ชนิดของตัวประสานที่เหมาะสมในการผลิตถ่านอัดแท่งจากเปลือกยูคาลิปตัส

The optimum binder for the production of charcoal briquettes from eucalyptus bark

อนุสรา งามเลิศ, เขมนิจจารีย์ สาริพันธ์* และ ประนิตดา เพ็งงิ้ว

Anusara Ngamlert, Khamanitjaree Saripan* and Pranitda Pengngiw

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

Environmental Science Program, Faculty of Science and Technology, Thepsatri Rajabhat University

*Email: fangkum.a@gmail.com

Received: September 19, 2019; Revised: October 18, 2019; Accepted: November 05, 2019

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาชนิดของตัวประสานที่เหมาะสมในการผลิตถ่านอัดแท่งจากเปลือกยูคาลิปตัส โดยใช้กากน้ำตาล ข้าวเหนียวกวน ดินเหนียว ผักตบชวาและแป้งเปียกเป็นตัวประสานในอัตราส่วนต่างๆ การขึ้นรูปถ่านอัดแท่งใช้วิธีการอัดเย็น โดยใช้เครื่องอัดแท่งแบบลูกสูบ และทดสอบคุณสมบัติของถ่านอัดแท่งตามมาตรฐาน American Society for Testing and Materials (ASTM) ผลการศึกษาพบว่าตัวประสานที่เหมาะสมในการผลิตถ่านอัดแท่งจากเปลือกยูคาลิปตัส คือ แป้งเปียกในอัตราส่วน 1.5:10 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว 7.01, 5.30, 6.08 และ 81.58% ตามลำดับ ค่าพลังงานความร้อน 4,833.6 cal/g ซึ่งใกล้เคียงกับค่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนที่กำหนด นอกจากนี้ยังมีค่าดัชนีการแตกร่วนอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการขนส่ง กล่าวคือค่าดัชนีการแตกร่วนเท่ากับ 0.58 ดังนั้นแป้งเปียกจึงเป็นตัวประสานเหมาะแก่การนำไปใช้งานการทำถ่านอัดแท่งจากเปลือกยูคาลิปตัส

คำสำคัญ: ถ่านอัดแท่ง, ตัวประสาน, เปลือกยูคาลิปตัส

ABSTRACT

This research was aimed to optimize binder for the production of charcoal briquettes from eucalyptus bark. The variations of binders such as molasses, rice stick, clay, water hyacinth and cassava starch were studied. The forming briquettes were cold pressed using piston press. The properties of charcoal briquettes were analyzed according to American Society for Testing and Materials (ASTM) standard. The results showed that the optimum binder for the production of charcoal briquettes from eucalyptus bark is cassava starch at a ratio of 1.5:10 by weight. At this condition, results revealed that the moisture, amounts of ash, amounts of volatile, amounts of fixed carbon and amounts of energy value were 7.01%, 5.30%, 6.08%, 81.58%, 4,833.6±19.11 cal/g, respectively. Moreover, the shatter index value was 0.58 which is in the range of the

optimum binder for transportation. Therefore, the optimum binder for charcoal briquettes production form eucalyptus bark is cassava starch.

Keywords: Charcoal briquettes, Binder, Eucalyptus bark

1. บทนำ

ปัจจุบัน การตระหนักถึงการใช้ทรัพยากรอย่างมีคุณค่าและเกิดประโยชน์สูงสุดโดยการนำทรัพยากรที่เหลือใช้กลับมาแปรสภาพเพื่อให้เกิดประโยชน์แทนการทิ้งเป็นขยะหรือปล่อยให้เน่าเปื่อยย่อยสลายไปตามธรรมชาติ ประเทศไทยมีการปลูกต้นไม้ที่สร้างรายได้ให้กับประเทศอย่างหลากหลาย เช่น การปลูกยูคาลิปตัสเพื่อส่งออก โดยผลิตได้ 400-800 ตันต่อไร่ การผลิตดังกล่าวทำให้มีส่วนที่เหลือใช้ได้แก่ เปลือกยูคาลิปตัส เศษไม้ เป็นต้น ซึ่งส่วนที่เหลือใช้นี้เหมาะที่จะนำมาใช้ประโยชน์ เช่น การทำปุ๋ยหรือการทำถ่านอัดแท่ง [1]

ปัจจุบันถ่านอัดแท่งเป็นแหล่งพลังงานความร้อนอีกแบบหนึ่งที่ได้รับความนิยม ถ่านอัดแท่งสามารถทดแทนถ่านจากป่าไม้ธรรมชาติได้ดี และสนองนโยบายการอนุรักษ์ธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม สามารถผลิตจากวัสดุธรรมชาติอื่นๆ ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรได้ เช่น ถ่านอัดแท่งจากขี้เลื่อย [2] ถ่านอัดแท่งจากกะลามะพร้าว [3] ถ่านอัดแท่งจากไม้ยางพารา [4] เป็นต้น ถ่านอัดแท่งได้รับความนิยมใช้ในภัตตาคาร ร้านอาหาร เนื่องจากให้พลังงานสูง ไม่มีควัน ไม่แตกประทุ และประหยัดค่าใช้จ่ายกว่าถ่านไม้ทั่วไป [5] ประเทศไทยมีการผลิตถ่านอัดแท่งเพื่อใช้ในประเทศร้อยละ 60 และส่งออกต่างประเทศ ร้อยละ 40 ได้แก่ ญี่ปุ่น เกาหลีใต้ ฮ่องกง และมาเลเซีย แนวโน้มของตลาดถ่านอัดแท่งในอนาคตทั้งภายในและภายนอกประเทศสูงขึ้น เนื่องจากมีความต้องการบริโภคอาหารประเภทปิ้ง ย่าง [6] ในการส่งออก ถ่านอัดแท่งต้องมีความคงรูปดี ไม่แตกหักง่ายต่อการขนส่ง ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ตัวประสาน [2,7] และวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต เป็นต้น

ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวความคิดที่จะนำเปลือกยูคาลิปตัสมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านอัดแท่ง โดยศึกษาตัวประสานที่เหมาะสมในการผลิตถ่านอัดแท่ง เพื่อให้ได้ถ่านอัดแท่งที่มีคุณภาพดี ไม่แตกหักง่าย และมีคุณสมบัติตามมาตรฐานของเชื้อเพลิงอัดแท่ง นอกจากนี้ยังนำไปเป็นแบบอย่างส่งเสริมและสนับสนุนการตัดสินใจให้มีการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งใช้เองภายในครัวเรือนตามหลักเศรษฐกิจพอเพียงหรือจำหน่ายเพื่อเป็นรายได้เสริมแก่ชุมชนท้องถิ่นที่มีศักยภาพในการผลิตต่อไป

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ถ่านอัดแท่ง

ถ่านอัดแท่ง (charcoal briquettes) คือผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำวัตถุดิบธรรมชาติ พวกเศษไม้ ท่อนไม้ กะลามะพร้าว กะลาปาล์ม ซังข้าวโพดมาเผาจนเป็นถ่าน นำมาบดเป็นผงหรือเม็ดแล้วอัดเป็นแท่งตามรูปทรงที่ต้องการ หรือนำวัตถุดิบธรรมชาติ พวกแกลบ ขี้เลื่อย มาอัดเป็นรูปทรงที่ต้องการแล้วนำมาเผาเป็นถ่าน [8]

