อภินันทนาการ

สัญญาเลขที่ R2555C117

สำนักหอสมุด

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ ระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์สำหรับเครื่องปรับอากาศพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ที่ทำงานร่วมกับระบบสะสมพลังงานสำหรับที่อยู่อาศัย

คณะผู้วิจัย สังกัด

1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศรายุทธ วัยวุฒิ วิทยาลัยพลังงานทดแทน
2. นาย จักรี ศรีพนม วิทยาลัยพลังงานทดแทน

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยนเรศวร
วันลงทะเบียน - 2 มี.ย. 2558
เลขทะเบียน 1696492
เลขเรียกหนังสือ ว TH
7687
.9
ศ167ร
2557

สนับสนุนโดย กองทุนวิจัย มหาวิทยาลัยนเรศวร

บทคัดย่อ

ได้ออกแบบและพัฒนาระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์สำหรับเครื่องปรับอากาศที่ใช้พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์สำหรับที่อยู่อาศัย โดยเลือกระบบพลังงานแสงอาทิตย์แบบเครื่องรับรังสีดวงอาทิตย์แผ่นเรียบที่สามารถให้ความร้อนแก่สารทำงาน ในการวิจัยนี้เลือก สาร R141b ซึ่งเป็นสารทำงานที่นิยมใช้กันในระบบเครื่องปรับอากาศทั่วไปและมีความเหมาะสมในการใช้งานกับระบบที่ใช้พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ และได้ออกแบบระบบสะสมพลังงานโดยใช้ถังน้ำร้อนขนาด 6 m^3 ซึ่งสามารถให้พลังงานแก่ระบบให้ทำงานได้เมื่อรังสีจากดวงอาทิตย์มีพลังงานไม่สม่ำเสมอ การทำงานของระบบเครื่องปรับอากาศมีความเหมาะสมที่ค่าสัมประสิทธิ์การทำงานรวมของระบบประมาณ 0.5 และสัมประสิทธิ์การทำงานของอีเจ็คเตอร์มีค่าประมาณ 0.22 ในการวิเคราะห์ต้นทุนการทำงานของระบบพบว่ามูลค่าการลงทุนมีค่ารวมกันเป็นเงิน 357,000 บาท จึงสามารถใช้งานได้ และเมื่อระบบทำงานตามปกติจะสามารถคำนวณวิเคราะห์มูลค่าได้เป็น 35.7 บาทต่อวัตต์ความเย็น โดยมีค่าระยะเวลาคุ้มทุนประมาณ 8 ปี โดยขึ้นอยู่กับการใช้งานเครื่องปรับอากาศและค่าความเข้มของพลังงานแสงอาทิตย์

คำสำคัญ ระบบสะสมพลังงาน, อีเจ็คเตอร์, ระบบทำความเย็นพลังงานแสงอาทิตย์

Abstract

An ejector for a solar air conditioning system with thermal solar energy and storage was designed and installed for residential by selecting the solar thermal energy system from flat plate collector that sufficient to a working fluid. In this research the working fluid was selected by R141b, the conventional fluid for general air conditioning and there is an advantage of the suitably for solar energy application. In addition the design was included with the water storage tank size of 6m3 for intermittent solar radiation. The total system coefficient of performance was calculated of around 0.5 and the ejector COP of 0.22. The capital investment for the system was 357,000 baht for the installation and working in the cost of energy of 35.7 baht per month. This data was shown the playback period of 8 years approximate by the solar radiation and the working time.

Keywords Energy storage system, Ejector, Solar cooling system

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ กองทุนวิจัย มหาวิทยาลัยนเรศวรที่ได้ให้ทุนสนับสนุนจนงานวิจัยนี้สำเร็จลงได้ และขอขอบพระคุณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ได้อนุญาตให้ทำการวิจัยและเก็บข้อมูลในการออกแบบรวมทั้งติดตั้งระบบและทดสอบการทำงาน ขอขอบพระคุณผู้ให้ความอุปการคุณในการอำนวยความสะดวกจนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์

สารบัญ

บทที่		หน้า
1.	บทนำ	1
	1. ที่มาของงานวิจัย	1
	2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1
	3. ขอบเขตของโครงการวิจัย	2
	4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
2.	ทฤษฎีและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
	1. หลักการและทฤษฎีของระบบทำความเย็นด้วยอีเจ็คเตอร์	3
	2. รายละเอียดการทำงานของระบบทำความเย็นด้วยอีเจ็คเตอร์	5
	3. การทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบทำความเย็นพลังงานแสงอาทิตย์	6
3.	การทดลองและผลการทดลอง	9
	1. การออกแบบระบบและการทดสอบการทำงานของระบบพลังงานแสงอาทิตย์	9
	2. การทำงานของระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์	11
	3. การเก็บข้อมูลการลงทุนของระบบทำความเย็นพลังงานแสงอาทิตย์ด้านเศรษฐศาสตร์	14
4.	การวิเคราะห์ข้อมูล	15
	1. ผลการวิเคราะห์การออกแบบอีเจ็คเตอร์สำหรับระบบทำความเย็นแสงอาทิตย์	15
	2. การคำนวณการทำงานของระบบที่ใช้สารทำงานเป็น R141b	19
5.	สรุปผลการวิจัย	22
	บรรณานุกรม	50

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 แผนผังแสดงระบบทำความเย็นแบบเจ็คเตอร์	3
2.2 แสดงลักษณะของความดัน และความเร็วของสารทำงานที่เกิดขึ้นภายในอีเจ็คเตอร์	2
2.3 แผนผังแสดงระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์สำหรับเครื่องปรับอากาศพลังงานความร้อนแสงอาทิตย์ที่ทำงานร่วมกับระบบสะสมพลังงาน	5
3.1 แผนผังการทำงานของระบบทำความเย็นพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยอีเจ็คเตอร์	9
3.2 การคำนวณหาขนาดของถังสะสมพลังงานความร้อนโดยใช้ค่าความร้อน	10
3.3 แผนภูมิค่า P-h ของระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์	11
3.4 ค่าความเข้มของแสงแดดเทียบกับอุณหภูมิของสารทำงานที่ไหลผ่านเครื่องกำเนิดไอ	12
3.5 ค่าอุณหภูมิของสารทำงานในอีวาปอเรเตอร์เทียบกับอุณหภูมิสารทำงานในเครื่องกำเนิดไอ	12
3.6 ค่าสัมประสิทธิ์การทำงานของอีเจ็คเตอร์เมื่ออุณหภูมิของสารทำงานที่เครื่องควบแน่นเปลี่ยนแปลง	13
3.7 ผลจากการคำนวณค่า COP รวมของระบบเทียบกับค่า T_s	14
4.1 แผนผังการทำงานของอีเจ็คเตอร์ขณะมีก๊าซปฐมภิมและทุติยภูมิไหลผ่าน	15
4.2 แผนผังแสดงการคำนวณจากการทำงานเพื่อออกแบบอีเจ็คเตอร์	16
4.3 ค่าอัตราส่วนพื้นที่ของอีเจ็คเตอร์จากการคำนวณเพื่อเปรียบเทียบผลการทดลอง	16
4.4 ผลการคำนวณหาค่า COP ของระบบทำความเย็นแบบ soingle stage	17
4.5 ผลการคำนวณเปรียบเทียบกับการวัดค่าอัตราส่วนการไหลข้าวของสารทำงาน	17
4.6 ค่าอุณหภูมิของสารทำงาน R141b ที่มีผลต่อค่าอัตราส่วนการไหลข้าวของอีเจ็คเตอร์	18
4.7 ค่า COP ของระบบที่ขึ้นอยู่กับขนาดของท่อผสมก๊าซในอีเจ็คเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ	18
4.8 เปรียบเทียบค่า COP ของสารทำงาน 3 ชนิดที่อุณหภูมิอีวาปอเรเตอร์ต่างๆ	19
4.9 เปรียบเทียบค่า COP ของสารทำงาน 3 ชนิดที่อุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอต่างๆ	20
4.10 เปรียบเทียบค่า COP ของสารทำงาน 3 ชนิดที่อุณหภูมิเครื่องควบแน่นค่าต่างๆ	20

บทที่ 1
บทนำ

1. ที่มาของงานวิจัย

เนื่องจากความต้องการใช้เครื่องปรับอากาศได้เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องดังจะเห็นได้จาก [1] อัตราการขยายตัวของตลาดเครื่องปรับอากาศที่เพิ่มขึ้นประมาณ 17 % ส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทุกปี อันเป็นผลมาจากสภาวะโลกร้อน ซึ่งจากความต้องการใช้เครื่องปรับอากาศที่เพิ่มขึ้นนี้เองทำให้จำเป็นต้องจัดหาพลังงานเพื่อรองรับเพิ่มเติมเนื่องจากระบบทำความเย็น หรือระบบปรับอากาศเป็นระบบที่ต้องการพลังงานมาก [2] โดยมีการประมาณการว่า 15 % ของไฟฟ้าที่ผลิตได้ทั้งโลกถูกใช้เพื่อระบบทำความเย็น และระบบปรับอากาศ ซึ่งในประเทศไทยเอง [3] ในอาคารธุรกิจต่างๆ จะต้องเสียค่าไฟฟ้ามากกว่าร้อยละ 50 ของค่าไฟฟ้าทั้งหมดของอาคาร เป็นค่าใช้จ่ายในการทำความเย็น และการปรับอากาศ จากอัตราความต้องการใช้เครื่องปรับอากาศที่เพิ่มขึ้น และจากแนวโน้มราคาพลังงานที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องนี่เอง ทำให้จำเป็นที่จะต้องแสวงหาพลังงานจากแหล่งอื่นๆ เพื่อทดแทนพลังงานจากฟอสซิล เช่นพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานสะอาดไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และสามารถนำมาใช้ได้ทั้งในรูปของ ไฟฟ้า และความร้อน ซึ่งความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์สามารถนำมาใช้ในระบบทำความเย็นได้ และยังช่วยลดการปลดปล่อย CO_2 ที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลในการผลิตไฟฟ้าได้อีกด้วย

เทคโนโลยีทางด้านความเย็นที่ใช้กันทั่วไปที่สามารถทำงานร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ได้นั้น มีหลายชนิด เช่น ระบบทำความเย็นแบบอัดไอที่ใช้ไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ระบบแบบ Desiccant ระบบทำความเย็นชนิดพาสซีพ และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน (Absorption System) และระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ (Ejector) จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า มีนักวิจัยหลายคนได้ทำการศึกษา และพัฒนาระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ เนื่องจากระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์มีข้อดีหลายประการ เช่น ติดตั้งระบบและการออกแบบที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน และค่าใช้จ่ายในการดูแลรักษาต่ำเมื่อเทียบกับระบบทางความร้อนอื่นๆ และมีความเป็นไปได้ที่จะนำไปใช้ในที่อยู่อาศัย ยิ่งไปกว่านั้นยังสามารถใช้ได้กับสารทำความเย็นที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตามจากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ายังไม่มีการนำระบบสะสมพลังงานมาใช้ร่วมกับระบบปรับอากาศ หรือระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ ดังนั้นงานจิวัยนี้จึงมุ่งที่จะพัฒนาระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ที่ทำงานร่วมกับระบบสะสมพลังงานสำหรับเครื่องปรับอากาศเพื่อใช้ในที่อยู่อาศัย

