

การวิเคราะห์ต้นทุนด้านพลังงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ด้วยเชื้อเพลิงขยะติดเชื้อ

ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ กรณีศึกษา: โรงพยาบาลลำปาง

Energy Costing of Organic Rankine Cycle Using Medical Waste
from Mathematical Model a Case Study: Lampang Hospital

ศรศักดิ์ เสงนาวงศ์¹ นัฐพร ไชยญาติ^{1*} ชวโรจน์ ใจสิน¹ และ จักรพันธ์ ถาวรงามยิ่งสกุล²

Sonesack Sengnavong¹, Nattaporn Chaayat^{1*}, Chawaroj Jaisin¹ and Chakkraphan Thawongmyigsakul²

¹วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้

²คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก

¹School of Renewable Energy, Meajo University

²Faculty of engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Tak

* Corresponding author: benz178tii@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ต้นทุนต่อหน่วยของการผลิตไฟฟ้า ด้วยวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ และการวิเคราะห์ต้นทุนเชื้อเพลิงขยะติดเชื้อ ซึ่งอ้างอิงจากข้อมูลปริมาณขยะของโรงพยาบาลลำปาง ในการศึกษาได้ทำการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรม Refprop สำหรับการประเมินศักยภาพด้านพลังงานและเศรษฐศาสตร์ จากผลการจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่า เมื่อนำขยะติดเชื้อปริมาณ 750 kg/day ของโรงพยาบาลลำปางมาทำการอบแห้งโดยโรงเรือนพลาสติก เป็นระยะเวลาทั้งหมด 12 h เชื้อเพลิงขยะติดเชื้อหลังการอบแห้งจะมีค่าความชื้นอยู่ที่ 5.65% โดยมีค่าความร้อนต่ำ 26.29 MJ/kg และเมื่อป้อนเชื้อเพลิงขยะในอัตรา 39.47 kg/h ให้แก่ระบบผลิตไฟฟ้า พบว่า วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ขนาด 13 kW_e ที่ใช้สารทำงาน R-245fa มีประสิทธิภาพด้านผลิตไฟฟ้า 8.97% ผลการวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์ พบว่า ต้นทุนการผลิตเชื้อเพลิงขยะอบแห้งมีค่าเท่ากับ 3.185 Baht/kg_{Medical waste} และต้นทุนต่อหน่วยของการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 4.668 Baht/kWh

คำสำคัญ: เชื้อเพลิงขยะติดเชื้อ วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ พลังงานทดแทน

Abstract

This research studies levelized of electricity cost (LOEC) of organic Rankine cycle (ORC) and medical waste fuel, which refers the medical waste data of Lampang hospital. The mathematical model is developed in this study by using Refprop program for evaluating energy and economic potentials. From the simulation results, it could be found that when medical waste of Lampang hospital at around 750 kg/day was heated by solar greenhouse drying room as 12 h, the dried medical waste shown moisture as 5.65% and low heating value at 26.29 MJ/kg. Moreover, when the waste fuel of 39.47 kg/h was supplied to electricity machine, the 13 kW_e ORC unit with using R-245fa as refrigerant revealed energy efficiency of 8.97%. In economic results, it could be found that levelized cost (LC) of the dried medical waste fuel was 3.185 Baht/kg_{Medical waste} and the LOEC was 4.668 Baht/kWh.

Keywords: Medical waste fuel, Organic Rankine cycle, Renewable energy.

บทนำ

ปัจจุบันสถานการณ์ในประเทศไทยมีปริมาณของเสียทั้งที่เป็นขยะมูลฝอยทั่วไป และขยะมูลฝอยติดเชื้อ ในแต่ละวันเป็นจำนวนมาก โดยองค์ประกอบทางกายภาพของขยะติดเชื้อประกอบด้วยพลาสติก สาลี ฝ้าย กอ ฝ้าย ฝ้าย กระดาษชำระ เข็มฉีดยา และมีดผ่าตัด เป็นต้น ซึ่งขยะมูลฝอยจากสถานพยาบาลจัดเป็นของเสียอันตราย เนื่องจากสามารถแพร่เชื้อโรคได้ และส่วนใหญ่ยังไม่มีการจัดการเก็บรวบรวมหรือกำจัดอย่างถูกวิธี โดยสถานการณ์ปริมาณขยะมูลฝอยติดเชื้อในปี พ.ศ. 2560 เพิ่มขึ้นจากปี 2558 จำนวน 1,778 ton หรือคิดเป็น 3.3% และในการกำจัดขยะโดยทั่วไปมักจะใช้วิธีการกำจัดด้วยความร้อน อาทิเช่น การเผาแบบเผาไหม้ตรงที่อุณหภูมิสูง การใช้ไอน้ำในการบำบัดขยะติดเชื้อ และการฝังกลบ เป็นต้น ซึ่งปกติแล้วกระบวนการกำจัดขยะติดเชื้อทางการแพทย์ด้วยเตาเผาขยะพิษ หรือขยะอันตรายต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่า 1,200 °C ขึ้นไป และกำจัดสารพิษประเภทโลหะหนัก ตะกั่ว พรอท โดยมีตัวกรองไอเสีย (Flue gas cleaning) เป็นส่วนประกอบสำคัญในการกำจัดแก๊สพิษ จากข้อมูลดังกล่าวเห็นว่า ขยะติดเชื้อที่สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ จึงเกิดแนวคิดในการนำขยะติดเชื้อมาผลิตเป็นพลังงาน (กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2561) เพื่อเป็นแนวทางในการแก้ไขปัญหาขยะติดเชื้อของสถานพยาบาลต่าง ๆ ในประเทศไทย