2.2 การอัดแท่งถ่าน

การอัดถ่านแท่งเป็นกระบวนการในการเปลี่ยนวัตถุดิบให้เป็นแท่งๆ โดยใช้เครื่องอัดแท่ง วิธีการอัดแท่งแบ่งได้เป็น 2 วิธี [9] ดังนี้

1) การอัดแบบใช้ความร้อนและแรงดันสูง

2) การอัดแบบไม่ใช้ความร้อนโดยใช้แรงอัดและอุณหภูมิระหว่างการอัดต่ำ กระบวนการอัดแท่งอาจใช้ตัวประสานหรือไม่ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการอัด [2,10]

2.3 ตัวประสาน (Binder)

วัสดุที่ใช้เป็นตัวประสานมีหลายชนิด ได้แก่ น้ำแป้งเปียก ดินเหนียว กากน้ำตาล ผักตบชวา มูลสัตว์ ยางไม้ น้ำมันดิบ และผลิตภัณฑ์จากปิโตรเลียม [11-12] ตัวประสานแต่ละชนิดมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 1 [13-14]

ตารางที่ 1 ข้อดีข้อเสียของตัวประสานแต่ละชนิดที่สามารถเผาไหม้ได้และไม่สามารถเผาไหม้ได้

ชนิดของตัวประสาน	ข้อดี	ข้อเสีย
ตัวประสานที่สามารถเผาไหม้ได้	1.หาง่าย 2.ราคาถูก 3.ไม่เป็นอุปสรรคต่อการเผา 4.ให้ค่าพลังงานความร้อนสูง	1.มีปริมาณเถ้า 2.การแตกปะทุขณะติดไฟ 3.มีกลิ่นและควันมาก
ตัวประสานที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้	1.สามารถยึดเกาะได้ดี 2.หาง่าย	1.ค่าพลังงานความร้อนต่ำ 2.ราคาแพง 3.การติดไฟไม่ดี 4.การเผาไหม้ช้า

2.4 คุณสมบัติของถ่านอัดแท่ง

การประเมินคุณภาพและคุณสมบัติของถ่านอัดแท่งจะใช้องค์ประกอบสำคัญของถ่านเป็นหลักในการประเมินคุณภาพ [15] คือ ปริมาณความชื้น (Moisture Content) ปริมาณเถ้า (Ash Content) สารที่ระเหยได้ (Volatile Matters) คาร์บอนเสถียร (Fixed Carbon) ค่าความร้อน (Calorific Value or Heating Value)

3. วัสดุและวิธีการทดลอง

3.1 การเตรียมวัตถุดิบ

การเตรียมผงถ่าน

เผาเปลือกยูคาลิปตัสในเตาเผาแบบหลุมจนเป็นถ่าน นำถ่านที่ได้ไปตากแดดให้แห้ง แล้วนำไปบดด้วยเครื่องบดจนละเอียดเก็บในถุงพลาสติก เพื่อใช้ในการผสมวัตถุดิบขั้นตอนต่อไป

การเตรียมตัวประสาน

1) กากน้ำตาล ได้จาก เกษตรและสหกรณ์ จังหวัดสิงห์บุรี

2) ข้าวเหนียวกวน นำข้าวเหนียวดิบมาบดละเอียดให้เป็นผงแป้ง นำมาร่อนผ่านตะแกรง 850 ไมโครเมตร ผสมผงแป้งกับน้ำร้อน เคี่ยวให้เหนียวคล้ายกาว

3) ดินเหนียว ได้จากแหล่งธรรมชาตินำไปตากแดดให้แห้ง ตำให้ละเอียด ร่อนผ่านตะแกรง 850 ไมโครเมตร

4) ผักตบชวา ได้จาก หมู่ 3 ตำบลสระแจง อำเภอบางระจัน จังหวัดสิงห์บุรี หั่นให้มีขนาดเล็กและนำไปตากแดดจนแห้ง นำเข้าเครื่องบดละเอียด

5) แป้งเปียก ใช้แป้งมันสำปะหลังยี่ห้อเหรียญทองคู่ผสมกับน้ำร้อน เคี่ยวให้เหนียวคล้ายกาว

3.2 การผสมวัตถุดิบกับตัวประสาน

นำผงถ่านข้อ 3.1 ผสมกับตัวประสาน ตามสัดส่วนดังตารางที่ 2 คลุกเคล้าให้เข้ากัน แล้วนำเข้าเครื่องอัดแท่งต่อไป (รูปที่ 1)

ตารางที่ 2 สัดส่วนของวัตถุดิบในการผลิตถ่านอัดแท่งจากเปลือกยูคาลิปตัสที่มีตัวประสานในอัตราส่วนต่างกัน

ชนิดของตัวประสาน	ปริมาณตัวประสาน (กิโลกรัม)	ปริมาณถ่าน (กิโลกรัม)	ปริมาณน้ำ (มิลลิลิตร)
กากน้ำตาล	3.0	10	120
	3.5	10	120
	4.0	10	120
ข้าวเหนียวกวน	0.5	10	250
	1.0	10	250
	1.5	10	250
แป้งเปียก	0.5	10	250
	1.0	10	250
	1.5	10	250
ดินเหนียว	0.5	10	250
	1.0	10	250
	1.5	10	250
ผักตบชวา	2	10	250
	2.5	10	250
	3	10	250

รูปที่ 1 เครื่องอัดถ่านแท่งแบบลูกสูบ

3.3 การอัดแท่งด้วยเครื่องอัดแบบลูกสูบ

นำส่วนผสมที่ได้ในหัวข้อ 3.2 ใส่ในแม่พิมพ์ของเครื่องอัดแท่งแบบลูกสูบ 4 ครั้ง โดยแท่งถ่านมีขนาดความสูง 5.5 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 9 เซนติเมตร นำแท่งถ่านที่ได้ตากแดด 3-5 วัน แล้ววิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี

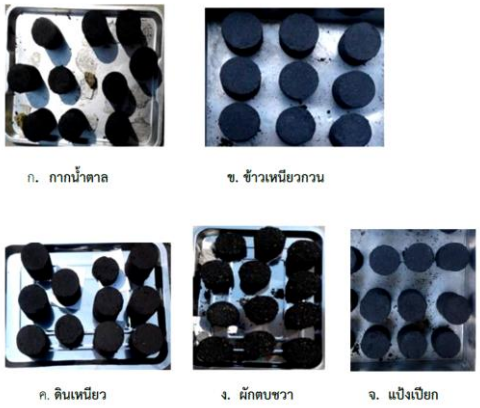
3.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติด้านกายภาพและเคมีของถ่านอัดแท่ง

วิเคราะห์ความชื้น (% Moisture) ตามวิธีมาตรฐาน ASTMD 3173 วิเคราะห์ปริมาณเถ้า (% Ash) ตามวิธีมาตรฐาน ASTMD 3174 วิเคราะห์การหาปริมาณสารระเหย (% Volatile Matter) ตามวิธีมาตรฐาน ASTMD 3175 วิเคราะห์การหาปริมาณคาร์บอนคงตัว (% Fixed Carbon) ตามวิธีมาตรฐาน ASTMD 3172 วิเคราะห์การหาค่าความร้อน (% Heating Value) ตามวิธีมาตรฐาน ASTMD 5865 วิเคราะห์ค่าดัชนีการแตกร่วน (%Shatter index) ตามวิธีมาตรฐาน Drop Shatter Test ASTMD 3038 [16] และวิเคราะห์สถิติความแตกต่างของตัวประสานด้วย Duncant's Multiple Range Test (DMRT)

4. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1 คุณสมบัติทางด้านกายภาพของถ่านอัดแท่งจากเปลือกยูคาลิปตัส

การอัดแท่งแบบลูกสูบและอัดเย็นของเปลือกยูคาลิปตัสและตัวประสานกากน้ำตาล ข้าวเหนียวกวน ดินเหนียว ผักตบชวา และแป้งเปียก ด้วยอัตราส่วนผสมทั้ง 15 สูตร พบว่าทุกสูตรสามารถขึ้นรูปถ่านอัดแท่งได้ (รูปที่ 2) เมื่อนำไปตากแดดในช่วงระยะเวลา 3-5 วัน ถ่านอัดแท่งที่มีการดูดซับน้ำไว้ในการอัดแท่งจะมีการคายน้ำที่มีอยู่ออกไป ส่งผลทำให้ถ่านอัดแท่งมีการแตกร้าวเพียงเล็กน้อย ในถ่านอัดแท่งที่มีตัวประสานเป็นกากน้ำตาล และผักตบชวา ส่วนสูตรที่มีข้าวเหนียวกวน ดินเหนียว และแป้งเปียก ไม่มีการแตกร้าว เนื่องจากตัวประสานที่นำมาอัดแท่งมีลักษณะเป็นผงละเอียดจึงสามารถขึ้นรูปและยึดเกาะกันได้ดี



รูปที่ 2 แท่งถ่านเปลือกยูคาลิปตัสตัวประสาน (ก) กากน้ำตาล (ข) ข้าวเหนียวกวน (ค) ดินเหนียว (ง) ผักตบชวา และ (จ) แป้งเปียก

4.2 คุณสมบัติทางเคมีของถ่านอัดแท่งจากเปลือกยูคาลิปตัส

4.2.1 ปริมาณความชื้น

ผลการศึกษาปริมาณความชื้นของถ่านอัดแท่งจากเปลือกยูคาลิปตัสดังในตารางที่ 3 พบว่า ถ่านอัดแท่งที่มีกากน้ำตาลเป็นตัวประสานในอัตราส่วน 3.0:10, 3.5:10 และ 4.0:10 มีแนวโน้มของความชื้นเพิ่มขึ้นจาก 8.61% เป็น 10.55% ถ่านอัดแท่งที่มีข้าวเหนียวกวนเป็นตัวประสานในอัตราส่วน 0.5:10, 1.0:10 และ 1.5:10 มีความชื้นอยู่ระหว่าง 6.29 - 6.84% ถ่านอัดแท่งที่มีดินเหนียวเป็นตัว

ประสานในอัตราส่วน 0.5:10, 1.0:10 และ1.5:10 ความชื้นลดลงจาก 3.39% เป็น 2.58% ถ่านอัดแท่งที่มีผักตบชวาเป็นตัวประสานในอัตราส่วน 2.0:10, 2.5:10 และ 3.0:10 ความชื้นลดลงจาก 5.25% เป็น 2.81% ถ่านอัดแท่งที่มีแป้งเปียกเป็นตัวประสานในอัตราส่วน 0.5:10, 1.0:10 และ 1.5:10 ความชื้นเพิ่มขึ้นจาก 5.83% เป็น 7.02% จะเห็นได้ว่าถ่านอัดแท่งมีความชื้นตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนที่กำหนดไว้กล่าวคือไม่เกิน 10% ได้แก่ ถ่านอัดแท่งที่มีกากน้ำตาล (3.0:10) ข้าวเหนียวกวน ดินเหนียว ผักตบชวาและแป้งเปียกเป็นตัวประสาน ส่วนถ่านอัดแท่งที่มีกากน้ำตาลเป็นตัวประสาน มีปริมาณความชื้นเกินมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนกำหนด ได้แก่ถ่านอัดแท่งที่มีกากน้ำตาลเป็นตัวประสานอัตราส่วน 3.5:10 และ 4.0:10 ความแตกต่างความชื้นของถ่านอัดแท่งจากเปลือกยูคาลิปตัส โดยใช้วิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่าถ่านอัดแท่งที่มีดินเหนียวและผักตบชวาเป็นตัวประสานในอัตราส่วนของดินเหนียวต่อถ่าน 1.0:10 และ 1.5:10 อัตราส่วนของผักตบชวาต่อถ่าน 2.5:10 และ 3.0:10 มีค่าเฉลี่ยของความชื้นไม่แตกต่างกัน ถ่านอัดแท่งที่มีข้าวเหนียวกวนและแป้งเปียกเป็นตัวประสานในอัตราส่วนของข้าวเหนียวกวนต่อถ่าน 0.5:10 และ 1.5:10 อัตราส่วนของแป้งเปียกต่อถ่าน 0.5:10 และ 1.0:10 มีค่าเฉลี่ยของความชื้นไม่แตกต่างกัน ถ่านอัดแท่งที่มีกากน้ำตาลเป็นตัวประสานในอัตราส่วนของกากน้ำตาลต่อถ่าน 3.5:10 และ 4.0:10 มีค่าเฉลี่ยของความชื้นไม่แตกต่างกัน ปริมาณความชื้นจะส่งผลต่อคุณภาพของถ่านอัดแท่ง หากความชื้นน้อยจะมีความสามารถจุดติดไฟได้สูง [17] ในทางตรงกันข้ามจากการศึกษางานวิจัยของธนาพลและคณะ [18] ได้ทำการศึกษาเชื้อเพลิงอัดแท่งจากทางมะพร้าวแห้งปน โดยมีกากน้ำตาลและน้ำแป้งมันสำปะหลังเป็นตัวประสานโดยการเพิ่มอัตราส่วนของตัวประสาน พบว่ากากน้ำตาลและน้ำแป้งมันสำปะหลังมีการยึดเกาะกันได้ดี แต่มีความชื้นสูง ทำให้เชื้อเพลิงอัดแท่งมีปริมาณควันเกิดขึ้นในขณะจุดติดไฟ เนื่องจากมีปริมาณความชื้นมาก

ตารางที่ 3 ความชื้นของถ่านอัดแท่งจากเปลือกยูคาลิปตัสที่มีตัวประสานในอัตราส่วนต่างกัน

ชนิดตัวประสาน	อัตราส่วน (ตัวประสาน : ถ่าน)	ความชื้น (%) ± SD
กากน้ำตาล	3.0:10	8.61^{g} ± 0.68
	3.5:10	10.55^{h} ± 0.54
	4.0:10	10.24^{h} ± 0.37
ข้าวเหนียวกวน	0.5:10	6.29^{d} ± 0.11
	1.0:10	6.84^{e} ± 0.09
	1.5:10	6.36^{d} ± 0.07
ดินเหนียว	0.5:10	3.38^{b} ± 0.01
	1.0:10	3.10^{a} ± 0.05
	1.5:10	2.57^{a} ± 0.13
ผักตบชวา	2.0:10	5.24^{c} ± 0.67
	2.5:10	2.81^{a} ± 0.09
	3.0:10	2.81^{a} ± 0.08
แป้งเปียก	0.5:10	5.83^{d} ± 0.28
	1.0:10	5.93^{d} ± 0.15
	1.5:10	7.01^{f} ± 0.06

