ต้นแบบโรงไฟฟ้าระบบ Organic Rankine Cycle

ต้นแบบโรงไฟฟ้าระบบ Organic Rankine Cycle มีหลักการทำงาน คือ การเปลี่ยนพลังงานความร้อนอุณหภูมิต่ำในช่วง 90-110 องศาเซลเซียส มาผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้าผ่านระบบ Organic Rankine Cycle

วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ หรือ Organic Rankine Cycle (ORC) เป็นระบบการทำงานที่ใช้หลักการของวัฏจักรแร็งคิน (Rankin Cycle) แต่ใช้สารทำงานในกลุ่มสารอินทรีย์ (Organic) ที่มีมวลโมเลกุลสูง สามารถเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นไอที่อุณหภูมิต่ำหรือมีจุดเดือดต่ำ (Boiling point) เมื่อเปรียบเทียบกับจุดเดือดของน้ำที่ใช้เป็นสารทำงานในระบบแร็งคิน ทำให้ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าแบบ ORC สามารถทำให้สารทำงานกลายสถานะจากของเหลวเป็นไอ เพื่อใช้ขับกังหันและผลิตกระแสไฟฟ้าออกมาได้ โดยใช้แหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ

1.1 หลักการทำงานของต้นแบบโรงไฟฟ้าระบบ Organic Rankine Cycle

ต้นแบบโรงไฟฟ้าระบบ Organic Rankine Cycle ของวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ มีกระบวนการทำงานดังแสดงในรูปที่ 1 ใช้น้ำมันดีเซลเป็นแหล่งเชื้อเพลิงให้แก่หัวเผา (Burner) ตัวที่ 1 และ 2 (จุดที่ 1h และ 2h) และใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลว (Liquefied Petroleum Gas: LPG) เป็นแหล่งเชื้อเพลิงให้แก่หัวเผาตัวที่ 3 (จุดที่ 3h) ในการให้ความร้อนแก่หม้อต้มน้ำ (Hot Water Generator) เพื่อผลิตน้ำร้อนอุณหภูมิประมาณ 95 องศาเซลเซียส

จากนั้นน้ำร้อนดังกล่าวจะถูกจ่ายให้แก่ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าแบบ ORC (จุดที่ 4h และ 5h) โดยปั๊มน้ำร้อน (Hot Water Pump) เพื่อถ่ายเทความร้อนให้แก่สารทำงาน (Refrigerant) ในระบบผลิตกระแสไฟฟ้าแบบ ORC น้ำร้อนจะมีอุณหภูมิลดลงประมาณ 10 องศาเซลเซียส (จุดที่ 6h) และถูกส่งกลับไปรับความร้อนอีกครั้งที่หม้อต้มน้ำ

ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าแบบ ORC มี R-245fa (Pentafluoropropane) เป็นสารทำงานในระบบ (แสดงคุณสมบัติของสารทำงานในตารางที่ 1) โดยสารทำงานในสถานะของเหลว (จุดที่ 1) จะถูกส่งมารับความร้อนที่เครื่องระเหย (Evaporator) (จุดที่ 2) โดยปั๊มสารทำงาน (Refrigerant Pump) จากนั้นสารทำงานจะรับความร้อนจากน้ำร้อนภายใต้ความดันคงที่ ($P_2 = P_2'$) จนกระทั่งเข้าสู่สภาวะของเหลวอิ่มตัวที่สภาวะ (จุดที่ 2′) กลายเป็นไออิ่มตัวที่สภาวะ (จุดที่ 3′) และเป็นไอร้อนยวดยิ่งที่สภาวะ (จุดที่ 3) ในที่สุด ไอร้อนยวดยิ่งจะเข้าสู่กังหัน (Turbine) ขยายตัวและขับเพลาที่ต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) เพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้า จากนั้นความดันและอุณหภูมิของไอของสารทำงานที่ทางออกของกังหันจะลดลง (จุดที่ 4) และอยู่ในสภานะของผสมระหว่างไอสารทำงานและน้ำมันหล่อลื่น ทั้งนี้ภายในกังหันจะมีการใช้น้ำมันหล่อลื่นฉีดเข้าสู่ภายในของกังหัน เพื่อลดความเสียดทานระหว่างการสัมผัสกันของโลหะที่ใช้ทำกังหัน (จุดที่ 5-7) ซึ่งระบบผลิตกระแสไฟฟ้าแบบ ORC ของวิทยาลัยพลังงานทดแทน ได้นำหลักการกลับทางหมุนของเครื่องอัดไอ

