

## การไพโรไลซิสแบบต่อเนื่องสำหรับการผลิตแกลบดำ

### The Continuous Pyrolysis of Rice Husk for Charcoal Production

กัณณีย์ หอมชาติ<sup>1\*</sup>, มงคลชัย คำปากดี<sup>1</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องจักรกลเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, นครราชสีมา, 30000

\*Corresponding author: Tel: +66-8-1669-4701, E-mail: [karan.ho4701@gmail.com](mailto:karan.ho4701@gmail.com)

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติของถ่านที่ได้จากการไพโรไลซิสแบบต่อเนื่องด้วยแก๊สร้อน เตาปฏิกรณ์ทรงกระบอกสองตัวมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 150 mm ยาว 1244 mm แกลบถูกเคลื่อนย้ายภายในเตาเผาโลหะด้วยเวลาประมาณ 16 นาทีโดยใช้สกรูลำเลียงหมุนด้วยความเร็ว 2.75 rpm ความจุของเตาปฏิกรณ์เท่ากับ 2.57 kg/h สำหรับแกลบและสามารถผลิตแกลบดำได้ 1.09 kg/h แกลบเปลี่ยนสภาพเป็นถ่านได้ทั้งหมดที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 380°C ปริมาณผลผลิตถ่านที่ได้จากงานวิจัยนี้ค่อนข้างสูงเท่ากับ 40.48 % (d.b.) เนื่องจากอุณหภูมิไพโรไลซิสต่ำ ค่าความร้อนของแกลบดำเท่ากับ 19,581 kJ/kg ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานถ่านสำหรับหุงต้มที่ 25,116 kJ/kg ปริมาณขี้เถ้าของแกลบดำสูงมากเท่ากับ 38.10% (d.b.) เห็นได้ชัดว่าคุณสมบัติแกลบดำที่ได้รับจากงานวิจัยนี้ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานถ่านสำหรับหุงต้ม อย่างไรก็ตามแกลบดำที่ได้จากงานวิจัยนี้เหมาะสำหรับการนำไปใช้สำหรับปรับปรุงดินทางการเกษตรมากกว่าใช้สำหรับเป็นเชื้อเพลิงสำหรับหุงต้ม ประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานจากชีวมวลเป็นถ่านและประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาปฏิกรณ์เท่ากับ 53.19% และ 28.34% ตามลำดับ

คำสำคัญ: แกลบ, แกลบดำ, ไพโรไลซิส, พลังงานชีวมวล

#### Abstract

The objective of this research was studied the properties of charcoal from continuous pyrolysis rice husk using flue gas. The two cylindrical reactors kiln with a diameter of 150 mm and length 1244 mm. The rice husk was moved within the metal kiln about 16 min by using the screw conveyor with 2.75 rpm of speed. The capacity of the rice husk and the rice husk charcoal in reactors were 2.57 kg/h and 1.09 kg/h respectively. The pyrolysis temperatures that all rice husk became to charcoal at 380°C. The charcoal yield obtained from this research was high, about 40.48% (d.b.) due to the low pyrolysis temperature. The higher heating value (HHV) 19,581 kJ/kg of charcoal was lower than the standard charcoal for cooking (25,116 kJ/kg). The ash content of the rice husk charcoal was very high 38.10% (d.b.). Obviously, the properties of the rice husk charcoal obtained from this research was lower than the standard charcoal for cooking. However, the rice husk charcoal obtained from this research was suitable using for improvement the soil rather than for cooking fuel. The energy conversion efficiency of biomass into charcoal and the thermal efficiency of the reactor kiln was 53.19% and 28.34% respectively.

Keywords: Biomass, Pyrolysis, Rice husk, Rice husk Charcoal

#### 1 บทนำ

ปัจจุบันทั่วโลกให้ความสำคัญกับการนำพลังงานทางเลือกมาใช้ทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลและแก๊สธรรมชาติ สาเหตุสำคัญเนื่องจากแต่ละประเทศมีความต้องการใช้เชื้อเพลิงสูงขึ้น ทั้งในภาคอุตสาหกรรม การคมนาคม และภาคครัวเรือน ส่งผลให้ปริมาณเชื้อเพลิงฟอสซิลและแก๊สธรรมชาติลดลง ราคาเชื้อเพลิงมีแนวโน้มสูงขึ้น การเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลก่อให้เกิดก๊าซเรือนกระจกส่งผลกระทบต่อการทำลายชั้นบรรยากาศโลกก่อให้เกิดปรากฏการณ์โลกร้อน จากข้อมูลการสำรวจของกรมพัฒนา

พลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานในปี 2557 “กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน(2558)” ประเทศไทยใช้พลังงานทดแทนคิดเป็น 11.9% (9,025 ktoe) ของการใช้พลังงานทั้งหมด 75,840 ktoe ซึ่งเป็นปริมาณน้อยมาก ประเทศไทยมีเป้าหมายการใช้พลังงานทดแทนเพิ่มขึ้นให้ได้เป็น 25% ของการใช้พลังงานทั้งหมดภายในปี 2564 รัฐบาลไทยได้สนับสนุนการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ เช่น โซลาร์ฟาร์ม (Solar Farm) และ หลังคาพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Rooftop) ส่วนพลังงานลมมีทั้งกังหันลมขนาดใหญ่เพิ่มมากขึ้น ส่วนพลังงานชีว

มวลก็มีการส่งเสริมแต่ยังคงมีจำนวนน้อย ในแต่ละปีประเทศไทย มีเศษวัสดุชีวมวลเหลือทิ้งจากการปลูกพืชเศรษฐกิจของเกษตรกร ปริมาณมากมาเทียบเท่าน้ำมันดิบได้หลายล้านลิตร เช่น แกลบ ฟาง ชังข้าวโพด ต้นข้าวโพด เหง้ามันสำปะหลัง เป็นต้น รัฐบาล มีแผนการส่งเสริมการใช้พลังงานชีวมวลซึ่งปัจจุบันมีกำลังการผลิตรวม 1,751.86 MW เป้าหมายในปี 2564 คือ 3,630 MW การผลิตไฟฟ้าพลังงานชีวมวลในประเทศไทยในปัจจุบันติดปัญหา การต่อต้านจากหลายชุมชนส่งผลให้การลงทุนโรงไฟฟ้าชีวมวล หยุดชะงัก สำหรับชีวมวลมีข้อจำกัดในการเก็บรักษาคือเมื่อเก็บ รักษาไว้เป็นเวลานานก็จะเกิดการสูญเสียจากการผุพังหรือถูกมอด ไ้กินไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ทางพลังงานได้ การเปลี่ยนรูป จากชีวมวลให้เป็นถ่านสามารถหลีกเลี่ยงปัญหาข้างต้นได้ ถ่านไม้ สามารถเก็บรักษาได้ยาวนานกว่าชีวมวลสดและสะดวกต่อการ นำไปใช้ มี การผลิตถ่านแบบดั้งเดิมจะเผาถ่านในเตาดินซึ่งให้ผล ผลิตถ่านค่อนข้างต่ำคุณภาพถ่านต่ำและใช้เวลาเผายาวนาน Yu- Jen Lin (2009)[2] เผาถ่านไม้ Crytomeria(Sugi) ในเตาดินได้ ปริมาณถ่านค่อนข้างต่ำ 29% ใช้เวลายาวนาน 6-9 วัน ต่อมาได้มี การพัฒนาเตาเผาถ่านให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นและลดเวลาการผลิต ถ่านได้ค่อนข้างมาก 3-12 h ได้ปริมาณผลผลิตถ่าน 28- 47%(d.b.) J.C. Adum. (2009) ได้พัฒนาเตาเผาถ่านโลหะแบบ รับความร้อนจากผ่านผนังเตาเผาแบบรีทอร์ท (Retort) ลดเวลา เผาถ่านจาก 4-7 วันเหลือ 10-12 h ได้ผลผลิตถ่านค่อนข้างสูง 30-42% K.N. Patil (2000) ได้มีการพัฒนาเตาเผาถ่านโดยนำไฟ โรไลซิสแก๊สที่ได้กลับมาเผาไหม้เพื่อเร่งการไพโรไลซิสให้เร็วขึ้น และใช้เวลาเผาถ่าน 3 h ผลผลิตถ่าน 28-47%(d.b.) นอกจากนี้ D. Ayhan (2001), Homchat K. (2011) และ A. Saravanakumar (2006) ได้ศึกษาวิจัยและพัฒนาเตาโลหะให้มี ประสิทธิภาพสูงขึ้นโดยใช้เวลาค่อนข้างสั้นไม่เกิน 5 h ปริมาณ ผลผลิตและคุณภาพถ่านขึ้นอยู่กับวัตถุดิบละอุนหภูมิการไพโรไล ซิส

