



## ประสบการณ์ในการสร้างและทดสอบเครื่องผลิตน้ำแข็งที่ใช้ระบบทำความเย็นแบบดูดซับ จากพลังงานแสงอาทิตย์

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

มานพ พิพัฒน์ตฤณกุล, จารุณี เข็มพิลา และรา芳งษ์ โคตรแปร

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

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

## บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษาการสร้างและทดสอบการทำงานของเครื่องท่าน้ำแข็งที่ใช้ระบบทำความเย็นแบบดูดซึบจากพลังงานแสงอาทิตย์ ที่ประกอบด้วย 6 อุปกรณ์หลัก คือ เครื่องดูดซึบ-อุ่นเงิน เนอเรเตอร์ ถังพักสารทำความเย็น เครื่องควบคุมน้ำแบบระบบายความร้อนด้วยน้ำ วัสดุลดความดัน เครื่องทำระเบย และแผงรับรังสีอาทิตย์ เป็นแบบร่างพาราโบลิก โดยใช้แอมโมเนียม(สารทำความเย็น) และแคลเซียมคลอไรด์(ตัวดูดซึบ) เป็นคู่สารทำงานและใช้คอมพลอดหังสตีนไฮโลเจน 1,500 Watt เป็นแหล่งความร้อนเนื่องจากเป็นการทดลองในฤดูฝน วัจัยการการทำงานของระบบมี 2 ขั้นตอนคือขั้นตอนการผลิตแอมโมเนียมเหลวและขั้นตอนการทำงานทำความเย็น

จากการศึกษาความสัมพันธ์ของความดันและอุณหภูมิที่เกี่ยวข้องพบว่า ในขั้นตอนการผลิตแอมโมเนียเหลวน้ำ เมื่อไอแอมโมเนียมีอุณหภูมิสูงขึ้นจนถึงช่วง 45-50°C ทำให้ความดันในระบบมีค่าประมาณ 20 barg ซึ่งมีผลทำให้อเมโนมโนเนียเริ่มควบแน่นที่เครื่องควบแน่นได้เป็นแอมโมเนียเหลวเก็บไว้ที่ถังพักความดัน ซึ่งอุณหภูมิและความดันเฉลี่ยของการควบแน่นมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 26.4°C และ 11.4 barg ตามลำดับ ส่วนขั้นตอนการทำความเย็นนั้น เริ่มจากฉีดแอมโมเนียเหลวที่ผลิตได้ผ่านวาล์วลดความดันเพื่อไปถูกดับชับความร้อนจากน้ำและอากาศภายในเครื่องทำรั่วเหย ซึ่งเครื่องดันแบบสามารถลดอุณหภูมิของน้ำได้ต่ำสุดที่ 9.0°C เพื่อการพัฒนาระบบศึกษาในเรื่อง การลดจำนวนคอยล์และขนาดเครื่องทำรั่วเหย เพิ่มปริมาณสารทำความเย็นในระบบ หรือทำให้เกิดการหมุนเวียนของอากาศภายในเครื่องทำรั่วเหย อาจช่วยให้เกิดเป็นน้ำแข็งได้

**คำสำคัญ:** ระบบทำความเย็นแบบบดูดซับ, 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) มีลักษณะสำคัญคือใช้เหล่งความร้อนที่ให้อุณหภูมิทำงานไม่สูงมากนัก เช่น ไอน้ำ น้ำร้อน กำชาร้อนหรือพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อใช้ในการหมุนเวียนสารทำงาน สืบเนื่องจากประเทศไทยตั้งอยู่ใกล้เส้นศูนย์สูตร มีพลังงานแสงอาทิตย์ค่อนข้างสูงและสามารถอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 0°C ได้ 17 MJ/m<sup>2</sup> ต่อปี [7] ถือได้ว่ามีศักยภาพที่จะนำมายังประเทศไทยได้ อีกทั้งเป็นพลังงานสะอาดที่ไม่มีมวนหมุด การพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานความเย็นจากแสงอาทิตย์จึงเป็นทางเลือกที่มีความยั่งยืน ทั้งนี้หากมองในด้านกลไกของระบบทำความเย็นแบบดูดซับจะเห็นว่าประกอบด้วยอุปกรณ์น้อยชิ้นไม่ слับซับซ้อน และสามารถทำความเย็นในระบบไม่ก่อผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้งระบบใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับระบบทำความเย็นแบบอัดไอ มีอายุการใช้งานยาวนานเนื่องจากไม่มีอุปกรณ์ที่มีการเคลื่อนไหวในระบบ (Moving part) ทำให้การดูแลรักษาและแก้ไขข้อบกพร่องในกระบวนการดำเนินการต่ำ

เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาและการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจึงทำการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาประกอบ ซึ่งจะเห็นว่าเหล่าความร้อนที่เข้าในระบบทำความเย็นแบบดูดซับมีทั้งแรงจ�กระจากหลอดไฟและแรงอาทิตย์ เช่นการศึกษาของ สมัคร แสงอรุณ [8] ใช้สูตรทำงานคือแอลกอเอมคลอรีด และแอมโมเนีย มีเหล่าความร้อนคือเตาไฟฟ้าขนาด 1,500 Watt พบว่า อุณหภูมิต่ำสุดภายในเครื่องทำรำ夷มีค่าประมาณ  $-6^{\circ}\text{C}$  ซึ่งผลิตน้ำแข็งได้มากที่สุดประมาณ 5.4 kg มีค่าประสิทธิภาพการทำความเย็น (COP) เฉลี่ยและสอดประมาณ 0.068 และ 0.081 ตามลำดับ นอกจากนี้ R.Z.

Wang และคณะ [4] สร้างระบบทำความเย็นแบบดูดซับเพื่อผลิตน้ำแข็งโดยใช้รังสีอาทิตย์เที่ยมจากหลอดไฟแบบครอตซ์ (Quartz lamps) เป็นแหล่งความร้อน ซึ่งต่างจากงานวิจัยแรกเนื่องจากใช้ร่วมกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นร้าบและเครื่องควบแน่นเป็นแบบบิดคิริบรรยายความร้อน ค่าสารทำงานคือ Activated carbon และเมทานอล พบร่วมสามารถผลิตน้ำแข็งได้ 7-10 kg หากแต่เกิดปัญหาในการถ่ายเทความร้อนแก้ชั้นของถ่านเนื่องจากหนาเกินไป ในส่วนของงานวิจัยที่ใช้แหล่งความร้อนจากแสงอาทิตย์นั้น เทืนว่าทั้ง K.Sumathy และ Li Zhongfu [2], M. Li และคณะ [3] จำรัส เก้าทันฑ์ทอง และอินทิรา แก้วช่วง [5] ต่างใช้คู่สารทำงานคือ ถ่านกัมมันต์ และเมทานอล และแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นร้าบ แต่พัฒนาเพิ่มในส่วนของการติดคิริให้กับคอนเดนเซอร์ ไม่ใช้วิธีควบคุมความดันและไม่ติดตั้งใจความดันในระบบ พบร่วมสามารถผลิตน้ำแข็งได้ในขณะที่มีค่า COP ต่ำกว่า 0.15

ดังนั้นโครงงานนี้จึงทำการศึกษาระบบทำความเย็นแบบดูดซับ โดยใช้แคลเซียมคลอไรด์เป็นตัวดูดซับไอโอดีโนมีเนี่ย และเลือกใช้แพงรับรังสีอาทิตย์เป็นแบบร่างพาโนลิก (Parabolic trough collector) ซึ่งมีตัวรวมรังสีเป็นท่อทรงกระบอกยาวซึ่งยึดพื้นที่ในการถ่ายโอนความร้อน ทำให้ได้รับอุณหภูมิใช้งานที่สูงมากขึ้นอีกทั้งเพื่อแก้ปัญหาความหนาของชั้นสารหากเลือกใช้แบบแผ่นรับดังในงานวิจัยที่ผ่านมา

