

ศักยภาพวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ความร้อนพลังงาน แสงอาทิตย์ขนาดเล็กแบบเทอร์โมไซฟอนในการผลิตกำลัง Potential of Small Thermosyphon Solar Organic Rankine Cycle for Power Generation

คมกฤษณ์ ศรีสุวรรณ¹ จิรวรรณ เตียรธสุวรรณ^{*2} อภิชาติ เทอดโยธิน¹ และ ปิยะ เลียงสุคนธ์²
 Khomkrit Srisuwan¹ Jirawan Tiansuwan^{*2} Apichit Therdyothinhit¹ and Piya Siangsukone²
¹สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงาน, ²สาขาวิชาเทคโนโลยีอุณหภาพ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ 10140

¹Division of Energy management Technology, ²Division of Thermal Technology,
 School of Energy, Environment and Materials,
 King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok 10140 Thailand
 Tel. 0-2470-8695-99 ext. 515, 518, Fax. 0-2427-9062
 *E-mail: jirawan.tia@kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทดสอบศักยภาพวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์พลังงานแสงอาทิตย์ขนาดเล็กโดยใช้หลักการเทอร์โมไซฟอนเพื่อสร้างความดันเสดและก่อให้เกิดการหมุนเวียนของของไหลแทนการใช้ปั๊มสารทำงาน กำหนดให้ของไหลซึ่งเป็น R134a จากสภาพของเหลวเดือดในตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบขนาด 2 m² ไอน้ำจะไปไหลผ่านตัวขยายที่ดัดแปลงจากคอมเพรสเซอร์ชนิดกันหอยที่ใช้ในเครื่องปรับอากาศของรถยนต์เพื่อสร้างงานกล และไปควบแน่นเป็นของเหลวภายในเครื่องควบแน่นที่ความดันเสดความสูง 3 เมตรจากระดับตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ของเหลวจะไหลต่อไปที่ตัวเก็บรังสีเพื่อรับความร้อนอีก ผลการทดสอบในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใสพบว่า สามารถผลิตกำลังสูงสุดที่ 161.6 W และประเมิณประสิทธิภาพวัฏจักรสูงสุดเท่ากับ 18%

ABSTRACT

A study on a potential of a small thermosyphon solar organic Rankine cycle system for generating power under a concept of thermosyphon to generate pressure head in fluid without pump was undertaken. R134a was the working liquid which boiled in a 2 m² flat plate solar collector. The vapor expanded through an expander which was modified from a scroll compressor of automobile air-conditioner and a mechanical work was generated. After that the vapor condensed completely in the condenser of which the height was 3 m from the solar collector and the condensed liquid entered the solar collector to restart the new cycle. The results on a clear sky day showed that the maximum mechanical power was about 161.6 W and the maximum cycle efficiency was around 18%.

1. บทนำ

การนำพลังงานหมุนเวียนอย่างเช่นความร้อนจากรังสีอาทิตย์มาใช้ผลิตไฟฟ้า (Solar Thermal Power Plant) เป็นเทคโนโลยีหนึ่งซึ่งช่วยแก้ปัญหาความต้องการการใช้

ไฟฟ้าในอนาคต และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอันเนื่องมาจากการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลของโรงไฟฟ้าพลังไอน้ำ การผลิตไฟฟ้าด้วยความร้อนจากรังสีอาทิตย์คือการนำความร้อนจากรังสีอาทิตย์มาผลิตไอน้ำให้กับวัฏจักร

กังหันไอน้ำ (Rankine Cycle) โดยใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ชนิดรวมแสง (Concentrated solar collector) ซึ่งความร้อนที่ใช้จะมีอุณหภูมิสูงถึง 400°C ร่วมกับระบบสะสมความร้อน โดยมีพิกัดกำลังการผลิตไฟฟ้าตั้งแต่ 1.5-354 MW [1, 2]

วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ (Organic Rankine cycle) เป็นวัฏจักรหนึ่งที่มีการทำงานเหมือนวัฏจักรกังหันไอน้ำ แต่ต่างกันที่ของไหลใช้สารอินทรีย์เป็นสารทำงาน (Organic fluid) แทนน้ำและสามารถใช้แหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิต่ำได้ เช่น การใช้ชีวมวลมาเผาโดยตรง เพื่อผลิตไฟฟ้าผ่านวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ขนาดเล็ก [3] รวมถึงการศึกษาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผลต่อสมรรถนะวัฏจักร [4] ปัจจุบันมีงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาการนำความร้อนจากรังสีอาทิตย์มาใช้ร่วมกับวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ (Solar organic Rankine cycle: SORC) เพื่อผลิตกำลังไฟฟ้าเช่นเดียวกับโรงไฟฟ้าความร้อนจากรังสีอาทิตย์ (Solar thermal power plant) แต่กำลังการผลิตไฟฟ้าไม่เกิน 1 MW มีขนาดเล็กและใช้ความร้อนอุณหภูมิต่ำกว่า 300°C [5]

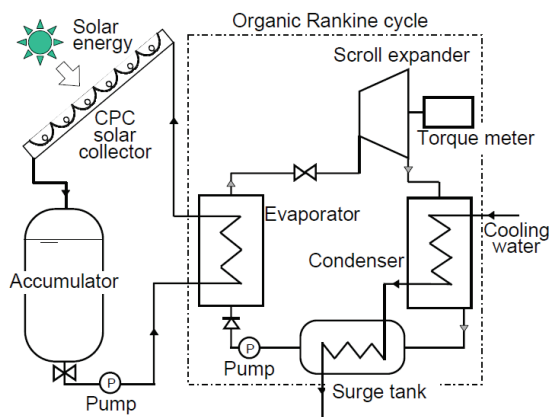
ระบบ SORC เป็นระบบผลิตกำลังที่มีขนาดเล็กมีการผลิตกำลังไฟฟ้าตั้งแต่ 1-3 kW มีประสิทธิภาพของวัฏจักรต่ำกว่า 10% เนื่องจากกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของระบบค่อนข้างต่ำและยังต้องจ่ายคืนให้กับปั๊มสารทำงานในระบบด้วย จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพของวัฏจักรลดลง [6-9]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาแนวทางความเป็นไปได้ในการผลิตไฟฟ้าในระบบ SORC รูปแบบใหม่โดยไม่ใช่ปั๊มสารทำงานหมุนเวียนของไหลในวงจร โดยอาศัยหลักการของเทอร์โมไซฟอน การศึกษาจะสร้างชุดทดสอบโดยใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ขนาด 2 m² ทำหน้าที่ให้ความร้อนแก่สารทำงานจนสารทำงานเดือด และมีตัวขยายชนิดก้นหอย (Scroll expander) โดยมี R134a เป็นสารทำงาน โดยในการศึกษาจะทดสอบเพื่อทำการประเมินกำลังงานกลและประสิทธิภาพของวัฏจักรในการผลิตงาน

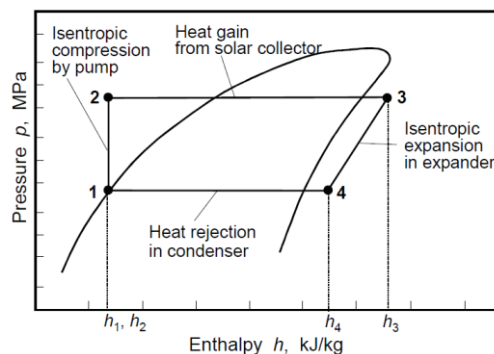
2. ทฤษฎีและแนวคิดหลักการทำงาน

2.1 วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ความร้อนจากรังสีอาทิตย์

วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ความร้อนจากรังสีอาทิตย์ (Solar Organic Rankine Cycle System : SORCS) [6] ดังแสดงในรูปที่ 1 ประกอบด้วยระบบผลิตน้ำร้อนจากรังสีอาทิตย์และวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ โดยน้ำจะถูกปั๊มผ่านตัวเก็บรังสีอาทิตย์เพื่อรับความร้อนและถ่ายโอนความร้อนให้กับสารทำงานที่เป็นสารอินทรีย์ (Organic fluid) ที่เครื่องระเหย สารทำงานจะถูกปั๊มผ่านเครื่องระเหยเพื่อรับความร้อนและเปลี่ยนสถานะจากของเหลวไปเป็นไอที่ความดันและอุณหภูมิสูง จากนั้นไอระเหยจะขยายตัวภายในกังหันหรือตัวขยายและเปลี่ยนเป็นงานกลออกมา ไอระเหยที่ออกจากกังหันจะมีความดันลดลงและไหลเข้าสู่ตัวควบแน่นเพื่อระบายความร้อนของสารทำงาน การควบแน่นจะทำให้สารทำงานในสถานะไอกลายเป็นของเหลวอีกครั้ง และจะถูกปั๊มกลับเข้าสู่เครื่องระเหยอีก แผนภาพความดัน-เอนทัลปีแสดงดังรูปที่ 2



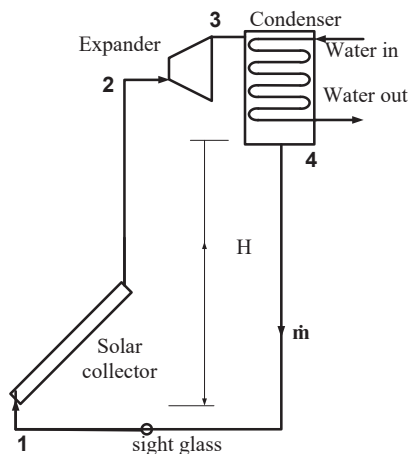
รูปที่ 1 วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์พลังงานแสงอาทิตย์ [6]



รูปที่ 2 แผนภาพความดัน-เอนทัลปีวัฏจักร SORCS [6]

2.2 หลักการทำงานวัฏจักรแรงดันแบบเทอร์โมไซฟอน

งานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาและปรับปรุงวัฏจักรแรงดันอินทรีย์รูปแบบใหม่ ที่อาศัยหลักการทำงานแบบเทอร์โมไซฟอน ทำให้เกิดการหมุนเวียนของของไหล โดยไม่ใช้ปั๊มสารทำงาน โดยมีแนวคิดหลักการทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 วัฏจักรแรงดันอินทรีย์พลังงานแสงอาทิตย์แบบเทอร์โมไซฟอน

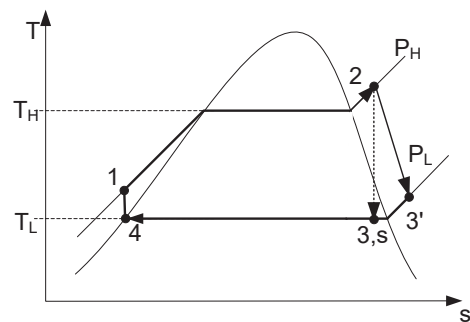
พิจารณาแนวคิดการทำงานในรูปที่ 3 วัฏจักรประกอบด้วยตัวเก็บรังสีอาทิตย์ซึ่งทำหน้าที่รับความร้อนหรือตัวระเหย (Evaporator) ตัวควบแน่น (Condenser) และตัวขยาย (Expander) หรือกักัน

หลักการการทำงานเริ่มจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์หรือตัวระเหยรับความร้อนจากดวงอาทิตย์และถ่ายโอนให้กับของไหลที่มีจุดเดือดต่ำ เช่น สารอินทรีย์ เมื่อของไหลได้รับความร้อนมากพอ จะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นไอ (สภาวะ 1→2) ซึ่งของไหลที่อยู่ในตัวระเหยจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นและมีความดันเท่ากับความดันเสดของของไหลสถานะของเหลวในส่วนที่ออกจากตัวควบแน่น (สภาวะ 4→1) ของไหลสถานะไอในตัวเก็บรังสีอาทิตย์จะถูกดันเข้าและขยายตัวในตัวขยาย (สภาวะ 2→3) ด้วยความดันเสดของไหล ผลิตพลังงานกลเพื่อขับเจนเนเรเตอร์ผลิตกระแสไฟฟ้า ของไหลที่ออกจากตัวขยายจะมีความดันและอุณหภูมิลดลงและไหลเข้าสู่ตัวควบแน่น (สภาวะ 3→4)

