

## บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

### 3.1 วัสดุที่ใช้ในการอัดแท่งเชื้อเพลิง

วัสดุที่ใช้ในการอัดแท่งเชื้อเพลิงจะประกอบด้วยวัสดุหลัก 2 อย่าง คือ วัสดุที่ใช้อัดเป็นแท่งเชื้อเพลิง และวัสดุที่ใช้เป็นตัวประสานเพื่อที่จะทำให้แท่งเชื้อเพลิงที่ผ่านกระบวนการอัดสามารถยึดเกาะกันได้

#### 3.1.1 วัสดุที่ใช้อัดเป็นแท่งเชื้อเพลิง

วัสดุหลักที่นำมาใช้อัดเป็นแท่งเชื้อเพลิงคือผงของกึ่ง และลำต้นของสับดูคาร์รวมถึงวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร อันได้แก่ ชังข้าวโพด ชานอ้อย กากมันสำปะหลัง และแกลบ โดยเริ่มจากนำวัสดุบดดังกล่าวไปทดสอบค่า Proximate Analysis เพื่อเปรียบเทียบคาร์บอนเสถียร (fixed carbon) เถົ่าถ่าน ความหนาแน่น และค่าความร้อนของวัสดุแต่ละชนิด ซึ่งได้ผลดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่า Proximate Analysis ของวัสดุหลักที่นำมาใช้อัดเป็นแท่งเชื้อเพลิง [15]

วัสดุ	% สารระเหย	% เถົ่าถ่าน	% คาร์บอนเสถียร	ความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )	ค่าความร้อน (kJ/kg)
สับดูคาร์	80.84	1.21	15.78	123.552	15,742
ชังข้าวโพด	81.00	1.38	15.39	375.158	15,580
กากมันสำปะหลัง	82.00	3.28	11.17	339.211	14,407
ชานอ้อย	84.00	1.55	9.51	104.667	13,281
แกลบ	63.00	19.45	14.02	219.136	12,393

จากตารางที่ 3.1 จะเห็นได้ว่าค่าความร้อนของวัสดุเรียงลำดับจากมากไปหาน้อยคือสับดูคาร์ ชังข้าวโพด กากมันสำปะหลัง ชานอ้อย และแกลบ ตามลำดับ เนื่องจากการอัดขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลต้องทำการบดย่อยวัสดุต่างๆ จนมีขนาดเล็กกว่า 3 mm นำวัสดุบดดังกล่าวไปตัดเป็นท่อนๆ และตากแดดให้แห้งเพื่อสะดวกต่อการบดย่อย โดยการบดนั้นจะใช้เครื่องบดย่อยวัสดุที่มีตะแกรงกรองวัสดุขนาด 3 mm รองอยู่ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากกองเกษตรวิศวกรรมดังรูปที่ 3.1

หลังจากทำการบดขยี้ด้วยเครื่องบดขยี้แล้ววัตถุดิบต่างๆ ก็จะมีลักษณะเกือบเป็นผงดังรูปที่ 3.2 ซึ่งจะมีขนาดเล็กกว่า 3 mm



รูปที่ 3.1 ลักษณะของเครื่องบดขยี้วัสดุ



รูปที่ 3.2 ลักษณะของวัตถุดิบที่ผ่านการบด

### 3.1.2 ตัวประสานที่ใช้ในการอัดแท่งเชื้อเพลิง

ตัวประสานที่จะนำมาใช้ในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ประกอบด้วยกากน้ำตาล (Molasses) และแป้งเปียก เนื่องจากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา นั้นระบุว่าตัวประสานทั้งสองตัวที่เลือกมานี้มีสมบัติในการนำมาทำเป็นตัวประสานได้

#### 3.1.2.1 กากน้ำตาล (Molasses)

กากน้ำตาลคือของเหลวที่มีลักษณะเป็นน้ำเชื่อมสีน้ำตาลเข้ม ของเหลวนี้จะถูกแยกออกจากเก็ลคน้ำตาลโดยวิธีการปั่น (Centrifuge) โดยกากน้ำตาลที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้เป็นกากน้ำตาลที่ได้มาจากอุตสาหกรรมน้ำตาลซึ่งจะมีลักษณะหนืดและข้นดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ลักษณะของกากน้ำตาลที่ใช้ในงานวิจัย

#### 3.1.2.2 แป้งเปียก

ตัวประสานแป้งเปียกทำได้โดยการนำแป้งมันผสมกับน้ำในสัดส่วน 1 ต่อ 4 โดยใช้แป้งมัน 1 ส่วน น้ำ 4 ส่วน (หรือเทียบเป็นสัดส่วนแป้งมัน 0.25 kg ต่อ น้ำ 1 L) แล้วต้มที่อุณหภูมิ 80-90 °C ค่อยๆ กวนเพื่อให้แป้งสุก และเข้ากันกับน้ำ เป็นเวลา 5-10 นาที จะสังเกตเห็นว่าน้ำจะระเหยไปจนหมด เหลือเพียงเนื้อแป้งเปียกเหลวคล้ายเจลเหนียวดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ลักษณะของตัวประสานแป้งเปียกที่ใช้ในงานวิจัย

### 3.2 อุปกรณ์การทดลอง

ในการทดลองการอัดแท่งเชื้อเพลิงที่เงื่อนไขต่างๆ จะมีอุปกรณ์ในการทดลองดังนี้

1. เครื่องอัดรีดแท่งเชื้อเพลิงแข็งซึ่งใช้มอเตอร์ส่งกำลังขนาด 10 แรงม้า (10 hp)
2. เครื่องผสมวัสดุคืบ
3. เครื่องบดย่อยวัสดุ
4. ตาชั่งน้ำหนัก
5. มีดตัดแท่งเชื้อเพลิง
6. เครื่องทดสอบค่าการต้านทานแรงกด (UTM)
7. เครื่องทดสอบค่าความร้อน (Bomb Calorimeter)
8. สารละลายที่ใช้ในการทดสอบค่าความหนาแน่น (ทอลูอิน)

### 3.3 ขั้นตอนการทดลองอัดแท่งเชื้อเพลิง

1. นำลำต้นสับปูลำรวมทั้งวัสดุชีวมวลอื่นๆ อันได้แก่ ช้างข้าวโพด กากมันสำปะหลัง ชานอ้อย และ แกลบที่จะทำการผสมเพื่ออัดแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลไปตัดเป็นท่อนและนำไปตากแห้ง
2. นำวัสดุชีวมวลที่ตากแห้งแล้วมาทำการบดให้มีขนาดเล็กกว่า 3 mm
3. ทำการเตรียมส่วนผสมโดยการชั่งน้ำหนักของผงชีวมวลแต่ละชนิดในสัดส่วนที่จะทำการทดลองในแต่ละเงื่อนไข
4. ผสมตัวประสานตามสัดส่วนของเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง
5. คลุกเคล้าส่วนผสมที่เติมตัวประสานแล้วให้เข้ากัน

6. ทดลองอัดแห้งเชื้อเพลิงชีวมวลด้วยเครื่องอัดรีดแห้งเชื้อเพลิงแข็งที่มีขายตามท้องตลาดซึ่งใช้มอเตอร์ส่งกำลังขนาด 10 แรงม้า
7. เมื่อได้แห้งเชื้อเพลิงชีวมวลมาแล้วให้ทำการนำไปอบให้เหลือความชื้น 10 % db (dry basis)
8. นำแห้งเชื้อเพลิงที่อบจนได้ความชื้น 10 % db แล้วไปทำการทดสอบสมบัติต่างๆ

### 3.4 การทดลองที่ใช้แป้งเปียกเป็นตัวประสาน

ในการทดลองทำการผลิตแห้งเชื้อเพลิงแข็งซึ่งใช้แป้งเปียกเป็นตัวประสานจะแบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกเป็นการศึกษาถึงอิทธิพลของสัดส่วนของตัวประสานที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพของแห้งเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ ส่วนที่สองเป็นการศึกษาถึงอิทธิพลของสัดส่วนวัตถุดิบที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพของแห้งเชื้อเพลิงที่ผลิตได้เช่นเดียวกัน

#### 3.4.1 อิทธิพลของสัดส่วนตัวประสานแป้งเปียก

การศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนตัวประสาน มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ทราบถึงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของตัวประสานและผลที่ได้จากการทดลอง โดยเลือกใช้สัดส่วนของสบูดำ และสัดส่วนของแป้งเปียกค่อน้ำหนักของวัตถุดิบตามเงื่อนไขในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขการทดลองเพื่อการศึกษาการผลิตแห้งเชื้อเพลิงซึ่งใช้แป้งเปียกเป็นตัวประสาน

เงื่อนไขการทดลอง	สัดส่วนของสบูดำ (% โดยน้ำหนัก)	สัดส่วนของแป้งเปียก (% โดยน้ำหนัก)
1	60	40
2	65	35
3	70	30
4	75	25
5	80	20
6	85	15
7	90	10
8	95	5

### 3.4.2 อิทธิพลของสัดส่วนวัตถุดิบเมื่อใช้แป้งเปียกเป็นตัวประสาน

ในการศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนวัตถุดิบมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาถึงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของวัตถุดิบต่อผลที่ได้จากการทดลอง โดยจะทำการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของวัตถุดิบตามเงื่อนไขในตารางที่ 3.3-3.10

