บทที่ 2
ทฤษฎี

โครงการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาถึงระบบเก็บสะสมความเย็นเพื่อใช้ในการปรับสภาวะอากาศโดยใช้หลักการถ่ายเทความร้อนแบบสัมผัสโดยตรงภายในอีวาปอเรเตอร์ ดังนั้นจะขอกล่าวถึง รูปแบบการเก็บสะสมความเย็น ลักษณะการทำงานของระบบเก็บสะสมความเย็น หลักของระบบทำความเย็น แบบอัดไอ และหลักการถ่ายเทความร้อนพอสังเขปดังนี้

2.1 รูปแบบการสะสมความเย็น

สารเก็บสะสมความเย็นคือ สารที่ทำหน้าที่เก็บสะสมความเย็นไว้ในช่วงเวลาที่ระบบทำความเย็นได้เดินเครื่องเพื่อเก็บสะสมความเย็น สารเก็บสะสมความเย็นที่ดี ต้องมีค่าความจุความร้อนสูง ซึ่งจะช่วยลดขนาดของถังเก็บสะสมความเย็นลงได้ สารเก็บสะสมความเย็นสามารถเก็บสะสมความเย็นได้ 3 ลักษณะ ได้แก่

- การเก็บความเย็นในรูปความร้อนสัมผัส
- การเก็บความเย็นในรูปความร้อนแฝง
- การเก็บความเย็นในรูปสารเปลี่ยนสถานะ

2.1.1 การเก็บความเย็นในรูปความร้อนสัมผัส

การเก็บความเย็นในลักษณะนี้เป็นการนำความร้อนสัมผัสจากน้ำเย็นมาใช้งาน ความสามารถของการนำความเย็นมาใช้งาน โดยขึ้นอยู่กับความแตกต่างของอุณหภูมิน้ำเย็นที่ได้เก็บไว้กับอุณหภูมิน้ำเย็นที่ไหลกลับเข้าสู่ถังเก็บน้ำเย็นเพื่อมารับความเย็นของน้ำเย็นนี้ถ้าต้องการให้ได้ปริมาณความเย็นให้มากนั้น จำเป็นต้องใช้เนื้อที่ในการเก็บน้ำเย็นมาก แต่ในทางด้านการลงทุนระบบจะต่ำเพราะสามารถต่อเข้ากับระบบทำความเย็นที่ใช้อยู่ได้ และเป็นระบบที่ง่ายไม่ซับซ้อน

2.1.2 การเก็บความเย็นในรูปความร้อนแฝง

การเก็บความเย็นในลักษณะนี้เป็นการนำความร้อนแฝงของการเปลี่ยนสถานะจากน้ำแข็งกลายเป็นน้ำ และความร้อนสัมผัส จากน้ำอุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ไปเป็นน้ำที่อุณหภูมิประมาณ 6-7 องศาเซลเซียส ข้อดีของการเก็บความเย็นในรูปน้ำแข็งคือ สามารถลดเนื้อที่ของถังเก็บลงได้ และลดการสูญเสียความเย็นให้กับสภาพแวดล้อมน้อย แต่การใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบจะ

เพิ่มขึ้นอีก 15-20 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบเก็บความเย็นในรูปของน้ำเย็น โดยลักษณะการเกิดน้ำแข็งของระบบมีด้วยกันอยู่ 2 ลักษณะคือ

2.1.2.1 ลักษณะการเกิดน้ำแข็งเกาะผิวคอยล์ โดยสารความเย็นที่ใช้ในระบบจะต้องมีจุดเยือกแข็งต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ สารทำความเย็นจะไหลภายในท่อ ซึ่งอีวาปอเรเตอร์จะจุ่มอยู่ในถังน้ำ เมื่อระบบเริ่มทำงานน้ำแข็งจะเริ่มจับตัวท่อและมีความหนาเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนน้ำกลายเป็นน้ำแข็งหมด ถังน้ำแข็งก็จะทำหน้าที่เก็บสะสมความเย็นในรูปน้ำแข็งเพื่อนำไปใช้งานต่อไป โดยระบบน้ำแข็งเกาะผิวคอยล์ยังสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทดังนี้