จากงานวิจัยที่ได้ศึกษาผ่านมาพบว่าทั้งหมดเป็นเตาเผาถ่าน แบบปริมาตรคงที่ ดังนั้นการวิจัยนี้จึงวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา ปริมาณผลผลิตถ่านจากการไพโรไลซิสแบบต่อเนื่องด้วยการ ให้ความร้อนทางอ้อมผ่านผนังเตาโลหะและศึกษาคุณลักษณะ ของถ่าน เช่น ค่าความร้อนของถ่าน ปริมาณคาร์บอนคงตัว ปริมาณสารระเหย ปริมาณซีไ้ไ้ของแกลบดำ และประเมิน ประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานของเตาปฏิกรณ์ในงานวิจัยนี้

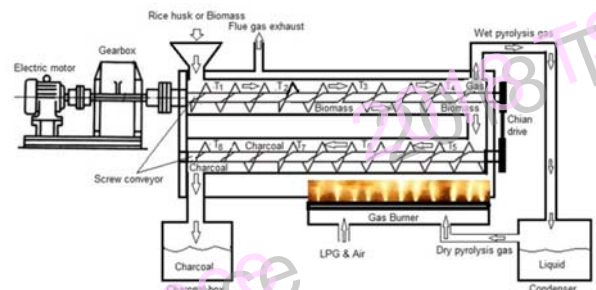
## 2 อุปกรณ์และวิธีการ

งานวิจัยนี้เป็นการไพโรไลซิสแบบต่อเนื่องในเตาโลหะ สำหรับผลิตแกลบดำ อุปกรณ์ต่างๆและส่วนประกอบของเตา ปฏิกรณ์สำหรับการทดลองและวิธีการทดลองแสดงรายละเอียด ดังต่อไปนี้

### 2.1 อุปกรณ์การทดลอง

รูปที่ 1 แสดงผังรายละเอียดอุปกรณ์และส่วนประกอบต่างๆ ของเตาปฏิกรณ์สำหรับไพโรไลซิสแบบต่อเนื่องซึ่งมี

ส่วนประกอบต่างๆดังนี้ ลักษณะภายนอกของเตาปฏิกรณ์มี รูปทรงสี่เหลี่ยม ขนาดกว้าง 50 cm ยาว 124 cm และสูง 90 cm ภายในประกอบด้วยเตาปฏิกรณ์ ทรงกระบอกขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง 15 cm ยาว 124 cm จำนวน 2 ท่อ ภายในท่อ มีเกลียวลำเลียงวัสดุถูกขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 24 VDC ขนาด 250 W ส่งกำลังผ่านชุดเกียร์ทดและโซ่กำลังหมุนตามเข็มนาฬิกาด้วยความเร็วรอบ 2.75 rpm ระยะพิทช์ของเกลียว ลำเลียงเท่ากับ 5 cm ช่วงเกลียวยาว 110 cm เกลียวลำเลียงตัว บนแบบเกลียวขวาและตัวล่างแบบเกลียวซ้าย วัสดุแกลบจะถูก บรรจุที่กรวยด้านบนเตาและถูกลำเลียงด้วยเกลียวตัวบนไป ทางด้านขวาพร้อมรับความร้อนที่เหลือจากเตาด้านล่าง หลังจากนั้นแกลบจะไหลลงไปที่เกลียวลำเลียงด้านล่างและจะถูกลำเลียง ไปด้านซ้ายโดยที่แกลบจะรับความร้อนผ่านผนังเตาจากหัวเผา แก๊สปิโตรเลียมเหลว (Liquid petroleum gas, LPG) ซึ่งหัวเผา แก๊สมีขนาดกว้าง 10 cm ยาว 40 cm ติดตั้งอยู่ด้านล่างท่อ ทรงกระบอกตัวล่าง หลังจากแกลบเปลี่ยนเป็นแกลบดำแล้วจะ ถูกระบายความร้อนและส่งไปที่ถังบรรจุแกลบดำด้านล่าง ที่ บริเวณด้านบนของเตาจะติดตั้งปล่องระบายแก๊สไอเสียเพื่อ ระบายแก๊สร้อนที่ใช้สำหรับการไพโรไลซิสออกจากเตา และที่ บริเวณด้านบนฝั่งขวาจะติดตั้งท่อลำเลียงไพโรไลซิสแก๊สที่โดยที่ แก๊สจะถูกลำเลียงส่งไปที่หอกลั่น (Condenser) ด้านนอกเตา เพื่อกลั่นความชื้นในไพโรไลซิสแก๊สเพื่อทำให้แก๊สแห้ง หลังจากนั้นแก๊สที่แห้งแล้วจะถูกส่งไปที่หัวเผาเป็นเชื้อเพลิงร่วมกับแก๊ส LPG ต่อไป



