



## รายงานโครงการวิจัย

### เรื่อง

เทคโนโลยีต้นแบบการแปรสภาพของเหลือใช้จากอุตสาหกรรมมะพร้าว น้ำหอม  
เป็นถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพและการทดสอบการเผาในระดับต้นแบบ  
Technology Prototype Development for Waste utilization  
from Young coconut to biocoal

### เสนอ

บริษัท ผลิตไฟฟ้าราชบุรี จำกัด

### โดย

- |                    |               |                  |
|--------------------|---------------|------------------|
| 1. นางสาวสาวิณี    | วุฒิสกุลวงศ์  | หัวหน้าโครงการ   |
| 2. ดร.พิสิฐพงษ์    | อินทรพงษ์     | ผู้ร่วมโครงการ   |
| 3. ผศ.ดร.ปวีณ      | ชัยวัฒน์เสฏฐ์ | ผู้ร่วมโครงการ   |
| 4. นายกิตตินันท์   | สดีใส         | ผู้ร่วมโครงการ   |
| 5. ผศ.ดร.รุ่งโรจน์ | ปิยะภานุวัฒน์ | ที่ปรึกษาโครงการ |
| 6. นายจิระพันธุ์   | เนืองจากนิล   | ที่ปรึกษาโครงการ |

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

# โครงการ เทคโนโลยีต้นแบบการแปรสภาพของเหลือใช้จากอุตสาหกรรมมะพร้าว น้ำหอมเป็นถ่าน เชื้อเพลิงชีวภาพและการทดสอบการเผาในระดับต้นแบบ

## 1. รายละเอียดคณะทำงาน

### 1.1 หัวหน้าโครงการ

ชื่อ นางสาวสาวิณี วุฒิสกุลวงศ์

สังกัด ศูนย์บริการทางการศึกษาราชบุรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

สัดส่วน % การทำงาน 30%

### 1.2 ผู้ร่วมโครงการ

ชื่อ ดร.พิสิฐพงษ์ อินทรพงษ์

สังกัด ศูนย์บริการทางการศึกษาราชบุรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

สัดส่วน % การทำงาน 20%

ชื่อ ผศ.ดร.ปวีณ ชัยวัฒน์เสฏฐ์

สังกัด สถาบันพัฒนาและฝึกอบรมโรงงานต้นแบบ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

สัดส่วน % การทำงาน 20%

ชื่อ นายกิตตินันท์ สดใส

สังกัด ศูนย์บริการทางการศึกษาราชบุรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

สัดส่วน % การทำงาน 10%

### 1.3 ที่ปรึกษาโครงการ

ชื่อ ผศ.ดร.รุ่งโรจน์ ปิยะภานุวัฒน์

สังกัด ศูนย์บริการทางการศึกษาราชบุรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

สัดส่วน % การทำงาน 10%

ชื่อ นายจิระพันธ์ เนื่องจากนิล

สังกัด ศูนย์วิจัยและบริการเพื่อชุมชนและสังคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

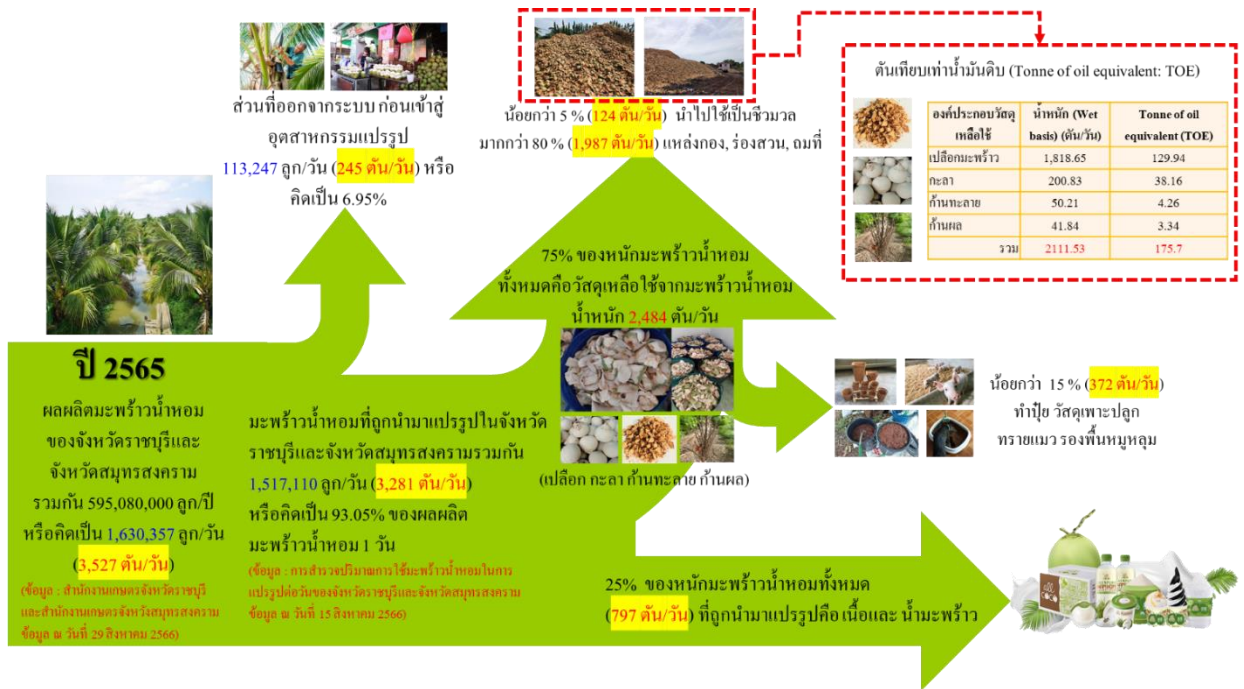
สัดส่วน % การทำงาน 10%

## 2. หลักการและเหตุผล

จังหวัดราชบุรีเป็นพื้นที่สำคัญของประเทศที่มีการผลิตมะพร้าวน้ำหอม (อันดับ 1 ของประเทศ) การเก็บเกี่ยวและการแปรรูปมะพร้าวน้ำหอมส่งผลให้เกิดของเหลือใช้จำนวนมาก ได้แก่ เปลือกมะพร้าว กะลามะพร้าว เส้นใย หนวด และมะพร้าวตกเกรด (ทรงมะละกอ) ปัจจุบันการนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ ยังมีในปริมาณน้อย (ประมาณร้อยละ 10 จากปริมาณทั้งหมด) ของเหลือเหล่านี้ส่วนใหญ่จึงถูกทิ้งให้เน่าเปื่อยตามธรรมชาติหรือถูกนำไปเผาในที่โล่ง ทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมต่างๆ เช่น มลพิษทางอากาศ การเกิดกลิ่นไม่พึงประสงค์ และแมลงศัตรูพืชจากกองของเหลือที่มีอยู่ทั่วจังหวัดราชบุรี การจัดการของเหลือที่มีประสิทธิภาพจะสามารถลดผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อสิ่งแวดล้อมและสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับของเหลือเหล่านี้ได้

การแปรสภาพของเหลือจากอุตสาหกรรมมะพร้าวน้ำหอมเป็นถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพเป็นแนวทางที่มีศักยภาพและโอกาสเป็นไปได้สูง เนื่องจากสามารถนำไปใช้เป็นพลังงานทดแทนการใช้เชื้อเพลิงถ่านหินได้เกือบทั้งหมด รวมถึงลดการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากถ่านหิน โดยกระบวนการผลิตถ่านชีวภาพเริ่มจากการนำของเหลือใช้ ลดความชื้น เผาในสภาพที่มีออกซิเจนจำกัด ด้วยกระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) กระบวนการนี้ทำให้เกิดถ่านชีวภาพซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในครัวเรือนและปรับปรุงให้ใช้ในหม้อไอน้ำอุตสาหกรรมได้ นอกจากนี้ยังสามารถนำถ่านชีวภาพไปใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดินในการเกษตร เนื่องจากมีความสามารถในการดูดซับน้ำและสารอาหารที่ดี ช่วยปรับปรุงคุณภาพดินและส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช

ในส่วนศักยภาพในการนำของเหลือทิ้งจากมะพร้าวน้ำหอมมาผลิตเป็นถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพจากข้อมูลที่ได้ทำการวิจัยในปี 2566 พบว่า มีของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมมะพร้าวน้ำหอมในพื้นที่ทำวิจัยราชบุรีและสมุทรสงครามประมาณสองพันตันต่อวันและมีนำไปใช้ประโยชน์และศักยภาพการแปรสภาพดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ปริมาณของเหลือใช้จากมะพร้าว น้ำหอม การแปรรูป และการนำไปใช้ประโยชน์

ดังนั้นการผลิตถ่านชีวภาพและทดสอบผลผลิตในระดับต้นแบบ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการตัดสินใจ  
ในดำเนินการศึกษาความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์และวิศวกรรมรวมถึงกำหนดแผนธุรกิจต่อไป

### 3. วัตถุประสงค์

- ทดสอบเทคโนโลยีการแปรรูปจากของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมมะพร้าว น้ำหอมเป็นถ่านเชื้อเพลิงชีวมวลแบบกะ (Batch type) ระดับต้นแบบ เพื่อผลิตถ่านชีวมวลจำนวน 300 กิโลกรัม
- ศึกษาคุณสมบัติของถ่านเชื้อเพลิงชีวมวลที่ผ่านการแปรรูป
- ทดสอบการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงถ่านชีวมวลเทียบกับถ่านหินซับบิทูมินัสในเตาเผาต้นแบบและวิเคราะห์สมบัติของก๊าซเสียจากปล่อง (Flue gas) และองค์ประกอบเถ้า

#### 4. กรอบการดำเนินงาน

##### 4.1 การวางแผนและการเตรียมการ

- คัดเลือกเทคโนโลยีต้นแบบในการแปรสภาพของเหลือจากอุตสาหกรรมมะพร้าว น้ำหอมเป็น ถ่านเชื้อเพลิงและถ่านชีวภาพ
- เตรียมแผนการจัดหาวัตถุดิบจำนวน 2 ตันในการแปรสภาพ

##### 4.2 การผลิตและวิเคราะห์คุณสมบัติของเชื้อเพลิง

- ศึกษาข้อมูลด้านเทคนิค กำหนดแนวคิดกระบวนการแปรสภาพของเหลือเป็นถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพ
- วิเคราะห์คุณสมบัติของเชื้อเพลิงที่ได้จากการแปรสภาพ

##### 4.3 การทดสอบการเผาไหม้และสรุปผล

- ทำการเปรียบเทียบการเผาไหม้เชื้อเพลิงโดยใช้ถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพ 100% เทียบกับ ถ่านหิน ซับปิทมินัส 100% ในการทดสอบในเตาเผาระดับต้นแบบ
- ทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงด้วยการปรับค่า A/F ratio อย่างน้อย 2 ค่า
- วัดผลไอเสียที่ออกจากปล่องการเผาไหม้และประเมินผลจากการเผาไหม้
- สรุปผลการทดสอบและประเมินต้นทุนการแปรสภาพในเบื้องต้น

#### 5. แผนการดำเนินงานวิจัย

##### 5.1 การเก็บข้อมูลและการวิเคราะห์

- นำตัวอย่างของเหลือจากอุตสาหกรรมมะพร้าว น้ำหอมในพื้นที่จังหวัดราชบุรี เฉพาะเปลือกมะพร้าว ตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพและเคมี เช่น ความชื้น และอื่นๆ ที่จำเป็น

##### 5.2 การทดลองแปรสภาพของเหลือเป็นถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพ

- ทำการเตรียมตัวอย่างของเหลือให้เหมาะสมสำหรับการทดลอง ชั่งน้ำหนักและทดสอบการแปรสภาพ เช่น การตัดตัวอย่างให้มีขนาดเล็ก การทำให้แห้งด้วยการอัด และบันทึกน้ำหนัก
- บันทึกน้ำหนักและความชื้นของวัตถุดิบ ทดสอบการแปรสภาพด้วยเตาเผาไพโรไลซิส และควบคุมสภาวะการแปรสภาพ เช่น อุณหภูมิที่ 500 องศาเซลเซียส เวลาในการเผา และปริมาณออกซิเจน และหลังการแปรสภาพให้บันทึกน้ำหนักที่ได้

### 5.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติของถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพ

- ตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพ เช่น ค่าความร้อน ปริมาณเถ้า ultimate analysis และอื่นๆ ที่จำเป็น

### 5.4 ทดสอบการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ต้นแบบ

- กำหนดเชื้อเพลิงที่ทดสอบได้แก่ ถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพกับถ่านหินโดยทำการเผาไหม้เปรียบเทียบผลซึ่งกัน โดยอุณหภูมิในการเผาไหม้ระหว่าง 830-870 องศาเซลเซียส
- วัดอุณหภูมิในห้องเผาไหม้เปรียบเทียบตามประเภทเชื้อเพลิง
- ตรวจสอบวัดและประเมินประสิทธิภาพการเผาไหม้ สมบัติของไอเสียจากระบบ
- สรุปปัญหาที่เกิดและศักยภาพของเชื้อเพลิงต้นแบบจากการทดสอบเบื้องต้น

6. แผนการทำงาน

หัวข้อ	สัปดาห์ที่							
	1	2	3	4	5	6	7	8
<b>6.1 การเก็บข้อมูลและการวิเคราะห์</b>								
<ul style="list-style-type: none"> <li>นำตัวอย่างของเหลือจากอุตสาหกรรมมะพร้าวน้ำหอมในพื้นที่จังหวัดราชบุรี เฉพาะเปลือกมะพร้าว ตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพและเคมี เช่น ความชื้น และอื่นๆ ที่จำเป็น</li> </ul>								
<b>6.2 การทดลองแปรสภาพของเหลือเป็นถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพ</b>								
<ul style="list-style-type: none"> <li>ทำการเตรียมตัวอย่างของเหลือให้เหมาะสมสำหรับการทดลอง ชั่งน้ำหนัก และทดสอบการแปรสภาพ เช่น การตัดตัวอย่างให้มีขนาดเล็ก การทำให้แห้ง ด้วยการอัด และบันทึกน้ำหนัก</li> </ul>								
<ul style="list-style-type: none"> <li>ทดสอบการแปรสภาพด้วยเตาเผาไพโรไลซิส และควบคุมสภาวะการแปรสภาพ เช่น อุณหภูมิที่ 500 องศาเซลเซียส เวลาในการเผา และปริมาณออกซิเจน และหลังการแปรสภาพให้บันทึกน้ำหนักที่ได้</li> </ul>								
<b>6.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติของถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพ</b>								
<ul style="list-style-type: none"> <li>ตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพ เช่น ค่าความร้อน ปริมาณเถ้า ultimate analysis และอื่นๆ ที่จำเป็น</li> </ul>								

หัวข้อ	สัปดาห์ที่							
	1	2	3	4	5	6	7	8
6.4 ทดสอบการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ต้นแบบ								
<ul style="list-style-type: none"> <li>กำหนดเชื้อเพลิงที่ทดสอบ ได้แก่ ถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพกับถ่านหิน โดยทำการเผาไหม้เปรียบเทียบผลซึ่งกัน โดยอุณหภูมิในการเผาไหม้ระหว่าง 830-870 องศาเซลเซียส วัดอุณหภูมิในห้องเผาไหม้เปรียบเทียบตามประเภทเชื้อเพลิง ตรวจวัดและประเมินประสิทธิภาพการเผาไหม้ สมบัติของไอเสียจากระบบ</li> </ul>								
<ul style="list-style-type: none"> <li>สรุปปัญหาที่เกิดและศักยภาพของเชื้อเพลิงต้นแบบจากการทดสอบเบื้องต้น</li> </ul>								

