



การจำลองเชิงตัวเลขของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบORC ด้วยโปรแกรม Matlab Numerical simulation of Organic Rankine Cycle (ORC) using Matlab

อนุกูล โม่งปราณีต และ อาทิตย์ ดูณศรีสุข *

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 111 ถ.มหาวิทยาลัย ต.สรนารี อ.เมือง นครราชสีมา 30000 * Email: atit@sut.ac.th, เบอร์โทรศัพท์: 044-224515, เบอร์โทรสาร: 044-224613

บทคัดย่อ

Organic Rankine Cycle (ORC) เป็นวัฏจักรที่พัฒนามาจาก Rankine cycle (RC) ที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้า โดยการ เปลี่ยนพลังงานความร้อนให้เป็นพลังงานไฟฟ้าในวัฏจักร ORC จะไม่ใช้น้ำเป็นสารทำงานในระบบ แต่จะใช้สารอินทรีย์ (organic fluid) ที่มีจุดเดือดต่ำกว่าน้ำ จึงทำให้ระบบ ORC สามารถใช้แหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ (เช่น ความร้อนจากการ เผาชีวมวล ความร้อนทิ้ง และความร้อนจากใต้พิภพ) เป็นต้นกำลังของ ORC ได้ ในการศึกษานี้ ได้พัฒนาโปรแกรม ้จำลองการทำงานของระบบ ORC ด้วยโปรแกรม Matlab โดยโปรแกรมคำนวณคุณสมบัติของสารทำงานด้วยโปรแกรม CoolProp ซึ่งเป็นฐานข้อมูลแบบ open-source ที่สามารถ download มาใช้งานโดยไม่มีค่าใช้จ่าย โปรแกรมที่พัฒนาขึ้น ้สามารถคำนวณประสิทธิภาพตามกฎข้อที่ 1 และข้อที่ 2 รวมทั้งค่า exergy destruction ของระบบ และในการศึกษานี้ได้ ์ แสดงผลของการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำแหล่งความร้อน จาก 112 °C จนถึง 140 °C โดยให้กำลังที่ได้จากเครื่องกังหันมีค่าคงที่ พบว่าความต้องการของน้ำแหล่งร้อนที่ป้อนเข้าระบบมีค่าลดลง 47% และได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิสารทำงานที่ ทางออกของเครื่องควบแน่นจาก 25 °C จนถึง 40 °C โดยให้กำลังที่ได้จากเครื่องกังหันมีค่าคงที่พบว่า อัตราการไหลของ ้น้ำแหล่งความร้อนและสารทำงานมีค่าเพิ่มขึ้น 32.38% และ 22.69% ตามลำดับ อย่างไรก็ตามเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นงาน ้ที่ให้กับปมั้จะเพิ่มขึ้นตาม และการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิดังกล่าว ยังส่งผลให้ งานสุทธิ ประสิทธิภาพตามกฎข้อที่ 1 และ ่ 2 ลดลง 0.35% 18.75% และ 18.65% ตามลำดับ และในการศึกษานี้ยังแสดงให้เห็น Exergy ถูกทำลายในแต่ละอุปกรณ์ ์ โดยเรียงลำดับจากมากไปน้อย ดังนี้ เครื่องควบแน่น เครื่องอุ่น เครื่องระเหย เครื่องกังหัน และ ปมั้ *คำหลัก:* การจำลองเชิงตัวเลข, เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบORC, โปรแกรม Matlab

Abstract

The Organic Rankine Cycle (ORC) is a modified Rankine cycle which converts heat into electricity. Instead of using steam as the working fluid, ORC uses an appropriate organic fluid as the working fluid. The boiling point of ORC working fluids is significantly lower than that of steam. Consequently, low-temperature sources (e.g. biomass combustion, waste heat, and geothermal heat) can be used as the heat source for ORC. In this study, a Matlab code was developed to model the operation of ORC. CoolProp, a free open-source C++ library that provides transport properties of refrigerants and many other fluids, is implemented to feed in fluid properties into Matlab. The model can provide 1st- and 2nd-law efficiencies, including the exergy destruction of the system. The study shows that, when the work output is kept constant and the geothermal fluid temperature drops from 112 °C to 140 °C, the needed mass flow rate of geothermal fluid decreases by 47%. In addition, to keep the work output constant when the working fluid temperature at the condenser outlet increases from 25 °C to 40 °C, the mass flow rates of geothermal fluid and working fluid increase by 32.38% and 22.69%, respectively. However, these mass flow rate increases need more pump work. Consequently, the net work



output, 1st- and 2nd-law efficiencies reduce by 0.35%, 18.78% and 18.65%, respectively. The study also reveals that the magnitudes of exergy destruction at the components in descending order are at the condenser, preheater, evaporator, turbine and pump