(Revert Compressor) มาใช้ในกระบวนเปลี่ยนพลังงานกลให้เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยเครื่องอัดไอที่ใช้ในระบบผลิตกระแสไฟฟ้าแบบ ORC เป็นแบบสกรู (Screw Compressor) ซึ่งมีการใช้ระบบน้ำมันหล่อลื่นภายในเครื่องอัดไออยู่ก่อนแล้วนั้นเอง จากนั้นจะไอสารทำงาน (จุดที่ 8) ที่แยกตัวออกจากน้ำมันหล่อลื่นโดยตัวแยกของไหล (Oil and Vapor Separator) จะเข้าสู่เครื่องควบแน่น (Condenser) ภายใต้ความดันคงที่ ($P_4 = P_1$) กลายเป็นของเหลวอิ่มตัว (จุดที่ 1) อีกครั้ง

ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าแบบ ORC มีการระบายความร้อนโดยน้ำที่เครื่องควบแน่นโดยใช้หอผึ่งความร้อน (Cooling Tower) โดยมีอุณหภูมิน้ำเข้าและออกประมาณ 27 องศาเซลเซียส และ 32 องศาเซลเซียส (จุดที่ 1c-3c) ตามลำดับ

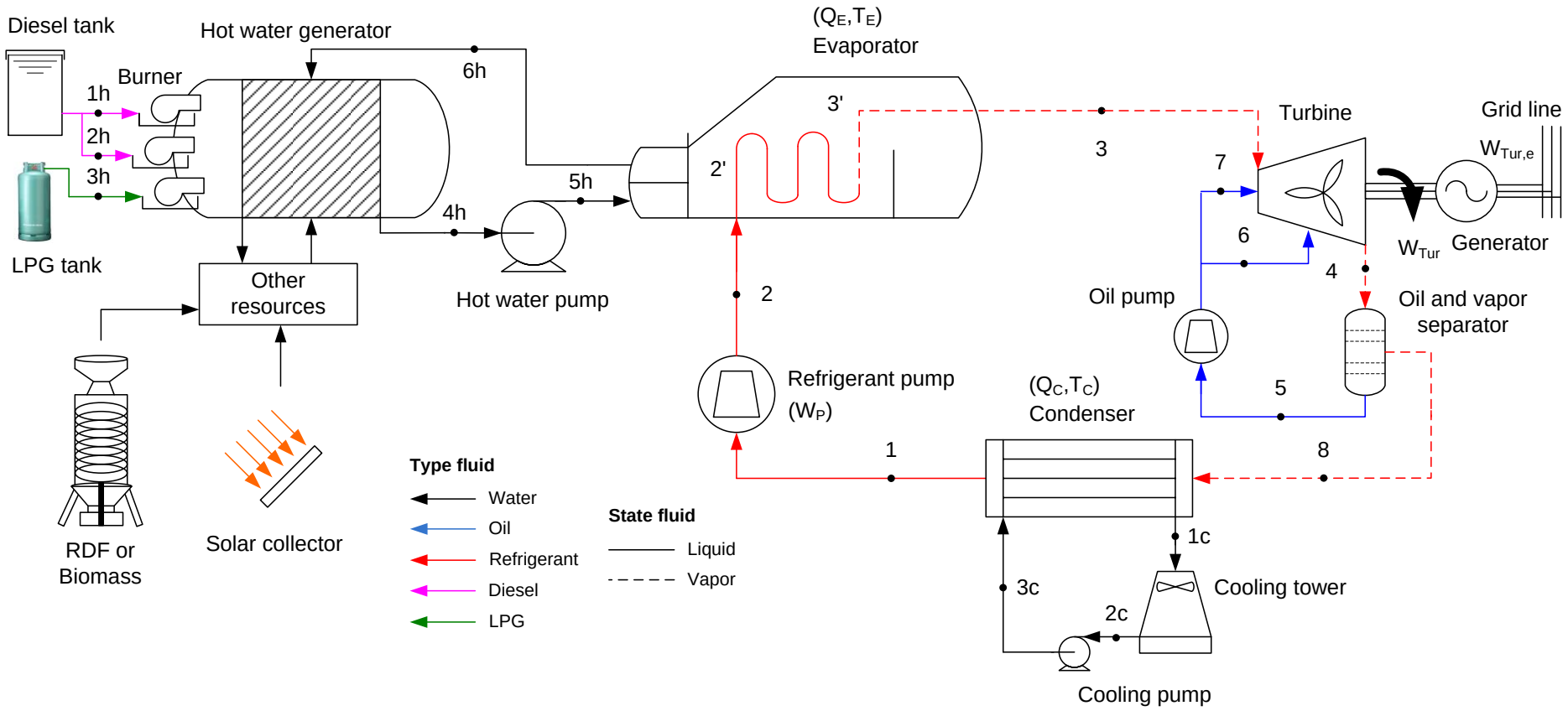
ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพของสารทำงาน R-245fa

