ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

เทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม — **สาขา**

วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม — **ภาควิชา**

เรื่อง การลดการใช้น้ำมันเตาและการจัดการของเสียผ่านกระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่นของกากตะกอนชีวภาพในอุตสาหกรรมกระดาษรีไซเคิล

Reduction of Fuel Oil Consumption and Waste Management through Bio-sludge Gasification in Recycle Paper Industry

นามผู้วิจัย นายบุริมภัทร ปกรณ์ศิริ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ตุลวิทย์ สถาปนจารุ, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม .....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วีรชัย อาจหาญ, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา .....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์จักรกฤษณ์ มหัจฉริยวงศ์, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

.....

(รองศาสตราจารย์กัญจนา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ _____ **เดือน** _____ **พ.ศ.** _____

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การลดการใช้น้ำมันเตาและการจัดการของเสียผ่านกระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่นของกากตะกอนชีวภาพในอุตสาหกรรมกระดาษรีไซเคิล

Reduction of Fuel Oil Consumption and Waste Management through Bio-sludge Gasification in Recycle Paper Industry

โดย

นายบุริมภัทร ปกรณ์ศิริ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม)
พ.ศ. 2552

บุริมภัทร ปกรณ์ศิริ 2552: การลดการใช้น้ำมันเตาและการจัดการของเสียผ่านกระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่นของกากตะกอนชีวภาพในอุตสาหกรรมกระดาษรีไซเคิล ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม) สาขาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ตุลวิทย์ สถาปนจารุ, Ph.D. 104 หน้า

งานวิจัยนี้เป็นการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากเชื้อเพลิงผสมกากตะกอนและขยะภายในโรงงานจากกระบวนการผลิตและระบบบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมกระดาษรีไซเคิล ใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชั่นแบบ Open-top Downdraftของโรงไฟฟ้าต้นแบบ ศูนย์ความเป็นเลิศทางชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ทดสอบอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง 4 ระดับ คือ 100, 120 ,140 และ 180 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง พบว่าอัตราการไหลที่เหมาะสมที่สุด คือ 140 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง โดยได้แก๊สเชื้อเพลิงที่มีองค์ประกอบของ CO, H_2 และ CH_4 เป็นร้อยละ 10.06, 11.77 และ 1.63 ตามลำดับ ที่อัตราการใช้เชื้อเพลิง 87.9 กิโลกรัมต่อชั่วโมง โดยมีค่าความร้อนเทียบเท่า 3.54 เมกกะจูลต่อลูกบาศก์เมตรที่ STP และพบว่าปริมาณเถ้าที่เหลือหลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการมีปริมาณลดน้อยกว่า 50% กระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่นจึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมต่อการจัดการของเสียโดยเปลี่ยนของเสียให้อยู่ในรูปของพลังงานและลดปริมาณของเสียก่อนส่งไปยังหลุมฝังกลบ

การประเมินทางด้านเทคนิคและทางด้านเศรษฐศาสตร์ในการใช้เชื้อเพลิงผสมกากตะกอนและขยะสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันเตาในการผลิตไอน้ำ พบว่าในการใช้เชื้อเพลิงผสมกากตะกอนและขยะจำนวน 42.2 ตันจะสามารถผลิตไอน้ำได้ 92 ตันต่อเดือน ทดแทนการใช้น้ำมันเตาได้ 5,350.72 ลิตรต่อเดือน สามารถประหยัดค่าเชื้อเพลิงได้ 64,956.60 บาทต่อเดือน ซึ่งต้องใช้เงินลงทุน 3,000,000 บาท และระยะเวลาคืนทุน 46.18 เดือน โดยมีอัตราผลตอบแทนการลงทุนร้อยละ 25 มูลค่าปัจจุบันสุทธิเท่ากับ 2.93 ล้านบาท

_____ _____ ___ / ___ / ___

ลายมือชื่อนิสิต ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Burimparth Pakornsiri 2009: Reduction of Fuel Oil Consumption and Waste Management through Bio-sludge Gasification in Recycle Paper Industry. Master of Science (Environmental Technology and Management), Major Field: Environmental Technology and Management, Department of Environmental Science. Thesis Advisor: Assistant Professor Tunlawit Satapanajaru, Ph.D. 104 pages.

