



# รายงาน

## การประชุมวิชาการ ประจำปี 2556



3-4 ธันวาคม 2556

ณ ศูนย์การศึกษาและฝึกอบรมนานาชาติ  
สำนักวิจัยและส่งเสริมวิชาการการเกษตร  
มหาวิทยาลัยแม่โจ้

ISBN 978-974-8445-53-3

ภาคบรรยาย

การศึกษาระบบทำความเย็นแบบหัวฉีดสำหรับการใช้ไอเสีย  
ของเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้าก๊าซชีวภาพ

Study of Ejector Refrigeration for Using Exhaust Gas  
of Biogas Electricity Generator

นัฐพร ไชยญาติ

Nattaporn Chaiyat

วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ 50290

School of Renewable Energy, Maejo University, Chiang Mai, Thailand 50290

Corresponding author: benz178tii@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการจัดการพลังงานก๊าซชีวภาพในฟาร์มเลี้ยงสัตว์ โดยเทคนิคการผลิตกระแสไฟฟ้า ร่วมกับการนำความร้อนกลับมาใช้ประโยชน์ ซึ่งความร้อนที่นำมาศึกษา คือ ไอเสียจากเครื่องยนต์ ผลิตกระแสไฟฟ้าก๊าซชีวภาพอุณหภูมิประมาณ  $450^{\circ}\text{C}$  เพื่อนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานหลักของระบบ ทำความเย็นแบบหัวฉีดลดความดัน การศึกษามี 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนที่ 1 ออกแบบและสร้างชุดสาธิตระบบ ทำความเย็นแบบหัวฉีดลดความดัน โดยใช้ขดลวดไฟฟ้าในการผลิตไอน้ำที่ generator อุณหภูมิประมาณ  $120^{\circ}\text{C}$  เพื่อผลิตน้ำเย็นในถังเก็บขนาด 45 ลิตร ซึ่งผลการทดสอบ พบว่า Evaporator สามารถลดอุณหภูมิน้ำได้ ต่ำสุดประมาณ  $16^{\circ}\text{C}$  ชุดสาธิตสามารถผลิตน้ำเย็นได้ชั่วโมงละประมาณ 180 ลิตร/ชม. หรือวันละประมาณ 4,300 ลิตร/วัน และระบบมีค่า COP เท่ากับ 0.016 ขั้นตอนที่ 2 คือ นำผลการตรวจวัดความร้อนทั้ง ของเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้าก๊าซชีวภาพ มาประเมินร่วมกับผลการทดสอบในขั้นตอนที่ 1 ซึ่งผลการ ประเมินพบว่าระบบทำความเย็นแบบหัวฉีดลดความดัน สามารถเพิ่มประสิทธิภาพรวมของระบบขึ้นเป็น 30.32% เพิ่มขึ้น 17.05% เปรียบเทียบกับระบบก่อนการปรับปรุงที่ 13.27% และมีความสามารถการทำ ความเย็นประมาณ 1.4 kW ลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน 21,168 บาท/ปี ลดการปล่อยก๊าซ  $\text{CO}_2$  ได้ 3,780 กก./ปี

**คำสำคัญ:** ระบบทำความเย็นแบบหัวฉีดลดความดัน เครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้าก๊าซชีวภาพ ความร้อนทิ้ง  
ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ

Abstract

This research studies biogas energy management in the animal farm by using technique of electricity production combined with heat recovery. For waste heat, exhaust of biogas electricity generator at  $450^{\circ}\text{C}$  is selected for supplying to the ejector refrigeration. Two processes for analyzing are used in this study. First step, the prototype of ejector refrigeration is designed and constructed. Electrical heater is selected for generating steam to supply the generator at temperature around

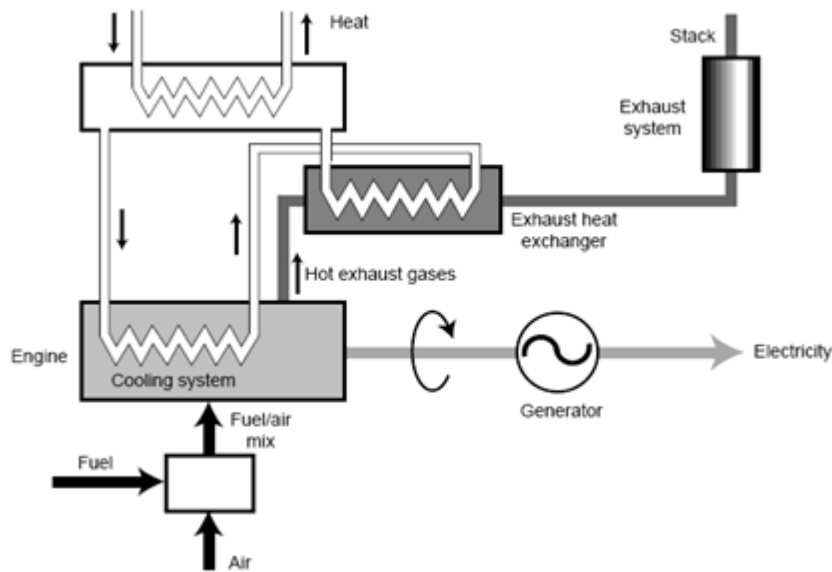
120°C. The hot steam is used to generate the cool water in the storage tank at capacity around 45 liter. It could be found that the testing set could decrease the minimum water temperature around 16°C at the evaporator. The prototype of ejector refrigeration could be supplied cool water around 180 l/h or 4,300 l/d at the cooling efficiency in term of COP around 0.016. The second step, the measured data of the biogas electricity is considered with the testing results of the prototype unit. The modified unit of heat recovery technique could be increased the total efficiency of the biogas electricity generator system to be around 30.32% with higher than the normal system around 17.05% which the COP of normal system is around 13.27%. The cooling capacity of the ejector refrigeration from biogas energy is around 1.4 kW which could be decreased the energy cost and gas emission of CO<sub>2</sub> around 21,168 Baht/y and 3,780 kg/y, respectively.

