

การศึกษาประสิทธิภาพของการดูดซับน้ำมันและไขมันของวัสดุดูดซับที่ได้จากของเหลือทิ้งทางการเกษตร  
และการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากวัสดุดูดซับที่มีประสิทธิภาพสูง

Study of Oil and Grease Adsorption Efficiency of Agricultural Waste Material Derived  
Adsorbents and Production of Briquette Fuel from Highly Efficient Adsorbent

พัชรวรรณ สิริศาสตร์\* กัญญารัตน์ สิริกุล มณีรัตน์ หัตถวงค์ และ นิชนันท์ ใจเพ็ง

Patcharawan Sittisart\* Kanyarat Sittikul Maneerat Hattawong and Nitchanan Jaipeng

สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏศรีสะเกษ

Division of Environmental Science, Faculty of Liberal Arts and Science, Sisaket Rajabhat University

\*E-mail: patcwan07@gmail.com

Received: Apr 03, 2023

Revised: May 10, 2023

Accepted: May 15, 2023

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของค่าความเป็นกรด-ด่าง และปริมาณของน้ำเสียสังเคราะห์ต่อประสิทธิภาพการดูดซับน้ำมันและไขมันของวัสดุดูดซับที่เตรียมจากใยตาล ใบหอมแดง และไผ่ รวมทั้งเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพการดูดซับน้ำมันและไขมันที่ดีที่สุด ผลการศึกษาพบว่าตัวดูดซับที่เตรียมได้จากใยตาลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำมันและไขมัน และประสิทธิภาพการกรองของแข็งแขวนลอยได้มากที่สุดเมื่อน้ำเสียนี้อัตราส่วน 3 ลิตร และมีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 8 ดังนั้นจึงนำตัวดูดซับดังกล่าวไปผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง จากการศึกษาพบว่าอัตราส่วนของถ่านไม้ต่อใยตาลที่ 50:50, 40:60 และ 30:70 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง เนื่องจากอัตราส่วนดังกล่าวทำให้เชื้อเพลิงอัดแท่งขึ้นรูปได้ดี และมีค่าพลังงานความร้อนสูงถึง 7,054, 7,299 และ 6,954 แคลอรีต่อกรัม ตามลำดับ นอกจากนี้ เชื้อเพลิงอัดแท่งเหล่านี้ยังมีค่าพลังงานความร้อน และค่าความชื้นผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่านอัดแท่ง ดังนั้นใยตาลจึงสามารถใช้เป็นวัสดุดูดซับน้ำมันและไขมันจากน้ำทิ้ง และเป็นวัสดุในการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งสำหรับใช้ในครัวเรือนเพื่อลดการใช้ถ่านไม้

**คำสำคัญ:** ตัวดูดซับ ใยตาล น้ำมันและไขมัน เชื้อเพลิงอัดแท่ง

**Abstract**

This research aimed to study the effect of pH and quantity of synthetic wastewater on oil and grease adsorption efficiency of adsorbents prepared from palmyra palm fibers, shallot leaves and bamboo fibers and to study the possibility of producing briquette fuel from the adsorbent having the best oil and grease adsorption efficiency. The results revealed that the adsorbent prepared from palmyra palm fibers exhibited the highest efficiency in oil and grease adsorption and suspended solid filtration when the volume of wastewater was 3 liters and its pH was 8. Therefore, the adsorbent was used to produce briquette fuel. The study found that the ratios of wood charcoal to the adsorbent prepared from palmyra palm fibers at 50:50, 40:60 and 30:70 were suitable for the production of briquette fuel because with these ratios, the briquette fuels were well molded and had high calorific values of 7,054, 7,299 and 6,954 calories per gram, respectively. Furthermore, the calorific values and moisture contents of the briquette fuels were qualified according to the Community Product Standards of Charcoal Briquettes. Therefore, palmyra palm fibers can be used as an oil and grease absorbent from effluents and as a material for the production of briquette fuel for household use to reduce the use of wood charcoal.

**Keywords:** Adsorbent, Palmyra palm fiber, Oil and grease, Briquette fuel

## 1. บทนำ

น้ำมัน (Oil) และไขมัน (Grease) เป็นองค์ประกอบหนึ่งที่พบในน้ำเสียชุมชน โดยมีปริมาณร้อยละ 10 ของสารอินทรีย์ทั้งหมด น้ำมันและไขมันมักพบในน้ำเสียชุมชนที่เกิดจากการประกอบอาหาร ขำระล้างสิ่งสกปรกในครัวเรือน โรงอาหาร หรือตามอาคารต่าง ๆ และเมื่อปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมจำนวนมาก จึงก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำ โดยเกิดการปนเปื้อนสู่แหล่งน้ำผิวดิน ทำให้เกิดสภาพไม่นาดู และขวางกั้นการซึมผ่านของออกซิเจนจากอากาศลงสู่แหล่งน้ำ [1], [2] ดังนั้นจึงมีความจำเป็นในการบำบัดน้ำมันและไขมันในน้ำทิ้งชุมชนเบื้องต้น เพื่อป้องกันปัญหาการอุดตันของท่อน้ำทิ้ง การกำจัดน้ำมันและไขมันมีหลายวิธี การใช้เศษวัสดุเหลือทิ้งเป็นตัวดูดซับน้ำมันและไขมัน เป็นวิธีการหนึ่งที่ยิยมใช้กันมาก โดยเฉพาะการใช้เส้นใยธรรมชาติจากพืชที่หาได้ง่ายแทนการใช้วัสดุสังเคราะห์ที่มีราคาสูงเป็นตัวดูดซับ [3] เส้นใยพืชจะมีองค์ประกอบของเซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน (Lignin) ที่มีกลุ่มฟังก์ชันฮอล (Functional group) เป็นจำนวนมาก จึงทำให้สามารถดูดซับน้ำมันและไขมันได้ อย่างไรก็ตามเส้นใยจากพืชแต่ละชนิดมีองค์ประกอบทางเคมีและปริมาณที่แตกต่างกัน จึงส่งผลต่อการดูดซับได้มากน้อยต่างกัน [4] จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเส้นใยจากพืชหลายชนิดที่สามารถนำมาเป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพ เช่น เปลือกข้าวโพดและกาบไผ่ [3] เปลือกทุเรียนและเส้นใยเปลือกผลปาล์ม [5] มะรุม [6] และเส้นใยจากลำต้นกล้วย [7] เป็นต้น

ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับน้ำมันและไขมันนั้นมีหลายปัจจัย เช่น ปริมาณของตัวดูดซับ ขนาดของตัวดูดซับ ความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับ ค่าความเป็นกรด-ด่าง อุณหภูมิ และเวลาในการสัมผัส [7], [8] ซึ่งค่าความเป็นกรด-ด่างเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญสำหรับการควบคุมกระบวนการดูดซับน้ำมันและไขมันจากน้ำเสียครัวเรือน โดยจะเห็นได้จากหลายงานวิจัยที่ศึกษาถึงผลของค่าความเป็นกรด-ด่างต่อประสิทธิภาพการดูดซับน้ำมันและไขมัน เช่น Daud et al. [7] ได้ศึกษาผลของค่าความเป็นกรด-ด่างต่อประสิทธิภาพการดูดซับน้ำมันและไขมันโดยการใช้เส้นใยจากลำต้นกล้วย และพบว่าน้ำเสียที่มีค่าความเป็นกรดสูง ประสิทธิภาพการดูดซับน้ำมันและไขมันจะต่ำ และหากค่าความเป็นกรด-ด่างสูงขึ้น ประสิทธิภาพในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น แต่หากเพิ่มจนถึงจุดหนึ่งที่มีความเป็นด่างสูงมาก ประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำมันและไขมันก็จะลดลง Wisetrat et al. [9] ได้ศึกษาผลของค่าความเป็นกรด-ด่าง

