

การออกแบบสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิงแข็งด้วยเทคนิคเอ็กซ์ทรูชัน และการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากกะลามะพร้าว

ประสาน สถิตย์เรืองศักดิ์¹ ฐานิตย์ เมธิยานนท์² และ สมชาติ โสภณรณฤทธิ³

Abstract

Sathitruangsak, P.¹, Madhiyanon, T.¹ and Soponronnarit, S.²

Design of an extrusion screw and solid fuel produced from coconut shell

Songklanakar J. Sci. Technol., 2006, 28(2) : 387-401

The objectives were to design an extrusion screw to produce biomass solid fuel in a cold extrusion process, and investigate the effects of molasses used as a selected adhesive on the physical properties of extruded products. The material employed consisted of crushed coconut shell char and coconut fiber char mixed at a ratio of 40:60. The ratios of molasses in the mixture were 10:100, 15:100 and 20:100 (by weight) and the extrusion die angles were 1.0, 1.1, 1.2, and 1.3 degrees gradation per experiment. The experimental results showed that the newly designed screw could function properly in the output range 0.75-0.90 kg/min, which is close to the design value. Regarding the molasses's effect on solid fuel properties, increasing the share of molasses was positive for both output and strength of the resulting briquettes, whereas the results of increasing die angle showed decreases in both output and strength. The compressive strength varied

¹Department of Mechanical Engineering, Mahanakorn University, 51 Cheum-Sampan Road, Nong Chok, Bangkok 10530 Thailand. ²Ph.D.(Production and Processing of Vegetable Raw Materials), Prof., School of Energy and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi, 91 Prachauthit Road, Bangmod, Thung Kharu District, Bangkok 10140 Thailand.

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

Corresponding e-mail: thanid_m@yahoo.com

รับต้นฉบับ 13 มิถุนายน 2547 รับลงพิมพ์ 20 กันยายน 2548

between 2.49-2.87 MPa in all circumstances, which was considerably higher than acceptable industrial level. Furthermore, the extruded solid fuel showed excellent resistance to impact force. Regarding energy consumption, the amount of electrical energy used in the extrusion process was insignificant, ranging between 0.040-0.079 kWh/kg.

Key words : extruded fuel, extrusion, binder, extrusion die, molasses

บทคัดย่อ

ประสาน สติชัยเรืองศักดิ์ ฐานิตย์ เมธิยานนท์ และ สมชาติ โสภณธนฤทธิ์
การออกแบบสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิงแข็งด้วยเทคนิคเอ็กซ์ทรูชัน และการผลิตเชื้อเพลิง
อัดแท่งจากกะลามะพร้าว

ว. สงขลานครินทร์ วทท. 2549 28(2) : 387-401

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการออกแบบสกรูอัดรีดสำหรับผลิตแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลในกระบวนการอัดรีดเย็น และศึกษาผลของสัดส่วนมวลโมลาสซึ่งใช้เป็นตัวประสานและขนาดของมุมอัดรีดต่ออัตราการผลิตและสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงที่อัดได้ วัตถุประสงค์ที่ใช้คือผงถ่านกะลามะพร้าวผสมกับผงถ่านโยกะลามะพร้าวในสัดส่วน 40:60 ในการทดลองได้ปรับเปลี่ยนสัดส่วนการผสมของโมลาสต่อมวลวัตถุดิบดังนี้ 10:100 15:100 และ 20:100 และมุมอัดรีดของแม่พิมพ์จะเปลี่ยนไปดังนี้คือ 1.0 1.1 1.2 และ 1.3 องศา ตามลำดับ จากการทดลองพบว่าสกรูที่ออกแบบไว้ใช้งานได้ดีโดยมีอัตราการผลิตอยู่ในช่วง 0.75-0.90 กก./นาที ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่ออกแบบไว้ สำหรับผลของโมลาสพบว่ามวลของโมลาสที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลดีต่ออัตราการผลิตและความแข็งแรงของแท่งเชื้อเพลิง ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของมุมอัดรีดจะทำให้ทั้งอัตราการผลิตและความแข็งแรงลดลง ในทุก ๆ เงื่อนไขการทดลองค่าการต้านทานแรงกดมีค่าระหว่าง 2.49-2.87 MPa ซึ่งสูงกว่าค่าที่ยอมรับได้ในทางอุตสาหกรรม นอกจากนี้เชื้อเพลิงแท่งที่อัดได้ยังมีความสามารถต้านทานแรงกระแทกได้อย่างดีเยี่ยม สำหรับพลังงานที่ใช้ในการอัดรีดแท่งเชื้อเพลิงพบว่ามีค่าน้อยโดยมีค่าอยู่ระหว่าง 0.040-0.079 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/กก.

ในปัจจุบันสภาวะการใช้พลังงานของประเทศไทยมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นทุกขณะ โดยพลังงานส่วนใหญ่ที่ใช้เป็นพลังงานความร้อนซึ่งได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลที่ต้องมีการนำเข้าจากต่างประเทศทำให้ต้องสูญเสียเงินตราออกนอกประเทศเพื่อที่จะซื้อเชื้อเพลิงเหล่านี้เข้ามา แต่จากการที่ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมจึงทำให้มีวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรจำนวนมากซึ่งวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรดังกล่าวเป็นชีวมวลที่สามารถนำมาแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงได้และมีศักยภาพในการใช้งานที่ดี โดยจากการสำรวจข้อมูลที่ผ่านมาพบว่าศักยภาพของพลังงานจากวัสดุเหลือใช้ทางเกษตรมีมากถึง $156,402 \times 10^6$ เมกะจูล วิธีการหนึ่งในการนำชีวมวลเหล่านี้มาใช้ประโยชน์คือการเพิ่มความหนาแน่นของวัสดุเหลือใช้เหล่านี้ก่อนเพื่อสะดวกต่อการใช้งานและการเก็บรักษา เพิ่มค่าความ

ร้อนต่อหน่วยปริมาตรและเป็นการลดต้นทุนในการขนส่ง (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, L.H. 1964; Emre et al., 2003 and Husain et al., 2002) และการอัดรีดด้วยเทคนิคเอ็กซ์ทรูชัน (Madhiyanon et al., 2003; Madhiyanon et al., 2004; Sathitruangsak et al., 2004 and Bhattacharya et al., 2002) โดยในวิธีการอัดด้วยไฮดรอลิกส์เครื่องจักรจะมีความซับซ้อนมากกว่าและที่สำคัญการผลิตจะไม่ต่อเนื่อง ในขณะที่การอัดรีดด้วยเทคนิคเอ็กซ์ทรูชันนั้นสามารถผลิตแท่งเชื้อเพลิงได้อย่างต่อเนื่อง มีชิ้นส่วนและอุปกรณ์เครื่องจักรน้อยทำให้ต้นทุนในการผลิต

ต่ำกว่าการอัดด้วยไฮดรอลิกส์ โดยปกติกระบวนการผลิตแท่งเชื้อเพลิงด้วยเทคนิคเอ็กซ์ทรูชันจะมีด้วยกัน 2 แบบ (Madhiyanon *et al.*, 2004) คือกระบวนการอัดรีดร้อนและกระบวนการอัดรีดเย็นซึ่งกระบวนการอัดรีดร้อนนั้นเหมาะสำหรับวัตถุดิบที่มีลักษณะเป็นส่วนประกอบ เช่น ชี้อ้อย เป็นต้น โดยการให้ความร้อนจะทำให้ลักษณะที่มืออยู่ในวัตถุดิบละลายออกมายึดเกาะอนุภาคของวัตถุดิบให้คงรูปเป็นแท่งเชื้อเพลิงแต่สำหรับกระบวนการอัดรีดเย็นนั้นไม่ต้องการความร้อนในระหว่างการอัด แต่จำเป็นต้องใช้ตัวประสานเพื่อทำหน้าที่ยึดเกาะวัตถุดิบให้คงรูปเป็นแท่งเชื้อเพลิงแทน จากการทดลองที่ผ่านมาของ Madhiyanon และคณะ (2003) ซึ่งได้ทดลองผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากชี้อ้อยด้วยการเอ็กซ์ทรูชันแบบอัดรีดร้อน โดยใช้ชี้อ้อยของไม้ 3 ชนิดเป็นวัตถุดิบ และใช้ขดลวดความร้อนเป็นตัวให้ความร้อนกับผิวของแม่พิมพ์ด้วยอุณหภูมิ 230-250°C (มากกว่าอุณหภูมิต่ำสุดที่สามารถทำให้ลักษณะละลายได้ซึ่งมีค่า 163°C (Reineke, 1964)) ซึ่งจากการทดลองพบว่าอัตราการผลิตแท่งเชื้อเพลิงจะต่ำและใช้พลังงานในการอัดสูง แต่สำหรับการอัดแท่งเชื้อเพลิงแบบอัดรีดเย็นด้วยกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันซึ่งจำเป็นต้องใช้ตัวประสานนั้นจำเป็นต้องศึกษาถึงชนิดของตัวประสานที่จะนำมาใช้ โดยได้มีการทดลองการใช้ตัวประสานชนิดต่างๆ เช่น โมลาส (Blesa *et al.*, 2003 and Mayoral *et al.*, 2000) ยางสน (Debdoubi *et al.*, 2004) ฟางข้าวหมักด้วยสารละลายต่างๆ (Zhang *et al.*, 2000) แอสฟัลต์ (Paul *et al.*, 2002) เป็นต้น โดยจากการทดลองที่ใช้โมลาสเป็นตัวประสานพบว่าการใช้โมลาสเป็นตัวประสานจะทำให้แท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตได้นั้นมีค่าน้อยเมื่อนำมาใช้งาน (Blesa *et al.*, 2003 and Mayoral *et al.*, 2000) นอกจากนี้ยังทำให้สมบัติทางกายภาพด้านความแข็งแรงของแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตได้มีค่าสูงซึ่งสามารถยอมรับได้ในการใช้งานในระดับอุตสาหกรรม (Richards, 1990)

