

# การศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งด้วยเทคนิคเอ็กซ์ทรูชันจาก กะลามะพร้าวโดยใช้ฟางข้าวหมักและโมลาสเป็นตัวประสาน

ประสาน สถิตย์เรืองศักดิ์<sup>1</sup> ฐานิตย์ เมธิยานนท์<sup>2</sup> และ สมชาติ โสภณรณฤทธิ<sup>3</sup>

## Abstract

Sathitruangsak, P.<sup>1</sup>, Madhiyanon, T.<sup>1</sup> and Sophonrarnarit, S.<sup>2</sup>

**Study of solid fuel from coconut shell produced by extrusion technique  
using treated rice straw and molasses as binders**

Songklanakarini J. Sci. Technol., 2006, 28(6) : 1305-1316

The objective was to study solid fuel produced from biomass by cold extrusion technique. The raw materials used comprised crushed coconut shell char and coconut fiber char mixed with two kinds of binders produced from treated rice straw and molasses. In order to investigate the effects of the amounts of binder used on the physical properties of the solid fuel produced, the mass ratio of molasses was varied, at 10:100, 15:100, and 20:100, whereas that of the treated rice straw was 15:100, 20:100, and 25:100. In addition, the effects of mixing the ratios of crushed coconut shell char and coconut fiber char were studied by varying their ratios in the mixture (shell: fiber), at 40:60, 50:50, 60:40 and 70:30. The results showed that when

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Mahanakorn University, Nong Chok, Bangkok, 10530 Thailand.

<sup>2</sup>School of Energy and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Thung Kharu District, Bangkok, 10140 Thailand.

<sup>1</sup>M.Eng.(Energy Management Technology), <sup>2</sup>Ph.D.(Energy Technology), ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร เขตหนองจอก กรุงเทพฯ 10530 <sup>3</sup>Ph.D.(Production and Processing of Vegetable Raw Materials) ศาสตราจารย์ คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

Corresponding e-mail: thanid\_m@yahoo.com

รับต้นฉบับ 5 มกราคม 2549      รับลงพิมพ์ 28 เมษายน 2549

molasses were used as a binder, increasing both the amount of molasses and coconut shell enhanced the compressive strength of the solid fuel produced. When treated rice straw binder was used, compressive strength also increased with the increasing of coconut shell ratios in the raw material mixture, but decreased with increases in the binder ratio. Regarding product output and specific energy consumption, when the amounts of both binders were increased, product output increased, while specific energy consumption decreased. However, the converse was true regarding increasing the amount of coconut shell char. Generally, the compressive strength varied between 2.60-3.00 MPa (molasses) and 0.49-0.79 MPa (treated rice straw), which were considerably higher than acceptable commercial levels. Regarding energy consumption, considerably low electrical energy was used in the extrusion process, at 0.032-0.056 kWh/kg.

**Key words :** extrusion, binder, extrusion die, molasses, treated rice straw, solid fuel

### บทคัดย่อ

ประสาน สติชัยเรืองศักดิ์ ฐานิตย์ เมธิยานนท์ และ สมชาติ โสภณรณฤทธิ์

การศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งด้วยเทคนิคเอ็กซ์ทรูชันจาก

กะลามะพร้าวโดยใช้ฟางข้าวหมักและโมลาสเป็นตัวประสาน

ว. สงขลานครินทร์ วทท. 2549 28(6) : 1305-1316

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากชีวมวลด้วยเทคนิคเอ็กซ์ทรูชันแบบอัดรีดเย็นโดยใช้ผงถ่านกะลามะพร้าวผสมกับผงถ่านไยกะลาเป็นวัตถุดิบและใช้ตัวประสาน 2 ชนิดคือ ฟางข้าวหมักและโมลาส เพื่อศึกษาผลของปริมาณตัวประสานที่ใช้ต่อการผลิตและสมบัติทางกายภาพของแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ สัดส่วนของตัวประสานต่อวัตถุดิบโดยมวลจะปรับเปลี่ยนไปดังนี้คือ 10:100 15:100 20:100 ในกรณีการใช้โมลาส และ 15:100 20:100 25:100 ในกรณีใช้ฟางข้าวหมัก นอกจากนี้ยังได้ศึกษาผลของสัดส่วนการผสมระหว่างผงถ่านกะลาและผงไยกะลามะพร้าว โดยมีการปรับเปลี่ยนสัดส่วนโดยมวลของผงถ่านกะลาต่อผงถ่านไยกะลาดังนี้คือ 40:60 50:50 60:40 และ 70:30 จากผลการทดลองกรณีใช้โมลาสเป็นตัวประสานพบว่าเมื่อเพิ่มสัดส่วนตัวประสานและสัดส่วนผงถ่านกะลาต่อผงถ่านไยกะลาจะทำให้ความแข็งแรงของแท่งเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น ในกรณีใช้ฟางข้าวหมักเป็นตัวประสานนั้น ความแข็งแรงของแท่งเชื้อเพลิงจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มสัดส่วนของผงถ่านกะลา แต่ค่าความแข็งแรงจะลดลงเมื่อใช้ปริมาณฟางข้าวหมักเพิ่มขึ้น สำหรับผลของปริมาณตัวประสานต่ออัตราการผลิตและพลังงานจำเพาะในการผลิตพบว่า เมื่อปริมาณตัวประสาน (ทั้งสองชนิด) เพิ่มขึ้น อัตราการผลิตจะเพิ่มขึ้นและพลังงานจำเพาะที่ใช้จะลดลง แต่สำหรับการเพิ่มขึ้นของปริมาณผงถ่านกะลาจะส่งผลตรงข้ามต่ออัตราการผลิตและพลังงานจำเพาะในการผลิต จากการทดลองพบว่าความสามารถต้านทานแรงกดของกรณีการใช้โมลาสมีค่า 2.60-3.00 เมกะปาสกาล ซึ่งสูงกว่ากรณีของฟางข้าวหมักมากที่ 0.49-0.79 เมกะปาสกาล และสูงกว่าค่าที่ยอมรับได้ในเชิงพาณิชย์ สำหรับการใช้พลังงานจำเพาะในการผลิตในทุกเงื่อนไขการทดลองมีค่าน้อยมากโดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.032-0.056 กิโลวัตต์-ชม./กก.