ในการศึกษางานวิจัยต่าง ๆ อาทิเช่น Bujak (2015) ได้ทำการศึกษานำขยะติดเชื้อมาทำการเผาไหม้ด้วยการหมุนแบบโรตารีคัย (Rotary kiln) เพื่อผลิตน้ำร้อนป้อนให้แก่ระบบผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก ผลการศึกษาพบว่า มีประสิทธิภาพอยู่ที่ประมาณ 79% ปรีชญา และสมรัฐ (2556) ได้นำขยะจากหลุมฝังกลบมาใช้ผลิตพลังงานในรูปของแก๊ส โดยเครื่องผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบไหลลง ด้วยกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) ในระดับเครื่องต้นแบบขนาด 50 kg/h และนำแก๊สเชื้อเพลิงใช้ร่วมกับเครื่องยนต์ดีเซลเพื่อผลิตไฟฟ้า ผลการศึกษาพบว่า สามารถทดแทนการใช้ น้ำมันดีเซลในการผลิตไฟฟ้าได้สูงสุด 73.33% และแก๊สที่ได้มีค่าความร้อนสูงสุด 3.99 MJ/Nm³ ณวรรษดา (2555) ได้ทำการศึกษานำขยะในประเทศญี่ปุ่น โดยเน้นที่ผลประโยชน์ของการผลิตไฟฟ้าจากขยะ ผลการศึกษาพบว่า ประเทศญี่ปุ่นมีโรงงานผลิตไฟฟ้าจากขยะในประเทศมากถึง 306 แห่ง หรือคิดเป็น 25.1% จากปริมาณโรงงานเผาขยะทั้งหมดและมีกำลังการผลิตไฟฟ้าทั้งหมด 1,700 MW Shen et al. (2017) ได้ทำการศึกษา การนำเศษไม้และขยะติดเชื้อมาย่อยสลายด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน (Hydrothermal carbonization) ผลการศึกษาพบว่า จากขบวนการดังกล่าวเศษไม้และขยะติดเชื้อถูกแปรสภาพให้กลายเป็นถ่านโดยมีค่าความร้อนสูงอยู่ที่ 24.18 MJ/kg

จากงานวิจัยที่กล่าวมาในข้างต้น พบว่า ยังไม่มีงานวิจัยใดที่ได้ทำการศึกษาด้านทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์จากเชื้อเพลิงขยะติดเชื้อ ดังนั้น จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ที่ต้องการวิเคราะห์ต้นทุนด้านพลังงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ด้วยเชื้อเพลิงขยะติดเชื้อของโรงพยาบาลลำปาง

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ (Organic Rankine cycle, ORC)

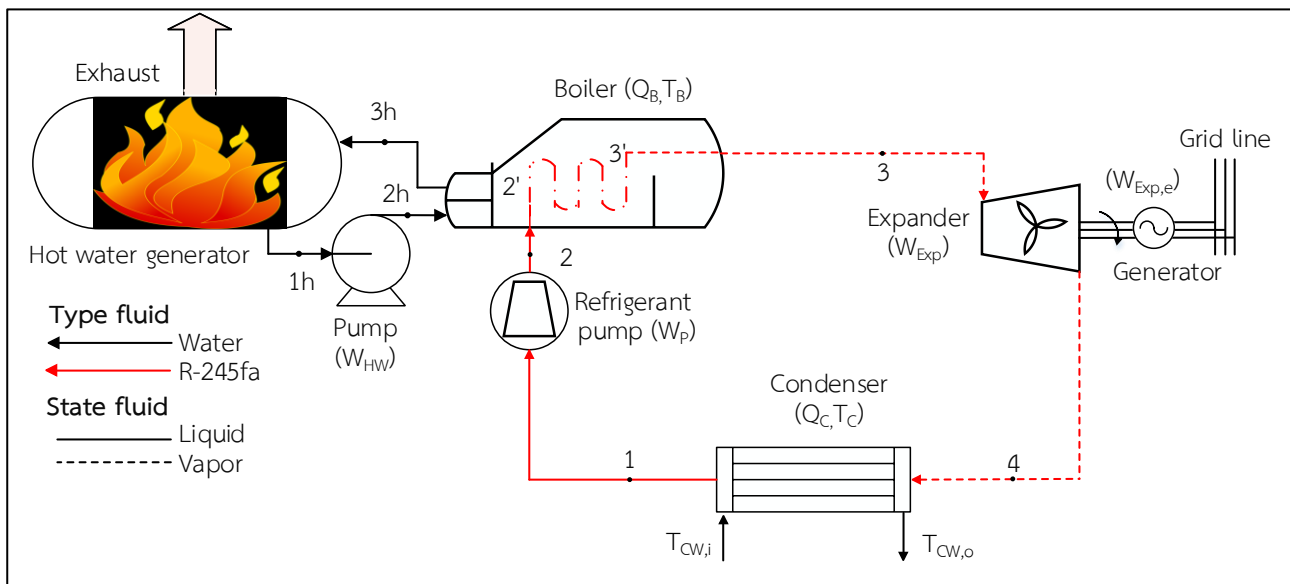
ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ มีหลักการทำงานดังแสดงรูปที่ 1 โดยเริ่มจากการนำเชื้อเพลิงขยะติดเชื้อไปป้อนให้แก่เตาเผาเพื่อผลิตน้ำร้อน สำหรับใช้เป็นแหล่งความร้อนในวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ เมื่อสารทำงานได้รับความร้อนจากแหล่งความร้อนดังกล่าวที่หม้อต้ม (Boiler) จะระเหยกลายเป็นไอเข้าสู่เครื่องขยายตัว (Expander) ขับหมุนเพลลาที่ต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) เพื่อผลิตไฟฟ้า หลังจากนั้นอุณหภูมิและความดันของสารจะลดลงเข้าสู่เครื่องควบแน่น (Condenser) เพื่อควบแน่นสารทำงานให้กลายเป็นของเหลว และถูกปั๊มเข้าสู่หม้อต้มเพื่อเริ่มต้นกระบวนการใหม่อีกครั้ง

ประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ (η_{ORC}) ดังแสดงในสมการที่ 1

$$\eta_{\text{ORC}} = (W_{\text{Exp,e}} - W_p) / Q_B \quad (1)$$

อัตราความร้อนที่หาได้จากการเผาไหม้โดยตรงจากขยะติดเชื้อดังแสดงในสมการที่ 2

$$\begin{aligned} Q_{\text{MCW}} &= \dot{m}_{\text{MCW}} \text{LHV}_{\text{MCW}} \\ Q_{\text{HW}} &= \epsilon_{\text{Incinerator}} Q_{\text{MCW}} \\ Q_B &= \epsilon_B Q_{\text{HW}} \end{aligned} \quad (2)$$



รูปที่ 1 แผนภาพการทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ร่วมกับเตาเผาขยะ

ต้นทุนต่อหน่วยของการผลิตไฟฟ้า (Levelized of electricity cost, LOEC)

การวิเคราะห์ต้นทุนด้านพลังงานของการผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ โดยใช้พลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ขยะติดเชื้อติดเชื้อดังแสดงในสมการที่ 3 (Chaiyat, 2015)

$$\text{LOEC} = \frac{\text{Inv} + \sum_{t=1}^n \frac{\text{PEC}}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{W_{\text{net top}}}{(1+r)^t}} \quad (3)$$

วิธีการศึกษา

ในการศึกษาการวิเคราะห์ต้นทุนด้านพลังงานของการผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ จากเชื้อเพลิงขยะติดเชื้อทางการแพทย์ของโรงพยาบาลลำปาง มีวิธีการศึกษาดังต่อไปนี้