**Keywords:** ejector refrigeration, biogas electricity generator, waste heat, coefficient of performance

## คำนำ

การใช้ประโยชน์จากก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ของฟาร์มเลี้ยงสัตว์ เป็นการผลิตกระแสไฟฟ้าจากชุดเครื่องยนต์และเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้า หรือการนำไปเป็นเชื้อเพลิงโดยตรงเช่น แทนก๊าซหุงต้ม หรือผลิตน้ำร้อนเพื่อใช้ในฟาร์มเป็นต้น สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงาน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (2550) นำเสนอข้อมูลการศึกษาการผลิตกระแสไฟฟ้า พบว่ามีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเฉลี่ยประมาณ 17.5% การสูญเสียของระบบส่วนใหญ่จะสูญเสียในเครื่องยนต์น้ำหล่อเย็นของเครื่องยนต์และความร้อนในไอเสีย ซึ่งหากมีการนำความร้อนทั้งส่วนนี้กลับมาใช้ประโยชน์จะเพิ่มประสิทธิภาพรวมได้ถึง 75-80% หรือเพิ่มขึ้น 55-60%

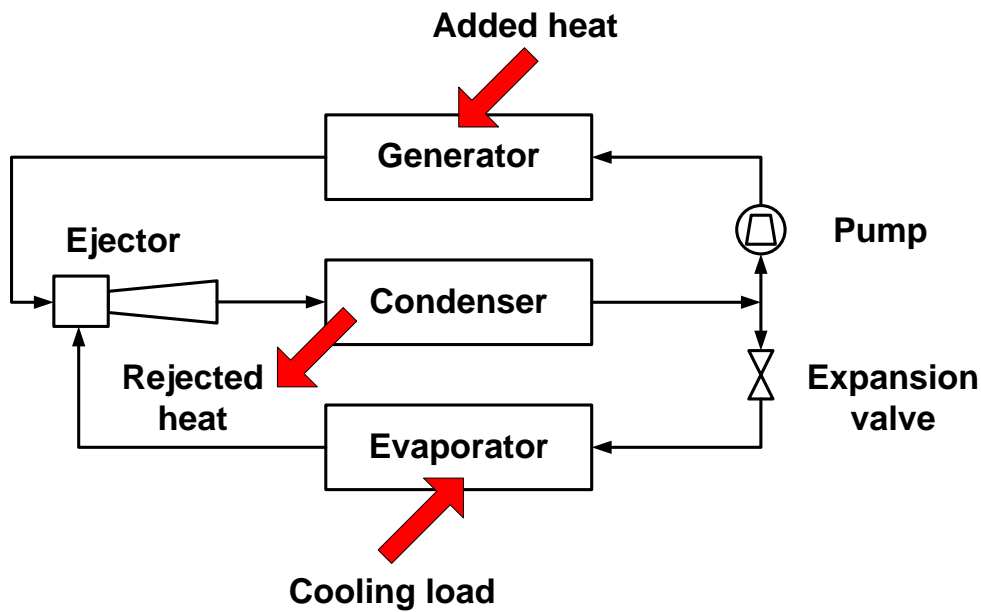
นอกจากนั้นรัฐพร (2551) ยังนำเสนออีกว่า ระบบการผลิตกระแสไฟฟ้าร่วมกับการนำความร้อนกลับมาใช้ประโยชน์เรียกว่า Combined heat and power (CHP) ส่วนประกอบของระบบ CHP แสดงดังภาพที่ 1 พลังงานจากเชื้อเพลิง (Fuel) ทั้งหมด (Energy input = 100%) จะเผาไหม้ในเครื่องยนต์ (Engine) เพื่อเปลี่ยนพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้เป็นพลังงานกล เพื่อนำไปใช้หมุนเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้า (Generator) ทั้งนี้สำหรับเครื่องยนต์ก๊าซโซลีนจะได้กำลังงานที่เพลลาหรือประสิทธิภาพ (Efficiency or Energy output) ประมาณ 20-30% และเครื่องยนต์ดีเซลจะได้กำลังงานที่เพลลาประมาณ 30-40% ขึ้นกับชนิดเชื้อเพลิง คุณภาพเชื้อเพลิง และเทคโนโลยีการผลิตเครื่องยนต์นั้น ความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ในเครื่องยนต์จะถูกนำหล่อเย็น (Cooling system) ช่วยลดอุณหภูมิของเครื่องยนต์ รวมทั้งไอเสีย (Exhaust gas) ที่เกิดขึ้นจะถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศผ่านท่อไอเสีย (Exhaust system) โดยความร้อนจากน้ำหล่อเย็นและไอเสียที่เกิดขึ้นดังกล่าว (Heat loss) มีค่าประมาณ 50-60% นอกจากนี้ระบบจะเกิดความร้อนสูญเสีย (Engine loss) เนื่องจากแรงเสียดทานของชิ้นส่วนที่สัมผัสกัน การสูญเสียในห้องเครื่อง และการแผ่รังสีออกจากตัวเครื่องยนต์มีค่าประมาณ 10-20%



