การผลิตถ่านอัดแท่งจากตะกอนเปียกเหลือทิ้งจากการผลิตเอทานอลจากมันเส้น
Production of briquette charcoals from wet cake waste of ethanol industry from chiped cassava

วลัยรัตน์ อุตตมะปรากรม[1]และ ธราพงษ์ วิทิตศานท์[2]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการนำตะกอนเปียกเพื่อนำไปเป็นเชื้อเพลิงทดแทน โดยการนำมาวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นและค่าความร้อน พบว่า มีปริมาณคาร์บอนคงตัวต่ำซึ่งเป็นส่วนที่เผาไหม้ให้พลังงานร้อยละ 13.33 และค่าความร้อนต่ำคือ 13,864.38 KJ/kg จึงเหมาะสมในการนำมาวิจัยเพื่อปรับปรุงคุณภาพก่อนนำไปใช้งาน จากนั้นนำไปคาร์บอไนเซชันในสภาวะต่างๆที่อุณหภูมิ 400, 450, 500 และ 550°C ในแต่ละช่วงอุณหภูมิทำการทดลองที่ระยะเวลา 30, 45, 60 และ 90 นาที ในภาวะจำกัดออกซิเจน จากการทดลองพบว่า ภาวะที่เหมาะสมสำหรับการคาร์บอไนเซชันตะกอนเปียก คือ อุณหภูมิ 500°C ที่ระยะเวลา 60 นาที โดยภาวะดังกล่าว มีความชื้น 1.17% สารระเหย 16.57% เถ้า 34.42% และคาร์บอนคงตัว 47.84% เมื่อทราบภาวะคาร์บอไนเซชันที่เหมาะสมจึงนำตะกอนเปียกมาอัดแบบร้อนและแบบเย็นเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการให้พลังงานความร้อน พบว่า ถ่านอัดแบบเย็นมีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูง ซึ่งเป็นส่วนที่เผาไหม้ให้พลังงานร้อยละ 59.01 และค่าความร้อน 24,790.38 KJ/kg ในขณะที่ถ่านอัดแบบร้อนมีปริมาณคาร์บอนคงตัวร้อยละ 42.66 และค่าความร้อน 20,257.25 KJ/kg สำหรับการผลิตถ่านทั้ง 2 แบบในเชิงพาณิชย์ ถ่านอัดแบบร้อนมีต้นทุน 0.17 บาท/ก้อน ราคาขาย 0.525 บาท/ก้อน จำนวนการผลิตที่จุดคุ้มทุน 704,225 ชิ้น ระยะเวลาคืนทุน 0.18 ปี ถ่านอัดแบบเย็นมีต้นทุน 0.3175 บาท/ก้อน ราคาขาย 1.05 บาท/ก้อน จำนวนการผลิตที่จุดคุ้มทุน 338,524 ชิ้น ระยะเวลาคืนทุน 0.17 ปี โดยอ้างอิงจากต้นทุนคงที่ 250,000 บาท ราคาขายถ่านทั้ง 2 แบบราคา 10.5 บาท/กิโลกรัม ระยะเวลาคืนทุนคิดเทียบกับกำลังการผลิตของเครื่องจักร

คำสำคัญ : คาร์บอไนเซชัน, ตะกอนเปียก, ถ่านอัดแบบร้อน, ถ่านอัดแบบเย็น

[1]สถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ชั้น 12 อาคารสถาบัน 3 ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10300
E-mail: walairat@eri.chula.ac.th

[2] ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร 10300

Abstract

This research study, the wet cake to be used as alternative fuels by providing proximate analysis and heating value found that low fixed carbon content which is burned for energy only 13.33 percent and relatively low heating value is 13,864.38 kj / kg. Perfectly suited for research to improve quality prior to use. Then bring the wet cake to carbonization in various conditions at 400, 450, 500 and 550°C in each temperature range of the experimental period, 30, 45, 60 and 90 minutes in oxygen-limited conditions. It was found that the appropriate condition for carbonization is the temperature at 500°C for 60 minutes. The condition has 1.17% moisture, 34.42% ash, 16.57% volatile matter and 47.84% fixed carbon. When get the appropriate carbonization condition, thus bring the wet cake to hot and cold compressed to compare the efficiency of thermal energy found that cold compressed high fixed carbon content 59.01% and heating value 24,790.38 kj/kg while hot compressed fixed carbon content 42.66% and heating value 20,257.25 kj/kg. Both of the production of briquette charcoal in commercial, hot compressed cost 0.17 baht/piece, sale price 0.525 baht/pieces, total production at breakeven 704,225 pieces and payback period of 0.18 years, cold compressed cost 0.3175 baht/piece, sale price 1.05 baht/pieces, total production at breakeven 338,524 pieces and payback period of 0.17 years. Based on fixed cost 250,000 Baht ,assuming sale price of both briquette charcoal 10.5 baht/kg and the payback period compared with the capacity of the machines.

Keyword: carbonization, wet cake, hot compressed, cold compressed

1 บทนำ

ในปัจจุบันได้มีการตระหนักถึงภาวะของปริมาณเชื้อเพลิงที่มีอยู่อย่างจำกัด จึงได้มีความพยายามที่จะหาเชื้อเพลิงชนิดอื่นเข้ามาทดแทน ซึ่งเชื้อเพลิงหนึ่งที่น่าสนใจในที่นี้คือ ชีวมวล เนื่องจากชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงที่สามารถหาได้ง่ายภายในประเทศ ประกอบกับประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมที่มีแหล่งชีวมวลจากภาคการเกษตรมากมาย เช่น มันสำปะหลัง อ้อย แกลบ ชานอ้อย ฯลฯ จึงมีความได้เปรียบทางวัตถุดิบ นอกจากนี้ชีวมวลยังได้มาจากวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรและอุตสาหกรรมบางประเภททำให้มีปริมาณมากและราคาถูก ปัจจุบันหลายฝ่ายที่มีส่วนเกี่ยวข้องทั้งภาครัฐและเอกชนต่างให้ความสนใจกับการพัฒนาพลังงานทดแทนจากชีวมวล เช่น ก๊าซชีวภาพ (Biogas) ไบโอเอทานอล (Bioethanol) และไบโอดีเซล (Biodiesel) นอกจากนี้การนำชีวมวลมาใช้เป็นเชื้อเพลิงยังช่วยลดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปลดปล่อยสู่บรรยากาศ

จากความจำเป็นในการพัฒนาแหล่งพลังงานทดแทนที่หมุนเวียน เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและสามารถผลิตได้เองภายในประเทศ ส่งผลให้อุตสาหกรรมการผลิตเอทานอล เพื่อใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงในรูปแบบของแก๊สโซฮอล์ของประเทศไทยขยายตัวอย่างมาก เมื่อ 12 ธันวาคม 2549 คณะรัฐมนตรีมีมติเห็นชอบแนวทางการเปิดเสรีโรงงานเอทานอล ส่งผลให้อุตสาหกรรมเอทานอลเกิดการขยายตัวอย่างกว้างขวาง โดยตั้งเป้าหมายในปี พ.ศ. 2554 ให้มีการใช้เอทานอล 3 ล้านลิตร/วัน เพื่อทดแทน MTBE ในน้ำมันเบนซิน 95 และทดแทนเนื้อน้ำมันในน้ำมันเบนซิน 91 ในปี 2555 เริ่มจำหน่าย E85 ในปี 2560 จำหน่าย E20 และยกเลิกเบนซิน 95 และ 91 ทั่วประเทศ และในปี 2565 ให้มีการใช้เอทานอล 9 ล้านลิตร/วัน โดยส่งเสริมให้มีงานวิจัยต่าง ๆมากมายที่สอดรับกับแผนพัฒนาแก๊สโซฮอล์ 2551–2565 จากข้อมูลล่าสุดพบว่ามีจำนวนผู้ประกอบการที่ได้รับอนุญาตก่อสร้างโรงงานผลิตเอทานอลเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงทั้งสิ้น 47 ราย แสดงดังตารางที่ 1.1 โดยโรงงานเอทานอลที่ดำเนินการผลิตแล้วในปัจจุบันมีทั้งสิ้น 13 ราย แสดงดังตารางที่ 1.2

ตารางที่ 1.1 ผู้ประกอบการที่ได้รับอนุญาตก่อสร้างโรงงานผลิตเอทานอลเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิง

ประเภทของวัตถุดิบ	จำนวนโรงงาน	กำลังการผลิตรวม (ลิตร/วัน)
อ้อย	1	200,000
มันสำปะหลัง	27	8,290,000
กากน้ำตาล	5	675,000
อ้อย/กากน้ำตาล	12	1,810,000
มันสำปะหลัง/กากน้ำตาล	5	770,000
อ้อย/มันสำปะหลัง	1	200,000
กากน้ำตาล/มันสำปะหลัง/อ้อย	2	250,000
กากมันสำปะหลัง	1	100,000
รวมกำลังการผลิต		**12,295,000**

ที่มา : กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน ,2551[1]

ตารางที่ 1.2 โรงงานที่ดำเนินการผลิตเอทานอลแล้ว

ประเภทของวัตถุดิบ	จำนวนโรงงาน	กำลังการผลิตรวม (ลิตร/วัน)
กากน้ำตาล	4	575,000
อ้อย/กากน้ำตาล	6	770,000
มันสำปะหลัง	2	330,000
กากน้ำตาล/มันสำปะหลัง	1	150,000
รวมกำลังการผลิต		**1,825,000**