รูปที่ 1 ผังอุปกรณ์และเตาปฏิกรณ์สำหรับการทดลอง

## 2.2 วัตถุประสงค์สำหรับการทดลอง

### ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพของแกลบในการวิจัยนี้

Proximate analysis (% by weight, Dry basis)		Method/ Instruments
Moisture content, MC	13.48	ASTM D1672-84
Volatile matter, VM	52.26	
Ash	15.24	
Fix carbon, FC	18.32	
Ultimate analysis (% by weight, Dry ash-free basis)		Method/ Instruments
Carbon, C	38.992	Carbon, Hydrogen, Nitrogen & Sulfur Analyzer model CHNS-932
Hydrogen, H <sub>2</sub>	5.80	
Nitrogen, N <sub>2</sub>	0.432	
Total sulphur, S	0.018	
Oxygen, O <sub>2</sub>	31.39	

ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของแกลบที่ใช้ในการทดลองนี้ จากผลการวิเคราะห์ทางองค์ประกอบโดยประมาณของเชื้อเพลิงชีวมวล (Proximate Analysis) แกลบมีความชื้นเฉลี่ย 13.48 % (by weight) ปริมาณคาร์บอนคงตัวไม่สูงมากนักเท่ากับ 18.32 % (by weight) และมีปริมาณสารระเหยค่อนข้างสูงประมาณ 52.26 % (by weight) ปริมาณซัลเฟอร์ 18.32% แต่อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ทางองค์ประกอบโดยละเอียดหรือแบบแยกธาตุของเชื้อเพลิงชีวมวล (Ultimate analysis) พบว่าแกลบมีซัลเฟอร์ (Sulphur) 0.018% เป็นปริมาณที่ไม่สูงมากนักจึงมีความเป็นไปได้สูงที่จะนำแกลบมาใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลและผลิตแกลบดำได้

## 2.3 วิธีการทดลอง

ก่อนการทดลองตากแห้งแกลบเพื่อลดความชื้นวัตถุดิบและเก็บตัวอย่างแกลบเพื่อวิเคราะห์หาคุณสมบัติ Ultimate analysis และค่าพลังงานความร้อน (Higher heating value, HHV) ของแกลบ การติดตั้งอุปกรณ์และตำแหน่งติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลเข้ากับเตาปฏิกรณ์แสดงในรูปที่ 1 หลังจากนั้นเริ่มทำการทดลองตามขั้นตอนดังนี้ เริ่มการทดลองซึ่งนำหนักวัตถุดิบแล้วบรรจุแกลบเข้าที่กรวยด้านบนเตา ติดไฟที่หัวเผาแก๊สภายในเตาเมื่อเตาได้อุณหภูมิการทำงานเริ่มเดินเครื่องให้มอเตอร์ทำงาน แกลบจะถูกลำเลียงไปด้านขวาด้วยเกลียวตัวบนและรับความร้อนในช่วงแรก หลังจากนั้นแกลบจะไหลตกลงไปที่เกลียวลำเลียงตัวล่างถูกลำเลียงไปด้านซ้ายพร้อมกับรับความร้อนจากหัวเผาแก๊ส LPG ทางอ้อมผ่านผนังเตา ควบคุมอัตราการไหลแก๊สให้อุณหภูมิการไพโรไลซิสอยู่ที่ช่วง 350-450°C วัตถุดิบภายในเตาที่บรรจุวัตถุดิบตามตำแหน่งในรูปที่ 1 ด้วยเทอร์โมคัปเปิล Type K ตลอดกระบวนการไพโรไลซิสและจับเวลาตลอดการทดลอง

แก๊สที่ได้จากการไพโรไลซิสจากปล่องระบายแก๊สด้านบนเตาถูกลำเลียงไหลผ่านอุปกรณ์ควบแน่น (Condenser) เพื่อให้สารระเหยในแก๊สกลั่นตัวเป็นของเหลว หลังจากนั้นแก๊สแห้งจะถูกป้อนกลับเป่าเผาไหม้ที่ห้องเผาไหม้ด้านล่างเตาปฏิกรณ์เพื่อเร่งความร้อนภายในเตาเป็นการลดการใช้เชื้อเพลิงหลักแก๊ส LPG เมื่อแกลบถูกลำเลียงผ่านความร้อนในเตาปฏิกรณ์จะเปลี่ยนเป็นถ่านหรือแกลบดำ หลังแกลบดำออกจากเตาปฏิกรณ์จะตกลงไปที่ถังเก็บถ่านความร้อนจะถูกระบายออกตามธรรมชาติและรอจนกระทั่งอุณหภูมิตกลงต่ำกว่า 50°C จึงเก็บถ่านบรรจุถุงและซีลปากถุงซึ่งน้ำหนักแกลบดำที่ได้จากการไพโรไลซิสแกลบแบบต่อเนื่อง หลังจากนั้นนำแกลบดำที่ได้จากการทดลองไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate analysis) และค่าความร้อน (Higher heating value, HHV) นำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์และคำนวณหา ปริมาณผลผลิตถ่าน ประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงาน และประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาปฏิกรณ์

