

การประยุกต์ใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน กับกระบวนการผลิตแก๊สชีววมวล

Apply the Thermosyphon Heat Exchanger for Biomass Gasification Process

นำพร ปัญญาใหญ่^{*} สุพัตรา ชายป่า และ อนุรักษ์ ปักดีสันติพงษ์
คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้

อ.สันทราย จ.เชียงใหม่ 50290 โทร 0-5387-8123 โทรสาร 0-5349-8902 E-mail: n_panyoyai9@hotmail.com

Numpon Panyoyai^{*} Supattra Chaipa and Anurak Paksontipong
Faculty of Engineering and Agro-Industry, Maejo University

Sansai, Chiangmai 50290 Thailand Tel: 0-5387-8123 Fax: 0-5349-8902 E-mail: n_panyoyai9@hotmail.com

บทคัดย่อ

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีประสิทธิภาพการนำความร้อนสูง งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนร่วมกับกระบวนการผลิตแก๊สชีววมวล เพื่อลดปริมาณน้ำมันดิน โดยออกแบบท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน ซึ่งทำจากท่อเหล็กมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.54 cm มีความยาวรวม 1 m จำนวน 43 ท่อ แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนทำระเหย 50 cm และส่วนควบแน่น 50 cm ใช้น้ำเป็นสารทำงานภายใน ซึ่งมีอัตราส่วนการเติม 50% ของปริมาตรในส่วนทำระเหย

กระบวนการผลิตแก๊สชีววมวลเป็นกระบวนการที่ทำให้เชื้อเพลิงชีววมวลได้รับความร้อนในสภาพแวดล้อมที่จำกัดออกซิเจน เพื่อผลิตแก๊สที่ติดไฟได้ โดยงานวิจัยนี้ใช้เศษไม้ลำไยเป็นเชื้อเพลิงชีววมวล โดยย่อยให้มีขนาด 1- 2 cm จำนวน 10 kg จากการทดลองพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาแก๊สชีววมวลแบบดั้งเดิมคือ น้ำมันดิน 1.5 kg และแก๊สที่ติดไฟได้นาน 70 นาที เมื่อติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนในกระบวนการได้ผลการทดลองดังนี้ ปริมาณน้ำมันดิน 2.27 kg และระยะเวลาของแก๊สติดไฟ 75.3 นาที โดยมีอัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เท่ากับ 0.60 kW ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่ของท่อความร้อนมีค่าเท่ากับ 363.5 W/m² และมีค่าประสิทธิผลเท่ากับ 75.4 % ดังนั้นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถนำมาใช้ร่วมกับกระบวนการผลิตแก๊สชีววมวลเพื่อลดปริมาณน้ำมันดินในระบบได้มากขึ้น

คำสำคัญ : เทอร์โมไซฟอน, เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน, กระบวนการผลิตแก๊สชีววมวล

Abstract

Thermosyphon was a high potential heat exchanger. This research was applied thermosyphons heat exchange to biomass gasification process to decreased tar. The thermosyphon heat exchanger was made of 43 steel tubes, 2.54 cm internal diameter and 1 m of length. Each of tube was separated into 2 parts: evaporator and condenser sections, which both section was 50 cm in length. The water was served as a working fluid which filling ratio 50% of volume of evaporator section. Ten kilograms of shivers was used in each experiment with length approximately 1-2 cm. It was found that 1.5 kg of tar and fuel gas derived from biomass gasification process can be used 70 min. and the result of applied thermosyphons heat exchange to process showed that 2.27 kg of tar and gasification process can be used 75.33 min. per 10 kg of fuel. The ratio of heat transfer of thermosyphon heat exchanger was 0.60 kW and efficiency was 75.4 %. The surface area of heat transfer was 363.5 W/m². This study suggested thermosyphon heat exchanger could be applied with biomass gasification process for efficiently decreasing tar from derived gas.

Key words: Thermosyphon, heat exchanger, biomass gasification process.

