



ประสบการณ์ในการสร้างและทดสอบเครื่องผลิตน้ำแข็งที่ใช้ระบบทำความเย็นแบบดูดซับ จากพลังงานแสงอาทิตย์

Experience in the Construction and Testing of a Solar-Powered Adsorptive Ice Maker

มานพ พิพัฒน์ตฤกุล, จารุณี เข้มพิลา และธราพงษ์ โคตรแปร
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

833 ถนนพระราม 1 เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330 โทรศัพท์: 0 2219 3862 E-mail: Jarunee.kh@hotmail.com

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษาการสร้างและทดสอบการทำงานของเครื่องทำน้ำแข็งที่ใช้ระบบทำความเย็นแบบดูดซับจากพลังงานแสงอาทิตย์ ที่ประกอบด้วย 6 อุปกรณ์หลัก คือ เครื่องดูดซับ-ท่อเจนนอเตอร์ ถึงพักสารทำความเย็น เครื่องควบแน่นแบบระบายความร้อนด้วยน้ำ วาล์วลดความดัน เครื่องทำระเหย และแผงรับรังสีอาทิตย์ เป็นแบบรางพาราโบลิก โดยใช้แอมโมเนีย(สารทำความเย็น) และแคลเซียมคลอไรด์(ตัวดูดซับ) เป็นคู่สารทำงานและใช้โคมหลอดทังสเตนฮาโลเจน 1,500 Watt เป็นแหล่งความร้อนเนื่องจากการทดลองในฤดูฝน วัฏจักรการทำงานของระบบมี 2 ขั้นตอนคือขั้นตอนการผลิตแอมโมเนียเหลวและขั้นตอนการทำคามเย็น

จากการศึกษาความสัมพันธ์ของความดันและอุณหภูมิที่เกี่ยวข้องพบว่า ในขั้นตอนการผลิตแอมโมเนียเหลวนั้น เมื่อโอแอมโมเนียมีอุณหภูมิสูงขึ้นจนถึงช่วง 45-50°C ทำให้ความดันในระบบมีค่าประมาณ 20 barg ซึ่งมีผลทำให้โอแอมโมเนียเริ่มควบแน่นที่เครื่องควบแน่นได้เป็นแอมโมเนียเหลวเก็บไว้ที่ถังพักความดัน ซึ่งอุณหภูมิและความดันเฉลี่ยของการควบแน่นมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 26.4°C และ 11.4 barg ตามลำดับ ส่วนขั้นตอนการทำคามเย็นนั้น เริ่มจากฉีดแอมโมเนียเหลวที่ผลิตได้ผ่านวาล์วลดความดันเพื่อไปดูดซับความร้อนจากน้ำและอากาศภายในเครื่องทำระเหย ซึ่งเครื่องต้นแบบสามารถลดอุณหภูมิของน้ำได้ต่ำสุดที่ 9.0°C เพื่อการพัฒนากระบวนการศึกษาในเรื่อง การลดจำนวนคอยล์และขนาดเครื่องทำระเหย เพิ่มปริมาณสารทำความเย็นในระบบ หรือทำให้เกิดการหมุนเวียนของอากาศภายในเครื่องทำระเหย อาจช่วยให้เกิดเป็นน้ำแข็งได้

คำสำคัญ: ระบบทำความเย็นแบบดูดซับ, เครื่องทำน้ำแข็งพลังงานแสงอาทิตย์, เทคโนโลยีและการประยุกต์ใช้พลังงานแสงอาทิตย์

Abstract

The objective of this project is to study, construct and test the operation of the prototype of a solar-powered adsorptive ice maker that consists of 6 main components as adsorber-generator, receiver, water cool condenser, throttling device, evaporator and parabolic trough concentrator. The working pair is ammonia(refrigerant) and calcium chloride(adsorbent). A 1,500 Watt Tungsten halogen lamp is used as a heat source due to this project carried out during the rainy season. Adsorption Refrigeration cycle consists of 2 processes that are Regeneration process and Refrigeration process.

The relation between temperature and pressure was studied. In the regeneration process, it is observed

that when the temperature of the generator up to be about 45-50°C, the pressure in the system is about 20 barg, causing the condensation of ammonia vapor at the condenser. At the end of this process the liquid ammonia is collected in a receiver. The average condensation temperature and pressure are 26.4°C and 11.4 barg, respectively. In the refrigeration process, The liquid ammonia is throttled through the throttling valve to the evaporator where it evaporates by absorbing heat and provides useful cooling.

The test result shows that the lowest temperature obtained of the evaporator is about 9.0°C. In order to improve the system it is recommended that the reducing the number of coil and capacity of evaporator, increasing the refrigerant quantity or integrating blowers and air circulation systems be studied further so that the ice to form may be reached.

Keywords: Adsorption Refrigeration, Solar Ice Maker, Technology and Solar Energy Applications

1. คำนำ

ระบบทำความเย็นแบบดูดซับ (Adsorption refrigeration system) มีลักษณะสำคัญคือใช้แหล่งความร้อนที่ให้อุณหภูมิทำงานไม่สูงมากนัก เช่น ใช้น้ำร้อน ก๊าซร้อนหรือพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อใช้ในการหมุนเวียนสารทำงาน สืบเนื่องจากประเทศไทยตั้งอยู่ใกล้เส้นศูนย์สูตร มีพลังงานแสงอาทิตย์ค่อนข้างสูงและสม่ำเสมอเฉลี่ยตลอดปีประมาณ 17 MJ/m² ต่อปี [7] ถือได้ว่ามีศักยภาพที่จะนำมาใช้ประโยชน์ได้ อีกทั้งเป็นพลังงานสะอาดที่ไม่มีวันหมด การพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์จึงเป็นทางเลือกที่มีความยั่งยืน ทั้งนี้หากมองในด้านกลไกของระบบทำความเย็นแบบดูดซับจะเห็นว่าประกอบด้วยอุปกรณ์น้อยชิ้นไม่สลับซับซ้อน และสารทำความเย็นในระบบไม่ก่อมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้งระบบใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับระบบทำความเย็นแบบอัดไอมืออายุการใช้งานยาวนานเนื่องจากไม่มีอุปกรณ์ที่มีการเคลื่อนไหวในระบบ (Moving part) ทำให้การดูแลรักษาและค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาต่ำ

เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาและการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจึงทำการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาประกอบ ซึ่งจะเห็นว่าแหล่งความร้อนที่ใช้ในระบบทำความเย็นแบบดูดซับมีทั้งแสงจาลองจากหลอดไฟและแสงอาทิตย์ เช่นการศึกษาของ สมัคร แสงอรุณ [8] ใช้คู่สารทำงานคือแคลเซียมคลอไรด์และแอมโมเนีย มีแหล่งความร้อนคือเตาไฟฟ้าขนาด 1,500 Watt พบว่าอุณหภูมิต่ำสุดภายในเครื่องทำระเหยมีค่าประมาณ -6 °C ซึ่งผลิตน้ำแข็งได้มากที่สุดประมาณ 5.4 kg มีค่าประสิทธิภาพการทำคามเย็น (COP) เฉลี่ยและสูงสุดประมาณ 0.068 และ 0.081 ตามลำดับ นอกจากนี้ R.Z.

