

# สมรรถนะทางความร้อนของเตาเผาขยะขนาดเล็กสำหรับการผลิตร่วม ความร้อนและไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์

## Thermal Performance of Small Incinerator for Combined Heat and Power by Organic Rankine Cycle

ชัยวัช แก้วเมือง<sup>1</sup> และนัฐพร ไชยญาติ<sup>2\*</sup>

Chaithawat Kaewmueang<sup>1</sup> and Nattaporn Chaayat<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้

<sup>2</sup>ศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีพลังงานทดแทนและเกษตรอัจฉริยะที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

<sup>1</sup>School of Renewable Energy, Maejo University

<sup>2</sup>Excellence Center on Environmental Friendly Smart Agriculture and Renewable Energy Technology (ECoT)

E-mail: benz178tii@hotmail.com

วันที่รับบทความ 3 มีนาคม 2563

Received: Mar. 3, 2020

วันที่รับแก้ไขบทความ 7 พฤษภาคม 2563

Revised: May. 7, 2020

วันที่ตอบรับบทความ 27 พฤษภาคม 2563

Accepted: May. 27, 2020

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาสมรรถนะทางความร้อนของเตาเผาขยะขนาดเล็กขนาด 1 ton/day ร่วมกับการผลิตความร้อนโดยของไหล 3 ชนิด คือ น้ำ ไอน้ำ และน้ำมันร้อน เพื่อผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ขนาด 20 kW<sub>e</sub> โดยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณร่วมกับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมของระบบผลิตพลังงานร่วมจากไหลร้อนทั้ง 3 ชนิด ผลการศึกษาพบว่า เตาเผาขยะขนาดเล็กที่มีอัตราการผลิตความร้อนประมาณ 240 kW เมื่อนำน้ำมาใช้ในการถ่ายเทความร้อนมีอุณหภูมิที่เหมาะสม 116.57 °C และสารทำงาน R-236ea สามารถนำมาใช้ในการผลิตไฟฟ้าที่ประสิทธิภาพร้อยละ 7.58 ในขณะที่การใช้ไอน้ำที่อุณหภูมิ 143.25 °C เหมาะสำหรับการใช้สารทำงาน R-245ca ที่ให้ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าสูงสุดร้อยละ 11.70 ในกรณีของการใช้น้ำมันร้อนอุณหภูมิที่เหมาะสม 189.61 °C สามารถถ่ายเทความร้อนให้แก่สารทำงาน R-141b ทำให้ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าสูงสุดร้อยละ 14.19

**คำสำคัญ:** สมรรถนะทางความร้อน, เตาเผาขยะขนาดเล็ก, การผลิตร่วมความร้อนและไฟฟ้า, วัฏจักรแรงดันอินทรีย์

### Abstract

This research studied the thermal performance of a small incinerator at a combustion rate of 1 ton/day combined with heating production from three heating fluids of water, steam, and hot oil for electricity production using an organic Rankine cycle at an electrical power capacity of 20 kW<sub>e</sub>. Computational fluid dynamics and mathematical modeling methods were used to evaluate the suitable working conditions of the cogeneration system of the three hot fluids. From the study results, the small incinerator at a heating capacity of approximately 240 kW could transfer heat into the hot fluid of water at a suitable temperature of 116.57 °C by using R-236ea at a maximum power efficiency of 7.58%. At the same time, the use of steam at a

temperature of 143.25 °C for R-245ca showed a maximum power efficiency of 11.70%. In the case of hot oil, a suitable temperature of 189.61 °C for using R-141b was able to transfer heat at a maximum power efficiency of 14.19%.

**Keywords:** Thermal performance, Small incinerator, Combined heat and power, Organic Rankine cycle

## 1. บทนำ

ปัจจุบันสถานการณ์ขยะในประเทศไทย มีแนวโน้มของปริมาณขยะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทุกปี สาเหตุมาจากการเพิ่มขึ้นของประชากร การขยายตัวทางเศรษฐกิจ และการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรม การอุปโภคบริโภคของประชาชน หากปริมาณขยะที่เพิ่มขึ้นไม่ได้ถูกกำจัดอย่างถูกวิธี จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จึงทำให้เตาเผาขยะ (Incinerator) ได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้น เพื่อใช้ในการกำจัดขยะ เช่น ขยะเทศบาล และขยะติดเชื้อทางการแพทย์ เป็นต้น แต่ทั้งนี้เตาเผากำจัดขยะขนาดใหญ่จะต้องมีการขนย้ายขยะเข้าสู่พื้นที่กำจัด จึงส่งผลกระทบต่อกลิ่นเหม็นและสร้างความไม่พอใจให้แก่ประชาชนในชุมชนโดยรอบ ดังนั้นเตาเผากำจัดขยะขนาดเล็กที่ถูกออกแบบให้เหมาะสมต่อปริมาณขยะในแต่ละพื้นที่ จึงเป็นประเด็นที่น่าสนใจในสถานการณ์ปัจจุบันของประเทศไทย ซึ่งสอดคล้องกับนโยบายของกระทรวงพลังงานที่ต้องการส่งเสริมการผลิตไฟฟ้าจากขยะ (Ministry of Energy, 2020) ดังนั้นการประยุกต์เตาเผากำจัดขยะขนาดเล็กร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ (Organic Rankine cycle, ORC) จึงเป็นประเด็นที่น่าสนใจ และยังไม่มีการวิจัยใดในประเทศไทยทำการศึกษาในประเด็นดังกล่าวอีกด้วย

การออกแบบเตาเผาขยะขนาดเล็กร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์นิยมใช้การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamics, CFD) และการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นเครื่องมือในการออกแบบ โดยมีงานวิจัยที่ทำการศึกษาอันประกอบไปด้วย Silva et al (2017) Soria et al. (2013) Saad et al. (2019) Wissing et al. (2017) Rezeau et al. (2018) และ Zhong et al. (2019) ที่ได้ทำการศึกษาการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในการวิเคราะห์การออกแบบเตาเผาขยะ ซึ่งพบว่า สามารถประเมินคุณลักษณะทางความร้อนของเตาเผาขยะได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้การประยุกต์พลังงานทดแทนด้านความร้อน เพื่อนำไปใช้ในการผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ มีงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษา เช่น Chaiyat and Kiatsiriroat (2015) Sung and Kim (2017) และ Li et al. (2012) นำเสนอผลการทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ โดยใช้แหล่งความร้อนประเภทต่าง ๆ ซึ่งผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า ระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์สามารถประยุกต์ร่วมกับพลังงานทดแทนด้านความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ประเด็นที่น่าสนใจจากงานวิจัยดังกล่าว คือ แหล่งความร้อนแต่ละประเภท เช่น สถานะของแหล่งความร้อนและอุณหภูมิ เป็นต้น มีผลต่อการเลือกสารทำงานและประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้า ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wang et al. (2019) ที่ทำการศึกษาสารทำงาน 30 ชนิด สำหรับวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ โดยมีแหล่งความร้อนจากคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide, CO<sub>2</sub>) ของโรงงานอุตสาหกรรม

