บทที่ ๒

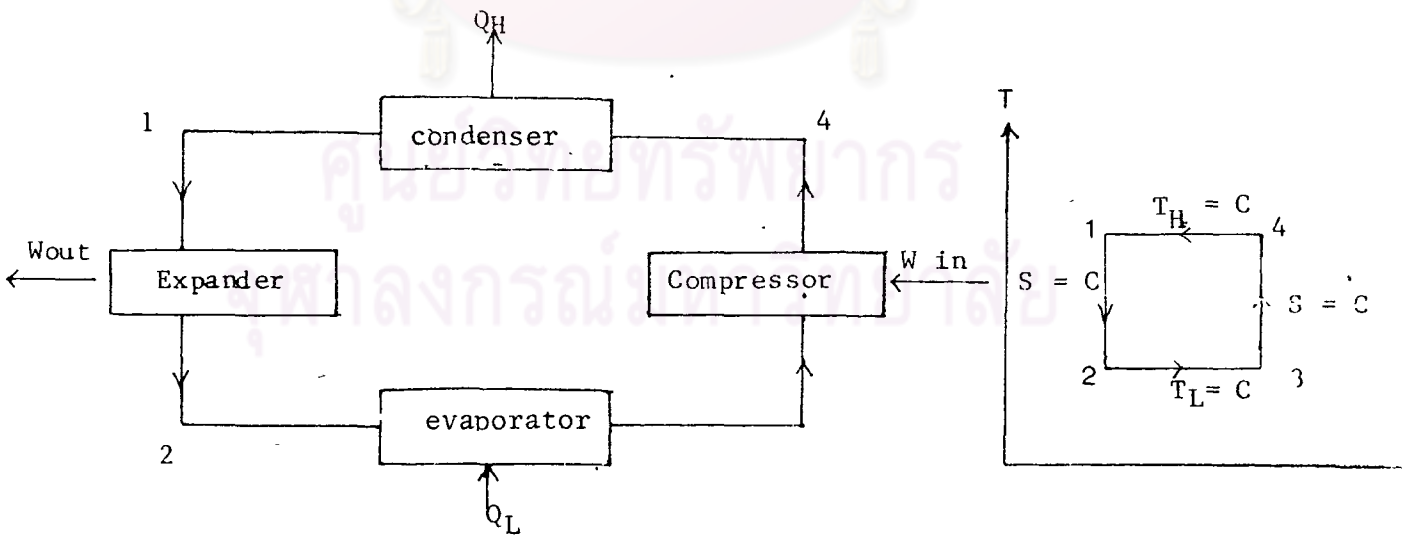
ทฤษฎี

หลักการทำงานของตู้เย็นพลังงานแสงอาทิตย์คล้ายกับหลักการทำงานของตู้เย็นที่ใช้ไฟฟ้าโดยทั่วไป ซึ่งอาจจะอธิบายได้ด้วย reversed carnot cycle และ absorption cycle

๒.๑ Reversed Carnot Cycle

Reversed carnot cycle เป็นวัฏจักรที่มีหลักการทำงานคือ ระบบจะดึงความร้อนจากแหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิต่ำ (T_L) ไปคาย ณ. แหล่งความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า (T_H) อันเป็นหลักการขั้นพื้นฐานของตู้เย็น

Reversed carnot cycle จะต้องการงานจากภายนอก system เพื่อให้ system นำไปใช้ดึงความร้อน จากแหล่งที่มีอุณหภูมิต่ำ โดยผ่าน evaporator แล้วพาไปคายทิ้ง ณ แหล่งที่มีอุณหภูมิสูงกว่า โดยผ่าน condenser



รูปที่ ๑ , ๒ ส่วนประกอบและ diagram ของ reversed carnot cycle

สำหรับการทำความเย็นได้นิยาม ส.ป.ส. ของการทำงาน (coefficient of performance) ของระบบที่มีการไหลอย่างสม่ำเสมอ เขียนย่อเป็น COP ไว้ว่า

$$COP = \frac{\text{heat removed}}{\text{net work}}$$

$$= \frac{Q_L}{Q_H - Q_L}$$

เขียนในรูปของอุณหภูมิได้เป็น

$$COP = \frac{T_L}{T_H - T_L}$$

๒.๒ Absorption Cycle

ในปี ๑๙๖๑ Chinnappaได้วิเคราะห์วัฏจักรของ NH_3-H_2O solution ที่ใช้ในตู้เย็นพลังงานแสงอาทิตย์ ทั้งในทางทฤษฎี และปฏิบัติ โดย diagram ของ ความดัน-อุณหภูมิ-ความเข้มข้น (P-T-X diagram) ดังในรูปที่ ๓ โดยมี theoretical cycle คือ ๑-๒-๕-๖-๑ และ actual cycle คือ ๑-๒-๓-๔-๗-๑ ในการทดลองครั้งนี้นั้น วัฏจักรดังกล่าวจะเกิดใน collector

