Science and Engineering Connect, ISSN 3027-7914 (Online)
Vol. 47 No. 4 pp. 348-361 (2024)

บทความวิจัย (Research Article)

การศึกษาศักยภาพกากตะกอนระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน ร่วมกับกากชาและกากกาแฟเพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ดร่วม

Study on the Potential of Co-pelletizing Fuel from Municipal Wastewater Treatment System Sludge, Tea Ground, and Coffee Ground

กานติมา แก้วตะพาน, ณัฐคงคา ศิริธร, วนิดา ชูอักษร*
Kantima Kaewtapan, Natthakongka Sirithorn, Wanida Chooaksorn*
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ปทุมธานี ประเทศไทย
Faculty of Science and Technology, Thammasat University, Pathum Thani, Thailand
* Corresponding author E-mail: cwanida@tu.ac.th

Received 18 March 2024; Revised 11 December 2024; Accepted 19 December 2024

บทคัดย่อ

ความเป็นมาและวัตถุประสงค์ : เพื่อให้สามารถใช้ประโยชน์กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย ตลอดจนสมบัติของกากชาและกากกาแฟ ซึ่งมีค่าความร้อนสูง ให้ได้ประโยชน์สูงสุด งานวิจัยนี้จึงนำวัสดุดังกล่าวมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ดร่วม โดยศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิง และลักษณะสมบัติของเชื้อเพลิงอัดเม็ดร่วมที่ได้

วิธีดำเนินการวิจัย : ทำการทดลองที่อัตราส่วนระหว่างกากตะกอนระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน กากชา และกากกาแฟ เท่ากับ 1:1:1 1:2:1 2:1:1 3:1:1 3:1:2 และ 3:2:1 ขึ้นรูปเชื้อเพลิงอัดเม็ดร่วม และทดสอบลักษณะสมบัติด้านเชื้อเพลิงตามมาตรฐานของ American Society for Testing and Materials (ASTM)

ผลการวิจัย : กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียไม่มีสมบัติที่เหมาะสมในการผลิตเป็นเชื้อเพลิง แต่เมื่อผสมกับกากชาและกากกาแฟที่อัตราส่วน 1:1:2 สามารถอัดเม็ดขึ้นรูปได้ โดยมีปริมาณความชื้น 20% ปริมาณเถ้า 5.96±0.97% และค่าความร้อน 4,796±49 kcal/kg ที่อัตราส่วน 1:2:3 เชื้อเพลิงอัดเม็ดร่วมมีระยะเวลาเผาไหม้นานที่สุด เท่ากับ 385 วินาที

สรุป : เชื้อเพลิงอัดเม็ดร่วมที่มีอัตราส่วนระหว่างกากตะกอนระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน กากชา และกากกาแฟ เท่ากับ 1:1:2 สามารถอัดขึ้นรูปได้ มีปริมาณเถ้าและค่าความร้อนตามเกณฑ์ที่เหมาะสมตามคู่มือแนวทางและเกณฑ์คุณสมบัติของเสียเพื่อการแปรรูปเป็นแท่งเชื้อเพลิงและบล็อกประสานของกรมโรงงานอุตสาหกรรม และมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเชื้อเพลิงชีวมวลแข็งอัดเม็ด มอก. 2772-2560

การนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงปฏิบัติ : เชื้อเพลิงอัดเม็ดร่วมจากกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย กากชา และกากกาแฟ สามารถเป็นพลังงานทางเลือกสำหรับใช้ในครัวเรือนหรืออาจขยายไปสู่ภาคอุตสาหกรรมได้ต่อไปในอนาคต

คำสำคัญ : กากตะกอน, กากชา, กากกาแฟ, เชื้อเพลิงอัดเม็ดร่วม, พลังงานทดแทน

Abstract

Background and Objective: To utilize sludge from wastewater treatment system and the high calorific value characteristics of tea and coffee grounds to their maximum benefits, the present research used these materials to produce co-pellet fuel. The appropriate ratio for fuel production and the characteristics of the co-pellet fuel were then investigated.

Methodology: Experiments were conducted at different ratios of municipal wastewater treatment sludge, tea ground and coffee ground of 1:1:1, 1:2:1, 2:1:1, 3:1:1, 3:1:2 and 3:2:1. The resulting samples were assessed for their fuel characteristics according to the standards set by the American Society for Testing and Materials (ASTM).

Main Results: The sludge from the wastewater treatment system was noted to be unsuitable for fuel production. On the other hand, co-pellet fuel could be produced by mixing the sludge with tea ground and coffee ground at a ratio of 1:1:2. The resulting mixture had a moisture content of 20%, an ash content of 5.96 ± 0.97% and a heating value of 4,796 ± 49 kcal/kg. Additionally, when a 1:2:3 ratio was used, the co-pellet fuel exhibited the longest combustion time, lasting 385 seconds.

Conclusions: The co-pellet fuel prepared at a ratio of municipal wastewater treatment sludge, tea ground and coffee ground of 1:1:2 could be effectively pelletized. Its ash content and heating value meet the standards outlined in the guidelines for processing waste materials into fuel pellets and briquettes established by the Department of Industrial Works. Additionally, they comply with the Industrial Product Standard for Compressed Biomass Fuel Pellets, as specified by the Thai Industrial Standard (TIS) 2772-2560.

Practical Application: Co-pellet fuel produced from the sludge of municipal wastewater treatment system in combination with tea grounds and coffee grounds can serve as an

alternative energy source for households and has the potential to be transferred to industrial applications.