ตารางที่ 3.3 เงื่อนไขการทดลองเพื่อการศึกษาการผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากสบูดำและซังข้าวโพด  
ซึ่งใช้แป้งเปียกเป็นตัวประสานที่สัดส่วน 15 %

สบูดำ (% โดยน้ำหนัก)	ซังข้าวโพด (% โดยน้ำหนัก)	แป้งเปียก (% โดยน้ำหนัก)
45	40	15
50	35	
55	30	
60	25	

ตารางที่ 3.4 เงื่อนไขการทดลองเพื่อการศึกษาการผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากสบูดำและกากมันสำปะหลัง  
ซึ่งใช้แป้งเปียกเป็นตัวประสานที่สัดส่วน 15 %

สบูดำ (% โดยน้ำหนัก)	กากมันสำปะหลัง (% โดยน้ำหนัก)	แป้งเปียก (% โดยน้ำหนัก)
45	40	15
50	35	
55	30	
60	25	

ตารางที่ 3.5 เงื่อนไขการทดลองเพื่อการศึกษาการผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากสบูดำและชานอ้อย  
ซึ่งใช้แป้งเปียกเป็นตัวประสานที่สัดส่วน 15 %

สบูดำ (% โดยน้ำหนัก)	ชานอ้อย (% โดยน้ำหนัก)	แป้งเปียก (% โดยน้ำหนัก)
45	40	15
50	35	
55	30	
60	25	

ตารางที่ 3.6 เงื่อนไขการทดลองเพื่อการศึกษาการผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากสบู่ดำและแกลบ  
ซึ่งใช้แป้งเปียกเป็นตัวประสานที่สัดส่วน 15 %

สบู่ดำ (% โดยน้ำหนัก)	แกลบ (% โดยน้ำหนัก)	แป้งเปียก (% โดยน้ำหนัก)
45	40	15
50	35	
55	30	
60	25	

ตารางที่ 3.7 เงื่อนไขการทดลองเพื่อการศึกษาการผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากสบู่ดำและซังข้าวโพด  
ซึ่งใช้แป้งเปียกเป็นตัวประสานที่สัดส่วน 20 %

สบู่ดำ (% โดยน้ำหนัก)	ซังข้าวโพด (% โดยน้ำหนัก)	แป้งเปียก (% โดยน้ำหนัก)
40	40	20
50	30	
60	20	
70	10	

ตารางที่ 3.8 เงื่อนไขการทดลองเพื่อการศึกษาการผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากสบู่ดำและกากมันสำปะหลัง  
ซึ่งใช้แป้งเปียกเป็นตัวประสานที่สัดส่วน 20 %

สบู่ดำ (% โดยน้ำหนัก)	กากมันสำปะหลัง (% โดยน้ำหนัก)	แป้งเปียก (% โดยน้ำหนัก)
40	40	20
50	30	
60	20	
70	10	

**ตารางที่ 3.9** เงื่อนไขการทดลองเพื่อการศึกษาการผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากสบู่ดำและชานอ้อย  
ซึ่งใช้แบ่งเป็ยเป็นตัวประสาณที่สัดส่วน 20 %

สบู่ดำ (% โดยน้ำหนัก)	ชานอ้อย (% โดยน้ำหนัก)	แบ่งเป็ย (% โดยน้ำหนัก)
40	40	20
50	30	
60	20	
70	10	

**ตารางที่ 3.10** เงื่อนไขการทดลองเพื่อการศึกษาการผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากสบู่ดำและแกลบ  
ซึ่งใช้แบ่งเป็ยเป็นตัวประสาณที่สัดส่วน 20 %

สบู่ดำ (% โดยน้ำหนัก)	แกลบ (% โดยน้ำหนัก)	แบ่งเป็ย (% โดยน้ำหนัก)
40	40	20
50	30	
60	20	
70	10	

### 3.5 การทดลองที่ใช้กากน้ำตาลเป็นตัวประสาณ

ในการทดลองทำการผลิตแท่งเชื้อเพลิงแข็งซึ่งใช้กากน้ำตาลเป็นตัวประสาณจะแบ่งออกเป็นสองส่วน เช่นเดียวกับการทดลองในส่วนของการใช้แบ่งเป็ยเป็นตัวประสาณ ซึ่งในส่วนแรกเป็นการศึกษาถึงอิทธิพลของสัดส่วนของตัวประสาณที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพของแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ ส่วนที่สองเป็นการศึกษาถึงอิทธิพลของสัดส่วนวัตถุดิบที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพของแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตได้เช่นกัน

#### 3.5.1 อิทธิพลของสัดส่วนตัวประสาณกากน้ำตาล

การศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนตัวประสาณ มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ทราบถึงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของตัวประสาณและผลที่ได้จากการทดลอง โดยเลือกใช้สัดส่วนของสบู่ดำ และสัดส่วนของโมลาสต่อน้ำหนักของวัตถุดิบตามเงื่อนไขในตารางที่ 3.11

ตารางที่ 3.11 เงื่อนไขการทดลองเพื่อการศึกษาการผลิตแ่งเชื้อเพลิงซึ่งใช้กากน้ำตาลเป็นตัวประสาน

เงื่อนไขการทดลอง	สัดส่วนของสบูดำ (% โดยน้ำหนัก)	สัดส่วนของกากน้ำตาล (% โดยน้ำหนัก)
1	60	40
2	65	35
3	70	30
4	75	25
5	80	20
6	85	15
7	90	10
8	95	5

### 3.5.2 อิทธิพลของสัดส่วนวัตถุดิบเมื่อใช้กากน้ำตาลเป็นตัวประสาน

ในการศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนวัตถุดิบมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาถึงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของวัตถุดิบต่อผลที่ได้จากการทดลอง โดยจะกำหนดสัดส่วนของโมลาสต่อน้ำหนักของวัตถุดิบที่ 20 % และ 15 % แล้วทำการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของวัตถุดิบตามเงื่อนไขการทดลองตามตารางที่ 3.12-3.19

ตารางที่ 3.12 เงื่อนไขการทดลองเพื่อการศึกษาการผลิตแ่งเชื้อเพลิงจากสบูดำและซังข้าวโพดซึ่งใช้กากน้ำตาลเป็นตัวประสานที่สัดส่วน 15 %

สบูดำ (% โดยน้ำหนัก)	ซังข้าวโพด (% โดยน้ำหนัก)	กากน้ำตาล (% โดยน้ำหนัก)
45	40	15
50	35	
55	30	
60	25	

ตารางที่ 3.13 เงื่อนไขการทดลองเพื่อการศึกษาการผลิตแ่งเชื้อเพลิงจากสบู่ดำและกากมันสำปะหลัง  
ซึ่งใช้กากน้ำตาลเป็นตัวประสานที่สัดส่วน 15 %

สบู่ดำ (% โดยน้ำหนัก)	กากมันสำปะหลัง (% โดยน้ำหนัก)	กากน้ำตาล (% โดยน้ำหนัก)
45	40	15
50	35	
55	30	
60	25	

ตารางที่ 3.14 เงื่อนไขการทดลองเพื่อการศึกษาการผลิตแ่งเชื้อเพลิงจากสบู่ดำและชานอ้อย  
ซึ่งใช้กากน้ำตาลเป็นตัวประสานที่สัดส่วน 15 %

สบู่ดำ (% โดยน้ำหนัก)	ชานอ้อย (% โดยน้ำหนัก)	กากน้ำตาล (% โดยน้ำหนัก)
45	40	15
50	35	
55	30	
60	25	

ตารางที่ 3.15 เงื่อนไขการทดลองเพื่อการศึกษาการผลิตแ่งเชื้อเพลิงจากสบู่ดำและแกลบ  
ซึ่งใช้กากน้ำตาลเป็นตัวประสานที่สัดส่วน 15 %

สบู่ดำ (% โดยน้ำหนัก)	แกลบ (% โดยน้ำหนัก)	กากน้ำตาล (% โดยน้ำหนัก)
45	40	15
50	35	
55	30	
60	25	

**ตารางที่ 3.16** เงื่อนไขการทดลองเพื่อการศึกษาการผลิตแ่งเชื้อเพลิงจากสบู่ดำและซังข้าวโพด  
ซึ่งใช้กากน้ำตาลเป็นตัวประสานที่สัดส่วน 20 %

สบู่ดำ (% โดยน้ำหนัก)	ซังข้าวโพด (% โดยน้ำหนัก)	กากน้ำตาล (% โดยน้ำหนัก)
40	40	20
50	30	
60	20	
70	10	

**ตารางที่ 3.17** เงื่อนไขการทดลองเพื่อการศึกษาการผลิตแ่งเชื้อเพลิงจากสบู่ดำและกากมันสำปะหลัง  
ซึ่งใช้กากน้ำตาลเป็นตัวประสานที่สัดส่วน 20 %

สบู่ดำ (% โดยน้ำหนัก)	กากมันสำปะหลัง (% โดยน้ำหนัก)	กากน้ำตาล (% โดยน้ำหนัก)
40	40	20
50	30	
60	20	
70	10	

**ตารางที่ 3.18** เงื่อนไขการทดลองเพื่อการศึกษาการผลิตแ่งเชื้อเพลิงจากสบู่ดำและชานอ้อย  
ซึ่งใช้กากน้ำตาลเป็นตัวประสานที่สัดส่วน 20 %

