

การศึกษาศักยภาพภาคตะกอนน้ำเสียอุตสาหกรรมประเภทอนินทรีย์สาร
เพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง

นางสาวประริญา ไร่ไพ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม

คณะพลังงานและวัสดุ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

พ.ศ. 2546

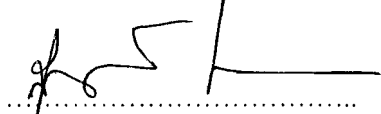
ISBN 974-456-266-8

การศึกษาศักยภาพภาคตะกอนน้ำเสียอุตสาหกรรมประเภทอนินทรีย์สารเพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง

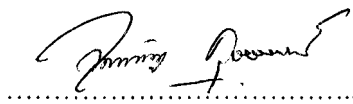
นางสาวประริญา ไร่ไพ วท.บ.(วิทยาศาสตร์ทั่วไป)

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม
คณะพลังงานและวัสดุ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ.2546

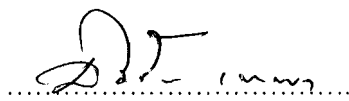
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


.....
(ดร.สุทธิพงษ์ เสถียรนพเก้า)

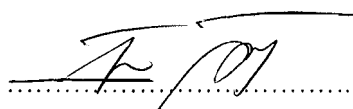
ประธานกรรมการวิทยานิพนธ์


.....
(อาจารย์จันทนา กุญชรรัตน์)

ประธานร่วม


.....
(ผศ.ดร.ศิริชัย เทพา)

กรรมการ


.....
(ผศ.ดร.สุวิมล อัสวพิศิษฐ)

กรรมการ

ISBN 974-456-266-8

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

นางสาวประริญา ไร่ไพ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาศักยภาพกากตะกอนน้ำเสียอุตสาหกรรมประเภท อนินทรีย์สารเพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง
หน่วยกิต	6
ผู้เขียน	นางสาวประริญา รำไพ
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร. สุทธิพงษ์ เสถียรนพเก้า อาจารย์จันทนา กุญชรรัตน์
หลักสูตร	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม
สายวิชา	เทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม
คณะ	พลังงานและวัสดุ
พ.ศ.	2546

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการนำกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยามาใช้ผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง กากตะกอนที่ใช้ในการศึกษามาจากโรงงานผลิตเชื้อกระดาษและโรงงานฟอกย้อม โดยทำการศึกษาร่วมกันของกากตะกอนและเปลือกมะพร้าวอ่อนในอัตราส่วนต่างๆ เพื่อเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมในการนำไปอัดแท่ง ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพกากตะกอนโดยใช้การหมัก 2 แบบคือไม่มีอากาศและมีอากาศและการเผาแท่งเชื้อเพลิงให้เป็นถ่าน หลังจากนั้นนำแท่งเชื้อเพลิงที่ได้ไปทดสอบการใช้งานความร้อนเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงถ่านไม้เพื่อประเมินศักยภาพการนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทน

ผลการศึกษาร่วมกันพบว่าอัตราส่วนที่สามารถอัดได้ และเหมาะสมที่จะนำไปผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งคือ 1:1, 1:2 และ 1:3 ผลการหมักของตะกอนโรงงานผลิตเชื้อกระดาษพบว่าการหมักทั้ง 2 แบบทำให้กลิ่นลดลงและผลการใช้งานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงที่หมักแบบไม่มีอากาศดีกว่าหมักแบบมีอากาศโดยอัตราส่วนที่ดีที่สุดคือ 1:3 มีค่าความร้อนเท่ากับ 3,398 แคลอรี/กรัม ผลการทดลองหมักกากตะกอนโรงงานฟอกย้อม พบว่าการหมักแบบมีอากาศให้การใช้งานความร้อนดีกว่าหมักแบบไม่มีอากาศโดยอัตราส่วนที่ดีที่สุดคือ 1:3 มีค่าความร้อนเท่ากับ 2,851 แคลอรี/กรัม

ผลการปรับปรุงโดยการเผาด่านของแท่งเชื้อเพลิงทั้งสองโรงงานมีประสิทธิภาพดีกว่าการหมักทั้งสองแบบทั้งทางด้าน การกำจัดกลิ่นและเชื้อโรคและการใช้งานความร้อน อัตราส่วนที่ดีที่สุดของถ่านแท่ง

เชื้อเพลิงโรงงานผลิตเชื้อกระดาษคือ 1:3 โดยมีค่าความร้อนเท่ากับ 4,736 แคลอรี/กรัม และ อัตราส่วนที่ดีที่สุดของถ่านแท่งเชื้อเพลิงโรงงานฟอกข้อมคือ 1:3 โดยมีค่าความร้อนเท่ากับ 3,729 แคลอรี/กรัม เมื่อนำไปทดสอบการใช้งานความร้อนเปรียบเทียบกับถ่านไม้ พบว่าถ่านแท่งเชื้อเพลิงสามารถใช้งานความร้อนได้เทียบเท่ากับถ่านไม้และใช้เวลาในการติดไฟน้อยกว่า

คำสำคัญ: เชื้อเพลิงอัดแท่ง/กากตะกอนน้ำเสีย/ค่าความร้อน/กระบวนการหมัก/การเผาถ่าน

Thesis Title A Feasibility Study of Inorganic Industrial Wastewater Sludge being Utilized for the Production of Heating Fuel Briquettes.

Thesis Credits 6

Thesis Advisors Dr. Suthipong Sthiannopkao
Mrs. Janthana Kunchornrat

Program Master of Science

Field of Study Environmental Technology

Department Environmental Technology

Faculty School of Energy and Materials

B.E. 2546

Abstract

The main purpose of this research was to utilize industrial wastewater sludge for producing briquettes. The sources of wastewater sludge were from pulp and dye factories. Young coconut shell was used to mix with wastewater sludge in order to increase the heating value of sludge. The experiments started with pre-treatment of sludge by using aerobic and anaerobic processes. The optimal mixing ratios between sludge and young coconut shell were also studied. The improvement of the quality of briquettes by burning them into charcoals was conducted at the final stage.

The results obtained reveals that the optimal mixing ratios between sludge and young coconut shell were at 1:1, 1:2 and 1:3 by volume. The pre-treatment of pulp and dye sludges by both aerobic and anaerobic processes significantly reduced the level of smell. The highest heating values of both pulp and dye sludges were found at the mixing ratio 1:3 (sludge: young coconut shell) at 3,398 and 2,851 cal/g, respectively.

In addition, the improvement of the quality of briquettes produced by burning them into charcoals had proved the significant increase of heating values and decrease of smell. The heating values of burned briquettes of pulp and dye sludges at the same mixing ratios of 1:3 were increased to 4,736 and 3,729 cal/g, respectively. When comparing the results in term of testing the

efficiency of use as fuel with charcoal, indicates that both burned briquettes and charcoal were similar. However, the burned briquettes were easier to be ignited.

Keywords : Briquette/Wastewater Sludge/Heating
Value/Aerobic and Anaerobic Processed Burning into
Charcoal

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนวิทยานิพนธ์ขอขอบพระคุณ ดร. สุทธิพงษ์ เสถียรนพเก้า และ อ. จันทนา กุญชรรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ช่วยให้คำปรึกษาและแนะนำแนวทางในการศึกษาที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้ ตลอดระยะเวลาของการจัดทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งคณะกรรมการ 2 ท่าน คือ ผศ.ดร.สุวิมล อัครพิศิษฐ และ ผศ.ดร.ศิริชัย เทพา ที่สละเวลาในการเป็นกรรมการวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งให้ข้อคิดเห็นและแนวทางในการวิจัยที่เป็นประโยชน์ นอกจากนี้ขอขอบพระคุณบริษัท ปัญจพล อินคัสทรี และ บริษัท พัฒนาผ้าไทย จำกัด ที่ให้ความสะดวกและให้ความอนุเคราะห์เป็นอย่างยิ่งในการเก็บตัวอย่างกากตะกอน รวมทั้งเจ้าหน้าที่ของศูนย์ทดลองวิชาการด้านพลังงานธรรมชาติและเชื้อเพลิงพลังงานที่ให้คำชี้แนะการทำงานและอนุเคราะห์สถานที่ในการเก็บกากตะกอนและทดลองอัดแท่ง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีที่สนับสนุนทุนวิจัย ทุนการศึกษาของมูลนิธิ ชิน โสภณพนิช อาจารย์และเจ้าหน้าที่ทุกท่านของคณะพลังงานและวัสดุ ตลอดจนเพื่อนๆ ที่เป็นกำลังใจในการทำงาน สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่งคือคุณพ่อที่สร้างแรงบันดาลใจในการศึกษาเล่าเรียนตลอดมา และคุณแม่ พี่สาว พี่ชาย รวมทั้งคุณเจษฎาที่ให้กำลังใจให้การสนับสนุนในการทำงานเป็นอย่างดี

ประโยชน์อันใดที่เกิดจากการทำวิทยานิพนธ์นี้ ล้วนแต่เป็นผลมาจากความกรุณาของบุคคลทั้งหมดที่กล่าวมาทั้งสิ้น ผู้เขียนจึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
รายการตาราง	ญ
รายการรูปภาพประกอบ	ฎ
ประมวลศัพท์และคำย่อ	ท
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและความเป็นมา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ผลประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับและหน่วยงานที่นำผลวิจัยไปใช้ประโยชน์	3
2. ทฤษฎี	4
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.2 น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม	8
2.3 อุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษ	10
2.3.1 กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ	10
2.3.2 กระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ	11
2.4 อุตสาหกรรมฟอกย้อม	12
2.4.1 กระบวนการฟอกย้อม	13
2.4.2 การบำบัดน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม	13
2.5 กากตะกอนน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม	13
2.6 การกำจัดกากตะกอนน้ำเสีย	15
2.6.1 ขั้นตอนการกำจัดกากตะกอนน้ำเสีย	15
2.6.2 วิธีการทำให้กากตะกอนคงตัว	16
2.6.3 กระบวนการเป็นปุ๋ยหมัก	17

	หน้า
2.7 การเผาเป็นถ่าน	23
2.8 เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร	24
2.8.1 ชีวมวล	24
2.8.2 แหล่งผลิตชีวมวล	25
2.8.3 ปริมาณวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรของประเทศไทย	26
2.8.4 การประเมินคุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของชีวมวล	27
2.9 มะพร้าว	28
2.9.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์	28
2.9.2 พื้นที่ปลูก	29
2.9.3 มะพร้าวอ่อน	29
2.10 การอัดแท่งเชื้อเพลิง	30
2.10.1 เครื่องมืออัดแท่งเชื้อเพลิง	30
2.10.2 การต่อเครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิงเข้ากับระบบไฟฟ้า	31
2.10.3 การใช้และบำรุงรักษาเครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิง	31
3. การดำเนินการวิจัย	32
3.1 ขั้นตอนการวิจัย	32
3.2 วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการวิจัย	33
3.2.1 กากตะกอนน้ำเสีย	33
3.2.2 เปลือกมะพร้าวอ่อน	33
3.3 การเตรียมวัตถุดิบที่ใช้ในการวิจัย	33
3.3.1 กากตะกอนน้ำเสีย	33
3.3.2 เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร	33
3.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของวัตถุดิบ	34
3.5 กระบวนการหมักกากตะกอน	35
3.5.1 กระบวนการหมักแบบไม่มีอากาศ	35
3.5.2 กระบวนการหมักแบบมีอากาศ	35
3.6 การอัดแท่งกากตะกอน	35
3.7 การเผาแท่งเชื้อเพลิงที่ไม่ได้ผ่านการหมักให้เป็นถ่าน	36
3.8 การวิเคราะห์คุณสมบัติแท่งเชื้อเพลิงและถ่าน	36
3.9 อุปกรณ์ในการวิจัย	37

	หน้า
3.10 สถานที่ทำการทดลอง	37
4. ผลการทดลอง	38
4.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้น	38
4.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพของกากตะกอนและเปลือกมะพร้าวอ่อน	38
4.1.2 คุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของกากตะกอนและเปลือกมะพร้าวอ่อน	39
4.1.3 ปริมาณ โลหะหนักที่มีอยู่ในกากตะกอนน้ำเสีย	41
4.1.4 ศึกษาส่วนผสมในการอัดแท่งและการทดลองอัดแท่งตะกอน	43
4.2 การปรับปรุงคุณภาพกากตะกอน โรงงานผลิตเชื้อกระดาษ	49
4.2.1 การหมักกากตะกอน โรงงานผลิตเชื้อกระดาษแบบไม่มีอากาศ	49
4.2.2 การหมักกากตะกอน โรงงานผลิตเชื้อกระดาษแบบมีอากาศ	52
4.2.3 การเผาถ่านแท่งเชื้อเพลิงกากตะกอนสด โรงงานผลิตเชื้อกระดาษ	55
4.3 การทดสอบการติดไฟและการใช้งานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิง โรงงานผลิตเชื้อกระดาษ	56
4.3.1 แท่งเชื้อเพลิงจากตะกอนสดของ โรงงานผลิตเชื้อกระดาษ	56
4.3.2 แท่งเชื้อเพลิงจากตะกอน โรงงานผลิตเชื้อกระดาษที่หมักแบบไม่มีอากาศ	59
4.3.3 แท่งเชื้อเพลิงจากตะกอน โรงงานผลิตเชื้อกระดาษที่หมักแบบมีอากาศ	62
4.3.4 ถ่านแท่งเชื้อเพลิงจากตะกอนสด โรงงานผลิตเชื้อกระดาษ	64
4.3.5 การเปรียบเทียบการใช้งานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงจากตะกอน โรงงานผลิตเชื้อกระดาษ	66
4.4 การปรับปรุงคุณภาพกากตะกอน โรงงานฟอกย้อม	68
4.4.1 การหมักกากตะกอน โรงงานฟอกย้อมแบบไม่มีอากาศ	68
4.4.2 การหมักกากตะกอน โรงงานฟอกย้อมแบบมีอากาศ	71
4.4.3 การเผาถ่านแท่งเชื้อเพลิงตะกอนสด โรงงานฟอกย้อม	74
4.5 การทดสอบการติดไฟและการใช้งานความร้อนแท่งเชื้อเพลิง โรงงานฟอกย้อม	74
4.5.1 แท่งเชื้อเพลิงจากตะกอนสด โรงงานฟอกย้อม	75
4.5.2 แท่งเชื้อเพลิงจากตะกอน โรงงานฟอกย้อมที่หมักแบบไม่มีอากาศ	77
4.5.3 แท่งเชื้อเพลิงจากตะกอน โรงงานฟอกย้อมที่หมักแบบมีอากาศ	79
4.5.4 ถ่านแท่งเชื้อเพลิงตะกอนสด โรงงานฟอกย้อม	82
4.5.5 การเปรียบเทียบการใช้งานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงจากตะกอน โรงงานฟอกย้อม	84

	หน้า
5. สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	86
5.1 สรุปผลการทดลอง	86
5.1.1 คุณสมบัติเบื้องต้นทางกายภาพและทางด้านเชื้อเพลิง	86
5.1.2 ปริมาณโลหะหนักในกากตะกอน	87
5.1.3 การศึกษาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่นำมาใช้ในการศึกษา	87
5.1.4 ผลการอัดแท่งทั้ง 3 อัตราส่วน	87
5.1.5 การปรับปรุงกากตะกอนน้ำเสีย	88
5.1.6 การเผาถ่าน	88
5.1.7 การทดสอบการติดไฟของแท่งเชื้อเพลิง	89
5.1.8 การใช้งานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิง	89
5.1.9 เปรียบเทียบการปรับปรุงกากตะกอนทั้ง 3 แบบ	89
5.1.10 เปรียบเทียบการใช้งานความร้อนกับถ่านไม้	90
5.2 ข้อเสนอแนะ	90
เอกสารอ้างอิง	91
ภาคผนวก	95
ก วิธีวิเคราะห์	95
ข ผลการทดลองการให้ความร้อนของเชื้อเพลิงอัดแท่ง	108
ประวัติผู้วิจัย	133

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 ค่าความร้อนของกากตะกอนน้ำเสีย	14
2.2 ค่าอัตราส่วนคาร์บอน/ไนโตรเจนของของเหลือทิ้งต่างๆ	21
2.3 ชีวมวลที่นำมาใช้เป็นพลังงาน	26
2.4 ปริมาณชีวมวลชนิดต่างๆ ที่ผลิตได้ในประเทศไทยปี 2540/41	27
3.1 มาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของกากตะกอน	34
4.1 คุณสมบัติกายภาพของกากตะกอนสดและเปลือกมะพร้าวอ่อน	39
4.2 คุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของกากตะกอนและเปลือกมะพร้าวอ่อน	40
4.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในกากตะกอนสดเปรียบเทียบกับขยะอินทรีย์และ ค่ามาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์	41
4.4 การจัดการโลหะหนักที่มีในกากตะกอนตามปริมาณที่กำหนด	42
4.5 ปริมาณโลหะหนักในกากตะกอนสดเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน	42
4.6 ผลการอัดแท่งระหว่างตะกอนสดกับเปลือกมะพร้าวอ่อน	44
4.7 ผลการอัดแท่งระหว่างตะกอนสดโรงงานผลิตเยื่อกระดาษกับเปลือกมะพร้าวอ่อน	45
3 อัตราส่วน	
4.8 ผลการอัดแท่งระหว่างตะกอนสดโรงงานฟอกย้อมกับเปลือกมะพร้าวอ่อน 3 อัตราส่วน	47
4.9 คุณสมบัติกายภาพของตะกอน โรงงานผลิตเยื่อกระดาษหลังหมักแบบไม่มีอากาศ	49
4.10 คุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของตะกอน โรงงานผลิตเยื่อกระดาษหลังหมักแบบ ไม่มีอากาศ	50
4.11 ปริมาณโลหะหนักของตะกอน โรงงานผลิตเยื่อกระดาษหลังหมักแบบ ไม่มีอากาศ	50
4.12 ผลการอัดแท่งตะกอน โรงงานผลิตเยื่อกระดาษที่หมักแบบไม่มีอากาศ	51
4.13 C/N Ratio โรงงานผลิตเยื่อกระดาษ โรงงานฟอกย้อม ฟางข้าว	52
4.14 คุณสมบัติทางกายภาพของตะกอน โรงงานผลิตเยื่อกระดาษที่หมักแบบมีอากาศ	53
4.15 คุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของตะกอน โรงงานผลิตเยื่อกระดาษหลังหมักแบบมีอากาศ	53
4.16 ผลการอัดแท่งตะกอน โรงงานผลิตเยื่อกระดาษที่หมักแบบมีอากาศ	54
4.17 แท่งเชื้อเพลิง โรงงานผลิตเยื่อกระดาษก่อนและหลังเผาถ่าน	55
4.18 ผลการทดสอบการใช้งานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงจากตะกอนสดโรงงาน ผลิตเยื่อกระดาษ	58

ตาราง (ต่อ)

	หน้า
4.19 ปริมาณโลหะหนักในเก้าอี้ของแท่งเชื้อเพลิงจากตะกอนสด โรงงานผลิตเชื้อกระดาษ กับเปลือกมะพร้าวอ่อนที่อัตราส่วน 1:1	58
4.20 ผลการทดสอบการใช้งานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงตะกอนที่หมักแบบไม่มีอากาศ โรงงานผลิตเชื้อกระดาษ 3 อัตราส่วน	61
4.21 ผลการทดสอบการใช้งานความร้อนแท่งเชื้อเพลิงที่หมักแบบมีอากาศโรงงาน ผลิตเชื้อกระดาษ 3 อัตราส่วน	63
4.22 ผลการทดสอบการใช้งานความร้อนถ่านแท่งเชื้อเพลิงจากตะกอนสด โรงงาน ผลิตเชื้อกระดาษ 3 อัตราส่วน	65
4.23 เปรียบเทียบการใช้งานความร้อนและปริมาณเก้าอี้ของอัตราส่วน 1:3 ของ แท่งเชื้อเพลิงตะกอนสดและแท่งที่ปรับปรุง	66
4.24 คุณสมบัติกายภาพของกากตะกอนโรงงานฟอกย้อมหลังหมักแบบไม่มีอากาศ	68
4.25 คุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของกากตะกอน โรงงานฟอกย้อมหลังหมักแบบไม่มีอากาศ	69
4.26 ปริมาณ โลหะหนักของกากตะกอน โรงงานฟอกย้อมหลังหมักแบบไม่มีอากาศ	69
4.27 ผลการอัดแท่งกากตะกอน โรงงานฟอกย้อมที่หมักแบบไม่มีอากาศ	70
4.28 C/N Ratio โรงงานฟอกย้อม และ ฟางข้าว	71
4.29 คุณสมบัติทางกายภาพของตะกอน โรงงานฟอกย้อมที่หมักแบบมีอากาศ	72
4.30 คุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของกากตะกอน โรงงานฟอกย้อมหลังหมักแบบมีอากาศ	72
4.31 ผลการอัดแท่งกากตะกอน โรงงานฟอกย้อมที่หมักแบบมีอากาศ	73
4.32 คุณสมบัติของแท่งเชื้อเพลิงจากตะกอนสด โรงงานฟอกย้อมก่อนและหลังเผาถ่าน	74
4.33 ผลการทดสอบการใช้งานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงตะกอนสด โรงงานฟอกย้อม	76
4.34 ปริมาณ โลหะหนักในเก้าอี้ของแท่งเชื้อเพลิงตะกอนสด โรงงานฟอกย้อม กับเปลือกมะพร้าวอ่อนที่อัตราส่วน 1:1	77
4.35 ผลทดสอบการใช้งานความร้อนแท่งเชื้อเพลิง โรงงานฟอกย้อม ที่หมักแบบไม่มีอากาศ 3 อัตราส่วน	79
4.36 การทดสอบการใช้งานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงตะกอน โรงงานฟอกย้อม ที่หมักแบบมีอากาศ 3 อัตราส่วน	81
4.37 การทดสอบการใช้งานความร้อนของถ่านจากเชื้อเพลิง โรงงานฟอกย้อม ที่ 3 อัตราส่วน	83
4.38 เปรียบเทียบการใช้งานความร้อนและปริมาณเก้าอี้ของอัตราส่วน 1:3 ของ แท่งเชื้อเพลิงตะกอนสดและแท่งที่ปรับปรุง	84

รายการรูปประกอบ

รูป	หน้า
3.1	32
4.1	46
4.2	46
4.3	48
4.4	48
4.5	56
4.6	57
4.7	57
4.8	59
4.9	60
4.10	60
4.11	62
4.12	62
4.13	63
4.14	64
4.15	64

รูป (ต่อ)

	หน้า
4.16 ความสัมพันธ์ของเวลากับอุณหภูมิต้มน้ำของถ่านแท่งเชื้อเพลิงตะกอนสด โรงงานผลิตเยื่อกระดาษที่อัตราส่วน 1:3	65
4.17 ความสัมพันธ์ของเวลากับอุณหภูมิต้มน้ำของแท่งเชื้อเพลิงตะกอนสด โรงงานฟอกย้อมที่อัตราส่วน 1:1	75
4.18 ความสัมพันธ์ของเวลากับอุณหภูมิต้มน้ำของแท่งเชื้อเพลิงตะกอนสด โรงงานฟอกย้อมที่อัตราส่วน 1:2	75
4.19 ความสัมพันธ์ของเวลากับอุณหภูมิต้มน้ำของแท่งเชื้อเพลิงตะกอนสด โรงงานฟอกย้อมที่อัตราส่วน 1:3	76
4.20 ความสัมพันธ์ของเวลากับอุณหภูมิต้มน้ำแท่งเชื้อเพลิงตะกอน โรงงานฟอกย้อมที่หมักแบบไม่มีอากาศที่อัตราส่วน 1:1	77
4.21 ความสัมพันธ์ของเวลากับอุณหภูมิต้มน้ำแท่งเชื้อเพลิงตะกอน โรงงานฟอกย้อมที่หมักแบบไม่มีอากาศที่อัตราส่วน 1:2	78
4.22 ความสัมพันธ์ของเวลากับอุณหภูมิต้มน้ำแท่งเชื้อเพลิงตะกอน โรงงานฟอกย้อมที่หมักแบบไม่มีอากาศที่อัตราส่วน 1:3	78
4.23 ความสัมพันธ์ของเวลากับอุณหภูมิต้มน้ำของแท่งเชื้อเพลิงตะกอน โรงงานฟอกย้อมที่หมักแบบมีอากาศที่อัตราส่วน 1:1	80
4.24 ความสัมพันธ์ของเวลากับอุณหภูมิต้มน้ำของแท่งเชื้อเพลิงตะกอน โรงงานฟอกย้อมที่หมักแบบมีอากาศที่อัตราส่วน 1:2	80
4.25 ความสัมพันธ์ของเวลากับอุณหภูมิต้มน้ำของแท่งเชื้อเพลิงตะกอน ฟอกย้อมที่หมักแบบมีอากาศที่อัตราส่วน 1:3	81
4.26 ความสัมพันธ์ของเวลากับอุณหภูมิต้มน้ำของถ่านจากแท่งเชื้อเพลิง โรงงานฟอกย้อมที่อัตราส่วน 1:1	82
4.27 ความสัมพันธ์ของเวลากับอุณหภูมิต้มน้ำของถ่านจากแท่งเชื้อเพลิง โรงงานฟอกย้อมที่อัตราส่วน 1:2	82
4.28 ความสัมพันธ์ของเวลากับอุณหภูมิต้มน้ำของถ่านจากแท่งเชื้อเพลิง โรงงานฟอกย้อมที่อัตราส่วน 1:3	83

ประมวลศัพท์และคำย่อ

A	=	พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง
atm	=	บรรยากาศ
BOD	=	biochemical oxygen demand
C/N ratio	=	carbon to nitrogen ratio
C ₁	=	correction in calories for heat of formation of nitric acid
C ₂	=	correction in calories for heat of formation of benzoic acid
C ₃	=	correction in calories for heat of formation of fuse wire
cal/°C	=	แคลอรีต่อองศาเซลเซียส
cal/g	=	แคลอรีต่อกรัม
cm	=	เซนติเมตร
cm ³	=	ลูกบาศก์เซนติเมตร
Cp	=	ค่าความร้อนจำเพาะ
D	=	เส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอก
d	=	เส้นผ่านศูนย์กลางด้านใน
E	=	energy equivalent
F	=	แรงอัดที่กระทำต่อตัวอย่างจนกระทั่งตัวอย่างแตก
g	=	กรัม
g/cm ³	=	กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
h	=	ความยาว
H _g	=	gross heating of combustion
HHV	=	higher heating value
Hz	=	hertz
kcal	=	กิโลแคลอรี
kcal/kg	=	กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม
kg	=	กิโลกรัม
kg/cm ²	=	กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
kg/m ³	=	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
kJ/kg	=	กิโลจูลต่อกิโลกรัม
kw.hr	=	กิโลวัตต์.ชั่วโมง
LHV	=	lower heating value

ประมวลศัพท์และคำย่อ (ต่อ)

m	=	มวล
mg/kg	=	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
mg/l	=	มิลลิกรัมต่อลิตร
MJ/kg	=	เมกะจูลต่อกิโลกรัม
ml	=	มิลลิลิตร
Q	=	พลังงานความร้อนที่น้ำได้รับ
q	=	ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดแท่ง
R	=	ดัชนีการแตกรวน
sec	=	วินาที
t	=	ผลต่างอุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิสุดท้าย
t1	=	อุณหภูมิของน้ำเมื่อแรกเริ่ม
t2	=	อุณหภูมิของน้ำเมื่อเดือด
t3	=	อุณหภูมิของน้ำเมื่อหม้อหลังสุด
v	=	ปริมาตร
w	=	น้ำหนักของเชื้อเพลิงอัดแท่ง
Wf	=	น้ำหนักถ่านอัดแท่งก่อนทำการทดสอบ
Wi	=	น้ำหนักถ่านอัดแท่งหลังทำการทดสอบ

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและความเป็นมา

ปัจจุบันธุรกิจภาคอุตสาหกรรมในประเทศไทยได้ขยายตัวอย่างรวดเร็ว เพื่อรองรับกระบวนการผลิตที่เพิ่มขึ้นและพอเพียงกับจำนวนประชากรที่มากขึ้น จะเห็นว่าสิ่งที่ตามมาจากการขยายตัวของธุรกิจภาคอุตสาหกรรมคือปัญหาสิ่งแวดล้อมหลายๆ ด้าน ทั้งอากาศเสีย น้ำเน่าเสีย ขยะล้นเมือง เหล่านี้เป็นต้น ดังนั้นจึงได้มีกฎหมายควบคุมการปล่อยของเสียต่างๆ ให้อยู่ในระดับมาตรฐานเสียก่อน น้ำเสียก็เป็นปัญหาที่สำคัญของโรงงานอุตสาหกรรมเกือบทุกประเภท เพราะมาจากหลายจุดด้วยกัน ไม่ว่าจะเป็นจากกระบวนการผลิตเอง หรือว่ามาจากการล้างวัตถุดิบ การทำความสะอาด และใช้ในกิจกรรมต่างๆ ของโรงงาน โดยน้ำเสียที่เกิดขึ้นนี้ทางโรงงานจะต้องทำการบำบัดเสียก่อนเพื่อให้ได้คุณภาพมาตรฐานของกระทรวงอุตสาหกรรม

การบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบชีววิทยา ซึ่งจะได้กากตะกอนน้ำเสียหรือที่เรียกว่าสลัดจ์ (sludge) ออกมาเป็นจำนวนมากและจะต้องทำการบำบัดเสียก่อนที่จะนำไปกำจัดต่อไป โดยทั่วไปสลัดจ์ที่ได้จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบชีววิทยาเมื่อเราปรับสภาพแล้วก็สามารถนำมาใช้ถมที่ ปรับปรุงดิน หรือหมักทำปุ๋ยใช้ประโยชน์ได้อีก ปัจจุบันนี้สลัดจ์ได้เพิ่มปริมาณมากขึ้นตามจำนวนโรงงานอุตสาหกรรมจึงได้มีการหาทางเลือกใหม่ในการใช้ประโยชน์จากสลัดจ์ให้ได้มากที่สุด คือเมื่อผ่านการปรับปรุงคุณภาพให้เหมาะสมแล้วสามารถนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งได้ [1] สามารถนำมาใช้เป็นพลังงานในกระบวนการผลิตของโรงงานได้อีก เพื่อทดแทนพลังงานชนิดอื่นๆ เช่น น้ำมัน ถ่านหิน นอกจากจะเป็นการลดต้นทุนแล้วยังสามารถที่จะลดปริมาณซัลเฟอร์ที่จะปล่อยออกสู่บรรยากาศได้อีกทางหนึ่ง

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นทำการศึกษาค้นคว้าวิจัยทางด้าน การปรับปรุงคุณภาพกากตะกอนน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งรวมทั้งมีการทดสอบความเป็นไปได้ของการใช้ร่วมกันระหว่างกากตะกอนน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมกับเศษวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรเพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทนนอกเหนือจากการกำจัดที่ไร้ประโยชน์

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1.2.1 เพื่อศึกษาปริมาณและคุณสมบัติของกากตะกอนน้ำเสียอุตสาหกรรมเพื่อนำมาใช้ประโยชน์ในการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง
- 1.2.2 เพื่อศึกษากระบวนการปรับปรุงคุณภาพของกากตะกอนน้ำเสียจากอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ เพื่อให้มีความเหมาะสมในการนำไปใช้ผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง
- 1.2.3 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้ร่วมกันระหว่างกากตะกอนน้ำเสียกับเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เพื่อการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง
- 1.2.4 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเชื้อเพลิงอัดแท่งมาใช้เป็นพลังงานทดแทน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาปริมาณและคุณสมบัติของกากตะกอนน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรม 2 ประเภท ได้แก่ อุตสาหกรรมกระดาษและอุตสาหกรรมฟอกย้อม-สิ่งทอ เพื่อนำมาใช้ผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง
- 1.3.2 ศึกษาวิธีการปรับปรุงคุณภาพกากตะกอนน้ำเสียเพื่อให้เหมาะสมกับการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง
- 1.3.3 ทดสอบและวิเคราะห์คุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงและคุณสมบัติทางกายภาพของกากตะกอนที่ได้ผ่านการปรับปรุงคุณภาพแล้ว
- 1.3.4 ทดสอบและวิเคราะห์คุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงและคุณสมบัติทางกายภาพของเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร
- 1.3.5 ศึกษาการใช้ร่วมกันระหว่างกากตะกอนน้ำเสียจากอุตสาหกรรมกับเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ได้แก่ เปลือกมะพร้าวอ่อน เพื่อพัฒนาคุณภาพกากตะกอนน้ำเสียในการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง
- 1.3.6 ทดสอบและวิเคราะห์คุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงและคุณสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ได้
- 1.3.7 ทำการเปรียบเทียบกับถ่านไม้เพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทน

1.4 ผลประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับและหน่วยงานที่นำผลวิจัยไปใช้ประโยชน์

1.4.1 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1.1 เกิดการใช้ประโยชน์ของกากตะกอนน้ำเสียทางด้านพลังงานแทนการกำจัดที่ไร้ประโยชน์ และลดปัญหาในการกำจัดกากตะกอน

1.4.1.2 เป็นแนวทางในการพัฒนาและประยุกต์ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมจริง เพื่อลดการใช้น้ำมัน ในกระบวนการผลิต โดยใช้กากตะกอนอัดแห้งเป็นพลังงานทดแทน

1.4.1.3 เกิดการใช้ประโยชน์เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร

1.4.2 หน่วยงานที่จะนำไปใช้ประโยชน์

1.4.2.1 โรงงานอุตสาหกรรม

1.4.2.2 กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน

1.4.2.3 สำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ

บทที่ 2 ทฤษฎี

กากตะกอนและเปลือกมะพร้าวอ่อนที่นำมาใช้ในการศึกษาจะต้องทำการวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ ที่จำเป็นเบื้องต้น ได้แก่คุณสมบัติทางกายภาพและทางด้านเชื้อเพลิง นอกจากนี้ต้องศึกษาถึงปริมาณและความเป็นไปได้ที่จะนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง โดยต้องพิจารณาถึงความเป็นไปได้ในการนำมาใช้ประโยชน์ในด้านพลังงานทดแทน เพื่อลดอัตราการใช้ถ่านหิน ลดการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศ และที่สำคัญคือช่วยลดการปล่อยซัลเฟอร์ออกสู่บรรยากาศได้

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Stannislav et al ได้ศึกษาการนำพลังงานกลับมาใช้ใหม่จากน้ำทิ้งของระบบบำบัดน้ำเสีย [2]

โดยการนำกากตะกอนน้ำเสียจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน ซึ่งเป็นกากตะกอนที่รีดน้ำออกแล้ว (sludge Dewatering) แล้วทำการหมัก (Composting) เหมือนกรรมวิธีการทำปุ๋ยหมัก หลังจากนั้นนำมาอัดแท่ง (Briquetting) ได้เป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง และนำไปเผา (Combustion) ในเตาเผาขนาดทดลอง ซึ่งคล้ายกับ Fixed-grate Boiler ในห้องทดลอง จะมีเครื่องมือวัดความร้อนของกระบวนการเผาไหม้ และก๊าซต่างๆ เช่น NO_x , CO_x , SO_2 และโลหะหนักในขี้เถ้า (Ash) และขี้เถ้าลอย (Fly Ash) จากการทดลองพบว่ากากตะกอนหมักอัดแท่งเมื่อมีความชื้น 15 % จะให้ค่าความร้อนต่ำ (LHV) ประมาณ 10 MJ/kg และมีค่าความร้อนสูง (HHV) ประมาณ 12.5 MJ/kg ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าสามารถที่จะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนได้ เนื่องจากสภาวะการเผาไหม้ของกากตะกอนหมักอัดความร้อน 4,295.60 kcal/kg โดยความชื้นในการอัดแท่งและปริมาณเถ้าสูงสุดเป็น 70% และ 33.71% ตามลำดับ

สุริยา ชัยเดชากุล (2544) ได้ศึกษาการทำเชื้อเพลิงอัดแท่งจากส่วนผสมของกากตะกอนระบบบำบัดน้ำเสียและเศษชิ้นไม้สับของโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ [3]

โดยนำกากตะกอนน้ำเสียจากระบบบำบัดมาผสมกับเศษชิ้นไม้สับจากการสับไม้ก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษจำนวน 11 อัตราส่วนผสม ดังนี้ 100:0 90:10 80:20 70:30 60:40 30:70 20:80 10:90 และ 0:100 โดยน้ำหนัก จากนั้นอัดเป็นแท่งแล้วเผาให้ถ่านเชื้อเพลิงและทำการศึกษาค่าคุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงตามมาตรฐาน ASTM รวมทั้งศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตและลงทุน เปรียบเทียบกับค่าใช้จ่ายในการกำจัดวัสดุเหลือทิ้งของโรงงานที่มีอยู่ในปัจจุบัน ผลการวิจัยพบว่า อัตราส่วนผสมระหว่างกากตะกอนน้ำเสียกับเศษชิ้นไม้สับตั้งแต่ 100:0 ถึง 40:60 โดยน้ำหนัก สามารถอัดขึ้นรูป

เป็นแห่งได้ เมื่อนำไปเผาเป็นถ่านแล้วนำไปทดสอบคุณสมบัติหลักทางด้านเชื้อเพลิง 6 ด้านคือ ปริมาณความร้อน ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหย คาร์บอนคงตัว กำมะถันรวม และค่าความร้อน แล้วหา ส่วนผสมที่ดีที่สุด พบว่าอัตราส่วนผสม 70:30 มีคุณสมบัติดีที่สุด เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิง ชนิดอื่น มีค่าใกล้เคียงกับฟืน แกลบ นอกจากนี้ปริมาณความร้อนของเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันทั้ง 8 อัตราส่วนซึ่งมีค่าประมาณ 4,090 kcal/kg ยกเว้นอัตราส่วน 100:0 และ 90:10

วัฒนา เติยธรวาสดี และคณะ ทำการศึกษาการอัดแท่งเชื้อเพลิงดังนี้ [4]

การศึกษาการอัดแท่งเชื้อเพลิงแบบเพเลทจากวัชพืชและใบพืชบางชนิด โดยมีวัสดุที่ใช้ในการอัดแท่งคือหญ้าหาง โสน ใบสนปญ์พัทท์ และใบยูคาลิปตัส ซึ่งจะทำการศึกษาการอัดแท่งเชื้อเพลิง รวมทั้งศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานและความร้อนของเชื้อเพลิงที่ได้ จากการทดลองพบว่าใบสนปญ์พัทท์ และใบยูคาลิปตัส จะให้ค่าความร้อนสูงที่สุด รองลงมาคือโสนและหญ้าหาง ซึ่งค่าความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิงทั้ง 4 ชนิดนี้มีค่าใกล้เคียงกับค่าความร้อนที่ได้จากไม้สนนทรี แต่ต่ำกว่าค่าความร้อนจากถ่าน นนทรีและประสิทธิภาพการใช้งานของความร้อนพบว่าเชื้อเพลิงอัดแท่งจากใบยูคาลิปตัสมีประสิทธิ ภาพสูงสุด รองลงมาคือใบสนปญ์พัทท์ โสน และหญ้าหางการศึกษาการอัดแท่งเชื้อเพลิงแบบเพเลทวัช พืชบางชนิดจาก วัสดุที่ใช้ในการอัดแท่งคือ หญ้าหาง โคนกระสุน ไมยราบ และผักตบชวา จากการ ทดลองพบว่าไมยราบจะให้ค่าความร้อนสูงสุดรองลงมาคือ โคนกระสุน หญ้าหางและผักตบชวา ซึ่งค่า ความร้อนของวัชพืชมักดงกล่าวมีค่าใกล้เคียงกับไม้สนนทรี แต่ต่ำกว่าค่าความร้อนจากถ่านนนทรีมาก เนื่องจากถ่านนนทรีที่มีคาร์บอนคงตัวสูงกว่า และค่าสารระเหยต่ำกว่าเชื้อเพลิงเพเลทและไม้สนนทรี แต่ประสิทธิภาพการใช้งานของความร้อนของผักตบชวาจะมีประสิทธิภาพสูงสุด รองลงมาคือหญ้า หาง ไมยราบ และโคนกระสุน ซึ่งจะมีประสิทธิภาพสูงกว่าไม้และถ่านนนทรีมาก ดังนั้นเชื้อเพลิงแบบ เพเลทมีศักยภาพที่จะใช้ทดแทนไม้ฟืนและถ่านได้ โดยเฉพาะเชื้อเพลิงที่ใช้กับเตาที่มีการระบาย อากาศที่ดี

การศึกษาการอัดแท่งเชื้อเพลิงแบบเพเลทจากวัชพืชบางชนิด [4]

เศษวัสดุที่ใช้ในการทดลองอัดแท่งคือ หญ้าหาง โคนกระสุน ไมยราบ และผักตบชวา จากการทดลอง พบว่าไมยราบจะให้ค่าความร้อนสูงสุด รองลงมาคือ โคนกระสุน หญ้าหาง และผักตบชวา ซึ่งค่า ความร้อนของวัชพืชมักดงกล่าวมีค่าใกล้เคียงกันกับไม้สนนทรี แต่ต่ำกว่าค่าความร้อนจากถ่านนนทรีมาก เนื่องจากถ่านไม้สนนทรีมีคาร์บอนคงตัวสูงกว่า และค่าสารระเหยต่ำกว่าเชื้อเพลิงเพเลทและไม้สนนทรี แต่ประสิทธิภาพความร้อนของผักตบชวาจะสูงสุด รองลงมาคือ หญ้าหาง ไมยราบ และโคนกระสุน

ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงกว่าไม้และถ่านไม้หนนทริมาก ดังนั้นเชื้อเพลิงแกลบเพเลทมีศักยภาพที่จะนำมาใช้ทดแทนไม้ฟืนและถ่านได้ โดยเฉพาะเชื้อเพลิงที่ใช้กับเตาที่มีการระบายอากาศดี

กลุ่มพัฒนาพลังงานจากไม้ส่วนวิจัยและพัฒนาผลผลิตป่าไม้ สำนักวิชาการป่าไม้กรมป่าไม้ ได้ทำการศึกษาการอัดแท่งเชื้อเพลิงชีวเพื่อทดแทนฟืนและถ่าน โดยวิธีการอัดเป็ยกด้วยเครื่องอัดแบบเกลียว [5]

ในการทดลองจะใช้ชานอ้อยเน่าเปื่อย (filter cake) ผสมกับขุยมะพร้าวในอัตราส่วนดังต่อไปนี้ 1:0 1:1 2:1 3:1 และ 4:1 จากการทดลองพบว่าผลผลิตเฉลี่ยของแท่งเชื้อเพลิงชีวจะอยู่ในช่วง 24-25 kg/hr แต่เมื่อศึกษาเวลาที่ใช้ในการผลิตแท่งเชื้อเพลิงชีวพบว่า ในอัตราส่วนชานอ้อยต่อขุยมะพร้าวคือ 1:1 และ 2:1 จะใช้เวลาในการผลิตน้อยที่สุด และแท่งเชื้อเพลิงชีวที่ผลิตได้ทุกอัตราส่วนจะให้ค่าความร้อนเฉลี่ย 3,100 cal/g โดยแท่งเชื้อเพลิงที่มีชานอ้อยอย่างเดียวจะให้ค่าความร้อนสูงที่สุด แต่ทั้งนี้การใช้ชานอ้อยเพียงอย่างเดียวทำให้เกิดปัญหาในการการอัดแท่งได้ โดยชานอ้อยที่มีความละเอียดมากๆ จะทำให้เกิดความหนาแน่นในขณะที่อัดส่งผลให้เกลียวอัดแท่งหยุดหมุนได้ เช่นเดียวกับการใช้ขุยมะพร้าวในการอัดแท่งเพียงอย่างเดียวก็ทำให้เกลียวแท่งหยุดหมุนได้เช่นกันเนื่องจากขุยมะพร้าวมีเส้นใยที่แข็งและยาวไปพันรอบเกลียวอัดแท่งในขณะที่ทำการอัดแท่งได้

ส่วนคั้นคว่ำและพัฒนาพลังงาน ได้ทำการศึกษาการนำถ่านแกลบอัดแท่งมาปรับปรุงคุณภาพและการผลิต [6]

โดยการนำเศษถ่านแกลบอัดแท่งของโครงการส่วนพระองค์สวนจิตรลดา ที่เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตถ่านแกลบที่ไม่สามารถอัดขึ้นรูปใหม่ให้เป็นแท่งได้ พบว่าถ่านแกลบนี้ได้ผ่านการอบไล่ความชื้นและสารระเหยต่างๆ ไปหมดแล้ว องค์ประกอบที่เหลือส่วนใหญ่เป็นคาร์บอนและเถ้า ดังนั้นในการนำเศษถ่านแกลบอัดแท่งมาปรับปรุงคุณภาพเพื่อให้สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ได้อีกจะต้องใช้ตัวประสานต่างๆ เช่นกากน้ำตาล เนื้อมันสำปะหลัง ผักตบชวาหมัก และน้ำเพื่อช่วยในการยึดเกาะให้คงรูปเป็นแท่งได้

การศึกษามลพิษในเชื้อเพลิงอัดแท่งชีวมวลใน Chongqing [7]

ผลการศึกษาปริมาณมลพิษทางอากาศจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่ง พบว่า HCL และ SO₂ มีประมาณ 35 – 912 และ 52 – 1764 mg/kg ของเชื้อเพลิงชีวมวล

การวิจัยเกี่ยวกับเรื่องพลังงานทดแทนจากไบโอดีเซลโดยการทดลองจากไบโอดีเซล [8]

ผลการศึกษาปรากฏว่าไบโอดีเซลสามารถเผาเป็นถ่านได้ โดยมีอัตราการถ่ายเทความร้อนประมาณครึ่งหนึ่งของถ่านไม้ แต่มีค่าคงตัวสูงกว่าถ่านไม้ในปริมาณที่เท่ากัน (โดยน้ำหนัก) กรรมวิธีในการทำถ่านไบโอดีเซลทำได้โดยเผาไบโอดีเซลให้เป็นถ่านแล้วอัดด้วยวัสดุประสานเพื่อให้เป็นก้อน ในการศึกษาครั้งนี้ได้นำน้ำแข็งมาละลายเป็นน้ำประปาในอัตราส่วนถ่านไบโอดีเซล 6 ส่วนต่อน้ำแข็ง 1 ส่วน แล้วอัดด้วยกระบอกโลหะ สรุปผลการวิจัยได้ว่าการเผาไบโอดีเซลให้เป็นถ่านนั้นจะทำให้ได้ถ่านเพียงร้อยละ 25 ของน้ำหนักก่อนเผาและถ่านที่ได้ยังคงเป็นรูปไบโอดีเซลอย่างเดิม และในด้านการทดลองเกี่ยวกับการเผาไหม้ของถ่านไบโอดีเซลสังเกตเห็นได้ว่ามีควันเมื่อเริ่มลุกไหม้ ในช่วงประมาณ 15 นาที หลังจากนั้นแทบจะไม่มีควันเลย ส่วนถ่านที่ได้จากการเผาไหม้นี้มีน้อย และละเอียดมาก

การศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากไขมัน น้ำมันผสมขี้เถ้า [9]

จากการทดลองนำ scum (น้ำมัน, ไขมัน) จากบ่อดักไขมันในร้านอาหารผสมกับขี้เถ้าในอัตราส่วน 1:1, 1:2, 1:3 และ 1:4 โดยปริมาตร และมีการทดสอบองค์ประกอบเชื้อเพลิงโดยใช้มาตรฐาน ASTM ได้แก่ ความชื้น เถ้า สารระเหย คาร์บอนคงตัว กำมะถัน และค่าความร้อน รวมทั้งได้ศึกษาการปล่อยมลพิษ CO₂, NO และ SO₂ พบว่า scum ผสมขี้เถ้าสามารถอัดแท่งได้ แต่เมื่อปริมาณขี้เถ้าเพิ่มขึ้นไม่สามารถอัดแท่งได้ เชื้อเพลิงมีค่าความร้อนสูงสุดอยู่ที่ 7065, 6915, 6466 และ 6117 kcal/kg มีสารระเหย 20.92, 21.84, 29.22 และ 31.51 เปอร์เซ็นต์ การศึกษาความเข้มข้นของ CO₂, NO และ SO₂ พบว่าอยู่ที่ 302, 203, 275, 217 ppm และ 11, 0.4, 7, 7 ppm และ 3, 2, 3, 4 ตามลำดับ และอัตราส่วนที่ 1:3 ให้ค่าความร้อนสูงสุด ซึ่งใกล้เคียงกับขี้เถ้าและถ่านไม้

การศึกษาผลิตภัณฑ์และกระบวนการกำจัดกากตะกอนน้ำเสีย [10]

การผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากกากตะกอนน้ำเสียชุมชน โดยทำการผสมปูนขาวและวัสดุประสานอื่นๆ ในอัตราส่วนที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดความเสถียรและสามารถขึ้นรูปได้ดี อาจมีการเพิ่มถ่านหินเพื่อช่วยเพิ่มค่าความร้อนให้กับเชื้อเพลิงอัดแท่ง

จารุณี ได้ศึกษาการทำเชื้อเพลิงชีวจากเศษวัสดุเกษตรผสมกากส่าเหล้าและกากน้ำตาลเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนฟืนและถ่าน [11]

