

## รายงานผลการทดลองการหาค่าความร้อนของเปลือกข้าว

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมที่มีการปลูกข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจหลัก ผลพลอยได้จากการสีข้าวเปลือกคือ "แกลบ" (Rice Husk) ซึ่งคิดเป็นสัดส่วนประมาณ 20-22% ของน้ำหนักข้าวเปลือก ในอดีตแกลบอาจถูกมองว่าเป็นของเหลือทิ้ง แต่ในปัจจุบัน แกลบถือเป็นเชื้อเพลิงชีวมวล (Biomass) ที่สำคัญมากในการผลิตกระแสไฟฟ้าและความร้อนในภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากมีราคาถูกและหาได้ง่ายในท้องถิ่น

### คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี (Physical and Chemical Properties)

เพื่อให้เข้าใจถึงค่าความร้อน จำเป็นต้องทราบองค์ประกอบพื้นฐานของแกลบ ดังนี้

ความชื้น (Moisture Content) โดยปกติแกลบที่ออกจากโรงสีจะมีความชื้นประมาณ 9-12% ซึ่งถือว่าต่ำเมื่อเทียบกับชีวมวลชนิดอื่น ทำให้จุดติดไฟได้ง่าย

ความหนาแน่น (Density) แกลบมีความหนาแน่นรวม (Bulk Density) ต่ำ ประมาณ 90-150 kg/m<sup>3</sup> ทำให้เปลืองพื้นที่ในการจัดเก็บและขนส่ง

ปริมาณเถ้า (Ash Content) แกลบมีปริมาณเถ้าสูงมากถึง 15-20% โดยองค์ประกอบหลักของเถ้าคือ ซิลิกา ซึ่งต่างจากไม้ทั่วไปที่มีเถ้าน้อยกว่า

### ค่าความร้อนของแกลบ (Calorific Value)

ค่าความร้อนคือตัวชี้วัดความสามารถในการให้พลังงานงาน โดยแบ่งออกเป็น 2 ประเภท

ค่าความร้อนสูง (High Heating Value - HHV) คือค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ โดยรวมความร้อนแฝงของการกลายเปลี่ยนไอน้ำไว้ด้วย ค่าเฉลี่ยประมาณ 3,300 - 3,600 kcal/kg (หรือประมาณ 13.8 - 15.1 MJ/kg) ในสถานะแห้ง (Dry Basis)

ค่าความร้อนต่ำ (Low Heating Value - LHV) คือค่าความร้อนที่หักลบความร้อนแฝงของไอน้ำออกไป (ซึ่งเป็นค่าที่สะท้อนการใช้งานจริงในเตาเผามากกว่า) ค่าเฉลี่ยประมาณ 3,000 - 3,200 kcal/kg (ณ ความชื้นมาตรฐานโรงสี)

### ค่าความร้อนของเปลือกข้าว (แกลบ) ที่นิยมใช้เป็นค่ามาตรฐานอ้างอิงในประเทศไทย

ค่ามาตรฐานที่ใช้กันทั่วไป (Standard Reference) ค่ากลางที่นิยมนำมาใช้ในการคำนวณทางพลังงานและเศรษฐศาสตร์สำหรับแกลบในไทยคือ

ค่าความร้อนต่ำ (LHV): ประมาณ 3,300 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม (kcal/kg) ที่ความชื้นประมาณ 10-12%

## การเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงชนิดอื่น (Comparison)

ตารางเปรียบเทียบค่าความร้อนโดยประมาณของแกลบกับเชื้อเพลิงอื่น ๆ

ชนิดเชื้อเพลิง (Fuel Type)	ค่าความร้อนโดยประมาณ (kcal/kg)	หมายเหตุ
แกลบ (Rice Husk)	3,300 - 3,600	ชี้เป้าสูงมาก
ไม้ฟืน / ไม้สับ	2,500 - 3,800	ขึ้นอยู่กับความชื้นอย่างมาก
ถ่านหิน (Lignite)	2,500 - 4,000	ค่ากำมะถันสูง
ถ่านหิน (Bituminous)	6,000 - 7,000	ให้พลังงานสูง
น้ำมันเตา	9,800 - 10,000	ราคาสูง

แกลบเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีศักยภาพสูงมากสำหรับประเทศไทย ด้วยค่าความร้อนเฉลี่ยที่ **3,300 - 3,600 kcal/kg** ซึ่งเพียงพอสำหรับการใช้ในโรงไฟฟ้าชีวมวล (Biomass Power Plant) และหม้อไอน้ำอุตสาหกรรม (Boiler) แม้จะมีข้อจำกัดเรื่องปริมาณเชื้อสูง แต่หากมีการบริหารจัดการระบบเผาไหม้ที่ดี แกลบจะช่วยลดต้นทุนพลังงานและลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิลได้อย่างยั่งยืน