ต่อการดูดซับน้ำมันโดยใช้ชานอ้อย พบว่าที่ค่าความเป็นกรดสูง ประสิทธิภาพการดูดซับน้ำมันจะต่ำ และเมื่อเพิ่มค่าความเป็นกรด-ด่างให้สูงขึ้น ประสิทธิภาพการดูดซับก็จะเพิ่มขึ้น ข้อมูลเหล่านี้จึงแสดงให้เห็นว่าค่าความเป็นกรด-ด่าง ส่งผลต่อประสิทธิภาพของตัวดูดซับ อย่างไรก็ตามตัวดูดซับเหล่านี้อาจกลายเป็นขยะและยากต่อการกำจัดในภายหลัง ซึ่งจะทำให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมตามมา ดังนั้นหากนำมาอัดเป็นแท่งเชื้อเพลิง ก็จะสามารถใช้ทดแทนพลังงานจากไม้พืนและถ่านไม้ได้ [10] ซึ่งเป็นการตอบสนองนโยบายของรัฐบาลที่มีการส่งเสริมและสนับสนุนให้มีการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่สอดคล้องกับยุทธศาสตร์แห่งชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของประเทศไทย ด้วยการลดอัตราการเผาวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร และนำมาแปรรูปใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งสำหรับการให้ความร้อนทั้งทางภาคอุตสาหกรรมและครัวเรือน [11] ประกอบกับสภาวะเศรษฐกิจในปัจจุบันนี้ที่ราคาเชื้อเพลิงสูงกว่าในอดีตมาก ทำให้การใช้ถ่านไม้และพืนมีความจำเป็นในภาคครัวเรือนมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งครัวเรือนในเขตชนบท [12] ด้วยเหตุนี้จึงมีการพยายามผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ได้จากเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร และมีงานวิจัยที่ประสบความสำเร็จมากมายที่แสดงให้เห็นเกี่ยวกับการนำชีวมวลมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งเพื่อใช้ทดแทนถ่านไม้และพืนอย่างหลากหลาย เช่น เชื้อเพลิงอัดแท่งจากเศษตะไคร้ และเปลือกกล้วย [13] เชื้อเพลิงอัดแท่งจากกะลามะพร้าว ใบไม้แห้ง และขี้เลื่อย [14] เชื้อเพลิงอัดแท่งจากฝักหางนกยูงฝรั่ง และฝักมะค่าโมง [15] เป็นต้น

ตาล (Palmyra palm) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Borassus flabellifer* L. นิยมนำผลตาลไปแปรรูปเป็นขนมตาลเพื่อสร้างรายได้ จึงมีส่วนของเส้นใยจากผลตาลที่เป็นส่วนที่เหลือทิ้งในท้องถิ่นเป็นจำนวนมาก [16] เส้นใยจากผลของตาลมีองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญ ได้แก่ ลิกนิน (12.20%) เซลลูโลส (62.90%) เฮมิเซลลูโลส (18.42%) และ เพกติน (Pectin) (1.55%) [17] หอมแดง (Shallot) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Allium ascalonicum* L. เป็นพืชผักที่มีลำต้นใต้ดิน หรือเป็นไม้หัว ลักษณะหัวเป็นรูปไข่ ทำหน้าที่เก็บสะสมอาหาร หอมแดงจะมีใบเรียงเวียน กาบใบอวบน้ำ อัดกันแน่น มีแผ่นใบเป็นรูปทรงกระบอก กลวง สีเขียวหรือเขียวอ่อน ใบตั้งหรือเอนเล็กน้อย โดยคนไทยนิยมใช้ประโยชน์จากส่วนของหัว [18] หอมแดงจัดเป็นพืชเศรษฐกิจสำคัญของจังหวัดศรีสะเกษ โดยมีการส่งออกส่วนของหัวหอมแดงที่สร้างรายได้ให้กับเกษตรกรจังหวัดศรีสะเกษ อย่างไรก็ตามส่วนของใบกลับเป็นส่วนเหลือ

ทั้งในภาคการผลิตและแปรรูป จึงก่อให้เกิดเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรจำนวนมาก [19] โดยใบของหอมแดงนั้นมีองค์ประกอบทางเคมีหลัก ๆ ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน เป็นองค์ประกอบ [20] ไม้ (Bamboo) เป็นพืชในตระกูล Poaceae ซึ่งมีมากกว่าร้อยสกุล และมากกว่าพันชนิด ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ที่สำคัญคือ เป็นไม้พุ่ม ขึ้นเป็นกอ ลำต้นเป็นปล้อง ๆ โดยส่วนของลำต้นหรือไม้ไผ่ นิยมนำมาทำจักตอกมัดข้าว มัดผักแทนการใช้หนัวยาง ซึ่งยังมีส่วนของไผ่ที่ไม่ได้ใช้ประโยชน์ใด ๆ หลงเหลืออยู่จำนวนมาก และนิยมนำไปกำจัดด้วยการเผา ไม้ไผ่ จะมีเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินเป็นองค์ประกอบหลัก โดยมีค่าเฉลี่ยของเซลลูโลส เป็นองค์ประกอบประมาณร้อยละ 61-71 และลิกนินประมาณร้อยละ 20-30 [21]

จากการทบทวนเอกสารที่ผ่านมาพบว่ายังไม่มีการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากตัวดูดซับธรรมชาติของพืชทั้ง 3 ชนิด (ไยตาล ใบหอมแดง และไผ่) ที่ผ่านการกรองหรือดูดซับน้ำมันและไขมันแล้ว ด้วยเหตุนี้คณะผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาผลของความเป็นกรด-ด่าง และปริมาณของน้ำเสียสังเคราะห์ (Synthetic wastewater) ต่อประสิทธิภาพการดูดซับน้ำมันและไขมัน โดยการใช่วัสดุธรรมชาติเหลือทิ้งเป็นตัวดูดซับน้ำมันและไขมัน ได้แก่ ไยตาล ใบหอมแดง และไผ่ ตลอดจนการศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากตัวดูดซับน้ำมันและไขมันที่เหมาะสมที่สุดซึ่งผ่านการใช้งานแล้ว

## 2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

### 2.1. การเตรียมวัสดุและชุดการทดลองของกระบวนการดูดซับ

#### 2.1.1. ตัวอย่างวัสดุดูดซับและการเตรียมวัสดุดูดซับ

วัสดุธรรมชาติที่ใช้เป็นตัวดูดซับน้ำมันและไขมัน ได้แก่ ไยตาล ใบหอมแดง และไผ่ โดยเก็บเศษไยตาลแห้งที่เหลือจากการแปรรูปเป็นขนมตาล ในระหว่างเดือน มกราคม ถึงมิถุนายน 2565 และเก็บใบหอมแดงจากกองรวบรวมใบหอมแดงของเกษตรกร ในกระบวนการตัดแต่งแปรรูปหอมแดงเพื่อส่งออก ในระหว่างเดือนมกราคมถึงเมษายน

2565 จากพื้นที่หมู่บ้านหนองคำ ตำบลน้ำคำ อำเภอเมือง จังหวัดศรีสะเกษ ส่วนไผ่เก็บจากกองเศษไม้ไผ่เหลือทิ้งในการจักตอกมัดข้าว ในระหว่างเดือนพฤศจิกายน 2564 ถึงมกราคม 2565 ในพื้นที่หมู่บ้านห้วยนา ตำบลน้ำคำ อำเภอเมือง จังหวัดศรีสะเกษ

สับและตัด ไยตาล ใบหอมแดง และไผ่ ด้วยการใช้มีดและกรรไกรให้ได้ขนาด 1-2 มิลลิเมตร ล้างด้วยน้ำกลั่น เพื่อกำจัดฝุ่นและสิ่งปนเปื้อนออก โดยให้มีค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำล้างสุดท้ายประมาณ 5-8 แล้วนำไปตากแดด เป็นเวลา 2 วัน ตามด้วยอบด้วยเครื่องอบลมร้อน (Memmert UN110, Germany) ที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที และดูความชื้นในตัวดูดซับความชื้น (Weifo DRY-300-2, Taiwan) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำไปชั่ง และเก็บรักษาตัวอย่างในถุงซิปล็อคใส (Figure 1A-1C)

#### 2.1.2. การเตรียมอุปกรณ์รองรับตัวดูดซับน้ำมันและไขมัน

ออกแบบอุปกรณ์รองรับตัวดูดซับน้ำมันและไขมัน [1] โดยปรับเปลี่ยนให้เหมาะสม ซึ่งสามารถนำไปติดตั้งในอ่างล้างอุปกรณ์ ก่อนปล่อยน้ำเสียสังเคราะห์ลงสู่ท่อระบายน้ำห้อง 4205 ตึก 4 คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏศรีสะเกษ อุปกรณ์ดังกล่าวใช้ท่อพีวีซีรูปทรงกรวยขนาด 2 นิ้ว ฝั่มตะแกรงดักเศษอาหารขนาด 1 นิ้ว และรองด้วยแผ่นตาข่ายสแตนเลสขนาด 1 นิ้ว ใช้กาวติดข้อต่อท่อน้ำเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 1.5 นิ้ว ใส่วัสดุดูดซับลงในท่อน้ำ และต่อด้วยท่อพีวีซีรูปกรวยขนาด 1 x 1/2 นิ้ว ที่ฝั่มตะแกรงดักเศษอาหาร ขนาด 1 นิ้ว ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวสามารถถอดออกเพื่อเปลี่ยนวัสดุดูดซับได้ (Figure 2)

