



การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าวัฏจักรแรงดัน สารอินทรีย์ขนาดโมดูลาร์ที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง Cost Analysis on Power Generation from Biomass-Fuelled Modular Organic Rankine Cycle Power Plant

ธรณิศวร์ ดีทายาท¹ และ ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์²

Thoranis Deethayat¹ and Tanongkiat Kiatsiriroat²

สาขาวิศวกรรมพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่¹

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่²

Energy Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University, 50200, Thailand

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University, 50200,
Thailand

E-mail: thoranisdee@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาต้นทุนการผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าที่ใช้วัฏจักรแรงดันสารอินทรีย์ขนาดโมดูลาร์ เมื่อมีการใช้ชีวมวลชนิดต่างๆ เป็นเชื้อเพลิง โดยพิจารณาจากโรงไฟฟ้า 2 ขนาด ที่มีจำหน่ายในท้องตลาด ที่กำลังการผลิตไฟฟ้าสุทธิ 35 และ 65 kW ในงานนี้ยังพิจารณาถึงอิทธิพลของอัตราการไหล และอุณหภูมิของน้ำร้อนที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าที่มีต่อต้นทุนการผลิตไฟฟ้า จากผลการศึกษาพบว่า เมื่อมีการเพิ่มค่าอัตราการไหลของน้ำร้อน และอุณหภูมิของน้ำร้อนเข้าเครื่องทำระเหย พบว่าประสิทธิภาพของระบบจะเพิ่มขึ้น และต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยจะลดลง สำหรับโรงไฟฟ้า ขนาด 35 และ 65 kW ที่อัตราการไหลของน้ำร้อนที่เข้าเครื่องทำระเหย 12.6 l/s และอุณหภูมิของน้ำร้อนเข้า 116 °C จะมีประสิทธิภาพทางความร้อนที่ 16.9% และ 16.53% ตามลำดับ เมื่อมีการใช้ชีวมวลชนิดทะลายปาล์มจะมีต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่ำที่สุด เทียบกับชีวมวลอื่น โดยมีค่าเท่ากับ 6.66 และ 4.85 บาท/kWh ตามลำดับ

คำสำคัญ: วัฏจักรแรงดันสารอินทรีย์ขนาดโมดูลาร์, ชีวมวล, ประสิทธิภาพ, การวิเคราะห์ต้นทุน

ABSTRACT

Economic analyses on power generations from biomass-fuelled modular organic Rankine cycle (ORC) power plants available in the market were considered. The net power generations were at 35 and 65kW. And economic analyses from effect of hot water at various flow rates and temperatures to generated power. When the supplied mass flow rate and the inlet temperature of the hot water at the cycle evaporator increased, it was found that the thermal efficiencies were increased and the unit costs of the power generation decreased. For the ORCs at 35 and 65 kW, at hot water mass flow rate of 12.6 l/s and evaporator inlet temperature of 116°C, the thermal efficiencies were 16.9% and 16.53%, respectively. With palm bunch as feedstock for heat source, the levelized electricity unit costs were lowest compared with other biomass residues which were 6.66 and 4.85 baht/kWh, respectively.

Keywords: Modular organic Rankine cycle, Biomass, Efficiency, Economic analysis

1. บทนำ

ในระยะ 20 ปีที่ผ่านมา ตั้งแต่ปี ค.ศ.1990 การใช้พลังงานของประเทศไทยเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในอัตราเฉลี่ยร้อยละ 4.4 ต่อปี จนในปี ค.ศ.2010 การใช้พลังงานขั้นสุดท้าย (Final Energy) สูงขึ้นเป็น 2.32 เท่าของปี ค.ศ. 1990 หรือประมาณ 71,200 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ (ktoe) และแนวโน้มความต้องการใช้พลังงานในอนาคต ช่วงตั้งแต่ปี ค.ศ.2011-2030 คาดว่าจะเพิ่มขึ้นจาก 71,200 ktoe ต่อปี ในปัจจุบัน เป็น 162,715 ktoe หรือประมาณ 2.3 เท่าของปีปัจจุบัน [1]

การผลิตไฟฟ้าโดยใช้วัฏจักรไอน้ำยังเป็นวิธีหลักวิธีหนึ่งในปัจจุบัน ความร้อนที่นำมาใช้มาจากเชื้อเพลิงฟอสซิล เป็นตัวการสำคัญที่ทำให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมทางอากาศ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) มีเทน (CH_4) ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) และ ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_x) ที่ปลดปล่อยออกมา ก่อให้เกิดสภาวะโลกร้อน การทำลายชั้นโอโซนและฝนกรด ในระหว่างปี ค.ศ.2008-2011 [2] พบว่าการใช้พลังงานด้านไฟฟ้ามีการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงที่สุด

จากเป้าหมายการใช้พลังงานทดแทนของประเทศไทย ภายในปี ค.ศ.2021 จะมีการส่งเสริมให้ชุมชนมีส่วนร่วมในการผลิตและการใช้พลังงานทดแทนโดยมีสัดส่วนเป็น 25% ของการใช้พลังงานทั้งหมด รัฐบาลส่งเสริมให้มีการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน อีกทั้งยังมุ่งเน้นการผลิตไฟฟ้าระดับหมู่บ้าน โดยสนับสนุนการก่อสร้างโครงการไฟฟ้าระดับชุมชนให้องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นหรือชุมชนเจ้าของพื้นที่มีส่วนร่วมเป็นเจ้าของโครงการ สามารถบริหารงานและบำรุงรักษาเองได้ในอนาคต