ตารางบันทึกผลการทดลองครั้งที่ 1

	วินาทีที่	เวลา (นาที : วินาที)	อุณหภูมิ (°C)		วินาทีที่	เวลา (นาที : วินาที)	อุณหภูมิ (°C)		วินาทีที่	เวลา (นาที : วินาที)	อุณหภูมิ (°C)
จุด a <sub>0</sub>	0	00:00	26.2		210	08:30	27.5		495	13:15	27.5
	60	01:00	26.2		225	08:45	27.5		510	13:30	27.5
	120	02:00	26.3		240	09:00	27.5		525	13:45	27.5
	180	03:00	26.3		255	09:15	27.5	จุด d	540	14:00	27.5
	240	04:00	26.3		270	09:30	27.5		555	14:15	
จุด a	300	05:00	26.3		285	09:45	27.5		570	14:30	
	15	05:15	26.3		300	10:00	27.5		585	14:45	
	30	05:30	26.3		315	10:15	27.5		600	15:00	
	45	05:45	26.5		330	10:30	27.5		615	15:15	
	60	06:00	26.7		345	10:45	27.5		630	15:30	
จุด b	75	06:15	26.8		360	11:00	27.5		645	15:45	
	90	06:30	26.9		375	11:15	27.5		660	16:00	
	105	06:45	27.1		390	11:30	27.5		675	16:15	
	120	07:00	27.2		405	11:45	27.5		690	16:30	
	135	07:15	27.3		420	12:00	27.5		705	16:45	
จุด c	150	07:30	27.3		435	12:15	27.5		720	17:00	
	165	07:45	27.3		450	12:30	27.5		735	17:15	
	180	08:00	27.4		465	12:45	27.5		750	17:30	
	195	08:15	27.4		480	13:00	27.5		765	17:45	

ชนิดของเชื้อเพลิงที่ทำการทดลองคือ เปลือกข้าว

ความยาวของหลอดความร้อนที่เผาไหม้ เท่ากับ .....6.5..... cm

อุณหภูมิห้องขณะทำการทดลอง.....25..... °C

อุณหภูมิน้ำในแคลอรีมิเตอร์ก่อนการทดลอง.....26.2..... °C

น้ำหนักของเชื้อเพลิง.....1.0..... g

จากตารางข้อมูลการทดลอง จะได้ค่าต่างๆดังนี้

$$t_{a0} = 26.2 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad t_a = 26.3 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad t_c = 27.4 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad t_d = 27.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

a = เวลาที่เริ่มเผาไหม้ = 0 s

c = เวลาที่อุณหภูมิเริ่มคงที่หลังการเผาไหม้ = 180 s

b = เวลาที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น 60% ซึ่งมีวิธีการหาค่าดังนี้

1. หาค่าอุณหภูมิที่สูงขึ้น 60% จากสูตรดังนี้

$$\begin{aligned} t_C &= [(t_c - t_a) \times 0.6] + t_a \\ &= [(27.4 - 26.3) \times 0.6] + 26.3 \\ &= 26.96 \text{ }^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

2. หาเวลาที่มีอุณหภูมิประมาณ 26.96 °C จากข้อมูลการทดลอง ซึ่งพบว่าเวลาที่มี อุณหภูมิใกล้เคียงกับ 26.9 คือวินาทีที่ 90 ดังนั้น b = 90

$$\begin{aligned} r_1 &= (\text{อุณหภูมิสุดท้ายก่อนเผาไหม้} - \text{อุณหภูมิที่เริ่มกวนน้ำ}) \\ &= t_a - t_{a0} = 26.30 - 26.20 \\ &= 0.1 \text{ }^{\circ}\text{C}/5 \text{ min} \\ &= 0.02 \text{ }^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} r_2 &= \text{อุณหภูมิสุดท้ายก่อนหยุดกวนน้ำ} - \text{อุณหภูมิที่เริ่มคงที่} \\ &= t_d - t_c = 27.5 - 27.4 \\ &= 0.01 \text{ }^{\circ}\text{C}/5 \text{ min} \\ &= 0.02 \text{ }^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

c3 = ความยาวของฟิวส์ที่ถูกเผาไหม้ = 6.5 cm

W = พลังงานสมมูลของ Bomb Calorimeter = 2,426 cal/°C

m = มวลของเชื้อเพลิง = 1.0 g

$e_3$  = ค่าความร้อนของฟิวส์ ซึ่งหาได้จากสมการดังนี้

$$e_3 = 2.3 \times 6.5$$

$$e_3 = 14.95 \text{ cal}$$

จากข้อมูลที่ได้สามารถนำมาคำนวณหาค่าความร้อนเชื้อเพลิงได้ดังนี้ คำนวณหา  $t$  จะได้ดังนี้

$$t = t_c - t_a - [r_1(b-a)] - [r_2(c-b)]$$

$$= 27.4 - 26.3 - [0.02(90-0)] - [0.02(180-90)]$$

$$= 1.1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

คำนวณหาค่าความร้อนสูงสุดของเชื้อเพลิง จะได้ดังนี้

จาก

$$H_g = \frac{t \cdot w - e_3}{m}$$
$$H_g = \frac{(1.1) \cdot (2426 - 14.95)}{1.0}$$
$$H_g = 2652.155 \text{ Btu/lb}$$

