

การศึกษาพารามิเตอร์และการจำลองของระบบแปลงความร้อนแบบดูดกลืน

กรณีศึกษา : สารละลาย น้ำ - ลิเทียมโบรไมด์

(A Study of Parameters and Simulation of Absorption Heat Transformers)

A Case Study : Water - Lithium Bromide Mixture

ผศ. ดร. ธนาคม สุนทรชัยนาคแสง พันเอก ดร. ประสาท สุขเกษตร
และมณฑล ชูโซนาค

บทคัดย่อ

ระบบแปลงความร้อนแบบดูดกลืนที่ทำการวิจัยนี้ใช้สารละลาย น้ำ - ลิเทียมโบรไมด์ เป็นสารทำงาน โดยใช้น้ำเป็นของไหลทำงาน (Working fluid) หรือสารที่ถูกดูดกลืน (Absorbate) และลิเทียมโบรไมด์เป็นสารดูดกลืน (Absorbent) ในงานวิจัยนี้ ได้ศึกษาพารามิเตอร์ที่สำคัญของระบบ อาทิเช่น สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะเทอมเอนทาลปี สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะคาร์โน อัตราส่วนการไหล อัตราความร้อนถ่ายเทที่อุปกรณ์ต่างๆ เมื่อประสิทธิผลของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและอุณหภูมิของอุปกรณ์หลักๆ เปลี่ยนแปลง

ผลจากการวิจัยพบว่า สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะและอัตราความร้อนถ่ายเทลดลง อัตราส่วนการไหลเพิ่มขึ้นที่ระดับอุณหภูมิของคอนเดนเซอร์และตัวดูดกลืนสูงขึ้น สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะและอัตราความร้อนถ่ายเทเพิ่มขึ้น อัตราส่วนการไหลลดลงที่ระดับอุณหภูมิของเอนเนอเรเตอร์และอีวาโปเรเตอร์สูงขึ้น และเมื่อประสิทธิผลของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสูงขึ้นมีผลให้สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะเทอมเอนทาลปีและอัตราความร้อนถ่ายเทที่เอนเนอเรเตอร์และตัวดูดกลืนเพิ่มขึ้น

1. บทนำ

ปัจจุบันปัญหาการขาดแคลนพลังงานเป็นปัญหาหนึ่ง เนื่องจากแหล่งพลังงานที่มีอยู่ไม่เพียงพอต่อความต้องการ ดังนั้นจึงได้มีการพิจารณาการนำพลังงานความร้อนที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งนอกจากจะเป็นการประหยัดพลังงานแล้ว ยังช่วยลดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมด้วย ดังนั้นระบบแปลงความร้อนแบบดูดกลืนจึงเป็นอีกระบบหนึ่งที่นำมาใช้ในการอนุรักษ์พลังงาน โดยการนำพลังงานความร้อนที่ใช้ประโยชน์ไม่ได้แล้ว ซึ่งมีอุณหภูมิปานกลาง (สูงกว่าอุณหภูมิแวดล้อม) นำมาเพิ่มคุณภาพหรือแปลงให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นเพื่อนำกลับไปใช้ประโยชน์ได้อีก “เกือบครึ่งหนึ่งของพลังงานความร้อนที่ใช้ประโยชน์ไม่ได้ในกระบวนการทางความร้อนที่สามารถเพิ่มคุณภาพเพื่อนำกลับไปใช้ประโยชน์ได้อีก” [2]

ระบบแปลงความร้อนแบบดูดกลืน มีอุปกรณ์หลักๆ ประกอบด้วย เอนเนอเรเตอร์ (Generator) คอนเดนเซอร์ (Condenser) อีแวปอเรเตอร์ (Evaporator) ตัวดูดกลืน (Absorber) และอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) คอนเดนเซอร์และเอนเนอเรเตอร์จะติดตั้งอยู่ด้านที่มีความดันต่ำ (Low pressure : P_L) อีแวปอเรเตอร์และตัวดูดกลืนจะติดตั้งอยู่ทางด้านความดันสูง (High pressure : P_H) ความดันต่ำและความดันสูงในระบบทราบได้จากอุณหภูมิของคอนเดนเซอร์และอีแวปอเรเตอร์ตามลำดับ โดยการนำอุณหภูมิของอุปกรณ์ดังกล่าวไปเปิดตารางคุณสมบัติของของไหลทำงาน(น้ำ) ข้อดีของระบบคือ มีอุปกรณ์ที่เคลื่อนที่น้อยเป็นผลให้การสึกหรอของชิ้นส่วนน้อย และการบำรุงรักษาง่าย

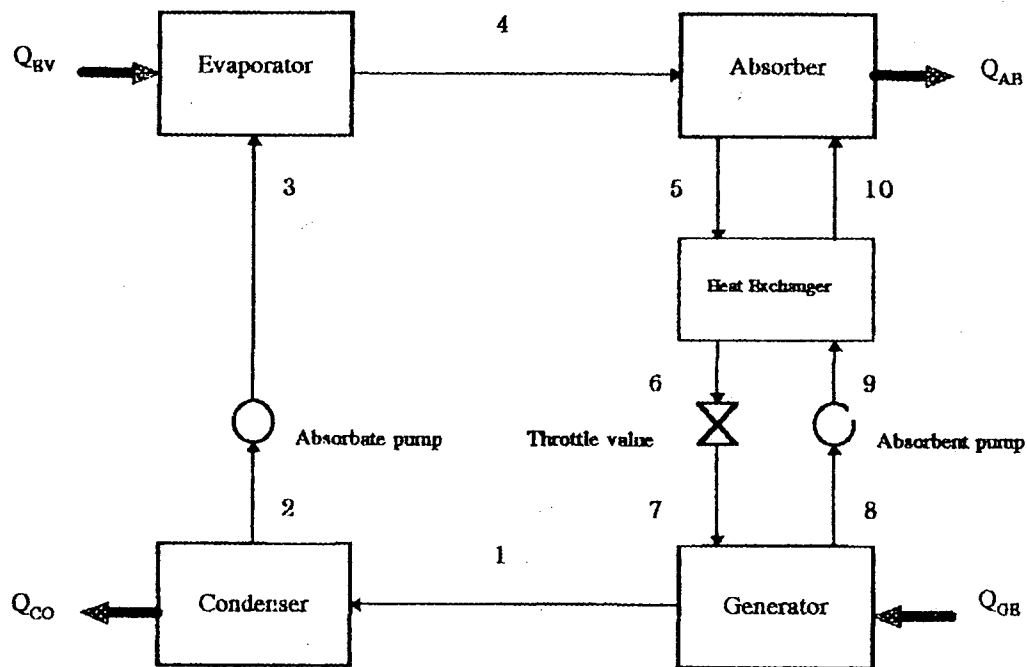
ระบบแปลงความร้อนแบบดูดกลืนที่จะทำการวิจัยนี้ จะใช้สารละลาย น้ำ - ลิเทียมโบรไมด์ (Water-Lithium bromide) เป็นสารทำงาน โดยใช้สารลิเทียมโบรไมด์เป็นสารดูดกลืน (Absorbent) และน้ำเป็นของไหลทำงาน (Working fluid) หรือสารที่ถูกดูดกลืน (Absorbate) ในการศึกษาจะสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ และเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการศึกษา ซึ่งจะทำให้การศึกษาพารามิเตอร์หลักๆ ของระบบ อาทิเช่น สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะเทอมเอนทัลปี (COP_p) สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะคาร์โน (COP_c) อัตราส่วนการไหล (FR) ตลอดจนอัตราความร้อนถ่ายเทในอุปกรณ์หลักๆ ของระบบ เมื่ออุณหภูมิของอุปกรณ์หลักๆ และประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเปลี่ยนแปลง

