้สารทำความเย็นมีความดันลดต่ำลงด้วยอุปกรณ์ลดความดัน (Pressure reducer) หรือที่มักเรียกว่า วาล์วขยายตัว หรือวาล์วควบคุมสารทำความเย็น
- 4) กระบวนการดูดซับความร้อนออกจากตู้เย็นหรือบริเวณที่ต้องการทำความเย็นสู่สารทำความเย็น ในขณะที่สารทำความเย็นเปลี่ยนแปลงสถานะจากสถานะของเหลวเป็นสถานะก๊าซ กระบวนการเกิดขึ้นผ่านอุปกรณ์ที่เรียกว่า เครื่องระเหย

นอกจากนี้เพื่อให้มีสารทำความเย็นเพียงพอ ในระบบขนาดใหญ่ที่ต้องใช้สารทำความเย็นจำนวนมากจะออกแบบให้มีถังพักสารทำความเย็นเหลว (Liquid receiver) อยู่ระหว่างเครื่องควบแน่นกับวาล์วขยายตัวเพื่อทำการสะสมสารทำความเย็นเหลวที่กลั่นตัวเก็บไว้เมื่อจำเป็น สำหรับในระบบขนาดเล็ก เช่น ตู้เย็น ไม่จำเป็นต้องมี แต่จะมีกระเปาะสะสมสารทำความเย็นในสถานะก๊าซ (Accumulator) ระหว่างเครื่องระเหยกับเครื่องอัดเพียงอย่างเดียว

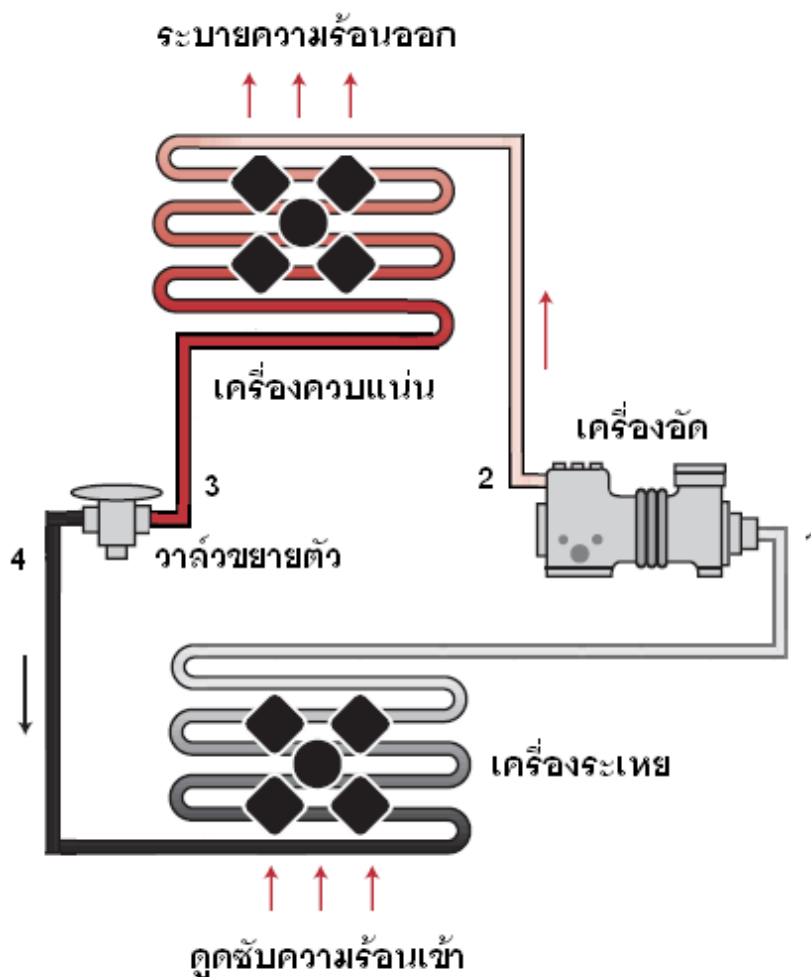
ในรูปที่ 1.5 แสดงให้เห็นถึงรูปแบบพื้นฐานของเครื่องทำความเย็นลักษณะนี้ ส่วนในรูปที่ 1.6 แสดงแผนภูมิการทำงานซึ่งแสดงในรูปแบบแผนภูมิความดัน (Pressure; P) กับปริมาณความร้อนหรือเอนทัลปี (Enthalpy; h) สำหรับในตารางที่ 1.1 เป็นการสรุปให้เห็นถึงความสัมพันธ์ต่างๆ ของระบบเครื่องทำความเย็นแบบอัดไอ

และดังกล่าวมาแล้วว่า การทำความเย็นเป็นการถ่ายเทความร้อนจากห้องหรือบริเวณที่ต้องการทำความเย็นซึ่งมีอุณหภูมิต่ำไปถ่ายเทที่ด้านนอกห้องซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่า เนื่องจากเป็นลักษณะการทำงานที่ฝืนกฎตามธรรมชาติของการถ่ายเทความร้อน การทำงานจึงต้องอาศัยกำลังงานจากเครื่องอัดเป็นตัวช่วยให้เกิดการกระทำดังกล่าว การทำงานลักษณะนี้อาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนกับการกระทำเชิงกลซึ่งเป็นรูปแบบหนึ่งของปรากฏการณ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ เนื่องจากศาสตร์ทางด้านเทอร์โมไดนามิกส์ เป็นเรื่องที่ศึกษาเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ทางความร้อนในลักษณะต่างๆ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าวัฏจักรการทำความเย็นเป็นวัฏจักรทางเทอร์โมไดนามิกส์รูปแบบหนึ่ง ทำให้สามารถนำหลักการทางเทอร์โมไดนามิกส์มาใช้อธิบายลักษณะการทำงานและการออกแบบระบบให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

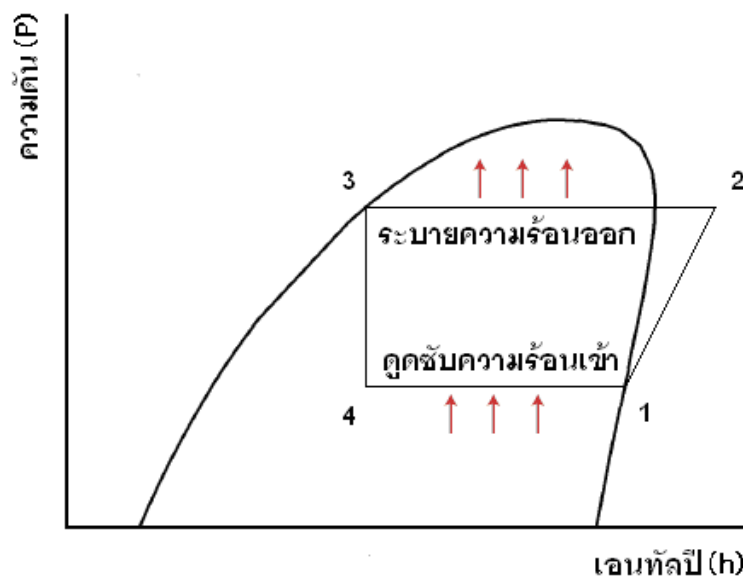
1.3.3 คำจำกัดความทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่เกี่ยวข้องกับการทำความเย็น

ระบบทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamics system) คือปริมาณของสารหรือมวลสารที่มีค่าแน่นอนจำนวนหนึ่งซึ่งกำลังสนใจศึกษาอยู่ โดยมีขอบเขตของระบบเป็นเกณฑ์ในการระบุให้

ทราบถึงปริมาณของสารหรือมวลสารนั้น สำหรับทุกสิ่งทุกอย่างที่อยู่นอกขอบเขตของระบบถือเป็น สิ่งแวดล้อมของระบบ ยกตัวอย่างในระบบการทำความเย็น การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของไอสารทำความ เย็นภายในกระบอกสูบของเครื่องอัด จะกำหนด ให้ไอสารทำความเย็นคือระบบ โดยมีผนังของกระบอก สูบและผิวหน้าของลูกสูบเป็นขอบเขต ส่วนตัวกระบอกสูบ ลูกสูบ และอากาศรอบๆ ถือเป็นสิ่งแวดล้อม



รูปที่ 1.5 แผนภาพอุปกรณ์การทำความเย็นพื้นฐานของระบบเครื่องทำความเย็นแบบอัด



รูปที่ 1.6 แผนภาพความดัน - เอนทัลปีของระบบเครื่องทำความเย็นแบบอัด

ตารางที่ 1.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขั้นตอนการทำงาน อุณหภูมิ ความดัน สถานะของสาร และอุปกรณ์การทำงาน

ลักษณะขั้นตอนการทำงาน	อุณหภูมิ	ความดัน	สถานะของสาร ทำความเย็น	อุปกรณ์
1→2 อัดสารทำความเย็นให้มีความดันสูง	ต่ำ→สูง	ต่ำ→สูง	ไอ	เครื่องอัด
2→3 คายความร้อนสู่บรรยากาศ	สูง	สูง	ไอ→ของเหลว	เครื่องควบแน่น
3→4 ลดความดันสารทำความเย็น	สูง→ต่ำ	สูง→ต่ำ	ของเหลว → (ของเหลว + ไอ)	วาล์วขยายตัว
4→1 ดูดซับความร้อนเข้าสู่ระบบ	ต่ำ	ต่ำ	ของเหลว + ไอ	เครื่องระเหย

สมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของระบบ (Thermodynamics property of system) คือ สมบัติของระบบซึ่งทำหน้าที่กำหนดหรือบ่งบอกถึงสถานะ (State) ของระบบว่ามีสถานะในขณะนั้นอยู่ในสภาพใด สมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์มีมากมายหลายอย่าง แต่สมบัติที่สำคัญซึ่งเกี่ยวข้องกับการทำความเย็น ได้แก่ ความดัน อุณหภูมิ ปริมาตร พลังงานภายใน เอนทัลปี และ เอนโทรปี การทราบสมบัติเหล่านี้ในแต่ละสถานะช่วยให้สามารถออกแบบ และคำนวณภาระงานของอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบได้อย่างถูกต้อง (ในลักษณะทำนองเดียวกับการทราบพิกัด x , y และ z ในการระบุตำแหน่งของวัตถุในทางกลศาสตร์ในแต่ละตำแหน่ง ทำให้สามารถคำนวณระยะทางในการเคลื่อนที่ของวัตถุ หรือค่าอื่นๆ ได้)

ความสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ของระบบ (Thermodynamics equilibrium of system) คือการที่ระบบคงสถานะเดิมตลอดไปโดยไม่มีเปลี่ยนแปลงใดๆ เกิดขึ้น (ความดัน อุณหภูมิ ปริมาตร พลังงานภายใน เอนทัลปี และเอนโทรปีมีค่าคงที่)

ความดัน คือแรงที่กระทำตั้งฉากต่อหน่วยพื้นที่ที่แรงนั้นกระทำ ในระบบที่สมดุล ความดัน ณ จุดใดๆ จะมีค่าเท่ากันทุกทิศทุกทาง สัญลักษณ์ที่ใช้แทนความดันคือ P หน่วยของความดันในระบบ SI คือ นิวตันต่อตารางเมตรหรือที่เรียกว่าพาสคัล (Pascal) ใช้สัญลักษณ์ Pa ในระบบอังกฤษ คือ ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ใช้สัญลักษณ์ psi

ความดันบรรยากาศ (Atmospheric pressure) คือความดันของอากาศรอบๆ โลกที่กระทำต่อพื้นผิวโลกเนื่องจากอิทธิพลของแรงโน้มถ่วง ความดันบรรยากาศ ณ ระดับน้ำทะเลมาตรฐานมีค่าเท่ากับ 101.325 kPa หรือ 14.696 psi ซึ่งโดยปกติมักใช้ค่าที่ 14.7 psi สัญลักษณ์ที่ใช้แทนความดันบรรยากาศคือ P_{atm}

ความดันมาตรวัด (Gage pressure) คือความดันที่อ่านได้จากมาตรวัด เนื่องจากความดันมาตรวัดจะมีการปรับค่าศูนย์ ณ ความดันบรรยากาศมาตรฐาน ดังนั้น 0 kPa ของความดันมาตรวัด = 101.325 kPa ของความดันบรรยากาศ สัญลักษณ์ที่ใช้แทนความดันมาตรวัดคือ P_{gage}

ความดันสุญญากาศ (Vacuum pressure) คือความดันที่อ่านได้จากมาตรวัด แต่เป็นค่าที่ต่ำกว่าความดันบรรยากาศ สัญลักษณ์ที่ใช้แทนความดันสุญญากาศคือ P_{vac}

ความดันสัมบูรณ์ (Absolute pressure) คือความดันที่แท้จริงของระบบ เนื่องจากความดันมาตรวัดเป็นค่าที่อ่านได้เทียบกับความดันบรรยากาศ ดังนั้นความดันสัมบูรณ์จึงมีค่าเท่ากับ ความดันมาตรวัดบวกด้วยความดันบรรยากาศ สัญลักษณ์ที่ใช้แทนความดันสัมบูรณ์คือ P_{abs} ความสัมพันธ์ระหว่างความดันสัมบูรณ์ ความดันมาตรวัด ความดันสุญญากาศ และความดันบรรยากาศ แสดงเป็นสมการได้ดังนี้

$$P_{abs} = P_{atm} + P_{gage}$$

เมื่อความดันมาตรวัดเป็นบวกหรือมากกว่าความดันบรรยากาศ และ

$$P_{abs} = P_{atm} - P_{vac}$$

เมื่อความดันมาตรวัดเป็นสุญญากาศหรือน้อยกว่าความดันบรรยากาศ

อุณหภูมิ คือสมบัติอย่างหนึ่งของระบบซึ่งใช้เป็นตัวบ่งชี้เกี่ยวกับระดับความร้อนของมวลสารในระบบ และใช้บอกถึงความสมดุลทางความร้อนของระบบ ระบบที่มีอุณหภูมิเท่ากันจะมีความสมดุลทางความร้อนต่อกัน อย่างไรก็ตามก็อุณหภูมิอย่างเดียวไม่สามารถบอกให้ทราบถึงปริมาณความร้อนได้ (ทำนองเดียวกับความสูงบ่งบอกให้ทราบถึงระดับน้ำ แต่ไม่ได้บอกให้ทราบว่าปริมาตรของน้ำมีปริมาณเท่าไร) สัญลักษณ์ที่ใช้แทนอุณหภูมิคือ T หน่วยของอุณหภูมิในระบบ SI คือ องศาเซลเซียส (Celsius) ใช้สัญลักษณ์ °C ในระบบอังกฤษ คือ องศาฟาเรนไฮท์ (Fahrenheit) ใช้สัญลักษณ์ °F

อุณหภูมิสัมบูรณ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamic absolute temperature) คือ ค่าอุณหภูมิที่วัดเทียบกับจุดไตรภาคของน้ำซึ่งเป็นจุดที่น้ำบริสุทธิ์ทั้งสามสถานะอยู่ด้วยกันอย่างสมดุลในระบบ SI กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 273.16 K (เคลวิน) (ไม่มีเครื่องหมายองศา) และกำหนดให้

$273.16 \text{ K} = 0^{\circ}\text{C}$ โดยผลต่างอุณหภูมิ $1 \text{ K} = 1^{\circ}\text{C}$ สำหรับในระบบอังกฤษอุณหภูมิสัมบูรณ์มีค่าเท่ากับ 460°R (แรงคิน) และกำหนดให้ $460^{\circ}\text{R} = 32^{\circ}\text{F}$ โดยผลต่างอุณหภูมิ $1^{\circ}\text{R} = 1^{\circ}\text{F}$

ความร้อน คือพลังงานรูปแบบหนึ่ง และสามารถแปลงให้เป็นพลังงานรูปแบบอื่นๆ ได้ รวมทั้งพลังงานรูปแบบอื่นๆ สามารถแปลงให้เป็นพลังงานความร้อนได้เช่นกัน ในทางเทอร์โมไดนามิกส์ ความร้อนเป็นพลังงานที่ถ่ายเทจากวัตถุหนึ่งไปสู่วัตถุอีกอันหนึ่ง หากวัตถุทั้งสองมีอุณหภูมิที่แตกต่างกัน โดยความร้อนจะถ่ายเทจากแหล่งที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่แหล่งที่มีอุณหภูมิต่ำเสมอ (ทำนองเดียวกับน้ำที่ไหลจากที่สูงไปสู่ที่ต่ำ) สัญลักษณ์ที่ใช้แทนความร้อนคือ Q หน่วยของความร้อนในระบบ SI คือ kJ ในระบบอังกฤษ คือ Btu

ความเย็น คือสภาวะอุณหภูมิต่ำ หรือการขาดแคลนความร้อน ความเย็นเป็นผลจากการเคลื่อนที่ของความร้อน เครื่องทำความเย็นผลิต “ความเย็น” ด้วยการดึงความร้อนจากภายในห้องที่ต้องการทำความเย็น

ความร้อนจำเพาะ (Specific heat) คือค่าปริมาณความร้อนที่ทำให้มวลหนึ่งหน่วยมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นหนึ่งองศา ในระบบ SI คือปริมาณความร้อน (kJ) ที่ทำให้มวล 1 kg มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1°C (หรือ 1 K) ในระบบอังกฤษ คือปริมาณความร้อน (Btu) ที่ทำให้มวล 1 ปอนด์ มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1°F (หรือ 1°R) สัญลักษณ์ที่ใช้แทนความร้อนจำเพาะคือ c หน่วยของความร้อนจำเพาะในระบบ SI คือ กิโลจูล/กิโลกรัม·เคลวิน ($\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$) ในระบบอังกฤษ คือ บีทียู/ปอนด์·องศาแรงคิน ($\text{Btu/lb}\cdot^{\circ}\text{R}$) อย่างไรก็ตาม ความร้อนจำเพาะยังแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ ความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ สัญลักษณ์ที่ใช้คือ c_p และความร้อนจำเพาะที่ปริมาตรคงที่ สัญลักษณ์ที่ใช้คือ c_v โดยความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่มีค่ามากกว่าความร้อนจำเพาะที่ปริมาตรคงที่ของสารชนิดเดียวกัน

ความร้อนสัมผัส (Sensible heat) คือค่าปริมาณความร้อนที่ทำให้มวลสารมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น หรือลดลง โดยสถานะไม่เปลี่ยนแปลง

ความร้อนแฝง (Latent heat) คือค่าปริมาณความร้อนที่ทำให้มวลสารเปลี่ยนแปลงสถานะ โดยอุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลง

ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (Latent heat of vaporization) คือปริมาณความร้อนแฝงที่ทำให้มวลสารเปลี่ยนแปลงสถานะจากของเหลวกลายเป็นไอ

ความร้อนแฝงของการควบแน่น (Latent heat of condensation) คือปริมาณความร้อนแฝงที่ทำให้มวลสารเปลี่ยนแปลงสถานะจากไอกลายเป็นของเหลว

อุณหภูมิอิ่มตัว (Saturation temperature) คืออุณหภูมิซึ่งของไหล (ของเหลวหรือก๊าซ) จะเปลี่ยนแปลงสถานะจากของเหลวเป็นก๊าซ หรือจากก๊าซเป็นของเหลว กรณีเปลี่ยนแปลงสถานะจากของเหลวเป็นก๊าซเรียกว่าอุณหภูมิของเหลวอิ่มตัว กรณีเปลี่ยนแปลงสถานะจากก๊าซเป็นของเหลวเรียกว่าอุณหภูมิก๊าซอิ่มตัว

พลังงานศักย์ (Potential energy) คือพลังงานอันเนื่องมาจากความแตกต่างของระดับระหว่างตำแหน่งของมวลสารหรือวัตถุเทียบกับตำแหน่งอ้างอิงตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่ง สัญลักษณ์ที่ใช้แทนพลังงานศักย์คือ PE

พลังงานภายใน (Internal energy) คือความสามารถในการทำงานได้ของโมเลกุลภายในมวลสารหรือวัตถุ สัญลักษณ์ที่ใช้แทนพลังงานภายในคือ U มีหน่วยเช่นเดียวกับพลังงานและแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด เช่นกันคือ พลังงานจลน์ภายใน และพลังงานศักย์ภายใน

พลังงานจลน์ภายใน (Internal kinetic energy) คือพลังงานอันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่หรือความเร็วของโมเลกุลภายในมวลสารหรือวัตถุ สัญลักษณ์ที่ใช้แทนพลังงานจลน์ คือ K

พลังงานศักย์ภายใน (Internal potential energy) คือพลังงานจากการแยกชั้นของโมเลกุล เป็นพลังงานที่โมเลกุลมีอยู่อันเนื่องมาจากตำแหน่งของโมเลกุลนั้นเทียบกับตำแหน่งของโมเลกุลอ้างอิง ยิ่งระดับของการแยกชั้นของโมเลกุลยิ่งมาก พลังงานศักย์ภายในยิ่งสูง สัญลักษณ์ที่ใช้แทนพลังงานศักย์คือ P

พลังงานภายในจำเพาะ (Specific internal energy) คือพลังงานภายในต่อหน่วยมวลสารของระบบ ดังนั้นปริมาตรจำเพาะจึงไม่ขึ้นกับมวลของระบบ

เอนทัลปี คือสมบัติสมบัตินี้ที่ใช้เป็นตัวแทนกลุ่มสมบัติของมวลสาร ได้แก่ พลังงานภายใน(U) ความดัน (P) และปริมาตร(V) เนื่องจากสมบัติเหล่านี้มักปรากฏอยู่ด้วยกันในรูป $U + PV$ ดังนั้นเพื่อความสะดวกจึงแทนกลุ่มสมบัตินี้ด้วยสมบัติตัวหนึ่งและให้ชื่อว่า เอนทัลปี สัญลักษณ์ที่ใช้แทนเอนทัลปี คือ H หน่วยของเอนทัลปีเป็นเช่นเดียวกับหน่วยของพลังงาน

เอนทัลปีจำเพาะ (Specific enthalpy) คือเอนทัลปีต่อหน่วยมวลสารของระบบ แต่โดยปกติจะใช้ค่าเอนทัลปีจำเพาะเป็นหลักมากกว่าเอนทัลปีรวม (H) ในทางปฏิบัติคำว่า เอนทัลปี จึงหมายถึงเอนทัลปีจำเพาะ สัญลักษณ์ที่ใช้แทนเอนทัลปีจำเพาะ คือ h หน่วยของเอนทัลปีจำเพาะในระบบ SI คือ กิโลจูลต่อกิโลกรัม (kJ/kg) ในระบบอังกฤษ คือ บีทียู/ปอนด์ (Btu/lb)

เอนโทรปี คือสมบัติสมบัตินี้ที่ใช้แทนอัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อน (ΔQ) ที่ถ่ายเทสู่มวลสารต่อระดับอุณหภูมิสัมบูรณ์ (T) ที่นำมวลสารสู่สภาวะนั้นจากจุดอ้างอิงจุดใดจุดหนึ่ง สัญลักษณ์ที่ใช้แทนเอนโทรปี คือ S แต่เนื่องจากเอนโทรปีเป็นสมบัติที่เทียบกับอัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงาน จึงนิยามเอนโทรปีด้วยสมการที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปี ดังนี้ $\Delta S = \Delta Q / T$ หน่วยของเอนโทรปีในระบบ SI คือ kJ/K ในระบบอังกฤษ คือ Btu/°R

เอนโทรปีจำเพาะ (Specific entropy) คือเอนโทรปีต่อหน่วยมวลสารของระบบ แต่โดยปกติจะใช้ค่าเอนโทรปีจำเพาะเป็นหลักเช่นเดียวกับเอนทัลปี ในทางปฏิบัติคำว่า เอนโทรปี จึงหมายถึงเอนโทรปีจำเพาะ สัญลักษณ์ที่ใช้แทนเอนโทรปีจำเพาะ คือ s หน่วยของเอนโทรปีจำเพาะในระบบ SI คือ kJ/kg·K ในระบบอังกฤษ คือ Btu/lb·°R

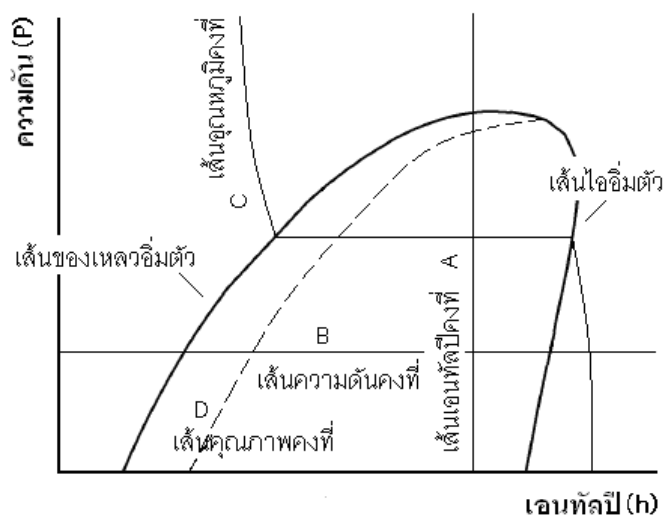
กระบวนการ คือการเปลี่ยนแปลงของระบบจากสถานะหนึ่งไปสู่อีกสถานะหนึ่ง อาจเป็นการเปลี่ยนแปลง ความดัน อุณหภูมิ ปริมาตร พลังงานภายใน เอนทัลปี หรือเอนโทรปี อย่างใดอย่างหนึ่ง เพียงอย่างเดียว หรือหลายอย่าง หรือทั้งหมดก็ได้

วัฏจักร คือการเปลี่ยนแปลงตามกระบวนการต่างๆ ของระบบ จนในที่สุดระบบกลับมีสถานะเหมือนกับสถานะเริ่มต้นอีกครั้ง หรือเรียกว่าระบบผ่านการเปลี่ยนแปลงครบ “วัฏจักร”

1.3.4 แผนภูมิทางเทอร์โมไดนามิกส์และแผนภูมิความดัน – เอนทัลปี

แผนภูมิทางเทอร์โมไดนามิกส์ คือกราฟแสดงสถานะของสารบนแกนสองมิติ ได้มาจากความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติของสารหรือระบบที่สถานะสมดุลใดๆ เช่น แผนภูมิความดัน – ปริมาตร จำเพาะ ($P - v$) แผนภูมิความดัน – อุณหภูมิ ($P - T$) แผนภูมิอุณหภูมิ – เอนโทรปี ($T - s$) และแผนภูมิความดัน – เอนทัลปี ($P - h$) เป็นต้น

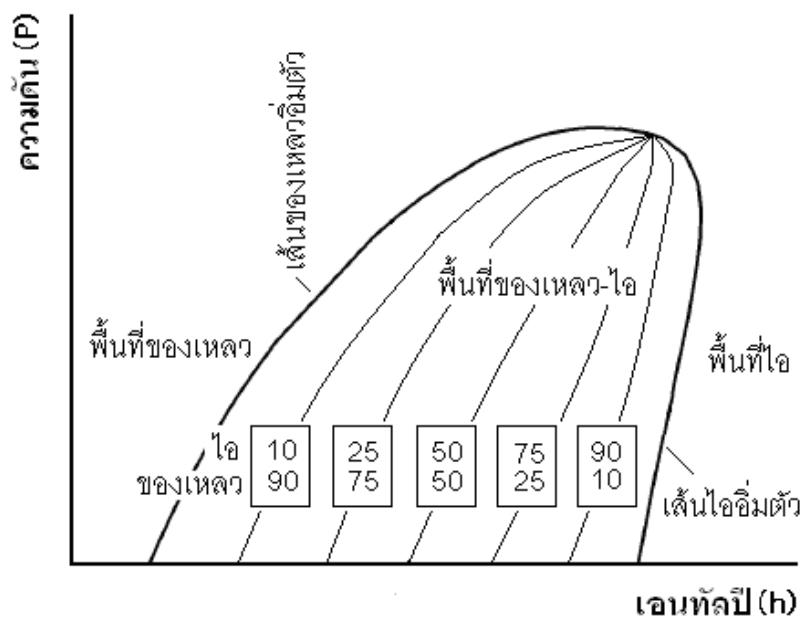
แผนภูมิความดัน – เอนทัลปี คือแผนภูมิทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่แสดงให้เห็นว่าสมบัติของสารในสถานะของเหลวและก๊าซมีความสัมพันธ์กับค่าความดันและความร้อนค่าหนึ่งๆ เสมอ นอกจากนี้ในแผนภูมิความดัน – ความร้อนโดยปกติยังสามารถบอกให้ทราบถึงสมบัติของสารได้หลายอย่าง โดยอาศัยเส้นค่าคงที่ต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 1.7 ในรูปเส้นแนวตั้ง (เส้น A) บอกให้ทราบถึงค่าความร้อน (เอนทัลปี) ของสารที่มีค่าเท่ากันตามเส้นนี้ มีหน่วยเป็นกิโลจูลต่อกิโลกรัม หรือบีทียูต่อปอนด์ เส้นแนวนอน (เส้น B) บอกให้ทราบถึงค่าความดันของสารที่มีค่าเท่ากันตามเส้นนี้ มีหน่วยเป็น กิโลพาสคัล หรือปอนด์ต่อตารางนิ้ว เส้นแนวนอนในพื้นที่บริเวณตรงกลางและเกือบเป็นแนวตั้งในพื้นที่ด้านซ้าย กับเป็นเส้นโค้งลงไปทางขวาในพื้นที่ด้านขวา (เส้น C) บอกให้ทราบถึงอุณหภูมิของสารที่มีค่าเท่ากันตามเส้นนี้ และเส้นเกือบขนานกับเส้นของเหลวอิ่มตัวภายในพื้นที่บริเวณตรงกลาง (เส้น D) บอกให้ทราบถึงคุณภาพของสาร (x) ที่มีค่าเท่ากันตามเส้นนี้ว่ามีสัดส่วนของไอผสมกับของเหลวปริมาณเท่าใด เช่น คุณภาพ $x = 0.10$ หมายถึงมีสัดส่วนของไออยู่ ร้อยละ 10 และมีสัดส่วนของของเหลวอยู่ร้อยละ 90 เป็นต้น



รูปที่ 1.7 แผนภูมิความดัน – เอนทัลปี แสดงเส้นคงที่ของสมบัติต่างๆ ของสาร

แผนภูมิความดัน - เอนทัลปี ถือเป็นแผนภูมิที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบระบบ การทำความเย็น เริ่มตั้งแต่การหาขนาดของกำลังงานเชิงกลที่จำเป็นในการทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อน ให้ได้ตามปริมาณที่ต้องการ ซึ่งถือเป็นสิ่งสำคัญของระบบที่จะทำให้สามารถถ่ายเทความร้อนออกจาก ห้องหรือบริเวณที่ต้องการทำความเย็นนั้นได้ตามที่ต้องการ สำหรับระบบการทำความเย็นแบบอัดไอซึ่งเป็นระบบการทำความเย็นที่ได้รับความนิยมมากที่สุด กำลังงานเชิงกลได้แก่ กำลังงานจากเครื่องอัดในการอัดไอสารทำความเย็นให้มีความดันและอุณหภูมิสูงตามที่ต้องการ ด้วยปริมาณสารทำความเย็นที่เหมาะสมกับปริมาณการถ่ายเทความร้อนออก อันจะทำให้สามารถคงอุณหภูมิของห้องหรือบริเวณที่ต้องการทำความเย็นให้ต่ำตามที่กำหนดได้ รวมทั้งแผนภูมิช่วยให้สามารถหาขนาดของเครื่องควบแน่น ขนาดของ อุปกรณ์ปรับลดความดันหรือควบคุมสารทำความเย็น และขนาดของเครื่องระเหยที่เหมาะสมกับปริมาณ การถ่ายเทความร้อนออกได้ด้วย

พื้นที่แสดงสถานะของสารทำความเย็นในแผนภูมิ คือพื้นที่ในแผนภูมิความดัน - เอนทัลปี ที่บอกให้ทราบถึงสถานะของสารซึ่งในการทำความเย็นคือสารทำความเย็นว่า มีสถานะเป็นของเหลว อิมิตัว ของผสมระหว่างของเหลวกับไอ ไออิมิตัว หรือไอร้อนยิ่งยวด ดังรูปที่ 1.8 แสดงให้เห็น ความสัมพันธ์ของสถานะของสารทำความเย็นในรูปของเหลวและก๊าซตามค่าความดันและความร้อน (เอนทัลปี) ค่าต่างๆ ซึ่งทำให้สามารถแบ่งพื้นที่ออกเป็น 3 ส่วนคือ พื้นที่ด้านซ้ายมือ พื้นที่บริเวณตรงกลาง และพื้นที่ด้านขวามือ โดยมีเส้นแบ่งอยู่ 2 เส้น เส้นแบ่งด้านซ้ายมือ เรียกว่าเส้นของเหลวอิมิตัว เส้นแบ่ง ด้านขวามือ เรียกว่าเส้นไออิมิตัว ดังนั้นพื้นที่ด้านซ้ายมือของเส้นของเหลวอิมิตัว สารทำความเย็นจึงมี สถานะเป็นของเหลวทั้งหมด พื้นที่ด้านขวามือของเส้นไออิมิตัวสารทำความเย็นจึงมีสถานะเป็นไอทั้งหมด และพื้นที่บริเวณตรงกลางระหว่างเส้นของเหลวอิมิตัวกับเส้นไออิมิตัว สารทำความเย็นมีสถานะเป็นของ ผสมระหว่างของเหลวกับไอ ทั้งนี้จะมีสัดส่วนของของเหลวหรือไอปริมาณมาก - น้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับว่า มีค่าความร้อน (เอนทัลปี) มาก - น้อยเพียงใดในแต่ละค่าความดัน (ค่าความดันจะบอกให้ทราบถึง ระดับสูง - ต่ำ ของเส้นระเหย และเส้นควบแน่น) นั่นคือถ้าสารทำความเย็นมีค่าความร้อนในตัวน้อย สภาวะสารทำความเย็นอยู่ใกล้กับเส้นของเหลวอิมิตัว (เส้นซ้ายมือ) และสารทำความเย็นมีสัดส่วนเป็น ของเหลวมากกว่าเป็นก๊าซ ในทางตรงข้ามหากสารทำความเย็นมีค่าความร้อนในตัวมาก สภาวะสารทำ ความเย็นอยู่ใกล้กับเส้นไออิมิตัว (เส้นขวามือ) และสารทำความเย็นมีสัดส่วนเป็นไอมากกว่าเป็นของเหลว ดังแสดงในรูปที่ 1.8



รูปที่ 1.8 แผนภูมิความดัน - เอนทัลปี แสดงเส้นแบ่งพื้นที่สถานะ

สำหรับบริเวณที่เป็นของเหลวที่ห่างจากเส้นของเหลวอิ่มตัวออกไปทางซ้ายมือ สารทำความเย็นอยู่ในสถานะของเหลวอัด เนื่องจากบริเวณนี้ของเหลวมีความดันสูงกว่าความดันของของเหลวอิ่มตัว ณ เส้นของเหลวอิ่มตัวที่อุณหภูมิเท่ากัน กล่าวอีกนัยหนึ่งบริเวณนี้ของเหลวมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิของของเหลวอิ่มตัว ณ เส้นของเหลวอิ่มตัวที่ความดันเท่ากัน (ดูเส้นอุณหภูมิตั้งที่ในรูปที่ 1.7 ประกอบ) ในทำนองเดียวกันบริเวณที่เป็นก๊าซที่ห่างจากเส้นไออิ่มตัวออกไปทางขวามือ สารทำความเย็นอยู่ในสถานะไอร้อนยิ่งยวด เนื่องจาก ณ เส้นอุณหภูมิตั้งที่เท่ากัน ไอ (ก๊าซ) บริเวณนี้มีความดันต่ำกว่าความดันของไออิ่มตัว หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งบริเวณนี้ไอมีอุณหภูมิตั้งที่สูงกว่าอุณหภูมิของไออิ่มตัว ณ เส้นไออิ่มตัวที่ความดันเท่ากัน

1.3.5 เทอร์โมไดนามิกส์ในวัฏจักรการทำความเย็นพื้นฐานเชิงอุดมคติ

ดังกล่าวแล้วว่า ในวัฏจักรการทำความเย็นแบบอัด ประกอบด้วยกระบวนการทางเทอร์โมไดนามิกส์ 4 กระบวนการ ได้แก่ กระบวนการอัดสารทำความเย็นในเครื่องอัด กระบวนการคายความร้อนจากสารทำความเย็นให้บรรยากาศภายนอกในเครื่องควบแน่น กระบวนการลดความดันในอุปกรณ์ลดความดัน (Pressure reducer) หรือวาล์วควบคุมสารทำความเย็น และกระบวนการดูดซับความร้อนออกจากตู้เย็นหรือบริเวณที่ต้องการทำความเย็นสู่สารทำความเย็นในเครื่องระเหย

1.3.5.1 กระบวนการอัดสารทำความเย็น

หากเริ่มพิจารณาที่กระบวนการอัดสารทำความเย็น เมื่อสารทำความเย็นออกจากเครื่องระเหย A ในรูปที่ 1.9 ผ่านท่อทางดูดเข้าสู่เครื่องอัด B เพื่อเข้าสู่กระบวนการอัด เครื่องอัดซึ่งโดยปกติมีอัตราการอัดที่สูงมาก (ประมาณ 1000 - 3000 รอบ/นาที) ทำให้วงรอบการอัดเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ไอสารทำความเย็นมีโอกาสสัมผัสกับผิวของทรงกระบอกของเครื่องอัดในช่วงสั้นๆ มาก

รวมทั้งผลต่างของอุณหภูมิระหว่างไอสารทำความเย็น (อุณหภูมิต่ำสุดเฉลี่ยประมาณ -15°C และอุณหภูมิสูงสุดประมาณ 45°C) กับอุณหภูมิเครื่องอัด (อุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ 30°C) มีค่าไม่มาก การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างสารทำความเย็นกับเครื่องอัดจึงไม่ต้องนำมาพิจารณาได้ ทำให้สามารถพิจารณาว่ากระบวนการอัดมีลักษณะเป็นกระบวนการแบบแอดิยาเบติก (Adiabatic process) นั่นคือถือว่าไม่มีการถ่ายเทความร้อนขณะดำเนินกระบวนการอัดระหว่างก๊าซกับสิ่งแวดล้อมซึ่งคือเครื่องอัด สมการทำงานของกระบวนการแบบแอดิยาเบติกเป็นดังนี้

$$w = \frac{P_1 v_1 - P_2 v_2}{k - 1} \quad (1.1)$$

เมื่อ w = งานของกระบวนการ, kJ/kg

P_1 = ความดันเริ่มต้น, kPa

v_1 = ปริมาตรเริ่มต้น, m^3/kg

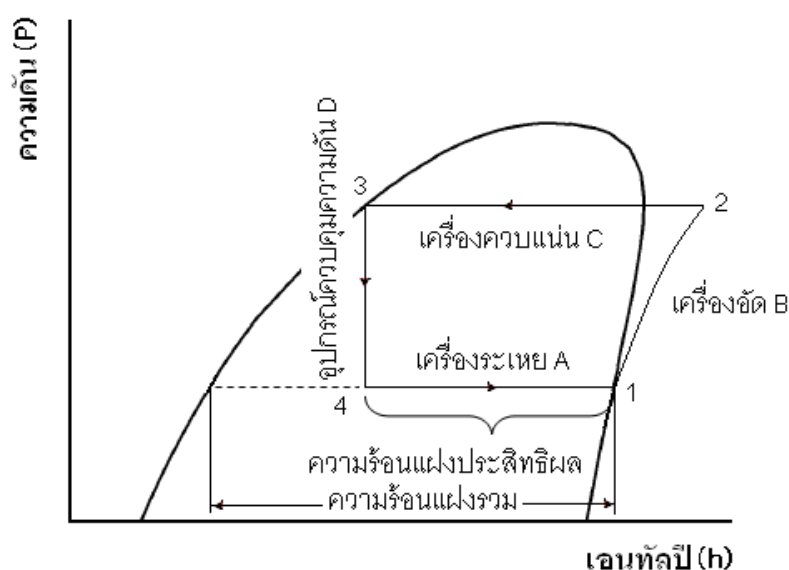
P_2 = ความดันสุดท้าย, kPa

v_2 = ปริมาตรสุดท้าย, m^3/kg

k = อัตราส่วนความร้อนจำเพาะของก๊าซ (c_p / c_v) (ดังแสดงในตารางที่ 1.2)

ตารางที่ 1.2 ค่าอัตราส่วนความร้อนจำเพาะของก๊าซ (c_p / c_v); k ของสารทำความเย็นบางชนิดที่อุณหภูมิ 30°C

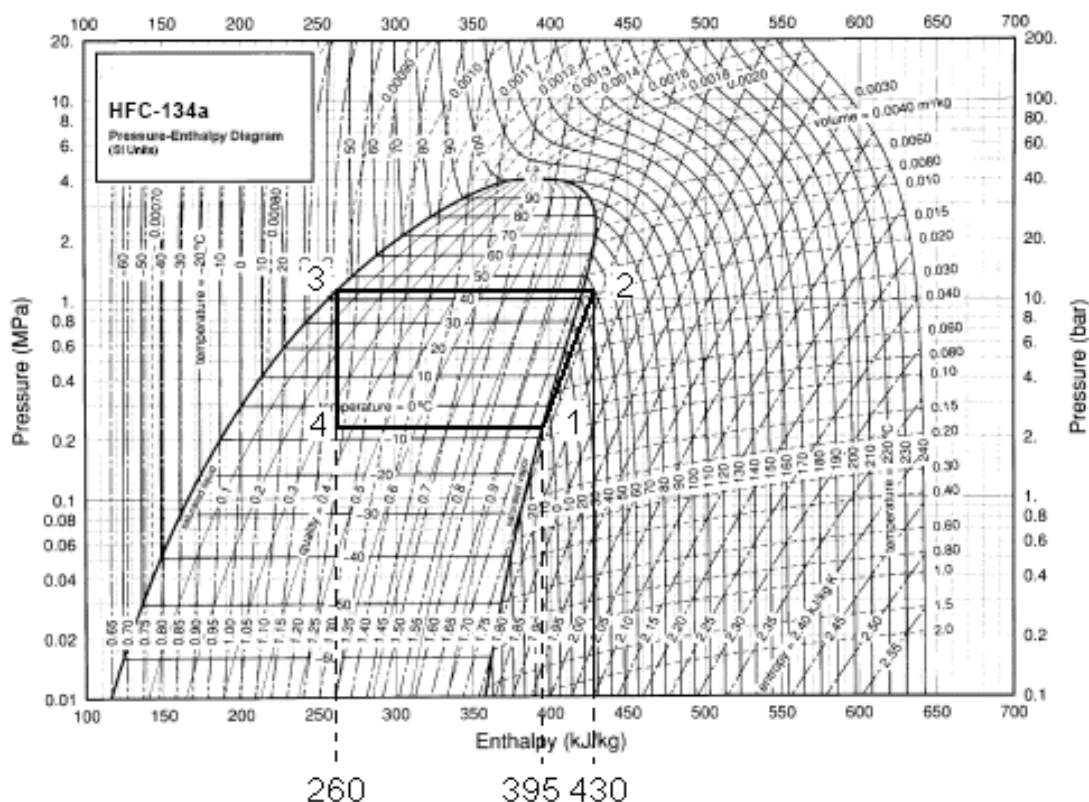
ชนิดของสารทำความเย็น	R - 12	R - 22	R - 134a	R - 502
ค่า k	1.14	1.18	1.12	1.14



รูปที่ 1.9 แผนภูมิความดัน - เอนทัลปี ของระบบการทำความเย็นแบบอัด (แสดงเส้นทางของกระบวนการในระบบ)

อย่างไรก็ดี ไม่นิยมคำนวณหางานจากสมการข้างต้น เนื่องจากสารทำความเย็นที่ใช้งานโดยทั่วไป ได้มีการจัดทำเป็นแผนภูมิทางเทอร์โมไดนามิกส์และตารางทางเทอร์โมไดนามิกส์ไว้เรียบร้อยแล้ว ดังแผนภูมิของสารทำความเย็นชนิด R-134a ในรูปที่ 1.10 และตารางสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็นชนิด R-134a ในภาคผนวก อย่างไรก็ตาม เนื่องจากหน่วยที่ใช้งานที่เกี่ยวข้องกับระบบการทำความเย็นในประเทศไทย ใช้หน่วยทั้งในระบบ SI และในระบบอังกฤษปะปนกันไป ตารางที่ 1.3 ได้แสดงการแปลงหน่วยที่เกี่ยวข้องไว้ให้ เพื่อความสะดวกในการใช้งาน

ในการใช้งานแผนภูมิและตารางดังกล่าวจะสมมติให้กระบวนการนี้เป็นกระบวนการแอดิยาเบติกชนิดไอเซนทรอปิก หรือที่เรียกว่ากระบวนการแอดิยาเบติกที่ไม่มีแรงเสียดทาน (Frictionless-adiabatic process) หรือกระบวนการอัดแบบเอนโทรปีคงที่ (Constant entropy compression) ดังนั้นในแผนภูมิความดัน-เอนทัลปี (รูปที่ 1.10) ลักษณะเส้นกระบวนการในแผนภูมิจะลากไปตามเส้นเอนโทรปีคงที่ และถ้าทราบจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของกระบวนการจะสามารถคำนวณงานในส่วนนี้โดยอาศัยข้อมูลจากแผนภูมิหรือจากตารางไอร็อนยิ่งยวด ดังตารางไอร็อนยิ่งยวดของ R - 134a ในผนวก ข



รูปที่ 1.10 แผนภูมิความดัน-เอนทัลปี ของสารทำความเย็นชนิด R-134a

ตารางที่ 1.3 ตารางแปลงหน่วย

สมบัติ	SI เป็นอังกฤษ	อังกฤษเป็น SI
ความดัน	$1 \text{ kPa} = 1 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2} = 0.14504 \text{ psi}$	$1 \text{ psi} = 6.8948 \text{ kPa}$
พลังงานจำเพาะ	$1 \text{ kJ/kg} = 0.42922 \text{ Btu/lb}$	$1 \text{ Btu/lb} = 2.326 \text{ kJ/kg}$
การถ่ายเทพลังงาน	$1 \text{ kW} = 1 \text{ kJ/s} = 3,413 \text{ Btu/h}$ $= 0.2844 \text{ TR (ตันความเย็น)}$	$1 \text{ Btu/h} = 0.293 \text{ W} = 0.293 \times 10^{-3} \text{ kW}$ $1 \text{ TR} = 12,000 \text{ Btu/lb} = 3.516 \text{ kW}$
ความร้อนจำเพาะ	$1 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K} = 0.238846 \text{ Btu/lb}\cdot\text{R}$	$1 \text{ Btu/lb}\cdot\text{R} = 4.1868 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$

1.3.5.2 กระบวนการคายความร้อน

หลังจากสารทำความเย็นผ่านกระบวนการอัด ทำให้สารทำความเย็นมีความดันและอุณหภูมิที่สูงขึ้น แต่จะสูงมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับงานที่กระทำโดยเครื่องอัดว่ามีปริมาณที่มากน้อยเพียงใด กล่าวคือยิ่งใส่งานเข้าไปในเครื่องอัดยิ่งมาก ความดันและอุณหภูมิของสารทำความเย็นยิ่งสูงส่งผลให้อุณหภูมิในการควบแน่นของสารทำความเย็นในกระบวนการคายความร้อนในเครื่องควบแน่น C (รูปที่ 1.9) สูงตามไปด้วย ทำให้สามารถถ่ายเทความร้อนสู่บรรยากาศได้รวดเร็ว จากผลของความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของเครื่องควบแน่นกับบรรยากาศที่มีความแตกต่างกันมาก อย่างไรก็ตาม ผลของการอัดให้มีความดันสูงและอุณหภูมิสูงมากๆ ทำให้ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทออกมีปริมาณต่อน้ำหนัก (kJ/kg หรือ Btu/lb) ลดลง ซึ่งส่งผลให้ปริมาณความร้อน (หรืออาจเรียกว่าปริมาณความเย็น) ที่ถ่ายเทสู่เครื่องระเหยลดลงตามไปด้วย นอกจากนี้การอัดให้สารทำความเย็นมีความดันสูงมากๆ ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานมากตามไปด้วย ดังนั้นโดยทั่วไปจึงทำการอัดสารทำความเย็นให้มีอุณหภูมิสูงกว่าระดับอุณหภูมิของบรรยากาศประมาณ $10 - 15^{\circ}\text{C}$ สำหรับปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทออกมีค่าเท่ากับความร้อนแฝงของการควบแน่น (ไอกลายเป็นของเหลว)ของสารทำความเย็น

1.3.5.3 กระบวนการลดความดัน

เมื่อสารทำความเย็นคายความร้อนและเปลี่ยนแปลงสถานะจากไอเป็นของเหลวแล้ว การที่จะทำให้สารทำความเย็นสามารถดูดซับความร้อนในการทำความเย็น ณ บริเวณพื้นที่ที่ต้องการและในระดับความเย็นที่เหมาะสม ตัวสารทำความเย็นต้องมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าบริเวณที่ต้องการทำความเย็นมากพอที่จะดูดซับความร้อนเข้ามาได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในการทำให้สารทำความเย็นมีอุณหภูมิที่ต่ำลงจำเป็นต้องทำการลดความดันสารทำความเย็นลง โดยผ่านอุปกรณ์ลดความดันหรือควบคุมสารทำความเย็น D (รูปที่ 1.9) สำหรับกระบวนการลดความดันนี้มีลักษณะเป็นกระบวนการแบบเอนทัลปีคงที่เนื่องจากเป็นกระบวนการขยายตัวแบบแอดิเอเบติก กล่าวคือกระบวนการเกิดการขยายตัวลดความดันอย่างรวดเร็วมาก ทำให้สารทำความเย็นมีโอกาสสัมผัสกับพื้นผิวของท่อและอุปกรณ์ลดความดันในช่วงสั้นๆ มาก ในลักษณะทำนองเดียวกับกระบวนการอัด การถ่ายเทความร้อนกับสิ่งแวดล้อมจึงไม่ต้องนำมาคิดได้ อย่างไรก็ตามในขณะที่สารทำความเย็นขยายตัวลดความดันลง สารทำความเย็นบางส่วนจะกลายเป็นไอ

ที่เรียกว่าไอแฟล็กซ์ เนื่องจากผลของการลดความดันลง ทำให้แรงกดที่กระทำต่อโมเลกุลของสารลดลงไปด้วย (ทำนองเดียวกับการเกิดละอองน้ำ (ไอน้ำ) ปะปนกับน้ำจากการบีบปลายสายยางขณะรดน้ำต้นไม้ จากผลที่ความดันของน้ำในสายยางถูกลดความดันลงเท่ากับความดันบรรยากาศอย่างทันทีทันใด) ดังนั้นเมื่อความดันของสารทำความเย็นลดต่ำลงถึงระดับที่ต้องการ สารทำความเย็นที่ระดับความดันต่ำนี้จะมีสถานะเป็นของผสมระหว่างของเหลวและไอ โดยทั่วไปอยู่ในอัตราส่วนโดยประมาณเท่ากับ ของเหลวร้อยละ 75 และไอร้อยละ 25 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ 3 ประการ คือ ความดันด้านสูงในเครื่องควบแน่น ความดันด้านต่ำในเครื่องระเหย และผลของการเกิดของเหลวเย็นยิ่ง ในเครื่องควบแน่นว่าเป็นอย่างไร

1.3.5.4 กระบวนการดูดซับความร้อน

หลังจากที่สารทำความเย็นขยายตัวลดความดันลงสู่ระดับความดันที่ทำให้สารทำความเย็นมีอุณหภูมิต่ำกว่าที่ต้องการ (โดยปกติจะต่ำกว่าอุณหภูมิของบริเวณที่ต้องการทำความเย็น ประมาณ $5 - 10^{\circ}\text{C}$) ณ จุดนี้สารทำความเย็นจะเริ่มเดือดกลายเป็นไอผ่านเครื่องระเหย A (รูปที่ 1.9) ในขณะที่สารทำความเย็นเปลี่ยนสถานะจากของผสมระหว่างของเหลว - ไอ เป็นไออย่างสมบูรณ์นั้น สารทำความเย็นจะดูดซับความร้อนจากบริเวณรอบๆ เข้ามาด้วย ในปริมาณเท่ากับค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของสารทำความเย็น อย่างไรก็ตามปริมาณความร้อนที่ถูกดูดซับจากห้องที่ต้องการทำความเย็น และจากเครื่องระเหยไม่เท่ากับปริมาณความร้อนแฝงทั้งหมดในการกลายเป็นไอของสารทำความเย็น ทั้งนี้เนื่องจากขณะที่สารทำความเย็นถูกลดความดันลงผ่านวาล์วขยายตัวหรืออุปกรณ์ลดความดันแบบอื่นๆ สารทำความเย็นบางส่วนได้กลายเป็นไอก่อนเข้าสู่เครื่องระเหย ลักษณะนี้ทำให้ปริมาณความร้อนแฝงประสิทธิผล ในการทำความเย็นมีค่าน้อยกว่าปริมาณความร้อนแฝงรวมของการกลายเป็นไอของสารทำความเย็น ดังแสดงในแผนภูมิความดัน-เอนทัลปี ในรูปที่ 1.9 (เครื่องระเหย A)

1.3.6 การใช้งานและการอ่านค่าในกระบวนการต่างๆ ของวัฏจักรการทำความเย็นใน แผนภูมิ-เอนทัลปี และตารางทางเทอร์โมไดนามิกส์

จากแผนภูมิความดัน-เอนทัลปีที่แสดงให้เห็นถึงสมบัติต่างๆ ของสารทำความเย็น และจากการศึกษาการทำงานของกระบวนการต่างๆ ของวัฏจักรการทำความเย็นแบบอัด ทำให้สามารถนำแผนภูมิความดัน-เอนทัลปีมาใช้ในการศึกษาวัฏจักรการทำความเย็นได้ ด้วยการแทนการทำงานต่างๆ ลงในแผนภูมิ และนำผลจากการอ่านค่าสมบัติต่างๆ ในกระบวนการมาใช้งานต่อไป ดังนี้

1.3.6.1 กระบวนการอัดสารทำความเย็น

หากพิจารณาสารทำความเย็นที่ไหลผ่านเครื่องระเหยในสภาวะไออิ่มตัว และถูกดูดเข้าสู่เครื่องอัด ถ้าสารทำความเย็นที่ใช้เป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนคือ R -134a มีอุณหภูมิที่เครื่องระเหยเท่ากับ -7°C และอุณหภูมิของสารทำความเย็นที่เครื่องควบแน่นเท่ากับ 43°C

จากข้อมูลข้างต้นสามารถนำมากำหนดจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของกระบวนการอัดสารทำความเย็นได้ดังนี้

เริ่มจากสถานะเข้าเครื่องอัด ถ้าสารทำความเย็นเข้าสู่เครื่องอัดในสถานะไออิ่มตัว จุดเริ่มต้นของกระบวนการคือ จุดที่เส้นอุณหภูมิคงที่ ที่ -7°C ตัดกับเส้นไออิ่มตัว (จุด 1 ในรูปที่ 1.10) และจุดสิ้นสุดของกระบวนการคือจุดที่เส้นเอนโทรปีคงที่จากจุด 1 ($s = 1.74 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$) ไปตัดกับเส้นความดันคงที่ ที่ได้มาจากค่าอุณหภูมิที่เครื่องควบแน่น ที่ 43°C (จุด 2 ในรูปที่ 1.10)

จากจุดเริ่มต้น (จุด 1) และจุดสิ้นสุด (จุด 2) สามารถอ่านค่าต่างๆ ของกระบวนการได้ดังนี้

จากจุด 1 ลากเส้นขนานกับเส้นแกนตั้งมาตัดกับแกนนอน (เอนทัลปี) สามารถอ่านค่าเอนทัลปีของจุดเริ่มต้นกระบวนการได้ ในที่นี้เท่ากับ 395 kJ/kg และถ้าลากเส้นขนานกับแกนนอนมาตัดกับเส้นแกนตั้ง (ความดัน) สามารถอ่านค่าความดันของจุดเริ่มต้นกระบวนการได้ ในที่นี้เท่ากับ 0.2 MPa นอกจากนี้ยังสามารถอ่านค่าปริมาตรจำเพาะของสารทำความเย็น ณ จุดนี้ได้ ตามเส้นปริมาตรจำเพาะคงที่ (เส้นประที่เกือบขนานกับแกนนอน) ในที่นี้เท่ากับ $0.09 \text{ m}^3/\text{kg}$ ค่าปริมาตรจำเพาะประกอบกับค่าความดันมีประโยชน์ในการออกแบบและเลือกใช้งานเครื่องอัด ซึ่งจะได้อ่านถึงในรายละเอียดเกี่ยวกับเครื่องอัด

ในทำนองเดียวกัน ที่จุด 2 สามารถอ่านค่าเอนทัลปีได้เท่ากับ 430 kJ/kg และอ่านค่าความดันได้เท่ากับ 1.1 MPa

ในส่วนผลการทำงานของเครื่องอัดที่ทำให้สารทำความเย็นมีความดันและอุณหภูมิสูงขึ้นนั้น สามารถหาค่าของพลังงานกลของเครื่องอัดที่ใช้ในการอัดสารทำความเย็นนี้ได้จากค่าพลังงานความร้อนของการอัด ซึ่งมีค่าเท่ากับการเพิ่มขึ้นของเอนทัลปีจากจุดเริ่มต้นไปจุดสิ้นสุดของกระบวนการอัด ดังนั้นถ้าให้ w_c คือพลังงานกลต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็นที่เครื่องอัดทำงาน h_1 คือเอนทัลปีที่จุดเริ่มต้น และ h_2 คือเอนทัลปีที่จุดสิ้นสุด จะได้

$$\begin{aligned} w_c &= h_2 - h_1 \\ &= 430 - 395 = 35.0 \text{ kJ/kg} \end{aligned} \quad (1.2)$$

1.3.6.2 กระบวนการคายความร้อน

หลังจากสารทำความเย็นผ่านกระบวนการอัดและออกจากเครื่องอัดที่จุด 2 ณ จุดนี้ถือเป็นจุดเริ่มต้นของกระบวนการคายความร้อนในเครื่องควบแน่น สำหรับจุดสิ้นสุดของกระบวนการคือจุดที่เส้นความดันคงที่ (เส้นขนานกับแกนนอน) ณ จุด 2 ลากไปตัดกับเส้นของเหลวอิ่มตัว (จุด 3 ในรูปที่ 1.10) ซึ่งสามารถอ่านค่าสมบัติต่างๆ ของกระบวนการได้ดังนี้

1) ค่าต่างๆ ณ จุด 2 ของกระบวนการคายความร้อนคือค่าเดียวกับค่าต่างๆ ณ จุด 2 ของกระบวนการอัดสารทำความเย็น

2) ค่าต่างๆ ณ จุด 3 สามารถอ่านค่าได้ในทำนองเดียวกับการอ่านค่า ณ จุด 1 และจุด 2 นั่นคือสามารถอ่านค่าเอนทัลปี ณ จุด 3 ได้เท่ากับ 260 kJ/kg และค่าปริมาตรจำเพาะได้เท่ากับ $0.0009 \text{ m}^3/\text{kg}$

ผลจากการคายความร้อนที่ทำให้สารทำความเย็นเปลี่ยนสภาพจากไอร้อนยิ่งยวดมาเป็นไออิ่มตัว และเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวอิ่มตัวในที่สุด สามารถหาได้จากการลดลงของเอนทัลปีจากจุดเริ่มต้นไปจุดสิ้นสุดของกระบวนการคายความร้อน ดังนั้นถ้าให้ q_c คือพลังงานความร้อนต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็นที่สารทำความเย็นระบายออกที่เครื่องควบแน่น h_2 คือเอนทัลปีที่จุดเริ่มต้น และ h_3 คือเอนทัลปีที่จุดสิ้นสุด จะได้

$$\begin{aligned} q_c &= h_3 - h_2 & (1.3) \\ &= 260 - 430 &= -170 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

(หมายเหตุ: เครื่องหมายลบแสดงการเป็นกระบวนการคายความร้อนจากระบบ)

1.3.6.3 กระบวนการลดความดัน

เมื่อสารทำความเย็นคายความร้อนและออกจากเครื่องควบแน่นที่จุด E ในสถานะของเหลวอิ่มตัว ณ จุดนี้ถือเป็นจุดเริ่มต้นของกระบวนการลดความดัน ให้ความดันต่ำเพื่อเข้าสู่กระบวนการดูดซับความร้อนที่เครื่องระเหย ดังนั้นจุดสิ้นสุดของกระบวนการลดความดันจึงเป็นจุดเริ่มต้นของกระบวนการดูดซับความร้อน (จุด 4 ในรูปที่ 1.10)

ในการกำหนดจุด 4 ให้ลากเส้นจากจุด 3 ขนานกับแกนตั้งลงมาตัดกับเส้นที่ลากจากจุด 1 ขนานกับแกนนอนมาทางซ้าย ณ จุดนี้สามารถอ่านค่าสมบัติต่างๆ ของสารทำความเย็นจากแผนภูมิได้ดังนี้

1) ค่าต่างๆ ณ จุด 3 ของกระบวนการลดความดันคือ ค่าเดียวกับค่าต่างๆ ณ จุด 3 ของกระบวนการคายความร้อน

2) ค่าต่างๆ ณ จุด 4 สามารถอ่านค่าได้ในทำนองเดียวกับการอ่านค่า ณ จุด 1 ดังกล่าวมาแล้ว ดังนั้นสามารถอ่านค่าเอนทัลปี ณ จุด 4 ได้เท่ากับ 260 kJ/kg ซึ่งเท่ากับค่าเอนทัลปี ณ จุด 3 เนื่องจากทั้งจุด 4 และจุด 3 อยู่บนเส้นเอนทัลปีคงที่ที่เส้นเดียวกัน ผลจากการที่จุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของกระบวนการทั้งสองจุดมีค่าเอนทัลปีเท่ากัน จึงสรุปได้ว่าในกระบวนการนี้ไม่เกิดผลของการถ่ายเทพลังงานใดๆ กับระบบทั้งในแง่ของพลังงานกลและพลังงานความร้อน

1.3.6.4 กระบวนการดูดซับความร้อน เมื่อสารทำความเย็นถูกลดความดันลง ณ จุด 4 และเข้าสู่เครื่องระเหย จนกระทั่งออกจากเครื่องระเหยที่จุด 1 ถือว่ากระบวนการเกิดขึ้นครบวัฏจักรสำหรับค่าสมบัติต่างๆ ของกระบวนการ ณ จุด 4 และจุด 1 คือค่าต่างๆ ณ จุด 4 ของกระบวนการลดความดัน และค่าต่างๆ ณ จุด 1 ของกระบวนการอัดสารทำความเย็น ตามลำดับ

ผลจากการดูดซับความร้อนที่ทำให้สารทำความเย็นเปลี่ยนสภาพจากของผสมระหว่างของเหลว-ไอ มาเป็นไออิ่มตัว สามารถหาได้จากการเพิ่มขึ้นของเอนทัลปีจากจุดเริ่มต้นไปจุดสิ้นสุดของกระบวนการดูดซับความร้อน ดังนั้นถ้าให้ q_e คือพลังงานความร้อนต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็นที่สารทำความเย็นดูดซับไว้ที่เครื่องระเหย h_4 คือเอนทัลปีที่จุดเริ่มต้น และ h_1 คือเอนทัลปีที่จุดสิ้นสุด จะได้

$$\begin{aligned}
 q_e &= h_1 - h_4 & (1.4) \\
 &= 395 - 260 &= 135 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}$$

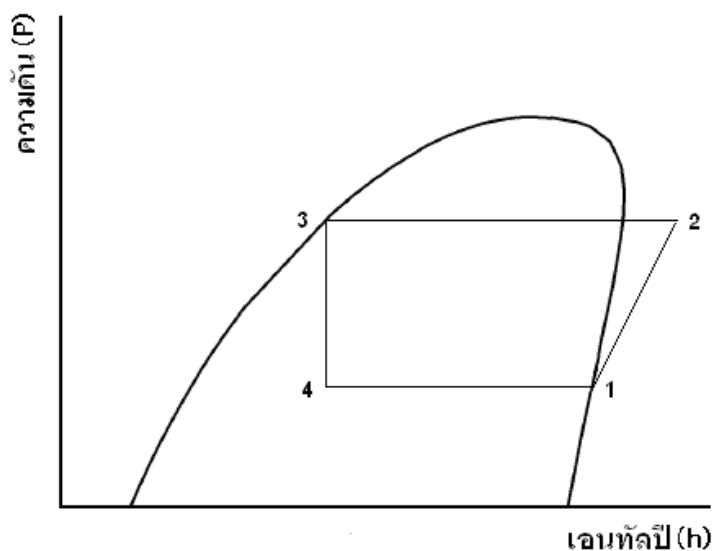
1.3.6.5 สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะการทำความเย็น

ในการเปรียบเทียบการทำความเย็นของระบบการทำความเย็นใดๆ ค่าที่ใช้แสดงประสิทธิภาพของการทำความเย็นที่นำมาพิจารณา คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของสมรรถนะ (Coefficient of performance) หรือ COP ของระบบการทำความเย็นนั้น

ค่า COP คือ อัตราส่วนระหว่างพลังงานความร้อนที่สารทำความเย็นดูดซับไว้ที่เครื่องระเหยกับพลังงานกลที่ใช้ในการขับเคลื่อนอัด ดังนั้น ถ้าพลังงานความร้อนที่สารทำความเย็นดูดซับไว้ที่เครื่องระเหยเท่ากับ 135 kJ/kg และพลังงานกลที่ใช้ในการขับเคลื่อนอัดเท่ากับ 35.0 kJ/kg จะได้ค่า $COP = 135/35.0 = 3.86$ ค่า COP ยิ่งสูงแสดงถึงสมรรถนะของเครื่องทำความเย็นว่ามีสมรรถนะสูงตามไปด้วย

อย่างไรก็ดี การอ่านค่าของกระบวนการต่างๆ ของวัฏจักรการทำความเย็นด้วยแผนภูมิ-เอนทัลปี มีโอกาสของความผิดพลาดมาก เนื่องจากการประมาณด้วยสายตาเป็นหลัก ดังนั้น ในทางปฏิบัติมักใช้ตารางทางเทอร์โมไดนามิกส์ในการหาค่าต่างๆ

ตัวอย่าง 1.1 ให้หา (ก) งานในการอัดสารทำความเย็นชนิด R-134a (ข) พลังงานความร้อนต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็นที่สารทำความเย็นระบายออกที่เครื่องควบแน่น (q_c) (ค) พลังงานความร้อนต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็นที่สารทำความเย็นดูดซับไว้ที่เครื่องระเหย (q_e) และ (ง) สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะการทำความเย็น (COP) ของระบบทำความเย็น ด้วยวิธีใช้ตารางทางเทอร์โมไดนามิกส์ในการหาค่าต่างๆ ถ้าอุณหภูมิของสารทำความเย็นที่เครื่องระเหยเท่ากับ -7°C และอุณหภูมิของสารทำความเย็นที่เครื่องควบแน่นเท่ากับ 43°C



รูปที่ 1.11 แผนภาพ P - h ของตัวอย่าง 1.1

วิธีทำ

จากตารางทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็นชนิด R 134a ในผนวก ก

ที่ -4°C : $P_{\text{sat}} = 0.25274 \text{ MPa}$, $h_f = 44.75 \text{ kJ/kg}$, $h_g = 244.90 \text{ kJ/kg}$, $s_g = 0.9239 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$

ที่ -8°C : $P_{\text{sat}} = 0.21704 \text{ MPa}$, $h_f = 39.54 \text{ kJ/kg}$, $h_g = 242.54 \text{ kJ/kg}$, $s_g = 0.9213 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$

เมื่อนำค่าต่างๆ ที่อุณหภูมิทั้งสองมาบรรณัติไตรยางค์ ได้

ที่ -7°C : $P_{\text{sat}} = 0.25274 \text{ MPa}$, $h_f = 44.75 \text{ kJ/kg}$, $h_g = 244.90 \text{ kJ/kg}$, $s_g = 0.9213 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$

ดังนั้นได้ $P_1 = P_4 = 0.25274 \text{ MPa}$, $h_1 = 244.90 \text{ kJ/kg}$, $s_1 = 0.9213 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$

จากตารางทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็นชนิด R 134a ผนวก ก

ที่ 42°C และที่ 44°C เมื่อนำค่าต่างๆ ที่อุณหภูมิทั้งสองมาบรรณัติไตรยางค์ ได้

ที่ 43°C : $P_{\text{sat}} = 1.10 \text{ MPa}$, $h_f = 110.70 \text{ kJ/kg}$

ดังนั้นได้ $P_2 = P_3 = 1.10 \text{ MPa}$, $h_3 = 110.70 \text{ kJ/kg}$

จากกระบวนการขยายตัวแบบเอนทัลปีคงที่ได้

$h_4 = h_3 = 110.70 \text{ kJ/kg}$

จากตารางทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็นชนิด R 134a (ผนวก ข)

ที่ $P = 1.00 \text{ MPa}$ และที่ $P = 1.20 \text{ MPa}$ และจาก $s_4 = s_1 = 0.9213 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ เมื่อบรรณัติไตรยางค์ ที่

$P_2 = 1.10 \text{ MPa}$ ได้ $h_2 = 274.70 \text{ kJ/kg}$

ดังนั้นสามารถหางานในการอัดสารทำความเย็น (w_c)

$$w_c = h_2 - h_1$$

$$= 274.70 - 244.90 = 29.8 \text{ kJ/kg} \quad \text{ตอบ}$$

พลังงานความร้อนต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็นที่สารทำความเย็นระบายออกที่เครื่องควบแน่น (q_c)

$$q_c = h_3 - h_2$$

$$= 110.70 - 274.70 = -164 \text{ kJ/kg} \quad \text{ตอบ}$$

พลังงานความร้อนต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็นที่สารทำความเย็นดูดซับไว้ที่เครื่องระเหย (q_e)

$$q_e = h_1 - h_4$$

$$= 244.90 - 110.70 = 134.2 \text{ kJ/kg} \quad \text{ตอบ}$$

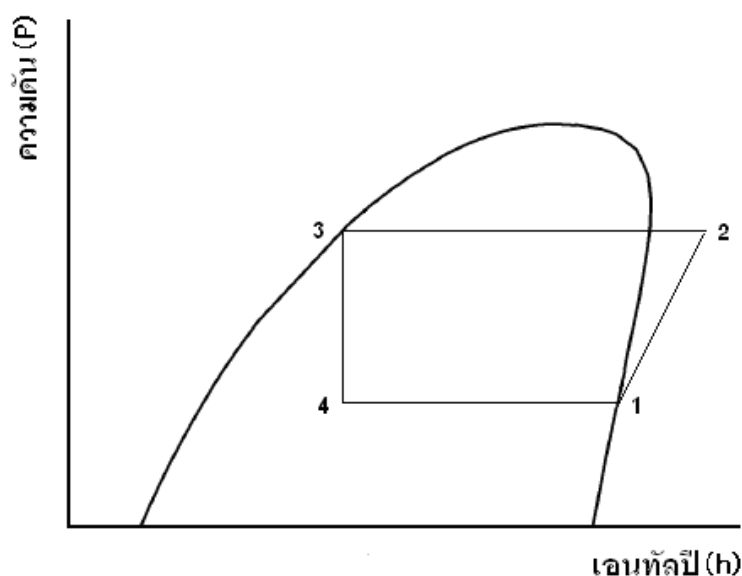
สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะการทำความเย็น (COP) ของระบบทำความเย็น

$$\text{COP} = (h_2 - h_1) / (h_1 - h_4)$$

$$= 134.2 / 29.8 = 4.50 \quad \text{ตอบ}$$

จากค่าต่างๆ ที่หาได้ตามตัวอย่าง 1.1 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าต่างๆ ที่หาได้จากแผนภูมิความดัน-เอนทัลปี ของสารทำความเย็นชนิด R-134a จะเห็นว่าค่าเอนทัลปี ณ จุดต่างๆ มีค่าไม่ตรงกัน สาเหตุเนื่องจากการตั้งค่าเอนทัลปีที่ 0 kJ/kg ของแผนภูมิความดัน-เอนทัลปีกับค่าเอนทัลปีที่ 0 kJ/kg ที่ใช้ในตารางไม่ได้ตั้งค่าไว้ที่จุดเดียวกัน อย่างไรก็ตามก็ไม่มีผลในการคำนวณผลต่าง เพียงแต่ค่า COP ที่ได้ที่ไม่เท่ากันมาจากการอ่านค่าที่ผิดพลาดจากแผนภูมิความดัน-เอนทัลปี

ตัวอย่าง 1.2 โรงงานน้ำแข็งแห่งหนึ่งใช้วัฏจักรการอัดสารทำความเย็นชนิด R-134a ในการทำความเย็น โดยสารทำความเย็นเข้าเครื่องอัด ณ สภาวะไออิ่มตัวที่ 0.15 MPa และออกจากเครื่องควบแน่น ณ สภาวะของเหลวอิ่มตัวที่ 0.7 MPa ถ้าน้ำเข้าเครื่องทำน้ำแข็งที่อุณหภูมิ 30°C และออกที่ -5°C ทั้งนี้อัตราการผลิตน้ำแข็งเท่ากับ 10 kg/hr ให้หาค่าพลังงานที่ใช้ในการผลิตของโรงงานน้ำแข็งนี้ ให้ความร้อนจำเพาะของน้ำแข็งและน้ำเท่ากับ 2.1 และ 4.18 kJ/kg·K ตามลำดับ และความร้อนแฝงในการละลายน้ำแข็งคือ 334 kJ/kg



รูปที่ 1.12 แผนภาพ P - h ของตัวอย่าง 1.2

วิธีทำ

ความร้อนที่ต้องกำจัดออกในการเปลี่ยนน้ำให้เป็นน้ำแข็งที่ -5°C สามารถหาได้ดังนี้

$$Q = mc_{\text{water}} \times (t_{\text{water}} - 0) + mL_f + mc_{\text{ice}} (0 - t_{\text{ice}})$$

เมื่อ m คือ มวลของน้ำหรือมวลของน้ำแข็ง, kg

L_f คือ ความร้อนแฝงในการละลายน้ำแข็ง, kJ/kg

ดังนั้น
$$Q = 1 \times 4.18 \times (30 - 0) + 1 \times 2.10 \times \{0 - (-5)\}$$

$$= 125.4 + 334 + 10.5 = 469.9 \text{ kJ}$$

และเพื่อผลิตน้ำแข็งจำนวน 10 kg/hr ชีตความสามารถในการทำความเย็นที่ต้องการคือ

$$\frac{10}{3600} \times 469.9 = 1.30 \text{ kW}$$

จากรูปที่ 1.12 และตารางของสารทำความเย็นชนิด R 134a ในผนวก ก ได้

$$h_1 = 389.11 \text{ kJ/kg}, h_2 = 425 \text{ kJ/kg}, h_3 = 236 \text{ kJ/kg} = h_4$$

ขีดความสามารถในการทำความเย็นที่ต้องการที่เครื่องระเหย (Q_e)

$$Q_e = \dot{m}(h_1 - h_4)$$

$$1.30 \text{ kW} = \dot{m}(389.11 - 236)$$

ดังนั้น

$$\dot{m} = 0.0084 \text{ kg/s}$$

ตอบ

งานของเครื่องอัด (\dot{W})

$$\dot{W} = \dot{m}(h_2 - h_1) = 0.0084(425 - 389.11)$$

$$= 0.301 \text{ kW}$$

ตอบ

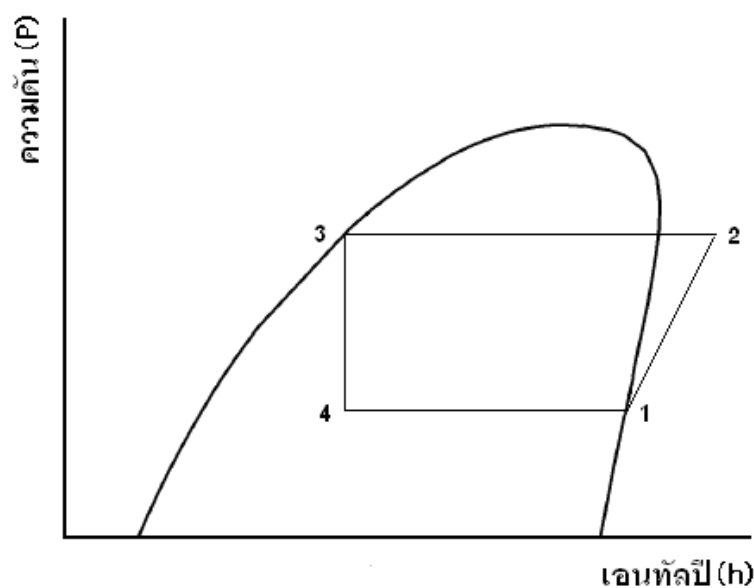
สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะการทำความเย็น (COP) ของระบบทำความเย็น

$$\text{COP} = Q_e / \dot{W}$$

$$= 1.30 / 0.301 = 4.31$$

ตอบ

ตัวอย่าง 1.3 ตู้เย็นเครื่องหนึ่งใช้สารทำความเย็นชนิด R-134a เป็นของไหลโดยทำงานระหว่าง 0.12 และ 0.7 MPa ตามวัฏจักรดังแสดงในรูปที่ 1.13 ถ้าอัตราการไหลของสารทำความเย็นเท่ากับ 0.06 kg/s ให้หา (ก) อัตราการถ่ายเทความร้อนออกจากพื้นที่ทำความเย็นที่เครื่องระเหย (Q_e) และกำลังงานที่ใส่ให้เครื่องอัด (\dot{W}) (ข) พลังงานความร้อนที่สารทำความเย็นระบายออกที่เครื่องควบแน่น (Q_c) และ (ค) สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะการทำความเย็น (COP) ของระบบทำความเย็น



รูปที่ 1.13 แผนภาพ P - h ของตัวอย่าง 1.3

วิธีทำ

จากรูปที่ 1.13 และตารางของสารทำความเย็นชนิด R 134a ในผนวก ก ได้

$$h_1 = 385.43 \text{ kJ/kg}, h_2 = 428 \text{ kJ/kg}, h_3 = 236 \text{ kJ/kg} = h_4$$

ขีดความสามารถในการทำความเย็นที่ต้องการที่เครื่องระเหย (Q_e)

$$\begin{aligned} Q_e &= \dot{m}(h_1 - h_4) \\ &= 0.06 (385.43 - 236) \\ &= 8.96 \text{ kW} \end{aligned}$$

ตอบ

กำลังงานของเครื่องอัด (\dot{W})

$$\begin{aligned} \dot{W} &= \dot{m}(h_2 - h_1) = 0.06(428 - 385.43) \\ &= 2.55 \text{ kW} \end{aligned}$$

ตอบ

สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะการทำความเย็น (COP) ของระบบทำความเย็น

$$\begin{aligned} \text{COP} &= Q_e / \dot{W} \\ &= 8.96 / 2.55 \\ &= 3.51 \end{aligned}$$

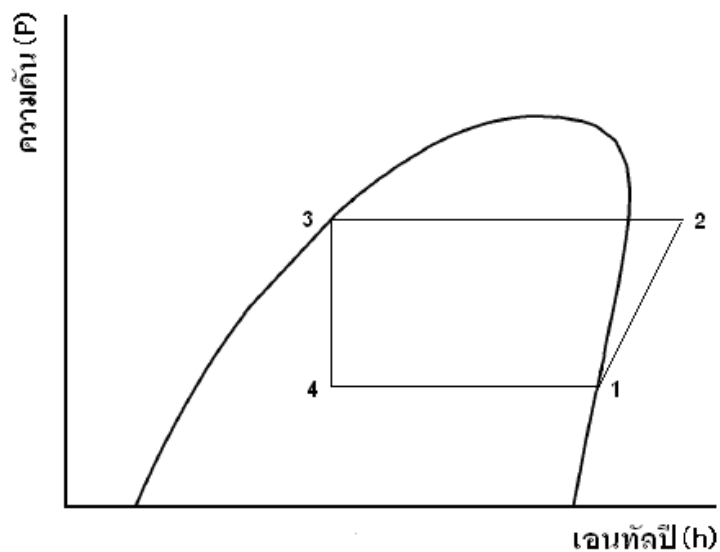
ตอบ

ตัวอย่าง 1.4 ในระบบการทำความเย็นระบบหนึ่งที่ใช้สารทำความเย็นชนิด R-134a เป็นของไหล ถ้าต้องการให้ระบบทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ ควรให้เครื่องควบแน่นทำงานที่ความดันเท่าไรระหว่าง 0.8 MPa หรือ 1.0 MPa ทั้งนี้อุณหภูมิของตัวกลางที่ใช้ในการหล่อเย็นคือ 30°C

ตอบ

โดยทั่วไปผลต่างของอุณหภูมิของการถ่ายเทความร้อนที่มีประสิทธิภาพที่ดีอยู่ระหว่าง $7 - 10^\circ\text{C}$ โดยค่าที่ยิ่งน้อยยิ่งดี แต่ขนาดเครื่องควบแน่นต้องใหญ่ขึ้น ในที่นี้ถ้าให้ผลต่างของอุณหภูมิเท่ากับ 7°C ดังนั้นอุณหภูมิของสารทำความเย็นควรเป็น 37°C ซึ่งความดันของสารทำความเย็นที่สมนัยกับค่าอุณหภูมินี้คือ 0.937 MPa ดังนั้นค่าความดันที่ใช้ในระบบควรให้เครื่องควบแน่นทำงานที่ความดันเท่ากับ 1.0 MPa

ตัวอย่าง 1.5 ระบบการทำความเย็นระบบหนึ่งทำงานด้วยการใช้สารทำความเย็นชนิด R-134a เป็นของไหลทำงาน โดยมีขีดความสามารถในการทำความเย็นเท่ากับ 10 kW ถ้าสารทำความเย็นเข้าสู่เครื่องอัดด้วยสภาวะไออิ่มตัวที่ 0.14 MPa และอัดอย่างไอเซนโทรปิกเป็น 1 MPa ถ้าสารทำความเย็นออกจากเครื่องควบแน่นด้วยสภาวะของเหลวอิ่มตัวและขยายตัวผ่านวาล์วลดความดันด้วยกระบวนการเอนทัลปีคงที่ จงหา (ก) คุณภาพของสารทำความเย็น ณ ทางออกของวาล์วลดความดัน (ข) กำลังงานที่ใช้ในการอัดสารทำความเย็น (\dot{W}) และ (ค) สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะการทำความเย็น (COP) ของระบบทำความเย็นนี้



รูปที่ 1.14 แผนภาพ P - h ของตัวอย่าง 1.5

วิธีทำ

จากรูปที่ 1.14 และตารางทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็นชนิด R 134a ใน
ผนวก ก ได้

$$h_1 = 387.89 \text{ kJ/kg}, h_2 = 435 \text{ kJ/kg}, h_3 = 256.35 \text{ kJ/kg} = h_4$$

คุณภาพของสารทำความเย็น ณ ทางออกของวาล์วลดความดัน คือ

$$x = \frac{h_4 - h_f}{h_2 - h_f} = \frac{256.35 - 176.39}{435 - 176.39} = 0.37$$

ขีดความสามารถในการทำความเย็นที่เครื่องระเหย (Q_e)

$$Q_e = \dot{m}(h_1 - h_4)$$

$$10 \text{ kW} = \dot{m} (387.89 - 256.35) \text{ kJ/kg}$$

ได้ $\dot{m} = 0.076 \text{ kg/s}$

กำลังงานของเครื่องอัด (\dot{W})

$$\dot{W} = \dot{m}(h_2 - h_1) = 0.076(435 - 387.89)$$

$$= 3.58 \text{ kW}$$

ตอบ

สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะการทำความเย็น (COP) ของระบบทำความเย็น

$$\text{COP} = Q_e / \dot{W}$$

$$= 10 / 3.58$$

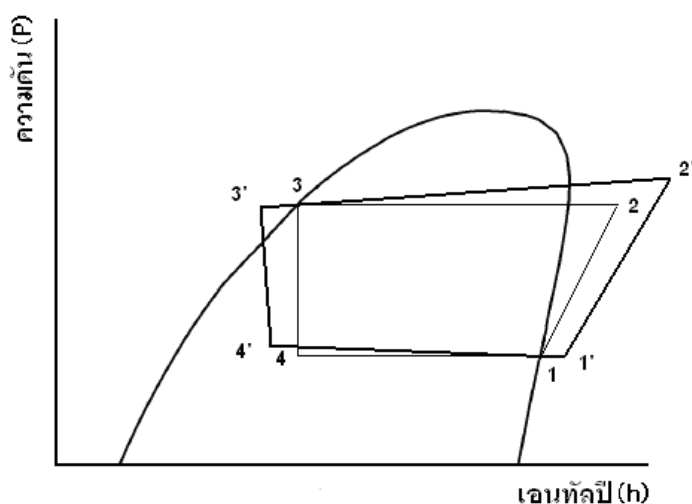
$$= 2.79$$

ตอบ

1.4 วัฏจักรการทำความเย็นแบบอัดไอในการทำงานจริง

ระบบในทางปฏิบัติในการทำงานจริงดังแสดงในรูปที่ 1.14 วัฏจักร $1'-2'-3'-4'$ จะแตกต่างจากวัฏจักรอุดมคติพื้นฐาน 1-2-3-4 อยู่บ้าง เนื่องจากผลของความดันตกที่เกิดขึ้นจากการไหลของสารทำความเย็น รวมทั้งผลที่เกิดขึ้นจากการถ่ายเทความร้อนระหว่างระบบกับสิ่งแวดล้อม ทั้งนี้โดยปกติอุณหภูมิของสารทำความเย็นของวัฏจักรในการทำงานจริงที่ออกจากเครื่องควบแน่นมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิตัว ในลักษณะของเหลวเย็นยิ่ง เพื่อให้มั่นใจว่าไม่มีไอสารทำความเย็นเข้าสู่วาล์วขยายตัวรวมทั้งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำความเย็นด้วย นอกจากนี้สารทำความเย็นที่ออกจากเครื่องระเหยมีอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิตัวด้วย เพื่อให้มั่นใจว่ามีเฉพาะไอสารทำความเย็นแห่งเท่านั้นที่เข้าสู่เครื่องอัด เนื่องจากสารทำความเย็นในสถานะของเหลว ถ้าปะปนไปกับไอสารทำความเย็นอาจทำให้เสียหายต่อเครื่องอัดได้ สุดท้ายกระบวนการอัดไม่ได้เป็นกระบวนการไอเซนโทรปิกอย่างสมบูรณ์ จากผลของแรงเสียดทานในระบบ และกระบวนการขยายตัวในวาล์วขยายตัวเพื่อลดความดัน สารทำความเย็นไม่ได้เป็นกระบวนการในลักษณะเอนทัลปีคงที่อย่างสมบูรณ์ด้วย จากผลของแรงเสียดทานในระบบเช่นกัน

ตัวอย่าง 1.6 จากรูปที่ 1.15 วัฏจักร $1'-2'-3'-4'$ สารทำความเย็นชนิด R-134a เข้าเครื่องอัดในลักษณะไอร้อนยิ่งยวดด้วยความดัน 0.14 MPa และอุณหภูมิ -12°C ด้วยอัตราการไหล 0.076 kg/s และออกที่ความดัน 1 MPa และอุณหภูมิเท่ากับ 70°C จากนั้นสารทำความเย็นระบายออกที่เครื่องควบแน่นจนมีอุณหภูมิเท่ากับ 36°C และความดัน 1 MPa ก่อนถูกลดความดันในวาล์วขยายตัวให้เหลือ 0.15 MPa ถ้าไม่คิดการถ่ายเทความร้อนใดๆ และความดันตกในระบบท่อที่เชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ต่างๆ ให้หา (ก) พลังงานความร้อนที่สารทำความเย็นดูดซับไว้ที่เครื่องระเหย (Q_e) (ข) งานในการอัดสารทำความเย็น (W_c) (ค) ประสิทธิภาพในการอัดของเครื่องอัด (η_c) และ (ง) สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะการทำความเย็น (COP) ของระบบทำความเย็น



รูปที่ 1.15 แผนภาพ P - h ของวัฏจักรในทางปฏิบัติในการทำงานจริง

วิธีทำ

จากตารางทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็นชนิด R 134a ในผนวก ก และรูปที่

1.15 วัฏจักร 1'-2'-3'-4' สามารถหาเอนทัลปีที่สภาวะต่างๆ ได้ดังนี้

$$\text{ที่ } T_{1'} = -12^{\circ}\text{C} \quad \text{และ } P_{1'} = 0.14 \text{ MPa} \quad \text{ได้ } h_{1'} = 241.7 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{ที่ } T_{2'} = 70^{\circ}\text{C} \quad \text{และ } P_{2'} = 1.0 \text{ MPa} \quad \text{ได้ } h_{2'} = 302.34 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{ที่ } T_{3'} = 36^{\circ}\text{C} \quad \text{และ } P_{3'} = 1.0 \text{ MPa} \quad \text{ได้ } h_{3'} = 100.25 \text{ kJ/kg}$$

จากกระบวนการขยายตัวแบบเอนทัลปีใกล้เคียงคงที่ได้

$$h_{4'} = h_{3'} = 100.25 \text{ kJ/kg}$$

ดังนั้นสามารถหา

(ก) พลังงานความร้อนต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็นที่สารทำความเย็นดูดซับไว้ที่เครื่องระเหย (Q_e) ได้

$$\begin{aligned} Q_e &= \dot{m}(h_{1'} - h_{4'}) \\ &= 0.076(241.7 - 100.25) = 10.75 \quad \text{kW} \end{aligned} \quad \text{ตอบ}$$

(ข) งานในการอัดสารทำความเย็น (W_c) ได้

$$\begin{aligned} W_c &= \dot{m}(h_{2'} - h_{1'}) \\ &= 0.076(302.34 - 241.7) = 4.61 \quad \text{kW} \end{aligned} \quad \text{ตอบ}$$

(ค) ประสิทธิภาพในการอัดของเครื่องอัด (η_c) ได้

$$\begin{aligned} \eta_c &= (h_{2's} - h_{1'}) / (h_{2'} - h_{1'}) \\ &= (283.87 - 241.7) / (302.34 - 241.7) \\ &= 0.695 \quad \text{หรือ} \quad 69.5\% \end{aligned} \quad \text{ตอบ}$$

(ง) สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะการทำความเย็น (COP) ของระบบทำความเย็น ได้

$$\begin{aligned} \text{COP} &= Q_e / W_c \\ &= 10.75 / 4.61 = 2.33 \end{aligned} \quad \text{ตอบ}$$

แบบฝึกหัดบทที่ 1

1. จงอธิบายพอสังเขปถึงวิธีการและจุดประสงค์ของการทำความเย็น
2. จงอธิบายความแตกต่างระหว่างการทำความเย็นแบบดูดซึมกับแบบอัดไอ
3. จงอธิบายความแตกต่างระหว่างการทำความเย็นแบบไอน้ำพ่นกับแบบอัดไอ
4. จงอธิบายวัตถุประสงค์ของอุปกรณ์ต่อไปนี้ในระบบการทำความเย็นแบบอัดไอ (ก) เครื่องอัด (ข) เครื่องควบแน่น (ค) วาล์วขยายตัว (ง) เครื่องระเหย (จ) ถังแยกน้ำมัน และ (ฉ) ถังพักสารทำความเย็นเหลว
5. จงเขียนวัฏจักรการทำความเย็นแบบอัดไอเชิงอุณหพลศาสตร์บนแผนภาพความดัน - เอนทัลปี และแผนภาพอุณหภูมิ - เอนโทรปี พร้อมทั้งอธิบายการทำงานของวัฏจักร
6. ในระบบการทำความเย็นระบบหนึ่งที่ใช้สารทำความเย็นชนิด R-134a เป็นของไหล ถ้าต้องการให้ระบบทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ ควรให้เครื่องควบแน่นทำงานที่ความดันเท่าไร ทั้งนี้อุณหภูมิของตัวกลางที่ใช้ในการหล่อเย็นคือ 35°C
7. ระบบการทำความเย็นแบบอัดไอรบบหนึ่งใช้สารทำความเย็นชนิด R-134a ถ้าขีดความสามารถในการทำความเย็นของเครื่องระเหยมีค่าเท่ากับ 6 kW สารทำความเย็นเข้าสู่เครื่องอัดด้วยสถานะไออิ่มตัวที่ความดัน 0.14 MPa และถูกอัดด้วยกระบวนการเอนโทรปีคงที่จนมีความดันเท่ากับ 0.8 MPa หลังจากนั้นสารทำความเย็นไหลผ่านเครื่องควบแน่นและออกด้วยสถานะของเหลวอิ่มตัวเข้าสู่ วาล์วขยายตัวซึ่งถูกทำให้ขยายตัวอย่างแอดิเอแบติก จงวาดแผนภาพความดัน - เอนทัลปี และแผนภาพอุณหภูมิ - เอนโทรปี ของวัฏจักรทำความเย็นนี้พร้อมทั้งคำนวณหา (ก) คุณภาพของสารทำความเย็นหลังจากผ่านวาล์วขยายตัว และ (ข) สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะของวัฏจักร
8. ระบบการทำความเย็นระบบหนึ่งทำงานด้วยการใช้สารทำความเย็นชนิด R-134a เป็นของไหลทำงาน โดยมีขีดความสามารถในการทำความเย็นเท่ากับ 20 kW ถ้าสารทำความเย็นเข้าสู่เครื่องอัดด้วยสถานะไออิ่มตัวที่อุณหภูมิ -18°C และอัดอย่างไอเซนโทรปิกเป็น 1 MPa ถ้าสารทำความเย็นออกจากเครื่องควบแน่นด้วยสถานะของเหลวอิ่มตัวและขยายตัวผ่านวาล์วลดความดันด้วยกระบวนการเอนทัลปีคงที่ จงหา (ก) คุณภาพของสารทำความเย็น ณ ทางออกของวาล์วลดความดัน (ข) กำลังงานที่ใช้ในการอัดสารทำความเย็น (\dot{W}) และ (ค) สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะการทำความเย็น (COP) ของระบบทำความเย็นนี้
9. ห้องเย็นห้องหนึ่งใช้สารทำความเย็นชนิด R-134a เป็นของไหลโดยทำงานระหว่าง 0.08 และ 1.2 MPa ถ้าอัตราการไหลของสารทำความเย็นเท่ากับ 0.6 kg/s ให้หา (ก) อัตราการถ่ายเทความร้อนออกจากพื้นที่ทำความเย็นที่เครื่องระเหย (Q_c) และกำลังงานที่ใส่ให้เครื่องอัด (\dot{W}) (ข) พลังงานความร้อนที่สารทำความเย็นระบายออกที่เครื่องควบแน่น (Q_c) และ (ค) สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะการทำความเย็น (COP) ของระบบทำความเย็น

10. โรงงานน้ำแข็งแห่งหนึ่งใช้วัฏจักรการอัดสารทำความเย็นชนิด R-134a ในการทำความเย็น โดยสารทำความเย็นเข้าเครื่องอัด ณ สภาวะไออิ่มตัวที่อุณหภูมิ -29°C และออกจากเครื่องควบแน่น ณ สภาวะของเหลวอิ่มตัวที่ 1.2 MPa ถ้าน้ำเข้าเครื่องทำน้ำแข็งที่อุณหภูมิ 25°C และออกที่ -8°C ทั้งนี้ อัตราการผลิตน้ำแข็งเท่ากับ 150 kg/hr ให้หาค่าพลังงานที่ใช้ในการผลิตของโรงงานน้ำแข็งนี้ ให้ ความร้อนจำเพาะของน้ำแข็งและน้ำเท่ากับ 2.1 และ $4.18\text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ ตามลำดับ และความร้อนแฝง ในการละลายน้ำแข็งคือ 334 kJ/kg
11. โรงงานทำไอศกรีมแห่งหนึ่งใช้วัฏจักรการอัดสารทำความเย็นชนิด R-134a ในการทำความเย็น โดยสารทำความเย็นเข้าเครื่องอัด ณ สภาวะไออิ่มตัวที่ 0.05 MPa และออกจากเครื่องควบแน่น ณ สภาวะของเหลวอิ่มตัวที่ 0.9 MPa ถ้าไอศกรีมเหลวเข้าเครื่องทำไอศกรีมที่อุณหภูมิ 20°C และออกที่ -25°C ทั้งนี้ อัตราการผลิตไอศกรีมเท่ากับ 70 kg/hr ให้หาค่าพลังงานที่ใช้ในการผลิตของโรงงาน ไอศกรีมนี้ ให้ความร้อนจำเพาะของไอศกรีมแข็งและไอศกรีมเหลวเท่ากับ 2.9 และ $5.1\text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ ตามลำดับ และความร้อนแฝงในการละลายไอศกรีมแข็งคือ 544 kJ/kg
12. ห้องเย็นแห่งหนึ่งใช้วัฏจักรการอัดสารทำความเย็นชนิด R-134a ในการทำความเย็น โดยสารทำความเย็นเข้าเครื่องอัด ณ สภาวะไออิ่มตัวที่ 0.01 MPa และออกจากเครื่องควบแน่น ณ สภาวะของเหลวอิ่มตัวที่ 0.8 MPa ถ้าเครื่องอัดสารทำความเย็นเท่ากับ 1.15 kg/s ให้หาค่าพลังงานที่ใช้ในการผลิตของห้องเย็นนี้ และสัมประสิทธิ์ของสมรรถนะของวัฏจักร
13. ระบบการทำความเย็นแบบอัดไอรอบหนึ่งใช้สารทำความเย็นชนิด R-134a ถ้าขีดความสามารถในการทำความเย็นของเครื่องระเหยมีค่าเท่ากับ 180 kW สารทำความเย็นเข้าสู่เครื่องอัดด้วยสภาวะ ไออิ่มตัวที่อุณหภูมิ -10°C และถูกอัดด้วยกระบวนการเอนโทรปีคงที่ซึ่งมีผลให้สารทำความเย็น ควบแน่นที่เครื่องควบแน่นด้วยอุณหภูมิ 40°C และออกด้วยสภาวะของเหลวอิ่มตัวเข้าสู่วาล์ว ขยายตัวซึ่งถูกทำให้ขยายตัวอย่างแอดิเอแบติก จงวาดแผนภาพความดัน – เอนทัลปี และแผนภาพ อุณหภูมิ – เอนโทรปี ของวัฏจักรทำความเย็นนี้พร้อมทั้งคำนวณหา (ก) คุณภาพของสารทำความเย็นหลังจากผ่านวาล์วขยายตัว และ (ข) สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะของวัฏจักร
14. จากรูปที่ 1.12 วัฏจักร 1'-2'-3'-4' สารทำความเย็นชนิด R-134a เข้าเครื่องอัดในลักษณะไอร้อน ยิงยวดด้วยความดัน 0.24 MPa และอุณหภูมิ -12°C ด้วยอัตราการไหล 0.9 kg/s และออกที่ ความดัน 1.8 MPa และอุณหภูมิเท่ากับ 70°C จากนั้นสารทำความเย็นระบายออกที่เครื่องควบแน่น จนมีอุณหภูมิเท่ากับ 44°C และความดัน 1.8 MPa ก่อนถูกลดความดันในวาล์วขยายตัวให้เหลือ 0.25 MPa ถ้าไม่คิดการถ่ายเทความร้อนใดๆ และความดันลดยในระบบท่อที่เชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ ต่างๆ ให้หา (ก) พลังงานความร้อนที่สารทำความเย็นดูดซับไว้ที่เครื่องระเหย (Q_E) (ข) งานในการอัด สารทำความเย็น (W_C) (ค) ประสิทธิภาพในการอัดของเครื่องอัด (η_C) และ (ง) สัมประสิทธิ์ของ สมรรถนะการทำความเย็น (COP) ของระบบทำความเย็น

15. จากรูปที่ 1.12 วัฏจักร 1'-2'-3'-4' สารทำความเย็นชนิด R-134a เข้าเครื่องอัดในลักษณะไอร้อน ยิงยวดด้วยความดัน 0.2 MPa และอุณหภูมิ -14°C ด้วยอัตราการไหล 1.0 kg/s และออกที่ความดัน 2.0 MPa และอุณหภูมิเท่ากับ 70°C จากนั้นสารทำความเย็นระบายออกที่เครื่องควบแน่นจนมีอุณหภูมิเท่ากับ 40°C และความดัน 1.8 MPa ก่อนถูกลดความดันในวาล์วขยายตัวให้เหลือ 0.22 MPa ถ้าไม่คิดการถ่ายเทความร้อนใดๆ และความดันลดในระบบท่อที่เชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ต่างๆ ให้หา (ก) พลังงานความร้อนที่สารทำความเย็นดูดซับไว้ที่เครื่องระเหย (Q_E) (ข) งานในการอัดสารทำความเย็น (W_C) (ค) ประสิทธิภาพในการอัดของเครื่องอัด (η_C) และ (ง) สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะการทำความเย็น (COP) ของระบบทำความเย็น

บทที่ 2

สารทำความเย็น

2.1 วิวัฒนาการของสารทำความเย็น

สารทำความเย็น คือสารที่ใช้เป็นตัวกลางในการทำความเย็นด้วยการดูดซับความร้อนจากวัตถุหรือสารอื่นๆ สำหรับในระบบการทำความเย็นแบบอัดไอที่กำลังพิจารณานี้ สารทำความเย็นหมายถึงของไหลทำงานของวัฏจักรในฐานะเป็นตัวกลางในการดูดซับความร้อนด้วยกระบวนการกลายเป็นไอที่ความดันต่ำ (ประมาณ 50 – 240 kPa) และอุณหภูมิต่ำ (ประมาณ -40 ถึง -5°C) และคายความร้อนทิ้งด้วยกระบวนการควบแน่นที่ความดันสูง (ประมาณ 900 – 1500 kPa) และอุณหภูมิสูง (ประมาณ 40 – 60°C) ตามลำดับสลับกันไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของสารทำความเย็นและสภาวะการใช้งาน

ตั้งแต่มีการสร้างเครื่องทำความเย็นแบบอัดไอเครื่องแรกในปี ค.ศ.1834 โดย Jacob Perkins ในตอนเริ่มต้นได้ใช้น้ำและกรดกำมะถันเป็นของไหลทำงาน จนกระทั่งปี ค.ศ.1866 จึงได้เปลี่ยนมาใช้สารผสมที่เรียกว่า chemogene (ประกอบด้วย petrol ether และ naphtha) และคาร์บอนไดออกไซด์ในฐานะเป็นสารทำความเย็นแทน ต่อมาในปี ค.ศ.1873 ได้มีการนำแอมโมเนียมาใช้เป็นสารทำความเย็นในเครื่องทำความเย็นแบบอัดไอเป็นครั้งแรกหลังจากที่นำมาใช้ในเครื่องทำความเย็นแบบดูดซึมในปี ค.ศ.1859

ในปี ค.ศ.1875 และ 1878 ได้มีการนำ sulfur dioxide และ methyl ether มาใช้เป็นสารทำความเย็นตามลำดับ ตารางที่ 2.1 แสดงให้เห็นถึงรายชื่อสารทำความเย็นที่มีการพัฒนาขึ้นตั้งแต่เริ่มต้นจนถึง ปี ค.ศ.1926

อย่างไรก็ดี สารทำความเย็นในยุคแรกๆ ส่วนใหญ่สามารถติดไฟได้ หรือเป็นพิษ หรือทั้งสามสามารถติดไฟและเป็นพิษ ดังนั้นจึงเกิดอุบัติเหตุขึ้นอยู่เสมอๆ จนกระทั่งในปี ค.ศ.1926 Thomas Midgley จึงสามารถพัฒนาสารทำความเย็นที่ไม่ติดไฟ และเกือบไม่เป็นพิษหากไม่สูดดมโดยตรงหรือไม่สัมผัสกับเปลวไฟ ไม่กัดกร่อนและสามารถเข้ากันได้ดีกับวัสดุอื่นๆ ในระบบ นอกจากนี้ยังเป็นสารที่มีเสถียรภาพมาก รวมทั้งมีสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์และทางฟิสิกส์ในการใช้งานที่ดีมาก ได้แก่ dichlorodifluoromethane หรือที่รู้จักกันในชื่อ ฟรีออน 12 หรือ R-12 โดยได้ประกาศการค้าค้นพบอย่างเป็นทางการเมื่อเดือนเมษายน ค.ศ.1930 และบริษัทดูปองท์ (DuPont) ผลิตขึ้นเพื่อจำหน่ายเป็นครั้งแรกในราวต้น ค.ศ.1931 (พ.ศ.2474) ในชื่อ ฟรีออน 12 (F-12) หลังจากนั้นได้พัฒนาสารทำความเย็นตระกูล chlorofluorocarbon (CFC) ตัวอื่นๆ ดังนี้ R-11 ในปี ค.ศ.1932, R-114 ในปี ค.ศ.1933, และ R-113 ในปี ค.ศ.1934 สำหรับสารทำความเย็นตระกูล hydrochlorofluorocarbon (HCFC) ตัวแรกคือ R-22 พัฒนาขึ้นในปี ค.ศ.1936 และได้มีการพัฒนาสารทำความเย็นตระกูล CFC สารทำความเย็นตระกูล HCFC

และอื่นๆ รวมทั้งสารทำความเย็นชนิดผสมระหว่างสารทำความเย็นในทั้งสองตระกูลหรือสารอื่นขึ้นอย่าง
ต่อเนื่อง

ตารางที่ 2.1 รายชื่อสารทำความเย็นที่มีการพัฒนาขึ้นตั้งแต่เริ่มต้นจนถึง ปี ค.ศ.1926

