

ชนิดและสัดส่วนตัวประสานต่อคุณภาพถ่านกะลาตาลโตนดอัดแห้ง  
โดยใช้ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก  
Effects of Binder Types and Ratios on Quality of  
Palmyra Palm Shell Charcoal Briquettes by  
Using Solar Greenhouse Dryer

อาคม ปะหลามานิต\*

บัณฑิตวิทยาลัยสหวิทยาการระบบพลังงาน มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์  
ถนนกาญจนวนณิชย์ ตำบลคอหงส์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110

พิสิฐุ ทรงเลิศ, ภคินี ธงไชย,

รวีสุดา แดงเปีย และสุเมธ ไชยประพัทธ์

สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์  
ถนนกาญจนวนณิชย์ ตำบลคอหงส์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110

Arkorn Palamanit\*

Interdisciplinary Graduate School of Energy Systems, Prince of Songkla University,  
Karnjanavanich Road, Kho Hong, Hat Yai, Songkhla 90110

Pisit Throngleart, Pakinee Thongshai,

Ravisuda Deangpea and Sumate Chairapat

Environmental Engineering Program, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering,  
Prince of Songkla University, Karnjanavanich Road, Kho Hong, Hat Yai, Songkhla 90110

---

### บทคัดย่อ

กะลาตาลโตนดเป็นชีวมวลเชิงพื้นที่ในจังหวัดสงขลาชนิดหนึ่งที่เกิดจากผลตาลสุกและการเพาะผลตาลเพื่อ  
ทำจาวตาล การผลิตถ่านกะลาตาลโตนดอัดแห้งเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงในครัวเรือนและร้านอาหารปิ้งย่างจึงเป็น  
แนวทางหนึ่งที่น่าสนใจ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของชนิดและสัดส่วนตัวประสานต่อคุณภาพ  
ของถ่านกะลาตาลโตนดอัดแห้งโดยใช้ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก คุณภาพของถ่านกะลา  
ตาลโตนดอัดแห้งพิจารณาจากองค์ประกอบแบบประมาณ องค์ประกอบแบบแยกธาตุ ค่าความร้อน ความต้านทาน  
แรงอัด ความหนาแน่น และความชื้น รวมทั้งศึกษาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งถ่านอัดแห้ง และประเมินต้นทุน

---

\*ผู้รับผิดชอบบทความ : [arkom.p@psu.ac.th](mailto:arkom.p@psu.ac.th)

การผลิตและระยะเวลาคั่วของถ่านกะลาตาลโตนดอัดแท่ง ตัวประสานที่ใช้มี 3 ชนิด ได้แก่ แป้งมัน กากมัน และ แป้งมันดิบ สัดส่วนตัวประสานร้อยละ 4, 7 และ 10 โดยน้ำหนัก ถ่านอัดแท่งที่ผลิตมีลักษณะเป็นทรงกระบอกหกเหลี่ยม มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 cm ยาว 10 cm และบริเวณตรงกลางมีรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 cm ลดความชื้นถ่านอัดแท่งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกจากความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 38.11-39.10 ฐานเปียก จนเหลือความชื้นสุดท้ายต่ำกว่าร้อยละ 8 ฐานเปียก ผลการศึกษพบว่ากรอบแห้งถ่านกะลาตาลโตนดอัดแท่งโดยใช้ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกสามารถอบถ่านอัดแท่งให้มีความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 8 ฐานเปียก ได้ภายใน 2 วัน ชนิดและสัดส่วนตัวประสานส่งผลเล็กน้อยต่อองค์ประกอบแบบประมาณองค์ประกอบแบบแยกธาตุ และค่าความร้อนของถ่านอัดแท่ง ถ่านอัดแท่งที่ได้มีค่าความร้อนต่ำ (lower heating value) 25.48-27.43 MJ/kg ชนิดและสัดส่วนตัวประสานส่งผลต่อความต้านทานแรงอัด ความหนาแน่น และความร่วน การผสมตัวประสานแต่ละชนิดด้วยสัดส่วนร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก ไม่เหมาะสำหรับการผลิตถ่านกะลาตาลโตนดอัดแท่ง เนื่องจากทำให้ได้ถ่านอัดแท่งที่มีความร่วนสูง การผลิตถ่านกะลาตาลโตนดอัดแท่งโดยใช้ตัวประสานทั้ง 3 ชนิด ที่สัดส่วนร้อยละ 7 และ 10 โดยน้ำหนัก ทำให้ได้ถ่านกะลาตาลโตนดอัดแท่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่านอัดแท่ง การใช้สัดส่วนตัวประสานเพิ่มขึ้นมีแนวโน้มที่ส่งผลให้เกิดควันมากขึ้นในระหว่างการลุกไหม้ของถ่านอัดแท่ง การผลิตถ่านกะลาตาลโตนดอัดแท่งโดยใช้กากมันที่สัดส่วนร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก เป็นตัวประสานทำให้ต้นทุนการผลิตและระยะเวลาคั่วต่ำสุด

**คำสำคัญ :** การอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์; ถ่านอัดแท่งจากกะลาตาลโตนด; เชื้อเพลิงชีวมวลแข็ง; ตัวประสาน; ระยะเวลาคั่ว

## Abstract

The palmyra palm shell is one of local biomass in Songkhla Province. This biomass is the residue from processing of ripe palmyra palm fruit. The production of palmyra palm shell charcoal briquettes (PSCBs) for using as biofuel in household and grinder restaurant is an interesting way. The objectives of this study were therefore to study the effects of binder types and ratios on the quality of PSCBs by using solar greenhouse drying (SGD) system. The quality of PSCBs was considered in terms of proximate analysis, ultimate analysis, heating value, compressive strength, density and crumbling. The drying kinetics, production cost and payback period of PSCBs were also studied. The binders that used in this study included tapioca flour, tapioca residue and native tapioca starch. The proportions of binders were 4, 7 and 10 % (wt), respectively. The spiral compression machine was used as charcoal briquettes making machine. The obtained PSCBs had hexagonal prism geometry with diameter of 5 cm, length of 10 cm and at the center of PSCBs has a hole with diameter of 1.5 cm. The moistened PSCBs were dried by SGD system until their final moisture content were lower than 8 % (wet basis). The results showed that drying of PSCBs with

SGD system to the desired final moisture content can be done within 2 days. Type and ratio of binders had small effects on the quality of PSCBs, considering from the results of proximate analysis, ultimate analysis and heating value. The lower heating values (LHV) of PSCBs were in the range of 25.48-27.43 MJ/kg. Type and ratio of binders had effects on compressive strength, density and crumbling of PSCBs. Mixing of binders with the ratio of 4 % (wt) was not appropriate to produce the PSCBs due to they were highly crumbling. Production of PSCBs by adding the proposed binders with the ratios of 7 and 10 % (wt) obtained the PSCBs which pass the charcoal briquettes standard. However, adding more ratio of each binder into charcoal mixture led to higher smoke during burning of PSCBs. Production of PSCBs with 7 % (wt) of tapioca residue provided the lowest production cost and payback period.

**Keywords:** solar drying; palmyra palm shell charcoal briquette; solid biomass fuel; binder; payback period

## 1. บทนำ

การใช้ชีวมวลเป็นพลังงานทดแทนนอกจากจะช่วยลดการพึ่งพาพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล ยังเป็นการเพิ่มความมั่นคงและยั่งยืนด้านพลังงาน รวมทั้งช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งตามแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก (Alternative Energy Development Plan, AEDP) [1] ของประเทศไทยปี พ.ศ. 2558 ได้มีการส่งเสริมให้ใช้พลังงานชีวภาพ ได้แก่ ชีวมวล ขยะอินทรีย์จากชุมชน และก๊าซชีวภาพ เพื่อผลิตไฟฟ้าและความร้อนเพิ่มมากขึ้น โดยกรณีของการใช้ชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานทดแทนนั้น ประเทศไทยมีชีวมวลหลายชนิดที่มีศักยภาพ ได้แก่ อ้อย มันสำปะหลัง ปาล์มน้ำมัน ยางพารา และข้าวโพด [2] รวมทั้งชีวมวลเชิงพื้นที่ต่าง ๆ ดัง เช่น ตาลโตนด ซึ่งเป็นชีวมวลเชิงพื้นที่ชนิดหนึ่งที่มีมากในภาคใต้ของประเทศไทย กรณีของจังหวัดสงขลานั้นมีพื้นที่ปลูกตาลโตนดประมาณ 8,242 ไร่ คิดเป็นพื้นที่ให้ผลผลิต 4,739 ไร่ ซึ่งครอบคลุมพื้นที่ในจังหวัดสงขลาหลายอำเภอ ได้แก่ สิงหนคร สทิงพระ กระแสสินธุ์ รัตภูมิ และจะนะ [3]

โดยปกติตาลโตนดใช้ประโยชน์ได้หลายส่วน ตั้งแต่ส่วนรากจนถึงยอดของลำต้น เช่น รากใช้ต้มเป็นยารักษาโรคตานขโมย การผลิตน้ำตาลโตนดและน้ำตาลสดจากการปาดวงตาล การนำผลตาลสุกมาเพาะเพื่อทำจาวตาล การแยกเส้นใยตาลจากผลตาลสุกเพื่อใช้ในงานหัตถกรรม การใช้ใบตาลมุงหลังคา การใช้ทางตาลทำรั้วคอกสัตว์เลี้ยง และการใช้ลำต้นตาลทำเครื่องเรือน การใช้ประโยชน์ตาลโตนดในส่วนต่าง ๆ นั้นทำให้เกิดชีวมวลเหลือทิ้ง เช่น กรณีของการเพาะผลตาลเพื่อทำจาวตาลนั้น เมื่อผ่าผลตาลเพื่อนำจาวตาลออกมาทำให้เกิดกะลาตาลจำนวนมาก ซึ่งชาวบ้านจะนำกะลาตาลมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในครัวเรือนด้วยการเผาไหม้ [4]

โดยทั่วไปการเปลี่ยนรูปชีวมวลเป็นพลังงานทำได้โดยกระบวนการดังนี้ (1) กระบวนการทางเคมีความร้อน (thermochemical process) เช่น การเผาไหม้ (combustion) แก๊สซิฟิเคชัน (gasification) และไพโรไลซิส (pyrolysis) (2) กระบวนการทางชีวเคมี (biochemical process) เช่น การผลิตก๊าซชีวภาพ