จากข้อมูลการสำรวจพบว่าวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรซึ่งเหมาะกับการนำมาแปรรูปเป็นแท่งเชื้อเพลิงคือผลมะพร้าว โดยจะใช้ส่วนที่เป็นกะลาและใยกะลา เพราะยังมีสัดส่วนการนำไปใช้ประโยชน์ค่อนข้างน้อยและให้ค่าความร้อนสูงประมาณ 20 เมกะจูล/กก. ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการออกแบบสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิง ซึ่งจะใช้หลัก

การออกแบบสกรูลำเลียงของ Rauwendaal, 1990 มาประยุกต์และเลือกใช้กะลามะพร้าวผสมกับใยกะลามะพร้าวเป็นวัตถุดิบในการผลิตเป็นแท่งเชื้อเพลิง โดยใช้โมลาสเป็นตัวประสานเพื่อที่จะใช้ยึดเกาะวัตถุดิบแล้วใช้กระบวนการเอ็กซ์ทรูชันแบบอัดรีดเย็น นอกจากนี้ยังทำการศึกษาถึงอิทธิพลของขนาดมุมอัดรีดของแม่พิมพ์ที่มีต่อการผลิตและสมบัติทางกายภาพของแท่งเชื้อเพลิงที่อัดได้ซึ่งมุมของแม่พิมพ์ที่ทำการศึกษามี 4 ขนาดคือ 1.0, 1.1, 1.2 และ 1.3 ° สำหรับแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตได้นั้นจะนำไปทดสอบสมบัติทางกายภาพต่างๆ ได้แก่ ค่าการต้านทานแรงกด การต้านทานแรงกระแทก ค่าความร้อน และความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิง

การออกแบบสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิง

1. เงื่อนไขในการออกแบบสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิง

ในการออกแบบสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิงจะกำหนดความต้องการไว้ว่า อัตราการผลิตแท่งเชื้อเพลิงมีค่า 1 กก./นาที่ ความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิงที่ผ่านการอัดรีดแล้วต้องมีความหนาแน่นมากกว่า 1,000 กก./ลบ.ม. และสามารถอัดวัตถุดิบเป็นแท่งเชื้อเพลิงได้ภายในขั้นตอนเดียว สำหรับค่าความหนาแน่นปรากฏ (bulk density) เริ่มต้นของส่วนผสมผงถ่านกะลาต่อผงถ่านใยกะลามะพร้าว (40:60) และผสมโมลาสสัดส่วน 10:100 มีค่า 415 กก./ลบ.ม.

2. หลักการในการออกแบบสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิง

โดยปกติการออกแบบสกรูอัดที่ใช้ในกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันนั้นได้แบ่งออกเป็น 3 ช่วง (Weert *et al.*, 2000) คือ ช่วงการลำเลียงอนุภาควัตถุดิบ ช่วงการให้ความร้อนและช่วงการอัดรีดวัตถุดิบ ซึ่งการแบ่งช่วงการทำงานแบบนี้จะใช้กับกรณีของการอัดรีดร้อนแต่สำหรับการอัดรีดเย็นนั้นจะเหลือเพียง 2 ช่วงคือ ช่วงการลำเลียงและช่วงการอัดตัวของวัตถุดิบ ในการวิเคราะห์เพื่อคำนวณและออกแบบสกรูอัดรีดแท่งเชื้อเพลิงในงานวิจัยนี้ได้ใช้หลักการออกแบบสกรูลำเลียง (Rauwendaal, 1990) มาประยุกต์ โดยจะแบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 ช่วงคือ ช่วงการลำเลียงอนุภาคสำหรับร่องเกลียวลำเลียงและช่วงการอัดรีดอนุภาคให้ออกมาเป็นแท่งเชื้อเพลิง ในการวิเคราะห์แรงที่กระทำกับเบตอนุภาคของชีวมวลแสดงใน Figure 1

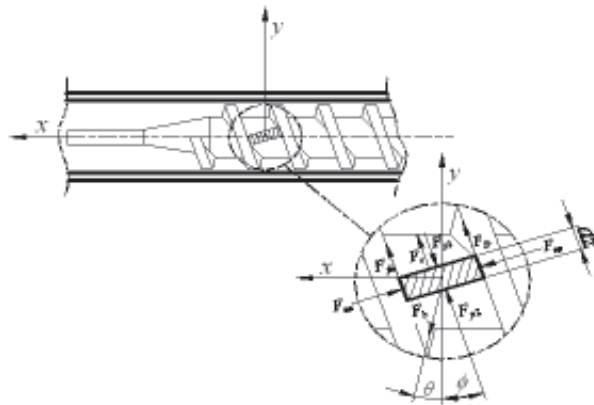


Figure 1. various forces acting on solid plug element.

2.1 การคำนวณในช่วงการลำเลียงอนุภาค

ในการวิเคราะห์เพื่อออกแบบในช่วงการลำเลียงอนุภาควัตถุติดของสกรูอัดเดี่ยว (Single screw extrusion) ตามหลักการของ Rauwendaal (1990) นั้นได้มีการตั้งสมมติฐานดังนี้

1. อนุภาคของวัตถุติดเคลื่อนที่ไปอย่างต่อเนื่องไม่มีการสะสมมวล
2. เบตอนุภาคของชีวมวลจะสัมผัสกับผนังของ barrel (หรือกระบอกสกรู) ฐานสกรูและใบเกลียวสกรู
3. ความสูงของใบเกลียวมีค่าคงที่
4. ไม่พิจารณาช่องว่างระหว่างใบเกลียวกับผนัง barrel
5. อนุภาคเคลื่อนที่แบบจุกอัด (plug flow)
6. ความดันในเบตอนุภาคไม่เปลี่ยนแปลงตลอดช่วงการลำเลียงอนุภาค
7. ไม่พิจารณาแรงโน้มถ่วงของโลก
8. ไม่พิจารณาแรงเหวี่ยงที่เกิดขึ้นของมวลอนุภาคภายในร่องเกลียว
9. ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของเบตอนุภาคตลอดช่วงการลำเลียง

การหาอัตราการขนถ่ายเบตอนุภาคของวัตถุติดภายในร่องเกลียวของสกรูได้นั้น จำเป็นต้องทราบมุมขนถ่ายเบตอนุภาค (มุม θ ใน Figure 1) ของวัตถุติดที่ออกจากร่องเกลียวก่อน โดยมุมขนถ่ายเบตอนุภาคออกจากร่องเกลียวเป็นมุมที่แรงลัพธ์ (F_b) กระทำกับเบตอนุภาคของวัตถุติด การหาค่ามุมขนถ่ายเบตอนุภาคหาได้

จากการสมดุลแรงในแนวแกนและสมดุลแรงบิดรอบแกนที่กระทำกับเบตอนุภาคดังแสดงใน Figure 1 ดังนี้

สมดุลแรงในแนวแกน x จะได้

$$\sum F_x = 0$$

$$F_{bx} - (F_{p2} - F_{p1})_x - (F_{na} - F_{np})_x + F_{fa} + F_{fpx} + F_{rx} = 0 \tag{1}$$

