ผลการศึกษาเชิงปฏิบัติของระบบทำความเย็นแบบอีเจคเตอร์

Experimental Investigation of an Ejector Refrigerator

ศรัทธา อาภรณ์รัตน์, ศุภชาติ จงไพบูลย์พัฒนะ และ พงษ์สิทธิ์ ศรีศิรินทร์
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร,
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต, ปทุมธานี 12121,
โทร. 986-9009 ต่อ 2203 โทรสาร ต่อ 2201,
E-mail: satha@siit.tu.ac.th

บทคัดย่อ

จุดประสงค์หลักของงานวิจัยนี้ คือ การทดลองและออกแบบระบบทำความเย็นแบบอีเจคเตอร์ ที่สามารถนำมาพัฒนาใช้งานได้จริงในประเทศ ได้มีการออกแบบและจัดสร้างเครื่องต้นแบบระบบทำความเย็นแบบอีเจคเตอร์ ซึ่งใช้ R11 เป็นสารทำงาน ในงานวิจัยนี้ได้มีการทดลองใช้อีเจคเตอร์ ซึ่งมีท่อผสมต่างกัน 2 แบบ และได้ทำการทดลองในช่วงอุณหภูมิทำงานต่างๆ คือ ที่เครื่องกำเนิดไอ สารทำงานจะมีอุณหภูมิในช่วง 100 ถึง 110°C ที่เครื่องควบแน่นจะอยู่ในช่วง 35 ถึง 41°C และเครื่องระเหยจะมีอุณหภูมิสูงสุดที่ 12°C เครื่องต้นแบบที่ใช้ในการทดลองนี้สามารถทำความเย็นได้ต่ำสุดประมาณ -5°C ความสามารถในการรับภาระความเย็นอยู่ในช่วง 500 ถึง 1700 วัตต์ และมีค่าสัมประสิทธิการทำความเย็นจะอยู่ในช่วง 0.1 ถึง 0.25

ABSTRACT

This report describes an experimental study of an ejector refrigeration cycle using R11 as the working fluid. An experimental refrigerator was constructed. Two different mixing chambers were used. The system was tested with boiler temperature from 100 to 110°C, the condenser temperature from 35 to 41°C. and the evaporator temperature up to 12°C. It was found that, cooling temperature as low as -5°C could be obtained. COP between 0.1 to 0.25 and cooling capacity between 500 to 1700 W was found. It was found that, choking of fluid in the ejector's mixing chamber played a very important role in the system performance.

1. คำนำ

ในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ที่ต้องใช้พลังงานความร้อนซึ่งโดยทั่วไปได้จากการเผาไหม้ของน้ำมัน ไม้ หรือ ถ่านหิน แล้วนำความร้อนที่ได้ไปผลิตไอน้ำเพื่อใช้ในกระบวนการผลิต เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการผลิตความร้อนที่ใช้ในการผลิตนี้จะถูกทิ้งสู่ภายนอกที่อุณหภูมิต่ำลง (โดยทั่วไปประมาณ 100 ถึง 200°C) ถ้าความร้อนที่ถูกปล่อยทิ้งนี้สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้อีก โดยนำมาใช้กับระบบทำความเย็นที่ใช้พลังงานความร้อน (heat-operated refrigeration cycle) ระบบดังกล่าวนี้คือ ระบบทำความเย็นแบบอีเจคเตอร์ (ejector refrigeration cycle) และ ระบบทำความเย็นแบบดูดซึม (absorption refrigeration cycle) ผลที่ได้คือ การใช้กระแสไฟฟ้าของโรงงานเพื่อขับเคลื่อนระบบทำความเย็นก็จะลดลงด้วย ดังนั้นจึงสามารถประหยัดค่ากระแสไฟฟ้าได้ นอกเหนือไปจากนี้ยังช่วยรักษาสภาพแวดล้อมได้อีก คือเมื่อลดการใช้กระแสไฟฟ้าก็จะลดคาร์บอนไดออกไซด์ และลดปริมาณความร้อนที่จะปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมเนื่องจากการผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งเป็นสาเหตุของปัญหาสภาวะเรือนกระจก (green-house effect) ซึ่งทำให้อุณหภูมิของโลกสูงขึ้น

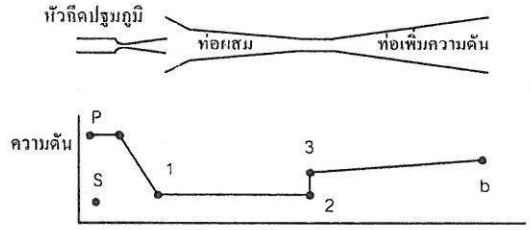
ระบบทำความเย็นแบบอีเจคเตอร์และระบบทำความเย็นแบบดูดซึมนี้ใช้พลังงานความร้อนเป็นพลังงานขับเคลื่อนหลัก แต่ยังคงต้องใช้พลังงานกลบ้างในการขับเคลื่อนปั๊มหมุนเวียนสารทำงานแต่ก็น้อยมาก เมื่อนำระบบทำความเย็นทั้งสองแบบนี้มาเปรียบเทียบกัน ระบบทำความเย็นแบบอีเจคเตอร์นั้นไม่ซับซ้อนและยุ่งยากเท่าระบบทำความเย็นแบบดูดซึม ถึงแม้ว่าจะมีค่าสัมประสิทธิการทำความเย็นที่ต่ำกว่า นอกเหนือไปจากนี้ระบบทำความเย็นแบบอีเจคเตอร์ยังใช้สารทำงานเพียงชนิดเดียว และไม่มีปฏิกริยาเคมีเกิดขึ้นภายในนอกเหนือไปจากการระเหยกลายเป็นไอและการควบแน่นกลับกลายเป็นของเหลว ส่วนในระบบทำความเย็นแบบดูดซึมนั้นต้องใช้สารทำงานสอง

ชนิด คือ สารทำความเย็นและสารดูดซึม และยังมีปฏิกริยาเคมีเกิดขึ้น คือ การแยกตัวและรวมตัวของสารทำความเย็นและสารดูดซึม ซึ่งทำให้ระบบมีความซับซ้อนและยุ่งยากในการออกแบบและการทำงาน ดังนั้น ระบบทำความเย็นแบบอีเจคเตอร์จึงดูเหมาะสมกว่าที่จะนำมาพัฒนาเพื่อใช้ในประเทศไทยเนื่องจากความเรียบง่ายจึงทำให้ต้นทุนการผลิตต่ำกว่า ถึงแม้ว่าจะมีประสิทธิภาพต่ำกว่าก็ตาม

2.หลักการของอีเจคเตอร์

อีเจคเตอร์เป็นหัวใจหลักสำคัญของระบบการทำความเย็นแบบนี้ อีเจคเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตมานานแล้ว ที่เห็นได้อย่างชัดเจน คือ ใช้ในการทำสุญญากาศในระบบต่างๆ ข้อดีของอีเจคเตอร์เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เครื่องอัดไอหรือเครื่องทำสูญญากาศแบบอื่นๆ คืออีเจคเตอร์จะไม่มีชิ้นส่วนที่เคลื่อนไหว ดังนั้น การสึกหรอจึงแทบจะไม่เกิดขึ้น ซึ่งทำให้การบำรุงรักษาน้อยมาก

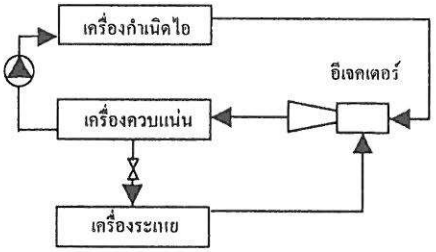
อีเจคเตอร์ถูกประดิษฐ์และพัฒนาครั้งแรกในประเทศอังกฤษ ในช่วงปี ค.ศ. 1901 โดย Sir Charles Parsons เพื่อใช้ในการดูดอากาศออกจากเครื่องควบแน่นของระบบกังหันไอน้ำ อีเจคเตอร์ที่ใช้พลังงานไอน้ำนั้นสามารถนำมาใช้ในการปั๊มของไหลต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นก๊าซ ของเหลว หรือแม้กระทั่งของไหลที่มีของแข็งปนอยู่



รูปที่ 1 อีเจคเตอร์

รูปที่ 1 แสดงโครงสร้างและส่วนประกอบหลักของอีเจ็กเตอร์ที่ใช้ก๊าซเป็นสารทำงาน ก๊าซปฐมภูมิที่ความดันสูง (primary fluid) (P) ถูกอัดผ่านหัวฉีดปฐมภูมิ (primary nozzle) เพื่อที่จะเพิ่มความเร็วให้อยู่ในขั้นเหนือเสียง ซึ่งจะก่อให้เกิดความดันต่ำที่ปากทางออกของหัวฉีด (1) ความดันที่ลดลงเนื่องจากก๊าซปฐมภูมิความเร็วสูงนี้จะดูดก๊าซทุติยภูมิ (secondary fluid) (S) เข้าสู่ท่อผสม (mixing chamber) โดยสันนิษฐานว่าก๊าซปฐมภูมิและทุติยภูมิจะผสมกันอย่างสมบูรณ์ภายในท่อผสม (2) และมีความเร็วเหนือเสียง ซึ่งยังมีความดันต่ำอยู่ เมื่อก๊าซผสมเคลื่อนตัวมาถึงที่คอคอด (3) ซึ่งเป็นจุดที่มีความดันสูงจะเกิดคลื่นกระแทก (shock wave) ซึ่งทำให้ความเร็วของก๊าซผสมลดลงทันทีมาอยู่ที่ระดับความเร็วต่ำกว่าเสียง ทำให้ความดันสูงขึ้น หลังจากนั้น ความดันของก๊าซผสมจะถูกเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อถูกลดความเร็วลงในท่อเพิ่มความดัน (subsonic diffuser) (b)