ปริมาณความชื้น(ร้อยละ)

$$M = 100 \times \left( \frac{w_1 - w_2}{w_2 - w_0} \right)$$
$$M = 100 \times \left( \frac{1 - 0.87}{0.87 - 0} \right)$$
$$M = 14.94$$

ปริมาณเถ้า

$$\text{ปริมาณเถ้า}(\%) = \left( \frac{\text{น้ำหนักเถ้าหลังเผา}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น}} \right) \times 100$$

$$\text{ปริมาณเถ้า}(\%) = 15$$

ความหนาแน่นของเชื้อเพลิง

$$\rho = \frac{m}{v}$$
$$\rho = \frac{1}{6.77}$$
$$\rho = 0.15 \text{ g/cm}^3$$

ตารางบันทึกผลการทดลองครั้งที่ 2

จุด a <sub>0</sub>	วินาทีที่	เวลา (นาที : วินาที)	อุณหภูมิ (°C)	จุด c	วินาทีที่	เวลา (นาที : วินาที)	อุณหภูมิ (°C)	จุด d	วินาทีที่	เวลา (นาที : วินาที)	อุณหภูมิ (°C)
	0	00:00	26.5		210	08:30	27.7		495	13:15	27.8
	60	01:00	26.5		225	08:45	27.7		510	13:30	27.8
	120	02:00	26.5		240	09:00	27.7		525	13:45	27.8
	180	03:00	26.5		255	09:15	27.7		540	14:00	27.8
จุด a	240	04:00	26.5	จุด c	270	09:30	27.8	จุด d	555	14:15	
	300	05:00	26.5		285	09:45	27.8		570	14:30	
	15	05:15	26.6		300	10:00	27.8		585	14:45	
	30	05:30	26.6		315	10:15	27.8		600	15:00	
	45	05:45	26.6		330	10:30	27.8		615	15:15	
จุด b	60	06:00	26.8	จุด c	345	10:45	27.8	จุด d	630	15:30	
	75	06:15	27.1		360	11:00	27.8		645	15:45	
	90	06:30	27.1		375	11:15	27.8		660	16:00	
	105	06:45	27.3		390	11:30	27.8		675	16:15	
	120	07:00	27.4		405	11:45	27.8		690	16:30	
	135	07:15	27.5		420	12:00	27.8		705	16:45	
	150	07:30	27.5		435	12:15	27.8		720	17:00	
	165	07:45	27.6		450	12:30	27.8		735	17:15	
	180	08:00	27.6		465	12:45	27.8		750	17:30	
	195	08:15	27.6		480	13:00	27.8		765	17:45	

ชนิดของเชื้อเพลิงที่ทำการทดลองคือ เปลือกข้าว

ความยาวของหลอดความร้อนที่เผาไหม้ เท่ากับ .....5.7..... cm

อุณหภูมิห้องขณะทำการทดลอง.....25..... °C

อุณหภูมิน้ำในแคลอรีมิเตอร์ก่อนการทดลอง.....26.5..... °C

น้ำหนักของเชื้อเพลิง.....1.0..... g

จากตารางข้อมูลการทดลอง จะได้ค่าต่างๆดังนี้

$$t_{a0} = 26.5 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad ta = 26.5 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad tc = 27.7 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad td = 27.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

a = เวลาที่เริ่มเผาไหม้ = 0 s

c = เวลาที่อุณหภูมิเริ่มคงที่หลังการเผาไหม้ = 255 s

b = เวลาที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น 60% ซึ่งมีวิธีการหาค่าดังนี้

1. หาค่าอุณหภูมิที่สูงขึ้น 60% จากสูตรดังนี้

$$\begin{aligned} tC &= [(tC - ta) \times 0.6] + ta \\ &= [(27.7 - 26.5) \times 0.6] + 26.5 \\ &= 27.22 \text{ }^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

2. หาเวลาที่มีอุณหภูมิประมาณ 27.22 °C จากข้อมูลการทดลอง ซึ่งพบว่าเวลาที่มี อุณหภูมิใกล้เคียงกับ 27.1 คือวินาทีที่ 90 ดังนั้น b = 90

r1 = (อุณหภูมิสุดท้ายก่อนเผาไหม้ – อุณหภูมิที่เริ่มกวนน้ำ)

$$\begin{aligned} &= ta - ta0 \\ &= 26.5 - 26.5 \\ &= 0 \text{ }^{\circ}\text{C}/5 \text{ min} \\ &= 0. \text{ }^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

r2 = อุณหภูมิสุดท้ายก่อนหยุดกวนน้ำ – อุณหภูมิที่เริ่มคงที่

$$\begin{aligned} &= td - tc = 27.8 - 27.7 \\ &= 0.01 \text{ }^{\circ}\text{C}/5 \text{ min} \\ &= 0.02 \text{ }^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