ในสภาวะการณปัจจุบันพบว่าปริมาณการใช้พลังงานของประเทศไทยกำลังเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ประเทศไทยต้องขาดดุลการค้ากับต่างประเทศ เพราะพลังงานที่ใช้ส่วนใหญ่ต้องมีการนำเข้ามาจากต่างประเทศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งพลังงานที่มาจากเชื้อเพลิงฟอสซิลที่ใช้ในภาคการผลิตจำพวกน้ำมันเตาหรือน้ำมันดีเซล ซึ่งมีราคาสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องทำให้ผู้ประกอบการด้านอุตสาหกรรม

กรรมจำเป็นต้องแสวงหาพลังงานจากแหล่งอื่นมาใช้ทดแทนพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล โดยพลังงานจากชีวมวลกำลังเป็นที่ได้รับความนิยมเพราะสามารถหาได้ภายในประเทศ เช่น แกลบ ฟางข้าว กะลามะพร้าว และวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรจำนวนมาก สำหรับเทคนิคการแปรรูปวัสดุดังกล่าวมีอยู่หลายรูปแบบ เช่น การเผาไหม้แกลบในเตาเผา (Madhiyanon et al., 2003) ซึ่งเหมาะ

กับกรณีแหล่งวัตถุดิบอยู่ใกล้กับโรงงาน หรือการแปรรูปวัสดุเหลือใช้ให้กลายเป็นแท่งเชื้อเพลิงเพื่อสะดวกในการเก็บรักษาและขนส่ง การแปรรูปวัสดุดังกล่าวให้เป็นแท่งเชื้อเพลิงจะส่งผลให้ค่าความร้อนต่อหน่วยปริมาตรเพิ่มขึ้นและเป็นการลดต้นทุนในการขนส่ง (Granada *et al.*, 2002) สำหรับการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งนั้นสามารถทำได้ด้วยกันหลายวิธี แต่วิธีที่ได้รับความนิยมมี 2 วิธี คือ การอัดด้วยไฮดรอลิกส์ (Granada *et al.*, 2002; Blesa *et al.*, 2003; Mayoral *et al.*, 2000; Deboudi *et al.*, 2004; Reineke, 1964; Emre *et al.*, 2003 and Husain *et al.*, 2002) และการอัดรีดด้วยเทคนิคเอ็กซ์ทรูชัน (Madhiyanon *et al.*, 2003; Madhiyanon *et al.*, 2004; Sathitruangsak *et al.*, 2004; Sathitruangsak *et al.*, 2006 and Bhattacharya *et al.*, 2002) โดยในวิธีการอัดด้วยไฮดรอลิกส์เครื่องจักรจะมีความซับซ้อนมากกว่า และที่สำคัญการผลิตจะไม่ต่อเนื่อง ในขณะที่การอัดรีดด้วยเทคนิคเอ็กซ์ทรูชันนั้นสามารถผลิตแท่งเชื้อเพลิงได้อย่างต่อเนื่องมีชิ้นส่วนและอุปกรณ์เครื่องจักรน้อยทำให้ต้นทุนในการผลิตต่ำกว่าการอัดด้วยไฮดรอลิกส์ โดยปกติกระบวนการผลิตแท่งเชื้อเพลิงด้วยเทคนิคเอ็กซ์ทรูชันยังสามารถแบ่งออกได้อีก 2 แบบ (Madhiyanon *et al.*, 2004) คือ กระบวนการอัดรีดร้อนและกระบวนการอัดรีดเย็นซึ่งกระบวนการอัดรีดร้อนนั้นเหมาะกับวัตถุดิบที่มีลักษณะเป็นส่วนประกอบ เช่น ชี้อเลื้อย เป็นต้น โดยการให้ความร้อนจะทำให้ลิกนินที่มีอยู่ในวัตถุดิบละลายออกมายึดเกาะอนุภาคของวัตถุดิบให้คงรูปเป็นแท่งเชื้อเพลิง แต่สำหรับการอัดแท่งเชื้อเพลิงแบบอัดรีดเย็นด้วยกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันซึ่งจำเป็นต้องใช้ตัวประสานนั้นจำเป็นต้องศึกษาถึงชนิดของตัวประสานที่จะนำมาใช้ โดยได้มีการทดลองการใช้ตัวประสานชนิดต่างๆ เช่น โมลาส (Blesa *et al.*, 2003 and Mayoral *et al.*, 2000) ยางสน (Deboudi *et al.*, 2004) ฟางข้าวหมักด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Zhang *et al.*, 2000) แอสฟัลต์ (Paul *et al.*, 2002) เป็นต้น โดยจากการทดลองที่ใช้โมลาสเป็นตัวประสานพบว่าการใช้โมลาสเป็นตัวประสานจะทำให้แท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตได้นั้นมีความแข็งแรงของแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตได้มีค่าสูงซึ่งสามารถ

ยอมรับได้ในการใช้งานในระดับอุตสาหกรรม (ประสาน และคณะ 2549; Richards, 1990)

จากข้อมูลการสำรวจ พบว่า วัสดุเหลือใช้จากการเกษตรซึ่งเหมาะกับการที่นำมาแปรรูปเป็นแท่งเชื้อเพลิงคือผลมะพร้าว โดยจะใช้ส่วนที่เป็นกะลาและโยเกลาเป็นวัตถุดิบในการผลิตแท่งเชื้อเพลิง นอกจากนี้ฟางข้าวที่มีจำนวนมากก็เหมาะสำหรับผลิตเป็นตัวประสานในการผลิตแท่งเชื้อเพลิงได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาการผลิตตัวประสานจากฟางข้าวและเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ระหว่างการใส่ฟางข้าวหมักเป็นตัวประสานและการใช้โมลาสเป็นตัวประสาน โดยจะปรับเปลี่ยนทั้งสัดส่วนการผสมตัวประสานต่อน้ำหนักของวัตถุดิบและปรับเปลี่ยนสัดส่วนการผสมกะลาต่อโยเกลาในการทดลองของทั้งสองชนิดตัวประสาน สำหรับแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตได้นั้นจะนำไปทดสอบสมบัติทางกายภาพต่างๆ ได้แก่ ค่าการต้านทานแรงกด การต้านทานแรงกระแทก ค่าความร้อน และความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิง

## วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ

### 1. ตัวประสานที่ใช้ในงานวิจัย

เนื่องจากในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเปรียบเทียบการผลิตแท่งเชื้อเพลิงที่ใช้ตัวประสานสองชนิดคือ ตัวประสานฟางข้าวหมักและตัวประสานโมลาสหรือกากน้ำตาล โดยแต่ละตัวประสานทั้งสองชนิดมีวิธีการได้มาดังนี้

#### 1.1 ตัวประสานฟางข้าวหมัก

ตัวประสานฟางข้าวหมักได้มาจากการนำฟางข้าวแห้งหลังจากการเก็บเกี่ยวซึ่งมีความชื้นประมาณ 15% d.b. (มาตรฐานแห้ง) ในปริมาณ 15% โดยน้ำหนักของตัวประสานที่ต้องการจะผลิตแล้วนำมาหมักกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 50% ในปริมาณ 5% โดยน้ำหนักและเติมน้ำอีก 80% โดยน้ำหนัก จากนั้นจึงนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80-90°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้ลิกนินและเซลลูโลสที่มีอยู่ในฟางข้าวแตกตัวออกมาเป็นสารยึดเกาะของตัวประสานฟางข้าวหมัก โดยในตัวประสานจากฟางข้าวหมักกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์นั้นจะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นของเหลวและส่วนที่มีลักษณะคล้ายเจล ซึ่งส่วนที่เป็นของเหลวจะมี