โดยผลิตเชื้อเพลิงชีวจากเศษวัสดุการเกษตร 3 ชนิดคือกากอ้อย แกลบ และซังข้าวโพดที่สับให้เป็นชิ้นเล็กๆ ผสมกับกากส่าเหล้าและกากน้ำตาลเป็นตัวเชื่อมประสานแล้วอัดเป็นแท่งด้วยเครื่องอัดที่ทำงานด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า 2 ขนาด แล้วนำเชื้อเพลิงที่ยังมีความชื้นอยู่มากไปตากแห้งเปรียบเทียบ 3 วิธี ได้แก่ อบในตู้อบไฟฟ้า ตากในตู้อบแสงอาทิตย์ และตากในที่โล่งบนแผ่นสังกะสี ทำให้แท่งเชื้อเพลิงจะมีความชื้นประมาณ 5-6 เปอร์เซ็นต์ ก็สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการหุงต้มและกิจกรรมในครัวเรือนได้ เชื้อเพลิงที่ได้จะถูกนำมาวิเคราะห์หาองค์ประกอบทั่วไปของเชื้อเพลิง และทำการทดสอบประสิทธิภาพในการอัด และการใช้งานของความร้อนกับเตาที่สร้างขึ้นสำหรับใช้ทดสอบเชื้อเพลิงชีว ผลการทดสอบปรากฏว่าเชื้อเพลิงชีวมีองค์ประกอบและคุณสมบัติคล้ายฟืนคือให้ค่าความร้อนเฉลี่ยประมาณ 4,000 kcal/kg แต่มีค่าความร้อนน้อยกว่าถ่านไม้มะขามเทศ ซึ่งให้ค่าความร้อนเฉลี่ย 7,390 kcal/kg

2.2 น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม [1]

น้ำเสียจากอุตสาหกรรม (Industrial Wastewater) ได้แก่ น้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการ อุตสาหกรรมทุกขั้นตอนตั้งแต่การล้างวัตถุดิบ กระบวนการผลิต การล้างวัสดุอุปกรณ์และเครื่องจักรกล ตลอดจนการทำความสะอาดโรงงาน ลักษณะของน้ำเสียประเภทนี้จะแตกต่างกันไปตามประเภทของวัตถุดิบ กระบวนการผลิต รวมทั้งระบบควบคุมและบำรุงรักษา องค์ประกอบของน้ำเสียประเภทนี้ส่วนใหญ่จะมีสิ่งสกปรกที่เจือปนอยู่ในรูปสารอินทรีย์ (Organic Matters) สารอนินทรีย์ (Inorganic Matters) อาทิ สารเคมี โลหะหนัก เป็นต้น

ลักษณะของน้ำเสียมีองค์ประกอบต่าง ๆ ดังนี้

1) สารอินทรีย์ หมายถึง สารซึ่งมาจากสิ่งมีชีวิต ทั้งสัตว์และพืช มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ และอาจมีธาตุไฮโดรเจน และสารอนุพันธ์ของไฮโดรเจน-คาร์บอน เป็นองค์ประกอบร่วมอยู่ด้วย ตัวอย่างของสารอินทรีย์ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมันซึ่งสามารถถูกย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์ ปริมาณของสารอินทรีย์ในน้ำนิยมนวัดด้วยค่าบีโอดี (Biochemical Oxygen Demand-BOD)

2) สารอินทรีย์ ได้แก่ แร่ธาตุต่าง ๆ ที่อาจจะไม่ทำให้น้ำเน่าเหม็น แต่อาจจะเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต สารอินทรีย์ที่จำเป็นต้องได้รับการบำบัดในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย ได้แก่ ชัลไฟด์ ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส เป็นต้น

3) โลหะหนักและสารพิษอื่น ๆ อาจอยู่ในรูปของสารอินทรีย์หรือสารอินทรีย์ก็ได้ นอกจากนี้ยังสามารถสะสมอยู่ในห่วงโซ่อาหาร จนเกิดเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต เช่น ปรอต โครเมียม ทองแดง ปกติจะอยู่ในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม และสารเคมีที่ใช้ในการกำจัดศัตรูพืชที่ปนมากับน้ำทิ้งจากการเกษตร สำหรับในเขตชุมชนอาจมีสารพิษ มาจากอุตสาหกรรมในครัวเรือนบางประเภท เช่น ร้านชุบโลหะ ตู้ซ่อมรถ เป็นต้น

4) ไขมัน น้ำมันและกรีส (Fat Oil and Grease) สารประกอบนี้เกิดจากการใช้น้ำมัน ไขมัน ขี้ผึ้ง จนกระทั่งถึงน้ำมันหล่อลื่น ซึ่งยังไม่มีการมีวิธีการเก็บรวบรวมน้ำมันหล่อลื่นเหล่านี้สำหรับการขนส่ง และการกำจัดอย่างถูกวิธี ส่วนน้ำมันและไขมันที่เกิดจากบ้านเรือน ร้านอาหาร และภัตตาคารต่าง ๆ จำเป็นต้องมีการสร้างบ่อคักไขมันเพื่อกำจัดไขมันในเบื้องต้นก่อน

5) ความร้อน ทำให้เกิดการแบ่งชั้น (Stratification) ของน้ำจะเร่งปฏิกิริยาการใช้ออกซิเจนของจุลินทรีย์ และลดระดับการละลายของออกซิเจนในน้ำ ทำให้เกิดสภาพเน่าเหม็นขึ้นได้ อุณหภูมิของน้ำที่เหมาะสม สำหรับในกระบวนการบำบัดน้ำเสียควรอยู่ประมาณ 25-35 องศาเซลเซียส ความร้อนของน้ำเสียทำให้จุลินทรีย์บางชนิดในถังย่อยสลายตายหรือเจริญเติบโตช้าลง และมีผลต่อประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียได้ ความร้อนของน้ำเสียเกิดจาก Condenser Boiler และขบวนการทำความร้อนอื่น ๆ ดังนั้นจึงควรปรับอุณหภูมิของน้ำเสียให้เหมาะสมก่อนปล่อยสู่ระบบบำบัด

6) ของแข็ง (Solids) หมายถึง สารที่เหลืออยู่เป็นตะกอนภายหลังจากที่ผ่านการระเหยด้วยไอน้ำ และทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส ตะกอนที่เกิดขึ้นมีทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ การตรวจวัดค่าของแข็งนี้ทำทั้งในน้ำดิบที่นำมาทำน้ำประปา น้ำทิ้งจากบ้านเรือน และจากแหล่งอื่น ๆ ดังนั้นการตรวจวัดค่าของแข็งจึงมีหลายชนิด ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้

7) สีและความขุ่น เกิดจากอุตสาหกรรมประเภทสิ่งทอ กระดาษ ฟอกหนัง และโรงฆ่าสัตว์ สีและความขุ่นจะขัดขวางกระบวนการสังเคราะห์แสงในน้ำ

8) กรดและด่าง (pH) การอ่านค่าความเป็นกรด-ด่างมีช่วงตั้งแต่ 0 ถึง 14 โดยสารละลายที่มีค่า pH ต่ำกว่า 7 เรียกว่า สารละลายเป็นกรด เท่ากับ 7 เรียกว่าสารละลายเป็นกลาง (Neutral Solution) สูงกว่า 7 เรียกว่า สารละลายเป็นด่าง น้ำที่มีคุณภาพที่ดีจะต้องมีค่า pH ใกล้เคียง หรือเท่ากับ 7 แต่ในทางปฏิบัติได้กำหนดมาตรฐานค่า pH ของน้ำทิ้งอยู่ในช่วง 5-9

9) จุลินทรีย์ (Microorganism) โดยทั่วไปสามารถแบ่งจุลินทรีย์ออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ ๆ ได้แก่ Eucaryotes, Eubacteria และ Archaeobacteria โดยสองกลุ่มหลังนี้มักจะเรียกรวมกันว่ากลุ่ม Procaroyotic ซึ่งมีแบคทีเรียเป็นองค์ประกอบและมีบทบาทสำคัญต่อการบำบัดน้ำเสีย ส่วนจุลินทรีย์ใน

กลุ่ม Eucaryotes ที่มีบทบาทสำคัญต่อการบำบัดน้ำเสียได้แก่ รา (Fungi) โปรโตซัว (Protozoa) Rotifers และสาหร่าย (Algae)

น้ำเสียที่เกิดขึ้นจากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ จะเป็นสารประเภทใดขึ้นอยู่กับวัตถุดิบและกระบวนการผลิตที่ใช้ ถ้าเป็นอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่มน้ำเสียที่เกิดขึ้นจะประกอบไปด้วยสารอินทรีย์เป็นส่วนใหญ่ และการบำบัดน้ำเสียจะใช้การบำบัดแบบชีววิทยาโดยใช้จุลินทรีย์ในการเปลี่ยนสารอินทรีย์ให้เป็นเซลล์ใหม่ สุดท้ายจะได้กากตะกอนออกมาเป็นจำนวนมาก กากตะกอนที่เกิดขึ้นสามารถนำไปกำจัดโดยการถมที่ หรือ สามารถนำไปหมักทำเป็นปุ๋ยได้ [12]

สำหรับอุตสาหกรรมที่มีการใช้สารอินทรีย์เป็นส่วนประกอบในการผลิต เช่น อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมฟอกหนัง อุตสาหกรรมฟอกย้อม-สิ่งทอ และอุตสาหกรรมหุบโลหะ เหล่านี้เป็นต้น ก่อนที่จะนำน้ำเสียไปทำการบำบัดแบบชีววิทยาในขั้นสุดท้ายต้องมีการกำจัดสารอินทรีย์ที่เป็นพิษออกไปก่อน เช่น กรด ต่าง สารเคมี โลหะหนัก เพื่อว่ากากตะกอนที่ได้จากการบำบัดแบบชีววิทยาสามารถที่จะนำไปใช้ประโยชน์ได้ [13]

2.3 อุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษ

อุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษในประเทศไทยเป็นอุตสาหกรรมการเกษตรที่สำคัญต่อระบบเศรษฐกิจ เป็นอุตสาหกรรมที่ส่งเสริม สนับสนุนให้ใช้วัตถุดิบในท้องถิ่น เช่น ฆานอ้อย ไม้ไผ่ และไม้เนื้อแข็งต่างๆ เพื่อให้วัตถุดิบเหล่านี้เกิดมูลค่าเพิ่มและมีการจ้างงานเพิ่มขึ้น ตลอดจนมีศักยภาพการผลิตและสามารถผลิตเพื่อการส่งออกได้ แต่ในขณะเดียวกันอุตสาหกรรมการผลิตเยื่อกระดาษดังกล่าวต้องใช้ทรัพยากรและมีกากที่เกิดจากกระบวนการผลิตเป็นจำนวนมาก โดยคาดว่าแต่ละโรงงานจะมีกากมากกว่า 45 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ [3] หากมีการรั่วไหลออกนอกโรงงานโดยไม่ผ่านการบำบัด จะส่งผลต่อสภาพแวดล้อมได้

2.3.1 กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ [3]

กากตะกอนที่ใช้ในการศึกษาเป็นกากตะกอนของโรงงานผลิตเยื่อกระดาษของบริษัท ปัญจพล พัลล์ อินดัสตรี จำกัด มหาชน อำเภอเสนา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา มีพื้นที่ 500 ไร่ มีกำลังการผลิตเยื่อกระดาษประมาณ 275 ตัน/วัน ใช้ชิ้นไม้สับคุณภาพดีส ประมาณ 543 ตัน/วัน กากตะกอนน้ำเสียประมาณ 7.82 ตัน/วัน

กระบวนการผลิตของโรงงานประกอบไปด้วย 4 ขั้นตอน โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) การเตรียมวัตถุดิบ (Raw Material Preparation)

ท่อนไม้ยูคาลิปตัสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 3-10 นิ้ว ยาว 1.5-2.5 เมตร จากลานกองจะถูกเก็บเข้าเครื่องปอกเปลือก แล้วจึงนำเข้าเครื่องสับ ได้ชิ้นไม้สับ (Wood Chip) ถูกส่งเข้าตะแกรงคัดขนาด เพื่อให้ได้ขนาดมาตรฐานหนา 3 มิลลิเมตร กว้างและยาวประมาณ 25 มิลลิเมตร ชิ้นไม้สับที่มีขนาดใหญ่กว่าที่ต้องการจะถูกส่งเข้าเครื่องอีกครั้ง ส่วนไม้สับที่ได้ขนาดแล้วจะถูกส่งไปยังกระบวนการต่อไป

2) การต้มเยื่อ (Cooking)

ชิ้นไม้สับจะถูกส่งเข้าสู่หม้อต้มเยื่อพร้อมกับการเติมเคมีที่เรียกว่าน้ำขาว (White Liquor) ซึ่งประกอบไปด้วยโซดาไฟ (NaOH) และโซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) การต้มเยื่อจะกระทำภายใต้อุณหภูมิ 165 องศาเซลเซียส และความดัน 7 บาร์ เพื่อละลายลิกนินและส่วนประกอบอื่นๆ ที่ไม่ใช่เยื่อออก ส่วนการต้มเยื่อใช้เวลาประมาณ 60-70 นาที จะได้เยื่อซึ่งแขวนลอยอยู่ในสารละลายที่เรียกว่าน้ำดำ (Black Liquor) ในน้ำดำจะประกอบไปด้วยสารเคมีและลิกนินละลายอยู่ น้ำดำจากขั้นตอนนี้จะนำไปเข้าสู่กระบวนการผลิตน้ำยากลับคืน (Chemical Recovery) ส่วนเยื่อจะถูกส่งเข้ากระบวนการต่อไป

3) การบดเยื่อ (Refiner) และการแยกเยื่อ (Screening)

เยื่อที่ได้จากการต้มเยื่อจะถูกส่งเข้าเครื่องบดเยื่อ (Refiner) เพื่อให้เยื่อแตกตัวจากชิ้นไม้มากยิ่งขึ้น และเพิ่มความแข็งแรงให้กับเยื่อ จากนั้นจะถูกส่งเข้ากระบวนการต่อไป ส่วนเยื่อที่ยังติดกับชิ้นไม้จะถูกส่งไปยัง Reject Refiner เพื่อบดเยื่อใหม่แล้วจึงส่งกลับมาเพื่อแยกเยื่ออีกครั้ง

4) การล้างเยื่อ (Washing)

เยื่อที่ได้จากการแยกเยื่อจะถูกส่งเข้าสู่เครื่องล้างเยื่อ Washer เพื่อล้างสารเคมีที่ติดมากับเยื่อออก แล้วจึงส่งเยื่อไปล้างอีกครั้ง น้ำล้างเยื่อครั้งที่สองนี้ส่งกลับไปใช้ในการต้มเยื่อ ส่วนเยื่อจะถูกส่งเข้าไปรีดน้ำออกจนมีความชื้นประมาณร้อยละ 10 ก่อนส่งไปยังโรงงานผลิตกระดาษต่อไป

2.3.2 กระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ

น้ำเสียจากอุตสาหกรรมประเภทนี้ประกอบไปด้วยสารที่เป็นสารอินทรีย์การบำบัดน้ำเสียขั้นแรกจะเป็นการกำจัดพวกอนินทรียสาร คือสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการและสีย้อม หลังจากนั้นจะได้น้ำเสียที่เหลือออกมา และทำการบำบัดขั้นต่อไป ระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานเป็นระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่ง (Activated Sludge) เพื่อรองรับน้ำเสียจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษประมาณวันละ 21,000 ลูกบาศก์เมตร น้ำเสียจะถูกส่งเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสีย โดยผ่านตะแกรง (Screen) เพื่อดักสิ่งเจือปนที่มีขนาดใหญ่ๆ ออกจากน้ำเสีย

- 1) น้ำเสียที่ผ่านตะแกรงแล้วจะผ่านเข้าสู่บ่อตกตะกอนชั้นที่ 1 (Primary Clarifier) เพื่อแยกตะกอนแขวนลอยออกจากน้ำเสียในชั้นหนึ่งก่อน ตะกอนที่ได้จะสูบไปยังถังพักตะกอน (Sludge Tank)
- 2) น้ำเสียจากบ่อตกตะกอนชั้นที่ 1 ผ่านเข้าสู่บ่อปรับสภาพน้ำ (Equation Tank) เพื่อปรับสภาพน้ำเสียให้มีคุณสมบัติและอัตราการไหลสม่ำเสมอ
- 3) น้ำเสียจากบ่อปรับสภาพน้ำจะผ่านเข้าสู่บ่อเติมอากาศ (Aeration Tank) ซึ่งติดตั้งเครื่องเติมอากาศ (Aerator) เพื่อเติมอากาศให้แบคทีเรียนำไปใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย
- 4) น้ำเสียจากบ่อเติมอากาศจะผ่านเข้าสู่บ่อตกตะกอนชั้นที่สอง (Secondary Clarifier) เพื่อแยกตะกอนแบคทีเรียออกจากน้ำเสีย โดยตะกอนจะตกลงสู่ด้านล่างน้ำใสจะอยู่ด้านบนและไหลเข้าบ่อพักน้ำทิ้ง ก่อนระบายลงสู่แม่น้ำแควต่อไป
- 5) ตะกอนที่ได้จากถังตกตะกอนชั้นที่หนึ่งและชั้นที่สองจะถูกสูบไปยังถังพักตะกอน (Sludge Tank) แล้วจึงสูบตะกอนไปยังเครื่องบีบตะกอน (Belt Filter Press) เพื่อกำจัดน้ำออกจากตะกอนแล้วนำตะกอนไปใช้เป็นเชื้อเพลิงหม้อต้มไอน้ำให้พลังงาน โดยมีกากตะกอนเกิดขึ้นประมาณ 7.82 ตัน/วัน

กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียประมาณ 7.82 ตัน/วัน [3] ที่นำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงของหม้อไอน้ำและไปถมที่ว่างบริเวณโรงงาน มีลักษณะเป็นผงเกาะตัวกันเป็นแผ่นหนา เนื้อตะกอนประกอบไปด้วยเยื่อกระดาษเล็กๆ เกาะตัวกัน โดยลักษณะของน้ำเสียที่ออกจากกระบวนการผลิตของโรงงานประเภทนี้ จะเห็นว่า COD จะสูงกว่า BOD มากเป็นเพราะว่าใน ส่วนประกอบของน้ำเสียจะประกอบด้วยสารประเภทอินทรีย์สารถ่อยากอยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งเป็นส่วนประกอบของเนื้อไม้ที่นำมาผลิตเป็นกระดาษเช่น ลิกนิน ลิกโนเซลลูโลส

2.4 อุตสาหกรรมฟอกย้อม [13,14]

อุตสาหกรรมฟอกย้อมเป็นอุตสาหกรรมขั้นกลางในอุตสาหกรรมสิ่งทอทั้งระบบ ทำหน้าที่เปลี่ยนวัสดุสิ่งทอในรูปที่ยังเป็นวัตถุดิบ คือ เส้นด้ายดิบหรือผ้าดิบให้เป็นวัสดุที่สามารถนำไปจำหน่ายแก่ผู้บริโภคได้โดยตรง หรือนำไปทำเป็นวัตถุดิบของอุตสาหกรรมขั้นปลายได้ กระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมฟอกย้อมส่วนใหญ่เป็นกระบวนการทางเคมีที่อาศัยการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติของเส้นใย โดยการใช้สารเคมีและสีย้อมที่เหมาะสมซึ่งอาศัยน้ำเป็นตัวกลาง ดังนั้นอุตสาหกรรมฟอกย้อมจึงเป็นอุตสาหกรรมที่ต้องการใช้น้ำมาก ทำให้มีน้ำเสียออกมาในปริมาณมากเช่นเดียวกัน

2.4.1 กระบวนการฟอกย้อม

กากตะกอนที่ใช้ในการศึกษามาจากโรงงานฟอกย้อมผ้า บริษัท พัฒนาผ้าไทย จำกัด นิคมอุตสาหกรรม บางปู จ.สมุทรปราการ ซึ่งทำการฟอกย้อมผ้าเพื่อส่งให้อุตสาหกรรมผลิตเรื่องนุ่งห่มต่อไป ซึ่งกระบวนการผลิตประกอบด้วย 5 ขั้นตอนหลักที่สำคัญดังต่อไปนี้

- 1) การลอกแป้ง (Desizing) คือการกำจัดสารที่ทำให้ด้ายแข็งออกจากผ้า ช่วยให้ผ้าติดสีได้ดีและสม่ำเสมอ โดยปกติแล้วแล้วสารที่ทำให้ด้ายย่นแข็งจะเป็นสารประเภทแป้งและสารสังเคราะห์
- 2) การทำความสะอาด(Scouring) คือการส่งผ้าที่กำจัดแป้งแล้วลงไปแช่น้ำยาเคมีแล้วหมักร้อนในตู้อบไอน้ำ จากนั้นนำไปซักล้างแล้วทำให้แห้ง เป็นขั้นตอนการกำจัดไขมันและสิ่งสกปรกให้ละลายออกมาจากเนื้อผ้า
- 3) การชุบมัน (Mercerization) เป็นขั้นตอนการชุบมัน ซึ่งเป็นการชุบผ้าในโซดาไฟเข้มข้น 15-20 % ที่อุณหภูมิ 5-20 องศาเซลเซียส จากนั้นผ่านลูกกลิ้งบีบเอาน้ำออก แล้วผ่านไปตามลูกกลิ้งอีกชุดหนึ่งเพื่อดึงผ้าตามความยาว จากนั้นผ่านไปยังเครื่องดึงผ้าแบบหนีบเพื่อดึงผ้าตามขวาง แล้วผ่านลงไปแช่น้ำร้อนทำให้เป็นกลางด้วยกรด จากนั้นนำไปซักล้างแล้วทำให้แห้ง จะทำให้ผ้ามีความเรียบและเป็นเงามัน มีความคงตัว ไม่ยับง่าย สามารถดูดสีและสารเคมีได้ดี รวมทั้งทำให้ผ้ามีความคงทนมากขึ้น
- 4) การฟอกขาว (Bleaching) เป็นการนำผ้าไปชุบน้ำยาฟอกขาวหมักอบไอน้ำ ซักล้างทำให้แห้ง ขั้นตอนนี้ทำให้ผ้าขาวสะอาดพร้อมที่จะไปทำการย้อมและพิมพ์ลาย

2.4.2 การบำบัดน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม

อุตสาหกรรมฟอกย้อมเป็นอุตสาหกรรมชั้นกลาง ซึ่งอุตสาหกรรมประเภทนี้ก่อให้เกิดปัญหามลภาวะมากที่สุดและน้ำเสียดังกล่าวค่อนข้างยากต่อการบำบัดเพราะมีสารเคมีปนเปื้อนอยู่ด้วย น้ำเสียก่อนที่จะผ่านเข้าสู่ระบบบำบัดแบบชีววิทยาต้องทำการกำจัดสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผลิตเสียก่อนเช่นสีที่ละลายอยู่ในน้ำเสีย จากนั้นน้ำเสียที่เกิดขึ้นจะเข้าสู่ระบบบำบัดประมาณวันละ 60 ลูกบาศก์เมตรโดยใช้การบำบัดแบบชีววิทยาคือ ระบบเลี้ยงตะกอนเร่ง (Activated sludge) จากนั้นผ่านเครื่องรีดตะกอนผลสุดท้ายจะได้กากตะกอนน้ำเสียออกมาประมาณวันละ 1 ตัน กากตะกอนที่เกิดขึ้นทางโรงงานจะนำไปถมที่และปลุกหญ้าในพื้นที่ของโรงงาน

2.5 กากตะกอนน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

น้ำเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่มีทั้งสารอนินทรีย์และอินทรีย์ปะปนในปริมาณมาก ซึ่งระบบบำบัดน้ำเสียแบบชีววิทยาเป็นระบบที่ถูกนำมาใช้ในการบำบัดมากระบบหนึ่ง โดยใช้จุลินทรีย์ช่วยในการการบำบัดน้ำเสีย ที่นิยมใช้กันคือระบบบำบัดน้ำเสียแบบ Activated sludge หัวใจสำคัญของระบบบำบัดแบบนี้ คืออาศัยจุลินทรีย์ทั้งหลายที่มีอยู่ในถังเดิมอากาศ

ของระบบเป็นตัวย่อยสลาย สิ่งสกปรกที่มีอยู่ในน้ำเสียให้หมดไปหรือจนมีความสะอาดเพียงพอที่จะระบายทิ้งได้โดยไม่ทำให้น้ำคูคลองเน่าเสียอีก สิ่งสกปรกในน้ำเสียที่จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายได้ส่วนใหญ่เป็นพวกสารอินทรีย์ทั้งในรูปที่ละลายน้ำได้และในรูปของคอลลอยด์ ผลผลิตสุดท้ายที่ได้จากการย่อย ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ เชลจุลินทรีย์ตัวใหม่ และพลังงานดังนี้

น้ำเสีย (สารอินทรีย์)+จุลินทรีย์+ออกซิเจน -> คาร์บอนไดออกไซด์+น้ำ+จุลินทรีย์ตัวใหม่+พลังงาน

โดยทั่วไปแล้วเชลล์จุลินทรีย์จะประกอบด้วยส่วนที่เป็นพวกสารอินทรีย์ 70-90 % และส่วนที่เป็นสารอนินทรีย์อีก 10-30 % ดังนั้น จะเห็นได้ว่าสารอินทรีย์ซึ่งเป็นสิ่งสกปรกส่วนใหญ่ในน้ำเสียจะถูกเปลี่ยนมาเป็นเชลล์ของจุลินทรีย์นั่นเอง เนื่องจากตะกอนจุลินทรีย์มีน้ำหนักมากกว่าซึ่งสามารถแยกออกจากน้ำได้ง่ายด้วยถังตกตะกอน ตะกอนที่ถูกสูบออกจากถังตกตะกอนเรียกว่า กากตะกอนน้ำเสียหรือสลัดจ์นั่นเอง กากตะกอนน้ำเสียที่ได้นี้จะถูกนำไปกำจัดได้หลายวิธีเช่น ถมที่ ทิ้งทะเล เผากำจัดโดยตรง หมักทำปุ๋ย ใช้ปรับปรุงดิน เหล่านี้เป็นต้น (เสริมพล, 2532) [13]

อย่างไรก็ตามกากตะกอนน้ำเสียที่เกิดขึ้นนี้สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อีกทางหนึ่งคือนำมาใช้ผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง ซึ่งนอกจากจะเป็นการลดปริมาณกากของเสียที่จะต้องนำไปกำจัดแล้วยังเป็นการใช้ประโยชน์จากของเสียได้มากขึ้น โดยนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนพลังงานชนิดอื่นๆ ดังนั้นจึงเป็นการช่วยลดต้นทุนอีกทางหนึ่งด้วย ปัจจุบันนี้การนำกากตะกอนมาใช้ประโยชน์ค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณที่เกิดขึ้นทั้งหมด ทั้งที่ปริมาณค่าความร้อนของกากตะกอนมีมากพอที่จะใช้เป็นพลังงานทดแทนได้ โดยได้มีผู้ศึกษาวิจัยค่าความร้อนของกากตะกอนน้ำเสียไว้ดังตาราง 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าความร้อนของกากตะกอนน้ำเสีย [2]

ชนิดของกากตะกอน น้ำเสีย	อ้างอิง	ค่าความร้อน(kJ/kg Dissolved Solids)	
		a	b
Cake (Vacuum filter)	Dicken, R., Wallis, B. and Hrundel, J. (1990)	-	11,350-19,400
Cake (Fillter press)	Smith, JI., Griffin, B.G. and Graheme, A.W. (1978)	15,792	15,228
Cake (filter press)	Tench, H.B. Phillips, L.F. and Swanwick, K.H. (1972)	25,040	-

หมายเหตุ

a = ค่าที่ได้จากการทดลอง

b = ค่าที่ได้จากการคำนวณ

2.6 การกำจัดกากตะกอนน้ำเสีย

การบำบัดน้ำเสียจะสมบูรณ์ไม่ได้หากกากตะกอนที่เกิดจากระบวนการบำบัดน้ำเสียยังไม่ได้ถูกกำจัดจนถึงขั้นสุดท้าย ตะกอนจากถังตกตะกอนถังแรกจะมีคุณสมบัติของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์รวมกัน [1] ส่วนตะกอนจากถังตกตะกอนที่สองจะเป็นมวลอินทรีย์ เว้นเสียแต่ว่าเป็นการกำจัดทางเคมี จึงจะเป็นตะกอนเคมีล้วน ๆ เราจึงสามารถแยกกากตะกอนพวกนี้เป็นสองประเภทใหญ่ๆ คือ

1) การตกตะกอนเคมี หรือ อนินทรีย์ (Chemical Sludge) กากตะกอนนี้เกิดจากระบวนการบำบัดน้ำเสียทางเคมี ส่วนใหญ่เป็นเกลืออนินทรีย์บางชนิดอาจเป็นสารพิษยากต่อการบำบัด

2) กากตะกอนอินทรีย์ (Organic Sludge) อาจมาจากถังกรอง ถังตกตะกอนที่สองส่วนใหญ่จะเป็นมวลอินทรีย์หรือมวลจุลินทรีย์หากปล่อยทิ้งไว้จะเกิดการเน่าเสียส่งกลิ่นเหม็นได้กากตะกอนส่วนนี้มีลักษณะเป็นของเหลวข้นที่มีของแข็งแขวนลอย ประมาณร้อยละ 0.25-12 โดยน้ำหนักไม่สามารถรักษารูปทรงได้ จำเป็นต้องมีภาระปริมาณมากในการขนย้ายไม่สะดวกในการขนย้าย หากว่าเป็นตะกอนสด (Fresh Sludge) จะมีสีออกน้ำตาล มีกลิ่นไม่รุนแรง และมีสารอินทรีย์สูง กากตะกอนนี้เมื่อนำมาย่อยสลายแล้ว (Digested Sludge) สีของตะกอนจะเปลี่ยนเป็นสีเทาหรือดำเพราะมีปริมาณสารอินทรีย์ลดน้อยลง เมื่อได้ตะกอนออกจากระบบแล้วต้องการบำบัดกากตะกอน (Sludge Treatment) เพื่อจะลดปริมาตรและปริมาณของสารอินทรีย์ให้มีความเข้มข้นน้อยลง เป็นการเพิ่มเปอร์เซ็นต์ของของแข็งให้มากขึ้น เพื่อให้กากตะกอนสามารถรักษารูปทรงไว้ได้ นอกจากนี้ยังสะดวกในการขนย้ายหรือการนำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่นๆ ต่อไป

2.6.1 ขั้นตอนการกำจัดกากตะกอนน้ำเสีย มีดังนี้

1) Sludge Thickening คือ การเพิ่มความเข้มข้นของกากตะกอน

- Gravity Thickening เพิ่มความเข้มข้นได้ 2-3 % เหมาะสำหรับกรณีที่มีตะกอนไม่มากนัก

- Air Flootation เพิ่มความเข้มข้นได้จาก 1 → 6 % Dissolved Air Flootation เพิ่มความเข้มข้นแล้ว ลดความดัน

- Centrifugation แยกของแข็งออกจากของเหลวโดยใช้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง แยกตะกอนได้เร็ว แต่ Cost สูง

2) Sludge Stabilization คือการทำให้กากตะกอนคงตัว ซึ่งก็คือกระบวนการการหมักกากตะกอนนั่นเอง

- Anaerobic Digestion → Conventional Anaerobic Digestion

(Capacity > 1 Mg per day) วิธีการนี้จะได้ผลพลอยได้คือก๊าซมีเทน CH_4 ซึ่งนำมาเป็นเชื้อเพลิงได้

- Aerobic Digestion (Capacity < 8 Mg per day)

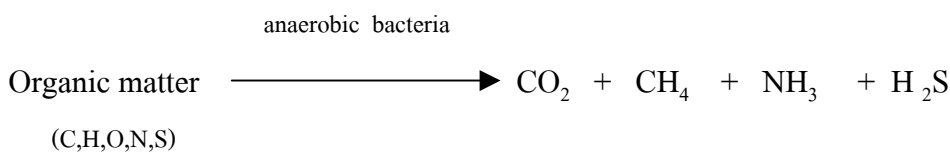
- Heat Treatment → ดีที่สุด ทำให้ตะกอนที่มีพิษสูงละลายได้ เผาตะกอนภายใต้ความกดดันสูง (150-200 psi) ค่าใช้จ่ายสูง แต่กำจัดตะกอนได้ทั้ง Inorganic และ Organic และดึงน้ำออกได้ง่าย
 - 3) Sludge Dewatering คือการไล่น้ำออกจากกากตะกอนมีหลายวิธีดังต่อไปนี้
 - Sludge Drying Beds ตากบนทราย มีปัญหาเรื่องกลิ่น ใช้เวลานาน 4-10 วัน ถูฝุ่นใช้ไม่ได้
 - Vacuum Filtration ใช้หลักการ Suction ผ่านตัวกลาง เช่น ฝ้าย หรือ Filter medium
 - Centrifugation ใช้หลักการแรงหนีศูนย์กลาง Filter Pressed นิยมใช้มากที่สุดในเมืองไทย
- มีทั้งระบบ Manual และ Automatics

2.6.2 วิธีการทำให้กากตะกอนคงตัว (Sludge Stabilization)

การทำให้กากตะกอนคงตัว (Sludge Stabilization) คือการหมักกากตะกอน สามารถแบ่งกระบวนการหมักได้ 2 แบบคือหมักแบบไร้อากาศและแบบมีอากาศ [15] โดยทั่วไปกากตะกอนจากระบบ Activated Sludge จะมีความเข้มข้นของ SS ประมาณ 1% - 5% (10,000 mg/l-40,000 mg/l) [6] การกำจัดกากตะกอนจึงต้องนำตะกอนมาแยกน้ำออกก่อนเรียกว่า Dewatering แต่ว่ากากตะกอนจากระบบ Activated Sludge เป็นตะกอนอินทรีย์และอนินทรีย์ผสมกันอยู่ จะแยกน้ำออกไปได้ยากและเมื่อทิ้งไว้นานๆ จะมีกลิ่นเหม็น จึงต้องนำกากตะกอนมาผ่านวิธีการทำให้สารอินทรีย์น้อยลงและแยกน้ำออกได้ง่ายขึ้นเรียกว่า Sludge stabilization ที่ใช้กันมากที่สุดก็คือกระบวนการหมัก การหมักกากตะกอนน้ำเสียเป็นกระบวนการย่อยสลายอินทรีย์สารภายใต้สภาวะที่เหมาะสม เป็นการเปลี่ยนรูปของกากตะกอนน้ำเสียให้ไปอยู่ในรูปปุ๋ยหมัก เพื่อให้สารอินทรีย์มีความคงตัวมากขึ้น

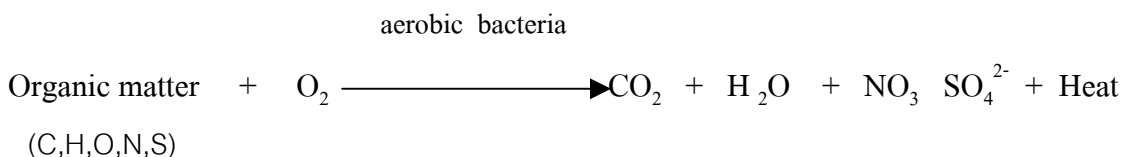
1) การหมักแบบไร้อากาศ

เป็นกระบวนการหมักกากตะกอนน้ำเสียเพื่อให้สลายตัวในสภาพที่ไร้ออกซิเจนทำให้ได้ผลพลอยได้คือก๊าซมีเทน (CH₄) เกิดขึ้นนำมาใช้ประโยชน์ได้ ปฏิกิริยาชีวเคมีที่เกิดเป็นดังต่อไปนี้



2) การหมักแบบมีอากาศ

เป็นการหมักกากตะกอนน้ำเสียในสภาวะมีออกซิเจนเมื่อผ่านระบบนี้แล้วกากตะกอนจะไม่มีปัญหาเรื่องกลิ่น ผลผลิตที่ได้จากกระบวนการนี้คือ คาร์บอนไดออกไซด์(CO₂), น้ำ(H₂O) ไนเตรต (NO₃) และพลังงานความร้อน ปฏิกิริยาชีวเคมีที่เกิดในกระบวนการหมักแบบมีอากาศเป็นดังนี้



การหมักกากตะกอนน้ำเสียเพื่อนำมาใช้ผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง จะใช้วิธีการหมักแบบใช้ออกซิเจน และไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่ง Slupek et al. [2] ได้ระบุว่าวิธีการที่ใช้กระบวนการหมักทั้งสองแบบรวมกันจะให้ประสิทธิภาพมากที่สุด

2.6.3 กระบวนการเป็นปุ๋ยหมัก (Composting)

กระบวนการเป็นปุ๋ยหมักเป็นกระบวนการทางชีวเคมี ซึ่งสารอินทรีย์ถูกย่อยสลายเป็นสารคล้ายฮิวมัส และเป็นกระบวนการที่ธาตุอาหารและสารอินทรีย์ในวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรถูกนำมาใช้ประโยชน์อีกครั้งหนึ่ง ได้มีผู้ให้คำจำกัดความของกระบวนการเป็นปุ๋ยหมักไว้มากมาย ดังเช่น Bell [16] ได้ให้คำจำกัดความกระบวนการเป็นปุ๋ยหมักไว้ว่าเป็นกระบวนการย่อยสลายทางชีววิทยาแบบใช้อากาศมีช่วงอุณหภูมิสูงและสะสมความร้อนภายในตัวเองซึ่งเกิดขึ้นได้ตามธรรมชาติ และสะสมวัสดุอินทรีย์ที่มีการย่อยสลาย

Biddle Stone และ Gray [17] กล่าวว่ากระบวนการเป็นปุ๋ยหมักเป็นการย่อยสลายวัสดุอินทรีย์ที่มีเนื้อต่างชนิดกันโดยกลุ่มประชากรจุลินทรีย์ในสภาพแวดล้อมแบบมีอากาศและร้อนขึ้น ในขณะที่ Muller [18] บ่งไว้ว่าในน้ำที่กว้างที่สุด กระบวนการเป็นปุ๋ยหมักเป็นการย่อยสลายวัสดุอินทรีย์ทางจุลชีววิทยาที่ยังไม่สมบูรณ์ ซึ่งกระบวนการทางจุลชีววิทยานี้ผันแปรจากกระบวนการแบบมีอากาศจนถึงกระบวนการแบบไม่ใช้อากาศ ตามคำจำกัดความที่ให้ไว้โดย American Society of Agricultural Engineers [19] กระบวนการเป็นปุ๋ยหมักเป็นการย่อยสลายวัสดุเหลือใช้อินทรีย์แบบมีอากาศที่อุณหภูมิสูงเป็นสารประกอบฮิวมัสที่ค่อนข้างคงตัว ฮิวมัสที่เกิดขึ้นนี้อาจจะมีถึง 25% และจะย่อยสลายต่อไปอย่างช้ามาก แต่ก็คงตัวเพียงพอที่จะไม่ร้อนขึ้นมาอีกหรือก่อให้เกิดกลิ่นรบกวนหรือเป็นที่เกิดของแมลงวัน Haug [20] จำกัดความกระบวนการเป็นปุ๋ยหมักว่าเป็นการย่อยสลายและการทำให้คงตัวทางชีววิทยาของวัสดุอินทรีย์ภายใต้สภาวะที่เอื้อต่อการสะสมอุณหภูมิสูง ซึ่งเป็นผลจากการสร้างความร้อนโดยปฏิกิริยาทางชีววิทยา ผลผลิตสุดท้ายที่ได้จะมีความคงตัวเพียงพอที่จะนำไปเก็บและใส่ลงดินโดยไม่ก่อให้เกิดผลร้ายต่อสิ่งแวดล้อม

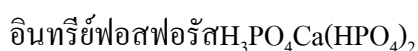
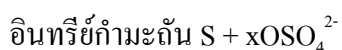
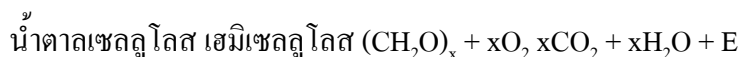
อีกคำจำกัดความของกระบวนการเป็นปุ๋ยหมักที่เป็นที่ยอมรับกันไม่นานนักในทวีปยุโรปก็คือเป็นกระบวนการที่สามารถควบคุมได้ เกิดมาจากกลุ่มประชากรจุลินทรีย์ทั้งประเภทที่ชอบอุณหภูมิปานกลาง (mesophiles) และที่ชอบอุณหภูมิสูง (thermophiles) ซึ่งนำไปสู่การเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ ธาตุอาหารและอินทรีย์วัตถุที่คงตัว ให้คำจำกัดความกระบวนการเป็นปุ๋ยหมักแบบมีอากาศไว้ดังนี้ เป็นกระบวนการซึ่งปฏิกิริยาทางชีววิทยาแบบมีการสร้างความร้อนเกิดขึ้นโดยประชากรจุลินทรีย์แบบใช้อากาศ Finstein [21] เรียกกระบวนการเป็นปุ๋ยหมักเป็นเหมือนปรากฏการณ์ซึ่งมวลของวัสดุอินทรีย์มีแนวโน้มเกิดการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจากภายในกองวัสดุและผลิตผลที่

ได้ถูกนำไปใช้ประโยชน์เพื่อเศรษฐกิจ กระบวนการเป็นปุ๋ยหมักสามารถนำไปใช้เป็นเทคโนโลยีเพื่อ การกำจัดของเสียเพราะเป็นกระบวนการที่มุ่งใช้กับวัสดุที่เน่าเหม็น ก่อให้เกิดการลดลงของปริมาณ น้ำหนักและปริมาณน้ำ ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่คงตัวและเป็นกระบวนการที่ลดจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิด โรค [21]

กระบวนการเป็นปุ๋ยหมักนี้แตกต่างจากการย่อย (digestion) หรือการหมัก (fermentation) ตรงที่สาร ที่นำมาย่อยสลายนั้น เริ่มแรกเป็นของแข็ง ซึ่งมีช่องว่างเปิดมากกว่าที่จะเป็นของแข็งในของเหลวหรือ ในกึ่งของเหลว กระบวนการเกิดขึ้นในสภาพไม่มีอากาศ ในที่มีอุณหภูมิปานกลาง ไปจนถึงอุณหภูมิ สูง แต่สภาพที่เอื้ออำนวยให้เกิดการย่อยสลายอย่างรวดเร็วและสมบูรณ์ที่สุดก็คือ สภาพที่มีอากาศและ อุณหภูมิสูง ผลผลิตสุดท้ายของกระบวนการเป็นปุ๋ยหมัก คือส่วนผสมของอนุภาคที่คงตัวและมี ประโยชน์โดยใช้เป็นสิ่งที่ช่วยปรับสภาพดินปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพ ทางเคมี และทางชีววิทยา ของดินให้ดีขึ้น และมีผลก่อให้เกิดการเพิ่มผลผลิตพืช [22] กระบวนการย่อยสลายอาจเกิดได้ตาม ธรรมชาติเช่นการย่อยสลายของเศษใบไม้ในป่าหรือการย่อยสลายของรากพืชที่ตายแล้วในดิน นอก จากนี้ยังสามารถเป็นกระบวนการที่มนุษย์เป็นผู้กระตุ้นเร่งให้เกิดขึ้นก็ได้เช่นการเพิ่มเชื้อจุลินทรีย์ที่ย่อย เซลลูโลสลงไปในกองปุ๋ยหมัก

2.6.3.1 หลักของกระบวนการเป็นปุ๋ยหมัก

การย่อยสลายวัสดุอินทรีย์เกิดขึ้นโดยกลุ่มของจุลินทรีย์ชนิดต่าง ๆ กันไป ซึ่งมีทั้งเชื้อแบคทีเรีย เชื้อรา แอคติโนมัยซีตและโปรโตซัว เชื้อจุลินทรีย์ที่มีบทบาทสำคัญเป็นอย่างยิ่งในกระบวนการย่อยสลาย วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรก็คือ เชื้อจุลินทรีย์พวกที่ย่อยเซลลูโลสและลิกนิน จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องใน กระบวนการย่อยสลายได้รับพลังงานและคาร์บอนจากการย่อยสลายวัสดุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ ประกอบ จุลินทรีย์จะใช้คาร์บอน 10 ส่วน ไนโตรเจน 1 ส่วนสำหรับการสร้างเซลล์โปรโตพลาส กระบวนการเป็นปุ๋ยหมักส่วนใหญ่เกิดขึ้นได้สภาพมีอากาศ ปฏิกริยาสำคัญที่นำเกิดขึ้นภายใต้สภาพ การย่อยสลายแบบมีอากาศเป็นดังนี้คือ



2.6.3.2 วัตถุประสงค์ คุณประโยชน์ และข้อจำกัดของกระบวนการเป็นปุ๋ยหมัก [13]

1) เป็นการทำให้วัสดุเหลือทิ้งมีความคงตัว

กิจกรรมทางชีววิทยาที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเป็นปุ๋ยหมักจะเปลี่ยนรูปแบบที่เน่าเสียได้ของวัสดุเหลือทิ้งอินทรีย์ให้เป็นรูปแบบที่คงตัวขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งให้อยู่รูปอินทรีย์ซึ่งจะก่อให้เกิดผลที่เป็นมลภาวะเพียงเล็กน้อยถ้าปล่อยลงดินหรือลงน้ำ

2) ยับยั้งเชื้อโรค

ความร้อนที่เกิดขึ้นในกองปุ๋ยหมักอาจจะสูงถึงประมาณ 60 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่พอเพียงที่จะยับยั้งเชื้อโรคส่วนใหญ่ เช่น เชื้อแบคทีเรีย ไวรัส และไข่พยาธิ โดยมีข้อแม้ว่าอุณหภูมิที่ต่ำต้องคงที่เป็นเวลาอย่างน้อย 1 วัน ดังนั้นปุ๋ยหมักที่ได้สามารถนำไปเป็นปุ๋ยและวัสดุปรับปรุงโครงสร้างของดินได้อย่างปลอดภัย

3) การนำธาตุอาหารพืชกลับมาเป็นประโยชน์ใหม่และการนำมาใช้ปรับปรุงดิน

ธาตุอาหารพืช NPK ที่มีอยู่ในของเหลือทิ้งมักจะอยู่ในรูปอินทรีย์ซึ่งพืชใช้ประโยชน์ได้ยาก ภายหลังกระบวนการเป็นปุ๋ยหมัก ธาตุอาหารพืชเหล่านี้จะอยู่ในรูปแบบอนินทรีย์ เช่น NO_3 และ $\text{PO}_4\text{-3}$ ซึ่งเหมาะสมสำหรับการดูดซึมของพืช การใช้ผลิตภัณฑ์ผ่านกระบวนการเป็นปุ๋ยหมักกับดินจะช่วยลดการสูญเสียธาตุอาหารพืช โดยการชะล้างเพราะธาตุอาหารพืชรูปอนินทรีย์ส่วนใหญ่อยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำ ซึ่งเป็นรูปแบบที่ถูกชะล้างได้น้อยกว่ารูปแบบที่ละลายน้ำของวัสดุที่ไม่ได้ผ่านการย่อยสลาย นอกจากนี้ความยากง่ายในการไถพรวนของดินดีขึ้น ซึ่งเป็นผลต่อเนื่องทำให้รากพืชเจริญเติบโตได้ดีจึงดูดธาตุอาหารได้เพิ่มขึ้น [23] การใส่ปุ๋ยหมักลงดินแล้วจึงช่วยทำให้คุณภาพดินนั้นดีขึ้นซึ่งเป็นการปรับปรุงพื้นที่ที่ไม่มีประโยชน์ให้ใช้ประโยชน์ได้

4) เป็นการทำให้กากตะกอนแห้ง

สิ่งขับถ่ายจากมนุษย์ มูลจากสัตว์ และกากตะกอนประกอบด้วยน้ำประมาณ 80-90% ซึ่งทำให้ค่าใช้จ่ายในการเก็บรวบรวมขนส่งและกำจัดสูงขึ้น การทำให้กากตะกอนแห้งโดยวิธีทำปุ๋ยหมักจึงเป็นทางเลือกอีกทางหนึ่ง โดยความร้อนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการไประเหยน้ำที่มีอยู่ในกากตะกอน

2.6.3.3 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการหมัก [19]

มีวิธีการทำปุ๋ยหมักหลายวิธี ถึงแม้ว่าหลักการของกระบวนการเป็นปุ๋ยหมักจะเหมือนกันในแต่ละกรณีความสำเร็จของแต่ละวิธีขึ้นอยู่กับปัจจัยที่มีอิทธิพลจำนวนหนึ่ง ปัจจัยหลักซึ่งเอื้ออำนวยให้เกิดสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการเป็นปุ๋ยหมักซึ่งสามารถควบคุมได้ระดับหนึ่งก็คือ ลักษณะเฉพาะของวัสดุอินทรีย์เหลือทิ้ง เช่น ปริมาณความชื้นและค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน นอกจากนี้ยังมีการถ่ายเทอากาศของกองปุ๋ยหมัก อุณหภูมิและความเป็นกรด-ด่างภายในกองปุ๋ย ปัจจัยเหล่านี้ขึ้นอยู่กับระยะห่างกันมาก ประสิทธิภาพของกระบวนการเป็นปุ๋ยหมักโดยแท้จริงแล้วขึ้นอยู่กับกลุ่มของประชากรจุลินทรีย์ซึ่งมีอยู่และทำให้วัสดุอินทรีย์เหลือทิ้งนั้น ๆ คงตัว กระบวนการเป็นปุ๋ยหมักครั้งใด

ที่ไม่ได้ผลอาจจะเนื่องมาจากสภาพที่ไม่สมดุลย์ทางเคมีและทางกายภาพภายในกองปุ๋ยหมักนั้น ๆ ซึ่งส่งผลต่อการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการหมักมีดังต่อไปนี้

1) วัตถุดิบ

ส่วนประกอบของวัสดุอินทรีย์มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการเป็นปุ๋ยหมัก วัสดุอินทรีย์ที่เหมาะสมสำหรับนำมาทำปุ๋ยหมักแตกต่างกันไปมีทั้งวัสดุเนื้อผสมหลายชนิด เช่น ของเสียจากบ้านเรือน น้ำโสโครกจนถึงวัสดุเนื้อเดียว เช่น ของเสียที่ได้จากอุตสาหกรรมอาหาร อย่างไรก็ตามวัสดุทั้งหลายนี้เป็นส่วนผสมของน้ำตาล โปรตีน ไขมัน เฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งมีความเข้มข้นต่าง ๆ กัน