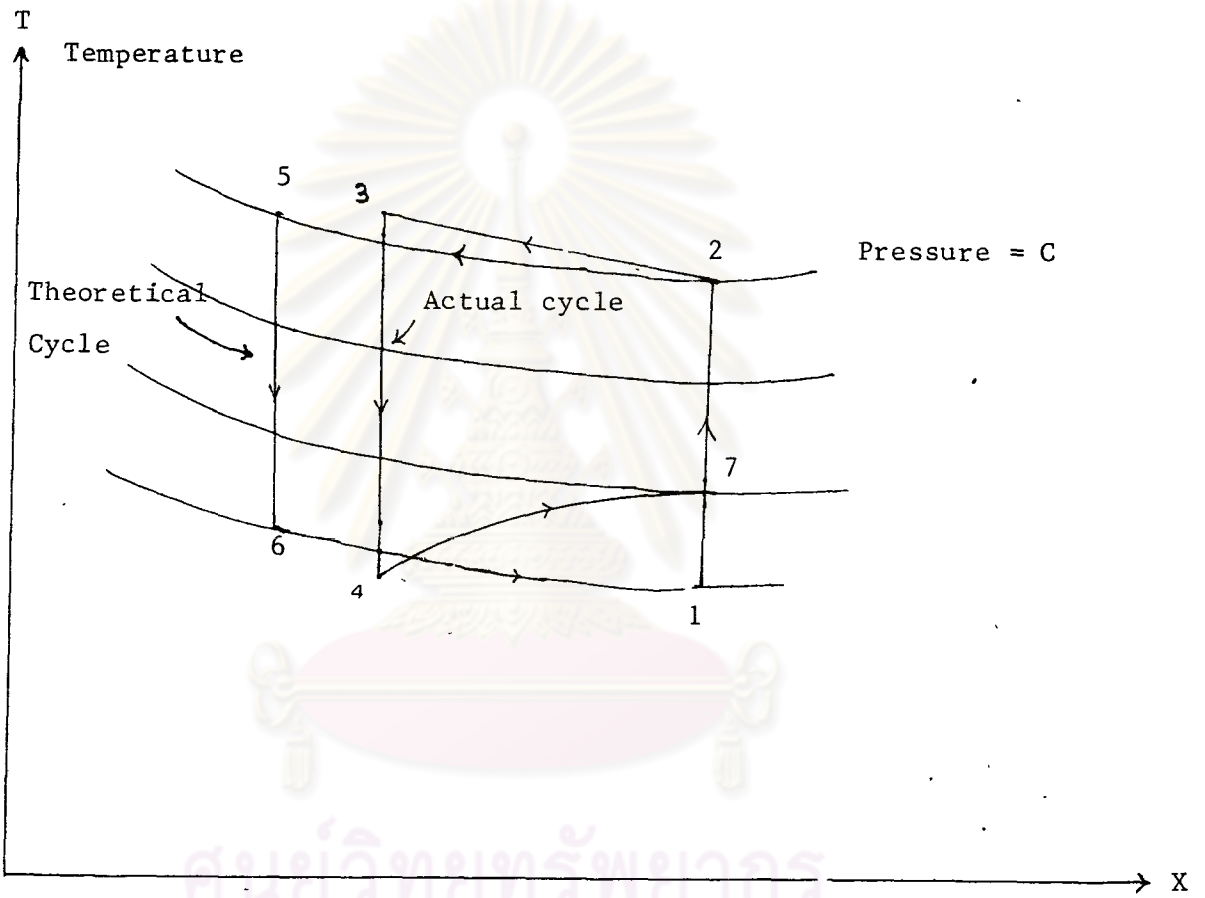
absorption cycle ประกอบด้วยขบวนการต่างๆดังต่อไปนี้

๑. Heating process

เกิดขึ้นในขบวนการที่ ๑-๒ ในขบวนการนี้ NH_3-H_2O solution เมื่อได้รับความร้อนที่ส่งผ่านมาจาก collector แล้ว solution จะมีอุณหภูมิ ความดัน ปริมาตร เพิ่มขึ้น ในขบวนการนี้ NH_3 จะยังไม่ระเหย หรือ แยกตัวออกไปจาก solution actual cycle และ theoretical cycle จะทับกัน

๒. Evaporation process

ใน theoretical cycle คือขบวนการที่ ๒-๕ NH_3 จะแยกตัวออกจาก solution ที่ความดันคงที่ แต่สำหรับใน actual cycle นั้น (ขบวนการ ๒-๓) ขบวนการนี้จะไม่ทับกับเส้นความดันคงที่เหมือน theoretical cycle เนื่องมาจากอุณหภูมิของน้ำ ใน



รูปที่ ๓ Actual and theoretical cycle of NH_3-H_2O solution

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

condenser tank มีค่าเพิ่มขึ้นระหว่างขบวนการ จากผลอันนี้จึงทำให้ความดันที่ใช้กลั่นตัวของ NH_3 สูงขึ้น

๓. Cooling process

ขบวนการนี้เกิดจากสารละลายใน collector มีการระบายความร้อนออกในตอนกลางคืนจึงทำให้ ความดัน อุณหภูมิ และปริมาตร ลดลง โดยความเข้มข้นของสารละลายคงที่ ลักษณะของ theoretical process กับ actual process จะเหมือนกันคือเป็นขบวนการ ๕-๖ และ ๓-๔ ตามลำดับ

๔. Absorption process

เป็นขบวนการที่ไอแอมโมเนียพาความร้อนจาก cooling box มาละลายปนกับ solution ใน collector ความเข้มข้นของ solution จึงเพิ่มขึ้น ขณะเดียวกันอุณหภูมิ ความดัน และปริมาตรของสารละลายจึงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เมื่อสิ้นสุดขบวนการทำความเย็นค่าความเข้มข้นของสารละลายจะเท่ากับค่าความเข้มข้นก่อน heating process (ตำแหน่งที่ ๑) ใน theoretical cycle นั้นจะแทนด้วยขบวนการ ๖-๑ ซึ่งเป็นขบวนการที่ความดันคงที่ แต่สำหรับ actual cycle (ขบวนการ ๔-๗-๑) นั้นเมื่อสิ้นสุดขบวนการ absorption แล้วอุณหภูมิและความดันอาจจะยังสูงกว่าตำแหน่งที่ ๑ อันเป็นผลมาจากปฏิกิริยาการรวมตัวระหว่างไอแอมโมเนีย กับ solution อย่างไรก็ตาม collector ก็จะระบายความร้อนออกจาก solution ไปเรื่อยๆจน solution กลับมาอยู่ตำแหน่งที่ ๑ ได้อีก