เซลูโลส แทนิน เบ็คติน และลิกนิน ซึ่งทำหน้าที่เสมือนซีเมนต์ในคอนกรีตเสริมเหล็กที่ช่วยในการยึดเกาะวัตถุดิบที่นำมาอัดเป็นแท่งเชื้อเพลิงให้แข็งแรงเมื่อผ่านกระบวนการอัด สำหรับในส่วนที่เป็นเจลจะมีฟางข้าวเป็นเส้นใย ซึ่งเปรียบเสมือนกับเส้นเหล็กที่เป็นวัสดุเสริมแรงในคอนกรีตเพื่อช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับแท่งเชื้อเพลิงที่อัดได้ (Zhang *et al.*, 2000) โดยลักษณะของตัวประสานจากฟางข้าวหมักนั้นแสดงใน Figure 1

## 2.2 ตัวประสานโมลาส

โมลาสหรือกากน้ำตาลจะเป็นของเหลวมีลักษณะเป็นน้ำเชื่อมสีน้ำตาลเข้ม ซึ่งของเหลวนี้จะถูกแยกออกจากเกล็ดน้ำตาลโดยวิธีการปั่น (centrifuge) ส่วนประกอบของกากน้ำตาลจะแตกต่างกันไปตามโรงงานที่ผลิต ซึ่งส่วนประกอบโดยประมาณคิดเป็นร้อยละตามน้ำหนักของกากน้ำตาลมีดังนี้ คือ น้ำ 17-25% น้ำตาลซูโครส 30-40% น้ำตาลกลูโคส 4-9% น้ำตาลฟรักโทส 5-12% นอกจากนี้ยังมีสารประกอบคาร์โบไฮเดรตอื่นๆ สารประกอบไนโตรเจนกรดต่างๆ วิตามิน ไขมัน และแร่ธาตุอื่นๆ อีกเป็นจำนวนมาก (Suriyaphan, 2002) โดยโมลาสที่นำมาใช้ในงานวิจัยเป็นโมลาสที่มาจากอุตสาหกรรมน้ำตาลซึ่งจะมีลักษณะ

หนืดและข้นดัง Figure 2

## 2. วัตถุดิบในการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ใช้กะลามะพร้าวผสมกับใยกะลามะพร้าวซึ่งอยู่ในสภาพของถ่านเป็นวัตถุดิบในการผลิตแท่งเชื้อเพลิง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำถ่านกะลามะพร้าวก่อน โดยนำกะลามะพร้าวแห้งซึ่งจะมีใยกะลามะพร้าวติดอยู่นั้นไปทำการเผาให้เป็นถ่านกะลามะพร้าวและถ่านใยกะลามะพร้าว หลังจากนั้นนำถ่านกะลามะพร้าวที่ได้ไปทำการคัดแยกสิ่งทีปะปนอยู่กับถ่านออกแล้วจึงนำไปทำการบดด้วยเครื่องบด (hammer mill) ซึ่งหลังจากทำการบดแล้วจะนำผงถ่านกะลาและผงถ่านใยกะลาไปทำการกระจายขนาด (size distribution) ด้วยวิธี sieve analysis โดยขนาดของผงถ่านกะลาที่ผ่านการบดนั้นจะมีขนาดต่างๆ กันคิดเป็นสัดส่วนโดยมวลดังแสดงใน Figure 3 แต่สำหรับผงถ่านใยกะลาที่ผ่านการคัดแยกไม่จำเป็นต้องทำการบดเพราะมีขนาดเล็กอยู่แล้ว โดยมีการกระจายขนาดเป็นสัดส่วนโดยมวลดังแสดงใน Figure 4 ซึ่งขนาดของผงถ่านกะลาและผงถ่านใยกะลาที่มีสัดส่วนมากที่สุดคือขนาด 0.6 มม. ซึ่งคิดเป็น 39.63% สำหรับผงถ่านกะลา และ



Figure 1. Photo showing the treated rice straw binder.



Figure 2. Photo showing the molasses binder.  
[Color figure can be viewed in the electronic version]

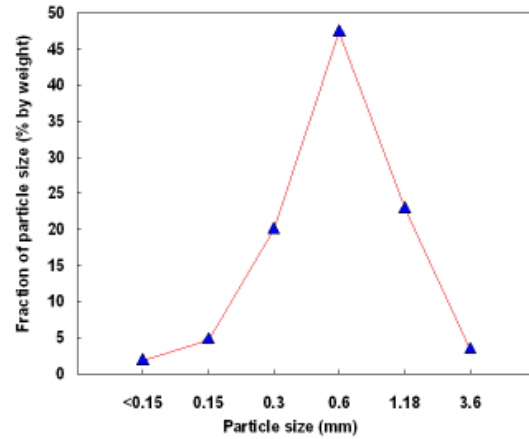
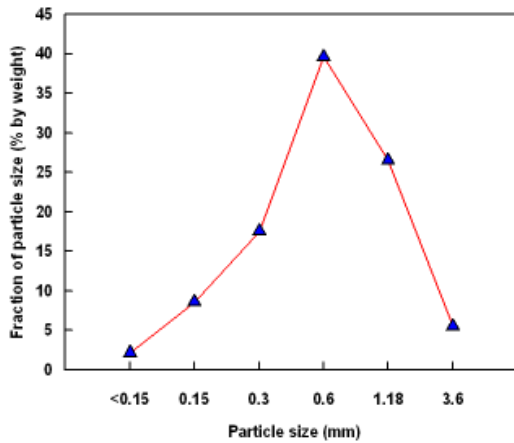


Figure 3. Size distributions of crushed coconut shell char.

Figure 4. Size distributions of coconut fiber char.