## 2.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

M.J. Antal (2003) ได้เขียนสมการสำหรับหาปริมาณผลผลิตถ่านประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานดังนี้

### 2.4.1 การคำนวณผลผลิตแกลบดำ

ปริมาณผลผลิตถ่าน (charcoal yield,  $y_{char}$ ) ที่ได้จากเตาเผาถ่านคำนวณได้ดังนี้

$$y_{char} = \frac{m_{char}}{m_{bio}} \quad (1)$$

เมื่อ  $y_{char}$  คือ ปริมาณผลผลิตถ่านที่ได้ (%)

$m_{char}$  คือ มวลแห้งของถ่านที่ได้ (kg)

$m_{bio}$  คือ มวลแห้งของชีวมวลที่ป้อนเข้าเตา (kg)

มวลแห้งของถ่านและมวลแห้งของชีวมวล คือ มวลของถ่านและชีวมวลที่มีความชื้น 0% หาได้จากการอบแห้งถ่านและชีวมวลสดในตู้อบแห้งแบบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 72 ชม.

### 2.4.2 ประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานของเตาปฏิกรณ์

ประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานจากชีวมวลเป็นถ่านของเตาปฏิกรณ์คำนวณได้ดังนี้

$$\eta_{char} = y_{char} \times \left( \frac{HHV_{char}}{HHV_{bio}} \right) \quad (2)$$

เมื่อ  $\eta_{char}$  คือ ประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานจากชีวมวลเป็นถ่านของเตาปฏิกรณ์ (%)

$HHV_{char}$  คือ ค่าความร้อนสูงของถ่าน (kJ/kg)

$HHV_{bio}$  คือ ค่าความร้อนสูงของวัตถุดิบชีวมวล (kJ/kg)

### 2.4.3 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาปฏิกรณ์

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาปฏิกรณ์เท่ากับสัดส่วนพลังงานของผลผลิตถ่านที่ได้หารด้วยพลังงานที่ใช้ในการผลิตถ่าน คำนวณได้ดังนี้

$$\eta_{kiln} = \left( \frac{\dot{m}_{char} HHV_{char}}{\dot{m}_{bio} HHV_{bio} + \dot{m}_{LPG} HHV_{LPG} + w_{motor}} \right) \quad (3)$$

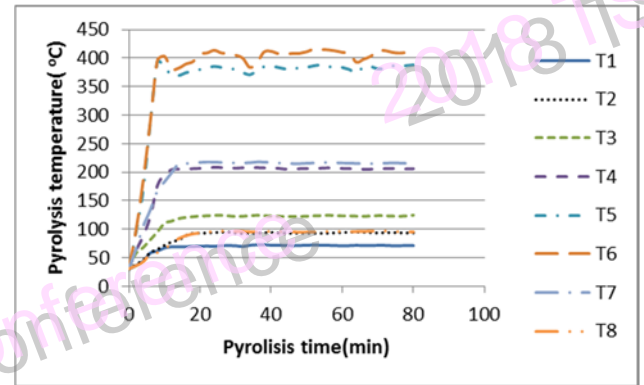
- เมื่อ  $\eta_{kiln}$  คือ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเตาปฏิกรณ์ (%)  
 $HHV_{LPG}$  คือ ค่าความร้อนสูงของของแก๊ส LPG (kJ/kg)  
 $w_{motor}$  คือ ขนาดกำลังขับของมอเตอร์ไฟฟ้า (kW)  
 $\dot{m}_{char}$  คือ อัตราการการผลิตแกลบดำของเตา (kg/s)  
 $\dot{m}_{bio}$  คือ อัตราการป้อนชีวมวลของของเตา (kg/s)  
 $\dot{m}_{LPG}$  คือ อัตราการไหลเชิงมวลของแก๊ส LPG (kg/s)