This research was the production of producer gases from gasification of bio-sludge and rejected solid waste in recycle paper industry. Open-top downdraft gasification system at Center of Excellent of Biomass, Suranaree Universirty of Technology, was used in this study. Gas flow rates at 100, 120, 140 and 180 m^3/hr were studied. The results indicated that suitable flow rate was 140 m^3/hr. Carbon monoxide, hydrogen and methane from gasifying were 10.06%, 11.77% and 1.63%, respectively. Fuel consumption rate was 87.9 kg/hr. Average high heating value was 3.54 MJ/Nm^3. Percentage of ash volume after process was reduced less than 50%. Gasification is one of the effectively alternative waste managements for industry by changing waste to energy and reducing waste volume.

Technical and economical evaluation in using bio-sludges and rejected plastics as a fuel for steam production show that using 42.2 tons of bio-sludge with rejected plastic can produce 92 tons of steam per month. Five thousand three hundred and fifty point seven two tons of fuel oil can be saved (64,956.60 baht) per month. Investment cost is 3,000,000 baht and payback period is 46.18 months. Net present value is 2.93 million baht and internal rate of return is 25 %.

_____ _____ ___ / ___ / ___

Student's signature Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์ได้โดยการอุปการะและช่วยเหลือจากผู้มีพระคุณหลายท่าน ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร. ตุลวิทย์ สถาปนจารุ อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก และ ผศ.ดร. วีรชัย อาจหาญ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมที่ให้คำปรึกษาทั้งทางด้านการเรียน การค้นคว้าวิจัย และคำแนะนำด้านต่างๆ เกี่ยวกับงานวิจัย ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศทางชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ในการทดลองในงานวิจัย รวมถึงพี่ๆ พนักงานทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือในการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย(สกว.) โครงการทุนวิจัยมหาบัณฑิต สกว. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ประจำปี 2551 สัญญาเลขที่ MRG-WI515S019 คณะผู้วิจัยจึงขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้และทุนโครงการส่งเสริมการวิจัยร่วมแบบทวิภาคีจากคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ได้ให้โอกาสข้าพเจ้าไปทำวิจัยที่ Tokyo University of Agriculture and Technology ประเทศญี่ปุ่น และขอขอบคุณ Dr.Wuled Lenggoro ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำงานวิจัย และการประสานงานต่างๆ ตลอดระยะเวลาทำการวิจัยที่ประเทศญี่ปุ่นมา ณ ที่นี้ด้วย

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ตลอดจนเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ รวมถึงอาจารย์ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อมที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจให้ผู้วิจัยมาโดยตลอด และขอขอบพระคุณผู้ที่ให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้ซึ่งมิได้เอ่ยนามในที่นี้ทุกๆ ท่าน

บุริมภัทร ปกรณ์ศิริ

กันยายน 2552

สารบัญ

หน้า

สารบัญ (1)

สารบัญตาราง (2)

สารบัญภาพ (4)

คำนำ 1

วัตถุประสงค์ 4

การตรวจเอกสาร 5

อุปกรณ์และวิธีการ 36

- อุปกรณ์ 36
- วิธีการ 42

ผลการวิจัยและวิจารณ์ 52

สรุปและข้อเสนอแนะ 69

- สรุป 69
- ข้อเสนอแนะ 71

เอกสารและสิ่งอ้างอิง 72

ภาคผนวก 75

- ภาคผนวก ก วิธีวิเคราะห์คุณสมบัติด้านเชื้อเพลิงของกากตะกอนและขยะจากโรงงานตัวอย่าง 76
- ภาคผนวก ข ข้อมูลผลการทดลอง 81
- ภาคผนวก ค การวิเคราะห์หม้อไอน้ำ 85
- ภาคผนวก ง การคำนวณค่าโสหุ้ยการผลิต 91
- ภาคผนวก จ ทฤษฎีการประเมินความคุ้มทุนในการลงทุน 93
- ภาคผนวก ฉ ผลของการสกัด TiO_2 จากกากตะกอนน้ำเสียอุตสาหกรรมที่ตกตะกอนโดย $TiCl_4$ 96