ที่มา : กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน ,2551[1]

อุตสาหกรรมเอทานอลในประเทศไทยใช้วัตถุดิบทางการเกษตรจากกากน้ำตาลและมันสำปะหลังเป็นหลักจากการประเมินปริมาณของวัตถุดิบอย่างคร่าวๆ ตามจำนวนโรงงานเอทานอลที่มีการขอใบอนุญาตจัดตั้งโรงงานเอทานอลเชื้อเพลิง พบว่าจะเกิดของเสีย (Waste) มากมาย ยกตัวอย่าง โรงงานเอทานอลเชื้อเพลิงขนาดกำลังการผลิตประมาณ 150,000 ลิตร/วัน จะมีปริมาณน้ำจากหอกลั่นมากถึงวันละประมาณ 1,500,000 ลิตร/วัน หากโรงงานไม่มีขั้นตอนการนำน้ำกลับมาใช้ในกระบวนการผลิตน้ำจากหอกลั่นทั้งหมดจะเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียซึ่งการจัดการกับน้ำเสียวันละ 1.5 ล้านลิตร/วัน ต้องใช้พื้นที่มากหรือต้องมีการลงทุนระบบบำบัดน้ำเสียประสิทธิภาพสูงเนื่องจากปริมาณของน้ำเสียมาก โดยเฉพาะโรงงานที่ใช้กากน้ำตาลเป็นวัตถุดิบจะต้องบำบัดสีของน้ำเสียก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะในกระบวนการผลิตเอทานอลนอกจากเอทานอลแล้ว ยังมีผลพลอยได้อื่นๆที่สำคัญได้แก่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการหมักและฟูเซลออยล์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการกลั่น รวมถึงของเสียจากกระบวนการผลิตคือน้ำเสียหรือน้ำกากส่า ซึ่งมีเซลล์ยีสต์ปนอยู่เกิดขึ้นด้วย ทั้งนี้คุณภาพของน้ำกากส่าจะแตกต่างกันตามชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ ปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ และผลได้วมถึงของเสียที่เกิดขึ้นทั้งหมดจากการผลิตเอทานอล (ตารางที่ 1.3)

ตารางที่ 1.3 ข้อมูลการสำรวจโรงงานผลิตเอทานอลจากมันสำปะหลังในรูปมันเส้นและกากน้ำตาลคำนวณที่กำลังการผลิต 150,000 ลิตร/วัน

วัตถุดิบและผลพลอยได้	ปริมาณและคุณภาพ			
	มันเส้น		กากน้ำตาล	
	ปริมาณ	คุณภาพ	ปริมาณ	คุณภาพ
วัตถุดิบ (INPUT)				
1. วัตถุดิบ (ตันต่อวัน)	350-370	- ความชื้น 12-16% - ปริมาณแป้ง 64%	540-550	- น้ำตาลทั้งหมด 48-50% - ของแข็งละลายได้ 80 บริกซ์
2. น้ำ (ลบ.ม. ต่อวัน)	1,200-1,500	-	1,000-1,300	-
3. สารเคมี				
- ยีสต์ผง (กก./วัน)	20-80	-	20-80	-
- เอนไซม์ (กก./วัน)	20-800	-	-	-
- สารเคมีอื่น (กก./วัน)	1,000-5,000	-	1,000-5,000	-
4. พลังงาน				
- ไฟฟ้า (Kw-hr/day)	25,000-47,000	380 V 50 Hz	22,000-44,000	380 V 50 Hz
- ไอน้ำ (ตัน./วัน)	300-500	3-10 บาร์	200-400	3-10 บาร์
ผลได้ (OUTPUT)				
1. เอทานอล (ลิตรต่อวัน)	150,000	ตาม มอก. (640-2533)	150,000	ตาม มอก. (640-2533)
2. CO_2 (ตัน ต่อวัน)	100-120	-	100-120	-
3. Fusel Oil (ลิตร/วัน)	300-600	-	300-600	-
4. น้ำกากส่า (ลบ.ม./วัน)	1,400-1,600	- TS 5-7% - COD 40,000-60,000 mg/l - BOD 15,000-35,000 mg/l	1,000-1,300	TS 15% - COD 100,000-150,000 mg/l - BOD 40,000-70,000 mg/l
4.1 ตะกอนเปียก (ตันต่อวัน)	100-200	20-30% TS		
4.2 น้ำเสีย (ลบ.ม./วัน)	1,200-1,400	TS 5-7% - COD 20,000-40,000 mg/l - BOD 10,000-30,000 mg/l	1,000-1,300	TS 10-12% - COD 120,000-150,000 ppm - BOD 40,000-70,000 ppm

ที่มา : กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน , 2549 [2]

จากการสำรวจสถานภาพการจัดการของเสียและผลพลอยได้ของโรงงานผลิตเอทานอลที่มีในปัจจุบันยังไม่สามารถจัดการของเสียต่างๆที่เกิดขึ้นจากการผลิตในแต่ละขั้นตอนและนำมาใช้ประโยชน์อย่างเต็มที่ ตะกอนเปียกเป็นของเสียที่เกิดจากกระบวนการกลั่นเอทานอลเป็นปริมาณมากในแต่ละวัน ในงานวิจัยนี้จึงศึกษาตะกอนเปียก (Wet cake) เพื่อนำไปเป็นเชื้อเพลิงทดแทน อย่างไรก็ตามการใช้ตะกอนเปียกเป็นเชื้อเพลิงโดยตรงนั้นประสบปัญหาในด้านความชื้นและการควบคุมขนาดเชื้อเพลิงในเตาปฏิกรณ์ จึงมีการนำมาอัดแท่งเพื่อให้มีขนาดเหมาะสมในการใช้เป็นเชื้อเพลิง รวมทั้งศึกษากระบวนการคาร์บอไนเซชัน (Carbonization) เพื่อเพิ่มประโยชน์ในการนำไปใช้งานโดยเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ชาร์ และยังเป็นการเพิ่มคุณภาพของของถ่านชาร์เนื่องจากปริมาณคาร์บอนคงตัวและค่าความร้อนที่สูงขึ้น เพื่อพัฒนาไปสู่การผลิตถ่านอัดแท่งในเชิงพาณิชย์ต่อไป

2 ทฤษฎี และ งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

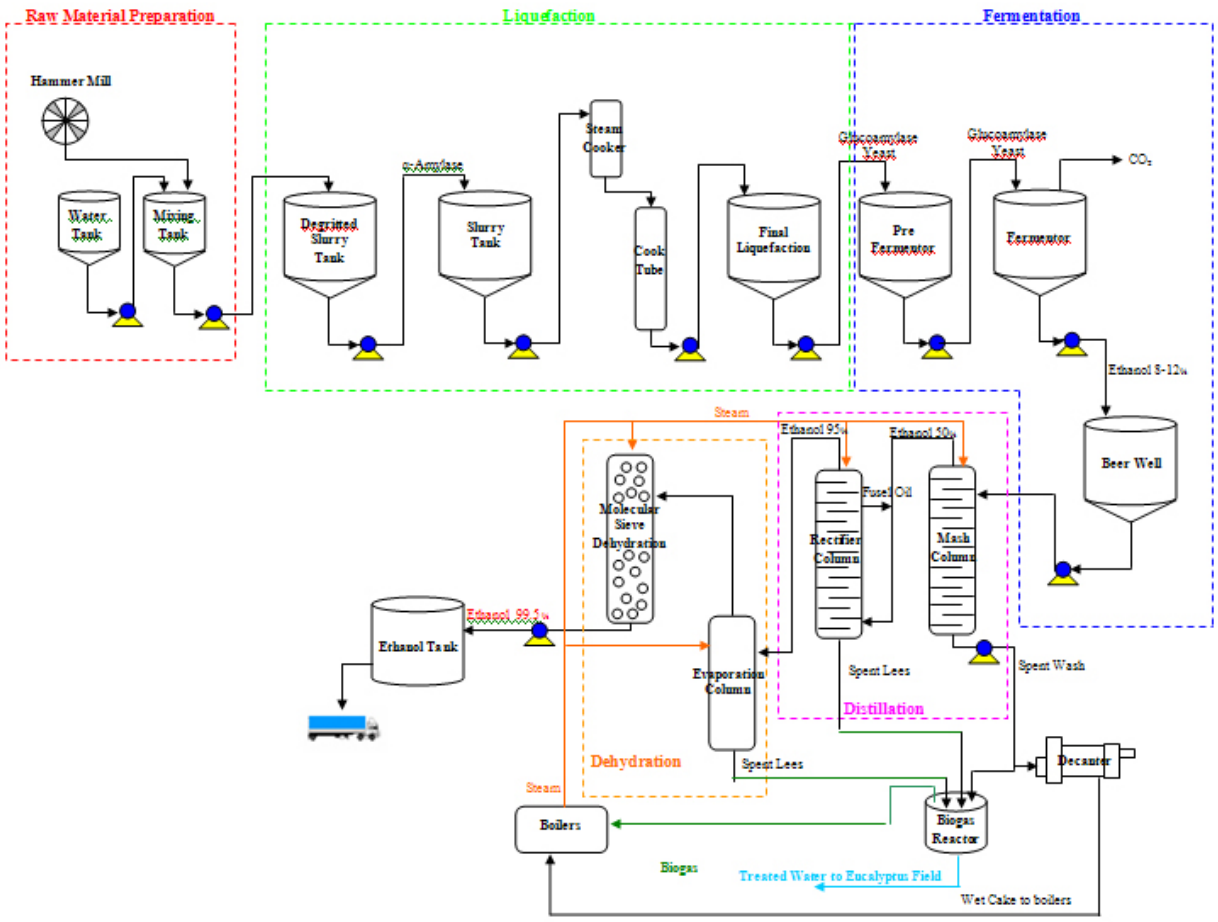
2.1 ตะกอนเปียกตะกอนเปียกเป็นของเสียที่เกิดจากการกลั่นและการแยกน้ำจากการผลิตเอทานอลจากมันสำปะหลัง มีสีดำ ลักษณะร่วนซุย มีกลิ่นฉุนคล้ายกลิ่นยีสต์ และมีเศษกากมันสำปะหลังปนอยู่มีความชื้นประมาณ 40% ถือเป็นของเสียชีวมวลที่เกิดจากอุตสาหกรรม เกิดเป็นปริมาณมากต่อวันยากแก่การจัดการ อาทิเช่น โรงงานผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลกำลังการผลิต 200,000 ลิตร/วัน จะมีตะกอนเปียกเกิดขึ้น 250 ตัน/วัน หากอนาคตมีโรงงานผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลกำลังการผลิต 200,000 ลิตร/วัน ประมาณ 20 โรง จะมีตะกอนเปียกเกิดขึ้นประมาณ 37 ล้านตัน/ปี