2. ลักษณะและหลักการทำงานของระบบแปลงความร้อนแบบดูดกลืน

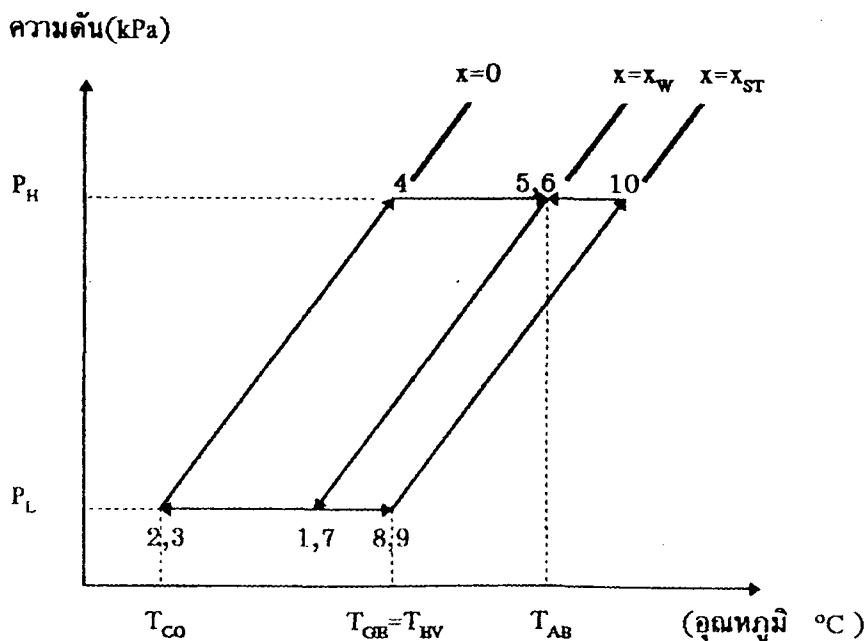
ลักษณะของระบบแปลงความร้อนแบบดูดกลืน ดังแสดงในรูปที่ 1 อุปกรณ์หลักๆ ประกอบไปด้วย เอนเนอเรเตอร์ คอนเดนเซอร์ อีแวปอเรเตอร์ ตัวดูดกลืน และอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน จากรูปที่ 1 และ 2 จะเห็นว่าเอนเนอเรเตอร์และคอนเดนเซอร์จะติดตั้งอยู่ทางด้านความดันต่ำ (Low pressure : P_L) ส่วนอีแวปอเรเตอร์และตัวดูดกลืนติดตั้งอยู่ด้านความดันสูง (High pressure : P_H) พลังงานความร้อนที่ใช้ประโยชน์ไม่ได้แล้วซึ่งมีอุณหภูมิปานกลาง (สูงกว่าอุณหภูมิแวดล้อม) จะจ่ายให้กับเอนเนอเรเตอร์ที่อุณหภูมิ T_{GB} เพื่อแยกของไหลทำงาน(น้ำ)ออกจากสารละลายเจือจาง (สารละลายที่มีส่วนผสมของลิเทียมโบรไมด์ต่ำ) ของไหลทำงานที่แยกออกมาจะมีสถานะเป็นไออิ่มตัวและจะถูกควบแน่นเป็นของเหลวอิ่มตัวในคอนเดนเซอร์ที่อุณหภูมิ T_{Co} จากนั้นจะถูกส่งไปยังอีแวปอเรเตอร์โดยปั๊ม ได้รับความร้อนที่อุณหภูมิปานกลาง T_{Ev} กลายเป็นไออิ่มตัวแล้วส่งผ่านไปยังตัวดูดกลืนและจะถูกดูดกลืนโดยสารละลายเข้มข้น (สารละลายที่มีส่วนผสมของลิเทียมโบรไมด์สูง) ที่ส่งมาจากเอนเนอเรเตอร์ เมื่อมีการรวมตัวกันในตัวดูดกลืน ไอของของไหลทำงาน(น้ำ)จะกลายเป็นของเหลวและระบบคายความร้อนออกมา ทำให้อุณหภูมิที่ได้จากตัวดูดกลืน (T_{AB}) มีค่าสูงสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ในการนำความร้อนส่วนนี้ไปใช้ประโยชน์สามารถกระทำได้โดยการนำกระแสของไหลภายนอก

มารับความร้อนจากตัวดูดกลืน หรือนำกระแสของไหลที่จ่ายให้กับเยนเนอเรเตอร์และอีแวปอเรเตอร์มารับความร้อนเพื่อเพิ่มคุณภาพให้สูงขึ้นก่อนนำไปใช้ประโยชน์ตามต้องการ

สุดท้ายสารละลายเจือจางจะถูกส่งไปยังเยนเนอเรเตอร์ผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน และทรอตเติลวาล์ว ขณะที่ผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนกันขึ้นระหว่างกระแสของสารละลายเจือจางและสารละลายเข้มข้น เป็นผลให้กระแสของสารละลายเข้มข้นมีอุณหภูมิสูงขึ้นก่อนเข้าตัวดูดกลืน จากนั้นก็จะเริ่มวัฏจักรใหม่



รูปที่ 1. แสดงรายละเอียดของระบบแปลงความร้อนแบบดูดกลืน



รูปที่ 2. แสดงวัฏจักรของระบบบนแผนภูมิความดัน อุณหภูมิ และความเข้มข้นของสารละลาย

3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุปกรณ์ต่าง ๆ ของระบบแปลงความร้อนแบบดูดกลืนมีสมมุติฐานดังนี้

1. การทำงานของระบบ ต้องอยู่ในสภาวะสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์
2. การวิเคราะห์ จะต้องวิเคราะห์ภายใต้สภาวะคงที่ (Steady state)
3. สำหรับเครื่องแยกไอ (Rectifier) ไม่มีความจำเป็นต้องใช้ เนื่องจากสารดูดกลืน (Absorbent) จะไม่กลายเป็นไอในช่วงอุณหภูมิที่พิจารณา
4. สารละลายที่ออกจากเฮนเนอเรเตอร์และตัวดูดกลืนอยู่ในสภาวะอิ่มตัว และ ของไหลทำงานที่ออกจาก คอนเดนเซอร์และอีแวปอเรเตอร์อยู่ในสภาวะอิ่มตัวเช่นกัน
5. ความดันในอีแวปอเรเตอร์ เท่ากับ ความดันในตัวดูดกลืน (ความดันสูง) ความดันในคอนเดนเซอร์ เท่ากับ ความดันในเฮนเนอเรเตอร์ (ความดันต่ำ)
6. ค่าที่กำหนดคือ อุณหภูมิที่ทางออกของอุปกรณ์หลัก ๆ อัตราการไหลของมวลของสารละลาย เจือจางจากตัวดูดกลืนไปยังเฮนเนอเรเตอร์ และประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน
7. ไม่คิดความร้อนสูญเสีย (Heat loss) และความดันลด (Pressure drop) ภายในท่อ และอุปกรณ์ต่าง ๆ ของระบบ
8. ไม่คิดการเปลี่ยนแปลงของพลังงานศักย์ และพลังงานจลน์
9. พลังงานที่ใช้ขับเคลื่อนถือว่าน้อยมาก

จากสมมุติฐานดังกล่าว นำมาใช้ในการวิเคราะห์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ โดยใช้หลักการสมดุลมวล (Mass balance) สมดุลสารดูดกลืน (Absorbent balance) และสมดุลพลังงาน (Energy balance) กับอุปกรณ์หลัก ๆ ของระบบ

หลักการสมดุลมวล (Mass Balance)

$$\sum M_i - \sum M_e = 0 \quad (1)$$

หลักการสมดุลสารดูดกลืน (Lithium Bromide Balance)

$$\sum x_i M_i - \sum x_e M_e = 0 \quad (2)$$

หลักการสมดุลพลังงาน (Energy Balance)

$$\sum Q_i + \sum M_i (h_i) = \sum Q_e + \sum M_e (h_e) \quad (3)$$

ผลจากการวิเคราะห์ จะได้

- เฮนเนอเรเตอร์

$$\text{สมดุลมวล} : M_{AB} = M_{GH} + M_{WF} \quad (4)$$

$$\text{สมดุลสารดูดกลืน} : x_w M_{AB} = x_{ST} M_{GH} \quad (5)$$

$$\text{สมดุลพลังงาน} : Q_{GH} = M_{GH} h_g + M_{WF} h_1 - M_{AB} h_7 \quad (6)$$

- คอนเดนเซอร์

$$\text{สมดุลมวล} : M_{WF} = M_{WF} \quad (7)$$

$$\text{สมดุลพลังงาน} : Q_{CO} = M_{WF} (h_1 - h_2) \quad (8)$$

- อินเวอร์เตอร์

$$\text{สมดุลมวล} : M_{WF} = M_{WF} \quad (9)$$

$$\text{สมดุลพลังงาน} : Q_{EV} = M_{WF}(h_4 - h_3) \quad (10)$$

- ตัวดูดกลืน

$$\text{สมดุลมวล} : M_{WF} + M_{GB} = M_{AB} \quad (11)$$

$$\text{สมดุลสารดูดกลืน} : x_{ST}M_{GB} = x_W M_{AB} \quad (12)$$

$$\text{สมดุลพลังงาน} : Q_{AB} = M_{WF}h_4 + M_{GB}h_{10} - M_{AB}h_5 \quad (13)$$

- อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

$$\text{สมดุลมวล} : M_{AB} + M_{GB} = M_{AB} + M_{GB} \quad (14)$$

$$\text{สมดุลสารดูดกลืน} : x_W M_{AB} + x_{ST} M_{GB} = x_W M_{AB} + x_{ST} M_{GB} \quad (15)$$

$$\text{สมดุลพลังงาน} : Q_{GB} = M_{AB}(h_5 - h_6) = M_{GB}(h_{10} - h_9) \quad (16)$$

โดยที่

$$M_1 = M_2 = M_3 = M_4 = M_{WF} \quad x_1 = x_2 = x_3 = x_4 = x = 0$$

$$M_5 = M_6 = M_7 = M_{AB} \quad x_5 = x_6 = x_7 = x_W$$

$$M_8 = M_9 = M_{10} = M_{GB} = M_{AB} - M_{WF} \quad x_8 = x_9 = x_{10} = x_{ST}$$

4. พารามิเตอร์ที่สำคัญ

4.1 อัตราส่วนการไหล (Flow ratio) : FR [1]

อัตราส่วนการไหลเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญและมีผลโดยตรงต่อขนาดและค่าใช้จ่ายของ เซนเนอเรเตอร์ ตัวดูดกลืน อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและปั๊ม อัตราส่วนการไหลสามารถหาได้จาก อัตราการไหลของมวลของสารละลายจากตัวดูดกลืนไปยังเซนเนอเรเตอร์ (M_{AB}) ต่ออัตราการไหลของมวลของของไหลทำงาน (M_{WF}) [1]

$$FR = \frac{M_{AB}}{M_{WF}} \quad (17)$$

เมื่อ M_{AB} เป็นอัตราการไหลของมวลของสารละลายเจือจางจากตัวดูดกลืนไปยังเซนเนอเรเตอร์

M_{WF} เป็นอัตราการไหลของมวลของของไหลทำงาน

นำมาเขียนอยู่ในเทอมที่เป็นส่วนประกอบของสารละลาย จะได้

$$FR = \frac{x_{ST}}{x_{ST} - x_W} \quad (18)$$

4.2 ประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Effectiveness of the heat exchanger) : EF [1]

จุดประสงค์หลักของการมีอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในระบบแปลงความร้อนแบบดูดกลืนคือการนำความร้อนจากกระแสของไหลกลับมาใช้ให้เป็นประโยชน์ และประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์ดังกล่าว สามารถทราบได้จากค่าประสิทธิภาพ (Effectiveness) ของตัวอุปกรณ์เอง อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในระบบแปลงความร้อนแบบดูดกลืน จะทำหน้าที่เป็นตัวเพิ่มความร้อนให้กับสารละลายที่ออกจาก