ประวัติการศึกษาและการทำงาน 104

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

1 คุณสมบัติของน้ำเสียในกระบวนการผลิตกระดาษชนิดต่างๆ ของโรงงานขนาดกลาง . 16
2 ลักษณะและคุณภาพน้ำมันเตา 30
3 การวิเคราะห์แบบประมาณและแบบแยกธาตุของกากตะกอน (dry basis) 54
4 การวิเคราะห์แบบประมาณและแบบแยกธาตุของขยะ (dry basis) 54
5 อุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง และอุณหภูมิแก๊สเชื้อเพลิงหลังออกจากเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงและหลังออกจากระบบทำความสะอาดแก๊ส 57
6 อัตราการใช้เชื้อเพลิง อัตราการเกิดเถ้า และอัตราการดึงเถ้าออก 60
7 ร้อยละโดยปริมาตรของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากเชื้อเพลิงกากตะกอนผสมขยะ 61
8 ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง 63
9 การเปรียบเทียบผลการศึกษาในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากกากตะกอน 64
10 ต้นทุน ค่าใช้จ่าย และมูลค่าที่ประหยัดได้จากการนำเชื้อเพลิงกากตะกอนผสมขยะอัดแท่งมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทน 67

ตารางผนวกที่

ข1 ค่าการวิเคราะห์องค์ประกอบแก๊สเชื้อเพลิงเมื่อใช้อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง 100 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง 82
ข2 ค่าการวิเคราะห์องค์ประกอบแก๊สเชื้อเพลิงเมื่อใช้อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง 120 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง 82
ข3 ค่าการวิเคราะห์องค์ประกอบแก๊สเชื้อเพลิงเมื่อใช้อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง 140 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง 83

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่ **หน้า**

ข4 ค่าการวิเคราะห์องค์ประกอบแก๊สเชื้อเพลิงเมื่อใช้อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง 180 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง 83
ข5 ตัวอย่างการบันทึกข้อมูลแบบต่อเนื่องด้วยระบบ online measuring system (อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงที่ 100 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง) 84
ค1 ปริมาณพลังงานและสัดส่วนในหม้อไอน้ำต่อเดือนของโรงงานตัวอย่าง 90
ฉ1 น้ำหนักตัวอย่างก่อนและหลังผ่านการให้ความร้อนโดยวิธี tube heating furnace (ใช้อากาศเป็นตัวกลาง) 100
ฉ2 น้ำหนักตัวอย่างก่อนและหลังผ่านการให้ความร้อนโดยวิธี tube heating furnace (ใช้ไนโตรเจนเป็นตัวกลาง) 101

สารบัญภาพ

ภาพที่ **หน้า**

1	แผนภาพกระบวนการผลิตกระดาษจากกระดาษที่ผ่านการใช้งานแล้วโดยทั่วไป	5
2	แผนภาพกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษรีไซเคิลโดยทั่วไป	7
3	แผนภาพกระบวนการผลิตกระดาษโดยทั่วไป	13
4	กากของเสียต่างๆ จากกระบวนการผลิตกระดาษ	17
5	กระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่นในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงชนิดไหลลง	21
6	ลักษณะโครงสร้างของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบไหลขึ้น	24
7	ลักษณะโครงสร้างของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบไหลลง	25
8	ลักษณะโครงสร้างของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบไหลตัดขวาง	26
9	ลักษณะโครงสร้างของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบฟลูอิดไดซ์เบด	27
10	แผนผังส่วนประกอบที่สำคัญของต้นแบบโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กสำหรับชุมชนมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	37
11	ส่วนประกอบของต้นแบบโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	40
12	เครื่องอัดแท่งกากตะกอน	44
13	การเริ่มต้นการทำงานของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง	46
14	แสดงตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิภายในเตา (T_1 –T_6)	47
15	การเกิดและการจัดการของเสียในโรงงานผลิตเยื่อกระดาษและกระดาษตัวอย่าง	52
16	สมดุลมวลสารของกระบวนการผลิตของโรงงานผลิตเยื่อกระดาษและกระดาษตัวอย่าง	53
17	ลักษณะทางกายภาพของ (ก) กากตะกอน (ข) ขยะ ที่ใช้ในการทดลอง	55
18	ลักษณะทางกายภาพของเชื้อเพลิงหลังผ่านกระบวนการอัดแท่ง	55
19	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในเตาและระยะเวลา เมื่อใช้อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง 100 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง	57

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

20 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในเตาและระยะเวลา เมื่อใช้อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง 120 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง 58

21 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในเตาและระยะเวลา เมื่อใช้อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง 140 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง 58

22 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในเตาและระยะเวลา เมื่อใช้อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง 180 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง 59