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อสร้าง และออกแบบระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์สำหรับเครื่องปรับอากาศพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ที่ทำงานร่วมกับระบบสะสมพลังงานเพื่อใช้ในที่อยู่อาศัย
2. เพื่อวิเคราะห์ความคุ้มทุนของระบบเปรียบเทียบกับระบบปรับอากาศแบบทั่วไป

3. ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. การวิจัยนี้จะทำการทดลอง และเก็บข้อมูลที่ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร
2. ระบบปรับอากาศโดยใช้อีเจ็คเตอร์และพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ที่มีระบบสะสมพลังงาน

4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์จากผลลัพธ์ของงานวิจัย

1. ลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในเครื่องปรับอากาศในบ้านและที่อยู่อาศัย
2. แก้ปัญหาภาวะโลกร้อนเนื่องจากการปลดปล่อยความร้อนสู่บรรยากาศจากการใช้พลังงาน
3. เป็นต้นแบบการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ในกิจกรรมที่สิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้ามาก
4. ได้เครื่องต้นแบบสำหรับใช้ทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ในการปรับอากาศโดยใช้พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ที่มีระบบสะสมพลังงานสำหรับที่อยู่อาศัย

นอกจากนี้ยังมีประโยชน์จากตัวผลงานวิจัย ซึ่งเป็นประโยชน์จากผลที่ได้รับในเชิงวิชาการ คือ

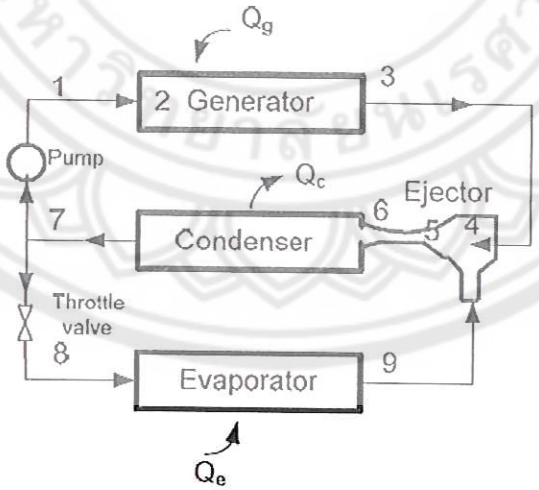
1. สามารถนำไปเผยแพร่ในวารสารเชิงวิชาการด้านพลังงานในประเทศและต่างประเทศได้
2. เครื่องต้นแบบสำหรับใช้ทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ในการปรับอากาศโดยใช้พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ที่มีระบบสะสมพลังงานอาจดำเนินการขอจด อนุสิทธิบัตรเพื่อเป็นประโยชน์ในการนำไปใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้ความร้อนและมีการปลดปล่อยความร้อนเหลือทิ้งจากโรงงาน

บทที่ 2
ทฤษฎีและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ถูกพัฒนาขึ้นครั้งแรกประมาณปี คศ. 1901 โดย Le Blance และ Charles Parsons สำหรับการปรับอากาศในอาคารขนาดใหญ่ [4] แต่เนื่องจากมีสมรรถนะในการทำความเย็นต่ำกว่าระบบอัดไอทำให้การพัฒนาหยุดชะงักลง แต่ในปัจจุบันกลับมาได้รับความสนใจอีกครั้งเพราะระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ สามารถใช้พลังงานคุณภาพต่ำ และราคาถูก เช่น Solar energy หรือ West heat มาเป็นตัวขับเคลื่อนระบบได้ [5]

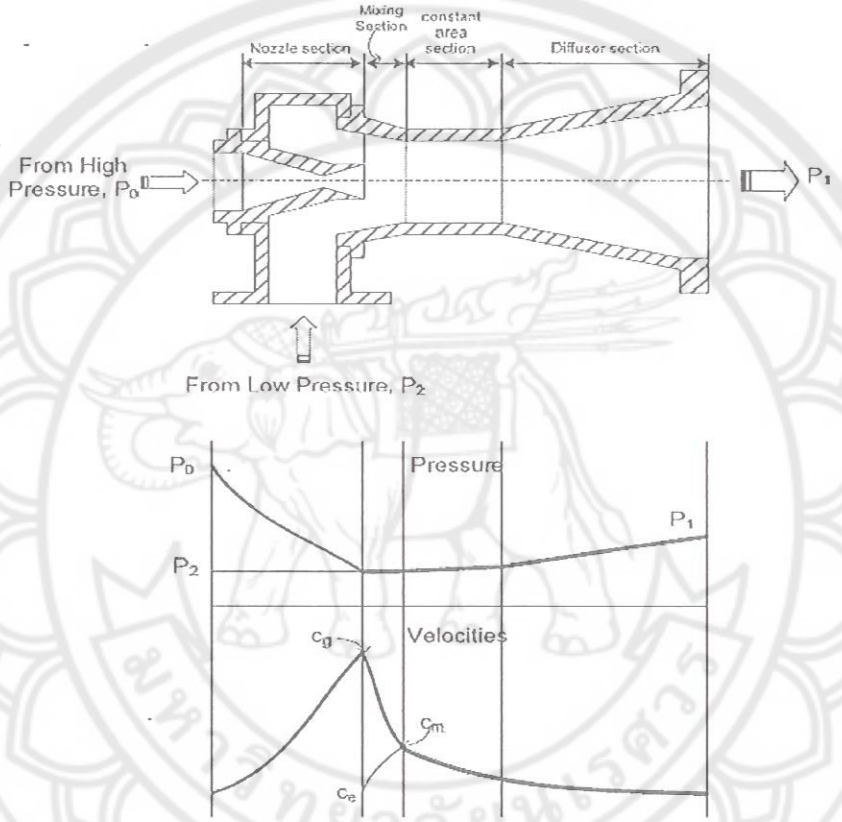
1. หลักการและทฤษฎีของระบบทำความเย็นด้วยอีเจ็คเตอร์

ระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ เป็นระบบทำความเย็นที่ไม่ใช้คอมเพรสเซอร์ในการอัดไอสารทำงาน โดยระบบจะทำการติดตั้ง อีเจ็คเตอร์ เครื่องกำเนิดไอ (generator) และปั๊มป์ เพื่อทำหน้าที่แทนคอมเพรสเซอร์ ดังแสดงในภาพที่ 2.1 โดยสารทำงานความดันสูงที่ได้รับความร้อนจากเครื่องกำเนิดไอจนเดือดกลายเป็นไออิ่มตัว หรือเรียกว่าก๊าซปฐมภูมิจะไหลและขยายตัวผ่านหัวฉีด (nozzle) ด้วยความเร็วสูงส่งผลให้บริเวณปลายทางออกของหัวฉีดมีความดันลดต่ำลงจนสามารถดูดสารทำงานจากอีวาปอเรเตอร์ (evaporator) ซึ่งเรียกว่า ก๊าซทุติยภูมิ เข้ามาผสมกับก๊าซปฐมภูมิที่ห้องผสม (Mixing chamber) และปลายทางออกของ อีเจ็คเตอร์ตามลำดับ จากนั้นจะกลั่นตัวเป็นสารทำงานเหลวภายในเครื่องควบแน่น (condenser) โดยที่ส่วนหนึ่งของสารทำงานเหลวจะถูกปั๊มป์กลับไปที่เครื่องกำเนิดไอ และสารทำงานเหลวบางส่วนจะถูกลดความดันผ่านวาล์วลดความดัน (expansion valve) และไหลเข้าสู่อีวาปอเรเตอร์ซึ่งเป็นการครบวัฏจักรการงานของระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์



ภาพที่ 2.1 แผนผังแสดงระบบทำความเย็นแบบเจ็คเตอร์ [5]

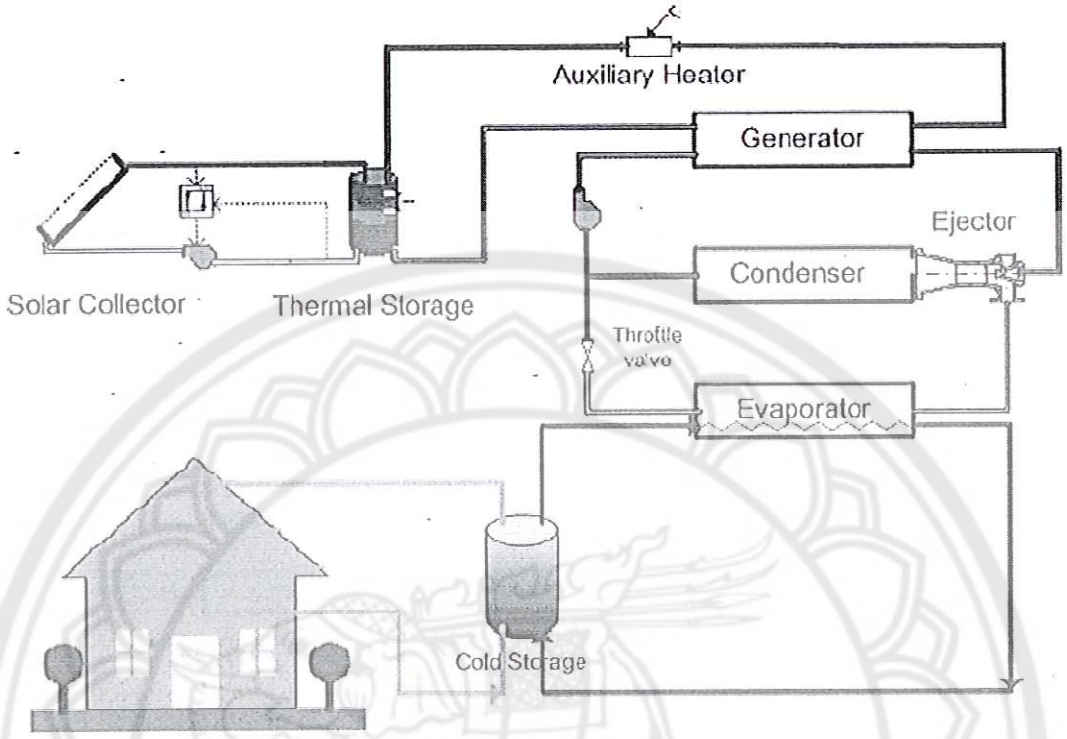
จากหลักการทำงานของระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์จะเห็นการไหลของสารทำงานที่เกิดขึ้นภายในระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์นี้ซึ่งสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2.2 เมื่อของไหลปฐมภูมิ (primary fluid) ไหลเข้าสู่หัวฉีด ผ่านคอคอด (throat) ความดันที่ปลายทางออกของหัวฉีดจะลดลง และจะดูดไอจากอีวาปอเรเตอร์เข้ามา โดยที่ของไหลทุติยภูมิ (secondary fluid) จะเพิ่มความเร็วขึ้นจนเข้าสู่ความเร็ว subsonic และจะเริ่มผสมกับของไหลปฐมภูมิที่ช่วงผสม (mixing section) ของไหลทั้งสองจะมีความดันคงที่และความเร็วจะเพิ่มขึ้นจนเข้าสู่ supersonic จนกระทั่งเกิด shock ทำให้ความเร็วของไอผสมลดลงอย่างรวดเร็วจาก supersonic เป็น subsonic ส่วนความดันจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนถึงปลายทางออกของอีเจ็คเตอร์