2.2 การผลิตเอทานอลจากมันสำปะหลัง (มันเส้น)

กระบวนการผลิตเอทานอลจากมันสำปะหลัง (มันเส้น) เริ่มจากกระบวนการเตรียมวัตถุดิบคือ มันเส้นนำมาบดให้มีขนาดเล็ก จากนั้นทำการคัดขนาดแล้วนำไปผสมกับน้ำในถังผสม (Mixing tank) เป็นน้ำแป้ง (Slurry) เพื่อส่งเข้าสู่กระบวนการย่อยแป้งให้เป็นน้ำตาล โดยทำการเติมเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส (α-amylase) และต้มน้ำแป้งด้วยไอน้ำในหม้อต้ม (Steam cooker) เพื่อให้น้ำแป้งมีอุณหภูมิที่เหมาะในการทำปฏิกิริยาของเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสที่ 90-100°C ขั้นตอนนี้จะเป็นการย่อยแป้งให้เปลี่ยนเป็นน้ำตาลเด็กซ์ทริน

จากนั้นจะทำการย่อยครั้งสุดท้ายในถัง Final Liquefaction โดยเอนไซม์กลูโคอะไมเลสอุณหภูมิ 50-60°C จะเป็นการย่อยน้ำตาลเด็กซ์ทรินให้เปลี่ยนเป็นน้ำตาลกลูโคส จากนั้นจะเข้าสู่กระบวนการหมักโดยจะเติมยีสต์ในถัง Prefermentor ก่อนที่จะเข้าสู่ถัง Fermentor เพื่อทำการหมักน้ำตาลกลูโคสให้เปลี่ยนเป็นเอทานอล ซึ่งในกระบวนการนี้จะได้เอทานอลลออกมาร้อยละ 8-12 แล้วยังได้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นผลิตผลพลอยได้ด้วย

น้ำหมักที่ได้จะถูกนำไปเก็บไว้ในถังเบียร์ (Beer Well) รอเข้าสู่กระบวนการกลั่น เพื่อทำให้เอทานอลมีความบริสุทธิ์มากขึ้นโดยผ่านเข้าสู่หอกลั่น Mash Column จะได้เอทานอลที่มีความบริสุทธิ์ประมาณร้อยละ 50 น้ำกากส่า (น้ำเสีย) ที่ออกจากหอกลั่นนี้จะผ่านเข้าสู่กระบวนการแยกน้ำด้วยเครื่องแยกกาก (Decanter) เพื่อแยกกากมันสำปะหลังออกมาสามารถนำไปผลิตเป็นอาหารสัตว์ได้ ส่วนน้ำที่แยกได้จะผ่านเข้าสู่กระบวนการบำบัดน้ำเสีย จากนั้นจะนำเอทานอลที่ได้ไปทำการกลั่นอีกครั้งที่หอกลั่น Rectifier Column จะได้เอทานอลที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 95 ในกระบวนการนี้จะเกิดผลิตผลพลอยได้คือ Fusel Oil จากนั้นจะทำการแยกน้ำออกจากเอทานอลโดยผ่านเข้าสู่กระบวนการแยกน้ำที่เครื่อง Molecular Sieve ซึ่งภายในจะมีตัวดูดซับจะทำการดูดซับน้ำออกจากเอทานอลทำให้เอทานอลที่ผ่านกระบวนการนี้มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5 สามารถนำไปผสมกับน้ำมันเบนซินเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับรถยนต์ได้



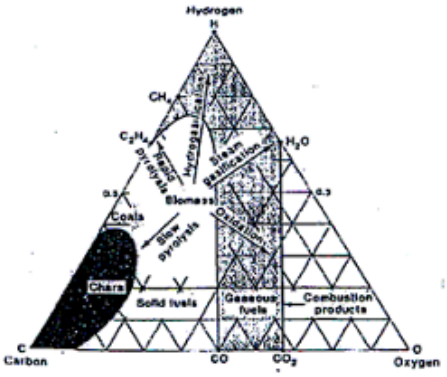
รูปที่ 2.1 แผนผังกระบวนการผลิตเอทานอลจากมันเส้น

ที่มา : http://www.sapthip.com/product.php [3]

2.3 หลักการแปรรูปชีวมวล

เมื่อพิจารณาถึงคุณสมบัติของชีวมวลจะเห็นได้ว่าชีวมวลสามารถที่จะแปรรูปไปเป็นเชื้อเพลิงสังเคราะห์ได้ด้วยกระบวนการต่างๆ ซึ่งอาจเป็นกระบวนการทางชีวภาพหรือกระบวนการทางเคมีความร้อน

การแปรรูปชีวมวลให้เป็นแหล่งพลังงานที่มีประสิทธิภาพ กระทำได้โดยใช้เทคโนโลยีการแปรรูปทางความร้อน (Thermal conversion Technology) ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 กระบวนการ คือ ไพโรไลซิส (Pyrolysis) แกซิฟิเคชัน (Gasification) และการเผาไหม้ (Combustion) โดยแผนภาพอธิบายกระบวนการเหล่านี้ไปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ แสดงดังกราฟสามเหลี่ยมที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของชีวมวล

2.4 กระบวนการเปลี่ยนแปลงเคมีทางความร้อน

2.4.1 CONVERSION PROCESS

พลังงานศักย์ในชีวมวลสามารถปลดปล่อยออกมาโดยการเผาไหม้ได้โดยตรงหรือโดยการเปลี่ยนแปลงวัสดุอันนั้นให้เป็นเชื้อเพลิง หรือเป็นสารเคมีตัวอื่นโดยวิธีการทางความร้อนหรือวิธีการทางชีวเคมีก็ได้ สามารถกระทำได้หลายวิธี คือกระบวนการทางเคมี-ความร้อน (Thermo-chemical process) หรือเกิดจากกระบวนการทางชีวภาพ (Biological process) เป็นต้น

2.4.1.1 การเผาไหม้ (Combustion)

การเผาไหม้สารอินทรีย์ด้วยออกซิเจนที่มากเกินพอ ซึ่งจะเกิดเป็นการเผาไหม้แบบสมบูรณ์โดยได้ผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำการเผาไหม้ของชีวมวลสามารถอธิบายได้ทั่วๆไปทั้งหมด 4 ขั้นตอนดังนี้ คือ

1. การระเหยความชื้นออกไป (evaporation of moisture) เป็นกระบวนการดูดความร้อน
2. การกลั่นของสารระเหย (distillation of volatiles) สามารถเป็นได้ทั้งกระบวนการดูดและคายความร้อน
3. การเผาไหม้ของสารระเหย (burning of volatiles) เป็นกระบวนการคายความร้อน
4. การเผาไหม้ของคาร์บอนคงตัว (combustion of fixed carbon) เป็นกระบวนการคายความร้อน

2.4.1.2 กระบวนการไพโรไลซิส : Carbonization

การทำคาร์บอไนเซชันใช้เมื่อสารที่มีองค์ประกอบซับซ้อนนั้นมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ เช่น ไม้หรือวัสดุเหลือใช้จากการเกษตร และอุตสาหกรรม โดยวัสดุเหล่านี้จะถูกแยกสลายเป็นธาตุคาร์บอน และสารประกอบเคมีอื่นๆ ซึ่งอาจมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบก็ได้