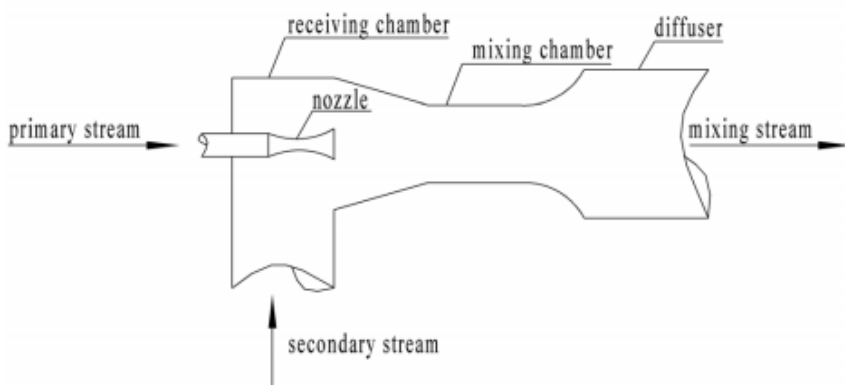
ภาพที่ 1 ระบบการผลิตกระแสไฟฟ้าร่วมกับการนำความร้อน (รัฐพร, 2551)

งานวิจัยนี้สังเกตเห็นว่าการจัดการการใช้พลังงานก๊าซชีวภาพด้วยเทคโนโลยี CHP ในฟาร์มเลี้ยงสัตว์ จะช่วยก่อให้เกิดประโยชน์แก่ผู้ประกอบการในหลายๆ ด้านทั้งนี้การศึกษาการนำความร้อนทิ้งมาใช้ประโยชน์ของงานวิจัย จะมุ่งนำไปใช้ในการผลิตน้ำเย็นสำหรับใช้ในกระบวนการลดอุณหภูมิภายในโรงเรือนเลี้ยงสัตว์ โดยระบบทำความเย็นแบบหัวฉีดลดความดัน (Ejector refrigeration) ทดแทนการใช้ระบบทำความเย็นแบบระเหย (Evaporative cooling) ที่ปัจจุบันนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย

ระบบทำความเย็นแบบหัวฉีดเริ่มต้นทำงานโดยเริ่มจาก สารทำงานความดันสูงที่เดือดภายในเครื่องกำเนิดไอ (Generator) ได้รับความร้อนทิ้งจากภายนอก จะถูกใช้เป็นตัวนำพาความร้อน (Primary fluid) ของหัวฉีด (Ejector) มีความดันสูง ซึ่งจะไหลและขยายตัวผ่านหัวฉีด (Nozzle) ด้วยความเร็วสูง ส่งผลให้บริเวณปากทางออกของหัวฉีดและเครื่องระเหย (Evaporator) มีความดันต่ำลง ดังนั้นสารทำงานในเครื่องระเหยจึงสามารถเดือดได้ในอุณหภูมิต่ำ ซึ่งสารทำงานในเครื่องระเหยหรือของไหลทุติยภูมิ (Secondary fluid) ของ Ejector จะถูกดูดพร้อมเพิ่มความดันให้สูงขึ้นที่ห้องผสม (Mixing chamber) และทางออกของ Ejector ตามลำดับ จากนั้นจะกลับตัวกลับเป็นสารทำงานเหลวภายในเครื่องควบแน่น (Condenser) สารทำงานสถานะของเหลวนี้นี้จะถูกหมุนเวียนกลับไปเครื่องกำเนิดไอโดยปั๊มหมุนวน (Pump) สารทำงานบางส่วนจะถูกลดความดันผ่านวาล์วลดความดัน (Expansion valve) ก่อนจะไหลกลับเข้าสู่เครื่องระเหย ดังแสดงหลักการการทำงานของระบบใน ภาพที่ 2