ภาพที่ 2.2 แสดงลักษณะของความดัน และความเร็วของสารทำงานที่เกิดขึ้นภายในอีเจ็คเตอร์ [5]

ระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ที่ใช้งานกันอยู่ในปัจจุบันเป็นระบบที่มีขนาดใหญ่ โดยจะใช้กับอาคารขนาดใหญ่ หรือโรงงานอุตสาหกรรมเท่านั้น ยังไม่มีการนำมาใช้งานจริงกับที่อยู่อาศัย จะมีก็เพียงชุดทดลองเท่านั้น ถึงแม้จะมีนักวิจัยหลายท่านได้พัฒนาให้มีขนาดเล็กลงแล้วก็ตาม ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์สามารถประยุกต์ใช้งานกับที่อยู่อาศัยหรือห้องพักขนาดเล็กได้ แต่เนื่องจากพฤติกรรมการใช้เครื่องปรับอากาศในที่อยู่อาศัยจะใช้ในช่วงเย็น หรือกลางคืนเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งในช่วงเวลาดังกล่าวระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ที่ใช้ความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ไม่สามารถทำงานได้ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำระบบสะสมพลังงานมาใช้ร่วมกับระบบทำความเย็น

แบบอีเจ็คเตอร์สำหรับเครื่องปรับอากาศพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ ที่มีความเหมาะสมสำหรับที่พักอาศัยในประเทศไทย



ภาพที่ 2.3 แผนผังแสดงระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์สำหรับเครื่องปรับอากาศพลังงานความร้อนแสงอาทิตย์ที่ทำงานร่วมกับระบบสะสมพลังงาน

2. รายละเอียดการทำงานของระบบทำความเย็นด้วยอีเจ็คเตอร์

จากภาพที่ 2.3 จะเห็นว่าระบบทำความเย็นประกอบด้วยวงจรของระบบพลังงานแสงอาทิตย์และวงจรของระบบอีเจ็คเตอร์ วงจรของระบบพลังงานแสงอาทิตย์ประกอบด้วย แผงรับรังสี ถังสะสมพลังงานความร้อน และระบบปั๊มหมุนเวียน ส่วนวงจรของระบบอีเจ็คเตอร์ประกอบด้วยระบบให้กำลัง และระบบทำความเย็น ในระบบให้กำลังจะมีสารทำงานไหลผ่านเครื่องกำเนิดไอ อีเจ็คเตอร์ เครื่องควบแน่นและปั๊มหมุนเวียนกลับเข้าสู่เครื่องกำเนิดไอ ส่วนระบบทำความเย็นสารทำงานจะไหลผ่านอีเจ็คเตอร์ เครื่องควบแน่น วาวล์ขยายพื้นที่ และอีวาปอเรเตอร์โดยไหลเวียนกลับสู่ส่วนดูดในอีเจ็คเตอร์ ทำความเย็นที่ประกอบด้วยอีเจ็คเตอร์ แผงรับรังสีเป็นแหล่งพลังงานความร้อนหลักของระบบโดยมีระบบสะสมพลังงานความร้อนเพื่อใช้ในเวลาที่แสงแดดไม่เพียงพอต่อการทำงานของระบบทำความเย็น การใช้พลังงานถือเป็นภาระ (Load) ของระบบในส่วนของอีวาปอเรเตอร์ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้เกิดความเย็นในอาคาร

0.467 ซึ่งจะต้องออกแบบที่มีอุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอ 117.7 °C ถึง 132.5 °C อุณหภูมิคอนเดนเซอร์ 42 °C ถึง 50 °C และอุณหภูมิที่เครื่องระเหย -10 °C ถึง 5 °C

Huang BJ. et al 1998 [10] ได้พัฒนาระบบทำความเย็นพลังงานแสงอาทิตย์แบบอีเจ็คเตอร์สมรรถนะสูงโดยใช้ R141b เป็นสารทำงาน จากการทดลองพบว่ามีค่า COP ที่ 0.5 สำหรับระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ชนิด single stage ที่อุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอที่ 90 °C อุณหภูมิเครื่องควบแน่นที่ 28 °C และอุณหภูมิเครื่องระเหยที่ 8 °C สำหรับระบบทำความเย็นพลังงานแสงอาทิตย์จะมีค่า COP รวมประมาณ 0.22 ที่อุณหภมิเครื่องกำเนินไอที่ 95 °C และอุณหภูมิเครื่องระเหยที่ 8 °C และค่ารังสีอาทิตย์ที่ 700 W/m^2

Huang BJ. et al 2007 [11] ได้ทำการศึกษาสมรรถนะของระบบทำความเย็นพลังงานแสงอาทิตย์แบบอีเจ็คเตอร์โดยการจำลองระบบโดยใช้แผงน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่แตกต่างกัน 3 ชนิด คือ แบบแผ่นเรียบทั่วไป แบบแผ่นเรียบประสิทธิภาพสูง และแบบหลอดแก้วสูญญากาศ ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นถึงการเลือกอุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอ และค่า COP ที่เหมาะสมที่สามารถทำได้ ระบบทำความเย็นพลังงานแสงอาทิตย์แบบอีเจ็คเตอร์ที่ใช้แผงน้ำร้อน single glazed ที่มีการเคลือบสารที่สามารถเลือกแสงที่ผิว และเพิ่มชั้นอากาศเป็นฉนวน จะสามารถประหยัดที่สุดเมื่อทำงานที่อุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอที่เหมาะสม ในกรณีนี้จะมีค่าใช้จ่ายประมาณ 1 USD ต่อวัตน์ของปริมาณความเย็นของเครื่องปรับอากาศ

Boumaraf L. and Lallemand A. 2009 [12] ได้อธิบายถึงโปรแกรมจำลองระบบ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการประเมินประสิทธิภาพการทำงานและคุณลักษณะของวัฐจักรการทำงานของระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ที่มี R142b และ R600a เป็นสารทำงาน โดยใช้อุณหภูมิของสามแหล่งความร้อน และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในท้องถิ่นสำหรับ boiler, คอนเดนเซอร์ และอีวาปอเรเตอร์ นอกจากนี้โปรแกรมจำลองระบบยังรวมถึงความสัมพันธ์ของ entrainment ratio ของอีเจ็คเตอร์ ที่กำหนดขึ้นในสภาพการใช้งานที่แตกต่างกันที่มีจุดที่สำคัญจากสมการการอนุรักษ์ ของแบบจำลองแบบ 1 - D ที่มีอยู่ในงานวิจัยที่ผ่านมา ซึ่งองค์ประกอบทุกส่วนของระบบมีขนาดสำหรับพลังงานทำความเย็นจาก 10 กิโลวัตต์, อุณหภูมิของแหล่งความร้อนจะมีค่าเท่ากับ 120 °C และ 130 °C ในขณะที่ระดับพื้นฐาน และแหล่งความเย็นจะคงที่ที่อุณหภูมิ 35 °C และ 10 °C ตามลำดับ จากนั้นจะตรวจสอบประสิทธิภาพของระบบในสภาวะที่ไม่มีมิติโดยใช้โปรแกรมจำลองสภาวะการทำงานของระบบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการวิเคราะห์ผลที่แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิของแหล่งความเย็นจะถูกกำหนดให้คงที่ และที่อุณหภูมิระดับกลางที่สอดคล้องกับสภาวะวิกฤต ($P_c <= P_c^*$) ซึ่งค่า COP ของระบบจะลดลงเมื่ออุณหภูมิของแหล่งความร้อนสูงกว่าที่กำหนด ดังนั้นจะต้องออกแบบให้องค์ประกอบต่างๆของระบบมีอุณหภูมิสูงสุดที่เป็นไปได้เพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น ในกรณีนี้การทำงานของระบบมีอุณหภูมิต่ำกว่าแหล่งความร้อน และยังเป็นที่สังเกตว่า R142b จะทำให้ประสิทธิภาพของระบบดีกว่าในทุกกรณี เนื่องจากว่า R142b เป็นของเหลวที่หนักกว่า R600a นั่นเอง

Alexis GK. and Karayiannis EK. 2005 [13] ได้อธิบายถึงประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ที่ขับเคลื่อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ และใช้ R134a เป็นสารทำงาน โดยระบบทำงานร่วมกับแผงน้ำ

ร้อนอุณหภูมิปานกลางในกรุงเอเธนส์ ซึ่งระบบทำความเย็นพลังงานแสงอาทิตย์แบบอีเจ็คเตอร์ที่มี R134a เป็นสารทำงานนี้จะวิเคราะห์ผลในวันที่ 21 ของโดยทำการทดลอง 5 เดือน คือระหว่างเดือนพฤษภาคม ถึงเดือนกันยายน ซึ่งระบบจะสามารถทำงานและให้ค่า COP อยู่ระหว่าง 0.011 ถึง 0.101 และมีประสิทธิภาพของแผงน้ำร้อนจาก 0.319 ถึง 0.507 สำหรับอุณหภูมิที่เครื่องกำเนิดไอ ระหว่าง 82 ℃ ถึง 92 ℃ ค่าอุณหภูมิที่คอนเดนเซอร์ระหว่าง 32 ℃ ถึง 40 ℃ และมีค่าอุณหภูมิที่เครื่องระเหยระหว่าง -10 ℃ ถึง 0 ℃ ซึ่งจะให้ค่า COP ที่สูงที่สุดในเดือนกรกฎาคม โดยจะมีอุณหภูมิที่เครื่องกำเนิดไอเท่ากับ 92 ℃ ที่คอนเดนเซอร์เท่ากับ 32 ℃ และที่อีวาปอเรเตอร์เท่ากับ 0 ℃ และจะมีค่า COP ต่ำที่สุดในเดือนพฤษภาคม โดยจะมีอุณหภูมิที่เครื่องกำเนิดไอเท่ากับ 82 ℃ ที่คอนเดนเซอร์เท่ากับ 40 ℃ และที่อีวาปอเรเตอร์เท่ากับ -10 ℃ การศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นว่า COP ของระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์เป็นฟังก์ชั่น exponential ของอุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอ อุณหภูมิคอนเดนเซอร์ และอุณหภูมิอีวาปอเรเตอร์