Wang และคณะ [4] สร้างระบบทำความเย็นแบบดูดซับเพื่อผลิตน้ำแข็ง โดยใช้รังสีอาทิตย์เทียมจากหลอดไฟแบบควอตซ์ (Quartz lamps) เป็นแหล่งความร้อน ซึ่งต่างจากงานวิจัยแรกเนื่องจากใช้ร่วมกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบและเครื่องควบแน่นเป็นแบบติดครีบบรรยากาศร้อน คู่มือการทำงานคือ Activated carbon และเมทานอล พบว่าสามารถผลิตน้ำแข็งได้ 7-10 kg หากแต่เกิดปัญหาในการถ่ายเทความร้อนแก่ชั้นของถ่านเนื่องจากหนาเกินไป ในส่วนของงานวิจัยที่ใช้แหล่งความร้อนจากแสงอาทิตย์นั้น เห็นว่าทั้ง K.Sumathy และ Li Zhongfu [2], M. Li และคณะ [3] จำรัส เกาทิมทอง และอินทิตรา แก้วช่วง [5] ต่างใช้คู่มือการทำงานคือ ถ่านกัมมันต์ และเมทานอล และแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นราบ แต่พัฒนาเพิ่มในส่วนของการติดครีบบนคอนเดนเซอร์ ไม่ใช้วาล์วควบคุมความดันและไม่ติดตั้งเกจความดันในระบบ พบว่าสามารถผลิตน้ำแข็งได้ในขณะที่มีค่า COP ต่ำกว่า 0.15

ดังนั้นโครงงานนี้จึงทำการศึกษาระบบทำความเย็นแบบดูดซับโดยใช้แคลเซียมคลอไรด์เป็นตัวดูดซับไอแอมโมเนีย และเลือกใช้แผงรับรังสีอาทิตย์เป็นแบบรางพาราโบลิก (Parabolic trough collector) ซึ่งมีตัวรวมรังสีเป็นท่อทรงกระบอกยาวช่วยลดพื้นที่ในการถ่ายโอนความร้อน ทำให้ได้รับอุณหภูมิใช้งานที่สูงมากขึ้นอีกทั้งเพื่อแก้ปัญหาความหนาของชั้นสารหากเลือกใช้แบบแผ่นราบตั้งในงานวิจัยที่ผ่านมา

2. ทฤษฎี

2.1 ระบบทำความเย็นแบบดูดซับ

ระบบทำความเย็นแบบดูดซับเป็นระบบที่มีการทำงานคล้ายกับระบบทำความเย็นแบบดูดซึม แตกต่างกันที่สารตัวกลางที่จะทำให้สารทำความเย็นมาดูดซับเป็นของแข็งที่มีรูพรุนสูง ซึ่งสามารถดูดซับสารทำความเย็นที่อยู่ในสถานะก๊าซได้ ของแข็งที่มีรูพรุนสูงนี้เรียกว่า สารดูดซับ ส่วนสารทำความเย็นซึ่งจะทำหน้าที่เป็นสารถูกดูดซับ จะเป็นของเหลว โดยเรียกสารดูดซับและสารทำความเย็นในระบบทำความเย็นแบบดูดซับนี้ว่า คู่มือการทำงาน

การทำงานของระบบการทำความเย็นจากพลังงานแสงอาทิตย์ โดยใช้หลักการดูดซับ เริ่มขึ้นเมื่อท่อเครื่องดูดซับ (Adsorber) ที่ภายในบรรจุคู่มือการทำงานได้รับความร้อนจากแหล่งความร้อน ทำให้สารทำความเย็นที่ถูกดูดซับอยู่ที่ผิวสารดูดซับเกิดการระเหยออกจากเครื่องดูดซับไปแลกเปลี่ยนความร้อนกับสารถ่ายโอนความร้อน และควบแน่นภายในเครื่องควบแน่นไปเก็บในถังพักความดัน เรียกกระบวนการนี้ว่า การคายสารดูดซับ (Desorption process)

จากนั้นระบายความร้อนออกจากเครื่องดูดซับทำให้อุณหภูมิของเครื่องดูดซับลดต่ำลงเช่นเดียวกับความดันของระบบ สารทำความเย็นภายในคอยล์เครื่องทำระเหยจะเกิดการระเหยตัวกลับมาดูดซับบนผิวของสารดูดซับภายในท่อเครื่องดูดซับอีกครั้ง กระบวนการนี้เรียกว่า การดูดซับ (Adsorption process) ซึ่งการระเหยของสารทำความเย็นภายในคอยล์เครื่องทำระเหยเกิดจากการดึงความร้อนภายในส่วนทำความเย็น ใช้เป็นความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ เป็นผลให้อุณหภูมิภายในส่วนทำความเย็นลดต่ำลง

2.2 คู่มือการทำงาน

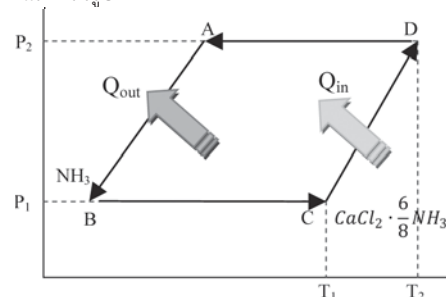
เป็นกระบวนการดูดซับทางกายภาพ (Physisorption) ที่โมเลกุลของก๊าซถูกดูดให้ติดแน่นอยู่ที่ผิวของของแข็งที่เป็นสารดูดซับ โดยคู่มือการทำงานที่เลือกใช้ในการศึกษานี้คือ แอมโมเนียเป็นสารทำความเย็นและแคลเซียมคลอไรด์เป็นสารดูดซับ แม้ว่าแอมโมเนียจะเป็นสารพิษและสามารถจุดระเบิดได้ในบางสภาวะ แต่มีความสามารถในการทำความเย็น

สูงสุด เมื่อเทียบกับสารทำความเย็นชนิดอื่น ๆ มีจุดเดือดต่ำประมาณ -2.2°C ที่ความกดดันของบรรยากาศ และยังมีประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนสูง ดังนั้นเครื่องทำระเหยและเครื่องควบแน่นในระบบจึงมีอุณหภูมิและความดันอยู่ในช่วงปานกลางคือ -15°C และ 30°C ที่ความดัน 2.37 barg และ 11.67 barg ทำให้สามารถใช้วัสดุเบาเป็นวัสดุสำหรับอุปกรณ์ในระบบได้ แอมโมเนียจะกัดโลหะที่ไม่ใช่เหล็กและสแตนเลส เช่น ทองแดง ทองเหลือง เป็นต้น ถ้ามีการรั่วไหลจะมีฟองเกิดขึ้น ข้อดีของการใช้แอมโมเนียคือสามารถทำความเย็นได้ที่อุณหภูมิต่ำ หากซื้อได้ง่ายและราคาถูก ด้านความปลอดภัยจะเห็นว่ากลิ่นของแอมโมเนียเป็น Leak detector ที่ดีหากมีการรั่วไหล ในด้านสิ่งแวดล้อม แอมโมเนียเป็นสารทำงานที่มีอยู่ในธรรมชาติ ไม่มีพิษต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะการทำลายชั้นโอโซน แต่มีข้อเสียคือแอมโมเนียเป็นสารพิษต่อร่างกาย

ส่วนสารดูดซับที่เลือกใช้คือ แคลเซียมคลอไรด์เกรดอุตสาหกรรมที่มีความบริสุทธิ์ 70% ซึ่งมีสมบัติดูดความชื้นได้ดี ขณะเดียวกันจะเกิดปฏิกิริยาคายความร้อนซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะของแคลเซียมคลอไรด์อีกทั้งจากงานวิจัยของ Iloeje O.C [1] ที่ทำการศึกษาร่วมกับคู่มือการทำงานในระบบทำความเย็นด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งใช้แอมโมเนียเป็นสารถูกดูดซับ คู่กับสารดูดซับ 5 ชนิด พบว่า การใช้แคลเซียมคลอไรด์คู่กับแอมโมเนียเป็นคู่มือการทำงานที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด

2.3 วัฏจักรของระบบดูดซับไอแอมโมเนียด้วยแคลเซียมคลอไรด์

วัฏจักรของระบบของแข็งกับก๊าซ เป็นผลมาจากคุณสมบัติของสารประกอบฮาไลด์ของโลหะ (Metal halide) ที่สามารถดูดซับแอมโมเนียได้ เช่น แคลเซียมคลอไรด์ และสตรอนเตียมคลอไรด์ ซึ่งใน 1 โมเลกุลสามารถดูดซับแอมโมเนียได้ 4 ถึง 8 โมเลกุล ขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความดัน ระหว่างที่แคลเซียมคลอไรด์ดูดซับไอแอมโมเนียนั้นจะมีความร้อนเกิดขึ้นและคายความร้อนแก่สิ่งแวดล้อม และระหว่างที่แอมโมเนียระเหยแยกตัวออกจากแคลเซียมคลอไรด์ จะดูดความร้อนจากสิ่งแวดล้อม ความร้อนที่คายออกมาหรือดูดเข้าไปมีค่าใกล้เคียงกัน และมีค่าเกือบเป็น 2 เท่าของความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ ดังนั้น ในเชิงทฤษฎีแล้ว COP จึงมีค่าไม่เกิน 0.5 ระบบทำความเย็นแบบดูดซับนี้ มีความลับซับซ้อนน้อยกว่าระบบทำความเย็นแบบดูดซึม ทางเข้าและทางออกของไอแอมโมเนียสามารถใช้ทางเดียวกันได้ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงทางเทอร์โมไดนามิกส์ของแอมโมเนียและแคลเซียมคลอไรด์ สามารถแทนได้ด้วยแผนภาพ ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนภาพทางเทอร์โมไดนามิกส์ของ NH_3 และ CaCl_2

