

## บทที่ 8

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 8.1 สรุปผลการวิจัย

โครงการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์เพื่อประยุกต์ใช้ในงานปรับอากาศ โดยทำการศึกษาทั้งในทางด้านวิศวกรรมและเศรษฐศาสตร์ ในการศึกษาทางด้านวิศวกรรมนั้นมุ่งเน้นที่จะศึกษาถึงสมรรถนะการทำงานของระบบ โดยได้ทำการออกแบบ สร้างและทดสอบชุดต้นแบบระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ นอกจากนี้ยังทำการศึกษาถึงอิทธิพลของสภาวะการทำงานที่มีผลต่อขนาดและสมรรถนะของระบบ โดยใช้สมการทางด้านวิศวกรรมในการวิเคราะห์ผล ส่วนในการศึกษาทางด้านเศรษฐศาสตร์นั้น ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบต้นทุนในการผลิต ค่าใช้จ่ายในการทำงานของชุดต้นแบบและเครื่องปรับอากาศแบบทั่วไป

สำหรับการออกแบบอีเจ็คเตอร์นั้นได้ใช้กระบวนการออกแบบของ ESDU ร่วมกับการจำลองการไหลเชิงพลศาสตร์ (CFD) เนื่องจากพบว่า วิธีการออกแบบของ ESDU นั้น ไม่สามารถบอกขนาดและรูปร่างของอีเจ็คเตอร์ที่มีสมรรถนะการทำงานของอีเจ็คเตอร์สูงสุดภายใต้สภาวะการทำงานจริงของอีเจ็คเตอร์ได้

การออกแบบของ ESDU นั้นสามารถหาขนาดของอีเจ็คเตอร์โดยตรงจากการคำนวณเพียงบางส่วนเท่านั้น ได้แก่ เส้นผ่านศูนย์กลางของคอคอดหัวฉีด, ปากทางออกหัวฉีด และคอคอดอีเจ็คเตอร์ ส่วนรูปร่างอื่นๆ ที่มีความจำเป็นในการสร้างอีเจ็คเตอร์ซึ่งได้แก่ ขนาดของมูมดูว์เข้าและออกของอีเจ็คเตอร์ และความยาวของช่วงคอคอดของอีเจ็คเตอร์ ไม่สามารถหาได้จากการคำนวณโดยตรง ESDU เพียงแค่แนะนำค่าต่างๆ เหล่านั้นเป็นช่วงกว้างๆ จึงเป็นเหตุผลให้มีความจำเป็นที่จะต้องใช้การจำลองการไหลเชิงตัวเลขมาจำลองการไหลของอีเจ็คเตอร์รูปร่างต่างๆ เพื่อหารูปร่างและขนาดของอีเจ็คเตอร์ที่ให้สมรรถนะการทำงานสูงสุดภายใต้เงื่อนไขการออกแบบ

จากผลการออกแบบพบว่า อีเจ็คเตอร์ที่มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอดหัวฉีด, ปากทางออกหัวฉีด, คอคอดอีเจ็คเตอร์, ความยาวคอคอดอีเจ็คเตอร์, ห้องผสมและช่วงคู่ออกของอีเจ็คเตอร์ เท่ากับ 3.7, 20, 34, 137, 206 และ 184 มิลลิเมตรตามลำดับ และมีมูมดูว์เข้าและออกอีเจ็คเตอร์เท่ากับ 2 และ 3 องศา ตามลำดับ มีประสิทธิภาพการทำงานสูงสุด โดยมีอัตราส่วนการเหนี่ยวนำและค่าความดันวิกฤต เท่ากับ 0.21 และ 90 มิลลิบาร์ ตามลำดับ