สบู่ดำ (% โดยน้ำหนัก)	ชานอ้อย (% โดยน้ำหนัก)	กากน้ำตาล (% โดยน้ำหนัก)
40	40	20
50	30	
60	20	
70	10	

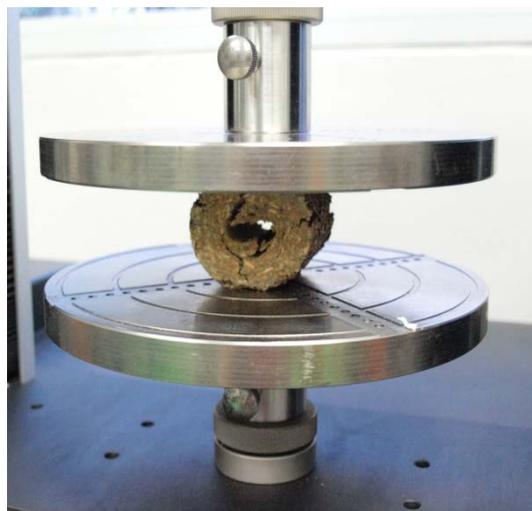
**ตารางที่ 3.19** เงื่อนไขการทดลองเพื่อการศึกษาการผลิตแ่งเชื้อเพลิงจากสบูดำและแกลบ  
ซึ่งใช้กากน้ำตาลเป็นตัวประสานที่สัดส่วน 20 %

สบูดำ (% โดยน้ำหนัก)	แกลบ (% โดยน้ำหนัก)	กากน้ำตาล (% โดยน้ำหนัก)
40	40	20
50	30	
60	20	
70	10	

### 3.6 การทดสอบสมบัติทางกายภาพของแ่งเชื้อเพลิง

ในการศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงแข็งอัดแ่งจะทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพต่างๆ ดังนี้

1. การหาค่าความร้อน ทำโดยการนำแ่งเชื้อเพลิงที่ผ่านการอบมาแล้วจนเหลือความชื้น 10 % db มาทำการบดให้เป็นผงในปริมาณที่เพียงพอต่อการทำการทดลองซ้ำได้ 3-5 ครั้ง แล้วนำไปหาค่าความร้อนด้วยเครื่องหาค่าพลังงานความร้อน (Bomb Calorimeter) ซึ่งขั้นตอนการหาค่าความร้อนจะทำตามหัวข้อ 2.4.2.1
2. หลังจากทำการอบแ่งเชื้อเพลิงจนเหลือความชื้น 10 % db จากนั้นจะนำไปทดสอบความต้านทานแรงกดโดยใช้เครื่อง UTM ซึ่งลักษณะการวางแ่งเชื้อเพลิงระหว่างทดสอบมีลักษณะดังรูปที่ 3.5 ซึ่งเป็นทิศทางที่แ่งเชื้อเพลิงมีการต้านทานแรงกดได้น้อยที่สุด



**รูปที่ 3.5** ลักษณะการวางแ่งเชื้อเพลิงในการทดสอบการต้านทานแรงกด

- ค่าความหนาแน่น ทำการทดสอบโดยการนำแท่งเชื้อเพลิงที่ทำการตัดไว้ให้ขนาดเล็กพอที่จะใส่เข้าไปในภาชนะที่เตรียมไว้สำหรับวัดปริมาตรได้ แล้วทำการทดสอบหาค่าความหนาแน่นโดยการวัดมวลเทียบกับปริมาตรของเชื้อเพลิง โดยขั้นตอนการทดสอบค่าความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิงจะทำตามหัวข้อ 2.4.3.1

### 3.7 การออกแบบสร้างเครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิงแบบเอ็กซ์ทรูชัน และทดสอบผลิตแท่งเชื้อเพลิง

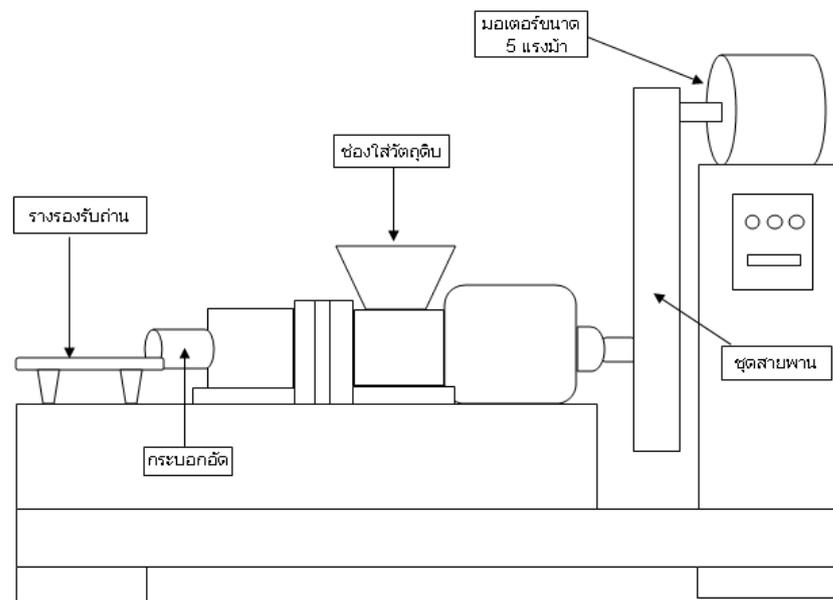
ในการออกแบบสร้างเครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิง มีจุดประสงค์เพื่อปรับปรุงเครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิงแบบเก่า ซึ่งใช้ในการอัดแท่งเชื้อเพลิงที่ทำการเผาแล้วให้เหมาะสมกับการอัดแท่งเชื้อเพลิงเขียว (เชื้อเพลิงอัดแท่งที่ผลิตจากเชื้อเพลิงชีวมวลที่ยังไม่ได้ทำการเผา) โดยที่ลักษณะ โครงสร้างส่วนใหญ่จะใช้พื้นฐานการออกแบบจากเครื่องเอ็กซ์ทรูชันแบบเก่า แต่ทำการปรับเปลี่ยนระบบการครอบตัวส่งกำลัง ลักษณะของสกรู และกระบอกอัด แล้วทดสอบหาลักษณะของสกรูที่ทำให้เครื่องอัดมีประสิทธิภาพในการอัดแท่งถ่านเขียวที่ดี โดยจะดูจากสมบัติด้านความต้านทานแรงกดของตัวเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ผลิตออกมาได้ เนื่องจากในการใช้งานแท่งเชื้อเพลิงโดยทั่วไป ผู้อุปโภคแท่งเชื้อเพลิงแข็งนั้นจะยอมรับแท่งเชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนของตัวชีวมวลสูงกว่าร้อยละ 65 เพราะจะมีค่าความร้อนสูง อีกทั้งจะต้องมีความแข็งแรงสูงเพียงพอ ขั้นตอนการออกแบบเครื่องอัดแท่งชีวมวลจะแบ่งออกเป็นสองขั้นตอน โดยขั้นตอนที่ 1 จะเป็นการออกแบบสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิงแข็งโดยการใช้ข้อมูลที่ได้จากทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ซึ่งเป็นหลักการที่ใช้ในกระบวนการอัดวัสดุในอุตสาหกรรม โพลีเมอร์ และขั้นตอนที่ 2 เป็นการทดสอบสมรรถนะของสกรูที่คำนวณออกมาได้เมื่อทำการทดลองอัดแท่งเชื้อเพลิงแข็งจริง และเปรียบเทียบค่าความร้อนและค่าความแข็งของแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากเครื่องอัดที่สร้างขึ้นกับแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากเครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิงแข็งแบบเก่า

#### 3.7.1 การออกแบบสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิงแข็ง

การออกแบบสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิงแข็งมีข้อกำหนดเบื้องต้นในการออกแบบดังนี้

- ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Barrel กำหนดให้มีขนาด 63 mm เพราะเมื่อทำการอัดแท่งเชื้อเพลิงแล้วจะได้ขนาดของแท่งเชื้อเพลิงแข็งที่ได้รับความนิยมใช้กันในงานอุตสาหกรรมและงานทั่วไป
- ความเร็วรอบของสกรูที่ใช้ในการอัดแท่งเชื้อเพลิงมีค่า 50 rpm
- สัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างเบดอนุภาคของแข็งกับผิวของ Barrel มีค่า 0.6 เป็นค่าเริ่มต้นที่ใช้ในการออกแบบ

4. สัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างเบดอนุภาคของแข็งกับผิวของสกรู มีค่า 0.3
5. ความหนาแน่นของชีวมวลเริ่มต้นในกรณีที่เป็นสปูดำมีค่า  $415 \text{ kg/m}^3$
6. เส้นผ่านศูนย์กลางของสกรูมีค่า 33 mm
7. มุมเกลียวสกรูที่ตำแหน่ง โคนมีค่า 20 องศา
8. กำหนดให้ในการคำนวณอัตราการผลิตเชื้อเพลิงแข็งอัดแท่งได้ในอัตรา  $0.85 \text{ kg/min}$  เพื่อที่จะใช้หาขนาดของตัวแปรอื่นๆ เช่น ความสูงของฟันเกลียวในช่วงลำเลียงและมุมเฉียงของ Barrel
9. ความหนาของฟันเกลียวสกรูมีค่า 3.38 mm เป็นค่าเริ่มต้นที่ใช้สำหรับการคำนวณ