## 7. ผลการวิจัย

### 7.1 การเก็บข้อมูลและการวิเคราะห์

ตัวอย่างของเหลือใช้จากอุตสาหกรรมมะพร้าว น้ำหอมที่นำมาใช้ในโครงการนี้ มีลักษณะเป็นลูกมะพร้าว น้ำหอมผ่าครึ่งที่มีการนำน้ำและเนื้อมะพร้าวออกไปใช้ประโยชน์แล้ว (รูปที่ 2) ซึ่งแต่เดิมโรงงานจะนำลูกมะพร้าว น้ำหอมมากองตากแดดไว้เพื่อลดความชื้นในเปลือกมะพร้าว น้ำหอมที่มีมากถึง 88.46 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แต่ในโครงการนี้จะนำลูกมะพร้าว น้ำหอมที่เหลือใช้มาลดขนาดด้วยเครื่องบด hammer mill แล้วนำมาเข้าเครื่องอัดไฮดรอลิกเพื่อกดอัดเอาน้ำที่มีอยู่ในเปลือกมะพร้าวออกมาทำให้ความชื้นลดลงเหลือ 75.46 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งสามารถลดความชื้นได้ประมาณร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก เปลือกมะพร้าวที่ได้จะมีลักษณะแห้ง สีน้ำตาลอ่อนปนขาว แสดงดังรูปที่ 3 ส่วนน้ำที่ได้จากกระบวนการบีบอัดจะถูกเก็บไว้เพื่อนำไปวิเคราะห์หาสมบัติทางเคมีต่อไป



ของเหลือใช้จากอุตสาหกรรมมะพร้าว น้ำหอม

แบบเดิม



กองตากแดดเพื่อลดความชื้น

แบบใหม่



การลดขนาดด้วยเครื่องบด hammer mill



การบีบเอาน้ำออกเครื่องอัดไฮดรอลิก

รูปที่ 2 แผนภาพการจัดการของเหลือใช้จากอุตสาหกรรมมะพร้าว น้ำหอมก่อนนำไปแปรสภาพ



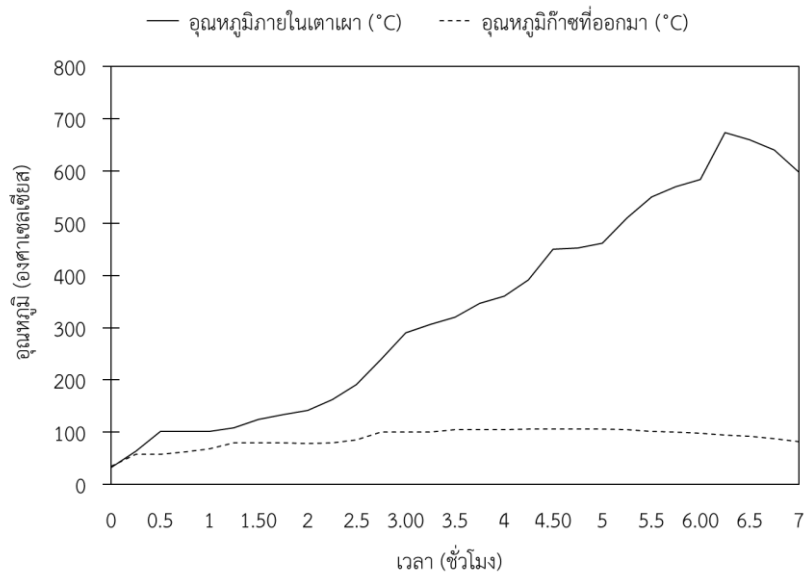
รูปที่ 3 ลักษณะของเหลือใช้จากอุตสาหกรรมมะพร้าว น้ำหอมก่อนและหลังบีบอัด

## 7.2 การทดลองแปรสภาพของเหลือเป็นถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพ

ของเหลือใช้จากอุตสาหกรรมมะพร้าว น้ำหอมที่ผ่านการบีบอัดจะถูกนำไปเผาแบบไพโรไลซิส (pyrolysis) คือ การเผาในสภาวะไร้ออกซิเจน ด้วยเตาเผาในรูปที่ 4 โดยเริ่มจากการใส่ของเหลือใช้จากอุตสาหกรรมมะพร้าว น้ำหอมลงในเตาเผาให้เต็มและชั่งน้ำหนักเริ่มต้นได้ 45 กิโลกรัม จากนั้นปิดฝาให้สนิทและอุดฝาเตาด้วยปูนทนความร้อนอย่าให้มีอากาศเข้าไปได้ แล้วให้ความร้อนโดยใช้น้ำมันเครื่องและไม้พินเป็นเชื้อเพลิงที่บริเวณด้านล่างและช่องด้านบนตรงกลางเตาเผา อุณหภูมิภายในเตาเผาจะค่อยๆ เพิ่มมากขึ้น และต้องควบคุมอุณหภูมิของเตาเผาให้ไม่ต่ำกว่า 550 องศาเซลเซียส ซึ่งจะวัดอุณหภูมิ 2 จุด คือ อุณหภูมิภายในเตาเผาและอุณหภูมิก๊าซที่ออกมา และบันทึกอุณหภูมิทุกๆ 15 นาที (รูปที่ 5) จนอุณหภูมิก๊าซที่ออกมาค่อยๆ ลดลง แสดงว่า ของเหลือใช้จากอุตสาหกรรมมะพร้าว น้ำหอมถูกแปรสภาพเป็นถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพ (biocoal) สมบูรณ์แล้ว จากนั้นรอให้เตาเผาเย็นตัวลง แล้วเปิดฝาทิ้งจะได้ถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพที่มีสีดำเบา และเปราะแตกง่าย ชั่งน้ำหนักถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพหลังเผาที่ได้ เท่ากับ 3.25 กิโลกรัม ซึ่งคิดเป็นผลผลิตร้อยละ 26.46 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4 ลักษณะเตาเผาและถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพที่ได้



รูปที่ 5 กราฟอุณหภูมิภายในเตาเผาและอุณหภูมิก๊าซที่ออกมา

### 7.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติของถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพที่ได้

ถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพที่ได้จะถูกนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีเทียบกับถ่านหินซับบิทูมินัส ที่มีลักษณะเป็นก้อน สีน้ำตาล ขนาด 10-25 มิลลิเมตร โดยได้รับความอนุเคราะห์มาจาก บริษัท นำเขา (ประเทศไทย) จำกัด ด้วยวิธีต่างๆ ดังนี้

- 1) การวิเคราะห์ปริมาณแบบกลุ่มสาร (proximate analysis) ได้แก่ ความชื้น สารระเหย คาร์บอนคงตัว และเถ้า
- 2) การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis) ได้แก่ ปริมาณธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์
- 3) การวิเคราะห์อื่นๆ ได้แก่ ความหนาแน่น ค่าความร้อน และอื่นๆ

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพและเคมีของถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพและถ่านหิน

	ถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพ	ถ่านหิน
การวิเคราะห์ปริมาณแบบกลุ่มสาร (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)		
ความชื้น	1.85	24.18
สารระเหย	19.68	34.48
คาร์บอนคงตัว	70.38	37.67
เถ้า	8.08	3.67
การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)		
คาร์บอน	73.03	62.80
ไฮโดรเจน	2.96	5.64
ไนโตรเจน	1.3	1.40
ซัลเฟอร์	0.06	0.40
ความหนาแน่นรวม (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	180.16	670.55
ค่าความร้อน ที่ความชื้นฐานเปียก (กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม)	6,124	5,195

ตารางที่ 1 แสดงสมบัติทางกายภาพและเคมีของถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพเทียบกับถ่านหิน พบว่า ถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพที่ได้มีความชื้น เพียง 1.85 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และมีปริมาณสารระเหย คาร์บอนคงตัว และเถ้า เท่ากับ 19.68 70.38 และ 8.08 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ขณะที่ ถ่านหินจะมีความชื้น ปริมาณสารระเหย คาร์บอนคงตัว และเถ้า เท่ากับ 24.18 34.48 37.67 และ 3.67 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพกับถ่านหิน พบว่า ถ่านหินมีค่าความชื้นและสารระเหยที่สูงกว่าถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพ ซึ่งสารระเหยที่ถูกปลดปล่อยมาจากการเผาถ่านหินส่วนใหญ่จะเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน ไฮโดรเจน น้ำ ไอน้ำมันดิน (tar) และอื่นๆ ขณะที่ปริมาณคาร์บอนคงตัวและเถ้าของถ่านหินจะมีค่าน้อยกว่าถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพ แสดงให้เห็นว่า ถ่านหินมีส่วนที่เผาแล้วติดไฟได้และมีปริมาณสารอนินทรีย์น้อยกว่า ถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพ เมื่อพิจารณาปริมาณธาตุของถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพ พบว่า ปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ ของถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพ เท่ากับ 73.03 2.96 1.30 และ 0.06 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ขณะที่ถ่านหินจะมีปริมาณธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ เท่ากับ 62.80 5.64 1.40 และ 0.40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า ปริมาณคาร์บอนของถ่านหินน้อยกว่าถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพ แต่ถ่านหินจะมีปริมาณไฮโดรเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ที่มากกว่าถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพ ซึ่งจากผลการวิเคราะห์สามารถนำมา คำนวณหาอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไฮโดรเจนของถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพและถ่านหินได้ เท่ากับ 24.67 และ 11.13 ตามลำดับ แสดงว่า ถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพจะมีโครงสร้างเป็นวงแอรอแมติก

ที่เชื่อมต่อกันขนาดใหญ่และมีมวลโมเลกุลสูงกว่าถ่านหิน นอกจากนี้ยังพบว่า ถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพจะให้ค่าความร้อน เท่ากับ 6,124 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม ที่ความชื้นฐานเปียก (wet basis) และมากกว่าถ่านหินที่มีค่าความร้อน เท่ากับ 5,195 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม ที่ความชื้นฐานเปียก เนื่องจากถ่านหินมีความชื้นสูงกว่าถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพ แต่เมื่อกำหนดค่าความร้อนที่ความชื้นฐานแห้ง (dry basis) ของถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพและถ่านหินจะได้ค่าเท่ากับ 6,240 และ 6,852 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งถ่านหินจะมีค่าสูงกว่าเล็กน้อย

จากลักษณะทางกายภาพของถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพและถ่านหินที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน และความหนาแน่นของถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพที่มีค่าต่ำกว่าถ่านหินมาก จะทำให้เกิดปัญหาในด้านการจัดการ (handling) ถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพ เช่น การใช้พื้นที่การกองเก็บมาก และอาจเกิดปัญหาในการลำเลียงเข้าเตาเผา/หม้อไอน้ำ แต่สามารถปรับปรุงสมบัติของถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพได้โดยการนำไปอัดเม็ด (palletization) เพื่อปรับรูปลักษณะให้ใกล้เคียงกับถ่านหินและช่วยเพิ่มความหนาแน่นรวมได้

จากข้อมูลมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่านอัดแท่งของสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคุณภาพของถ่านเชื้อเพลิง ปี 2547 ระบุคุณลักษณะของถ่านอัดแท่งที่ต้องการ ไว้ว่า ถ่านอัดแท่งต้องมีความชื้นไม่เกินร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก และมีค่าความร้อนไม่น้อยกว่า 5,000 แคลอรีต่อกกรัม หรือ กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม จะเห็นได้ว่า ถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพที่ได้จากการแปรสภาพของเหลือจากอุตสาหกรรมมะพร้าว น้ำหอมเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่านอัดแท่ง คือ มีความชื้น 1.85 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และมีค่าความร้อน 6,124 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม

ตารางที่ 2 สมบัติของเถ้าจากถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพและถ่านหิน

	ถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพ	ถ่านหิน
องค์ประกอบ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)		
Si	5.24	5.29
Al	0.184	6.23
Ca	3.78	15.0
Mg	3.90	7.61
Na	6.15	3.46
K	28.9	0.563
P	2.76	0.113
Cl	19.0	0.173
S	0.929	5.92
Fe	0.964	10.00
Ti	0.02	0.26
สารประกอบ		
	KCl	
	CaCO <sub>3</sub>	CaSO <sub>4</sub>
	SiO <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>
	Mg <sub>2</sub> (P <sub>2</sub> O <sub>7</sub> )	SiO <sub>2</sub>
	K <sub>2</sub> Ca <sub>2</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
	Amorphous	Amorphous
คุณสมบัติด้าน Fouling		
R <sub>b/a</sub>	4.854	2.2631
F <sub>u</sub>	209.16	12.103

เถ้าจากถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพและถ่านหินถูกเตรียมตามวิธีมาตรฐาน ASTM E1755-01 และนำไปวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วยเครื่อง X-ray fluorescence spectrometer (XRF) และโครงสร้างผลึกด้วยเครื่อง X-ray diffractometer (XRD) พบว่า เถ้าของถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพ จะมีธาตุ K และ Cl เป็นธาตุหลัก มี Si Ca Mg Na และ P เป็นธาตุรอง และมี S Fe และ Al อยู่เล็กน้อย ซึ่งธาตุดังกล่าวอยู่ในรูปสารประกอบ KCl CaCO<sub>3</sub> SiO<sub>2</sub> และสารประกอบเชิงซ้อน รวมไปถึงสารประกอบที่ไม่มีโครงสร้างผลึกที่อาจประกอบไปด้วยธาตุหมู่ Alkaline (K และ Na) ขณะที่เถ้าของถ่านหินจะมีธาตุ Ca Mg และ Fe เป็นธาตุหลัก มีธาตุ Si Al Mg S และ Na เป็นธาตุรอง และมี Cl P และ K น้อยมาก โดยธาตุดังกล่าวจะอยู่ในรูปของสารประกอบซัลเฟตและคาร์บอเนตของ Ca (และอาจรวมถึง Mg) ออกไซด์ของ Si และ Fe และสารประกอบที่ไม่มีโครงสร้างผลึก (Amorphous) ที่อาจมีธาตุ Na เป็นส่วนประกอบ เมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบเถ้าของถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพและถ่านหิน พบว่า ปริมาณธาตุหมู่ Alkaline ของถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพจะสูงกว่าถ่านหินประมาณ 9 เท่า