23 ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงที่อัตราการไหลต่างๆ 62

ภาพผนวกที่

ฉ1 (ก) ภาชนะบรรจุอะครีลิกที่ใช้ร่วมกับเตาไมโครเวฟ (ข) เตาไมโครเวฟ 98

ฉ2 ผลการวิเคราะห์ด้วย High Temperature X-ray Diffraction ของกากตะกอนน้ำเสียที่ตกตะกอนด้วย $TiCl_4$ หลังจากผ่านการให้ความร้อนด้วยวิธีไมโครเวฟที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสที่เวลา (ก) 0 ชั่วโมง (ข) 1 ชั่วโมง (ค) 2 ชั่วโมง และ(ง) 3 ชั่วโมง 99

ฉ3 (ก) ภาชนะอะลูมิน่า (ข) Tube Furnace 100

ฉ4 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่หายไปของตัวอย่างกับอุณหภูมิของ Tube Furnace (ก) เมื่อใช้อากาศเป็นตัวกลาง (ข) เมื่อใช้ไนโตรเจนเป็นตัวกลาง 101

ฉ5 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี X-ray Diffraction ของกากตะกอนน้ำเสียที่ผ่านการให้ความร้อนโดยวิธี Tube Heating Furnace (ก) ใช้อากาศเป็นตัวกลาง (ข) ใช้ไนโตรเจนเป็นตัวกลาง 102

การลดการใช้น้ำมันเตาและการจัดการของเสียผ่านกระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่นของกากตะกอนชีวภาพในอุตสาหกรรมกระดาษรีไซเคิล

Reduction of Fuel Oil Consumption and Waste Management through Bio-sludge Gasification in Recycle Paper Industry

คำนำ

ในปัจจุบันประเทศไทยได้เกิดวิกฤติการณ์ด้านพลังงานเชื้อเพลิง โดยเฉพาะปัญหาราคาน้ำมันที่สูงขึ้น ความต้องการใช้เชื้อเพลิงในอัตราที่สูงของภาคอุตสาหกรรมในประเทศ และการต้องพึ่งพาน้ำมันจากต่างประเทศเป็นหลัก ปัญหาเหล่านี้ส่งผลกระทบทั้งทางด้านเศรษฐกิจและสังคมของประเทศ จากวิกฤติการณ์ดังกล่าวจึงได้มีการพัฒนาและค้นหาพลังงานในรูปแบบอื่นมาใช้ทดแทน แหล่งพลังงานที่ได้รับความสนใจมากที่สุดคือแหล่งพลังงานในประเทศในลักษณะของพลังงานทดแทน (renewable energy) อาทิเช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม และพลังงานจากขยะ เป็นต้น โดยกระทรวงพลังงานตั้งเป้าหมายให้ประเทศไทยมีการใช้พลังงานทดแทนเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0.5 ของการใช้พลังงานทั้งหมดในปัจจุบันเป็นร้อยละ 8 ในช่วงระยะเวลา 8 ปี (พ.ศ.2546-2554) ดังนั้นการพัฒนาหาพลังงานทางเลือกในรูปแบบอื่นเพื่อนำมาใช้ทดแทนน้ำมันจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง ทั้งเป็นการช่วยลดต้นทุนในการผลิตของภาคอุตสาหกรรม อีกทั้งยังสามารถช่วยลดปัญหาโลกร้อนอันเกิดจากการใช้พลังงานซึ่งเป็นปัญหาใหญ่ของโลกลงได้อีกด้วย

อุตสาหกรรมเยื่อกระดาษเป็นอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ที่มีความสำคัญต่อการพัฒนาประเทศ โดยอัตราการขยายตัวของอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษอาจใช้บ่งชี้ความเจริญก้าวหน้าทางสังคมและการขยายตัวทางเศรษฐกิจของประเทศได้ ยิ่งมีการขยายตัวของอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษมาก แสดงว่าเศรษฐกิจของประเทศมีแนวโน้มที่จะขยายตัวเพิ่มมากขึ้น ในปัจจุบันอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษมีการขยายตัวเพิ่มมากขึ้นทุกๆปี ในปี พ .ศ. 2549 มีปริมาณการผลิตเยื่อกระดาษสูงถึง 0.9 ล้านตัน และในไตรมาสที่ 3 ปี พ.ศ. 2550 การผลิตเพิ่มขึ้นเทียบจากช่วงเดียวกันในปี พ.ศ. 2549 คิดเป็นร้อยละ 12.5 และมีการนำเข้าเยื่อกระดาษและเศษกระดาษจากต่างประเทศเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 25.8 และมีแนวโน้มที่จะขยายตัวอย่างต่อเนื่อง จากข้อมูลการบริโภคกระดาษของประชาชน คนไทยบริโภคกระดาษเฉลี่ยคนละ 44 กิโลกรัมต่อปีและมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นทุกปี ขณะที่ประเทศอื่นๆในแถบเอเชียมีอัตราการบริโภคกระดาษต่อคนสูงกว่ามาก เช่น มาเลเซียมีอัตราการบริโภคกระดาษ 98