Keywords: Numerical simulation, Organic Rankine Cycle, Matlab

1. บทน้ำ

ในปจจุบันพลังงานไฟฟ้ าเป็นปจจัยหนึ่งที่มีอิทธิพล ต่อการดำรงชีวิต และเป็นสิ่งที่มีความต้องการเพิ่มสูงขึ้น ทุกปี โดยส่วนใหญ่การผลิตไฟฟ้าในปจีจุบัน ได้มาจาก เชื้อเพลิงฟอสซิล ได้แก่ น้ำมันดิบ ถ่านหิน และก๊าซ ธรรมชาติ ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่มีอยู่อย่างจำกัดและจะ หมดไปในอนาคต และในการสับดาปเชื้อเพลิงเหล่านี้ยัง ปล่อยไอเสีย เช่น ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ ก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ และ ในตรัสออกไซด์ ที่มีผลกระทบ ต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม ก่อให้เกิดสภาวะโลกร้อน และ ทำลายชั้นบรรยากาศของโลก เพื่อที่จะแก้ปั้นหาดังกล่าว ้ได้มีการพัฒนาโรงไฟฟ้าที่สามารถใช้แหล่งพลังงานความ ้ร้อนที่มีอุณหภูมิต่ำ หรือ พลังงานความร้อนที่มีคุณภาพต่ำ (low grade heat) มาใช้ในการผลิตไฟฟ้า เช่น พลังงาน ความใต้พิภพ พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ พลังงาน ้ความร้อนจากเชื้อเพลิงชีวมวล และความร้อนทิ้งจาก กระบวนการอุตสาหกรรม ซึ่งมีโรงไฟฟ้าประเภทหนึ่งที่ใช้ แหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำเป็นต้นกำลัง คือ โรงไฟฟ้าที่ ทำงานด้วยวัฏจักร Organic Rankine cycle (ORC) เป็น โรงไฟฟ้าที่มีหลักการทำงานและส่วนประกอบที่สำคัญอยู่ 4 ส่วน เหมือนกับโรงไฟฟ้าพลังไอน้ำ หรือ Rankine cycle (RC) ดังรูปที่ 1 มีส่วนประกอบของ ปมั้ หม้อต้ม เครื่องกังหัน เครื่องควบแน่น แต่จะแตกต่างกันที่ขนาด ORC จะเล็กกว่า RC และมีกำลังการผลิตไฟฟ้าต่ำกว่า ิสารทำงาน (working fluid) ของ RC ที่ใช้จะเป็นน้ำ แต่ ORC จะใช้ สารอินทรีย์ (organic fluid) ซึ่งเป็นสารที่ ้ส่วนผสมของธาตุ คาร์บอนผสมอยู่ ทำให้มีจุดเดือดต่ำกว่า ้น้ำมาก เช่น สารทำความเย็น R123 R134a Isobutane n-pentane จึงทำให้โรงไฟฟ้าประเภทนี้สามารถใช้ความ ้ร้อนอุณหภูมิต่ำเพื่อต้มสารทำงานให้กลายเป็นไอ เพื่อไป หมุนเครื่องกังหันให้ผลิตกระแสไฟฟ้ าได้

ป**จ**จุบันมีบริษัทต่างประเทศที่จำหน่ายส่วนประกอบ โรงไฟฟ้า ORC เช่น ประเทศสหรัฐอเมริกามีบริษัท Ormat [1], Pratt & Whitney [2] ในประเทศอิตาลีมีบริษัท Turboden [3], Exergy [4] และมีการศึกษาแหล่งความ

ร้อนเกี่ยวกับโรงไฟฟ้า ORC ที่หลากหลาย มีการศึกษา ของ Guopeng Yu. [5] ได้ทำการจำลองและวิเคราะห์ โรงไฟพ้าORC ที่ใช้เป็น Bottoming cycle ของ Diesel egine (DE) จากผลการจำลองและวิเคราะห์พบว่า ความ ้ร้อนที่ถูกปล่อยออกมาจากเครื่องยนต์ดีเซล ที่ท่อไอเสีย ประมาณ 75% และเสื้อสูบ 9.5% ประสิทธิภาพของ โรงไฟฟ้าORC ที่ใช้ความร้อนทิ้งจากเครื่องยนต์ดีเซล ประมาณ 9.2% กำลังงานที่ได้ 14.5 kW และมี ประสิทธิภาพตามกฎข้อที่สองของเทอร์โม 21.7% เมื่อนำ ใช้กับเครื่องยนต์ดีเซล ทำให้ โรงไฟฟ้า ORC ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์เพิ่มขึ้น 6.1%. J.P.Roy. [6] ศึกษาการวิเคราะห์สมรรถนะและการหาค่าพารามิเตอร์ที่ เหมาะสมที่สุดของโรงไฟฟ้า ORC โดยใช้ความร้อนทิ้ง ้จากปล่องไอเสีย ผลการศึกษาระบบสามารถผลิตกำลังได้ 19.09 MW มีอัตราการใหลของสารทำงาน 341.16 kg/s โดยให้มีความแตกต่างของอุณหภูมิแหล่งความร้อนกับ สารทำงานภายในเครื่องแลกแปลี่ยนความร้อนต่างกัน 5 °C มีประสิทธิภาพตามกฎข้อที่หนึ่งและสองของเทอร์โม ใดนามิกส์เท่ากับ 25.30% และ 64.40 % ตามลำดับ.

Zvonimir Guzovic. [7,8].ได้พิจารณาหาความ เป็นไปได้ในการใช้พลังงานความร้อนใต้พิภพในประเทศ โครเอเชียเพื่อนำมาใช้ในการผลิตไฟฟ้า จากการศึกษา ได้ มีการเสนอโรงไฟฟ้า ORC และ Kalina cycle เปรียบเทียบสมรรถนะ ของโรงไฟฟ้าทั้งสองแบบ พบว่า โรงไฟฟ้าORC กับโรงไฟฟ้า Kalina cycle มี ประสิทธิภาพตามกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ เท่ากับ 13.5% และ 12.8% มีกำลังงานสุทธิ 2225.5 kW และ 2101.4 kW ตามลำดับ และโรงไฟฟ้า ORC กับ โรงไฟฟ้าKalina cycle มีประสิทธิภาพตามกฎข้อที่หนึ่ง ของเทอร์โมไดนามิกส์มากกว่า โรงไฟฟ้า Kalina cycle เท่ากับ 14.1% และ 10.6% มีประสิทธิภาพตามกฎข้อที่ สอง เท่ากับ 52% และ 44% กำลังงานสุทธิ 5270 kW และ 3949 kW ตามลำดับ