#### 2.1.3. การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ให้มีสมบัติใกล้เคียงกับน้ำเสียจากครัวเรือนมากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับวิธีการของ Chalermwat and Saripan [1] ดังนี้ ใช้น้ำมันพืช 50 มิลลิกรัม แป้งมันสำปะหลัง 2 มิลลิกรัม น้ำตาลทราย 2 มิลลิกรัม ในน้ำ 1 ลิตร ผสมให้เข้ากัน สำหรับใช้ในการทดลองต่อไป



Figure 1 Adsorbents prepared from (A) palmyra palm fibers, (B) shallot leaves and (C) bamboo fibers

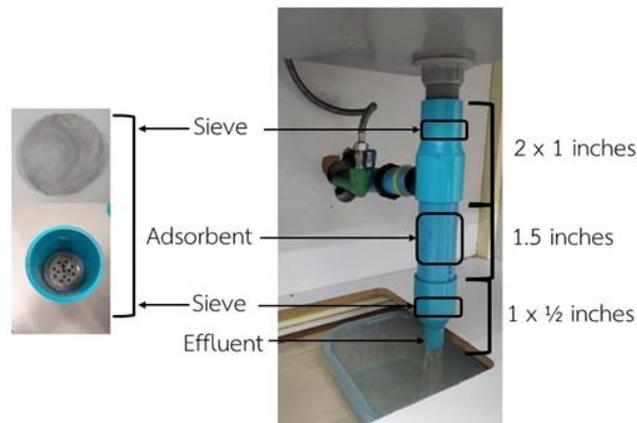


Figure 2 Preparation of adsorption equipment

## 2.2. กระบวนการดูดซับและการตรวจสอบผล

### 2.2.1. การตรวจสอบผลของความเป็นกรด-ด่างของน้ำเสียสังเคราะห์ต่อประสิทธิภาพการดูดซับน้ำมันและไขมัน

ตรวจสอบผลของค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำเสียสังเคราะห์ต่อประสิทธิภาพการดูดซับน้ำมันและไขมันของตัวดูดซับธรรมชาติจากไยตาล ใบหอมแดง และใยไผ่ ตามวิธีการของ Chalermwat and Saripan [1] ดังนี้ นำน้ำเสียสังเคราะห์มาปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง เป็น 4, 5, 6, 7 และ 8 แล้วปล่อยน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเป็นกรด-ด่าง แตกต่างกันไป ปริมาณ 2 ลิตร ผ่านอุปกรณ์รองรับตัวดูดซับน้ำมันและไขมันที่มีตัวดูดซับเป็นไยตาล ใบหอมแดง และใยไผ่ ขนาด 1-2 มิลลิเมตร ปริมาณ 20 กรัม แล้วเก็บตัวอย่างน้ำไปวิเคราะห์หาปริมาณน้ำมันและไขมันและปริมาณของแข็งแขวนลอยต่อไป

### 2.2.1.1. การวิเคราะห์หาปริมาณน้ำมันและไขมัน

การวิเคราะห์หาปริมาณน้ำมันและไขมันในตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างแตกต่างกัน ทำโดยวิธี Partition gravimetric method ซึ่งมีขั้นตอนสอดคล้องกับวิธีการของ Kaewkhunjit [22] โดยปรับเปลี่ยนวิธีการให้เหมาะสมและมีรายละเอียดดังนี้ เติมกรด HCl อัตราส่วนร่วม 1:1 ใส่ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ pH แตกต่างกันไป เหย้าให้เข้ากันแล้ววัดค่าความเป็นกรด-ด่าง ให้ได้น้อยกว่า 2 จากนั้นเติมตัวอย่างน้ำปริมาณ 50 มิลลิลิตร ใส่ในกรวยแยกสาร ขนาด 125 มิลลิลิตร แล้วเติม n-hexane (Hopewell International Co., Ltd., Thailand) 5 มิลลิลิตร แล้วเขย่ากรวยแยกสารเป็นเวลา 2 นาที ตั้งทิ้งไว้ให้แยกชั้น เก็บส่วนของน้ำเสียสังเคราะห์ที่อยู่ด้านล่างของกรวยแยกสารใส่ปิเกตอร์

เก็บน้ำตัวอย่าง ตามด้วยเก็บส่วนของ n-hexane ที่ละลาย น้ำมันและไขมัน นำน้ำเสียที่เก็บไว้มาสกัดซ้ำอีก 2 ครั้ง ด้วย n-hexane จากนั้นกรอง n-hexane ที่มีน้ำมันและไขมันผ่าน กระดาษกรอง เบอร์ 1 (GE Healthcare Whatman, China) ที่มี  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ลงในถ้วยระเหยที่ทราบน้ำหนัก ซึ่งถ้วยระเหยนั้น ผ่านการอบ (103-105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง) และดูดความชื้น (30 นาที) มาแล้ว จากนั้นนำตัวอย่างที่อยู่ใน ถ้วยระเหยไประเหยบนอ่างควบคุมอุณหภูมิ (Memmert WNB 29, Germany) ที่ 80 องศาเซลเซียส จน n-hexane ระเหยออกหมด ตามด้วยอบที่ 103-105 องศาเซลเซียส เป็น เวลา 1 ชั่วโมง และดูดความชื้น 30 นาที ชั่งน้ำหนักถ้วยระเหย บันทึกลง แล้วคำนวณหาปริมาณไขมันและน้ำมัน ตามด้วยค่า ร้อยละประสิทธิภาพการดูดซับน้ำมันและไขมันดังสมการ ต่อไปนี้

ประสิทธิภาพการดูดซับน้ำมันและไขมัน (%) =

$$[(C_i - C_{ef}) \div C_i] \times 100$$

เมื่อ  $C_i$  คือ ความเข้มข้นของน้ำมันเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$C_{ef}$  คือ ความเข้มข้นของน้ำมันที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

### 2.2.1.2. การวิเคราะห์หาปริมาณของแข็ง

#### แขวนลอย

การวิเคราะห์หาปริมาณของแข็งแขวนลอยใน ตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างแตกต่างกัน มีขั้นตอนสอดคล้องกับวิธีการของ Kaewkhunjit [22] โดย ปรับเปลี่ยนวิธีการให้เหมาะสม ดังนี้ นำกระดาษกรองใยแก้ว (GF/C) ขนาด 47 มิลลิเมตร (GE Healthcare Whatman, China) รองด้วยอลูมิเนียมฟอยล์ (Aluminium foil) รูปถ้วย อบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วดูดความชื้นเป็นเวลา 30 นาที ชั่งน้ำหนักกระดาษกรอง จากนั้นกรองน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาณ 100 มิลลิตร ผ่าน กระดาษกรองใยแก้วบนชุดกรองแก้วแบบสุญญากาศ (Millipore, USA) ที่ต่อกับเครื่องปั๊มสุญญากาศ (Millipore, USA) นำกระดาษกรองที่มีสารแขวนลอยไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วดูดความชื้นอีก 30 นาที ชั่งน้ำหนักกระดาษกรองที่มีสารแขวนลอย บันทึกค่า แล้ว คำนวณหาปริมาณสารแขวนลอย ตามด้วยค่าประสิทธิภาพ การกรองของแข็งแขวนลอยดังสมการต่อไปนี้

ประสิทธิภาพการกรองของแข็งแขวนลอย (%) =

$$[(SS_{in} - SS_{out}) \div SS_{in}] \times 100$$

เมื่อ  $SS_{in}$  คือ ของแข็งแขวนลอยเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$SS_{out}$  คือ ของแข็งแขวนลอยหลังบำบัด (มิลลิกรัมต่อลิตร)

### 2.2.2. การตรวจสอบผลของปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ต่อประสิทธิภาพการดูดซับน้ำมันและไขมัน

ตรวจสอบผลของปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ต่อ ประสิทธิภาพการดูดซับน้ำมันและไขมันของตัวดูดซับ ธรรมชาติ ซึ่งมีขั้นตอนสอดคล้องกับวิธีการของ Chalermwat and Saripan [1] โดยคัดเลือกตัวดูดซับและค่าความเป็น กรด-ด่างที่เหมาะสมที่สุดในการดูดซับปริมาณน้ำมันและไขมัน และการกรองของแข็งแขวนลอยที่ได้จากการทดลองที่ 2.2.1. เริ่มต้นโดยการปล่อยน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปริมาณแตกต่างกัน ได้แก่ 3, 4 หรือ 5 ลิตร ผ่านอุปกรณ์ทดลองดักน้ำมันและ ไขมันที่มีตัวดูดซับธรรมชาติที่เหมาะสมที่สุด ปริมาณ 20 กรัม และทำเหมือนกับวิธีในหัวข้อที่ 2.2.1. จากนั้นคำนวณหา ประสิทธิภาพการดูดซับน้ำมันและไขมันและประสิทธิภาพการ กรองของแข็งแขวนลอยเช่นเดียวกับวิธีในหัวข้อที่ 2.2.1.1. และ 2.2.1.2.