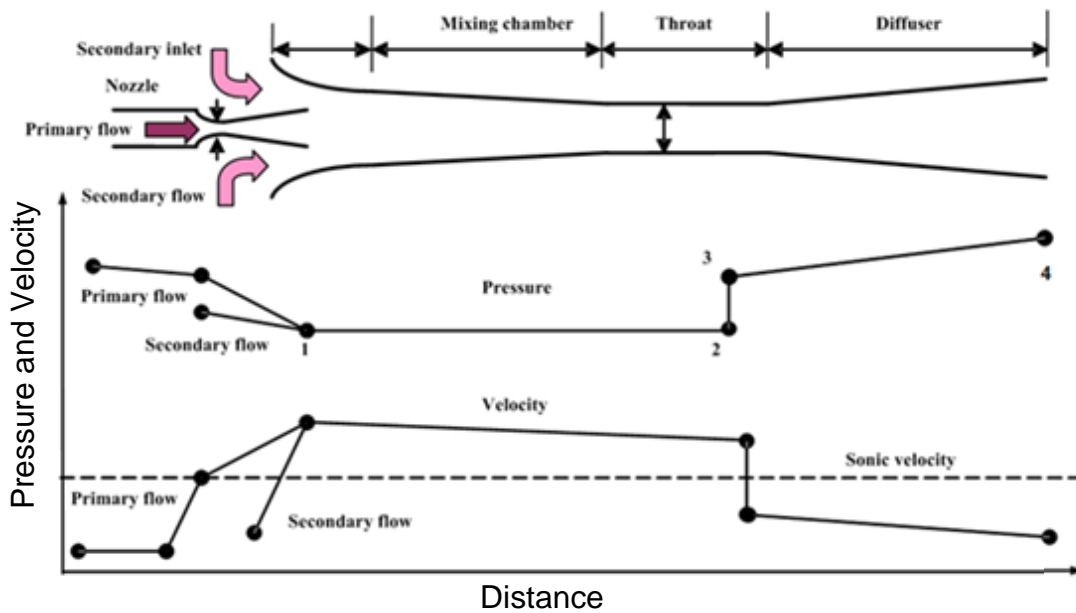


ภาพที่ 2 หลักการทำงานของระบบทำความเย็นแบบหัวฉีด



ภาพที่ 3 ลักษณะทั่วไปของEjector (B. Zhanget al., 2013)

จากภาพที่ 3 เมื่อพิจารณาปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นใน Ejector สามารถอธิบายได้ว่า ของไหลปฐมภูมิ (Primary steam) จากเครื่องกำเนิดไอน้ำที่ความดันสูงเข้าสู่หัวฉีด (Nozzle) ผ่านคอขวดของหัวฉีด และขยายตัวออกทางปากทางออกหัวฉีดที่ตำแหน่ง 1 ดังแสดงในภาพที่ 4 ความดันสถิตของก๊าซปฐมภูมิจะเปลี่ยนเป็นความเร็วทำให้ความดันที่ห้องผสม (Mixing chamber) ต่ำลงและเหนี่ยวนำของไหลทุติยภูมิ (Secondary steam) จากเครื่องระเหยเข้าสู่ห้องรับก๊าซ (Receiving chamber) กระบวนการผสมกันของทั้งสองสาร ความดันจะคงที่จนกระทั่งเกิด Shock (ช่วง 2-3 ดังแสดงในภาพที่ 4) เนื่องจากความดันสูงบริเวณคอขวด (Throat) และ Subsonic diffuser ปรากฏการณ์นี้ ทำให้ความเร็วของของผสม (Mixing steam) ลดลงจากซูเปอร์โซนิค (Supersonic) เป็นโซนิค (Sonic) อย่างรวดเร็ว จากนั้นความดันช่วงการกระจาย (Diffuser) จะเพิ่มขึ้น (ช่วง 3-4 ดังแสดงในภาพที่ 4) จนถึงปากทางออก



ภาพที่ 4 ลักษณะการไหลของสารทำงานภายใน Ejector

โดยประสิทธิภาพของระบบ Ejector นิยามด้วยค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (Coefficient of performance, COP) ที่คิดอัตราส่วนอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ Evaporator ( $Q_E$ ) ส่วนด้วยอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ Generator ( $Q_G$ ) โดยตัดพจน์ของงานทางความร้อนที่ป้อนออก เนื่องจากมีค่าน้อยมาก ( $W_P \approx 0$ ) ดังแสดงในสมการที่ 1

$$COP_{Ejector} = \frac{Q_E}{Q_G}, (W_P \approx 0) \quad (1)$$

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบทำความเย็นแบบหัวฉีดมีดังนี้ Kshirsagar *et al.* (2013) นำเสนอระบบทำงานร่วมของ Vapour compression-ejector refrigeration ที่ใช้สารทำงานสองชนิดในระบบ ซึ่งสามารถเพิ่ม COP ของระบบได้ประมาณ 3.086% Zhang *et al.* (2013) ศึกษา ระบบ Solarejectorcooling ที่ใช้สารทำงาน R-236fa โดยระบบดังกล่าวมี COP ประมาณ 0.413 ซึ่งสูงกว่าระบบปกติที่มีค่า COP ประมาณ 0.243 สอดคล้องกับ Jain *et al.* (2012) PraitoonChaiwongsa and SomchaiWongwises (2006) Saito *et al.* (2012) และ Shen *et al.* (2005) ที่ใช้สารทำงานเย็นชนิดต่างๆ ในระบบทำความเย็นแบบหัวฉีดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของระบบ แตกต่างกับ Reddick *et al.* (2012) ที่ใช้หัวฉีดสองชั้น (Double throat) เพื่อเพิ่มอัตราส่วนความดัน ซึ่งสามารถเพิ่ม COP ของระบบได้ 11%โดยประมาณ และ Yuet *al.* (2005) ที่ติดตั้ง Jet pump ในระบบบริเวณทางเข้า Condenser