ต่อไป ของไหลที่อยู่ในตัวควบแน่นจะถูกระบายความร้อนออกด้วยน้ำเพื่อให้ควบแน่นเป็นของเหลว และของไหลที่ออกจากตัวควบแน่นมีสถานะเป็นของเหลวและไหลกลับลงไปในตัวเก็บรังสีอาทิตย์อีกครั้ง ซึ่งของไหลสภาวะนี้จะทำให้เกิดความดันแตกต่างในวัฏจักร เนื่องจากความสูงของของเหลวทางด้านตัวควบแน่น และไอทางด้านตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ทำให้เกิดการหมุนเวียนของของไหลในวงจรทดแทนการใช้ปั๊ม

เนื่องจากวัฏจักรนี้ไม่ใช้ปั๊มสารทำงาน ระบบจึงติดตั้งตัวเก็บรังสีอาทิตย์อยู่ในระดับที่ต่ำกว่าตัวควบแน่น เป็นผลให้ของไหลสภาวะของเหลวไหลกลับมายังตัวเก็บรังสีได้ นอกจากนี้ยังติดตั้งตัวขยายให้อยู่ในระดับเดียวกันกับตัวควบแน่น เพื่อให้ของไหลที่ออกจากตัวขยายไหลเข้าสู่เครื่องควบแน่นได้ทันที

ในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดศึกษาวัฏจักรแรงดันอินทรีย์โดยใช้ความร้อนจากรังสีอาทิตย์เป็นแหล่งความร้อนถ่ายเทให้กับสารทำงาน เพื่อให้สารทำงานระเหยไปยังตัวขยาย ซึ่งกำหนดให้ของไหลระหว่างตัวควบแน่นและตัวเก็บรังสีอาทิตย์สร้างความดันแตกต่างเนื่องจากความสูงของของไหล (head pressure) ดังแสดงในรูปที่ 3 และแผนภูมิของความดัน-เอนโทรปีในรูปที่ 4



รูปที่ 4 แผนภูมิอุณหภูมิต่อเอนโทรปีของวัฏจักรแรงดันแบบเทอร์โมไซฟอน

2.2.3 ทฤษฎี

จากแผนภูมิอุณหภูมิต่อเอนโทรปี อัตราความร้อนของเครื่องระเหยหรือตัวเก็บรังสีอาทิตย์ คำนวณจาก

$$Q_u = I_T A_C (F_R (\tau \alpha) - F_R U_L (T_f - T_a)) \quad (1)$$

โดยที่ Q_u คืออัตราความร้อนจากตัวเก็บรังสี (W), I_T คือค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ (W/m^2), A_C คือพื้นที่ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (m^2), F_R คือแฟกเตอร์การนำความร้อนมาใช้ของตัวเก็บรังสี, ($\tau \alpha$) คือผลคูณประสิทธิภาพของค่าส่งผ่านและค่าดูดกลืนรังสี, U_L คือสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวม ($W/m^2 \cdot ^\circ C$), T_f คืออุณหภูมิของของไหลเข้า ($^\circ C$) หรือ T_I และ T_a คืออุณหภูมิอากาศรอบๆ ($^\circ C$)

อัตราความร้อนของของไหลที่นำไปใช้ได้ยังสามารถคำนวณจาก

$$Q_u = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (2)$$

เมื่อ \dot{m} คืออัตราการไหลของของไหลในตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (kg/s)