ปี ค.ศ.	สารทำความเย็น	สูตรเคมี หรือ ผลิตภัณฑ์จาก
1830s	Caoutchoucine	การกลั่นยางอินเดีย
	Sulfuric (ethyl) ether	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{-O-CH}_2\text{-CH}_3$
1840s	Methyl ether	$\text{CH}_3\text{-O-CH}_3$
1850	Water / sulfuric acid	$\text{H}_2\text{O} / \text{H}_2\text{SO}_4$
1856	Ethyl alcohol	$\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-OH}$
1859	Ammonia / water	$\text{NH}_3 / \text{H}_2\text{O}$
1866	Chymogene	Petrol ether and naphtha (hydrocarbon)
	Carbon dioxide	CO_2
1860s	Ammonia (R-717)	NH_3
	Methyl amine (R-630)	$\text{CH}_3(\text{NH}_2)$
	Ethyl amine (R-631)	$\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-(NH}_2)$
1870	Methyl formate (R-611)	HCOOCH_3
1875	Sulfur dioxide (R-764)	SO_2
1878	Methyl chloride (R-40)	CH_3Cl
1870s	Ethyl chloride (R-160)	$\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{Cl}$
1891	Blends of sulfuric acid with hydrocarbons	$\text{H}_2\text{SO}_4, \text{C}_4\text{H}_{10}, \text{C}_5\text{H}_{12}, (\text{CH}_3)_2\text{CH-CH}_3$
1900s	Ethyl bromide (R-160B1)	$\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{Br}$
1912	Carbon tetrachloride	CCl_4
	Water vapor (R-718)	H_2O
1920s	Isobutane (R-600a)	$(\text{CH}_3)_2\text{CH-CH}_3$
	Propane (R-290)	$\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH}_3$
1922	Dielene (R-1130)	CHCl=CHCl
1923	Gasoline	Hydrocarbons
1925	Trielene (R-1120)	CHCl=CCl_2
1926	Methylene chloride (R-30)	CH_2Cl_2

2.2 ผลกระทบของสารทำความเย็นตระกูล CFC ต่อสภาพแวดล้อม

หลังจากใช้งานสารทำความเย็นในตระกูล CFC อยู่ยาวนานมากกว่า 40 ปี ในต้นทศวรรษที่ 1970s นักวิทยาศาสตร์ได้ค้นพบว่าสารทำความเย็นในตระกูลนี้มีผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมในชั้นบรรยากาศอย่างมาก เนื่องจากความมีเสถียรภาพมากของสารทำความเย็นทำให้มีอายุอยู่ในบรรยากาศได้นาน และการที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบจึงเป็นตัวการในการทำลายโอโซนในบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์ (ชั้นบรรยากาศที่ความสูงระหว่าง 12 - 50 กิโลเมตรจากพื้นผิวโลก) ซึ่งหน้าที่ของโอโซนในบรรยากาศชั้นนี้เป็นประโยชน์ต่อสิ่งมีชีวิต ที่สำคัญได้แก่ การเป็นสารดูดซับรังสีอัลตราไวโอเล็ตไว้ประมาณร้อยละ 95 ซึ่งรังสีอัลตราไวโอเล็ตนี้หากส่งผ่านมาสู่พื้นผิวโลกมากจะเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตบนผิวโลก รวมทั้งโอโซนยังเป็นตัวกำหนดอุณหภูมิของชั้นบรรยากาศด้วยการแผ่ความร้อนที่ดูดซับไว้ให้กระจายในชั้นบรรยากาศ ทำให้อุณหภูมิพื้นผิวโลกไม่ร้อนเกินไปในตอนกลางวันและไม่เย็นเกินไปในตอนกลางคืน

นอกจากทำให้โอโซนในชั้นบรรยากาศลดลงแล้ว สารทำความเย็นตระกูล CFC ยังมีส่วนทำให้โลกมีอุณหภูมิสูงขึ้นจากการที่ก๊าซแผ่ปกคลุมในลักษณะภาวะเรือนกระจก (Greenhouse gases) อีกด้วย ทำให้รังสีความร้อนจากพื้นผิวโลกไม่สามารถกระจายออกสู่ชั้นบรรยากาศชั้นสูงๆ ขึ้นไปได้

ในส่วนของสารทำความเย็นตระกูล HCFC เนื่องจากมีระยะเวลาในการคงสภาพอยู่ในบรรยากาศสั้นกว่า รวมทั้งยังมีไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบที่ช่วยลดปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดคลอรีนได้น้อยลง ดังนั้นถึงแม้จะมีคลอรีนเป็นองค์ประกอบเช่นเดียวกับสารทำความเย็นตระกูล CFC แต่มีคลอรีนไปทำลายโอโซนได้น้อยกว่ามาก อย่างไรก็ตามก็ยังมีคลอรีนบางส่วนเกิดขึ้น และมีผลต่อการทำลายโอโซนในชั้นบรรยากาศเช่นกัน

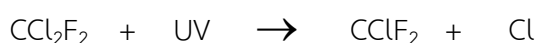
จากการค้นพบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมดังกล่าวทำให้มีความพยายามที่จะแสวงหาสารทำความเย็นตัวใหม่ๆ ที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมให้น้อยที่สุด ในขณะที่มีความเป็นพิษและผลกระทบต่อด้านอื่นน้อยเช่นกัน แต่ยังคงมีสมบัติในการทำความเย็นได้ดี ผลการวิจัยและพัฒนาพบว่าสารทำความเย็นตระกูล HFC (hydrofluorocarbon) เป็นสารทำความเย็นที่สามารถนำมาทดแทน สารทำความเย็นตระกูล CFC และสารทำความเย็นตระกูล HCFC ได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามจำเป็นต้องดัดแปลงระบบบางส่วน หรือออกแบบอุปกรณ์ในระบบใหม่หมด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสารทำความเย็นที่ใช้อยู่เดิม

จากการพัฒนาสารทำความเย็นตระกูล HFC ได้เป็นผลสำเร็จและเพื่อเป็นการกำหนดระยะเวลาในการเลิกใช้และเลิกผลิตสารทำความเย็นตระกูล CFC และ HCFC รวมทั้งสารอื่นที่มีผลต่อการทำลายชั้นโอโซน จึงเกิดการประชุมระหว่างประเทศว่าด้วยการกำหนดระยะเวลาใช้งานสารที่มีผลต่อการทำลายชั้นโอโซนขึ้นที่นครมอนทรีออล ประเทศแคนาดา และได้มีการลงนามข้อตกลงเลิกใช้สารที่มีผลต่อการทำลายชั้นโอโซน ซึ่งเรียกว่า พิธีสารมอนทรีออลว่าด้วยการเลิกใช้สารทำลายชั้นโอโซน (The Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer) ขึ้นเมื่อ ค.ศ.1987 (พ.ศ.2530) เพื่อจัดการต่อการเลิกใช้งานสารทำความเย็นในปัจจุบันและอนาคต

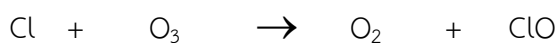
2.3 ลักษณะกระบวนการทำลายโอโซน

เนื่องจากสารทำความเย็นตระกูล CFC มีคลอรีน (Cl) เป็นองค์ประกอบหลักซึ่งเมื่อแตกตัวออกมา จะเกิดปฏิกิริยาทำลายโอโซน ตามขั้นตอนดังนี้

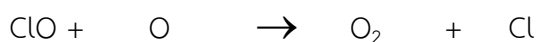
1) เมื่อสารทำความเย็นที่กระจายตัวออกสู่บรรยากาศลอยตัวขึ้นสู่บรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์ รังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV) ในบรรยากาศชั้นนี้ซึ่งถูกดูดซับไว้โดยโอโซนประมาณร้อยละ 95 ของรังสีที่ส่งผ่านมาจากดวงอาทิตย์ จะทำให้คลอรีนในสารทำความเย็นแตกตัวออกมาเป็นอะตอมคลอรีนอิสระดังตัวอย่างสมการเคมีของสารทำความเย็น R-12 ดังต่อไปนี้



2) คลอรีนที่ได้จะทำปฏิกิริยากับโอโซนดังสมการเคมีต่อไปนี้



3) คลอรีนมอนอกไซด์ (ClO) ที่ได้จะรวมตัวกับอะตอมของออกซิเจนอิสระดังสมการเคมีต่อไปนี้



จะเห็นว่าคลอรีนที่ได้จากข้อ 3) เมื่อผนวกจากที่ได้จากข้อ 1) จะยิ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาตามข้อ 2) ในการทำลายโอโซนมากยิ่งขึ้นเป็นทวีคูณ ดังนั้นยิ่งสารทำความเย็นตระกูล CFC มีระยะเวลาอยู่ในบรรยากาศได้นาน โอโซนยิ่งถูกทำลายได้มากตามไปด้วย ดังขั้นตอนการเกิดคลอรีนข้างต้น เป็นผลให้คลอรีน 1 อะตอมสามารถทำลายโอโซนได้ทวีคูณนับแสนโมเลกุล

2.4 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในการเลือกใช้สารทำความเย็น

จากผลกระทบของสารทำความเย็นตระกูล CFC และ HCFC ต่อสภาวะแวดล้อมดังกล่าว จึงได้มีการศึกษาสมบัติของสารทำความเย็นแต่ละชนิดเพิ่มเติม นอกเหนือจากสมบัติที่ไม่ติดไฟ ไม่เป็นพิษ ไม่กัดกร่อน สามารถเข้ากันได้ดีกับวัสดุอื่นๆ ในระบบ มีเสถียรภาพ และมีสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์และทางฟิสิกส์ในการทำความเย็นที่ดี เพื่อนำผลที่ได้มาใช้ในการพิจารณาเลือกใช้สารทำความเย็นต่อไป คุณสมบัติดังกล่าวได้แก่ ระยะเวลาในการคงสภาพอยู่ในบรรยากาศ ระดับการทำลายโอโซน และระดับการทำให้โลกมีอุณหภูมิสูงขึ้น

2.4.1 ระยะเวลาในการคงสภาพอยู่ในบรรยากาศ

สารทำความเย็นที่สามารถคงอยู่ในบรรยากาศได้นาน ย่อมมีโอกาที่จะหมุนเวียนมาทำลายโอโซนได้มาก หรือก่อให้เกิดภาวะเรือนกระจกได้นาน พบว่าสารทำความเย็นตระกูล CFC อยู่ในบรรยากาศได้นานมากดังแสดงในตารางที่ 2.2 สดมภ์ที่ 4 รองลงมาคือกลุ่มสารอนินทรีย์ ยกเว้นแอมโมเนียที่อยู่ในบรรยากาศได้น้อยที่สุดเพียงไม่เกิน 2 สัปดาห์ ถัดมาคือสารทำความเย็นตระกูล HCFC และ HFC เนื่องจากมีไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบเพิ่มเข้ามา ทำให้สลายตัวได้รวดเร็วขึ้น

2.4.2 ระดับการทำลายโอโซน

แสดงเป็นตัวเลขในการทำลายโอโซนของสารทำความเย็นแต่ละชนิดเทียบกับสารทำความเย็น R-11 โดยกำหนดให้ค่าระดับการทำลายโอโซน หรือ ODP (Ozone Depletion Potential) ของ R-11 ให้เท่ากับ 1 ตารางที่ 2.2 สดมภ์ที่ 5 แสดงค่า ODP ของสารทำความเย็นแต่ละชนิด

2.4.3 ระดับการทำให้โลกมีอุณหภูมิสูงขึ้น

แสดงเป็นตัวเลขในการทำให้โลกมีอุณหภูมิสูงขึ้นของสารทำความเย็นแต่ละชนิดเทียบกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยกำหนดให้ค่าระดับการทำให้โลกมีอุณหภูมิสูงขึ้น หรือ GWP (Global Warming Potential) ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ให้เท่ากับ 1 ตารางที่ 2.2 สดมภ์ที่ 6 แสดงค่า GWP ของสารทำความเย็นแต่ละชนิด

จากผลของการศึกษาคุณลักษณะดังกล่าวข้างต้น จึงมีการลงนามพิธีสารมอนทรีออลว่าด้วยการเลิกใช้สารทำลายชั้นโอโซนขึ้น และได้มีการแก้ไขตามญัตติกรุงลอนดอนและญัตติกรุงโคเปนเฮเกน รวมทั้งตามญัตติในที่ประชุมในครั้งต่อๆ มา ซึ่งได้กำหนดให้มีการเลิกใช้งานสารทำความเย็นตระกูล CFC และ HCFC รวมทั้งสารทำความเย็นชนิดผสมที่ได้มาจากสารทำความเย็นทั้งสองตระกูลในอนาคตตามระยะเวลาของการส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมในชั้นบรรยากาศ ตารางที่ 2.3 แสดงให้เห็นถึงระยะเวลาในการควบคุมการใช้ของประเทศที่พัฒนาแล้ว ซึ่งเป็นญัตติที่ได้แก้ไขของปี ค.ศ.2002 สำหรับประเทศที่กำลังพัฒนางดล็กเลียงไม่พันเช่นกัน เนื่องจากหากประเทศที่พัฒนาแล้วเลิกใช้ย่อมเลิกผลิตด้วย สารทำความเย็นเหล่านั้นย่อมขาดตลาดและมีราคาสูงขึ้น ดังนั้นสำหรับระบบความเย็นที่สร้างใหม่ให้ใช้สารตระกูล HFC จะดีกว่า โดยเฉพาะตั้งแต่ปี ค.ศ.2015 (พ.ศ.2558) เป็นต้นไป สำหรับสารทำความเย็นในตระกูล HCFC และตระกูล HFC ที่นำมาทดแทนสารทำความเย็นตระกูล CFC ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.2 แสดงระยะเวลาที่สารทำความเย็นสามารถคงสภาพในชั้นบรรยากาศ รวมทั้ง ค่า ODP และค่า GWP ของสารทำความเย็นบางชนิด

ชนิดสารทำความเย็น			ระยะเวลาอยู่ในบรรยากาศ (ปี)	ODP	GWP*
สาร	ชื่อทั่วไป	ชื่อและสูตรทางเคมี			
CFC	R-11	Trichlorofluoromethane (CCl ₃ F)	45.0	1.0	4000
	R-12	Dichlorodifluoromethane (CCl ₂ F ₂)	100.0	1.0	8500
	R-113	1,1,2- Trichlorotrifluoroethane (CCl ₂ CClF ₂)	85.0	0.8	5000
	R-114	1,2- Dichlorotetrafluoroethane (CClF ₂ CClF ₂)	300.0	1.0	9300
	R-115	Chloropentafluoroethane (CClF ₂ CF ₃)	1700.0	0.6	9300

ตารางที่ 2.2 แสดงระยะเวลาที่สารทำความเย็นสามารถคงสภาพในชั้นบรรยากาศ รวมทั้ง ค่า ODP และค่า GWP ของสารทำความเย็นบางชนิด (ต่อ)

ชนิดสารทำความเย็น			ระยะเวลาอยู่ในบรรยากาศ (ปี)	ODP	GWP*
สาร	ชื่อทั่วไป	ชื่อและสูตรทางเคมี			
HCFC	R-22	Chlorodifluoromethane (CHClF ₂)	11.8	0.055	1700
	R-123	1,1-Dichloro-2,2,2-trifluoroethane (CHCl ₂ CF ₃)	1.4	0.02	90
	R-124	2-Chloro-1,1,1,2- tetrafluoroethane (CHClF ₂ CF ₃)			
		1,1-Dichloro-1-fluoroethane (CHCl ₂ CF)	6.0	0.022	480
	R-141b	1-Chloro-1,1-difluoroethane (CHClF ₂)	9.2	0.1	630
	R-142b		18.5	0.065	2000
HFC	R-125	Pentafluoroethane (CHF ₂ CF ₃)	29.0	0.0	3400
	R-134a	1,1,1,2-Tetrafluoroethane (CF ₃ CH ₂ F)	13.8	0.0	1300
	R-143a	1,1,1-Trifluoroethane (CH ₃ CF ₃)	52.0	0.0	4300
	R-152a	1,1-Difluoroethane (CH ₃ CHF ₂)	1.4	0.0	120
อนินทรีย์	R-717	Ammonia (NH ₃)	< 15 วัน	0.0	ใกล้ 0
	R-744	Carbon Dioxide (CO ₂)	120.0	0.0	1
	R-50	Methane (CH ₄)	10.0	0.0	-
	R-744A	Nitrous Oxide (N ₂ O)	150.0	0.0	-

* ใช้กรอบเวลา 100 ปีของคาร์บอนไดออกไซด์เป็นฐานในการพิจารณา ทั้งนี้ตารางดัดแปลงจาก The Scientific Assessment of Ozone Depletion, 2002 อ้างถึงใน www.epa.gov

ตารางที่ 2.3 ระยะเวลาการควบคุมการใช้สารทำความเย็นตระกูล CFC และ HCFC ในประเทศ ที่พัฒนาแล้ว

ชนิดสารทำความเย็น	ตัวอย่างสารทำความเย็น	ลักษณะการควบคุม	วันเวลา
CFC และสารผสม CFC กับ HCFC หรือ HFC	R-11; R-12; R-113;	เลิกผลิต	1 ม.ค.1996 (พ.ศ.2539)
	R-114; R-115; R-500;	เลิกใช้งาน	1 ม.ค.2000 (พ.ศ.2543)
	R-502; R-503		
HCFC และสารทำความเย็นชนิดผสม HCFC กับ HFC	R-22; R-123;	ลดการใช้ลง 35.0%	1 ม.ค.2004 (พ.ศ.2547)
	R-401A; R-401B;	ลดการใช้ลง 65.0%	1 ม.ค.2010 (พ.ศ.2553)
	R-402A; R-402B;	ลดการใช้ลง 90.0%	1 ม.ค.2015 (พ.ศ.2558)
	R-408A;R-409A;	ลดการใช้ลง 99.5%	1 ม.ค.2020 (พ.ศ.2563)
		เลิกใช้งาน	1 ม.ค.2030 (พ.ศ.2573)

ตารางที่ 2.4 แนวทางการเลือกใช้สารทำความเย็นทดแทนสารทำความเย็นตระกูล CFC

ชื่อสารทำความเย็น ตระกูล CFC	ชื่อสารทำความเย็น ตระกูล HCFC ที่ทดแทน	ชื่อสารทำความเย็น ตระกูล HFC ที่ทดแทน
R-11	R-123	(กำลังพัฒนา)
R-12	R-401A; R-409A	R-134a; R-401B; R-152a
R-13	-	R-23; R-508B
-	R-22	R-407C; R-410A/ R-410B
R-500	-	R-401B
R-502	R-402A; R-402B; R-408A	R-404A; R-407C; R-507
R-503	-	R-508B

2.5 ชนิดของสารทำความเย็น

สารทำความเย็นที่มีใช้งานในปัจจุบันสามารถแบ่งออกได้เป็น 7 ประเภทใหญ่ๆ ตามองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติของสารทำความเย็น ดังนี้

2.5.1 สารทำความเย็นกลุ่มฮาโลคาร์บอน (Halocarbon compounds)

สารกลุ่มนี้เป็นสารสังเคราะห์ของมีเทน (Methane) อีเทน (Ethane) เป็นสารทำความเย็นที่ใช้งานเป็นส่วนใหญ่ในปัจจุบันทั้งในเครื่องทำความเย็นที่ใช้ในครัวเรือน ใช้เชิงพาณิชย์ และในทางอุตสาหกรรมการทำความเย็น แบ่งออกเป็น 3 กลุ่มตามองค์ประกอบทางเคมี ดังนี้

2.5.1.1 สารทำความเย็นตระกูล CFC (Chlorofluorocarbon) เป็นสารทำความเย็นที่มีคลอรีน (Cl) ฟลูออรีน (F) และคาร์บอน (C) เป็นองค์ประกอบ เช่น สารทำความเย็น Dichloromonofluoromethane (R-12)

2.5.1.2 สารทำความเย็นตระกูล HCFC (Hydrochlorofluorocarbon) เป็นสารทำความเย็นที่มี ไฮโดรเจน (H) คลอรีน (Cl) ฟลูออรีน (F) และคาร์บอน (C) เป็นองค์ประกอบ เช่น สารทำความเย็น Monochlorodifluoromethane (R-22)

2.5.1.3 สารทำความเย็นตระกูล HFC (Hydrofluorocarbon) เป็นสารทำความเย็นที่มี ไฮโดรเจน (H) ฟลูออรีน (F) และคาร์บอน (C) เป็นองค์ประกอบ เช่น สารทำความเย็น Tetrafluoroethane (R-134a)

2.5.2 สารทำความเย็นผสมชนิดซีโอโทรปิก (Zeotropic blends)

สารกลุ่มนี้เป็นสารทำความเย็นที่ได้จากการนำสารที่มีส่วนประกอบทางเคมีต่างกันตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปมาผสมกัน สารที่นำมาผสมกันอาจมีสมบัติเป็นสารทำความเย็นอยู่เดิมที่มีใช้อยู่หรืออาจเป็นสารอื่นก็ได้ ทำให้ได้สารทำความเย็นชนิดใหม่ขึ้นมาที่มีสมบัติเหมาะสมกับการใช้งานบางลักษณะ สำหรับสมบัติของสารทำความเย็นที่ได้เมื่อมาใช้ในระบบการทำความเย็น ขณะเปลี่ยนแปลงสถานะจาก

ไอควบแน่นเป็นสารทำความเย็นเหลว หรือจากสารทำความเย็นเหลวเดือดกลายเป็นไอ อุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิสุดท้ายขณะเปลี่ยนแปลงสถานะ (Temperature glide) จะต่างกันค่อนข้างมาก เช่นสารทำความเย็น R-407C ซึ่งเป็นสารทำความเย็นที่มีส่วนผสมของสารทำความเย็น Difluoromethane (R-32) จำนวนร้อยละ 23 สารทำความเย็น Pentafluoroethane (R-125) จำนวนร้อยละ 25 และสารทำความเย็น Tetrafluoroethane (R-134a) จำนวนร้อยละ 52 โดยน้ำหนัก มีอุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิสุดท้ายขณะเปลี่ยนแปลงสถานะเท่ากับ 4.9°C เป็นต้น

เนื่องจากอุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิสุดท้ายขณะเปลี่ยนแปลงสถานะเปลี่ยนไป ทำให้ขณะเปลี่ยนแปลงสถานะสารทำความเย็นที่ผสมกันอยู่สามารถแยกตัว ส่งผลให้อัตราส่วนหรือความเข้มข้นของสารทำความเย็นผสมที่เหลือเปลี่ยนไป ดังนั้นเมื่อใช้สารทำความเย็นกลุ่มนี้ เมื่อต้องมีการเติมสารทำความเย็นหรือการถ่ายสารทำความเย็นออกต้องทำในสภาวะที่สารทำความเย็นมีสถานะเป็นของเหลว

2.5.3 สารทำความเย็นผสมชนิดกึ่งอะซีโอโทรปิก (Semi-azeotropic blends)

สารกลุ่มนี้เป็นสารทำความเย็นที่ได้จากการนำสารที่มีส่วนประกอบทางเคมีต่างกันตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปมาผสมกัน ในทำนองเดียวกับสารทำความเย็นผสมชนิดซีโอโทรปิก เพียงแต่สารทำความเย็นใหม่ที่ได้เมื่อมาใช้ในระบบการทำความเย็น ขณะเปลี่ยนแปลงสถานะจากไอควบแน่นเป็นสารทำความเย็นเหลว หรือจากสารทำความเย็นเหลวเดือดกลายเป็นไอ อุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิสุดท้ายขณะเปลี่ยนแปลงสถานะจะต่างกันอย่างน้อยจนสามารถตัดทิ้งไม่นำมาคิดได้ เช่นสารทำความเย็น R-404A ซึ่งเป็นสารทำความเย็นที่มีส่วนผสมของสารทำความเย็น Pentafluoroethane (R-125) จำนวนร้อยละ 44 สารทำความเย็น Trifluoroethane (R-143a) จำนวนร้อยละ 52 และสารทำความเย็น Tetrafluoroethane (R-134a) จำนวนร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก มีอุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิสุดท้ายขณะเปลี่ยนแปลงสถานะเท่ากับ 0.7°C เป็นต้น อย่างไรก็ตามเมื่อต้องมีการเติมสารทำความเย็นหรือการถ่ายสารทำความเย็นออกควรทำในสภาวะที่สารทำความเย็นมีสถานะเป็นของเหลวเช่นเดียวกับสารทำความเย็นกลุ่มซีโอโทรปิก

2.5.4 สารทำความเย็นผสมชนิดอะซีโอโทรปิก (Azeotropic blends)

สารกลุ่มนี้เป็นสารทำความเย็นที่ได้จากการนำสารที่มีส่วนประกอบทางเคมีต่างกันตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปมาผสมกัน ในทำนองเดียวกับสารทำความเย็นผสมชนิดซีโอโทรปิก เพียงแต่สารทำความเย็นใหม่ที่ได้เมื่อมาใช้ในระบบการทำความเย็น ขณะเปลี่ยนแปลงสถานะจากไอควบแน่นเป็นสารทำความเย็นเหลว หรือจากสารทำความเย็นเหลวเดือดกลายเป็นไอ อุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิสุดท้ายขณะเปลี่ยนแปลงสถานะจะเป็นค่าเดียวกันเหมือนสารทำความเย็นเดี่ยว เช่นสารทำความเย็น R-502 ซึ่งเป็นสารทำความเย็นที่มีส่วนผสมของสารทำความเย็น Monochlorodifluoromethane (R-22) จำนวนร้อยละ 48.8 และสารทำความเย็น Monochloropentafluoroethane (R-115) จำนวนร้อยละ 51.2 โดยน้ำหนัก มีอุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิสุดท้ายขณะเปลี่ยนแปลงสถานะเท่ากับ 0°C เป็นต้น สำหรับการเติมสารทำความเย็นหรือการถ่ายสารทำความเย็นออกสามารถทำได้ทั้งในสภาวะที่สารทำความเย็นมีสถานะเป็นของเหลวหรือก๊าซ

2.5.5 สารทำความเย็นกลุ่มสารอินทรีย์ (Organic compounds)

สารกลุ่มนี้เป็นสารทำความเย็นที่มีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบ เช่น บิวเทน (Butane)

2.5.6 สารทำความเย็นกลุ่มสารอนินทรีย์ (Inorganic compounds)

สารกลุ่มนี้เป็นสารทำความเย็นที่มีสารอนินทรีย์เป็นองค์ประกอบ ถือเป็นสารทำความเย็นยุคแรกๆ ที่ใช้ในการทำความเย็น เช่น แอมโมเนีย คาร์บอนไดออกไซด์ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เป็นต้น เนื่องจากสารทำความเย็นในกลุ่มนี้เป็นสารที่ค่อนข้างอันตราย และต้องอาศัยการควบคุมดูแลอย่างใกล้ชิด จึงไม่เป็นที่นิยมใช้โดยทั่วไป ในปัจจุบันที่มีใช้งานในทางอุตสาหกรรมการทำความเย็นเป็นหลัก ได้แก่ แอมโมเนีย เนื่องจากมีราคาถูก และมีค่าความร้อนจำเพาะสูง

2.5.7 สารทำความเย็นกลุ่มสารอินทรีย์ที่ไม่อิ่มตัว (Unsaturated organic compounds)

สารกลุ่มนี้เป็นสารทำความเย็นที่มีสารอินทรีย์ที่ไม่อิ่มตัวเป็นองค์ประกอบ เช่น เอทิลีน (Ethylene) โพรพิลีน (Propylene) เป็นต้น

2.6 การจำแนกสารทำความเย็นตามระดับความปลอดภัย

นอกจากการแบ่งประเภทสารทำความเย็นตามองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติของสารทำความเย็นแล้ว ได้มีการจำแนกและแบ่งกลุ่มสารทำความเย็นออกตามระดับความปลอดภัย โดยแบ่งตามความเป็นพิษ (Toxicity) และความสามารถในการติดไฟ (Flammability) ของสารทำความเย็น ซึ่งมีหลักการจำแนกตามข้อกำหนดของ ASHRAE (American Society of Heating Refrigeration and Air-Conditioning Engineering) ดังนี้

2.6.1 ความเป็นพิษ

ได้จำแนกสารทำความเย็นตามความเป็นพิษออกเป็น 2 ระดับ คือ ระดับชั้น A และ B
ชั้น A (Class A) คือสารทำความเย็นที่มีระดับความเป็นพิษต่ำ และไม่มีการระบุระดับของความเป็นพิษ

ชั้น B (Class B) คือสารทำความเย็นที่มีระดับความเป็นพิษสูง และมีการระบุระดับของความเป็นพิษ

การกำหนดระดับใช้ค่าความเข้มข้นของสารทำความเย็นที่ 400 ppm (ส่วนในล้านส่วน) หรือน้อยกว่าเป็นมาตรฐานในการตรวจสอบความเป็นพิษ

2.6.2 ความสามารถในการติดไฟ

ได้จำแนกสารทำความเย็นตามความสามารถในการติดไฟออกเป็น 3 กลุ่ม คือ กลุ่มเลข 1 กลุ่มเลข 2 และกลุ่มเลข 3

กลุ่มเลข 1 คือสารทำความเย็นที่ไม่ติดไฟ

กลุ่มเลข 2 คือสารทำความเย็นที่มีความสามารถในการติดไฟได้ต่ำ

กลุ่มเลข 3 คือสารทำความเย็นที่มีความสามารถในการติดไฟได้สูง

สำหรับการจัดระดับความปลอดภัยเป็นการนำระดับความเป็นพิษและความสามารถในการติดไฟของสารทำความเย็นมารวมกัน เช่น ระดับความปลอดภัย A1 หมายถึงสารทำความเย็นชนิดนี้มีระดับความเป็นพิษต่ำและไม่ติดไฟ เป็นต้น ตารางที่ 2.5 แสดงการจำแนกสารทำความเย็นตามการจัดระดับความปลอดภัยของสารทำความเย็นบางชนิดที่นิยมใช้งานในอดีตและปัจจุบัน

ตารางที่ 2.5 การจำแนกสารทำความเย็นตามการจัดระดับความปลอดภัยของสารทำความเย็นบางชนิด

ชนิดสารทำความเย็น	ระดับความปลอดภัย	ชนิดสารทำความเย็น	ระดับความปลอดภัย	ชนิดสารทำความเย็น	ระดับความปลอดภัย
R-11	A1	R-134a	A1	R-407C	A1
R-12	A1	R-143a	A2	R-410A	A1
R-22	A1	R-152a	A2	R-500	A1
R-32	A2	R-245ca	A2	R-502	A1
R-123	A1	R-290	A3	R-507	A1
R-124	A1	R-401A	A1	R-717	B2
R-125	A1	R-406A	A2	R-744	A1

2.7 การใช้สัญลักษณ์เรียกชื่อสารทำความเย็น

การเรียกชื่อสารทำความเย็นตามวิธีการของ ASHRAE Standard 34 ซึ่งพัฒนามาจากการเรียกชื่อสารทำความเย็นของบริษัทดูปองก์ ได้กำหนดให้ใช้ตัวอักษร R- นำหน้าการเรียกชื่อสารทำความเย็นตามด้วยตัวเลขหรือตัวอักษร โดยแบ่งการเรียกชื่อตามกลุ่มชนิดของสารทำความเย็น ดังนี้

2.7.1 สารทำความเย็นกลุ่มฮาโลคาร์บอน

สารกลุ่มนี้ได้แก่ สารทำความเย็นตระกูล CFC สารทำความเย็นตระกูล HCFC และสารทำความเย็นตระกูล HFC มีหลักเกณฑ์การเรียกชื่อนี้ดังนี้

2.7.1.1 ตัวเลขตำแหน่งแรกด้านขวามือคือจำนวนอะตอมของฟลูออรีน (F)

2.7.1.2 ตัวเลขตำแหน่งที่สองจากด้านขวามือคือจำนวนอะตอมของไฮโดรเจน (H) บวกหนึ่ง

2.7.1.3 ตัวเลขตำแหน่งที่สามจากด้านขวามือคือจำนวนอะตอมของคาร์บอน (C) ลบหนึ่ง ถ้าค่าที่ได้เท่ากับศูนย์ให้ตัดทิ้งไม่ต้องใส่

2.7.1.4 ตัวเลขตำแหน่งที่สี่จากด้านขวามือคือจำนวนพันธะของคาร์บอนกับคาร์บอนที่ไม่อิมตัวของสารประกอบในสารทำความเย็น ถ้ามีค่าเท่ากับศูนย์ให้ตัดทิ้งไม่ต้องใส่

2.7.1.5 จำนวนอะตอมของคลอรีนหาได้จากการนำผลรวมของจำนวนอะตอมของฟลูออรีน (F) โบรมีน (B) และไฮโดรเจน (H) มาลบออกจากจำนวนอะตอมที่สามารถสร้างพันธะเคมีได้

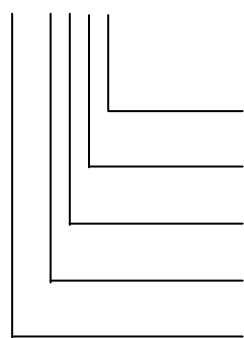
ของคาร์บอน โดยคาร์บอน 1 ตัวสามารถสร้างพันธะเคมีได้กับ 4 อะตอม คาร์บอน 2 ตัวสามารถสร้างพันธะเคมีได้กับ 6 อะตอม และคาร์บอน 3 ตัวสามารถสร้างพันธะเคมีได้กับ 8 อะตอม

2.7.1.6 ในบางกรณีที่อะตอมของคลอรีนถูกแทนที่ด้วยอะตอมของโบรมีน อาจเป็นบางส่วนหรือทั้งหมด ให้นำตัวอักษร B มาใช้ในตัวเลขด้วย โดยตัวเลขที่ตามหลังตัวอักษร B แสดงจำนวนอะตอมของโบรมีนที่ปรากฏอยู่

2.7.1.7 กรณีที่สารทำความเย็นมีอะตอมสร้างพันธะกันอย่างไม่สมมาตรในลักษณะเป็นสารไอโซเมอร์ (มีโครงสร้างโมเลกุลต่างกันแต่มีส่วนประกอบทางเคมีเหมือนกัน) ให้ตามด้วยตัวอักษร a ต่อท้ายตัวเลขตำแหน่งแรกด้านขวามือ

ตัวอย่าง สารทำความเย็น Tetrafluoroethane (R-134a) ซึ่งมีสูตรทางเคมีดังนี้ ($\text{CF}_3\text{CH}_2\text{F}$) จึงมีชื่อสัญลักษณ์ว่า R-134a โดย

R-134a



อักษร a แสดงว่าเป็นสารไอโซเมอร์

จำนวนอะตอมของฟลูออรีน (F) = 4

จำนวนอะตอมของไฮโดรเจน (H) บวกหนึ่ง = $2 + 1 = 3$

จำนวนอะตอมของคาร์บอน (C) ลบหนึ่ง = $2 - 1 = 1$

อักษรนำหน้าสารทำความเย็นแทนคำว่า Refrigerant

2.7.2 สารทำความเย็นผสมชนิดซีไอโทรปิกและกึ่งอะซีไอโทรปิก

สารกลุ่มนี้มีหลักเกณฑ์การเรียกชื่อโดยกำหนดให้ใช้เลขในกลุ่มอนุกรม 400 เรียงลำดับกันไปตามการค้นพบหรือพัฒนา สำหรับสารทำความเย็นที่มีส่วนผสมจากสารทำความเย็นชนิดที่เหมือนกัน แต่อัตราส่วนผสมต่างกัน ให้ตามหลังด้วยตัวอักษร A, B, C ตามลำดับไป เช่น สารทำความเย็น R-402A มีส่วนผสมของสารทำความเย็น R-22 จำนวนร้อยละ 38 สารทำความเย็น R-125 จำนวนร้อยละ 60 กับ โพรเพนจำนวนร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก และสารทำความเย็น R-402B มีส่วนผสมของสารทำความเย็น R-22 จำนวนร้อยละ 38 สารทำความเย็น R-125 จำนวนร้อยละ 60 กับโพรเพน (R-290) จำนวนร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก เป็นต้น

2.7.3 สารทำความเย็นผสมชนิดอะซีไอโทรปิก

สารกลุ่มนี้มีหลักเกณฑ์การเรียกชื่อโดยกำหนดให้ใช้เลขในกลุ่มอนุกรม 500 เรียงลำดับกันไปตามการค้นพบหรือพัฒนา สำหรับสารทำความเย็นที่มีส่วนผสมจากสารทำความเย็นชนิดที่เหมือนกัน แต่อัตราส่วนผสมต่างกัน ให้ตามหลังด้วยตัวอักษร A, B, C ตามลำดับไป เช่น สารทำความเย็น R-508A และสารทำความเย็น R-508B เป็นต้น

2.7.4 สารทำความเย็นประกอบ

สารกลุ่มนี้เป็นสารทำความเย็นที่ประกอบด้วยสารทำความเย็นผสมที่นำมารวมกับสารทำความเย็นชนิดอื่นให้เป็นสารทำความเย็นชนิดใหม่ มีหลักเกณฑ์การเรียกชื่อโดยกำหนดให้ใช้ชื่อของสารทำความเย็นที่นำมาผสมระบุเรียงต่อกันไปพร้อมทั้งบอกส่วนผสมตามน้ำหนักในวงเล็บท้ายชื่อสารทำความเย็นด้วย เช่น สารทำความเย็นที่ประกอบด้วยส่วนผสมของสารทำความเย็น R-502 (สารทำความเย็นผสมชนิดอะซีโอโทริกประหว่ง R-22 กับ R-115) จำนวนร้อยละ 92 กับสารทำความเย็น R-290 (Propane) จำนวนร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก จะเรียกชื่อสารทำความเย็นนี้ว่า R-290/22/115 (8/45/47) เป็นต้น

2.7.5 สารทำความเย็นกลุ่มสารอินทรีย์อื่นๆ

สารกลุ่มนี้มีหลักเกณฑ์การเรียกชื่อโดยกำหนดให้ใช้เลขในกลุ่มอนุกรม 600

2.7.6 สารทำความเย็นกลุ่มสารอนินทรีย์

สารกลุ่มนี้มีหลักเกณฑ์การเรียกชื่อโดยกำหนดให้ใช้เลขในกลุ่มอนุกรม 700

2.7.7 สารทำความเย็นกลุ่มสารอินทรีย์ที่ไม่อิ่มตัว

สารกลุ่มนี้มีหลักเกณฑ์การเรียกชื่อโดยกำหนดให้ใช้เลขในกลุ่มอนุกรม 1000

2.8 สมบัติของสารทำความเย็นที่พึงประสงค์

ในการพัฒนาสารทำความเย็นขึ้นมาในแต่ละชนิด มักอาศัยเกณฑ์สมบัติต่างๆ ของสารทำความเย็นที่พึงประสงค์เป็นแนวทางในการพัฒนา ซึ่งควรมีลักษณะของสารทำความเย็น ดังนี้

- 1) มีผลกระทบต่อปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมต่ำ โดยเฉพาะการทำลายโอโซน และการทำให้โลกร้อน
- 2) ไม่ติดไฟหรือไม่มีกการระเบิด ทั้งในสภาวะของเหลว ก๊าซ หรือเมื่อผสมกับน้ำมันหล่อลื่น
- 3) มีความเป็นพิษต่ำ หรือไม่เป็นพิษ หรือไม่มีอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต
- 4) เมื่อเกิดการรั่วไหล ไม่ทำปฏิกิริยากับอาหารและน้ำดื่มจนทำให้รส กลิ่น สี เปลี่ยนแปลงหรือเป็นอันตราย
- 5) ไม่ทำปฏิกิริยาหรือกัดกร่อนวัสดุและอุปกรณ์ในระบบ เช่น ยาง พลาสติก เหล็ก ทองเหลือง ทองแดง อะลูมิเนียม เป็นต้น
- 6) มีโครงสร้างทางเคมีที่มีเสถียรภาพ สามารถทำงานภายใต้ความดันและอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงภายในระบบได้โดยไม่เปลี่ยนสภาพ
- 7) มีค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอสูง ทำให้อัตราการไหลของสารทำความเย็นในระบบต่ำ อุปกรณ์มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบาและใช้พลังงานลดลง
- 8) มีความหนาแน่นสูง ทำให้อุปกรณ์มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบาและใช้พลังงานลดลง
- 9) จุดเดือด จุดหลอมเหลว และจุดแข็งตัวต่ำ
- 10) รวมตัวกับน้ำมันหล่อลื่นได้ดี สามารถพาน้ำมันหล่อลื่นกลับสู่เครื่องอัดได้

11) มีค่าความต้านทานไฟฟ้าสูง ทำให้ไม่เกิดไฟฟ้าลัดวงจรผ่านสารทำความเย็นขณะทำงาน โดยเฉพาะเมื่อใช้กับเครื่องอัดแบบหุ้มปิด

12) มีค่าความดันขณะควบแน่นต่ำ ทำให้ลดน้ำหนักอุปกรณ์จากความหนาที่ลดลง รวมทั้งลดการเกิดการรั่วไหลของสารทำความเย็น และลดอันตรายจากสาเหตุที่มาจากความดันสูง

2.9 การประยุกต์ใช้งานสารทำความเย็นกับระบบการทำความเย็น

ในตารางที่ 2.6 ได้สรุปลักษณะการประยุกต์ใช้งานของสารทำความเย็นข้างต้นกับระบบการทำความเย็นบางรูปแบบ รวมทั้งแสดงค่าระดับการทำลายชั้นโอโซนของสารดังกล่าว ซึ่งวัดเป็น ODP โดย $ODP = 1$ ใช้ผลจากการที่สารทำความเย็น R - 11 มีผลต่อการทำลายชั้นโอโซน และ $ODP = 0$ หมายถึงไม่มีผลต่อการทำลายชั้นโอโซน นอกจากนี้ยังได้แสดงค่าระดับการทำให้อุณหภูมิโลกมีอุณหภูมิสูงขึ้นไว้ในวงเล็บในช่องที่แสดงค่า ODP ด้วย ค่าระดับการทำให้อุณหภูมิโลกมีอุณหภูมิสูงขึ้นวัดเป็น GWP โดย $GWP = 1$ ใช้ผลจากการที่สารทำความเย็น R - 11 มีผลต่อการทำให้อุณหภูมิโลกมีอุณหภูมิสูงขึ้น

2.10 หน้าที่ สมบัติ และชนิดของน้ำมันหล่อลื่น

น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้ในระบบทำความเย็น มีหน้าที่หลักเพื่อหล่อลื่นเครื่องอัดให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและประสิทธิผล ด้วยการช่วยลดความฝืด ลดการสึกหรอ และระบายความร้อนที่เกิดขึ้นของชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ของเครื่องอัดด้วยการไหลเป็นฟิล์มบางๆ ระหว่างพื้นที่ผิวที่เคลื่อนที่นั้น เป็นการลดการสัมผัสโดยตรงระหว่างของแข็งกับของแข็ง

เนื่องจากในระหว่างการหล่อลื่นจะทำให้น้ำมันบางส่วนเกิดการผสมผสานเข้ากับสารทำความเย็นทำความเย็น และไหลปะปนไปกับสารทำความเย็นด้วย ดังนั้นการเข้ากันได้กับสารทำความเย็นจึงมีความสำคัญในการเลือกใช้น้ำมันหล่อลื่น นอกจากนี้ขณะที่น้ำมันไหลไปกับสารทำความเย็นจำเป็นต้องไหลผ่านอุปกรณ์ต่างๆ ดังนั้นน้ำมันจึงต้องมีความเหมาะสมที่จะทำงานร่วมกับชิ้นส่วนของอุปกรณ์ต่างๆ ด้วย

สำหรับสมบัติหลักของน้ำมันหล่อลื่นที่ต้องการ คือ

1) ไม่มีส่วนผสมของไข (Wax free) เพื่อป้องกันการแข็งตัวที่อาจทำให้เกิดการอุดตันขึ้นในระบบเมื่อสัมผัสกับช่วงอุณหภูมิต่ำ

2) ไม่เป็นสื่อไฟฟ้า เพื่อป้องกันอันตรายจากการเกิดไฟฟ้าลัดวงจร โดยเฉพาะกับระบบที่ใช้เครื่องอัดแบบปิด เพราะน้ำมันต้องใช้ในการหล่อลื่นมอเตอร์ด้วย

3) สามารถรวมตัวกับสารทำความเย็นได้ในทุกสภาวะ เพื่อป้องกันการแยกตัวออกจากสารทำความเย็นและตกค้างอยู่ในอุปกรณ์ต่างๆ ที่ทำให้อุปกรณ์นั้นๆ ทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ

ตารางที่ 2.6 ชนิดของสารทำความเย็นและการประยุกต์ใช้งาน

ชนิดของสารทำความเย็น	จุดเดือดที่ความดันบรรยากาศ °C (°F)	ODP (GWP)	การประยุกต์ใช้งาน
R-12 (CCl ₂ F ₂)	-29°C (-22°F)	1.000 (3.00)	ใช้ในระบบตู้เย็น ตู้แช่ สำหรับเครื่องทำความเย็นขนาดเล็ก ใช้งานกับเครื่องอัดแบบลูกสูบ แบบโรตารี และแบบหอยโข่ง
R-22 (CHClF ₂)	-41°C (-41°F)	0.055 (0.36)	ใช้ในระบบตู้แช่เย็นจัด และตู้แช่แข็ง ทั้งการใช้ในครัวเรือน และใช้เชิงพาณิชย์ ใช้งานกับเครื่องอัดแบบลูกสูบ แบบโรตารี และแบบหอยโข่ง
R-134a (CF ₃ CH ₂ F)	-27°C (-16°F)	0 (0.76)	ใช้งานในลักษณะเดียวกับ R-12 เป็นสารทำความเย็นที่ผลิตมาเพื่อรองรับการใช้งานแทนสารทำความเย็น R-12 แต่ประสิทธิภาพจะต่ำกว่า
R-502	-46°C (-50°F)	0.290 (5.00)	ใช้ในระบบตู้แช่เย็นจัด ตู้แช่แสดงสินค้าในร้านค้า ตู้แช่แข็งเชิงพาณิชย์ ห้องเย็น และโรงงานผลิตอาหารแช่แข็ง ใช้งานกับเครื่องอัดแบบลูกสูบเท่านั้น ประสิทธิภาพของระบบสูงกว่าระบบที่ใช้สารทำความเย็น R-22
R-507	-47°C (-52°F)	0 (ไม่มีข้อมูล)	ใช้งานในลักษณะเดียวกับ R-502 เป็นสารทำความเย็นที่ผลิตมาเพื่อรองรับการใช้งานแทนสารทำความเย็น R-502 และประสิทธิภาพของระบบสูงกว่าระบบที่ใช้สารทำความเย็น R-502 เล็กน้อย
R-717 แอมโมเนีย (NH ₃)	-33°C (-28°F)	0 (ใกล้ 0)	ใช้ในระบบเครื่องทำความเย็นขนาดใหญ่แบบโรงงานอุตสาหกรรม ใช้งานกับเครื่องอัดแบบลูกสูบ

การพิจารณาสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นสามารถประเมินได้จากสมบัติพื้นฐาน 3 ประการ คือ ความหนืด สภาวะหล่อลื่น และเสถียรภาพทางเคมี ที่ต้องมีความเหมาะสมในการป้องกันเครื่องอัด

ความหนืด แสดงถึงความสามารถในการต้านทานการไหล น้ำมันที่มีความหนืดมากจะไหลได้ช้ากว่าน้ำมันที่มีความหนืดน้อยกว่า ดังนั้นความหนืดที่ถูกต้องจึงมีความจำเป็นในการหล่อลื่น เนื่องจากเป็นตัวบ่งบอกถึงความหนาของน้ำมันที่หล่อลื่นในระบบในการเคลื่อนตัวผ่านของน้ำมันให้ไหลอยู่ระหว่างชิ้นส่วนต่างๆ และให้ไหลผ่านไปตามชิ้นส่วนเหล่านั้นได้อย่างถูกต้อง โดยทั่วไปอุปกรณ์ยิ่งเล็กและมี

ระยะห่างระหว่างชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ยิ่งน้อยยิ่งต้องการความหนืดที่ต่ำ ส่วนอุปกรณ์ยิ่งโตและมีระยะห่างระหว่างชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ยิ่งมากยิ่งต้องการความหนืดที่สูง

นอกจากนี้พบว่าความหนืดมีผลกระทบโดยตรงจากอุณหภูมิของของเหลวที่เปลี่ยนไป กล่าวคือ ความหนืดลดลงขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น และเพิ่มขึ้นขณะที่อุณหภูมิลดลง โดยปกติค่าความหนืดที่ใช้ได้แก่ ค่าความหนืดจลน์ (Kinematic viscosity) มีหน่วยวัดเป็นเซนติสโตก (cst) และโดยปกติกำหนดค่าที่อุณหภูมิ 40°C และ 100°C ซึ่งทั้งสองค่านี้นำมาใช้ในการกำหนดดัชนีความหนืด (Viscosity index) หรือ VI ของ น้ำมันหล่อลื่น สำหรับค่า VI เป็นการวัดผลของการเปลี่ยนแปลงความหนืดของน้ำมันเทียบกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป โดยค่า VI ยิ่งสูง แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงความหนืดของน้ำมันตามอุณหภูมียิ่งต่ำและเป็นสิ่งที่ต้องการ ตัวอย่างเช่น ถ้าค่า VI ของน้ำมันชนิด POE มีค่าเท่ากับ 100 และค่า VI ของน้ำมันชนิด MO มีค่าเท่ากับ 60 แสดงว่าน้ำมันชนิด POE มีค่าความหนืดที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมिन้อยกว่าน้ำมันชนิด MO หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งค่าความหนืดของน้ำมันชนิด POE มีค่าค่อนข้างคงที่มากกว่าของน้ำมันชนิด MO

สถานะหล่อลื่น แสดงถึงความสามารถในการป้องกันการสึกหรอของเครื่องอัด อันได้แก่ ความสามารถของน้ำมันในการป้องกันการสึกหรอของพื้นผิวของโลหะที่เสียดสีกันอยู่

เสถียรภาพทางเคมี หมายถึงการที่น้ำมันจะไม่ทำปฏิกิริยาที่ก่อให้เกิดสารเคมีที่เป็นอันตราย (เช่น กรด ฯลฯ) และสารจำพวกโคลนที่อาจไปปิดกั้นท่อ หรือสารจำพวกคาร์บอนตกค้าง

อย่างไรก็ดีปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันหล่อลื่นกับสารทำความเย็นอาจสร้างปัญหาขึ้นมาได้ จึงเป็นสาเหตุสำคัญในการกำหนดความสามารถรวมตัวกับสารทำความเย็นได้ในทุกสถานะของน้ำมันหล่อลื่น ดังนี้

ความสามารถในการผสมผสานกันได้ (Miscibility) หมายความว่าในย่านอุณหภูมิที่กำหนดสารทำความเย็นและน้ำมันจะผสมกันหรือแยกออกจากกันดังนี้ ในกรณีการแยกตัวของน้ำมันจากสารทำความเย็นในเครื่องอัด น้ำมันจะไหลเข้าไปตามชิ้นส่วนที่เป็นโลหะเพื่อช่วยหล่อลื่นชิ้นส่วนเหล่านี้ ในกรณีการแยกตัวของน้ำมันจากสารทำความเย็นในเครื่องระเหยหรือส่วนอื่นๆ ในระบบ น้ำมันต้องไหลเวียนกลับไปสู่เครื่องอัด เพื่อไม่ให้เกิดสถานะขาดแคลนน้ำมันหล่อลื่นในระบบ

ความสามารถในการละลายได้ (Solubility) หมายถึงการที่สารทำความเย็นสามารถถูกดูดซับและคงอยู่ในน้ำมันได้ในระหว่างการทำงานปกติ โดยกำหนดว่าถ้าน้ำมันแยกตัวออกมามาก (ละลายน้อย) แสดงว่าสารทำความเย็นมีส่วนผสมบางจะทำให้สูญเสียความสามารถในการป้องกันเครื่องอัด นอกจากนี้ยังทำให้การไหลเวียนกลับของน้ำมันลดลงด้วย

สำหรับน้ำมันหล่อลื่นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มพื้นฐาน คือ กลุ่มที่ได้จากกรรมวิธีแยกกลั่นของน้ำมันดิบ ได้แก่ น้ำมันชนิด Mineral oil (MO) และกลุ่มที่ได้จากการสังเคราะห์ทางเคมี ได้แก่ น้ำมันชนิด Alkyl benzene (AB) ชนิด Polyol ester (POE) และชนิด Poly alkylene glycol (PAG)

น้ำมันชนิด MO เป็นผลผลิตจากกระบวนการกลั่นปิโตรเลียม ดังนั้นจึงมีราคาถูก และนำมาใช้งานเป็นเวลานาน รวมทั้งทางอุตสาหกรรมมีประสบการณ์เกี่ยวกับน้ำมันชนิดนี้มาก ทั้งในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นและการใช้งาน อย่างไรก็ตามน้ำมันชนิดนี้เข้ากันได้ได้น้อยมากกับสารทำความเย็นตระกูล HFC

น้ำมันชนิด AB เป็นผลผลิตจากกระบวนการเฉพาะในส่วนต่างๆ ของโรงงานปิโตรเลียม ดังนั้นจึงมีราคาไม่แพงมากนัก เท่าที่ผ่านมาใช้งานในการทำความเย็นที่ต่ำมาก เนื่องจากผสมผสานกับสารทำความเย็นตระกูล HCFC ได้ดีกว่าน้ำมันชนิด MO รวมทั้งใช้งานกับระบบที่ต้องรับภาระสูงหรือใช้งานหนัก เนื่องจากค่อนข้างมีเสถียรภาพมากกว่าที่อุณหภูมิสูงเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันชนิด MO อย่างไรก็ตามน้ำมันชนิดนี้ไม่สามารถเข้ากันได้กับสารทำความเย็นตระกูล HFC เช่นกัน

น้ำมันชนิด POE เป็นผลผลิตจากการสังเคราะห์ทางเคมีที่ทำให้ได้น้ำมันที่มีสมบัติที่แตกต่างออกมาชนิดหนึ่งซึ่งมีลักษณะสามารถแยกตัวเป็นไอออน (Polar) อันทำให้น้ำมันชนิดนี้สามารถผสมกันได้ดีกับสารทำความเย็นตระกูล HFC ได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ นอกจากนี้พบว่าน้ำมันชนิดนี้มีเกรดเบา (Lighter grade) มีสมบัติที่ดีกว่าน้ำมันชนิด PAG ดังนั้นจึงมีความเหมาะสมมากกว่าในการใช้งานกับระบบการทำความเย็นที่อยู่กับที่ และอุปกรณ์ในการปรับอากาศ

น้ำมันชนิด PAG เป็นผลผลิตจากการสังเคราะห์ทางเคมีที่ทำให้ได้สารเคมีชนิดหนึ่งที่มีสมบัติในการหล่อลื่นเหมือนน้ำมัน และมีลักษณะสามารถแยกตัวเป็นไอออน (Polar) อันทำให้น้ำมันชนิดนี้สามารถผสมกันได้ดีกับสารทำความเย็นตระกูล HFC ได้ดี อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติเกิดปัญหาบางอย่างในการใช้งานกับระบบการทำความเย็นและอุปกรณ์ในการปรับอากาศที่อยู่กับที่ แต่สามารถใช้งานได้ดีกับระบบที่เคลื่อนที่เช่น ระบบปรับอากาศรถยนต์ ดังนั้นจึงนิยมใช้ในระบบดังกล่าว

2.11 การเลือกน้ำมันหล่อลื่นให้เข้ากับสารทำความเย็น

จากสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นและสภาพเข้ากันได้กับสารทำความเย็นสามารถสรุปการเลือกใช้น้ำมันกับสารทำความเย็นได้ดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ชนิดของน้ำมันหล่อลื่นเครื่องอัดที่เข้ากันได้กับสารทำความเย็นในตระกูลต่างๆ

ชนิดของน้ำมันหล่อลื่น	สารทำความเย็น ตระกูล CFC&HCFC	สารทำความเย็น ตระกูล HFC
Mineral oil (MO)	เหมาะสมดี	ไม่เหมาะสม
Alkyl benzene (AB)	เหมาะสมดี	จำกัดการใช้งาน
MO + AB	เหมาะสมดี	ไม่เหมาะสม
Polyol ester (POE)	จำกัดการใช้งาน	เหมาะสมดี
Poly alkylene glycol (PAG)	ไม่เหมาะสม	จำกัดการใช้งาน *

* มีปัญหาในเรื่องความชื้นค่อนข้างมาก

จากตารางที่ 2.7 จะเห็นว่า น้ำมัน MO และน้ำมันสังเคราะห์ชนิด AB สามารถใช้ได้ดีกับสารทำความเย็นในตระกูล CFC และตระกูล HCFC แต่ไม่สามารถใช้ได้อย่างเหมาะสมกับสารทำความเย็นใน

ตระกูล HFC เนื่องจากไม่สามารถรวมตัวกับสารทำความเย็น HFC ได้ ส่วนสารทำความเย็นที่สามารถใช้ได้กับสารทำความเย็นในตระกูล HFC ในระบบการทำความเย็นคือน้ำมันชนิด POE

2.12 ปัญหาความชื้นในน้ำมันชนิด POE

เนื่องจากน้ำมันชนิด POE เป็นสารจำพวกดูดความชื้นซึ่งหมายความว่า เป็นสารที่ชอบดูดซับน้ำเข้ามาอยู่ตลอดเวลา หากเปรียบเทียบกับน้ำมันชนิด MO ที่โดยทั่วไปจะดูดซับน้ำเข้ามาจนกระทั่งอิ่มตัวแล้ว จะไม่ดูดซับน้ำเข้ามาอีก สำหรับน้ำที่ไม่ถูกดูดซับในกรณีของน้ำมันชนิด MO จะรวมตัวกันเป็นชั้นแยกออกมาและแข็งตัวในส่วนที่เย็นของระบบ ซึ่งในบางขณะอาจไปปิดกั้นวาล์วหรือชิ้นส่วนอื่นๆ อย่างไรก็ตาม ใ้สำหรับระบบที่ใช้ น้ำมันชนิด POE จะมีน้ำเป็นจำนวนมากกว่าที่ถูกดูดซับเข้ามา ซึ่งอาจมีจำนวนถึง 10 ใน 1000 ส่วนในล้านส่วน (PPM) ที่ถูกดูดซับเข้ามาและยังคงไม่แยกตัวออกมาจากส่วนผสมของสารทำความเย็น/น้ำมัน น้ำที่ถูกดูดซับเข้ามานี้ อาจเป็นสาเหตุของการแยกตัวออกของน้ำมัน และปัญหาที่เกี่ยวข้องกับน้ำ/กรดอื่นๆ

การที่จะทำให้ระบบที่ใช้ น้ำมันชนิด POE ที่เปียก แล้วมาทำให้แห้งเป็นสิ่งที่ยุ้งยากมาก วิธีการทำให้แห้งด้วยสุญญากาศ (Vacuum dry) คือวิธีที่ใช้โดยทั่วไป อย่างไรก็ตาม ถ้า น้ำถูกดูดซับเข้าไปในน้ำมันชนิด POE แล้ว ไม่จำเป็นต้องทำ เพราะไม่สามารถดึงโมเลกุลของน้ำออกมาได้ วิธีที่ดีที่สุดในการนี้คือ ปิดระบบและบรรจุสารทำความเย็นที่ต้องการใช้เข้าไป สารทำความเย็นจะช่วยดึงน้ำออกจากน้ำมันและเมื่อไหลเวียนน้ำผ่านตัวกรอง/ตัวลดความชื้น ตัวลดความชื้นจะช่วยในการกำจัดน้ำออก อย่างไรก็ตาม ตัวลดความชื้นต้องมีประสิทธิภาพในการกำจัดความชื้นได้ดี ซึ่งตัวลดความชื้นที่มีใช้งานในปัจจุบันส่วนใหญ่มีความสามารถในการลดความชื้นเพื่อป้องกันระบบที่ใช้สารทำความเย็นตระกูล HFC/น้ำมันชนิด POE อยู่แล้ว

2.13 ลักษณะการไหลเวียนกลับของน้ำมันและการถ่ายน้ำมันซ้ำในการรีโทรฟิต

ดังได้กล่าวแล้วว่าในระบบการทำความเย็น (รวมทั้งระบบปรับอากาศ) น้ำมันบางส่วนจะผสมเข้ากับสารทำความเย็นและไหลเวียนไปกับสารทำความเย็นด้วย สำหรับลักษณะการไหลเวียนของน้ำมันในระบบเป็นดังนี้

1) ในเครื่องอัด หลังจากน้ำมันที่ผสมในสารทำความเย็นถูกอัดผ่านเครื่องอัด (ซึ่งน้ำมันนี้จะช่วยในการหล่อลื่นส่วนต่างๆ) จะถูกทำให้แยกตัวออกจากสารทำความเย็นมาบางส่วน น้ำมันที่แยกตัวออกนี้ บางส่วนจะเหลือตกค้างตามร่องต่างๆ ในบริเวณนี้และไม่ไหลกลับไปเครื่องอัด

2) น้ำมันบางส่วนที่ไหลไปกับสารทำความเย็น และไหลเวียนไปกับสารทำความเย็นเพื่อกลับสู่เครื่องอัดหลังจากไหลไปตามอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบจะมีปริมาณการไหลกลับสู่เครื่องอัดได้เล็กน้อย เพียงใดนั้นมักขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของน้ำมันกับสารทำความเย็นว่าเป็นไปได้ดีเพียงใดขณะที่ไหลไปด้วยกันในช่วงอุณหภูมิและความดันที่เปลี่ยนแปลงของอุปกรณ์ต่างๆ

3) น้ำมันที่แยกตัวออกมาจากสารทำความเย็นขณะที่ไหลไปด้วยกันในช่วงอุณหภูมิและความดันที่เปลี่ยนแปลงของอุปกรณ์ต่างๆ ดังกล่าวอาจเกาะติดตามระบบท่อซึ่งทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของเครื่องควบแน่นและเครื่องระเหยลดลง (นอกเหนือจากการที่ไม่สามารถไหลกลับคืนสู่เครื่องอัดได้)

จากลักษณะการไหลเวียนของน้ำมันในระบบดังกล่าวจึงทำให้เมื่อทำการรีโทรฟิตระบบการทำความเย็น เพื่อปรับเปลี่ยนไปใช้สารทำความเย็นในตระกูล HFC จึงมักมีปัญหาในการจัดการกับน้ำมันชนิดเดิมที่ตกค้างอยู่ในระบบ โดยเฉพาะถ้าเป็นน้ำมันชนิด MO จะเกิดปัญหาน้ำมันตกค้างมากกว่าน้ำมันชนิด AB เนื่องจากความสามารถในการผสมผสานกันได้ และความสามารถในการละลายได้กับสารทำความเย็นต่ำกว่าน้ำมันชนิด AB โดยเฉพาะถ้าใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ

ดังนั้นในการรีโทรฟิตระบบเดิมไปเป็นระบบที่ใช้สารทำความเย็น HFC จึงต้องมีการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันชนิด POE หลายครั้งเท่าที่เป็นไปได้ ซึ่งขั้นตอนนี้โดยทั่วไปเรียกว่าการถ่ายน้ำมันซ้ำ หรือการฟลัช (Flushing) เพื่อลดปริมาณน้ำมันชนิดเดิมให้เหลือค้างอยู่ในระบบให้น้อยที่สุด ขั้นตอนนี้โดยทั่วไปกระทำได้ด้วยการถ่ายน้ำมันเดิมออก เติมน้ำมันใหม่ เดินเครื่องระบบ ถ่ายน้ำมันเดิมออก เติมน้ำมันใหม่ เดินเครื่องระบบ ซ้ำๆ กันหลายๆ ครั้ง จนกว่าน้ำมันชนิดเดิมจะถูกชะออกให้หมดหรือเกือบหมด

สำหรับการถ่ายน้ำมันซ้ำโดยทั่วไปที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดมักจะทำก่อนการเปลี่ยนถ่ายสารทำความเย็นไปเป็นชนิดใหม่มากกว่ากระทำหลังการเปลี่ยนถ่ายสารทำความเย็นแล้ว

2.14 การรีโทรฟิต

ในที่นี้มุ่งเน้นการรีโทรฟิตระบบที่ใช้สารทำความเย็นตระกูล CFC ซึ่งมีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (เครื่องทำน้ำเย็นและเครื่องควบแน่น) อยู่ในสภาพดี โดยอาจปรับเปลี่ยนมอเตอร์และเครื่องอัด รวมทั้งน้ำมันหล่อลื่น ตัวกรองและลดความชื้น วาล์วขยายตัว และอุปกรณ์อื่นที่จำเป็นซึ่งเข้ากันได้กับสารทำความเย็นชนิดใหม่ตระกูล HFC เท่านั้น

อย่างไรก็ดี ก่อนการรีโทรฟิตต้องประเมินเบื้องต้นก่อนว่า การรีโทรฟิตดีกว่าการเปลี่ยนอุปกรณ์ใหม่หรือไม่ ได้แก่ การประเมินสภาพทั่วไปของอุปกรณ์ ซิลหรือปะเก็นต่างๆ และอายุ รวมถึงสภาพทั่วไปของเครื่องทำน้ำเย็น (Chiller) นอกจากนี้ควรตรวจสอบการใช้งาน ประสิทธิภาพ และบันทึกการใช้สารทำความเย็นทำความเย็นที่ผ่านมา ซึ่งพอสรุปขั้นตอนการรีโทรฟิตสำหรับสารทำความเย็นทางเลือกได้ดังนี้

1) รวบรวมข้อมูลพื้นฐานของระบบปัจจุบันเพื่อนำมาใช้จัดการระบบให้เหมาะสมที่สุด เมื่อเปลี่ยนมาใช้สารทำความเย็นทางเลือก เช่นปริมาณสารทำความเย็น CFC ที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน ชนิดและปริมาณของน้ำมันหล่อลื่น อุณหภูมิและความดันใช้งานที่เป็นอยู่ (ติดตั้งเทอร์โมมิเตอร์และเครื่องวัดความดันตามจุดต่างๆ ในระบบ) รวมทั้งประเมินสมรรถนะและประสิทธิภาพของระบบโดยรวม และคาดการณ์สมรรถนะของระบบภายหลังการรีโทรฟิตด้วย

2) ถ้าย่น้ำมันหล่อลื่นเดิมออกจากระบบในกรณีของการรีโทรฟิตเป็นสารทำความเย็น HFC ได้แก่ น้ำมันชนิด MO หรือ AB ตามแต่ชนิดที่ใช้ และวัดปริมาณที่ถ่ายออกไว้ อย่างไรก็ตามในขั้นตอนนี้ยังไม่ต้องถ่ายสารทำความเย็นเดิมออกจากระบบ (สำหรับการรีโทรฟิตจากสารทำความเย็น CFC เป็นสารทำความเย็น HCFC ซึ่งน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้สามารถเข้ากันได้กับสารทำความเย็น HCFC ที่ใช้ ก็ไม่จำเป็นต้องถ่ายน้ำมันหล่อลื่นเดิมออก ให้ข้ามไปทำขั้นตอนที่ 5)

3) กรณีของการรีโทรฟิตเป็นสารทำความเย็น HFC ให้ใช้น้ำมันหล่อลื่นชนิด POE ส่วนกรณีของการรีโทรฟิตเป็นสารทำความเย็น HCFC ที่ต้องการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่นใหม่เพื่อความเหมาะสมให้ใช้น้ำมันหล่อลื่นตามข้อของสารทำความเย็น HCFC นั้นๆ ทั้งนี้ไม่ว่ากรณีใดให้ใช้น้ำมันหล่อลื่นในปริมาณที่เท่ากับน้ำมันหล่อลื่นเดิมที่ถ่ายออกจากขั้นตอนที่ 2) จากนั้นเริ่มเดินเครื่องระบบและให้ระบบทำงานอย่างต่อเนื่องไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง หรืออาจนานขึ้นถ้าระบบมีระบบท่อที่ซับซ้อน

4) กรณีของการรีโทรฟิตเป็นสารทำความเย็น HFC ให้ถ่ายน้ำมันหล่อลื่นชนิด POE ออก และทำขั้นตอนที่ 3) ซ้ำอย่างน้อยอีก 2 ครั้ง หรือจนกว่าน้ำมันหล่อลื่นชนิด MO/AB ตกค้างอยู่ในระบบน้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก หรือตามคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิตเครื่องอัด

5) ดูดสารทำความเย็น CFC/HCFC ออกจากระบบเก็บไว้ในถังเก็บที่เหมาะสมเพื่อนำไปฟื้นฟูสภาพ (Recycling) ปรึสภาพ (Reclaiming) หรือทำลาย (Disposing) รวมทั้งถ่ายน้ำมันหล่อลื่นออกด้วย

6) เปลี่ยนตัวกรอง/ตัวลดความชื้นใหม่ รวมทั้งซีลหรือปะเก็นต่างๆ ตามความเหมาะสมที่เข้ากันได้กับสารทำความเย็นชนิดใหม่ ในกรณีนี้ให้ปรึกษาบริษัทผู้ผลิตสารทำความเย็นและผู้ผลิตอุปกรณ์ต่างๆ เป็น การดีที่สุด

7) ทำสัญญาการระบบเพื่อกำจัดความชื้นและตรวจสอบการรั่วไหล

8) เริ่มบรรจุสารทำความเย็นทางเลือก ในเบื้องต้นให้บรรจุประมาณร้อยละ 75 – 90 โดยน้ำหนักของสารทำความเย็นเดิม พร้อมทั้งบรรจุน้ำมันหล่อลื่นใหม่ด้วย

9) เริ่มใช้งานระบบได้อย่างสมบูรณ์ และปรับปริมาณสารทำความเย็นให้เหมาะสม ด้วยการตรวจสอบจากเทอร์โมมิเตอร์และเครื่องวัดความดัน ให้ได้ตามที่ออกแบบ จากนั้นจัดทำป้ายสลากกำกับระบุให้ทราบถึงชนิดของสารทำความเย็นและน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้ สุดท้ายให้ทำการฝึกอบรมพนักงานให้เข้าใจ ถือเป็น การเสร็จสิ้นการรีโทรฟิต

แบบฝึกหัดบทที่ 2

1. จงอธิบายถึงสาเหตุที่ทำให้สารทำความเย็นชนิด CFC เป็นสารทำความเย็นต้องห้าม
2. สารทำความเย็นชนิดอะซีโอโทรปิกคืออะไร และมีผลกระทบต่อการทำงานของระบบทำความเย็น
3. จงอธิบายความแตกต่างของสารทำความเย็นชนิดอะซีโอโทรปิกกับสารทำความเย็นผสมชนิดกึ่งอะซีโอโทรปิกมาพอสังเขป
4. จงอธิบายวิธีการเรียกชื่อสารทำความเย็น
5. จงอธิบายความแตกต่างของสารทำความเย็นชนิด R-134a กับ R-717
6. จงอธิบายความแตกต่างของน้ำมันชนิด Mineral oil (MO) น้ำมันชนิด Alkyl benzene (AB) ชนิด Polyol ester (POE) และชนิด Poly alkylene glycol (PAG) มาพอสังเขป
7. จงบอกสมบัติหลักของน้ำมันหล่อลื่นที่สำคัญมา 5 ข้อ
8. จงอธิบายการเลือกใช้งานน้ำมันกับสารทำความเย็น
9. จงอธิบายลักษณะการไหลเวียนกลับของน้ำมันและการถ่ายน้ำมันซ้ำในการรีโทรฟิต
10. จงอธิบายขั้นตอนการรีโทรฟิตสำหรับสารทำความเย็นทางเลือก

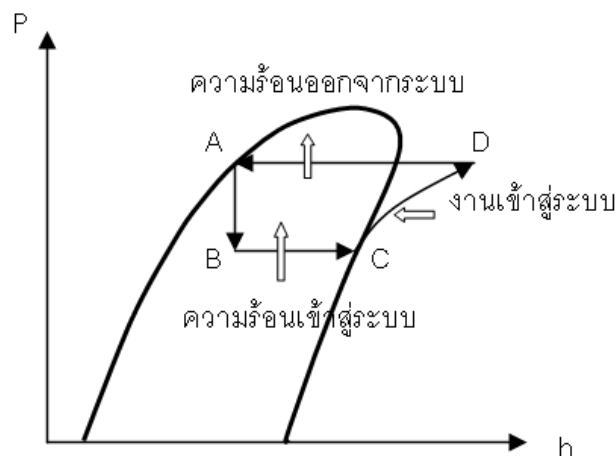
บทที่ 3

พื้นฐานการออกแบบสมรรถนะ ของระบบการทำความเย็นแบบอัดไอ

3.1 ผลกระทบต่อสมรรถนะการทำความเย็น

ในบทที่ 1 หัวข้อ 1.3 วัฏจักรการทำความเย็นพื้นฐาน ได้กล่าวถึงวัฏจักรการทำความเย็นพื้นฐานทางทฤษฎีของระบบการทำความเย็นแบบอัดไอซึ่งเป็นวัฏจักรการทำความเย็นเชิงอุดมคติดังแผนภาพ P - h รูปที่ 3.1 ในบทนี้เป็นการอธิบายพื้นฐานการออกแบบสมรรถนะของระบบการทำความเย็นแบบอัดไอใน 7 ลักษณะที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์ต่างๆ ของระบบและผลต่อสัมประสิทธิ์ของสมรรถนะการทำความเย็น หรือ COP ได้แก่

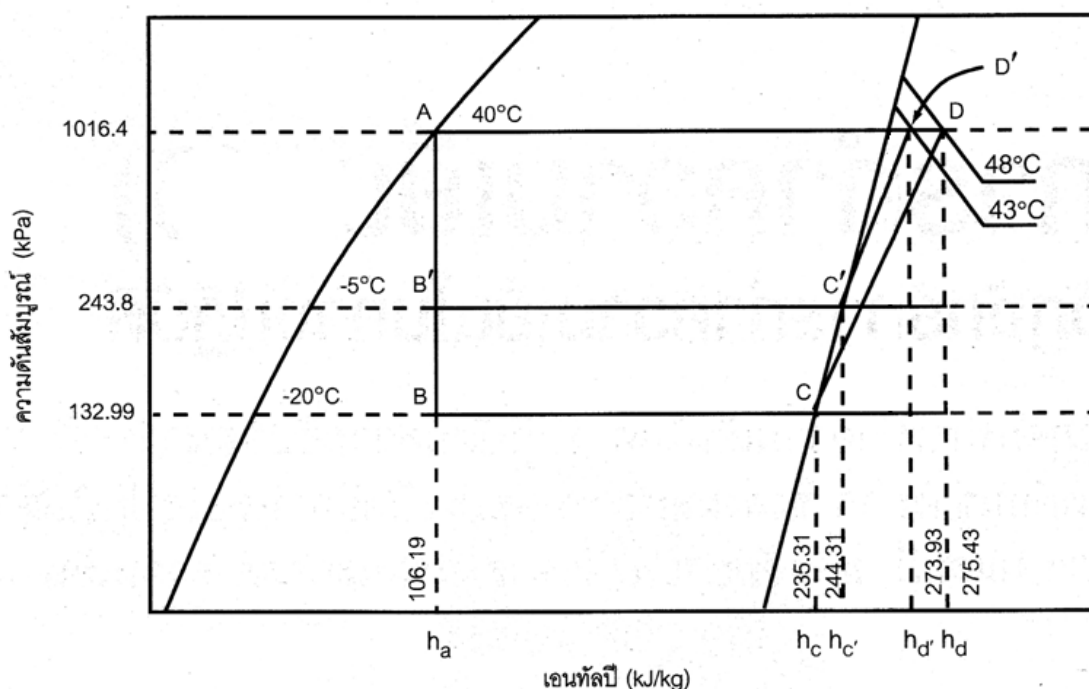
- 1) ผลของอุณหภูมิสารทำความเย็นที่เครื่องระเหยที่ลดลง
- 2) ผลของอุณหภูมิสารทำความเย็นที่เครื่องควบแน่นที่สูงขึ้น
- 3) ผลของอุณหภูมิสารทำความเย็นก่อนเข้าอุปกรณ์ลดความดันที่ลดลง
- 4) ผลของอุณหภูมิสารทำความเย็นก่อนเข้าเครื่องอัดที่สูงขึ้น
- 5) ผลของอุณหภูมิสารทำความเย็นก่อนเข้าอุปกรณ์ลดความดันที่ลดลงและผลของอุณหภูมิสารทำความเย็นก่อนเข้าเครื่องอัดที่สูงขึ้นด้วยการใช้การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสารทำความเย็นในกระบวนการทั้งสอง
- 6) ผลของการสูญเสียความดันสารทำความเย็นขณะไหลผ่านอุปกรณ์ต่างๆ
- 7) ผลของการสูญเสียประสิทธิภาพเชิงกลในอุปกรณ์ต่างๆ



รูปที่ 3.1 วัฏจักรการทำความเย็นเชิงอุดมคติ

3.2 ผลของอุณหภูมิสารทำความเย็นที่เครื่องระเหยที่ลดลง

เนื่องจากในทางปฏิบัติ การทำงานของเครื่องทำความเย็นมีหลากหลายลักษณะตามวัตถุประสงค์ในการออกแบบระบบทำความเย็นนั้นๆ เช่น ใช้งานที่อุณหภูมิ -5°C หรือ -10°C หรือ -20°C หรือ -30°C หรืออาจเป็น -40°C เป็นต้น อย่างไรก็ตามอย่างไรก็ดีบางครั้งผู้ออกแบบอาจปรับลดอุณหภูมิการออกแบบที่เครื่องระเหยลงให้ต่ำกว่าที่ต้องการในการดึงความร้อนออกจากระบบ เพื่อให้ใช้งานได้หลากหลายมากขึ้น การกระทำดังกล่าวจะมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์ต่างๆ และมีผลต่อสัมประสิทธิ์ของสมรรถนะการทำความเย็น หรือ COP ดังนี้



รูปที่ 3.2 การเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิสารทำความเย็นที่เครื่องระเหยที่ลดลง สำหรับสารทำความเย็น R-134a

พิจารณาวัฏจักร ABCD ในรูปที่ 3.2 ซึ่งมีอุณหภูมิสารทำความเย็น (R-134a) ที่เครื่องควบแน่นเท่ากับ 40°C และมีอุณหภูมิสารทำความเย็นที่เครื่องระเหยเท่ากับ -20°C นอกจากนี้ในรูปที่ 3.2 ยังมีวัฏจักร AB'C'D' ซึ่งมีอุณหภูมิสารทำความเย็นที่เครื่องควบแน่นเท่ากับอุณหภูมิสารทำความเย็นของวัฏจักร ABCD แต่มีอุณหภูมิสารทำความเย็นที่เครื่องระเหยเท่ากับ -5°C เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิสารทำความเย็นที่เครื่องระเหยที่ลดลงต่อระบบ

สำหรับค่าเอนทัลปี ณ จุดต่างๆ ของแต่ละวัฏจักรซึ่งหาได้จากแผนภูมิความดัน-เอนทัลปี หรือตารางคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็น R-134a มีค่าดังต่อไปนี้ (รายละเอียดการหาค่าต่างๆ ดูในบทที่ 1)

วัฏจักร $AB'C'D'$ ซึ่งมีอุณหภูมิสารทำความเย็นที่เครื่องระเหยเท่ากับ -5°C

$$h_A = h_{B'} = 106.19 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{C'} = 244.31 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{D'} = 273.93 \text{ kJ/kg}$$

วัฏจักร ABCD ซึ่งมีอุณหภูมิสารทำความเย็นที่เครื่องระเหยเท่ากับ -20°C

$$h_A = h_B = 106.19 \text{ kJ/kg}$$

$$h_C = 235.31 \text{ kJ/kg}$$

$$h_D = 275.43 \text{ kJ/kg}$$

ในการเปรียบเทียบวัฏจักรทั้งสองในแง่มุมต่างๆ ได้แก่ ผลกระทบต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์ต่างๆ และผลต่อสัมประสิทธิ์ของสมรรถนะการทำความเย็น หรือ COP แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 การเปรียบเทียบผลกระทบในแง่มุมต่างๆ ของวัฏจักร $AB'C'D'$ และวัฏจักร ABCD

หัวข้อเปรียบเทียบ	วัฏจักร $AB'C'D'$ (-5°C)	วัฏจักร ABCD (-20°C)
1) การถ่ายเทความร้อนที่เครื่องระเหย (kJ/kg)	$h_{C'} - h_{B'} = 138.12$	$h_C - h_B = 129.12$
2) การถ่ายเทความร้อนที่เครื่องควบแน่น (kJ/kg)	$h_A - h_{D'} = -167.74$	$h_A - h_D = -169.24$
3) งานของเครื่องอัด (kJ/kg)	$h_{D'} - h_{C'} = 29.62$	$h_D - h_C = 40.12$
4) COP	ข้อ 1./ข้อ 3. = 4.66	ข้อ 1./ข้อ 3. = 3.22
5) มวลการไหลของสารทำความเย็นต่อตันความเย็น, m (kg/s ton)	$(3.516 \text{ kW/ton}) / \text{ข้อ 1.}$ $= (3.516 \text{ kW/ton}) / 138.12$ $= 0.0254$	$(3.516 \text{ kW/ton}) / \text{ข้อ 1.}$ $= (3.516 \text{ kW/ton}) / 129.12$ $= 0.0272$
6) ปริมาตรการไหลของสารทำความเย็นต่อตันความเย็น, V (m^3/ton)	ข้อ 5. X ปริมาตรจำเพาะที่ C' $= (0.0254)(0.0825)$ $= 0.002095$	ข้อ 5. X ปริมาตรจำเพาะที่ C $= (0.0272)(0.1464)$ $= 0.003982$
7) กำลังม้าที่ใช้ในการขับเครื่องอัดต่อตันความเย็น (hp)	ข้อ 5. X ข้อ 3./0.7457 kW/hp $= 1.009$	ข้อ 5. X ข้อ 3./0.7457 kW/hp $= 1.463$

มวลการไหลของสารทำความเย็นต่อตันความเย็นในตารางที่ 3.1 หาได้จากการนำค่าอัตราการทำความเย็นขนาด 1 ตันความเย็น (3.516 kW หรือ 12,000 Btu/hr) หารด้วยค่าการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องระเหย (ข้อ 1. ในตารางที่ 3.1) ดังนั้น

กรณี วัฏจักร AB'C'D' ได้

$$\begin{aligned} m &= (3.516 \text{ kW/ton}) / (138.12 \text{ kJ/kg}) \\ &= 0.0254 \text{ kg/s/ton} \end{aligned}$$

ส่วน วัฏจักร ABCD ได้

$$\begin{aligned} m &= (3.516 \text{ kW/ton}) / (129.12 \text{ kJ/kg}) \\ &= 0.0272 \text{ kg/s/ton} \end{aligned}$$

ปริมาตรการไหลของสารทำความเย็นต่อตันความเย็นในตารางที่ 3.1 หาได้จากการนำค่ามวลการไหลของสารทำความเย็นต่อตันความเย็นคูณด้วยค่าปริมาตรจำเพาะของสารทำความเย็นที่ออกจากเครื่องระเหย ดังนั้น

กรณี วัฏจักร AB'C'D' ได้

$$\begin{aligned} V &= (0.0254 \text{ kg/s ton})(0.0825 \text{ m}^3/\text{kg}) \\ &= 0.002095 \text{ m}^3/\text{ton} \end{aligned}$$

ส่วน วัฏจักร ABCD ได้

$$V = (0.0272 \text{ kg/s ton})(0.1464 \text{ m}^3/\text{kg}) = 0.003982 \text{ m}^3/\text{ton}$$

กำลังม้าที่ใช้ในการขับเครื่องอัดต่อตันความเย็นในตารางที่ 3.1 หาได้จากการนำค่ามวลการไหลของสารทำความเย็นต่อตันความเย็นคูณด้วยค่างานของเครื่องอัด จากนั้นหารด้วยค่าตัวประกอบการแปลงค่าจาก kW เป็น hp (1 hp = 0.7457 kW) ดังนั้น

กรณี วัฏจักร AB'C'D' ได้

$$\begin{aligned} \text{กำลังม้า} &= (0.0254 \text{ kg/s ton})(29.62 \text{ kJ/kg}) / (0.7457 \text{ kW/ hp}) \\ &= 1.009 \text{ hp} \end{aligned}$$

ส่วน วัฏจักร ABCD ได้

$$\begin{aligned} \text{กำลังม้า} &= (0.0272 \text{ kg/s ton})(40.12 \text{ kJ/kg}) / (0.7457 \text{ kW/ hp}) \\ &= 1.463 \text{ hp} \end{aligned}$$

จากค่าต่างๆ ที่นำมาเปรียบเทียบในตารางที่ 3.1 ของทั้งสองวัฏจักรสามารถสรุปได้ดังนี้

- การถ่ายเทความร้อนที่เครื่องระเหยของวัฏจักร AB'C'D' มากกว่าวัฏจักร ABCD

$$\begin{aligned} &= [(h_{C'} - h_{B'}) - (h_C - h_B)] \times 100 / (h_C - h_B) \\ &= [138.12 - 129.12] \times 100 / 129.12 = 6.97 \% \end{aligned}$$
- การถ่ายเทความร้อนที่เครื่องควบแน่นของวัฏจักร AB'C'D' น้อยกว่าวัฏจักร ABCD

$$\begin{aligned} &= [(h_A - h_D) - (h_A - h_{D'})] \times 100 / (h_A - h_D) \\ &= [169.24 - 167.74] \times 100 / 169.24 = 0.89 \% \end{aligned}$$

- 3) งานของเครื่องอัดของวัฏจักร $AB'C'D'$ น้อยกว่าวัฏจักร ABCD

$$= [(h_D - h_C) - (h_D - h_{C'})] \times 100 / (h_D - h_C)$$

$$= [40.12 - 29.62] \times 100 / 40.12 = 26.17 \%$$
- 4) สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะการทำความเย็น หรือ COP ของวัฏจักร $AB'C'D'$ มากกว่าวัฏจักร ABCD

$$= [4.66 - 3.22] \times 100 / 3.22 = 44.72 \%$$
- 5) มวลการไหลของสารทำความเย็นต่อตันความเย็นของวัฏจักร $AB'C'D'$ น้อยกว่าวัฏจักร ABCD

$$= [0.0272 - 0.0254] \times 100 / 0.0272 = 6.62 \%$$
- 6) ปริมาตรการไหลของสารทำความเย็นต่อตันความเย็นของวัฏจักร $AB'C'D'$ น้อยกว่าวัฏจักร ABCD

$$= [0.003982 - 0.002095] \times 100 / 0.003982 = 47.39 \%$$
- 7) กำลังม้าที่ใช้ในการขับเคลื่อนเครื่องอัดต่อตันความเย็น วัฏจักร $AB'C'D'$ น้อยกว่าวัฏจักร ABCD

$$= [1.463 - 1.009] \times 100 / 1.463 = 31.03 \%$$

จากผลการเปรียบเทียบดังกล่าวข้างต้นพบว่า ผลของอุณหภูมิสารทำความเย็นที่ลดลงทำให้ผลการทำความเย็นของระบบลดลง 6.97 % ในขณะที่ต้องใช้งานในการอัดเพิ่มขึ้น 26.17 % ซึ่งทำให้ต้องใช้กำลังม้าต่อตันความเย็นเพิ่มขึ้น 31.03 % ส่งผลให้ค่า COP ของวัฏจักรลดลง 44.72 % ในขณะที่ทำให้ต้องเพิ่มปริมาตรการไหลของสารทำความเย็นต่อตันความเย็นเพิ่มขึ้น 47.39 % ซึ่งส่งผลให้ขนาดของเครื่องอัดโตขึ้นเป็นสัดส่วนกัน ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า ควรออกแบบอุณหภูมิสารทำความเย็นที่เครื่องระเหยให้มีระดับที่เหมาะสมมากกว่าออกแบบให้มีระดับอุณหภูมิที่ต่ำเกินความจำเป็นที่ต้องใช้ เพื่อการใช้งานที่ประหยัด

3.3 ผลของอุณหภูมิสารทำความเย็นที่เครื่องควบแน่นที่สูงขึ้น

เนื่องจากในทางปฏิบัติการทำงานของเครื่องทำความเย็นโดยปกติมีทั้งที่ติดตั้งภายในอาคาร โดยเฉพาะเครื่องทำความเย็นขนาดเล็กที่ใช้ตามบ้าน หรือเครื่องเชิงพาณิชย์ที่มีขนาดใหญ่ และที่ติดตั้งภายนอกอาคารสำหรับเครื่องที่มีขนาดใหญ่ที่บางครั้งอาจจำเป็นต้องติดตั้งในลักษณะจัดวางเครื่องทำความเย็นที่ไม่สามารถให้เครื่องควบแน่นระบายความร้อนได้ดี หรือมีการติดตั้งเครื่องควบแน่นที่ทำให้ถูกแสงแดดส่องอยู่ตลอด ผลคือเครื่องที่ติดตั้งในลักษณะดังกล่าว บรรยายภาศรอบๆ เครื่องควบแน่นที่ใช้ในการระบายความร้อนออกจากระบบมีอุณหภูมิสูงกว่าเครื่องที่มีการจัดวางให้มีการระบายความร้อนออกได้ดี ดังนั้นในการออกแบบระบบการทำความเย็นที่ใช้งานดังกล่าวจึงจำเป็นต้องปรับเพิ่มอุณหภูมิการออกแบบที่เครื่องควบแน่นจากอุณหภูมิออกแบบปกติขึ้นอีกประมาณ $10 - 15^{\circ}\text{C}$ เพื่อชดเชยผลของอุณหภูมิที่สูงขึ้นและผลของพลังงานความร้อนที่สะสมอยู่รอบๆ เครื่องควบแน่น ตัวอย่างเช่น ถ้าอุณหภูมิ

บรรยากาศปกติมีอุณหภูมิที่ระดับ 30°C อุณหภูมิออกแบบที่เครื่องควบแน่นสำหรับเครื่องที่มีการระบายความร้อนที่เครื่องควบแน่นได้ดีมีค่าประมาณ 40°C ดังนั้นอุณหภูมิออกแบบที่เครื่องควบแน่นสำหรับเครื่องที่มีการระบายความร้อนไม่ดีจะมีค่าประมาณ $50 - 55^{\circ}\text{C}$ เป็นต้น

สำหรับผลของการปรับเพิ่มอุณหภูมิสารทำความเย็นที่เครื่องควบแน่นมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์ต่างๆ และมีผลต่อสัมประสิทธิ์ของสมรรถนะการทำความเย็น ดังนี้

พิจารณาวัฏจักร ABCDE และวัฏจักร A'B'CD'E' ในรูปที่ 3.3 ซึ่งมีอุณหภูมิสารทำความเย็น (R-134a) ที่เครื่องระเหยเท่ากับทั้งสองวัฏจักรที่ -20°C และมีอุณหภูมิสารทำความเย็นที่เครื่องควบแน่นเท่ากับ 40°C และ 50°C ตามลำดับ เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิสารทำความเย็นที่เครื่องระเหยที่สูงขึ้นต่อระบบ

สำหรับค่าเอนทัลปี ณ จุดต่างๆ ของแต่ละวัฏจักรมีค่าดังต่อไปนี้

วัฏจักร ABCDE ซึ่งมีอุณหภูมิสารทำความเย็นที่เครื่องควบแน่นเท่ากับ 40°C

$$h_A = h_B = 106.19 \text{ kJ/kg}$$

$$h_C = 235.31 \text{ kJ/kg}$$

$$h_D = 275.43 \text{ kJ/kg}$$

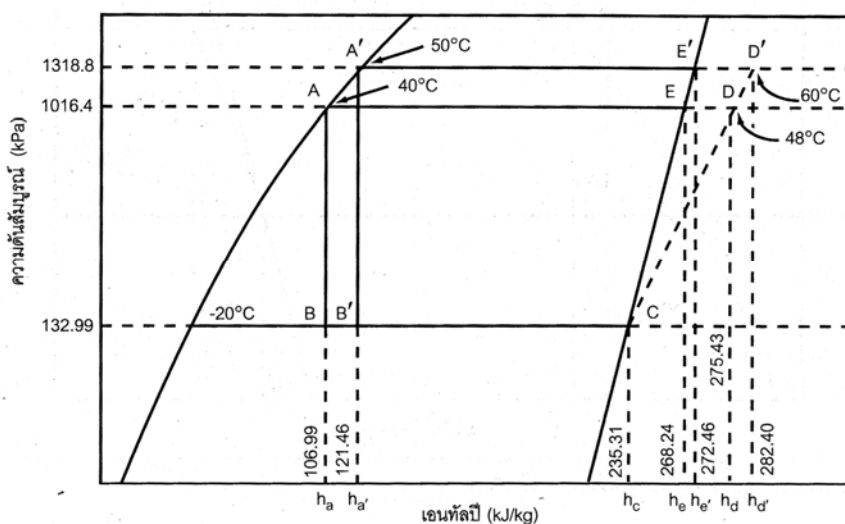
วัฏจักร A'B'CD'E' ซึ่งมีอุณหภูมิสารทำความเย็นที่เครื่องควบแน่นเท่ากับ 50°C

$$h_{A'} = h_{B'} = 106.19 \text{ kJ/kg}$$

$$h_C = 235.31 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{D'} = 282.80 \text{ kJ/kg}$$

ตารางที่ 3.2 แสดงการเปรียบเทียบผลกระทบของอุณหภูมิสารทำความเย็นที่เครื่องควบแน่นที่สูงขึ้นต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์ต่างๆ และผลต่อสัมประสิทธิ์ของสมรรถนะการทำความเย็น หรือ COP ของวัฏจักรทั้งสอง



รูปที่ 3.3 การเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิสารทำความเย็นที่เครื่องควบแน่นที่สูงขึ้น

ตารางที่ 3.2 การเปรียบเทียบผลกระทบในแง่มุมต่างๆ ของวัฏจักร ABCDE และวัฏจักร A'B'CD'E'

หัวข้อเปรียบเทียบ	วัฏจักร ABCDE (40°C)	วัฏจักร A'B'CD'E' (50°C)
1) การถ่ายเทความร้อนที่เครื่องระเหย (kJ/kg)	$h_C - h_B = 129.12$	$h_C - h_{B'} = 113.85$
2) การถ่ายเทความร้อนที่เครื่องควบแน่น (kJ/kg)	$h_A - h_D = -169.24$	$h_{A'} - h_{D'} = -161.34$
3) งานของเครื่องอัด (kJ/kg)	$h_D - h_C = 40.12$	$h_{D'} - h_C = 47.49$
4) COP	ข้อ 1./ข้อ 3. = 3.22	ข้อ 1./ข้อ 3. = 2.4
5) มวลการไหลของสารทำความเย็นต่อตันความเย็น, m (kg/s ton)	(3.516 kW/ton)/ ข้อ 1. = (3.516 kW/ton)/129.12 = 0.0272	(3.516 kW/ton)/ ข้อ 1. = (3.516 kW/ton)/113.85 = 0.03088
6) ปริมาณการไหลของสารทำความเย็นต่อตันความเย็น, V (m ³ /ton)	ข้อ 5. X ปริมาตรจำเพาะที่ C = (0.0272)(0.1464) = 0.003982	ข้อ 5. X ปริมาตรจำเพาะที่ C = (0.03088)(0.1464) = 0.004521
7) กำลังม้าที่ใช้ในการขับเครื่องอัดต่อตันความเย็น (hp)	ข้อ 5. X ข้อ 3./0.7457 kW/hp = 1.463	ข้อ 5. X ข้อ 3./0.7457 kW/hp = 1.967

จากค่าต่างๆ ที่นำมาเปรียบเทียบในตารางที่ 3.2 ของทั้งสองวัฏจักรสามารถสรุปได้ดังนี้

- การถ่ายเทความร้อนที่เครื่องระเหยของวัฏจักร A'B'CD'E' น้อยกว่าวัฏจักร ABCDE

$$= [(h_C - h_B) - (h_C - h_{B'})] \times 100 / (h_C - h_B)$$

$$= [129.12 - 113.85] \times 100 / 129.12 = 11.83 \%$$
- การถ่ายเทความร้อนที่เครื่องควบแน่นของวัฏจักร A'B'CD'E' น้อยกว่าวัฏจักร ABCDE

$$= [(h_A - h_D) - (h_{A'} - h_{D'})] \times 100 / (h_A - h_D)$$

$$= [169.24 - 161.34] \times 100 / 169.24 = 4.67 \%$$
- งานของเครื่องอัดของวัฏจักร A'B'CD'E' มากกว่าวัฏจักร ABCDE

$$= [(h_{D'} - h_C) - (h_D - h_C)] \times 100 / (h_D - h_C)$$

$$= [47.49 - 40.12] \times 100 / 40.12 = 18.37 \%$$
- สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะการทำความเย็น หรือ COP ของวัฏจักร A'B'CD'E' น้อยกว่าวัฏจักร ABCDE

$$= [3.22 - 2.40] \times 100 / 3.22 = 25.47 \%$$

- 5) มวลการไหลของสารทำความเย็นต่อตันความเย็นของวัฏจักร A'B'CD'E' มากกว่าวัฏจักร ABCDE
- $$= [0.03088 - 0.0272] \times 100 / 0.0272 = 13.53 \%$$
- 6) ปริมาตรการไหลของสารทำความเย็นต่อตันความเย็นของวัฏจักร A'B'CD'E' มากกว่าวัฏจักร ABCDE
- $$= [0.004521 - 0.003982] \times 100 / 0.003982 = 13.54 \%$$
- 7) กำลังม้าที่ใช้ในการขับเคลื่อนอัดต่อตันความเย็น วัฏจักร A'B'CD'E' มากกว่าวัฏจักร ABCDE
- $$= [1.967 - 1.463] \times 100 / 1.463 = 34.45 \%$$

จากผลการเปรียบเทียบดังกล่าวข้างต้นพบว่าผลของอุณหภูมิสารทำความเย็นที่เครื่องควบแน่นที่สูงขึ้นทำให้ผลการทำความเย็นของระบบลดลง 11.83 % ในขณะที่ต้องใช้งานในการอัดเพิ่มขึ้น 18.37 % และต้องใช้กำลังม้าต่อตันความเย็นเพิ่มขึ้น 34.45 % ส่งผลให้ค่า COP ของวัฏจักรลดลง 25.47 % ในขณะที่ทำให้ต้องเพิ่มปริมาตรการไหลของสารทำความเย็นต่อตันความเย็นเพิ่มขึ้น 13.54 %

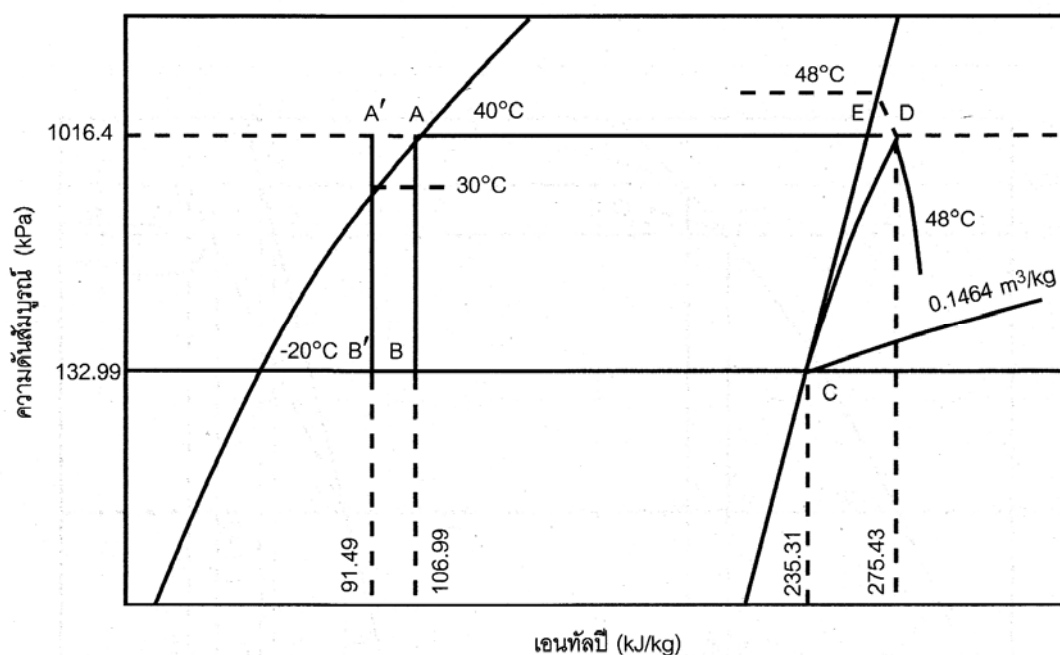
ถึงแม้ว่าผลของอุณหภูมิสารทำความเย็นที่เครื่องควบแน่นที่สูงขึ้นจะส่งผลกระทบต่อระบบเมื่อเปรียบเทียบกับผลกระทบที่เกิดขึ้นในกรณีผลของอุณหภูมิสารทำความเย็นที่เครื่องระเหยที่ต่ำลงที่กล่าวถึงในหัวข้อก่อนหน้านี้ น้อยกว่าในแง่ของค่า COP และปริมาตรการไหลที่ลดลงและที่เพิ่มขึ้นตามลำดับ แต่ก็ยังมีผลกระทบต่อระบบไม่น้อย โดยเฉพาะค่ากำลังม้าที่ใช้ในการขับเคลื่อนอัดต่อตันความเย็นที่สูงขึ้นค่อนข้างมาก ดังนั้นในการออกแบบติดตั้งเครื่องควบแน่นควรคำนึงถึงผลกระทบดังกล่าวด้วย นอกจากนี้ในการติดตั้งควรจัดวางเครื่องควบแน่นให้สามารถระบายความร้อนได้ดี มิฉะนั้นจะเกิดผลกระทบที่ทำให้สารทำความเย็นไม่สามารถเปลี่ยนสถานะจนกลายเป็นของเหลวอิมิตัวอย่างสมบูรณ์ในเครื่องควบแน่นก่อนเข้าสู่อุปกรณ์ลดความดันซึ่งส่งผลให้การทำความเย็นของระบบลดลงในลักษณะทำนองเดียวกัน และทำให้ค่า COP ของระบบลดลง ถึงแม้ว่าผลกระทบด้านอื่นๆ อาจไม่เปลี่ยนแปลงก็ตาม อย่างไรก็ตาม ภายหลังจากผลกระทบดังกล่าวได้นำไปสู่แนวความคิดในการลดอุณหภูมิสารทำความเย็นก่อนเข้าสู่อุปกรณ์ลดความดันให้ต่ำกว่าจุดของเหลวอิมิตัวเพื่อชดเชยผลกระทบดังกล่าว นอกจากนี้การลดอุณหภูมิสารทำความเย็นให้ต่ำกว่าจุดของเหลวอิมิตัวมีผลดีกับระบบในด้านอื่นๆ ด้วยดังอธิบายในหัวข้อต่อไป

3.4 ผลของอุณหภูมิสารทำความเย็นก่อนเข้าสู่อุปกรณ์ลดความดันที่ลดลง

จากผลของอุณหภูมิสารทำความเย็นที่เครื่องควบแน่นที่สูงขึ้นดังกล่าว จึงได้มีการวิเคราะห์ต่อเนื่องถึงผลของอุณหภูมิสารทำความเย็นก่อนเข้าสู่อุปกรณ์ลดความดันที่ลดลง ซึ่งมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์ต่างๆ และมีผลต่อสัมประสิทธิ์ของสมรรถนะการทำความเย็น หรือ COP ดังนี้

พิจารณาวัฏจักร ABCDE และวัฏจักร A'B'CDE ในรูปที่ 3.4 ซึ่งมีอุณหภูมิสารทำความเย็น (R-134a) ที่เครื่องระเหยและที่เครื่องควบแน่นเท่ากันทั้งสองวัฏจักรที่ -20°C และ 40°C ตามลำดับ เพียงแต่ในวัฏจักร A'B'CDE มีการลดอุณหภูมิสารทำความเย็นก่อนเข้าสู่อุปกรณ์ลดความดันให้ต่ำกว่า

อุณหภูมิของเหลวอิ่มตัวที่ 40°C ลงไปเป็น 30°C เพื่อเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิสารทำความเย็นก่อนเข้าอุปกรณ์ลดความดันที่ลดลงต่อระบบ



รูปที่ 3.4 การเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิสารทำความเย็นก่อนเข้าอุปกรณ์ลดความดันที่ลดลง

สำหรับค่าเอนทัลปี ณ จุดต่างๆ ของแต่ละวัฏจักรมีค่าดังต่อไปนี้

วัฏจักร ABCDE ซึ่งมีอุณหภูมิสารทำความเย็นก่อนเข้าอุปกรณ์ลดความดันเท่ากับ 40°C

$$h_A = h_B = 106.19 \text{ kJ/kg}$$

$$h_C = 235.31 \text{ kJ/kg}$$

$$h_D = 275.43 \text{ kJ/kg}$$

วัฏจักร A'B'CDE ซึ่งมีอุณหภูมิสารทำความเย็นก่อนเข้าอุปกรณ์ลดความดันเท่ากับ 30°C

$$h_{A'} = h_{B'} = 91.49 \text{ kJ/kg}$$

$$h_C = 235.31 \text{ kJ/kg}$$

$$h_D = 275.43 \text{ kJ/kg}$$

ตารางที่ 3.3 แสดงการเปรียบเทียบผลกระทบของอุณหภูมิสารทำความเย็นก่อนเข้าอุปกรณ์ลดความดันที่ลดลงต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์ต่างๆ และผลต่อสัมประสิทธิ์ของสมรรถนะการทำความเย็น หรือ COP ของวัฏจักรทั้งสอง

ตารางที่ 3.3 การเปรียบเทียบผลกระทบในแง่มุมต่างๆ ของวัฏจักร ABCDE และวัฏจักร A'B'CDE