1. บทนำ

1.1 การผลิตแก๊สชีววมวล

เป็นกระบวนการที่ทำให้เชื้อเพลิงชีวมวล ได้รับความร้อนในสภาพแวดล้อมที่จำกัดออกซิเจน เพื่อผลิตแก๊สที่ติดไฟได้ (Combustible Gas) ความร้อนที่ใช้ในการผลิตแก๊สชีวมวลนั้น เกิดขึ้นในส่วนของการเผาไหม้วัสดุ หรือ Oxidation Zone จะมีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 700 °C - 1100 °C และในส่วนของการ Reduction Zone จะมีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 600 °C - 900 °C

อนุตร (2541) กล่าวว่า การออกแบบสร้างเตาเผาเพื่อผลิตแก๊สชีวมวลต้องคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่เกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิ อัตราความเร็วในการเผาไหม้ ปริมาณของอากาศในเตาเผา เป็นต้น กระบวนการผลิตแก๊สชีวมวลอาจแบ่งออกได้ดังนี้

1.1.1 Air gasification

เป็นกระบวนการผลิตแก๊สชีวมวลแบบที่ง่ายที่สุด ซึ่งแก๊สที่ได้ในกระบวนการประกอบด้วย แก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ ไฮโดรเจน และไนโตรเจน เนื่องจากมีแก๊สไนโตรเจนที่เป็นแก๊สเฉื่อยด้วย จึงทำให้แก๊สที่ได้มีพลังงานต่ำ

1.1.2 Oxygen gasification

เป็นการเผาไหม้เพื่อผลิตแก๊สชีวมวลโดยใช้แก๊สออกซิเจนโดยตรง แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จะให้พลังงานปานกลาง ซึ่งมีศักยภาพที่จะส่งแก๊สไปตามท่อส่งได้ หรือใช้ในการสังเคราะห์ทางเคมีเพื่อใช้ในการผลิตเมทานอล แอมโมเนีย หรือมีเทน อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะสูงและเร็วกว่าแบบแรก จึงก่อให้เกิดฝุ่นละอองที่มากับแก๊สน้อยกว่า ในการผลิตแก๊สชีวมวลจำนวน 1 Ton จะต้องใช้ปริมาณออกซิเจน 1/3 Ton เนื่องจากแก๊สออกซิเจนมีราคาแพงจึงไม่มีการผลิตแก๊สชีวมวลแบบนี้ในอุตสาหกรรมขนาดเล็ก

1.1.3 Pyrolysis gasification

เนื่องจากแก๊สชีวมวลที่ได้จะมีองค์ประกอบที่เป็นสารระเหยสูงเมื่อเทียบกับถ่านหินและสามารถใช้วิธีการกลั่นสลายเพื่อให้ได้แก๊สที่มีพลังงานปานกลาง ซึ่งมีองค์ประกอบเป็นแก๊สมีเทน (Light hydrocarbons) และยังได้ถ่านและน้ำมันในกระบวนการอีกด้วย

1.1.4 Hydrogen gasification

การนำไฮโดรเจนไปใช้ในที่มีความดันสูงจะสามารถเปลี่ยนองค์ประกอบภายในของแก๊สชีวมวลได้ ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวหรือแก๊สทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสถานะของการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งเป็นวิธีการที่น่าสนใจสำหรับที่ซึ่งมีปริมาณไฮโดรเจนมากอย่างเพียงพอ

1.1.5 Chemical and electrochemical gasification

กระบวนการนี้จะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยา ทางเคมี ได้ผลิตภัณฑ์ที่น่าสนใจขึ้น อาทิปฏิกิริยาการรวมตัวของแก๊สชีวมวลกับแก๊สโบรมีน เพื่อที่จะให้ได้แก๊สไฮโดรโบรมีนและคาร์บอนมอนนอกไซด์ แล้วนำไฮโดรโบรมีนที่ได้ไป Electrolyzed เพื่อให้ได้แก๊สไฮโดรเจน