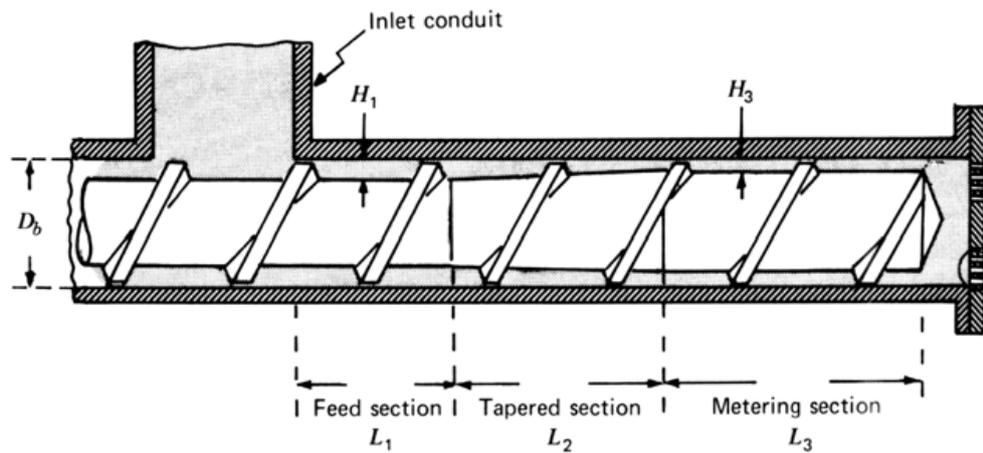
รูปที่ 3.6 ลักษณะ โครงสร้างหลักในการสร้างเครื่องอัดแบบเอ็กซ์ทรูชัน

### 3.7.1.1 แนวคิดในการออกแบบสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิงแข็งในงานวิจัย

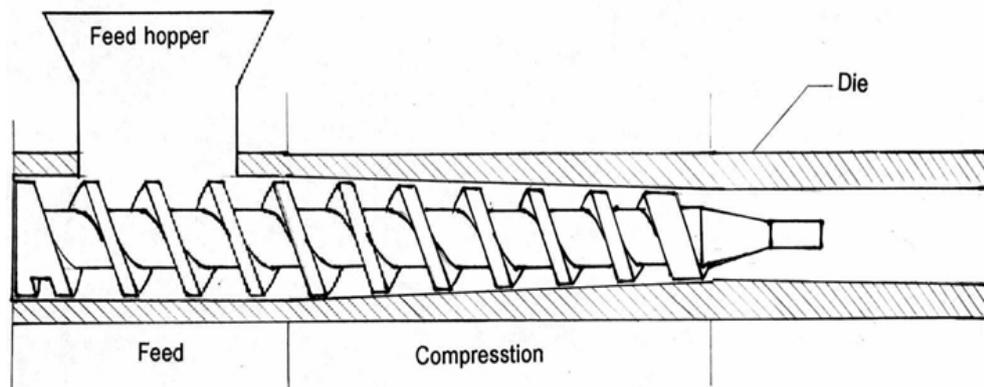
โดยปกติสกรูอัดวัสดุที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมการอัดโพลีเมอร์ทั่วไปมีลักษณะดังรูปที่ 3.7 ซึ่งจะเห็นว่าสกรูอัดดังกล่าว มีลักษณะที่ โคนของสกรูมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสกรูเล็กกว่าช่วงของปลายสกรู เพราะที่ช่วง โคนเป็นช่วงที่ใช้สำหรับลำเลียงอนุภาคของวัสดุที่จะทำการอัด และช่วงปลายจะเป็นช่วงอัดซึ่งจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสกรู โตขึ้นเพื่ออัดอนุภาคของวัสดุให้มีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้นและดันตัวออกมาจากแม่พิมพ์

การสร้างสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิงแข็งให้มีลักษณะดังรูปที่ 3.7 ทำได้ยากมากจึงทำการออกแบบให้สกรูอัดมีลักษณะดังรูปที่ 3.8 ซึ่งโดยหลักการของสกรูอัดคือการเพิ่มความหนาแน่นของอนุภาคในแต่ละร่องเกลียวจากหลักการดังกล่าวสามารถใช้ในการออกแบบสกรูที่ใช้ในการอัดแท่งเชื้อเพลิงแข็งได้

สกรูที่ใช้ในการวิจัยนี้มีลักษณะเส้นผ่านศูนย์กลางของสกรูมีค่าคงที่ แต่จะลดปริมาตรของแต่ละร่องเกลียวเพื่อเพิ่มความหนาแน่นของอนุภาคด้วยการให้ขนาดความสูงของเกลียวมีขนาดเล็กลงตามปริมาตรหรือความหนาแน่นที่ต้องการ โดยพิจารณาว่ามวลของอนุภาคในแต่ละร่องเกลียวของสกรูมีค่าคงที่ แผนภูมิกระบวนการออกแบบสกรูอัดแสดงดังภาพผนวก ข



รูปที่ 3.7 ลักษณะสกรูที่ใช้ในงานอัดโพลีเมอร์ทั่วไป



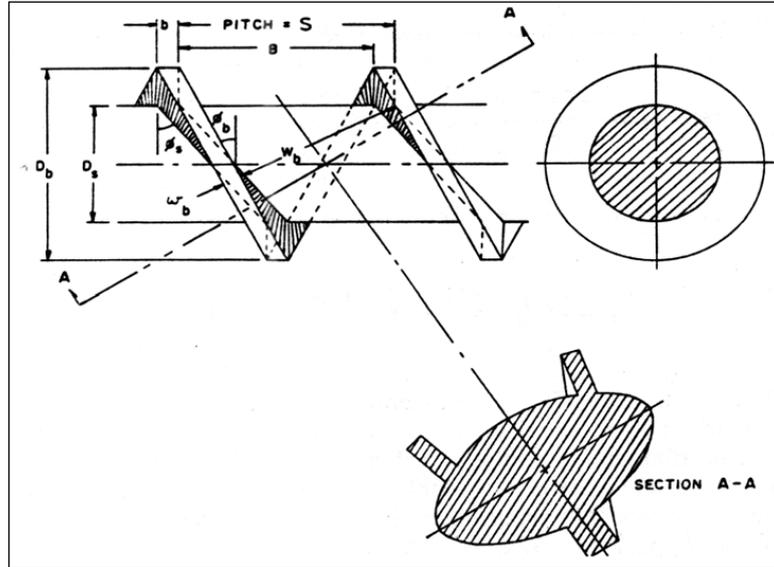
รูปที่ 3.8 ลักษณะสกรูที่ใช้อัดแท่งเชื้อเพลิงในงานวิจัย

### 3.7.2 การคำนวณสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิงที่ใช้ในงานวิจัย

การคำนวณสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิงที่ใช้ในงานวิจัยแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงการลำเลียงชีวมวล และช่วงการอัดแท่งชีวมวล

### 3.7.2.1 การคำนวณช่วงลำเลียง

ในการคำนวณสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิงในช่วงลำเลียงจะกำหนดตัวแปรเริ่มต้นต่างๆ ตามรูปที่ 3.9 ไว้ดังนี้



รูปที่ 3.9 รูปแบบสกรูและตัวแปรที่กำหนด

$D_s$	=	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางสกรู = 33 mm = 0.033 m
$D_b$	=	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง barrel = 63 mm = 0.063 m
$H$	=	ความลึกของร่องเกลียวสกรู = 15 mm = 0.015 m
$\phi_s$	=	มุมเอียงของฟันสกรูที่ตำแหน่งโคน = $20^\circ$
$f_b$	=	สัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างอนุภาคกับผิวของ barrel = 0.6
$f_s$	=	สัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างอนุภาคกับผิวของสกรู = 0.3
$P_2 / P_1$	=	อัตราส่วนของความดันของเบคอนุภาคตามความยาวร่องเกลียว = 1
$p$	=	จำนวนปากของเกลียวสกรู = 1 ปาก
$N$	=	ความเร็วรอบของสกรู = 50 rpm
$\rho$	=	ความหนาแน่นของชีวมวลเริ่มต้น = $415 \text{ kg/m}^3$
$b$	=	ความหนาของฟันสกรูที่วัดขนานกับแกนสกรู = 3.38 mm = 0.00338 m
$\theta$	=	มุมขนถ่ายเบคอนุภาค

จากค่าของตัวแปรที่กำหนดข้างต้นสามารถสรุปได้ดังนี้

$$D_b = 63 \text{ mm}, \phi_s = 20^\circ, N = 50 \text{ rpm}, p = 1, D_s = 33 \text{ mm.}, f_b = 0.6, \rho = 415 \text{ kg/m}^3$$

$$H = 15 \text{ mm}, f_s = 0.3, b = 3.38 \text{ mm}, P_1 = 1.01325 \text{ bar}, P_2 = 1.01325 \text{ bar}$$

ในการคำนวณสกรูอัดแท่งเชิงเพลิงในช่วงลำเฉียงจะใช้สมการ ดังนี้

$$\dot{M}_s = \rho \times H \times p \times W_b \times V_b \times \frac{\sin \theta}{\sin(\theta + \phi_m)} \quad (3.1)$$