- C→D กระบวนการให้ความร้อนเพื่อระเหยไอแอมโมเนียออกจากแคลเซียมคลอไรด์ จนกระทั่งความดันมากพอที่จะทำให้อิโอมโมเนียควบแน่นที่เครื่องควบแน่น
- D→A กระบวนการแอมโมเนียระเหยแยกตัวออกมาจากแคลเซียมคลอไรด์มาควบแน่นที่เครื่องควบแน่น เป็นกระบวนการซึ่งเกิดขึ้นที่ความดันคงที่

- A→B กระบวนการทำความเย็น แอมโมเนียเปลี่ยนจากของเหลวเป็นไอ ความดันลดลงและอุณหภูมิลดลง
- B→C กระบวนการดูดซับแอมโมเนีย ไอแอมโมเนียที่มาจากเครื่องทำระเหย อุณหภูมิสูงขึ้น แต่ความดันคงเดิม

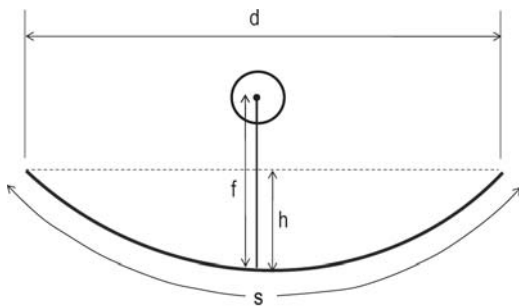
2.4 แผงรับพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลิก [6]

แผงรับรังสีแบบนี้จะมีอุปกรณ์ให้เคลื่อนที่ตามดวงอาทิตย์ (Tracking solar collectors) จะมีผลทำให้แผงรับรังสีสามารถรับรังสีอาทิตย์ได้เต็มที่ตลอดเวลาที่มีแสง และทำให้อุณหภูมิสูงมาก ปัจจุบันแผงรับแสงอาทิตย์แบบนี้จะมีใช้กันอยู่ 2 ชนิด คือจานรวมแสงเป็นจุด (Parabolic dish) และจานรวมแสงเป็นเส้น ซึ่ง เรียกว่า ตัวรับรังสีแบบรางพาราโบลิก (Parabolic trough) มีลักษณะเป็นรางโค้งยาว ผิวด้านในของรางโค้งทำด้วยวัสดุที่มีคุณสมบัติในการสะท้อนแสงได้ดี แสงสะท้อนที่เกิดจากรางพาราโบลิกทุกตำแหน่งตามความยาวของรางจะไปรวมกันที่ท่อรับแสงสะท้อน ลักษณะการรวมแสงแบบนี้เรียกว่าการรวมแสงแบบเส้น (Line concentrating) โดยองค์ประกอบของตัวแผงแสดงได้ดังรูปที่ 2 ซึ่งมีสมการที่ใช้ในการออกแบบ[9] ดังนี้

$$f = \frac{\left(\frac{d}{2}\right)^2}{4h} \quad (1)$$

$$s = \left[\frac{d}{2} \sqrt{\left(\frac{4h}{d}\right)^2 + 1} \right] + (2f) \left(\ln \left[\frac{4h}{d} + \sqrt{\left(\frac{4h}{d}\right)^2 + 1} \right] \right) \quad (2)$$

- เมื่อ h คือ ความลึกของพาราโบลิก
- d คือ ความกว้างของแผง (ความยาวเส้นโค้ง)
- f คือ ระยะโฟกัส
- s คือ ความยาวส่วนโค้งของพาราโบลิก



รูปที่ 2 แผนภาพของตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบพาราโบลิก

3. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การสร้างเครื่องต้นแบบ

เครื่องต้นแบบที่ทำการออกแบบและทดสอบประกอบด้วย อุปกรณ์หลัก คือ แผงรับรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิก เครื่องดูดซับ ถึงพักสารทำความเย็น เครื่องควบแน่นแบบระบายความร้อนด้วยน้ำ และเครื่องทำระเหย

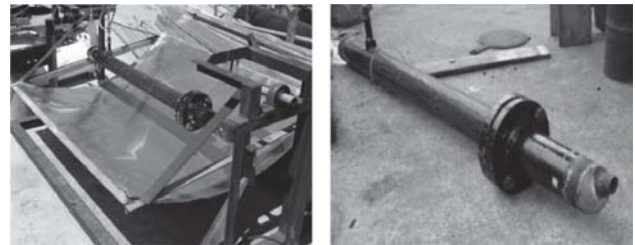
3.1.1 แผงรับรังสีอาทิตย์แบบรางพาราโบลิก

ขนาดของแผงรับรังสีคำนวณได้จากสมการ (1) และ (2) ซึ่งทำจากลูมิเนียมแผ่นเรียบ กว้าง 1.2 m ยาว 1.4 m ขึ้นรูปเป็นทรงพาราโบล่า ปลายขอบของแผงทั้งสองด้าน (ความยาวเส้นโค้ง) ห่างกัน 1.10 m และมีจุดรวมรังสีที่ระยะ 0.378 m ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ใช้วางแนวท่อเจนเนอเรเตอร์ดังรูปที่ 3

3.1.2 เครื่องดูดซับ (Adsorber)

เป็นส่วนที่เกิดปฏิกิริยาดูดซับระหว่างคู่สารทำงาน หากถูกใช้ในกระบวนการผลิตแอมโมเนียเหลวแล้วจะถูกเรียกว่า เจนเนอเรเตอร์ (Generator) ทำหน้าที่ส่งผ่านความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ให้กับแคลเซียมคลอไรด์และระเหยไอแอมโมเนียให้แยกตัวออกจากการดูดซับของแคลเซียมคลอไรด์ ดังนั้นการสร้างเจนเนอเรเตอร์ จึงต้องออกแบบให้มีการส่งผ่านความร้อนได้ดี ทนต่อสภาพความดันสูงและเมื่อทำหน้าที่เป็นเครื่องดูดซับก็ต้องดูดซับไอแอมโมเนียได้ดีด้วย

เครื่องดูดซับที่ใช้ในการศึกษานี้มีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกดังรูปที่ 3 ซึ่งทำจากท่อเหล็กดำเนื่องจากเป็นวัสดุที่มีสมบัติทนต่อการกัดกร่อนของแอมโมเนีย มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 inch ยาว 1.2 m ภายในบรรจุแอมโมเนีย 0.718 kg และแคลเซียมคลอไรด์ 0.836 kg ซึ่งบรรจุในรางที่ทำด้วยแผ่นสแตนเลส ขึ้นรูปโดยการม้วนเป็นครึ่งวงกลม มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.075 m และมีแผ่นกั้นแบ่งเป็น 4 ช่วง เพื่อให้เกล็ดมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และทำการติดตั้ง เกจความดัน (Pressure gauge) ในตำแหน่งปลายท่อเจนเนอเรเตอร์ ที่เป็นทางเข้าและออกของไอแอมโมเนีย สำหรับใช้ในการวัดความดันภายในระบบ



รูปที่ 3 แผงรับรังสีอาทิตย์และเครื่องดูดซับ(ท่อเจนเนอเรเตอร์)

3.1.3 ถึงพักสารทำความเย็น (Receiver)

จากการคำนวณ ทำให้ทราบว่า แอมโมเนียที่ควบแน่นที่เครื่องควบแน่นมีมวล 0.539 kg ซึ่งต้องการถึงเก็บที่มีปริมาตรอย่างน้อย 0.90 Litre สำหรับบรรจุแอมโมเนียเหลว จึงใช้ท่อเหล็กที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.10 m เป็นตัวถัง และเพื่อให้สามารถบรรจุแอมโมเนียได้ตามปริมาณที่คำนวณจะต้องใช้ท่อที่มีความยาวอย่างน้อย 0.115 m ทั้งนี้ใช้ค่าความปลอดภัย 10% ในการเพิ่มขนาดของถังเก็บ ทำให้ได้ขนาดความสูงของถังเก็บคือ 0.127 m และหุ้มฉนวนภายนอกตัวถังเพื่อป้องกันการถ่ายโอนความร้อนจากภายนอกเข้าสู่ระบบดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ถังเก็บแอมโมเนียและรางสแตนเลส