วัฏจักรแรงจลนสารอินทรีย์ (Organic Rankine Cycle) เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากวัฏจักรแรงจลนสารอินทรีย์ มีระบบโครงสร้างเหมือนวัฏจักรแรงจลน (Rankine Cycle) ทั่วไปที่ใช้ไอน้ำเป็นสารทำงาน โดย ORC มีการใช้สารอินทรีย์ที่มีจุดเดือดต่ำเป็น

สารทำงาน ซึ่งสามารถเปลี่ยนสถานะเป็นไออิ่มตัวหรือไอร้อนยวดยิ่งเมื่อได้รับความร้อนจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำที่ไม่สูงมาก ทำให้สามารถใช้แหล่งความร้อนได้หลายชนิด เช่น พลังงานความร้อนใต้พิภพ พลังงานจากแสงอาทิตย์ พลังงานจากชีวมวล รวมถึงความร้อนทิ้งจากอุตสาหกรรม

ชีวมวลถือเป็นแหล่งพลังงานที่มีศักยภาพสูงของไทย เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ส่งผลให้มีผลผลิตทางการเกษตรเป็นจำนวนมาก ผลผลิตทางการเกษตรเหล่านี้จะมีวัสดุเหลือทิ้งออกมาจำนวนหนึ่งด้วย เช่น แกลบ ฟางข้าว ชานอ้อย และขังข้าวโพด เป็นต้น ปริมาณวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมีมากถึง 59,539,905.20 ตันต่อปี คิดเป็นพลังงานเทียบเท่า 504,339.40 TJ [3]

เบญจมาศและคณะ[4] ได้ศึกษาศักยภาพการผลิตไฟฟ้าจากชีวมวล 5 ชนิด ได้แก่ เศษไม้ แกลบ เหง้ามันสำปะหลัง กากอ้อย และกะลาปาล์ม พบว่า ในปี พ.ศ.2547 ปริมาณชีวมวลทั้ง 5 ชนิด เพียงพอที่จะสามารถนำไปใช้ผลิตไฟฟ้าได้ถึง 1,999.42 MW และการพยากรณ์ปริมาณชีวมวลในปี พ.ศ.2554 มีศักยภาพในการผลิตไฟฟ้ามากถึง 2,938.47 MW วิรัชและคณะ[5] ได้ศึกษาโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาด 100kW ใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน พบว่าสามารถใช้เชื้อเพลิงชีวมวลได้ทุกชนิดในประเทศไทย โดยเชื้อเพลิงจากขังข้าวโพดมีต้นทุนต่ำสุด คือ 1.9 บาท/kWh รองลงมาคือ เหง้ามันสำปะหลังและไม้โตเร็ว 2.1 และ 2.2 บาท/kWh ตามลำดับ จักรพันธ์และทองเกียรติ [6] ทำการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์โรงไฟฟ้าวัฏจักรแรงจลนสารอินทรีย์ที่ใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิง มีกำลังการผลิตไฟฟ้า 2.18 MW ชั่วโมงการทำงาน 8,000 ชั่วโมงต่อปี มีระยะโครงการ 25 ปี พิจารณาราคาแกลบ 400-1,600 บาทต่อตัน พบว่าต้นทุนผลิตไฟฟ้ามีค่า 2-3.65 บาท/kWh และที่ราคาแกลบต่ำกว่า 1,200 บาทต่อตัน

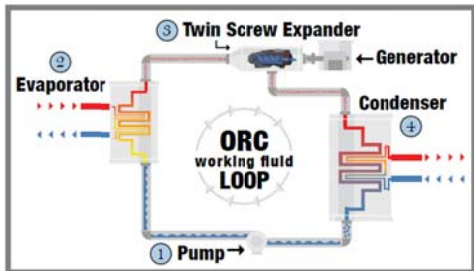
จากเป้าหมายการใช้พลังงานทดแทนของประเทศไทย ที่ส่งเสริมให้ชุมชนผลิตไฟฟ้าได้เอง งานวิจัยนี้จึงศึกษาสมรรถนะในการผลิตไฟฟ้า และวิเคราะห์ต้นทุนการ

ผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์แบบโมคูลาร์ ขนาด 35kW และ 65kW ที่ใช้ชีวมวลต่างๆ เป็นเชื้อเพลิง และหาชนิดของชีวมวลที่มีราคาต้นทุนเหมาะสมกับโรงไฟฟ้าวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ขนาดโมคูลาร์ดังกล่าว

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์

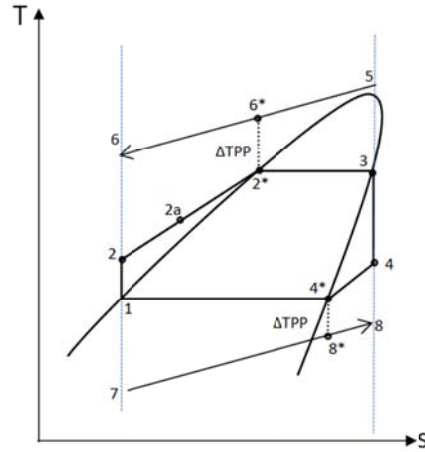
วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ มีระบบโครงสร้างเหมือนวัฏจักรแรงคิน (Rankine Cycle) แต่มีลักษณะโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน ใช้สารอินทรีย์ที่มีจุดเดือดต่ำเป็นของไหลทำงาน ซึ่งสามารถเปลี่ยนสถานะเป็นไออัมตัวหรือไอร้อนยวดยิ่งเมื่อได้รับความร้อนจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำเช่น พลังงานจากแสงอาทิตย์ และพลังงานจากชีวมวล วัฏจักรพื้นฐานประกอบไปด้วยอุปกรณ์ 4 ตัว คือ ปั๊ม (Pump) เครื่องระเหย (Evaporator) เอ็กซ์แพนเดอร์ (Expander) และเครื่องควบแน่น (Condenser) ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ไคอะแกรมอุปกรณ์ของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษา [11]