Table 1. Testing conditions

Testing number	Mass fraction of crush coconut shell char : coconut fiber char (raw material)	Binder type		Mass ratio of Binder : raw material				Speed of extrusion screw (RPM)
		Molass	Treated rice straw	10:100	15:100	20:100	25:100	
1	40:60	✓		✓				145
2	40:60	✓			✓			145
3	40:60	✓				✓		145
4	50:50		✓		✓			200
5	50:50		✓			✓		200
6	50:50		✓				✓	200
7	50:50	✓			✓			145
8	60:40	✓			✓			145
9	60:40		✓			✓		200
10	70:30		✓			✓		200

47.34% สำหรับผงถ่านไยกะลา

### 3. การทดลองผลิตแท่งเชื้อเพลิง

#### 3.1 เงื่อนไขการทดลองผลิตแท่งเชื้อเพลิง

การศึกษาเปรียบเทียบการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งด้วยเทคนิคเอ็กซ์ทรูชันจากกะลามะพร้าวโดยใช้ฟางข้าวหมักและโมลาสเป็นตัวประสาน ในงานวิจัยนี้จะแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วนคือ 1) ศึกษาถึงอิทธิพลของสัดส่วนการผสมตัวประสานต่อน้ำหนักของวัตถุดิบทั้งสองชนิดของตัวประสาน และ 2) ศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนการผสมผง

ถ่านกะลามะพร้าวต่อผงถ่านไยกะลามะพร้าวซึ่งจะคงที่สัดส่วนการผสมตัวประสานแต่ละชนิดไว้ โดยเงื่อนไขการทดลองทั้งสองส่วนแสดงใน Table 1

#### 3.2 วิธีการทดลอง

เครื่องอัดรีดเชื้อเพลิงโดยเทคนิคเอ็กซ์ทรูชันมีขนาดมอเตอร์ต้นกำลัง 5 แรงม้า (Figure 5) เริ่มต้นการทดลองทำโดยให้นำผงถ่านที่ผ่านการบดมาผสมกับผงถ่านไยกะลาในสัดส่วนต่างๆ ตามเงื่อนไขการทดลอง หลังจากนั้นนำไปผสมกับตัวประสานแต่ละชนิดตามสัดส่วนของเงื่อนไขที่ใช้ทดลองดัง Table 1 เมื่อผสมวัตถุดิบและ

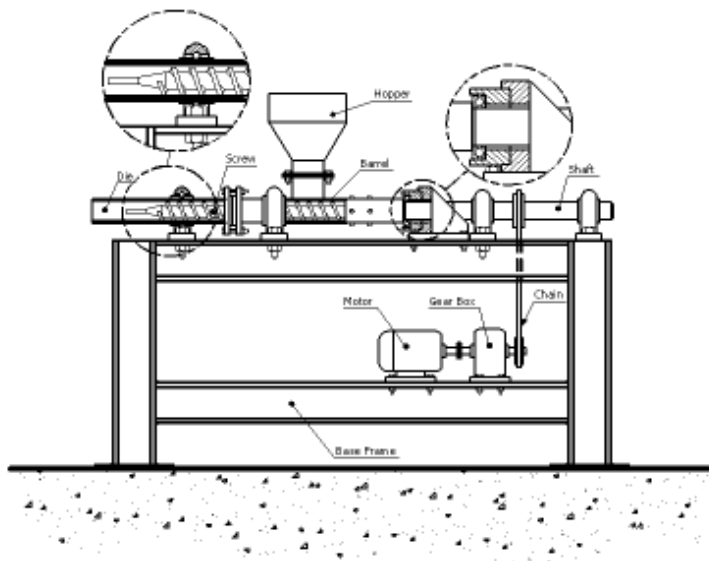


Figure 5. Schematic diagram of extruder used for the experiments.



Figure 6. Photo showing the extruded fuel from the experiments.

ตัวประสานแล้วทำการคลุกเคล้าส่วนผสมให้เข้ากันโดยใช้เครื่องปั่นกวนเชิงกล (mixing machine) นาน 15 นาที จากนั้นนำวัตถุดิบที่ผสมแล้วมาอัดเป็นแท่งเชื้อเพลิงโดยเดินเครื่องผลิตแท่งเชื้อเพลิง โดยทำการป้อนวัตถุดิบลงในเครื่องผลิตแท่งเชื้อเพลิงซึ่งในระหว่างทำการผลิตแท่งเชื้อเพลิงจะต้องทำการวัดปริมาณกระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์ใช้ในการอัดแท่งเชื้อเพลิงและวัดอัตราการผลิตแท่งเชื้อเพลิงของแต่ละเงื่อนไขเพื่อนำไปหาค่าพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการผลิต เมื่อผลิตแท่งเชื้อเพลิงได้จะนำแท่งเชื้อเพลิงดังกล่าวบางส่วนมาทำการบดเพื่อที่จะนำไปหาค่าความชื้นเริ่มต้นของเชื้อเพลิงแต่ละเงื่อนไขที่ทำการทดลอง เมื่อทราบค่าความชื้นเริ่มต้นแล้วนำแท่งเชื้อเพลิงที่อัดได้ที่เหลือจากการหาความชื้นเริ่มต้นมาทำการอบให้เหลือความชื้นประมาณ 10% d.b. (มาตรฐานแห้ง) ซึ่งใกล้เคียงกับค่า

ความชื้นสมดุลของแท่งเชื้อเพลิง จากนั้นนำแท่งเชื้อเพลิงหลังการอบแล้วดัง Figure 6 ไปทำการตัดเป็นชิ้นงานเพื่อทดสอบสมบัติค่าการต้านทานแรงกด ค่าความหนาแน่น การต้านทานแรงกระแทก และค่าความร้อน ตามวิธีการทดลองของ ประสาน และคณะ (2549)

#### ผลการทดลองและวิจารณ์

จากการทดลองผลิตแท่งเชื้อเพลิงโดยใช้ผงถ่านกะลาผสมกับผงถ่านไยกะลาเป็นวัตถุดิบโดยใช้ฟางข้าวหมักและโมลาสเป็นตัวประสานเพื่อเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ แสดงใน Table 2 โดยจากผลการทดลองนั้นจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ 1) การเปรียบเทียบได้ถึงสมบัติทางกายภาพของแท่งเชื้อเพลิงที่

**Table 2. Experimental Results.**

Descriptions	Run Nos.									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Coconut shell char : coconut fiber char	40:60	40:60	40:60	50:50	50:50	50:50	50:50	60:40	60:40	70:30
Binder type	M	M	M	R	R	R	M	M	R	R
Mass ratio of binder : raw material	10:100	15:100	20:100	15:100	20:100	25:100	15:100	15:100	20:100	20:100
Screw speed (RPM)	145	145	145	200	200	200	145	145	200	200
Production rate (kg/min)	0.73	0.79	0.82	1.13	1.16	1.2	0.75	0.72	1.10	1.05
Specific energy consumption (kWh/kg)	0.055	0.047	0.045	0.040	0.034	0.032	0.054	0.056	0.390	0.043
Density of briquette (kg/m <sup>3</sup> )	1342	1337	1283	1388	1342	1328	1448	1486	1426	1465
Compressive strength (MPa)	2.60	2.73	2.87	0.49	0.48	0.33	2.90	3.00	0.75	0.79
Impact resistance index	∞	∞	∞	81	61	56	∞	∞	72	75
High heating value (MJ/kg)	20.33	19.34	19.04	23.60	24.00	24.50	21.57	22.73	24.85	25.31

M = Molasses binder R = Treated rice straw binder

Remark: The infinity sign (∞) means that the samples were not fractured when each sample was dropped 50 times.