จากสมการ (3.1) หาค่าอัตรากรขนถ่ายเชิงมวลได้ดังนี้

มุมขนถ่ายเบดอนุภาค ( $\theta$ ) สามารถหาได้จากสมการ (3.2)

$$\theta = \arcsin \left[ \frac{(1 + K^2 - M_{Total}^2)^{1/2} - (K \times M_{Total})}{1 + K^2} \right] \quad (3.2)$$

หาค่า  $K$  ได้จากสมการ (3.3)

$$K = \frac{D_m (\sin \phi_m + f_s \cos \phi_m)}{D_b (\cos \phi_m - f_s \sin \phi_m)} \quad (3.3)$$

ค่ามุมเกลียวเฉลี่ย ( $\phi_m$ ) หาได้จากสมการ (3.4)

$$\phi_m = \arctan \left( \frac{S}{\pi \times D_m} \right) \quad (3.4)$$

เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของฟันสกรู ( $D_m$ )

$$\begin{aligned} D_m &= D_s + H \\ &= (0.033 + 0.015) \text{ m} \\ &= 0.048 \text{ m} \end{aligned}$$

หาค่า  $S$  ได้จากสมการ (3.5)

$$\phi_s = \arctan \left( \frac{S}{\pi \times D_s} \right) \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned}
 S &= \pi \times (D_s \tan \phi_s) \\
 S &= \pi \times (0.033 \tan 20) \\
 S &= 0.0377 \text{ m}
 \end{aligned}$$

แทนค่า  $S$  และ  $D_m$  ลงในสมการ (3.4)

$$\begin{aligned}
 \phi_m &= \arctan\left(\frac{0.0377}{\pi \times 0.048}\right) \\
 \phi_m &= 14.05^\circ
 \end{aligned}$$

$\therefore$  มุมเอียงพื้นเกลียวของสกรูเฉลี่ย,  $\phi_m = 14.05^\circ$

แทนค่า  $D_m, \phi_m, f_s, D_b$  ลงในสมการ (3.3) จะได้

$$\begin{aligned}
 K &= \frac{0.048(\sin 14.05 + 0.3 \cos 14.05)}{0.063(\cos 14.05 - 0.3 \sin 14.05)} \\
 K &= 0.04533
 \end{aligned}$$

หาค่า  $M_{Total}$  จากสมการ (3.6)

$$M_{Total} = M_1 + M_2 + M_3 \quad (3.6)$$

หาค่า  $M_1$  จากสมการ (3.7)

$$M_1 = \frac{2 \times H \times f_s}{W_b \times f_b} \times \sin \phi_b \times \left( K + \frac{D_m}{D_b} \times \cot \phi_m \right) \quad (3.7)$$

หาค่าความกว้างระหว่างพื้นเกลียวสกรูในแนวเอียง ( $W_b$ ) จากสมการ (3.8)

$$W_b = B \cos \phi_b \quad (3.8)$$

หาค่าความกว้างของร่องเกลียวสกรูตามแนวแกนสกรู ( $B$ ) ได้จาก

$$\begin{aligned}
 B &= S - b \\
 &= 0.03774 - 0.00338 \\
 &= 0.03436
 \end{aligned}$$

หาค่ามุมเอียงของพื้นสกรูที่ยึดคพื้นสกรู ( $\phi_b$ ) จากสมการ (3.9)

$$\begin{aligned}\phi_b &= \arctan\left(\frac{S}{\pi \times D_b}\right) \\ \phi_b &= \arctan\left(\frac{0.03774}{\pi \times 0.063}\right) = 10.795^\circ\end{aligned}\quad (3.9)$$

แทนค่า  $B$  และ  $\phi_b$  ลงในสมการ(3.8) จะได้

$$\begin{aligned}W_b &= 0.03436 \cos(10.795) \\ W_b &= 0.03375\end{aligned}$$

$\therefore$  ความกว้างระหว่างพื้นเกลียวสกรูในแนวเอียง,  $W_b = 0.03375$  m

จากสมการ (3.7) แทนค่าหา  $M_1$  จะได้

$$\begin{aligned}M_1 &= \frac{2 \times 0.015 \times 0.3}{0.03375 \times 0.6} \times \sin 10.795 \times \left(0.04533 + \frac{0.048}{0.063} \times \cot 14.05\right) \\ M_1 &= 0.29116\end{aligned}$$

หาค่า  $M_2$  จากสมการ(3.10)

$$M_2 = \frac{W_s \times f_s}{W_b \times f_b} \times \sin \phi_b \times \left(K + \frac{D_s}{D_b} \times \cot \phi_s\right) \quad (3.10)$$

หาค่าความกว้างระหว่างพื้นเกลียวสกรูในแนวเอียงที่ตำแหน่งโคนสกรู ( $W_s$ ) จาก

$$\begin{aligned}W_s &= B \cos \phi_s \\ &= 0.03436 \cos 20 \\ W_s &= 0.03229\end{aligned}$$

จากสมการ (3.10) แทนค่าหา  $M_2$  จะได้

$$\begin{aligned}M_2 &= \frac{0.03229 \times 0.3}{0.03375 \times 0.6} \times \sin 10.795 \times \left(0.04533 + \frac{0.033}{0.063} \times \cot 20\right) \\ M_2 &= 0.22812\end{aligned}$$

หาค่า  $M_3$  จากสมการ (3.11)

$$M_3 = \frac{W_m \times H}{W_b \times Z_b \times f_b} \times \sin \phi_m \times \left( K + \frac{D_m}{D_b} \times \cot \phi_m \right) \times \ln \left( \frac{P_2}{P_1} \right) \quad (3.11)$$

หาค่าความกว้างระหว่างพื้นเกลียวสกรูเฉลี่ยในแนวเอียง ( $W_m$ ) จาก

$$\begin{aligned} W_m &= B \cos \phi_m \\ &= 0.03436 \cos 14.05 \\ &= 0.03333 \quad \text{m} \end{aligned}$$

หาค่าความกว้างของ Barrel ( $Z_b$ ) จาก

$$\begin{aligned} Z_b &= \frac{\pi \times D_b}{\cos \phi_b} \\ &= \frac{\pi \times 0.063}{\cos 10.795} \\ &= 0.2015 \end{aligned}$$

จากสมการ (3.11) แทนค่าจะได้

$$\begin{aligned} M_3 &= \frac{0.03333 \times 0.015}{0.03375 \times 0.2015 \times 0.6} \times \sin 14.05 \times \left( 0.4533 + \frac{0.048}{0.063} \times \cot 14.05 \right) \times \ln(1) \\ M_3 &= 0 \end{aligned}$$

จากสมการ (3.6) จะได้

$$\begin{aligned} M_{Total} &= M_1 + M_2 + M_3 \\ &= 0.29116 + 0.22812 + 0 \\ &= 0.5193 \end{aligned}$$

แทนค่า  $K$  และ  $M_{Total}$  ในสมการ (3.2) จะได้

$$\begin{aligned} \theta &= \left( \frac{(1 + 0.04533^2 - 0.5193^2)^{1/2} - (0.04533 \times 0.5193)}{(1 + 0.4533^2)} \right) \\ &= 37.39^\circ \end{aligned}$$

$$\therefore \text{มุมขนถ่ายเบคอนุภาค, } \theta = 37.40^\circ$$

หาค่า  $V_b$  จาก

$$\begin{aligned} V_b &= \pi \times D_b \times N \\ &= \pi \times (0.063 \text{ m}) \times \left( 50 \text{ rpm} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \right) \\ &= 0.16493 \frac{\text{m}}{\text{s}} \end{aligned}$$

แทนค่า  $V_b$  ลงในสมการ (3.1) จะได้

$$\begin{aligned} \dot{M}_s &= 415 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0.015 \text{ m} \times 1 \times 0.03375 \text{ m} \times 0.16493 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times \frac{\sin 37.40}{\sin(37.40 + 14.05)} \\ &= 0.02691 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 60 \frac{\text{s}}{\text{min}} \\ &= 1.6145 \frac{\text{kg}}{\text{min}} \\ \therefore \text{อัตราขนถ่ายเชิงมวล, } \dot{M}_s &= 1.615 \frac{\text{kg}}{\text{min}} \end{aligned}$$

ปริมาตรระหว่างร่องเกลียวของสกรูช่วงลำเฉียงจาก

$$\begin{aligned} V &= \frac{\pi}{4} \times (D_b^2 - D_s^2) \times \cos \phi_m \times W_m \\ &= \frac{\pi}{4} \times (0.063^2 - 0.033^2) \times \cos 14.05 \times 0.03333 \\ &= 7.314 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \end{aligned}$$