การเผาไหม้ถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพมีแนวโน้มที่จะประสบปัญหาจากเถ้าในระหว่างการเผาไหม้เนื่องจากมีปริมาณธาตุ K และ Na สูง ทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยากับธาตุ Si และ Ca เกิดเป็นสารประกอบกลุ่มซิลิเกตที่ไม่มีโครงสร้างผลึกและมีจุดหลอมเหลวต่ำ (eutectic point 730 องศาเซลเซียส) ซึ่งอยู่ในรูปสารหลอมเหลวและเกาะตัวสะสมอยู่ที่พื้นผิวต่างๆ ในห้องเผาไหม้ (slagging) นอกจากนี้ถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพมีปริมาณธาตุ Cl สูง จะทำให้ธาตุ K ที่อยู่ในเชื้อเพลิง ถูกปลดปล่อยออกมาในระหว่างการเผาไหม้ในรูปของ KCl ที่เป็นวัฏภาคก๊าซ (vapor phase) และสามารถเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่อง กลายเป็นสารประกอบกลุ่ม silicate ที่ไปเกาะสะสมบนท่อและเปลี่ยนความร้อน (fouling) ขณะที่สารประกอบในถ่านหินจะเกิดขึ้นจากธาตุ Ca และ Fe รวมทั้ง Si Al และ Mg ที่อยู่ในรูปสารประกอบออกไซด์ ซัลเฟต และคาร์บอเนต เป็นสารประกอบที่มีเสถียรภาพทางความร้อนสูง (จุดหลอมเหลว  $\text{CaSO}_4$ : 1,460 °C;  $\text{CaCO}_3$ : 825 °C,  $\text{SiO}_2$ : 1,710 °C และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ : 1,565 °C) ซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปสารของแข็ง โดยที่ธาตุ Na และ K ในถ่านหินสามารถเกิดปฏิกิริยากลายเป็นสารประกอบกลุ่ม silicate ได้เช่นกัน แต่ถ่านหินมีปริมาณธาตุดังกล่าวน้อยกว่าถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพมาก

เมื่อนำสัดส่วนขององค์ประกอบในถ่านเชื้อเพลิงในรูปแบบออกไซด์ (ภาคผนวก ข) มาคำนวณค่า Fouling Index (Fu) ดังสมการที่ (1) และ (2)

$$F_u = R_{b/a} \times (Na_2O + K_2O) \quad (1)$$

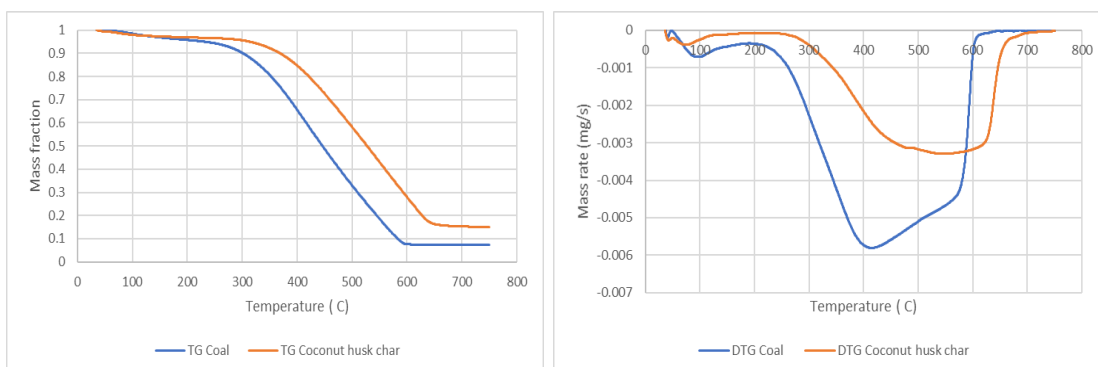
$$R_{b/a} = \frac{Fe_2O_3 + CaO + MgO + K_2O + Na_2O}{Al_2O_3 + SiO_2 + TiO_2} \quad (2)$$

โดยที่	$F_u < 0.6$	ความเสี่ยงในการเกิด fouling ต่ำ
	$F_u = 0.6-1.6$	ความเสี่ยงในการเกิด fouling ปานกลาง
	$F_u = 1.6-40$	ความเสี่ยงในการเกิด fouling สูง
	$F_u > 40$	ความเสี่ยงในการเกิด fouling สูงมาก

ค่า Fouling Index ของถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพและถ่านหิน มีค่าเท่ากับ 209.16 และ 12.103 ตามลำดับ แสดงว่า ความเสี่ยงในการเกิด fouling จากการเผาไหม้ถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพอยู่ในเกณฑ์สูงมาก ขณะที่การเผาไหม้ถ่านหินจะมีความเสี่ยงที่เกิด fouling สูง จึงประเมินในเบื้องต้นได้ว่าแนวโน้มความรุนแรงของปัญหาที่เกิดจากเถ้าในระหว่างการเผาไหม้ถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพจะสูงกว่าการเผาไหม้ถ่านหิน

การทดสอบการเปลี่ยนแปลงของถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพและถ่านหินในสภาวะบรรยากาศของอากาศ เป็นการจำลองกระบวนการเผาไหม้ (combustion) ของวัสดุด้วยเครื่องมือ Thermal gravimetric analyzer (TGA) โดยใช้วิธีอุณหภูมิไม่คงที่ (non-isothermal method) ตัวอย่างถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพและถ่านหินที่นำมาทดสอบจะผ่านการอบแห้งแล้ว ซึ่งพฤติกรรมทางความร้อนของ

ถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพและถ่านหินจะแสดงในรูปที่ 6 คือ (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนมวลของตัวอย่าง (TG) กับอุณหภูมิ และ (ข) อัตราการเปลี่ยนแปลงมวล (DTG) กับอุณหภูมิ



(ก) TG

(ข) DTG

รูปที่ 6 พฤติกรรมทางความร้อนของถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพและถ่านหินในอากาศ

การเปลี่ยนแปลงสัดส่วนมวลของถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพและถ่านหินจะลดลงอย่างช้าๆ โดยที่อุณหภูมิประมาณ 120 องศาเซลเซียส อัตราการเปลี่ยนแปลงมวลจะมีค่าเป็นลบ แสดงถึง มวลของถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพและถ่านหินที่ลดลง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนถึงประมาณ 200-300 องศาเซลเซียส สัดส่วนมวลของตัวอย่างจะลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงอุณหภูมิประมาณ 700 องศาเซลเซียส ซึ่งพบอัตราการเปลี่ยนแปลงมวลสูงสุดของถ่านหินและถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพ ที่อุณหภูมิ 410 และ 550 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จากนั้นสัดส่วนมวลของถ่านหินและถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพจะคงที่และมีอัตราการเปลี่ยนแปลงมวล เท่ากับ 0 ที่อุณหภูมิ 620 และ 710 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

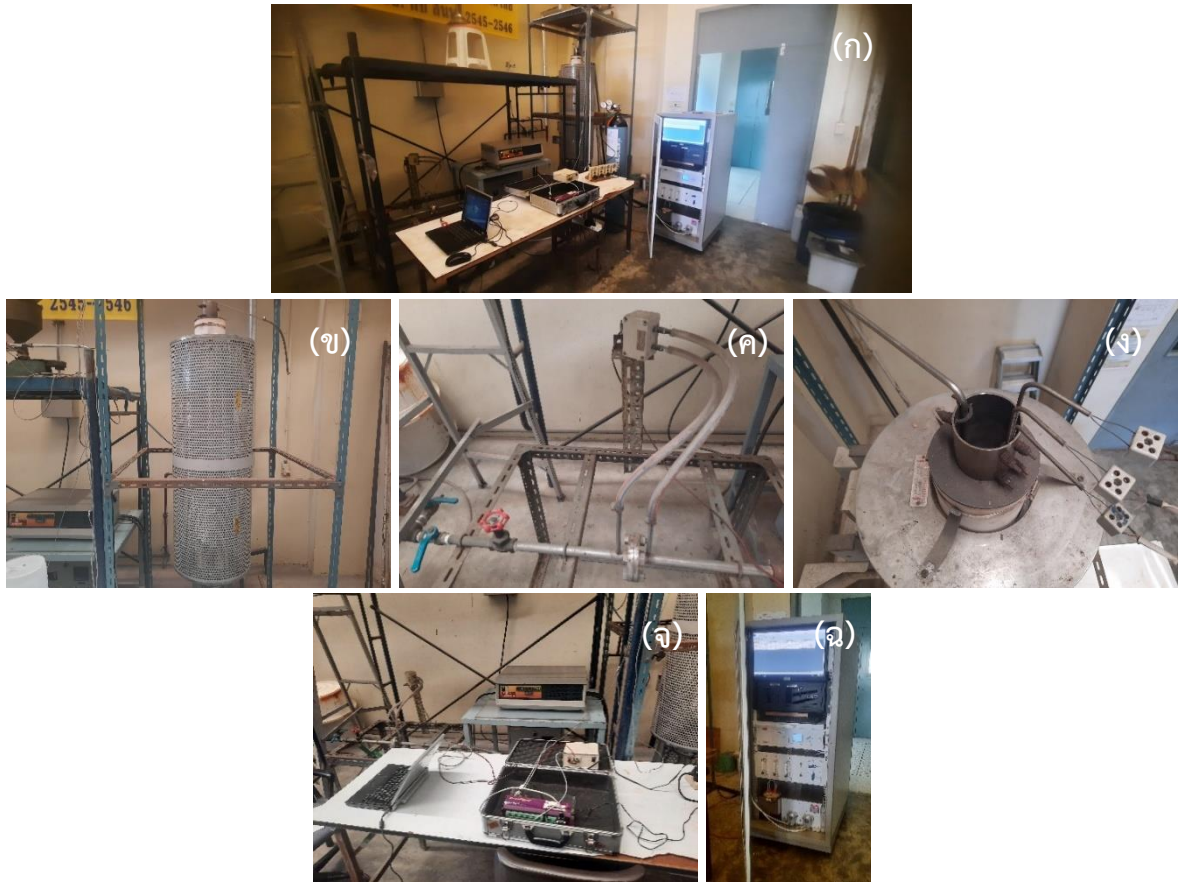
การเปลี่ยนแปลงของมวลตัวอย่างในช่วงอุณหภูมิต่างๆ มีสาเหตุดังต่อไปนี้

- 1) ที่อุณหภูมิเริ่มต้น จนถึงอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส มวลที่ลดลงเกิดจากการระเหยของน้ำ แม้ว่าตัวอย่างจะผ่านการอบแห้งแล้ว แต่จะเกิดการระเหยของน้ำได้เนื่องจากตัวอย่างดูดซับความชื้นในอากาศในระหว่างขั้นตอนเตรียมตัวก่อนการวิเคราะห์
- 2) ที่อุณหภูมิระหว่าง 140 องศาเซลเซียส ถึง ช่วงอุณหภูมิ 220-250 องศาเซลเซียส มวลที่ลดลงเกิดจากการสลายตัวทางความร้อนขององค์ประกอบบางส่วนในตัวอย่าง กลายเป็นสารระเหย (devolatilization) ซึ่งถ่านหินจะมีการเปลี่ยนแปลงช่วงนี้ชัดเจนกว่าถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพจึงมีปริมาณสารระเหยมากกว่า
- 3) ที่ช่วงอุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ถึง ช่วงอุณหภูมิ 620-710 องศาเซลเซียส จะเกิดการลดลงของมวลมากที่สุดและลดลงอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากเป็นช่วงที่เกิดการเผาไหม้ถ่าน (Char combustion)
- 4) ที่อุณหภูมิ 620 และ 710 องศาเซลเซียส การเผาไหม้ถ่านจะสิ้นสุดลง ตัวอย่างที่เหลืออยู่จะกลายเป็นเถ้าที่ไม่เกิดปฏิกิริยากับอากาศและน้ำหนักสุดท้ายจะคงที่

จากตารางที่ 1 ถ่านหินมีความชื้นสูงกว่าถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพทำให้ถ่านหินต้องใช้ความร้อนในการระเหยน้ำมากกว่าถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพ ขณะที่ถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพจะมีอุณหภูมิการเกิดสารระเหยและอุณหภูมิสิ้นสุดการเผาไหม้สูงกว่าถ่านหิน ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณสารระเหยของถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพที่มีค่าต่ำกว่าถ่านหิน แสดงให้เห็นว่า ถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพเกิดการติดไฟและเผาไหม้ยากกว่าถ่านหินและต้องใช้อุณหภูมิการเผาที่สูงกว่า รวมไปถึงเวลาที่ใช้ในกระบวนการเผาไหม้นานกว่า เพื่อให้การเผาไหม้ของถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพเกิดได้เทียบเท่ากับถ่านหิน (ประสิทธิภาพการเผาไหม้ หรือ การเปลี่ยนไปเป็นไอเสีย)

#### 7.4 ทดสอบการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ต้นแบบ

การทดสอบการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ต้นแบบจะใช้เตาเผาแบบตะแกรงนิ่งระดับห้องปฏิบัติการในการจำลองการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นในเตาเผาอุตสาหกรรม โดยระบบเตาเผาแบบตะแกรงนิ่งระดับห้องปฏิบัติการจะประกอบด้วยส่วนต่างๆ แสดงดังรูปที่ 7 ซึ่งตัวอย่างถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพและถ่านหินที่จะป้อนเข้ามาทดสอบในเตาเผาต้องนำไปบดย่อยเพื่อลดขนาดให้มีขนาดอนุภาคไม่เกิน 2 มิลลิเมตร ก่อน จึงจะสามารถใช้เครื่องป้อนแบบสกรูป้อนตัวอย่างได้ เครื่องป้อนแบบสกรูที่ผ่านการสอบเทียบน้ำหนักแล้วจะป้อนตัวอย่างและปล่อยให้ไหลตกด้วยแรงโน้มถ่วงจากด้านบนของเตาปฏิกรณ์ลงมาที่ห้องเผาไหม้ โดยมีเครื่องมือวัดแบบ orifice วัดอากาศที่ไหลจากทางด้านล่างของปฏิกรณ์ผ่านกองเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ ไอเสียจากการเผาไหม้จะถูกเก็บและถูกวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบ ภายในห้องเผาไหม้มีอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ ข้อมูลสภาวะการทำงานของเตาเผาถูกเก็บรวบรวมโดยอุปกรณ์เก็บข้อมูลและเครื่องคอมพิวเตอร์ การทดสอบเผาไหม้ดำเนินการในแบบสภาวะคงตัว ที่อุณหภูมิคงที่ โดยอัตราการป้อนเชื้อเพลิงและอากาศถูกควบคุมให้คงที่ที่ร้อยละของอากาศส่วนเกินอยู่ในช่วง 40-50 และอุณหภูมิเตาเผาที่ 850 องศาเซลเซียส หลังการทดสอบการเผาไหม้ตัวอย่างถ้าที่อยู่ในเตาเผาจะถูกเก็บรวบรวมและนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีต่อไป

