

การออกแบบและพัฒนากระบวนการผลิตน้ำจากอากาศด้วยระบบวัฏจักรอัดไอ

Design and development of atmospheric water generation using vapor compression cycle system

ธีรวัฒน์ วงษาเทียม¹ เสมอขวัญ ตันติกุล¹ กิตติกร สาสุจิตต์¹ สุระพล ริยะนา¹ ญาณกร สุทัตมาลี¹ พนักร เหลี่ยมเคลือบ¹
ลลิตา เพชรใจหาญ¹ และ นิกราน หอมดวง^{1*}

Tirawat Wongsatiam¹ Samerkawn Tantikul¹ Kittikorn Sasujit¹ Surapol Riyana¹ Yanakorn Sutasamalee¹
Phontakorn Liamkloub¹ Lalita Petchaihan¹ and Nigran Homdoun^{1*}

วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ 50290

School of Renewable Energy, Maejo University, Chiang Mai 50290

*Corresponding author: Tel.: 084-1773632 E-mail address: nigranghd@gmail.com

Abstract

Atmospheric Water Generation (AWG) systems are a technology that has the potential to solve water scarcity problems in many areas around the world, including some areas of Thailand. It relies on the principle of extracting moisture or water vapor from the air and condensing it into water. The design and development of atmospheric water generation systems require the study of variables that affect water production. Therefore, this research aims to study and analyze the variables that affect water generation from atmospheric water generation processes using the principle of condensing moisture in the air into water by cooling using a vapor compression cycle. The atmospheric water generator consists of a 12,283 BTU/h vapor compression refrigeration system and four cross-flow heat exchangers that act as cold coils, arranged in series to lower the temperature of the supplied air to the dew point. The relative humidity and temperature of the air fed into the atmospheric water generator are in the range of 75% - 90% and 25-35 °C, respectively, while the airflow rate is in the range of 6-8 m³/min. The results of the study found that temperature, relative humidity, and airflow rate affect the atmospheric water generation rate, with the optimal temperature, relative humidity, and flow rate for the highest water generation being 35 °C, 90%, and 8 m³/min respectively, The maximum water generation rate was 2.65 kg/h. The specific energy consumption of the atmospheric water generation system was in the range of 0.56–0.95 kWh/L.

Keywords: Air, Water, humidity, Vapor compression refrigeration, Atmospheric water generation

บทคัดย่อ

การผลิตน้ำจากอากาศเป็นเทคโนโลยีที่มีความเป็นไปได้ในการแก้ไขปัญหาการขาดแคลนน้ำในหลายพื้นที่ทั่วโลก รวมทั้งในบางพื้นที่ของประเทศไทย โดยอาศัยหลักการดึงเอาความชื้นหรือไอน้ำที่อยู่ในอากาศมาควบแน่นให้กลายเป็นน้ำ การออกแบบ และพัฒนาระบบผลิตน้ำจากอากาศจำเป็นต้องศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการผลิตน้ำ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาและวิเคราะห์ตัวแปรที่มีผลต่อการผลิตน้ำจากกระบวนการผลิตน้ำจากอากาศโดยใช้หลักการทำให้ความชื้นในอากาศควบแน่นเป็นน้ำด้วยการทำความเย็นโดยใช้วัฏจักรอัดไอ ซึ่งเครื่องผลิตน้ำจากอากาศประกอบด้วยระบบเครื่องทำความเย็นแบบอัดไอขนาด 12,283 BTU/h เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขวางซึ่งทำหน้าที่เป็นคอยล์เย็น 4 ชุด วางเรียงซ้อนต่อกันเป็นแบบอนุกรม เพื่อให้อากาศที่ถูกป้อนเข้ามีอุณหภูมิต่ำลงจนถึงจุดควบแน่น ความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของอากาศที่ป้อนเข้าสู่เครื่องผลิตน้ำจากบรรยากาศอยู่ในช่วง 75% - 90% และ 25-35 °C ตามลำดับ ในขณะที่อัตราการไหลของอากาศอยู่ในช่วง 6-8 m³/min ผลการศึกษาพบว่า อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และอัตราการไหลของอากาศมีผลกระทบต่อการผลิตน้ำจากอากาศ โดยที่อุณหภูมิอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ และอัตราการไหลที่ทำให้อัตราการผลิตน้ำสูงสุดคือ 35 °C, 90% และ 8 m³/min ตามลำดับ สามารถผลิตน้ำได้สูงสุดที่ 2.65 kg/h อัตราการใช้พลังงานจำเพาะของระบบผลิตน้ำจากอากาศ มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0.56-0.95 kWh/L

คำสำคัญ: อากาศ น้ำ ความชื้น การทำความเย็นด้วยวัฏจักรอัดไอ การผลิตน้ำจากอากาศ

บทนำ

น้ำเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของระบบนิเวศและสิ่งมีชีวิต ถึงแม้ว่าน้ำจะเป็นทรัพยากรหมุนเวียน แต่ 97.5% ของปริมาณน้ำทั้งหมดบนโลกเป็นน้ำทะเลในมหาสมุทร มีส่วนที่เหลือเพียง 2.5% เท่านั้นที่เป็นน้ำจืด และในน้ำจืด 68.7% ถูกกักเก็บในรูปแบบของน้ำแข็งและหิมะ อีก 30.1% ส่วนเป็นน้ำใต้ดิน ดังนั้นจึงเหลือน้ำจืดที่ผิวดินและอื่น ๆ เพียง 1.2% และเมื่อแบ่งออกเป็น 100 ส่วนจะเห็นว่าน้ำหรือไอน้ำอยู่ในชั้นบรรยากาศถึง 3% ซึ่งมากกว่าน้ำในแม่น้ำหลายเท่าตัว [1] การผลิตน้ำจากอากาศ (Atmospheric water generation: AWG) [2] เป็นวิธีการทางเลือกหนึ่งที่มีความสามารถในการผลิตน้ำจืด นอกเหนือจากการใช้กลยุทธ์การกักเก็บน้ำจากน้ำผิวดินและการขุดเจาะน้ำบาดาลแหล่งน้ำใต้ดิน การผลิตน้ำจากอากาศเป็นวิธีการที่ค่อนข้างใหม่ การผลิตน้ำด้วยวิธีนี้จะเน้นการผลิตน้ำเพื่อนำไปบริโภคเนื่องจากมีต้นทุนในการผลิตค่อนข้างสูง จากการวิเคราะห์ข้อมูลสภาพภูมิอากาศของประเทศไทยในปีที่ผ่านมาและปี 2566 ประเทศไทยมีอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ในช่วง 35-42 °C และมีความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยสูง 60-80% และเมื่อใช้ไซโครเมตริกชาร์ทในการคำนวณหาอุณหภูมิจุดไอน้ำกลั่นตัวหรือจุดน้ำค้าง โดยพบว่าใช้อุณหภูมิเพียง 27-34 °C น้ำในอากาศก็สามารถกลั่นตัวได้ [3] ทั้งนี้จะต้องออกแบบอุปกรณ์ต่าง ๆ อย่างมีประสิทธิภาพจึงจะดำเนินการได้ ดังนั้นการศึกษานี้จึงสนใจและมุ่งเน้นในการออกแบบ พัฒนา ทดสอบ และประเมินสมรรถนะของระบบผลิตน้ำจากอากาศเพื่อการอุปโภคบริโภค เพื่อแก้ไขปัญหาที่ได้อ้างมาแล้วข้างต้น