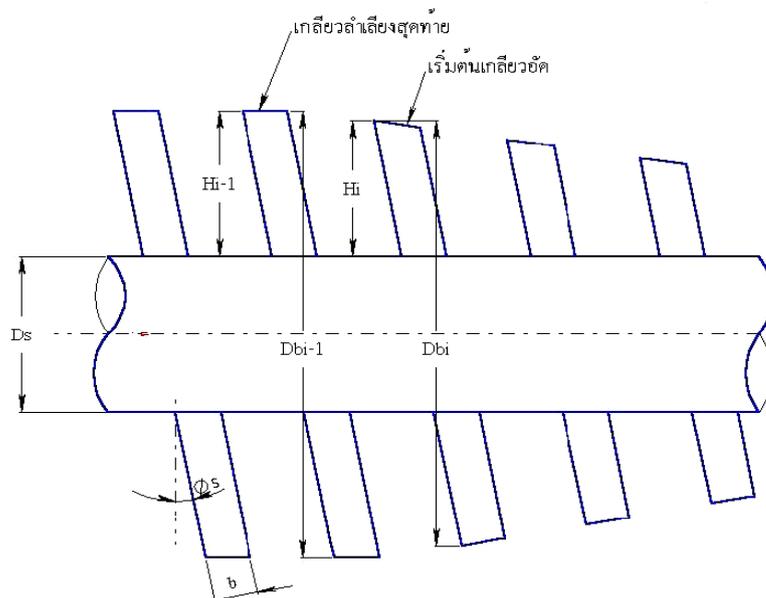
ดังนั้นปริมาตรระหว่างร่องเกลียวของสกรูในช่วงลำเฉียงจะเท่ากับ  $7.314 \times 10^{-5} \text{ m}^3$  ปริมาณของชีวมวลในร่องเกลียวลำเฉียงจะหาได้จากความสัมพันธ์ของความหนาแน่น และปริมาตรของร่องเกลียวสกรูในแต่ละช่วง โดยทำการกำหนดให้ความหนาแน่นของชีวมวลในช่วงลำเฉียงนั้นมีค่าคงที่ เพราะจะพิจารณาว่าไม่เกิดการอัดตัวของชีวมวลอย่างสิ้นเชิง ดังนั้นปริมาณของชีวมวลในร่องเกลียวแต่ละร่องจะมีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} m &= \rho \times V \\ &= 415 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 7.314 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \\ &= 0.03035 \text{ kg} \end{aligned}$$

ปริมาณของชีวมวลในร่องเกลียวที่หาได้นั้นจะพิจารณาให้มีค่าคงที่ตลอดทุกๆ ร่องเกลียวของสกรู ตั้งแต่ช่วงลำเลียงจนกระทั่งช่วงอัด เพื่อจะใช้ทำการหาค่าความหนาแน่นของเบคอนุภาคของชีวมวล เมื่อถูกอัดเป็นแท่งเชื้อเพลิงในร่องเกลียวต่อไป

### 3.7.2.2 การคำนวณช่วงอัด

ในการคำนวณสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิงในช่วงการอัด จะมีขั้นตอนการคำนวณคล้ายกับการคำนวณในช่วงลำเลียง โดยสมการในการคำนวณจะใช้เหมือนกัน แต่จะแตกต่างกับสมการที่ 3.6 ซึ่งจะมีผลทำให้สมการที่ 3.11 นั้นมีค่าของเทอม  $M_3$  เพิ่มขึ้นมาเนื่องจากในช่วงการอัดนั้นจะเกิดความดันที่แตกต่างกันของเบคอนุภาคของชีวมวลระหว่างทางเข้าร่องเกลียวและทางออกของร่องเกลียว ( $P_2/P_1$ ) แต่ละร่องฟันที่เกิดการอัดอนุภาคของชีวมวลให้เป็นแท่งเชื้อเพลิง ความหนาแน่นของเบคอนุภาคของชีวมวลจะเพิ่มขึ้นต่อไปเรื่อยๆ ร่องเกลียวต่อเนื่องกัน โดยที่การลดลงของขนาดความสูงของฟันเกลียวจะลดลงฟันละ 2.5 mm ดังรูปที่ 3.12 และเหตุผลดังกล่าวนี้ทำให้การหาปริมาตรของร่องเกลียวต้องใช้ความสูงของฟันเกลียวเฉลี่ย ( $\bar{D}_{bi}$ ) ระหว่างฟันเกลียวในตำแหน่งที่กำลังพิจารณา ( $D_{bi}$ ) และฟันเกลียวในตำแหน่งที่ได้พิจารณามาก่อนแล้ว ( $D_{bi-1}$ ) ดังรูปที่ 3.10 ซึ่งจะทำการกำหนดตัวแปรเริ่มต้นที่ใช้ในการคำนวณดังนี้



รูปที่ 3.10 ลักษณะการลดความสูงของฟันเกลียวในช่วงการอัด

ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณสกรูช่วงอัดในพื้นเกลียวแรกจากรูปที่ 3.10

$D_s$	=	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางสกรู = 33 mm = 0.033 m
$D_{bi-1}$	=	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลาง barrel ตำแหน่งที่พิจารณาก่อนหน้า = 63 mm = 0.063 m
$H_i$	=	ความลึกของร่องเกลียวตำแหน่งที่กำลังพิจารณา = 14 mm = 0.014 m
$H_{i-1}$	=	ความลึกของร่องเกลียวตำแหน่งที่พิจารณามาก่อนแล้ว = 15 mm = 0.015 m
$\phi_s$	=	มุมเอียงของพื้นสกรูที่ตำแหน่งโคน = 20°
$f_b$	=	สัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างอนุภาค กับ ผิวของ barrel = 0.6
$f_s$	=	สัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างอนุภาค กับ ผิวของสกรู = 0.3
$P_1$	=	ความดันของเบคอนุภาคชีวมวลตามความยาวร่องเกลียวทางเข้า = 1.01325 bar
$P_2$	=	ความดันของเบคอนุภาคชีวมวลตามความยาวร่องเกลียวทางออก
$p$	=	จำนวนปากของเกลียวสกรู = 1 ปาก
$N$	=	ความเร็วรอบของสกรู = 50 rpm
$\rho_i$	=	ความหนาแน่นของชีวมวลเริ่มต้น = 415 kg/ m <sup>3</sup>
$b$	=	ความหนาของพื้นสกรูที่วัดขนานกับแกนสกรู = 3.38 mm = 0.00338 m
$m$	=	ปริมาณชีวมวลที่อยู่ภายในร่องเกลียวใดๆ = 0.03035 kg

จากสมการ (3.1) หาค่าอัตราการขนถ่ายเชิงมวลดังนี้

$$\dot{M}_s = \rho \times H \times p \times W_b \times V_b \times \frac{\sin \theta}{\sin(\theta + \phi_m)}$$

มุมขนถ่ายเบคอนุภาค ( $\theta$ ) สามารถหาได้จากสมการ (3.2)

$$\theta = \arcsin \left[ \frac{(1 + K^2 - M_{Total}^2)^{1/2} - (K \times M_{Total})}{1 + K^2} \right]$$

หาค่า  $K$  ได้จากสมการ (3.12)

$$K = \frac{D_{mi} (\sin \phi_{mi} + f_s \cos \phi_{mi})}{D_{bi} (\cos \phi_{mi} - f_s \sin \phi_{mi})} \quad 3.12$$

หาค่ามุมเก็ยวเจ็ย (  $\phi_{mi}$  ) จากสมการ (3.13)

$$\phi_{mi} = \arctan\left(\frac{S_i}{\pi + D_{mi}}\right) \quad 3.13$$

เสถียรภาพศูนย์กลางเฉลี่ยของพืนสกรู ( $D_{mi}$ )

$$\begin{aligned} D_{mi} &= D_s + H_i \\ &= 0.033 + 0.014 \\ &= 0.047 \text{ m} \end{aligned}$$

เสถียรภาพศูนย์กลางของ barrel ในตำแหน่งที่พิจารณา ( $D_{bi}$ )

$$\begin{aligned} D_{bi} &= D_s + 2H_i \\ &= 0.033 + 2(0.014) \\ &= 0.061 \end{aligned}$$

หาค่ามุมเอียงของพืนสกรูที่ตำแหน่งโคน ( $\phi_s$ ) จาก

$$\begin{aligned} \phi_s &= \arctan\left(\frac{S_i}{\pi + D_s}\right) \\ S_i &= \pi \times (D_s \tan \phi_s) \\ &= \pi \times (0.033 \tan 20) \\ &= 0.03773 \text{ m} \end{aligned}$$

แทนค่า  $S_i$  และ  $D_{mi}$  ลงในสมการ (3.12) จะได้

$$\begin{aligned} \phi_{mi} &= \arctan\left(\frac{0.03773}{\pi + 0.047}\right) \\ &= 14.335 \end{aligned}$$

$\therefore$  มุมเอียงพืนเฉลี่ยของสกรูเจ็ย,  $\phi_{mi} = 14.34^\circ$

แทนค่า  $D_{mi}$ ,  $\phi_{mi}$ ,  $f_s$  และ  $D_{bi}$  ลงในสมการ (3.12) จะได้

$$K = \frac{0.047(\sin 14.34 + 0.3 \cos 14.34)}{0.061(\cos 14.34 - 0.3 \sin 14.34)} = 0.4636$$

หาค่า  $M_1$  จากสมการ (3.14)

$$M_1 = \frac{2 \times H_i \times f_s}{W_{bi} \times f_b} \times \sin \phi_{bi} \times \left( K + \frac{D_{mi}}{D_{bi}} \times \cot \phi_{mi} \right) \quad 3.14$$

หาค่าความกว้างระหว่งฟลักซ์เกลียวสกรูในแนวเอียง ( $W_{bi}$ ) จากสมการ (3.15)

$$W_{bi} = B \cos \phi_{bi} \quad 3.15$$

หาค่าความกว้างของร่องเกลียวสกรูตามแนวแกนสกรู ( $B$ ) จาก

$$\begin{aligned} S &= (B + b) \times p \\ p &= 1 \\ B &= S - b \\ &= 0.03773 - 0.00338 \\ &= 0.03435 \end{aligned}$$