ประสิทธิภาพในการทำคาร์บอไนเซชันขึ้นกับ 3 ปัจจัยหลัก ดังนี้

1. ปริมาณความชื้นระหว่างการทำคาร์บอไนเซชัน
2. ชนิดของอุปกรณ์ที่ใช้ทำคาร์บอนไนเซชัน
3. ความรอบคอบในขั้นตอนการทำคาร์บอไนเซชัน

ระหว่างการเกิดคาร์บอไนเซชันของชีวมวล ซึ่งจะจำกัดออกซิเจน หรือจะใช้เพียงปริมาณน้อยเพื่อใช้พอติดไฟเท่านั้น ชีวมวลที่ทำคาร์บอไนเซชันจะแตกสลายได้ผลิตภัณฑ์หลัก คือ charcoal และของแข็งสีดำที่มีรูพรุนโดยมีองค์ประกอบหลัก คือ คาร์บอน นอกนั้นคือเถ้าจากชีวมวล (ประมาณ 0.5-6%) โดยปริมาณเถ้าจะขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวล

ในขั้นตอนการทำคาร์บอไนเซชันที่ช่วงอุณหภูมิต่างๆ สามารถสรุปได้คร่าวๆ ดังนี้

ช่วงอุณหภูมิ 20 -110^{o}C	ชีวมวลจะรับความร้อนเข้าไปในเนื้อโดยตรง ซึ่งความร้อนส่วนนี้จะทำให้ความชื้นในชีวมวลระเหยออกไป และอุณหภูมิจะยังคงที่อยู่ที่ 110^{o}C จนกว่าชีวมวลจะแห้ง
ช่วงอุณหภูมิ 110 -270^{o}C	ชีวมวลจะเริ่มสลายตัวโดยปล่อย CO, CO_2, Acetic acid และ methanol ออกมา
ช่วงอุณหภูมิ 270-290^{o}C	เป็นจุดที่ไม้เริ่มเกิดการสลายตัวโดยจะคายความร้อนออกมา ซึ่งจะได้ก๊าซผสมหลายชนิดและมีTar เกิดขึ้นในปริมาณเล็กน้อย
ช่วงอุณหภูมิ 290-400^{o}C	การสลายตัวของไม้ยังคงเกิดขึ้นอยู่ ได้ก๊าซผสมหลายชนิดและได้ Tar ในปริมาณที่มากขึ้น
ช่วงอุณหภูมิ 400-500^{o}C	ที่ช่วงอุณหภูมินี้ชีวมวลจะเปลี่ยนไปเป็น Charcoal อย่างสมบูรณ์

ไพโรไลซิสหรือการกลั่นสลาย (Destructive distillation) เป็นกระบวนการสลายตัวทางความร้อนที่ไม่สมบูรณ์ในภาวะที่ไม่มีออกซิเจน มีการถ่ายเทความร้อนโดยทางอ้อม ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ในรูปของแข็ง คือ ชาร์ ของเหลวที่ควบแน่นได้ทาร์และแก๊ส

ปฏิกิริยาไพโรไลซิสต้องการความร้อนทั้งทางตรงจากการออกซิเดชันเพียงบางส่วน หรือจากปฏิกิริยาอื่นๆที่เกิดขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์ และทางอ้อม (รีทอร์ท) ซึ่งในปัจจุบันการสลายตัว

ทางความร้อนในภาวะที่มีออกซิเจนน้อย หรือในที่ที่มีการถ่ายเทความร้อนให้เกิดการไพโรไลซิสโดยตรงจากการเผาไหม้บางส่วนของชาร์และแก๊ส เรียกได้ว่าเป็นกระบวนการไพโรไลซิส เมื่อชีวมวลเกิดการสลายตัวทางความร้อนจะเกิดอนุกรมของปฏิกิริยาต่างๆ ได้แก่ แก๊สที่มีพลังงานปานกลาง น้ำมันที่มีองค์ประกอบซับซ้อนและชาร์

2.5 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและเอกสารอ้างอิง

Zanzi R et al. [4] ได้ศึกษาไพโรไลซิสชีวมวลอย่างรวดเร็วของไม้และวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร โดยใช้กับเครื่องปฏิกรณ์แบบ Free Fall เพื่อศึกษาถึงผลของอัตราการให้ความร้อน อุณหภูมิ ขนาดของอนุภาค เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา องค์ประกอบของแก๊ส และความว่องไวของถ่านชาร์ การเกิดถ่านชาร์ในปริมาณต่ำแต่มีความว่องไวที่สูง จะพบทั้งในกระบวนการทำให้เป็นก๊าซและการเผาไหม้ ส่วนความว่องไวของถ่านชาร์นั้นจะเพิ่มขึ้นเมื่อให้ความร้อนในอัตราที่สูง ขนาดของอนุภาคเชื้อเพลิงเล็ก และเวลาในการทำปฏิกิริยาน้อยที่อุณหภูมิสูง

Michael Jerry Antal et al. [5] ศึกษากระบวนการคาร์บอไนเซชันแบบรวดเร็ว โดยชีวมวลที่นำมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ได้แก่ ไม้ลูเซน ไม้โอ๊ค ซังข้าวโพด และเปลือกถั่วแม็กคาเดเมีย ทำการคาร์บอไนเซชันแบบรวดเร็วที่ความดัน 1 megapascal ในเครื่องปฏิกรณ์เตาเผาแบบเบดนิ่ง (fixed bed) ซึ่งถูกออกแบบให้เปลวไฟที่เกิดขึ้นเคลื่อนที่ขึ้นด้านบนของเบดสวนทางกับอากาศที่ไหลลงมา ทำให้ชีวมวลเปลี่ยนรูปไปเป็นแก๊สและถ่านชาร์ที่มีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูง โดยใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์น้อยกว่า 30 นาที จากผลการทดลองพบว่าสัดส่วนได้ของถ่านชาร์เป็น 29.5–40% ของน้ำหนักแห้งเริ่มต้น 59-63% ของคาร์บอนในชีวมวลถูกเปลี่ยนไปเป็นคาร์บอนที่อยู่ในชาร์ และมีประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงเชิงพลังงานคิดเป็น 55.1-66.3%

กฤติยาณี และ กิดาการ.[6] ศึกษาการคาร์บอไนเซชันชีวมวลสำหรับการใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพ ในงานวิจัยนี้ศึกษาการคาร์บอไนเซชันของชีวมวล 3 ชนิด ได้แก่ ไม้ยูคาลิปตัส ชานอ้อย และกะลาปาล์ม ที่อุณหภูมิต่ำ (400-450°C) โดยนำไปผ่านการคาร์บอไนเซชันในเครื่องปฏิกรณ์ที่ทำการออกแบบและสร้างขึ้นใหม่ เพื่อศึกษาผลของชนิดชีวมวลที่ใช้และอุณหภูมิในการคาร์บอไนเซชัน พบว่า เมื่ออุณหภูมิในการคาร์บอไนเซชันสูงขึ้น ร้อยละโดยน้ำหนักคาร์บอนจะเพิ่มขึ้นด้วย โดยที่อุณหภูมิ 450°C จะได้ร้อยละโดยน้ำหนักคาร์บอนสูงสุดในชีวมวลทั้ง 3 ชนิด ส่วนร้อยละโดยน้ำหนักของสาระเหยจะลดลง ค่าความร้อนต่อน้ำหนักของถ่านชาร์ที่ได้จะสูงขึ้นตามอุณหภูมิ และเมื่อเปรียบเทียบสมบัติของถ่านชาร์ที่ได้จากชีวมวลแต่ละชนิด พบว่า กะลาปาล์มเป็นชีวมวลที่ให้ร้อยละโดยน้ำหนักคาร์บอนและค่าความร้อนสูงสุดเมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิในการคาร์บอไนเซชันเดียวกัน

S.R. Teixeira a, A.F.V. Pena a and A.G. Miguel b [7] บราซิลเป็นผู้ผลิตแอลกอฮอล์และน้ำตาลทรายจากอ้อยที่ใหญ่ที่สุดทั่วโลก และมีโครงการด้านพลังงานทดแทนที่หลากหลายสำหรับเชื้อเพลิงรถยนต์ วัตถุประสงค์ของงานนี้คือการเสนอทางเลือกการจัดการกับ Solid residue ที่ผลิตจากกลุ่มอุตสาหกรรมนี้ กากชานอ้อยถูกเผาไหม้เพื่อผลิตไอน้ำและไฟฟ้าโดย Cogeneration การเผาไหม้ทำให้เกิดขี้เถ้าที่มีปริมาณซิลิคอนออกไซด์สูงเป็นองค์ประกอบหลัก เถ้าที่เกิดจากกการเผาถ่าน(> 30% โดยน้ำหนัก) ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ด้วย การทำให้เป็นแท่งเกิดจากการใช้มือกดอัดโดยการใช้ผงถ่านผสมกับแป้งมันสำปะหลัง จากการวิเคราะห์โดยการใช้เครื่อง Thermogravimetric และ differential scanning calorimetry ถูกนำมาใช้อธิบายลักษณะขี้เถ้าและถ่านอัดแท่ง โดยผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าเถ้าที่เกิดจากกากชานอ้อยสามารถนำมาใช้ในการผลิตถ่านได้ โดยถ่านอัดแท่งมีความหนาแน่นเฉลี่ย 1.12 $g.cm^3$ และมีค่าความร้อนเฉลี่ย 25,551 KJ / Kg