## 2. ທຸລະກິດ

## 2.1 ระบบทำความเย็นแบบดูดซับ

ระบบทำความเย็นแบบดูดซับเป็นระบบที่มีการทำงานคล้ายกับระบบทำความเย็นแบบดูดซึม แตกต่างกันที่สารตัวกลางที่จะทำให้สารทำความเย็นมาดูดซับเป็นของแข็งที่มีรูพรุนสูง ซึ่งสามารถดูดซับสารทำความเย็นที่อยู่ในสถานะกําไถได ของแข็งที่มีรูพรุนสูงนี้เรียกว่า สารดูดซับ ส่วนสารทำความเย็นซึ่งจะทำหน้าที่เป็นสารถูกดูดซับ จะเป็นของเหลวโดยเรียกสารดูดซับและสารทำความเย็นในระบบทำความเย็นแบบดูดซับนี้ว่า คสารทำงาน

การทำงานของระบบการทำความเย็นจากพลังงานแสงอาทิตย์ โดยใช้หัวลักษณะคุดชับ เริ่มขึ้นเมื่อหัวเครื่องคุดชับ (Adsorber) ที่ภายในบรรจุสสารทำงานได้รับความร้อนจากแหล่งความร้อน ทำให้สารการทำความเย็นที่ถูกดูดซับอยู่ผ่านสารดูดซับเกิดการระเหยออกจากเครื่องคุดชับไป แลกเปลี่ยนความร้อนกับสารถ่ายโอนความร้อน และควบแน่นภายในเครื่องควบแน่นไปเป็นในถังพักความดัน เรียกกระบวนการนี้ว่า การคายสารดูดซับ (Desorption process)

จากนั้นระบายความร้อนออกจากเครื่องดูดซับทำให้อุณหภูมิของเครื่องดูดซับลดต่ำลง เช่นเดียวกับความดันของระบบ สารทำความเย็นภายในคอยล์ เครื่องทำรำบ夷จะเกิดการระเหยตัวกลับมาดูดซับบนผิวของสารดูดซับภายในท่อเครื่องดูดซับอีกครั้ง กระบวนการนี้เรียกว่า การดูดซับ (Adsorption process) ซึ่งการระเหยของสารทำความเย็นภายในคอยล์ เครื่องทำรำบ夷เกิดจากการดึงความร้อนภายในส่วนทำความเย็น ใช้เป็นความร้อนแผงของการถ่ายเป็นไอ เป็นผลให้อุณหภูมิภายในส่วนทำความเย็นลดต่ำลง

## 2.2 คู่สารทำงาน

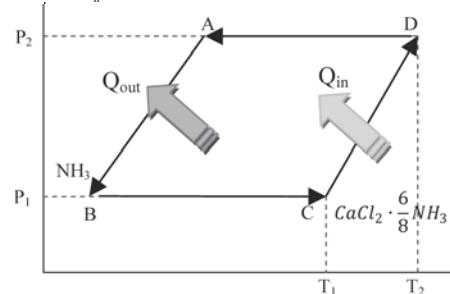
เป็นกระบวนการกรดดูดซับทางกายภาพ (Physisorption) ที่ไม่เกลูลของก๊าซถูกดูดให้ติดแน่นอยู่ที่ผิวของของแข็งที่เป็นสารดูดซับ โดยคุ่ำรำทำงานที่เลือกใช้ในการศึกษาคือ แอมโมนีนเป็นสารทำงานเย็น และแคลเซียมคลอโรไดเป็นสารดูดซับ แม้ว่าแอมโมนีนจะเป็นสารพิษและสามารถระเบิดได้ในบางสภาวะ แต่เมื่อความสามารถในการทำงานเย็น

สูงสุด เมื่อเทียบกับสารความเย็นชนิดอื่น ๆ มีจุดเดือดต่ำประมาณ  $-2.2^{\circ}\text{C}$  ที่ความกดดันของบรรยากาศ และยังมีประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนสูง ดังนั้นเครื่องทำระเหยและเครื่องควบแน่นในระบบจึงมีอุณหภูมิและความดัน อยู่ในช่วงปานกลางคือ  $-15^{\circ}\text{C}$  และ  $30^{\circ}\text{C}$  ที่ความดัน  $2.37 \text{ barg}$  และ  $11.67 \text{ barg}$  ทำให้สามารถใช้วัสดุเบาเป็นวัสดุสำหรับอุปกรณ์ในระบบได้ แอมโมเนียมเจี้ยนจัดโลหะที่ไม่ใช่เหล็กและสแตนเลส เช่น ทองแดง ทองเหลือง เป็นต้น ถ้ามีการรั่วไหลจะมีฟองเกิดขึ้น ข้อดีของการใช้แอมโมเนียมเจี้ยนคือ สามารถทำความเย็นได้ที่อุณหภูมิต่ำ ทำชื้อได้ง่ายและราคาถูก ด้านความปลอดภัยจะเห็นว่ากลิ่นของแอมโมเนียมเจี้ยนเป็น Leak detector ที่ดีหากมีการรั่ว ไหล ในต้านสิ่งแวดล้อม แอมโมเนียมเจี้ยนเป็นสารทำงานที่มีอุญในธรรมชาติ ไม่มีพิษต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะการทำลายชั้นโอลิฟิน แต่มีข้อเสียคือ แอมโมเนียมเจี้ยนเป็นสารพิษต่อร่างกาย

ส่วนสารคดูดซับที่เลือกใช้คือ แคลเซียมคลอไรด์กระดูกสากหلام ที่มีความบริสุทธิ์ 70% ซึ่งมีสมบัติดูดความชื้นได้ดี ขณะเดียวกันจะเกิดปฏิกิริยาคายความร้อนซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะของแคลเซียมคลอไรด์อีกทั้งจากงานวิจัยของ Iloeje O.C [1] ที่ทำการศึกษาเปรียบเทียบคุณภาพทำงานในระบบทำความเย็นด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งใช้แอมโมเนียมเป็นสารถูกดูดซับ คุ้กับสารคดูดซับ 5 ชนิด พบร่วม การใช้แคลเซียมคลอไรด์คุ้กับแอมโมเนียมเป็นคุณภาพทำงานที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด

### 2.3 วิจัยของระบบดูดซับไอเอมโมเนียด้วยแคลเซียมคลอไรด์

วัสดุจักรของระบบของแข็งกับก้าช เป็นผลมาจากการคุณสมบัติของสารประกอบของโลหะ(Metal halide) ที่สามารถดูดซับแอมโมเนียได้ เช่น แคลเซียมคลอไรด์ และสตรอนเทเรียมคลอไรด์ ซึ่งใน 1 โมเลกุลสามารถดูดซับแอมโมเนียได้ 4 ถึง 8 โมเลกุล ขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความดัน ระหว่างที่แคลเซียมคลอไรด์ดูดซับไอมโมเนียนั้นจะมีความร้อนเกิดขึ้นและคายความร้อนแก่สิ่งแวดล้อม และระหว่างที่แอมโมเนียระเหยแยกตัวออกจากแคลเซียมคลอไรด์ จะดูดความร้อนจากสิ่งแวดล้อม ความร้อนที่คายออกมายังไห้อุดเข้าไปมีค่าใกล้เคียงกัน และมีค่าเกือบเป็น 2 เท่าของความร้อนแห้งของการกลายน้ำเป็นไอ ดังนั้น ในเชิงทฤษฎีแล้ว COP จึงมีค่าไม่เกิน 0.5 ระบบทำความเย็นแบบดูดซับนั้น มีความ слับซับซ้อนอย่างมากที่ระบบทำความเย็นแบบดูดซึม ทางเข้าและทางออกของไอแอมโมเนียสามารถใช้ทางเดียวกันได้ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงทางเทอร์มิเดนไนกิสของแอมโมเนียและแคลเซียมคลอไรด์ สามารถแทนได้ด้วยแผนภาพ ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนภาพทางเทอร์โมไดนามิกส์ของ  $\text{NH}_3$  และ  $\text{CaCl}_2$