(biogas) และการผลิตเอทานอล (ethanol) (3) กระบวนการทางกล (mechanical process) เช่น การอัดชีวมวลเป็นอัด การอัดชีวมวลเป็นแท่ง การหีบน้ำมัน และการอัดชีวมวลเป็นก้อน และ (4) กระบวนการร่วม (combined process) เช่น การเผาชีวมวลเป็นถ่านแล้วอัดถ่านชีวมวลเป็นแท่ง และการหีบน้ำมันปาล์มแล้วเปลี่ยนน้ำมันปาล์มเป็นไบโอดีเซล [5] การเลือกใช้กระบวนการเปลี่ยนรูปพลังงานควรคำนึงถึงเป้าหมายการใช้พลังงาน การจัดเก็บ และการขนส่ง ซึ่งกรณีของการใช้กะลาตาลโตนดเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อนผ่านการเผาไหม้ นั้นพบว่า การใช้กะลาตาลเป็นเชื้อเพลิงโดยตรงนั้นยังมีข้อจำกัดอยู่บ้าง เช่น การเกิดควันในระหว่างการเผาไหม้ การให้ความร้อนที่ไม่สม่ำเสมอ ความชื้นไม่แน่นอน การเกิดสะเก็ดไฟในระหว่างการเผาไหม้ กะลาตาลมีความหนาแน่นของพลังงานค่อนข้างต่ำ และการเสื่อมสภาพหรือการย่อยสลายในระหว่างการเก็บรักษา ทำให้ไม่เหมาะที่จะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงแข็งเชิงพาณิชย์โดยตรง เช่น การใช้ในร้านอาหารประเภทปิ้งย่าง ดังนั้นการเปลี่ยนรูปกะลาตาลโตนดเป็นถ่านกะลาตาลโตนดอัดแท่งจึงเป็นแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจ การผลิตถ่านกะลาตาลโตนดอัดแท่งนอกจากจะก่อให้เกิดประโยชน์ด้านพลังงาน (energy) และสิ่งแวดล้อม (environment) แล้วยังทำให้เกิดประโยชน์ด้านสังคม (society) โดยการสร้างรายได้ให้แก่ชาวบ้านในพื้นที่ รวมทั้งการร่วมมือกันระหว่างผู้นำชุมชนและชาวบ้าน ซึ่งจะเป็นต้นแบบที่ดีสำหรับการพัฒนาระบบพลังงานในระดับชุมชนให้มีความยั่งยืนและมั่นคงต่อไปในอนาคต [6]

การผลิตถ่านอัดแท่งเป็นกระบวนการที่นำชีวมวล เช่น ไม้พิน กะลาปาล์ม กะลามะพร้าว กะลาตาลโตนด และชีวมวลอื่น ๆ มาให้ความร้อนภายใต้สภาวะที่จำกัดอากาศหรือออกซิเจน เพื่อแปรสภาพชีวมวลให้เป็นถ่านซึ่งมีปริมาณสารระเหยและความชื้น

น้อยลง แล้วบดถ่านเป็นผงหรือเม็ดแล้วอัดขึ้นรูปตามรูปทรงที่ต้องการ [7-11] หรืออาจใช้กระบวนการนำชีวมวล เช่น แกลบ ขี้เลื่อย และชีวมวลอื่น ๆ ที่มีขนาดเล็ก มาอัดขึ้นรูปตามที่ต้องการแล้วนำไปแปรสภาพเป็นถ่าน ซึ่งกระบวนการเตรียมผงถ่านเพื่อผลิตถ่านอัดแท่งนั้นจำเป็นต้องผสมตัวประสานและน้ำในสัดส่วนที่เหมาะสม เพื่อให้ผงถ่านเกิดการยึดเกาะกันได้ดีในระหว่างการอัดแท่ง และไม่เปราะหรือแตกร่วนในระหว่างการบรรจุหรือขนส่ง โดยทั่วไปถ่านอัดแท่งที่ผลิตขายมีลักษณะเป็นทรงกระบอก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5 cm และยาวประมาณ 10 cm และตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่านอัดแท่ง ซึ่งกำหนดให้ถ่านอัดแท่งมีความชื้นไม่เกินร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก มีค่าความความร้อนไม่น้อยกว่า 20.93 MJ/kg (5,000 cal/g) [12] และเมื่อจุดติดไฟแล้วต้องไม่เกิดสะเก็ดไฟ รวมทั้งไม่มีกลิ่นและควันในระหว่างการลุกไหม้ การผลิตถ่านอัดแท่งให้มีคุณภาพและสมบัติตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่านอัดแท่งนั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น สมบัติของชีวมวล ส่วนผสม ขนาด และรูปทรง และเงื่อนไขการอัดแท่ง ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ล้วนแต่ส่งผลต่อสมบัติทางกล ค่าความร้อน และคุณลักษณะการเป็นเชื้อเพลิงของถ่านอัดแท่ง ดังนั้นด้วยเหตุผลดังกล่าวงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของชนิดและสัดส่วนตัวประสานต่อคุณภาพของถ่านกะลาตาลโตนดอัดแท่งโดยใช้ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก รวมทั้งศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งถ่านกะลาตาลโตนดอัดแท่งและประเมินต้นทุนและระยะเวลาคืนทุนของการผลิตถ่านกะลาตาลโตนดอัดแท่ง

## 2. อุปกรณ์และวิธีการ

### 2.1 การเตรียมวัตถุดิบ

งานวิจัยนี้ใช้ถ่านกะลาตาลโตนด ซึ่งรับซื้อ

จากชาวบ้านในตำบลคลองรี อำเภอสิงหนิง จังหวัดสงขลา แล้วนำถ่านมาบดด้วยเครื่องบดถ่านที่ติดตั้งตะแกรงซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรู 5 mm เพื่อลดขนาดถ่านให้เหมาะสมสำหรับการผลิตถ่านอัดแท่ง ถ่านที่บดแล้วมีความชื้นร้อยละ 16 ฐานเปียก (wet basis) ส่วนตัวประสาน (binder) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยกากมัน แป้งมัน และแป้งมันดิบ สำหรับกากมันนั้นจำเป็นต้องนำมาผ่านกระบวนการบดละเอียด เนื่องจากกากมันที่ได้จากผู้จำหน่ายมีการเกาะกันเป็นก้อน ซึ่งเกิดขึ้นในระหว่างการลดความชื้น โดยงานวิจัยนี้ใช้เครื่องบดละเอียดยี่ห้อ FUXUN รุ่น FX-180 พร้อมติดตั้งตะแกรงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm จากนั้นทดสอบหาสัดส่วนการกระจายขนาดของอนุภาคผงถ่าน (particle size distribution) ด้วยเครื่อง vibratory sieve shaker Analysett 3 Pro (Fritsch, Germany) ตามมาตรฐาน ASTM E11 วิเคราะห์หาองค์ประกอบแบบประมาณ (proximate analysis) โดยใช้ macro thermogravimetric analyzer (TGA 701, LECO, USA) ตามมาตรฐาน ASTM E1131 วิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุหรือ

แบบละเอียด (ultimate analysis) โดยใช้เครื่อง CHNS/ O analyzer (FLASH 2000, Thermo Scientific, Italy) ตามมาตรฐาน ASTM D4239 ทดสอบหาค่าความร้อนต่ำ (lower heating value, LHV) ด้วยเครื่อง Bomb calorimeter (C5000, IKA® Werke, Germany) ตามมาตรฐาน EN14918 การวิเคราะห์หาองค์ประกอบแบบประมาณตรวจสอบเพียงซ้ำเดียว ส่วนการวิเคราะห์หาองค์ประกอบแบบแยกธาตุและการตรวจสอบค่าความร้อนต่ำทำซ้ำ 3 ครั้ง และผลการตรวจสอบที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยพร้อมกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

## 2.2 การผลิตถ่านอัดแท่ง

งานวิจัยนี้ผลิตถ่านอัดแท่งจากถ่านกะลาตาลโตนดโดยใช้ตัวประสาน 3 ชนิด ซึ่งประกอบด้วยแป้งมัน กากมัน และแป้งมันดิบ โดยปริมาณผงถ่านที่ใช้แต่ละครั้งมีปริมาณ 10 kg น้ำมีปริมาณ 4 kg และปริมาณตัวประสาน 0.4-1 kg (ร้อยละ 4, 7 และ 10 โดยน้ำหนัก เทียบกับน้ำหนักผงถ่าน) ดังแสดงตามตารางที่ 1

**Table 1** Conditions for preparing the composition of charcoal briquettes

| Conditions no. | Compositions         |            |                             |             |
|----------------|----------------------|------------|-----------------------------|-------------|
|                | Ground charcoal (kg) | Water (kg) | Binder types                | Binder (kg) |
| 1              | 10                   | 4          |                             | 0.4         |
| 2              | 10                   | 4          | Tapioca flour (TF)          | 0.7         |
| 3              | 10                   | 4          |                             | 1.0         |
| 4              | 10                   | 4          |                             | 0.4         |
| 5              | 10                   | 4          | Tapioca residue (TR)        | 0.7         |
| 6              | 10                   | 4          |                             | 1.0         |
| 7              | 10                   | 4          |                             | 0.4         |
| 8              | 10                   | 4          | Native tapioca starch (NTS) | 0.7         |
| 9              | 10                   | 4          |                             | 1.0         |



Figure 1 Real charcoal briquette machine used in this study

สำหรับระบบผลิตถ่านอัดแท่งที่ใช้ในงานวิจัยแสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งประกอบด้วยชิ้นส่วนและอุปกรณ์ที่สำคัญดังนี้ (1) ถังผสมถ่านรูปทรงกระบอกแกนตั้งพร้อมชุดใบกวนและมอเตอร์ต้นกำลัง (2) ชุดลำเลียงส่วนผสมแบบสกรูที่ทำหน้าที่ลำเลียงส่วนผสมจากถังผสมมายังหัวอัดถ่าน (3) หัวอัดถ่านแบบสกรูพร้อมมอเตอร์ไฟฟ้าต้นกำลังและระบบทดรอบผ่านมูเลย์และสายพาน หัวอัดถ่านที่ใช้ผลิตถ่านอัดแท่งมีลักษณะเป็นทรงหกเหลี่ยมและมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 cm บริเวณตรงกลางติดตั้งแกนเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 cm เพื่อทำให้เกิดรูตรงกลางถ่านอัดแท่ง (4) ชุดตัดถ่านอัดแท่งแบบนิวเมติกส์ที่ทำงานแบบอัตโนมัติ ระบบถูกปรับตั้งให้ตัดถ่านอัดแท่งเมื่อมีความยาว 10 cm และ (5) ชุดสายพานลำเลียงถ่านอัดแท่งที่ตัดตามขนาดแล้ว ซึ่งจะทำหน้าที่ลำเลียงถ่านจากหัวอัดไปยังบริเวณจัดเรียงถ่านสำหรับการนำไปอบแห้งต่อไป

การผลิตถ่านอัดแท่งเริ่มจากการนำผงถ่านมาผสมกับตัวประสานภายในถังผสม เพื่อผสมส่วนผสมดังกล่าวให้เป็นเนื้อเดียวกัน โดยใช้ระยะเวลา 20 min