ก. ระบบ Ice on coil

โดยการเก็บความเย็นในลักษณะนี้ประกอบไปด้วยท่อสารทำความเย็นขดไปมาอยู่ในถังที่มีน้ำบรรจุอยู่ ในระหว่างการสร้างน้ำแข็ง เครื่องทำความเย็นจะทำให้น้ำที่อยู่โดยรอบผิวท่อด้านนอกแข็งตัวเกิดเป็นน้ำแข็งเกาะโดยรอบผิวท่อมีความหนาประมาณ 1.4 ถึง 2.5 นิ้ว เมื่อความหนาของน้ำแข็งมีค่าพอเหมาะระบบควบคุมจะหยุดการทำงานของคอมเพรสเซอร์ และถังน้ำแข็งก็จะพร้อมที่จะนำไปใช้งานได้ ในเวลาที่ต้องการใช้น้ำแข็งไปทำความเย็นปั๊มน้ำเย็นในระบบก็จะทำงานทำให้เกิดการไหลเวียนของน้ำรอบแท่งน้ำแข็ง และเกิดการละลายขึ้น โดยจะต้องมีการจำกัดความหนาของน้ำแข็งรอบท่อให้มีความหนาแน่นของน้ำแข็งรอบผิวท่อให้มีค่าพอเหมาะ เพราะประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นจะลดลงเรื่อยๆ เมื่อความหนาของน้ำแข็งเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงควรมีจำนวนท่อของสารทำความเย็นภายในถังน้ำเย็นให้มาก ซึ่งจะช่วยให้น้ำแข็งที่ถูกสร้างขึ้นมีความหนาไม่มาก และปัญหาอีกอย่างหนึ่งคือ ความหนาของน้ำแข็งระหว่างท่อ ซึ่งจะมีผลให้ประสิทธิภาพในทางด้านการละลายลดลง เพราะน้ำเย็นที่ไหลเวียนอยู่โดยรอบไม่สามารถไหลไปตามช่องว่างท่อได้ ในระบบนี้จึงควรมีเครื่องอัดอากาศเพื่อสร้างฟองอากาศให้เกิดขึ้นภายในถังน้ำเย็น โดยฟองอากาศที่ถูกสร้างขึ้นจะทำให้น้ำเย็นในถังมีการไหลหมุนเวียนและทำให้การสร้างน้ำแข็งเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ

ข. ระบบ Ice tank

โดยการเก็บความเย็นในลักษณะนี้ประกอบไปด้วยท่อพลาสติกและแผ่นพลาสติกหนาบรรจุอยู่ภายในถังรูปทรงกระบอก แผ่นพลาสติกหนาและท่อจะกินเนื้อที่ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ที่เหลือจะเหลือให้ไว้สำหรับน้ำในถังขยายตัว เมื่อน้ำกลายเป็นน้ำแข็งในระหว่างการสร้างน้ำแข็ง สารทำความเย็นซึ่งเย็นจัดจะไหลผ่านท่อพลาสติก และทำให้น้ำกลายเป็นน้ำแข็ง ซึ่งอุณหภูมิของสารทำความเย็นที่ออกจากชิลเลอร์จะมีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำคือประมาณ –6 องศาเซลเซียส ถึง –8 องศาเซลเซียส และเมื่อไหลออกจากถังอุณหภูมิของสารทำความเย็นจะสูงขึ้น โดยชิลเลอร์จะทำการผลิตน้ำแข็งต่อไปจนกระทั่งอุณหภูมิขาออกจากถังลดลงถึง –5.5 องศา

เซลเซียส น้ำในถังก็จะกลายเป็นน้ำแข็งเกือบหมดชิลเลอร์ก็จะหยุดทำงานและพร้อมที่จะนำน้ำแข็งไปใช้งาน

ค. ระบบ Ice container

โดยการเก็บความเย็นในลักษณะนี้ประกอบไปด้วยภาชนะพลาสติกรูปร่างกลมหรือเหลี่ยม ภาชนะพลาสติกกลมเรียกว่า Ice ball มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 25.807 เซนติเมตร แต่ถ้าเป็นภาชนะรูปเหลี่ยมก็จะมีขนาด 3.447 เซนติเมตร x 30.48 เซนติเมตร x 76.2 เซนติเมตร Ice ball หรือภาชนะรูปเหลี่ยมนี้จะถูกบรรจุอยู่ในถังเก็บความเย็น โดยสารทำความเย็นอุณหภูมิประมาณ –6 องศาเซลเซียส ถึง –8 องศาเซลเซียส จะถูกปั๊มให้ไหลเวียนผ่านถังเก็บความเย็น ทำให้น้ำใน Ice ball แข็งตัวและเก็บความเย็นไว้ เมื่อต้องการใช้ความเย็น สารที่ใช้ในการทำความเย็นเช่น น้ำจากเครื่องส่งลมเย็นที่มีอุณหภูมิสูงขึ้นก็จะไหลมาคลายความร้อนให้กับ Ice ball ทำให้สารทำความเย็นมีอุณหภูมิต่ำลงและนำความเย็นไปแลกเปลี่ยนความร้อนกับลมที่เครื่องส่งลมเย็นในการปรับสภาวะอากาศ