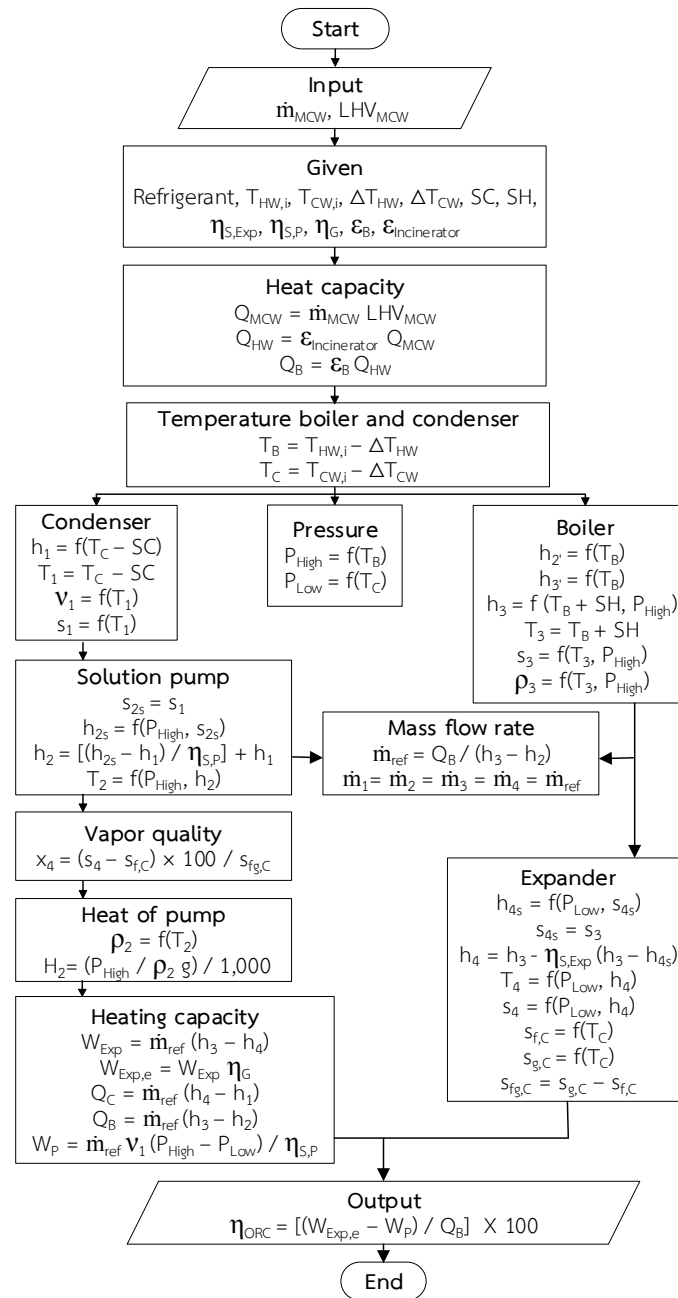
1. การสำรวจและเก็บข้อมูลของกระบวนการบำบัดขยะติดเชื้อ ปริมาณขยะติดเชื้อทางการแพทย์ และการประเมินต้นทุนต่อหน่วยการบำบัดขยะติดเชื้อของโรงพยาบาลลำปาง โดยมีเงื่อนไขในการคำนวณดังต่อไปนี้
 - 1.1. มูลค่าการลงทุนโครงการ (Inv) = ราคาโรงเรือนบำบัดขยะติดเชื้อ (Z_{Building}) + ราคาเครื่องบำบัดขยะติดเชื้อ (Z_{ECODUS})
 - 1.2. ระยะเวลาการทำงาน (t_{op}) เท่ากับ 19 h/day ทำงาน 365 day/year
 - 1.3. อายุการใช้งานของระบบบำบัดขยะติดเชื้อ (n) คิดที่ 20 year
 - 1.4. ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ (Z_{op}) คิดที่คนละ 15,000 Baht/moth จำนวน 2 person
 - 1.5. อัตราดอกเบี้ยเงินกู้ธนาคาร (r) โดยคิดที่ 7.12% (ธนาคารกรุงไทย, 2561)
2. การอบแห้งขยะติดเชื้อทางการแพทย์ที่ผ่านการบำบัดแล้วด้วยโรงเรือนพลาสติกขนาดการผลิต 2,000 kg ที่มีขนาดกว้าง 3 m ยาว 6 m และสูง 2 m โดยใช้เวลาในการอบแห้ง 12 h ที่ทำการชั่งน้ำหนักทุก ๆ 1 h
3. การวิเคราะห์หาคุณสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงขยะติดเชื้อทางการแพทย์ที่ผ่านการอบแห้ง โดยวิธีการวิเคราะห์หาโครงสร้างองค์ประกอบของเชื้อเพลิง (Proximate analysis) และการวิเคราะห์สัดส่วนของธาตุ (Ultimate analysis)
4. การประเมินศักยภาพทางพลังงานด้วยการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ที่ใช้แหล่งความร้อนจากเชื้อเพลิงขยะติดเชื้อ โดยโปรแกรมเรฟโปรป (Refprop) (NIST, 2018) ดังแสดงในภาพที่ 2 มีเงื่อนไขในการคำนวณดังต่อไปนี้
 - 4.1. สารทำงานที่ใช้ในวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ คือ R-245fa
 - 4.2. ของไหลที่เข้าวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์เป็นน้ำร้อนอุณหภูมิ ($T_{\text{HW},i}$) เท่ากับ 105°C
 - 4.3. อุณหภูมิน้ำระบายความร้อนเข้าเครื่องควบแน่น ($T_{\text{CW},i}$) เท่ากับ 32°C
 - 4.4. ประสิทธิภาพไอเซนทรอปิกของปั๊ม ($\eta_{\text{s,p}}$) และเครื่องขยายตัว ($\eta_{\text{s,Exp}}$) เท่ากับ 80%
 - 4.5. ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (η_{G}) เท่ากับ 80%
 - 4.6. ประสิทธิภาพของหม้อต้ม (ϵ_{B}) และเตาเผาขยะ ($\epsilon_{\text{Incinerator}}$) เท่ากับ 80%
 - 4.7. ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิงขยะติดเชื้อ (Lower heating value) อ้างอิงผลการวิเคราะห์ในข้อที่ 3
5. การวิเคราะห์ต้นทุนด้านพลังงานของการผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ โดยใช้ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงขยะติดเชื้อทางการแพทย์ โดยมีเงื่อนไขในการคำนวณดังต่อไปนี้
 - 5.1. ขนาดระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ (W_{ORC}) อ้างอิงผลการวิเคราะห์ในข้อที่ 4
 - 5.2. ราคาของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ ($Z_{\text{ORC, Unit}}$) อ้างอิงราคาของระบบที่ผลิตเองในประเทศของ นัฐพร (2560) ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ราคากระบบผลิตไฟฟ้าของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ (นัฐพร, 2560)