กิโลกรัมต่อคนต่อปี ประเทศญี่ปุ่นมีอัตราการบริโภคกระดาษ 241 กิโลกรัมต่อคนต่อปี (สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม, 2550) ดังนั้นอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษของไทยจึงยังมีโอ กาสที่จะขยายตัวได้อีกมาก อุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษจัดเป็นอุตสาหกรรมที่ต้องใช้พลังงานเป็นจำนวนมากในกระบวนการผลิต โดยพลังงานที่ใช้ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของพลังงานความร้อน และพลังงานไฟฟ้า โดยพลังงานความร้อนผลิตมาจากหม้อไอน้ำ โดยเชื้อเพลิงที่ใช้ส่วนใหญ่นั้นจะใช้น้ำ มันเตา และมีบ้างที่ใช้ถ่านหินลิกไนต์ โดยพลังงานความร้อนจะถูกใช้ในการระเหยน้ำเพื่อผลิตไอน้ำส่งไปใช้ในกระบวนการผลิตโดยส่วนใหญ่ส่งไปใช้ในขั้นตอนการทำแผ่นเยื่อและอบแห้ง ส่วนพลังงานไฟฟ้าจะใช้ในการเดินเครื่องจักรกลต่างๆ นอกจากนี้ในกระบวนผลิตมีการใช้น้ำเป็นปริมาณมาก น้ำเสียที่เกิดขึ้นจะถูกนำไปบำบัดโดยระบบ activated sludge จากกระบวนการดังกล่าวทำให้เกิดกากตะกอนจำนวนมาก กากตะกอนที่เกิดขึ้นเป็นกากตะกอนชีวภาพจากระบบบำบัดน้ำเสีย และ ไฟเบอร์ (fiber) ขนาดเล็กที่หลุดมาจากกระบวนการผลิต โดยกากตะกอนเหล่านี้ถ้าถูกนำไปทำให้แห้ง จะมีค่าความร้อน (higher heat value (HHV)) ประมาณ 6000- 8000 KJ/Kg (วรวุฒิ, 2552) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับขยะบางประเภท และมีคุณสมบัติในการเผาไหม้ ซึ่งวัสดุเชื้อเพลิงที่มีค่า HHV มากกว่า 5000 KJ/Kg มีความชื้นต่ำกว่า 50% และมีปริมาณเถ้าต่ำกว่า 60% จะถูกเผาได้โดย ไม่ต้องเติมเชื้อเพลิงเพิ่ม (Rhyner *et al*., 1995)

สำหรับการนำของเสียไปเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานมีหลายวิธี อาทิเช่น การเผาโดยตรง (direct combustion) กระบวนการเกิดแก๊สหรือแก๊สซิฟิเคชั่น (gasification) และกระบวนการไพโรไรซิส (pyrolysis) ซึ่งกระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่นเป็นกระบวนการที่น่าสนใจ เนื่องจากสามารถนำแก๊สที่ผลิตได้มาใช้งานได้โดยตรงและเกิดมลพิษทางอากาศต่ำ กระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่นเป็นกระบวนการเปลี่ยนเชื้อเพลิงแข็งให้อยู่ในสภาพแก๊สเชื้อเพลิง โดยเกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งในสภาวะที่มีออกซิเจนจำกัด มีกลไกการทำงานไม่ยุ่งยาก โดยการเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาทางเคมีเป็นไปภายใต้ภาวะความดันบรรยากาศอุณหภูมิอยู่ในช่วง 700-1,200 องศาเซลเซียส แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้นี้สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงเครื่องยนต์ได้ โดยหากเป็นเครื่องยนต์แก๊สโซลีน (เครื่องเบนซิน) สามารถที่จะใช้แก๊สดังกล่าวเป็นเชื้อเพลิงได้โดยไม่ต้องผสมเชื้อเพลิงอื่น (เบญจมาศ, 2547)