ผลจากการศึกษาพบว่า การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้านความร้อน สามารถช่วยในการเลือกสารทำงานที่เหมาะสม สำหรับวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น พบว่า ยังไม่มีงานวิจัยใดศึกษาเกี่ยวกับเตาเผาขยะขนาดเล็ก ร่วมกับการผลิตความร้อน เพื่อใช้ในการผลิตไฟฟ้าที่เหมาะสมกับคุณลักษณะทางกายภาพของขยะในประเทศไทย จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ ที่ต้องการศึกษาและวิเคราะห์สมรรถนะทางความร้อนของเตาเผาขยะขนาดเล็ก ร่วมกับการผลิตความร้อนสำหรับการผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ โดยใช้เทคนิคของพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ร่วมกับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

## 2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

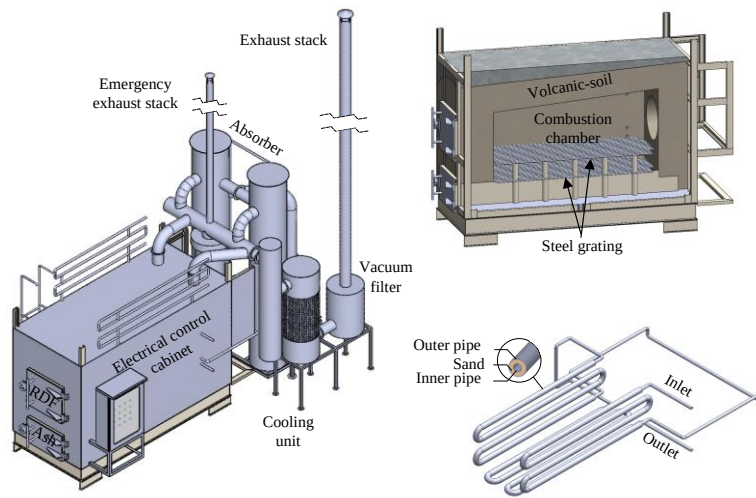
เพื่อศึกษาสมรรถนะทางความร้อนของเตาเผาขยะขนาดเล็ก ร่วมกับการผลิตความร้อน สำหรับการผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ โดยใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

## 3. วิธีดำเนินการวิจัย

วิธีดำเนินการวิจัย เริ่มจากการสร้างแบบแปลน 3 มิติ โดยโปรแกรม Solidworks เพื่อทำการวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของเตาเผาขยะขนาดเล็ก และศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนของเตาเผาขยะขนาดเล็ก จากนั้นนำผลการวิเคราะห์ไปใช้เป็นเงื่อนไขเริ่มต้นการคำนวณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่ทำการพัฒนาขึ้นมาโดยใช้โปรแกรม Refprop, Visual basic application (VBA) และ Excel ในการวิเคราะห์หาสารทำงานที่เหมาะสมสำหรับระบบผลิตพลังงานร่วมจากของไหลร้อนทั้ง 3 ชนิด ซึ่งรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนมีดังต่อไปนี้

### 3.1 การวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

การวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ โดยใช้โปรแกรม Solidworks (Flow simulation) ของเตาเผาขยะขนาดอัตราการเผาไหม้ประมาณ 1 ton/day ที่มีประสิทธิภาพการเผาไหม้ประมาณร้อยละ 32 และสามารถผลิตความร้อนได้ประมาณ 240 kW (Yatsunthea and Chaiyat, 2020) โดยเตาเผาขยะดังกล่าวได้ทำการออกแบบห้องเผาไหม้ให้มีขนาดความจุ 1.09 m<sup>3</sup> ท่อเหล็กแลกเปลี่ยนเป็นแบบท่อซ้อนท่อ ทำหน้าที่ในการถ่ายเทความร้อนจากการเผาไหม้ขยะให้แก่ของไหลร้อน โดยมีพื้นที่ถ่ายเทความร้อน 3.756 m<sup>2</sup> ส่วนในช่องว่างระหว่างท่อเหล็กมีการบรรจุทรายในปริมาตร 0.04 m<sup>3</sup> เพื่อช่วยกระจายความร้อนให้สม่ำเสมอ ผนังเตาสร้างจากดินเผาไฟ มีความหนา 0.03 m หุ้มด้วยฉนวนเหล็กด้านนอกที่มีความหนา 0.002 m ดังแสดงรายละเอียดการออกแบบต่าง ๆ ในภาพที่ 1 โดยทำการจำลองของไหลร้อนอันประกอบด้วย น้ำร้อน ไอน้ำ และน้ำมันร้อน (PTT Hitemp 500, 2018) ที่มีคุณสมบัติทางกายภาพของไหลดังกล่าวแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งของไหลร้อนทั้ง 3 ชนิด สามารถหาได้ง่ายและมีใช้งานกันอย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรมของประเทศไทย อีกทั้งยังไม่ทำปฏิกิริยาต่อวัสดุที่ใช้สร้างเตาเผาขยะอีกด้วย โดยการวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ มีเงื่อนไขเริ่มต้นดังแสดงในตารางที่ 2



ภาพที่ 1 แบบจำลอง 3 มิติ ของเตาเผาขยะขนาดเล็ก

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพของของไหลร้อน

| คุณสมบัติทางกายภาพ                             | น้ำร้อน | ไอน้ำ   | น้ำมันร้อน | หน่วย                       |
|------------------------------------------------|---------|---------|------------|-----------------------------|
| ช่วงอุณหภูมิการทำงานของไหลร้อน ( $T_{WR,HF}$ ) | 90-120  | 120-170 | 140-320    | $^{\circ}\text{C}$          |
| อุณหภูมิเฉลี่ยของไหลร้อน ( $T_{a,HF}$ )        | 105     | 145     | 230        | $^{\circ}\text{C}$          |
| ความหนาแน่นเฉลี่ย ( $\rho_{HF}$ )              | 954.70  | 4.17    | 711.95     | $\text{kg/m}^3$             |
| ความจุความร้อนจำเพาะเฉลี่ย ( $C_{p,bulk,HF}$ ) | 4.22    | 2.38    | 2.80       | $\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$ |
| สัมประสิทธิ์การนำความร้อนเฉลี่ย ( $k_{HF}$ )   | 0.68    | 0.03    | 0.12       | $\text{W/m}\cdot\text{K}$   |
| ความหนืดเฉลี่ย ( $CV_{HF}$ )                   | 0.27    | 0.01    | 0.84       | $\text{mPa}\cdot\text{s}$   |
| จุดวาบไฟ ( $T_{FP,HF}$ )                       | -       | -       | 212        | $^{\circ}\text{C}$          |
| จุดลุกติดไฟได้เอง ( $T_{AIT,HF}$ )             | -       | -       | 350        | $^{\circ}\text{C}$          |