ในปี ค.ศ. 1910 Maurice Leblanc ได้นำอีเจ็กเตอร์มาใช้กับระบบทำความเย็นโดยมีน้ำเป็นสารทำงานเป็นครั้งแรก [1] ระบบทำความเย็นแบบอีเจคเตอร์นี้ได้รับความนิยมอย่างมากในช่วงทศวรรษที่ 30 สำหรับระบบปรับอากาศในอาคารขนาดใหญ่ ต่อมาระบบทำความเย็นแบบอีเจ็กเตอร์เสื่อมความนิยมและถูกแทนที่โดยระบบอัดไอ ซึ่งได้รับการพัฒนาให้ดีขึ้น ตั้งแต่บัดนั้นเป็นต้นมาระบบทำความเย็นแบบอีเจ็กเตอร์ไม่ได้รับการพัฒนาใดๆ เพิ่มอีกเนื่องจากความสนใจทั้งหมดไปตกอยู่กับระบบทำความเย็นแบบอัดไอ



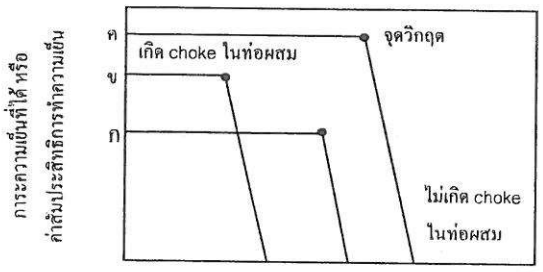
รูปที่ 2 แผนผังของระบบทำความเย็นแบบอีเจคเตอร์

รูปที่ 2 แสดงแผนผังของระบบทำความเย็นแบบอีเจคเตอร์ ไอสารทำงานซึ่งมีอุณหภูมิและความดันสูงที่เกิดจากการเดือดของสารทำงานในเครื่องกำเนิดไอ (boiler) ถูกใช้เป็นก๊าซปฐมภูมิของอีเจคเตอร์ จะไหลผ่านหัวฉีดปฐมภูมิด้วยความเร็วสูงซึ่งก่อให้เกิดความดันต่ำที่ตัวอีเจคเตอร์ซึ่งต่อกับเครื่องระเหย (evaporator) ทำให้ความดันในเครื่องระเหยลดลง ดังนั้นสารทำงานจึงสามารถระเหยเป็นไอได้ที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งความร้อนที่ใช้ในการระเหยสารทำงานนี้ คือ ค่าภาระความเย็นที่ได้จากระบบ ไอสารทำงานที่ระเหยนี้จะถูกดูดเข้าไปในอีเจคเตอร์ และถูกเพิ่มความดันให้สูงขึ้น ดังนั้น จึงสามารถกลั่นตัวกลับเป็นของเหลวที่อุณหภูมิบรรยากาศในเครื่องควบแน่นได้ สารทำงานเหลวที่ถูกกลั่นนี้จะถูกปั๊มกลับไปที่เครื่องกำเนิดไอ และสารที่เหลือจะถูกลดความดันโดยผ่านวาวล์ลดความดัน (expansion valve) แล้วจึงไหลเข้าสู่เครื่องระเหย เป็นการครบวัฏจักรการทำงาน เนื่องจากพลังงานกลที่ใช้ในการหมุนเวียนสารทำงานนี้มีน้อยมาก (น้อยกว่า 1%) เมื่อเทียบกับพลังงานความร้อนที่เครื่องกำเนิดไอต้องการ ดังนั้น ค่าสัมประสิทธิการทำความเย็น (COP) ของระบบนี้สามารถคำนวณได้จาก

$$\mathrm{COP} = \frac{\text{heat input at the evaporator}}{\text{heat input at the boiler}} \qquad (1)$$

ในการศึกษาทั้งทางทฤษฎีและการทดลองของระบบทำความเย็นแบบอีเจ็กเตอร์ขนาดเล็ก ซึ่งถูกนำเสนอโดย Huang et al [2-3] Eames et al. [4] และโดย Aphornratana และ Eames [5] การ

ศึกษาได้แสดงให้เห็นว่าค่าสัมประสิทธิการทำความเย็นและภาระในการทำความเย็นที่ได้จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความดันของสารทำงานที่จุดต่างๆ นอกเหนือจากนี้ ประสิทธิภาพของระบบยังขึ้นอยู่กับขนาดและลักษณะของอีเจคเตอร์



เส้น ก: ใช้เป็นเส้นอ้างอิง.
เส้น ข: เมื่อลดความดันของเครื่องกำเนิดไอ หรือ เลื่อนหัวฉีดออกจากท่อผสม หรือ เปลี่ยน ขนาดหัวฉีดให้เล็กลง
เส้น ค: เมื่อเพิ่มความดันในเครื่องระเหย

รูปที่ 3 กราฟแสดงลักษณะการทำงานของระบบทำความเย็นแบบอีเจคเตอร์โดยอ้างอิงถึงผลการทดลอง [2-5]

รูปที่ 3 แสดงกราฟประสิทธิภาพการทำงานของอีเจคเตอร์โดยอ้างอิงผลการทดลองของดังกล่าว และ จากรูปจะเห็นได้ว่า (เส้น ก) เมื่ออุณหภูมิและความดันของเครื่องกำเนิดไอและเครื่องระเหยคงที่ เมื่อมีการลดความดันของเครื่องควบแน่นลงต่ำกว่าค่า ความดันควบแน่นวิกฤต (critical condenser pressure) ค่าสัมประสิทธิการทำความเย็นและความสามารถในการรับภาระความเย็นจะคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง และเมื่อเพิ่มความดันในเครื่องควบแน่นให้สูงกว่าค่าความดันวิกฤต อีเจคเตอร์จะสูญเสียการทำงานทันที ทำให้ค่าสัมประสิทธิการทำความเย็นและความสามารถในการรับภาระความเย็นลดลงทันทีเป็นศูนย์ นอกเหนือจากนี้ (เส้น ข) การลดความดันและอุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอจะทำให้ค่าสัมประสิทธิการทำความเย็นและความสามารถในการรับภาระความเย็นที่ได้จะเพิ่มขึ้น แต่อีเจคเตอร์จะสามารถทำงานที่ความดันควบแน่นวิกฤตต่ำลง จะเห็นได้ว่าเมื่อไม่สามารถเพิ่มอุณหภูมิของเครื่องระเหย จะไม่สามารถเพิ่มปริมาณความเย็นและค่าสัมประสิทธิเมื่ออุณหภูมิและความดันของเครื่องควบแน่นสูงขึ้นเช่นในวันที่อากาศร้อนได้เลย

จากผลการทดลองดังกล่าว Huang et al. อธิบายว่า มีการ choking ของสารทำงานภายในอีเจคเตอร์ เกิดขึ้นสองครั้ง คือ ที่หัวฉีดปฐมภูมิ และที่ท่อผสม โดยปกติแล้วจะมีการ choke เกิดขึ้นที่หัวฉีด เนื่องจากหัวฉีดได้ถูกออกแบบให้เพิ่มความเร็วของก๊าซปฐมภูมิให้มีความเร็วเหนือเสียง เมื่อเกิดการ choke ที่หัวฉีดอัตราการไหลของก๊าซปฐมภูมิจะขึ้นอยู่กับความดันภายในเครื่องกำเนิดไอเท่านั้น โดยไม่ขึ้นอยู่กับความดันภายในของเครื่องควบแน่นและเครื่องระเหยเลย เมื่ออัตราไหลของก๊าซปฐมภูมิคงที่จึงทำให้พลังงานความร้อนที่ต้องการของเครื่องกำเนิดไอคงที่ด้วย

สำหรับการ choke ที่เกิดขึ้นในท่อผสมนั้น เมื่อเกิดการ choking ขึ้นจะทำให้อัตราการไหลของก๊าซภายในท่อผสมคงที่ ดังนั้นเมื่อมีการลดความดันภายในเครื่องควบแน่น และถ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลงความดันของเครื่องกำเนิดไอ (อัตราการไหลออกของก๊าซปฐมภูมิคงที่) ความสามารถในการรับภาระความเย็นและค่าสัมประสิทธิการทำความเย็นซึ่งขึ้นกับอัตราการไหลของก๊าซทุติยภูมิจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆ การเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซทุติยภูมิและค่าภาระความเย็นที่ได้จะสามารถทำได้โดยการเพิ่มความดันและอุณหภูมิภายในเครื่องระเหยเท่านั้น การเพิ่มความดันของเครื่องระเหยยังทำให้ความดันควบแน่นวิกฤตเพิ่มขึ้นอีกด้วย การที่ความสามารถในการรับภาระทำความเย็นเพิ่มขึ้นเนื่องมาจากการลดความดันของเครื่องกำเนิดไอ ซึ่งทำให้อัตราการไหลของก๊าซปฐมภูมิลดลง และเป็นผลให้อัตราการไหลของก๊าซทุติยภูมิเพิ่มขึ้น จะทำให้ความดันควบแน่นวิกฤตลดลงด้วย