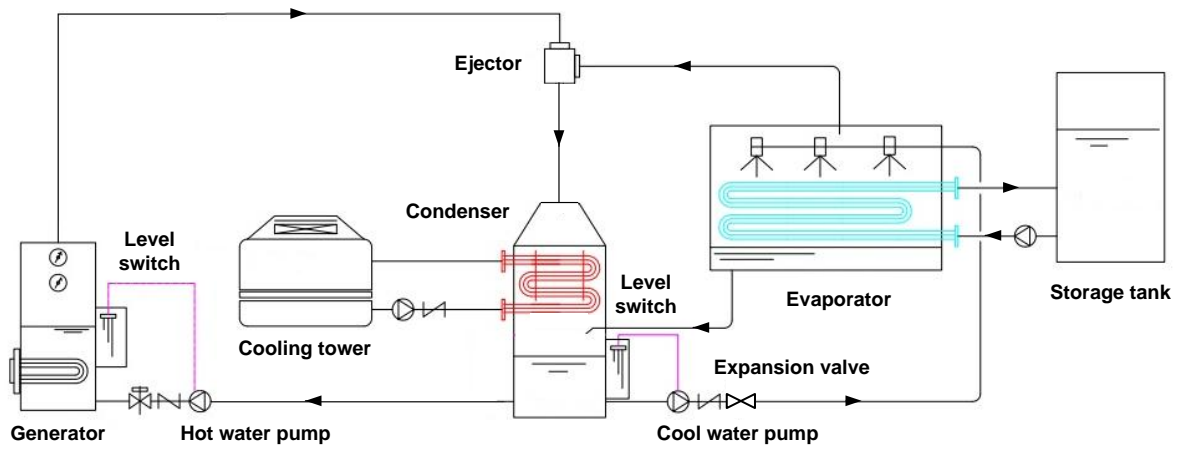
ซึ่งงานวิจัยนี้มีความแตกต่างจากงานวิจัยที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น คือ ใช้ น้ำ (R-718) เป็นสารทำงานในระบบทำความเย็นแบบ Ejector ซึ่งไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสามารถหาได้ง่ายและน้ำมีสถานะเป็นของเหลว ณ ความดันบรรยากาศ ทำให้สะดวกในการบรรจุสารทำงานเข้าสู่ระบบทำความเย็น รวมทั้งหาซื้อ

อุปกรณ์ต่างๆ ในระบบได้ง่ายและราคาถูกลงกว่า โดยเฉพาะปั๊มที่ใช้สำหรับสารทำความเย็นจะมีราคาค่อนข้างสูง (มากกว่า 30,000 บาท)

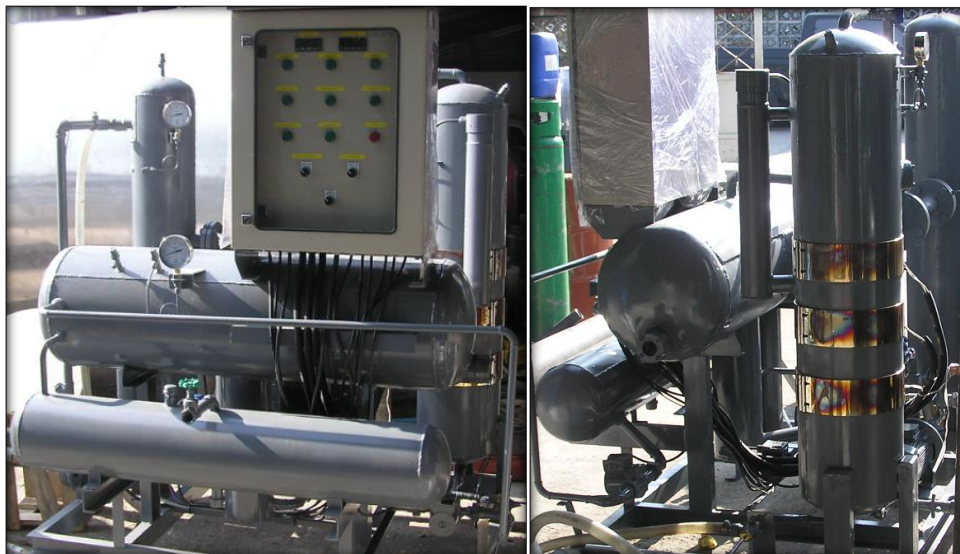
### อุปกรณ์และวิธีการ

วิธีการดำเนินงานวิจัยแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 ทำการออกแบบ สร้าง และทดสอบระบบทำความเย็นแบบหวัฉืด ที่มีการผลิตไอน้ำด้วยขดลวดไฟฟ้า โดยไดอะแกรมการทำงานของระบบและรูปถ่ายของชุดสาริตแสดงดังในรูปที่ 5 และรูปที่ 6 ตามลำดับ รวมทั้งแสดงรายละเอียดของอุปกรณ์ต่างๆ ของชุดสาริตในตารางที่ 1



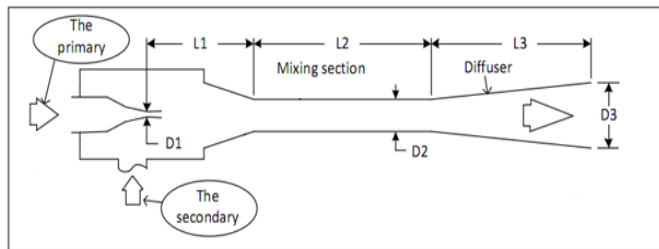
ภาพที่ 5 ไดอะแกรมการทำงานของระบบทำความเย็นแบบหวัฉืด



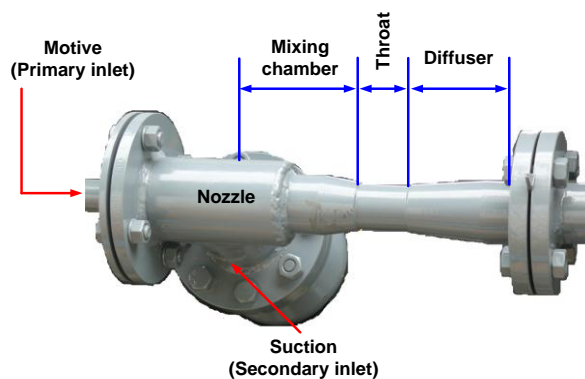
รูปที่ 6 ชุดสาริตระบบทำความเย็นแบบหวัฉืด

