

# สารทำงานสำหรับปั๊มความร้อนที่ใช้น้ำพุร้อนเป็นแหล่งความร้อน Working Fluid Selection for Geothermal Heat Pump

ชัชวาลย์ ชัยชนะ และ นัฐพร ไชยญาติ

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

สถานจัดการและอนุรักษ์พลังงาน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

## บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการศึกษาการเลือกสารทำงานที่เหมาะสมสำหรับใช้ในปั๊มความร้อนที่ใช้น้ำพุร้อนเป็นแหล่งความร้อน โดยทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพและประสิทธิภาพในการทำงานของระบบทางทฤษฎี โดยในการเปรียบเทียบจะใช้ Chlorodifluoromethane หรือ R-22 เป็นสารทำงานอ้างอิงเนื่องจากอุปกรณ์ของระบบปั๊มความร้อนส่วนใหญ่ใช้กับสารทำงาน R-22 และสามารถหาได้ง่ายในท้องตลาด สารทำงานที่นำมาเปรียบเทียบเป็นสารเดี่ยว 5 ชนิดคือ R-290 (Propane) R-600 (Butane) R-600a (Isobutane) R-1270 (Propylene) และ R-717 (Ammonia) เงื่อนไขหลักที่ใช้ในการเปรียบเทียบคือ อุณหภูมิคอยล์ร้อนที่  $90^{\circ}\text{C}$  และอุณหภูมิคอยล์เย็น  $40^{\circ}\text{C}$

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการทำงานของระบบพิจารณาจากค่าต่างๆ ดังนี้ อัตราการไหลของสารทำงานต่อความร้อนที่ได้ ปริมาตรกระบอกสูบของอุปกรณ์อัดไอ ความดันของสารทำงานที่ออกจากอุปกรณ์อัดไอ อุณหภูมิของสารทำงานที่ออกจากอุปกรณ์อัดไอ และสัมประสิทธิ์ของประสิทธิภาพ ( $\text{COP}_{\text{hp}}$ ) ผลการศึกษาพบว่าสารทำงานที่มีความเหมาะสมมากที่สุดในการนำมาประยุกต์ใช้กับปั๊มความร้อนที่ใช้น้ำพุร้อนเป็นแหล่งความร้อนคือ R-290

## Abstract

This paper describes the methods and result of choosing an appropriate working fluid for geothermal heat pump (GHP). The methods used are physical property comparison and cycle simulation under a preferred working condition. R-22 is used as reference working fluid since it is widely used in heat pump applications. The five working fluids considered are R-290 (Propane), R-600 (Butane), R-600a (Isobutane), R-1270 (Propylene) and R-717 (Ammonia). The condensing temperature and evaporating temperature chosen are  $90^{\circ}\text{C}$  and  $40^{\circ}\text{C}$ .

## 1. บทนำ

สารทำงานในระบบปั๊มความร้อนและระบบปรับอากาศนั้นเป็นสิ่งหนึ่งที่มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพของระบบมาก การเลือกใช้สารทำงานที่เหมาะสมนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง จากการศึกษที่ผ่านมาพบว่าปัจจัยหลักที่ใช้ในการคัดเลือกสารทำงานในอดีตคือ ประสิทธิภาพของระบบ ความปลอดภัย และราคาของสารทำงาน แต่ในปัจจุบันเมื่อภาวะโลกร้อน (Global warming) ได้ส่งผลกระทบต่อถึงมนุษย์ทำให้เกิดการตื่นตัวในการลดผลกระทบจากภาวะโลกร้อนนี้ สำหรับภาวะโลกร้อนส่วนหนึ่งเป็นผลสืบเนื่องมาจากการใช้สารทำงานในระบบปรับอากาศที่ทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก (Green house effect) ดังนั้นในการเลือกสารทำงานที่เหมาะสมสำหรับระบบปั๊มความร้อนและระบบปรับอากาศจึงต้องคำนึงถึงปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมเหล่านี้ด้วย [1]