คุณสมบัติ	R-245fa
ชื่อทางเคมี	$CF_3CH_2CHF_2$
มวลโมเลกุล (kg/kmol)	134.05
อุณหภูมิจุดวิกฤต (^oC)	154.01
ความดันจุดวิกฤต (MPa)	3.651
ความหนาแน่นจุดวิกฤต (kg/m^3)	516.08
จุดเดือด (^oC)	15.14
ความร้อนแฝงการกลายเป็นไอที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส (kJ/kg)	143.92
การติดไฟ	No
เป็นพิษ	Yes
ALT (Year, Atmosphere Life Time)	7.6
ODP (R-11 related, Ozone Depletion Potential)	0
GWP (100 Years, Global Warming Potential)	1030

ข้อดีของการผลิตไฟฟ้าด้วยระบบ ORC เปรียบเทียบกับระบบอื่นๆ เช่น ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันไอน้ำ (Steam turbine) มีดังต่อไปนี้ [Turboden, 2015]

- ประสิทธิภาพของระบบรวมสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำไปใช้ในระบบผลิตความร้อนร่วม (Cogeneration plants)
- ประสิทธิภาพของกังหันสูงหรือประมาณ 90%
- ความเครียดของเครื่องจักรต่ำ เนื่องจากความเร็วของสารทำงานในระบบต่ำ
- ความเร็วรอบของกังหันต่ำ ทำให้สามารถต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้โดยตรงกับกังหัน โดยปราศจากเกียร์ทดรอบ

- ไม่มีการกัดกร่อนของใบกังหัน เนื่องจากไม่มีความชื้นในหัวฉีดไอสารทำงาน
- มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน เนื่องจากคุณสมบัติของสารทำงานที่ไม่เหมือนไอน้ำ ที่มักจะเป็นสนิมและเกิดการสึกกร่อนของวาล์วและใบกังหัน
- ไม่ต้องมีระบบรักษาความสะอาดน้ำ เหมือนเช่น โรงไฟฟ้ากังหันไอน้ำ เป็นต้น



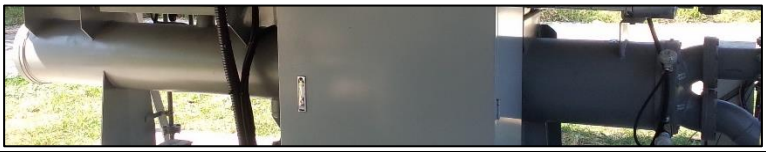
รูปที่ 1 แผนภาพแสดงอุปกรณ์ของต้นแบบโรงไฟฟ้าระบบ Organic Rankine Cycle

จัดทำโดย รองศาสตราจารย์ ดร.นัฐพร ไชยญาติ (Email: benz178tii@hotmail.com)

1.2 คุณลักษณะของต้นแบบโรงไฟฟ้าระบบ Organic Rankine Cycle

ต้นแบบโรงไฟฟ้าระบบ Organic Rankine Cycle แบ่งออกเป็น 3 ส่วนย่อย คือ ระบบให้พลังงานความร้อน ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าแบบ ORC และระบบระบายความร้อน ตามลำดับ โดยอุปกรณ์หลักต่างๆ ของทั้ง 3 ระบบแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 รายละเอียดอุปกรณ์ของต้นแบบโรงไฟฟ้าระบบ Organic Rankine Cycle