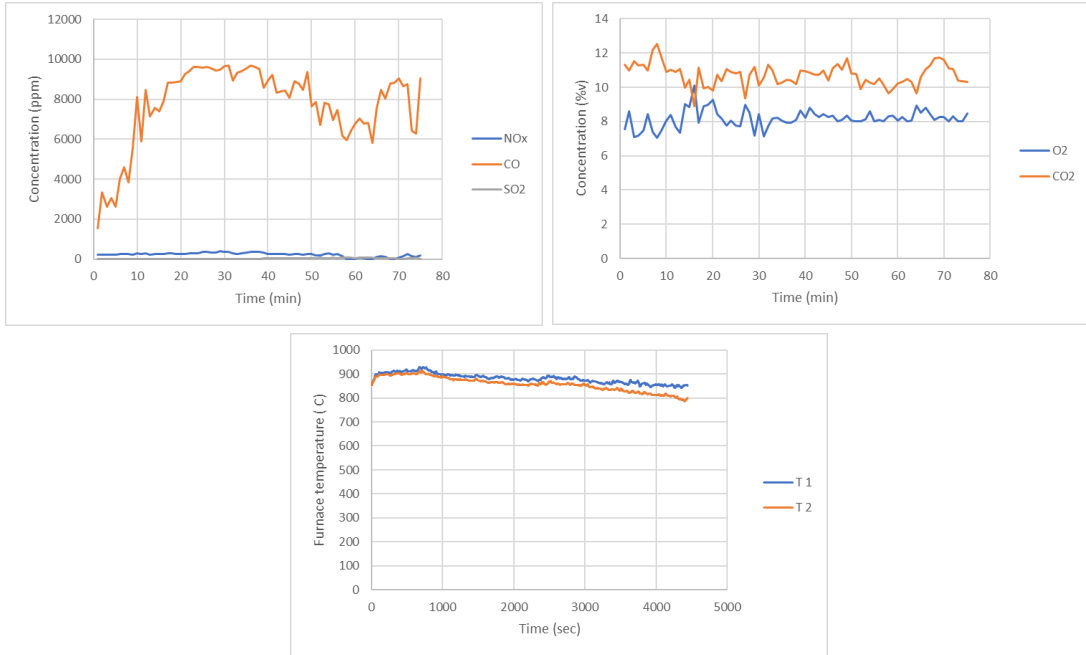


รูปที่ 7 เตาเผาแบบตะแกรงรับนิ่งระดับห้องปฏิบัติการ

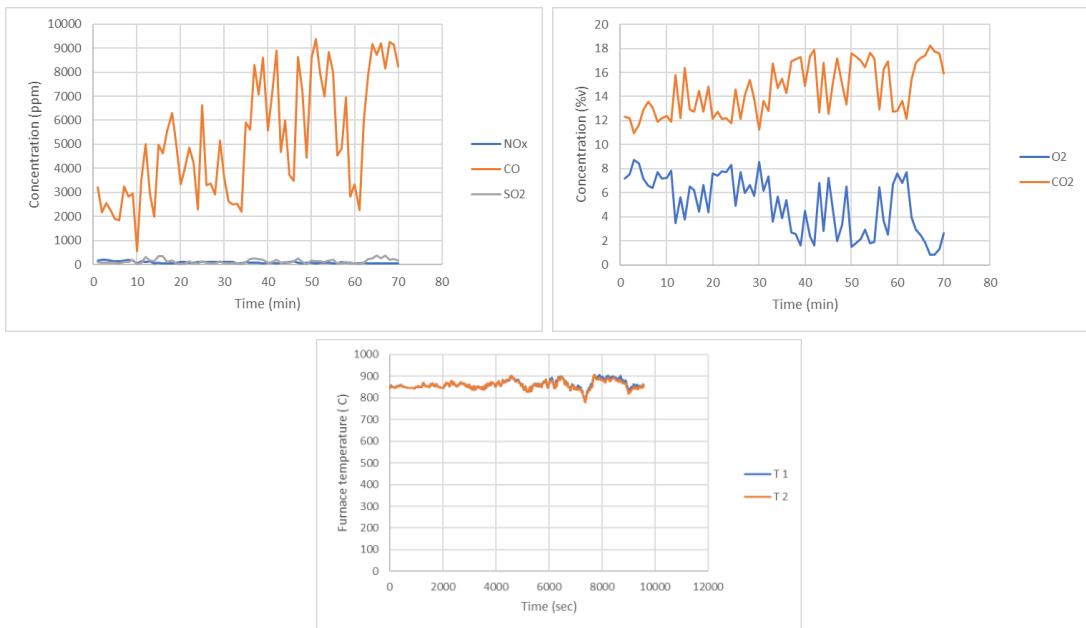
- (ก) ระบบโดยรวม; (ข) เตาเผาอุณหภูมิสูงและปฏิกรณ์; (ค) อุปกรณ์วัดอัตราไหลของอากาศแบบ Orifice อุปกรณ์วัดความดัน และวาล์วปลั๊กอัตราไหล; (ง) หัววัดอุณหภูมิ และท่อเก็บก๊าซไอเสีย;
- (จ) เครื่องควบคุมการทำงานของเตาเผา อุปกรณ์เก็บข้อมูล และเครื่องคอมพิวเตอร์;
- (ฉ) เครื่องวิเคราะห์ห้องค์ประกอบก๊าซไอเสีย

#### 7.4.1 พฤติกรรมการเผาไหม้

องค์ประกอบของไอเสียแห้งและอุณหภูมิการเผาไหม้ในระหว่างการเผาไหม้ของถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพและถ่านหินในเตาเผาแบบตะแกรงรับนิ่งระดับห้องปฏิบัติการ แสดงดังรูปที่ 8



(ก) การเผาไหม้ของถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพ



(ข) การเผาไหม้ของถ่านหิน

รูปที่ 8 พฤติกรรมการเผาไหม้ของถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพและถ่านหินในเตาเผาแบบตะกรับนี้ระดับห้องปฏิบัติการ

องค์ประกอบไอเสียจากการเผาไหม้ของถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพจะสามารถควบคุมให้อัตราการป้อนได้คงที่สม่ำเสมอ เนื่องจากมีความชื้นต่ำ ขณะที่ถ่านหินมีความชื้นสูงทำให้องค์ประกอบไอเสียจากการเผาไหม้ค่อนข้างแปรผันและเกิดการเกาะตัวกันในถังบรรจุของเครื่องป้อนทำให้อัตราการป้อนของถ่านหินคงไม่ที่ ซึ่งเตาเผาแบบตะแกรงระดับห้องปฏิบัติการใช้อากาศที่ป้อนจากทางด้านล่างของปฏิกรณ์และไม่มีอากาศทุติยภูมิช่วยในการเผาไหม้ในส่วนของพื้นที่เหนือกองจึงทำให้มีความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์สูง และก๊าซออกไซด์ของซัลเฟอร์และไนโตรเจนมีความเข้มข้นต่ำ

#### 7.4.2 คุณสมบัติของเถ้า

ลักษณะทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมีของเถ้าของถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพและถ่านหินที่เก็บได้จากการทดสอบ แสดงดังรูปที่ 9 และตารางที่ 3 ตามลำดับ



(ก) เถ้าของถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพ

(ข) เถ้าของถ่านหิน

รูปที่ 9 เถ้าจากการเผาไหม้ในเตาเผาห้องปฏิบัติการ

ลักษณะเถ้าของถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพจะประกอบด้วยอนุภาค 2 ขนาด คือ อนุภาคขนาดเล็ก สีเทาดำ และอนุภาคขนาดใหญ่เป็นก้อนผิวโค้งมน สีน้ำตาล เกาะติดแน่นที่ผิวของแผ่นกระจายอากาศภายในของก้อนเถ้าจะมีลักษณะเป็นโพรงและมีรูพรุน ซึ่งแสดงถึงการหลอมเหลวและรวมตัวกันของเถ้าจากถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพ ขณะที่เถ้าของถ่านหินจะมีลักษณะเป็นอนุภาคขนาดเล็ก มีสีน้ำตาลแดงปนสีขาว วัสดุค่อนข้างมีความเป็นเนื้อเดียวกัน

ตารางที่ 3 แสดงองค์ประกอบธาตุในเถ้าของถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพ พบว่า เถ้าของถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพ จะมีธาตุหมู่ Alkali เป็นหลัก ธาตุหมู่ Alkali earth Si Cl และ Fe รองลงมา ซึ่งธาตุเหล่านี้จะรวมเป็นสารประกอบ  $KCl$   $K_3(PO_4)$   $Fe_2O_3$  ที่ไม่มีโครงร่างผลึก และคาดว่าจะจะเป็นสารประกอบในกลุ่มซิลิเกตของธาตุหมู่ Alkali ขณะที่เถ้าของถ่านหินจะมีธาตุ Si Al เป็นหลัก ธาตุหมู่ Alkali earth และ Fe เป็นธาตุรอง ธาตุเหล่านี้จะรวมตัวเป็นสารประกอบออกไซด์และซัลเฟต และสารประกอบเชิงซ้อน รวมไปถึงสารประกอบที่ไม่มีโครงร่างผลึกที่คาดว่าจะมีธาตุ K และ Na เป็นส่วนประกอบ

ตารางที่ 3 คุณสมบัติของเถ้าของถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพและถ่านหินจากเตาเผาแบบตะแกรงนิ่ง

	ถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพ	ถ่านหิน
องค์ประกอบ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)		
Si	8.99	26.0
Al	0.358	7.29
Ca	5.07	5.34
Mg	3.99	2.28
Na	4.98	1.46
K	14.9	1.06
P	3.05	0.099
Cl	2.17	0.017
S	0.413	1.22
Fe	10.6	5.53
Ti	0.036	0.352
สารประกอบ	KCl	SiO <sub>2</sub>
	K <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> )	Ca(SO <sub>4</sub> )
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
	CaSiH <sub>1.06</sub>	FeAlO <sub>3</sub>
	(Fe <sub>0.76</sub> Mg <sub>0.24</sub> )	Amorphous
	Cr <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	Amorphous

เมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบของเถ้าที่เตรียมด้วยวิธีมาตรฐานในตารางที่ 2 พบว่า เถ้าจากถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพ องค์ประกอบโดยส่วนใหญ่ค่อนข้างคล้ายคลึงกัน แต่ก็มีความแตกต่างกันที่ปริมาณ Cl ในเถ้าจะต่ำกว่า เนื่องจากในระหว่างการเผาไหม้ ธาตุ Cl จะถูกปลดปล่อยจากเชื้อเพลิงในรูปของก๊าซ HCl ที่อยู่ในไอเสียเป็นหลัก ถ้ามีธาตุ K ในเชื้อเพลิง ธาตุ Cl บางส่วนจะรวมตัวกับธาตุ K เกิดเป็นสารประกอบ KCl ที่เป็นไอ (vapor) และเมื่ออุณหภูมิในไอเสียลดลง ก็จะควบแน่นและแข็งตัวเป็นสารประกอบ KCl ในรูปแบบ Aerosol (ถูกตรวจพบในเถ้า) แม้ว่าในเถ้าจะมีปริมาณธาตุ Si มาก แต่ไม่พบว่า ธาตุ Si จะรวมตัวเป็นสารประกอบ SiO<sub>2</sub> ที่มีโครงสร้างผลึก (เหมือนกับตารางที่ 2) จึงสันนิษฐานว่า ธาตุ Si ส่วนใหญ่อาจรวมตัวกับธาตุหมู่ alkali ที่มีปริมาณมากกว่า เกิดเป็นสารประกอบกลุ่มซิลิเกตที่ไม่มีโครงสร้างผลึก นอกจากนี้ในเถ้าจะพบธาตุ Fe ปริมาณมาก และพบสารประกอบเชิงซ้อนที่มีธาตุ Cr เป็นส่วนประกอบ น่าจะเกิดจากการสึกกร่อน/กัดกร่อนของปฏิกรณ์ที่สร้างจากเหล็กไร้สนิม (stainless steel) เกิดเป็นสารประกอบที่เจือปนในเถ้า

องค์ประกอบในแก้วของถ่านหินจะมีปริมาณธาตุในกลุ่ม Refractory (Si และ Al) และธาตุหมู่ Alkali earth แตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยแก้วของถ่านหินจะมีปริมาณ Si และ Al สูงกว่าธาตุหมู่ Alkali earth แต่องค์ประกอบในแก้วของถ่านหินในตารางที่ 2 จะแสดงผลตรงข้าม ทั้งนี้อาจเกิดจากการปลดปล่อยธาตุหมู่ Alkali earth ในระหว่างการเผาไหม้เชื้อเพลิง ที่มีอนุภาคขนาดเล็กกว่า 1  $\mu\text{m}$  หรือที่เรียกว่า Submicron particle ซึ่งเป็นสารประกอบกลุ่มออกไซด์เป็นหลัก อนุภาคบางส่วนจะถูกพาออกไปพร้อมกับไอเสีย (entrainment) ที่มาจากการป้อนอากาศผ่านกองเชื้อเพลิง ทำให้เกิดการสะสมอยู่ภายในถ้ำลดลง ขณะที่ธาตุในกลุ่ม Refractory (Si และ Al) จะเกิดเป็นสารประกอบออกไซด์และสารประกอบเชิงซ้อนที่ขนาดอนุภาคใหญ่กว่า ทำให้พาออกไปพร้อมกับไอเสียได้น้อยกว่า จึงไม่พบสารประกอบที่มีโครงสร้างผลึกจากธาตุหมู่ Alkali ทั้งในแก้ว จึงอาจสันนิษฐานได้ว่าธาตุหมู่ Alkali อาจรวมตัวกันเป็นสารประกอบที่ไม่มีโครงสร้างผลึก

เมื่อเปรียบเทียบกันองค์ประกอบในแก้วของถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพและแก้วของถ่านหิน พบว่าแก้วของถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพจะมีการหลอมเหลวและรวมตัวกันเกาะติดบนพื้นผิวในห้องเผาไหม้ ทำให้เกิดจากธาตุ/สารประกอบอนินทรีย์ในเชื้อเพลิงระหว่างการเผาไหม้ ซึ่งส่งผลกระทบต่อการทำงานของเตาเผา/หม้อไอน้ำ

#### 7.5 การวิเคราะห์น้ำจากกระบวนการบีบอัด

น้ำที่ได้จากกระบวนการบีบอัดน้ำออกจากของเหลือใช้จากอุตสาหกรรมมะพร้าว น้ำหอมจะมีสีน้ำตาลอ่อน และจัดว่าเป็นน้ำเสียจากกระบวนการเนื่องจากมีค่า BOD COD เท่ากับ 3,878 และ 7,964 ตามลำดับ (ตารางที่ 4) ทำให้ไม่สามารถปล่อยน้ำเสียที่เกิดขึ้นลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติได้ จึงจำเป็นต้องมีกระบวนการบำบัดน้ำเสียก่อนปล่อยออก นอกจากนี้ยังพบว่า น้ำเสียจากกระบวนการจะมีสารสำคัญ ที่เรียกว่า แแทนนิน ที่พบในส่วนต่างๆ ของพืช เช่น เปลือก ใบ และผล ละลายออกมาพร้อมกับน้ำ โดยแทนนินจะถูกนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมฟอกหนังและในทางการแพทย์เป็นยารักษาโรคท้องเสีย การวิเคราะห์ปริมาณแทนนินทำได้โดยการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 760 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง UV-vis spectrophotometer พบว่า น้ำเสียจากกระบวนการมีปริมาณแทนนิน เท่ากับ 1.02 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

**ตารางที่ 4** องค์ประกอบทางเคมีของน้ำที่ได้จากกระบวนการบีบอัด

	น้ำที่ได้จากกระบวนการ
บีโอดี (BOD) (มิลลิกรัมต่อลิตร)	3,878
ซีโอดี (COD) (มิลลิกรัมต่อลิตร)	7,964
แทนนิน (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	1.02

## 7.6 การวิเคราะห์ปริมาณโพแทสเซียมในถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพและน้ำจากกระบวนการบีบอัด

ปริมาณโพแทสเซียมในของเหลือใช้จากอุตสาหกรรมมะพร้าว น้ำหอมก่อนและหลังการบีบอัด และถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพ จะถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray fluorescence spectrometer (XRF) พบว่า ของเหลือใช้จากอุตสาหกรรมมะพร้าว น้ำหอมก่อนและหลังการบีบอัดมีปริมาณโพแทสเซียมที่ความเข้มข้นแห้ง เท่ากับ 2.67 และ 1.80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ และถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพที่มีปริมาณโพแทสเซียม เท่ากับ 5.41 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ความเข้มข้นแห้ง