### 2.3. กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งและการ ตรวจสอบผล

#### 2.3.1. การเตรียมผงถ่านไม้จามจุรี

นำถ่านไม้จามจุรีมาบดหยาบด้วยเครื่องสับบด (Oxygen KW-250, Thailand) และนำไปบดให้ละเอียดด้วย เครื่องปั่น (Kashiwa KW-999, Thailand) จากนั้นร่อนผงถ่าน ไม้ผ่านตะแกรงร่อนแป็งสแตนเลสสตีล (Stainless steel) กลม ความถี่ 20 เมส (Mesh) เป็นจำนวน 2 รอบ เพื่อให้ได้ ผงถ่านที่ละเอียดพอที่จะขึ้นรูปได้ สำหรับใช้ผลิตเชื้อเพลิง อัดแท่งต่อไป

#### 2.3.2. การเตรียมตัวประสานกาวแป็งเปียก

นำแป้งมันสำปะหลัง 150 กรัม ละลายในน้ำ 1.5 ลิตร (1:10) แล้วให้ความร้อนพร้อมทั้งคนจนแป้งมันสำปะหลัง ละลายกลายเป็นกาวแป็งเปียก ที่มีลักษณะสีใสและเหนียว

#### 2.3.3. กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจาก วัสดุดูดซับใช้งานแล้วที่เหมาะสมที่สุด

นำตัวอย่างที่เหมาะสมที่สุดจากการดูดซับน้ำมัน และไขมันมาผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง โดยมีอัตราส่วนของผงถ่าน

ไม้จามจูรี (กรัม) ต่อตัวดูดซับ (กรัม) ดังนี้ 100:0, 50:50, 40:60, 30:70, 20:80, 10:90 และ 0:100 [10] เริ่มต้นโดยนำผงถ่านไม้ผสมกับตัวดูดซับที่ใช้งานแล้ว ตามด้วยตัวประสานกาวแป้งเปียก (1,500 มิลลิลิตร) แล้วคลุกเคล้าส่วนผสมทั้งหมดให้เข้ากัน จากนั้นนำส่วนผสมทั้งหมดไปอัดให้เป็นแท่งด้วยเครื่องอัดแท่งแบบใช้มือกด ซึ่งเป็นท่อพีวีซีทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 นิ้ว กำหนดให้ถ่านมีความยาว 5 เซนติเมตร แล้วอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 วัน เพื่อไล่ความชื้น และเก็บรักษาเชื้อเพลิงอัดแท่งไว้ในถุงซิปล็อคใสสำหรับตรวจสอบคุณสมบัติด้านเชื้อเพลิงต่อไป (Figure 3)

### 2.3.4. การทดสอบคุณสมบัติด้านเชื้อเพลิง

ทดสอบคุณสมบัติด้านเชื้อเพลิงอัดแท่งของผงถ่านไม้ผสมกับตัวดูดซับที่เหมาะสมที่สุดด้วยอัตราส่วน 100:0, 50:50, 40:60, 30:70, 20:80, 10:90 และ 0:100 ตามมาตรฐาน ASTM (American Society for Testing and Materials) [23] ได้แก่ ความชื้น (ASTM D3173) เถ้า (ASTM D3174) สารระเหย (ASTM D3175) คาร์บอนคงตัว (ASTM D3172) และค่าความร้อน (ASTM D420) ซึ่งอธิบายโดย Sittisart and et al. [15] โดยค่าความร้อนได้ส่งวิเคราะห์ที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ด้วยเครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์ (Automatic Calorimeter LECO, USA) สำหรับปริมาณคาร์บอนคงตัวสามารถคำนวณได้จากสูตรนี้

$$\% \text{ คาร์บอนคงตัว} = 100 - (\% \text{ ปริมาณความชื้น} + \% \text{ ปริมาณสารระเหย} + \% \text{ ปริมาณเถ้า})$$

นอกจากนี้ยังวิเคราะห์หาค่าดัชนีแตรกรวน โดยนำเชื้อเพลิงอัดแท่ง 100 กรัม ใส่ถุงพลาสติก ปล่อยจากที่สูง 180 เซนติเมตร แล้วนำไปร่อน และชั่งน้ำหนักเชื้อเพลิงอัดแท่งที่เหลือจากการร่อนผ่านตะแกรงร่อนแป้งสแตนเลสตีกลม ความถี่ 20 เมส คำนวณหาค่าดัชนีแตรกรวนจากสูตร

$$R = W_b/W_a$$

เมื่อ  $W_a$  คือน้ำหนักเชื้อเพลิงอัดแท่งก่อนปล่อยจากที่สูง

$W_b$  คือน้ำหนักเชื้อเพลิงอัดแท่งที่เหลือจากการร่อนหลังปล่อยจากที่สูง [10]

### 2.4. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ผลการศึกษาจะแสดงเป็นค่าเฉลี่ยบวกลบค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดสอบ 3 ซ้ำ (Mean  $\pm$  SD,  $n = 3$ ) และเป็นตัวแทนจากการทดลอง 3 ครั้ง ด้วยสถิติ One way ANOVA เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างกลุ่มการทดลอง ( $p < 0.05$ ) โดยการวิเคราะห์ด้วย *post hoc* Tukey's ด้วยซอฟต์แวร์ SPSS เวอร์ชัน 26



Figure 3 Briquette fuel production process

### 3. ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

#### 3.1. ผลของค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำเสียสังเคราะห์ต่อประสิทธิภาพการดูดซับน้ำมันและไขมัน และการกรองของแข็งแขวนลอย

การทดสอบประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำมันและไขมัน และการกรองของแข็งแขวนลอยจากน้ำเสียสังเคราะห์ของตัวดูดซับจากพืชทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ ไยตาล ใบหอมแดง และไผ่ เมื่อปรับค่าความเป็นกรด-ด่างแตกต่างกัน (pH 4, pH 5, pH 6, pH 7 และ pH 8) ผลการศึกษาแสดงใน Table 1 เมื่อพิจารณาที่ pH 4 ถึง pH 8 ในตัวดูดซับชนิดเดียวกันต่อการดูดซับน้ำมันและไขมัน พบว่าเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้น ทั้งไยตาล ใบหอมแดง และไผ่ มีแนวโน้มในการดูดซับน้ำมันและไขมันได้ดีขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างค่าความเป็นกรด-ด่างเดียวกันของตัวดูดซับทั้ง 3 ชนิด พบว่าไยตาลมีประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำมันและไขมันได้ดีที่สุด และมากกว่าใบหอมแดงและไผ่ตามลำดับ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่  $p < 0.05$  ของทุกค่าความเป็นกรด-ด่าง ดังนั้นเมื่อพิจารณาเฉพาะไยตาล พบทุกค่าความเป็นกรด-ด่าง มีประสิทธิภาพการดูดซับน้ำมันและไขมันสูงกว่าร้อยละ 50 โดย  $pH 8 > pH 7 > pH 6 > pH 5 > pH 4$  อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยค่า pH 8 มีประสิทธิภาพการดูดซับน้ำมันและไขมันสูงถึงร้อยละ 99.67 ในขณะที่ใบหอมแดงและไผ่มีประสิทธิภาพการดูดซับน้ำมันและไขมันสูงสุดที่ pH 7 เป็นร้อยละ 82.83 และ 21.45 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาที่การกรองของแข็งแขวนลอยพบว่า ไยตาลและใบหอมแดง มีแนวโน้มในการกรองของแข็งแขวนลอยได้ดีขึ้นเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้น โดยไยตาลมีประสิทธิภาพในการกรองของแข็งแขวนลอยมากที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่  $p < 0.05$  เมื่อเปรียบเทียบในแต่ละค่า ความเป็นกรด-ด่าง ดังนั้นเมื่อพิจารณาเฉพาะไยตาล พบทุกค่า ความเป็นกรด-ด่าง มีประสิทธิภาพการกรองของแข็งแขวนลอยมากกว่าร้อยละ 50 โดย pH 7 และ pH 8  $> pH 6 > pH 5$  และ pH 4 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งค่า pH 7 และ pH 8 มีประสิทธิภาพการกรองสูงถึงร้อยละ 99.16 และ 99.44 ตามลำดับ ในขณะที่ใบหอมแดงมีประสิทธิภาพการกรองสูงสุดที่ pH 8 เป็นร้อยละ 51.13 และไผ่มีประสิทธิภาพการกรองสูงสุดประมาณร้อยละ 19 เท่านั้น