3.1.4 เครื่องควบแน่นแบบระบายความร้อนด้วยน้ำ

เครื่องควบแน่น (Condenser) ใช้สำหรับควบแน่นไอแอมโมเนียที่ถูกส่งมาจากเจนเนอเรเตอร์ให้เป็นแอมโมเนียเหลว ทำจากท่อเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1/2 inch ขดเป็นเกลียวจำนวน 6 ขด เส้นผ่านศูนย์กลางของขดท่อมีขนาด 0.23 m วางอยู่ในถังพลาสติกขนาด 200 Litre ที่ระบายความร้อนด้วยน้ำซึ่งมีปริมาณท่วมคอยล์อยู่ตลอดเวลาเพื่อหล่อเย็น โดยน้ำที่ใช้ในการหล่อเย็นเป็นระบบน้ำหมุนเวียน ซึ่งทำการฉีดน้ำเข้าถังจาก

ด้านล่างจำนวน 1 จุด และปล่อยออกที่ด้านบนของถัง 1 จุด ดังรูปที่ 5 เพื่อให้เกิดการหมุนวนของน้ำเพิ่มการถ่ายโอนความร้อนออกจากโอแอมโมเนียที่มีอุณหภูมิสูง

3.1.5 เครื่องทำระเหย (Evaporator)

ความร้อนที่อยู่รอบๆ เครื่องทำระเหยเป็นความร้อนแฝงในการกลายเป็นไอของละอองแอมโมเนียเหลว เมื่อความร้อนรอบๆ เครื่องทำระเหยถูกแอมโมเนียดูดซับไปเรื่อยๆ จึงเกิดความเย็นขึ้นแทนที่ แล้วโอแอมโมเนียจำนวนนี้จะนำความร้อนไปถ่ายโอนแก่สิ่งแวดล้อมที่เครื่องดูดซับ ซึ่งเครื่องทำระเหยในการศึกษานี้สร้างจากท่อเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1/2 inch ยาว 4.23 m ขดเป็นเกลียวจำนวน 6 ขด วางในถังกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.30 m ภายนอกหุ้มฉนวนเพื่อป้องกันการถ่ายโอนความร้อนจากภายนอกเข้าสู่ระบบดังรูปที่ 5

ในขั้นตอนการออกแบบระบบของทั้งเครื่องควบแน่นและเครื่องทำระเหย ได้คำนึงถึงความเสียหายของท่อที่มีผลต่อการดำเนินการไหลของสารทำความเย็นในระบบที่อยู่ในสถานะไอที่อาศัยแรงลอยตัวเป็นแรงผลักดัน ดังนั้นจึงออกแบบระบบท่อให้มีความต้านทานการไหลน้อยลงโดยการลดข้องอ 90° ให้เป็นข้องอที่มีรัศมีความโค้ง 0.10 และ 0.20 m ตามความเหมาะสมของแต่ละตำแหน่ง



รูปที่ 5 โครงสร้างเครื่องควบแน่นและเครื่องทำระเหย

3.1.6 โคมไฟสปอตไลท์ (Spotlight)

แหล่งความร้อนที่ใช้ทดสอบการทำงานของระบบ ได้ใช้แสงจำลองจากโคมไฟสปอตไลท์ (Spotlight) ซึ่งใช้หลอดทั้งสแตนเลสฮาโลเจน ขนาด 1,500 Watt จำนวน 2 โคม ติดตั้งสูงจากแผงรับแสงอาทิตย์ 0.70 m ซึ่งโคมไฟสปอตไลท์ที่เลือกใช้เป็นโคมที่จุดติดด้วยการป้อนกระแสเข้าไปเผาไส้หลอดให้ร้อน ซึ่งสามารถจุดติดหลอดได้ทันทีเมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าโดยไม่ต้องเสียเวลาอุ่นหลอดให้ร้อนเช่นหลอดไฟจำพวกหลอดปล่อยประจุก๊าซอื่นๆ (Discharge lamp) และสมบัติที่สำคัญอย่างยิ่งคือหลอดประเภทนี้ให้สเปกตรัมของแสงใกล้เคียงกับแสงธรรมชาติมากที่สุด

3.1.7 สมบัติคูสารทำงาน

สมบัติของคูสารทำงานที่ใช้คือแอมโมเนีย (NH₃) ความบริสุทธิ์ที่ 99% บรรจุในถังเก็บแอมโมเนียดังรูปที่ 6 และเกลือแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl₂) เกรดอุตสาหกรรม 70%

3.1.8 วาล์ว

วาล์วทุกตัวเป็นวาล์วที่ใช้กับแอมโมเนียโดยเฉพาะ ซึ่งวาล์วจำพวกนี้จะมีลิ้นภายในที่เป็นเหล็ก ซึ่งแอมโมเนียไม่ทำปฏิกิริยา (กัดกร่อน) กับเหล็กและสแตนเลส ซึ่งวาล์วที่ใช้ในระบบทุกตัวเป็น Stainless

ball valve ยกเว้นในส่วนของวาล์วที่ทำหน้าที่เป็น Throttling device ได้ใช้เป็น Globe valve แล้วใช้การปรับหรืออัตราการไหลของสารทำความเย็นให้เหมาะสมแทน

3.1.9 เกจวัดความดันและอุณหภูมิ

เกจวัดความดันที่เลือกใช้เป็นชนิดที่ตัวเรือนและเกลียวทั้งชุดทำด้วยสแตนเลส หน้าปัดกว้าง 3 inch ชนิดของเกลียวเป็นแบบออกข้าง และมีย่านการวัดอยู่ในช่วง 0 ถึง 25 barg หัววัดอุณหภูมิที่สัมผัสกับแอมโมเนียโดยตรงได้เลือกใช้หัววัดอุณหภูมิที่มีไส้เป็นเทอร์โมคัปเปิลชนิดเค (type K) และปลอกทำด้วยสแตนเลส ดังรูปที่ 6 ส่วนหัววัดอุณหภูมิที่ไม่ได้สัมผัสกับแอมโมเนียโดยตรงได้เลือกใช้สายเทอร์โมคัปเปิลชนิดเค แล้วทำการตีเกลียวที่ปลายสายเพื่อทำหน้าที่เป็นหัววัด

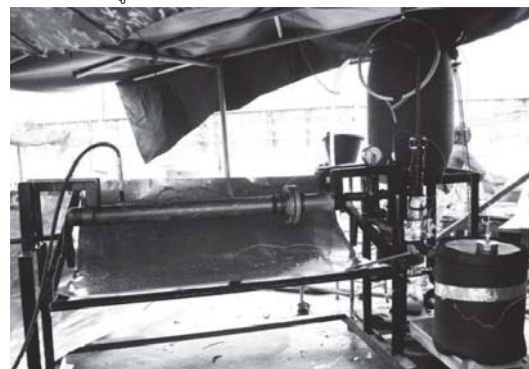


รูปที่ 6 ถังเก็บแอมโมเนียบริสุทธิ์ หัววัดอุณหภูมิและ Pressure gauge

3.1.10 เครื่องบันทึกอุณหภูมิแบบต่อเนื่อง

เพื่อประสิทธิภาพในการติดตามและวิเคราะห์ผลการทำงานเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรของชุดทดสอบคือค่าอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งตรวจวัดต่างๆ จึงทำการเลือกใช้การบันทึกข้อมูลแบบต่อเนื่องด้วยเครื่อง Data logger ยี่ห้อ YOKOGAWA รุ่น MW100 จำนวน 20 ช่องสัญญาณที่สามารถสังเกตและติดตามการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิแบบ Real time พร้อมแปลงข้อมูลจากเครื่องวัดเข้าสู่โปรแกรม Microsoft Excel ได้อีกด้วย

เมื่อทำการประกอบชิ้นส่วนและอุปกรณ์ต่างๆ เสร็จสมบูรณ์จะได้เครื่องต้นแบบดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ชุดทดลองที่ประกอบแล้วเสร็จ