c3 = ความยาวของฟิวส์ที่ถูกเผาไหม้ = 5.7 cm

W = พลังงานสมมูลของ Bomb Calorimeter = 2,426 cal/°C

m = มวลของเชื้อเพลิง = 1.0 g

$e_3$  = ค่าความร้อนของฟิวส์ ซึ่งหาได้จากสมการดังนี้

$$e_3 = 2.3 \times 5.7$$

$$e_3 = 13.11 \text{ cal}$$

จากข้อมูลที่ได้สามารถนำมาคำนวณหาค่าความร้อนเชื้อเพลิงได้ดังนี้ คำนวณหาค่า  $t$  จะได้ดังนี้

$$\begin{aligned} t &= t_c - t_a - [r_1(b-a)] - [r_2(c-b)] \\ &= 27.7 - 26.5 - [0(90-0)] - [0.02(255-90)] \\ &= 3.72^\circ\text{C} \end{aligned}$$

คำนวณหาค่าความร้อนสูงสุดของเชื้อเพลิง จะได้ดังนี้

จาก

$$\begin{aligned} H_g &= \frac{t \cdot w - e_3}{m} \\ H_g &= \frac{(3.72) \cdot (2426) - (13.11)}{1.0} \\ H_g &= 9011.61 \text{ Btu/lb} \end{aligned}$$

ปริมาณความชื้น(ร้อยละ)

$$\begin{aligned} M &= 100 \times \left( \frac{w_1 - w_2}{w_2 - w_0} \right) \\ M &= 100 \times \left( \frac{1 - 0.04}{0.04 - 0} \right) \\ M &= 2400 \end{aligned}$$

ปริมาณเถ้า

$$\text{ปริมาณเถ้า}(\%) = \left( \frac{\text{น้ำหนักเถ้าหลังเผา}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น}} \right) \times 100$$

$$\text{ปริมาณเถ้า}(\%) = 4$$

ความหนาแน่นของเชื้อเพลิง

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{m}{v} \\ \rho &= \frac{1}{6.77} \\ \rho &= 0.15 \text{ g/cm}^3 \end{aligned}$$



ตารางบันทึกผลการทดลองครั้งที่ 3

	วินาทีที่	เวลา (นาที : วินาที)	อุณหภูมิ (°C)		วินาทีที่	เวลา (นาที : วินาที)	อุณหภูมิ (°C)		วินาทีที่	เวลา (นาที : วินาที)	อุณหภูมิ (°C)
จุด a <sub>0</sub>	0	00:00	26.5		210	08:30	27.5		495	13:15	27.5
	60	01:00	26.5		225	08:45	27.5		510	13:30	27.5
	120	02:00	26.5		240	09:00	27.5		525	13:45	27.5
	180	03:00	26.5		255	09:15	27.5	จุด d	540	14:00	27.5
	240	04:00	26.5		270	09:30	27.5		555	14:15	
จุด a	300	05:00	26.5		285	09:45	27.5		570	14:30	
	15	05:15	26.5		300	10:00	27.5		585	14:45	
	30	05:30	26.5		315	10:15	27.5		600	15:00	
	45	05:45	26.6		330	10:30	27.5		615	15:15	
	60	06:00	26.8		345	10:45	27.5		630	15:30	
จุด b	75	06:15	26.9		360	11:00	27.5		645	15:45	
	90	06:30	27		375	11:15	27.5		660	16:00	
	105	06:45	27.1		390	11:30	27.5		675	16:15	
	120	07:00	27.2		405	11:45	27.5		690	16:30	
	135	07:15	27.3		420	12:00	27.5		705	16:45	
จุด c	150	07:30	27.3		435	12:15	27.5		720	17:00	
	165	07:45	27.3		450	12:30	27.5		735	17:15	
	180	08:00	27.4		465	12:45	27.5		750	17:30	
	195	08:15	27.5		480	13:00	27.5		765	17:45	

ชนิดของเชื้อเพลิงที่ทำการทดลองคือ เปลือกข้าว

ความยาวของหลอดความร้อนที่เผาไหม้ เท่ากับ .....5..... cm

อุณหภูมิห้องขณะทำการทดลอง.....25..... °C

อุณหภูมิในแคลอรีมิเตอร์ก่อนการทดลอง.....26.5..... °C

น้ำหนักของเชื้อเพลิง.....1.0..... g

จากตารางข้อมูลการทดลอง จะได้ค่าต่างๆดังนี้

$$t_{a0} = 26.5 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad ta = 26.5 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad tc = 27.5 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad td = 27.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

a = เวลาที่เริ่มเผาไหม้ = 0 s

c = เวลาที่อุณหภูมิเริ่มคงที่หลังการเผาไหม้ = 195 s

b = เวลาที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น 60% ซึ่งมีวิธีการหาค่าดังนี้

1. หาค่าอุณหภูมิที่สูงขึ้น 60% จากสูตรดังนี้

$$\begin{aligned} tC &= [(tC - ta) \times 0.6] + ta \\ &= [(27.5 - 26.5) \times 0.6] + 26.5 \\ &= 27.1 \text{ }^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