## 3 ผลและวิจารณ์

### 3.1 อุณหภูมิเตาปฏิกรณ์

ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิ (T<sub>1</sub>-T<sub>8</sub>) แสดงในรูปที่ 1 โดยที่ตำแหน่งวัด T<sub>1</sub> คือจุดที่ป้อนแกลบเข้าเตาจนกระทั่งแกลบเปลี่ยนรูปเป็นถ่านหรือแกลบดำและออกจากเตาที่ตำแหน่ง T<sub>8</sub> จากรูปที่ 2 แสดงอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ที่ตำแหน่งต่างๆ จากกราฟจะเห็นว่าลักษณะอุณหภูมิที่ตำแหน่ง T<sub>1</sub>-T<sub>3</sub> มีอุณหภูมิต่ำกว่า 200°C แสดงว่าบริเวณดังกล่าวเป็นช่วงการอบแห้ง (Drying Zone) ของเตา ที่ตำแหน่ง T<sub>4</sub> อุณหภูมิเฉลี่ยสูงกว่า 210°C หลังจากนั้นแกลบจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อยๆจนกระทั่งจะตกลงไปที่เตาทรงกระบอกด้านล่าง บริเวณนี้จึงเชื่อได้ว่าเป็นจุดเริ่มต้นของการไพโรไลซิสจากรูปจะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่ง T<sub>5</sub> มีอุณหภูมิสูงกว่า 350°C แสดงว่าเป็นบริเวณที่แกลบเกิดการสลายตัวไพโรไลซิสแล้วคือแกลบจะเปลี่ยนเป็นถ่านหรือแกลบดำ หลังจากนั้นแกลบยังเกิดการไพโรไลซิสอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งถึงบริเวณตำแหน่ง T<sub>6</sub> ซึ่งมีอุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ย 410°C ที่ หลังจากนั้นแกลบดำจะเคลื่อนที่ผ่านที่ตำแหน่ง T<sub>7</sub> ซึ่งเป็นบริเวณที่ไม่ได้รับความร้อนจากแก๊สร้อนแล้วส่งผลให้อุณหภูมิลดลงที่ประมาณ 215°C และอุณหภูมิจะลดลงต่ำสุด 95°C ที่ตำแหน่ง T<sub>8</sub> แสดงให้เห็นว่าบริเวณดังกล่าวคือบริเวณระบายความร้อนของแกลบดำ (Cooling zone) แกลบดำออกจากเตาปฏิกรณ์และถูกส่งไปเก็บที่ถังเก็บถ่านและระบายความร้อนต่อไปจนกระทั่งมีอุณหภูมิต่ำกว่า 50°C จึงสามารถเก็บตัวอย่างแกลบดำไปวิเคราะห์หาคุณสมบัติต่อไป ไพโรไลซิสแก๊สจะเริ่มติดไฟเมื่อเริ่มเดินเครื่องไพโรไลซิสไปได้ประมาณ 15 min และติดไฟได้ต่อเนื่องลักษณะเปลวไฟของไพโรไลซิสแก๊สมีสีฟ้าซึ่งให้ไฟค่อนข้างแรงแต่มีปริมาณเปลวไฟค่อนข้างน้อยเนื่องจากปริมาณแก๊สน้อยส่งผลให้นำความร้อนป้อนกลับเข้าช่วยไพโรไลซิสได้น้อยจึงไม่สามารถใช้ไพโรไลซิสแก๊สแทนเชื้อเพลิงหลักได้ สาเหตุสำคัญเนื่องจากการให้ความร้อนกับชีวมวลแบบทางอ้อมคือการให้ความร้อนผ่านผนังเตาปฏิกรณ์เพื่อถ่ายโอนความร้อนให้กับชีวมวลที่อยู่ด้านในอีกทอดหนึ่ง ความร้อนผ่านเข้าไปในเตาได้น้อยมีการสูญเสียมากจึง

ส่งผลให้ประสิทธิภาพการให้ความร้อนลดลงและเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ปริมาณไพโรไลซิสแก๊สน้อย แต่อย่างไรก็ตามความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ไพโรไลซิสแก๊สที่หัวเผาชุดที่สองนั้นก็ช่วยเพิ่มความร้อนให้กับการไพโรไลซิสได้เช่นกัน