Component	Data
ORC model	• Hanbell model: RC2-300 • Gross power: 20 kW, Net power: 16 kW • 3 Phase, 380 V, 50 Hz
Refrigerant	• R245fa
Expander	• Semi-hermetic twin screw type expander • Speed 3,000 rpm
Evaporator	• SUS 316 plate type heat exchanger
Condenser	• Shell and tube heat exchanger • Shell: carbon steel 12 in x 3 m • Tube: 3/4 in copper tube 
Oil separator	• Vertical type oil separator with oil tank 18 in diameter 0.7 m

Component	Data
Oil pump	• Viking heavy duty oil pump GG4195 • Motor: 3 hp, 3 phase, 380 V, 50 Hz
Refrigerant pump	• Vertical multi-stage centrifugal pump VFD drive • Model: BN3-17 • Motor: 2 hp, 3 phase, 380 V, 50 Hz
Hot water pump/ Cooling pump	• Ebora model CMB/E 3 T • Electrical consumption 2.2 kW • Flow rate 100-280 L/m

จัดทำโดย รองศาสตราจารย์ ดร.นัฐพร ไชยญาติ (Email: benz178tii@hotmail.com)

Component	Data
Control system	• PLC programmed controller with 5.7" LCD touch screen • Human-Machine interface, magnetic switch, main NFB, INT69 power protector, power meter, expander tachometer, pressure sensor, temperature sensor
Cooling tower	• Model BKC 80 RT • Electrical consumption of fan motor 1.12 kW (1.5 hp)

ระบบให้พลังงานความร้อนมีหม้อต้มน้ำแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ (Shell and Tube Heat Exchanger) ที่มีการให้ความร้อนวิ่งผ่านภายในท่อ และมีน้ำอยู่ระหว่างภายนอกท่อและเปลือกของอุปกรณ์ ดังแสดงรูปถ่ายของอุปกรณ์ในรูปที่ 2

รูปที่ 2 หม้อต้มน้ำและระบบหัวเผาน้ำมันดีเซลและก๊าซปิโตรเลียมเหลว

น้ำร้อนอุณหภูมิประมาณ 95 องศาเซลเซียส จากระบบผลิตน้ำร้อนจะถูกส่งไปตามท่อน้ำน้ำร้อน (ท่อเหล็กดำ SCH 60) ที่มีการหุ้มฉนวนใยแก้วหนา 1 นิ้ว เข้าสู่ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าแบบ ORC ดังแสดงในรูปที่ 3 มีการระบายความร้อนโดยหอผึ่งระบายความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 4 และมีภาพโดยรวมของต้นแบบโรงไฟฟ้าระบบ Organic Rankine Cycle ดังแสดงในรูปที่ 5