ในปัจจุบัน ASHRAE [2]แบ่งประเภทสารทำงานออกเป็น 5 กลุ่มคือ Halocarbon Inorganic Hydrocarbon Cryogenic และ Absorption โดยแบ่งตามส่วนประกอบโมเลกุลและการใช้งานในระบบต่างๆ สำหรับสารทำงานที่เหมาะสมสำหรับระบบอัดไอ ซึ่งเป็นระบบที่ใช้กันแพร่หลายในการทำความเย็นคือกลุ่ม Halocarbon Inorganic และ Hydrocarbon ในบทความนี้จะเลือกพิจารณาสารทำงานที่เมื่อปล่อยสู่บรรยากาศแล้วมีผลกระทบต่อชั้นบรรยากาศน้อย ซึ่งสารทำงานดังกล่าวหมายถึงสารทำงานในกลุ่ม Inorganic และกลุ่ม Hydrocarbon ที่สามารถหาได้ทั่วไปและมีราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับสารทำงานที่สังเคราะห์ขึ้นมา ส่วนสารทำงานในกลุ่ม Cryogenic และกลุ่ม Absorption นั้นจะเหมาะกับการทำความเย็นในรูปแบบเฉพาะ

Natural working fluid ที่ถูกเลือกเพื่อนำมาใช้กับระบบปั๊มความร้อน ในบทความนี้สารทำงานในกลุ่ม Hydrocarbon คือ Propane (R-290) , Butane (R-600) , Isobutane (R-600a) , และ

Propylene (R-1270) ในกลุ่ม Inorganic คือ Ammonia (R-717) หลักเกณฑ์ที่ใช้ในการเลือกสารทำงานเหล่านี้มาพิจารณาคือมีค่า Global Warming Potential (GWP) เป็นศูนย์ ซึ่งจะน้อยกว่าค่า GWP ของ R-22 ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน

ในการเลือกสารทำงานที่ที่เหมาะสมสำหรับใช้ใน Geothermal Heat Pump (GHP) นั้น จะพิจารณาจากคุณสมบัติทางกายภาพของสารทำงานก่อน แล้วจึงพิจารณาผลที่ได้จากการจำลองการทำงานของสารทำงานในวัฏจักรอัดไอ [3] โดยใช้เงื่อนไขการทำงานที่ใกล้เคียงกับสภาพการทำงานจริง และสารทำงานที่เหมาะสมสามารถใช้อุปกรณ์ที่มีอยู่ในท้องตลาดได้ โดยอาจต้องปรับปรุงเพียงเล็กน้อยหรือไม่ต้องปรับปรุงเลย

## 2. คุณสมบัติทางกายภาพของสารทำงาน

คุณสมบัติทางกายภาพของสารทำงานเป็นสิ่งแรกที่ใช้ในการคัดเลือกสารทำงานของระบบปั๊มความร้อนและระบบปรับอากาศ เนื่องจากคุณสมบัติหลายตัวเป็นสิ่งบ่งชี้ถึงความสามารถในการทำงาน และสภาวะที่เหมาะสมสำหรับระบบที่จะทำงานได้ดี สำหรับคุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญและใช้เป็นเกณฑ์ในการเลือกสารทำงาน แสดงไว้ในตารางที่ 1 [4] [5] โดยสารทำงานที่เลือกมาในบทความนี้จะสามารถนำมาใช้งานในช่วงอุณหภูมิที่ต้องการได้ ในขณะที่เดียวกันก็มีผลกระทบต่อชั้นบรรยากาศต่ำ เนื่องจากมีอายุอยู่ในชั้นบรรยากาศสั้นและมีค่า (Ozone Depletion Potential) ODP เท่ากับศูนย์

จากตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่า R-717 มีข้อเสียหลักคือเป็นสารพิษและเป็นสารไวไฟ ซึ่งอาจทำให้การใช้งานจำกัดอยู่ในเพียงบางด้านเท่านั้น แต่มีข้อดีเช่น มีผลกระทบต่อชั้นบรรยากาศของโลกน้อยที่สุดคืออยู่ในชั้นบรรยากาศน้อยกว่า 2 อาทิตย์เมื่อเทียบกับ R-22 ที่อยู่ในชั้นบรรยากาศถึง 12 ปีจึงจะสลายตัว นอกจากนี้ R-717 ยังมีความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอน้ำมากกว่า R-22 ประมาณ 8 เท่าในช่วงอุณหภูมิ 0 ถึง 70 องศาเซลเซียส