จากผลการวิจัยของ Aphornratana และ Eames [5] จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพของอีเจคเตอร์ สามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยการเลื่อนตำแหน่งของหัวฉีดปฐมภูมิ เมื่อหัวฉีดถูกเลื่อนออกห่างจากท่อผสมจะทำให้อัตราการไหลของก๊าซทุติยภูมิเพิ่มขึ้น แต่จะทำให้ค่าความดันควบแน่นวิกฤตต่ำลง การใช้อีเจคเตอร์ที่สามารถปรับตำแหน่งหัวฉีดได้จะมีความคล่องตัวมากขึ้น เช่น ในวันที่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลง ค่าความเย็น อุณหภูมิ สามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยไม่ต้องเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความดันของเครื่องกำเนิดไอ

3. สารทำงาน

ระบบทำความเย็นแบบอีเจคเตอร์นี้เริ่มพัฒนาโดยใช้น้ำเป็นสารทำงาน เนื่องจากเป็นระบบขนาดใหญ่ใช้สำหรับปรับอากาศอาคารขนาดใหญ่ ดังนั้น ไม่ว่าเครื่องกำเนิดไอ เครื่องควบแน่น ปั๊มหมุนเวียนสารทำงาน ก็สามารถนำเอาของที่ใช้อยู่ในอุตสาหกรรมมาใช้ได้เลย น้ำมีค่าความร้อนแฝงของการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นไอสูงมาก จึงทำให้อัตราการหมุนเวียนสารทำงานต่ำและความดันแตกต่างระหว่างเครื่องกำเนิดไอกับเครื่องควบแน่นต่ำ จึงทำให้พลังงานกลที่ใช้ในการขับเคลื่อนปั๊มนั้นมีค่าน้อยมาก นอกจากนี้น้ำยังมีราคาถูกและไม่ทำลายสภาวะแวดล้อม แต่ข้อเสียของการใช้น้ำเป็นสารทำงาน คือ ไม่สามารถใช้กับงานที่ต้องการความเย็นที่ต่ำกว่า $0^{\circ}C$ และโดยปรกติแล้วระบบจะมีความดันต่ำกว่าบรรยากาศมาก จึงเป็นการยากที่จะป้องกันการรั่วซึมของอากาศจากภายนอก

	R11	R12	R22	R113	R141b	R134a	R123
Boiling point At 1 atn (°C)	23.7	-29.8	-40.8	47.6	32.1	-26.1	27.9
Pressure at 90°C (kPa)	661	2783	4442	344	538	3245	625
Molecular weight (kg/kmole)	137.38	120.92	86.47	187.39	116.95	102.03	152.93
Latent heat at 10°C (kJ/kg)	186.3	147.6	196.4	155.3	129.4	190.9	176.8
Halocarbon global warming potential*	1	1	0.3	n/a	0.15	0.2	0.02
Ozone depletion potential**	1	1	0.05	0.8	0.15	0	0.02

* GWP scale ranges from 0 to 1 (for CO_2, GWP = 1)
** ODP scale ranges from 0 to 1
ข้อมูลจาก [9-10]

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของสารทำงานประเภท halocarbon

การทดลองของ Eames et al. [4], Aphornratana และ Eames [5] แสดงให้เห็นว่า เมื่อใช้น้ำเป็นสารทำงานสำหรับระบบทำความเย็นแบบอีเจคเตอร์ขนาดเล็ก อุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอต้องอยู่ระหว่าง 120 ถึง 160°C นอกจากนี้ยังต้องใช้กับเครื่องควบแน่นที่ใช้น้ำระบายความร้อนเท่านั้น เพราะระบบไม่สามารถทำงานที่ความดันควบแน่นสูงได้

การทดลองของ Holton [6] แสดงให้เห็นว่าอีเจคเตอร์จะมีประสิทธิภาพดีขึ้นเมื่อสารทำงานมีมวลโมเลกุลสูง ได้มีการทดลองใช้สารทำงานประเภท halocarbon ซึ่งมีมวลโมเลกุลสูงชนิดต่าง ๆ เช่น R11 [7], R12 [8], R113 [2], R141b [3] การทดลองของ Huang et al. [3] แสดงให้เห็นว่า เมื่อใช้ R141b เป็นสารทำงาน ระบบทำความเย็นสามารถทำงานเมื่ออุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอมีค่าเพียง 80°C และสามารถใช้กับเครื่องควบแน่นซึ่งมีอุณหภูมิ 32°C โดยให้ความเย็นที่ 8°C

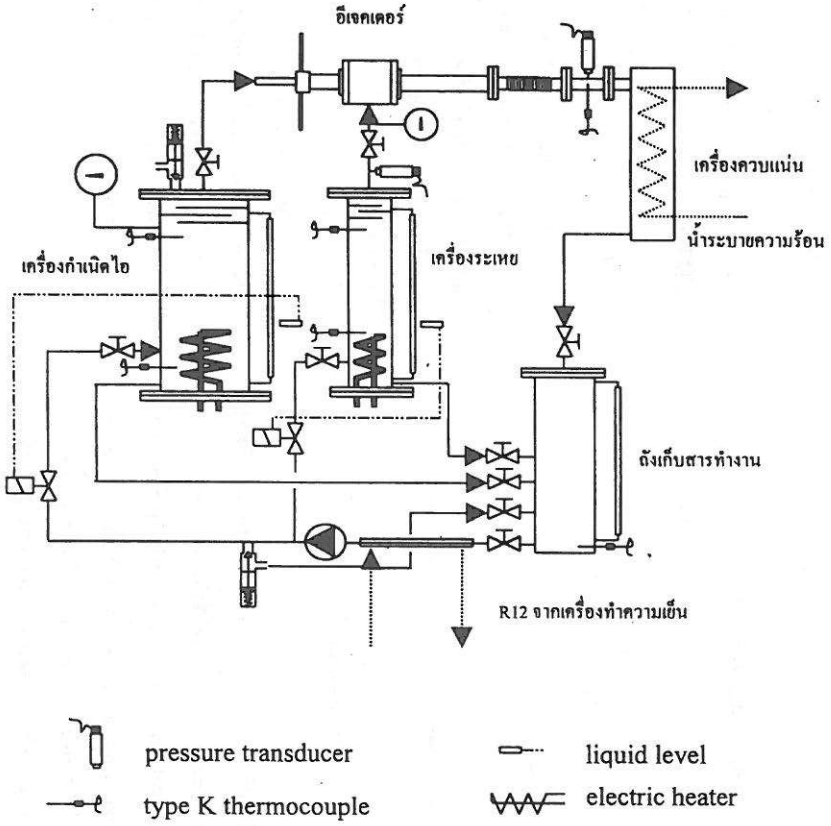
จากตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่า R12 R22 และ R134a นั้นไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้กับระบบนี้ เนื่องจากจะมีความดันสูงมากเมื่อมีอุณหภูมิสูง ดังนั้น จะต้องใช้เครื่องกำเนิดไอที่มีความแข็งแรงและขนาดใหญ่ ทำให้มีราคาสูงและยังต้องใช้ปั๊มหมุนเวียนขนาดใหญ่อีกด้วย ดังนั้น R11 R113 R141b และ R123 ดูเหมือนจะเป็นทางเลือกที่ดีกว่า จะเห็นได้ว่า R123 เป็นสารทำงานที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากมีผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อมน้อยมาก และยังมีค่าความร้อนแฝงค่อนข้างสูง

R123 เป็นสารทำความเย็นที่มีความดันค่อนข้างต่ำและใช้แพร่หลายกับ centrifugal compressor ในระบบปรับอากาศขนาดใหญ่ R123 เป็นสารที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อย และถูกใช้แทนที่ R11 ซึ่งมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมสูงกว่า แต่อย่างไรก็ตาม R123 และ R11 มีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน

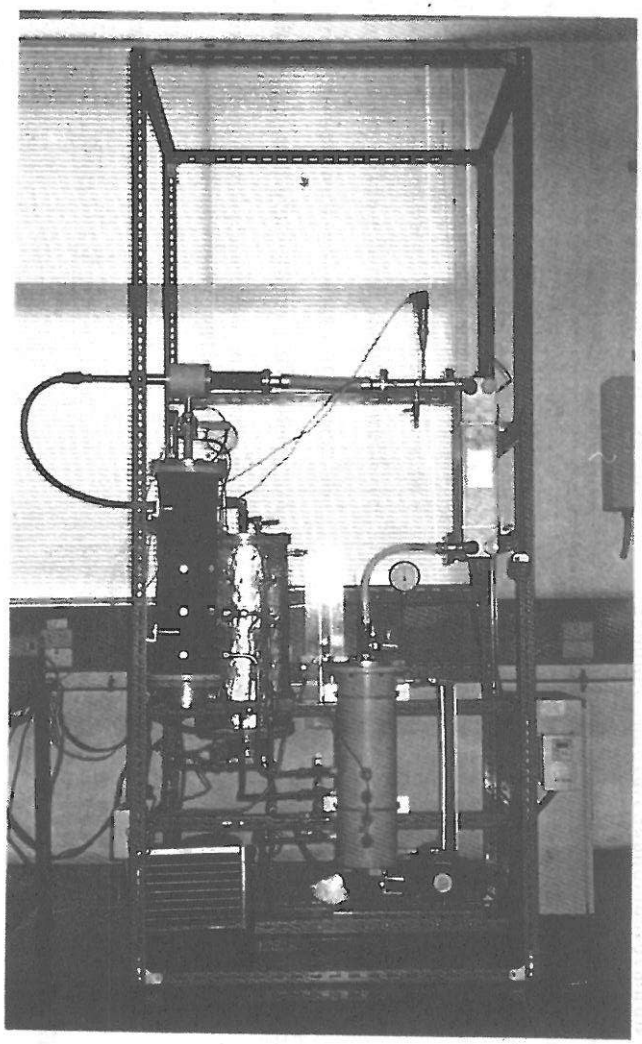
เนื่องจากสภาพทางเศรษฐกิจที่ตกต่ำ เงินบาทมีค่าลดลงทำให้ R123 ซึ่งเป็นสินค้านำเข้ามีราคาสูงขึ้นมาก ปัจจุบัน R123 ราคา 510 บาท ต่อ 1 กิโลกรัม ในขณะที่ R11 ราคาเพียงกิโลกรัมละ 120 บาท ในการทดลองนี้ต้องใช้สารทำงานเป็นปริมาณมาก เนื่องจากต้องมีการถ่ายเข้าถ่ายออกตลอดเวลา (ซึ่งในการทดลองนี้ใช้สารทำงานรวมทั้งหมดประมาณ 100 กิโลกรัม) และค่าใช้จ่ายของการวิจัยและทดลองมีจำกัด คณะผู้วิจัยจึงได้ตัดสินใจใช้ R11 แทน เนื่องจากมีคุณสมบัติใกล้เคียงกันและราคาต่ำกว่า R123 มาก

4. ระบบทำความเย็นแบบอีเจคเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

รูปที่ 4 และ 5 แสดงแบบและภาพถ่ายของเครื่องทำความเย็นที่ใช้ในการทดลอง ตัวถังต่างๆ ทำขึ้นด้วยเหล็กชุบสังกะสีเพื่อป้องกันการเกิดสนิม เครื่องกำเนิดไอที่ใช้นั้นถูกออกแบบให้ใช้พลังงานความร้อนจากขดลวดไฟฟ้า โดยใช้ขดลวดไฟฟ้า ขนาด 4 kW จำนวน 2 ชุด ซึ่งติดตั้งไว้ที่ส่วนล่างของเครื่องกำเนิดไอ ที่ด้านบนนั้นมีแผ่น baffle 3 แผ่นเชื่อมติดไว้สำหรับป้องกันไม่ให้สารทำงานเหลวไหลรวมไปกับไอ สำหรับเครื่องระเหยนั้นได้ถูกออกแบบมาคล้ายกับเครื่องกำเนิดไอ แต่มีขนาดเล็กกว่า และใช้ขดลวดทำความร้อนขนาด 3 kW แทนภาระความเย็นจากภายนอก การใช้ความร้อนจากขดลวดไฟฟ้าแทนความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้นั้น ทำให้ง่ายต่อการทดลอง เพราะจะทำให้สามารถปรับตั้งค่าอุณหภูมิและความดันภายในเครื่องระเหยและเครื่องกำเนิดไอได้ง่าย และยังสะดวกในการวัดค่าพลังงานที่ใช้ไป สำหรับเครื่องควบแน่นนั้นใช้ของที่มีจำหน่ายในท้องตลาด โดยใช้

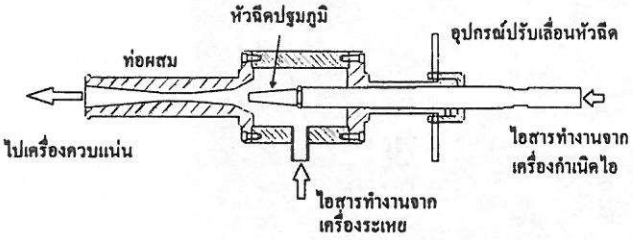


รูปที่ 4 แบบแสดงเครื่องทำความเย็นแบบอีเจคเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

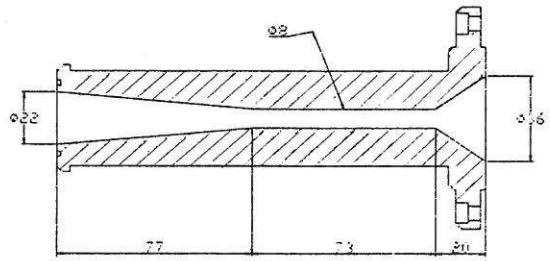


รูปที่ 5 ภาพถ่ายของเครื่องทำความเย็นแบบอีเจคเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

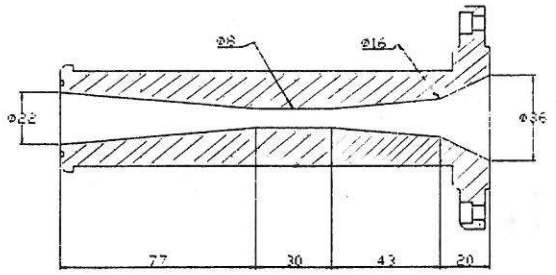
ของ Alfa-Lava ซึ่งเป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นและระบายความร้อนด้วยน้ำ เพื่อป้องกันการถ่ายเทความร้อนที่ไม่จำเป็นระหว่างระบบกับสิ่งแวดล้อมภายนอก เครื่องกำเนิดไอจึงหุ้มด้วยฉนวนใยแก้วกันความร้อนหนา 40mm และที่เครื่องระเหยจะหุ้มด้วยแผ่นโฟมหนา 30 mm



รูปที่ 6 อีเจคเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง



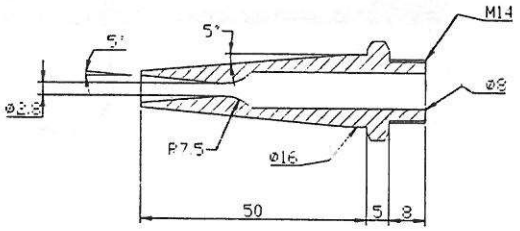
รูปที่ 7ก ท่อผสมตัวที่ 1



รูปที่ 7ข ท่อผสมตัวที่ 2

สำหรับปั๊มที่ใช้ในการหมุนเวียนสารทำงานจากถังเก็บไปยังเครื่องกำเนิดไอและเครื่องระเหยนั้น ได้ใช้ปั๊ม diaphragm ซึ่งขับเคลื่อนโดยมอเตอร์ชนิดปรับรอบได้ขนาด ¼ แรงม้า ข้อเสียของการใช้ปั๊มแบบนี้คือจะเกิดการเดือดของสารทำงานขึ้นที่วาวล์กันไหลกลับซึ่งอยู่ที่ทางเข้าของปั๊ม ทั้งนี้เนื่องจากสารทำงานในถังเก็บนั้นอยู่ในสภาวะอิ่มตัว ดังนั้นเมื่อความดันลดลงจะเกิดการเดือดขึ้น ทำให้ปั๊มไม่สามารถทำงานได้ ปัญหาดังกล่าวนี้ได้ถูกแก้ไขโดยติดตั้งเครื่องทำความเย็นขนาดเล็กเพื่อลดอุณหภูมิของสารทำความเย็นที่มาจากถังเก็บ

รูปที่ 6 แสดงแบบของ อีเจคเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง อีเจคเตอร์ที่ใช้นี้ได้ถูกออกแบบตามวิธีของ Eames et al [4] และ ESDU [11] จากรูปจะเห็นได้ว่าหัวฉีดปฐมภูมิสามารถปรับเลื่อนได้ เพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด ในการทดลองที่ได้มีการใช้ท่อผสมสองแบบที่มีขนาดเท่ากันคือ มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่คอคอดเท่ากับ 8 mm โดยที่ท่อผสมตัวที่ 1 จะมีทางเข้าเป็นท่อตรงซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดคงที่ สำหรับท่อผสมตัวที่ 2 จะมีทางเข้าเป็นท่อซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดเล็กลง รูปที่ 7 ได้แสดงถึงภาพรายละเอียดของท่อผสมและหัวฉีดปฐมภูมิ



รูปที 7ค หัวฉีดปฐมภูมิ

ในการทดลองนี้ได้นำเครื่องคอมพิวเตอร์มาใช้ในการควบคุมและเก็บข้อมูล โดยที่อุณหภูมิและความดันของสารทำงานนั้นจะสามารถวัดได้โดยใช้ thermocouple type k และ pressure transducer ส่วนพลังงานไฟฟ้าของขดลวดทำความร้อนนั้นสามารถวัดได้โดยใช้ power transducer ซึ่งสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากอุปกรณ์วัดต่างๆนั้นจะต่อเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์ซึ่งใช้ในการแสดงผล

เครื่องคอมพิวเตอร์นี้ยังใช้ในการควบคุมการทำงานของระบบด้วย โดยที่พลังงานไฟฟ้าของขดลวดแต่ละตัวจะถูกควบคุมผ่าน solid-state-relay โดยอัตโนมัติ เพื่อที่จะให้ได้ค่าความดันและอุณหภูมิภายในเครื่องกำเนิดไอและเครื่องระเหยตามต้องการ ส่วนความดันของเครื่องควบแน่นนั้นสามารถควบคุมโดยปรับอัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนโดยใช้ solenoid valve ซึ่งควบคุมโดยเครื่องคอมพิวเตอร์