เซนเซอร์เรเตอร์ไปยังตัวดูดกลืน โดยทั่วๆ ไปค่าประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนคำนวณได้จาก อัตราส่วนของความร้อนที่นำกลับมาใช้ได้จริง (Actual heat : Q_A) ต่อความร้อนสูงสุดที่สามารถนำกลับมาใช้ได้ (Maximum heat : Q_{MAX}) [1]

$$EF = \frac{Q_A}{Q_{MAX}} \quad (19)$$

หรือ

$$EF = \frac{M_{GE}(h_{10} - h_9)}{M_{AB}(h_{9.5} - h_9)} \quad (20)$$

เมื่อ $h_{9.5}$ เป็นเอนทาลปีของสารละลาย [1] คำนวณที่ (x_9, T_9)

4.3 สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะ (Coefficient of Performance) : COP

สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะ (COP) เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอีกตัวหนึ่งที่ใช้แทนประสิทธิภาพของระบบแปลงความร้อนแบบดูดกลืน โดยทั่วไปคำนวณได้จาก อัตราส่วนระหว่างความร้อนที่ได้จากตัวดูดกลืนต่อภาระความร้อนที่จ่ายให้กับเซนเซอร์เรเตอร์และอีแวปอเรเตอร์ [1]

$$COP = \frac{Q_{AB}}{Q_{GE} + Q_{EV}} \quad (21)$$

- สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะเทอมเอนทาลปี (Enthalpy-Based Coefficient of Performance) : COP_E

$$COP_E = \frac{h_4 + (FR - 1)h_{10} - FR \cdot h_5}{(FR - 1) \cdot h_8 - FR \cdot h_7 + h_1 + h_4 - h_3} \quad (22)$$

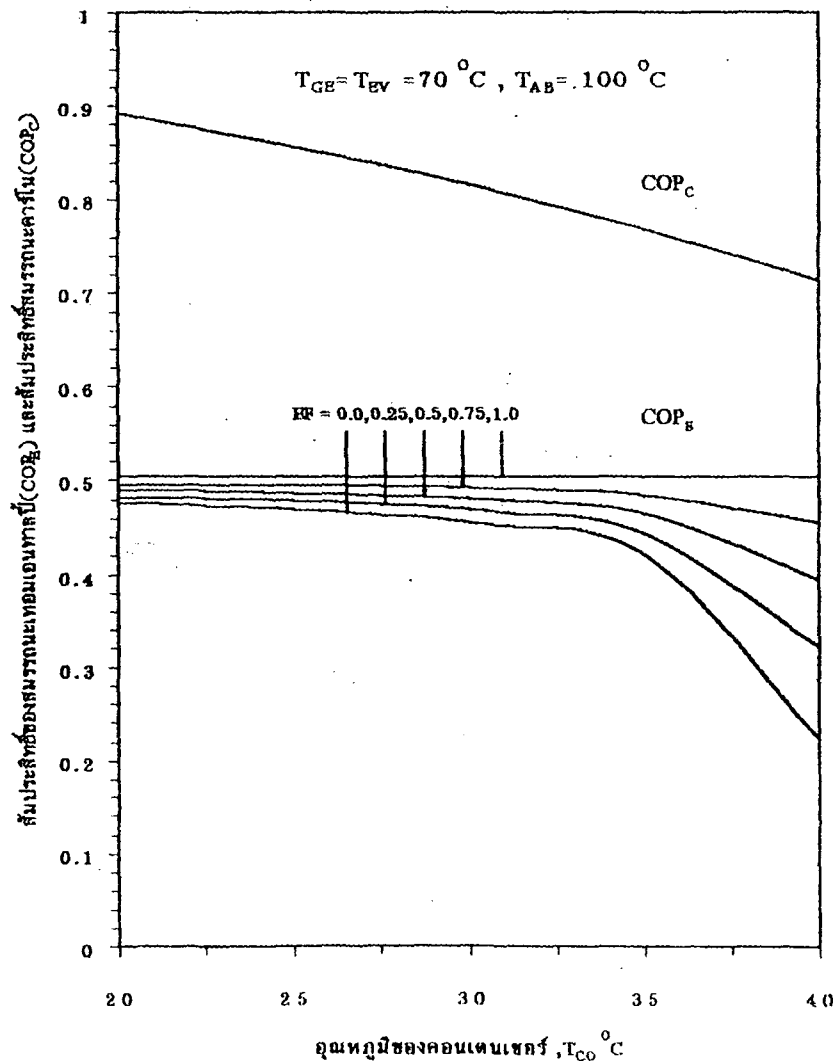
- สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะคาร์โน (Carnot Coefficient of Performance) : COP_C

จากการวิเคราะห์โดยใช้กฎข้อที่ 2 ของเทอร์โมไดนามิกส์ จะได้

$$COP_C = \frac{T_{AB}(T_{EV} - T_{CO})}{T_{EV}(T_{AB} - T_{GE}) + T_{GE}(T_{EV} - T_{CO})} \quad (23)$$

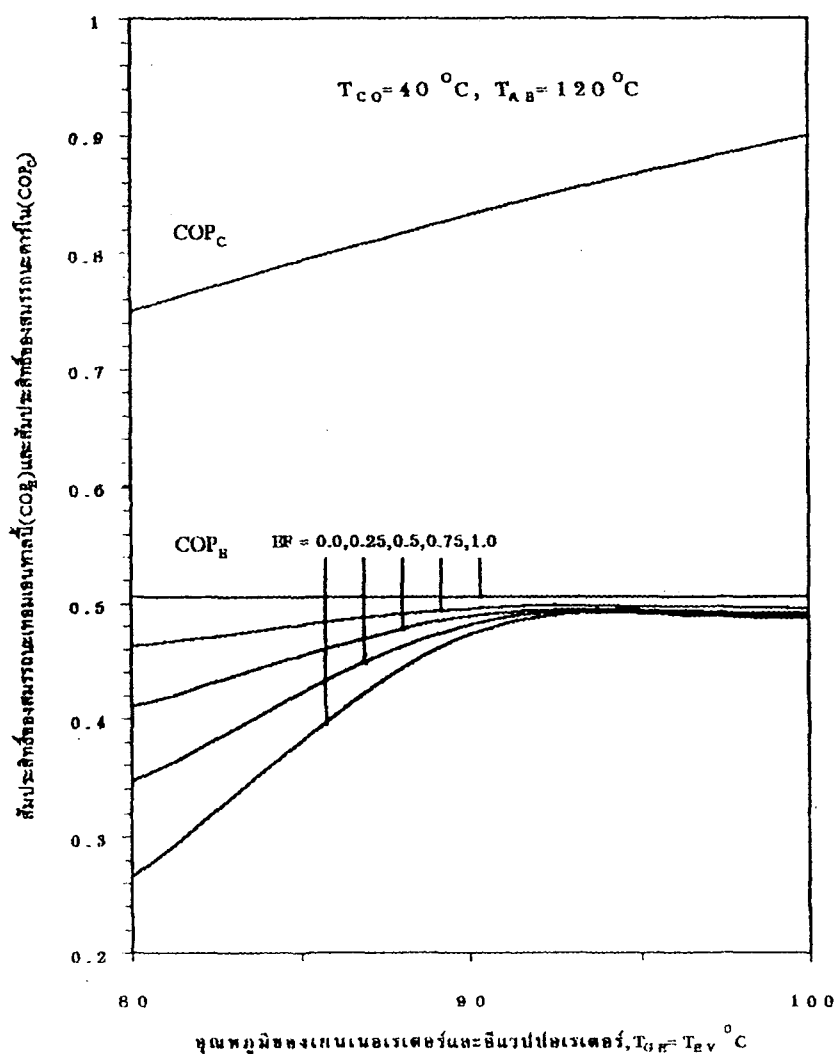
5. ผลวิจัย

รูปที่ 3 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ของสมรรถนะ (COP) เทียบกับ อุณหภูมิของคอนเดนเซอร์ (T_{co}) ที่ค่าประสิทธิผลของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนต่างๆ จากรูปจะเห็นว่าที่อุณหภูมิของคอนเดนเซอร์ต่ำๆ สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะเทอมเอนทาลปี (COP_E) จะมีค่าสูง และประสิทธิผลของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเกือบจะไม่มีผลต่อสัมประสิทธิ์ของสมรรถนะเทอมเอนทาลปี (COP_E) แต่ที่อุณหภูมิของคอนเดนเซอร์สูงๆ สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะเทอมเอนทาลปี (COP_E) จะลดลง และประสิทธิผลของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะมีผลต่อสัมประสิทธิ์ของสมรรถนะเทอมเอนทาลปี (COP_E) มาก จะเห็นว่าสัมประสิทธิ์ของสมรรถนะเทอมเอนทาลปี (COP_E) จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อประสิทธิผลของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มขึ้น ส่วนสัมประสิทธิ์ของสมรรถนะคาร์โน (COP_C) จะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิของคอนเดนเซอร์เพิ่มขึ้น และประสิทธิผลของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะไม่มีผลต่อสัมประสิทธิ์ของสมรรถนะคาร์โน