สมดุลแรงบิดรอบแกน x จะได้

$$\sum M_x = 0$$

$$F_{bx} \frac{D_b}{2} - (F_{p2} - F_{p1})_y \frac{D_m}{2} - (F_{na} - F_{np})_y \frac{D_m}{2} - F_{fay} \frac{D_m}{2} - F_{fpy} \frac{D_m}{2} - F_{ry} \frac{D_s}{2} = 0 \tag{2}$$

โดยนิยามของตัวแปรในสมการข้างบนดูได้จากคำนิยามที่แสดงต่อท้ายสมการที่ (9) จากการสมดุลแรงและแรงบิดตามสมการที่ (1) และ (2) จะพิจารณาให้สกรูหยุดนิ่งอยู่กับที่ และ barrel หมุนรอบแกนสกรู โดยจะสามารถหาแรงลัพธ์ (F_b) ซึ่งเป็นแรงผลักดันให้เบตอนุภาคเกิดการเคลื่อนที่ไปด้านหน้าได้ ผลเฉลยของสมการ (1) และ (2) จะอาศัยลักษณะรูปทรงทางเรขาคณิตของสกรูแสดงใน Figure 2 และไดอะแกรมความเร็วที่เกิดขึ้นภายในร่องเกลียวของสกรูแสดงใน Figure 3 ประกอบการคำนวณ โดยสามารถจัดรูปสมการที่ (1) และ (2) ให้อยู่ในรูปสมการที่ (3) ซึ่งเป็นสมการที่นำไปใช้หามุมขนถ่ายเบตอนุภาค (θ) ของวัตถุติดในร่องเกลียวโดยในสมการที่ (3) จะปรากฏตัวแปรช่วยต่างๆ ดังมีค่าตามสมการที่ (4 ถึง 8) หลังจาก

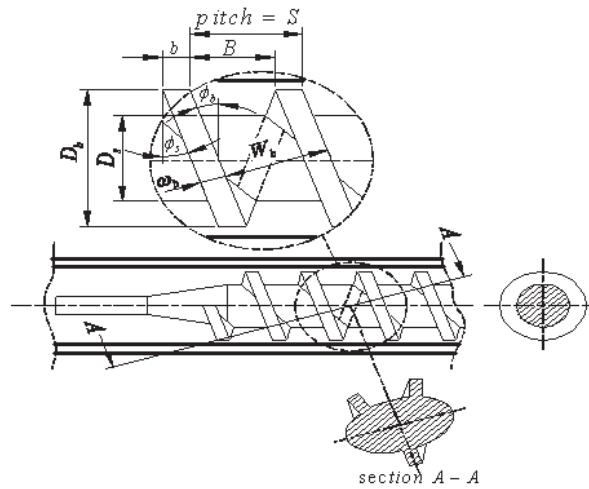


Figure 2. Basic screw geometry and screw drawn with straight flights.

ทราบค่ามุมขนถ่ายเบตอนุภาคจะสามารถหาค่าอัตราการขนถ่ายเบตอนุภาคหรืออัตราการผลิตแท่งเชื้อเพลิง (M_s) ได้ดังสมการที่ (9)

มุมขนถ่ายเบตอนุภาคของวัตถุติบภายในร่องเกลียว (θ)

$$\theta = \arcsin \left[\frac{(1 + K^2 - M_{total}^2)^{1/2} - KM_{total}}{1 + K^2} \right] \quad (3)$$

ตัวแปรช่วยในสมการ (3) มีค่าดังนี้

$$K = \frac{D_m(\sin \phi_m + f_s \cos \phi_m)}{D_b(\cos \phi_m + f_s \sin \phi_m)} \quad (4)$$

$$M_{total} = M_1 + M_2 + M_3 \quad (5)$$

$$M_1 = \frac{2Hf_s}{W_b f_b} \sin \phi_b \left(K + \frac{D_m}{D_b} \cotan \phi_m \right) \quad (6)$$

$$M_2 = \frac{W_s f_s}{W_b f_b} \sin \phi_b \left(K + \frac{D_s}{D_b} \cotan \phi_s \right) \quad (7)$$

$$M_3 = \frac{W_m H}{W_b z_b f_b} \sin \phi_m \left(K + \frac{D_m}{D_b} \cotan \phi_m \right) \ln \frac{P_2}{P_1} \quad (8)$$

อัตราการขนถ่ายเบตอนุภาคหรืออัตราการผลิตแท่งเชื้อเพลิง (M_s) คำนวณได้ดังนี้

$$\dot{M}_s = \rho H p W V_{sz} = \rho H W p V_b \frac{\sin \theta}{\sin(\theta + \phi_m)} \quad (9)$$

โดยที่

ρ = ความหนาแน่นของเบตอนุภาคของชีวมวล, (กก./ลบ.เมตร)

p = จำนวนปากของเกลียวสกรู

H = ความสูงของฟันเกลียว, (เมตร)

V_b = ความเร็วของ Barrel, (เมตร/วินาที)

D_b = เส้นผ่านศูนย์กลางของ Barrel, (เมตร)

สำหรับใน Figure 1 ถึง 3 จะมีตัวแปรต่างๆ ซึ่งความหมายของตัวแปรมีดังนี้

F_b = แรงเสียดทานระหว่างเบตอนุภาคกับผิวของ

F_r = แรงเสียดทานระหว่างเบตอนุภาคกับฐานสกรู

F_{na} = แรงตั้งฉากระหว่างเบตอนุภาคกับด้านข้างของเกลียวที่รับอนุภาคเข้ามา (active flight flank)

F_{np} = แรงตั้งฉากระหว่างเบตอนุภาคกับด้านข้างของเกลียวที่ส่งอนุภาคออกไป (passive flight flank)

F_{fa} = แรงเสียดทานระหว่างเบตอนุภาคกับด้านข้างของเกลียวที่รับอนุภาคเข้ามา

F_{fp} = แรงเสียดทานระหว่างเบตอนุภาคกับด้านข้างของเกลียวที่ส่งอนุภาคออกไป

F_{p1} = แรงเนื่องจากความดันที่ระยะใดๆ

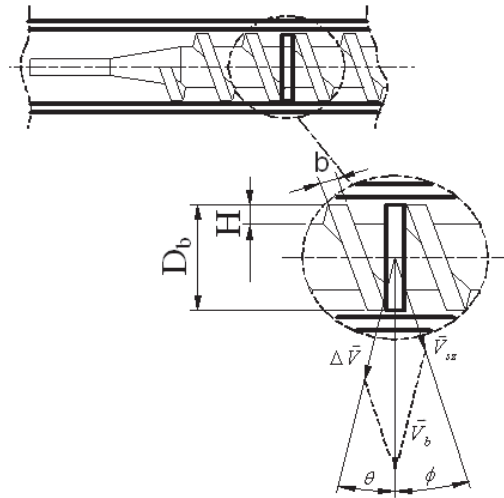


Figure 3. Velocity diagram in the screw channel.

- | | |
|--|--|
| F_{p2} = แรงเนื่องจากความดันที่ระยะ | b = ความหนาของฟันเกลียว (เมตร) |
| \vec{V}_b = ความเร็วของ barrel | ϕ_s = มุมเกลียวสกรู |
| \vec{V}_{sx} = ความเร็วของเบตอนุภาคในทิศทาง z (ตามแนวร่องสกรู) | ϕ_m = มุมเกลียวเฉลี่ย |
| $\Delta\vec{V}$ = ผลต่างระหว่าง \vec{V}_b และ \vec{V}_{sx} | θ = มุมขนถ่ายเบตอนุภาค |
| $P1$ = ความดันที่ตำแหน่งทางเข้าร่องเกลียว | D_b = เส้นผ่านศูนย์กลางกลาง barrel |
| $P2$ = ความดันที่ตำแหน่งทางออกร่องเกลียว | D_s = เส้นผ่านศูนย์กลางกลางสกรู |
| | D_m = เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของร่องเกลียวสกรู |

สำหรับสมการที่ใช้ในการคำนวณโดยอาศัยรูปทรงทางเรขาคณิตของสกรูที่เกี่ยวข้องมีดังนี้

$$S = (B + b) p \quad (10)$$

$$\phi_b = \arctan\left(\frac{S}{\pi D_b}\right) \quad (11)$$

$$\phi_m = \arctan\left(\frac{S}{\pi D_m}\right) \quad (12)$$

$$\phi_s = \arctan\left(\frac{S}{\pi D_s}\right) \quad (13)$$

$$W_b = B \cos \phi_b \quad (14)$$

$$W_m = B \cos \phi_m \quad (15)$$

$$W_s = B \cos \phi_s \quad (16)$$

B = ความกว้างของร่องเกลียวที่วัดตามแนวแกนสกรู (เมตร)