นอกจากการออกแบบอีเจ็คเตอร์แล้วงานวิจัยนี้ยังได้ออกแบบเครื่องควบแน่นและเครื่องระเหยที่ใช้กับชุดลองด้วย จึงได้ทำการศึกษาอิทธิพลของสภาวะการทำงานของระบบที่มีต่อขนาดของอีเจ็คเตอร์ เครื่องควบแน่นและเครื่องระเหยในระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ โดยใช้สมการทางวิศวกรรม เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ผล ซึ่งผลที่ได้จากการศึกษานี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการออกแบบระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ที่มีสภาวะการทำงานเหมือนกันกับงานวิจัยนี้ได้ รวมทั้งยังสามารถทำนายประสิทธิภาพของระบบที่ต้องการออกแบบได้ สำหรับระบบที่ต้องการออกแบบซึ่งมีสภาวะการทำงานเหมือนกันกับงานวิจัยนี้สามารถใช้กราฟความสัมพันธ์ที่ได้จากการวิจัยนี้หาขนาดของอีเจ็คเตอร์ เครื่องควบแน่นและเครื่องระเหยได้โดยตรง แต่ถ้ระบบที่ต้องการออกแบบนั้นมีสภาวะการทำงานที่ต่างจากงานวิจัยนี้ ก็สามารถใช้สมการที่ได้นำเสนอในงานวิจัยไปใช้ออกแบบระบบนั้นได้ ซึ่งจากการศึกษานี้พบว่า

ขนาดที่เหมาะสมและสมรรถนะที่ดีที่สุดของระบบขึ้นอยู่กับสภาวะการทำงานของระบบ อุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอและเครื่องระเหยจะแปรผันตรงกับอัตราส่วนการเหี่ยวน้ำ อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดและสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็น แต่จะแปรผกผันกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอดหัวฉีด ในขณะที่อุณหภูมิของเครื่องควบแน่นจะแปรผกผันกับอัตราส่วนการเหี่ยวน้ำ อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดและสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็น แต่จะแปรผันตรงกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอดหัวฉีด

ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อขนาดของเครื่องควบแน่น คือ อุณหภูมิของเครื่องควบแน่นและน้ำหล่อเย็น โดยที่ปัจจัยเหล่านี้จะแปรผันตรงกับขนาดของเครื่องควบแน่น

ขนาดของเครื่องระเหยจะเพิ่มขึ้นเมื่อวิสัยสมรรถนะการทำความเย็นและอุณหภูมิของเครื่องระเหยเพิ่มขึ้น

หลังจากที่ได้ทำการศึกษาการออกแบบระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ จึงได้ทำการสร้างและทดสอบชุดต้นแบบระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์จากผลการทดลอง พบว่า ความดันของเครื่องควบแน่นจะแปรผันตามความดันของของไหลปฐมภูมิ กล่าวคือ เมื่อความดันปฐมภูมิเพิ่มขึ้น ความดันของเครื่องควบแน่นจะมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความดันของเครื่องระเหยจะมีค่าคงที่ไม่แปรผันตามความดันของของไหลปฐมภูมิ

เมื่อความดันของของไหลปฐมภูมิเพิ่มขึ้น อัตราส่วนการเหี่ยวน้ำจะมีค่าเพิ่มขึ้นก่อนที่จะลดลง หลังจากนั้นอัตราส่วนการเหี่ยวน้ำจะมีแนวโน้มคงที่ เนื่องจาก เมื่อความดันของของไหลปฐมภูมิเปลี่ยนแปลง จะทำให้อัตราส่วนพื้นที่เปลี่ยนตามไปด้วย จึงเป็นเหตุผลที่ทำให้อัตราส่วนการเหี่ยวน้ำมีค่าเปลี่ยนแปลง อัตราส่วนการเหี่ยวน้ำมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1.66 ที่ ความดันปฐมภูมิเท่ากับ 4 บาร์

เนื่องจากค่าเอนทาลปีที่ติดคร่อมเครื่องระเหยมีค่าเท่ากันตลอดช่วงของความดันปฐมภูมิ ที่ทำการทดลอง ดังนั้น วิสัยสามารถการทำความเย็นของชุดต้นแบบจึงขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของ ไหลหตุยภูมิ วิสัยสามารถการทำความเย็นของชุดต้นแบบมีค่าสูงสุดเท่ากับ 3.44 กิโลวัตต์ ที่ ความดันปฐมภูมิเท่ากับ 4.5 บาร์ ซึ่งที่สภาวะการทำงานนี้มีอัตราการไหลของของไหลหตุยภูมิสูง ที่สุด