งานวิจัยนี้สนใจศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตพลังงานทดแทนจากกากตะกอนชีวภาพและขยะที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตและการบำบัดน้ำเสียของโรงงานกระดาษ โดยนำมาผ่านกระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่นเพื่อผลิตแก๊สสังเคราะห์ (synthesis gas หรือ syngas) ในรูปของแก๊สเชื้อเพลิง เพื่อใช้ร่วมกับน้ำมันเชื้อเพลิงเดิมทำให้ลดปริมาณการใช้พลังงานเชื้อเพลิงเดิมของโรงงาน

ลง อีกทั้งยังเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดกากตะกอน จากนั้นนำผลที่ได้ทางด้านเทคนิค เศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อมไปประเมินความเป็นไปได้ในการติดตั้งระบบแก๊สซิฟิเคชั่นกับระบบเดิมของทางโรงงาน

วัตถุประสงค์

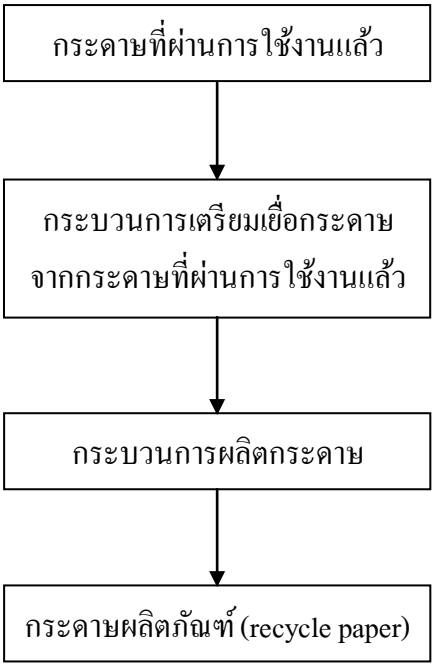
1. ศึกษาความเป็นไปได้ในการลดปริมาณการใช้น้ำมันเตาและจัดการของเสียของโรงงานโดยใช้กากตะกอนและขยะที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตและการบำบัดน้ำเสียมาทำผ่านกระบวนการ แก๊สซิฟิเคชั่น

2. วิเคราะห์ผลเชิงด้านเศรษฐศาสตร์ ความคุ้มทุน ในการติดตั้งระบบแก๊สซิฟิเคชั่นในอุตสาหกรรมกระดาษรีไซเคิล

การตรวจเอกสาร

กระบวนการผลิตกระดาษจากในอุตสาหกรรมกระดาษรีไซเคิล

อุตสาหกรรมกระดาษรีไซเคิล คือ อุตสาหกรรมการผลิตกระดาษจากกระดาษที่ใช้งานแล้ว ซึ่งประกอบด้วยกระบวนการหลัก 2 กระบวนการ (วรวุฒิ, 2552) คือ กระบวนการเตรียมเยื่อกระดาษจากกระดาษใช้แล้ว (recycle fiber process) เป็นกระบวนการกำจัดหมึกและสิ่งปนเปื้อนออกจากกระดาษใช้แล้วและเปลี่ยนกระดาษใช้แล้วให้กลับเป็นเยื่อกระดาษ และกระบวนการผลิตกระดาษ (paper mill) จะใช้เยื่อกระดาษที่ได้จากกระบวนการเตรียมเยื่อกระดาษมาขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่อไป (UNPE, 1996) สรุปแผนภาพกระบวนการผลิตได้ดังแสดงในภาพที่ 1