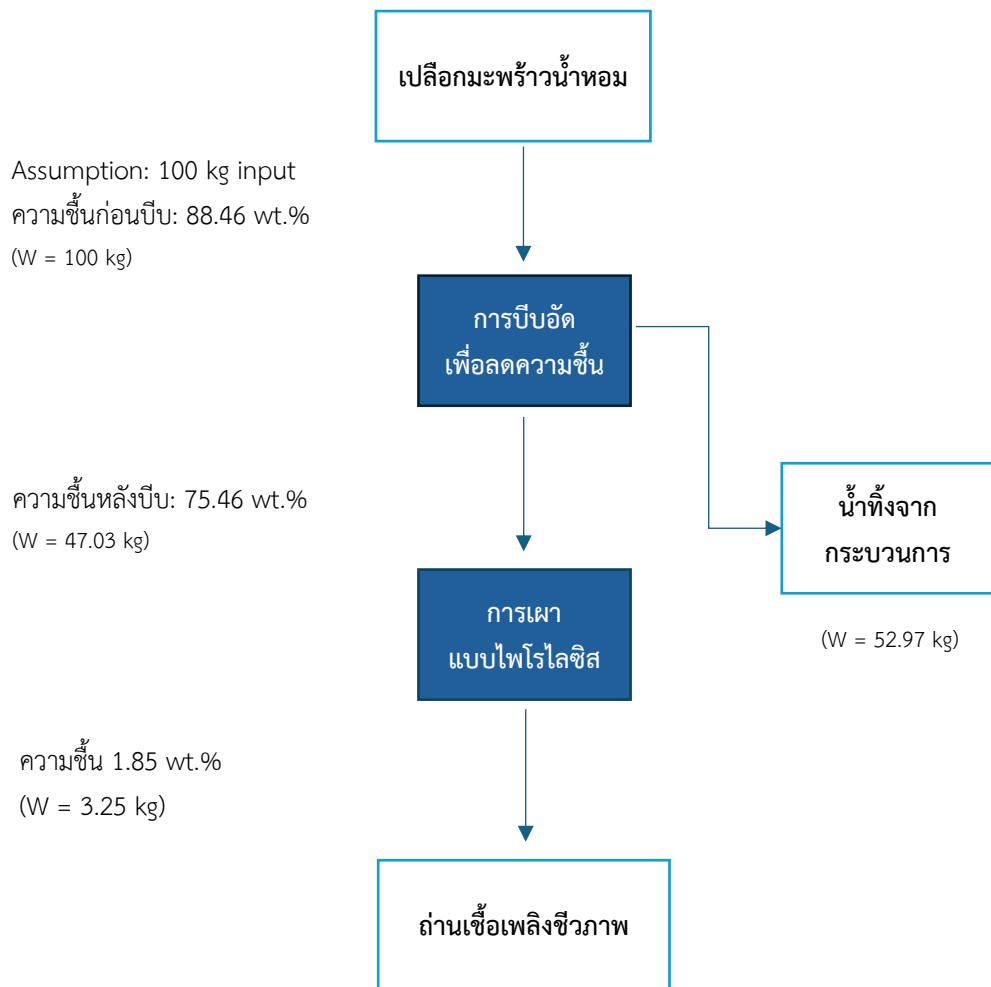
## 8. วิจัยผลการวิจัย

กระบวนการการแปรสภาพของเหลือใช้จากอุตสาหกรรมมะพร้าว น้ำหอม แสดงดังรูปที่ 10 จะประกอบด้วย 3 กระบวนการ คือ 1) การลดขนาดด้วยเครื่องบด hammer mill 2) การบีบเอาน้ำออกด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก และ 3) การเผาแบบไพโรไลซิส ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส

การคำนวณสมดุลมวลสาร (mass balance) โดยตั้งสมมุติฐานไว้ว่า เปลือกมะพร้าว น้ำหอมเริ่มต้นที่นำมาใช้จำนวน 100 กิโลกรัม ที่ความชื้น 88.46 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อนำมาอัดลดความชื้นจะเหลือได้น้ำหนักของเปลือกมะพร้าว เท่ากับ 47.03 กิโลกรัม ที่ความชื้น 75.46 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แสดงว่า น้ำเสียที่ได้จากกระบวนการบีบอัดมีปริมาณ เท่ากับ 52.97 กิโลกรัม จากนั้นนำเปลือกมะพร้าวที่ได้นำมาเผาแบบไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส จะได้ถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพ 3.25 กิโลกรัม ที่ความชื้น 1.85 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

การคำนวณสมดุลคาร์บอนคงตัว (fixed carbon balance) จะใช้ปริมาณสารระเหย คาร์บอนคงตัว และเถ้าของเปลือกมะพร้าว น้ำหอมเริ่มต้นและถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพมาใช้คำนวณ โดยมีสมมุติฐานว่า เมื่อเผาเปลือกมะพร้าว น้ำหอมเริ่มต้นแล้ว ถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพจะมีปริมาณคาร์บอนคงตัวและเถ้าเท่าเดิม จากการคำนวณพบว่า ถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพจะมีปริมาณสารระเหย คาร์บอนคงตัว และเถ้า ที่ความเข้มข้นแห้ง เท่ากับ 19.36 69.24 และ 11.40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับปริมาณสารระเหย คาร์บอนคงตัว และเถ้า ที่ความเข้มข้นแห้ง ของถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพที่ได้วิเคราะห์จริง คือ 20.05 71.71 และ 8.23 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ โดยปริมาณเถ้าจะต่างกันเล็กน้อยและอาจหายไปในช่วงขั้นตอนการเผา

การคำนวณสมดุลโพแทสเซียม (potassium balance) จะใช้น้ำหนักของเปลือกมะพร้าว น้ำหอมที่ได้จากการคำนวณสมดุลมวลสารมาคำนวณ พบว่า เปลือกมะพร้าว น้ำหอมเริ่มต้นมีปริมาณโพแทสเซียม เท่ากับ 0.31 กิโลกรัม และเปลือกมะพร้าวที่ผ่านการบีบอัดน้ำออกจะมีปริมาณโพแทสเซียมลดลงเหลือ 0.21 กิโลกรัม แสดงว่า การบีบอัดน้ำออกจากเปลือกมะพร้าว น้ำหอมทำให้ปริมาณโพแทสเซียมลดลงได้ 0.10 กิโลกรัม หรือเท่ากับ ร้อยละ 32.25 ซึ่งเปลือกมะพร้าวที่ผ่านการบีบอัดจะถูกนำไปเผาได้เป็นถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพที่มีปริมาณโพแทสเซียมเหลือ 0.17 กิโลกรัม



รูปที่ 10 แผนภาพกระบวนการการแปรสภาพของเหลือใช้จากอุตสาหกรรมมะพร้าว น้ำหอม

## 9. สรุปผลการวิจัย

การแปรสภาพของเหลือใช้จากอุตสาหกรรมมะพร้าว น้ำหอมเป็นถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพ จะผ่านกระบวนการ 3 ขั้นตอน คือ

1) การลดขนาดด้วยเครื่องบด hammer mill เพื่อลดขนาดของเปลือกมะพร้าว น้ำหอมให้มีขนาดเล็กลง แต่ความชื้นในเปลือกมะพร้าว น้ำหอมจะมีค่าเท่าเดิม คือ 88.46 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

2) การบีบเอาน้ำออกด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก เพื่อลดความชื้นในเปลือกมะพร้าว น้ำหอม ซึ่งสามารถลดได้ร้อยละ 15 ของค่าความชื้นเริ่มต้น และสามารถลดปริมาณโพแทสเซียมในเปลือกมะพร้าว น้ำหอมเริ่มต้นจาก 0.31 กิโลกรัม เหลือ 0.21 กิโลกรัม คิดเป็นปริมาณโพแทสเซียมที่ลดลง เท่ากับ 0.10 กิโลกรัม หรือเท่ากับ 0.10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

3) การเผาแบบไพโรไลซิส ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ใช้เวลาเผาประมาณ 7 ชั่วโมง จะได้ถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพ 3.25 กิโลกรัม ที่ความชื้น 1.85 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพที่ได้จะมีปริมาณคาร์บอนคงตัวและธาตุคาร์บอนสูงกว่าถ่านหิน ขณะที่ถ่านหินมีปริมาณความชื้น สารระเหย และความหนาแน่นกองสูงกว่า ถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพจะมีค่าความร้อน เท่ากับ

6,124 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม ที่ความชื้นฐานเปียก และมีปริมาณโพแทสเซียมเหลืออยู่ 0.17 กิโลกรัม หรือเท่ากับ 0.17 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อเทียบกับถ่านหิน พบว่า ถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพจะมีค่าความร้อนที่ความชื้นฐานเปียกสูงกว่าถ่านหิน แต่ที่ความชื้นฐานแห้ง ค่าความร้อนของถ่านหินจะสูงกว่าเล็กน้อย โดยถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพและถ่านหินสามารถเผาไหม้ได้ในปฏิกรณ์ทดสอบ แต่ถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพจะติดไฟและเผาไหม้ได้ยากกว่าถ่านหิน เพราะต้องใช้อุณหภูมิที่สูงกว่า และต้องใช้เวลาในกระบวนการเผาไหม้นานกว่า ซึ่งถ้าของถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพจะประกอบด้วยอนุภาคขนาดเล็กสี่เท่าตัวและอนุภาคที่เป็นก้อนผิวโค้งมน สีนํ้าตาล เกาะติดแน่นที่ผิวแผ่นกระจายอากาศ โดยภายในของก้อนมีลักษณะเป็นโพรงและมีรูพรุนที่ประกอบไปด้วยธาตุหมู่ Alkali เป็นหลัก ธาตุหมู่ Alkali earth Si Cl และ Fe รองลงมา ธาตุเหล่านี้รวมกันเป็นสารประกอบโครไรต์ ออกไซด์ และ สารประกอบเชิงซ้อน รวมไปถึงสารประกอบที่ไม่มีโครงสร้างผลึก ขณะที่ถ่านหินมีลักษณะเป็นอนุภาคขนาดเล็กมีสีน้ำตาลแดงปนสีขาว ที่มีธาตุ Si Al เป็นหลัก ธาตุหมู่ Alkali earth และ Fe เป็นธาตุรอง ธาตุเหล่านี้รวมตัวเป็นสารประกอบออกไซด์และซัลเฟต และสารประกอบเชิงซ้อน รวมไปถึงสารประกอบที่ไม่มีโครงสร้างผลึก การที่ถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพมีธาตุหมู่ alkaline และ Cl ในปริมาณสูง จะทำให้เกิดปัญหาที่มาจากถ่านในระหว่างการเผาไหม้สูงกว่าถ่านหิน

## 10. ข้อเสนอแนะ

1) การลดความชื้นด้วยการบีบน้ำออกโดยใช้เครื่องอัดไฮดรอลิกขึ้นกับชนิดและกำลังอัดของเครื่องอัด แนวนอนมีกำลังอัดมากกว่าทำให้สามารถบีบน้ำออกได้ดีกว่าเครื่องอัดแนวตั้ง หรือการเพิ่มเวลาและลดขนาดก้อนของเปลือกมะพร้าวในการอัดแต่ละครั้งสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบีบน้ำออกได้

2) การบีบน้ำออกจากเปลือกมะพร้าว น้ำหอมสามารถลดปริมาณโพแทสเซียมที่อยู่ในเปลือกมะพร้าว น้ำหอมได้ ซึ่งคาดว่าถ้าบีบน้ำออกมาได้มากขึ้นจะทำให้ปริมาณโพแทสเซียมในเปลือกมะพร้าวลดลงมากขึ้น

3) การเผาแบบไพโรไลซิสจะใช้น้ำมันเครื่องและไม้ฟืนเป็นเชื้อเพลิงในการเผา ถ้าเปลือกมะพร้าว น้ำหอมมีความชื้นสูงจะต้องใช้ปริมาณเชื้อเพลิงในการเผามากและใช้เวลาในการเผานาน เปลือกมะพร้าว น้ำหอมมีความชื้นต่ำ

4) ถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพมีความหนาแน่นต่ำกว่าถ่านหินมาก จะทำให้ต้องใช้พื้นที่การกองเก็บมาก และอาจเกิดปัญหาในการลำเลียงเข้าเตาเผา/หม้อไอน้ำ ซึ่งควรนำถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพไปอัดเม็ดเพื่อปรับรูปลักษณะให้ใกล้เคียงกับถ่านหิน

5) การเผาแบบไพโรไลซิสที่อุณหภูมิสูงจะได้ค่าความร้อนสูง แต่ปริมาณถ่านที่ได้จะน้อย จึงควรลดอุณหภูมิในการเผาเพื่อให้ได้ผลผลิตและค่าความร้อนที่เหมาะสม

## 11. เอกสารอ้างอิง

1. กานดา โกลวัฒน์ชัย. การประเมินค่าความร้อนของถ่านหินโดยใช้ข้อมูลจากการวิเคราะห์แบบพรอกซีเมต. กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม. หน้า 1-48
2. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.). 2547. ถ่านอัดแท่ง. มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน. หน้า 1-3
3. วัฒนา วิรุฒิกกร. 2539. ความสำคัญของแทนนินที่มีต่ออุตสาหกรรมอาหาร. อาหาร. ปีที่ 26 ฉบับที่ 3. หน้า 157-167
4. พรรณพณิช แซ่ม. ผลของการสกัดหยาบจากเปลือกกล้วยน้ำว้าและสารเคลือบผิวอัลจินตต่อคุณภาพของผลมะนาวหลังเก็บเกี่ยว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
5. นางปาริชาติ พจนศิลป์ และคณะ. 2561. ศึกษาการสกัดสารแทนนินจากเปลือกมะพร้าวอ่อน. โครงการวิจัยพัฒนาพันธุ์และเทคโนโลยีในการเพิ่มผลผลิตมะพร้าวให้เพียงพอกับความ ต้องการ, สถาบันวิจัยพืชสวน
6. Skrifvars, B.-J., Hupa, M., Moilanen, A. and Lundqvist, R., 1996, "Characterization of biomass ashes", In Applications of Advanced Technology to Ash-related Problems in Boilers, Baxter, L. and DeSollar, R. (Ed.), Plenum Publishers, New York, pp. 383-398.
7. Vassilev, S., Baxter, D., Andersen, L. and Vassileva, C., 2010, "An overview of the chemical composition of biomass", Fuel, Vol. 89, pp. 913-933.
8. Olsson, J.G., Jaglid, U. and Pettersson, J.B.C., 1997, "Alkali metal emission during pyrolysis of biomass", Energy and Fuels, Vol. 11, pp. 779-784.
9. Jensen, P.A., Frandsen, F.J., Johansen, K.D. and Sander, B., 2000, "Experimental investigation of the transformation and release to gas phase of potassium and chlorine during straw pyrolysis", Energy and Fuels, Vol. 14, pp. 1280-1285.
10. Valmari, T., 2000, Potassium behavior during combustion of wood in circulating fluidized bed power plants, Dissertation, VTT Chemical Technology, Technical research center of FINLAND.
11. Brus, E., 2004, Bed agglomeration during combustion and gasification of biomass fuels mechanisms and measure prevention, Licentiate Thesis, Energy Technology and thermal Process Chemistry, Umea University, Sweden.
12. Lachman, J., Baláš, M., Lisý, M., Lisá, H., Milčák, P. and Elbl, P., 2021, "An overview of slagging and fouling indicators and their applicability to biomass fuels", Fuel Processing Technology, Vol. 217, 106804.