ส่งผลให้อัตราการไหลของสารทำงานต่อปริมาณความร้อนที่ต้องการมีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับ R-22

อย่างไรก็ตามยังไม่สามารถสรุปได้ในขั้นนี้ว่าขนาดของท่อที่ใช้ในระบบของ R-717 จะมีขนาดเล็กกว่าขนาดของท่อที่ใช้ในระบบอื่นๆ เนื่องจากต้องพิจารณาความหนาแน่น ณ อุณหภูมิและความดันที่ใช้งานอีกด้วย

**ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพของสารทำงาน**

สารทำงาน	R-22	R-290	R-600	R-600a	R-1270	R-717
สูตรเคมี	CHClF <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	NH <sub>3</sub>
มวลโมเลกุล [kg/kmol]	86.46	44.10	58.12	58.12	42.08	17.03
อุณหภูมิวิกฤติ [°C]	96.14	96.70	152.0	134.7	92.40	131.9
ความดันวิกฤติ [MPa]	4.99	4.25	3.80	3.64	4.66	11.3
ความหนาแน่นวิกฤติ [kg/m <sup>3</sup> ]	562.0	220.0	227.8	224.4	222.6	225.0
จุดเดือด [°C]	-40.9	-42.1	-0.5	-11.6	-47.7	-33.3
ความร้อนแฝงการกลายเป็นไอ [kJ/kg]	166.6	306.4	345.1	312.0	303.1	1099.2
ติดไฟ	NO	YES	YES	YES	YES	YES
เป็นพิษ	NO	NO	NO	NO	NO	YES
ALT [Yr]	15	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
ODP	0.05	0	0	0	0	0
GWP	1700	3	3	3	3	3

อุณหภูมิวิกฤติของ R-290 และ R-1270 มีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิวิกฤติของ R-22 ทำให้สามารถใช้งานในช่วงอุณหภูมิเดียวกันได้ โดยมีข้อจำกัดคืออุณหภูมิด้านสูงหรือในคอลด์รูนไม่ควรเกิน 90°C เพราะจะทำให้อุณหภูมิของสารทำงานเข้าใกล้อุณหภูมิวิกฤติ โดยในช่วง

อุณหภูมินี้ ค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของสารจะต่ำทำให้อัตราการไหลของสารทำงานสูงมาก

สารทำงานในกลุ่ม Hydrocarbon มีค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอมากกว่า R-22 อยู่ประมาณ 2 เท่า ที่ตำแหน่งด้านดูดของคอมเพรสเซอร์ ส่งผลให้ต้องการอัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงานที่น้อยกว่า แต่หากพิจารณาความหนาแน่นแล้วสารทำงานในกลุ่ม Hydrocarbons จะเห็นว่ามีค่าน้อยกว่าประมาณ 2 เท่าเมื่อเทียบกับ R-22 ทำให้อัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารทำงานในกลุ่ม Hydrocarbons กับ R-22 มีค่าใกล้เคียงกัน จุดสำคัญอีกจุดหนึ่งที่ควรระมัดระวังหากจะใช้สารทำงานในกลุ่ม Hydrocarbons กับ ปุ่มความร้อนคือ มีความไวไฟที่ค่อนข้างสูง การเลือกใช้เครื่องอัดไอแบบ Hermetic ที่ทั้งมอเตอร์และส่วนอัดไออยู่ในชุดเดียวกัน จะมีความเสี่ยงของการเกิดประกายไฟจากขดลวดของมอเตอร์ภายในได้

คุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญอีกข้อหนึ่งคือการทำปฏิกิริยากับทองแดง เป็นที่ทราบกันดีว่าอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบปั๊มความร้อนและระบบทำความเย็นและโดยทั่วไปจะทำขึ้นจากทองแดง โดยสารทำงานที่ใช้ในการเปรียบเทียบกับชนิดเดียวที่ไม่สามารถใช้กับทองแดงได้คือ R-717

### 3. การจำลองการทำงาน

การจำลองการทำงานของระบบปั๊มความร้อนที่ใช้น้ำพุร้อนอุณหภูมิต่ำเป็นแหล่งพลังงานหลักโดยใช้สารทำงานที่คัดเลือกไว้มีข้อกำหนดและเงื่อนไขการทำงาน ของระบบดังนี้

1. เป็นการทำงานภายใต้วัฏจักรอัดไอ (Vapour compression cycle)
2. ไม่เกิดความดันตก (Pressure drop) อันเนื่องมาจากการไหลของสารทำงานในอุปกรณ์ต่างๆ
3. อุณหภูมิคอลด์รูน = 90°C
4. อุณหภูมิคอลด์เย็น = 40°C (อุณหภูมิน้ำพุร้อนประมาณ 50°C)

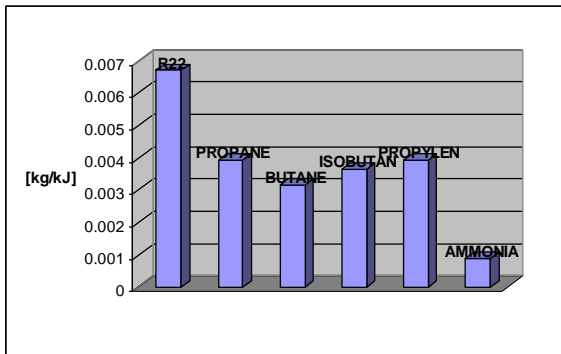
5. Isentropic efficiency = 80%
6. Degree of superheating = 4.0 °C
7. Degree of subcooling = 3.5 °C
8. คุณสมบัติของสารทำงานที่สภาวะต่างๆ

คำนวณจากโปรแกรม REFPROP

#### 4. ผลการจำลอง

##### 4.1. อัตราการไหลเชิงมวลต่ออัตราความร้อน

อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงานแต่ละชนิดในวัฏจักรสามารถบ่งบอกถึงปริมาณสารทำงานที่ต้องใช้ในระบบทั้งหมด โดยในการจำลองนี้ได้กำหนดตัวแปรขึ้นมาใหม่คือ อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงานต่ออัตราความร้อนที่ได้ของวัฏจักรจากการควบแน่น เพื่อให้สามารถทำการเปรียบเทียบระหว่างสารทำงานแต่ละชนิดที่สภาวะการทำงานเดียวกัน ซึ่งผลจากการจำลองแสดงในรูปที่ 1



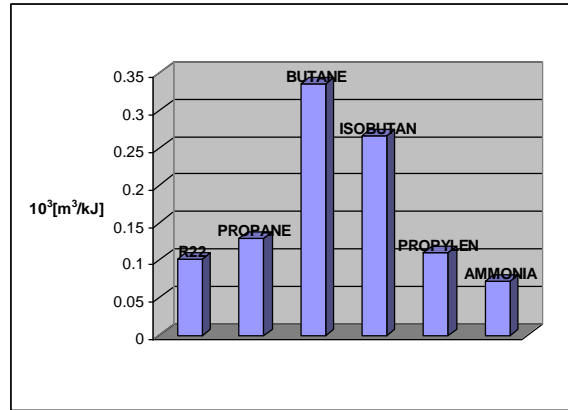
รูปที่ 1 เปรียบเทียบอัตราการไหลต่อความร้อน

จากรูปที่ 1 จะเห็นว่าสารทำงานในกลุ่มของ Hydrocarbon มีอัตราการไหลที่ต่ำกว่าอัตราการไหลของ R-22 อยู่เกือบหนึ่งเท่าตัว ในขณะที่หากใช้ R-717 จะมีอัตราการไหลน้อยกว่าอัตราการไหลของ R-22 ประมาณ 8 เท่า