Keywords: Sludge, Tea Ground, Coffee Ground, Co-pelletizing Fuel, Renewable Energy

Introduction

ประเทศไทยมีการปล่อยแก๊สเรือนกระจกจากภาคการจัดการของเสีย 11.83 MtCO2e คิดเป็นร้อยละ 3.71 ของการปล่อยแก๊สเรือนกระจกทั้งหมดของประเทศ ซึ่งแก๊สเรือนกระจกที่สำคัญ ได้แก่ แก๊สมีเทน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สไนตรัสออกไซด์ [1] โดยเฉพาะการจัดการของเสียด้วยวิธีการฝังกลบ ทำให้เกิดกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ (Anaerobic Decomposition) มีการปลดปล่อยแก๊สมีเทน ประมาณร้อยละ 60 ของแก๊สทั้งหมดในหลุมฝังกลบ [2] ซึ่งหลุมฝังกลบในประเทศไทยก่อให้เกิดแก๊สมีเทนประมาณ 103 – 366 พันตัน/ปี [3] และแก๊สมีเทนเป็นแก๊สเรือนกระจกที่มีค่าศักยภาพที่ทำให้โลกร้อน (Global Warming Potential; GWP) มากกว่าแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ถึง 25 เท่า การเพิ่มขึ้นของแก๊สเรือนกระจก ส่งผลให้ชั้นบรรยากาศมีความสามารถในการกักเก็บรังสีความร้อนได้มากขึ้น ก่อให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก (Greenhouse Effect) และส่งผลให้อุณหภูมิพื้นผิวโลกเพิ่มสูงขึ้น หรือที่เรียกว่าภาวะโลกร้อน (Global Warming) [4-5]

แก๊สเรือนกระจกในหลุมฝังกลบเกิดจากของเสียที่สามารถย่อยสลายได้โดยเฉพาะขยะอินทรีย์จากกิจกรรมของชุมชน และกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน และเนื่องจากในปัจจุบันมีความนิยมในการดื่มชาและกาแฟทำให้กากเหลือทิ้งเป็นปริมาณมาก โดยในแต่ละปีประเทศไทยมีจำนวนกากกาแฟเหลือทิ้งประมาณ 290,000 ตัน/ปี และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มมากขึ้นทุกปี [6] แม้ว่าจะมีการรีไซเคิลกากชาและกากกาแฟในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง การนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล โดยผ่านกระบวนการทรานส์เอส-เทอริฟิเคชัน (Tranesterification) โดยต้องผ่านขั้นตอนการสกัดทางเคมีเพื่อแยกน้ำมันออกจากกากกาแฟ ซึ่งกระบวนการสกัดที่เหมาะสมสามารถผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากกากกาแฟได้ร้อยละ 10 [7-9] รวมทั้งยังมีการผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษวัสดุเหลือทิ้งจากกาแฟ ซึ่งมีการผลิตแก๊สชีวภาพ 1.14 NL/L d และมีแก๊สมีเทนร้อยละ 65 ทำให้ได้ผลผลิตในกระบวนการประมาณร้อยละ 83 [10-11] เป็นต้น อย่างไรก็ตามยังคงมีปริมาณเหลือทิ้งค่อนข้างสูงอยู่ ซึ่งกากชาและกากกาแฟที่จะต้องนำไปกำจัดโดยการฝังกลบเกิดกระบวนการย่อยสลาย [12] ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมบริเวณรอบหลุมฝังกลบ ก่อให้เกิดสภาวะดินเป็นกรด และก่อให้เกิดแก๊สเรือนกระจก [13] เช่นเดียวกับกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน ต้องกำจัดโดยการฝังกลบหรือการถมที่ เนื่องจากไม่เหมาะสมสำหรับการกำจัดด้วยวิธีการเผา หรือแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงเพราะให้ค่าความร้อนที่ต่ำกว่า 3,000 กิโลแคลอรี่ต่อกิโลกรัม [14-15] แต่การนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ด โดยผสมร่วมกับวัสดุอื่น ได้แก่ ผงถ่าน ถ่านหิน ซังข้าวโพดทำให้ค่าความร้อนเพิ่มมากขึ้น [16-17] ในขณะที่กากชาและกากกาแฟสามารถผลิตเป็นแท่งเชื้อเพลิงโดยใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นตัวประสาน มีค่าความร้อน 5,517

กิโลแคลอรี่/กิโลกรัม และ 4,482 กิโลแคลอรี่/กิโลกรัม ตามลำดับ [12] การผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดทำให้ง่ายต่อการขนส่งและเก็บรักษา จึงเหมาะสมต่อการนำมาใช้ในกระบวนการทางความร้อน สะดวกและประหยัดค่าขนส่ง เนื่องจากมีความหนาแน่นสูง และสามารถควบคุมปริมาณการใช้ได้ง่ายเนื่องจากมีขนาด และน้ำหนักใกล้เคียงกัน [16, 18]

สมบัติของกากชา กากกาแฟ มีความร้อนสูง และความจำเป็นในการกำจัดกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย เพื่อให้ได้ประโยชน์สูงสุด จึงนำมาผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดร่วม และตรวจสอบลักษณะสมบัติ เพื่อศึกษาถึงศักยภาพของเชื้อเพลิงอัดเม็ดร่วมในอัตราส่วนต่างๆ ทำให้เพื่อนำไปเป็นแนวทางนำของเสียกลับมาใช้ประโยชน์ทางด้านพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ พร้อมทั้งสามารถกำจัดของเสีย แก้ปัญหาการปล่อยแก๊สเรือนกระจกซึ่งเป็นสาเหตุของภาวะโลกร้อน และลดปริมาณขยะที่จะต้องนำไปฝังกลบ ทำให้ยืดอายุการใช้งานของหลุมฝังกลบ