ตารางที่ 1 รายละเอียดอุปกรณ์ในระบบทำความเย็นแบบหวัฉืด

Devices	Specifications
Generator	Capacity 8.2 kW
	Type Flooded shell and tube heat exchanger
	Heat area 0.41 m <sup>2</sup>
	Heater 10 kW
	Flow rate 11.5 kg/h
	Pressure 2 bar
	Temperature 120 °C
Condenser	Capacity 11.2 kW
	Type Shell and tube heat exchanger
	Heat area 0.35 m <sup>2</sup>
Evaporator	Capacity 3 kW
	Type Shell and tube heat exchanger
Ejector	Heat area 1.6 m <sup>2</sup>
	Temperature 10 °C



L111 cm L27 cm L311 cm  
 D11 cm D21.1 cm D33.9 cm





การทดสอบหาความสามารถการทำความเย็นของระบบทำความเย็นแบบหวัฉืดโดยค่าที่ทำการวัดประกอบไปด้วย อุณหภูมิ อัตราการไหลของของไหลเข้าระบบทำความเย็น ความดันในระบบ และกำลังไฟฟ้าเพื่อวิเคราะห์หาพฤติกรรมการทำงานและค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะต่อไป

ขั้นตอนที่ 2 นำผลการทดสอบของชุดสาธิตในขั้นตอนที่ 1 มาประเมินร่วมกับผลการตรวจวัดประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้าก๊าซชีวภาพดังแสดงใน 4kr ที่ 7 เพื่อหาประสิทธิภาพรวมของระบบการผลิตกระแสไฟฟ้าร่วมกับการนำความร้อนกลับมาใช้ประโยชน์ต่อไป

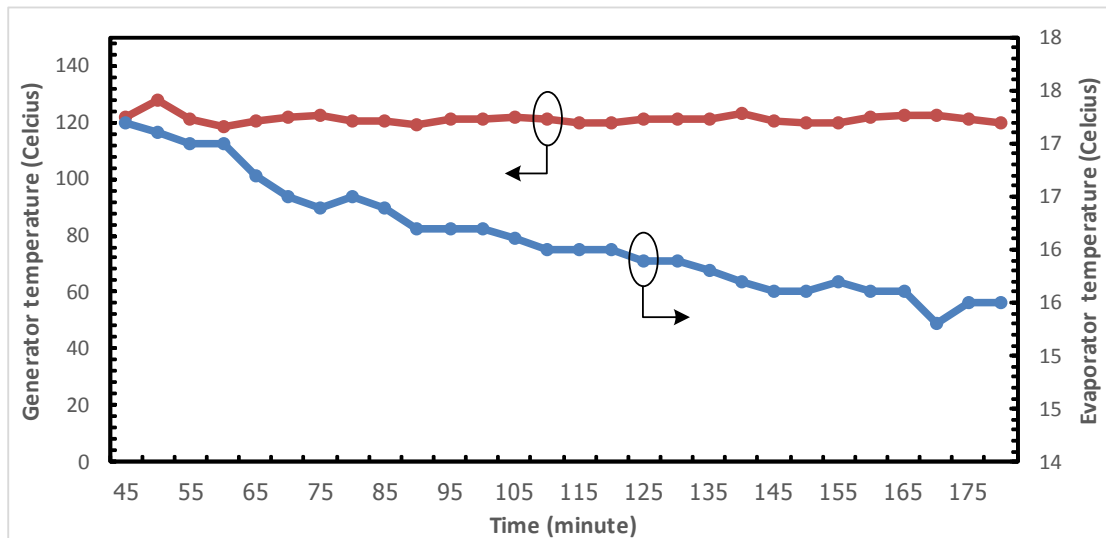


ภาพที่ 7 การตรวจวัดประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้าก๊าซชีวภาพ

### ผลการวิจัย

ผลการทดสอบในขั้นตอนที่ 1 การทดสอบและเก็บข้อมูลชุดสาธิตระบบทำความเย็นแบบหวัฉืด พบว่าเมื่อเริ่มจ่ายความร้อนให้แก่ Generator โดยขดลวดไฟฟ้า ระบบจะเข้าสู่สภาวะคงที่ของการทำงานเมื่อเวลาผ่านไป 45 min โดยไอน้ำที่ Generator จะเริ่มมีอุณหภูมิคงที่ประมาณ  $120^{\circ}\text{C}$  ที่ความดัน  $1.31 \text{ kg/m}^2$  และอุณหภูมิไอน้ำในถังเก็บน้ำเย็นขนาด 45 liter จะลดลงอย่างต่อเนื่อง และระบบสามารถทำน้ำเย็นอุณหภูมิต่ำสุดได้ประมาณ  $16^{\circ}\text{C}$  ที่ความดัน  $-76 \text{ kg/m}^2$  ออกจาก Evaporator ดังแสดงในภาพที่ 8

โดยผลการทดสอบดึงน้ำเย็นในถังเก็บน้ำเย็นไปใช้ โดยรักษาอุณหภูมิไอน้ำในถังน้ำเย็นดังกล่าวให้ที่อุณหภูมิคงที่ (Steady state) ผลที่ได้จากการทดสอบและเก็บข้อมูลระบบทำความเย็นแบบหวัฉืด ณ ช่วงสภาวะ Steady state ของระบบ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2



ภาพที่ 8 กราฟแสดงอุณหภูมิไอน้ำที่ Generator และน้ำเย็นที่ถึงเก็บน้ำเย็น

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบและเก็บข้อมูลระบบทำความเย็นแบบหวัฉืดโดยใช้ขดลวดไฟฟ้าผลิตไอน้ำ