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่ตามด้วยอักษรเหมือนกัน หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยวิธี DMRT

4.2.2 ปริมาณเถ้า

จากการศึกษาปริมาณเถ้าของถ่านอัดแท่งจากเปลือกยูคาลิปตัส (ตารางที่ 4) ผลการทดลองพบว่า ถ่านอัดแท่งที่มีกากน้ำตาลเป็นตัวประสานในอัตราส่วนของกากน้ำตาลต่อถ่าน 3.0:10, 3.5:10 และ 4.0:10 มีปริมาณเถ้าอยู่ระหว่าง 15.52 - 16.32% ถ่านอัดแท่งที่มีข้าวเหนียวกวนเป็นตัว

ประสานในอัตราส่วนของข้าวเหนียวกวนต่อถ่าน 0.5:10, 1.0:10 และ 1.5:10 มีแนวโน้มของปริมาณเถ้าเพิ่มขึ้นจาก 12.42% เป็น 13.47% ถ่านอัดแท่งที่มีดินเหนียวเป็นตัวประสานในอัตราส่วนของดินเหนียวต่อถ่าน 0.5:10, 1.0:10 และ 1.5:10 มีแนวโน้มของปริมาณเถ้าอยู่ระหว่าง 24.29 - 28.95% ถ่านอัดแท่งที่มีผักตบชวาเป็นตัวประสานในอัตราส่วนของผักตบชวาต่อถ่าน 2.0:10, 2.5:10 และ 3.0:10 มีปริมาณเถ้าอยู่ระหว่าง 15.42 - 16.59% ถ่านอัดแท่งที่มีแป้งเปียกเป็นตัวประสานในอัตราส่วนของแป้งเปียกต่อถ่าน 0.5:10, 1.0:10 และ 1.5:10 มีแนวโน้มของปริมาณเถ้าเพิ่มขึ้นจาก 3.72% เป็น 5.30% ความแตกต่างทางสถิติของปริมาณความเถ้าของถ่านอัดแท่งจากเปลือกยูคาลิปตัสโดยมีตัวประสานชนิดต่างๆ โดย DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่า ถ่านอัดแท่งที่มีข้าวเหนียวกวนตัวประสานในอัตราส่วนของข้าวเหนียวกวนต่อถ่าน 1.0:10 และ 1.5:10 มีค่าเฉลี่ยของปริมาณเถ้าไม่แตกต่างกัน ถ่านอัดแท่งที่มีกากน้ำตาลและผักตบชวาเป็นตัวประสานในอัตราส่วนของกากน้ำตาลต่อถ่าน 3.5:10 และอัตราส่วนของผักตบชวาต่อถ่าน 2.5:10 มีค่าเฉลี่ยของปริมาณเถ้าไม่แตกต่างกัน ถ่านอัดแท่งที่มีกากน้ำตาลและผักตบชวาเป็นตัวประสานในอัตราส่วนกากน้ำตาลต่อถ่าน 4.0:10 และอัตราส่วนของผักตบชวาต่อถ่าน 3.0:10 มีค่าเฉลี่ยของปริมาณเถ้าไม่แตกต่างกัน ถ่านอัดแท่งในอัตราส่วนที่เหลือมีปริมาณเถ้าแตกต่างกัน จากตารางที่ 4 จะเห็นได้ว่าถ่านอัดแท่งที่มีแป้งเปียกเป็นตัวประสานมีค่าปริมาณเถ้าเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนที่กำหนด (น้อยกว่า 8%) ส่วนถ่านอัดแท่งที่มีกากน้ำตาล ข้าวเหนียวกวน ดินเหนียว และผักตบชวาเป็นตัวประสาน มีค่าปริมาณเถ้าเกินมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนที่กำหนด ทั้งนี้อาจเนื่องจากตัวประสานสามารถเผาไหม้ได้และมีสารอนินทรีย์มากจึงทำให้มีปริมาณเถ้าเพิ่มมากขึ้น [19] ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของนิพนธ์และธรพร [10] ที่ผลิตถ่านจากผักตบชวา โดยใช้แป้งมันสำปะหลัง กากมันสำปะหลังและกากน้ำตาลเป็นตัวประสาน ในทางตรงข้ามจากรายงานของบริสุทธิ์ (2552) [20] ที่ทำการผลิตเชื้อเพลิงโดยเทคโนโลยีการทำ pellet จากเปลือกยูคาลิปตัสและของเหลือทิ้งจากชีวมวล พบว่ามีปริมาณเถ้าน้อย เนื่องจากไม่มีการใช้ตัวประสานในการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง ปริมาณเถ้าที่เกิดขึ้นนอกจากจะขึ้นอยู่กับชนิดของตัวประสานแล้วยังขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่นำมาผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งด้วย อย่างไรก็ตามปริมาณเถ้าที่เกิดขึ้นก็สามารถนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ได้อีก เช่น การนำไปผลิตวัสดุก่อสร้าง เช่น อิฐ และกระเบื้องเซรามิก [21-22]

ตารางที่ 4 ปริมาณเถ้าของถ่านอัดแท่งจากเปลือกยูคาลิปตัสที่มีตัวประสานอัตราส่วนต่างกัน

ชนิด	อัตราส่วน (ตัวประสาน : ถ่าน)	ปริมาณเถ้า (%) ± SD
กากน้ำตาล	3.0:10	16.32^{h} ± 0.34
	3.5:10	15.52^{f} ± 0.25
	4.0:10	16.03^{g} ± 0.15
ข้าวเหนียวกวน	0.5:10	12.42^{d} ± 0.15
	1.0:10	13.63^{e} ± 0.18
	1.5:10	13.74^{e} ± 0.07
ดินเหนียว	0.5:10	24.29^{j} ± 0.53
	1.0:10	28.95^{l} ± 0.61
	1.5:10	27.70^{k} ± 0.34
ผักตบชวา	2.0:10	16.59^{i} ± 0.37
	2.5:10	15.42^{f} ± 0.24
	3.0:10	15.74^{g} ± 0.33
แป้งเปียก	0.5:10	3.72^{a} ± 0.07
	1.0:10	4.42^{b} ± 0.30
	1.5:10	5.30^{c} ± 0.07

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่ตามด้วยอักษรเหมือนกัน หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยวิธี DMRT

