

## การผลิตเชื้อเพลิงแข็งอัดแท่งจากกะลามะพร้าวด้วยเทคนิคเอ็กซ์ทรูชัน โดยใช้โมลาสเป็นตัวประสาน Briquette fuel producing from coconut shell by extrusion technique using molass as binder

ประสาน สติดยี่เรืองศักดิ์<sup>1</sup>, ฐานิตย์ เมธิยานนท์<sup>2</sup> และ สมชาติ โสภณรณฤทธิ์<sup>3</sup>  
<sup>1</sup>นักศึกษ ป.โท <sup>3</sup>อาจารย์ คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ถ.ประชาธิปไตย เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140  
<sup>2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร  
51 ถ.เชื่อมสัมพันธ์ แขวงกระทุ่มราย เขตหนองจอก กรุงเทพฯ 10530  
โทร 0-2988-3666 ต่อ 244 โทรสาร 0-2988-3666 ต่อ 241 E-mail: xmandmitnb@yahoo.com<sup>1</sup>, Thanid@mut.ac.th<sup>2</sup>

Prasan Sathitruangsak<sup>1</sup>, Somchart Soponronnarit<sup>3</sup>  
Faculty of Energy and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi  
91 Prachauthit Road, Bangmod, Thung Kharu District, Bangkok 10140  
Thanid Madhiyanon<sup>2</sup>  
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Mahanakorn University  
51 Cheum-Sampan Road, Nong Chok, Bangkok 10530

### บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและออกแบบสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิงสำหรับใช้ในกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันแบบอัดรีดเย็น รวมถึงศึกษาสมบัติทางกายภาพของแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ ซึ่งวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง คือผงถ่านกะลามะพร้าวผสมกับผงถ่านใยกะลามะพร้าว สัดส่วน 40:60 และใช้โมลาสเป็นตัวประสาน โดยจะศึกษาถึงอิทธิพลของสัดส่วนการผสมโมลาสต่อน้ำหนักของวัตถุดิบที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของแท่งเชื้อเพลิงที่อัดได้ ซึ่งจะปรับเปลี่ยนสัดส่วนการผสมโมลาสต่อน้ำหนักของวัตถุดิบดังนี้ คือ 10:100, 15:100 และ 20:100 ซึ่งสมบัติทางกายภาพของแท่งเชื้อเพลิงที่ทดสอบได้แก่ ค่าความหนาแน่น ค่าการต้านทานแรงกด และค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิง ผลที่ได้พบว่าพบว่าการผลิตและการต้านทานแรงกดของแท่งเชื้อเพลิงจะแปรผันตรงกับปริมาณสัดส่วนการผสมโมลาสต่อน้ำหนักของวัตถุดิบ แต่ค่าความหนาแน่นและการใช้พลังงานในการอัดแท่งเชื้อเพลิงจำเพาะจะแปรผกผันกับปริมาณสัดส่วนการผสมโมลาส สำหรับการอัดแท่งเชื้อเพลิงของสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิงมีความคลาดเคลื่อนจากการทดลองประมาณ 20% โดยมีอัตราการผลิตแท่งเชื้อเพลิงที่มีความเร็วรอบของสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิง 145 รอบต่อนาทีที่มีค่าระหว่าง 0.8–0.9 kg/min และแท่งเชื้อเพลิงที่ได้มีค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง 1283–1342 kg/m<sup>3</sup> ซึ่งมีค่าการต้านทานแรงกดระหว่าง 2.60–2.87 MPa สำหรับค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงมีค่า 19.0–20.3 MJ/kg

ในขณะที่พลังงานจำเพาะในการผลิตแท่งเชื้อเพลิงมีค่า 0.14–0.18 MJ/kg

### Abstract

The objectives of this research are to study and design a screw for producing solid fuel by extrusion technique, as well as physical properties of extruded fuel are also discussed. Crushed coconut shell char mixed to coconut fiber char at the mass ratio of 40:60 was used as base material and molass was chosen as binder in this study. To investigate the influence of molass on physical properties of fuel such as density, compressive strength and high heating value, mass ratio of molass to base material was varied from one experimental to the other as follows: 10:100, 15:100 and 20:100. It was found that output of product and compressive strength were directly proportional to amount of molass whereas density, high heating value and specific energy consumption (SEC) increased as amount of molass decreased. The output of product was about 20% deviated from a design value. At screw speed of 145 rpm, the results are the output 0.8–0.9 kg/min, density 1283–1342 kg/m<sup>3</sup>, compressive strength 2.60–