สำหรับ actual cycle นั้น ถ้าหากได้มีการระบายความร้อนออกจาก collector ที่ดีพอแล้ว ขบวนการ ๔-๗-๑ ก็จะกลายเป็น ๔-๑ ซึ่งเป็นขบวนการที่มีอุณหภูมิคงที่

๒.๓ ตู้เย็นพลังงานแสงอาทิตย์

ตู้เย็นพลังงานแสงอาทิตย์ทำงานด้วยระบบดูดละลาย จึงมีความจำเป็นต้องกล่าวถึงการทำความเย็นด้วยระบบดูดละลายเสียก่อน เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาถึงการทำความเย็นของตู้เย็นพลังงานแสงอาทิตย์ต่อไป

๒.๓.๑ การทำความเย็นในระบบดูดละลาย (absorption cooling system)

ระบบการทำความเย็นโดยวิธีดูดละลายนี้ เป็นที่รู้จักกันมานานแล้ว การทำความเย็น

โดยวิธีดูดละลายนิยมใช้แอมโมเนียกับน้ำ โดยใช้น้ำเป็นสารดูดละลาย (absorbent) และใช้แอมโมเนียเป็นสารทำความเย็น(refrigerant) โดยเฉพาะอย่างยิ่งการทำความเย็นที่อุณหภูมิต่ำกว่า ๐°C แต่ถ้าต้องการทำความเย็นที่อุณหภูมิไม่ต่ำมากนักนิยมใช้ ลิเทียม โบรไมด์ กับ น้ำ บางทีก็ใช้สารคู่อื่นได้ตามความเหมาะสม แต่สาร ๒ ชนิดที่จะเหมาะสมในการใช้ทำความเย็นระบบดูดละลายจะต้องมีคุณสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่ง คือ ของผสมของสารทั้ง ๒ ชนิดนี้จะต้องผสมเข้ากันเป็นเนื้อเดียวทั้งในขณะที่เป็นของเหลวและก๊าซ จะต้องไม่มีโอกาสที่จะไม่เป็นเนื้อเดียวกันที่ความเข้มข้นบางช่วงเลย

เราอาจจะแบ่งการทำความเย็นในระบบดูดละลายนี้ออกได้เป็น ๒ แบบใหญ่ๆคือ

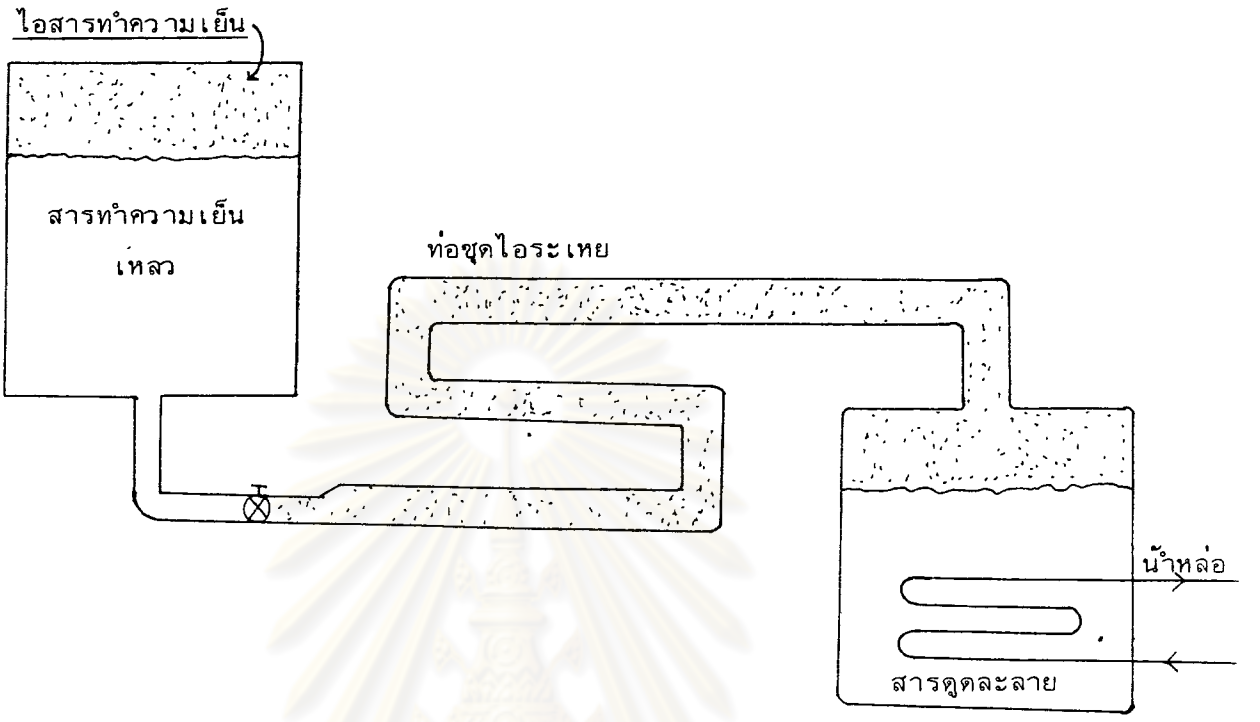
๑. ระบบการทำความเย็นแบบดูดละลายชนิดไม่ต่อเนื่อง (Intermittent absorption cooling system)