C→D กระบวนการให้ความร้อนเพื่อระเหยไอแอมोเนียออกจาก  
แคลเซียมคลอไรด์ จนกระทั่งความดันมากพอที่จะทำให้อ  
แอมโมเนียควบแน่นที่เครื่องควบแน่น

D→A กระบวนการแรมโมเนียระเหยียกตัวออกจากแคลเซียม-คลอไรด์มีความแน่นที่เครื่องควบแน่น เป็นกระบวนการซึ่งเกิดขึ้นที่ความดันคงที่

A→B กระบวนการที่ความเย็น แอมโมเนียมเปลี่ยนจากของเหลว เป็นไอ ความดันลดลงและอุณหภูมิลดลง  
 B→C กระบวนการดูดซับแอมโมเนียม ไอแอมโมเนียมที่มีจากเครื่อง ทำร้าย อุณหภูมิสูงขึ้น แต่ความดันคงเดิม

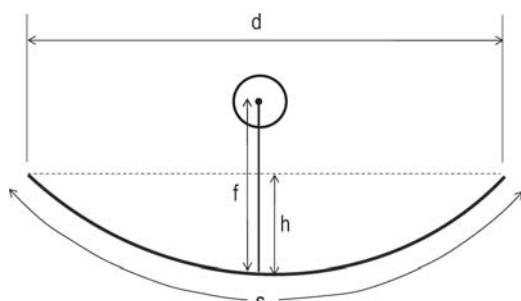
#### 2.4 แผงรับพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลิก [6]

แผงรับรังสีแบบนี้จะมีอุปกรณ์ให้เคลื่อนที่ตามดวงอาทิตย์ (Tracking solar collectors) จะมีผลทำให้แผงรับรังสีสามารถรับรังสีอาทิตย์ได้เต็มที่ตลอดเวลาที่มีแสง และทำให้อุณหภูมิสูงมาก ปัจจุบันแผงรับแสงอาทิตย์แบบนี้จะมีใช้กันอยู่ 2 ชนิด คือจานรวมแสงเป็นจุด (Parabolic dish) และจานรวมแสงเป็นสัน ซึ่ง เรียกว่า ตัวรับรังสีแบบพาราโบลิก (Parabolic trough) มีลักษณะเป็นรังคดี แสงสะท้อนที่เกิดจากการพาราโบลาทุกทำแหน่งตามความยาวของรางจะไปรวมกันที่อุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่บนราง ลักษณะการรวมแสงแบบนี้เรียกว่าการรวมแสงแบบเส้น (Line concentrating) โดยองค์ประกอบของตัวแผงแสดงได้ดังรูปที่ 2 ซึ่ง มีสมการที่ใช้ในการออกแบบ[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 ความลึกของพาราโบลา  
 d คือ ความกว้างของแผง (ความยาวเส้นคอร์ด)  
 f คือ ระยะโฟกัส  
 s คือ ความยาวส่วนเดิมของพาราโบลา



รูปที่ 2 แผนภาพของตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบพาราโบลิก

#### 3. วิธีดำเนินการวิจัย

##### 3.1 การสร้างเครื่องต้นแบบ

เครื่องต้นแบบที่ทำการออกแบบและทดสอบประกอบด้วย อุปกรณ์หลัก คือ แผงรับรังสีอาทิตย์แบบพาราโบลิก เครื่องดูดซับ ถังพักสาร ทำความสะอาด เครื่องควบแน่นแบบระบบบายความร้อนด้วยน้ำ และเครื่อง ทำร้าย

##### 3.1.1 แผงรับรังสีอาทิตย์แบบพาราโบลิก

ขนาดของแผงรับรังสีความกว้างได้จากการคำนวณ (1) และ (2) ซึ่งทำ จากอัตราการเปลี่ยนเรียบ กว้าง 1.2 m ยาว 1.4 m ขึ้นไปเป็นทาง พาราโบลา ปลายขอบของแผงทั้งสองด้าน (ความยาวเส้นคอร์ด) ห่างกัน 1.10 m และมีจุดรวมรังสีที่ระยะ 0.378 m ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ใช้วางแนว ท่อเจนเนอเรเตอร์ดังรูปที่ 3

##### 3.1.2 เครื่องดูดซับ (Adsorber)

เป็นส่วนที่เกิดปฏิกิริยาดูดซับระหว่างคู่การทำาง หากถูกใช้ในกระบวนการผลิตแอมโมเนียมเนี่ยเหลวแล้วจะถูกเรียกว่า เจ็นเนอเรเตอร์ (Generator) ทำหน้าที่ส่งผ่านความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ให้กับ แคลเซียมคลอไรด์และระยะห่างแอมโมเนียมให้แยกตัวออกจาก การดูดซับของ แคลเซียมคลอไรด์ ดังนั้นการสร้างเจ็นเนอเรเตอร์ จึงต้องออกแบบให้มีการ ส่งผ่านความร้อนได้ ทันต่อสภาพความตันสูงและเมื่อทำหน้าที่เป็น เครื่องดูดซับก็ต้องดูดซับไอแอมโมเนี่ยได้ด้วย

เครื่องดูดซับที่ใช้ในการศึกษานี้มีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกดัง รูปที่ 3 ซึ่งทำจากหอเหล็กดำเนื่องจากเป็นวัสดุที่มีสมบัติทนต่อการกัดกร่อน ของแอมโมเนี่ย มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 inch ยาว 1.2 m ภายในบรรจุ แอมโมเนี่ย 0.718 kg และแคลเซียมคลอไรด์ 0.836 kg ซึ่งบรรจุในรางที่ทำ ด้วยแผ่นสแตนเลส ขึ้นรูปโดยการม้วนเป็นครึ่งวงกลม มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.075 m และมีแผ่นกันแบบเป็น 4 ช่วง เพื่อให้เกลือมีการ กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และทำการติดตั้ง เจ็กความดัน (Pressure gauge) ในตำแหน่งปลายท่อเจนเนอเรเตอร์ ที่เป็นทางเข้าและออกของไอ แอมโมเนี่ย สำหรับใช้ในการวัดความดันภายในระบบ



รูปที่ 3 แผงรับรังสีอาทิตย์และเครื่องดูดซับ(ท่อเจนเนอเรเตอร์)

##### 3.1.3 ถังพักสารทำความสะอาด (Receiver)

จากการคำนวณ ทำให้ทราบว่า แอมโมเนี่ยที่ควบแน่นที่เครื่อง ควบแน่นมีมวล 0.539 kg ซึ่งต้องการถังเก็บที่มีปริมาตรอย่างน้อย 0.90 Litre สำหรับรุ่แอมโมเนี่ยเหลว จึงใช้หอเหล็กที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.10 m เป็นตัวถัง และเพื่อให้สามารถบรรจุแอมโมเนี่ยได้ตามปริมาณที่คำนวณ จะต้องใช้หอเหล็กที่มีความยาวอย่างน้อย 0.115 m ทั้งนี้ใช้ค่าความปลดภัย 10% ในการเพิ่มขนาดของถังเก็บ ทำให้ได้ขนาดความสูงของถังเก็บคือ 0.127 m และหุ้มฉนวนภายนอกตัวถังเพื่อป้องกันการถ่ายโอนความร้อน จากภายนอกเข้าสู่ระบบดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ถังเก็บแอมโมเนี่ยและรางสแตนเลส

##### 3.1.4 เครื่องควบแน่นแบบระบบบายความร้อนด้วยน้ำ

เครื่องควบแน่น (Condenser) ใช้สำหรับควบแน่นไอแอมโมเนี่ย ที่ถูกส่งมาจากเจนเนอเรเตอร์ให้เป็นแอมโมเนี่ยเหลว ทำจากหอเหล็กขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง ½ inch ขดเป็นเกลียวจำนวน 6 ขด เส้นผ่านศูนย์กลาง ของขดที่มีขนาด 0.23 m วางอยู่ในถังพลาสติกขนาด 200 Litre ที่ระบบ ความร้อนด้วยน้ำซึ่งมีรีเมานท์ท่อมอยล์อยู่ติดต่อเวลาเพื่อหล่อเย็น โดยน้ำที่ ใช้ในการหล่อเย็นเป็นระบบหัวหมุนเรียน ซึ่งทำการฉีดน้ำเข้าถังจาก