Hao Liu. [9] ศึกษาการจำลองเชิงตัวเลขโรงไฟฟ้า ORC โดยใช้พลังงานความร้อนร่วมกับเชื้อเพลิงชีวมวล



จากการศึกษา โรงไฟฟ้า ORC มีประสิทธิภาพ 7.5% -13.5% ผลิตไฟฟ้าอยู่ในช่วง 1.5 kW ถึง 2.71 kW. Bertrand Fankam Tchanches. [10] ศึกษาสารทำงานที่ ใช้ในโรงไฟฟ้า ORC โดยใช้พลังงานความร้อนจาก แสงอาทิตย์ จากการศึกษาพบว่า สารทำงานที่เหมาะสม ที่สุด คือ R134a และยังมีสารทำงานอื่นๆ ที่น่าสนใจคือ R125a R600a R600 และ R290 แต่ต้องระมัดระวังใน เรื่องของความปลอดภัยเนื่องจาก สารทำงานดังกล่าว สามารถติดไฟได้

ระบบ ORC ไม่พียงแต่ใช้ในการผลิตไฟฟ้า แต่ยังใช้ ในการขับปมั๊เพื่อใช้ในระบบกรองน้ำ การศึกษาของ Joan Carles Bruno. [11] ได้สร้างแบบจำลองโรงไฟฟ้า ORC ที่ ใช้พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ เพื่อใช้ในระบบกรอง น้ำ (reverse osmosis desalination) การศึกษานี้ได้ จำลองแบบโรงไฟฟ้า ORC-RO ที่ใช้ Solar collectors ชนิดต่างๆ เปรียบเทียบกับ RO-photovoltaic พบว่าน้ำที่ ได้จากระบบที่ใช้ ORC-RO มีต้นทุนต่อปริมาตรมีค่า เท่ากับ 2-3.3 €/m³ สำหรับกรองน้ำกร่อย และ 4.3-9.5 €/m³ สำหรับกรองน้ำทะเล ในทางตรงกันข้าม ROphotovoltaic มีต้นทุนต่อปริมาตรมีค่าเท่ากับ 3.8-4.3 €/m³ และ 12.8-14.8 €/m³ สำหรับกรองน้ำกร่อยและน้ำ ทะเล ตามลำดับ



ในการศึกษานี้ มีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาโปรแกรม จำลองการทำงานของโรงไฟฟ้าORC ที่ใช้ความร้อนใต้ พิภพเป็นต้นกำลัง ด้วยโปรแกรม Matlab โดยคำนวณ ดุณสมบัติของสารทำงานด้วยโปรแกรม CoolProp ซึ่งเป็น ฐานข้อมูลแบบ open-source ที่สามารถ download มาใช้ งานโดยไม่มีค่าใช้จ่าย โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสามารถ คำนวณประสิทธิภาพตามกฎข้อที่ 1 และข้อที่ 2 ของเทอร์ โมไดนามิกส์ รวมทั้งค่า exergy destruction ของระบบได้ และ เพื่อเป็นแนวทางในการหาจุดทำงานที่ดีที่สุดของ ระบบ ORC ต่อไป

2. แบบจำลองคณิตศาสตร์

ในการศึกษานี้ ระบบของโรงไฟฟ้า ORC ที่ได้ ทำการศึกษามีลักษณะดังรูปที่ 3 ซึ่งมีสมการควบคุม (governing equations) ที่เกี่ยวข้องมีดังนี้

$$\sum \dot{m}_{in} = \sum \dot{m}_{out} \tag{1}$$

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_{out} h_{out} - \sum \dot{m}_{in} h_{in}$$
(2)

$$\dot{X}_{dest} = \dot{I} = \dot{X}_{in} - \dot{X}_{out} \tag{3a}$$

$$\dot{X}_{dest} = \dot{X}_{m,in} - \dot{X}_{m,out} - \dot{X}_w + \dot{X}_{heat}$$
(3b)

$$\dot{X}_{m,in} = \sum \dot{m}_{in} \psi_{in} \tag{3c}$$

$$\dot{X}_{m,out} = \sum \dot{m}_{out} \psi_{out}$$
(3d)

$$\dot{X}_W = W_{net}$$
 (3e)

$$\dot{X}_{heat} = \sum \left(1 - \frac{T_0}{T_k} \right) \dot{Q}_k \tag{3f}$$

$$\psi = (h_k - h_0) - T_0(s_k - s_0)$$
 (4)

$$\dot{Q}_{hot} = \dot{Q}_{cold} \tag{5a}$$

$$\dot{Q}_{hot} = \dot{m}_{hot} (h_{hot,in} - h_{hot,out})$$
 (5b)

$$\dot{Q}_{cold} = \dot{m}_{cold} (h_{cold,out} - h_{cold,in})$$
 (5c)

จากสมการข้างต้นสามารถนำมาพิจารณาคำณวณ หาค่าต่างๆ ในแต่ละอุปกรณ์ได้ดังนี้

2.1 ปมั้ (pump)

$$\eta_p = \frac{h_{4\rm s} - h_3}{h_4 - h_3} \tag{6a}$$

$$\dot{W}_p = \dot{m}_{\rm wf}(h_4 - h_3)$$
 (6b)

$$\dot{X}_{dest,p} = \dot{I}_p = \dot{W}_p - \dot{m}_{wf}(\psi_4 - \psi_3)$$
 (6c)