รูปที่ 3 ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าแบบ ORC ด้านหน้า

รูปที่ 4 ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าแบบ ORC ด้านหลัง

รูปที่ 5 หอผึ่งระบายความร้อน

รูปที่ 6 ภาพโดยรวมของต้นแบบโรงไฟฟ้าระบบ Organic Rankine Cycle

1.3 ประสิทธิภาพของระบบผลิตกระแสไฟฟ้าแบบ Organic Rankine Cycle

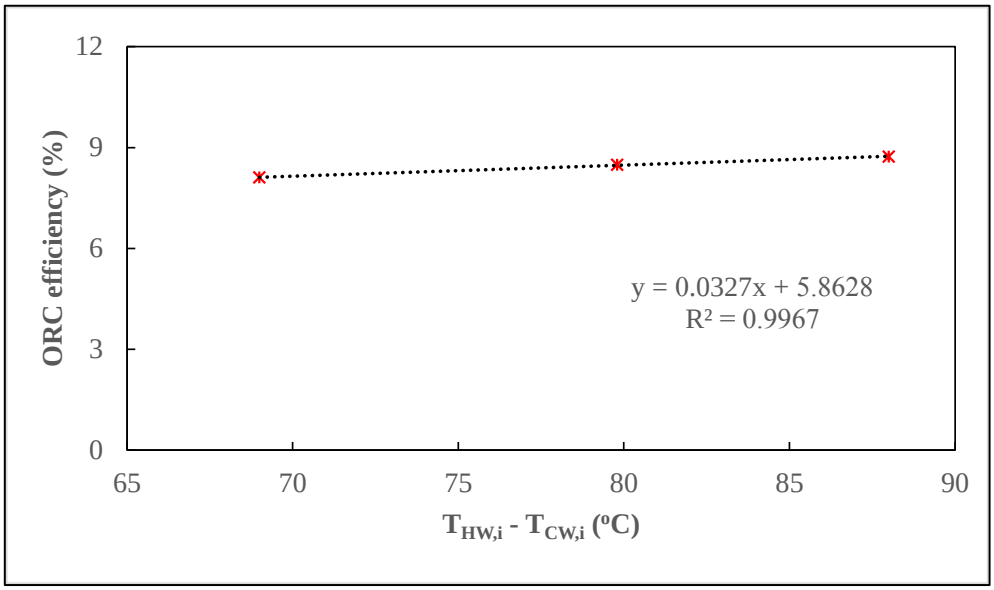
จากผลการทดสอบระบบผลิตกระแสไฟฟ้าแบบ Organic Rankine Cycle ขนาด 20 กิโลวัตต์ไฟฟ้า โดยป้อนน้ำร้อนในช่วงอุณหภูมิ 90-120 องศาเซลเซียส (ทดสอบในระบบปิดที่ความดันสูงกว่า 1 บาร์ ทำให้น้ำมีจุดเดือดสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส) โดยผลการทดสอบพบว่า ประสิทธิภาพของระบบแปรผันตรงกับอุณหภูมิน้ำร้อนที่เข้าสู่ระบบ ณ เครื่องระเหย ดังแสดงในตารางที่ 3 นอกจากนั้นยังพบอีกว่า ประสิทธิภาพของระบบ Organic Rankine Cycle (η_{ORC}) มีความสัมพันธ์กับผลต่างอุณหภูมิของน้ำร้อนเข้าเครื่องระเหยกับเครื่องควบแน่น ($T_{HW,i} - T_{CW,i}$) เป็นลักษณะเส้นตรงดังแสดงในรูปที่ 7 ทั้งนี้ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวจะเรียกว่า “สมการสมรรถนะ (Performance curve)” [นัฐพร, 2557] ดังต่อไปนี้

$$\eta_{ORC} = 0.0327(T_{HW,i} - T_{CW,i}) + 5.8628. \qquad \text{สมการที่ 1}$$

ตารางที่ 3 ผลทดสอบระบบผลิตกระแสไฟฟ้าแบบ Organic Rankine Cycle ที่ใช้ R-245fa เป็นสารทำงาน

Descriptions	Data			
Hot water inlet ($T_{HW,i}$)	116	107.8	97	^{o}C
Heat source capacity (Q_B)	243.2	248.2	203.4	kW
Cool water inlet ($T_{CW,i}$)	28	28	28	^{o}C

Descriptions	Data			
Heat sink capacity (Q_C)	219.0	215.6	210.9	kW
Turbine inlet pressure (P_{High})	1,097.1	1,120.0	1,074.0	kPa-Abs
Turbine outlet pressure (P_{Low})	227.4	227.4	227.0	kPa-Abs
Pumping power (W_P)	1.78	1.90	1.19	kW
Oil power (W_{OP})	1.40	1.40	1.40	kW
Lift temperature ($T_{HW,i} - T_{CW,i}$)	88	79.8	69	^oC
Gross power (W_{Tur})	21.50	21.36	16.70	kW
Cycle efficiency (η_{ORC})	8.73	8.49	8.11	%



รูปที่ 7 สมการสมรรถนะของระบบผลิตกระแสไฟฟ้าแบบ Organic Rankine Cycle [Nataporn and Tanongkiat, 2015]

บรรณานุกรม

นัฐพร ไชยญาติ. เทคโนโลยีพลังงานความร้อนใต้พิภพ (Geothermal Energy Technology), วิทยาลัยพลังงานทดแทน, มหาวิทยาลัยแม่โจ้, สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยแม่โจ้, พิมพ์ครั้งที่ 3 กรกฎาคม พ.ศ.2557.

Nattaporn Chaiyat. Upgrading of Low Temperature Heat with Absorption Heat Transformer for Generating Electricity by Organic Rankine Cycle, Global Advanced Research Journal of Engineering, Technology and Innovation, Vol.3(9), pp. 235-247, November, 2014.

Turboden. Waste Heat Recovery. <Online: http://www.turboden.eu/en> [Accessed: 5 March 2015].