ด้านล่างจำนวน 1 จุด และปล่อยออกที่ด้านบนของถัง 1 จุด ดังรูปที่ 5 เพื่อให้เกิดการหมุนวนของน้ำเพิ่มการถ่ายโอนความร้อนออกจากไออกอนโนมเนี่ยที่มีอุณหภูมิสูง

### 3.1.5 เครื่องทำรำเรhey (Evaporator)

ความร้อนที่อยู่รอบๆ เครื่องทำรำเรheyเป็นความร้อนแผงในกระบวนการเป็นไอของละอองแอมโนเนียมเหลว เมื่อความร้อนรอบๆ เครื่องทำรำเรheyถูกแอมโนเนียมดูดซึบไปเรื่อยๆ จึงเกิดความเย็นขึ้นแทนที่แล้วไอแอมโนเนี่ยนวนนี้จะนำความร้อนไปถ่ายโอนแกลังแวดล้อมที่เครื่องดูดซึบ ซึ่งเครื่องทำรำเรheyในการศึกษานี้สร้างจากท่อเหล็กขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง  $\frac{1}{2}$  inch ยาว 4.23 m ขนาดเป็นเกลียวจำนวน 6 ชุด วางในถังกลมที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.30 m ภายนอกหุ้มวนเพื่อป้องกันการถ่ายโอนความร้อนจากภายนอกเข้าสู่ระบบดังรูปที่ 5

ในขั้นตอนการออกแบบระบบท่อของทั้งเครื่องควบคุมและเครื่องทำรำเรhey ได้คำนึงถึงความเสียดทานของท่อที่มีผลต่อการต้านทานไหหลังการทำรำเรheyในระบบที่อยู่ในสถานะไหที่อาศัยแรงรอลอยตัวเป็นแรงผลัก ดังนั้นจึงออกแบบระบบท่อให้มีความต้านทานการไหหลังอย่างโดยการลดข้องอ 90° ให้เป็นข้องอที่มีรัศมีความโค้ง 0.10 และ 0.20 m ตามความเหมาะสมของแต่ละตำแหน่ง



รูปที่ 5 โครงสร้างเครื่องควบคุมและเครื่องทำรำเรhey

### 3.1.6 โคมไฟสนาม (Spotlight)

แหล่งความร้อนที่ใช้ทดสอบการทำงานของระบบ ได้ใช้แสงจำลองจากโคมไฟสนาม(Spotlight) ซึ่งใช้หลอดทั้งสตีนไฮโลเจน ขนาด 1,500 Watt จำนวน 2 โคม ติดตั้งสูงจากแผงรับแสงอาทิตย์ 0.70 m ซึ่งโคมไฟสนามที่เลือกใช้เป็นโคมที่จุดติดด้วยการป้อนกระแสเข้าไปเพาล์ส หลอดให้ร้อน ซึ่งสามารถจุดติดหลอดได้ทันทีเมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าโดยไม่ต้องเสียเวลาอุ่นหลอดให้ร้อน เช่นหลอดไฟจำพวกหลอดปัลล์อย่างประจุก้าช อื่นๆ (Discharge lamp) และสมบัติที่สำคัญอย่างยิ่งคือหลอดประเภทนี้ให้สเปกตรัมของแสงใกล้เคียงกับแสงธรรมชาติมากที่สุด

### 3.1.7 สมบัติคุ้มครองการทำงาน

สมบัติของคุ้มครองการทำงานที่ใช้คือแอมโนเนียม ( $\text{NH}_3$ ) ความบริสุทธิ์ 99% บรรจุในถังเก็บแอมโนเนี่ยนดังรูปที่ 6 และเกลือแคลเซียมคลอไรด์ ( $\text{CaCl}_2$ ) เกรดอุตสาหกรรม 70%

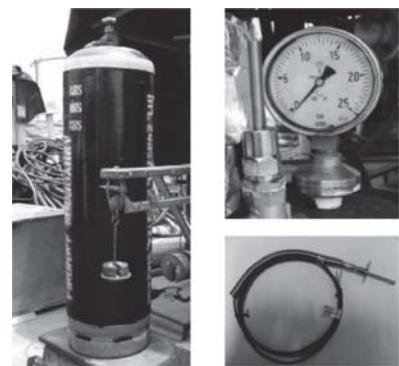
### 3.1.8 วาล์ว

วาล์วทุกตัวเป็นวาล์วที่ใช้กับแอมโนเนี่ยโดยเฉพาะ ซึ่งวาล์วจำพวกนี้จะมีลักษณะในที่เป็นเหล็ก ซึ่งแอมโนเนี่ยไม่ทำปฏิกิริยา (กัดกร่อน) กับเหล็กและสแตนเลส ซึ่งวาล์วที่ใช้ในระบบทุกตัวเป็น Stainless

ball valve ยกเว้นในส่วนของวาล์วที่ทำหน้าที่เป็น Throttling device ได้ใช้เป็น Globe valve และใช้การปรับหรืออัตราการไหของสารทำความเย็นให้เหมาะสมแทน

### 3.1.9 เจ้าวัดความดันและอุณหภูมิ

เจ้าวัดความดันที่เลือกใช้เป็นชนิดที่ตัวเรือนและเกลียวหักชุดทำด้วยสแตนเลส หน้าปัดกว้าง 3 inch ชนิดของเกลียวเป็นแบบอกหัก และมีย่านการวัดอยู่ในช่วง 0 ถึง 25 barg หัววัดอุณหภูมิที่สัมผัสกับแอมโนเนี่ยนนี้จะมีอุณหภูมิที่สัมผัสกับแอมโนเนี่ยโดยตรงได้เลือกใช้หัววัดอุณหภูมิที่มีไส้เป็นเทอร์โมคัปเปลี่ยนนิดเดค (type K) และประกอบทำด้วยสแตนเลส ดังรูปที่ 6 ส่วนหัววัดอุณหภูมิที่ไม่ได้สัมผัสกับแอมโนเนี่ยนโดยตรงได้เลือกใช้สายเทอร์โมคัปเปลี่ยนนิดเดค แล้วทำการตีเกลียวที่ปลายสายเพื่อทำหน้าที่เป็นหัววัด

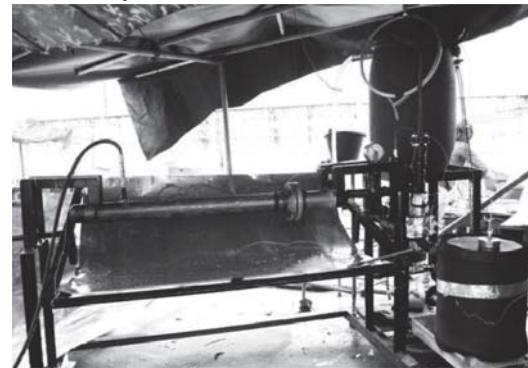


รูปที่ 6 ถังเก็บแอมโนเนี่ยนบริสุทธิ์ หัววัดอุณหภูมิและ Pressure gauge

### 3.1.10 เครื่องบันทึกอุณหภูมิแบบต่อเนื่อง

เพื่อประสิทธิภาพในการติดตามและวิเคราะห์ผลการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรของชุดทดสอบคือค่าอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งตัววัดต่างๆ จึงทำการเลือกใช้การบันทึกข้อมูลแบบต่อเนื่องด้วยเครื่อง Data logger ยี่ห้อ YOKOGAWA รุ่น MW100 จำนวน 20 ช่องสัญญาณที่สามารถสั่งเกตและติดตามการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิแบบ Real time พร้อมแบ่งข้อมูลจากเครื่องวัดเข้าสู่โปรแกรม Microsoft Excel ได้อีกด้วย