2. หาเวลาที่มีอุณหภูมิประมาณ 27.1 °C จากข้อมูลการทดลอง ซึ่งพบว่าเวลาที่มี อุณหภูมิใกล้เคียงกับ

27.1 คือวินาทีที่ 105 ดังนั้น b = 105

r1 = (อุณหภูมิสุดท้ายก่อนเผาไหม้ – อุณหภูมิที่เริ่มกวนน้ำ)

$$\begin{aligned} &= ta - ta0 \\ &= 26.5 - 26.5 \\ &= 0 \text{ }^{\circ}\text{C}/5 \text{ min} \\ &= 0. \text{ }^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

r2 = อุณหภูมิสุดท้ายก่อนหยุดกวนน้ำ – อุณหภูมิที่เริ่มคงที่

$$\begin{aligned} &= td - tc = 27.5 - 27.5 \\ &= 0 \text{ }^{\circ}\text{C}/5 \text{ min} \\ &= 0 \text{ }^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

c3 = ความยาวของฟิวส์ที่ถูกเผาไหม้ = 5 cm

W = พลังงานสมมูลของ Bomb Calorimeter = 2,426 cal/°C

m = มวลของเชื้อเพลิง = 1.0 g

$e_3$  = ค่าความร้อนของฟิวส์ ซึ่งหาได้จากสมการดังนี้

$$e_3 = 2.3 \times 5$$

$$e_3 = 11.5 \text{ cal}$$

จากข้อมูลที่ได้สามารถนำมาคำนวณหาค่าความร้อนเชื้อเพลิงได้ดังนี้ คำนวณหา  $t$  จะได้ดังนี้

$$\begin{aligned} t &= t_c - t_a - [r_1(b-a)] - [r_2(c-b)] \\ &= 27.5 - 26.5 - [0(105-0)] - [0(195-105)] \\ &= 1^\circ\text{C} \end{aligned}$$

คำนวณหาค่าความร้อนสูงสุดของเชื้อเพลิง จะได้ดังนี้

จาก

$$\begin{aligned} H_g &= \frac{t \cdot w - e_3}{m} \\ H_g &= \frac{(1) \cdot (2426) - (11.5)}{1.0} \\ H_g &= 2414.5 \text{ Btu/lb} \end{aligned}$$

ปริมาณความชื้น(ร้อยละ)

$$\begin{aligned} M &= 100 \times \left( \frac{w_1 - w_2}{w_2 - w_0} \right) \\ M &= 100 \times \left( \frac{1 - 0.11}{0.11 - 0} \right) \\ M &= 809.09 \end{aligned}$$

ปริมาณเถ้า

$$\text{ปริมาณเถ้า}(\%) = \left( \frac{\text{น้ำหนักเถ้าหลังเผา}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น}} \right) \times 100$$

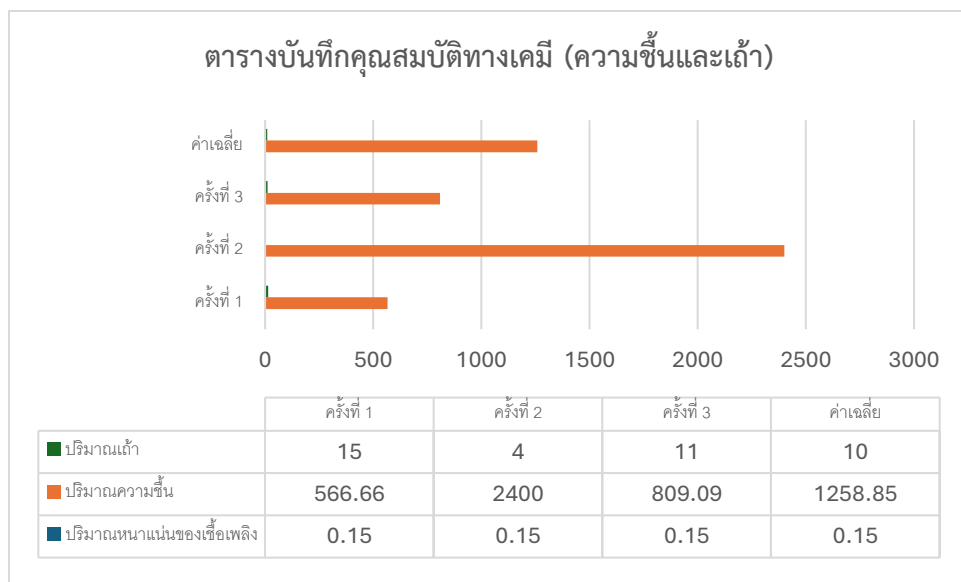
$$\text{ปริมาณเถ้า}(\%) = 11$$

ความหนาแน่นของเชื้อเพลิง

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{m}{v} \\ \rho &= \frac{1}{6.77} \\ \rho &= 0.15 \text{ g/cm}^3 \end{aligned}$$