การที่ไยตาลมีคุณสมบัติในการดูดซับได้ดี อาจเนื่องจากเป็นเส้นใยธรรมชาติที่มีปริมาณเยื่อใยหรือส่วนของคาร์โบไฮเดรตที่ย่อยได้ยาก ซึ่งเป็นส่วนของผนังเซลล์พืช

(เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน) ในปริมาณที่สูง ซึ่งมีหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group, -OH) เป็นตัวบ่งชี้ถึงสมบัติของการดึงดูดน้ำ และมีความสามารถทนต่อการย่อยด้วยกรดและด่างได้สูง [24] ซึ่งเส้นใยจากพืชแต่ละชนิดมีองค์ประกอบของเซลลูโลสในปริมาณที่แตกต่างกัน เส้นใยของพืชที่มีปริมาณเซลลูโลสมาก ก็จะมีคุณสมบัติในการดูดซับได้ดี ดังนั้นการที่เส้นใยตาลมีคุณสมบัติในการดูดซับได้ดี อาจเนื่องมาจากมีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบสูงถึงร้อยละ 62.90 [17] Chalemwat and Saripan [1] ได้ศึกษาผลของค่าความเป็นกรด-ด่างต่อตัวดูดซับจากธรรมชาติ ได้แก่ ดอกธูปฤๅษี ขานอ้อย และผักตบชวา ต่อการดูดซับน้ำมันและไขมันและการกรองของแข็งแขวนลอย พบว่าดอกธูปฤๅษีมีความสามารถในการดูดซับน้ำมันและไขมัน และการกรองของแข็งแขวนลอยได้ดีที่สุด อีกทั้งพบว่าทั้งดอกธูปฤๅษี และผักตบชวามีผลในการดูดซับน้ำมันและไขมันได้ดีเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้น โดย pH 7 มีประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำมันและไขมันได้ดีที่สุดอยู่ที่ร้อยละ 99.54 และ 95.56 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของพวกเราที่พบว่าเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำ ประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำมันและไขมันก็ต่ำด้วย เพราะเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำ ประสิทธิภาพการดูดซับจะต่ำ เนื่องจากน้ำเสียสังเคราะห์จะเต็มไปด้วยไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) เข้าไปล้อมรอบตัวดูดซับ ส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับน้ำมัน ซึ่งเป็นสารไม่มีขั้ว อันเป็นสมบัติที่ตรงกันข้ามกับน้ำที่เป็นสารมีขั้วมีค่าลดลง และเมื่อเพิ่มค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำเสียสังเคราะห์จะทำให้  $H^+$  มีค่าลดลง ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพการดูดซับยังขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ในการดูดซับ และประเภทของน้ำมันอีกด้วย [9], [25] โดยตัวดูดซับที่ต่างกันจะบ่งบอกถึงคุณสมบัติต่าง ๆ ซึ่งมีผลต่อความสามารถในการดูดซับ ได้แก่ ความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobicity) หมู่ฟังก์ชัน (Functional group) ลักษณะของผิวดูดซับ (Surface morphology) และความสามารถในการลอยตัว (Buoyancy) เป็นต้น [8]

ดังนั้นไยตาลที่ pH 8 ซึ่งมีคุณสมบัติในการดูดซับน้ำมันและไขมัน รวมถึงปริมาณสารแขวนลอยได้ดีที่สุด จึงเหมาะที่จะนำมาประยุกต์ใช้เป็นตัวดูดซับไขมันและน้ำมันจากน้ำทิ้งในครัวเรือนได้ และผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ และลดปัญหาขยะที่ยากต่อการกำจัดในอนาคต ในขั้นตอนต่อไปตัวดูดซับจากไยตาลที่ pH 8 ที่ผ่านการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์แล้ว จึงถูกคัดเลือกนำไปศึกษาในเรื่องของปริมาณน้ำเสียที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ และความเป็นไปได้ในการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งต่อไป

**Table 1** Effect of synthetic wastewater pH on oil and grease adsorption efficiency and suspended solid filtration of adsorbents prepared from palmyra palm fibers, shallot leaves and bamboo fibers

pH	Efficiency of oil and grease adsorption (%)			Efficiency of suspended solid filtration (%)		
	Palmyra palm fibers	Shallot leaves	Bamboo fibers	Palmyra palm fibers	Shallot leaves	Bamboo fibers
4	91.79±0.09 <sup>a,A</sup>	33.45±2.64 <sup>a,B</sup>	10.59±0.19 <sup>a,C</sup>	66.50±0.68 <sup>a,A</sup>	14.30±2.64 <sup>a,C</sup>	19.50±0.15 <sup>c,B</sup>
5	92.84±0.11 <sup>b,A</sup>	44.12±0.75 <sup>b,B</sup>	16.20±0.22 <sup>b,C</sup>	68.47±0.22 <sup>b,A</sup>	11.83±0.75 <sup>a,C</sup>	14.48±0.96 <sup>b,B</sup>
6	94.62±0.05 <sup>c,A</sup>	49.69±0.09 <sup>c,B</sup>	15.16±1.25 <sup>b,C</sup>	72.09±0.65 <sup>c,A</sup>	11.56±0.09 <sup>a,C</sup>	19.50±0.15 <sup>c,B</sup>
7	99.24±0.10 <sup>d,A</sup>	82.83±0.09 <sup>e,B</sup>	21.45±0.12 <sup>c,C</sup>	99.16±0.87 <sup>d,A</sup>	48.03±0.09 <sup>b,B</sup>	18.79±0.35 <sup>c,C</sup>
8	99.67±0.03 <sup>e,A</sup>	75.35±0.31 <sup>d,B</sup>	16.55±0.15 <sup>b,C</sup>	99.44±0.73 <sup>d,A</sup>	51.13±0.31 <sup>b,B</sup>	11.55±0.80 <sup>a,C</sup>

Values in a column with different lowercase letters are significantly different at  $p < 0.05$ .

Values in a row (for each efficiency) with different uppercase letters are significantly different at  $p < 0.05$ .

### 3.2. ผลของปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ต่อประสิทธิภาพการดูดซับน้ำมันและไขมัน และการกรองของแข็งแขวนลอยด้วยตัวดูดซับใยตาล

ในการศึกษาครั้งนี้ พบว่าตัวดูดซับธรรมชาติชนิดใยตาลมีประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดซับน้ำมันและไขมัน รวมถึงการกรองของแข็งแขวนลอย เมื่อใช้น้ำเสียสังเคราะห์ปริมาณ 2 ลิตรที่มีค่า pH 8 แต่จากการวิจัยที่ผ่านมายังพบว่าปริมาณน้ำเสียมีผลต่อการดูดซับของวัสดุดูดซับจากธรรมชาติ ยิ่งน้ำเสียที่มีความสกปรกมาก หรือมีปริมาณน้ำมันและไขมันมาก ประสิทธิภาพของการดูดซับก็ยิ่งลดลง [1] ด้วยเหตุนี้ คณะผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาใยตาลสำหรับเป็นวัสดุดูดซับต่อปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ที่เพิ่มขึ้น ที่ค่า pH 8 โดยเพิ่มปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ เป็น 3, 4 หรือ 5 ลิตร ต่อตัวดูดซับจากใยตาล ในปริมาณ 20 กรัม ผลการศึกษาที่แสดงใน Table 2 พบว่า ปริมาณน้ำเสียที่มากขึ้นมีผลต่อการดูดซับน้ำมันและไขมัน รวมถึงปริมาณสารแขวนลอยด้วย โดยสังเกตได้จากค่าที่ลดลง เมื่อให้ปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์มากขึ้น โดยปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ 3 ลิตร มีประสิทธิภาพการดูดซับน้ำมันและไขมัน สูงถึงร้อยละ 95.77 แต่ก็ยังน้อยกว่าปริมาณน้ำเสียที่ 2 ลิตร (99.67%) และเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำเสียเป็น 4 และ 5 ลิตร ประสิทธิภาพการดูดซับน้ำมันและไขมันก็ลดลงเป็นร้อยละ 87.10 และ 60.81 ตามลำดับ โดยน้ำเสียที่ 5 ลิตร ยังมีประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำมันและไขมันได้สูงกว่าร้อยละ 50 ดังนั้นหากเพิ่มปริมาณน้ำเสียให้มากกว่านี้ก็จะทำให้เห็นถึงค่าประสิทธิภาพที่ลดลงต่ำกว่าร้อยละ 50 ได้

เช่นเดียวกันเมื่อพิจารณาที่ประสิทธิภาพในการกรองของแข็งแขวนลอย ปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ 3 ลิตร ก็ยังคงมี ประสิทธิภาพในการกรองของแข็งแขวนลอยสูงถึงร้อยละ 91.43 แต่ก็ยังน้อยกว่าปริมาณน้ำเสียที่ 2 ลิตร (99.44%) เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำเสียเป็น 4 และ 5 ลิตร ประสิทธิภาพการกรองก็ลดลงเป็นร้อยละ 79.69 และ 39.48 ตามลำดับ