2.2 เครื่องกังหัน (turbine)

$$\eta_t = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}} \tag{7a}$$

$$\dot{W}_t = \dot{m}_{\rm wf}(h_1 - h_2) \tag{7b}$$

$$\dot{X}_{dest,t} = \dot{I}_t = \dot{m}_{wf}(\psi_1 - \psi_2) - \dot{W}_t$$
 (7c)

2.3 เครื่องระเหย (evaporator)

$$\dot{Q}_{1w,Wp} = \dot{Q}_{ev} \tag{8a}$$

$$\dot{Q}_{1w,Wp} = \dot{m}_{geo} \left(h_{1w} - h_{Wp} \right) \tag{8b}$$

$$\dot{Q}_{ev} = \dot{m}_{wf}(h_1 - h_5)$$
 (8c)

$$\dot{X}_{dest,ev} = \dot{I}_{ev} = \sum \dot{m}_{in} \psi_{in} - \sum \dot{m}_{out} \psi_{out}$$
(8d)

$$\sum \dot{m}_{in}\psi_{in} = \dot{m}_{wf}\psi_5 + \dot{m}_{geo}\psi_{1w} \tag{8e}$$

$$\sum \dot{m}_{out} \psi_{out} = \dot{m}_{wf} \psi_1 + \dot{m}_{geo} \psi_{Wp} \tag{8f}$$

2.4 เครื่องอุ่น (preheater)

.

$$Q_{Wp,2w} = Q_{ph} \tag{9a}$$

$$\dot{Q}_{Wp,2w} = \dot{m}_{geo} \left(h_{Wp} - h_{2w} \right) \tag{9b}$$

$$\dot{Q}_{ph} = \dot{m}_{wf}(h_5 - h_4)$$
 (9c)

$$\dot{X}_{dest,ph} = \dot{I}_{ph} = \sum \dot{m}_{in} \psi_{in} - \sum \dot{m}_{out} \psi_{out}$$
 (9d)

$$\sum \dot{m}_{in}\psi_{in} = \dot{m}_{wf}\psi_4 + \dot{m}_{geo}\psi_{Wp} \tag{9e}$$

$$\sum \dot{m}_{out} \psi_{out} = \dot{m}_{wf} \psi_5 + \dot{m}_{geo} \psi_{2w} \tag{9f}$$

2.5 เครื่องควบแน่น (air condenser)

$$\dot{Q}_{\rm ac} = \dot{Q}_{air} \tag{10a}$$

$$\dot{Q}_{ac} = \dot{m}_{wf}(h_2 - h_3)$$
 (10b)

$$\dot{Q}_{air} = \dot{m}_{air}(h_{2z} - h_{1z})$$
 (10c)

$$\dot{X}_{dest,ac} = \dot{I}_{ac} = \sum \dot{m}_{in} \psi_{in} - \sum \dot{m}_{out} \psi_{out}$$
(10d)

$$\sum \dot{m}_{in}\psi_{in} = \dot{m}_{wf}\psi_2 + \dot{m}_{air}\psi_{1z} \tag{10e}$$

$$\sum \dot{m}_{out} \psi_{out} = \dot{m}_{wf} \psi_3 + \dot{m}_{air} \psi_{2z} \qquad (10f)$$

2.6 Exergy balance

$$\dot{X}_{System} = \dot{X}_{in} - \dot{X}_{out} - \dot{X}_{des} = 0$$
 (11a)

$$\dot{X}_{in} = \dot{X}_{1w} + \dot{X}_{1z}$$
 (11b)

$$\dot{X}_{out} = \dot{X}_{2w} + \dot{X}_{2z} + \dot{W}_{net}$$
 (11c)

$$\dot{X}_{dest.sum} = \dot{I}_{p} + \dot{I}_{t} + \dot{I}_{ph} + \dot{I}_{ev} + \dot{I}_{ac}$$
 (11d)

$$\dot{X}_{1w} = \dot{m}_{\text{geo}}[h_{1w} - h_0 - T_0(s_{1w} - s_0)]$$
 (11e)

$$\dot{X}_{2w} = \dot{m}_{\text{geo}}[h_{2w} - h_0 - T_0(s_{2w} - s_0)]$$
 (11f)

$$\dot{X}_{1z} = \dot{m}_{air}[h_{1z} - h_0 - T_0(s_{1z} - s_0)]$$
 (11g)

$$\dot{X}_{2z} = \dot{m}_{air}[h_{2z} - h_0 - T_0(s_{2z} - s_0)]$$
 (11h)

2.7 ระบบโรงไฟฟ้า(power plant system)

2.7.1 กำลังสุทธิ (net power)

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_t - \dot{W}_p \tag{12}$$

2.7.2 ประสิทธิภาพตามกฏข้อที่ 1 ของเทอร์โม ไดนามิกส์ (first-Law efficiency)

$$\eta_I = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_{in}} \tag{13a}$$

เมื่อ

$$\dot{Q}_{in} = \dot{Q}_{ev} + \dot{Q}_{ph} \tag{13b}$$

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m}_{geo}(h_{1w} - h_{2w})$$
 (13c)

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m}_{wf}(h_1 - h_4)$$
 (13d)

2.7.3 ประสิทธิภาพตามกฏข้อที่ 2 ของเทอร์โม ไดนามิกส์ (second-Law efficiency)

$$\eta_{II} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{X}_{1w} - \dot{X}_{2w}} \tag{14}$$