หาค่ามุมเอียงของฟลักซ์สกรูที่ยอดฟลักซ์สกรู ( $\phi_{bi}$ ) จาก

$$\begin{aligned} \phi_{bi} &= \arctan \left( \frac{S}{\pi \times D_{bi}} \right) \\ \phi_{bi} &= \arctan \left( \frac{0.3773}{\pi \times 0.061} \right) = 11.139^\circ \end{aligned}$$

แทนค่า  $B$  และ  $\phi_{bi}$  ลงในสมการ (3.15)

$$\begin{aligned} W_{bi} &= 0.03435 \cos 11.139 \\ &= 0.03353 \text{ m} \end{aligned}$$

$\therefore$  ความกว้างระหว่งฟลักซ์เกลียวสกรูในแนวเอียง,  $W_{bi} = 0.03371 \text{ m}$

แทนค่าต่างๆ ลงในสมการ (3.14) เพื่อหา  $M_1$  จะได้

$$\begin{aligned} M_1 &= \frac{2 \times 0.014 \times 0.3}{0.03371 \times 0.6} \times \sin 11.139 \times \left( 0.4636 + \frac{0.047}{0.061} \times \cot 14.335 \right) \\ &= 0.2791 \end{aligned}$$

หาค่า  $M_2$  จากสมการ (3.16)

$$M_2 = \frac{W_{si} \times f_s}{W_{bi} \times f_b} \times \sin \phi_{bi} \times \left( K + \frac{D_{si}}{D_{bi}} \times \cot \phi_{si} \right) \quad 3.16$$

หาค่าความกว้างระหว่งฟันเกลียวสกรูในแนวเอียงที่ตำแหน่งโคนสกรู ( $W_{si}$ ) จากสมการ (3.17)

$$\begin{aligned} W_{si} &= B \cos \phi_{si} & 3.17 \\ &= 0.03435 \cos 20 \\ &= 0.03228 \end{aligned}$$

แทนค่าลงในสมการ (3.16)

$$\begin{aligned} M_2 &= \frac{0.03228 \times 0.3}{0.03371 \times 0.6} \times \sin 11.139 \times \left( 0.4636 + \frac{0.047}{0.061} \times \cot 20 \right) \\ &= 0.1804 \end{aligned}$$

หาค่า  $M_3$  จากสมการ(3.18)

$$M_3 = \frac{W_{mi} \times H_i}{W_{bi} \times Z_{bi} \times f_b} \times \sin \phi_{mi} \times \left( K + \frac{D_{mi}}{D_{bi}} \times \cot \phi_{mi} \right) \times \ln \left( \frac{P_2}{P_1} \right) \quad 3.18$$

หาค่าความกว้างระหว่งฟันเกลียวสกรูเฉลี่ยในแนวเอียง ( $W_m$ ) จากสมการ (3.19)

$$\begin{aligned} W_{mi} &= B \cos \phi_{mi} & 3.19 \\ &= 0.03435 \cos 14.335 \\ &= 0.03328 \end{aligned}$$

หาค่าความกว้างของ Barrel ( $Z_b$ )

$$\begin{aligned} Z_b &= \frac{\pi \times D_{bi}}{\cos \phi_b} \\ &= \frac{\pi \times 0.061}{\cos 11.139} = 0.1953 \text{ m} \end{aligned}$$

จากสมการ (3.18) จะได้

$$M_3 = \frac{0.03328 \times 0.014}{0.03371 \times 0.1953 \times 0.6} \times \sin 14.335 \times \left( 0.4636 + \frac{0.047}{0.061} \times \cot 14.335 \right) \times \ln \left( \frac{P_2}{P_1} \right)$$

จากสมการที่ 3.18 จะมีเทอมของอัตราส่วนของความดันของเบคอนุภาคซึ่งมวลตามความยาวของร่องเกลียวสกรู ( $P_2/P_1$ ) ซึ่ง  $P_1$  เป็นความดันที่ทางเข็รร่องเกลียวอัดเกลียวแรกหรือความดันที่ออกจากร่องเกลียวลำเลียงเกลียวสุดท้าย ส่วน  $P_2$  หาได้จากความสัมพันธ์ของ Husain และคณะ [7]

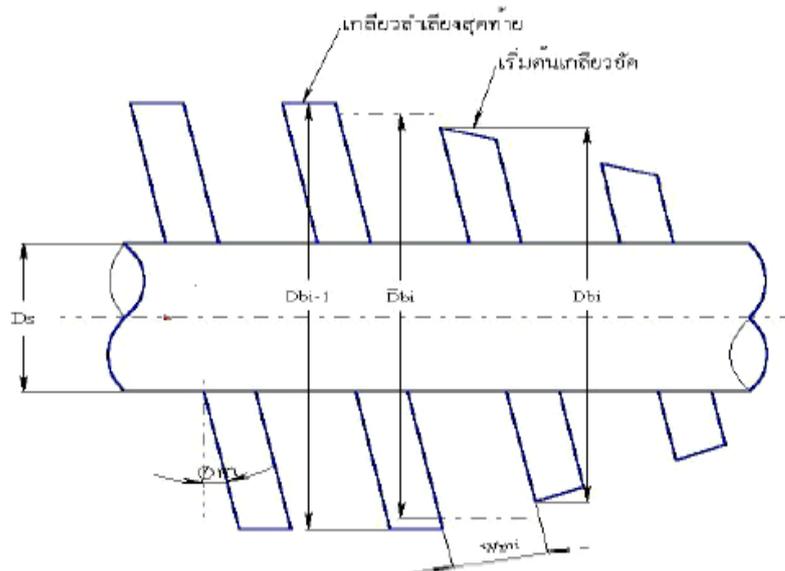
$$P_2 = ae^{bD} \quad 3.20$$

โดยที่  $P_2$  เป็นความดันของเบคอนุภาคที่ออกจากร่องเกลียวอัด (MPa)

$$a = 0.05818$$

$$b = 0.0041$$

$D$  เป็นความหนาแน่นของเบคซึ่งมวลที่ออกจากร่องเกลียวอัดใดๆ ( $\text{kg/m}^3$ )



รูปที่ 3.11 ลักษณะปริมาตรในร่องเกลียวอัด

ความหนาแน่น  $\rho$  ของเบดชีวมวลที่ถูกอัดออกจากโรงเกลียวอัดใดๆ สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของปริมาณชีวมวลในโรงเกลียวและปริมาตรของโรงเกลียวเดียวกัน และจากที่กล่าวไปแล้วข้างต้นว่าปริมาณชีวมวลที่หาได้จากโรงเกลียวลำเลียงเกลียวแรกนั้นมีค่าคงที่ ดังนั้นความหนาแน่น  $\rho$  ของเบด อนุภาคของชีวมวลในโรงเกลียวอัดใดๆ จะมีค่าเท่ากับมวลในโรงเกลียวลำเลียงเกลียวแรกต่อปริมาตรในโรงเกลียวอัดใดๆ ซึ่งปริมาตรของโรงเกลียวอัดใดๆ หาได้จากสมการที่ 3.21

$$V_i = \frac{\pi}{4} (\bar{D}_{bi}^2 - D_s^2) \times \cos \phi_{mi} \times W_{mi} \quad 3.21$$

โดยที่

$$\bar{D}_{bi} = \frac{D_{bi-1} + D_{bi}}{2}$$

$$\bar{D}_{bi} = \frac{0.063 + 0.061}{2} = 0.062 \text{ m}$$

แทนค่าลงในสมการ (3.20)

$$V_i = \frac{\pi}{4} (0.062^2 - 0.033^2) \times \cos 14.335 \times 0.03328$$

$$= 6.98 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

ดังนั้น ความหนาแน่น  $\rho$  ของเบดอนุภาคที่ออกจากโรงเกลียวอัดมีค่า

$$\rho_i = \frac{m}{V_i} = \frac{0.0305}{6.98 \times 10^{-5}} = 437.42 \text{ kg/m}^3$$

แทนค่าความหนาแน่น  $\rho$  ของเบดอนุภาคลงในสมการที่ 3.20 ซึ่งจะได้อัตราความดัน  $P_2$

$$P_2 = 0.05818 \times e^{0.0041 \times 437.42}$$

$$= 3.5 \text{ bar}$$

แทนค่า  $P_2$  ลงในสมการที่ (3.18) จะได้

$$M_3 = \frac{0.03328 \times 0.014}{0.03371 \times 0.1953 \times 0.6} \times \sin 14.335 \times \left( 0.4636 + \frac{0.047}{0.061} \times \cot 14.335 \right) \times \ln \left( \frac{3.5}{1.01325} \right)$$

$$M_3 = 0.126$$

หาค่า  $M_{Total}$  ได้จาก

$$\begin{aligned}
 M_{Total} &= M_1 + M_2 + M_3 \\
 &= 0.2791 + 0.1804 + 0.1258 \\
 &= 0.585
 \end{aligned}$$