3. เครื่องมือและการดำเนินงานทดลอง

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ในงานวิจัย

1. เตาเผา TUBULAR FURNACE MODEL CTF 12/75/700/201 ยี่ห้อ CARBOLITE
2. ตู้อบ ยี่ห้อ MMM MODEL ECOCELL
3. เตาเผา MODEL SC 96 AVM ยี่ห้อ MODUTEMP
4. BOMB CALORIMETER MODEL 6200 ยี่ห้อ PARR
5. Tube furnace : type 21100 (0-1,200°C) Thermolyne Corporation, USA
6. CHN Elemental Analyzer รุ่น CHN-2000 ยี่ห้อ LEGO
7. ชุดอุปกรณ์ทดสอบธาตุอาหารในดิน

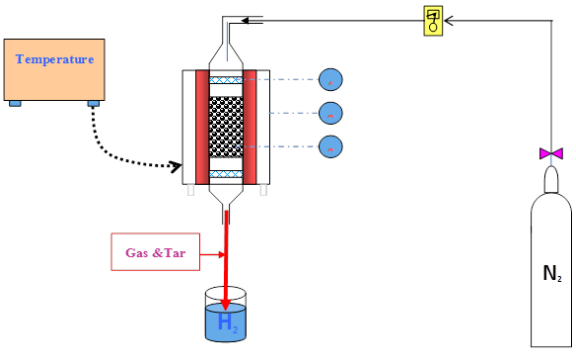
3.2 การทดลอง

1.นำตะกอนเปียก (wet cake) อบไล่ความชื้นด้วยเครื่อง Screwdry ที่กำลังการผลิต 100 กก./ชม. ให้เหลือความชื้นประมาณ 10% (ความชื้นในตะกอนเปียกประมาณ 40%) แสดงดังรูปที่ 3.1

รูปที่ 3.1 เครื่องอบไล่ความชื้นตะกอนเปียก Screwdry กำลังการผลิต 100 กก./ชม.

2. นำผงตะกอนเปียกที่ผ่านการอบมาบดให้มีขนาด 1.18 - 2.36 มม. แล้วคาร์บอไนเซชันในสภาวะที่กำหนด คือ อุณหภูมิ 400, 450, 500 และ 550°C ในแต่ละช่วงอุณหภูมิทำการทดลองที่ระยะเวลา 30, 45, 60 และ 90 นาที ในภาวะจำกัดออกซิเจน โดยปล่อยให้แก๊สไหลในอัตรา 50 มล./นาที อุปกรณ์การทดลองแสดงดังรูปที่ 3.2 และ 3.3

รูปที่ 3.2 ชุดอุปกรณ์เครื่องมือคาร์บอไนเซชันตะกอนเปียก



รูปที่ 3.3 ชุดอุปกรณ์เครื่องมือคาร์บอไนเซชันตะกอนเปียก

3. หลังจากทราบสภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอไนเซชันตะกอนเปียก จึงนำตัวอย่างมาวิเคราะห์ Proximate analysis, Ultimate analysis และ Heating value อีกครั้ง

4. นำตะกอนเปียกเข้าสู่กระบวนการผลิตเป็นถ่านอัดแท่งหลังจากทราบสภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอไนเซชัน โดยผลิตถ่านใน 2 รูปแบบ คือ ถ่านอัดแท่งแบบร้อน และ ถ่านอัดแท่งแบบเย็น

5. ศึกษาลักษณะ ประสิทธิภาพ การลุกจุดติดไฟ และความเหมาะสมในการนำไปใช้ประโยชน์ระหว่างถ่านอัดแท่งแบบร้อนและแบบเย็น

6. วิเคราะห์ Proximate analysis, Ultimate analysis และ Heating value ของถ่านอัดแท่งแบบร้อนและแบบเย็น

7. วิเคราะห์ต้นทุนและความคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์ในการผลิตถ่านอัดแท่งแบบร้อนและแบบเย็นในเชิงพาณิชย์

4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ผลการวิเคราะห์ตะกอนเปียก

ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) และค่าความร้อน เป็นการวิเคราะห์เบื้องต้นเพื่อหาคุณสมบัติของตะกอนเปียกก่อนทำการทดลองตามมาตรฐาน ASTM D 3172-3175 และ ASTM D 3286 แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ตะกอนเปียกแบบประมาณและค่าความร้อน

องค์ประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ความชื้น	7.55 ± 0.16
เถ้า	15.25 ± 0.31
สารระเหย	63.87 ± 0.42
คาร์บอนคงตัว	13.33 ± 0.04
ค่าความร้อน	13,864.38 kj/kg

รูปที่ 4.1 ตะกอนเปียกก่อน –หลังทำการคาร์บอไนเซชัน

ผลของคุณสมบัติทางเคมีของตะกอนเปียก พบว่าคุณภาพอยู่ในระดับต่ำ ตะกอนเปียกมีค่าคาร์บอนคงตัวต่ำ ซึ่งเป็นส่วนที่เผาไหม้ให้พลังงานเพียงร้อยละ 13.33 และค่าความร้อนเพียง 13,864.38 KJ/Kg, จึงมีความเหมาะสมในการวิจัยเพื่อปรับปรุงคุณภาพก่อนนำไปใช้งาน

4.2 ผลของตัวแปรในการทำคาร์บอไนเซชัน

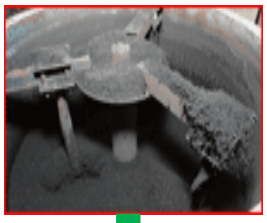
งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของตัวแปรต่อการทำคาร์บอไนเซชันตะกอนเปียกที่ภาวะต่าง ๆ อันได้แก่ 400, 450, 500 และ 550°C ในแต่ละช่วงอุณหภูมิทำการทดลองที่ระยะเวลา 30, 45, 60 และ 90 นาที ในภาวะจำกัดออกซิเจน ผลิตภัณฑ์สุดท้ายจากการคาร์บอไนเซชัน คือ ถ่าน ค่าแบบประมาณสมบัติของถ่าน แสดงดังตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ

จากการทดลอง พบว่า ภาวะที่เหมาะสมสำหรับการคาร์บอไนเซชันตะกอนเปียก คือ อุณหภูมิ 500°C ที่ระยะเวลา 60 นาที โดยสภาวะดังกล่าวมีความชื้น 1.17% สารระเหย 16.57% เถ้า 34.42% และคาร์บอนคงตัว 47.84%

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ตะกอนเปียก

Wet cake						
Temperature (°C)	Time (minutes)	YC (%wt)	M (%wt)	VM(%wt)	ASH (%wt)	FC (%wt)
400	30	45.85	2.13	33.41	29.01	35.45
	45	44.54	2.65	28.30	29.86	39.19
	60	42.22	2.66	26.16	32.12	39.06
	90	40.79	3.32	19.74	30.95	45.99
450	30	42.42	2.02	26.11	29.71	42.16
	45	39.93	2.55	24.00	29.61	43.84
	60	39.81	2.14	18.86	32.99	46.01
	90	37.82	1.95	16.13	34.85	47.07
500	30	41.55	1.89	19.08	40.27	38.76
	45	39.94	1.45	17.13	38.98	42.44
	60	**40.58**	**1.17**	**16.57**	**34.42**	**47.84**
	90	36.55	1.28	15.02	34.99	48.71
550	30	39.13	2.65	14.11	45.99	37.25
	45	38.71	1.86	12.87	41.41	43.86
	60	37.83	1.55	12.15	42.69	43.61
	90	34.53	1.13	11.24	37.85	49.78

4.3 การผลิตถ่านอัดแบบร้อนและแบบเย็น

ถ่านอัดแบบร้อน		ถ่านอัดแบบเย็น	
	ตะกอนเปียกจาก อุตสาหกรรมเอทานอล ที่มีความชื้นประมาณ 40%		ตะกอนเปียกจาก อุตสาหกรรมเอทานอล ที่มีความชื้นประมาณ 40%
	นำตะกอนเปียกเข้า สู่เครื่อง Screwdry เพื่ออบไล่ความชื้น		นำตะกอนเปียกเข้า สู่เครื่อง Screwdry เพื่ออบไล่ความชื้น
	ตะกอนเปียกที่ผ่านการอบ ไล่ความชื้นออกแล้ว คงเหลือความชื้น ประมาณ 10%		ทำการบดถ่านและผสม แป้งมันสำปะหลัง ในอัตราส่วนที่พอเหมาะ
	นำตะกอนเปียกเข้าสู่ กระบวนการอัดแท่ง เพื่อให้ได้ขนาด ตามที่ต้องการ		นำตะกอนเปียกเข้าสู่ กระบวนการอัดแท่ง เพื่อให้ได้ขนาด ตามที่ต้องการ
	เมื่อทำการเผาเรียบร้อย แล้วจะได้ถ่านอัดแท่ง แบบอัดร้อนตามที่ต้องการ		สุดท้ายจะได้ ถ่านอัดแท่งแบบเย็น

4.4 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ และค่าความร้อน ระหว่างถ่านอัดแบบร้อนและแบบเย็น

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการวิเคราะห์คุณสมบัติระหว่างถ่านอัดแท่งแบบร้อนและแบบเย็น