การทำงานเริ่มจากสารทำงานไหลเข้าปั๊มในสถานะของเหลวอัมตัวที่สภาวะที่ 1 แล้วถูกอัดจนกระทั่งมีความดันเท่ากับความดันชุดทำระเหยซึ่งเป็นความดันสูงสุดของวัฏจักร โดยสารทำงานที่ออกจากปั๊มมีสถานะของเหลวอัมตัวที่สภาวะที่ 2 จากนั้นไปรับความร้อนที่ชุดทำระเหยที่ความดันคงที่ และไหลออกมาในสถานะไออัมตัวที่สภาวะที่ 3 ต่อจากนั้นไหลเข้าเทอร์ไบน์เกิดการขยายตัวให้งานออกมาโดยการหมุนของเพลลา ซึ่งกระบวนการนี้ความดันและอุณหภูมิของสารทำงานจะ

ลดลง หลังจากนั้นสารทำงานไหลเข้าเครื่องควบแน่นเพื่อเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลว โดยคายความร้อนออกมาที่ความดันคงที่ซึ่งเป็นความดันต่ำสุดของวัฏจักร จากนั้นสารทำงานไหลเข้าปั๊มทำงานเป็นวัฏจักรต่อไป ซึ่งสภาวะและสถานะต่างๆ สามารถเขียนแผนภาพอุณหภูมิ-เอนโทรปีดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผนภาพอุณหภูมิ-เอนโทรปีของสารทำงานที่พิจารณาสมการเซอร์โมไดนามิกส์ สำหรับวัฏจักร

ตามรูปที่ 1 โดยพิจารณาสภาวะต่างๆ จากแผนภาพอุณหภูมิ-เอนโทรปี ตามรูปที่ 2 โดยแยกอุปกรณ์ต่างๆ จะได้ดังนี้สภาวะต่างๆ ของ ORC

ปั๊ม

$$\dot{W}_p = \frac{\dot{m}v_1(P_2 - P_1)}{\eta_p} \quad (1)$$

$$\dot{W}_p = \dot{m}(h_{2a} - h_1) \quad (2)$$

เครื่องระเหย

$$\dot{Q}_E = \dot{m}_R(h_3 - h_2) = \dot{m}_{hw}C_p(T_5 - T_6) \quad (3)$$

$$\dot{m}_R(h_3 - h_{2^*}) = \dot{m}_{hw}C_p(T_5 - T_{6^*}) \quad (4)$$

เทอร์ไบน์

$$\dot{W}_T = \dot{m}_R(h_3 - h_4)\eta_T \quad (5)$$

เครื่องควบแน่น

$$\dot{Q}_C = \dot{m}_R(h_4 - h_1) = \dot{m}_{cw}C_p(T_8 - T_7) \quad (6)$$

$$\dot{m}_R(h_{4^*} - h_1) = \dot{m}_{cw}C_p(T_{8^*} - T_7) \quad (7)$$

ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal efficiency) η_{th} ที่ใช้คำนวณในการศึกษานี้คือ

$$\eta_{th} = \frac{W_T - W_P}{Q_E} \quad (8)$$

ในงานวิจัยนี้ จะใช้ข้อมูลสมรรถนะของวัฏจักรสารอินทรีย์แบบโมดูลาร์ ที่มีจำหน่ายในท้องตลาด โดยแบบโมดูลาร์จะมีอุปกรณ์ย่อยต่างๆ อยู่ในระบบรวมชุดเดียวกัน โดยระบบดังกล่าว เมื่อมีการติดตั้งระบบทำน้ำร้อน และระบบระบายความร้อน สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าสุทธิมาใช้ประโยชน์ได้เลย ในงานนี้จะใช้ที่กำลังการผลิตไฟฟ้าที่ 35 kW และ 65 kW ข้อมูลสมรรถนะแสดงในภาคผนวก ซึ่งประกอบด้วยความสัมพันธ์ ของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ ที่อัตราการไหลของน้ำร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ และข้อมูลการระบายความร้อนที่คอนเดนเซอร์ สารทำงานที่ใช้ในวัฏจักร เป็นสาร R245fa จากนั้นจึงนำอัตราการไหลของน้ำร้อนไปใช้ในรูปที่ 8 โดยเมื่อกำหนดผลต่างอุณหภูมิ น้ำร้อนขาเข้าและขาออกเครื่องทำระเหยที่ค่าต่างๆ เทียบกับอัตราการไหลของน้ำร้อนจะสามารถหาอัตราความร้อนที่ต้องป้อนให้เครื่องระเหยได้