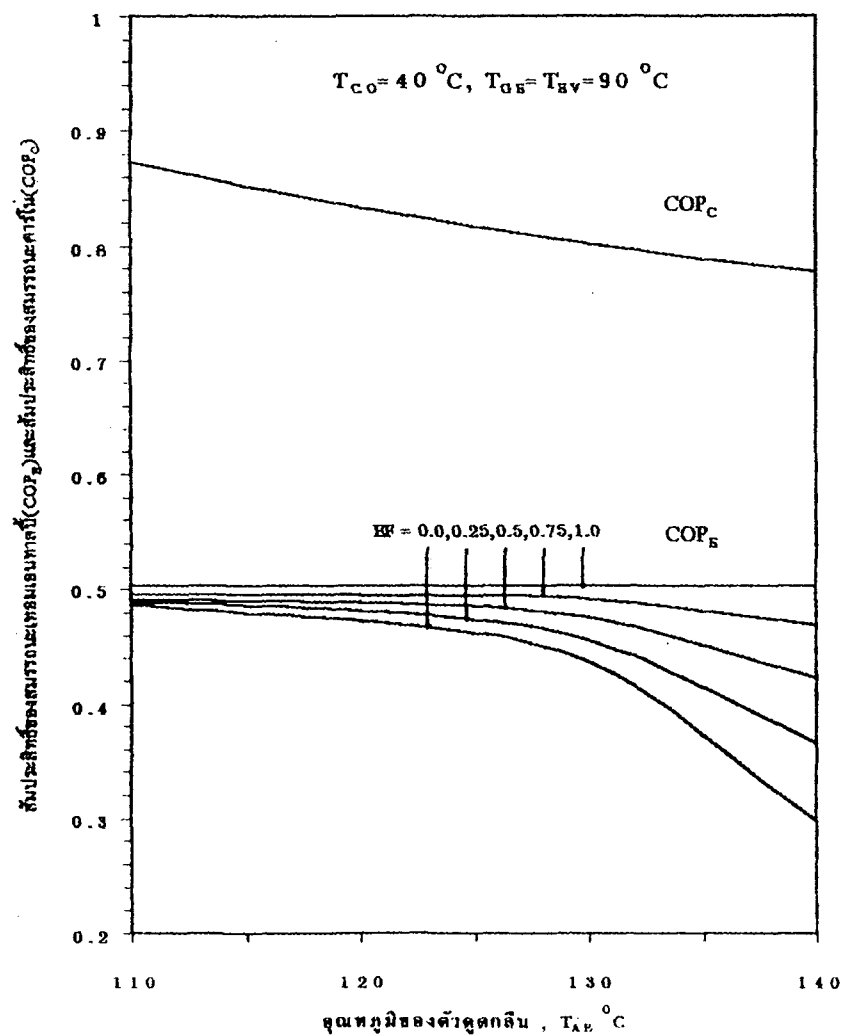
รูปที่ 3. แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ของสมรรถนะ เทียบกับ อุณหภูมิของคอนเดนเซอร์ ที่ค่าประสิทธิผลของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนต่างๆ

รูปที่ 4 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ของสมรรถนะ (COP) เทียบกับ อุณหภูมิของเซนเนอเรเตอร์และอีแวปอเรเตอร์ ($T_{GB}=T_{EV}$) ที่ค่าประสิทธิผลของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนต่างๆ จากรูปจะเห็นว่าที่อุณหภูมิของเซนเนอเรเตอร์และอีแวปอเรเตอร์ต่ำๆ สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะเทอมเอนทาลปีจะมีค่าต่ำ และประสิทธิผลของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะมีผลต่อสัมประสิทธิ์ของสมรรถนะเทอมเอนทาลปี จะเห็นว่าเมื่อประสิทธิผลของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มขึ้นจะเป็นผลให้สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะเทอมเอนทาลปีเพิ่มขึ้นด้วย เมื่ออุณหภูมิของเซนเนอเรเตอร์และอีแวปอเรเตอร์สูงๆ สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะเทอมเอนทาลปีจะเพิ่มขึ้นและประสิทธิผลของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะมีผลต่อสัมประสิทธิ์ของสมรรถนะเทอมเอนทาลปีน้อยมาก ส่วนสัมประสิทธิ์ของสมรรถนะคาร์โนจะมีผลขณะที่ประสิทธิผลของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเปลี่ยนแปลงแต่จะมีผลเมื่ออุณหภูมิของเซนเนอเรเตอร์และอีแวปอเรเตอร์เปลี่ยนแปลง จะเห็นว่า สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะคาร์โนเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของเซนเนอเรเตอร์และอีแวปอเรเตอร์เพิ่มขึ้น



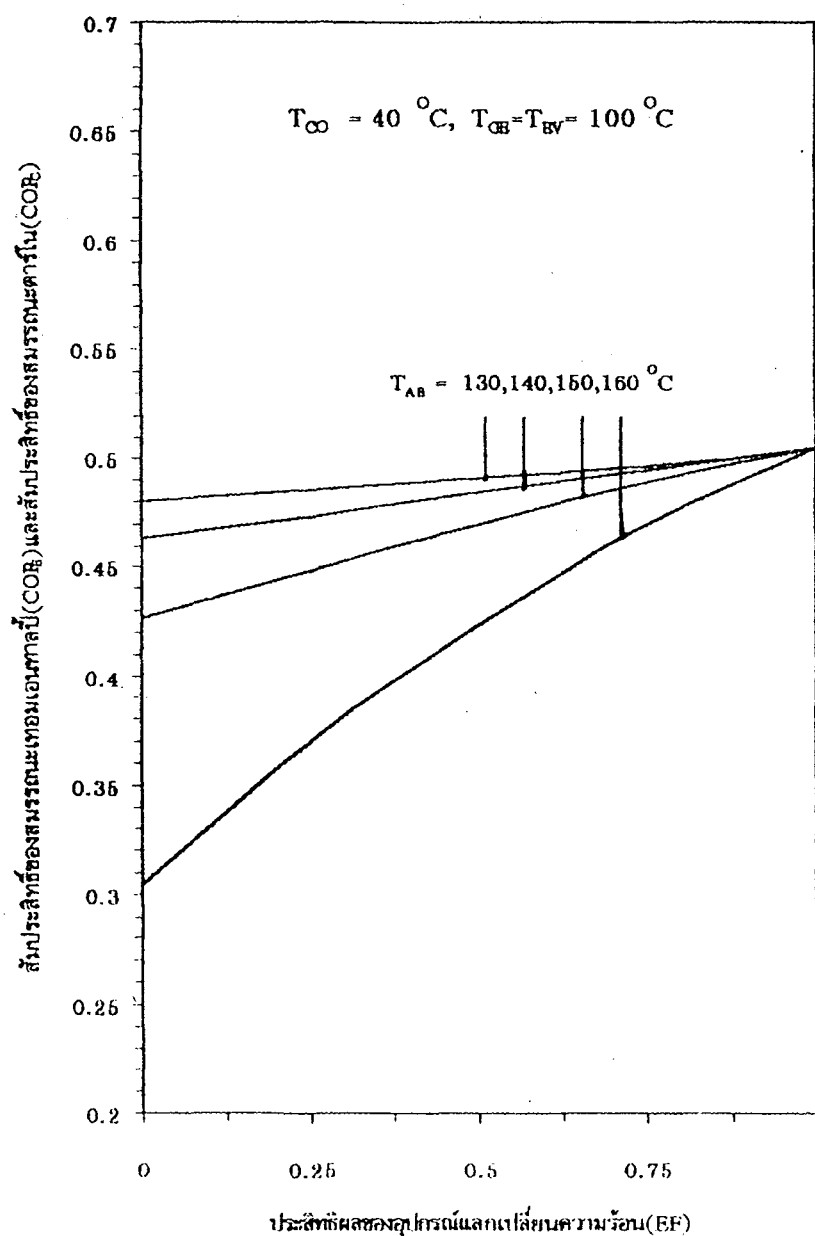
รูปที่ 4. แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ของสมรรถนะ เทียบกับ อุณหภูมิของ
เซนเนอเรเตอร์และอีแวปอเรเตอร์ ที่ค่าประสิทธิผลของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนต่างๆ

รูปที่ 5 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ของสมรรถนะ (COP) เทียบกับ อุณหภูมิของตัวดูดกลืน (T_{AB}) ที่ค่าประสิทธิผลของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนต่างๆ จากรูปจะเห็นว่า ที่อุณหภูมิตัวดูดกลืนต่ำๆ สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะเทอมเอนทาลปีมีค่าสูงและประสิทธิผลของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะมีผลต่อ สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะเทอมเอนทาลปีน้อยมาก และที่อุณหภูมิตัวดูดกลืนสูงๆ สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะ เทอมเอนทาลปี จะลดลงและการเปลี่ยนแปลงประสิทธิผลของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะมีผลให้ สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะเทอมเอนทาลปีมีการเปลี่ยนแปลงด้วย จะเห็นว่าเมื่อประสิทธิผลของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าต่ำจะมีผลให้สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะเทอมเอนทาลปีมีค่าต่ำไปด้วย และเมื่อประสิทธิผล ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าสูงขึ้นสัมประสิทธิ์ของสมรรถนะเทอมเอนทาลปีก็จะเพิ่มสูงขึ้นด้วย ส่วน สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะคาร์โนจะลดลงเมื่ออุณหภูมิของตัวดูดกลืนเพิ่มขึ้น



รูปที่ 5. แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ของสมรรถนะ เทียบกับ อุณหภูมิของ ตัวดูดกลืน ที่ค่าประสิทธิผลของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนต่างๆ

รูปที่ 6 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ของสมรรถนะ (COP) เทียบกับ ประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ที่อุณหภูมิของตัวดูดกลืน(T_{AB})ต่างๆ จากรูปจะเห็นว่า ที่ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของแหล่งที่ให้ความร้อน ($T_{CH}=T_{EV}$) และอุณหภูมิของตัวดูดกลืนต่ำกว่า 40 องศาเซลเซียส สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะเทอมเอนทาลปีจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยแม้ว่าประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะเปลี่ยนไป และที่ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของแหล่งที่ให้ความร้อน($T_{CH}=T_{EV}$) และอุณหภูมิของตัวดูดกลืนสูงกว่า 40 องศาเซลเซียส สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะเทอมเอนทาลปีจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วกับการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