2.1.2.2 ลักษณะการเกิดน้ำแข็งระบบไดนามิคส์

สำหรับระบบไดนามิคส์นั้นการสร้างน้ำแข็งกับการเก็บน้ำแข็งไม่ได้เกิดขึ้นอยู่ตำแหน่งเดียวกัน โดยการสร้างน้ำแข็งนั้นจะสร้างน้ำแข็งที่ผิวอีวาปอเรเตอร์ เมื่อน้ำแข็งมีความหนาเพียงพออยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมแล้วก็จะหยุดระบบทำความเย็น และให้ความร้อนที่ผิวคอยล์อีวาปอเรเตอร์ น้ำแข็งที่เกาะบนผิวคอยล์จะหลุดลงไปในถังเก็บความเย็นและระบบทำความเย็นก็จะเริ่มต้นทำงานใหม่อีกครั้งหนึ่งเพื่อผลิตน้ำแข็ง

2.1.3 การเก็บความเย็นในรูปสารเปลี่ยนสถานะ

การเก็บความเย็นในลักษณะนี้เป็นการนำความร้อนแฝงไปใช้งานเช่นกัน แต่สารเปลี่ยนลักษณะส่วนมากเป็นสารผสม เช่น Eutectic salt เป็นเกลือไฮเตรดชนิดหนึ่ง เป็นส่วนผสมระหว่างเกลือกับน้ำมีจุดเยือกแข็งระหว่าง –8 องศาเซลเซียส ถึง –16 องศาเซลเซียส แต่มีข้อเสียคือเมื่อเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็งแล้วเปลี่ยนสถานะกลับเป็นของเหลวไม่สมบูรณ์ จะเกิดเป็นผลึกเล็กและจะคงเป็นสภาพเป็นผลึกอยู่ถึงแม้ว่าอุณหภูมิจะถึงจุดเยือกแข็งเหล่านี้ก็ไม่สามารถรวมตัวเข้ากับสารละลาย ดังนั้นจึงมีผลทำให้ค่าความร้อนแฝงของสารเหล่านี้ลดลง

2.2 ลักษณะการทำงานของระบบเก็บสะสมความเย็น

ลักษณะการทำงานของระบบเก็บสะสมความเย็นที่มีถังเก็บสะสมความเย็นแบ่งออกเป็น 4 ลักษณะได้แก่

2.2.1 การทำงานลักษณะ Full storage

เครื่องทำความเย็นจะทำงานเพื่อผลิตและเก็บสะสมความเย็นในช่วงที่มีความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำ สำหรับนำไปใช้ในการปรับสภาวะอากาศ ในช่วงที่มีความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงหรือมีความต้องการภาระทำความเย็นสูง โดยเครื่องทำความเย็นจะหยุดทำงานและจะนำน้ำเย็นจากถังเก็บสะสมมาใช้ในการทำความเย็นนั่นคือเป็นการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าสำหรับการปรับอากาศและยังเป็นการเลื่อนการใช้พลังงานไฟฟ้าในช่วงการใช้พลังงานไฟฟ้าสูง ไปใช้ในช่วงเวลาที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำแทน โดยลักษณะการทำงานแบบนี้ถังเก็บความเย็นต้องมีขนาดใหญ่เพียงพอต่อการจัดเก็บความเย็นเพื่อใช้ในการปรับอากาศในช่วงภาระความเย็นสูงและช่วงเวลาปกติของอาคารได้ ในกรณีนี้จะลดปริมาณความต้องการใช้พลังไฟฟ้าสำหรับปรับอากาศได้ถึง 80-90 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับระบบปรับอากาศทั่วไป ดังรูป 2.1 (ข)