ตารางที่ 2 เงื่อนไขเริ่มต้นการวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

| รายละเอียด                                                 | น้ำร้อน         | ไอน้ำ              | น้ำมันร้อน       | หน่วย                     |
|------------------------------------------------------------|-----------------|--------------------|------------------|---------------------------|
| อุณหภูมิขาเข้าเตาเผา ( $T_{HF,i,ICH}$ )                    | 95 <sup>1</sup> | 129 <sup>2</sup>   | 160 <sup>3</sup> | $^{\circ}\text{C}$        |
| อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ( $T_0$ )                              | -               | 30                 | -                | $^{\circ}\text{C}$        |
| อุณหภูมิไอเสีย ( $T_E$ )                                   | -               | 1,200 <sup>4</sup> | -                | $^{\circ}\text{C}$        |
| ความดันภายในห้องเผาไหม้ ( $P_{CC,ICH}$ )                   | -               | 10,1325            | -                | Pa                        |
| อัตราการไหลของของไหลร้อน ( $\dot{m}_{HF}$ )                | -               | 3                  | -                | $\text{kg/s}$             |
| สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของเหล็ก ( $k_{steel}$ )          | -               | 43                 | -                | $\text{W/m}\cdot\text{K}$ |
| สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของดิน<br>( $k_{volcanic-soil}$ ) | -               | 0.62               | -                | $\text{W/m}\cdot\text{K}$ |
| สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของทราย ( $k_{sand}$ )            | -               | 3.34               | -                | $\text{W/m}\cdot\text{K}$ |
| ขนาดความจุห้องเผาไหม้ ( $V_{CC,ICH}$ )                     | -               | 1.09               | -                | $\text{m}^3$              |

**ตารางที่ 2** เงื่อนไขเริ่มต้นการวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (ต่อ)

| รายละเอียด                                                   | น้ำร้อน | ไอน้ำ   | น้ำมันร้อน | หน่วย        |
|--------------------------------------------------------------|---------|---------|------------|--------------|
| ปริมาตรทรายในท่อเหล็ก ( $V_{\text{sand}}$ )                  | -       | 0.04    | -          | $\text{m}^3$ |
| พื้นที่การถ่ายเทความร้อนของท่อเหล็ก ( $A_{\text{pipe}}$ )    | -       | 3.76    | -          | $\text{m}^2$ |
| ความหนาแน่นดินภูเขาไฟ ( $\text{TH}_{\text{volcanic-soil}}$ ) | -       | 0.03    | -          | m            |
| ความหนาแน่นเหล็ก ( $\text{TH}_{\text{steel}}$ )              | -       | 0.002   | -          | m            |
| จำนวนกริดในการคำนวณ (Mesh)                                   | -       | 237,600 | -          | mesh         |

หมายเหตุ: <sup>1</sup> อ้างอิงข้อมูลจาก Chaiyat and Kiatsiriroat (2015)

<sup>2</sup> อ้างอิงข้อมูลจาก Sung and Kim (2017)

<sup>3</sup> อ้างอิงข้อมูลจาก Li et al. (2012)

<sup>4</sup> อ้างอิงข้อมูลจาก Bujak (2009)

### 3.2 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้านความร้อน

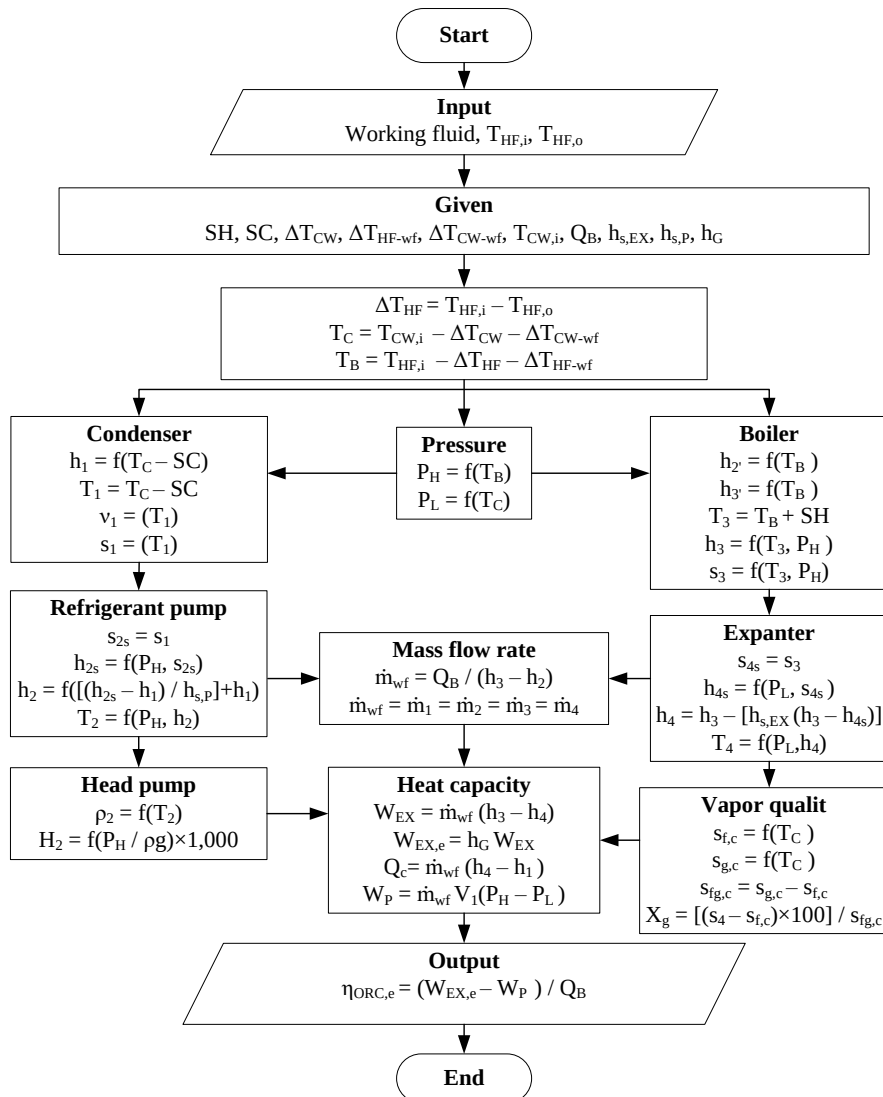
งานวิจัยนี้เลือกใช้สารทำงาน 11 ชนิด อันประกอบไปด้วย R-123 R-1233zd R-124 R-141b R-142b R-21 R-236fa R-236ea R-245ca R-245fa และ R-365mfc ซึ่งสารทำงานทั้งหมดดังกล่าวสามารถหาซื้อได้ในประเทศไทย สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ การวิเคราะห์สารทำงานที่เหมาะสมร่วมกับของไหลร้อน 3 ชนิด มีเงื่อนไขเริ่มต้นในการจำลองทางคณิตศาสตร์ต่าง ๆ อ้างอิงข้อมูลการทดสอบของระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ ขนาดกำลังการผลิตไฟฟ้า 20 kW<sub>e</sub> ของ Wakaiyang and Chaiyat (2016) และ Yatsunthea and Chaiyat (2020) ดังแสดงในตารางที่ 3 และมีแผนภาพแสดงขั้นตอนการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบผลิตพลังงานร่วม ดังแสดงในภาพที่ 2