13. Sandberg, J., Fouling in biomass fired boilers, Dissertations, School of Sustainable Development of Society and Technology, Mälardalen University, Västerås, Sweden.
14. Horák, J., Kuboňová, L., Dej, M., Laciok, V., Tomšejová, S., Hopan, F., Krpec, K. and Koloničný, J., 2019, "Effects of the type of biomass and ashing temperature on the properties of solid fuel ashes", Polish Journal of Chemical Technology, Vol. 21, No. 2, pp. 43-51
15. Jenkins B.M., Baxter L.L., Miles Jr T.R., Miles T.R., 1997, "Combustion properties of biomass", Fuel Processing Technology, Vol. 54, pp. 17-46.
16. Theis M., Skrifvars B.-J., Hupa M., Tran H., 2006, "Fouling tendency of ash resulting from burning mixtures of biofuels. Part 1. Deposition rate.", Fuel, Vol. 85, pp. 1125-1130.
17. Tortosa Masia A.A., Buhre B.J.P., Gupta R.P., Wall T.F., 2007, "Characterising ash of biomass and waste", Fuel Processing Technology, Vol. 88, pp. 1071-1081.
18. Okuno, T., Sonoyama, N., Hayashi, J.I., Li, C.Z., Sathe. C. and Chiba, T., 2005, "Primary release of alkali and alkaline earth metallic species during the pyrolysis of pulverized biomass", Energy and Fuels, Vol. 19, pp. 2164-2171.

ภาคผนวก ก  
การแปรสภาพของเหลือเป็นถ่านเชื้อเพลิงชีวภาพ

ตารางที่ ก1 อุณหภูมิในการเผาของเหลือใช้จากอุตสาหกรรมมะพร้าว น้ำหอม

เวลา (นาท)	อุณหภูมิภายในเตาเผา (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิก๊าซที่ออกมา (องศาเซลเซียส)
0	33	35
15	64	58
30	101	58
45	101	62
60	101	68
75	108	80
90	125	80
105	134	80
120	142	79
135	163	80
150	191	85
165	240	100
180	290	100
195	306	100
210	320	105
225	347	105
240	360	105
255	391	106
270	450	106
285	453	106
300	462	106
315	510	105
330	550	102
345	570	100
360	584	98
375	674	95
390	660	92
405	640	88
420	598	82

ภาคผนวก ข  
ผลวิเคราะห์ถ้ำ

Eval2 V2.5.500 Admin 10/15/2024 10:23:58 AM  
 Sample: 670110-4479\_coal ash astm  
 Measured on 10/11/2024 12:57:01 PM  
 Sample measured by Admin  
 Measurement method: Best Detection-Vac34mm

CaO	SO3	Fe2O3	MgO	Al2O3	SiO2	Na2O	K2O	SrO	TiO2	MnO
470.3 KCps	228.1 KCps	1097.8 KCps	134.7 KCps	89.3 KCps	82.8 KCps	21.1 KCps	17.2 KCps	250.1 KCps	7.5 KCps	22.9 KCps
21.0 %	14.8 %	14.3 %	12.6 %	11.8 %	11.3 %	4.67 %	0.678 %	0.435 %	0.428 %	0.373 %
P2O5	Cl	BaO	ZrO2	NiO	Br	CuO	Cr2O3	ZnO	CoO	As2O3
2.4 KCps	3.7 KCps	1.2 KCps	58.2 KCps	1.7 KCps	3.5 KCps	1.2 KCps	0.2 KCps	1.1 KCps	4.0 KCps	0.7 KCps
0.260 %	0.173 %	0.159 %	176 PPM	155 PPM	93.4 PPM	83.4 PPM	59.0 PPM	58.2 PPM	53.6 PPM	24.8 PPM

Eval2 V2.5.500 Admin 10/15/2024 10:24:09 AM  
 Sample: 670110-4479\_coal ash astm  
 Measured on 10/11/2024 12:57:01 PM  
 Sample measured by Admin  
 Measurement method: Best Detection-Vac34mm

Ca	Fe	Mg	Al	S	Si	Na	K	Sr	Mn	Ti
15.0 %	10.0 %	7.61 %	6.23 %	5.92 %	5.29 %	3.46 %	0.563 %	0.368 %	0.289 %	0.256 %

Cl	Ba	P	Zr	Ni	Br	Cu	Zn	Co	Cr	As
0.173 %	0.143 %	0.113 %	130 PPM	122 PPM	93.4 PPM	66.6 PPM	46.7 PPM	42.2 PPM	40.3 PPM	18.8 PPM

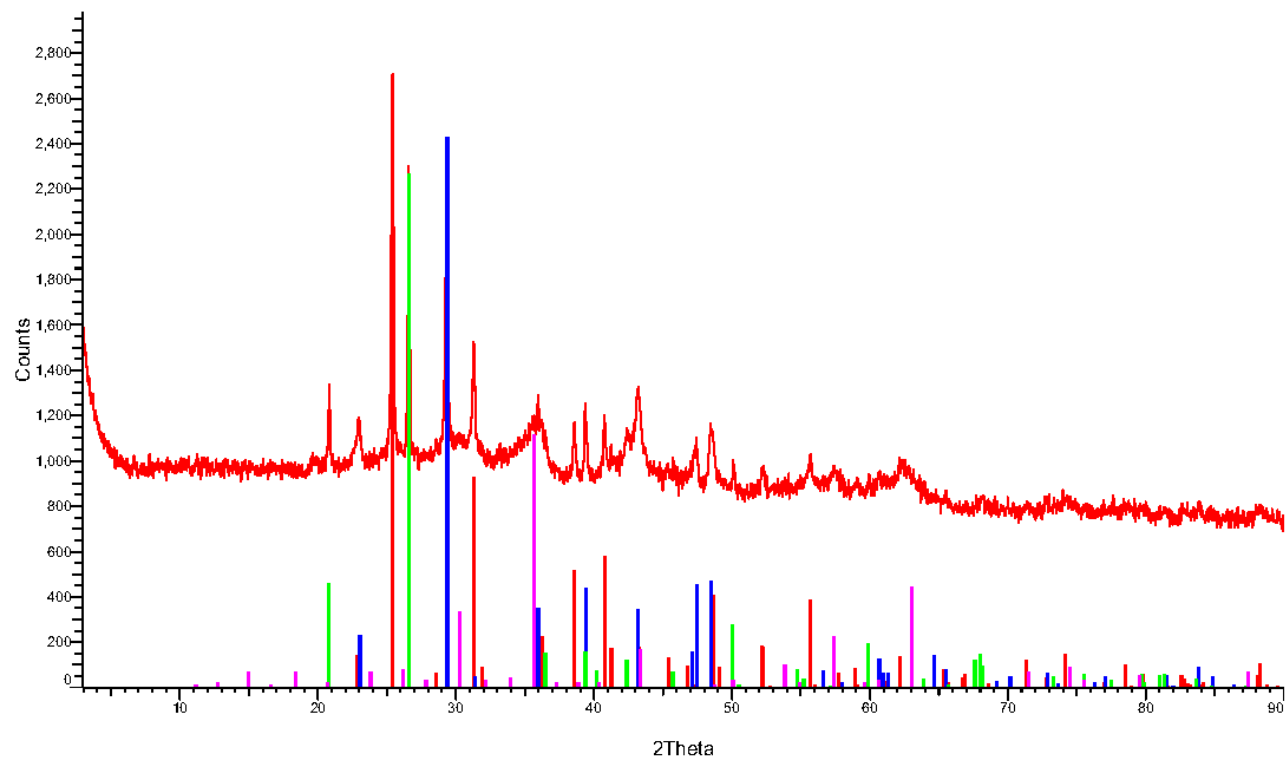
Sum
56 %

Eval2 V2.5.500 Admin 10/15/2024 10:35:24 AM  
 Sample: 670110-4479\_C Charcoal ash astm  
 Measured on 10/11/2024 12:39:12 PM  
 Sample measured by Admin  
 Measurement method: Best Detection-Vac34mm

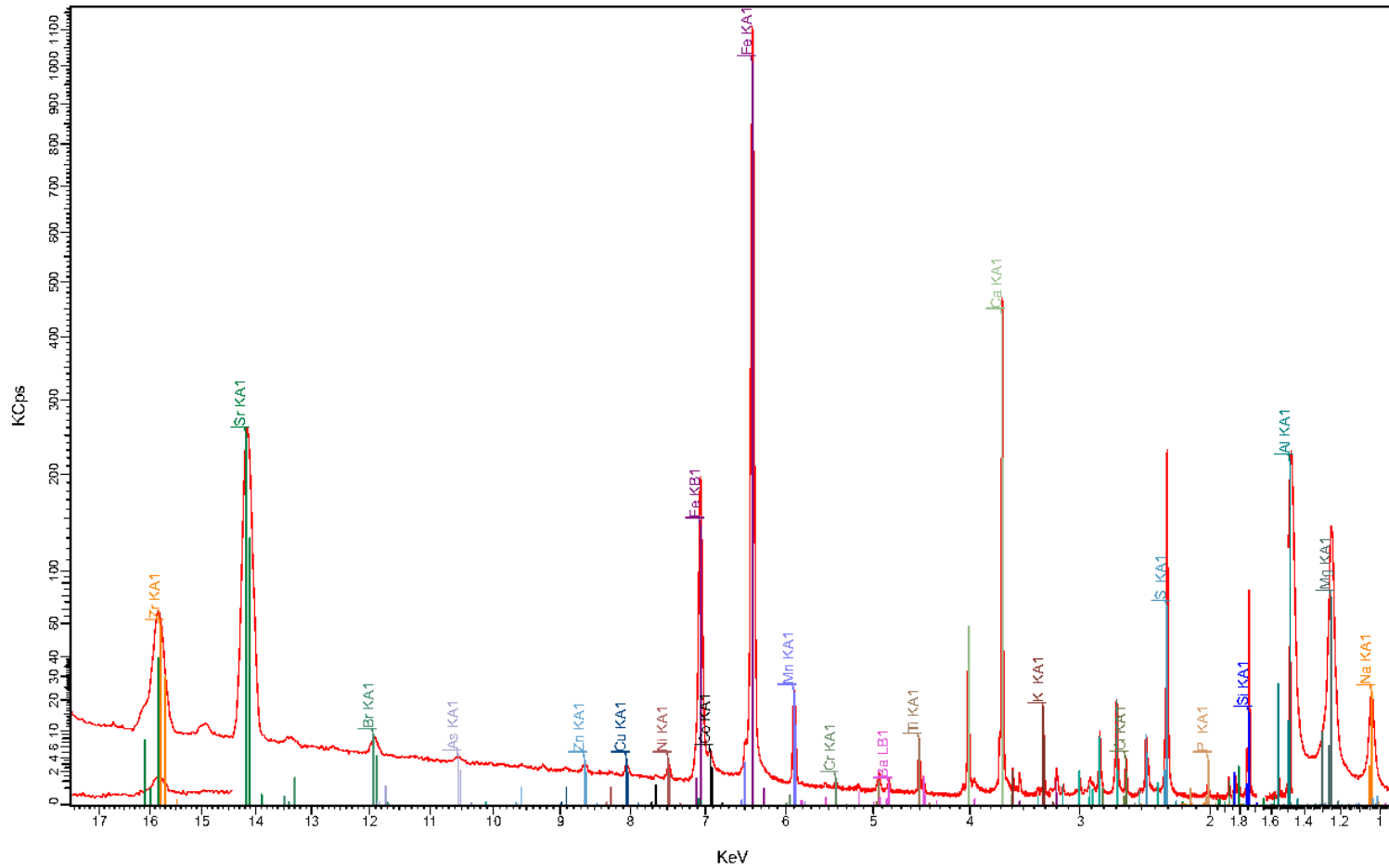
K2O	Cl	SiO2	Na2O	MgO	P2O5	CaO	SO3	Fe2O3	Al2O3	Rb2O
619.7 KCps	451.1 KCps	105.9 KCps	43.9 KCps	77.1 KCps	72.1 KCps	56.9 KCps	41.9 KCps	77.3 KCps	3.2 KCps	45.9 KCps
34.8 %	19.0 %	11.2 %	8.29 %	6.46 %	6.31 %	5.29 %	2.32 %	1.38 %	0.347 %	794 PPM

Br	MnO	ZnO	TiO2	SrO	CuO	ZrO2	NiO	CoO	Y2O3	MoO3
24.1 KCps	2.5 KCps	7.1 KCps	0.4 KCps	12.5 KCps	2.8 KCps	6.9 KCps	0.5 KCps	0.2 KCps	8.8 KCps	1.6 KCps
652 PPM	583 PPM	399 PPM	354 PPM	217 PPM	204 PPM	73.0 PPM	44.2 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM

## Coal ash astm

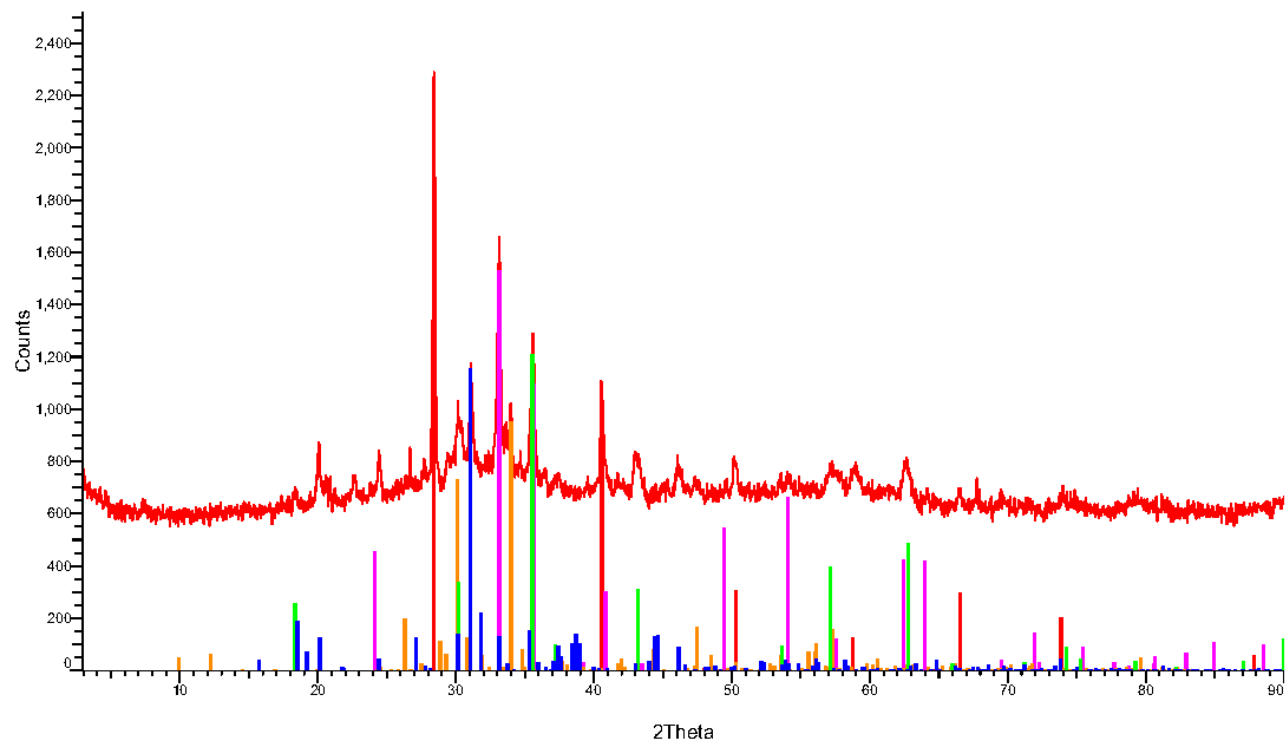


File: 670110-4480\_01.brml (Smooth), Scan Type: Coupled TwoTheta/Theta, 40.0 kV, 40.0 mA, Start: 3.0000 ° - End: 90.0000 °, Step size: 0.0200 °, Time/Step: 1.00 s, Temp.: 25 °C (Room)  
PDF 01-072-0916 - Anhydrite - Ca(SO4) - WL=1.54060 Å - Orthorhombic - a=7.00600 Å - b=6.98600 Å - c=6.24500 Å - alpha= - beta= - gamma= - Amma (63) - 306.18 Å³  
PDF 01-086-4273 - Calcite - Ca(CO3) - WL=1.54060 Å - Hexagonal - a=4.98660 Å - b= - c=17.08160 Å - alpha= - beta= - gamma= - R-3c (167) - 367.85 Å³  
PDF 01-083-0539 - Quartz, syn - SiO2 - WL=1.54060 Å - Hexagonal - a=4.92100 Å - b= - c=5.41630 Å - alpha= - beta= - gamma= - P3121 (152) - 113.59 Å³  
PDF 00-025-1402 - Maghemite, syn - Fe2O3 - WL=1.54060 Å - Tetragonal - a=8.34000 Å - b= - c=25.02000 Å - alpha= - beta= - gamma= - P43212 (96) - 1740.28 Å³