จากสมการการคำณวนของแต่ละอุปกรณ์สามารถ นำไปเขียนขั้นตอนการคำนวณดังแสดงในรูปที่ 4





การตรวจสอบความถูกต้อง

เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง งานวิจัยนี้ ใช้ข้อมูลและผลการทดลองของโรงไฟฟ้า ORC ของ Seok Hun Kang [5] โดยมีระบบโรงไฟฟ้าแสดงในรูปที่ 2 ซึ่ง Seok Hun Kang ได้ทำการออกแบบและทดสอบโรงไฟฟ้า ORC โดยใช้สารทำงานในระบบ คือ R245fa โดยใช้ ค่าพารามิเตอร์จาก Seok Hun Kang ดังแสดงในตารางที่ 1 ได้ผลดังตารางที่ 2 จะเห็นว่าค่าที่มีความคลาดเคลื่อน มากที่สุดคือค่าประสิทธิภาพของระบบ ซึ่งประสิทธิภาพ ของแบบจำลองมีค่ามากกว่าผลการทดลองของ Seok Hun Kang 12.48%

ความแตกต่างที่ปรากฏน่าจะเกิดจากการจำลองระบบ โรงไฟฟ้ า ORC ในแบบจำลองไม่ได้พิจารณาการสูญเสีย พลังงานความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อม ที่เกิดขึ้นระหว่างการ แลกเปลี่ยนความร้อน และความร้อนที่สูญเสียในอุปกรณ์ ต่าง ๆ และการสูญเสียความดันภายในระบบ จึงทำให้ผล การจำลองมีค่าประสิทธิภาพมากกว่าในผลการทดลอง และในส่วนของค่าประสิทธิภาพ Carnot ของแบบจำลองมี ค่ามากกว่าการทดลอง 6.46% เนื่องจากการนิยามค่าของ อุณหภูมิที่ใช้ในการพิจารณา ซึ่งใช้ค่าอุณหภูมิสูงสุดใน ระบบแตกต่างกัน ในแบบจำลองจะใช้ค่าอุณหภูมิสูงสุดใน ระบบคืออุณหภูมิที่ทางเข้าเครื่องกังหัน แต่ในการทดลอง ของ Seok Hun Kang ใช้อุณหภูมิที่ทางเข้าเครื่องระเหย ทำให้ค่าประประสิทธิภาพ Carnot ของแบบจำลองมีค่า มากกว่าการทดลอง ดังที่แสดงในตารางที่ 2 จะเห็นว่า แบบจำลองมีความน่าเชื่อถือจึงนำแบบจำลองไปใช้ต่อ เนื่องจากความผิดพลาดสูงสุดมีค่าเท่ากับ 12.48%



ร**ูปที่ 2** ระบบโรงไฟฟ้าORC ของ Seok Hun Kang [12] (a) กระบวนการของระบบ ORC (b) กราฟ T-S diagram

ตารางที่ 1 ค่าที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองจาก Seok Hun Kang [12]

Parameters	T _{ev.in}	$T_{t.in}$	$T_{c.out}$	$P_{t.out}$	W_t	η_t	η_p
Units	°C	°C	°C	bar	kW	%	%
Values	77	80	37.4	2.91	24.5	75	85.9

d .	0	0	id i	a	ب					
ิตารางท 2	ผลการคำนวณแข	แบล้าลองเ	าโรยาเ	เทยา	เกาเผล	การทดลอง	Seok	Hun	Kand	[12]
							0001	1 10111	i tonig	11

T (°C)		% orror	P (bar)		%	η_I (%)		%	η_{carnot} (%)		%	
FUSILION	[12]	Present	70e110i	[12]	Present	error	[12]	Present	error	[12]	Present	error
Evp. in	77.1	77	0.13	7.6	7.22	5.00						
Turb. in	80.7	80	0.87	7.6	7.22	5.00	E 0E	5 69	10 10	11 2	10.02	6 46
Turb. out	61	58.5	4.10	2.91	2.91	0.00	5.05	5.00	12.40	11.5	12.03	0.40
Cond. out	37.4	37.4	0.00	2.34	2.27	2.99						





ร**ูปที่ 3** ระบบ ORC ที่ใช้พลังงานความร้อนใต้พิภพ (a) กระบวนการของระบบ ORC (b) กราฟ T-S diagram [7]





parameter	T_{1w}	T_{2w}	T_3	T_{1z}	T_{2z}	T_0	ΔT_{pp}	P_{ev}	P_{geo}	P_0	\dot{W}_t	η_t	η_p
unit	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	bar	bar	bar	kW	%	%
value	140	80	25	15	20	15	5	5.6	16	1	2260	85	80

ตารางที่ 3 ค่าที่ใช้เป็นค่าเริ่มต้นในการจำลองระบบ ORC Zvonimir Guzovic [7]

4. ผลการศึกษา

ในการศึกษานี้จะใช้ข้อมูลจาก Zvonimir Guzovic [7] โดยมีส่วนประกอบและกระบวนการของโรงไฟฟ้า ORC ดังแสดงในรูปที่ 3 และใช้ค่าในตารางที่ 3 เป็นค่าเริ่มต้น ซึ่งสารทำงานที่ใช้ในโรงไฟฟ้า ORC คือ isopentane (C5H12) และใช้น้ำร้อนจากแหล่งความร้อนใต้พิภพเป็นต้น กำลัง จากนั้นได้ศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงของ ค่าพารามิเตอร์ได้ผลดังนี้