**ตารางที่ 3** เงื่อนไขเริ่มต้นการวิเคราะห์ระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์

| รายละเอียด                                                                           | ปริมาณ | หน่วย |
|--------------------------------------------------------------------------------------|--------|-------|
| อัตราการถ่ายเทความร้อนที่หม้อต้ม ( $Q_B$ ) <sup>1</sup>                              | 240    | kW    |
| อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นที่เข้าเครื่องควบแน่น ( $T_{\text{CW},i}$ ) <sup>2</sup>          | 28     | °C    |
| ผลต่างอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นที่ป้อนเข้า-ออกระบบ ( $\Delta T_{\text{CW}}$ ) <sup>2</sup> | 5      | °C    |
| ผลต่างอุณหภูมิของไหลร้อนกับสารทำงาน ( $\Delta T_{\text{HF-wf}}$ ) <sup>2</sup>       | 2      | °C    |
| ผลต่างอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นกับสารทำงาน ( $\Delta T_{\text{CW-wf}}$ ) <sup>2</sup>      | 2      | °C    |
| ประสิทธิภาพไอเซนทรอปิกของปั๊ม ( $\eta_{s,p}$ ) <sup>2</sup>                          | 80     | %     |
| ประสิทธิภาพไอเซนทรอปิกของเครื่องขยายตัว ( $\eta_{s,ex}$ ) <sup>2</sup>               | 80     | %     |
| ความสามารถในการผลิตไฟฟ้า ( $\eta_G$ ) <sup>2</sup>                                   | 80     | %     |
| ค่าอุณหภูมิร้อนยวดยิ่ง (Superheating, SH) <sup>2</sup>                               | 9.2    | °C    |
| ค่าอุณหภูมิเย็นยิ่ง (Subcooling, SC) <sup>2</sup>                                    | 6.5    | °C    |

หมายเหตุ: <sup>1</sup> อ้างอิงข้อมูลจาก Yatsunthea and Chaiyat (2020)

<sup>2</sup> อ้างอิงข้อมูลจาก Chaiyat and Kiatsiriroat (2015)

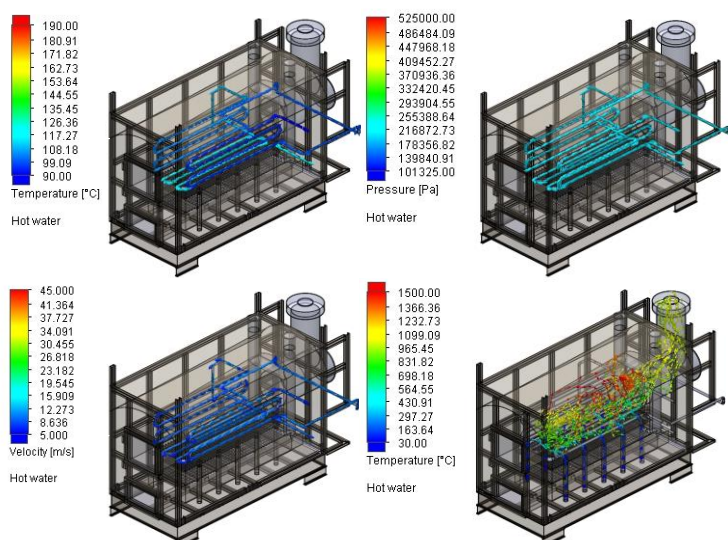


ภาพที่ 2 แผนผังการวิเคราะห์ระบบผลิตพลังงานร่วม

#### 4. ผลการวิจัย

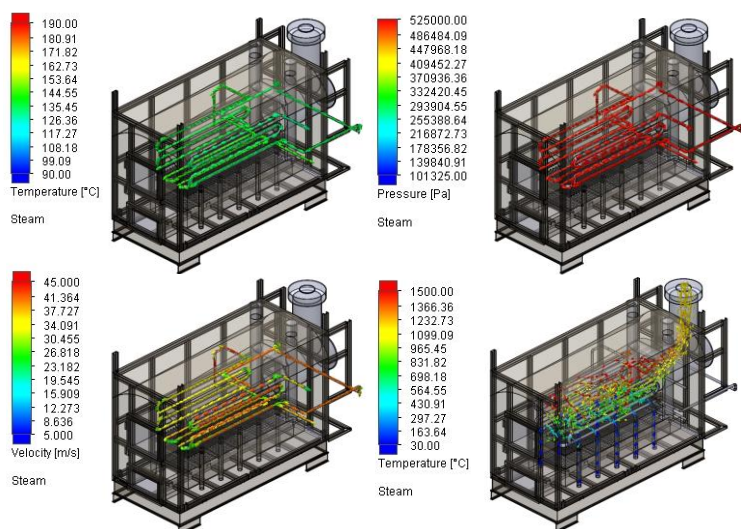
##### 4.1 การวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

ภาพที่ 3 แสดงผลการวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของน้ำร้อน พบว่าเมื่อจ่ายน้ำร้อนอุณหภูมิ 95 °C เข้าไปแลกเปลี่ยนความร้อนในห้องเผาไหม้ อุณหภูมิน้ำร้อนขาออกเพิ่มขึ้นเป็น 116.57 °C โดยมีความดันตกคร่อม 202.69 kPa ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 6.25 m/s และมีอุณหภูมิไอเสียเฉลี่ยเท่ากับ 1,136.81 °C ซึ่งมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ที่มีค่าเท่ากับ 1200 °C เนื่องจากการสูญเสียความร้อนให้แก่สิ่งแวดล้อมจากระบบท่อต่าง ๆ ทำให้อุณหภูมิไอเสียเฉลี่ยที่เกิดขึ้นภายในเตาเผาขยะมีค่าลดลงประมาณ 65 °C