แทนค่า  $K$  และ  $M_{Total}$  ลงในสมการ (3.2)

$$\theta = \arcsin \left[ \frac{(1 + 0.4636^2 - 0.585^2)^{1/2} - (0.4636 \times 0.585)}{1 + 0.4636^2} \right]$$

$$\theta = 33.0495^\circ$$

$$\text{มุมขนถ่ายเบดอนุภาค, } \theta = 33.05^\circ$$

ทำการหาค่า  $V_b$  ได้จาก

$$\begin{aligned}
 V_b &= \pi \times D_{bi} \times N \\
 &= \pi \times (0.061 \text{ m}) \left( 50 \text{ rpm} \times \frac{1}{60} \frac{\text{min}}{\text{s}} \right) \\
 &= 0.1597 \frac{\text{m}}{\text{s}}
 \end{aligned}$$

แทนค่า  $V_b$  ลงในสมการ (3.1) จะได้

$$\begin{aligned}
 \dot{M}_s &= 437.42 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0.014 \text{ m} \times 1 \times 0.3371 \text{ m} \times 0.1597 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times \frac{\sin 33.05}{\sin(33.05 + 14.335)} \\
 &= 0.02318 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 60 \frac{\text{s}}{\text{min}} \\
 &= 1.3906 \frac{\text{kg}}{\text{min}}
 \end{aligned}$$

$$\therefore \text{อัตราการขนถ่ายเชิงมวลหรืออัตราการผลิต, } \dot{M}_s = 1.391 \frac{\text{kg}}{\text{min}}$$

จากการคำนวณสกรูในขั้ววงอัดข้างบน เมื่อทำการคำนวณต่อไปจนกระทั่งได้ความหนาแน่นสูงสุดที่ฟลักซ์-เกลียวสุดปลายแล้ว สามารถสรุปผลการคำนวณผลการในร่องเกลียวฟลักซ์แรกจนถึงร่องเกลียวอัด ฟลักซ์สุดปลายได้ดังตารางที่ 3.20 ซึ่งลักษณะและขนาดของสกรูอัดที่ได้ออกแบบไว้สำหรับในงานวิจัยนี้สามารถดูได้จากภาคผนวก ค

ตารางที่ 3.20 ผลสรุปของการคำนวณสกรูในขั้ววงการอัด

ความลึกของร่องเกลียว (m)	ความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )	ความดัน (bar)	อัตราการผลิต (kg/min)
เกลียวล้าเลียง (0.015)	415.000	1.01325	1.615
เกลียวอัด (0.014)	445.763	4.942	1.391
เกลียวอัด (0.011)	524.770	6.6024	1.107
เกลียวอัด (0.008)	631.060	7.7347	0.847

กำลังงานที่ใช้ในการขับสกรูอัดแท่งเชื่อมเพลิงหาได้จากผลรวมกำลังงานที่ใช้ในการบิดสกรูในแต่ละร่องเกลียวจากเกลียวอัดเกลียวแรกจนถึงเกลียวอัดสุดท้าย โดยจะเริ่มจากร่องเกลียวอัดแรกจะหา ค ได้ดังนี้

แรงที่กระทำที่ barrel ในร่องเกลียวแรกหาได้จาก

$$\begin{aligned}
 F_b &= P \times W_b \times f_b \times Z_b \\
 F_{b1} &= 4.942 \times 100 \times 0.03371 \times 0.6 \times 0.1953 \\
 &= 1.952 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

ความเร็วของ barrel ที่ตำแหน่งร่องเกลียวแรกมีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned}
 V_b &= \pi \times D_b \times N \\
 V_{b1} &= \frac{\pi \times 0.061 \times 50}{60} \\
 &= 0.1597 \text{ m/s}
 \end{aligned}$$

กำลังงานที่ใช้ในการหมุนร่องเกลียวแรกมีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned}
 P_w &= F_b \times V_b \\
 P_{w1} &= 1.952 \times 0.1597
 \end{aligned}$$

$$= 0.03117 \text{ kW}$$

ในการหาค่าพลังงานที่ไซ้ในการอัดแท่งเชื้อเพลิงในร่องเกลียวอื่นๆ จะหาได้จากวิธีการเดียวกันนี้ซึ่งจะสรุปผลการคำนวณได้ดังตารางที่ 3.21

ตารางที่ 3.21 ผลการคำนวณกำลังงานที่ไซ้ในการขับสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิง

ร่องเกลียวอัดที่	H (m)	F <sub>b</sub> (kN)	V <sub>b</sub> (m/s)	P <sub>w</sub> (kW)
1	0.014	1.331	0.14397	0.3117
2	0.011	7.4718	0.1262	0.9429
3	0.008	12.5327	0.1145	1.4350
รวม				2.6896

จากตารางที่ 3.21 พบว่ากำลังงานที่ไซ้ในการขับสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิงรวมมีค่าเท่ากับ 2.554 kW ซึ่งเมื่อ

นำมาหาขนาดของมอเตอร์จะมีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} P_{input} &= \frac{2.6896}{0.85 \times 0.95} \\ &= 3.3308 \text{ kW} \end{aligned}$$

ขนาดของมอเตอร์ที่จะใช้ขับสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิงซึ่งคิดเป็นแรงมิกะมีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} P_{input} &= \frac{3.3308 \times 1000}{746} \\ &= 4.465 \text{ hp} \end{aligned}$$

ดังนั้นขนาดมอเตอร์ที่ติดตั้งไซ้ในการขับสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิงต้องมีขนาด 5 แรงม้า

### 3.7.3 การคำนวณสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิงที่ใช้ในงานวิจัย

ในการทดสอบเครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิงนั้นจะเลือกทดสอบเฉพาะสัดส่วนการผสมที่ทำให้ได้แท่งเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนสูงสุดจากการทดลองในหัวข้อ 3.3 และนำแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตได้นั้นไปทดสอบสมบัติทางกายภาพ อันได้แก่ ค่าความร้อน ค่าความหนาแน่น และค่าความต้านทานแรงกด

เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากเครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิงที่ใช้ทดลองในหัวข้อ 3.3 นอกจากนี้สกรูอัดแท่งเชื้อเพลิงที่ออกแบบจากหัวข้อที่ 3.7.2 ไซคลิกของสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของผิวสกรูและผิวของ Barrel ที่ไม่เฉพาะเจาะจงสำหรับชีวมวล ผลของการที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะของชีวมวลแต่ละชนิดและแต่ละส่วนผสมอาจทำให้ผลที่ได้จากการทดลองจริงคลาดเคลื่อนจากการคำนวณ ดังนั้นจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องหาประสิทธิภาพของสกรูอัดที่ไซคลิกในการอัดแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลตามสมการที่ 3.22

$$\text{สมรรถนะของสกรูอัด} = \frac{\text{อัตราการไหลเชิงมวลจริง}}{\text{อัตราการไหลเชิงมวลทฤษฎี}} \times 100\% \quad 3.22$$

### 3.8 การศึกษารูปร่างของแท่งเชื้อเพลิงที่เหมาะสมกับการใช้ในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง

การศึกษาสมบัติของแก๊สชีวมวล มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความสามารถในการผลิตพลังงานด้วยกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดต่างๆ ซึ่งปกติแก๊สชีวมวลที่ผลิตได้จะมีองค์ประกอบ (Gas composition) คือ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ ไนโตรเจน ออกซิเจน ไฮโดรเจน และมีเทน ในสัดส่วนที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้ นอกจากนี้แก๊สชีวมวลที่ผลิตได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน จะมีส่วนประกอบของทาร์ (Tar) ซึ่งเป็นไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลหนัก และฝุ่นละออง (Dust) เป็นสิ่งปนเปื้อน (Gas Impurities) ออกมาด้วยซึ่งปริมาณการเกิดจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับลักษณะการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงว่าเป็นการไหม้ที่สมบูรณ์มากน้อยเพียงใด ทาร์สามารถควบแน่นได้เมื่ออุณหภูมิลดลง และกลายเป็นของเหลวที่มีความหนืดสูง และมีฤทธิ์กัดกร่อน ทั้งทาร์และฝุ่นละอองเป็นอันตรายและเป็นปัญหาหลักในการนำแก๊สชีวมวลไปใช้ผลิตไฟฟ้า สำหรับการวิเคราะห์เพื่อหาองค์ประกอบของแก๊สชีวมวลสามารถทำได้โดยใช้เครื่อง Gas Chromatograph สำหรับการประเมินประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวมวลสามารถคำนวณได้โดยใช้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\text{Gasification Efficiency } (\eta_g) = \frac{[V_g \times \text{HHV}_g]}{[M_{\text{bio}} \times \text{HHV}_{\text{bio}}]} \quad 3.23$$

- $V_g$  = ปริมาตรแก๊สที่ผลิตได้
- $\text{HHV}_g$  = ค่าความร้อนของแก๊สที่ผลิตได้
- $M_{\text{bio}}$  = มวลของชีวมวลที่ใช้ (Fuel consumption, kg/h)
- $\text{HHV}_{\text{bio}}$  = ค่าความร้อนของชีวมวลที่ใช้

ในการทำวิจัยนี้จะทำการศึกษารูปรางลักษณะของแท่งเชื้อเพลิงที่มีการใช้ในงานวิจัยด้านการผลิตแก๊สชีวมวลเพื่อผลิตไฟฟ้าโดยใช้กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน แล้วเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวมวลสำหรับแท่งเชื้อเพลิงแต่ละชนิดที่มีรูปร่างลักษณะแตกต่างกันไป