อัตราความร้อนที่เครื่องควบแน่นจะคำนวณจาก

$$Q_{cond} = \dot{m}(h_3 - h_4) \quad (3)$$

$$Q_{cond} = \dot{m}_w c_{p_w} (T_{wo} - T_{wi}) \epsilon_{cond} \quad (4)$$

โดยที่ Q_{cond} คืออัตราความร้อนของเครื่องควบแน่น (W), \dot{m}_w คืออัตราการไหลน้ำหล่อเย็น (kg/s), c_{p_w} คือความร้อนจำเพาะของน้ำ ($J/kg \cdot ^\circ C$), T_{wi}, T_{wo} คืออุณหภูมิน้ำหล่อเย็นเข้า-ออก ($^\circ C$) และ ϵ_{cond} คือสัมประสิทธิ์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

กระบวนการขยายตัวของตัวขยายไม่เป็นไปตามอุดมคติ (isentropic process) เนื่องจากแรงเสียดทานและการสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อม ดังนั้นประสิทธิภาพของการขยายตัวจะเท่ากับ

$$\eta_{exp} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_{3,s}} \quad (5)$$

$$W_{exp} = \dot{m}(h_2 - h_3) \quad (6)$$

โดยที่ W_T คืออัตรากำลังของตัวขยาย (W), และ η_{exp} คือประสิทธิภาพของตัวขยาย, h_i คือเอนทัลปีของของไหล (J/kg)

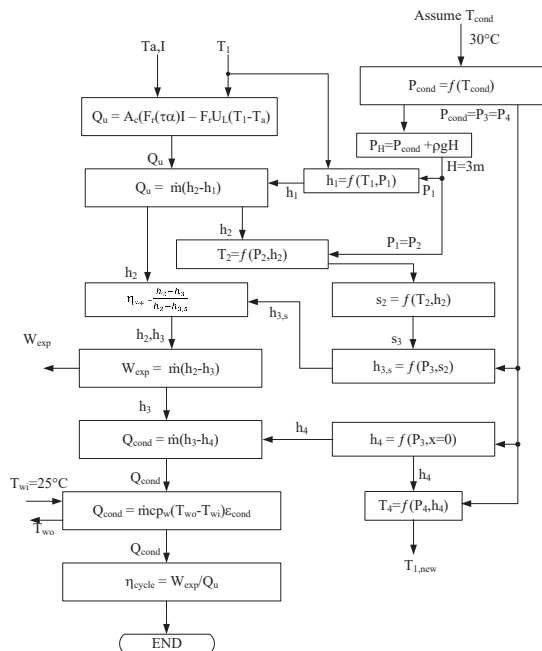
พิจารณาความดันแตกต่างกันวัฏจักร

$$P_H = P_L + \rho_l g H \quad (7)$$

โดยที่ P_H คือความดันในตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Pa), P_L คือความดันในตัวควบแน่น, ρ_l คือความหนาแน่นของของไหลสถานะของเหลว (kg/m^3), g คือความเร่งที่เกิดจากแรงโน้มถ่วงของโลก ($9.81 m/s^2$) และ H คือความสูงของของไหล (m) และประสิทธิภาพของวัฏจักร (η_{cycle}) สามารถคำนวณได้จาก

$$\eta_{cycle} = \frac{W_{exp}}{Q_u} \quad (8)$$

จากรูปที่ 5 แสดงแผนผังของการคำนวณเพื่อหาสมรรถนะของวัฏจักรแรงจลนสารอินทรีย์พลังงานแสงอาทิตย์ภายใต้การทำงานแบบเทอร์โมไซฟอน



รูปที่ 5 แผนผังการคำนวณเพื่อหาสมรรถนะวัฏจักรแรงจลนสารอินทรีย์พลังงานแสงอาทิตย์แบบเทอร์โมไซฟอน

3. การดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาศักยภาพในการผลิตไฟฟ้าหรือกำลังงานกลของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์พลังงานแสงอาทิตย์ขนาดเล็กที่ทำงานโดยอาศัยหลักการเทอร์โมไซฟอน เช่นเดียวกับรูปที่ 3 โดยมีอุปกรณ์ประกอบด้วยตัวเก็บรังสีอาทิตย์ชนิดแผ่นราบ ขนาด 2 m^2 ซึ่งมีค่า $F_R (\tau\alpha)$ และ $F_R U_L$ ในการทำงานทั่วไปมีค่า 0.72 และ $10.52 \text{ W/m}^2\text{C}$ จำนวน 1 แผง ทำหน้าที่ให้ความร้อนแก่สารทำงาน ซึ่งเป็น R134a ตัวขยายชนิดก้นหอย (Scroll expander) ที่ดัดแปลงจากคอมเพรสเซอร์เครื่องปรับอากาศรถยนต์ รุ่น TRS090 โดยมีชุดความแน่นชนิดเปลือกและท่อขนาด 3,500 BTU/h ที่ระบายความร้อนด้วยน้ำ ทั้งนี้ ความสูง H จะมีค่า 3 m รูปที่ 6 แสดงภาพถ่ายของชุดทดสอบ และตารางที่ 1 แสดงสมบัติสารทำงาน สำหรับอุปกรณ์วัดความดัน จะใช้อุปกรณ์วัดความดัน Ashcroft model G2 ซึ่งมีช่วงการวัด 0-500 psi accuracy $\pm 1\%$ อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ ใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K accuracy $\pm 0.1^\circ\text{C}$ อุปกรณ์วัดอัตราการไหล ใช้ Flowmeter ยี่ห้อ Flow Technology LN-5_C-MAB6 ช่วงการวัด 0-49320 ml/min และอุปกรณ์วัดรังสีอาทิตย์ใช้ Pyranometer ยี่ห้อ Kipp&Zonen CM1B มี accuracy $\pm 2 \text{ W/m}^2$

ในงานวิจัยนี้จะนำค่าการทดสอบจริง ได้แก่ อัตราการไหล อุณหภูมิสารทำงานและความดันที่เข้าและออกที่อุปกรณ์ต่าง ๆ จะถูกนำมาคำนวณหาเอนทัลปีที่เกี่ยวข้องและอัตราความร้อนที่ได้จากตัวเก็บรังสี งานกล รวมถึงประสิทธิภาพของวัฏจักร



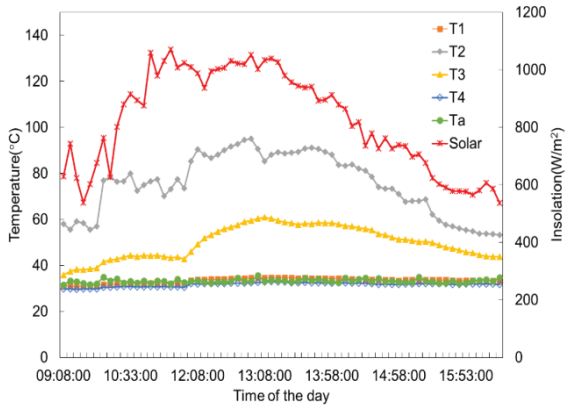
รูปที่ 6 ภาพชุดทดสอบ

ตารางที่ 1 สมบัติของ R134a

Fluid properties		R134a
Molecular weight	kg/kmol	102.3
Liquid density	kg/m ³	511.9
Critical temperature	°C	101.06
Critical pressure	kPa	4059.3
Boiling point	°C	-26.074

4. ผลการศึกษา

การทดสอบได้ดำเนินการในวันที่ห้องฟ้าแจ่มใส อุณหภูมิสารทำงานที่เข้า (T_1) และออก (T_2) จากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ อุณหภูมิที่เข้า (T_3) และออก (T_4) จากชุดคอนเดนเซอร์ แสดงในรูปที่ 7