4.2.3 ปริมาณสารระเหย

ปริมาณสารระเหยของถ่านอัดแท่งจากเปลือกยูคาลิปตัส จากตารางที่ 5 พบว่า ถ่านอัดแท่งที่มีกากน้ำตาลเป็นตัวประสาน มีปริมาณสารระเหย 21.14 - 22.68% ถ่านอัดแท่งที่มีข้าวเหนียวกวนเป็นตัวประสาน มีปริมาณสารระเหย 16.17 - 20.33% ถ่านอัดแท่งที่มีดินเหนียวเป็นตัวประสาน มีปริมาณสารระเหย 30.80 - 34.60% ถ่านอัดแท่งที่มีผักตบชวาเป็นตัวประสาน มีปริมาณสารระเหยอยู่ระหว่าง 21.49 - 24.89% ถ่านอัดแท่งที่มีแป้งเปียกเป็นตัวประสาน มีปริมาณสารระเหยอยู่ระหว่าง 4.96 - 6.08% ถ่านอัดแท่งจากเปลือกยูคาลิปตัส ที่มีแป้งเปียกเป็นประสานในอัตราส่วนของแป้งเปียกต่อถ่าน 0.5:10, 1.0:10 และ 1.5:10 มีค่าเฉลี่ยของปริมาณสารระเหยไม่แตกต่างกัน ถ่านอัดแท่งที่มีข้าวเหนียวกวนเป็นตัวประสานในอัตราส่วนของข้าวเหนียวกวนต่อถ่าน 1.0:10 และ 1.5:10 มีค่าเฉลี่ยของปริมาณสารระเหยไม่แตกต่างกัน ถ่านอัดแท่งที่มีกากน้ำตาลเป็นตัวประสานในอัตราส่วน 4.0:10 และที่มีผักตบชวาอัตราส่วน 2.5:10 มีค่าเฉลี่ยของปริมาณสารระเหยไม่แตกต่างกัน ถ่านอัดแท่งที่มีกากน้ำตาลเป็นตัวประสานในอัตราส่วน 3.0:10 และ 3.5:10 และที่มีผักตบชวาอัตราส่วน 2.0:10 และ 3.0:10 มีค่าเฉลี่ยของปริมาณสารระเหยไม่แตกต่างกัน และถ่านอัดแท่งที่มีดินเหนียวเป็นตัวประสานในอัตราส่วน 1.0:10 และ 1.5:10 มีค่าเฉลี่ยของปริมาณสารระเหยไม่แตกต่างกัน ตารางที่ 5 จะพบว่า ถ่านอัดแท่งที่มีดินเหนียวเป็นตัวประสานมีค่าปริมาณสารระเหยเกินมาตรฐาน (25%) ถ่านอัดแท่งที่มีตัวประสานอื่นมีปริมาณสารระเหยเป็นไปตามค่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนที่กำหนด ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของนิพนธ์และธรพร [10] ที่ผลิตถ่านจากผักตบชวาแห้งและผักตบชวาสด โดยใช้แป้งมันสำปะหลังและกากมันสำปะหลัง กากน้ำตาลเป็นตัวประสาน พบว่ามีปริมาณสารระเหยเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนที่กำหนด ทำให้เชื้อเพลิงที่ได้มีคุณภาพ อย่างไรก็ตามยังมีรายงานที่พบปริมาณสารระเหยสูงเช่นงานวิจัยของเอกลักษณ์ และคณะ [23] ที่ศึกษาการทำเชื้อเพลิงอัดแท่งจากการผลิตร่วมของตะกอนเปียกอุตสาหกรรมผลิตเอทานอล โดยใช้เศษเปลือกมังคุด เปลือกทุเรียนและกะลามะพร้าวเป็นตัวประสานโดยกระบวนการเผาไหม้ ถ่านอัดแท่งมีปริมาณสารระเหยมากจะทำให้แท่งเชื้อเพลิงติดไฟง่ายและมีควันมาก เมื่อนำมาใช้งานจะทำให้ผู้ใช้แสบตา [15]

ตารางที่ 5 ปริมาณสารระเหยของถ่านอัดแท่งจากเปลือกยูคาลิปตัสที่มีตัวประสานอัตราส่วนต่างกัน

ชนิดตัวประสาน	อัตราส่วน (ตัวประสาน – ถ่าน)	ปริมาณสารระเหย (%) ± SD
กากน้ำตาล	3.0:10	$22.54^{e} \pm 0.59$
	3.5:10	$22.68^{e} \pm 0.61$
	4.0:10	$21.13^{d} \pm 0.16$
ข้าวเหนียวกวน	0.5:10	$16.17^{b} \pm 0.11$
	1.0:10	$18.55^{c} \pm 0.22$
	1.5:10	$20.33^{c} \pm 0.15$
ดินเหนียว	0.5:10	$30.79^{f} \pm 1.80$
	1.0:10	$34.60^{g} \pm 0.93$
	1.5:10	$33.31^{g} \pm 1.47$
ผักตบชวา	2.0:10	$24.89^{e} \pm 0.43$
	2.5:10	$21.49^{d} \pm 2.48$
	3.0:10	$24.16^{e} \pm 0.45$
แป้งเปียก	0.5:10	$4.96^{a} \pm 0.42$
	1.0:10	$5.02^{a} \pm 0.19$
	1.5:10	$6.08^{a} \pm 0.19$

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่ตามด้วยอักษรเหมือนกัน หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยวิธี DMRT

4.2.4 ปริมาณคาร์บอนคงตัว

ปริมาณคาร์บอนคงตัวของถ่านอัดแท่งจากเปลือกยูคาลิปตัสในตารางที่ 6 พบว่า ถ่านอัดแท่งที่มีกากน้ำตาลเป็นตัวประสาน มีปริมาณคาร์บอนคงตัวระหว่าง 51.23 - 52.57% ถ่านอัดแท่งที่มีข้าวเหนียวกวนเป็นตัวประสาน มีปริมาณคาร์บอนคงตัว 59.54 -65.10 % ถ่านอัดแท่งที่มีดินเหนียวเป็นตัวประสาน มีปริมาณคาร์บอนคงตัว 35.15 - 41.50 % ถ่านอัดแท่งที่มีผักตบชวาเป็นตัวประสาน มีปริมาณคาร์บอนคงตัวระหว่าง 53.25 - 60.25% ถ่านอัดแท่งที่มีแป้งเปียกเป็นตัวประสาน มีปริมาณคาร์บอนคงตัว 81.58 - 85.47 % ถ่านอัดแท่งที่มีกากน้ำตาลเป็นตัวประสานในอัตราส่วน 3.0:10, 3.5:10 และ 4.0:10 มีค่าเฉลี่ยของปริมาณคาร์บอนคงตัวไม่แตกต่างกัน ถ่านอัดแท่งที่มีอัตราส่วนของข้าวเหนียวกวนต่อถ่าน 1.5:10 และอัตราส่วนของผักตบชวาต่อถ่าน 3.0:10 มีค่าเฉลี่ยของปริมาณคาร์บอนคงตัวไม่แตกต่างกัน ถ่านอัดแท่งที่มีข้าวเหนียวกวนเป็นตัวประสานในอัตราส่วน 1.0:10 และที่มีผักตบชวาอัตราส่วน 2.5:10 มีค่าเฉลี่ยของปริมาณคาร์บอนคงตัวไม่แตกต่างกัน จะเห็นได้ว่าถ่านอัดแท่งที่มีแป้งเปียกเป็นตัวประสานมีค่าคาร์บอนคงตัวสูงที่สุด จึงทำให้เกิดการสันดาปได้เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ถ่านอัดแท่งมีปริมาณเถ้าน้อย มีค่าพลังงานความร้อนสูง เมื่อเปรียบเทียบปริมาณคาร์บอนคงตัวกับรายงานของอดิเทพและเขมนิจ-จารีย์ [24] ที่ศึกษาค่าพลังงานความร้อนของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากเปลือกยูคาลิปตัสและซังข้าวโพด โดยใช้กากน้ำตาลเป็นตัวประสาน รายงานว่า เชื้อเพลิงอัดแท่งจากเปลือกยูคาลิปตัสและซังข้าวโพดในอัตราส่วน 20:80 มีค่าคาร์บอนคงตัวสูง เนื่องจากเชื้อเพลิงอัดแท่งจากเปลือกยูคาลิปตัสและซังข้าวโพดในอัตราส่วน 20:80 มีปริมาณความชื้นต่ำ ปริมาณเถ้าต่ำ ปริมาณสารระเหยต่ำ ค่าพลังงานความร้อนอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด จึงทำให้เกิดการสันดาปได้ดี เชื้อเพลิงจึงมีคุณภาพดี