2.2 การคำนวณในช่วงการอัดรีดอนุภาค

ในการคำนวณสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิงในช่วงการอัดอนุภาคจะแตกต่างจากการคำนวณในช่วงลำเลียง เพราะสมมุติฐานที่ใช้ในการคำนวณช่วงลำเลียงนั้นจะพิจารณาว่าไม่เกิดการอัดตัวของอนุภาคในร่องเกลียวทำให้ความดันในเบตอนุภาคของวัตถุดิบไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งหากความดันแตกต่างกันระหว่างความดันภายในร่องเกลียวที่ทางเข้า (P_1) และความดันในร่องเกลียวที่ทางออกของร่องเกลียวเดียวกัน (P_2) ไม่เกิดขึ้น ($P_2/P_1 = 1$) จะทำให้เทอมของตัวแปร M_3 ในสมการที่ (8) มีค่าเท่ากับศูนย์ แต่สำหรับในช่วงการอัดตัวของเบตอนุภาคนั้นจะพิจารณาว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงความดันภายในร่องเกลียวเพื่อใช้สำหรับอัดเบตอนุภาคของวัตถุดิบให้มีค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้น โดยความดันที่ใช้ในการอัดเบตอนุภาคให้มีค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นนั้นจะใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองของ Husain และคณะ (2002) ซึ่งทำการหาความสัมพันธ์

ของความหนาแน่นของถ่านกะลาปาล์มผสมกับผงถ่านโยกะลาปาล์มสัดส่วน 40:60 ในรูปของสมการดังสมการที่ (17) ดังนั้นเมื่อต้องการทราบค่าความดันที่กระทำกับเบดอนุภาคของวัตถุดิบก็แทนค่าความหนาแน่นของวัตถุดิบในร่องเกลียวนั้นใส่ลงในสมการที่ (17) สำหรับความหนาแน่นที่เปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นระหว่างการอัดเบดอนุภาคของวัตถุดิบในแต่ละร่องเกลียวสกรูเกิดจากการลดลงของปริมาตรของร่องเกลียวสกรูในแต่ละร่องซึ่งจะทำให้การลดความสูงของไบสกรูในช่วงการอัดลง สำหรับสมการความสัมพันธ์ของความดันที่เปลี่ยนแปลงตามความหนาแน่นของวัตถุดิบมีดังนี้ (Husain *et al.*, 2002)

$$P = a \exp(bD) \quad (17)$$

โดยที่ P เป็นความดันที่ใช้ในการอัด; เมกะปาสกาล

D เป็นความหนาแน่นของเบดอนุภาคชีวมวล; กก./ลบ.เมตร

a, b เป็นค่าคงที่ของสมการเอมไพริคัล โดย a = 0.05818 และ b = 0.0041

ความดันในร่องเกลียวที่ทางเข้า (P_1) ของร่องเกลียวอัดร่องแรกจะให้ค่าเท่ากับความดันบรรยากาศและความดันที่ทางออกของร่องเกลียวเดียวกัน (P_2) นั้นจะต้องหาจากความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นจากปริมาตรของร่องเกลียวที่ลดลง แล้วนำความหนาแน่นดังกล่าวแทนค่าลงในสมการที่ (17) ซึ่งความดัน P_2 ที่หาได้จากร่องเกลียวอัดร่องแรกจะเป็นค่า P_1 ของร่องเกลียวอัดร่องต่อไปซึ่งจะเป็นเช่นนี้ไปเรื่อยๆ จนได้ความหนาแน่นตามที่ต้องการ ขั้นตอนการคำนวณจะใช้วิธีการทำคำนวณซ้ำ (Iteration) โดยมีขั้นตอนดังนี้ เริ่มจากกำหนดมุมสกรู (ϕ_s) และสมมติความสูงของไบเกลียวแรกขึ้นมาก่อน จากนั้นคำนวณค่าความหนาแน่นจากปริมาตรที่เปลี่ยนไปและหาค่า P_2 จากสมการ (17) จากนั้นไปคำนวณค่ามุมขนถ่ายเบดอนุภาคตามสมการ

(6) โดยอาศัยสมการที่ (3)-(16) และคำนวณอัตราการผลิต (M_f) จากสมการ (9) ถ้าอัตราการผลิตที่คำนวณได้ไม่เท่ากับเงื่อนไขที่ตั้งไว้ให้สมมติค่าความสูงของไบเกลียวใหม่และทำซ้ำขั้นตอนเดิมจนกว่าจะได้ค่าอัตราการผลิตตามต้องการ และทำเช่นเดียวกับร่องเกลียวถัดไป โดยให้ความสูงของไบเกลียวในร่องเกลียวถัดๆ ไปมีค่าลดลงเรื่อยๆ ซึ่งการคำนวณจะสิ้นสุดลงที่ร่องเกลียวที่ให้ค่าความหนาแน่นสุดท้ายตามต้องการ ในกรณีที่ไม่ได้ค่าอัตราการผลิตตามต้องการให้ไปกำหนดค่ามุมสกรูในตอนเริ่มต้นใหม่ สำหรับแม่พิมพ์อัดรีดที่ใช้ในงานวิจัยจะมีลักษณะเรียวยาวตามความสูงของไบเกลียวสกรูที่ลดลงทำมุมกับแนวระนาบ (α) ซึ่งได้ทำการออกแบบแม่พิมพ์ไว้ถึง 4 มุมด้วยกันคือ 1.0, 1.1, 1.2 และ 1.3 ° ลักษณะของสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิงที่ออกแบบได้แล้วประกอบเข้ากับแม่พิมพ์แสดงใน Figure 4 ซึ่งหากนำค่าอัตราการผลิตที่คำนวณได้เมื่อเปลี่ยนขนาดความสูงฟันเกลียวสุดท้ายที่ระดับต่างๆ ในช่วงมุมสกรู 20 22 และ 24 ° โดยที่ความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตได้มีค่าตามต้องการ (ประมาณ 1,000 กก./ลบ.เมตร) มาพลอตกราฟดัง Figure 5 ซึ่งพบว่าในงานวิจัยนี้ซึ่งต้องการอัตราการผลิตแท่งเชื้อเพลิงเพลิงที่ 1 กก./นาที จะต้องใช้มุมสกรูที่ 22° และได้ความสูงของฟันเกลียวสุดท้ายที่ 5 มม.

วัตถุดิบในการทดลองและเงื่อนไขในการออกแบบสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิงในการวิจัย

ในการออกแบบสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิงและการทดลองผลิตแท่งเชื้อเพลิงนั้นจำเป็นต้องทราบถึงชนิดและประเภทของวัตถุดิบซึ่งจะทำให้ทราบถึงสมบัติเบื้องต้นของวัตถุดิบที่นำมาใช้ เช่น การกระจายขนาดของวัตถุดิบ (size distribution) ความหนาแน่นปรากฏ (bulk density) รวมถึงชนิดของตัวประสานเพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบการออกแบบสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิง สำหรับงานวิจัยนี้ได้

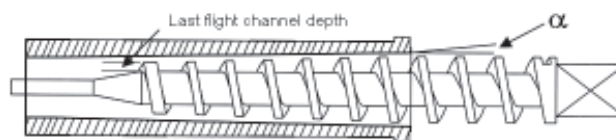


Figure 4. Schematic of screw and die in this work.

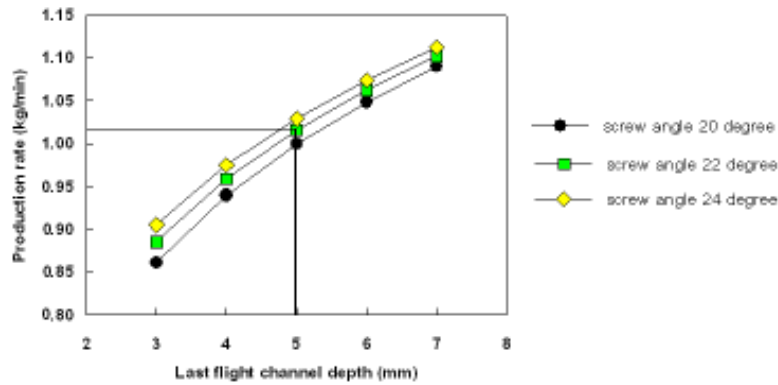


Figure 5. Dependence of the last flight Channel depth on production rate at various screw angles (ϕ_s).