ที่เครื่องกำเนิดไอ เครื่องระเหย และ ถังเก็บ ได้มีการติดตั้งหลอดแก้วสำหรับดูระดับของสารทำงานเหลว และยังใช้ในการควบคุมระดับอีกด้วย โดยที่หลอดแก้วแต่ละอันนั้นจะมีลูกลอยอยู่ภายในและได้ติดตั้ง infra-red sensor ซึ่งใช้ตรวจจับระดับของลูกลอย และส่งสัญญาณให้ solenoid valve ควบคุมให้สารทำงานไหลสู่ระบบ

5. วิเคราะห์ผลการทดลอง

ในการทดลองแต่ละครั้ง เครื่องคอมพิวเตอร์ จะถูกป้อนข้อมูล คือ อุณหภูมิ และความดันที่จุดต่างๆ หลังจากนั้นจึงปล่อยให้ระบบทำงานจนเข้าสู่สภาวะทำงานคงที่ แล้วจึงทำการเก็บข้อมูล คือ ความดัน อุณหภูมิของสารทำงานที่จุดต่างๆ อัตราการระเหยของสารทำงานในเครื่องกำเนิดไอและเครื่องระเหย

เนื่องจากฉนวนกันความร้อนที่ใช้ห่อหุ้มเครื่องกำเนิดไอและเครื่องระเหยนั้นไม่สามารถป้องกันการถ่ายเทความร้อนระหว่างบรรยากาศภายนอกกับสารทำงานได้สมบูรณ์ ดังนั้น ที่เครื่องกำเนิดไอค่าความร้อนที่ถ่ายเทให้สารทำงานก็จะมีค่าน้อยกว่าค่าพลังงานไฟฟ้าที่ถูกใช้โดยขดลวดทำความร้อน เนื่องจากความร้อนบางส่วนได้สูญเสียสู่บรรยากาศภายนอกซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าสารทำงาน ผ่านผนังท่อและฉนวนกันความร้อน ในขณะเดียวกันค่าภาระความเย็นที่ได้รับโดยสารทำงานก็จะมีค่ามากกว่าค่าพลังงานไฟฟ้าที่ถูกใช้โดยขดลวดทำความร้อน เนื่องจาก สารทำงานรับความร้อนจากบรรยากาศภายนอกซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าผ่านผนังท่อและฉนวนกันความร้อน ดังนั้นเมื่อนำค่าพลังงานไฟฟ้ามาใช้ในการหาประสิทธิภาพก็จะทำให้เกิดการผิดพลาดได้ ดังนั้น ค่าภาระทำความเย็นที่เครื่องระเหยจะคำนวณได้จาก :

$$\dot{Q}_{evap} = \dot{m}_{evap} \times (h_{ex} - h_{in})_{evap} \qquad (2)$$

และค่าพลังงานความร้อนที่เครื่องกำเนิดไอจะคำนวณจาก :

$$\dot{Q}_{boiler} = \dot{m}_{boiler} \times (h_{ex} - h_{in})_{boiler} \qquad (3)$$

และค่าสัมประสิทธิการทำความเย็นจะคำนวณจาก :

$$COP = \frac{\dot{Q}_{evap}}{\dot{Q}_{boiler}} \qquad (4)$$

อัตราการไหลของสารทำงานของเครื่องกำเนิดไอและเครื่องระเหยสามารถวัดได้โดยเมื่อขณะที่เครื่องทำงานคงที่แล้ว (steady-state-operation) อัตราการระเหยของสารทำงานภายในเครื่องกำเนิดไอและเครื่องระเหยจะสามารถรู้ได้โดยการวัดระดับของสารทำงานเหลวในถังที่ลดลง ในขณะที่ปั๊มหยุดทำงานและจับเวลาโดยสารทำงานที่ระเหยออกมาจะถูกควบแน่นและเก็บไว้ภายในถังเก็บ

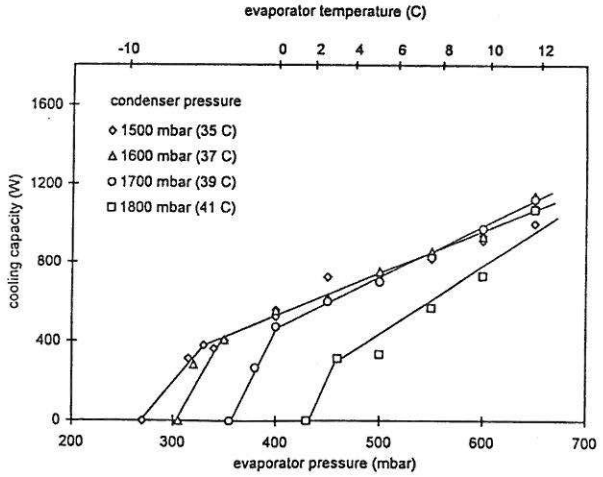
เนื่องจากหัวฉีดปฐมภูมิที่ใช้นั้นเป็นแบบ convergent-divergent ซึ่งถูกออกแบบให้สารทำงานปฐมภูมิมีความเร็วเหนือเสียงที่ทางออก โดยปรกติแล้วจะมีการ choke ที่หัวฉีดปฐมภูมิตลอดเวลา ดังนั้น อัตราการไหลของสารทำงานผ่านหัวฉีดจะขึ้นอยู่กับสภาวะภายในเครื่องกำเนิดไอเท่านั้น ดังนั้น เมื่ออัตราการไหลของสารทำงานผ่านหัวฉีดคงที่ ซึ่งจะเท่ากับอัตราการระเหยของสารทำงานภายในเครื่องกำเนิดไอ จึงทำให้ค่าพลังงานความร้อนที่ใช้นั้นคงที่ด้วย ผลของการเปลี่ยนความดันภายในเครื่องกำเนิดไอต่อค่าพลังงานความร้อนที่ใช้ได้นำเสนอในตารางที่ 2

อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (bar)	อัตราการระเหย (kg/min)	ความร้อนที่ใช้ (W)
100	8.2	1.248	4326
105	9.2	1.368	4789
110	10.2	1.568	5541
115	11.2	1.681	5994
120	12.4	1.879	6785

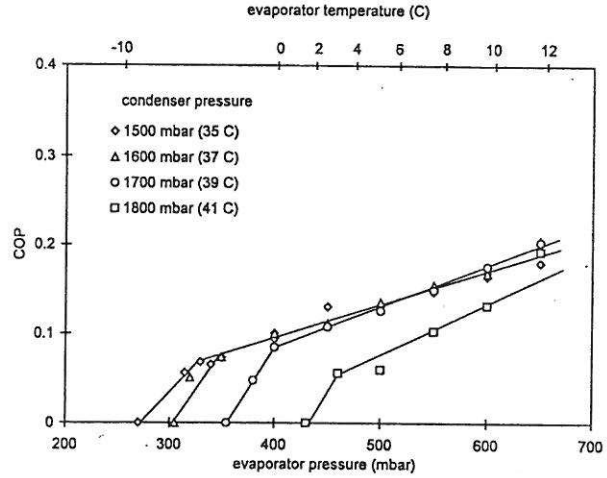
ตารางที่ 2 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารทำงานในเครื่องกำเนิดไอ

รูปที่ 8, 9, 10 และ 11 แสดงผลการทดลองที่ได้โดยใช้ท่อผสมตัวที่ 1 และหัวฉีดอยู่ในตำแหน่งที่ปากทางออกของหัวฉีดจะอยู่ที่ 5 mm ด้านนอกของปากทางเข้าท่อผสม จากรูปจะเห็นได้ว่า ที่ความดันภายในเครื่องควบแน่นและเครื่องกำเนิดไอคงที่ ความสามารถในการรับภาระทำความเย็นของเครื่องระเหยจะเพิ่มขึ้นโดยตรงกับความดันภายในของเครื่องระเหยที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อความดันลดลงต่ำกว่าจุดหนึ่ง ประสิทธิภาพของอีเจคเตอร์จะลดต่ำลงอย่างรวดเร็ว ทำไม่สามารถรับภาระทำความเย็นได้ จุดที่ประสิทธิภาพของอีเจคเตอร์ลดต่ำลงอย่างรวดเร็วนี้ อาจเรียกว่า *ความดันเครื่องระเหยวิกฤต (critical evaporator pressure)* เนื่องจากค่าพลังงานความร้อนที่ถูกใช้ในเครื่องกำเนิดไอมีค่าคงที่ เมื่อความดันหรืออุณหภูมิของสารทำงานภายในคงที่ ดังนั้นเส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิการทำความเย็นจึงมีลักษณะเช่นเดียวกันกับค่าความสามารถในการรับภาระทำความเย็นซึ่งได้แสดงไว้ในรูปที่ 9