โดยทั่วไป สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นของระบบทำความเย็นแบบอิจิเตอร์ จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการเหนี่ยวนำของระบบ ดังนั้น สภาวะการทำงานใดที่ทำให้ระบบมีอัตราส่วน การเหนี่ยวนำสูงจะทำให้สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นของระบบสูงตามไปด้วย สำหรับการศึกษานี้สภาวะการทำงานที่ทำให้ชุดต้นแบบมีอัตราส่วนการเหนี่ยวนำสูงสุด คือ สภาวะการ ทำงานที่ความดันปฐมภูมิเท่ากับ 4.0 บาร์ ซึ่งที่สภาวะการทำงานนี้ชุดต้นแบบมีค่าสัมประสิทธิ์ สมรรถนะการทำความเย็นสูงสุดเท่ากับ 0.16

สำหรับชุดต้นแบบนี้มีอัตราส่วนประสิทธิภาพการใช้พลังงาน (EER) สูงสุดเท่ากับ 0.54 ที่ความดันปฐมภูมิเท่ากับ 4.0 บาร์ ซึ่งถือว่าต่ำมากเมื่อเทียบกับเครื่องปรับอากาศที่มีอยู่ในปัจจุบัน และไม่คุ้มค่าในด้านของการใช้พลังงาน ดังนั้น ระบบนี้จึงเหมาะกับการนำไปใช้กับแหล่งพลังงาน ความร้อนทิ้งหรือพลังงานแสงอาทิตย์เพราะแหล่งพลังงานเหล่านั้นไม่มีต้นทุนในการผลิต

ในด้านของเศรษฐศาสตร์ ชุดต้นแบบมีต้นทุนในการผลิตเท่ากับ 401,785 บาท ซึ่งสูง มากเมื่อเทียบกับเครื่องปรับอากาศแบบอัดไอที่มีวิสัยสามารถการทำความเย็นเท่ากัน ซึ่งมีราคาโดย เฉลี่ยประมาณ 20,000 บาท สาเหตุที่ทำให้ต้นทุนในการผลิตสูงก็เพราะว่าระบบนี้ใช้น้ำเป็นสารทำ ความเย็น จึงทำให้ขนาดของอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบโดยเฉพาะเครื่องควบแน่นและเครื่องระเหยมี ขนาดใหญ่ รวมทั้งชุดต้นแบบนี้ยังต้องมีระบบที่ทำงานควบคู่กันด้วย เช่น ระบบน้ำหล่อเย็นเครื่อง ควบแน่น หรือระบบส่งลมเย็น เป็นต้น จึงทำให้ต้นทุนในการผลิตสูงเมื่อเทียบกับระบบทำความเย็น แบบทั่วไป

แต่อย่างไรก็ตามชุดต้นแบบนี้มีปริมาณการใช้ไฟฟ้าต่ำกว่าระบบปรับอากาศแบบอัดไอ โดยมีปริมาณการใช้ไฟฟ้าเท่ากับ 571 วัตต์ ซึ่งต่ำกว่าเครื่องปรับอากาศแบบอัดไอถึง 43.3% และจะ ทำให้ประหยัดค่าไฟได้ถึง 48% ต่อเดือน ในกรณีที่ชุดต้นแบบนี้ทำงานวันละ 8 ชั่วโมง จะมี ระยะเวลาคืนทุนยาวนานถึง 133 ปี เนื่องจากต้นทุนการผลิตที่สูงนั่นเอง

## 8.2 ข้อเสนอแนะ

ชุดต้นแบบระบบทำความเย็นที่ได้จากงานวิจัยนี้ยังมีข้อด้อยที่ยังต้องการการพัฒนาดังต่อไปนี้