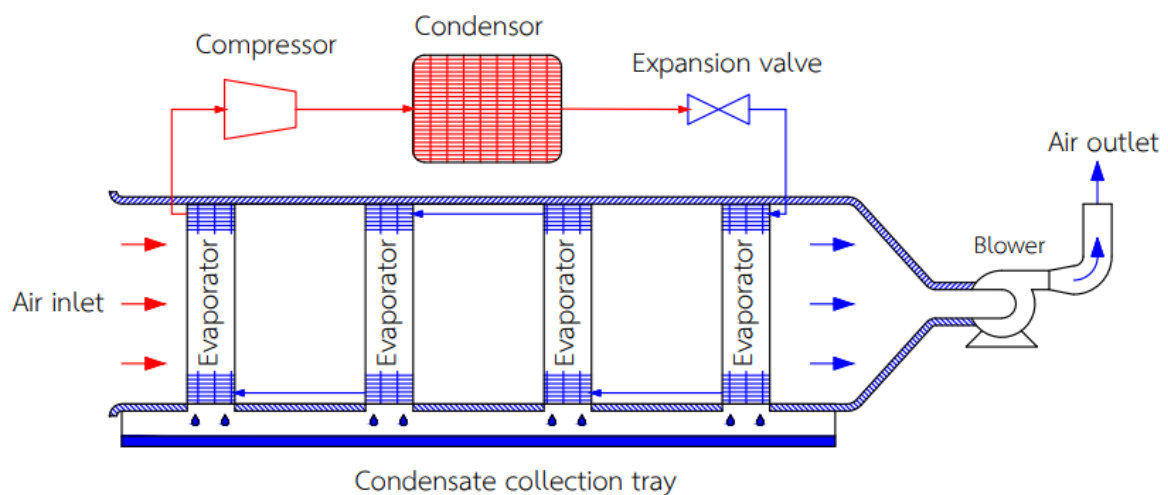
เทคโนโลยีการผลิตน้ำจากอากาศ คือการดึงน้ำจากอากาศหรือการสกัดน้ำจากอากาศที่มีไอน้ำผสมและแทรกตัวอยู่ ซึ่งในปัจจุบันมีวิธีการสกัดน้ำออกมาได้หลายรูปแบบเช่น การสกัดน้ำจากอากาศด้วยการทำความเย็นด้วยวัฏจักรอัดไอ การสกัดน้ำจากอากาศด้วยการทำความเย็นจากเทอร์โมอิเล็กทริก การสกัดน้ำจากอากาศด้วยการเก็บน้ำค้าง การสกัดน้ำจากอากาศด้วยการเก็บหมอก การสกัดน้ำจากอากาศด้วยการใช้การดูดซับ เป็นต้น การผลิตน้ำจากอากาศโดยใช้การทำ ความเย็นด้วยวัฏจักรอัดไอ (Vapour compression refrigeration) เป็นวิธีการที่นิยมใช้สำหรับการผลิตน้ำจากอากาศ [4-6] ซึ่งใช้หลักการเช่นเดียวกับ ตู้เย็น เครื่องปรับอากาศ และเครื่องลดความชื้น คือทำให้อากาศที่มีความชื้นมีอุณหภูมิลด

ต่ำกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้าง ซึ่งจะทำให้ไอน้ำไม่สามารถแทรกตัวอยู่ในอากาศที่อุณหภูมิและความชื้นนี้ได้ จึงทำให้เกิดการควบแน่นกลายเป็นของเหลว โดยขั้นตอนในการทำงานจะเริ่มจากพัดลมหรือโบลเวอร์ดูดอากาศขึ้นผ่านคอยล์เย็นทำให้อากาศชื้นเย็นลงต่ำกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้าง จากนั้นจะเกิดการควบแน่นที่คอยล์เย็นและกลายเป็นหยดน้ำ โดยระบบการผลิตน้ำจากอากาศโดยใช้การทำความเย็นแบบอัดไอนี้มีข้อดีคือสามารถผลิตน้ำได้จำนวนมากกว่า 1000 L/day โดยการใช้ร่วมกับระบบปรับอากาศขนาดใหญ่ [3] แต่มีข้อเสียคือ ต้องใช้พลังงานไฟฟ้าในกระบวนการผลิตน้ำค่อนข้างสูงประมาณ 1-4 L/kWh [7-9] และจะยิ่งสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้ามากยิ่งขึ้นเมื่อทำงานที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ โดยการทำงานที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่า 20% จากแผนภูมิไซโครเมตริกจะเห็นว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้างจะมีค่าต่ำกว่า 0 °C จึงทำให้เกิดน้ำที่ควบแน่นที่คอยล์เย็นกลายเป็นน้ำแข็ง ซึ่งจะเกิดการสะสมของน้ำแข็งและอุดตันคอยล์เย็นทำให้ระบบไม่สามารถทำงานในสภาพอากาศแบบนี้ได้ [10] สำหรับการสกัดน้ำจากอากาศด้วยการทำความเย็นแบบอัดไอนี้จะให้สมรรถนะดีที่สุด เนื่องจากเทคโนโลยีนี้มีความสามารถในการผลิตน้ำสูง สามารถออกแบบปรับเพิ่มขนาดได้ตามความต้องการ แม้ว่าต้องใช้พลังงานไฟฟ้าในการขับเคลื่อนการทำงานของระบบต่าง ๆ แต่ก็ให้ประสิทธิภาพในการทำงานสูง มีความเป็นไปได้ในการนำไปใช้งานได้จริง แต่ยังคงติดอยู่ในด้านการมีต้นทุนการผลิตที่สูง ดังนั้นการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตน้ำจากอากาศด้วยการทำความเย็นแบบอัดไอ เพื่อทำให้ความสามารถในการผลิตน้ำสูงขึ้นในขณะที่ใช้พลังงานน้อยลงเพื่อทำให้ต้นทุนในการผลิตน้ำจากอากาศต่ำลงจึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจ

วิธีการวิจัย

1. ระบบผลิตน้ำจากอากาศ

ต้นแบบระบบผลิตน้ำจากอากาศใช้หลักการทำความเย็นแบบอัดไอประกอบด้วยเครื่องอัดไอ (Compressor) เครื่องควบแน่น (Condenser) วาล์วลดความดัน (Expansion Valve) เครื่องทำระเหยหรือคอยล์เย็น (Evaporator) โดยระบบทำความเย็นแบบอัดไอนี้มีกำลังการทำงาน 12,283 BTU/hr ใช้สารทำความเย็น R 22/1.19 เนื่องจากสารทำความเย็นชนิดนี้ไม่ติดไฟ เหมาะกับการทดลองเพิ่มประสิทธิภาพของระบบในอนาคตที่อาจมีประกายไฟ ทำให้อากาศชื้นเย็นลงได้ และติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ทำหน้าที่เสมือนเครื่องทำระเหยจำนวน 4 ชุด (จากภาพที่ 2 เครื่องทำระเหยมีทั้งหมด 5 ชุด แต่การศึกษาในครั้งนี้ทำการทดลอง 4 ชุดเนื่องจากให้อัตราการผลิตน้ำจากอากาศที่สูงสุด) วางเรียงต่อกันแบบอนุกรม เพื่อให้อากาศที่เข้าสู่ระบบมีระยะเวลาในการแลกเปลี่ยนความร้อนมากขึ้นแต่ละชุดมีพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน 2.45 m² ติดตั้งไว้ภายในท่อสี่เหลี่ยมขนาด 0.35 m x 0.35 m เพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศจากภายนอก ระบบการป้อนอากาศใช้โบลเวอร์ขนาด 373 W อากาศที่มีความชื้นสูงไหลผ่านท่ออากาศเข้า ชุดคอยล์เย็นและพัดลม แล้วปล่อยอากาศที่มีความชื้นต่ำออกสู่ระบบภายนอก ดังแสดงในภาพที่ 1 และ 2



ภาพที่ 1 แผนภาพแสดงกระบวนการผลิตน้ำจากอากาศด้วยระบบวัฏจักรอัดไอ



ภาพที่ 2 ระบบผลิตน้ำจากอากาศด้วยการทำความเย็นแบบอัดไอ

ตารางที่ 1 ข้อมูลจำเพาะระบบผลิตน้ำจากอากาศด้วยการทำความเย็นแบบอัดไอ

อุปกรณ์	รายละเอียด
ชุดเครื่องอัดไอ	LG/S13 LCK NR1
กำลังการทำความเย็น	3,600 W (12,283 BTU/hr)
กำลังไฟฟ้าชุดเครื่องอัดไอ	1,150 W
สารทำความเย็น	R 22/1.19
พัดลม	373 W
เครื่องทำระเหยหรือคอยล์เย็น	cross flow 4 panel

2. การประเมินสมรรถนะระบบผลิตน้ำจากอากาศ

ระบบผลิตน้ำจากอากาศทำการทดลองในเขตพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่ ช่วงเดือนกรกฎาคมซึ่งเป็นฤดูฝน ที่อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในช่วง 25-35 °C และ 75-90% ตามลำดับ โดยใช้การควบคุมสภาวะอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนเข้าระบบผลิตน้ำจากอากาศด้วยเครื่องปรับสภาพอากาศ ESSOM รุ่น TH 518 โดยเครื่องปรับสภาพอากาศมีระบบทำความเย็นเพื่อควบคุมอุณหภูมิอากาศให้เย็นลงรวมไปถึงการทำให้ลดความชื้นในอากาศ มีระบบทำความร้อนด้วยฮีตเตอร์เพื่อควบคุมอุณหภูมิอากาศให้ร้อนขึ้น และมีระบบเพิ่มความชื้นในอากาศด้วยหม้อต้มไอน้ำเพื่อควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศให้มีค่าสูงขึ้น โดยระบบที่กล่าวมาจะทำให้สามารถควบคุมรวมไปถึงการปรับค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ก่อนเข้าระบบผลิตน้ำจากอากาศได้ ในขณะที่อัตราการไหลของอากาศป้อนระหว่าง 6-8 m³/min ซึ่งเป็นช่วงที่ให้อัตราการผลิตน้ำจากอากาศสูงสุดจากงานวิจัยที่ผ่านมา [17] โดยใช้ฮีตเตอร์ควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์พัดลม Mitsubishi รุ่น D700 ความดันบรรยากาศ 100.91 kPa ระยะเวลาทดสอบเก็บตัวอย่างน้ำทุก ๆ 1 ชั่วโมง เทอร์มิเตอร์และเครื่องวัดความชื้นคือ UNI-T รุ่น A12T ช่วงการวัด -10-50 °C (ความแม่นยำ ±1°C) ในขณะที่มีความชื้นในอากาศสามารถวัดได้ระหว่าง 10-99 % (ความแม่นยำ ±5%) อัตราการไหลของอากาศใช้เครื่องวัดแบบใบพัด รุ่น WM04 การวัดความเร็วในช่วง 0-45 m/s (ความแม่นยำ 3%) น้ำหนักน้ำวัดจากเครื่องชั่งดิจิตอล Sunford รุ่น ACS-30-FC31 ขนาด 30 kg (ความละเอียดชั่ง 10 g) การวิเคราะห์ข้อมูลดำเนินการเพื่อหาผลกระทบของอุณหภูมิ ความชื้น อัตราการไหลของอากาศ และประสิทธิภาพการใช้พลังงานที่มีต่ออัตราการผลิตน้ำจากอากาศ [11] สามารถหาได้จากสมการที่ 1

$$WGR = \frac{V}{T} \quad (1)$$

เมื่อ WGR (Water generation rate) คือ อัตราการผลิตน้ำจากอากาศ (L/h) V คือ ปริมาตรน้ำ (L) และ T คือ เวลา (h)

3. อัตราการใช้พลังงานจำเพาะของระบบผลิตน้ำจากอากาศ

การวิเคราะห์อัตราการใช้พลังงานจำเพาะ คือ การใช้พลังงานต่อหน่วยถือเป็นหนึ่งในดัชนีประสิทธิภาพพลังงาน

[9] สามารถหาได้จากสมการที่ 2 โดย P คือ กำลังไฟฟ้า (kW) ได้จากการวัด

กำลังไฟฟ้ารวมของระบบผลิตน้ำจากอากาศซึ่งมาจากชุดเครื่องอัดไอและพัดลม

$$SEC = \frac{P}{WGR} \quad (2)$$

เมื่อ SEC (Specific energy consumption) คือ อัตราการใช้พลังงานจำเพาะของระบบผลิตน้ำจากอากาศ (kWh/L) P คือ กำลังไฟฟ้า (kW) และ WGR คือ อัตราการผลิตน้ำจากอากาศ (L/h)

4. การวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์ของระบบผลิตน้ำจากอากาศ

การวิเคราะห์ผลเชิงเศรษฐศาสตร์จะประกอบไปด้วยการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการทำงานและระยะเวลาคืนทุน ใช้วิธีเส้นตรงในการคิดค่าเสื่อมราคา ไม่คิดค่าโรงเรือน ค่าภาษี และค่าประกัน [12] สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

4.1 ค่าใช้จ่ายในการทำงาน

$$TC = FC + VC \quad (3)$$

โดยที่ TC คือ ค่าใช้จ่ายรวมจากการผลิตน้ำ (baht/yr) FC คือ ต้นทุนคงที่ (baht/yr) VC ต้นทุนผันแปร (baht/yr)

$$FC = D + I \quad (4)$$

โดยที่ D คือ ค่าเสื่อมราคา (baht/yr) I คือ ค่าดอกเบี้ย (%/yr)

$$VC = (L + E + M) \times A \quad (5)$$

โดยที่ L คือ ค่าแรงงาน (baht/d) E คือ ค่าไฟฟ้า (baht/d) M คือ ค่าซ่อมบำรุง (baht/d) A คือ จำนวนวันที่ปฏิบัติงานต่อปี (d/yr)

4.2 ระยะเวลาคืนทุน

$$PB = \frac{TC}{CR \times WGR \times h \times A} \quad (6)$$

โดยที่ PB คือ ระยะเวลาคืนทุน (ปี) CR คือ อัตราการคืนน้ำ (bath/L) WGR คือ อัตราการผลิตน้ำจากอากาศ (L/h) h คือ ระยะเวลาการทำงานของระบบ (h/d)

5. การประเมินประสิทธิภาพการทำความเย็นของระบบผลิตน้ำจากอากาศ

การประเมินประสิทธิภาพการทำความเย็นของระบบผลิตน้ำจากอากาศจะใช้การหาค่า EER (Energy Efficiency Ratio, อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้วัดประสิทธิภาพในการใช้พลังงานของการทำความเย็นแสดงถึงอัตราส่วนระหว่างความสามารถในการทำความเย็น (BTU/h) ต่อกำลังไฟฟ้าที่ใช้ (W) ค่า EER ที่สูงกว่าหมายถึง ระบบทำความเย็นนั้นมีประสิทธิภาพในการใช้พลังงานที่ดีกว่าสามารถให้ความเย็นได้มากต่อหน่วยพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ [13]

$$EER = \frac{C}{P} \quad (7)$$

โดยที่ EER คือ อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน (BTU/h/W) P คือ กำลังไฟฟ้าที่ใช้ (W) และ C คือ ความสามารถในการทำความเย็น (BTU/h) หาได้จากสมการดังต่อไปนี้

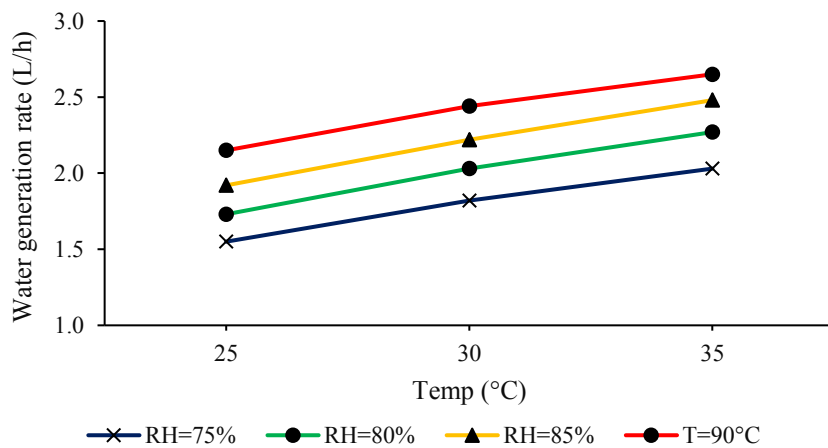
$$C = \Delta h \times Q \times 68.46 \quad (8)$$

โดยที่ Δh คือ ค่าความแตกต่างเอนทาลปีของอุณหภูมิอากาศ (kJ/kg) Q อัตราการไหลของอากาศ (m^3/min)

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

1. ผลของการปรับอุณหภูมิที่มีต่อการผลิตน้ำจากอากาศ

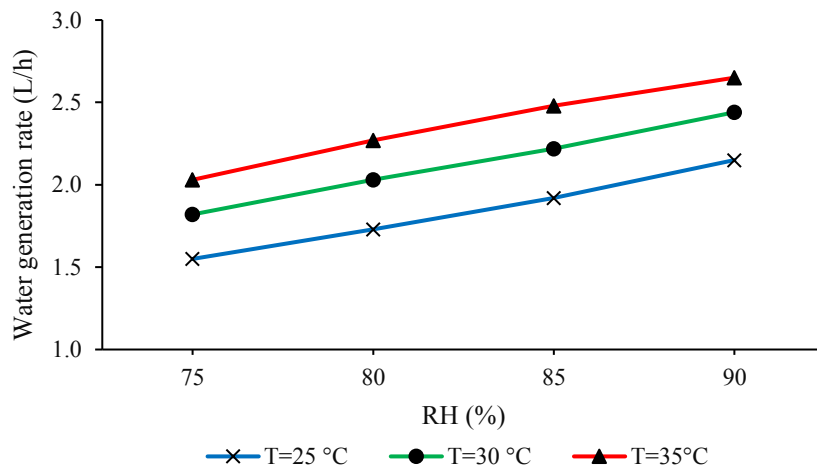
ภาพที่ 2 แสดงถึงผลของการปรับอุณหภูมิอากาศก่อนเข้าระบบผลิตน้ำจากอากาศเพื่อเปรียบเทียบกับปริมาณน้ำที่ได้ โดยทำการปรับค่าอุณหภูมิที่ 25-35 °C ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 75-90% อัตราการไหลของอากาศเข้าระบบ 8 m^3/min ผลการศึกษาพบว่าอุณหภูมิของอากาศมีผลต่ออัตราการผลิตน้ำจากอากาศ อุณหภูมิเหมาะสมที่ทำให้อัตราการผลิตน้ำสูงสุดเกิดขึ้นที่ 35 °C ในทุกค่าความชื้นสัมพัทธ์ ในขณะที่อัตราการผลิตน้ำต่ำสุดเกิดขึ้นที่ 25 °C ในทุกค่าความชื้นสัมพัทธ์เช่นเดียวกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอุณหภูมิของอากาศหรืออากาศที่มีอุณหภูมิสูง จะส่งผลให้ระบบผลิตน้ำได้เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [8,15] โดยอากาศที่อุณหภูมิ 35 °C สามารถผลิตน้ำได้สูงสุดที่ 2.03-2.65 L/h เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงนั้นไอน้ำสามารถแทรกตัวอยู่ในอากาศได้ในปริมาณที่สูงกว่าอุณหภูมิต่ำ ซึ่งคุณสมบัติของอากาศในลักษณะนี้สามารถดูได้จากแผนภูมิไซโครเมตริก



ภาพที่ 2 ผลของการปรับอุณหภูมิที่มีต่อการผลิตน้ำจากอากาศ

2. ผลของการปรับความชื้นสัมพัทธ์ที่มีต่อการผลิตน้ำจากอากาศ

ภาพที่ 3 แสดงถึงผลของการปรับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนเข้าระบบผลิตน้ำจากอากาศเพื่อเปรียบเทียบกับปริมาณน้ำที่ได้ โดยทำการปรับค่า ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 75-90% อุณหภูมิที่ 25-35 °C อัตราการไหลอากาศเข้าระบบ 8 m³/min ผลการศึกษาพบว่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศมีผลต่ออัตราการผลิตน้ำจากอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์เหมาะสมที่ทำให้อัตราการผลิตน้ำสูงสุดเกิดขึ้นที่ 90% ในทุกค่าอุณหภูมิ ในขณะที่อัตราการผลิตน้ำต่ำสุดเกิดขึ้นที่ 75% ในทุกค่าอุณหภูมิเช่นเดียวกัน แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหรืออากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูงจะส่งผลให้ระบบผลิตน้ำได้เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [8, 11, 15] โดยอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 90% สามารถผลิตน้ำได้สูงสุดที่ 2.15-2.65 L/h เนื่องมาจากที่ความชื้นสัมพัทธ์สูงนั้นไอน้ำสามารถแทรกตัวอยู่ในอากาศได้ในปริมาณที่สูงกว่าอุณหภูมิต่ำ ซึ่งคุณสมบัติของอากาศในลักษณะนี้สามารถดูได้จากแผนภูมิไซโครเมตริกเช่นเดียวกัน

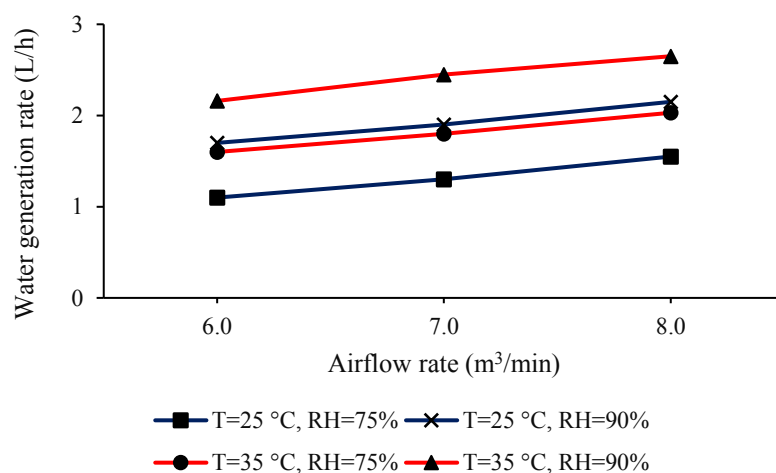


ภาพที่ 3 ผลของการปรับความชื้นสัมพัทธ์ที่มีต่อการผลิตน้ำจากอากาศ

3. ผลของการปรับอัตราการไหลของอากาศที่มีต่อการผลิตน้ำจากอากาศ

ภาพที่ 4 แสดงถึงผลของการปรับอัตราการไหลของอากาศเข้าระบบผลิตน้ำจากอากาศเพื่อเปรียบเทียบกับปริมาณน้ำที่ได้ โดยทำการปรับค่าอัตราการไหลของอากาศ 6-8 m³/min อุณหภูมิที่ 25 และ 35 °C ความชื้นสัมพัทธ์ของ

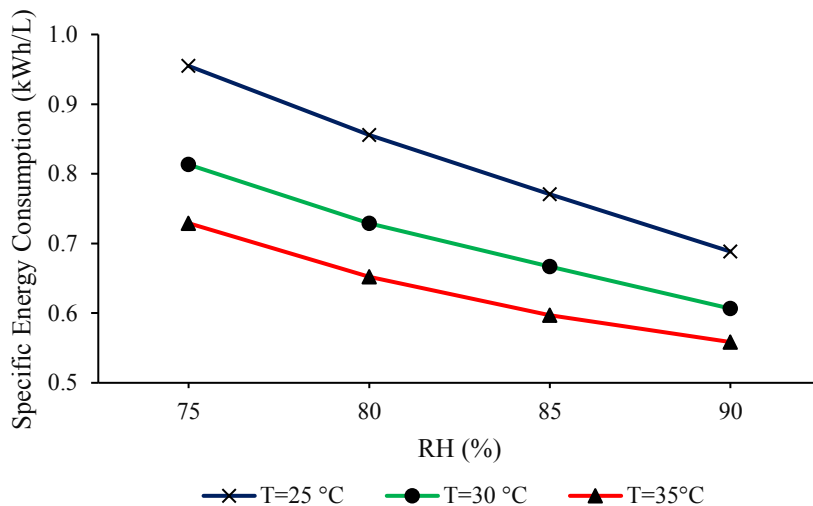
อากาศ 75% และ 90% ผลการศึกษาพบว่า อัตราการไหลของอากาศมีผลต่ออัตราการผลิตน้ำจากอากาศ อัตราการไหลของอากาศที่ทำให้อัตราการผลิตน้ำสูงสุดเกิดขึ้นที่ $8 \text{ m}^3/\text{min}$ ทุกสภาพอากาศ ในขณะที่อัตราการผลิตน้ำต่ำสุดเกิดขึ้นที่ $6 \text{ m}^3/\text{min}$ ทุกสภาพอากาศเช่นเดียวกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของอากาศ จะส่งผลให้ระบบผลิตน้ำได้เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [7,14] โดยอากาศที่อัตราการไหลของอากาศ $8 \text{ m}^3/\text{min}$ สามารถผลิตน้ำได้สูงสุดที่ 1.55-2.65 L/h แต่จะเห็นได้ว่าที่อัตราการไหลของอากาศ $8 \text{ m}^3/\text{min}$ อาจยังไม่ใช่อัตราการผลิตน้ำสูงสุดของระบบนี้เนื่องจากลักษณะกราฟเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศทำให้อัตราการผลิตน้ำยังมีค่าสูงขึ้น ซึ่งเป็นข้อจำกัดของพัดลมป้อนอากาศเข้าระบบที่สามารถทำได้สูงสุดที่ $8 \text{ m}^3/\text{min}$ ดังนั้นการเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจะทำให้อัตราการผลิตน้ำสูงขึ้นซึ่งจะทำการปรับปรุงและศึกษาในครั้งต่อไป



ภาพที่ 4 ผลของการปรับอัตราการไหลของอากาศที่มีต่อการผลิตน้ำจากอากาศ

4. อัตราการใช้พลังงานจำเพาะของระบบผลิตน้ำจากอากาศ

ภาพที่ 5 แสดงถึงอัตราการใช้พลังงานจำเพาะของระบบผลิตน้ำจากอากาศ ซึ่งในอุปกรณ์หลักในระบบที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจะประกอบไปด้วย เครื่องอัดไอ พัดลมระบายความร้อนของเครื่องควบแน่น และพัดลมดูดอากาศเข้าระบบ ซึ่งมีกำลังไฟรวมทั้งหมด 1,523 W ผลการศึกษาพบว่า อัตราการใช้พลังงานจำเพาะของระบบผลิตน้ำจากอากาศ มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0.56– 0.95 kWh/L อัตราการใช้พลังงานจำเพาะของระบบผลิตน้ำจากอากาศต่ำสุดจะเกิดขึ้นที่สภาพอากาศที่มีความชื้นสูงและอุณหภูมิสูง เนื่องจากให้อัตราการผลิตน้ำสูง ส่วนอัตราการใช้พลังงานจำเพาะของระบบผลิตน้ำจากอากาศสูงสุดจะเกิดขึ้นที่สภาพอากาศที่มีความชื้นต่ำและอุณหภูมิต่ำ เนื่องจากให้อัตราการผลิตน้ำต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [9,16,17] โดยพบว่าอัตราการใช้พลังงานจำเพาะของระบบผลิตน้ำจากอากาศ มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0.18– 1.78 kWh/L



ภาพที่ 5 อัตราการใช้พลังงานจำเพาะของระบบผลิตน้ำจากอากาศ

5. ผลการวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์ระบบผลิตน้ำจากอากาศ

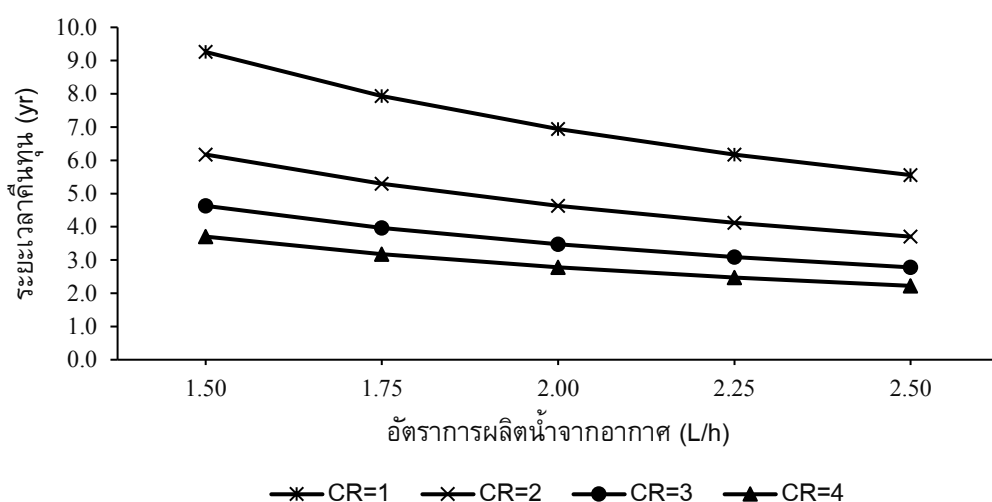
การวิเคราะห์ผลเชิงเศรษฐศาสตร์จะประกอบไปด้วยการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการทำงานและระยะเวลาคืนทุน โดยกำหนดให้ตัวแปรที่มีค่าดังต่อไปนี้ ราคากระบบผลิตน้ำจากอากาศ (P) 100,000 baht มูลค่าซาก (s) คิดที่ 10 % ของราคากระบบผลิตน้ำจากอากาศ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 10,000 บาท อายุการใช้งาน (y) คิดที่ 10 yr ทำให้ได้ค่าเสื่อมราคา (D) 9,000 baht/yr ค่าดอกเบี้ย (i) คิดที่ 7.5 %/yr ทำให้ได้ค่าดอกเบี้ย 7,500 baht/yr ค่าแรงงาน (L) 340 baht/d คิดจากค่าแรงขั้นต่ำของจังหวัดเชียงใหม่ ใช้ผู้ปฏิบัติงาน 1 คน ระยะเวลาการทำงานของระบบผลิตน้ำจากอากาศ (h) คิดที่ 12 h/d โดยทำงานในช่วงเวลา 18.00-6.00 น. เนื่องจากให้อัตราการผลิตน้ำจากอากาศและประสิทธิภาพการใช้พลังงานที่สูง [17] อัตราค่าไฟฟ้า (e) คิดที่ 4.2 baht/Unit จำนวนวันที่ปฏิบัติงานต่อปี (A) 300 d/yr ค่าอัตราการผลิตน้ำจากอากาศ (wGR) 1.5-2.5 L/h ต่อปี เป็นค่าที่ได้จากการทดสอบระบบผลิตน้ำจากอากาศ เพื่อเป็นการจำลองสถานการณ์การใช้งานของระบบผลิตน้ำจากอากาศจากน้อยไปมาก อัตราราคาค่าน้ำ (CR) 1-4 baht/L ได้มาจากการประมาณของราคาขายน้ำดื่มในพื้นที่ทางไกลและขาดแคลนน้ำ ใช้วิธีเส้นตรงในการคิดค่าเสื่อมราคา ไม่คิดค่าโรงเรือน ค่าภาษี และค่าประกัน คิดค่าใช้จ่ายในปี 2567 เป็นฐานการคำนวณ ซึ่งมีตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ตัวแปรการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

ตัวแปรการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์	ค่าที่ใช้	หน่วย
ราคากระบบผลิตน้ำจากอากาศ (P)	100,000	baht
มูลค่าซาก (s)	10	%
อายุการใช้งาน (y)	10	yr
ค่าเสื่อมราคา (D)	9,000	baht/yr
ค่าดอกเบี้ย (i)	7.5	%/yr
ค่าแรงงาน (L)	340	baht/d
อัตราค่าไฟฟ้า (e)	4.2	baht/Unit
ค่าซ่อมบำรุง (M)	9.4 (50 % ของ E)	baht/d
ระยะเวลาการทำงานของระบบผลิตน้ำจากอากาศ (h)	12	h/d

อัตราการผลิตน้ำจากอากาศ (WGR)	1.5-2.5	L/h
จำนวนวันที่ปฏิบัติงานต่อปี (A)	300	d/yr
อัตราราคาค่าน้ำ (CR)	1-4	baht/L

ภาพที่ 6 แสดงระยะเวลาคืนทุนของระบบผลิตน้ำจากอากาศเพื่อใช้สำหรับผลิตน้ำดื่มในพื้นที่ท่าंगไกและขาดแคลนน้ำ โดยระยะเวลาคืนทุนคืออัตราส่วนของเงินลงทุนต่อผลตอบแทนสุทธิที่ได้รายปี การวิเคราะห์พบว่าการเพิ่มอัตราการผลิตน้ำจากอากาศ และการเพิ่มอัตราราคาค่าน้ำเพิ่มขึ้นส่งผลให้ระยะเวลาคืนทุนลดลง อัตราการผลิตน้ำจากอากาศ 1.5-2.5 L/h และอัตราราคาค่าน้ำอยู่ในช่วง 1-4 baht/L จะให้ระยะเวลาคืนทุนอยู่ในช่วง 2.22-9.25 yr การใช้อัตราการผลิตน้ำจากอากาศ 1.5-2.5 L/h เป็นค่าเฉลี่ยที่ใช้เท่ากันตลอดทั้งปีเพื่อประมาณการเท่านั้นซึ่งในสภาพอากาศจริงอัตราการผลิตน้ำจากอากาศจะเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศตามช่วงวันเวลาและฤดูกาล และการใช้ระบบผลิตน้ำจากอากาศนั้นมีต้นทุนที่สูงกว่าการผลิตน้ำแบบอื่น ๆ ดังนั้นในการใช้งานจริงอาจต้องใช้ในฤดูแล้งหรือใช้ใน พื้นที่ท่าंगไกและขาดแคลนน้ำจึงจะเหมาะสมกับการใช้งาน ทำให้ระยะเวลาคืนทุนของระบบผลิตน้ำจากอากาศสั้นลง



ภาพที่ 6 ผลของอัตราการผลิตน้ำจากอากาศและอัตราราคาค่าน้ำที่มีต่อระยะเวลาคืนทุน

5. ผลการประเมินประสิทธิภาพการทำความเย็นของระบบผลิตน้ำจากอากาศ

การประเมินประสิทธิภาพการทำความเย็นของระบบผลิตน้ำจากอากาศใช้การหาค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน (EER) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้วัดประสิทธิภาพในการใช้พลังงานของการทำความเย็น โดยหาจากสถานะของระบบผลิตน้ำจากอากาศที่ให้อัตราการผลิตน้ำต่ำสุดและสูงสุดดังตารางที่ 3

อัตราการผลิตน้ำต่ำสุดทำการปรับค่าอุณหภูมิขาเข้า (T_{in}) ที่ 25 °C ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศขาเข้า (RH_{in}) ที่ 75% ทำให้ได้ค่าอุณหภูมิขาออก (T_{out}) ที่ 16.6 °C ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศขาออก (RH_{out}) ที่ 88.2 % ที่อัตราการไหลอากาศเข้าระบบ (Q) 6 m³/min อุปกรณ์หลักในระบบที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจะประกอบไปด้วย เครื่องอัดไอ พัดลมระบายความร้อนของเครื่องควบแน่น และพัดลมดูดอากาศเข้าระบบ ซึ่งมีกำลังไฟฟ้ารวม (P) ทั้งหมด 1,458 W ทำให้ได้ค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน (EER) ของระบบผลิตน้ำจากอากาศอยู่ที่ 6.52 BTU/h/W

อัตราการผลิตน้ำสูงสุดทำการปรับค่าอุณหภูมิอากาศเข้าที่ 35 °C ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเข้าที่ 90% ทำให้ได้ค่าอุณหภูมิอากาศออกจะอยู่ที่ 29.5 °C ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศออกจะอยู่ที่ 93.8 % ที่อัตราการไหลอากาศเข้าระบบ 8 m³/min เนื่องจากพัดลมดูดอากาศเข้าระบบต้องใช้พลังงานไฟฟ้าสูงขึ้นทำให้กำลังไฟฟ้ารวมทั้งหมดเพิ่มขึ้น 1,523 W ทำให้ได้ค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานของระบบผลิตน้ำจากอากาศอยู่ที่ 9.49 BTU/h/W แต่โดยรวมค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน (EER) ก็ยังมีค่าที่สูงกว่าที่สภาวะของระบบผลิตน้ำจากอากาศที่ให้อัตราการผลิตน้ำต่ำสุด ถึงแม้ว่าจะต้องพลังงานไฟฟ้าสูงขึ้นและทำงานในสภาวะที่มีความชื้นสูงซึ่งจากงานวิจัยอื่นพบว่าจะทำให้ค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานลดลง [18]

ตารางที่ 3 ตารางแสดงอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานของระบบผลิตน้ำจากอากาศ

T_{in} (°C)	RH_{in} (%)	T_{out} (°C)	RH_{out} (%)	Δh (kJ/kg)	Q (m ³ /min)	P (W)	EER (BTU/h/W)
25	75	16.6	88.2	23.17	6	1458	6.52
35	90	29.5	93.8	26.4	8	1523	9.49

สรุปผลการวิจัย

1. ผลของการปรับอุณหภูมิมีผลต่อการผลิตน้ำจากอากาศ การเพิ่มอุณหภูมิของอากาศหรืออากาศที่มีอุณหภูมิสูงจะส่งผลให้ระบบผลิตน้ำได้เพิ่มสูงขึ้น อุณหภูมิเหมาะสมที่ทำให้อัตราการผลิตน้ำสูงสุดเกิดขึ้นที่ 35 °C สามารถผลิตน้ำได้สูงสุดที่ 2.03-2.65 L/h
2. ผลของการปรับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศมีผลต่อการผลิตน้ำจากอากาศ การเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหรืออากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูงจะส่งผลให้ระบบผลิตน้ำได้เพิ่มสูงขึ้น ความชื้นสัมพัทธ์เหมาะสมที่ทำให้อัตราการผลิตน้ำสูงสุดเกิดขึ้นที่ 90% สามารถผลิตน้ำได้สูงสุดที่ 2.15-2.65 L/h
3. ผลของการปรับอัตราการไหลของอากาศเข้าระบบผลิตน้ำจากอากาศมีผลต่ออัตราการผลิตน้ำจากอากาศ การเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจะส่งผลให้ระบบผลิตน้ำได้เพิ่มสูงขึ้น อัตราการไหลของอากาศที่ทำให้อัตราการผลิตน้ำสูงสุดเกิดขึ้นที่ 8 m³/min สามารถผลิตน้ำได้สูงสุดที่ 1.55-2.65 L/h
4. อัตราการใช้พลังงานจำเพาะของระบบผลิตน้ำจากอากาศ มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0.56– 0.95 kWh/L
5. ระยะเวลาคืนทุนของระบบผลิตน้ำจากอากาศอยู่ในช่วง 2.22-9.25 yr
6. ค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานของระบบผลิตน้ำจากอากาศมีค่าอยู่ที่ 6.52-9.49 BTU/h/W

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณโครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทนในกลุ่มประเทศอาเซียน สำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่ได้อนุเคราะห์ให้ทุนสนับสนุนงบประมาณการวิจัย รวมไปถึงเครื่องมือ อุปกรณ์และพื้นที่ในการทำวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] Mishra, R. K. (2023). Fresh water availability and its global challenge. British Journal of Multidisciplinary and Advanced Studies, 4(3), 1-78.

- [2] Shafeian, N., Ranjbar, A. A., & Gorji, T. B. (2022). Progress in atmospheric water generation systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 161, 112325.
- [3] นิกราน หอมดวง, เจนจิรา อุตเรือน, กิตติกร สาสุจิตต์, ชูรัตน์ ธารารักษ์, นงเยาว์ เตชะใหม่, แสนวสันต์ ยอดคำ และ ประพนอม ยิ่งคำมัน. (2564). ปฏิบัติการควบแน่นของน้ำจากอากาศด้วยการใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนรวมกับตู้แช่เย็น. วารสารวิชาการพลังงานทดแทนสู่ชุมชน. สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร
- [4] Alkinani, S. S., El-Amin, M. F., & Brahimi, T. (2022). Numerical modeling and analysis of harvesting atmospheric water using porous materials. *Separations*, 9(11), 364.
- [5] Raveesh, G., Goyal, R., & Tyagi, S. K. (2021). Advances in atmospheric water generation technologies. *Energy Conversion and Management*, 239, 114226.
- [6] Magrini, A., Cattani, L., Cartesegna, M., & Magnani, L. (2015). Integrated systems for air conditioning and production of drinking water–Preliminary considerations. *Energy Procedia*, 75, 1659-1665.
- [7] Patel, J., Patel, K., Mudgal, A., Panchal, H., & Sadasivuni, K. K. (2020). Experimental investigations of atmospheric water extraction device under different climatic conditions. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 38, 100677.
- [8] Zolfagharkhani, S., Zamen, M., & Shahmardan, M. M. (2018). Thermodynamic analysis and evaluation of a gas compression refrigeration cycle for fresh water production from atmospheric air. *Energy Conversion and Management*, 170, 97-107.
- [9] Talib, A. J., Khalifa, A. H. N., & Mohammed, A. Q. (2019). Performance study of water harvesting unit working under iraqi conditions. *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*, 27(01), 1950011.
- [10] Salehi, A. A., Ghannadi-Maragheh, M., Torab-Mostaedi, M., Torkaman, R., & Asadollahzadeh, M. (2020). A review on the water-energy nexus for drinking water production from humid air. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 120, 109627.
- [11] Ahmad, F. F., Ghenai, C., Al Bardan, M., Bourgon, M., & Shanableh, A. (2022). Performance analysis of atmospheric water generator under hot and humid climate conditions: drinkable water production and system energy consumption. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 6, 100270.
- [12] เพ็ญจันทร์ จริ่งจิตร. (2552). การวิเคราะห์ต้นทุน-ปริมาณการผลิต-กำไร. วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยรังสิต. กรุงเทพฯ.
- [13] กันตถณ มะหาหมัด, ปิ่นพงษ์ ยอดสะคุณ และวนิดา เพ็ชรลมูล. (2021). ระบบการปรับปรุงประสิทธิภาพเครื่องปรับอากาศ แบบแยกส่วนโดยการฉีดสเปรย์น้ำที่แผงคอยล์ร้อน. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏศรีสะเกษ, 1(1), 10-18.
- [14] Fu, H., Xu, W., Liu, Z., & Yan, K. (2022). Fog droplet collection by corona discharge in a needle–cylinder electrostatic precipitator with a water cooling system. *Separations*, 9(7), 169.
- [15] Bagheri, F. (2018). Performance investigation of atmospheric water harvesting systems. *Water resources and industry*, 20, 23-28.

- [16] Peeters, R., Vanderschaeghe, H., Rongé, J., & Martens, J. A. (2020). Energy performance and climate dependency of technologies for fresh water production from atmospheric water vapour. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 6(8), 2016-2034.
- [17] Homdoun, N., Sasujit, K., Thararux, C. (2022). Development prototype of water agricultural generated system from air with using ground coolant and solar energy final report.
- [18] Sripadej, S. (2021). ความชื้นในห้องพักที่มีห้องน้ำในตัวส่งผลต่อค่าไฟฟ้าจากเครื่องปรับอากาศ. *Journal of Architecture and Design*, 4(4), 908-919.