เฮมิเซลลูโลส เป็นโพลีแซคคาไรด์ที่ประกอบด้วยหน่วยน้ำตาล 50-150 หน่วย ซึ่งค่อนข้างง่ายต่อการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ ส่วนเซลลูโลสเป็นโพลีเมอร์ที่ใหญ่กว่ามาก และประกอบด้วยหน่วยน้ำตาล 1,000-10,000 หน่วย ซึ่งยากต่อการย่อยสลาย [24] เซลลูโลสเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบซึ่งมีมากที่สุดในหมู่พืชในโลก และไม่ถูกย่อยสลายโดยเอนไซม์ในกระเพาะและลำไส้ของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมเป็นส่วนใหญ่สัตว์พวกนี้จึงไม่สามารถใช้เซลลูโลสให้เป็นประโยชน์ได้ แต่สัตว์จำพวกเคี้ยวเอื้อง เช่น วัว ควาย สามารถใช้เซลลูโลสเป็นอาหารได้ เพราะมีแบคทีเรียในกระเพาะซึ่งผลิตเอนไซม์ที่เรียกว่า "เซลลูเลส" ใช้ย่อยสลายเซลลูโลสได้ สำหรับลิกนินนั้นเป็นสารผนังเซลล์ ซึ่งยากต่อการถูกย่อยสลาย

2) อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน

ปริมาณไนโตรเจนและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนสำคัญมากสำหรับกระบวนการย่อยสลาย โดยทั่วไปถ้าปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดมากกว่า 1.5-2.5% ก็ไม่จำเป็นต้องเพิ่มไนโตรเจนให้กองปุ๋ย อย่างไรก็ตาม ธรรมชาติของไนโตรเจนและความเป็นประโยชน์ของมันต่อเชื้อจุลินทรีย์ก็สำคัญ เช่น พืชน้ำไม่ย่อยสลายเต็มที่ถึงแม้ว่าจะมีปริมาณไนโตรเจนมากกว่า 2-3% ดังนั้นจึงแนะนำให้เพิ่มไนโตรเจนในรูปของปุ๋ยยูเรีย ปุ๋ยแอมโมเนียซัลเฟตหรือไนเตรทลงไปในกองปุ๋ย ในการย่อยสลายกากตะกอนน้ำทิ้งก็เช่นเดียวกัน ถึงแม้ว่ากากตะกอนน้ำทิ้งมีปริมาณไนโตรเจน 3.5-4.5% การย่อยสลายเป็นปุ๋ยการหมักของกากตะกอนน้ำทิ้งก็ไม่สมบูรณ์เนื่องด้วยเหตุจากปริมาณโลหะหนักที่มีอยู่ในระดับความเข้มข้นสูงในกากตะกอนน้ำทิ้งนั้น

ปัจจัยด้านธาตุอาหารที่สำคัญที่สุด คือ อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน Alexander [24] รายงานว่าประมาณ 20-40% ของคาร์บอนที่มีในวัตถุดิบจะถูกใช้ในการสร้างเซลล์ใหม่ของเชื้อจุลินทรีย์ในกระบวนการเป็นปุ๋ยหมัก ส่วนที่เหลือถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในกระบวนการสร้างพลังงาน อย่างไรก็ตาม เซลล์จุลินทรีย์เหล่านี้มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบประมาณ 50% มีไนโตรเจน 5% โดยถือเอาตามน้ำหนักแห้ง ดังนั้นความต้องการไนโตรเจนในวัสดุที่นำมาทำปุ๋ยหมักเริ่มต้นจะเป็น

2-4% ของคาร์บอนเริ่มต้น ซึ่งผลสุดท้ายจะทำให้ได้ค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสม ประมาณ 25 / 1 [24]

ตารางที่ 2.2 ค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของของเหลือทิ้งต่าง ๆ [24]

วัสดุ	ไนโตรเจน (เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้ง)	อัตราส่วนคาร์บอน / ไนโตรเจน
อุจจาระคน	5.5 - 6.5	6-10
ปัสสาวะ	15-18	0.8
เลือด	10-14	3.0
มูลวัว	1.7	18
มูลสัตว์ปีก	6.8	15
มูลแกะ	3.8	-
มูลหมู	3.8	-
มูลม้า	2.3	25
กากตะกอนน้ำทิ้งดิบ	4-7	11
กากตะกอนน้ำทิ้งซึ่งบำบัดแล้ว	2-4	-
เศษหญ้าผสม	2.4	17
พืชผักที่ไม่ใช่ตระกูลถั่ว	2.5-4	11-12
ฟางข้าวสาลี	0.3-0.5	128-150
ฟางข้าวโอ๊ต	1.1	48
ขี้เลื่อย	0.1	200-500

โดยปกติการลดลงของส่วนที่เป็นอินทรีย์สารในวัตถุดิบอยู่ในช่วง 7-99.9% [25] คาร์โบไฮเดรตละลายน้ำได้มาก และง่ายต่อการย่อยสลายโดยเชื้อจุลินทรีย์ ไขมัน แป้ง และน้ำตาล อาจลดลงในระหว่างกระบวนการเป็นปุ๋ยหมักประมาณ 77% 88% และ 99.9% ตามลำดับ พวกเส้นใยหยาบที่มีเซลลูโลสและลิกนินจะย่อยสลายยากและจะลดลงเพียง 7% การย่อยสลายเซลลูโลสกินเวลา 2-3 สัปดาห์ น้ำหนักที่ลดลงอยู่ในช่วง 47-80% อันเป็นผลจากการสูญเสียคาร์บอนไปในรูปของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และการสูญเสียปริมาณความชื้นไปในรูปการระเหยน้ำ การลดลงของปริมาณความชื้นนี้อาจจะถึง 35% [25]

3) ปริมาณความชื้น

ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของวัสดุที่นำมาทำปุ๋ยหมักเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการย่อยสลายวัสดุอินทรีย์โดยเชื้อจุลินทรีย์ ด้วยสาเหตุที่น้ำจำเป็นสำหรับการละลายธาตุอาหารและเป็นส่วนของเซลล์โปรโตพลาสต์ ปริมาณความชื้นต่ำกว่า 20% สามารถยับยั้งกิจกรรมทางชีวภาพได้อย่างรุนแรง ปริมาณความชื้นที่มากเกินไปจะก่อให้เกิดการชะล้างธาตุอาหารและเชื้อโรคออกจากกองปุ๋ย ในกระบวนการเป็นปุ๋ยหมักแบบใช้อากาศ น้ำปริมาณมากเกินไปไปกั้นทางเดินอากาศทำให้กองปุ๋ยหมักมีสภาพเป็นไร้อากาศ ปริมาณความชื้นระหว่าง 50-70% (เฉลี่ย 60%) เหมาะสมที่สุดสำหรับกระบวนการเป็นปุ๋ยหมักและควรจะต้องดำรงไว้ในช่วงที่จุลินทรีย์มีกิจกรรม เช่น ช่วงระยะการเจริญเติบโตที่อุณหภูมิปานกลางและช่วงอุณหภูมิสูง การรักษาปริมาณความชื้นสำหรับกองปุ๋ยหมักอาจกระทำได้โดยพ่นน้ำให้กองปุ๋ยเมื่อพบว่ากองปุ๋ยหมักมีปริมาณความชื้นต่ำไป ถ้ากองปุ๋ยหมักขึ้นมากให้ใส่วัสดุที่จะช่วยความชื้นได้เพิ่มลงไปในกองปุ๋ย เช่น ฟางข้าว จี้เลื่อย

โดยปกติแล้วเป็นการยากที่จะคงรักษาให้กองปุ๋ยมีปริมาณความชื้นที่พอเหมาะ สาเหตุหลักที่เป็นดังนี้เนื่องมาจากขนาด รูปร่าง และธรรมชาติของวัสดุที่ผสมอยู่ในกองปุ๋ยหมัก [26] วัสดุอินทรีย์บางชนิด เช่น ใบไม้แก่ ฟางข้าวไรน์ ฟางข้าวสาลี จี้เลื่อยหรือวัสดุอื่นที่มีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบในปริมาณสูงมักจะต้านการซึมผ่านของน้ำและทำให้เปียกยาก ดังนั้นวิธีแก้ไขก็โดยการใส่ผงซักฟอกจำนวนเล็กน้อยลงในน้ำแล้วพ่นให้ทั่วกองปุ๋ยเพื่อเพิ่มความเปียกให้ผิวหน้าวัสดุที่นำมาทำปุ๋ยหมักนั้น ๆ

4) การถ่ายเทอากาศ

การถ่ายเทอากาศที่พอเหมาะ จำเป็นสำหรับการทำปุ๋ยหมัก เป็นการเติมกาซออกซิเจนแก่เชื้อจุลินทรีย์พวกที่ต้องใช้อากาศ ซึ่งเกี่ยวข้องกับกระบวนการเป็นปุ๋ยหมัก การเติมอากาศทางกลร่วมกับการระบายอากาศที่สอดคล้องกันมีแนวโน้มทำให้กระบวนการเป็นปุ๋ยหมักดำเนินเร็วขึ้น กองปุ๋ยหมักที่เติมอากาศตามธรรมชาติซึ่งไม่ค่อยมีการกลับกองปุ๋ยสามารถย่อยสลายภายใน 8-12 สัปดาห์ โดยมีเงื่อนไขว่าปริมาณความชื้นและปัจจัยอื่น ๆ ต้องอยู่สภาพเหมาะสม [25] การเติมอากาศให้กองปุ๋ยหมักทางกลสามารถลดเวลาที่ใช้ในการทำปุ๋ยหมักลงอยู่ในช่วง 2-3 สัปดาห์ [27]

5) อุณหภูมิและความเป็นกรด-ด่าง

อุณหภูมิและความเป็นกรด-ด่าง เป็นผลมาจากย่อยสลายวัสดุอินทรีย์ของกระบวนการเป็นปุ๋ยหมัก ดังนั้นจึงยากต่อการจัดการ โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าปัจจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเป็นปุ๋ยหมักไม่อยู่ในช่วงที่เหมาะสม ในช่วงต้น ๆ ของกระบวนการเป็นปุ๋ยหมักอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างช้า ๆ ขณะที่ความเป็นกรด-ด่างภายในกองปุ๋ยหมักต่ำลงเป็นค่า 5.6 พันท์ที่ความเป็นกรด-ด่างมีค่าต่ำลง กิจกรรมที่อยู่ในกองปุ๋ยก็เปลี่ยนกลับ โดยอุณหภูมิภายในกองปุ๋ยเริ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วจากอุณหภูมิปานกลาง (20-40 องศาเซลเซียส) ไปเป็นอุณหภูมิสูง (50-70 องศาเซลเซียส) ภายหลังเมื่อความเป็นกรด-ด่างของปุ๋ยมีค่ามากกว่า 7 และอาจจะถึง 8-9 อุณหภูมิจะเป็น 65-70 องศาเซลเซียส และจะคงอยู่ที่อุณหภูมิ

นี้ประมาณ 2-3 ชั่วโมง ถึง 2 วัน ขึ้นอยู่กับค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนและอัตราการย่อยสลายคาร์บอน ในขณะที่ความเป็นกรด-ด่างของกองปุ๋ยหมักที่มีค่าอยู่ในช่วง 7-9 อุณหภูมิภายในกองปุ๋ยเริ่มลดลงจนเท่ากับอุณหภูมิภายนอกกองปุ๋ยภายหลังจากระยะเวลาหลายวันหรือหลายสัปดาห์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวิธีการที่ใช้ทำปุ๋ยหมัก [26]

โดยความร้อนที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมชีววิทยภายในกองปุ๋ยหมักมีความสำคัญด้วยเหตุผลหลัก ๆ 2 ประการคือ

- เป็นการทำให้อัตราการย่อยสลายเพิ่มมากที่สุด
- เป็นการผลิตวัสดุซึ่งปลอดภัยทางด้านจุลชีววิทยาที่จะนำไปใช้ อุณหภูมิภายในกองปุ๋ยหมักถ้าสูงกว่า 60-65 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นค่าของช่วงอุณหภูมิสูงจะลดอัตราการออกซิเดชันทางชีวะในกองปุ๋ยหมักลง

รายงานผลการทดลองกับตัวอย่างปุ๋ยหมักจาก โรงงานผลิตปุ๋ยหมักแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการเป็นปุ๋ยหมักซึ่งวัดได้จากกิจกรรมของจุลินทรีย์ (โดยใช้ C14 อะซิเตด) มีค่าคงที่ต่ำกว่า 55 องศาเซลเซียส [28] ในอีกด้านหนึ่งเชื้อจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรคส่วนมากจะถูกยับยั้งอย่างมีประสิทธิภาพที่อุณหภูมิสูงกว่า 50 องศาเซลเซียส รูปที่ 1 ดังนั้นสิ่งที่ต้องนำมาพิจารณาอย่างยิ่งก็คือการควบคุมอุณหภูมิในกองปุ๋ยหมักให้ได้ประสิทธิภาพที่สุดในด้านการย่อยสลายวัสดุอินทรีย์และการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรค (ประมาณ 55 องศาเซลเซียส) สามารถควบคุมอุณหภูมิได้โดยการปรับการถ่ายเทอากาศและปริมาณความชื้นและการใช้ปุ๋ยหมักที่ผ่านการร่อนแล้วมาคลุมเป็นดังจนวนให้กองปุ๋ยหมัก

6) เชื้อจุลินทรีย์

กระบวนการเป็นปุ๋ยหมักแบบใช้อากาศเป็นกระบวนการซึ่งสิ่งมีชีวิตหลายชนิดมีบทบาทเกี่ยวข้องร่วมกัน แต่ละชนิดของสิ่งมีชีวิตจะเหมาะสมกับสภาพแวดล้อมของแต่ละช่วงเวลา และแต่ละเชื้อจะมีกิจกรรมการย่อยสลายในรูปแบบเฉพาะของตัวเอง สิ่งมีชีวิตเหล่านี้คือ เชื้อจุลินทรีย์ เช่น เชื้อแบคทีเรีย เชื้อรา เชื้อแอคติโนมัยซิส และโปรโตซัว และอาจจะเกี่ยวข้องกับสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลัง เช่นพวกไส้เดือนฝอย ไส้เดือนดิน ปลวก และสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ

2.7 การเผาเป็นถ่าน [29]

การเผาให้เป็นถ่านหรือการเกิดปฏิกิริยา Carbonization เป็นการเพิ่มเปอร์เซ็นต์คาร์บอนให้กับแท่งเชื้อเพลิง โดยให้ความร้อนแก่แท่งเชื้อเพลิงในภาชนะปิดที่อุณหภูมิสูงกว่า 300 องศาเซลเซียส โดยปราศจากอากาศ และทำให้เย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้องโดยไม่ให้อากาศเข้าไป ปฏิกิริยา Carbonization มี 4 ขั้นตอน ดังนี้

- 1) ที่อุณหภูมิห้องจนถึง 110 องศาเซลเซียส เป็นการไล่ความชื้นออกจากแท่งเชื้อเพลิง กลายเป็นไอน้ำ เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน
- 2) ที่อุณหภูมิ 110-270 องศาเซลเซียส ความชื้นที่เหลืออยู่จะระเหยออกไปหมด และเกิดก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และมีกรดอะซิดิกและเมธานอลเล็กน้อย เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน
- 3) ที่อุณหภูมิ 270-300 องศาเซลเซียส เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน เกิดสารพวกน้ำมันดิน ทาร์ และ ยังคงเกิดก๊าซต่างๆ
- 4) ที่อุณหภูมิสูงกว่า 300 องศาเซลเซียส องค์ประกอบที่ระเหยได้จะถูกขับออกไป ทำให้ปริมาณคาร์บอนสูงขึ้นเรื่อย ๆ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส การเกิดถ่านจะเสร็จสิ้นสมบูรณ์ แต่ถ้าให้ความร้อนต่อไปจนถึง 800-900 องศาเซลเซียส ถ่านจะประกอบด้วยคาร์บอนกับขี้เถ้าเท่านั้น

เชื้อเพลิงที่มีคุณภาพสูงจะมีปริมาณคาร์บอนคงตัวเป็นองค์ประกอบอยู่สูง แต่มีสารที่ระเหยได้และปริมาณเถ้าต่ำ เชื้อเพลิงที่มีความชื้นสูงจะมีผลทำให้ค่าความร้อนต่ำ เชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนสูงถือว่าเป็นเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพดี เช่น ถ่านที่มีค่าความร้อนสูงถือว่าเป็นถ่านที่มีคุณภาพดี แต่สำหรับการใช้ถ่านเพื่อการหุงต้มในครัวเรือนนั้น ถ่านที่มีคุณภาพดีที่สุดไม่จำเป็นต้องเป็นถ่านที่มีค่าความร้อนสูงสุด แต่จะต้องมีคุณสมบัติที่ดีของถ่านทางด้านอื่นๆ ด้วย [30] คือ

- 1) ไม่แตกปะทุในขณะที่ติดไฟ หรือแตกปะทุบ้างเล็กน้อยในช่วงแรกที่ติดไฟ
- 2) มีน้ำหนักมากเพราะจะลุกไหม้ให้ความร้อนได้นาน
- 3) ไม่มีควันและกลิ่นฉุนในขณะที่ลุกไหม้
- 4) มีความแข็งแรงสูงไม่แตกหักง่าย ทำให้สะดวกต่อการใช้งาน การขนส่ง และการเก็บรักษา

2.8 เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร

2.8.1 ชีวมวล (Biomass)

ชีวมวล คือ สารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้ เช่น เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร หรือกากจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมเกษตร ชีวมวลสามารถเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานได้ [32] โดยในขั้นตอนของการเจริญเติบโตนั้น พืชใช้คาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำและเปลี่ยนพลังงานจากแสงอาทิตย์โดยผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสงได้ออกมา เป็นแป้งและน้ำตาล แล้วกักเก็บไว้ตามส่วนต่างๆ ของพืช ดังนั้นเมื่อนำพืชมาเป็นเชื้อเพลิงเราก็จะได้พลังงานออกมา การใช้ประโยชน์จากพลังงานชีวมวล สามารถใช้ได้ทั้งในรูปแบบของพลังงานความร้อน ไอน้ำ หรือผลิตเป็นกระแสไฟฟ้า โดยจะใช้เชื้อเพลิงชีวมวลชนิดใดชนิดหนึ่งที่กล่าวมา

ข้างต้น หรือหลายชนิดรวมกันก็ได้ ชีวมวลจึงเป็นแหล่งเชื้อเพลิงราคาถูก หากมีการใช้ประโยชน์ในบริเวณที่ไม่ไกลจากแหล่งเชื้อเพลิงมากนัก เพื่อลดต้นทุนในการขนส่ง

ชีวมวลนั้นมีอยู่ทั่วไปในประเทศไทย การนำชีวมวลมาใช้จึงช่วยลดการสูญเสียเงินตราต่างประเทศในการนำเข้าเชื้อเพลิงและสร้างรายได้ให้กับคนท้องถิ่น และการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวลด้วยเทคโนโลยีที่เหมาะสม จะไม่ก่อให้เกิดมลภาวะและไม่สร้างสภาวะเรือนกระจก เนื่องจากการปลูกทดแทนทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกิดการหมุนเวียนและไม่มีการปลดปล่อยเพิ่มเติม เรายังมุ่งหวังว่าการพัฒนาโครงการเกี่ยวกับชีวมวลจะสามารถเสริมสร้างความเข้มแข็งและ การมีส่วนร่วมของชุมชนได้อีกด้วยเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดหนึ่ง และสามารถใช้เป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนได้เพราะใช้แล้วสามารถปลูกขึ้นมาทดแทนได้ การเอาพลังงานจากเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาใช้ประโยชน์ในแง่ของความร้อนก็โดยการเผาไหม้โดยตรง (direct combustion) ซึ่งพลังงานเชื้อเพลิงที่สำคัญคือสารลิกโนเซลลูโลส (ligno-cellulose) ที่ได้จากพืช [31] ตัวอย่างที่สำคัญได้แก่ ฟืน ถ่านไม้ เศษไม้ รวมทั้งสารอินทรีย์เหลือทิ้งทั้งในทางด้านการเกษตรและขยะมูลฝอย

2.8.2 แหล่งผลิตชีวมวล [32]

พลังงานจากชีวมวล เป็นพลังงานที่ได้จากพืชและสัตว์ หรือองค์ประกอบของสิ่งมีชีวิตหรือสารอินทรีย์ต่างๆ รวมทั้งการผลิตจากการเกษตรและป่าไม้ เช่น ไม้ฟืน แกลบ กากอ้อย วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรอื่นๆ รวมถึง การนำมูลสัตว์ ของเสียจากโรงงานแปรรูปทางเกษตร และขยะ มาเผาไหม้โดยตรงและนำความร้อนที่ได้ไปใช้ หรือนำมาผลิตก๊าซชีวภาพ โดยขบวนการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีโดยอาศัยจุลินทรีย์

ชีวมวลแต่ละชนิดมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันออกไป บางชนิดไม่เหมาะที่จะนำมาเผาไหม้โดยตรงเพื่อผลิตไฟฟ้า เช่น กากมันสำปะหลัง และสำเหล้า เพราะมีความชื้นสูงถึง 80-90 % บางชนิดต้องนำมาย่อย ก่อนนำไปเผาไหม้ เช่น เศษไม้ยางพารา เป็นต้น ชีวมวลบางส่วนได้ถูกนำไปใช้เพื่อการผลิตอยู่แล้ว เช่น แกลบจะถูกนำมาเผา เพื่อผลิตไอน้ำ นำไปหมุนกังหันใช้งาน ในโรงสีข้าว กากอ้อยและกากปาล์ม จะถูกนำมาเผาเพื่อผลิตไอน้ำ และไฟฟ้า ใช้ในขบวนการผลิต และเศษไม้ยางพารา จะถูกนำมาเผาเพื่อผลิตความร้อน ใช้ในการอบไม้ยางพารา เป็นต้น

ตารางที่ 2.3 ชีวมวลที่นำมาใช้เป็นพลังงาน

ของเหลือทิ้ง	ผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร	วัชพืชบกและน้ำ
เศษไม้ ไม้เลื้อย แกลบ ยอดอ้อย ฟางข้าว เปลือกผลไม้ ชังข้าว โพด ชานอ้อย กากน้ำตาล เปลือก ผลไม้	พืชที่มีแป้ง เช่น ข้าวโพด มัน สำปะหลัง พืชที่มีน้ำตาล เช่น อ้อย ข้าวฟ่างหวาน	ผักตบชวา สำหรับยาง กระรอก หญ้า

ที่มา : 1/ สถิติการเกษตรของประเทศไทย สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรและสหกรณ์
2/ รวมผลผลิตข้าวเปลือกจากนาปีและนาปรัง

2.8.3 ปริมาณวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรของประเทศไทย [32]

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม มีผลผลิตทางการเกษตรเป็นจำนวนมาก เช่น ข้าว น้ำตาล ยางพารา น้ำมันปาล์ม และมันสำปะหลัง เป็นต้น ผลผลิตส่วนหนึ่งส่งออกไปยังต่างประเทศมีมูลค่าปีละหลายพันล้านบาท อย่างไรก็ตามในการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรเหล่านี้ จะมีวัสดุเหลือใช้ออกมาจำนวนหนึ่งด้วย ปริมาณชีวมวลที่สามารถผลิตได้ภายในประเทศ จะแปรผันและขึ้นอยู่กับปริมาณผลผลิตทางการเกษตรของประเทศ

ซึ่งจากสถิติการเกษตรของประเทศไทย สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรและสหกรณ์ ในปีเพาะปลูก 2540/41 เมื่อนำมาคำนวณสัดส่วนของการเปลี่ยนแปลง ปริมาณผลผลิตทางการเกษตรเป็นชีวมวล ดังที่ปรากฏในตารางที่ 1 เพื่อประมาณปริมาณชีวมวลที่ผลิตได้รวมทั้งประเทศ ในปี 2540/41 จะได้ปริมาณชีวมวลประมาณ 31.32 ล้านตัน หรือเทียบเท่าน้ำมันดิบ 8.49 ล้านตัน ดังที่ปรากฏในตารางที่ 2 ชีวมวลที่สามารถผลิตได้ส่วนใหญ่คือ ชานอ้อยมีปริมาณ 11.7 ล้านตัน หรือเทียบเท่าน้ำมันดิบ 2.56 ล้านตัน และแกลบมีปริมาณ 5.4 ล้านตัน หรือเทียบเท่าน้ำมันดิบ 1.8 ล้านตัน

ตารางที่ 2.4 ปริมาณชีวมวลชนิดต่างๆ ที่ผลิตได้ในประเทศไทย ปี 2540/41

ชนิด	ผลผลิต ^{1/}	ชีวมวล		พลังงานทั้งหมด	
	(1,000 ตัน)	ประเภท	(1,000 ตัน)	(1,000 GJ)	(1,000 toe)
อ้อย	46,873	ชานอ้อย	11,718	108,392	2,566
ข้าวเปลือก ^{2/}	23,580	แกลบ	5,423	77,386	1,832
		ฟางข้าว	10,540	107,930	2,555
มันสำปะหลัง	15,590	ลำต้นมันสำปะหลัง	1,247	22,970	544
ปาล์มน้ำ มัน	2,681	ทะลายปาล์ม	1,147	20,485	485
		เส้นใยปาล์ม	394	6,942	164
		กะลาปาล์ม	131	2,418	57
มะพร้าว	1,386	กาบมะพร้าว	502	8,147	193
		กะลามะพร้าว	222	3,980	94
รวม	90,110		31,324	358,650	8,490

ที่มา : 1/ สถิติการเกษตรของประเทศไทย สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรและสหกรณ์

2/ รวมผลผลิตข้าวเปลือกจากนาปีและนาปรัง

2.8.4 การประเมินคุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของชีวมวล [32]

องค์ประกอบที่สำคัญของเชื้อเพลิงที่ใช้เป็นหลักในการประเมินคุณภาพและสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวลในด้านการนำมาใช้เป็นพลังงาน คือ คาร์บอนเสถียร ความชื้น สารที่ระเหยได้ กำมะถัน ปริมาณเถ้า และค่าความร้อน เชื้อเพลิงที่มีคุณภาพสูงจะมีปริมาณคาร์บอนเสถียรเป็นองค์ประกอบอยู่สูง แต่มีสารที่ระเหยได้และปริมาณเถ้าอยู่ไม่เกินไป และค่าความร้อนของเชื้อเพลิงก็เป็นตัวชี้คุณสมบัติของเชื้อเพลิงอย่างหนึ่ง โดยเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนสูงถือว่าเป็นเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพดี แต่สำหรับถ่านที่ใช้ในครัวเรือนนั้นถือว่าเป็นถ่านที่มีคุณภาพดีที่สุด สักยภาพของการผลิตชีวมวลในประเทศ มีแนวโน้มจะเพิ่มมากขึ้นในอนาคต เนื่องมาจากปริมาณผลผลิตทางการเกษตร ที่ก่อให้เกิดชีวมวล มีแนวโน้มจะผลิตได้เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะปัจจัยสำคัญหลายประการ เช่น การเพิ่มจำนวนพื้นที่เพาะปลูกและการพัฒนาเทคโนโลยีทางการเกษตร เป็นต้น

ส่วนความต้องการใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในอนาคตเช่นกัน เนื่องจากว่าชีวมวลมีราคาไม่แพงเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงสมัยใหม่ในปริมาณความร้อนที่เท่าๆ และจากปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล ทำให้เกิดการสะสมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ในบรรยากาศที่นำไปสู่การเกิดปฏิกิริยาเรือนกระจก ส่งผลทำให้อุณหภูมิของโลกสูงขึ้น ในขณะที่การนำชีวมวลมาใช้เป็นพลังงานทดแทนการใช้พลังงานเชิงพาณิชย์ จะช่วยบรรเทาปัญหาการเพิ่มปริมาณ CO₂ ให้กับบรรยากาศ แต่เนื่องจากชีวมวลบางชนิดมีการผลิตตามฤดูกาลและ/หรือมีเฉพาะบางภูมิภาค ดังนั้นการนำชีวมวลมาใช้ผลิตพลังงาน ในแต่ละโรงงาน ต้องคำนึงถึงปัจจัยอื่นประกอบ ได้แก่ แหล่งชีวมวล ปริมาณรวมของชีวมวล และเทคโนโลยีการผลิตพลังงานจากชีวมวล เป็นต้น

2.9 มะพร้าว[33]

ชื่อสามัญของมะพร้าวคือ COCONUT หรือชื่อวิทยาศาสตร์ *Cocos nucifera* Linn. Palmae Coconut มีรากศัพท์มาจากภาษาโปรตุเกส และสเปนว่า co cos หรือ co co ซึ่งแปลว่า ลิง ซึ่งเมื่อแรกที่พบมะพร้าวในอินเดีย สมัยศตวรรษที่ 15 - 16 พ่อค้าชาวโปรตุเกสเห็นกะลามะพร้าวคล้ายหน้าลิง จึงเรียกมะพร้าวว่า co cos เอเชียอาคเนย์เป็นถิ่นแรกที่ปลูกมะพร้าว จากนั้นจึงแพร่กระจาย สูดินแดนหมู่เกาะแปซิฟิก ประเทศอื่น ๆ ในเอเชีย แล้วต่อไปยังแอฟริกา ตะวันออก แอฟริกาตะวันตก และอเมริกา มะพร้าวเป็นพืชที่ต้องการอากาศร้อนชื้น บริเวณชายทะเล จึงเป็นที่ปลูกมะพร้าวกันมาก เพราะอุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงมาก มีแสงแดด และฝนตก ดินทรายไม่อุ้มน้ำแต่มีความชื้นเพียงพอ

2.9.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

มะพร้าวเป็นไม้ยืนต้นสูงถึง 20-30 เมตร ใบออกเรียงซ้อนกัน เป็นกระจุกอยู่ที่ยอดใบ เป็นใบประกอบ รูปขนนก ก้านใบยาว ใบยาวแคบหนา เนื้อเหนียว สีเขียว ใบประกอบย่อยแตกจากแกนใหญ่เป็นคู่จำนวนมาก ดอกออกเป็นช่อระหว่างซอกใบสีเหลือง ผลอ่อนสีเขียว (หรือเหลือง) ผล เป็นรูปกลมหรือรี ยาวประมาณ 8.14 นิ้ว เส้นผ่าศูนย์กลางยาวประมาณ 8-9.5 นิ้ว เปลือกนอกเรียบเกลี้ยง ผลอ่อนมีสีเขียว เมื่อแก่มีสีน้ำตาล เปลือกชั้นกลางเป็นเส้นใยนุ่ม ชั้นในจะแข็งเป็นกะลา ชั้นต่อไปเป็นเนื้อผลมีสีขาวนุ่มและภายในมีน้ำใส รสจัดหรือหวาน

มะพร้าว เป็นพืชตระกูลปาล์ม มีความสำคัญทางเศรษฐกิจ พืชหนึ่งของประเทศไทย เนื่องจากคนไทยนั้นรู้จักใช้เนื้อมะพร้าว ในการบริโภคเป็นอาหารทั้งคาว และหวานในชีวิตประจำวัน ซึ่งจากสำนักงานสถิติแห่งชาติได้เคยสำรวจพบว่า ประชากรไทย 1 คน จะบริโภคเนื้อมะพร้าวประมาณปีละ 8,273.2 กรัม หรือประมาณ 18 ผล/คน/ปี ซึ่งปัจจุบันประเทศไทยมีผลเมืองประมาณ 55 ล้านคน จะใช้ผล

มะพร้าวประมาณ 990 ล้านผล หรือประมาณ 65% ของผลผลิตทั้งหมด ส่วนที่เหลือประมาณ 35% ของผลผลิตทั้งหมด หรือ 489 ล้านผล ใช้ในรูปของอุตสาหกรรมหรือส่งออกต่อไป ซึ่งสามารถแบ่งที่จะกลุ่มอุตสาหกรรมมะพร้าวใหญ่ๆ ได้ 2 กลุ่ม คือ

- 1) ผลิตภัณฑ์แปรรูปเพื่อการบริโภค เช่น อุตสาหกรรมมะพร้าวแห้งอุตสาหกรรมน้ำมันมะพร้าว อุตสาหกรรมกะทิเข้มข้น อุตสาหกรรมมะพร้าวชุบแห้ง อุตสาหกรรมน้ำตาลมะพร้าว
- 2) ผลิตภัณฑ์เพื่ออุตสาหกรรมและอุปโภค เช่น อุตสาหกรรมเส้นใยมะพร้าว อุตสาหกรรมแท่งเพาะชำ อุตสาหกรรมเผาถ่านจากกะลามะพร้าว อุตสาหกรรมแปรรูปมะพร้าว

2.9.2 พื้นที่ปลูก

เป็นพืชที่สามารถปลูกได้ทุกภาคของประเทศไทย แต่จะเจริญเติบโตได้ดีในสภาพดินเป็นกลาง ดินร่วนปนทราย ดินไม่เปรี้ยวหรือเค็มจัด อุณหภูมิ 20-34 องศาเซลเซียส และควรมีปริมาณน้ำฝนตกกระจายสม่ำเสมอแทบทุกเดือน โดยจะเริ่มเก็บเกี่ยวผลผลิตอายุประมาณ 5 ปี ขึ้นไป จนถึงอายุ 80 ปี การเก็บผลแก่เมื่ออายุ 11-12 เดือน หลังจากออก มีประมาณ 12 จัน/ต้น/ปี ทลายละประมาณ 7-12 ผล

- ภาคใต้ ได้แก่ ชุมพร สุราษฎร์ธานี นครศรีธรรมราช กระบี่ ตรัง
- ภาคกลาง ได้แก่ ประจวบคีรีขันธ์ สมุทรสงคราม นครปฐม เพชรบุรี ราชบุรี
- ภาคตะวันออก ได้แก่ ชลบุรี จันทบุรี ระยอง ตราด ฉะเชิงเทรา

2.9.3 มะพร้าวอ่อน

มะพร้าวน้ำหอมเป็นมะพร้าวอ่อนที่มีการปลูกกันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีคุณลักษณะพิเศษคือน้ำมะพร้าวและเนื้อมะพร้าวมีรสชาติหวานกลมกล่อมและมีกลิ่นหอมชื่นใจ ปัจจุบันจึงเป็นพืชที่นิยมบริโภคทั้งภายในประเทศและต่างประเทศ รวมทั้งนักท่องเที่ยวที่เดินทางเข้ามาท่องเที่ยวในประเทศไทย ก็นิยมรับประทาน นอกจากนี้ยังมีการส่งมะพร้าวออกไปจำหน่ายยังตลาดต่างประเทศทั้งในรูปผลสด และแปรรูปมูลค่าปีละหลายสิบล้านบาท ถูกแปรรูปเป็นสินค้าหลายชนิด เช่น น้ำมะพร้าวกระป๋อง มะพร้าวทั้งผลและมะพร้าวปอกเปลือก

ปัจจุบันได้มีการขยายการผลิตเป็นอุตสาหกรรมออกมาหลายประเภท เช่น พวกอุตสาหกรรมอาหาร เครื่องดื่ม เช่น การทำวุ้นมะพร้าว การทำน้ำผลไม้กระป๋อง ทั้งขายภายในประเทศและส่งออก ปัจจุบันมีโรงงานผลิตน้ำผลไม้เป็นจำนวนมาก ทั้งที่ผลิตน้ำผลไม้ชนิดเดียวหรือผลิตหลายประเภท มะพร้าวอ่อนก็เป็นพืชชนิดหนึ่งที่นิยมนำมาผลิตอัดกระป๋องและเสกเหลือทิ้งที่เหลือจากกระบวนการผลิตมีเป็นจำนวนมาก และไม่ได้นำมาใช้ให้เกิดประโยชน์อย่างคุ้มค่า

บริษัทไทย อกริ ฟู้ด จำกัด มหาชน เป็นโรงงานผลิตน้ำผลไม้หลายชนิด และมีเศษเปลือกมะพร้าวอ่อนเหลือทิ้งประมาณวันละ 10 คันรถสิบล้อ ทางบริษัทได้ร่วมมือกับ สกว. ทำการวิจัยและพัฒนาการใช้ประโยชน์จากเปลือกมะพร้าวเหลือทิ้ง โดยใช้เทคนิคการหมักแบบไฮเลจจากเปลือกมะพร้าวอ่อน ทำให้มีคุณค่าทางอาหารเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสามารถนำไปใช้เลี้ยงสัตว์ได้ [33]

นอกจากนี้จะเห็นว่าเปลือกมะพร้าวอ่อนเป็นเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้เป็นอย่างดี โคนทั่วไปแล้วการที่จะนำเศษวัสดุเหลือทิ้งต่าง ๆ มาใช้เป็นพลังงานเชื้อเพลิงจะได้ประสิทธิภาพพลังงานความร้อนต่ำ เนื่องจากการเผาไหม้ไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นการที่จะนำมาเป็นเชื้อเพลิงที่ดีจึงควรนำมาอัดเป็นก้อนและตากแห้ง เพื่อที่จะให้ค่าความร้อนที่สูงและการเผาไหม้สม่ำเสมอ [34]

จากรายงานการวิจัยทำแท่งเชื้อเพลิงเขียว (Green Fuel) จากการนำเศษพืช กิ่งพืช ต่างๆ ที่ยังสดและสับเป็นชิ้นเล็กๆ จากนั้นนำมาอัดแท่งโดยไม่ต้องใช้ตัวประสาน แล้วนำไปตากแดดให้แห้ง จะได้แท่งเชื้อเพลิงเขียว สามารถนำมาใช้ทดแทนฟืนและถ่านเป็นอย่างดี และได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีในการผลิตแท่งเชื้อเพลิงในรูปแบบต่างๆ เพื่อสามารถใช้ผลิตแท่งเชื้อเพลิงเขียว สำหรับใช้ในครัวเรือนและระดับอุตสาหกรรม [3,4,35]

2.10 การอัดแท่งเชื้อเพลิง

กระบวนการอัดแท่งเชื้อเพลิงมี 2 รูปแบบคือการอัดโดยใช้ความร้อนและการอัดแบบเย็น ซึ่งขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ในการอัดกระบวนการอัดแท่งเชื้อเพลิง กรณีใช้กากตะกอนในการอัดแท่งจะเป็นการอัดเย็น เนื่องจากกากตะกอนจะทำหน้าที่เป็นตัวประสาน (binder) จึงเป็นการอัดเย็นหรือการอัดเปียก ซึ่งการอัดแท่งโดยวิธีนี้เป็นการอัดแบบใช้เทคนิคการอัดแท่งเชื้อเพลิงเขียว [4]

2.10.1 เครื่องมืออัดแท่งเชื้อเพลิง

- สกรูอัด (Screwfeeder) ทำจากสแตนเลส
- มอเตอร์ ขนาด 2 แรงม้า (HP.)
- กระบอกรีด (Troat) ทำจากสแตนเลส
- ลูกป้อนตุ๊กตา (UCP 205 - สำหรับประกอบเพลลา)
- คับปิ้ง (หน้าเป็นสำหรับต่อเชื่อมเพลลา 2 ชุด)
- พูลเลย์ (มูเล่) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2" , 4" , 6" และ 12
- เพลลา
- แกนเพลลา
- ถาดกองวัตถุดิบ
- สายพาน
- ช่องป้อนวัตถุดิบ ทำจากสแตนเลส

2.10.2 การต่อเครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิงเข้ากับระบบไฟฟ้า

ในหลักการของเครื่องที่ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าโดยทั่วๆ ไป ผู้ใช้จะต้องตรวจสอบดูว่า แหล่งจ่ายไฟฟ้าสำหรับเครื่องมีขนาด แรงดัน (โวลท์) และความสามารถในการจ่าย กระแสไฟ (แอมป์) ได้เพียงพอ และถูกต้อง ดังนี้

1. สำหรับมอเตอร์ชนิด 2 สาย ใช้ไฟ 220 โวลท์ จ่ายกระแสไฟได้ไม่น้อยกว่า 10 แอมป์ ต่อ 1 เครื่อง การต่อสายไฟจากเครื่องเข้ากับระบบจ่ายไฟจะต้องผ่านคัทเอ้าท์ หรืออุปกรณ์ตัดตอนไฟฟ้า ที่มีฟิวส์หรือระบบป้องกันกระแสเกิน ขนาด 10 แอมป์ เป็นตัวป้องกัน

2. สำหรับมอเตอร์ชนิด 3 สาย ใช้ไฟ 380 โวลท์ จ่ายกระแสไฟได้ไม่น้อยกว่า 5 แอมป์ ต่อ 1 เครื่อง การต่อสายไฟจากเครื่องเข้ากับระบบจ่ายไฟจะต้องผ่านคัทเอ้าท์ หรืออุปกรณ์ตัดตอนไฟฟ้า ชนิด 3 สาย ที่มีฟิวส์หรือระบบป้องกันกระแสเกิน ขนาด 10 แอมป์ เป็นตัวป้องกัน การต่อคัทเอ้าท์จะต้องใช้แยกเครื่องละ 1 ตัวเท่านั้น ห้ามต่อรวมกันโดยใช้คัทเอ้าท์หรืออุปกรณ์ตัดตอนไฟฟ้าตัวเดียวเป็นอันขาด แต่สำหรับเครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิงที่ได้พัฒนาและปรับปรุงสำหรับโครงการนี้จะใช้ไฟ 220 โวลท์

2.10.3 การใช้และบำรุงรักษาเครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิง

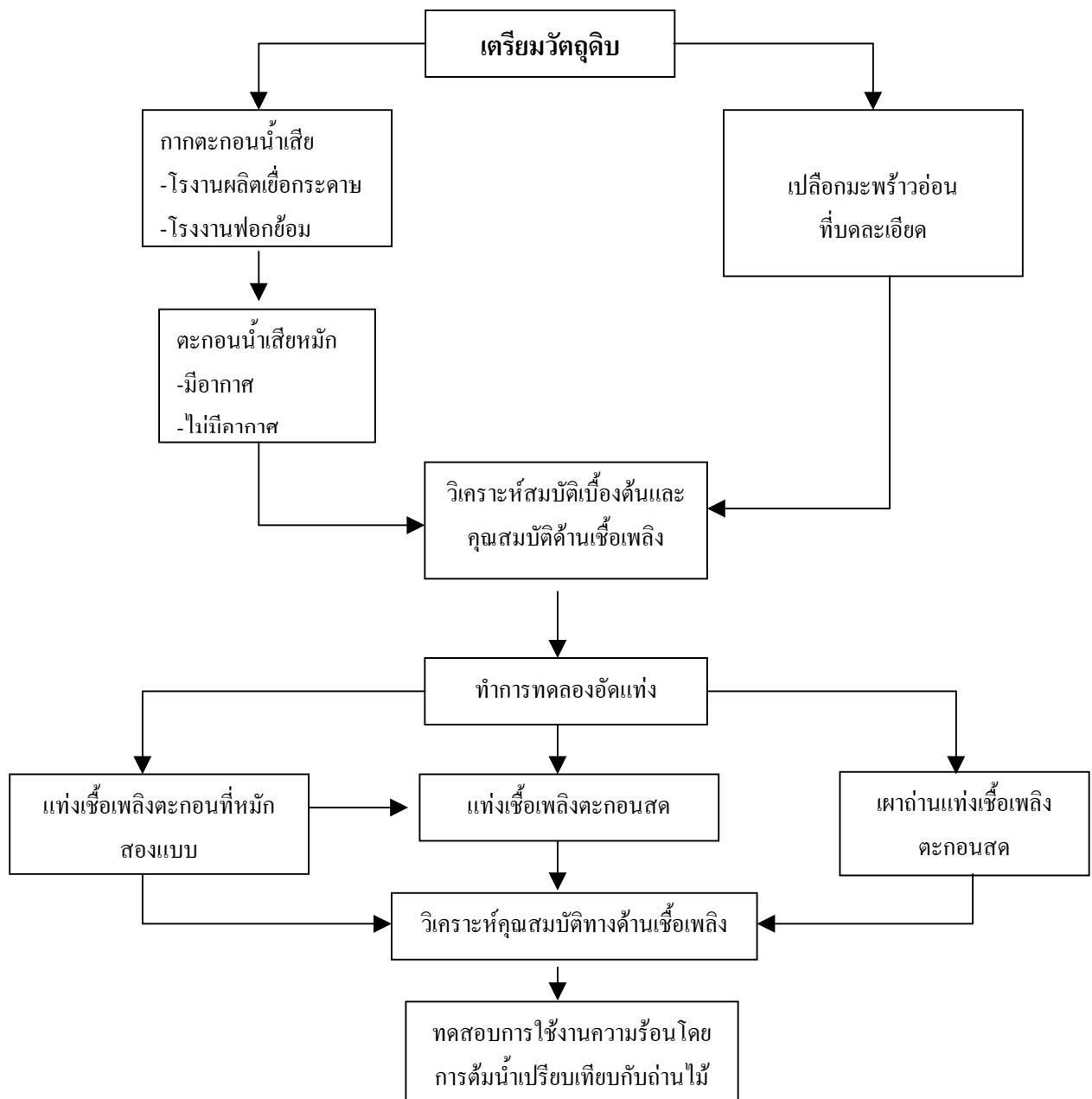
ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว เครื่องอัดชนิดนี้ทำงานด้วยการอัด (Pressure) หรือแรงดันจากมอเตอร์ไฟฟ้า ขนาด 2 แรงม้า ที่ไปหมุนสกรูหรือเกลียว (ซึ่งเป็นหัวใจสำคัญของเครื่องที่ผลิตจากสแตนเลสแทนเหล็ก เพื่อให้มีความทนทานต่อการสึกกร่อน ถ้าวัตถุดิบมีส่วนผสมของน้ำตาล) (ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่ทำแท่งเชื้อเพลิง) ให้อัดแน่นเป็นแท่งโดยรีดออกมาจากกระบอกรีด (Troat - ทำจากสแตนเลส) ดังนั้นเพื่อเป็นการใช้เครื่องให้ถูกต้องและรักษาเครื่องให้ใช้ได้ยาวนาน การปฏิบัติงานก่อนและหลังการอัดแท่งควรจะดำเนินการดังนี้

- เตรียมกองวัสดุที่ผสมเสร็จแล้วไว้บนถาด สำหรับกองวัตถุดิบ
- เตรียมอุปกรณ์สำหรับรับ แท่งเชื้อเพลิง ที่อัดออกมาได้ เช่น ใช้แผ่นสังกะสี ที่เป็นลอนลูกฟูกเป็นตัวรับ โดยอาจจะทำเป็นแคร่หรือขาตั้ง หรือจะทำเป็นรางเลื่อนก็ได้ เมื่อพร้อมแล้วจึงเปิดสวิทซ์เดินเครื่อง แล้วจึงป้อนวัตถุดิบลงในช่องป้อนโดยใช้เศษไม้ช่วยเขี่ย
- ก่อนหยุดเครื่องทุกครั้ง ต้องปล่อยให้เครื่องเดินอัดแท่งเชื้อเพลิงออกมาให้หมด อย่าปล่อยให้ตกค้างในกระบอกอัด
- หลังการใช้งานจะต้องถอดเกลียวอัด กระบอกรีด และท่อออกมาล้างทำความสะอาดทุกครั้ง
- ตรวจสอบเช็คและปรับระยะความตึงของสายพานให้เหมาะสมอยู่เสมอ
- ตรวจสอบอัดไข หรือจาระบี เป็นระยะสม่ำเสมอ หรืออย่างน้อยเดือนละครั้ง

บทที่ 3 การดำเนินการวิจัย

3.1 ขั้นตอนการวิจัย

ในการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำกากตะกอนน้ำเสียจาก 2 โรงงาน คือ โรงงานผลิตเยื่อกระดาษ และโรงงานฟอกย้อม โดยใช้ร่วมกับเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรคือเปลือกมะพร้าวอ่อน เพื่อนำมาใช้ในการผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง โดยมีขั้นตอนการวิจัยดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการวิจัย

3.2 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

3.2.1 กากตะกอนน้ำเสีย

กากตะกอนน้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นกากตะกอนที่มาจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบชีววิทยาคือระบบเลี้ยงตะกอนเร่ง (Activated sludge) ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จาก 2 โรงงาน คือ โรงงานผลิตเยื่อกระดาษปัญจพล อินคัสทรี จำกัด จ. พระนครศรีอยุธยา และตะกอนโรงงานฟอกย้อมผ้า จากโรงงานพัฒนาผ้าไทย จำกัด นิคมอุตสาหกรรมบางปู จ. สมุทรปราการ

3.2.2 เปลือกมะพร้าวอ่อน

เปลือกมะพร้าวอ่อนเหลือทิ้งได้รับความอนุเคราะห์จากโรงงานผลิตน้ำผลไม้กระป๋อง บริษัทไทย อกริฟูคส์ จำกัด (มหาชน) ส่วนที่ใช้ในการทดลองจะเป็นส่วนเปลือกชั้นนอกสุดจนถึงชั้นในแต่ไม่รวมถึงกะลา

3.3 การเตรียมวัสดุที่ใช้ในการวิจัย

3.3.1 กากตะกอนน้ำเสีย

ทำการเก็บตัวอย่างกากตะกอนน้ำเสียจากระบบบำบัด Activated Sludge ซึ่งกากตะกอนพวกนี้จะมีสารอินทรีย์ในปริมาณสูง ถ้าปล่อยทิ้งไว้ในที่ไม่มีอากาศจะเกิดกลิ่นเหม็นได้ดังนั้นเมื่อเก็บตะกอนมาต้องนำมาเก็บไว้ในที่อากาศถ่ายเทสะดวก วัดปริมาณความชื้นรวม ถ้าชื้นมากเกินไปต้องตากผึ่งไว้ให้ความชื้นลดลงเสียก่อน แต่ไม่จำเป็นต้องให้กากตะกอนแห้งมากเกินไป โดยความชื้นของกากตะกอนควรมีค่าประมาณ 60 % จึงจะเหมาะสมในการอัดแท่ง [36] และนำไปผสมกับเปลือกมะพร้าวอ่อนเพื่อว่าจะได้เพิ่มน้ำในปริมาณเพียงเล็กน้อยหรือไม่จำเป็นต้องเติมเลย โดยกากตะกอนที่เตรียมไว้สำหรับการวิจัยประกอบด้วย 3 ส่วนคือ กากตะกอนสดเพื่อใช้เป็นตัวเปรียบเทียบ กากตะกอนที่เตรียมไว้สำหรับการปรับปรุงคุณภาพโดยการหมัก และกากตะกอนสดที่นำไปทำการอัดแท่งก่อนที่จะนำไปแช่เชื้อเพลิงที่ได้ไปทำการปรับปรุงโดยการเผาให้เป็นถ่าน