ชีวมวล

ชีวมวล คือ สารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้ เช่น เศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรหรือกากจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมการเกษตร เช่น แกลบ ได้จากการสีข้าวเปลือก ชานอ้อย ได้จากการผลิตน้ำตาลทราย เศษไม้ที่ได้จากการแปรรูปไม้ยางพาราหรือไม้ยูคาลิปตัส และบางส่วนได้จากสวนป่าที่ปลูกไว้ กากปาล์ม ได้จากการสกัดน้ำมันปาล์มดิบออกจากผลปาล์มสด กากมันสำปะหลัง ได้จากการผลิตแป้งมันสำปะหลัง ชังข้าวโพด ได้จากการสีข้าวโพดเพื่อนำเมล็ดออก และกะลามะพร้าว ได้จากการนำมะพร้าวมาปลอกเปลือกออกเพื่อนำเนื้อ

มะพร้าวไปผลิตกะทิ และน้ำมันมะพร้าว ส่วนที่เหลือที่ได้จากการผลิตแอลกอฮอล์ เป็นต้น

กระบวนการแปรรูปชีวมวลไปเป็นพลังงานรูปแบบต่างๆ สามารถกระทำได้โดยกระบวนการต่างๆ เช่น การเผาไหม้โดยตรง การผลิตก๊าซ การหมัก เป็นต้น แต่ในงานวิจัยนี้จะพิจารณานำชีวมวลมาผลิตน้ำร้อนโดยกระบวนการเผาไหม้โดยตรงเพียงอย่างเดียว เพื่อใช้เป็นแหล่งความร้อนให้กับวัฏจักรแรงดันอินทรีย์

การเผาไหม้โดยตรง (Direct combustion)

เป็นการนำชีวมวลมาเผาไหม้โดยตรงในเตาเผา ซึ่งจะได้ความร้อนออกมาตามค่าความร้อนของชนิดชีวมวลดังตารางที่ 1 ความร้อนที่ได้จากการเผาสามารถนำไปถ่ายเทให้กับหม้อต้ม เพื่อผลิตน้ำร้อนที่มีอุณหภูมิและความดันสูง โดยน้ำร้อนที่ได้จะนำไปแลกเปลี่ยนความร้อนกับสารทำงานในวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ ทำให้สารทำงานมีอุณหภูมิสูงขึ้นจนเป็นไออิ่มตัวหรือไอร้อนยิ่งยวด จากนั้นจึงไปปั่นเทอร์ไบน์ เพื่อผลิตไฟฟ้าต่อไป ตัวอย่างชีวมวลประเภทนี้ คือ เศษวัสดุทางการเกษตรและเศษไม้

ตารางที่ 1 ค่าความร้อนและราคาของชีวมวลแต่ละชนิด [7, 8]

ชนิดของชีวมวล	ความชื้น (%)	Ash (%)	Higher heating value (kJ/kg)	Lower heating value (kJ/kg)	ราคา (บาท/ตัน)
แกลบ	12	12.65	14,755	13,517	1,600
ฟางข้าว	10	10.39	13,650	12,330	1,225
ยอดและใบอ้อย	9.2	6.10	16,794	15,479	1,125
ไม้ยางพารา	45	1.59	10,365	8,600	1,300
ทะลายปาล์ม	58.6	2.03	9,196	7,240	514
ชังข้าวโพด	40	0.9	11,298	9,615	1,100
เห้งมันสำปะหลัง	59.4	1.5	7,451	5,494	950
เปลือกไม้ยูคา	60	2.44	6,811	4,917	700

สำหรับการหาอัตราความร้อนที่ป้อนให้เครื่องระเหย (\dot{Q}_E) จะมีค่าใกล้เคียงอัตราความร้อนที่หม้อน้ำร้อนได้รับจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง (\dot{Q}_{heater}) โดยกำหนดให้ประสิทธิภาพของหม้อน้ำร้อนเท่ากับ 75% ดังนั้น อัตราน้ำร้อนที่หม้อน้ำร้อนได้รับ สามารถหาได้จาก

$$\dot{Q}_{heater} = n_f(\dot{m}LHV) \quad (9)$$

การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์

สำหรับการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ของระบบประกอบไปด้วย

1. ต้นทุนการลงทุน (Investment cost) ของระบบในงานวิจัยนี้ ได้แก่ ราคาโรงไฟฟ้าวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ที่มีระบบระบายความร้อนในตัวบวกกับราคาหม้อผลิตน้ำร้อนที่ใช้เชื้อเพลิงชีวมวลแบบเผาตรง ไม่รวมต้นทุนของระบบกำจัดเถ้า, มูลค่าซากของอุปกรณ์ต่างๆ หลังสิ้นสุดระยะเวลา 20 ปี และค่าขนส่งชีวมวล
2. ค่าดำเนินการและบำรุงรักษา (Operating & maintenance cost) ของระบบ ได้แก่ บุคลากรสำหรับใช้ในการเดินเครื่องและควบคุมระบบ ค่าบำรุงรักษาระบบสามารถคำนวณได้ โดยกำหนดให้มีค่า 3.5% ของต้นทุนการลงทุน
3. ค่าชีวมวลที่ต้องใช้เป็นเชื้อเพลิงตลอดทั้งปี