ดังนั้นโดยภาพรวมจากผลการศึกษาครั้งนี้ พบว่า ใยตาลปริมาณ 20 กรัม สามารถดูดซับน้ำมันและไขมัน หรือ กรองของแข็งแขวนลอยได้ดีที่สุดในน้ำเสียปริมาณ 2 ลิตร หากมี ปริมาณน้ำเสียที่มากกว่า 2 ลิตร ประสิทธิภาพในการบำบัดก็ จะลดลง อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพการบำบัดเหล่านี้ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นด้วย เช่น ปริมาณของวัสดุดูดซับ ซึ่งหากเพิ่ม ปริมาณของตัวดูดซับ พื้นที่ผิวในการสัมผัสก็จะมากขึ้น และ ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดที่ดีขึ้น [7], [8] แต่ก็ไม่ควรใช้ใน ปริมาณที่มากเกินไป ต้องคำนึงถึงขนาดของอุปกรณ์รองรับ ตัวดูดซับด้วย รวมถึงเรื่องของระยะเวลาในการใช้งานหรือ ระยะเวลาในการดูดซับ เพราะโดยธรรมชาติของวัสดุดูดซับในช่วงแรกการดูดซับจะเกิดเร็วมาก เนื่องจากความเข้มข้นของ น้ำเสียสูง และที่ว่างบนผิวของตัวดูดซับยังคงมีมากทำให้ สามารถดูดซับได้มาก แต่หลังจากนั้นการดูดซับก็จะลดลง จน เข้าสู่ภาวะสมดุล เพราะที่ว่างเหล่านั้นดูดซับไว้เต็มที่แล้ว จึงไม่ สามารถดูดซับได้อีก จึงจำเป็นต้องเปลี่ยนวัสดุดูดซับใหม่ [26] ดังนั้นปัจจัยเหล่านี้จึงเป็นสิ่งจำเป็นที่ควรศึกษาเพิ่มเติม ในอนาคตต่อไป

**Table 2** Effect of synthetic wastewater quantity on oil and grease adsorption efficiency and suspended solid filtration of the adsorbent prepared from palmyra palm fibers

Wastewater quantity (L)	Palmyra palm fibers (g)	Efficiency of oil and grease adsorption (%)	Efficiency of suspended solid filtration (%)
3	20	95.77±0.05 <sup>c</sup>	91.43±0.94 <sup>c</sup>
4	20	87.10±0.05 <sup>b</sup>	79.69±0.97 <sup>b</sup>
5	20	60.81±1.49 <sup>a</sup>	39.48±3.64 <sup>a</sup>

Values in a column with different lowercase letters are significantly different at  $p < 0.05$ .

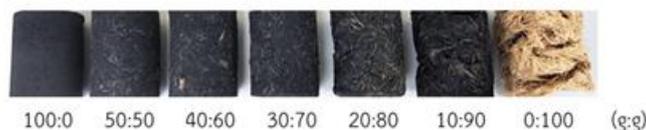
### 3.3. ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของ เชื้อเพลิงอัดแท่งจากตัวดูดซับไยตาล

จากวัสดุดูดซับธรรมชาติทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ เส้นไยตาล ใบหอมแดง และไยไผ่ พบว่าเส้นไยตาลมีคุณสมบัติในการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านการปรับค่าความเป็นกรด-ด่างเป็น 8 ในปริมาณน้ำเสีย 2 ลิตร ได้ดีที่สุดในครั้งนั้น เส้นไยตาลที่ผ่านการดูดซับแล้วจึงถูกนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง ด้วยการผสมกับผงถ่านไม้จามจุรี ซึ่งมีอัตราส่วนของผงถ่านไม้จามจุรี (กรัม) ต่อ ตัวดูดซับไยตาล (กรัม) เป็น 100:0, 50:50, 40:60, 30:70, 20:80, 10:90 และ 0:100 โดยใช้กาวแป้งเปียกเป็นตัวประสาน

ผลการอัดเชื้อเพลิงอัดแท่งพบว่าทุกอัตราส่วนสามารถอัดแท่งได้ อย่างไรก็ตามพบว่าอัตราส่วนที่มีตัวดูดซับค่อนข้างสูง (20:80, 10:90 และ 0:100) ถึงแม้จะอัดได้ แต่จะขึ้นรูปได้ไม่ค่อยดี เชื้อเพลิงไม่เรียบเนียน และแตก เมื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วนที่มีปริมาณผงถ่านมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อัตราส่วน 0:100 ซึ่งไม่มีผงถ่านไม้จามจุรีเป็นส่วนประกอบพบว่าแท่งเชื้อเพลิงมีผิวที่หยาบและรอยแตกมากที่สุด (Figure 4) ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Saripan [10] ที่ผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากผงถ่านไม้ผสมกับตัวดูดซับดอกธูปฤๅษี ที่ผ่านการดูดซับแล้ว พบว่าที่อัตราส่วนที่มีตัวดูดซับค่อนข้าง

สูงตั้งแต่ร้อยละ 80 เป็นต้นไป (20:80, 10:90 และ 0:100) ถึงแม้จะขึ้นรูปได้ แต่มีลักษณะอ่อนนุ่ม และไม่คงรูป งานวิจัยนี้ไม่ได้ศึกษาอัตราส่วนที่มีผงถ่านไม้จามจุรีในสัดส่วนที่สูง คือ เริ่มศึกษาตั้งแต่ผงถ่านไม้จามจุรีที่ร้อยละ 50 ลงไป เนื่องจากมีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการลดปริมาณการใช้ถ่านไม้ โดยใช้วัสดุที่ผ่านการดูดซับแล้วทดแทน แต่ยังสามารถขึ้นรูปและคงรูปได้ และมีคุณสมบัติเทียบเคียงการใช้ถ่านไม้เพียงอย่างเดียว ดังนั้นอัตราส่วนที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้จึงเน้นใช้ตัวดูดซับในปริมาณสูง เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตนั่นเอง

Table 3 ได้แสดงให้เห็นถึงลักษณะทางกายภาพของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากผงถ่านและตัวดูดซับไยตาล ที่มีน้ำหนักรวม 100 กรัม ผสมกับตัวประสานกาวแป้งเปียก 1,500 มิลลิลิตร ซึ่งสามารถขึ้นรูปได้ประมาณ 14-20 ก้อน เชื้อเพลิงอัดแท่งมีความยาวประมาณ 5 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3.8 เซนติเมตร และมีน้ำหนักก้อนอบอยู่ระหว่าง 66.71-83.57 กรัม น้ำหนักเฉลี่ยหลังอบอยู่ระหว่าง 28.59-36.03 กรัม การที่อัตราส่วนที่ 0:100 มีน้ำหนักเฉลี่ยก่อนอบและหลังอบต่อก้อนน้อยที่สุด อาจเนื่องจากมีเพียงตัวดูดซับเส้นไยตาล จึงทำให้มีน้ำหนักน้อยกว่าอัตราส่วนอื่น ๆ ที่มีผงถ่านเป็นองค์ประกอบ



**Figure 4** Briquette fuels prepared from different ratios of charcoal and the palmyra palm fiber derived adsorbent

**Table 3** Physical characteristics of briquette fuels prepared from different ratios of charcoal and the palmyra palm fiber derived adsorbent

Charcoal : Adsorbent ratio	Charcoal (g)	Adsorbent (g)	Starch paste (mL)	Number of briquettes (Sticks)	Height (cm)	Diameter (cm)	Average weight per briquette before baking (g)	Average weight per briquette after baking (g)
100:0	100	0	1,500	20	5	3.8	83.57	33.22
50:50	50	50	1,500	18	5	3.8	72.67	32.87
40:60	40	60	1,500	18	5	3.8	74.59	35.88
30:70	30	70	1,500	14	5	3.8	66.71	36.03
20:80	20	80	1,500	16	5	3.8	71.46	33.57
10:90	10	90	1,500	14	5	3.8	73.43	30.83
0:100	0	100	1,500	17	5	3.8	67.42	28.59