2.87 MPa, high heating value 19.0-20.3 MJ/kg and SEC 0.14-0.18 MJ/kg

## 1. บทนำ

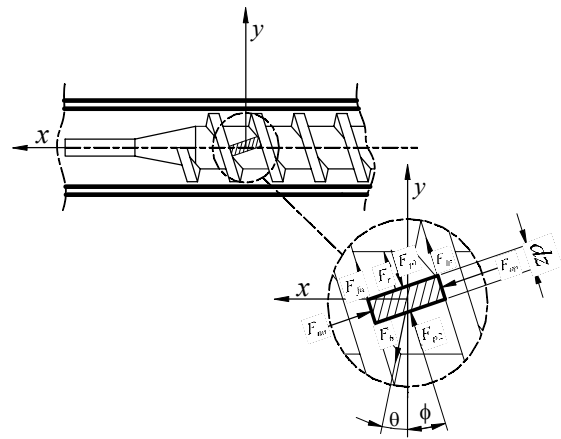
ในปัจจุบันสภาวะการใช้พลังงานของประเทศไทย มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นทุกขณะ โดยพลังงานส่วนใหญ่ที่ใช้นั้นเป็นพลังงานความร้อนซึ่งได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลที่ต้องมีการนำเข้ามาจากต่างประเทศทำให้ต้องสูญเสียเงินตราออกนอกประเทศ เพื่อที่จะซื้อเชื้อเพลิงเหล่านี้เข้ามาแต่จากการที่ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมจึงทำให้มีวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรจำนวนมากที่สามารถนำมาแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงซึ่งมีศักยภาพใช้งานได้เป็นอย่างดี โดยจากการสำรวจข้อมูลที่ผ่านมาพบว่าศักยภาพของพลังงานจากวัสดุเหลือใช้ทางเกษตรมีมากถึง  $156,402 \times 10^6$  MJ [1] โดยวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรที่เหมาะสมกับการนำมาแปรรูปเป็นแท่งเชื้อเพลิงคือ ผลมะพร้าว ซึ่งมีการเก็บเกี่ยวผลผลิตรวมปีละเกือบ 1.5 ล้านตัน โดส่วนที่เป็นกะลาและใยกะลาจะให้ค่าความร้อนสูงถึง 17.93 MJ/kg และ 16.23 MJ/kg [1] ตามลำดับ ในการแปรรูปวัสดุเหลือใช้จากผลมะพร้าวเป็นแท่งเชื้อเพลิงนั้นจะสามารถเลือกใช้ได้หลายกระบวนการ เช่น กระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน หรือ กระบวนการอัดไฮดรอลิกส์ เป็นต้น แต่สำหรับกระบวนการอัดด้วยไฮดรอลิกส์นั้นจะมีอุปกรณ์ที่ซับซ้อน และมีการทำงานที่ไม่ต่อเนื่องเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการอัดด้วยกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันซึ่งโดยปกติกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันจะมีด้วยกัน 2 แบบคือกระบวนการอัดรีดร้อนและกระบวนการอัดรีดเย็น ซึ่งกระบวนการอัดรีดร้อนนั้นมักจะใช้กับวัตถุดิบที่มีลักษณะเป็นส่วนประกอบหลัก การให้ความร้อนก็เพื่อที่จะทำให้ลักษณะที่มียูในวัตถุดิบละลายออกมายึดเกาะวัตถุดิบให้คงรูปเป็นแท่งเชื้อเพลิง โดยจากการทดลองที่ผ่านมาซึ่งทำการทดลองผลิตเชื้อเพลิงแท่งแข็งจากชี้เสียดด้วยการเอ็กซ์ทรูชันแบบอัดรีดร้อน โดยใช้ขดลวดความร้อนเป็นตัวให้ความร้อนกับชี้เสียดซึ่งเป็นวัตถุดิบที่นำมาอัดเป็นแท่งเชื้อเพลิง [2] พบว่าอัตราการผลิตแท่งเชื้อเพลิงต่ำและใช้พลังงานจำเพาะสูงรวมถึงมีขั้นตอนที่ยุ่งยาก แต่ในกรณีที่เป็นกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันแบบอัดรีดเย็นนั้น จะต้องใช้ตัวประสานเพื่อทำหน้าที่ยึดเกาะวัตถุดิบให้คงรูปเป็นแท่งเชื้อเพลิง ซึ่งตัวประสานนั้นมีด้วยกันหลายแบบเช่น โมลาส หรือกากน้ำตาล ซึ่งมีสมบัติที่สามารถยึดเกาะวัตถุดิบให้เป็นแท่งเชื้อเพลิงได้ ลักษณะเด่นของการนำโมลาสมาใช้เป็นตัวประสานคือมีค่าน้อยเมื่อนำแท่งเชื้อเพลิงที่ได้ไปเผาไหม้ [3] นอกจากนี้ยังมีตัวประสานชนิดอื่น ๆ เช่น แป้งมัน รวมถึงเคมีภัณฑ์ที่เหลือจากกระบวนการทางปิโตรเลียมจำพวก แอสฟัลต์ เป็นต้น โดยปกติแท่งเชื้อเพลิงที่ได้จากการผลิตต้องมีการทดสอบสมบัติทางกายภาพก่อนการนำไปใช้ เช่น ค่าความร้อน การต้านทานแรงกด ซึ่งการต้านทานแรงกดนั้นจะมีค่าที่ยอมรับได้ต่ำสุดคือ 0.375 MPa [4] แต่ค่าความร้อนนั้นจะขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบที่นำมาใช้

ดังนั้นจากที่กล่าวมาทั้งหมดข้างต้นจึงได้ทำการออกแบบสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิงเพื่อใช้กับกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันแบบอัดรีดเย็น และเลือกใช้กะลามะพร้าวผสมกับใยกะลามะพร้าวเป็นวัตถุดิบในการผลิตเป็นแท่งเชื้อเพลิงและใช้โมลาสเป็นตัวประสาน เพื่อที่จะยึดเกาะวัตถุ

ดิบให้คงรูปเป็นแท่งเชื้อเพลิง ทั้งนี้ในการออกแบบสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิงนั้นจะใช้หลักการในการออกแบบสกรูลำเลียง [5] มาประยุกต์ใช้เพื่อให้สามารถอัดแท่งเชื้อเพลิงได้ภายในขั้นตอนเดียว นอกจากนี้ยังศึกษาถึงอิทธิพลของสัดส่วนการผสมโมลาสต่อสมบัติทางกายภาพของแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ โดยสมบัติทางกายภาพที่ทดสอบได้แก่ ความหนาแน่น การต้านทานแรงกด และค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิง

## 2. การออกแบบสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิง

ในการวิเคราะห์เพื่อคำนวณสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิงนั้น จะแบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงการลำเลียงอนุภาคสำหรับร่องเกลียวลำเลียง และช่วงการอัดรีดชีวมวลให้ออกมาเป็นแท่งเชื้อเพลิง ในการวิเคราะห์แรงที่กระทำกับเบตตอนุภาคของชีวมวล จะพิจารณาตามรูปที่ 1



รูปที่ 1 แรงที่กระทำกับเบตตอนุภาคของชีวมวล

### 2.1 การคำนวณในช่วงการลำเลียงอนุภาค

ในการวิเคราะห์ในช่วงการลำเลียงอนุภาคของสกรูอัดเดี่ยว (Single screw extrusion) มีสมมุติฐานดังนี้ [5]

1. อนุภาคชีวมวลเคลื่อนที่ไปอย่างต่อเนื่องไม่มีการสะสมมวล
2. เบตตอนุภาคของชีวมวลจะสัมผัสกับผนังของ barrel ฐานสกรูและใบเกลียวสกรู
3. ความสูงของใบเกลียวมีค่าคงที่
4. ไม่พิจารณาช่องว่างระหว่างในเกลียวกับผนัง barrel
5. อนุภาคเคลื่อนที่แบบ plug flow
6. ความดันในเบตตอนุภาคไม่เปลี่ยนแปลงตลอดช่วงการลำเลียงอนุภาค
7. ไม่พิจารณาแรงเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก
8. ไม่พิจารณาแรงเหวี่ยงที่เกิดจากการหมุนของสกรู
9. ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของเบตตอนุภาคตลอดช่วงการลำเลียง

การหาอัตราการขนถ่ายเบตตอนุภาคจำเป็นต้องหามุมขนถ่ายเบตตอนุภาคของชีวมวลซึ่งเป็นมุมที่แรงลัพธ์กระทำกับเบตตอนุภาค โดยการ

หาค่ามุมขนถ่ายเบตอนุภาคสามารถหาได้จากการสมดุลแรง และสมดุลแรงบิดที่กระทำกับเบตอนุภาคตามรูปที่ 1 ดังนี้  
สมดุลแรงในแนวแกน x จะได้

$$\sum F_x = 0$$

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

สมดุลแรงบิดรอบแกน x จะได้

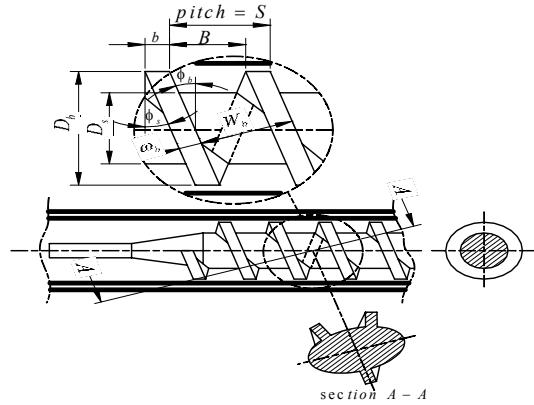
$$\sum M_x = 0$$

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

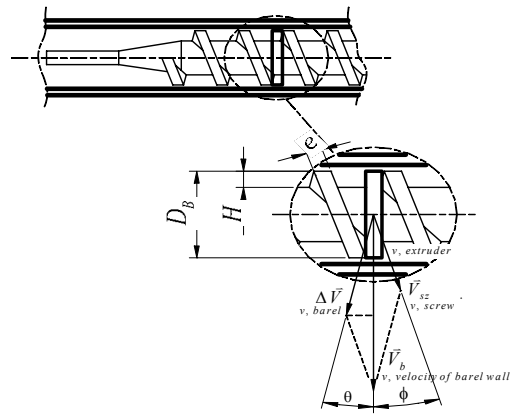
จากสมการสมดุลแรงและแรงบิดตามสมการที่ (1) และ(2) จะกำหนดให้สกรูหยุดนิ่งอยู่กับที่และ barrel หมุนรอบแกนสกรู โดยจะสามารถหาแรงลัพท์ซึ่งเป็นแรงผลักดันให้เบตอนุภาคเกิดการเคลื่อนที่ด้านหน้าได้ ผลเฉลยของสมการ (1) และ (2) จะอาศัยลักษณะรูปทรงทางเรขาคณิตของสกรูดังรูปที่ 2 และไดอะแกรมความเร็วของเบตและสกรูตัดดังรูปที่ 3 ประกอบการคำนวณ หลังจากนั้นสามารถจัดรูปสมการที่ (1) และ (2) ให้เป็นสมการที่ (3) ซึ่งเป็นสมการที่ใช้หาค่ามุมขนถ่ายเบตอนุภาคและนำไปหาค่าอัตราการผลิตแห้งเชื้อเพลิง ( $\dot{M}_s$ ) ในสมการที่ (9) ต่อไป โดยตัวแปรต่างๆจากรูปที่ 1,2 และ 3 มีความหมายดังนี้