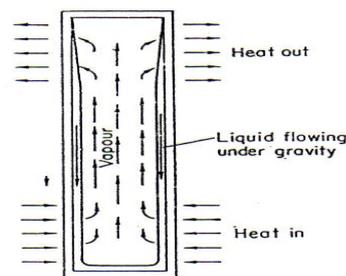
1.2 อุณหภูมิ

การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวลจะแปรผันตามอุณหภูมิเริ่มแรก และจะเกิดขึ้นแบบช้าๆ และเกิดต่อเนื่องไปเรื่อยๆ ความร้อนที่ได้จะทำให้อุณหภูมิของเชื้อเพลิงและอากาศสูงขึ้น ทำให้อัตราการเผาไหม้เพิ่มขึ้น ดังนั้นปริมาณความร้อนจากภายนอกที่เพียงพอสำหรับการเพิ่มปฏิกิริยาเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการเผาไหม้ และจะทำให้ปฏิกิริยาดำเนินต่อไปได้ปกติ ในการเผาไหม้นั้นต้องการให้มีอุณหภูมิสูงถึง 600 °C – 900 °C (Baker et al., 1988) แต่อาจมีข้อจำกัดที่สำคัญ คือ

ชนิดของเชื้อเพลิงซึ่งจะทำให้ได้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน นอกจากนี้การที่อุณหภูมิสูงมากเกินไป อาจทำให้เกิดสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจนที่เป็นแก๊สพิษ และเกิดกาก (Slag) เกาะติดผนังเตา ทำให้ลดความสามารถในการถ่ายเทความร้อนและก่อให้เกิดปัญหาการกัดกร่อนของผนังเตาได้

1.3 ท่อความร้อน

ท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนนั้น จัดเป็นอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนชนิดหนึ่ง ที่สามารถถ่ายเทความร้อนได้ดีโดยไม่ต้องอาศัยแหล่งพลังงานจากภายนอก สามารถทำงานได้โดยใช้หลักการการถ่ายเทความร้อนจากค่าความร้อนแฝงของสารทำงานภายในท่อความร้อน ซึ่งสารทำงานจะระเหยตัวโดยการรับความร้อนจากแหล่งให้ความร้อนที่มีอุณหภูมิสูง ถ่ายเทความร้อนโดยการควบแน่นของสารทำงาน โดยถ่ายเทความร้อนให้กับแหล่งรับความร้อนที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า หลักการทำงานของท่อความร้อนแบบธรรมชาติ คือ เมื่อท่อความร้อนได้รับความร้อนจากส่วนที่ระเหยจะทำให้สารทำงานภายในท่อความร้อนซึ่งมีสถานะเป็นของเหลวอ้อมตัว เปลี่ยนสถานะเป็นไอและลอยขึ้นสู่ด้านบนไปยังส่วนควบแน่นซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่า เมื่อสารทำงานถ่ายเทความร้อนออกจะทำให้เกิดการควบแน่นของสารทำงาน และไหลกลับลงสู่ส่วนที่ระเหยด้วยแรงโน้มถ่วง เพื่อกลับมารับความร้อนในส่วนที่ระเหยอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งจะทำงานเป็นวัฏจักรแบบนี้เรื่อยไป เนื่องจากความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของสารทำงานภายในท่อความร้อนมีค่าสูงมาก ดังนั้นสารทำงานจึงสามารถถ่ายเทความร้อนจากปลายด้านหนึ่งไปสู่ปลายอีกด้านหนึ่งได้ โดยที่อุณหภูมิระหว่างส่วนที่ระเหยและส่วนควบแน่นของท่อความร้อนนั้น มีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ความสามารถในการส่งถ่ายความร้อนของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนนั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยด้วยกัน สามารถแยกได้คือ ขนาดความโต ความยาวของท่อความร้อน ชนิดหรือวัสดุที่ใช้ทำท่อความร้อน ลักษณะการติดตั้งท่อความร้อน ชนิดของสารทำงาน อุณหภูมิของแหล่งให้ความร้อน และแหล่งคายความร้อน เป็นต้น



รูปที่ 1 ท่อความร้อน (Heat pipe)
ที่มา: S.W.Chi. (1976)

คุณสมบัติโดยทั่วไปของท่อความร้อนคือมีค่าการนำความร้อนที่สูง มีความสามารถในการแปลงอัตราการไหลของความร้อน มีพื้นที่ผิวที่อุณหภูมิเท่ากันตลอด โดยมีค่าความต้านทานความร้อนต่ำ ไม่ต้องการใช้พลังงานเสริมในการทำงาน ซึ่งท่อความร้อนสามารถทำงานได้เองเมื่ออุณหภูมิของท่อและของไหลใช้งานถึงอุณหภูมิจุดเดือด อุณหภูมิใช้งานมีช่วงกว้าง และสามารถทำงานได้แม้ว่าผลต่างของอุณหภูมิ