ตารางที่ 2 แสดงค่าต่างๆ ที่ใช้ในการประเมินการลงทุนทางเศรษฐศาสตร์

Investment Cost, C_{invest} สำหรับ ORC 35kW [12],[14]	9,847,166.27 บาท
Investment Cost, C_{invest} สำหรับ ORC 65kW [13],[14]	11,048,857.34 บาท
Financial Parameters	
-Annual insurance rate, $k_{Insurance}$	0.6%/ปี
-Real debt interest rate, i_d [9]	6.75%
- Depreciation period, n	20 ปี

4. ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยในรูปแบบ Levelized Electricity Cost (LEC) สามารถคำนวณตามสมการดังต่อไปนี้ [15]

$$LEC = \frac{(crf \times C_{invest}) + \dot{C}_{o\&m} + \dot{C}_{biomass}}{E_{Net}} \quad (10)$$

เมื่อ

$$crf = \frac{i_d(1+i_d)^n}{(1+i_d)^n - 1} + k_{Insurance} \quad (11)$$

$$E_{Net} = H \times W \quad (12)$$

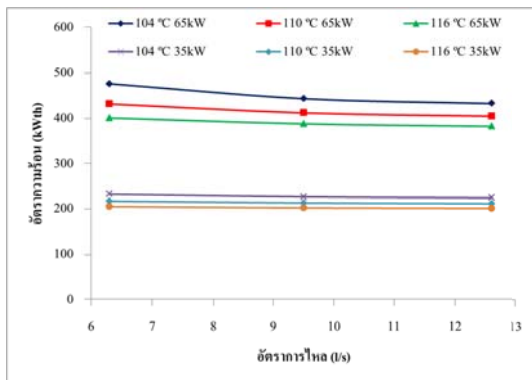
เงื่อนไขในการคำนวณ

1. โรงไฟฟ้าวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ที่ทำการศึกษากำลังการผลิตไฟฟ้าสุทธิ 35 kW และ 65 kW ชั่วโมงการทำงาน 8,000 ชั่วโมงต่อปี
2. ชีวมวลถูกนำไปใช้เผาไหม้โดยตรง ให้แก่หม้อน้ำร้อน เพื่อผลิตน้ำร้อนจ่ายให้ ORC โดยประสิทธิภาพของหม้อน้ำร้อนเท่ากับ 75% [14]
3. อัตราการไหลของน้ำร้อนที่จ่ายให้วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ 6.3-12.6 l/s อุณหภูมิน้ำร้อนที่เข้า 104°C, 110°C และ 116°C ตามลำดับ
4. อัตราการไหลของน้ำเย็นผสมไกลโคล 40% ที่ใช้ในการระบายความร้อน ORC ขนาด 35 kW และ 65 kW เท่ากับ 13.9 l/s และเท่ากับ 22 l/s ตามลำดับ
5. อุณหภูมิพินช์ (ΔT_{PP}) ระหว่างการแลกเปลี่ยนความร้อนที่เครื่องระเหยและเครื่องควบแน่นคือ 3°C
6. ไม่ได้พิจารณาพลังงานที่ใช้ในการปั้มน้ำร้อนที่เปลี่ยนแปลงตามอัตราการไหลรวมถึงการระบายความร้อนของเครื่องควบแน่นน้อยมาก
7. ค่าเชื้อเพลิงชีวมวลและค่า O&M ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ไม่พิจารณาค่า escalation rate

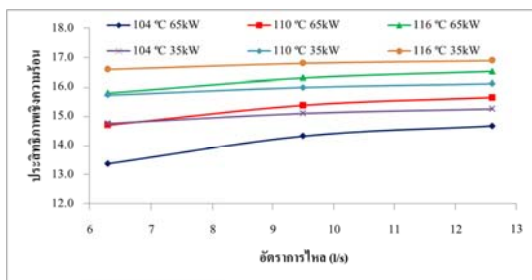
3. ผลการศึกษา

จากรูปที่ 3 และ 4 เมื่อมีการเพิ่มค่าอัตราการไหลของน้ำร้อน และอุณหภูมิน้ำร้อนตั้งแต่ 104°C จนถึง 116°C โดยกำหนดกำลังการผลิตไฟฟ้าสุทธิตั้งที่ 35 kW และ 65 kW พบว่าความต้องการอัตราความร้อนลดลงเนื่องจากอัตราการไหลของของไหลมีค่าเพิ่มขึ้น โดยเมื่อความร้อนที่ใช้ในการผลิตน้ำร้อนลดลง จะส่งผลให้ประสิทธิภาพของวัฏจักรสูงขึ้น โดยวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ ขนาด 35kW และ 65kW ที่อัตราการไหล 12.6 l/s อุณหภูมิของน้ำร้อนขาเข้าเครื่องทำระเหยเท่ากับ 116°C มีประสิทธิภาพของวัฏจักรสูงสุดที่ 16.9% และ 16.53% ตามลำดับ ดังนั้นในการวิเคราะห์ต้นทุนผลิตไฟฟ้าจะนำอัตราความร้อนที่ใช้

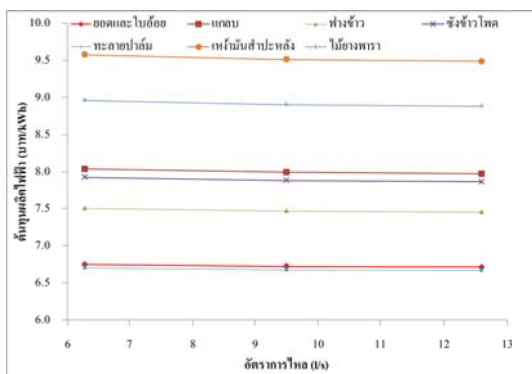
ในวัฏจักรที่อุณหภูมิของน้ำร้อนขาเข้าเครื่องทำระเหยเท่ากับ 116°C มาใช้ต่อไป