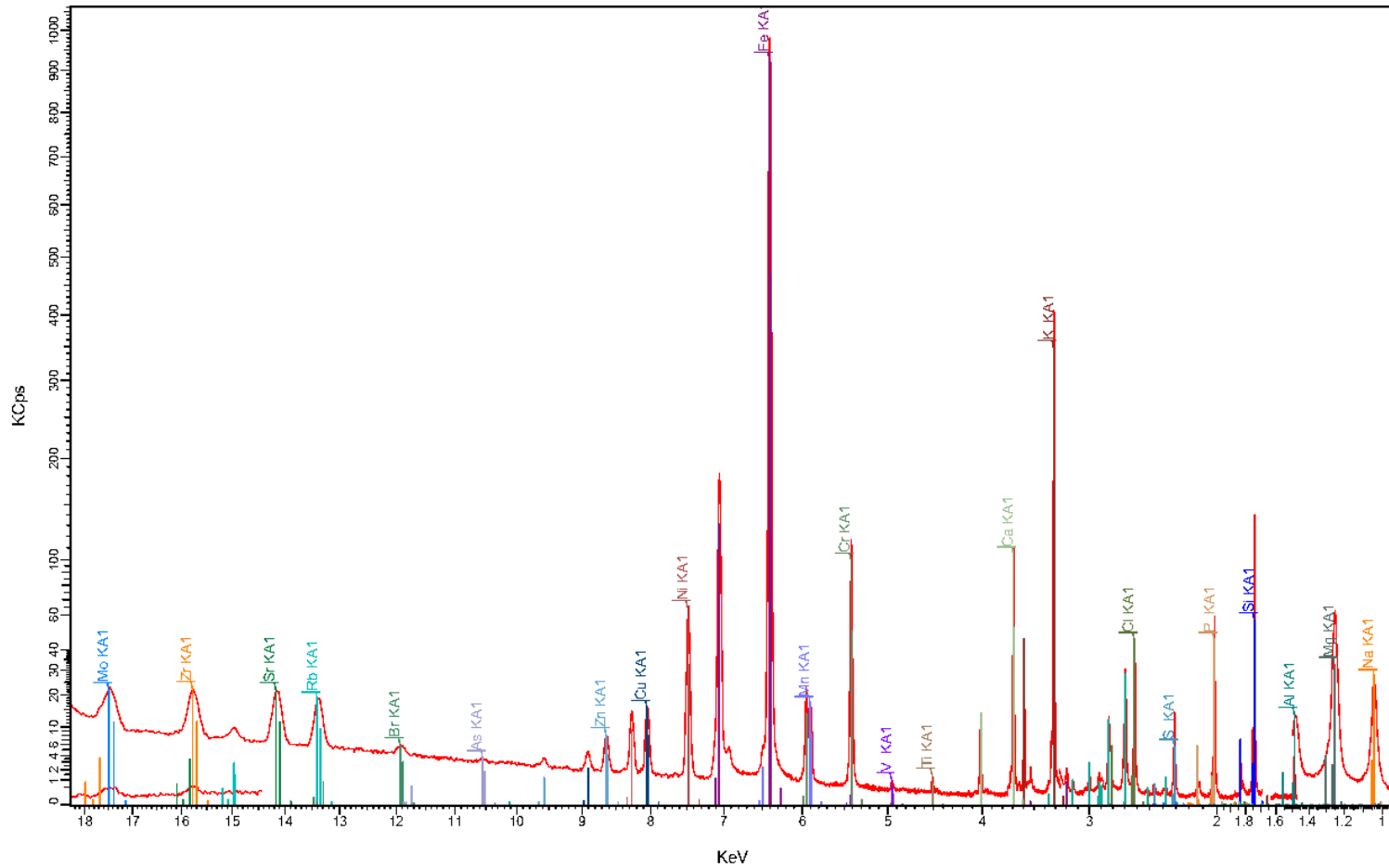


670110-4479\_coal ash astm  
 Eval2 V2.5.500 Admin 10/15/2024 10:28:03 AM

## C charcoal ash sim



- File: 672210-4796\_02.brml (Smooth), Scan Type: Coupled TwoTheta/Theta, 40.0 kV, 40.0 mA, Start: 3.0000 ° - End: 90.0000 °, Step size: 0.0200 °, Time/Step: 1.00 s, Temp.: 25 °C (Room)
- PDF 04-007-8797 - Sylvite, syn - KCl - WL=1.54060 Å - Cubic -a=6.28000 Å - b= - c= - alpha= - beta= - gamma= - Fm-3m (225) - 247.67 Å³
- PDF 04-013-6916 - Potassium Phosphate - K3(PO4) - WL=1.54060 Å - Orthorhombic -a=11.23770 Å - b=8.10460 Å - c=5.92270 Å - alpha= - beta= - gamma= - Pnma (62) - 539.42 Å³
- PDF 01-075-3309 - Chromite, Mg-bearing, syn - (Fe0.76Mg0.24)Cr2O4 - WL=1.54060 Å - Cubic -a=8.36720 Å - b= - c= - alpha= - beta= - gamma= - Fd-3m (227) - 585.79 Å³
- PDF 01-088-6850 - Iron Oxide - Fe2O3 - WL=1.54060 Å - Hexagonal -a=5.03612 Å - b= - c=13.75243 Å - alpha= - beta= - gamma= - R-3c (167) - 302.07 Å³
- PDF 04-017-6574 - Calcium Silicide Hydride - CaSiH1.06 - WL=1.54060 Å - Orthorhombic -a=14.48840 Å - b=3.82470 Å - c=11.25090 Å - alpha= - beta= - gamma= - Pnma (62) - 623.46 Å³



672210-4795\_C charcoal ash sim  
 Eval2 V2.5.500 Admin 11/5/2024 10:25:32 AM

Eval2 V2.5.500 Admin 11/5/2024 10:21:34 AM  
 Sample: 672210-4795\_C charcoal ash sim  
 Measured on 11/4/2024 4:59:44 PM  
 Sample measured by Admin  
 Measurement method: Best Detection-Vac34mm

K	Fe	Si	Ca	Na	Mg	P	Cr	Cl	Ni	S
14.9 %	10.6 %	8.99 %	5.07 %	4.98 %	3.99 %	3.05 %	2.32 %	2.17 %	0.525 %	0.413 %

Al	Mn	Cu	Ti	Zn	Sr	Rb	Zr	Mo	V	Br
0.358 %	0.217 %	924 PPM	360 PPM	309 PPM	262 PPM	245 PPM	148 PPM	148 PPM	140 PPM	45.4 PPM

As	Sum
14.8 PPM	58 %

Eval2 V2.5.500 Admin 11/5/2024 10:21:25 AM

Sample: 672210-4795\_C charcoal ash sim

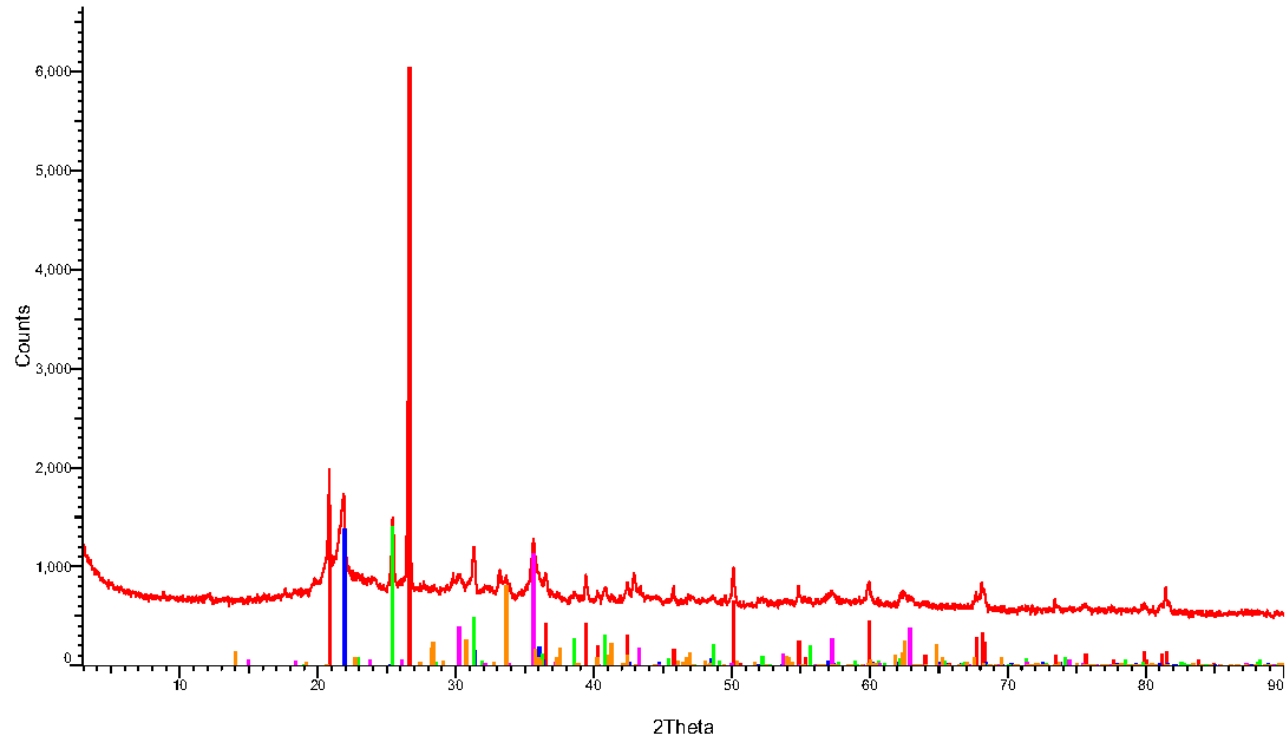
Measured on 11/4/2024 4:59:44 PM

Sample measured by Admin

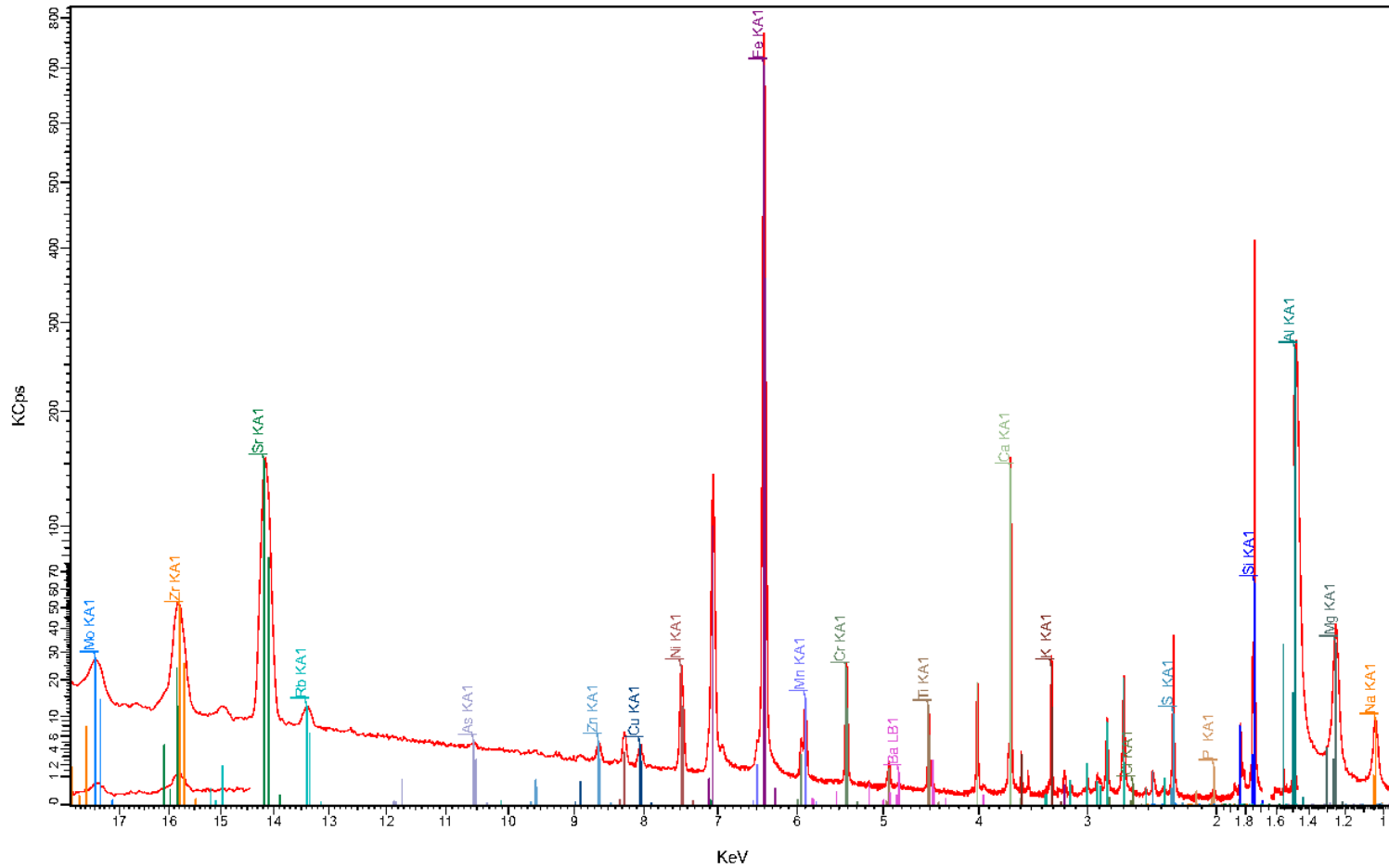
Measurement method: Best Detection-Vac34mm