เมื่อทำการประกอบชิ้นส่วนและอุปกรณ์ต่างๆ เสร็จสมบูรณ์จะได้เครื่องตัวดันแบบดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ชุดทดลองที่ประกอบแล้วเสร็จ

## 3.2 การเตรียมและทดสอบระบบ

### 3.2.1 ทดสอบการรับแรงดัน

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

psi (0.9996 barg) จะขึ้นชี้ว่า เป็นถังรับแรงดันทึ้งสั้น ซึ่งควรต้องทำการทดสอบการรับแรงดัน โดยมีขั้นตอนกล่าวพอสังเขปโดยเริ่มต้นจากทดสอบความพร้อมของอุปกรณ์และข้อต่อต่างๆ แล้วเติมน้ำเข้าในระบบช้าๆ โดยใช้ hand pump ทำการเพิ่มแรงดันน้ำแบบเป็น 2 ชั้วโมง แล้วทำการตรวจสอบรั่วซึ่งด้วยตาเปล่าอีกครั้ง เมื่อตรวจสอบแล้วจึงทำการระบายน้ำออกเพื่อลดความดันจนเหลือท่ากับบรรยากาศแล้วเปิดวาล์วระบายน้ำ (Vent) และ瓦ล์วระบายน้ำออก (Drain) ตามลำดับ ในขั้นตอนนี้มีข้อควรระวังคือ จะต้องเปิดวาล์วระบายน้ำออกก่อน มิฉะนั้น ในขณะระบายน้ำออกจะเกิดสูญญากาศขึ้นในตัวอุปกรณ์และตัวอุปกรณ์อาจเกิดการเสียหายได้และขั้นตอนสุดท้ายคือการปล่อยความชื้นและอากาศ โดยการเป่าก้ามไนโตรเจนที่แรงดัน 0.5 barg เพื่อถ่ายอากาศและความชื้นออกให้หมดหรือให้เหลือน้อยที่สุด

### 3.2.2 ใส่ความชื้นออกจากระบบ

ในขั้นตอนนี้จะต้องใช้เวลาอย่างพอสมควร โดยในการศึกษานี้ใช้เชอร์วิสวอล์ฟ (Service valve) ที่เจนเนอเรเตอร์ เป็นทางเข้าของก๊าซในโตรเจน โดยอัดก๊าซเข้าไปผ่านระบบที่ความดัน 0.3 barg เป็นเวลา 6-7 ชั่วโมง แล้วปล่อยออกที่เชอร์วิสวอล์ฟของเครื่องควบคุมและเครื่องระเหย

### 3.2.3 ทดสอบการรั่วซึ่ม (Air leakage test)

เนื่องจากเครื่องทำการมีความเย็นแบบบดดับทำงานภายใต้ความดันที่สูงกว่าความดันบรรยายภายนอก จึงมักจะประสบปัญหาการรั่วซึ่มของสารทำความเย็น ดังนั้นเมื่อทำการประกอบส่วนต่างๆ ของเครื่องทำการมีความเย็นแล้วต้องทำการทดสอบหาจุดรั่วซึ่มของระบบซึ่งสามารถทำได้โดยอัดก๊าซในโตรเจนเข้าระบบที่ความดัน 10 barg แล้วทำการฉีดด้วยน้ำสบุ่นขึ้นในตำแหน่งของรอยเชื่อมที่ข้อต่อ หน้าจาน(Flange) หากมีการรั่วซึ่มจะเกิดเป็นฟองสบุบubbles ให้เห็น แล้วจึงปล่อยก๊าซออกจากระบบให้หมด

### 3.2.4 การทำสูญญากาศระบบ

ทำได้โดยการใช้ปั๊มสูญญากาศสำหรับลดแรงดันในระบบและอัดทึ้งสูญญากาศภายนอก โดยใช้เชอร์วิสวอล์ฟที่เครื่องควบคุมเป็นจุดดูดอากาศออกให้มีความดันต่ำกว่าบรรยายภายนอกเพื่อหลีกเลี่ยงการปั๊มน้ำของเกลือแคลเซียมคลอไรด์ที่ออกจากระบบพร้อมกับอากาศที่ดูดออกมากซึ่งใช้เวลาในการดูดความชื้นอย่างน้อย 20 นาที แล้วจึงทำการเติมสารทำความเย็น

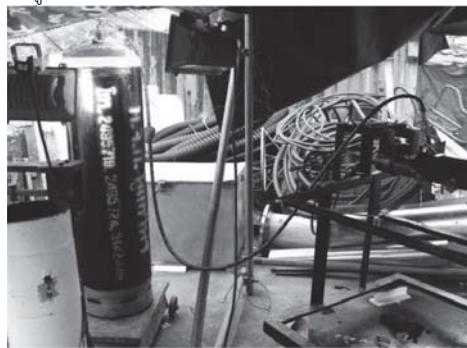
### 3.2.5 การบรรจุคุณร้าทำงาน

ทำการบรรจุเกลือแคลเซียมคลอไรด์ในปริมาณ 1 kg โดยแบ่งเกลือในร่างสแตนเลสดังรูปที่ 8 ในปริมาณเท่าๆ กันและสม่ำเสมอ แล้วจึงเปิดโคมไฟ spot light ส่องให้ความร้อนกับเกลือในร่างประมาณ 30 นาที แล้วจึงทำการสอดร่างบรรจุเกลือเข้าไปในเจนเนอเรเตอร์ หลังจากนั้นทำการดูดอากาศและความชื้นออกจากระบบอีกครั้งโดยใช้ปั๊มสูญญากาศ



รูปที่ 8 ร่างใส่เกลือแคลเซียมคลอไรด์ที่อยู่ภายในเจนเนอเรเตอร์

ขั้นตอนถัดไปคือ การเติมแอมโมเนียเข้าไปในระบบ ซึ่งจะทำการเติมแอมโมเนียเข้าไปในสภาวะไอให้เกลือแคลเซียมคลอไรด์ดูดซับไอแอมโมเนียไว้ที่ผิว ก่อนอื่นต้องทำการปิดวาล์ฟที่เครื่องทำการระเหยและที่เครื่องควบคุมและเพื่อกัดแอมโมเนียไว้เฉพาะในส่วนของเจนเนอเรเตอร์ แล้วจึงทำการเติมแอมโมเนียโดยการส่องโคมไฟ Spotlight ให้กับถังเก็บแอมโมเนียเพื่อเพิ่มความดันและทำให้แอมโมเนียอยู่ในสถานะไอ ในส่วนของท่อเจนเนอเรเตอร์น้ำที่ด้านล่างน้ำที่ด้านล่างน้ำเข้าไปในท่อเจนเนอเรเตอร์ใหม่ก้าน ซึ่งปริมาณแอมโมเนียที่เติมเข้าไปในระบบทราบได้จากการอ่านค่าจากตาชั่งซึ่งจะแสดงน้ำหนักของถังที่ลดลง ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 การบรรจุแอมโมเนียเข้าไปในระบบ

### 3.2.6 การสอบเทียบเครื่องมือวัดอุณหภูมิ

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

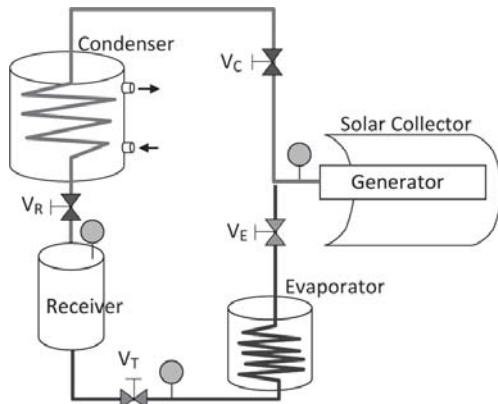
### 3.3 วิธีการทดลอง

แบ่งเป็น 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนการผลิตแอมโมเนียเหลว และขั้นตอนการทำความเย็น โดยมีตำแหน่งติดตั้งวาล์วดังรูปที่ 10 เพื่อควบคุมการไหลของสารทำการทำความเย็น