ระหว่างแหล่งให้ความร้อนและแหล่งรับความร้อนมีค่าไม่มาก ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารทำงานภายในท่อความร้อน มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูง เมื่อเปรียบเทียบกับ การนำความร้อนของโลหะที่ใช้ทำท่อ ไม่มีชิ้นส่วนเคลื่อนไหวสามารถดูแลรักษาได้ง่าย ต้นทุนการผลิตต่ำและมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานเชิงความร้อนได้มากมาย

สมการในการคำนวณค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน

$$Q = \dot{m}C_p\Delta T \quad (1)$$

เมื่อ Q = อัตราการถ่ายเทความร้อน (kJ/s)

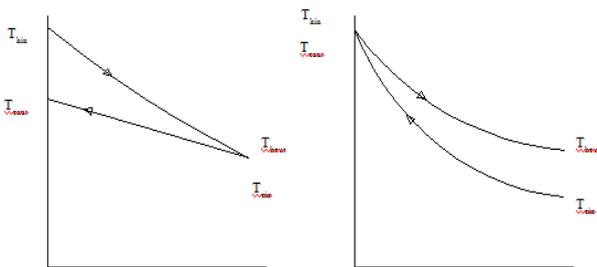
\dot{m} = อัตราการไหลเชิงมวล (kg/s)

C_p = ความร้อนจำเพาะของวัตถุ ($kJ/kg^\circ C$)

ΔT = ผลต่างของอุณหภูมิ ($^\circ C$)

ค่าสมรรถนะต่าง ๆ ของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนสามารถหาได้โดยการใช้ขั้นตอนเดียวกันกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลสวนทางกัน (Pure countercurrent) ซึ่งนำมาใช้ประเมินสมรรถนะ ดังนี้ (พิชัย, 2529)

ค่าประสิทธิผล (Effectiveness) เป็นอัตราส่วนของการถ่ายเทความร้อนจริงต่ออัตราส่วนของการถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่เป็นไปได้ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนั้น อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่หาได้จากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบของไหลไหลสวนทางกัน ที่มีพื้นที่สำหรับการถ่ายเทความร้อนไม่จำกัดขนาด (Infinity) อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้หากไม่มีการสูญเสียความร้อนให้แก่ภายนอกแล้ว อุณหภูมิของของไหลเย็นที่ไหลออกจากเครื่องก็ต้องเท่ากับอุณหภูมิของของไหลร้อนที่ไหลเข้า ($T_{c_o} = T_{h_i}$) เมื่อ $mc_{po} < mc_{ph}$ แต่ถ้าหาก $mc_{ph} < mc_{po}$ แล้วอุณหภูมิของของไหลร้อนที่ไหลออกจากเครื่องจะเท่ากับอุณหภูมิของของไหลเย็นที่ไหลเข้า ($T_{h_o} = T_{c_i}$) จากรูปที่ 2



รูปที่ 2 กราฟแสดงสภาพของการถ่ายเทความร้อนสูงสุด

ที่มา : สุรินทร์ (2535)

ดังนั้น การถ่ายเทความร้อนสูงสุด คือ

$$Q_{\max} = (mc_p)_{\min} \Delta T_{\max} \quad (2)$$

เมื่อ $(mc_p)_{\min}$ = ความจุความร้อนตัวที่มีค่าน้อยระหว่าง

mc_{ph} กับ mc_{po}

ΔT_{\max} = อุณหภูมิแตกต่างของของไหลขาเข้า

ค่าประสิทธิผลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นตัวเปรียบเทียบอัตราการถ่ายเทความร้อนจริงกับอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งสามารถเขียนได้ดังนี้คือ