จากนั้นค่อย ๆ ผสมน้ำกับส่วนผสมที่อยู่ภายในถังผสม เพื่อให้ส่วนน้ำกระจายทั่วส่วนผสมอย่างสม่ำเสมอ ปรับตั้งช่องเปิดของถังผสมเพื่อให้ส่วนผสมของผงถ่านที่ผสมเสร็จแล้วไหลออกจากถังผสม และไหลเข้าสู่ชุดลำเลียงเพื่อลำเลียงส่วนผสมของผงถ่านจากช่องทางออกของถังผสมไปยังเครื่องอัดถ่านแบบสกรู ถ่านอัดแท่งที่เคลื่อนที่ออกจากกระบอกอัดแบบสกรูจะถูกตัดเป็นท่อนด้วยระบบตัดอัตโนมัติแบบนิวเมติกส์ ถ่านที่ได้มีลักษณะเป็นทรงหกเหลี่ยมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 cm ยาว 10 cm และบริเวณตรงกลางมีรูขนาด 1.5 cm ตลอดความยาวของถ่านอัดแท่ง

### 2.3 การตรวจสอบคุณภาพและสมบัติถ่านอัดแท่ง

การทดสอบหาความต้านทานแรงอัด (compressive strength) ทำได้โดยนำตัวอย่างถ่านอัดแท่งไปวางตามแนวนอนในเครื่องทดสอบแรงอัด (Zwick, Z010, USA) จากนั้นเพิ่มแรงอัดขึ้นเรื่อย ๆ และสังเกตผลจนกระทั่งถ่านอัดแท่งแตกหรือหัก บันทึกค่าความต้านทานแรงอัดสูงสุดที่ถ่านอัดแท่งรับได้ โดยตรวจสอบซ้ำ 3 ครั้ง และรายงานค่าเฉลี่ยพร้อมด้วย

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ความหนาแน่น (density) ของถ่านอัดแท่ง ซึ่งแสดงอัตราส่วนระหว่างมวลของอัดแท่งต่อปริมาตรของถ่านอัดแท่ง มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ( $\text{kg/m}^3$ ) และคำนวณจากสมการที่ (1) โดยตรวจสอบซ้ำ 3 ครั้ง และรายงานค่าเฉลี่ยพร้อมด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{kg/m}^3) \quad (1)$$

เมื่อ  $\rho$  คือ ความหนาแน่นของถ่านกะลาตาลโดนอัดแท่ง ( $\text{kg/m}^3$ );  $m$  คือ มวลของถ่านกะลาตาลโดนอัดแท่ง (kg);  $V$  คือ ปริมาตรของถ่านกะลาตาลโดนอัดแท่ง ( $\text{m}^3$ )

การวิเคราะห์หาองค์ประกอบแบบประมาณ ซึ่งประกอบด้วยปริมาณความชื้น (moisture content) ปริมาณสารระเหย (volatile matter) ปริมาณขี้เถ้า (ash content) ปริมาณคาร์บอนคงตัว (fixed carbon) วิเคราะห์ด้วยเครื่อง simultaneous thermal analyzer (STA8000, Perkin Elmer, USA) ตามมาตรฐาน ASTM E1131 และผลลัพธ์แสดงค่าเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก (% wt, as received basis)

ค่าความร้อน (heating value) ของถ่านกะลาตาลโดนอัดแท่งทดสอบหาด้วยเครื่อง bomb calorimeter (IKA<sup>®</sup> Calorimeter System C5000 Control, Germany) ซึ่งวิเคราะห์ตามขั้นตอนของ BSEN14918 และผลลัพธ์ที่ได้รายงานอยู่ในรูปของค่าความค่าความร้อนต่ำ (lower heating value, LHV) และค่าความร้อนสูง (higher heating value, HHV) โดยตรวจสอบซ้ำ 3 ครั้ง และรายงานค่าเฉลี่ยพร้อมด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในหน่วยของ MJ/kg

องค์ประกอบแบบละเอียดหรือแบบแยกธาตุ ได้แก่ ปริมาณคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ไนโตรเจน (N) และซัลเฟอร์ (S) วิเคราะห์หาด้วยเครื่อง CHNS-O analyzer (CE Instruments Flash EA 1112

Series, Thermo Quest, Italy) ซึ่งวิเคราะห์ตามมาตรฐาน EN15104 และ ASTM D4239 โดยวิเคราะห์ซ้ำ 3 ครั้ง และรายงานค่าเฉลี่ยพร้อมด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในหน่วยของร้อยละโดยน้ำหนัก (% wt) ส่วนปริมาณออกซิเจน (O) คำนวณจากความแตกต่างของค่าเฉลี่ย

ระยะเวลาการลุกไหม้ของถ่านอัดแท่ง ปริมาณขี้เถ้า การเกิดควัน และการเกิดสะเก็ดไฟทดสอบโดยการนำตัวอย่างถ่านอัดแท่งมาชั่งน้ำหนักแล้วนำไปจุดติดไฟเป็นระยะเวลา 7 นาที ชั่งน้ำหนักอีกครั้งหลังจากจุดติดไฟและนำตัวอย่างที่จุดติดไฟแล้วไปวางบนแผ่นตะแกรงเพื่อให้เกิดการลุกไหม้ตามธรรมชาติ บันทึกระยะเวลาเพื่อหาระยะเวลาการลุกไหม้ของถ่าน (burning time) พร้อมทั้งสังเกตการณ์เกิดควันและการเกิดสะเก็ดไฟด้วยตาเปล่า (visual observation) ในระหว่างการลุกไหม้ ซึ่งการเกิดควันไฟนั้นจะสังเกตจากสีของควันไฟที่มีลักษณะเป็นสีขาวและช่วงระยะเวลาที่เกิดควัน สำหรับการสังเกตการเกิดสะเก็ดไฟนั้นสังเกตได้จากการประทุของสะเก็ดไฟในระหว่างที่ถ่านอัดแท่งลุกติดไฟ เมื่อถ่านอัดแท่งลุกไหม้จนเหลือแต่ขี้เถ้าแล้ว นำขี้เถ้ามาชั่งน้ำหนักเพื่อหาร้อยละของปริมาณขี้เถ้าหลังลุกไหม้โดยสมบูรณ์ การตรวจสอบระยะเวลาการลุกไหม้และปริมาณขี้เถ้าของถ่านอัดแท่งดำเนินการซ้ำ 3 ครั้ง และรายงานค่าเฉลี่ยพร้อมด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

#### 2.4 การอบแห้งและการศึกษาจลนพลศาสตร์

##### การอบแห้งถ่านกะลาตาลโดนอัดแท่ง

การอบแห้งถ่านอัดแท่งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกดำเนินการโดยนำตัวอย่างถ่านอัดแท่งซึ่งมีความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 38.11-39.10 ฐานเปียก มาอบด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก (solar greenhouse dryer) ซึ่งมีพื้นที่  $49.2 \text{ m}^2$  (กว้าง 6.0 m และยาว

8.20 m) ปิดคลุมด้วยแผ่นโพลีคาร์บอเนตแบบโปร่งแสงที่มีความหนา 6 mm พร้อมทั้งมีพัดลมระบายอากาศ โดยในช่วงการวิจัยความเข้มข้นรังสีดวงอาทิตย์มีค่า 16.66-19.11 MJ/m<sup>2</sup>·day (เดือนมกราคมถึงเดือนพฤษภาคม ปี พ.ศ. 2559) [13] อุณหภูมิแวดล้อม 29.7-34.6 °C บันทึกน้ำหนักถ่านทุก ๆ 1 ชั่วโมง จนกว่าน้ำหนักถ่านจะคงที่หรือลดลงน้อยกว่า 1 กรัม บันทึกอุณหภูมิถ่านแต่ละเงื่อนไขทุก ๆ 1 ชั่วโมง รวมทั้งอุณหภูมิอากาศภายในระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก และหาค่าความชื้นของถ่านอัดแห้งแต่ละเงื่อนไข การหาค่าความชื้นของถ่านอัดแห้งแต่ละเงื่อนไข การหาค่าความชื้นถ่านอัดแห้งดำเนินการโดยใช้วิธีการอบด้วยตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 103 °C เป็นระยะเวลา 72 ชั่วโมง แล้วคำนวณหาความชื้นของถ่านอัดแห้งและแสดงค่าความชื้นอยู่ในรูปร้อยละฐานเปียก สำหรับจลนพลศาสตร์การอบแห้งถ่านอัดแห้งในระหว่างการอบแห้งแสดงอยู่ในรูปของการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนความชื้น (moisture ratio, MR) ซึ่งอัตราส่วนความชื้นเป็นค่าที่แสดงถึงปริมาณความชื้นของวัสดุ ณ เวลาอบแห้งใด ๆ ต่อปริมาณความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ

ส่วนการศึกษาการอบแห้งถ่านอัดแห้งด้วยตู้อบลมร้อนดำเนินการโดยนำถ่านอัดแห้งมาลดความชื้นด้วยตู้อบลมร้อน (Memmert UF55, 53 L) ที่อุณหภูมิ 65 °C (เป็นค่าอุณหภูมิจาก solar greenhouse dryer) แล้วชั่งน้ำหนักถ่านอัดแห้งทุก ๆ 1 ชั่วโมง จนกว่าน้ำหนักจะคงที่หรือลดลงน้อยกว่า 1 กรัม และจลนพลศาสตร์การอบแห้งถ่านอัดแห้งในระหว่างการอบด้วยตู้อบลมร้อนแสดงอยู่ในรูปของการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนความชื้น (MR)

## 2.5 การวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์

งานวิจัยนี้วิเคราะห์หาต้นทุนการผลิตถ่านอัดแห้งต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนัก (kg) ซึ่งต้นทุนการผลิตถ่านอัดแห้งที่พิจารณาประกอบด้วยค่าตัวประสาน ค่า

ถ่าน ค่าน้ำ ค่าไฟฟ้า ค่าแรง และค่าระบบผลิตถ่านอัดแห้ง ดังแสดงตามตารางที่ 7 ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์แสดงอยู่ในรูปต้นทุนการผลิตต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักถ่านอัดแห้ง (บาท/กิโลกรัม) และต้นทุนการผลิตต่อหนึ่งหน่วยค่าความร้อนต่ำ (บาท/MJ<sub>LHV</sub>)