ORC capacity (kW _e)	ORC cost (Baht)
Waste heat machine: ORC-10	1,500,000
Waste heat machine: ORC-20	1,800,000

- 5.3. ราคาที่ดิน (Z_{Land}) คิดที่ 625 Baht/m² โดยใช้พื้นที่ทั้งหมด 300 m² (Chiangmai provincial land office, 2018)
- 5.4. ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา (Z_{OM}) คิดที่ 5% ของราคาวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์
- 5.5. ราคาของโรงเรือนพลาสติก ($Z_{\text{Solar greenhouse}}$) เท่ากับ 200,000 Baht/Unit

- 5.6. ราคาเครื่องเรือน (Z_{Building}) ค่าเตาเผาขยะ ($Z_{\text{Incinerator}}$) และค่าท่อน้ำร้อน (Z_{Piping}) คิดที่ 50% ของราคาวิศวกรแรงคินสารอินทรีย์
- 5.7. อายุการใช้งานของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ (n) คิดที่ 20 year
- 5.8. ระยะเวลาการทำงาน (t_{op}) เท่ากับ 19 h/day ทำงาน 365 day/year
- 5.9. ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ (Z_{Op}) คิดที่ 15,000 Baht/month จำนวน 1 person
- 5.10. อัตราดอกเบี้ยเงินกู้ธนาคาร (r) โดยคิดที่ 7.12% (ธนาคารกรุงไทย, 2561)



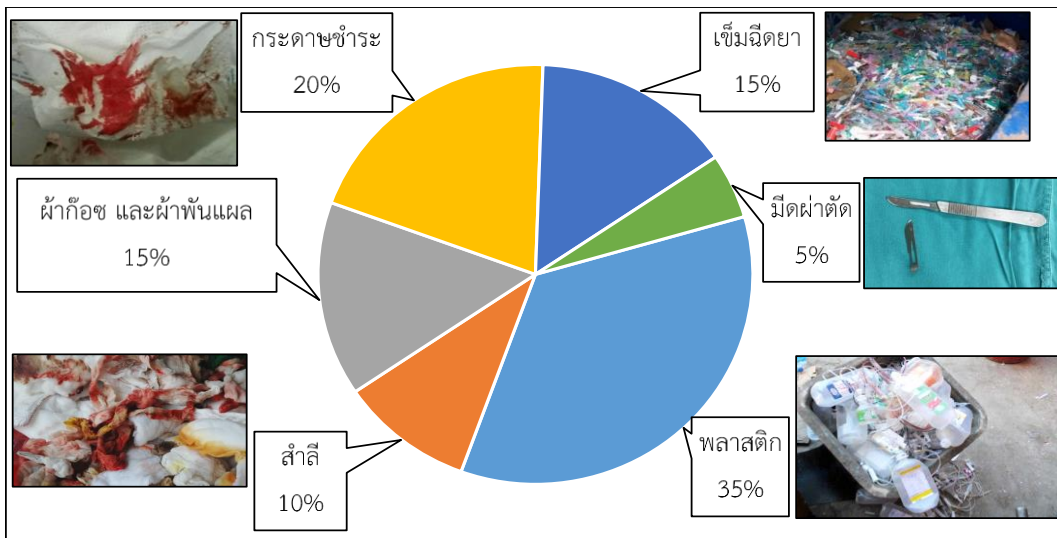
รูปที่ 2 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์

ผลการศึกษาและวิจารณ์

ผลการวิเคราะห์ต้นทุนด้านพลังงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ ด้วยเชื้อเพลิงขยะติดเชื้อของโรงพยาบาลลำปาง แสดงดังต่อไปนี้

1. ผลการสำรวจและเก็บข้อมูลขยะติดเชื้อทางการแพทย์ของโรงพยาบาลลำปาง

จากการสำรวจและเก็บข้อมูล พบว่า ขยะติดเชื้อจะถูกแบ่งออก 2 ส่วน คือ ส่วนที่สามารถบำบัดได้ทันที และส่วนที่ไม่สามารถบำบัดได้ประกอบไปด้วยโลหะ อาทิเช่น เข็มฉีดยา มีดผ่าตัด เป็นต้น โดยมีปริมาณขยะติดเชื้อทางการแพทย์ที่สามารถบำบัดได้ประมาณ 750 kg/day โดยทำการบำบัดด้วยเครื่อง ECODAS รุ่น T300 ด้วยวิธีการบดย่อย และฆ่าเชื้อ ที่อุณหภูมิประมาณ 135-140 °C อันประกอบไปด้วย พลาสติก สำลี และผ้ากอซ เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 3 และ 4 ตามลำดับ



รูปที่ 3 ปริมาณขยะติดเชื้อทางการแพทย์ของโรงพยาบาลลำปาง



รูปที่ 4 การคัดแยกและกระบวนการบำบัดขยะติดเชื้อ

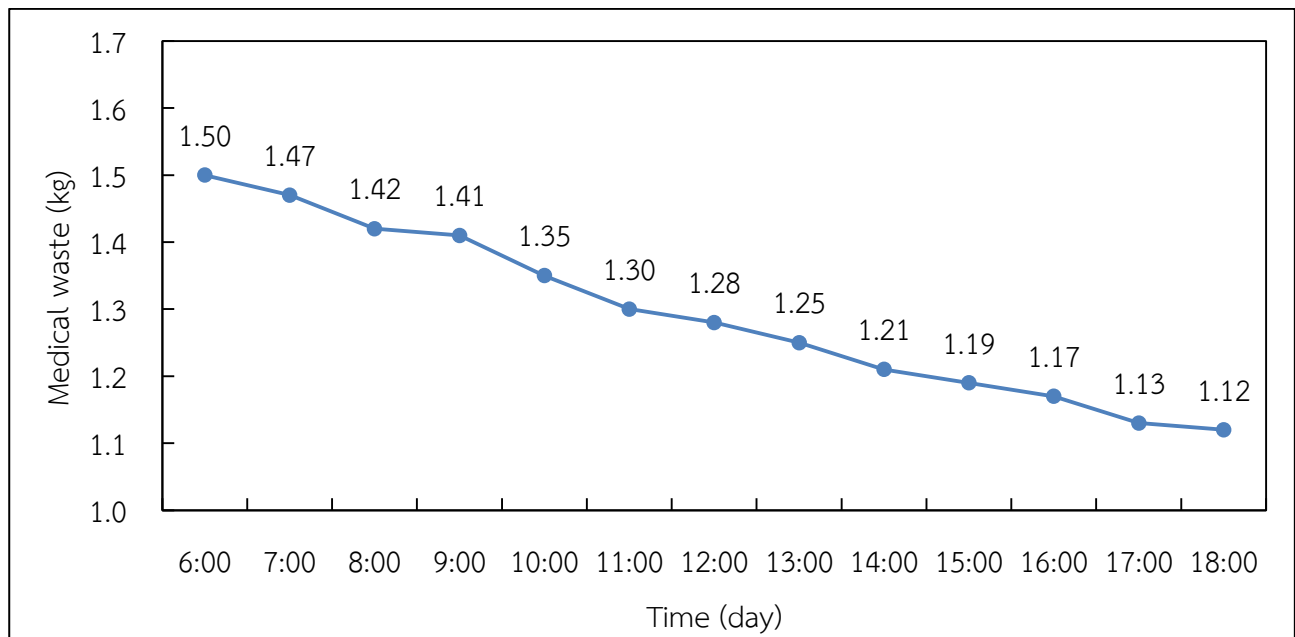
การประเมินต้นทุนต่อหน่วยของการบำบัดขยะติดเชื้อทางการแพทย์ของโรงพยาบาลลำปาง พบว่า การบำบัดขยะติดเชื้อ 1 kg_{Medical waste} มีต้นทุนต่อหน่วยของการบำบัดขยะติดเชื้อเท่ากับ 3.185 Baht/kg_{Medical waste} มีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การประเมินต้นทุนต่อหน่วยของการบำบัดขยะติดเชื้อทางการแพทย์ (Sonesack et al. 2017)