ตารางที่ 6 ปริมาณคาร์บอนคงตัวของถ่านอัดแท่งจากเปลือกยูคาลิปตัสที่มีตัวประสานอัตราส่วนต่างกัน

ชนิด	อัตราส่วน (ตัวประสาน : ถ่าน)	คาร์บอนคงตัว (%) ± SD
กากน้ำตาล	3.0:10	52.51^{d} ± 1.37
	3.5:10	51.23^{d} ± 3.07
	4.0:10	52.57^{d} ± 0.12
ข้าวเหนียวกวน	0.5:10	65.10^{g} ± 0.25
	1.0:10	60.95^{f} ± 0.12
	1.5:10	59.54^{e} ± 0.14
ดินเหนียว	0.5:10	41.50^{c} ± 1.36
	1.0:10	37.97^{b} ± 0.88
	1.5:10	35.15^{a} ± 3.14
ผักตบชวา	2.0:10	53.25^{d} ± 0.08
	2.5:10	60.25^{f} ± 2.86
	3.0:10	57.27^{e} ± 0.65
แป้งเปียก	0.5:10	85.47^{i} ± 0.26
	1.0:10	84.61^{i} ± 0.35
	1.5:10	81.58^{h} ± 0.26

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่ตามด้วยอักษรเหมือนกัน หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยวิธี DMRT

4.2.5 ค่าพลังงานความร้อน

ค่าพลังงานความร้อนของถ่านอัดแท่งจากเปลือกยูคาลิปตัส (ตารางที่ 7) พบว่า ถ่านอัดแท่งที่มีกากน้ำตาลเป็นตัวประสาน พลังงานความร้อนอยู่ระหว่าง 3,785.00 – 4,111.00 cal/g ถ่านอัดแท่งที่มีข้าวเหนียวกวนเป็นตัวประสาน มีค่าพลังงานความร้อนอยู่ระหว่าง 4,206.90 - 4,444.60 cal/g ถ่านอัดแท่งที่มีดินเหนียวเป็นตัวประสาน มีค่าพลังงานความร้อนอยู่ระหว่าง 3,948.30 - 3,533.40 cal/g ถ่านอัดแท่งที่มีผักตบชวาเป็นตัวประสาน มีค่าพลังงานความร้อนอยู่ระหว่าง 3,718.10 - 3,888.80 cal/g ถ่านอัดแท่งที่มีแป้งเปียกเป็นตัวประสาน มีค่าพลังงานความร้อน 4,833.60 - 5,299.60 cal/g ถ่านอัดแท่งที่มีกากน้ำตาลเป็นตัวประสานในอัตราส่วน 3.0:10, 3.5:10 และ 4.0:10 ดินเหนียวอัตราส่วน 1.0:10 และ 1.5:10 ผักตบชวาอัตราส่วน 2.0:10 และ 2.5:10 มีค่าเฉลี่ยของค่าพลังงานความร้อนไม่แตกต่างกัน ถ่านอัดแท่งที่มีดินเหนียวเป็นตัวประสานในอัตราส่วน 0.5:10 และผักตบชวาอัตราส่วน 3.0:10 มีค่าเฉลี่ยของค่าพลังงานความร้อนไม่แตกต่างกัน ถ่านอัดแท่งที่มีแป้งเปียกเป็นตัวประสานในอัตราส่วน 1.0:10 และ 1.5:10 มีค่าเฉลี่ยไม่แตกต่างกัน จะเห็นได้ว่าค่าพลังงานความร้อนของถ่านอัดแท่งที่มีค่าแป้งเปียกเป็นตัวประสานในอัตราส่วน 0.5:10 มีค่าพลังงานความร้อนสูงสุดเท่ากับ 5,299.60 cal/g เป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนที่กำหนด (มากกว่า 5,000 cal/g) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับรายงานของพิมลรัตน์ และภิตินันท์ [25] ถ่านอัดแท่งให้ค่าพลังงานความร้อนสูง เนื่องจากถ่านอัดแท่งมีความชื้นต่ำ ปริมาณสารระเหยต่ำ ปริมาณเถ้าต่ำและคาร์บอนคงตัวสูง จึงทำให้ค่าพลังงานความร้อนสูง และส่งผลให้ถ่านอัดแท่งมีคุณภาพดี [26] ในทางตรงกันข้ามหากถ่านอัดแท่งมีปริมาณความชื้นสูง ปริมาณเถ้าสูง สารระเหยสูง ทำให้คาร์บอนคงตัวต่ำและค่าพลังงานความร้อนที่ได้ต่ำกว่ามาตรฐาน ดังปรากฏในรายงานของอัจฉรา และคณะ [27] ที่ศึกษาการนำเปลือกมังคุดและเปลือกทุเรียนมาใช้ประโยชน์ในรูปเชื้อเพลิงอัดแท่งที่มีแป้งมันเป็นตัวประสาน

ตารางที่ 7 ค่าพลังงานความร้อนของถ่านอัดแท่งจากเปลือกยูคาลิปตัสที่มีตัวประสานอัตราส่วนต่างกัน

ชนิด	อัตราส่วน (ตัวประสาน : ถ่าน)	ค่าพลังงานความร้อน (cal/g) ± SD
กากน้ำตาล	3.0:10	3818.6^{a} ± 83.89
	3.5:10	4111.0^{a} ± 19.27
	4.0:10	3785.0^{a} ± 17.32
ข้าวเหนียวกวน	0.5:10	4444.6^{f} ± 29.22
	1:10	4269.10^{e} ± 12.44
	1.5:10	4206.9^{d} ± 32.16
ดินเหนียว	0.5:10	33948.3^{b} ± 44.32
	1.0:10	3552.0^{a} ± 93.04
	1.5:10	3553.4^{a} ± 95.26
ผักตบชวา	2.0:10	3718.1^{a} ± 308.13
	2.5:10	3718.9^{a} ± 179.38
	3.0:10	3888.8^{b} ± 50.96
แป้งเปียก	0.5:10	5299.6^{h} ± 0.38
	1.0:10	5070.3^{g} ± 22.91
	1.5:10	4833.6^{g} ± 19.11

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่ตามด้วยอักษรเหมือนกัน หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยวิธี DMRT