2.2.2 การทำงานลักษณะ Partial storage

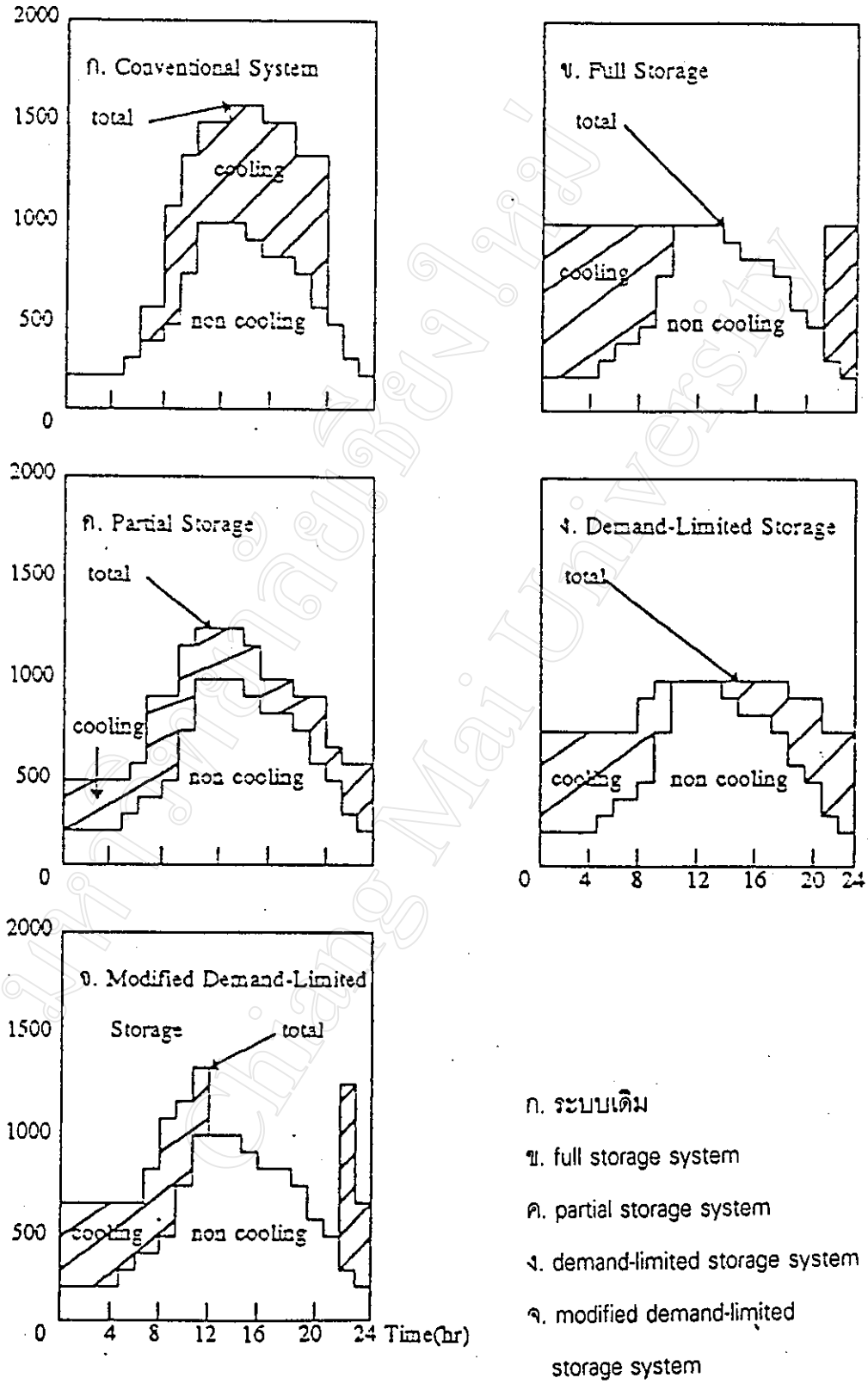
การทำงานของระบบเก็บสะสมความเย็นแบบนี้จะทำการเดินคอมเพรสเซอร์ของเครื่องทำความเย็นตลอด 24 ชั่วโมงคือ ช่วงความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าปานกลางจะเดินน้ำเย็นจ่ายให้กับอาคารโดยจะเดินเต็มกำลังของชิลเลอร์ ถ้าภาระความร้อนเกินก็จะนำเอาน้ำแข็งที่เก็บไว้มาช่วย โดยทำการผลิตน้ำแข็งเก็บในช่วงความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำ การทำงานในลักษณะเช่นนี้ เครื่องทำความเย็นและถังเก็บสะสมความเย็นจะมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับระบบเก็บความเย็นแบบอื่น และสามารถลดความต้องการใช้พลังไฟฟ้าในระบบปรับอากาศได้ถึงประมาณ 40-60 เปอร์เซ็นต์ ดังรูป 2.1 (ค)