เปลี่ยนแปลงตามสัดส่วนตัวประสาน และ 2) เปลี่ยนแปลงตามสัดส่วนการผสมของผงถ่านกะลาต่อผงถ่านไยกะลาในการใช้ตัวประสานแต่ละชนิด ในขณะที่อัตราการผลิตและการใช้พลังงานจำเพาะในการผลิตไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้เพราะความเร็วรอบของสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลองทั้งสองกรณีมีค่าไม่เท่ากัน

### 1. อัตราการผลิตและพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการผลิต

การเปลี่ยนแปลงของอัตราการผลิต เมื่อสัดส่วนโดยน้ำหนักของตัวประสานต่อวัตถุดิบเปลี่ยนไป แสดงใน Figure 7a โดยพบว่าทั้งกรณีของการใช้ฟางข้าวหมักและโมลาสเป็นตัวประสาน พบว่า การเพิ่มสัดส่วนการผสมตัวประสานส่งผลให้อัตราการผลิตแท่งเชื้อเพลิงมีค่าเพิ่มขึ้น และพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการผลิตลดลงเพราะตัวประสานที่ผสมลงในวัตถุดิบจะมีสมบัติเป็นสารหล่อลื่นทำให้แท่งเชื้อเพลิงสามารถไหลผ่านแม่พิมพ์ออกมาได้ง่าย โดยจะคล้ายกับกรณีการอัดรีดร้อนซึ่งจะมีลิกนินที่ละลายออกมาจากวัตถุดิบหลังจากการให้ความร้อนมาช่วยในการหล่อลื่น

แท่งเชื้อเพลิงให้ไหลออกมาจากแม่พิมพ์ได้ง่ายขึ้นและลดการใช้พลังงานจำเพาะในการผลิต (ประสาน และคณะ 2549, Reineke, 1964; Bhattacharaya *et al.*, 2002) ส่วนผลของสัดส่วนผงถ่านกะลาต่อผงถ่านไยกะลา (Figure 7b) พบว่าการเพิ่มสัดส่วนการผสมผงถ่านกะลาส่งผลให้อัตราการผลิตที่น้อยลงแต่พลังงานจำเพาะที่ใช้ในการผลิตเพิ่มสูงขึ้น สาเหตุคาดว่า เป็นเพราะผงถ่านกะลาที่มีความแข็งมากกว่าผงถ่านไยกะลา ดังนั้นการอัดรีดผงถ่านกะลาในสัดส่วนที่มากให้เกาะรวมตัวกันและมีปริมาตรเล็กลง ทำให้ยากกว่า ประกอบกับผงถ่านกะลาที่มีความแข็งจะทำให้เกิดแรงเสียดทานที่บริเวณทางออกแม่พิมพ์สูง โดยพบว่าอัตราการผลิตแท่งเชื้อเพลิงซึ่งพิจารณาที่ปริมาณความชื้น 10% d.b. มีค่าระหว่าง 1.05-1.20 กก./นาที ในกรณีการใช้ฟางข้าวหมัก ส่วนกรณีการใช้โมลาสมีค่าระหว่าง 0.72-0.82 กก./นาที สำหรับพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการผลิตแท่งเชื้อเพลิงมีค่าระหว่าง 0.045-0.056 กิโลวัตต์-ชม./กก. สำหรับกรณีการใช้โมลาส และ 0.032-0.043 กิโลวัตต์-ชม./กก. ในกรณีของการใช้ฟางข้าวหมัก ทั้งนี้

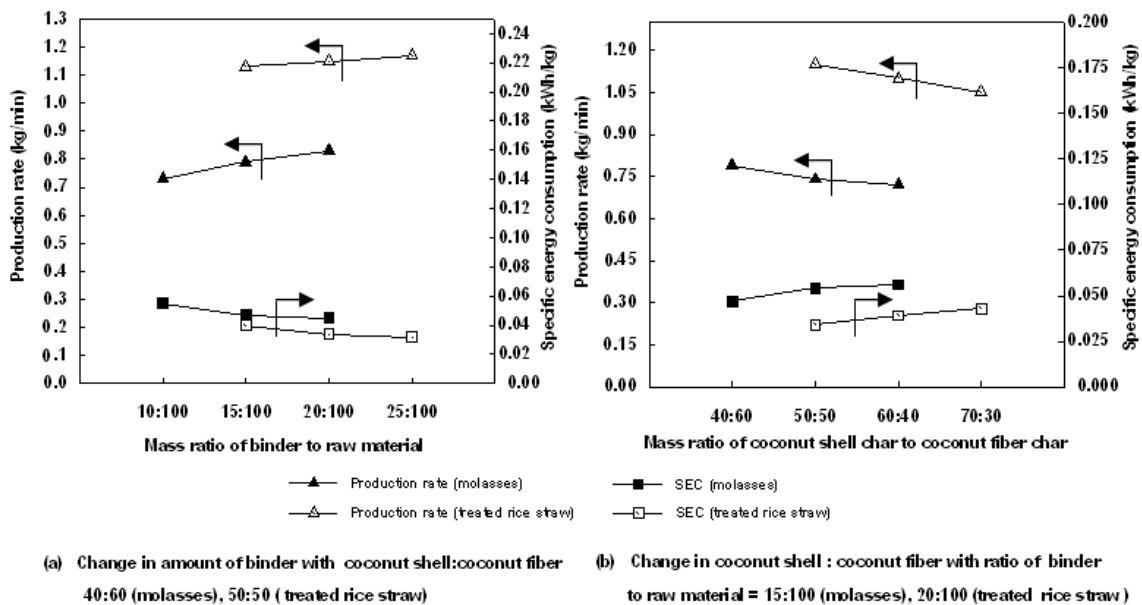


Figure 7. The effects of mass ratio of binder to raw material and mass ratio of coconut shell char: coconut fiber char on production rate and specific energy consumption of extruded fuel.

อัตราการผลิตแห้งเชื้อเพลิงกรณีการใช้ฟางข้าวหมักมีค่าสูงกว่าเนื่องจากการทดลองในกรณีนี้ได้ใช้ความเร็วรอบของสกรูอัดแห้งเชื้อเพลิง (200 รอบ/นาที) สูงกว่ากรณีการใช้โมลาสเป็นตัวประสาน (145 รอบ/นาที)

2. ความหนาแน่นและการต้านทานแรงกดของแห้งเชื้อเพลิง

ผลของปริมาณตัวประสานแต่ละชนิดต่อค่าความหนาแน่นของเชื้อเพลิงแห้งที่อัดรีดได้ (Figure 8a) พบว่าความหนาแน่นของแห้งเชื้อเพลิงจะมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณตัวประสาน เหตุผลเพราะว่าตัวประสานทั้งสองชนิดเป็นของเหลวซึ่งมีน้ำเป็นส่วนประกอบและเมื่อนำแห้งเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ไปทำการอบจะทำให้มีน้ำที่อยู่ในตัวประสานระเหยออกไปซึ่งหากผสมตัวประสานในสัดส่วนที่มากก็จะทำให้มีปริมาณน้ำระเหยออกไปมากเป็นผลให้เกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคมากขึ้นซึ่งทำให้ความหนาแน่นของแห้งเชื้อเพลิงลดลง สำหรับผลของสัดส่วนผงถ่านกะลาต่อผงถ่านไยมะพร้าว (Figure 8b) พบว่าการเพิ่มสัดส่วนผสมผงถ่านกะลาส่งผลให้ความหนาแน่นมีค่าเพิ่ม