ภาพที่ 3 ผลการวิเคราะห์ผลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของน้ำร้อน

ภาพที่ 4 แสดงผลการวิเคราะห์ผลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของไอน้ำ โดยกำหนดให้อุณหภูมิขาเข้าของไอน้ำเท่ากับ  $129^{\circ}\text{C}$  ผลการจำลองพบว่า อุณหภูมิขาออกห้องเผาไหม้ของไอน้ำมีค่าประมาณ  $143.25^{\circ}\text{C}$  ที่ความดันตกคร่อม  $516.84\text{ kPa}$  ความเร็วเฉลี่ย  $28.32\text{ m/s}$  และมีอุณหภูมิไอเสียเฉลี่ยเท่ากับ  $1,154.72^{\circ}\text{C}$  ลดลงประมาณ  $45^{\circ}\text{C}$  เมื่อเทียบกับอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ จากผลการจำลองยังพบอีกว่า ไอน้ำมีความดันตกคร่อมและความเร็วในการเคลื่อนที่ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับการใช้น้ำร้อนเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน

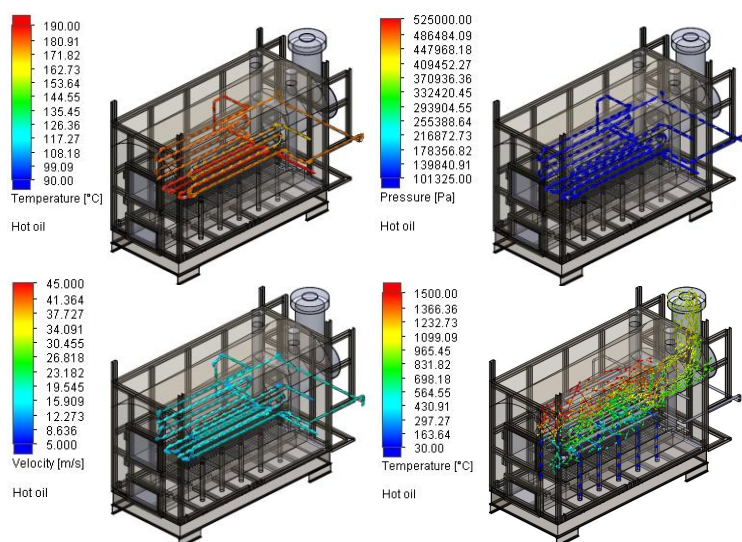


ภาพที่ 4 ผลการวิเคราะห์ผลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของไอน้ำ

น้ำมันร้อนมีช่วงการทำงานอุณหภูมิไม่เกิน  $320^{\circ}\text{C}$  สำหรับระบบปิด และในระบบเปิดไม่เกิน  $200^{\circ}\text{C}$  ซึ่งหากใช้งานน้ำมันร้อนเกินกว่าอุณหภูมิดังกล่าว จะทำให้เกิดการลุกไหม้ติดไฟได้ ในการจำลองครั้งนี้จึงเลือกอุณหภูมิขาเข้าห้องเผาไหม้ที่  $160^{\circ}\text{C}$  ดังแสดงในภาพที่ 5 ผลการจำลอง



พบว่า อุณหภูมิน้ำมันร้อนขาออกมีค่า  $189.61\text{ }^{\circ}\text{C}$  ซึ่งมีความดันตกคร่อม  $105.58\text{ kPa}$  ความเร็วของน้ำมันร้อน  $10.15\text{ m/s}$  และมีอุณหภูมิไอเสียเฉลี่ย  $1,099.38\text{ }^{\circ}\text{C}$  โดยน้ำมันร้อนมีความหนาแน่นเฉลี่ยเท่ากับ  $762\text{ kg/m}^3$  ทำให้ความเร็วของน้ำมันร้อนสูงกว่าน้ำร้อน



ภาพที่ 5 ผลการวิเคราะห์ผลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของน้ำมันร้อน

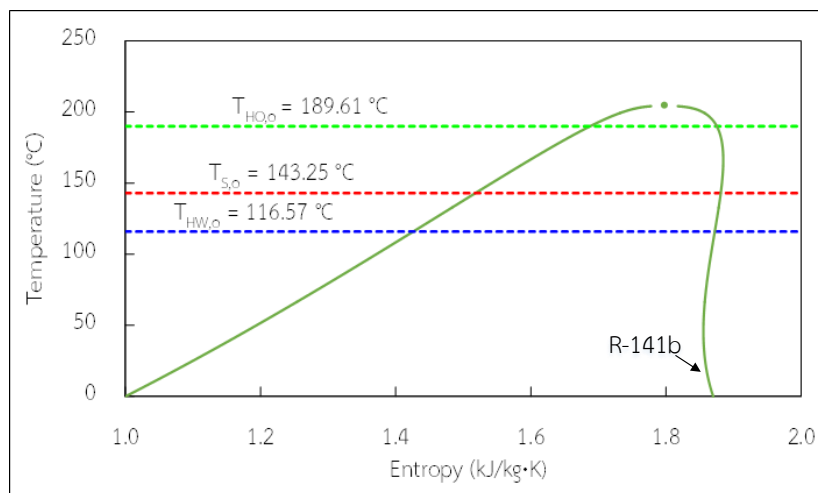
#### 4.2 การวิเคราะห์สารทำงานที่เหมาะสมในระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์

การวิเคราะห์ความเหมาะสมของสารทำงาน 11 ชนิด โดยพิจารณาอุณหภูมิวิกฤติของสารทำงานกับอุณหภูมิของไหลร้อนขาออกห้องเผาไหม้ (ผลจากหัวข้อที่ 4.1) เป็นสำคัญ และผลการวิเคราะห์การเลือกสารทำงานในระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์สำหรับของไหลร้อนชนิดต่าง ๆ แสดงดังภาพที่ 6 - 8 และตารางที่ 4 - 6

ภาพที่ 6 แสดงสารทำงานในระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ที่สามารถใช้งานร่วมกับน้ำมันร้อนได้ ซึ่งพบว่า มีเพียงชนิดเดียว คือ R-141b ที่สามารถใช้งานในอุณหภูมิสูงได้ เนื่องจากสารทำงานมีอุณหภูมิวิกฤติค่อนข้างสูง มีค่าเท่ากับ  $204.35\text{ }^{\circ}\text{C}$  และมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิการใช้งานสูงสุดของน้ำมันร้อนที่  $189.61\text{ }^{\circ}\text{C}$  โดยสารทำงาน R-141b เป็นสารทำงานในกลุ่มฮาโลคาร์บอน มีลักษณะเป็นสารทำงานแบบไอเซนโทรปิก (Isentropic type)