Methodology

การศึกษาศักยภาพเชื้อเพลิงอัดเม็ดร่วมกากตะกอนระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน (Domestic Wastewater Sludge; DWS) ร่วมกับกากชา (Tea Ground; TG) และกากกาแฟ (Coffee Ground; CG) ดำเนินการเตรียมตัวอย่าง ศึกษาลักษณะสมบัติเป็นเชื้อเพลิง อัตราส่วนผสมที่เหมาะสม และความสามารถในการจุดติดไฟโดยมีรายละเอียดดังนี้

การเตรียมตัวอย่าง

การเตรียมตัวอย่างโดยนำกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนหลังจากผ่านเครื่องบีบตะกอนจากระบบโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำเทศบาลนครปากเกร็ด จังหวัดนนทบุรี ส่วนกากชา และกากกาแฟ เป็นของเสียเหลือทิ้งจากร้านสตาร์บัค สาขาหอสมุดป๋วย อึ๊งภากรณ์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ดำเนินการนำกากตะกอน กากชา และกากกาแฟลดความชื้น โดยเข้าตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลาต่าง ๆ เพื่อควบคุมความชื้นร้อยละ 20-30 [19] เนื่องจากเป็นความชื้นที่เหมาะสมทำให้เกิดการขึ้นรูปได้ ลดการเกิดความเปราะหากความชื้นน้อยเกินไป และถ้าหากความชื้นมากเกินไปจะทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนไปกับการระเหย การเผาไหม้ [20]

การผสมกากตะกอนระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน กากชา และกากกาแฟ

การผสมกากตะกอนระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน กากชา และกากกาแฟ ให้เป็นเนื้อเดียวกันโดยเครื่องคนผสมตัวอย่าง (Mixer) ตามอัตราส่วนโดยน้ำหนักที่กำหนดโดยให้สัดส่วนของกากตะกอนเพิ่มขึ้น เพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสม ซึ่งมีสัดส่วนต่างๆ ได้แก่ 1:1:1 1:2:1 2:1:1 3:1:1 3:1:2 และ 3:2:1 นำไปอัดให้เป็นเม็ดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร ขนาดยาว 0.5 เซนติเมตร ด้วยเครื่อง Pelleting Press และควบคุมความชื้นของเชื้อเพลิงอัดเม็ดร่วมก่อนเข้าเครื่อง โดยการอบลมร้อนให้มีความชื้น ร้อยละ 20 และร้อยละ 30

การวิเคราะห์สมบัติของเชื้อเพลิงอัดเม็ดร่วม

1. ปริมาณความชื้น (Moisture Content) ปริมาณความชื้น มีผลต่อค่าความร้อนโดยตรงเนื่องจากความชื้นที่มีปริมาณสูงจะลดความร้อนที่ปลดปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ [21] การวิเคราะห์ปริมาณความชื้นตามมาตรฐาน ASTM D3173-95 [15] ให้ความร้อนกับตัวอย่างปริมาณ 1-2 กรัม ด้วยตู้อบลมร้อนรุ่น ED56 ยี่ห้อ BINDER นำตัวอย่างวางบนภาชนะทนความร้อนและทำการชั่งน้ำหนักก่อนนำเข้าอุณหภูมิ 105-110 องศาเซลเซียส จนกว่าน้ำหนักจะคงที่ ทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้นอย่างน้อย 20 นาที นำถ้วยที่ใส่ตัวอย่างทำการชั่งน้ำหนักอีกครั้ง คำนวณน้ำหนักที่หายไปเป็นร้อยละของปริมาณความชื้น ดังสมการที่ (1) [22]

$$MC = \frac{A - B}{A} \times 100 \quad (1)$$

โดย MC คือ ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)
A คือ น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (กรัม)
B คือ น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ (กรัม)

2. ปริมาณเถ้า (Ash Content) การวิเคราะห์ปริมาณเถ้า เป็นการหาปริมาณสารอนินทรีย์ที่คงเหลือหลังจากการเผาตัวอย่าง ตามมาตรฐาน ASTM D 3174-95 [15] โดยการเผาตัวอย่างน้ำหนักประมาณ 1-2 กรัมบนภาชนะทนความร้อนในเตาเผา อุณหภูมิ 500-600 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 30 นาที แล้วเพิ่มอุณหภูมิเป็น 750 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง โดยใช้เตาเผารุ่น CWF 1100 ยี่ห้อ CARBOLITE คำนวณน้ำหนักที่คงเหลืออยู่เป็นร้อยละของปริมาณเถ้า ดังสมการที่ (2)

$$AC = \frac{A - B}{A} \times 100 \quad (2)$$

โดย AC คือ ปริมาณเถ้า (ร้อยละ)
A คือ น้ำหนักตัวอย่างหลังเผา (กรัม)
B คือ น้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา (กรัม)

3. ปริมาณสารระเหย (Volatile Matter Content) การวิเคราะห์ปริมาณสารระเหย ตามมาตรฐาน ASTM D 3175-95 [23] นำตัวอย่างประมาณ 1-2 กรัม โดยใช้เตาเผารุ่น CWF 1100 ยี่ห้อ CARBOLITE นำตัวอย่างวางบนถ้วยที่ทนอุณหภูมิที่ทราบน้ำหนัก และเผาในตู้เผาอุณหภูมิสูง 950 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 7 นาที ซึ่งปริมาณสารระเหยที่ถูกปลดปล่อยออกมาโดยส่วนใหญ่เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ ดังสมการที่ (3)

$$VM = \left[\left(\frac{A - B}{A}\right) \times 100\right] - MC \quad (3)$$

โดย VM คือ ปริมาณสารระเหย (ร้อยละ)
MC คือ ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)
A คือ น้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา (กรัม)
B คือ น้ำหนักตัวอย่างหลังเผา (กรัม)

4. ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon Content) การวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนคงตัวตามมาตรฐาน ASTM D 3172 [15] โดยการนำปริมาณความชื้น เถ้า สารระเหย ลบออกจาก 100 และทุกค่าต้องอยู่ในสภาวะความชื้นเดียวกัน ดังสมการที่ (4)

$$FC = 100 - MC - AC - VM \quad (4)$$

โดย FC คือ ปริมาณคาร์บอนคงตัว (ร้อยละ)
MC คือ ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)
AC คือ ปริมาณเถ้า (ร้อยละ)
VM คือ ปริมาณสารระเหย (ร้อยละ)

5. ค่าความร้อน (Heating Value) การหาค่าความร้อนดำเนินการโดยใช้เครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์ (Bomb Calorimeter) รุ่น C 6000 ยี่ห้อ IKA ด้วยวิธี Isoperibol ตามมาตรฐาน ASTM D 5865-13 [15] โดยการนำตัวอย่างมาเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ในตัวจุดระเบิด (Bomb) ในตัวเครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์ที่มีออกซิเจนอยู่ในปริมาณมากเกินพอ โดยกระแสไฟฟ้าจะวิ่งผ่านฟิวส์ไปสัมผัสตัวอย่างเชื้อเพลิงเมื่อเกิดการเผาไหม้ตัวอย่างเชื้อเพลิงจนหมด เครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์จะอ่านค่าความร้อนผ่านสายไฟทั้งสองจะใส่ตัวอย่างลงไปในลูกบอมบ์ จากนั้นนำลูกบอมบ์ใส่ไปในเครื่องวิเคราะห์พลังงานความร้อน (Bomb Calorimeter) โดยรอบ ๆ ลูกบอมบ์จะมีน้ำที่ควบคุมอุณหภูมิเครื่องก็จะทำงานโดยการจุดติดไฟเพื่อเผาไหม้ตัวอย่างจนสมบูรณ์และให้ความร้อนออกมา ความร้อนจะแพร่กระจายไปยังน้ำที่อยู่รอบ ๆ ลูกบอมบ์ เครื่องจะตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิน้ำและคำนวณออกมาเป็นค่าพลังงานความร้อนออกมา

6. การหาระยะเวลาการเผาไหม้ การหาระยะเวลาการเผาไหม้หรือการติดไฟ (Combustion time/ Burning time) ของเชื้อเพลิงอัดเม็ดร่วม เป็นการทดสอบการเผาไหม้โดยตรง ด้วยการนำก้อนเชื้อเพลิงที่อัตราส่วนต่าง ๆ จำนวนอัตราส่วนละ 3 ก้อน โดยมีน้ำหนักอยู่ในช่วง 3-5 กรัม เผาไฟซึ่งจุดด้วยเปลวแก๊สเป็นเวลา 5 วินาที ปล่อยให้เผาไหม้จนหมด ทำการจับเวลาเมื่อเชื้อเพลิงติดไฟ สังเกตการเผาไหม้ ปริมาณเถ้า และหยุดจับเวลาเมื่อเชื้อเพลิงเผาไหม้หมดหรือไม่มีการติดไฟแล้ว ปล่อยทิ้งไว้ให้เย็น และนำเอาเถ้ามาชั่งน้ำหนัก [24-25]

Results and Discussion

ลักษณะสมบัติองค์ประกอบของเชื้อเพลิง

การศึกษาลักษณะสมบัติตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย พบว่า มีความชื้น 68.10% ปริมาณเถ้า สารระเหย และคาร์บอนคงตัว 47.59±0.27% 46.26±0.25% และ 6.15±0.04% ตามลำดับ และมีปริมาณค่าความร้อน 2,552±154 kcal/kg ซึ่งไม่เหมาะสมต่อการนำไปแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ดโดยตรงเนื่องจากมีค่าความร้อนต่ำ [26] ถึงแม้นำตะกอนมาปรับสภาพโดยลดความชื้นลงเหลือ 20% และ 30% ไม่สามารถตรวจวัดหาปริมาณความร้อนได้ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Chansongsri [14] และ Sangkhaphan [15] พบว่า กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียมีความชื้น และปริมาณความร้อนต่ำไม่เป็นไปตามสมบัติพื้นฐานของเชื้อเพลิงอัดเม็ด เนื่องจากยังคงมีปริมาณความชื้นสูงซึ่งจะส่งผลทำให้สูญเสียความร้อนระหว่างการเผาไหม้ [15] สำหรับกากชาที่ความชื้น 0% มีปริมาณเถ้า สารระเหย และคาร์บอนคงตัว 0.25±0.02% 97.24±0.98% และ 2.51±0.22% ตามลำดับ และมีปริมาณค่าความร้อน 4,640±282 kcal/kg ซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานแนวทางและเกณฑ์คุณสมบัติของเสียเพื่อการแปรรูปเป็นแท่งเชื้อเพลิงและบล็อกประสาน [26] ปริมาณสารระเหยและปริมาณคาร์บอนคงตัวเป็นองค์ประกอบสำคัญต่อค่าความร้อนของเชื้อเพลิง [27] แต่กากชาที่ความชื้น 20% และ 30% ไม่สามารถตรวจวัดหาปริมาณความร้อนได้เช่นเดียวกับกากตะกอน ปริมาณความชื้นในกากตะกอนและกากชามีผลต่อค่าความร้อนโดยตรงเนื่องจากความชื้นที่มีปริมาณสูงจะลดความร้อนที่ปลดปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ [21] (Table 1) สำหรับกากกาแฟมีสมบัติเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานแนวทางและเกณฑ์คุณสมบัติของเสียเพื่อการแปรรูปเป็นแท่งเชื้อเพลิงและบล็อกประสาน [26] โดยกำหนดปริมาณค่าความร้อนจะต้องมีค่ามากกว่า 3,000 kcal/kg ซึ่งพบว่าปริมาณเถ้าต่ำกว่า 20% สำหรับความชื้น 0% และ 20% มีปริมาณค่าความร้อน 5,544±281 และ 3,118±118 kcal/kg ตามลำดับ แต่ความชื้น 30% มีปริมาณค่าความร้อนต่ำกว่าเกณฑ์คุณสมบัติของเสียของกรมโรงงานอุตสาหกรรม [24] ซึ่งมีปริมาณความร้อน 2,638±188 kcal/kg โดยกากกาแฟที่ความชื้น 0% มีปริมาณเถ้า สารระเหย คาร์บอนคงตัว 0.22±0.03% 98.89±1.23% และ 0.89±0.11% ตามลำดับ (Table 1)

สำหรับกากกาแฟมีสมบัติเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานแนวทางและเกณฑ์คุณสมบัติของเสียเพื่อการแปรรูปเป็นแท่งเชื้อเพลิงและบล็อกประสาน [26] โดยกำหนดปริมาณค่าความร้อนจะต้องมีค่ามากกว่า 3,000 kcal/kg ซึ่งพบว่าปริมาณเถ้าต่ำกว่า 20% สำหรับความชื้น 0% และ 20% มีปริมาณค่าความร้อน 5,544±281 และ 3,118±118 kcal/kg ตามลำดับ แต่ความชื้น 30% มีปริมาณค่าความร้อนต่ำกว่าเกณฑ์คุณสมบัติของเสียของกรมโรงงานอุตสาหกรรม [24] ซึ่งมีปริมาณความร้อน 2,638±188 kcal/kg โดยกากกาแฟที่ความชื้น 0% มีปริมาณเถ้า สารระเหย คาร์บอนคงตัว 0.22±0.03% 98.89±1.23% และ 0.89±0.11% ตามลำดับ (Table 1)

Table 1 Composition of Fuels from Domestic Wastewater Sludge (DWS), Tea Ground (TG) and Coffee Ground (CG)

Fuel	Characteristic			
	Ash (%)	Volatile Matter (%)	Fixed Carbon (%)	Heating Value (kcal/kg)
DWS				
- Moisture Content 0%	47.59±0.27	46.26±0.25	6.15±0.04	2,552±154
- Moisture Content 20%	38.21±1.97	37.18±1.66	4.61±0.11	ND
- Moisture Content 30%	33.29±1.67	32.45±1.43	4.26±0.19	ND
TG				
- Moisture Content 0%	0.25±0.02	97.24±0.98	2.51±0.22	4,640±282
- Moisture Content 20%	0.22±0.02	77.79±2.48	1.99±0.12	ND
- Moisture Content 30%	0.18±0.04	68.19±3.44	1.63±0.17	ND
CG				
- Moisture Content 0%	0.22±0.03	98.89±1.23	0.89±0.11	5,544±281
- Moisture Content 20%	0.34±0.11	79.06±1.70	0.60±0.19	3,118±118
- Moisture Content 30%	0.29±0.04	69.09±5.17	0.62±0.10	2,638±188

ND - Sample cannot be ignited in the bomb calorimeter

ลักษณะสมบัติเชื้อเพลิงอัดเม็ดร่วม

จากการศึกษาลักษณะสมบัติของเชื้อเพลิงอัดเม็ดร่วม โดยเป็นการผสมกันระหว่างตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย กากชาและกากกาแฟ ในปริมาณความชื้น และอัตราส่วนต่าง ๆ พบว่าที่ปริมาณความชื้น 0% และ 30% ไม่สามารถอัดเม็ดได้ที่อัตราส่วนต่าง ๆ เนื่องจากความชื้นของความชื้นในวัสดุสูงหรือต่ำเกินไปจะทำให้รูแม่พิมพ์อุดตัน ทำให้เครื่องอัดเม็ดไม่สามารถระบายออกได้ แต่ปริมาณความชื้น 20% สามารถอัดเม็ดได้ รวมทั้งความชื้นเกิดจากปริมาณน้ำที่สะสมอยู่ในวัสดุ ซึ่งปริมาณความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการอัดเม็ดจะแตกต่างกันไปในแต่ละวัสดุ ซึ่งอาจเกิดจากองค์ประกอบของวัตถุดิบที่แตกต่างกัน [28] โดยมีรายละเอียดลักษณะสมบัติดังนี้ (Table 2)

1. ปริมาณความชื้น 0% ที่อัตราส่วนตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย กากชาและกากกาแฟ 1:1:1 1:1:2 1:2:1 1:2:3 3:1:1 และ 3:1:2 ปริมาณเถ้ามีปริมาณเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียที่เพิ่มขึ้น 4.45±0.24% 4.57±0.29% 5.10±0.37% 4.54±0.47% 12.22±2.16% และ 11.57±0.97% ตามลำดับ ในขณะที่ปริมาณความร้อนเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของกากกาแฟ โดยมีปริมาณค่าความร้อน 4,084±201 4,756±103 4,249±264 4,377±153 3,511±93 และ 3,605±131 kcal/kg ตามลำดับ

2. ปริมาณความชื้น 20% ที่อัตราส่วนตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย กากชาและกากกาแฟ 1:1:1 1:1:2 1:2:1 1:2:3 3:1:1 และ 3:1:2 ปริมาณเถ้ามีปริมาณเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของตะกอนจากระบบบำบัดน้ำ