คุณสมบัติ	ปริมาณ
อุณหภูมิสารทำงานที่ Generator (°C)	121.51
อุณหภูมิสารทำงานที่ Condenser (°C)	28.25
อุณหภูมิสารทำงานที่ Evaporator (°C)	18.21
อุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำเย็น (°C)	18.68
ความดันที่ Generator(kg/m <sup>2</sup> )	1.31
ความดันที่ Condenser (kg/m <sup>2</sup> )	-72
ความดันที่ Evaporator (kg/m <sup>2</sup> )	-76
อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ Generator (kW)	7.94
อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ Evaporator (kW)	0.13
อัตราการผลิตน้ำเย็น(l/h)	180
COP <sub>Ejector</sub>	0.016

จากตารางที่ 2 ผลการทดสอบและเก็บข้อมูลชุดสาธิตพบว่า การดึงน้ำเย็นไปใช้งานจากระบบทำความเย็นแบบหวัฉืดต้องการไอน้ำที่อุณหภูมิประมาณ 120°C เพื่อผลิตน้ำเย็นอุณหภูมิประมาณ 18°C โดยชุดสาธิตสามารถผลิตน้ำเย็นได้ชั่วโมงละประมาณ 180l/h หรือวันละประมาณ 4,300 l/d เมื่อมีแหล่งพลังงานความร้อนจ่ายให้แก่ระบบทำความเย็นตลอด 24 h และระบบมีค่า COP เท่ากับ 0.016 ซึ่งใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Shen *et al.* (2004) นอกจากนี้ยังพบอีกว่า ป้อน้ำในระบบทำความเย็นแบบหวัฉืดมีการใช้งานน้อยมาก เนื่องจากชุดสาธิตใช้ป้อน้ำที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่ เมื่อเทียบกับความต้องการอัตราการไหลของสารทำงานในระบบทำความเย็น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงไม่นำผลของพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่ป้อน้ำมาพิจารณาร่วม

จากผลการดำเนินงานในขั้นตอนที่ 2 นำผลการทดสอบระบบทำความเย็น มาประเมินร่วมกับผลการตรวจวัดเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้าก๊าซชีวภาพผลที่ได้พบว่าปริมาณความร้อนทิ้งที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ คือ ความร้อนทิ้งจากไอเสียอุณหภูมิประมาณ 450°C ปริมาณ 87.4 kW ดังแสดงในตารางที่ 3 โดยยังพบอีกว่า ระบบที่ใช้ก๊าซชีวภาพผลิตพลังงานไฟฟ้าอย่างเดียวมีประสิทธิภาพ 13.27%

**ตารางที่ 3** ผลการตรวจวัดปริมาณความร้อนในกระบวนการต่างๆ ของเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้าก๊าซชีวภาพ

อัตราการถ่ายเทความร้อน	kW	%
Q <sub>เชื้อเพลิงก๊าซ</sub>	512.5	100
Q <sub>กระแสไฟฟ้า</sub>	68.0	13.36
Q <sub>ไอเสีย</sub>	87.4	17.05
Q <sub>นำระบายความร้อน</sub>	148.5	28.89
Q <sub>อื่นๆ</sub>	208.6	40.70

เมื่อนำผลการทดสอบระบบทำความเย็นแบบหัวฉีดมาวิเคราะห์ร่วมกับข้อมูลในตารางที่ 3 พบว่า ระบบหลังการปรับปรุง โดยสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าและนำความร้อนทิ้งมาใช้ประโยชน์ มีประสิทธิภาพรวมของระบบเพิ่มเป็น 30.32% หรือเพิ่มขึ้น 17.05% และมีความสามารถการทำความเย็นที่ประมาณ 1.4 kW(COP<sub>Ejector</sub> = 0.016) สามารถผลิตน้ำเย็นได้ประมาณ 1,766/h หรือ 42,385/d ทั้งนี้สามารถเทียบกับระบบทำน้ำเย็นแบบอัดไอ (Water chiller, COP = 2) ที่ใช้กำลังไฟฟ้าของระบบอัดไอประมาณ 0.7kW หรือ 6,048 kWh/y คิดเป็นค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน 21,168 Baht/y นอกจากนี้ยังพบว่า ระบบทำความเย็นแบบหัวฉีดสามารถลดการปล่อยก๊าซ CO<sub>2</sub> ได้ 3,780 kg/y ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการเปรียบเทียบการปล่อย CO<sub>2</sub>ของระบบทำความเย็นแบบหวัณิดและระบบทำน้ำเย็นแบบอัดไอ

รายละเอียด	Ejector	Water chiller
COP	0.016	2
ปริมาณความร้อนที่ได้รับ <sup>1</sup> (Q <sub>G</sub> , kW)	87.4	87.4
ปริมาณความเย็นที่ได้ <sup>2</sup> (Q <sub>E</sub> , kW)	1.40	1.40
พลังงานไฟฟ้าของระบบ <sup>3</sup> (W <sub>system</sub> , kW <sub>e</sub> )	≈0	0.70
จำนวนชั่วโมงการทำงานต่อวัน (h/d)	24	24
จำนวนชั่วโมงการทำงานต่อวัน (d/y)	365	365
อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้า (kWh)	0	6,124.99
ปริมาณน้ำเย็นที่ <sup>4</sup> (l/d)	1,766.04	1,766.04
การปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ <sup>5</sup> (kg/y)	0	3,780.00