ชุดต้นแบบนี้มีปัญหาใหญ่เหมือนกับระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ทั่วไป คือ ในกรณีที่มิวีสสามารถทำความเย็นเท่ากัน สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นของระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์มีค่าต่ำกว่าระบบทำความเย็นแบบอัดไอ

วิธีการเพิ่มสมรรถนะการทำความเย็นของระบบที่นิยมกันมาก คือ การเพิ่มอัตราส่วนการเหนี่ยวนำ (Entrainment ratio) รวมทั้งการลดอัตราส่วนการอัด (Compression ratio) ของระบบ ซึ่งมีนักวิจัยหลายท่านได้นำเสนอไว้ เช่น ระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ที่ใช้เจ็ทปั๊ม ระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์-ขับकुलเลอร์ หรือระบบทำความเย็นแบบทรานส์คริติคอลลีเจ็คเตอร์ เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถใช้อีเจ็คเตอร์แบบใหม่เพื่อเพิ่มอัตราส่วนการเหนี่ยวนำของระบบได้ เช่น อีเจ็คเตอร์ที่ใช้หัวฉีดแบบกลีบ (Petal nozzle) หรืออีเจ็คเตอร์ที่ปรับอัตราส่วนพื้นที่ได้ แต่อย่างไรก็ตามวิธีการต่างๆ เหล่านี้ยังคงต้องการการศึกษาและทำการทดลองเพื่อหาข้อมูลเพิ่มเติมต่อไปในอนาคต

อีกประเด็นหนึ่งที่เป็นจุดด้อยของชุดต้นแบบนี้ คือ ต้นทุนในการผลิตที่มีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับระบบทำความเย็นแบบอัดไอที่มีวิสัยสามารถทำความเย็นเท่ากัน ซึ่งสาเหตุเกิดจากการใช้น้ำเป็นสารทำความเย็นจึงทำให้ขนาดของอุปกรณ์ในระบบมีขนาดใหญ่เกินไปสู่ต้นทุนการผลิตที่สูง ดังนั้น เราสามารถลดต้นทุนการผลิตชุดต้นแบบระบบทำความเย็นแบบได้โดยใช้สารทำความเย็นชนิดอื่นที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและไม่คัดต่อสนธิสัญญาโตเกียว เช่น R-113, R-123, R-141b หรือ R-134a เป็นต้น สารทำความเย็นเหล่านี้มีค่าความร้อนจำเพาะ (Latent heat) ต่ำกว่าน้ำ ซึ่งจะทำให้ขนาดของอุปกรณ์ในระบบมีขนาดเล็กลง และสามารถลดต้นทุนในการสร้างชุดต้นแบบได้

ข้อเสียอีกประการหนึ่งของการใช้น้ำเป็นสารทำความเย็น คือ เนื่องจากความดันใช้งานของระบบเป็นสูญญากาศ เมื่อเกิดการรั่วซึมอากาศสามารถเข้าไปในระบบได้ ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของระบบลดลงหรือถ้าอากาศเข้าไประบบมากเกินไประบบจะไม่สามารถทำงานได้ และเป็นเรื่องยากมากที่จะหาจุดรั่วซึมนั้น ดังนั้น ข้อต่อต่างๆ ที่มีภายในระบบควรใช้เป็นแบบหน้าแปลน (Flange) และมีร่องโอริง (O-ring) เพื่อป้องกันการรั่วเข้าระบบของอากาศ

สุดท้ายนี้ ชุดต้นแบบของงานวิจัยนี้ยังไม่สามารถทำงานครบวัฏจักรของระบบทำความเย็นแบบอີเจ็คเตอร์ได้ เนื่องจากยังไม่มีระบบส่งสารทำความเย็นจากถังพัก (Receiver tank) ไปยังเครื่องกำเนิดไอโดยไม่หยุดการทำงานของระบบได้ ซึ่งในอนาคตอาจนำระบบ Workless-Generator-Feeding (WGF) หรือระบบ Multi-Function Generator มาใช้เพื่อให้ชุดต้นแบบสามารถทำงานได้ครบวัฏจักรโดยไม่ต้องหยุดการทำงานของทั้งระบบกลางคัน