3.3.2 เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร

นำเปลือกมะพร้าวอ่อนที่เก็บมาทำการสับให้เป็นชิ้นเล็กๆ ลดขนาดเพื่อให้เหมาะสมในการอัดแท่ง เนื่องจากว่าเป็นเปลือกมะพร้าวอ่อนจึงสับได้ง่าย หลังจากนั้นวัดปริมาณความชื้นรวมในสภาพสดแล้วนำไปตากแดดเพื่อให้ปริมาณความชื้นลดลง

3.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของวัตถุดิบ

ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของตะกอนน้ำเสียที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ และเปลือกมะพร้าวอ่อน โดยการวิเคราะห์คุณสมบัติทางด้านกายภาพจะวิเคราะห์ลักษณะทั่วไปที่สังเกตได้ชัดเจนคือ สีและลักษณะเนื้อตะกอน ความหนาแน่น และปริมาณความชื้นของกากตะกอนสด ส่วนคุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงจะวิเคราะห์ ปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหยปริมาณคาร์บอนคงตัว ปริมาณกำมะถันรวม และค่าความร้อนตามวิธีมาตรฐาน (ASTM) ซึ่งวิธีการวิเคราะห์จะแสดงในภาคผนวก ก

ตารางที่ 3.1 มาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของกากตะกอน

คุณสมบัติที่ต้องการวิเคราะห์	มาตรฐานหรือวิธีการวิเคราะห์
คุณสมบัติทางกายภาพ - ลักษณะทั่วไป (สีและเนื้อตะกอน) - ความหนาแน่น	สังเกตด้วยตาเปล่า ใช้อัตราส่วนมวลต่อปริมาตร
คุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิง - ปริมาณความชื้น - ปริมาณสารระเหย (Volatile Solid) - ปริมาณเถ้า (Ash) - ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) - ปริมาณกำมะถันรวม (Total Sulfur) - ค่าความร้อน (Heating Value)	วิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D5142 วิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D5142 วิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D5142 วิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D5142 วิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D5142 วิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D5142

นอกจากนี้กากตะกอนจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษและโรงงานฟอกข้อมอาจจะมีโลหะหนักปนเปื้อนอยู่เพราะในส่วนของกระบวนการผลิตจะมีสารเคมีเข้าไปเกี่ยวข้องด้วย ดังนั้นจะทำการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักที่อยู่ในกากตะกอนน้ำเสียเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานที่ใช้ในปัจจุบัน ซึ่งจะส่งวิเคราะห์ ณ ห้องปฏิบัติการของภาควิชาปฐพีวิทยา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ โดยใช้วิธีการย่อย (digest) กากตะกอนโดยใช้กรด จากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectroscopy ซึ่งวิธีการวิเคราะห์จะแสดงไว้ในภาคผนวก ก

3.5 กระบวนการหมักกากตะกอน

นำกากตะกอนจากโรงงานผลิตเชื้อกระดาษจากโรงงานปัญจพล อินคัสทรี จำกัด และ กากตะกอนจากโรงงานฟอกข้อมผ้า พัฒนาผ้าไทย ซึ่งเป็นกากตะกอนที่ผ่านการรีดน้ำออกแล้ว แต่ยังคงมีปริมาณความชื้นสูงอยู่ โดยทำการหมักกากตะกอน 2 แบบคือหมักแบบไม่มีอากาศ (anaerobic digestion) และแบบมีอากาศ (aerobic digestion)

3.5.1 กระบวนการหมักแบบไม่มีอากาศ

นำกากตะกอนจากโรงงานทั้งสองแห่ง มาทำการหมักในถัง 200 ลิตร เติมน้ำให้ท่วมกากตะกอนเพื่อให้อยู่ในสภาพไร้อากาศ ไม่ควรเติมน้ำจนเต็มถัง เนื่องจากเมื่อเกิดการย่อยสลายแล้วจะเกิดการฟองตัว และได้แก๊สมีเทนออกมา ทำให้ถังบวมออกมาจนล้นและจะระเบิดได้ ระยะเวลาในการหมักประมาณ 1 เดือน [37] จากนั้นเทกากตะกอนออกมา นำไปตากบนผ้าใบและสิ่งลมเพื่อลดปริมาณความชื้นและเพื่อให้แก๊สที่เกิดขึ้นระเหยออกไป จากนั้นนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติทางด้านกายภาพและทางด้านเชื้อเพลิง และนำไปทดลองอัดแท่งกับเปลือกมะพร้าวอ่อนใน 3 อัตราส่วน คือ 1:1, 1:2 และ 1:3

3.5.2 กระบวนการหมักแบบมีอากาศ

นำกากตะกอนจากโรงงานทั้งสองแห่ง มาทำการหมักแบบใช้อากาศ วิธีการจะคล้ายกับกระบวนการทำปุ๋ยหมัก (composting) เนื่องจากว่า C/N Ratio ของกากตะกอนทั้งสองมีค่าน้อยมาก ซึ่งทำให้จำนวนคาร์บอนไม่เพียงพอที่จะให้จุลินทรีย์ใช้ในการเจริญเติบโต จึงใช้ฟางข้าวที่มี C/N สูงถึง 150 เป็นตัวเพิ่มคาร์บอนให้กับกองปุ๋ย การหมักทำได้โดยกองกากตะกอนเป็นชั้นๆ รูปสี่เหลี่ยม กว้างประมาณ 2.4 เมตร สูงประมาณ 1 เมตร พื้นที่ที่ใช้ในการกองควรจะเป็นพื้นที่โล่งอากาศถ่ายเทสะดวก ชั้นของปุ๋ยหมักจะสลับกันระหว่างกากตะกอนและฟางข้าว รดน้ำให้ชุ่มและหมักไว้ประมาณ 1 เดือน โดยทำการกลับกองปุ๋ยเมื่ออุณหภูมิถึง 55 องศาเซลเซียส จากนั้นแยกเอาฟางข้าวออกไปและตากในที่ร่มเพื่อลดความชื้น และทำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางด้านเชื้อเพลิง และนำไปทดลองอัดแท่งกับเปลือกมะพร้าวอ่อนใน 3 อัตราส่วน คือ 1:1, 1:2 และ 1:3

3.6 การอัดแท่งกากตะกอน

นำกากตะกอนทั้งที่ยังไม่ได้ผ่านการหมักและผ่านการหมักทั้งแบบที่ไม่มีอากาศและมีอากาศไปทำการอัดแท่งกับเปลือกมะพร้าวอ่อนที่บดละเอียดในหลายๆ อัตราส่วนโดยปริมาตร คือ 1:0, 1:1, 1:2, 1:3, 1:4, 1:5, 1:6 และ 1:7 จากนั้นเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมไปศึกษาการอัดแท่งและคุณสมบัติต่างๆ โดยละเอียด ซึ่งการเลือกอัตราส่วนที่ดีจะพิจารณาจากการขึ้นรูปของแท่งเชื้อเพลิง ความยากง่ายในการอัดเชื้อเพลิงที่อัดแล้วควรจะเป็นเนื้อเดียวกันและเมื่อนำไปตากแห้งจะต้องไม่แตก ดังนั้นต้องทำการเลือก

อัตราส่วนที่เหมาะสม 3 อัตราส่วน แล้วทำการอัดแท่งใหม่โดยละเอียด ในการอัดแท่งจะต้องวิเคราะห์ ความชื้นของส่วนผสมที่เหมาะสมในการอัดแท่ง เวลาที่ใช้ในการอัดแท่ง พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอัดแท่ง และน้ำหนัก/แท่ง เมื่อได้แท่งเชื้อเพลิงออกมาแล้วก็นำไปตากแห้ง จากนั้นก็นำไปทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติด้านเชื้อเพลิง

3.7 การเผาแท่งเชื้อเพลิงที่ไม่ได้ผ่านการหมักให้เป็นถ่าน

นำแท่งเชื้อเพลิงที่อัดจากกากตะกอนสดไปทำการเผาถ่าน ซึ่งเป็นกระบวนการปรับปรุงคุณภาพแท่งเชื้อเพลิงอีกวิธีหนึ่ง ก่อนที่จะนำแท่งเชื้อเพลิงไปเผาถ่านต้องทำการตากแท่งเชื้อเพลิงให้ประมาณ 1 เดือนก่อนการเผา [38] การเผาจะเผาในถังน้ำมัน 200 ลิตร โดยร้อยแท่งเชื้อเพลิงในถาดเพื่อความสะดวกในการนำถ่านขึ้นจากถังน้ำมัน และไม่ให้เกิดอัตราส่วนคละผสมกัน ซึ่งวิธีการเผาเป็นดังนี้

1. เรียงแท่งเชื้อเพลิงลงในถังน้ำมันในแนวตั้งประมาณ 2 ใน 3 ของถัง ประมาณ 60 กิโลกรัม ใส่ฟืนเชื้อเพลิงให้เต็มเตาแล้วปิดฝาถัง
2. จุดไฟหน้าเตาเผาเพื่อเผาแท่งเชื้อเพลิง
3. เมื่อแท่งเชื้อเพลิงติดไฟแล้ว สังเกตได้จากควันจากปล่องเร่งขึ้นมากเรื่อยๆ ให้ปิดปล่องเร่งปล่อยให้การเผาไหม้สมบูรณ์ สังเกตจากควันจะจางลงและอุณหภูมิเตาไม่เพิ่มขึ้น
4. ปล่อยให้เย็นใช้เวลาประมาณ 12 ชั่วโมงจึงเปิดเตา

จากนั้นนำถ่านแท่งเชื้อเพลิงที่ได้ไปทำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางด้านเชื้อเพลิงเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับกับแท่งเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ

3.8 การวิเคราะห์คุณสมบัติแท่งเชื้อเพลิงและถ่าน

ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางด้านกายภาพและทางด้านเชื้อเพลิงของแท่งเชื้อเพลิงและถ่านจากแท่งเชื้อเพลิง โดยคุณสมบัติทางด้านกายภาพจะทำการวิเคราะห์หาค่าดัชนีการแตกร่วนด้วยวิธี drop shatter testing และการทดสอบ strength ทั้งในแนวนอนและแนวตั้ง โดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine ซึ่งวิธีการวิเคราะห์แสดงไว้ในภาคผนวก ก

3.9 อุปกรณ์ในการวิจัย

3.9.1 เครื่องอัดเชื้อเพลิงชีว

มอเตอร์ขับ	1 เฟส กำลัง 5 แรงม้า
ความเร็วรอบ	1,470 รอบ/นาที
แรงดันไฟฟ้า	220 โวลต์ 50 Hz
อัตราการผลิต	220 กิโลกรัม/ชั่วโมง

ขนาดกระบอกอัด ยาว 27.05 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางด้านเข้า 5.5 เซนติเมตรและเส้นผ่านศูนย์กลางด้านออก 5 เซนติเมตร

3.9.2 กระบือ่งลอนเล็กสำหรับรองเชื้อเพลิง

3.9.3 ถังซีเมนต์สำหรับหมักกากตะกอน

3.9.4 เครื่องบดวัตถุดิบ

3.9.5 เครื่องผสมวัตถุดิบ

3.9.6 พลับ ถู่มือ ถูพลาสติก

3.9.7 เครื่องชั่งอย่างหยาบ และเครื่องชั่งละเอียด

3.10 สถานที่ทำการทดลอง

3.10.1 ศูนย์ทดลองวิชาการด้านพลังงานธรรมชาติและเชื้อเพลิงพลังงาน จังหวัดปทุมธานี ส่วนค้นคว้าและพัฒนาพลังงาน สำนักศึกษาค้นคว้าและพัฒนาพลังงาน กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน

3.10.2 คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

บทที่ 4 ผลการทดลอง

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาศักยภาพการนำกากตะกอนน้ำเสียจาก 2 โรงงาน คือกากตะกอนจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษและกากตะกอนจากโรงงานฟอกย้อม มาใช้ผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง โดยจะผสมเปลือกมะพร้าวอ่อนลงไปด้วยเพื่อเป็นตัวเพิ่มความร้อน จากนั้นจะทำการทดลองอัดแท่งหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมในการอัดแท่ง และทำการอัดแท่งกากตะกอนที่ยังไม่ได้ทำการปรับปรุงเพื่อใช้เป็นตัวเปรียบเทียบ ทำการทดลองปรับปรุงคุณภาพกากตะกอนเพื่อลดกลิ่นและเชื้อโรครก่อนนำมาอัดแท่ง และการนำแท่งเชื้อเพลิงที่อัดแท่งจากตะกอนที่ไม่ได้ทำการหมักไปปรับปรุงโดยการเผาถ่าน หลังจากนั้นนำแท่งเชื้อเพลิงทั้ง 3 ส่วนไปทำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงและผลการศึกษาประกอบไปด้วย

- 1) ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของกากตะกอนและเปลือกมะพร้าวอ่อน
- 2) ผลการทดลองหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมในการอัดแท่งตะกอนกับเปลือกมะพร้าวอ่อน
- 3) ผลการอัดแท่งและการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเชื้อเพลิงของตะกอนที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุง
- 4) ผลการอัดแท่งและการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเชื้อเพลิงของตะกอนผ่านการหมักแบบไม่มีอากาศ
- 5) ผลการอัดแท่งและการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเชื้อเพลิงของตะกอนที่ผ่านการหมักแบบมีอากาศ
- 6) ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเชื้อเพลิงของถ่านแท่งเชื้อเพลิง
- 7) ผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของแท่งเชื้อเพลิงและถ่านแท่งเชื้อเพลิงกับถ่านไม้

4.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้น

4.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพของกากตะกอนและเปลือกมะพร้าวอ่อน

ในการศึกษาต้องทำการวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นด้านกายภาพและทางด้านการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงของกากตะกอนทั้งสองโรงงานและเปลือกมะพร้าวอ่อน เพื่อที่จะนำข้อมูลที่ได้มาประเมินศักยภาพการนำมาใช้ผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง จากผลการทดลองจะเห็นว่ากากตะกอนโรงงานผลิตเยื่อกระดาษมีความเป็นไปได้เพราะค่าความร้อนเท่ากับ 2,817 แคลอรี/กรัม ส่วนโรงงานฟอกย้อมมีค่าความร้อนเท่ากับ 1,774 แคลอรี/กรัม แต่อย่างไรก็ตามสามารถที่จะนำเปลือกมะพร้าวอ่อนมาใช้เป็นตัวเพิ่มความร้อนได้ เมื่อพิจารณาโดยรวมจากคุณสมบัติทั้งหมดแล้วจะนำมาใช้ผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งได้ เช่น ปริมาณสารระเหยเพียง 20-60 เปอร์เซ็นต์ และกำมะถัน 0.3-0.6 เปอร์เซ็นต์ สามารถนำ

มาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ดี นอกจากนี้แล้วในส่วนของคุณสมบัติของปริมาณตะกอนที่ออกมาจากระบบบำบัดน้ำเสียในแต่ละวันมีปริมาณมากพอที่นำมาใช้อัดแท่งเพื่อนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้และเปลือกมะพร้าวอ่อนก็เช่นเดียวกันเป็นเศษวัสดุที่ไม่มีมูลค่าและเหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติกายภาพของกากตะกอนสดและเปลือกมะพร้าวอ่อน

รายการ	คุณสมบัติ		
	โรงงานผลิตเยื่อกระดาษ	โรงงานฟอก-ย้อมสิ่งทอ	เปลือกมะพร้าวอ่อน
ความชื้น(% wet)	80.59	80.71	87
ความหนาแน่น(kg/l)	0.69	0.70	0.25
สีและกลิ่น	เทาดำค่อนข้างเหม็น	ดำกลิ่นฉุน	-
ลักษณะทั่วไป	เกาะตัวเป็นแผ่น	เหมือนดินเนื้อละเอียด	ขุขขนาดเล็ก

คุณสมบัติทางกายภาพของตะกอนสด เป็นสารอินทรีย์ที่ยังไม่เสถียรทำให้มีปัญหาเรื่องกลิ่นเหม็นฉุน และมีเชื้อโรคอยู่เป็นจำนวนมาก ถ้าจะนำมาใช้ผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งจะไม่เหมาะสม เมื่อนำไปผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งถ้าได้รับความชื้นก็จะเกิดการย่อยสลายได้เพราะตะกอนยังไม่มีความคงตัว ดังนั้นจึงต้องศึกษาวิธีการปรับปรุงคุณภาพกากตะกอนให้มีความเหมาะสมในการนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง

4.1.2 คุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของกากตะกอนและเปลือกมะพร้าวอ่อน

ก่อนที่จะนำกากตะกอนและเปลือกมะพร้าวอ่อนมาใช้ในการผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง และสิ่งที่จะต้องพิจารณาอันดับแรกคือคุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงได้แก่ ปริมาณความชื้น(moiture content) ค่าความร้อน (heating value) เถ้า(ash) สารระเหย(volatiles) ฟิกซ์คาร์บอน(fixed carbon) และซัลเฟอร์(sulphur) ซึ่งค่าต่างๆเหล่านี้ต้องมีในปริมาณที่เหมาะสมในการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง เพื่อว่าสามารถที่จะนำไปใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติและไม่ให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม การวิเคราะห์คุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของกากตะกอนโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ โรงงานฟอกย้อม และเปลือกมะพร้าวอ่อนจะทำให้สามารถพิจารณาศักยภาพเบื้องต้นว่ามีความเหมาะสมในการนำมาใช้ผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งมากน้อยเพียงใด โดยจะพิจารณาจากคุณสมบัติที่กล่าวมาทั้งหมด ซึ่งคุณสมบัติของเชื้อเพลิงที่ดีต้องมีความร้อนที่ไม่น้อยจนเกินไป ความชื้นต้องน้อยกว่า 15 เปอร์เซ็นต์ เถ้าต้องมีปริมาณไม่เกิน 50 เปอร์เซ็นต์ สารระเหยไม่เกิน 70 เปอร์เซ็นต์ และซัลเฟอร์ต้องมีปริมาณน้อยที่สุด [4]

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของกากตะกอนและเปลือกมะพร้าวอ่อน

รายการ	คุณสมบัติ		
	โรงงานผลิตเชื้อกระดาษ	โรงงานฟอกข้อม	เปลือกมะพร้าวอ่อน
ความชื้น,dry wt.(%)	7.11	29.5	9.5
ค่าความร้อน(cal/g)	2,817	1,774	4,180
เถ้า(% ,ash)	27.64	43.24	3.86
สารระเหย(%)	58.2	23.24	61.27
ฟิสิกส์คาร์บอน(%)	6.73	4.02	21.10
ซัลเฟอร์(%)	0.36	0.61	0.07

ที่มา : วิเคราะห์ที่ห้องปฏิบัติการกองวิเคราะห์เชื้อเพลิงธรรมชาติ กรมทรัพยากรธรณี

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของเปลือกมะพร้าวอ่อนปรากฏว่ามีคุณสมบัติที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงทั้งปริมาณค่าความร้อนและคุณสมบัติต่างๆ กล่าวคือมีค่าความร้อนเท่ากับ 4,180 แคลอรี/กรัม และปริมาณเถ้าเพียง 3.86 เปอร์เซ็นต์ ส่วนกากตะกอนโรงงานผลิตเชื้อกระดาษมีค่าความร้อนเท่ากับ 2,817 แคลอรีต่อกรัม ซึ่งเป็นปริมาณที่ไม่มากแต่ก็ไม่น้อยจนเกินไป ส่วนปริมาณเถ้าค่อนข้างสูงเท่ากับ 27.64 เปอร์เซ็นต์ ส่วนสารระเหย และซัลเฟอร์อยู่ในปริมาณที่เหมาะสม ส่วนค่าความร้อนของกากตะกอนจากโรงงานฟอกข้อมเท่ากับ 1,774 แคลอรีต่อกรัม ซึ่งเป็นปริมาณค่าความร้อนที่ค่อนข้างต่ำ มีปริมาณเถ้าสูง สารระเหยและซัลเฟอร์อยู่ในค่าที่เหมาะสม

จากผลการวิเคราะห์จะเห็นว่าคุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของกากตะกอนโรงงานผลิตเชื้อกระดาษดีกว่ากากตะกอนโรงงานฟอกข้อม เพราะตะกอนโรงงานฟอกข้อมยังมีคุณสมบัติบางอย่างที่ไม่เหมาะสมในการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงคือค่าความร้อนต่ำและปริมาณเถ้าสูง อย่างไรก็ตามสามารถที่จะใช้เปลือกมะพร้าวอ่อนเป็นตัวเพิ่มปริมาณค่าความร้อนได้เพราะเปลือกมะพร้าวอ่อนมีค่าความร้อนสูง และสามารถลดปริมาณเถ้าได้ โดยการเพิ่มอัตราส่วนผสมของเปลือกมะพร้าวอ่อนให้มากขึ้น

4.1.3 ปริมาณโลหะหนักที่มีอยู่ในกากตะกอนน้ำเสีย

เนื่องจากว่าในกระบวนการผลิตของโรงงานผลิตเยื่อกระดาษและโรงงานฟอกย้อมจะต้องใช้สารเคมีอยู่ในส่วนของการผลิตเป็นจำนวนมาก ดังนั้นจะต้องทำการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักที่มีอยู่ในกากตะกอนก่อนที่จะนำมาผลิตเพลิ่งอัดแท่ง เพื่อไม่ให้เกิดอันตรายเมื่อนำไปใช้งานและปริมาณโลหะหนักที่มีอยู่ในกากตะกอนจะต้องมีค่าไม่เกินค่ามาตรฐานที่ประกาศใช้และควบคุมอยู่ในปัจจุบัน

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในกากตะกอนสดเปรียบเทียบกับขยะอินทรีย์และค่ามาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์

ชนิดโลหะหนัก (mg/kg)	โรงงานผลิตเยื่อ กระดาษ	โรงงานฟอกย้อม	ขยะอินทรีย์	ค่ามาตรฐานปุ๋ย อินทรีย์
ตะกั่ว (Pb)	23.4	25.10	0.03	ไม่เกิน 150.0
แคดเมียม(Cd)	2.60	2.53	5.46	ไม่เกิน 3.2
ปรอท(Hg)	0.0026	0.0025	1.10	ไม่เกิน 2.5
สารหนู (As)	0.0029	0.0033	น้อยกว่า 1	ไม่เกิน 8.7

ที่มา : การวิเคราะห์ทางห้องปฏิบัติการ โดยสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักเริ่มต้นในกากตะกอนสดของโรงงานผลิตเยื่อกระดาษและโรงงานฟอกย้อมโดยเปรียบเทียบกับปริมาณโลหะหนักที่อยู่ในขยะอินทรีย์ทั่วไป พบว่าแคดเมียม ปรอท และสารหนูในกากตะกอนของทั้งสองโรงงานมีปริมาณต่ำกว่าที่พบในขยะอินทรีย์และเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานโลหะหนักในปุ๋ยอินทรีย์พบว่าปริมาณต่ำกว่าค่ามาตรฐาน ส่วนตะกั่วที่ตรวจพบในกากตะกอนมีปริมาณมากกว่าที่พบในขยะอินทรีย์แต่ต่ำกว่าค่ามาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ ดังนั้นจากผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักของทั้งสองโรงงานจะเห็นว่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ทุกตัว แต่อย่างไรก็ตามก็ไม่ใช่ค่ามาตรฐานที่กำหนดปริมาณโลหะหนักในตะกอนที่นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง แต่ในทางปฏิบัติก็สามารถที่จะนำมาใช้เป็นมาตรฐานเบื้องต้นได้

นอกจากจะใช้มาตรฐานปริมาณโลหะหนักของปุ๋ยอินทรีย์แล้ว ในส่วนของประเทศไทยนั้นมาตรฐานที่ใช้ในการกำหนดปริมาณของโลหะหนักในกากตะกอนเพื่อการกำจัดด้วยวิธีต่างๆยังไม่มีกำหนดไว้ ดังนั้นจะใช้มาตรฐานสากลที่ประเทศต่างใช้กันอยู่โดยทั่วไปในการวิเคราะห์จะใช้ค่ามาตรฐานของออสเตรเลีย [39]

ตารางที่ 4.4 การจัดการโลหะหนักที่มีในกากตะกอนตามปริมาณที่กำหนด

โลหะหนัก (mg/kg)	คุณภาพกากตะกอน 4 ระดับ			
	A	B	C	D
Pb	150	150	420	500
Cd	3	5	20	32
Hg	1	4	15	19
As	20	20	20	30

ที่มา : NSWENA , 1995(AUS)

มาตรฐานที่ใช้เป็นมาตรฐานการกำหนดคุณภาพกากตะกอนที่สามารถนำมาใช้ทางการเกษตรของออสเตรเลีย [39] เป็นปริมาณโลหะหนักสูงสุดที่ยอมให้มีในกากตะกอนที่สามารถนำไปทิ้งในสถานที่ต่างๆ โดยแบ่งคุณภาพกากตะกอนเป็น 4 ระดับ คือ A, B, C และ D ซึ่งความหมายของ A, B, C และ D อธิบายได้ดังนี้

A = ใส่น้ำผักแปลงผักในบ้านได้

B = ทิ้งในที่ต่างๆ ได้

C,D = ทิ้งในป่าได้

>D = ฝังกลบ

ตารางที่ 4.5 ปริมาณโลหะหนักในกากตะกอนสดเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน

รายการ	หน่วย	โรงงานผลิตเชื้อกระดาษ	โรงงานฟอกย้อม	คุณภาพกากตะกอน ระดับ A
ตะกั่ว	mg/kg	23.4	25.10	150
แคดเมียม	mg/kg	2.60	2.53	3
ปรอท	mg/kg	0.0026	0.0025	1
อาร์เซนิก	mg/kg	0.0029	0.0033	20

ที่มา : โครงการพัฒนาวิชาการดิน ปุ๋ย และสิ่งแวดล้อม ภาควิชาปฐพีวิทยา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ปริมาณโลหะหนักที่วิเคราะห์ได้จากตะกอนทั้งสองโรงงานจะใช้คุณภาพที่มีปริมาณโลหะหนักอยู่ในระดับต่ำสุดคือ A ผลการวิเคราะห์โลหะหนักในกากตะกอนที่ยังไม่ได้ผ่านการปรับปรุง จะเห็นว่าอยู่

ในระดับที่ไม่เกินคั้งนี้ A ทั้งสี่ตัว และสามารถนำไปใส่แปลงผักในบ้านได้ อย่างไรก็ตามในประเทศไทยนั้นยังไม่มีมาตรการด้านความปลอดภัยในการนำกากตะกอน จึงควรหลีกเลี่ยงที่จะนำกากตะกอนมาใช้ในการปลูกผักเพื่อบริโภค กรณีที่นำไปปลูกพืชไม้ประดับจะเป็นการปลอดภัยกว่า

4.1.4 ศึกษาส่วนผสมในการอัดแท่งและการทดลองอัดแท่งตะกอน

ทดลองทำการอัดแท่งตะกอนนำเสียบกับเปลือกมะพร้าวอ่อน โดยวิธีการอัดเย็น ใช้เครื่องอัดแบบเกลียว ณ ห้องปฏิบัติการของศูนย์ทดลองทางวิชาการด้านพลังงานธรรมชาติและเชื้อเพลิงพลังงาน จังหวัดปทุมธานี อัตราส่วนที่ใช้ในการอัดแท่งระหว่างตะกอนกับเปลือกมะพร้าวอ่อน คือ อัตราส่วนโดยปริมาตร 8 อัตราส่วนดังนี้ 1:0, 1:1, 1:2, 1:3, 1:4, 1:5, 1:6 และ 1:7 ความยาวของแท่งเชื้อเพลิง 50 เซนติเมตรและเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร

การอัดแท่งสามารถทำได้โดยไม่ต้องใช้ตัวประสาน(binder) เนื่องจากว่าตะกอนจะมีคุณสมบัติเป็นตัวประสานในตัวเองมีความเหนียวและความชื้นในปริมาณที่เหมาะสมอยู่แล้ว นอกจากนี้ลักษณะสีตะกอนและเนื้อตะกอนคล้ายกับเนื้อดิน เมื่อนำมาบีบจะจับตัวกันเป็นก้อนจึงมีคุณสมบัติเป็นตัวประสานได้ [3] ดังนั้นจะช่วยลดขั้นตอนที่ยุ่งยากในการอัดแท่งเป็นอย่างมาก ในขั้นตอนการอัดแท่งจะพิจารณาความชื้นของส่วนผสมระหว่างตะกอนและเปลือกมะพร้าวอ่อนเพราะจะเป็นตัวควบคุมเวลาในการอัดแท่ง ความชื้นจะต้องไม่มากหรือน้อยจนเกินไป ถ้าน้อยเกินไปจะทำให้อัดออกมาได้ยากจะต้องเติมน้ำให้ได้ความชื้นที่เหมาะสมหรือถ้าความชื้นมากเกินไปจะทำให้เกลียวของเครื่องอัดคายส่วนผสมไม่สามารถอัดออกมาเป็นแท่งได้ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับลักษณะของตะกอนและเศษวัสดุที่ใช้ผสมลงไป ถ้ามีความชื้นและความเหนียวอยู่ในตัวแล้ว ทำให้ไม่ต้องเติมน้ำลงไปในส่วนผสมมากก็สามารถอัดออกมาได้ดี

4.1.4.1 การทดลองอัดแท่งกากตะกอนสดโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ

ตารางที่ 4.6 ผลการอัดแท่งระหว่างตะกอนสดกับเปลือกมะพร้าวอ่อน

อัตราส่วน โดยปริมาตร	โรงงานผลิตเยื่อกระดาษ	โรงงานฟอกย้อม
1:0	สามารถอัดแท่งได้ ผิวเรียบดี	สามารถอัดแท่งได้ ผิวเรียบดี
1:1	สามารถอัดแท่งได้ ผิวเรียบดี	สามารถอัดแท่งได้ ผิวเรียบดี
1:2	สามารถอัดแท่งได้ ผิวเรียบดี	สามารถอัดแท่งได้ ผิวเรียบดี
1:3	อัดแท่งได้ ผิวขรุขระเล็กน้อย	อัดแท่งได้ ผิวเรียบดี
1:4	อัดแท่งได้ ผิวขรุขระเล็กน้อย	อัดแท่งได้ ผิวเรียบดี
1:5	อัดแท่งได้ ผิวขรุขระเล็กน้อย	อัดแท่งได้ ผิวขรุขระเล็กน้อย
1:6	อัดแท่งได้ ผิวขรุขระ แตกหักง่าย	อัดแท่งได้ ผิวขรุขระเล็กน้อย
1:7	อัดแท่งได้ ผิวขรุขระ แตกหักง่าย	อัดแท่งได้ ผิวขรุขระ แตกหักง่าย

อัตราส่วนที่ได้ทำการทดลองอัดแท่งสามารถอัดแท่งตะกอนกับเปลือกมะพร้าวอ่อนได้ทุกอัตราส่วน เพราะว่าเปลือกมะพร้าวอ่อนที่ใช้เป็นเศษวัสดุเพิ่มค่าความร้อนนั้นมีลักษณะเป็นขุยขนาดเล็กและเป็นเนื้อเดียวกับกากตะกอน จึงทำให้อัดออกมาได้ง่าย แต่ว่าผู้ทำการวิจัยได้เลือกอัตราส่วนที่นำมาศึกษาเพียง 3 อัตราส่วนเท่านั้นเนื่องจากว่าในการอัดแท่งจะต้องการอัตราส่วนของกากตะกอนให้เหมาะสม ปริมาณตะกอนที่ผสมลงไปจะต้องไม่น้อยจนเกินไปเพราะเราต้องการใช้ประโยชน์จากตะกอนให้ได้มากที่สุดและจำนวนมากที่สุด

อย่างไรก็ตามจำเป็นต้องเพิ่มขุยมะพร้าวอ่อนเข้าไปเพิ่มค่าความร้อนให้กับแท่งเชื้อเพลิงเพื่อให้เหมาะสมในการนำไปใช้งาน แต่ถ้ามากเกินไปก็จะทำให้แท่งเชื้อเพลิงไม่แข็งแรงเปราะและแตกง่ายได้ ดังนั้นผู้ทำการวิจัยจะทำการทดลอง 3 อัตราส่วนและจะเลือกอัตราส่วนที่ดีที่สุดเพื่อศึกษาการนำไปใช้งานต่อไป

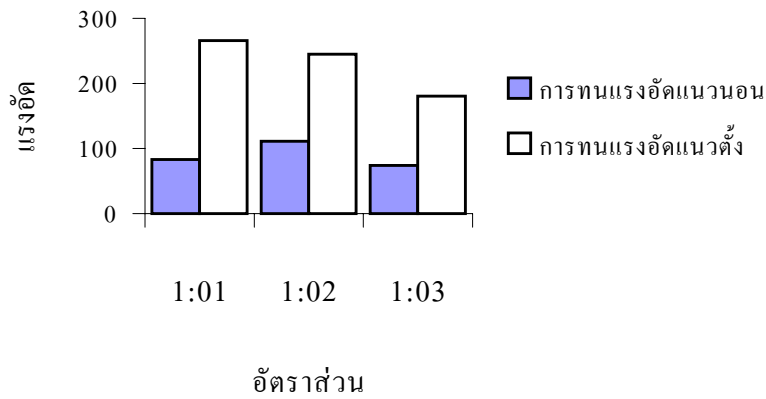
ตารางที่ 4.7 ผลการอัดแท่งระหว่างตะกอนสด โรงงานผลิตเชื้อกระดาษกับเปลือกมะพร้าวอ่อน
ที่ 3 อัตราส่วน

รายการ	1:1	1:2	1:3
ความชื้นผสม(%)	71.78	77.84	79.12
เวลา/1แท่ง(วินาที)	26	32.71	34.72
น้ำหนัก/1 แท่ง(kg)	1	0.90	0.85
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอัดแท่ง(kwh/แท่ง)	0.00805	0.0107	0.01122
การทนแรงอัดแวนอน (kg)	83.3	111.1	74.1
การทนแรงอัดแวนตั้ง (kg)	265.8	244.8	180.4
ดัชนีการแตกร่วน	0.999	0.998	0.998

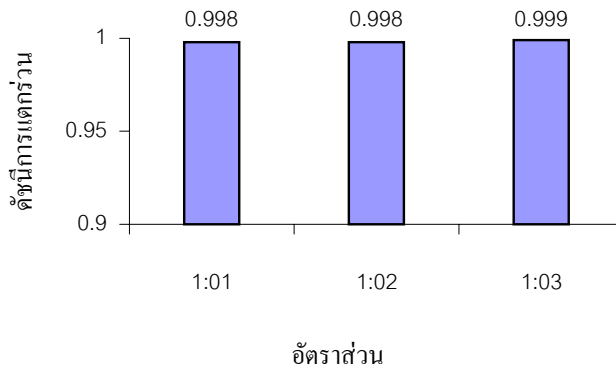
ผลการอัดแท่งกากตะกอนสดของโรงงานผลิตเชื้อกระดาษทั้ง 3 อัตราส่วน คืออัดออกมาได้ดีและเร็ว ความชื้นที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 70-80 เปอร์เซ็นต์ ใช้เวลาอัดแท่งน้อย ทั้ง 3 อัตราส่วนอัดออกมาใช้เวลาใกล้เคียงกันตัวที่จะเป็นตัวแปรคือปริมาณความชื้นของส่วนผสม ถ้าความชื้นเหมาะสมก็อัดออกมาได้ดีและเร็ว และอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อเวลาในการอัดแท่งก็คือความสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกันของส่วนผสม ถ้าส่วนผสมมีความสม่ำเสมอจะทำให้สามารถอัดได้ง่ายขึ้น โดยส่วนผสมจะถูกดันออกมาจากกระบอกรีดได้อย่างต่อเนื่อง [3] หนาแน่นของตะกอนเท่ากับ 0.69 กิโลกรัม/ลิตร และเปลือกมะพร้าวอ่อนเท่ากับ 0.25 กิโลกรัม/ลิตร น้ำหนักโดยเฉลี่ยของแท่งเชื้อเพลิงประมาณ 1 กิโลกรัม แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนขุยมะพร้าวที่มากขึ้นน้ำหนักจะลดลงเพราะขุยมะพร้าวอ่อนจะมีน้ำหนักเบา จากผลการทดลองจะเห็นว่าน้ำหนักของแท่งเชื้อเพลิงจะแปรผกผันกับปริมาณเปลือกมะพร้าวอ่อน เนื่องจากเปลือกมะพร้าวอ่อนมีความหนาแน่นน้อยกว่ากากตะกอน ซึ่งความหนาแน่นของเชื้อเพลิงอัดแท่งมีผลต่อการนำมาใช้งาน โดยเชื้อเพลิงอัดแท่งที่มีความหนาแน่นสูงจะทำให้มีความสะดวก ประหยัดเนื้อที่ในการเก็บและประหยัดแรงงานในการขนย้ายเพราะในปริมาตรที่เท่ากันจะทำให้ได้ความร้อนและระยะเวลาในการเผาไหม้สูงกว่า จึงไม่จำเป็นต้องคอยเติมเชื้อเพลิงบ่อยๆ แต่จะมีปัญหาในการจุดติดไฟ ซึ่งถ้าแท่งเชื้อเพลิงมีความหนาแน่นสูงจะจุดติดไฟได้ยาก [6] และถ้าแท่งเชื้อเพลิงมีความหนาแน่นต่ำจะทำให้มีการเผาไหม้อย่างรวดเร็วจนไม่เหมาะกับการใช้งาน [41]

นอกจากนี้พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอัดแท่งอัตราส่วน 1:1 น้อยที่สุด เนื่องจากการอัดแท่งอัดได้ง่ายและใช้เวลาน้อย ส่วน 1:2 และ 1:3 ใช้พลังงานไฟฟ้าใกล้เคียงกัน เวลาที่ใช้ในการอัด 1 แท่ง ก็ใกล้เคียงกันด้วย ส่วนผลการทดสอบความแข็งแรงของแท่งเชื้อเพลิงคือการทดสอบแรงอัดและการแตกร่วนแสดงผลดังรูปที่ 4.1 และ 4.2

คุณสมบัติทางกายภาพหลังจากตากแห้ง 1 เดือน ก็จะทดสอบความแข็งแรงของแท่งเชื้อเพลิง ผลการทดสอบการทนแรงอัดในแนวนอนอัตราส่วนที่แข็งแรงที่สุดคือ 1:2 ส่วนแรงอัดในแนวตั้งแข็งแรงที่สุดคือ 1:1 โดยรวมแล้วแท่งเชื้อเพลิงทั้ง 3 อัตราส่วนสามารถทนแรงอัดแนวนอนและแนวตั้งได้ดี เนื่องจากว่ากากตะกอนจะมีความเหนียวอยู่ในตัว ทำหน้าที่เป็นตัวประสาน (binder) เนื่องจากเป็นเนื้อเยื่อพืชที่มีโครงสร้างผนังเซลล์ เป็นสารประเภทลิกโน-เซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน มีความยึดหยุ่นสูง [25] จึงทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีความแข็งแรงทนแรงกดทับได้ดี



รูปที่ 4.1 การทนแรงอัดแนวนอนและแนวตั้งของแท่งเชื้อเพลิงตะกอนสดโรงงานผลิตเชื้อกระดาษ



รูปที่ 4.2 ดัชนีการแตก่วนของแท่งเชื้อเพลิงตะกอนสดโรงงานผลิตเชื้อกระดาษ

ดัชนีการแตก่วนใกล้เคียง 1 ทุกอัตราส่วนแสดงว่าแท่งเชื้อเพลิงมีการแตก่วนน้อยมาก เนื่องจากตะกอนจะมีคุณสมบัติเป็นตัวประสานที่ดีดังที่กล่าวมา นอกจากจะทำให้แท่งเชื้อเพลิงทนแรงกดทับได้ดีทั้งแนวนอนและแนวตั้งแล้ว ยังมีความแข็งแรง แดกหักได้ยาก การขนส่งแท่งเชื้อเพลิงไปในระยะทางไกลจึงสามารถทำได้

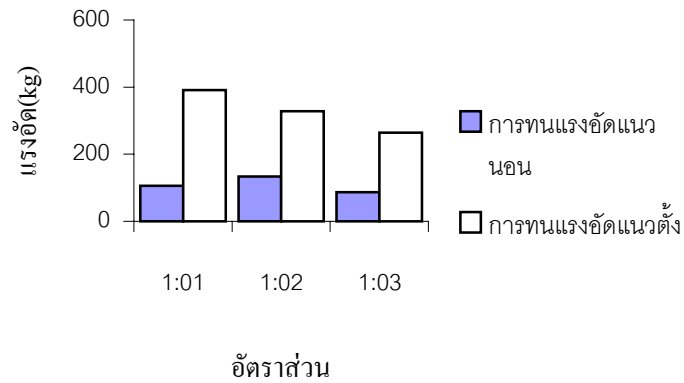
4.1.4.2 การทดลองอัดแท่งกากตะกอนสดโรงงานฟอกย้อม

ตารางที่ 4.8 ผลการอัดแท่งระหว่างตะกอนสด โรงงานฟอกย้อมกับเปลือกมะพร้าวอ่อน 3 อัตราส่วน

รายการ	1:1	1:2	1:3
ความชื้นผสม(%)	65.69	73.22	64.29
เวลา/1แท่ง(วินาที)	51.53	43.35	58.90
น้ำหนัก/1 แท่ง(kg)	1	0.98	0.95
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอัด(kw.hr/แท่ง)	0.02	0.01808	0.0297
การทนแรงอัดแวนอน(kg)	106.3	133.7	87
การทนแรงอัดแวนตั้ง(kg)	391.4	328.6	264.2
ดัชนีการแตกร่วน	0.998	0.998	0.996

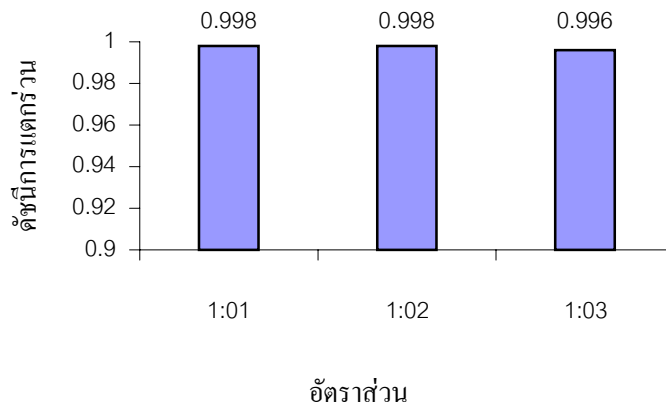
การอัดแท่งตะกอนโรงงานฟอกย้อมค่อนข้างง่ายเพราะเนื้อตะกอนมีลักษณะคล้ายดินเมื่อผสมกันกับขุยมะพร้าวอ่อนสามารถอัดออกมาได้ดีและเร็ว ช่วงความชื้นที่อัดได้ก็อยู่ในช่วงกว้างประมาณ 60-80 เปอร์เซ็นต์ เวลาที่ใช้ในการอัดต่อ 1 แท่งไม่เกิน 1 นาที แม้ว่าจะช้ากว่าตะกอนโรงงานกระดาษแต่จะมีข้อดีก็คือช่วงความชื้นที่อัดได้จะกว้างทำให้สะดวกในการผสม การอัดแท่งกากตะกอนสดของโรงงานฟอกย้อมทั้ง 3 อัตราส่วนดังตารางที่ 4.8

ผลการอัดแท่งคืออัดออกมาได้ดีและเร็ว โดยถ้าเพิ่มความชื้นให้กับส่วนผสมจะทำให้อัดออกมาเร็วขึ้น ความสามารถในการขึ้นรูปดี ผิวเรียบ ผลการอัดแท่งกากตะกอนสดของโรงงานผลิตเยื่อกระดาษทั้ง 3 อัตราส่วน ความหนาแน่นของตะกอนเท่ากับ 0.70 กิโลกรัม/ลิตร และขุยมะพร้าวเท่ากับ 0.25 กิโลกรัม/ลิตร น้ำหนักโดยเฉลี่ยของแท่งเชื้อเพลิงประมาณ 1 กิโลกรัม แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนขุยมะพร้าวที่มากขึ้นน้ำหนักจะลดลงเพราะขุยมะพร้าวอ่อนจะมีน้ำหนักเบา นอกจากนี้พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอัดแท่งอัตราส่วน 1:2 น้อยที่สุด เนื่องจากการอัดแท่งอัดได้ง่ายและใช้เวลาน้อย ส่วน 1:1 และ 1:3 ใช้พลังงานไฟฟ้าใกล้เคียงกัน เวลาที่ใช้ในการอัด 1 แท่ง ก็ใกล้เคียงกันด้วย ส่วนผลการทดสอบความแข็งแรงของแท่งเชื้อเพลิงโดยการทดสอบการทนแรงอัดและการแตกร่วนแสดงผลดังรูปที่ 4.3 และ 4.4



รูปที่ 4.3 การทนแรงอัดแนวนอนและแนวตั้งของแท่งเชื้อเพลิงตะกอนสดโรงงานฟอกข้อม

ผลการทดสอบการทนแรงอัดในแนวนอน อัตราส่วนที่แข็งแรงที่สุดคือ 1:1 ส่วนแรงอัดในแนวตั้งที่แข็งแรงที่สุดคือ 1:2 โดยรวมแล้วแท่งเชื้อเพลิงจากกากตะกอนโรงงานฟอกข้อมกับเปลือกมะพร้าวอ่อนทั้ง 3 อัตราส่วนสามารถทนแรงอัดแนวนอนและแนวตั้งได้ดี เนื่องจากว่ากากตะกอนจะมีความเหนียวอยู่ในตัวและเนื้อละเอียดเหมือนเนื้อดิน จึงทำหน้าที่เป็นตัวประสาน (binder) ให้กับแท่งเชื้อเพลิง จึงทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีความแข็งแรง และทนแรงกดทับได้ดี



รูปที่ 4.4 ดัชนีการแปรปรวนของแท่งเชื้อเพลิงตะกอนสดโรงงานฟอกข้อม

ผลการทดสอบการแปรปรวนของแท่งเชื้อเพลิงจากกากตะกอนโรงงานฟอกข้อมกับเปลือกมะพร้าวอ่อนพบว่าทั้ง 3 อัตราส่วนมีการแปรปรวนใกล้เคียงกัน เนื่องจากตะกอนเป็นตัวประสานที่ดี (binder) จึงทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีความแข็งแรงและการแปรปรวนน้อยมากหรือแทบจะไม่แตกเลยคือใกล้เคียง 1 มากจึงสามารถขนส่งได้โดยไม่เกิดปัญหาเรื่องการแตกหัก

4.2 การปรับปรุงคุณภาพกากตะกอนโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ

4.2.1 การหมักกากตะกอนโรงงานผลิตเยื่อกระดาษแบบไม่มีอากาศ

การปรับปรุงคุณภาพตะกอนก่อนที่จะทำการอัดแห้งดำเนินการโดยการหมักเป็นการกำจัดกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์และเชื้อโรคต่างๆ ที่มีอยู่ในกากตะกอน โดยได้นำกากตะกอนไปทำการหมักแบบไม่มีอากาศ (Anaerobic digestion) เป็นระยะเวลาประมาณ 1 เดือน โดยได้ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ ก่อนและหลังหมักกากตะกอน

เมื่อตะกอนได้ผ่านการหมักแล้วจะมีลักษณะขุ่นมากขึ้น เป็นผลมาจากการย่อยสลายสารอินทรีย์บางส่วนไป แต่อย่างไรก็ตามสารอินทรีย์อาจจะถูกย่อยสลายไปไม่มากนักเพราะลักษณะตะกอนของโรงงานจะเป็นสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยากเพราะองค์ประกอบของเนื้อไม้ที่ใช้ผลิตเยื่อกระดาษจะเป็นพวกเซลลูโลส ลิกนิน ซึ่งสารเหล่านี้เป็นสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยาก [25] ผลการทดสอบจะเห็นว่าเมื่อทำการหมักแล้วในช่วงที่ตะกอนออกมายังคงมีกลิ่นเหม็นอยู่เป็นเพราะว่าเกิดแก๊สขึ้นภายในถังหมัก แต่ว่าถ้าตากไว้ให้แก๊สระเหยออกไปและตะกอนมีความชื้นลดลงกลิ่นก็จะลดลงเช่นเดียวกัน

ตารางที่ 4.9 คุณสมบัติกายภาพของตะกอน โรงงานผลิตเยื่อกระดาษหลังหมักแบบไม่มีอากาศ

คุณสมบัติทางกายภาพ	ก่อนหมัก	หลังหมัก
ความชื้น(%)	80.59	83.38
กลิ่น	กลิ่นเหม็นฉุน	กลิ่นฉุนเล็กน้อย
เนื้อตะกอน	เกาะกันเป็นแผ่น	ยุ่ย
สีตะกอน	เทาดำ	ดำ
pH	6.96	6.83