๒. ระบบการทำความเย็นแบบดูดละลายชนิดต่อเนื่อง (Continuous absorption cooling system)

๒.๓.๑.๑ ระบบการทำความเย็นแบบดูดละลายชนิดทำงานไม่ต่อเนื่อง (Intermittent absorption cooling system)

ระบบการทำความเย็นแบบนี้เป็นระบบที่ใช้ในตู้เย็นพลังงานแสงอาทิตย์ ในการทำงานอย่างไม่ต่อเนื่องนี้จะมีระบบการทำงานเป็นไปอย่างง่ายๆ การทำความเย็นจะเกิดขึ้นเมื่อปล่อยสารทำความเย็นเหลวระเหย แหล่งที่ทำให้สารทำความเย็นระเหยนี้คือแหล่งที่ต้องการทำความเย็นนั่นเอง ไอของสารทำความเย็นที่เกิดขึ้นจะมาถูกดูดละลายในแหล่งดูดละลาย การทำความเย็นจะเป็นไปเรื่อยๆจนกระทั่งความดันของสารทำความเย็นในถังลดลงจนเท่ากับความดันในแหล่งดูดละลาย แผนภูมิการทำงานในช่วงนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ ๔

หลังจากสารดูดละลายดูดละลายไอสารทำความเย็นจนอิ่มตัวแล้ว เมื่อต้องการนำสารทำความเย็นกลับมาใช้ใหม่ จะต้องนำสารดูดละลายที่อิ่มตัวนี้ไปอุ่นให้มีอุณหภูมิสูงพอสมควร (อุณหภูมิจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารทำความเย็นและสารดูดละลาย) ไอของสารทำความเย็นจะแยกออกมา ถ้าหล่อเย็นไอสารทำความเย็น ไอสารทำความเย็นที่แยกตัวออกมานี้จะกลั่นตัวกลายเป็นสารทำความเย็นเหลว วิธีแยกไอสารทำความเย็นนี้ได้แสดงในรูปที่ ๕



รูปที่ ๔ การทำความเย็นแบบไม่ต่อเนื่อง

๒.๓.๑.๒ ระบบการทำความเย็นแบบดูดละลายชนิดทำงานอย่างต่อเนื่อง (Continuous absorption cooling system)

ระบบการทำความเย็นแบบดูดละลายชนิดทำงานอย่างต่อเนื่องสามารถแสดงเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ ๖ เพื่อให้การทำงานเป็นไปอย่างต่อเนื่องจึงต้องมีเครื่องมือต่างๆดังต่อไปนี้

แหล่งรับความร้อน (generator)

เครื่องควบแน่น (condenser)

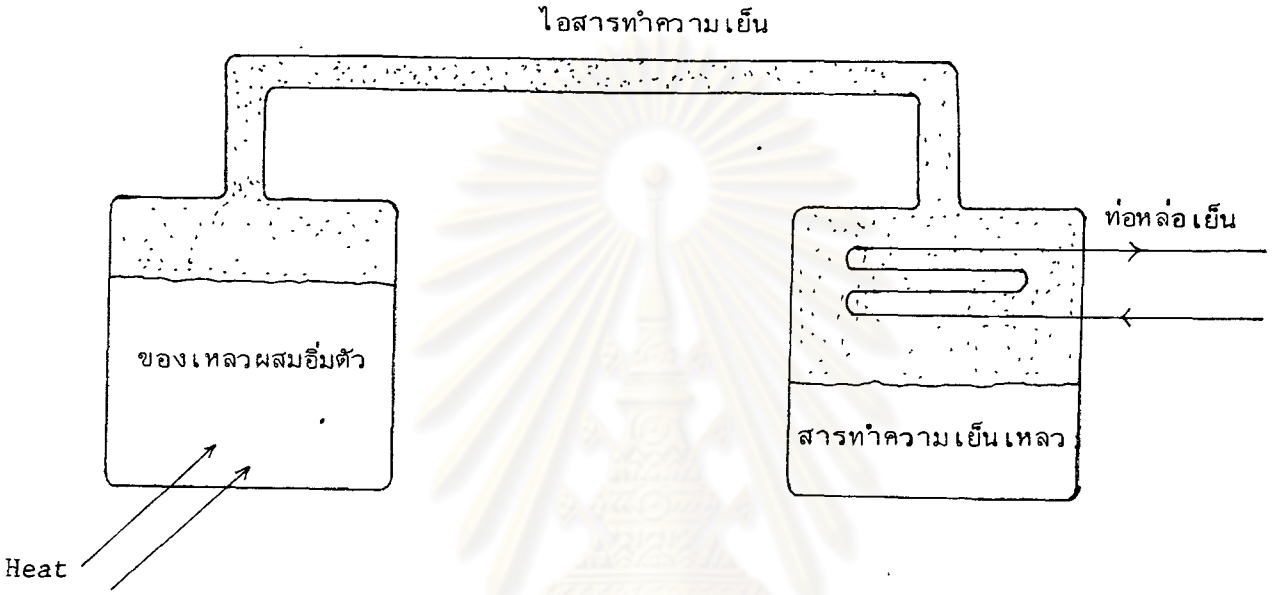
ถังรับสารทำความเย็นเหลว (liquid receiver)