## ตารางบันทึกคุณสมบัติทางเคมี (ความชื้นและเถ้า)

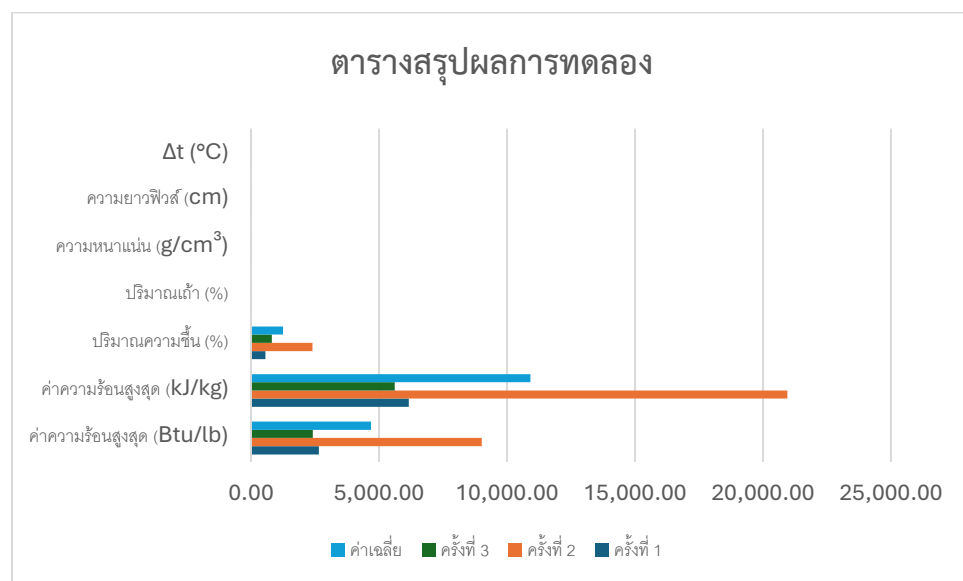
ปริมาณการวิเคราะห์	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
ปริมาณหนาแน่นของเชื้อเพลิง	0.15	0.15	0.15	0.15
ปริมาณความชื้น	566.66	2400	809.09	1258.85
ปริมาณเถ้า	15	4	11	10



จากผลการทดลอง พบว่าความชื้นมีผลต่อปริมาณความชื้นอย่างชัดเจน โดยครั้งที่ 2 ที่มีความชื้นต่ำสุด (4%) ให้ค่าสูงสุดถึง 2,400 ส่วนครั้งที่ 1 ที่มีความชื้นสูง (15%) ให้ค่าเพียง 566.66 แสดงว่าการลดความชื้นช่วยเพิ่มประสิทธิภาพได้มาก ปริมาณความหนาแน่นคงที่ (0.15) ยืนยันว่าวัสดุมีความสม่ำเสมอ

## ตารางสรุปผลการทดลอง

พารามิเตอร์	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
ค่าความร้อนสูงสุด (Btu/lb)	2,652.16	9,011.61	2,414.50	4692.75
ค่าความร้อนสูงสุด (kJ/kg)	6,168.5	20,958.0	5,615.5	10914
ปริมาณความชื้น (%)	566.66	2,400	809.09	1,258.85
ปริมาณเถ้า (%)	15	4	11	10
ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	0.15	0.15	0.15	0.15
ความยาวฟิวส์ (cm)	6.5	5.7	5.0	5.73
$\Delta t$ (°C)	1.1	3.72	1.0	1.94



จากผลการทดลองทั้ง 3 ครั้ง พบว่าค่าความร้อนสูงสุดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยครั้งที่ 2 ให้ค่าความร้อนสูงสุดที่ 9,011.61 Btu/lb (20,958.0 kJ/kg) ซึ่งสูงกว่าครั้งอื่นๆ มาก เมื่อเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยที่ 4692.75 Btu/lb ความแตกต่างนี้จะสัมพันธ์กับปริมาณความชื้นที่แตกต่างกัน โดยครั้งที่ 2 มีความชื้นเพียง 4% ซึ่งต่ำที่สุด ในขณะที่ครั้งที่ 1 มีความชื้นถึง 15% ปริมาณความชื้นเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้ เนื่องจากความชื้นสูงจะดูดซับพลังงานความร้อนไปใช้ในการระเหยน้ำ ทำให้ค่าความร้อนที่ได้จริงลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ครั้งที่ 1 (ความชื้น 15%) ให้ค่าความร้อนเพียง 2,652.16 Btu/lb ปริมาณเถ้าในทุกครั้งมีความคงที่ที่ 0.15 g/cm<sup>3</sup> แสดงว่าองค์ประกอบของวัสดุที่ใช้ทดลองมีความสม่ำเสมอ ส่วนความหนาของฟิล์มมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ระหว่าง 5.0-6.5 cm โดยไม่แสดงความสัมพันธ์ที่ชัดเจนกับค่าความร้อนค่า  $\Delta t$  (การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ) ที่ครั้งที่ 2 สูงถึง 3.72°C ซึ่งสูงกว่าครั้งอื่นๆ อย่างเห็นได้ชัด สอดคล้องกับค่าความร้อนสูงสุดที่วัดได้ในครั้งนั้น แสดงให้เห็นว่าการควบคุมความชื้นให้ต่ำสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนได้สรุปได้ว่า ปริมาณความชื้นเป็นตัวแปรสำคัญที่สุดที่ส่งผลต่อค่าความร้อนสูงสุดของวัสดุ การลดความชื้นลงจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้และการถ่ายเทความร้อนได้อย่างมีนัยสำคัญ