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางด้านกายภาพของตะกอนที่ผ่านการหมักแบบไม่มีอากาศพบว่าคุณสมบัติทางกายภาพดีขึ้นมาก แต่ช่วงที่เทออกมากลิ่นจะแรง เนื่องจากมีแก๊สที่เกิดจากกระบวนการหมักเช่น แอมโมเนีย และ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ เป็นต้น แต่เมื่อนำกากตะกอนไปตากทิ้งไว้เพื่อลดความชื้น จะทำให้กลิ่นลดลง นอกจากนี้ลักษณะสีตะกอนและเนื้อตะกอนคล้ายกับเนื้อดิน เมื่อนำมาบีบจะจับตัวกันเป็นก้อนจึงมีคุณสมบัติเป็นตัวประสานได้ [3] จึงเหมาะสมที่จะนำไปอัดแห้งมากขึ้น

ตารางที่ 4.10 คุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของตะกอนโรงงานผลิตเยื่อกระดาษหลังหมักแบบไม่มีอากาศ

รายการ	ปริมาณ			
	ก่อนหมัก		หลังหมัก	
	wet	dry	wet	dry
ความชื้น (%)	7.11	-	8.13	-
เถ้า (%)	27.64	29.51	36.74	40.48
สารระเหย (%)	58.2	62.13	47.30	52.11
ฟิสิกส์คาร์บอน (%)	7.83	8.36	6.73	7.41
ซัลเฟอร์ (%)	0.36		0.75	
ค่าความร้อน (cal/g)	2,817		2,292	

ที่มา : ผลการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการกองวิเคราะห์เชื้อเพลิงธรรมชาติ กรมทรัพยากรธรณี

คุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของกากตะกอนโรงงานผลิตเยื่อกระดาษจะเห็นว่าหลังหมักปริมาณเถ้าและซัลเฟอร์เพิ่มขึ้น ส่วนสารระเหย และฟิสิกส์คาร์บอนลดลงทำให้ค่าความร้อนลดลงประมาณ 19 % โดยค่าความร้อนจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณคาร์บอนคงตัวโดยตรงเนื่องจากปริมาณคาร์บอนคงตัวเป็นส่วนของเชื้อเพลิงที่อยู่ในรูปคาร์บอนหรือสารประกอบของคาร์บอน เมื่อเกิดการสันดาปจะสลายตัวให้พลังงานความร้อนออกมา เชื้อเพลิงที่มีคาร์บอนคงตัวสูงจึงให้ค่าความร้อนสูงด้วย [42] โดยสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในกากตะกอนบางส่วนเกิดการย่อยสลายไปเป็นก๊าซมีเทน [43] ทำให้ปริมาณส่วนประกอบต่างๆ เกิดการเปลี่ยนแปลงไป

ตารางที่ 4.11 ปริมาณโลหะหนักของตะกอนโรงงานผลิตเยื่อกระดาษหลังหมักแบบไม่มีอากาศ

รายการ	ปริมาณ		คุณภาพกากตะกอน ระดับ A [46]
	ก่อนหมัก	หลังหมัก	
ตะกั่ว (mg/kg)	23.4	27.6	150
แคดเมียม (mg/kg)	2.60	3.00	3
ปรอท (mg/kg)	0.0026	0.0027	1
อาร์เซนิก (mg/kg)	0.0029	0.0030	20

ที่มา : โครงการพัฒนาวิชาการดิน ปุ๋ย และสิ่งแวดล้อม ภาควิชาปฐพีวิทยา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักในตะกอนหลังหมักแบบไม่มีอากาศพบว่าปริมาณใกล้เคียงกับกากตะกอนที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพโดยเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าการหมักจะทำให้สารอินทรีย์เกิดการย่อยสลายได้ แต่โลหะหนักเป็นสารที่ย่อยสลายยาก จึงทำให้ยังคงอยู่ในกากตะกอน แต่อย่างไรก็ตามปริมาณโลหะหนักในตะกอนยังไม่เกินค่ามาตรฐาน [39]

ตารางที่ 4.12 ผลการอัดแท่งตะกอน โรงงานผลิตเชื้อกระดาษที่หมักแบบไม่มีอากาศ

รายการ	อัตราส่วนโดยปริมาตร		
	1:1	1:2	1:3
ความชื้นผสม (%)	62.4	76.19	70.17
เวลา/1แท่ง (วินาที)	60	57	64
น้ำหนัก/1แท่ง (kg)	1	0.95	0.90
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอัด (kw.h/แท่ง)	0.01692	0.01947	0.03625
การทนแรงอัดแวนอน (kg)	98.3	75.7	48.2
การทนแรงอัดในแนวตั้ง (kg)	378.5	278.7	175.6

เวลาที่ใช้ในการอัดขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นของส่วนผสมระหว่างกากตะกอนและเปลือกมะพร้าวอ่อน ถ้าปริมาณความชื้นมากเกินไปจะทำให้เกลียวอัดคายส่วนผสมออกมา ไม่สามารถอัดออกมาเป็นแท่งได้ หรือถ้าอัดออกมาแล้วแท่งเชื้อเพลิงที่ได้จะไม่มีรู จึงไม่เหมาะในการนำไปใช้งาน เนื่องจากรูตรงกลางแท่งจะช่วยให้แท่งเชื้อเพลิงสามารถติดไฟได้ดีขึ้น และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเผาไหม้ได้ [3] แต่ส่วนผสมมีความชื้นน้อยเกินไปจะทำให้ใช้เวลาในการอัดมากขึ้น หรือไม่สามารถอัดออกมาเป็นแท่งได้ เนื่องจากส่วนผสมจะติดอยู่ในเกลียวอัด และอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อเวลาในการอัดแท่งก็คือความสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกันของส่วนผสม ถ้าส่วนผสมมีความสม่ำเสมอจะทำให้สามารถอัดได้ง่ายขึ้น โดยส่วนผสมจะถูกดันออกมาจากกระบอกรีดได้อย่างต่อเนื่อง [3]

พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอัดแท่งจะแปรผันตามเวลาในการอัดแท่งและปริมาณเปลือกมะพร้าวอ่อน โดยพบว่าอัตราส่วน 1:1 และ 1:2 ใช้พลังงานไฟฟ้าใกล้เคียงกัน คือ 0.01692 และ 0.01947 kw.h/แท่ง เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการอัด/แท่ง ใกล้เคียงกัน และอัตราส่วน 1:3 ใช้เวลาในการอัดมากที่สุดจึงใช้พลังงานไฟฟ้าไป 0.03625 kw.h/แท่ง

จากผลการทดลองจะเห็นว่าน้ำหนักของแท่งเชื้อเพลิงจะแปรผกผันกับปริมาณเปลือกมะพร้าวอ่อน เนื่องจากเปลือกมะพร้าวอ่อนมีความหนาแน่นน้อยกว่ากากตะกอน ซึ่งความหนาแน่นของเชื้อเพลิงอัด

แท่งมีผลต่อการนำมาใช้งาน โดยเชื้อเพลิงอัดแท่งที่มีความหนาแน่นสูงจะทำให้มีความสะดวก ประหยัดเนื้อที่ในการเก็บและประหยัดแรงงานในการขนย้ายเพราะในปริมาตรที่เท่ากันจะทำให้ได้ ความร้อนและระยะเวลาในการเผาไหม้สูงกว่า จึงไม่จำเป็นต้องคอยเติมเชื้อเพลิงบ่อยๆ แต่จะมีปัญหา ในการจุดติดไฟ ซึ่งถ้าแท่งเชื้อเพลิงมีความหนาแน่นสูงจะจุดติดไฟได้ยาก [40] และถ้าแท่งเชื้อเพลิงมี ความหนาแน่นต่ำจะทำให้มีการเผาไหม้อย่างรวดเร็วจนไม่เหมาะกับการใช้งาน [41]

ผลการอัดแท่งตะกอน โรงงานผลิตเชื้อกระดาษที่หมักแบบไม่มีอากาศพบว่าอัดออกมาได้ดี ผิวเรียบ โดยอัตราส่วน 1:1 ผิวเรียบที่สุด เนื่องจากมีปริมาณเนื้อตะกอนมากกว่าอัตราส่วน 1:2 และ 1:3 ส่วน ผลการทดสอบการทนแรงอัดพบว่าอัตราส่วนที่มีการทนแรงอัดแน่นอนและแนวตั้งสูงสุด คือ อัตรา ส่วน 1:1 คือ 98.3 และ 378.5 กิโลกรัม เนื่องจากตะกอนที่ผ่านการหมักจะมีลักษณะเหนียวขึ้น และ กากตะกอนจากโรงงานผลิตเชื้อกระดาษจะมีลักษณะเป็นเยื่อ เนื่องจากเป็นเนื้อเยื่อพืชที่มีโครงสร้าง ผนังเซลล์ เป็นสารประเภทลิกโน-เซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน มีความยืดหยุ่นสูง [25] จึงสามารถ รับแรงอัดได้มาก แต่บางครั้งการทนแรงอัดของเชื้อเพลิงอัดแท่งก็ไม่ได้ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนสูงต่ำของ องค์ประกอบแต่จะขึ้นอยู่กับจุดพอดีของแท่งเชื้อเพลิง [38] เนื่องจากในการอัดแท่งส่วนผสมของกาก ตะกอนกับเศษวัสดุอาจไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอดแท่งจึงทำให้อาจจะมีจุดที่รับแรงอัดได้น้อยทำให้แท่ง เชื้อเพลิงแตกหักง่าย

4.2.2 การหมักกากตะกอนโรงงานผลิตเชื้อกระดาษแบบมีอากาศ

วิธีการหมักจะเกี่ยวข้องกับค่า C/N Ratio เพราะว่าดำเนินการคล้ายกับการทำปุ๋ยหมักเพียงแต่ว่าระยะเวลา น้อยกว่า สิ่งที่ต้องการจากการหมักคือให้สารอินทรีย์มีความเสถียรมากขึ้นและไม่เกิดปัญหาเรื่อง กลิ่นและเชื้อโรคเมื่อนำไปใช้งาน ซึ่งค่า C/N Ratio ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 30:1 - 35:1 ในกรณีของ ตะกอนที่ใช้ในการศึกษานี้ค่า C/N Ratio น้อยมาก(1) จึงต้องใช้ฟางข้าวเป็นตัวเพิ่มค่า C/N Ratio เพื่อให้ จุลินทรีย์นำคาร์บอนไปใช้ในการสร้างเซลล์ใหม่ได้เร็วทำให้การหมักสมบูรณ์ยิ่งขึ้น และสาเหตุที่ ไม่ใช้เปลือกมะพร้าวอ่อนเป็นตัวเพิ่มค่า C/N Ratio เพราะว่ามีค่า C/N Ratio น้อยเกินไป (9.38)

ตารางที่ 4.13 C/N Ratio โรงงานผลิตเชื้อกระดาษ โรงงานฟอกข้อม ฟางข้าว

รายการ	ค่า C/N Ratio
ตะกอน โรงงานผลิตเชื้อกระดาษ	1.72
เปลือกมะพร้าวอ่อน	9.38
ฟางข้าว	150

ที่มา : กองวิเคราะห์ส่วนกลาง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

ซึ่งหมักจากตะกอนเป็นระยะเวลา 1 เดือนแล้วทำการแยกฟางข้าวออกจากตะกอน จากนั้นนำมาวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิง แสดงดังตารางที่ 4.14 และ 4.15

ตารางที่ 4.14 คุณสมบัติทางกายภาพของตะกอน โรงงานผลิตเยื่อกระดาษที่หมักแบบมีอากาศ

คุณสมบัติทางกายภาพ	ลักษณะก่อนหมัก	ลักษณะหลังหมัก
ความชื้น (%)	80.59	76
กลิ่นตะกอน	เหม็นฉุน	ไม่มี
เนื้อตะกอน	เกาะกันเป็นแผ่น	ยุ่ย
สีของตะกอน	เทาดำ	เทาดำเข้มขึ้น

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของกากตะกอน โรงงานผลิตเยื่อกระดาษที่หมักแบบมีอากาศ พบว่ามีคุณสมบัติดีขึ้นคือ มีกลิ่นคล้ายดิน เนื้อตะกอนเหมือนเนื้อดิน เนื้อตะกอนจากที่เคยเกาะกันเป็นแผ่นจะมีลักษณะยุ่ยมากขึ้น เมื่อนำมาบีบจะจับตัวกันเป็นก้อนจึงมีคุณสมบัติเป็นตัวประสานได้ [3] จึงเหมาะสมที่จะนำไปอัดแท่งมากขึ้น ส่วนสีของกากตะกอนเข้มขึ้นจนเกือบเป็นสีดำเช่นเดียวกันกับการหมักแบบไม่มีอากาศ

ตารางที่ 4.15 คุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของตะกอน โรงงานผลิตเยื่อกระดาษหลังหมักแบบมีอากาศ

รายการ	ปริมาณ			
	ก่อนหมัก		หลังหมัก	
	wet	dry	wet	dry
ความชื้น (%)	7.11	-	9.1	-
เถ้า (%)	27.64	29.51	15.7	17.27
สารระเหย (%)	58.2	62.13	61.3	67.44
ฟิสิกส์คาร์บอน (%)	7.83	8.36	13.9	15.29
ซัลเฟอร์ (%)	0.36		0.91	
ค่าความร้อน (cal/g)	2,817		3,281	

ที่มา : ผลการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการกองวิเคราะห์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของกากตะกอนโรงงานผลิตเชื้อกระดาษที่หมักแบบมีอากาศพบว่าซัลเฟอร์ ฟิกซ์คาร์บอน สารระเหย มีปริมาณเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความร้อนเพิ่มขึ้นประมาณ 16 % โดยค่าความร้อนจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณคาร์บอนคงตัวโดยตรงเนื่องจากปริมาณคาร์บอนคงตัวเป็นส่วนหนึ่งของเชื้อเพลิงที่อยู่ในรูปคาร์บอนหรือสารประกอบของคาร์บอน เมื่อเกิดการสันดาปจะสลายตัวให้พลังงานความร้อนออกมา เชื้อเพลิงที่มีคาร์บอนคงตัวสูงจึงให้ค่าความร้อนสูงด้วย [42] ซึ่งฟิกซ์คาร์บอนที่เพิ่มขึ้นหลังจากการหมักแล้วอาจมาจากเศษฟางข้าวเนื่องจากกากตะกอนมีลักษณะร่วนจึงทำให้เศษฟางข้าวมีโอกาสเข้าไปผสมได้จึงทำให้ค่าความร้อนของกากตะกอนเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.16 ผลการอัดแท่งตะกอนโรงงานผลิตเชื้อกระดาษที่หมักแบบมีอากาศ

รายการ	อัตราส่วนโดยปริมาตร		
	1:1	1:2	1:3
ความชื้นผสม (%)	79	80	77.4
เวลา/1แท่ง (วินาที)	42	39	46
น้ำหนัก/1แท่ง (kg)	1	0.95	0.90
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอัด (kw.h/แท่ง)	0.0167	0.0152	0.03125
การทนแรงอัดแวนอน (kg)	66	78.9	69.3
การทนแรงอัดในแนวตั้ง (kg)	383.4	256.1	249.7

เวลาที่ใช้ในการอัดขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นของส่วนผสมระหว่างกากตะกอนและเปลือกมะพร้าวอ่อน ถ้าปริมาณความชื้นมากเกินไปจะทำให้เกลียวอัดคายส่วนผสมออกมา ไม่สามารถอัดออกมาเป็นแท่งได้ หรือถ้าอัดออกมาแล้วแท่งเชื้อเพลิงที่ได้จะไม่มีรู จึงไม่เหมาะในการนำไปใช้งาน เนื่องจากรูตรงกลางแท่งจะช่วยให้แท่งเชื้อเพลิงสามารถติดไฟได้ดีขึ้น และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเผาไหม้ได้ [29] แต่ส่วนผสมมีความชื้นน้อยเกินไปจะทำให้ใช้เวลาในการอัดมากขึ้น หรือไม่สามารถอัดออกมาเป็นแท่งได้ เนื่องจากส่วนผสมจะติดอยู่ในเกลียวอัด

พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอัดแท่งจะแปรผันตามเวลาในการอัดแท่งและปริมาณเปลือกมะพร้าวอ่อน โดยพบว่าที่อัตราส่วน 1:1 และ 1:2 ใช้พลังงานไฟฟ้าใกล้เคียงกัน คือ 0.0167 และ 0.0152 kw.h/แท่ง เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการอัด/แท่ง ใกล้เคียงกัน และอัตราส่วน 1:3 ใช้เวลาในการอัดมากที่สุดจึงใช้พลังงานไฟฟ้าไป 0.03125 kw.h/แท่ง ส่วนน้ำหนักของแท่งเชื้อเพลิงจะแปรผกผันกับปริมาณเปลือกมะพร้าวอ่อน เนื่องจากเปลือกมะพร้าวอ่อนมีความหนาแน่นน้อยกว่ากากตะกอน

ผลการอัดแท่งตะกอนโรงงานผลิตเยื่อกระดาษที่หมักแบบมีอากาศพบว่าอัดออกมาได้ดี ผิวเรียบ โดยอัตราส่วน 1:1 ผิวเรียบที่สุด เนื่องจากมีปริมาณเนื้อตะกอนมากกว่าอัตราส่วน 1:2 และ 1:3 ส่วนผลการทดสอบการทนแรงอัดพบว่าอัตราส่วนที่มีการทนแรงอัดแวนอนสูงสุด คือ อัตราส่วน 1:2 (78.9 กิโลกรัม) ส่วนแนวตั้งคือที่อัตราส่วน 1:1 (383.4 กิโลกรัม) เนื่องจากทั้งเปลือกมะพร้าวอ่อนและกากตะกอนมีลักษณะเป็นเยื่อและมีความยืดหยุ่นสูง [25] จึงสามารถรับแรงอัดได้มาก

4.2.3 การเผาถ่านแท่งเชื้อเพลิงกากตะกอนสดโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ

เมื่อนำแท่งเชื้อเพลิงที่ได้จากการอัดแท่งไปทำการเผาให้เป็นถ่าน โดยใช้เตาเผาที่เป็นถังน้ำมัน ใช้เวลาในการเผาให้เป็นถ่านและเย็นลงประมาณ 1 วัน แท่งเชื้อเพลิงก่อนเผาจะทำการวัดคุณสมบัติต่างๆ ไว้เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับถ่านที่ออกมา เช่น น้ำหนักก่อนเผา เส้นผ่านศูนย์กลาง ความหนาแน่น

ตารางที่ 4.17 แท่งเชื้อเพลิงโรงงานผลิตเยื่อกระดาษก่อนและหลังเผาถ่าน

รายการ	อัตราส่วน					
	1:1		1:2		1:3	
	ก่อนเผา	หลังเผา	ก่อนเผา	หลังเผา	ก่อนเผา	หลังเผา
น้ำหนัก (kg)	24.9	5.9	9.2	2.9	8.3	3.2
ความหนาแน่น	0.38	0.29	0.36	0.25	0.33	0.24
เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm.)	4.56	3.69	4.60	3.80	4.65	3.79
มวลที่หายไป (%)	76		65		60	
ประสิทธิภาพเผาถ่าน (%)	24		35		40	

ผลการปรับปรุงคุณภาพแท่งเชื้อเพลิงโดยการเผาถ่าน เป็นการกำจัดกลิ่นและเชื้อโรคที่มีอยู่ในแท่งเชื้อเพลิงได้เป็นอย่างดี เพราะทำการเผาถ่านที่อุณหภูมิสูง ส่วนคุณสมบัติทางกายภาพเปลี่ยนแปลงไปคือน้ำหนัก ความหนาแน่น และเส้นผ่านศูนย์กลางลดลง ซึ่งส่วนที่หายไปคือพวกสารระเหยต่างๆ โดยน้ำหนักที่หายไปเมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์แล้วพบว่าอัตราส่วนที่ 1:1 น้ำหนักหายไปมากที่สุดคือ 76 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นว่าปริมาณสารระเหยที่มีอยู่ในกากตะกอนและเปลือกมะพร้าวอ่อนมีค่าใกล้เคียงกันคือ 58.2 และ 61.27 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นการสูญเสียน้ำหนักของอัตราส่วน 1:3 ควรจะมากกว่าอัตราส่วน 1:1 และ 1:2 แต่จากผลการทดลองพบว่า การสูญเสียน้ำหนักของอัตราส่วน 1:1 มากกว่า 1:2 และ 1:3 ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากว่า เนื้อตะกอนที่เป็นเยื่อกระดาษสามารถติดไฟได้ง่ายจึงมีโอกาที่จะถูกเผาไหม้ได้ง่ายทำให้สูญเสียน้ำหนักไปได้มากที่สุด

เมื่อพิจารณาน้ำหนักที่หายไปแล้ว เปอร์เซ็นต์ที่เหลือจะเป็นประสิทธิภาพการเผาถ่านที่ได้ ดังนั้น อัตราส่วนที่มีประสิทธิภาพในการเผาถ่านมากที่สุดคือ 1:3 อยู่ที่ 40 % รองลงมาคือ 1:2 อยู่ที่ 35 % และ 1:1 น้อยที่สุดอยู่ที่ 24 %

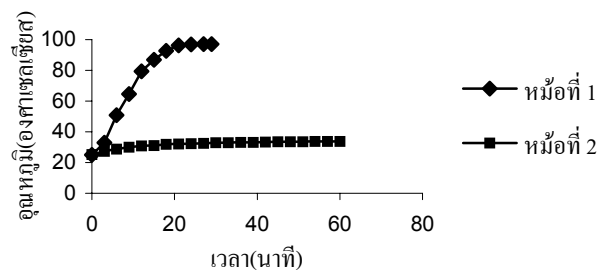
4.3 ทดสอบการติดไฟและการใช้งานความร้อนแท่งเชื้อเพลิงโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ

กระดาษ

การจุดติดจะดูเวลาที่แท่งเชื้อเพลิงติดไฟนับตั้งแต่เริ่มจุดไฟและเมื่อทดสอบการใช้งานความร้อนโดย ต้มน้ำทั้ง 3 อัตราส่วน จะพิจารณาการทำให้ น้ำเดือดของแท่งเชื้อเพลิง และระยะเวลาที่ทำให้ น้ำเดือด จะทำการเลือกอัตราส่วนที่ต้มน้ำได้เดือดหลายหม้อมากที่สุด แต่ถ้าได้จำนวนหม้อที่เดือดเท่ากันก็จะ ทำการเลือกอัตราส่วนที่ให้อุณหภูมิสุดท้ายสูงที่สุด

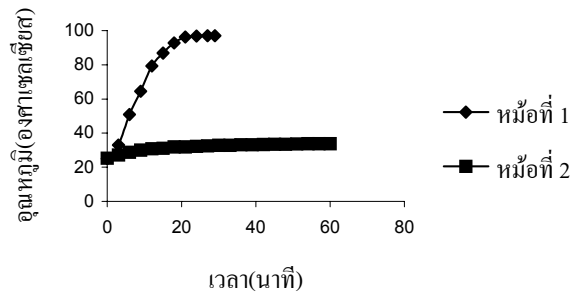
4.3.1 แท่งเชื้อเพลิงจากตะกอนสดของโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ

ผลการทดสอบการใช้งานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงและทำการบันทึกอุณหภูมิทุก 3 นาทีจนกระทั่ง น้ำเดือด ได้แสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลดังรูป 4.5, 4.6 และ 4.7



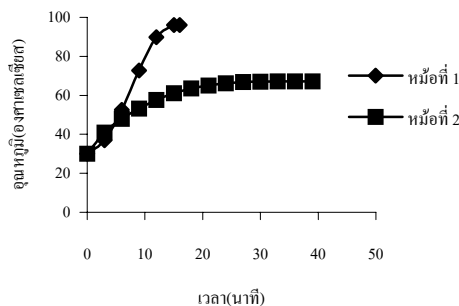
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ของเวลากับอุณหภูมิต้มน้ำของแท่งเชื้อเพลิงจากตะกอนสด โรงงานผลิตเยื่อกระดาษที่อัตราส่วน 1:1

ผลการทดสอบพบว่าแท่งเชื้อเพลิงอัตราส่วน 1:1 ใช้เวลาในการจุดติดไฟ 3 นาที การเผาไหม้ช่วงแรก จะมีควันเกิดขึ้นมาก แต่เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 15 นาที ควันจะหายไปและเกิดการลุกไหม้เป็นถ่าน สีแดง แท่งเชื้อเพลิงสามารถต้มน้ำเดือด 1 หม้อ เวลาที่ต้มน้ำเดือดเท่ากับ 27 นาที ส่วนอุณหภูมิสุดท้ายของหม้อที่ 2 เท่ากับ 33.8 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 54 นาที ปริมาณเถ้าที่เหลือจากการเผาไหม้คือ 11.76 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ของเวลากับอุณหภูมิต้มน้ำของแท่งเชื้อเพลิงจากกากตะกอนสด โรงงานผลิตเยื่อกระดาษที่อัตราส่วน 1:2

ผลการทดสอบพบว่าแท่งเชื้อเพลิงอัตราส่วน 1:2 ใช้เวลาในการจุดติดไฟ 2 นาที การเผาไหม้ช่วงแรกจะมีควันเกิดขึ้นมาก แต่เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 10 นาที ควันจะหายไปและเกิดการลุกไหม้เป็นถ่านสีแดง แท่งเชื้อเพลิงสามารถต้มน้ำเดือด 1 หม้อ เวลาที่ต้มน้ำเดือดเท่ากับ 17 นาที ส่วนอุณหภูมิสุดท้ายของหม้อที่ 2 เท่ากับ 66 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 27 นาที ปริมาณเถ้าที่เหลือจากการเผาไหม้คือ 9.18 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ของเวลากับอุณหภูมิต้มน้ำของแท่งเชื้อเพลิงจากกากตะกอนสด โรงงานผลิตเยื่อกระดาษที่อัตราส่วน 1:3

ผลการทดสอบพบว่าแท่งเชื้อเพลิงอัตราส่วน 1:3 ใช้เวลาในการจุดติดไฟ 2 นาที การเผาไหม้ช่วงแรกจะมีควันเกิดขึ้นปานกลาง แต่เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 10 นาที ควันจะหายไปและเกิดการลุกไหม้เป็นถ่านสีแดง แท่งเชื้อเพลิงสามารถต้มน้ำเดือด 1 หม้อ เวลาที่ต้มน้ำเดือดเท่ากับ 15 นาที ส่วนอุณหภูมิสุดท้ายของหม้อที่ 2 เท่ากับ 67.2 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 36 นาที ปริมาณเถ้าที่เหลือจากการเผาไหม้คือ 9.02 เปอร์เซ็นต์

เมื่อทำการเปรียบเทียบการใช้งานความร้อนโดยการต้มน้ำของแท่งเชื้อเพลิง 3 อัตราส่วน สามารถสรุปผลการทดสอบออกมาได้ดังตาราง 4.18

ตารางที่ 4.18 ผลการทดสอบการใช้งานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงจากตะกอนสดโรงงานผลิตเชื้อกระดาษ

กากตะกอน:เปลือกมะพร้าวอ่อน	1:1	1:2	1:3
เวลาจุดติดไฟ (นาที)	3	2	2
จำนวนหม้อที่เดือด	1	1	1
เวลาที่ต้มน้ำเดือด (นาที)	27	17	15
พลังงานความร้อนที่น้ำได้รับ (kcal)	322.4	411.6	412.8
เถ้า (%)	11.76	9.18	9.02

ผลการทดสอบเวลาจุดติดไฟพบว่าที่อัตราส่วน 1 :3 ลูกติดไฟง่ายที่สุดเนื่องจากมีเปลือกมะพร้าวอ่อนมาผสมกับกากตะกอนทำให้เชื้อเพลิงอัดแท่งสามารถจุดติดไฟได้ง่ายขึ้น [45] โดยใช้เวลาน้อยกว่า 1:1 และ 1:2 และจะเห็นว่าแท่งเชื้อเพลิงทั้ง 3 อัตราส่วนสามารถต้มน้ำให้เดือดได้ 1 หม้อเท่ากัน แต่ว่าอัตราส่วนที่ให้พลังงานความร้อนสูงที่สุดคือ 1:3 (412.8 kcal) ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากอัตราส่วน 1:3 มีปริมาณเปลือกมะพร้าวอ่อนมากที่สุด (กากตะกอนและเปลือกมะพร้าวอ่อนมีค่าความร้อนเท่ากับ 2,817 และ 4,810 cal/g) จึงเป็นตัวเพิ่มค่าความร้อนให้กับแท่งเชื้อเพลิง นอกจากนี้พบว่าปริมาณเถ้าหลังจากการเผาไหม้ของแท่งเชื้อเพลิงที่อัตราส่วน 1:3 มีค่าน้อยที่สุด คือ 9.02 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นอัตราส่วน 1:3 ให้ความร้อนในการใช้งานได้ดีที่สุด

ตารางที่ 4.19 ปริมาณโลหะหนักในเถ้าของแท่งเชื้อเพลิงจากตะกอนสดโรงงานผลิตเชื้อกระดาษกับเปลือกมะพร้าวอ่อนที่อัตราส่วน 1:1

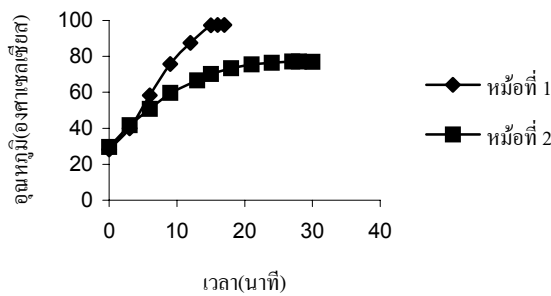
รายการ	เถ้า	Reference Std.(mg/kg)
ตะกั่ว (mg/kg)	21.7	150
แคดเมียม (mg/kg)	1.4	3
ปรอท (mg/kg)	0.0187	1
อาร์เซนิก (mg/kg)	0.0267	20

ที่มา : โครงการพัฒนาวิชาการดิน ปุ๋ย และสิ่งแวดล้อม ภาควิชาปฐพีวิทยา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เก้าที่นำมาวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในเก้าที่ได้จากการทดสอบการใช้งานความร้อนโดยการต้มน้ำ จะใช้เก้าของแท่งเชื้อเพลิงจากตะกอนผสมเปลือกมะพร้าวอ่อนที่อัตราส่วน 1:1 เพราะเป็นอัตราส่วน เริ่มต้นและมีปริมาณจากตะกอนในส่วนผสมมากที่สุด และถ้าปริมาณโลหะหนักในอัตราส่วนนี้อยู่ใน เกณฑ์มาตรฐานอัตราส่วนที่ตามมา คือ 1:2 และ 1:3 ซึ่งมีปริมาณจากตะกอนลดลงเรื่อยๆ ก็จะมี ปริมาณโลหะหนักลดลงตามไปด้วยเช่นเดียวกัน โดยนำปริมาณโลหะหนักที่วิเคราะห์ได้เปรียบเทียบกับ โลหะหนักจากค่ามาตรฐาน ผลทดสอบพบว่าโลหะหนักที่ตรวจพบไม่เกินค่ามาตรฐานอ้างอิง

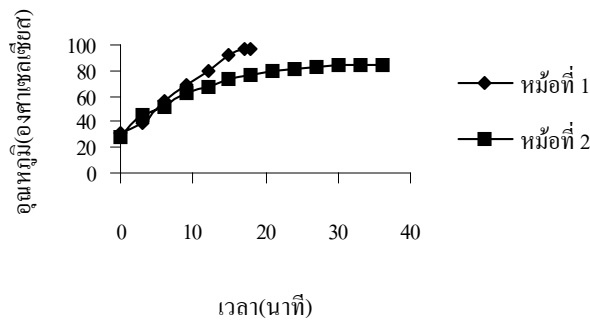
4.3.2 แท่งเชื้อเพลิงจากตะกอนโรงงานผลิตเยื่อกระดาษที่หมักแบบไม่มีอากาศ

ผลการทดสอบการใช้งานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงและทำการบันทึกอุณหภูมิทุก 3 นาทีจนกระทั่ง น้ำเดือด ได้แสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลดังรูป 4.8, 4.9 และ 4.10



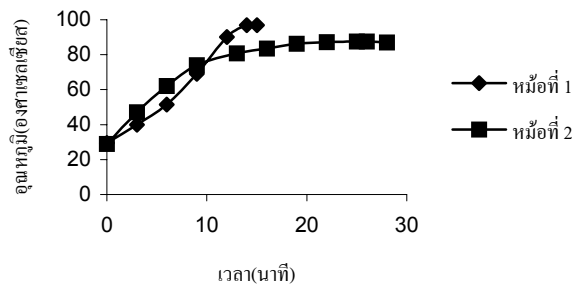
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ของเวลากับอุณหภูมิต้มน้ำของแท่งเชื้อเพลิงที่หมักแบบไม่มีอากาศโรงงาน ผลิตเยื่อกระดาษที่อัตราส่วน 1:1

ผลการทดสอบพบว่าแท่งเชื้อเพลิงอัตราส่วน 1:1 ใช้เวลาในการจุดติดไฟ 4 นาที การเผาไหม้ช่วงแรก จะมีควันเกิดขึ้น แต่เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 15 นาที ควันจะหายไปและเกิดการลุกไหม้เป็นถ่านสี แดง แท่งเชื้อเพลิงสามารถต้มน้ำเดือด 1 หม้อ เวลาที่ต้มน้ำเดือดเท่ากับ 16 นาที ส่วนอุณหภูมิสุดท้าย ของหม้อที่ 2 เท่ากับ 77.1 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 27 นาที ปริมาณเก้าที่เหลือจากการเผาไหม้คือ 12.06 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ของเวลากับอุณหภูมิต้มน้ำของแท่งเชื้อเพลิงที่หมักแบบไม่มีอากาศโรงงานผลิตเชื้อกระดาษที่อัตราส่วน 1:2

ผลการทดสอบพบว่าแท่งเชื้อเพลิงอัตราส่วน 1:2 ใช้เวลาในการจุดติดไฟ 3 นาที การเผาไหม้ช่วงแรกจะมีควันเกิดขึ้น แต่เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 10 นาที ควันจะหายไปและเกิดการลุกไหม้เป็นถ่านสีแดง แท่งเชื้อเพลิงสามารถต้มน้ำเดือด 1 หม้อ เวลาที่ต้มน้ำเดือดเท่ากับ 17 นาที ส่วนอุณหภูมิสุดท้ายของหม้อที่ 2 เท่ากับ 85 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 36 นาที ปริมาณเถ้าที่เหลือจากการเผาไหม้คือ 11.34 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ของเวลากับอุณหภูมิต้มน้ำของแท่งเชื้อเพลิงที่หมักแบบไม่มีอากาศโรงงานผลิตเชื้อกระดาษที่อัตราส่วน 1:3

ผลการทดสอบพบว่าแท่งเชื้อเพลิงอัตราส่วน 1:3 ใช้เวลาในการจุดติดไฟ 2 นาที การเผาไหม้ช่วงแรกจะมีควันเกิดขึ้น แต่เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 10 นาที ควันจะหายไปและเกิดการลุกไหม้เป็นถ่านสีแดง แท่งเชื้อเพลิงสามารถต้มน้ำเดือด 1 หม้อ เวลาที่ต้มน้ำเดือดเท่ากับ 14 นาที ส่วนอุณหภูมิสุดท้ายของหม้อที่ 2 เท่ากับ 87.5 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 43 นาที ปริมาณเถ้าที่เหลือจากการเผาไหม้คือ 10.42 เปอร์เซ็นต์

เมื่อทำการเปรียบเทียบการใช้งานความร้อนโดยการต้มน้ำของแท่งเชื้อเพลิง 3 อัตราส่วน สามารถสรุปผลการทดสอบออกมาได้ดังตาราง 4.21

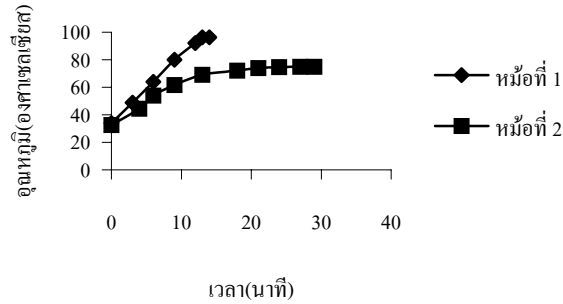
ตารางที่ 4.20 ผลการทดสอบการใช้งานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงตะกอนที่หมักแบบไม่มีอากาศ โรงงานผลิตเยื่อกระดาษ 3 อัตราส่วน

กากตะกอน:เปลือกมะพร้าวอ่อน	1:1	1:2	1:3
เวลาจุดติดไฟ (นาที)	4	3	2
จำนวนหม้อที่เดือด	1	1	1
เวลาที่ต้มน้ำเดือด (นาที)	16	17	14
พลังงานความร้อนที่น้ำได้รับ (kcal)	467.6	486.4	503.6
เถ้า (%)	12.26	11.34	10.42

ผลการทดสอบเวลาจุดติดไฟพบว่าที่อัตราส่วน 1 :3 จุดติดไฟง่ายที่สุด เนื่องจากมีเปลือกมะพร้าวอ่อนมาผสมกับกากตะกอนทำให้เชื้อเพลิงอัดแท่งสามารถจุดติดไฟได้ง่ายขึ้น [45] โดยใช้เวลาน้อยกว่า 1:1 และ 1:2 และจะเห็นว่าแท่งเชื้อเพลิงทั้ง 3 อัตราส่วนสามารถต้มน้ำให้เดือดได้ 1 หม้อเท่ากัน แต่ว่าอัตราส่วนที่ให้พลังงานความร้อนสูงที่สุดคือ 1:3 (503.6 kcal) ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากอัตราส่วน 1:3 มีปริมาณเปลือกมะพร้าวอ่อนมากที่สุด(กากตะกอนและเปลือกมะพร้าวอ่อนมีค่าความร้อนเท่ากับ 2,817 และ 4,810 cal/g) จึงเป็นตัวเพิ่มค่าความร้อนให้กับแท่งเชื้อเพลิง นอกจากนี้พบว่าปริมาณเถ้าหลังจากการเผาไหม้ของแท่งเชื้อเพลิงที่อัตราส่วน 1:3 มีค่าน้อยที่สุด คือ 10.42 เปอร์เซนต์ ดังนั้นอัตราส่วน 1:3 ให้ความร้อนในการใช้งานได้ดีที่สุด

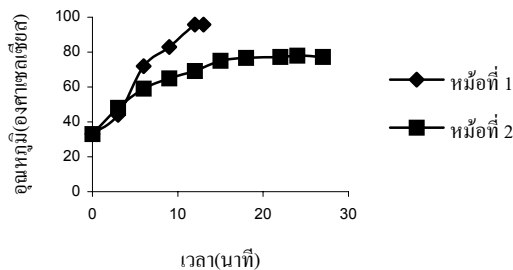
4.3.3 แท่งเชื้อเพลิงจากตะกอนโรงงานผลิตเยื่อกระดาษที่หมักแบบมีอากาศ

ผลการทดสอบการใช้งานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงและทำการบันทึกอุณหภูมิทุก 3 นาทีจนกระทั่งน้ำเดือด ได้แสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลดังรูป 4.11, 4.12 และ 4.13



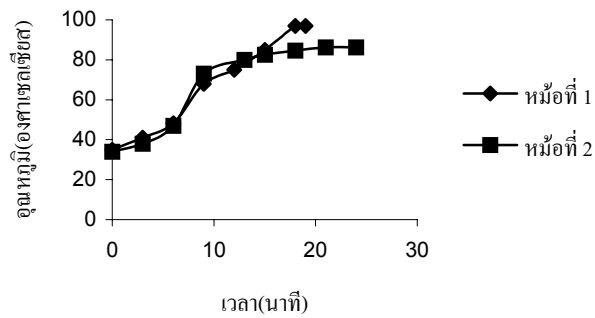
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ของเวลากับอุณหภูมิต้มน้ำแท่งเชื้อเพลิงที่หมักแบบมีอากาศโรงงานผลิตเยื่อกระดาษที่อัตราส่วน 1:1

ผลการทดสอบพบว่าแท่งเชื้อเพลิงอัตราส่วน 1:1 ใช้เวลาในการจุดติดไฟ 3 นาที การเผาไหม้ช่วงแรกจะมีควันเกิดขึ้น แต่เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 15 นาที ควันจะหายไปและเกิดการลุกไหม้เป็นถ่านสีแดง แท่งเชื้อเพลิงสามารถต้มน้ำเดือด 1 หม้อ เวลาที่ต้มน้ำเดือดเท่ากับ 13 นาที ส่วนอุณหภูมิสุดท้ายของหม้อที่ 2 เท่ากับ 75 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 27 นาที ปริมาณเถ้าที่เหลือจากการเผาไหม้คือ 13.54 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ของเวลากับอุณหภูมิต้มน้ำของแท่งเชื้อเพลิงที่หมักแบบมีอากาศโรงงานผลิตเยื่อกระดาษที่อัตราส่วน 1:2

ผลการทดสอบพบว่าแท่งเชื้อเพลิงอัตราส่วน 1:2 ใช้เวลาในการจุดติดไฟ 3 นาที การเผาไหม้ช่วงแรกจะมีควันเกิดขึ้น แต่เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 15 นาที ควันจะหายไปและเกิดการลุกไหม้เป็นถ่านสีแดง แท่งเชื้อเพลิงสามารถต้มน้ำเดือด 1 หม้อ เวลาที่ต้มน้ำเดือดเท่ากับ 13 นาที ส่วนอุณหภูมิสุดท้ายของหม้อที่ 2 เท่ากับ 77.9 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 31 นาที ปริมาณเถ้าที่เหลือจากการเผาไหม้คือ 11.6 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ของเวลากับอณูหภูมิต้มน้ำของแท่งเชื้อเพลิงที่หมักแบบมีอากาศโรงงานผลิตเชื้อกระดาษที่อัตราส่วน 1:3

เมื่อทำการเปรียบเทียบการใช้งานความร้อนโดยการต้มน้ำของแท่งเชื้อเพลิง 3 อัตราส่วน สามารถสรุปผลการทดสอบออกมาได้ดังตาราง 4.22

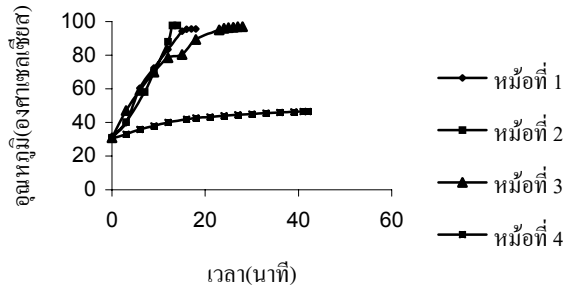
ตารางที่ 4.21 ผลการทดสอบการใช้งานความร้อนแท่งเชื้อเพลิงที่หมักแบบมีอากาศโรงงานผลิตเชื้อกระดาษ 3 อัตราส่วน

กากตะกอน:เปลือกมะพร้าวอ่อน	1:1	1:2	1:3
เวลาจุดติดไฟ(นาทีก)	3	3	2
จำนวนหม้อที่เดือด	1	1	1
เวลาที่ต้มน้ำเดือด (นาทีก)	13	13	18
พลังงานความร้อนที่น้ำได้รับ (kcal)	419.2	430.8	456.8
เถ้า (%)	13.54	11.6	10.88

ผลการทดสอบเวลาจุดติดไฟพบว่าที่อัตราส่วน 1 :3 จุดติดไฟง่ายที่สุด เนื่องจากมีเปลือกมะพร้าวอ่อนมาผสมกับกากตะกอนทำให้เชื้อเพลิงอัดแท่งสามารถจุดติดไฟได้ง่ายขึ้น [45] โดยใช้เวลาน้อยกว่า 1:1 และ 1:2 และจะเห็นว่าแท่งเชื้อเพลิงทั้ง 3 อัตราส่วนสามารถต้มน้ำให้เดือดได้ 1 หม้อเท่ากัน แต่ว่าอัตราส่วนที่ให้พลังงานความร้อนสูงที่สุดคือ 1:3 (456.8 kcal) ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากอัตราส่วน 1:3 มีปริมาณเปลือกมะพร้าวอ่อนมากที่สุด (กากตะกอนและเปลือกมะพร้าวอ่อนมีค่าความร้อนเท่ากับ 2,817 และ 4,810 cal/g) จึงเป็นตัวเพิ่มค่าความร้อนให้กับแท่งเชื้อเพลิง นอกจากนี้พบว่าปริมาณเถ้าหลังจากการเผาไหม้ของแท่งเชื้อเพลิงที่อัตราส่วน 1:3 มีค่าน้อยที่สุด คือ 10.88 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นอัตราส่วน 1:3 ให้ความร้อนในการใช้งานได้ดีที่สุด

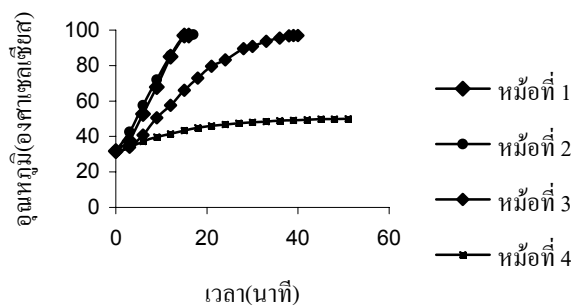
4.3.4 ถ่านแท่งเชื้อเพลิงตะกอนสกรองงานผลิตเยื่อกระดาษ

ผลการทดสอบการใช้งานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงและทำการบันทึกอุณหภูมิทุก 3 นาทีจนกระทั่งน้ำเดือด ได้แสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลดังรูป 4.14, 4.15 และ 4.16



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ของเวลากับอุณหภูมิต้มน้ำของถ่านแท่งเชื้อเพลิงตะกอนสกรองงานผลิตเยื่อกระดาษที่อัตราส่วน 1:1

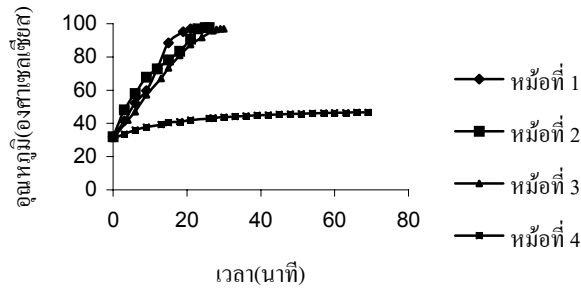
ผลการทดสอบพบว่าแท่งเชื้อเพลิงอัตราส่วน 1:1 ใช้เวลาในการจุดติดไฟ 2 นาที การเผาไหม้ช่วงแรกจะมีควันเกิดปานกลาง แต่เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 10 นาที ควันจะหายไปและเกิดการลุกไหม้เป็นถ่านสีแดง แท่งเชื้อเพลิงสามารถต้มน้ำเดือด 3 หม้อ เวลาที่ต้มน้ำเดือดหม้อที่ 1 เท่ากับ 17 นาที ส่วนเวลาที่ต้มน้ำเดือดหม้อที่ 2 เท่ากับ 14 นาที และเวลาที่ต้มน้ำเดือดหม้อที่ 3 เท่ากับ 27 นาที อุณหภูมิสุดท้ายของหม้อที่ 4 เท่ากับ 46.5 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 43 นาที ปริมาณเถ้าที่เหลือจากการเผาไหม้คือ 27.72 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ของเวลากับอุณหภูมิต้มน้ำของถ่านแท่งเชื้อเพลิงตะกอนสกรองงานผลิตเยื่อกระดาษที่อัตราส่วน 1:2

ผลการทดสอบพบว่าแท่งเชื้อเพลิงอัตราส่วน 1:2 ใช้เวลาในการจุดติดไฟ 1 นาที การเผาไหม้ช่วงแรกจะมีควันเกิดปานกลาง แต่เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 7 นาที ควันจะหายไปและเกิดการลุกไหม้เป็นถ่านสีแดง แท่งเชื้อเพลิงสามารถต้มน้ำเดือด 3 หม้อ เวลาที่ต้มน้ำเดือดหม้อที่ 1 เท่ากับ 15 นาที ส่วน

เวลาที่ต้มน้ำเดือดหม้อที่ 2 เท่ากับ 16 นาที และเวลาที่ต้มน้ำเดือดหม้อที่ 3 เท่ากับ 39 นาที อุณหภูมิสุดท้ายของหม้อที่ 4 เท่ากับ 50 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 51 นาที ปริมาณเถ้าที่เหลือจากการเผาไหม้คือ 23.92 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ของเวลากับอุณหภูมิต้มน้ำของถ่านแท่งเชื้อเพลิงตะกอนสดโรงงานผลิตเชื้อกระดาษที่อัตราส่วน 1:3

เมื่อทำการเปรียบเทียบการใช้งานความร้อนโดยการต้มน้ำของแท่งเชื้อเพลิง 3 อัตราส่วน สามารถสรุปผลการทดสอบออกมาได้ดังตาราง 4.22

ตารางที่ 4.22 ผลการทดสอบการใช้งานความร้อนถ่านแท่งเชื้อเพลิงจากตะกอนสดโรงงานผลิตเชื้อกระดาษ 3 อัตราส่วน

ตะกอน:ขุยมะพร้าวอ่อน	1:1	1:2	1:3
เวลาจุดติดไฟ(นาที)	2	1	1
จำนวนหม้อที่เดือด	3	3	3
พลังงานความร้อนที่น้ำได้รับ (kcal)	852.4	860.8	910
เถ้า (dry. Wt.,%)	27.72	23.92	22.6

ผลการทดสอบเวลาจุดติดไฟพบว่าที่อัตราส่วน 1 :3 และ 1:2 เนื่องจากมีเปลือกมะพร้าวอ่อนมาผสมกับกากตะกอนทำให้เชื้อเพลิงอัดแท่งสามารถจุดติดไฟได้ง่ายขึ้น [45] ลูกคิดไฟง่ายกว่า 1:1 และจะเห็นว่าแท่งเชื้อเพลิงทั้ง 3 อัตราส่วนสามารถต้มน้ำให้เดือดได้ 3 หม้อเท่ากัน แต่ว่าอัตราส่วนที่ให้พลังงานความร้อนสูงที่สุดคือ 1:3 (910 kcal) ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากอัตราส่วน 1:3 มีปริมาณเปลือกมะพร้าวอ่อนมากที่สุด (กากตะกอนและเปลือกมะพร้าวอ่อนมีค่าความร้อนเท่ากับ 2,817 และ 4,810 cal/g) จึงเป็นตัวเพิ่มค่าความร้อนให้กับแท่งเชื้อเพลิง นอกจากนี้พบว่าปริมาณเถ้าหลังจากการเผาไหม้ของแท่งเชื้อเพลิงที่อัตราส่วน 1:3 มีค่าน้อยที่สุด คือ 22.6 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นอัตราส่วน 1:3 ให้ความร้อนในการใช้งานได้ดีที่สุด