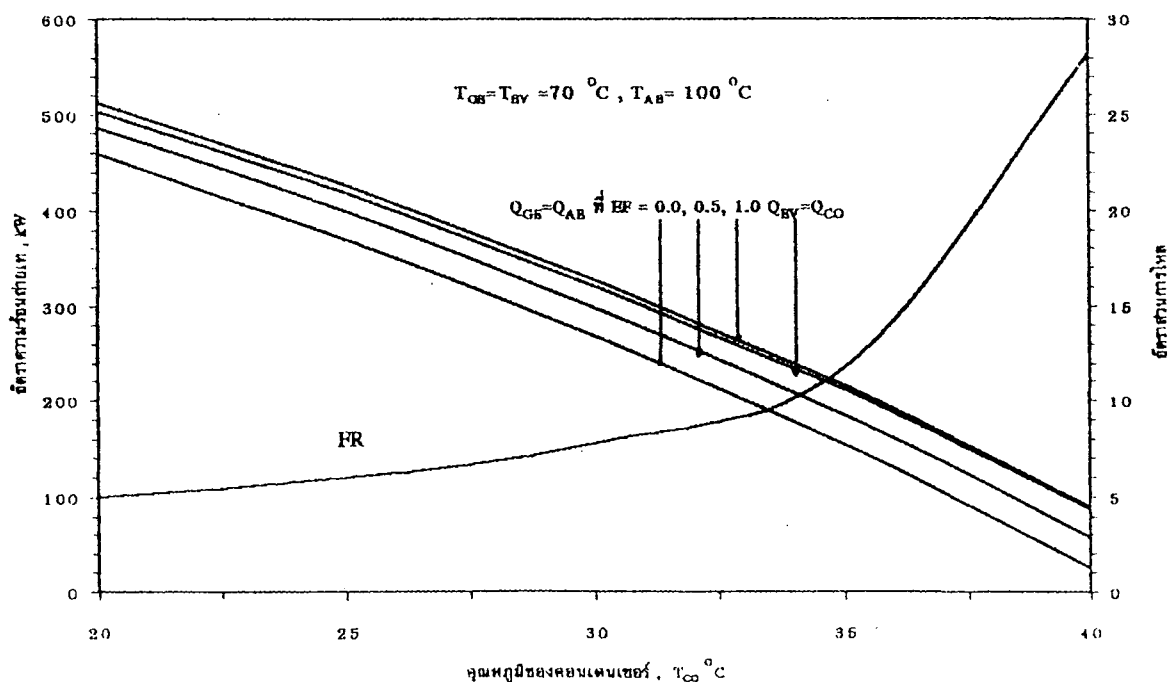


รูปที่ 6. แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ของสมรรถนะ (COP) เทียบกับ ประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ที่อุณหภูมิของตัวดูดกลืน(T_{AB})ต่างๆ

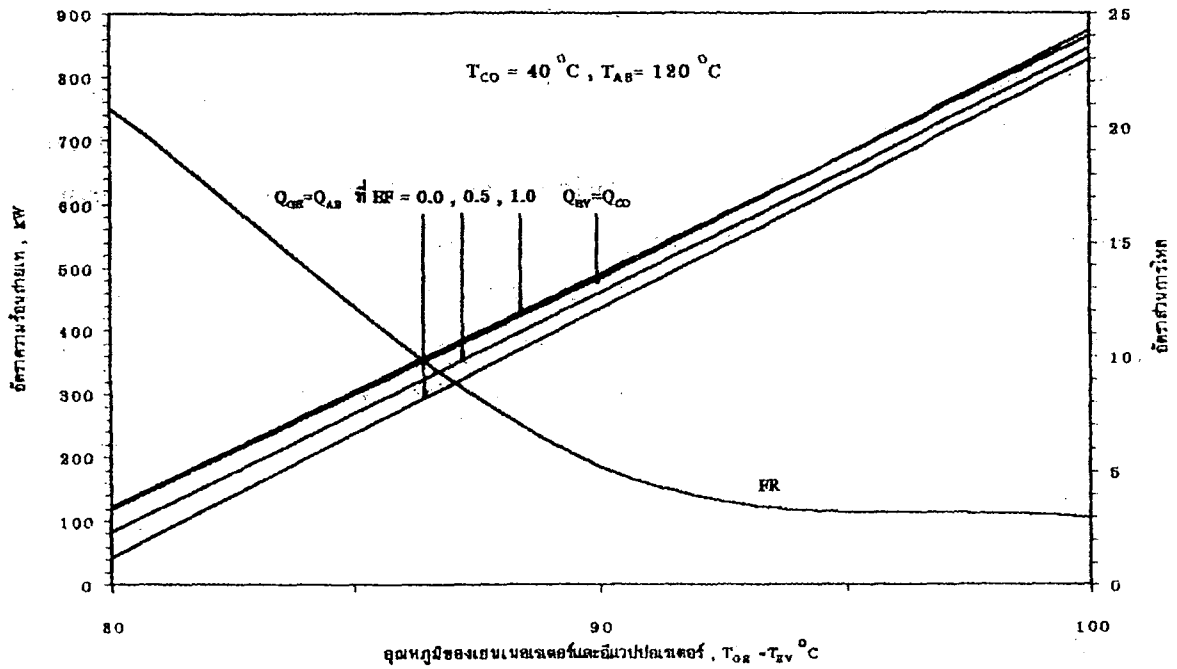
รูปที่ 7 แสดงอัตราความร้อนถ่ายเทและอัตราส่วนการไหล เทียบกับ อุณหภูมิของคอนเดนเซอร์ ที่ประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนต่างๆ จากรูปจะเห็นว่า ที่อุณหภูมิของคอนเดนเซอร์ต่ำๆ อัตราความร้อนถ่ายเทที่อุปกรณ์ต่างๆ จะมีค่าสูงและอัตราส่วนการไหลจะต่ำ เมื่ออุณหภูมิของคอนเดนเซอร์เพิ่มสูงขึ้น อัตราความร้อนถ่ายเทที่อุปกรณ์ต่างๆ จะมีค่าต่ำและอัตราส่วนการไหลจะสูง อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะไม่มีผลต่ออัตราส่วนการไหลและอัตราความร้อนถ่ายเทที่อีแวปอเรเตอร์และคอนเดนเซอร์ ส่วนที่เสนเนอเรเตอร์และตัวดูดกลืนจะมีผล จะเห็นว่าอัตราความร้อนถ่ายเทสูงขึ้นเมื่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มขึ้น

รูปที่ 8 แสดงอัตราความร้อนถ่ายเทและอัตราส่วนการไหล เทียบกับ อุณหภูมิของเสนเนอเรเตอร์และอีแวปอเรเตอร์ ที่ประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนต่างๆ จากรูปจะเห็นว่า ที่อุณหภูมิของเสนเนอเรเตอร์และอีแวปอเรเตอร์ต่ำๆ อัตราความร้อนถ่ายเทที่อุปกรณ์ต่างๆ จะมีค่าต่ำและอัตราส่วนการไหลจะมีค่าสูง เมื่ออุณหภูมิของเสนเนอเรเตอร์และอีแวปอเรเตอร์เพิ่มสูงขึ้นอัตราความร้อนถ่ายเทที่อุปกรณ์ต่างๆ จะสูงขึ้นและอัตราส่วนการไหลจะลดลง

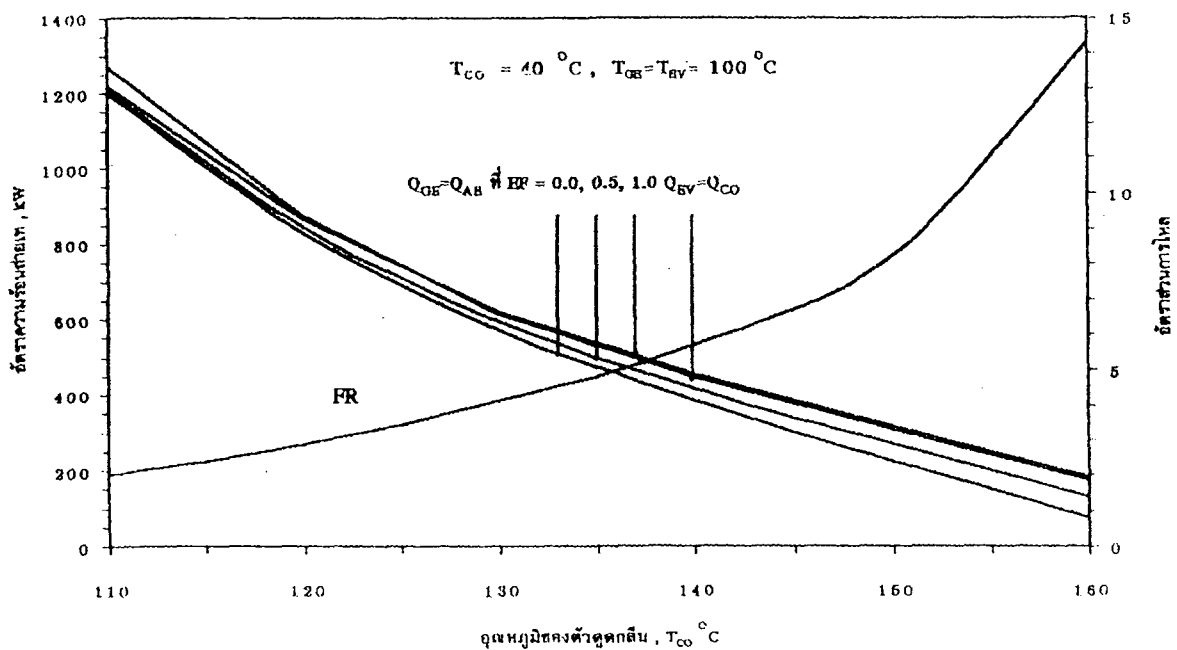
รูปที่ 9 แสดงอัตราความร้อนถ่ายเทและอัตราส่วนการไหล เทียบกับ อุณหภูมิของตัวดูดกลืน ที่ประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนต่างๆ จากรูปจะเห็นว่า ที่อุณหภูมิของตัวดูดกลืนต่ำๆ อัตราความร้อนถ่ายเทที่อุปกรณ์ต่างๆ จะมีค่าสูงและอัตราส่วนการไหลจะมีค่าต่ำ เมื่ออุณหภูมิของตัวดูดกลืนสูงขึ้น อัตราความร้อนถ่ายเทที่อุปกรณ์ต่างๆ จะมีค่าลดลงและอัตราส่วนการไหลจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น