3.2 การเตรียมและทดสอบระบบ

3.2.1 ทดสอบการรับแรงดัน

การทดสอบ Hydro test หรือ ทดสอบอัดแรงดัน มีจุดประสงค์เพื่อทดสอบความสามารถในการรับแรงดันของถัง ซึ่งในเงื่อนไขของ ASME Code ระบุไว้อย่างกว้างๆ ว่า ภาชนะที่มีส่วนของพื้นผิวรับแรงดัน เกิน 14.7

psi (0.9996 barg) จะขึ้นชื่อว่า เป็นถึงรับแรงดันทั้งสิ้น ซึ่งควรต้องทำการทดสอบการรับแรงดัน โดยมีขั้นตอนกล่าวพอสังเขปโดยเริ่มต้นจากทดสอบความพร้อมของอุปกรณ์และข้อต่อต่างๆ แล้วเติมน้ำเข้าไปในระบบช้าๆ โดยใช้ hand pump ทำการเพิ่มแรงดันน้ำแบ่งเป็น 2 ช่วงคือ 50%(12 barg) ทิ้งไว้ 30 นาที และ 100% (24 barg) ทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง แล้วทำการตรวจสอบรอยรั่วซึมด้วยตาเปล่าอีกครั้ง เมื่อตรวจสอบแล้วจึงทำการระบายน้ำออกเพื่อลดความดันจนเท่ากับบรรยากาศแล้วเปิดวาล์วระบายอากาศ (Vent) และวาล์วระบายน้ำออก (Drain) ตามลำดับ ในขั้นตอนนี้มีข้อควรระวังคือ จะต้องเปิดวาล์วระบายอากาศออกก่อน มิฉะนั้น ในขณะที่ระบายน้ำออกจะเกิดสุญญากาศขึ้นในตัวอุปกรณ์และตัวอุปกรณ์อาจเกิดการเสียหายได้และขั้นตอนสุดท้ายคือการไล่ความชื้นและอากาศ โดยการเป่าก๊าซไนโตรเจนที่แรงดัน 0.5 barg เพื่อไล่อากาศและความชื้นออกให้หมดหรือให้เหลือน้อยที่สุด

3.2.2 ไล่ความชื้นออกจากระบบ

ในขั้นตอนนี้จะต้องใช้เวลามากพอสมควร โดยในการศึกษานี้ ใช้เซอร์วิสวาล์ว(Service valve)ที่เจนเนอเรเตอร์ เป็นทางเข้าของก๊าซไนโตรเจน โดยอัดก๊าซเข้าไปผ่านระบบที่ความดัน 0.3 barg เป็นเวลา 6-7 ชั่วโมง แล้วปล่อยออกที่เซอร์วิสวาล์วของเครื่องควบแน่นและเครื่องระเหย

3.2.3 ทดสอบการรั่วซึม (Air leakage test)

เนื่องจากเครื่องทำความเย็นแบบดูดซับทำงานภายใต้ความดันที่สูงกว่าความดันบรรยากาศภายนอก จึงมักจะประสบปัญหาการรั่วซึมของสารทำความเย็น ดังนั้นเมื่อทำการประกอบส่วนต่างๆ ของเครื่องทำความเย็นแล้วต้องทำการทดสอบหาจุดรั่วซึมของระบบซึ่งสามารถทำได้โดยอัดก๊าซไนโตรเจนเข้าระบบที่ความดัน 10 barg แล้วทำการฉีดด้วยน้ำสบู่เข้มข้นในตำแหน่งของรอยเชื่อมที่ข้อต่อ หน้างาน(Flange) หากมีการรั่วซึมจะเกิดเป็นฟองสบู่ให้เห็น แล้วจึงปล่อยก๊าซออกจากระบบให้หมด

3.2.4 การทำสุญญากาศระบบ

ทำได้โดยการใช้ปั๊มสุญญากาศสำหรับลดแรงดันในระบบและอัดทั้งสู่อากาศภายนอก โดยใช้เซอร์วิสวาล์วที่เครื่องควบแน่นเป็นจุดดูดอากาศออกให้มีความดันต่ำกว่าบรรยากาศเล็กน้อยเพื่อหลีกเลี่ยงการปนเปื้อนของเกลือแคลเซียมคลอไรด์ที่ออกจากระบบพร้อมกับอากาศที่ดูดออกมาซึ่งใช้เวลาในการดูดความชื้นอย่างน้อย 20 นาที แล้วจึงทำการเติมสารทำความเย็น

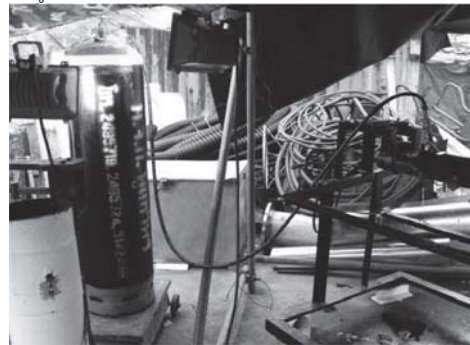
3.2.5 การบรรจุคู่อสารทำงาน

ทำการบรรจุเกลือแคลเซียมคลอไรด์ในปริมาณ 1 kg โดยแบ่งเกลือใส่ในรางสแตนเลสดังรูปที่ 8 ในปริมาณเท่าๆ กันและสม่ำเสมอ แล้วจึงเปิดโคมไฟ spot light ส่องให้ความร้อนกับเกลือในรางประมาณ 30 นาที แล้วจึงทำการสอดรางบรรจุเกลือเข้าไปในเจนเนอเรเตอร์ หลังจากนั้นทำการดูดอากาศและความชื้นออกจากระบบอีกครั้งโดยใช้ปั๊มสุญญากาศ



รูปที่ 8 รางใส่เกลือแคลเซียมคลอไรด์ที่อยู่ภายในเจนเนอเรเตอร์

ขั้นตอนถัดไปคือ การเติมแอมโมเนียเข้าไปในระบบ ซึ่งจะทำการเติมแอมโมเนียเข้าไปในสภาวะไอให้เกลือแคลเซียมคลอไรด์ดูดซับไออนแอมโมเนียไว้ที่ผิว ก่อนอื่นต้องทำการปิดวาล์วที่เครื่องระเหยและที่เครื่องควบแน่นเพื่อกักแอมโมเนียไว้เฉพาะในส่วนของเจนเนอเรเตอร์ แล้วจึงทำการเติมแอมโมเนียโดยการส่องโคมไฟ Spotlight ให้กับถังเก็บแอมโมเนียเพื่อเพิ่มความดันและทำให้แอมโมเนียอยู่ในสถานะไอ ในส่วนของท่อเจนเนอเรเตอร์นั้นได้ทำการหล่อเย็นด้วยน้ำแข็งให้มีความดันต่ำกว่าฝั่งทางด้านถังเก็บแอมโมเนีย ทั้งนี้เพื่อให้เกิดความแตกต่างของความดันช่วยในการอัดไออนแอมโมเนียเข้าไปในท่อเจนเนอเรเตอร์ได้มากขึ้น ซึ่งปริมาณแอมโมเนียที่เติมเข้าไปในระบบทราบได้จากการอ่านค่าจากตาซึ่งจะแสดงน้ำหนักของถังที่ลดลง ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 การบรรจุไออนแอมโมเนียเข้าไปในระบบ

3.2.6 การสอบเทียบเครื่องมือวัดอุณหภูมิ

ได้ทำการสอบเทียบเครื่องมือวัดอุณหภูมิคือสายเทอร์โมคัปเปิล Type K ที่ศูนย์สอบเทียบ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน โดยใช้ Dry well เป็นแหล่งกำเนิดอุณหภูมิตามค่าที่ป้อน ในที่นี้ได้ทำการสอบเทียบที่ 40 °C ซึ่งผลการสอบเทียบพบว่า มีค่าความคลาดเคลื่อนของผลการตรวจวัดอยู่ในช่วง ± 1.0 °C หากต้องการความแม่นยำของค่าตรวจวัดมากขึ้น สามารถทำได้โดยการสอบเทียบที่ทุกๆ ช่วงอุณหภูมิใช้งานเนื่องจากในแต่ละช่วงอุณหภูมิจะมีค่าความคลาดเคลื่อนที่แตกต่างกัน

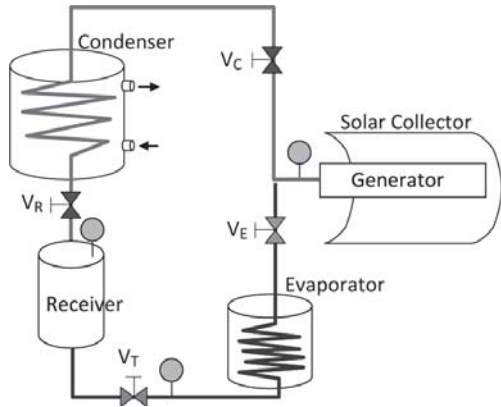
3.3 วิธีกรทดสอบ

แบ่งเป็น 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนการผลิตแอมโมเนียเหลว และขั้นตอนการทำความเย็น โดยมีตำแหน่งติดตั้งวาล์วดังรูปที่ 10 เพื่อควบคุมการไหลของสารทำความเย็น