4.2.6 ค่าดัชนีการแตกร่วน

การแตกร่วนของถ่านอัดแท่งจากเปลือกยูคาลิปตัส (ตารางที่ 8) พบว่า ถ่านอัดแท่งที่มีกากน้ำตาลเป็นตัวประสานในอัตราส่วนของกากน้ำตาลต่อถ่าน 3.0:10, 3.5:10 และ 4.0:10 มีค่าดัชนีการแตกร่วนดีที่สุดเท่ากับ 0.99 รองลงมาคือถ่านอัดแท่งที่มีข้าวเหนียวกวนเป็นตัวประสานในอัตราส่วน 0.5:10, 1.0:10 และ 1.5:10 มีค่าดัชนีการแตกร่วน 0.64 - 0.94 ถ่านอัดแท่งที่มีดินเหนียวเป็นตัวประสานในอัตราส่วน 0.5:10, 1.0:10 และ 1.5:10 มีค่าดัชนีการแตกร่วนอยู่ระหว่าง 0.39 - 0.79 ถ่านอัดแท่งที่มีผักตบชวาเป็นตัวประสานในอัตราส่วน 2.0:10, 2.5:10 และ 3.0:10 มีค่าดัชนีการแตกร่วน 0.53 - 0.61 และถ่านอัดแท่งที่มีแป้งเปียกเป็นตัวประสานในอัตราส่วน 0.5:10, 1.0:10 และ 1.5:10 มีค่าดัชนีการแตกร่วน 0.28 - 0.58 ทั้งนี้ค่าดัชนีการแตกร่วนของถ่านอัดแท่ง ที่ทดสอบโดยวิธี Drop Shatter Test มีค่ามาตรฐานอยู่ระหว่าง 0.50 - 1.00 การทดลองนี้พบว่าตัวประสานที่มีค่าดัชนีการแตกร่วนต่ำกว่า 0.5 ได้แก่ถ่านอัดแท่งที่มีดินเหนียวเป็นตัวประสานในอัตราส่วน 1.0:10 และ 1.5:10 และถ่านอัดแท่งที่มีแป้งเปียกเป็นตัวประสานในอัตราส่วน 0.5:10 และ 1.0:10 ส่วนตัวประสานที่มีค่าดัชนีการแตกร่วนมากกว่า 0.5 ได้แก่ ถ่านอัดแท่งที่มีกากน้ำตาลเป็นตัวประสานในอัตราส่วน 3.0:10, 3.5:10 และ 4.0:10 ถ่านอัดแท่งที่มีข้าวเหนียวกวนเป็นตัวประสานในอัตราส่วน 0.5:10, 1.0:10 และ 1.5:10 ถ่านอัดแท่งที่มีดินเหนียวเป็นตัวประสานในอัตราส่วน 0.5:10 ถ่านอัดแท่งที่มีผักตบชวาเป็นตัวประสานในอัตราส่วน 2.0:10, 2.5:10 และ 3.0:10 และถ่านอัดแท่งที่มีแป้งเปียกเป็นตัวประสานในอัตราส่วน 1.5:10 ถ่านอัดแท่งเหล่านี้มีค่าดัชนีการแตกร่วนมากกว่า 0.5 เป็นถ่านที่เหมาะแก่การนำมาใช้งาน [15] เปรียบเทียบได้กับรายงานของ อัจฉรา และคณะ [27] ที่ศึกษาการนำเปลือกทุเรียนและเปลือกมังคุดมาใช้ประโยชน์ในรูปของเชื้อเพลิงอัดแท่ง มีแป้งมันและกากน้ำตาลเป็นตัวประสาน ถ่านอัดแท่งมีค่าแตกร่วนอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด จึงเหมาะแก่การนำไปใช้งาน อย่างไรก็ตาม ถ้าค่าดัชนีการแตกร่วนต่ำจะส่งผลให้ถ่านอัดแท่งที่ได้แตกหักง่าย ไม่แข็งแรงและร่วนซุย แต่ถ้าค่าดัชนีการแตกร่วนมีมาก จะส่งผลทำให้ถ่านอัดแท่งที่ได้มีความแข็งแรงมากและง่ายต่อการขนส่งหรือนำไปใช้งาน [10]

ตารางที่ 8 ค่าดัชนีการแตกร่วนของถ่านอัดแท่งจากเปลือกยูคาลิปตัสที่มีตัวประสานอัตราส่วนต่างกัน

ชนิด	อัตราส่วน (ตัวประสาน : ถ่าน)	ค่าดัชนีการแตกร่วน ± SD
กากน้ำตาล	3.0:10	$0.99^{f} \pm 0.00$
	3.5:10	$0.99^{f} \pm 0.00$
	4.0:10	$0.99^{f} \pm 0.00$
ข้าวเหนียวกวน	0.5:10	$0.64^{d} \pm 0.01$
	1.0:10	$0.88^{e} \pm 0.03$
	1.5:10	$0.94^{f} \pm 0.01$
ดินเหนียว	0.5:10	$0.79^{e} \pm 0.03$
	1.0:10	$0.39^{a} \pm 0.01$
	1.5:10	$0.44^{b} \pm 0.04$
ผักตบชวา	2.0:10	$0.53^{c} \pm 0.03$
	2.5:10	$0.61^{e} \pm 0.67$
	3.0:10	$0.58^{c} \pm 0.00$
แป้งเปียก	0.5:10	$0.28^{a} \pm 0.15$
	1.0:10	$0.48^{b} \pm 0.07$
	1.5:10	$0.58^{c} \pm 0.06$

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่ตามด้วยอักษรเหมือนกัน หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยวิธี DMRT

5. สรุปผลการวิจัย

ตัวประสานของถ่านอัดแท่งที่เหมาะสมต่อการผลิตถ่านอัดแท่งจากเปลือกยูคาลิปตัส ได้แก่ แป้งเปียก ในอัตราส่วน 1.5:10 เนื่องจากมีค่าพลังงานความร้อน 4,833.60 ± 19.11 cal/g ซึ่งใกล้เคียงมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนที่กำหนด และคุณสมบัติอื่นๆ พบว่าปริมาณความชื้นเท่ากับ 7.02% ปริมาณเถ้าเท่ากับ 5.30% ปริมาณสารระเหยเท่ากับ 6.09% และปริมาณคาร์บอนคงตัวเท่ากับ 81.58% เป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนกำหนด ค่าดัชนีการแตกร่วนเท่ากับ 0.58 เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด ทำให้ถ่านอัดแท่งมีการทนทานต่อแรงกระแทกและสะดวกในการเก็บรักษา การขนส่ง จึงเหมาะแก่การนำไปใช้งาน

6. อ้างอิง

[1] วรธรรม อุ่นจิตติชัย, “การใช้ประโยชน์ไม้สวนป่าเพื่อชุมชนเป็นผลิตภัณฑ์ไม้ท่อนกลม (กรณีไม้ยูคาลิปตัสคามาลดูเลนซิส)”, พิมพ์ครั้งที่ 1, สกสค. ลาดพร้าว, กรุงเทพฯ, 2556.

[2] Shyamalee, D., Amarasinghe, A.D.U.S., and Senanayaka, N.S., “Evaluation of different binding materials in forming biomass briquettes with saw dust”, *International Journal of Scientific and Research Publications*, vol. 5, Issue 3, pp. 1-8, 2015.

[3] Yandri, P., “Consumer preferences for coconut shell charcoal in Suburban Indonesia”, *International Research Journal of Business Studies*, vol. 6, Issue 2, pp. 121-132, 2013.