$$\varepsilon = Q/Q_{\max} \quad (3)$$

แต่

$$Q = UA\Delta T_m$$

ดังนั้น ε สามารถเขียนได้ว่า

$$\varepsilon = (UA\Delta T_m) / ((mc_p)_{\min} \Delta T_{\max}) \quad (4)$$

จาก

$$Q = m_h c_{ph} (Th_i - Tc_o) = m_c c_{po} (Tc_o - Tc_i) \quad (5)$$

จะได้

$$\varepsilon = m_h c_{ph} (Th_i - Th_o) / (m_{op})_{\min} (Th_i - Tc_o) \quad (6)$$

$$= m_c c_{po} (Tc_o - Tc_i) / (m_{cp})_{\min} (Th_i - Tc_o) \quad (7)$$

จากสมการข้างต้น สามารถเขียนได้ว่า

$$\varepsilon = Q_h / Q_{\max} = Q_c / Q_{\max} = Q_{ave} / Q_{\max} \quad (8)$$

โดยที่

$$Q_h = mc_p (Th_i - Th_o)$$

$$Q_c = mc_p (Tc_o - Tc_i)$$

$$Q_{\max} = mc_{p_{\min}} (Th_i - Tc_i)$$

$$Q_{ave} = (Q_h + Q_c) / 2$$

เมื่อ

ε = ค่าประสิทธิผล (Effectiveness)

Q = อัตราการถ่ายเทความร้อน (kJ/s)

\dot{m} = อัตราการไหลเชิงมวล (kg/s)

C_p = ความร้อนจำเพาะของวัตถุ ($kJ/kg^\circ C$)

2. อุปกรณ์และวิธีการ

เตาแก๊สซีฟิเคชั่นแบบ Fixed bed

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน



รูปที่ 3 เตาแก๊สซีฟิเคชั่นแบบเบดนิ่ง

ฟอน T_4 คือ อุณหภูมิหลังออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน T_5 คือ อุณหภูมิภายในอุโมงค์ช่วงจุด และ T_6 คือ อุณหภูมิภายในอุโมงค์ช่วงอบแห้ง



รูปที่ 4 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน (Thermosyphon heat exchanger)

- เครื่องชั่งน้ำหนัก ยี่ห้อ สิงโตทอง
- ชุดบันทึกข้อมูลอุณหภูมิ (Data logger) ยี่ห้อ Brain Child รุ่น VR18 ช่วงการวัดอุณหภูมิ $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $1,370\text{ }^{\circ}\text{C}$
- เครื่องวัดความเร็วลม ยี่ห้อ Digicon รุ่น DA-44
- พัดลมดูดอากาศ ยี่ห้อ Hatari รุ่น HB-VW30M2(N)
- เทอร์โมคัปเปิ้ล (Thermocouples) ชนิด K
- นาฬิกาจับเวลา
- เครื่องคอมพิวเตอร์
- เศษไม้
- หม้อสำหรับต้มน้ำ

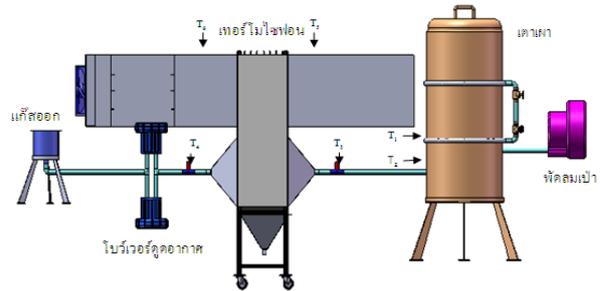
2.1 วิธีการทดสอบ

ย่อยเศษไม้ที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงให้มีขนาดประมาณ 1 cm ถึง 2 cm ดังแสดงในภาพที่ 5 แล้วบรรจุลงในเตาประมาณ 10 kg และปิดลิ้นคฝาเตาให้เรียบร้อย