- $F_r$  = แรงเสียดทานระหว่าง เบตอนุภาคกับฐานสกรู
- $F_{na}$  = แรงตั้งฉากระหว่างเบตอนุภาคกับด้านข้างของเกลียวที่รับอนุภาคเข้ามา (active flight flank)
- $F_{np}$  = แรงตั้งฉากระหว่างเบตอนุภาคกับด้านข้างของเกลียวที่ส่งอนุภาคออกไป (passive flight flank)
- $F_{fa}$  = แรงเสียดทานระหว่างเบตอนุภาคกับด้านข้างของเกลียวที่รับอนุภาคเข้ามา
- $F_{fp}$  = แรงเสียดทานระหว่างเบตอนุภาคกับด้านข้างของเกลียวที่ส่งอนุภาคออกไป
- $F_{p1}$  = แรงเนื่องจากความดันที่ระยะใด ๆ
- $F_{p2}$  = แรงเนื่องจากความดันที่ระยะ  $Z + dZ$
- $\bar{V}_b$  = ความเร็วของ barrel
- $\bar{V}_{sz}$  = ความเร็วของเบตอนุภาคในทิศทาง Z (ตามแนวร่องสกรู)
- $\Delta \bar{V}$  = ผลต่างระหว่าง  $\bar{V}_b$  และ  $\bar{V}_{sz}$
- $\phi_s$  = มุมเกลียวสกรู
- $\phi_m$  = มุมเกลียวเฉลี่ย
- $\theta$  = มุมขนถ่ายเบตอนุภาค
- $D_b$  = เส้นผ่านศูนย์กลาง barrel
- $D_s$  = เส้นผ่านศูนย์กลางสกรู

$D_m$  = เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของร่องสกรู  
 $P_1$  = ความดันที่ตำแหน่งทางเข้าร่องเกลียว  
 $P_2$  = ความดันที่ตำแหน่งทางออกร่องเกลียว



รูปที่ 2 รูปทรงทางเรขาคณิตของสกรู



รูปที่ 3 ไดอะแกรมความเร็วของเบตและสกรู

มุมขนถ่ายเบตอนุภาคสามารถหาได้จาก

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

โดยมีตัวแปรช่วยในสมการ (3) มีดังนี้

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

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

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

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

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

ดังนั้นสามารถหาอัตราการขนถ่ายเบตอณูภาคหรืออัตราการผลิตแห้งเชื้อเพลิงได้ดังนี้

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

โดยที่

$\rho$  = ความหนาแน่นของเบตอณูภาคของชีวมวล, (kg/m<sup>3</sup>)

$p$  = จำนวนปากของเกลียวสกรู

$V_b$  = ความเร็วของ Barrel ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $\pi D_b N / 60$ , m/s

$D_b$  = เส้นผ่านศูนย์กลางของ Barrel, (m)

## 2.2 การคำนวณในช่วงการอัดอนุภาค

ในการคำนวณสกรูอัดแห้งเชื้อเพลิงในช่วงการอัดจะแตกต่างจากการคำนวณในช่วงลำเลียง เพราะสมมุติฐานที่ใช้ในการคำนวณช่วงลำเลียงนั้นไม่เกิดการอัดตัวของอนุภาคในร่องเกลียวทำให้ความดันในเบตอณูภาคไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งหากความดันแตกต่างกันระหว่างความดันในร่องเกลียวที่ทางเข้า ( $P_1$ ) และความดันในร่องเกลียวที่ทางออกของร่องเกลียวเดียวกัน ( $P_2$ ) ไม่เกิดขึ้น ( $P_2/P_1=1$ ) จะทำให้เทอมของตัวแปร  $M_3$  ในสมการที่ 8 มีค่าเท่ากับศูนย์ แต่ในช่วงการอัดนั้น จะเกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของร่องเกลียวสกรูเพื่อเพิ่มความหนาแน่นของเบตอณูภาค โดยการลดลงของปริมาตรของร่องเกลียวสกรูจะเป็นการลดลงของความสูงของใบสกรู สำหรับความดันที่เกิดขึ้นระหว่างการอัดตัวของเบตอณูภาค เพื่อเพิ่มความหนาแน่นหาได้จากการทดลอง ซึ่งได้ความสัมพันธ์ของความดันและความหนาแน่นที่เปลี่ยนแปลงตามความดันดังสมการที่ (10) [6]

$$P = a \exp(bD) \quad (10)$$

โดยที่  $P$  เป็นความดันที่ใช้ในการอัด; MPa

$D$  เป็นความหนาแน่นของเบตอณูภาคชีวมวล; kg/m<sup>3</sup>

$a, b$  เป็นค่าคงที่ของสมการเอมไพริคัล

$$a = 0.05818$$

$$b = 0.0041$$

ความดันในร่องเกลียวที่ทางเข้า ( $P_1$ ) ของร่องเกลียวอัดครั้งแรกจะให้ค่าเท่ากับความดันบรรยากาศและความดันในร่องเกลียวที่ทางออกของร่องเกลียวเดียวกัน ( $P_2$ ) นั้นจะต้องหาความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นจากปริมาตรของร่องเกลียวที่ลดลง แล้วนำความหนาแน่นดังกล่าวแทนค่าลงในสมการที่ (10) ซึ่งความดัน  $P_2$  ที่หาได้จากร่องเกลียวอัดครั้งแรกจะเป็นค่า  $P_1$  ของร่องเกลียวอัดครั้งต่อไปซึ่งจะเป็นเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนได้ความหนาแน่นตามที่ต้องการ ในการคำนวณสกรูอัดแห้งเชื้อเพลิงทั้งสองช่วงนั้นจะใช้วิธีการหาคำนวณซ้ำ (Iteration) โดยจะกำหนดอัตราการผลิตแห้งเชื้อเพลิงและความหนาแน่นของแห้งเชื้อเพลิงที่จะผลิตได้ซึ่งจะสมมติความสูงของใบเกลียวเริ่มต้น โดยจะกำหนดให้ระยะพิทช์ของร่องเกลียวมีค่าคงที่แล้วคำนวณซ้ำจนได้อัตราการผลิตและความหนาแน่นที่ต้องการที่ร่องเกลียวสุดท้ายซึ่งในการออกแบบสกรูอัดแห้ง