4.3.5 การเปรียบเทียบการใช้งานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงจากตะกอนโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ

จากผลการวิเคราะห์การใช้งานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงทุกชนิดทั้งที่ได้จากตะกอนที่ไม่ปรับปรุงและผ่านการปรับปรุงกับเปลือกมะพร้าวอ่อนที่อัตราส่วนต่างๆคือ 1:1, 1:2 และ 1:3 โดยนำมาต้มน้ำภายใต้สภาวะเดียวกันผลการทดสอบพบว่าอัตราส่วนที่ดีที่สุดคือ 1:3 ทั้งหมด ซึ่งได้นำอัตราส่วนนี้ไปทำการวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบการใช้งานความร้อนและปริมาณค่าความร้อน

ตารางที่ 4.23 เปรียบเทียบการใช้งานความร้อนและปริมาณเถ้าของอัตราส่วน 1:3 ของแท่งเชื้อเพลิงตะกอนสดและแท่งที่ปรับปรุง

แท่งเชื้อเพลิง (dry.,wt.)	เวลาที่ใช้ในการ การติดไฟ (นาที)	ค่าความร้อน (cal/g)	เถ้า (%)	พลังงาน ความร้อน ที่น้ำได้รับ	ประสิทธิภาพ การใช้งาน ความร้อน
กากตะกอนสด	-	2,817	27.64	-	-
แท่งเชื้อเพลิงตะกอนสด	2	3,255	9.02	412	25.36
หมักแบบไม่มีอากาศ	2	3,398	10.42	503.6	29.71
หมักแบบมีอากาศ	2	3,339	10.88	456.8	27.36
เผาถ่าน	1	4,736	22.6	910	39.46
ถ่านไม้	8	7,391	4.92	941.6	25.44

ผลการเปรียบเทียบการใช้งานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงจากกากตะกอน โรงงานผลิตเยื่อกระดาษทั้ง 3 แบบ พบว่าแท่งเชื้อเพลิงจากตะกอนสด (ไม่ได้ปรับปรุง) หมักแบบไม่มีอากาศ และหมักแบบมีอากาศสามารถต้มน้ำเดือดได้ 1 หม้อเท่ากัน เวลาที่ใช้ในการติดไฟเท่ากัน ส่วนพลังงานความร้อนที่น้ำได้รับจากแท่งเชื้อเพลิงจากกากตะกอนที่หมักแบบไม่มีอากาศและมีอากาศมีค่ามากกว่าแท่งเชื้อเพลิงจากกากตะกอนสด ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากว่ากากตะกอนที่ผ่านการหมักแล้วจะมีความคงตัวมากขึ้น จึงมีส่วนทำให้การลุกไหม้ของแท่งเชื้อเพลิงดีขึ้น และจะเห็นว่าประสิทธิภาพการใช้งานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงจากกากตะกอนที่หมักแบบไม่มีอากาศและมีอากาศมีค่าสูงกว่าแท่งเชื้อเพลิงจากกากตะกอนสด ดังนั้นน้ำจึงได้รับความร้อนจากแท่งเชื้อเพลิงอย่างเต็มที่ ส่วนปริมาณเถ้าที่เหลือจากการเผาไหม้มีลักษณะสีเทาขาวละเอียด และมีเปอร์เซ็นต์ใกล้เคียงกัน

แท่งเชื้อเพลิงที่เป็นถ่านสามารถต้มน้ำเดือดถึง 3 หม้อ และพลังงานความร้อนที่น้ำได้รับมีค่าสูงกว่าแท่งเชื้อเพลิงตะกอนสดและแท่งเชื้อเพลิงที่หมักทั้งสองแบบ เนื่องจากว่าแท่งเชื้อเพลิงที่ผ่านการเผา

ให้เป็นถ่านจะมีปริมาณฟิสิกส์คาร์บอนเพิ่มขึ้น ทำให้มีค่าความร้อนสูงขึ้น และเมื่อหาประสิทธิภาพการใช้งานความร้อนพบว่ามีความมากกว่าแท่งเชื้อเพลิงทั้ง 3 แบบ และยังมีประสิทธิภาพสูงกว่าถ่านไม้มะขามเทศ (30.2 %) และฟืนไม้มะขามเทศ (28%) [4] อีกด้วย นอกจากนี้จะเห็นว่าถ่านแท่งเชื้อเพลิงติดไฟง่าย เนื่องจากเมื่อนำแท่งเชื้อเพลิงซึ่งมีส่วนประกอบของเปลือกมะพร้าวอ่อนไปเผาถ่าน จะได้ถ่านที่มีลักษณะพรุน ทำให้ติดไฟง่ายและลุกไหม้ดี จึงสามารถต้มน้ำให้เดือดได้ถึง 3 หม้อ แต่ว่าปริมาณถ่านของถ่านแท่งเชื้อเพลิงเท่ากับ 22.6 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมากกว่าแท่งเชื้อเพลิงทั้ง 3 แบบ เนื่องจากแท่งเชื้อเพลิงที่ผ่านการเผาให้เป็นถ่านแล้วจะมีปริมาณความชื้นและสารระเหยลดลงมากซึ่งเมื่อการเกิดถ่านเสร็จสิ้นสมบูรณ์แล้วถ่านจะประกอบด้วยคาร์บอนกับขี้เถ้าเท่านั้น [32] ทำให้เปอร์เซ็นต์ถ่านในถ่านแท่งเชื้อเพลิงสูงขึ้น

เมื่อพิจารณาค่าความร้อนที่วิเคราะห์ได้จะเห็นว่าแปรตามผลการทดลองโดยค่าความร้อนของถ่านแท่งเชื้อเพลิงสูงที่สุด รองลงมาคือแท่งเชื้อเพลิงที่หมักแบบไม่มีอากาศ แท่งเชื้อเพลิงที่หมักแบบมีอากาศ และต่ำสุดคือแท่งเชื้อเพลิงตะกอนสด

จะเห็นว่าการปรับปรุงคุณภาพกากตะกอน โรงงานผลิตเอ็อกระดาศโดยการหมักทั้งสองแบบก่อนที่จะนำมาใช้ผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งสามารถทำให้คุณภาพของกากตะกอนดีขึ้นทั้งในเรื่องกลิ่น [26] และการใช้งานความร้อน โดยการปรับปรุงแบบหมักไม่มีอากาศจะให้พลังงานความร้อนสูงกว่าการหมักแบบมีอากาศ ส่วนการปรับปรุงโดยการเผาถ่านดีที่สุดทั้งในเรื่องการกำจัดกลิ่นและเชื้อโรค [38] นอกจากนี้การนำไปใช้งานด้านความร้อนก็ดีที่สุดที่สุด สามารถติดไฟง่าย ต้มน้ำเดือด 3 หม้อ โดยให้พลังงานความร้อนสูงถึง 910 kcal ซึ่งดีกว่าการหมักทั้ง 2 แบบ

เมื่อทำการเปรียบเทียบการใช้งานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงกับถ่านไม้ พบว่าถ่านไม้มีค่าความร้อนสูงกว่าแท่งเชื้อเพลิง แต่มีประสิทธิภาพการใช้งานความร้อนต่ำกว่าแท่งเชื้อเพลิงทั้ง 4 แบบ โดยเฉพาะแท่งเชื้อเพลิงที่เผาเป็นถ่านมีประสิทธิภาพการใช้งานความร้อนสูงถึง 39.46 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ถ่านไม้มีประสิทธิภาพเพียง 25.44 เปอร์เซ็นต์ จึงทำให้เมื่อนำไปทดสอบการต้มน้ำแล้วพบว่าพลังงานความร้อนที่น้ำได้รับจากถ่านแท่งเชื้อเพลิงมีค่าใกล้เคียงกับถ่านไม้ (910 และ 941.6 kcal ตามลำดับ) แม้ว่าถ่านแท่งเชื้อเพลิงจะมีค่าความร้อนต่ำกว่าก็ตาม ดังนั้นถ่านแท่งเชื้อเพลิงจึงน่าจะมีศักยภาพในการนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนถ่านไม้ได้

4.4 การปรับปรุงคุณภาพอากาศก่อนโรงงานฟอกย้อม

4.4.1 การหมักกากตะกอนโรงงานฟอกย้อมแบบไม่มีอากาศ

โดยรวมแล้วตะกอนก่อนหมักจะค่อนข้างมีกลิ่นเหม็นฉุน เมื่อหมักแล้วเทออกจากถังใหม่ๆ จะมีกลิ่นเหม็นเนื่องจากเกิดจากแก๊สในกระบวนการหมัก แต่เมื่อแก๊สระเหยไปหมดแล้วกลิ่นจะลดลง ในส่วนของการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่อยู่ในตะกอนจะมีไม่มากเพราะเป็นสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยาก [25] เช่น สีที่ใช้ในการย้อมหรือว่าจะเป็นเส้นใยผ้าที่หลุดออกมาในกระบวนการฟอกย้อม เป็นต้น

ตารางที่ 4.24 คุณสมบัติกายภาพของกากตะกอน โรงงานฟอกย้อมหลังหมักแบบไม่มีอากาศ

คุณสมบัติทางกายภาพ	ก่อนหมัก	หลังหมัก
ความชื้น(%)	81.50	91.61
กลิ่น	กลิ่นเหม็น	กลิ่นเหม็นเล็กน้อย
เนื้อตะกอน	เนื้อละเอียด	ยุ่ยมากขึ้น
สีตะกอน	เทาดำ	ดำ
pH	7.53	7.64

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางด้านกายภาพของตะกอนที่ผ่านการหมักแบบไม่มีอากาศ พบว่าคุณสมบัติทางกายภาพดีขึ้น เนื่องจากเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ ทำให้ตะกอนมีความคงตัวมากขึ้น ส่งผลให้กลิ่นลดลง นอกจากนี้สีของตะกอนเข้มขึ้น และเนื้อตะกอนยุ่ยมากขึ้น เมื่อนำมาบีบจะจับตัวกันเป็นก้อนจึงมีคุณสมบัติเป็นตัวประสานได้ [3] จึงเหมาะสมที่จะนำไปอัดแท่งมากขึ้น ในช่วงที่เทออกมาครั้งแรกจะเหม็นกลิ่นแก๊สเช่นเดียวกันกับการหมักกากตะกอนของโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ เมื่อนำกากตะกอนที่เทออกมาไปทำการลดความชื้นโดยการตากบนผ้าใบ จนความชื้นลดลง กลิ่นจะหายไป

สำหรับผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของกากตะกอนโรงงานฟอกย้อมหลังจากผ่านการหมักแสดงดังตารางที่ 4.26 ซึ่งพบว่าปริมาณเถ้า สารระเหย และซัลเฟอร์ เพิ่มขึ้น ส่วนปริมาณฟิสิกส์คาร์บอนลดลงทำให้ค่าความร้อนลดลงประมาณ 7 % โดยค่าความร้อนจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณคาร์บอนคงตัวโดยตรงเนื่องจากปริมาณคาร์บอนคงตัวเป็นส่วนหนึ่งของเชื้อเพลิงที่อยู่ในรูปคาร์บอนหรือสารประกอบของคาร์บอน เมื่อเกิดการสันดาปจะสลายตัวให้พลังงานความร้อนออกมา เชื้อเพลิงที่มีคาร์บอนคงตัวสูงจึงให้ค่าความร้อนสูงด้วย [42] โดยสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในกากตะกอนบางส่วนเกิดการย่อยสลายไปเป็นก๊าซมีเทน [43] ทำให้ปริมาณส่วนประกอบต่างๆ เกิดการเปลี่ยนแปลงไป

ตารางที่ 4.25 คุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงกากตะกอนโรงงานฟอกย้อมหลังหมักแบบไม่มีอากาศ

รายการ	ปริมาณ			
	ก่อนหมัก		หลังหมัก	
	wet	dry	wet	dry
ความชื้น (%)	29.50	-	10.45	-
เถ้า (%)	43.24	61.33	55.31	61.76
สารระเหย (%)	23.24	32.96	29.80	33.28
ฟีกส์คาร์บอน (%)	4.02	5.70	4.44	4.96
ซัลเฟอร์ (%)	0.61		0.78	
ค่าความร้อน (cal/g)	1,774		1,658	

ที่มา : ผลการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการกองวิเคราะห์เชื้อเพลิงธรรมชาติ กรมทรัพยากรธรณี

ตารางที่ 4.26 ปริมาณโลหะหนักของกากตะกอนโรงงานฟอกย้อมหลังหมักแบบไม่มีอากาศ

รายการ	ปริมาณ		Reference Standard (mg/kg)
	ก่อนหมัก	หลังหมัก	
ตะกั่ว (mg/kg)	25.1	24.8	150
แคดเมียม (mg/kg)	2.53	2.48	3
ปรอท (mg/kg)	0.0025	0.0027	1
อาร์เซนิก (mg/kg)	0.00333	0.0030	20

ที่มา : โครงการพัฒนาวิชาการดิน ปุ๋ยและสิ่งแวดล้อม ภาควิชาปฐพีวิทยา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักในตะกอนหลังหมักแบบไม่มีอากาศพบว่าปริมาณใกล้เคียงกับกากตะกอนที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพโดยตะกั่ว แคดเมียม และสารหนู มีปริมาณลดลง ส่วนปรอทเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการหมักจะทำให้สารอินทรีย์เกิดการย่อยสลายได้ แต่โลหะหนักเป็นสารที่ย่อยสลายยาก จึงทำให้ยังคงอยู่ในกากตะกอน แต่อย่างไรก็ตามปริมาณโลหะหนักในตะกอนยังไม่เกินค่ามาตรฐาน

ตารางที่ 4.27 ผลการอัดแห้งกากตะกอนโรงงานฟอกย้อมที่หมักแบบไม่มีอากาศ

รายการ	อัตราส่วน โดยปริมาตร		
	1:1	1:2	1:3
ความชื้นผสม (%)	69.5	66.67	64.59
เวลา/1แห้ง (วินาที)	42	42	54
น้ำหนัก/1แห้ง (kg)	1	0.98	0.95
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอัด (kw.h/แห้ง)	0.015	0.015	0.02667
การทนแรงอัดแวนอน (kg)	85.4	102.5	122.4
การทนแรงอัดในแนวตั้ง (kg)	336.6	389.8	414

เวลาที่ใช้ในการอัดขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นของส่วนผสมระหว่างกากตะกอนและเปลือกมะพร้าวอ่อน ถ้าปริมาณความชื้นมากเกินไปจะทำให้เกิดยวอดคายส่วนผสมออกมา ไม่สามารถอัดออกมาเป็นแห้งได้ หรือถ้าอัดออกมาแล้วแห้งเชื้อเพลิงที่ได้จะไม่บริสุทธิ์ จึงไม่เหมาะในการนำไปใช้งาน เนื่องจากตรงกลางแห้งจะช่วยให้แห้งเชื้อเพลิงสามารถติดไฟได้ดีขึ้น และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเผาไหม้ได้ [46] แต่ส่วนผสมมีความชื้นน้อยเกินไปจะทำให้ใช้เวลาในการอัดมากขึ้น หรือไม่สามรถอัดออกมาเป็นแห้งได้ เนื่องจากส่วนผสมจะติดอยู่ในเกลียวอัด และอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อเวลาในการอัดแห้งก็คือความสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกันของส่วนผสม ถ้าส่วนผสมมีความสม่ำเสมอจะทำให้สามารถอัดได้ง่ายขึ้น โดยส่วนผสมจะถูกดันออกมาจากกระบอกอัดได้อย่างต่อเนื่อง [3]

พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอัดแห้งจะแปรผันตามเวลาในการอัดแห้งและปริมาณเปลือกมะพร้าวอ่อน โดยพบว่าที่อัตราส่วน 1:1 และ 1:2 ใช้พลังงานไฟฟ้าเท่ากัน คือ 0.015 kw.h/แห้ง เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการอัด/แห้ง เท่ากัน และอัตราส่วน 1:3 ใช้เวลาในการอัดมากที่สุดจึงใช้พลังงานไฟฟ้าไป 0.02667 kw.h/แห้ง จากผลการทดลองจะเห็นว่าน้ำหนักของแห้งเชื้อเพลิงจะแปรผกผันกับปริมาณเปลือกมะพร้าวอ่อน เนื่องจากเปลือกมะพร้าวอ่อนมีความหนาแน่นน้อยกว่ากากตะกอน ซึ่งความหนาแน่นของเชื้อเพลิงอัดแห้งมีผลต่อการนำมาใช้งาน โดยเชื้อเพลิงอัดแห้งที่มีความหนาแน่นสูงจะทำให้มีความสะดวก ประหยัดเนื้อที่ในการเก็บและประหยัดแรงงานในการขนย้ายเพราะในปริมาตรที่เท่ากัน จะทำให้ได้ความร้อนและระยะเวลาในการเผาไหม้สูงกว่า จึงไม่จำเป็นต้องคอยเติมเชื้อเพลิงบ่อยๆ แต่จะมีปัญหาในการจุดติดไฟ ซึ่งถ้าแห้งเชื้อเพลิงมีความหนาแน่นสูงจะจุดติดไฟได้ยาก [40] และถ้าแห้งเชื้อเพลิงมีความหนาแน่นต่ำจะทำให้มีการเผาไหม้อย่างรวดเร็วจนไม่เหมาะกับการใช้งาน [41]

ผลการอัดแท่งตะกอนโรงงานฟอกย้อมที่หมักแบบไม่มีอากาศพบว่าอัดออกมาได้ดี ผิวเรียบ โดยอัตราส่วน 1:1 ผิวเรียบที่สุด เนื่องจากมีปริมาณเนื้อตะกอนมากกว่าอัตราส่วน 1:2 และ 1:3 ส่วนผลการทดสอบการทนแรงอัดพบว่าอัตราส่วนที่มีการทนแรงอัดแน่นอนและแนวตั้งสูงสุด คือ อัตราส่วน 1:3 คือ 122.4 และ 414 กิโลกรัม เนื่องจากเปลือกมะพร้าวอ่อนมีลักษณะเป็นเยื่อที่มีเป็นโครงสร้างผนังเซลล์ เป็นสารประเภทลิกโน-เซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน มีความยืดหยุ่นสูง [25] จึงสามารถรับแรงอัดได้มาก

แต่บางครั้งการทนแรงอัดของเชื้อเพลิงอัดแท่งก็ไม่ได้ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนสูงต่ำขององค์ประกอบแต่จะขึ้นอยู่กับจุดพอดีของแท่งเชื้อเพลิง [38] เนื่องจากในการอัดแท่งส่วนผสมของกากตะกอนกับเศษวัสดุอาจไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอดแท่งจึงอาจจะมีจุดที่รับแรงอัดได้น้อยทำให้แท่งเชื้อเพลิงแตกหักง่าย

4.4.2 การหมักกากตะกอนโรงงานฟอกย้อมแบบมีอากาศ

วิธีการหมักจะเกี่ยวข้องกับค่า C/N Ratio เพราะว่าดำเนินการคล้ายกับการทำปุ๋ยหมักเพียงแต่ว่าระยะเวลาสั้นกว่า สิ่งที่ต้องการจากการหมักคือให้สารอินทรีย์มีความเสถียรมากขึ้นและไม่เกิดปัญหาเรื่องกลิ่นและเชื้อโรคเมื่อนำไปใช้งาน ซึ่งค่า C/N Ratio ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 30:1 - 35:1 ในกรณีของตะกอนจากโรงงานฟอกย้อมที่ใช้ในการศึกษานี้มีค่า C/N Ratio น้อยมาก (1) จึงต้องใช้ฟางข้าวเป็นตัวเพิ่มค่า C/N Ratio เพื่อให้ จุลินทรีย์นำคาร์บอนไปใช้ในการสร้างเซลล์ใหม่ได้เร็วทำให้การหมักสมบูรณ์ยิ่งขึ้น และสาเหตุที่ไม่ใช้เปลือกมะพร้าวอ่อนเป็นตัวเพิ่มค่า C/N Ratio เพราะว่ามีค่า C/N Ratio น้อยเกินไป (9.38) ดังนั้นจึงเลือกใช้ฟางข้าวซึ่งมีค่า C/N Ratio สูง (150) มาเป็นส่วนประกอบในกองปุ๋ยหมัก

ตารางที่ 4.28 C/N Ratio โรงงานฟอกย้อม และ ฟางข้าว

รายการ	ค่า C/N Ratio
ตะกอน โรงงานฟอกย้อม	1.00
เปลือกมะพร้าวอ่อน	9.38
ฟางข้าว	150

ที่มา : กองวิเคราะห์ส่วนกลาง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

ซึ่งหมักจากตะกอนเป็นระยะเวลา 1 เดือนแล้วทำการแยกฟางข้าวออกจากตะกอน จากนั้นนำมาวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิง แสดงดังตารางที่ 4.29 และ 4.30 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.29 คุณสมบัติทางกายภาพของตะกอนโรงงานฟอกย้อมที่หมักแบบมีอากาศ

รายการ	ก่อนหมัก	หลังหมัก
ความชื้น(%)	80.59	78
กลิ่น	กลิ่นค่อนข้างเหม็น	ไม่มีกลิ่น
เนื้อตะกอน	เนื้อละเอียด	เนื้อละเอียด
สีตะกอน	เทาดำ	ดำ

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของกากตะกอนโรงงานฟอกย้อมที่หมักแบบมีอากาศพบว่าโดยรวมแล้วดีขึ้น ทั้งกลิ่น เนื้อตะกอน และสี ที่มีลักษณะคล้ายดินมาก มีความคงตัวมากขึ้น เนื้อตะกอนมีลักษณะยุ่ยมากขึ้น เมื่อนำมาบีบจะจับตัวกันเป็นก้อนจึงมีคุณสมบัติเป็นตัวประสานได้ [3] จึงเหมาะสมที่จะนำไปอัดแท่งมากขึ้น ซึ่งจะเห็นว่ากากตะกอนก่อนหมักจะมีกลิ่นค่อนข้างเหม็น สีไม่เข้ม แต่หลังจากที่ผ่านการหมักแล้วคุณสมบัติทางกายภาพดีขึ้น มีความเหมาะสมที่จะอัดแท่ง ส่วนสีของกากตะกอนเข้มขึ้นจนเกือบเป็นสีดำเช่นเดียวกับการหมักแบบไม่มีอากาศ

ตารางที่ 4.30 คุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของกากตะกอนโรงงานฟอกย้อมหลังหมักแบบมีอากาศ

รายการ	ก่อนหมัก		หลังหมัก	
	wet	dry	wet	dry
ความชื้น (%)	29.50	-	5.4	-
เถ้า (%)	43.24	61.33	58.3	62.89
สารระเหย (%)	23.24	32.96	29.3	31.61
ฟิสิกส์คาร์บอน (%)	4.02	5.70	5.1	5.50
ซัลเฟอร์ (%)	0.61		0.82	
ค่าความร้อน (cal/g)	1,774		1,798	

ที่มา : ผลการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการกองวิเคราะห์เชื้อเพลิงธรรมชาติ กรมทรัพยากรธรณี

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของกากตะกอนโรงงานฟอกย้อมที่หมักแบบมีอากาศพบว่าซัลเฟอร์มีปริมาณเพิ่มขึ้น ส่วนเถ้า สารระเหย ฟิสิกส์คาร์บอน และค่าความร้อนมีค่าใกล้เคียงกับก่อนที่จะทำการหมัก แสดงว่าการหมักแบบมีอากาศมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิง

เพียงเล็กน้อย เนื่องจากตะกอนมีโครงสร้างเป็นพวกผนังเซลล์พืชพวกเซลล์ลูไลสปะปนอยู่ จึงมีลักษณะเป็นอินทรีย์สารย่อยยาก [25] เช่น เชื้อยีสต์ที่หลุดออกมาจากการฟอกย้อม เป็นต้น

ตารางที่ 4.31 ผลการอัดแห้งกากตะกอนโรงงานฟอกย้อมที่หมักแบบมีอากาศ

รายการ	อัตราส่วนโดยปริมาตร		
	1:1	1:2	1:3
ความชื้นผสม (%)	73.33	69.54	69.23
เวลา/1แห้ง (วินาที)	53	45	47
น้ำหนัก/1แห้ง (kg)	1	0.98	0.95
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอัด (kw.h/แห้ง)	0.01429	0.01157	0.01233
การทนแรงอัดแวนอน (kg)	87	111.1	125.6
การทนแรงอัดแวนตั้ง (kg)	281.9	335	333.4

เวลาที่ใช้ในการอัดขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นของส่วนผสมระหว่างกากตะกอนและเปลือกมะพร้าวอ่อน ถ้าปริมาณความชื้นมากเกินไปจะทำให้เกลียวอัดคายส่วนผสมออกมา ไม่สามารถอัดออกมาเป็นแห้งได้ หรือถ้าอัดออกมาแล้วแห้งเชื้อเพลิงที่ได้จะไม่บริสุทธิ์ จึงไม่เหมาะในการนำไปใช้งาน เนื่องจากตรงกลางแห้งจะช่วยให้แห้งเชื้อเพลิงสามารถติดไฟได้ดีขึ้น และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเผาไหม้ได้ [29] แต่ส่วนผสมมีความชื้นน้อยเกินไปจะทำให้ใช้เวลาในการอัดมากขึ้น หรือไม่สามารถอัดออกมาเป็นแห้งได้ เนื่องจากส่วนผสมจะติดอยู่ในเกลียวอัด

พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอัดแห้งจะแปรผันตามเวลาในการอัดแห้ง โดยอัตราส่วน 1:2 และ 1:3 ใช้พลังงานไฟฟ้าใกล้เคียงกัน คือ 0.01157 และ 0.01233 kw.h/แห้ง เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการอัด/แห้งใกล้เคียงกันและอัตราส่วน 1:1 ใช้เวลาในการอัดมากที่สุดจึงใช้พลังงานไฟฟ้าไป 0.01429 kw.h/แห้ง ส่วนน้ำหนักของแห้งเชื้อเพลิงจะแปรผกผันกับปริมาณเปลือกมะพร้าวอ่อน เนื่องจากเปลือกมะพร้าวอ่อนมีความหนาแน่นน้อยกว่ากากตะกอน

ผลการอัดแห้งตะกอนโรงงานฟอกย้อมที่หมักแบบมีอากาศพบว่าอัดออกมาได้ดี ผิวเรียบ โดยอัตราส่วน 1:1 ผิวเรียบที่สุด เนื่องจากมีปริมาณเนื้อตะกอนมากกว่าอัตราส่วน 1:2 และ 1:3 ส่วนผลการทดสอบการทนแรงอัดพบว่าอัตราส่วนที่มีการทนแรงอัดแวนอนและแวนตั้งสูงสุด คือ อัตราส่วน 1:3 คือ 125.6 และ 335 กิโลกรัม เนื่องจากเปลือกมะพร้าวอ่อนมีลักษณะเป็นเยื่อและมีความยืดหยุ่นสูง จึงสามารถรับแรงอัดได้มาก [25]

4.4.3 การเผาถ่านแท่งเชื้อเพลิงตะกอนสดโรงงานฟอกย้อม

ตารางที่ 4.32 คุณสมบัติของแท่งเชื้อเพลิงจากตะกอนสดโรงงานฟอกย้อมก่อนและหลังเผาถ่าน

รายการ	อัตราส่วน					
	1:1		1:2		1:3	
	ก่อนเผา	หลังเผา	ก่อนเผา	หลังเผา	ก่อนเผา	หลังเผา
น้ำหนัก(kg)	25	11.90	25.2	10.10	25	9.50
ความหนาแน่น	0.52	0.41	0.47	0.36	0.44	0.31
เส้นผ่านศูนย์กลาง(cm.)	4.51	4.123	4.58	4.13	4.7	4.10
มวลที่หายไป (%)	55		60		62	
ประสิทธิภาพเผาถ่าน(%)	45		40		38	

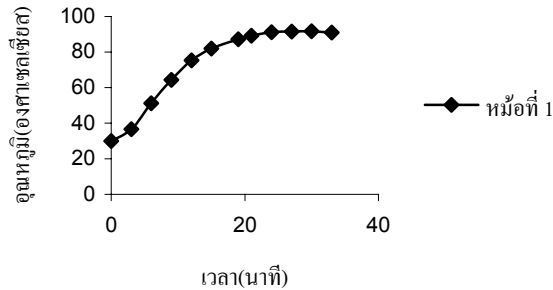
ผลการปรับปรุงคุณภาพแท่งเชื้อเพลิงโดยการเผาถ่าน พบว่าคุณสมบัติทางกายภาพเปลี่ยนแปลงไปคือ น้ำหนัก ความหนาแน่น และเส้นผ่านศูนย์กลางลดลง เนื่องจากกระบวนการเผาถ่านทำให้สารระเหยและความชื้นในแท่งเชื้อเพลิงถูกไล่ออกไป ซึ่งมวลที่หายไปคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้คือ อัตราส่วน 1:1 หายไป 55 เปอร์เซ็นต์ 1:2 หายไป 60 เปอร์เซ็นต์ และ 1:3 หายไป 62 เปอร์เซ็นต์ โดยอัตราส่วน 1:3 มวลหายไปมากที่สุด เนื่องจากว่าสารระเหยที่มีอยู่ในส่วนประกอบของเปลือกมะพร้าวอ่อนมีมากกว่าในกากตะกอน จึงทำให้มวลของอัตราส่วน 1:3 ที่มีสัดส่วนของเปลือกมะพร้าวอ่อนมากที่สุดหายไปมากกว่า 1:1 และ 1:2 นอกจากนี้เมื่อนำ 100 – มวลที่หายไปแล้ว ตัวเลขที่ออกมาจะเป็นประสิทธิภาพในการเผาถ่าน ดังนั้น อัตราส่วน 1:1 มีประสิทธิภาพในการเผาถ่านมากที่สุด คือ 45 เปอร์เซ็นต์

4.5 ทดสอบการติดไฟและการใช้งานความร้อนแท่งเชื้อเพลิงโรงงานฟอกย้อม

การจุดติดจะดูเวลาที่แท่งเชื้อเพลิงติดไฟนับตั้งแต่เริ่มจุดไฟ และเมื่อทดสอบการใช้งานความร้อนโดยต้มน้ำทั้ง 3 อัตราส่วน จะพิจารณาการทำให้หน้าเดือดของแท่งเชื้อเพลิง และระยะเวลาที่ทำให้หน้าเดือด จะทำการเลือกอัตราส่วนที่ต้มน้ำได้เดือดหลายหม้อมากที่สุด แต่ถ้าได้จำนวนหม้อที่เดือดเท่ากันจะเลือกอัตราส่วนที่ให้อุณหภูมิสุดท้ายสูงที่สุด

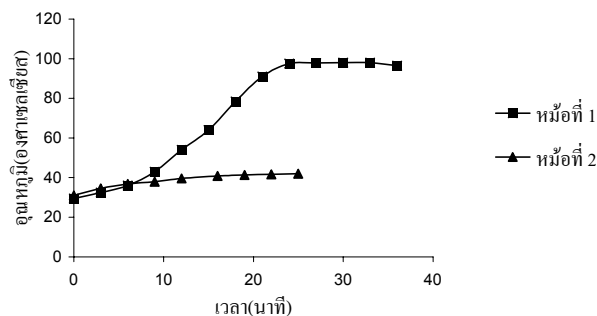
4.5.1 แท่งเชื้อเพลิงจากตะกอนสดโรงงานฟอกย้อม

ผลการทดสอบการใช้งานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงและทำการบันทึกอุณหภูมิทุก 3 นาทีจนกระทั่งน้ำเดือด ได้แสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลดังรูป 4.17, 4.18 และ 4.19



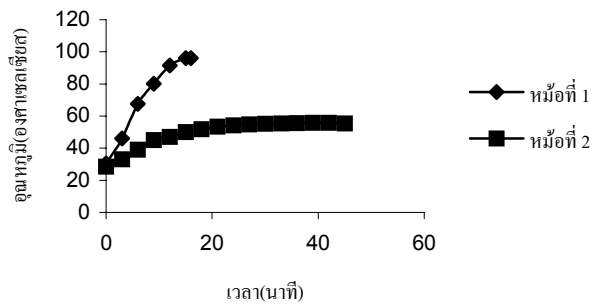
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ของเวลากับอุณหภูมิต้มน้ำของแท่งเชื้อเพลิงตะกอนสดโรงงานฟอกย้อม ที่อัตราส่วน 1:1

ผลการทดสอบพบว่าแท่งเชื้อเพลิงอัตราส่วน 1:1 ใช้เวลาในการจุดติดไฟ 4 นาที การเผาไหม้ช่วงแรกจะมีควันเกิดมาก แต่เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 15 นาที ควันจะหายไปและเกิดการลุกไหม้เป็นถ่านสีแดง แท่งเชื้อเพลิงไม่สามารถต้มน้ำเดือดได้ เวลาที่ต้มน้ำเท่ากับ 30 นาที อุณหภูมิสุดท้ายของน้ำเท่ากับ 91.8 องศาเซลเซียส ปริมาณเถ้าที่เหลือจากการเผาไหม้ค่อนข้างสูงคือ 43.12 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ของเวลากับอุณหภูมิต้มน้ำของแท่งเชื้อเพลิงตะกอนสดโรงงานฟอกย้อม ที่อัตราส่วน 1:2

ผลการทดสอบพบว่าแท่งเชื้อเพลิงอัตราส่วน 1:2 ใช้เวลาในการจุดติดไฟ 3 นาที การเผาไหม้ช่วงแรกจะมีควันเกิดขึ้นมาก แต่เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 15 นาที ควันจะหายไปและเกิดการลุกไหม้เป็นถ่านสีแดง แท่งเชื้อเพลิงสามารถต้มน้ำเดือด 1 หม้อ เวลาที่ต้มน้ำเดือดเท่ากับ 27 นาที ส่วนอุณหภูมิสุดท้ายของหม้อที่ 2 เท่ากับ 42 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 25 นาที ปริมาณเถ้าที่เหลือจากการเผาไหม้คือ 23.12 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ของเวลากับอุณหภูมิต้มน้ำของแท่งเชื้อเพลิงตะกอนสดโรงงานฟอกย้อม ที่อัตราส่วน 1:3

ผลการทดสอบพบว่าแท่งเชื้อเพลิงอัตราส่วน 1:3 ใช้เวลาในการจุดติดไฟ 2 นาที การเผาไหม้ช่วงแรก จะมีควันเกิดขึ้นปานกลาง แต่เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 15 นาที ควันจะหายไปและเกิดการลุกไหม้เป็นถ่านสีแดง แท่งเชื้อเพลิงสามารถต้มน้ำเดือด 1 หม้อ เวลาที่ต้มน้ำเดือดเท่ากับ 15 นาที ส่วนอุณหภูมิสุดท้ายของหม้อที่ 2 เท่ากับ 55.9 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 42 นาที ปริมาณเถ้าที่เหลือจากการเผาไหม้คือ 23.12 เปอร์เซ็นต์

เมื่อทำการเปรียบเทียบการใช้งานความร้อนโดยการต้มน้ำของแท่งเชื้อเพลิง 3 อัตราส่วน สามารถสรุปผลการทดสอบออกมาได้ดังตาราง 4.33

ตารางที่ 4.33 ผลการทดสอบการใช้งานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงตะกอนสดโรงงานฟอกย้อม

กากตะกอน:เปลือกมะพร้าวอ่อน	1:1	1:2	1:3
เวลาจุดติดไฟ(นาที)	4	3	2
จำนวนหม้อที่เดือด	-	1	1
พลังงานความร้อนที่น้ำได้รับ (kcal)	247.2	317.2	372.4
เถ้า (%)	43.12	38.40	23.12

ผลการทดสอบเวลาจุดติดไฟพบว่าที่อัตราส่วน 1 :3 ลุกติดไฟง่ายที่สุด เนื่องจากมีเปลือกมะพร้าวอ่อนมาผสมกับกากตะกอนทำให้เชื้อเพลิงอัดแท่งสามารถจุดติดไฟได้ง่ายขึ้น [45] โดยใช้เวลาน้อยกว่า 1:1 และ 1:2 และจะเห็นว่าแท่งเชื้อเพลิงอัตราส่วน 1:1 ไม่สามารถต้มน้ำให้เดือดได้ ส่วนที่อัตราส่วน 1:2 และ 1:3 สามารถต้มน้ำให้เดือดได้ 1 หม้อเท่ากัน โดยอัตราส่วนที่ให้พลังงานความร้อนสูงสุดคือ 1:3 (372.4 kcal) ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากอัตราส่วน 1:3 มีปริมาณเปลือกมะพร้าวอ่อนมากที่สุด (กากตะกอนและเปลือกมะพร้าวอ่อนมีค่าความร้อนเท่ากับ 1,774 และ 4,810 cal/g) จึงเป็นตัวเพิ่มค่าความร้อนให้

กับแท่งเชื้อเพลิง นอกจากนี้พบว่าปริมาณเถ้าหลังจากการเผาไหม้ของแท่งเชื้อเพลิงที่อัตราส่วน 1:3 มีค่าน้อยที่สุด คือ 23.12 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นอัตราส่วน 1:3 ให้ความร้อนในการใช้งานได้ดีที่สุด

ตารางที่ 4.34 ปริมาณโลหะหนักในเถ้าของแท่งเชื้อเพลิงตะกอนสดโรงงานฟอกย้อมกับเปลือกมะพร้าวอ่อนที่อัตราส่วน 1:1

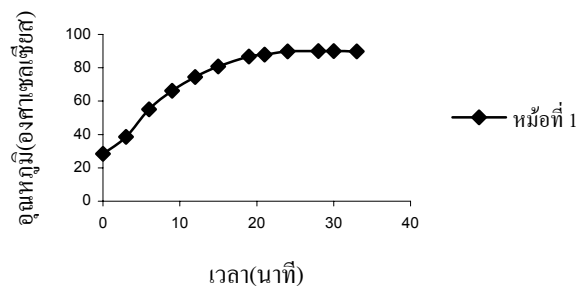
รายการ	เถ้า	Reference Std. (mg/kg)
ตะกั่ว (mg/kg)	20.6	150
แคดเมียม (mg/kg)	1.3	3
ปรอท (mg/kg)	0.0196	1
สารหนู (mg/kg)	0.0231	20

ที่มา : โครงการพัฒนาวิชาการดิน ปุ๋ย และสิ่งแวดล้อม ภาควิชาปฐพีวิทยา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เถ้าที่นำมาวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในเถ้าที่ได้จากการทดสอบการใช้งานความร้อน โดยการต้มน้ำ จะใช้เถ้าของแท่งเชื้อเพลิงกากตะกอนผสมเปลือกมะพร้าวอ่อนที่อัตราส่วน 1:1 เพราะเป็นอัตราส่วนเริ่มต้นและมีปริมาณกากตะกอนในส่วนผสมมากที่สุด และถ้าปริมาณโลหะหนักในอัตราส่วนนี้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานอัตราส่วนที่ตามมา คือ 1:2 และ 1:3 ซึ่งมีปริมาณกากตะกอนลดลงเรื่อยๆ ก็จะมีปริมาณโลหะหนักลดลงตามไปด้วยเช่นเดียวกัน โดยนำปริมาณโลหะหนักที่วิเคราะห์ได้เปรียบเทียบกับโลหะหนักจากค่ามาตรฐาน ผลทดสอบพบว่าโลหะหนักที่ตรวจพบไม่เกินค่ามาตรฐานอ้างอิง

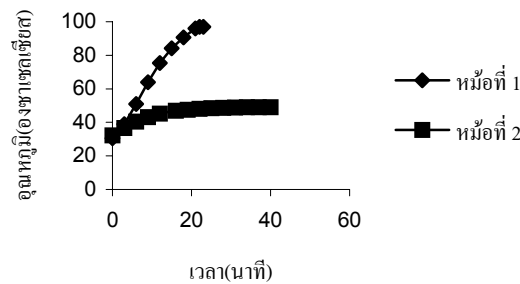
4.5.2 แท่งเชื้อเพลิงจากตะกอนโรงงานฟอกย้อมที่หมักแบบไม่มีอากาศ

ผลการทดสอบการใช้งานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงและทำการบันทึกอุณหภูมิทุก 3 นาทีจนกระทั่งน้ำเดือด ได้แสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลดังรูป 4.20, 4.21 และ 4.22



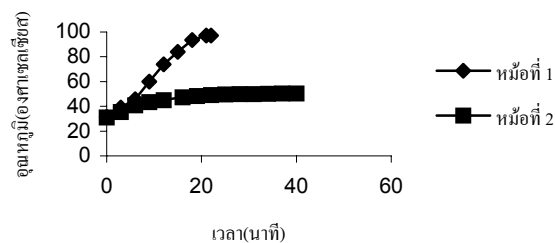
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ของเวลากับอุณหภูมิต้มน้ำแท่งเชื้อเพลิงตะกอนโรงงานฟอกย้อมที่หมักแบบไม่มีอากาศที่อัตราส่วน 1:1

ผลการทดสอบพบว่าแท่งเชื้อเพลิงอัตราส่วน 1:1 ใช้เวลาในการจุดติดไฟ 4 นาที การเผาไหม้ช่วงแรกจะมีควันเกิดมาก แต่เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 15 นาที ควันจะหายไปและเกิดการลุกไหม้เป็นถ่านสีแดง แท่งเชื้อเพลิงไม่สามารถต้มน้ำเดือดได้ เวลาที่ต้มน้ำเท่ากับ 30 นาที อุณหภูมิสุดท้ายของน้ำเท่ากับ 89.9 องศาเซลเซียส ปริมาณเถ้าที่เหลือจากการเผาไหม้ค่อนข้างสูงคือ 40.18 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ของเวลากับอุณหภูมิต้มน้ำแท่งเชื้อเพลิงตะกอน โรงงานฟอกย้อม ที่หมักแบบไม่มีอากาศที่อัตราส่วน 1:2

ผลการทดสอบพบว่าแท่งเชื้อเพลิงอัตราส่วน 1:2 ใช้เวลาในการจุดติดไฟ 2.30 นาที การเผาไหม้ช่วงแรกจะมีควันเกิดขึ้น แต่เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 15 นาที ควันจะหายไปและเกิดการลุกไหม้เป็นถ่านสีแดง แท่งเชื้อเพลิงสามารถต้มน้ำเดือด 1 หม้อ เวลาที่ต้มน้ำเดือดเท่ากับ 22 นาที ส่วนอุณหภูมิสุดท้ายของหม้อที่ 2 เท่ากับ 49.1 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 37 นาที ปริมาณเถ้าที่เหลือจากการเผาไหม้คือ 33.6 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ของเวลากับอุณหภูมิต้มน้ำแท่งเชื้อเพลิงตะกอน โรงงานฟอกย้อม ที่หมักแบบไม่มีอากาศที่อัตราส่วน 1:3

ผลการทดสอบพบว่าแท่งเชื้อเพลิงอัตราส่วน 1:3 ใช้เวลาในการจุดติดไฟ 2 นาที การเผาไหม้ช่วงแรกจะมีควันเกิดขึ้น แต่เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 10 นาที ควันจะหายไปและเกิดการลุกไหม้เป็นถ่านสีแดง แท่งเชื้อเพลิงสามารถต้มน้ำเดือด 1 หม้อ เวลาที่ต้มน้ำเดือดเท่ากับ 21 นาที ส่วนอุณหภูมิสุดท้ายของหม้อที่ 2 เท่ากับ 50.4 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 37 นาที ปริมาณเถ้าที่เหลือจากการเผาไหม้คือ 27.8 เปอร์เซ็นต์

เมื่อทำการเปรียบเทียบการใช้งานความร้อนโดยการต้มน้ำของแท่งเชื้อเพลิง 3 อัตราส่วน สามารถสรุปผลการทดสอบออกมาได้ดังตาราง 4.35

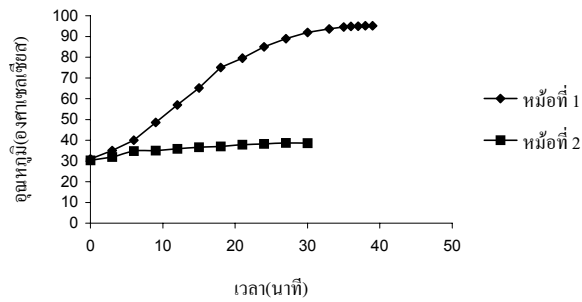
ตารางที่ 4.35 ผลทดสอบการใช้งานความร้อนแท่งเชื้อเพลิงโรงงานฟอกย้อมที่หมักแบบไม่มีอากาศ 3 อัตราส่วน

ตะกอน:ขุยมะพร้าวอ่อน	1:1	1:2	1:3
เวลาจุดติดไฟ(นาที)	4	2.30	2
จำนวนหม้อที่เดือด	-	1	1
พลังงานความร้อนที่น้ำได้รับ (kcal)	245.6	332.4	340.4
เถ้า (%)	40.18	33.6	27.8

ผลการทดสอบเวลาจุดติดไฟพบว่าที่อัตราส่วน 1 :3 ลุกติดไฟง่ายที่สุด เนื่องจากมีเปลือกมะพร้าวอ่อนมาผสมกับกากตะกอนทำให้เชื้อเพลิงอัดแท่งสามารถจุดติดไฟได้ง่ายขึ้น [45] โดยใช้เวลาน้อยกว่า 1:1 และ 1:2 และจะเห็นว่าแท่งเชื้อเพลิงอัตราส่วน 1:1 ไม่สามารถต้มน้ำให้เดือดได้ ส่วนที่อัตราส่วน 1:2 และ 1:3 สามารถต้มน้ำให้เดือดได้ 1 หม้อเท่ากัน โดยอัตราส่วนที่ให้พลังงานความร้อนสูงที่สุดคือ 1:3 (340.4 kcal) ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากอัตราส่วน 1:3 มีปริมาณเปลือกมะพร้าวอ่อนมากที่สุด (กากตะกอนและเปลือกมะพร้าวอ่อนมีค่าความร้อนเท่ากับ 2,817 และ 4,810 cal/g) จึงเป็นตัวเพิ่มค่าความร้อนให้กับแท่งเชื้อเพลิง นอกจากนี้พบว่าปริมาณเถ้าหลังจากการเผาไหม้ของแท่งเชื้อเพลิงที่อัตราส่วน 1:3 มีค่าน้อยที่สุด คือ 27.8 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นอัตราส่วน 1:3 ให้ความร้อนในการใช้งานได้ดีที่สุด

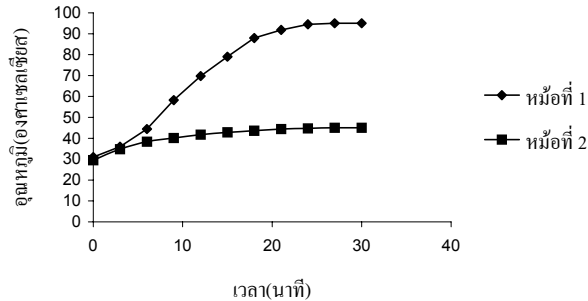
4.5.3 แท่งเชื้อเพลิงจากตะกอนโรงงานฟอกย้อมที่หมักแบบมีอากาศ

ผลการทดสอบการใช้งานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงและทำการบันทึกอุณหภูมิทุก 3 นาทีจนกระทั่งน้ำเดือด ได้แสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลดังรูป 4.23, 4.24 และ 4.25



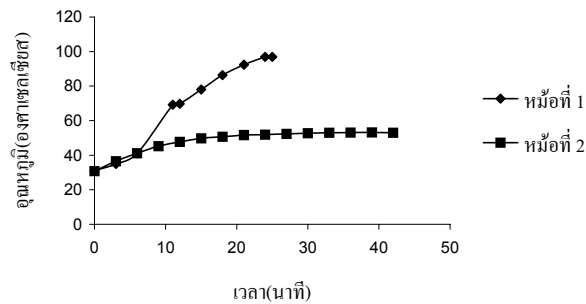
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ของเวลากับอุณหภูมิต้มน้ำของแท่งเชื้อเพลิงตะกอนโรงงานฟอกย้อม ที่หมักแบบมีอากาศที่อัตราส่วน 1:1

ผลการทดสอบพบว่าแท่งเชื้อเพลิงอัตราส่วน 1:1 ใช้เวลาในการจุดติดไฟ 3 นาที การเผาไหม้ช่วงแรกจะมีควันเกิดขึ้น แต่เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 15 นาที ควันจะหายไปและเกิดการลุกไหม้เป็นถ่านสีแดง แท่งเชื้อเพลิงสามารถต้มน้ำเดือด 1 หม้อ เวลาที่ต้มน้ำเดือดเท่ากับ 39 นาที ส่วนอุณหภูมิสุดท้ายของหม้อที่ 2 เท่ากับ 38.7 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 59 นาที ปริมาณเถ้าที่เหลือจากการเผาไหม้คือ 38.66 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ของเวลากับอุณหภูมิต้มน้ำของแท่งเชื้อเพลิงตะกอนโรงงานฟอกย้อม ที่หมักแบบมีอากาศที่อัตราส่วน 1:2