พารามิเตอร์	ถ่านอัดแท่งแบบร้อน	ถ่านอัดแท่งแบบเย็น
ความชื้น	2.16 ± 0.03%	5.78 ± 0.07%
เถ้า	28.98 ± 0.29%	2.41 ± 0.01%
สารระเหย	26.20 ±	32.80 ±
คาร์บอนคง	42.66 ±	59.01 ±
ซัลเฟอร์	0.110%	0.0534%
ค่าความร้อน	20,257.25 kj/kg	24,790.21 kj/kg

ความชื้น : ถ่านอัดแบบเย็นมีค่าความชื้นสูงกว่าถ่านอัดแบบร้อน เนื่องจากถ่านอัดแบบเย็นมีการผสมตัวประสาน คือ แป้งมันสำปะหลัง เพื่อให้อนุภาคของตะกอนเปียกยึดติดกันดีขึ้น โดยในขั้นตอนการผสมแป้งมันสำปะหลังจะมีการเติมน้ำลงไปในสัดส่วนที่พอเหมาะเพื่อให้รวมเป็นเนื้อเดียวกันและสามารถอัดแท่งได้ง่าย

สารระเหย : ถ่านอัดแบบเย็นมีค่าสารระเหยสูงกว่าถ่านอัดแบบร้อน เนื่องจากถ่านอัดแบบเย็นมีการผสมแป้งมันสำปะหลังซึ่งเป็นสารอินทรีย์ชนิดมีน้ำเป็นตัวประสาน เมื่อแป้งมันสำปะหลังได้รับความร้อนจะเกิดการระเหยของน้ำในตัวแป้ง volatile matter บนพื้นผิว รวมทั้งคาร์บอนในตะกอนเปียกจะถูกเผาไหม้กลายเป็นแก๊สอย่างรวดเร็วและระเหยอยู่ในรูป volatile

คาร์บอนคงตัว และ ค่าความร้อน : ถ่านอัดแบบเย็นมีค่าคาร์บอนคงตัวและค่าความร้อนสูงกว่าถ่านอัดแบบร้อนเนื่องจากถ่านอัดแบบเย็นจะคาร์บอไนซ์ผงตะกอนเปียกที่อุณหภูมิสูง ($> 800^{\circ}C$) เกิดการเผาไหม้อย่างเต็มที่จนกลายเป็นผงชาร์ ทำให้สามารถไล่ความชื้นและสารระเหยที่เป็นองค์ประกอบไปได้มากขึ้น จึงทำให้ % fixed carbon ที่เป็นตัวให้พลังงานได้สูงที่สุดมีสัดส่วนเพิ่มขึ้น

เถ้า : ถ่านอัดแบบร้อนมีเถ้ามากกว่าถ่านอัดแบบเย็นเนื่องจากในช่วงอุณหภูมิต่ำๆจะมีเพียง volatile matter ที่ถูกกำจัด องค์ประกอบต่างๆในตะกอนเปียกยังคงเหลืออยู่ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นเรื่อยๆ % ash จะเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารไฮโดรคาร์บอนในตะกอนเปียกจะเกิดปฏิกิริยาและเปลี่ยนไปเป็นขี้เถ้าในที่สุด สำหรับถ่านอัดแบบเย็นแม้จะมีคาร์บอนคงตัวสูงกว่าแต่เกิดขี้เถ้าน้อยกว่า เนื่องจากถ่านอัดแบบเย็นจะประกอบด้วยผงชาร์อนุภาคเล็ก เมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการลุกไหม้อย่างรวดเร็วให้เป็นพลังงานความร้อน จึงเกิดเถ้าน้อย เถ้าที่เกิดขึ้นจึงเกิดจากตัวประสานที่ผสมลงไปมากกว่า

ซัลเฟอร์ : ถ่านอัดแบบเย็นมีค่าซัลเฟอร์น้อยกว่าถ่านอัดแบบร้อนซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าคาร์บอนคงตัวที่มากกว่า

4.5 ลักษณะการใช้ประโยชน์ของถ่านอัดแท่งทั้ง 2 แบบ

ในการทดลองนี้เป็นการศึกษาเปรียบเทียบปริมาณการใช้เชื้อเพลิง ความสามารถในการจุดติดไฟ ระยะเวลาการให้ความร้อน และการประยุกต์นำไปใช้ประโยชน์

4.5.1 ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงของถ่านทั้ง 2 แบบ

ถ่านอัดแบบร้อน **ถ่านอัดแบบเย็น**

รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบปริมาณการใช้เชื้อเพลิงถ่านทั้ง 2 แบบ

รูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นถึงจำนวนการใช้เชื้อเพลิงในปริมาณที่เท่ากัน (500 กรัม) เห็นได้ว่าถ่านอัดแบบร้อน (50 กรัม / ชิ้น) มีจำนวนการใช้เชื้อเพลิงมากกว่าถ่านอัดแบบเย็น (100 กรัม/ชิ้น)

4.5.2 ความสามารถในการลุกติดไฟ ระยะเวลาการให้ความร้อน และการประยุกต์นำไปใช้ประโยชน์

ตารางที่ 4.5 สรุปความสามารถของการลุกติดไฟของถ่านทั้ง 2 แบบ

ประเภทถ่าน 500 กรัม	ระยะเวลาลุกติดไฟ	ระยะเวลาให้ความร้อน	ปริมาณเถ้า	คราบเขม่า (บริเวณใต้ภาชนะ)
ถ่านอัดแบบร้อน	~ 5 นาที	30 นาที	มาก	คราบเขม่าปานกลาง
ถ่านอัดแบบเย็น	~ 10 นาที	40-50 นาที	น้อย	ไม่มี

หมายเหตุ : ข้อมูลจากการทดสอบจริง

ตารางที่ 4.6 สรุปปริมาณธาตุอาหารในเถ้าจากการเผาถ่านทั้ง 2 แบบ

เถ้าจากถ่านชนิดต่าง ๆ	ปริมาณธาตุอาหาร		
	ไนโตรเจน	ฟอสฟอรัส	โพแทสเซียม
ถ่านอัดร้อน	10 (Deficiency)	80 (Surplus)	80 (Surplus)
ถ่านอัดเย็น	10 (Deficiency)	80 (Surplus)	80 (Surplus)

หมายเหตุ : ข้อมูลจากการทดสอบจริงด้วยชุด kit สำหรับหาปริมาณธาตุอาหารในดิน

ถ่านอัดร้อน : การลุกจุดติดไฟของถ่านใช้เวลาน้อยมีควันเยอะในช่วงแรก เมื่อถ่านแดงแล้วควันน้อยลง ให้ความร้อนอย่างรวดเร็ว เกิดคราบเขม่าปานกลาง เหมาะสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อนแก่บอยเลอร์ในโรงงานอุตสาหกรรม ปริมาณเถ้ามาก จากการทดสอบกับชุดทดสอบ NPK พบว่า เถ้ามีธาตุโพแทสเซียมและฟอสฟอรัสมากเกินพอ ในขณะที่มีปริมาณธาตุไนโตรเจนน้อย หากนำมาผสมทำปุ๋ยควรใช้ปุ๋ยหมัก ปุ๋ยพืชสด และปุ๋ยคอกร่วมด้วย หรืออาจใช้ฟางข้าวในการเพิ่มระดับอินทรีย์วัตถุและความอุดมสมบูรณ์ของดินในระยะยาว

ถ่านอัดเย็น : การลุกจุดติดไฟของถ่านใช้เวลานานกว่าถ่านอัดแบบร้อน มีควันในช่วงแรก เมื่อถ่านแดงแล้วไม่มีควัน ให้ความร้อนสูงนานสม่ำเสมอ ไม่แตกประทุ ไม่มีกลิ่น ไม่มีคราบเขม่า เหมาะสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อนในร้านอาหารประเภทหมูกระทะ ปิ้งย่าง เป็นต้น ปริมาณเถ้าน้อย จากการทดสอบกับชุดทดสอบ NPK พบว่า เถ้ามีธาตุโพแทสเซียมและฟอสฟอรัสมากเกินพอ ในขณะที่มีปริมาณธาตุไนโตรเจนน้อย

4.6 ข้อมูลเบื้องต้นในการวิเคราะห์ต้นทุนและความคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์เพื่อการผลิตถ่านอัดแท่งแบบร้อนและแบบเย็น

4.6.1 ข้อมูลเบื้องต้นของการคาร์บอไนเซชันตะกอนเปียก

ข้อมูลเบื้องต้น : ตะกอนเปียกมีความชื้น 40%
: ราคาขายตะกอนเปียก 250 บาท/ตัน
: % คาร์บอไนเซชันปกติที่ 33.33

4.6.2 ข้อมูลเบื้องต้นของอุปกรณ์เครื่องจักรในการผลิต

ข้อมูลเบื้องต้น : เครื่องอบไล่ความชื้น (Screwdry) 200,000 บาท
กำลังการผลิต 100 กิโลกรัม/ชั่วโมง
: เครื่องอัดแท่ง (Extruder) 50,000 บาท
กำลังการผลิต 100 กิโลกรัม/ชั่วโมง