เชื้อเพลิงในการวิจัย จะกำหนดให้อัตราการผลิตแห้งเชื้อเพลิงที่สามารถผลิตได้ไว้ที่ 1 kg/min และความหนาแน่นของแห้งเชื้อเพลิงมีค่าประมาณ 1,000 kg/m<sup>3</sup>

## 3. วัตถุประสงค์ในการทดลองและการทดลอง

$$\dot{M}_s = \rho H p W V_{sz} = \rho H W p V_b$$

### 3.1 วัตถุประสงค์ในการทดลอง

วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการทดลองคือผงถ่านกะลามะพร้าวผสมกับผงถ่านไยกะลามะพร้าว โดยวัตถุประสงค์ทั้งสองนั้นได้จากการนำกะลา มะพร้าวแห้งไปทำการเผาจนได้ถ่านกะลามะพร้าว หลังจากนั้นนำกะลาที่ผ่านการเผาทำการบดด้วยเครื่องบด (Hammer mill) ซึ่งผงถ่านกะลาที่ผ่านการบดและผงถ่านไยกะลาจะมีหลายขนาด ซึ่งสามารถคัดแยกเป็นร้อยละโดยมวลด้วยเครื่อง Sieve analysis โดยขนาดของผงถ่านกะลาและผงถ่านไยกะลาที่มีสัดส่วนมากที่สุดที่ขนาด 0.6mm ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 39.63 สำหรับผงถ่านกะลา และร้อยละ 47.34 สำหรับผงถ่านไยกะลา สำหรับตัวประสานที่เลือกใช้คือโมลาส หรือกากน้ำตาล ซึ่งจะผสมลงในส่วนผสมของผงถ่านกะลาและผงถ่านไยกะลาเพื่อเป็นตัวยึดเกาะวัตถุดิบให้เกาะตัวกันเป็นแห้งเชื้อเพลิงตามแบบของแม็พิมพ์ โดยเมื่อนำผงถ่านกะลาผสมกับผงถ่านไยกะลาที่สัดส่วน 40:60 และผสมโมลาสสัดส่วน 10:100 จะมีค่าความหนาแน่น (Bulk Density) 415 kg/m<sup>3</sup> ซึ่งเป็นค่าความหนาแน่นเริ่มต้นในการออกแบบสกรูอัดแห้งเชื้อเพลิง

## 3.2 การทดลอง

### 3.2.1 อุปกรณ์การทดลอง

ในการทดลองการอัดแห้งเชื้อเพลิงที่เงื่อนไขต่าง ๆ จะมีอุปกรณ์ในการทดลองดังนี้

1. เครื่องอัดรีดแห้งเชื้อเพลิงแข็ง
2. ชุดปรับความเร็วรอบมอเตอร์ (Inverter)
3. นาฬิกาจับเวลา
4. ตาชั่งน้ำหนัก
5. แคลล์มิเตอร์ซึ่งมีความแม่นยำ  $\pm 0.2$  แอมแปร์
6. มิเตอร์วัดแห้งเชื้อเพลิง
7. เวอร์เนียคาลิเปอร์
8. เครื่องบดย่อยวัสดุ
9. เครื่องทดสอบค่าการต้านทานแรงกด (UTM)
10. เครื่องทดสอบค่าความร้อน (Bomb Calorimeter)
11. สารละลายที่ใช้ทดสอบค่าความหนาแน่น

### 3.2.2 เงื่อนไขการทดลอง

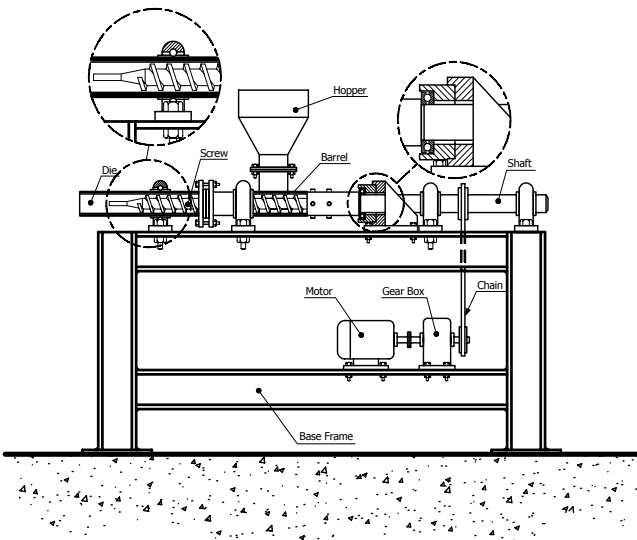
เงื่อนไขการทดลองการผลิตแห้งเชื้อเพลิงแข็งอัดแห้งจะกำหนดสัดส่วนการผสมผงถ่านกะลาต่อผงถ่านไยกะลาที่ 40:60 และความเร็วรอบของสกรูอัดแห้งเชื้อเพลิงที่ 145 รอบต่อนาที แล้วทำการปรับ เปลี่ยนสัดส่วนการผสมโมลาสต่อน้ำหนักของวัตถุดิบ เพื่อศึกษาถึงผลกระทบบต่อการผลิต และสมบัติทางกายภาพของแห้งเชื้อเพลิงที่ผลิตได้โดยเงื่อนไขการทดลองมีดังนี้