รูปที่ 7. แสดงอัตราความร้อนถ่ายเทและอัตราส่วนการไหล เทียบกับ อุณหภูมิของคอนเดนเซอร์ ที่ประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 8. แสดงอัตราความร้อนถ่ายเทและอัตราส่วนการไหล เทียบกับ อุณหภูมิของเซนเซอร์และอีวาโปเรเตอร์ ที่ประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 9. แสดงอัตราความร้อนถ่ายเทและอัตราส่วนการไหล เทียบกับ อุณหภูมิของตัวดูดกลืน ที่ประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเปลี่ยนแปลง

6. สรุป

ผลจากการวิจัยพบว่า ที่ระดับอุณหภูมิของคอนเดนเซอร์และตัวดูดกลืนสูงๆ สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะและอัตราความร้อนถ่ายเทลดลง อัตราส่วนการไหลเพิ่มขึ้น และที่ระดับอุณหภูมิของเยนเนอเรเตอร์และอีแวปอเรเตอร์สูงๆ สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะและอัตราความร้อนถ่ายเทเพิ่มขึ้น อัตราส่วนการไหลลดลง และเมื่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสูงขึ้นเป็นผลให้สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะเทอมเอนทาลปีและอัตราความร้อนถ่ายเทที่เยนเนอเรเตอร์และตัวดูดกลืนเพิ่มขึ้น

ดังนั้นจะเห็นว่า สมรรถนะของระบบแปลงความร้อนแบบดูดกลืนจะขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและอุณหภูมิของอุปกรณ์ต่างๆ ที่ผ่านมาศึกษากรณีอุณหภูมิเยนเนอเรเตอร์เท่ากับอุณหภูมิอีแวปอเรเตอร์ และจะทำการศึกษาคณณิ์อุณหภูมิเยนเนอเรเตอร์ไม่เท่ากับอุณหภูมิอีแวปอเรเตอร์ต่อไป

สัญลักษณ์

		หน่วย
COP	สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะ	-
EF	ประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน	-
FR	อัตราส่วนการไหล(Flow ratio)	$\text{kg ของสารละลายเจือจาง} / \text{kg ของของไหลทำงาน}$
h	เอนทาลปี ต่อ หน่วยมวล	kJ / kg
M	อัตราการไหลของมวล	kg / s
P	ความดัน	kPa
Q	อัตราความร้อนถ่ายเท	kW
T	อุณหภูมิ	$^{\circ}\text{C}$
x	ความเข้มข้นของสารละลาย คิดเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก	%

สัญลักษณ์กำกับล่าง

A	ความร้อนที่สามารถนำมาใช้ได้จริง (Actual heat)
AB	ตัวดูดกลืน
C	วัฏจักรคาร์โน
CO	คอนเดนเซอร์
E	ในเทอมของเอนทาลปี
EV	อีแวปอเรเตอร์
e	สภาวะทางออก
GE	เยนเนอเรเตอร์
H	ความดันสูง
i	ทางเข้า
L	ความดันต่ำ
MAX	ความร้อนสูงสุดที่สามารถนำมาใช้ได้ (Maximum heat)
ST	สารละลายเข้มข้น (สารละลายที่มีส่วนผสมของลิเทียมโบรมาйдสูง)
W	สารละลายเจือจาง (สารละลายที่มีส่วนผสมของลิเทียมโบรมาйдต่ำ)
WF	ของไหลทำงาน (Working fluid) หรือ สารที่ถูกดูดกลืน (Absorbate)

เอกสารอ้างอิง

1. W.Rivera, R. Best, J. Hernandez, C.L. Heard and F.A. Holland , Thermodynamic study of advanced absorption heat transformers -1 : Single and Two stage configurations with heat exchanger. Heat Recovery Systems & CHP. Vol.14 No. 2 , pp. 173-183(1994)
2. C. Z. Zhuo and C. H. M. Machielsen, Thermodynamic assessment of an absorption heat transformers with TFR - PYR as the working pair. Heat Recovery Systems & CHP Vol.14, No. 3 , pp. 265-272(1994)
3. R. Best and W. Rivera, Thermodynamic design data for absorption heat transformers. Part six : Operating on water - carrol. Heat Recovery Systems & CHP. Vol.14 No. 4 , pp. 427-436(1994)
4. Renato M. Lazzarin, Heat pump in industry -I Equipment. Heat Recovery Systems & CHP. Vol.14 No. 6 , pp. 581-597(1994)
5. J. C. V. Chinnapa, Principles of absorption systems machines (chapter 2.), Solar air condition and Refrigeration, Pergamon Press
6. G. Grossman, Absorption heat transformers for process heat generation from solar ponds, ASHRAE Transactions. Vol. 97 , part. 1, NY-99-2-2. pp. 420-427(1991)
7. G. Grossman, Multistage absorption heat transformers for industrial applications. ASHRAE Transactions. Vol. 91 , part. B, Hi-85-41 No 1, pp. 2047-2061(1985)
8. P. Holmberg and T. Berntsson , Alternative working fluids in heat transformers, ASHRAE Transactions. Vol. 96 , part. 1, AT-90-30-2. pp. 1582-1589(1990)
9. Gordon J. Van Wylen and Richard E. Sonntag, Fundamentals of classical Thermodynamic, SI Version. 2 nd. Ed. John Wiley & Sons Inc New York
10. W.F. Stoecker, Design of thermal system, Third Edition, McGRAW - Hill. International Editions
11. F.P. Incropera and D. P. Dewitt, Fundamentals of heat and mass transfers, third Edition, John Wiley & Sons, 1990, New york, U.S.A.
12. Herold, K. E. , and Moran. M. J. 1987. "Thermodynamic properties of Lithium bromide/water solutions." ASHRAE Transactions, Vol. 93, Part 1, pp. 35-50
13. M.R. Patterson, Ph.D. and H. Perez-Blanco, Ph.D. 1988. Numerical first of the properties of LiBr - H₂O Solution, ASHRAE Transaction , Vol. 94, Part 2, pp2059 - 2077
14. ผศ. ดร. ธนาคม สุนทรชัยนาคแสง และมนพล ชูไชนาค , คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนร่วมกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน , ส่งเสริมเทคโนโลยี , ปีที่ 22 ฉบับที่ 126 , หน้า 147-151(2539)

กรณีที่จะศึกษาต่อไป

กรณีอุณหภูมิเซนเซอร์เท่ากับอุณหภูมิอีแวปอเรเตอร์

- COP, FR เทียบกับ T_{AB} ที่อุณหภูมิ T_{CO} ต่างๆ โดยกำหนด $T_{GE}=T_{EV}=C$ และ $EF=0.0$
- COP, FR เทียบกับ T_{AB} ที่อุณหภูมิ $T_{GE}=T_{EV}$ ต่างๆ โดยกำหนด $T_{CO}=C$ และ $EF=0.0$
- COP, FR เทียบกับ $T_{GE}=T_{EV}$ ที่อุณหภูมิ T_{AB} ต่างๆ โดยกำหนด $T_{CO}=C$ และ $EF=0.0$

กรณีอุณหภูมิเซนเซอร์ไม่เท่ากับอุณหภูมิอีแวปอเรเตอร์

- COP เทียบกับ T_{CO} ที่ค่า EF ต่างๆ โดยกำหนด $T_{GE}=C$, $T_{EV}=C$ และ $T_{AB}=C$
- COP เทียบกับ T_{GE} ที่ค่า EF ต่างๆ โดยกำหนด $T_{CO}=C$, $T_{EV}=C$ และ $T_{AB}=C$
- COP เทียบกับ T_{EV} ที่ค่า EF ต่างๆ โดยกำหนด $T_{CO}=C$, $T_{GE}=C$ และ $T_{AB}=C$
- COP เทียบกับ T_{AB} ที่ค่า EF ต่างๆ โดยกำหนด $T_{CO}=C$, $T_{GE}=C$ และ $T_{EV}=C$
- COP เทียบกับ EF ที่ค่า T_{AB} ต่างๆ โดยกำหนด $T_{CO}=C$, $T_{GE}=C$ และ $T_{EV}=C$
- Q, FR เทียบกับ T_{CO} ที่ค่า EF ต่างๆ โดยกำหนด $T_{GE}=C$, $T_{EV}=C$ และ $T_{AB}=C$
- Q, FR เทียบกับ T_{GE} ที่ค่า EF ต่างๆ โดยกำหนด $T_{CO}=C$, $T_{EV}=C$ และ $T_{AB}=C$
- Q, FR เทียบกับ T_{EV} ที่ค่า EF ต่างๆ โดยกำหนด $T_{CO}=C$, $T_{GE}=C$ และ $T_{AB}=C$
- Q, FR เทียบกับ T_{AB} ที่ค่า EF ต่างๆ โดยกำหนด $T_{CO}=C$, $T_{GE}=C$ และ $T_{EV}=C$
- COP, FR เทียบกับ T_{AB} ที่อุณหภูมิ T_{CO} ต่างๆ โดยกำหนด $T_{GE}=C$, $T_{EV}=C$ และ $EF=0.0$
- COP, FR เทียบกับ T_{AB} ที่อุณหภูมิ T_{GE} ต่างๆ โดยกำหนด $T_{CO}=C$, $T_{EV}=C$ และ $EF=0.0$
- COP, FR เทียบกับ T_{AB} ที่อุณหภูมิ T_{EV} ต่างๆ โดยกำหนด $T_{CO}=C$, $T_{GE}=C$ และ $EF=0.0$
- COP, FR เทียบกับ T_{GE} ที่อุณหภูมิ T_{AB} ต่างๆ โดยกำหนด $T_{CO}=C$, $T_{EV}=C$ และ $EF=0.0$
- COP, FR เทียบกับ T_{EV} ที่อุณหภูมิ T_{AB} ต่างๆ โดยกำหนด $T_{CO}=C$, $T_{GE}=C$ และ $EF=0.0$