4.1 อิทธิพลของอุณหภูมิแหล่งความร้อน

โดยพิจารณาให้แหล่งความร้อนมีค่าอุณหภูมิตั้งแต่ 112°C ถึง 140°C และกำลังที่ได้จากเครื่องกังหันมีค่าคงที่ ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 5 จากกราฟจะพบว่าเมื่อแหล่งความ ร้อนมีอุณหภูมิสูงขึ้น ปริมาณน้ำที่ต้องการเพื่อจะต้มสาร ทำงานจะมีค่าลดลง จะเห็นว่าอิทธิพลของอุณหภูมิแหล่ง ความร้อนมีผลต่อความต้องการของน้ำ เมื่ออุณหภูมิมีค่า เพิ่มขึ้นจาก 112°C เป็น 140°C จะส่งผลให้ความต้องการ น้ำเพื่อใช้ในการต้มสารทำงานลดลงถึง 47% และยังส่งผล ถึงการทำงานของป์มั้น้ำ เมื่อความต้องการของน้ำลดลงก็ จะทำให้งานที่จะจ่ายให้ป์มั้ลดลงด้วย

4.2 อิทธิพลของอุณหภูมิสารทำงานที่ทางออกเครื่อง ดวบแน่น

กำหนดให้อุณหภูมิของสารทำงานมีค่า 25°C ถึง 40°C โดยให้สถานะของสารทำงานที่ทางออกเครื่องควบแน่น เป็นของเหลวอิ่มตัว และกำลังที่ได้จากเครื่องกังหันเป็น ค่าคงที่ ได้ผลดังรูปที่ 6 จะเห็นว่าเมื่อค่าอุณหภูมิของสาร ทำงานในระบบเพิ่มสูงขึ้น เพื่อจะรักษากำลังที่ได้จาก เครื่องกังหันให้คงที่ จึงต้องการอัตราการไหลของสาร ทำงานที่เพิ่มขึ้น และเมื่ออัตราการไหลของสารร ทำงานที่เพิ่มขึ้น และเมื่ออัตราการไหลของสารร ทำงานที่เพิ่มขึ้น และเมื่ออัตราการไหลของสาร กำงานที่เพิ่มขึ้น และเมื่ออัตราการไหลของสาร กำงานที่เพิ่มขึ้น และเมื่ออัตราการไหลของสาร กำงานที่เพิ่มขึ้น และเมื่ออัตราการไหลของสาร กำงานที่เพิ่มขึ้น และเมื่ออัตราการไหลของสาร กำงานที่เพิ่มขึ้น และเมื่ออัตราการไหล สูงขึ้น เพื่อจะให้มีปริมาณความร้อนแลกเปลี่ยนที่เครื่องอุ่น และเครื่องระเหยตามที่ต้องการ จึงต้องเพิ่มอัตราการไหล ของน้ำจากแหล่งความร้อนให้มากขึ้น นอกจากนี้ แม้ว่าจะ ได้กำลังจากเครื่องกังหันมีค่าคงที่ แต่เพื่อจะเพิ่มอัตราการ ใหลของสารทำงาน งานที่ต้องจ่ายให้กับปมั้จึงมีค่าเพิ่มขึ้น ค่ากำลังสุทธิจึงมีค่าลดลงดังแสดงในรูปที่ 6 เมื่ออุณหภูมิ ของสารทำงานเพิ่มขึ้นจาก 25°C ถึง 40°C จะส่งผลให้ต้อง เพิ่มอัตราการไหลของสารทำงานและของน้ำเพิ่มขึ้น 32.38% และ 22.69% ตามลำดับ กำลังสุทธิจะลดลง 0.35%

ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารทำงานไม่ เพียงแต่ส่งผลต่ออัตราการไหลของสารทำงาน ของน้ำ และกำลังสุทธิ ยังส่งผลต่อประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้า ORC ตามกฏข้อที่หนึ่งและข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ ดังแสดงในรูปที่ 7 จะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิของสารทำงานมี ค่าเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพตามกฏข้อที่หนึ่งและ ข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ลดลง เนื่องจากอุณหภูมิ ของสารทำงานมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้กำลังสุทธิมีค่า ลดลง ดังที่ได้อธิบายไว้แล้วทำให้ประสิทธิภาพมีค่าลดลง และพิจารณาช่วงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิพบว่า เมื่อ อุณหภูมิของสารทำงานมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 25°C ถึง 40°C จะส่งผลให้ประสิทธิภาพตามกฏข้อที่หนึ่งและข้อที่สองของ เทอร์โมไดนามิกส์มีค่าลดลงถึง 18.78% และ 18.65% ตามลำดับ



ร**ูปที่ 5** อัตราการไหลของน้ำจากแหล่งความร้อน เมื่อ อุณหภูมิของน้ำแหล่งความร้อนเปลี่ยนไป







ร**ูปที่ 6** อัตราการไหลของสารทำงานในระบบ ORC และ กำลังสุทธิ เมื่ออุณหภูมิสารทำงานทางออกของเครื่อง ควบแน่นเปลี่ยนไป



ร**ูปที่ 7** ประสิทธิภาพตามกฏข้อที่ 1 และ 2 ของเทอร์โม ไดนามิกส์ ของระบบ ORC เมื่ออุณหภูมิที่ตำแหน่ง ทางออกของเครื่องควบแน่นเปลี่ยนไป