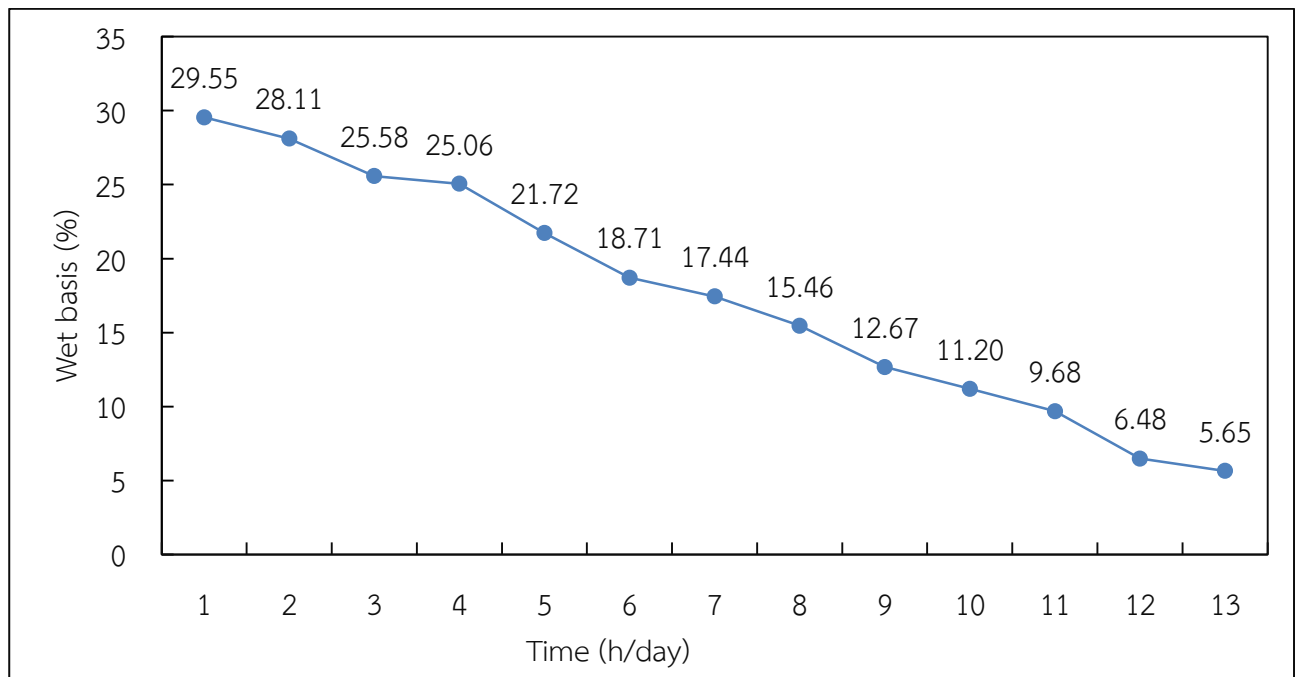
Description	Data	Unit
Cost of ECODUS model T300 (Z_{ECODUS})	12,000,000	Baht
Cost of building ($Z_{Building}$)	975,000	Baht
Investment cost (Inv)	12,975,000	Baht
Cost of electricity ($PC_{Electricity}$)	61,477	Baht/year
Cost of water (PC_{Water})	3,753	Baht/year
Operating cost (PC_{OP})	360,000	Baht/year
Cost of maintenance (Z_{OM})	425,230	Baht/year
Mass of medical waste ($M_{Medical\ waste}$)	750	kg _{Medical waste} /day
Operating time (t_{OP})	365	day/year
Life time (n)	20	year
Levelized cost (LC)	3.185	Baht/kg _{Medical waste}

2. ผลการอบแห้งของขยะติดเชื้อทางการแพทย์

จากการนำตัวอย่างของขยะติดเชื้อที่ผ่านการบำบัดมาทำการอบแห้งในโรงเรือนพลาสติก ที่น้ำหนักเริ่มต้น 1.5 kg ตั้งแต่เวลา 06:00-18:00 น. เป็นเวลาทั้งหมด 12 h และมีการชั่งน้ำหนักทุก ๆ 1 h จากผลการศึกษาพบว่า การอบแห้งขยะติดเชื้อมีอัตราการลดลงของน้ำหนักประมาณ 0.016 kg/h น้ำหนักสุดท้ายหลังการอบแห้งเหลือ 1.12 kg และนำไปประเมินค่าความชื้นฐานเปียกของเชื้อเพลิงขยะติดเชื้อมีค่าอยู่ที่ 5.65% ดังแสดงในรูปที่ 5 และ 6 ตามลำดับ โดยสภาพอากาศในวันที่ทำการอบแห้งมีอุณหภูมิแวดล้อมโดยเฉลี่ยประมาณ 28.44 °C อุณหภูมิภายในห้องอบแห้งโดยเฉลี่ยประมาณ 45.07 °C และจากการตรวจวัดค่ารังสีอาทิตย์ในแนวระนาบมีค่าโดยเฉลี่ยประมาณ 590 W/m²