ขึ้นคาดว่ามาจากการที่ผงถ่านกะลาที่มีความหนาแน่นมากกว่าผงถ่านไยกะลาซึ่งเมื่อผสมในสัดส่วนที่มากก็จะส่งผลให้แห้งเชื้อเพลิงที่ผลิตได้นั้นมีค่าความหนาแน่นมากขึ้นด้วย โดยความหนาแน่นของแห้งเชื้อเพลิงมีค่าระหว่าง 1283-1486 กก./ลบ.ม. สำหรับกรณีการใช้โมลาส และสำหรับกรณีการใช้ฟางข้าวหมักมีค่าระหว่าง 1328-1465 กก./ลบ.ม.

เมื่อพิจารณาถึงการต้านทานแรงกดของแห้งเชื้อเพลิง พบว่าการใช้ตัวประสานทั้งสองชนิดให้ผลที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยกรณีการใช้โมลาสจะมีค่าความแข็งแรงสูงกว่ากรณีใช้ฟางข้าวหมักประมาณ 3 เท่าตัวและเมื่อเพิ่มปริมาณตัวประสานมากขึ้นจะทำให้แห้งเชื้อเพลิงมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับการทดลองในการใช้แอสฟัลต์เป็นตัวประสาน (Pual et al., 2002; Rubio et al., 1999) เนื่องจากตัวประสานฟางข้าวหมักมีปริมาณของเหลวมากกว่า 80% ซึ่งเมื่อนำไปอบแล้วเกิดพอรุนค่อนข้างมากทำให้การยึดเกาะตัวของอนุภาคไม่ดี แต่กรณีการใช้โมลาสพบว่าการเพิ่มสัดส่วนการผสมจะทำให้โมลาสสามารถยึดกับอนุภาคได้อย่างทั่วถึงขึ้นทำให้การยึดตัวกัน



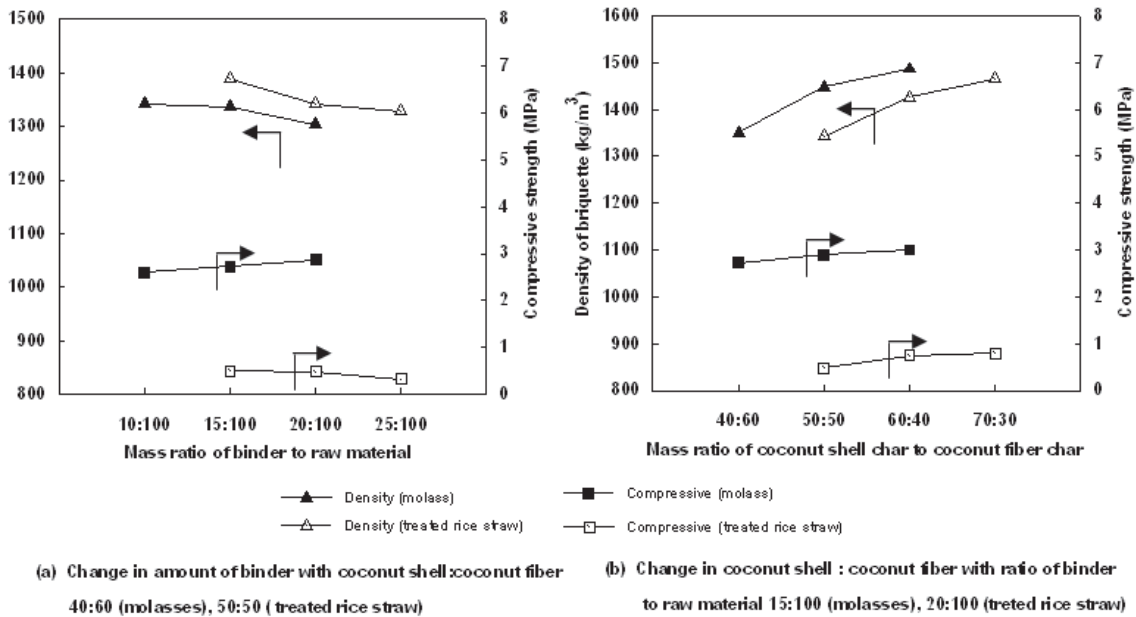


Figure 8. The effects of mass ratio of binder to raw material and mass ratio of coconut shell char: coconut fiber char on density and compressive strength of extruded fuel.

ระหว่างอนุภาคเพิ่มมากขึ้นซึ่งมีค่าความแข็งแรงสูงกว่าการใช้ฟางข้าวหมักมาก โดยมีค่าระหว่าง 2.60-3.00 เมกะปาสคาล ในขณะที่การใช้ฟางข้าวหมักมีค่าระหว่าง 0.33-0.79 เมกะปาสคาล โดยในเกือบทุกเงื่อนไขการทดลองมีค่าความแข็งแรงสูงกว่าค่าที่ยอมรับได้ในเชิงพาณิชย์ซึ่งมีค่าเพียง 0.375 เมกะปาสคาล (Richards, 1990)

### 3. ค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิง

ผลของการเพิ่มสัดส่วนตัวประสาน (Figure 9a) พบว่าการเพิ่มสัดส่วนในการผสมโมลาส มีแนวโน้มที่ส่งผลให้ค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงมีค่าลดลง แต่ในกรณีของการใช้ฟางข้าวหมักเป็นตัวประสานนั้นเห็นได้ว่าค่าความร้อนมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเมื่อใช้ฟางข้าวหมักเป็นตัวประสาน ฟางข้าวที่ผสมอยู่สามารถเผาไหม้และให้ค่าความร้อนออกมาได้ แต่ถ้าใช้โมลาสเป็นตัวประสานนั้นอาจจะมีปริมาณสารที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้มากทำให้การเพิ่มสัดส่วนการผสมมีผลให้ค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงลดลง

เมื่อพิจารณาถึงผลของการเพิ่มสัดส่วนของผงถ่านกะลา (Figure 9b) พบว่าการเพิ่มสัดส่วนของผงถ่านกะลา

ทำให้ค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตได้มีค่าเพิ่มสูงขึ้นทั้ง 2 ชนิดของตัวประสานเพราะการเพิ่มสัดส่วนผงถ่านกะลาเปรียบเสมือนการเพิ่มสัดส่วนของคาร์บอนในวัตถุดิบซึ่งมีค่าความร้อนสูง โดยค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงหลังการอบจะเหลือความชื้นประมาณ 10% db มีค่าระหว่าง 19.04-22.70 เมกะจูล/กก. ในกรณีที่ใช้โมลาสเป็นตัวประสาน และ 23.60-25.31 เมกะจูล/กก. สำหรับการใส่ฟางข้าวหมักเป็นตัวประสาน