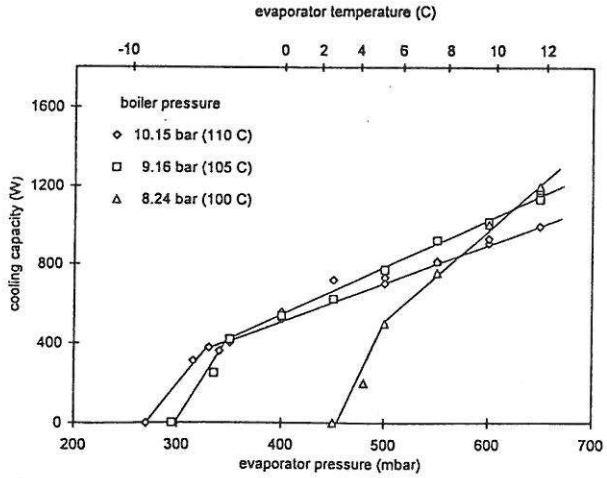
จากรูปที่ 8 จะเห็นได้ว่า เมื่อมีการลดความดันของเครื่องควบแน่นจาก 1500 เป็น 1700 mbar ความสามารถในการรับภาระทำความเย็นจะไม่เปลี่ยนแปลง ทั้งนี้เนื่องมาจากอีเจคเตอร์ไม่สามารถดูดไอสารทำความเย็นจากเครื่องระเหยเพิ่มขึ้นได้ ทั้งนี้เนื่องมาจากเกิดการ choking ภายในท่อผสม ซึ่งเหมือนกับการทดลองของ Eames et al. [4] และของ Huang et al. [2-3] และจะเห็นได้ว่าเมื่อค่าความดันของเครื่องควบแน่นลดต่ำลง ค่าความดันเครื่องระเหยวิกฤตก็จะเพิ่มขึ้นด้วย และเป็นที่น่าสังเกตุได้ว่าค่าความดันเครื่องระเหยวิกฤต (จุดที่ค่าภาระการทำความเย็นลดลงต่ำอย่างรวดเร็ว) กับค่าความดันเครื่องควบแน่นวิกฤต (จุดที่การเปลี่ยนแปลงความดันเครื่องควบแน่นแล้วมี



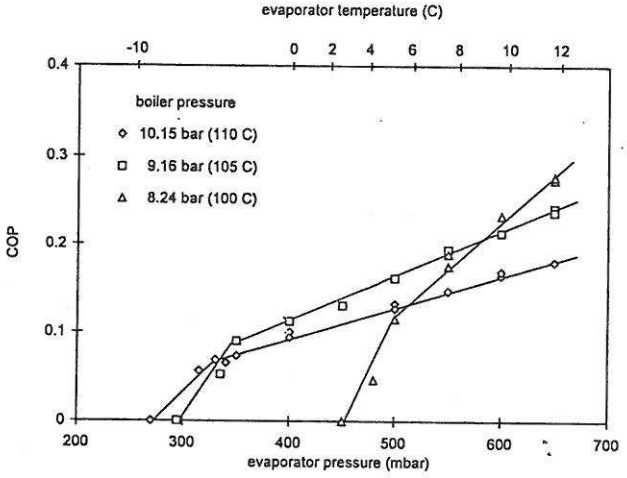
รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าภาระความเย็นกับความดันของเครื่องระเหยที่อุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอเท่ากับ 110°C



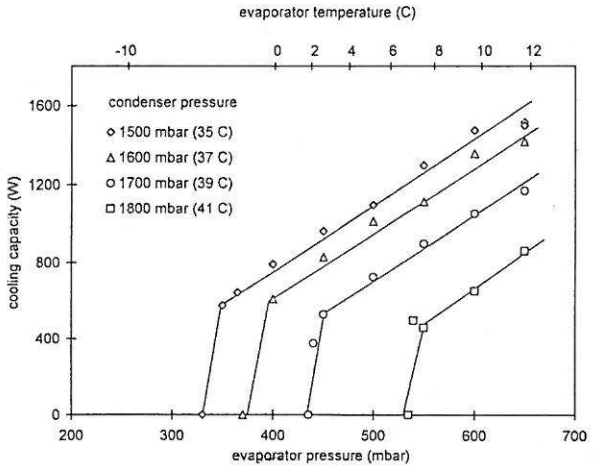
รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การทำความเย็นกับความดันของเครื่องระเหยที่อุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอเท่ากับ 110°C



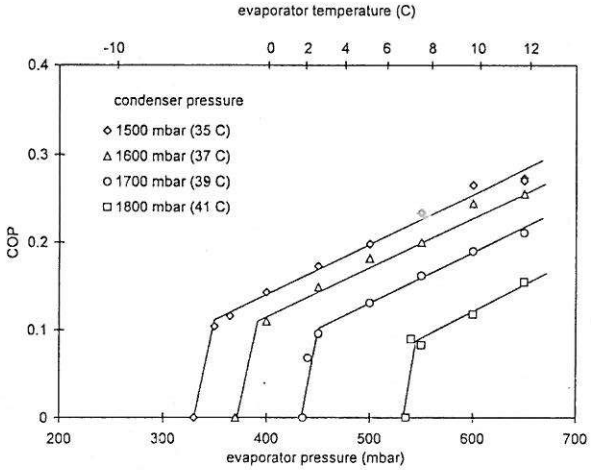
รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าภาระความเย็นกับความดันของเครื่องระเหยที่ความดันเครื่องควบแน่นเท่ากับ 1500 mbar



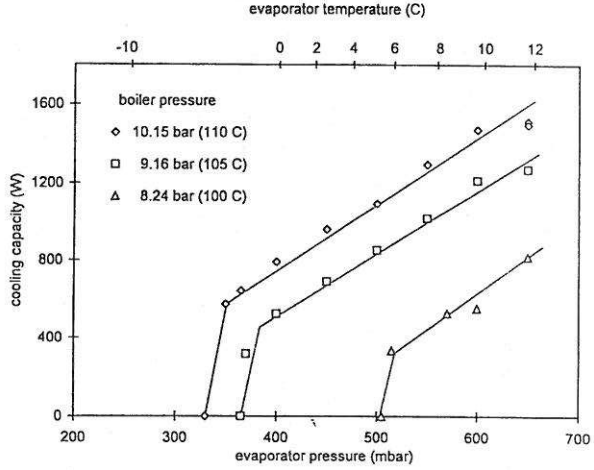
รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การทำความเย็นกับความดันของเครื่องระเหยที่ความดันเครื่องควบแน่นเท่ากับ 1500 mbar



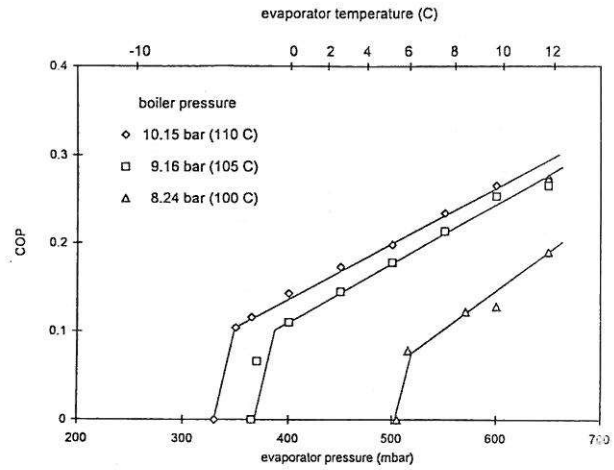
รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าภาระความเย็นกับความดันของเครื่องระเหยที่อุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอเท่ากับ 110°C



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การทำความเย็นกับความดันของเครื่องระเหยที่อุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอเท่ากับ 110°C



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าภาระความเย็นกับความดันของเครื่องระเหยที่ความดันเครื่องควบแน่นเท่ากับ 1500 mbar



รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การทำความเย็นกับความดันของเครื่องระเหยที่ความดันเครื่องควบแน่นเท่ากับ 1500 mbar

ผลกับค่าภาระการทำความเย็น) ซึ่งนำเสนอโดย Huang et al.[2] นั้นน่าจะเป็นจุดเดียวกัน

จากรูปที่ 10 เมื่อเพิ่มความดันของเครื่องกำเนิดไอ จะทำให้อีเจคเตอร์สามารถทำงานที่ค่าความดันเครื่องระเหยวิกฤตต่ำลง ที่ความดันเครื่องระเหยต่ำ เครื่องระเหยจะสามารถรับภาระได้สูงขึ้นเมื่อความดันเครื่องกำเนิดไอสูงขึ้นแต่จะตรงกันข้ามเมื่อความดันเครื่องระเหยเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเมื่อมีการเพิ่มความดันของเครื่องกำเนิดไอจะทำให้อัตราการไหลของสารทำงานปฐมภูมิเพิ่มขึ้นด้วย และเนื่องจากมีการเกิด choke ภายในท่อผสมซึ่งทำให้อัตราการไหลของสารทำงานซึ่งเป็นผลรวมของสารทำงานปฐมภูมิและทุติยภูมินั้นคงที่ ดังนั้น เมื่ออัตราการไหลของสารทำงานปฐมภูมิเพิ่มขึ้นจึงทำให้อัตราการไหลของสารทำงานทุติยภูมิลดลง ดังนั้น จึงทำให้ความสามารถในการรับภาระความเย็นของเครื่องระเหยลดลง ในขณะเดียวกันเมื่ออัตราการไหลของสารทำงานปฐมภูมิเพิ่ม จะทำให้มีการถ่ายเท momentum สูงขึ้น ดังนั้นอีเจคเตอร์จึงสามารถทำความดันได้ต่ำลง ทำให้อุณหภูมิของเครื่องระเหยลดลงเมื่อมีการเพิ่มความดันภายในเครื่องกำเนิดไอ

เมื่อลดความดันและอุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอ จะทำให้ค่าความร้อนที่ใช้ลดลงด้วย ดังนั้น เมื่อความสามารถในการรับภาระความเย็นสูงขึ้นขณะที่ค่าความร้อนที่ใช้ของเครื่องกำเนิดไอลดลง จึงทำให้ค่าสัมประสิทธิการทำความเย็นเพิ่มขึ้นด้วย ดังที่แสดงในรูปที่ 11