3.3.1 ขั้นตอนการผลิตแอมโมเนียเหลว

เป็นกระบวนการที่ให้ความร้อนแก่เครื่องดูดซับเพื่อที่จะทำให้แอมโมเนียระเหยแยกตัวออกมาจากแคลเซียมคลอไรด์ ไปควบแน่นที่เครื่องควบแน่นได้แอมโมเนียเหลวอยู่ในถังเก็บ มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

- 1) เริ่มต้นจากการส่องโคมไฟให้กระทบแผงรับรังสี แล้วเปิดวาล์ว V_C ในขณะที่วาล์วอื่นๆ ยังคงอยู่ในสถานะปิด เริ่มบันทึกค่าอุณหภูมิและความดัน
- 2) เมื่อความดันเริ่มมีค่าคงที่ นั่นหมายถึงไออนแอมโมเนียเริ่มควบแน่นของเหลว ให้เปิดวาล์ว V_R เพื่อให้แอมโมเนียเหลวความดันสูงไหลไปเก็บสะสมไว้ที่ Receiver
- 3) เมื่อไออนแอมโมเนียระเหยหมดไปจากท่อเจนเนอเรเตอร์แล้ว สังเกตจากความดันเริ่มลดลง ให้ทำการปิดวาล์ว V_R
- 4) ปล่อยให้เจนเนอเรเตอร์เย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิอากาศแวดล้อม



รูปที่ 10 แผนผังส่วนประกอบของระบบทำความเย็นแบบดูดซับ

3.3.2 ขั้นตอนการทำความเย็น

เป็นกระบวนการสร้างความเย็นที่เครื่องทำระเหย หลังจากทีเครื่องดูดซับเย็นตัวลงเท่ากับอุณหภูมิอากาศแวดล้อม แล้วเปิดวาล์วเพื่อให้แอมโมเนียเหลวความดันสูงจากถังเก็บฉีดผ่านวาล์วลดความดันแล้วเข้าไปดูดซับความร้อนภายในเครื่องทำระเหย และแอมโมเนียก็จะถูกแคลเซียมคลอไรด์ดูดติดผิวเอาไว้ภายในชุดดูดซับ โดยทำการทดสอบระบบภายใต้สภาวะของการลดความดันที่เครื่องดูดซับให้เหลือ 1 barg พร้อมหล่อเย็นผิวนอกของเครื่องดูดซับเพื่อช่วยลดความดันภายในระบบ โดยมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

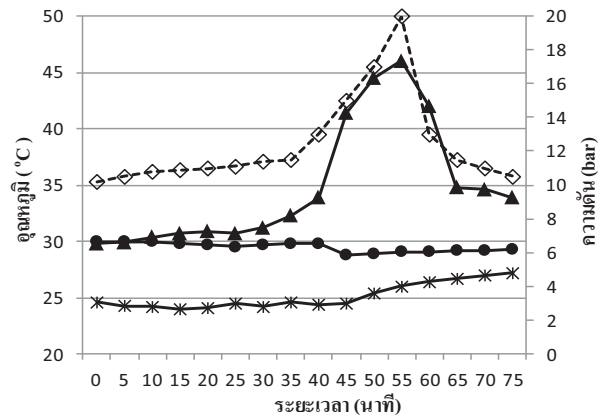
- 1) เติมน้ำ 0.3 Litre ลงในภาคน้ำอุณหภูมิเย็นแล้วทำการปิดเครื่องทำระเหยให้แน่นให้มีการไหลเข้าหรือออกของอากาศน้อยที่สุด
- 2) ลดความดันที่เครื่องดูดซับลงเป็น 1 barg
- 3) ใช้น้ำแข็งหล่อเย็นเครื่องดูดซับโดยควบคุมให้อุณหภูมิผิวของเครื่องดูดซับต่ำกว่า 10 °C
- 4) เปิดวาล์ว V_E แล้วค่อยๆ หรีวาล์ว V_T เพื่อลดความดันและอุณหภูมิ
- 5) บันทึกอุณหภูมิ และความดัน จนกระทั่งแอมโมเนียระเหยหมด วัฏจักรการทำความเย็นจึงครบวัฏจักร
- 6) ทำการปิดวาล์วทุกตัว แล้วสังเกตผลที่เกิดขึ้นกับน้ำในภาคน้ำและอากาศภายในเครื่องทำระเหย

4. การทดลองและการวิเคราะห์ผล

จากการทดลองในหัวข้อ 3.3 ได้ทำการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอุณหภูมิในระบบ ซึ่งมีรายละเอียดการวิเคราะห์ดังนี้

4.1 ผลการทดลองในขั้นตอนการผลิตแอมโมเนียเหลว

เป็นขั้นตอนการให้ความร้อนแก่เกลือแคลเซียมคลอไรด์เพื่อระเหยแอมโมเนียออกจากเจนเนอเรเตอร์ไปควบแน่นเป็นแอมโมเนียเหลวที่เครื่องควบแน่นแล้วไหลลงไปเก็บที่ถังพักความดัน สภาวะเริ่มต้นการทดลองที่ทอเจนเนอเรเตอร์มีความดันในระบบ 10 barg และแอมโมเนียมีอุณหภูมิใกล้เคียงอากาศแวดล้อมคือ 28.8 °C เมื่อให้ความร้อนจากแสงจำลองไปเรื่อยๆ จะพบว่าอุณหภูมิและความดันของระบบเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆอย่างช้าๆ หลังจากนั้นอุณหภูมิและความดันของระบบจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วทั้งนี้เนื่องจากความร้อนที่ป้อนแก่ระบบในช่วงเริ่มต้นต้องสูญเสียไปกับการเพิ่มอุณหภูมิให้กับโครงสร้างของทอเจนเนอเรเตอร์ รวมถึงการทำให้เกลือและแอมโมเนียมีอุณหภูมิสูงขึ้น และการพาความร้อนที่ผิวนอกของทอเจนเนอเรเตอร์ จึงทำให้ช่วงแรกของการป้อนความร้อนส่งผลต่อการเพิ่มอุณหภูมิและความดันในอัตราที่ช้า



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความดันที่ตำแหน่งต่างๆ ในกระบวนการผลิตแอมโมเนียเหลว

จากรูปที่ 11 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความดันที่ตำแหน่งต่างๆ ในกระบวนการผลิตแอมโมเนียเหลว พบว่าเมื่อให้ความร้อนจนทำให้แอมโมเนียมีอุณหภูมิสูงขึ้นจนถึงช่วง 45-50 °C แล้ว หลังจากนั้นอุณหภูมิของแอมโมเนียที่แยกตัวออกจากเกลือแคลเซียมคลอไรด์มีค่าต่ำลง เนื่องจากแอมโมเนียเริ่มควบแน่นเป็นของเหลวที่เครื่องควบแน่น ทำให้แอมโมเนียที่อยู่ภายในทอเจนเนอเรเตอร์มีปริมาณค่อยๆ ลดลงจึงส่งผลต่อการลดลงของค่าอุณหภูมิดังกล่าว อีกทั้งความดันในระบบมีค่าลดลงด้วยเช่นกันเนื่องจากการเปิดวาล์วเพื่อให้แอมโมเนียเหลวไหลลงไปที่ถังพักความดัน แต่ความดันในช่วงที่แอมโมเนียควบแน่นมีค่าค่อนข้างคงที่เนื่องจากแอมโมเนียถ่ายโอนความร้อนในรูปของความร้อนแฝงในการเปลี่ยนสถานะให้กับน้ำซึ่งทำหน้าที่เป็นสารหล่อเย็นในเครื่องควบแน่นกลายเป็นแอมโมเนียเหลว โดยค่าความดันและอุณหภูมิเฉลี่ยในช่วงที่แอมโมเนียควบแน่นมีค่าอยู่ที่ 11.4 barg และ 26.4 °C ตามลำดับ ซึ่งจากกราฟสมบัติของแอมโมเนียใน P-h diagram พบว่าอยู่ในขอบเขตที่แอมโมเนียมีสถานะเป็นของเหลว