หัวข้อเปรียบเทียบ	วัฏจักร ABCDE (40°C)	วัฏจักร A'B'CDE (30°C)
1) การถ่ายเทความร้อนที่เครื่องระเหย (kJ/kg)	$h_C - h_B = 129.12$	$h_C - h_{B'} = 143.82$
2) การถ่ายเทความร้อนที่เครื่องควบแน่น (kJ/kg)	$h_A - h_D = -169.24$	$h_{A'} - h_D = -183.94$
3) งานของเครื่องอัด (kJ/kg)	$h_D - h_C = 40.12$	$h_D - h_C = 40.12$
4) COP	ข้อ 1./ข้อ 3. = 3.22	ข้อ 1./ข้อ 3. = 3.58
5) มวลการไหลของสารทำความเย็นต่อตันความเย็น, m (kg/s ton)	(3.516 kW/ton)/ ข้อ 1. = (3.516 kW/ton)/129.12 = 0.0272	(3.516 kW/ton)/ ข้อ 1. = (3.516 kW/ton)/143.82 = 0.02445
6) ปริมาณการไหลของสารทำความเย็นต่อตันความเย็น, V (m ³ /ton)	ข้อ 5. X ปริมาตรจำเพาะที่ C = (0.0272)(0.1464) = 0.003982	ข้อ 5. X ปริมาตรจำเพาะที่ C = (0.02445)(0.1464) = 0.003579
7) กำลังม้าที่ใช้ในการขับเครื่องอัดต่อตันความเย็น (hp)	ข้อ 5. X ข้อ 3./0.7457 kW/hp = 1.463	ข้อ 5. X ข้อ 3./0.7457 kW/hp = 1.317

จากค่าต่างๆ ที่นำมาเปรียบเทียบในตารางที่ 3.3 ของทั้งสองวัฏจักรสามารถสรุปได้ดังนี้

- การถ่ายเทความร้อนที่เครื่องระเหยของวัฏจักร A'B'CDE มากกว่าวัฏจักร ABCDE

$$= [(h_C - h_{B'}) - (h_C - h_B)] \times 100 / (h_C - h_B)$$

$$= [143.82 - 129.12] \times 100 / 129.12 = 11.38 \%$$
- การถ่ายเทความร้อนที่เครื่องควบแน่นของวัฏจักร A'B'CDE มากกว่าวัฏจักร ABCDE

$$= [(h_{A'} - h_D) - (h_A - h_D)] \times 100 / (h_A - h_D)$$

$$= [183.94 - 169.24] \times 100 / 169.24 = 8.68 \%$$
- งานของเครื่องอัดของวัฏจักร A'B'CDE เท่ากับ วัฏจักร ABCDE
- สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะการทำความเย็น หรือ COP ของวัฏจักร A'B'CDE มากกว่าวัฏจักร ABCDE

$$= [3.58 - 3.22] \times 100 / 3.22 = 11.18 \%$$
- มวลการไหลของสารทำความเย็นต่อตันความเย็นของวัฏจักร A'B'CDE น้อยกว่าวัฏจักร ABCDE

$$= [0.0272 - 0.02445] \times 100 / 0.0272 = 10.11 \%$$

6) ปริมาณการไหลของสารทำความเย็นต่อตันความเย็นของวัฏจักร A'B'CDE น้อยกว่าวัฏจักร ABCDE

$$= [0.003982 - 0.003579] \times 100 / 0.003982 = 10.12 \%$$

7) กำลังม้าที่ใช้ในการขับเคลื่อนเครื่องอัดตันความเย็น วัฏจักร A'B'CDE น้อยกว่าวัฏจักร ABCDE

$$= [1.463 - 1.317] \times 100 / 1.463 = 9.98 \%$$

จากผลการเปรียบเทียบดังกล่าวข้างต้นจะเห็นว่าผลของอุณหภูมิสารทำความเย็นก่อนเข้าอุปกรณ์ลดความดันที่ลดลงทำให้ผลการทำความเย็นของระบบเพิ่มขึ้น 11.38 % ในขณะที่งานของการอัดเท่าเดิม และต้องใช้กำลังม้าต่อตันความเย็นลดลง 9.98 % ส่งผลให้ค่า COP ของวัฏจักรเพิ่มขึ้น 11.18 % ในขณะที่ปริมาณการไหลของสารทำความเย็นต่อตันความเย็นลดลง 10.12 %

อย่างไรก็ดี ถึงแม้ว่าผลกระทบโดยรวมจะเป็นผลดีต่อระบบ แต่ยังมีปัจจัยอื่นที่ต้องพิจารณาคือ ค่าใช้จ่ายที่อาจเพิ่มขึ้นในการเพิ่มความซับซ้อนให้กับระบบเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้รับข้างต้น สำหรับการพิจารณาเปรียบเทียบข้อดีกับข้อจำกัดที่อาจเพิ่มขึ้น ขึ้นอยู่กับวิธีการที่จะนำมาใช้ในการลดอุณหภูมิสารทำความเย็นก่อนเข้าอุปกรณ์ลดความดัน ซึ่งมีด้วยกันหลายวิธี ดังนี้

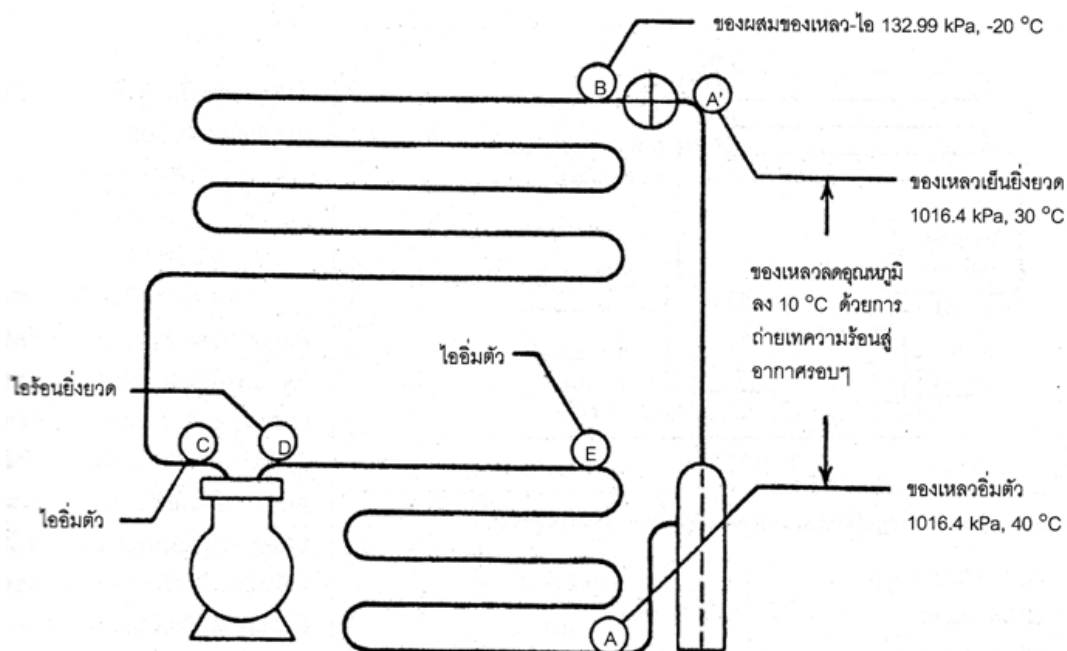
- 1) การใช้อากาศรอบๆ ที่อุณหภูมิต่ำกว่าช่วยลดอุณหภูมิสารทำความเย็นเหลว
- 2) การใช้อุปกรณ์เสริมช่วยลดอุณหภูมิสารทำความเย็นเหลว
- 3) การใช้วิธีการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสารทำความเย็นก่อนเข้าอุปกรณ์ลดความดันกับสารทำความเย็นก่อนเข้าเครื่องอัด

การใช้อากาศรอบๆ ที่อุณหภูมิต่ำกว่าช่วยลดอุณหภูมิสารทำความเย็นเหลวเป็นลักษณะการลดอุณหภูมิที่อาศัยธรรมชาติของการถ่ายเทความร้อนที่ว่า สารที่มีอุณหภูมิสูงจะถ่ายเทความร้อนให้แก่สารที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ดังนั้นในขณะที่สารทำความเย็นเหลวถูกเก็บกักอยู่ในถังพักสารทำความเย็นเหลว หรือไหลไปตามเส้นท่อสารทำความเย็นเหลวจะเกิดการถ่ายเทความร้อนสู่อากาศรอบๆ ทำให้สารทำความเย็นเหลวมีอุณหภูมิลดลงโดยอัตโนมัติ (หากไม่มีการหุ้มฉนวนไว้) ดังแสดงในรูปที่ 3.5 วิธีการนี้มีข้อดีคือ ไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นหากไม่มีการเพิ่มความยาวท่อ แต่ก็มีข้อจำกัดที่ถ้าอุณหภูมิอากาศรอบๆ มีอุณหภูมิก่อนข้างสูงจะทำให้การถ่ายเทความร้อนไม่ค่อยได้ผลเท่าที่ควร

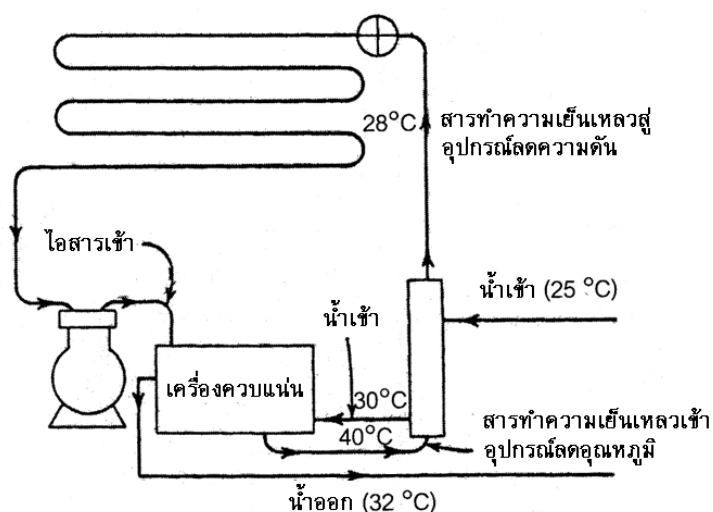
การใช้อุปกรณ์เสริมช่วยลดอุณหภูมิสารทำความเย็นเหลวกระทำได้ด้วยการนำอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่เรียกว่า เครื่องลดอุณหภูมิสารทำความเย็นเหลว (Liquid subcooler) มาช่วยในการลดอุณหภูมิสารทำความเย็นเหลว ดังแสดงในรูปที่ 3.6 อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงควรมีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นเทียบกับผลที่ได้รับจากการลดอุณหภูมิสารทำความเย็นว่าคุ้มหรือไม่ โดยเฉพาะกับระบบที่ใช้งานที่อุณหภูมิสูงกว่า -20°C

สำหรับการติดตั้งเครื่องลดอุณหภูมิสารทำความเย็นเหลวกับระบบ กรณีเครื่องควบแน่นเป็นชนิดระบายความร้อนด้วยน้ำ เครื่องลดอุณหภูมิสารทำความเย็นเหลวอาจต่อกับเครื่องควบแน่นแบบอนุกรมหรือแบบขนานก็ได้ ถ้าเป็นการต่อแบบอนุกรม น้ำหล่อเย็นจะไหลผ่านเครื่องลดอุณหภูมิสารทำความเย็น

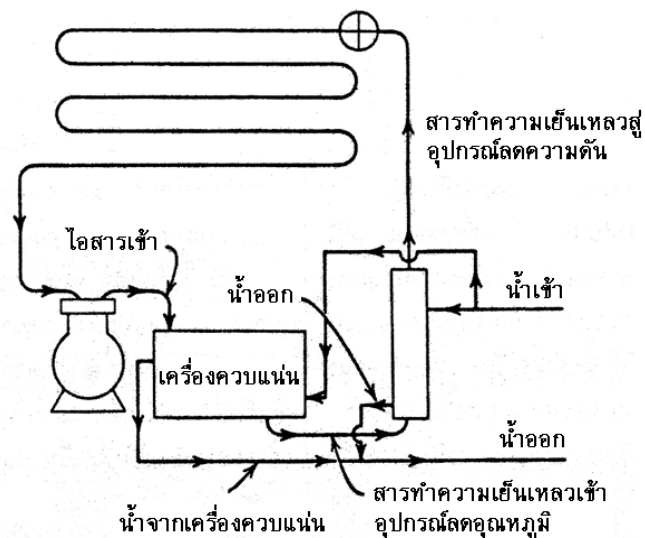
เหลวก่อน จากนั้นจึงไหลผ่านเครื่องควบแน่น ดังแสดงในรูปที่ 3.6 ผลที่ได้รับจะทำให้ได้น้ำเย็นในการลดอุณหภูมิสารทำความเย็นเหลว แต่จะทำให้หน้าที่เข้าเครื่องควบแน่นมีอุณหภูมิสูงขึ้นซึ่งส่งผลให้อุณหภูมิที่เครื่องควบแน่นสูงตาม ผลที่ได้รับโดยรวมอาจจะไม่เป็นผลดีต่อระบบจริงๆ ส่วนถ้าเป็นการต่อแบบขนาน ดังแสดงในรูปที่ 3.7 น้ำหล่อเย็นจะไหลผ่านทั้งเครื่องลดอุณหภูมิสารทำความเย็นเหลวและเครื่องควบแน่นไปพร้อมๆ กัน แยกกันไป ทำให้ได้น้ำเย็นไหลผ่านเครื่องทั้งสอง แต่อาจเพิ่มค่าใช้จ่ายมากขึ้นในการวางระบบท่อและปั๊มน้ำ อย่างไรก็ตามทั้งระบบต้องใช้ปั๊มน้ำช่วยในการไหลเวียนของน้ำหล่อเย็นซึ่งเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายให้ระบบดังกล่าว



รูปที่ 3.5 แผนภาพแสดงการลดอุณหภูมิสารทำความเย็นเหลวในเส้นท่อ



รูปที่ 3.6 แผนภาพแสดงการเชื่อมต่อท่อระหว่างเครื่องควบแน่นกับเครื่องลดอุณหภูมิสารทำความเย็นเหลวแบบอนุกรม



รูปที่ 3.7 แผนภาพแสดงการเชื่อมต่อท่อระหว่างเครื่องควบแน่นกับ
เครื่องลดอุณหภูมิสารทำความเย็นเหลวแบบขนาน

การใช้วิธีการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสารทำความเย็นก่อนเข้าอุปกรณ์ลดความดันกับสารทำความเย็นก่อนเข้าเครื่องอัดกระทำได้ด้วยการนำเส้นท่อสารทำความเย็นเหลวก่อนเข้าอุปกรณ์ลดความดันมาเดินท่อหาบติดขนานไปกับเส้นท่อไอสารทำความเย็นก่อนเข้าเครื่องอัดและหุ้มฉนวนล้อมรอบท่อทั้งสอง (รายละเอียดจะได้กล่าวถึงในหัวข้อผลของอุณหภูมิสารทำความเย็นก่อนเข้าอุปกรณ์ลดความดันที่ลดลงและผลของอุณหภูมิสารทำความเย็นก่อนเข้าเครื่องอัดที่สูงขึ้นด้วยการใช้การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสารทำความเย็นในกระบวนการทั้งสอง ในหัวข้อ 3.6

3.5 ผลของอุณหภูมิสารทำความเย็นก่อนเข้าเครื่องอัดที่สูงขึ้น

ในวัฏจักรเชิงอุดมคติจะสมมติให้ไอสารทำความเย็นที่จะเข้าสู่เครื่องอัดอยู่ในสถานะไออิ่มตัว ซึ่งมักไม่เกิดขึ้นกับการทำงานของระบบในทางปฏิบัติ เนื่องจากขณะที่สารทำความเย็นเหลวกลายเป็นไออย่างสมบูรณ์ในเครื่องระเหยที่อุณหภูมิต่ำและความดันต่ำ เมื่อไหลผ่านเส้นท่อทางดูดก่อนเข้าสู่เครื่องอัดจะดูดกลืนความร้อนจากอากาศรอบๆ ท่อเข้ามา ถึงแม้ว่าจะมีฉนวนความร้อนหุ้มไว้ก็ตาม ผลจากการรับความร้อนเข้ามาทำให้ไอสารทำความเย็นมีอุณหภูมิสูงขึ้นและเข้าสู่ย่านสถานะไอร้อนยิ่งยวด (จากจุด C เป็นจุด C' ในรูปที่ 3.8 และรูปที่ 3.9) ก่อนเข้าสู่เครื่องอัด ถ้าไม่คิดผลที่เกิดขึ้นในเส้นท่อทางดูด ผลดังกล่าวจะมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์ต่างๆ และมีผลต่อสัมประสิทธิ์ของสมรรถนะการทำ ความเย็น หรือ COP ดังนี้

พิจารณาวัฏจักร ABCDE และวัฏจักร ABC'D'E ในรูปที่ 3.9 ซึ่งมีอุณหภูมิสารทำความเย็น (R-134a) ที่เครื่องระเหยและที่เครื่องควบแน่นเท่ากันทั้งสองวัฏจักรที่ -20°C และ 40°C ตามลำดับ

เพียงแต่ในวัฏจักร ABC'D'E มีอุณหภูมิไอสารทำความเย็นก่อนเข้าเครื่องอัดที่สูงกว่าและอยู่ในสถานะไอร้อนยิ่งยวดที่อุณหภูมิ -5°C เพื่อเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิไอสารทำความเย็นก่อนเข้าเครื่องอัดต่อระบบ สำหรับค่าเอนทัลปี ณ จุดต่างๆ ของแต่ละวัฏจักรมีค่าดังต่อไปนี้

วัฏจักร ABCDE ซึ่งมีอุณหภูมิสารทำความเย็นก่อนเข้าเครื่องอัดเท่ากับ -20°C

$$h_A = h_B = 106.19 \text{ kJ/kg}$$

$$h_C = 235.31 \text{ kJ/kg}$$

$$h_D = 275.43 \text{ kJ/kg}$$

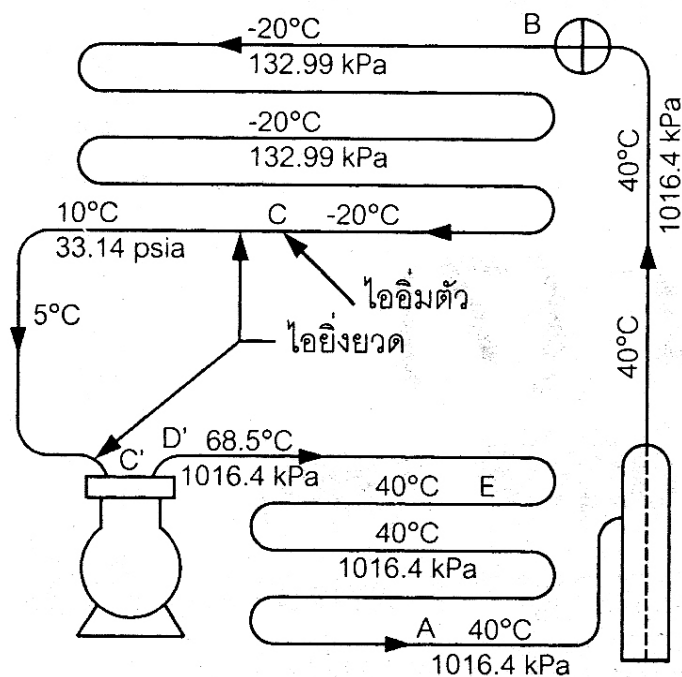
วัฏจักร A'B'CDE ซึ่งมีอุณหภูมิสารทำความเย็นก่อนเข้าเครื่องอัดเท่ากับ -5°C

$$h_A = h_B = 106.19 \text{ kJ/kg}$$

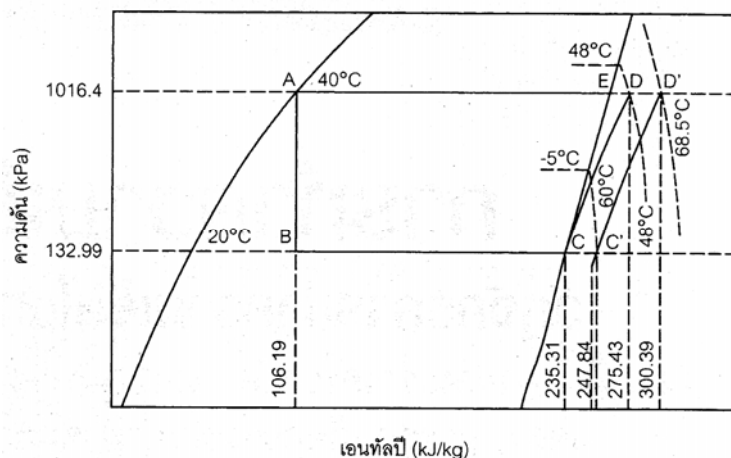
$$h_{C'} = 247.84 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{D'} = 300.39 \text{ kJ/kg}$$

ตารางที่ 3.4 แสดงการเปรียบเทียบผลกระทบของอุณหภูมิสารทำความเย็นก่อนเข้าเครื่องอัดที่สูงขึ้นต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์ต่างๆ และผลต่อสัมประสิทธิ์ของสมรรถนะการทำความเย็น หรือ COP ของวัฏจักรทั้งสอง



รูปที่ 3.8 รูปแสดงผลของอุณหภูมิสารทำความเย็นก่อนเข้าเครื่องอัดที่สูงขึ้น



รูปที่ 3.9 การเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิสารทำความเย็นก่อนเข้าเครื่องอัดที่สูงขึ้น

ตารางที่ 3.4 การเปรียบเทียบผลกระทบในแง่ต่างๆ ของวัฏจักร ABCDE และวัฏจักร ABC'D'E

หัวข้อเปรียบเทียบ	วัฏจักร ABCDE (-20°C)	วัฏจักร ABC'D'E (-5°C)
1) การถ่ายเทความร้อนที่เครื่องระเหย (kJ/kg)	$h_C - h_B = 129.12$	$h_{C'} - h_B = 141.65$
2) การถ่ายเทความร้อนที่เครื่องควบแน่น (kJ/kg)	$h_A - h_D = -169.24$	$h_A - h_{D'} = -194.20$
3) งานของเครื่องอัด (kJ/kg)	$h_D - h_C = 40.12$	$h_{D'} - h_{C'} = 52.55$
4) COP	ข้อ 1./ข้อ 3. = 3.22	ข้อ 1./ข้อ 3. = 2.69
5) มวลการไหลของสารทำความเย็นต่อตันความเย็น, m (kg/s ton)	$(3.516 \text{ kW/ton}) / \text{ข้อ 1.}$ $= (3.516 \text{ kW/ton}) / 129.12$ $= 0.0272$	$(3.516 \text{ kW/ton}) / \text{ข้อ 1.}$ $= (3.516 \text{ kW/ton}) / 141.65$ $= 0.0248$
6) ปริมาณการไหลของสารทำความเย็นต่อตันความเย็น, V (m ³ /ton)	ข้อ 5. X ปริมาตรจำเพาะที่ C $= (0.0272)(0.1464)$ $= 0.003982$	ข้อ 5. X ปริมาตรจำเพาะที่ C' $= (0.0248)(0.1587)$ $= 0.003936$
7) กำลังม้าที่ใช้ในการขับเครื่องอัดต่อตันความเย็น (hp)	ข้อ 5. X ข้อ 3./0.7457 kW/hp $= 1.463$	ข้อ 5. X ข้อ 3./0.7457 kW/hp $= 1.748$

จากค่าต่างๆ ที่นำมาเปรียบเทียบในตารางที่ 3.4 ของทั้งสองวัฏจักรสามารถสรุปได้ดังนี้

- การถ่ายเทความร้อนที่เครื่องระเหยของวัฏจักร ABC'D'E มากกว่าวัฏจักร ABCDE

$$= [(h_{C'} - h_B) - (h_C - h_B)] \times 100 / (h_C - h_B)$$

$$= [141.65 - 129.12] \times 100 / 129.12 = 9.70 \%$$

- 2) การถ่ายเทความร้อนที่เครื่องควบแน่นของวัฏจักร ABC'D'E มากกว่าวัฏจักร ABCDE

$$= [(h_A - h_{D'}) - (h_A - h_D)] \times 100 / (h_A - h_D)$$

$$= [194.20 - 169.24] \times 100 / 169.24 = 14.75 \%$$
- 3) งานของเครื่องอัดของวัฏจักร ABC'D'E มากกว่าวัฏจักร ABCDE

$$= [52.55 - 40.12] \times 100 / 40.12 = 30.98 \%$$
- 4) สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะการทำความเย็น หรือ COP ของวัฏจักร ABC'D'E น้อยกว่าวัฏจักร ABCDE

$$= [3.22 - 2.69] \times 100 / 3.22 = 16.50 \%$$
- 5) มวลการไหลของสารทำความเย็นต่อตันความเย็นของวัฏจักร ABC'D'E น้อยกว่าวัฏจักร ABCDE

$$= [0.0272 - 0.0248] \times 100 / 0.0272 = 8.82 \%$$
- 6) ปริมาตรการไหลของสารทำความเย็นต่อตันความเย็นของวัฏจักร ABC'D'E น้อยกว่าวัฏจักร ABCDE

$$= [0.003982 - 0.003936] \times 100 / 0.003982 = 1.16 \%$$
- 7) กำลังม้าที่ใช้ในการขับเคลื่อนเครื่องอัดต่อตันความเย็น วัฏจักร ABC'D'E มากกว่าวัฏจักร ABCDE

$$= [1.748 - 1.463] \times 100 / 1.463 = 19.48 \%$$

จากผลการเปรียบเทียบดังกล่าวข้างต้นจะเห็นว่าผลของอุณหภูมิสารทำความเย็นก่อนเข้าเครื่องอัดที่สูงขึ้นทำให้ผลการทำความเย็นของระบบเพิ่มขึ้น 9.70 % ในขณะที่งานของการอัดเพิ่มขึ้น 30.98 % และต้องใช้กำลังม้าต่อตันความเย็นเพิ่มขึ้น 19.48 % ส่งผลให้ค่า COP ของวัฏจักรลดลง 16.50 % ในขณะที่ปริมาตรการไหลของสารทำความเย็นต่อตันความเย็นลดลง 1.16 %

อย่างไรก็ดี ถึงแม้ว่าผลกระทบต่อค่า COP ของระบบลดลง 16.50 % แต่มีผลดีต่อระบบในแง่ของสารทำความเย็นที่เข้าสู่เครื่องอัดจะอยู่ในสภาวะไออย่างสมบูรณ์โดยไม่มีสภาวะของเหลวผสมอยู่ ซึ่งหากมีสภาวะของเหลวผสมอยู่จะก่อให้เกิดความเสียหายต่อเครื่องอัดได้ ในลักษณะทำนองเดียวกับการมีเม็ดทรายเล็กๆ ผสมไปกับอากาศวงจรถนที่ขับเคลื่อนด้วยความเร็วสูงๆ ย่อมทำให้พื้นผิวตัวถังรถเสียหายได้ รวมทั้งยังพบว่า หากอุณหภูมิที่เครื่องระเหยสูงขึ้น เช่น จาก -20°C เป็น -5°C ค่า COP ของวัฏจักรที่มีสารทำความเย็นเข้าเครื่องอัดที่สภาวะไออิ่มตัวกับที่สภาวะไอร้อนยิ่งยวดจะมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก

นอกจากนี้ผลกระทบดังกล่าวคิดบนพื้นฐานที่ว่า ผลของการกลายเป็นไอสารทำความเย็นทั้งหมดตั้งแต่ไออิ่มตัวจนถึงไอร้อนยิ่งยวดมีผลต่อการทำความเย็นของระบบอย่างสมบูรณ์ ซึ่งเป็นไปได้ยากในความเป็นจริง เนื่องจากมีเส้นท่อทางดูดบางส่วนเดินท่อนอกพื้นที่ที่ต้องการทำความเย็น ส่วนจะมีสัดส่วนต่อความยาวเส้นท่อนรวมเท่าไรขึ้นอยู่กับกรอกแบบดังนี้

- 1) ออกแบบให้ปลายทางเครื่องระเหยตั้งแต่เส้นท่อทางดูดอยู่นอกพื้นที่ทำความเย็น ซึ่งทำให้เส้นท่อทางดูดที่เกิดสภาวะไอร้อนยิ่งยวดอยู่นอกพื้นที่ทำความเย็นทั้งหมด

- 2) ออกแบบให้ตั้งแต่กึ่งกลางของเส้นท่อทางดูด (โดยอาจขยับให้เพิ่มขึ้นหรือลดลงจากกึ่งกลางประมาณร้อยละ 5 - 10) อยู่นอกพื้นที่ทำความเย็น ซึ่งทำให้เส้นท่อทางดูดที่เกิดสภาวะไอร้อนยิ่งยวดอยู่นอกพื้นที่ทำความเย็นประมาณร้อยละ 50
- 3) ออกแบบให้ปลายทางเครื่องระเหยตั้งแต่เส้นท่อทางดูดอยู่นอกพื้นที่ทำความเย็นและให้มีการถ่ายเทความร้อนระหว่างไอสารทำความเย็นในเส้นท่อทางดูดกับสารทำความเย็นเหลวในเส้นท่อที่ออกจากเครื่องระเหยก่อนเข้าอุปกรณ์ลดความดัน ซึ่งทำให้เส้นท่อทางดูดที่เกิดสภาวะไอร้อนยิ่งยวดอยู่นอกพื้นที่ทำความเย็นทั้งหมด แต่ได้ไอสารทำความเย็นยิ่งที่มีอุณหภูมิสูงขึ้นจากกรณีที่ไม่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสารทำความเย็นทั้งสองส่วนอีกประมาณ 10°C (รายละเอียดอยู่ในหัวข้อ 3.6)

ตารางที่ 3.5 แสดงการเปรียบเทียบผลกระทบกรณีออกแบบให้ปลายทางเครื่องระเหยตั้งแต่เส้นท่อทางดูดอยู่นอกพื้นที่ทำความเย็นทั้งหมด กับกรณีออกแบบให้เส้นท่อทางดูดอยู่นอกพื้นที่ทำความเย็นประมาณร้อยละ 50 ต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์ต่างๆ และผลต่อสัมประสิทธิ์ของสมรรถนะการทำความเย็น หรือ COP ของวัฏจักรในทั้งสองกรณี

ตารางที่ 3.5 การเปรียบเทียบผลกระทบในแง่มุมต่างๆ ของวัฏจักร ABC'D'E กรณีออกแบบให้ปลายทางเครื่องระเหยตั้งแต่เส้นท่อทางดูดอยู่นอกพื้นที่ทำความเย็นร้อยละ 100 กับกรณีร้อยละ 50

หัวข้อเปรียบเทียบ	กรณีร้อยละ 100	กรณีร้อยละ 50
1) การถ่ายเทความร้อนที่เครื่องระเหย (kJ/kg)	$h_C - h_B = 129.12$	$[(h_C - h_B) + (h_{C'} - h_B)]/2 = 135.38$
2) การถ่ายเทความร้อนที่เครื่องควบแน่น (kJ/kg)	$h_A - h_{D'} = -194.20$	$h_A - h_{D'} = -194.20$
3) งานของเครื่องอัด (kJ/kg)	$h_{D'} - h_{C'} = 52.55$	$h_{D'} - h_{C'} = 52.55$
4) COP	ข้อ 1./ข้อ 3. = 2.46	ข้อ 1./ข้อ 3. = 2.58
5) มวลการไหลของสารทำความเย็นต่อตันความเย็น, m (kg/s ton)	$(3.516 \text{ kW/ton}) / \text{ข้อ 1.} = (3.516 \text{ kW/ton}) / 129.12 = 0.0272$	$(3.516 \text{ kW/ton}) / \text{ข้อ 1.} = (3.516 \text{ kW/ton}) / 135.38 = 0.0260$
6) ปริมาตรการไหลของสารทำความเย็นต่อตันความเย็น, V (m^3/ton)	ข้อ 5. X ปริมาตรจำเพาะที่ C' $= (0.0272)(0.1587) = 0.004317$	ข้อ 5. X ปริมาตรจำเพาะที่ C' $= (0.0260)(0.1587) = 0.004126$
7) กำลังม้าที่ใช้ในการขับเครื่องอัดต่อตันความเย็น (hp)	ข้อ 5. X ข้อ 3./0.7457 kW/hp $= 1.917$	ข้อ 5. X ข้อ 3./0.7457 kW/hp $= 1.832$

จากค่าต่างๆ ที่นำมาเปรียบเทียบในตารางที่ 3.5 ของวัฏจักร ABC'D'E ในสองกรณีกับค่าต่างๆ ของวัฏจักร ABCDE ในตารางที่ 3.4 สามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) การถ่ายเทความร้อนที่เครื่องระเหยของวัฏจักร ABC'D'E กรณีออกแบบให้ปลายทางเครื่องระเหยตั้งแต่เส้นท่อทางดูอยู่นอกพื้นที่ทำความเย็นร้อยละ 50 มากกว่าวัฏจักร ABCDE ส่วนกรณีร้อยละ 100 เท่ากับของ วัฏจักร ABCDE โดยมากกว่า

$$= [(h_c - h_B) + (h_{c'} - h_B)] / 2 - (h_c - h_B) \times 100 / (h_c - h_B)$$

$$= [135.38 - 129.12] \times 100 / 129.12 = 4.85 \%$$

- 2) การถ่ายเทความร้อนที่เครื่องควบแน่นของวัฏจักร ABC'D'E ทั้งสองกรณีเท่ากัน และมากกว่าวัฏจักร ABCDE

$$= [(h_A - h_{D'}) - (h_A - h_D)] \times 100 / (h_A - h_D)$$

$$= [194.20 - 169.24] \times 100 / 169.24 = 14.75 \%$$

- 3) งานของเครื่องอัดของวัฏจักร ABC'D'E ทั้งสองกรณีเท่ากัน และมากกว่าวัฏจักร ABCDE

$$= [52.55 - 40.12] \times 100 / 40.12 = 30.98 \%$$

- 4) สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะการทำความเย็น หรือ COP ของวัฏจักร ABC'D'E น้อยกว่าวัฏจักร ABCDE ทั้งสองกรณี

$$\text{กรณีร้อยละ 100} = [3.22 - 2.46] \times 100 / 3.22 = 23.60 \%$$

$$\text{กรณีร้อยละ 50} = [3.22 - 2.58] \times 100 / 3.22 = 19.88 \%$$

- 5) มวลการไหลของสารทำความเย็นต่อตันความเย็นของวัฏจักร ABC'D'E กรณีออกแบบให้ปลายทางเครื่องระเหยตั้งแต่เส้นท่อทางดูอยู่นอกพื้นที่ทำความเย็นร้อยละ 50 น้อยกว่าวัฏจักร ABCDE ส่วนกรณีร้อยละ 100 เท่ากับของ วัฏจักร ABCDE โดยน้อยกว่า

$$= [0.0272 - 0.0260] \times 100 / 0.0272 = 4.41 \%$$

- 6) ปริมาณการไหลของสารทำความเย็นต่อตันความเย็นของวัฏจักร ABC'D'E มากกว่าวัฏจักร ABCDE ทั้งสองกรณี

$$\text{กรณีร้อยละ 100} = [0.004317 - 0.003982] \times 100 / 0.003982 = 8.41 \%$$

$$\text{กรณีร้อยละ 50} = [0.004126 - 0.003982] \times 100 / 0.003982 = 3.62 \%$$

- 7) กำลังม้าที่ใช้ในการขับเคลื่อนเครื่องอัดต่อตันความเย็น วัฏจักร ABC'D'E มากกว่าวัฏจักร ABCDE ทั้งสองกรณี

$$\text{กรณีร้อยละ 100} = [1.917 - 1.463] \times 100 / 1.463 = 31.03 \%$$

$$\text{กรณีร้อยละ 50} = [1.832 - 1.463] \times 100 / 1.463 = 25.22 \%$$

จากผลการเปรียบเทียบดังกล่าวข้างต้นจะเห็นว่าผลของอุณหภูมิสารทำความเย็นก่อนเข้าเครื่องอัดที่สูงขึ้นกรณีออกแบบให้ปลายทางเครื่องระเหยตั้งแต่เส้นท่อทางดูอยู่นอกพื้นที่ทำความเย็นร้อยละ 50

ทำให้ผลการทำความเย็นของระบบเพิ่มขึ้น 4.85 (จากเดิมที่เพิ่มขึ้น 9.70 %) ในขณะที่งานของการอัดเพิ่มขึ้น 30.98 % และต้องใช้กำลังม้าต่อต้านความเย็นเพิ่มขึ้น 31.03 % กรณีร้อยละ 100 และเพิ่มขึ้น 25.22 % กรณีร้อยละ 50 ส่งผลให้ค่า COP ของวัฏจักรลดลง 23.60 % กรณี ร้อยละ 100 และลดลง 19.88 % กรณีร้อยละ 50 ในขณะที่ปริมาตรการไหลของสารทำความเย็นต่อต้านความเย็นเพิ่มขึ้น 8.41 % กรณีร้อยละ 100 และเพิ่มขึ้น 3.62 % กรณีร้อยละ 50

3.6 ผลของอุณหภูมิสารทำความเย็นก่อนเข้าอุปกรณ์ลดความดันที่ลดลงและผลของอุณหภูมิสารทำความเย็นก่อนเข้าเครื่องอัดที่สูงขึ้นด้วยการใช้การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสารทำความเย็นในกระบวนการทั้งสอง

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิสารทำความเย็นก่อนเข้าอุปกรณ์ลดความดันที่ลดลงในหัวข้อ 3.4 และผลของอุณหภูมิก่อนเข้าเครื่องอัดที่สูงขึ้นในหัวข้อ 3.5 จะเห็นถึงข้อดีและข้อจำกัดที่เกิดขึ้น รวมทั้งยังมีเรื่องค่าใช้จ่ายในอุปกรณ์เสริมหากต้องการลดอุณหภูมิสารทำความเย็นก่อนเข้าอุปกรณ์ลดความดันให้ต่ำๆ ดังนั้นจึงมีการคิดนำสารทำความเย็นก่อนเข้าอุปกรณ์ลดความดันมาถ่ายเทความร้อนให้กับสารทำความเย็นก่อนเข้าเครื่องอัดในอุปกรณ์ที่เรียกว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสารทำความเย็นเหลวกับเส้นทางดูด (Liquid-suction heat exchanger) ดังแสดงในรูปที่ 3.10 ซึ่งทำให้อุณหภูมิสารทำความเย็นก่อนเข้าอุปกรณ์ลดความดันลดลงในขณะที่ทำให้อุณหภูมิสารทำความเย็นก่อนเข้าเครื่องอัดสูงขึ้น สำหรับผลที่ได้ต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์ต่างๆ และมีผลต่อสัมประสิทธิ์ของสมรรถนะการทำความเย็น หรือ COP ดังนี้

พิจารณาวัฏจักร ABCDE และวัฏจักร A'B'C'D'E ในรูปที่ 3.11 ซึ่งมีอุณหภูมิสารทำความเย็น (R-134a) ที่เครื่องระเหยและที่เครื่องควบแน่นเท่ากันทั้งสองวัฏจักรที่ -20°C และ 40°C ตามลำดับ เพียงแต่ในวัฏจักร A'B'C'D'E มีอุณหภูมิไอสารทำความเย็นก่อนเข้าอุปกรณ์ลดความดันต่ำกว่าและอยู่ในสถานะของเหลวอัด เนื่องจากถ่ายเทความร้อนให้กับไอสารทำความเย็นก่อนเข้าเครื่องอัด ซึ่งทำให้อุณหภูมิจากไอสารทำความเย็นก่อนเข้าเครื่องอัดสูงขึ้นและอยู่ในสถานะไอร้อนยิ่งยวด สำหรับอุณหภูมิสารทำความเย็นในสถานะของเหลวอัดและในสถานะไอร้อนยิ่งยวดมีค่าเท่ากับเท่าไรขึ้นอยู่กับสถานะออกแบบในตัวแลกเปลี่ยนความร้อนสารทำความเย็นเหลวกับเส้นทางดูด และชนิดของสารทำความเย็น กล่าวคือยิ่งออกแบบให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นเวลานาน ยิ่งทำให้อุณหภูมิสารทำความเย็นเหลวและไอสารทำความเย็นเข้าใกล้กันมากเท่านั้น และทำให้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีขนาดโตมากขึ้นตามไปด้วย ส่วนชนิดของสารทำความเย็นจะเป็นตัวกำหนดค่าความร้อนจำเพาะของสารทำความเย็นเหลวและไอสารทำความเย็น ยกตัวอย่าง กรณีสารทำความเย็น R-134a มีค่าความร้อนจำเพาะในสถานะของเหลวประมาณ $1.42 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ และในสถานะก๊าซประมาณ $0.88 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ นั้นหมายความว่าอุณหภูมิของสารทำความเย็นเหลว R-134a ที่ลดลงจะส่งผลให้อุณหภูมิของไอสารทำความเย็น R-134a เพิ่มขึ้นในสัดส่วน 62% ($0.88/1.42$) ดังนั้นในกรณีนี้ อุณหภูมิของสารทำความเย็นเหลวอิมตัวอยู่ที่ 40°C และอุณหภูมิของ

ไอสารทำความเย็นอิ่มตัวอยู่ที่ -20°C ผลต่างของอุณหภูมิสารทำความเย็นทั้งสองอยู่ที่ 60°C จะทำให้สามารถลดอุณหภูมิสารทำความเย็นเหลวลงมาได้ไม่ต่ำกว่า 17°C ($40^{\circ}\text{C} - 23^{\circ}\text{C}$) และสามารถเพิ่มอุณหภูมิไอสารทำความเย็นได้ไม่สูงกว่า 17°C ($-20^{\circ}\text{C} + 37^{\circ}\text{C}$) ในที่นี้ออกแบบให้อุณหภูมิไอสารทำความเย็นเพิ่มขึ้นเป็น 5°C และถ้าสมมุติให้สารทำความเย็นเป็นไอร้อนยิ่งยวดทั้งหมดและเกิดขึ้นภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ดังนั้นความร้อนที่ทำให้ไอสารทำความเย็นอิ่มตัวกลายเป็นไอร้อนยิ่งยวดมาจากความร้อนที่สารทำความเย็นเหลวลอิมตัวลดอุณหภูมิลง นั่นคือ

$$h_A - h_{A'} = h_{C'} - h_C$$

สำหรับค่าเอนทัลปี ณ จุดต่างๆ ของแต่ละวัฏจักรมีค่าดังต่อไปนี้

วัฏจักร ABCDE ซึ่งมีอุณหภูมิสารทำความเย็นก่อนเข้าเครื่องอัดเท่ากับ -20°C

$$h_A = h_B = 106.19 \text{ kJ/kg}$$

$$h_C = 235.31 \text{ kJ/kg}$$

$$h_D = 275.43 \text{ kJ/kg}$$

วัฏจักร A'B'C'D'E ซึ่งมีอุณหภูมิสารทำความเย็นก่อนเข้าเครื่องอัดเท่ากับ 5°C

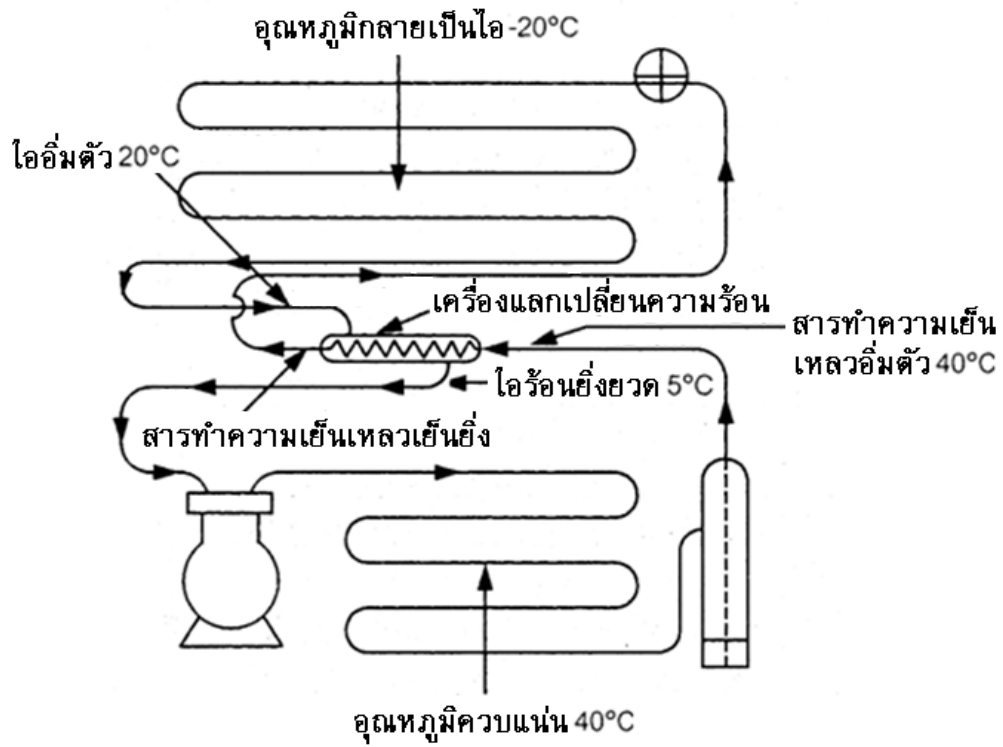
$$h_{C'} = 256.33 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{D'} = 303.13 \text{ kJ/kg}$$

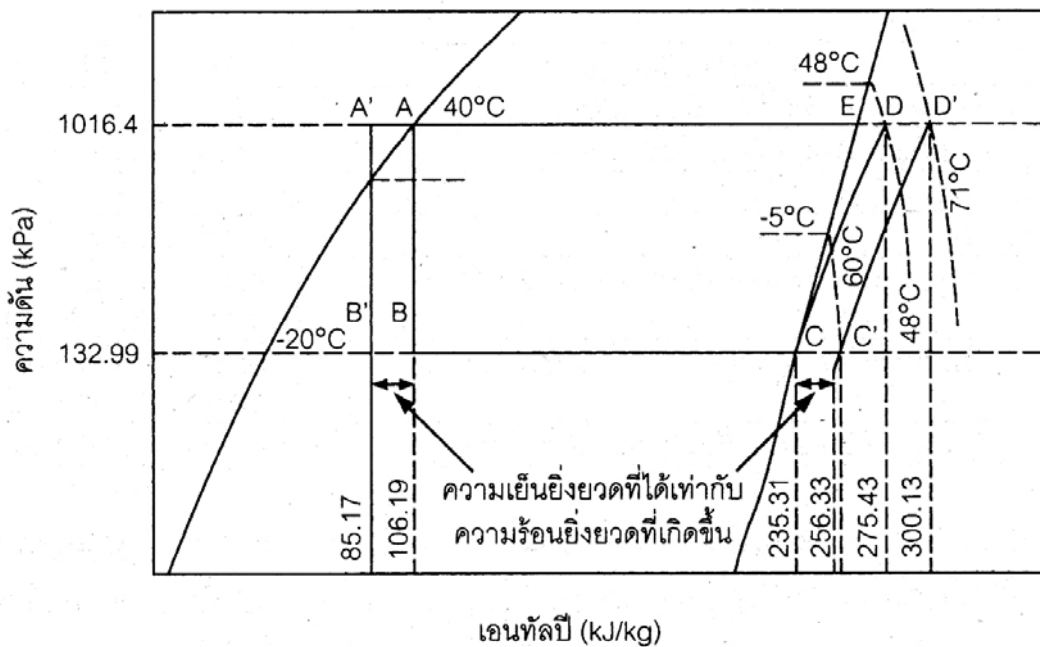
$$h_{A'} = h_{B'} = h_A - (h_{C'} - h_C)$$

$$= 106.19 - (256.33 - 235.31) = 85.17 \text{ kJ/kg}$$

ตารางที่ 3.6 แสดงการเปรียบเทียบผลกระทบเนื่องจากการใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์ต่างๆ และผลต่อสัมประสิทธิ์ของสมรรถนะการทำความเย็น หรือ COP ของวัฏจักรทั้งสอง



รูปที่ 3.10 วัฏจักรการทำความเย็นที่แสดงเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสารทำความเย็นเหลว



รูปที่ 3.11 การเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิสารทำความเย็น เมื่อติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนกับเส้นทางดูด

ตารางที่ 3.6 การเปรียบเทียบผลกระทบในแง่มุมต่างๆ ของวัฏจักร ABCDE และวัฏจักร A'B'C'D'E

หัวข้อเปรียบเทียบ	วัฏจักร ABCDE	วัฏจักร A'B'C'D'E
1) การถ่ายเทความร้อนที่เครื่องระเหย (kJ/kg)	$h_C - h_B = 129.12$	$h_C - h_{B'} = 150.14$
2) การถ่ายเทความร้อนที่เครื่องควบแน่น (kJ/kg)	$h_A - h_D = -169.24$	$h_{A'} - h_{D'} = -217.96$
3) งานของเครื่องอัด (kJ/kg)	$h_D - h_C = 40.12$	$h_{D'} - h_{C'} = 46.80$
4) COP	ข้อ 1./ข้อ 3. = 3.22	ข้อ 1./ข้อ 3. = 3.21
5) มวลการไหลของสารทำความเย็นต่อตันความเย็น, m (kg/s ton)	$(3.516 \text{ kW/ton}) / \text{ข้อ 1.}$ $= (3.516 \text{ kW/ton}) / 129.12$ $= 0.0272$	$(3.516 \text{ kW/ton}) / \text{ข้อ 1.}$ $= (3.516 \text{ kW/ton}) / 150.14$ $= 0.0234$
6) ปริมาณการไหลของสารทำความเย็นต่อตันความเย็น, V (m ³ /ton)	ข้อ 5. X ปริมาตรจำเพาะที่ C $= (0.0272)(0.1464)$ $= 0.003982$	ข้อ 5. X ปริมาตรจำเพาะที่ C' $= (0.0234)(0.1668)$ $= 0.003903$
7) กำลังม้าที่ใช้ในการขับเครื่องอัดต่อตันความเย็น (hp)	ข้อ 5. X ข้อ 3./0.7457 kW/hp $= 1.463$	ข้อ 5. X ข้อ 3./0.7457 kW/hp $= 1.469$

จากค่าต่างๆ ที่นำมาเปรียบเทียบในตารางที่ 3.4 ของทั้งสองวัฏจักรสามารถสรุปได้ดังนี้

- การถ่ายเทความร้อนที่เครื่องระเหยของวัฏจักร A'B'C'D'E มากกว่าวัฏจักร ABCDE

$$= [(h_C - h_{B'}) - (h_C - h_B)] \times 100 / (h_C - h_B)$$

$$= [150.14 - 129.12] \times 100 / 129.12 = 16.27 \%$$
- การถ่ายเทความร้อนที่เครื่องควบแน่นของวัฏจักร A'B'C'D'E มากกว่าวัฏจักร ABCDE

$$= [(h_{A'} - h_{D'}) - (h_A - h_D)] \times 100 / (h_A - h_D)$$

$$= [217.96 - 169.24] \times 100 / 169.24 = 28.79 \%$$
- งานของเครื่องอัดของวัฏจักร A'B'C'D'E มากกว่าวัฏจักร ABCDE

$$= [46.80 - 40.12] \times 100 / 40.12 = 16.65 \%$$
- สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะการทำความเย็น หรือ COP ของวัฏจักร A'B'C'D'E น้อยกว่าวัฏจักร ABCDE

$$= [3.22 - 3.21] \times 100 / 3.22 = 0.31 \%$$

- 5) มวลการไหลของสารทำความเย็นต่อตันความเย็นของวัฏจักร A'B'C'D'E น้อยกว่าวัฏจักร ABCDE
- $$= [0.0272 - 0.0234] \times 100 / 0.0272 = 12.97 \%$$
- 6) ปริมาตรการไหลของสารทำความเย็นต่อตันความเย็นของวัฏจักร A'B'C'D'E น้อยกว่าวัฏจักร ABCDE
- $$= [0.003982 - 0.003903] \times 100 / 0.003982 = 1.98 \%$$
- 7) กำลังม้าที่ใช้ในการขับเคลื่อนอัดต่อตันความเย็น วัฏจักร A'B'C'D'E มากกว่าวัฏจักร ABCDE
- $$= [1.469 - 1.463] \times 100 / 1.463 = 0.41 \%$$

จากผลการเปรียบเทียบดังกล่าวข้างต้นจะเห็นว่าผลของการใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทำให้ผลการทำความเย็นของระบบเพิ่มขึ้น 16.27 % ในขณะที่งานของการอัดเพิ่มขึ้น 16.65 % และต้องใช้กำลังม้าต่อตันความเย็นเพิ่มขึ้น 0.41 % ส่งผลให้ค่า COP ของวัฏจักรลดลง 0.31 % ในขณะที่ปริมาตรการไหลของสารทำความเย็นต่อตันความเย็นลดลง 1.98 %

จากค่า COP ของวัฏจักรทั้งสองที่ต่างกันน้อยมาก แสดงให้เห็นว่าการใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนก่อให้เกิดผลในด้านดีที่ช่วยให้ไอสารทำความเย็นที่เข้าเครื่องอัดอยู่ในสภาพไออย่างสมบูรณ์รวมทั้งให้การถ่ายเทความร้อนที่เครื่องระเหยของวัฏจักรมากกว่า โดยประสิทธิภาพของระบบไม่ได้ลดลงอย่างไรก็ดีพบว่า ถ้าออกแบบให้อุณหภูมิของเครื่องระเหยสูงขึ้นกว่า -20°C ค่า COP ที่ได้จะสูงขึ้นตามไปด้วย และยิ่งอุณหภูมิเครื่องระเหยยิ่งสูงขึ้นมาก ค่า COP ที่ได้ยิ่งสูงขึ้นตามไปด้วย ในทางตรงกันข้าม ถ้าออกแบบให้อุณหภูมิของเครื่องระเหยต่ำลงกว่า -20°C ค่า COP ที่ได้จะต่ำลงตามไปด้วย และยิ่งอุณหภูมิเครื่องระเหยยิ่งต่ำมากค่า COP ที่ได้ยิ่งต่ำลงตามไปด้วย ดังนั้นโดยทั่วไปการใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในวัฏจักรการทำความเย็นใช้เฉพาะวัฏจักรที่ออกแบบให้เครื่องระเหยมีอุณหภูมิไม่ต่ำกว่า -20°C

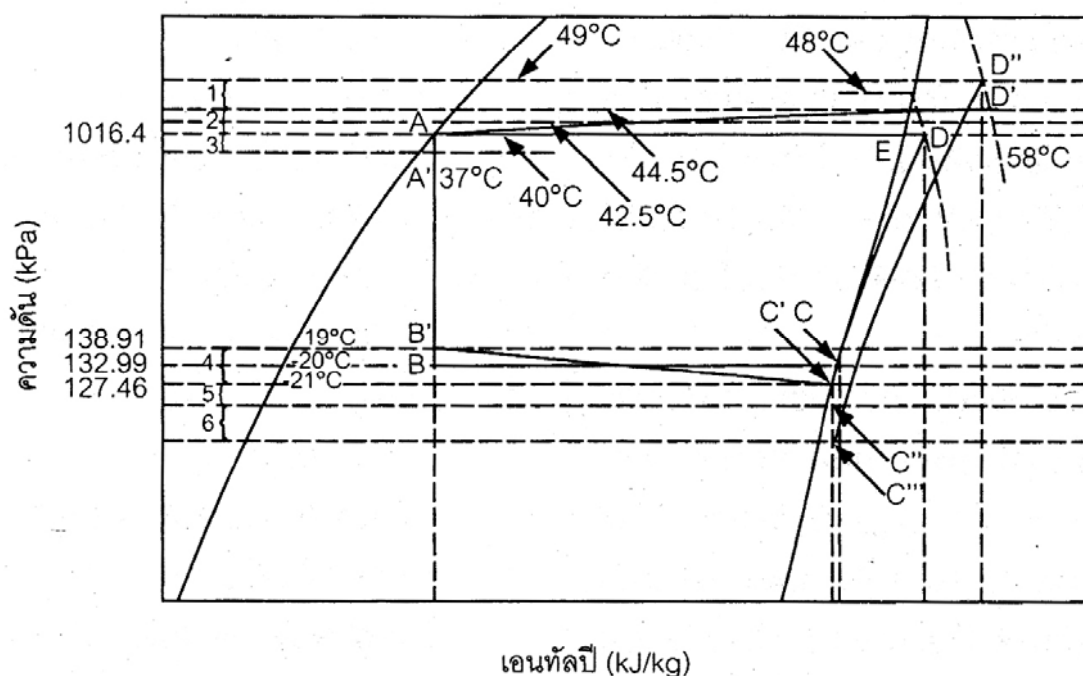
3.7 ผลของการสูญเสียความดันสารทำความเย็นขณะไหลผ่านอุปกรณ์ต่างๆ

การไหลของของไหลที่ไหลผ่านท่อทางและอุปกรณ์ต่างๆ จะมีแรงเสียดทานต้านทานการไหลทั้งในลักษณะแรงเสียดทานภายในของไหลและแรงเสียดทานภายนอกของไหลกับพื้นผิวของท่อและอุปกรณ์ต่างๆ โดยเฉพาะในกรณีพื้นผิวที่ขรุขระ หรือเส้นทางเดินของไหลที่มีลักษณะคดเคี้ยว หรือพื้นที่หน้าตัดการไหลไม่สม่ำเสมอ ความเสียดทานที่เกิดขึ้นยิ่งมาก ผลที่ตามมาคือเกิดการสูญเสียความดันสารทำความเย็นในขณะที่ไหลผ่านท่อทางต่างๆ เครื่องระเหย เครื่องควบแน่น วาล์ว และเครื่องอัด ดังตัวอย่างแผนภาพความดัน-เอนทัลปี ที่แสดงในรูปที่ 3.12 และ ตารางที่ 3.7 ของสารทำความเย็น R-134a ซึ่งมีความดันออกจากเครื่องควบแน่นเท่ากับ 1016.4 kPa (อุณหภูมิ 40°C) และมีความดันเฉลี่ยของเครื่องระเหยเท่ากับ 132.99 kPa (อุณหภูมิ -20°C)

ในแผนภาพความดัน-เอนทัลปี ในรูปที่ 3.12 แสดงวัฏจักรจริงของการสูญเสียความดันที่เกิดขึ้น แต่ไม่ได้แสดงผลของการเกิดสถานะไอร้อนยิ่งยวดและสถานะของเหลวเย็นยิ่งยวดเพื่อให้วัฏจักรง่ายขึ้น

สำหรับการสูญเสียความดันตามรูปที่ 3.12 และตามตารางที่ 3.7 มีความหมายดังนี้

เส้น A - A' แทนการสูญเสียความดันอันเนื่องมาจากการไหลของสารทำความเย็นผ่านถึงฟักสารทำความเย็นเหลวและเส้นท่อสารทำความเย็นเหลว เนื่องจากสารทำความเย็น ณ จุด A มีสถานะเป็นของเหลวอิ่มตัว ดังนั้นในขณะที่ความดันลดลงอุณหภูมิของสารทำความเย็นเหลวต้องลดลงด้วย ถ้าสารทำความเย็นเหลวไม่มีการถ่ายเทความร้อนให้แหล่งความร้อนภายนอกขณะเกิดการสูญเสียความดัน บางส่วนของสารทำความเย็นเหลวจะเกิดการแฟลชกลายเป็นไอในเส้นท่อสารทำความเย็นเหลวเพื่อทำให้สารทำความเย็นเหลวมีอุณหภูมิลดลง ดังจะสังเกตเห็นได้จากจุด A' ที่อยู่ในย่านของผสม



รูปที่ 3.12 แผนภาพความดัน-เอนทัลปีของวัฏจักรการทำความเย็น

ที่แสดงผลของการสูญเสียความดัน

ตารางที่ 3.7 ผลกระทบของการสูญเสียความดันในส่วนต่างๆ ของระบบ (สารทำความเย็น R-134a

ที่มีความดันออกจากเครื่องควบแน่นเท่ากับ 1016.4 kPa (อุณหภูมิ 40 °C) และ

มีความดันเฉลี่ยของเครื่องระเหยเท่ากับ 132.99 kPa (อุณหภูมิ -20 °C)

อุปกรณ์	อุณหภูมิและความดันของวัฏจักรที่ไม่คิดการสูญเสียความดัน		อุณหภูมิและความดันก่อนเข้าอุปกรณ์		อุณหภูมิและความดันหลังออกจากอุปกรณ์		การสูญเสียความดันที่เกิดขึ้น kPa (%)
	°C	kPa	°C	kPa	°C	kPa	
1) ท่อทางของเหลว	40	1016.4	40	1016.4	37	937.3	79.07 (7.8) A มา A'
2) เครื่องระเหย	-20	132.99	-19	138.91	-21	127.46	11.45 (8.2) B' มา C'
3) ท่อทางดูด	-20	132.99	-21	127.46	-22	121.92	5.54 (4.3) C' มา C''
4) วาล์วทางดูดของเครื่องอัด	-20	132.99	-22	121.92	-23	116.76	5.16 (4.2) C'' มา C'''
5) วาล์วทางส่งของเครื่องอัด	48	1016.4	58	1285.7	49	1145.2	140.5 (10.9) D'' มา D'
6) ท่อทางส่งและเครื่องควบแน่น	48 และ 40	1016.4	49	1145.2	48	1016.4	128.8 (11.2) D' มา D

อย่างไรก็ดี ถึงแม้ว่าจะเกิดการแฟลชของสารทำความเย็นเหลวและอุณหภูมิลดลงตามความดันที่ลดลง แต่จะไม่เกิดผลใดๆ ต่อประสิทธิภาพของวัฏจักร เนื่องจากจำเป็นต้องลดความดันและอุณหภูมิของ

สารทำความเย็นเหลวก่อนเข้าสู่เครื่องระเหยอยู่แล้ว แต่จะมีผลเสียต่อขีดความสามารถของอุปกรณ์ลดความดันและอาจทำให้อุปกรณ์เสียหายจากผลของการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นกับลิ้นวาล์วและปาวาล์วได้ สำหรับเส้น B - B' แทนกระบวนการกลายเป็นไอ

3.8 ผลของการสูญเสียประสิทธิภาพเชิงกลในอุปกรณ์ต่างๆ

การไหลของของไหลที่ไหลผ่านท่อทางและอุปกรณ์ต่างๆ ที่มีแรงเสียดทานต้านทานการไหล นอกจากทำให้เกิดการสูญเสียความดันสารทำความเย็นแล้ว ยังมีผลทำให้เกิดความร้อนขึ้นระหว่างการเสียดสีจากการไหลของสารทำความเย็นกับพื้นผิวของอุปกรณ์ต่างๆ ด้วย ผลที่ตามมาคือ งานบางส่วนของระบบต้องสูญเสียไปกับการเปลี่ยนแปลงพลังงานไปเป็นพลังงานความร้อนนี้ ทำให้ประสิทธิภาพเชิงกลของอุปกรณ์ต่างๆ ลดลง ผลที่ตามมาคือ ต้องใส่งานให้กับระบบมากขึ้น (ต้องใช้กำลังงานในการอัดมากขึ้น) ในขณะที่ได้ผลของการทำความเย็นลดลง ซึ่งส่งผลให้ค่า COP ลดลงตามไปด้วย โดยทั่วไปส่งผลให้ค่า COP ลดลงประมาณ 10%

3.9 สรุป

วัฏจักรการทำความเย็นในทางปฏิบัติมีความซับซ้อนมากกว่าวัฏจักรการทำความเย็นในเชิงอุดมคติค่อนข้างมาก ซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์ต่างๆ ของระบบ และมีผลต่อสัมประสิทธิ์ของสมรรถนะการทำความเย็น หรือ COP โดยตรง ซึ่งมีผลกระทบใน 7 ลักษณะ คือ (1) ผลของอุณหภูมิสารทำความเย็นที่เครื่องระเหยที่ลดลง (2) ผลของอุณหภูมิสารทำความเย็นที่เครื่องควบแน่นที่สูงขึ้น (3) ผลของอุณหภูมิสารทำความเย็นก่อนเข้าอุปกรณ์ลดความดันที่ลดลง (4) ผลของอุณหภูมิสารทำความเย็นก่อนเข้าเครื่องอัดที่สูงขึ้น (5) ผลของอุณหภูมิสารทำความเย็นก่อนเข้าอุปกรณ์ลดความดันที่ลดลงและผลของอุณหภูมิสารทำความเย็นก่อนเข้าเครื่องอัดที่สูงขึ้นด้วยการใช้การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสารทำความเย็นในกระบวนการทั้งสอง (6) ผลของการสูญเสียความดันสารทำความเย็นขณะไหลผ่านอุปกรณ์ต่างๆ และ (7) ผลของการสูญเสียประสิทธิภาพเชิงกลในอุปกรณ์ต่างๆ อย่างไรก็ตาม ผลกระทบทั้ง 7 ลักษณะยังจัดว่าเป็นวัฏจักรพื้นฐานเท่านั้น ในการประยุกต์ใช้งานยังมีการดัดแปลงวัฏจักรพื้นฐานดังกล่าวออกไปอีกหลายลักษณะ ซึ่งจะได้กล่าวถึงในบทที่ 4

แบบฝึกหัดบทที่ 3

- จากผลกระทบใน 7 ลักษณะ คือ (1) ผลของอุณหภูมิสารทำความเย็นที่เครื่องระเหยที่ลดลง (2) ผลของอุณหภูมิสารทำความเย็นที่เครื่องควบแน่นที่สูงขึ้น (3) ผลของอุณหภูมิสารทำความเย็นก่อนเข้าอุปกรณ์ลดความดันที่ลดลง (4) ผลของอุณหภูมิสารทำความเย็นก่อนเข้าเครื่องอัดที่สูงขึ้น (5) ผลของอุณหภูมิสารทำความเย็นก่อนเข้าอุปกรณ์ลดความดันที่ลดลงและผลของอุณหภูมิสารทำความเย็นก่อนเข้าเครื่องอัดที่สูงขึ้นด้วยการใช้การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสารทำความเย็นในกระบวนการทั้งสอง (6) ผลของการสูญเสียความดันสารทำความเย็นขณะไหลผ่านอุปกรณ์ต่างๆ และ (7) ผลของการสูญเสียประสิทธิภาพเชิงกลในอุปกรณ์ต่างๆ จงวิเคราะห์ว่าควรมีการออกแบบระบบการทำความเย็นแบบอัดไอให้มีลักษณะที่เหมาะสมอย่างไร
- ระบบการทำความเย็นแบบอัดไอระบบหนึ่งใช้สารทำความเย็นชนิด R-134a ถ้าสารทำความเย็นเข้าสู่เครื่องอัดด้วยสภาวะไออิ่มตัวที่ความดัน 0.14 MPa และถูกอัดด้วยกระบวนการเอนโทรปีคงที่จนมีความดันเท่ากับ 0.8 MPa หลังจากนั้นสารทำความเย็นไหลผ่านเครื่องควบแน่นและออกด้วยสภาวะของเหลวอิ่มตัวเข้าสู่วาล์วขยายตัวซึ่งถูกทำให้ขยายตัวอย่างแอดิเอแบติก จงเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ของสมรรถนะของวัฏจักรนี้กับวัฏจักรต่อไปนี้ (ก) ถ้าอุณหภูมิสารทำความเย็นที่เครื่องระเหยลดลง 10°C (ข) ถ้าอุณหภูมิสารทำความเย็นที่เครื่องควบแน่นสูงขึ้น 10°C (ค) ถ้าอุณหภูมิสารทำความเย็นก่อนเข้าอุปกรณ์ลดความดันลดลง 5°C (ง) ถ้าอุณหภูมิสารทำความเย็นก่อนเข้าเครื่องอัดสูงขึ้น 5°C และ (จ) ถ้าอุณหภูมิสารทำความเย็นก่อนเข้าอุปกรณ์ลดความดันลดลง 5°C และอุณหภูมิสารทำความเย็นก่อนเข้าเครื่องอัดสูงขึ้น 5°C ด้วยการใช้การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสารทำความเย็นในกระบวนการทั้งสอง
- ระบบการทำความเย็นแบบอัดไอระบบหนึ่งใช้สารทำความเย็นชนิด R-134a ถ้าสารทำความเย็นเข้าสู่เครื่องอัดด้วยสภาวะไออิ่มตัวที่ความดัน 0.2 MPa และถูกอัดด้วยกระบวนการเอนโทรปีคงที่จนมีความดันเท่ากับ 0.8 MPa หลังจากนั้นสารทำความเย็นไหลผ่านเครื่องควบแน่นและออกด้วยสภาวะของเหลวอิ่มตัวเข้าสู่วาล์วขยายตัวซึ่งถูกทำให้ขยายตัวอย่างแอดิเอแบติก จงเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ของสมรรถนะของวัฏจักรนี้กับวัฏจักรที่มีอุณหภูมิสารทำความเย็นที่เครื่องระเหยลดลง 10°C อุณหภูมิสารทำความเย็นที่เครื่องควบแน่นสูงขึ้น 10°C ทั้งนี้อุณหภูมิสารทำความเย็นก่อนเข้าอุปกรณ์ลดความดันลดลง 5°C และอุณหภูมิสารทำความเย็นก่อนเข้าเครื่องอัดสูงขึ้น 5°C ด้วยการใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสารทำความเย็นในกระบวนการทั้งสองข้างต้น

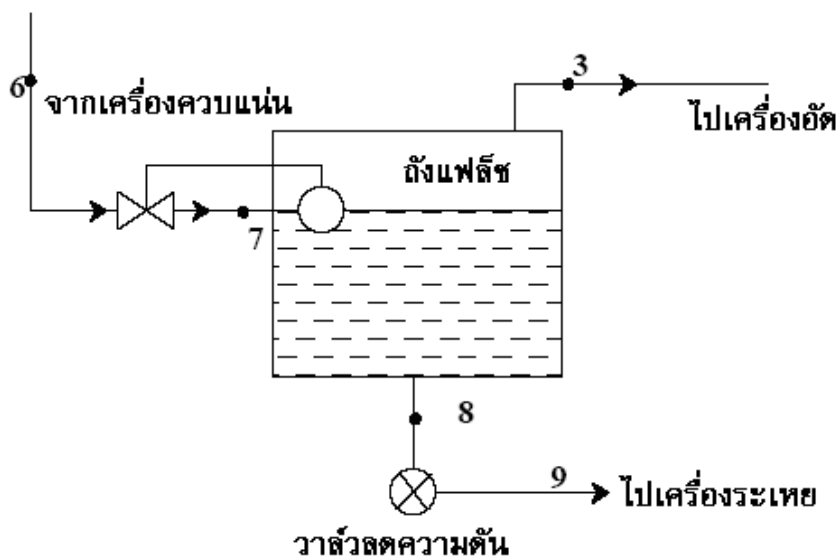
บทที่ 4

ระบบการทำความเย็นแบบอัดไอที่พัฒนา

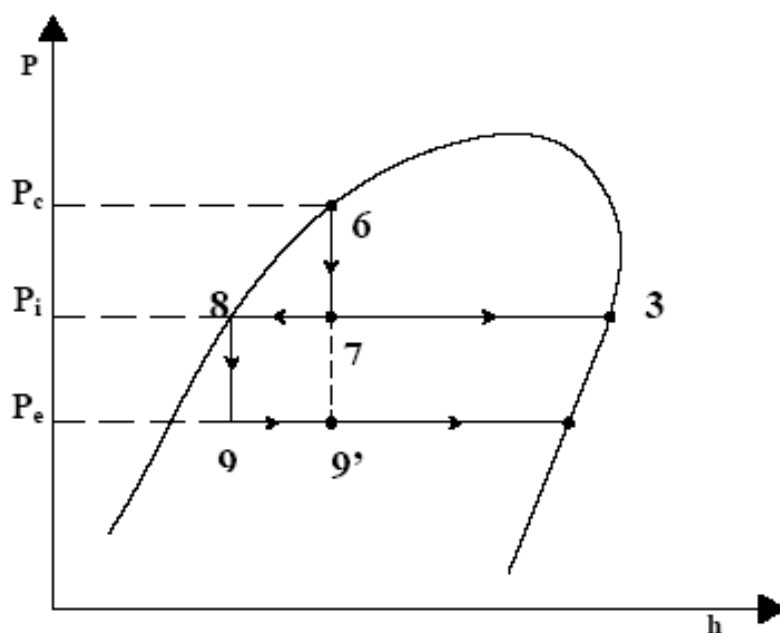
4.1 ระบบทำความเย็นแบบมีถังแฟลช

ในบทที่ 3 ที่ได้กล่าวมาทั้งหมดเป็นการทำความเย็นแบบไออัดรูปแบบธรรมดา การทำความเย็นแบบไออัดมีลักษณะเป็นวัฏจักรทำความเย็นที่นิยมกันมากที่สุดเพราะว่าเป็นระบบที่ง่าย ราคาที่ไม่แพง ไม่เสียหายง่าย และไม่ต้องบำรุงรักษามาก แต่อย่างไรก็ตาม ในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่มักคำนึงถึงประสิทธิภาพของการทำงานเป็นหลัก เพื่อให้ระบบมีความคุ้มค่าในการใช้งาน โดยเฉพาะเมื่อมีความต้องการทำความเย็นที่อุณหภูมิต่ำมาก ซึ่งจากหัวข้อ 3.2 จะเห็นว่าผลของอุณหภูมิสารทำความเย็นที่เครื่องระเหยที่ลดลงจะทำให้สมรรถนะการทำความเย็นลดลงในทุกๆ ด้าน จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงวัฏจักรการทำความเย็นดังกล่าวให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นในรูปแบบต่างๆ ได้แก่ ระบบทำความเย็นแบบมีถังแฟลช ระบบทำความเย็นแบบหลายขั้นตอน ระบบทำความเย็นแบบเครื่องระเหยหลายเครื่อง หรือระบบทำความเย็นแบบหลั่น ในหัวข้อนี้จะได้อธิบายถึงระบบทำความเย็นแบบมีถังแฟลช ส่วนระบบทำความเย็นอื่นๆ จะได้กล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

ระบบทำความเย็นแบบมีถังแฟลชพัฒนาขึ้นมาเพื่อแก้ปัญหาเกี่ยวกับผลของอุณหภูมิสารทำความเย็นที่เครื่องระเหยที่ลดลงที่ทำให้คุณภาพไอสูงขึ้น ขณะเข้าเครื่องระเหยจนทำให้ประสิทธิภาพการทำความเย็นลดลงดังได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.2 จากการที่ไอสารทำความเย็นที่เข้าเครื่องระเหยที่เกิดจากกระบวนการลดความดันที่เรียกว่า ไอแฟลช (Flash vapour) มีปริมาณมากขึ้น ซึ่งสถานะที่เป็นไอของไอแฟลชทำให้ไม่มีประสิทธิภาพต่อการทำความเย็น นอกจากนี้ยังเป็นตัวเพิ่มความดันตกในเครื่องระเหย ดังนั้นหากสามารถกำจัดไอแฟลชนี้ให้ออกไปก่อนที่สารทำความเย็นจะเข้าเครื่องระเหย ย่อมทำให้ COP ของระบบปรับเพิ่มขึ้นได้ อย่างไรก็ตามการกำจัดไอแฟลชอย่างต่อเนื่องในทันทีที่เกิดไอแฟลชขึ้น เป็นไปได้ยากในทางปฏิบัติ แนวทางหนึ่งในการกำจัดไอแฟลชเพื่อเพิ่มสมรรถนะของระบบคือการกำจัดไอแฟลช ณ ความดันระหว่างกลางของเครื่องควบแน่นและเครื่องระเหยด้วยการใช้ถังแฟลช ดังแสดงลักษณะทางกายภาพในรูปที่ 4.1 และแผนภูมิความดัน-เอนทัลปี ในรูปที่ 4.2 ลักษณะของถังแฟลช คือถังความดันที่สารทำความเย็นเหลวและไอสารทำความเย็นจะถูกทำให้แยกออกจากกัน ณ ความดันระหว่างกลางของเครื่องควบแน่นและเครื่องระเหย เริ่มจากเมื่อสารทำความเย็นจากเครื่องควบแน่นถูกทำให้ขยายตัวเข้าสู่ถังแฟลช ด้วยการใช้วาล์วลอยด้านความดันต่ำ (กระบวนการ 6 – 7) ส่วนที่เป็นของเหลวจะรวมตัวเข้ากับสารทำความเย็นเหลวในถังแฟลชและไหลลงสู่ด้านล่างสู่วาล์วลดความดัน ณ จุด 8 ขณะที่ส่วนที่เป็นไออนแยกตัวออกไปสู่เครื่องอัดที่จุด 3



รูปที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพในการใช้ถังพลังค์กับระบบทำความเย็น



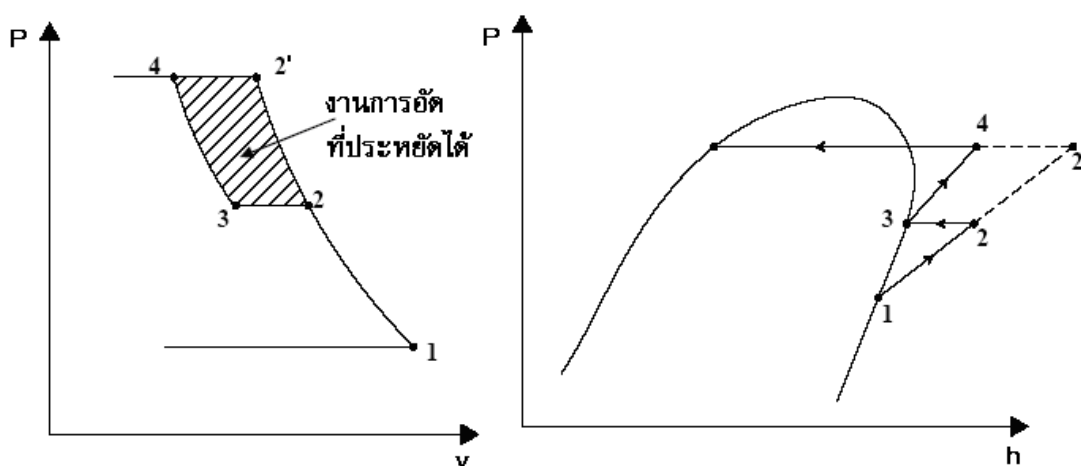
รูปที่ 4.2 แผนภูมิความดัน-เอนทัลปี ในการใช้ถังพลังค์กับระบบทำความเย็น

4.2 ระบบทำความเย็นแบบอัดหลายขั้นตอน

เมื่อสารทำความเย็นในสถานะก๊าซในระบบทำความเย็นแบบมีถังพลังค์ที่มีเส้นทางการไหลของสารทำความเย็นในการเข้าสู่เครื่องอัด 2 เส้นทาง คือ เส้นทางจากจุด 3 และเส้นทางจากจุด 9 ผ่านเครื่องระเหย ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2 ทั้งนี้การออกแบบช่วงการอัดก๊าซสามารถกระทำได้ใน 2 ลักษณะ คือ

(1) ใช้เครื่องอัดแยกกันต่างหาก ณ จุด 3 เครื่องหนึ่ง และ ณ ทางออกของเครื่องระเหยอีกเครื่องหนึ่ง

(2) ใช้เครื่องอัดแบบมีกระบวนการอัด 2 ชั้น ดังนี้ ณ จุดที่เป็นทางออกของเครื่องอัด สารทำความเย็นจะถูกอัดเพิ่มความดันจนมีความดันเท่ากับความดันของถังแฟลช จากนั้นทำการลดอุณหภูมิจนมีอุณหภูมิเท่ากับสารทำความเย็นที่จุด 3 และเข้าผสมรวมกันกับสารทำความเย็นที่ออกจากถังแฟลช ณ จุด 3 จากนั้นจึงทำการอัดเพิ่มความดันจนมีความดันเท่ากับความดันของเครื่องควบแน่น ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ระบบลักษณะนี้จึงเรียกว่า ระบบทำความเย็นโดยมีกระบวนการอัดหลายขั้นตอน



รูปที่ 4.3 แผนภูมิความดัน-ปริมาตรจำเพาะ และแผนภูมิความดัน-เอนทัลปี
ที่ใช้เครื่องอัดแบบมีกระบวนการอัด 2 ชั้น

ถ้าเปรียบเทียบการออกแบบช่วงการอัดก๊าซของกระบวนการอัดใน 2 ลักษณะข้างต้น จะเห็นว่ากระบวนการการอัดตามวิธีการใช้เครื่องอัดแบบมีกระบวนการอัด 2 ชั้น จะมีผลต่อการประหยัดพลังงานในการอัดมากกว่า ดังสมการการอัดแบบโพลีทรอปิก ตามสมการ 4.1

$$w = -\int_1^2 v \cdot dP = \left(\frac{n}{n-1} \right) \cdot P_1 v_1 \left[1 - \frac{P_2}{P_1} \right]^{(n-1)/n} \quad (4.1)$$

เมื่อ P_1 และ P_2 คือ ความดันเข้าและออกของเครื่องอัด

v_1 คือ ปริมาตรจำเพาะของสารทำความเย็นที่เข้าเครื่องอัด

n คือ เลขยกกำลังโพลีทรอปิก

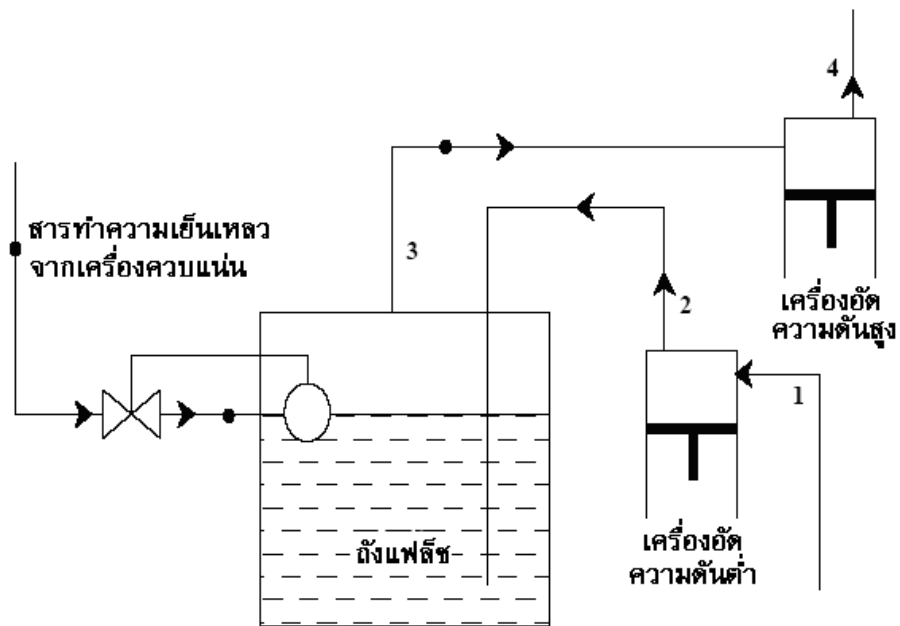
รูปที่ 4.3 ในส่วนของแผนภูมิความดัน-ปริมาตรจำเพาะ แสดงให้เห็นถึงผลการประหยัดพลังงานนี้ สำหรับการหล่อเย็นระหว่างกลางของไอสารทำความเย็นอาจใช้วิธีการใช้สารทำความเย็นในถังแฟลช ดังรูปที่ 4.4 หรือด้วยการหล่อเย็นด้วยน้ำเย็นในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ดังรูปที่ 4.5 อย่างไรก็ตาม วิธีหลังมักใช้กับเครื่องอัดอากาศ เนื่องจากอุณหภูมิอากาศไม่ต่ำพอที่จะทำให้ไอสารทำความเย็นอิ่มตัว

ในส่วนของความดันที่เลือกใช้ในถังแฟลช สามารถหาได้จากสมการ 4.2 ดังนี้

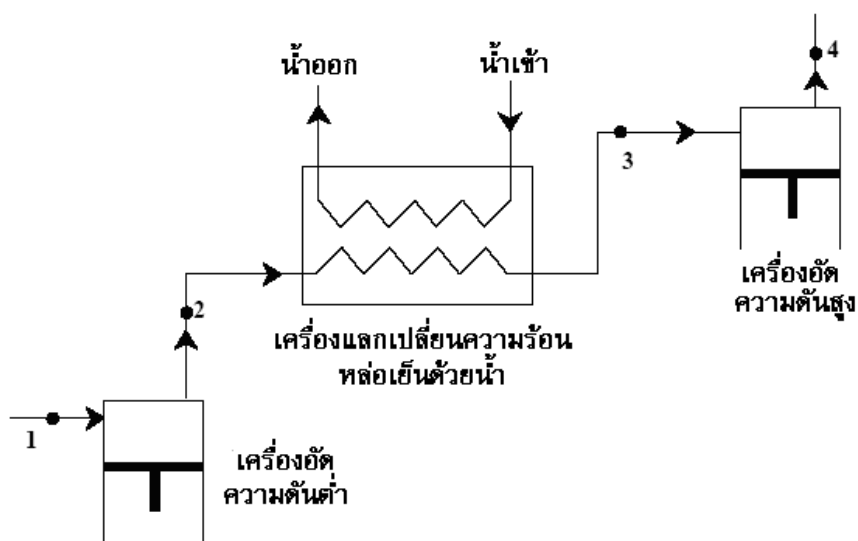
$$P_{i,opt} = \sqrt{P_e P_c \frac{T_c}{T_e}} \quad (4.2)$$

เมื่อ P_e และ P_c คือ ความดันเครื่องระเหยและความดันเครื่องควบแน่น, MPa

T_e และ T_c คือ อุณหภูมิเครื่องระเหยและอุณหภูมิเครื่องควบแน่น, K



รูปที่ 4.4 ลักษณะการหล่อเย็นระหว่างกลางด้วยการใช้สารทำความเย็นเหลวในถังแฟลช



รูปที่ 4.5 ลักษณะการหล่อเย็นระหว่างกลางด้วยการใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจากภายนอก

นอกจากวิธีการตามข้างต้น สามารถออกแบบระบบให้มีการกำจัดก๊าซแฟลชด้วยการใช้สารทำความเย็นเหลวในถังแฟลชและการหล่อเย็นระหว่างกลาง ดังแสดงในรูปที่ 4.6 และ 4.7 ด้วยการให้ไอสารทำความเย็นร้อนยิ่งยวดจากการหล่อเย็นผ่านสารทำความเย็นเหลวในถังแฟลช (2 - 3 - 4) อย่างไรก็ตาม การทำความเย็นในถังแฟลชทำให้ปริมาณการเกิดไอลดลง สำหรับการคำนวณสมดุลมวลและพลังงานสามารถกระทำได้จากสมการดังต่อไปนี้

กรณีสมดุลมวลและพลังงานในถังแฟลช

$$m_7 + m_3 = m_8 + m_4 \quad (4.3)$$

$$m_7 h_7 + m_3 h_3 = m_8 h_8 + m_4 h_4 \quad (4.4)$$

กรณีสมดุลมวลและพลังงานคร่อมมวลวาล์วขยายตัว

$$m_8 = m_9 \quad (4.5)$$

$$h_8 = h_9 \quad (4.6)$$

กรณีสมดุลมวลและพลังงานคร่อมเครื่องระเหย

$$m_9 = m_1 \quad (4.7)$$

$$Q_e = m_1 (h_1 - h_9) \quad (4.8)$$

กรณีสมดุลมวลและพลังงานคร่อมเครื่องอัดความดันต่ำ (เครื่องอัด I)

$$m_9 = m_1 = m_i \quad (4.9)$$

$$W_i = m_i (h_2 - h_1) \quad (4.10)$$

เมื่อ m_i คืออัตราการไหลเชิงมวลของสารทำความเย็นผ่านเครื่องอัด I

กรณีสมดุลมวลและพลังงานคร่อมเครื่องหล่อเย็นระหว่างกลาง (intercooler)

$$m_2 = m_3 = m_i \quad (4.11)$$

$$Q_i = m_i (h_2 - h_3) \quad (4.12)$$

เมื่อ Q_i คือความร้อนที่ถ่ายเทโดยสารทำความเย็นสู่น้ำหล่อเย็นในเครื่องหล่อเย็นระหว่างกลาง

กรณีสมดุลมวลและพลังงานคร่อมเครื่องอัดความดันสูง (เครื่องอัด II)

$$m_4 = m_5 = m_{ii} \quad (4.13)$$

$$W_{ii} = m_{ii} (h_5 - h_4) \quad (4.14)$$

เมื่อ m_{ii} คืออัตราการไหลเชิงมวลของสารทำความเย็นผ่านเครื่องอัด II

กรณีสมดุลมวลและพลังงานคร่อมเครื่องควบแน่น

$$m_5 = m_6 = m_{ii} \quad (4.15)$$

$$Q_c = m_{ii} (h_5 - h_6) \quad (4.16)$$

สุดท้าย กรณีสมดุลมวลและพลังงานคร่อมมวลวาล์วกลอย

$$m_6 = m_7 = m_{ii} \quad (4.17)$$

$$h_6 = h_7 \quad (4.18)$$

จากสมการทั้งหมดข้างต้น สามารถสรุปได้ว่า

$$m_7 = m_4 = m_{II} \quad (4.19)$$

$$m_3 = m_8 = m_I \quad (4.20)$$

$$m_{II} = m_I \left[\frac{h_3 - h_8}{h_4 - h_7} \right] \quad (4.21)$$

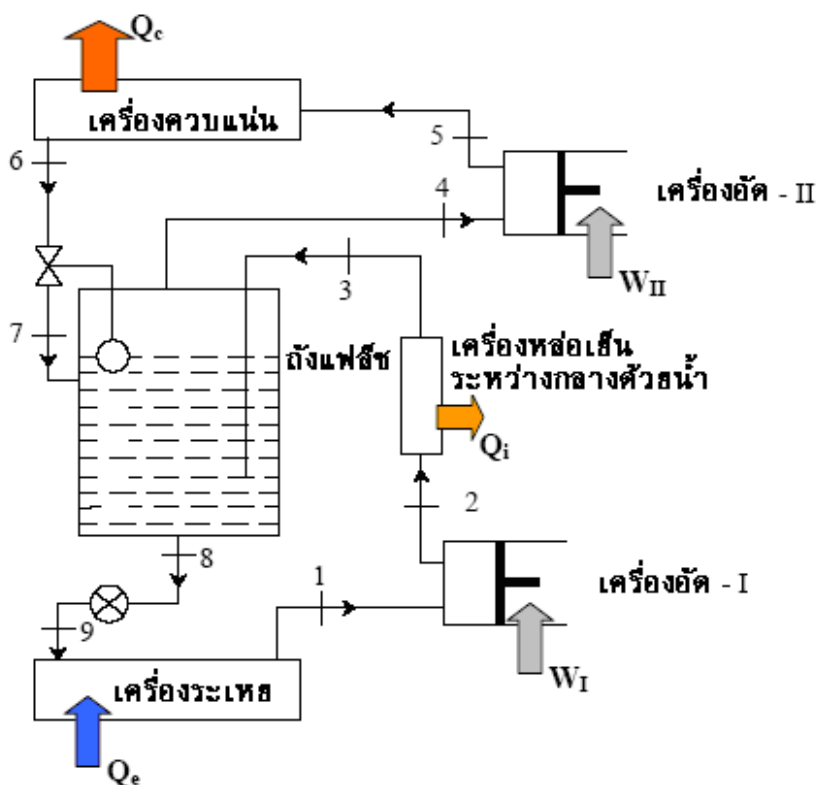
จากสมการจะเห็นว่า การไหลของสารทำความเย็นผ่านการอัดความดันสูง m_{II} สามารถทำให้ลดลงด้วยการลดเอนทัลปีของไอสารทำความเย็นที่เข้าสู่ถึงแฟลช h_3 จากเครื่องหล่อเย็นระหว่างกลาง

สำหรับปริมาณไอที่เพิ่มเข้ามาที่เกิดขึ้นเนื่องจากการลดสถานะไอร้อนยิ่งยวด (desuperheating) ของไอสารทำความเย็นจากเครื่องหล่อเย็นระหว่างกลาง กำหนดโดย

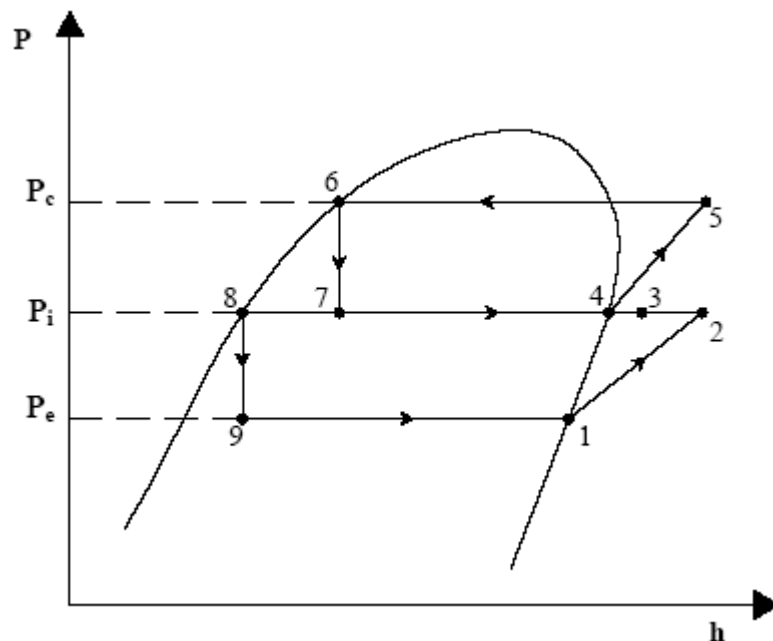
$$m_{gen} = m_I \left[\frac{h_3 - h_8}{h_4 - h_8} \right] \quad (4.22)$$

จากระบบดังข้างต้น สามารถหาค่า COP ได้ดังสมการ

$$COP = \frac{Q_e}{W_I + W_{II}} = \frac{m_I(h_1 - h_9)}{m_I(h_2 - h_1) + m_{II}(h_5 - h_4)} \quad (4.23)$$



รูปที่ 4.6 ระบบการทำความเย็นแบบอัดสองชั้นที่มีการกำจัดก๊าซแฟลชด้วยการใช้สารทำความเย็นเหลวในถังแฟลชและการหล่อเย็นระหว่างกลาง

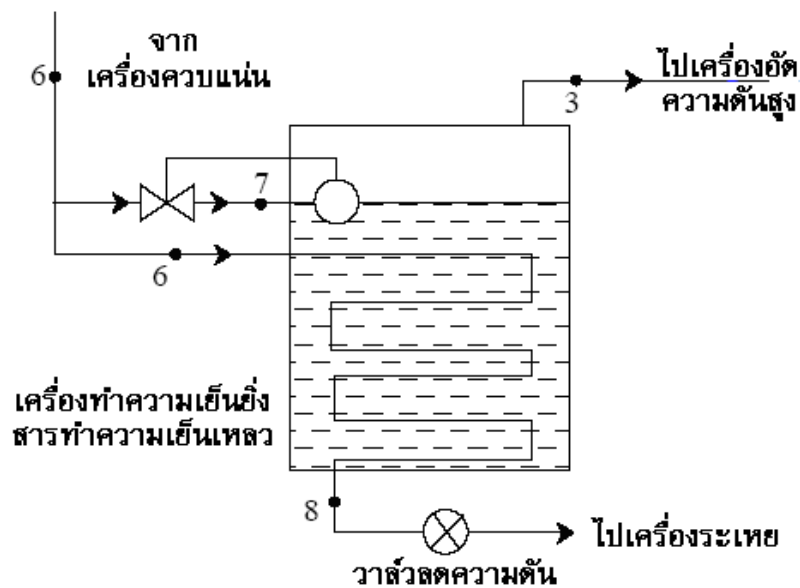


รูปที่ 4.7 แผนภูมิ P - h ของระบบการทำความเย็นแบบอัดสองขั้นที่มีการกำจัดก๊าซแฟลชด้วยการใช้สารทำความเย็นเหลวในถังแฟลชและการหล่อเย็นระหว่างกลาง

ระบบดังกล่าวมีข้อดีหลายประการ ดังนี้

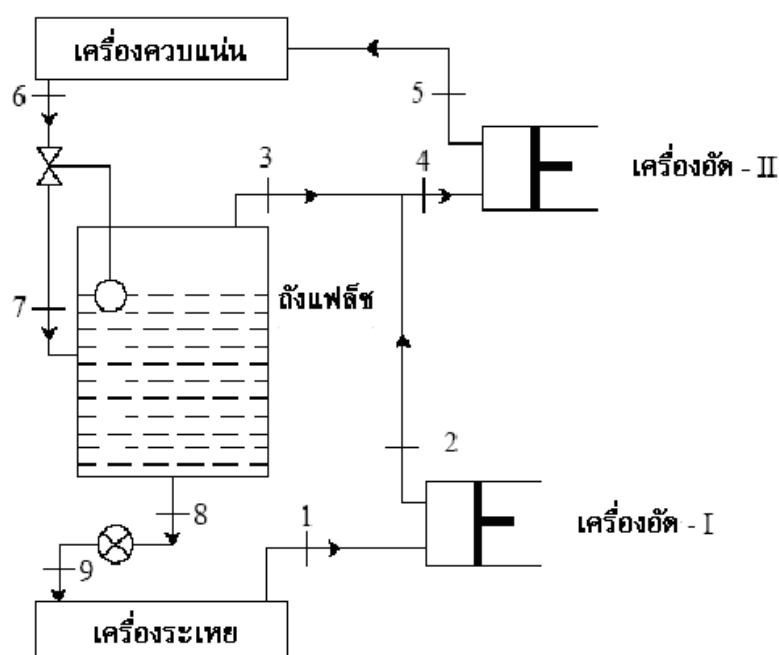
- 1) คุณภาพของสารทำความเย็นที่เข้าสู่เครื่องระเหยลดลง ดังนั้นช่วยเพิ่มผลการทำความเย็นให้มากขึ้น ลดความดันตกให้ลดลง และการถ่ายเทความร้อนในเครื่องระเหยดีขึ้น
- 2) การสูญเสียในกระบวนการลดความดันลดลง ในขณะที่ไอที่เกิดขึ้นระหว่างการลดความดันจาก P_c เป็น P_i ถูกแยกออกในถังแฟลชและถูกอัดโดยเครื่องอัด II
- 3) ประสิทธิภาพเชิงปริมาตรของเครื่องอัดจะสูง เนื่องจากอัตราส่วนความดันที่ลดลง
- 4) อุณหภูมิด้านทางออกของเครื่องอัดลดลงอย่างมาก

อย่างไรก็ดี มีข้อจำกัดประการหนึ่งของระบบดังกล่าว คือ เนื่องจากสารทำความเย็นเหลวในถังแฟลชอยู่ในสภาวะอิ่มตัว จึงเป็นไปได้ที่ของเหลวจะเกิดการแฟลชหรือกลายเป็นไวก่อนเข้าวาล์วขยายตัวจากผลของความดันตกหรือการถ่ายเทความร้อนในเส้นท่อที่เชื่อมต่อกับถังแฟลชสู่อุปกรณ์ลดความดัน บางครั้งการแก้ปัญหานี้จะกระทำได้โดยการใช้เครื่องทำความเย็นยิ่งยวดสารทำความเย็นเหลว (Liquid subcooler) ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ด้วยการให้สารทำความเย็นเหลวจากเครื่องควบแน่นถูกทำให้เย็นลงด้วยการแลกเปลี่ยนความร้อนกับสารทำความเย็นเหลวในถังแฟลช อย่างไรก็ตาม แม้ว่าจะทำให้ไม่เกิดการแฟลชหรือกลายเป็นไวก่อนเข้าวาล์วขยายตัว แต่ผลการทำความเย็นในเครื่องระเหยจะลดลง

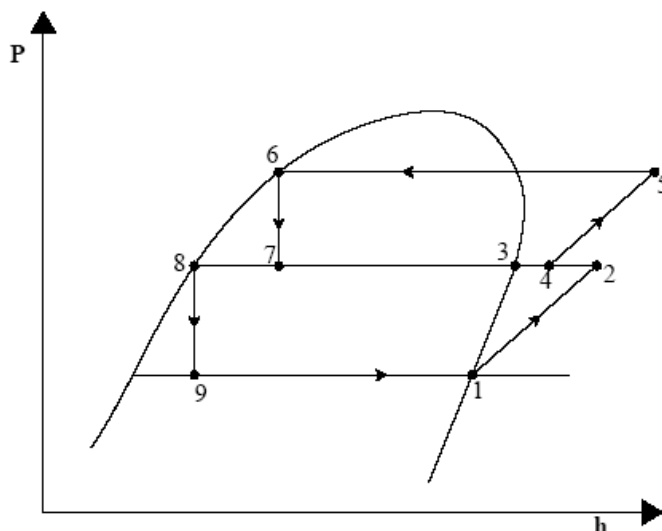


รูปที่ 4.8 ระบบการทำความเย็นที่มีเครื่องทำความเย็นยิ่งสารทำความเย็นเหลว

ในทางปฏิบัติพบว่า ระบบข้างต้นใช้ได้ดีกับสารทำความเย็นชนิดแอมโมเนีย แต่กับสารทำความเย็นชนิด R-134a โดยทั่วไปจะเป็นไปไม่ได้ เนื่องจากอุณหภูมิ ณ ทางออกของเครื่องอัดที่ต่ำกว่า ในระบบนี้จะเป็นการผสมไอสารทำความเย็นที่ออกจากเครื่องอัดความดันต่ำกับไอสารทำความเย็นที่ออกจากถังแฟลชโดยตรงแทน ดังแสดงในรูปที่ 4.9 และ 4.10

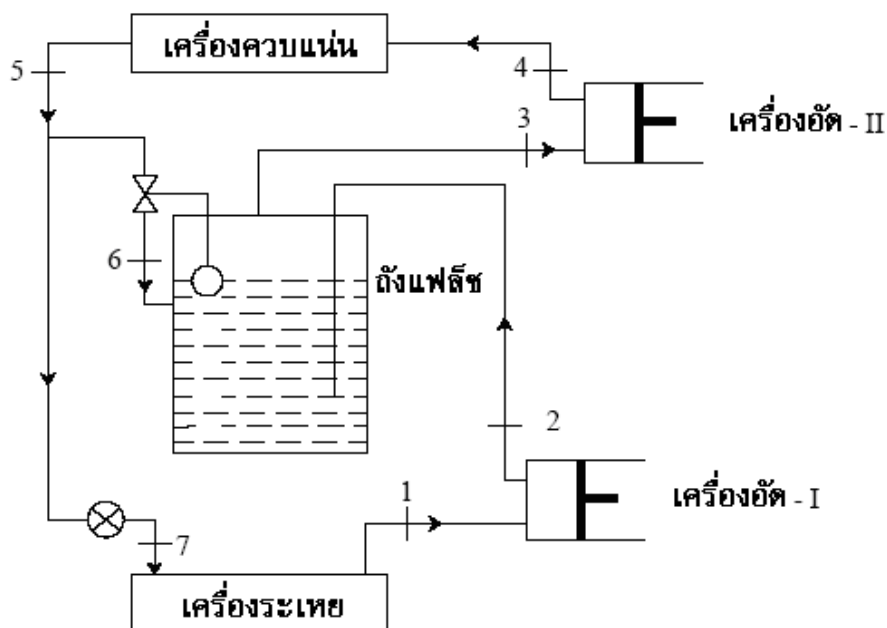


รูปที่ 4.9 ลักษณะระบบการทำความเย็นแบบอัดสองชั้นที่มีถังแฟลชใช้กำจัดก๊าซแฟลชเท่านั้น

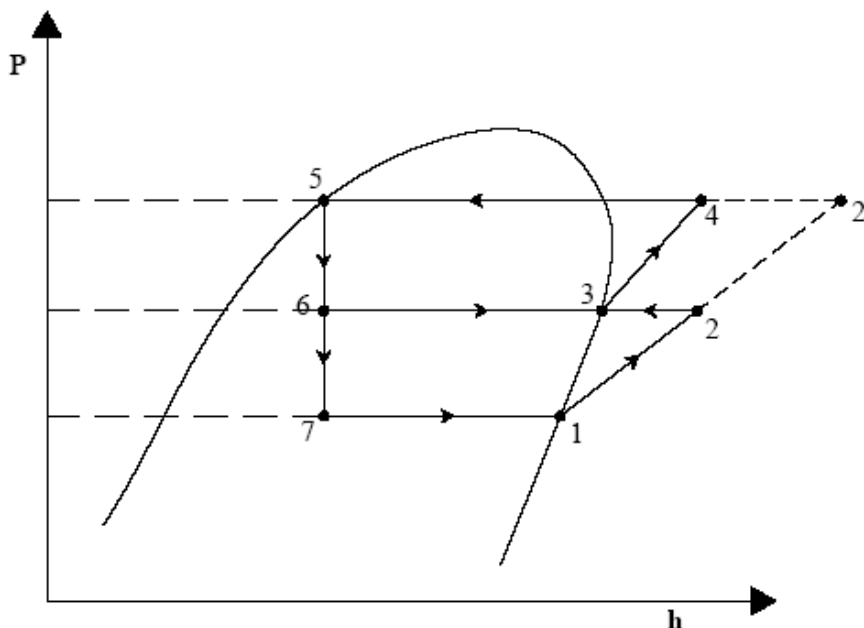


รูปที่ 4.10 แผนภูมิ P - h ของระบบการทำความเย็นแบบอัดสองชั้น
ที่มีถังแฟลชใช้กำจัดก๊าซแฟลชเท่านั้น