เมื่อท่อผสมตัวที่ 2 ถูกนำมาใช้ โดยปรับตำแหน่งหัวฉีดปฐมภูมิไว้ที่โดยที่ปากทางออกของหัวฉีดจะอยู่ที่ 10 mm ด้านนอกของปากทางเข้าท่อผสม จากรูปที่ 12 และ 13 จะเห็นว่าไม่มีการเกิด choke ภายในท่อผสมเลย เนื่องจากเมื่อลดความดันเครื่องควบแน่นจะทำให้เครื่องระเหยสามารถรับภาระทำความเย็นเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะอีเจคเตอร์สามารถดูดไอสารทำงานจากเครื่องระเหยเพิ่มขึ้น และเมื่อความดันเครื่องควบแน่นลดลงก็จะทำให้ค่าความดันเครื่องระเหยวิกฤตต่ำลงด้วย ซึ่งเป็นผลให้ความเย็นที่ได้มีอุณหภูมิต่ำลง ทั้งนี้เนื่องมาจากไม่มีเกิดการ choke ภายในท่อผสม จึงทำให้สารทำงานไหลผ่านท่อผสมเพิ่มขึ้นได้ เมื่อความดันภายในเครื่องควบแน่นต่ำลง

จะเห็นได้ว่าเมื่อไม่มีการเกิด choke ภายในท่อผสมดังนั้นจึงไม่มีค่าความดันเครื่องควบแน่นวิกฤตเกิดขึ้น ตามที่เสนอโดย Huang et al. [2] คงมีแต่ค่าความดันเครื่องระเหยวิกฤตเท่านั้น เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิและความดันของสารทำงานภายในเครื่องกำเนิดไอจะทำให้เครื่องระเหยสามารถรับภาระความเย็นเพิ่มขึ้นตามที่แสดงในรูปที่ 14 ทั้งนี้เนื่องมาจากไม่มีการ choke ภายในท่อผสม ดังนั้น อัตราการไหลของสารทำงานผสมจึงสามารถเพิ่มขึ้นได้ เมื่ออัตราการไหลของสารทำงานปฐมภูมิเพิ่มขึ้นทำให้มีการถ่ายเท momentum เพิ่มขึ้น จึงทำให้อีเจคเตอร์สามารถดูดไอสารทำงานจากเครื่องระเหยได้มากขึ้น ซึ่งทำให้สามารถรับภาระความเย็นได้มากขึ้นในขณะเดียวกันค่าความดันควบแน่นวิกฤตก็ลดลงด้วย

แม้ว่าพลังงานความร้อนที่ใช้โดยเครื่องกำเนิดไอจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มความดันและอุณหภูมิ แต่ว่าอัตราการเพิ่มของภาระทำความเย็นของเครื่องระเหยนั้นสูงกว่า ดังนั้น จึงทำให้ค่าสัมประสิทธิการทำความเย็นเพิ่มขึ้น ดังที่แสดงในรูปที่ 15

จะเห็นได้ว่าเมื่อท่อผสมตัวที่ 1 ถูกนำมาใช้จะมีการเกิด choke ภายในท่อผสม ซึ่งทำให้ค่าภาระทำความเย็นไม่สามารถเปลี่ยนแปลงโดยการลดความดันของเครื่องควบแน่น แต่ถ้าความดันภายในเครื่องระเหยลดต่ำลงหรือความดันภายในเครื่องควบแน่นเพิ่มขึ้นสูงกว่าค่าวิกฤต จะทำให้ประสิทธิภาพของอีเจคเตอร์ลดต่ำลงอย่างรวดเร็วทำให้ที่เครื่องระเหยไม่สามารถรับภาระความเย็นได้ และเป็นที่น่าสังเกตว่าไม่สามารถให้อีเจคเตอร์ทำงานโดยไม่มีการ choke ที่ในท่อผสมได้ นอกจากจุดที่อีเจคเตอร์ให้ความดันต่ำสุด คือ ไม่มีการไหลของสารทำงานจากเครื่องระเหยเลย ซึ่งผลที่ได้นี้เหมือนกับผลการทดลองที่นำเสนอโดย Eames et al. [4] และ Huang et al. [2-3] คือไม่สามารถให้อีเจคเตอร์ทำงานอย่างราบรื่นไม่มีการสะดุด (ให้ความดันคงที่) ที่ความดันระหว่างค่าความดันวิกฤตกับความดันต่ำสุด

เมื่อใช้ท่อผสมตัวที่ 2 ไม่มีการเกิด choke ที่ท่อผสมเลย (ได้มีการทดลองเพิ่มความดันที่เครื่องระเหยจนถึง 1200 mbar ก็ไม่พบการเกิด choke ในท่อผสม ความสามารถในการรับภาระความเย็นของเครื่องระเหยยังคงเพิ่มขึ้นเมื่อความดันเครื่องควบแน่นลดลง) ผลการทดลองที่ได้นั้นต่างจากเมื่อใช้ท่อผสมตัวที่ 1 คืออีเจคเตอร์สามารถทำงานได้อย่างราบรื่นโดยไม่มีการสะดุดเกิดขึ้นเลยแม้ว่าไม่มีการ choking ในท่อผสมเกิดขึ้น นอกจากเมื่อความดันเครื่องระเหยต่ำกว่าค่าวิกฤตจะเกิดการสะดุดเกิดขึ้น ดังนั้นอีเจคเตอร์ไม่จำเป็นต้องทำงานโดยมีการเกิด choking ภายในท่อผสมเสมอไป ดังที่เสนอโดย Huang [3] การที่อีเจคเตอร์จะทำงานโดยเกิด choking ในท่อผสมหรือหรือไม่นั้นขึ้นอยู่กับลักษณะของท่อผสม ช่วงความดันและอุณหภูมิของสารทำงาน และชนิดของสารทำงาน ความแตกต่างระหว่างการทำงานของอีเจคเตอร์ เมื่อมีการ choke และไม่มีการ choke ในท่อผสมอาจสรุปได้ดังนี้

ก. เมื่อมีการ choke ภายในท่อผสม

- เมื่อระบบต้องทำความเย็นที่อุณหภูมิและความดันภายในเครื่องระเหยคงที่ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ และความดันในเครื่องควบแน่นนั้นสูงขึ้นเช่นในวันที่มีอากาศร้อน เครื่องระเหยไม่สามารถรับภาระความเย็นเพิ่มขึ้น และถ้าอีเจคเตอร์ทำงานที่จุดวิกฤตแล้วระบบจะสามารถทำงานต่อไปได้โดยเพิ่มความดัน

และอุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอเท่านั้น แต่ค่าภาระทำความเย็นที่ได้จะลดลง

- ในวันที่มีอากาศเย็นทำให้ความดันและอุณหภูมิเครื่องควบแน่นต่ำลง ค่าภาระทำความเย็นที่ได้จากเครื่องระเหย จะคงที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่จะสามารถเพิ่มขึ้นโดยลดความดันและอุณหภูมิภายในเครื่องกำเนิดไอ หรือเพิ่มความดันและอุณหภูมิที่เครื่องระเหยเท่านั้น
- เครื่องระเหยจะสามารถรับภาระทำความเย็นเพิ่มขึ้นเมื่อสามารถเพิ่มอุณหภูมิและความดันภายในเครื่องระเหยเท่านั้น
- อีเจคเตอร์ไม่สามารถทำงานโดยไม่มีการ choke ภายในท่อผสมได้เลย นอกจากจุดความดันต่ำสุด คือไม่มีการไหลของสารทำงานจากเครื่องระเหย

ข. เมื่อไม่มีการ choke ภายในท่อผสม

- เครื่องระเหยสามารถรับภาระทำความเย็นเพิ่มขึ้นโดยการเพิ่มความดันและอุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอ
- ในวันที่มีอากาศเย็นซึ่งทำให้ความดันและอุณหภูมิของเครื่องควบแน่นลดลง ถ้าไม่มีการเพิ่มภาระความเย็น อุณหภูมิที่เครื่องระเหยจะลดลงเอง แต่ถ้าต้องการอุณหภูมิคงที่ เครื่องระเหยจะต้องภาระความเย็นเพิ่มขึ้นโดยไม่ต้องมีการเปลี่ยนแปลงที่เครื่องกำเนิดไอเลย
- ในวันที่มีอากาศร้อนซึ่งทำให้ความดันและอุณหภูมิของเครื่องควบแน่นสูงขึ้น ค่าภาระความเย็นจะสามารถเพิ่มขึ้นได้โดยเพิ่มความดันของเครื่องกำเนิดไอหรือของเครื่องระเหย

ดังนั้น จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้ท่อผสมตัวที่ 2 ซึ่งไม่มีการ choke ภายในท่อผสม ดูจะมีความยืดหยุ่นในการใช้งานมากกว่าเมื่อใช้ท่อผสมตัวที่ 1 ซึ่งมีการ choke ภายในท่อผสม และเมื่อใช้ท่อผสมตัวที่ 2 ยังทำให้ประสิทธิภาพของระบบสูงขึ้น ทั้งความสามารถในการรับภาระความเย็น และค่าสัมประสิทธิซึ่งดีกว่าเมื่อใช้ท่อผสมตัวที่ 1 เมื่อเครื่องทำงานที่สภาวะเดียวกัน แต่ข้อได้เปรียบของการใช้ท่อผสมตัวที่ 1 คือ สามารถใช้งานที่อุณหภูมิและความดันในเครื่องระเหยต่ำกว่า