expansion valve

evaporator coil

absorber

pump



รูปที่ ๕ วิธีแยกไอสารทำความเย็น

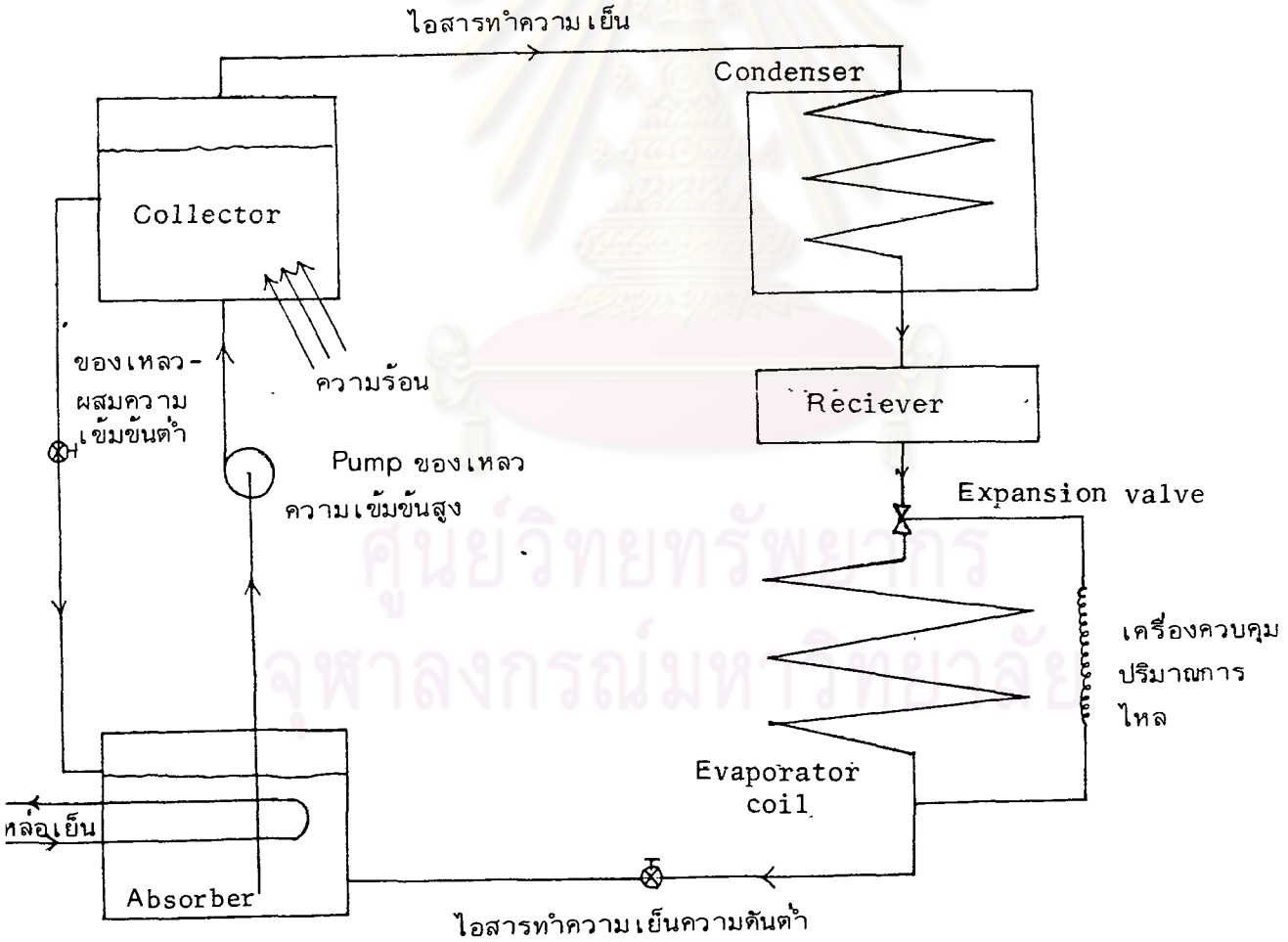
วัฏจักรการทำงานจะเป็นดังนี้คือ

solution ที่มีสารทำความเย็นอยู่อย่างเข้มข้นใน generator เมื่อได้รับความร้อนสารทำความเย็นจะระเหยกลายเป็นไอออกจากสารดูดละลาย จึงทำให้ความเข้มข้นของ solution ลดลง ไอของสารทำความเย็นจะไหลผ่าน condenser แล้วกลั่นตัวเป็นของเหลว solution ใน generator ที่มีความเข้มข้นต่ำจะไหลกลับมายัง absorber ด้วยแรงดึงดูดของโลก

corderser จะถ่ายเทความร้อนจำนวนหนึ่งออกจากไอของสารทำความเย็น ทำให้สารทำความเย็นกลั่นตัวกลายเป็นของเหลว และไหลลงสู่ถังรับสารทำความ

เย็นเหลว จากนั้นสารทำความเย็นเหลวจะไหลผ่านท่อไปยัง expansion valve และจะระเหยกลายเป็นไอใน evaporator coil สารทำความเย็นขณะระเหยกลายเป็นไอจะดูดความร้อนบริเวณรอบๆ coil

solution ที่ใช้ในการดูดละลายจะดูดละลายไอของสารทำความเย็นจนกระทั่งความเข้มข้นของ solution สูงพอสมควรแล้วจะถูกถ่ายไปยัง generator โดยใช้ pump การที่ต้องใช้ pump เพราะระดับความดันของ absorber ต่ำกว่าความดันที่ generator มาก