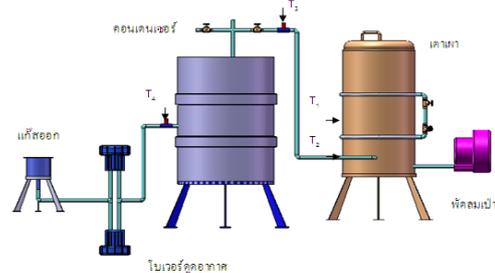
รูปที่ 5 ขนาดของเศษไม้หลังการย่อย

เปิดวาล์วสำหรับป้อนอากาศ และจุดไฟที่ Ignite port โดยการใช้นิวไฟ Pilot flame ทำการเก็บข้อมูลต่าง ๆ ดังนี้ อุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 6 โดย T_1 คือ อุณหภูมิในเตา T_2 คือ อุณหภูมิก่อนออกจากเตา T_3 คือ อุณหภูมิก่อนเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน



รูปที่ 6 กระบวนการผลิตแก๊สชีววมวลโดยใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน

รูปที่ 7 แสดงอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ โดย T_1 คือ อุณหภูมิในเตา T_2 คือ อุณหภูมิก่อนออกจากเตา T_3 คือ อุณหภูมิก่อนเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบใช้น้ำหรือแบบทั่วไป และ T_4 คือ อุณหภูมิหลังออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบใช้น้ำ



รูปที่ 7 กระบวนการผลิตแก๊สชีววมวลโดยใช้ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบใช้น้ำ

ข้อมูลในการประเมินประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแก๊สโดยทำการทดสอบการติดไฟของแก๊สผลิตภัณฑ์ ทำการวัดปริมาณน้ำมันดินที่ได้จากกระบวนการ และวัดค่าความร้อนของแก๊สผลิตภัณฑ์ โดยทำการทดสอบระยะเวลาการติดไฟของแก๊ส แล้วทำการทดลองซ้ำ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแก๊ส ผลิตภัณฑ์ระหว่างกระบวนการผลิตแก๊สชีววมวลโดยใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน และแบบใช้น้ำ มีการวางแผนการทดสอบแบบ RCBD (Randomized Complete Block Design) ทดสอบ 3 ซ้ำ จัดการทดสอบเป็นแบบทางเดียว (One-way experiment) โดยเชื้อเพลิง (เศษไม้) จะถูกป้อนเข้าทางด้านบนของเตา ส่วนอากาศจะถูกป้อนเข้าสู่เตาในส่วนให้และรับออกซิเจน (Combustion and reduction zone) โดยใช้วาล์วในการปรับปริมาณการไหลของอากาศ ซึ่งการทดสอบได้กำหนดการป้อนเชื้อเพลิงให้คงที่ตลอดการทดสอบคือ 10 kg ต่อครั้ง แล้วนำไปคำนวณหาอัตราส่วนปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์ต่อเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้ และปริมาณน้ำมันดินต่อเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลต่อไป ดังนั้นจึงสามารถสรุปตัวแปรในการทดสอบได้ดังนี้ คือ ตัวแปรต้น คือ จำนวนเชื้อเพลิง 10 kg ตัวแปร

ตาม คือ ระยะเวลาการติดไฟ ปริมาณน้ำมันดิน ตัวแปรควบคุม คือ ท่อ ความร้อน ปริมาณความร้อนของแก๊สหาได้จากสมการ 9

$$\text{ปริมาณความร้อนของแก๊ส} = m_{gas} C_p \rho \Delta T \quad (9)$$

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

3.1 ผลการทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบใช้น้ำกับกระบวนการผลิตแก๊สชีววมวล

การทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบใช้น้ำกับกระบวนการผลิตแก๊สชีววมวล เมื่อทำการเผาชีววมวลจะเกิดแก๊สร้อนไหลผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาไหม้ จะถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยกระบวนการวิเคราะห์แบบประมาณ ซึ่งได้ทำการทดสอบ 3 ซ้ำ และนำมาหาค่าเฉลี่ย ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับดังนี้

ตารางที่ 1 อุณหภูมิเฉลี่ยของแก๊ส ทางเข้า-ออก ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบใช้น้ำ

ตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิ	อุณหภูมิ (°C)
ขาเข้า (T ₃)	92.30
ขาออก (T ₄)	32.20

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของกระบวนการผลิตแก๊สชีววมวลร่วมกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบใช้น้ำ

ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากการเผา	ต่อเชื้อเพลิง 10 kg
น้ำมันดิน	1.53 kg
แก๊สติดไฟ	70 นาที