นอกจากนี้ ในบางครั้งถังแฟลชถูกนำมาใช้สำหรับการหล่อเย็นระหว่างกลางของไอสารทำความเย็นระหว่างเครื่องอัดความดันต่ำและความดันสูงเท่านั้น โดยไม่ได้ใช้เป็นเครื่องกำจัดก๊าซแฟลชด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.11 และ รูปที่ 4.12 ซึ่งแสดงลักษณะระบบการทำความเย็นแบบอัดสองชั้นที่มีถังแฟลชใช้ในการหล่อเย็นระหว่างกลางเท่านั้น



รูปที่ 4.11 ลักษณะระบบการทำความเย็นแบบอัดสองชั้น
ที่มีถังแฟลชใช้ในการหล่อเย็นระหว่างกลางเท่านั้น



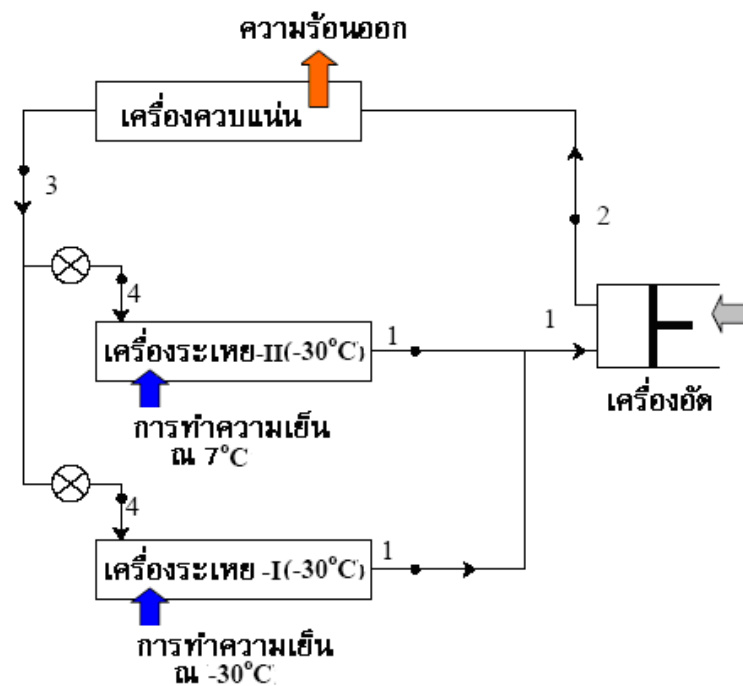
รูปที่ 4.12 แผนภูมิ P - h ของระบบการทำความเย็นแบบอัดสองชั้น
ที่มีถังแฟลชใช้ในการหล่อเย็นระหว่างกลางเท่านั้น

4.3 ระบบทำความเย็นแบบเครื่องระเหยหลายเครื่อง

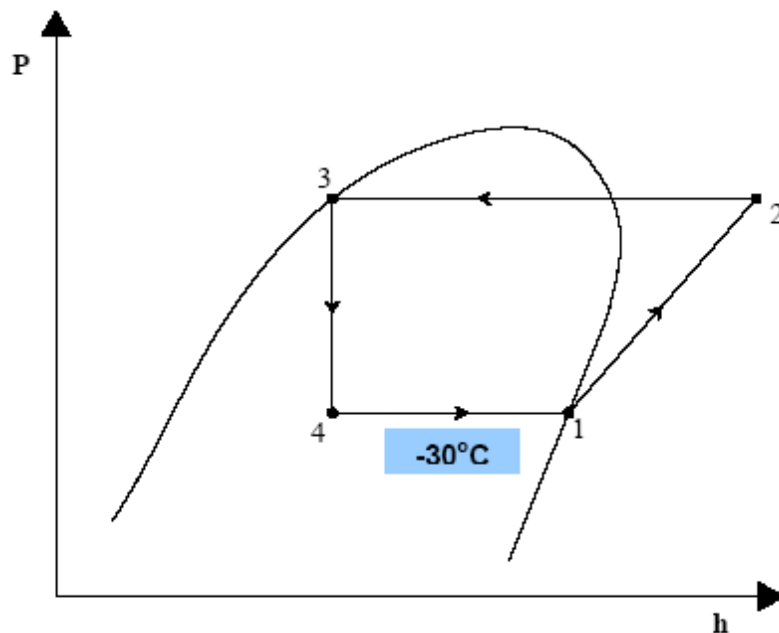
ในการใช้งานบางอย่างของระบบทำความเย็น อาจต้องการความเย็นที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันมากกว่าหนึ่งแห่ง ลักษณะดังกล่าวสามารถกระทำได้ด้วยการใช้วาล์วลดความดันแยกกันและใช้เครื่องอัดแยกกันสำหรับเครื่องระเหยแต่ละเครื่องที่มีใช้งานที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน แต่ระบบเช่นนี้จะทำให้ระบบมีขนาดโตขึ้นและไม่คุ้มค่าการใช้งานในทางเศรษฐศาสตร์ วิธีที่เหมาะสมในทางปฏิบัติสามารถกระทำได้หลายวิธี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการออกแบบระบบ เช่น การรวมเอากระแสการไหลออกจากเครื่องระเหยทุกเครื่องไปยังเครื่องอัดเพียงเครื่องเดียว ดังรูปที่ 4.13 ถึง รูปที่ 4.18 หรือใช้เครื่องอัดหลายเครื่อง ดังรูปที่ 4.19 ถึง รูปที่ 4.22 ซึ่งแต่ละรูปแบบจะมีข้อดีและข้อจำกัดแตกต่างกันไป

ระบบดังรูปที่ 4.13 และรูปที่ 4.14 เป็นระบบการทำความเย็นแบบเครื่องระเหยสองเครื่องที่มีอุณหภูมิของเครื่องระเหยเท่ากัน โดย COP ของระบบสามารถหาได้จากสมการ ดังนี้

$$COP = \frac{Q_{e,I} + Q_{e,II}}{W_c} = \frac{(h_1 - h_4)}{(h_2 - h_1)} \tag{4.24}$$



รูปที่ 4.13 ลักษณะระบบการทำความเย็นแบบเครื่องระเหยสองเครื่อง
ที่มีอุณหภูมิของเครื่องระเหยเท่ากัน



รูปที่ 4.14 แผนภูมิ P - h ของระบบการทำความเย็นแบบเครื่องระเหยสองเครื่อง
ที่มีอุณหภูมิของเครื่องระเหยเท่ากัน

ระบบดังรูปที่ 4.15 และรูปที่ 4.16 เป็นระบบการทำความเย็นแบบเครื่องระเหยสองเครื่องที่มีอุณหภูมิของเครื่องระเหยไม่เท่ากัน โดย COP ของระบบสามารถหาได้จากสมการ ดังนี้

$$\text{COP} = \frac{Q_{e,I} + Q_{e,II}}{W_c} = \frac{m_I(h_7 - h_5) + m_{II}(h_6 - h_4)}{(m_I + m_{II})(h_2 - h_1)} \quad (4.25)$$

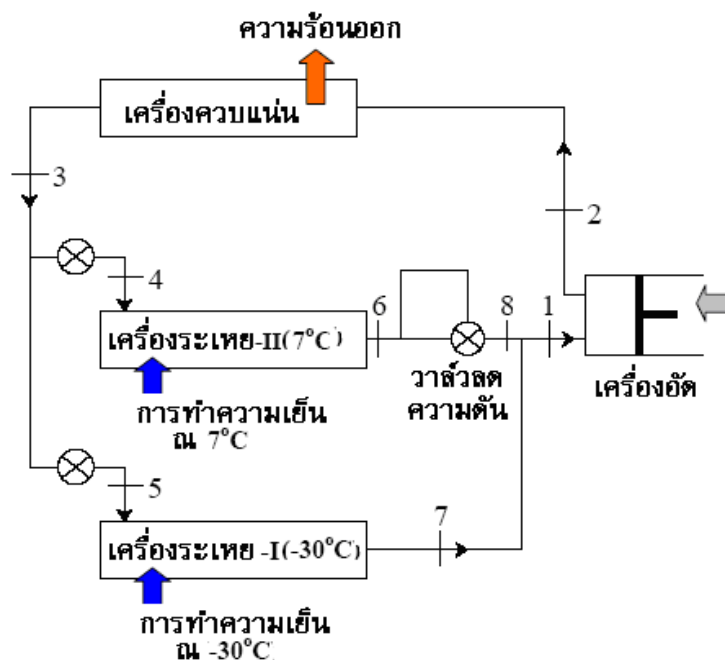
เมื่อ m_I และ m_{II} คืออัตราการไหลเชิงมวลของสารทำความเย็นผ่านเครื่องระเหย I และ II ตามลำดับ ทั้งนี้

$$m_I = \frac{Q_{e,I}}{(h_7 - h_5)} \quad (4.26)$$

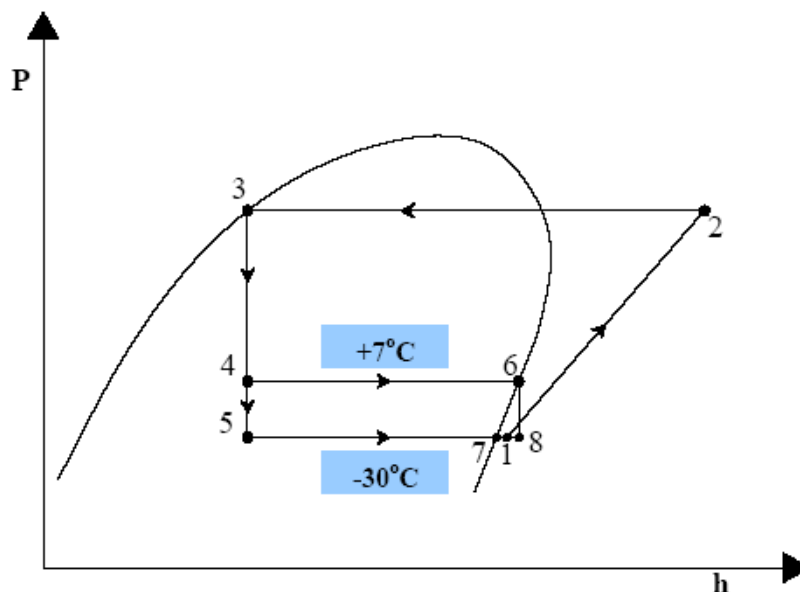
$$m_{II} = \frac{Q_{e,II}}{(h_6 - h_4)} \quad (4.27)$$

เอนทัลปีที่จุด 2 (ทางเข้าเครื่องอัด) หาได้จากสมการดุลมวลและพลังงานในการการผสมกันของกระแสสารทำความเย็นทั้งสอง นั่นคือ

$$h_2 = \frac{m_I h_7 + m_{II} h_8}{(m_I + m_{II})} \quad (4.28)$$



รูปที่ 4.15 ลักษณะระบบการทำความเย็นแบบเครื่องระเหยสองเครื่องที่มีอุณหภูมิของเครื่องระเหยไม่เท่ากัน



รูปที่ 4.16 แผนภูมิ P - h ของระบบการทำความเย็นแบบเครื่องระเหยสองเครื่อง
ที่มีอุณหภูมิของเครื่องระเหยไม่เท่ากัน

ระบบดังรูปที่ 4.17 และรูปที่ 4.18 เป็นระบบการทำความเย็นแบบเครื่องระเหยสองเครื่องที่มีมวล
ขยายตัวของเครื่องระเหยแยกจากกัน โดย COP ของระบบสามารถหาได้จากสมการ ดังนี้

$$\text{COP} = \frac{Q_{e,I} + Q_{e,II}}{W_c} = \frac{m_I(h_8 - h_6) + m_{II}(h_7 - h_4)}{(m_I + m_{II})(h_2 - h_1)} \quad (4.29)$$

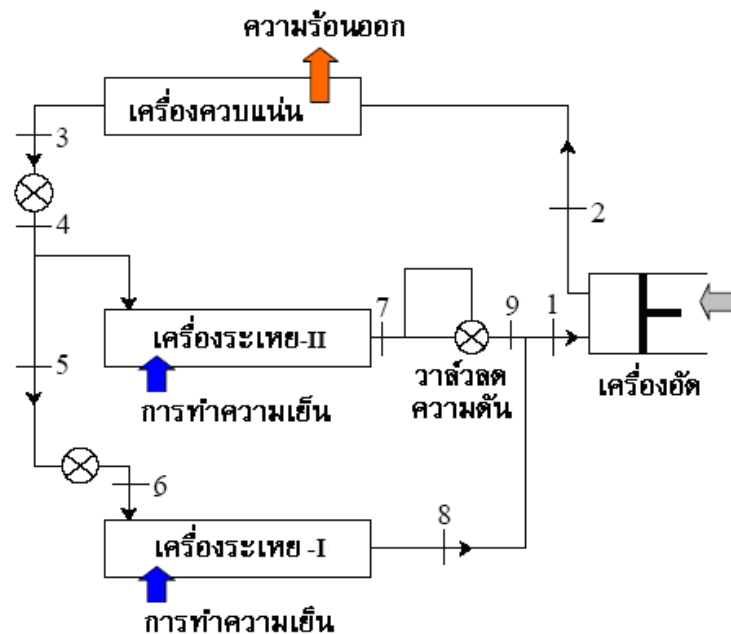
เมื่อ m_I และ m_{II} คืออัตราการไหลเชิงมวลของสารทำความเย็นผ่านเครื่องระเหย I และ II
ตามลำดับ ทั้งนี้

$$m_I = \frac{Q_{e,I}}{(h_8 - h_6)} \quad (4.30)$$

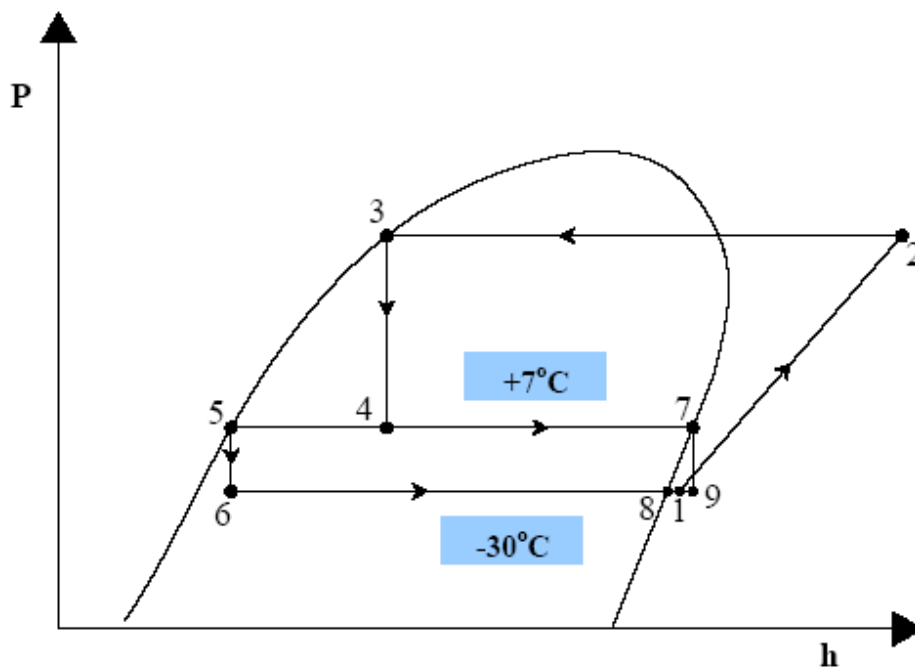
$$m_{II} = \frac{Q_{e,II}}{(h_7 - h_4)} \quad (4.31)$$

เอนทัลปีที่จุด 2 (ทางเข้าเครื่องอัด) หาได้จากสมการดุลมวลและพลังงานในการการผสมกันของกระแ
สารทำความเย็นทั้งสอง นั่นคือ

$$h_2 = \frac{m_I h_8 + m_{II} h_9}{(m_I + m_{II})} \quad (4.32)$$



รูปที่ 4.17 ลักษณะระบบการทำความเย็นแบบเครื่องระเหยสองเครื่องที่มีวาล์วขยายตัวของเครื่องระเหยแยกจากกัน



รูปที่ 4.18 แผนภูมิ P - h ของระบบการทำความเย็นแบบเครื่องระเหยสองเครื่องที่มีวาล์วขยายตัวของเครื่องระเหยแยกจากกัน

ระบบดังรูปที่ 4.19 และรูปที่ 4.20 เป็นระบบการทำความเย็นแบบเครื่องระเหยสองเครื่องที่มีเครื่องอัดของเครื่องระเหยแยกจากกันและมีถังฟลีสสำหรับการกำจัดก๊าซฟลีสและการหล่อเย็นระหว่างกลาง โดย COP ของระบบสามารถหาได้จากสมการ ดังนี้

$$\text{COP} = \frac{Q_{e,I} + Q_{e,II}}{W_{c,I} + W_{c,II}} = \frac{m_I(h_1 - h_8) + m_{II}(h_3 - h_6)}{m_I(h_2 - h_1) + m_{II}(h_4 - h_3)} \quad (4.33)$$

เมื่อ m_I และ m_{II} คืออัตราการไหลเชิงมวลของสารทำความเย็นผ่านเครื่องระเหย I และ II ตามลำดับ ทั้งนี้

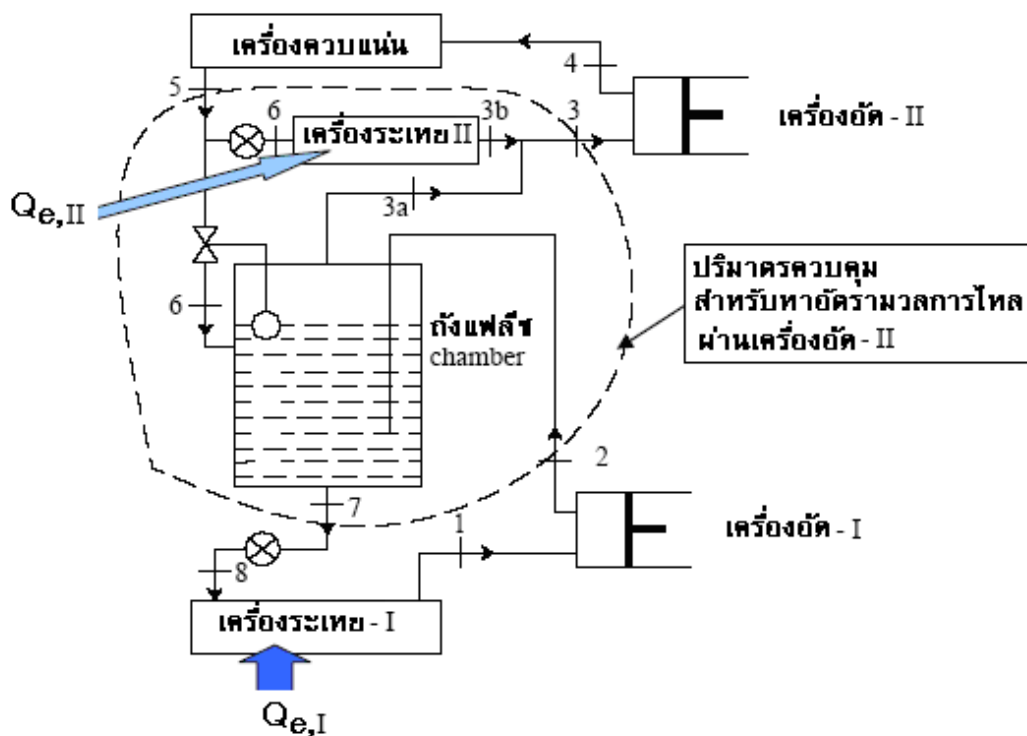
$$m_I = \frac{Q_{e,I}}{(h_1 - h_8)} \quad (4.34)$$

$$m_{II} = \frac{Q_{e,II}}{(h_3 - h_6)} \quad (4.35)$$

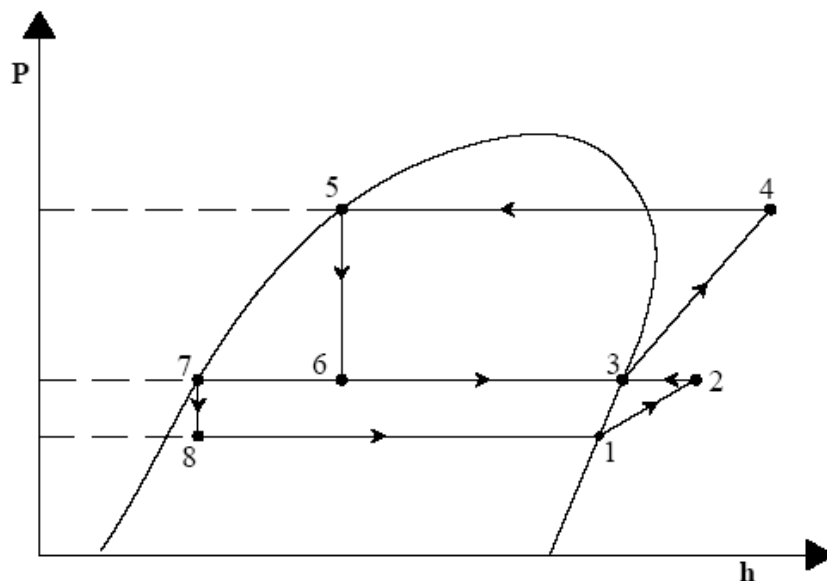
จากสมดุลมวลและพลังงาน

$$m_5 + m_2 = m_7 + m_3; m_5 = m_3 \text{ \& } m_2 = m_7 \quad (4.36)$$

$$m_5 h_5 + m_2 h_2 + Q_{e,II} = m_7 h_7 + m_3 h_3 \quad (4.37)$$



รูปที่ 4.19 ลักษณะระบบการทำความเย็นแบบเครื่องระเหยสองเครื่องที่มีเครื่องอัดของเครื่องระเหยแยกจากกันและมีถังฟลีสสำหรับการกำจัดก๊าซฟลีสและการหล่อเย็นระหว่างกลาง



รูปที่ 4.20 แผนภูมิ P - h ของระบบการทำความเย็นแบบเครื่องระเหยสองเครื่อง
ที่มีเครื่องอัดของเครื่องระเหยแยกจากกันและมีถึงแฟลช
สำหรับการกำจัดก๊าซแฟลชและการหล่อเย็นระหว่างกลาง

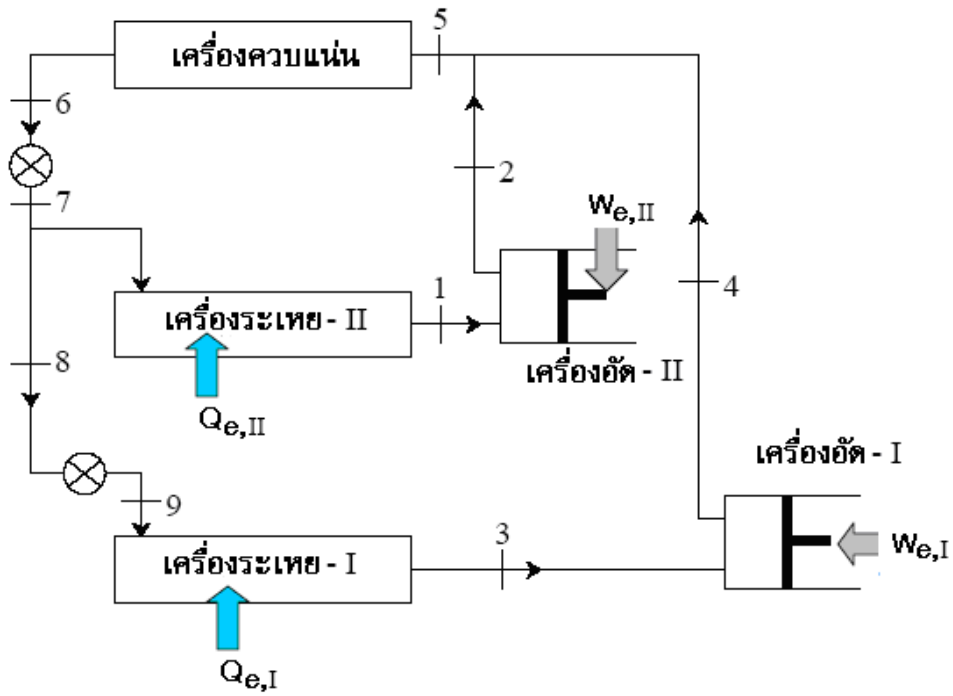
ระบบดังรูปที่ 4.21 และรูปที่ 4.22 เป็นระบบการทำความเย็นแบบเครื่องระเหยสองเครื่องที่มี
เครื่องอัดและวาล์วขยายตัวของเครื่องระเหยแยกจากกัน โดย COP ของระบบสามารถหาได้จากสมการ
ดังนี้

$$\text{COP} = \frac{Q_{e,I} + Q_{e,II}}{W_{c,I} + W_{c,II}} = \frac{m_I(h_3 - h_9) + m_{II}(h_1 - h_7)}{m_I(h_4 - h_3) + m_{II}(h_2 - h_1)} \quad (4.38)$$

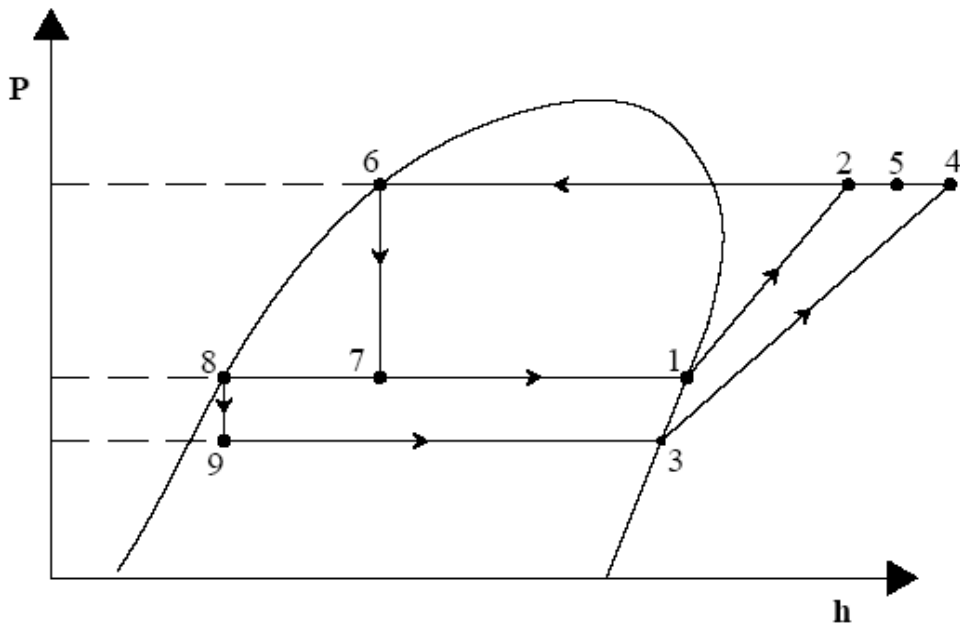
เมื่อ m_I และ m_{II} คืออัตราการใช้ไหลเชิงมวลของสารทำความเย็นผ่านเครื่องระเหย I และ II
ตามลำดับ ทั้งนี้

$$m_I = \frac{Q_{e,I}}{(h_3 - h_9)} \quad (4.39)$$

$$m_{II} = \frac{Q_{e,II}}{(h_1 - h_7)} \quad (4.40)$$



รูปที่ 4.21 ลักษณะระบบการทำความเย็นแบบเครื่องระเหยสองเครื่อง ที่มีเครื่องอัดและวาล์วขยายตัวของเครื่องระเหยแยกจากกัน



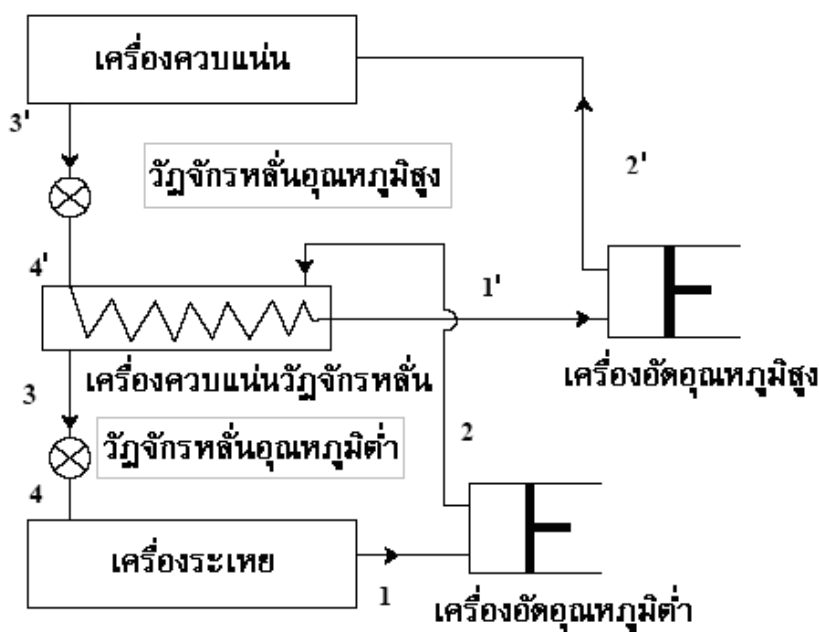
รูปที่ 4.22 แผนภูมิ P - h ของระบบการทำความเย็นแบบเครื่องระเหยสองเครื่อง ที่มีเครื่องอัดและวาล์วขยายตัวของเครื่องระเหยแยกจากกัน

4.4 ระบบทำความเย็นแบบหลั่น

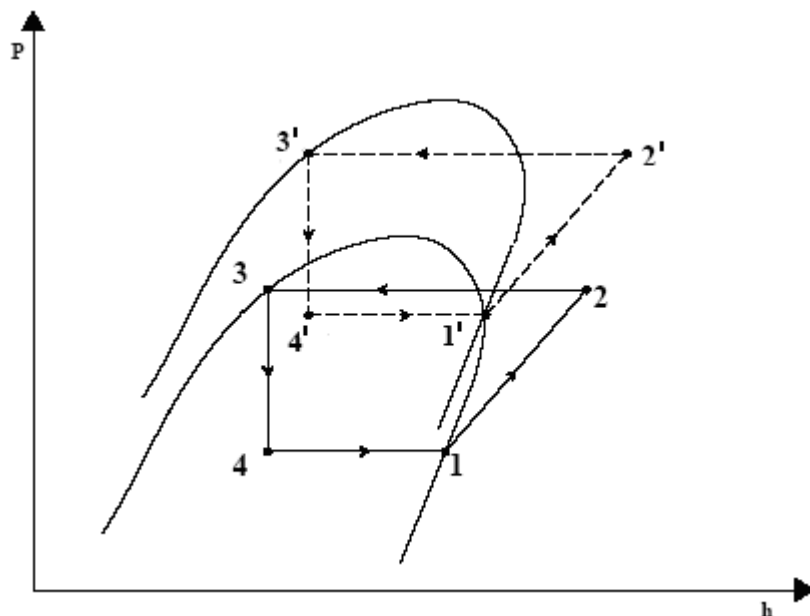
ในโรงงานอุตสาหกรรมบางประเภทที่ต้องการทำให้บริเวณที่ต้องทำความเย็นมีอุณหภูมิต่ำมาก จึงมีผลทำให้ช่วงความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างภายในเครื่องควบแน่นและเครื่องระเหยมีค่ากว้างมากเกินไป สิ่งที่เป็นผลตามมามีคือ ทำให้วัฏจักรทำความเย็นแบบไออัดเพียงวัฏจักรเดียว ไม่เหมาะในการนำมาใช้ในงานในทางปฏิบัติ เนื่องจากช่วงความแตกต่างของอุณหภูมียิ่งมากเท่าใด ทำให้ช่วงความแตกต่างของความดันในวัฏจักรยิ่งสูงมากขึ้นเท่านั้น ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานในระบบเครื่องอัดลดลง การแก้ปัญหาคือ การทำความเย็นเป็นขั้นๆ คือการใช้วัฏจักรการทำความเย็นมากกว่า 2 วัฏจักรขึ้นไปในลักษณะที่เป็นอนุกรม และวัฏจักรนี้จะถูกเรียกว่า วัฏจักรทำความเย็นแบบหลั่น (Cascade refrigeration cycle) จากรูปที่ 4.23 และรูปที่ 4.24 แสดงวัฏจักรการทำความเย็นแบบหลั่นแบบ 2 ขั้นตอน ด้วยการเชื่อมต่อกันโดยผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่อยู่ตรงกลางซึ่งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนี้ทำหน้าที่เป็นเครื่องระเหยในวัฏจักรส่วนบน และเป็นเครื่องควบแน่นในวัฏจักรส่วนล่าง ทั้งนี้อุณหภูมิที่เหมาะสมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่อยู่ตรงกลาง ซึ่งจะทำให้ได้ COP มากที่สุด สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$T_{cc,opt} = \sqrt{T_e \cdot T_c} \quad (4.41)$$

เมื่อ T_e และ T_c คืออุณหภูมิเครื่องระเหยของวัฏจักรล่างและอุณหภูมิเครื่องควบแน่นของวัฏจักรบน ตามลำดับ



รูปที่ 4.23 ลักษณะระบบการทำความเย็นแบบหลั่นสองขั้นตอน



รูปที่ 4.24 แผนภูมิ P - h ของระบบการทำความเย็นแบบหลั่นสองชั้นตอน

สำหรับสมการของอัตราส่วนของการไหลเชิงมวลที่ไหลผ่านแต่ละวัฏจักรสามารถคำนวณได้จากผลของการถ่ายเทความร้อนระหว่างเครื่องระเหยในวัฏจักรส่วนบนและเป็นเครื่องควบแน่นในวัฏจักรส่วนล่าง ดังนี้

$$m_H (h_{1'} - h_{4'}) = m_L (h_2 - h_3) \quad (4.42)$$

$$m_H / m_L = h_2 - h_3 / h_{1'} - h_{4'} \quad (4.43)$$

$$\text{COP}_{R, \text{ CASCADE}} = Q_L / W_{\text{net, in}} \quad (4.44)$$

$$= m_L (h_1 - h_4) / m_H (h_{2'} - h_{1'}) + m_B (h_2 - h_1) \quad (4.45)$$

ทั้งนี้สารทำความเย็นที่ใช้ในระบบสามารถใช้เป็นสารชนิดเดียวกันหรือสามารถใช้สารต่างชนิดกันก็ได้ เพราะไม่ได้มีการผสมของของไหลทั้งสองชนิดภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ดังนั้นจึงสามารถเลือกใช้สารทำความเย็นที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมได้ในแต่ละวัฏจักร

จากรูปที่ 4.24 หากเปรียบเทียบกับวัฏจักรปกติที่มีกระบวนการอัดชั้นตอนเดียว งานที่ต้องป้อนให้กับเครื่องอัดจะลดลง และปริมาณความร้อนที่ถูกดูดออกจากบริเวณที่ทำความเย็นจะเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากมีผลมาจากการใช้ระบบทำความเย็นแบบหลั่น ส่งผลให้มีค่า COP ของระบบสูงขึ้น

แบบฝึกหัดบทที่ 4

1. จากรูปแบบการออกแบบระบบการทำความเย็นในหัวข้อ 4.1 ถึง 4.4 จงวิเคราะห์ข้อดีและข้อจำกัด รวมทั้งเปรียบเทียบลักษณะการออกแบบระบบการทำความเย็นแบบอัดไอในแต่ละรูปแบบว่าเหมาะสมในการใช้งานในลักษณะอย่างไรบ้าง
2. ระบบการทำความเย็นแบบอัดไอระบบหนึ่งใช้สารทำความเย็นชนิด R-134a ถ้าสารทำความเย็นเข้าสู่เครื่องอัดด้วยสถานะไออิ่มตัวที่ความดัน 0.14 MPa และถูกอัดด้วยกระบวนการเอนโทรปีคงที่จนมีความดันเท่ากับ 0.8 MPa หลังจากนั้นสารทำความเย็นไหลผ่านเครื่องควบแน่นและออกด้วยสถานะของเหลวอิ่มตัวเข้าสู่วาล์วขยายตัวซึ่งถูกทำให้ขยายตัวอย่างแอดิเอแบติก จงเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ของสมรรถนะของวัฏจักรนี้กับวัฏจักรต่อไปนี้ ทั้งนี้ค่าความดันและอุณหภูมิระหว่างกลางใช้ค่าที่เหมาะสมของระบบนั้นๆ (ก) วัฏจักรตามรูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7 ของระบบการทำความเย็นแบบอัดสองชั้นที่มีการกำจัดก๊าซแฟลชด้วยการใช้สารทำความเย็นเหลวในถังแฟลชและการหล่อเย็นระหว่างกลาง ทั้งนี้อุณหภูมิไอร้อนยิ่งยวดที่เข้าถึงแฟลชภายหลังออกจากเครื่องหล่อเย็นระหว่างกลาง (จุด 3) เท่ากับ 10°C (ข) วัฏจักรตามรูปที่ 4.9 และรูปที่ 4.10 ของระบบการทำความเย็นแบบอัดสองชั้นที่มีถังแฟลชใช้กำจัดก๊าซแฟลชเท่านั้น (ค) วัฏจักรตามรูปที่ 4.11 และรูปที่ 4.12 ของระบบการทำความเย็นแบบอัดสองชั้นที่มีถังแฟลชใช้ในการหล่อเย็นระหว่างกลางเท่านั้น (ง) วัฏจักรตามรูปที่ 4.19 และรูปที่ 4.20 ของระบบการทำความเย็นแบบเครื่องระเหยสองเครื่องที่มีเครื่องอัดของเครื่องระเหยแยกจากกันและมีถังแฟลชสำหรับการกำจัดก๊าซแฟลชและการหล่อเย็นระหว่างกลาง โดยอุณหภูมิที่เครื่องระเหยอันบนสูงกว่าอันล่าง 20°C และ (จ) วัฏจักรตามรูปที่ 4.23 และรูปที่ 4.24 ของระบบการทำความเย็นแบบหลั่นสองชั้นตอน
3. ระบบการทำความเย็นแบบอัดไอระบบหนึ่งใช้สารทำความเย็นชนิด R-134a ถ้าสารทำความเย็นเข้าสู่เครื่องอัดด้วยสถานะไออิ่มตัวที่ความดัน 0.06 MPa และถูกอัดด้วยกระบวนการเอนโทรปีคงที่จนมีความดันเท่ากับ 0.8 MPa หลังจากนั้นสารทำความเย็นไหลผ่านเครื่องควบแน่นและออกด้วยสถานะของเหลวอิ่มตัวเข้าสู่วาล์วขยายตัวซึ่งถูกทำให้ขยายตัวอย่างแอดิเอแบติก จงเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ของสมรรถนะของวัฏจักรนี้กับวัฏจักรต่อไปนี้ ทั้งนี้ค่าความดันและอุณหภูมิระหว่างกลางใช้ค่าที่เหมาะสมของระบบนั้นๆ (ก) วัฏจักรตามรูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7 ของระบบการทำความเย็นแบบอัดสองชั้นที่มีการกำจัดก๊าซแฟลชด้วยการใช้สารทำความเย็นเหลวในถังแฟลชและการหล่อเย็นระหว่างกลาง (ข) วัฏจักรตามรูปที่ 4.9 และรูปที่ 4.10 ของระบบการทำความเย็นแบบอัดสองชั้นที่มีถังแฟลชใช้กำจัดก๊าซแฟลชเท่านั้น (ค) วัฏจักรตามรูปที่ 4.11 และรูปที่ 4.12 ของระบบการทำความเย็นแบบอัดสองชั้นที่มีถังแฟลชใช้ในการหล่อเย็นระหว่างกลางเท่านั้น
4. ระบบการทำความเย็นแบบอัดไอระบบหนึ่งใช้สารทำความเย็นชนิด R-134a ถ้าสารทำความเย็นเข้าสู่เครื่องอัดด้วยสถานะไออิ่มตัวที่ความดัน 0.08 MPa และถูกอัดด้วยกระบวนการเอนโทรปีคงที่จนมี

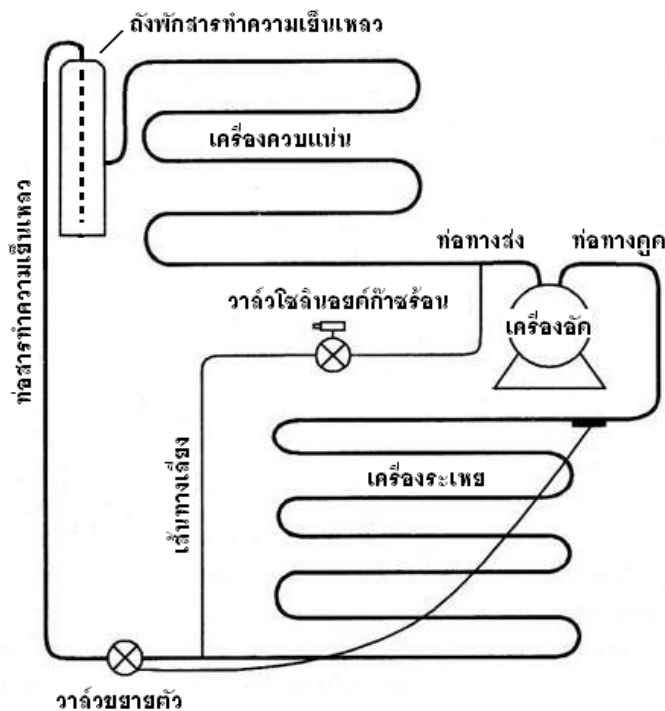
ความดันเท่ากับ 1.0 MPa หลังจากนั้นสารทำความเย็นไหลผ่านเครื่องควบแน่นและออกด้วยสถานะของเหลวอิ่มตัวเข้าสู่วาล์วขยายตัวซึ่งถูกทำให้ขยายตัวอย่างแอดิเยกแบติก จงเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ของสมรรถนะของวัฏจักรนี้กับวัฏจักรต่อไปนี้ ทั้งนี้ค่าความดันและอุณหภูมิระหว่างกลางใช้ค่าที่เหมาะสมของระบบนั้นๆ (ก) วัฏจักรตามรูปที่ 4.19 และรูปที่ 4.20 ของระบบการทำความเย็นแบบเครื่องระเหยสองเครื่องที่มีเครื่องอัดของเครื่องระเหยแยกจากกันและมีถังแฟลชสำหรับการกำจัดก๊าซแฟลชและการหล่อเย็นระหว่างกลาง โดยอุณหภูมิที่เครื่องระเหยอันบนสูงกว่าอันล่าง 20°C และ (ข) วัฏจักรตามรูปที่ 4.23 และรูปที่ 4.24 ของระบบการทำความเย็นแบบหลั่นสองชั้นตอน

บทที่ 5

อุปกรณ์ในระบบการทำความเย็นแบบอัดไอ

5.1 เครื่องอัด

ในบทนี้เป็นการนำเสนอถึงอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในระบบการทำความเย็นแบบอัดไอ อุปกรณ์ที่สำคัญของระบบการทำความเย็นแบบนี้ ได้แก่ เครื่องอัด เครื่องควบแน่น อุปกรณ์ลดความดัน และเครื่องระเหย ตามลักษณะการทำงานของระบบการทำความเย็นแบบอัดไอที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 1 ถึง 4 ดังลักษณะของอุปกรณ์ในรูปที่ 5.1 ซึ่งแสดงให้เห็นลักษณะของอุปกรณ์ที่สำคัญในระบบ นอกจากนี้ระบบยังจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ต่างๆ เพิ่มเติมอีกเพื่อช่วยให้ระบบทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนี้ อุปกรณ์แยกน้ำมัน ถังพักสารทำความเย็นเหลว ท่อทางส่งสารทำความเย็นเหลว ตัวกรองและตัวลดความชื้นทางส่ง วาล์วควบคุมสารทำความเย็น อุปกรณ์ควบคุมมอเตอร์ของเครื่องอัด กระเปาะหรือที่เก็บสารทำความเย็น ท่อทางดูด (ไอสารทำความเย็น) ตัวกรองและตัวลดความชื้นทางดูด ดังแสดงในตารางที่ 5.1 ซึ่งได้แสดงความสัมพันธ์และลักษณะการทำงานของอุปกรณ์เหล่านี้บางชนิดเทียบกับความดัน อุณหภูมิ และสถานะของสารทำความเย็น



รูปที่ 5.1 ลักษณะของอุปกรณ์ที่สำคัญในระบบการทำความเย็นแบบอัด

ตารางที่ 5.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุปกรณ์การทำงาน ขั้นตอนการทำงาน อุณหภูมิ ความดัน และสถานะของสารทำความเย็น

อุปกรณ์	ลักษณะขั้นตอนการทำงาน	อุณหภูมิ	ความดัน	สถานะของสารทำความเย็น
เครื่องอัด	อัดสารทำความเย็นให้มีความดันสูง	ต่ำ→สูง	ต่ำ→สูง	ไอ
ท่อทางส่งไอ	ส่งสารทำความเย็นเข้าสู่เครื่องควบแน่น	สูง	สูง	ไอ
เครื่องควบแน่น	คายความร้อนสู่บรรยากาศ	สูง	สูง	ไอ→ของเหลว
ถังพักสารทำความเย็นทางส่ง *	แยกและพักสารทำความเย็นที่ควบแน่น	สูง	สูง	ไอ + ของเหลว
ท่อทางส่งของเหลว	ส่งสารทำความเย็นเข้าสู่อุปกรณ์ลดความดัน	สูง	สูง	ของเหลว
วาล์วลดความดัน	ลดความดันสารทำความเย็น	สูง→ต่ำ	สูง→ต่ำ	ของเหลว→(ของเหลว + ไอ)
เครื่องระเหย	ดึงความร้อนออกจากระบบ	ต่ำ	ต่ำ	(ของเหลว + ไอ)→ไอ
ที่เก็บสารทำความเย็นทางดูด *	สะสมและแยกสารทำความเย็นเหลวออกจากไอ	ต่ำ	ต่ำ	ของเหลว + ไอ
ท่อทางดูด	ดูดสารทำความเย็นเข้าสู่เครื่องอัด	ต่ำ	ต่ำ	ไอ

หมายเหตุ : * ถังพักสารทำความเย็นทางส่งมักติดตั้งในระบบขนาดปานกลางขึ้นไป ส่วนที่เก็บสารทำความเย็นทางดูดมักติดตั้งในระบบขนาดเล็ก เช่น ตู้เย็นที่ใช้ตามบ้าน อย่างไรก็ตามในระบบขนาดใหญ่จะมีทั้งถังพักสารทำความเย็นทางส่งและถังพักสารทำความเย็นทางดูด (คือที่เก็บสารทำความเย็นทางดูดในระบบขนาดเล็ก)

ในส่วนของเครื่องอัด (สารทำความเย็น) หรือคอมเพรสเซอร์ โดยส่วนใหญ่ในระบบการทำความเย็น โดยเฉพาะที่มีกำลังผลิตไม่สูง เครื่องอัดมักทำงานด้วยแรงขับจากมอเตอร์ไฟฟ้าเป็นหลัก หน้าที่ของเครื่องอัดคือ อัดสารทำความเย็นในสถานะก๊าซหรือไอที่ส่งมาจากเครื่องระเหยให้มีความดันและอุณหภูมิที่สูงขึ้นตามที่ต้องการ

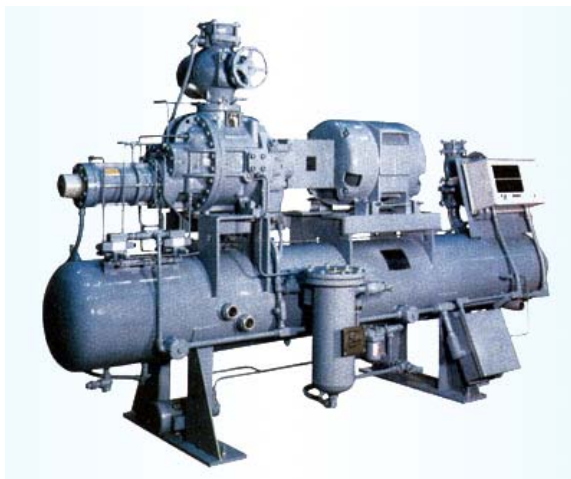
5.1.1 การจำแนกประเภทเครื่องอัด

เครื่องอัดสามารถจำแนกประเภทได้เป็นหลายลักษณะ ในที่นี้จัดแบ่งเป็น 2 ลักษณะใหญ่ คือ การจำแนกประเภทตามลักษณะการจัดวางมอเตอร์ของเครื่องอัด และการจำแนกประเภทตามลักษณะการทำงานของเครื่องอัด

เครื่องอัดจำแนกประเภทตามลักษณะโครงสร้าง สามารถแบ่งย่อยออกเป็น 2 แบบ คือ แบบเปิด (Open type) และแบบปิด (Close type)

เครื่องอัดแบบเปิด เป็นแบบที่เครื่องอัดที่ติดตั้งแยกกันกับตัวขับโดยมีสายพาน ต่อเชื่อมระหว่างเพลลาของมอเตอร์และเพลลาข้อเหวี่ยงของเครื่องอัดมักใช้กับระบบทำความเย็นใหญ่ๆ เช่น ระบบ

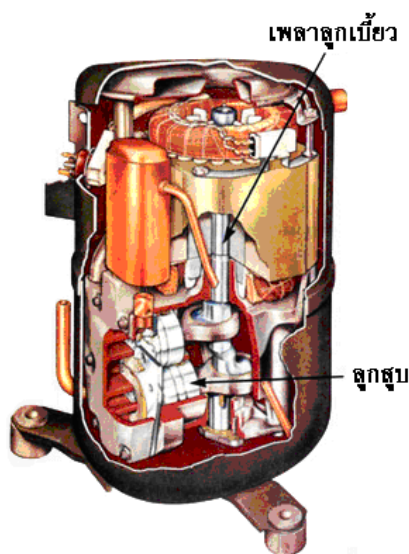
ทำความเย็นของห้องเย็น ลักษณะโดยทั่วไปดังแสดงในรูปที่ 5.2 ซึ่งติดตั้งอยู่บนถังพักสารทำความเย็นและแยกน้ำมันหล่อลื่น



รูปที่ 5.2 เครื่องอัดแบบเปิดซึ่งติดตั้งอยู่บนถังพักสารทำความเย็นและแยกน้ำมันหล่อลื่น

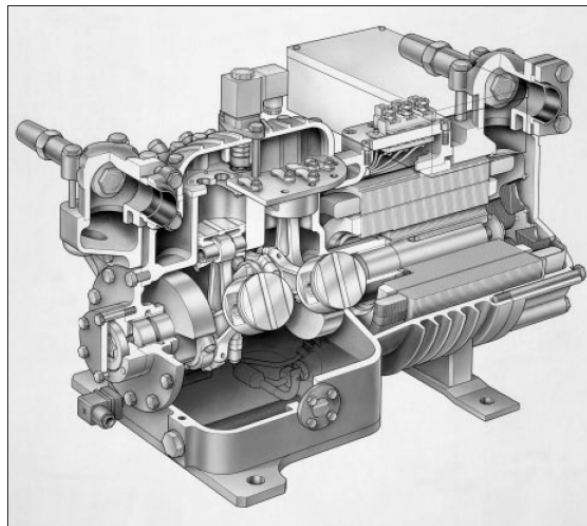
เครื่องอัดแบบปิด เป็นเครื่องอัดที่มีตัวมอเตอร์ติดตั้งรวมอยู่ในเปลือกโลหะที่เป็นชิ้นเดียวกัน เครื่องอัดแบบนี้จึงเรียกกันว่า มอเตอร์เครื่องอัด แบ่งออกเป็น 2 ชนิด ดังนี้

1) แบบปิดสนิท เรียกโดยทั่วไปว่าแบบเฮอริเมติก (Hermetic compressor) ดังแสดงในรูปที่ 5.3 เป็นแบบที่มีมอเตอร์และเครื่องอัดอยู่ในตัวเดียวกันโดยมีการเชื่อมปิดหมดแต่จะมี ท่อไพล์มา 3 ทาง คือ ทางดูด ทางอัด และท่อเติมสารทำความเย็น ขั้วสายไฟจะมีขั้วหลัก 3 ขั้ว คือ ขั้วหลักขดสตาร์ท ขั้วขดรีน และขั้วคอมมอน



รูปที่ 5.3 เครื่องอัดแบบเฮอริเมติกแสดงชิ้นส่วนภายใน

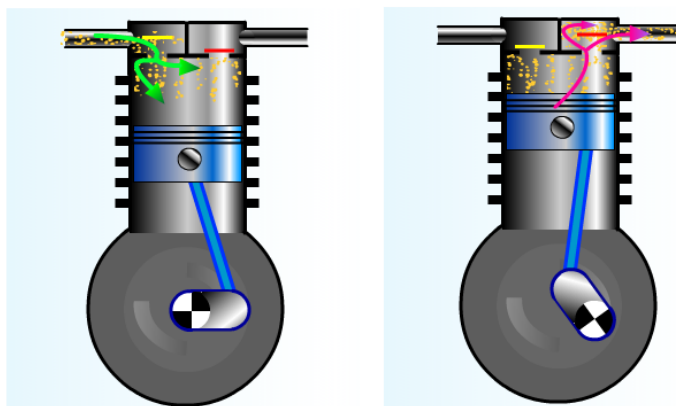
2) แบบกึ่งปิดสนิท (Semi hermetic) เป็นเครื่องอัดที่มีมอเตอร์และเครื่องอัดรวมอยู่ในเปลือกเดียวกันแต่ไม่ได้เชื่อมติดหมด โดยใช้การยึดด้วยสลักเกลียวแทน ดังแสดงในรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 เครื่องอัดแบบกึ่งปิดสนิท (แบบลูกสูบ)

เครื่องอัดจำแนกประเภทตามลักษณะการทำงาน อาศัยหลักการพิจารณาจากชิ้นส่วนของเครื่องอัดและลักษณะการทำงานของเครื่องอัด สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 แบบ คือ แบบลูกสูบ (Reciprocating compressor) แบบโรตารี (Rotary type compressor) แบบสกรู (Screw compressor) และแบบสโครล์ (Scroll compressor)

1) เครื่องอัดแบบลูกสูบ เป็นแบบที่ใช้ลูกสูบเคลื่อนที่กลับไปกลับมาในกระบอกสูบ อาจใช้กำลังจากเครื่องยนต์หรือมอเตอร์ ทั้งนี้อาจมีสูบเดียวหรือหลายสูบก็ได้แล้วแต่การทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 5.4 และรูปที่ 5.5

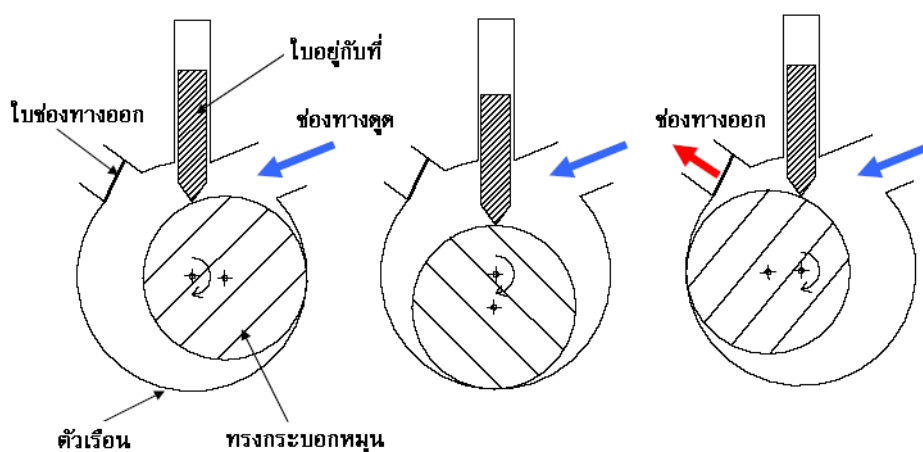


รูปที่ 5.5 แสดงการทำงานและหลักการเบื้องต้นของเครื่องอัดแบบลูกสูบ

ลักษณะการทำงาน เมื่อลูกสูบเคลื่อนที่ลงจะเป็นจังหวะการดูดไอสารทำความเย็นผ่านวาล์วทางดูด ในจังหวะนี้วาล์วทางส่งจะปิดเนื่องจากสุญญากาศที่เกิดขึ้นในกระบอกสูบ จังหวะนี้จะทำให้สารทำความเย็นเข้ามาเก็บตัวอยู่ในกระบอกสูบ แต่เมื่อลูกสูบเคลื่อนขึ้นจะทำการอัดสารให้มีความดันสูงขึ้น รวมทั้งดันให้วาล์วทางส่งเปิดและวาล์วทางดูดปิด ทำให้สารทำความเย็นไหลออกจาก กระบอกสูบเมื่อลูกสูบเคลื่อนขึ้น

2) เครื่องอัดแบบโรตารี สามารถแบ่งย่อยออกเป็น 2 ชนิด คือ

ก) เครื่องอัดแบบโรตารีชนิดทรงกระบอกหมุน ลักษณะของเครื่องประกอบด้วย ทรงกระบอกหมุน (Roller) ทำด้วยเหล็กเหนียวหมุนรอบเพลาลูกเบี้ยว และประกอบเข้าไปในเสื้อสูบของเครื่องอัด โดยมีจุดหมุนร่วมกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.6 เนื่องจากเพลาลูกเบี้ยวและทรงกระบอกหมุนอยู่เยื้องศูนย์กลางกับเสื้อสูบและสัมผัสกับผนังเสื้อสูบ ดังนั้นขณะที่เพลาลูกเบี้ยว หมุนรอบเพลาลูกเบี้ยวจะหมุนรอบผนังเสื้อสูบในทิศทางการหมุนของเพลาลูกเบี้ยวและสัมผัสกับผนังเสื้อสูบ โดยสัมผัสกับแกนลูกเบี้ยว ทั้งนี้ผิวด้านในของทรงกระบอกหมุนเคลื่อนที่สวนทางกับทิศทางการหมุนของเพลาลูกเบี้ยวที่อยู่ที่อยู่ในช่องของเสื้อสูบซึ่งเคลื่อนที่เข้าออกโดยมีสปริงกดอยู่ เพื่อให้ปลายของใบพัดสัมผัสกับทรงกระบอกหมุนอยู่ตลอดเวลา สำหรับฝาสูบ (End-plates) ใช้ปิดเสื้อสูบทั้งด้านหน้าและด้านหลังเพื่อเป็นตัวรองรับแกนลูกเบี้ยว ส่วนช่องทางดูดและช่องทางออกติดตั้งอยู่ในผนังเสื้อสูบใกล้กับช่องใบพัดแต่อยู่คนละด้านกัน



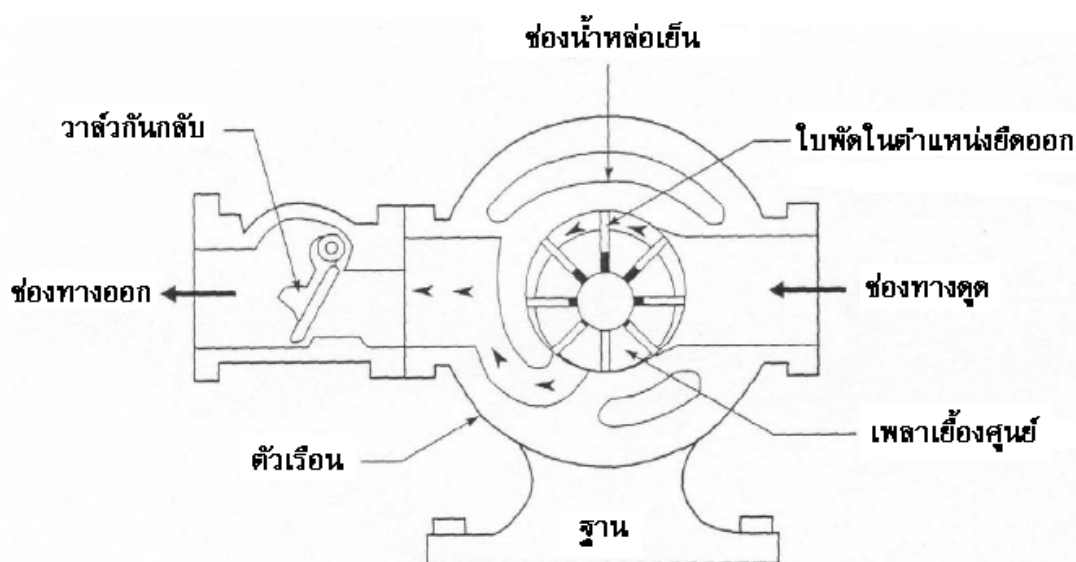
รูปที่ 5.6 เครื่องอัดแบบโรตารีชนิดทรงกระบอกหมุน

การทำงาน ไอสารทำความเย็นไหลเข้าช่องดูดและออกทางช่องจ่ายอย่างต่อเนื่องทั้งนี้เมื่อเพลาลูกเบี้ยวหมุนทวนเข็มนาฬิกาผิวนอกของทรงกระบอกหมุนสัมผัสผิวในด้านล่างของเสื้อสูบของเครื่องอัด ดังรูปที่ 5.6 โดยไอสารทำความเย็นจะถูกดูดเข้าสู่เสื้อสูบจากช่องทางดูดในช่องว่างระหว่างทรงกระบอกหมุนและเสื้อสูบซึ่งมีใบพัดกั้นอยู่อีกด้านหนึ่ง ในขณะที่เดียวกันไอสารทำความเย็นซึ่ง

อยู่ในช่องว่างอีกด้านหนึ่งจะถูกอัดเมื่อเพลาลูกเบี้ยวหมุนต่อไปจนกระทั่งผิวนอกของทรงกระบอกหมุนสัมผัสกับผิวในทางด้านขวาของเสื้อสูบ ดังรูปที่ 5.6

จากนั้นเมื่อไอสารทำความเย็นถูกดูดเข้ามาในเสื้อสูบจนเต็มในช่องว่างด้านล่างและในช่องด้านบนไอสารทำความเย็นถูกอัดและออกไปตามช่องทางจ่าย ซึ่งจะมีวาล์วกันกลับ (Check valve) ป้องกันการไหลย้อนกลับของไอสารทำความเย็น ดังรูปที่ 5.6 และเมื่อเพลาลูกเบี้ยวหมุนต่อไปอีก ช่องว่างทางด้านบนจะลดลงไอสารทำความเย็นจะถูกอัดออกไปตามช่องทางจ่ายเรื่อยๆ ขณะเดียวกันช่องว่างด้านล่างจะเพิ่มขึ้น ไอสารทำความเย็นจะถูกดูดเข้ามาอีก ในขณะที่เพลาลูกเบี้ยวหมุนเป็นการเริ่มวัฏจักรใหม่ต่อไป

ข) เครื่องอัดแบบโรตารีชนิดใบพัดหมุน ลักษณะของเครื่องประกอบด้วยใบพัดหมุนซึ่งติดตั้งอยู่ในช่องของเพลายี่งศูนย์ (Off-center rotor) ดังรูปที่ 5.7 โดยเจาะไว้เป็นช่องๆ เพื่อให้ใบพัดสวมอยู่ได้ และประกอบเข้าไปบรรจุไว้ในเสื้อสูบโดยอยู่เยื้องศูนย์กัน ระยะที่แคบสุดจะเป็นระยะที่ โรเตอร์หรือเพลาลูกเบี้ยวเกือบสัมผัสกับผนังเสื้อสูบโดยมีน้ำมันหล่อลื่นบางๆ อยู่ระหว่างผิวสัมผัส ทั้งสองสำหรับด้านตรงข้ามกับด้านที่สัมผัสนี้เป็นด้านที่มีเนื้อที่ว่างระหว่างโรเตอร์และผนังเสื้อสูบมากที่สุด ส่วนฝาปิดใช้ปิดเสื้อสูบเพื่อเป็นซีลกันรั่วและยังเป็นตัวยึดเพลาลูกเบี้ยว ทั้งนี้ใบพัดเคลื่อนที่เข้าออกในร่องโรเตอร์ในลักษณะปลายของใบพัดสัมผัสกับผนังเสื้อสูบโดยแรงเหวี่ยงและแรงดันจากสปริงภายในร่องของโรเตอร์ และในขณะที่เคลื่อนที่จะกวาดไอสารทำความเย็นไปพร้อมๆ กับการหมุนของเพลาลูกเบี้ยว



รูปที่ 5.7 เครื่องอัดแบบโรตารีชนิดใบพัดหมุนแสดงลักษณะการทำงาน

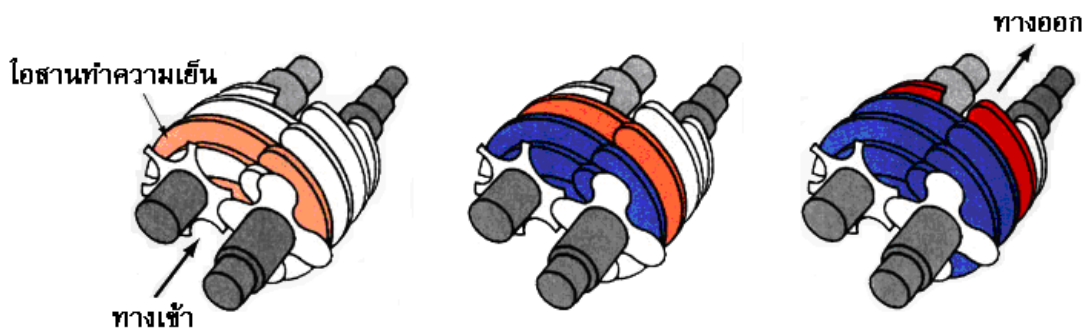


รูปที่ 5.8 เครื่องอัดแบบโรตารีชนิดไบพัดหมุนแสดงส่วนประกอบภายในของเครื่องแบบปิดสนิท

ลักษณะการทำงานโดยทั่วไปของเครื่องในการอัดไอสารทำความเย็น ไอสารทำความเย็นจะถูกดูดเข้ามาอยู่ระหว่างไบพัดที่กั้นไว้ 2 ไบ จากนั้นไอสารทำความเย็นถูกอัดโดยการลดปริมาตรซึ่งเป็นผลจากการเคลื่อนที่ของไบพัดจากจุดที่มีปริมาตรสูงสุดถึงจุดที่มีปริมาตรต่ำสุดของโรเตอร์ ทั้งนี้ไอสารทำความเย็นที่ถูกอัดจะออกมาทางช่องจ่ายที่อยู่ที่ผนังเสื้อสูบจนเกือบถึงจุดต่ำสุดของช่องว่างของโรเตอร์ โดยมีวาล์วกันกลับเป็นตัวกั้นไม่ให้ไอสารทำความเย็นที่มีความดันสูงย้อนกลับเมื่อหยุดเครื่อง เช่นเดียวกับชนิดทรงกระบอกหมุน สำหรับอัตราส่วนการอัดไอสูงสุดของเครื่องอัดชนิดนี้คือ 7:1 รูปที่ 5.8 แสดงภาคตัดส่วนประกอบภายในของเครื่องอัดแบบโรตารีชนิดไบพัดหมุน

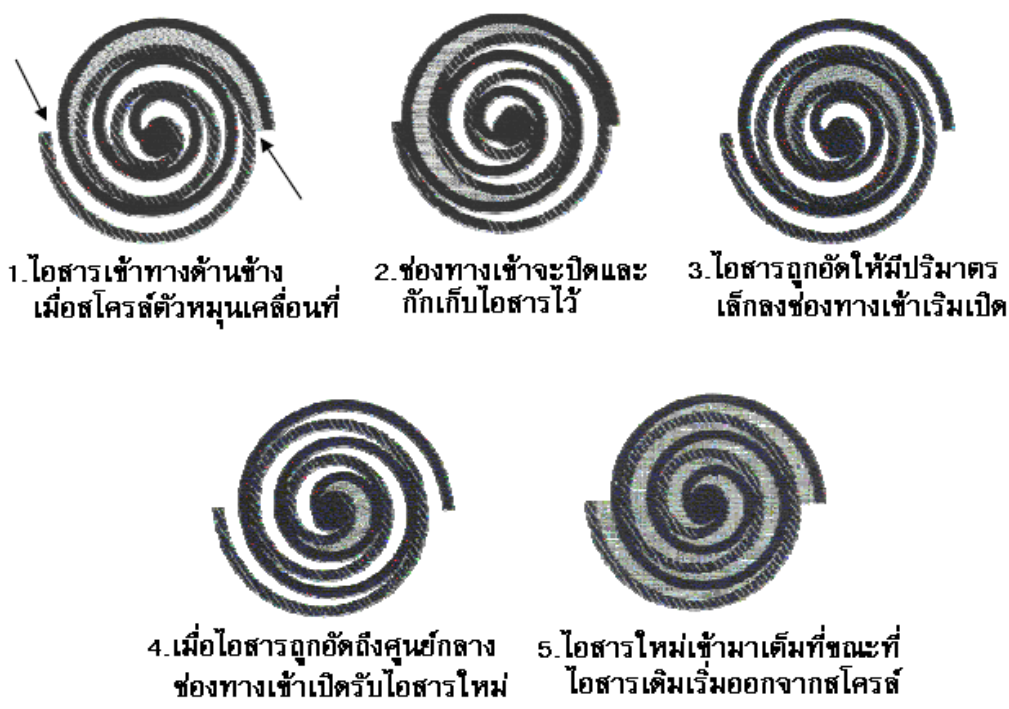
3) เครื่องอัดแบบสกรู ประกอบด้วยเฟืองตัวหนอน 2 ตัว คือตัวผู้และตัวเมียประกบกันอยู่ในเรือน โดยมีช่องทางเข้าและช่องทางจ่ายที่เหมาะสม เฟืองตัวผู้จะเป็นตัวขับเคลื่อนด้วยร่องเกลียว (Lobe) โดยทั่วไประยะจะมี 6 ร่อง ดังแสดงในรูปที่ 5.9

ลักษณะการทำงาน ขณะที่เฟืองเริ่มหมุนไอสารทำความเย็นเข้าทางช่องทางเข้าและเข้าไปอยู่ในช่องว่างระหว่างร่องเกลียว (Interlobe space) เมื่อสกรูหมุนต่อไปช่องทางจะถูกปิดโดยตัวเกลียว ไอสารทำความเย็นจะถูกกักอยู่ภายในช่องว่างระหว่างร่องเกลียวที่ปิดและจะถูกอัดต่อเนื่องขณะที่ปริมาตรช่องว่างระหว่างเกลียวลดลง การอัดตัวดำเนินต่อไปจนกระทั่งไอสารทำความเย็นมาถึงร่องเกลียวที่อยู่ติดกับช่องทางจ่าย ไอสารทำความเย็นที่อัดตัวแล้วจะถูกปล่อยออกไปทางช่องทางจ่ายตามรูปที่ 5.9 ไปยังเครื่องควบแน่นต่อไป



รูปที่ 5.9 หลักการทำงานของเครื่องอัดแบบสกรู

4) เครื่องอัดแบบสโครล์ ประกอบด้วยชิ้นส่วนลักษณะก้นหอยม้วนเข้าข้างในสองชิ้นประกบกันดังรูปที่ 5.10 ซึ่งทำให้เกิดเป็นกระเปาะหลายห้องสำหรับกักเก็บไอสารทำความเย็นระหว่างกระบวนการอัด การทำงาน สโครล์อันหนึ่งจะคงที่ ในขณะที่อีกอันหนึ่งจะเคลื่อนที่เบียดกับสโครล์อันแรก แต่ไม่ใช่การหมุนแบบรอบตัว ทั้งนี้ขณะการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้น กระเปาะต่างๆ ระหว่างสโครล์สองอันจะรีดให้ไอสารเข้าสู่ตรงศูนย์กลางซึ่งเป็นการลดปริมาตร และทำให้ไอสารมีความดันสูงขึ้นและจ่ายออกไปทางช่องซึ่งอยู่ตรงศูนย์กลาง ระหว่างกระบวนการอัดกระเปาะต่างๆ จะถูกอัดพร้อมกัน เป็นผลให้กระบวนการเป็นไปอย่างราบเรียบและต่อเนื่องทั้งกระบวนการดูด (เข้าทางด้านนอกของสโครล์) และกระบวนการส่ง (ทางด้านในของสโครล์)



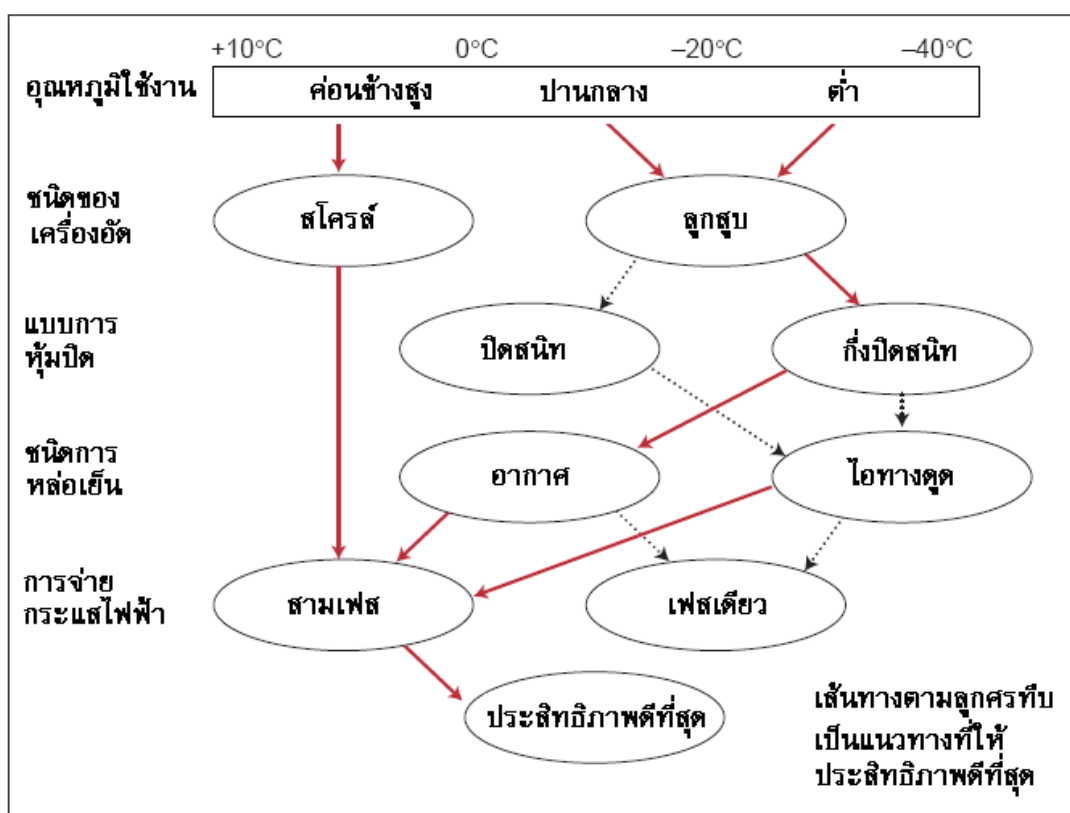
รูปที่ 5.10 หลักการทำงานของเครื่องอัดแบบสโครล์

5.1.2 การเลือกใช้งานเครื่องอัด

การเลือกใช้งานเครื่องอัดให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดขึ้นอยู่กับเกณฑ์หลายอย่าง ได้แก่

- 1) สภาพการใช้งาน
- 2) ขีดความสามารถในการทำความเย็นที่ต้องการ
- 3) การแปรเปลี่ยนของขีดความสามารถในการทำความเย็นที่จำเป็น

สำหรับการประยุกต์ใช้งานเครื่องอัดกรณีกำลังมอเตอร์ต่ำกว่า 5 kW ลงมา สามารถใช้แนวทางตาม que แสดงในรูปที่ 5.11 ช่วยในการตัดสินใจเลือกใช้ได้



รูปที่ 5.11 แนวทางการเลือกใช้งานเครื่องอัดขนาดเล็ก (ต่ำกว่า 5 kW ลงมา)

แผนภูมิต้นไม้การตัดสินใจดังรูปถือเป็นกฎหัวแม่มือ อย่างไรก็ตามก็พึงระลึกว่า เครื่องอัดที่ผลิตจากผู้ผลิตที่แตกต่างกันให้ประสิทธิภาพที่ไม่เท่ากัน ทำให้แนวทางดังรูปอาจไม่เป็นไปตามนี้

กรณีเครื่องอัดแบบสโครล์มีแนวโน้มที่จะมีประสิทธิภาพมากกว่าเครื่องอัดแบบอื่น ถ้าใช้งาน ณ อุณหภูมิค่อนข้างสูง (0 - 10°C) เนื่องจากเป็นเครื่องอัดที่พัฒนาสำหรับใช้งานกับระบบปรับอากาศในระยะแรก สำหรับเครื่องอัดแบบกึ่งปิดสนิทโดยทั่วไปมีประสิทธิภาพมากกว่าแบบปิดสนิท เนื่องจากสามารถออกแบบให้ใช้อากาศในการหล่อเย็นซึ่งทำให้สามารถลดอุณหภูมิไอสารให้ต่ำที่สุดก่อนเข้าสู่กระบวนการอัด ในส่วนมอเตอร์สามเฟสโดยทั่วไปมีประสิทธิภาพสูงกว่ามอเตอร์เฟสเดียว

สำหรับเครื่องอัดขนาดใหญ่มักเลือกใช้เครื่องอัดแบบลูกสูบหรือแบบสกรูหรือบางครั้งอาจใช้เครื่องอัดแบบหอยโข่ง (Centrifugal type) ที่มีการหุ้มปิดแบบเปิดหรือกึ่งปิดสนิท อย่างไรก็ตาม โดยส่วนใหญ่ไม่มีกฎเกณฑ์ตายตัวในการเลือกใช้สำหรับเครื่องอัดขนาดใหญ่ ต้องทำการตรวจสอบจากการคำนวณ การสิ้นเปลืองพลังงานจากข้อมูลทางเทคนิคของผู้ผลิต

5.1.3 การคำนวณปริมาตรที่ลูกสูบเคลื่อนที่

ปริมาตรที่ลูกสูบเคลื่อนที่ของเครื่องอัดแบบลูกสูบ หมายถึง ปริมาตรทั้งหมดภายในกระบอกสูบที่ลูกสูบเคลื่อนที่จากศูนย์ตายบนลงมาถึงศูนย์ตายล่าง โดยปกติจะบอกเป็นลิตรต่อวินาที (L/s) สำหรับเครื่องอัดแบบลูกสูบที่ทำการอัดครั้งเดียว ปริมาตรที่ลูกสูบเคลื่อนที่คำนวณได้ดังนี้

$$V_p = \frac{0.7857D^2LNn}{1000} \quad (5.1)$$

เมื่อ V_p = ปริมาตรที่ลูกสูบเคลื่อนที่, L/s

D = เส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอกสูบ, cm

L = ระยะชัก, cm

N = จำนวนรอบของข้อเหวี่ยง, rps (รอบ/วินาที)

n = จำนวนของลูกสูบ

ตัวอย่าง 5.1 จงคำนวณหาปริมาตรที่ลูกสูบเคลื่อนที่ของเครื่องอัด 2 สูบ หมุนที่ความเร็ว 1500 รอบ/นาที (25 รอบ/วินาที) ถ้าเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกสูบเท่ากับ 5 เซนติเมตร และระยะชักเท่ากับ 5 เซนติเมตร

วิธีทำ

จากสมการ (5.1) สามารถแทนค่าได้ดังนี้

$$\begin{aligned} V_p &= [(0.7857)(5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm})(5 \text{ cm})(25 \text{ rps})(2)]/1000 \\ &= 4.91 \text{ L/s} \end{aligned}$$

ตอบ

5.1.4 ความสามารถของการทำความเย็นทางทฤษฎี

ความสามารถของการทำความเย็นทางทฤษฎี (Theoretical refrigerating capacity) ของเครื่องอัดใดๆ จะขึ้นกับสภาพการทำงานของระบบ และความสามารถของระบบคำนวณได้จากอัตราการไหลเชิงมวลของสารทำความเย็นต่อหน่วยเวลา และค่าการทำความเย็นต่อหน่วยมวลของสารทำความเย็นที่หมุนเวียน อัตราการไหลเชิงมวลที่ได้ของเครื่องอัดจะเท่ากับมวลของไอสารทำความเย็นที่เครื่องอัดดูดเข้ามาต่อหน่วยเวลา

ถ้าสมมติว่าเครื่องอัดมีประสิทธิภาพ 100% และเสื่อสูบของเครื่องอัดบรรจุไอสารทำความเย็นอย่างสมบูรณ์ ปริมาตรไอสารทำความเย็นที่เข้ามาในกระบอกสูบเครื่องอัดและถูกอัดต่อหน่วยเวลาจะเท่ากับปริมาตรที่ลูกสูบเคลื่อนที่ ทั้งนี้จำนวนมวลของสารทำความเย็นที่เทียบเท่าอัตราการไหล

เชิงปริมาตรของไอสารความเย็นในกระบอกสูบต่อเวลา สามารถคำนวณได้จากผลคูณระหว่างปริมาตรที่ลูกสูบเคลื่อนที่กับความหนาแน่นของไอสารทำความเย็นที่เข้ามาในเครื่องอัด และเนื่องจากปริมาตรจำเพาะเป็นส่วนกลับของความหนาแน่น เพราะฉะนั้นอัตราการไหลเชิงมวลจะเท่ากับปริมาตรที่ลูกสูบเคลื่อนที่หารด้วยปริมาตรจำเพาะของไอสารทำความเย็นที่ถูกอัดเข้ามาในเครื่องอัด ดังนี้

$$m = V_p/v \quad (5.2)$$

เมื่อ m = อัตราการไหลเชิงมวล, kg/s

V_p = ปริมาตรที่ลูกสูบเคลื่อนที่, L/s (ลิตรต่อวินาที)

v = ปริมาตรจำเพาะของไอสารทำความเย็น, L/kg

ตัวอย่าง 5.2 เครื่องอัดชนิด 2 สูบ ทำการอัดสารทำความเย็นด้วยความเร็วรอบ 1500 รอบ/นาที (25 รอบ/วินาที) ถ้าเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกสูบเท่ากับ 5 เซนติเมตร และระยะชักเท่ากับ 5 เซนติเมตร ทำงานโดยใช้ R-134a เป็นสารทำความเย็น อุณหภูมิที่เครื่องระเหยคือ -5°C ถ้าไอสารทำความเย็นที่เข้าเครื่องอัดเป็นไออิ่มตัว และสารทำความเย็นเหลวก่อนที่ไหลผ่านวาล์วขยายตัวมีอุณหภูมิ 40°C จงคำนวณหา (ก) อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำความเย็น และ (ข) ความสามารถของการทำความเย็นทางทฤษฎีในหน่วย KW

วิธีทำ

จากตัวอย่าง 5.1 ได้ $V_p = 4.91$ L/s และจากตาราง R-134a ความหนาแน่นของไอสารทำความเย็นที่อุณหภูมิ -5°C เท่ากับ 0.01539 kg/L

จากสมการ (5.2) สามารถแทนค่าได้ดังนี้

$$\begin{aligned} m &= V_p/v \\ &= (4.91 \text{ L/s}) \times (0.01539 \text{ kg/L}) \\ &= 0.0750 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

จากตาราง R-134a ที่อุณหภูมิ -5°C และไออิ่มตัวจะได้ค่าเอนทัลปี = 349.32 kJ/kg และที่อุณหภูมิ 40°C ในสถานะของเหลวอิ่มตัว จะได้ค่าเอนทัลปี = 238.53 kJ/kg

ค่าการทำความเย็นต่อหน่วยมวล, $q_e = 349.32 - 238.53$ kJ/kg = 110.79 kJ/kg

ความสามารถการทำความเย็นของเครื่องอัดทางทฤษฎี

$$\begin{aligned} &= (0.0750 \text{ kg/s}) \cdot (110.19 \text{ kJ/kg}) \\ &= 8.376 \text{ kW} \end{aligned}$$

ตอบ

5.1.5 ประสิทธิภาพเชิงปริมาตร

ในทางทฤษฎี ถ้าเครื่องอัดไม่มีปริมาตรที่ว่างเหนือลูกสูบ (Clearance volume) และไม่มี ความสูญเสียใดๆ เลย เครื่องอัดจะดูดไอสารทำความเย็นเข้ามาในกระบอกสูบในแต่ละช่วงชักเท่ากับการ เคลื่อนที่ของลูกสูบ แต่ในทางปฏิบัติไม่สามารถทำได้ เนื่องจากไม่สามารถสร้างเครื่องอัดโดยปราศจาก ปริมาตรที่ว่างเหนือลูกสูบและฝาสูบได้ นอกจากนี้ ยังมี ความสูญเสียความดันในขณะที่ไอสารไหลผ่านใน ท่อ ผ่านวาล์วทางเข้า (Suction valve) และวาล์วทางออก (Discharge valve) อีกด้วย

การที่มีปริมาตรที่ว่างเหนือลูกสูบในตำแหน่งศูนย์ตายบน (Top dead center) จะมีไอ สารทำความเย็นจำนวนหนึ่งเหลืออยู่ในปริมาตรที่ว่างเหนือลูกสูบ และไม่ถูกขับออกมาทางวาล์วทางออก ไอสารทำความเย็นจำนวนนี้ จะมีความดันและอุณหภูมิสูง และในจังหวะที่ลูกสูบเคลื่อนที่ลงไอสารทำ ความเย็นนี้จะเกิดการขยายตัว จนกระทั่งความดันลดลงต่ำกว่าความดันด้านทางเข้า วาล์วทางเข้าจึงจะ เปิดและดูดไอสารทำความเย็นเข้ามาในกระบอกสูบ ทำให้ไอสารทำความเย็นที่เข้ามาในกระบอกสูบมี ปริมาตรน้อยกว่าปริมาตรที่ลูกสูบเคลื่อนที่

ดังนั้น ประสิทธิภาพเชิงปริมาตร (Volumetric efficiency) จึงหมายถึง อัตราส่วน ปริมาตรไอสารทำความเย็นที่เข้าไปในกระบอกสูบของเครื่องอัดในแต่ละช่วงชักต่อปริมาตรที่ลูกสูบ เคลื่อนที่ ดังนี้

$$\eta_{vol} = V_a / V_d \quad (5.3)$$

เมื่อ η_{vol} = ประสิทธิภาพเชิงปริมาตร

V_a = ปริมาตรไอสารทำความเย็นที่เข้ามาในกระบอกสูบจริง

V_d = ปริมาตรที่ลูกสูบเคลื่อนที่

หรือ $V_a = V_d \times \eta_{vol}$

ดังนั้น ความสามารถของการทำความเย็นที่ได้

= ความสามารถของการทำความเย็นทางทฤษฎี \times ประสิทธิภาพเชิงปริมาตร

สำหรับประสิทธิภาพเชิงปริมาตร ถ้าพิจารณาเฉพาะปริมาตรที่ว่างเหนือลูกสูบอย่างเดียว เรียกว่า ประสิทธิภาพเชิงปริมาตรของที่ว่าง (Clearance Volumetric efficiency) แต่ถ้าคิดถึงความ สูญเสียต่างๆ ที่เกิดขึ้นทั้งหมด เรียกว่า ประสิทธิภาพเชิงปริมาตรรวม

ตัวอย่าง 5.3 เครื่องอัด 2 สูบ หมุนที่ความเร็ว 1500 รอบ/นาที (25 รอบ/วินาที) ถ้าเส้นผ่านศูนย์กลาง ของลูกสูบเท่ากับ 5 เซนติเมตร และระยะชักเท่ากับ 5 เซนติเมตร มีประสิทธิภาพเชิงปริมาตรเท่ากับ 76% จงคำนวณหา (ก) ปริมาตรไอสารทำความเย็นที่เข้ามาในกระบอกสูบจริง และ (ข) ความสามารถ ของการทำความเย็น

วิธีทำ

(ก) จากเครื่องอัด 2 สูบ หมุนที่ความเร็ว 1500 รอบ/นาที (25 รอบ/วินาที) ถ้าเส้นผ่าศูนย์กลางของลูกสูบเท่ากับ 5 เซนติเมตร และระยะชักเท่ากับ 5 เซนติเมตร

จากตัวอย่างที่ 5.1 ปริมาตรที่ลูกสูบเคลื่อนที่ = 4.91 L/s

ดังนั้น ปริมาตรไอสารทำความเย็นที่เข้ามาในกระบอกสูบจริง

$$= (4.91 \text{ L/s}) \cdot (0.76) = 3.73 \text{ L/s} \quad \text{ตอบ}$$

(ข) จากตัวอย่าง 5.2 ความสามารถในการทำความเย็นทางทฤษฎี

$$= 8.376 \text{ kW}$$

ดังนั้น ความสามารถในการทำความเย็นที่ได้จริง

$$= (8.376 \text{ kW}) \cdot (0.76) = 6.366 \text{ kW} \quad \text{ตอบ}$$

5.1.6 ความต้องการพลังงานของเครื่องอัดทางปฏิบัติ

พลังงานรวมที่ใช้ในการหมุนเพลลาของเครื่องอัด เรียกว่า พลังงานเพลลา อาจจะคำนวณจากพลังงานทางทฤษฎี และตัวประกอบในการใช้งาน ซึ่งเรียกว่า ประสิทธิภาพของเครื่องอัด ประสิทธิภาพของเครื่องอัดเป็นความสัมพันธ์ของพลังงานทางทฤษฎีต่อพลังงานเพลลา ดังสมการ

$$E_0 = (P_T / P_S) \times (100) \quad (5.4)$$

และ

$$P_S = P_T / [E_0 / 100] \quad (5.5)$$

เมื่อ E_0 = ประสิทธิภาพรวม, %

P_T = พลังงานทางทฤษฎี

P_S = พลังงานเพลลา

ตัวอย่าง 5.4 เครื่องอัด 2 สูบ หมุนที่ความเร็ว 1500 รอบ/นาที (25รอบ/วินาที) ถ้าเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกสูบเท่ากับ 5 เซนติเมตร และระยะชักเท่ากับ 5 เซนติเมตร มีประสิทธิภาพเชิงปริมาตรเท่ากับ 76% พลังงานทางทฤษฎีที่ใช้ในการขับเครื่องอัด = 1.327 kW จงคำนวณหาพลังงานเพลลาของเครื่องอัดที่ต้องการ ถ้าประสิทธิภาพทั้งหมดของเครื่องอัดเท่ากับ 80%

วิธีทำ

$$\text{จาก } P_T = 1.327 \text{ kW}$$

$$\begin{aligned} \text{และจากสมการ } P_S &= P_T / E_0 \\ &= 1.327 \text{ kW} / 0.8 \end{aligned}$$

$$= 1.659 \text{ kW} \quad \text{ตอบ}$$

ประสิทธิภาพของเครื่องอัด (P_T) บางครั้งจะตกลง เนื่องจากส่วนประกอบ 2 ประการ คือ

(1) ประสิทธิภาพการอัดตัว และ (2) ประสิทธิภาพทางกล

$$\text{ดังนั้น} \quad E_0 = E_C \times E_m \quad (5.6)$$

เมื่อ E_C = ประสิทธิภาพการอัด, %

E_m = ประสิทธิภาพทางกล, %

ดังนั้น

$$P_S = P_T / E_C \times E_m \quad (5.7)$$

ประสิทธิภาพการอัดตัวของเครื่องอัดวัดจากความสูญเสียจากการเปลี่ยนแปลงของวัฏจักรการอัดตัวที่เกิดขึ้นจริงกับวัฏจักรการอัดตัวทางทฤษฎี ส่วนประสิทธิภาพทางกลของเครื่องอัดวัดจากความสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานทางกลในเครื่องอัด ซึ่งเขียนสมการได้ดังนี้

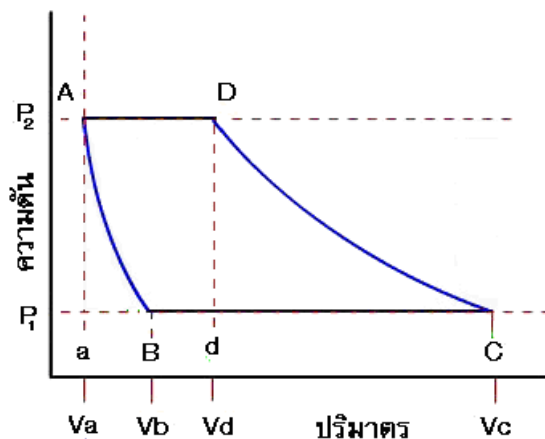
$$P_S = m (h_D - h_C) \times 1.1 / E_v \quad (5.8)$$

และเนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบต่างๆ ที่เปลี่ยนแปลงเป็นผลทำให้การคำนวณหาประสิทธิภาพการอัดตัวมีข้อยุ่งยาก ประสิทธิภาพการอัดตัวของเครื่องอัดจึงสามารถที่จะคำนวณได้ค่าที่ละเอียดด้วยการทดสอบเครื่องอัดเท่านั้น

5.1.7 พลังงานอินดิเคเตด (Indicated Power)

บางครั้งในการคำนวณหาประสิทธิภาพการอัด ใช้เครื่องมือบันทึกที่เรียกว่า อินดิเคเตอร์ ไดอะแกรม ซึ่งเป็นเครื่องมือที่บันทึกวัฏจักรการอัดตัวของเครื่องอัดในลักษณะความดัน-ปริมาตร ดังรูปที่ 5.12 ซึ่งเป็นอินดิเคเตอร์ไดอะแกรมของวัฏจักรการอัดทางอุดมคติ ในรูปพื้นที่ d-D-C-d แทนงานที่เกิดจากการอัดไอด้วยกระบวนการไอเซนโทรปิก CD และพื้นที่ a-A-D-d-a แทนงานที่เกิดจากลูกสูบอัดไอออกไปจากกระบอกสูบระหว่างกระบวนการความดันคงที่ DA ส่วนพื้นที่ a-A-B-a แทนงานที่เกิดจากไอขยายตัวในปริมาตรที่ว่างเหนือลูกสูบด้วยกระบวนการไอเซนโทรปิก AB ซึ่งเป็นงานที่ไอสารกระทำบนลูกสูบ ดังนั้นงานสุทธิของวัฏจักรการอัดเป็นผลรวมของงานกระบวนการ CD และ DA ลบด้วยงานของกระบวนการ AB เพราะฉะนั้นงานสุทธิของวัฏจักรการอัดแทนได้ด้วยพื้นที่ B-A-D-C-B ทั้งนี้งานของวัฏจักรการอัดที่หาจากอินดิเคเตอร์ไดอะแกรมเรียกว่า งานอินดิเคเตดและพลังงานที่คำนวณจากงานอินดิเคเตดเรียกว่า พลังงานอินดิเคเตด

ตามรูปที่ 5.12 เป็นอินดิเคเตอร์ไดอะแกรมของวัฏจักรการอัดทางอุดมคติ พลังงานอินดิเคเตดคำนวณจากงานอินดิเคเตด ซึ่งมีค่าเท่ากับพลังงานทางทฤษฎี อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติกราฟอินดิเคเตดเป็นภาพจำลองที่แสดงทางเดินของกระบวนการอัดของวัฏจักร ส่วนงานอินดิเคเตดจากกราฟเป็นการอัดที่แสดงงานที่ได้จากวัฏจักรการอัดที่เกิดขึ้นจริง โดยพลังงานอินดิเคเตดทางทฤษฎีเป็นพลังงานที่เครื่องอัดต้องการในงานการอัดไอสารทำความเย็น ข้อควรระวังเพื่อไม่ให้เกิดความสับสนระหว่างพลังงานอินดิเคเตดกับพลังงานเพลลา พลังงานอินดิเคเตดเป็นการรวมพลังงานที่ใช้กับความสูญเสียจากการเปลี่ยนแปลงวัฏจักรการอัดจริงจากวัฏจักรทางอุดมคติ แต่ไม่รวมพลังงานที่ต้องการเอาชนะความสูญเสียจากความเสียดทานทางกลในเครื่องอัด



รูปที่ 5.12 อินดิเคเตอร์ไดอะแกรมของวัฏจักรการอัดทางอุดมคติ

อีกนัยหนึ่งพลังงานอินดิเคเตอร์คือ ประสิทธิภาพการอัดไม่ใช่ประสิทธิภาพทางกล ดังนั้นพลังงานเพลาจึงแตกต่างจากพลังงานอินดิเคเตอร์ตรงที่พลังงานเพลาคือพลังงานที่ใช้เพื่อที่จะเอาชนะความเสียดทานทางกลในเครื่องอัด

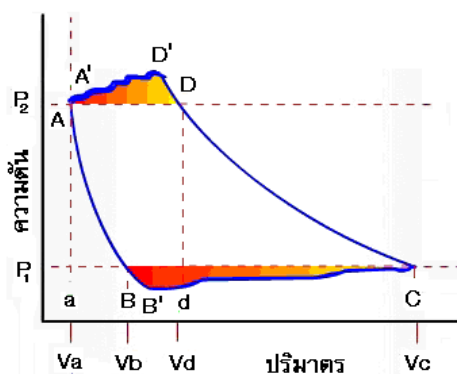
พลังงานที่ใช้ในการเอาชนะความเสียดทานทางกล เรียกว่า พลังงานความเสียดทาน (P_F) ดังนั้น

$$P_S = P_i + P_F \quad (5.9)$$

$$P_i = P_G / E_C \quad (5.10)$$

อินดิเคเตอร์ไดอะแกรมของวัฏจักรการอัดทางปฏิบัติ แสดงในรูปที่ 5.13 ตามพื้นที่ $A'-B'-C'-D'-A'$ ส่วนวัฏจักรทางอุดมคติแสดงด้วยเส้น $A-B-C-D-A$ สำหรับความดัน P_1 และ P_2 แทนความดันของไอที่เข้าและออกจากเครื่องอัด พื้นที่เหนือเส้นความดัน P_2 และต่ำกว่าเส้นความดัน P_1 แทนงานที่เพิ่มขึ้นของวัฏจักรเนื่องจากความสูญเสีย

สังเกตว่าช่วงสุดท้ายของการดูด ณ จุด C และการปล่อยออกไป ณ จุด A ความเร็วของลูกสูบจะลดลงจนถึงศูนย์และความดันของไอจะอยู่ที่ P_1 และ P_2 ตามลำดับ



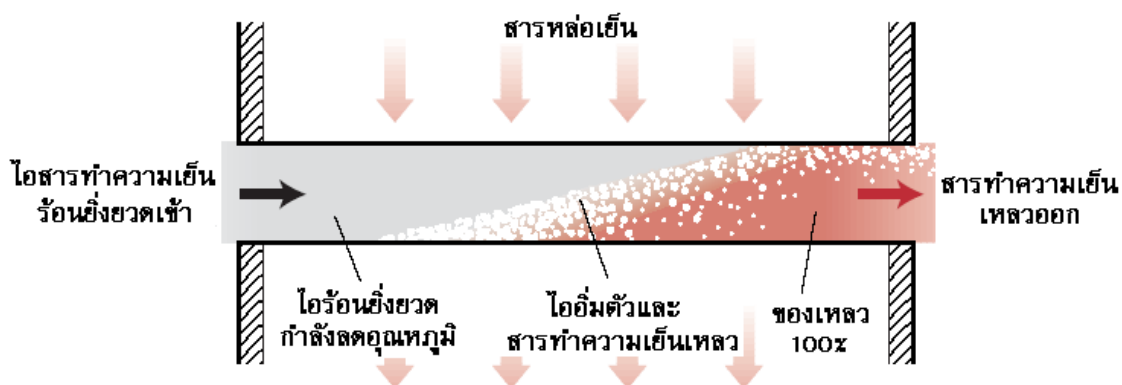
รูปที่ 5.13 อินดิเคเตอร์ไดอะแกรมของวัฏจักรการอัดทางปฏิบัติ

5.2 เครื่องควบแน่น

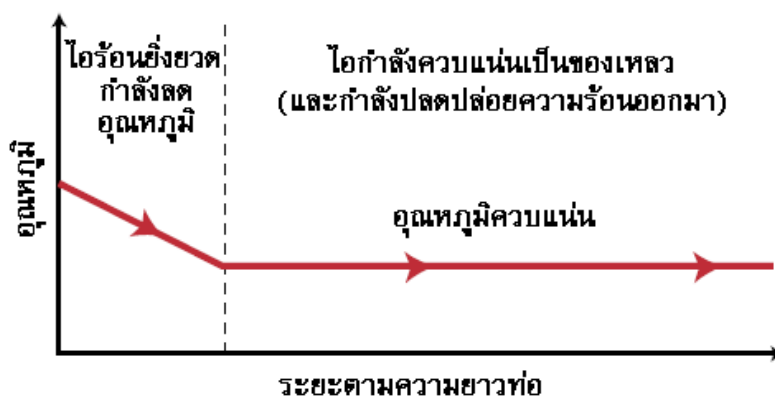
เครื่องควบแน่นมีหน้าที่หลักในการเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนออกจากไอสารทำความเย็น เพื่อให้ควบแน่นเป็นสารทำความเย็นเหลว ทำให้สามารถนำสารทำความเย็นกลับไปใช้ดูดซับความร้อนในเครื่องระเหยได้อีกหลังจากผ่านกระบวนการปรับลดความดันในอุปกรณ์ลดความดัน

5.2.1 กระบวนการควบแน่น

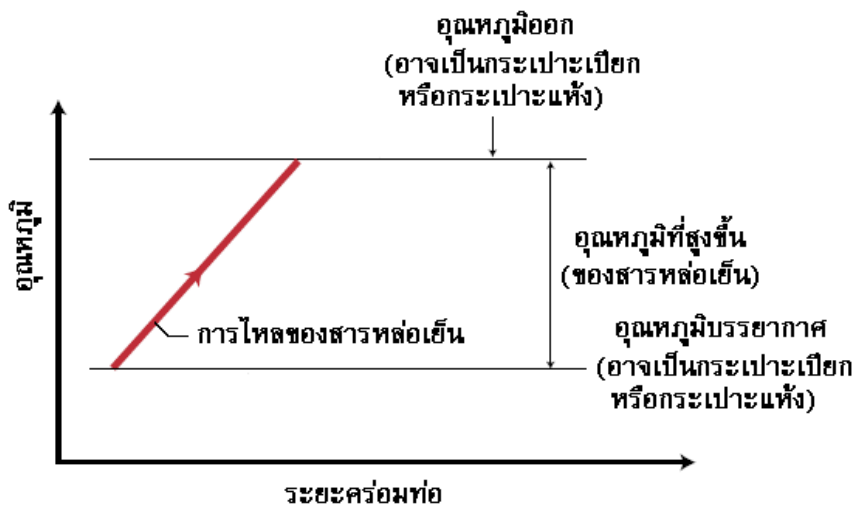
เมื่อไอสารทำความเย็นที่มีอุณหภูมิสูงในสถานะไอร้อนยิ่งยวดเข้าสู่เครื่องควบแน่น ในขั้นแรกไอร้อนยิ่งยวดจะถูกลดอุณหภูมิลงจนอยู่ในสถานะไออิ่มตัวซึ่ง ณ จุดนี้ไอสารทำความเย็นจะเริ่มกลั่นตัวในสถานะที่อุณหภูมิคงที่และปลดปล่อยความร้อนแฝงออกมา ดังแสดงกระบวนการควบแน่นในรูปที่ 5.14 สำหรับรูปที่ 5.15 และรูปที่ 5.16 แสดงเส้นกราฟการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสำหรับสารทำความเย็นและสารหล่อเย็นตามลำดับ ทั้งนี้สารหล่อเย็นอาจเป็นอากาศ น้ำ หรือสารชนิดอื่นๆ



รูปที่ 5.14 กระบวนการควบแน่น

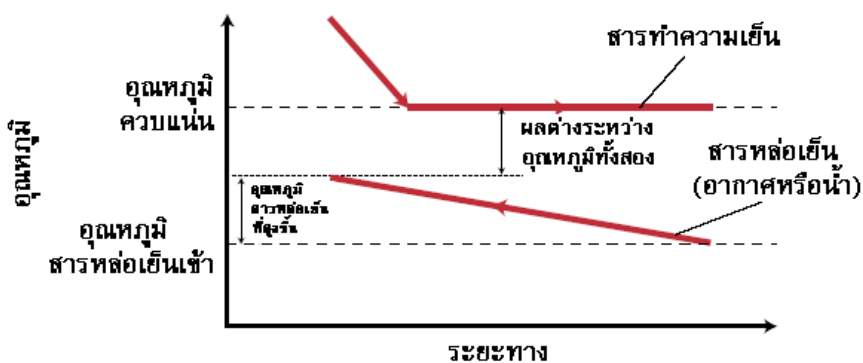


รูปที่ 5.15 เส้นกราฟการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสำหรับสารทำความเย็น



รูปที่ 5.15 เส้นกราฟการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสำหรับสารทำความเย็น

เพื่อให้การถ่ายเทความร้อนจากสารทำความเย็นไปสู่สารหล่อเย็นเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ อุณหภูมิระหว่างสารทั้งสองต้องมีความแตกต่างกัน และต้องมีความต่างที่มากพอในการทำให้เกิดการไหลของความร้อนให้เป็นไปในปริมาณที่ต้องการ อย่างไรก็ตามระบบที่มีประสิทธิภาพสูงจำเป็นต้องให้มีค่าผลต่างระหว่างอุณหภูมิทั้งสองให้น้อยที่สุด ดังนั้นจึงต้องปรับปรุงทั้งสองนี้ให้สมดุลที่ทำให้เกิดค่าใช้จ่ายที่สมเหตุสมผลในการใช้งานระบบ รูปที่ 5.17 แสดงกราฟความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของสารทำความเย็นและสารหล่อเย็นดังกล่าว