รูปที่ ๖ แผนภูมิทำความเย็นแบบดูดละลายชนิดทำงานต่อเนื่อง

๒.๓.๒ การทำความเย็นโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์

ในกรณีของตู้เย็นพลังงานแสงอาทิตย์นั้นจะใช้ระบบการทำความเย็นแบบดูดละลายชนิดไม่ต่อเนื่อง โดยการนำพลังงานจากแสงอาทิตย์มาเปลี่ยนให้กลายเป็นพลังงานความร้อนแล้วนำไปอุ่นสารดูดละลายเพื่อแยกไอของสารทำความเย็นออกไปยัง liquid receiver จากนั้นพอถึงตอนกลางคืนก็ระบายความร้อนออกจาก absorber แล้วปล่อยสารทำความเย็นเหลวผ่าน expansion valve เข้าไประเหยใน evaporator coil แล้วไปถูกดูดละลายใน absorber อีก

ในการทดลองครั้งนี้เราจะใช้ collector แบบแผ่นราบเป็นตัวรับพลังงานจากแสงอาทิตย์ และ collector นี้ยังทำหน้าที่เป็น absorber ด้วย ขณะที่ทำหน้าที่เป็น absorber จะมีการนำความร้อนออกไปโดยการเปิดช่องให้อากาศผ่าน collector plate และมีการใช้น้ำหล่อเย็นที่ header ด้วย

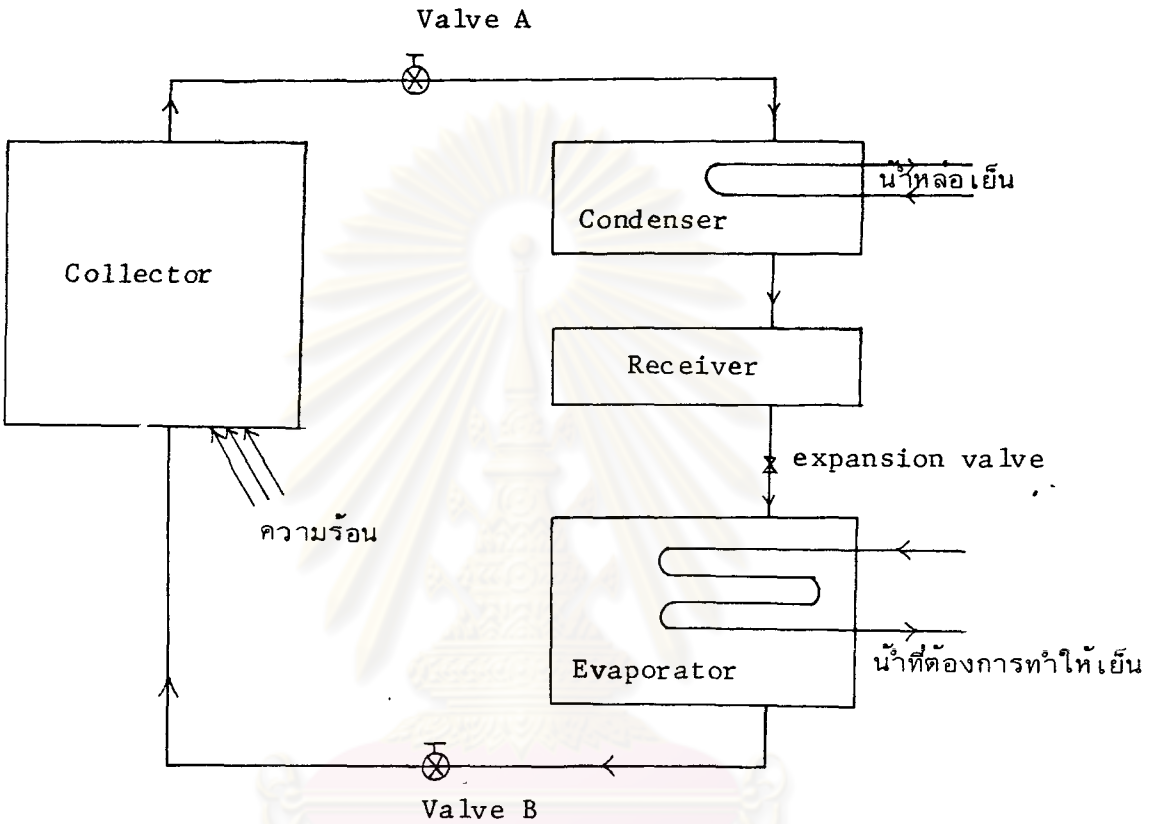
๒.๓.๒.๑ ตู้เย็นพลังงานแสงอาทิตย์แบบใช้คนบังคับ

รูปที่ ๗ แสดงถึงแผนภูมิการทำงานของตู้เย็นพลังงานแสงอาทิตย์แบบใช้คนบังคับเพื่อความสะดวกในการอธิบาย จะอธิบายโดยใช้ solution ที่ใช้เป็นแอมโมเนียกับน้ำ (แบบเดียวกับที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้) โดยมีหลักการทำงานคือ

ในตอนกลางวันระหว่างการรับพลังงานนั้น valve A จะเปิด valve B จะปิด solution ที่เข้มข้นภายใน collector จะถูกทำให้ร้อนขึ้นจนเดือดแล้วจะผลิตไอของแอมโมเนียที่ความดันสูงจากนั้นไอของแอมโมเนียก็จะไหลผ่านเข้าไปใน condenser ที่แช่อยู่ในถังน้ำ ไอของแอมโมเนียจะถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำแล้วเปลี่ยนเป็น แอมโมเนียเหลวไหลลงสู่ receiver เมื่อหยุดการให้พลังงานแก่ collector แล้วจึงปิด valve A แล้วเริ่มระบายความร้อนออกจาก collector เพื่อให้ collector ทำตัวเป็น absorber