4.6.3 ข้อมูลเบื้องต้นค่าใช้จ่ายในการขนส่งตะกอนเปียก

ข้อมูลเบื้องต้น : รถบรรทุก 10 ล้อ บรรทุกได้ 15,000 กิโลกรัม/เที่ยว
: ค่าใช้จ่ายในการขนส่งต่อเที่ยว 13,000 บาท/เที่ยว
: ค่าขนส่งตะกอนเปียก 0.86 บาท/กิโลกรัม

4.6.4 ข้อมูลเบื้องต้นของถ่านอัดแบบร้อนและแบบเย็น

ข้อมูลเบื้องต้น : ถ่านอัดแบบร้อน 0.05 กิโลกรัม/ก้อน
: ถ่านอัดแบบเย็น 0.1 กิโลกรัม/ก้อน

4.7 การวิเคราะห์ต้นทุนและความคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์เพื่อการผลิตถ่านอัดแท่งแบบร้อนและแบบเย็น

ค่าใช้จ่ายคงที่ (F)		
1.เงินลงทุนเครื่อง Screw Dry	200,000	บาท
2.เงินลงทุนเครื่องอัดแท่ง	50,000	บาท
รวมเป็นเงิน	**250,000**	**บาท**

ค่าต้นทุนวัตถุดิบ		
ตะกอนเปียก	250	บาท/ตัน
ปริมาณถ่านที่ต้องการต่อวัน	1,000	กิโลกรัม
% คาร์บอไนเซชันปกติ	33.33	%
ต้องการตะกอนเปียกแห้ง	1,333	กิโลกรัม
ตะกอนเปียกมีความชื้น	40	%
ดังนั้น ต้องการตะกอนเปียกจากโรงงาน	**~2,000**	**กิโลกรัม**
ค่าใช้จ่ายวัตถุดิบ	500	บาท
ถ่านอัดแบบร้อน	0.05	กิโลกรัม/ก้อน
ถ่านอัดแบบเย็น	0.1	กิโลกรัม/ก้อน
ตะกอนเปียก 1,000 กก. ผลิตถ่านอัดแบบร้อน	20,000	ก้อน
ตะกอนเปียก 1,000 กก. ผลิตถ่านอัดแบบเย็น	10,000	ก้อน
อัตราการป้อนเครื่อง SCREWDRY	100	กิโลกรัม/ชั่วโมง
ทำงานวันละ	8	ชั่วโมง
ผลิตชิ้นงานวันละ (ถ่านอัดแบบร้อน)	16,000	ก้อน
ผลิตชิ้นงานวันละ (ถ่านอัดแบบเย็น)	8,000	ก้อน
ต้นทุนถ่านอัดแบบร้อนต่อก้อน	**0.03125**	**บาท/ก้อน**
ต้นทุนถ่านอัดแบบเย็นต่อก้อน	**0.0625**	**บาท/ก้อน**

ค่าต้นทุนขนส่งวัตถุดิบ		
อัตราภาระบรรทุกรถขนส่ง 10 ล้อ	15,000	กิโลกรัม/เที่ยว
ค่าใช้จ่ายต่อเที่ยว	13,000	บาท/เที่ยว
ดังนั้น ต้นทุนขนส่งวัตถุดิบ	0.87	บาท/กิโลกรัม
ต้องการตะกอนเปียก	2,000	กิโลกรัม
ดังนั้น ค่าใช้จ่ายในการขนส่งวัตถุดิบ	1,740	บาท
ผลิตชิ้นงานวันละ (ถ่านอัดแบบร้อน)	16,000	ก้อน
ผลิตชิ้นงานวันละ (ถ่านอัดแบบเย็น)	8,000	ก้อน
ต้นทุนขนส่งถ่านอัดแบบร้อนต่อก้อน	**0.11**	**บาท/ก้อน**
ต้นทุนขนส่งถ่านอัดแบบเย็นต่อก้อน	**0.2175**	**บาท/ก้อน**

ค่าใช้จ่ายแปรผัน (v)		
ค่าแรงขั้นต่ำ (สมุทรสงคราม)	172	บาท/วัน
ผลิตชิ้นงานวันละ (ถ่านอัดแบบร้อน)	16,000	ก้อน
ผลิตชิ้นงานวันละ (ถ่านอัดแบบเย็น)	8,000	ก้อน
ค่าแรงของถ่านอัดแบบร้อนต่อก้อน	**0.011**	**บาท/ก้อน**
ค่าแรงของถ่านอัดแบบเย็นต่อก้อน	**0.0215**	**บาท/ก้อน**

ค่าใช้จ่ายอื่น ๆ		
ค่าไฟฟ้า	0.3	บาท/กิโลกรัม
ตะกอนเปียก 1 กก. ผลิตได้	20	ก้อน
ผลิตชิ้นงานวันละ (ถ่านอัดแบบร้อน)	16,000	ก้อน
ดังนั้น ค่าไฟฟ้า	240	บาท
ค่าไฟฟ้าของถ่านอัดแบบร้อนต่อก้อน	**0.015**	**บาท/ก้อน**

ค่าใช้จ่ายอื่น ๆ		
ค่าไฟฟ้า	0.1	บาท/กิโลกรัม
ตะกอนเปียก 1 กก. ผลิตได้	10	ก้อน
ผลิตชิ้นงานวันละ (ถ่านอัดแบบเย็น)	8,000	ก้อน
ดังนั้น ค่าไฟฟ้า	80	บาท
ค่าไฟฟ้าของถ่านอัดแบบเย็นต่อก้อน	**0.01**	**บาท/ก้อน**
ค่าน้ำ	0.01	บาท/กิโลกรัม
ดังนั้น ค่าน้ำ	8	บาท
ค่าน้ำของถ่านอัดแบบเย็นต่อก้อน	**0.001**	**บาท/ก้อน**
ค่าแป้งมันสำปะหลัง	0.05	บาท/กิโลกรัม
ดังนั้น ค่าแป้งมันสำปะหลัง	40	บาท
ค่าแป้งมันสำปะหลังของถ่านอัดแบบเย็นต่อก้อน	**0.005**	**บาท/ก้อน**

ราคาขายต่อหน่วย (p)		
ราคาขายถ่านอัดแบบร้อนและเย็น	10.5	บาท/กิโลกรัม
ตะกอนเปียก 1 กก. ผลิตถ่านอัดแบบเย็น	20	ก้อน
ตะกอนเปียก 1 กก. ผลิตถ่านอัดแบบเย็น	10	ก้อน
ราคาขายถ่านอัดแบบเย็นต่อก้อน	**0.525**	**บาท/ก้อน**
ราคาขายถ่านอัดแบบเย็นต่อก้อน	**1.05**	**บาท/ก้อน**

ต้นทุนแปรผันของถ่านอัดแบบร้อนต่อก้อน (v)		
ค่าแรงต่อหน่วย	0.011	บาท/ก้อน
ต้นทุนวัตถุดิบต่อหน่วย	0.03125	บาท/ก้อน
ต้นทุนขนส่งตะกอนเปียกต่อหน่วย	0.11	บาท/ก้อน
ค่าไฟฟ้าต่อหน่วย	0.015	บาท/ก้อน
ต้นทุนแปรผันของถ่านอัดแบบร้อนต่อก้อน	**0.17**	**บาท/ก้อน**

ต้นทุนแปรผันของถ่านอัดแบบเย็นต่อก้อน (v)		
ค่าแรงต่อหน่วย	0.0215	บาท/ก้อน
ต้นทุนวัตถุดิบต่อหน่วย	0.0625	บาท/ก้อน
ต้นทุนขนส่งตะกอนเปียกต่อหน่วย	0.2175	บาท/ก้อน
ค่าไฟฟ้าต่อหน่วย	0.01	บาท/ก้อน
ค่าน้ำต่อหน่วย	0.001	บาท/ก้อน
ค่าแป้งมันสำปะหลังต่อหน่วย	0.005	บาท/ก้อน
ต้นทุนแปรผันของถ่านอัดแบบเย็นต่อก้อน	**0.3175**	**บาท/ก้อน**

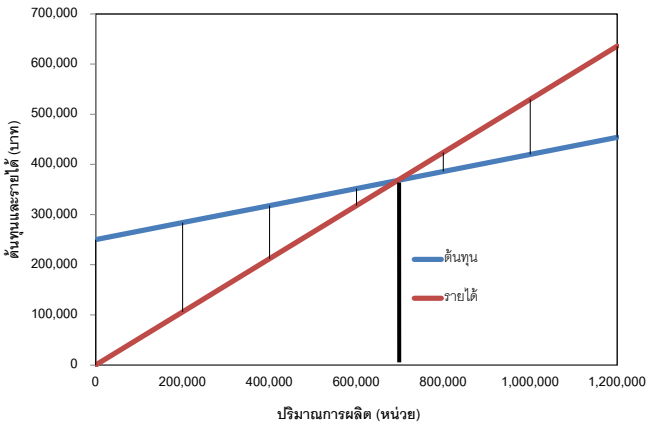
การผลิตชิ้นงานต่อปี (N)		
การทำงาน 1 ปี	250	วัน
ผลิตถ่านอัดแบบร้อน	16,000	ก้อน/วัน
ผลิตถ่านอัดแบบเย็น	8,000	ก้อน/วัน
ดังนั้น ผลิตถ่านอัดแท่งแบบร้อน	**4,000,000**	**ก้อน/ปี**
ดังนั้น ผลิตถ่านอัดแท่งแบบเย็น	**2,000,000**	**ก้อน/ปี**