##### 4.2. ปริมาตรสารทำงานก่อนเข้าอุปกรณ์อัดไอ

การพิจารณาปริมาตรของสารทำงานก่อนเข้าอุปกรณ์อัดไอให้ข้อมูลที่สำคัญสองประการคือ ขนาดของ Displacement volume ของอุปกรณ์อัดไอ และขนาดของท่อที่ใช้ในระบบ โดยในการจำลองจะใช้หลักการคล้ายกับในหัวข้อที่ผ่านมาคือการประมาณอัตราการไหล

เชิงปริมาตรของสารทำงาน ณ ตำแหน่งก่อนเข้าอุปกรณ์อัดไอต่ออัตราความร้อนที่ได้ของวัฏจักรจากการควบแน่น โดยผลจากการจำลองแสดงในรูปที่ 2



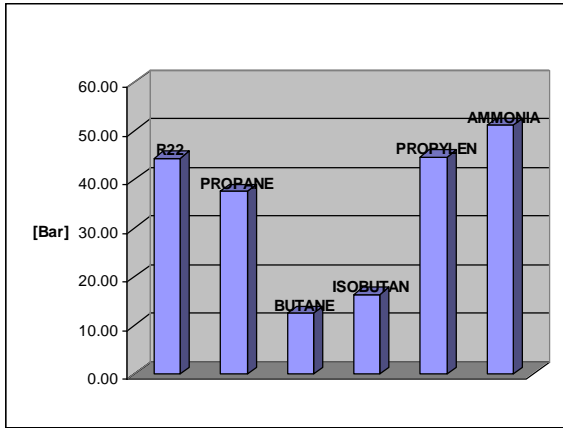
รูปที่ 2 เปรียบเทียบปริมาตรระบอบสูบ

ในรูปที่ 2 จะเห็นได้ว่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรต่ออัตราความร้อนที่ได้ของ R-290 และ R-1270 มีค่าใกล้เคียงกับค่าของ R-22 มาก โดยมีความแตกต่างกันเพียง  $\pm 5\%$  ในขณะที่ค่าของ R-600 และ R600a นั้นมีค่ามากกว่าค่าของ R-22 ประมาณ 3 เท่า

ข้อมูลจากรูปที่ 2 ยังสามารถสรุปได้ว่าสามารถใช้ R-290 และ R-1270 ในวัฏจักรหรือปั๊มความร้อนที่ใช้ R-22 ได้โดยที่อัตราความร้อนที่ได้รับจากวัฏจักรยังมีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้ผลกระทบของความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของสารทำงานแต่ละชนิดมีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนน้อยมากเพราะการถ่ายเทความร้อนในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเป็นการถ่ายเทความร้อนแบบเปลี่ยนสถานะที่มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงอยู่แล้ว อย่างไรก็ตามผู้ใช้อาจต้องศึกษากระบวนการไหลในอุปกรณ์อัดไอเพิ่มเติมว่าสามารถใช้งานได้ในขอบเขตที่ต้องการหรือไม่

##### 4.3. ความดันสูงสุดในวัฏจักร

ความดันสูงสุดที่เกิดขึ้นในวัฏจักรอัดไอเกิดขึ้น ณ ทางออกของอุปกรณ์อัดไอซึ่งความดันนี้จะถูกกำหนดโดยอุณหภูมิคอมดัดร้อน หรืออีกนัยหนึ่งคืออุณหภูมิที่ต้องการให้วัฏจักรทำได้ โดยความดันสูงสุดนี้จะเป็นสิ่งที่กำหนดชนิดและขนาดของวัสดุที่ใช้ในปั๊มความร้อน ผลจากการจำลองแสดงในรูปที่ 3