เสียที่เพิ่มขึ้น 5.23±0.41% 5.96±0.97% 5.51±0.70% 3.85±0.43% 14.16±1.66% และ 12.35±1.06% ตามลำดับ ในขณะที่ปริมาณความร้อนเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของกากกาแฟ โดยมีปริมาณค่าความร้อน 3,978±136 4,796±49 2,515±86 4,297±159 2,989±135 และ 3,588±128 kcal/kg ตามลำดับ มีความร้อนมากกว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดรวมจากตะกอนน้ำเสีย และชีวมวล (ฟางข้าวและขี้เลื่อย) ซึ่งมีค่าความร้อน 3,002 kcal/kg [29] โดยเชื้อเพลิงอัดเม็ดร่วมอัตราส่วน 1:1:2 สามารถอัดเม็ดขึ้นรูปได้ เนื่องจากมีอัตราส่วนของกากกาแฟมากที่สุด ซึ่งอนุภาคขนาดเล็กของกากกาแฟทำให้เกิดแรงยึดเกาะระหว่างอนุภาคได้ดีไม่แตกร่วนซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kim และคณะ [11] และ Chanathaworn และ Phumivanichakit [27] อย่างไรก็ตามสำหรับอัตราส่วน 1:2:3 มีสัดส่วนของกากกาแฟเท่ากัน แต่มีสัดส่วนของกากชามากกว่าทำให้เกิดการแตกร่วนหลังจากขึ้นรูปอัดเม็ด

3. ปริมาณความชื้น 30% ที่อัตราส่วนตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย กากชาและกากกาแฟ 1:1:1 1:1:2 1:2:1 1:2:3 3:1:1 และ 3:1:2 ปริมาณเถ้ามีปริมาณเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียที่เพิ่มขึ้น 7.32±0.27% 6.66±0.48% 5.17±0.42% 4.89±0.57% 16.21±1.01% และ 14.53±10.3% ตามลำดับ ในขณะที่ปริมาณความร้อนเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของกากกาแฟ โดยมีปริมาณค่าความร้อน 3,936±119 4,407±150 2,410±174 3,747±133 2,561±25 และ 2,875±71 kcal/kg ตามลำดับ ซึ่งความชื้นสูง ลดความร้อนที่ปลดปล่อยออกมาจึงทำให้ค่าความร้อนจากการเผาไหม้ต่ำ [21]

Table 2 Characteristics of Different Co-pelletizing Fuels

Ratio DWS:TG:CG	Moisture (%)	Ash (%)	Heating Value (kcal/kg)	Remark
1:1:1	0	4.45±0.24	4,084±201	All ratios cannot be formed into pellets
1:1:2		4.57±0.29	4,756±103	
1:2:1		5.10±0.37	4,249±264	
1:2:3		4.54±0.47	4,377±153	
3:1:1		12.22±2.16	3,511±93	
3:1:2		11.57±0.97	3,605±131	
1:1:1	20	5.23±0.41	3,978±136	Formed into pellets (1:1:2)
1:1:2		5.96±0.97	4,796±49	
1:2:1		5.51±0.70	2,515±86	
1:2:3		3.85±0.43	4,297±159	
3:1:1		14.16±1.66	2,989±135	
3:1:2		12.35±1.06	3,588±128	
1:1:1	30	7.32±0.27	3,936±119	All ratios cannot be formed into pellets
1:1:2		6.66±0.48	4,407±150	
1:2:1		5.17±0.42	2,410±174	
1:2:3		4.89±0.57	3,747±133	
3:1:1		16.21±1.01	2,561±25	
3:1:2		14.53±10.3	2,875±71	

การศึกษาระยะเวลาเผาไหม้ของเชื้อเพลิงอัดเม็ดร่วม

การศึกษาระยะเวลาเผาไหม้ของเชื้อเพลิงร่วม พบว่า ทุกอัตราส่วนติดไฟได้ ยกเว้นอัตราส่วน 1:1:1 ถึงแม้ไม่สามารถขึ้นรูปได้ แต่เมื่อได้รับความร้อนที่ผิวมากพอและมีออกซิเจนจึงเกิดการลุกไหม้ต่อเนื่องเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ [30] โดยเชื้อเพลิงอัดเม็ดร่วมสามารถติดไฟได้นานที่สุด 6 นาที 25 วินาที หรือ 385 วินาที คือ อัตราส่วน 1:2:3 เนื่องจากมีสัดส่วนของกากชาและกากกาแฟสูงที่สุด ทำให้มีพลังงานสูง มีความแรงของเปลวไฟเห็นได้ชัด และมีควันไฟในปริมาณเล็กน้อย ซึ่งการติดไฟเกิดจากพลังงานที่ทำให้เชื้อเพลิงแต่ละชนิดเกิดการคายไอออก โดยมีค่าความร้อนและปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงขึ้นจากการเพิ่มปริมาณของกากกาแฟในส่วนผสม และมีปริมาณสารระเหยค่อนข้างสูงแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการติดไฟที่ง่ายขึ้น [31-32] (Figure 1) สำหรับอัตราส่วน 1:2:1 3:1:2 1:2:1 และ1:1:2 มีระยะเวลาการติดไฟรองลงมาตามลำดับ แต่อัตราส่วน 1:1:1 ไม่สามารถติดไฟได้ เนื่องจากเชื้อเพลิงอัดเม็ดร่วมจะแตกเป็นผงเมื่อผิวสัมผัสกับความร้อน