สำหรับการพิจารณาระยะเวลาคืนทุน (payback period) นั้น งานวิจัยนี้พิจารณาจากสัดส่วนเงินลงทุนเริ่มต้นทั้งหมดต่อกำไรสุทธิ ดังแสดงตามสมการที่ (2) การพิจารณาด้านต้นทุนการผลิตและระยะเวลาคืนทุนใช้ข้อมูลพื้นฐานดังนี้ (1) ผลิตถ่านอัดแห้งได้ปีละ 144,000 กิโลกรัม (2) อายุการใช้งานระบบผลิตถ่านอัดแห้ง 10 ปี (3) ต้นทุนระบบผลิตถ่านอัดแห้งและระบบอบแห้งแบบเรือนกระจก 550,000 บาท (4) ค่าซ่อมบำรุงระบบผลิตถ่านอัดแห้ง 17,500 บาท/ปี และ (5) ราคาขายส่งถ่านอัดแห้ง 15 บาท/กิโลกรัม ส่วนข้อมูลอื่น ๆ แสดงตามตารางที่ 7

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน} = [\text{เงินลงทุนเริ่มต้นทั้งหมด (บาท)} \div \text{กำไรสุทธิ (บาท/ปี)}] \quad (2)$$

## 3. ผลการวิจัยและวิจารณ์

### 3.1 สมบัติของวัสดุที่ใช้ผลิตถ่านกะลาตาลโตนดอัดแห้ง

ตารางที่ 2 แสดงสัดส่วนขนาดอนุภาคผงถ่านกะลาตาลโตนดหลังการบด ซึ่งผลการทดสอบพบว่าผงถ่านมีขนาดอนุภาคส่วนใหญ่ 2.0-4.76, 0.84-1.19, 1.19-2.0, 0.42-0.60 และ 0.6-0.84 mm ร้อยละ 27.79, 25.22, 18.59 และ 17.46 โดยน้ำหนักตามลำดับ ขนาดอนุภาคผงถ่านมีผลต่อความหนาแน่นของถ่านอัดแห้ง หากผงถ่านมีขนาดอนุภาคเล็กมากเมื่อนำมาอัดแห้งจะทำให้ได้ถ่านอัดแห้งที่มีความหนาแน่นสูง ถ่านอัดแห้งที่มีความหนาแน่นสูงมีจำนวนช่องว่างอากาศ (number of pore) และขนาดช่องว่างอากาศเล็ก (small pore size) ส่งผลทำให้จุดติดไฟได้

ยากในตอนเริ่มจุดติดไฟ แต่ข้อดีของถ่านอัดแท่งที่มีความหนาแน่นสูง คือ เมื่อจุดติดไฟแล้วจะเกิดลูกไหม้ได้นาน ดังนั้นการบดถ่านเพื่อผลิตถ่านอัดแท่งควรบดให้มีขนาดที่เหมาะสม ซึ่งอนุภาคผงถ่านควรมีทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ผสมกันในสัดส่วนที่เหมาะสม เพื่อช่วยทำให้เกิดการจุดติดไฟได้เร็วขึ้น รวมทั้งได้ระยะเวลาการลุกไหม้เหมาะสมกับการใช้งานจริง

**Table 2** Particle size distribution of ground palmyra palm shell charcoal

| Sieve sizes | Particle sizes (mm) | Particle size distribution (% wt) |
|-------------|---------------------|-----------------------------------|
| 4           | > 4.76              | 0.31                              |
| 10          | 2.00-4.76           | 27.79                             |
| 16          | 1.19-2.00           | 17.46                             |
| 20          | 0.84-1.19           | 25.22                             |
| 30          | 0.60-0.84           | 5.22                              |
| 40          | 0.42- .60           | 18.59                             |
| 50          | 0.30-0.42           | 0.69                              |
| PAN         | < 0.30              | 4.72                              |

### 3.2 สมบัติของวัตถุดิบที่ใช้ผลิตถ่านกะลาตาลโตนดอัดแท่ง

ตารางที่ 3 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ และค่าความร้อนของวัตถุดิบที่ใช้ผลิตถ่านกะลาตาลโตนดอัดแท่ง ซึ่งประกอบด้วยผงถ่านตาลโตนด แป้งมัน แป้งมันดิบ และกากมัน ผลการวิเคราะห์พบว่าผงถ่านที่ใช้มีความชื้นร้อยละ 16.03 โดยน้ำหนัก และตัวประสานมีค่าความชื้นร้อยละ 7.73-11.42 โดยน้ำหนัก ความชื้นในผงถ่านส่งผลต่อปริมาณน้ำที่ใช้ผสมในกระบวนการเตรียมส่วนผสม หากผงถ่านมีความชื้นสูงปริมาณน้ำที่ใช้ผสมจะมีสัดส่วนลดลง

อย่างไรก็ตาม หากผงถ่านมีความชื้นสูงมากเกินไปจะส่งผลกระทบต่อกระบวนการเก็บรักษา ผงถ่านที่มีความชื้นสูงมีโอกาสที่จะเกิดการเสื่อมสภาพหรือการเกิดราได้สูงหากผงถ่านดังกล่าวเก็บรักษาในสถานที่ที่ไม่เหมาะสม นอกจากนี้ความชื้นในผงถ่านและปริมาณน้ำที่ใช้ผสมยังส่งผลต่อคุณภาพถ่านอัดแท่งหลังการอัด หากส่วนผสมของผงถ่านและตัวประสานมีความชื้นมากเกินไปจะส่งผลทำให้ถ่านอัดแท่งหลังการอัดมีความอ่อนตัวสูง ซึ่งมีโอกาสที่จะเกิดการแตกหักได้ง่าย ดังนั้นการเตรียมส่วนผสมของผงถ่านและตัวประสานจึงจำเป็นต้องใช้ปริมาณน้ำที่เหมาะสม ซึ่งพิจารณาได้จากความชื้นของผงถ่านและความชื้นของตัวประสาน

การพิจารณาปริมาณซีเถ้าของวัตถุดิบพบว่าผงถ่านกะลาตาลโตนดมีปริมาณซีเถ้าร้อยละ 5.88 โดยน้ำหนัก และตัวประสานมีปริมาณซีเถ้าร้อยละ 0.86-2.93 โดยน้ำหนัก สำหรับตัวประสานนั้น แป้งมันดิบมีปริมาณซีเถ้าต่ำสุด คือ 0.86 โดยน้ำหนัก เมื่อเปรียบเทียบปริมาณซีเถ้าของผงถ่านกะลาตาลโตนดกับถ่านกะลามะพร้าว ถ่านไม้ยางพารา และถ่านกะลาปาล์ม พบว่าถ่านกะลาตาลโตนดมีปริมาณซีเถ้าต่ำกว่าถ่านถ่านกะลาปาล์มและถ่านไม้ยางพารา แต่มีปริมาณซีเถ้าสูงกว่าถ่านกะลามะพร้าว ซึ่งถ่านกะลามะพร้าว ถ่านไม้ยางพารา และถ่านกะลาปาล์มมีปริมาณซีเถ้าร้อยละ 2.36, 8.92 และ 6.98 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ [9] ปริมาณซีเถ้าในถ่านที่ใช้ผลิตถ่านอัดแท่งจะส่งผลต่อปริมาณซีเถ้าที่เกิดหลังการลุกไหม้ของถ่านอัดแท่ง นอกจากนี้ยังส่งผลต่อค่าความร้อนของถ่านอัดแท่งเช่นกัน เนื่องจากซีเถ้าเป็นส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้และหากวัตถุดิบที่มีปริมาณซีเถ้าสูงก็จะส่งผลทำให้มีค่าความร้อนต่ำ

ส่วนปริมาณสารระเหยพบว่าผงถ่านกะลาตาลโตนดมีปริมาณสารระเหยร้อยละ 23.37 โดยน้ำหนัก และตัวประสานมีปริมาณสารระเหยร้อยละ

83.92-87.41 โดยน้ำหนัก ซึ่งสังเกตเห็นได้ว่าถ่านที่ใช้มีปริมาณสารระเหยค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับชีวมวลแข็งทั่วไป เช่น กะลาตาลโตนด (ร้อยละ 77.28 โดยน้ำหนัก) [6] กะลาปาล์ม (ร้อยละ 83.45 โดยน้ำหนัก) [14] และกะลามะพร้าว (ร้อยละ 74.27 โดยน้ำหนัก) [15] สาเหตุที่ทำให้ถ่านมีปริมาณสารระเหยลดลง เนื่องในกระบวนการผลิตถ่านนั้นเป็นการทำให้สารระเหยเกิดการระเหยออกจากชีวมวล เพื่อทำให้คงเหลือแต่ส่วนที่เป็นคาร์บอน ซึ่งโดยปกติแล้วสารระเหยในชีวมวลมีสมบัติจุดติดไฟและให้ความร้อน แต่สำหรับการผลิตถ่านอัดแท่งนั้นปริมาณสารระเหยจะส่งผลให้เกิดควันไฟในระหว่างการลุกไหม้ ซึ่งไม่เป็นที่พึงประสงค์ของผู้ใช้ถ่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในร้านอาหารปิ้งย่าง ดังนั้นการผลิตถ่านอัดแท่งจึงควรเลือกใช้ถ่านที่มีปริมาณสารระเขยน้อย เพื่อลดการเกิดควันในระหว่างการลุกไหม้ของถ่าน ส่วนปริมาณสารระเหยของตัวประสานนั้นส่งผลต่อการเกิดควันน้อยในระหว่างการลุกไหม้ของถ่านอัดแท่ง เนื่องจากสัดส่วนตัวประสานที่ใช้มีปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณผงถ่าน สำหรับผลการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนคงตัวพบว่าผงถ่านกะลาตาลโตนดมีปริมาณคาร์บอนคงตัวร้อยละ 54.72 โดยน้ำหนัก และตัวประสานมีปริมาณคาร์บอนคงตัวร้อยละ 0.20-5.43 โดยน้ำหนัก ถ่านกะลาตาลโตนดมีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงเนื่องจากในกระบวนการผลิตถ่านนั้นทำให้ความชื้นและสารระเหยส่วนใหญ่ออกไป และเหลือส่วนที่เป็นคาร์บอนคงตัวซึ่งมีสมบัติเป็นเชื้อเพลิง ส่วนตัวประสานจะเห็นได้ว่ากากมันมีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูง เนื่องจากกากมันเป็นส่วนเหลือทิ้งจากการบวนการผลิตแ่งมันและมีส่วนผสมของเส้นใยที่เป็นลิกโนเซลลูโลสสูงกว่าแ่งมันและแ่งมันดิบ

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุหรือแบบละเอียดของวัตถุดิบ ได้แก่ ผงถ่านกะลา