### 3.4. ผลการทดสอบคุณสมบัติด้านเชื้อเพลิงอัดแท่งจากตัวดูดซับไยตาล

เชื้อเพลิงอัดแท่งจากผงถ่านไม้จามจุรีผสมกับตัวดูดซับไยตาล ที่อัตราส่วน 100:0, 50:50, 40:60, 30:70, 20:80, 10:90 และ 0:100 ถูกนำมาวิเคราะห์คุณสมบัติด้านเชื้อเพลิงตามมาตรฐาน ASTM ได้แก่ ความชื้น เถ้า ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว และค่าความร้อน รวมถึงค่าดัชนีแตกร่วน ได้ผลดังแสดงใน Table 4 พบว่าทุกอัตราส่วนมีค่าความชื้นไม่เกินร้อยละ 8 ซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ถ่านอัดแท่ง มผช. 238/2547 [27] โดยอัตราส่วน 0:100 มีปริมาณความชื้นสูงที่สุด (1.71%) และแตกต่างจากอัตราส่วนอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งทุกอัตราส่วนมีค่าความชื้นไม่ถึง 1 อาจเนื่องจากว่าอัตราส่วน 0:100 นี้มีเพียงตัวดูดซับไยตาลเป็นองค์ประกอบร่วมกับกาบแปงเปียกที่ใช้เป็นตัวประสานเท่านั้น ส่วนอัตราส่วนอื่น ๆ มีผงถ่านเป็นองค์ประกอบซึ่งกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งนี้ผงถ่านไม้ผ่านการเผามาแล้ว จึงอาจทำให้น้ำเป็นองค์ประกอบในวัตถุดิบน้อยกว่าตัวดูดซับไยตาลที่มีน้ำมันและไขมัน ซึ่งผ่านเพียงกระบวนการทำให้แห้งเท่านั้น เชื้อเพลิงอัดแท่งยังมีค่าความชื้นต่ำ จะมีประสิทธิภาพการใช้งานสูง เนื่องจากสูญเสียความร้อนไปกับการระเหยของน้ำในระหว่างการใช้น้อย [28] ในด้านความร้อนพบว่าเชื้อเพลิงอัดแท่งจากถ่านไม้จามจุรีอย่างเดียว (100:0) มีค่าพลังงานความร้อนสูงที่สุดถึง 7,360 แคลอรีต่อกรัม แต่เมื่อผสมกับตัวดูดซับไยตาลพบว่ามีความร้อนลดลงอย่างไรก็ตามทุกอัตราส่วนยังมีค่าความร้อนผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่านอัดแท่ง มผช. 238/2547 ที่กำหนดให้ค่าพลังงานความร้อนไม่

ต่ำกว่า 5,000 แคลอรีต่อกรัม ซึ่งเชื้อเพลิงอัดแท่งที่มีค่าความร้อนยิ่งสูง ยิ่งจัดว่าเป็นเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพดี [27] เมื่อพิจารณาที่ค่าความเป็นเถ้าพบว่ามีความโน้มถ่วงลดลงเมื่อสัดส่วนของปริมาณตัวดูดซับเพิ่มขึ้น เถ้าคือส่วนที่เป็นผงละเอียดของเชื้อเพลิงที่คงเหลือจากไฟเผาไหม้แล้ว ความโน้มถ่วงของปริมาณเถ้าจะเพิ่มขึ้นเมื่อเชื้อเพลิงอัดแท่งมีปริมาณผงถ่านมากขึ้น [29] ดังนั้นจึงสอดคล้องกับผลการศึกษาในครั้งนี้ที่มีความโน้มถ่วงเถ้าลดลง เมื่อผงถ่านมีจำนวนลดลง สำหรับค่าปริมาณสารระเหยพบว่ามีค่าแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อสัดส่วนของปริมาณตัวดูดซับเพิ่มขึ้น อัตราส่วน 0:100 มีค่าปริมาณสารระเหยสูงที่สุด (73.73%) และแตกต่างจากอัตราส่วนอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ปริมาณสารระเหยเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพการใช้งานของเชื้อเพลิง โดยเชื้อเพลิงที่มีปริมาณสารระเหยมากจะติดไฟได้ไม่นาน มอดเร็ว ทำให้สิ้นเปลืองเชื้อเพลิงมาก [28] ปริมาณคาร์บอนคงตัวพบว่าอัตราส่วนที่ 0:100 มีปริมาณคาร์บอนต่ำที่สุด (7.85%) และแตกต่างจากอัตราส่วนอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่อัตราส่วนอื่น ๆ มีค่าใกล้เคียงกัน และมีค่าค่อนข้างสูง (20.96%-27.20%) ซึ่งเชื้อเพลิงที่มีปริมาณคาร์บอนสูงจะติดไฟได้นานกว่าเชื้อเพลิงที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำ จึงทำให้สิ้นเปลืองเชื้อเพลิงน้อยกว่า [28] ดังนั้นอัตราส่วนที่ 0:100 ที่มีเพียงตัวดูดซับไยตาล จึงอาจไม่เหมาะสมต่อการนำมาเป็นเชื้อเพลิงหุงต้ม เนื่องจากมีปริมาณคาร์บอนที่ต่ำมากจึงติดไฟได้นาน และทำให้สิ้นเปลืองเชื้อเพลิงมาก สำหรับค่าดัชนีแตกร่วนนั้นพบว่าทุกอัตราส่วนมีค่าดัชนีแตกร่วนอยู่ระหว่าง 0.96-1 ซึ่งบ่งบอกถึงลักษณะที่อัดแน่น และแข็งแรงของแท่งเชื้อเพลิงได้อย่างดี เพราะค่าดัชนีแตกร่วนของแท่งเชื้อเพลิงที่ดีนั้นควรมีค่าอยู่ระหว่าง 0.5-1 [30]

**Table 4** Composition and characteristics of briquette fuels prepared from different ratios of charcoal and the palmyra palm fiber derived adsorbent

Charcoal : Adsorbent ratio	Moisture (%)	Ash (%)	Volatile matters (%)	Fixed carbon (%)	Shatter index	Calorific values (Ca/g)
100:0	0.84±0.01 <sup>b</sup>	38.66±5.01 <sup>d</sup>	34.50±3.45 <sup>a</sup>	26.00±5.21 <sup>b</sup>	0.96±0.02 <sup>a</sup>	7,360
50:50	0.67±0.06 <sup>a</sup>	37.61±2.86 <sup>cd</sup>	39.30±3.93 <sup>ab</sup>	22.42±1.97 <sup>b</sup>	0.97±0.02 <sup>a</sup>	7,054
40:60	0.74±0.02 <sup>ab</sup>	35.01±4.32 <sup>bcd</sup>	43.28±1.25 <sup>ab</sup>	20.96±3.73 <sup>b</sup>	0.99±0.01 <sup>a</sup>	7,299
30:70	0.80±0.06 <sup>b</sup>	27.35±4.05 <sup>abc</sup>	45.37±1.31 <sup>bc</sup>	26.48±3.14 <sup>b</sup>	0.99±0.02 <sup>a</sup>	6,954
20:80	0.75±0.04 <sup>ab</sup>	26.06±5.50 <sup>ab</sup>	46.00±2.21 <sup>bc</sup>	27.20±6.73 <sup>b</sup>	0.98±0.03 <sup>a</sup>	6,974
10:90	0.83±0.03 <sup>b</sup>	21.67±1.61 <sup>a</sup>	53.98±5.02 <sup>c</sup>	23.52±5.58 <sup>b</sup>	1.00±0.01 <sup>a</sup>	6,765
0:100	1.71±0.04 <sup>c</sup>	16.71±2.85 <sup>a</sup>	73.73±4.88 <sup>d</sup>	7.85±2.64 <sup>a</sup>	1.00±0.00 <sup>a</sup>	6,576

Values in a column with different lowercase letters are significantly different at  $p < 0.05$ .

#### 4. บทสรุป

จากการกรองน้ำเสียสังเคราะห์ 2 ลิตร ที่ความเป็นกรด-ด่างแตกต่างกัน (pH 4, pH 5, pH 6, pH 7 และ pH 8) ผ่านตัวดูดซับจากพืช (ไยตาล ใบหอมแดง และไยฝ) ปริมาณ 20 กรัม ที่ใส่ในอุปกรณ์รองรับตัวดูดซับที่ต่อกับซิงค์ (Sink) ล้างทำความสะอาด โดยสรุปพบว่าไยตาลมีประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำมันและไขมันจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่ pH 8 ได้ดีที่สุด โดยมีค่าประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำมันและไขมันสูงถึงร้อยละ 99.67 อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพในการกรองของแข็งแขวนลอยสูงที่สุดที่ pH 8 อีกด้วย (99.44%) และเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์กับตัวดูดซับไยตาล 20 กรัม พบว่ามีแนวโน้มในการดูดซับน้ำมันและไขมันและการกรองของแข็งแขวนลอยลดลง ด้วยเหตุนี้ไยตาลที่ดูดซับน้ำมันและไขมันจากน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาณ 2 ลิตร ที่ pH 8 จึงถูกคัดเลือกเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง โดยใช้ผงถ่านไม้จามจุรี (กรัม) ผสมกับตัวดูดซับไยตาลที่ใช้แล้ว พบว่าทุกอัตราส่วนสามารถขึ้นรูปได้ มีค่าความชื้นและค่าความร้อนผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่านอัดแท่ง มผช. 238/2547 โดยอัตราส่วน 50:50, 40:60 และ 30:70 น่าจะเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการประยุกต์ใช้เป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง เนื่องจากสามารถขึ้นรูปได้ดี ผิวเรียบ ไม่เกิดรอยแตก อีกทั้งยังมีคุณสมบัติด้านเชื้อเพลิงดีอีกด้วย โดยมีค่าความร้อนที่สูงกว่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่านอัดแท่ง (6,954-7,299 แคลอรีต่อกรัม) และมีค่าความชื้น เถ้า ปริมาณสารระเหย ค่าคาร์บอนคงตัว และดัชนีแตกร่วนที่ใกล้เคียงกับเชื้อเพลิงอัดแท่งจากผงถ่านไม้