รูปที่ 5 น้ำหนักขยะติดเชื้อแต่ละชั่วโมงในโรงเรือนพลาสติก



รูปที่ 6 ค่าความชื้นฐานเปียกของเชื้อเพลิงขยะติดเชื้อที่ผ่านการอบแห้งโดยโรงเรือนพลาสติกในแต่ละชั่วโมง

3. ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงขยะติดเชื้อที่ผ่านการอบแห้ง

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างองค์ประกอบของเชื้อเพลิงและการวิเคราะห์สัดส่วนของธาตุ พบว่า มีค่าความร้อนต่ำ 26.29 MJ/kg ซึ่งจะถูกนำมาประเมินการผลิตไฟฟ้าในหัวข้อถัดไป ดังแสดงในตารางที่ 3 (สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, 2560)

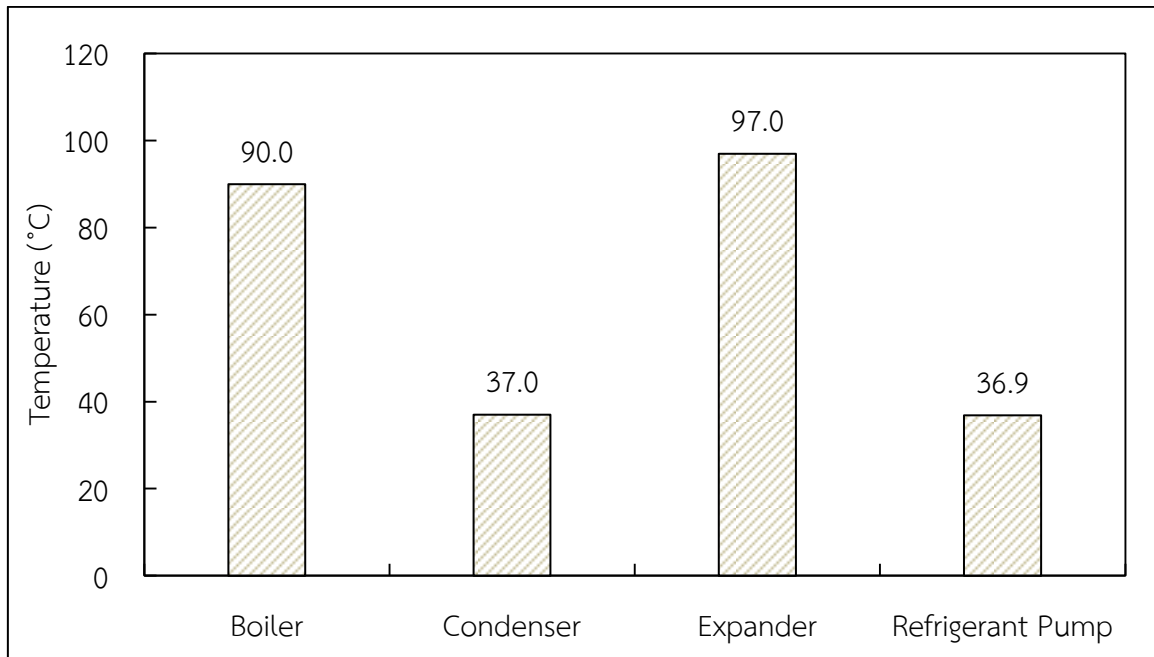
ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงขยะติดเชื้อที่ผ่านการอบแห้ง

Parameter	Testing standard	Result	Unit
Proximate analysis			
Moisture	ASTM D 7582	5.65	%
Fix carbon	ASTM D 7582	5.70	%
Volatile matter	ASTM D 7582	82.20	%
Ash	ASTM D 7582	6.45	%
Ultimate analysis			
Higher heating value	ASTM D 5865	28.38	MJ/kg
Lower heating value	ASTM D 5865	26.29	MJ/kg
Carbon	ASTM D 5373	58.00	%
Hydrogen	ASTM D 5373	9.33	%
Nitrogen	ASTM D 5373	0.73	%
Oxygen	ASTM D 5373	25.35	%
Sulfur	ASTM D 4239	0.14	%

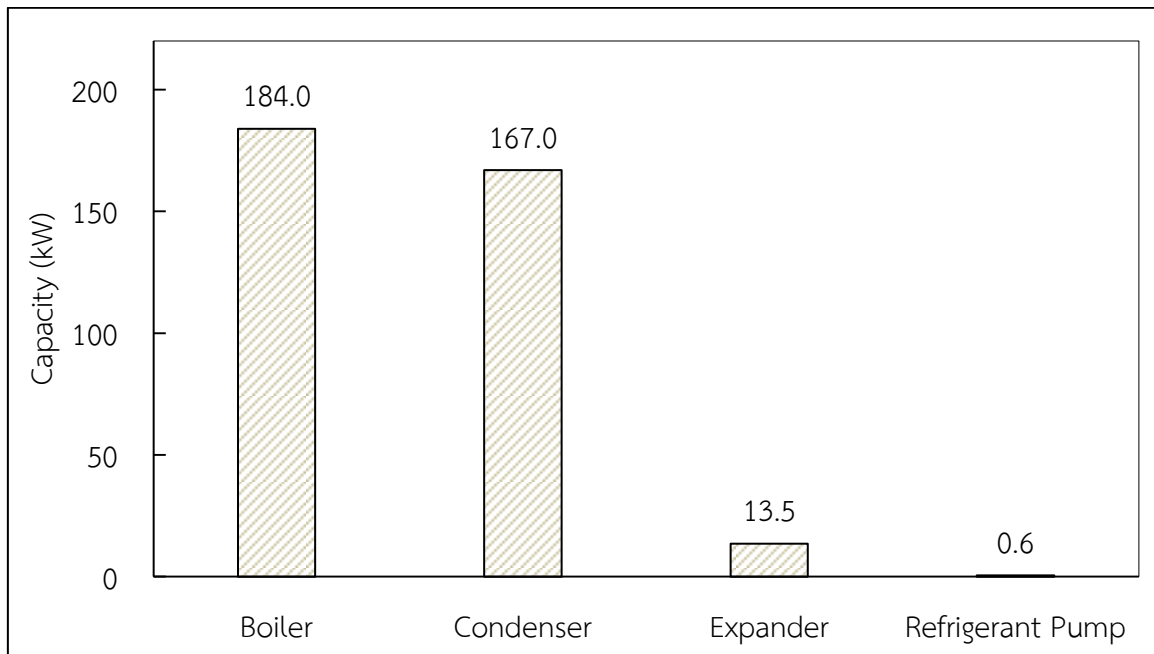
4. ผลการประเมินศักยภาพทางพลังงาน

ผลการประเมินศักยภาพทางพลังงานด้วยการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของวัฏจักรแรงจลนศาสตร์อินทรีย์ ที่ใช้สารทำงาน R-245fa มีอุณหภูมิน้ำร้อนที่ป้อนให้แก่หม้อต้มอยู่ที่ประมาณ 105 °C โดยใช้เชื้อเพลิงขยะติดเชื้อที่ผ่านการอบแห้งเป็นแหล่งความร้อนที่ป้อนให้แก่ระบบ อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นที่เครื่องควบแน่นประมาณ 32 °C และขนาดของวัฏจักรแรงจลนศาสตร์อินทรีย์ ที่มีความเหมาะสมกับแหล่งความร้อนดังกล่าว คือ ขนาดการผลิตไฟฟ้า 13 kW_e อัตราการป้อนเชื้อเพลิงขยะติดเชื้อที่ผ่านการอบแห้งอยู่ที่ 39.47 kg/h