ตาลโตนด แ่งมัน แ่งมันดิบ และกากมัน พบว่าวัตถุดิบดังกล่าวมีปริมาณคาร์บอน ซัลเฟอร์ ไนโตรเจน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ร้อยละ 38.59-71.61, 0.01-0.07, 0.01-0.92, 1.95-6.45 และ 25.45-55.16 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ โดยถ่านกะลาตาลโตนดมีปริมาณคาร์บอนสูงที่สุด และลำดับรองลงมา คือ กากมัน แ่งมันดิบ และแ่งมัน ตามลำดับ ซึ่งแ่งมันและแ่งมันดิบมีปริมาณคาร์บอนใกล้เคียงกัน แต่ต่ำกว่าปริมาณคาร์บอนของกากมัน สำหรับปริมาณไฮโดรเจนพบว่าผงถ่านมีปริมาณไฮโดรเจนเพียงร้อยละ 1.95 โดยน้ำหนัก และตัวประสานมีปริมาณไฮโดรเจนร้อยละ 6.25-6.45 โดยน้ำหนัก ผงถ่านมีปริมาณไฮโดรเจนต่ำเนื่องจากเป็นไปได้อาจกระบวนการผลิตถ่าน ซึ่งเป็นการให้ความร้อนภายใต้สภาวะที่จำกัดออกซิเจน ทำให้ไฮโดรเจนบางส่วนกลายเป็นไอน้ำและระเหยออกจากชีวมวล โดยทั่วไปปริมาณคาร์บอนและไฮโดรเจนจะเป็นดัชนีที่บ่งบอกถึงสมบัติการเป็นเชื้อเพลิงของชีวมวลหรือเชื้อเพลิงฟอสซิล แต่สำหรับการผลิตถ่านอัดแท่งนั้นถ่านควรมีปริมาณคาร์บอนสูง เนื่องจากจะทำให้ถ่านอัดแท่งมีค่าความร้อนสูงและเกิดการลุกไหม้ได้ดี การพิจารณาปริมาณซัลเฟอร์ของผงถ่านกะลาตาลโตนด แ่งมัน แ่งมันดิบ และกากมัน พบว่ามีปริมาณซัลเฟอร์ที่ต่ำมาก ๆ (0.01-0.07) ซึ่งปริมาณซัลเฟอร์ที่ต่ำนี้แสดงให้เห็นว่าการใช้ถ่านอัดแท่งเป็นเชื้อเพลิงมีโอกาสที่จะทำให้เกิด  $SO_2$  และ  $SO_x$  น้อยมาก ๆ นอกจากนี้มีค่าความร้อนสูงและค่าความร้อนสูงต่ำของวัตถุดิบ 22.25-27.40 MJ/kg และ 20.91-26.98 MJ/kg ตามลำดับ

### 3.3 องค์ประกอบและค่าความร้อนของถ่านกะลาตาลโตนดอัดแท่ง

ตารางที่ 4 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุหรือละเอียด และค่าความร้อนของถ่าน

**Table 3** Properties and heating value of each composition for preparing charcoal briquettes

| Properties                 | Samples         |            |            |            |
|----------------------------|-----------------|------------|------------|------------|
|                            | Ground charcoal | TF         | NTS        | TR         |
| Proximate analysis (% wt)  |                 |            |            |            |
| Moisture content           | 16.03           | 11.42      | 11.15      | 7.73       |
| Ash content                | 5.88            | 1.55       | 0.86       | 2.93       |
| Volatile matter            | 23.37           | 86.83      | 87.41      | 83.92      |
| Fixed carbon content       | 54.72           | 0.20       | 0.58       | 5.43       |
| Ultimate analysis (% wt)   |                 |            |            |            |
| Carbon (C)                 | 71.61±0.58      | 38.59±0.50 | 38.96±0.21 | 41.08±0.22 |
| Sulphur (S)                | 0.07±0.00       | ND         | ND         | ND         |
| Nitrogen (N)               | 0.92±0.04       | ND         | ND         | 0.26±0.01  |
| Hydrogen (H)               | 1.95±0.00       | 6.25±0.12  | 6.36±0.07  | 6.45±0.07  |
| Oxygen (O)*                | 25.45           | 55.16      | 54.68      | 52.21      |
| Heating value (MJ/kg)      |                 |            |            |            |
| Higher heating value (HHV) | 27.40±0.20      | 22.25±0.31 | 22.54±0.17 | 23.40±0.14 |
| Lower heating value (LHV)  | 26.98±0.20      | 20.91±0.29 | 21.17±0.16 | 22.01±0.13 |

ND = not-detectable; \* oxygen was determined by difference.

**Table 4** Proximate analysis, ultimate analysis and heating value of charcoal briquettes

| Properties                 | Conditions no. |            |            |            |            |            |
|----------------------------|----------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|                            | 2              | 3          | 5          | 6          | 8          | 9          |
| Proximate analysis (% wt)  |                |            |            |            |            |            |
| Moisture content           | 5.13           | 6.02       | 4.07       | 5.03       | 7.51       | 7.04       |
| Ash content                | 6.27           | 5.05       | 7.79       | 5.36       | 6.09       | 5.52       |
| Volatile matter            | 20.84          | 18.41      | 16.79      | 19.04      | 16.85      | 20.53      |
| Fixed carbon content       | 64.71          | 69.08      | 68.18      | 68.82      | 68.65      | 65.00      |
| Ultimate analysis (% wt)   |                |            |            |            |            |            |
| Carbon (C)                 | 70.87±0.57     | 68.85±0.68 | 69.72±1.00 | 70.50±0.77 | 66.59±1.14 | 69.28±0.98 |
| Sulphur (S)                | 0.13±0.00      | 0.12±0.00  | 0.13±0.00  | 0.15±0.01  | 0.12±0.01  | 0.14±0.00  |
| Nitrogen (N)               | 0.90±0.04      | 0.82±0.02  | 0.84±0.01  | 0.98±0.03  | 0.71±0.01  | 0.78±0.01  |
| Hydrogen (H)               | 2.54±0.09      | 2.32±0.08  | 2.19±0.05  | 2.17±0.08  | 2.12±0.02  | 2.28±0.05  |
| Oxygen (O)*                | 25.56          | 27.89      | 27.12      | 26.2       | 30.46      | 27.52      |
| Heating value (MJ/kg)      |                |            |            |            |            |            |
| Higher heating value (HHV) | 27.98±0.21     | 26.99±0.16 | 27.10±0.32 | 27.34±0.35 | 25.93±0.37 | 27.09±0.40 |
| Lower heating value (LHV)  | 27.43±0.20     | 26.49±0.16 | 26.63±0.32 | 26.88±0.33 | 25.48±0.37 | 26.60±0.39 |

\* oxygen was determined by difference.

กะลาตาลโตนดอัดแห้ง การพิจารณาส่วนนี้นั้นไม่พิจารณาเงื่อนไขการทดลองที่ 1, 4 และ 7 ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่ผสมตัวประสานแต่ละชนิดร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก เนื่องจากถ่านอัดแห้งที่ได้จากเงื่อนไขดังกล่าวนี้มีความร้อนมากเกินไป ทำให้มีสมบัติไม่เป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่านอัดแห้ง สำหรับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของถ่านกะลาตาลโตนดอัดแห้งที่เงื่อนไขต่าง ๆ พบว่าถ่านอัดแห้งมีปริมาณความชื้นที่ต่ำกว่า สารระเหย และคาร์บอนคงตัวร้อยละ 5.03-7.51, 5.05-7.79, 16.79-20.84 และ 64.71-69.08 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ซึ่งความชื้นของถ่านกะลาตาลโตนดอัดแห้งมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่านอัดแห้งและมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่านไม้หุงต้ม ซึ่งกำหนดไว้ไม่เกินร้อยละ 8 และ 10 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ถ่านอัดแห้งที่ดีควรมีความชื้นต่ำเนื่องจากจะช่วยทำให้จุดติดไฟได้ง่าย และทำให้เกิดควันน้อยในระหว่างการลุกไหม้ รวมทั้งเกิดการสูญเสียความร้อนสำหรับการระเหยความชื้นในระหว่างการลุกไหม้ต่ำ การพิจารณาปริมาณซีเถ้าพบว่าถ่านกะลาตาลโตนดอัดแห้งมีปริมาณซีเถ้าค่อนข้างต่ำ (ร้อยละ 5.05-7.79 โดยน้ำหนัก) ซึ่งมีค่าผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่านไม้หุงต้มที่กำหนดไว้ไม่เกินร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก และเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น [5] พบว่าปริมาณซีเถ้าของถ่านอัดแห้งจากกะลาตาลโตนดมีปริมาณใกล้เคียงกัน แต่ปริมาณซีเถ้าของถ่านกะลาตาลโตนดอัดแห้งน้อยกว่าถ่านกะลาปาล์มและถ่านกะลาปาล์มผสมถ่านไม้ยางพาราอัดแห้ง [6] สำหรับการพิจารณาองค์ประกอบของถ่านอัดแห้งที่เผาไหม้และให้ความร้อนได้พบว่าถ่านกะลาตาลโตนดอัดแห้งมีองค์ประกอบของคาร์บอนคงตัวเป็นหลัก ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้ถ่านอัดแห้งลุกไหม้ได้นาน ส่วนปริมาณสารระเหยนั่นเป็นส่วนที่ช่วยในการจุดติดไฟและการเกิดเปลวไฟ ซึ่งเชื้อเพลิงที่มีปริมาณสารระเหยสูงจะจุดติด

ไฟได้ง่ายและเกิดเปลวไฟชัดเจนในระหว่างการเผาไหม้ เมื่อพิจารณาผลของชนิดตัวประสานและสัดส่วนตัวประสานที่ใช้ต่อสมบัติด้านองค์ประกอบต่าง ๆ ของถ่านกะลาตาลโตนดอัดแห้ง พบว่าชนิดและสัดส่วนตัวประสานส่งผลน้อยต่อสมบัติด้านองค์ประกอบแบบประมาณ ถึงแม้ว่าสมบัติของตัวประสานแต่ละชนิดจะต่างกัน แต่เนื่องด้วยปริมาณที่ใช้้น้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณผงถ่าน ดังนั้นผลของชนิดและสัดส่วนตัวประสานถึงส่งผลกระทบน้อยต่อองค์ประกอบแบบประมาณของถ่านกะลาตาลโตนดอัดแห้ง

สำหรับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุหรือแบบละเอียดของถ่านกะลาตาลโตนดอัดแห้ง พบว่าถ่านกะลาตาลโตนดอัดแห้งที่แต่ละเงื่อนไขมีปริมาณคาร์บอน ซัลเฟอร์ ไนโตรเจน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ร้อยละ 66.59-70.87, 0.12-0.15, 0.71-0.90, 2.12-2.54 และ 25.56-30.46 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ผลดังกล่าวเห็นได้ว่าชนิดและสัดส่วนตัวประสานส่งผลน้อยต่อองค์ประกอบแบบแยกธาตุของถ่านกะลาตาลโตนดอัดแห้ง เนื่องจากตัวประสานที่ใช้มีองค์ประกอบทางเคมีที่ใกล้เคียงกัน และสัดส่วนที่ใช้ก็มีปริมาณน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณผงถ่านส่วนปริมาณซัลเฟอร์และไนโตรเจนในถ่านอัดแห้งพบว่ามีปริมาณต่ำมาก ๆ ซึ่งสอดคล้องกับองค์ประกอบเริ่มต้นของผงถ่านและตัวประสานแต่ละชนิด การที่ถ่านอัดแห้งมีปริมาณสารดังกล่าวต่ำแสดงให้เห็นว่าการใช้ถ่านอัดแห้งจากถ่านผสมกับตัวประสานชนิดต่าง ๆ ก่อให้เกิด  $SO_2$  และ  $SO_x$  น้อยมาก ๆ หรืออาจไม่เกิดขึ้นเลย สำหรับ  $NO_x$  นั้นโอกาสที่จะเกิด fuel  $NO_x$  และ thermal  $NO_x$  นั้นก็น้อยมาก ๆ เนื่องจากเชื้อเพลิงมีไนโตรเจนต่ำมาก ๆ อีกทั้งอุณหภูมิในระหว่างการลุกไหม้ของถ่านก็ต่ำเช่นกัน

การพิจารณาค่าความร้อนสูง (HHV) และค่าความร้อนสูงต่ำ (LHV) ของถ่านกะลาตาลโตนดอัด

แห้งที่แต่ละเงื่อนไข พบว่าถ่านกษะตาลโตนดอัดแห้งมีค่าความร้อนสูงและค่าความร้อนต่ำ 25.93-27.98 และ 25.48-27.43 MJ/kg ตามลำดับ ค่าความร้อนดังกล่าวมีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนของถ่านอัดแห้งและมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่านไม้หุงต้ม ซึ่งกำหนดไว้ไม่ต่ำกว่า 20.93 MJ/kg (5,000 cal/g) และ 25.12 MJ/kg (6,000 cal/g) ตามลำดับ เมื่อพิจารณาผลของชนิดและสัดส่วนตัวประสานต่อค่าความร้อนของถ่านกษะตาลโตนดอัดแห้ง พบว่าชนิดและสัดส่วนตัวประสานส่งผลน้อยต่อค่าความร้อน เนื่องจากตัวประสานที่ใช้มีค่าความร้อนใกล้เคียงกันและสัดส่วนที่ใช้มีปริมาณน้อย ดังนั้นจึงทำให้ไม่ส่งผลต่อค่าความร้อนของถ่านกษะตาลโตนดอัดแห้งอย่างชัดเจน

### 3.4 สมบัติทางกลของถ่านกษะตาลโตนดอัดแห้ง

ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกลและสมบัติทางกายภาพของถ่านกษะตาลโตนดอัดแห้งที่แต่ละเงื่อนไขการผลิตแสดงดังตารางที่ 5 ซึ่งเห็นได้ว่าถ่านกษะตาลโตนดอัดแห้งมีค่าความต้านทานแรงอัด 10.85-20.53 kg/cm<sup>2</sup> และความหนาแน่น 876.95-915.02 kg/m<sup>3</sup> โดยชนิดและสัดส่วนตัวประสานส่งผลต่อความต้านทานแรงอัดและความหนาแน่นของถ่านกษะตาลโตนดอัดแห้ง ที่สัดส่วนตัวประสานร้อยละ 7

โดยน้ำหนัก การใช้กากมันเป็นตัวประสานทำให้ถ่านกษะตาลโตนดอัดแห้งมีความต้านทานแรงอัดสูงสุด แต่เมื่อเพิ่มสัดส่วนตัวประสานเป็นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก พบว่าการใช้แป้งมันดิบเป็นตัวประสานทำให้ถ่านกษะตาลโตนดอัดแห้งมีความต้านทานแรงอัดสูงสุด ซึ่งอาจเกิดจากสมบัติและองค์ประกอบของตัวประสานที่ต่างกัน วิรภัทร และคณะ (2547) [9] รายงานว่าถ่านอัดแห้งที่ดีควรมีค่าความต้านทานแรงกดอัด 15-20 kg/cm<sup>2</sup> เนื่องจากจะช่วยความเสียหายหรือการแตกหักในระหว่างการเคลื่อนย้ายหรือขนส่ง ถ่านอัดแห้ง ส่วนความหนาแน่นของถ่านอัดแห้งพบว่ามีค่าสอดคล้องกับค่าความต้านทานแรงกด ชนิดของตัวประสานส่งผลน้อยต่อความหนาแน่น แต่สัดส่วนตัวประสานค่อนข้างส่งผลต่อความหนาแน่นของถ่านกษะตาลโตนดอัดแห้ง ผลการทดสอบความร่วนของถ่านกษะตาลโตนดอัดแห้งพบว่าถ่านกษะตาลโตนดอัดแห้งที่ผลิตภายใต้เงื่อนไข 2, 5 และ 8 มีความร่วนบ้างเล็กน้อย เนื่องจากที่เงื่อนไขดังกล่าวนี้ใช้ตัวประสานเพียงร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก และเมื่อเพิ่มสัดส่วนตัวประสานเป็นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ส่งผลทำให้อุณหภูมิของถ่านจับตัวกันแน่นมากยิ่งขึ้นและถ่านกษะตาลโตนดอัดแห้งที่ได้ไม่เกิดการร่วน

Table 5 Physical and mechanical properties of charcoal briquettes

| Conditions no. | Compressive strength (kg/cm <sup>2</sup> ) | Density (kg/m <sup>3</sup> ) | Crumbling |
|----------------|--|------------------------------|-----------|
| 2              | 14.13±2.33                                 | 898.08±8.58                  | Few       |
| 3              | 17.71±0.64                                 | 915.02±18.15                 | No        |
| 5              | 18.43±1.87                                 | 876.95±63.91                 | Few       |
| 6              | 20.53±4.17                                 | 900.73±38.71                 | No        |
| 8              | 10.85±3.94                                 | 881.89±33.39                 | Few       |
| 9              | 24.05±1.10                                 | 910.13±25.34                 | No        |

**Table 6** Burning test results of charcoal briquettes

| Conditions no. | Burning times (min) | Ash content (% wt) | Smog during burning   | Splashing fire |
|----------------|---------------------|--------------------|-----------------------|----------------|
| 2              | 235.33 ± 2.08       | 7.59 ± 0.28        | No                    | No             |
| 3              | 237.33 ± 4.04       | 7.71 ± 0.05        | High smog during      | No             |
| 5              | 225.67 ± 6.66       | 8.14 ± 0.10        | Small smog at initial | No             |
| 6              | 224.33 ± 5.86       | 9.07 ± 1.77        | Small smog at initial | No             |
| 8              | 233.33 ± 5.51       | 8.29 ± 0.55        | Small smog at initial | No             |
| 9              | 234.00 ± 7.94       | 7.79 ± 0.73        | High smog at initial  | No             |

**3.5 สมบัติด้านเชื้อเพลิงของถ่านกะลาตาล  
โตนดอัดแท่ง**

ตารางที่ 6 แสดงผลการทดสอบสมบัติด้านเชื้อเพลิงของถ่านกะลาตาลโตนดอัดแท่งซึ่งประกอบด้วย ระยะเวลาการลุกไหม้ สัดส่วนปริมาณซีเถ้าหลังลุกไหม้สมบูรณ์ การเกิดควันในระหว่างลุกไหม้ และการเกิดสะเก็ดไฟในระหว่างลุกไหม้ ผลการทดสอบพบว่า ถ่านกะลาตาลโตนดอัดแท่งที่ผลิตภายใต้เงื่อนไขต่างๆ มีระยะเวลาการลุกไหม้อยู่ในช่วง 224.33-237.33 นาที หรือ 3.74-3.96 ชั่วโมง การจุดติดไฟในช่วงเริ่มต้นจะค่อนข้างยากเนื่องจากถ่านกะลาตาลโตนดอัดแท่งมีความหนาแน่นค่อนข้างสูง ทำให้มีช่องว่างอากาศน้อยระหว่างอนุภาคของผงถ่านที่จับกันเป็นก้อน ซึ่งผลดังกล่าวนี้เกิดขึ้นในทุกเงื่อนไขการผลิตถ่านอัดแท่ง ส่วนการเกิดควันในระหว่างการลุกไหม้พบว่า การผลิตถ่านกะลาตาลโตนดอัดแท่งภายใต้เงื่อนไขที่ 2 ไม่ทำให้เกิดควันในระหว่างการลุกไหม้ ซึ่งใกล้เคียงกับเงื่อนไขที่ 5, 6 และ 7 ที่ทำให้เกิดควันเล็กน้อยในช่วงแรกของการลุกไหม้ สำหรับเงื่อนไขที่ 3 นั้นพบว่า เกิดควันในระหว่างการลุกไหม้มากและเกิดตลอดเวลาซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกับเงื่อนไขที่ 9 ที่เกิดควันมากในช่วงแรก สำหรับการพิจารณาการเกิดสะเก็ดไฟในระหว่างการลุกไหม้พบว่า การลุกไหม้ของถ่านกะลาตาลโตนดอัดแท่งไม่ก่อให้เกิดสะเก็ดไฟ

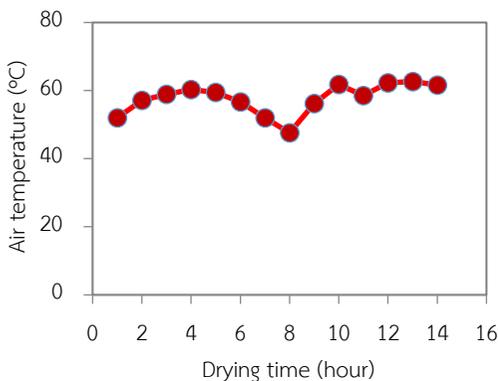
ตลอดช่วงระยะเวลาการลุกไหม้ จากผลการทดสอบในส่วนนี้จะเห็นได้ว่าการใช้สัดส่วนตัวประสานเพิ่มขึ้นมีแนวโน้มที่ส่งผลทำให้เกิดควันมากขึ้นในระหว่างการลุกไหม้ ซึ่งควันที่เกิดขึ้นอาจจะเป็นผลมาจากปริมาณสารระเหยที่มีอยู่ในตัวประสาน และการเกิดควันในช่วงแรกของการลุกไหม้อาจจะมีสาเหตุมาจากการที่ถ่านกะลาตาลโตนดอัดแท่งจุดติดได้ยากในช่วงแรก