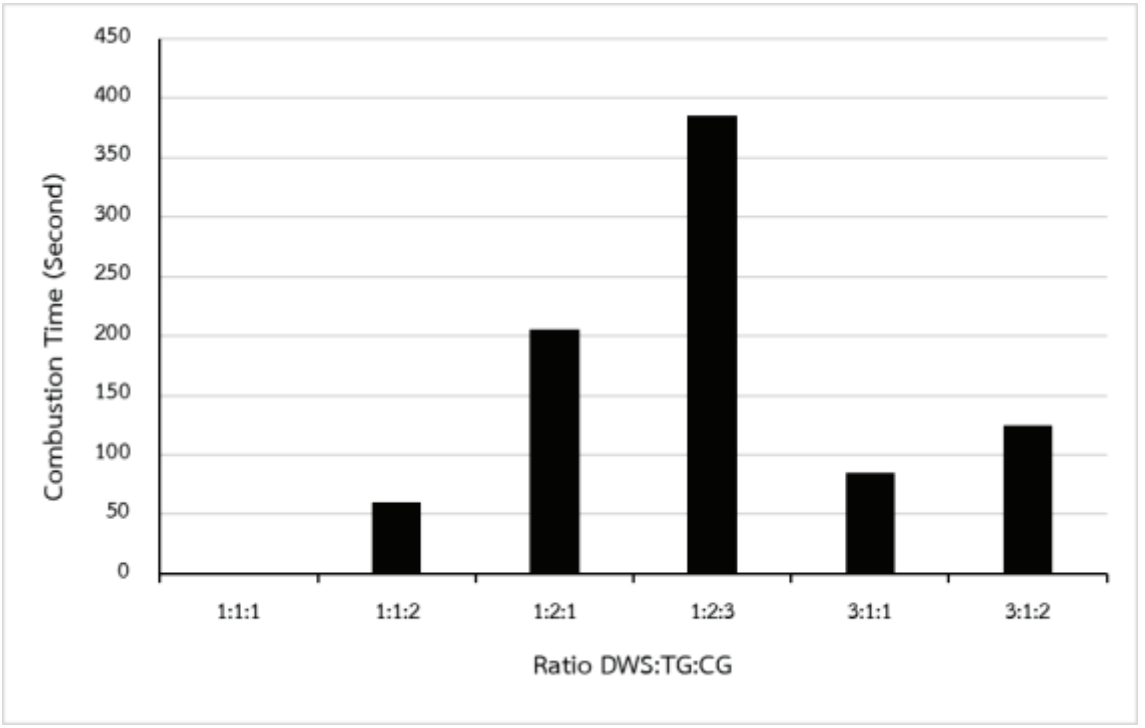

Figure 1 Combustion Time of Different Co-pelletizing Fuels

Conclusion

การศึกษาศักยภาพตะกอนระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนร่วมกับกากชา และกากกาแฟเพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ดร่วม พบว่า ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย ไม่มีสมบัติที่เหมาะสมในการผลิตเป็นเชื้อเพลิง แต่เมื่อนำมาผสมร่วมกับกากชา และกากกาแฟ พบว่า ปริมาณความชื้น 20% อัตราส่วนตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย กากชา และกากกาแฟ 1:1:2 สามารถอัดเม็ดขึ้นรูปได้ และมีสมบัติเป็นไปตามเกณฑ์ที่เหมาะสมตามคู่มือแนวทางและเกณฑ์คุณสมบัติของเสียเพื่อการแปรรูปเป็นแท่งเชื้อเพลิงและบล็อกประสาน ของกรมโรงงานอุตสาหกรรม และมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเชื้อเพลิงชีวมวลแข็งอัดเม็ด มอก. 2772-2560 โดยมีปริมาณเถ้า และปริมาณค่าความร้อน 5.96±0.97% 4,796±49 kcal/kg ตามลำดับ และที่อัตราส่วน 1:2:3 เชื้อเพลิงอัดเม็ดร่วมมีระยะเวลาเผาไหม้นานที่สุด ซึ่งความสัมพันธ์ของปริมาณกากกาแฟในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เชื้อเพลิงมีคุณภาพสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามควรศึกษาการขึ้นรูปแบบอื่นเพื่อสามารถใช้งานที่หลากหลาย และศึกษาลักษณะสมบัติทางด้านมลพิษทางอากาศจากเชื้อเพลิงอัดเม็ดร่วม เพื่อเป็นแนวทางในการใช้ของเสียให้เกิดประโยชน์และมีประสิทธิภาพสูงสุด เป็นการลดปริมาณของเสียในการกำจัด และลดผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมในระยะยาวต่อไป

References

1. Thailand Greenhouse Gas Management Organization (Public Organization), 2018, A Guide to Calculating Greenhouse Gas Reductions for Energy and Waste Sector Projects, 240 p. (In Thai)
2. Humer, M. and Lechner, P., 2001, “Microbial Methane Oxidation for the Reduction of Landfill Gas Emission,” *Journal of Solid Waste Technology and Management*, 27 (3), pp. 146-151.
3. Chiemchaisri, C. and Visvanathan, C., 2008, “Greenhouse Gas Emission Potential of the Municipal Solid Waste Disposal Sites in Thailand,” *Journal of the Air & Waste Management Association*, 58 (5), pp. 629-635.
4. Thailand Greenhouse Gas Management Organization (Public Organization), 2021, Global Warming Potential (GWP) for Thailand Voluntary Emission Reduction Program (T-VER), pp. 1-3. (In Thai)
5. Panichayapichet, P., 2017, Reducing Greenhouse Gases from Solid Waste Management, Office of Analysis, Monitoring, and Evaluation, Thailand Greenhouse Gas Management Organization (Public Organization), pp. 1-14. (In Thai)
6. Tuntiwiwattanapun, N., 2019, “Coffee Grounds, from Coffee Cups to Economic Concepts Renewable Energy for Biological Products,” *Environmental Journal*, 23 (1), pp. 1-8. (In Thai)