ผลการทดสอบพบว่าแท่งเชื้อเพลิงอัตราส่วน 1:2 ใช้เวลาในการจุดติดไฟ 3 นาที การเผาไหม้ช่วงแรกจะมีควันเกิดขึ้น แต่เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 15 นาที ควันจะหายไปและเกิดการลุกไหม้เป็นถ่านสีแดง แท่งเชื้อเพลิงสามารถต้มน้ำเดือด 1 หม้อ เวลาที่ต้มน้ำเดือดเท่ากับ 29 นาที ส่วนอุณหภูมิสุดท้ายของหม้อที่ 2 เท่ากับ 45 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 27 นาที ปริมาณเถ้าที่เหลือจากการเผาไหม้คือ 31.52 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ของเวลากับอุณหภูมิต้มน้ำของแท่งเชื้อเพลิงตะกอน โรงงานฟอกย้อม ที่หมักแบบมีอากาศที่อัตราส่วน 1:3

ผลการทดสอบพบว่าแท่งเชื้อเพลิงอัตราส่วน 1:3 ใช้เวลาในการจุดติดไฟ 2 นาที การเผาไหม้ช่วงแรกจะมีควันเกิดขึ้น แต่เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 110 นาที ควันจะหายไปและเกิดการลุกไหม้เป็นถ่านสีแดง แท่งเชื้อเพลิงสามารถต้มน้ำเดือด 1 หม้อ เวลาที่ต้มน้ำเดือดเท่ากับ 24 นาที ส่วนอุณหภูมิสุดท้ายของหม้อที่ 2 เท่ากับ 53 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 32 นาที ปริมาณเถ้าที่เหลือจากการเผาไหม้คือ 26.6 เปอร์เซ็นต์

เมื่อทำการเปรียบเทียบการใช้งานความร้อนโดยการต้มน้ำของแท่งเชื้อเพลิง 3 อัตราส่วน สามารถสรุปผลการทดสอบออกมาได้ดังตาราง 4.36

ตารางที่ 4.36 การทดสอบการใช้งานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงตะกอน โรงงานฟอกย้อมที่หมักแบบมีอากาศ 3 อัตราส่วน

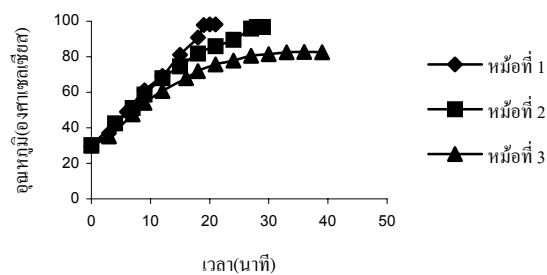
ตะกอน:ขุยมะพร้าวอ่อน	1:1	1:2	1:3
เวลาจุดติดไฟ(นาที)	3	3	2
จำนวนหม้อที่เดือด	1	1	1
พลังงานความร้อนที่น้ำได้รับ (kcal)	290	318	352.4
เถ้า (%)	38.66	31.52	26.6

ผลการทดสอบเวลาจุดติดไฟพบว่าที่อัตราส่วน 1 :3 ลุกติดไฟง่ายที่สุด เนื่องจากมีเปลือกมะพร้าวอ่อนมาผสมกับกากตะกอนทำให้เชื้อเพลิงอัดแท่งสามารถจุดติดไฟได้ง่ายขึ้น [35] โดยใช้เวลาน้อยกว่า 1:1 และ 1:2 และจะเห็นว่าแท่งเชื้อเพลิงทั้ง 3 อัตราส่วนสามารถต้มน้ำให้เดือดได้ 1 หม้อเท่ากัน แต่ว่าอัตราส่วนที่ให้พลังงานความร้อนสูงสุดคือ 1:3 (352.4 kcal) ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากอัตราส่วน 1:3 มีปริมาณเปลือกมะพร้าวอ่อนมากที่สุด(กากตะกอนและเปลือกมะพร้าวอ่อนมีค่าความร้อนเท่ากับ

2,817 และ 4,810 cal/g) จึงเป็นตัวเพิ่มค่าความร้อนให้กับแท่งเชื้อเพลิง นอกจากนี้พบว่าปริมาณเถ้าหลังจากการเผาไหม้ของแท่งเชื้อเพลิงที่อัตราส่วน 1:3 มีค่าน้อยที่สุด คือ 26.6 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นอัตราส่วน 1:3 ให้ความร้อนในการใช้งานได้ดีที่สุด

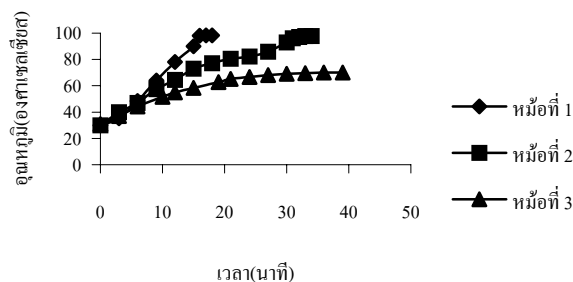
4.5.4 ถ่านแท่งเชื้อเพลิงตะกอนสดโรงงานฟอกย้อม

ผลการทดสอบการใช้งานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงและทำการบันทึกอุณหภูมิทุก 3 นาทีจนกระทั่งน้ำเดือด ได้แสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลดังรูป 4.26, 4.27 และ 4.28



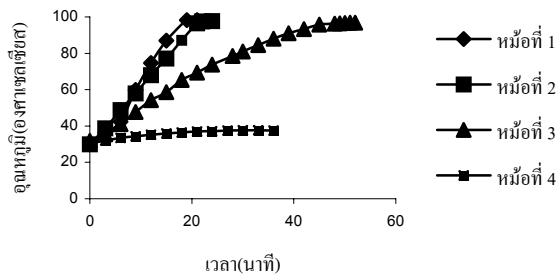
รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ของเวลากับอุณหภูมิต้มน้ำของถ่านจากแท่งเชื้อเพลิงโรงงานฟอกย้อมที่อัตราส่วน 1:1

ผลการทดสอบพบว่าแท่งเชื้อเพลิงอัตราส่วน 1:1 ใช้เวลาในการจุดติดไฟ 2 นาที การเผาไหม้ช่วงแรกจะมีควันเกิดปานกลาง แต่เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 10 นาที ควันจะหายไปและเกิดการลุกไหม้เป็นถ่านสีแดง แท่งเชื้อเพลิงสามารถต้มน้ำเดือด 2 หม้อ เวลาที่ต้มน้ำเดือดหม้อที่ 1 เท่ากับ 20 นาที ส่วนเวลาที่ต้มน้ำเดือดหม้อที่ 2 เท่ากับ 28 นาที อุณหภูมิสุดท้ายของหม้อที่ 3 เท่ากับ 82.7 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 37 นาที ปริมาณเถ้าที่เหลือจากการเผาไหม้เท่ากับ 40.8 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ของเวลากับอุณหภูมิต้มน้ำของถ่านจากแท่งเชื้อเพลิงโรงงานฟอกย้อมที่อัตราส่วน 1:2

ผลการทดสอบพบว่าแท่งเชื้อเพลิงอัตราส่วน 1:2 ใช้เวลาในการจุดติดไฟ 2 นาที การเผาไหม้ช่วงแรกจะมีควันเกิดปานกลาง แต่เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 10 นาที ควันจะหายไปและเกิดการลุกไหม้เป็นถ่านสีแดง แท่งเชื้อเพลิงสามารถค้ำน้ำเดือด 2 หม้อ เวลาที่ค้ำน้ำเดือดหม้อที่ 1 เท่ากับ 19 นาที ส่วนเวลาที่ค้ำน้ำเดือดหม้อที่ 2 เท่ากับ 33 นาที อุณหภูมิสุดท้ายของหม้อที่ 3 เท่ากับ 87.5 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 40 นาที ปริมาณเถ้าที่เหลือจากการเผาไหม้เท่ากับ 35.72 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ของเวลากับอุณหภูมิค้ำน้ำของถ่านจากแท่งเชื้อเพลิงโรงงานฟอกย้อมที่อัตราส่วน 1:3

ผลการทดสอบพบว่าแท่งเชื้อเพลิงอัตราส่วน 1:3 ใช้เวลาในการจุดติดไฟ 1 นาที การเผาไหม้ช่วงแรกจะมีควันเกิดขึ้นเล็กน้อย แต่เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 10 นาที ควันจะหายไปและเกิดการลุกไหม้เป็นถ่านสีแดง แท่งเชื้อเพลิงสามารถค้ำน้ำเดือด 3 หม้อ เวลาที่ค้ำน้ำเดือดหม้อที่ 1 เท่ากับ 20 นาที ส่วนเวลาที่ค้ำน้ำเดือดหม้อที่ 2 เท่ากับ 23 นาที เวลาที่ค้ำน้ำเดือดหม้อที่ 3 เท่ากับ 52 นาที อุณหภูมิสุดท้ายของหม้อที่ 3 เท่ากับ 37.5 องศาเซลเซียส ปริมาณเถ้าที่เหลือจากการเผาไหม้เท่ากับ 31.54 เปอร์เซ็นต์ เมื่อทำการเปรียบเทียบการใช้งานความร้อนโดยการค้ำน้ำของแท่งเชื้อเพลิง 3 อัตราส่วนสามารถสรุปผลการทดสอบออกมาได้ดังตาราง 4.37

ตารางที่ 4.37 การทดสอบการใช้งานความร้อนของถ่านจากเชื้อเพลิงโรงงานฟอกย้อมที่ 3 อัตราส่วน

ตะกอน:ขุยมะพร้าวอ่อน	1:1	1:2	1:3
เวลาจุดติดไฟ(นาที)	2	2	1
จำนวนหม้อที่เดือด	2	2	3
พลังงานความร้อนที่น้ำได้รับ (kcal)	750	770.8	828.4
เถ้า (dry.wt.%)	40.8	35.72	31.54

ผลการทดสอบเวลาจุดติดไฟพบว่าที่อัตราส่วน 1 :3 ลูกติดไฟง่ายกว่า 1:1 และ 1:2 เนื่องจากมีเปลือกมะพร้าวอ่อนมาผสมกับกากตะกอนทำให้เชื้อเพลิงอัดแท่งสามารถจุดติดไฟได้ง่ายขึ้น [45] และจะเห็นว่าแท่งเชื้อเพลิงอัตราส่วน 1:1 และ 1:2 สามารถต้มน้ำให้เดือดได้ 2 หม้อเท่ากัน ส่วนอัตราส่วน 1:3 สามารถต้มน้ำให้เดือดได้ 3 หม้อ และให้พลังงานความร้อนสูงสุด (828.4 kcal) ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากอัตราส่วน 1:3 มีปริมาณเปลือกมะพร้าวอ่อนมากที่สุด (กากตะกอนและเปลือกมะพร้าวอ่อนมีค่าความร้อนเท่ากับ 2,817 และ 4,810 cal/g) จึงเป็นตัวเพิ่มค่าความร้อนให้กับแท่งเชื้อเพลิง นอกจากนี้พบว่าปริมาณเถ้าหลังจากการเผาไหม้ของแท่งเชื้อเพลิงที่อัตราส่วน 1:3 มีค่าน้อยที่สุด คือ 31.54 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นอัตราส่วน 1:3 ให้ความร้อนในการใช้งานได้ดีที่สุด

4.5.5 การเปรียบเทียบการใช้งานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงจากตะกอนโรงงานฟอกย้อม

จากผลการวิเคราะห์การใช้งานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงทุกชนิดทั้งที่ได้จากตะกอนที่ไม่ปรับปรุงและผ่านการปรับปรุงกับเปลือกมะพร้าวอ่อนที่อัตราส่วนต่างๆคือ 1:1, 1:2 และ 1:3 โดยนำมาต้มน้ำภายใต้สภาวะเดียวกันผลการทดสอบพบว่าอัตราส่วนที่ดีที่สุดคือ 1:3 ทั้งหมด ซึ่งได้นำอัตราส่วนนี้ไปทำการวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบการใช้งานความร้อนและปริมาณค่าความร้อน

ตารางที่ 4.38 เปรียบเทียบการใช้งานความร้อนและปริมาณเถ้าของอัตราส่วน 1:3 ของแท่งเชื้อเพลิงตะกอนสดและแท่งที่ปรับปรุง

แท่งเชื้อเพลิง	เวลาที่ใช้ในการติดไฟ (นาที)	ค่าความร้อน (cal/g)	เถ้า (%)	พลังงานที่น้ำได้รับ (kcal)	ประสิทธิภาพการใช้งานความร้อน
กากตะกอนสด	-	1,774	43.24	-	-
แท่งเชื้อเพลิงตะกอนสด	2	2,546	23.12	372.4	29.25
หมักแบบไม่มีอากาศ	2	2,583	27.80	340.4	26.35
หมักแบบมีอากาศ	2	2,851	26.60	352.4	24.72
เผาถ่าน	1	3,729	31.54	828.4	44.44
ถ่านไม้	8	7,391	4.92	941.6	25.44

ผลการเปรียบเทียบการใช้งานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงจากกากตะกอนโรงงานฟอกย้อมทั้ง 3 แบบพบว่าแท่งเชื้อเพลิงจากตะกอนสด (ไม่ได้ปรับปรุง) หมักแบบไม่มีอากาศ และหมักแบบมีอากาศสามารถต้มน้ำให้เดือดได้ 1 หม้อเท่ากัน เวลาที่ใช้ในการติดไฟเท่ากัน ส่วนค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงจากกากตะกอนที่หมักแบบไม่มีอากาศและมีอากาศมีค่ามากกว่าแท่งเชื้อเพลิงจากกากตะกอนสดที่เป็น

เช่นนี้เนื่องจากว่ากากตะกอนที่ผ่านการหมักแล้วจะมีความคงตัวมากขึ้น แต่จะเห็นว่าประสิทธิภาพการใช้งานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงจากกากตะกอนที่ผ่านการหมักทั้งสองแบบมีค่าต่ำกว่าแท่งเชื้อเพลิงจากกากตะกอนสด ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการหมักทำให้กากตะกอนโรงงานฟอกย้อมเผาไหม้ได้ยากขึ้น ดังนั้นพลังงานความร้อนที่น้ำได้รับจึงน้อยกว่าแท่งเชื้อเพลิงจากกากตะกอนสด ส่วนปริมาณเถ้าที่เหลือจากการเผาไหม้มีลักษณะสีเทา และมีเปอร์เซ็นต์ใกล้เคียงกัน

แท่งเชื้อเพลิงที่เป็นถ่านสามารถต้มน้ำเดือดถึง 3 หม้อ และพลังงานความร้อนที่น้ำได้รับมีค่าสูงกว่าแท่งเชื้อเพลิงตะกอนสดและแท่งเชื้อเพลิงที่หมักทั้งสองแบบ เนื่องจากว่าแท่งเชื้อเพลิงที่ผ่านการเผาให้เป็นถ่านแล้ว จะมีปริมาณฟิสิกส์คาร์บอนเพิ่มขึ้น ทำให้มีค่าความร้อนสูงขึ้นเมื่อหาประสิทธิภาพการใช้งานความร้อนพบว่ามีความสูงกว่าแท่งเชื้อเพลิงทั้ง 3 แบบ นอกจากนี้จะเห็นว่าถ่านจากแท่งเชื้อเพลิงจะติดไฟง่าย เนื่องจากเมื่อนำแท่งเชื้อเพลิงซึ่งมีส่วนประกอบของเปลือกมะพร้าวอ่อนไปทำการเผาให้เป็นถ่าน จะได้ถ่านที่มีลักษณะพรุน ทำให้ติดไฟง่ายและลุกไหม้ดี สามารถต้มน้ำให้เดือดได้ถึง 3 หม้อ แต่ว่าปริมาณเถ้าของถ่านแท่งเชื้อเพลิงเท่ากับ 44.44 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมากกว่าแท่งเชื้อเพลิงทั้ง 3 แบบ เนื่องจากแท่งเชื้อเพลิงที่ผ่านการเผาให้เป็นถ่านแล้ว จะมีปริมาณความชื้นและสารระเหยลดลงมาก ทำให้เปอร์เซ็นต์เถ้าในถ่านแท่งเชื้อเพลิงสูงขึ้น

จะเห็นว่าการปรับปรุงคุณภาพกากตะกอน โรงงานฟอกย้อมโดยการหมักทั้งสองแบบก่อนที่จะนำมาใช้ผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง สามารถทำให้คุณสมบัติทางกายภาพของกากตะกอนดีขึ้นทั้งในเรื่องกลิ่นสีของกากตะกอน แต่จะเห็นว่าในส่วนของการใช้งานความร้อนจะต่ำกว่าแท่งเชื้อเพลิงตะกอนสด ส่วนการปรับปรุงโดยการเผาถ่านดีที่สุดทั้งในเรื่องการกำจัดกลิ่นและเชื้อโรค นอกจากนี้การนำไปใช้งานด้านความร้อนก็ดีที่สุด สามารถติดไฟง่าย ต้มน้ำเดือดถึง 3 หม้อ โดยให้พลังงานความร้อนสูงถึง 828.4 kcal ซึ่งดีกว่าการหมักทั้ง 2 แบบ

เมื่อทำการเปรียบเทียบการใช้งานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงกับถ่านไม้ พบว่าถ่านไม้มีค่าความร้อนสูงกว่าแท่งเชื้อเพลิง แต่มีประสิทธิภาพการใช้งานความร้อนต่ำกว่าแท่งเชื้อเพลิงทั้ง 4 แบบ โดยเฉพาะแท่งเชื้อเพลิงที่เผาเป็นถ่านมีประสิทธิภาพการใช้งานความร้อนสูงถึง 39.46 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ถ่านไม้มีประสิทธิภาพเพียง 25.44 เปอร์เซ็นต์ จึงทำให้เมื่อนำไปทดสอบการต้มน้ำแล้วพบว่าพลังงานความร้อนที่น้ำได้รับจากถ่านแท่งเชื้อเพลิงมีค่าใกล้เคียงกับถ่านไม้ (910 และ 941.6 kcal ตามลำดับ) แม้ว่าถ่านแท่งเชื้อเพลิงจะมีค่าความร้อนต่ำกว่าก็ตาม ดังนั้นถ่านแท่งเชื้อเพลิงจึงน่าจะมีศักยภาพในการนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนถ่านไม้ได้

บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการวิจัยเรื่องการศึกษาสัณยภาพกากตะกอนน้ำเสียอุตสาหกรรมประเภทอนินทรีย์สารเพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง โดยการนำกากตะกอนที่ผ่านการบำบัดแบบ Activated Sludge จากโรงงานอุตสาหกรรม 2 ประเภทคือ โรงงานผลิตเชื้อกระดาษและโรงงานฟอกย้อม และใช้เปลือกมะพร้าวอ่อนเป็นส่วนผสมในการเพิ่มค่าความร้อนและทำให้ปริมาณเถ้าลดลงได้ และก่อนที่จะทำการอัดแท่งได้นำกากตะกอนมาผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดยการหมักแบบไม่มีอากาศ หมักแบบมีอากาศ และนำแท่งเชื้อเพลิงจากกากตะกอนสดไปทำการเผาถ่าน สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 คุณสมบัติเบื้องต้นทางกายภาพและทางด้านเชื้อเพลิง

ผลการวิเคราะห์เบื้องต้นของกากตะกอนจากโรงงานผลิตเชื้อกระดาษ ปัญจพล อินคัสทรี จำกัด พบว่ามีค่าความร้อน 2,817 แคลอรี/กรัม ซึ่งมีศักยภาพสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงพลังงานได้ โดยกากตะกอนสดมีปริมาณความชื้นเท่ากับ 80.59 เปอร์เซ็นต์ และมีคุณสมบัติเป็นตัวประสานที่ดี จึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้ผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง

ผลการวิเคราะห์เบื้องต้นของกากตะกอนจากโรงงานฟอกย้อมผ้า พัฒนาผ้าไทยจำกัด พบว่าค่าความร้อนน้อยกว่ากากตะกอนจากโรงงานผลิตเชื้อกระดาษคือ 1,774 แคลอรี/กรัม ซึ่งจะเห็นว่าศักยภาพที่จะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงพลังงานค่อนข้างต่ำ แต่ว่ามีคุณสมบัติเป็นตัวประสานที่ดี โดยปริมาณความชื้นของกากตะกอนสดเท่ากับ 80.71 เปอร์เซ็นต์ และสามารถที่จะนำมาใช้ผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งได้

เปลือกมะพร้าวอ่อนมีค่าความร้อนสูงคือ 4,180 แคลอรี/กรัม เหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงพลังงานได้ดี ประกอบกับมีปริมาณเถ้าเพียง 3.26 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านไม้ทั่วไปที่มีปริมาณเถ้าประมาณ 4 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้พบว่าเปลือกมะพร้าวอ่อนมีปริมาณกำมะถันต่ำเพียง 0.07 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับ RDF และถ่านหินไบทুমินัสซึ่งมีปริมาณกำมะถันอยู่ที่ 0.3 และ 1.0 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ [28] ดังนั้นเปลือกมะพร้าวอ่อนสามารถนำมาเป็นวัสดุเพิ่มค่าความร้อนให้กับแท่งเชื้อเพลิงได้ดี โดยเฉพาะกากตะกอนจากโรงงานฟอกย้อมที่มีค่าความร้อนต่ำ

5.1.2 ปริมาณโลหะหนักในกากตะกอน

ปริมาณโลหะหนัก ปรอท แคดเมียม ตะกั่ว และ สารหนู ในตะกอนน้ำเสียของทั้งสองโรงงานทั้งที่เป็นกากตะกอนสดและกากตะกอนที่ผ่านการหมักพบว่ามีค่าอยู่ในช่วง (0.0025-0.0027, 2.48-3.00, 23.4-27.0 และ 0.0029-0.0033 mg/kg ตามลำดับ) ซึ่งไม่เกินมาตรฐานที่กำหนด [7] (1, 3, 150 และ 20 mg/kg ตามลำดับ) จึงสามารถที่จะนำกากตะกอนจากทั้งสองโรงงานไปใช้ประโยชน์โดยการนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งได้

5.1.3 การศึกษาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่นำมาใช้ในการศึกษา

อัตราส่วนผสมที่นำมาใช้ในการศึกษาการอัดแท่งระหว่างกากตะกอนกับเปลือกมะพร้าวอ่อนคือ 1:1, 1:2, และ 1:3 เนื่องจาก 3 อัตราส่วนนี้เมื่อทำการอัดแท่งเบื้องต้นแล้วพบว่าสามารถอัดออกมาเป็นแท่งได้ดีทั้งกากตะกอนโรงงานผลิตเชื้อกระดาษและกากตะกอนโรงงานฟอกย้อม ซึ่งเริ่มตั้งแต่อัตราส่วน 1:1 ที่มีปริมาณกากตะกอนในส่วนผสมมากที่สุด รองลงมาคือ 1:2 และ 1:3 น้อยที่สุด

5.1.4 ผลการอัดแท่งทั้ง 3 อัตราส่วน

ผลการอัดแท่งตะกอน โรงงานผลิตเชื้อกระดาษสามารถอัดแท่งได้ทุกอัตราส่วน เวลาที่ใช้ในการอัดแท่งเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของเปลือกมะพร้าวที่เพิ่มขึ้นพลังงานไฟฟ้าที่ใช้แปรตามเวลาที่ใช้ในการอัดแท่งโดยรวมแล้วการอัดแท่งอัดได้ดีมาก ลักษณะแท่งเชื้อเพลิงมีผิวเรียบดีมีความแข็งแรง การแตกร่วนน้อยมากและใกล้เคียงกันทุกอัตราส่วน

ผลการอัดแท่งตะกอน โรงงานฟอกย้อมสามารถอัดแท่งได้ทุกอัตราส่วน เวลาที่ใช้ในการอัดแท่งเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของเปลือกมะพร้าวที่เพิ่มขึ้นแต่ในผลการทดลองไม่แปรตามอัตราส่วนของเปลือกมะพร้าวอ่อน นี่เป็นเพราะว่าความชื้นของส่วนผสมน้อยเกินไปถ้าเพิ่มน้ำเข้าไปจะทำให้อัดออกมาได้ดีขึ้น พลังงานไฟฟ้าที่ใช้แปรตามเวลาที่ใช้ในการอัดแท่ง โดยรวมแล้วการอัดแท่งอัดได้ดีมาก ลักษณะแท่งเชื้อเพลิงมีผิวเรียบดีมีความแข็งแรง การแตกร่วนน้อยมากและใกล้เคียงกันทุกอัตราส่วน

ดัชนีการแตกร่วนของแท่งเชื้อเพลิงจากกากตะกอนทั้งสองโรงงานใกล้เคียง 1 ทั้ง 3 อัตราส่วน ซึ่งอยู่ในช่วง 0.996-0.999 โดยมีการรายงานการวิจัยไว้ว่าดัชนีการแตกร่วนที่อยู่ระหว่าง 0.5-1.0 มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้งาน [31] ดังนั้นแท่งเชื้อเพลิงที่ได้มีความเหมาะสมและมีความแข็งแรงเพียงพอในการขนส่ง

5.1.5 การปรับปรุงกากตะกอนน้ำเสีย

5.1.5.1 การหมักแบบไม่มีอากาศ

กากตะกอนจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษที่ผ่านการหมักแบบไม่มีอากาศ ทำให้คุณสมบัติทางกายภาพของกากตะกอนดีขึ้น คือกลิ่นเหม็นลดลง เนื้อตะกอนยุ่ยและสีเข้มขึ้น เนื่องจากกากตะกอนมีความคงตัวมากขึ้นไม่เกิดการย่อยสลายอีก[14] อย่างไรก็ตามการหมักจะทำให้ค่าความร้อนของกากตะกอนลดลงจาก 2,817 แคลอรี/กรัม เป็น 2,292 แคลอรี/กรัม

กากตะกอนจากโรงงานฟอกย้อมที่ผ่านการหมักแบบไม่มีอากาศ ทำให้คุณสมบัติทางกายภาพของกากตะกอนดีขึ้น คือกลิ่นเหม็นลดลง เนื้อตะกอนยุ่ยและสีเข้มขึ้น เนื่องจากกากตะกอนมีความคงตัวมากขึ้นไม่เกิดการย่อยสลายอีก [14] โดยค่าความร้อนของกากตะกอนที่ผ่านการหมักมีค่า 1,658 แคลอรี/กรัม ซึ่งน้อยกว่ากากตะกอนสดที่มีค่าความร้อน 1,774 แคลอรี/กรัม แต่อย่างไรก็ตามก็ถือว่าค่าความร้อนใกล้เคียงกัน

5.1.5.2 การหมักแบบมีอากาศ

กากตะกอนจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษที่ผ่านการหมักแบบมีอากาศทำให้คุณสมบัติทางกายภาพของกากตะกอนดีขึ้น คือกลิ่นของกากตะกอนหายไป เนื่องจากกากตะกอนมีความคงตัวมากขึ้น จากผลการวิเคราะห์พบว่าค่าความร้อนกากตะกอนเพิ่มขึ้นจาก 2,817 แคลอรี/กรัม เป็น 3,281 แคลอรี/กรัม เนื่องจากกากตะกอนมีลักษณะร่วนจึงทำให้เศษฟางข้าวมีโอกาสเข้าไปผสมกับกากตะกอนได้

กากตะกอนจากโรงงานฟอกย้อมที่ผ่านการหมักแบบมีอากาศทำให้คุณสมบัติทางกายภาพของกากตะกอนดีขึ้น คือกลิ่นไม่เหม็นเลย เนื้อตะกอนยุ่ยและสีเข้มขึ้น เนื่องจากกากตะกอนมีความคงตัว ส่วนค่าความร้อนของกากตะกอนที่ผ่านการหมักเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยจาก 1,774 แคลอรี/กรัม เป็น 1,798 แคลอรี/กรัม แสดงว่าการหมักแบบมีอากาศมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงเพียงเล็กน้อย

5.1.6 การเผาถ่าน

การเผาถ่านนอกจากเป็นการกำจัดกลิ่นและเชื้อโรคแล้วยังเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการเผาไหม้ให้กับแท่งเชื้อเพลิง โดยแท่งเชื้อเพลิงที่ผ่านการเผาถ่านมีสีดำ น้ำหนักหายไปและเส้นผ่านศูนย์กลางลดลง เนื่องจากสารระเหยที่อยู่ในองค์ประกอบหายไป ส่วนที่เหลือจะเป็นถ่านคงตัว จึงทำให้พลังงานความร้อนที่น้ำได้รับจากถ่านแท่งเชื้อเพลิงกากตะกอน โรงงานผลิตเยื่อกระดาษและ โรงงานฟอกย้อมมีค่าสูง (910 และ 828.4 kcal ตามลำดับ) และใกล้เคียงกับถ่านไม้ (941.6 kcal)

5.1.7 การทดสอบการติดไฟของแท่งเชื้อเพลิง

- 1) แท่งเชื้อเพลิงตะกอนสด แท่งเชื้อเพลิงที่หมักแบบไม่มีอากาศ และแท่งเชื้อเพลิงที่หมักแบบมีอากาศ ที่ปริมาณความชื้นเท่ากัน ความสามารถติดไฟในเวลาที่ใช้ใกล้เคียงกันคือประมาณ 2 นาที
- 2) แท่งเชื้อเพลิงที่ติดไฟได้ดีที่สุดคือแท่งเชื้อเพลิงที่ผ่านการปรับปรุงโดยการเผาถ่าน
- 3) อัตราส่วนที่ติดไฟได้ดีที่สุดคือ 1:3 เพราะมีปริมาณเปลือกมะพร้าวอ่อนมากที่สุด ส่วน 1:1 ติดไฟยากที่สุดเพราะมีปริมาณตะกอนมากกว่า

5.1.8 การใช้งานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิง

- 1) การใช้งานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงกากตะกอนโรงงานผลิตเชื้อกระดาษที่ผ่านการหมักแบบไม่มีอากาศดีกว่าหมักแบบมีอากาศเล็กน้อย (503.6 และ 456.8 kcal) และอัตราส่วนที่ดีที่สุดคือ 1:3
- 2) การใช้งานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงกากตะกอนโรงงานฟอกย้อมที่ผ่านการหมักแบบมีอากาศดีกว่าหมักแบบไม่มีอากาศ (352.4 และ 340.4 kcal) แต่น้อยกว่าแท่งเชื้อเพลิงกากตะกอนสด (372.4 kcal) และอัตราส่วนที่ดีที่สุดคือ 1:3
- 3) การใช้งานความร้อนของถ่านแท่งเชื้อเพลิงโรงงานผลิตเชื้อกระดาษดีกว่าการหมักแบบไม่มีอากาศและมีอากาศ โดยพลังงานที่น้ำได้รับจากถ่านที่อัตราส่วนที่ดีที่สุด (1:3) อยู่ที่ 910 kcal
- 4) การใช้งานความร้อนของถ่านแท่งเชื้อเพลิงโรงงานฟอกย้อมดีกว่าการหมักแบบไม่มีอากาศและมีอากาศ โดยพลังงานที่น้ำได้รับจากถ่านที่อัตราส่วนที่ดีที่สุด (1:3) อยู่ที่ 828.4 kcal

5.1.9 เปรียบเทียบการปรับปรุงกากตะกอนทั้ง 3 แบบ

กากตะกอนโรงงานผลิตเชื้อกระดาษที่ผ่านการหมักทั้งสองแบบ จะมีคุณสมบัติทางกายภาพและการใช้งานความร้อนดีขึ้น โดยการปรับปรุงแบบหมักไม่มีอากาศจะให้พลังงานความร้อนสูงกว่าการหมักแบบมีอากาศ ส่วนการปรับปรุงโดยการเผาถ่านจะให้พลังงานความร้อนสูงสุด

กากตะกอนโรงงานฟอกย้อมที่ผ่านการหมักทั้งสองแบบ จะมีคุณสมบัติทางกายภาพดีขึ้น แต่การใช้งานความร้อนจะต่ำกว่าแท่งเชื้อเพลิงตะกอนสด ดังนั้นควรปรับปรุงโดยการเผาถ่าน ซึ่งให้พลังงานความร้อนสูงสุด

5.1.10 เปรียบเทียบการใช้งานความร้อนกับถ่านไม้

ถ่านไม้มีค่าความร้อนสูงกว่าแท่งเชื้อเพลิง แต่มีประสิทธิภาพการใช้งานความร้อนต่ำกว่า (25.44 เปอร์เซ็นต์) ส่วนพลังงานความร้อนที่น้ำได้รับมีค่าใกล้เคียงกับถ่านแท่งเชื้อเพลิง (941.6 และ 910 kcal ตามลำดับ) ดังนั้นถ่านแท่งเชื้อเพลิงจึงน่าจะมีศักยภาพในการนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนถ่านไม้ได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ทดลองผสมตะกอนโรงงานฟอกย้อมกับเปลือกมะพร้าวอ่อนในอัตราส่วนที่มากกว่า 1:3 เพื่อเพิ่มค่าความร้อนให้แท่งเชื้อเพลิง
- 2) ทำการทดสอบผสมกากตะกอนโรงงานฟอกย้อมกับเศษวัสดุทางการเกษตรชนิดอื่นๆ ที่มีค่าความร้อนมากกว่าเปลือกมะพร้าวอ่อน เพื่อให้สามารถนำแท่งเชื้อเพลิงไปใช้ประโยชน์ได้มากขึ้น
- 3) ในการผสมตะกอนกับเปลือกมะพร้าวอ่อนต้องตีให้เข้ากันก่อนทำการอัดแท่งเพื่อให้ส่วนผสมเป็นเนื้อเดียวกัน
- 4) ในการทดสอบการใช้งานความร้อนโดยการต้มน้ำอาจจะมีผลผิดพลาดได้ต้องมีการควบคุมปัจจัยต่างๆ ให้เหมาะสม เช่น ต้องทดสอบสถานะที่ไม่มีลมพัด ใช้เทอร์โมมิเตอร์ที่ละเอียดวัดอุณหภูมิได้ทุก 3 นาที เป็นต้น
- 5) ทำการศึกษาวิธีการปรับปรุงโดยวิธีอื่นๆ ที่เหมาะสม ใช้ต้นทุนการดำเนินการต่ำและขั้นตอนการดำเนินการที่ไม่ยุ่งยาก
- 6) ทำการศึกษาตะกอนจากโรงงานอุตสาหกรรมอื่นๆ ที่น่าจะมีศักยภาพเพียงพอในการนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง
- 7) ในการศึกษาการนำตะกอนน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมมาใช้เป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งต้องทำการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักในตะกอนด้วยเพื่อความปลอดภัยในการนำใช้งาน
- 8) ทำการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของเมื่อนำแท่งเชื้อเพลิงมาใช้งานจริง โดยจะต้องศึกษาการศึกษาปลดปล่อยแก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้ว่ามีส่วนประกอบพวกสารโลหะหนักต่างๆ ที่เป็นอันตรายหรือไม่

เอกสารอ้างอิง

1. กองจัดการสารอันตราย, 2536, กากตะกอนน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรม, กรมควบคุมมลพิษ, กรุงเทพฯ
2. Slupek, S., Buczek, A., Kurez, L., and Sekula, R., 2000, "**Energy Recovery from Liquid Waste of a sewage-Treatment Plant,** " Energy Source, Vol. 22, No 7,pp.641-648
3. สุริยา ชัยเดชทยากุล, 2544, การทำเชื้อเพลิงอัดแท่งจากส่วนผสมของกากตะกอนของระบบบำบัดน้ำเสียและเศษชิ้นไม้สับของโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ, บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยมหิดล, นครปฐม หน้า 8-11 และ 30-101
4. วัฒนา เสถียรสวัสดิ์, เรณู เอี่ยมธนาภรณ์, เดชา สายรวมญาติ, สมสกุล ภาณุภาส, ชวลิต เทพลักษณ์เลขา, จารุณี แสงสุวรรณาว, วิทวัส บัวจันทร์, สมาน ทองแท้, มยุรา นิมูลชาติ, วัฒนา นพคุณ และพิศมัย เสถียรยานนท์, 2530, โครงการเชื้อเพลิงแข็ง, คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ, หน้า 20 – 64
5. Kerdsuwan, Somrat.,Dornkrasin, Nisakorn., Uyasathien Aussani., 2002 "**Utilization of fuel briquette derive from mixing fat, oil and grease with sawdust** " Department of mechanical Engineering., the waste incineration research center., Bangkok Thailand.
6. เอกสารเผยแพร่กลุ่มพัฒนาพลังงานจากไม้, 2543, แท่งเชื้อเพลิงเขียวเพื่อทดแทนฟืน-ถ่าน, กรมป่าไม้, กรุงเทพฯ
7. ส่วนคั้นคว่ำและพัฒนาพลังงาน, 2544, การนำเศษถ่านแกลบอัดแท่งมาปรับปรุงคุณภาพและการผลิต, สำนักศึกษาค้นคว้าและพัฒนาพลังงาน, กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน, หน้า2-38
8. Gao, Shidong; Sakameto, Kazuhito; Dong, Xihui; Wang,Wei; Murano, Kentaro,. (2001) "**Studie on biomass for production of bio briquette in Chongqing, China**", Grad.sch.Sci_Eng., Saitama University.,Taiki kanky Gakkishi(2001),36(2)., 78-87
9. ทองม้วน นาเสงี่ยม, 2524, พลังงานทดแทนจากใบจำปา, การศึกษาและวิจัยทางวิทยาศาสตร์, วิทยาลัยครูมหาสารคาม, มหาสารคาม
10. Kerdsuwan, Somrat.,Dornkrasin, Nisakorn.,Uyasathien Aussani., 2002 "**Utilization of fuel briquete derive from mixing fat, oil and grease with sawdust**" Department of mechanical Engineering., The waste incineration research center., Bangkok Thailand.
11. Schulz, Helmut W., "Sewage Sludge disposal process and product", (Dynecology.Inc, USA) US.(1998), 7 pp.

12. จารุณี แสงสุวรรณาวา, 2530, การศึกษาการทำเชื้อเพลิงชีวจากเศษวัสดุการเกษตรผสมกาก
ส่วหล้าและกากน้ำตาลเพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทนฟืนและถ่าน, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์,
กรุงเทพฯ
13. กมลทิพย์ จันทร์ชัย และอุไรวรรณ พูลสิน, 2543, การใช้ประโยชน์ของกากตะกอนน้ำเสียจากโรง
งานอุตสาหกรรมนมในรูปปุ๋ยอินทรีย์เพื่อปลูกพืชในดินเปรี้ยว, คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากร
ศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล, นครปฐม, หน้า 1-6
14. เสริมพล รัตสุข และ ไชยยุทธ กลิ่นสุคนธ์, การก่ำน้้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและแหล่ง
ชุมชน, สถาบันวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ, 2524
15. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 (พ.ศ.2539), 2540, พระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ.2535
เรื่องกำหนดคุณลักษณะน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน. กรมโรงงานอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ
16. Bredenbach, A.W. 1971. **Composting of Municipal Waste in the United States., U.S.**
Environmental Protection agency. Washington, D.C.
17. Bell, R.C.,1973 ,**The Role of compost and Composting in Modern Agriculture**, J. Compost
Science, V.14, NO.6, p.24.
18. Biddlestone, A.J., and Gray, K.R.,1973,**The Chemical Engineer.** 76:270
19. Golueke, C.G.1972. **Composting : a review of rational, principles and public health.**In
Composting : Theory and Practise for City, Industry and Farm, pp.192-25.
20. American Society of Agricultural Engineers, Agricultural Engineers Yearbook, pp.515-17,
ASEA, St.Joseph, Mich., 1975
21. Haug, R.T. 1980.**Compost Engineering : Principles and Practice.** Ann Arbor Science,
Michigan.
22. Finstein, M.S. and Morris, M.L. 1975. **Microbiology of Municipal Solid Waste Composting.**
Advances in Applied Microbil. 19:113-151.
23. Gray, K.R., Sherman, K., and Biddlestone, A.J. 1971. **A review of composting-Part 1, Process**
Biochem., 6, 32-6.
24. Finstein, M.S., Lin, K.W., and Fischler, G.E. 1982. **Sludge Composting and Utilization :**
Review of the Literature on Temperature Inactivation of Pathogens. Report of New Jersey
Agricultural Experimental Station Project No. 03543, New Brunswick
25. Alexander, M.1977. **Microbiology of Cellulose.**In :Introduction to Soil Microbiology
2ndedition, John Wiley and Sons, Inc, New York.

26. Hays, S.T. 1973 **Composting of municipal refuse.** In : **Symposium on Processing Agricultural and Municipal Wastes** (ed.G.E. Inglett), pp. 205-15. AVI Publishing Co., Westport, Conn.
27. Cardenas, R.R. and Varro, S. 1973. **Disposal of urban solid wastes by composting.** In : **Symposium on Processing Agricultural and Municipal Wastes** (ed.G.E.Inglett). pp. 183-204. AVI Pub.Co., Westport, Conn.
28. Gailer, W.S. and Davey, C.B. 1971. **High rate poultry manure composting with sawdust.** In : **Livestock Waste Management and Pollution Abacterment**, pp. 159-62. ASAE,ST Joseph, Mich.
29. Mickinley, V.L., Vestal, J.R., and Eralp, A.E. 1985. **Microbial activity in composting.** *Biocycle*, 26, pp.47-50.
30. Owen McDougal, Richard Stanley and Seth C. Holstein, 2001, “A unique approach to conservation”, **Chemical Innovation**, Vol. 31, No. 2, pp. 22-28.
31. กองวิจัยผลิตผลป่าไม้ กรมป่าไม้, 2526, **พลังงานจากไม้**, เอกสารเผยแพร่.
32. Reed, T. and B. Bryant. 1978, **Densified Biomass, A New Form of Solid Fuel** . Solar Energy Research Institute, A Division of Midwest Research Institute, Golden, Colorado.
33. กัญญา เม้ามี่ทรัพย์, 2544, **การผลิตถ่านเชื้อเพลิงจากชีวมวลและกระบวนการ Pyrolysis**, วารสารประสิทธิภาพพลังงาน, ม.ค. – มี.ค. 2544, หน้า 42
34. กรมส่งเสริมการเกษตร, 2527, **รายงานสัมมนาเรื่องการมะพร้าว**.
35. มณฑิ โพธิ์ทัย, 2528, **คู่มือการปลูกยูคาลิปตัส**, งานประชาสัมพันธ์ ฝ่ายเลขานุการ องค์การอุตสาหกรรมป่าไม้ กรุงเทพฯ, 46 หน้า
36. วีระสิทธิ์ แดงประเสริฐ, 2524, **แท่งเชื้อเพลิงเศรษฐกิจ**, รายงานการประชุมสัมมนาทางวิชาการเรื่องเตาเศรษฐกิจและเชื้อเพลิงถ่าน, 5 – 6 มีนาคม 2524, สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.
37. Ostejski, A., 1997, “Use of sludge energy in Swarzewo”, **Gaz, Woda Tech. Sanit.**, Vol. 71, No. 10, pp. 370-373.
38. พิชิต สกุลพราหมณ์ และคณะ, 2522, **การผลิตแก๊สชีวภาพและปุ๋ยอินทรีย์โดยการหมักอินทรีย์วัตถุให้เกิดการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ที่ไม่ต้องการอากาศ**, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล.
39. ธารศ ศรีสถิตย์, ปัทมาพร ยอดสันติ และอนันต์ วีระณรงค์, 2544, **ความสัมพันธ์ของปริมาณโลหะหนักในกากตะกอนกับประสิทธิภาพการบำบัดของโรงบำบัดน้ำเสียสี่พระยา**, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, หน้า 4-59.

40. กรมป่าไม้, กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2541, เทคโนโลยีการผลิตถ่านสำหรับชนบท.
41. วชิรวิภา นาควิโรจน์, 2525, การประเมินโครงการผลิตฟืนอัดแท่งในประเทศไทย, วิทยานิพนธ์ปริญญาเศรษฐศาสตร์บัณฑิต คณะเศรษฐศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
42. นารา พิทักษ์อรณพ, 2541, “การผลิตแท่งเชื้อเพลิงแข็งจากวัสดุเหลือใช้ทางอุตสาหกรรม”, เทคโนโลยีการผลิตเชื้อเพลิงแข็งจากวัสดุเหลือใช้, โครงการวิจัยที่ ภ. 31-05, รายงานฉบับที่ 2.
43. สมสกุล ภาณุมาศ, 2529, การผลิตเชื้อเพลิงชีวแบบอุตสาหกรรมจากวัชพืชเพื่อใช้ทดแทนฟืนและถ่านในชนบท, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
44. Paul N. Cheremisinoff and Angelo C. Morresi, 1976, **Energy from Solid Wastes**, pp. 413-436
45. Swamy, Y. V., Mohanty, J. N., Murthy, B. U. R. and Tripathy, H. K., 2000, “**Treatment of black liquor and utilization of waste materials generated in small paper plant**”, IPPTA, Vol. 12, No. 2, pp. 53-60.
46. Muller, Dietrich, 1986, **Sewage sludge fuel briquette**, US. Patent, No. 4,615,711.

ภาคผนวก ก
วิธีวิเคราะห์

ก.1 การวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในกากตะกอน

ก.1.1 การวิเคราะห์ Total (Hg,As)

ก.1.1.1 อุปกรณ์

-Erlenmeyer flask 125 ml

-Water bath ที่ควบคุมอุณหภูมิได้

-Hydride Generator GBC HG 3000

สารเคมี

-Potassium permanganate 6 % wt/v : ละลาย KmnO_4 30 กรัม ในน้ำกลั่นปรับปริมาตรเป็น 500 ml Potassium persulfate 5 % wt/v : ละลาย $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 5 กรัม ในน้ำกลั่นปรับปริมาตรเป็น 500 ml

- $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{HNO}_3$ mixture 2 % v/v : ผสม Cone H_2SO_4 200 ซีซี และ Cone HNO_3 100 ซีซี (ควรเตรียมเมื่อใช้)

-Hydroxylamine Sulfate Sodium Chloride : ละลาย $\text{NH}_2\text{ON.H}_2\text{SO}_4$ 30 กรัม และ NaCl 30 กรัม ในน้ำกลั่น ปรับปริมาตรเป็น 500 ซีซี

-Standard Hg 1000 mg/ml (ppm)

-12 N HCl

ก.1.1.2 วิธีการ

-เตรียมการย่อยสลายตัวอย่างตะกอน ซึ่งตะกอนแห้งหนักประมาณ 1 กรัม ใส่ใน Erlenmeyer Flask ขนาด 125 ซีซี

-เติม 2:1 $\text{H}_2\text{SO}_4 - \text{HNO}_3$ 15 ซีซี ผสมให้เข้ากัน

หมายเหตุ

1) ถ้าเป็น Calcareous soil (ดินค่าง) ให้ค่อยๆ หยด acid mixture แล้วเขย่าจนทั่ว CO_2 ออกมาจนหมด (น้อยลง)

2) ถ้าตัวอย่างมี O.M. มาก ให้เติม acid mixture เป็น 25 ซีซี เพื่อให้การ digest เกิดได้อย่างสมบูรณ์หรือทำการ predigestion โดยใช้ cone HNO_3 5 ml เพื่อลดการลอยตัวของ O.M.

3) นำ flask ใส่ใน Water bath ตั้งอุณหภูมิ 50-60 ° C (ถ้า T สูงกว่านี้ปรอทจะระเหยไป) ตั้งทิ้งไว้จนได้สารละลายใส(2-3 ชั่วโมง)

4) เมื่อ digest จนใสแล้วนำ flask มาตั้งทิ้งไว้ในอ่างน้ำเย็น ค่อยๆ เติม 6 % KMnO_4 เขย่าเบาๆ จนกระทั่งประมาณ 15 นาที แล้วค่อยเติม 6 % KMnO_4 อีกจนกระทั่งได้สีม่วงของ permanganate ion

5) เติม 5 % $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 5 ซีซี เพื่อให้เกิด Oxidation ของ Orgamercury Compound ตั้งทิ้งไว้อย่างน้อย 4 ชั่วโมง หรือทิ้งไว้ข้ามคืน ในตอนนี้ Hg ในตัวอย่างจะถูกเปลี่ยนไปอยู่ในรูป Hg^{++} ซึ่งสามารถหาได้โดย เครื่อง A.A.