หมายเหตุ: <sup>1</sup>ปริมาณความร้อนจากไอเสียทั้งหมดจ่ายให้แก่ระบบทำความเย็นแบบหวัณิด (Q<sub>G</sub> = Q<sub>ไอเสีย</sub>) อ้างอิงข้อมูลจากนัฐพร (2551)

<sup>2</sup>Q<sub>E</sub> = COP x Q<sub>G</sub> (แสดงไว้ในสมการที่ 1)

<sup>3</sup>พลังงานไฟฟ้าของระบบทำน้ำเย็นแบบอัดไอคำนวณจาก W<sub>System</sub> = Q<sub>E</sub>/COP

<sup>4</sup>ปริมาณน้ำเย็นคำนวณหาจากสูตร M = (Q<sub>E</sub> x Δt) / (C<sub>p</sub> x ΔT) โดยค่า C<sub>p</sub>ของน้ำเย็นกำหนดให้มีค่า 4.19 kJ/kg.K และค่าความแตกต่างอุณหภูมิของน้ำที่ผ่าน Evaporator (ΔT) มากจากผลการทดสอบมีค่าเท่ากับ 0.68 °C

<sup>5</sup>ค่า Emission factor พลังงานไฟฟ้า = 0.625 kg/kWh (ทศวรรษ ใจเที่ยง, 2555)

### สรุปผลการดำเนินงาน

จากผลการศึกษาสามารถสรุปผลงานวิจัยได้ดังต่อไปนี้

1. ระบบทำความเย็นแบบหวัณิดต้องการไอน้ำที่ Generator อุณหภูมิประมาณ 120°C และสามารถทำน้ำเย็นในถังเก็บขนาด 45 liter ได้อุณหภูมิต่ำสุดได้ประมาณ 16°C

2. ชุดสาคิตสามารถผลิตน้ำเย็นได้ชั่วโมงละประมาณ 180 l/h หรือวันละประมาณ 4,300 l/d และระบบมีค่า COP เท่ากับ 0.016

3. การนำความร้อนทิ้งของเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้าก๊าซชีวภาพมาใช้ประโยชน์ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพรวมของระบบเพิ่มเป็น 30.32% หรือเพิ่มขึ้น 17.05% เปรียบเทียบกับระบบก่อนการปรับปรุงที่ 13.27% และมีความสามารถทำความเย็นที่ประมาณ 1.4kW ลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน 21,168 Baht/y สามารถลดการปล่อยก๊าซ CO<sub>2</sub> ได้ 3,780 kg/y

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณบริษัททีซีเอส อินโนเวชั่น อินเทลลิเจนซ์ จำกัด ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ทุนวิจัย สถานที่ทำวิจัยและสิ่งอำนวยความสะดวก รวมถึงวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่สนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้

## เอกสารอ้างอิง

- สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงาน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 2550. รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการ การสาธิตการใช้ประโยชน์จากความร้อนร่วมของการใช้ก๊าซชีวภาพ. นำเสนอต่อกระทรวงพลังงาน. 304 น.
- ทศวรรณ ใจเที่ยง. 2555. การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์และดัชนีความยั่งยืนจากการผลิตเชื้อเพลิงขยะในมหาวิทยาลัยเชียงใหม่. สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- นัฐพร ไชยญาติ. 2551. การออกแบบและสร้างระบบทำความเย็นแบบดูดซึมที่ใช้ไอเสียจากเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าก๊าซชีวภาพ สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 192 น.
- Jain, A. S.K. Agrawal and P. Pachorkar. 2012. Steady-state analysis of the solar-driven ejector refrigeration system using water, methanol, ammonia as arefrigerant. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2(9): 334-338.
- Zhang, B. J.S. Lv and J.X. Zuo. 2013. Theoretical and experimental study on solarejector cooling system using R236fa. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 8(2): 1-5.
- Reddick, C. Y. Mercadier and M. Ouzzane. 2012. Experimental study of an ejector refrigeration system. In *International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue*, July 16-19, 2012.
- Yu, J. Chen, H. Y. Ren and Y. Li. 2006. A new ejector refrigeration system with an additional jet pump. ***Applied Thermal Engineering***, 26: 312-319.
- Deng, J.Q. P.-X. Jiang, T. Lu and W. Lu. 2006. Particular characteristic of transcritical CO<sub>2</sub> refrigeration cycle with an ejector. ***Applied Thermal Engineering***, 27: 381-388.
- Chaiwongsa, P. and S. Wongwises. 2007. Experimental study on R-134a refrigeration system using a two-phase ejector as an expansion device. ***Applied Thermal Engineering***, 28 (5): 467-477.
- Shengqiang Shen, X. Qu, B. Zhang, S. Riffat and Mark Gillott. 2005. Study of a gas-liquid ejector and its application to a solar-powered bi-ejector refrigeration system, ***Applied Thermal Engineering***, 25: 2891-2902.
- Kshirsagar, S.D. and M. M. Deshmukh. 2013. Thermal design & performance of combined vapour compression-ejector refrigeration system using R600a. ***International Journal of Engineering Research and Applications***, March-April 2013, 3(2): 1368-1380.
- Saito, Y. T. Ito, S. Chan, T. Fukushima, A. Matsuo and H. Sato. 2012. A ejector refrigeration cycle for utilizing solar thermal energy. In *Proceedings of the Solar Conference 1<sup>st</sup>*: 82-87.