เลือกใช้ผงถ่านกะลามะพร้าวผสมกับผงถ่านไยกะลามะพร้าวเป็นวัตถุดิบและใช้โมลาสเป็นตัวประสานในการผลิตแท่งเชื้อเพลิง ในการทำถ่านกะลามะพร้าวนั้นทำโดยนำกะลามะพร้าวแห้งซึ่งจะมีไยกะลามะพร้าวติดอยู่นั้นไปทำการเผาให้เป็นถ่านกะลามะพร้าวและถ่านไยกะลามะพร้าว หลังจากนั้นนำถ่านที่ได้ไปทำการคัดแยกสิ่งที่ไม่ปะปนอยู่กับถ่านแล้วนำถ่านกะลาไปทำการบดด้วยเครื่องบด (hammer mill) ซึ่งหลังจากทำการบดแล้วจะนำผงถ่านกะลาและผงถ่านไยกะลาไปทำการกระจายขนาดด้วยเครื่องคัดแยกขนาด โดยขนาดของผงถ่านกะลาที่ผ่านการบดนั้นจะมีการ

กระจายขนาดเป็นสัดส่วนโดยมวลแสดงใน Figure 6 แต่สำหรับผงถ่านไยกะลาที่ผ่านการคัดแยกไม่จำเป็นต้องทำการบดเพราะมีขนาดเล็กอยู่แล้ว โดยมีการกระจายขนาดเป็นสัดส่วนโดยมวลแสดงใน Figure 7 ซึ่งขนาดของผงถ่านกะลาและผงถ่านไยกะลาที่มีสัดส่วนมากที่สุดคือขนาด 0.6 มม. ซึ่งคิดเป็น 39.63% สำหรับผงถ่านกะลา และ 47.34% สำหรับผงถ่านไยกะลา สำหรับตัวประสานโมลาสจะเป็นของเหลวมีลักษณะเป็นน้ำเชื่อมสีน้ำตาลเข้มของเหลวนี้จะถูกแยกออกจากเกล็ดน้ำตาลโดยวิธีการปั่น (centrifuge) ส่วนประกอบของกากน้ำตาลแตกต่างกันไป

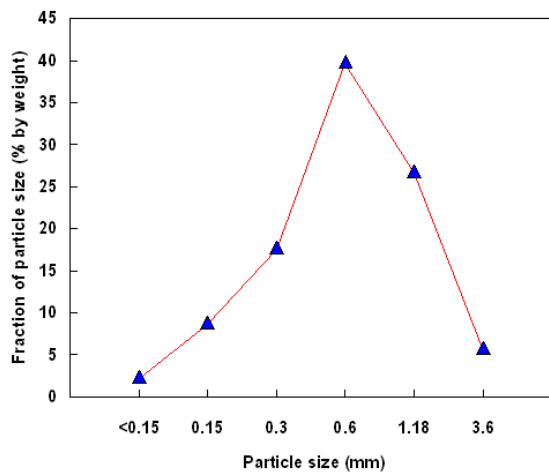


Figure 6. Size distributions of crushed coconut shell char.

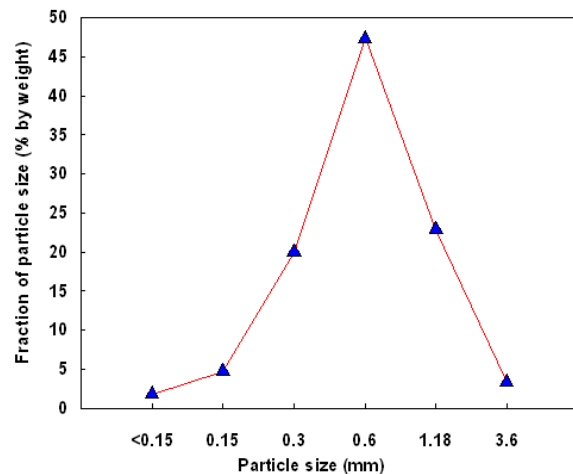


Figure 7. Size distributions of coconut fiber char.

ตามโรงงานที่ผลิต สำหรับส่วนประกอบโดยประมาณคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ตามน้ำหนักของกากน้ำตาลมีดังนี้คือ น้ำ 17-25% น้ำตาลซูโครส 30-40% น้ำตาลกลูโคส 4-9% น้ำตาลฟรักโทส 5-12% นอกจากนี้ยังมีสารประกอบคาร์โบไฮเดรตอื่นๆ สารประกอบไนโตรเจน กรดต่างๆ วิตามิน ไขมัน และแร่ธาตุอื่นๆ อีกเป็นจำนวนมาก (Suriyaphan, 2002) โดยโมลาสที่นำมาใช้ในงานวิจัยเป็นโมลาสที่มาจากอุตสาหกรรมน้ำตาลซึ่งจะมีลักษณะเหนียวและข้น

การทดลองผลิตแท่งเชื้อเพลิง

1. เงื่อนไขการทดลองผลิตแท่งเชื้อเพลิง

เงื่อนไขการทดลองการผลิตเชื้อเพลิงแข็งอัดแท่งจะกำหนดสัดส่วนการผสมผงถ่านกะลาต่อผงถ่านโยกะลาที่ 40:60 และความเร็วยรอบของสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิงที่ 145 รอบ/นาที แล้วทำการปรับเปลี่ยนสัดส่วนการผสมโมลาสต่อน้ำหนักของวัตถุดิบ เพื่อศึกษาถึงผลกระทบต่อผลผลิต และสมบัติทางกายภาพของแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ นอกจากนี้ยังทำการปรับเปลี่ยนมุมการอัดรีดของแม่พิมพ์จากมุม 1.0-1.3 ° โดยเงื่อนไขการทดลองมีดังแสดงใน Table 1

2. วิธีการทดลอง

เครื่องอัดรีดเชื้อเพลิงโดยเทคนิคเอ็กซ์ทรูชันมี

ขนาดมอเตอร์ต้นกำลัง 5 แรงม้าที่ใช้ในการทดลองได้แสดงไว้ใน Figure 8 การทดลองเริ่มต้นให้นำผงถ่านกะลาที่ผ่านการบดมาผสมกับผงถ่านโยกะลาในสัดส่วน 40:60 โดยน้ำหนักมาผสมกับโมลาสตามสัดส่วนของเงื่อนไขที่ใช้ทดลองดัง Table 1 เมื่อผสมวัตถุดิบและตัวประสานแล้วทำการคลุกเคล้าส่วนผสมให้เข้ากันโดยใช้เครื่องปั่นกวนเชิงกล (ไม่ได้จัดแสดงรูปไว้ ณ ที่นี้) เป็นเวลา 15 นาที หลังจากผสมวัตถุดิบเสร็จแล้วนำวัตถุดิบมาอัดเป็นแท่งเชื้อเพลิงโดยเดินเครื่องผลิตแท่งเชื้อเพลิง แล้วทำการป้อนวัตถุดิบลงในเครื่องผลิตแท่งเชื้อเพลิงซึ่งในระหว่างทำการผลิตแท่งเชื้อเพลิงจะต้องทำการวัดปริมาณกระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์ใช้ในการอัดแท่งเชื้อเพลิงและวัดอัตราการผลิตแท่งเชื้อเพลิงของแต่ละเงื่อนไขเพื่อนำไปหาค่าพลังงานที่ใช้ในการอัดจำเพาะ เมื่อผลิตแท่งเชื้อเพลิงได้จะนำแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตได้บางส่วนมาทำการบดเพื่อที่จะนำไปหาค่าความชื้นเริ่มต้นของเชื้อเพลิงแต่ละเงื่อนไขที่ทำการทดลอง เมื่อทราบค่าความชื้นเริ่มต้นแล้วนำแท่งเชื้อเพลิงที่อัดได้ที่เหลือจากการหาความชื้นเริ่มต้นมาทำการอบให้เหลือความชื้นประมาณ 10% d.b. (มาตรฐานแห้ง) ซึ่งใกล้เคียงกับค่าความชื้นสมดุลของแท่งเชื้อเพลิง จากนั้นนำแท่งเชื้อเพลิงหลังการอบแล้วไปทำการตัดเป็นชิ้นงานเพื่อทดสอบสมบัติค่าการต้านทานแรงกด ค่าความหนาแน่น และค่าความร้อนตามวิธีการทดลองในหัวข้อ 2.1

Table 1. Testing conditions.