SiO2	K2O	Fe2O3	CaO	P2O5	Na2O	MgO	Cr2O3	Cl	SO3	Al2O3
138.8 KCps	408.8 KCps	981.5 KCps	109.9 KCps	59.7 KCps	25.3 KCps	58.7 KCps	115.5 KCps	45.0 KCps	14.3 KCps	4.6 KCps
19.2 %	18.0 %	15.2 %	7.10 %	6.98 %	6.71 %	6.61 %	3.39 %	2.17 %	1.03 %	0.676 %
NiO	MnO	CuO	TiO2	ZnO	SrO	Rb2O	V2O5	MoO3	ZrO2	Br
63.9 KCps	16.1 KCps	14.3 KCps	0.9 KCps	5.9 KCps	15.2 KCps	12.9 KCps	0.5 KCps	11.8 KCps	13.7 KCps	1.4 KCps
0.668 %	0.280 %	0.116 %	601 PPM	384 PPM	310 PPM	268 PPM	250 PPM	222 PPM	200 PPM	45.4 PPM
As2O3	CoO	Y2O3	Rh	Pd	Ag	Tb4O7	Dy2O3	Er2O3	Yb2O3	WO3
0.5 KCps	4.0 KCps	2.6 KCps	83.5 KCps	0.2 KCps	0.2 KCps	1.4 KCps	4.5 KCps	3.6 KCps	1.7 KCps	0.2 KCps
19.6 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM

## Coal ash sim



- File: 672210-4796\_01.brml (Smooth), Scan Type: Coupled TwoTheta/Theta, 40.0 kV, 40.0 mA, Start: 3.0000 ° - End: 90.0000 °, Step size: 0.0200 °, Time/Step: 1.00 s, Temp.: 25 °C (Room)
- PDF 01-075-0443 - Quartz - SiO<sub>2</sub> - WL=1.54060 Å - Hexagonal -a=4.91300 Å - b= - c=5.40500 Å - alpha= - beta= - gamma= - P3121 (152) - 112.98 Å<sup>3</sup>
- PDF 01-071-0785 - Cristobalite - SiO<sub>2</sub> - WL=1.54060 Å - Tetragonal -a=4.97800 Å - b= - c=6.94800 Å - alpha= - beta= - gamma= - P41212 (92) - 172.17 Å<sup>3</sup>
- PDF 01-072-0916 - Anhydrite - Ca(SO<sub>4</sub>) - WL=1.54060 Å - Orthorhombic -a=7.00600 Å - b=6.99800 Å - c=6.24500 Å - alpha= - beta= - gamma= - Amma (63) - 306.18 Å<sup>3</sup>
- PDF 00-038-1346 - Maghemite, syn - Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - WL=1.54060 Å - Cubic -a=8.35150 Å - b= - c= - alpha= - beta= - gamma= - P4132 (213) - 582.50 Å<sup>3</sup>
- PDF 04-016-2654 - Aluminum Iron Oxide - FeAlO<sub>3</sub> - WL=1.54060 Å - Orthorhombic -a=4.98990 Å - b=8.56700 Å - c=9.25920 Å - alpha= - beta= - gamma= - Pna21 (33) - 395.82 Å<sup>3</sup>



672210-4795\_Coal ash sim  
 Eval2 V2.5.500 Admin 11/5/2024 10:19:31 AM

Eval2 V2.5.500 Admin 11/5/2024 10:16:24 AM  
 Sample: 672210-4795\_Coal ash sim  
 Measured on 11/4/2024 4:41:09 PM  
 Sample measured by Admin  
 Measurement method: Best Detection-Vac34mm

Si	Al	Fe	Ca	Mg	Na	S	K	Cr	Ti	Sr
26.0 %	7.29 %	5.53 %	5.34 %	2.28 %	1.46 %	1.22 %	1.06 %	0.370 %	0.352 %	0.151 %

Mn	Ni	P	Ba	Cl	Zr	Cu	Mo	Zn	Rb	As
0.139 %	0.118 %	999 PPM	601 PPM	171 PPM	127 PPM	107 PPM	95.6 PPM	76.5 PPM	46.1 PPM	12.7 PPM

Eval2 V2.5.500 Admin 11/5/2024 10:16:15 AM

Sample: 672210-4795\_Coal ash sim

Measured on 11/4/2024 4:41:09 PM

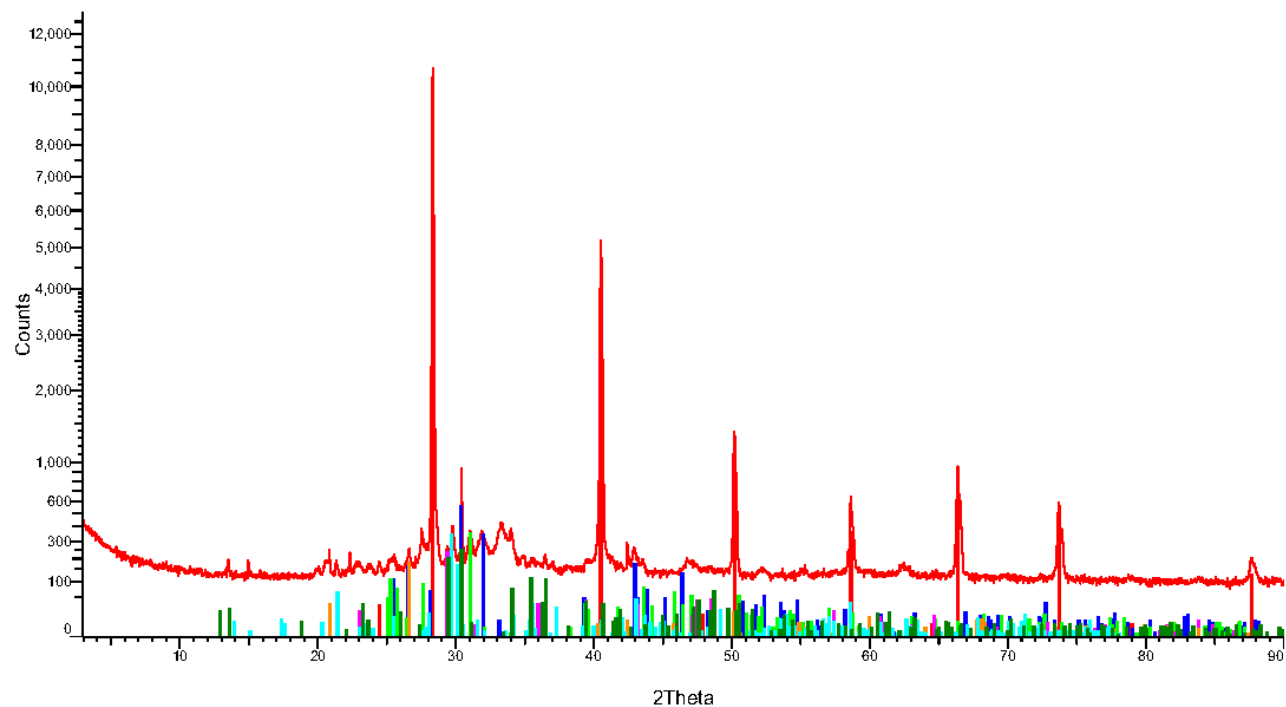
Sample measured by Admin

Measurement method: Best Detection-Vac34mm

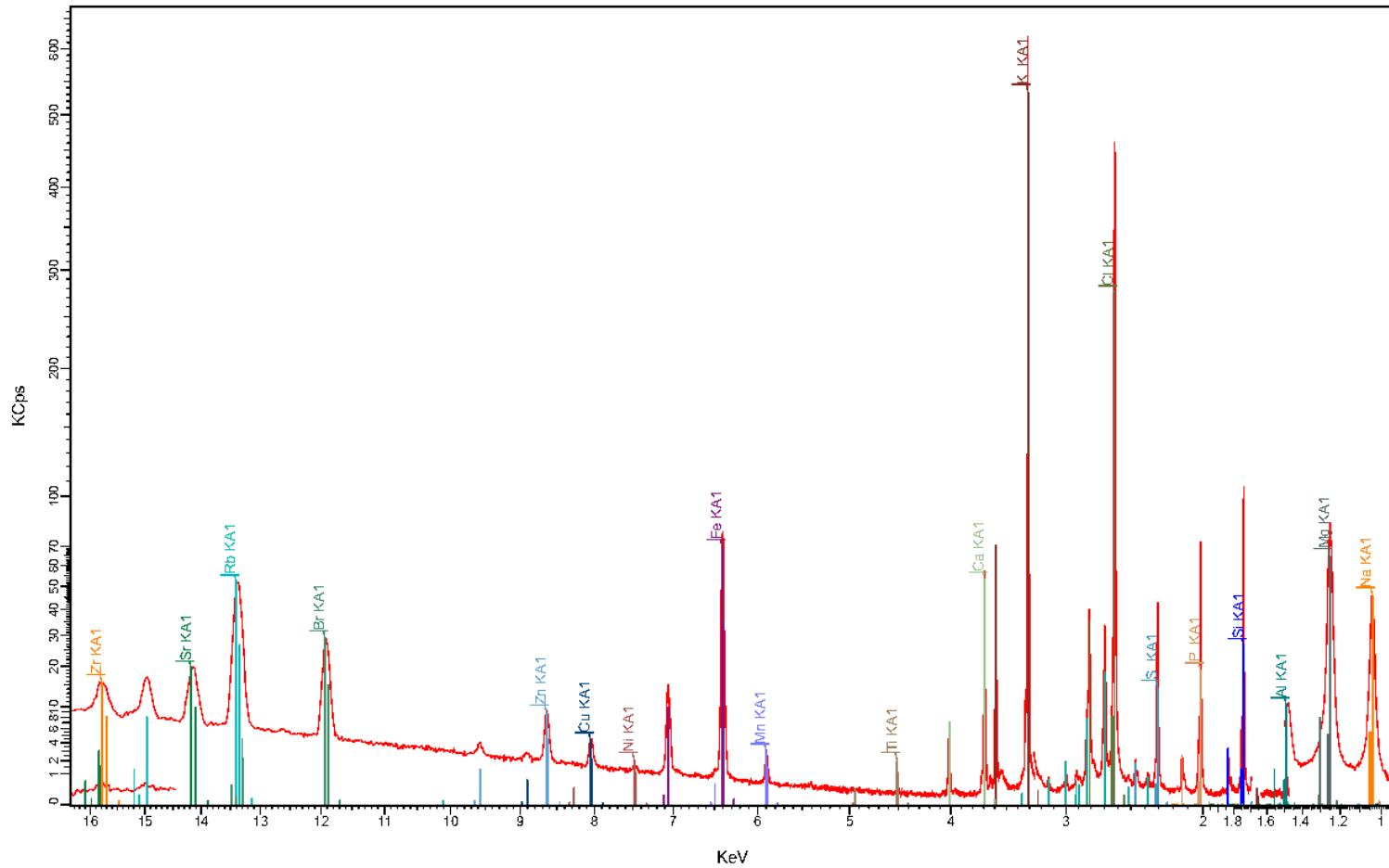
SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	SO3	Na2O	K2O	TiO2	Cr2O3	P2O5
408.9 KCps	110.0 KCps	758.0 KCps	154.7 KCps	38.8 KCps	36.0 KCps	8.2 KCps	28.5 KCps	12.2 KCps	25.0 KCps	1.6 KCps
55.6 %	13.8 %	7.90 %	7.48 %	3.77 %	3.04 %	1.97 %	1.27 %	0.588 %	0.541 %	0.229 %

MnO	SrO	NiO	BaO	Cl	ZrO2	MoO3	CuO	ZnO	Rb2O	As2O3
13.9 KCps	144.9 KCps	23.1 KCps	0.7 KCps	0.3 KCps	41.6 KCps	12.4 KCps	2.7 KCps	2.4 KCps	4.4 KCps	0.7 KCps
0.180 %	0.179 %	0.151 %	671 PPM	171 PPM	171 PPM	143 PPM	134 PPM	95.2 PPM	50.4 PPM	16.8 PPM

## C charcoal ash astm



- File: 670110-4480\_02.brml (Smooth), Scan Type: Coupled TwoTheta/Theta, 40.0 kV, 40.0 mA, Start: 3.0000 ° - End: 90.0000 °, Step size: 0.0200 °, Time/Step: 1.00 s, Temp.: 25 °C (Room)
- PDF 04-007-3113 - Sylvite, sy n - KCl - WL=1.54060 Å - Cubic - a=6.29200 Å - b= - c= - alpha= - beta= - gamma= - Fm-3m (225) - 249.10 Å³
- PDF 04-008-2745 - Calcium Carbide - CaC2 - WL=1.54060 Å - Monoclinic - a=6.63200 Å - b=4.18890 Å - c=7.31100 Å - alpha= - beta=107.241 ° - gamma= - C2/c (15) - 193.98 Å³
- PDF 01-084-9767 - Calcium Carbide - CaC2 - WL=1.54060 Å - Monoclinic - a=7.24200 Å - b=3.85500 Å - c=7.38500 Å - alpha= - beta=107.520 ° - gamma= - C2/m (12) - 196.61 Å³
- PDF 01-086-4273 - Calcite - Ca(CO3) - WL=1.54060 Å - Hexagonal - a=4.98660 Å - b= - c=17.08160 Å - alpha= - beta= - gamma= - R-3c (167) - 367.85 Å³
- PDF 01-087-8429 - Silicon dioxide | Silicon Oxide - SiO2 - WL=1.54060 Å - Hexagonal - a=4.91300 Å - b= - c=5.40600 Å - alpha= - beta= - gamma= - P3221 (154) - 113.01 Å³
- PDF 01-079-8259 - dimagnesium diphosphate | Magnesium Phosphate - Mg2(P2O7) - WL=1.54060 Å - Monoclinic - a=6.94430 Å - b=8.28610 Å - c=9.04380 Å - alpha= - beta=113.816 ° - gamma= - P2
- PDF 04-011-4938 - Potassium Calcium Carbonate - K2Ca2(CO3)3 - WL=1.54060 Å - Hexagonal - a=13.01000 Å - b= - c=8.61500 Å - alpha= - beta= - gamma= - R3 (146) - 1262.82 Å³



670110-4479\_C Charcoal ash astrm  
 Eval2 V2.5.500 Admin 10/15/2024 10:37:45 AM

Eval2 V2.5.500 Admin 10/15/2024 10:35:33 AM  
 Sample: 670110-4479\_C Charcoal ash astm  
 Measured on 10/11/2024 12:39:12 PM  
 Sample measured by Admin  
 Measurement method: Best Detection-Vac34mm

K	Cl	Na	Si	Mg	Ca	P	Fe	S	Al	Rb
28.9 %	19.0 %	6.15 %	5.24 %	3.90 %	3.78 %	2.76 %	0.964 %	0.929 %	0.184 %	726 PPM

Br	Mn	Zn	Ti	Sr	Cu	Zr	Ni	Sum
652 PPM	451 PPM	321 PPM	212 PPM	183 PPM	163 PPM	54.0 PPM	34.7 PPM	72 %