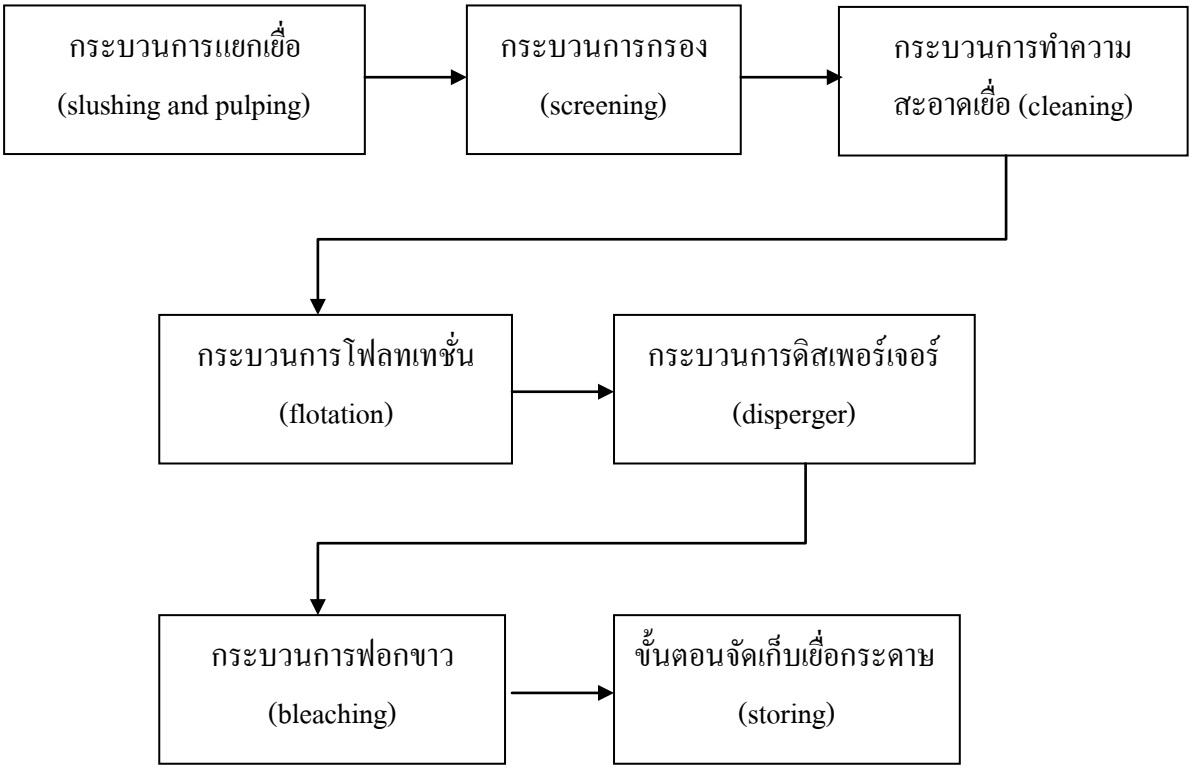
ภาพที่ 1 แผนภาพกระบวนการผลิตกระดาษจากกระดาษที่ผ่านการใช้งานแล้วโดยทั่วไป

ในกระบวนการผลิตกระดาษโดยทั่วไป เยื่อกระดาษชนิดต่างๆ จะถูกนำมาผสมกันในอัตราส่วนต่างๆ เพื่อให้ได้คุณสมบัติของกระดาษตามที่ต้องการ ดังนั้นกระดาษแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติของเยื่อกระดาษที่แตกต่างกัน เมื่อทำการรีไซเคิลกระดาษจึงจะต้องมีการคัดเลือกประเภทของกระดาษที่จะนำมาผ่านกระบวนการรีไซคิล เพื่อให้ได้คุณสมบัติของเยื่อกระดาษที่เหมาะสมต่อการผลิตกระดาษรีไซเคิลชนิดต่างๆ ซึ่งเกณฑ์การแยกประเภทกระดาษชนิดต่างๆ จะแตกต่างไปในแต่ละประเทศ (McKinney, 1995) ลักษณะการผลิตกระดาษรีไซเคิลสามารถแบ่งได้เป็นสองลักษณะใหญ่ๆ คือ การผลิตกระดาษสำหรับบรรจุภัณฑ์ และการผลิตกระดาษขาวสำหรับพิมพ์เขียน หรือนำไปผลิตหนังสือต่างๆ (Gottsching and Pakarinen, 2000) โดยกระดาษเก่าที่ใช้ในการผลิตกระดาษสำหรับบรรจุภัณฑ์ที่ใช้งานแล้ว จะใช้กระดาษจำพวกกระดาษสำหรับบรรจุภัณฑ์ที่ใช้งานแล้วเช่น กระดาษลัง และกระดาษลูกฟูกเป็นวัตถุดิบหลักในกระบวนการผลิต ส่วนการผลิตกระดาษขาวจะใช้กระดาษหนังสือพิมพ์เก่า กระดาษนิตยสารเก่า กระดาษขาวที่ผ่านการใช้งานแล้วจากสำนักงาน และกระดาษขาวที่ไม่ผ่านการตรวจคุณภาพจากกระบวนการผลิตเป็นวัตถุดิบตามคุณสมบัติของกระดาษขาวที่ต้องการผลิต ในการผลิตกระดาษหนังสือพิมพ์จากกระดาษที่ผ่านการใช้งาน วัตถุดิบหลักที่ใช้ในกระบวนการผลิต ได้แก่ กระดาษหนังสือพิมพ์เก่าและกระดาษนิตยสารเก่า