2.2.3 การทำงานลักษณะ Demand - limited storage

เป็นรูปแบบของ Partial storage แบบหนึ่งแต่มีข้อแตกต่างคือ จะกำหนดขีดสูงสุดของการใช้พลังไฟฟ้ารวมของอาคาร ซึ่งโดยทั่วไปจะไม่ให้เกินความต้องการสูงสุดของการใช้พลังไฟฟ้าในส่วนอื่นที่นอกเหนือจากระบบปรับอากาศของอาคาร กล่าวคือเมื่อให้ระบบเก็บความเย็นทำงานตามลักษณะนี้แล้วความต้องการใช้พลังไฟฟ้ารวมของอาคารจะไม่เกินค่าความต้องการสูงสุดของการใช้พลังไฟฟ้าในส่วนอื่นที่นอกเหนือจากระบบปรับอากาศของอาคาร กรณีนี้สามารถลดปริมาณความต้องการการใช้พลังงานไฟฟ้าได้ถึง 80-90 เปอร์เซ็นต์ ดังรูป 2.1 (ง)

2.2.4 การทำงานลักษณะ Modified demand - limited storage

เป็นรูปแบบของระบบเก็บความเย็นที่ใช้ได้ผลดีในกรณีอัตราค่าไฟฟ้าในช่วงของวันแตกต่างกันมาก โดยเครื่องทำความเย็นจะทำการผลิตและเก็บความเย็นในช่วงเวลาที่อัตราค่าไฟฟ้าต่ำโดยนำความเย็นไปใช้สำหรับปรับอากาศในช่วงเวลาที่อัตราค่าไฟฟ้าสูงแต่การควบคุมการทำงานค่อนข้างง่าย ดังแสดงในรูป 2.1 (จ)



ก. ระบบเดิม

ข. full storage system

ค. partial storage system

ง. demand-limited storage system

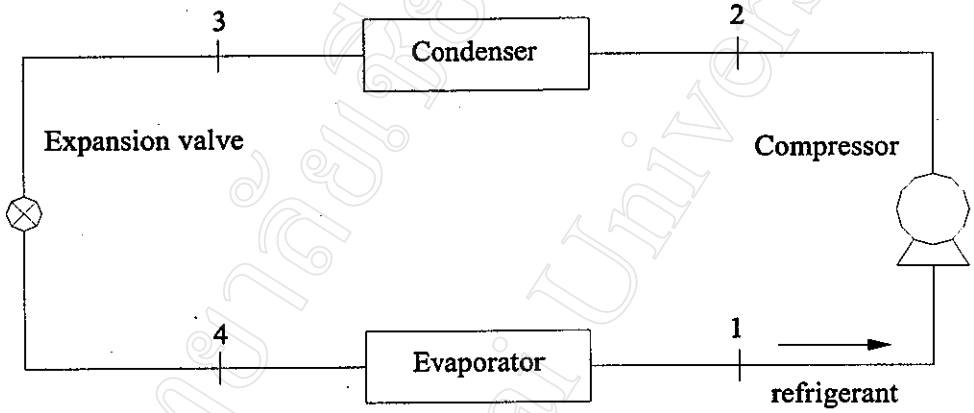
จ. modified demand-limited storage system

รูป 2.1 แสดงการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบเก็บความเย็นลักษณะต่างๆ

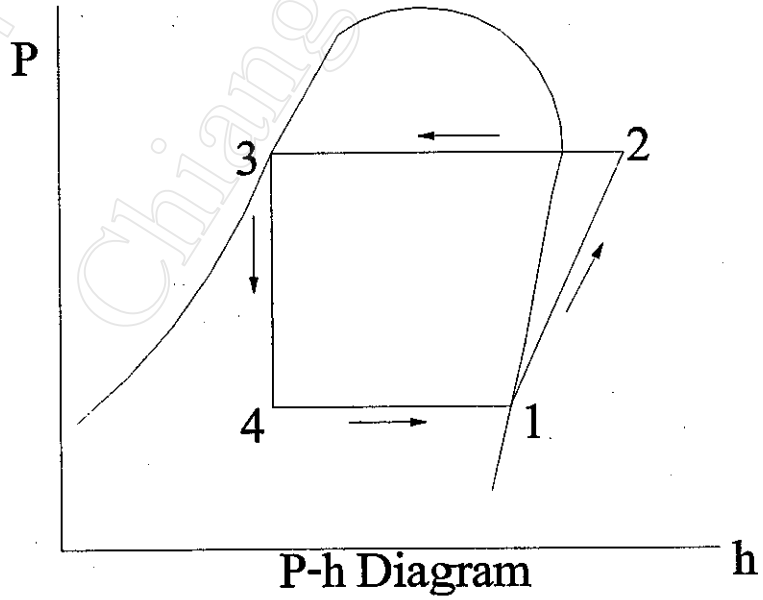
ที่มา: สันติชัย ลี้ยุทธานนท์ (2539)