หมายเหตุ C = ค่าคงที่ ซึ่งยังไม่สามารถกำหนดค่าได้ในขณะนี้ เนื่องจากวิเคราะห์ข้อมูลยังไม่หมด

สรุปผลการคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของการลดลง (เทียบกับ COP_E ที่ $EF = 1.0$)

1. สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะ(COP) เทียบกับ อุณหภูมิของคอนเดนเซอร์(T_{co}) ที่ประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน(EF)ต่างๆ โดยที่กำหนดให้ อุณหภูมิของเยนเนอเรเตอร์และอีแวปอเรเตอร์ ($T_{GE}=T_{EV}$) = 70 องศาเซลเซียส และ อุณหภูมิของตัวดูดกลืน(T_{AB}) = 100 องศาเซลเซียส

- ช่วงอุณหภูมิ T_{co} ต่างๆ (20-30 °C) เปอร์เซนต์การลดลงของ COP_E เมื่อ EF ลดลงนั้นน้อยมาก

- ที่อุณหภูมิ $T_{co} = 35$ °C เปอร์เซนต์การลดลงของ COP_E เมื่อ EF ลดลงนั้นจะเริ่มเพิ่มสูงขึ้น

ที่ $EF = 0.75$ เปอร์เซนต์การลดลงของ $COP_E = 3.7623 \%$

ที่ $EF = 0.5$ เปอร์เซนต์การลดลงของ $COP_E = 7.723 \%$

ที่ $EF = 0.25$ เปอร์เซนต์การลดลงของ $COP_E = 11.881 \%$

ที่ $EF = 0.0$ เปอร์เซนต์การลดลงของ $COP_E = 16.435 \%$

- ที่อุณหภูมิ $T_{co} = 40$ °C เปอร์เซนต์การลดลงของ COP_E เมื่อ EF ลดลงนั้นจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

ที่ $EF = 0.75$ เปอร์เซนต์การลดลงของ $COP_E = 9.703 \%$

ที่ $EF = 0.5$ เปอร์เซนต์การลดลงของ $COP_E = 21.584 \%$

ที่ $EF = 0.25$ เปอร์เซนต์การลดลงของ $COP_E = 36.237 \%$

ที่ $EF = 0.0$ เปอร์เซนต์การลดลงของ $COP_E = 55.247 \%$

สรุป จะเห็นว่า EF จะมีผลต่อ COP_E มาก เมื่อ T_{co} สูงกว่า 35 °C

2. สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะ(COP) เทียบกับ อุณหภูมิของเยนเนอเรเตอร์และอีแวปอเรเตอร์ ($T_{GE}=T_{EV}$) ที่ประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน(EF)ต่างๆ โดยที่กำหนดให้ อุณหภูมิของคอนเดนเซอร์(T_{co}) = 40 องศาเซลเซียส และ อุณหภูมิของตัวดูดกลืน(T_{AB}) = 120 องศาเซลเซียส

- ที่อุณหภูมิ $T_{GE}=T_{EV} = 80$ °C เปอร์เซนต์การลดลงของ COP_E เมื่อ EF ลดลงนั้นจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

ที่ $EF = 0.75$ เปอร์เซนต์การลดลงของ $COP_E = 8.317 \%$

ที่ $EF = 0.5$ เปอร์เซนต์การลดลงของ $COP_E = 18.812 \%$

ที่ $EF = 0.25$ เปอร์เซนต์การลดลงของ $COP_E = 31.485 \%$

ที่ $EF = 0.0$ เปอร์เซนต์การลดลงของ $COP_E = 47.525 \%$

- ที่อุณหภูมิ $T_{GE}=T_{EV} = 90$ °C เปอร์เซนต์การลดลงของ COP_E เมื่อ EF ลดลงจะลดลงน้อย

ที่ $EF = 0.75$ เปอร์เซนต์การลดลงของ $COP_E = 1.782 \%$

ที่ $EF = 0.5$ เปอร์เซนต์การลดลงของ $COP_E = 3.168 \%$

ที่ $EF = 0.25$ เปอร์เซนต์การลดลงของ $COP_E = 4.752 \%$

ที่ $EF = 0.0$ เปอร์เซนต์การลดลงของ $COP_E = 6.336 \%$

- ช่วงอุณหภูมิ $T_{GE}=T_{EV}$ มากกว่า 90 °C เปอร์เซนต์การลดลงของ COP_E เมื่อ EF ลดลงจะลดลงน้อยมาก

สรุป จะเห็นว่า EF จะมีผลต่อ COP_E มาก เมื่อ $T_{GE}=T_{EV}$ ต่ำกว่า 90 °C

3. สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะ(COP) เทียบกับ อุณหภูมิของตัวดูดกลืน(T_{AB}) ที่ประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน(EF)ต่างๆ โดยที่กำหนดให้ อุณหภูมิของคอนเดนเซอร์(T_{CO})= 40 องศาเซลเซียส และ อุณหภูมิของเฮนเนอเรเตอร์และอีวาพออเรเตอร์($T_{OE}=T_{EV}$) = 90 องศาเซลเซียส

- ช่วงอุณหภูมิ T_{AB} น้อยกว่า 130°C เปอร์เซ็นต์การลดลงของ COP_R เมื่อ EF ลดลงนั้นน้อยมาก

- ที่อุณหภูมิ $T_{AB} = 130^{\circ}\text{C}$ เปอร์เซ็นต์การลดลงของ COP_R เมื่อ EF ลดลง

ที่ EF = 0.75 เปอร์เซ็นต์การลดลงของ $COP_R = 2.579 \%$

ที่ EF = 0.5 เปอร์เซ็นต์การลดลงของ $COP_R = 5.754 \%$

ที่ EF = 0.25 เปอร์เซ็นต์การลดลงของ $COP_R = 9.325 \%$

ที่ EF = 0.0 เปอร์เซ็นต์การลดลงของ $COP_R = 13.095 \%$

- ที่อุณหภูมิ $T_{AB} = 140^{\circ}\text{C}$ เปอร์เซ็นต์การลดลงของ COP_R เมื่อ EF ลดลง

ที่ EF = 0.75 เปอร์เซ็นต์การลดลงของ $COP_R = 6.944 \%$

ที่ EF = 0.5 เปอร์เซ็นต์การลดลงของ $COP_R = 16.269 \%$

ที่ EF = 0.25 เปอร์เซ็นต์การลดลงของ $COP_R = 27.381 \%$

ที่ EF = 0.0 เปอร์เซ็นต์การลดลงของ $COP_R = 40.873 \%$

สรุป จะเห็นว่า EF จะมีผลต่อ COP_R มาก เมื่อ T_{AB} สูงกว่า 140°C

4. สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะ(COP) เทียบกับ ประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน(EF) ที่อุณหภูมิของตัวดูดกลืน(T_{AB}) ต่างๆ โดยที่กำหนดให้ อุณหภูมิของคอนเดนเซอร์(T_{CO})= 40 องศาเซลเซียส และ อุณหภูมิของเฮนเนอเรเตอร์และอีวาพออเรเตอร์($T_{OE}=T_{EV}$) = 100 องศาเซลเซียส

- ช่วงอุณหภูมิ T_{AB} น้อยกว่า 130°C เปอร์เซ็นต์การลดลงของ COP_R เมื่อ EF ลดลงนั้นน้อยมาก