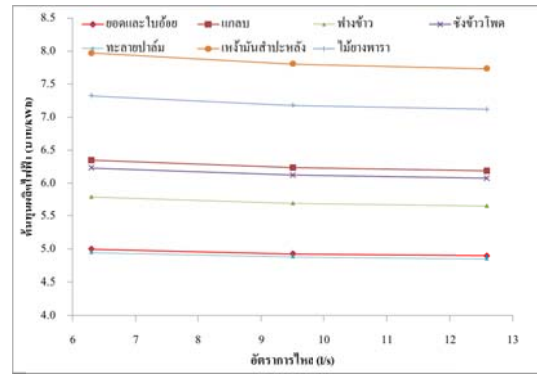
รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการร้อนและอุณหภูมิของน้ำร้อนขาเข้าเครื่องทำระเหยที่อัตราการไหลของน้ำร้อนต่างๆ



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพเชิงความร้อนและอุณหภูมิของน้ำร้อนขาเข้าเครื่องทำระเหยที่อัตราการไหลของน้ำร้อนต่างๆ



รูปที่ 5 ต้นทุนผลิตไฟฟ้าที่ชีวมวลชนิดต่างๆ ที่วัฏจักรแรงดันอินทรีย์ ขนาด 35 kW เมื่อมีการเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำร้อน ที่อุณหภูมิของน้ำร้อนขาเข้าเครื่องทำระเหย 116°C



รูปที่ 6 ต้นทุนผลิตไฟฟ้าที่ชีวมวลชนิดต่างๆ ที่วัฏจักรแรงดันอินทรีย์ ขนาด 65 kW เมื่อมีการเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำร้อน ที่อุณหภูมิของน้ำร้อนขาเข้าเครื่องทำระเหย 116°C

ดังนั้น ในรูปที่ 5 และ 6 เมื่อกำหนดกำลังการผลิตไฟฟ้าสุทธิที่ 35kW และ 65 kW และอุณหภูมิน้ำร้อนขาเข้าเครื่องทำระเหยให้คงที่ที่ 116°C เนื่องจากให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงที่สุด เมื่ออัตราการไหลของน้ำร้อนเพิ่มขึ้น ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าของชีวมวลชนิดต่างๆ จะลดลง เนื่องจากความร้อนที่ใช้ในการผลิตน้ำร้อนลดลง โดยโรงไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ขนาด 35 และ 65kW เมื่อมีการใช้ชีวมวลชนิดทะลายน้ำมันจะมีต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่ำที่สุด เทียบกับชีวมวลชนิดอื่น โดยมีค่าเท่ากับ 6.66 และ 4.85 บาท/kWh ตามลำดับ

สาเหตุที่ทำให้ทะลายน้ำมันมีต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่ำ เพราะถึงแม้ว่าค่าความร้อน (LHV) ทะลายน้ำมันจะมีค่าต่ำและใช้ปริมาณมากในการเผาให้ความร้อนน้ำร้อนแต่ทะลายน้ำมันนั้นมีราคาต่อตันค่อนข้างถูกทำให้ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่ำ โดยเมื่อเปรียบเทียบ ขอดและใบอ้อยที่มีต้นทุนการผลิตไฟฟ้าใกล้เคียงกับทะลายน้ำมัน ซึ่งราคาต่อตันจะมีราคาแพงแต่สามารถชดเชยด้วยค่าความร้อนที่มีค่าสูง ทำให้ปริมาณชีวมวลที่ใช้ในโรงไฟฟ้าจึงมีค่าต่ำ ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าจึงต่ำด้วยเช่นกัน ดังผลแสดงในตารางที่ 3 และตารางที่ 4 ในภาคผนวก

ตารางที่ 3 ตัวอย่างปริมาณชีวมวลที่ต้องใช้ตลอดทั้งปี เมื่อใช้โรงไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ ขนาด 65 kW อัตราการไหลและอุณหภูมิขาเข้าของน้ำร้อนเครื่องทำระเหยเท่ากับ 12.6 l/s และ 116°C ตามลำดับ

ชนิดของชีวมวล	LHV (kJ/kg)	ราคา (บาท/ตัน)	ปริมาณชีวมวลเหลือใช้ (ตัน/ปี) [10]	ปริมาณชีวมวลที่ต้องใช้ตลอดทั้งปี (ตัน/ปี)
ทะลาล์ม	7,540	514	1,024,868	2033.45
ขอลและใบอ้อย	15,479	1,125	4,190,794	951.11

4. สรุปผลการศึกษา

ความร้อนจากชีวมวลที่ใช้ในการผลิตน้ำร้อนเพื่อป้อนอัตราความร้อนให้เครื่องทำระเหยจะมีปริมาณลดลงเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น และอุณหภูมิของน้ำร้อนขาเข้าเครื่องทำระเหยมีค่าต่ำ โดยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์