2.3 หลักการของระบบทำความเย็นแบบอัดไอ

วัฏจักรทำความเย็นแบบอัดไอ โดยหลักการทำงานของระบบทำความเย็นแบบอัดไอจะเริ่มจากสารทำความเย็นในอีวาปอเรเตอร์จะรับเอาความร้อนจากบริเวณที่เราต้องการทำความเย็น โดยการเปลี่ยนสถานะจากของไหลสองสถานะ กลายเป็นไอไหลมายังคอมเพรสเซอร์ ซึ่งจะเพิ่มความดันให้สารทำความเย็น และไปควบแน่นเพื่อถ่ายเทความร้อนออกที่คอนเดนเซอร์ สารทำความเย็นไปในสภาพของเหลวที่ไหลเข้าไปรับความร้อนที่อีวาปอเรเตอร์ต่อไปโดยมีวงจรการทำงานดังรูป 2.2 และไดอะแกรมของสภาวะต่างๆแสดงในรูป 2.3



รูป 2.2 วงจรการทำงานของวัฏจักรการทำความเย็นแบบอัดไอ



รูป 2.3 ไดอะแกรมกระบวนการที่เกิดในวัฏจักรทำความเย็นแบบอัดไอบนไดอะแกรม P-h

กระบวนการที่เกิดขึ้นสามารถสรุปได้ดังนี้

- กระบวนการ 1 – 2 การอัดแบบเอนโทรปีคงที่ (Isentropic compression)
- กระบวนการ 3 – 4 การควบแน่นที่ความดันคงที่ (Isobaric condenser)
- กระบวนการ 4 – 5 การขยายตัวแบบเอนทัลปีคงที่ (Isenthalpic expansion)
- กระบวนการ 5 – 6 การระเหยที่ความดันคงที่ (Isobaric evaporator)

การคำนวณทางอุณหพลศาสตร์ ในกระบวนการจะอาศัยกฎข้อที่ 1 ของอุณหพลศาสตร์สำหรับไหลคงที่

$$Q+\sum m_r\left(h_i+\frac{v_i^2}{2}+gZ_i\right)=\sum m_r\left(h_o+\frac{v_o^2}{2}+gZ_o\right)+W \qquad [2.1]$$

โดยที่ Q = อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบที่พิจารณา (kW)

W = กำลังงานที่ให้ระบบ (kW)

m_r = อัตราการไหลโดยมวลของสารทำความเย็น (kg/s)

h = เอนทัลปี (kJ/kg)

v = ความเร็วของสารทำความเย็น (m/s)

Z = ระดับความสูงจากจุดอ้างอิง (m)

g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (m/s^2)

Subscripts i,o = สภาวะที่ทางเข้าและทางออกตามลำดับ

สมรรถนะของระบบทำความเย็นนิยมแสดงโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะทำความเย็น (Coefficient of Performance, COP) กำหนดเป็น