3.2 ผลการทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนกับกระบวนการผลิตแก๊สชีววมวล

การทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนกับกระบวนการผลิตแก๊สชีววมวล เมื่ออุณหภูมิในเตามีการเปลี่ยนแปลง ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นหลังจากการเผาจะถูกนำมาวิเคราะห์ ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 3 และ 4 ตาม ลำดับดังนี้

ตารางที่ 3 อุณหภูมิเฉลี่ยของแก๊สทางเข้า-ออก ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน

ตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิ	อุณหภูมิ (°C)
ขาเข้า (T ₃)	119.58
ขาออก (T ₄)	53.65

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของกระบวนการผลิตแก๊สชีววมวลกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน

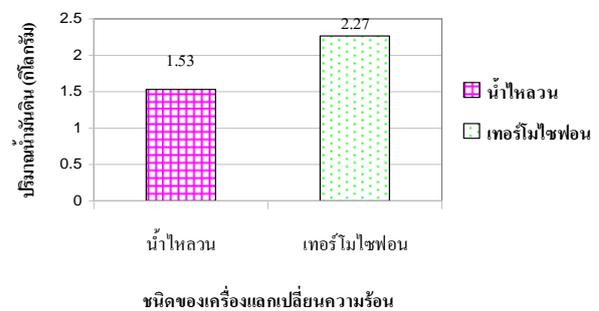
ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นหลังจากการเผา	ต่อเชื้อเพลิง 10 kg
น้ำมันดิน	2.27 kg
แก๊สติดไฟ	75.33 นาที

ตารางที่ 5 อุณหภูมิเฉลี่ย ทางเข้า-ออกอุโมงค์ลม ของกระบวนการผลิตแก๊สชีววมวลร่วมกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน

ตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิ	อุณหภูมิ (°C)
อากาศขาเข้า (T ₅)	32.00
อากาศขาออก (T ₆)	48.00

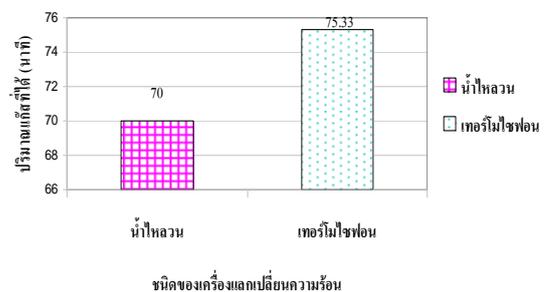
3.3 ความแตกต่างของปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการผลิตแก๊สชีววมวลร่วมกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบใช้น้ำกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน

การทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบคอนเดนเซอร์น้ำและเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน เมื่อนำปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้ คือ น้ำมันดินและแก๊สที่ได้จากกระบวนการผลิตแก๊สชีววมวล มาเปรียบเทียบดังตารางที่ 2 และ 4 นั้น จะพบว่าปริมาณน้ำมันดินและแก๊สที่ได้จากกระบวนการผลิตแก๊สชีววมวลร่วมกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน มีค่ามากกว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบใช้น้ำ ดังรูปที่ 8 และ 9 ตามลำดับ



รูปที่ 8 เปรียบเทียบปริมาณน้ำมันดินจากกระบวนการผลิตแก๊สชีววมวล

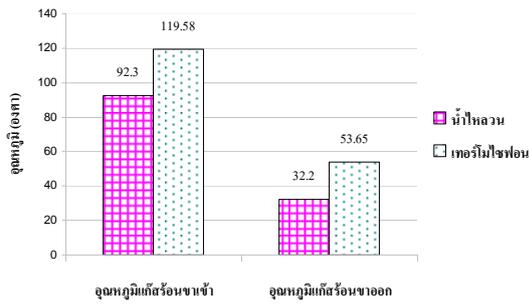
จากรูปที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณน้ำมันดินที่ได้จากกระบวนการ พบว่าในกระบวนการผลิตแก๊สชีววมวลที่ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนจะได้ปริมาณน้ำมันดินมากกว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบใช้น้ำ เนื่องจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนสามารถดึงความร้อนจากแก๊สที่เผาไหม้ได้ดีกว่า ทำให้เกิดการควบแน่นของน้ำมันดินในระบบได้ดีกว่า