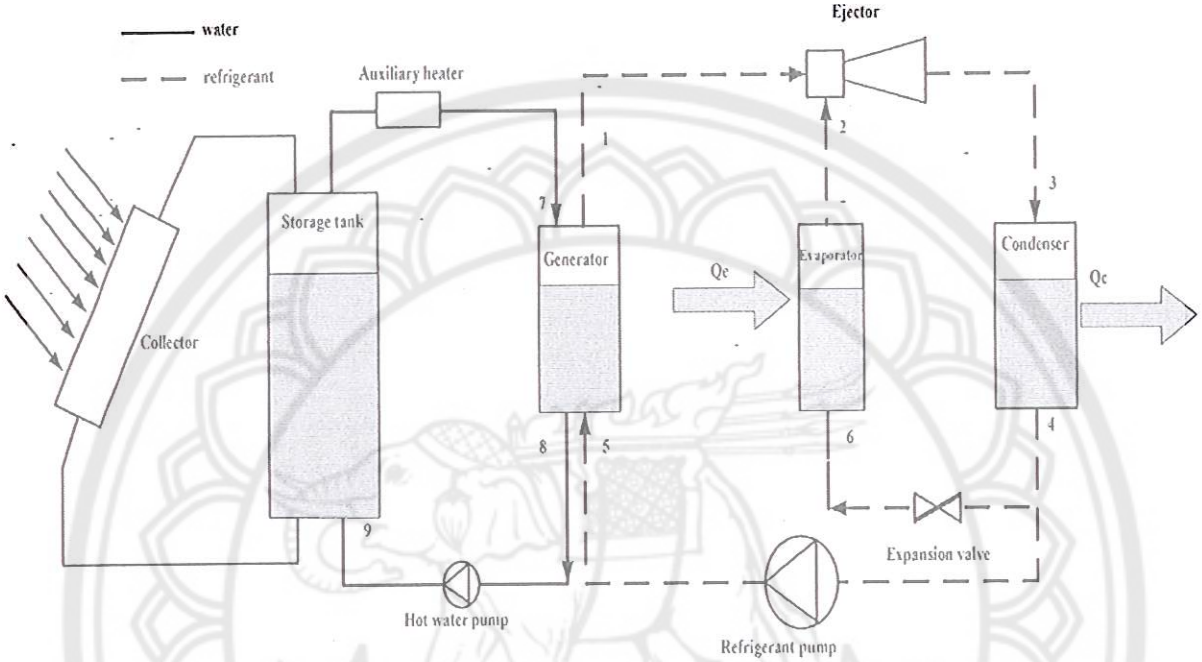
Rafet Y. 2008 [14] ได้ทำการศึกษาอีเจ็คเตอร์แบบใหม่ ที่มีการออกแบบให้ขึ้นอยู่กับโมเดลแบบ constant area และผลิตขึ้นเพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ในช่วงการดำเนินงานที่กว้างขึ้น โดยทำการติดตั้งอีเจ็คเตอร์ที่มีหัวฉีดที่สามารถเคลื่อนที่ได้เข้าไปในระบบที่สร้างขึ้นก่อนแล้วสำหรับสารทำความเย็นที่มีความดันต่ำ ระบบที่ความเย็นที่ได้รับการปรับปรุงจะทดสอบโดยใช้น้ำร้อนเป็นตัวขับเคลื่อนระบบ และใช้ R123 เป็นสารทำงาน ผลกระทบของอุณหภูมิในการทำความเย็นและ COP ของระบบจะถูกตรวจสอบจากการทดลองเมื่อตำแหน่งของหัวฉีดอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมค่าอัตราส่วนพื้นที่ของอีเจ็คเตอร์จะเท่ากับ 9.97 ส่งผลให้ค่า COP ที่ได้รับเท่ากับ 0.39 ที่อุณหภูมิของไอที่เจนเนอร์เรเตอร์ เท่ากับ 98 ℃ อุณหภูมิที่อีวาปอเรเตอร์เท่ากับ 10 ℃ และความดันคอนเดนเซอร์วิกฤต เท่ากับ 129 kPa.

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าได้มีการพัฒนาระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบให้สูงขึ้นเพื่อให้สามารถแข่งขันกับระบบทำความเย็นที่ใช้ในปัจจุบันอย่างต่อเนื่อง แต่ส่วนใหญ่ยังเป็นเพียงการทดลองเท่านั้น และที่สำคัญยังไม่การนำระบบสะสมพลังงานซึ่งจะช่วยลดข้อจำกัดของระบบทำความเย็นพลังงานแสงอาทิตย์แบบอีเจ็คเตอร์ที่จะใช้กับเครื่องปรับอากาศในที่อยู่อาศัยที่จำเป็นจะต้องทำงานในช่วงกลางคืนที่ไม่มีแสงอาทิตย์ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งที่จะพัฒนาให้ระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ที่ทำงานร่วมกับระบบสะสมพลังงานให้สามารถใช้งานจริงในที่อยู่อาศัยได้

บทที่ 3

การทดลองและผลการทดลอง

การออกแบบระบบทำความเย็นแบบปรับอากาศโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ด้วยอีเจ็คเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ทำการออกแบบโดยมีรายละเอียดในการออกแบบและการทดสอบการทำงานของระบบทั้งพลังงานแสงอาทิตย์และระบบทำความเย็นด้วยอีเจ็คเตอร์ดังนี้



ภาพที่ 3.1 แผนผังการทำงานของระบบทำความเย็นพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยอีเจ็คเตอร์

จากรูปที่ 3.1 จะเห็นว่าระบบพลังงานแสงอาทิตย์ประกอบด้วยแผงรับแสงแดด ถังน้ำร้อนสะสมพลังงานและฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพื่อให้ความร้อนในกรณีที่ไม่มีแสงแดดและไม่สามารถสะสมน้ำร้อนเพื่อใช้ในระบบได้ การทำงานของระบบพลังงานแสงอาทิตย์เกิดจากพลังงานความร้อนที่ได้จากแผงรับแสงอาทิตย์ส่งพลังงานให้กับน้ำร้อนที่บรรจุในถังซึ่งต้องการหาค่าขนาดและพลังงานที่เหมาะสม ส่วนระบบทำความเย็นใช้อีเจคเตอร์ในการผสมสารทำงานและปรับค่าความดันให้เหมาะสมซึ่งต้องทำการออกแบบหาขนาดและการทำงาน

1. การออกแบบระบบและการทดสอบการทำงานของระบบพลังงานแสงอาทิตย์

การออกแบบระบบพลังงานแสงอาทิตย์จากแผงรับแสงอาทิตย์ซึ่งจะให้ความร้อนแก่สารทำงานในที่นี้คือ R141b หรือ CH_3CCl_2F ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุล 117 จุดเดือดที่ความดันปกติ 1 บรรยากาศมีค่า 32°C และค่าความร้อนแฝงมีค่า 227 kJ/kg ทำให้ได้อุณหภูมิของสารทำงานที่ไหลผ่านแผงรับแสงแดดชนิดแผ่นเรียบที่ใช้กระจกป้องกันความรอนสูญเสียสองชั้น (double-glazed) ตามสมการ [10]

$$\eta = 0.8 - 3.5\frac{T_i - T_a}{I} \qquad (3.1)$$

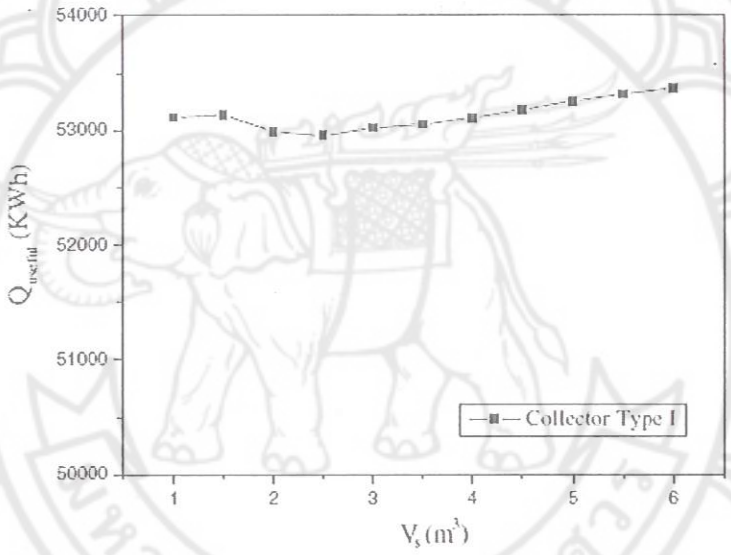
เมื่อ η คือ ประสิทธิภาพของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์

T_i คือ อุณหภูมิของสารทำงานไหลเข้าสู่ระบบทำความเย็น

T_o คือ อุณหภูมิของอากาศแวดล้อม (Ambient air)

I คือ ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์

ค่าพลังงานความร้อนที่ระบบทำความเย็นต้องการสามารถคำนวณได้จากค่าพลังงานความร้อนที่ต้องให้กับเครื่องกำเนิดไอ โดยผ่านการเปลี่ยนรูปพลังงานจากแผงรับแสงอาทิตย์ตามค่าประสิทธิภาพในสมการ 3.1 ค่าพลังงานที่วัดได้จากแสงอาทิตย์ในวันที่ทำการทดลองเฉลี่ยประมาณ 700 W/m^2 ค่าประสิทธิภาพของแผงรับแสงอาทิตย์มีค่าประมาณ 0.5 และมีพื้นที่ของแผง 68 m^2 สำหรับการออกแบบถังสะสมพลังงานความร้อนโดยใช้น้ำเป็นตัวกลางสะสมพลังงานความร้อน ขนาดของถังสะสมพลังงานความร้อนที่เหมาะสมสามารถคำนวณได้ตามผลการทดลอง



ภาพที่ 3.2 การคำนวณหาขนาดของถังสะสมพลังงานความร้อนโดยใช้ค่าความร้อน

การออกแบบระบบทำความเย็นใช้แนวความคิดของ Huang ซึ่งยึดหลักการทำงานแบบสถานะคงที่ (Steady state) โดยให้การลดลงของค่าความดันในแต่ละส่วนของอีเจ็คเตอร์มีค่าน้อยจนตัดทิ้งได้ และถือว่าไม่มีความร้อนสูญเสียจากระบบ สารทำงานที่เลือกใช้ในระบบคือ R141b จะให้ไออิ่มตัวที่อุณหภูมิดำเนินการ ค่าอุณหภูมิของสารก่อนและหลังการหมุนเวียนผ่านปั๊มมีค่าแตกต่างกันน้อยมากจนค่าเอนทาลปี $h_4 = h_5$ โดยถือว่างานที่ให้กับปั๊มมีค่าน้อย ตามรูปแสดงการเปลี่ยนแปลงความดันและเอนทาลปีของกระบวนการทำความเย็นโดยใช้อีเจ็คเตอร์และที่ตำแหน่งขยายของอีเจ็ตเคอร์ซึ่งต่อเชื่อมกับท่อขยายพื้นที่หน้าตัดจะมีค่าเอนทาลปีเท่ากัน ($h_4 = h_6$) ในการทดลองเบื้องต้นพบว่าค่าอุณหภูมิ $T_g = 95^oC$, $T_c = 32^oC$, $T_e = 8^oC$, อัตราการไหลของสารทำงาน 0.1054 kg/s และค่าพลังงานความร้อนที่ลดลงจากการทำงานของอีวาปอเรเตอร์มีค่า 10.5 kW และค่าสัมประสิทธิ์ของการทำงานสามารถคำนวณได้ตามสมการ

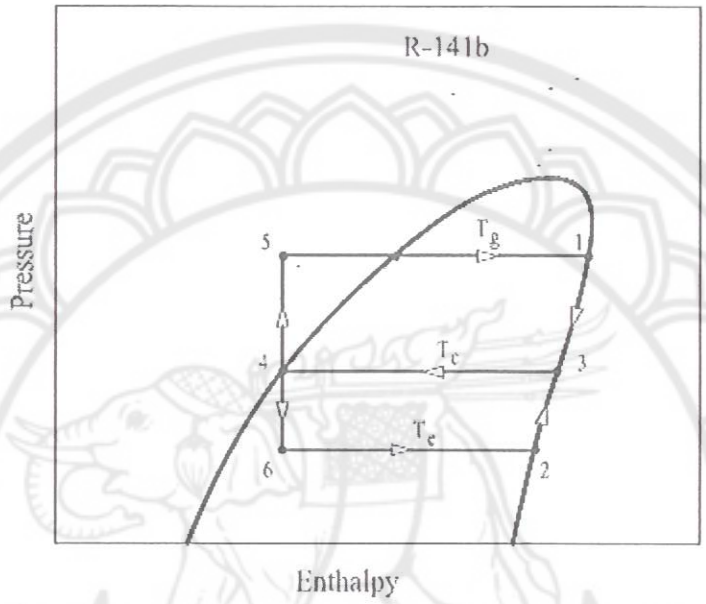
$$COP_o = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{Q}_g} = \eta(COP_e) \qquad (3.2)$$