หากพิจารณาเส้นกราฟของอุณหภูมิภายในถังพักความดันเมื่อเวลาผ่านไป 45 นาที พบว่ามีแนวโน้มสูงขึ้นเนื่องจากในระหว่างกระบวนการควบแน่นแอมโมเนียไปเป็นแอมโมเนียเหลวนั้นเป็นกระบวนการคายความร้อนแฝงจึงส่งผลให้อุณหภูมิแอมโมเนียในถังพักความดันมีค่าสูงขึ้น หรืออีกนัยหนึ่งอาจเนื่องมาจากพลังงานความร้อนบางส่วนที่เกินจากความร้อนแฝงในการเปลี่ยนสถานะ ที่ได้รับจากทอเจนเนอเรเตอร์นั้นไม่สามารถระบายออกสู่เครื่องควบแน่นได้ทั้งหมด

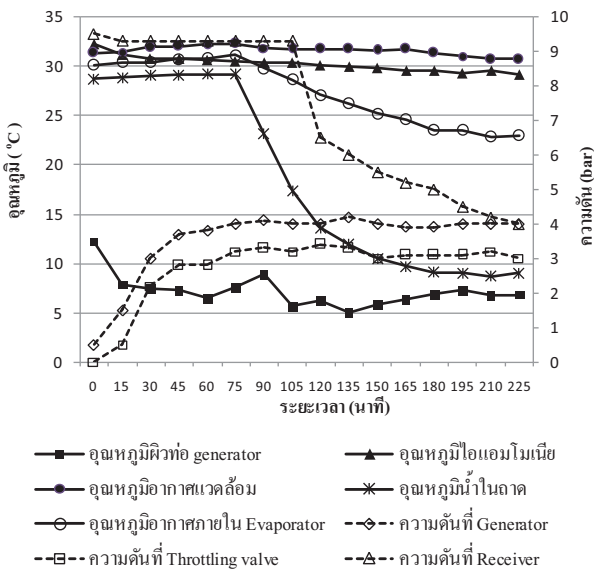
หากพิจารณาเฉพาะในส่วนของการลดอุณหภูมิของภาชนะการทำความเย็นซึ่งก็คือน้ำและอากาศภายในเครื่องทำระเหย ดังแสดงในรูปที่ 12 จะพบว่า ในช่วง 75 นาทีแรก อุณหภูมิของอากาศ น้ำ และแอมโมเนียที่ฉีดผ่านวาล์วลดความดันยังคงมีค่าใกล้เคียงกันคือ เปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 26-30 °C ทำให้เกิดการถ่ายโอนความร้อนระหว่างกันน้อยมาก ซึ่งในช่วงที่ความดันของแอมโมเนียมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ จากเดิม 0 จนถึง 3 barg พบว่า ที่ค่าความดันค่านี้อาจส่งผลให้อุณหภูมิของแอมโมเนียที่ฉีดผ่านวาล์วลดความดันมีค่าลดลง ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำ อากาศกับแอมโมเนียซึ่งอยู่ภายในคอยล์ของเครื่องทำระเหย ส่งผลให้อุณหภูมิของ

4.2 ผลการทดลองในขั้นตอนการทำความเย็น

หากพิจารณาเฉพาะในส่วนของการลดอุณหภูมิของภาชนะการทำความเย็นซึ่งก็คือน้ำและอากาศภายในเครื่องทำระเหย ดังแสดงในรูปที่ 12 จะพบว่า ในช่วง 75 นาทีแรก อุณหภูมิของอากาศ น้ำ และแอมโมเนียที่ฉีดผ่านวาล์วลดความดันยังคงมีค่าใกล้เคียงกันคือ เปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 26-30 °C ทำให้เกิดการถ่ายโอนความร้อนระหว่างกันน้อยมาก ซึ่งในช่วงที่ความดันของแอมโมเนียมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ จากเดิม 0 จนถึง 3 barg พบว่า ที่ค่าความดันค่านี้อาจส่งผลให้อุณหภูมิของแอมโมเนียที่ฉีดผ่านวาล์วลดความดันมีค่าลดลง ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำ อากาศกับแอมโมเนียซึ่งอยู่ภายในคอยล์ของเครื่องทำระเหย ส่งผลให้อุณหภูมิของ

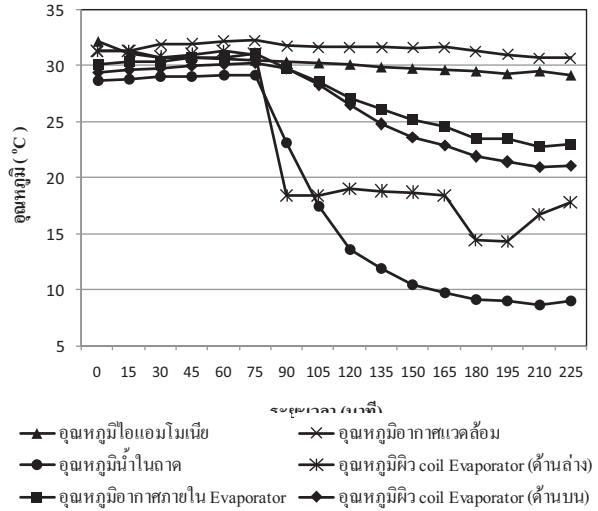
น้ำและอากาศลดต่ำลงเรื่อยๆ และเริ่มคงที่หลังจากผ่านไป 225 นาที ซึ่งในช่วงเวลาดังกล่าว อุณหภูมิของน้ำและอากาศมีค่าต่ำที่สุดอยู่ที่ 9°C และ 23 °C ตามลำดับ

จากรูปที่ 12 ทำการพิจารณาความดันในระบบ พบว่าเมื่อเวลาผ่านไป 45 นาที ความดันสูงขึ้นจนถึง 3-4 barg แล้วค่อนข้างคงที่ที่ความดันในช่วงนี้ตลอดกระบวนการทำความเย็น นั่นคือช่วงความดันดังกล่าวเป็นช่วงที่แอมโมเนียดูดซับความร้อนแฝงกลายเป็นความร้อนแฝงเพื่อเปลี่ยนสถานะเป็นไอแอมโมเนียแล้วลอยตัวกลับเข้าไปที่ท่อเจเนอเรเตอร์อีกครั้งทำให้ความดันในระบบไม่สูงกว่านี้มากนัก ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าความดันที่เจเนอเรเตอร์มีค่าสูงกว่าความดันที่เครื่องทำระเหยทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิของแอมโมเนียสูงขึ้นส่งผลต่อค่าความดันที่เพิ่มขึ้นด้วยแต่ความดันสูงขึ้นไม่มากเนื่องจากความร้อนที่เกิดจากการคายความร้อนของไอแอมโมเนียเพื่อจับที่ผิวของแคลเซียมคลอไรด์นั้นเกิดการถ่ายโอนกับอากาศแวดล้อมภายนอกท่อเจเนอเรเตอร์



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความดันที่ตำแหน่งต่างๆ ในกระบวนการทำความเย็น

หากทำการเปรียบเทียบ อุณหภูมิ น้ำ ฝิวคอยล์และอากาศภายในเครื่องทำระเหย พบว่าอากาศมีอุณหภูมิสูงกว่าฝิวคอยล์ด้านบนและสูงกว่าน้ำ เนื่องจากตำแหน่งติดตั้งหัววัดอุณหภูมิอากาศอยู่ในระดับเดียวกับคอยล์ด้านบน ดังนั้นจึงได้รับอิทธิพลจากอากาศร้อนที่ลอยตัวและนั่งอยู่ส่วนบนซึ่งเกิดการแยกชั้นเนื่องจากความแตกต่างอุณหภูมิของอากาศภายในเครื่องทำระเหยอย่างชัดเจน กลายเป็นฉนวนอากาศปิดกั้นการถ่ายโอนความร้อนระหว่างอากาศทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศสูงกว่าน้ำ อีกทั้งถาดน้ำวางไว้ที่ตำแหน่งล่างสุดชิดกับคอยล์ส่วนล่างที่เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดีกับแอมโมเนียภายในคอยล์ทำให้อุณหภูมิ น้ำลดต่ำลงได้มาก ซึ่งปัญหาการเป็นฉนวนอากาศภายในเครื่องทำระเหย คาดว่าสามารถแก้ไขด้วยการลดจำนวนคอยล์ ลดขนาดเครื่องทำระเหย เพิ่มปริมาณสารทำความเย็นในระบบ หรือทำให้เกิดการหมุนเวียนของอากาศภายใน