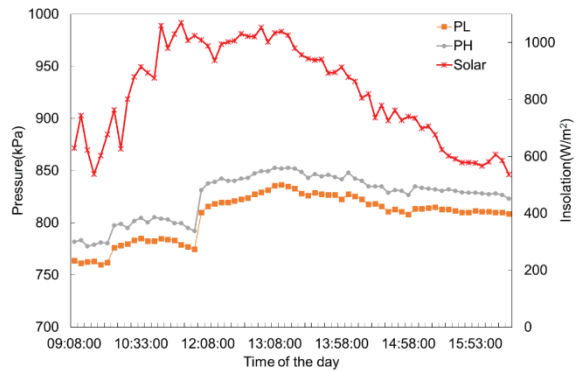
รูปที่ 7 อุณหภูมิสารทำงานที่เข้าและออกที่อุปรกรณ์ต่าง ๆ

อุณหภูมิสารทำงานที่เข้าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ T_1 ก่อนข้างจะคงที่ และมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่ออกจากชุดคอนเดนเซอร์ T_4 โดยมีค่าประมาณ 30°C แสดงให้เห็นถึงการควบคุมอุณหภูมิสารทำงานโดยชุดคอนเดนเซอร์ที่ทำงานได้ดี จากรูปจะเห็นได้ว่า อุณหภูมิสารทำงานที่ออกจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ T_2 จะมีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงตามค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ โดยมีค่าสูงสุดประมาณ 95°C ก่อนเข้าตัวขยาย และอุณหภูมิสารทำงานลดลงหลังจากผ่านตัวขยาย เนื่องจากการผลิตงานกลซึ่งจะเห็นได้จากความดันสารทำงานก่อนเข้าและออกจากตัวขยาย ดังแสดงในรูปที่ 8

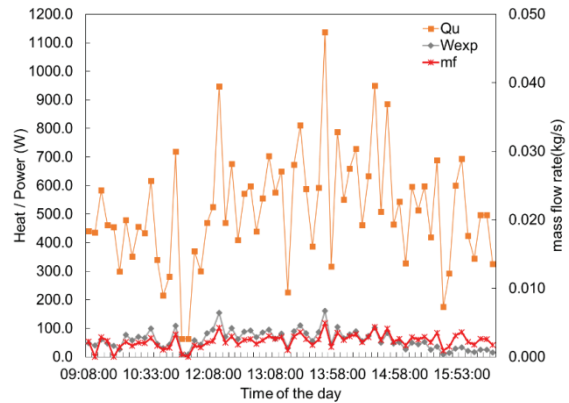
จากรูปที่ 8 จะเห็นได้ว่า ความดันสารทำงานเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิสารทำงาน ทั้งก่อนเข้าและออกจากตัวขยาย โดยความดันจะลดลงหลังจากผ่านตัวขยาย อย่างไรก็ตาม ค่าความดันแตกต่างกันไม่มากนัก และจากค่าความดันแตกต่างกันได้ สามารถนำไปคำนวณกำลังงานกลที่เกิดขึ้น ซึ่งผลแสดงในรูปที่ 9

จากรูปที่ 9 ค่าอัตราการไหลของสารทำงาน จะแกว่งตัวค่อนข้างมาก เนื่องจากในแต่ละรอบของการทำงานจะต้องใช้เวลาในการทำให้ของไหลเดือด และสร้างความดันให้เพียงพอในการขยายตัวผ่านตัวขยาย เช่นเดียวกับการผลิตไอน้ำแบบจังหวะในตัวเก็บรังสีอาทิตย์ [10] และการใช้การเดือดของสารทำงานในตัวเก็บรังสีอาทิตย์ในระบบทำน้ำร้อนแสงอาทิตย์ และควมแน่นที่ถังเก็บน้ำร้อน โดยไม่ใช้ปั๊มหมุนเวียนของไหล [11] ทำให้อัตราการดึง

ความร้อนจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์รวมทั้งกำลังงานที่ได้จากตัวขยาย



รูปที่ 8 ความดันที่ทางเข้าและออกของตัวขยายที่เวลาต่าง ๆ



รูปที่ 9 อัตราการไหลของสารทำงาน อัตราความร้อนที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์และกำลังงานจากการขยายตัว