1. สัดส่วนการผสมโมลาสต่อน้ำหนักของวัตถุดิบ 10:100
2. สัดส่วนการผสมโมลาสต่อน้ำหนักของวัตถุดิบ 15:100

3. สัดส่วนการผสมโมลาสต่อน้ำหนักของวัตถุดิบ 20:100

### 3.2.3 วิธีการทดลอง

1. เตรียมวัตถุดิบและอุปกรณ์ที่จะใช้ในการทดลอง
2. ทำการเดินเครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิงดังรูปที่ 4 เพื่อทดสอบการทำงานของเครื่อง
3. ปรับความเร็วรอบของสกรูตามเงื่อนไขการทดลอง
4. นำวัตถุดิบที่เตรียมไว้ใส่ลงในถังพักป้อน (Hopper)
5. นำภาชนะมารองรับมวลที่ยังไม่เป็นแท่ง
6. สังเกตการอัดแท่งเชื้อเพลิงซึ่งจะร่อนออกมาเป็นแท่งอย่างสม่ำเสมอจึงเริ่มบันทึกผลการทดลองโดยจะทำการวัดอัตราการผลิตแท่งเชื้อเพลิงและพลังงานที่ใช้ในการอัดแท่งเชื้อเพลิงจำเพาะ
7. นำแท่งเชื้อเพลิงที่ได้ไปอบให้มีความชื้นประมาณ 10% d.b เพื่อเตรียมไปทดสอบสมบัติทางกายภาพ
8. เปลี่ยนสัดส่วนของโมลาสตามเงื่อนไขการทดลองจนครบ
9. นำแท่งเชื้อเพลิงที่ผ่านการอบไปทดสอบสมบัติทางกายภาพ



รูปที่ 4 ลักษณะของเครื่องอัดรีดแท่งเชื้อเพลิงที่ใช้ในงานวิจัย

### 4. ผลการทดลอง

จากการทดลองผลิตแท่งเชื้อเพลิง โดยใช้วัตถุดิบผงถ่านกะลาผสมกับผงถ่านไยกะลาที่สัดส่วน 40:60 แล้วทำการเปลี่ยนสัดส่วนการผสมโมลาสต่อน้ำหนักของวัตถุดิบจาก 10:100, 15:100 และ 20:100 ความเร็วรอบของสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิง 145 รอบต่อนาที ซึ่งจากการออกแบบนั้นได้คำนวณอัตราการผลิตแท่งเชื้อเพลิงไว้ 1 kg/min ที่ค่าความหนาแน่นเริ่มต้นของวัตถุดิบที่ผสมแล้ว 415 kg/m<sup>3</sup> (ผงถ่านกะลาต่อผงถ่านไยกะลาที่ 40:60 สัดส่วนการผสมโมลาส 10:100) ความเร็วรอบของสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิง 145 รอบต่อนาที แต่ผลที่ได้จากการทดลองพบว่าที่เงื่อนไขการออกแบบจะได้อัตราการผลิตแท่งเชื้อเพลิงจริงเพียง 0.8 kg/min ทั้งนี้เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ใช้คำนวณไม่ตรงกับประเภทของวัตถุดิบ โดยแท่งเชื้อเพลิงที่อัดได้มีลักษณะดังรูปที่ 5 และการวางแท่งเชื้อเพลิงเพื่อทดสอบการต้านทานแรงกด

แรงกดและลักษณะการแตกของแท่งเชื้อเพลิงในการทดสอบมีลักษณะดังรูปที่ 6 นอกจากนี้ผลการทดลองของแท่งเชื้อเพลิงที่อัดได้เมื่อนำไปทดสอบสมบัติทางกายภาพต่าง ๆ จะได้ผลการทดลองดังรูปที่ 7-9