#### 3.3.1 ขั้นตอนการผลิตแอมโมเนียเหลว

เป็นกระบวนการที่ห้ามร้อนแก่เครื่องดูดซับเพื่อที่จะทำให้แอมโมเนียระเหยแยกตัวออกมาจากแคลเซียมคลอไรด์ ไปควบคุมที่เครื่องควบคุมและได้แอมโมเนียเหลวอยู่ในถังเก็บ มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

- เริ่มต้นจากการส่องโคมไฟให้กระทบแสงรับรังสี แล้วเปิดวาล์ฟ  $V_C$  ในขณะที่วาล์วอื่นๆ ยังคงอยู่ในสถานะปิด เริ่บบันทึกค่าอุณหภูมิและความดัน
- เมื่อความดันเริ่มมีค่าคงที่ นั่นหมายถึงไอแอมโมเนียเริ่มควบคุม ของเหลว ให้เปิดวาล์ฟ  $V_R$  เพื่อให้ไอแอมโมเนียเหลวความดันสูงไหลไปเก็บสะสมไว้ที่ Receiver
- เมื่อไอแอมโมเนียระเหยหมดไปจากท่อเจนเนอเรเตอร์แล้ว สั่งเกตจากความดันเริ่มลดลง ให้ทำการปิดวาล์ฟ  $V_R$
- ปล่อยให้เจนเนอเรเตอร์เย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิอากาศแวดล้อม



รูปที่ 10 แผนผังส่วนประกอบของระบบทำความเย็นแบบดูดซับ

### 3.3.2 ขั้นตอนการทำความเย็น

เป็นกระบวนการสักษาความเย็นที่เครื่องทำระเหย หลังจากที่เครื่องดูดซับเย็นตัวลงเท่ากับอุณหภูมิอากาศแวดล้อม แล้วเปิดวาล์ว เพื่อให้ไอแอมโนเนียมเหลวความตันสูงจากถังเก็บน้ำด้านล่างมาสู่ถังความตัน แล้วเข้าไปดูดซับความร้อนภายในเครื่องทำระเหย และไอแอมโนเนียมก็จะถูกแคลเซียมคลอไรด์ดูดดิผิวเอาไว้ภายในชุดดูดซับ โดยทำการทดสอบระบบภายในได้สภาวะของการลดความตันที่เครื่องดูดซับให้เหลือ 1 barg พร้อมหล่อเย็นผิวนอกของเครื่องดูดซับเพื่อช่วยลดความตันภายในระบบ โดยมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

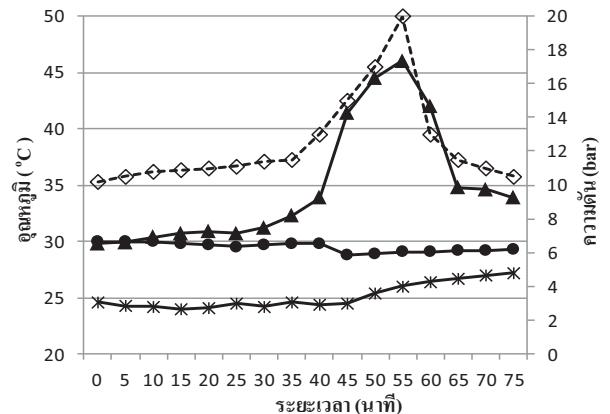
- เติมน้ำ 0.3 Litre ลงในถังน้ำอุ่นโนเนียมแล้วทำการปิดเครื่องทำระเหยให้แน่นให้การไหลเข้าหรือออกของอากาศน้อยที่สุด
- ลดความตันที่เครื่องดูดซับลงเป็น 1 barg
- ใช้น้ำแข็งหล่อเย็นเครื่องดูดซับโดยควบคุมให้อุณหภูมิผิวของเครื่องดูดซับต่ำกว่า 10 °C
- เปิดวาล์ว  $V_E$  แล้วค่อยๆ หรือวาล์ว  $V_T$  เพื่อลดความตันและอุณหภูมิ
- บันทึกอุณหภูมิ และความตัน จนกระทั่งแอมโนเนียมระเหยหมด วัดจักรการทำความเย็นจึงครบวัฏจักร
- ทำการปิดวาล์วทุกด้วย แล้วสังเกตผลที่เกิดขึ้นกับน้ำในถังและอากาศภายในเครื่องทำระเหย

### 4. การทดลองและการวิเคราะห์ผล

จากการทดลองในหัวข้อ 3.3 ได้ทำการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความตันและอุณหภูมิในระบบ ซึ่งมีรายละเอียดการวิเคราะห์ดังนี้

#### 4.1 ผลการทดลองในขั้นตอนการผลิตแอมโนเนียมเหลว

เป็นขั้นตอนการให้ความร้อนแก่เกลือแคลเซียมคลอไรด์เพื่อระเหยไอแอมโนเนียมออกจากเจนเนอเรเตอร์ไปควบคุมแล้วให้ลงไปเก็บที่ถังพักความตัน สามารถเริ่มต้นการทดลองที่ห้องเจนเนอเรเตอร์มีความตันในระบบ 10 barg และแอมโนเนียมอุณหภูมิใกล้เคียงอากาศแวดล้อมที่  $28.8^{\circ}\text{C}$  เมื่อให้ความร้อนจากแสงจำลองไปเรื่อยๆ จะพบว่าอุณหภูมิและความตันของระบบเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ หลังจากนั้นอุณหภูมิและความตันของระบบจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วทั้งนี้เนื่องจากความร้อนที่ป้อนแก่ระบบในช่วงเริ่มต้นดังสูญเสียไปกับการเพิ่มอุณหภูมิให้กับโครงสร้างของห้องเจนเนอเรเตอร์ รวมถึงการทำให้เกลือและแอมโนเนียมอุณหภูมิสูงขึ้น และการพากความร้อนที่ผ่านออกของห้องเจนเนอเรเตอร์ จึงทำให้ช่วงแรกของการป้อนความร้อนส่งผลต่อการเพิ่มอุณหภูมิและความตันในอัตราที่ช้า



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความตันที่ดำเนินการทดลองในระบบการผลิตแอมโนเนียมเหลว

จากรูปที่ 11 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความตันที่ดำเนินการทดลองในระบบการผลิตแอมโนเนียมเหลว พบว่าเมื่อให้ความร้อนจนทำให้ไอแอมโนเนียมอุณหภูมิสูงขึ้นจนถึงช่วง  $45\text{--}50^{\circ}\text{C}$  แล้วหลังจากนั้นอุณหภูมิของไอแอมโนเนียมที่แยกตัวออกจากเกลือ แคลเซียมคลอไรด์มีค่าต่ำลง เนื่องจากไอแอมโนเนียมเริ่มควบแน่นเป็นของเหลวที่เครื่องควบแน่น ทำให้ไอแอมโนเนียมที่อยู่ภายในห้องเจนเนอเรเตอร์ มีปริมาณค่อนข้างน้อย ลดลงจึงส่งผลต่อการลดลงของค่าอุณหภูมิตั้งกล่าว อีกทั้งความตันในระบบมีค่าลดลงด้วยเช่นกันเนื่องจากการเปิดวาล์วเพื่อให้แอมโนเนียมเหลวไหลลงไปควบคุมแล้วเก็บที่ถังพักความตัน แต่ความตันในช่วงที่แอมโนเนียมควบแน่นมีค่าต่ำลงมากจนที่เนื่องจากไอแอมโนเนียมถ่ายโอนความร้อนในรูปของความร้อน放熱 ในการเปลี่ยนสถานะให้กับน้ำซึ่งทำหน้าที่เป็นสารหล่อเย็นในเครื่องความเย็นแบบกลไกเป็นแอมโนเนียมเหลว โดยค่าความตันและอุณหภูมิเฉลี่ยในช่วงที่แอมโนเนียมควบแน่นมีค่าอยู่ที่  $11.4\text{ barg}$  และ  $26.4^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ ซึ่งจากการ์ฟสมบัติของแอมโนเนียมใน P-h diagram พบว่าอยู่ในขอบเขตที่แอมโนเนียมสึกสามารถเป็นของเหลว