Testing number	Mass fraction of crushed coconut shell char: coconut fiber char (raw material)	Mass ratio of molasses : raw material			Die angle (Degree)			
		10:100	15:100	20:100	1.0	1.1	1.2	1.3
1	40:60	✓			✓			
2	40:60	✓				✓		
3	40:60	✓					✓	
4	40:60	✓						✓
5	40:60		✓		✓			
6	40:60		✓			✓		
7	40:60		✓				✓	
8	40:60		✓					✓
9	40:60			✓	✓			
10	40:60			✓		✓		
11	40:60			✓			✓	
12	40:60			✓				✓

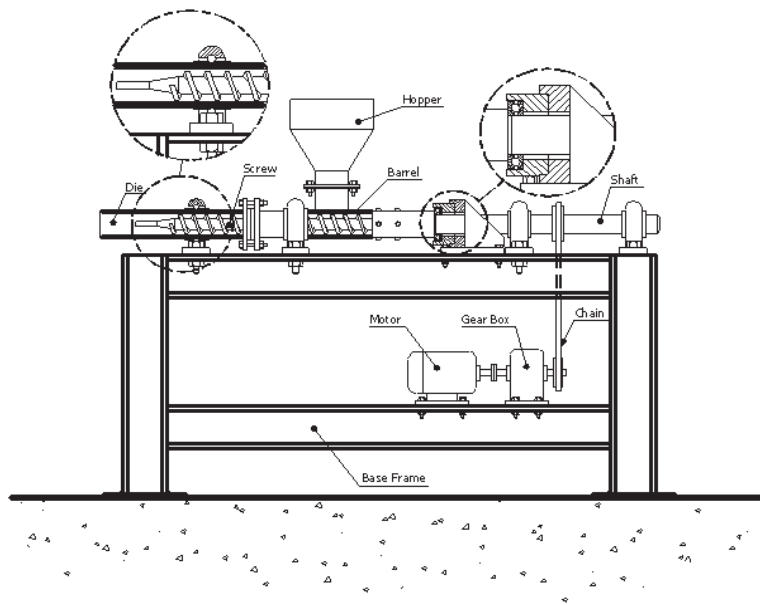


Figure 8. Schematic diagram of extruder used in this work.

3. การทดสอบสมบัติทางกายภาพของแท่งเชื้อเพลิง

3.1 การหาค่าการต้านทานแรงกด

การทดสอบการต้านทานแรงกดทำโดยการใช้เครื่องทดสอบ UTM (Universal Testing Machine) ซึ่งจะนำแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตได้และผ่านกระบวนการอบแล้วแสดงใน Figure 9 มาทำการตัดให้มีขนาดประมาณ 3 ซม. นำมาวางลงบนผิวสัมผัสที่เรียบของแผ่นกดบนเครื่อง UTM โดยให้วางตามแนวอนของแท่งเชื้อเพลิงแสดงใน Figure 10 เพราะเป็นทิศทางที่มีความแข็งแรงน้อยที่สุด จากนั้นทำการปรับเพิ่มน้ำหนักกดที่จะกดลงบนแท่งเชื้อเพลิงในอัตราคงที่ จนกระทั่งแท่งเชื้อเพลิงเกิดการแตกหักแล้วทำการบันทึกผลของน้ำหนักกดที่สูงที่สุดที่ทำให้แท่งเชื้อเพลิงเกิดการแตกหักและวัดขนาดรอยกดบนแท่งเชื้อเพลิงที่เกิดจากการทดลองเพื่อจะนำไปคำนวณหาค่าความต้านทานแรงกด

3.2 การหาค่าการต้านทานแรงกระแทก

การทดสอบการต้านทานแรงกระแทก ทำโดยการนำแท่งเชื้อเพลิงที่ผ่านกระบวนการอบแล้วมาทำการตัดให้มีขนาด 1 ลบ.ซม. จำนวน 3-6 ชิ้นในการทดลองแต่ละครั้ง จากนั้นนำแท่งเชื้อเพลิงที่ตัดไว้ปล่อยลงจากที่สูง

2 เมตรลงบนพื้นคอนกรีตเรียบและได้ระดับ โดยจะปล่อยแท่งเชื้อเพลิงไปจนกระทั่งแท่งเชื้อเพลิงแตกหักแต่จะมีจำนวนการปล่อยมากที่สุดไม่เกิน 50 ครั้งในแต่ละชิ้น ซึ่งต้องทำการบันทึกจำนวนครั้งที่ทำการปล่อยแท่งเชื้อเพลิงและจำนวนชิ้นของแท่งเชื้อเพลิงที่แตกหักเมื่อตกกระทบพื้น โดยการแตกหักของแท่งเชื้อเพลิงที่นำมาทดสอบนั้นจะสังเกตได้จากขนาดของแท่งเชื้อเพลิงก่อนทำการทดสอบ ซึ่งถ้าหากแท่งเชื้อเพลิงที่ทำการทดสอบอยู่นั้นแตกเกินกว่า 10% ของขนาดเริ่มต้นจะถือว่าเกิดการแตกหักของแท่งเชื้อเพลิง จากนั้นหาค่าดัชนีการต้านทานแรงกระแทก (impact resistance index: IRI) ได้ดังสมการที่ (18) ซึ่งค่าการต้านทานแรงกระแทกต่ำสุดที่ยอมรับได้มีค่าเท่ากับ 50 (Richards, 1990)

$$IRI = 100 \times \frac{\text{Average number of drops}}{\text{Average number of pieces}} \quad (18)$$

3.3 การหาค่าความร้อนของเชื้อเพลิงแข็งอัดแท่ง

การหาค่าความร้อนของเชื้อเพลิงแข็งโดยทั่วไปหาได้ 2 อย่างคือ ค่าความร้อนสูงและค่าความร้อนต่ำ ซึ่งในการวิจัยนี้ได้เลือกหาค่าความร้อนสูงโดยใช้อุปกรณ์



Figure 9. Schematic of Extruded fuel from the experiments.



Figure 10. Schematic of compressive strength testing.

ในการทดสอบคือ บอมบ์แคลอรีมิเตอร์ ซึ่งมีลักษณะของการทำงานเหมือนกับบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ที่ใช้งานอยู่ทั่วไป โดยการวัดค่าอุณหภูมิสามารถอ่านละเอียดได้ถึง 0.05°C

3.4 การหาค่าความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิง

ความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิงที่ผ่านกระบวนการอัดสามารถหาโดยนำมาทำการตัดให้มีขนาดประมาณ 2×3 ซม. (เพื่อให้สามารถใส่ในหลอดแก้วสำหรับวัดปริมาตรของแท่งเชื้อเพลิงดังกล่าวได้) หลังจากนั้นนำแท่งเชื้อเพลิงที่ตัดแล้วมาชั่งน้ำหนักเพื่อให้ทราบมวลเริ่มต้น การหาค่าความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิงจะใช้สารละลายโทลูอินเป็นสารตัวกลางในการทดสอบโดยนำเอาโทลูอินใส่ในหลอดวัดปริมาตร หลังจากนั้นนำแท่งเชื้อเพลิงที่ผ่านการตัดข้างต้นมาใส่ลงในหลอดแก้วแล้วอ่านค่าปริมาตรของโทลูอินที่เพิ่มขึ้นเพื่อนำไปคำนวณความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิง

ผลการทดลองและวิจารณ์

จากการทดลองผลิตแท่งเชื้อเพลิง โดยใช้วัตถุดิบผงถ่านกะลาผสมกับผงถ่านไยกะลาที่สัดส่วน 40:60 แล้วทำการเปลี่ยนสัดส่วนการผสมโมลาสต่อน้ำหนักของวัตถุดิบจาก 10:100, 15:100 และ 20:100 ความเร็วรอบของสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิงคงที่ที่ 145 รอบ/นาที ซึ่งจากการทดลองพบว่าได้อัตราการผลิตแท่งเชื้อเพลิงจริงเท่ากับ 0.8 กก./นาที ซึ่งมีค่าต่ำกว่าที่ออกแบบไว้ที่ 1 กก./นาที ซึ่งสาเหตุน่าจะมาจาก 1) การกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ความ

เสียดทานจลน์ระหว่างเบตอโนภาคกับผิวสกรู (f_s) และสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์ระหว่างเบตอโนภาคกับผิว barrel (f_b) ที่ใช้ในการคำนวณอาจยังมีความคลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริง และ 2) ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความดัน (P) และความหนาแน่น (D) ในสมการ (17) อาจยังไม่ถูกต้องนักสำหรับกรณีของผงถ่านกะลามะพร้าว และผงถ่านไยกะลามะพร้าว โดยผลการทดลองแสดงใน Table 2