เมื่อ COP_o คือ ค่าสัมประสิทธิ์การทำงานรวมของระบบ

COP_e คือ ค่าสัมประสิทธิ์การทำงานของอีเจ็คเตอร์

Q_e คือ ค่าพลังงานความร้อนที่ลดลงด้วยการทำงานของอีวาปอเรเตอร์

Q_g คือ ค่าพลังงานความร้อนที่ให้กับสารทำงานที่เครื่องกำเนิดไอ

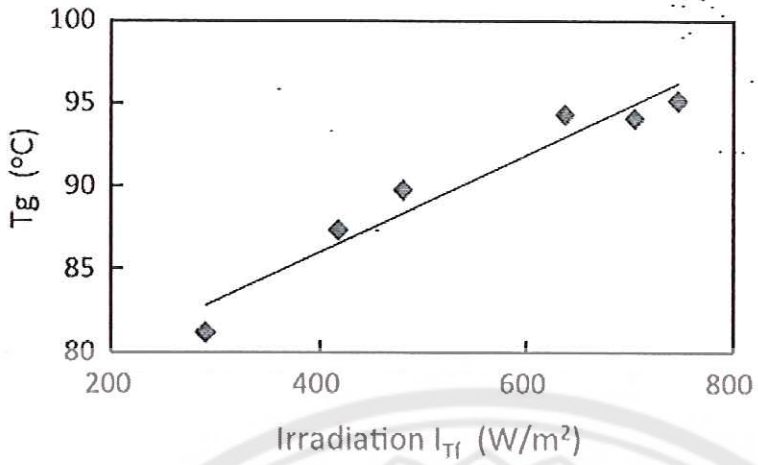


ภาพที่ 3.3 แผนภูมิค่า P-h ของระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์

จากภาพที่ 3.3 แผนภูมิแสดงค่า P-h ของระบบแสดงค่าความชัน (Slope) ของการใช้สารทำงาน R141b จะเห็นว่าที่บริเวณสารทำงานเปลี่ยนสถานะเป็นไอ (จุดที่ 1, 2, 3) ผลการออกแบบอีเจ็คเตอร์ในส่วนที่เป็นขนาดต่างๆของอีเจ็คเตอร์ คือ throat diameter 2.64 mm, exit diameter 4.50 mm, ในส่วนที่เป็นทรงกระบอกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 8.10 mm, มุม diffuser 5°และความยาวพื้นที่หน้าตัดมีค่า 13 mm

2 การทำงานของระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์

2.1 ค่าอุณหภูมิของสารทำงานที่เครื่องกำเนิดไอเมื่อแผงรับแสงอาทิตย์ได้รับพลังงานจากแสงอาทิตย์ (B.J. Huang, 2014) จากการออกแบบแผงรับแสงพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อใช้งานกับระบบทำความเย็นที่ค่าความเข้มแสงอาทิตย์ต่างๆ จะทำให้สารทำงานมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นตามกราฟดังภาพที่ 3.4

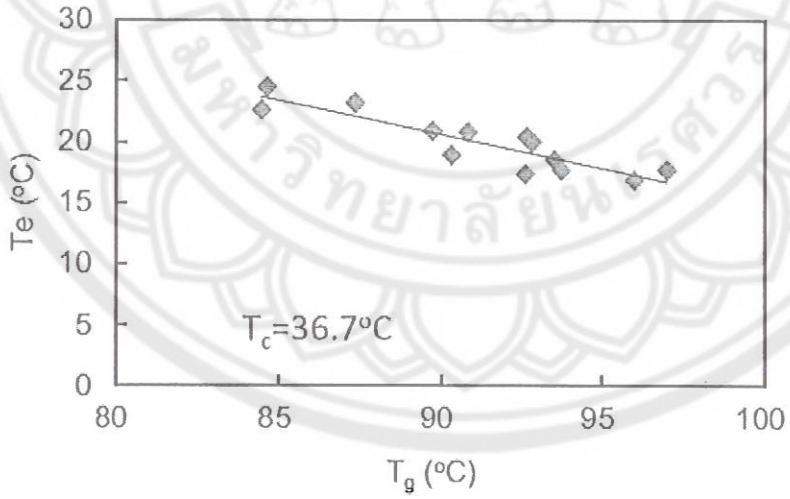


ภาพที่ 3.4 ค่าความเข้มของแสงแดดเทียบกับอุณหภูมิของสารทำงานที่ไหลผ่านเครื่องกำเนิดไอ

จากรูปที่ 3.3 จะเห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มของแสงแดดและอุณหภูมิของสารทำงานที่เครื่องกำเนิดไอมีลักษณะเป็นเส้นตรง เมื่อทำการคำนวณจะได้ตามสมการ

$$T_g = 0.0292I + 74.327 \quad (3.3)$$

2.2 ค่าอุณหภูมิของสารทำงานในอีวาปอเรเตอร์เทียบกับอุณหภูมิสารทำงานในเครื่องกำเนิดไอ ในทำนองเดียวกันเมื่อสารทำงานเครื่องกำเนิดไอเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะมีผลต่ออุณหภูมิสารทำงานในอีวาปอเรเตอร์ โดยความสัมพันธ์เป็นตามภาพที่ 3.5



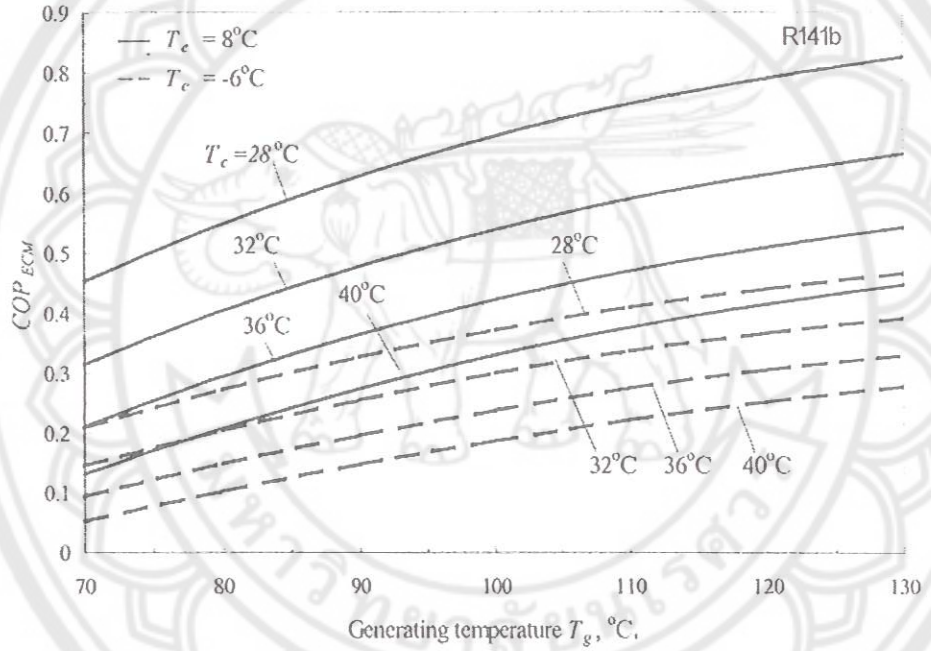
ภาพที่ 3.5 ค่าอุณหภูมิของสารทำงานในอีวาปอเรเตอร์เทียบกับอุณหภูมิสารทำงานในเครื่องกำเนิดไอ

อุณหภูมิของสารทำงานในอีวาปอเรเตอร์มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิของสารทำงานที่เครื่องกำเนิดไอเพิ่มขึ้นตามสมการจากการฟิตกราฟในภาพที่ 3.5

$$T_e = -0.5549T_g + 33.83T_c \quad (3.4)$$

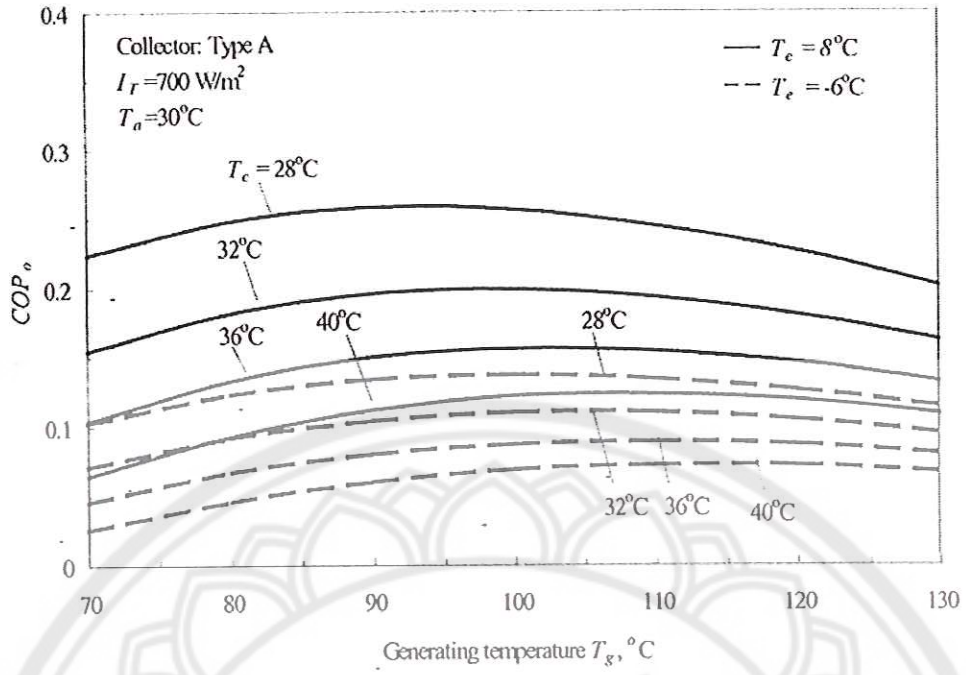
ตามรูปที่ 3.3 เป็นการทำงานของระบบทำความเย็นที่อุณหภูมิสารทำงานของเครื่องควบแน่นมีค่า 36.7°C ซึ่งการคำนวณค่าอุณหภูมิให้ผลสอดคล้องกับการวัดค่าจากการทำงานจริงของระบบ ค่าอุณหภูมิของสารทำงานที่อีวาปอเรเตอร์จะเป็นผลที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การทำงานของระบบ การหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของสารทำงานทั้งสองจะมีความสัมพันธ์กับค่าอุณหภูมิของสารทำงานที่เครื่องควบแน่น ดังตัวอย่างในรูปที่ 3.3 เป็นความสัมพันธ์ของอุณหภูมิสารทำงานที่มีค่า T_c = 36.7°C