ขนาด 35 kW และ 65 kW อัตราการไหล 12.6 l/s อุณหภูมิของน้ำร้อนขาเข้าเครื่องทำระเหยเท่ากับ 116°C มีประสิทธิภาพของวัฏจักร 16.9% และ 16.53% ตามลำดับ เมื่อทำการศึกษาเศรษฐศาสตร์พบว่าโรงไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ขนาด 35 kW และ 65 kW ที่ใช้ชีวมวลชนิดทะลาล์มจะมีต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่ำที่สุดคือ 6.66 และ 4.85 บาท/kWh ตามลำดับ

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และ ศูนย์ความเป็นเลิศด้านพลังงานสะอาดและการพัฒนาทรัพยากรธรรมชาติที่ยั่งยืน ภายใต้โครงการพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

เอกสารอ้างอิง

- [1] กระทรวงพลังงาน (2554). แผนปฏิบัติการอนุรักษ์พลังงาน 20 ปี (2554-2573). [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา: http://www.eppo.go.th/encon/ee-20yrs/EEDP_Thai.pdf [2556, 20 ตุลาคม].
- [2] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (2554). แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก 25% ใน 10 ปี (2555-2565). [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา: <http://www.dede.go.th/dede/images/stories/aedp25.pdf> [2556, 20 ตุลาคม].
- [3] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (2554). ศักยภาพชีวมวลในประเทศไทย. [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา: <http://www.dede.go.th> [2557, 25 พฤษภาคม].
- [4] เบญจมาศ ปุยอ้อก วิชากร จารุศิริ และจินตนา อุบลวัฒน์ (2550). การศึกษาศักยภาพการผลิตไฟฟ้าจากเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร. การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่ง ประเทศไทยครั้งที่ 3, โรงแรมไอบีฮอเต็ล, กรุงเทพมหานคร, 23-25 พฤษภาคม 2550.
- [5] วีรัชย์ อัจหาญ (2553). การศึกษาต้นแบบโรงงานผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลสู่ชุมชน. รายงานการวิจัย, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, สิงหาคม 2553.
- [6] จักรพันธ์ ถาวรงามยิ่งสกุล และทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์ (2554). การศึกษาเชิงเศรษฐศาสตร์โรงไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันที่ใช้สารอินทรีย์ที่ใช้กลายเป็นเชื้อเพลิง. การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 4, มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง, ลำปาง, 28-30 พฤศจิกายน 2554.
- [7] Energy for Environment Foundation. Biomass. Q print management, Bangkok, 2008.
- [8] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน (2556). แนวคิดการกำหนดโครงสร้างราคารับซื้อไฟฟ้า แบบ Feed-in tariff สำหรับกลุ่มพลังงานชีวภาพ. [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา: <http://www.eppo.go.th/FIT/part2.pdf> [2557, 5 มิถุนายน].

- [9] ธนาคารกรุงเทพ. อัตราดอกเบี้ยเงินให้สินเชื่อ. [online] Available: <http://www.bangkokbank.com> [2557, 2 มิถุนายน].
- [10] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. ศักยภาพชีวมวลในประเทศไทย. [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา: <http://www.dede.go.th/> [2557, 1 มิถุนายน].
- [11] ElectraTherm's waste heat-to-power system uses a closed loop Organic Rankine Cycle [online] Available: <http://electratherm.com/docs/6500Brochure20140321.pdf> [2557, 15 มิถุนายน].
- [12] The Green Machine 4200 Specification Sheet [Online] Available: <http://electratherm.com/docs/SS-4200GreenMachine20140326.pdf> [2557, 5 มิถุนายน].
- [13] The Green Machine 4400 Specification Sheet [Online] Available: <http://electratherm.com/docs/SS-6500GreenMachine20140326.pdf> [2557, 5 มิถุนายน].
- [14] European Wood-Heating Technology Survey [Online] Available: <https://www.nyserda.ny.gov/Publications/Research-and-Development-Technical-Reports/Other-Technical-Reports/European-Wood-Heating-Technology-Survey.aspx> [2557, 5 มิถุนายน].
- [15] Pitz-Paal, R., Dersch, J., & Milow, B. European Concentrated Solar Thermal Road-Mapping Research Report on SES6-CT-2003-502578. European Commission. 2003.