### พื้นที่การวิเคราะห์

จากการทดลองวัดค่าความร้อนของเปลือกข้าวด้วยเครื่อง Bomb Calorimeter ทั้ง 3 ครั้ง พบว่าค่าความร้อนสูงสุด (Higher Heating Value: HHV หรือ Hg) มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยครั้งที่ 1 ได้ค่า 2,652.16 Btu/lb (6,168.5 kJ/kg) ครั้งที่ 2 ได้ค่าสูงสุดที่ 9,011.61 Btu/lb (20,958.0 kJ/kg) และครั้งที่ 3 ได้ค่าต่ำสุดที่ 2,414.50 Btu/lb (5,615.5 kJ/kg) ซึ่งให้ค่าเฉลี่ยทั้ง 3 ครั้งอยู่ที่ 4,692.76 Btu/lb หรือประมาณ 10,914 kJ/kg

เมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของเปลือกข้าวตามเอกสารอ้างอิงทางวิชาการ ซึ่งระบุว่าเปลือกข้าวมีค่าความร้อนอยู่ในช่วง 3,000-3,500 Btu/lb หรือประมาณ 12,000-16,000 kJ/kg พบว่าผลการทดลองมีความผันแปรสูง โดยครั้งที่ 2 ให้ค่าสูงกว่ามาตรฐานมาก ในขณะที่ครั้งที่ 1 และ 3 ให้ค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานอย่างเห็นได้ชัด การวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความร้อนพบว่า ปริมาณเถ้า (Ash Content) และค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ( $\Delta t$ ) มีความสัมพันธ์แบบผกผันอย่างชัดเจน ในครั้งที่ 2 ที่มีปริมาณเถ้าต่ำสุดเพียง 4% ให้ค่า  $\Delta t$  สูงถึง 3.72°C ซึ่งส่งผลให้ได้ค่าความร้อนสูงสุด ขณะที่ครั้งที่ 1 ที่มีปริมาณเถ้าสูงถึง 15% ให้ค่า  $\Delta t$  เพียง 1.1°C และครั้งที่ 3 ที่มีเถ้า 11% ให้ค่า  $\Delta t$  ที่ 1.0°C ตามลำดับ

จากการวิเคราะห์ค่าปริมาณความชื้น (M) ที่คำนวณได้ พบว่าครั้งที่ 2 ให้ค่าสูงถึง 2,400 ซึ่งสูงกว่าครั้งที่ 1 (566.66) และครั้งที่ 3 (809.09) อย่างมาก แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างการลดปริมาณความชื้นในตัวอย่างกับการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพการเผาไหม้ ทั้งนี้ ความชื้นในเชื้อเพลิงจะดูดซับพลังงานความร้อนจำนวนมากไปใช้

ในกระบวนการระเหย (Latent Heat of Vaporization) ซึ่งมีค่าประมาณ 2,260 kJ/kg ส่งผลให้พลังงานที่วัดได้จากการเผาไหม้ลดลง

ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงคงที่ที่  $0.15 \text{ g/cm}^3$  ในทุกครั้งที่ทดลองแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างมีโครงสร้างทางกายภาพที่สม่ำเสมอ แต่คุณสมบัติทางเคมี โดยเฉพาะปริมาณเถ้าและความชื้น มีความแปรปรวนสูง ซึ่งเป็นลักษณะทั่วไปของชีวมวลที่ได้จากแหล่งธรรมชาติ

ความยาวของฟิวส์ที่ถูกเผาไหม้แตกต่างกันในแต่ละครั้ง (6.5, 5.7 และ 5.0 cm) และมีผลต่อค่าพลังงานที่ต้องหักออก ( $e_3 = 14.95, 13.11$  และ  $11.5 \text{ cal}$  ตามลำดับ) แต่เมื่อพิจารณาจากค่า  $\Delta t$  ที่แตกต่างกันมาก ปัจจัยนี้มีผลรองต่อคุณภาพของเชื้อเพลิง

## อภิปราย

ความแตกต่างของค่าความร้อนในแต่ละครั้งสะท้อนให้เห็นถึงความสำคัญของคุณภาพเชื้อเพลิง โดยเฉพาะปริมาณความชื้นและเถ้า เปลือกข้าวที่มีความชื้นและเถ้าสูงจะให้ค่าความร้อนต่ำกว่า เนื่องจากพลังงานส่วนหนึ่งถูกใช้ไปในการระเหยน้ำ และเถ้าไม่สามารถเผาไหม้ได้ ผลการทดลองครั้งที่ 2 ที่ให้ค่าความร้อนสูงผิดปกติ (9,011.61 Btu/lb) อาจเกิดจากหลายสาเหตุ ได้แก่