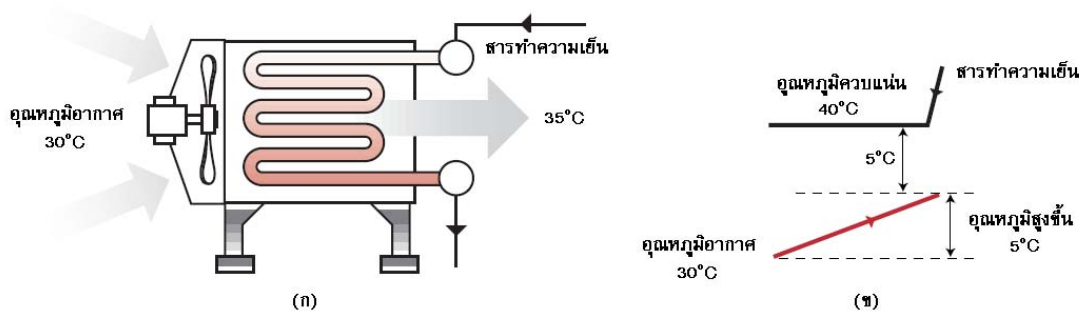


รูปที่ 5.17 กราฟความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของสารทำความเย็นและสารหล่อเย็น

5.2.2 ชนิดของเครื่องควบแน่น

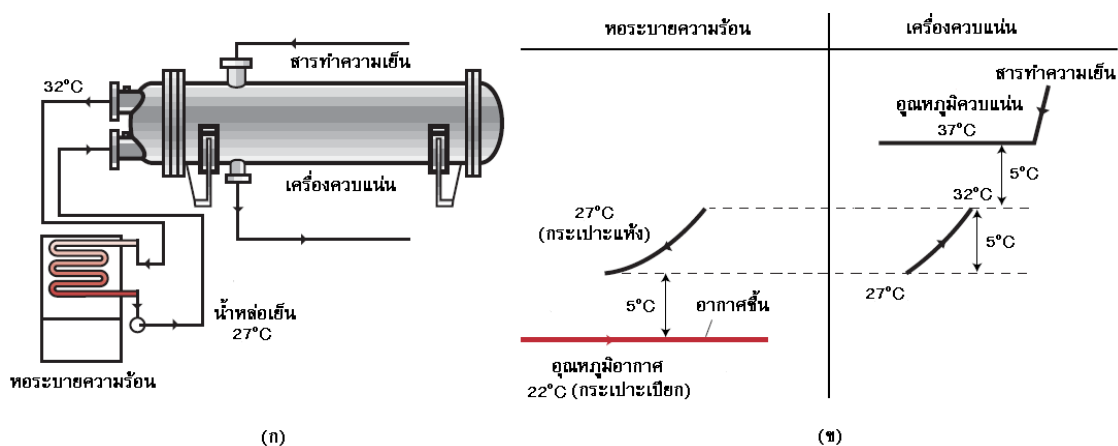
เครื่องควบแน่นที่ใช้งานกับเครื่องทำความเย็นทางอุตสาหกรรม มีด้วยกัน 3 ชนิดหลัก ดังนี้ ชนิดระบายความร้อนด้วยอากาศ (Air-cooled condenser) ชนิดระบายความร้อนด้วยน้ำ (water-cooled condenser) และชนิดระบายความร้อนด้วยการระเหยของน้ำ (Evaporative condenser)

5.2.2.1 เครื่องควบแน่นชนิดระบายความร้อนด้วยอากาศ มีรูปแบบเป็นแผงครีปและชุดท่อ การถ่ายเทความร้อนเป็นชนิดการพาความร้อนแบบบังคับที่ใช้พัดลมเป่า ดังรูปที่ 5.18 (ก) ส่วนในรูปที่ 5.18 (ข) แสดงกราฟความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของสารทำความเย็นและสารหล่อเย็น (อากาศ) สำหรับเครื่องควบแน่นชนิดนี้ไว้ด้วย



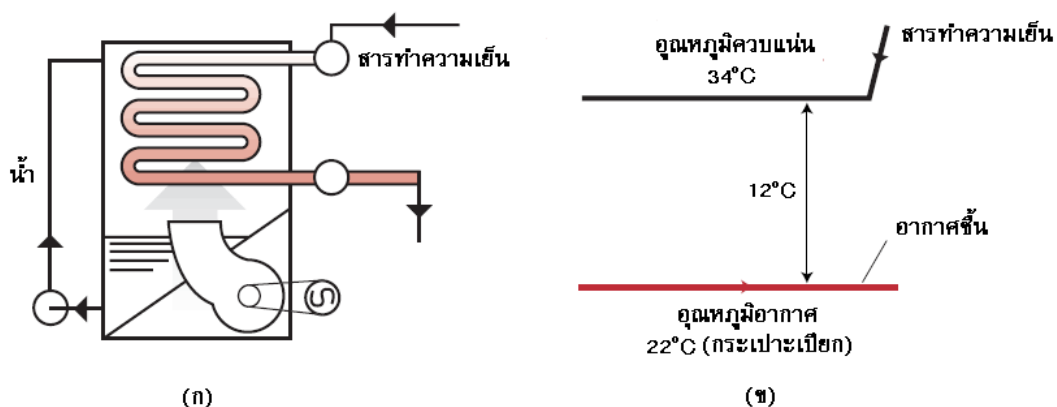
รูปที่ 5.18 เครื่องควบแน่นชนิดระบายความร้อนด้วยอากาศ

5.2.2.2 เครื่องควบแน่นชนิดระบายความร้อนด้วยน้ำ มีรูปแบบเป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อการถ่ายเทความร้อนเป็นชนิดการพาความร้อนแบบบังคับที่ใช้น้ำหมุนเวียนผ่านแบบไหลสวนทางกัน โดยท่ออยู่ชั้นในจะใช้เป็นท่อน้ำ ส่วนช่องว่างระหว่างท่อชั้นในกับเปลือกถังจะให้ไอสารทำความเย็นความดันสูงและอุณหภูมิสูงไหลผ่าน ลักษณะการไหลเป็นการไหลสวนทางกันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อน เครื่องควบแน่นรูปแบบนี้โดยทั่วไปต้องติดตั้งหอระบายความร้อน (Cooling tower) เพื่อใช้ในการระบายความร้อนออกของน้ำที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนอีกต่อหนึ่งเพื่อให้สามารถนำน้ำที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนกลับมาใช้ได้ใหม่ รูปที่ 5.19 (ก) แสดงเครื่องควบแน่นชนิดระบายความร้อนด้วยน้ำดังกล่าว ส่วนในรูปที่ 5.19 (ข) แสดงกราฟความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของสารทำความเย็นและสารหล่อเย็น (น้ำ) รวมทั้งระหว่างอุณหภูมิของสารหล่อเย็น (น้ำ) และอากาศชั้นในหอระบายความร้อน สำหรับเครื่องควบแน่นชนิดนี้ไว้ด้วย



รูปที่ 5.19 เครื่องควบแน่นชนิดระบายความร้อนด้วยน้ำ

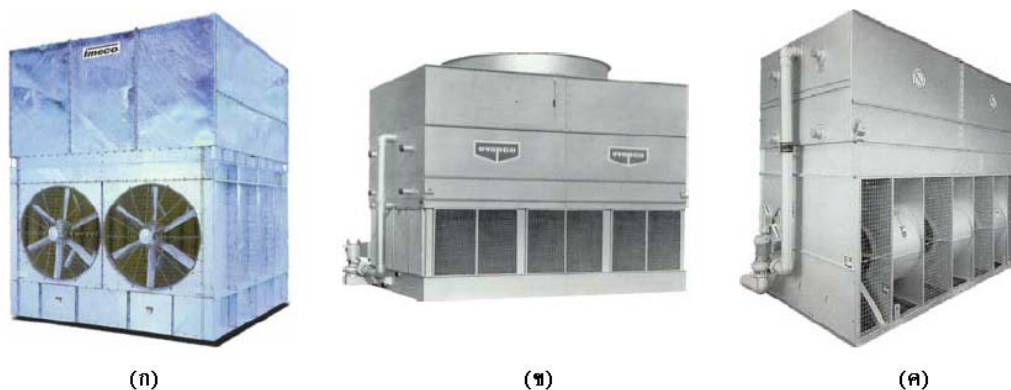
5.2.2.3 เครื่องควบแน่นชนิดระบายความร้อนด้วยการระเหยของน้ำ มีรูปแบบเป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกึ่งเปิดกึ่งปิด การถ่ายเทความร้อนเป็นชนิดการพาความร้อนแบบบังคับที่ใช้ น้ำหมุนเวียนผ่านลงบนชุดท่อสารทำความเย็น ในขณะที่มีอากาศหมุนเวียนผ่านสวนทางกับน้ำอีกต่อหนึ่งในการระบายความร้อนจากน้ำ ดังรูปที่ 5.20 (ก) ส่วนในรูปที่ 5.20 (ข) แสดงกราฟความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของสารทำความเย็นและอากาศขึ้น สำหรับเครื่องควบแน่นชนิดนี้ไว้ด้วย เครื่องควบแน่นชนิดนี้โดยทั่วไปมีรูปแบบการจัดวางพัดลมในการระบายความร้อนออกเป็น 3 รูปแบบ คือ รูปแบบพัดลมตามแนวแกนกระแสลมแบบเป่า (Forced-draft with axial fan) รูปแบบพัดลมตามแนวแกนกระแสลมแบบดูด (Induced-draft with axial fan) และรูปแบบพัดลมหอยโข่งกระแสลมแบบเป่า (Forced-draft with centrifugal fan)



รูปที่ 5.20 เครื่องควบแน่นชนิดระบายความร้อนด้วยการระเหยของน้ำ

เครื่องควบแน่นรูปแบบพัดลมตามแนวแกนกระแสลมแบบเป่า การจัดวางพัดลมอยู่ทางด้านข้างส่วนล่างของเครื่องและเป่าลมเข้าไปด้านใต้ของกลุ่มท่อสารทำความเย็น ดังแสดงในรูปที่ 5.21 (ก) ข้อดีของรูปแบบนี้คือ มีประสิทธิภาพสูง มีละอองน้ำพัดพาไปกับอากาศด้านทางออกน้อย สิ้นเปลืองพลังงานการขับพัดลมน้อย และง่ายต่อการเข้าถึงพัดลมและมอเตอร์ แต่มักเกิดกระแสไหลวนในเครื่องในบางครั้ง ดังนั้นจึงไม่ค่อยนิยม สำหรับเครื่องควบแน่นรูปแบบพัดลมตามแนวแกนกระแสลมแบบดูด การจัดวางพัดลมอยู่ทางด้านบนของเครื่องในลักษณะเป็นปล่องพัดลม และดูดลมออกให้ผ่านกลุ่มท่อสารทำความเย็น ดังแสดงในรูปที่ 5.21 (ข) ข้อดีของรูปแบบนี้คือ ประสิทธิภาพสูงกว่าและการปล่อยอากาศตามแนวตั้งค่อนข้างเงียบ แต่เนื่องจากดูดอากาศที่มีความชื้นสูงและอุณหภูมิสูงขึ้นจึงสิ้นเปลืองพลังงานมากกว่า รวมทั้งมีละอองน้ำถูกพัดพาไปกลับอากาศด้วย ทำให้ต้องเติมน้ำเข้าไปในระบบมากกว่า อย่างไรก็ตามเป็นรูปแบบที่นิยม ส่วนเครื่องควบแน่นรูปแบบพัดลมหอยโข่งกระแสลมแบบเป่า การจัดวางพัดลมอยู่ทางด้านข้างส่วนล่างของเครื่องและเป่าลมเข้าไปด้านใต้ของกลุ่มท่อสารทำความเย็นเช่นเดียวกับรูปแบบพัดลมตามแนวแกนกระแสลมแบบเป่า แต่ใช้พัดลมหอยโข่งแทน ดังแสดงในรูปที่ 5.21 (ค) ข้อดีของรูปแบบนี้คือ การปล่อยอากาศออกค่อนข้างเงียบมากและมีขีดความสามารถในการผลิตกระแสอากาศ

ความดันสูง มีละอองน้ำพัดพาไปกับอากาศด้านทางออกน้อยและสิ้นเปลืองพลังงานการขับพัดลมน้อยกว่า แต่มักเกิดกระแสไหลวนในเครื่องในบางครั้ง ดังนั้นจึงนิยมใช้ติดตั้งในอาคารหรืองานท่อ



รูปที่ 5.21 เครื่องควบแน่นชนิดระบายความร้อนด้วยการระเหยของน้ำ 3 รูปแบบ

5.2.3 การเลือกใช้งานเครื่องควบแน่น

เครื่องควบแน่นชนิดระบายความร้อนด้วยอากาศเป็นเครื่องที่มักใช้งานในเครื่องทำความเย็นขนาดกลางและขนาดเล็ก (100 kW ลงมา) โดยเฉพาะเครื่องขนาดเล็ก เนื่องจากบำรุงรักษาง่าย มีอุปกรณ์ประกอบระบบน้อยกว่าชนิดระบายความร้อนด้วยน้ำและชนิดระบายความร้อนด้วยการระเหยของน้ำ แต่จะมีประสิทธิภาพต่ำกว่าอีกสองชนิด เนื่องจากอากาศซึ่งทำหน้าที่เป็นสารหล่อเย็นมีอุณหภูมิที่สูงกว่าน้ำ ทำให้อุณหภูมิควบแน่นสูงตามไปด้วย สำหรับในระบบการทำทำความเย็นตั้งแต่ขนาดกลางถึงขนาดใหญ่ โดยเฉพาะระบบขนาดใหญ่ มักนิยมใช้เครื่องควบแน่นชนิดระบายความร้อนด้วยการระเหยของน้ำมากกว่าชนิดระบายความร้อนด้วยน้ำ เนื่องจากตัวเครื่องเป็นการรวมเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดระบายความร้อนด้วยน้ำเข้ากับหอระเหยความร้อนที่ทำงานแยกกันในเครื่องควบแน่นชนิดระบายความร้อนด้วยน้ำให้ทำงานเป็นชิ้นเดียวกัน จึงทำให้อุปกรณ์มีความกะทัดรัดกว่าและผลต่างอุณหภูมิระหว่างอากาศกับสารทำความเย็นโดยรวมต่ำกว่า ส่งผลให้อุณหภูมิควบแน่นต่ำลง

5.2.4 ภาระของเครื่องควบแน่น

ภาระของเครื่องควบแน่น (Condenser load) หมายถึง ปริมาณความร้อนทั้งหมดที่ถูกปล่อยออกจากเครื่องควบแน่น อันประกอบไปด้วยความร้อนที่สารทำความเย็นดูดซับจากเครื่องระเหย รวมถึงความร้อนที่ได้รับระหว่างท่อทางดูดเข้าเครื่องอัดและจากเครื่องอัด

เนื่องจากงานอัดไอต่อหน่วยของประสิทธิภาพการทำความเย็นจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการอัด ดังนั้นปริมาณความร้อนที่ปล่อยออกมาจากเครื่องควบแน่นต่อหน่วยของประสิทธิภาพการทำความเย็นจะแปรไปตามภาระการใช้งาน ส่วนความร้อนเนื่องจากการอัดจะแปรไปตามลักษณะการออกแบบของเครื่องอัด โดยที่เครื่องอัดแบบปิดจะมีค่าความร้อนมากกว่าแบบเปิด เพราะวบรวมความร้อนที่ไอสารทำความเย็นดูดซับขณะระบายความร้อนให้เครื่องอัดไว้ด้วย

ผู้ผลิตเครื่องอัดบางรายจะจัดข้อมูล "ความร้อนที่ถ่ายเททั้งหมด " ไว้เป็นส่วนหนึ่งของอัตราเครื่องอัด ซึ่งข้อมูลนี้จะใช้เป็นฐานในการเลือกใช้เครื่องควบแน่น แต่ถ้าไม่มีข้อมูลเหล่านี้สามารถที่จะหาภาระของเครื่องควบแน่นโดยประมาณได้ดังนี้

$$\text{ภาระเครื่องควบแน่น} = \text{ความสามารถของเครื่องอัด} \times \text{ตัวประกอบการถ่ายเทความร้อน} \quad (5.11)$$

โดยค่าตัวประกอบการถ่ายเทความร้อนหาได้จาก ตารางที่ 5.2 และ ตารางที่ 5.3 สำหรับเครื่องอัดแบบเปิดและแบบปิด ตามลำดับ

ตารางที่ 5.2 ค่าตัวประกอบการถ่ายเทความร้อนใช้กับเครื่องอัดแบบเปิด

อุณหภูมิเครื่องระเหย (°C)	อุณหภูมิการควบแน่น (°C)					
	32	38	43	49	54	60
-34	1.37	1.42	1.47	-	-	-
-29	1.33	1.37	1.42	1.47	-	-
-23	1.28	1.32	1.37	1.42	1.47	-
-18	1.24	1.28	1.32	1.37	1.41	1.47
-12	1.21	1.24	1.28	1.32	1.36	1.42
-7	1.17	1.20	1.24	1.28	1.32	1.37
-1	1.14	1.17	1.20	1.24	1.27	1.32
5	1.12	1.15	1.17	1.20	1.23	1.28
10	1.09	1.12	1.14	1.17	1.20	1.24

ตัวอย่าง 5.5 จงประมาณภาระของเครื่องควบแน่นเมื่อ (1) ใช้เครื่องอัดแบบเปิดซึ่งมีขีดความสามารถใช้งาน 4.8 kW และที่ด้านดูดมีอุณหภูมิอิ่มตัว -18°C และด้านจ่ายอุณหภูมิไออิ่มตัว 43°C และ (2) ใช้เครื่องอัดแบบปิดซึ่งมีขีดความสามารถ ใช้งานและอุณหภูมิเช่นเดียวกับข้อ (1)

วิธีทำ

(1) จากตารางที่ 5.2 สำหรับเครื่องอัดแบบเปิด ได้ค่าตัวประกอบการถ่ายเทความร้อนเท่ากับ 1.32 และ จากสมการ (5.11)

$$\text{ภาระเครื่องควบแน่น} = (4.8)(1.32) = 6.34 \text{ kW}$$

(2) จากตารางที่ 5.3 สำหรับเครื่องอัดแบบปิด ได้ค่าตัวประกอบการถ่ายเทความร้อนเท่ากับ 1.44 จากสมการ (5.11)

$$\text{ภาระเครื่องควบแน่น} = (4.8)(1.44) = 6.91 \text{ kW}$$

ตอบ

ตารางที่ 5.3 ค่าตัวประกอบการถ่ายเทความร้อนใช้กับเครื่องอัดแบบปิด

อุณหภูมิเครื่องระเหย (°C)	อุณหภูมิการควบแน่น (°C)					
	32	38	43	49	54	60
-40	1.66	1.73	1.80	2.00	-	-
-34	1.57	1.62	1.68	1.18	-	-
-29	1.49	1.53	1.58	1.65	-	-
-23	1.42	1.46	1.50	1.57	1.64	-
-18	1.36	1.40	1.44	1.50	1.56	1.62
-15	1.33	1.37	1.41	1.46	1.52	1.59
-12	1.31	1.34	1.38	1.43	1.49	1.55
-9	1.28	1.32	1.35	1.40	1.46	1.52
-7	1.26	1.29	1.33	1.37	1.43	1.49
-4	1.24	1.27	1.31	1.35	1.40	1.45
-1	1.22	1.25	1.28	1.32	1.37	1.42
5	1.18	1.21	1.24	1.27	1.31	1.35
10	1.14	1.17	1.20	1.23	1.26	1.29

5.2.5 ขีดความสามารถของเครื่องควบแน่น

เพราะว่าการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องควบแน่นอาศัยการนำความร้อนเป็นหลัก ดังนั้นขีดความสามารถของเครื่องควบแน่น (Condenser capacity) สามารถหาได้จากสมการพื้นฐานการถ่ายเทความร้อน ดังนี้

$$Q_C = (A) (U) (TD) \quad (5.12)$$

เมื่อ Q_C = ขีดความสามารถของเครื่องควบแน่น, W

A = พื้นที่ผิวถ่ายเทความร้อน, m^2

U = สัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อน, $W/m^2 \cdot K$

TD = ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างสารหล่อเย็นกับสารทำความเย็น, K

$$= (T_R - T_E) - (T_R - T_L) / \ln [(T_R - T_E) / (T_R - T_L)]$$

กรณีเครื่องควบแน่นชนิดระบายความร้อนด้วยอากาศหรือน้ำ

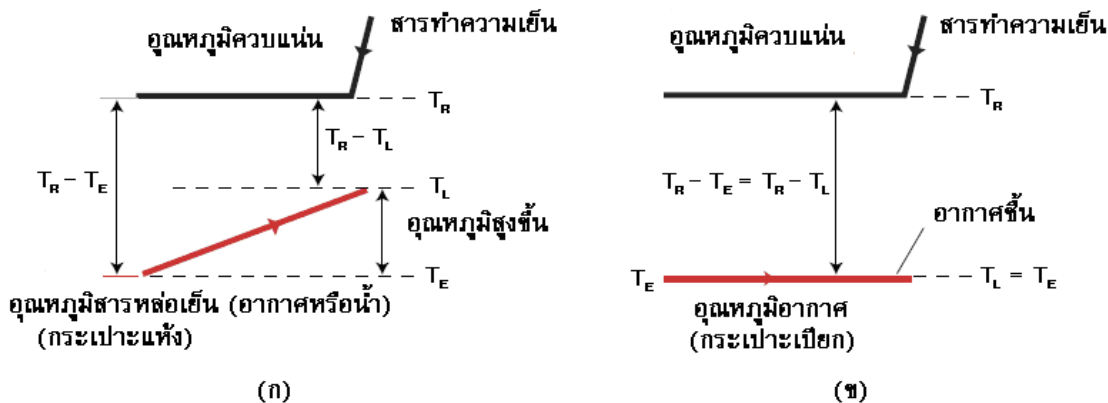
$$= T_R - T_E = T_R - T_L$$

กรณีเครื่องควบแน่นชนิดระบายความร้อนด้วยการระเหยของน้ำ

เมื่อ T_E = อุณหภูมิของสารหล่อเย็นที่เข้าชุดท่อ, °C (K)

T_L = อุณหภูมิของสารหล่อเย็นที่ออกจากชุดท่อ, °C (K)

$T_R =$ อุณหภูมิของสารทำความเย็นขณะควบแน่นในชดท่อ, °C (K)
 (ดังแสดงในรูปที่ 5.22)



รูปที่ 5.22 เส้นกราฟของอุณหภูมิสารหล่อเย็นในเครื่องควบแน่น
 (ก) ชนิดระบายความร้อนด้วยอากาศหรือน้ำ
 (ข) ชนิดระบายความร้อนด้วยการระเหยของน้ำ

ถ้าพิจารณาค่าต่างๆ ในสมการข้างต้น จะเห็นว่าค่า U เป็นค่าที่คงที่ตามชนิดของเครื่องควบแน่นและสารทำความเย็นที่ใช้ในระบบการทำความเย็น ดังนั้นขีดความสามารถของเครื่องควบแน่นจะเป็นอัตราส่วนโดยตรงกับพื้นที่ผิวของเครื่องควบแน่น และผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างสารหล่อเย็นกับสารทำความเย็น ทั้งนี้ค่า U สำหรับเครื่องควบแน่นชนิดระบายความร้อนด้วยน้ำ และใช้ R-134a เป็นสารทำความเย็น มีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ $1,300 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ และค่า U สำหรับเครื่องควบแน่นชนิดระบายความร้อนด้วยการระเหยของน้ำ และใช้ R-717 (แอมโมเนีย) เป็นสารทำความเย็น มีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ $6,500 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

ตัวอย่าง 5.6 เครื่องควบแน่นชนิดระบายความร้อนด้วยน้ำซึ่งมีขีดความสามารถ 15.5 kW และมีสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อน $1,300 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ จงหาพื้นที่ผิวถ่ายเทความร้อนของเครื่องควบแน่น ถ้าอุณหภูมิของสารหล่อเย็นที่เข้าชดท่อเท่ากับ 30°C อุณหภูมิของสารหล่อเย็นที่ออกจากชดท่อเท่ากับ 35°C และอุณหภูมิของสารทำความเย็นขณะควบแน่นในชดท่อเท่ากับ 40°C

วิธีทำ

จากสมการ (5.12) และค่า TD หาได้จาก

$$\begin{aligned} TD &= (T_R - T_E) - (T_R - T_L) / \ln [(T_R - T_E) / (T_R - T_L)] \\ &= (10 - 5) / \ln (10/5) = 5 / \ln 2 = 7 \end{aligned}$$

ดังนั้น พื้นที่ผิวถ่ายเทความร้อน = $15,500 \text{ W} / (1,300 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K})(7 \text{ K})$
 $= 1.7 \text{ m}^2$

ตอบ

5.2.6 อัตราการไหลและอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของสารหล่อเย็น

เมื่อสารหล่อเย็นไหลผ่านเครื่องควบแน่น สารหล่อเย็นจะได้รับความร้อนและมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นตามสมการดังนี้

$$\Delta T = Q_c / \dot{m} C_p \quad (5.13)$$

เมื่อ ΔT = อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของสารหล่อเย็นในเครื่องควบแน่น (K หรือ °C)

\dot{m} = อัตราการไหลเชิงมวลของสารหล่อเย็นในเครื่องควบแน่น (kg/s)

C_p = ความร้อนจำเพาะของสารหล่อเย็น (kJ/kg·K)

= 1.02 kJ/kg·K, สำหรับอากาศ

= 4.19 kJ/kg·K, สำหรับน้ำ

ทั้งนี้อัตราการไหลของสารหล่อเย็นจะแปรตามค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ดังนี้

จากสมการ (5.13) สำหรับสารหล่อเย็นที่เป็นน้ำ จะได้

$$\dot{m} = Q_c / C (\Delta T) = Q_c / (4.19 \text{ kJ/kg})(\Delta T) \quad (5.14)$$

และจะได้

$$\Delta T = Q_c / (4.19 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K})(\dot{m}) \quad (5.15)$$

และสำหรับสารหล่อเย็นที่เป็นอากาศ จะได้

$$\dot{m} = Q_c / (C) (\Delta T) = Q_c / (1.02 \text{ kJ/kg})(\Delta T) \quad (5.16)$$

และจะได้

$$\Delta T = Q_c / (1.02 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K})(\dot{m}) \quad (5.17)$$

อย่างไรก็ดี โดยทั่วไปอัตราการไหลของอากาศและน้ำมักมีหน่วยเป็น m^3/s และ L/s ตามลำดับ ซึ่งโดยปกติจะคำนวณหาอัตราการไหลของสารหล่อเย็นในหน่วยดังกล่าวมากกว่าใช้หน่วย kg/s ดังนั้นถ้าค่าเฉลี่ยความหนาแน่นของน้ำ = $1,000 \text{ m}^3/\text{kg}$ อัตราการไหลของน้ำที่มีหน่วยเป็น L/s จะมีค่าเท่ากับค่าที่หาได้จากสมการ (5.14)

สำหรับกรณีของอากาศ เนื่องจากค่าปริมาตรจำเพาะของอากาศมาตรฐาน (v) มีค่าเท่ากับ $0.842 \text{ m}^3/\text{kg}$ ดังนั้นความหนาแน่นของอากาศมาตรฐาน (ρ) จะมีค่าเท่ากับ $1/0.842 \text{ kg/m}^3$ ทำให้สามารถเปลี่ยนค่าอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศในหน่วย kg/s เป็นหน่วย m^3/s ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{m} &= (1.02 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K})(1/0.842 \text{ kg/m}^3) \\ &= 1.21 \text{ kJ/m}^3\cdot\text{K} \end{aligned}$$

จะได้

$$v = Q_c / (1.21)(\Delta T) \quad (5.18)$$

หรือ

$$\Delta T = Q_c / (1.21)(V) \quad (5.19)$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } Q_c &= \text{ความร้อนที่คายออกจากเครื่องควบแน่น, kW} \\ v &= \text{อัตราการไหลโดยปริมาตรของอากาศ, m}^3/\text{s} \\ 1.21 &= \text{ค่าคงที่ของอากาศ, kJ/m}^3 \cdot \text{K} \end{aligned}$$

ตัวอย่าง 5.7 ถ้าภาระของน้ำหล่อเย็นที่เครื่องควบแน่นเป็น 45 kW และอุณหภูมิของน้ำในเครื่องควบแน่นเพิ่มขึ้น 6 K จงหาปริมาณน้ำที่หมุนเวียนที่ไหลผ่านเครื่องควบแน่นในหน่วยลิตรต่อวินาที

วิธีทำ

จากสมการ (5.14)

$$\begin{aligned} m &= 45 \text{ kW} / (4.19 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K})(6\text{K}) \\ &= 1.79 \text{ kg/s} \quad = 1.79 \text{ L/s} \end{aligned}$$

ตอบ

ตัวอย่าง 5.8 ภาระของเครื่องควบแน่นที่ใช้น้ำเป็นสารหล่อเย็นเท่ากับ 26 kW ถ้าปริมาณของน้ำที่ไหลผ่านเครื่องควบแน่นเท่ากับ 1 L/s จงคำนวณหาอุณหภูมิของน้ำที่เพิ่มขึ้นในเครื่องควบแน่น

วิธีทำ

จากสมการ (5.15)

$$\begin{aligned} \Delta T &= 26 \text{ kW} / (4.19 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K})(1 \text{ L/s})(1 \text{ kg/L}) \\ &= 6.2 \text{ K} \end{aligned}$$

ตอบ

ตัวอย่าง 5.9 อัตราการไหลของน้ำที่ไหลผ่านชนิดระบายความร้อนด้วยน้ำเท่ากับ 0.3 L/s อุณหภูมิในเครื่องควบแน่นเพิ่มขึ้น 7K จงหาภาระเครื่องควบแน่นในหน่วย kW

วิธีทำ

จากสมการ (5.15)

$$\begin{aligned} Q_c &= (\dot{m}) (4.19 \text{ kW/kg} \cdot \text{K})(\Delta T) \\ &= (0.3 \text{ L/s})(1 \text{ kg/L})(4.19 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K})(7\text{K}) \\ &= 8.8 \text{ kW} \end{aligned}$$

ตอบ

ตัวอย่าง 5.10 ภาระของเครื่องควบแน่นแบบหล่อเย็นด้วยอากาศเท่ากับ 36 kW ถ้าออกแบบให้อากาศเพิ่มขึ้นในเครื่องควบแน่น 10 K จงคำนวณปริมาตรของอากาศในหน่วย m^3/s

วิธีทำ

จากสมการ (5.18)

$$\begin{aligned} v &= 36 \text{ kW} / (1.21 \text{ kJ/m}^3 \cdot \text{K})(10 \text{ K}) \\ &= 3 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

ตอบ

5.3 อุปกรณ์ลดความดัน

อุปกรณ์ลดความดันทำหน้าที่ในการลดความดันของสารทำความเย็น เพื่อให้สารทำความเย็นมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิของพื้นที่ที่ต้องการทำความเย็น ซึ่งเป็นผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนจากพื้นที่ที่ต้องการทำความเย็นสู่สารทำความเย็นได้ นอกจากนี้ยังทำหน้าที่ในการควบคุมการไหลของสารทำความเย็น ทำให้อุปกรณ์ประเภทนี้มี 2 หน้าที่ คือ ควบคุมสารทำความเย็นเหลวให้ไหลเข้าสู่เครื่องระเหยอย่างเหมาะสมและปรับลดความดันและคงสภาพความดันให้ได้ตามที่กำหนดในเครื่องระเหย อุปกรณ์ที่สามารถทำงานในลักษณะดังกล่าวที่นิยมใช้งานในกลไกการควบคุมความเย็นมีด้วยกัน 5 ชนิดหลัก ดังนี้

- 1) ท่อรูเล็กหรือท่อแคปิลลารี (Capillary tube : CAP) ใช้กับเครื่องระเหยแบบแห้ง
- 2) วาล์วขยายตัวอัตโนมัติ (Automatic expansion valve : AEV) ใช้กับเครื่องระเหยแบบแห้ง
- 3) วาล์วขยายตัวเทอร์โมสแตติก (Thermostatic expansion valve : TEV) ใช้กับเครื่องระเหยแบบแห้ง
- 4) วาล์วลูกลอยด้านความดันต่ำ (Low side float : LSF) ใช้กับเครื่องระเหยแบบท่วม
- 5) วาล์วลูกลอยด้านความดันสูง (High side float : HSF) ใช้กับเครื่องระเหยแบบท่วม

5.3.1 ท่อรูเล็กหรือท่อแคปิลลารี

อุปกรณ์ชนิดนี้ใช้งานกับตู้เย็น ตู้แช่ ตามบ้านและเครื่องทำความเย็นเชิงพาณิชย์ขนาดเล็กเป็นหลัก รูปที่ 5.23 แสดงรูปแบบท่อแคปิลลารีที่ใช้ในระบบการทำความเย็นโดยทั่วไป ลักษณะของท่อแคปิลลารีมีรูปร่างเป็นท่อรูเล็กที่มีขนาดยาวเพื่อทำหน้าที่ในการลดความดันด้วยการลดอัตราการไหลของสารทำความเย็นตลอดความยาวของท่อ สำหรับขนาดของท่อมักมีด้วยกันหลายขนาดทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของสารทำความเย็น ขนาดเครื่องทำความเย็น และความยาวของท่อเอง



รูปที่ 5.23 รูปแบบท่อแคปิลลารีที่ใช้ในระบบการทำความเย็น

ลักษณะการไหลของสารทำความเย็นในท่อแคปิลลารี เริ่มจากสารทำความเย็นเหลวความดันสูงจากท่อส่งสารทำความเย็นเหลวที่ผ่านตัวกรองและตัวลดความชื้นในท่อส่งสารทำความเย็นเหลว

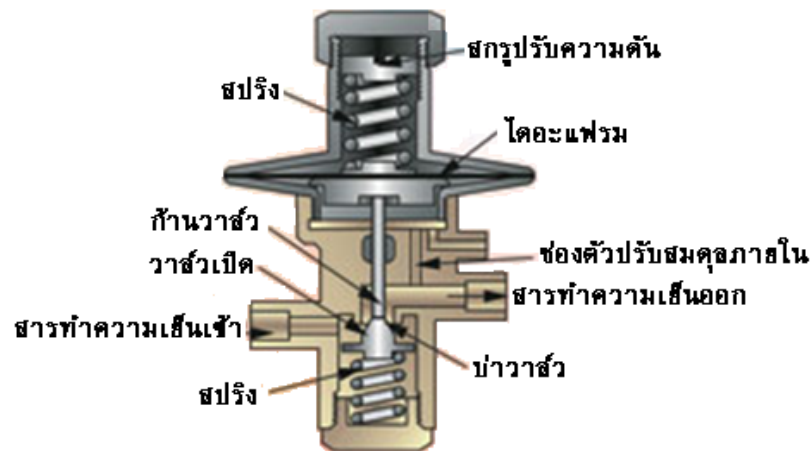
ไหลเข้าท่อและเนื่องจากรูท่อมมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับขนาดท่อส่งสารทำความเย็นเหลว ทำให้ความดันของสารทำความเย็นเหลวลดลง โดยในช่วงแรกๆ ประมาณสองในสามของความยาวท่อแคพิลลารี สารทำความเย็นยังมีสถานะเป็นของเหลวอยู่ จะเริ่มกลายเป็นไอเมื่อผ่านระยะนี้ไปแล้ว และเมื่อถึงปลายท่อ สารทำความเย็นจะมีส่วนผสมของไอในสารทำความเย็นเหลวประมาณ 10% ถึง 20% ซึ่งจากผลของการกลายเป็นไอทำให้ปริมาตรของสารทำความเย็นเพิ่มขึ้น และในขณะที่เครื่องอัดยังคงทำงานอยู่สารทำความเย็นที่เริ่มเข้าสู่เครื่องระเหยจะกลายเป็นไอเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งกลายเป็นไออิมตัวโดยสมบูรณ์เมื่อผ่านเครื่องระเหย

จากผลของการพัฒนาในการออกแบบท่อแคพิลลารี ในปัจจุบันมักใช้ท่อที่มีขนาดโตขึ้นและยาวขึ้น (ความยาวประมาณ 6 ถึง 9 เมตร) เนื่องจากการใช้ท่อที่มีขนาดโตขึ้นช่วยทำให้เกิดการอุดตันในท่อน้อยลง

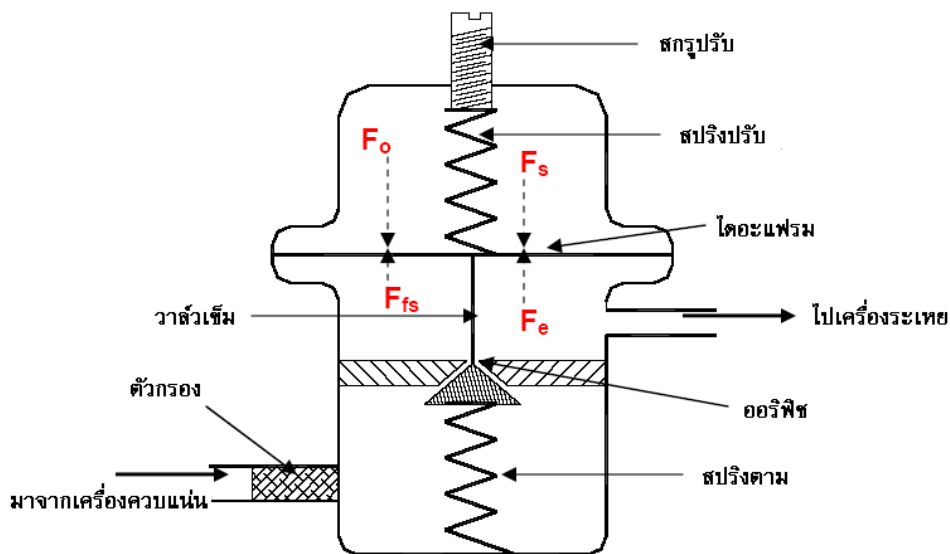
การควบคุมการไหลด้วยท่อแคพิลลารีจะไม่ใช้งานร่วมกับวาล์วกันการไหลย้อนกลับ (Check valve) หรือวาล์วควบคุมทิศทาง (Directional control valve) ดังนั้นระหว่างที่วัฏจักรหยุดการทำงานจะเกิดการปรับสมดุลระหว่างด้านความดันสูงและด้านความดันต่ำให้มีความดันเท่ากัน ซึ่งในสถานะที่ด้านความดันสูงและด้านความดันต่ำมีความดันเท่ากันนี้ทำให้เครื่องอัดเริ่มต้นทำงานใหม่ง่ายขึ้น เนื่องจากไม่มีความดันมาต้านการทำงานขณะเริ่มทำงานซึ่งเป็นสถานะที่ระบบมีความเสียดทานสูงอยู่แล้ว อย่างไรก็ตามระบบต้องไม่มีการบรรจุสารทำความเย็นเกินกว่ากำหนด เพราะจะเป็นสาเหตุให้สารทำความเย็นส่วนเกินนี้ไหลท่วมเครื่องระเหยอันเป็นผลให้เกิดน้ำแข็งเกาะบริเวณท่อทางดูดเมื่อเริ่มเดินเครื่องมอเตอร์

5.3.2 วาล์วขยายตัวอัตโนมัติ

อุปกรณ์ชนิดนี้ใช้งานเป็นอุปกรณ์ควบคุมการไหลของสารทำความเย็นในระบบการทำความเย็นแบบแห้ง สำหรับรูปหน้าตัดของวาล์วโดยทั่วไปดังแสดงในรูปที่ 5.24 โดยตัววาล์วออกแบบเพื่อควบคุมการไหลของสารทำความเย็นเหลวที่เข้าสู่เครื่องระเหย รวมทั้งเพื่อคงความดันในเครื่องระเหยให้ต่ำ ในขณะที่เครื่องอัดกำลังทำงาน อย่างไรก็ตามวาล์วชนิดนี้อาจใช้ได้เฉพาะกับการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ที่ใช้คุณสมบัติเป็นดัชนีควบคุม สำหรับลักษณะการทำงาน ขณะที่ความดันตกทางด้านความดันต่ำ นั่นคือ F_e ในรูปที่ 5.25 ลดลง ทำให้แรงสปริง F_s มีค่ามากกว่า ทำให้วาล์วเปิดให้สารทำความเย็นเหลวไหลเข้าสู่เครื่องระเหย (โดย F_0 คือ แรงความดันบรรยากาศเริ่มต้น และ F_{fs} คือ แรงสปริงตามด้านล่างลิ้นวาล์วเข็ม ซึ่งมีค่าคงที่) จากนั้นสารทำความเย็นเริ่มระเหยภายใต้ความดันต่ำและดูดซับความร้อนเข้ามา วาล์วจะคงความดันในเครื่องระเหยให้คงที่ขณะระบบทำงาน การทำงานลักษณะนี้เป็นการทำงานที่ไม่ขึ้นกับปริมาตรของสารทำความเย็นในระบบ รวมทั้งวาล์วทำหน้าที่เป็นจุดแบ่งระหว่างด้านความดันสูงและด้านความดันต่ำด้วย นอกจากนี้วาล์วอาจนำมาใช้ในการปรับแต่งความดันของเครื่องระเหยให้ถูกต้องได้ด้วยการปรับเกลียวของสกรูปรับแต่งความดันเพื่อเพิ่มหรือลดแรงกดของสปริงในวาล์ว หากปรับเกลียวออกเป็นการเพิ่มอัตราการไหลทำให้ความดันด้านความดันต่ำเพิ่มขึ้น และหากปรับเกลียวเข้าเป็นการลดอัตราการไหลทำให้ความดันด้านความดันต่ำลดลง



รูปที่ 5.24 รูปหน้าตัดของวาล์วขยายตัวอัตโนมัติ



รูปที่ 5.25 รูปหน้าตัดของวาล์วขยายตัวอัตโนมัติแสดงสมดุลแรง

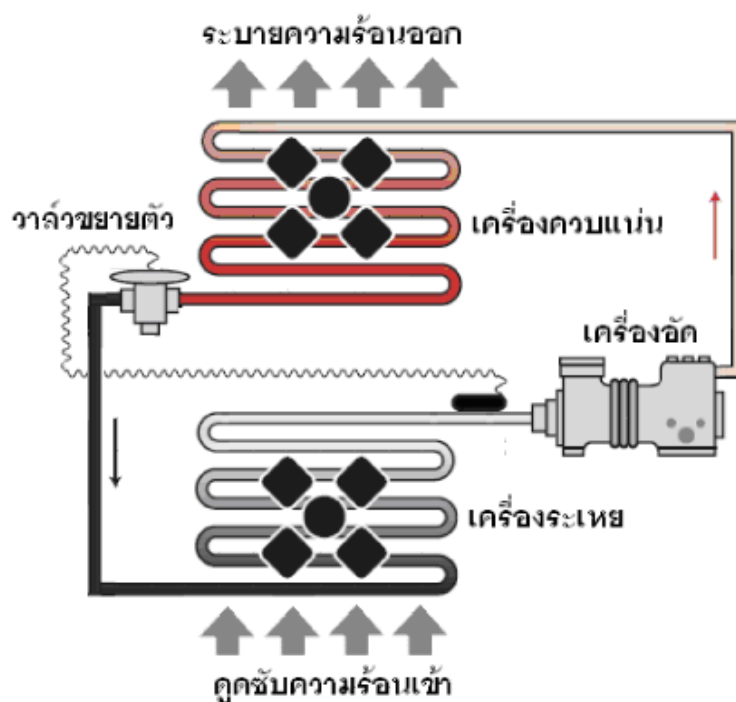
สำหรับอัตราการไหลของสารทำความเย็นผ่านวาล์วถูกควบคุมด้วยเครื่องระเหย สารทำความเย็นจะไม่ไหลผ่านวาล์วถ้าเครื่องอัดไม่ทำงานและเครื่องระเหยต้องอยู่ภายใต้ความดันต่ำด้วยสารทำความเย็นถึงจะไหล พึงระลึกว่าการที่ความดันในเครื่องระเหยต่ำทำให้อุณหภูมิสารทำความเย็นระเหยต่ำลงด้วย ข้อจำกัดของวาล์วชนิดนี้คือ การควบคุมอุณหภูมิไม่ค่อยเป็นไปตามที่ต้องการ

5.3.3 วาล์วขยายตัวเทอร์โมสแตติก

อุปกรณ์ชนิดนี้ใช้งานกับระบบทำความเย็นเชิงพาณิชย์เป็นส่วนใหญ่ วาล์วชนิดนี้เป็นวาล์วขยายตัวที่อาศัยการควบคุมอุณหภูมิที่ทางออกของเครื่องระเหย ด้วยการติดตั้งกระเปาะตรวจจับอุณหภูมิบริเวณท่อทางออกของเครื่องระเหยแล้วส่งสัญญาณผลของการวัดไปตามท่อรูเล็กที่เป็นท่อนำสู่ตัววาล์ว

ดังแสดงในรูปที่ 5.26 สำหรับลักษณะของวาล์วดังแสดงในรูปที่ 5.27 ซึ่งเป็นชนิดควบคุมการปิด-เปิด วาล์วด้วยแผ่นไดอะแฟรมตามสัญญาณที่ได้รับจากการตรวจจับอุณหภูมิบริเวณท่อทางออกของเครื่อง ระบาย ในลักษณะที่ถ้าอุณหภูมิกระเปาะตรวจจับเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความดันด้านบนแผ่นไดอะแฟรมเพิ่มขึ้น และดันก้านวาล์วให้วาล์วเปิด ทำให้สารทำความเย็นเหลวไหลเข้าสู่เครื่องระบาย ซึ่งเป็นผลให้อุณหภูมิ กระเปาะตรวจจับลดต่ำลง ทำให้ความดันด้านบนแผ่นไดอะแฟรมค่อยๆ ลดลง ส่งผลให้สปริงดันก้านวาล์ว ให้วาล์ววาล์วค่อยๆ ปิดลง ทำให้สารทำความเย็นเหลวมีอัตราการไหลลดลงและหยุดไหลเมื่อวาล์วปิดสนิท จนกว่าอุณหภูมิกระเปาะตรวจจับจะเพิ่มขึ้นอีกครั้ง อย่างไรก็ตามในระหว่างที่เครื่องอัดหยุดเดินเครื่องจะไม่มี การไหลเกิดขึ้นในระบบ

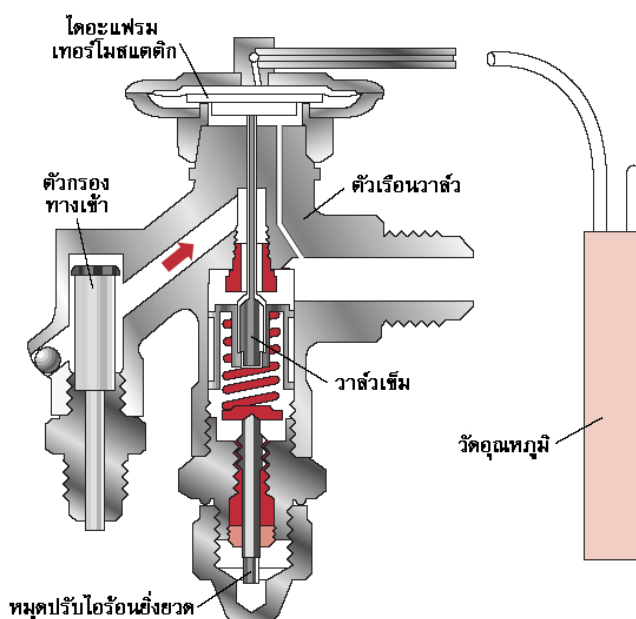
นอกเหนือจากการควบคุมการปิด-เปิดวาล์วที่ช่วยให้สารทำความเย็นเหลวเข้าสู่เครื่อง ระบายอย่างรวดเร็วและการทำความเย็นเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพแล้ว วาล์วขยายตัวชนิดนี้ยังช่วยให้ สารทำความเย็นเหลวคงอยู่เต็มเครื่องระบายในขณะที่ระบบกำลังทำงานอีกด้วย สำหรับการควบคุมการ ทำงานของมอเตอร์สามารถใช้ได้ทั้งการใช้อุณหภูมิเป็นดัชนีควบคุม และการใช้ความดันเป็นดัชนีควบคุม นอกจากนี้ยังสามารถใช้ได้กับระบบที่มีเครื่องระบายหลายเครื่องได้ด้วย



รูปที่ 5.26 วาล์วขยายตัวเทอร์โมสแตติกแสดงการติดตั้งในระบบการทำความเย็น



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.27 วาล์วขยายตัวเทอร์โมสแตติก (ก) รูปร่างภายนอก และ (ข) รูปหน้าตัด

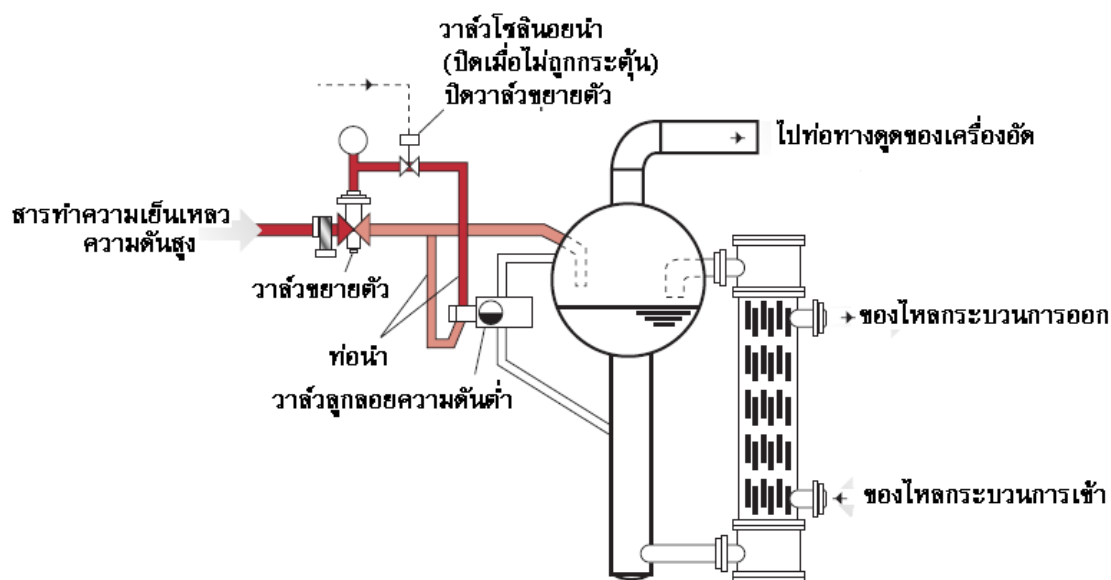
5.3.4 วาล์วลูกลอยด้านความดันต่ำ

อุปกรณ์ชนิดนี้ใช้กับเครื่องระเหยแบบท่วม ดังแสดงในรูปที่ 5.28 ซึ่งระดับของสารทำความเย็นถูกควบคุมด้วยวาล์วลูกลอย ลักษณะการทำงาน เริ่มจากในขณะที่สารทำความเย็นระเหยส่งผลให้ระดับสารทำความเย็นเหลวลดลง ทำให้วาล์วที่ต่ออยู่กับก้านลูกลอยเปิดและระบบเกิดการเสียดูด ซึ่งจะส่งสัญญาณผ่านทางวาล์วส่งถ่าย (รูปที่ 5.29 ด้านซ้ายสุด) ทำให้สารทำความเย็นเหลวจากด้านความดันสูงไหลเข้าสู่เครื่องระเหยทดแทนปริมาณสารทำความเย็นที่ระเหยไป ส่งผลให้ระดับสารทำความเย็นเหลวเพิ่มขึ้น ทำให้วาล์วที่ต่ออยู่กับก้านลูกลอยปิด จนกว่าระดับสารทำความเย็นจะลดลงและเปิดวาล์วใหม่

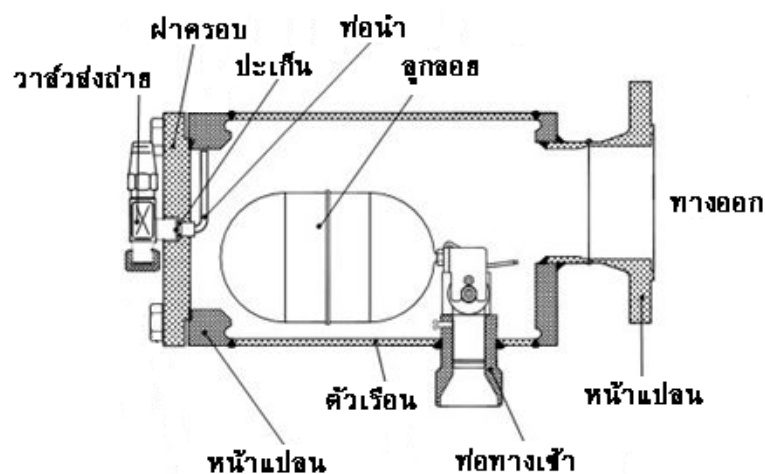
รูปที่ 5.29 แสดงให้เห็นลักษณะส่วนประกอบของลูกลอยและวาล์ว และจากการที่เครื่องระเหยต้องการสารทำความเย็นในปริมาณมาก ทำให้ระบบวาล์วลูกลอยด้านความดันต่ำโดยปกติมีถึงรับ

สารทำความเย็นเหลวขนาดใหญ่เพื่อให้สามารถเก็บสารทำความเย็นไว้ในระบบได้อย่างเพียงพอ ดังแสดงในรูปที่ 5.28

การควบคุมสารทำความเย็นแบบวาล์วลูกลอยด้านความดันต่ำสามารถใช้งานกับระบบเครื่องระเหยแบบหลายเครื่องได้



รูปที่ 5.28 การควบคุมสารทำความเย็นด้วยวาล์วลูกลอยด้านความดันต่ำ

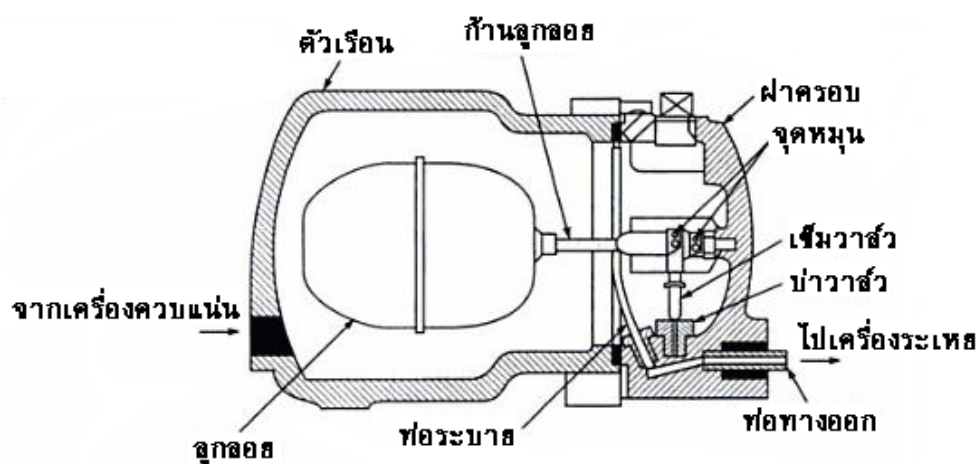


รูปที่ 5.29 รูปหน้าตัดแสดงส่วนประกอบวาล์วลูกลอยด้านความดันต่ำ

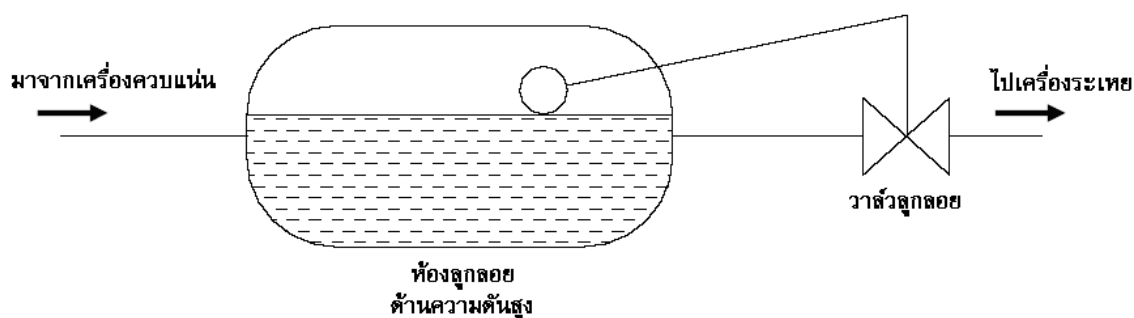
5.3.5 วาล์วลูกลอยด้านความดันสูง

หน้าที่ของวาล์วชนิดนี้คือ การระดับสารทำความเย็นเหลวในห้องลูกลอยให้คงที่ การติดตั้งวาล์วลูกลอยด้านความดันสูงติดตั้งเชื่อมต่อกับเครื่องควบแน่นด้านความดันสูง รูปที่ 5.30 แสดงให้เห็นถึงรูปหน้าตัดที่แสดงส่วนประกอบ และรูปที่ 5.31 แสดงกลไกในระบบวาล์วลูกลอยด้านความดันสูง ลักษณะ

การทำงานเมื่อภาระการทำความเย็นสูงขึ้น ปริมาณสารทำความเย็นที่ระเหยและที่ควบแน่นเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เป็นผลให้ระดับสารทำความเย็นเหลวในห้องลูกลอยสูงขึ้นและทำให้ลูกลอยลอยสูงขึ้นถึงระดับที่สามารถเปิดวาล์วเข็มได้ ทำให้สารทำความเย็นเหลวไหลเข้าสู่ด้านความดันต่ำหรือเครื่องระเหย เมื่อสารทำความเย็นไหลออกทำให้ลูกลอยลดระดับลง และเมื่อถึงระดับที่กำหนดวาล์วจะปิด จากหลักการทำงานดังกล่าวจึงทำให้ต้องตรวจสอบปริมาณสารทำความเย็นในระบบอย่างระมัดระวัง ให้เครื่องระเหยได้รับปริมาณสารทำความเย็นอย่างถูกต้อง เนื่องจากหากสารทำความเย็นมีมากเกินไปจะท่วมเครื่องระเหยและเป็นสาเหตุให้เกิดน้ำแข็งเกาะในท่อทางดูด



รูปที่ 5.30 รูปหน้าตัดแสดงส่วนประกอบวาล์วลูกลอยด้านความดันสูง



รูปที่ 5.31 กลไกในระบบวาล์วลูกลอยด้านความดันสูง

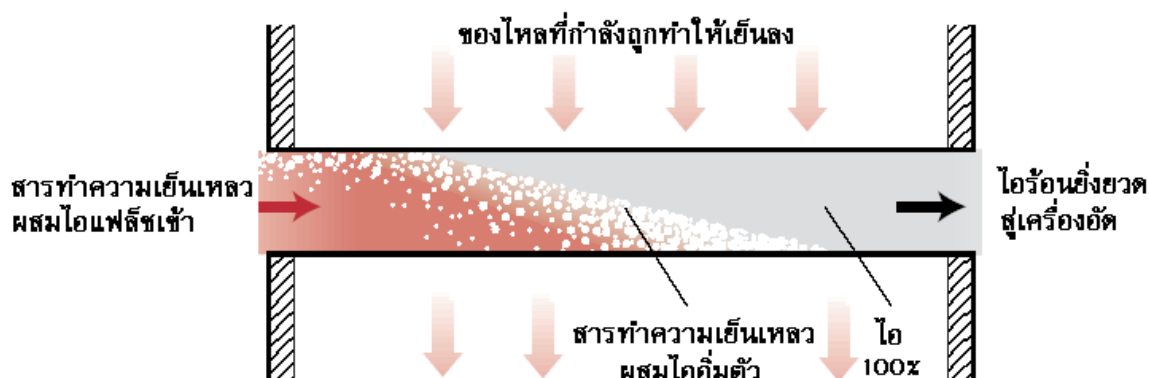
และเนื่องจากวาล์วลูกลอยด้านความดันสูงมีการจำกัดปริมาณสารทำความเย็นให้คงที่บนด้านความดันสูงเท่านั้น ทำให้ต้องเก็บสะสมสารทำความเย็นไว้ทางด้านความดันต่ำ (เครื่องระเหย) จึงทำให้เหมาะสมในการใช้งานกับเครื่องระเหยแบบท่วม

5.4 เครื่องระเหย

การทำความเย็นในระบบการทำความเย็นทั้งหมดเกิดขึ้นในอุปกรณ์ที่เรียกว่า เครื่องระเหย ดังนั้นหน้าที่หลักของอุปกรณ์นี้คือ การดึงเอาความร้อนออกไปจากผลิตภัณฑ์ หรือบริเวณที่ต้องการทำความเย็น เพื่อให้ได้อุณหภูมิต่ำตามที่ต้องการ

5.4.1 กระบวนการระเหย

สารทำความเย็นเหลวจะเข้าสู่เครื่องระเหยผ่านทางวาล์วควบคุมการไหลของสารทำความเย็นหรือวาล์วขยายตัวที่ทำให้สารทำความเย็นเหลวปรับลดความดันลงอย่างรวดเร็ว เป็นผลให้สารทำความเย็นบางส่วนกลายเป็นไอผสมอยู่กับสารเหลวก่อนเข้าเครื่องระเหย จากนั้นเมื่อเข้าสู่เครื่องควบแน่นสารทำความเย็นจะดูดซับความร้อนจากพื้นที่ที่ต้องการทำความเย็นเข้ามา ซึ่งทำให้สารทำความเย็นเดือดกลายเป็นไอเพิ่มขึ้นๆ ตามระยะทางที่ผ่านไปในเครื่องระเหยจนกระทั่งเป็นไออิ่มตัวเมื่อผ่านเครื่องระเหย และเป็นไอร้อนยิ่งยวดเมื่อได้รับความร้อนมากขึ้น จากนั้นไอที่ได้จะไหลไปตามท่อทางดูดเข้าสู่เครื่องอัดต่อไป รูปที่ 5.32 แสดงลักษณะการเกิดกระบวนการระเหย

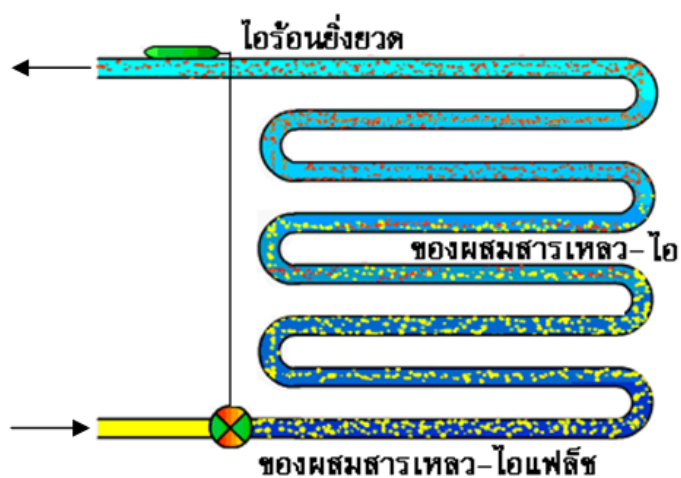


รูปที่ 5.32 กระบวนการระเหย

5.4.2 ชนิดของเครื่องระเหย

การสร้างเครื่องระเหยนั้นโดยทั่วไปใช้โลหะ เช่น เหล็ก ทองแดง หรือ อะลูมิเนียม เป็นต้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน สถานที่ที่ติดตั้ง และสิ่งของที่จะนำมาเป็นภาระการทำความเย็น สำหรับการแบ่งชนิดของเครื่องระเหยสามารถแบ่งได้เป็นหลายลักษณะ เช่น การแบ่งตามลักษณะตัวกลางของไหลที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนให้กับสารทำความเย็น โดยแบ่งเป็นแบบใช้อากาศเป็นสารตัวกลางและใช้น้ำหรือของเหลวชนิดอื่นเป็นสารตัวกลาง หรือการแบ่งตามลักษณะการทำงาน ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิด คือ แบบแห้ง (Dry expansion) แบบท่วม และแบบป้อนสารทำความเย็นเหลวเกินพิกัด (Liquid overfeed evaporator)

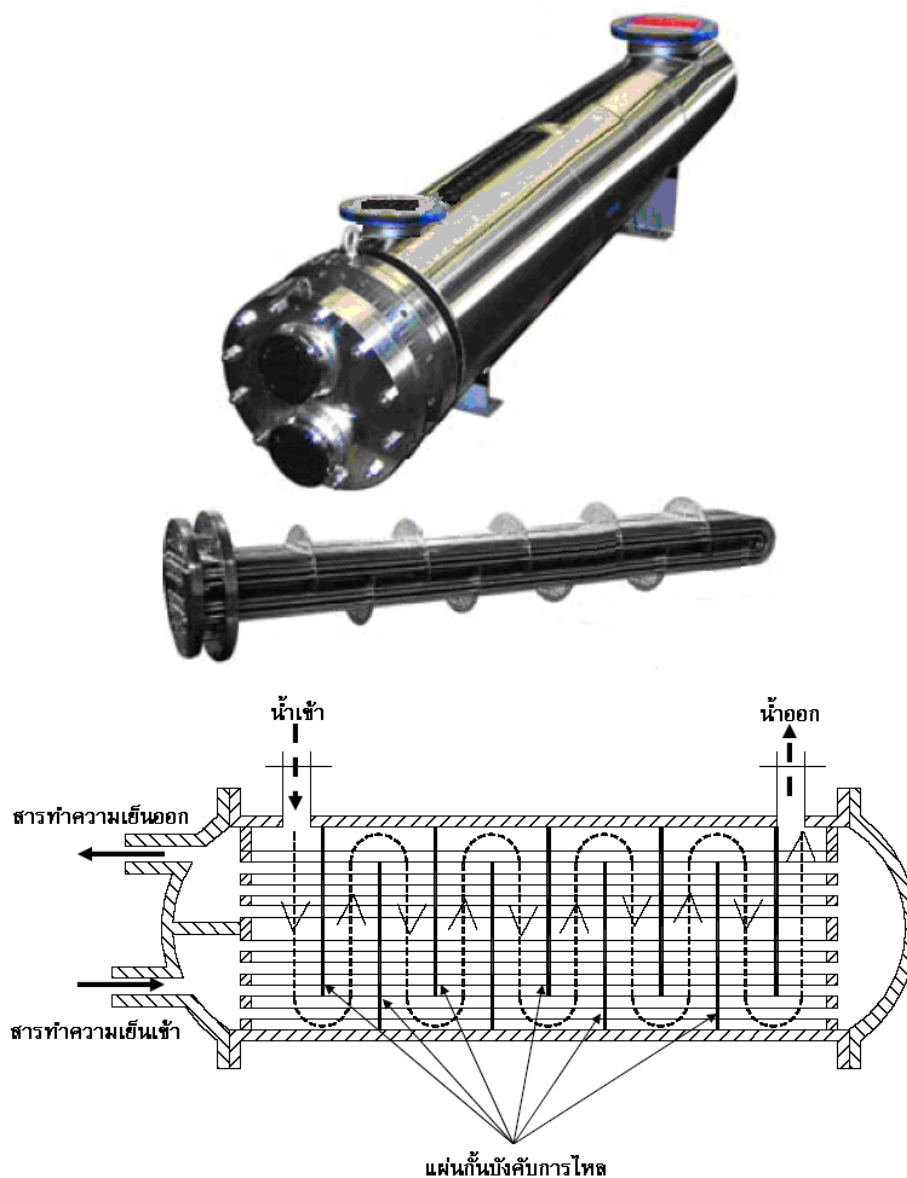
5.4.2.1 เครื่องระเหยแบบแห้ง เป็นเครื่องระเหยที่มีการป้อนสารความเย็นเข้าชุดท่อของเครื่องระเหยด้วยปริมาณที่จำกัดเท่าที่จำเป็นในการกลายเป็นไอเท่าที่ถูกต้องเข้าเครื่องอัดเท่านั้นดังแสดงในรูปที่ 5.33 ซึ่งจะเห็นว่าเครื่องระเหยแบบนี้ สารทำความเย็นที่เป็นของเหลวจะผ่านตลอดจนกระทั่งเป็นไอ โดยไม่มีการแยกแหว่งสารทำความเย็นที่เป็นของเหลวและไอ ส่วนรูปที่ 5.34 แสดงรูปร่างภายนอกและการเรียงตัวของชุดท่อของเครื่องระเหยแบบใช้อากาศเป็นสารตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนให้กับสารทำความเย็น สำหรับรูปที่ 5.35 แสดงรูปแบบของเครื่องระเหยแบบใช้น้ำหรือของเหลวชนิดอื่นเป็นสารตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนให้กับสารทำความเย็น



รูปที่ 5.33 การกลายเป็นไอในเครื่องระเหยแบบแห้ง

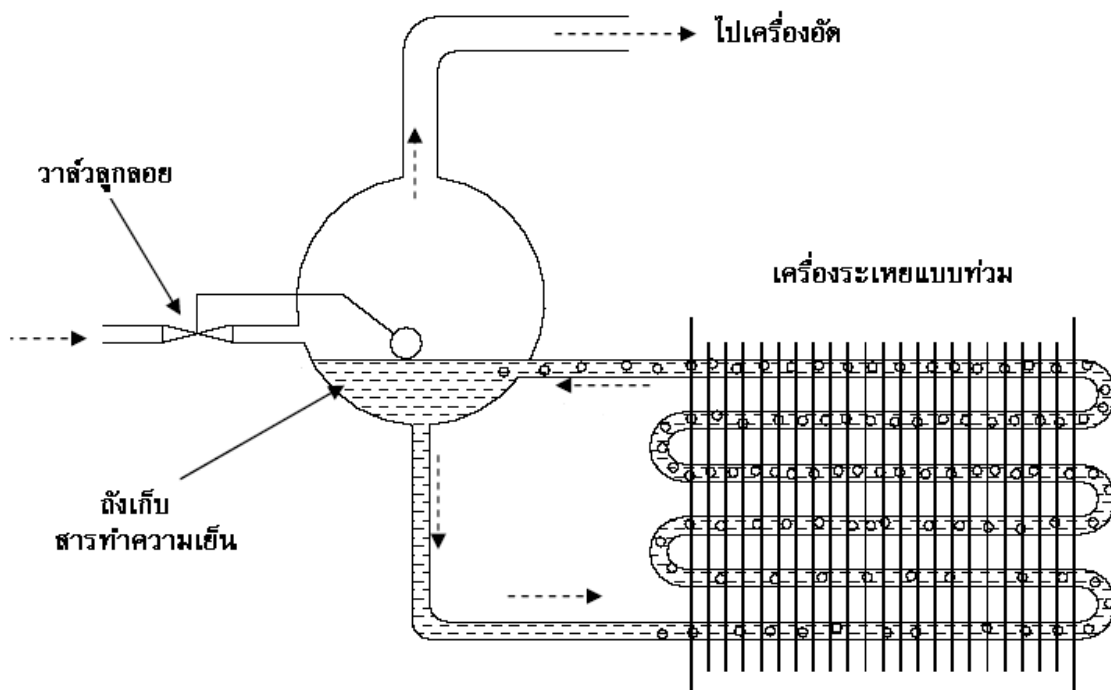


รูปที่ 5.34 รูปร่างภายนอกและการเรียงตัวของชุดท่อของเครื่องระเหยแบบแห้ง

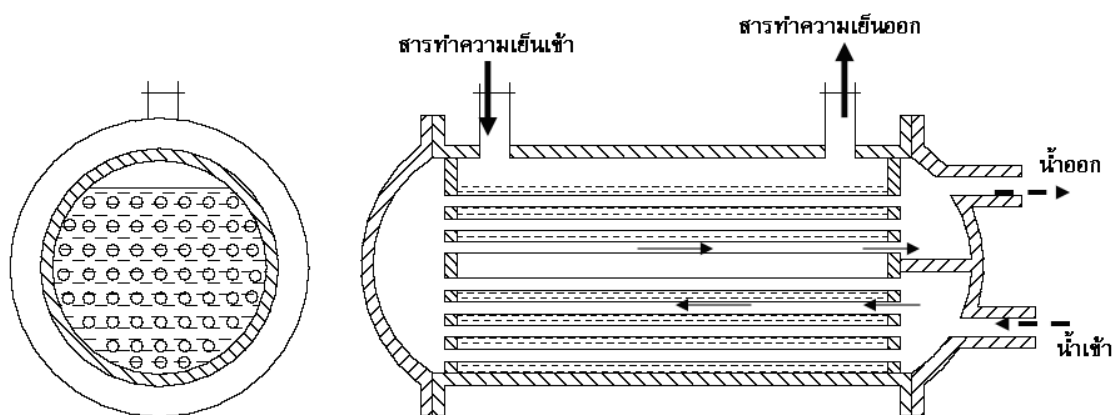


รูปที่ 5.35 รูปร่างภายนอก (รูปบน) ลักษณะของขดท่อ (รูปกลาง) และการไหล (รูปล่าง)
ของเครื่องระเหยแบบแห้งที่ใช้น้ำเป็นสารตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน

5.4.2.2 เครื่องระเหยแบบท่วม ลักษณะของเครื่องระเหยแบบนี้จะมีถังทำความเย็นเป็นแหล่งจ่ายสารทำความเย็นโดยใช้แรงโน้มถ่วงของโลกให้กับขดท่อ ระดับของเหลวในถังจะถูกควบคุมโดยด้านความดันต่ำหรือสูงก็ได้ และไอของสารทำความเย็นที่มาจากขดท่อจะถูกแยกอยู่ส่วนบนของถังเก็บ และถูกดูดออกไปเข้าเครื่องอัด ดังรูปที่ 5.36 ที่แสดงการติดตั้งเครื่องระเหยแบบท่วมในระบบการทำ ความเย็น ทั้งนี้สามารถใช้อากาศเป็นสารตัวกลาง หรือใช้น้ำหรือของเหลวชนิดอื่นเป็นสารตัวกลาง ตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนให้กับสารทำความเย็นได้เช่นเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.37 เป็นรูปแบบของเครื่องที่ใช้น้ำเป็นสารตัวกลาง



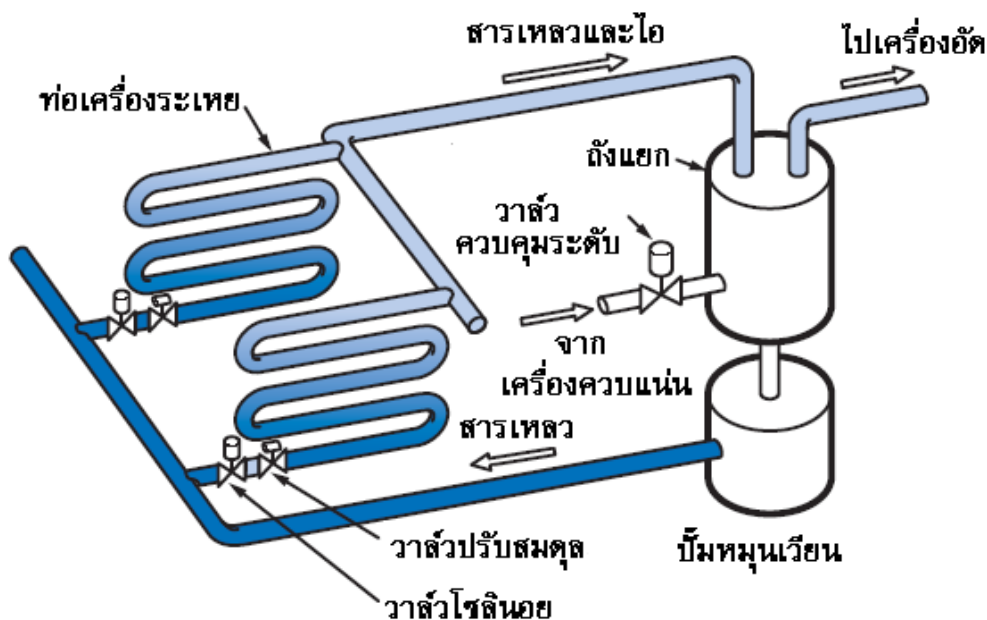
รูปที่ 5.36 เครื่องระเหยแบบท่อมที่ใช้อากาศเป็นสารตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน



รูปที่ 5.37 เครื่องระเหยแบบท่อมที่ใช้น้ำเป็นสารตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน

5.4.2.3 เครื่องระเหยแบบป้อนสารทำความเย็นเหลวเกินพิกัด เครื่องระเหยแบบนี้สารทำความเย็นจะถูกป้อนให้ชดท่อมมากกว่าที่สารจะสามารถระเหยเป็นไอหมดซึ่งส่วนที่ยังไม่ระเหยจะไหลเวียนในชดท่อมต่อไป ส่วนไอจะถูกดูดเข้าเครื่องอัด ระบบแบบป้อนสารทำความเย็นเหลวเกินพิกัดนี้ส่วนใหญ่นิยมใช้กับระบบที่มีเครื่องระเหยหลายๆ ชุดดังรูปที่ 5.38 เนื่องจากจะมีปัญหาในการแบ่งสารทำความเย็นในแต่ละชดท่อม แต่จะลดปัญหาได้ ถ้าเพิ่มอัตราการไหลให้ ทั้งนี้สามารถใช้อากาศเป็นสาร

ตัวกลาง หรือใช้น้ำหรือของเหลวชนิดอื่นเป็นสารตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนให้กับสารทำความเย็นได้ เช่นเดียวกัน



รูปที่ 5.38 เครื่องระเหยแบบป้อนสารทำความเย็นเหลวเกินฟีกัด

5.4.3 ขีดความสามารถของเครื่องระเหย

ขีดความสามารถของเครื่องระเหย คืออัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังเครื่องระเหยจากบริเวณหรือผลิตภัณฑ์ที่ต้องการทำความเย็นให้กับสารทำความเย็น ขีดความสามารถของเครื่องจึงต้องเพียงพอกับการทำความเย็นตามที่ต้องการ

การหาขีดความสามารถของขดท่อเครื่องระเหยอาศัยกฎของอุณหพลศาสตร์ที่กล่าวว่า ความร้อนจะไหลจากสิ่งที่มีอุณหภูมิสูงกว่าไปยังสิ่งที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า กรณีของเครื่องระเหยการถ่ายเทความร้อนมีผลสืบเนื่องมาจาก

- 1) พื้นที่ผิวของขดท่อเครื่องระเหย
- 2) อุณหภูมิแตกต่างระหว่างภายนอกท่อและภายในท่อ (TD) ของเครื่องระเหย
- 3) ความหนาของวัสดุที่ใช้ทำท่อเครื่องระเหย ทั้งนี้วัสดุที่ใช้ทำท่อต้องมีความสามารถเป็นสื่อความร้อนได้ดี
- 4) เวลาที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อน

ดังนั้นขีดความสามารถของเครื่องระเหย คืออัตราการถ่ายเทความร้อนจากกระแสอากาศผ่านผนังท่อสู่สารทำความเย็น กรณีใช้อากาศเป็นสารตัวกลาง และ คืออัตราการถ่ายเทความร้อนจากน้ำหรือของเหลวชนิดอื่นผ่านผนังท่อสู่สารทำความเย็น กรณีใช้น้ำหรือของเหลวชนิดอื่นเป็นสารตัวกลาง ซึ่งสามารถคำนวณจากสมการดังนี้

$$Q = A \times U \times TD \quad (5.20)$$

เมื่อ Q = อัตราการถ่ายเทความร้อน, W

A = พื้นที่ผิวภายนอกทั้งหมดของท่อ, m^2

U = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม, $W/m^2 \cdot K$

TD = ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยเชิงลอการิทึม (Logarithmic mean temperature difference: LMTD) ระหว่างอุณหภูมิกระแสน้ำกับสารภายในท่อ, K

การคำนวณหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall conductance factor)

หรือค่าตัวประกอบ U โดยทั่วไปอาศัยหลักการถ่ายเทความร้อนที่เข้าสู่เครื่องระเหยซึ่งมีด้วยกัน 3 รูปแบบ คือ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน อย่างไรก็ตาม การแผ่รังสีความร้อนที่จะเข้าสู่ท่อของเครื่องระเหยมีค่าน้อยมากไม่ต้องนำมาพิจารณาได้ ดังนั้นความร้อนที่ผ่านผนังท่อจะเป็นแบบการนำความร้อนและการพาความร้อน ทำให้การคำนวณหา U สามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$\frac{1}{U} = \frac{R}{f_i} + \frac{L}{K} + \frac{1}{f_o} \quad (5.21)$$

เมื่อ R = อัตราส่วนพื้นที่ผิวภายนอกต่อพื้นที่ผิวภายใน

f_i = สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของฟิล์มของพื้นผิวในท่อ, $W/m^2 \cdot K$

L/K = ความต้านทานต่อการถ่ายเทความร้อนของโลหะที่ทำท่อหรือครีป, $W/m^2 \cdot K$

f_o = สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของฟิล์มของพื้นผิวนอกท่อ, $W/m^2 \cdot K$

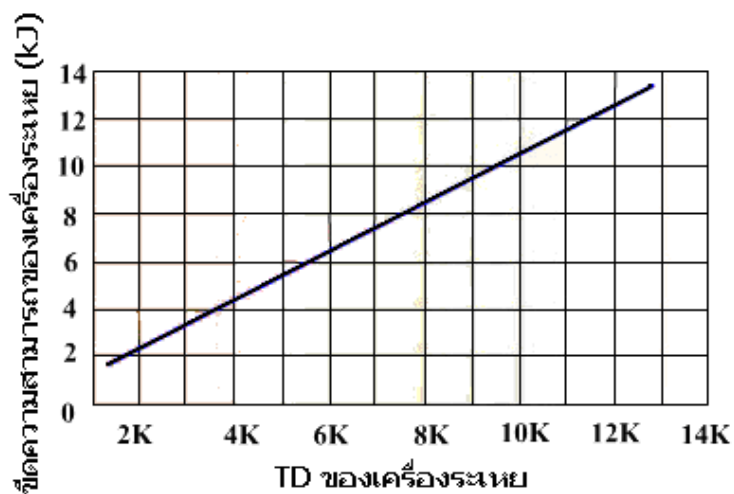
โดยทั่วไปค่า U ขึ้นอยู่กับโครงสร้างและโลหะที่ใช้ทำท่อ รวมถึงพื้นที่ผิวในท่อที่เปียกและความเร็วในการพาความร้อนของสารทำความเย็นและสารตัวกลาง ดังนั้นควรใช้โลหะที่มาทำท่อที่มีค่าสภาพการนำความร้อน (K) มากๆ แต่ไม่ทำปฏิกิริยากับสารทำความเย็น อย่างไรก็ตาม เนื่องจากมีความยุ่งยากในการหาค่าต่างๆ ในทางปฏิบัติ สามารถใช้ค่า U จากค่าโดยประมาณ ดังนี้

กรณีเครื่องระเหยที่ใช้อากาศเป็นตัวกลางและไม่มีพัดลมเป่า ค่า $U = 6 \text{ W/m}^2 \cdot K$

กรณีเครื่องระเหยที่ใช้อากาศเป็นตัวกลางและมีพัดลมเป่า ค่า $U = 17 \text{ W/m}^2 \cdot K$

กรณีเครื่องระเหยที่ใช้น้ำเป็นตัวกลาง ค่า $U = 85 \text{ W/m}^2 \cdot K$

สำหรับการหาค่าผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยเชิงลอการิทึม (TD) ของเครื่องระเหยซึ่งเป็นตัวแปรหนึ่งที่สำคัญมากตัวหนึ่งในการเลือกใช้เครื่องระเหย ทั้งนี้ TD ของเครื่องระเหย หมายถึง ความแตกต่างของอุณหภูมิของสารตัวกลางที่เข้าเครื่องระเหย (เช่น อุณหภูมิของห้องที่ต้องการทำความเย็น) กับอุณหภูมิกับสารทำความเย็น โดยพบว่าขีดความสามารถจะแปรผันโดยตรงกับ TD ของเครื่องระเหย ดังแสดงในรูปที่ 5.39 เมื่อตัวแปรอื่นๆ คงที่ สำหรับการหาค่า TD สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้



รูปที่ 5.39 การแปรเปลี่ยนขีดความสามารถของเครื่องระเหยตามค่า TD

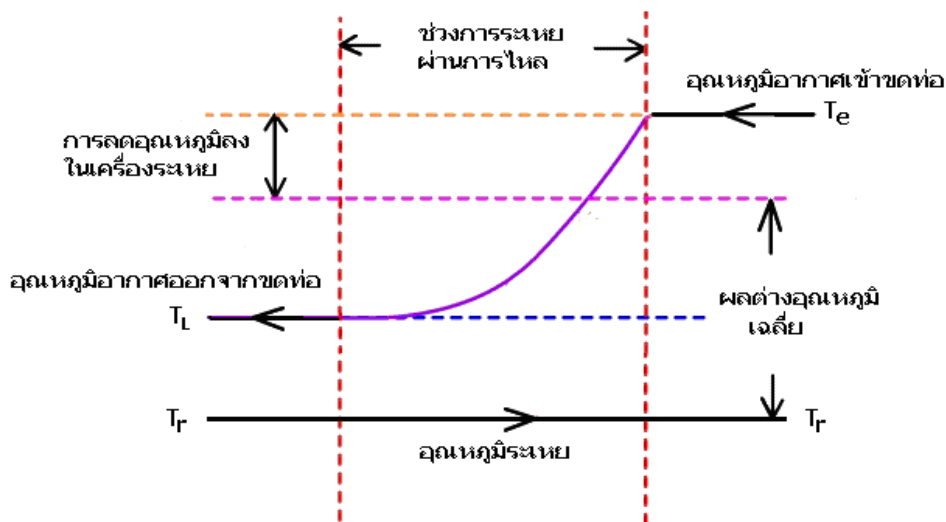
$$TD = (T_e - T_r) + (T_L - T_r) / \ln [(T_e - T_r) / (T_L - T_r)] \tag{5.22}$$

เมื่อ T_e = อุณหภูมิของอากาศที่เข้าขดท่อ, °C (K)

T_L = อุณหภูมิของอากาศที่ออกจากขดท่อ, °C (K)

T_r = อุณหภูมิของสารทำความเย็นขณะควบแน่นในขดท่อ, °C (K)

(ดูรูปที่ 5.40 ประกอบ)



รูปที่ 5.40 เส้นกราฟของอุณหภูมิที่ลดลงของอากาศในเครื่องระเหย

นอกจากนี้ผลของความชื้นมีผลต่อค่า TD เนื่องจากการรักษาลักษณะที่ให้อยู่ในสภาพที่ดีด้วยการทำให้เย็นนั้น ไม่ได้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ต่ำเท่านั้นแต่ยังขึ้นอยู่กับความชื้นในขดท่อทำความเย็นด้วย พบว่าถ้าความชื้นต่ำเกินไปความชื้นในผลิตภัณฑ์จะระเหยออกมา แต่ถ้าความชื้นมากเกินไปจะทำให้เกิดเชื้อแบคทีเรียหรือเกิดเป็นเมือกขึ้นที่ขดท่อทำความเย็น

ตัวแปรที่สำคัญที่สุดในการควบคุมความชื้นในชดท่ทำความเย็น คือ TD ของเครื่องระเหย ทั้งนี้ค่า TD ยิ่งมากความชื้นยิ่งน้อย นอกจากนี้ตัวแปรอื่นที่มีผลต่อความชื้น ได้แก่ การเคลื่อนที่ของอากาศในพื้นที่ทำความเย็น การตั้งเวลาละลายน้ำแข็ง รูปแบบของระบบควบคุม พื้นที่ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ที่สัมผัสอากาศ อัตราการรั่วไหลและสภาพของอากาศภายนอก ผลจากตัวแปรต่างๆ ดังกล่าว ทำให้การเลือกใช้งานเครื่องระเหยต้องคำนึงถึงค่า TD ว่าเหมาะสมกับการใช้งาน หรือไม่ ตารางที่ 5.4 แสดงค่า TD ในการออกแบบเครื่องระเหยเทียบกับความชื้นและการไหลเวียนของกระแสอากาศว่าเป็น การพาแบบธรรมชาติหรือแบบบังคับที่ใช้อุปกรณ์ช่วยพัดพา เช่น พัดลม

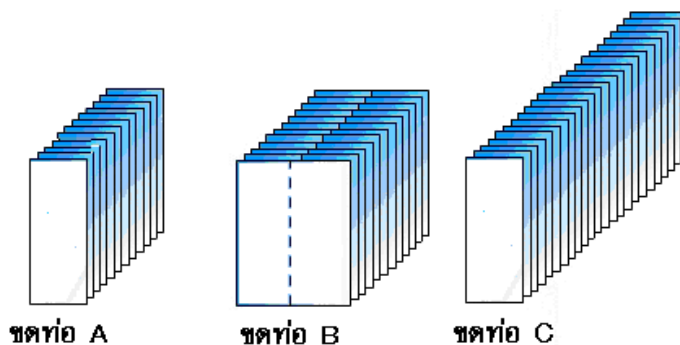
ตารางที่ 5.4 ค่า TD ในการออกแบบเครื่องระเหย

ความชื้นสัมพัทธ์ %	TD ในการออกแบบ, °C	
	การพาแบบธรรมชาติ	การพาแบบบังคับ
95 – 91	7	5
90 – 86	8	6
85 – 81	9	7
80 – 76	10	8
75 – 70	11	9
65 – 60	12	10

5.4.4 การเลือกใช้งานเครื่องระเหย

พื้นที่ผิวภายนอกของชดท่เครื่องระเหยเป็นปัจจัยหนึ่งในการเลือกใช้งานเครื่องระเหย ซึ่งในการพิจารณาค่าพื้นที่ผิวภายนอกของชดท่เครื่องระเหยนั้นต้องระมัดระวังในการพิจารณา เช่น พื้นที่ของครีบ พื้นที่ผิวภายนอกของชดท่เครื่องระเหย (อาจตัดทิ้งถ้าเป็นชุดเดียวกับครีบ) และพื้นที่ผิวภายนอกของท่อที่ตัด

จากสมการของการถ่ายเทความร้อน (สมการ 5.20) ถ้าค่า U และ TD คงที่แล้ว การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวภายนอกมีค่ามากขึ้น อย่างไรก็ตาม พบว่าเมื่อพื้นที่ผิวภายนอกเปลี่ยนแปลง ค่า U และ TD จะเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย นอกจากนี้ พบว่าการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ผิวภายนอกอย่างเดียวไม่ได้บ่งบอกว่า สรรณะของชดท่จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างเด่นชัด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเร็วตัวตามชดท่ด้วย ดังแสดงในรูปที่ 5.41 ซึ่งพบว่าประสิทธิภาพของชดท่ C มีค่ามากกว่าชดท่ B ซึ่งทั้งสองแบบมีประสิทธิภาพที่สูงกว่า A ถ้าความเร็วลมเท่ากัน เนื่องจาก ค่า TD ของชดท่ A และ C จะเท่ากัน ทำให้ชดท่ C จะมีประสิทธิภาพเป็นสองเท่าของ A แต่ลักษณะของชดท่ B พบว่า ค่า TD ลดลง ดังนั้นประสิทธิภาพจะไม่เท่ากับที่ชดท่ C



รูปที่ 5.41 ชุดท่อ B และ C มีพื้นที่เป็นสองเท่าของชุดท่อ A

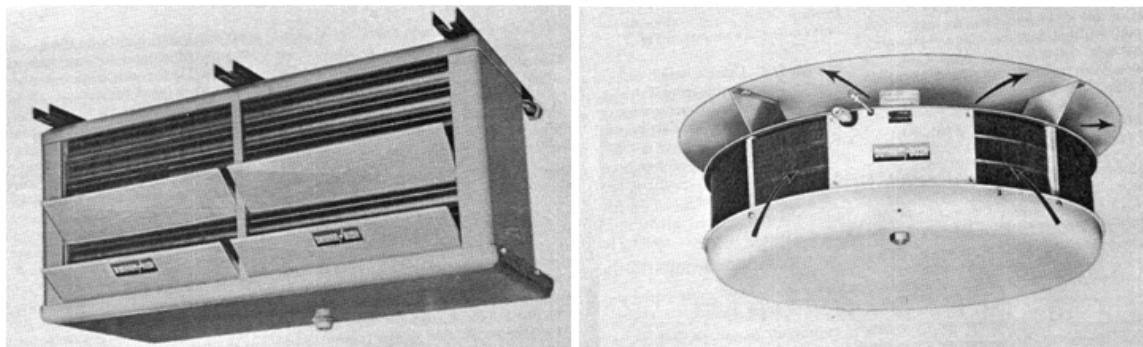
ทั้งนี้ชุดท่อ C มีประสิทธิภาพที่สูงกว่าชุดท่อ A และชุดท่อ B

นอกจากนี้พื้นที่ผิวหน้าของเครื่องระเหยซึ่งคือ พื้นที่หน้าตัดของเครื่องระเหย มีผลต่อการกำหนดขนาดของเครื่องระเหยด้วย โดยเฉพาะเครื่องระเหยที่มีรูปแบบการพาแบบบังคับซึ่งโดยทั่วไปเรียกว่า แฟนคอยล์ยูนิต (Fan coil unit) โดยมีลักษณะเป็นชุดท่อมีครีบกั้นกันไปมา ดังแสดงในรูปที่ 5.42 การติดตั้งอาจติดตั้งกับฝ้าเพดานสำหรับเครื่องขนาดเล็ก หรือติดตั้งกับพื้นห้องสำหรับเครื่องขนาดใหญ่ การทำงานอาจเป็นแบบแห้งหรือแบบท่วมก็ได้ สำหรับตำแหน่งในการติดตั้ง กรณีติดตั้งกับฝ้าเพดานแนะนำให้จัดวาง ดังแสดงในรูปที่ 5.43 ทั้งนี้ขีดความสามารถในการทำความเย็นรวมขึ้นอยู่กัปริมาณอากาศที่ไหลเวียนผ่านชุดท่อ โดยปริมาณอากาศที่ต้องการขึ้นอยู่กับปัจจัยสำคัญ 2 ประการ คือ สัดส่วนความร้อนสัมผัส และการลดลงของอุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านชุดท่อ นั่นคือ

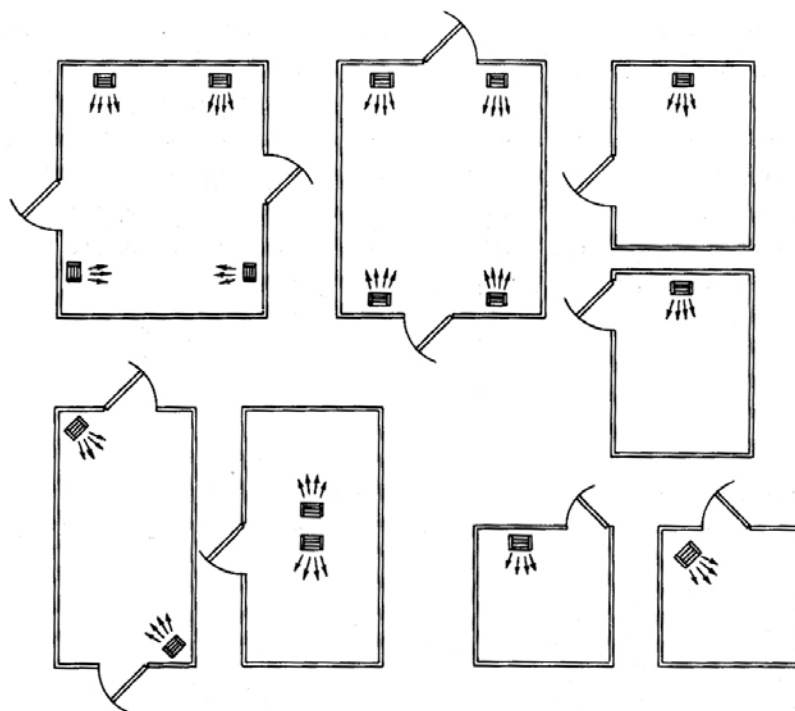
$$\begin{aligned} & \text{ปริมาตรการไหล (m}^3/\text{s)} \\ &= \frac{0.83 \times \text{ความสามารถการทำความเย็น (kW)} \times \text{สัดส่วนความร้อนสัมผัส}}{\text{การลดลงของอุณหภูมิของอากาศ}} \end{aligned} \quad (5.23)$$

ทั้งนี้สัดส่วนความร้อนสัมผัสโดยเฉลี่ยของเครื่องระเหยมีค่าเท่ากับ 0.8 สำหรับปริมาณอากาศออกแบบจะอยู่ในช่วงปริมาตรการไหลเท่ากับ 0.5 m³/s ในเครื่องความเร็วต่ำ และ เท่ากับ 1.25 m³/s ในเครื่องความเร็วสูงที่ใช้ลดอุณหภูมิผลิตภัณฑ์ลงอย่างรวดเร็ว (Blast) อย่างไรก็ตาม ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านชุดท่อ (m/s) เป็นฟังก์ชันของปริมาณอากาศ (m³/s) และพื้นที่ผิวหน้าของเครื่องระเหย (m²) นั่นคือ

$$\text{ความเร็วของอากาศ (m/s)} = \frac{\text{ปริมาตรการไหลของอากาศ (m}^3/\text{s)}}{\text{พื้นที่ผิวหน้า (m}^2\text{)}} \quad (5.24)$$



รูปที่ 5.42 รูปแบบเครื่องระเหยการพาแบบบังคับโดยทั่วไป



รูปที่ 5.43 ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องระเหยชนิดการพาแบบบังคับ กรณีติดตั้งกับฝ้าเพดาน

ตัวอย่าง 5.11 จงหาการลดลงของอุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านขดท่อสำหรับเครื่องระเหยขนาด 10 ตัน ความเย็น ถ้าปริมาตรการไหลของอากาศที่ไหลผ่านขดท่อ เท่ากับ $1.25 \text{ m}^3/\text{s}$

วิธีทำ

สัดส่วนความร้อนสัมผัสโดยเฉลี่ยของเครื่องระเหยมีค่าเท่ากับ 0.8 และเครื่องระเหยขนาด 1 ตันความเย็นมีค่าเท่ากับ 3.516 kW

ดังนั้น

$$\text{อุณหภูมิของอากาศที่ลดลง} = \frac{0.83 \times 3.516 \text{ kW} \times 0.8}{1.25 \text{ m}^3/\text{s}} = 1.87^\circ\text{C}$$

ตอบ

ตัวอย่าง 5.12 จงหาพื้นที่ผิวหน้าของขดท่อที่ต้องการสำหรับเครื่องระเหยที่ใช้ลดอุณหภูมิผลิตภัณฑ์ลงอย่างรวดเร็ว ถ้าความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านขดท่อมี่ค่าเท่ากับ 2 m/s

วิธีทำ

ในเครื่องความเร็วสูงที่ใช้ลดอุณหภูมิผลิตภัณฑ์ลงอย่างรวดเร็ว (Blast) ปริมาตรการไหลเท่ากับ 1.25 m³/s

ดังนั้น

$$\text{พื้นที่ผิวหน้าที่ต้องการ} = \frac{1.25 \text{ m}^3 / \text{s}}{2 \text{ m/s}} = 0.625 \text{ m}^2 \quad \text{ตอบ}$$

การเลือกเครื่องระเหยจากรายการของบริษัทผู้ผลิต

เนื่องจากมีปัจจัยหลายประการที่เกี่ยวข้องในการออกแบบเครื่องระเหย ดังนั้นบริษัทผู้ผลิตเครื่องระเหยจึงมักกำหนดสภาวะการออกแบบในหลายปัจจัยให้คงที่ในการผลิตเครื่องระเหยให้ลูกค้าเลือกใช้งาน เช่น ปริมาณและความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านขดท่อ อัตราการป้อนสารทำความเย็น ช่วงอุณหภูมิการทำงาน และอื่นๆ ดังตัวอย่างรายการเครื่องระเหยของบริษัทผู้ผลิตแห่งหนึ่ง ตามตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 ตัวอย่างรายการเครื่องระเหยแบบแพนคอยล์ชนิดของบริษัทผู้ผลิตแห่งหนึ่ง

รุ่น	อัตราการทำความเย็น (W)		พ.ท.ผิวภายนอก (m ²)	มอเตอร์		พัคลม		
	5°C TD	7.5°C TD		HP	ความร้อน kJ/24 hr	ขนาด (mm)	rpm	m ³ /s
E25	2,500	3,750	24	1/12	13,350	4,800	1,140	0.7
E31	3,100	4,650	30	1/6	15,100	5,200	1,140	0.8
E35	3,500	5,250	34	(2)1/20	18,000	(2) 4,200	1,140	0.9
E53	5,300	7,950	51	(2)1/12	25,200	(2) 4,800	1,140	1.2
E70	7,000	10,500	68	(2)1/6	34,000	(2) 5,200	1,140	1.9
E94	9,400	14,100	93	(2)1/4	75,000	(2) 6,600	1,140	2.9

ตัวอย่าง 5.13 จงเลือกเครื่องระเหยที่ใช้ในการทำความเย็นผลิตภัณฑ์ที่มีภาระการทำความเย็น 13,000 W ด้วยชั่วโมงการทำงานเท่ากับ 16 ชั่วโมง ถ้า TD มีค่าเท่ากับ 7.5°C

วิธีทำ

จากตารางที่ 5.5 เลือกเครื่องระเหยรุ่น E94 สำหรับค่า TD เท่ากับ 7.5°C โดยมีอัตราการทำความเย็นเท่ากับ 14,100 W อย่างไรก็ตาม เนื่องจากเครื่องระเหยรุ่นดังกล่าวมีการทำงานของมอเตอร์

พดลด้วย ดังนั้นจึงต้องคิดภาระความร้อนจากมอเตอร์เพิ่มเข้าไปด้วยในภาระการทำความเย็น จำนวน 75,000 kJ/24 hr แต่เนื่องจากมีชั่วโมงการทำงานเท่ากับ 16 ชั่วโมง ดังนั้นภาระความร้อนจากมอเตอร์มีค่าเท่ากับ $(75,000 \text{ kJ}/24 \text{ hr})/16 \text{ hr} = 4687.5 \text{ kJ/hr} = 1,302 \text{ W}$

$$\begin{aligned} & \text{เมื่อรวมภาระความร้อนจากมอเตอร์เข้ากับภาระการทำความเย็นเดิมได้} \\ & = 13,000 + 1,302 = 14,302 \text{ W} \end{aligned}$$

ตอบ

ถึงแม้ว่าค่าที่ได้มีค่ามากกว่าค่าขีดความสามารถของเครื่องระเหยรุ่นที่เลือก แต่มีค่าสูงกว่าเล็กน้อยถือว่ายังใช้ได้

5.5 อุปกรณ์ส่วนควบ

อุปกรณ์ส่วนควบ ได้แก่ ท่อทางดูด ตัวกรองและตัวลดความชื้นทางส่ง วาล์วด้านความดันต่ำของเครื่องอัดหรือวาล์วบริการทางดูด วาล์วด้านความดันสูงของเครื่องอัดหรือวาล์วบริการทางส่ง เครื่องแยกน้ำมัน ถังพักสารทำความเย็น ท่อส่งสารทำความเย็นเหลว ตัวกรองและตัวลดความชื้นในท่อส่งสารทำความเย็นเหลว กระจเปาะหรือที่เก็บสารทำความเย็นทางดูด และอุปกรณ์ควบคุมมอเตอร์

5.5.1 ท่อทางดูด

ท่อทางดูด คือท่อที่ใช้เป็นตัวกลางในการขนถ่ายไอสารทำความเย็นจากเครื่องระเหยสู่เครื่องอัด เนื่องจากสารทำความเย็นในสถานะไอมีปริมาตรมากกว่าสารทำความเย็นในสถานะของเหลวมาก ดังนั้นขนาดท่อต้องมีขนาดโตเพียงพอที่จะให้ไอสารทำความเย็นไหลผ่านได้โดยมีความต้านทานการไหลต่ำ นอกจากนี้ท่อควรจัดวางจากเครื่องระเหยหรือกระจเปาะเก็บสารทำความเย็นทางดูดสู่เครื่องอัดให้มีลักษณะเอียงลง เพื่อป้องกันไม่ให้หยดน้ำมันหล่อลื่นสะสมอยู่ตามท่อได้

ในการติดตั้งท่อทางดูดอาจนำมาจัดวางทาบติดไปกับท่อสารทำความเย็นเหลว อาจตลอดทั้งความยาวท่อหรือเพียงบางส่วน เพื่อช่วยให้สารทำความเย็นเหลวเย็นลงเป็นการลดการเกิดไอแฟลชของสารทำความเย็นในเครื่องระเหย นอกจากนี้ยังเป็นการเพิ่มสภาวะไอร้อนยิ่งยวดให้กับไอสารทำความเย็นที่เข้าสู่เครื่องอัดด้วย

5.5.2 ตัวกรองและตัวลดความชื้นทางส่ง

ตัวกรองและตัวลดความชื้นทางส่งเป็นตัวกรองและตัวลดความชื้นด้านความดันต่ำซึ่งบางระบบมีติดตั้งในเครื่องอัดที่ต่อกับท่อทางดูด แต่ในบางระบบอาจติดตั้งแยกออกมา ลักษณะของตัวกรองและตัวลดความชื้นควรมีลักษณะที่ต้านทานต่อการไหลของไอสารทำความเย็นต่ำ มีค่าความดันลดคร่อมต่ำด้วย

5.5.3 วาล์วด้านความดันต่ำของเครื่องอัดหรือวาล์วบริการทางดูด

ในระบบส่วนใหญ่จะมีวาล์วบริการ (Service valve) เพื่อใช้ในการเชื่อมต่อมาตรวัดกับระบบในการตรวจสอบความดัน และการเพิ่มหรือถ่ายสารทำความเย็นหรือน้ำมันหล่อลื่นเข้า-ออกระบบ