1. อัตราการผลิตแท่งเชื้อเพลิงและพลังงานที่ใช้ในการผลิตจำเพาะ

อัตราการผลิตที่ได้และพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตแท่งเชื้อเพลิงแสดงใน Figure 11 โดยพบว่า การเพิ่มขึ้นของสัดส่วนโมลาสต่อน้ำหนักของวัตถุดิบทำให้อัตราการผลิตแท่งเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มสัดส่วนการผสมโมลาสต่อน้ำหนักวัตถุดิบ โดยทุกขนาดมุมภายในแม่พิมพ์มีแนวโน้มผลการทดลองเหมือนเดิม ที่สัดส่วนโมลาสที่ 20:100 จะได้อัตราการผลิตสูงสุดที่ 0.9 กก./นาที และต่ำสุดที่สัดส่วนโมลาส 10:100 ที่ 0.75 กก./นาที เพราะโมลาสที่ผสมลงในวัตถุดิบจะมีสมบัติเป็นสารหล่อลื่นทำให้แท่งเชื้อเพลิงสามารถไหลผ่านแม่พิมพ์ออกมาได้ง่าย โดยจะคล้ายกับกรณีของการอัดรีดร้อนซึ่งจะมีลักษณะที่ละลายจากการให้ความร้อนมาช่วยในการหล่อลื่นแท่งเชื้อเพลิงให้ไหลออกจากแม่พิมพ์ได้ง่ายขึ้น และลดการใช้พลังงานในการผลิตลดลง (Reineke, 1964 and Bhattacharaya *et al.*, 2002) โดยจากการทดลองพบว่าพลังงานที่ใช้ในการ

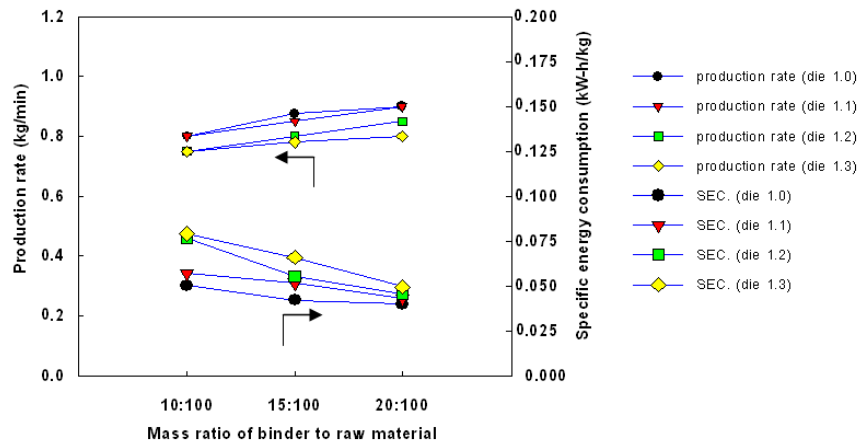


Figure 11. Production output and energy consumption at different binder mass mixing with raw material.

อัตราเร่งเชื้อเพลิงสูงสุดที่สัดส่วนโมลาส 10:100 และต่ำสุดที่สัดส่วนโมลาส 20:100 ซึ่งจะมีค่าพลังงานที่ใช้ในการอัดในทุกมุมภายในของแม่พิมพ์อยู่ระหว่าง 0.040-0.079 กิโลวัตต์-ชม./กก.

นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการผลิตแท่งเชื้อเพลิงจะลดลงเมื่อมุมภายในของแม่พิมพ์มีค่าเพิ่มมากขึ้นเพราะในกรณีมุมอัดรีดแม่พิมพ์มีค่ามากกว่าการอัดตัวของแท่งเชื้อเพลิงจะเป็นการอัดตัวอย่างทันทีทันใดซึ่งเป็นการเพิ่มความเสียหายในแม่พิมพ์ให้มีความมากขึ้นและส่งผลให้พลังงานที่ใช้ในการอัดแท่งเชื้อเพลิงเพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน

2. ความหนาแน่นและการต้านทานแรงกดของแท่งเชื้อเพลิง

ผลของปริมาณโมลาสที่ใช้ต่อค่าความแข็งแรงและความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิงแสดงใน Figure 12 โดยพบว่าการต้านทานแรงกดของแท่งเชื้อเพลิงจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามการเพิ่มของสัดส่วนการผสมโมลาส เพราะเมื่อเพิ่มสัดส่วนการผสมโมลาสต่อน้ำหนักของวัตถุดิบให้มากขึ้นจะทำให้โมลาสยึดเกาะกับอนุภาคได้อย่างทั่วถึงขึ้นส่งผลให้การยึดตัวกันระหว่างอนุภาคเพิ่มมากขึ้น และส่งผลต่อการเพิ่มความแข็งแรงของแท่งเชื้อเพลิงในที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองที่พบว่าค่าการต้านทานแรงกดของแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จะเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนการผสมตัวประสานที่เพิ่มขึ้น (Paul et al., 2002 and Rubio et al., 1999) โดยจาก

การทดลองจะมีค่าการต้านทานแรงกดของแท่งเชื้อเพลิงอยู่ระหว่าง 2.49-2.87 เมกะปาสคาล ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าที่ยอมรับได้ในอุตสาหกรรมที่มีค่าเพียง 0.375 เมกะปาสคาล (Richards, 1990) ส่วนค่าความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิงจะมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนการผสมโมลาส เนื่องจากโมลาสเป็นของเหลวซึ่งมีน้ำเป็นส่วนประกอบเมื่อนำแท่งเชื้อเพลิงไปทำการอบแห้งจะทำให้ น้ำที่มีอยู่ในโมลาสระเหยทำให้เกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคยังมีน้ำมากเมื่อระเหยน้ำออกไปก็เกิดช่องว่างมากขึ้นทำให้ความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิงลดลง โดยความหนาแน่นมีค่าอยู่ระหว่าง 1059-1342 กก./ลบ.เมตร

นอกจากนี้ที่ค่ามวลของโมลาสเท่ากันพบว่ามุมของแม่พิมพ์ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิงลดลง เพราะมุมของแม่พิมพ์ที่มากขึ้นนั้นจะทำให้ระยะทางในช่วงของการอัดรีดแท่งเชื้อเพลิงภายในแม่พิมพ์มีน้อยลง และผลที่ตามมาอีกประการคือการลดลงของค่าการต้านทานแรงกดเมื่อมุมอัดรีดของแม่พิมพ์สูงขึ้น

3. ค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิง

ผลของมวลโมลาสที่ใช้ต่อค่าความร้อนของเชื้อเพลิงแสดงใน Figure 13 พบว่าค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงจะมีค่าลดลงตามการเพิ่มของสัดส่วนการผสมโมลาสเพราะการผสมโมลาสที่มากขึ้นเท่ากับเป็นการลดสัดส่วนของผงถ่านกลาที่จะมีในแท่งเชื้อเพลิง โดยจะมีค่าความร้อนของ

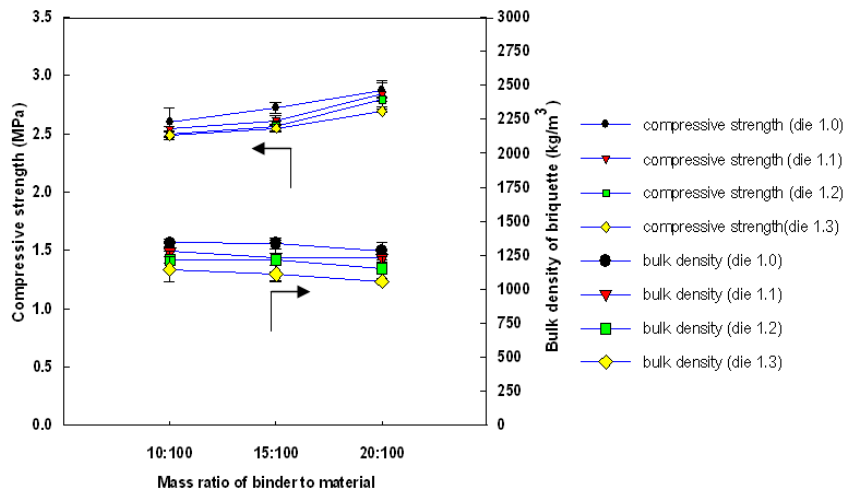


Figure 12. The variation of compressive strength and density of solid fuel with binder mass mixing with raw material.