ในตอนกลางคืน เมื่อมีการระบายความร้อนออกจาก collector จะทำให้อุณหภูมิของ solution ลดลง เป็นเหตุให้ความดันลดลงตามไปด้วย ในช่วงนี้ความเข้มข้นของแอมโมเนียใน solution จะมีค่าต่ำกว่าตอนเริ่ม heating process การเริ่มระบบทำความเย็นก็ทำโดยการเปิด valve B แอมโมเนียเหลวจะไหลผ่าน expansion valve เข้าไประเหยใน evaporator coil จึงทำให้ evaporator coil เย็นลง

จากนั้นไอของแอมโมเนียก็จะไหลไปถูกดูดละลายใน collector

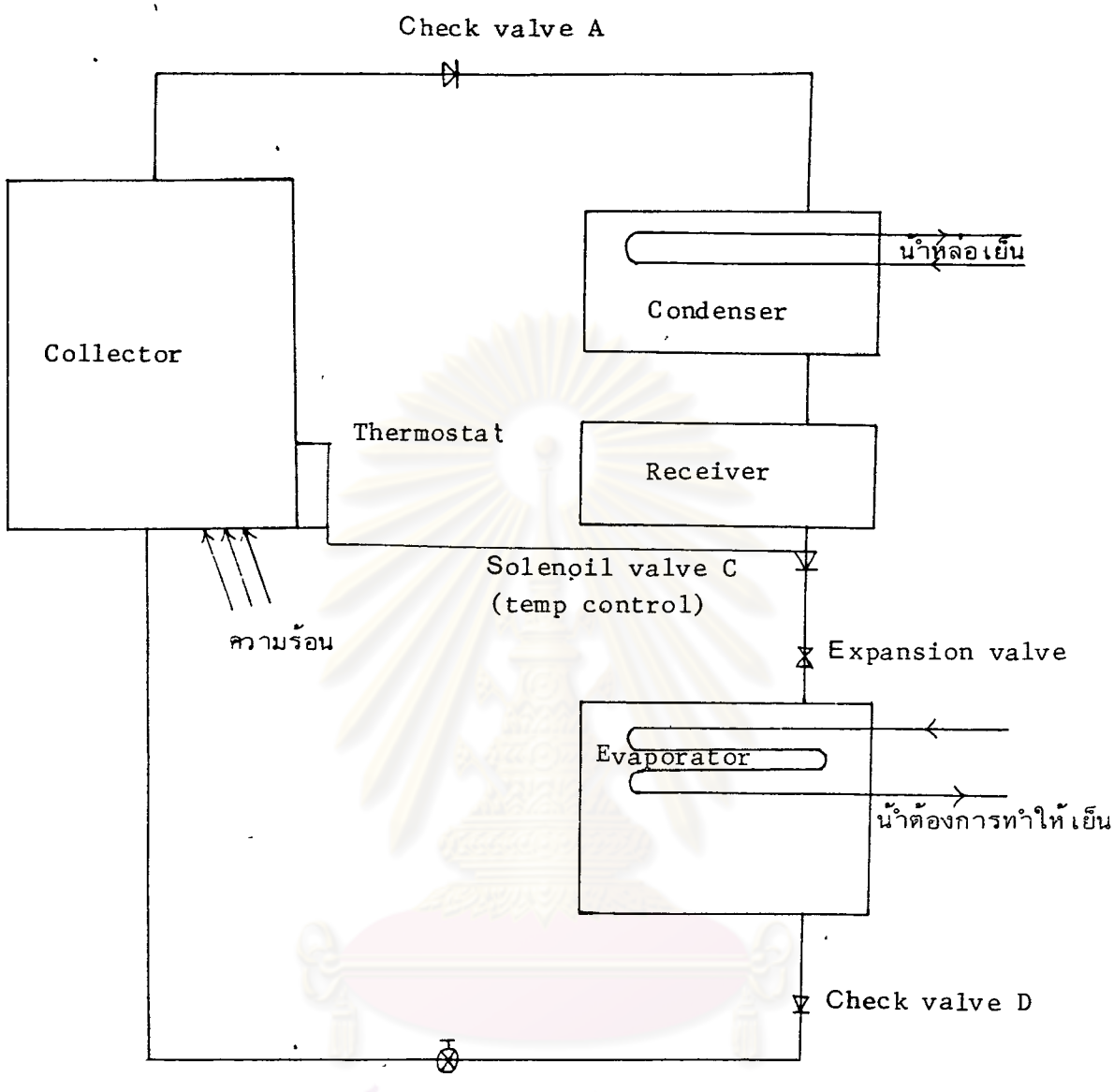


รูปที่ ๗ แผนภูมิการทำงานแบบใช้คนบังคับ

สำหรับเวลาหรือ condition ต่างๆที่ใช้ในการ ปิด-เปิด valve A และ valve B นั้น จะขึ้นอยู่กับการออกแบบระบบเป็นสำคัญ เพราะมีค่าเกี่ยวเนื่องถึง design condition ที่ใช้ด้วย เช่น อุณหภูมิบรรยากาศ อุณหภูมิของน้ำที่ใช้เป็นตัวระบายความร้อน

๒.๓.๒.๒ ตู้เย็นพลังงานแสงอาทิตย์แบบ automatic control

ในการทำงานแบบ automatic control นี้ อุปกรณ์ส่วนใหญ่จะเหมือนกับแบบใช้คนบังคับ นอกจาก gate valve A จะเปลี่ยนมาใช้ check valve A แทน