N* จำนวนการผลิตที่จุดคุ้มทุน (ถ่านอัดแบบร้อน)	$\frac{F}{p-v}$
F ต้นทุนคงที่	250,000 บาท
p ราคาขายต่อหน่วย	0.525 บาท/ก้อน
v ต้นทุนแปรผันต่อหน่วย	0.17 บาท/ก้อน
N* จำนวนการผลิตที่จุดคุ้มทุน	**704,225 ชิ้น**

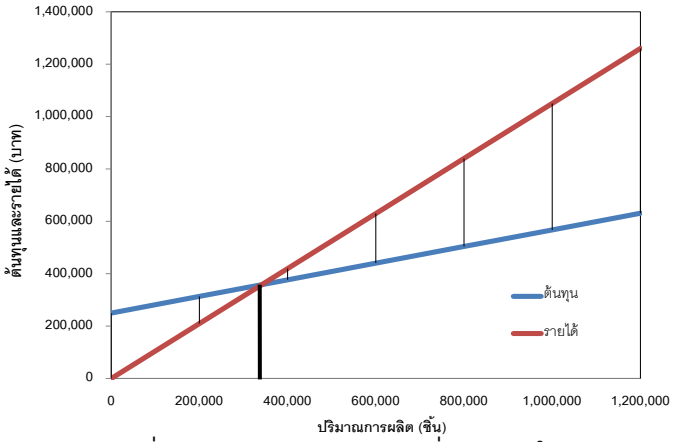
N* จำนวนการผลิตที่จุดคุ้มทุน (ถ่านอัดแบบเย็น)	$\frac{F}{p-v}$
F ต้นทุนคงที่	250,000 บาท
p ราคาขายต่อหน่วย	1.05 บาท/ก้อน
v ต้นทุนแปรผันต่อหน่วย	0.3175 บาท/ก้อน
N* จำนวนการผลิตที่จุดคุ้มทุน	**341,297 ชิ้น**

ใช้ระยะเวลาผลิตที่จะคุ้มทุน(ร้อน)	$\frac{N^*}{N}$
N* จำนวนการผลิตที่จุดคุ้มทุน	704,225 ชิ้น
N จำนวนการผลิตต่อปี	4,000,000 ชิ้น/ปี
ใช้ระยะเวลาผลิตที่จะคุ้มทุน(ร้อน)	**0.18 ปี (∼ 2 เดือน)**

ใช้ระยะเวลาผลิตที่จะคุ้มทุน(เย็น)	$\frac{N^*}{N}$
N* จำนวนการผลิตที่จุดคุ้มทุน	341,297 ชิ้น
N จำนวนการผลิตต่อปี	2,000,000 ชิ้น/ปี
ใช้ระยะเวลาผลิตที่จะคุ้มทุน(เย็น)	**0.17 ปี (∼2 เดือน)**



รูปที่ 4.4 แสดงจำนวนการผลิตที่จุดคุ้มทุนในการผลิตถ่านอัดแบบร้อน



รูปที่ 4.5 แสดงจำนวนการผลิตที่จุดคุ้มทุนในการผลิตถ่านอัดแบบเย็น

5.สรุปผลการทดลอง

ตะกอนเปียกเป็นของเสียที่เกิดจากการกลั่นในกระบวนการผลิตเอทานอลจากมันเส้น มีสีดำ ร่วนซุย กลิ่นคล้ายยีสต์ เกิดขึ้นเป็นปริมาณมากในแต่ละวันยากแก่การจัดการ การนำไปใช้ประโยชน์ยังไม่ชัดเจน ในงานวิจัยนี้จึงศึกษาการนำตะกอนเปียกเพื่อนำไปเป็นเชื้อเพลิงทดแทน โดยการนำมาวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นและค่าความร้อน พบว่า มีคุณภาพต่ำ คือ มีปริมาณคาร์บอนคงตัวต่ำซึ่งเป็นส่วนที่เผาไหม้ให้พลังงานเพียงร้อยละ 13.33 และค่าความร้อนค่อนข้างต่ำ คือ 13,864.38 KJ/kg จึงเหมาะสมอย่างยิ่งในการนำมาวิจัยเพื่อปรับปรุงคุณภาพก่อนนำไปใช้งาน จากนั้นนำไปคาร์บอไนเซชันในสภาวะต่างๆ ที่อุณหภูมิ 400, 450, 500 และ 550°C ในแต่ละช่วงอุณหภูมิทำการทดลองที่ระยะเวลา 30, 45, 60 และ 90 นาที ในภาวะจำกัดออกซิเจน จากการทดลองพบว่า สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการคาร์บอไนเซชันตะกอนเปียก คือ อุณหภูมิ 500°C ที่ระยะเวลา 60 นาที โดยสภาวะดังกล่าวมีความชื้น 1.17% สารระเหย 16.57% เถ้า 34.42% และคาร์บอนคงตัว 47.84% เมื่อทราบสภาวะคาร์บอไนเซชันที่เหมาะสมจึงนำตะกอนเปียกมาอัดแบบร้อนและแบบเย็นเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการให้พลังงานความร้อน พบว่า ถ่านอัดแบบเย็นมีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงซึ่งเป็นส่วนที่เผาไหม้ให้พลังงานร้อยละ 59.01 และค่าความร้อน 24,790.38 KJ/kg ในขณะที่ถ่านอัดแบบร้อนมีปริมาณคาร์บอนคงตัวร้อยละ 42.66 และค่าความร้อน 20,257.25 KJ/kg การนำใช้ประโยชน์ถ่านอัดแบบเย็นให้ความร้อนสูงนานสม่ำเสมอ ไม่แตกประทุ ไม่มีกลิ่น ไม่มีคราบเขม่า เหมาะสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อนในร้านอาหารประเภทหมูกระทะ ปิ้งย่าง เป็นต้น ถ่านอัดแบบร้อน ให้ความร้อนอย่างรวดเร็ว เกิดคราบเขม่าปานกลาง ปริมาณเถ้ามากเหมาะสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อนแก่บอยเลอร์ในโรงงานอุตสาหกรรม สำหรับเถ้าของถ่านทั้ง 2 แบบมีธาตุโพแทสเซียมและฟอสฟอรัสมากเกินพอ แต่มีปริมาณธาตุไนโตรเจนน้อย หากนำมาผสมทำปุ๋ยควรใช้ปุ๋ยหมัก ปุ๋ยพืชสด และปุ๋ยคอกร่วมด้วย หรืออาจใช้ฟางข้าวในการเพิ่มระดับอินทรีย์วัตถุและความอุดมสมบูรณ์ของดินในระยะยาว สำหรับการผลิตในเชิงพาณิชย์ถ่านอัดแบบร้อนมีต้นทุน 0.17 บาท/ก้อน ราคาขาย 0.525 บาท/ก้อน จำนวนการผลิตที่จุดคุ้มทุน 704,225 ชิ้น ระยะเวลาคืนทุน 0.18 ปี ถ่านอัดแบบเย็นมีต้นทุน 0.3175 บาท/ก้อน ราคาขาย 1.05 บาท/ก้อน จำนวนการผลิตที่จุดคุ้มทุน 338,524 ชิ้น ระยะเวลาคืนทุน 0.17 ปี โดยอ้างอิงจากต้นทุนคงที่ 250,000 บาท ราคาขายถ่านทั้ง 2 แบบราคา 10.5 บาท/กิโลกรัม ระยะเวลาคืนทุนคิดเทียบกับกำลังการผลิตของเครื่องจักร

บรรณานุกรม

[1] พัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, กรม. กระทรวงพลังงาน. 2551. โรงงานที่ดำเนินการผลิตและที่อยู่ระหว่างก่อสร้างโรงงานเอทานอลเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิง. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.dede.go.th.

[2] พัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, กรม. กระทรวงพลังงาน. 2549. รายงานฉบับสมบูรณ์ การนำของเสียจากการผลิตเอทานอลมาใช้ประโยชน์เพื่อเพิ่มมูลค่า. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.dede.go.th.

[3] ทรัพย์ทิพย์,บริษัท.การผลิตเอทานอลจากมันสำปะหลัง (มันเส้น).ชนิด.[ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.sapthip.com/product.php.

[4] Zanzi R., Sjostrom K. and Bjornbom E. 1996. Rapid High-Temperature Pyrolysis of Biomass in a Free-fall Reactor. Fuel. ฉบับที่ 75, เล่มที่ 5 : 545-550.

[5] Michael Jerry Antal., Jr., Kazubiro Mocbidzuki and Lloyd S. Parades. 2003.Flash carbonization of biomass. Ind. Eng. Chem. ฉบับที่ 42 : 3690-3699.

[6] กฤติยาณี รักสนิท และ กิดาการ แสงเดือน.2549. การทำคาร์บอไนเซชันชีวมวลสำหรับการใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพ. ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

[7] S.R.Teixeira a, A.F.V. Pena a and A.G. Miguel b. Briquetting of charcoal from sugar-cane bagasse fly ash (scbfa) as an alternative fuel. Waste management. ฉบับที่ 30 พิมพ์ครั้งที่ 5 (พฤษภาคม 2010) : 804-807