- (1) การเตรียมตัวอย่างที่มีคุณภาพดีกว่า โดยเฉพาะการลดปริมาณเถ้าและความชื้น
- (2) การควบคุมสภาวะการทดลองที่แม่นยำกว่า เห็นได้จากค่า  $r_1 = 0$  และ  $r_2 = 0.02$  ที่แสดงถึงความเสถียรของระบบ
- (3) ความแปรปรวนตามธรรมชาติของวัตถุดิบ เนื่องจากเปลือกข้าวแต่ละแบบห่ออาจมีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกันตามสายพันธุ์ข้าว สภาพการเก็บเกี่ยว และวิธีการแปรรูป

เมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดอื่น เช่น แกลบข้าว (Rice Straw:  $\sim 14\text{--}15 \text{ MJ/kg}$ ) ขี้เลื่อยไม้ (Wood Sawdust:  $\sim 18\text{--}19 \text{ MJ/kg}$ ) หรือเปลือกถั่ว (Peanut Shell:  $\sim 17\text{--}18 \text{ MJ/kg}$ ) พบว่าเปลือกข้าวมีค่าความร้อนอยู่ในระดับต่ำถึงปานกลาง อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาถึงความพร้อมใช้ (Availability) ของเปลือกข้าวในประเทศไทยซึ่งเป็นผู้ผลิตข้าวรายใหญ่ของโลก การใช้เปลือกข้าวเป็นเชื้อเพลิงยังคงเป็นทางเลือกที่มีความเป็นไปได้สูงทางเศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อม

ข้อจำกัดของการทดลองนี้คือ จำนวนครั้งที่ยังน้อย ( $n=3$ ) ทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standard Deviation) และค่าความเชื่อมั่น (Confidence Interval) อาจไม่สะท้อนความแปรปรวนที่แท้จริงของเปลือกข้าว การศึกษาในอนาคตควรเพิ่มจำนวนตัวอย่างและควบคุมตัวแปรกวนให้เข้มงวดขึ้น นอกจากนี้ ควรศึกษาปัจจัยอื่นๆ ที่อาจส่งผล เช่น ระยะเวลาการเก็บรักษา สภาพการอบแห้ง และขนาดของอนุภาคเชื้อเพลิง

## สรุปการทดลอง

การทดลองวัดค่าความร้อนของเปลือกข้าวด้วยเครื่อง Bomb Calorimeter พบว่าค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 4,692.76 Btu/lb หรือประมาณ 10,914 kJ/kg ซึ่งแปรปรวนตามปริมาณเถ้าและความชื้น โดยปริมาณเถ้าที่ต่ำ (4%) ให้ค่าความร้อนสูงสุดถึง 9,011.61 Btu/lb ในขณะที่ปริมาณเถ้าสูง (15%) ให้ค่าเพียง 2,652.16 Btu/lb แสดงให้เห็นว่าการควบคุมคุณภาพเชื้อเพลิงเป็นปัจจัยสำคัญต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้ เปลือกข้าวจึงมีศักยภาพเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลทางเลือกที่ยั่งยืนสำหรับประเทศไทย

## ข้อเสนอแนะในการทดลองครั้งต่อไป

- เพิ่มจำนวนการทดลองน้ำควรทำการทดลองอย่างน้อย 5 ครั้งและใช้การวิเคราะห์ทางสำนักสถิติเพื่อคัดค่าผิดปกติ (outliers) ออก
- ปรับปรุงวิธีการวัดความชื้นใช้เตาอบที่ควบคุมอุณหภูมิได้แม่นยำ ( $105 \pm 2^{\circ}\text{C}$ ) อบเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และชั่งน้ำหนักซ้ำจนได้น้ำหนักคงที่
- ใช้พิวส์ความยาวเท่ากัน เพื่อลดตัวแปรที่ไม่จำเป็นและทำให้สามารถเปรียบเทียบผลได้ง่ายขึ้น

สอบเทียบอุปกรณ์ตรวจสอบค่าคงที่ของแคลอรีมิเตอร์ (W) โดยใช้สารมาตรฐานเช่น benzoic acid ก่อนทำการทดลองจริง

- ควบคุมสภาพแวดล้อมทำการทดลองในห้องที่มีอุณหภูมิคงที่และหลีกเลี่ยงการเปิดหน้าต่างหรือใช้เครื่องปรับอากาศในระหว่างทดลอง
- บันทึกข้อมูลอย่างละเอียดบันทึกน้ำหนักตัวอย่างทั้งก่อนและหลังการทดลอง, สภาพอากาศ, ความชื้นสัมพัทธ์, และข้อสังเกตอื่นๆ ที่อาจมีผลต่อผลการทดลอง