จามจุรี (100:0) ดังนั้นเชื้อเพลิงอัดแท่งจากผงถ่านไม้ผสมกับตัวดูดซับ อาจนำไปใช้เพื่อทดแทนการใช้ถ่านไม้หรือฟืนมาจุดเป็นไฟ เพื่อให้เกิดความร้อนสำหรับการนำมาหุงต้มหรือประโยชน์อื่น ๆ ทางด้านความร้อนได้

อย่างไรก็ตามควรมีการศึกษาเพิ่มเติม เช่น การทดสอบประสิทธิภาพของตัวดูดซับไยตาลในน้ำเสียจากครัวเรือนจริง การศึกษาค่าประสิทธิภาพการใช้งานของเชื้อเพลิงอัดแท่ง การทดสอบการใช้งานจริงของแท่งเชื้อเพลิงในครัวเรือน ตลอดจนการศึกษาต้นทุนในการผลิต เป็นต้น

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ขอขอบคุณสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏศรีสะเกษ ที่ให้การสนับสนุนทั้งเงินทุน สถานที่ และอุปกรณ์ในการทำวิจัย

#### 6. References

- [1] Chalermwat, M. and Saripan, K. 2020. Effects of pH and wastewater loading on fat oil and grease adsorption efficiency by cattail flower, sugar cane bagasse and water hyacinth. *Thai Science and Technology Journal*. 28(1): 1965-1976. (in Thai)
- [2] Siriananphaiboon, S. 2020. Domestic wastewater. *Vocational Education Central Region Journal*. 4(1): 1-10. (in Thai)

- [3] Donchuprai, S. and et al. 2023. Comparison of oil adsorption capacity and efficiency corn husk and bamboo sheath. **Science and Technology Nakhon Sawan Rajabhat University Journal**. 15(21): 137-148. (in Thai)
- [4] Sriwongchai, S. 2017. **Biodiesel Production from Agricultural Wastes by Using Biotechnological Process**. SaKaeo: Faculty of Science and Social Science, Burapha University (Sakaeo Campus). (in Thai)
- [4] Abdul Hamid, N.S. and et al. 2016. Removal of oil and grease from wastewater using natural adsorbents. **Jurnal Teknologi (Sciences and Engineering)**. 78: 97-102.
- [5] Marzuki, N.A. and Daud, N.H. 2018. Effect of durian husk and palm fiber on performance of “Dukoffilt” to treat domestic wastewater. **Modern Environmental Science and Engineering**. 4(2): 169-196.
- [6] Hendrasarie, N. and Maria, S.H. 2021. Combining grease trap and *Moringa Oleifera* as adsorbent to treat wastewater restaurant. **South African Journal of Chemical Engineering**. 37: 196-205.
- [7] Daud, Z. and et al. 2017. Feasibility of banana (*Musa sapientum*) trunk biofibres for treating kitchen wastewater. **Nature Environment and Pollution Technology**. 16(4): 1205-1210.
- [8] Wahj, R. and et al. 2013. Oil removal from aqueous state by natural fibrous sorbent: An overview. **Separation and Purification Technology**. 113: 51-63.
- [9] Wisetrat, O. and et al. 2012. Adsorption of suspended oil using bagasse and modified bagasse. **Journal of Science and Technology Mahasarakham University**. 31(4): 354-362. (in Thai)
- [10] Saripan, K. 2019. The adsorption of oil by agricultural waste and the briquette production from adsorbent. **Journal of Renewable Energy for Community**. 2(1): 10-16. (in Thai)
- [11] Rattanapanya, P. 2022. **Feasibility Study to Invest in Renewable Energy from Biomass Sustainable Forest Products**. M.Eng. Thesis, Silpakorn University. (in Thai)
- [12] Saema, C. and Thongboonrith, K. 2016. The study on efficacy charcoal from corncob and charcoal from cassava rhizome. In: **Proceedings of the 3<sup>rd</sup> Kamphaeng Phet Rajabhat University Annual Conference**, 22 December 2016. Kamphaeng Phet, Thailand. (in Thai)
- [13] 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): 107-121. (in Thai)
- [14] Anantanukulwong, R., Chemae, R. and Sareanu, N. 2019. Production of charcoal from agricultural residues. **YRU Journal of Science and Technology**. 4(1): 47-53. (in Thai)
- [15] Sittisart, P. and et al. 2022. Energy potential of charcoal briquette from flamboyant and black rosewood pods. **Journal of Science & Science Education**. 5(2): 202-214. (in Thai)
- [16] The Botanical Garden Organization. 2013. **Medicinal Plants Database**. <http://www.qsbg.org/database/plantdb/mdp/medicinal-specimen.asp?id=492>. Accessed 20 February 2023. (in Thai)
- [17] Yantaboot, K. and Kaewarsa, P. 2020. Physical properties of natural rubber foam reinforced with Borassus fruit fiber: Effects of alkali treatment and fiber content. **Journal of Science and Technology, Ubon Ratchathani University**. 22(3): 75-81. (in Thai)
- [18] Thirach, P. 2013. **Effect of Cu<sup>2+</sup> and Humic Acid on Cell Division of *Allium ascalonicum* Linn. Root Tips**. M.Sc. Thesis, Silpakorn University. (in Thai)
- [19] Kaewmorakot, T. 2014. **Production of Compost from Shallot Waste, Bone Meal and Goat Dung**. M.Sc. Thesis, Prince of Songkla University. (in Thai)

- [20] Kavitha, S. and et al. 2022. An insight - A statistical investigation of consolidated bioprocessing of *Allium ascalonicum* leaves to ethanol using *Hangateiclostridium thermocellum* KSMK1203 and synthetic consortium. **Renewable Energy**. 187: 403-416.
- [21] Bunnag, S. 2020. **A Study on Physical and Chemical Properties of Bamboo through Torrefaction Process**. M.Sc. Thesis, Thammasat University. (*in Thai*)
- [22] Kaewkhunjit, S. 2018. **Application of Clean Technology for Wastewater Treatment in Housing Estate**. M.Sc. Thesis, National Institute of Development Administration. (*in Thai*)
- [23] American Society for Testing and Materials (ASTM). 2019. **Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke**. <https://www.astm.org/d5865-13.html>. Accessed 15 December 2021.
- [24] Chumsang, C. and Upan, P. 2013. **Creation of Added Value of Waste Material from Palmyra Palm**. Technology Transfer Project Report, Uttaradit Rajabhat University. (*in Thai*)
- [25] Lim, T.T. and Huang, X. 2006. In situ oil/water separation using hydrophobic-oleophilic fibrous wall: A lab-scale feasibility study for groundwater cleanup. **Journal of Hazardous Materials**. 137(2): 830-826.
- [26] Srimoon, R. 2016. Dyes treatment in wastewater using adsorption processes. **KKU Science Journal**. 44(3): 419-434. (*in Thai*)
- [27] Thai Industrial Standards Institute. 2004. **Community Product Standards of Charcoal Briquettes 238/2004**. <http://tcps.tisi.go.th/public/StandardList.aspx>. Accessed 15 December 2021. (*in Thai*)
- [28] Phutteesakul, R. 2010. **The Production of Charcoal Briquette by Coconut Shell and Cassava Rhizome**. M.Sc. Thesis, Srinakharinwirot University. (*in Thai*)
- [29] Jutajan, W. 2019. A study of charcoal burning process and properties of briquetted charcoal from vetiver grass. **Journal of Industrial Technology Ubon Ratchathani Rajabhat University**. 9(2): 135-146. (*in Thai*)
- [30] Tanpaiboonkul, N. and Budnumpetch, T. 2016. Molding and binding method on properties of fuel from water hyacinth. **Veridian E Journal Science and Technology, Silpakorn University**. 2(1): 10-16. (*in Thai*)