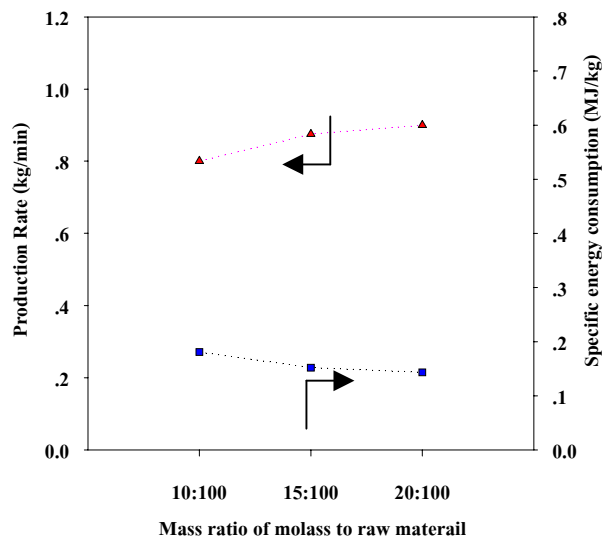


รูปที่ 5 แสดงแท่งเชื้อเพลิงที่อัดได้จากงานวิจัย



รูปที่ 6 การวางแท่งเชื้อเพลิงในการทดสอบการต้านทานแรงกด

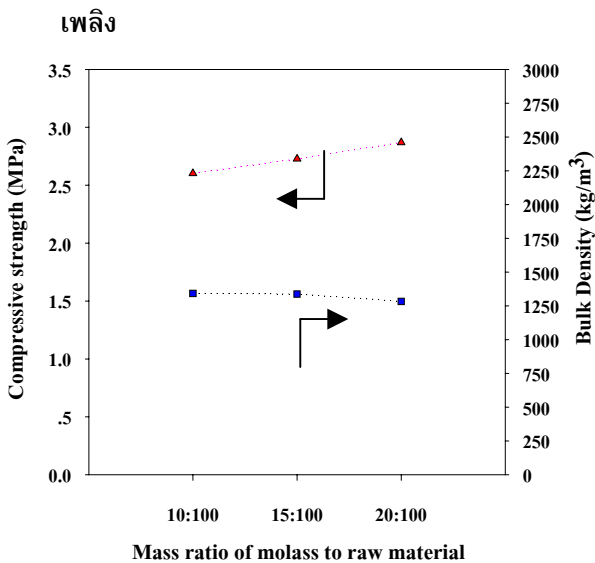
### 4.1 อัตราการผลิตแท่งเชื้อเพลิงและการใช้พลังงานจำเพาะ



รูปที่ 7 แสดงอัตราการผลิตแห้งเชื้อเพลิงและการใช้พลังงานจำเพาะที่สัดส่วนผงถ่านกะลาต่อผงถ่านไยกะลาเท่ากับ 40:60

จากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มสัดส่วนการผสมโมลาสต่อน้ำหนักของวัตถุดิบจะทำให้อัตราการผลิตแห้งเชื้อเพลิงเพิ่มสูงขึ้น เพราะโมลาสซึ่งมีความหนืด แต่สามารถลดความเสียหายที่บริเวณผิวของแท่งเชื้อเพลิงที่สัมผัสกับแม่พิมพ์ทำให้แท่งเชื้อเพลิงสามารถไหลออกจากแม่พิมพ์ได้ง่ายและเร็ว ซึ่งส่งผลให้การใช้พลังงานในการอัดหรือพลังงานจำเพาะลดลง โดยจากรูปที่ 7 พบว่าอัตราการผลิตแห้งเชื้อเพลิงมีค่าระหว่าง 0.8-0.9 kg/min และการใช้พลังงานจำเพาะมีค่าระหว่าง 0.14-0.18 MJ/kg

#### 4.2 การต้านทานแรงกดและความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิง

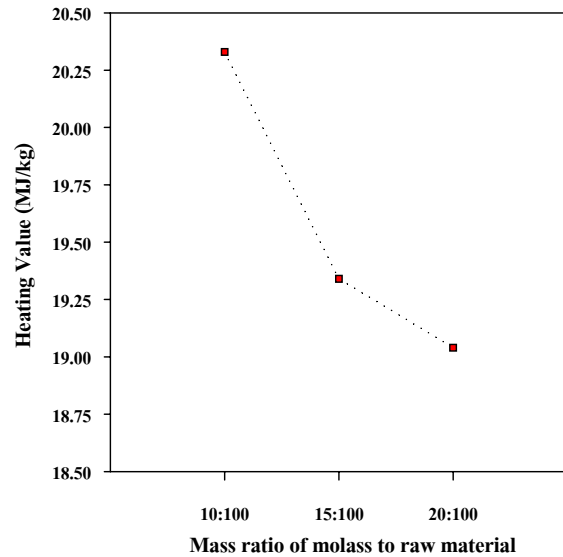


รูปที่ 8 แสดงการต้านทานแรงกดและความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิงที่สัดส่วนผงถ่านกะลาต่อผงถ่านไยกะลาเท่ากับ 40:60

จากการทดลอง พบว่าเมื่อสัดส่วนการผสมโมลาสต่อน้ำหนักของวัตถุดิบเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้ความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิงที่ได้ลดลงเพราะในตัวของระสานโมลาส จะมีน้ำเป็นส่วนประกอบอยู่ประมาณ 25% โดยน้ำหนัก ซึ่งเมื่อนำแท่งเชื้อเพลิงที่อัดได้ไปอบทำให้น้ำที่ผสมอยู่ในโมลาสระเหยทำให้น้ำหนักของแท่งเชื้อเพลิงลดลงแต่ไม่เกิดการหดตัวของแท่งเชื้อเพลิงทำให้ปริมาตรของแท่งเชื้อเพลิงเท่าเดิม ดังนั้นความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิงที่ผ่านการอบมีความหนาแน่นลดลง โดยจะแปรผกผันกับสัดส่วนการผสมโมลาสต่อน้ำหนักของวัตถุดิบ แต่ในกรณีของการต้านทานแรงกดของแท่งเชื้อเพลิงนั้นจะพบว่าการต้านทานแรงกดจะแปรผันตรงกับการเพิ่มสัดส่วนผสมโมลาส เพราะการผสมโมลาสมากจะทำให้ปริมาณของโมลาสที่จะยึดเกาะวัตถุดิบเพียงพอและทั่วถึงส่งผลให้สามารถรับแรงกดได้ดี โดยจากรูปที่ 8 พบว่าการต้านทานแรงกดของแท่งเชื้อเพลิงมีค่าระหว่าง 2.49-2.87 MPa โดยมีค่าสูงสุดที่สัดส่วนการผสมโมลาส 20:100 ในขณะที่ความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิง

มีค่าระหว่าง 1283-1342 kg/m<sup>3</sup> โดยมีค่าสูงสุดที่สัดส่วนการผสมโมลาสที่ 10:100