- ที่ EF = 0.0 เปอร์เซ็นต์การลดลงของ COP_R เมื่อ T_{AB} เพิ่มขึ้น

ที่ $T_{AB} = 130^{\circ}\text{C}$ เปอร์เซ็นต์การลดลงของ $COP_R = 4.95 \%$

ที่ $T_{AB} = 140^{\circ}\text{C}$ เปอร์เซ็นต์การลดลงของ $COP_R = 8.317 \%$

ที่ $T_{AB} = 150^{\circ}\text{C}$ เปอร์เซ็นต์การลดลงของ $COP_R = 15.643 \%$

ที่ $T_{AB} = 160^{\circ}\text{C}$ เปอร์เซ็นต์การลดลงของ $COP_R = 39.802 \%$

- ที่ EF = 0.25 เปอร์เซ็นต์การลดลงของ COP_R เมื่อ T_{AB} เพิ่มขึ้น

ที่ $T_{AB} = 130^{\circ}\text{C}$ เปอร์เซ็นต์การลดลงของ $COP_R = 3.762 \%$

ที่ $T_{AB} = 140^{\circ}\text{C}$ เปอร์เซ็นต์การลดลงของ $COP_R = 6.138 \%$

ที่ $T_{AB} = 150^{\circ}\text{C}$ เปอร์เซ็นต์การลดลงของ $COP_R = 11.080 \%$

ที่ $T_{AB} = 160^{\circ}\text{C}$ เปอร์เซ็นต์การลดลงของ $COP_R = 26.732 \%$

- ที่ EF = 0.5 เปอร์เซ็นต์การลดลงของ COP_R เมื่อ T_{AB} เพิ่มขึ้น

ที่ $T_{AB} = 130^{\circ}\text{C}$ เปอร์เซ็นต์การลดลงของ $COP_R = 2.882 \%$

ที่ $T_{AB} = 140^{\circ}\text{C}$ เปอร์เซ็นต์การลดลงของ $COP_R = 3.96 \%$

ที่ $T_{AB} = 150^{\circ}\text{C}$ เปอร์เซ็นต์การลดลงของ $COP_R = 3.93 \%$

ที่ $T_{AB} = 160^{\circ}\text{C}$ เปอร์เซ็นต์การลดลงของ $COP_R = 16.039 \%$

ที่ $EF = 0.75$ เปอร์เซ็นต์การลดลงของ COP_B เมื่อ T_{AB} เพิ่มขึ้น

ที่ $T_{AB} = 130^\circ C$ เปอร์เซ็นต์การลดลงของ $COP_B = 1.584 \%$

ที่ $T_{AB} = 140^\circ C$ เปอร์เซ็นต์การลดลงของ $COP_B = 1.98 \%$

ที่ $T_{AB} = 150^\circ C$ เปอร์เซ็นต์การลดลงของ $COP_B = 3.168 \%$

ที่ $T_{AB} = 160^\circ C$ เปอร์เซ็นต์การลดลงของ $COP_B = 6.93 \%$

COP เทียบกับ T_{CO} ที่ EF ต่างๆ $T_{GB}=T_{EV}=70^{\circ}\text{C}$, $T_{AB}=100^{\circ}\text{C}$

T_{CO}	COP _E ที่ EF ต่างๆ					COP _C
	0	0.25	0.5	0.75	1	
20	0.477	0.484	0.491	0.498	0.505	0.893
25	0.469	0.479	0.488	0.496	0.505	0.857
30	0.455	0.469	0.481	0.493	0.505	0.816
35	0.422	0.445	0.466	0.486	0.505	0.769
40	0.226	0.322	0.396	0.456	0.505	0.714

COP เทียบกับ $T_{GB}=T_{EV}$, ที่ EF ต่างๆ $T_{CO}=40^{\circ}\text{C}$, $T_{AB}=120^{\circ}\text{C}$

$T_{GB}=T_{EV}$	COP _E ที่ EF ต่างๆ					COP _C
	0	0.25	0.5	0.75	1	
80	0.265	0.346	0.41	0.463	0.505	0.75
90	0.473	0.481	0.489	0.496	0.505	0.833
100	0.487	0.489	0.492	0.496	0.505	0.9

COP เทียบกับ T_{AB} ที่ EF ต่างๆ $T_{CO}=40^{\circ}\text{C}$, $T_{GB}=T_{EV}=90^{\circ}\text{C}$

T_{AB}	COP _E ที่ EF ต่างๆ					COP _C
	0	0.25	0.5	0.75	1	
110	0.486	0.489	0.492	0.496	0.504	0.873
120	0.473	0.481	0.489	0.496	0.504	0.833
130	0.438	0.457	0.475	0.491	0.504	0.802
140	0.298	0.366	0.422	0.469	0.503	0.778

COP เทียบกับ EF ที่ T_{AB} ต่างๆ $T_{CO}=40^{\circ}\text{C}$, $T_{GB}=T_{EV}=100^{\circ}\text{C}$

EF	COP _E ที่ T_{AB} ต่างๆ			
	130	140	150	160
0	0.48	0.463	0.426	0.304
0.25	0.486	0.474	0.449	0.37
0.5	0.491	0.485	0.47	0.424
0.75	0.497	0.495	0.489	0.47
1	0.505	0.505	0.505	0.505

Q, FR เทียบกับ T_{CO} ที่ EF ต่างๆ $T_{GB}=T_{EV}=70^{\circ}C$, $T_{AB}=100^{\circ}C$

T_{CO}	FR	$Q_{AB}=Q_{GB}$ ที่ EF ต่างๆ			$Q_{EV}=Q_{CO}$
		0	0.5	1	
20	5	459.14	486.17	513.2	503.6
25	6	370.59	398.85	427.11	418.93
30	7.8	268.8	298.23	327.67	321.47
35	11.7	154.56	185.12	215.69	211.71
40	28.2	25.54	57.24	88.93	87.34

Q, FR เทียบกับ $T_{GB}=T_{EV}$, ที่ EF ต่างๆ $T_{CO}=40^{\circ}C$, $T_{AB}=120^{\circ}C$

$T_{GB}=T_{EV}$	FR	$Q_{AB}=Q_{GE}$ ที่ EF ต่างๆ			$Q_{EV}=Q_{CO}$
		0	0.5	1	
80	20.8	42.93	82.65	122.36	118.86
90	5.2	433.88	461.81	489.74	482.71
100	2.9	828.56	846.01	863.45	874.53

Q, FR เทียบกับ T_{AB} ที่ EF ต่างๆ $T_{CO}=40^{\circ}C$, $T_{GB}=T_{EV}=100^{\circ}C$

T_{AB}	FR	$Q_{AB}=Q_{GB}$ ที่ EF ต่างๆ			$Q_{EV}=Q_{CO}$
		0	0.5	1	
110	2	1200.55	1209.25	1217.96	1271.41
120	2.9	828.56	846.01	863.45	874.53
130	4.1	569.72	595.94	622.17	617.01
140	5.7	382.62	417.66	452.7	443.3
150	8.2	225.97	269.86	313.75	304.57
160	14.3	76.42	129.2	181.98	175.32

COP เทียบกับ T_{CO} ที่ EF ต่างๆ $T_{GB}=T_{EV}=70^{\circ}C$, $T_{AB}=100^{\circ}C$ (คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของการลดลง)

T_{CO}	COP _B ที่ EF ต่างๆ (เปอร์เซนต์ : %)					COP _C
	0	0.25	0.5	0.75	1	
20	5.554	4.158	2.772	1.386	0	0.893
25	7.1287	5.1485	3.366	1.782	0	0.857
30	9.901	7.1287	4.752	2.376	0	0.816
35	16.435	11.881	7.723	3.7623	0	0.769
40	55.247	36.237	21.584	9.703	0	0.714

COP เทียบกับ $T_{GB}=T_{EV}$, ที่ EF ต่างๆ $T_{CO} = 40^{\circ}C$, $T_{AB}=120^{\circ}C$ (คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของการลดลง)

$T_{GB}=T_{EV}$	COP _B ที่ EF ต่างๆ (เปอร์เซนต์ : %)					COP _C
	0	0.25	0.5	0.75	1	
80	47.525	31.485	18.812	8.317	0	0.75
90	6.336	4.752	3.168	1.782	0	0.833
100	3.564	3.1683	2.574	1.782	0	0.9

COP เทียบกับ T_{AB} ที่ EF ต่างๆ $T_{CO} = 40^{\circ}C$, $T_{GB}=T_{EV}=90^{\circ}C$ (คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของการลดลง)

T_{AB}	COP _B ที่ EF ต่างๆ (เปอร์เซนต์ : %)					COP _C
	0	0.25	0.5	0.75	1	
110	3.571	2.976	2.38	1.587	0	0.873
120	6.1507	4.563	2.976	1.587	0	0.833
130	13.095	9.325	5.754	2.579	0	0.802
140	40.873	27.381	16.269	6.944	0	0.778

COP เทียบกับ EF ที่ T_{AB} ต่างๆ $T_{CO} = 40^{\circ}C$, $T_{GB}=T_{EV}=100^{\circ}C$ (คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของการลดลง)

EF	COP _B ที่ T_{AB} ต่างๆ (เปอร์เซนต์ : %)			
	130	140	150	160
0	4.9504	8.317	15.643	39.302
0.25	3.762	6.138	11.089	26.732
0.5	2.772	3.96	6.93	16.039
0.75	1.584	1.98	3.168	6.93
1	0	0	0	0

Q, FR เทียบกับ T_{CO} ที่ EF ต่างๆ $T_{GB}=T_{EV}=70^{\circ}C$, $T_{AB}=100^{\circ}C$ (คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของการลดลง)

T_{CO}	FR	$Q_{AB}=Q_{GB}$ ที่ EF ต่างๆ (เปอร์เซ็นต์ : %)			$Q_{EV}=Q_{CO}$
		0	0.5	1	
20	5	10.534	5.267	0	503.6
25	6	13.233	6.616	0	418.93
30	7.8	17.966	8.985	0	321.47
35	11.7	28.341	14.173	0	211.71
40	28.2	71.28	35.63	0	87.34

Q, FR เทียบกับ $T_{GB}=T_{EV}$, ที่ EF ต่างๆ $T_{CO}=40^{\circ}C$, $T_{AB}=120^{\circ}C$ (คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของการลดลง)

$T_{GB}=T_{EV}$	FR	$Q_{AB}=Q_{GB}$ ที่ EF ต่างๆ (เปอร์เซ็นต์ : %)			$Q_{EV}=Q_{CO}$
		0	0.5	1	
80	20.8	64.915	32.4534	0	118.86
90	5.2	11.406	5.703	0	482.71
100	2.9	4.0407	2.0198	0	874.53

Q, FR เทียบกับ T_{AB} ที่ EF ต่างๆ $T_{CO}=40^{\circ}C$, $T_{GB}=T_{EV}=100^{\circ}C$ (คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของการลดลง)

T_{AB}	FR	$Q_{AB}=Q_{GB}$ ที่ EF ต่างๆ (เปอร์เซ็นต์ : %)			$Q_{EV}=Q_{CO}$
		0	0.5	1	
110	2	1.4294	0.7151	0	1271.41
120	2.9	4.0404	2.018	0	874.53
130	4.1	8.43	4.216	0	617.01
140	5.7	15.4804	7.742	0	443.3
150	8.2	27.9776	13.988	0	304.57
160	14.3	58.006	29.003	0	175.32