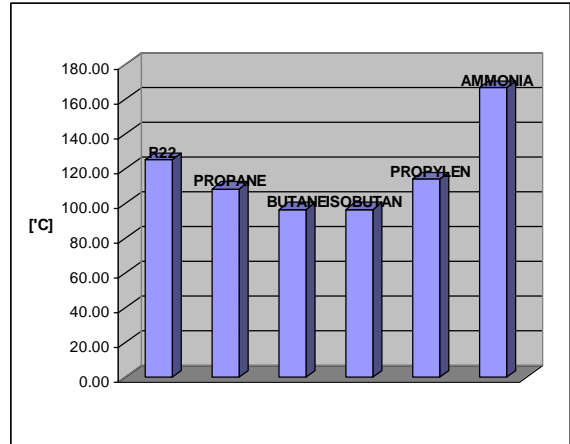
รูปที่ 3 เปรียบเทียบความดันสารทำงานสูงสุด

จากรูปที่ 3 จะเห็นว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ R-22 แล้วความดันสูงสุดที่เกิดขึ้นเนื่องจากสารทำงานต่างๆแยกออกเป็น 3 กลุ่มคือ กลุ่มที่หนึ่งประกอบด้วย R-290 และ R-1270 มีความดันสูงสุดใกล้เคียงกับความดันสูงสุดของ R-22 เพียงเล็กน้อย กลุ่มที่สองประกอบด้วย R-600 และ R-600a มีความดันสูงสุดต่ำกว่าความดันสูงสุดของ R-22 มาก และกลุ่มที่สามประกอบด้วย R-717 มีความดันสูงสุดมากกว่า ความดันสูงสุดของ R-22 จากข้อมูลดังกล่าวจะเห็นว่ามีเพียง R-717 เท่านั้นที่ไม่สามารถนำมาใช้กับอุปกรณ์เดิมที่ใช้ R-22 ได้

#### 4.4. อุณหภูมิสูงสุดของสารทำงาน

อุณหภูมิสูงสุดของสารทำงานเกิดขึ้นที่ทางออกของอุปกรณ์อัดไอเหมือนกับความดันสูงสุด เนื่องจากการใช้งานสารทำงานใน GHP นั้นวัฏจักรจะมีอุณหภูมิคอยล์เย็นที่สูงกว่าปกติและเมื่อรวมผลของ Degree of Superheating แล้วจะส่งผลให้อุณหภูมิสูงสุดมีค่าสูงกว่า ป้อนความร้อนโดยทั่วไป ซึ่งผลจากการจำลองสามารถแสดงในรูปที่ 4

จากรูปที่ 4 พบว่าอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นจากการใช้สารทำงานที่ต่างกันนั้น ค่าอุณหภูมิสูงสุดของ R-717 นั้นมีค่าสูงมากกว่าคือมีค่าประมาณ 160°C ในขณะที่อุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นในสารทำงานอื่นๆมีค่าต่ำกว่าค่าของ R-22