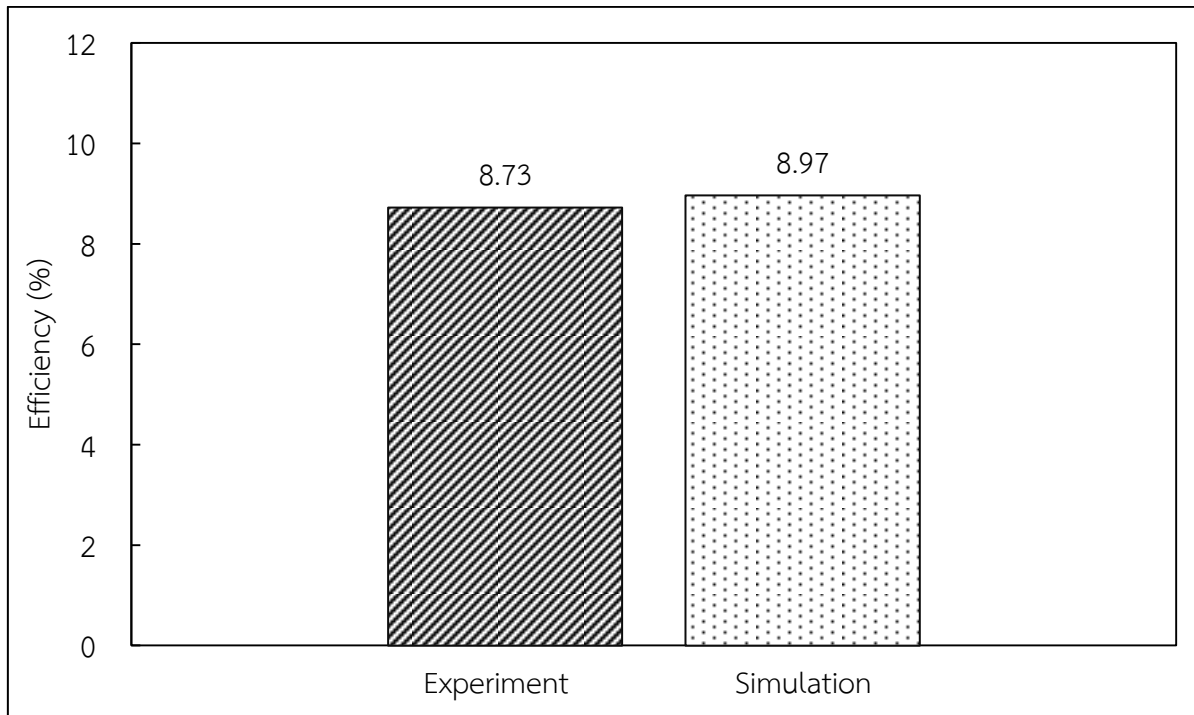
จากผลการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวัฏจักรแรงจลนศาสตร์อินทรีย์ สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุปกรณ์ของวัฏจักรแรงจลนศาสตร์อินทรีย์ และอุณหภูมิสารทำงานที่อยู่ในหม้อต้ม เครื่องควบแน่น เครื่องขยายตัว และปั๊มสารทำงานดังแสดงในรูปที่ 7 ในขณะที่เดียวกันยังมีอัตราการถ่ายเทความร้อนของสารทำงานในแต่ละอุปกรณ์ ซึ่งมีผลต่อการทำงานของวัฏจักรแรงจลนศาสตร์อินทรีย์ดังแสดงในรูปที่ 8 และเมื่อนำผลที่ได้มาทำการเปรียบเทียบกับ การทดสอบของ Chaiyat and Kaitsiriroat (2015) พบว่าประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงจลนศาสตร์อินทรีย์มีค่าใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 9 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความถูกต้อง และสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ได้ในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 7 อุณหภูมิการทำงานในแต่ละอุปกรณ์ของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์



รูปที่ 8 อัตราการถ่ายเทความร้อนและกำลังของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์



รูปที่ 9 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์จากการทดสอบ และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

5. ผลการวิเคราะห์ต้นทุนต่อหน่วยของการผลิตไฟฟ้า

ผลการวิเคราะห์ต้นทุนต่อหน่วยของการผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ จากเชื้อเพลิงขยะติดเชื้อทางการแพทย์ดังแสดงในตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ พบว่า ราคาต้นทุนของขยะติดเชื้อหลังการบำบัดแล้วมีค่าอยู่ที่ 3.185 Baht/kg_{Medical waste} และเงินลงทุนโครงการอยู่ที่ 2,772,500 Baht โดยคิดเป็นต้นทุนต่อหน่วยของการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 4.668 Baht/kWh

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ต้นทุนต่อหน่วยของการผลิตไฟฟ้า

Description	Data	Unit
Capacity of ORC ($W_{ORC,e}$)	13	kW _e
Heat capacity of boiler (Q_B)	184	kW
Heat capacity of hot water (Q_{HW})	230	kW
Heat capacity of medical waste ($Q_{Medical\ waste}$)	288	kW
Cost of ORC ($Z_{ORC, Unit}$)	1,590,000	Baht
Cost of land for 300 m ² (Z_{Land})	187,500	Baht
Cost of maintenance 5% of ORC price (Z_{OM})	79,500	Baht/year
Cost of medical waste fuel ($Z_{Medical\ waste}$)	871,893	Baht/year
Cost of solar greenhouse drying room ($Z_{Solar\ greenhouse}$)	200,000	Baht
Cost of building ($Z_{Building}$), incinerator ($Z_{Incinerator}$) and piping (Z_{Piping}) 50% of ORC price	795,000	Baht