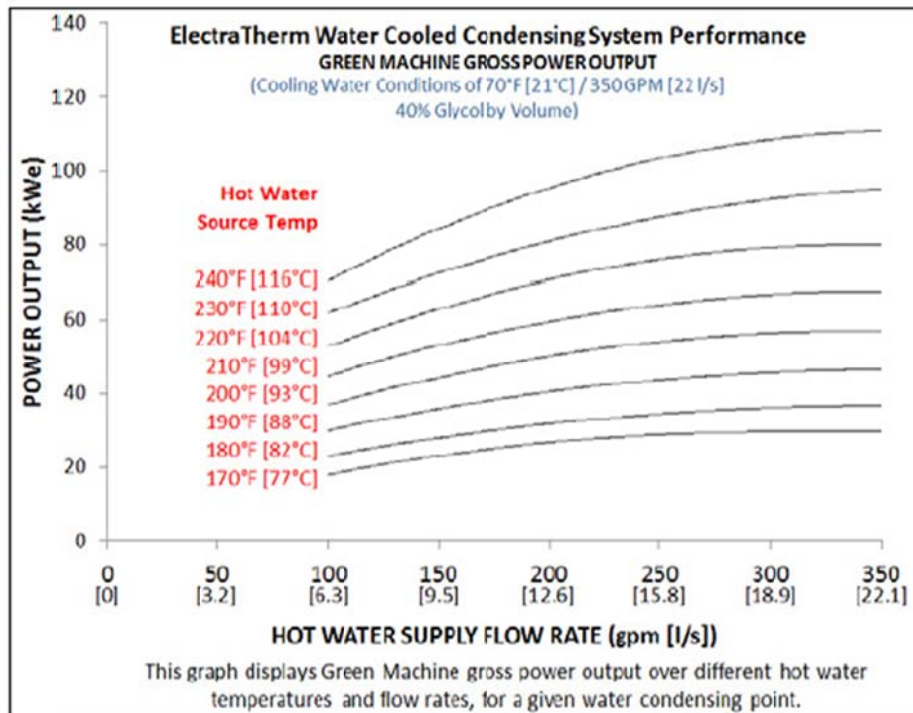
สัญลักษณ์

- C_{invest} = ค่าลงทุนเบื้องต้น (Baht)
- $\dot{C}_{o\&m}$ = ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานและซ่อมบำรุง (Baht/year)
- $\dot{C}_{biomass}$ = ค่าใช้จ่ายเนื่องจากเชื้อเพลิงชีวมวล (Baht/year)
- E_{Net} = อัตราไฟฟ้า (kWh)
- H = ชั่วโมงการทำงาน (Hour/year)
- h = เอนทาลปีจำเพาะ (kJ/kg)
- i_d = อัตราดอกเบี้ยทบต้น (%)
- $k_{Insurance}$ = อัตราประกันภัยรายปี (%/year)
- \dot{m}_{cw} = อัตราการไหลของน้ำเย็น (kg/s)
- \dot{m}_{hw} = อัตราการไหลของน้ำร้อน (kg/s)
- \dot{m}_R = อัตราการไหลของของไหลทำงาน (kg/s)
- n = อายุโครงการ (year)
- P = ความดัน (kPa)
- \dot{Q}_C = อัตราความร้อนที่สูญเสียจากเครื่องควบแน่น (kW)
- \dot{Q}_E = อัตราความร้อนที่ให้แก่เครื่องระเหย (kW)
- T = อุณหภูมิน้ำ ($^{\circ}\text{C}$)
- v_1 = ปริมาตรจำเพาะที่สถานะที่ 1 (m^3/kg)
- W_p = กำลังงานที่ปั๊มเข้าป้อน (kW)
- W_T = กำลังงานที่เทอร์ไบน์ได้จากวัฏจักร (kW)

ภาคผนวก

The Green Machine			4200 Up to 35kWe	4400 Up to 65kWe
Hot Water Input Parameters	Hot water input temp range	°F	170 - 240	170 - 240
		[°C]	[77-116]	[77-116]
	Thermal input range	MMBTU/hr	1.02-1.71	1.02-2.9
		[kWth]	[300-500]	[300-860]
Flow rate range	gpm	50-200	50-200	
	[l/s]	[3.2-12.6]	[3.2-12.6]	
Water Cooled Condensing Parameters	Cooling water input temp range	°F	40 - 110	40 - 110
		[°C]	[4-43]	[4-43]
	Heat rejected to cooling water range	MMBTU/hr	1.3 - 1.4	1.3 - 2.7
		[kWth]	[380-410]	[380-795]
Cooling water flow rate	gpm	220	350	
	[l/s]	[13.9]	[22.1]	
Air Condensing Conditions	Ambient air temp	°F	NA	<100
		[°C]	NA	[<38]
	Heat rejected to condenser	MMBTU/hr	NA	1.3 - 2.7
		[kWth]	NA	[380-795]

รูปที่ 7 พารามิเตอร์สมรรถนะของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ขนาด 35kW และ 65kW [12], [13]



รูปที่ 8 กราฟแสดงสมรรถนะของน้ำร้อนที่อุณหภูมิและอัตราการไหลต่างๆ [11]

ตารางที่ 4 ตัวอย่างการคำนวณที่น้ำร้อน 116 °C และอัตราการไหล 12.6 l/s

ชีวมวล	ปริมาณชีวมวล เหลือใช้ [10]	กำลังไฟฟ้า สุทธิ	ชั่วโมงการ ทำงาน	ผลิตไฟฟ้า ทั้งปี	ประสิทธิภาพการ หมักต้ม	ความ ร้อน	ปริมาณความร้อน ที่ต้องใช้ ตลอดทั้งปี	ปริมาณชีว- มวลที่ต้องใช้ ตลอดทั้งปี	ราคาชีวมวลที่ ต้องจ่ายต่อปี	Investment Cost, C_{invest}	$C_{o\&m}$	crf	LEC
													บาท/kWh
ชนิด	ตัน/ปี	kW	ชม	kWh	%	kW	kJ/ปี	ตัน/ปี	บาท/ปี	บาท	บาท/ปี		
ขอดและใบอ่อน	4,190,794							951.11	1,069,993				4.90
เกลบ	3,510,599							1089.16	1,742,654				6.19
ฟางข้าว	25,646,548							1194.01	1,462,664				5.65
ซึ่งข้าวโพด	584,539							1531.17	1,684,282				6.08
ทะลายน้ำส้ม	1,024,868	65	8,000	520,000	75	383.38	1.47×10^{10}	2033.45	1,045,192	11,048,857	386,710.01	0.098567	4.85
เหล็กรัดน้ำส้ม	1,834,467							2679.68	2,545,695				7.73
ไม่ขางพารา	312,118							1711.88	2,225,443				7.12