การใช้สารทำงาน R-141b ในระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ พบว่า มีความดันสารทำงานด้านสูงและต่ำเท่ากับ  $2,427.64\text{ kPa}$  และ  $112.28\text{ kPa}$  ตามลำดับ ที่อัตราการไหลเท่ากับ  $0.89\text{ kg/s}$  และมีผลต่างเอนทัลปีที่เครื่องขยายตัวเท่ากับ  $58.80\text{ kJ/kg}$  ซึ่งมีค่าค่อนข้างสูง เนื่องจากสารทำงานที่ออกจากหม้อต้มมีอุณหภูมิสูง ( $177.20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) จึงทำให้ค่าเอนทัลปีมีค่าสูงตามไปด้วย และส่งผลให้ระบบผลิตไฟฟ้ามีประสิทธิภาพสูงตามไปด้วย มีค่าเท่ากับร้อยละ 14.19 ดังแสดงในตารางที่ 4





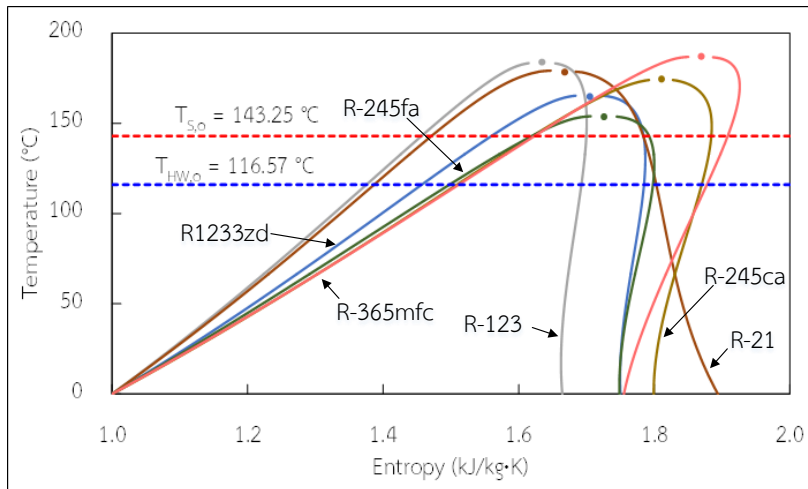
ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์อุณหภูมิและเอนโทรปีของสารทำงานที่เหมาะสมกับน้ำมันร้อน

ตารางที่ 4 ผลวิเคราะห์ระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ร่วมกับน้ำมันร้อน

| รายละเอียด                                                     | ปริมาณ   | หน่วย |
|----------------------------------------------------------------|----------|-------|
| ความดันด้านสูง ( $P_H$ )                                       | 2,427.64 | kPa   |
| ความดันด้านต่ำ ( $P_L$ )                                       | 112.28   | kPa   |
| ผลต่างเอนทัลปีที่เครื่องขยายตัว ( $\Delta h_{EX}$ )            | 58.80    | kJ/kg |
| อัตราการไหลของสารทำงาน ( $\dot{m}_{ref}$ )                     | 0.89     | kg/s  |
| ประสิทธิภาพระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ ( $\eta_{ORC}$ ) | 14.19    | %     |

ภาพที่ 7 แสดงสารทำงานในระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ที่สามารถใช้งานร่วมกับไอน้ำได้อย่างเหมาะสม มีจำนวน 6 ชนิด คือ R-123 R-1233zd R-21 R-245ca R-245fa และ R-365mfc เป็นสารทำงานที่มีอุณหภูมิวิกฤตอยู่ในช่วง 143.25-189.61 °C ซึ่งสารทำงานทั้ง 6 ชนิด ดังกล่าวเป็นสารทำงานในกลุ่มฮาโลคาร์บอน มีลักษณะเป็นสารทำงานแบบแห้ง (Dry type) และแบบไอเซ็นโทรปิก

จากตารางที่ 5 พบว่า สารทำงาน R-21 มีความดันของสารทำงานสูงที่สุด คือ ความดันด้านสูงและต่ำเท่ากับ 2,237.18 kPa และ 253.05 kPa ตามลำดับ รวมทั้งมีผลต่างเอนทัลปีที่เครื่องขยายตัวสูงที่สุดด้วยเช่นกัน ที่ค่าเท่ากับ 41.42 kJ/kg ในขณะที่ R-123 ให้อัตราการไหลสูงสุดมีค่าเท่ากับ 1.05 kg/s แต่หากพิจารณาประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้า พบว่า สารทำงาน R-245ca มีค่าสูงสุดที่ร้อยละ 11.70 ดังนั้นสารทำงานในระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ที่เหมาะสมใช้งานร่วมกับไอน้ำ คือ R-245ca โดยพิจารณาจากประสิทธิภาพทางความร้อนเป็นตัวแปรสำคัญ



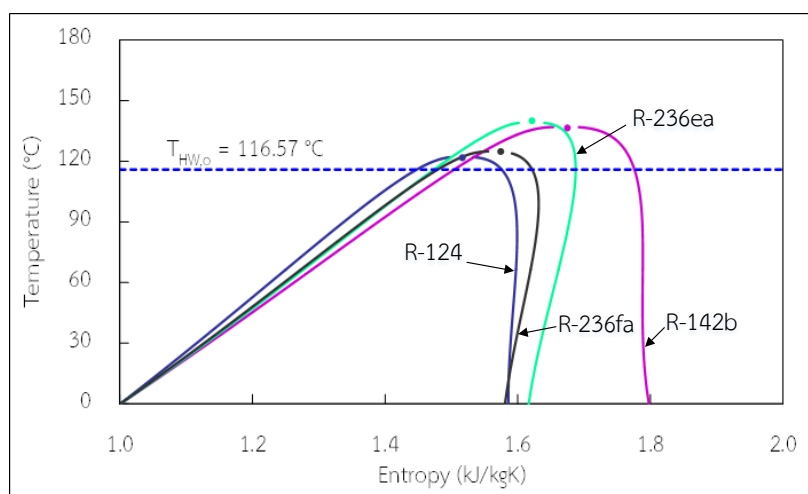
ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์อุณหภูมิและเอนโทรปีของสารทำงานที่เหมาะสมกับไอน้ำ