ในช่วงทดสอบ ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์เฉลี่ยประมาณ 825.1 W/m^2 จะได้ค่าเฉลี่ยของอัตราความร้อนจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ 512.8 W และกำลังงานกลเฉลี่ยที่ตัวขยาย 60.6 W โดยมีอัตราการไหลของสารทำงานเฉลี่ย 0.0023 kg/s โดยกำลังงานสูงสุดที่ได้ 161.6 W และประสิทธิภาพสูงสุด 18%

5. สรุป

จากการศึกษาการผลิตกำลังวัฏจักรแรงดันอินทรีย์พลังงานแสงอาทิตย์แบบเทอร์โทไซฟอน ซึ่งกำหนดให้มีตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบขนาด 2 m^2 เป็นตัวแลกเปลี่ยนความร้อน ใช้ R134a เป็นสารทำงาน พบว่า

ที่ความสูงระหว่างตัวควบแน่นกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์ 3 m มีศักยภาพในการผลิตกำลังงานกลเฉลี่ยที่ตัวขยาย 60.6 W โดยกำลังงานสูงสุดที่ได้มีค่า 161.6 W และประสิทธิภาพสูงสุด 18% โดยปราศจากการใช้ปั๊มสารทำงาน

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาแห่งชาติในการให้ทุนการศึกษาและการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Klaiß, H., Köhne, R., Nitsch, J. and Sprengel, U. Solar thermal power plants for solar countries – Technology economics and market potential. *Applied Energy*, 1995; 52 (2-3): 165–183.
- [2] Tiana, Y. and Zhaob, C.Y. A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications. *Applied Energy*, 2013; 104: 538-553.
- [3] ธรณิศวรรค์ ดิทยาบท และทองเกียรติ เกียรติศิริโรจน์. การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าวัฏจักรแรงจลนสารอินทรีย์ขนาดโมดูลาร์ที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*, 2557; 21(3): 84-93.
- [4] จักรพันธ์ ถาวรงามยิ่งสกุล. การวิเคราะห์พารามิเตอร์ของวัฏจักรแรงจลนสารอินทรีย์ R245fa ขนาดเล็กเพื่อใช้ในการผลิตไฟฟ้า. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*, 2559; 23(1): 1-10.
- [5] Tchanche, B.F., Lambrinos, Gr., Frangoudakis, A. and Papadakis, G. Low-grade heat conversion into power using organic Rankine cycles – A review of various applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011; 15(18): 3963-3979.
- [6] Saitoh, T., Yamada, N. and Wakashima, S. Solar Rankine Cycle System Using Scroll Expander. *Journal of Environment and Engineering*, 2007; 2 (14): 708-719.
- [7] Pei, G., Li, J., Li, Y., Wang, D. and Ji, J. Construction and dynamic test of a small-scale organic Rankine cycle. *Energy*, 2011; 36(15): 3215-3223.
- [8] Quoilin, S., Lemort, V. and Lebrun, J. Experimental study and modeling of an Organic Rankine Cycle using scroll expander. *Applied Energy*, 2010; 87(14): 1260-1268.
- [9] Qiu, G., Liu, H. and Riffat, S. Expanders for micro-CHP systems with organic Rankine cycle. *Applied Thermal Engineering*, 2011; 31(116): 3301-3307.
- [10] พิลาวัฒน์ สวงนไชยไผ่วงศ์, จิรวรรณ เตียรต์สุวรรณ และ ปิยะ เสียงสุคนธ์. การสูบน้ำรังสีอาทิตย์แบบขับเคลื่อนด้วยไอน้ำเป็นจังหวะโดยใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบเป็นแหล่งกำเนิดไอน้ำ. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*, 2558; 22(1): 27-35.
- [11] ศุภชัย กิริติกาญจน์พงศ์. การวิเคราะห์ฮีทปั๊มเสริมพลังงานแสงอาทิตย์ในระบบทำน้ำร้อน. *ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีอุณหภาพ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ, 2549.*