ก.1.1.3 การวัดปริมาณปรอทในตะกอน

1) เติมสารละลาย (NH₂OH)- H₂SO₄NaCl 10 ซีซี ในสารละลายที่ได้ข้างต้น เขย่าให้เข้ากัน จนสารละลายใสโดยทำให้ MnO₂ ที่ตกตะกอนละลายหมด

2) ปรับปริมาตรเป็น 100 ซีซี ใน Volumetric flask ด้วยน้ำกลั่น ตั้งทิ้งไว้ให้สารละลายที่จะนำไปหาปริมาณ Hg ใส (อาจจะต้อง centrifuge)

3) วัดปริมาณด้วยเครื่อง A.A. โดยระบบ raptor ใน closed system

ก.1.1.4 การคำนวณ ppb ของ Hg และ As

$$\text{ppb} = \frac{(\text{ค่าที่อ่านได้จากเครื่อง} - \text{ค่าที่อ่านได้จาก Blank}) \times \text{ปริมาตรที่ปรับ(ซีซี)} \times \text{dilution(ถ้ามี)}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างที่ใช้(กรัม)}}$$

ก.1.2 การวิเคราะห์หา Total Cd และ Pb ในกากตะกอน

ก.1.2.1 อุปกรณ์และเครื่องมือ

- 1) 100 ml Kjeldalh flask
- 2) 50 ml Volumetric flask
- 3) Beaker
- 4) Kjeldalh heater
- 5) Atomic absorption spectrophotometer

สารเคมีและน้ำยา

Acid mixture : ผสม Cone HNO₃ และ Cone HClO₄ ในอัตราส่วน 5:2

ก.1.2.1 วิธีการ

ชั่งกากตะกอนจำนวน 1-3 กรัม (อย่างละเอียด) 0.5-1.0 กรัม ลงใน digestion tube เติม Acid Mixture ลงไป 10 ซีซี นำไปวางบน digest จนได้สารละลายใส ทิ้งไว้ให้เย็นจึงค่อยถ่ายกรองลงใน Volumetric flask ขนาด 50 ซีซี แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 50 ซีซี Total Cd , Cr , และ Ni นำไปวัดด้วยเครื่อง A.A. ทำ Blank ทวนคู่กับตัวอย่างด้วย

ก.1.2.1 การคำนวณ ppm ของ Cd

$$\text{ppb} = \frac{(\text{ค่าที่อ่านได้จากเครื่อง} - \text{ค่าที่อ่านได้จาก Blank}) \times \text{ปริมาตรที่ปรับ(ซีซี)} \times \text{dilution(ถ้ามี)}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างที่ใช้(กรัม)}}$$

ก.2 วิธีวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุทดลอง

ก.2.1 การวัดกลิ่น (Odor to threshold ratio)

ใช้มาตรฐาน ASTM E 679 – 91 โดยนำตัวอย่าง กากตะกอนน้ำเสียปริมาตร 50 มิลลิลิตร มาเจือจางด้วยน้ำกลั่น โดยค่อยๆ เติมน้ำกลั่นครั้งละ 50 มิลลิลิตร จนกระทั่งกลิ่นหายไป แล้วนำปริมาตรน้ำกลั่นที่เติมลงไป มาคำนวณจาก

$$\text{Odor to threshold ratio} = \frac{\text{ปริมาตรน้ำกลั่นที่เติมลงไป}}{\text{ปริมาตรตะกอน}}$$

ซึ่งถ้า Odor to threshold ratio มีค่ามากแสดงว่ากากตะกอนมีกลิ่นรุนแรง

ก.2.2 ความหนาแน่น (Density)

คือ อัตราส่วนมวลต่อปริมาตร หาได้จากสมการ

$$\rho = m / V$$

- โดย ρ คือ ความหนาแน่นของวัสดุทดลอง (g/cm^3)
- m คือ มวลของวัสดุทดลอง (g)
- V คือ ปริมาตรของวัสดุทดลอง (cm^3)

ก.2.3 สีและเนื้อตะกอน

ใช้วิธีสังเกตด้วยตาเปล่า และสัมผัสด้วยมือ

ก.3 วิธีวิเคราะห์คุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของวัสดุทดลอง

ก.3.1 ปริมาณความชื้น (Moisture content)

ทำการวิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D5142 โดย ตัวอย่างจะถูกเผาให้ความร้อนคงที่ที่อุณหภูมิประมาณ 104-110 องศาเซลเซียส เพื่อให้ น้ำระเหยออกจากตัวอย่าง ปริมาณความชื้นคำนวณได้จากน้ำหนักของตัวอย่างที่ลดลง

ขั้นตอนการวิเคราะห์มีดังนี้

- 1) เตรียมตัวอย่างทดลองโดยทำการบดตัวอย่างให้ละเอียดแล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาด 60 mesh (250 μm)
- 2) นำตัวอย่างทดลอง 1 กรัมใส่ลงในถ้วยทนไฟซึ่งอยู่ในเครื่องวิเคราะห์อัตโนมัติที่มีเครื่องชั่งอยู่ภายใน โดยเครื่องวิเคราะห์จะทำการชั่งน้ำหนักของตัวอย่างและถ้วยทนไฟก่อนการอบ
- 3) ทำการอบตัวอย่างที่อยู่ในถ้วยทนไฟที่อุณหภูมิ 104-110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยใช้ก๊าซไนโตรเจนที่มีความบริสุทธิ์มากกว่า 99.5 % และความชื้น 1.9 mg/l
- 4) เครื่องวิเคราะห์จะทำการชั่งน้ำหนักของตัวอย่างและถ้วยทนไฟหลังการอบเสร็จสิ้น สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$\text{ปริมาณความชื้น (\%)} = \frac{(\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ} - \text{น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ}) \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ}}$$

ก.3.2 ปริมาณสารระเหย (Volatile matter)

ทำการวิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D5142 โดย ตัวอย่างจะถูกเผาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 950 \pm 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 นาที แล้วคำนวณปริมาณสารระเหยจากน้ำหนักตัวอย่างที่ลดลง

ขั้นตอนการวิเคราะห์มีดังนี้

- 1) เตรียมตัวอย่างทดลองโดยทำการบดตัวอย่างให้ละเอียดแล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาด 60 mesh (250 μm)
- 2) นำตัวอย่างทดลอง 1 กรัมใส่ลงในถ้วยพร้อมปิดฝาซึ่งอยู่ในเครื่องวิเคราะห์อัตโนมัติที่มีเครื่องชั่งอยู่ภายใน โดยเครื่องวิเคราะห์จะทำการชั่งน้ำหนักของตัวอย่างและถ้วยพร้อมฝาก่อนการเผา
- 3) ทำการเผาตัวอย่างที่อยู่ในถ้วยทนไฟที่ปิดฝา ด้วยอุณหภูมิ 950 \pm 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 นาที โดยใช้ก๊าซไนโตรเจนที่มีความบริสุทธิ์มากกว่า 99.5 % และความชื้น 1.9 mg/l
- 4) เครื่องวิเคราะห์จะทำการชั่งน้ำหนักของตัวอย่างและถ้วยพร้อมฝา หลังการเผาเสร็จสิ้น

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$\text{น้ำหนักที่หายไป (\%)} = \frac{(\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา} - \text{น้ำหนักตัวอย่างหลังเผา}) \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา}}$$

$$\text{ปริมาณสารระเหย (\%)} = \text{น้ำหนักที่หายไป} - \text{ปริมาณความชื้น}$$

ก.3.3 ปริมาณเถ้า (Ash content)

ทำการวิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D5142 โดยตัวอย่างจะถูกเผาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียสจนกระทั่งได้น้ำหนักของถั่วชนไฟพร้อมกับน้ำหนักของเถ้าที่เหลือคงที่ แล้วคำนวณปริมาณเถ้าจากน้ำหนักตัวอย่างที่เหลืออยู่ภายหลังการเผาเสร็จสิ้น
ขั้นตอนการวิเคราะห์มีดังนี้

1) ใช้ตัวอย่างทดลองจากการวิเคราะห์สารระเหยจากข้อ 2.8.3 โดยตัวอย่างอยู่ในถั่วชนไฟที่ไม่ปิดฝา ซึ่งอยู่ในเครื่องวิเคราะห์อัตโนมัติที่มีเครื่องชั่งอยู่ภายใน

2) ลดอุณหภูมิของเตาจาก 950 เป็น 600 องศาเซลเซียส แล้วเปลี่ยนจากก๊าซไนโตรเจนที่มีอยู่ไปเป็นก๊าซออกซิเจนบริสุทธิ์ หลังจากนั้นเพิ่มอุณหภูมิของเตาเป็น 750 องศาเซลเซียส

3) เครื่องวิเคราะห์จะทำการชั่งน้ำหนักของตัวอย่างและถั่วชนไฟจนกระทั่งน้ำหนักของถั่วชนไฟพร้อมกับน้ำหนักของเถ้าที่เหลือคงที่

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$\text{ปริมาณเถ้า (\%)} = \frac{(\text{น้ำหนักถั่วชนไฟพร้อมเถ้า} - \text{น้ำหนักถั่วชนไฟ}) \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างทดลองที่ใช้}}$$

ก.3.4 ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon)

คือปริมาณคาร์บอนที่เหลือจากการเผาที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส โดยคำนวณได้จาก

$$\text{ปริมาณคาร์บอนคงตัว (\%)} = 100 - (\% \text{ ความชื้น} + \% \text{ เถ้า} + \% \text{ สารระเหย})$$

ก.3.5 ปริมาณกำมะถันรวม (Total sulfur)

ทำการวิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D4239 ใช้วิธีทดสอบแบบ C โดยตัวอย่างเชื้อเพลิงอัดแท่งจะถูกเผาในเตาทรงกระบอก (Tube furnace) ที่อุณหภูมิ 1,350 องศาเซลเซียส โดยผ่านก๊าซออกซิเจนเข้าไปเพื่อออกซิไดซ์กำมะถันในตัวอย่างให้อยู่ในรูปก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ก๊าซและอนุภาคที่เกิดจากการเผาไหม้จะผ่านไปยัง Anhydron (Anhydrous magnesium perchlorate) เพื่อดักจับความชื้นและ

อนุภาค ก๊าซที่เหลือจะผ่านเข้าไปในเซลล์ซึ่งมี Infrared absorption detector (IR) สำหรับวัดปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ กล่าวคือ พลังงานที่ Detector วัดได้จะลดลงเนื่องจากซัลเฟอร์ไดออกไซด์ดูดซับเอาไว้ซึ่งพลังงานที่ลดลงนี้จะเป็นสัดส่วนกับปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น ดังนั้นปริมาณกัมมะถันทั้งหมดในตัวอย่างไม่อยู่ในรูปซัลเฟอร์ ไดออกไซด์จะถูกวัดได้อย่างต่อเนื่องแต่เนื่องจากการวัดนี้เป็นการวัดเปรียบเทียบความแตกต่างของพลังงานเครื่องมือที่ใช้ในการวัดจึงต้องมีการสอบเทียบ (Calibrate) โดยใช้ Standard reference materials ที่มีปริมาณกัมมะถันในช่วงที่ครอบคลุมตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์

ขั้นตอนการวิเคราะห์มีดังนี้

- 1) ทำการ Calibrate เครื่องวิเคราะห์ปริมาณกัมมะถัน
- 2) เพิ่มอุณหภูมิในเตาเผาอย่างน้อย 1,350 องศาเซลเซียส
- 3) ชั่งน้ำหนักตัวอย่าง แล้วกระจายตัวอย่างใน Combustion boats และใช้ Boat puller เลื่อนตัวอย่างให้อยู่ในตำแหน่งที่ร้อนที่สุดของเตาเผา ทำการเผาอย่างน้อย 2 นาที หรือจนกระทั่งเผาได้อย่างสมบูรณ์
- 4) เมื่อเผาเสร็จแล้วเครื่องวิเคราะห์ปริมาณกัมมะถันจะทำการอ่านค่ากัมมะถันที่วิเคราะห์ได้

ก.3.6 ค่าความร้อน (Heating value)

ค่าความร้อนของตัวอย่างสามารถวิเคราะห์ได้โดยการเผาตัวอย่างที่ทราบน้ำหนักแน่นอนใน Isoperibol oxygen bomb calorimeter ภายใต้สภาวะที่กำหนด คำนวณหาค่าความร้อนได้จากอุณหภูมิที่บันทึกไว้ก่อนและหลังจากที่ตัวอย่างถูกเผาไหม้ และจากค่า Thermochemical corrections สำหรับค่าความร้อน วัดเป็นค่าของปริมาณความร้อนต่อน้ำหนักของ ตัวอย่าง หรือปริมาณของตัวอย่าง

ขั้นตอนการวิเคราะห์มีดังนี้

- 1) เปิดเครื่อง Calorimeter และกด F1 เพื่อให้ปั๊ม Heater และระบบน้ำเย็นเริ่มทำงาน เปิดเครื่องทิ้งไว้อย่างน้อย 20 นาที เมื่อเครื่องพร้อมที่จะทำงานจะปรากฏคำว่า Stanby ที่ขอบมุมด้านซ้ายของจอ
- 2) นำตัวอย่าง เชื้อเพลิงที่บดแล้ว (250 μ m) มาชั่งให้ได้น้ำหนักที่แน่นอนประมาณ 0.5 กรัม (ใช้เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง) จากนั้นชั่งกรดเบนโซอิกให้ได้น้ำหนักที่แน่นอนประมาณ 0.5 กรัม แล้วนำมาผสมกับตัวอย่างและอัดเป็นเม็ดโดยใช้ Pellet press
- 3) นำตัวอย่างมาใส่ไว้ใน Capsule ซึ่งวางบน Electrode ของลูกบอมบ์โดยให้ Fuse Wire ติดกับตัวอย่างที่อยู่ใน Capsule นำมาใส่ในลูกบอมบ์ที่มีสารละลายมาตรฐาน โซเดียมคาร์บอเนตเข้มข้น 0.025 N อยู่ 2 ml ปิดลูกบอมบ์ให้แน่น แล้วอัดก๊าซออกซิเจนให้มีแรงดัน 30 atm (เปิดถังก๊าซออกซิเจน ปรับ Regulator ให้มีความดัน 450 psig) โดยกดปุ่ม O2 Fill ใช้เวลาประมาณ 1 นาที เครื่องจะปิดวาล์วออกซิเจนเอง

4) นำ Inner bucket มาบรรจุน้ำกลั่น 2 ลิตร จาก Bucket filling system (อุณหภูมิของน้ำควรต่ำกว่าอุณหภูมิของ Jacket ประมาณ 3-5 องศาเซลเซียส) แล้วใส่ในเครื่อง Isoperibol bomb calorimeter วางลูกบอมบ์ที่เตรียมไว้ลงใน Inner Bucket จากนั้นเสียบขั้ว Electrode ทั้งสองขั้วเข้ากับลูกบอมบ์ให้แน่น แล้วปิด Over cover

5) กดปุ่ม Start หรือ Shift start ป้อนค่า Energy equivalent ของลูกบอมบ์ (Cal ID) หมายเลขตัวอย่าง (Sample ID) น้ำหนักตัวอย่าง (Sample wt) น้ำหนักของกรดเบนโซอิก (Spike wt)

6) เครื่อง Isoperibol bomb calorimeter จะเริ่มทำงาน โดยจะแสดงคำว่า Preperiod เมื่อการเผาไหม้สิ้นสุดลง หลักการในการทำงานของเครื่อง Isoperibol bomb calorimeter คือ Calorimeter jacket จะรักษาอุณหภูมิให้คงที่ตลอดเวลา ในขณะที่ความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ตัวอย่างจะทำให้อุณหภูมิของ Bomb และ Jacket เพิ่มขึ้น มีการถ่ายเทความร้อนจำนวนเล็กน้อยไปมาระหว่าง Bucket กับบริเวณรอบๆ เครื่อง Calorimeter จะมีการวัดอุณหภูมิอย่างต่อเนื่อง ผลของความร้อนที่สูญหายไปหรือถูกนำมาใช้นั้นมีการแก้ค่าโดยอัตโนมัติ

7) เมื่อเครื่องหยุดทำงานจะมีผลออกมาในลักษณะของ Preliminary heat of combustion โดยกด Key Done เครื่องจะเก็บผลการทดลองไว้ในหน่วยความจำ ซึ่งเครื่องพิมพ์จะพิมพ์ Preliminary report

8) เปิด Cover นำลูกบอมบ์ออกจากเครื่องปล่อยก๊าซในลูกบอมบ์ออกช้าๆ จนกระทั่งความดันภายในลูกบอมบ์เท่ากับความดันบรรยากาศ เปิดลูกบอมบ์แล้วล้างด้วยน้ำกลั่นผสมอินดิเคเตอร์ (Metylred : Bromo-cresol green ในอัตราส่วน 1:4 ละลายใน Ethyl alcohol จำนวน 250 ml เตรียมไว้เป็น Stock solution) จนกระทั่งสารละลายที่ล้างออกมานั้นเปลี่ยนจากสีส้มเป็นสีเขียวแล้วล้างด้วยน้ำกลั่นอีก 5-6 ครั้ง นำสารละลายทั้งหมดใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 ml (สารละลายที่ได้นี้มีสีส้ม)

9) นำสารละลายที่ได้จากข้อ 8 ไตเตรตกับสารละลายมาตรฐานโซเดียมคาร์บอเนตจนกระทั่งสีของ อินดิเคเตอร์เปลี่ยนจากสีส้มเป็นสีเขียวอมน้ำเงิน ปริมาตรของสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่ใช้ไตเตรตรวมกับ 2 ml ที่ใช้ใส่ในลูกบอมบ์เป็นค่า C_1

10) นำ Fuse wire ที่เหลือจากการเผาไหม้มาชั่งน้ำหนักคำนวณน้ำหนักของ Fuse wire เป็นค่า C_3 (ค่าความร้อนของ Fuse wire เท่ากับ 1,400 cal/g)

11) สำหรับค่าความร้อนของกรดเบนโซอิกเครื่องจะคำนวณให้หลังจากป้อนค่าน้ำหนักของกรดเบนโซอิกที่ใช้เป็นค่า C_2 (ค่าความร้อนของกรดเบนโซอิก เท่ากับ 6,318 cal/g)

12) กดปุ่ม PRT ใส่หมายเลขตัวอย่าง ค่า C_1 , C_2 และ C_3 เครื่องจะคำนวณค่าความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ทั้งหมด (Gross heating of combustion) แล้วพิมพ์ผลออกมา ค่าความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ทั้งหมดหาได้จากสูตร

$$H_g = (tE - C_1 - C_2 - C_3) / m$$

โดย	H_g	คือ	Gross heating of combustion
t		คือ	ผลต่างของอุณหภูมิเริ่มต้นและสุดท้าย
E		คือ	Energy equivalent ของลูกบอมบ (cal/ °C)
C_1		คือ	Correction in calories for heat of formation of nitric acid
C_2		คือ	Correction in calories for heat of formation of benzoic acid
C_3		คือ	Correction in calories for heat of formation of fuse wire
m		คือ	น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)

ค่าความร้อนที่คำนวณได้นี้ยังไม่ได้หักค่าความร้อนของกำมะถันซึ่งค่าความร้อนของกำมะถัน คำนวณได้จากปริมาณกำมะถันที่วิเคราะห์ได้จากตัวอย่างคูณกับค่าความร้อนของกำมะถัน (ค่าความร้อนของกำมะถันเท่ากับ 14 cal/g) ดังนั้น

$$\text{ค่าความร้อนของตัวอย่าง} = \text{Gross Heat} - \text{ค่าความร้อนของกำมะถัน}$$

ก.4 คุณสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงอัดแท่ง

ก.4.1 ความหนาแน่น (Density)

คือ อัตราส่วนมวลต่อปริมาตร หาได้จากสมการ

$$\rho = m / V$$

สำหรับปริมาตรทรงกระบอกที่มีรูตรงกลางหาได้จาก

$$V = \frac{\square (D^2 - d^2) h}{4}$$

โดย	ρ	คือ	ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงอัดแท่ง (g/cm^3)
	m	คือ	มวลของเชื้อเพลิงอัดแท่ง (g)
	V	คือ	ปริมาตรของเชื้อเพลิงอัดแท่ง (cm^3)
	\square	คือ	ค่าคงที่
	D	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอกของแท่งเชื้อเพลิง (cm)
	d	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลางด้านในของแท่งเชื้อเพลิง (cm)
	h	คือ	ความยาวของแท่งเชื้อเพลิง (cm)

ทำการทดสอบโดยนำเชื้อเพลิงอัดแท่งมาตัดแล้ววัดความยาวให้แน่นอน วัดความยาวเส้นผ่านศูนย์กลาง แล้วคำนวณปริมาตร นำไปชั่งน้ำหนัก แล้วคำนวณหาความหนาแน่น

ก.4.2 ดัชนีการแตกร่วน

วิเคราะห์โดยวิธี Drop shatter test ค่าดัชนีการแตกร่วนเป็นค่าที่ใช้เพื่อหาความสามารถของถ่านอัดแท่งที่มีความทนทานระหว่างการขนส่ง การเก็บรักษา และการนำมาใช้งาน วิธีการทดสอบทำได้โดยนำถ่านอัดแท่งใส่ถุงพลาสติก ประมาณ 5 กิโลกรัม แล้วปล่อยลงจากที่สูง 2 เมตร ลงสู่พื้นซีเมนต์ 3 ครั้ง จากนั้นนำไปร่อนด้วยตะแกรงขนาด 20 มิลลิเมตร นำส่วนของเชื้อเพลิงอัดแท่งที่เหลือจากการอัดแท่งแล้วไปชั่งน้ำหนัก และสามารถหาค่าดัชนีการแตกร่วน (Friability index) หรือดัชนีการแตกละเอียด (Shatter index) ได้จาก

$$R = W_f / W_i$$

โดย	R	คือ	ดัชนีการแตกร่วน
	W_f	คือ	น้ำหนักของถ่านอัดแท่งที่เหลือหลังทดสอบ (กิโลกรัม)
	W_i	คือ	น้ำหนักของถ่านอัดแท่งก่อนทดสอบ (กิโลกรัม)

ก.4.3 การทนแรงอัด (Compressive strength)

วิเคราะห์โดยใช้เครื่อง Universal testing machine (UTM) โดยทำการทดสอบทั้งในแนวตั้ง และแนวนอน

1) การทดสอบในแนวตั้ง

การทดสอบทำโดยนำตัวอย่างถ่านอัดแท่งมาตัดด้วยเลื่อยไฟฟ้าเพื่อให้ปลายทั้งสองของถ่านอัดแท่งเรียบเสมอกันและตัดให้มีความยาวเป็น 2 เท่า ของเส้นผ่าศูนย์กลางของถ่านอัดแท่งจากนั้นนำถ่านอัดแท่งตัวอย่างที่ตัดเรียบเรียบร้อยแล้วไปวางแนวตั้งในเครื่อง Universal testing machine (UTM) เพื่อทำการทดสอบต่อไป ซึ่งค่าการทนแรงอัดของถ่านอัดแท่งนั้นเป็นค่าแรงเค้น (Stress) สูงสุดที่ถ่านอัดแท่งจะรับได้ ซึ่งหาได้จากความสัมพันธ์

$$\delta = F/A$$

โดย δ คือ การทนแรงอัด (กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร)

F คือ แรงอัดที่กระทำต่อตัวอย่างจนกระทั่งตัวอย่างแตก (กิโลกรัม)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง (ตารางเซนติเมตร)

2) การทดสอบในแนวนอน

ใช้ตัวอย่างขนาดเดียวที่ทดสอบแนวตั้ง เพื่อดูขนาดของแรงสูงสุด (Peak load) ที่ทำให้ถ่านอัดแท่งแตกแล้วเปรียบเทียบกับค่าการทนแรงอัดของถ่านอัดแท่งแนวตั้ง

ก.5 คุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของเชื้อเพลิงอัดแท่ง

ก.5.1 ค่าความร้อน (Heating Value)

ค่าความร้อนของตัวอย่างสามารถวิเคราะห์ให้ได้ โดยการเผา ตัวอย่างที่ทราบน้ำหนักแน่นอนใน Isoperibol oxygen bomb calorimeter ภายใต้สภาวะที่กำหนด คำนวณหาค่าความร้อนได้จากอุณหภูมิที่บันทึกไว้ก่อนและหลังจากที่ตัวอย่างถูกเผาไหม้ และจากค่า Thermochemical corrections สำหรับค่าความร้อน วัดเป็นค่าของปริมาณความร้อนต่อน้ำหนักของ ตัวอย่าง หรือปริมาณของตัวอย่าง โดยขั้นตอนการวิเคราะห์ ทำเช่นเดียวกับการหาค่าความร้อนใน หัวข้อ ก.2.6

ก.5.2 ปริมาณกำมะถันรวม (Total sulfur)

ทำการวิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D4239 ใช้วิธีทดสอบแบบ C โดยตัวอย่างเชื้อเพลิงอัดแท่งจะถูกเผาในเตาทรงกระบอก (Tube furnace) ที่อุณหภูมิ 1,350 องศาเซลเซียส โดยผ่านก๊าซออกซิเจนเข้าไปเพื่อออกซิไดซ์กำมะถันในตัวอย่างให้อยู่ในรูปก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ก๊าซและอนุภาคที่เกิดจากการเผาไหม้นี้จะผ่านไปยัง Anhydron (Anhydrous magnesium perchlorate) เพื่อดักจับความชื้นและอนุภาค ก๊าซที่เหลือจะผ่านเข้าไปในเซลล์ซึ่งมี Infrared absorption detector (IR) สำหรับวัดปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ กล่าวคือ พลังงานที่ Detector วัดได้จะลดลงเนื่องจากซัลเฟอร์ไดออกไซด์ดูดซับเอาไว้ ซึ่งพลังงานที่ลดลงนี้จะเป็นสัดส่วนกับปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น ดังนั้นปริมาณกำมะถันทั้งหมดในตัวอย่างที่อยู่ในรูปซัลเฟอร์ ไดออกไซด์จะถูกวัดได้อย่างต่อเนื่อง แต่เนื่องจากการวัดนี้เป็นการวัดเปรียบเทียบความแตกต่างของพลังงานเครื่องมือที่ใช้ในการวัดจึงต้องมีการสอบเทียบ (Calibrate) โดยใช้ Standard reference materials ที่มีปริมาณกำมะถันในช่วงที่ครอบคลุมตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ โดยขั้นตอนการวิเคราะห์ ทำเช่นเดียวกับการหาค่าความร้อนในหัวข้อ ก.2.5

ก.5.3 การติดไฟ การให้ความร้อนและประสิทธิภาพการใช้งานของความร้อน

ทำได้โดยการทดลองต้มน้ำโดยใช้เชื้อเพลิงอัดแท่งและถ่านเชื้อเพลิงอัดแท่งในสภาพการใช้งานปกติ เช่น อุณหภูมิห้อง ไม่ควบคุมความชื้น บรรยากาศ ไม่มีลมพัด และทดลองเปรียบเทียบกับถ่านไม้ทั่วไป อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 1) ตาชั่ง
- 2) หม้อออลูมิเนียม เบอร์ 24 พร้อมฝาปิด
- 3) เชื้อเพลิงที่จะมาทดสอบตัวอย่างละ 500 กรัม
- 4) น้ำสะอาดตัวอย่างละ 4,000 กรัม
- 5) เครื่องวัดอุณหภูมิ

ขั้นตอนการทดลอง

- 1) ปรับอุณหภูมิของน้ำให้ได้ 28 องศาเซลเซียส
- 2) เสียบเทอร์โมมิเตอร์ไว้ในหม้อต้มน้ำโดยมิให้เทอร์โมมิเตอร์สัมผัสกับส่วนของหม้อ
- 3) ใช้แท่งเชื้อเพลิงชูปน้ำมันก๊าดประมาณ 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรเพื่อเป็นเชื้อติดไฟ
- 4) จุดเชื้อเพลิงในเตา บันทึกทุกๆ 3 นาที
- 5) เมื่อน้ำเดือดให้เปลี่ยนหม้อใหม่ บันทึกอุณหภูมิทุก 3 นาทีจนกระทั่งอุณหภูมิของน้ำหม้อสุดท้ายไม่เพิ่มขึ้นอีก

คำนวณพลังงานความร้อนที่น้ำได้รับจากสมการ

$$Q = mC_p [\sum (t_2 - t_1) + (t_3 - t_1)]$$

คำนวณประสิทธิภาพการใช้งานของความร้อนของเชื้อเพลิงจากสมการ

$$\mu = \frac{Q}{w \cdot q}$$

โดย	Q	คือ	พลังงานความร้อนที่น้ำได้รับ (แคลอรี)
	m	คือ	น้ำหนักน้ำในหม้อ (กรัม)
	C _p	คือ	ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ (แคลอรี / กรัม-องศาเซลเซียส)
	t ₁	คือ	อุณหภูมิของน้ำเมื่อแรกเริ่ม (องศาเซลเซียส)
	t ₂	คือ	อุณหภูมิของน้ำเมื่อเดือด (องศาเซลเซียส)
	t ₃	คือ	อุณหภูมิของน้ำสุดท้ายของหม้อหลังสุด (องศาเซลเซียส)
	μ	คือ	ประสิทธิภาพการใช้งานของความร้อนของเชื้อเพลิง
	w	คือ	น้ำหนักของเชื้อเพลิงอัดแท่ง (กรัม)
	q	คือ	ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดแท่ง (แคลอรี/กรัม)

ภาคผนวก ข
ผลการทดลองการให้ความร้อนของเชื้อเพลิงอัดแท่ง

ตารางที่ ข.1 ผลการทดลองการให้ความร้อนของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากกากตะกอนสด โรงงานผลิตเชื้อ
 กระจายกับเปลือกมะพร้าวอ่อนที่อัตราส่วนผสม 1:1

เวลา (นาที)	อุณหภูมิหม้อที่ 1 ($^{\circ}\text{C}$)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิหม้อที่ 2 ($^{\circ}\text{C}$)
0	25	0	25.3
3	33	3	27.2
6	50.8	6	28.8
9	64.5	9	30
12	79.4	12	30.9
15	86.8	15	31.1
18	92.8	18	31.9
21	96.3	21	32
24	96.8	24	32.3
27	97.1	27	32.6
29	97.1	30	32.9
		33	32.9
		36	33.1
		39	33.1
		42	33.3
		45	33.5
		48	33.5
		51	33.6
		54	33.8
		57	33.8
		60	33.8

ตารางที่ ข.2 ผลการทดลองการให้ความร้อนของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากกากตะกอนสด โรงงานผลิตเชื้อ
 กระจกกับเปลือกมะพร้าวอ่อนที่อัตราส่วนผสม 1:2

เวลา (นาที)	อุณหภูมิหม้อที่ 1 ($^{\circ}\text{C}$)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิหม้อที่ 2 ($^{\circ}\text{C}$)
0	30	0	31
3	38.9	3	43
6	58	6	50
9	72.5	9	55
12	88	12	59.9
15	97.5	15	62
16	97.9	18	64
17	97.9	21	65
		24	65.5
		27	66
		30	66

ตารางที่ ข.3 ผลการทดลองการให้ความร้อนของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากกากตะกอนสด โรงงานผลิตเชื้อ
 กระจายกับเปลือกมะพร้าวอ่อนที่อัตราส่วนผสม 1:3

เวลา (นาที)	อุณหภูมิหม้อที่ 1 ($^{\circ}\text{C}$)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิหม้อที่ 2 ($^{\circ}\text{C}$)
0	30	0	30
3	37	3	40.9
6	52.6	6	47.9
9	72.8	9	53.2
12	89.9	12	57.7
15	96	15	61.1
16	96	18	63.5
		21	65.1
		24	66.1
		27	66.9
		30	67
		33	67.1
		36	67.2
		39	67.2

ตารางที่ ข.4 ผลการทดลองการให้ความร้อนของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากกากโรงงานผลิตเชื้อกระดาษ ตะกอนที่หมักแบบไม่มีอากาศกับเปลือกมะพร้าวอ่อนที่อัตราส่วนผสม 1:1

เวลา (นาที)	อุณหภูมิหม้อที่ 1 ($^{\circ}\text{C}$)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิหม้อที่ 2 ($^{\circ}\text{C}$)
0	28.1	0	29.6
3	40	3	41.8
6	58.3	6	50.8
9	75.7	9	59.7
12	87.5	13	66.7
15	97.3	15	70.2
16	97.5	18	73.4
17	97.5	21	75.6
		24	76.5
		27	77.1
		28	77.1
		30	77

ตารางที่ ข.5 ผลการทดลองการให้ความร้อนของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากกากโรงงานผลิตเชื้อกระดาษ ตะกอนที่หมักแบบไม่มีอากาศกับเปลือกมะพร้าวอ่อนที่อัตราส่วนผสม 1:2

เวลา (นาที)	อุณหภูมิหม้อที่ 1 ($^{\circ}\text{C}$)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิหม้อที่ 2 ($^{\circ}\text{C}$)
เวลา	tem	เวลา	tem
0	31.5	0	28.8
3	38.9	3	46
6	55.7	6	52.2
9	69	9	62
12	80.2	12	67.8
15	92.3	15	73
17	96.9	18	77
18	96.9	21	80.1
		24	82
		27	83.5
		30	84.4
		33	85
		36	85

ตารางที่ ข.6 ผลการทดลองการให้ความร้อนของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากกากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ
ตะกอนที่หมักแบบไม่มีอากาศกับเปลือกมะพร้าวอ่อนที่อัตราส่วนผสม 1:3

เวลา (นาที)	อุณหภูมิหม้อที่ 1 ($^{\circ}\text{C}$)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิหม้อที่ 2 ($^{\circ}\text{C}$)
0	29.5	0	29
3	40	3	47
6	51.5	6	62
9	69	9	74
12	90.2	13	80.8
14	96.9	16	83.5
15	96.9	19	86.2
		22	87.1
		25	87.5
		26	87.5
		28	87

ตารางที่ ข.7 ผลการทดลองการให้ความร้อนของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากกากโรงงานผลิตเชื้อกระดาษ ตะกอนที่หมักแบบมีอากาศกับเปลือกมะพร้าวอ่อนที่อัตราส่วนผสม 1:1

เวลา (นาที)	อุณหภูมิหม้อที่ 1 ($^{\circ}\text{C}$)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิหม้อที่ 2 ($^{\circ}\text{C}$)
0	34	0	32.5
3	48.9	4	44.5
6	64	6	53.9
9	80	9	61.6
12	92	13	69
13	96.3	18	72.2
14	96.3	21	74
		24	74.7
		27	75
		29	74.8

ตารางที่ ข.8 ผลการทดลองการให้ความร้อนของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากกากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ ตะกอนที่หมักแบบมีอากาศกับเปลือกมะพร้าวอ่อนที่อัตราส่วนผสม 1:2

เวลา (นาที)	อุณหภูมิหม้อที่ 1 ($^{\circ}\text{C}$)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิหม้อที่ 2 ($^{\circ}\text{C}$)
0	33	0	33
3	44	3	48
6	72	6	59
9	83	9	65
12	95.8	12	69.2
13	95.8	15	75
		18	76.7
		22	77.3
		24	77.9
		27	77.3

ตารางที่ ข.9 ผลการทดลองการให้ความร้อนของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากกากโรงงานผลิตเชื้อกระดาษ ตะกอนที่หมักแบบมีอากาศกับเปลือกมะพร้าวอ่อนที่อัตราส่วนผสม 1:3

เวลา (นาที)	อุณหภูมิหม้อที่ 1 ($^{\circ}\text{C}$)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิหม้อที่ 2 ($^{\circ}\text{C}$)
0	35	0	34
3	41	3	38
6	48.2	6	47
9	68	9	73
12	75	13	80
15	85	15	82.6
18	97	18	84.6
19	97	21	86.2
		24	86.2

ตารางที่ ข.10 ผลการทดลองการให้ความร้อนของถ่านเชื้อเพลิงอัดแท่งจากกากตะกอนสดโรงงาน
ผลิตเชื้อกระดาษกับเปลือกมะพร้าวอ่อนที่อัตราส่วนผสม 1:1

เวลา (นาที)	อุณหภูมิหม้อ ที่ 1 (°C)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ หม้อที่ 2 (°C)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ หม้อที่ 3 (°C)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ หม้อที่ 4 (°C)
0	31.4	0	30.8	0	30.9	0	30.5
3	39.9	3	40.1	3	47	3	33
6	60.4	7	58.1	6	59	6	35.8
9	72.3	9	69.8	9	69.9	9	38
12	83.5	12	88	12	78.5	12	40
15	94.2	13	97.7	15	80.4	16	41.9
16	95.4	14	97.7	18	89.4	18	42.6
17	95.6			23	95	21	43.3
18	95.6			24	96	24	44
				25	96.4	27	44.6
				26	96.6	30	45
				27	96.9	33	45.6
				28	96.9	36	45.9
						39	46.3
						41	46.5
						42	46.5

ตารางที่ ข.13 ผลการทดลองการให้ความร้อนของถ่านเชื้อเพลิงอัดแท่งจากกากตะกอนสดโรงงานผลิตเชื้อกระดาษกับเปลือกมะพร้าวอ่อนที่อัตราส่วนผสม 1:3

1:3	หม้อที่ 1	1:3	หม้อที่ 2	1:3	หม้อที่ 3	1:3	หม้อที่ 4
เวลา	tem	เวลา	tem	เวลา	tem	เวลา	tem
0	32	0	32	0	31.1	0	31
3	41.5	3	48.2	4	42	3	33.5
6	52.3	6	58	6	47	6	36
9	59.8	9	67.9	9	57.2	9	37.8
12	72.8	12	72.8	13	67	13	39.3
15	88.4	15	78.2	15	73.4	15	40.4
19	95.2	18	83.5	18	81	18	41.1
21	97	21	90.8	21	87.4	21	42
22	97	23	97	24	91.8	26	43
		25	97.6	27	95.8	27	43.3
		26	97.6	28	96.6	30	43.7
				29	97	33	44.1
				30	97	36	44.5
						39	44.8
						42	45.1
						45	45.4
						48	45.6
						51	45.8
						54	46
						57	46.2
						60	46.4
						63	46.5
						66	46.6
						69	46.6

ตารางที่ ข.14 ผลการทดลองการให้ความร้อนของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากกากตะกอนสดโรงงาน
ฟอกย้อมกับเปลือกมะพร้าวอ่อนที่อัตราส่วนผสม 1:1

เวลา (นาที)	อุณหภูมิหม้อที่ 1 ($^{\circ}\text{C}$)
0	30
3	36.5
6	51.1
9	64.4
12	75.4
15	82
19	87.2
21	89.2
24	91.1
27	91.5

ตารางที่ ข.15 ผลการทดลองการให้ความร้อนของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากกากตะกอนสดโรงงาน
ฟอกย้อมกับเปลือกมะพร้าวอ่อนที่อัตราส่วนผสม 1:2

เวลา (นาที)	อุณหภูมิหม้อที่ 1 ($^{\circ}\text{C}$)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิหม้อที่ 2 ($^{\circ}\text{C}$)
เวลา	tem	3	34.5
0	29.5	6	36.8
3	32.5	9	37.9
6	36	12	39.6
9	43	16	40.8
12	54	19	41.3
15	64	0	31
18	78.5	3	34.5
21	91	6	36.8
24	97.5	9	37.9
27	97.8	12	39.6
30	98	16	40.8
33	98	19	41.3
		22	41.7
		25	42

ตารางที่ ข.16 ผลการทดลองการให้ความร้อนของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากกากตะกอนสดโรงงาน
ฟอกเชื่อมกับเปลือกมะพร้าวอ่อนที่อัตราส่วนผสม 1:3

เวลา (นาที)	อุณหภูมิหม้อที่ 1 ($^{\circ}\text{C}$)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิหม้อที่ 2 ($^{\circ}\text{C}$)
0	30.4	0	28.5
3	46	3	33
6	67.5	6	39
9	80.1	9	45
12	91.4	12	47
15	96.1	15	50
16	96.1	18	51.9
		21	53.5
		24	54.2
		27	54.9
		30	55.2
		33	55.4
		36	55.7
		39	55.8
		42	55.9
		45	55.5

ตารางที่ ข.17 ผลการทดลองการให้ความร้อนของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากกากตะกอนโรงงานฟอกย้อม
ที่หมักแบบไม่มีอากาศกับเปลือกมะพร้าวอ่อนที่อัตราส่วนผสม 1:1

เวลา (นาท)	อุณหภูมิหม้อที่ 1 ($^{\circ}\text{C}$)
0	28.5
3	38.5
6	55
9	66.3
12	74.5
15	80.9
19	86.8
21	88
24	89.8
28	90
30	90.1
33	89.9

ตารางที่ ข.18 ผลการทดลองการให้ความร้อนของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากกากตะกอนโรงงานฟอกย้อม
ที่หมักแบบไม่มีอากาศกับเปลือกมะพร้าวอ่อนที่อัตราส่วนผสม 1:2

เวลา (นาที)	อุณหภูมิหม้อที่ 1 ($^{\circ}\text{C}$)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิหม้อที่ 2 ($^{\circ}\text{C}$)
0	30.5	0	32.3
3	38.9	3	36.6
6	50.9	6	40.4
9	63.9	9	43.1
12	75.4	12	45.2
15	84.1	16	46.9
18	90.6	19	47.6
21	96	22	48
22	97	25	48.5
23	97	28	48.6
		31	48.9
		34	49
		37	49.1
		40	49.1

ตารางที่ ข.19 ผลการทดลองการให้ความร้อนของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากกากตะกอนโรงงานฟอกย้อม
ที่หมักแบบไม่มีอากาศกับเปลือกมะพร้าวอ่อนที่อัตราส่วนผสม 1:3

เวลา (นาที)	อุณหภูมิหม้อที่ 1 ($^{\circ}\text{C}$)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิหม้อที่ 2 ($^{\circ}\text{C}$)
0	31.5	0	31
3	39	3	35.5
6	45.8	6	40.8
9	60	9	43.4
12	73.9	12	45
15	84	16	47.2
18	93.5	19	48.3
21	97.2	22	49
22	97.2	25	49.5
		28	49.8
		31	50
		34	50.2
		37	50.4
		40	50.4

ตารางที่ ข.20 ผลการทดลองการให้ความร้อนของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากกากตะกอนโรงงานฟอกย้อม
ที่หมักแบบมีอากาศกับเปลือกมะพร้าวอ่อนที่อัตราส่วนผสม 1:1

เวลา (นาที)	อุณหภูมิหม้อที่ 1 ($^{\circ}\text{C}$)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิหม้อที่ 2 ($^{\circ}\text{C}$)
0	31	0	30.3
3	35	3	31.9
6	40	6	34.7
9	48.5	9	35
12	57	12	35.9
15	65.2	15	36.6
18	75	18	37
21	79.5	21	37.8
24	85	24	38.2
27	88.9	27	38.7
30	91.9	30	38.6
33	93.6		
35	94.6		
36	94.8		
37	94.9		
38	95.1		
39	95.1		

ตารางที่ ข.21 ผลการทดลองการให้ความร้อนของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากกากตะกอนโรงงานฟอกย้อม
ที่หมักแบบมีอากาศกับเปลือกมะพร้าวอ่อนที่อัตราส่วนผสม 1:2

เวลา (นาที)	อุณหภูมิหม้อที่ 1 ($^{\circ}\text{C}$)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิหม้อที่ 2 ($^{\circ}\text{C}$)
0	31	0	29.5
3	36	3	34.8
6	44.4	6	38.4
9	58.3	9	40.2
12	69.8	12	41.7
15	79	15	42.8
18	88	18	43.6
21	91.8	21	44.4
24	94.5	24	44.7
27	95	27	45
30	95	30	45

ตารางที่ ข.22 ผลการทดลองการให้ความร้อนของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากกากตะกอนโรงงานฟอกย้อม
ที่หมักแบบมีอากาศกับเปลือกมะพร้าวอ่อนที่อัตราส่วนผสม 1:3

เวลา (นาที)	อุณหภูมิหม้อที่ 1 ($^{\circ}\text{C}$)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิหม้อที่ 2 ($^{\circ}\text{C}$)
0	31	0	30.8
3	35	3	36.5
6	41	6	41.2
11	69.2	9	45.2
12	69.8	12	47.7
15	78	15	49.8
18	86.4	18	50.7
21	92.3	21	51.6
24	96.9	24	51.9
25	96.9	27	52.4
		30	52.7
		33	53
		36	53.1
		39	53.2
		42	53

ตารางที่ ข.23 ผลการทดลองการให้ความร้อนของถ่านเชื้อเพลิงอัดแท่งจากกากตะกอนสดโรงงาน
ฟอกย้อมกับเปลือกมะพร้าวอ่อนที่อัตราส่วนผสม 1:1

เวลา (นาที)	อุณหภูมิหม้อที่ 1 (^o C)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิหม้อที่ 2 (^o C)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิหม้อที่ 3 (^o C)
เวลา	tem	เวลา	tem	เวลา	tem
0	30	0	30.3	0	29.9
3	37	4	42.5	3	35.2
6	49	7	51.1	7	47.5
9	61	9	58.8	9	54
12	69.2	12	68	12	60.7
15	81	15	74.6	16	68
18	90.9	18	81.8	18	71.9
19	97.9	21	86	21	75.6
20	98.2	24	89.5	24	77.9
21	98.2	27	95.9	27	80.5
		28	96.8	30	81.4
		29	96.8	33	82.6
				36	82.7
				39	82.5

ตารางที่ ข.24 ผลการทดลองการให้ความร้อนของถ่านเชื้อเพลิงอัดแท่งจากกากตะกอนสดโรงงาน
ฟอกย้อมกับเปลือกมะพร้าวอ่อนที่อัตราส่วนผสม 1:2

เวลา (นาที)	อุณหภูมิหม้อที่ 1 (°C)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิหม้อที่ 2 (°C)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิหม้อที่ 3 (°C)
0	30	0	30	0	30.8
3	35.4	3	39.8	3	36.9
6	48.5	6	47	6	44.3
9	64	9	57.3	10	51.5
12	78	12	64.5	12	55
15	90	15	73	15	58.4
16	98	18	77.2	19	62.7
17	98.2	21	80.5	21	65.1
18	98.2	24	82.2	24	66.6
		27	86	27	68.1
		30	93	30	69
		31	96	33	69.7
		32	97	36	70
		33	97.8	39	70
		34	97.8		

ตารางที่ ข.25 ผลการทดลองการให้ความร้อนของถ่านเชื้อเพลิงอัดแท่งจากกากตะกอนสดโรงงาน
ฟอกย้อมกับเปลือกมะพร้าวอ่อนที่อัตราส่วนผสม 1:3

เวลา (นาท)	อุณหภูมิ หม้อที่ 1 (°C)	เวลา (นาท)	อุณหภูมิ หม้อที่ 2 (°C)	เวลา (นาท)	อุณหภูมิ หม้อที่ 3 (°C)	เวลา (นาท)	อุณหภูมิ หม้อที่ 3 (°C)
0	30.8	0	30	0	31.8	0	30.5
3	36.3	3	38.8	3	35.4	3	32
6	42.5	6	48.8	6	41.1	6	33.5
9	59.9	9	58	9	47.7	9	34.3
12	74.6	12	68	12	54.3	12	35.2
15	87	15	77.1	15	58.7	15	36
19	98.2	18	87.2	18	65.3	18	36.5
21	98.2	21	96.5	21	69.3	21	36.9
		22	97.6	24	73.8	24	37.2
		23	97.7	28	78.5	27	37.5
		24	97.7	30	81	30	37.6
				33	84.5	33	37.6
				36	88	36	37.5
				39	91		
				42	93.3		
				45	95.7		
				48	96.3		
				49	96.5		
				50	96.7		
				51	96.8		
				52	96.8		

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นางสาวประริญา ราไพ
วัน เดือน ปีเกิด	26 ตุลาคม 2520
ประวัติการศึกษา	
ระดับมัธยมศึกษา	ประโยคมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนสว่างศึกษา พ.ศ. 2539
ระดับปริญญาตรี	วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ พ.ศ.2543
ระดับปริญญาโท	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ.2546
ทุนวิจัย	ทุนอุดหนุนสนับสนุนการวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ทบวงมหาวิทยาลัย ทุนอุดหนุนการวิจัยพระจอมเกล้าธนบุรี ปีการศึกษา 2544 ทุนสนับสนุนงานวิทยานิพนธ์ ทุนการศึกษามูลนิธิชิน โสภณพนิช ด้านสิ่งแวดล้อม
ประวัติการทำงาน	-
ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์	-

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ข้อตกลงว่าด้วยการโอนลิขสิทธิ์ในวิทยานิพนธ์

วันที่ 4 กรกฎาคม พ.ศ. 2545

ข้าพเจ้า (นาย/นางสาว/นาง) ประริญา ไร่ไพ รหัสประจำตัว 44401415

เป็นนักศึกษาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ระดับปริญญา โท เอก

หลักสูตร วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานและวัสดุ

อยู่บ้านเลขที่ ๑๓/๑๖๑ ตรอก/ซอย.....ถนน.....

ตำบล/แขวง กิ่งหวาย อำเภอ/เขต สีสุคนธ์ จังหวัด ภูเก็ต

รหัสไปรษณีย์ 15120 ขอโอนลิขสิทธิ์ในวิทยานิพนธ์ให้ไว้กับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี โดยมี รศ.ดร.จงจิตร หิรัญลาก ตำแหน่ง คณบดีคณะพลังงานและวัสดุ เป็นผู้รับโอนลิขสิทธิ์และมีข้อตกลงดังนี้

1. ข้าพเจ้าได้จัดทำวิทยานิพนธ์ เรื่อง “การศึกษาศักยภาพกากตะกอนน้ำเสียอุตสาหกรรมประเภท อนินทรีย์สารเพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง”

ซึ่งอยู่ในความควบคุมของ ดร.สุทธิพงษ์ เสถียรนพเก้า

ตามมาตรา 14 แห่ง พ.ร.บ. ลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 และถือว่าเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรของ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

2. ข้าพเจ้าตกลงโอนลิขสิทธิ์จากผลงานทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการสร้างสรรค์ของข้าพเจ้าใน วิทยานิพนธ์ให้ไว้กับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ตลอดอายุแห่งการคุ้มครองลิขสิทธิ์ตามมาตรา 23 แห่งพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 ตั้งแต่วันที่ได้รับอนุมัติโครงร่างวิทยานิพนธ์จากมหาวิทยาลัย

3. ในกรณีที่ข้าพเจ้าประสงค์จะนำวิทยานิพนธ์ไปใช้ในการเผยแพร่ในสื่อใด ๆ ก็ตาม ข้าพเจ้าจะต้อง ระบุว่าวิทยานิพนธ์เป็นผลงานของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีทุก ๆ ครั้งที่มีการเผยแพร่

4. ในกรณีที่ข้าพเจ้าประสงค์จะนำวิทยานิพนธ์ไปเผยแพร่หรืออนุญาตให้ผู้อื่นทำซ้ำหรือดัดแปลงหรือ เผยแพร่ต่อสาธารณชนหรือกระทำการอื่นใด ตามมาตรา 27, มาตรา 28 และมาตรา 29 และมาตรา 30 แห่ง พระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 โดยมีค่าตอบแทนในเชิงธุรกิจ ข้าพเจ้าจะกระทำได้เมื่อได้รับความยินยอมเป็น ลายลักษณ์อักษรจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ลงชื่อ.....ไร่ไพ ไร่ไพ.....ผู้โอนลิขสิทธิ์

(นางสาวประริญา ไร่ไพ)

ลงชื่อ.....(รศ.ดร.จงจิตร หิรัญลาก).....ผู้รับโอนลิขสิทธิ์

(รศ.ดร.จงจิตร หิรัญลาก)

ลงชื่อ.....(ดร.สุทธิพงษ์ เสถียรนพเก้า).....พยาน

(ดร.สุทธิพงษ์ เสถียรนพเก้า)

ลงชื่อ.....(อาจารย์จันทนา กุญชรรัตน์).....พยาน

(อาจารย์จันทนา กุญชรรัตน์)