ตารางที่ 5 ผลวิเคราะห์ระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันสารอินทรีย์ร่วมกับไอน้ำ

| รายละเอียด                                                 | R-123    | R-1233zd | R-21     | R-245ca  | R-245fa  | R-365mfc |
|------------------------------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| ความดันด้านสูง ( $P_H$ , kPa)                              | 1,376.15 | 1,803.04 | 2,237.18 | 1,658.48 | 2,212.51 | 1,074.27 |
| ความดันด้านต่ำ ( $P_L$ , kPa)                              | 130.53   | 183.09   | 253.05   | 145.46   | 211.72   | 83.76    |
| ผลต่างเอนทัลปีที่เครื่องขยายตัว ( $\Delta h_{EX}$ , kJ/kg) | 33.53    | 36.80    | 41.42    | 40.01    | 36.49    | 39.62    |
| อัตราการไหล ( $\dot{m}_{ref}$ , kg/s)                      | 1.05     | 0.94     | 0.90     | 0.84     | 0.92     | 0.83     |
| ประสิทธิภาพ ( $\eta_{ORC}$ , %)                            | 10.52    | 11.19    | 10.88    | 11.70    | 10.71    | 10.50    |

ภาพที่ 8 แสดงผลการจำลองสารทำงาน R-124 R-142b R-236ea และ R-236fa ที่เหมาะสมกับน้ำร้อน โดยมีค่าอุณหภูมิวิกฤติในช่วง 116.57-143.25 °C ที่อุณหภูมิสูงสุดของน้ำร้อนเท่ากับ 116.57 °C ซึ่งสารทำงาน 4 ชนิดดังกล่าว เป็นสารทำงานในกลุ่มสารทำงานกลุ่มฮาโลคาร์บอน มีลักษณะเป็นสารทำงานแบบแห้งและแบบไอเซ็นโทรปิก

จากผลในตารางที่ 6 พบว่า สารทำงาน R-124 ความดันด้านสูงและต่ำมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1,867.51 kPa และ 515.39 kPa ตามลำดับ ที่อัตราการไหลเท่ากับ 1.34 kg/s เพราะสารทำงาน R-124 มีจุดเดือดค่อนข้างต่ำ มีค่าเท่ากับ -11.96 °C และให้ค่าผลต่างเอนทัลปีที่เครื่องขยายตัวน้อยที่สุดในขณะที่สารทำงาน R-142b ให้ค่าผลต่างเอนทัลปีที่เครื่องขยายตัวสูงสุด คือ 24.34 kJ/kg และสารทำงานที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด คือ R-236ea มีค่าเท่ากับร้อยละ 7.58 ดังนั้นในด้านพลังงานสารทำงานที่เหมาะสมใช้ร่วมกับน้ำร้อนอุณหภูมิ 116.57 °C คือ R-236ea



ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์อุณหภูมิและเอนโทรปีของสารทำงานที่เหมาะสมกับน้ำร้อน

ตารางที่ 6 ผลวิเคราะห์ระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ร่วมกับน้ำร้อน

| รายละเอียด                                          | R-124    | R-142b   | R-236ea  | R-236fa  | หน่วย |
|-----------------------------------------------------|----------|----------|----------|----------|-------|
| ความดันด้านสูง ( $P_H$ )                            | 1,867.51 | 1,633.22 | 1,207.90 | 1,494.81 | kPa   |
| ความดันด้านต่ำ ( $P_L$ )                            | 515.39   | 454.30   | 288.00   | 375.11   | kPa   |
| ผลต่างเอนทัลปีที่เครื่องขยายตัว ( $\Delta h_{EX}$ ) | 17.62    | 24.34    | 19.09    | 17.64    | kJ/kg |
| อัตราการไหล ( $\dot{m}_{ref}$ )                     | 1.34     | 1.00     | 1.20     | 1.29     | kg/s  |
| ประสิทธิภาพ ( $\eta_{ORC}$ )                        | 7.06     | 7.24     | 7.58     | 7.19     | %     |

จากผลการศึกษาที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น สามารถสรุปผลการศึกษาเพื่อนำไปประยุกต์และต่อยอดร่วมกับแหล่งพลังงานทดแทนด้านความร้อนของประเทศไทย ได้ดังนี้ คือ การใช้ไขมันร้อนเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนเหมาะสมกับเชื้อเพลิงขยะที่มีค่าความร้อนสูง ๆ เช่น ขยะติดเชื้อทางการแพทย์ (ค่าความร้อนต่ำ 26.92 MJ/kg [Yatsunthea and Chaiyat, 2020]) ในขณะที่ไอน้ำเหมาะสมสำหรับขยะชุมชน (ขยะถุงดำ) ที่มีค่าความร้อนไม่สูงมาก และน้ำร้อนเหมาะสมสำหรับขยะที่มีความชื้นสูง เช่น ขยะจากตลาดสด และขยะที่มีเศษชีวมวลผสม เป็นต้น

## 5. สรุปผลและการอภิปรายผล

น้ำมันร้อนมีช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมประมาณ 189.61 °C เมื่อใช้งานร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ที่ใช้สารทำงาน R-141b ซึ่งเป็นเพียงสารทำงานชนิดเดียวที่สามารถใช้งานร่วมกับน้ำมันร้อนได้ จะให้ประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าเท่ากับร้อยละ 14.19 เหมาะสำหรับขยะที่มีค่าความร้อนสูง เช่น ขยะติดเชื้อทางการแพทย์

ไอน้ำเหมาะสำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิประมาณ 143.25 °C สามารถใช้สารทำงาน 6 ชนิด คือ R-123 R-1233zd R-21 R-245ca R-245fa และ R-365mfc ในระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ โดยสารทำงาน R-245ca เหมาะสมมากที่สุดในด้านประสิทธิภาพที่ให้ค่าสูงสุดเท่ากับร้อยละ 11.70 และเหมาะสำหรับขยะที่มีค่าความร้อนปานกลาง เช่น ขยะชุมชน

น้ำร้อนเหมาะสำหรับใช้งานที่อุณหภูมิประมาณ 116.57 °C และมีสารทำงาน 4 ชนิด คือ R-124 R-142b R-236ea และ R-236fa ที่สามารถใช้งานร่วมกับแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ

โดยสารทำงาน R-236ea ให้ประสิทธิภาพสูงที่สุดเท่ากับร้อยละ 7.58 เหมาะสำหรับขยะที่มีค่าความร้อนต่ำ เช่น ขยะที่มีความชื้นสูง ขยะที่ผสมเศษชีวมวลสด

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณทางวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ภายใต้โครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทนในกลุ่มประเทศอาเซียน สำหรับนักศึกษาาระดับบัณฑิตศึกษา (2561) ที่มอบทุนการสนับสนุนสำหรับการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้