[4] Mallika Thabuot, Thanchanok Pagketanang, Kasidet Panyacharoen, Pisit Mongkut, and Prasong Wongwicha, “Effect of applied pressure and binder proportion on the fuel properties of holey bio-briquettes”, *Energy Procedia*, vol. 79, pp. 890–895, 2015.

[5] กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม, “ถ่านอัดแท่ง”, 2546, สืบค้น มิถุนายน 20, 2560, จาก library.dip.go.th.

[6] ข่าวเศรษฐกิจ, “แบบอย่างการลงทุน:ถ่านอัดแท่ง”, 2548, สืบค้น มิถุนายน 20, 2560, จาก www.ryt9.com/s/ryt9/10674.

[7] Oyelaran, O. A., Bolaji, B. O., Waheed, M. A., Adekunle, M. F., “Performance evaluation of the effect of binder on groundnut shell briquette”, *International Journal of Applied Science and Technology*, vol. 8, Issue 1, pp. 11-19, 2015.

[8] รุ่งโรจน์ พุทธีสกุล, “การผลิตถ่านอัดแท่งจากถ่านกะลามะพร้าวและเหง้ามันสำปะหลัง”, ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 2553.

[9] กัญญา เม้ามีทรัพย์, “การผลิตถ่านเชื้อเพลิงจากชีวมวลและกระบวนการ Pyrolysis”, *วารสารประสิทธิภาพพลังงาน*, ปีที่ 11 ฉบับที่ 52, หน้า 42-48, 2544.

[10] นิพนธ์ ตันไพบูลย์กุล และธรพร บุศย์น้ำเพชร, “ลักษณะการขึ้นรูปและตัวประสานที่แตกต่างกันต่อสมบัติของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากผักตบชวา”, *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยศิลปกร*, ปีที่ 3 ฉบับที่ 6, หน้าที่ 86-100, 2559.

[11] ธงชัย ประจักษ์สูตร, “การเพิ่มศักยภาพของชานอ้อยเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงในอุตสาหกรรมครัวเรือน” ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2547.

[12] สังเวย เสวกวิหารี, “รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์เรื่องศักยภาพด้านพลังงานของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากเปลือกมังคุด”, มหาวิทยาลัยราชมงคลพระนคร, 2555.

[13] สำนักหอสมุดและศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, “ประมวลสารสนเทศพร้อมใช้ เรื่องการพัฒนาคุณภาพถ่านอัดแท่ง”, กรมวิทยาศาสตร์บริการกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2559.

[14] นฤภัทร ตั้งมั่นคงวรกูล, “การผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากวัสดุเหลือใช้ในอุตสาหกรรมการเกษตรและครัวเรือน”, *วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ*

สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, ปีที่ 6 ฉบับที่ 11, หน้า 66-77, 2557.

[15] สุริยา ชัยเดชาทยากูล, "การทำเชื้อเพลิงอัดแท่งจากส่วนผสมกากตะกอนของระบบบำบัดน้ำเสียและเศษชิ้นไม้สับของโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ", ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยมหิดล, 2544.

[16] American Society for Testing and Materials (ASTM), "Annual Book of American Standard Testing Method", Volume 05.06, 1996.

[17] ธนาพล ตันติสัตยกุล, สุริฉาย พงษ์เกษม, ปรีย์ปวีณ ภูหญ้า, และภานุวัฒน์ ไถ้บ้านกล้วย, "พลังงานทดแทนชุมชนจากเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งจากทางมะพร้าว", *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์*, ปีที่ 23 ฉบับที่ 3, หน้า 418-429, 2558.

[18] ทิพย์วรรณ ช่วยทอง, ธเนศ ไชยชนะ, และศุภลักษณ์ อำลอย, "สมบัติของถ่านจากเปลือกหมาก", *วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ*, ปีที่ 17 ฉบับที่ 3 ฉบับพิเศษ, หน้า 68-75, 2557.

[19] วลัยรัตน์ อุตตมะปรากรม, และธราพงษ์ วิทิตศานท์, "การผลิตถ่านอัดแท่งจากตะกอนเปียกเหลือทิ้งจากการผลิตเอทานอลจากมันเส้น", *วารสารวิจัยพลังงาน*, ปีที่ 8 ฉบับที่ 3, หน้าที่ 1-19, 2554.

[20] บริสุทธิ์ จันทรวงศ์ไพศาล, "สถานภาพเทคโนโลยีการทำ pellet ของประเทศไทย", 2552, สืบค้น มิถุนายน 20, 2560, จาก www.jgsee.kmutt.ac.th/v2/uploads /images/files/pellet.pdf.

[21] Pinatti, D.G., Conte, R.A., Borlini, M.C., Santos, B.C., Oliveira, I., Vieira, C.M.F., and Monteiro, S.N., "Incorporation of the ash from cellulignin into vitrified ceramic tiles", *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 26, pp. 305–310, 2006.

[22] ดนุพล ตันนโยภาส, กีรติกานต์ นิลยอง, และสุชาติ จันทรมณีย์, "การใช้ประโยชน์ของเถ้าใยปาล์มน้ำมันเป็นตัวเติมในกระเบื้องดินเผา", *วารสารมหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา*, ปีที่ 9 ฉบับที่ 2, หน้า 15-33, 2557.

[23] เอกลักษณ์ กิติภัทร์ถาวร, ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ, และวลัยลักษณ์ อุตตมะปรากรม, "เชื้อเพลิงอัดแท่งจากชีวมวลและตะกอนเปียกอุตสาหกรรมผลิตเอทานอล", *วารสารวิจัยพลังงาน*, ปีที่ 13 ฉบับที่ 3, หน้า 43-56, 2556.

[24] อดิเทพ เดชมา, เขมนิจจารีย์ สาริพันธ์, ประนิตดา เพ็งงิ้ว, และศตพล มุ่งค้ำกลาง, "การศึกษาค่าพลังงานความร้อนของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากเปลือกยูคาลิปตัสและซังข้าวโพด", *งานประชุมวิชาการระดับชาติมหาวิทยาลัยราชภัฏกลุ่มศรีอยุธยา ครั้งที่ 7*, 2559, หน้า 853-858.

[25] พิมลรัตน์ อินอุดม, และภิตินันท์ รัตนไตรสิงห์, "รายงานโครงการ เรื่องการศึกษาและพัฒนาถ่านอัดแท่งจากวัสดุเกษตรเพื่ออุตสาหกรรมในครัวเรือน", ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2549.

[26] สุพจน์ เดชผล, "การศึกษาศักยภาพและประสิทธิภาพของเชื้อเพลิงอัดแท่ง จากกากตะกอนน้ำเสียโรงงานน้ำตาลผสมกับชานอ้อย", ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2546).

[27] อัจฉรา อัศวรุจิกุลชัย, ชลันดา เสมสายัณห์, นัฐพร ประภักดี, ณัฐธิดา เปี่ยมสุวรรณศิริ, และนิภาวรรณ ชูชาติ, "การนำเปลือกทุเรียนและเปลือกมังคุดมาใช้ประโยชน์ในรูปเชื้อเพลิงอัดแท่ง", *การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 49: สาขาวิทยาศาสตร์*, 2554, หน้า 162-168.