รูปที่ 9 การเปรียบเทียบปริมาณแก๊สที่ติดไฟได้ ระหว่างกระบวนการผลิตแก๊สชีววมวล

จากรูปที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณแก๊สที่ติดไฟได้ ที่ได้จากกระบวนการผลิตแก๊สชีววมวล พบว่าปริมาณแก๊สที่ติดไฟได้ จากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนมีปริมาณแก๊สที่มากกว่า เนื่องจาก เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนสามารถทำ

ให้เกิดการควบแน่นที่มากกว่า ทำให้มีแก๊สที่ไม่ปนเป็นนํ้ามันดินมากกว่าส่งผลทำให้สามารถตีไฟได้นานกว่า



รูปที่ 10 การเปรียบเทียบอุณหภูมิก๊าซร้อน ระหว่างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนกับแบบใช้น้ำ

จากรูปที่ 10 พบว่า อุณหภูมิก๊าซร้อนขาเข้าและขาออกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนมีค่าสูงกว่า เนื่องจากการเคลื่อนที่ของแก๊สผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนนั้นมีค่าความดันตกคร่อมน้อยกว่า

3.4 ผลการคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

จากการทดสอบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนกับกระบวนการผลิตแก๊สชีวมวล เมื่อนำผลการทดสอบมาคำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อน จะได้ 601 W

4. สรุป

จากผลทดสอบ การใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนกับกระบวนการผลิตแก๊สชีวมวล โดยใช้เศษไม้เป็นเชื้อเพลิง ผลการศึกษานี้สามารถสรุปได้ดังนี้

ผลการวิเคราะห์แบบประมาณการ (Proximate analysis) พบว่า เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนสามารถให้แก๊สชีวมวลดีกว่า เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบคอนเดนเซอร์ ซึ่งเปรียบเทียบได้จากระยะของแก๊สชีวมวล

ผลการวิเคราะห์แบบประมาณการ (Proximate analysis) พบว่า เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนสามารถกลั่นนํ้ามันดินได้ดีกว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบคอนเดนเซอร์ ซึ่งเปรียบเทียบได้จากจำนวนนํ้ามันดิน

อัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบคอนเดนเซอร์ เท่ากับ 225 W

อัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน เท่ากับ 601 W และอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่ เท่ากับ 363.5 W/m²

ค่าประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน เท่ากับ 75.46 %

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยดังกล่าวได้รับการสนับสนุน จากคณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตรมหาวิทยาลัยแม่โจ้ และทุนอุดหนุนการวิจัยจาก

กองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน ทางผู้ทำวิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย

เอกสารอ้างอิง

1. Akachi H., F., Polasek and P., Stule. Pulsating Heat Pipe. Procs. Of the 5th International Heat Pipe Symposium, Melbourne Australia, Nov, 1996.
2. Alexis T. Belonio. Rice Husk Gas Stove. The Department of Agricultural Engineering and Environmental Management of the college of Agriculture, central Philippine University, Iloilo city, Philippines. 2005.
3. ASHRAE Fundamentals Handbook (SI) Chapter 20. Thermophysical Properties of Refrigerants. p 20.33, 2001.
4. Dossat, Roy J. Principles of Refrigeration. 4th ed. Upper Saddle River, NJ. : Prentice-Hall, 1997.
5. Fukuda. M et all. Development of an artificial Permafrost Storage Using Heat Pipes. *Heat Pipe Technology Vol.2*. New York : Begill House, p.305-318, 1993.
5. Hahnc. E and U. Gross. The Influence of the Inclination Angle on the Performance of a Closed Two-Phase Thermosyphon. *Advances in Heat Pipe Technology*. Oxford: PergamomPress. p.125-136, 1826.
6. Hoi, W. K. Development of a 35 kW rubber wood gasified. Second international energy conference on energy from biomass residues 93: 33-37, 1992.
7. Kiatsiriroat T. and N. Dussadee. Reduction of Heat Accumulated in Thermosyphon Paddy Bulk Storage. *International Journal of Ambient energy*. Vol.22.No. 1.p.12-18, 2001.