5.5.4 วาล์วบริการด้านทางดูดของเครื่องอัด

วาล์วชนิดนี้ถือเป็นวาล์วที่ใช้ในการเชื่อมต่อกับเครื่องอัด ณ ข้อต่อ (Union) ด้านทางเข้าของเครื่องอัด ปกติหากยังไม่ได้ใช้งานจะมีฝาครอบชั้นปิดช่องและก้านวาล์วไว้ อย่างไรก็ตามในกระบวนการทำความเย็นรุ่นใหม่ ๆ ไม่ค่อยมีการติดตั้งวาล์วบริการ ให้ใช้วาล์วแซดเดิล (Saddle valve) แทน

5.5.5 วาล์วด้านความดันสูงของเครื่องอัดหรือวาล์วบริการทางส่ง

วาล์วชนิดนี้เป็นวาล์วที่ใช้สำหรับปิดกั้นระหว่างเครื่องอัดกับเครื่องควบแน่นเมื่อต้องการซ่อมบำรุงระบบ เนื่องจากหากปิดวาล์วสามารถถอดเครื่องอัดออกมาได้โดยที่สารทำความเย็นไม่รั่วไหลออกมา นอกจากนี้ยังเป็นวาล์วสำหรับต่อกับมาตรวัดความดันสูงได้อีกด้วย

5.5.6 เครื่องแยกน้ำมัน

ในเครื่องอัดสารทำความเย็นจำเป็นต้องมีการหล่อลื่นด้วยน้ำมันหล่อลื่น ซึ่งสามารถเข้ากันได้กับสารทำความเย็นที่ใช้เป็นตัวกลางในการทำความเย็น น้ำมันหล่อลื่นนี้บรรจุอยู่ในอ่างน้ำมันภายในเครื่องอัดเพื่อนำมาใช้ไหลเวียนไปตามชิ้นส่วนต่างๆ ของเครื่องอัดในการลดแรงเสียดทานและช่วยในการระบายความร้อนของเครื่องอัด ในระบบการทำความเย็นขนาดเล็กเครื่องอัดและมอเตอร์เป็นระบบปิดที่รวมมอเตอร์อยู่ภายในเครื่องเดียวและปิดสนิทกับอากาศเข้า น้ำมันหล่อลื่นนี้จึงใช้ในการหล่อลื่นแบร์ริงของมอเตอร์ด้วย

เมื่อเครื่องอัดทำงาน น้ำมันหล่อลื่นจะถูกปั๊มเพื่อหล่อลื่นลูกสูบและชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ต่างๆ โดยบางส่วนจะผสมไปกับไอสารทำความเย็นที่ถูกอัดให้ร้อนด้วย น้ำมันหล่อลื่นที่ผสมไปกับสารทำความเย็นนี้หากมีปริมาณเล็กน้อยจะไม่ทำความเสียหายต่อระบบ แต่หากมีปริมาณมากเกินไปหากเข้าสู่เครื่องควบแน่น อุปกรณ์ควบคุมสารทำความเย็น เครื่องระเหย และตัวกรองจะทำให้การทำงานของอุปกรณ์เหล่านี้ลดประสิทธิภาพลง ดังนั้นหากเป็นไปได้จึงต้องมีการแยกน้ำมันหล่อลื่นนี้ออกจากสารทำความเย็นก่อนเข้าสู่เครื่องควบแน่น ทำให้โดยทั่วไปจึงมีการติดตั้งเครื่องแยกน้ำมันระหว่างทางออกของเครื่องอัดกับเครื่องควบแน่น รูปร่างของเครื่องแยกน้ำมันโดยทั่วไปมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอก ภายในบรรจุไว้ด้วยชุดแผงกั้น (Baffle) หรือตะแกรง (Screen) เพื่อขัดขวางการไหลของน้ำมัน สำหรับน้ำมันที่แยกตัวออกจากสารทำความเย็นจะตกลงด้านล่างของเครื่องแยก

การควบคุมการไหลของน้ำมันกลับเครื่องอัดโดยปกติใช้ลูกกลอยควบคุมการปิด-เปิดของวาล์วเข็ม (Needle valve) กล่าวคือเมื่อระดับของน้ำมันที่ด้านล่างเครื่องแยกสะสมถึงระดับที่สูงเพียงพอทำให้ลูกกลอยลอยขึ้นสูงและเปิดวาล์วเข็มซึ่งติดตั้งอยู่ด้านล่างลูกกลอย ความดันในเครื่องแยกที่มีความดันสูงกว่าความดันในอ่างน้ำมันหล่อลื่นบริเวณด้านล่างเครื่องอัดค่อนข้างมากทำให้น้ำมันในเครื่องแยกไหลกลับสู่อ่างน้ำมันด้านล่างเครื่องอัดอย่างรวดเร็ว และหากเครื่องแยกนี้มีประสิทธิภาพที่เหมาะสมจะทำให้มีน้ำมันหล่อลื่นปะปนเข้าสู่ระบบการทำความเย็นน้อยมาก เครื่องแยกน้ำมันนี้โดยทั่วไปมีใช้งานเป็นหลักในเครื่องทำความเย็นทางเชิงพาณิชย์ที่มีขนาดใหญ่

5.5.7 ถังพักสารทำความเย็นเหลว

ถังชนิดนี้เป็นถังที่ใช้ในการเก็บสารทำความเย็นเหลวเพื่อใช้แจกจ่ายให้กับอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบ รวมทั้งใช้เพื่อสำรองสารทำความเย็นไม่ให้มีปริมาณน้อยกว่าระดับวิกฤตของระบบ การติดตั้งถังพักสารทำความเย็นเหลวมักจัดวางให้อยู่ด้านล่างของเครื่องควบแน่น นอกจากนี้ส่วนใหญ่ถังพักสารทำความเย็นเหลวมักติดตั้งวาล์วบริการไว้ด้วย รูปร่างโดยทั่วไปมีรูปทรงกระบอกอาจมีลักษณะเป็นถังตั้งหรือถังนอนทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดและพื้นที่ติดตั้งเป็นสำคัญ สำหรับด้านทางออกของถังจะติดตั้งตะแกรงขดลวดทำด้วยทองแดงเพื่อป้องกันสิ่งสกปรกไม่ให้เข้าสู่วาล์วควบคุมสารทำความเย็น

ถังพักสารทำความเย็นเหลวมักพบในระบบซึ่งใช้การควบคุมสารทำความเย็นเป็นชนิดใช้ลูกลอยควบคุมการไหลด้านความดันต่ำหรือชนิดวาล์วขยายตัวซึ่งใช้งานเป็นหลักในเครื่องทำความเย็นทางอุตสาหกรรมที่มีขนาดใหญ่ สำหรับตู้เย็นตามบ้านและเครื่องทำความเย็นที่มีขนาดเล็กการควบคุมสารทำความเย็นเป็นชนิดใช้ท่อรูเล็กหรือท่อแคปิลเลอรีเป็นหลักและไม่มีถังพักสารทำความเย็นเหลวในระบบ ทั้งนี้ใช้กระเปาะหรือที่เก็บสารทำความเย็นทางดูดเป็นอุปกรณ์นิรภัยและใช้เครื่องระเหยทำหน้าที่เป็นถังพักสารทำความเย็นเหลวขณะระบบอยู่ในช่วงพักวัฏจักรการทำงาน

ในระบบเชิงพาณิชย์หรือทางอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ ถังพักสารทำความเย็นเป็นแหล่งจ่ายสารทำความเย็นหลักและต้องสามารถควบคุมให้สารทำความเย็นในเส้นทางสารทำความเย็นเหลวอยู่ในสถานะของเหลวอัดและในสภาพอุณหภูมิเย็นยิ่ง รวมทั้งไม่เกิดก๊าซแฟลช นอกจากนี้ถังพักสารทำความเย็นต้องมีปริมาตรที่เพียงพอต่อการรองรับสารทำความเย็นระหว่างช่วงปั๊มตัดการทำงานโดยอัตโนมัติในระหว่างการละลายน้ำแข็งเกาะ และเมื่อเครื่องควบแน่นบางเครื่องไม่ได้ใช้งาน (ในระบบที่มีหลายเครื่อง)

ในบางระบบที่มีเครื่องระเหยเป็นแบบระบายความร้อนด้วยอากาศและตั้งอยู่ภายนอก ถังพักสารทำความเย็นต้องออกแบบให้มีปริมาตรเพิ่มขึ้นเพื่อรองรับปริมาณสารทำความเย็นขณะที่เครื่องควบแน่นอยู่ในสถานะความดันต่ำมากด้วย มิฉะนั้นจะเกิดสถานะสารทำความเย็นเหลวบางส่วนท่วมเครื่องควบแน่น โดยไม่ยอมไหลผ่านเครื่องควบแน่นออกไป

5.5.8 ท่อส่งสารทำความเย็นเหลว

โดยทั่วไปท่อส่งสารทำความเย็นเหลวทำจากท่อทองแดงในการส่งผ่านสารทำความเย็นจากเครื่องควบแน่นสู่เครื่องระเหย อย่างไรก็ตาม ในตู้เย็นตามบ้านมักใช้ท่อเหล็กกล้า ท่อทางส่งปกติติดตั้งอยู่บริเวณด้านหลังของตู้เย็น หรืออาจวางซ่อนไว้ด้านหลังแถบเบรคเกอร์ที่ขอบประตูตู้ และดังได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อท่อทางดูด โดยทั่วไปมักจัดวางท่อส่งสารทำความเย็นเหลวนานไปกับท่อทางดูดเพื่อผลในการช่วยให้สารทำความเย็นเหลวเย็นลงเป็นการลดการเกิดไอแฟลช

ในการต่อท่อกับข้อต่อใช้การบัดกรีหรือการเชื่อมด้วยทองแดง นอกจากนี้ต้องหลีกเลี่ยงไม่ให้ท่อหักงอหรือถูกเจาะ รวมทั้งต้องป้องกันไม่ให้ท่อชำรุดและเสียหายจากการสั่นสะเทือนด้วย

5.5.9 ตัวกรองและตัวลดความชื้นในท่อส่งสารทำความเย็นเหลว

ในทางปฏิบัติมักติดตั้งตัวกรองและตัวลดความชื้นในท่อส่งสารทำความเย็นเหลว เพื่อป้องกันไม่ให้สิ่งสกปรกต่างๆ และความชื้นเข้าสู่อุปกรณ์ควบคุมการไหลของสารทำความเย็นหรือให้มีน้อยที่สุด เนื่องจากทำให้อุปกรณ์ควบคุมการไหลทำงานได้ไม่ดี โดยเฉพาะความชื้นอาจแข็งตัวอยู่ภายในได้ นอกจากนี้ความชื้นเมื่อรวมตัวเข้ากับน้ำมันหล่อลื่นและก่อตัวเป็นตะกอนและกรดสามารถทำความเสียหายกับอุปกรณ์อื่นๆ ในระบบได้ โดยเฉพาะชุดเครื่องอัดและมอเตอร์ สำหรับลักษณะของตัวกรองและตัวลดความชื้นมักมีช่องกระจกเพื่อใช้ตรวจสอบระดับสารทำความเย็นด้วย แต่จะมีในตัวกรองและตัวลดความชื้นบางแบบไม่มีในทุกแบบ ช่องกระจกของตัวกรองและตัวลดความชื้นบางแบบอาจสามารถเปลี่ยนสีหากมีความชื้นอยู่ภายในมากเกินไปกำหนดได้ด้วย

5.5.10 กระจเปาะหรือที่เก็บสารทำความเย็นทางดูด

อุปกรณ์ชนิดนี้ถือเป็นอุปกรณ์เพื่อความปลอดภัย เพื่อป้องกันสารทำความเย็นเหลวไม่ให้ไหลเข้าสู่ท่อทางดูดและเข้าสู่เครื่องอัด เนื่องจากหากมีสารทำความเย็นเหลวไหลเข้าสู่เครื่องอัดอาจเป็นสาเหตุให้เกิดการน็อก (เครื่องกระตุก) และก่อความเสียหายแก่เครื่องอัดได้

กระจเปาะเก็บสารทำความเย็นทางดูดโดยทั่วไปมีช่องทางออกของสารทำความเย็นทางด้านบน เพื่อให้สารทำความเย็นเหลวที่เข้าสู่กระจเปาะมีโอกาสระเหยกลายเป็นไอซึ่งจะทำให้มีเฉพาะไอสารทำความเย็นไหลเข้าสู่ท่อทางดูดเท่านั้น และเนื่องจากกระจเปาะนี้ถูกติดตั้งอยู่ภายในตู้เย็นจึงช่วยในการทำความเย็นให้ด้วย

5.5.11 อุปกรณ์ควบคุมมอเตอร์

โดยปกติเครื่องทำความเย็นมักออกแบบให้มีขีดความสามารถในการทำความเย็นมากกว่าที่ต้องการจริงๆ ระบบจึงมักไม่ได้ทำงานอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นภายใต้สภาวะใช้งานปกติเมื่ออุณหภูมิการทำความเย็นถึงจุดที่ได้ปรับตั้งไว้ มอเตอร์ต้องหยุดการทำงาน (เพื่อหยุดการทำงานเครื่องอัดเป็นบางช่วง) และเมื่ออุณหภูมิที่เครื่องระเหยสูงขึ้นถึงค่าที่กำหนด มอเตอร์ก็กลับมาทำงานขับเครื่องอัดต่อไป จนกว่าอุณหภูมิการทำความเย็นถึงจุดที่ได้ปรับตั้งไว้อีกครั้ง สำหรับการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ให้ปิดหรือเปิดตามที่ต้องการ ซึ่งมีด้วยกัน 2 รูปแบบ คือ การควบคุมการทำงานของมอเตอร์ด้วยการใช้อุณหภูมิเป็นดัชนีควบคุมหรือวิธีเทอร์โมสแตติก และการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ด้วยการใช้ความดันเป็นดัชนีควบคุมด้านความดันต่ำ

5.5.11.1 การควบคุมการทำงานของมอเตอร์ด้วยการใช้อุณหภูมิเป็นดัชนีควบคุม หรือวิธีเทอร์โมสแตติก (Thermostatic) การควบคุมด้วยวิธีนี้ถือเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุด โดยเฉพาะในเครื่องทำความเย็นขนาดเล็ก ลักษณะการทำงานใช้กระจเปาะตรวจจับ (Sensing bulb) ในการตรวจวัดอุณหภูมิที่ท่อทางออกของเครื่องระเหยแล้วส่งสัญญาณไปควบคุมการทำงานของวาล์วควบคุมการไหลด้วยการต่อเชื่อมกระจเปาะกับวาล์วผ่านทางท่อแคปิวเลอรีสุญญากาศโดยแพร้มหรือ เบลโลว์ (Bellow) ที่ใช้ในการควบคุมการปิด-เปิดวาล์ว ในท่อแคปิวเลอรีนี้จะบรรจุไว้ด้วยของไหลที่ระเหยง่าย ดังนั้นเมื่อของ

ไหลมีอุณหภูมิสูงขึ้นจะขยายตัวทำให้ความดันสูงขึ้นด้วย และเมื่อของไหลมีอุณหภูมิลดลงจะหดตัวทำให้ความดันลดลงด้วย

ขณะที่ความดันเพิ่มขึ้นทำให้แผ่นไดอะแฟรมเคลื่อนตัวลง เนื่องจากแผ่นไดอะแฟรมถูกต่อเข้ากับก้านวาล์วหรือสวิตช์เปิดจะทำให้สารทำความเย็นไหลผ่านวาล์ว ในทางตรงกันข้ามหากกระเปาะเย็นลงทำให้ความดันลดลงทำให้แผ่นไดอะแฟรมเคลื่อนตัวกลับเป็นการปิดวาล์วหรือสวิตช์

การควบคุมลักษณะนี้สามารถปรับแต่งให้อุณหภูมิทำงานมีค่าต่างๆ ได้ อาจด้วยสวิตช์มือปรับ เช่น ในตู้เย็นตามบ้านต่างๆ ไป ซึ่งสามารถใช้เป็นสวิตช์ปิด-เปิดเครื่องได้ด้วย หรืออาจรวมเป็นสวิตช์ป้องกันสถานะไฟฟ้าเกินซึ่งจะหยุดการทำงานเมื่อมีกระแสไฟฟ้าเข้ามาเกินเกินไป นอกจากนี้อาจนำเครื่องตั้งเวลามาเชื่อมต่อเข้ากับเทอร์โมสแตท เพื่อให้ระบบสามารถละลายน้ำแข็งอย่างอัตโนมัติได้ด้วย

5.5.11.2 การควบคุมการทำงานของมอเตอร์ด้วยการใช้ความดันเป็นดัชนีควบคุมด้านความดันต่ำ การควบคุมลักษณะนี้ใช้มากกับเครื่องทำความเย็นทางอุตสาหกรรม การทำงานอาศัยค่าความดันในเครื่องระเหยเป็นตัวควบคุม เครื่องจะตัดการทำงานเมื่อความดันลดลงต่ำเพียงพอ และจะกลับมาทำงานใหม่เมื่อความดันสูงขึ้นมากพอ การควบคุมมอเตอร์ลักษณะนี้สามารถใช้งานได้กับระบบการควบคุมสารทำความเย็นชนิดวาล์วขยายตัวเทอร์โมสแตติก รวมทั้งชนิดวาล์วลูกกลอยด้านความดันสูงหรือวาล์วลูกกลอยด้านความดันต่ำ

เนื่องจากความดันของสารทำความเย็นด้านความดันต่ำเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ดังนั้นความดันอาจเป็นดัชนีบอกอุณหภูมิได้ ซึ่งทำให้สามารถใช้ความดันในการควบคุมการตัดการทำงานหรือเริ่มต้นการทำงานใหม่ของมอเตอร์ได้ ดังนั้นถือเป็นการใช้ความดันควบคุมอุณหภูมิของตู้เย็นหรือห้องเย็นไปในตัว

5.6 สรุป

ในบทนี้ได้แสดงให้เห็นถึงภาพรวมอุปกรณ์ทำความเย็นแบบอัดไอ ในการนำหลักการการทำความเย็นไปสู่การปฏิบัติจริง ได้แก่ เครื่องอัด (สารทำความเย็น) ที่ช่วยให้สารทำความเย็นมีความดันและอุณหภูมิสูงขึ้นจนถึงจุดที่สามารถถ่ายเทความร้อนออกจากระบบได้ เครื่องควบแน่นที่ช่วยในการถ่ายเทความร้อนออกจากระบบ อุปกรณ์ลดความดันที่เป็นตัวปรับลดความดันให้ต่ำลงจนสารทำความเย็นมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิของสารตัวกลางที่ต้องการทำความเย็น และควบคุมการไหลของสารทำความเย็น เครื่องระเหยซึ่งถือเป็นอุปกรณ์สำคัญในการดึงความร้อนออกจากพื้นที่ที่ต้องการการทำความเย็นหรือเป็นอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดการทำความเย็นด้วยการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ระบบ และอุปกรณ์ส่วนควบ ได้แก่ วาล์วด้านความดันสูงของเครื่องอัดหรือวาล์วบริการทางส่งช่วยในการตรวจสอบความดันด้านความดันสูงและงานบริการต่างๆ เครื่องแยกน้ำมัน (หล้อลีน) เพื่อแยกน้ำมันออกจากสารทำความเย็นและส่งกลับสู่เครื่องอัด ถึงพักสารทำความเย็นเหลือช่วยในการเก็บสารทำความเย็นสำรองของระบบโดยเฉพาะในระบบ

ขนาดใหญ่ ท่อส่งสารทำความเย็นเหลวถือเป็นตัวส่งผ่านสารทำความเย็นเข้าสู่อุปกรณ์ลดความดัน กระเปาะหรือที่เก็บสารทำความเย็นทางดูดถือเป็นอุปกรณ์นิรภัยที่ใช้สำหรับระบบขนาดเล็ก ท่อทางดูดถือเป็นตัวส่งผ่านสารทำความเย็นเข้าสู่เครื่องอัด ตัวกรองและตัวลดความชื้นทางส่งใช้เพื่อกำจัดสิ่งสกปรก และน้ำออกจากระบบให้มีเหลือในระบบให้น้อยที่สุด วาล์วด้านความดันต่ำของเครื่องอัดหรือวาล์วบริการทางดูดที่ใช้เพื่อตรวจสอบความดันด้านความดันต่ำและเติมสารทำความเย็นเข้าระบบ และสุดท้ายอุปกรณ์ควบคุมมอเตอร์ใช้งานในการควบคุมการปิด-เปิดของมอเตอร์ให้สัมพันธ์กับการการทำงานของสารทำความเย็นในเครื่องระเหย

แบบฝึกหัดบทที่ 5

- ข้อมูลจากแคตตาล็อกของเครื่องอัดแบบ 6 สูบ ใช้ R-134a เป็นสารทำความเย็น ทำงานที่ความเร็วรอบ 29 รอบต่อวินาที ให้ค่าความสามารถในการทำความเย็น 96.4 kW และใช้กำลังงาน 28.9 kW ทั้งนี้ อุณหภูมิระเหยเท่ากับ 5°C และอุณหภูมิควบแน่นเท่ากับ 45°C โดยสารทำความเย็นเหลวเมื่อออกจากคอนเดนเซอร์มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิของเหลวอิ่มตัวเท่ากับ 3°C และไอสารทำความเย็นที่ตำแหน่งเข้าเครื่องอัดมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิไออิ่มตัวเท่ากับ 8°C ความกว้างกระบอกสูบ 67 mm ระยะชักของลูกสูบ 57 mm จงคำนวณหา (ก) ประสิทธิภาพเชิงปริมาตรของที่ว่าง ถ้าปริมาตรของที่ว่างเหนือลูกสูบ มีค่าร้อยละ 4.8 ของปริมาตรกระบอกสูบ (ข) ประสิทธิภาพเชิงปริมาตรจริง และ (ค) ประสิทธิภาพเชิงการอัดตัว
- เครื่องอัด 2 สูบ หมุนที่ความเร็ว 1500 รอบ/นาที ถ้าเส้นผ่าศูนย์กลางของลูกสูบเท่ากับ 50 mm และระยะชักเท่ากับ 50 mm มีประสิทธิภาพเชิงปริมาตรเท่ากับ 76% พลังงานทางทฤษฎีที่ใช้ในการขับเครื่องอัด = 1.4 kW จงคำนวณหาพลังงานเพลลาของเครื่องอัดที่ต้องการ ถ้าประสิทธิภาพทั้งหมดของเครื่องอัดเท่ากับ 85%
- จงประมาณภาระของเครื่องควบแน่นถ้าเครื่องทำความเย็นใช้เครื่องอัดแบบปิดซึ่งมีขีดความสามารถใช้งาน 3.8 kW และที่ด้านดูดมีอุณหภูมิอิ่มตัว -13°C และด้านจ่ายอุณหภูมิไออิ่มตัว 45°C
- เครื่องควบแน่นชนิดระบายความร้อนด้วยน้ำซึ่งมีขีดความสามารถ 20 kW และมีสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อน $1,350 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ จงหาพื้นที่ผิวถ่ายเทความร้อนของเครื่องควบแน่น ถ้าอุณหภูมิของสารหล่อเย็นที่เข้าชดต่อเท่ากับ 28°C อุณหภูมิของสารหล่อเย็นที่ออกจากชดต่อเท่ากับ 34°C และอุณหภูมิของสารทำความเย็นขณะควบแน่นในชดต่อเท่ากับ 40°C
- ถ้าอัตราการไหลของน้ำไหลผ่านเครื่องควบแน่นชนิดระบายความร้อนด้วยน้ำเท่ากับ 0.3 L/สอุณหภูมิในเครื่องควบแน่นเพิ่มขึ้น 8 K จงหาภาระเครื่องควบแน่นในหน่วย kW
- จงเปรียบเทียบการทำงานของอุปกรณ์ลดความดันชนิดท่อรูเล็กหรือท่อแคพิลารีกับชนิดวาล์วขยายตัวอัตโนมัติ
- จงเปรียบเทียบการทำงานของอุปกรณ์ลดความดันชนิดวาล์วขยายตัวเทอร์โมสแตติกกับชนิดวาล์วขยายตัวอัตโนมัติ
- จงเปรียบเทียบการทำงานของอุปกรณ์ลดความดันชนิดวาล์วลูกกลอยด้านความดันต่ำกับชนิดวาล์วลูกกลอยด้านความดันสูง
- จงหาการลดลงของอุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านชดต่อสำหรับเครื่องระเหยขนาด 20 ตันความเย็น ถ้าปริมาตรการไหลของอากาศที่ไหลผ่านชดต่อ เท่ากับ $2.25 \text{ m}^3/\text{s}$
- ถ้าปริมาตรการไหลของอากาศที่ไหลผ่านชดต่อ เท่ากับ $1.85 \text{ m}^3/\text{s}$ จงหาการลดลงของอุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านชดต่อสำหรับเครื่องระเหยขนาด 15 ตันความเย็น

11. จงเลือกเครื่องระเหยที่ใช้ในการทำความเย็นผลิตภัณฑ์ที่มีภาระการทำความเย็น 15 ตันความเย็น ด้วยชั่วโมงการทำงานเท่ากับ 18 ชั่วโมง ถ้า TD มีค่าเท่ากับ 8.5°C
12. ถ้า TD มีค่าเท่ากับ 8.0°C จงเลือกเครื่องระเหยที่ใช้ในการทำความเย็นผลิตภัณฑ์ที่มีภาระการทำความเย็น 18 kW ด้วยชั่วโมงการทำงานเท่ากับ 20 ชั่วโมง

บทที่ 6

ภาระการทำความเย็น

6.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับภาระการทำความเย็น

6.1.1 ความหมายของภาระการทำความเย็น

ภาระการทำความเย็น คือปริมาณความร้อนทั้งหมดภายในห้องหรือบริเวณใดๆ ที่เครื่องทำความเย็นจะต้องนำออกไป เพื่อลดและรักษาระดับอุณหภูมิให้ได้ตามที่ต้องการ ปริมาณความร้อนทั้งหมดดังกล่าวที่ทำให้เกิดภาระการทำความเย็นสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งจากภายในห้องหรือบริเวณใดๆ ที่ต้องการทำความเย็นและจากภายนอกที่ส่งผ่านหรือถ่ายเทเข้าสู่ห้องหรือบริเวณใดๆ ที่ต้องการทำความเย็นด้วยกระบวนการถ่ายเทความร้อนสามรูปแบบ ได้แก่ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน ทั้งนี้รูปแบบใดจะมากกว่ากันขึ้นอยู่กับลักษณะการประยุกต์ใช้งาน เช่น การประยุกต์ใช้งานทางอุตสาหกรรม การประยุกต์ใช้งานด้านการขนส่ง หรือการประยุกต์ใช้งานด้านอาหาร

ดังนั้นภาระการทำความเย็นจะเป็นผลรวมของความร้อนที่มาจากแหล่งต่างๆ ได้แก่

- 1) ความร้อนจากภายนอกที่ผ่านเข้ามาในบริเวณการทำความเย็น โดยการพาความร้อนจากอากาศรอบๆ ห้องสู่มัณห้องด้านนอก จากนั้นนำความร้อนจากผนังห้องด้านนอกผ่านผนังห้องสู่มัณห้องด้านใน และสุดท้ายพาความร้อนจากผนังห้องด้านในสู่อากาศภายในห้อง
- 2) ความร้อนที่เข้าสู่บริเวณทำความเย็นโดยตรงโดยการแผ่รังสีผ่านกระจกหรือวัสดุอื่นที่โปร่งแสง
- 3) ความร้อนที่มากับอากาศภายนอกในขณะเปิดประตู หรือผ่านตามรอยแยกของขอบหน้าต่างหรือประตู
- 4) ความร้อนจากผลิตภัณฑ์ที่ต้องการทำให้เย็น
- 5) ความร้อนจากคนที่กำลังทำงานภายในบริเวณทำความเย็น
- 6) ความร้อนจากอุปกรณ์ต่างๆ ที่เป็นตัวเกิดความร้อนที่อยู่ในบริเวณทำความเย็น เช่น มอเตอร์ไฟฟ้าของเครื่องระเหย หลอดไฟ เป็นต้น

6.1.2 ชั่วโมงการเดินเครื่องทำความเย็น

จากผลของไอน้ำที่มีปะปนอยู่ในบรรยากาศ และธรรมชาติของไอน้ำที่จะควบแน่นเป็นน้ำเมื่ออุณหภูมิลดลงต่ำกว่าจุดกลั่นตัวของไอน้ำ ดังนั้นเมื่ออากาศในห้องไหลผ่านเครื่องระเหยซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่า ทำให้อิอน้ำบางส่วนเกิดการควบแน่นเกาะอยู่ตามขดท่อของเครื่องระเหย และจากการที่อุณหภูมิของเครื่องระเหยมีค่าต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ จึงเกิดเป็นน้ำแข็งเกาะอยู่กับขดท่อของเครื่องระเหย ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนลดลง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องละลายน้ำแข็งที่เกาะจับ

ขดท่อของเครื่องระเหยออกไปตามช่วงเวลา ในทางปฏิบัติจึงมักจะไม้ออกแบบให้ระบบทำความเย็นทำงานต่อเนื่องตลอดเวลา วิธีการหนึ่งที่นิยมใช้ในการละลายน้ำแข็งคือ การหยุดการทำงานของเครื่องอัดเมื่อหยุดการทำงานแล้ว อาจอาศัยอากาศภายในห้องเย็นนั้นเป็นตัวละลายน้ำแข็ง ถ้าอุณหภูมิของห้องเย็นสูงกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ แต่จะใช้เวลาค่อนข้างนาน โดยทั่วไปใช้อุณหภูมิ 1.5°C เป็นเกณฑ์ เนื่องจากถ้าห้องเย็นมีอุณหภูมิต่ำกว่า 1.5°C จะไม่สามารถอาศัยอากาศในห้องเย็นเป็นตัวละลายน้ำแข็งได้ ทั้งนี้อาจออกแบบให้มีการละลายน้ำแข็งด้วยวิธีอื่น เช่น การใช้เครื่องทำความร้อนด้วยไฟฟ้า การใช้สารทำความเย็นจากเครื่องอัดที่มีอุณหภูมิสูงลัดวงจรให้ไหลผ่านภายในขดท่อของเครื่องระเหย เป็นต้น

เนื่องจากต้องใช้เวลาในการละลายน้ำแข็ง ดังนั้นชั่วโมงการเดินเครื่องทำความเย็นจะไม่สามารถทำงานได้ตลอด 24 ชั่วโมง (ชม.) ใน 1 วัน โดยทั่วไป กรณีสายอากาศภายในห้องเย็นนั้นเป็นตัวละลายน้ำแข็ง อาจออกแบบระบบให้เครื่องอัดทำงานเท่ากับ 16 ชม./วัน ส่วนที่เหลืออีก 8 ชม. เป็นเวลาที่ใช้ในการละลายน้ำแข็ง ซึ่งหมายความว่าอุปกรณ์การทำความเย็นของระบบต้องออกแบบให้สามารถรับภาระความร้อนที่เกิดใน 24 ชม. ได้ โดยมีทำงานเพียง 16 ชม. ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$Q = \frac{24Q_E}{T} \quad (6.1)$$

เมื่อ Q = ความต้องการขีดความสามารถของการทำความเย็น, kW

Q_E = ภาระการทำความเย็นทั้งหมด, kW

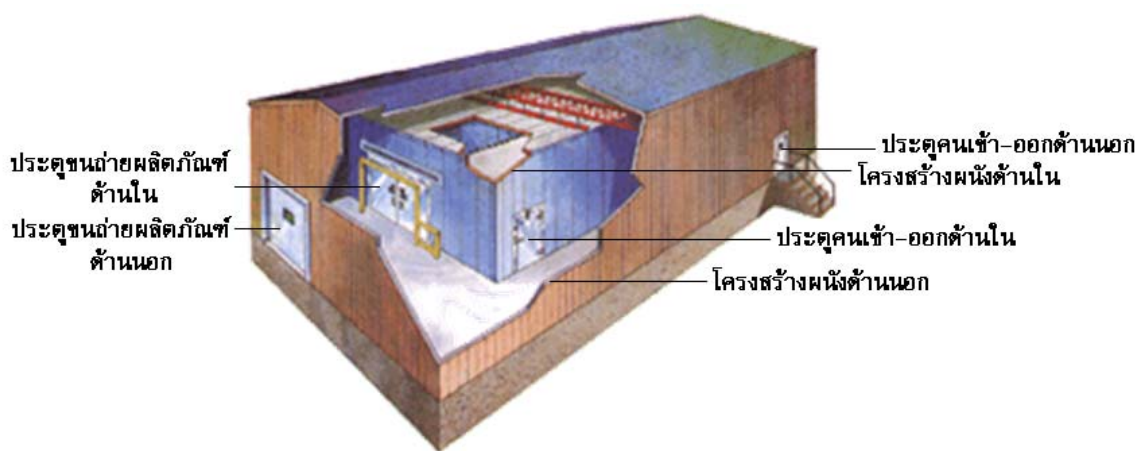
T = เวลาที่เครื่องทำความเย็นทำงานใน 1 วัน, ชม.

กล่าวคือ เมื่อคำนวณภาระการทำความเย็นทั้งหมดมาได้ จะต้องคูณด้วย 24/16 กรณีออกแบบระบบให้เครื่องอัดทำงาน 16 ชม./วัน เพื่อใช้เป็นปริมาณความร้อนที่นำไปใช้เลือกอุปกรณ์ ส่วนการละลายน้ำแข็งด้วยวิธีอื่นซึ่งจะใช้ระยะเวลาน้อยกว่า ช่วงการหยุดเดินเครื่องอัดจึงน้อยกว่ากรณีแรก โดยทั่วไปอาจกำหนดให้เครื่องอัดทำงาน 18 ถึง 20 ชม. ใน 1 วัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับว่าความต้องการหรือความจำเป็นในการละลายน้ำแข็งว่าต้องมีความถี่ขนาดไหนจากปัจจัยของไอน้ำในการเข้าสู่ห้องเย็น

6.2 โครงสร้างของห้องเย็นและห้องแช่แข็ง

เพื่อลดปริมาณความร้อนอันเนื่องมาจากภาระการทำความเย็นจากภายนอกห้องที่ส่งผ่านหรือถ่ายเทเข้าสู่ห้องด้วยกระบวนการถ่ายเทความร้อนทั้งสามรูปแบบดังกล่าว ได้แก่ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน ให้เหลือน้อยที่สุด อันส่งผลให้สามารถลดขนาดของเครื่องทำความเย็นลงได้และทำให้ประหยัดพลังงานในกระบวนการทำความเย็น การออกแบบโครงสร้างของห้องเย็นและห้องแช่แข็งด้วยวัสดุที่เป็นฉนวนความร้อนจึงเป็นสิ่งที่จำเป็น ลักษณะโครงสร้างโดยทั่วไปดังรูปที่ 6.1 ซึ่งประกอบด้วย โครงสร้างอาคารภายนอกและโครงสร้างส่วนที่เป็นห้องเย็นและห้องแช่แข็ง ในที่นี้ห้องเย็นได้แก่ห้องที่ต้องการรักษาระดับอุณหภูมิภายในห้องให้อยู่ที่ในระดับสูงกว่า 0°C ส่วนห้องแช่แข็งได้แก่ห้องที่ต้องการรักษาระดับอุณหภูมิภายในห้องให้อยู่ที่ในระดับต่ำกว่า 0°C โครงสร้างอาคารภายนอกโดยปกติประกอบด้วยผนังที่ปิดรอบส่วนที่เป็นห้องเย็นและห้องแช่แข็งไว้ โดยมีช่องทางเดิน

ระหว่างผนังด้านนอกของส่วนที่เป็นห้องเย็นและห้องแช่แข็งกับผนังภายในอาคาร ทั้งนี้เพื่อประโยชน์ในการเป็นส่วนกันชนระหว่างส่วนอุณหภูมิต่ำของห้องเย็นกับอากาศภายนอกที่มีอุณหภูมิสูง ดังแสดงในรูปที่ 6.1 โดยประตูทางเข้าออกจะมี 2 ประตู ทั้งส่วนอุณหภูมิต่ำของห้องเย็นและส่วนกันชน เพื่อใช้ในการขนถ่ายผลิตภัณฑ์ประตูหนึ่งและสำหรับคนเข้า-ออกอีกประตูหนึ่ง เนื่องจากประตูขนถ่ายผลิตภัณฑ์ช่องประตูมีขนาดใหญ่ ถ้านำมาใช้เป็นประตูเข้า-ออกปกติด้วยจะทำให้อากาศภายนอกที่มีอุณหภูมิสูงกว่าเข้าสู่พื้นที่ทำความเย็นได้มาก ทั้งนี้ขนาดของประตูด้านนอกจะออกแบบขนาดประตูให้มีขนาดพอดีกับขนาดประตูของรถบรรทุกที่ใช้ในการขนถ่ายผลิตภัณฑ์และมีแผ่นยางกันรั่วตามขอบประตูด้วย สำหรับส่วนที่เป็นห้องเย็นและห้องแช่แข็งจะออกแบบให้ส่วนที่มีอุณหภูมิต่ำสุดอยู่ด้านในสุด เพื่อให้ส่วนที่มีอุณหภูมิสูงกว่าเป็นส่วนกันชนให้ อันจะทำให้การสูญเสียพลังงานเกิดขึ้นได้น้อยลง นอกจากนี้โครงสร้างของห้องเย็นและห้องแช่แข็ง ผนังทุกด้านรวมทั้งพื้นและเพดานจะออกแบบให้มีการบุผนังด้วยวัสดุที่มีคุณสมบัติความเป็นฉนวนสูง และมีความหนาแน่นมากกว่าส่วนที่เป็นผนังของอาคารภายนอก โดยทั่วไปฉนวนที่ใช้มีความหนาแน่นน้อยกว่า 15 เซนติเมตรและมีค่าการนำความร้อนต่ำเสริมเข้ากับผนังห้องปกติ ดังแสดงค่าการนำความร้อนของวัสดุโครงสร้างต่างๆ ในตารางที่ 6.1



รูปที่ 6.1 ลักษณะโครงสร้างโดยทั่วไปของห้องเย็นและห้องแช่แข็ง

6.3 การคำนวณภาระการทำความเย็น

การคำนวณหาภาระการทำความเย็นในเชิงพาณิชย์หรือทางอุตสาหกรรม นิยมแบ่งภาระออกเป็นกลุ่มๆ ดังนี้ ภาระความร้อนที่ผ่านผนังเข้ามา (Wall heat gain load) ภาระความร้อนจากอากาศภายนอกเข้ามา (Air change load) ภาระความร้อนจากผลิตภัณฑ์ (Product load) ภาระความร้อนจากการละลายน้ำแข็งเกาะที่ขดท่อเครื่องระเหย (Defrost load) และภาระความร้อนอื่นๆ (Miscellaneous load) ทั้งนี้การคำนวณหาภาระการทำความเย็นทั้งหมดของพื้นที่ที่ต้องการการทำความเย็นจะเป็นผลรวมจากผลที่ได้จากการคำนวณภาระความร้อนของแต่ละกลุ่มดังกล่าว

ตารางที่ 6.1 การนำความร้อนของวัสดุที่ใช้กับผนังห้องเย็นและค่าการพาความร้อนของอากาศ

วัสดุ	ลักษณะวัสดุ	สภาพการนำความร้อน (k), W/(m·K)	ค่าการนำความร้อน (c), W/(m ² ·K)
อิฐฉาบปูน	อิฐก่อธรรมดา	0.72	
	อิฐก่อฉาบหน้า	1.30	
	อิฐก่อคอนกรีตผสมทราย	1.73	
	อิฐบล็อกคอนกรีตใส่ทราย		
	หนา 100 mm		7.95
	หนา 200 mm		5.11
	หนา 300 mm		4.43
	พลาสติกอร์ยิปซัม 13 mm		17.72
ไม้	เนื้อแข็ง	0.16	
	เนื้ออ่อน	0.12	
	ไม้อัด หนา 13 mm		9.09
	ไม้อัด หนา 19 mm		6.08
หลังคา	กระเบื้องหนา 9 mm		17.03
ฉนวน	แบบม้วนชนิดใยแก้วหรือใยแร่	0.039	
	แบบแผ่น		
	ชนิดเซลลูลาร์กลาส	0.058	
	ชนิดบอร์ดไม้ก๊อก	0.043	
	ชนิดใยแก้ว	0.036	
	ชนิดโพลีสไตรีนขยาย (เรียบ)	0.029	
	ชนิดโพลีสไตรีนขยาย (เซลตัด)	0.036	
	ชนิดโพลียูรีเทนขยาย	0.025	
	แบบลูสฟิล		
	ชนิดเยื่อกระดาษ	0.039	
ชนิดใยแร่	0.039		
ชนิดใยไม้เนื้ออ่อน	0.043		
การพา ความร้อน บนพื้นผิว	อากาศนิ่ง		9.37
	อากาศเคลื่อนที่ (3.35m/s)		22.70
	อากาศเคลื่อนที่ (6.7 m/s)		34.10

ภาระการทำความเย็นดังกล่าวข้างต้น ในห้องเย็นโดยทั่วไปพบว่า ภาระความร้อนที่ผ่านผนังเข้ามา มีปริมาณประมาณร้อยละ 20 ของปริมาณภาระความร้อนทั้งหมด ภาระความร้อนจากอากาศภายนอก เข้ามามีปริมาณประมาณร้อยละ 30 ของปริมาณภาระความร้อนทั้งหมด ภาระความร้อนจากผลิตภัณฑ์มี ปริมาณประมาณร้อยละ 5 ของปริมาณภาระความร้อนทั้งหมด ภาระความร้อนจากการละลายน้ำแข็ง เกาะที่ขดท่อเครื่องระเหยมีปริมาณประมาณร้อยละ 10 ของปริมาณภาระความร้อนทั้งหมด และภาระ ความร้อนอื่นๆ มีปริมาณประมาณร้อยละ 35 ของปริมาณภาระความร้อนทั้งหมด

6.3.1 ภาระความร้อนผ่านผนัง

ภาระความเย็นส่วนนี้ ได้แก่ อัตราความร้อนที่ไหลผ่านผนังจากภายนอกเข้ามาภายใน บริเวณห้องเย็น ถึงแม้ว่าจะมีฉนวนความร้อนหุ้มอยู่ก็ตาม ทั้งนี้การคำนวณภาระความร้อนในส่วนนี้ขึ้นอยู่กับ ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผนังของห้องเย็น ผลกระทบเนื่องจากรังสีจากดวงอาทิตย์ และ สภาพอากาศรอบๆ ห้องเย็น

6.3.1.1 ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผนังของห้องเย็น ค่าความแตกต่างของ อุณหภูมิระหว่างผนังเท่ากับ ผลต่างของอุณหภูมิออกแบบของผนังด้านใน (คือ อุณหภูมิภายในห้องเย็น หรือบริเวณทำความเย็นที่ต้องการรักษาระดับไว้) กับอุณหภูมิด้านนอกของผนัง อุณหภูมิออกแบบโดย ปกติขึ้นอยู่กับตัวผลิตภัณฑ์และระยะเวลาในการเก็บรักษาอุณหภูมิห้องเย็น ส่วนอุณหภูมิออกแบบ ภายนอกขึ้นอยู่กับตำแหน่งของห้องเย็น ถ้าผนังห้องเย็นอยู่ในอาคาร อุณหภูมิออกแบบภายนอกของ ห้องเย็นคืออุณหภูมิภายในของอาคาร แต่ถ้าเป็นกรณีผนังห้องเย็นติดกับภายนอกจะใช้อุณหภูมิที่สภาวะ บรรยากาศของสถานที่ที่ติดตั้งห้องเย็นนั้น สำหรับประเทศไทยใช้ที่อุณหภูมิ 35°C

6.3.1.2 ความแตกต่างอุณหภูมิของเพดานและพื้นห้องเย็น ถ้าห้องเย็นอยู่ในอาคาร และมีช่องว่างระหว่างเพดานห้องเย็นและเพดานของอาคาร จะคิดเพดานห้องเย็น เช่นเดียวกับผนังภายใน แต่ถ้าเพดานห้องเย็นติดกับภายนอกจะคิดเพดานห้องเย็นเสมือนผนังภายนอก เช่นเดียวกับพื้นห้องเย็น ถ้าไม่ติดพื้นดินโดยตรงคิดเหมือนผนังภายใน แต่ถ้าติดพื้นดินโดยตรงใช้อุณหภูมิของพื้นดินเป็นเกณฑ์ สำหรับประเทศไทยใช้ที่อุณหภูมิ 45°C

ในกรณีที่พื้นของห้องแช่แข็ง (Freezer) ติดพื้นดินโดยตรงต้องมีการป้องกันไม่ให้ มีการแข็งตัวของน้ำใต้พื้นด้านล่างของห้องแช่แข็ง เนื่องจากจะทำความเสียหายให้กับโครงสร้างได้ อาจ ป้องกันได้โดยเดินท่ออากาศอุ่น (Warm air duct) สายให้ความร้อนด้วยไฟฟ้า (Electric heating cable) หรือ ขดท่อให้ความร้อน เพื่อเป็นตัวจ่ายความร้อนในการรักษาอุณหภูมิพื้นดินให้สูงกว่าจุดเยือกแข็งของ น้ำ โดยเฉพาะในช่วงอากาศเย็นในฤดูหนาวตอนกลางคืน

6.3.1.3 ผลกระทบเนื่องจากรังสีจากดวงอาทิตย์ ผนังห้องเย็นที่ติดกับบริเวณภายนอก อาคารนั้นจะได้รับความร้อนบางส่วนจากการแผ่รังสี ทั้งโดยดวงอาทิตย์และวัตถุอุณหภูมิสูงอื่นๆ ซึ่งจะมี ผลให้อุณหภูมิที่ผิวภายนอกของผนังสูงกว่าอุณหภูมิบรรยากาศ ลักษณะจะคล้ายตัวถังด้านนอกของ รถยนต์ที่จอดไว้กลางแดดจะมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิบรรยากาศมาก ดังนั้นค่าอุณหภูมิแตกต่าง (TD) จึง

ต้องมีการปรับค่ามากขึ้นกว่าผลต่างของอุณหภูมิที่ทำได้ ตารางที่ 6.2 แสดงค่าของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น กรณีผนังสัมผัสแดดในทิศทางต่างๆ

ตารางที่ 6.2 ค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น สำหรับผนังด้านที่สัมผัสแดด

ชนิดของผิว	ค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (°C)				
	ด้านตะวันออก	ด้านตะวันตก	ด้านเหนือ	ด้านใต้	หลังคา
พื้นผิวสีเข้ม	6	7	5	8	20
พื้นผิวสีเข้มกลางๆ	5	6	4	7	16
พื้นผิวสีอ่อน	4	5	3	6	12

(ดัดแปลงจากตารางของ ASHRAE Handbook of Fundamentals, 1989)

6.3.1.4 ตัวอย่างการคำนวณภาระความร้อนที่ผ่านผนัง ในการคำนวณภาระความร้อนที่ผ่านผนังเข้ามาต้องคำนึงถึงความร้อนที่ผ่านผนังเข้ามาทุกๆ ด้าน ซึ่งรวมทั้ง เพดานและพื้นด้วย ถ้าผนังหรือบางส่วนของผนังมีโครงสร้างที่แตกต่างกัน และมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (U) ต่างกัน จะต้องคำนวณแยกเป็นส่วนๆ ไป แต่ถ้าทุกด้านมีค่า U เท่ากัน และผลต่างอุณหภูมิ (ΔT) เท่ากัน สามารถรวมการคำนวณเข้าด้วยกันได้ แต่บางครั้ง ถ้าค่า U ต่างกันน้อยมาก หรือพื้นที่มีขนาดเล็ก อาจจะสามารถรวมกันได้เช่นกัน ดังสมการดังนี้

$$Q = (A) \times (U) \times (\Delta T) \quad (6.2)$$

$$\text{เมื่อ } A = \text{พื้นที่ผิวของผนังห้องเย็น, m}^2$$

$$U = \text{สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม, W/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$\Delta T = \text{ผลต่างอุณหภูมিরะหว่างภายในห้องเย็นกับภายนอกห้อง, K}$$

ทั้งนี้

$$\text{ความต้านทานความร้อนรวม, } R = 1/U \quad (6.3)$$

$$\text{ความต้านทานของวัสดุแต่ละชนิด, } r = 1/C = x/k \quad (6.4)$$

$$\text{เมื่อ } C = \text{ความสามารถนำความร้อน (Thermal conductance) ของวัสดุ, W/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$x = \text{ความหนาของผนัง, m}$$

$$k = \text{สภาพการนำความร้อน (Thermal conductivity) ของวัสดุ, W/m} \cdot \text{K}$$

เมื่อผนังห้องเย็นประกอบด้วยวัสดุหลายชั้นและแตกต่างกัน ความต้านทานความร้อนรวมของผนังเป็นผลรวมของความต้านทานทั้งหมดของวัสดุรวมกันและชั้นบางๆ ของอากาศด้วยดังนี้

$$R = 1/U = 1/f_i + x/k_1 + x/k_2 + \dots + x/k_n + 1/f_o \quad (6.5)$$

เพราะฉะนั้น

$$U = 1/[1/f_i + x/k_1 + x/k_2 + \dots + x/k_n + 1/f_o] \quad (6.6)$$

เมื่อ f_i = สัมประสิทธิ์ของการพาความร้อนของผนังพื้นและเพดานด้านใน, $W/m^2 \cdot K$
 f_0 = สัมประสิทธิ์ของการพาความร้อนของผนังพื้นและเพดานด้านนอก,
 $W/m^2 \cdot K$
 $1/x/k_1, 1/x/k_2, \dots, 1/x/k_n$ = สัมประสิทธิ์ของการนำความร้อนผ่านผนังพื้นต่างๆ
 x = ความหนาของผนัง, m
 k_1, k_2, \dots, k_n = สภาพการนำความร้อนของผนังในแต่ละชนิด, $W/m \cdot K$

ตัวอย่าง 6.1 จงคำนวณหาอัตราการไหลของความร้อนที่ผ่านผนังกว้าง 3 m ยาว 6 m ถ้าตัวประกอบ U ของผนังเท่ากับ $0.37 W/m^2 \cdot K$ และอุณหภูมิด้านหนึ่งของผนัง $4^\circ C$ และอีกด้านหนึ่ง $35^\circ C$

วิธีทำ

$$\text{พื้นที่ของผนัง} = 3 \times 6 = 18 \text{ m}^2$$

จากสมการ $Q = (A) \times (U) \times (\Delta T)$

$$= (18 \text{ m}^2) \times (0.37 W/m^2 \cdot K) \times (35 - 4) K = 206 W$$

ตอบ

ตัวอย่าง 6.2 จงคำนวณความสามารถนำความร้อนของโพลียูรีเทน ซึ่งหนา 125 mm

วิธีทำ

จากตารางที่ 6.1 สภาพการนำความร้อน k ของโพลียูรีเทน คือ $0.025 W/m \cdot K$

และจากสมการ $C = k/x$

ดังนั้น

$$C = 0.025 W/m \cdot K / 0.125 \text{ m} = 0.2 W/m^2 \cdot K$$

ตอบ

ตัวอย่าง 6.3 สมมติว่าลมมีความเร็ว 3.35 m/s จงคำนวณหาค่า U สำหรับผนังอิฐบล็อกคอนกรีตใส่ทรายหนา 200 mm และมีฉนวนโพลียูรีเทนหนา 75 mm และผนังชั้นในฉนวนปูนหนา 13 mm

วิธีทำ

จากตารางที่ 6.1 ผนังอิฐบล็อกคอนกรีตใส่ทรายหนา 200 mm ได้ค่า $C = 5.11 W/m^2 \cdot K$

โพลียูรีเทนได้ค่า $k = 0.025 W/m \cdot K$

ผนังฉนวนปูนได้ค่า $k = 0.72 W/m \cdot K$

สัมประสิทธิ์ของการพาความร้อนภายใน $f_i = 9.37 W/m^2 \cdot K$

สัมประสิทธิ์ของการพาความร้อนภายนอก $f_0 = 22.70 W/m^2 \cdot K$

แทนค่าในสมการ ได้

$$1/U = 1/9.37 + 1/5.11 + 0.075/0.025 + 0.013/0.72 + 1/22.7$$

$$\begin{aligned} 1/U &= 0.107 + 0.196 + 0.3 + 0.018 + 0.044 \\ &= 0.665 \end{aligned}$$

ดังนั้น $U = 1/0.665 = 1.503 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

ตอบ

6.3.2 ภาระความร้อนจากอากาศภายนอกเข้ามา

ในขณะที่มีการเปิดประตูห้องเย็นหรือบริเวณทำความเย็น อากาศอุ่นภายนอกจะเข้าไปแทนที่อากาศเย็นจากภายในที่เล็ดรอดออกทางประตู จึงจำเป็นต้องขจัดความร้อนออกจากอากาศอุ่นนี้เพื่อลดอุณหภูมิและความชื้น ให้สอดคล้องกับเงื่อนไขในการออกแบบ

ในงานการปรับอากาศ ภาระความร้อนจากอากาศภายนอกอาจถูกเรียกว่า “ภาระการระบายอากาศ (Ventilating load)” หรือ “ภาระจากการรั่วไหล (Infiltration load)” คำว่า ภาระการระบายอากาศจะใช้กรณีเมื่ออากาศภายนอกที่เข้ามาเพื่อการหมุนเวียนอากาศ ส่วนภาระจากการรั่วไหลใช้ในกรณีเมื่ออากาศภายนอกที่เข้ามาเกิดจากการรั่วไหลโดยธรรมชาติ ผ่านรอยแตกต่างๆ ส่วนในตู้เย็นห้องเย็น หรือห้องแช่แข็งมักมีการผนึกกันรั่วอย่างดี จนการรั่วซึมแทบจะไม่เกิดขึ้น ดังนั้นอากาศภายนอกที่เข้ามาจะขึ้นอยู่กับเปิดปิดประตูเป็นหลัก

ตารางที่ 6.3 และ 6.4 แสดงตัวประกอบเอนทัลปีที่เปลี่ยนแปลงของอากาศภายนอกที่เข้ามาจากการเปิดประตูสำหรับห้องเย็น (อุณหภูมิสูงกว่า 0°C) และห้องแช่แข็ง (อุณหภูมิต่ำกว่า 0°C) ซึ่งเป็นค่าสำหรับการใช้งานโดยเฉลี่ย (Average usage) ที่สภาวะการทำความเย็นไม่รุนแรงที่ไม่ต้องสัมผัสหรือติดต่อกับแหล่งอุณหภูมิสูงๆ และปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่นำมาใส่ในห้องเย็นจะอยู่ในเกณฑ์ที่ไม่ผิดปกติ เช่น ห้องเย็นสำหรับเก็บผลิตภัณฑ์ทั่วไป แต่ถ้าเป็นการใช้งานหนัก (Heavy usage) ที่ต้องสัมผัสหรือติดต่อกับแหล่งอุณหภูมิต่ำกว่าสูง เช่น ห้องเย็นในครัวของภัตตาคารหรือโรงแรมซึ่งโดยทั่วไปมีอุณหภูมิห้องค่อนข้างสูง และมักจะใส่ผลิตภัณฑ์จำนวนมากเข้าตู้เย็นในเวลาวิกฤตหรือในการใช้งานที่มักจะทำผลิตภัณฑ์จำนวนมากเข้ามาในตู้เย็นหรือห้องเย็นบ่อยๆ ในกรณีการใช้งานหนักเช่นนี้ให้เพิ่มค่าจากที่อ่านได้ในตารางขึ้นอีกร้อยละ 50

ในกรณีที่ไม่ได้เป็นการระบายอากาศในบริเวณที่ทำความเย็น แต่เป็นการเข้าทางประตูที่เปิดเข้าออก ปริมาณของอากาศภายนอกที่เข้ามาทางประตูในเวลา 24 ชม. จะขึ้นอยู่กับขนาดและที่ตั้งของประตู และควมถี่ในการเปิดประตู เนื่องจากผลรวมของตัวประกอบเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงกับสถานที่ในแต่ละแห่งและมีความยุ่งยากในการประมาณค่าให้ละเอียด ดังนั้นในทางปฏิบัติการประมาณปริมาณอากาศที่เข้ามาภายในห้องเย็นโดยใช้ตารางที่ 6.5 เป็นค่าประมาณของอัตราการไหลของอากาศที่เข้าไปในห้องเย็น

ความร้อนที่เพิ่มขึ้นจากอากาศที่เข้าสามารถคำนวณหาจากสมการได้ดังนี้

ภาระความร้อนจากอากาศภายนอก, kW

$$= (\text{อัตราที่อากาศเข้ามา, l/s}) \times (\text{ตัวประกอบเอนทัลปีที่เปลี่ยนแปลง, kJ/l}) \quad (6.7)$$

ตารางที่ 6.3 ตัวประกอบเอนทัลปีที่เปลี่ยนแปลงของอากาศภายนอกที่เข้ามาจากการเปิดประตูของห้องเย็น (อุณหภูมิสูงกว่า 0°C) kJ/l

อุณหภูมิห้องเย็น °C	อุณหภูมิอากาศภายนอกที่เข้า °C									
	25			30			35		40	
	RH, %			RH, %			RH, %		RH, %	
	50	60	70	50	60	70	50	60	50	60
15	0.0128	0.0186	0.0246	0.0281	0.0357	0.0441	0.0500	0.0563	0.0663	0.0795
10	0.0266	0.0323	0.0382	0.0319	0.0491	0.0574	0.0591	0.0694	0.0792	0.0992
5	0.0388	0.0445	0.0502	0.0536	0.0610	0.0693	0.0708	0.0810	0.0906	0.1036
0	0.0493	0.0550	0.0606	0.0639	0.0713	0.0794	0.0808	0.0910	0.1003	0.1141

หมายเหตุ ในกรณีการใช้งานหนักให้เพิ่มค่าจากที่อ่านได้ในตารางขึ้นอีกร้อยละ 50

ตารางที่ 6.4 ตัวประกอบเอนทัลปีที่เปลี่ยนแปลงของอากาศภายนอกที่เข้ามาจากการเปิดประตูของห้องแช่แข็ง (อุณหภูมิต่ำกว่า 0°C) kJ/l

อุณหภูมิห้องเย็น °C	อุณหภูมิอากาศภายนอกที่เข้า °C									
	5		10		25		30		35	
	RH, %		RH, %		RH, %		RH, %		RH, %	
	70	80	70	80	50	60	50	60	50	60
0	0.0092	0.0111	0.0142	0.0154	0.0505	0.0562	0.0650	0.0724	0.0820	0.0921
-5	0.0193	0.0210	0.0235	0.0247	0.0592	0.0649	0.0736	0.0809	0.0903	0.1004
-10	0.0271	0.0288	0.0309	0.0321	0.0662	0.0719	0.0805	0.0877	0.0970	0.1071
-15	0.0350	0.0367	0.0383	0.0395	0.0732	0.0788	0.0873	0.0945	0.1037	0.1137
-20	0.0427	0.0444	0.0456	0.0468	0.0801	0.0857	0.0941	0.1013	0.1102	0.1203
-25	0.0501	0.0523	0.0525	0.0537	0.0866	0.0922	0.0998	0.1077	0.1165	0.1265
-30	0.0571	0.0588	0.0591	0.0604	0.0929	0.0985	0.1067	0.1138	0.1225	0.1325
-35	0.0640	0.0657	0.0656	0.0668	0.0989	0.1045	0.1126	0.1197	0.1283	0.1382
-40	0.0708	0.0725	0.0720	0.0732	0.1050	0.1106	0.1185	0.1256	0.1341	0.1440

หมายเหตุ ในกรณีการใช้งานหนักให้เพิ่มค่าจากที่อ่านได้ในตารางขึ้นอีกร้อยละ 50

สำหรับการคำนวณภาระจากอากาศภายนอกให้ได้ค่าที่แม่นยำทำได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากไม่สามารถวัดปริมาณอากาศที่ผ่านเข้ามาได้อย่างเที่ยงตรง ยกเว้นในกรณีที่นำอากาศเข้ามาเพื่อการระบายอากาศ จึงจะทราบค่าค่อนข้างแน่นอน ถ้าสามารถทราบอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศภายนอกที่ผ่านเข้ามาจะสามารถหาปริมาณความร้อนที่เข้ามาได้จากสูตร

$$Q = W(h_0 - h_i) \quad (6.8)$$

เมื่อ Q = ภาระความร้อนจากอากาศภายนอก, kW

W = อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศภายนอกที่ผ่านเข้ามา, kg/s

h_0 = เอนทัลปีของอากาศภายนอก, kJ/kg

h_i = เอนทัลปีของอากาศภายใน, kJ/kg

อย่างไรก็ดี โดยทั่วไปปริมาณอากาศมักจะวัดกันในหน่วยของปริมาตรมากกว่าหน่วยของน้ำหนัก ดังนั้นจึงมักใช้สมการ (6.7) ในการคำนวณหาภาระความร้อนจากอากาศภายนอก

ตารางที่ 6.5 ค่าปริมาณอากาศ (l/s) ที่เข้ามาจากการเปิดประตูแปรตามขนาดห้อง

ปริมาตรห้อง, m ³	อัตราการไหลเข้าของอากาศ, l/s	
	ห้องอุณหภูมิต่ำกว่า 0°C	ห้องอุณหภูมิสูงกว่า 0°C
7	3.1	2.3
8.5	3.4	2.6
10	3.7	2.8
15	4.4	3.3
20	5.0	3.8
25	5.5	4.2
30	5.9	4.6
40	6.8	5.4
50	7.5	5.8
75	9.0	6.9
100	10.2	7.9
150	12.2	9.4
200	13.9	10.9
250	15.3	11.9
300	16.7	12.9
400	19.0	14.9
500	21.4	16.8
600	23.6	18.1
700	24.3	18.6
800	25.9	20.4
900	27.1	21.9
1000	28.9	23.1

ตัวอย่าง 6.5 ห้องเย็นขนาด 75 m^3 ถ้าภายในบริเวณทำความเย็นมีอุณหภูมิ 2°C และภายนอกอุณหภูมิที่วัดจากเทอร์โมมิเตอร์ที่วัดจากกระเปาะแห้ง 30°C ความชื้นสัมพัทธ์ 50 % จงคำนวณหาภาระความเย็นจากอากาศภายนอกจากการเปิดประตู

วิธีทำ

จากตารางที่ 6.5 ห้องเย็นขนาด 75 m^3 อุณหภูมิสูงกว่า 0°C ได้อัตราการเข้ามาของอากาศภายนอกจากการเปิดประตูเท่ากับ 9 L/s

จากตารางที่ 6.3 โดยการเทียบบัญญัติไตรยางศ์ ได้

ตัวประกอบเอนทัลปีที่เปลี่ยนแปลง = 0.0598 kJ/L

ภาระความเย็นจากอากาศภายนอก = $(9 \text{ L/s}) \times (0.0598 \text{ kJ/L}) = 0.538 \text{ kW}$ **ตอบ**

ตัวอย่าง 6.6 ห้องเย็นขนาดภายนอก $(4 \times 5) \text{ m}^2$ สูง 3 m ภายนอกมีอุณหภูมิ 25°C และ RH 50% อุณหภูมิภายในห้องเย็น 2°C ผนังห้องเย็นมีความหนา 150 mm จงคำนวณหาภาระความเย็นจากอากาศภายนอก ในหน่วย kW

วิธีทำ

เนื่องจากผนังห้องเย็นหนา 150 mm ดังนั้นขนาดของห้องเย็นภายในจะลดลงไป 0.3 m จากขนาดภายนอก

เพราะฉะนั้นขนาดภายในห้องเย็น คือ $(3.7) \times (4.7) \times (2.7) = 47 \text{ m}^3$

จากตารางที่ 6.5 โดยการเทียบบัญญัติไตรยางศ์ ที่พื้นที่ 47 m^3 อุณหภูมิในห้องเย็น 2°C จะได้อัตราการเข้ามาของอากาศภายนอกเท่ากับ 7.3 L/s

จากตารางที่ 6.3 โดยการเทียบบัญญัติไตรยางศ์ ตัวประกอบอากาศที่เปลี่ยนแปลง = 0.0451 kJ/L

จากสมการ แทนค่า จะได้

ภาระความเย็นจากอากาศภายนอก

= (อัตราที่อากาศเข้ามา, L/s) \times (เอนทัลปีที่เปลี่ยนแปลง kJ/L)

= $(7.3 \text{ L/s}) \times (0.0451 \text{ kJ/L})$

= 0.329 kW **ตอบ**

6.3.3 ภาระความร้อนจากผลิตภัณฑ์

ภาระส่วนนี้ ได้แก่ ความร้อนที่ต้องดึงออกจากผลิตภัณฑ์เพื่อลดอุณหภูมิลงจนถึงระดับที่ต้องการ ในบางกรณีผลิตภัณฑ์อาจถูกแช่แข็ง ซึ่งจะต้องรวมความร้อนแฝงเข้าไปด้วย เช่นเดียวกับภาระตัวอื่นๆ ความสัมพันธ์ของภาระความเย็นจากผลิตภัณฑ์ต่อภาระการทำความเย็นขึ้นอยู่กับลักษณะงาน โดยปกติภาระความเย็นจากผลิตภัณฑ์จะมีผลกระทบต่ออุปกรณ์ทำความเย็นทั้งในลักษณะชั่วคราวและใน

ลักษณะต่อเนื่อง โดยขึ้นอยู่กับลักษณะงาน กล่าวคือ ภาวะความเย็นจากผลิตภัณฑ์จะเป็นส่วนหนึ่งของ ภาวะการทำความเย็นเฉพาะช่วงที่กำลังลดอุณหภูมิลงเพื่อให้เท่าอุณหภูมิห้องเก็บ เมื่ออุณหภูมิเท่าห้องเก็บ จะไม่มีความร้อนที่ต้องขจัดทิ้งอีกต่อไป ภาวะความเย็นจากผลิตภัณฑ์จะสิ้นสุดการเป็นภาวะส่วนหนึ่งของอุปกรณ์

การคำนวณภาวะจากผลิตภัณฑ์ในกรณีที่ผลิตภัณฑ์ถูกนำเข้าห้องเย็นและมีอุณหภูมิสูงกว่าห้องเย็น รวมทั้งอุณหภูมิห้องเย็นสูงกว่าจุดเยือกแข็งของผลิตภัณฑ์ ภาวะที่เกิดจากผลิตภัณฑ์สามารถคำนวณได้จากสมการ ดังนี้

$$Q = (m) \times (C) \times (\Delta T) \quad (6.9)$$

เมื่อ Q = ปริมาณความร้อน, kJ

m = มวลของผลิตภัณฑ์, kg

C = ค่าความร้อนจำเพาะ ณ อุณหภูมิสูงกว่าจุดเยือกแข็ง, kJ/kg·K

ΔT = อุณหภูมิผลิตภัณฑ์ที่เปลี่ยนแปลง, K

สำหรับการคำนวณภาวะจากผลิตภัณฑ์ในกรณีที่ผลิตภัณฑ์ถูกนำมาแช่แข็งและเก็บที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของตัวผลิตภัณฑ์นั้นๆ ความร้อนที่นำมาคำนวณจะประกอบไปด้วย 3 ช่วง ดังนี้

ช่วง 1) ปริมาณความร้อนที่ผลิตภัณฑ์จ่ายออกมาเพื่อลดอุณหภูมิจากเริ่มต้นจนเท่ากับจุดเยือกแข็ง

ช่วง 2) ปริมาณความร้อนที่ผลิตภัณฑ์จ่ายออกมาขณะแข็งตัว

ช่วง 3) ปริมาณความร้อนที่ผลิตภัณฑ์จ่ายออกมาเพื่อลดอุณหภูมิจากจุดเยือกแข็ง จนเป็นอุณหภูมิต่ำสุดท้ายของห้องเย็น

การคำนวณช่วง 1) และ 3) ใช้สูตรดังที่กล่าวมาแล้ว เพียงแต่ค่าความร้อนจำเพาะในช่วง

3) ใช้ค่า ΔH อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง ส่วนปริมาณความร้อนในช่วง 2) คำนวณจากสมการ ดังนี้

$$Q = (m) \times (L) \quad (6.10)$$

เมื่อ L = ค่าความร้อนแฝงของผลิตภัณฑ์, kJ/kg

ทั้งนี้ค่าความร้อนจำเพาะและค่าความร้อนแฝงของผลิตภัณฑ์ รวมทั้งอุณหภูมิในการเก็บรักษา ความชื้นสัมพัทธ์ที่ต้องการ ช่วงเวลาในการเก็บรักษา และจุดเยือกแข็งของผลิตภัณฑ์จำพวกของสดที่เสียหาย ได้แก่ ผัก ผลไม้ เนื้อสัตว์ และผลิตภัณฑ์อาหารแปรรูปและอาหารสดบางชนิด แสดงในตารางที่ 6.6 ตารางที่ 6.7 ตารางที่ 6.8 และตารางที่ 6.9 ตามลำดับ

ตารางที่ 6.6 สมบัติของผลิตภัณฑ์สดจำพวกผัก

ชนิดผลิตภัณฑ์	อุณหภูมิเก็บรักษา, °C	ความชื้นสัมพัทธ์, %	ช่วงเวลาเก็บรักษา	ปริมาณน้ำ, %	จุดเยือกแข็งสูงสุด, °C	ความร้อนจำเพาะเหนือจุดเยือกแข็ง, kJ/kg·K	ความร้อนจำเพาะใต้จุดเยือกแข็ง, kJ/kg·K	ความร้อนแฝง, kJ/kg
แอสปารากัส	0 – 2	95 – 100	2-3 สัปดาห์	93	-0.6	3.94	2.01	309
ถั่วเขียว	4 – 7	95	7-10 วัน	89	-0.7	3.81	1.97	295
ปืทรูท	0	95 – 100	4-6 เดือน	88	-0.9	3.77	1.93	293
บร็อกคอรี่	0	95 – 100	10-14 วัน	90	-0.6	3.85	1.97	302
แครอท	0	98 – 100	4-6 สัปดาห์	88	-1.4	3.77	1.93	293
กะหล่ำดอก	0	95 – 100	2-4 สัปดาห์	92	-0.8	3.89	1.97	307
เซเลอรี	0	98 – 100	1-2 เดือน	94	-0.5	3.98	2.01	314
ข้าวโพดหวาน	0	95 – 98	4-8 วัน	74	-0.6	3.31	1.76	247
แตงกวา	10 – 13	95	10-14 วัน	96	-0.5	4.06	2.05	319
มะเขือยาว	8 – 13	90 – 95	7-10 วัน	93	-0.8	3.94	2.01	309
ผักทุกชนิดแช่แข็ง	-23(-18)	-	6-12 เดือน	-	-	-	-	-
กระเทียมแห้ง	0	65 – 70	6-7 เดือน	61	-0.8	2.89	1.67	207
หัวผักกาดหอม	0 – 1	95 – 100	2-3 สัปดาห์	95	-0.2	4.02	2.01	316
เห็ด	0	95	3-4 วัน	91	-0.9	3.89	1.97	302
หัวหอม	0	95 – 100	3-4 สัปดาห์	89	-0.9	3.81	1.97	295
ถั่วลันเตา	0	95	1-3 สัปดาห์	74	-0.6	3.31	1.76	247
พริกหวาน	7 – 10	90 – 95	2-3 สัปดาห์	92	-0.7	3.94	1.97	307
มันฝรั่ง	3 – 10	90 – 95	5-8 เดือน	78	-0.6	3.43	1.80	258
ฟักทอง	10 – 13	50 – 75	2-3 เดือน	91	-0.8	3.85	1.97	302
ผักขม	0	95 – 98	10-14 วัน	93	-0.3	3.94	2.01	309
มะเขือเทศดิบ	13 – 21	90 – 95	1-2 สัปดาห์	93	-0.5	3.94	2.01	309
มะเขือเทศสุก	7 – 10	90 – 95	4-7 วัน	94	-0.5	3.98	2.01	312

ตารางที่ 6.7 สมบัติของผลิตภัณฑ์สดจำพวกผลไม้

ชนิดผลิตภัณฑ์	อุณหภูมิ เก็บรักษา, °C	ความชื้น สัมพัทธ์, %	ช่วงเวลา เก็บรักษา	ปริมาณ น้ำ, %	จุดเยือกแข็ง สูงสุด, °C	ความร้อน จำเพาะเหนือ จุดเยือกแข็ง, kJ/kg·K	ความร้อน จำเพาะใต้จุด เยือกแข็ง, kJ/kg·K	ความร้อน แฝง, kJ/kg
แอปเปิล	-1 – 4	90 – 95	3-4 เดือน	84	-1.1	3.64	1.88	281
แอปริคอต	0	90 – 95	1-2 สัปดาห์	85	-1.1	3.68	1.92	284
อะโวคาโด	4 – 13	85 – 90	2-4 สัปดาห์	65	0	3.01	1.67	219
กล้วย	-	85 – 95	-	75	-0.8	3.35	1.76	251
แบ็คเบอร์รี่	0	90 – 95	3 วัน	85	-0.8	3.68	1.93	284
บลูเบอร์รี่	0	90 – 95	2 สัปดาห์	82	-1.3	3.60	1.88	274
เชอร์รี่	0	90 – 95	3-7 วัน	84	-1.7	3.64	1.88	281
ผลไม้ทุกชนิดแช่แข็ง	-23–(-18)	90 – 95	6-12 เดือน	-	-	-	-	-
ส้มต่างๆ	10 – 16	85 – 90	6-10 สัปดาห์	89	-1.1	3.77	1.93	295
องุ่น	0	85 – 90	2-8 สัปดาห์	89	-1.3	3.60	1.88	274
ฝรั่ง	5 – 10	90	2-3 สัปดาห์	83	-	3.60	1.88	277
แตงฮันนี่ดีว	7 – 10	90 – 95	3-4 สัปดาห์	93	-0.9	3.94	2.01	309
มะนาว	0 – 10	85 – 90	1-6 เดือน	89	-1.4	3.81	1.93	295
มะม่วง	13	85 – 90	2-3 สัปดาห์	81	-0.9	3.56	1.84	272
มะกอก	5 – 10	85 – 90	4-6 สัปดาห์	75	-1.4	3.35	1.76	251
ส้ม	0 – 9	85 – 90	3-12 สัปดาห์	87	-0.8	3.77	1.93	288
ลูกท้อ	0	90 – 95	2-4 สัปดาห์	91	-0.8	3.81	1.93	295
ลูกสารี	-2 – 0	90 – 95	2-7 เดือน	83	-0.9	3.60	1.88	274
สับปะรดสุก	7	85 – 90	2-4 สัปดาห์	85	-1.0	3.68	1.88	284
พลัม	0	90 – 95	2-4 สัปดาห์	86	-0.9	3.68	1.88	286
สตอเบอร์รี่	0	90 – 95	5-7 วัน	90	-0.9	3.85	1.98	300
แตงโม	10 – 16	90	2-3 สัปดาห์	93	-0.4	4.06	2.01	309

ตารางที่ 6.8 สมบัติของผลิตภัณฑ์สดจำพวกเนื้อสัตว์

ชนิดผลิตภัณฑ์	อุณหภูมิเก็บรักษา, °C	ความชื้นสัมพัทธ์, %	ช่วงเวลาเก็บรักษา	ปริมาณน้ำ, %	จุดเยือกแข็งสูงสุด, °C	ความร้อนจำเพาะเหนือจุดเยือกแข็ง, kJ/kg·K	ความร้อนจำเพาะใต้จุดเยือกแข็ง, kJ/kg·K	ความร้อนแฝง, kJ/kg
ปลาเซลมอน	0 – 1	95 – 100	18 วัน	64	-2.2	3.01	1.63	314
ปลาทูน่า	0 – 2.2	95 – 100	14 วัน	70	-2.2	3.22	1.67	233
ปลาทุกชนิดแช่แข็ง	-29–(-20)	90 – 95	6-12 เดือน	-	-2.2	-	-	-
กุ้ง	0 – 1	95 – 100	12-14 วัน	76	-2.2	3.39	1.80	254
ลอบสเตอร์	5 – 10	ในน้ำทะเล	ไม่มีกำหนด	79	-2.2	3.48	1.84	263
หอย	5 – 10	95 – 100	5 วัน	80	-2.2	3.52	1.84	268
หอย กุ้ง ปู ทุกชนิดแช่แข็ง	-29–(-20)	90 – 95	3-8 เดือน	-	-	-	-	-
เนื้อวัวสด	0 – 1	88 – 92	1-6 สัปดาห์	62 – 77	-2.2–(-1.7)	2.93–3.52	1.63–1.80	207–256
เนื้อวัวแช่แข็ง	-23–(-18)	90 – 95	6-12 เดือน	-	-	-	-	-
เนื้อหมูสด	0 – 1	85 – 90	3-7 วัน	32 – 44	-2.2–(-1.7)	2.00–2.39	1.26–1.38	107–147
เนื้อหมูแช่แข็ง	-23–(-18)	90 – 95	4-8 เดือน	-	-	-	-	-
แฮม	0 – 1	80 – 85	3-5 วัน	56	-1.7	2.76	1.55	186
แฮมแช่แข็ง	-23–(-18)	90 – 95	6-8 เดือน	-	-	-	-	-
เบคอน	3 – 5	80 – 85	2-3 สัปดาห์	19	-	1.59	1.09	63
เบคอนแช่แข็ง	-23–(-18)	90 – 95	2-4 เดือน	-	-	-	-	-
ไส้กรอก	0	85	1-7 วัน	38	-	2.22	1.30	126
เนื้อแกะสด	0 – 1	85 – 90	5-12 วัน	60 – 70	-2.2–(-1.7)	2.89–3.22	1.59–1.72	200–233
เนื้อแกะแช่แข็ง	-23–(-18)	90 – 95	8-12 เดือน	-	-	-	-	-
สัตว์ปีกสด	-2 – 0	95 – 100	1-4 สัปดาห์	74	-2.8	3.35	1.76	247
สัตว์ปีกแช่แข็ง	-23–(-18)	90 – 95	12 เดือน	-	-	-	-	-
กระต่ายสด	0 – 1	90 – 95	1-5 วัน	68	-	3.14	1.67	226

ตารางที่ 6.9 สมบัติของผลิตภัณฑ์อาหารแปรรูปและอาหารสด

ชนิดผลิตภัณฑ์	อุณหภูมิ เก็บรักษา, °C	ความชื้น สัมพัทธ์, %	ช่วงเวลา เก็บรักษา	ปริมาณ น้ำ, %	จุดเยือกแข็ง สูงสุด, °C	ความร้อน จำเพาะเหนือ จุดเยือกแข็ง, kJ/kg·K	ความร้อน จำเพาะใต้จุด เยือกแข็ง, kJ/kg·K	ความร้อน แฝง, kJ/kg
บัตเตอร์ (เนยเหลว)	0	75 – 85	1 เดือน	16	-20 – 0	1.51	1.30	53
บัตเตอร์ (เนยเหลว) แข็ง	-23	70 – 85	12 เดือน	-	-	-	-	-
ชีส (เนยแข็ง) (เก็บนาน)	0 – 1	65	12 เดือน	37	-13.3	2.18	1.30	123
ชีส (เนยแข็ง) (เก็บไม่นาน)	4	65	6 เดือน	37	-13.3	2.18	1.30	123
ไอศกรีม	-29–(-26)	-	3-23 เดือน	63	-6.1	2.93	1.63	200
นมพาสเจอร์ไรซ์	0 – 1	-	2-3 สัปดาห์	87	-0.6	3.89	1.93	291
ไข่ (เก็บนาน)	-2 – 0	80 – 85	5-6 เดือน	66	-2.2	3.06	1.67	223
ไข่ (เก็บไม่นาน)	10 – 13	70 – 75	2-3 สัปดาห์	66	-2.2	3.06	1.67	223
ไข่แช่แข็ง	-18	-	> 1 ปี	74	-	3.35	1.76	247
ชีอกโกเลต	-18 – 1	40	7-10 วัน	1	-	1.05	0.84	2
พืชนัทบัตเตอร์ (ถั่วลิสงบดเคล้าเนยเหลว)	-18 – 1	40	6-12 เดือน	2	-	1.09	0.88	7
ลูกกวาด	-18 – 1	65	5-12 เดือน	10	-	1.34	0.96	33
อาหารกระป๋อง	0 – 16	≤ 70	1 ปี	-	-	-	-	-
โกโก้	0 – 4	50 – 70	> 1 ปี	-	-	-	-	-
กะทิ	0 – 2	80 – 85	1-2 เดือน	47	-1.2	2.43	1.42	156
กาแฟ (เขียว)	2 – 3	80 – 85	2-4 เดือน	10 – 15	-	1.34–1.47	0.96–1.00	33 – 49
น้ำผึ้ง	10	-	> 1 ปี	17	-	1.47	1.09	60
ถั่วอบ	0 – 10	65 – 75	8-12 เดือน	3 – 6	-	0.92-1.05	0.88-0.92	9 – 19
น้ำมันพืช	22	-	> 1 ปี	-	-	-	-	-
น้ำส้ม	-1 – 2	-	3-6 สัปดาห์	89	-	3.81	1.97	295

ตัวอย่าง 6.7 เนื้อสัตว์ปีกหนัก 300 kg ถูกนำเข้าสู่ห้องเย็นที่ระดับอุณหภูมิ 5°C ผ่านการแช่แข็ง และทำให้เย็นตัวจนถึงอุณหภูมิ -15°C ภายใน 12 ชั่วโมง จงคำนวณภาระการทำความเย็นเป็น kW

วิธีทำ

จากตารางที่ 6.8 สำหรับเนื้อสัตว์ปีก

ความร้อนจำเพาะเหนือจุดเยือกแข็ง = 3.18 kJ/kg °C

ความร้อนจำเพาะใต้จุดเยือกแข็ง = 1.55 kJ/kg °C

ความร้อนแฝง = 246 kJ/kg

อุณหภูมิแช่แข็ง = -2.75°C

ช่วง 1) ความร้อนในการลดอุณหภูมิจาก 5°C เป็น -2.75°C

$$= (300) \times (3.18) \times [5 - (-2.75)] = 7,630 \text{ kJ}$$

ช่วงที่ 2) ความร้อนในช่วงแข็งตัว

$$= (300) \times (246) = 73,800 \text{ kJ}$$

ช่วงที่ 3) ความร้อนในช่วงลดอุณหภูมิจาก -2.75°C เป็น -15°C

$$= (300) \times (1.55) \times [-2.75 - (-15)] = 5,580 \text{ kJ}$$

ดังนั้นได้พลังงานความร้อนรวมที่ใช้ = 87,010 kJ

$$\text{ภาระความเย็นรวมเทียบเท่า} = 87,010 / 12(3600) = 2.01 \text{ kW}$$

ตอบ

กรณีผลิตภัณฑ์จำพวกผักและผลไม้จะเพิ่มความร้อนจากการคายน้ำ (Respiration Heat) เนื่องจากหลังจากการเก็บเกี่ยวแล้วยังคงมีการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างออกซิเจนในอากาศกับคาร์โบไฮเดรตในเนื้อเยื่อของผักและผลไม้ ซึ่งได้ออกมาเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และความร้อน ความร้อนที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ความร้อนจากการคายน้ำ ดังนั้น ในกรณีที่ผลิตภัณฑ์เป็นผักหรือผลไม้สด และอุณหภูมิห้องเย็นสูงกว่าจุดเยือกแข็ง ต้องรวมความร้อนส่วนนี้เข้ากับภาระความร้อนของผลิตภัณฑ์ด้วย ตารางที่ 6.10 แสดงอัตราการคายน้ำของผักและผลไม้ และค่าความร้อนที่เกิดจากการคายน้ำของผักและผลไม้, Q, W สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$Q = (\text{มวลของผลิตภัณฑ์, kg}) \times (\text{อัตราการคายน้ำ, W/kg}) \quad (6.11)$$

นอกจากนี้ ผลิตภัณฑ์โดยปกติจะบรรจุอยู่ในภาชนะบรรจุ เช่น นมในขวดหรือกล่อง ดังนั้นจึงต้องนำค่าความร้อนที่ภาชนะบรรจุถูกลดอุณหภูมิมาคิดคำนวณด้วย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัสดุในการทำหีบห่อและบรรจุภัณฑ์ ดังนั้นในกรณีที่ผลิตภัณฑ์ที่นำเข้าห้องเย็นบรรจุอยู่ในภาชนะ การคิดภาระความร้อนของผลิตภัณฑ์ต้องรวมความร้อนที่ต้องขจัดออกจากภาชนะเหล่านี้จากอุณหภูมิเริ่มต้นจนเท่าอุณหภูมิห้องเย็นด้วย สำหรับการคำนวณสามารถใช้สมการ (6.9) ได้ โดยใช้มวลและความร้อนจำเพาะของบรรจุภัณฑ์แทน

ตารางที่ 6.10 อัตราการคายน้ำของผักและผลไม้

ผัก			ผลไม้		
ชนิด	อุณหภูมิ	W/kg	ชนิด	อุณหภูมิ	W/kg
แอสปารากัส	0	0.023	แอปเปิล	0	0.012
	5	0.110		5	0.019
	10	0.110		10	0.078
	16	0.531			
ถั่ว	0	0.064	แอปปริคอต	0	0.015
	5	0.090		5	0.023
	16	0.283		10	0.110
ถั่วลิ้นเต่า	0	0.046	กล้วย	12	0.044
	5	0.061		20	0.123
	16	0.181		21 – 23	0.319
กะหล่ำปลี	0	0.038	แบ็คเบอร์รี่	2	0.074
	5	0.061		บูลเบอร์รี่	16
	16	0.810			
กะหล่ำดอก	0	0.038	เชอร์รี่	0	0.021
	5	0.061		16	0.161
	16	0.810			
แครอท	0	0.029	ส้มต่างๆ	0	0.006
	5	0.047		5	0.014
	16	0.110		16	0.032
เซเลอรี่	0	0.038	องุ่น	0	0.005
	5	0.061		5	0.009
	16	0.810		16	0.032
ข้าวโพดหวาน	0	0.023	แครนเบอร์รี่	0	0.009
	5	0.110		5	0.012
				16	0.023
แตงกวา	0	0.018	ของสดรายวัน	0	0.009
	5	0.026		5	0.012
	16	0.113		10	0.023

6.3.4 ภาวะความร้อนจากการละลายน้ำแข็งเกาะที่ขดท่อเครื่องระเหย

ภาวะความร้อนส่วนนี้ ได้แก่ ภาวะความร้อนที่เกิดขึ้นขณะทำการละลายน้ำแข็งเกาะซึ่งปกติต้องใช้พลังงานความร้อนจากแหล่งต่างๆ มาทำการละลายน้ำแข็ง เช่น การใช้เครื่องทำความร้อนด้วยไฟฟ้า การใช้น้ำฉีดพ่นลงบนขดท่อของเครื่องระเหย หรือการใช้สารทำความเย็นจากเครื่องอัดที่มีอุณหภูมิสูงลัดวงจรให้ไหลผ่านภายในขดท่อของเครื่องระเหย ดังนั้นเป็นผลให้มีความร้อนตกค้างอยู่ในระบบหลังจากทำการละลายน้ำแข็งเสร็จซึ่งต้องทำการกำจัดออก อย่างไรก็ตามการหาค่าที่แน่นอนเป็นไปได้ยาก การเพิ่มภาระในส่วนนี้จึงถูกนำไปรวมกับการเพิ่มค่าความปลอดภัย

6.3.5 ภาวะความร้อนอื่นๆ

ภาวะความร้อนส่วนนี้ ได้แก่ ภาวะความร้อนที่ไม่ใช่ภาระดังกล่าวตามข้างต้น โดยคิดภาระจากแหล่งความร้อนทั้งหมดที่จะมีในบริเวณทำความเย็น เช่น หลอดไฟ มอเตอร์ไฟฟ้าของเครื่องระเหย คนที่ทำงานภายในบริเวณ อุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆ เป็นต้น อย่างไรก็ตามการทำความเย็นส่วนมาก ภาระอื่นๆ โดยทั่วไปที่มีผลกระทบมากประกอบด้วย ภาวะความร้อนจากหลอดไฟ มอเตอร์พัดลมของเครื่องระเหยเป็นหลัก และภาวะความร้อนจากคนที่ทำงานภายในห้อง ซึ่งสามารถหาได้ดังนี้

ความร้อนจากหลอดไฟ, Q คำนวณจากผลคูณของกำลังงานไฟฟ้าของหลอดไฟ, W คูณ ชั่วโมงที่ใช้งานหารด้วย 24 ชั่วโมง (ชม.) ดังสมการ

$$Q = (\text{กำลังงานไฟฟ้าของหลอดไฟ}) \times (\text{ชม.ที่ใช้งาน}) / (24 \text{ ชม.}) \quad (6.12)$$

ทำนองเดียวกันความร้อนจากมอเตอร์, Q สามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$Q = (\text{กำลังงานไฟฟ้าของมอเตอร์, } W) \times (\text{ชม.ที่ใช้งาน}) / (24 \text{ ชม.}) \quad (6.13)$$

สำหรับความร้อนจากคนที่ทำงานภายในบริเวณห้องทำความเย็น, Q หาได้ดังนี้

$$Q = (\text{จำนวนคน}) \times (\text{ค่าความร้อนเทียบเท่าต่อคน}) \times (\text{ชม.ที่อยู่ในห้อง}) / (24 \text{ ชม.}) \quad (6.14)$$

ตารางที่ 6.11 ค่าความร้อนเทียบเท่าของภาระการทำความเย็นจากคน

อุณหภูมิห้องเย็น, °C	ค่าความร้อนเทียบเท่า, W/คน
10	211
5	242
0	275
-5	305
-10	347
-15	378
-20	407

6.3.6 การใช้ค่าความปลอดภัย

เมื่อรวมภาระต่างๆ ที่กล่าวมาแล้วเข้าด้วยกันจะได้ภาระการทำความเย็นรวม ซึ่งมักต้องเพิ่มค่าอีก 5% ถึง 10% เป็นค่าความปลอดภัย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความน่าเชื่อถือของข้อมูล โดยหลังจากบวกค่าความปลอดภัยเข้าไปแล้วจึงนำไปคูณด้วย 24 ชั่วโมงและหารด้วยจำนวนชั่วโมงที่ต้องการใช้งานเครื่องเพื่อนำไปเลือกอุปกรณ์ต่อไป

ตัวอย่าง 6.8 ห้องเย็นใช้สำหรับเก็บผลิตภัณฑ์ ขนาด 6 m x 4 m สูง 3.4 m หุ้มด้วยแผ่นฉนวนใยแก้วหนา 100 mm ความหนาแน่นของผนังประมาณ 200 mm โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม $U = 0.31 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ อุณหภูมิภายนอกเท่ากับ 30°C และการใช้เป็นแบบใช้งานเฉลี่ยปกติ ทั้งนี้ในแต่ละวันจะทำความเย็นให้กับแครอทหนัก 1,250 kg จาก 16°C จนถึงอุณหภูมิในการเก็บ 5°C คำนวณภาระการทำความเย็นเป็น kW โดยไม่คิดภาระความร้อนอื่นๆ ทั้งนี้ให้คิดจากการทำงาน 16 ชั่วโมงต่อวัน

วิธีทำ

$$\text{พื้นที่ผิวภายนอกห้องเย็น} = 2(6 \times 4) + 2(4 \times 3.4) + 2(6 \times 3.4) = 116 \text{ m}^2$$

$$\text{ปริมาตรภายในห้องเย็น} = 5.6\text{m} \times 3.6\text{m} \times 3\text{m} = 60.5 \text{ m}^3$$

$$\text{ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม } U = 0.31 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

จากตารางที่ 6.5 ได้ค่าเฉลี่ยของอัตราการไหลเข้าของอากาศภายนอก โดยการบัญญัติไตรยางค์ที่ปริมาตรภายใน = 60.5 m^3 ได้อัตราการไหลเข้าของอากาศภายนอก = 8.13 l/s

ถ้าให้อากาศภายนอกมี RH = 50% และอุณหภูมิที่เข้าห้องเย็น = 30°C อุณหภูมิภายในห้องเย็น = 5°C จากตารางที่ 6.3 ตัวประกอบเอนทัลปีที่เปลี่ยนแปลงของอากาศภายนอกที่เข้ามาจากการเปิดประตูของห้องเย็น (อุณหภูมิสูงกว่า 0°C) ณ อุณหภูมิของห้องคือ 5° ได้ค่าตัวประกอบเอนทัลปีที่เปลี่ยนแปลง = 0.0536 kJ/l

$$\text{จากตารางที่ 6.10 ได้ค่าอัตราการคายน้ำของแครอท} = 0.047 \text{ W/kg}$$

หาภาระความร้อนที่ผ่านผนังเข้ามา

จากสมการ

$$Q = (A) \times (U) \times (\Delta T)$$

$$\text{ภาระความร้อนที่ผ่านผนังเข้ามา} = (116) \times (0.31) \times (30-5) = 899 \text{ W} = 0.899 \text{ kW}$$

หาภาระความร้อนจากอากาศภายนอกเข้ามา

ภาระความร้อนจากอากาศภายนอกเข้ามา

$$= (\text{อัตราการไหลเข้าของอากาศภายนอก}) \times (\text{ตัวประกอบเอนทัลปีที่เปลี่ยนแปลง})$$

$$= (8.13 \text{ l/s}) \times (0.0536 \text{ kJ/l}) = 0.43 \text{ kW}$$

หาภาระความร้อนจากผลิตภัณฑ์

$$\text{จากตารางที่ 6.6 แครอทมีค่าความร้อนจำเพาะเท่ากับ } 3.77 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ภาระความร้อนจากผลิตภัณฑ์} &= (m) \times (C_p) \times (\Delta T) \\
 &= (1250 \text{ kg}) \times (3.77 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}) \times (30 - 5) / (24 \times 3600\text{s}) = 1.90 \text{ kW} \\
 \text{ภาระความร้อนจากการคายน้ำ} &= (\text{มวลของผลิตภัณฑ์}) \times (\text{อัตราการคายน้ำ}) \\
 &= (1250 \text{ kg}) \times (0.047 \text{ W/kg}) = 58.75 \text{ W} = 0.059 \text{ kW} \\
 \text{ดังนั้น ภาระความร้อนรวม} &= 0.899 + 0.43 + 1.90 + 0.59 = 3.82 \text{ kW} \\
 \text{คิดค่าความปลอดภัย 10 \%} &= (3.82 \times (10/100)) \text{ kW} = 0.38 \text{ kW} \\
 \text{ได้ภาระความร้อนทั้งหมด} &= 3.82 + 0.38 \text{ kW} = 4.2 \text{ kW} \\
 \text{หาขนาดของเครื่องทำความเย็นที่ต้องการจากสมการ (6.1)} \\
 Q &= 24 \text{ hr } (q_r) / RT \\
 &= 24 \text{ hr } (4.2 \text{ kW}) / 16 \text{ hr} = 6.3 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

ตอบ

ตัวอย่าง 6.9 ห้องเย็นขนาด 6 m x 10 m x สูง 4 m ถูกใช้ในการเก็บเนื้อวัวสดเป็นระยะสั้นๆ ในแต่ละวัน โดยเนื้อวัวสดจะถูกนำเข้ามาแช่เย็น จากอุณหภูมิ 7°C จนถึงอุณหภูมิการเก็บที่ 2°C ในปริมาณ 3,400 kg ทั้งนี้ผนังทุกด้านรวมทั้งพื้นและเพดานอยู่ติดกับบริเวณที่ไม่มีมีการปรับอากาศ (30 °C และ RH = 50%) ยกเว้นผนังด้านทิศตะวันออก (6m x 4m) ติดกับห้องเย็นอีกห้องซึ่งมีอุณหภูมิเดียวกันกับห้องเย็นนี้ โครงสร้างของผนังประกอบด้วยอิฐบล็อกหนา 200 mm หุ้มฉนวนด้วยแผ่นไม้ก๊อกหนา 100 mm และฉาบหน้าด้วยผนังก่ออิฐถือปูนธรรมดาหนา 100 mm มีคนทำงานภายในห้องเย็นตลอดช่วงการนำเข้ามาเนื้อวัวสดเป็นเวลา 4 ชั่วโมง จำนวน 2 คน การใช้งานเป็นแบบการใช้งานเฉลี่ยปกติ มีภาระความร้อนจากหลอดไฟ 500 W และเปิดใช้งานประมาณ 4 ชม./วัน คำนวณขนาดเครื่องทำความเย็นที่ต้องการเป็น kW โดยอ้างอิงชั่วโมงทำงาน 20 ชั่วโมง

วิธีทำ

$$\text{พื้นที่ผิวภายนอกห้องเย็น} = 2(10 \times 4) + 2(6 \times 10) + 2(6 \times 4) = 224 \text{ m}^2$$

$$\text{ปริมาตรภายในห้องเย็น} = 5.4 \times 9.4 \times 3.4 = 172.58 \text{ m}^3$$

ผนังทุกด้านรวมทั้งพื้น และเพดานหุ้มฉนวน 100 mm เป็นแผ่นไม้ก๊อก

จากตารางที่ 6.1 ค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุ จะได้ค่า k ของแผ่นไม้ก๊อก และ

คอนกรีต โดย

$$\text{ค่า k ของแผ่นไม้ก๊อก} = 0.043 \text{ W/m}\cdot\text{K}$$

$$\text{ค่า k ของผนังก่ออิฐถือปูนธรรมดา} = 0.72 \text{ W/m}\cdot\text{K}$$

$$\text{ค่า C ของอิฐบล็อกหนา 200 mm} = 5.11 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$$

ทั้งนี้สมมติให้ด้านนอกลมสงบ ส่วนด้านในอากาศหมุนเวียนด้วยความเร็วต่ำ

$$\text{ดังนั้น } f_o = 9.37 \text{ W/m}^2\cdot\text{K} \text{ และ } f_i = 22.70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$$

$$\text{เพราะฉะนั้นจะได้ค่า } U = 0.368 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$$

จากตารางที่ 6.5 ได้ค่าเฉลี่ยของอัตราการไหลเข้าของอากาศภายนอก = 13.56 l/s

ถ้าให้อากาศภายนอกมี RH = 50% และอุณหภูมิที่เข้าห้องเย็น = 30°C อุณหภูมิภายในห้องเย็น = 2°C จากตารางที่ 6.3 ตัวประกอบเอนทัลปีที่เปลี่ยนแปลงของอากาศภายนอกที่เข้ามาจากการเปิดประตูของห้องเย็น (อุณหภูมิสูงกว่า 0°C) ณ อุณหภูมิของห้องคือ 2° ได้ค่าตัวประกอบเอนทัลปีที่เปลี่ยนแปลง = 0.0598 kJ/l

หาภาระความร้อนที่ผ่านผนังเข้ามา

จากสมการ

$$Q = (A) \times (U) \times (\Delta T)$$

$$\text{ภาระความร้อนที่ผ่านผนังเข้ามา} = (224-24)(0.368)(30-2) = 2060.8 \text{ W}$$

$$= 2.06 \text{ kW}$$

หาภาระความร้อนจากอากาศภายนอกเข้ามา

ภาระความร้อนจากอากาศภายนอกเข้ามา

$$= (\text{อัตราการไหลเข้าของอากาศภายนอก}) \times (\text{ตัวประกอบเอนทัลปีที่เปลี่ยนแปลง})$$

$$= (13.56 \text{ l/s}) \times (0.0598 \text{ kJ/l}) = 0.801 \text{ kW}$$

หาภาระความร้อนจากผลิตภัณฑ์

จากตารางที่ 6.8 เนื้อวัสดุมีค่าความร้อนจำเพาะเท่ากับ 3.14 kJ/kg·K

$$\text{ภาระความร้อนจากผลิตภัณฑ์} = (m) \times (C_p) \times (\Delta T)$$

$$= (3,400 \text{ kg}) \times (3.14 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}) \times (7-2) / (24 \times 3600\text{s}) = 0.875 \text{ kW}$$

หาภาระความร้อนอื่นๆ ได้แก่ จาก คน และหลอดไฟ

จากตารางที่ 6.11 ค่าความร้อนเทียบเท่าของภาระการทำมาความเย็นจากคน = 261 W

$$\text{ภาระความร้อนจากคน} = (2) \times (261 \text{ W}) \times (4 \text{ Hrs}) / (24 \text{ Hrs}) = 87 \text{ W} = 0.087 \text{ kW}$$

$$\text{ภาระความร้อนจากหลอดไฟ} = (500 \text{ W}) \times (4 \text{ Hrs}) / (24 \text{ Hrs}) = 83 \text{ W} = 0.083 \text{ kW}$$

$$\text{ดังนั้น ภาระความร้อนรวม} = 2.06 + 0.801 + 0.875 + 0.087 + 0.083 = 3.906 \text{ kW}$$

$$\text{คิดค่าความปลอดภัย 10 \%} = (3.906 \times (10/100)) \text{ kW} = 0.39 \text{ kW}$$

$$\text{ได้ภาระความร้อนทั้งหมด} = 3.906 + 0.39 \text{ kW} = 4.3 \text{ kW}$$

หาขนาดของเครื่องทำความเย็นที่ต้องการจากสมการ (6.1)

$$Q = 24 \text{ hr } (q_t) / RT$$

$$= 24 \text{ hr } (4.3 \text{ kW}) / 20 \text{ hr} = 5.2 \text{ kW}$$

ตอบ

แบบฝึกหัดบทที่ 6

- ห้องเย็นขนาด 10m x 6m สูง 3.4m บุด้วยแผ่นฉนวนใยแก้วหนา 100 mm ความหนาของผนังทั้งหมดประมาณ 200 mm อุณหภูมิภายนอก 35°C และใช้งานปานกลาง โดยในแต่ละวันมีฝึกชนิดต่างๆ เปียกชุ่ม 1250 kg อุณหภูมิ 25°C ถูกทำให้เย็นลงถึงอุณหภูมิห้องเย็น -25°C จงคำนวณภาระในการทำความเย็นในหน่วย kW เครื่องทำความเย็นทำงาน 18 ชม.
- แอปเปิล 3,000 กล่อง ถูกเก็บในห้องเย็นขนาด 16 m x 12 m สูง 3.4 m ที่ 2°C โดยแอปเปิล 3,000 กล่องนี้ ถูกทยอยนำเข้ามา 200 กล่อง ในแต่ละวัน ที่ 30°C เป็นเวลา 15 วันติดต่อกัน (ช่วงการเก็บเกี่ยว) ผนังทุกด้านรวมทั้งพื้นและเพดาน มีโครงสร้างเป็นแผ่นกระดานไม้เนื้อแข็งประกบทั้งสองด้านโดยแต่ละแผ่นหนา 50 mm. ผนังระหว่างแผ่นกระดานทั้งสอง หุ้มฉนวนใยแก้วหนา 100 mm. ผนังทุกด้านทาสีอ่อน แต่ผนังด้านทิศใต้มีร่มเงาบัง และอุณหภูมิบรรยากาศเท่ากับ 30°C น้ำหนักเฉลี่ยของแอปเปิลแต่ละกล่องเท่ากับ 27 kg น้ำหนักเฉลี่ยของกล่องเท่ากับ 2 kg โดยกล่องมีค่าความร้อนจำเพาะ 2.5 kJ/kg·K มีภาระจากดวงไฟ 500 W เป็นเวลา 3 ชั่วโมงต่อวัน มีคนงานสองคนทำงานพร้อมรถยกซึ่งมีแบตเตอรี่ 4.17 kW เป็นเวลา 3 ชั่วโมงต่อวัน หาขนาดเครื่องระเหยที่ต้องการ โดยอิงชั่วโมงทำงาน 20 ชั่วโมง ทั้งนี้การคำนวณภาระการทำความเย็นให้คำนวณสำหรับภาระสูงสุดที่เกิดในวันที่ 15 ซึ่งเป็นวันสิ้นสุดการเก็บเกี่ยว คือจะมีแอปเปิลเข้ามาในห้องทั้งหมดรวม $200 \times 15 = 3,000$ กล่อง
- เนื้อไก่จำนวน 3,000 kg ถูกเก็บในห้องเย็นขนาด 20 m x 15 m สูง 3.4 m ที่ -20°C โดยผนังทุกด้านรวมทั้งพื้นและเพดาน มีโครงสร้างเป็นคอนกรีตหนา 50 mm. หุ้มฉนวนใยแก้วหนา 150 mm. ผนังทุกด้านทาสีอ่อน และอุณหภูมิบรรยากาศเท่ากับ 30°C ทั้งนี้มีภาระจากดวงไฟ 1500 W เป็นเวลา 5 ชั่วโมงต่อวัน มีคนงานสองคนทำงานเป็นเวลา 5 ชั่วโมงต่อวัน หาขนาดเครื่องระเหยที่ต้องการ โดยอิงชั่วโมงทำงาน 18 ชั่วโมง ทั้งนี้การคำนวณภาระการทำความเย็นให้คำนวณสำหรับภาระสูงสุด
- ห้องเย็นขนาด 16 m x 10 m x สูง 4 m ถูกใช้ในการเก็บเนื้อหมูสดเป็นระยะสั้นๆ ในแต่ละวัน โดยเนื้อหมูสดจะถูกนำเข้าแช่เย็น จากอุณหภูมิ 17°C จนถึงอุณหภูมิการเก็บที่ -5°C ในปริมาณ 5,400 kg ทั้งนี้ผนังทุกด้านรวมทั้งพื้นและเพดานอยู่ติดกับบริเวณที่ไม่มีการปรับอากาศ (30 °C และ RH = 50%) โครงสร้างของผนังประกอบด้วยอิฐธรรมดาหนา 100 mm หุ้มฉนวนด้วยใยแก้วหนา 200 mm มีคนทำงานภายในห้องเย็นตลอดช่วงการนำเข้าเนื้อหมูสดเป็นเวลา 6 ชั่วโมง จำนวน 3 คน ภาระใช้งานเป็นแบบการใช้งานเฉลี่ยปกติ มีภาระความร้อนจากหลอดไฟ 1000 W และเปิดใช้งานประมาณ 6 ชม./วัน คำนวณขนาดเครื่องทำความเย็นที่ต้องการเป็น kW โดยอ้างอิงชั่วโมงทำงาน 20 ชั่วโมง

บรรณานุกรม

- Althouse, A.D., Turnquist, C.H. and Bracciano, A.F. **Modern Refrigeration and Air Conditioning**. Tinley Park, IL: The Goodheart-Willcox Company, Inc., 1996.
- Cascade Energy Engineering. **Industrial Refrigeration Best Practices Guide**. Northwest Energy Efficiency Alliance, 2004. <<http://www.nwalliance.org>> (20 August 2005).
- Dossat, R.J. **Principle of Refrigeration**. 4th Ed. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice-Hall International, Inc., 1997.
- An Introduction to Absorption Cooling**. Energy Efficiency Best Practice Programme, 2001. <<http://www.energy-efficiency.gov.uk>> (18 March 2003).
- Designing Energy Efficient Refrigeration Plant**. Energy Efficiency Best Practice Programme, 2000. <<http://www.energy-efficiency.gov.uk>> (20 March 2003).
- Energy Efficient Refrigeration Technology – The Fundamentals**. Energy Efficiency Best Practice Programme, 2000. <<http://www.energy-efficiency.gov.uk>> (21 March 2003).
- Honson, D. W. **Ammonia Absorption Refrigeration Plant**. Sydney: The Official Journal of AIRAH. Gordon Brothers Industries Pty Ltd., 2002.
- Stoecker, W. F. **Industrial Refrigeration Handbook**. New York: McGraw-Hill Companies, Inc., 1998.
- Whitman, W.C. and Johnson, W.M. **Refrigeration & Air Conditioning Technology**. 3rd Ed. Singapore: An International Thomson Publishing Company, 1995.