รูปที่ 2 อุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์

### 3.2 ปริมาณผลผลิตแกลบดำ

ปริมาณผลผลิตถ่านที่ได้จากการไพโรไลซิสแบบต่อเนื่องที่ความชื้นแกลบเฉลี่ย 13.48% (w.b.) คำนวณได้จากสมการที่ (1) ได้ปริมาณผลผลิตถ่านประมาณ 40.48 % (by weight) กำลังการผลิตของเตาปฏิกรณ์สำหรับไพโรไลซิสแบบต่อเนื่องมีอัตราการป้อนวัตถุดิบแกลบเท่ากับ 2.57 kg/h ใช้แก๊ส LPG 0.72 kg/h สามารถผลิตแกลบดำได้เท่ากับ 1.09 kg/h ที่ช่วงอุณหภูมิการไพโรไลซิส 380-415°C โดยที่แกลบจะผ่านเข้าไปอยู่ในเตาปฏิกรณ์ตลอดกระบวนการไพโรไลซิสเป็นเวลารวมทั้งสิ้น 16 min และแกลบจะเปลี่ยนสภาพเป็นแกลบดำเมื่อออกจากเตา แต่มีข้อสังเกตคือแกลบดำจะค้างอยู่บริเวณทางออกของเตาปฏิกรณ์บ้างทำให้เวลาเพิ่มขึ้นบ้างเล็กน้อยแต่ก็มีข้อดีคือเป็นการปล่อยให้แกลบดำระบายความร้อนได้เพิ่มขึ้นจึงช่วยทำให้แกลบดำอุณหภูมิลดลงได้มากขึ้น ส่วนประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานจากชีวมวลเป็นถ่านของเตาปฏิกรณ์คำนวณได้จากสมการที่ (2) เท่ากับ 53.19% ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาปฏิกรณ์คำนวณได้จากสมการที่ (3) เท่ากับ 28.34% เนื่องจากการถ่ายโอนความร้อนแบบทางอ้อมของแก๊สร้อนจากหัวเผาผ่านผนังเตาสู่ชีวมวลภายในเตามีความต้านทานการถ่ายโอนความร้อนของผนังเตามากจึงส่งผลให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนต่ำและประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาปฏิกรณ์ในทางานวิจัยนี้จึงค่อนข้างต่ำ

### 3.3 คุณสมบัติแกลบดำ

จากรูปที่ 3 แสดงลักษณะทั่วไปของแกลบดำที่ได้จากงานวิจัยนี้ แกลบถูกไพโรไลซิสที่ช่วงอุณหภูมิ 380-415°C จากรูปจะเห็นได้ว่าแกลบเปลี่ยนสภาพเป็นถ่านได้ทั้งหมดทั้งนี้เนื่องจากความร้อนจากหัวเผากระจายตัวทั่วถึงวัตถุดิบทั้งเตาทำให้อุณหภูมิภายในเตาสูงเพียงพอสำหรับการไพโรไลซิสจึงส่งผลให้แกลบ

เปลี่ยนเป็นถ่านได้ทั้งหมด ในกรณีที่ต้องการให้กลบดำมีความบริสุทธิ์มากขึ้นควรเพิ่มอุณหภูมิเตาให้สูงกว่าการทดลองนี้



รูปที่ 3 ลักษณะของกลบดำจากการทดลอง

จากตารางที่ 2 แสดงคุณสมบัติการวิเคราะห์ค่าเบบประมาณของกลบและกลบดำที่ได้จากการไพโรไลซิสแบบต่อเนื่องที่ช่วงระดับอุณหภูมิเตา 380 - 415°C จากตารางจะเห็นได้ว่าค่าคาร์บอนคงตัวของกลบที่ใช้เป็นวัตถุดิบมีค่าค่อนข้างต่ำ 18.32 % (by weight) จึงส่งผลให้ปริมาณคาร์บอนคงตัวของกลบดำที่ได้จากการทดลองนี้ค่อนข้างต่ำด้วยเท่ากับ 44.81 % (by weight) และเนื่องจากค่าความร้อนของกลบในการทดลองนี้ค่อนข้างต่ำ 14,902 kJ/kg จึงส่งผลให้ค่าความร้อนของกลบดำที่ได้จากการไพโรไลซิสมีค่าไม่สูงมากนักเท่ากับ 19,581 kJ/kg ปริมาณซีเถ้าค่อนข้างสูงเท่ากับ 38.10% เมื่อเปรียบเทียบกับคุณสมบัติกลบดำที่ได้ มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่านในตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่าถ่านที่ได้จากงานวิจัยนี้ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานถ่านสำหรับหุงต้ม สาเหตุสำคัญคือค่าความร้อนของวัตถุดิบคือกลบนั่นค่อนข้างต่ำพร้อมทั้งมีซีเถ้าค่อนข้างมากด้วย ดังนั้นกลบดำที่ได้จากงานวิจัยนี้จึงเหมาะสำหรับการนำไปใช้ทางการเกษตรเพื่อปรับปรุงดินมากกว่าใช้สำหรับเป็นเชื้อเพลิงสำหรับหุงต้ม

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของกลบดำที่ได้จากการทดลองนี้