5. สรุปและข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ได้พิสูจน์ให้เห็นว่า ระบบทำความเย็นแบบอีเจคเตอร์นั้นสามารถนำมาพัฒนาใช้งานได้จริงได้ ถึงแม้ว่าจะมีค่าสัมประสิทธิการทำความเย็นต่ำกว่าระบบแบบอื่น แต่พลังงานที่ใช้นั้นอยู่ในรูปพลังงานความร้อนซึ่งมีอุณหภูมิในช่วง 100 ถึง 200°C ซึ่งส่วนมากมีราคาถูกหรือเป็นความร้อนทิ้งจากอุตสาหกรรมทั่วไป เครื่องต้นแบบที่ใช้ในการทดลองนี้สามารถทำความเย็นได้ต่ำสุดประมาณ -5°C มีความสามารถในการรับภาระความเย็นอยู่ในช่วง 500 ถึง 1700 วัตต์ และมีค่าสัมประสิทธิการทำความเย็นจะอยู่ในช่วง 0.1 ถึง 0.25

ในการทดลองนี้ ท่อผสมซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากัน แต่มีลักษณะต่างกัน คือ ท่อผสมตัวที่ 1 นั้นจะมีท่อผสมซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดคงที่ ส่วนท่อผสมตัวที่ 2 จะมีพื้นที่หน้าตัดคอดลง จากการทดลองพบว่า เมื่อใช้ท่อผสมตัวที่ 1 ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดคงที่จะพบว่ามีการ choke ของสารทำงานภายในท่อผสม เมื่อมีการเกิด choking ภายในท่อผสมจะไม่สามารถเพิ่มภาระทำความเย็นของเครื่องระเหยได้ โดยการลดความดันในเครื่องควบแน่นหรือเพิ่มความดันของเครื่องกำเนิดไอ แต่จะสามารถทำได้โดยเพิ่มความดันและอุณหภูมิของเครื่องระเหยเท่านั้น และเป็นที่น่าสังเกตว่า ภาระทำความเย็นจะลดลงเมื่อเพิ่มความดันของเครื่องกำเนิดไอ นอกจากนี้ เมื่อเพิ่มความดันของเครื่องควบแน่น หรือลดความดันของเครื่องระเหยเกินกว่าค่าวิกฤต ประสิทธิภาพของอีเจคเตอร์จะลดลงต่ำอย่างรวดเร็ว ทำให้ไม่สามารถรับภาระทำความเย็นได้ และยังพบว่าเมื่อใช้ท่อผสมตัวที่ 1 นั้น อีเจคเตอร์ไม่สามารถรับภาระทำความเย็นได้เลย เมื่อไม่มีการเกิด choke ภายในท่อผสม

เมื่อมีการทดลองโดยใช้ท่อผสมตัวที่ 2 พบว่าไม่มีการเกิด choke ภายในท่อผสมเลย และพบว่าความสามารถในการรับภาระทำความเย็นของเครื่องระเหยสามารถเพิ่มขึ้นโดยการเพิ่มความดันที่เครื่องกำเนิดไอหรือลดความดันที่เครื่องควบแน่น ทำให้มีความยืดหยุ่นในการทำงานมากกว่า และยังพบว่าเมื่อใช้ท่อผสมตัวที่ 2 นี้จะให้ประสิทธิภาพโดยรวมที่ดีกว่า คือ มีความสามารถในการรับภาระความเย็นและค่าสัมประสิทธิการทำความเย็นที่สูงกว่า

จากการทดลองนี้สามารถสรุปได้ว่า ระบบทำความเย็นแบบอีเจคเตอร์ ซึ่งใช้ R11 เป็นสารทำงานนั้นสามารถนำมาพัฒนาใช้งานได้จริง โดยเหมาะที่จะนำมาใช้ทำความเย็นในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 0 ถึง 10°C ซึ่งเหมาะกับการใช้งานในระบบปรับอากาศหรือใช้ในการเก็บรักษาผลผลิตทางเกษตรต่างๆ และระบบนี้ยังสามารถใช้งานโดยใช้พลังงานความร้อนอุณหภูมิต่ำถึง 100°C ซึ่งมีราคาถูกหรือได้เปล่า เช่น ความร้อนที่ได้จากไอเสียเครื่องยนต์ต่างๆ และยังสามารถนำเครื่องควบแน่นที่ระบายความร้อนด้วยอากาศมาใช้ได้อีกด้วย เนื่องจากสามารถทำงานที่อุณหภูมิควบแน่นสูงถึง 41°C ระบบนี้ไม่ยุ่งยาก

ซับ ซ้อนง่ายต่อการออกแบบและจัดสร้าง การทำงานและควบคุมระบบนั้นง่ายไม่ยุ่งยากไปกว่าระบบอื่น อาจจะง่ายกว่าด้วย นอกจากนี้ระบบยังมีเพียงแค่ปั๊มหมุนเวียนสารทำงานเท่านั้นที่สามารถสึกหรอได้ ทำให้ง่ายต่อการบำรุงรักษา

ก่อนที่ระบบนี้จะสามารถนำไปพัฒนาใช้งานได้จริงนั้น สิ่งต่อไปนี้ควรจะได้รับการศึกษาหรือแก้ไขก่อน

- เนื่องจาก R 11 ที่ใช้ในการทดลองนั้นมีผลเสียต่อสภาพแวดล้อม ดังนั้น จึงควรเปลี่ยนมาใช้ R123 ถึงแม้จะมีราคาสูงกว่า แต่เมื่อใช้งานจริง ปริมาณที่ใช้จะไม่มากเช่นเดียวกันกับที่ใช้ในการทดลอง และประสิทธิภาพที่ได้จะไม่แตกต่างกันมากนัก
- อีเจคเตอร์ ลักษณะต่างๆ ควรนำมาทดลองศึกษาเพื่อหาว่า แบบไหนเหมาะสมกับการใช้งานจริง
- เครื่องกำเนิดไอที่ใช้พลังงานความร้อนจริง ไม่ว่าจากการเผาไหม้โดยตรง หรือความร้อนทิ้งต่างๆ ควรนำมาทดลองใช้และเปลี่ยนเครื่องควบแน่นเป็นแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ
- ทดลองผสมสารหล่อลื่นกับสารทำงาน เพื่อที่จะได้นำปั๊มแบบอื่น ๆ เช่น เกียร์ปั๊ม มาใช้ ซึ่งจะแก้ปัญหาการเดือดของสารทำงานที่ท่อทางเข้าปั๊มด้วย

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้ทำการวิจัยขอขอบคุณสำนักคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติที่ให้ความสนับสนุนด้านเงินทุน

รายการสัญลักษณ์

Q_{evap}	ภาระความเย็นที่เครื่องระเหย (W)
Q_{boiler}	พลังงานความร้อนที่เครื่องกำเนิดไอ (W)
m_{evap}	อัตราการระเหยของสารทำงานที่เครื่องระเหย ($kg.sec^{-1}$)
m_{boiler}	อัตราการระเหยของสารทำงานที่เครื่องกำเนิดไอ ($kg.sec^{-1}$)
h_{ex}	specific enthalpy ออกจากระบบ ($J.kg^{-1}$)
h_{in}	specific enthalpy เข้าสู่ระบบ ($J.kg^{-1}$)
COP	ค่าสัมประสิทธิการทำความเย็น (Coefficient of Performance)
evap	เครื่องระเหย (evaporator)
boiler	เครื่องกำเนิดไอ (boiler)

เอกสารอ้างอิง

[1] Gosney W. B. 'Principle of refrigeration', Cambridge University Press., (1982).

[2] Haung B. J., Jiang C. B., and Fu F. L., 'Ejector performance characteristics and design analysis of jet refrigeration system', ASME Trans. J. Eng. Gas Turbine and Power, Vol.107 July, pp.792-802, (1985).

[3] Huang B. J., Chang J. M., Wang C. P., and Petrenko V. A., 'A 1-D analysis of ejector performance', Int. J. Refrig., Vol.22, pp.354-364, (1999).

[4] Eames I. W., Aphornratana S., and Haider H., 'A theoretical and experimental study of a small-scale steam jet refrigerator', Int. J. Refrig., Vol.18, No.6, pp.378-386, (1995).

[5] Aphornratana S., and Eames I. W., 'A small capacity steam-ejector refrigerator: experimental investigation of a system using ejector with movable primary nozzle', Int. J. Refrig., Vol.20, No.5, pp.352-358, (1997).

[6] Holton W. C., 'Effect of molecular weight of entrained fluid on the performance of steam-ejectors', ASME Trans., Oct, pp.905-910, (1951).

[7] Hamner R. M., 'An investigation of an ejector-compression refrigeration cycle and its applications to heating, cooling, and energy conservation', Ph.D. thesis, The University of Alabama, Birmingham, U.S.A., (1978).

[8] Zeren F., 'Feron-12 vapour compression jet pump solar cooling system' Ph.D. thesis, Texas A&M University, U.S.A., (1982).

[9] ASHRAE, 'ASHRAE handbook: fundamentals volume', (1993).

[10] Salas C. E., and Salas M. S., 'Guide to refrigeration CFC's',The Fairmont Press, U.S.A., (1992)

[11] ESDU, 'Ejector and jet pump', data item 86030, ESDU international Ltd., London, (1985).