2.3 ค่าสัมประสิทธิ์การทำงานของสารทำงาน R141b และอุณหภูมิของสารที่เครื่องกำเนิดไอ จากการคำนวณของ Huang และคณะ (B.J Huang et al, 2001) จะพบว่าที่อุณหภูมิของสารทำงานที่อีวาปอเรเตอร์ 8°C ค่าอุณหภูมิของสารที่เครื่องควบแน่นจะทำให้เกิดค่าสัมประสิทธิ์การทำงานที่แตกต่างกันดังภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 ค่าสัมประสิทธิ์การทำงานของอีเจ็คเตอร์เมื่ออุณหภูมิของสารทำงานที่เครื่องควบแน่นเปลี่ยนแปลง

2.4 ค่าสัมประสิทธิ์การทำงานรวมของระบบเมื่ออุณหภูมิของสารทำงานที่เครื่องกำเนิดไอเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยเลือกค่าอุณหภูมิของสารทำงานที่อีวาปอเรเตอร์เป็น 8°C และเมื่อเครื่องกำเนิดไอได้รับพลังงานจากแสงอาทิตย์ประมาณ 700W/m^2 ทำให้สามารถคำนวณอุณหภูมิของสารทำงานและค่าสัมประสิทธิ์การทำงาน มีความสัมพันธ์กันตามภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.7 ผลจากการคำนวณค่า COP รวมของระบบเทียบกับค่า T_g

2.5 ผลการคำนวณจากข้อมูลการทำงานของระบบทำความเย็น จากการคำนวณเพื่อหาค่าความเหมาะสมของค่า COP พบว่าเมื่อค่าอุณหภูมิ T_c เพิ่มขึ้นจะทำให้อุณหภูมิ T_e ลดลง ในกรณีที่ค่าประสิทธิภาพของแผงรับแสงอาทิตย์มีค่าสูงสุดจะพบว่าค่า T_g จะมีค่าต่ำกว่าที่วัดได้จากการทดลองประมาณ 10°C (หรือประมาณ 85°C) ซึ่งจะต้องเพิ่มพื้นที่ของแผงรับแสงอาทิตย์เป็น 75 m^2 และพลังงานความร้อนที่ลดลงที่อีวาปอเรเตอร์มีค่า 10 kW โดยอุณหภูมิของสารทำงานที่อีวาปอเรเตอรและที่เครื่องควบแน่นยังมีค่าเท่าเดิม คือ 8°C และ 32°C ตามลำดับ การเพิ่มค่าประสิทธิภาพของแผงรับแสงอาทิตย์ตามการคำนวณนี้จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ของการทำงานของระบบทำความเย็นที่ค่าลดลงเหลือ 0.19 แต่จะเพิ่มสัมประสิทธิ์การทำงานของอีเจ็คเตอร์ให้กลายเป็น 0.44 เช่นเดียวกับค่าระสิทธิภาพของแผงรับรังสีมีค่า 0.43

3. การเก็บข้อมูลการลงทุนของระบบทำความเย็นพลังงานแสงอาทิตย์ด้านเศรษฐศาสตร์

3.1 การเก็บข้อมูลระบบพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ จากข้อมูลที่ได้ในการคำนวณที่ระบบทำความเย็นได้มีความเหมาะสมพบว่าระบบที่เหมาะสมจะต้องมีมูลค่าการลงทุนของระบบแผงรับแสงอาทิตย์คิดเฉลี่ยตารางเมตรละ 4,760 บาท (136$) รวมเป็นเงิน 357,000 บาท (10200$) คิดเป็นราคา **35.7 บาทต่อวัตต์ความเย็น และมีระยะเวลาคุ้มทุนประมาณ 8 ปี ขึ้นอยู่กับการใช้งานเครื่องปรับอากาศและค่าความเข้มของพลังงานแสงอาทิตย์**

1 164929
- 2 มิ.ย. 2558
สำนักหอสมุด

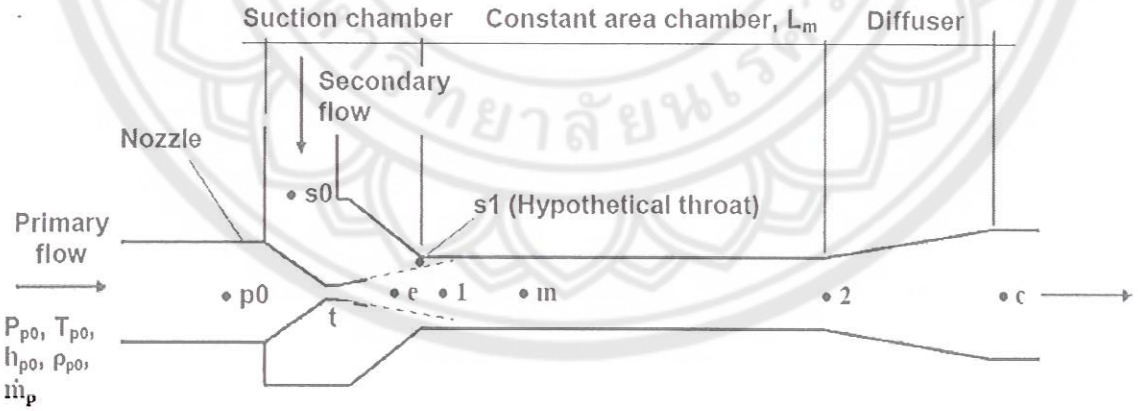
บทที่ 4

การวิเคราะห์ข้อมูล

จากผลการทดลองการทำงานของระบบทำความเย็นโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานและใช้ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนที่มีอีเจ็คเตอร์ซึ่งได้ทำการทดลองเพื่อออกแบบระบบที่มีความเหมาะสมและเก็บข้อมูลทางด้านเศรษฐศาสตร์ การวิจัยนี้มีส่วนสำคัญในการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อตรวจสอบผลการออกแบบและการทำงานของระบบทำความเย็นแสงอาทิตย์โดยใช้อีเจ็คเตอร์เป็นอุปกรณ์สำคัญ รวมทั้งการวิเคราะห์เชิงเศณษฐศาสตร์เพื่อแสดงความเหมาะสมในการลงทุนติดตั้งระบบ

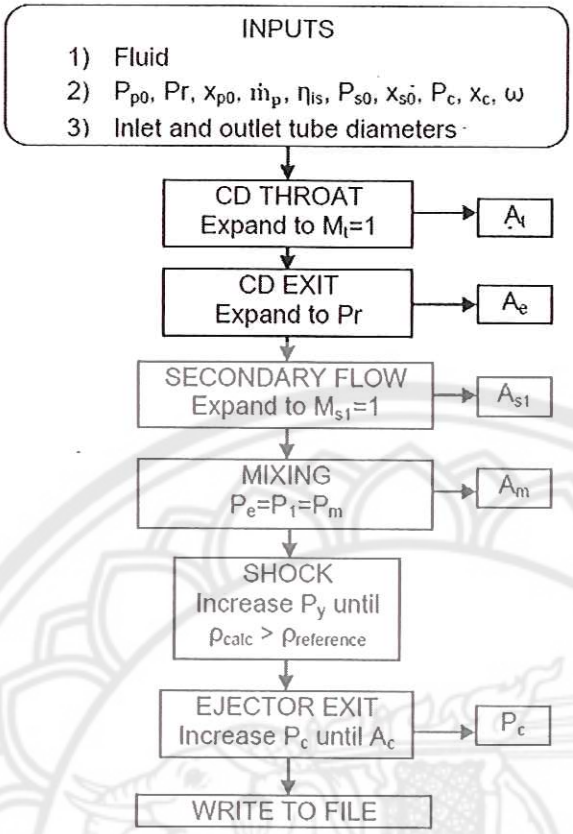
1. ผลการวิเคราะห์การออกแบบอีเจ็คเตอร์สำหรับระบบทำความเย็นแสงอาทิตย์

การออกแบบอีเจ็คเตอร์เพื่อใช้ในการผสมสารในระบบทำความเย็นโดยใช้หลักการไหลของของไหลที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความดันตามทฤษฎีการอัดแก๊ส แก๊สที่ไหลผ่านส่วนขยายของท่อแบบไอเซนโทรปิก (Isentropic) จะเกิดความเร่งจนทำให้ความเร็วเข้าสู่ค่าซูเปอร์โซนิกทำให้เกิดการลดความดันในส่วนดูดของอีเจ็คเตอร์ สารทำงานที่เป็นของไหลทุติยภูมิไหลเข้าสู่ส่วนดูดและเกิดการผสมกับสารทำงานที่เป็นของไหลปฐมภูมิในบริเวณที่มีค่าความดันคงที่ การไหลของก๊าซภายใต้เงื่อนไขที่มีความเร็ววิกฤตจนเกิดปรากฏการณ์ shock wave ทำให้ก๊าซที่ผสมกลายเป็นกระแสก๊าซไหลออกจาก diffuser การออกแบบอีเจ็คเตอร์พิจารณาจากค่าพารามิเตอร์ต่างๆเช่น ค่าอัตราส่วนการไหลเข้า (Entrainment ratio) หมายถึงอัตราส่วนของอัตราการไหลของก๊าซทุติยภูมิกับก๊าซปฐมภูมิ ค่าอัตราส่วนความดัน (Compression ratio) หมายถึงอัตราส่วนความดันของก๊าซที่ไหลออกต่อค่าความดันของก๊าซที่ไหลเข้า ค่าอัตราส่วนความดันนี้เป็นสัดส่วนตรงกับค่าอัตราส่วนการไหลเข้า ดังภาพที่ 4.1



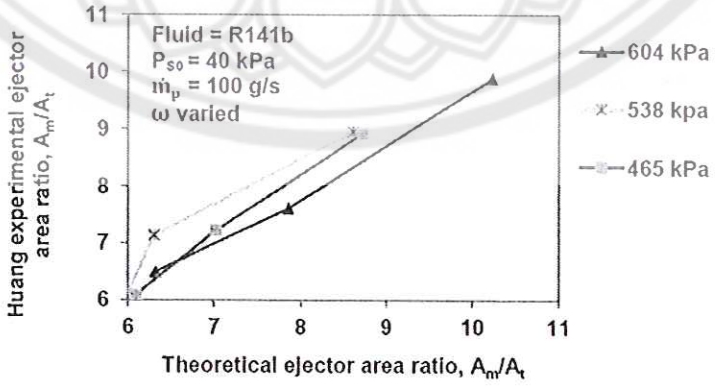
ภาพที่ 4.1 แผนผังการทำงานของอีเจ็คเตอร์ขณะมีก๊าซปฐมภิมและทุติยภูมิไหลผ่าน

การออกแบบอีเจ็คเตอร์ได้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อคำนวณค่าต่างๆ โดยการสร้างรูปแบบการคำนวณจากการทำงานของอีเจ็คเตอร์ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.1 แผนผังกรคำนวณมีลักษณะดังภาพที่ 4.2