Proximate analysis (% by weight, Dry basis)	Material		Charcoal Method/ standard Instruments for cooking
	Rice husk (% by weight)	Charcoal (% by weight)	
Moisture content, MC	13.48	1.83	≤10 %
Volatile matter, VM	52.26	15.26	≤25 %
Ash	15.94	38.10	≤ 8 %
Fix carbon, FC	18.32	44.81	-
Higher heating value, HHV	14,902 kJ/kg	19,581 kJ/kg	≥25116 (kJ/kg)

\* สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (2547)

#### 4 สรุปผล

กำลังการผลิตของเตาปฏิกรณ์สำหรับไพโรไลซิสแบบต่อเนื่องที่ช่วงอุณหภูมิไพโรไลซิส 380-415°C มีอัตราการป้อนวัตถุดิบกลบเท่ากับ 2.57 kg/h กลบเปลี่ยนสภาพเป็นกลบดำได้ทั้งหมดและสามารถผลิตกลบดำได้เฉลี่ย 1.09 kg/h ปริมาณผลผลิตถ่านที่ได้จากการไพโรไลซิสแบบต่อเนื่องที่ความชื้นกลบเฉลี่ย 13.48% (w.b.) ได้ปริมาณผลผลิตถ่าน 40.48 % (by weight) ค่าคาร์บอนคงตัวของกลบที่ใช้เป็นวัตถุดิบมีค่าค่อนข้างต่ำคือ 18.32 % (by weight) ส่งผลให้ปริมาณคาร์บอนคงตัวของกลบดำที่ได้จากการทดลองนี้มีค่าต่ำด้วยเฉลี่ย 44.81 % (by weight) ปริมาณซีเถ้าของกลบดำค่อนข้างสูงเท่ากับ 38.10% และค่าความร้อนของกลบในการทดลองนี้ค่อนข้างต่ำ 14,902 kJ/kg จึงส่งผลให้ค่าความร้อนของกลบดำที่ได้จากการไพโรไลซิสมีค่าไม่สูงมากนักเท่ากับ 19,581 kJ/kg คุณสมบัติกลบดำที่ได้จากการไพโรไลซิสในงานวิจัยนี้ที่อุณหภูมิเตาช่วง 380 - 415°C ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานถ่านสำหรับหุงต้ม อย่างไรก็ตามกลบดำที่ได้จากงานวิจัยนี้เหมาะสำหรับการนำไปใช้ทางการเกษตรเพื่อปรับปรุงดินมากกว่าใช้สำหรับเป็นเชื้อเพลิงสำหรับหุงต้มหรือปิ้งย่าง ประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานจากชีวมวลเป็นถ่านของเตาปฏิกรณ์คำนวณเท่ากับ 53.19% ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาปฏิกรณ์เท่ากับ 28.34%

#### 5 กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัยจาก สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) งบประมาณปี 2558 และขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมเครื่องจักรกลเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นครราชสีมา ที่สนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการวิจัย

#### 6 เอกสารอ้างอิง

- แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558 - 2579. 2558. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน พพ
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2547. มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ถ่านไม้หุงต้ม มผช.๖๕๗/๒๕๔๗. แหล่งข้อมูล <https://www.charcoal.snmcenter.com/charcoalthai/standard2.php>. [เข้าถึงเมื่อ 21 กุมภาพันธ์ 2561].
- Adum, J.C. (2009). Improved and more environmentally friendly charcoal production system using a low-cost retort-kiln (Eco-charcoal). Renewable Energy. pp. 1-3.
- Antal, M.J. and Gronk, M. 2003. The Art, Science, and Technology of Charcoal Production. Ind. Eng. Chem. Res. 42, 1619-1640.

Ayhan, D. 2001. Carbonization ranking of selected biomass for charcoal, liquid and gaseous products. Energy Conversion and Management 42. pp. 1229-1238.

Homchat K. and T. Sucharitakul. 2011. The experimental study on pyrolysis of cassava rhizome utilizing flue gas. Energy Procedia 9. pp. 264 – 273.

Patil, K.N., Ramana, P.V. and Singh, R.N. 2000. Performance evaluation of natural draft based agricultural residues charcoal system. Biomass and Bioenergy 18. pp. 161-173.

Saravanakumar, A., Haridasan, T.M. and Kasturi Bai, R. 2006. Technical and feasibility study of conversion of long-stick wood to charcoal in a partial combustion metal kiln. Energy for Sustainable Development.

Yu-Jen Lin and Gwo-shyong Hwang. 2009. Charcoal from biomass residues of a Cryptomeria plantation and analysis of its carbon fixation benefit in Taiwan. Biomass and Bioenergy 33. pp. 1289-1294.