รูปที่ ๘ แผนภูมิการทำงานแบบ Automatic Control

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

และเพิ่ม check valve D กับ solenoid valve C โดย solenoid valve C จะถูกควบคุมโดย thermostat สำหรับลักษณะการติดตั้งได้แสดงไว้แล้วในรูปที่ ๘ ลักษณะการทำงาน มีดังนี้

ในตอนกลางวัน check valve A จะเปิดแต่ check valve D จะปิด ไอของแอมโมเนียจาก collector จะมากลั่นตัวใน condenser แล้วไหลลงไปสู่ receiver โดยจะเป็นไปตลอดกลางวัน

ในเวลากลางคืน เมื่อระบายความร้อนออกจาก collector อุณหภูมิของ collector จะต่ำลงและความดันจะลดลง ต่อมา thermostat ก็จะบังคับให้ solenoid valve C เปิด แอมโมเนียเหลวจาก receiver จะไหลผ่าน expansion valve เข้าไประเหยใน evaporator coil และกลับไปถูกดูดละลายใน collector อีกครั้งหนึ่งเป็นการครบวัฏจักร

๒.๔ สัมประสิทธิ์การทำงานของตู้เย็นพลังงานแสงอาทิตย์(coefficient of performance of solar refrigerator)

การหา COP จะต้องหาคุณสมบัติอย่างหนึ่งทาง thermodynamics คือ enthalpy มาใช้ โดย enthalpy มีค่าเท่ากับผลรวมของ internal energy และพลังงานเนื่องจากการไหล เขียนเป็นสูตรได้ว่า

$$H = U + \frac{PV}{J}$$

William,Chung,Fester และDuffie (๑๔) เสนอวิธีหา COP สำหรับ absorption cycle แบบอุณหภูมิของ collector ใน absorption process

$$COP = \frac{Q_c}{Q_g}$$

เมื่อ Q_c = ความร้อนที่แอมโมเนียดูดออกไปจาก cooling box

= (มวล ของแอมโมเนียเหลวที่กลั่นได้ x ค่าเฉลี่ยของความร้อนแฝงของแอมโมเนียเหลว)

= $(M_1 - M_3)\ L_m$

013175

Q_g = ความร้อนที่ให้กับ solution ก่อนที่แอมโมเนียจะระเหยแยกตัวออกจาก solution (ขบวนการ ๑-๒) + ความร้อนที่ให้กับ solution ระหว่างที่ไอแอมโมเนียระเหยแยกตัวออกจาก solution(ขบวนการ ๒-๓)

$$= M_3h_3 - M_1h_1 + \int_{M_3}^{M_1} h_r \, dM$$

h = specific enthalpy ของ solution

h_r = specific enthalpy ของไอแอมโมเนีย ส่วนที่ระเหยออกจาก solution

M = มวลของ solution

dM = มวล ของไอแอมโมเนียที่ระเหยออกจาก solution

L_m = ค่าเฉลี่ยของความร้อนแฝง (mean latent heat) ของแอมโมเนีย

$$COP = \frac{(M_1-M_3)L_m}{M_3h_3-M_1h_1+\int_{M_3}^{M_1} h_r dM}$$

เนื่องจากการทำงานของตู้เย็นพลังงานแสงอาทิตย์ ประกอบด้วย 2 ส่วนใหญ่ ๆ ที่เกิดการถ่ายเทความร้อน คือที่ collector และที่ cooling box ดังนั้นสมรรถนะที่ใช้ในการวิเคราะห์ คือ cooling ratio และ solar coefficient of performance(COP) cooling ratio ที่จะกล่าวนี้จะมีความหมายเดียวกันกับ COP ของ William,Chug,Fester และ Duffie (14) แต่เพื่อสะดวกในการวิเคราะห์ จะใช้ค่าเฉลี่ยของ specific enthalpy ของไอแอมโมเนียส่วนที่ระเหยออกจาก solution (h_B) แทนค่า (h_r)

จากคำนิยาม cooling ratio $= \frac{Q_c}{Q_g}$

เมื่อ Q_c = ปริมาณความร้อนที่แอมโมเนียดูดจาก cooling box

$$= (M_1-M_3)(h_0-h_1)$$

M_1-M_3 = มวลของแอมโมเนียที่เข้าไปใน cooling box

h_o = specific enthalpy ของไอแอมโมเนียที่ออกมาจาก cooling box

h_1 = specific enthalpy ของแอมโมเนียที่เข้า cooling box

Q_g = ความร้อนที่ solution ได้รับจาก collector

$= M_3h_3 - M_1h_1 + (M_1 - M_3)h_B$

h_3 = specific enthalpy ของ solution ที่เหลือใน collector หลังจากที่แอมโมเนียหยุดการระเหย

h_B = mean specific enthalpy ของไอแอมโมเนียที่ออกมาจาก collector

h_1 = specific enthalpy ของ solution ก่อนที่แอมโมเนียจะระเหยแยกตัวออกจาก solution

จะได้ $$\text{cooling ratio} = \frac{(M_1 - M_3)(h_o - h_1)}{M_3h_3 - M_1h_1 + (M_1 - M_3)h_B}$$

ในกรณีที่ปล่อยแอมโมเนียจนหมด

จากคำนิยาม $$COP = \frac{Q_c}{Q_s}$$

เมื่อ Q_c = ปริมาณความร้อนที่แอมโมเนียดูดจาก cooling box

Q_s = พลังงานจากแสงอาทิตย์รับโดย collector

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย