

การศึกษาการจำลองแบบระบบทำความเย็นแบบใช้อีเจกเตอร์-คอมเพรสชัน ด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

A Simulation Study on a Solar Ejector-Compression Refrigeration System

ไทรชา สูดสวนสี* ธนาคม สุนทรชัยนาคแสง* และ สมบัติ ทิมทรัพย์**

*ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพฯ 10800

โทร (02) 913-2500 ต่อ 8319 , โทรสาร (02) 587-0026 , E-mail : tss@kmitnb.ac.th

**คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

19/1 ถนนเพชรเกษม นongkhaem กรุงเทพฯ 10160

โทร (02) 807-4500 ต่อ 315 , โทรสาร (02) 807-4530 , E-mail : teekasap@health.moph.co.th

Thaithacha Sudsuansi* Thanakom Soontornchainacksaeng* and Sombat Teekasap**

*Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering

King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok, Bangkok 10800, Thailand

Tel (02) 913-2500 Ext. 8319 , Fax (02) 587-0026

**Faculty of Engineering, South-East Asia University

19/1 Petkasem Rd., Nongkhaem, Bangkok 10160, Thailand

Tel (02) 807-4500 Ext. 315 , Fax (02) 807-4530

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษา วิเคราะห์ และจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ของระบบทำความเย็นพลังงานแสงอาทิตย์แบบอีเจกเตอร์-คอมเพรสชัน เพื่อนำไปใช้ในการผลิตน้ำแข็ง โดยใช้ทฤษฎีอีเจกเตอร์ และใช้ทฤษฎีการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างระบบทำความเย็นกับแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อใช้จำลองแบบระบบให้ได้ผลที่ใกล้เคียงทั้งปี เทคนิคในการจำลองแบบเพื่อหาสภาวะการทำงานใช้วิธีการของนิวตัน-ราฟสัน ระบบนี้ประกอบด้วย แผงรับพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 20 m^2 หน่วยสะสมความร้อนขนาด 1.1 m^3 และหน่วยทำความเย็นแบบใช้อีเจกเตอร์ขนาด 1.6 kW โดยที่สารทำความเย็นของระบบเท่ากับ R12 ในการจำลองระบบใช้ข้อมูลพลังงานแสงอาทิตย์จากกรมอุตุนิยมวิทยา เขตบางนา ผลที่ได้จากการจำลองแบบพบว่าเมื่อให้อุณหภูมิเงินเนอเรเตอร์เท่ากับ 80°C อุณหภูมิคอนเดนเซอร์ 40°C และอุณหภูมิอีวาพอเรเตอร์เท่ากับ -10°C ผลที่ได้คือภาระความร้อนที่เงินเนอเรเตอร์เท่ากับ 5.62 kW ภาระความร้อนที่อีวาพอเรเตอร์ 1.57 kW ค่า COP เท่ากับ 0.27 ประสิทธิภาพของระบบเฉลี่ยทั้งปีเท่ากับ 12.2% และปริมาณการผลิตน้ำแข็งเฉลี่ยทั้งปีเท่ากับ 64.7 kg/day

Abstract

This research presents a mathematical simulation study of a solar ejector-compression refrigeration system to produce ice. The existing ejector theory of ejector refrigeration system and theory of heat exchanger between ejector refrigeration system and solar collector has been employed to simulate the system for a whole year round. Simulation technique for various operating conditions used was Newton–Raphson method. The system was designed to work with solar collector of 20 m^2 area in Bangna District of Bangkok, thermal storage of 1.1 m^3 volume and cooling capacity of 1.6 kW with Freon R12 as the working fluid at the generator temperature of 80°C , condenser temperature of 40°C , and an evaporator temperature of -10°C with a required generator heat load of 5.62 kW , and an calculated evaporator heat load of 1.57 kW . Annual average values for COP, system efficiency, and ice production were 0.27, 12.2% and 64.7 kg/day respectively.

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A	= พื้นที่ (m^2)
A _C	= พื้นที่แผงรับแสงอาทิตย์ (m^2)
COP	= สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะ
C _p	= ค่าความร้อนจำเพาะ (J/kg·K)
F _R	= ตัวประกอบการนำเอาความร้อนออกจากแผงรับรังสี
G _T	= การแผ่รังสีจากแสงอาทิตย์ (W/m^2)
h	= เอนทัลปี (kJ/kg)
k	= อัตราส่วนความร้อนจำเพาะ
M	= มัคนัมเบอร์
m	= อัตราการไหลของสารทำความเย็น (kg/s)
P	= ความดัน (kPa)
Q	= อัตราความร้อน (W)
Q _{Loss}	= อัตราความร้อนที่สูญเสียจากถังสะสมความร้อนไปสู่บรรยากาศ (W)
Q _u	= อัตราความร้อนจากแผงรับแสงอาทิตย์ (W)
Q _{Load}	= อัตราความร้อนที่ต้องให้กับเจนเนอเรเตอร์ภายในระบบทำความเย็น (W)
R	= ค่าคงที่ของก๊าซสำหรับสารทำความเย็นที่สภาวะไอ (kJ/kg·K)
s	= เอนโทรปี (kJ/kg·K)
T	= อุณหภูมิ ($^{\circ}C$)
U _L	= ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียรวมของแผงรับแสงอาทิตย์ ($W/m^2\cdot K$)
V	= อัตราเร็ว (m/s)
v	= ปริมาตรจำเพาะ (m^3/kg)
($\tau\alpha$)	= ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน-ดูดกลืน (Transmittance absorptance coefficient)
η	= ประสิทธิภาพ
สัญลักษณ์กำกับล่าง	
a	= สภาวะแวดล้อม
C	= คอนเดนเซอร์
c	= แผงรับแสงอาทิตย์
d	= ดีฟิวเซอร์
E	= อีวาเพอเรเตอร์
G	= เจนเนอเรเตอร์
i	= สภาวะทางเข้า
n	= หัวฉีด
o	= สภาวะทางออก
S	= ถังสะสมความร้อน
s	= ไอเซนโทรปิก

1. บทนำ

การนำเอาระบบทำความเย็นพลังงานแสงอาทิตย์แบบใช้อีเจกเตอร์-คอมเพรสชัน มาประยุกต์ใช้ในประเทศไทย มีความเป็นไปได้สูงเนื่องจากมีสภาพภูมิอากาศที่เหมาะสมกับการนำแสงอาทิตย์มาใช้เป็น

พลังงานความร้อนให้กับระบบทำความเย็นแบบใช้อีเจกเตอร์ ในระบบนี้ประกอบด้วยแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์ หน่วยสะสมความร้อน และหน่วยทำความเย็นแบบใช้อีเจกเตอร์ ผลกระทบที่มีต่อประสิทธิภาพของระบบ ก็คือการเปลี่ยนแปลงของฤดูกาลและสภาวะอากาศ ดังนั้นการออกแบบระบบที่เหมาะสมจะคิดผลที่ได้เฉลี่ยต่อปี นอกจากนี้ประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นแบบใช้อีเจกเตอร์ยังขึ้นอยู่กับการเลือกใช้สารทำความเย็น และการพิจารณาอุณหภูมิของสารทำความเย็นที่เหมาะสมอีกด้วย ในงานวิจัยนี้ การศึกษาและวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบการทำความเย็นด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบอีเจกเตอร์-คอมเพรสชัน รวมทั้งการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำระบบนี้มาใช้ในประเทศไทยด้วย

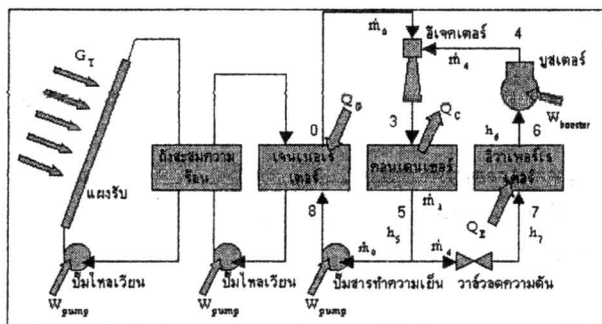
2. ระบบทำความเย็นแบบใช้อีเจกเตอร์-คอมเพรสชัน [3]

ระบบทำความเย็นพลังงานแสงอาทิตย์แบบใช้อีเจกเตอร์-คอมเพรสชัน เป็นระบบที่สามารถนำพลังงานแสงอาทิตย์มาประยุกต์ใช้กับการทำความเย็น โดยอาศัยอีเจกเตอร์เป็นตัวสำหรับดึงสารทำงานที่มาจากอีวาเพอเรเตอร์เพื่อมาผสมกับไอที่ได้จากเจนเนอเรเตอร์ ไปสู่สภาวะที่เหมาะสมกับการทำงานของคอนเดนเซอร์ ซึ่งระบบนี้สามารถลดการใช้พลังงานของคอมเพรสเซอร์ลงได้

ระบบทำความเย็นแบบใช้อีเจกเตอร์-คอมเพรสชัน มีสมมติฐานดังต่อไปนี้

- (1) มีสภาวะการไหลของของไหลเป็นแบบสม่ำเสมอ
 - (2) สารทำงานที่ไหลผ่านคอนเดนเซอร์และอีวาเพอเรเตอร์เป็นแบบย้อนกลับได้
 - (3) ไม่มีการสูญเสียความร้อนที่เจนเนอเรเตอร์
 - (4) สารทำงานไหลผ่านวาล์วลดความดันด้วยค่าเอนทัลปีคงที่
- จากรูปที่ 1 แสดงระบบทำความเย็นด้วยพลังงาน แสงอาทิตย์แบบใช้อีเจกเตอร์-คอมเพรสชัน โดยมีอุปกรณ์หลักเปลี่ยนความร้อนประกอบด้วย เจนเนอเรเตอร์ คอนเดนเซอร์ และอีวาเพอเรเตอร์ ในการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ของระบบดังกล่าว จะต้องทราบสภาวะการทำงานของอุปกรณ์ทางความร้อนแต่ละตัว เช่น อุณหภูมิทำงานของเจนเนอเรเตอร์ คอนเดนเซอร์ และอีวาเพอเรเตอร์ประกอบด้วย $100^{\circ}C$ $35^{\circ}C$ และ $-10^{\circ}C$ ตามลำดับ ขณะเดียวกันสารทำงานเมื่อออกจากเจนเนอเรเตอร์ (จุด 0) จะมีสภาวะเป็นไออิ่มตัว และไหลเข้าสู่อีเจกเตอร์ โดยมีสารทำงานอีกส่วนหนึ่งที่ออกจากอีวาเพอเรเตอร์ (จุด 6) ที่สภาวะไออิ่มตัว และป้อนงานแก่ระบบโดยบูสเตอร์ จนกระทั่งมีสภาวะเป็นไอซูเปอร์ฮีท (จุด 4) สารทำงานที่มาจากเจนเนอเรเตอร์จะดูดสารทำงานที่ได้มาจากบูสเตอร์เพื่อป้อนเข้าสู่อีเจกเตอร์ สารทำงานทั้งสองส่วนผสมกันในอีเจกเตอร์แล้วป้อนเข้าสู่คอนเดนเซอร์ และออกจากคอนเดนเซอร์อยู่ในสภาวะที่เป็นของเหลวอิ่มตัว (จุด 5) ซึ่งของเหลวนี้จะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกถูกปั๊มเข้าสู่เจนเนอเรเตอร์ (จุด 8) ส่วนที่สองจะเข้าสู่วาล์วลดความดันผ่านไปอีวาเพอเรเตอร์ (จุด 7) ทั้งสองส่วนทำงานที่สภาวะเอนทัลปีคงที่ ของเหลวที่เข้าสู่เจนเนอเรเตอร์จะแลกเปลี่ยนความร้อนกับของเหลวที่มาจากแผงรับแสงอาทิตย์ จนกระทั่งเปลี่ยนสภาวะไปเป็นไออิ่มตัวเมื่อออกจากเจนเนอเรเตอร์และอีกส่วนหนึ่งจะเข้าสู่อีวาเพอเรเตอร์เพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนกับภาระแล้วไหล

ออกมาเป็นไออิมตัว



รูปที่ 1 แสดงไดอะแกรมของระบบทำความเย็นพลังงานแสงอาทิตย์แบบใช้อีเจกเตอร์

2.1 สมรรถนะของวัฏจักรทำความเย็นแบบอีเจกเตอร์ [4]

ระบบทำความเย็นแบบใช้อีเจกเตอร์ในทางปฏิบัติ จะทำงานได้น้อยกว่าระบบอุดมคติ [4] เนื่องจากการย้อนกลับไม่ได้ทางเทอร์โมไดนามิก ซึ่งประกอบด้วย การถ่ายโอนพลังงานที่ไม่สมบูรณ์ และการสูญเสียของการไหลเนื่องจากการเสียดทาน จากรูปที่ 1 ค่าสัมประสิทธิ์ของสมรรถนะของวัฏจักร (COP) สามารถคำนวณได้จาก สมการดังนี้ [4]

$$\text{COP} = \frac{\text{พลังงานที่ใช้ในการทำความเย็น}}{\text{พลังงานที่ใส่ให้กับระบบ}} = \frac{Q_E}{Q_G + W_{\text{pump}} + W_{\text{booster}}} = \frac{\dot{m}_4(h_7 - h_6)}{\dot{m}_0(h_0 - h_5) + \dot{m}_4(h_4 - h_6)} \quad (1)$$

ประสิทธิภาพรวมของระบบทำความเย็นพลังงานแสงอาทิตย์แบบใช้อีเจกเตอร์ [3]

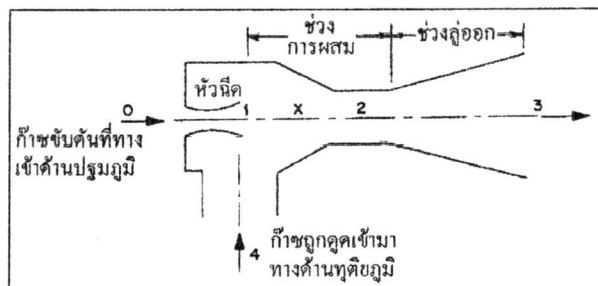
จากรูปที่ 1 ประสิทธิภาพรวมของระบบทำความเย็นพลังงานแสงอาทิตย์แบบใช้อีเจกเตอร์สามารถคำนวณได้จากประสิทธิภาพของแผงรับ (η_c) คูณกับ สัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบทำความเย็นแบบใช้อีเจกเตอร์ (COP_e) ดังสมการต่อไปนี้ :

$$\eta_{\text{sys}} = \eta_c \cdot \text{COP}_e \quad (2)$$

2.2 หลักการทำงานของอีเจกเตอร์ [1]

การวิเคราะห์ระบบของอีเจกเตอร์ที่ใช้เพื่อการจำลองแบบใช้สมมติฐานดังนี้

1. สภาวะของระบบเป็นแบบไอเซนโทรปิก
2. ไม่มีการสูญเสียเนื่องจากการถ่ายโอนความร้อน
3. ความเสียดทานที่เกิดจากการไหลผ่านหัวฉีดน้อยมาก
4. ของไหลเป็นแบบอัดตัวได้และมีการไหลในทิศทางเดียว



รูปที่ 2 แสดงแผนภาพของอีเจกเตอร์

ในรูปที่ 2 แสดงถึงแผนภาพของอีเจกเตอร์ ที่จุด 0 แก๊สความดันสูงได้ไหลเข้าสู่อีเจกเตอร์ทางด้านปรัภูมิ ที่ความดัน P_0 จากนั้นเคลื่อนผ่านหัวฉีดเข้ามาที่จุด 1 โดยที่ทางออกของหัวฉีด แก๊สจะถูกลดความดันลงเท่ากับความดันของแก๊สที่จุด 4 (P_4) ซึ่งถูกดูดเข้ามาทางด้านทุติยภูมิ จากนั้นแก๊สทั้งสองจะผสมกันโดยสมบูรณ์ที่จุด 2 แล้วจะถูกอัดตัวผ่านเข้าสู่ฟิวดเซอร์และออกมาที่จุด 3 ด้วยความดัน P_3

2.3 สมการหลักของอีเจกเตอร์ [6]

การสมดุลพลังงานที่เข้าออกจากอีเจกเตอร์ สามารถทำการสมดุลด้วยสมการพลังงานของอีเจกเตอร์ ได้ดังนี้

$$\dot{m}_0 h_0 + \dot{m}_4 h_4 = (\dot{m}_0 + \dot{m}_4) h_3 \quad (3)$$

สภาวะของการไหลผ่านหัวฉีด

- อัตราการไหลของมวลต่อหน่วยพื้นที่ช่วงคอคออดของหัวฉีด

$$\dot{m}_0 = \frac{P_0}{\sqrt{T_0}} \sqrt{\frac{k}{R} \left(\frac{2}{k-1} \right)^{(k+1)/(k-1)}} \quad (4)$$

- ความเร็วของของไหลด้านปรัภูมิที่ทางออกหัวฉีด

$$V_1 = [2\eta_n [h_0 - h_{1s}]]^{0.5} \quad (5)$$

สภาวะของการไหลผ่านช่วงการผสม

- สมการต่อเนื่อง

$$\dot{m}_0 + \dot{m}_4 = A_2 V_2 / v_2 \quad (6)$$

- สมการโมเมนตัม

$$\dot{m}_0 V_1 + P_4 A_2 = (\dot{m}_0 + \dot{m}_4) V_2 + P_2 A_2 \quad (7)$$

- สมการพลังงาน

$$\dot{m}_0 h_0 + \dot{m}_4 h_4 = (\dot{m}_0 + \dot{m}_4) (h_2 + V_2^2 / 2) \quad (8)$$

สภาวะของการไหลผ่านดีฟิวเซอร์

- สมการพลังงาน

$$h_2 + V_2^2 / 2 = h_3 \quad (9)$$

- จากสมการประสิทธิภาพของดีฟิวเซอร์ [8]

$$h'_3 - h_2 = \eta_d (h_3 - h_2) \quad (10)$$

พื้นที่หน้าตัดที่จุด 2

เมื่อกำหนดให้ M_2 = ตัวเลขมัคที่จุด 2 และสำหรับก๊าซอุดมคติ จะได้

$$M_2 = V_2 / (k P_2 V_2)^{0.5} \quad (11)$$

จากสมการ (7) (8) และ (11) พื้นที่หน้าตัด A_2 จะได้

$$A_2 = \frac{\dot{m}_0 V_1}{P_2 (k M_2^2 + 1) - P_4} \quad (12)$$

สำหรับพื้นที่ต่อหน่วยของคอคอดหัวฉีด

2.4 การวิเคราะห์ค่าที่เหมาะสมของอีเจกเตอร์ [1]

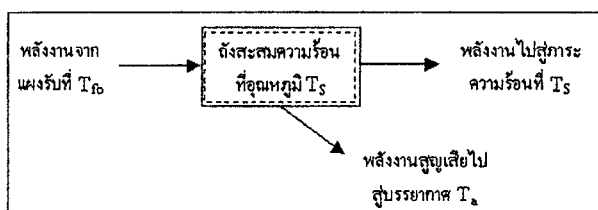
ในสภาวะที่มีการทำงานของอีเจกเตอร์นั้นต้องคำนวณพื้นที่ของจุด 2 (A_2) ที่เหมาะสม ซึ่งสามารถคำนวณได้จากค่าสูงสุดของ $\dot{m}_4$ ที่ได้จากสมการ (6) – (10) จะได้สมการที่ให้ค่าที่เหมาะสมของอีเจกเตอร์สำหรับก๊าซอุดมคติ และกระบวนการแบบไอเซนโทรปิกดังนี้

$$M_2^2 \left[1 + (1 - \eta_d) \left(\frac{P_2}{P_3} \right)^{\frac{k-1}{k}} \left[\frac{k}{1 - P_4/P_2} - k \right] \right] = 1 \quad (13)$$

โดย $P_3 = P_3'$ และการสมดุลพลังงานในดีฟิวเซอร์จากสมการ(9)จะได้

$$\left(\frac{P_2}{P_3} \right)^{\frac{k-1}{k}} - \eta_d M_2^2 (k-1) / 2 = 1 \quad (14)$$

2.5 การคำนวณอัตราความร้อนในถังสะสม



รูปที่ 3 แสดงการสมดุลพลังงานสำหรับถังเก็บสะสมความร้อนแบบไม่แบ่งแยกชั้น (Unstratified Storage)

ถ้ากำหนดให้ของเหลวในถังสะสมมีค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของของเหลวคือ T_s ดังนั้นสมการพลังงานที่ได้คือ [5]

$$(mC_p)_s (dT_s / dt) = Q_u - L_s - (UA)_s (T_s - T_a) \quad (15)$$

โดย L_s คืออัตราความร้อนที่ให้กับระบบ และ Q_u คืออัตราความร้อนจากแผงรับแสงอาทิตย์ ซึ่งจากสมการ (15) สามารถนำมาเขียนใหม่ให้อยู่ในรูปดังนี้ [5]

$$(mC_p)_s (dT_s / dt) = A_c F_R [S - U_L (T_i - T_a)] - \dot{m}_0 (h_0 - h_g) - (UA)_s (T_s - T_a) \quad (16)$$

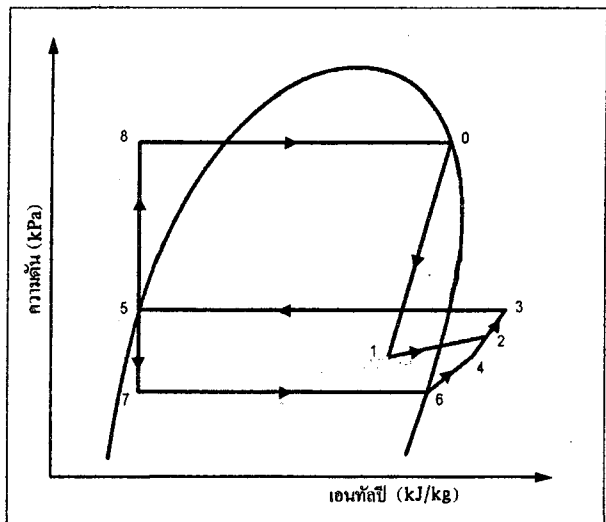
จากสมการ (16) อาจเขียนในรูปการเปลี่ยนแปลงแบบจำกัดช่วงเวลา (Finite increment in time) ได้ดังนี้ [5]

$$T_{s,new} = T_{s,old} + \frac{\Delta t}{(mC_p)_s} [A_c F_R [S - U_L (T_i - T_a)] - \dot{m}_0 (h_0 - h_g) - (UA)_s (T_s - T_a)] \quad (17)$$

โดยที่ $(UA)_s$ คือผลคูณของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของถังสะสมกับพื้นที่ผิวของถังสะสมในทิศทางตั้งฉากกับการไหลของของเหลวในถัง T_s และ T_a คืออุณหภูมิของของเหลวในถังและอุณหภูมิแวดล้อมตามลำดับ t คือเวลา และ Δt คือช่วงเวลาที่จะเพิ่มขึ้น

3. การจำลองแบบของระบบ

การกำหนดสภาวะของอุปกรณ์ทางความร้อนพิจารณาเป็นไปตามรูปที่ 4



รูปที่ 4 ไดอะแกรม P-h ของระบบทำความเย็นแบบใช้อีเจกเตอร์ - คอมเพรสชัน [8]

ซึ่งเป็นไดอะแกรมการทำงานของระบบทำความเย็นแบบอีเจกเตอร์-คอมเพรสชัน ซึ่งมีเงื่อนไขของสภาวะต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- (1) จุด 0 และจุด 8 ทำงานด้วยค่าความดันเจนเนอเรเตอร์ที่อยู่ในสถานะที่เป็นไออิ่มตัวและของเหลวตามลำดับ
- (2) จุด 3 และจุด 5 ทำงานด้วยค่าความดันคอนเดนเซอร์ที่อยู่ในสถานะไอซูบ-เปอร์ฮีทและของเหลวอิ่มตัวตามลำดับ
- (3) จุด 6 และจุด 7 ทำงานด้วยค่าความดันอีวาเพอเรเตอร์ที่อยู่ในสถานะไอ-อิ่มตัวและของผสมอิ่มตัวตามลำดับ
- (4) จุด 1 ทำงานที่สถานะเอนโทรปีคงที่
- (5) จุด 4 ทำงานด้วยค่าความดันของบูสเตอร์
- (6) จุด 1 และจุด 4 เข้ามารวมกันในอีเจกเตอร์โดยสมบูร์นที่จุด 2 และเข้าสู่จุด 3 ด้วย ความดันคอนเดนเซอร์

สำหรับเงื่อนไขสถานะในส่วนของแผงรับแสงอาทิตย์และถึงสะสมความร้อนมีดังนี้

- (1) ของเหลวในถังสะสมจะถูกนำมาแลกเปลี่ยนความร้อนกับสารทำความเย็นในเจนเนอเรเตอร์ที่อุณหภูมิคงที่
- (2) ถึงสะสมความร้อนจะเก็บความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ในช่วงเวลาเฉพาะที่มีพลังงานแสงอาทิตย์ตกกระทบที่แผงรับ
- (3) ระบบทำความเย็นพลังงานแสงอาทิตย์แบบอีเจกเตอร์-คอมเพรสชันจะทำงานได้ก็ต่อเมื่ออุณหภูมิของของเหลวในถังสะสมมีค่ามากพอที่จะนำไปแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อให้ได้สารทำความเย็นอยู่ในสถานะที่กำหนด

3.1 ขั้นตอนการจำลองแบบของระบบ

การจำลองแบบของระบบนี้จะประกอบด้วยขั้นตอนต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- (1) คำนวณหาสภาวะต่างๆของระบบโดยกำหนดอุณหภูมิของอุปกรณ์ทางความร้อนแต่ละตัว คือ อุณหภูมิของเจนเนอเรเตอร์ (T_G), อุณหภูมิคอนเดนเซอร์ (T_C) และอุณหภูมิอีวาเพอเรเตอร์ (T_E) และความดันที่ทางเข้าในด้านสภาวะต่างๆ

- (2) คำนวณหาสภาวะต่างๆภายในอีเจกเตอร์โดยการวิเคราะห์หาอีเจกเตอร์ที่เหมาะสม โดยขั้นตอนการคำนวณได้แสดงเป็นแผนภาพในรูปที่ 5

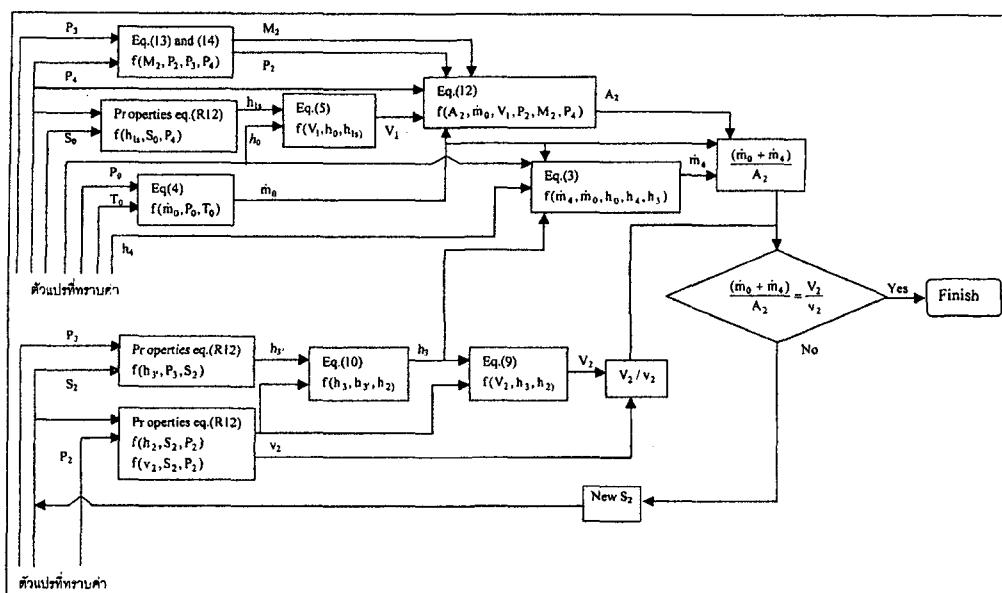
- (3) คำนวณภาระทางความร้อนของอุปกรณ์แต่ละตัว พร้อมทั้งคำนวณประสิทธิภาพของการทำความเย็น

- (4) คำนวณอัตราความร้อนจากสมการการสมดุลทางความร้อนที่ถึงสะสมความร้อน

- (5) คำนวณประสิทธิภาพของระบบ

4. ผลการจำลองแบบของระบบ

การศึกษาสภาวะต่างๆที่เกิดขึ้นภายในระบบด้วยการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ก็เพื่อต้องการแสดงให้เห็นถึงสภาวะที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์ทางความร้อนแต่ละตัวภายในระบบทำความเย็นแบบอีเจกเตอร์ โดยเรากำหนดค่าอุณหภูมิของระบบ โดยให้อุณหภูมิเจนเนอเรเตอร์ 80°C อุณหภูมิคอนเดนเซอร์ 40°C , อุณหภูมิอีวาเพอเรเตอร์ -10°C . และความดันใช้งานสำหรับบูสเตอร์คือ 688 kPa และใช้สารฟรอน R12 เป็นสารทำงาน ในการกำหนดสภาวะดังกล่าวนี้ทำให้เราสามารถคำนวณงานและความร้อนต่างๆที่เกิดขึ้นภายในระบบและสามารถคำนวณประสิทธิภาพของระบบได้ โดยสภาวะทางเทอร์โมไดนามิกของจุดต่างๆที่เกิดขึ้นได้ดังแสดงไว้ในตารางที่ 1

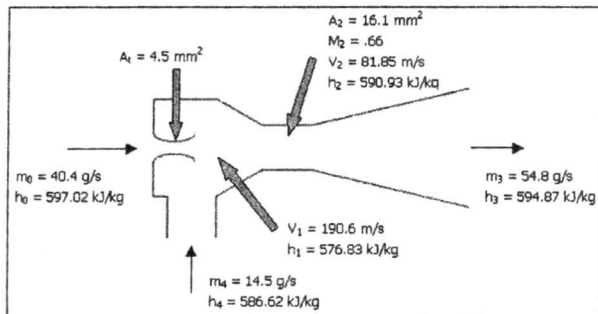


รูปที่ 5 แสดงแผนภาพการออกแบบที่เหมาะสมของอีเจกเตอร์

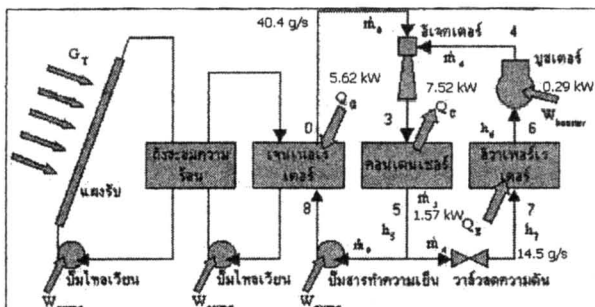
ตารางที่ 1 แสดงค่าสภาวะของระบบทำความเย็นแบบไอजेคเตอร์

สภาวะ	อุณหภูมิ		ความดัน (kPa)	เอนทัลปี (kJ/kg)	เอนโทรปี (kJ/kg·K)
	(°C)	(K)			
0	80	353.15	2295.28	597.02	4.72
1	27	300.15	687.66	576.83	4.72
2	41.13	314.28	777.54	590.93	4.75
3	50.28	323.43	959.44	594.87	4.75
4	33.12	306.27	687.66	586.62	4.75
5	40	313.15	959.44	457.77	4.32
6	-10	263.15	219.28	566.44	4.75
7	-10	263.15	219.28	457.77	4.33
8	-40	313.15	2295.28	457.77	~4.32

สำหรับการพิจารณาสภาวะต่างๆภายในไอजेคเตอร์ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 6 ซึ่งเป็นสภาวะที่เกิดอัตราการไหลมวลของสภาวะที่ทางเข้าด้านทุติยภูมิสูงสุด และจะส่งผลให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการทำความเย็น สำหรับการกำหนดค่าตัวแปรคงที่ของไอजेคเตอร์นั้น จะให้พื้นที่ในช่วงคอคอดของหัวฉีด, A_1 เท่ากับ 4.5 mm^2 ซึ่งจะไม่มีผลให้เกิดอัตราการไหลมวลที่ทางเข้าด้านปฐมภูมิเท่ากับ 40.4 g/s และอัตราการไหลมวลที่ทางเข้าด้านทุติยภูมิเท่ากับ 14.5 g/s โดยในการออกแบบที่ทำให้เกิด ประสิทธิภาพสูงสุดนี้ จะให้ค่าพื้นที่ของช่วงผสม, A_2 เท่ากับ 16.1 mm^2



รูปที่ 6 แสดงแผนภาพและสภาวะต่างๆภายในไอजेคเตอร์



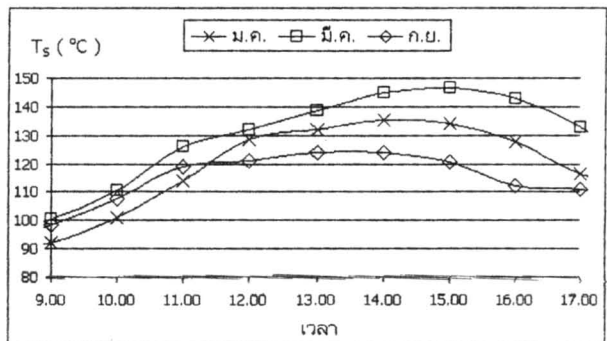
รูปที่ 7 แสดงถึงปริมาณงานกับความร้อนที่เข้าและออกจากระบบการทำความเย็นแบบไอจีเจคเตอร์-คอมเพรสชั่น

ในรูปที่ 7 แสดงถึงปริมาณงานและความร้อนที่เข้าและออกจากระบบทำความเย็นแบบไอจีเจคเตอร์-คอมเพรสชั่น จากรูปจะเห็นว่าที่เจนเนอเรเตอร์มีการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสารทำความเย็นกับสารที่ใช้ในถังสะสมความร้อนซึ่งมีค่าเท่ากับ 5.6 kW ที่คอนเดนเซอร์จะมีการคายความร้อนเท่ากับ 7.5 kW และที่อีวาเพอเรเตอร์มีการรับความร้อนจากภาระได้ 1.6 kW นอกจากนี้ยังมีการทำงานของปั๊มสเตอร์ โดยให้งานเท่ากับ 0.3 kW สำหรับการทำงานของปั๊มจะถือว่ามีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับการทำงานที่ปั๊มสเตอร์และผลจากการศึกษาสภาวะต่างๆที่เกิดขึ้นภายในระบบ จะทำให้ทราบถึงสภาวะต่างๆที่เกิดขึ้นที่จุดต่างๆ รวมถึงภาระการทำความเย็นและประสิทธิภาพการทำความเย็นของระบบด้วย

4.1 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงสภาวะของระบบตลอดปี

ผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรต่างๆของระบบประกอบด้วยอุณหภูมิของของเหลวในถังสะสมความร้อน ปริมาณน้ำแข็งที่ผลิตได้ และประสิทธิภาพของระบบ เมื่ออุณหภูมิเจนเนอเรเตอร์ คอนเดนเซอร์, และ อีวาเพอเรเตอร์ มีค่า 80°C , 40°C และ -10°C ตามลำดับ ค่าต่าง ๆ ที่ได้จะแสดงเป็นกราฟ โดยแสดงอุณหภูมิของเหลวในถังสะสมของเดือนที่อยู่ในฤดูหนาว ฤดูร้อน และ ฤดูฝน คือ เดือนมกราคม มีนาคม และกันยายน ตามลำดับ

ในการศึกษาปริมาณการผลิตน้ำแข็งต่อวันนั้น สามารถหาได้จากปริมาณการทำความเย็นของระบบทำความเย็นแบบไอจีเจคเตอร์ในแต่ละชั่วโมง โดยถ้าชั่วโมงใดมีพลังงานจากแสงอาทิตย์ไม่เพียงพอต่อความต้องการภาระทางความร้อนของเจนเนอเรเตอร์ ก็จะทำให้ระบบไม่มีการทำงาน ซึ่งจะไม่มีการผลิตน้ำแข็ง ในตารางที่ 2 นั้น แสดงถึงการผลิตน้ำแข็งในแต่ละชั่วโมง โดยชั่วโมงที่มีการทำงานจะแสดงเป็นพื้นที่แรเงา และมีการกำหนดสภาวะของอุณหภูมิที่เจนเนอเรเตอร์ 80°C อุณหภูมิคอนเดนเซอร์ 40°C และอุณหภูมิอีวาเพอเรเตอร์ -10°C



รูปที่ 8 แสดงอุณหภูมิของของเหลวในถังสะสมความร้อนของเดือนมกราคม, พฤษภาคม และตุลาคม

ตารางที่ 2 แสดงปริมาณการผลิตน้ำแข็งที่ได้เป็น kg/day ณ เขตบางนา กรุงเทพฯ ปี พ.ศ 2543

	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
9:00 น.												
10:00 น.												
11:00 น.												
12:00 น.												
13:00 น.												
14:00 น.												
15:00 น.												
16:00 น.												
17:00 น.												
รวม (kg)	61.62	73.94	86.27	61.62	73.94	49.29	61.62	61.62	49.29	73.94	61.62	

หมายเหตุ  คือช่วงเวลาที่สามารถผลิตน้ำแข็งได้

5. สรุปผลการวิเคราะห์

การจำลองระบบทำความเย็นแบบอีเจกเตอร์-คอมเพรสชันเมื่ออุณหภูมิของเจนเนอเรเตอร์เท่ากับ 80°C อุณหภูมิคอนเดนเซอร์เท่ากับ 40°C อุณหภูมิอีวาเพอเรเตอร์เท่ากับ -10°C และกำหนดความดันใช้งานสำหรับบูสเตอร์คือ 688 kPa พื้นที่แผงรับแสงอาทิตย์เป็น 20 m^2 พื้นที่ช่วงคอยดของหัวฉีด A_1 เท่ากับ 4.5 mm^2 และใช้สารฟรียอน R12 เป็นสารทำงาน จะได้ค่าที่เหมาะสมของระบบทำความเย็นเมื่อภาระทางความร้อนที่เจนเนอเรเตอร์เท่ากับ 5.62 kW ที่คอนเดนเซอร์จะมีภาระทางความร้อน 7.52 kW และที่อีวาเพอเรเตอร์สามารถรับความร้อนจากภาระได้ 1.57 kW นอกจากนี้ในส่วนของบูสเตอร์ต้องใช้งานเท่ากับ 0.3 kW ค่า COP เท่ากับ 0.27

การจำลองแบบของระบบตลอดทั้งปี จะพบว่าสภาวะอากาศมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของระบบ เนื่องจากในแต่ละเดือนนั้นมีปริมาณการแผ่รังสีของแสงอาทิตย์ไม่เท่ากัน ดังจะเห็นได้จากอุณหภูมิของของเหลวในถังสะสมความร้อน โดยถ้าอุณหภูมิของเหลวในถังมีค่าสูงเพียงพอที่จะนำไปแลกเปลี่ยนความร้อนใน เจนเนอเรเตอร์ เพื่อให้ระบบสามารถทำงานต่อไปได้ ระบบจะผลิตปริมาณน้ำแข็งออกมา ดังนั้นในเดือนที่อยู่ในฤดูร้อนจะมีพลังงานการแผ่รังสีสูง ซึ่งสามารถผลิตน้ำแข็งได้ในปริมาณที่มาก ส่วนในเดือนที่อยู่ในฤดูหนาวและฤดูฝน จะผลิตปริมาณน้ำแข็งได้ลดลงไปตามลำดับ โดยเดือนที่อยู่ในฤดูร้อน ฤดูหนาว และฤดูฝน มีค่าอุณหภูมิของของเหลวในถังสะสมเฉลี่ยเท่ากับ 121°C 113°C และ 109°C ตามลำดับ ระบบทำความเย็นด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบอีเจกเตอร์-คอมเพรสชัน มีประสิทธิภาพของระบบโดยเฉลี่ยตลอดทั้งปีเท่ากับ 12.2% และมีปริมาณการผลิตน้ำแข็งเฉลี่ยทั้งปี 64.7 kg/day

6. ข้อเสนอแนะ

ผลจากการศึกษาและวิเคราะห์แบบจำลองของระบบทำความเย็นด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบอีเจกเตอร์-คอมเพรสชัน ทำให้ค้นพบว่าอีเจกเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ช่วยลดปริมาณการใช้พลังงานจากคอมเพรสเซอร์ลงได้ โดยการนำพลังงานจากแสงอาทิตย์มาใช้แทน ซึ่งงานวิจัยฉบับนี้ได้แสดงให้เห็นว่าเมื่อนำระบบทำความเย็นพลังงานแสงอาทิตย์แบบอีเจกเตอร์-คอมเพรสชัน มาใช้ในการผลิตน้ำแข็งอัตรา 1.6 kW จะสามารถลดปริมาณการใช้พลังงานจากคอมเพรสเซอร์ลงได้ 23%

ระบบนี้นับว่ามีความเป็นไปได้สำหรับนำไปประยุกต์ใช้งานโดยเฉพาะในบริเวณที่มีการแผ่รังสีแสงอาทิตย์สูง ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพในการทำความเย็นสูงขึ้น ตัวอย่างของการนำไปใช้งาน เช่น การนำไปใช้ในการผลิตน้ำแข็ง การปรับอากาศ การนำไปใช้ในระบบปรับอากาศเป็นต้น ซึ่งนับว่าเป็นวิธีประหยัดพลังงานที่น่าสนใจวิธีหนึ่ง ในงานวิจัยนี้ได้จำลองระบบทำความเย็นโดยใช้สารทำความเย็น R12 เป็นสารทำงานที่ใช้ในระบบ สำหรับการใช้อนุภาคนาโนอื่น สามารถทำได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกของสารทำความเย็นชนิดนั้นว่าอยู่ในสภาวะที่เหมาะสมเพียงใด ตัวอย่างเช่น เมื่อต้องการใช้ในระบบทำความเย็นพลังงานแสงอาทิตย์แบบอีเจกเตอร์-คอมเพรสชันเพื่อการผลิตน้ำแข็งควรเลือกสารทำความเย็นที่สามารถทำงานในช่วงอุณหภูมิระหว่าง -20°C ถึง 115°C ได้ และมีช่วงของความดันใช้งานประมาณ 200 - 3000 kPa เป็นต้น นอกจากนี้การนำสารทำความเย็นชนิดที่ไม่เป็นสารจำพวก CFC มาใช้ในระบบนั้น จะเป็นการช่วยลดมลภาวะที่จะมีผลต่อสิ่งแวดล้อมได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Elrod, Jr., H.G. "The theory of ejectors" *J. Appl. Mech., Trans ASME*. 12 (March 1945): A170-A174.
- [2] Chen F.C., and Hsu C.T. "Performance of ejector heat pumps" *Energy Research* Vol.11 (1987) : 289-300.
- [3] Dorantes, R.; Estrada, C.A.; and Pilatowsky, I. "Mathematical simulation of a solar ejector-compression refrigeration system" *Applied Thermal Engineering* No.8/9, Vol.16 (1996) : 669-675.
- [4] Stoecker, Wilbert F., and Jones, Jerold W. *Refrigeration & Air Conditioning*. McGraw-Hill, 1982.
- [5] Duffie, J.A., and Beckman, W.A. *Solar engineering of thermal processes*. New York : John Wiley and Sons, 1991.
- [6] Michel A.S. *Compressible fluid flow*. Englewood Cliffs, N.J. : Prentice-Hall, 1985.
- [7] กองภูมิอากาศ, กรมอุตุนิยมวิทยา. "ข้อมูลพลังงานแสงอาทิตย์ ของ ปี 2543 วัดที่เขตบางนา กรุงเทพมหานคร."
- [8] Japanese Association Of Refrigeration. *Thermophysical properties of refrigerants for R12 (Dichlorodifluoromethane)*. 1981.
- [9] ธนาคม สุนทรชัยนาคแสง, และ ไทธชา สุดสวนสี. "ความเป็นไปได้ของระบบทำความเย็นด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบอีเจกเตอร์-คอมเพรสชัน" *วารสารเทคโนโลยี* ฉบับที่ 146, ปีที่ 26 (1999) : หน้า 125-129.