Description	Data	Unit
Operating time is 19 h/day (t_{OP})	6,935	h/year
Electrical product generation (PW_{ORC})	95,031	kWh/year
Operating cost (Z_{OP})	180,000	Baht/year
Discount rate (r)	7.12	%
Life time of ORC (n)	20	year
Investment cost ($Inv = Z_{ORC, Unit} + [Z_{Building} + Z_{Incinerator} + Z_{Pipping} Z_{Solar\ greenhouse} + Z_{Land}]$)	2,772,500	Baht
Production electricity cost ($PEC = Z_{Medical\ waste} + Z_{OP} + Z_{OM}$)	1,131,393	Baht/year
Levelized of electricity cost (LOEC)	4.668	Baht/kWh

สรุป

- 1) การสำรวจและเก็บข้อมูลขยะติดเชื้อทางการแพทย์ของโรงพยาบาลลำปาง รวมทั้งสิ้น 750 kg/day
- 2) การอบแห้งของขยะติดเชื้อทางการแพทย์มีอัตราการลดลงของน้ำหนัก 0.016 kg/h
- 3) เชื้อเพลิงขยะติดเชื้ออบแห้งมีค่าความร้อนสูงอยู่ที่ 28.38 MJ/kg และค่าความร้อนต่ำอยู่ที่ 26.29 MJ/kg
- 4) วัฏจักรแรงคินสาร์อินทรีย์ที่เหมาะสม คือ ขนาดการผลิตไฟฟ้า 13 kW_e มีประสิทธิภาพ 8.97% และมีอัตราการป้อนเชื้อเพลิงอยู่ที่ 39.47 kg/h
- 5) ราคาต้นทุนต่อหน่วยของการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 4.668 Baht/kWh

คำขอบคุณ

ขอขอบคุณวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ภายใต้โครงการ “ผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทน ในกลุ่มประเทศอาเซียนสำหรับนักศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษา” และขอขอบคุณโรงพยาบาลลำปาง และ บริษัท นำวิวัฒน์การช่าง (1992) จำกัด ที่สนับสนุนด้านสถานที่ในการศึกษาวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม “ขยะมูลฝอยของประเทศไทย”. 2560. <http://www.pcd.go.th> (28 มีนาคม 2561).
- ณวรรษดา มะโนคำ. 2555. การเผาขยะในประเทศญี่ปุ่น: ปัจจัยการเกิดและผลประโยชน์ของการผลิตไฟฟ้าจากขยะในประเทศญี่ปุ่นกรณีศึกษาโรงงานเผาขยะ ชินโกโต้. ปรียญฐานิพนธ์สาขาวิชาภาษาญี่ปุ่น มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่.
- นัฐพร ไชยญาติ. 2560. การออกแบบระบบพลังงานทดแทน (Renewable energy system design). พิมพ์ครั้งที่ 3, สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยแม่โจ้, มหาวิทยาลัยแม่โจ้, เชียงใหม่.
- นัฐพร ไชยญาติ. 2560. เทคโนโลยีความร้อนใต้พิภพ (Geothermal energy technology). พิมพ์ครั้งที่ 6, สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยแม่โจ้, มหาวิทยาลัยแม่โจ้, เชียงใหม่.
- ปรัชญา กรีส และสมรัฐ เกิดสุวรรณ. 2556. การทดสอบระบบผลิตพลังงานจากขยะมูลฝอยโดยเทคโนโลยีก๊าซซิฟเคชันแบบต่อเนื่อง 200 ชั่วโมง. น. 246-253. ใน: การจัดประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ครั้งที่ 32. 3-4 พฤศจิกายน 2557. มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, กรุงเทพมหานคร.

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. ศูนย์เชี่ยวชาญนวัตกรรมพลังงานสะอาดและสิ่งแวดล้อม. 2560. (Thailand Institute of Scientific and Technological Research, TISTR, 2018).

สำนักงานที่ดินจังหวัดเชียงใหม่ “ราคาที่ดินจังหวัดเชียงใหม่” <http://property.treasury.go.th/pvmwebsite/> (25 มีนาคม 2561).

ธนาคารกรุงไทย “อัตราดอกเบี้ยเงินให้สินเชื่อ”. 2561. <https://www.ktb.co.th> (20 มีนาคม 2561).

Sonesack Sengnavong, Nattaporn Chaiyat, Chawaroj Jaisin, Wassamol Lerdjaturanon, Chakkraphan Thawongamyigsakul. 2018. การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์และต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ของการบำบัดขยะติดเชื้อทางการแพทย์ กรณีศึกษา: โรงพยาบาลลำปาง, น. 84-89. ใน: การถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ ครั้งที่ 17. 15-16 กุมภาพันธ์ 2561. ลำปาง.

Bujak, J. 2015. Production of waste energy and heat in hospital facilities. Energy. 91: P. 350-362.

Chaiyat, N. 2015 Assessment alternative energy for organic Rankine cycle power plant in Thailand. International Journal of engineering and technology 7: P 0975-4024.

ECODAS. Online: www.contact@ecodas.com, Accessed: 9 December 2017.

NIST (National Institute of Standards and Technology), Inc. (Refprop Version 10: Customer Number 40754). Thermodynamic Properties of Refrigerants and Refrigerant Mixtures Software, America. 2018.

Shen, Y., Yu, S., Ge, S., Chen, X., Ge, X. and Chen, M. Hydrothermal carbonization of medical wastes and lignocellulosic biomass for solid fuel production from lab-scale to pilot-scale. Energy 2017; 118: P. 312-323.

อักษรย่อและสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
Inv	มูลค่าการลงทุน	Baht
LOEC	ค่าต้นทุนต่อหน่วยการผลิตไฟฟ้า	Baht/kWh
LHV	ค่าความร้อนต่ำ	MJ/kg
N	จำนวน	Unit
n	จำนวนปีและอายุการใช้งาน	year
ORC	วัฏจักรแรงดันอินทรีย์	kW
P	ความดัน	kPa
PB	ระยะเวลาในการคืนทุน	year
PW	กำลังการผลิตไฟฟ้า	kW
Q	อัตราการถ่ายเทความร้อน	kW, kJ
r	อัตราส่วนลด	%
T	อุณหภูมิ	°C
t	เวลา	h
W	กำลังไฟฟ้า	kW
Z	รายจ่าย	Baht

ตัวกรีก	ความหมาย	หน่วย
η	ประสิทธิภาพ	%
ϵ	ประสิทธิผล	%
\dot{m}	อัตราการไหล	kg/s
ρ	ความหนาแน่น	kg/m ³
v	ปริมาตรจำเพาะ	m ³ /kg

ตัวห้อย	ความหมาย
B	Boiler
CW	Cooling water
e	Electricity
Exp	Expander
G	Generator
HW	Hot water
i	Inlet
MCW	Medical waste
o	Outlet
OM	Operating maintenance
OP	Operating
P	Pump
W	Water