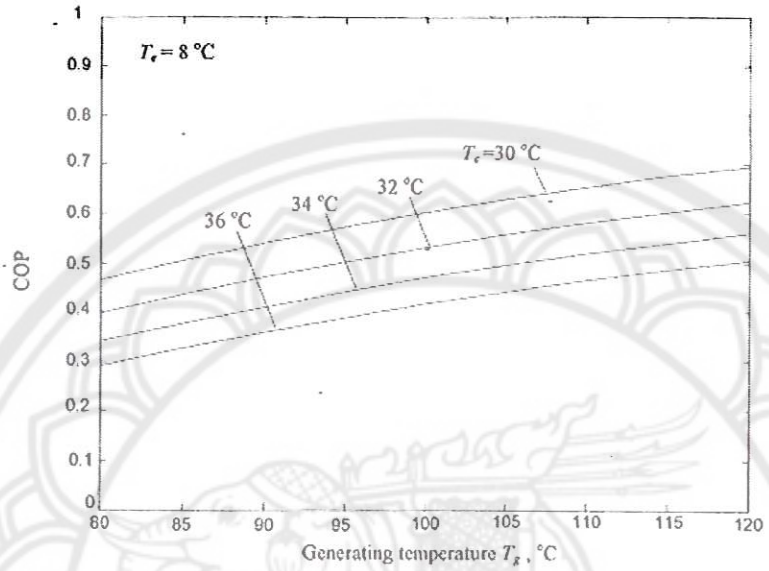
ภาพที่ 4.2 แผนผังแสดงการคำนวณจากการทำงานเพื่อออกแบบอีเจ็คเตอร์

จากการคำนวณโดยใช้สารทำงานเป็น R141b เพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองซึ่งได้เปลี่ยนค่าความดันที่เครื่องกำเนิดไอเป็น 400 kPa, 465 kPa และ 537 kPa ซึ่งเป็นไออิ่มตัว (saturated vapor) ในขณะที่ค่าความดันของก๊าซทุติยภูมิกำหนดให้มีค่าเป็น 40 kPa จากการคำนวณตามค่าความดันที่กล่าวมานี้ ทำให้คำนวณค่าอัตราส่วนการไหลเข้าเพื่อใช้หาค่าที่เหมาะสมของอัตราส่วนพื้นที่ของท่อที่ก๊าซไหลผ่านหลังจากเกิดการผสมกันแล้วต่อพื้นที่ของคอคอด (A_m/A_t) ค่าความสัมพันธ์ที่คำนวณออกมาได้มีความสอดคล้องกับผลการทดลอง โดยมีค่าความผิดพลาดประมาณ 6% ผลจากการคำนวณมีลักษณะดังภาพที่ 4.3



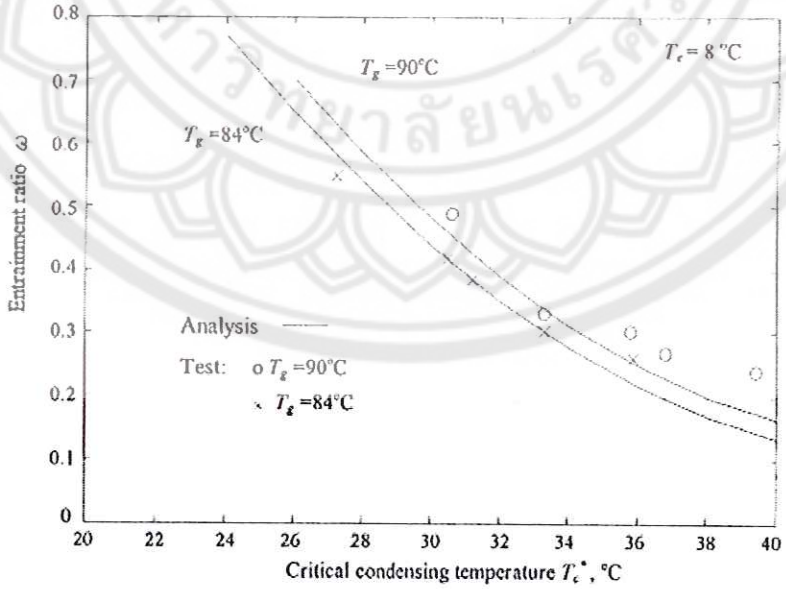
ภาพที่ 4.3 ค่าอัตราส่วนพื้นที่ของอีเจ็คเตอร์จากการคำนวณเพื่อเปรียบเทียบผลการทดลอง

ในการคำนวณเพื่อตรวจสอบการทำงานของระบบเครื่องปรับอากาศในบ้าน โดยใช้สารทำงาน R141b แบบ single stage สามารถให้ค่าสัมประสิทธิ์การทำงานที่สูงสุดถึง 0.6 ที่อุณหภูมิของสารทำงาน 100°C ผลการคำนวณตามแบบ Huang (Hiang et al, 1998) ตามเงื่อนไขของการทดลองเครื่องปรบอากาศที่ T_e = 8°C และ T_c = 30°C สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 4.4



ภาพที่ 4.4 ผลการคำนวณหาค่า COP ของระบบทำความเย็นแบบ soingle stage

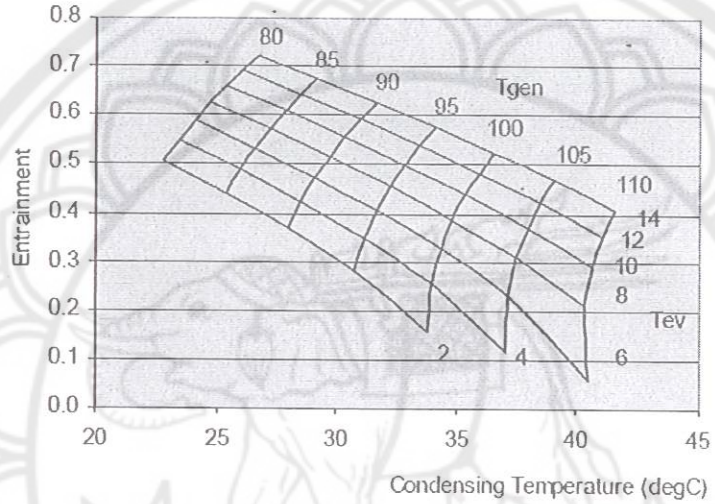
ผลการวิเคราะห์การทำงานของอีเจ็คเตอร์และผลการคำนวณในส่วนของค่าอัตราส่วนการไหลเข้าเทียบกับอุณหภูมิของสารทำงานที่เครื่องกำเนิดไอ จะได้ผลการคำนวณเป็นกราฟดังภาพที่ 4.5



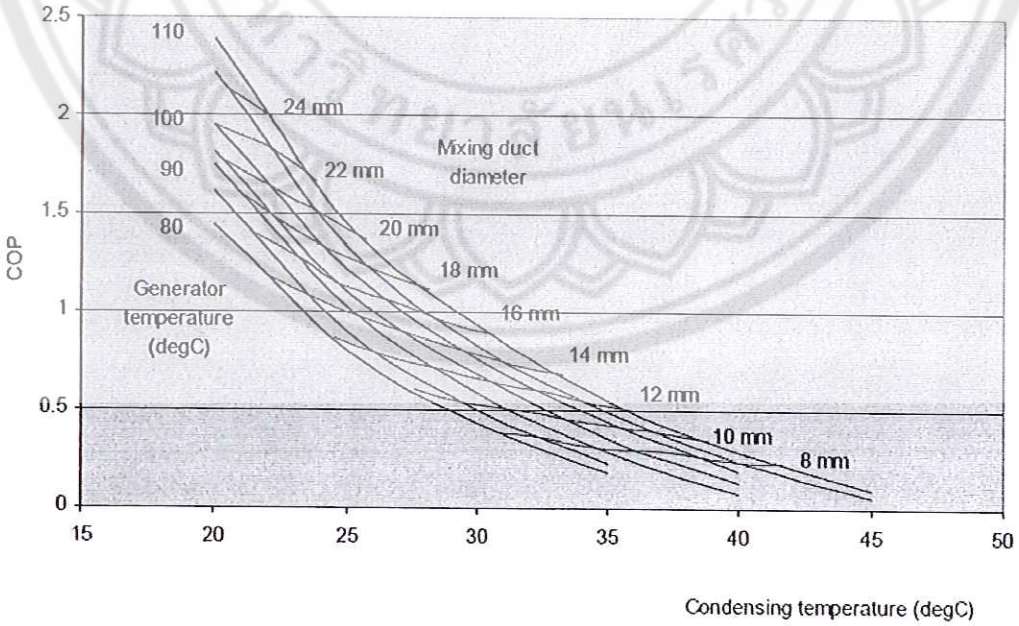
ภาพที่ 4.5 ผลการคำนวณเปรียบเทียบกับการวัดค่าอัตราส่วนการไหลข้าวของสารทำงาน

ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การทำงานรวมของระบบทำความเย็นให้มีค่าสูงสุดได้เป็น 0.6 พบว่าอุณหภูมิสารทำงานที่เครื่องกำเนิดไอต้องเปลี่ยนเป็น 100°C และอุณหภูมิของเครื่องควบแน่นและอีวาปอเรเตอร์มีค่าคงเดิมที่ 30°C และ 8°C ตามลำดับ และเมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิสารทำงานที่เครื่องกำเนิดไอเป็น 90°C ค่า COP ก็จะลดลงเป็น 0.5 พร้อมกับอุณหภูมิสารทำงานที่เครื่องควบแน่นก็ลดลงเป็น 28°C แต่อุณหภูมิที่อีวาปอเรเตอร์ยังคงเดิม โดยระบบต้องการพลังงานจากแสงอาทิตย์ด้วยค่าความเข้มรังสี 700 W/m^2

ผลการวิเคราะห์จากการคำนวณค่าอุณหภูมิที่เครื่องควบแน่นเพื่อหาค่าอุณหภูมิของสารทำงานที่เครื่องกำเนิดไอเพื่อตรวจสอบการทำงานของระบบทำความเย็น พบว่าการคำนวณมีความสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการทดลองที่ค่าอุณหภูมิเครื่องควบแน่นประมาณ 30°C และค่าที่ใกล้เคียงแสดงดังกราฟในภาพที่ 4.6



ภาพที่ 4.6 ค่าอุณหภูมิของสารทำงาน R141b ที่มีผลต่อค่าอัตราส่วนการไหลข้าวของอีเจ็คเตอร์

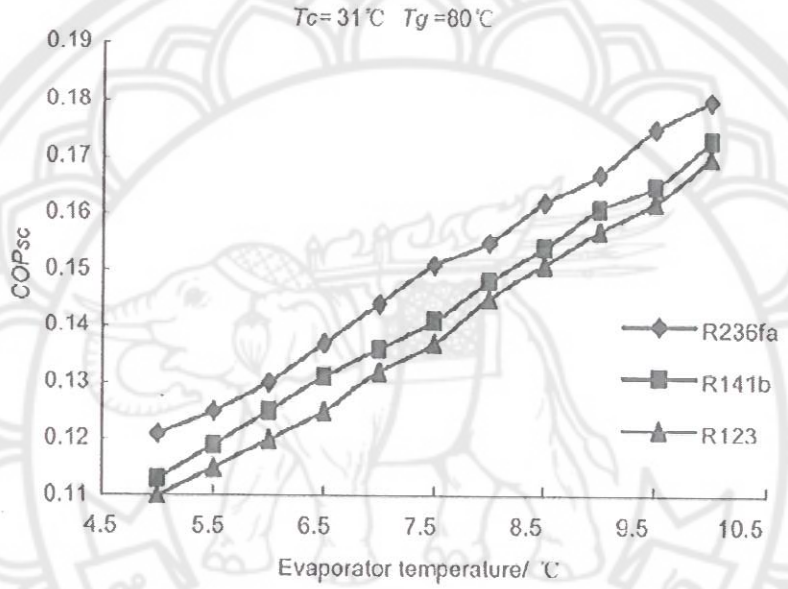


ภาพที่ 4.7 ค่า COP ของระบบที่ขึ้นอยู่กับขนาดของท่อผสมก๊าซในอีเจ็คเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ

ในทำนองเดียวกันเมื่อทดลองเปลี่ยนค่าขนาดของท่อผสมก๊าซที่ค่าอุณหภูมิของสารทำงานที่เครื่องควบแน่นต่างๆ ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิที่เครื่องกำเนิดไอและค่าสัมประสิทธิ์การทำงานรวมของระบบซึ่งค่าต่างๆเหล่านี้สามารถคำนวณจากขนาดของท่อที่ผสมสารทำงานดังภาพที่ 4.7

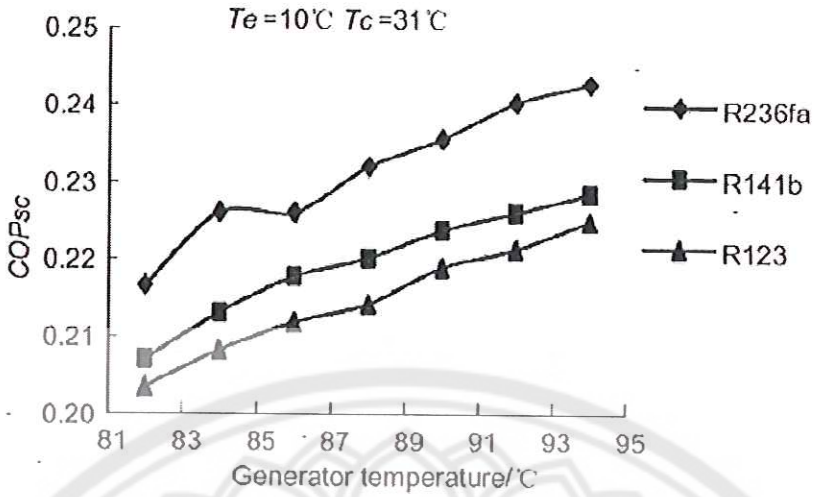
2. การคำนวณการทำงานของระบบที่ใช้สารทำงานเป็น R141b

สารทำงานที่เลือกใช้ในที่นี้ คือ R141b ซึ่งเป็นสารทำงานที่นิยมใช้กันทั่วไป โดยสารทำงานที่นำมาเปรียบเทียบกันมี 3 ชนิด คือ R123, R141b และ R236fa ตามการทดลองที่เลือกจากค่าตัวแปรต่างๆของระบบที่มีความใกล้เคียง (B. Zhang, J.S Lv and J.X Zuo, 2013)



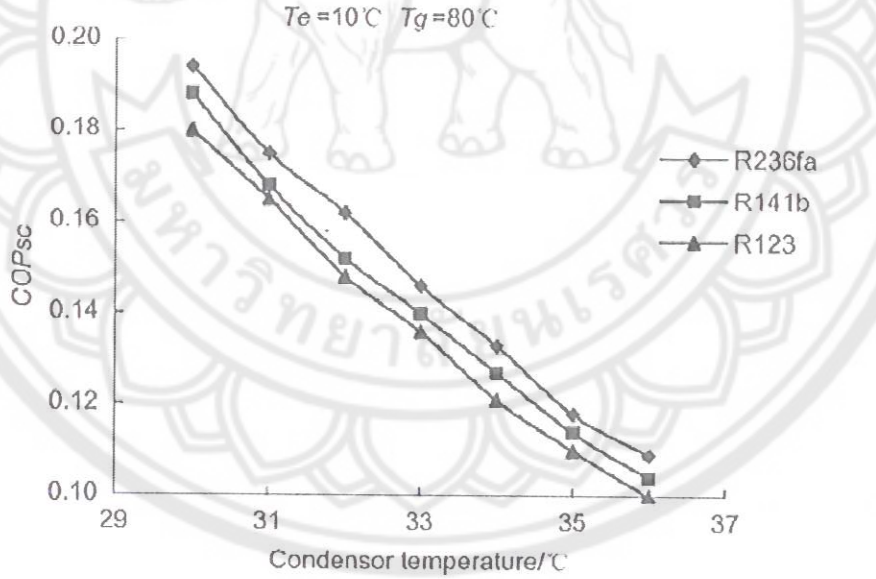
ภาพที่ 4.8 เปรียบเทียบค่า COP ของสารทำงาน 3 ชนิดที่อุณหภูมิอีวาปอเรเตอร์ต่างๆ

จากภาพที่ 4.8 จะเห็นว่าค่า COP ของอีเจ็คเตอร์ที่ใช้สารทำงาน R141b มีค่าสูงกว่า R123 และต่ำกว่า R236fa ที่ค่าอุณหภูมิสารทำงานที่อีวาปอเรเตอร์ต่างๆกัน ซึ่งในการทดลองค่าอุณหภูมิที่วัดได้คือ 8^{o}C จะสอดคล้องกับค่า COP ของอีเจ็คเตอร์ที่ประมาณ 0.15 สำหรับต้องทำการตรวจสอบต่อไปโดยพิจารณาค่าอุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอและเครื่องควบแน่น



ภาพที่ 4.9 เปรียบเทียบค่า COP ของสารทำงาน 3 ชนิดที่อุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอต่างๆ

จากรูปที่ 4.9 ที่ค่าอุณหภูมิของสารทำงานที่เครื่องกำเนิดไอตามการทดลองมีค่าประมาณ 95°C ซึ่งจะให้ค่า COP ที่ประมาณ 0.22 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่า COP ที่คำนวณได้จากการทดลอง การตรวจสอบโดยใช้อุณหภูมิของสารทำงานที่เครื่องกำเนิดไอจึงมีความใกล้เคียงกว่าการตรวจสอบจากค่าอุณหภูมิของสารทำงานที่อีวาปอเรเตอร์



ภาพที่ 4.10 เปรียบเทียบค่า COP ของสารทำงาน 3 ชนิดที่อุณหภูมิเครื่องควบแน่นค่าต่างๆ

การหาความสอดคล้องของค่า COP กับอุณหภูมิของสารทำงานที่เครื่องควบแน่นให้ค่า COP ที่ใกล้เคียงกับค่า COP ที่ได้จากค่าอุณหภูมิของสารทำงานที่อีวาปอเรเตอร์ที่ประมาณ 30°C ค่า COP ดังกล่าวมีค่าประมาณ 0.2 ซึ่งแตกต่างจากค่า COP ของระบบที่คำนวณได้จากผลการทดลอง ดังนั้นการนำค่าอุณหภูมิ

มาใช้กำหนดค่า COP ยังเกิดการผิดพลาดอยู่ประมาณ 10-20% แต่เนื่องจากผลการเปรียบเทียบนี้เป็นเหตุผลในการเลือกสารทำงานที่มีความนิยมในการใช้งาน และผลที่ได้จะเห็นว่าการทำงานของสารทั้งสามอยู่ในช่วงที่สามารถนำมาใช้ในระบบทำความเย็นในการวิจัยนี้ ค่า COP ของสารที่เลือกนี้คือ R141b มีค่าไม่สูงหรือต่ำมาก จึงมีความเหมาะสมในการเลือกใช้งาน

จากผลการวิเคราะห์โดยนำค่าที่ได้จากการทดลองมาเปรียบเทียบพบว่าการออกแบบระบบพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งใช้การสะสมพลังงานด้วยถังน้ำร้อนเพื่อใช้ในตอนที่ไม่มีแสงแดดสามารถเป็นแหล่งพลังงานสำรองให้กับระบบได้ และการออกแบบอีเจ็คเตอร์เพื่อใช้ในระบบทำความเย็นแบบเครื่องปรับอากาศก็มีความเหมาะสมโดยให้ค่าอุณหภูมิของสารทำงานที่อีวาปอเรเตอร์ประมาณ 8°C และอุณหภูมิสารทำงานที่เครื่องกำเนิดไอที่ 95°C เป็นอุณหภูมิที่สารทำงานผ่านเครื่องกำเนิดไอที่ได้พลังงานจากแสงอาทิตย์สามารถเลือกใช้แผงรับแสงอาทิตย์แบบผ่านเรียบซึ่งมีราคาไม่สูงมากนัก

บรรณานุกรม

[1] Henning, H.M. (2007). **Solar Air-Conditioning and Refrigeration,** TASK 38 of the IEA Solar Heating and Cooling Programme. Retrieved May 10, 2011, from http://lmora.free.fr/task38/pdf/matin/ Hėnning.pdf.

[2] Chunnanond, K. and Aphornratana, S. (2004). Ejectors: Applications in Refrigeration Technology. **Renewable and Sustainable Energy Reviews,** 8, 129-155.

[3] กรมพัฒนาพลังงานทดแทน กระทรวงพลังงาน รายงานการใช้ไฟฟ้า

[4] Sun, D. W., Eames I. W. (1996). Performance characteristics of HCFC-123 ejector refrigeration cycles. **International Journal of Energy Research,** 20, 871–85.

[5] Pridasawas, W. (2006). Solar-driven refrigeration system with focus on the ejector cycle. Doctoral dissertation, Ph.D., School of Industrial Engineering and Management, royal Institute of Technology, KTH. Stockholm.

[6] Huang B. J., Chang J. M., Wang C. P. and Petrenko V.A. (1999). A 1-D analysis of ejector performance. **International Journal of Refrigeration,** 22, 354–364.

[7] Huang B. J., Chang J. M. (1999). Empirical correlation for ejector design. **International Journal of Refrigeration,** 22, 379–388.

[8] Yapıcı R., Ersoy H. K., Aktoprakoglu A., Halkacı H. S. and Yigit O. (2008). Experimental determination of the optimum performance of ejector refrigeration system depending on ejector area ratio. **International Journal of Refrigeration,** 31, 1183–1189.

[9] Alexis G. K., Katsanis J. S. (2004). Performance characteristics of a methanol ejector refrigeration unit. **Energy Conversion and Management,** 45, 2729–2744.

[10] Huang B. J., Chang J. M., Petrenko V. A. and Zhuk K. B. (1998). A SOLAR EJECTOR COOLING SYSTEM USING REFRIGERANT R141b. **Solar Energy,** 64(4–6), 223–226.

[11] Huang B. J., Petrenko V. A., Samofatov I. Y., Shchetinina N. A. (2001). Collector Selection for Solar Ejector Cooling System. **Solar Energy,** 71(4), 269–274.

[12] Boumaraf L., Lallemand A. (2009). Modeling of an ejector refrigerating system operating in dimensioning and off-dimensioning conditions with the working fluids R142b and R600a. **Applied Thermal Engineering,** 29, 265–274.

[13] Alexis G. K., Karayiannis E. K. (2005). A solar ejector cooling system using refrigerant R134a in the Athens area. **Renewable Energy,** 30, 1457–1469.

[14] Yapıcı R. (2008). Experimental investigation of performance of vapor ejector refrigeration system using refrigerant R123. **Energy Conversion and Management,** 49, 953–961.