## 7. อักษรย่อและสัญลักษณ์

| สัญลักษณ์     | คำนิยาม                  | ความหมาย                  | หน่วย              |
|---------------|--------------------------|---------------------------|--------------------|
| A             | Area                     | พื้นที่                   | m <sup>2</sup>     |
| Cp            | Specific heat capacity   | ความจุความร้อนจำเพาะ      | kJ/kg□K            |
| CV            | Coefficient of viscosity | ความหนืด                  | mPa□s              |
| g             | Gravity                  | แรงโน้มถ่วง               | m/s <sup>2</sup>   |
| h             | Enthalpy                 | เอนทัลปี                  | kJ/kg              |
| k             | Thermal conductivity     | สัมประสิทธิ์การนำความร้อน | W/m□K              |
| $\dot{m}$     | Mass flow rate           | อัตราการไหล               | kg/s               |
| P             | Pressure                 | ความดัน                   | MPa                |
| Q             | Heating capacity         | อัตราการถ่ายเทความร้อน    | kW                 |
| SC            | Subcooling               | ค่าสถานะเย็นยิ่ง          | °C                 |
| SH            | Superheating             | ค่าสถานะร้อนยวดยิ่ง       | °C                 |
| s             | Entropy                  | เอนโทรปี                  | kJ/kg□K            |
| T             | Temperature              | อุณหภูมิ                  | °C                 |
| TH            | Thick                    | ความหนา                   | m                  |
| t             | Time                     | เวลา                      | s                  |
| V             | Volume                   | ปริมาตร, ความจุ           | m <sup>3</sup>     |
| v             | Velocity                 | ความเร็ว                  | m/s                |
| W             | Power                    | กำลังไฟฟ้า                | kW                 |
| X             | Vapor quality            | คุณภาพไอ                  | %                  |
| ตัวกรีก       | คำนิยาม                  | ความหมาย                  | หน่วย              |
| $\eta$        | Efficiency               | ประสิทธิภาพ               | %                  |
| $\varepsilon$ | Effectiveness            | ประสิทธิภาพ               | %                  |
| $\rho$        | Density                  | ความหนาแน่น               | kg/m <sup>3</sup>  |
| v             | Specific volume          | ปริมาตรจำเพาะ             | m <sup>3</sup> /kg |

### ตัวห้อย คำนิยาม

|     |                     |     |                           |
|-----|---------------------|-----|---------------------------|
| 0   | Environment         | AIT | Auto-Ignition temperature |
| a   | Average             | B   | Boiler                    |
| C   | Condenser           | c   | Cool                      |
| E   | Exhaust             | EX  | Expander                  |
| e   | Electricity energy  | FP  | Flash point               |
| f   | Liquid              | G   | Generator                 |
| g   | Gas                 | H   | High                      |
| HF  | Hot fluid           | HO  | Hot oil                   |
| HW  | Hot water           | ICH | incinerator combined heat |
| i   | Inlet               | L   | Low                       |
| NB  | Normal boiling      | ORC | Organic Rankine cycle     |
| o   | Outlet              | P   | Pump                      |
| RDF | Refuse derived fuel | S   | Steam                     |
| s   | Isentropic          | th  | Thermal energy            |

### 8. เอกสารอ้างอิง

- Bujak, J. (2009). Experimental study of the energy efficiency of an incinerator for medical waste, **Applied Energy**. 86, pp. 2386-2393.
- Chaiyat, N. and Kiatsirirot, T. (2015). Analysis of combined cooling heating and power generation from organic Rankine cycle and absorption system, **Energy**. 91, pp. 363-370.
- Li, J., Pei, G., Li, Y., Wang, D. and Ji, J. (2012). Energetic and exergetic investigation of an organic Rankine cycle at different heat source temperatures, **Energy**. Vol.38(1), pp. 85-95.
- Ministry of Energy. (2020). **Alternative Energy Development Plan: AEDP2015**, [online], Available: [http://www.dede.go.th/download/files/AEDP%20Action%20Plan\\_Final.pdf](http://www.dede.go.th/download/files/AEDP%20Action%20Plan_Final.pdf).
- NIST (National Institute of Standards and Technology). (2018). (Refprop Version 10: Customer Number 40754). **Thermodynamic Properties of Refrigerants and Refrigerant Mixtures Software**.
- PTT Hitemp 500. (2019). **PTT Public Company Limited**. [online], Available: [https://pttlubricants.pttor.com/assets/file\\_pds\\_msds/PTT%20HITEMP%20500.pdf](https://pttlubricants.pttor.com/assets/file_pds_msds/PTT%20HITEMP%20500.pdf).

- Rezeau, A. Díez, L.I., Royo, J. and Díaz-Ramírez, M. (2018). Efficient diagnosis of grate-fired biomass boilers by a simplified CFD-based approach, **Fuel Processing Technology**. 171, pp. 318-329.
- Saad, A. and Emad, H. (2019). Simulation of combustion of sesame and broad bean stalks in the freeboard zone inside a pilot-scale bubbling fluidized bed combustor using CFD modeling, **Applied Thermal Engineering**. 158, pp. 113767.
- Silva, J., Teixeira, J., Teixeira, S., Preziati, S. and Cassiano, J. (2017). CFD Modeling of Combustion in Biomass Furnace, **Energy Procedia**. 120, pp. 655-672.
- Soria, J., Gauthier, D., Falcoz, Q., Flamant, G. and Mazza, G. (2013). Local CFD kinetic model of cadmium vaporization during fluid bed incineration of municipal solid waste, **Journal of Hazardous Materials**. 248-249, pp. 276-284.
- Sung, T. and Kim, K.C. (2017). An organic Rankine cycle for two different heat sources: steam and hot water, **Energy Procedia**. 129, pp. 883-890.
- Yatsunthea, T. and Chaiyat N. (2020). A Very Small Power Plant – Municipal Waste of the Organic Rankine Cycle and Incinerator from Medical and Municipal Wastes, **Thermal Science and Engineering Progress**, Vol.18C, 100555.
- Wakaiyang, Y. and Chaiyat, N. (2016). Analysis of Selection Working Fluid of Organic Rankine Cycle for Thailand, **The 9<sup>th</sup> Thailand Renewable Energy for Community Conference (TREC-9)**, Doi Saket, Chiang Mai. (in Thai)
- Wang, X., Levy, E.K., Pan, C., Romero, C.E., Banerjee, A., Rubio-Maya, C. and Pan, L. (2019). Working fluid selection for organic Rankine cycle power generation using hot produced supercritical CO<sub>2</sub> from a geothermal reservoir, **Applied Thermal Engineering**. 149, pp. 1287-1304.
- Wissing, F., Wirtz, S. and Scherer, V. (2017). Simulating municipal solid waste incineration with a DEM/CFD method – Influences of waste properties, grate and furnace design, **Fuel**. 206, pp. 638-656.
- Zhong, H., Xiong, Q., Zhu, Y., Liang, S., Zhang, J., Niu, B. and Zhang, X. (2019). CFD modeling of the effects of particle shrinkage and intra-particle heat conduction on biomass fast pyrolysis, **Renewable Energy**. 141, pp. 236-245.