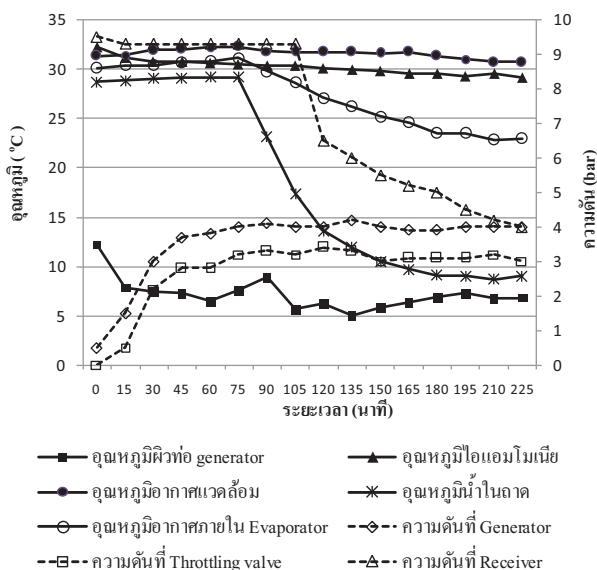
หากพิจารณาเส้นกราฟของอุณหภูมิภายในถังพักความตันเมื่อเวลาผ่านไป 45 นาที พบว่ามีแนวโน้มสูงขึ้นเนื่องจากในระหว่างกระบวนการควบแน่นไอแอมโนเนียมไปเป็นแอมโนเนียมเหลวนั้นเป็นกระบวนการขยายความร้อน放熱 จึงส่งผลให้อุณหภูมิแอมโนเนียมในถังพักความตันมีค่าสูงขึ้น หรืออีกนัยหนึ่งจากเนื่องมาจากพลังงานความร้อนบางส่วนที่เกินจากความร้อน放熱 ในการเปลี่ยนสถานะ ที่ได้รับจากห้องเจนเนอเรเตอร์ นั้นไม่สามารถระบายออกสู่เครื่องควบแน่นได้ทั้งหมด

#### 4.2 ผลการทดลองในขั้นตอนการทำความเย็น

หากพิจารณาเฉพาะในล่วงของการลดอุณหภูมิของการระการทำความเย็นซึ่งเกิดขึ้นแล้วจากความเย็นในห้องเจนเนอเรเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 12 จะพบว่า ในช่วง 75 นาทีแรก อุณหภูมิของอากาศ น้ำ และแอมโนเนียมที่ฉีดผ่านวาล์วลดความตันยังคงมีค่าใกล้เคียงกันคือ เปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง  $26\text{--}30^{\circ}\text{C}$  ทำให้เกิดการถ่ายโอนความร้อนระหว่างกันอย่างมาก ซึ่งในระหว่างที่ความตันของแอมโนเนียมเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ จากเดิม 0 จนถึง 3 barg พบว่า ค่าความตันด้านน้ำมีผลทำให้อุณหภูมิของแอมโนเนียมที่ฉีดผ่านวาล์วลดความตันมีค่าลดลง ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำ อากาศ กับแอมโนเนียมซึ่งอยู่ภายในห้องเจนเนอเรเตอร์ ทำให้ความเย็นลดลง

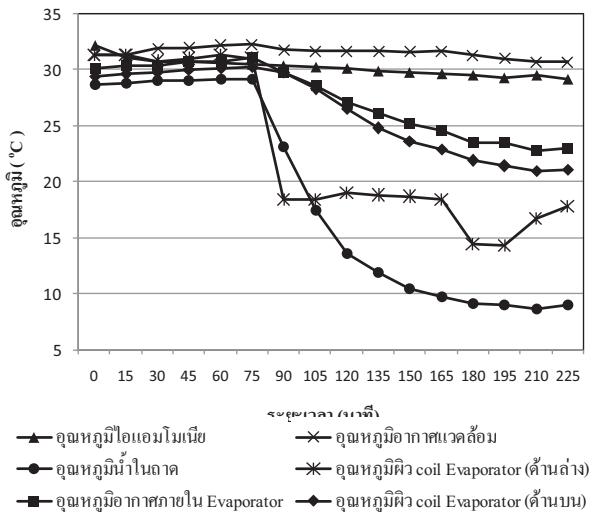
น้ำและอากาศลดต่ำลงเรื่อยๆ และเริ่มคงที่หลังจากผ่านไป 225 นาที ซึ่งในช่วงเวลาดังกล่าว อุณหภูมิของน้ำและอากาศมีค่าต่ำที่สุดอยู่ที่  $9^{\circ}\text{C}$  และ  $23^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ

จากรูปที่ 12 ทำการพิจารณาความดันในระบบ พบร่วมเมื่อเวลาผ่านไป 45 นาที ความดันสูงขึ้นจนถึง 3-4 barg แล้วค่อนข้างคงที่ที่ความดันในช่วงนี้ลดลงด้วยกระบวนการทำความเย็น นั่นคือช่วงความดันดังกล่าวเป็นช่วงที่เปลี่ยนสถานะเป็นไอแอมโมเนียแล้วถอยตัวกลับเข้าไปที่ห้องเย็น เนื่องจากอุณหภูมิของไอแอมโมเนียสูงกว่าอุณหภูมิของน้ำ ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าความดันที่เจนเนอเรเตอร์ทำให้ความดันในระบบไม่สูงกว่าชั้นมากนัก ซึ่งจะเพิ่มขึ้นด้วยแต่ความดันสูงขึ้นไม่มากเนื่องจากความร้อนที่เกิดจากการขยายตัวของไอแอมโมเนียเพื่อจับที่ผิวของแคลเซียมคลอไรด์นั้นเกิดการถ่ายโอนกับอากาศแล้วล้อมภายนอกท่อเจนเนอเรเตอร์



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความดันที่ต่ำแห่งต่างๆ ในกระบวนการทำความเย็น

หากทำการเปรียบเทียบ อุณหภูมน้ำ ผิวคอล์ล์และอากาศภายในเครื่องทำร้าย พบร่วมกับอากาศมีอุณหภูมิสูงกว่าผิวคอล์ล์ด้านบนและสูงกว่าน้ำ เนื่องจากตำแหน่งติดตั้งหัวอุณหภูมิอากาศอยู่ในระดับเดียวกับคอล์ล์ด้านบน ดังนั้นจึงได้รับอิทธิพลจากอากาศร้อนที่ถอยตัวและนั่งอยู่ส่วนบนซึ่งเกิดการแยกชั้นเนื่องจากความแตกต่างอุณหภูมิของอากาศภายในเครื่องทำร้ายอย่างชัดเจน กลยุทธ์ที่ใช้ในการลดความร้อนที่ติดตั้งคือการถ่ายโอนความร้อนระหว่างอากาศทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศสูงกว่าน้ำ อีกทั้งสามารถน้ำว่างไว้ที่ตำแหน่งล่างสุดซึ่งกับคอล์ล์ส่วนล่างที่เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนได้กับไอแอมโมเนียภายในคอล์ล์ทำให้อุณหภูมน้ำลดต่ำลงได้มาก ซึ่งปัจจุบันการเป็นจวนอากาศภายในเครื่องทำร้าย คาดว่าสามารถแก้ไขด้วยการลดจำนวนคอล์ล์ ลดขนาดเครื่องทำร้าย เพิ่มปริมาณสารทำความเย็นในระบบ หรือทำให้เกิดการหมุนเวียนของอากาศภายใน