4.3 Exergy analysis

จากการพิจารณาอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิของสารทำงานที่ทางออกของเครื่องควบแน่น ส่งผลต่อค่า exergy destruction ของแต่ละอุปกรณ์ได้ผล ดังแสดงในรูปที่ 8 จากกราฟจะเห็นว่า เมื่ออุณหภูมิของ สารทำงานเปลี่ยนแปลงไปส่งผลให้ exergy destruction ในบางอุปกรณ์ลดลงเช่น เครื่องระเหย กับ เครื่องกังหัน และอุปกรณ์ที่มีค่า exergy destruction เพิ่มขึ้นคือ เครื่อง ควบแน่น เครื่องอุ่น ปมั้ และอากาศหล่อเย็น ซึ่งจะเห็นว่า ที่ปมั้และอากาศหล่อเย็นนั้นมี การเปลี่ยนแปลงของค่า exergy destruction น้อยมากเมื่อเที่ยบกับ เครื่อง ควบแน่นและเครื่องอุ่น เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของ อุณหภูมิของสารทำงานที่ทางออกของเครื่องควบแน่น ไม่ได้มีอิทธิพลต่อผลต่างของอุณหภูมิที่ทางเข้าและ ทางออกของปมั้ และ อากาศหล่อเย็น แต่ค่าพารามิเตอร์ที่ ทำให้ exergy destruction ในปมั๊และอากาศหล่อเย็น เพิ่มขึ้น เนื่องจากค่าอัตราการไหลของสารทำงานมีค่า เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของสารทำงานเพิ่มขึ้นดังที่ได้อิบายไว้ ในหัวข้อ 4.2

ในทางตรงกันข้ามจะเห็นว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของ สารทำงาน ก็ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของผลต่าง อุณหภูมิที่ทางเข้าและทางออกของเครื่องระเหย และยังทำ ให้ exergy destruction มีค่าลดลง เนื่องจาก เมื่อเพิ่ม อุณหภูมิของสารทำงาน ส่งผลให้อัตราการไหลของสาร ทำงานเพิ่มขึ้นดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 4.2 ส่งผลให้สาร ทำงานที่อยู่ในเครื่องระเหยมี exergy เพิ่มขึ้น ซึ่ง หมายความว่าเครื่องอุ่นสามารถใช้ประโยชน์ หรือรับเอา exergy จากแหล่งความร้อนที่เข้ามาในเครื่องระเหยได้ มากขึ้น จึงส่งผลให้มีค่า exergy destruction ที่เครื่อง ระเหยลดลง

ในส่วนของเครื่องควบแน่นจะเห็นว่า มีค่า exergy destruction เพิ่มขึ้นสูงมากเมื่ออุณหภูมิของสารทำงาน เพิ่มขึ้นจาก 25 °C จนถึง 40 °C มีค่า exergy destruction เพิ่มขึ้นจาก 426.23 kW เป็น 1336.2 kW หรือเพิ่มขึ้น 213.5% เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิสารทำงานที่ ทางออกของเครื่องควบแน่น ส่งผลให้อุณหภูมิที่ทางเข้า และทางออกของเครื่องควบแน่นมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ทำให้ ้อัตราการเพิ่มขึ้นของค่า exergy ที่ทางเข้ามีค่ามากกว่า อัตราการเพิ่มขึ้นของ exergy ที่ทางออก จึงทำไห้ผลต่าง ของค่า exergy ของสารทำงานที่อยู่ในเครื่องควบแน่นมีค่า เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ exergy destruction มีค่าเพิ่มสูงขึ้น และ จะเห็นว่า ค่า exergy destruction ในเครื่องอุ่นมีค่าเพิ่ม สูงขึ้นเช่นกัน เนื่องจาก เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสารทำงานที่ ทางออกของเครื่องควบแน่นจากจาก 25°C จนถึง 40°C มี exergy destruction มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 453.19 kW เป็น 564.6 kW หรือเพิ่มขึ้น 24.6% ส่งผลให้อุณหภูมิของสาร ทำงานที่ทางเข้าของเครื่องอุ่นมีค่าเพิ่มขึ้น และทำให้มี ้อัตราการเพิ่มขึ้นของค่า exergy ของสารทำงานที่อยู่ใน ้เคื่องอุ่นมีค่าน้อยกว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า exergy ของ



้คำนวณประสิทธิภาพตามกฎข้อที่ 1 และข้อที่ 2 ของเทอร์ โมไดนามิกส์ รวมทั้งค่า exergy destruction ของระบบ

ในการศึกษานี้ได้ศึกษาอิธิพลของการเปลี่ยนแปลง ้ค่าอุณหภูมิของแหล่งความร้อนพบว่า เมื่อค่าอุณหภูมิของ ้น้ำเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ความต้องการน้ำลดลง พิจารณาช่วงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิพบว่า เมื่อ อุณหภูมิของน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 112 °C ถึง 140 °C จะ ส่งผลให้ความต้องการน้ำเพื่อใช้ในการต้มสารทำงานลดลง ถึง 47% และ ศึกษาอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงอ่า อุณหภูมิของสารทำงานที่ทางออกเครื่องควบแน่น พบว่า เมื่อค่าอุณหภูมิของสารทำงานมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตรา การไหลของสารทำงานและของน้ำ มีค่าเพิ่มขึ้น และยัง ส่งผลให้กำลังสุทธิมีค่าลดลง เมื่อพิจารณาช่วงของการ เปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิของสารทำงาน เมื่ออุณหภูมิของ สารทำงานเพิ่มขึ้นจาก 25°C ถึง 40°C จะส่งผลให้ต้อง เพิ่มอัตราการไหลของสารทำงานและของน้ำ 32.38% และ 22.69% ตามลำดับ และทำให้กำลังสุทธิลดลง 0.35% อีก ทั้งยังส่งผลถึงประสิทธิภาพตากฏข้อที่หนึ่งและข้อที่สอง ของเทอร์โมไดนามิกส์ ลดลง 18.78% และ 18.65% ์ตามลำดับ และ ส่งผลให้ exergy destruction ในเครื่องอุ่น และเครื่องควบแน่นมีค่าเพิ่มขึ้น 213.5% และ 24.6% ตามลำดับ