ภาคผนวก

ผนวก ก ตารางสมบัติของสารทำความเย็นชนิด R-134a ณ สภาวะอิ่มตัว

อุณหภูมิ °C	ความดัน kPa (abs)	ปริมาณ m ³ /kg		ความหนาแน่น kg/m ³		เอนทัลปี kJ/kg			เอนโทรปี kJ/(kg)(K)	
		ของเหลว v _f	ไอ v _g	ของเหลว 1/v _f	ไอ 1/v _g	ของเหลว h _f	แฝง h _{fg}	ไอ h _g	ของเหลว s _f	ไอ s _g
-100	0.57	0.0006	25.0000	1580.5	0.040	77.3	259.9	337.2	0.4448	1.9460
-99	0.63	0.0006	22.7273	1577.8	0.044	78.4	259.4	337.8	0.4514	1.9407
-98	0.70	0.0006	20.4082	1575.0	0.049	79.6	258.8	338.4	0.4581	1.9356
-97	0.77	0.0006	18.5185	1572.3	0.054	80.7	258.2	339.0	0.4646	1.9306
-96	0.86	0.0006	16.9492	1569.5	0.059	81.9	257.7	339.6	0.4711	1.9257
-95	0.95	0.0006	15.3846	1566.8	0.065	83.0	257.1	340.1	0.4776	1.9209
-94	1.04	0.0006	13.8889	1564.1	0.072	84.2	256.6	340.7	0.4841	1.9161
-93	1.15	0.0006	12.6582	1561.3	0.079	85.3	256.0	341.3	0.4905	1.9115
-92	1.27	0.0006	11.6279	1558.6	0.086	86.5	255.4	341.9	0.4968	1.9070
-91	1.40	0.0006	10.6383	1555.8	0.094	87.6	254.9	342.5	0.5032	1.9025
-90	1.53	0.0006	9.7087	1553.1	0.103	88.8	254.3	343.1	0.5095	1.8982
-89	1.68	0.0006	8.9286	1550.4	0.112	89.9	253.8	343.7	0.5158	1.8939
-88	1.84	0.0006	8.1967	1547.6	0.122	91.1	253.2	344.3	0.5220	1.8898
-87	2.02	0.0006	7.5188	1544.9	0.133	92.3	252.7	344.9	0.5282	1.8857
-86	2.20	0.0006	6.8966	1542.1	0.145	93.4	252.1	345.5	0.5344	1.8817
-85	2.41	0.0006	6.3291	1539.4	0.158	94.6	251.6	346.2	0.5406	1.8778
-84	2.63	0.0007	5.8480	1536.7	0.171	95.7	251.0	346.8	0.5467	1.8739
-83	2.86	0.0007	5.4054	1533.9	0.185	96.9	250.5	347.4	0.5528	1.8702
-82	3.11	0.0007	4.9751	1531.2	0.201	98.0	249.9	348.0	0.5589	1.8665
-81	3.39	0.0007	4.6083	1528.5	0.217	99.2	249.4	348.6	0.5650	1.8629
-80	3.68	0.0007	4.2553	1525.7	0.235	100.4	248.8	349.2	0.5710	1.8594
-79	3.99	0.0007	3.9526	1523.0	0.253	101.5	248.3	349.8	0.5770	1.8559
-78	4.33	0.0007	3.6630	1520.2	0.273	102.7	247.7	350.4	0.5830	1.8525
-77	4.69	0.0007	3.3898	1517.5	0.295	103.9	247.2	351.1	0.5890	1.8492
-76	5.07	0.0007	3.1546	1514.8	0.317	105.0	246.6	351.7	0.5949	1.846
-75	5.48	0.0007	2.9326	1512.0	0.341	106.2	246.1	352.3	0.6009	1.8428
-74	5.92	0.0007	2.7248	1509.3	0.367	107.4	245.5	352.9	0.6068	1.8397
-73	6.39	0.0007	2.5381	1506.5	0.394	108.6	245.0	353.5	0.6126	1.8366
-72	6.89	0.0007	2.3641	1503.8	0.423	109.7	244.4	354.2	0.6185	1.8336
-71	7.42	0.0007	2.2075	1501.0	0.453	110.9	243.9	354.8	0.6243	1.8307
-70	7.98	0.0007	2.0576	1498.3	0.486	112.1	243.3	355.4	0.6302	1.8279
-69	8.58	0.0007	1.9231	1495.5	0.520	113.3	242.8	356.0	0.6360	1.8251
-68	9.22	0.0007	1.7986	1492.8	0.556	114.5	242.2	356.6	0.6417	1.8223
-67	9.89	0.0007	1.6835	1490.0	0.594	115.6	241.6	357.3	0.6475	1.8196
-66	10.61	0.0007	1.5773	1487.3	0.634	116.8	241.1	357.9	0.6532	1.817
-65	11.37	0.0007	1.4771	1484.5	0.677	118.0	240.5	358.5	0.6590	1.8144
-64	12.18	0.0007	1.3850	1481.8	0.722	119.2	239.9	359.2	0.6647	1.8119
-63	13.03	0.0007	1.3004	1479.0	0.769	120.4	239.4	359.8	0.6704	1.8095
-62	13.93	0.0007	1.2210	1476.3	0.819	121.6	238.8	360.4	0.6760	1.8071
-61	14.88	0.0007	1.1481	1473.5	0.871	122.8	238.2	361.0	0.6817	1.8047
-60	15.89	0.0007	1.0799	1470.7	0.926	124.0	237.7	361.7	0.6873	1.8024
-59	16.95	0.0007	1.0163	1468.0	0.984	125.2	237.1	362.3	0.6929	1.8001
-58	18.07	0.0007	0.9579	1465.2	1.044	126.4	236.5	362.9	0.6985	1.7979
-57	19.25	0.0007	0.9025	1462.4	1.108	127.6	236.0	363.6	0.7041	1.7958
-56	20.49	0.0007	0.8511	1459.6	1.175	128.8	235.4	364.2	0.7097	1.7937
-55	21.80	0.0007	0.8032	1456.9	1.245	130.0	234.8	364.8	0.7152	1.7916
-54	23.17	0.0007	0.7587	1454.1	1.318	131.2	234.2	365.4	0.7208	1.7896
-53	24.62	0.0007	0.7168	1451.3	1.395	132.4	233.6	366.1	0.7263	1.7876
-52	26.14	0.0007	0.6775	1448.5	1.476	133.7	233.1	366.7	0.7318	1.7857
-51	27.73	0.0007	0.6410	1445.7	1.560	134.9	232.5	367.3	0.7373	1.7838
-50	29.41	0.0007	0.6068	1442.9	1.648	136.1	231.9	368.0	0.7428	1.7819
-49	31.16	0.0007	0.5747	1440.1	1.740	137.3	231.3	368.6	0.7482	1.7801
-48	33.00	0.0007	0.5447	1437.3	1.836	138.5	230.7	369.2	0.7537	1.7783
-47	34.93	0.0007	0.5165	1434.5	1.936	139.8	230.1	369.9	0.7591	1.7766
-46	36.95	0.0007	0.4902	1431.6	2.040	141.0	229.5	370.5	0.7645	1.7749
-45	39.06	0.0007	0.4653	1428.8	2.149	142.2	228.9	371.1	0.7699	1.7732
-44	41.27	0.0007	0.4419	1426.0	2.263	143.5	228.3	371.8	0.7753	1.7716
-43	43.58	0.0007	0.4198	1423.2	2.382	144.7	227.7	372.4	0.7806	1.77
-42	45.99	0.0007	0.3992	1420.3	2.505	145.9	227.1	373.0	0.7860	1.7685
-41	48.51	0.0007	0.3798	1417.5	2.633	147.2	226.5	373.7	0.7913	1.767

ตารางสมบัติของสารทำความเย็นชนิด R-134a ณ สภาวะอิ่มตัว (ต่อ)

อุณหภูมิ °C	ความดัน kPa (abs)	ปริมาตร m ³ /kg		ความหนาแน่น kg/m ³		เอนทัลปี kJ/kg			เอนโทรปี kJ/(kg)(K)	
		ของเหลว v _f	ไอ v _g	ของเหลว 1/v _f	ไอ 1/v _g	ของเหลว h _f	แฝง h _{fg}	ไอ h _g	ของเหลว s _f	ไอ s _g
-40	51.14	0.0007	0.3614	1414.6	2.767	148.4	225.9	374.3	0.7967	1.7655
-39	53.88	0.0007	0.3441	1411.8	2.906	149.6	225.3	374.9	0.8020	1.7641
-38	56.74	0.0007	0.3279	1408.9	3.050	150.9	224.7	375.5	0.8073	1.7627
-37	59.72	0.0007	0.3125	1406.0	3.200	152.1	224.0	376.2	0.8126	1.7613
-36	62.83	0.0007	0.2980	1403.1	3.356	153.4	223.4	376.8	0.8178	1.7599
-35	66.07	0.0007	0.2843	1400.2	3.518	154.6	222.8	377.4	0.8231	1.7586
-34	69.43	0.0007	0.2713	1397.4	3.686	155.9	222.2	378.1	0.8283	1.7573
-33	72.93	0.0007	0.2590	1394.5	3.861	157.1	221.5	378.7	0.8336	1.7561
-32	76.58	0.0007	0.2474	1391.5	4.042	158.4	220.9	379.3	0.8388	1.7548
-31	80.36	0.0007	0.2365	1388.6	4.229	159.7	220.3	379.9	0.8440	1.7536
-30	84.29	0.0007	0.2260	1385.7	4.424	160.9	219.6	380.6	0.8492	1.7525
-29	88.37	0.0007	0.2162	1382.8	4.625	162.2	219.0	381.2	0.8544	1.7513
-28	92.61	0.0007	0.2069	1379.8	4.833	163.5	218.3	381.8	0.8595	1.7502
-27	97.02	0.0007	0.1981	1376.9	5.049	164.7	217.7	382.4	0.8647	1.7491
-26	101.58	0.0007	0.1896	1373.9	5.273	166.0	217.1	383.1	0.8698	1.7481
-25	106.32	0.0007	0.1817	1371.0	5.504	167.3	216.4	383.7	0.8750	1.747
-24	111.22	0.0007	0.1741	1368.0	5.743	168.6	215.7	384.3	0.8801	1.746
-23	116.31	0.0007	0.1669	1365.0	5.991	169.8	215.1	384.9	0.8852	1.745
-22	121.57	0.0007	0.1601	1362.0	6.247	171.1	214.4	385.5	0.8903	1.744
-21	127.02	0.0007	0.1536	1359.0	6.511	172.4	213.7	386.2	0.8954	1.7431
-20	132.67	0.0007	0.1474	1356.0	6.784	173.7	213.1	386.8	0.9005	1.7422
-19	138.50	0.0007	0.1415	1353.0	7.066	175.0	212.4	387.4	0.9055	1.7413
-18	144.54	0.0007	0.1359	1349.9	7.357	176.3	211.7	388.0	0.9106	1.7404
-17	150.78	0.0007	0.1306	1346.9	7.658	177.6	211.0	388.6	0.9157	1.7395
-16	157.23	0.0007	0.1255	1343.8	7.968	178.9	210.4	389.2	0.9207	1.7387
-15	163.90	0.0007	0.1207	1340.8	8.288	180.2	209.7	389.8	0.9257	1.7379
-14	170.78	0.0007	0.1160	1337.7	8.618	181.5	209.0	390.4	0.9307	1.7371
-13	177.89	0.0007	0.1116	1334.6	8.958	182.8	208.3	391.1	0.9357	1.7363
-12	185.22	0.0008	0.1074	1331.5	9.309	184.1	207.6	391.7	0.9407	1.7356
-11	192.79	0.0008	0.1034	1328.4	9.671	185.4	206.9	392.3	0.9457	1.7348
-10	200.60	0.0008	0.0996	1325.3	10.044	186.7	206.2	392.9	0.9507	1.7341
-9	208.65	0.0008	0.0959	1322.1	10.428	188.0	205.4	393.5	0.9557	1.7334
-8	216.95	0.0008	0.0924	1319.0	10.823	189.3	204.7	394.1	0.9606	1.7327
-7	225.50	0.0008	0.0890	1315.8	11.231	190.7	204.0	394.7	0.9656	1.7321
-6	234.32	0.0008	0.0858	1312.6	11.650	192.0	203.3	395.3	0.9705	1.7314
-5	243.39	0.0008	0.0828	1309.4	12.082	193.3	202.5	395.9	0.9755	1.7308
-4	252.74	0.0008	0.0798	1306.2	12.526	194.6	201.8	396.4	0.9804	1.7302
-3	262.36	0.0008	0.0770	1303.0	12.983	196.0	201.1	397.0	0.9853	1.7295
-2	272.26	0.0008	0.0743	1299.8	13.454	197.3	200.3	397.6	0.9902	1.729
-1	282.45	0.0008	0.0718	1296.5	13.937	198.7	199.6	398.2	0.9951	1.7284
0	292.93	0.0008	0.0693	1293.3	14.435	200.0	198.8	398.8	1.0000	1.7278
1	303.70	0.0008	0.0669	1290.0	14.946	201.3	198.0	399.4	1.0049	1.7273
2	314.77	0.0008	0.0646	1286.7	15.472	202.7	197.3	400.0	1.0098	1.7267
3	326.16	0.0008	0.0624	1283.4	16.013	204.0	196.5	400.5	1.0146	1.7262
4	337.85	0.0008	0.0604	1280.1	16.569	205.4	195.7	401.1	1.0195	1.7257
5	349.87	0.0008	0.0583	1276.7	17.140	206.8	194.9	401.7	1.0244	1.7252
6	362.21	0.0008	0.0564	1273.4	17.726	208.1	194.2	402.3	1.0292	1.7247
7	374.88	0.0008	0.0546	1270.0	18.329	209.5	193.4	402.8	1.0340	1.7242
8	387.88	0.0008	0.0528	1266.6	18.948	210.8	192.6	403.4	1.0389	1.7238
9	401.23	0.0008	0.0511	1263.2	19.583	212.2	191.8	404.0	1.0437	1.7233
10	414.92	0.0008	0.0494	1259.8	20.236	213.6	190.9	404.5	1.0485	1.7229
11	428.97	0.0008	0.0478	1256.3	20.906	215.0	190.1	405.1	1.0533	1.7224
12	443.37	0.0008	0.0463	1252.9	21.594	216.4	189.3	405.6	1.0582	1.722
13	458.11	0.0008	0.0448	1249.4	22.301	217.7	188.5	406.2	1.0630	1.7216
14	473.25	0.0008	0.0434	1245.9	23.026	219.1	187.6	406.8	1.0678	1.7212
15	488.78	0.0008	0.0421	1242.3	23.770	220.5	186.8	407.3	1.0726	1.7208
16	504.68	0.0008	0.0408	1238.8	24.533	221.9	185.9	407.8	1.0773	1.7204
17	520.98	0.0008	0.0395	1235.2	25.317	223.3	185.1	408.4	1.0821	1.72
18	537.67	0.0008	0.0383	1231.6	26.121	224.7	184.2	408.9	1.0869	1.7196
19	554.76	0.0008	0.0371	1228.0	26.945	226.1	183.3	409.5	1.0917	1.7192

ตารางสมบัติของสารทำความเย็นชนิด R-134a ณ สภาวะอิ่มตัว (ต่อ)

อุณหภูมิ °C	ความดัน kPa (abs)	ปริมาณ m ³ /kg		ความหนาแน่น kg/m ³		เอนทัลปี kJ/kg			เอนโทรปี kJ/(kg)(K)	
		ของเหลว v _f	ไอ v _g	ของเหลว 1/v _f	ไอ 1/v _g	ของเหลว h _f	แฝง h _{fg}	ไอ h _g	ของเหลว s _f	ไอ s _g
20	572.25	0.0008	0.0360	1224.4	27.791	227.5	182.5	410.0	1.0964	1.7189
21	590.16	0.0008	0.0349	1220.7	28.659	228.9	181.6	410.5	1.1012	1.7185
22	608.49	0.0008	0.0338	1217.0	29.549	230.4	180.7	411.0	1.1060	1.7182
23	627.25	0.0008	0.0328	1213.3	30.462	231.8	179.8	411.6	1.1107	1.7178
24	646.44	0.0008	0.0318	1209.6	31.399	233.2	178.9	412.1	1.1155	1.7175
25	666.06	0.0008	0.0309	1205.9	32.359	234.6	178.0	412.6	1.1202	1.7171
26	686.13	0.0008	0.0300	1202.1	33.344	236.1	177.0	413.1	1.1250	1.7168
27	706.66	0.0008	0.0291	1198.3	34.354	237.5	176.1	413.6	1.1297	1.7165
28	727.64	0.0008	0.0283	1194.4	35.389	238.9	175.2	414.1	1.1345	1.7161
29	749.04	0.0008	0.0274	1190.6	36.451	240.4	174.2	414.6	1.1392	1.7158
30	771.02	0.0008	0.0266	1186.7	37.540	241.8	173.3	415.1	1.1439	1.7155
31	793.43	0.0008	0.0259	1182.8	38.657	243.3	172.3	415.6	1.1487	1.7151
32	816.28	0.0008	0.0251	1178.8	39.802	244.8	171.3	416.1	1.1534	1.7148
33	839.66	0.0009	0.0244	1174.9	40.975	246.2	170.3	416.6	1.1581	1.7145
34	863.53	0.0009	0.0237	1170.8	42.179	247.7	169.3	417.0	1.1628	1.7142
35	887.91	0.0009	0.0230	1166.8	43.413	249.2	168.3	417.5	1.1676	1.7138
36	912.80	0.0009	0.0224	1162.7	44.679	250.6	167.3	418.0	1.1723	1.7135
37	938.20	0.0009	0.0218	1158.6	45.977	252.1	166.3	418.4	1.1770	1.7132
38	964.14	0.0009	0.0211	1154.5	47.308	253.6	165.3	418.9	1.1817	1.7129
39	990.60	0.0009	0.0205	1150.3	48.672	255.1	164.2	419.3	1.1864	1.7125
40	1017.61	0.0009	0.0200	1146.1	50.072	256.6	163.2	419.8	1.1912	1.7122
41	1045.16	0.0009	0.0194	1141.9	51.508	258.1	162.1	420.2	1.1959	1.7119
42	1073.26	0.0009	0.0189	1137.6	52.980	259.6	161.0	420.6	1.2006	1.7115
43	1101.93	0.0009	0.0184	1133.3	54.490	261.1	159.9	421.1	1.2053	1.7112
44	1131.16	0.0009	0.0178	1128.9	56.040	262.7	158.8	421.5	1.2101	1.7108
45	1161.01	0.0009	0.0174	1124.5	57.630	264.2	157.7	421.9	1.2148	1.7105
46	1191.41	0.0009	0.0169	1120.0	59.261	265.7	156.6	422.3	1.2195	1.7101
47	1222.41	0.0009	0.0164	1115.6	60.934	267.3	155.4	422.7	1.2242	1.7097
48	1253.95	0.0009	0.0160	1111.0	62.652	268.8	154.3	423.1	1.2290	1.7093
49	1286.17	0.0009	0.0155	1106.4	64.415	270.4	153.1	423.5	1.2337	1.7090
50	1319.00	0.0009	0.0151	1101.8	66.225	271.9	151.9	423.8	1.2384	1.7086
51	1352.44	0.0009	0.0147	1097.1	68.084	273.5	150.7	424.2	1.2432	1.7082
52	1386.52	0.0009	0.0143	1092.4	69.992	275.1	149.5	424.6	1.2479	1.7077
53	1421.23	0.0009	0.0139	1087.6	71.952	276.6	148.3	424.9	1.2527	1.7073
54	1456.58	0.0009	0.0135	1082.8	73.966	278.2	147.0	425.3	1.2574	1.7069
55	1492.59	0.0009	0.0132	1077.9	76.035	279.8	145.8	425.6	1.2622	1.7064
56	1529.26	0.0009	0.0128	1072.9	78.162	281.4	144.5	425.9	1.2670	1.7059
57	1566.61	0.0009	0.0124	1067.9	80.348	283.0	143.2	426.2	1.2717	1.7055
58	1604.63	0.0009	0.0121	1062.8	82.596	284.6	141.9	426.5	1.2765	1.7051
59	1643.35	0.0009	0.0118	1057.7	84.908	286.3	140.5	426.8	1.2813	1.7044
60	1682.76	0.0010	0.0115	1052.5	87.287	287.9	139.2	427.1	1.2861	1.7039
61	1722.88	0.0010	0.0111	1047.2	89.735	289.5	137.8	427.4	1.2909	1.7033
62	1763.72	0.0010	0.0108	1041.8	92.255	291.2	136.4	427.6	1.2957	1.7028
63	1805.28	0.0010	0.0105	1036.4	94.851	292.9	135.0	427.9	1.3006	1.7021
64	1847.47	0.0010	0.0103	1030.9	97.526	294.5	133.6	428.1	1.3054	1.7015
65	1890.54	0.0010	0.0100	1025.3	100.283	296.2	132.1	428.3	1.3102	1.7009
66	1934.36	0.0010	0.0097	1019.6	103.125	297.9	130.6	428.5	1.3151	1.7002
67	1978.94	0.0010	0.0094	1013.8	106.058	299.6	129.1	428.7	1.3200	1.6995
68	2024.28	0.0010	0.0092	1008.0	109.085	301.3	127.5	428.8	1.3249	1.6987
69	2070.42	0.0010	0.0089	1002.0	112.212	303.0	126.0	429.0	1.3298	1.6979
70	2117.34	0.0010	0.0087	995.9	115.442	304.8	124.4	429.1	1.3347	1.6971
71	2165.08	0.0010	0.0084	989.7	118.783	306.5	122.7	429.2	1.3397	1.6963
72	2213.63	0.0010	0.0082	983.4	122.239	308.3	121.1	429.3	1.3446	1.6954
73	2263.01	0.0010	0.0079	977.0	125.818	310.1	119.4	429.4	1.3496	1.6945
74	2313.23	0.0010	0.0077	970.4	129.527	311.8	117.6	429.5	1.3547	1.6935
75	2364.31	0.0010	0.0075	963.7	133.373	313.7	115.8	429.5	1.3597	1.6924
76	2416.25	0.0010	0.0073	956.9	137.366	315.5	114.0	429.5	1.3648	1.6913
77	2469.08	0.0011	0.0071	949.9	141.514	317.3	112.2	429.5	1.3699	1.6902
78	2522.79	0.0011	0.0069	942.7	145.830	319.2	110.3	429.4	1.3750	1.6891
79	2577.42	0.0011	0.0067	935.4	150.324	321.0	108.3	429.3	1.3801	1.6877

ตารางสมบัติของสารทำความเย็นชนิด R-134a ณ สภาวะอิ่มตัว (ต่อ)

อุณหภูมิ °C	ความดัน kPa (abs)	ปริมาณ m ³ /kg		ความหนาแน่น kg/m ³		เอนทัลปี kJ/kg			เอนโทรปี kJ/(kg)(K)	
		ของเหลว v _f	ไอ v _g	ของเหลว 1/v _f	ไอ 1/v _g	ของเหลว h _f	แฝง h _{fg}	ไอ h _g	ของเหลว s _f	ไอ s _g
80	2632.97	0.0011	0.0065	927.8	155.010	322.9	106.3	429.2	1.3854	1.6863
81	2689.46	0.0011	0.0063	920.1	159.904	324.9	104.2	429.1	1.3906	1.6849
82	2746.90	0.0011	0.0061	912.1	165.022	326.8	102.1	428.9	1.3959	1.6834
83	2805.31	0.0011	0.0059	903.9	170.383	328.8	99.9	428.7	1.4012	1.6818
84	2864.70	0.0011	0.0057	895.5	176.010	330.7	97.7	428.4	1.4066	1.68
85	2925.11	0.0011	0.0055	886.7	181.929	332.8	95.3	428.1	1.4121	1.6782
86	2986.54	0.0011	0.0053	877.6	188.169	334.8	92.9	427.7	1.4176	1.6762
87	3049.01	0.0012	0.0051	868.2	194.766	336.9	90.4	427.3	1.4232	1.6741
88	3112.55	0.0012	0.0050	858.4	201.761	339.0	87.7	426.8	1.4289	1.6719
89	3177.10	0.0012	0.0048	848.1	209.206	341.2	85.0	426.2	1.4347	1.6694
90	3242.87	0.0012	0.0046	837.3	217.162	343.4	82.1	425.5	1.4406	1.6668
91	3309.78	0.0012	0.0044	826.0	225.706	345.7	79.1	424.8	1.4466	1.6639
92	3377.85	0.0012	0.0043	814.0	234.936	348.0	75.9	423.9	1.4528	1.6607
93	3447.13	0.0012	0.0041	801.1	244.978	350.4	72.5	422.9	1.4592	1.6572
94	3517.65	0.0013	0.0039	787.4	256.005	353.0	68.9	421.8	1.4658	1.6533
95	3589.44	0.0013	0.0037	772.3	268.255	355.6	64.9	420.5	1.4727	1.6489
96	3662.57	0.0013	0.0035	755.8	282.079	358.4	60.5	418.9	1.4799	1.6439
97	3737.09	0.0014	0.0034	737.1	298.029	361.3	55.7	417.0	1.4877	1.6381
98	3813.08	0.0014	0.0032	715.4	317.065	364.6	50.0	414.6	1.4963	1.6311
99	3890.64	0.0015	0.0029	688.6	341.133	368.4	43.2	411.5	1.5061	1.6221
100	3969.94	0.0015	0.0027	651.4	375.503	373.2	33.8	407.0	1.5187	1.6092
101	4051.35	0.0018	0.0022	566.4	457.594	383.0	13.0	396.0	1.5447	1.5794

ผนวก ข ตารางสมบัติของสารทำความเย็นชนิด R-134a ณ สภาวะไอร้อนยิ่งยวด

V = ปริมาตร, m³/kg; H = เอนทัลปี, kJ/kg; S = เอนโทรปี, kJ/kg·K; v_s = ความเร็วเสียง, m/sec C_p = ความร้อนจำเพาะ ณ ความดันคงที่, kJ/kg·K; C_p/C_v = อัตราส่วนความจำเพาะ (ไม่มีมิติ)

อุณหภูมิ °C	ความดัน = 10.00 kPa (abs)						SAT LIQ SAT VAP	ความดัน = 20.00 kPa (abs)						อุณหภูมิ °C
	V	H	S	Cp	Cp/Cv	v _s		V	H	S	Cp	Cp/Cv	v _s	
-66.85	0.00067	115.8	0.6484	1.1863	1.5234	938.7	0.00068	128.3	0.7075	1.2068	1.5130	887.7	-56.39	
-66.85	1.66667	357.4	1.8192	0.6695	1.1477	137.7	0.87032	363.9	1.7945	0.6968	1.1466	140.3	-56.39	
-65	1.68067	358.6	1.8252	0.6727	1.1465	138.3	—	—	—	—	—	—	-65	
-60	1.72414	362.0	1.8413	0.6816	1.1434	139.9	—	—	—	—	—	—	-60	
-55	1.76678	365.4	1.8572	0.6906	1.1405	141.4	0.87642	364.9	1.7989	0.6990	1.1456	140.7	-55	
-50	1.80832	368.9	1.8730	0.6996	1.1378	142.9	0.89767	368.4	1.8149	0.7071	1.1423	142.3	-50	
-45	1.84843	372.4	1.8886	0.7087	1.1352	144.4	0.91912	372.0	1.8306	0.7154	1.1392	143.9	-45	
-40	1.89036	376.0	1.9040	0.7178	1.1328	145.9	0.93985	375.6	1.8462	0.7238	1.1364	145.4	-40	
-35	1.93050	379.6	1.9193	0.7269	1.1304	147.4	0.96061	379.2	1.8617	0.7323	1.1337	146.9	-35	
-30	1.97239	383.3	1.9345	0.7360	1.1283	148.9	0.98232	382.9	1.8770	0.7409	1.1311	148.4	-30	
-25	2.01207	387.0	1.9496	0.7451	1.1262	150.3	1.00301	386.6	1.8921	0.7495	1.1288	149.8	-25	
-20	2.05339	390.7	1.9646	0.7541	1.1242	151.7	1.02354	390.4	1.9072	0.7582	1.1265	151.3	-20	
-15	2.09644	394.5	1.9794	0.7632	1.1223	153.1	1.04493	394.2	1.9221	0.7669	1.1244	152.7	-15	
-10	2.13675	398.3	1.9941	0.7722	1.1204	154.5	1.06496	398.1	1.9369	0.7756	1.1224	154.1	-10	
-5	2.17865	402.2	2.0087	0.7813	1.1187	155.9	1.08578	402.0	1.9516	0.7843	1.1205	155.5	-5	
0	2.21729	406.2	2.0233	0.7902	1.1170	157.2	1.10619	405.9	1.9661	0.7930	1.1186	156.9	0	
5	2.26244	410.1	2.0377	0.7992	1.1154	158.6	1.12740	409.9	1.9806	0.8017	1.1169	158.3	5	
10	2.30415	414.1	2.0520	0.8081	1.1139	159.9	1.14811	413.9	1.9950	0.8104	1.1152	159.6	10	
15	2.34192	418.2	2.0662	0.8169	1.1124	161.2	1.16822	418.0	2.0092	0.8191	1.1136	161.0	15	
20	2.38095	422.3	2.0803	0.8257	1.1109	162.6	1.18906	422.1	2.0234	0.8277	1.1121	162.3	20	
25	2.42718	426.5	2.0944	0.8345	1.1095	163.9	1.20919	426.3	2.0375	0.8363	1.1106	163.6	25	
30	2.46305	430.7	2.1083	0.8432	1.1082	165.1	1.23001	430.5	2.0514	0.8449	1.1092	164.9	30	
35	2.50627	434.9	2.1222	0.8518	1.1069	166.4	1.25156	434.7	2.0653	0.8534	1.1078	166.2	35	
40	2.54453	439.2	2.1360	0.8605	1.1056	167.7	1.27226	439.0	2.0791	0.8619	1.1065	167.5	40	
45	2.59067	443.5	2.1497	0.8690	1.1044	168.9	1.29199	443.3	2.0929	0.8704	1.1052	168.7	45	
50	2.63158	447.9	2.1633	0.8775	1.1033	170.2	1.31234	447.7	2.1065	0.8788	1.1040	170.0	50	
55	2.67380	452.3	2.1768	0.8860	1.1021	171.4	1.33333	452.1	2.1200	0.8871	1.1028	171.2	55	
60	2.71003	456.7	2.1903	0.8943	1.1010	172.7	1.35318	456.6	2.1335	0.8954	1.1017	172.5	60	
65	2.75482	461.2	2.2037	0.9027	1.1000	173.9	1.37363	461.1	2.1469	0.9037	1.1006	173.7	65	
70	2.79930	465.8	2.2170	0.9110	1.0989	175.1	1.39470	465.6	2.1603	0.9119	1.0995	174.9	70	
75	2.83286	470.3	2.2302	0.9192	1.0979	176.3	1.41443	470.2	2.1735	0.9201	1.0984	176.1	75	
80	2.87356	474.9	2.2434	0.9273	1.0969	177.5	1.43678	474.8	2.1867	0.9282	1.0974	177.3	80	
85	2.91545	479.6	2.2565	0.9354	1.0960	178.7	1.45560	479.5	2.1998	0.9362	1.0965	178.5	85	

อุณหภูมิ °C	ความดัน = 30.00 kPa (abs)						SAT LIQ SAT VAP	ความดัน = 40.00 kPa (abs)						อุณหภูมิ °C
	V	H	S	Cp	Cp/Cv	v _s		V	H	S	Cp	Cp/Cv	v _s	
-49.66	0.00069	136.5	0.7446	1.2205	1.5084	855.4	0.00070	142.8	0.7722	1.2311	1.5059	831.3	-44.57	
-49.66	0.59559	368.2	1.7813	0.7154	1.1468	141.8	0.45496	371.4	1.7725	0.7301	1.1475	142.8	-44.57	
-45	0.60901	371.5	1.7961	0.7224	1.1434	143.3	—	—	—	—	—	—	-45	
-40	0.62344	375.2	1.8118	0.7300	1.1401	144.8	0.46490	374.8	1.7871	0.7364	1.1440	144.3	-40	
-35	0.63735	378.8	1.8274	0.7379	1.1370	146.4	0.47574	378.5	1.8028	0.7437	1.1404	145.9	-35	
-30	0.65189	382.6	1.8428	0.7459	1.1341	147.9	0.48662	382.2	1.8183	0.7511	1.1372	147.4	-30	
-25	0.66578	386.3	1.8581	0.7541	1.1315	149.4	0.49727	386.0	1.8336	0.7587	1.1342	148.9	-25	
-20	0.67981	390.1	1.8732	0.7623	1.1289	150.9	0.50787	389.8	1.8489	0.7665	1.1314	150.4	-20	
-15	0.69396	393.9	1.8882	0.7707	1.1266	152.3	0.51867	393.6	1.8639	0.7745	1.1288	151.9	-15	
-10	0.70771	397.8	1.9031	0.7790	1.1244	153.8	0.52910	397.5	1.8789	0.7825	1.1264	153.4	-10	
-5	0.72202	401.7	1.9178	0.7874	1.1223	155.2	0.53967	401.5	1.8937	0.7906	1.1241	154.8	-5	
0	0.73584	405.7	1.9324	0.7959	1.1203	156.6	0.55036	405.4	1.9083	0.7988	1.1219	156.2	0	
5	0.74963	409.7	1.9470	0.8043	1.1184	158.0	0.56085	409.4	1.9229	0.8070	1.1199	157.7	5	
10	0.76336	413.7	1.9614	0.8128	1.1166	159.3	0.57110	413.5	1.9374	0.8152	1.1180	159.0	10	
15	0.77760	417.8	1.9757	0.8213	1.1149	160.7	0.58173	417.6	1.9517	0.8235	1.1161	160.4	15	
20	0.79114	421.9	1.9899	0.8297	1.1132	162.0	0.59207	421.7	1.9659	0.8318	1.1144	161.8	20	
25	0.80515	426.1	2.0040	0.8382	1.1117	163.4	0.60241	425.9	1.9801	0.8401	1.1128	163.1	25	
30	0.81900	430.3	2.0180	0.8466	1.1102	164.7	0.61312	430.1	1.9941	0.8484	1.1112	164.4	30	
35	0.83264	434.6	2.0319	0.8550	1.1087	166.0	0.62344	434.4	2.0081	0.8566	1.1097	165.7	35	
40	0.84602	438.9	2.0457	0.8634	1.1073	167.3	0.63371	438.7	2.0219	0.8649	1.1082	167.0	40	
45	0.85985	443.2	2.0595	0.8717	1.1060	168.5	0.64392	443.0	2.0357	0.8731	1.1068	168.3	45	
50	0.87413	447.6	2.0731	0.8800	1.1047	169.8	0.65445	447.4	2.0494	0.8813	1.1055	169.6	50	
55	0.88731	452.0	2.0867	0.8883	1.1035	171.1	0.66489	451.9	2.0630	0.8895	1.1042	170.9	55	
60	0.90171	456.5	2.1002	0.8965	1.1023	172.3	0.67522	456.3	2.0765	0.8977	1.1030	172.1	60	
65	0.91491	461.0	2.1136	0.9047	1.1012	173.5	0.68540	460.8	2.0899	0.9058	1.1018	173.4	65	
70	0.92851	465.5	2.1270	0.9129	1.1001	174.8	0.69589	465.4	2.1033	0.9138	1.1006	174.6	70	
75	0.94251	470.1	2.1402	0.9210	1.0990	176.0	0.70621	470.0	2.1165	0.9219	1.0995	175.8	75	
80	0.95602	474.7	2.1534	0.9290	1.0979	177.2	0.71633	474.6	2.1297	0.9299	1.0985	177.0	80	
85	0.96993	479.4	2.1665	0.9370	1.0969	178.4	0.72674	479.3	2.1429	0.9378	1.0974	178.2	85	
90	0.98328	484.1	2.1796	0.9449	1.0960	179.6	0.73692	484.0	2.1559	0.9457	1.0964	179.4	90	
95	0.99701	488.8	2.1925	0.9528	1.0950	180.7	0.74738	488.7	2.1689	0.9535	1.0954	180.6	95	
100	1.01112	493.6	2.2054	0.9607	1.0941	181.9	0.75758	493.5	2.1818	0.9613	1.0945	181.8	100	
105	1.02459	498.4	2.2183	0.9685	1.0932	183.1	0.76805	498.3	2.1947	0.9691	1.0936	183.0	105	
110	—	—	—	—	—	—	0.77821	503.2	2.2074	0.9768	1.0927	184.1	110	

ตารางสมบัติของสารทำความเย็นชนิด R-134a ณ สภาวะไอร้อนยิ่งยวด (ต่อ)

V = ปริมาตร, m³/kg; H = เอนทัลปี, kJ/kg; S = เอนโทรปี, kJ/kg·K; v_s = ความเร็วเสียง, m/sec C_p = ความร้อน

จำเพาะ ณ ความดันคงที่, kJ/kg·K; C_p/C_v = อัตราส่วนความจำเพาะ (ไม่มีมิติ)

อุณหภูมิ °C	ความดัน = 50.00 kPa (abs)						SAT LIQ SAT VAP	ความดัน = 60.00 kPa (abs)						อุณหภูมิ °C
	V	H	S	Cp	Cp/Cv	v _s		V	H	S	Cp	Cp/Cv	v _s	
-40.43	0.00071	147.9	0.7944	1.2399	1.5046	811.8	0.00071	152.2	0.8130	1.2476	1.5040	795.3	-36.91	
-40.43	0.36914	374.0	1.7661	0.7424	1.1483	143.6	0.31114	376.2	1.7611	0.7533	1.1493	144.2	-36.91	
-40	0.36982	374.3	1.7675	0.7430	1.1480	143.7	—	—	—	—	—	—	-40	
-35	0.37864	378.1	1.7833	0.7495	1.1440	145.3	0.31397	377.7	1.7672	0.7555	1.1477	144.8	-35	
-30	0.38745	381.8	1.7990	0.7564	1.1404	146.9	0.32134	381.5	1.7830	0.7618	1.1436	146.4	-30	
-25	0.39604	385.6	1.8144	0.7635	1.1370	148.5	0.32873	385.3	1.7986	0.7683	1.1400	148.0	-25	
-20	0.40469	389.5	1.8297	0.7708	1.1340	150.0	0.33591	389.2	1.8140	0.7752	1.1366	149.6	-20	
-15	0.41339	393.3	1.8449	0.7784	1.1311	151.5	0.34317	393.0	1.8292	0.7823	1.1334	151.1	-15	
-10	0.42194	397.3	1.8599	0.7860	1.1284	153.0	0.35039	397.0	1.8443	0.7896	1.1306	152.6	-10	
-5	0.43048	401.2	1.8748	0.7938	1.1260	154.5	0.35753	400.9	1.8592	0.7971	1.1279	154.1	-5	
0	0.43898	405.2	1.8895	0.8017	1.1236	155.9	0.36470	404.9	1.8740	0.8047	1.1254	155.6	0	
5	0.44743	409.2	1.9041	0.8097	1.1215	157.3	0.37189	409.0	1.8887	0.8124	1.1230	157.0	5	
10	0.45579	413.3	1.9186	0.8177	1.1194	158.7	0.37893	413.1	1.9032	0.8202	1.1208	158.4	10	
15	0.46425	417.4	1.9330	0.8257	1.1175	160.1	0.38595	417.2	1.9176	0.8280	1.1188	159.8	15	
20	0.47259	421.5	1.9473	0.8338	1.1156	161.5	0.39308	421.3	1.9319	0.8359	1.1168	161.2	20	
25	0.48100	425.7	1.9614	0.8420	1.1139	162.8	0.40000	425.5	1.9461	0.8439	1.1150	162.6	25	
30	0.48948	430.0	1.9755	0.8501	1.1122	164.2	0.40700	429.8	1.9602	0.8519	1.1132	163.9	30	
35	0.49776	434.2	1.9895	0.8582	1.1106	165.5	0.41408	434.1	1.9742	0.8599	1.1116	165.3	35	
40	0.50607	438.5	2.0034	0.8664	1.1091	166.8	0.42105	438.4	1.9881	0.8679	1.1100	166.6	40	
45	0.51440	442.9	2.0172	0.8745	1.1076	168.1	0.42808	442.7	2.0020	0.8759	1.1085	167.9	45	
50	0.52274	447.3	2.0309	0.8826	1.1062	169.4	0.43497	447.1	2.0157	0.8839	1.1070	169.2	50	
55	0.53107	451.7	2.0445	0.8907	1.1049	170.7	0.44189	451.6	2.0293	0.8919	1.1056	170.5	55	
60	0.53937	456.2	2.0580	0.8988	1.1036	171.9	0.44883	456.1	2.0429	0.8999	1.1043	171.8	60	
65	0.54765	460.7	2.0715	0.9068	1.1024	173.2	0.45579	460.6	2.0563	0.9079	1.1030	173.0	65	
70	0.55586	465.3	2.0848	0.9148	1.1012	174.4	0.46275	465.1	2.0697	0.9158	1.1018	174.3	70	
75	0.56402	469.9	2.0981	0.9228	1.1001	175.7	0.46970	469.7	2.0830	0.9237	1.1006	175.5	75	
80	0.57241	474.5	2.1113	0.9307	1.0990	176.9	0.47664	474.4	2.0962	0.9316	1.0995	176.7	80	
85	0.58072	479.2	2.1245	0.9386	1.0979	178.1	0.48356	479.1	2.1094	0.9394	1.0984	177.9	85	
90	0.58893	483.9	2.1375	0.9464	1.0969	179.3	0.49020	483.8	2.1225	0.9472	1.0973	179.1	90	
95	0.59737	488.6	2.1505	0.9543	1.0959	180.5	0.49727	488.5	2.1355	0.9550	1.0963	180.3	95	
100	0.60533	493.4	2.1635	0.9620	1.0949	181.7	0.50403	493.3	2.1484	0.9627	1.0953	181.5	100	
105	0.61387	498.3	2.1763	0.9697	1.0940	182.8	0.51099	498.2	2.1613	0.9703	1.0944	182.7	105	
110	0.62189	503.1	2.1891	0.9774	1.0931	184.0	0.51787	503.0	2.1741	0.9780	1.0934	183.9	110	
115	—	—	—	—	—	—	0.52466	507.9	2.1868	0.9855	1.0925	185.0	115	

อุณหภูมิ °C	ความดัน = 70.00 kPa (abs)						SAT LIQ SAT VAP	ความดัน = 80.00 kPa (abs)						อุณหภูมิ °C
	V	H	S	Cp	Cp/Cv	v _s		V	H	S	Cp	Cp/Cv	v _s	
-33.83	0.00072	156.1	0.8292	1.2544	1.5038	781.0	0.00072	159.5	0.8435	1.2606	1.5038	768.3	-31.09	
-33.83	0.26918	378.2	1.7571	0.7630	1.1504	144.6	0.23747	379.9	1.7538	0.7718	1.1515	145.0	-31.09	
-30	0.27412	381.1	1.7693	0.7673	1.1470	145.9	0.23872	380.7	1.7572	0.7729	1.1505	145.4	-30	
-25	0.28050	385.0	1.7850	0.7733	1.1430	147.6	0.24438	384.6	1.7730	0.7783	1.1460	147.1	-25	
-20	0.28678	388.8	1.8004	0.7797	1.1392	149.1	0.24994	388.5	1.7886	0.7842	1.1420	148.7	-20	
-15	0.29308	392.7	1.8158	0.7863	1.1359	150.7	0.25549	392.4	1.8040	0.7904	1.1383	150.3	-15	
-10	0.29931	396.7	1.8309	0.7932	1.1327	152.2	0.26103	396.4	1.8192	0.7969	1.1349	151.9	-10	
-5	0.30553	400.7	1.8459	0.8004	1.1298	153.8	0.26645	400.4	1.8343	0.8037	1.1318	153.4	-5	
0	0.31172	404.7	1.8608	0.8077	1.1271	155.2	0.27196	404.5	1.8492	0.8107	1.1290	154.9	0	
5	0.31786	408.8	1.8755	0.8151	1.1246	156.7	0.27732	408.5	1.8640	0.8179	1.1263	156.4	5	
10	0.32394	412.9	1.8901	0.8227	1.1223	158.1	0.28273	412.6	1.8786	0.8252	1.1238	157.8	10	
15	0.33003	417.0	1.9045	0.8303	1.1201	159.6	0.28810	416.8	1.8931	0.8326	1.1215	159.3	15	
20	0.33613	421.2	1.9189	0.8380	1.1180	161.0	0.29343	421.0	1.9075	0.8402	1.1193	160.7	20	
25	0.34211	425.4	1.9331	0.8458	1.1161	162.3	0.29878	425.2	1.9218	0.8478	1.1172	162.1	25	
30	0.34819	429.6	1.9473	0.8537	1.1143	163.7	0.30404	429.4	1.9359	0.8555	1.1153	163.5	30	
35	0.35423	433.9	1.9613	0.8615	1.1125	165.0	0.30941	433.7	1.9500	0.8632	1.1135	164.8	35	
40	0.36023	438.2	1.9752	0.8694	1.1109	166.4	0.31466	438.1	1.9640	0.8709	1.1118	166.2	40	
45	0.36630	442.6	1.9890	0.8773	1.1093	167.7	0.32000	442.4	1.9778	0.8787	1.1101	167.5	45	
50	0.37230	447.0	2.0028	0.8852	1.1078	169.0	0.32520	446.9	1.9916	0.8865	1.1085	168.8	50	
55	0.37821	451.4	2.0164	0.8931	1.1063	170.3	0.33047	451.3	2.0053	0.8944	1.1071	170.1	55	
60	0.38417	455.9	2.0300	0.9010	1.1050	171.6	0.33568	455.8	2.0188	0.9022	1.1056	171.4	60	
65	0.39017	460.5	2.0435	0.9089	1.1036	172.8	0.34095	460.3	2.0323	0.9100	1.1043	172.7	65	
70	0.39620	465.0	2.0569	0.9168	1.1024	174.1	0.34614	464.9	2.0457	0.9178	1.1030	173.9	70	
75	0.40209	469.6	2.0702	0.9246	1.1012	175.3	0.35137	469.5	2.0591	0.9255	1.1017	175.2	75	
80	0.40800	474.3	2.0834	0.9324	1.1000	176.6	0.35663	474.2	2.0723	0.9333	1.1005	176.4	80	
85	0.41391	478.9	2.0966	0.9402	1.0989	177.8	0.36179	478.8	2.0855	0.9410	1.0994	177.6	85	
90	0.41982	483.7	2.1097	0.9480	1.0979	179.0	0.36697	483.6	2.0986	0.9487	1.0982	178.9	90	
95	0.42589	488.4	2.1227	0.9557	1.0967	180.2	0.37216	488.3	2.1116	0.9564	1.0972	180.1	95	
100	0.43178	493.2	2.1357	0.9633	1.0957	181.4	0.37736	493.1	2.1246	0.9640	1.0961	181.3	100	
105	0.43764	498.1	2.1485	0.9710	1.0948	182.6	0.38256	498.0	2.1375	0.9716	1.0951	182.5	105	
110	0.44346	502.9	2.1613	0.9786	1.0938	183.8	0.38775	502.8	2.1503	0.9792	1.0942	183.6	110	
115	0.44944	507.8	2.1741	0.9861	1.0929	184.9	0.39293	507.8	2.1630	0.9867	1.0932	184.8	115	
120	0.45537	512.8	2.1867	0.9936	1.0920	186.1	0.39809	512.7	2.1757	0.9941	1.0923	186.0	120	

ตารางสมบัติของสารทำความเย็นชนิด R-134a ณ สภาวะไอร้อนยิ่งยวด (ต่อ)

V = ปริมาตร, m^3/kg ; H = เอนทัลปี, kJ/kg ; S = เอนโทรปี, $kJ/kg\cdot K$; v_s = ความเร็วเสียง, m/sec C_p = ความร้อน

จำเพาะ ณ ความดันคงที่, $kJ/kg\cdot K$; C_p/C_v = อัตราส่วนความจำเพาะ (ไม่มีมิติ)

อุณหภูมิ °C	ความดัน = 90.00 kPa (abs)						SAT LIQ SAT VAP	ความดัน = 100.00 kPa (abs)						อุณหภูมิ °C
	V	H	S	Cp	Cp/Cv	v_s		V	H	S	Cp	Cp/Cv	v_s	
-28.61	0.00072	162.7	0.8564	1.2662	1.5041	756.7		0.00073	165.6	0.8681	1.2715	1.5046	746.2	-26.34
-28.61	0.21254	381.4	1.7509	0.7800	1.1527	145.4		0.19246	382.8	1.7484	0.7876	1.1539	145.7	-26.34
-25	0.21622	384.3	1.7624	0.7835	1.1492	146.6		0.19372	383.9	1.7527	0.7888	1.1525	146.1	-25
-20	0.22129	388.2	1.7780	0.7898	1.1448	148.3		0.19829	387.9	1.7685	0.7935	1.1477	147.8	-20
-15	0.22624	392.1	1.7935	0.7946	1.1408	149.9		0.20284	391.8	1.7840	0.7988	1.1434	149.5	-15
-10	0.23121	396.1	1.8088	0.8007	1.1372	151.5		0.20734	395.8	1.7994	0.8045	1.1395	151.1	-10
-5	0.23613	400.2	1.8240	0.8071	1.1339	153.0		0.21182	399.9	1.8146	0.8106	1.1359	152.7	-5
0	0.24102	404.2	1.8389	0.8138	1.1308	154.5		0.21626	404.0	1.8297	0.8169	1.1327	154.2	0
5	0.24588	408.3	1.8538	0.8207	1.1279	156.0		0.22065	408.1	1.8445	0.8235	1.1296	155.7	5
10	0.25069	412.4	1.8684	0.8278	1.1253	157.5		0.22502	412.2	1.8593	0.8304	1.1269	157.2	10
15	0.25549	416.6	1.8830	0.8350	1.1229	159.0		0.22941	416.4	1.8739	0.8373	1.1243	158.7	15
20	0.26028	420.8	1.8974	0.8423	1.1206	160.4		0.23370	420.6	1.8883	0.8445	1.1218	160.2	20
25	0.26504	425.0	1.9117	0.8498	1.1184	161.8		0.23804	424.8	1.9027	0.8517	1.1196	161.6	25
30	0.26976	429.3	1.9259	0.8573	1.1164	163.2		0.24231	429.1	1.9169	0.8591	1.1175	163.0	30
35	0.27450	433.6	1.9400	0.8649	1.1145	164.6		0.24661	433.4	1.9310	0.8665	1.1155	164.3	35
40	0.27925	437.9	1.9540	0.8725	1.1127	165.9		0.25088	437.7	1.9450	0.8741	1.1136	165.7	40
45	0.28393	442.3	1.9679	0.8802	1.1110	167.3		0.25517	442.1	1.9589	0.8816	1.1118	167.1	45
50	0.28860	446.7	1.9816	0.8879	1.1093	168.6		0.25940	446.6	1.9727	0.8892	1.1101	168.4	50
55	0.29334	451.2	1.9953	0.8956	1.1078	169.9		0.26364	451.0	1.9864	0.8968	1.1085	169.7	55
60	0.29797	455.7	2.0089	0.9033	1.1063	171.2		0.26788	455.5	2.0001	0.9045	1.1070	171.0	60
65	0.30266	460.2	2.0225	0.9110	1.1049	172.5		0.27203	460.1	2.0136	0.9121	1.1055	172.3	65
70	0.30731	464.8	2.0359	0.9188	1.1036	173.8		0.27624	464.7	2.0270	0.9198	1.1042	173.6	70
75	0.31201	469.4	2.0492	0.9265	1.1023	175.0		0.28043	469.3	2.0404	0.9274	1.1028	174.9	75
80	0.31666	474.0	2.0625	0.9342	1.1010	176.3		0.28466	473.9	2.0537	0.9350	1.1016	176.1	80
85	0.32123	478.7	2.0757	0.9418	1.0999	177.5		0.28885	478.6	2.0669	0.9427	1.1004	177.4	85
90	0.32585	483.5	2.0888	0.9495	1.0987	178.7		0.29300	483.4	2.0800	0.9503	1.0992	178.6	90
95	0.33058	488.2	2.1018	0.9571	1.0976	179.9		0.29718	488.1	2.0930	0.9579	1.0981	179.8	95
100	0.33523	493.0	2.1148	0.9647	1.0966	181.1		0.30139	492.9	2.1060	0.9654	1.0970	181.0	100
105	0.33979	497.9	2.1277	0.9722	1.0955	182.3		0.30553	497.8	2.1189	0.9729	1.0959	182.2	105
110	0.34447	502.8	2.1405	0.9798	1.0946	183.5		0.30969	502.7	2.1318	0.9804	1.0949	183.4	110
115	0.34904	507.7	2.1533	0.9872	1.0936	184.7		0.31387	507.6	2.1445	0.9878	1.0940	184.6	115
120	0.35361	512.6	2.1659	0.9947	1.0927	185.9		0.31797	512.5	2.1572	0.9952	1.0930	185.8	120
125	0.35817	517.6	2.1786	1.0021	1.0918	187.0		0.32216	517.5	2.1698	1.0026	1.0921	186.9	125

อุณหภูมิ °C	ความดัน = 101.325 kPa (abs)						SAT LIQ SAT VAP	ความดัน = 110.00 kPa (abs)						อุณหภูมิ °C
	V	H	S	Cp	Cp/Cv	v_s		V	H	S	Cp	Cp/Cv	v_s	
-26.06	0.00073	165.9	0.8696	1.2722	1.5046	744.9		0.00073	168.2	0.8788	1.2765	1.5051	736.6	-24.25
-26.06	0.19011	383.0	1.7481	0.7886	1.1540	145.7		0.17593	384.1	1.7462	0.7948	1.1551	145.9	-24.25
-25	0.19106	383.9	1.7515	0.7895	1.1530	146.1		—	—	—	—	—	—	-25
-20	0.19562	387.8	1.7673	0.7942	1.1481	147.7		0.17953	387.5	1.7597	0.7984	1.1507	147.4	-20
-15	0.20012	391.8	1.7829	0.7994	1.1438	149.4		0.18369	391.5	1.7754	0.8031	1.1461	149.0	-15
-10	0.20454	395.8	1.7982	0.8050	1.1398	151.0		0.18783	395.6	1.7908	0.8084	1.1419	150.7	-10
-5	0.20894	399.9	1.8135	0.8110	1.1362	152.6		0.19194	399.6	1.8061	0.8141	1.1381	152.3	-5
0	0.21336	403.9	1.8285	0.8173	1.1329	154.2		0.19600	403.7	1.8212	0.8201	1.1346	153.9	0
5	0.21768	408.0	1.8434	0.8239	1.1299	155.7		0.20004	407.8	1.8361	0.8264	1.1314	155.4	5
10	0.22202	412.2	1.8581	0.8307	1.1271	157.2		0.20404	412.0	1.8509	0.8330	1.1284	156.9	10
15	0.22630	416.3	1.8727	0.8377	1.1244	158.6		0.20803	416.2	1.8656	0.8397	1.1257	158.4	15
20	0.23057	420.5	1.8872	0.8448	1.1220	160.1		0.21200	420.4	1.8801	0.8467	1.1231	159.9	20
25	0.23485	424.8	1.9015	0.8520	1.1197	161.5		0.21598	424.6	1.8945	0.8538	1.1208	161.3	25
30	0.23906	429.1	1.9158	0.8594	1.1176	162.9		0.21988	428.9	1.9087	0.8610	1.1186	162.7	30
35	0.24331	433.4	1.9299	0.8668	1.1156	164.3		0.22376	433.2	1.9228	0.8683	1.1165	164.1	35
40	0.24759	437.7	1.9439	0.8743	1.1137	165.7		0.22769	437.6	1.9369	0.8756	1.1145	165.5	40
45	0.25176	442.1	1.9578	0.8818	1.1119	167.0		0.23154	442.0	1.9508	0.8831	1.1127	166.9	45
50	0.25595	446.5	1.9716	0.8894	1.1102	168.4		0.23546	446.4	1.9646	0.8905	1.1109	168.2	50
55	0.26015	451.0	1.9853	0.8970	1.1086	169.7		0.23929	450.9	1.9784	0.8981	1.1093	169.5	55
60	0.26427	455.5	1.9989	0.9046	1.1071	171.0		0.24313	455.4	1.9920	0.9056	1.1077	170.8	60
65	0.26846	460.1	2.0125	0.9123	1.1056	172.3		0.24697	459.9	2.0055	0.9132	1.1062	172.1	65
70	0.27263	464.6	2.0259	0.9199	1.1042	173.6		0.25088	464.5	2.0190	0.9208	1.1048	173.4	70
75	0.27678	469.3	2.0393	0.9275	1.1029	174.8		0.25465	469.2	2.0324	0.9283	1.1034	174.7	75
80	0.28090	473.9	2.0526	0.9352	1.1016	176.1		0.25853	473.8	2.0457	0.9359	1.1021	176.0	80
85	0.28506	478.6	2.0658	0.9428	1.1004	177.3		0.26233	478.5	2.0589	0.9435	1.1009	177.2	85
90	0.28918	483.3	2.0789	0.9504	1.0992	178.6		0.26610	483.2	2.0720	0.9510	1.0997	178.4	90
95	0.29326	488.1	2.0919	0.9579	1.0981	179.8		0.26988	488.0	2.0851	0.9586	1.0985	179.7	95
100	0.29735	492.9	2.1049	0.9655	1.0970	181.0		0.27375	492.8	2.0981	0.9661	1.0974	180.9	100
105	0.30157	497.8	2.1178	0.9730	1.0960	182.2		0.27755	497.7	2.1110	0.9735	1.0963	182.1	105
110	0.30562	502.6	2.1306	0.9804	1.0950	183.4		0.28129	502.6	2.1238	0.9810	1.0953	183.3	110
115	0.30969	507.6	2.1434	0.9879	1.0940	184.6		0.28514	507.5	2.1366	0.9884	1.0943	184.5	115
120	0.31377	512.5	2.1561	0.9953	1.0931	185.7		0.28893	512.5	2.1493	0.9958	1.0934	185.6	120
125	0.31797	517.5	2.1687	1.0026	1.0922	186.9		0.29265	517.5	2.1619	1.0031	1.0924	186.8	125
130	—	—	—	—	—	—		0.29647	522.5	2.1745	1.0104	1.0915	188.0	130

ตารางสมบัติของสารทำความเย็นชนิด R-134a ณ สภาวะไอร้อนยิ่งยวด (ต่อ)

V = ปริมาตร, m^3/kg ; H = เอนทัลปี, kJ/kg ; S = เอนโทรปี, $kJ/kg\cdot K$; v_s = ความเร็วเสียง, m/sec C_p = ความร้อน

จำเพาะ ณ ความดันคงที่, $kJ/kg\cdot K$; C_p/C_v = อัตราส่วนความจำเพาะ (ไม่มีมิติ)

อุณหภูมิ °C	ความดัน = 120.00 kPa (abs)						SAT LIQ SAT VAP	ความดัน = 130.00 kPa (abs)						อุณหภูมิ °C
	V	H	S	C_p	C_p/C_v	v_s		V	H	S	C_p	C_p/C_v	v_s	
-22.29	0.00073	170.7	0.8888	1.2812	1.5058	727.6		0.00074	173.1	0.8981	1.2856	1.5065	719.1	-20.47
-22.29	0.16207	385.4	1.7443	0.9016	1.1563	146.1		0.15026	396.5	1.7426	0.8080	1.1575	146.3	-20.47
-20	0.16385	387.2	1.7516	0.8033	1.1538	146.9		0.15060	386.9	1.7441	0.8083	1.1570	146.4	-20
-15	0.16773	391.2	1.7674	0.8075	1.1488	148.6		0.15423	390.9	1.7600	0.8120	1.1516	148.2	-15
-10	0.17156	395.3	1.7829	0.8124	1.1443	150.3		0.15780	395.0	1.7756	0.8164	1.1468	149.9	-10
-5	0.17535	399.4	1.7983	0.8177	1.1402	151.9		0.16134	399.1	1.7910	0.8213	1.1425	151.5	-5
0	0.17912	403.5	1.8134	0.8233	1.1365	153.5		0.16483	403.2	1.8062	0.8266	1.1385	153.1	0
5	0.18285	407.6	1.8284	0.8294	1.1331	155.1		0.16829	407.3	1.8212	0.8323	1.1349	154.7	5
10	0.18657	411.7	1.8432	0.8356	1.1300	156.6		0.17173	411.5	1.8361	0.8383	1.1316	156.3	10
15	0.19022	415.9	1.8579	0.8422	1.1271	158.1		0.17516	415.7	1.8509	0.8446	1.1286	157.8	15
20	0.19387	420.2	1.8725	0.8489	1.1245	159.6		0.17857	420.0	1.8654	0.8511	1.1258	159.3	20
25	0.19751	424.4	1.8869	0.8558	1.1220	161.0		0.18195	424.2	1.8799	0.8578	1.1232	160.8	25
30	0.20113	428.7	1.9012	0.8628	1.1197	162.5		0.18529	428.5	1.8942	0.8647	1.1208	162.2	30
35	0.20475	433.1	1.9153	0.8700	1.1175	163.9		0.18864	432.9	1.9084	0.8717	1.1185	163.6	35
40	0.20833	437.4	1.9294	0.8772	1.1155	165.3		0.19198	437.3	1.9225	0.8788	1.1164	165.0	40
45	0.21191	441.8	1.9434	0.8845	1.1135	166.6		0.19531	441.7	1.9365	0.8860	1.1144	166.4	45
50	0.21552	446.3	1.9572	0.8919	1.1117	168.0		0.19861	446.1	1.9504	0.8933	1.1125	167.8	50
55	0.21906	450.7	1.9710	0.8993	1.1100	169.3		0.20190	450.6	1.9641	0.9006	1.1108	169.1	55
60	0.22262	455.3	1.9846	0.9068	1.1084	170.7		0.20521	455.1	1.9778	0.9080	1.1091	170.5	60
65	0.22614	459.8	1.9982	0.9143	1.1068	172.0		0.20846	459.7	1.9914	0.9154	1.1075	171.8	65
70	0.22967	464.4	2.0117	0.9218	1.1054	173.3		0.21173	464.3	2.0049	0.9228	1.1060	173.1	70
75	0.23321	469.0	2.0251	0.9293	1.1040	174.5		0.21501	468.9	2.0183	0.9302	1.1045	174.4	75
80	0.23669	473.7	2.0384	0.9368	1.1026	175.8		0.21825	473.6	2.0316	0.9377	1.1032	175.7	80
85	0.24021	478.4	2.0516	0.9443	1.1014	177.1		0.22148	478.3	2.0448	0.9451	1.1019	176.9	85
90	0.24372	483.1	2.0647	0.9518	1.1001	178.3		0.22477	483.0	2.0580	0.9526	1.1006	178.2	90
95	0.24722	487.9	2.0778	0.9593	1.0989	179.5		0.22800	487.8	2.0711	0.9600	1.0994	179.4	95
100	0.25069	492.7	2.0908	0.9667	1.0978	180.8		0.23116	492.6	2.0841	0.9674	1.0982	180.6	100
105	0.25419	497.6	2.1037	0.9742	1.0967	182.0		0.23447	497.5	2.0970	0.9748	1.0971	181.8	105
110	0.25767	502.5	2.1165	0.9816	1.0957	183.2		0.23764	502.4	2.1098	0.9822	1.0961	183.0	110
115	0.26116	507.4	2.1293	0.9890	1.0947	184.4		0.24091	507.3	2.1226	0.9895	1.0950	184.2	115
120	0.26462	512.4	2.1420	0.9963	1.0937	185.5		0.24414	512.3	2.1353	0.9968	1.0940	185.4	120
125	0.26810	517.4	2.1547	1.0036	1.0928	186.7		0.24728	517.3	2.1480	1.0041	1.0931	186.6	125
130	0.27152	522.4	2.1672	1.0109	1.0919	187.9		0.25050	522.3	2.1606	1.0114	1.0922	187.8	130

อุณหภูมิ °C	ความดัน = 140.00 kPa (abs)						SAT LIQ SAT VAP	ความดัน = 150.00 kPa (abs)						อุณหภูมิ °C
	V	H	S	C_p	C_p/C_v	v_s		V	H	S	C_p	C_p/C_v	v_s	
-18.75	0.00074	175.3	0.9068	1.2899	1.5072	711.2		0.00074	177.4	0.9150	1.2939	1.5081	703.7	-17.12
-18.75	0.14010	387.5	1.7411	0.8142	1.1587	146.4		0.13123	398.5	1.7397	0.8201	1.1599	146.5	-17.12
-15	0.14263	390.6	1.7530	0.8166	1.1545	147.7		0.13259	390.3	1.7464	0.8213	1.1574	147.3	-15
-10	0.14599	394.7	1.7687	0.8205	1.1493	149.5		0.13576	394.4	1.7622	0.8247	1.1519	149.1	-10
-5	0.14930	398.8	1.7842	0.8250	1.1447	151.2		0.13889	398.5	1.7778	0.8287	1.1470	150.8	-5
0	0.15258	402.9	1.7995	0.8299	1.1405	152.8		0.14196	402.7	1.7931	0.8333	1.1426	152.4	0
5	0.15584	407.1	1.8146	0.8353	1.1368	154.4		0.14503	406.9	1.8083	0.8384	1.1386	154.1	5
10	0.15906	411.3	1.8295	0.8411	1.1333	156.0		0.14806	411.1	1.8233	0.8438	1.1350	155.7	10
15	0.16226	415.5	1.8443	0.8471	1.1301	157.5		0.15106	415.3	1.8381	0.8496	1.1316	157.2	15
20	0.16543	419.8	1.8589	0.8534	1.1272	159.0		0.15404	419.6	1.8528	0.8557	1.1285	158.7	20
25	0.16858	424.1	1.8734	0.8599	1.1245	160.5		0.15701	423.9	1.8673	0.8620	1.1257	160.2	25
30	0.17173	428.4	1.8877	0.8666	1.1219	162.0		0.15995	428.2	1.8817	0.8685	1.1231	161.7	30
35	0.17486	432.7	1.9020	0.8735	1.1196	163.4		0.16289	432.5	1.8959	0.8752	1.1206	163.2	35
40	0.17794	437.1	1.9161	0.8804	1.1174	164.8		0.16581	436.9	1.9101	0.8820	1.1183	164.6	40
45	0.18106	441.5	1.9301	0.8875	1.1153	166.2		0.16869	441.4	1.9241	0.8890	1.1162	166.0	45
50	0.18413	446.0	1.9440	0.8946	1.1134	167.6		0.17156	445.8	1.9380	0.8960	1.1142	167.4	50
55	0.18720	450.5	1.9578	0.9019	1.1115	168.9		0.17449	450.3	1.9518	0.9032	1.1123	168.7	55
60	0.19026	455.0	1.9715	0.9091	1.1098	170.3		0.17734	454.9	1.9656	0.9103	1.1105	170.1	60
65	0.19331	459.6	1.9851	0.9165	1.1082	171.6		0.18018	459.4	1.9792	0.9176	1.1088	171.4	65
70	0.19635	464.2	1.9986	0.9238	1.1066	172.9		0.18305	464.0	1.9927	0.9249	1.1072	172.8	70
75	0.19936	468.8	2.0120	0.9312	1.1051	174.2		0.18587	468.7	2.0061	0.9322	1.1057	174.1	75
80	0.20243	473.5	2.0253	0.9386	1.1037	175.5		0.18875	473.4	2.0195	0.9395	1.1043	175.3	80
85	0.20547	478.2	2.0386	0.9460	1.1024	176.8		0.19157	478.1	2.0327	0.9468	1.1029	176.6	85
90	0.20851	482.9	2.0517	0.9534	1.1011	178.0		0.19440	482.8	2.0459	0.9541	1.1016	177.9	90
95	0.21146	487.7	2.0648	0.9607	1.0998	179.3		0.19720	487.6	2.0590	0.9615	1.1003	179.1	95
100	0.21450	492.5	2.0778	0.9681	1.0987	180.5		0.20000	492.4	2.0720	0.9688	1.0991	180.4	100
105	0.21753	497.4	2.0908	0.9755	1.0975	181.7		0.20284	497.3	2.0850	0.9761	1.0979	181.6	105
110	0.22051	502.3	2.1036	0.9828	1.0964	182.9		0.20563	502.2	2.0978	0.9834	1.0968	182.8	110
115	0.22351	507.2	2.1164	0.9901	1.0954	184.1		0.20846	507.1	2.1106	0.9907	1.0958	184.0	115
120	0.22650	512.2	2.1291	0.9974	1.0944	185.3		0.21124	512.1	2.1234	0.9979	1.0947	185.2	120
125	0.22946	517.2	2.1418	1.0046	1.0934	186.5		0.21404	517.1	2.1360	1.0052	1.0937	186.4	125
130	0.23245	522.2	2.1544	1.0118	1.0925	187.7		0.21683	522.2	2.1486	1.0123	1.0928	187.6	130
135	0.23546	527.3	2.1669	1.0190	1.0916	188.8		0.21964	527.2	2.1611	1.0195	1.0919	188.7	135

ตารางสมบัติของสารทำความเย็นชนิด R-134a ณ สภาวะไอร้อนยิ่งยวด (ต่อ)

V = ปริมาตร, m³/kg; H = เอนทัลปี, kJ/kg; S = เอนโทรปี, kJ/kg·K; v_s = ความเร็วเสียง, m/sec C_p = ความร้อนจำเพาะ ณ ความดันคงที่, kJ/kg·K; C_p/C_v = อัตราส่วนความจำเพาะ (ไม่มีมิติ)

อุณหภูมิ °C	ความดัน = 160.0 kPa (abs)						SAT LIQ SAT VAP	ความดัน = 170.0 kPa (abs)						อุณหภูมิ °C
	V	H	S	Cp	Cp/Cv	v _s		V	H	S	Cp	Cp/Cv	v _s	
-15.58	0.00074	179.4	0.9228	1.2979	1.5089	696.6		0.00075	181.3	0.9302	1.3017	1.5098	689.9	-14.11
-15.58	0.12344	389.5	1.7384	0.8258	1.1612	146.6		0.11655	390.4	1.7372	0.8313	1.1624	146.7	-14.11
-15	0.12379	390.0	1.7402	0.8261	1.1605	146.9		—	—	—	—	—	—	-15
-10	0.12679	394.1	1.7561	0.8289	1.1546	148.6		0.11889	393.8	1.7503	0.8333	1.1574	148.2	-10
-5	0.12975	398.3	1.7717	0.8325	1.1494	150.4		0.12170	398.0	1.7660	0.8364	1.1518	150.0	-5
0	0.13268	402.4	1.7872	0.8367	1.1447	152.1		0.12447	402.2	1.7815	0.8402	1.1469	151.7	0
5	0.13556	406.6	1.8024	0.8415	1.1405	153.7		0.12721	406.4	1.7968	0.8446	1.1424	153.4	5
10	0.13843	410.8	1.8174	0.8466	1.1367	155.3		0.12994	410.6	1.8119	0.8495	1.1384	155.0	10
15	0.14126	415.1	1.8323	0.8522	1.1332	156.9		0.13263	414.9	1.8268	0.8548	1.1347	156.6	15
20	0.14407	419.4	1.8470	0.8580	1.1299	158.5		0.13528	419.2	1.8415	0.8604	1.1314	158.2	20
25	0.14686	423.7	1.8616	0.8641	1.1270	160.0		0.13793	423.5	1.8561	0.8663	1.1283	159.7	25
30	0.14966	428.0	1.8760	0.8705	1.1242	161.5		0.14055	427.8	1.8706	0.8724	1.1254	161.2	30
35	0.15242	432.4	1.8903	0.8770	1.1217	162.9		0.14316	432.2	1.8849	0.8788	1.1228	162.7	35
40	0.15516	436.8	1.9044	0.8837	1.1193	164.4		0.14577	436.6	1.8991	0.8853	1.1203	164.1	40
45	0.15790	441.2	1.9185	0.8905	1.1171	165.8		0.14835	441.1	1.9132	0.8920	1.1180	165.6	45
50	0.16059	445.7	1.9324	0.8974	1.1150	167.2		0.15092	445.5	1.9272	0.8988	1.1159	167.0	50
55	0.16329	450.2	1.9463	0.9044	1.1131	168.6		0.15347	450.0	1.9410	0.9057	1.1139	168.4	55
60	0.16600	454.7	1.9600	0.9115	1.1112	169.9		0.15603	454.6	1.9548	0.9127	1.1120	169.7	60
65	0.16869	459.3	1.9736	0.9187	1.1095	171.3		0.15858	459.2	1.9684	0.9198	1.1102	171.1	65
70	0.17141	463.9	1.9872	0.9259	1.1079	172.6		0.16108	463.8	1.9820	0.9269	1.1085	172.4	70
75	0.17406	468.6	2.0006	0.9331	1.1063	173.9		0.16364	468.4	1.9954	0.9341	1.1069	173.7	75
80	0.17674	473.2	2.0140	0.9404	1.1048	175.2		0.16617	473.1	2.0088	0.9413	1.1054	175.0	80
85	0.17940	478.0	2.0272	0.9477	1.1034	176.5		0.16863	477.9	2.0221	0.9485	1.1039	176.3	85
90	0.18205	482.7	2.0404	0.9549	1.1020	177.7		0.17117	482.6	2.0353	0.9557	1.1025	177.6	90
95	0.18471	487.5	2.0535	0.9622	1.1008	179.0		0.17367	487.4	2.0484	0.9630	1.1012	178.9	95
100	0.18734	492.3	2.0666	0.9695	1.0995	180.2		0.17618	492.2	2.0614	0.9702	1.1000	180.1	100
105	0.19001	497.2	2.0795	0.9768	1.0983	181.5		0.17867	497.1	2.0744	0.9774	1.0988	181.3	105
110	0.19260	502.1	2.0924	0.9840	1.0972	182.7		0.18113	502.0	2.0873	0.9847	1.0976	182.6	110
115	0.19524	507.0	2.1052	0.9913	1.0961	183.9		0.18362	507.0	2.1001	0.9919	1.0965	183.8	115
120	0.19790	512.0	2.1179	0.9985	1.0951	185.1		0.18612	511.9	2.1128	0.9990	1.0954	185.0	120
125	0.20052	517.0	2.1306	1.0057	1.0941	186.3		0.18857	516.9	2.1255	1.0062	1.0944	186.2	125
130	0.20313	522.1	2.1432	1.0128	1.0931	187.5		0.19106	522.0	2.1381	1.0133	1.0934	187.4	130
135	0.20576	527.2	2.1557	1.0200	1.0922	188.6		0.19354	527.1	2.1506	1.0204	1.0925	188.5	135
140	—	—	—	—	—	—		0.19600	532.2	2.1631	1.0275	1.0915	189.7	140

อุณหภูมิ °C	ความดัน = 180.0 kPa (abs)						SAT LIQ SAT VAP	ความดัน = 190.0 kPa (abs)						อุณหภูมิ °C
	V	H	S	Cp	Cp/Cv	v _s		V	H	S	Cp	Cp/Cv	v _s	
-12.71	0.00075	183.2	0.9372	1.3053	1.5107	683.4		0.00075	184.9	0.9439	1.3089	1.5116	677.3	-11.37
-12.71	0.11039	391.2	1.7361	0.8366	1.1637	146.8		0.10484	392.0	1.7351	0.8418	1.1649	146.9	-11.37
-10	0.11186	393.5	1.7448	0.8377	1.1602	147.8		0.10556	393.2	1.7395	0.8422	1.1631	147.4	-10
-5	0.11453	397.7	1.7606	0.8404	1.1543	149.6		0.10812	397.4	1.7554	0.8444	1.1569	149.2	-5
0	0.11718	401.9	1.7761	0.8438	1.1491	151.3		0.11066	401.6	1.7710	0.8474	1.1514	151.0	0
5	0.11979	406.1	1.7915	0.8478	1.1444	153.0		0.11315	405.9	1.7864	0.8510	1.1464	152.7	5
10	0.12237	410.4	1.8066	0.8524	1.1402	154.7		0.11562	410.1	1.8016	0.8553	1.1420	154.4	10
15	0.12494	414.7	1.8216	0.8574	1.1363	156.3		0.11805	414.4	1.8166	0.8600	1.1390	156.0	15
20	0.12747	419.0	1.8364	0.8628	1.1328	157.9		0.12047	418.7	1.8314	0.8652	1.1343	157.6	20
25	0.12999	423.3	1.8510	0.8685	1.1296	159.4		0.12287	423.1	1.8461	0.8706	1.1309	159.2	25
30	0.13247	427.6	1.8655	0.8744	1.1266	160.9		0.12525	427.5	1.8606	0.8764	1.1278	160.7	30
35	0.13495	432.0	1.8798	0.8806	1.1239	162.4		0.12760	431.9	1.8750	0.8824	1.1250	162.2	35
40	0.13742	436.4	1.8941	0.8870	1.1213	163.9		0.12995	436.3	1.8893	0.8887	1.1223	163.7	40
45	0.13988	440.9	1.9082	0.8936	1.1190	165.3		0.13229	440.7	1.9034	0.8951	1.1199	165.1	45
50	0.14231	445.4	1.9222	0.9003	1.1167	166.8		0.13461	445.2	1.9174	0.9017	1.1176	166.6	50
55	0.14474	449.9	1.9360	0.9071	1.1147	168.2		0.13693	449.8	1.9313	0.9084	1.1155	168.0	55
60	0.14717	454.5	1.9498	0.9140	1.1127	169.5		0.13922	454.3	1.9451	0.9152	1.1134	169.4	60
65	0.14957	459.0	1.9635	0.9209	1.1109	170.9		0.14152	458.9	1.9588	0.9221	1.1115	170.7	65
70	0.15195	463.7	1.9770	0.9280	1.1091	172.2		0.14380	463.5	1.9724	0.9290	1.1098	172.1	70
75	0.15434	468.3	1.9905	0.9351	1.1075	173.6		0.14607	468.2	1.9859	0.9360	1.1081	173.4	75
80	0.15674	473.0	2.0039	0.9422	1.1059	174.9		0.14832	472.9	1.9993	0.9431	1.1065	174.7	80
85	0.15911	477.7	2.0172	0.9494	1.1044	176.2		0.15060	477.6	2.0126	0.9502	1.1050	176.0	85
90	0.16150	482.5	2.0304	0.9565	1.1030	177.5		0.15284	482.4	2.0258	0.9573	1.1035	177.3	90
95	0.16385	487.3	2.0435	0.9637	1.1017	178.7		0.15509	487.2	2.0399	0.9645	1.1021	178.6	95
100	0.16622	492.1	2.0566	0.9709	1.1004	180.0		0.15733	492.0	2.0520	0.9716	1.1008	179.8	100
105	0.16858	497.0	2.0696	0.9781	1.0992	181.2		0.15957	496.9	2.0650	0.9788	1.0996	181.1	105
110	0.17094	501.9	2.0825	0.9853	1.0980	182.4		0.16181	501.8	2.0779	0.9859	1.0984	182.3	110
115	0.17328	506.9	2.0953	0.9924	1.0969	183.7		0.16404	506.8	2.0907	0.9930	1.0972	183.6	115
120	0.17562	511.8	2.1080	0.9996	1.0958	184.9		0.16625	511.8	2.1034	1.0001	1.0961	184.8	120
125	0.17797	516.9	2.1207	1.0067	1.0947	186.1		0.16849	516.8	2.1161	1.0072	1.0951	186.0	125
130	0.18031	521.9	2.1333	1.0138	1.0937	187.3		0.17071	521.8	2.1288	1.0143	1.0940	187.2	130
135	0.18265	527.0	2.1458	1.0209	1.0928	188.4		0.17292	526.9	2.1413	1.0214	1.0931	188.3	135
140	0.18498	532.1	2.1583	1.0279	1.0918	189.6		0.17516	532.0	2.1538	1.0284	1.0921	189.5	140

ตารางสมบัติของสารทำความเย็นชนิด R-134a ณ สภาวะไอร้อนยิ่งยวด (ต่อ)

V = ปริมาตร, m³/kg; H = เอนทัลปี, kJ/kg; S = เอนโทรปี, kJ/kg·K; v_s = ความเร็วเสียง, m/sec C_p = ความร้อนจำเพาะ ณ ความดันคงที่, kJ/kg·K; C_p/C_v = อัตราส่วนความจำเพาะ (ไม่มีมิติ)

อุณหภูมิ °C	ความดัน = 200.00 kPa (abs)						SAT LIQ SAT VAP	ความดัน = 210.00 kPa (abs)						อุณหภูมิ °C
	V	H	S	Cp	Cp/Cv	v _s		V	H	S	Cp	Cp/Cv	v _s	
-10.08	0.00075	186.6	0.9503	1.3124	1.5125	671.3	0.00076	188.2	0.9565	1.3157	1.5135	665.6	-8.84	
-10.08	0.00985	392.8	1.7342	0.8468	1.1661	146.9	0.09531	393.6	1.7333	0.8517	1.1674	147.0	-8.84	
-10	0.00989	392.9	1.7344	0.8468	1.1660	146.9	—	—	—	—	—	—	-10	
-5	0.10235	397.1	1.7504	0.8485	1.1595	148.8	0.009713	396.8	1.7456	0.8527	1.1621	148.4	-5	
0	0.10478	401.4	1.7661	0.8510	1.1537	150.6	0.009945	401.1	1.7613	0.8548	1.1560	150.2	0	
5	0.10717	405.6	1.7815	0.8543	1.1485	152.3	0.10175	405.4	1.7729	0.8577	1.1506	152.0	5	
10	0.10953	409.9	1.7968	0.8583	1.1438	154.0	0.10401	409.7	1.7922	0.8613	1.1457	153.7	10	
15	0.11186	414.2	1.8118	0.8627	1.1396	155.7	0.10626	414.0	1.8073	0.8654	1.1413	155.4	15	
20	0.11417	418.5	1.8267	0.8676	1.1358	157.3	0.10847	418.3	1.8222	0.8700	1.1373	157.0	20	
25	0.11647	422.9	1.8414	0.8729	1.1323	158.9	0.11067	422.7	1.8370	0.8751	1.1336	158.6	25	
30	0.11874	427.3	1.8560	0.8784	1.1291	160.4	0.11284	427.1	1.8516	0.8805	1.1303	160.2	30	
35	0.12099	431.7	1.8704	0.8843	1.1261	162.0	0.11501	431.5	1.8660	0.8862	1.1272	161.7	35	
40	0.12324	436.1	1.8847	0.8904	1.1234	163.4	0.11715	435.9	1.8803	0.8921	1.1244	163.2	40	
45	0.12547	440.6	1.8989	0.8967	1.1208	164.9	0.11927	440.4	1.8945	0.8982	1.1218	164.7	45	
50	0.12767	445.1	1.9129	0.9031	1.1185	166.3	0.12139	444.9	1.9086	0.9046	1.1193	166.1	50	
55	0.12989	449.6	1.9268	0.9097	1.1163	167.8	0.12350	449.5	1.9225	0.9110	1.1171	167.6	55	
60	0.13207	454.2	1.9406	0.9164	1.1142	169.2	0.12560	454.0	1.9363	0.9176	1.1149	169.0	60	
65	0.13425	458.8	1.9543	0.9232	1.1122	170.5	0.12768	458.6	1.9501	0.9244	1.1129	170.4	65	
70	0.13643	463.4	1.9679	0.9301	1.1104	171.9	0.12975	463.3	1.9637	0.9312	1.1111	171.7	70	
75	0.13860	468.1	1.9814	0.9370	1.1087	173.2	0.13184	468.0	1.9772	0.9380	1.1093	173.1	75	
80	0.14075	472.8	1.9948	0.9440	1.1070	174.6	0.13390	472.7	1.9906	0.9450	1.1076	174.4	80	
85	0.14290	477.5	2.0082	0.9511	1.1055	175.9	0.13596	477.4	2.0040	0.9519	1.1060	175.7	85	
90	0.14505	482.3	2.0214	0.9581	1.1040	177.2	0.13799	482.2	2.0172	0.9589	1.1045	177.0	90	
95	0.14719	487.1	2.0345	0.9652	1.1026	178.4	0.14004	487.0	2.0304	0.9660	1.1031	178.3	95	
100	0.14932	491.9	2.0476	0.9723	1.1013	179.7	0.14209	491.8	2.0434	0.9730	1.1017	179.6	100	
105	0.15145	496.8	2.0606	0.9794	1.1000	181.0	0.14413	496.7	2.0564	0.9801	1.1004	180.8	105	
110	0.15359	501.7	2.0735	0.9865	1.0988	182.2	0.14616	501.6	2.0694	0.9872	1.0992	182.1	110	
115	0.15571	506.7	2.0864	0.9936	1.0976	183.4	0.14819	506.6	2.0822	0.9942	1.0980	183.3	115	
120	0.15783	511.7	2.0991	1.0007	1.0965	184.7	0.15020	511.6	2.0950	1.0013	1.0968	184.5	120	
125	0.15995	516.7	2.1118	1.0078	1.0954	185.9	0.15223	516.6	2.1077	1.0083	1.0957	185.8	125	
130	0.16207	521.8	2.1244	1.0148	1.0944	187.1	0.15423	521.7	2.1203	1.0153	1.0947	187.0	130	
135	0.16418	526.8	2.1370	1.0218	1.0934	188.2	0.15623	526.8	2.1329	1.0223	1.0937	188.1	135	
140	0.16628	532.0	2.1495	1.0288	1.0924	189.4	0.15825	531.9	2.1454	1.0293	1.0927	189.3	140	
145	—	—	—	—	—	—	0.16028	537.1	2.1578	1.0362	1.0917	190.5	145	

อุณหภูมิ °C	ความดัน = 220.00 kPa (abs)						SAT LIQ SAT VAP	ความดัน = 230.00 kPa (abs)						อุณหภูมิ °C
	V	H	S	Cp	Cp/Cv	v _s		V	H	S	Cp	Cp/Cv	v _s	
-7.64	0.00076	189.8	0.9624	1.3190	1.5144	660.2	0.00076	191.3	0.9681	1.3222	1.5154	654.9	-6.49	
-7.64	0.09117	394.3	1.7325	0.8564	1.1686	147.0	0.08737	395.0	1.7317	0.8611	1.1699	147.0	-6.49	
-5	0.09237	396.5	1.7410	0.8569	1.1649	148.0	0.08803	396.3	1.7365	0.8612	1.1677	147.6	-5	
0	0.09462	400.8	1.7568	0.8585	1.1584	149.8	0.09020	400.6	1.7524	0.8624	1.1609	149.5	0	
5	0.09683	405.1	1.7724	0.8611	1.1527	151.6	0.09234	404.9	1.7681	0.8645	1.1549	151.3	5	
10	0.09901	409.4	1.7878	0.8643	1.1476	153.4	0.09444	409.2	1.7835	0.8674	1.1495	153.0	10	
15	0.10116	413.8	1.8029	0.8682	1.1430	155.1	0.09651	413.6	1.7987	0.8709	1.1447	154.8	15	
20	0.10330	418.1	1.8179	0.8725	1.1388	156.7	0.09856	417.9	1.8137	0.8751	1.1404	156.4	20	
25	0.10540	422.5	1.8327	0.8774	1.1350	158.3	0.10059	422.3	1.8286	0.8796	1.1364	158.1	25	
30	0.10749	426.9	1.8473	0.8825	1.1316	159.9	0.10260	426.7	1.8433	0.8846	1.1329	159.7	30	
35	0.10957	431.3	1.8618	0.8880	1.1284	161.5	0.10459	431.2	1.8578	0.8900	1.1296	161.2	35	
40	0.11162	435.8	1.8762	0.8938	1.1255	163.0	0.10656	435.6	1.8721	0.8956	1.1265	162.7	40	
45	0.11365	440.3	1.8904	0.8998	1.1228	164.5	0.10853	440.1	1.8864	0.9014	1.1237	164.2	45	
50	0.11569	444.8	1.9044	0.9060	1.1202	165.9	0.11047	444.6	1.9005	0.9075	1.1211	165.7	50	
55	0.11772	449.3	1.9184	0.9124	1.1179	167.4	0.11242	449.2	1.9145	0.9138	1.1187	167.2	55	
60	0.11970	453.9	1.9322	0.9189	1.1157	168.8	0.11435	453.8	1.9283	0.9202	1.1165	168.6	60	
65	0.12171	458.5	1.9460	0.9255	1.1136	170.2	0.11627	458.4	1.9421	0.9267	1.1144	170.0	65	
70	0.12370	463.2	1.9596	0.9322	1.1117	171.6	0.11818	463.0	1.9557	0.9333	1.1124	171.4	70	
75	0.12569	467.8	1.9732	0.9390	1.1099	172.9	0.12008	467.7	1.9693	0.9400	1.1105	172.7	75	
80	0.12765	472.6	1.9866	0.9459	1.1082	174.3	0.12198	472.4	1.9827	0.9468	1.1088	174.1	80	
85	0.12962	477.3	1.9999	0.9528	1.1066	175.6	0.12387	477.2	1.9961	0.9537	1.1071	175.4	85	
90	0.13158	482.1	2.0132	0.9598	1.1050	176.9	0.12574	482.0	2.0094	0.9606	1.1055	176.7	90	
95	0.13355	486.9	2.0264	0.9667	1.1035	178.2	0.12763	486.8	2.0225	0.9675	1.1040	178.0	95	
100	0.13550	491.7	2.0395	0.9737	1.1022	179.5	0.12950	491.6	2.0356	0.9745	1.1026	179.3	100	
105	0.13746	496.6	2.0525	0.9808	1.1008	180.7	0.13135	496.5	2.0487	0.9814	1.1012	180.6	105	
110	0.13939	501.6	2.0654	0.9878	1.0996	182.0	0.13323	501.5	2.0616	0.9884	1.1000	181.8	110	
115	0.14132	506.5	2.0782	0.9948	1.0983	183.2	0.13508	506.4	2.0745	0.9954	1.0987	183.1	115	
120	0.14327	511.5	2.0910	1.0018	1.0972	184.4	0.13693	511.4	2.0872	1.0024	1.0975	184.3	120	
125	0.14520	516.5	2.1037	1.0088	1.0961	185.7	0.13879	516.4	2.1000	1.0094	1.0964	185.5	125	
130	0.14712	521.6	2.1164	1.0158	1.0950	186.9	0.14063	521.5	2.1126	1.0163	1.0953	186.8	130	
135	0.14905	526.7	2.1289	1.0228	1.0940	188.0	0.14247	526.6	2.1252	1.0233	1.0943	188.0	135	
140	0.15099	531.8	2.1414	1.0297	1.0930	189.2	0.14430	531.7	2.1377	1.0302	1.0933	189.1	140	
145	0.15288	537.0	2.1538	1.0366	1.0920	190.4	0.14616	536.9	2.1501	1.0371	1.0923	190.3	145	

ตารางสมบัติของสารทำความเย็นชนิด R-134a ณ สภาวะไอร้อนยิ่งยวด (ต่อ)

V = ปริมาตร, m³/kg; H = เอนทัลปี, kJ/kg; S = เอนโทรปี, kJ/kg·K; v_s = ความเร็วเสียง, m/sec C_p = ความร้อนจำเพาะ ณ ความดันคงที่, kJ/kg·K; C_p/C_v = อัตราส่วนความจำเพาะ (ไม่มีมิติ)

อุณหภูมิ °C	ความดัน = 240.00 kPa (abs)						SAT LIQ SAT VAP	ความดัน = 250.00 kPa (abs)						อุณหภูมิ °C
	V	H	S	Cp	Cp/Cv	v _s		V	H	S	Cp	Cp/Cv	v _s	
-5.37	0.00076	192.8	0.9736	1.3254	1.5164	649.7	0.00077	194.3	0.9790	1.3285	1.5174	644.8	-4.29	
-5.37	0.08389	395.6	1.7310	0.8656	1.1711	147.0	0.08067	396.3	1.7303	0.8701	1.1724	147.0	-4.29	
-5	0.08405	396.0	1.7322	0.8657	1.1706	147.2	—	—	—	—	—	—	-5	
0	0.08615	400.3	1.7482	0.8663	1.1634	149.1	0.08241	400.0	1.7441	0.8703	1.1660	148.7	0	
5	0.08821	404.6	1.7639	0.8680	1.1571	150.9	0.08442	404.4	1.7599	0.8715	1.1594	150.6	5	
10	0.09024	409.0	1.7794	0.8705	1.1515	152.7	0.08638	408.7	1.7754	0.8737	1.1535	152.4	10	
15	0.09224	413.3	1.7947	0.8738	1.1465	154.4	0.08832	413.1	1.7908	0.8766	1.1483	154.1	15	
20	0.09422	417.7	1.8097	0.8776	1.1420	156.1	0.09023	417.5	1.8059	0.8802	1.1436	155.8	20	
25	0.09618	422.1	1.8246	0.8820	1.1379	157.8	0.09212	421.9	1.8208	0.8843	1.1393	157.5	25	
30	0.09812	426.5	1.8393	0.8867	1.1341	159.4	0.09399	426.3	1.8355	0.8889	1.1355	159.1	30	
35	0.10004	431.0	1.8539	0.8919	1.1307	161.0	0.09584	430.8	1.8501	0.8938	1.1319	160.7	35	
40	0.10194	435.4	1.8683	0.8973	1.1276	162.5	0.09768	435.3	1.8645	0.8991	1.1287	162.3	40	
45	0.10383	439.9	1.8825	0.9030	1.1247	164.0	0.09951	439.8	1.8788	0.9047	1.1257	163.8	45	
50	0.10571	444.5	1.8967	0.9090	1.1220	165.5	0.10131	444.3	1.8930	0.9105	1.1230	165.3	50	
55	0.10757	449.0	1.9107	0.9151	1.1196	167.0	0.10310	448.9	1.9070	0.9165	1.1204	166.8	55	
60	0.10942	453.6	1.9245	0.9214	1.1172	168.4	0.10489	453.5	1.9209	0.9227	1.1180	168.2	60	
65	0.11127	458.3	1.9383	0.9278	1.1151	169.8	0.10668	458.1	1.9347	0.9290	1.1158	169.6	65	
70	0.11311	462.9	1.9520	0.9344	1.1130	171.2	0.10845	462.8	1.9484	0.9355	1.1137	171.0	70	
75	0.11494	467.6	1.9656	0.9410	1.1111	172.6	0.11019	467.5	1.9620	0.9421	1.1118	172.4	75	
80	0.11675	472.3	1.9790	0.9478	1.1093	173.9	0.11197	472.2	1.9755	0.9487	1.1099	173.8	80	
85	0.11857	477.1	1.9924	0.9546	1.1076	175.3	0.11371	477.0	1.9888	0.9554	1.1082	175.1	85	
90	0.12038	481.9	2.0057	0.9614	1.1060	176.6	0.11545	481.8	2.0021	0.9622	1.1065	176.5	90	
95	0.12219	486.7	2.0189	0.9683	1.1045	177.9	0.11718	486.6	2.0153	0.9690	1.1050	177.8	95	
100	0.12398	491.5	2.0320	0.9752	1.1030	179.2	0.11891	491.4	2.0285	0.9759	1.1035	179.1	100	
105	0.12577	496.4	2.0450	0.9821	1.1017	180.5	0.12064	496.3	2.0415	0.9828	1.1021	180.3	105	
110	0.12755	501.4	2.0579	0.9891	1.1004	181.7	0.12235	501.3	2.0544	0.9897	1.1008	181.6	110	
115	0.12933	506.3	2.0708	0.9960	1.0991	183.0	0.12407	506.2	2.0673	0.9966	1.0995	182.9	115	
120	0.13111	511.3	2.0836	1.0030	1.0979	184.2	0.12579	511.2	2.0801	1.0035	1.0983	184.1	120	
125	0.13291	516.4	2.0963	1.0099	1.0967	185.4	0.12750	516.3	2.0928	1.0104	1.0971	185.3	125	
130	0.13466	521.4	2.1090	1.0168	1.0956	186.7	0.12920	521.3	2.1055	1.0173	1.0960	186.5	130	
135	0.13646	526.5	2.1216	1.0237	1.0946	187.9	0.13092	526.4	2.1181	1.0242	1.0949	187.8	135	
140	0.13824	531.7	2.1341	1.0306	1.0936	189.0	0.13261	531.6	2.1306	1.0311	1.0938	189.0	140	
145	0.13998	536.8	2.1465	1.0375	1.0926	190.2	0.13432	536.8	2.1430	1.0379	1.0929	190.1	145	
150	—	—	—	—	—	—	0.13600	542.0	2.1554	1.0448	1.0919	191.3	150	

อุณหภูมิ °C	ความดัน = 260.00 kPa (abs)						SAT LIQ SAT VAP	ความดัน = 270.00 kPa (abs)						อุณหภูมิ °C
	V	H	S	Cp	Cp/Cv	v _s		V	H	S	Cp	Cp/Cv	v _s	
-3.24	0.00077	195.7	0.9841	1.3315	1.5184	640.0	0.00077	197.0	0.9891	1.3345	1.5194	635.3	-2.23	
-3.24	0.07769	396.9	1.7297	0.8745	1.1737	147.0	0.07493	397.5	1.7291	0.8787	1.1749	147.0	-2.23	
0	0.07897	399.7	1.7401	0.8744	1.1687	148.3	0.07578	399.5	1.7363	0.8785	1.1714	147.1	0	
5	0.08091	404.1	1.7560	0.8752	1.1617	150.2	0.07766	403.8	1.7522	0.8788	1.1641	149.8	5	
10	0.08282	408.5	1.7716	0.8769	1.1556	152.0	0.07951	408.2	1.7679	0.8802	1.1577	151.7	10	
15	0.08469	412.9	1.7870	0.8785	1.1501	153.8	0.08133	412.6	1.7833	0.8825	1.1520	153.5	15	
20	0.08654	417.3	1.8021	0.8828	1.1452	155.5	0.08313	417.1	1.7985	0.8855	1.1469	155.2	20	
25	0.08837	421.7	1.8171	0.8867	1.1408	157.2	0.08490	421.5	1.8135	0.8891	1.1423	156.9	25	
30	0.09018	426.1	1.8319	0.8910	1.1368	158.9	0.08666	426.0	1.8283	0.8932	1.1381	158.6	30	
35	0.09197	430.6	1.8465	0.8958	1.1331	160.5	0.08839	430.4	1.8430	0.8978	1.1344	160.2	35	
40	0.09375	435.1	1.8610	0.9009	1.1298	162.0	0.09011	434.9	1.8575	0.9027	1.1309	161.8	40	
45	0.09550	439.6	1.8753	0.9063	1.1267	163.6	0.09181	439.5	1.8718	0.9080	1.1277	163.4	45	
50	0.09725	444.2	1.8894	0.9120	1.1239	165.1	0.09350	444.0	1.8860	0.9135	1.1248	164.9	50	
55	0.09899	448.7	1.9035	0.9179	1.1213	166.6	0.09517	448.6	1.9001	0.9193	1.1221	166.4	55	
60	0.10073	453.4	1.9174	0.9240	1.1188	168.0	0.09685	453.2	1.9140	0.9253	1.1196	167.8	60	
65	0.10243	458.0	1.9312	0.9302	1.1165	169.5	0.09851	457.9	1.9279	0.9314	1.1173	169.3	65	
70	0.10414	462.7	1.9449	0.9366	1.1144	170.9	0.10016	462.5	1.9416	0.9377	1.1151	170.7	70	
75	0.10583	467.4	1.9585	0.9431	1.1124	172.3	0.10180	467.2	1.9552	0.9441	1.1130	172.1	75	
80	0.10753	472.1	1.9720	0.9497	1.1105	173.6	0.10342	472.0	1.9687	0.9506	1.1111	173.8	80	
85	0.10921	476.8	1.9854	0.9563	1.1087	175.0	0.10505	476.7	1.9821	0.9572	1.1093	174.8	85	
90	0.11089	481.6	1.9987	0.9630	1.1071	176.3	0.10668	481.5	1.9954	0.9639	1.1076	176.2	90	
95	0.11256	486.5	2.0119	0.9698	1.1055	177.6	0.10830	486.4	2.0087	0.9706	1.1059	177.5	95	
100	0.11425	491.3	2.0251	0.9766	1.1040	178.9	0.10990	491.2	2.0218	0.9774	1.1044	178.8	100	
105	0.11590	496.2	2.0381	0.9835	1.1025	180.2	0.11151	496.1	2.0348	0.9842	1.1029	180.1	105	
110	0.11755	501.2	2.0511	0.9903	1.1012	181.5	0.11311	501.1	2.0478	0.9910	1.1016	181.4	110	
115	0.11922	506.1	2.0640	0.9972	1.0999	182.7	0.11471	506.1	2.0607	0.9978	1.1002	182.6	115	
120	0.12086	511.2	2.0768	1.0041	1.0986	184.0	0.11629	511.1	2.0735	1.0047	1.0990	183.9	120	
125	0.12249	516.2	2.0895	1.0110	1.0974	185.2	0.11788	516.1	2.0863	1.0115	1.0978	185.1	125	
130	0.12416	521.3	2.1022	1.0178	1.0963	186.4	0.11946	521.2	2.0989	1.0183	1.0966	186.3	130	
135	0.12579	526.4	2.1147	1.0247	1.0952	187.7	0.12105	526.3	2.1115	1.0252	1.0955	187.6	135	
140	0.12744	531.5	2.1273	1.0315	1.0941	188.9	0.12264	531.4	2.1241	1.0320	1.0944	188.8	140	
145	0.12907	536.7	2.1397	1.0384	1.0931	190.0	0.12422	536.6	2.1365	1.0388	1.0934	190.0	145	
150	0.13068	541.9	2.1521	1.0452	1.0922	191.2	0.12577	541.8	2.1489	1.0456	1.0924	191.1	150	

ตารางสมบัติของสารทำความเย็นชนิด R-134a ณ สภาวะไอร้อนยิ่งยวด (ต่อ)

V = ปริมาตร, m³/kg; H = เอนทัลปี, kJ/kg; S = เอนโทรปี, kJ/kg·K; v_s = ความเร็วเสียง, m/sec C_p = ความร้อน

จำเพาะ ณ ความดันคงที่, kJ/kg·K; C_p/C_v = อัตราส่วนความจำเพาะ (ไม่มีมิติ)