**3.6 จลนพลศาสตร์การอบแห้งถ่านกะลาตาล  
โตนดอัดแท่ง**

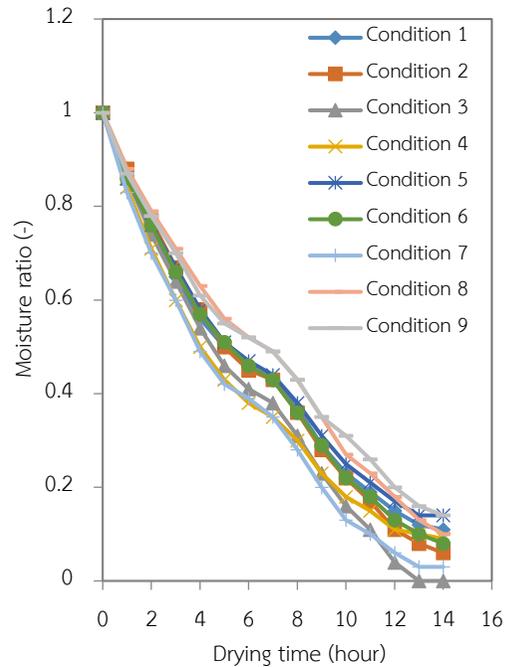
การศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้ง (drying kinetic) ถ่านกะลาตาลโตนดอัดแท่งด้วยความร้อนจากรังสีอาทิตย์ภายในระบบอบแห้งเรือนกระจกโดยการอบถ่านในช่วงกลางวันเป็นระยะเวลา 2 วัน การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศภายในเรือนกระจกในระหว่างอบแห้งดังแสดงตามตารางที่ 2

รูปที่ 2 จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิอากาศภายในระบบอบแห้งแบบเรือนกระจกเพิ่มขึ้นในช่วง 4 ชั่วโมงแรกของการอบ ซึ่งเป็นช่วงเข้าถึงช่วงเที่ยง สำหรับการอบแห้งในวันแรกอุณหภูมิในช่วงดังกล่าวจะเพิ่มขึ้นเป็น 60 °C และเมื่อเข้าสู่ช่วงบ่ายอุณหภูมิอากาศจะเริ่มลดลง สำหรับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศในวันที่สองก็มีลักษณะเช่นเดียวกับวันแรก แต่ในวันที่สองของการอบแห้งนั้นอุณหภูมิของอากาศภายในเรือนกระจกสูงกว่าวันแรกเล็กน้อย ซึ่งสาเหตุที่ทำให้เกิดการ

เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศในระหว่างการอบแห้ง ด้วยพลังงานความร้อนจากรังสีอาทิตย์ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นรังสีอาทิตย์ การเปลี่ยนตำแหน่งดวงอาทิตย์ และสภาพท้องฟ้า ซึ่งข้อดีของการใช้พลังงานความร้อนจากรังสีอาทิตย์สำหรับอบแห้ง คือ ลดต้นทุนด้านพลังงาน ไม่เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และระบบอบแห้งมีองค์ประกอบที่ไม่ซับซ้อน อย่างไรก็ตาม การใช้ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์นั้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตลอดเวลา ยากต่อการควบคุมอุณหภูมิและการทำนายระยะเวลาการอบแห้งที่แน่นอน ซึ่งต่างกับการอบแห้งหรือการลดความชื้นของผลิตภัณฑ์โดยใช้ระบบอบแห้งที่ใช้พลังงานไฟฟ้า หรือใช้เชื้อเพลิง เช่น ไม้ฟืน ก๊าซแอลพีจี การใช้พลังงานไฟฟ้าหรือเชื้อเพลิงส่งผลทำให้เกิดต้นทุนด้านพลังงานเพิ่มขึ้น และอาจต้องออกแบบระบบอบแห้งที่ซับซ้อนมากขึ้น แต่มีข้อดี คือ สามารถควบคุมอุณหภูมิอากาศร้อนหรือลมร้อนตามต้องการ ซึ่งช่วยให้สามารถทำนายระยะเวลาการอบแห้งได้อย่างแม่นยำ และผลิตสินค้าได้ทันตามความต้องการของผู้ใช้ ดังนั้นการผลิตถ่านอัดแท่งที่มีกำลังการผลิตมากควรต้องพิจารณาในประเด็นดังกล่าวนี้



**Figure 2** Variation of air temperature inside solar greenhouse dryer during drying of charcoal briquettes



**Figure 3** Variation of moisture ratio during drying of palmyra palm shell charcoal briquettes using solar greenhouse dryer

รูปที่ 3 และ 4 แสดงการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของถ่านกะลาตาลโตนดอัดแท่งที่ลดความชื้นด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกและการอบด้วยตู้อบลมร้อน รูปที่ 3 จะเห็นได้ว่าการอบแห้งถ่านกะลาตาลโตนดอัดแท่งด้วยความร้อนจากรังสีอาทิตย์ภายในระบบอบแห้งเรือนกระจกทำให้อัตราส่วนความชื้นของถ่านอัดแท่งลดลงค่อนข้างเร็วในช่วงแรกของวันที่ 1 เนื่องจากในช่วงเริ่มต้นอบแห้งถ่านอัดแท่งมีความชื้นสูงในขณะที่อุณหภูมิอากาศร้อนก็เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความชื้นระเหยออกจากถ่านอัดแท่งได้ง่ายและรวดเร็ว แต่เมื่อระยะเวลาอบแห้งยาวนานขึ้นถ่านอัดแท่งมีความชื้นลดลง การระเหยของความชื้นออกจากถ่านอัดแท่งลดลง สำหรับการอบแห้งในวันที่ 2 ก็มีลักษณะการ

เปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นที่ใกล้เคียงกับวันแรก เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศภายในระบบ มีลักษณะที่ไม่ต่างกันมาก และเมื่อพิจารณาผลและสัดส่วนตัวประสานต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นในระหว่างการอบแห้ง พบว่าปัจจัยดังกล่าวส่งผลเล็กน้อยต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้น ซึ่งสังเกตได้จากเส้นกราฟที่มีความชันต่างกันเล็กน้อย เนื่องจากตัวประสานที่ใช้มีความชื้นเริ่มต้นต่างกัน รวมทั้งความหนาแน่นของถ่านที่ต่างกัน การใช้ตัวประสานที่สัดส่วนร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก มีแนวโน้มการลดลงของอัตราส่วนความชื้นเร็วกว่าที่สัดส่วนอื่น ๆ ซึ่งค่อนข้างสอดคล้องกับค่าความหนาแน่นของถ่านอัดแห้ง หากถ่านอัดแห้งมีความหนาแน่นสูงการแพร่ของความชื้นจากภายในมายังที่ผิวนอกจะเกิดได้ช้าลง ส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นลดลง

เมื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของถ่านกะลาตาลโตนดในระหว่างการอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนจากรังสีอาทิตย์กับการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน พบว่าการอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนจากรังสีอาทิตย์ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นได้ช้ากว่าการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน ซึ่งสังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงความชันของเส้นกราฟที่ต่างกันระหว่างการอบแห้งด้วยวิธีดังกล่าว สาเหตุที่ทำให้การอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนจากรังสีอาทิตย์ช้ากว่าการใช้ตู้อบลมร้อน เนื่องจากการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิอากาศให้คงที่ได้ตามต้องการ เมื่ออุณหภูมิเกิดการเปลี่ยนแปลงส่งผลทำให้อัตราการอบแห้งหรืออัตราการระเหยของความชื้นเปลี่ยนแปลงเช่นกัน โดยปกติการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงทำให้อัตราการระเหยของความชื้นสูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ สำหรับผู้ประกอบการหรือโรงงานที่ต้องการผลิตถ่านอัดแห้งปริมาณมากให้ทัน

ตามต้องการผู้ใช้ การใช้ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์อาจไม่เหมาะสม เนื่องจากปัญหาด้านความแปรปรวนของสภาพภูมิอากาศ ทำให้ไม่สามารถควบคุมกำลังการผลิตตามต้องการ ดังนั้นการใช้ระบบอบแห้งแบบร่วม (hybrid) เช่น การใช้พลังงานความร้อนจากรังสีอาทิตย์ร่วมกับการใช้ลมร้อน ซึ่งลมร้อนที่ใช้นั้นได้จากการเผาไหม้ไม้ฟืนหรือชีวมวลอื่น ๆ ซึ่งระบบดังกล่าวนี้จะช่วยลดต้นทุนด้านพลังงานและทำให้ควบคุมกำลังการผลิตได้ตามต้องการ

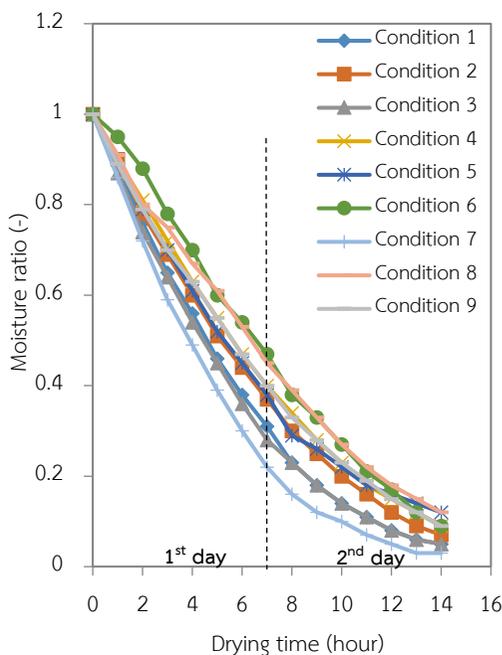


Figure 4 Variation of moisture ratio during drying of palmyra palm shell charcoal briquettes using hot air oven dryer

### 3.7 ต้นทุนการผลิตถ่านกะลาตาลโตนดอัดแห้ง

ผลการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตถ่านกะลาตาลโตนดอัดแห้งภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ แสดงตามตาราง

ที่ 7 จะเห็นได้ว่าต้นทุนการผลิตถ่านกะลาตาลโตนดอัดแห้ง 10.78-12.82 บาท/กิโลกรัม หรือ 0.40-0.48 บาท/MJ<sub>LHV</sub> ชนิดและสัดส่วนตัวประสานส่งผลต่อต้นทุนการผลิตถ่านกะลาตาลโตนดอัดแห้ง การผลิตถ่านกะลาตาลโตนดอัดภายใต้เงื่อนไขที่ 3 ทำให้เกิดต้นทุนสูงสุด คือ 12.82 บาท/กิโลกรัม ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่ใช้แบริ่งมันส์สัดส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เป็นตัวประสาน สำหรับการใช้อากมันส์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักเป็นตัวประสานนั้นทำให้ต้นทุนการผลิตถ่านกะลาตาลโตนดอัดแห้ง 10.97 บาท/กิโลกรัม ซึ่งต่ำกว่าการใช้อากมันส์ประมาณ 2 บาท/กิโลกรัม ดังนั้นหากเปรียบเทียบกับราคาขายส่งถ่านกะลาตาลโตนดอัดแห้งที่ผลิตโดยกลุ่มชาวบ้านที่ตำบลคลองรี อำเภอสิงหนคร จังหวัดสงขลา ซึ่งขายส่งราคา 15 บาท/กิโลกรัม การ