7. Misra, M., Kondamudi N., Mohapatra, S.K. and John, S.E., 2008, "High Quality Biodiesel from Spent Coffee Grounds," *Clean Technology*, 2, pp. 39-42.
8. Delligiannis, A., Papazafeiropoulou, A., Anastopoulos, G. and Zanikos, F., 2011, "Waste Coffee Ground as an Energy Feedstock," *Proceeding of the 3rd International Cempee and Secotox Conference*, pp. 978-960.
9. Caetano, N. Caetano, S. and Mata, T.M., 2012, "Volarization of Coffee Grounds for Biodiesel Production," *Chemical Engineering Transactions*, 26, pp. 267-272.
10. Battista, F., Fino, D. and Mancini, G., 2016, "Optimization of Biogas Production from Coffee Production Waste," *Bioresource Technology*, 200, pp. 884-890.
11. Kim, J., Kim, H., Baek, G. and Lee, C., 2017, "Anaerobic Co-digestion of Spent Coffee Grounds with Different Waste Feedstocks for Biogas Production," *Waste Management*, 60 (2017), pp. 322-328.
12. Tangmankongworakoon, N. and Preedasuriyachai, P., 2015, "A Study on How to Utilize Coffee Residue and Tea Residue for the Production of Briquettes," *Srinakharinwirot University Journal of Sciences and Technology*, 7 (13), pp. 15-26. (In Thai)
13. Sermyagina, E., Martinez, C.L.M., Nikku, M. and Vakkilainen, E., 2021, "Spent Coffee Grounds and Tea Leaf Residues: Characterization, Evaluation of Thermal Reactivity and Recovery of High-value Compounds," *Biomass and Bioenergy*, 150 (2021), pp. 1-14.
14. Chansongsri, T., 2014, Potential of Briquette Fuel Production using Wastewater Treatment Sludge from Cosmetic Industry, Master of Engineering Thesis, Energy and Environmental Technology Management Program, Faculty of Engineering, Thammasat University, 66 p. (In Thai)
15. Sangkhaphan, A., 2018, Co-pelletized Briquettes Production from Municipal Wastewater Sludge; Case Study of Pattaya Municipal Wastewater Treatment Plant, Master of Engineering Thesis, Energy and Environmental Technology Management Program, Faculty of Engineering, Thammasat University, 67 p. (In Thai)
16. Ersel, Y., Małgorzata, W. and Selin, A., 2018, "Co- pelletization of Sewage Sludge and Agricultural Wastes," *Journal of Environmental Management*, 216, pp. 169-175.
17. Chua-am, S., Thongsang, S. and Yamsangsung, W., 2018, "Properties of Fuel Briquette from Corn Coband Plastic IndustrySludge," *Proceeding of the the 19th National Graduate Research Conference: NGRC*, 9 March 2018, Khonkaen University, pp. 145-154. (In Thai)

18. Phuangchik, T., 2015, "Wood Pellets from Bamboo: Renewable Energy Enormous Value?," *Thai Science and Technology Journal*, 23, pp. 35-42. (In Thai)
19. Chiraniramai, K. and Chooaksorn, W., 2024, "Production of the Co-pelletizing Fuel from Domestic Wastewater Sludge and Non-recyclable Waste," *Burapha Science Journal*, 29 (2), pp. 481-493. (In Thai)
20. Chuchottaworn, J., 2013, Energy and Economic Analysis of Heat Production from Pennisetum Purpureum cv. Pakchong 1 Grass through Gassification Process, Master of Engineering Thesis, Energy Engineering Program, Graduate School, Chiang Mai University, 147 p. (In Thai)
21. Demirbas, A., 2007, "Effects of Moisture and Hydrogen Content on the Heating Value of Fuels," *Energy Sources*, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 29 (7), pp. 649-655. https://doi.org/10.1080/009083190957801
22. Department of Alternative Energy Development and Efficiency, 2012, Report on the Project to Study the Standardization of Biomass Pellets to Develop into the Future. (In Thai)
23. Pukdee-asa, M. and Pimpan, P., 2022, "Fuel Briquettes from Waste of Lemon Grass and Banana Peel," *Science and Technology Nakhon Sawan Rajabhat University Journal*, 14 (19), pp. 107-121. (In Thai)
24. Kerdwan, S., Jeendoung, R. and Getpun, S., 2019, The Production of Charcoal from Sago Bark, Research Report, Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Srivijaya, 51 p. (In Thai)
25. Thassana, C. and Noolek, V., 2003, Salacca Leaf Stalk Charcoal Briquette, Final Report, Faculty of Science and Technology, Rambhai Barni Rajabhat University, 24 p. (In Thai)
26. Department of Industrial Works, 2012, Standards, Guidelines, and Waste Qualification Criteria for Processing into Fuel Briquette and the Interlocking Block. Bangkok: Industrial Waste Management Division, Department of Industrial Works, Ministry of Industry, 83 p. (In Thai)
27. Chanathaworn, J. and Phumivanichakit, K., 2019, "Effect of Coffee Silverskin and Spent Coffee Ground on Properties of Biomass Pellet Fuel," *RMUTP Research Journal*, 13 (1), pp. 78-89.
28. Puttakarn, B., 2003, Drying Kinetics of Lychee, Master of Engineering Thesis, Energy Engineering Program, Graduate School, Chiang Mai University, 159 p. (In Thai)

29. Duangjaiboon, K., Kittiwan, M. and Kaewpengkrow, P.R., 2023, "Properties Analysis of Pellets Fuel from Sewage Sludge and Biomass for Renewable Energy," *Journal of Engineering and Innovation*, 16 (2), pp. 29-37. (In Thai)
30. Soonkum, T., 2014, Identification of Gasoline on the Arsonist's Hands and Clothes by the Technique of Gas Chromatography-Flame Ionization Detector (GC-FID), Master of Science Thesis, Forensic Science Program, Graduate School, Silpakorn University, 97 p. (In Thai)
31. Gil, M.V., Oulego, P., Pevida, C., Pis, J.J. and Rubiera, F., 2010, "Mechanical Durability and Combustion Characteristics of Pellets from Biomass Blends," *Biomass Technology*, 101 (22), pp. 8859-8867.
32. Warajanont S. and Soponpongpipat, N., 2013, "Effect of Particle Size and Moisture Content on Cassava Root Pellet Fuel's Qualities follow the Acceptance of Pellet Fuel Standard," *International Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2 (2), pp. 74-79. (In Thai)