อุณหภูมิ °C	ความดัน = 280.00 kPa (abs)						SAT LIQ SAT VAP	ความดัน = 290.00 kPa (abs)						อุณหภูมิ °C
	V	H	S	Cp	Cp/Cv	v _s		V	H	S	Cp	Cp/Cv	v _s	
-1.24	0.00077	198.3	0.9939	1.3374	1.5204	630.8		0.00077	199.6	0.9986	1.3403	1.5214	626.4	-0.28
-1.24	0.07235	398.1	1.7285	0.8830	1.1762	147.0		0.06995	398.6	1.7280	0.8871	1.1774	147.0	-0.28
0	0.07281	399.2	1.7325	0.8827	1.1741	147.5		0.07005	398.9	1.7289	0.8870	1.1770	147.1	0
5	0.07464	403.6	1.7485	0.8826	1.1665	149.5		0.07163	403.3	1.7449	0.8864	1.1690	149.1	5
10	0.07645	408.0	1.7643	0.8835	1.1598	151.3		0.07359	407.8	1.7607	0.8869	1.1620	151.0	10
15	0.07822	412.4	1.7797	0.8854	1.1539	153.2		0.07531	412.2	1.7763	0.8885	1.1558	152.8	15
20	0.07996	416.9	1.7950	0.8881	1.1486	154.9		0.07701	416.6	1.7916	0.8909	1.1503	154.6	20
25	0.08168	421.3	1.8100	0.8915	1.1438	156.7		0.07867	421.1	1.8067	0.8939	1.1454	156.2	25
30	0.08338	425.8	1.8249	0.8954	1.1395	158.3		0.08033	425.6	1.8216	0.8976	1.1409	158.1	30
35	0.08506	430.3	1.8396	0.8998	1.1356	160.0		0.08196	430.1	1.8363	0.9018	1.1369	159.7	35
40	0.08672	434.8	1.8541	0.9045	1.1320	161.6		0.08358	434.6	1.8508	0.9064	1.1332	161.3	40
45	0.08837	439.3	1.8685	0.9096	1.1288	163.1		0.08517	439.1	1.8652	0.9113	1.1298	162.9	45
50	0.09001	443.9	1.8827	0.9150	1.1258	164.7		0.08676	443.7	1.8795	0.9166	1.1267	164.4	50
55	0.09163	448.5	1.8968	0.9207	1.1230	166.2		0.08835	448.3	1.8936	0.9221	1.1239	166.0	55
60	0.09325	453.1	1.9108	0.9266	1.1204	167.6		0.08990	452.9	1.9076	0.9279	1.1212	167.4	60
65	0.09485	457.7	1.9246	0.9326	1.1180	169.1		0.09145	457.6	1.9215	0.9338	1.1187	168.9	65
70	0.09645	462.4	1.9383	0.9388	1.1158	170.5		0.09301	462.3	1.9352	0.9399	1.1164	170.3	70
75	0.09804	467.1	1.9520	0.9451	1.1137	171.9		0.09455	467.0	1.9489	0.9462	1.1143	171.8	75
80	0.09962	471.8	1.9655	0.9516	1.1117	173.3		0.09606	471.7	1.9624	0.9525	1.1123	173.1	80
85	0.10118	476.6	1.9789	0.9581	1.1098	174.7		0.09760	476.5	1.9758	0.9580	1.1104	174.5	85
90	0.10275	481.4	1.9922	0.9647	1.1081	176.0		0.09911	481.3	1.9892	0.9656	1.1086	175.9	90
95	0.10432	486.3	2.0055	0.9714	1.1064	177.3		0.10062	486.2	2.0024	0.9722	1.1069	177.2	95
100	0.10588	491.1	2.0186	0.9781	1.1049	178.7		0.10213	491.0	2.0156	0.9788	1.1053	178.5	100
105	0.10743	496.1	2.0317	0.9848	1.1034	180.0		0.10363	496.0	2.0286	0.9855	1.1038	179.8	105
110	0.10897	501.0	2.0447	0.9916	1.1020	181.2		0.10512	500.9	2.0416	0.9923	1.1024	181.1	110
115	0.11052	506.0	2.0576	0.9984	1.1006	182.5		0.10663	505.9	2.0546	0.9990	1.1010	182.4	115
120	0.11206	511.0	2.0704	1.0052	1.0993	183.8		0.10812	510.9	2.0674	1.0058	1.0997	183.7	120
125	0.11358	516.0	2.0831	1.0120	1.0981	185.0		0.10960	515.9	2.0801	1.0126	1.0985	184.9	125
130	0.11511	521.1	2.0958	1.0189	1.0969	186.2		0.11107	521.0	2.0928	1.0194	1.0973	186.1	130
135	0.11665	526.2	2.1084	1.0257	1.0958	187.5		0.11256	526.1	2.1054	1.0262	1.0961	187.4	135
140	0.11818	531.4	2.1209	1.0325	1.0947	188.7		0.11404	531.3	2.1180	1.0329	1.0950	188.6	140
145	0.11969	536.5	2.1334	1.0392	1.0937	189.9		0.11550	536.5	2.1304	1.0397	1.0940	189.8	145
150	0.12121	541.7	2.1458	1.0460	1.0927	191.0		0.11697	541.7	2.1428	1.0464	1.0930	191.0	150

อุณหภูมิ °C	ความดัน = 300.00 kPa (abs)						SAT LIQ SAT VAP	ความดัน = 310.00 kPa (abs)						อุณหภูมิ °C
	V	H	S	Cp	Cp/Cv	v _s		V	H	S	Cp	Cp/Cv	v _s	
0.66	0.00077	200.9	1.0032	1.3431	1.5225	622.1		0.00078	202.1	1.0077	1.3459	1.5235	617.9	1.57
0.66	0.06770	399.2	1.7275	0.8912	1.1787	147.0		0.06559	399.7	1.7270	0.8952	1.1900	146.9	1.57
5	0.06921	403.1	1.7415	0.8902	1.1715	148.7		0.06676	402.8	1.7381	0.8942	1.1741	148.3	5
10	0.07092	407.5	1.7573	0.8904	1.1642	150.7		0.06842	407.3	1.7540	0.8938	1.1665	150.3	10
15	0.07260	412.0	1.7729	0.8915	1.1578	152.5		0.07006	411.7	1.7696	0.8947	1.1598	152.2	15
20	0.07424	416.4	1.7883	0.8936	1.1521	154.3		0.07166	416.2	1.7850	0.8964	1.1538	154.0	20
25	0.07587	420.9	1.8034	0.8964	1.1469	156.1		0.07325	420.7	1.8002	0.8989	1.1485	155.8	25
30	0.07748	425.4	1.8183	0.8998	1.1423	157.8		0.07481	425.2	1.8152	0.9021	1.1438	157.5	30
35	0.07906	429.9	1.8331	0.9038	1.1381	159.5		0.07635	429.7	1.8300	0.9059	1.1394	159.2	35
40	0.08063	434.4	1.8477	0.9082	1.1343	161.1		0.07788	434.3	1.8446	0.9101	1.1355	160.8	40
45	0.08219	439.0	1.8621	0.9130	1.1309	162.7		0.07939	438.8	1.8590	0.9147	1.1319	162.4	45
50	0.08372	443.6	1.8764	0.9181	1.1277	164.2		0.08090	443.4	1.8734	0.9197	1.1287	164.0	50
55	0.08525	448.2	1.8905	0.9236	1.1247	165.8		0.08239	448.0	1.8875	0.9250	1.1256	165.6	55
60	0.08678	452.8	1.9045	0.9292	1.1220	167.3		0.08385	452.7	1.9015	0.9305	1.1228	167.1	60
65	0.08829	457.5	1.9184	0.9350	1.1195	168.7		0.08532	457.3	1.9154	0.9363	1.1203	168.5	65
70	0.08978	462.1	1.9322	0.9411	1.1171	170.2		0.08678	462.0	1.9292	0.9422	1.1178	170.0	70
75	0.09128	466.9	1.9458	0.9472	1.1149	171.6		0.08821	466.7	1.9429	0.9483	1.1156	171.4	75
80	0.09276	471.6	1.9594	0.9535	1.1129	173.0		0.08967	471.5	1.9565	0.9545	1.1135	172.8	80
85	0.09424	476.4	1.9728	0.9599	1.1110	174.4		0.09111	476.3	1.9699	0.9608	1.1115	174.2	85
90	0.09571	481.2	1.9862	0.9664	1.1091	175.7		0.09253	481.1	1.9833	0.9672	1.1097	175.6	90
95	0.09718	486.1	1.9994	0.9730	1.1074	177.1		0.09395	486.0	1.9966	0.9737	1.1079	176.9	95
100	0.09863	490.9	2.0126	0.9796	1.1058	178.4		0.09536	490.8	2.0097	0.9803	1.1063	178.3	100
105	0.10009	495.9	2.0257	0.9862	1.1042	179.7		0.09678	495.8	2.0228	0.9869	1.1047	179.6	105
110	0.10153	500.8	2.0387	0.9929	1.1028	181.0		0.09818	500.7	2.0359	0.9936	1.1032	180.9	110
115	0.10299	505.8	2.0516	0.9996	1.1014	182.3		0.09958	505.7	2.0488	1.0003	1.1018	182.2	115
120	0.10444	510.8	2.0645	1.0064	1.1001	183.5		0.10098	510.7	2.0616	1.0070	1.1004	183.4	120
125	0.10588	515.9	2.0772	1.0131	1.0988	184.8		0.10236	515.8	2.0744	1.0137	1.0991	184.7	125
130	0.10730	520.9	2.0899	1.0199	1.0976	186.0		0.10376	520.9	2.0871	1.0204	1.0979	185.9	130
135	0.10873	526.1	2.1025	1.0266	1.0964	187.3		0.10514	526.0	2.0997	1.0271	1.0967	187.2	135
140	0.11017	531.2	2.1151	1.0334	1.0953	188.5		0.10654	531.1	2.1122	1.0338	1.0956	188.4	140
145	0.11158	536.4	2.1275	1.0401	1.0943	189.7		0.10791	536.3	2.1247	1.0406	1.0945	189.6	145
150	0.11301	541.6	2.1399	1.0468	1.0932	190.9		0.10929	541.5	2.1371	1.0472	1.0935	190.8	150
155	0.11442	546.9	2.1523	1.0535	1.0922	192.1		0.11067	546.8	2.1495	1.0539	1.0925	192.0	155

ตารางสมบัติของสารทำความเย็นชนิด R-134a ณ สภาวะไอร้อนยิ่งยวด (ต่อ)

V = ปริมาตร, m³/kg; H = เอนทัลปี, kJ/kg; S = เอนโทรปี, kJ/kg·K; v_s = ความเร็วเสียง, m/sec C_p = ความร้อน

จำเพาะ ณ ความดันคงที่, kJ/kg·K; C_p/C_v = อัตราส่วนความจำเพาะ (ไม่มีมิติ)

อุณหภูมิ °C	ความดัน = 320.00 kPa (abs)						SAT LIQ SAT VAP	ความดัน = 330.00 kPa (abs)						อุณหภูมิ °C
	V	H	S	Cp	Cp/Cv	v _s		V	H	S	Cp	Cp/Cv	v _s	
2.46	0.00078	203.3	1.0120	1.3486	1.5245	613.8		0.00078	204.5	1.0162	1.3514	1.5256	609.8	3.33
2.46	0.06361	400.2	1.7265	0.8991	1.1813	146.9		0.06174	400.7	1.7260	0.9030	1.1825	146.9	3.33
5	0.06445	402.5	1.7347	0.8982	1.1768	148.0		0.06229	402.2	1.7315	0.9023	1.1795	147.6	5
10	0.06608	407.0	1.7507	0.8974	1.1688	149.9		0.06388	406.8	1.7475	0.9010	1.1712	149.6	10
15	0.06768	411.5	1.7664	0.8978	1.1618	151.9		0.06544	411.3	1.7633	0.9010	1.1639	151.5	15
20	0.06924	416.0	1.7819	0.8992	1.1557	153.7		0.06697	415.8	1.7788	0.9021	1.1575	153.4	20
25	0.07079	420.5	1.7971	0.9015	1.1501	155.5		0.06848	420.3	1.7941	0.9040	1.1518	155.2	25
30	0.07231	425.0	1.8121	0.9044	1.1452	157.3		0.06996	424.8	1.8091	0.9067	1.1467	157.0	30
35	0.07382	429.5	1.8269	0.9080	1.1407	159.0		0.07143	429.3	1.8240	0.9101	1.1421	158.7	35
40	0.07530	434.1	1.8416	0.9120	1.1367	160.6		0.07288	433.9	1.8387	0.9139	1.1379	160.4	40
45	0.07678	438.7	1.8561	0.9165	1.1330	162.2		0.07432	438.5	1.8532	0.9182	1.1341	162.0	45
50	0.07824	443.2	1.8704	0.9213	1.1296	163.8		0.07574	443.1	1.8675	0.9229	1.1306	163.6	50
55	0.07967	447.9	1.8846	0.9264	1.1265	165.3		0.07715	447.7	1.8818	0.9279	1.1274	165.1	55
60	0.08112	452.5	1.8986	0.9319	1.1237	166.9		0.07854	452.4	1.8958	0.9332	1.1245	166.7	60
65	0.08254	457.2	1.9126	0.9375	1.1210	168.4		0.07993	457.0	1.9098	0.9387	1.1218	168.2	65
70	0.08396	461.9	1.9264	0.9433	1.1186	169.8		0.08131	461.8	1.9236	0.9445	1.1193	169.6	70
75	0.08537	466.6	1.9401	0.9493	1.1163	171.3		0.08267	466.5	1.9373	0.9504	1.1169	171.1	75
80	0.08676	471.4	1.9536	0.9555	1.1141	172.7		0.08403	471.3	1.9509	0.9565	1.1147	172.5	80
85	0.08816	476.2	1.9671	0.9617	1.1121	174.1		0.08538	476.1	1.9644	0.9627	1.1127	173.9	85
90	0.08953	481.0	1.9805	0.9681	1.1102	175.4		0.08675	480.9	1.9778	0.9690	1.1107	175.3	90
95	0.09092	485.9	1.9938	0.9745	1.1084	176.8		0.08807	485.7	1.9910	0.9753	1.1089	176.7	95
100	0.09229	490.7	2.0070	0.9811	1.1067	178.1		0.08941	490.6	2.0042	0.9818	1.1072	178.0	100
105	0.09366	495.7	2.0201	0.9876	1.1051	179.5		0.09074	495.6	2.0174	0.9883	1.1056	179.3	105
110	0.09504	500.6	2.0331	0.9942	1.1036	180.8		0.09208	500.5	2.0304	0.9949	1.1040	180.6	110
115	0.09639	505.6	2.0460	1.0009	1.1022	182.0		0.09339	505.5	2.0433	1.0015	1.1026	181.9	115
120	0.09775	510.6	2.0589	1.0075	1.1008	183.3		0.09471	510.5	2.0562	1.0081	1.1012	183.2	120
125	0.09910	515.7	2.0716	1.0142	1.0995	184.6		0.09603	515.6	2.0690	1.0148	1.0998	184.5	125
130	0.10046	520.8	2.0843	1.0209	1.0983	185.8		0.09735	520.7	2.0817	1.0214	1.0986	185.7	130
135	0.10180	525.9	2.0970	1.0276	1.0971	187.1		0.09866	525.8	2.0943	1.0281	1.0974	187.0	135
140	0.10316	531.0	2.1095	1.0343	1.0959	188.3		0.09995	531.0	2.1069	1.0348	1.0962	188.2	140
145	0.10448	536.2	2.1220	1.0410	1.0948	189.5		0.10126	536.2	2.1194	1.0414	1.0951	189.4	145
150	0.10582	541.5	2.1344	1.0477	1.0938	190.7		0.10255	541.4	2.1318	1.0481	1.0940	190.6	150
155	0.10717	546.7	2.1468	1.0543	1.0928	191.9		0.10384	546.6	2.1441	1.0547	1.0930	191.8	155

อุณหภูมิ °C	ความดัน = 340.00 kPa (abs)						SAT LIQ SAT VAP	ความดัน = 350.00 kPa (abs)						อุณหภูมิ °C
	V	H	S	Cp	Cp/Cv	v _s		V	H	S	Cp	Cp/Cv	v _s	
4.18	0.00078	205.6	1.0204	1.3541	1.5266	605.9		0.00078	206.8	1.0244	1.3567	1.5276	602.1	5.01
4.18	0.05998	401.2	1.7256	0.9069	1.1838	146.8		0.05832	401.7	1.7252	0.9106	1.1851	146.8	5.01
5	0.06024	402.0	1.7283	0.9064	1.1823	147.2		—	—	—	—	—	—	5
10	0.06180	406.5	1.7444	0.9047	1.1736	149.2		0.05985	406.2	1.7414	0.9084	1.1761	148.9	10
15	0.06333	411.0	1.7602	0.9043	1.1660	151.2		0.06134	410.8	1.7572	0.9076	1.1682	150.9	15
20	0.06483	415.5	1.7758	0.9050	1.1594	153.1		0.06281	415.3	1.7729	0.9079	1.1613	152.8	20
25	0.06630	420.1	1.7911	0.9066	1.1535	154.9		0.06425	419.9	1.7882	0.9093	1.1552	154.6	25
30	0.06776	424.6	1.8062	0.9091	1.1482	156.7		0.06567	424.4	1.8034	0.9115	1.1497	156.4	30
35	0.06919	429.2	1.8211	0.9122	1.1434	158.4		0.06706	429.0	1.8183	0.9143	1.1448	158.2	35
40	0.07060	433.7	1.8358	0.9158	1.1391	160.1		0.06845	433.6	1.8330	0.9178	1.1403	159.9	40
45	0.07200	438.3	1.8504	0.9200	1.1352	161.8		0.06981	438.2	1.8476	0.9217	1.1363	161.5	45
50	0.07339	442.9	1.8648	0.9245	1.1316	163.4		0.07116	442.8	1.8620	0.9261	1.1327	163.1	50
55	0.07476	447.6	1.8790	0.9294	1.1284	164.9		0.07250	447.4	1.8763	0.9309	1.1293	164.7	55
60	0.07612	452.2	1.8931	0.9346	1.1254	166.5		0.07383	452.1	1.8904	0.9359	1.1262	166.3	60
65	0.07747	456.9	1.9070	0.9400	1.1226	168.0		0.07515	456.8	1.9044	0.9412	1.1234	167.8	65
70	0.07880	461.6	1.9209	0.9456	1.1200	169.5		0.07645	461.5	1.9182	0.9468	1.1207	169.3	70
75	0.08013	466.4	1.9346	0.9515	1.1176	170.9		0.07775	466.2	1.9320	0.9525	1.1183	170.7	75
80	0.08146	471.1	1.9482	0.9575	1.1153	172.3		0.07904	471.0	1.9456	0.9585	1.1160	172.2	80
85	0.08280	475.9	1.9617	0.9636	1.1132	173.8		0.08033	475.8	1.9591	0.9645	1.1138	173.6	85
90	0.08410	480.8	1.9751	0.9698	1.1113	175.1		0.08161	480.7	1.9725	0.9707	1.1118	175.0	90
95	0.08540	485.6	1.9884	0.9761	1.1094	176.5		0.08287	485.5	1.9858	0.9770	1.1099	176.4	95
100	0.08669	490.5	2.0016	0.9826	1.1077	177.9		0.08414	490.4	1.9991	0.9833	1.1081	177.7	100
105	0.08800	495.5	2.0147	0.9890	1.1060	179.2		0.08541	495.4	2.0122	0.9897	1.1065	179.1	105
110	0.08929	500.4	2.0278	0.9955	1.1044	180.5		0.08666	500.3	2.0252	0.9962	1.1049	180.4	110
115	0.09058	505.4	2.0407	1.0021	1.1030	181.8		0.08790	505.3	2.0382	1.0027	1.1034	181.7	115
120	0.09184	510.4	2.0536	1.0087	1.1015	183.1		0.08916	510.4	2.0511	1.0093	1.1019	183.0	120
125	0.09314	515.5	2.0664	1.0153	1.1002	184.4		0.09041	515.4	2.0639	1.0159	1.1006	184.3	125
130	0.09440	520.6	2.0791	1.0220	1.0989	185.6		0.09165	520.5	2.0766	1.0225	1.0993	185.5	130
135	0.09568	525.7	2.0917	1.0286	1.0977	186.9		0.09289	525.6	2.0892	1.0291	1.0980	186.8	135
140	0.09696	530.9	2.1043	1.0352	1.0965	188.1		0.09413	530.8	2.1018	1.0357	1.0968	188.0	140
145	0.09822	536.1	2.1168	1.0419	1.0954	189.3		0.09536	536.0	2.1143	1.0423	1.0957	189.2	145
150	0.09948	541.3	2.1292	1.0485	1.0943	190.5		0.09658	541.2	2.1267	1.0489	1.0946	190.4	150
155	0.10074	546.6	2.1416	1.0551	1.0933	191.7		0.09781	546.5	2.1391	1.0555	1.0935	191.6	155
160	—	—	—	—	—	—		0.09904	551.8	2.1514	1.0621	1.0925	192.8	160

ตารางสมบัติของสารทำความเย็นชนิด R-134a ณ สภาวะไอร้อนยิ่งยวด (ต่อ)

V = ปริมาตร, m³/kg; H = เอนทัลปี, kJ/kg; S = เอนโทรปี, kJ/kg·K; v_s = ความเร็วเสียง, m/sec C_p = ความร้อน

จำเพาะ ณ ความดันคงที่, kJ/kg·K; C_p/C_v = อัตราส่วนความจำเพาะ (ไม่มีมิติ)

อุณหภูมิ °C	ความดัน = 360.00 kPa (abs)						SAT LIQ SAT VAP	ความดัน = 370.00 kPa (abs)						อุณหภูมิ °C
	V	H	S	C _p	C _p /C _v	v _s		V	H	S	C _p	C _p /C _v	v _s	
5.82	0.00078	207.9	1.0283	1.3593	1.5287	598.3	0.00079	209.0	1.0322	1.3619	1.5297	594.7	6.62	
5.82	0.05675	402.2	1.7248	0.9144	1.1864	146.7	0.05526	402.6	1.7244	0.9181	1.1877	146.7	6.62	
10	0.05800	406.0	1.7384	0.9122	1.1786	148.5	0.05625	405.7	1.7354	0.9160	1.1812	148.1	10	
15	0.05946	410.5	1.7543	0.9109	1.1704	150.5	0.05769	410.3	1.7514	0.9143	1.1727	150.2	15	
20	0.06090	415.1	1.7700	0.9109	1.1632	152.5	0.05909	414.9	1.7672	0.9140	1.1652	152.1	20	
25	0.06231	419.7	1.7854	0.9120	1.1569	154.3	0.06047	419.4	1.7826	0.9147	1.1586	154.0	25	
30	0.06370	424.2	1.8006	0.9139	1.1512	156.2	0.06184	424.0	1.7979	0.9163	1.1528	155.9	30	
35	0.06507	428.8	1.8156	0.9165	1.1462	157.9	0.06317	428.6	1.8129	0.9187	1.1476	157.7	35	
40	0.06641	433.4	1.8303	0.9198	1.1416	159.6	0.06449	433.2	1.8277	0.9217	1.1429	159.4	40	
45	0.06775	438.0	1.8449	0.9235	1.1375	161.3	0.06580	437.8	1.8423	0.9253	1.1386	161.1	45	
50	0.06907	442.6	1.8594	0.9278	1.1337	162.9	0.06708	442.5	1.8568	0.9294	1.1347	162.7	50	
55	0.07037	447.3	1.8736	0.9324	1.1302	164.5	0.06836	447.1	1.8711	0.9339	1.1312	164.3	55	
60	0.07167	451.9	1.8878	0.9373	1.1271	166.1	0.06962	451.8	1.8852	0.9387	1.1279	165.9	60	
65	0.07296	456.6	1.9018	0.9425	1.1242	167.6	0.07088	456.5	1.8992	0.9438	1.1250	167.4	65	
70	0.07423	461.4	1.9156	0.9480	1.1215	169.1	0.07213	461.2	1.9131	0.9491	1.1222	168.9	70	
75	0.07551	466.1	1.9294	0.9536	1.1189	170.6	0.07336	466.0	1.9269	0.9547	1.1196	170.4	75	
80	0.07676	470.9	1.9430	0.9595	1.1166	172.0	0.07459	470.8	1.9406	0.9605	1.1172	171.9	80	
85	0.07800	475.7	1.9566	0.9654	1.1144	173.4	0.07582	475.6	1.9541	0.9664	1.1150	173.3	85	
90	0.07925	480.6	1.9700	0.9716	1.1124	174.9	0.07702	480.4	1.9675	0.9724	1.1129	174.7	90	
95	0.08050	485.4	1.9833	0.9778	1.1104	176.2	0.07824	485.3	1.9809	0.9786	1.1109	176.1	95	
100	0.08173	490.3	1.9966	0.9841	1.1086	177.6	0.07945	490.2	1.9941	0.9848	1.1091	177.5	100	
105	0.08295	495.3	2.0097	0.9904	1.1069	178.9	0.08065	495.2	2.0073	0.9912	1.1074	178.0	105	
110	0.08418	500.2	2.0228	0.9969	1.1053	180.3	0.08184	500.1	2.0203	0.9975	1.1057	180.1	110	
115	0.08540	505.2	2.0357	1.0034	1.1038	181.6	0.08304	505.1	2.0333	1.0040	1.1042	181.5	115	
120	0.08663	510.3	2.0486	1.0099	1.1023	182.9	0.08420	510.2	2.0462	1.0105	1.1027	182.8	120	
125	0.08783	515.3	2.0614	1.0164	1.1009	184.2	0.08540	515.3	2.0590	1.0170	1.1013	184.0	125	
130	0.08904	520.4	2.0741	1.0230	1.0996	185.4	0.08657	520.4	2.0718	1.0235	1.0999	185.3	130	
135	0.09024	525.6	2.0868	1.0296	1.0983	186.7	0.08776	525.5	2.0844	1.0301	1.0986	186.6	135	
140	0.09146	530.7	2.0994	1.0362	1.0971	187.9	0.08891	530.7	2.0970	1.0366	1.0974	187.8	140	
145	0.09264	535.9	2.1119	1.0428	1.0960	189.1	0.09009	535.9	2.1095	1.0432	1.0963	189.0	145	
150	0.09385	541.2	2.1243	1.0493	1.0949	190.3	0.09126	541.1	2.1219	1.0498	1.0951	190.3	150	
155	0.09504	546.4	2.1367	1.0559	1.0938	191.6	0.09241	546.4	2.1343	1.0563	1.0941	191.5	155	
160	0.09623	551.7	2.1490	1.0625	1.0928	192.7	0.09358	551.7	2.1466	1.0628	1.0930	192.7	160	

อุณหภูมิ °C	ความดัน = 380.00 kPa (abs)						SAT LIQ SAT VAP	ความดัน = 390.00 kPa (abs)						อุณหภูมิ °C
	V	H	S	C _p	C _p /C _v	v _s		V	H	S	C _p	C _p /C _v	v _s	
7.4	0.00079	210.0	1.0360	1.3645	1.5308	591.1	0.00079	211.1	1.0397	1.3670	1.5318	587.6	8.16	
7.4	0.05384	403.1	1.7240	0.9218	1.1890	146.6	0.05250	403.5	1.7237	0.9254	1.1903	146.6	8.16	
10	0.05459	405.5	1.7325	0.9200	1.1838	147.8	0.05302	405.2	1.7297	0.9240	1.1865	147.4	10	
15	0.05600	410.1	1.7486	0.9178	1.1750	149.8	0.05440	409.8	1.7459	0.9213	1.1773	149.5	15	
20	0.05738	414.6	1.7644	0.9170	1.1672	151.8	0.05576	414.4	1.7617	0.9201	1.1693	151.5	20	
25	0.05874	419.2	1.7799	0.9174	1.1604	153.7	0.05708	419.0	1.7773	0.9202	1.1622	153.4	25	
30	0.06007	423.8	1.7952	0.9188	1.1544	155.6	0.05839	423.6	1.7926	0.9213	1.1560	155.3	30	
35	0.06138	428.4	1.8102	0.9209	1.1490	157.4	0.05968	428.2	1.8077	0.9232	1.1504	157.1	35	
40	0.06267	433.0	1.8251	0.9238	1.1441	159.1	0.06094	432.8	1.8225	0.9258	1.1454	158.9	40	
45	0.06395	437.7	1.8397	0.9272	1.1398	160.8	0.06219	437.5	1.8372	0.9290	1.1409	160.6	45	
50	0.06521	442.3	1.8542	0.9311	1.1358	162.5	0.06342	442.1	1.8517	0.9328	1.1368	162.3	50	
55	0.06645	447.0	1.8686	0.9354	1.1321	164.1	0.06465	446.8	1.8661	0.9369	1.1331	163.9	55	
60	0.06769	451.7	1.8827	0.9401	1.1288	165.7	0.06586	451.5	1.8803	0.9415	1.1297	165.5	60	
65	0.06892	456.4	1.8968	0.9451	1.1258	167.2	0.06706	456.2	1.8944	0.9464	1.1266	167.0	65	
70	0.07014	461.1	1.9107	0.9503	1.1229	168.8	0.06825	461.0	1.9083	0.9515	1.1237	168.6	70	
75	0.07135	465.9	1.9245	0.9558	1.1203	170.2	0.06942	465.7	1.9221	0.9569	1.1210	170.1	75	
80	0.07254	470.7	1.9381	0.9615	1.1179	171.7	0.07061	470.5	1.9358	0.9625	1.1185	171.5	80	
85	0.07374	475.5	1.9517	0.9673	1.1156	173.1	0.07177	475.4	1.9494	0.9683	1.1162	173.0	85	
90	0.07492	480.3	1.9652	0.9733	1.1135	174.6	0.07293	480.2	1.9628	0.9742	1.1140	174.4	90	
95	0.07611	485.2	1.9785	0.9794	1.1115	176.0	0.07407	485.1	1.9762	0.9802	1.1120	175.8	95	
100	0.07729	490.1	1.9918	0.9856	1.1096	177.3	0.07523	490.0	1.9894	0.9864	1.1101	177.2	100	
105	0.07846	495.1	2.0049	0.9919	1.1078	178.7	0.07637	495.0	2.0026	0.9926	1.1083	178.6	105	
110	0.07962	500.1	2.0180	0.9982	1.1061	180.0	0.07750	500.0	2.0157	0.9989	1.1066	179.9	110	
115	0.08078	505.1	2.0310	1.0046	1.1046	181.3	0.07865	505.0	2.0287	1.0053	1.1050	181.2	115	
120	0.08193	510.1	2.0439	1.0111	1.1031	182.6	0.07978	510.0	2.0416	1.0117	1.1034	182.5	120	
125	0.08308	515.2	2.0567	1.0175	1.1016	183.9	0.08089	515.1	2.0544	1.0181	1.1020	183.8	125	
130	0.08423	520.3	2.0694	1.0241	1.1003	185.2	0.08202	520.2	2.0672	1.0246	1.1006	185.1	130	
135	0.08538	525.4	2.0821	1.0306	1.0990	186.5	0.08314	525.3	2.0798	1.0311	1.0993	186.4	135	
140	0.08653	530.6	2.0947	1.0371	1.0977	187.7	0.08425	530.5	2.0924	1.0376	1.0980	187.6	140	
145	0.08767	535.8	2.1072	1.0437	1.0966	189.0	0.08536	535.7	2.1049	1.0441	1.0968	188.9	145	
150	0.08881	541.0	2.1196	1.0502	1.0954	190.2	0.08648	540.9	2.1174	1.0506	1.0957	190.1	150	
155	0.08994	546.3	2.1320	1.0567	1.0943	191.4	0.08757	546.2	2.1298	1.0571	1.0946	191.3	155	
160	0.09107	551.6	2.1443	1.0632	1.0933	192.6	0.08868	551.5	2.1421	1.0636	1.0935	192.5	160	

ตารางสมบัติของสารทำความเย็นชนิด R-134a ณ สภาวะไอร้อนยิ่งยวด (ต่อ)

V = ปริมาตร, m³/kg; H = เอนทัลปี, kJ/kg; S = เอนโทรปี, kJ/kg·K; v_s = ความเร็วเสียง, m/sec C_p = ความร้อนจำเพาะ ณ ความดันคงที่, kJ/kg·K; C_p/C_v = อัตราส่วนความจำเพาะ (ไม่มีมิติ)

อุณหภูมิ °C	ความดัน = 400.0 kPa (abs)						SAT LIQ SAT VAP	ความดัน = 425.0 kPa (abs)						อุณหภูมิ °C
	V	H	S	Cp	Cp/Cv	v _s		V	H	S	Cp	Cp/Cv	v _s	
8.91	0.00079	212.1	1.0433	1.3695	1.5329	584.1	0.00080	214.6	1.0520	1.3757	1.5355	575.8	10.72	
8.91	0.05122	403.9	1.7234	0.9290	1.1916	146.5	0.04827	404.9	1.7226	0.9378	1.1949	146.4	10.72	
10	0.05152	404.9	1.7269	0.9281	1.1893	147.0	—	—	—	—	—	—	10	
15	0.05288	409.6	1.7432	0.9249	1.1797	149.1	0.04939	408.9	1.7366	0.9341	1.1859	148.3	15	
20	0.05421	414.2	1.7590	0.9233	1.1714	151.2	0.05067	413.6	1.7526	0.9314	1.1788	150.4	20	
25	0.05552	418.8	1.7747	0.9230	1.1641	153.1	0.05192	418.3	1.7683	0.9302	1.1688	152.4	25	
30	0.05680	423.4	1.7900	0.9238	1.1576	155.0	0.05314	422.9	1.7838	0.9302	1.1618	154.3	30	
35	0.05806	428.0	1.8051	0.9254	1.1519	156.9	0.05434	427.6	1.7990	0.9312	1.1556	156.2	35	
40	0.05930	432.7	1.8201	0.9278	1.1467	158.6	0.05553	432.2	1.8140	0.9331	1.1501	158.0	40	
45	0.06052	437.3	1.8348	0.9309	1.1421	160.4	0.05669	436.9	1.8288	0.9356	1.1451	159.8	45	
50	0.06172	442.0	1.8493	0.9345	1.1379	162.0	0.05785	441.6	1.8434	0.9388	1.1407	161.5	50	
55	0.06293	446.7	1.8637	0.9385	1.1341	163.7	0.05899	446.3	1.8579	0.9424	1.1366	163.2	55	
60	0.06411	451.4	1.8779	0.9429	1.1306	165.3	0.06010	451.0	1.8722	0.9465	1.1329	164.8	60	
65	0.06529	456.1	1.8920	0.9477	1.1274	166.9	0.06123	455.7	1.8863	0.9510	1.1295	166.4	65	
70	0.06645	460.8	1.9059	0.9527	1.1244	168.4	0.06233	460.5	1.9003	0.9558	1.1264	167.9	70	
75	0.06761	465.6	1.9198	0.9580	1.1217	169.9	0.06343	465.3	1.9142	0.9608	1.1235	169.5	75	
80	0.06876	470.4	1.9335	0.9635	1.1192	171.4	0.06452	470.1	1.9279	0.9661	1.1206	171.0	80	
85	0.06989	475.3	1.9471	0.9692	1.1168	172.8	0.06559	475.0	1.9415	0.9716	1.1183	172.4	85	
90	0.07102	480.1	1.9605	0.9751	1.1146	174.3	0.06668	479.8	1.9550	0.9773	1.1160	173.9	90	
95	0.07215	485.0	1.9739	0.9810	1.1125	175.7	0.06774	484.7	1.9684	0.9831	1.1138	175.3	95	
100	0.07328	489.9	1.9872	0.9871	1.1106	177.1	0.06880	489.7	1.9817	0.9891	1.1118	176.7	100	
105	0.07440	494.9	2.0004	0.9933	1.1087	178.4	0.06986	494.6	1.9949	0.9951	1.1099	178.1	105	
110	0.07551	499.9	2.0134	0.9996	1.1070	179.8	0.07092	499.6	2.0081	1.0013	1.1081	179.5	110	
115	0.07661	504.9	2.0264	1.0059	1.1054	181.1	0.07196	504.6	2.0211	1.0075	1.1064	180.8	115	
120	0.07772	509.9	2.0394	1.0123	1.1038	182.4	0.07300	509.7	2.0340	1.0138	1.1048	182.1	120	
125	0.07881	515.0	2.0522	1.0187	1.1023	183.7	0.07404	514.8	2.0469	1.0201	1.1033	183.4	125	
130	0.07991	520.1	2.0649	1.0251	1.1009	185.0	0.07508	519.9	2.0596	1.0264	1.1018	184.7	130	
135	0.08101	525.2	2.0776	1.0316	1.0996	186.3	0.07611	525.0	2.0723	1.0328	1.1004	186.0	135	
140	0.08210	530.4	2.0902	1.0381	1.0983	187.5	0.07714	530.2	2.0849	1.0393	1.0991	187.3	140	
145	0.08318	535.6	2.1028	1.0445	1.0971	188.8	0.07817	535.4	2.0975	1.0457	1.0979	188.5	145	
150	0.08426	540.9	2.1152	1.0510	1.0960	190.0	0.07920	540.7	2.1099	1.0521	1.0967	189.8	150	
155	0.08535	546.1	2.1276	1.0575	1.0949	191.2	0.08021	546.0	2.1223	1.0585	1.0955	191.0	155	
160	0.08642	551.4	2.1399	1.0640	1.0938	192.4	0.08123	551.3	2.1347	1.0650	1.0944	192.2	160	
165	—	—	—	—	—	—	0.08224	556.6	2.1469	1.0714	1.0934	193.4	165	

อุณหภูมิ °C	ความดัน = 450.0 kPa (abs)						SAT LIQ SAT VAP	ความดัน = 475.0 kPa (abs)						อุณหภูมิ °C
	V	H	S	Cp	Cp/Cv	v _s		V	H	S	Cp	Cp/Cv	v _s	
12.45	0.00080	217.0	1.0603	1.3818	1.5382	567.8	0.00080	219.3	1.0683	1.3878	1.5409	560.1	14.11	
12.45	0.04564	405.9	1.7218	0.9465	1.1982	146.2	0.04327	406.8	1.7211	0.9549	1.2015	146.0	14.11	
15	0.04628	408.3	1.7302	0.9437	1.1925	147.4	0.04349	407.7	1.7241	0.9538	1.1994	146.4	15	
20	0.04751	413.0	1.7464	0.9399	1.1825	149.5	0.04468	412.4	1.7404	0.9487	1.1884	148.7	20	
25	0.04871	417.7	1.7623	0.9377	1.1738	151.6	0.04584	417.2	1.7565	0.9454	1.1790	150.8	25	
30	0.04989	422.4	1.7779	0.9369	1.1662	153.6	0.04697	421.9	1.7722	0.9438	1.1708	152.9	30	
35	0.05104	427.1	1.7932	0.9372	1.1595	155.5	0.04808	426.6	1.7876	0.9433	1.1635	154.8	35	
40	0.05217	431.8	1.8083	0.9384	1.1536	157.4	0.04917	431.3	1.8028	0.9439	1.1572	156.7	40	
45	0.05329	436.5	1.8232	0.9405	1.1482	159.2	0.05024	436.0	1.8177	0.9454	1.1515	158.6	45	
50	0.05439	441.2	1.8379	0.9432	1.1435	160.9	0.05130	440.8	1.8325	0.9477	1.1464	160.4	50	
55	0.05548	445.9	1.8524	0.9464	1.1391	162.6	0.05234	445.5	1.8471	0.9505	1.1418	162.1	55	
60	0.05655	450.6	1.8667	0.9502	1.1352	164.3	0.05336	450.3	1.8615	0.9539	1.1376	163.8	60	
65	0.05761	455.4	1.8809	0.9543	1.1316	165.9	0.05438	455.0	1.8757	0.9578	1.1338	165.4	65	
70	0.05867	460.2	1.8949	0.9589	1.1283	167.5	0.05539	459.8	1.8898	0.9620	1.1303	167.0	70	
75	0.05971	465.0	1.9088	0.9637	1.1253	169.0	0.05639	464.7	1.9038	0.9666	1.1271	168.6	75	
80	0.06075	469.8	1.9226	0.9688	1.1225	170.6	0.05737	469.5	1.9176	0.9714	1.1242	170.1	80	
85	0.06178	474.7	1.9363	0.9741	1.1199	172.1	0.05836	474.4	1.9313	0.9765	1.1214	171.7	85	
90	0.06279	479.6	1.9498	0.9796	1.1174	173.5	0.05934	479.3	1.9448	0.9819	1.1189	173.1	90	
95	0.06381	484.5	1.9632	0.9852	1.1152	175.0	0.06030	484.2	1.9583	0.9874	1.1165	174.6	95	
100	0.06482	489.4	1.9766	0.9910	1.1130	176.4	0.06126	489.2	1.9717	0.9930	1.1143	176.0	100	
105	0.06583	494.4	1.9898	0.9970	1.1111	177.8	0.06221	494.1	1.9849	0.9988	1.1122	177.5	105	
110	0.06683	499.4	2.0029	1.0030	1.1092	179.2	0.06317	499.1	1.9981	1.0047	1.1103	178.8	110	
115	0.06782	504.4	2.0160	1.0091	1.1074	180.5	0.06411	504.2	2.0111	1.0107	1.1085	180.2	115	
120	0.06882	509.5	2.0289	1.0153	1.1057	181.9	0.06506	509.3	2.0241	1.0168	1.1067	181.6	120	
125	0.06979	514.6	2.0418	1.0215	1.1042	183.2	0.06600	514.3	2.0370	1.0230	1.1051	182.9	125	
130	0.07078	519.7	2.0546	1.0278	1.1027	184.5	0.06694	519.5	2.0498	1.0291	1.1036	184.2	130	
135	0.07176	524.8	2.0673	1.0341	1.1013	185.8	0.06787	524.6	2.0625	1.0354	1.1021	185.5	135	
140	0.07274	530.0	2.0799	1.0405	1.0999	187.0	0.06880	529.8	2.0752	1.0417	1.1007	186.8	140	
145	0.07371	535.2	2.0925	1.0468	1.0986	188.3	0.06972	535.1	2.0877	1.0480	1.0994	188.1	145	
150	0.07468	540.5	2.1050	1.0532	1.0974	189.6	0.07065	540.3	2.1002	1.0543	1.0981	189.3	150	
155	0.07565	545.8	2.1174	1.0596	1.0962	190.8	0.07157	545.6	2.1127	1.0606	1.0969	190.6	155	
160	0.07662	551.1	2.1297	1.0659	1.0951	192.0	0.07249	550.9	2.1250	1.0669	1.0957	191.8	160	
165	0.07757	556.4	2.1420	1.0723	1.0940	193.2	0.07341	556.3	2.1373	1.0732	1.0946	193.0	165	

ตารางสมบัติของสารทำความเย็นชนิด R-134a ณ สภาวะไอร้อนยิ่งยวด (ต่อ)

V = ปริมาตร, m³/kg; H = เอนทัลปี, kJ/kg; S = เอนโทรปี, kJ/kg·K; v_s = ความเร็วเสียง, m/sec C_p = ความร้อนจำเพาะ ณ ความดันคงที่, kJ/kg·K; C_p/C_v = อัตราส่วนความจำเพาะ (ไม่มีมิติ)

อุณหภูมิ °C	ความดัน = 500.00 kPa (abs)						SAT LIQ SAT VAP	ความดัน = 525.00 kPa (abs)						อุณหภูมิ °C
	V	H	S	C _p	C _p /C _v	v _s		V	H	S	C _p	C _p /C _v	v _s	
15.71	0.00081	221.5	1.0759	1.3937	1.5436	552.8	0.00081	223.6	1.0833	1.3995	1.5463	545.7	17.24	
15.71	0.04114	407.7	1.7205	0.9633	1.2049	145.8	0.03920	408.5	1.7199	0.9715	1.2083	145.6	17.24	
20	0.04213	411.8	1.7347	0.9578	1.1947	147.8	0.03982	411.2	1.7291	0.9674	1.2013	146.9	20	
25	0.04325	416.6	1.7508	0.9535	1.1844	150.0	0.04090	416.0	1.7454	0.9618	1.1901	149.2	25	
30	0.04434	421.3	1.7667	0.9509	1.1755	152.1	0.04196	420.8	1.7613	0.9582	1.1804	151.4	30	
35	0.04541	426.1	1.7822	0.9496	1.1677	154.1	0.04300	425.6	1.7770	0.9562	1.1721	153.4	35	
40	0.04646	430.8	1.7975	0.9496	1.1609	156.1	0.04401	430.4	1.7924	0.9554	1.1647	155.4	40	
45	0.04749	435.6	1.8125	0.9505	1.1548	158.0	0.04501	435.2	1.8075	0.9558	1.1582	157.3	45	
50	0.04851	440.4	1.8274	0.9523	1.1493	159.8	0.04599	439.9	1.8224	0.9570	1.1524	159.2	50	
55	0.04951	445.1	1.8420	0.9547	1.1444	161.5	0.04695	444.7	1.8371	0.9590	1.1472	161.0	55	
60	0.05050	449.9	1.8565	0.9577	1.1400	163.3	0.04790	449.5	1.8517	0.9616	1.1425	162.7	60	
65	0.05147	454.7	1.8708	0.9612	1.1360	164.9	0.04884	454.3	1.8660	0.9648	1.1383	164.5	65	
70	0.05244	459.5	1.8849	0.9652	1.1323	166.6	0.04976	459.2	1.8802	0.9685	1.1344	166.1	70	
75	0.05339	464.3	1.8989	0.9695	1.1290	168.2	0.05068	464.0	1.8942	0.9725	1.1309	167.7	75	
80	0.05434	469.2	1.9128	0.9741	1.1259	169.7	0.05159	468.9	1.9081	0.9769	1.1276	169.3	80	
85	0.05528	474.1	1.9265	0.9791	1.1230	171.3	0.05250	473.8	1.9219	0.9816	1.1246	170.9	85	
90	0.05621	479.0	1.9401	0.9842	1.1204	172.8	0.05338	478.7	1.9355	0.9866	1.1219	172.4	90	
95	0.05713	483.9	1.9536	0.9895	1.1179	174.2	0.05428	483.7	1.9491	0.9917	1.1193	173.9	95	
100	0.05806	488.9	1.9670	0.9950	1.1156	175.7	0.05516	488.6	1.9625	0.9971	1.1169	175.4	100	
105	0.05898	493.9	1.9803	1.0007	1.1134	177.1	0.05603	493.6	1.9758	1.0026	1.1147	176.8	105	
110	0.05989	498.9	1.9934	1.0065	1.1114	178.5	0.05691	498.7	1.9890	1.0083	1.1126	178.2	110	
115	0.06078	503.9	2.0065	1.0124	1.1095	179.9	0.05777	503.7	2.0021	1.0140	1.1106	179.6	115	
120	0.06169	509.0	2.0195	1.0183	1.1077	181.3	0.05864	508.8	2.0151	1.0199	1.1087	181.0	120	
125	0.06258	514.1	2.0324	1.0244	1.1060	182.6	0.05950	513.9	2.0281	1.0259	1.1070	182.4	125	
130	0.06348	519.3	2.0452	1.0305	1.1044	184.0	0.06035	519.1	2.0409	1.0319	1.1053	183.7	130	
135	0.06437	524.4	2.0580	1.0367	1.1029	185.3	0.06120	524.2	2.0536	1.0380	1.1038	185.0	135	
140	0.06526	529.6	2.0707	1.0429	1.1015	186.6	0.06205	529.4	2.0663	1.0441	1.1023	186.3	140	
145	0.06613	534.9	2.0832	1.0491	1.1001	187.8	0.06289	534.7	2.0789	1.0503	1.1009	187.6	145	
150	0.06702	540.1	2.0957	1.0554	1.0988	189.1	0.06373	539.9	2.0914	1.0565	1.0995	188.9	150	
155	0.06790	545.4	2.1082	1.0616	1.0975	190.4	0.06457	545.2	2.1039	1.0627	1.0982	190.2	155	
160	0.06877	550.7	2.1205	1.0679	1.0964	191.6	0.06541	550.6	2.1163	1.0689	1.0970	191.4	160	
165	0.06964	556.1	2.1328	1.0742	1.0952	192.8	0.06624	555.9	2.1286	1.0751	1.0958	192.6	165	
170	0.07052	561.5	2.1450	1.0804	1.0941	194.0	0.06707	561.3	2.1408	1.0813	1.0947	193.9	170	

อุณหภูมิ °C	ความดัน = 550.00 kPa (abs)						SAT LIQ SAT VAP	ความดัน = 575.00 kPa (abs)						อุณหภูมิ °C
	V	H	S	C _p	C _p /C _v	v _s		V	H	S	C _p	C _p /C _v	v _s	
18.72	0.00081	225.7	1.0904	1.4052	1.5490	538.8	0.00082	227.7	1.0972	1.4109	1.5518	532.2	20.15	
18.72	0.03743	409.3	1.7193	0.9795	1.2117	145.4	0.03581	410.1	1.7188	0.9875	1.2152	145.2	20.15	
20	0.03771	410.6	1.7236	0.9774	1.2083	146.0	—	—	—	—	—	—	20	
25	0.03877	415.4	1.7401	0.9705	1.1961	148.4	0.03681	414.8	1.7349	0.9796	1.2023	147.5	25	
30	0.03980	420.3	1.7562	0.9658	1.1856	150.6	0.03781	419.7	1.7512	0.9737	1.1910	149.8	30	
35	0.04080	425.1	1.7720	0.9629	1.1766	152.7	0.03879	424.6	1.7671	0.9699	1.1813	152.0	35	
40	0.04178	429.9	1.7874	0.9614	1.1687	154.8	0.03974	429.4	1.7827	0.9676	1.1728	154.1	40	
45	0.04274	434.7	1.8027	0.9611	1.1617	156.7	0.04068	434.3	1.7980	0.9666	1.1654	156.1	45	
50	0.04369	439.5	1.8177	0.9618	1.1556	158.6	0.04159	439.1	1.8131	0.9668	1.1588	158.0	50	
55	0.04462	444.3	1.8324	0.9633	1.1501	160.5	0.04249	443.9	1.8279	0.9678	1.1530	159.9	55	
60	0.04554	449.2	1.8470	0.9656	1.1451	162.2	0.04338	448.8	1.8426	0.9696	1.1477	161.7	60	
65	0.04644	454.0	1.8614	0.9684	1.1406	164.0	0.04425	453.6	1.8570	0.9721	1.1430	163.5	65	
70	0.04733	458.8	1.8757	0.9718	1.1366	165.6	0.04511	458.5	1.8713	0.9751	1.1387	165.2	70	
75	0.04822	463.7	1.8898	0.9755	1.1328	167.3	0.04597	463.4	1.8854	0.9786	1.1348	166.9	75	
80	0.04909	468.6	1.9037	0.9797	1.1294	168.9	0.04681	468.3	1.8994	0.9825	1.1313	168.5	80	
85	0.04996	473.5	1.9175	0.9842	1.1263	170.5	0.04765	473.2	1.9133	0.9868	1.1280	170.1	85	
90	0.05082	478.4	1.9312	0.9889	1.1234	172.0	0.04847	478.1	1.9270	0.9914	1.1250	171.6	90	
95	0.05167	483.4	1.9447	0.9939	1.1207	173.5	0.04930	483.1	1.9406	0.9962	1.1222	173.2	95	
100	0.05252	488.4	1.9582	0.9991	1.1182	175.0	0.05011	488.1	1.9540	1.0012	1.1196	174.7	100	
105	0.05336	493.4	1.9715	1.0045	1.1159	176.5	0.05092	493.1	1.9674	1.0065	1.1171	176.1	105	
110	0.05419	498.4	1.9847	1.0100	1.1137	177.9	0.05172	498.2	1.9806	1.0119	1.1149	177.6	110	
115	0.05503	503.5	1.9979	1.0157	1.1117	179.3	0.05253	503.2	1.9938	1.0174	1.1128	179.0	115	
120	0.05585	508.6	2.0109	1.0215	1.1097	180.7	0.05332	508.3	2.0069	1.0231	1.1108	180.4	120	
125	0.05668	513.7	2.0239	1.0273	1.1079	182.1	0.05412	513.5	2.0198	1.0288	1.1089	181.8	125	
130	0.05749	518.8	2.0367	1.0333	1.1062	183.4	0.05490	518.6	2.0327	1.0347	1.1071	183.2	130	
135	0.05832	524.0	2.0495	1.0393	1.1046	184.8	0.05568	523.8	2.0455	1.0406	1.1055	184.5	135	
140	0.05913	529.2	2.0622	1.0453	1.1031	186.1	0.05647	529.0	2.0582	1.0466	1.1039	185.8	140	
145	0.05994	534.5	2.0748	1.0514	1.1016	187.4	0.05724	534.3	2.0708	1.0526	1.1024	187.2	145	
150	0.06074	539.8	2.0873	1.0576	1.1002	188.7	0.05801	539.6	2.0834	1.0587	1.1010	188.4	150	
155	0.06155	545.1	2.0998	1.0637	1.0989	189.9	0.05879	544.9	2.0958	1.0648	1.0996	189.7	155	
160	0.06235	550.4	2.1122	1.0699	1.0977	191.2	0.05956	550.2	2.1082	1.0709	1.0983	191.0	160	
165	0.06315	555.8	2.1245	1.0761	1.0965	192.4	0.06032	555.6	2.1206	1.0770	1.0971	192.2	165	
170	0.06395	561.2	2.1367	1.0822	1.0953	193.7	0.06109	561.0	2.1328	1.0831	1.0959	193.5	170	
175	—	—	—	—	—	—	0.06185	566.4	2.1450	1.0893	1.0948	194.7	175	

ตารางสมบัติของสารทำความเย็นชนิด R-134a ณ สภาวะไอร้อนยิ่งยวด (ต่อ)

V = ปริมาตร, m³/kg; H = เอนทัลปี, kJ/kg; S = เอนโทรปี, kJ/kg·K; v_s = ความเร็วเสียง, m/sec C_p = ความร้อนจำเพาะ ณ ความดันคงที่, kJ/kg·K; C_p/C_v = อัตราส่วนความจำเพาะ (ไม่มีมิติ)

อุณหภูมิ °C	ความดัน = 600.00 kPa (abs)						SAT LIQ SAT VAP	ความดัน = 625.00 kPa (abs)						อุณหภูมิ °C
	V	H	S	Cp	Cp/Cv	v _s		V	H	S	Cp	Cp/Cv	v _s	
21.54	0.00082	229.7	1.1038	1.4165	1.5545	525.8		0.00082	231.6	1.1102	1.4221	1.5573	519.5	22.88
21.54	0.03432	410.8	1.7183	0.9854	1.2187	145.0		0.03295	411.5	1.7179	1.0033	1.2223	144.7	22.88
25	0.03502	414.2	1.7299	0.9890	1.2090	146.7		0.03336	413.6	1.7250	0.9988	1.2159	145.8	25
30	0.03600	419.2	1.7463	0.9819	1.1967	149.0		0.03432	418.6	1.7415	0.9904	1.2026	148.2	30
35	0.03695	424.1	1.7623	0.9771	1.1862	151.3		0.03525	423.5	1.7577	0.9845	1.1913	150.5	35
40	0.03787	428.9	1.7780	0.9740	1.1771	153.4		0.03615	428.4	1.7735	0.9805	1.1816	152.7	40
45	0.03878	433.8	1.7934	0.9723	1.1692	155.5		0.03703	433.3	1.7890	0.9781	1.1731	154.8	45
50	0.03967	438.7	1.8086	0.9718	1.1622	157.4		0.03790	438.2	1.8042	0.9771	1.1657	156.8	50
55	0.04054	443.5	1.8235	0.9724	1.1560	159.3		0.03874	443.1	1.8192	0.9771	1.1591	158.8	55
60	0.04140	448.4	1.8382	0.9738	1.1505	161.2		0.03957	448.0	1.8340	0.9780	1.1532	160.6	60
65	0.04224	453.3	1.8527	0.9759	1.1455	163.0		0.04040	452.9	1.8486	0.9797	1.1480	162.5	65
70	0.04308	458.1	1.8671	0.9786	1.1410	164.7		0.04121	457.8	1.8630	0.9820	1.1432	164.2	70
75	0.04390	463.0	1.8813	0.9818	1.1369	166.4		0.04200	462.7	1.8772	0.9850	1.1389	166.0	75
80	0.04472	467.9	1.8953	0.9854	1.1331	168.1		0.04279	467.6	1.8913	0.9884	1.1350	167.6	80
85	0.04552	472.9	1.9092	0.9895	1.1297	169.7		0.04357	472.6	1.9052	0.9922	1.1314	169.3	85
90	0.04633	477.9	1.9229	0.9938	1.1265	171.3		0.04434	477.6	1.9190	0.9963	1.1282	170.9	90
95	0.04712	482.8	1.9365	0.9985	1.1236	172.8		0.04511	482.6	1.9327	1.0008	1.1251	172.4	95
100	0.04790	487.8	1.9500	1.0033	1.1209	174.3		0.04587	487.6	1.9462	1.0055	1.1223	174.0	100
105	0.04868	492.9	1.9634	1.0084	1.1184	175.8		0.04663	492.6	1.9596	1.0104	1.1197	175.5	105
110	0.04945	497.9	1.9767	1.0137	1.1161	177.3		0.04738	497.7	1.9729	1.0155	1.1173	177.0	110
115	0.05023	503.0	1.9899	1.0191	1.1139	178.7		0.04812	502.8	1.9861	1.0208	1.1150	178.4	115
120	0.05100	508.1	2.0030	1.0247	1.1118	180.1		0.04886	507.9	1.9992	1.0263	1.1129	179.8	120
125	0.05175	513.3	2.0159	1.0303	1.1099	181.5		0.04959	513.0	2.0122	1.0318	1.1109	181.3	125
130	0.05252	518.4	2.0288	1.0361	1.1081	182.9		0.05033	518.2	2.0251	1.0375	1.1090	182.6	130
135	0.05327	523.6	2.0417	1.0419	1.1063	184.3		0.05105	523.4	2.0380	1.0433	1.1072	184.0	135
140	0.05402	528.8	2.0544	1.0478	1.1047	185.6		0.05177	528.6	2.0507	1.0491	1.1055	185.4	140
145	0.05477	534.1	2.0670	1.0538	1.1032	186.9		0.05250	533.9	2.0633	1.0550	1.1040	186.7	145
150	0.05552	539.4	2.0796	1.0598	1.1017	188.2		0.05321	539.2	2.0759	1.0609	1.1024	188.0	150
155	0.05626	544.7	2.0921	1.0658	1.1003	189.5		0.05393	544.5	2.0884	1.0669	1.1010	189.3	155
160	0.05700	550.0	2.1045	1.0719	1.0990	190.8		0.05465	549.9	2.1008	1.0729	1.0997	190.6	160
165	0.05774	555.4	2.1168	1.0780	1.0977	192.0		0.05536	555.2	2.1132	1.0789	1.0984	191.8	165
170	0.05848	560.8	2.1291	1.0840	1.0965	193.3		0.05607	560.7	2.1255	1.0850	1.0971	193.1	170
175	0.05921	566.3	2.1413	1.0901	1.0954	194.5		0.05678	566.1	2.1377	1.0910	1.0959	194.3	175

อุณหภูมิ °C	ความดัน = 650.00 kPa (abs)						SAT LIQ SAT VAP	ความดัน = 675.00 kPa (abs)						อุณหภูมิ °C
	V	H	S	Cp	Cp/Cv	v _s		V	H	S	Cp	Cp/Cv	v _s	
24.18	0.00083	233.5	1.1163	1.4276	1.5601	513.5		0.00083	235.3	1.1224	1.4331	1.5630	507.6	25.45
24.18	0.03167	412.2	1.7174	0.9811	1.2259	144.5		0.03049	412.8	1.7170	1.0188	1.2295	144.2	25.45
25	0.03183	413.0	1.7202	0.9811	1.2233	144.9		—	—	—	—	—	—	25
30	0.03277	418.0	1.7369	0.9933	1.2089	147.4		0.03133	417.4	1.7323	1.0086	1.2154	146.6	30
35	0.03367	423.0	1.7532	0.9922	1.1967	149.8		0.03222	422.5	1.7487	1.0002	1.2022	149.0	35
40	0.03456	428.0	1.7691	0.9873	1.1862	152.0		0.03308	427.4	1.7648	0.9943	1.1910	151.3	40
45	0.03542	432.9	1.7847	0.9841	1.1772	154.2		0.03392	432.4	1.7805	0.9903	1.1814	153.5	45
50	0.03626	437.8	1.8000	0.9824	1.1693	156.2		0.03474	437.4	1.7959	0.9879	1.1730	155.6	50
55	0.03708	442.7	1.8151	0.9819	1.1623	158.2		0.03555	442.3	1.8111	0.9868	1.1656	157.6	55
60	0.03789	447.6	1.8300	0.9823	1.1561	160.1		0.03633	447.2	1.8260	0.9867	1.1590	159.6	60
65	0.03869	452.5	1.8446	0.9836	1.1505	162.0		0.03711	452.2	1.8407	0.9876	1.1532	161.5	65
70	0.03948	457.5	1.8591	0.9856	1.1456	163.8		0.03787	457.1	1.8552	0.9892	1.1479	163.3	70
75	0.04025	462.4	1.8733	0.9882	1.1411	165.5		0.03862	462.1	1.8695	0.9915	1.1432	165.1	75
80	0.04102	467.3	1.8874	0.9913	1.1370	167.2		0.03937	467.0	1.8837	0.9944	1.1389	166.8	80
85	0.04177	472.3	1.9014	0.9949	1.1332	168.9		0.04010	472.0	1.8977	0.9977	1.1350	168.5	85
90	0.04252	477.3	1.9152	0.9988	1.1296	170.5		0.04083	477.0	1.9116	1.0014	1.1314	170.1	90
95	0.04326	482.3	1.9289	1.0031	1.1266	172.1		0.04155	482.0	1.9253	1.0054	1.1282	171.7	95
100	0.04399	487.3	1.9425	1.0076	1.1237	173.6		0.04226	487.0	1.9389	1.0098	1.1251	173.3	100
105	0.04472	492.4	1.9559	1.0124	1.1210	175.1		0.04296	492.1	1.9523	1.0144	1.1223	174.8	105
110	0.04545	497.4	1.9693	1.0174	1.1185	176.6		0.04367	497.2	1.9657	1.0193	1.1197	176.3	110
115	0.04617	502.5	1.9825	1.0226	1.1161	178.1		0.04437	502.3	1.9789	1.0243	1.1173	177.8	115
120	0.04688	507.7	1.9956	1.0279	1.1139	179.6		0.04505	507.4	1.9921	1.0296	1.1150	179.3	120
125	0.04760	512.8	2.0086	1.0334	1.1119	181.0		0.04574	512.6	2.0051	1.0349	1.1129	180.7	125
130	0.04830	518.0	2.0215	1.0389	1.1099	182.4		0.04642	517.8	2.0181	1.0404	1.1109	182.1	130
135	0.04900	523.2	2.0344	1.0446	1.1081	183.8		0.04711	523.0	2.0309	1.0460	1.1090	183.5	135
140	0.04970	528.4	2.0471	1.0504	1.1064	185.1		0.04778	528.2	2.0437	1.0516	1.1072	184.9	140
145	0.05040	533.7	2.0598	1.0562	1.1047	186.5		0.04845	533.5	2.0564	1.0574	1.1055	186.2	145
150	0.05109	539.0	2.0724	1.0620	1.1032	187.8		0.04913	538.8	2.0690	1.0632	1.1039	187.6	150
155	0.05178	544.3	2.0849	1.0680	1.1017	189.1		0.04979	544.2	2.0815	1.0690	1.1024	188.9	155
160	0.05247	549.7	2.0973	1.0739	1.1003	190.4		0.05046	549.5	2.0940	1.0749	1.1010	190.2	160
165	0.05316	555.1	2.1097	1.0799	1.0990	191.6		0.05112	554.9	2.1063	1.0809	1.0996	191.5	165
170	0.05384	560.5	2.1220	1.0859	1.0977	192.9		0.05178	560.3	2.1186	1.0868	1.0983	192.7	170
175	0.05453	565.9	2.1342	1.0919	1.0965	194.2		0.05244	565.8	2.1309	1.0928	1.0971	194.0	175
180	0.05520	571.4	2.1464	1.0979	1.0954	195.4		0.05310	571.2	2.1430	1.0987	1.0959	195.2	180

ตารางสมบัติของสารทำความเย็นชนิด R-134a ณ สภาวะไอร้อนยิ่งยวด (ต่อ)

V = ปริมาตร, m³/kg; H = เอนทัลปี, kJ/kg; S = เอนโทรปี, kJ/kg·K; v_s = ความเร็วเสียง, m/sec C_p = ความร้อนจำเพาะ ณ ความดันคงที่, kJ/kg·K; C_p/C_v = อัตราส่วนความจำเพาะ (ไม่มีมิติ)

อุณหภูมิ °C	ความดัน = 700.00 kPa (abs)						SAT LIQ SAT VAP	ความดัน = 725.00 kPa (abs)						อุณหภูมิ °C
	V	H	S	Cp	Cp/Cv	v _s		V	H	S	Cp	Cp/Cv	v _s	
26.68	0.00083	237.0	1.1282	1.4385	1.5658	501.8	0.00084	238.8	1.1339	1.4440	1.5687	496.2	27.88	
26.68	0.02939	413.5	1.7166	1.0265	1.2332	144.0	0.02836	414.1	1.7162	1.0341	1.2370	143.7	27.88	
30	0.02999	416.8	1.7278	1.0182	1.2223	145.7	0.02874	416.2	1.7234	1.0283	1.2295	144.9	30	
35	0.03086	421.9	1.7444	1.0085	1.2081	148.2	0.02960	421.4	1.7401	1.0172	1.2142	147.4	35	
40	0.03171	426.9	1.7606	1.0015	1.1960	150.6	0.03043	426.4	1.7564	1.0090	1.2013	149.9	40	
45	0.03253	431.9	1.7764	0.9967	1.1857	152.8	0.03123	431.5	1.7724	1.0033	1.1903	152.2	45	
50	0.03333	436.9	1.7919	0.9935	1.1768	155.0	0.03202	436.5	1.7880	0.9994	1.1807	154.4	50	
55	0.03412	441.9	1.8071	0.9918	1.1689	157.0	0.03278	441.4	1.8033	0.9970	1.1724	156.5	55	
60	0.03488	446.8	1.8221	0.9913	1.1620	159.0	0.03353	446.4	1.8184	0.9959	1.1651	158.5	60	
65	0.03564	451.8	1.8369	0.9917	1.1559	160.9	0.03427	451.4	1.8332	0.9959	1.1587	160.4	65	
70	0.03638	456.7	1.8515	0.9929	1.1504	162.8	0.03500	456.4	1.8478	0.9967	1.1529	162.3	70	
75	0.03711	461.7	1.8658	0.9949	1.1454	164.6	0.03571	461.4	1.8623	0.9983	1.1477	164.1	75	
80	0.03784	466.7	1.8801	0.9974	1.1409	166.3	0.03641	466.4	1.8765	1.0006	1.1430	165.9	80	
85	0.03855	471.7	1.8941	1.0005	1.1369	168.0	0.03711	471.4	1.8906	1.0033	1.1387	167.6	85	
90	0.03925	476.7	1.9080	1.0040	1.1331	169.7	0.03779	476.4	1.9045	1.0066	1.1349	169.3	90	
95	0.03995	481.7	1.9217	1.0078	1.1297	171.3	0.03847	481.5	1.9183	1.0103	1.1313	171.0	95	
100	0.04064	486.8	1.9354	1.0120	1.1266	172.9	0.03914	486.5	1.9320	1.0143	1.1280	172.6	100	
105	0.04133	491.9	1.9489	1.0165	1.1236	174.5	0.03981	491.6	1.9455	1.0186	1.1250	174.1	105	
110	0.04201	496.9	1.9622	1.0212	1.1209	176.0	0.04047	496.7	1.9589	1.0231	1.1222	175.7	110	
115	0.04269	502.1	1.9755	1.0261	1.1184	177.5	0.04112	501.8	1.9722	1.0279	1.1196	177.2	115	
120	0.04336	507.2	1.9887	1.0312	1.1161	179.0	0.04177	507.0	1.9854	1.0329	1.1172	178.7	120	
125	0.04402	512.4	2.0018	1.0365	1.1139	180.4	0.04243	512.2	1.9985	1.0380	1.1149	180.1	125	
130	0.04468	517.6	2.0147	1.0419	1.1118	181.8	0.04307	517.4	2.0115	1.0433	1.1128	181.6	130	
135	0.04535	522.8	2.0276	1.0473	1.1099	183.2	0.04371	522.6	2.0244	1.0487	1.1108	183.0	135	
140	0.04600	528.0	2.0404	1.0529	1.1081	184.6	0.04434	527.8	2.0372	1.0542	1.1089	184.4	140	
145	0.04665	533.3	2.0531	1.0586	1.1063	186.0	0.04497	533.1	2.0499	1.0598	1.1071	185.8	145	
150	0.04730	538.6	2.0657	1.0643	1.1047	187.3	0.04560	538.4	2.0625	1.0655	1.1055	187.1	150	
155	0.04795	544.0	2.0782	1.0701	1.1032	188.7	0.04622	543.8	2.0751	1.0712	1.1039	188.4	155	
160	0.04859	549.3	2.0907	1.0760	1.1017	190.0	0.04685	549.2	2.0875	1.0770	1.1024	189.8	160	
165	0.04923	554.7	2.1031	1.0818	1.1003	191.3	0.04747	554.6	2.0999	1.0828	1.1009	191.1	165	
170	0.04987	560.2	2.1154	1.0877	1.0990	192.5	0.04809	560.0	2.1122	1.0887	1.0996	192.3	170	
175	0.05051	565.6	2.1276	1.0936	1.0977	193.8	0.04871	565.4	2.1245	1.0945	1.0983	193.6	175	
180	0.05114	571.1	2.1398	1.0996	1.0965	195.0	0.04932	570.9	2.1367	1.1004	1.0970	194.9	180	

อุณหภูมิ °C	ความดัน = 750.00 kPa (abs)						SAT LIQ SAT VAP	ความดัน = 800.00 kPa (abs)						อุณหภูมิ °C
	V	H	S	Cp	Cp/Cv	v _s		V	H	S	Cp	Cp/Cv	v _s	
29.04	0.00084	240.5	1.1394	1.4494	1.5716	490.8	0.00085	243.7	1.1500	1.4602	1.5775	490.2	31.29	
29.04	0.02740	414.6	1.7158	1.0417	1.2408	143.5	0.02565	415.7	1.7150	1.0569	1.2485	142.9	31.29	
30	0.02757	415.6	1.7191	1.0388	1.2372	144.0	—	—	—	—	—	—	30	
35	0.02841	420.8	1.7360	1.0262	1.2206	146.6	0.02626	419.6	1.7278	1.0453	1.2344	145.0	35	
40	0.02923	425.9	1.7524	1.0168	1.2067	149.1	0.02705	424.8	1.7445	1.0332	1.2184	147.6	40	
45	0.03002	431.0	1.7684	1.0100	1.1950	151.5	0.02782	430.0	1.7608	1.0243	1.2049	150.1	45	
50	0.03079	436.0	1.7842	1.0053	1.1848	153.7	0.02856	435.1	1.7767	1.0178	1.1935	152.4	50	
55	0.03154	441.0	1.7996	1.0023	1.1760	155.9	0.02928	440.2	1.7923	1.0133	1.1836	154.7	55	
60	0.03227	446.0	1.8147	1.0006	1.1683	157.9	0.02998	445.2	1.8076	1.0105	1.1750	156.8	60	
65	0.03299	451.0	1.8296	1.0001	1.1615	159.9	0.03067	450.3	1.8226	1.0089	1.1674	158.8	65	
70	0.03370	456.0	1.8443	1.0005	1.1554	161.8	0.03135	455.3	1.8374	1.0085	1.1607	160.8	70	
75	0.03439	461.0	1.8588	1.0018	1.1500	163.7	0.03202	460.4	1.8520	1.0090	1.1548	162.7	75	
80	0.03508	466.1	1.8731	1.0037	1.1451	165.5	0.03267	465.4	1.8664	1.0103	1.1494	164.6	80	
85	0.03576	471.1	1.8872	1.0063	1.1406	167.2	0.03331	470.5	1.8806	1.0122	1.1446	166.4	85	
90	0.03643	476.1	1.9012	1.0093	1.1366	168.9	0.03395	475.5	1.8947	1.0147	1.1402	168.1	90	
95	0.03708	481.2	1.9150	1.0127	1.1329	170.6	0.03457	480.6	1.9086	1.0177	1.1362	169.8	95	
100	0.03774	486.2	1.9287	1.0165	1.1295	172.2	0.03520	485.7	1.9223	1.0212	1.1325	171.5	100	
105	0.03839	491.3	1.9422	1.0207	1.1264	173.8	0.03581	490.8	1.9360	1.0250	1.1292	173.1	105	
110	0.03903	496.4	1.9557	1.0251	1.1235	175.4	0.03642	495.9	1.9494	1.0291	1.1261	174.7	110	
115	0.03966	501.6	1.9690	1.0297	1.1208	176.9	0.03703	501.1	1.9628	1.0334	1.1232	176.3	115	
120	0.04030	506.7	1.9822	1.0346	1.1183	178.4	0.03763	506.3	1.9761	1.0380	1.1205	177.8	120	
125	0.04093	511.9	1.9953	1.0396	1.1160	179.9	0.03822	511.5	1.9892	1.0428	1.1181	179.3	125	
130	0.04155	517.1	2.0083	1.0448	1.1138	181.3	0.03881	516.7	2.0023	1.0478	1.1157	180.8	130	
135	0.04217	522.4	2.0212	1.0501	1.1117	182.7	0.03940	522.0	2.0152	1.0529	1.1136	182.2	135	
140	0.04279	527.6	2.0341	1.0555	1.1098	184.1	0.03998	527.2	2.0281	1.0582	1.1115	183.6	140	
145	0.04340	532.9	2.0468	1.0611	1.1080	185.5	0.04056	532.5	2.0408	1.0636	1.1096	185.0	145	
150	0.04401	538.3	2.0594	1.0667	1.1062	186.9	0.04114	537.9	2.0535	1.0690	1.1078	186.4	150	
155	0.04462	543.6	2.0720	1.0723	1.1046	188.2	0.04171	543.2	2.0661	1.0745	1.1061	187.8	155	
160	0.04523	549.0	2.0845	1.0780	1.1031	189.5	0.04229	548.6	2.0786	1.0801	1.1045	189.1	160	
165	0.04583	554.4	2.0969	1.0838	1.1016	190.9	0.04285	554.0	2.0910	1.0858	1.1029	190.5	165	
170	0.04643	559.8	2.1092	1.0896	1.1002	192.1	0.04342	559.5	2.1034	1.0915	1.1015	191.8	170	
175	0.04703	565.3	2.1215	1.0954	1.0989	193.4	0.04398	565.0	2.1157	1.0972	1.1001	193.1	175	
180	0.04762	570.8	2.1336	1.1013	1.0976	194.7	0.04455	570.5	2.1279	1.1030	1.0988	194.3	180	
185	—	—	—	—	—	—	0.04511	576.0	2.1400	1.1087	1.0975	195.6	185	

ตารางสมบัติของสารทำความเย็นชนิด R-134a ณ สภาวะไอร้อนยิ่งยวด (ต่อ)

V = ปริมาตร, m³/kg; H = เอนทัลปี, kJ/kg; S = เอนโทรปี, kJ/kg·K; v_s = ความเร็วเสียง, m/sec C_p = ความร้อนจำเพาะ ณ ความดันคงที่, kJ/kg·K; C_p/C_v = อัตราส่วนความจำเพาะ (ไม่มีมิติ)

อุณหภูมิ °C	ความดัน = 850.00 kPa (abs)						SAT LIQ SAT VAP	ความดัน = 900.00 kPa (abs)						อุณหภูมิ °C
	V	H	S	Cp	Cp/Cv	v _s		V	H	S	Cp	Cp/Cv	v _s	
33.44	0.00085	246.9	1.1602	1.4710	1.5836	470.1		0.00086	249.9	1.1699	1.4818	1.5897	460.4	35.49
33.44	0.02410	416.8	1.7143	1.0720	1.2564	142.4		0.02271	417.7	1.7137	1.0872	1.2646	141.8	35.49
35	0.02435	418.4	1.7198	1.0663	1.2498	143.3		—	—	—	—	—	—	35
40	0.02512	423.7	1.7368	1.0510	1.2312	146.0		0.02340	422.6	1.7293	1.0702	1.2453	144.4	40
45	0.02586	429.0	1.7534	1.0395	1.2157	148.6		0.02412	427.9	1.7462	1.0559	1.2275	147.2	45
50	0.02658	434.1	1.7695	1.0311	1.2027	151.1		0.02482	433.2	1.7625	1.0452	1.2128	149.7	50
55	0.02728	439.3	1.7853	1.0250	1.1916	153.4		0.02550	438.4	1.7785	1.0373	1.2003	152.2	55
60	0.02796	444.4	1.8008	1.0208	1.1820	155.6		0.02616	443.5	1.7942	1.0316	1.1896	154.5	60
65	0.02862	449.5	1.8159	1.0181	1.1737	157.8		0.02680	448.7	1.8095	1.0278	1.1803	156.7	65
70	0.02927	454.6	1.8309	1.0167	1.1663	159.8		0.02743	453.8	1.8246	1.0253	1.1722	158.8	70
75	0.02991	459.7	1.8456	1.0164	1.1598	161.8		0.02803	458.9	1.8394	1.0242	1.1650	160.8	75
80	0.03053	464.7	1.8601	1.0170	1.1539	163.7		0.02864	464.1	1.8540	1.0240	1.1586	162.8	80
85	0.03115	469.8	1.8744	1.0184	1.1487	165.5		0.02923	469.2	1.8684	1.0247	1.1529	164.7	85
90	0.03176	474.9	1.8885	1.0204	1.1439	167.3		0.02981	474.3	1.8826	1.0261	1.1478	166.5	90
95	0.03236	480.0	1.9025	1.0229	1.1396	169.1		0.03039	479.4	1.8967	1.0282	1.1431	168.3	95
100	0.03295	485.1	1.9163	1.0259	1.1357	170.8		0.03096	484.6	1.9106	1.0308	1.1389	170.1	100
105	0.03353	490.3	1.9300	1.0293	1.1321	172.4		0.03151	489.8	1.9243	1.0338	1.1351	171.7	105
110	0.03412	495.4	1.9435	1.0331	1.1288	174.1		0.03207	494.9	1.9379	1.0373	1.1315	173.4	110
115	0.03469	500.6	1.9569	1.0372	1.1257	175.6		0.03262	500.1	1.9514	1.0410	1.1282	175.0	115
120	0.03526	505.8	1.9703	1.0415	1.1229	177.2		0.03316	505.3	1.9647	1.0451	1.1252	176.6	120
125	0.03582	511.0	1.9834	1.0461	1.1202	178.7		0.03370	510.6	1.9779	1.0494	1.1224	178.2	125
130	0.03639	516.3	1.9965	1.0509	1.1178	180.2		0.03423	515.8	1.9911	1.0540	1.1196	179.7	130
135	0.03695	521.5	2.0095	1.0558	1.1155	181.7		0.03477	521.1	2.0041	1.0587	1.1174	181.2	135
140	0.03750	526.8	2.0224	1.0609	1.1133	183.1		0.03530	526.4	2.0170	1.0636	1.1151	182.7	140
145	0.03805	532.2	2.0352	1.0661	1.1113	184.6		0.03582	531.8	2.0298	1.0687	1.1130	184.1	145
150	0.03860	537.5	2.0479	1.0714	1.1094	186.0		0.03634	537.1	2.0426	1.0738	1.1110	185.5	150
155	0.03914	542.9	2.0605	1.0768	1.1076	187.4		0.03686	542.5	2.0552	1.0791	1.1091	186.9	155
160	0.03969	548.3	2.0731	1.0823	1.1059	188.7		0.03737	547.9	2.0678	1.0844	1.1073	188.3	160
165	0.04023	553.7	2.0855	1.0878	1.1043	190.1		0.03789	553.3	2.0803	1.0898	1.1056	189.7	165
170	0.04076	559.1	2.0979	1.0934	1.1028	191.4		0.03840	558.8	2.0927	1.0953	1.1040	191.0	170
175	0.04130	564.6	2.1102	1.0990	1.1013	192.7		0.03890	564.3	2.1050	1.1009	1.1025	192.3	175
180	0.04183	570.1	2.1224	1.1047	1.0999	194.0		0.03941	569.8	2.1172	1.1064	1.1011	193.6	180
185	0.04236	575.7	2.1346	1.1104	1.0986	195.3		0.03992	575.4	2.1294	1.1120	1.0997	194.9	185
190	—	—	—	—	—	—		0.04042	580.9	2.1415	1.1177	1.0984	196.2	190

อุณหภูมิ °C	ความดัน = 950.00 kPa (abs)						SAT LIQ SAT VAP	ความดัน = 1000.00 kPa (abs)						อุณหภูมิ °C
	V	H	S	Cp	Cp/Cv	v _s		V	H	S	Cp	Cp/Cv	v _s	
37.46	0.00086	252.8	1.1792	1.4926	1.5960	451.1		0.00087	255.6	1.1881	1.5035	1.6025	442.1	39.35
37.46	0.02147	418.6	1.7130	1.1024	1.2730	141.2		0.02034	419.5	1.7124	1.1177	1.2817	140.6	39.35
40	0.02184	421.4	1.7220	1.0913	1.2609	142.8		0.02044	420.2	1.7147	1.1144	1.2782	141.0	40
45	0.02256	426.8	1.7391	1.0736	1.2404	145.7		0.02114	425.7	1.7322	1.0928	1.2546	144.1	45
50	0.02324	432.2	1.7558	1.0604	1.2236	148.3		0.02181	431.2	1.7491	1.0766	1.2354	146.9	50
55	0.02390	437.4	1.7720	1.0504	1.2095	150.9		0.02246	436.5	1.7655	1.0644	1.2195	149.6	55
60	0.02454	442.7	1.7878	1.0431	1.1976	153.3		0.02308	441.8	1.7816	1.0552	1.2061	152.1	60
65	0.02516	447.9	1.8033	1.0379	1.1873	155.6		0.02368	447.1	1.7972	1.0485	1.1947	154.4	65
70	0.02577	453.1	1.8185	1.0344	1.1783	157.8		0.02427	452.3	1.8126	1.0438	1.1848	156.7	70
75	0.02636	458.2	1.8334	1.0323	1.1705	159.9		0.02485	457.5	1.8277	1.0406	1.1762	158.9	75
80	0.02694	463.4	1.8481	1.0313	1.1635	161.9		0.02541	462.7	1.8425	1.0388	1.1687	160.9	80
85	0.02751	468.5	1.8626	1.0313	1.1573	163.8		0.02596	467.9	1.8571	1.0381	1.1619	162.9	85
90	0.02807	473.7	1.8769	1.0321	1.1518	165.7		0.02650	473.1	1.8715	1.0383	1.1559	164.9	90
95	0.02862	478.9	1.8911	1.0337	1.1468	167.5		0.02703	478.3	1.8857	1.0393	1.1506	166.8	95
100	0.02917	484.0	1.9050	1.0358	1.1422	169.3		0.02756	483.5	1.8997	1.0409	1.1457	168.6	100
105	0.02971	489.2	1.9188	1.0384	1.1381	171.1		0.02807	488.7	1.9136	1.0432	1.1413	170.4	105
110	0.03023	494.4	1.9325	1.0415	1.1343	172.7		0.02859	493.9	1.9273	1.0459	1.1372	172.1	110
115	0.03076	499.6	1.9460	1.0450	1.1309	174.4		0.02909	499.1	1.9409	1.0490	1.1335	173.8	115
120	0.03128	504.9	1.9594	1.0488	1.1277	176.0		0.02959	504.4	1.9543	1.0525	1.1301	175.4	120
125	0.03180	510.1	1.9727	1.0528	1.1247	177.6		0.03008	509.7	1.9676	1.0563	1.1270	177.0	125
130	0.03231	515.4	1.9858	1.0572	1.1219	179.1		0.03058	515.0	1.9809	1.0604	1.1241	178.6	130
135	0.03282	520.7	1.9989	1.0617	1.1194	180.7		0.03106	520.3	1.9940	1.0647	1.1214	180.1	135
140	0.03333	526.0	2.0119	1.0664	1.1170	182.2		0.03155	525.6	2.0070	1.0692	1.1189	181.7	140
145	0.03383	531.4	2.0247	1.0713	1.1147	183.6		0.03203	531.0	2.0198	1.0739	1.1165	183.1	145
150	0.03432	536.7	2.0375	1.0763	1.1126	185.1		0.03250	536.3	2.0326	1.0787	1.1143	184.6	150
155	0.03482	542.1	2.0502	1.0814	1.1107	186.5		0.03298	541.8	2.0453	1.0837	1.1122	186.0	155
160	0.03531	547.5	2.0628	1.0866	1.1088	187.9		0.03345	547.2	2.0579	1.0888	1.1103	187.5	160
165	0.03580	553.0	2.0753	1.0919	1.1070	189.3		0.03392	552.6	2.0705	1.0940	1.1084	188.9	165
170	0.03629	558.5	2.0877	1.0973	1.1054	190.6		0.03438	558.1	2.0829	1.0993	1.1067	190.2	170
175	0.03677	564.0	2.1000	1.1027	1.1038	192.0		0.03485	563.6	2.0953	1.1046	1.1050	191.6	175
180	0.03725	569.5	2.1123	1.1082	1.1023	193.3		0.03531	569.2	2.1076	1.1100	1.1035	192.9	180
185	0.03774	575.0	2.1245	1.1137	1.1009	194.6		0.03577	574.7	2.1198	1.1154	1.1020	194.2	185
190	0.03821	580.6	2.1366	1.1193	1.0995	195.9		0.03623	580.3	2.1319	1.1209	1.1006	195.6	190

ตารางสมบัติของสารทำความเย็นชนิด R-134a ณ สภาวะไอร้อนยิ่งยวด (ต่อ)

V = ปริมาตร, m³/kg; H = เอนทัลปี, kJ/kg; S = เอนโทรปี, kJ/kg·K; v_s = ความเร็วเสียง, m/sec C_p = ความร้อนจำเพาะ ณ ความดันคงที่, kJ/kg·K; C_p/C_v = อัตราส่วนความจำเพาะ (ไม่มีมิติ)

อุณหภูมิ °C	ความดัน = 1100.00 kPa (abs)						SAT LIQ SAT VAP	ความดัน = 1200.00 kPa (abs)						อุณหภูมิ °C
	V	H	S	Cp	Cp/Cv	v _s		V	H	S	Cp	Cp/Cv	v _s	
42.93	0.00088	261.0	1.2050	1.5256	1.6158	424.9	0.00089	266.2	1.2208	1.5481	1.6300	408.8	46.28	
42.93	0.01839	421.0	1.7112	1.1488	1.3000	139.4	0.01674	422.4	1.7100	1.1807	1.3195	138.1	46.28	
45	0.01867	423.4	1.7186	1.1368	1.2876	140.8								
50	0.01932	429.0	1.7362	1.1131	1.2623	143.9	0.01722	426.8	1.7235	1.1563	1.2951	140.7	50	
55	0.01995	434.5	1.7531	1.0952	1.2419	146.8	0.01783	432.5	1.7411	1.1310	1.2685	143.9	55	
60	0.02054	440.0	1.7696	1.0817	1.2251	149.5	0.01842	438.1	1.7580	1.1119	1.2471	146.9	60	
65	0.02112	445.4	1.7856	1.0716	1.2110	152.1	0.01897	443.6	1.7745	1.0974	1.2296	149.7	65	
70	0.02168	450.7	1.8013	1.0640	1.1990	154.5	0.01951	449.1	1.7905	1.0864	1.2149	152.3	70	
75	0.02223	456.0	1.8166	1.0586	1.1887	156.8	0.02003	454.5	1.8062	1.0782	1.2025	154.8	75	
80	0.02275	461.3	1.8317	1.0548	1.1797	159.1	0.02054	459.8	1.8215	1.0722	1.1918	157.1	80	
85	0.02327	466.6	1.8465	1.0525	1.1718	161.2	0.02103	465.2	1.8365	1.0679	1.1825	159.3	85	
90	0.02378	471.8	1.8611	1.0513	1.1648	163.2	0.02151	470.5	1.8513	1.0652	1.1743	161.5	90	
95	0.02428	477.1	1.8755	1.0511	1.1585	165.2	0.02199	475.8	1.8659	1.0636	1.1671	163.6	95	
100	0.02477	482.3	1.8897	1.0517	1.1529	167.1	0.02245	481.2	1.8802	1.0630	1.1607	165.6	100	
105	0.02525	487.6	1.9037	1.0530	1.1479	168.9	0.02290	486.5	1.8944	1.0633	1.1549	167.5	105	
110	0.02573	492.9	1.9175	1.0549	1.1433	170.7	0.02335	491.8	1.9083	1.0644	1.1497	169.4	110	
115	0.02620	498.1	1.9312	1.0573	1.1391	172.5	0.02379	497.1	1.9221	1.0660	1.1450	171.2	115	
120	0.02666	503.4	1.9447	1.0602	1.1353	174.2	0.02423	502.5	1.9358	1.0682	1.1407	173.0	120	
125	0.02713	508.7	1.9582	1.0634	1.1318	175.9	0.02466	507.8	1.9493	1.0708	1.1368	174.7	125	
130	0.02758	514.1	1.9715	1.0670	1.1285	177.5	0.02508	513.2	1.9627	1.0739	1.1331	176.4	130	
135	0.02803	519.4	1.9846	1.0709	1.1255	179.1	0.02550	518.5	1.9760	1.0773	1.1298	178.0	135	
140	0.02848	524.8	1.9977	1.0750	1.1227	180.6	0.02592	523.9	1.9891	1.0810	1.1267	179.6	140	
145	0.02892	530.2	2.0106	1.0793	1.1201	182.2	0.02633	529.4	2.0021	1.0849	1.1239	181.2	145	
150	0.02936	535.6	2.0235	1.0838	1.1177	183.7	0.02675	534.8	2.0150	1.0890	1.1212	182.8	150	
155	0.02980	541.0	2.0363	1.0885	1.1154	185.2	0.02715	540.2	2.0279	1.0934	1.1187	184.3	155	
160	0.03023	546.5	2.0489	1.0933	1.1133	186.6	0.02756	545.7	2.0406	1.0979	1.1164	185.8	160	
165	0.03067	551.9	2.0615	1.0982	1.1113	188.0	0.02796	551.2	2.0532	1.1026	1.1142	187.2	165	
170	0.03110	557.4	2.0740	1.1033	1.1094	189.5	0.02836	556.8	2.0657	1.1074	1.1122	188.7	170	
175	0.03152	563.0	2.0864	1.1084	1.1076	190.8	0.02875	562.3	2.0782	1.1123	1.1102	190.1	175	
180	0.03194	568.5	2.0987	1.1136	1.1059	192.2	0.02915	567.9	2.0906	1.1173	1.1084	191.5	180	
185	0.03237	574.1	2.1110	1.1188	1.1043	193.6	0.02954	573.5	2.1029	1.1223	1.1067	192.9	185	
190	0.03279	579.7	2.1231	1.1241	1.1028	194.9	0.02993	579.1	2.1151	1.1275	1.1050	194.2	190	
195	0.03321	585.3	2.1353	1.1295	1.1013	196.2	0.03032	584.7	2.1272	1.1326	1.1035	195.6	195	
200	—	—	—	—	—	—	0.03070	590.4	2.1393	1.1379	1.1020	196.9	200	

อุณหภูมิ °C	ความดัน = 1300.00 kPa (abs)						SAT LIQ SAT VAP	ความดัน = 1400.00 kPa (abs)						อุณหภูมิ °C
	V	H	S	Cp	Cp/Cv	v _s		V	H	S	Cp	Cp/Cv	v _s	
49.42	0.00091	271.0	1.2357	1.5714	1.6449	393.5	0.00092	275.7	1.2498	1.5954	1.6608	378.9	52.39	
49.42	0.01534	423.6	1.7088	1.2137	1.3405	136.9	0.01413	424.7	1.7076	1.2482	1.3631	135.5	52.39	
50	0.01542	424.3	1.7110	1.2088	1.3358	137.3	—	—	—	—	—	—	45	
55	0.01602	430.3	1.7292	1.1731	1.3005	140.9	0.01445	427.9	1.7174	1.2239	1.3399	137.6	55	
60	0.01660	436.1	1.7468	1.1466	1.2730	144.1	0.01502	434.0	1.7357	1.1872	1.3039	141.2	60	
65	0.01714	441.8	1.7637	1.1266	1.2510	147.1	0.01556	439.8	1.7531	1.1600	1.2760	144.5	65	
70	0.01767	447.3	1.7801	1.1114	1.2330	150.0	0.01607	445.6	1.7700	1.1395	1.2537	147.5	70	
75	0.01817	452.9	1.7961	1.0998	1.2179	152.6	0.01656	451.2	1.7864	1.1239	1.2354	150.4	75	
80	0.01865	458.4	1.8117	1.0911	1.2052	155.1	0.01703	456.8	1.8023	1.1119	1.2201	153.0	80	
85	0.01912	463.8	1.8270	1.0847	1.1942	157.5	0.01749	462.3	1.8179	1.1029	1.2071	155.6	85	
90	0.01959	469.2	1.8420	1.0801	1.1847	159.8	0.01793	467.8	1.8331	1.0962	1.1960	158.0	90	
95	0.02003	474.6	1.8568	1.0770	1.1763	161.9	0.01836	473.3	1.8481	1.0913	1.1863	160.2	95	
100	0.02047	480.0	1.8713	1.0751	1.1690	164.0	0.01878	478.8	1.8628	1.0880	1.1779	162.4	100	
105	0.02091	485.3	1.8856	1.0743	1.1624	166.0	0.01919	484.2	1.8772	1.0859	1.1704	164.6	105	
110	0.02133	490.7	1.8997	1.0743	1.1565	168.0	0.01960	489.6	1.8915	1.0849	1.1637	166.6	110	
115	0.02175	496.1	1.9136	1.0752	1.1512	169.9	0.01999	495.0	1.9055	1.0847	1.1577	168.6	115	
120	0.02216	501.5	1.9274	1.0766	1.1464	171.7	0.02038	500.5	1.9194	1.0854	1.1524	170.5	120	
125	0.02257	506.9	1.9410	1.0786	1.1420	173.5	0.02077	505.9	1.9332	1.0866	1.1475	172.3	125	
130	0.02297	512.3	1.9545	1.0810	1.1380	175.3	0.02115	511.3	1.9467	1.0885	1.1430	174.1	130	
135	0.02336	517.7	1.9678	1.0839	1.1343	177.0	0.02153	516.8	1.9602	1.0908	1.1390	175.9	135	
140	0.02375	523.1	1.9810	1.0871	1.1309	178.6	0.02189	522.2	1.9734	1.0935	1.1352	177.6	140	
145	0.02414	528.5	1.9941	1.0906	1.1278	180.2	0.02226	527.7	1.9866	1.0966	1.1318	179.3	145	
150	0.02453	534.0	2.0071	1.0944	1.1249	181.8	0.02263	533.2	1.9997	1.1000	1.1286	180.9	150	
155	0.02491	539.5	2.0200	1.0984	1.1221	183.4	0.02299	538.7	2.0126	1.1036	1.1257	182.5	155	
160	0.02529	545.0	2.0328	1.1027	1.1196	184.9	0.02334	544.2	2.0255	1.1075	1.1229	184.1	160	
165	0.02566	550.5	2.0455	1.1070	1.1172	186.4	0.02370	549.8	2.0382	1.1116	1.1203	185.6	165	
170	0.02604	556.1	2.0581	1.1116	1.1150	187.9	0.02405	555.4	2.0508	1.1159	1.1179	187.1	170	
175	0.02641	561.6	2.0706	1.1162	1.1129	189.4	0.02440	561.0	2.0634	1.1203	1.1157	188.6	175	
180	0.02677	567.2	2.0830	1.1210	1.1110	190.8	0.02475	566.6	2.0758	1.1249	1.1136	190.1	180	
185	0.02714	572.8	2.0953	1.1259	1.1091	192.2	0.02509	572.2	2.0882	1.1295	1.1116	191.5	185	
190	0.02751	578.5	2.1075	1.1308	1.1073	193.6	0.02543	577.9	2.1005	1.1343	1.1097	192.9	190	
195	0.02787	584.1	2.1197	1.1359	1.1057	194.9	0.02577	583.5	2.1127	1.1391	1.1079	194.3	195	
200	0.02823	589.8	2.1318	1.1409	1.1041	196.3	0.02611	589.3	2.1248	1.1440	1.1062	195.7	200	
205	—	—	—	—	—	—	0.02645	595.0	2.1369	1.1490	1.1046	197.0	205	

ตารางสมบัติของสารทำความเย็นชนิด R-134a ณ สภาวะไอร้อนยิ่งยวด (ต่อ)

V = ปริมาตร, m³/kg; H = เอนทัลปี, kJ/kg; S = เอนโทรปี, kJ/kg·K; v_s = ความเร็วเสียง, m/sec C_p = ความร้อนจำเพาะ ณ ความดันคงที่, kJ/kg·K; C_p/C_v = อัตราส่วนความจำเพาะ (ไม่มีมิติ)

อุณหภูมิ °C	ความดัน = 1500.00 kPa (abs)						SAT LIQ SAT VAP	ความดัน = 1600.00 kPa (abs)						อุณหภูมิ °C
	V	H	S	Cp	Cp/Cv	v _s		V	H	S	Cp	Cp/Cv	v _s	
55.2	0.00093	280.1	1.2632	1.6205	1.6778	365.0		0.00094	284.5	1.2759	1.6468	1.6959	351.6	57.88
55.2	0.01308	425.7	1.7063	1.2844	1.3876	134.2		0.01215	426.5	1.7050	1.3227	1.4142	132.8	57.88
60	0.01363	431.7	1.7246	1.2358	1.3416	138.0		0.01239	429.3	1.7134	1.2953	1.3888	134.7	60
65	0.01417	437.8	1.7427	1.1989	1.3056	141.7		0.01294	435.6	1.7323	1.2448	1.3412	138.7	65
70	0.01468	443.7	1.7601	1.1715	1.2776	145.0		0.01344	441.7	1.7503	1.2083	1.3066	142.3	70
75	0.01516	449.5	1.7769	1.1507	1.2552	148.0		0.01392	447.7	1.7675	1.1811	1.2779	145.6	75
80	0.01562	455.2	1.7932	1.1349	1.2368	150.9		0.01437	453.6	1.7842	1.1604	1.2556	148.7	80
85	0.01606	460.9	1.8090	1.1228	1.2214	153.6		0.01480	459.3	1.8004	1.1447	1.2373	151.5	85
90	0.01649	466.4	1.8245	1.1136	1.2084	156.1		0.01522	465.0	1.8162	1.1325	1.2220	154.2	90
95	0.01690	472.0	1.8397	1.1067	1.1972	158.5		0.01562	470.6	1.8316	1.1233	1.2090	156.8	95
100	0.01731	477.5	1.8546	1.1016	1.1875	160.8		0.01602	476.2	1.8467	1.1163	1.1978	159.2	100
105	0.01770	483.0	1.8692	1.0982	1.1790	163.0		0.01640	481.8	1.8616	1.1112	1.1881	161.5	105
110	0.01809	488.5	1.8837	1.0959	1.1714	165.2		0.01677	487.4	1.8761	1.1077	1.1796	163.7	110
115	0.01847	494.0	1.8978	1.0948	1.1647	167.2		0.01714	492.9	1.8905	1.1054	1.1721	165.9	115
120	0.01885	499.4	1.9119	1.0945	1.1587	169.2		0.01750	498.4	1.9046	1.1042	1.1653	167.9	120
125	0.01921	504.9	1.9257	1.0950	1.1532	171.1		0.01785	503.9	1.9186	1.1038	1.1593	169.9	125
130	0.01958	510.4	1.9394	1.0962	1.1483	173.0		0.01820	509.5	1.9323	1.1042	1.1539	171.8	130
135	0.01993	515.9	1.9529	1.0979	1.1438	174.8		0.01854	515.0	1.9460	1.1053	1.1489	173.7	135
140	0.02028	521.4	1.9663	1.1001	1.1397	176.6		0.01887	520.5	1.9594	1.1069	1.1444	175.5	140
145	0.02063	526.9	1.9795	1.1027	1.1360	178.3		0.01921	526.0	1.9728	1.1090	1.1403	177.3	145
150	0.02098	532.4	1.9926	1.1057	1.1325	180.0		0.01954	531.6	1.9860	1.1115	1.1365	179.0	150
155	0.02132	537.9	2.0056	1.1090	1.1293	181.6		0.01986	537.2	1.9990	1.1144	1.1330	180.7	155
160	0.02166	543.5	2.0185	1.1125	1.1263	183.2		0.02018	542.7	2.0120	1.1176	1.1298	182.4	160
165	0.02199	549.1	2.0313	1.1163	1.1235	184.8		0.02050	548.3	2.0248	1.1211	1.1268	184.0	165
170	0.02233	554.7	2.0440	1.1203	1.1209	186.3		0.02082	554.0	2.0376	1.1248	1.1240	185.5	170
175	0.02265	560.3	2.0566	1.1244	1.1185	187.9		0.02113	559.6	2.0502	1.1287	1.1214	187.1	175
180	0.02298	565.9	2.0691	1.1288	1.1162	189.3		0.02144	565.2	2.0627	1.1328	1.1190	188.6	180
185	0.02331	571.6	2.0815	1.1332	1.1141	190.8		0.02175	570.9	2.0752	1.1370	1.1167	190.1	185
190	0.02363	577.2	2.0939	1.1378	1.1121	192.3		0.02206	576.6	2.0876	1.1414	1.1145	191.6	190
195	0.02395	582.9	2.1061	1.1425	1.1102	193.7		0.02236	582.3	2.0998	1.1458	1.1125	193.1	195
200	0.02427	588.7	2.1183	1.1472	1.1084	195.1		0.02267	588.1	2.1121	1.1504	1.1106	194.5	200
205	0.02459	594.4	2.1303	1.1520	1.1067	196.5		0.02297	593.8	2.1242	1.1551	1.1088	195.9	205
210	0.02491	600.2	2.1424	1.1569	1.1050	197.8		0.02327	599.6	2.1362	1.1598	1.1070	197.3	210

อุณหภูมิ °C	ความดัน = 1700.00 kPa (abs)						SAT LIQ SAT VAP	ความดัน = 1800.00 kPa (abs)						อุณหภูมิ °C
	V	H	S	Cp	Cp/Cv	v _s		V	H	S	Cp	Cp/Cv	v _s	
60.43	0.00095	288.6	1.2882	1.6746	1.7155	338.6		0.00096	292.6	1.2999	1.7040	1.7366	326.1	62.87
60.43	0.01132	427.2	1.7037	1.3635	1.4432	131.4		0.01058	427.8	1.7022	1.4072	1.4749	130.0	62.87
65	0.01183	433.3	1.7217	1.3004	1.3851	135.5		0.01082	430.8	1.7110	1.3696	1.4408	132.1	65
70	0.01234	439.7	1.7405	1.2514	1.3390	139.5		0.01134	437.4	1.7306	1.3029	1.3794	136.5	70
75	0.01281	445.8	1.7583	1.2158	1.3042	143.1		0.01182	443.8	1.7491	1.2559	1.3352	140.5	75
80	0.01326	451.8	1.7754	1.1891	1.2770	146.4		0.01227	450.0	1.7667	1.2215	1.3016	144.0	80
85	0.01369	457.7	1.7920	1.1687	1.2551	149.5		0.01269	456.1	1.7837	1.1957	1.2752	147.3	85
90	0.01410	463.5	1.8081	1.1532	1.2371	152.3		0.01309	462.0	1.8001	1.1760	1.2538	150.3	90
95	0.01449	469.3	1.8238	1.1412	1.2219	155.0		0.01348	467.8	1.8161	1.1607	1.2361	153.2	95
100	0.01487	474.9	1.8391	1.1321	1.2091	157.5		0.01386	473.6	1.8317	1.1491	1.2213	155.8	100
105	0.01525	480.6	1.8541	1.1252	1.1980	159.9		0.01422	479.3	1.8469	1.1401	1.2087	158.4	105
110	0.01561	486.2	1.8689	1.1202	1.1884	162.3		0.01457	485.0	1.8618	1.1334	1.1978	160.8	110
115	0.01596	491.8	1.8834	1.1166	1.1799	164.5		0.01491	490.7	1.8765	1.1284	1.1882	163.1	115
120	0.01631	497.4	1.8976	1.1143	1.1724	166.6		0.01524	496.3	1.8909	1.1249	1.1798	165.3	120
125	0.01665	502.9	1.9117	1.1130	1.1657	168.7		0.01557	501.9	1.9051	1.1226	1.1724	167.4	125
130	0.01698	508.5	1.9256	1.1126	1.1597	170.7		0.01589	507.5	1.9191	1.1214	1.1657	169.5	130
135	0.01730	514.1	1.9393	1.1130	1.1542	172.6		0.01621	513.1	1.9329	1.1210	1.1598	171.5	135
140	0.01763	519.6	1.9529	1.1140	1.1493	174.5		0.01652	518.7	1.9466	1.1213	1.1544	173.4	140
145	0.01795	525.2	1.9663	1.1156	1.1448	176.3		0.01682	524.3	1.9601	1.1223	1.1495	175.3	145
150	0.01826	530.8	1.9796	1.1176	1.1407	178.1		0.01713	530.0	1.9734	1.1239	1.1450	177.1	150
155	0.01857	536.4	1.9927	1.1201	1.1369	179.8		0.01742	535.6	1.9866	1.1259	1.1409	178.9	155
160	0.01888	542.0	2.0057	1.1229	1.1334	181.5		0.01772	541.2	1.9997	1.1283	1.1371	180.6	160
165	0.01918	547.6	2.0186	1.1260	1.1302	183.1		0.01801	546.9	2.0127	1.1310	1.1336	182.3	165
170	0.01949	553.2	2.0314	1.1294	1.1272	184.8		0.01830	552.5	2.0256	1.1341	1.1304	184.0	170
175	0.01978	558.9	2.0441	1.1330	1.1244	186.4		0.01859	558.2	2.0383	1.1374	1.1274	185.6	175
180	0.02008	564.6	2.0567	1.1368	1.1218	187.9		0.01887	563.9	2.0509	1.1410	1.1246	187.2	180
185	0.02037	570.3	2.0692	1.1408	1.1193	189.4		0.01915	569.6	2.0635	1.1447	1.1220	188.7	185
190	0.02066	576.0	2.0816	1.1450	1.1170	190.9		0.01943	575.4	2.0759	1.1487	1.1196	190.3	190
195	0.02095	581.7	2.0939	1.1493	1.1149	192.4		0.01971	581.1	2.0883	1.1528	1.1173	191.8	195
200	0.02124	587.5	2.1062	1.1537	1.1128	193.9		0.01998	586.9	2.1005	1.1570	1.1151	193.3	200
205	0.02153	593.3	2.1183	1.1582	1.1109	195.3		0.02026	592.7	2.1127	1.1613	1.1130	194.7	205
210	0.02182	599.1	2.1304	1.1628	1.1091	196.7		0.02053	598.5	2.1248	1.1658	1.1111	196.2	210
215	0.02210	604.9	2.1424	1.1674	1.1073	198.1		0.02080	604.3	2.1369	1.1703	1.1093	197.6	215

ผนวก ค แผนภูมิความดัน-เอนทัลปีของสารทำความเย็นชนิด R-134a