รูปที่ 13 графฟ์เปรียบเทียบการทำความเย็นภายใน Evaporator

จากรูปที่ 13 เมื่อทำการเปรียบเทียบ อุณหภูมิผิวคอล์ล์ของเครื่องทำร้ายด้านบนและด้านล่าง จะเห็นว่าแนวโน้มของอุณหภูมิผิวคอล์ล์ด้านล่างมีค่าต่ำกว่าด้านบน สืบเนื่องจากการทดลองในกรณีที่ภาระการทำความเย็นมีเฉพาะอากาศพบว่า มีเกล็ดน้ำแข็งจากไอน้ำในอากาศ เกาะที่คอล์ล์ 2 ขดล่างเท่านั้น ซึ่งอาจเกิดจากสารการทำความเย็นเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนเฉพาะในช่วง 2 ขดแรกที่เข้าสู่เครื่องทำร้ายแล้วดึงความร้อนโดยรอบเพื่อทำให้เปลี่ยนสถานะเป็นไอแอมโมเนียแล้วถอยตัวขึ้นไปสู่ขดคอล์ล์ด้านบนแต่เนื่องจากไอแอมโมเนียได้รับความร้อนมากพอนอกจากเป็นไออุ่นตัวจึงไม่เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ขดคอล์ล์ด้านบนดังนั้นจึงทำให้เกิดแนวโน้มของผลต่างผิวคอล์ล์ที่ด้านบนและล่าง ดังกล่าวข้างต้น

## 5. สรุป

จากการศึกษาระบบทามความเย็นโดยการสร้างเครื่องทำน้ำแข็ง พลังงานแสงอาทิตย์ด้วยระบบทำความเย็นแบบคูลชัปไอแอมโมเนีย สามารถสรุปได้ว่า ระบบการทำความเย็นของเครื่องตันแบบเป็นการทำความเย็นแบบคูลชัปแบบไม่ต่อเนื่อง โดยใช้ไอแอมโมเนียเป็นสารการทำความเย็นและเกลือแคลเซียมคลอไรด์เป็นสารดูดซับ ซึ่งใช้แสงจำลองจากคอมไฟสันมีเพลิง ความร้อน ร่วมกับแผงรับรังสีแบบพาราโบลิก วัสดุที่ใช้ในการทำงานแบ่งเป็น 2 ช่วง ซึ่งช่วงแรกคือ ขั้นตอนการผลิตไอแอมโมเนีย เป็นขั้นตอนที่ห้องเย็น เนื่องจากเครื่องตันได้รับความร้อนจากแหล่งที่มา ทำให้อุณหภูมิและความดันสูงขึ้นจนถึงช่วงที่ทำให้ไอแอมโมเนียระเหยเป็นไอหกุดจากการเกาะที่ผิวแคลเซียมคลอไรด์ไปควบคุมเป็นไอแอมโมเนียเหลวที่เครื่องควบคุมเก็บไว้ที่ถังพักความดัน หลังจากนั้นจะเข้าสู่กระบวนการที่ส่องคือ การทำความเย็นโดยการฉีดไอแอมโมเนียเหลวที่ผลิตได้ผ่านวัลว์ลดความดัน ทำให้มีอุณหภูมิและความดันลดลง สามารถที่จะรับความร้อนจากภาระการทำความเย็นในเครื่องทำร้ายเพื่อเป็นความร้อนแรงในการกลยุทธ์เป็นไอแอมโมเนียถอยตัวกลับไปที่เครื่องคูลชัปและเก่าที่ผิวของเกลือแคลเซียมอีกรั้ง จึงครบวุฒิการการทำงาน

จากการศึกษาข้างต้นพบว่า เครื่องตันแบบไม่สามารถทำน้ำแข็งได้แต่สามารถทำน้ำเย็นได้ที่อุณหภูมิต่ำสุดคือ  $9^{\circ}\text{C}$  ซึ่งทางคณะผู้ทำการศึกษาจะทำการพัฒนาและแก้ไขปัญหาตามแนวทางที่จะนำเสนอในหัวข้อดังไปซึ่งคาดว่าสามารถที่จะผลิตน้ำแข็งได้ตามการอุปบัญชาก

## ปัญหาและแนวทางแก้ไข

- 1) แอมโมเนียมที่อัดเข้าไปในท่อเจนเนอเรเตอร์มีความดันเริ่มต้นที่ 10 barg ซึ่งเป็นความดันของถังเก็บแอมโมเนียม ดังนั้นในขั้นตอนการทำความเย็นจำต้องลดความดันของท่อเจนเนอเรเตอร์ก่อนเริ่มขั้นตอน เพื่อให้เกิดความแตกต่างความดันกับเครื่องทำระเหย  
**แนวทางแก้ไข** : หากไม่ต้องการลดความดันในระบบก่อนเข้าสู่กระบวนการทำความเย็น ต้องทำระบบให้เป็นสัญญาคัสเพื่อดูดก๊าซ แอมโมเนียมเข้าไปในระบบ
- 2) การแยกขั้นของอากาศทำให้เกิดการเป็นฉนวนอากาศภายในเครื่องทำระเหยทำให้ไม่สามารถทำความเย็นได้อย่างทั่วถึง  
**แนวทางแก้ไข** : เพิ่มระบบหมุนเวียนอากาศภายในเครื่องทำระเหย แบบ Hybrid cooling system ช่วยกระจายความเย็น
- 3) พื้นที่ภายในเครื่องทำระเหยไม่เหมาะสมกับความสามารถในการทำความเย็นของสภาวะที่ทำการทดสอบ  
**แนวทางแก้ไข** : ในเบื้องต้นจะทำการลดพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน ของคอยล์โดยคงจำนวนของคอยล์ไว้เท่าเดิม หลังจากนั้นจะทำการเพิ่มปริมาณสารทำความเย็น

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณคณาจารย์สาขาวิชาชีวกรรมเครื่องกลและศูนย์บริการวิชาการและสอนเที่ยบ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน ห้างหุ้นส่วนจำกัด พุนทร์พิร บริษัท ไทย แทงค์ เทอร์มินอล จำกัด และ บริษัท บัลมอร์รัล จำกัด ที่ให้การสนับสนุนวัสดุอุปกรณ์เพื่อการศึกษามา ณ โอกาสนี้

### เอกสารอ้างอิง

- [1] Illoeje 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] จำรัส เก้าหัมทอง และอินทร์รา แก้วช่วง. “เครื่องทำความเย็นแบบดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์”. บริณูนิพนธ์ วิทยาศาสตร์บัณฑิต (วิทยาศาสตร์ประยุกต์) คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2550
- [6] ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์. อนุกรรมพัลลังงานนอกแบบและการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ เล่มที่ 1 การแปรรังสีด้วยอาทิตย์ และหัวร้อนสี. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2531

- [7] พีระพงษ์ ถ້າอุทก “การพัฒนาระบบททำความร้อนและความเย็นแบบดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์”. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์ มหาบัณฑิต สาขาวิชาชีวกรรมพัลลังงาน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2550
- [8] สมคร แสงอรุณ. “การศึกษาระบบททำความเย็นที่ใช้แคลเซียมคลอโรร์”. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (การสอนพิสิกส์) คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2531
- [9] W.B.Stine and R.W.Harrigan. “Solar Energy Systems Design”. : John Wiley and Sons, 1986.

### ประวัติผู้เขียนบทความ



นายมานพ พิพัฒหัตถกุล  
อาจารย์ประจำคณะวิศวกรรมศาสตร์  
สาขาวิชาชีวกรรมเครื่องกล  
สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน



นางสาวจารุณี เชื้อพิศา  
ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรี ชั้นปีที่ 4  
สาขาวิชาชีวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน



นายธราพงษ์ โคตรแปร  
ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรี ชั้นปีที่ 4  
สาขาวิชาชีวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

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