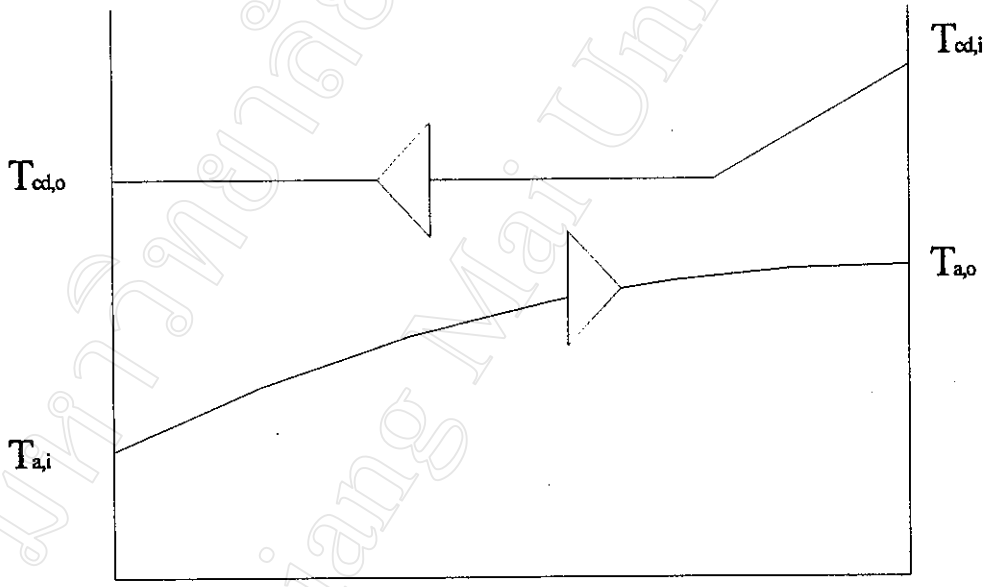
$$COP=\frac{Q_{ev}}{W_{cp}} \qquad [2.2]$$

โดยที่ COP = สัมประสิทธิ์สมรรถนะทำความเย็น

2.4 การถ่ายเทความร้อนในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

โครงการวิจัยนี้มีอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน จำแนกได้เป็น 2 แบบคือ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ของไหล 2 ชนิดไม่สัมผัสกัน (มีการถ่ายเถความร้อนผ่านผนังกั้นระหว่างสารทำความเย็น) ได้แก่ คอนเดนเซอร์ เครื่องส่งลมเย็น อีวาปอเรเตอร์ และอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ของไหล 2 ชนิดสัมผัสกันคือ อีวาปอเรเตอร์แบบสัมผัสโดยตรง ดังนั้นจะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

2.4.1 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ของไหลทั้ง 2 ชนิดไม่สัมผัสกัน เป็นการคำนวณการถ่ายเทความร้อนโดยที่ของไหลทั้ง 2 ไม่สัมผัสกัน ตัวอย่างในกรณีคอนเดนเซอร์ พิจารณารูป 2.3 ประกอบดังนี้



รูป 2.4 การกระจายอุณหภูมิในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

$$Q_{cd} = m_a C_{pa} (T_{a,o} - T_{a,i}) \qquad [2.3]$$

$$= (UA)_{cd} \frac{[(T_{cd,o} - T_{a,i}) - (T_{cd,i} - T_{a,o})]}{ln \frac{(T_{cd,o} - T_{a,i})}{(T_{cd,i} - T_{a,o})}}$$

โดยที่ m_a = อัตราการไหลโดยมวลของอากาศ (kg/s)

C_{cp} = ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ (kJ/kg-K)

$T_{a,i}$ = อุณหภูมิอากาศขาเข้าคอนเดนเซอร์ ($^{\circ}$C)

$T_{a,o}$ = อุณหภูมิอากาศขาออกจากคอนเดนเซอร์ ($^{\circ}$C)

$T_{cd,i}$ = อุณหภูมิสารทำความเย็นขาเข้าคอนเดนเซอร์ ($^{\circ}$C)

$T_{cd,o}$ = อุณหภูมิสารทำความเย็นขาออกจากคอนเดนเซอร์ ($^{\circ}$C)

$(UA)_{cd}$ = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของคอนเดนเซอร์ (kW/K)

2.4.2 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ของไหลทั้ง 2 ชนิดสัมผัสกัน โดยใช้หลักการถ่ายเทความร้อนแบบสัมผัสโดยตรง ซึ่งแสดงไว้ในรูป 1.2

ในกรณีที่กำหนดให้อุณหภูมิของน้ำในถังที่เวลาใดๆมีอุณหภูมิสม่ำเสมอสามารถคำนวณการสมดุลพลังงานได้จากสมการ 2.4 โดยพจน์ทางซ้ายมือคือ อัตราการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของน้ำในถัง พจน์แรกทางขวามือของสมการคืออัตราการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของสารทำความเย็นที่เข้าและออกจากถัง และพจน์สุดท้ายคือ อัตราความร้อนที่ถ่ายเทจากอากาศโดยผ่านทางฉนวนเข้าสู่ถังน้ำ ดังสมการ

$$\frac{d}{dt}(M_w h_w) = m_r(h_{ev,i} - h_{ev,o}) + (UA)_{ev}(T_{amb} - T_w) \qquad [2.4]$$