รูปที่ 13 กราฟเปรียบเทียบการทำความเย็นภายใน Evaporator

จากรูปที่ 13 เมื่อทำการเปรียบเทียบ อุณหภูมิฝิวคอยล์ของเครื่องทำระเหยด้านบนและด้านล่าง จะเห็นว่าแนวโน้มของอุณหภูมิฝิวคอยล์ด้านล่างมีค่าต่ำกว่าด้านบน สืบเนื่องจากการทดลองในกรณีที่มีการทำความเย็นมีเฉพาะอากาศพบว่า มีเกล็ดน้ำแข็งจากไอน้ำในอากาศเกาะที่คอยล์ 2 ขดล่างเท่านั้น ซึ่งอาจเกิดจากสารทำความเย็นเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนเฉพาะในช่วง 2 ขดแรกที่เข้าสู่เครื่องทำระเหยแล้วถึงความร้อนโดยรอบเพื่อทำให้เปลี่ยนสถานะเป็นไอแอมโมเนียและลอยตัวขึ้นไปสู่ขดคอยล์ด้านบนแต่เนื่องจากแอมโมเนียได้รับความร้อนมากพอจนกลายเป็นไออ้อมตัวจึงไม่เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ขดคอยล์ด้านบน ดังนั้นจึงทำให้เกิดแนวโน้มของผลต่างฝิวคอยล์ที่ด้านบนและล่าง ดังกล่าวข้างต้น

5. สรุป

จากการศึกษาระบบทำความเย็นโดยการสร้างเครื่องทำน้ำแข็งพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยระบบทำความเย็นแบบดูดซับไอแอมโมเนีย สามารถสรุปได้ว่า ระบบการทำงานของเครื่องต้นแบบเป็นการทำความเย็นแบบดูดซับแบบไม่ต่อเนื่อง โดยใช้แอมโมเนียเป็นสารทำความเย็นและเกลือแคลเซียมคลอไรด์เป็นสารดูดซับ ซึ่งใช้แสงจำลองจากโคมไฟสนามเป็นแหล่งความร้อน ร่วมกับแผงรับรังสีแบบพาราโบลา วัฏจักรการทำงานแบ่งเป็น 2 ช่วง ซึ่งช่วงแรกคือ ขั้นตอนการผลิตแอมโมเนีย เป็นขั้นตอนที่ท่อเจเนอเรเตอร์ได้รับความร้อนจากแหล่งความร้อน ทำให้อุณหภูมิและความดันสูงขึ้นจนถึงช่วงที่ทำให้แอมโมเนียระเหยเป็นไอหลุดจากการเกาะที่ผิวแคลเซียมคลอไรด์ไปควบแน่นเป็นแอมโมเนียเหลวที่เครื่องควบแน่นเก็บไว้ที่ถังพักความดัน หลังจากนั้นจะเข้าสู่กระบวนการที่สองคือ การทำความเย็นโดยการฉีดแอมโมเนียเหลวที่ผลิตได้ผ่านวาล์วลดความดัน ทำให้มีอุณหภูมิและความดันลดลง สามารถที่จะรับความร้อนจากภาระการทำความเย็นในเครื่องทำระเหยเพื่อเป็นความร้อนแฝงในการกลายเป็นไอแอมโมเนียลอยตัวกลับไปที่เครื่องดูดซับและเกาะที่ผิวของเกลือแคลเซียมอีกครั้ง จึงครบวัฏจักรการทำงาน

จากการศึกษาข้างต้นพบว่า เครื่องต้นแบบไม่สามารถทำน้ำแข็งได้แต่สามารถทำน้ำเย็นได้ที่อุณหภูมิต่ำสุดคือ 9°C ซึ่งทางคณะผู้ทำการศึกษาจะทำการพัฒนาและแก้ไขปัญหาดังกล่าวตามแนวทางที่จะนำเสนอในหัวข้อถัดไปซึ่งคาดว่าสามารถที่จะผลิตน้ำแข็งได้ตามการออกแบบ

ปัญหาและแนวทางแก้ไข

- 1) แอมโมเนียที่อัดเข้าไปในท่อเงินเนอเรเตอร์มีความดันเริ่มต้นที่ 10 barg ซึ่งเป็นความดันของถังเก็บแอมโมเนีย ดังนั้นในขั้นตอนการทำความเย็นจำเป็นต้องลดความดันของท่อเงินเนอเรเตอร์ก่อนเริ่มขั้นตอนเพื่อให้เกิดความแตกต่างความดันกับเครื่องทำระเหย
แนวทางแก้ไข : หากไม่ต้องการลดความดันในระบบก่อนเข้าสู่กระบวนการทำความเย็น ต้องทำระบบให้เป็นสุญญากาศเพื่อดูดก๊าซแอมโมเนียเข้าไปในระบบ
- 2) การแยกชั้นของอากาศทำให้เกิดการเป็นฉนวนอากาศภายในเครื่องทำระเหยทำให้ไม่สามารถทำความเย็นได้อย่างทั่วถึง
แนวทางแก้ไข : เพิ่มระบบหมุนเวียนอากาศภายในเครื่องทำระเหยแบบ Hybrid cooling system ช่วยกระจายความเย็น
- 3) พื้นที่ภายในเครื่องทำระเหยไม่เหมาะสมกับความสามารถในการทำความเย็นของสภาวะที่ทำการทดสอบ
แนวทางแก้ไข : ในเบื้องต้นจะทำการลดพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนของคอยล์โดยคงจำนวนขดคอยล์ไว้เท่าเดิม หลังจากนั้นจะทำการเพิ่มปริมาณสารทำความเย็น

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณคณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและศูนย์บริการวิชาการและสอบเทียบ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน ห้างหุ้นส่วนจำกัด พูนทวีพร บริษัท ไทย แทงค์ เทอร์มินอล จำกัด และ บริษัท บัลมอรัล จำกัด ที่ให้การสนับสนุนวัสดุอุปกรณ์เพื่อการศึกษา มา ณ โอกาสนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Iloje O.C. 1995. Treatments of Calcium Chloride for use as a Solid Absorber in Solar Powered Refrigeration, Technical Report No. SE-I, Oct 1982, Solar Energy Project, Univ. of Nigeria, Nsukka.
- [2] K.Sumathy, Li Zhongfu. 1999. Experiment with solar-powered adsorption ice-maker, Renewable energy. 16: 704-707
- [3] Li, M., Wang, C.J. Sun, R.Z., Xu, and W.D. Cai. 2004. Development of no valve solar ice maker, Applied thermal engineering. 24: 865-872
- [4] Li, M., Wang, R.Z., Xu, Y.X., Wu, J.Y. and Dieng, A.D. 2002. Experimental study on dynamic performance analysis of a flat-plate solar solid-adsorption refrigeration for ice maker, Renewable energy. 27: 211-221
- [5] จาริส เกาทัณฑ์ทอง และอินทิรา แก้วช่วง. “เครื่องทำความเย็นแบบดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์”. ปริญญาโท วิทยาศาสตร์บัณฑิต (วิทยาศาสตร์ประยุกต์) คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2550
- [6] ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์. อนุกรมพลังงานนอกแบบและการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ เล่มที่ 1 การแผ่รังสีดวงอาทิตย์ และตัวรับรังสี. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2531

- [7] พีระพงษ์ ถ้าอุทก “การพัฒนากระบวนการทำความร้อนและความเย็นแบบดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์”. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2550
- [8] สมัคร แสงอรุณ. “การศึกษาระบบทำความเย็นที่ใช้แคลเซียมคลอไรด์”. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (การสอนฟิสิกส์) คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2531
- [9] W.B.Stine and R.W.Harrigan. “Solar Energy Systems Design”. : John Wiley and Sons, 1986.

ประวัติผู้เขียนบทความ



นายมานพ พิพัฒน์หัตถกุล
อาจารย์ประจำคณะวิศวกรรมศาสตร์
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน



นางสาวจรุณี เช็มพิลา
ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรี ชั้นปีที่ 4
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน



นายธราพงษ์ โคตรแปร
ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรี ชั้นปีที่ 4
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

งานวิจัยที่สนใจ Solar powered adsorption refrigeration, Solar ice maker, Solar application