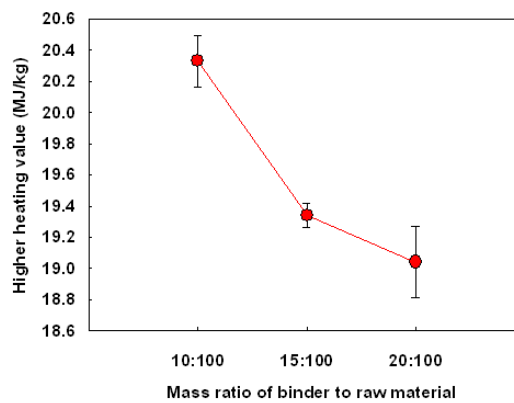


Figure 13. The effect of mass of binder mixing with raw material on heating value.

แท่งเชื้อเพลิงหลังจากอบจนมีความชื้นเหลือ 10% d.b. มีค่าระหว่าง 19.04-20.33 เมกะจูล/กก.

(Richards, 1990) โดยผลการต้านทานแรงกระแทกของทุกเงื่อนไขการทดลองแสดงดัง Table 2

4. การต้านทานแรงกระแทกของแท่งเชื้อเพลิง

จากการทดลองการนำแท่งเชื้อเพลิงที่ผ่านการอบของแต่ละเงื่อนไขการทดลองไปทดสอบการต้านทานแรงกระแทก โดยปล่อยให้กระทบกับพื้นคอนกรีตจำนวน 50 ครั้ง พบว่าไม่เกิดการแตกหักของตัวอย่างซึ่งเมื่อนำมาทำการคำนวณตามสมการที่ (11) จะพบว่าค่าการต้านทานแรงกระแทกมีค่าสูงจนเป็นอนันต์ (∞) ซึ่งสูงกว่าค่าที่สามารถยอมรับได้ในอุตสาหกรรมที่มีค่าเท่ากับ 50

สรุปผลการทดลอง

จากสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิงที่ออกแบบไว้เมื่อนำไปใช้ทดลองผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากผงถ่านกะลามะพร้าวและผงถ่านใยกะลามะพร้าวโดยใช้โมลาสเป็นตัวประสานพบว่าอัตราการผลิตแท่งเชื้อเพลิงที่ออกแบบไว้จะมีความคลาดเคลื่อนจากผลการทดลองที่เงื่อนไขการออกแบบสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิงประมาณ 20% จากการทดลองภายใต้เงื่อนไข

Table 2. Experimental Results.

Testing number	Mass ratio of binder to material	Die angle (Degree)	Production rate (kg/min)	Bulk density (kg/m ³)	Compressive strength (MPa)	Heating Value (MJ/kg)	Specific energy consumption (kW-h/kg)	Impact resistance index
1	10:100	1.0	0.80	1342	2.60	20.33	0.050	∞
2	15:100	1.0	0.88	1337	2.73	19.34	0.042	∞
3	20:100	1.0	0.90	1283	2.87	19.04	0.040	∞
4	10:100	1.1	0.80	1278	2.54	20.33	0.057	∞
5	15:100	1.1	0.85	1236	2.61	19.34	0.052	∞
6	20:100	1.1	0.90	1232	2.85	19.04	0.043	∞
7	10:100	1.2	0.75	1216	2.50	20.33	0.076	∞
8	15:100	1.2	0.80	1214	2.57	19.34	0.055	∞
9	20:100	1.2	0.85	1149	2.79	19.04	0.046	∞
10	10:100	1.3	0.75	1148	2.49	20.33	0.079	∞
11	15:100	1.3	0.78	1114	2.55	19.34	0.066	∞
12	20:100	1.3	0.80	1059	2.70	19.04	0.050	∞

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

การทดลองที่สัดส่วนการผสมผงถ่านกะลาต่อผงถ่านใยกะลา 40:60 สัดส่วนการผสมโมลาสต่อน้ำหนักวัตถุดิบคือ 10:100 15:100 และ 20:100 และปรับเปลี่ยนขนาดมุมอัดรีดของแม่พิมพ์จาก 1.0 เป็น 1.1 1.2 และ 1.3 ° ตามลำดับ โดยกำหนดให้ความเร็วรอบของสกรูอยู่ที่ 145 รอบ/นาที พบว่าอัตราการผลิตแท่งเชื้อเพลิงและการต้านทานแรงกดจะแปรผันตรงกับสัดส่วนการผสมโมลาสต่อน้ำหนักวัตถุดิบแต่จะแปรผกผันกับขนาดของมุมอัดรีดของแม่พิมพ์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งอัตราการผลิตมีค่าระหว่าง 0.75-0.9 กก./นาที และการต้านทานแรงกดของแท่งเชื้อเพลิงมีค่าระหว่าง 2.49-2.87 เมกะปาสคาล ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าต่ำสุดที่สามารถยอมรับได้ทางอุตสาหกรรม (0.375 เมกะปาสคาล) ค่อนข้างมาก โดยมีค่าสูงสุดที่สัดส่วนการผสมโมลาสต่อน้ำหนักวัตถุดิบที่ 20:100 และขนาดมุมอัดรีดแท่งเชื้อเพลิงที่ 1.0° สำหรับพลังงานที่ใช้ในการผลิตแท่งเชื้อเพลิง ค่าความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิงจะแปรผกผันกับสัดส่วนการผสมโมลาสและขนาดของมุมอัดรีดแท่งเชื้อเพลิง โดยค่าพลังงานที่ใช้ในการผลิตมีค่าระหว่าง 0.040-0.079 กิโลวัตต์-ชม./กก. และค่าความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิงมีค่าระหว่าง 1059-1342 กก./ลบ.เมตร โดยค่าความหนาแน่นมีค่าต่ำสุดที่สัดส่วนการผสมโมลาสต่อน้ำหนักวัตถุดิบที่ 20:100 และขนาดมุมอัดรีดแท่งเชื้อเพลิงที่ 1.3° ในขณะที่ค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงจะแปรผกผันกับสัดส่วนการผสมโมลาสที่เพิ่มขึ้น โดยจะมีค่าระหว่าง 19.04-20.33 เมกะจูล/กก.

นอกจากนี้ค่าการต้านทานแรงกระแทกของแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ทุกสัดส่วนการผสมโมลาสและทุกขนาดมุมอัดรีดแท่งเชื้อเพลิงมีค่าสูงมากจนเป็นอนันต์ ซึ่งสูงกว่าค่าที่ยอมรับได้มากเช่นเดียวกัน (ค่าที่ยอมรับได้คือ 50 (Richards, 1990)) ทั้งนี้จากการศึกษาทดลองพบว่าในการออกแบบสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิงจำเป็นต้องทราบความสัมพันธ์ของความดันและความหนาแน่นที่ถูกต้องตามชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ซึ่งจะทำให้ค่าที่คำนวณได้มีค่าเคลื่อนเล็กน้อย นอกจากนี้ขีดจำกัดความสามารถของเครื่องผลิตแท่งเชื้อเพลิงที่สร้างขึ้นนั้นจะถูกกำหนดโดยความหนาแน่นเริ่มต้นของวัตถุดิบ (ชนิดของวัตถุดิบ) ทำให้จำเป็นต้องมีการพัฒนาเครื่องอัดรีดให้สามารถใช้งานได้กับวัตถุดิบหลายๆ ชนิดต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนในการวิจัย และขอบคุณกองเกษตรวิศวกรรม กรมวิชาการเกษตร ที่อนุเคราะห์เครื่องบดย่อยวัสดุเพื่อใช้ในการบดถ่านกะลาให้เป็นผงถ่านกะลาในการวิจัยและนักศึกษาภาควิชาชีพวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ที่ช่วยเหลือในการเก็บผลการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

- Bhattacharya, S.C., Augustus Leon, M. and Mizanur Rahman, Md. 2002. A study on improved biomass briquetting. *Energ 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.
- Debduobi, 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 energ*, 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 17th Conference on Mechanical Engineering Network of Thailand, King mongkut's Institute of Technology North Bangkok, Prachinburi.
- Madhiyanon, T., Sathitruangsak, P. and Soponronnarit, S. 2004. A study of influences of binder treated from wheat straw on physical properties of fuel briquette, the 18th Conference on Mechanical Engineering Network of Thailand, Khon Khean University, Khon Khean.
- 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*, 37:1833-18411
- Sathitruangsak, P., Madhiyanon, T. and Soponronnarit, S. 2004. Briquette fuel producing from coconut shell by extrusion technique using molass as binder, the 18th 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.