Nomenclature

h	specific enthalpy (J/kg)
İ	exergy lost rate (W)
'n	mass flow rate (kg/s)
Р	pressure (Pa)
Ż	heat transfer rate (W)
S	specific entropy (J/kg.K)
Т	temperature (°C)
Ŵ	power output (W)
Ż	exergy rate (W)
Greek letters	

ΔT	temperature difference (°C)
ψ	specific exergy rate (J/kg)
η_I	First-Law efficiency (%)
η_{II}	Second-Law efficiency (%)

แหล่งความร้อนที่เข้ามาในเครื่องอุ่น จึงส่งผลให้ค่า exergy destruction มีค่าเพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 8

ทั้งนี้แนวทางในการลดค่า exergy destruction ใน ้เครื่องควบแน่นและเครื่องอุ่นสามารถทำได้ด้วยวิธีการลด อุณหภูมิของสารทำงานที่ทางออกของเครื่องควบแน่น หรือลดค่าความดันในเครื่องควบแน่น จะทำให้ exergy destruction ลดลง ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 8 จะเห็นได้ว่าที่ อุหภูมิ 25°C มีค่า exergy ถูกทำลายในเครื่องควบแน่น และเครื่องอุ่นน้อยมากเมื่อเทียบกับอุณหภูมิของสาร ทำงานที่มีค่าเท่ากับ 40°C และหากไม่สามารถลดอุณหภูมิ ของสารทำงานลงได้ วิธีที่จะทำให้ค่า exergy destruction ูลดลง คือ การเพิ่มอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเข้าไป เช่น economizer หรือ recuperator เพื่อนำสารทำงานที่ ้ออกจากเครื่องกังหันที่ยังมีอุณหภูมิสูง ไปถ่ายเทความ ้ร้อนให้กับสารทำงานก่อนที่จะเข้าเครื่องอุ่น จะทำให้ exergy destruction ในเครื่องควบแน่นและเครื่องอุ่นมีค่า ลดลง





5. สรุปผล

ในการศึกษานี้ มีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาโปรแกรม จำลองการทำงานของโรงไฟฟ้าORC ที่ใช้ความร้อนใต้ พิภพเป็นต้นกำลัง ด้วยโปรแกรม Matlab โดยคำนวณ คุณสมบัติของสารทำงานด้วยโปรแกรม CoolProp ซึ่งเป็น ฐานข้อมูลแบบ open-source ที่สามารถ download มาใช้ ้งานโดยไม่มีค่าใช้จ่าย โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสามารถ

[4] Exergy, Italy. Statistic Data, URL:



Subscribe

0	reference state
1-5	state points
2s,4s	state points for the ideal case
1w,Wp,2w	state points for the heat source
1z,2z	state points for the heat sink
ac	air condenser
air	air
cold	cold fluid
dest	destruction
e	exit
ev	evaporator
geo	geothermal fluid
heat	heat
hot	hot fluid
I	in
In	inlet
k	location
m	mass
net	net
out	outlet
р	pump
ph	preheater
рр	pinch-point
sum	summation
system	system
t	turbine
w	work
wf	working fluid

6.เอกสารอ้างอิง

[1] Ormat, United state. Statistic Data, URL: http://www.omat.com, access on 25 April 2015. [2] Pratt & Whitney, United state. Statistic Data, URL: http://www.pratt-whitney.com, access on 25 April 2015.

[3] Turboden, Italy. Statistic Data, URL:

http://www.turboden.com, access on 25 April 2015.

http://www.exergy-orc.com, access on 25 April 2015. [5] Guopeng Yu, Gegun Shu, Hua Tian, Haiqiao Wei, and Lina Liu. Simulation and thermodynamic analysis of a bottoming Organic Rankine Cycle (ORC) of diesel engine (DE). Energy 2013; 51:1-10 [6] J.P. Roy, M.K. Mishra, and Ashok Misra.

Parametric optimization and performance analysis of a waste heat recovery system using Organic Rankine Cycle. Energy 2010; 35:5049-5062

[7] Zvonimir Guzovic, Boris Majcen, and Svetislav Cvetkovic. Possibilities of electricity generation in the Republic of Croatia from medium-temperaturegeothermal sources. Applied Energy 2012; 98:404-414

[8] Z. Guzovi, D. Loncar, and N. Ferdelji. Possibilities of electricity generation in the Republic of Croatia by means of geothermal energy. Energy 2010; 35: 3429-3440

[9] Hao Liu, Yingjuan Shao, and Jinxing Li. A biomass-fired micro-scale CHP system with organic Rankine cycle (ORC) Thermodynamic modelling studies. Biomass and bioenergy 2011; 35: 3985-3994 [10] Bertrand Fankam Tchanche, George Papadakis, Gregory Lambrinos, and Antonios Frangoudakis. Fluid selection for a low-temperature solar organic Rankine cycle. Applied Thermal Engineering 2009; 29: 2468-2476

[11] Joan Carles Bruno, Jesus Lopez-Villada, Eduardo Letelier, Silvia Romera, and Alberto Coronas. Modelling and optimisation of solar organic rankine cycle engines for reverse osmosis desalination. Applied Thermal Engineering 2008; 28: 2212-2226

[12] Seok Hun Kang. Design and experimental study of ORC (organic Rankine cycle) and radial turbine using R245fa working fluid. Energy 2012; 41:514-524.