#### 4.3 ค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิง



รูปที่ 9 แสดงค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงที่สัดส่วนผงถ่านกะลาต่อผงถ่านไยกะลาเท่ากับ 40:60

จากการทดลองพบว่าเมื่อสัดส่วนการผสมโมลาสต่อน้ำหนักของวัตถุดิบเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้ค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงที่อัดได้นั้นมีค่าลดลง เพราะเมื่อผสมโมลาสในปริมาณมากจะทำให้สัดส่วนของปริมาณผงถ่านกะลาซึ่งให้ค่าความร้อนสูงกว่าโมลาสที่ผสมในแท่งเชื้อเพลิงที่อัดได้ลดลงทุกๆ 1 กิโลกรัมมีปริมาณลดลง ส่งผลให้ค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงมีค่าน้อยลง ตามการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนการผสมโมลาสต่อน้ำหนักของวัตถุดิบ โดยจากรูปที่ 9 พบว่าค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงมีค่าระหว่าง 19.0-20.3MJ/kg ซึ่งค่าความร้อนจะสูงสุดที่สัดส่วนการผสมโมลาสต่อน้ำหนักของวัตถุดิบที่ 10:100

#### 5. สรุปผลการทดลอง

ในการศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงแข็งอัดแท่งจากชีวมวลโดยกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันแบบอัดรีดเย็น ซึ่งใช้โมลาสเป็นตัวประสานนั้นพบว่าอัตราการผลิตแห้งเชื้อเพลิงจากสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิงที่ได้ออกแบบไว้นั้นมีความคลาดเคลื่อนจากผลการทดลองจริงประมาณ 20% และการเปลี่ยนสัดส่วนการผสมโมลาสต่อน้ำหนักของวัตถุดิบจาก 10:100 ไปเป็น 15:100 และ 20:100 ส่งผลต่อการผลิตและสมบัติทางกายภาพของแท่งเชื้อเพลิงที่อัดได้ โดยจากการทดลองที่สัดส่วนของผงถ่านกะลาต่อผงถ่านไยกะลาที่ 40:60 ความเร็วรอบของสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิงที่ 145 รอบต่อนาที พบว่าอัตราการผลิตจะแปรผันตรงกับการผสมโมลาสต่อน้ำหนักของวัตถุดิบ ซึ่งมีค่าระหว่าง 0.8-0.9 kg/min โดยอัตราการผลิตสูงสุดที่สัดส่วนการผสมโมลาสที่ 20:100 ในขณะที่ใช้พลังงานจำเพาะในการผลิต จะแปรผกผันกับสัดส่วนการผสมโมลาสต่อ

น้ำหนักของวัตถุดิบ ซึ่งมีค่าระหว่าง 0.14-0.18 MJ/kg ซึ่งจะมีค่าต่ำสุดที่สัดส่วนโมลาสที่ 20:100 นอกจากนี้แท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตได้มีความหนาแน่นระหว่าง 1283-1342 kg/m<sup>3</sup> ซึ่งมีค่าการต้านทานแรงกดระหว่าง 2.6-2.87 MPa โดยค่าความต้านทานแรงกดนี้มีค่าสูงกว่าค่าที่ยอมรับในระดับอุตสาหกรรมมาก (ค่าที่ยอมรับได้ต่ำสุด 0.375 MPa) สำหรับค่าความหนาแน่นและการต้านทานแรงกดของแท่งเชื้อเพลิงมีค่าสูงสุดที่สัดส่วนการผสมโมลาสที่ 10:100 และ 20:100 ตามลำดับ สำหรับค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงที่อัดได้มีค่าระหว่าง 19.04-20.33 MJ/kg ซึ่งจะสูงสุดที่สัดส่วนการผสมโมลาสที่ 10:100

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานสนับสนุนการวิจัยที่ให้การสนับสนุนเงินทุนในการวิจัย นอกจากนี้ขอขอบคุณกองเกษตรวิศวกรรม กรมวิชาการเกษตร ที่เอื้อเฟื้อเครื่องบดย่อยวัสดุในการบดถ่านกะลามะพร้าว

## เอกสารอ้างอิง

- [1] การส่งเสริมการใช้พลังงานชีวมวลของประเทศไทย, วารสารนโยบายพลังงาน, ฉบับที่ 55 ม.ค.-มี.ค. 2543
- [2] ฐานิตย์ เมธิยานนท์, เมธี ไบงาม และ สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, "การผลิตเชื้อเพลิงแท่งแข็งจากขี้เลื่อยโดยเทคนิคเอ็กซ์ทรูชัน", การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17, ปี พ.ศ. 2546, หน้า 656-661
- [3] M.C. Mayoral, M.T. Izquierdo, M.J. Blesa, J.M Andres, B. Rubio and J.L. Miranda, 2001, "DSC study of curing in smokeless briquetting", *Thermochimica Acta [Electronic]*, Vol. 371, pp. 41-44, Available : Elsevier / Science Direct [2001]
- [4] S.R. Richard, 1989, "Physical of Fuel Briquettes", *Fuel Processing Technology [Electronic]*, Vol.25, pp. 89-100, Available: Elsevier / Science Publishers
- [5] Rauwendaal,C., "Function process analysis", *Polymer Extrusion*, 2<sup>nd</sup> edition, 1990, p.p 222-256
- [6] Z. Husain, Z. Zainac and Z. Addullah, 2002, "Briquetting of palm fiber and shell from the processing of palm nuts to palm oil", *Biomass and Bioenergy [Electronic]*, Vol. 22, No. 10, pp. 505-509, Available: Elsevier / Science Direct [2002]