ผลิตถ่านกะลาตาลโตนดอัดแห้งโดยใช้แบริ่งมันส์สัดส่วนร้อยละ 7 และ 10 เป็นตัวประสาน ทำให้มีกำไรประมาณ 2.18-2.93 บาทต่อกิโลกรัม แต่หากใช้อากมันส์ที่สัดส่วนร้อยละ 7 และ 10 เป็นตัวประสานทำให้มีกำไรประมาณ 4.03-4.22 บาท/กิโลกรัม ซึ่งสามารถลดต้นทุนการผลิตและทำให้มีกำไรเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาระยะเวลาคืนทุนพบว่าการผลิตถ่านกะลาตาลโตนดอัดแห้งภายใต้เงื่อนไขที่ศึกษาในงานวิจัยดังกล่าวนี้มีระยะเวลาคืนทุน 0.91-1.75 ปี การใช้อากมันส์เป็นตัวประสานนอกจากช่วยให้ลดต้นทุนการผลิตแล้วยังทำให้คืนทุนได้เร็วขึ้น อย่างไรก็ตาม การใช้อากมันส์เป็นตัวประสานอาจมีข้อจำกัดสำหรับจังหวัดทางภาคใต้ เนื่องจากอยู่ห่างไกลจากโรงงานแปรรูปมันส์สำหรับ

**Table 7** Cost, profit and payback period of palmyra palm shell charcoal briquettes production

| Lists of cost (Baht/kg)              | Conditions no. |       |       |       |       |       |
|--------------------------------------|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                      | 2              | 3     | 5     | 6     | 8     | 9     |
| Charcoal                             | 8.00           | 8.00  | 8.00  | 8.00  | 8.00  | 8.00  |
| Binder                               | 1.75           | 2.50  | 0.46  | 0.65  | 0.77  | 1.10  |
| Water                                | 0.01           | 0.01  | 0.01  | 0.01  | 0.01  | 0.01  |
| Electricity                          | 0.67           | 0.67  | 0.67  | 0.67  | 0.67  | 0.67  |
| Labor                                | 1.14           | 1.14  | 1.14  | 1.14  | 1.14  | 1.14  |
| Machine and maintenance              | 0.50           | 0.50  | 0.50  | 0.50  | 0.50  | 0.50  |
| Total cost (Baht/kg)                 | 12.07          | 12.82 | 10.78 | 10.97 | 11.09 | 11.42 |
| Total cost (Baht/MJ <sub>LHV</sub> ) | 0.44           | 0.48  | 0.40  | 0.41  | 0.44  | 0.43  |
| Net profit (Baht/kg)                 | 2.93           | 2.18  | 4.22  | 4.03  | 3.91  | 3.58  |
| Payback period (year)                | 1.30           | 1.75  | 0.91  | 0.95  | 0.98  | 1.07  |

#### 4 สรุป

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของชนิดและสัดส่วนตัวประสานต่อคุณภาพถ่านกะลาตาลโตนดอัดแห้งโดยใช้

ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก ตัวประสานที่ใช้ประกอบด้วยแบริ่งมันส์ อากมันส์ และแบริ่งมันส์ดิบ สัดส่วนตัวประสานร้อยละ 4, 7 และ 10 โดย

น้ำหนัก ผสมตัวประสานตามสัดส่วนดังกล่าวกับผงถ่าน  
 กะลาตาลโตนด 10 กิโลกรัม และน้ำ 4 กิโลกรัม  
 ส่วนผสมผงถ่านถูกป้อนเข้าเครื่องอัดถ่านแบบสกรู  
 ถ่านอัดแท่งที่ได้มีลักษณะเป็นทรงหกเหลี่ยมและมี  
 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 cm ยาว 10 cm และ  
 บริเวณตรงกลางมีรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 cm  
 ถ่านอัดแท่งถูกลดความชื้นด้วยระบบอบแห้งพลังงาน  
 แสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกจนเหลือความชื้นสุดท้าย  
 ต่ำกว่าร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก ผลการศึกษาพบว่าการ  
 อบแห้งถ่านกะลาตาลโตนดอัดแท่งโดยใช้ระบบอบแห้ง  
 พลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกสามารถอบถ่าน  
 อัดแท่งให้มีความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก  
 ภายใน 2 วัน ชนิดและสัดส่วนตัวประสานส่งผลต่อผล  
 น้อยต่อปริมาณองค์ประกอบแบบประมาณ องค์  
 ประกอบแบบแยกธาตุ และค่าความร้อนของถ่านอัด  
 แท่ง แต่ชนิดและสัดส่วนตัวประสานส่งผลต่อความ  
 ต้านทานแรงอัด ความหนาแน่น และความชื้น การ  
 ผสมตัวประสานด้วยสัดส่วนร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก ไม่  
 เหมาะสำหรับการผลิตถ่านกะลาตาลโตนดอัดแท่ง  
 เนื่องจากทำให้ถ่านกะลาตาลโตนดอัดแท่งมีความชื้น  
 สูง การผลิตถ่านกะลาตาลโตนดอัดแท่งโดยใช้ตัว  
 ประสานทั้ง 3 ชนิด ที่สัดส่วนร้อยละ 7 และ 10 โดย  
 น้ำหนัก ทำให้ได้ถ่านกะลาตาลโตนดอัดแท่งที่ผ่าน  
 เกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่านอัดแท่ง การใช้  
 สัดส่วนตัวประสานที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลทำให้มีแนวโน้ม  
 ที่เกิดควั่นระหว่างการลุกไหม้ของถ่านกะลาตาลโตนด  
 อัดแท่งมากขึ้นชนิด และสัดส่วนตัวประสานส่งผลต่อ  
 ต้นทุนการผลิตถ่านกะลาตาลโตนดอัดแท่ง การผลิต  
 ถ่านกะลาตาลโตนดอัดแท่งโดยใช้กากมันที่สัดส่วน  
 ร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก เป็นตัวประสานทำให้ต้นทุนการ  
 ผลิตต่อหน่วยน้ำหนักต่ำสุด ระยะเวลาคืนทุนเร็วสุด  
 และมีคุณภาพตามเกณฑ์มาตรฐาน

## 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ลุงชาติ พฤษศรี ที่กรุณาให้  
 คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลือในการใช้เครื่องอัด  
 แท่งถ่าน ตั้งแต่เริ่มต้นจนเสร็จสิ้นโครงการวิจัย  
 ขอขอบคุณ องค์การบริหารส่วนตำบลคลองรี อำเภอสทิงพระ  
 จังหวัดสงขลา ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ใช้  
 ระบบผลิตถ่านอัดแท่ง และขอขอบคุณ ศูนย์บริการ  
 วิชาการที่ 8 (จังหวัดสงขลา) ที่ได้ให้อนุเคราะห์ใช้  
 ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก

## 6. References

- [1] Department of Alternative Energy Development and Efficiency, Ministry of Energy, 2015, Alternative Energy Development Plan ( 2015- 2036) : AEDP2015, Available Source: [http://www.dede.go.th/download/files/AEDP2015\\_Final\\_version.pdf](http://www.dede.go.th/download/files/AEDP2015_Final_version.pdf). (in Thai)
- [2] Department of Alternative Energy Development and Efficiency, Ministry of Energy, 2018, Potential of Biomass in Thailand, Available Source: [http://www.biomass.dede.go.th/biomass\\_web/index.html](http://www.biomass.dede.go.th/biomass_web/index.html), 9 August 2018. (in Thai)
- [3] Department of Agriculture Extension, Ministry of Agriculture and Cooperatives, Situation of palmyra palm plantation of Thailand in 2016, Available Source: <http://www.agriinfo.doae.go.th/year60/plant/rortor/perennial/tantanode.pdf>, 9 January 2019. (in Thai)
- [4] Chumsang, C. and Upan, P., 2013, Value-added of Wastes from Palmyra Palm,

- Training Report: Technology Transfer for Value-added of Wastes from Palmyra Palm by Participation of the Community, Practical Knowledge Management to Community under the Project of Knowledge Management and Technology Transfer from Research and Innovation, National Research Council of Thailand, Bangkok, 44 p. (in Thai)
- [5] Department of Industrial Works, 2012, Manual of Guideline and Characteristics of Wastes for Fuel Briquettes and Compressed Block, Bangkok, 83 p. (in Thai)
- [6] Chumsang, C. and Upan, P., 2014, Production of charcoal briquettes from palmyra palm waste in Kirimat district, Sukhothai province, Thailand, Appl. Environ. Res. 36: 29-38.
- [7] Phutteesakul, R., 2010, The Production of Charcoal Briquette by Coconut Shell and Cassava Rhizome, Master Thesis, Srinakharinwirot University, Bangkok, 181 p. (in Thai)
- [8] Dungphontong, D., Pinata, W. and Rucha, A., 2016, A comparison of the heating value and density of charcoal briquettes manufactured by electric motor and bicycle-powered compressors, Indust. Technol. Lampang Rajabhat Univ. J. 9(1): 1-13. (in Thai)
- [9] Pongsuwararat, V., Sukreung, A. and Thumviriyant, P., 2004, Production Briquette Charcoal from Palm Shell, Bachelor Project, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, 77 p. (in Thai)
- [10] Kongphupha, P., Tapier, A. and Saadchom, 2016, Effect of drying temperatures on charcoal briquettes drying using a combined solar energy and far-infrared radiation dryer, and a far-infrared radiation dryer, RMUTP Res. J. 10(1): 77-93. (in Thai)
- [11] Sugumaran, P. and Seshadri, S., 2010, Biomass Charcoal Briquetting Technology for Alternative Energy Based Income Generation in Rural Areas, Shri AMM Murugappa Chettiar Research Centre, Taramani, 20 p.
- [12] Thai Industrial Standards Institute (TISI), Standard of Community Products: Charcoal Briquettes, (SCP. 238/2547), Ministry of Industry, Bangkok. (in Thai)
- [13] Department of Alternative Energy Development and Efficiency, 2016, Report Data of Solar Intensity of Thailand in 2016, Ministry of Energy, Bangkok, 3 p. (in Thai)
- [14] Loh, S. K., 2017, The potential of the Malaysian oil palm biomass as a renewable energy source, Energy Convers. Manage. 141: 285-298.
- [15] Irawan, A., Latifah, U.S. and Meity Dwi I.P., 2017, Effect of torrefaction process on the coconut shell energy content for solid fuel, AIP Conf. Proc. 1826: 10.1063/1.4979226