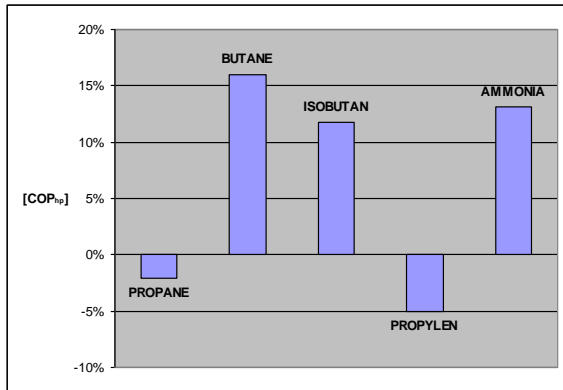


รูปที่ 4 เปรียบเทียบอุณหภูมิสารทำงานสูงสุด

อุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นในวัฏจักรนี้ส่งผลโดยตรงถึงคุณสมบัติของสารหล่อลื่นที่ใช้ในอุปกรณ์อัดไอ โดยอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้ความหนืดของสารหล่อลื่นลดลงและกลายเป็นละอองเล็กๆได้ง่าย ละอองของสารหล่อลื่นนี้จะถูกสารทำงานพาออกไปจากอุปกรณ์อัดไอได้มากขึ้น เมื่อเทียบกับการทำงานที่อุณหภูมิปกติ ผลเสียของปรากฏการณ์นี้มีสองประการคือเมื่อละอองของสารหล่อลื่นนี้ไหลไปที่คอยล์เย็นที่มีอุณหภูมิต่ำก็จะเกิดการรวมตัวกันขึ้นเป็นแผ่นฟิล์มบางเคลือบที่ผิวท่อทำให้การแลกเปลี่ยนความร้อนของคอยล์เย็นลดลง ผลเสียข้อที่สองคือเมื่อสารหล่อลื่นหายไปจากอุปกรณ์อัดไอในปริมาณที่สูงในขณะที่การไหลกลับมาค่อนข้างช้าจะทำให้การหล่อลื่นในอุปกรณ์อัดไอลดลงส่งผลให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์อัดไอลดลงด้วย

#### 4.5. สัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อน (COP<sub>hp</sub>)

สัมประสิทธิ์สมรรถนะคำนวณได้จากผลต่างของเอนทัลปีของสารทำงานที่เข้าและออกจากคอยล์ร้อนต่อผลต่างของเอนทัลปีของสารทำงานที่เข้าและออกจากคอมเพรสเซอร์ ซึ่งค่าที่คำนวณได้จากการจำลองการทำงานของสารทำงานนั้นมีความแตกต่างกันไม่มาก ดังนั้นจึงแสดงผลการคำนวณในรูปของความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะจากสารทำงานเปรียบเทียบหรือ R-22 ผลการเปรียบเทียบแสดงได้ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพ

จากรูปจะเป็นว่า เมื่อเลือกใช้ Butane Isobutane และ Ammonia ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะจะสูงกว่าค่าของ R-22 ประมาณ 10 – 15% ในขณะที่ถ้าใช้ Propane และ Propylene ทดแทน R-22 ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อนจะลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น อย่างไรก็ตาม ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะที่แสดงไว้นี้เป็นเพียงค่าที่ได้จากคำนวณ ในการใช้งานจริงยังต้องคำนึงถึงการแลกเปลี่ยนการถ่ายเทความร้อนระหว่างตัวกลางต่างๆด้วย ซึ่งบางครั้งอาจทำให้ค่าของสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบเปลี่ยนไปจากที่แสดงไว้

## 5. สรุป

จากการเปรียบเทียบทั้งด้านคุณสมบัติทางกายภาพและผลจากการจำลองการทำงานของสารทำงานที่ได้คัดเลือกไว้พบว่าสารทำงานที่มีความเหมาะสมทั้งในด้านประสิทธิภาพ ประสิทธิผล และสิ่งแวดล้อม สำหรับใช้ใน GHP คือ R-290 โดยเป็นสารที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยมาก มีคุณสมบัติเชิงความร้อนที่ใกล้เคียงกับ R-22 และที่สำคัญคือสามารถใช้กับอุปกรณ์ส่วนใหญ่ที่ผลิตใช้กับ R-22 ได้ เมื่อเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์สมรรถนะแล้วพบว่ามีความใกล้เคียงกับค่าของ R-22 อย่างไรก็ตามการศึกษานี้เป็นเพียงการศึกษาทางทฤษฎีเท่านั้น การนำไปใช้จริงยังคงต้องการผลการทดสอบจริงเพื่อยืนยันผลที่ได้อีกครั้ง

## 6. เอกสารอ้างอิง

1. International\_Institute\_of\_Refrigeration (IIR). *Proceedings of the Conference of Natural Working Fluids'98 in Gustav Lorentzen Conference*. Oslo, Norway.
2. ASHRAE, *Chapter 19 Refrigerants*, in *ASHRAE Fundamentals*. 2001, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc.: Atlanta.
3. Chaichana, C., L. Aye, and W.W.S. Charters, *Natural working fluids for solar-boosted heat pumps*. International Journal of Refrigeration, 2003. **26**(6): p. 637-643.
4. Lemmon, E.W., M.O. McLinden, and M.L. Huber, *REFPROP*. 2002, National Institute of Standards and Technology.
5. Bitzer\_International. *Refrigerant Report 9*. 2002 [cited; Available from: <http://www.bitzer.de/doc/a/a-501-9.pdf>].