### 4. การต้านทานแรงกระแทกของแท่งเชื้อเพลิง

จากการนำแท่งเชื้อเพลิงที่ผ่านการอบจนเหลือความชื้น 10% db ของทุกเงื่อนไขการทดลองไปทดสอบการต้านทานแรงกระแทกพบว่ากรณีการใช้โมลาสไม่เกิดการแตกหักของตัวอย่างที่นำมาทดสอบทำให้ค่าการต้านทานแรงกระแทกมีค่าสูงจนเป็นอนันต์ ( $\infty$ ) เช่นเดียวกับการทดลองของ ประสาน และคณะ (2549) แต่กรณีการใช้ฟางข้าวหมักนั้นสามารถหาค่าการต้านทานแรงกระแทกได้โดยพบว่าการต้านทานแรงกระแทกจะแปรผกผันกับสัดส่วนตัวประสานซึ่งเหมือนกับการต้านทานแรงกดของแท่งเชื้อเพลิง เนื่องจากการที่แท่งเชื้อเพลิงหลังการอบมีรู

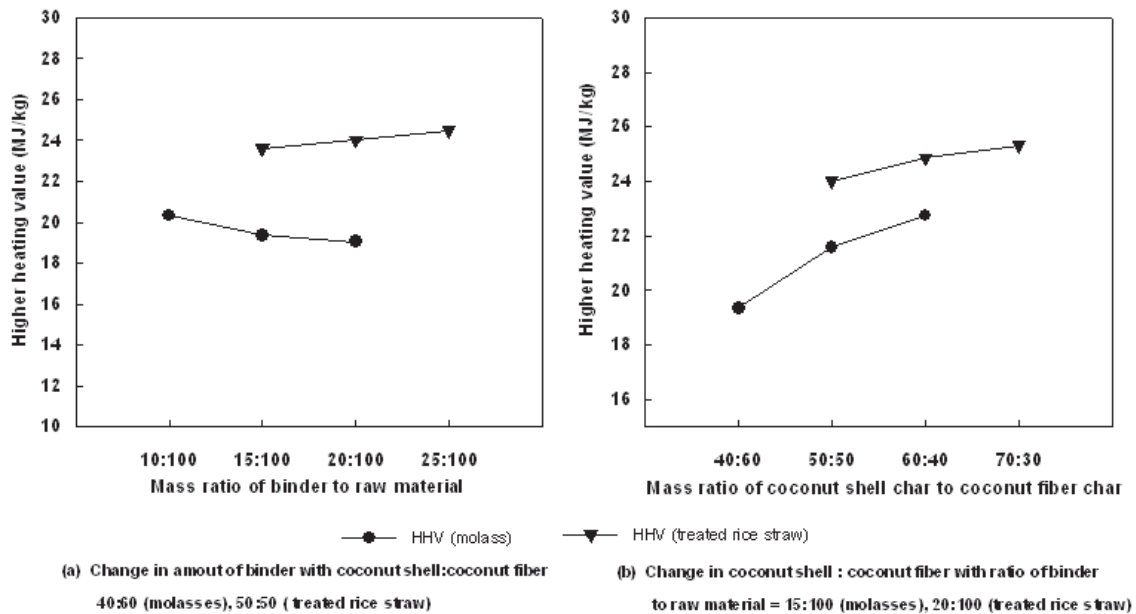


Figure 9. The effects of mass ratio of binder to raw material and mass ratio of coconut shell char: coconut fiber char on higher heating value of extruded fuel.

พูนจำนวนมากซึ่งจะทำให้พื้นผิวการยึดเกาะของอนุภาค วัสดุดิบมีน้อยเป็นผลให้ความแข็งแรงของแท่งเชื้อเพลิง ลดลง สำหรับสัดส่วนของผงถ่านกะลาที่เพิ่มขึ้นในกรณี การใช้ฟางข้าวหมักส่งผลให้การต้านทานแรงกระแทกเพิ่ม สูงขึ้น โดยพบว่าค่าการต้านทานแรงกระแทกมีค่าระหว่าง 56-81 ซึ่งสูงกว่าค่าที่ยอมรับได้ในเชิงพาณิชย์ที่มีค่าเท่ากับ 50 (Richards, 1990) โดยผลการต้านทานแรงกระแทก ของทุกเงื่อนไขการทดลองแสดงดัง Table 2

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากผงถ่าน กะลามะพร้าวผสมผงถ่านไยกะลามะพร้าวโดยใช้ฟางข้าว หมักและโมลาสเป็นตัวประสาน โดยศึกษาผลของสัดส่วน การผสมตัวประสานและสัดส่วนการผสมผงถ่านกะลาที่มี ต่อสมบัติทางกายภาพและอัตราการผลิตแท่งเชื้อเพลิง โดย ปรับเปลี่ยนสัดส่วนการผสมตัวประสานดังนี้คือ 15:100 20:100 และ 25:100 สำหรับการใส่ฟางข้าวหมัก ส่วน การใช้โมลาสจะใช้สัดส่วน 10:100 15:100 และ 20:100 โดยสัดส่วนของผงถ่านกะลาต่อผงถ่านไยกะลามีค่า 40:60

50:50 60:40 และ 70:30 ขึ้นกับชนิดของตัวประสานที่ใช้ ซึ่งผลการทดลองพบว่าอัตราการผลิตแท่งเชื้อเพลิงมีค่า เพิ่มขึ้นตามสัดส่วนตัวประสานแต่จะลดลงเมื่อสัดส่วนการ ผสมผงถ่านกะลาเพิ่มสูงขึ้นโดยมีอัตราการผลิตที่ปริมาณ ความชื้น 10% d.b. ระหว่าง 0.73-0.82 กก./นาที่ สำหรับการ ใช้โมลาสซึ่งมีความเร็วรอบสกรูอัดที่ 145 รอบ/นาที่ ในขณะที่การใช้ฟางข้าวหมักมีค่าระหว่าง 1.13-1.20 กก./ นาที่ ซึ่งมีความเร็วรอบสกรูอัดที่ 200 รอบ/นาที่ ส่วนการ ใช้พลังงานจำเพาะในการผลิตและความหนาแน่นของแท่ง สองกรณีจะลดลงตามสัดส่วนการผสมตัวประสานแต่จะ เพิ่มขึ้นตามสัดส่วนการผสมผงถ่านกะลา โดยมีค่าการใช้ พลังงานจำเพาะในการผลิตของกรณีใช้ฟางข้าวหมักระหว่าง 0.032-0.043 กิโลวัตต์-ชม./กก. และ 0.045-0.056 กิโล วัตต์-ชม./กก.ในกรณีการใช้โมลาส สำหรับความหนาแน่น ของแท่งเชื้อเพลิงมีค่าระหว่าง 1328-1465 กก./ลบ.ม. ในกรณีการใช้ฟางข้าวหมัก และ 1283-1486 กก./ลบ.ม. ในกรณีการใช้โมลาส นอกจากนี้มีประเด็นที่น่าสนใจคือการ เพิ่มสัดส่วนการผสมตัวประสานจะให้ผลด้านความแข็งแรง ที่แตกต่างกันของตัวประสานทั้งสองชนิดคือ กรณีการใช้ โมลาสจะมีค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนการผสม

ตัวประสานที่เพิ่มขึ้น แต่กรณีของฟางข้าวหมักจะให้ผลในทิศทางที่กลับกัน สำหรับการเพิ่มสัดส่วนการผสมผงถ่านกลางจะทำให้ค่าการต้านทานแรงกดเพิ่มขึ้นทั้งสองชนิดของตัวประสาน โดยพบว่าค่าการต้านทานแรงกดกรณีการใช้โมลาสมีค่าระหว่าง 2.60-3.00 เมกะปาสคาล ซึ่งสูงกว่ากรณีการใช้ฟางข้าวหมักที่มีค่าเพียง 0.49-0.79 เมกะปาสคาล แต่อย่างไรก็ตามทุกเงื่อนไขการทดลองมีค่าการต้านทานแรงกดสูงกว่าค่าที่ยอมรับในเชิงพาณิชย์ซึ่งมีค่า 0.375 เมกะปาสคาล (Richards, 1990) สำหรับค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนการผสมตัวประสานฟางข้าวหมักที่เพิ่มขึ้นแต่จะแปรผกผันกับสัดส่วนการผสมโมลาส และพบว่าค่าการเพิ่มสัดส่วนการผสมผงถ่านกะลามะพร้าวจะทำให้ค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงสูงขึ้นสอดคล้องกันทั้งสองชนิดของตัวประสาน ส่วนค่าการต้านทานแรงกระแทกของแท่งเชื้อเพลิงพบว่ากรณีการใช้โมลาสในทุกเงื่อนไขการทดลองมีค่าสูงเป็นอนันต์ ( $\infty$ ) แต่กรณีการใช้ฟางข้าวหมักมีค่าลดลงตามการเพิ่มสัดส่วนการผสมตัวประสานแต่จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนการผสมผงถ่านกะลา โดยมีค่าการต้านทานแรงกระแทกระหว่าง 56-81

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนในการวิจัย และขอบคุณกองเกษตรวิศวกรรม กรมวิชาการเกษตร ที่อนุเคราะห์เครื่องบดย่อยวัสดุเพื่อใช้ในการบดถ่านกะลาให้เป็นผงถ่านกะลาในการวิจัยและนักศึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ที่ช่วยเหลือในการเก็บผลการทดลอง

### เอกสารอ้างอิง

ประสาน สถิตย์เรืองศักดิ์ ฐานิตย์ เมธิยานนท์ และ สมชาติ โสภณธรณฤทธิ์. 2549. การออกแบบสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิงแข็งด้วยเทคนิคเอ็กซ์ทรูชันและการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากกะลามะพร้าว, ว.สงขลานครินทร์ ฉบับวทท. 28(2): 387-401.

- Bhattacharya, S.C., Augustus Leon, M. and Mizanur Rahman Md. 2002. A study on improved biomass briquetting. *Energy for Sustain Develop.*, 6 (2): 67-71
- Blesa, M.J., Miranda, J.L., Izquierdo, M.T. and Moliner, R. 2003. Curing temperature effect on mechanical strength of smokeless fuel briquettes. *Fuel Process Technol.*, 82: 943-947
- Rauwendaal, C. 1990. *Polymer Extrusion*. Hanser Publishers, Munich Vienna, New York.
- Debdubi, A., El amati, A. and Colacio, E. 2004. Production of fuel briquettes from esparto partially pyrolyzed. *Energy conver.*, 46: 1877-1884
- Emre Altun, N., Cahit Hicyilmaz, and Suat Bagci, A. 2004. Influence of coal briquette size on the combustion kinetics. *Fuel Process Technol.*, 85: 1345-1357
- Granada, E., Gonzalez, L.M., Miguez, J.L. and Moran, J. 2002. Fuel lignocellulosic briquettes, die design and products study. *Renew energy.*, 27: 561-573
- Husain, Z., Zainac, Z. and Abdullah, M.Z. 2002. Briquetting of palm fiber and shell from the processing of palm nuts to palm oil. *Biomass Bioenerg.*, 22(10): 505-509.
- Madhiyanon, T., Bingam, M. and Soponronnarit, S. 2003. Solid fuel producing from sawdust by extrusion technique, the 17<sup>th</sup> Conference on Mechanical Engineering Network of Thailand, King mongkut's Institute of Technology North Bangkok, Prachinburi.
- Madhiyanon, T., Piriyanunroj, N., Nathakaranakule, A. and Soponronnarit, S. 2003. Development of a vortexing-fluidized bed combustor for rice husk fuel, the 17<sup>th</sup> Conference on Mechanical Engineering Network of Thailand, King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok, Prachinburi.
- Mayoral, M.C., Izquierdo, M.T., Blesa, M.J., Andres, J.M., Rubio B. and Miranda, J.L. 2001. DSC study of curing in smokeless briquetting. *Thermochim Acta.*, 371: 41-44.
- Paul, S.A., Hull, A.S., Plancher, H. and Agarwal, P.K. 2002. Use asphalts for formcoke briquettes, *Fuel Process Technol.*, 76: 211-230.

- Reineke, L.H. 1964. Briquets from wood residue. U.S. Forest service research note. FPL-075
- Richards, S.R. 1990. Physical of fuel briquettes. Fuel Process Technol., 25: 89-100.
- Rubio, B., Izquierdo, M.T. and Segura, E. 1999. Effect of binder addition on the mechanical and physicochemical properties of low rank char briquettes. Carbon, 37: 1833-1841
- Sathitruangsak, P., Madhiyanon, T. and Soponronnarit, S. 2004. Briquette fuel producing from coconut shell by extrusion technique using molass as binder, the 18<sup>th</sup> Conference on Mechanical Engineering Network of Thailand, Khon Khean University, Khon Khean.
- Suriyaphan, P. 2002. The utilization of various sugarcane products. available: <http://www.sugarzone.in.th>
- Weert, X., Lawrence, C.J., Adams, M.J. and Briscoe, B.J. 2001. Screw extrusion of food powder: prediction and performance, Chem Eng J., 56: 1953-1949.
- Zhang, X., Xu, D., XU, Z., and Cheng, Q. 2001. The effect of different treatment condition on binder preparation for lignite briquette. Fuel Process Technol., 73: 185-196.