โดยที่ M_w = มวลของน้ำในถังอีวาปอเรเตอร์แบบสัมผัสโดยตรง (kg)

h_w = เอนทัลปีของน้ำแข็งในถังอีวาปอเรเตอร์แบบสัมผัสโดยตรง (kJ/kg)

$h_{ev,}$ = เอนทัลปีของสารทำความเย็นขาเข้าอีวาปอเรเตอร์แบบสัมผัสโดยตรง (kJ/kg)

$h_{ev,o}$ = เอนทัลปีของสารทำความเย็นขาออกจากอีวาปอเรเตอร์แบบสัมผัสโดยตรง (kJ/kg)

$(UA)_{ev}$ = ผลคูณของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและพื้นที่ของถังอีวาปอเรเตอร์แบบสัมผัสโดยตรง (kW/K)

T_{amb} = อุณหภูมิอากาศของสภาพแวดล้อม ($^{\circ}$C)

T_w = อุณหภูมิน้ำในถังอีวาปอเรเตอร์แบบสัมผัสโดยตรง ($^{\circ}$C)

จากสมการข้างต้นสมมุติว่าสารทำความเย็นที่ใช้ ไม่ละลายน้ำและไม่มีไอน้ำไหลออกจากถังไปพร้อมกับสารทำความเย็นและสามารถจัดใหม่เป็น

$$h_w^{t+\Delta t} = h_w^t + \frac{m_r \Delta t}{M_w}\left(h_{ev,i} - h_{ev,o}\right) + \frac{(UA)_{ev}\Delta t}{M_w}\left(T_{amb} - T_w\right) \qquad [2.5]$$

โดยที่ h_w^t = เอนทัลปีของน้ำแข็งที่เวลา t ใด ๆ (kJ/kg)

$h_w^{t+\Delta t}$ = เอนทัลปีของน้ำแข็งที่เวลาผ่านไป Δt (kJ/kg)

ในการคำนวณค่าเอนทัลปีของน้ำแข็ง สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$h_w = 4.195\,(T_w - 0.01)\,;\, T_w \geq 0.01^{\circ}\mathrm{C} \qquad [2.6]$$

$$-333.33 \leq h_w \leq 0\,;\, T_w = 0.01^{\circ}\mathrm{C} \qquad [2.7]$$

การคำนวณหาค่าผลคูณของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและพื้นที่ของอีวาปอเรเตอร์แบบสัมผัสโดยตรง $(UA)_{ev}$ ในสมการ 2.4 จะใช้หลักการนำความร้อนผ่านฉนวนซึ่งเป็นรูปทรงกระบอก (โดยสมมุติว่าผนังโลหะของถังอีวาปอเรเตอร์แบบสัมผัสโดยตรงมีขนาดความหนาน้อยมากเมื่อเทียบกับฉนวนและค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูงกว่าฉนวนมากจึงไม่นำมาคิดในการคำนวณ) จะได้สมการ

$$(UA)_{ev} = \frac{2\pi kL}{\ln\frac{R_o}{R_i}} \qquad [2.8]$$

โดยที่ R_i = รัศมีภายในของฉนวน (m)

R_o = รัศมีภายนอกของฉนวน (m)

k = สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของฉนวน (kW/m-K)

L = ระดับความสูงของน้ำภายในถัง (m)

2.5 การคำนวณคุณสมบัติของสารทำความเย็น

โครงการวิจัยนี้ใช้สารทำความเย็น (R-12) เพื่อความสะดวกในการคำนวณจะใช้สมการทางคณิตศาสตร์ในการคำนวณคุณสมบัติของสารทำความเย็น [Kiatsiriroat] ดังนี้

Saturated Condition

$$1nP_{sat} = -1.56 + 8.96\left[\frac{T_{sat}}{100}\right] - 1.038\left[\frac{T_{sat}}{100}\right]^2 \quad [2.9]$$

$$h_f = -239.8 + 100.6\left[\frac{T_{sat}}{100}\right] \quad [2.10]$$

Superheated Condition

$$h = 173.52 + 13.011nP + (0.57 + (0.0826)lnP)(T - T_{sat}) \quad [2.11]$$

โดยที่ Subscript sat = สภาวะอิ่มตัว (Saturated Condition)

Subscript f = สภาวะของเหลว

T = Temperature (K), P = Pressure (bar) และ h = Enthalpy (kJ/kg)