กระบวนการรีไซเคิลกระดาษมีขั้นตอนโดยละเอียดในกระบวนการแตกต่างกันไปตามแต่ลักษณะโรงงานหรือชนิดของกระดาษที่ต้องการทำการผลิต การผลิตกระดาษสำหรับบรรจุผลิตภัณฑ์จะมีขั้นตอนน้อยกว่ากระบวนการผลิตขาวกระดาษพิมพ์เขียน และอาจจะไม่มีกระบวนการกำจัดหมึกในกระบวนการผลิต (McKinny, 1995)

กระบวนการเตรียมเยื่อกระดาษจากกระดาษใช้แล้ว

กระบวนการเตรียมเยื่อกระดาษจากกระดาษที่ใช้แล้ว (เยื่อกระดาษรีไซเคิล) จะเป็นกระบวนการที่เปลี่ยนเยื่อกระดาษในกระดาษที่ใช้งานแล้วให้อยู่ในสภาพที่พร้อมจะนำมาใช้ในการผลิตกระดาษอีกครั้ง กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษจะมีความแตกต่างกันไปตามลักษณะของกระดาษที่ต้องการผลิต กระบวนการสำคัญในการเตรียมเยื่อกระดาษมีดังนี้ (ภาพที่ 2) (สำนักงานเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542; Gottsching and Pakarinen, 2000)



ภาพที่ 2 แผนภาพกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษรีไซเคิลโดยทั่วไป

1. กระบวนการแยกเยื่อ (slushing and pulping)

กระบวนการแยกเยื่อ เป็นกระบวนการเปลี่ยนกระดาษที่ผ่านการใช้งานแล้วให้กลายเป็นเส้นใยเยื่อกระดาษให้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ กระบวนการแยกเยื่อเริ่มจากการป้อนกระดาษที่ใช้งานแล้วเข้าสู่เครื่องจักรที่ใช้ในการตีเยื่อด้วยอัตราการป้อนที่เหมาะสมกับการผลิต เครื่องจักรจะทำการบด ฉีกกระดาษที่ป้อนเข้าไปให้กลายเป็นชิ้นเล็ก ๆ ผสมกับน้ำในถัง และทำการกวนเศษกระดาษด้วยใบพัดที่ก้นถังซึ่งหมุนด้วยความเร็วสูง เส้นใยในกระดาษจะแยกออกจากกันเป็นเส้นใยอิสระอีกครั้ง เครื่องจักรตีเยื่อจะทำหน้าที่แยกสิ่งเจือปนที่มีขนาดใหญ่ออกจากเยื่อกระดาษ ก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการต่อไปอาจมีการเติมสารเคมีบางชนิด เช่น สารเคมีที่ใช้ในการกำจัดหมึก สารปรับสภาพความเป็นกรดด่าง และสารฟอกย้อมเข้าไปในกระบวนการนี้ ตามแต่ลักษณะการผลิตอีกด้วย

2. กระบวนการกรองเยื่อกระดาษ (screening)

กระบวนการกรองมีจุดประสงค์เพื่อทำการแยกสิ่งปนเปื้อนต่าง ๆ ออกจากเยื่อกระดาษ โดยอาศัยความแตกต่างของขนาดของสิ่งปนเปื้อนกับเยื่อกระดาษ กระบวนการกรองจะมีการทำการกรองหลาย ๆ ชั้น โดยเครื่องจักรและขนาดของตัวกรองจะแตกต่างกันไป เพื่อให้สามารถแยกเยื่อกระดาษออกจากสิ่งปนเปื้อนให้ได้มากที่สุด การกรองเริ่มจากการกรองหยาบผ่านตัวกรองที่มีรูขนาดใหญ่ แล้วจึงกรองผ่านตัวกรองที่มีรูขนาดเล็กลงในขั้นต่อ ๆไป โดยทั่วไปส่วนที่ถูกคัดออกจากกระบวนการกรองจะถูกนำมากรองซ้ำอีกครั้งหนึ่งเพื่อลดการสูญเสียเยื่อกระดาษให้มากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้

3. กระบวนการทำความสะอาดเยื่อ (cleaning)

กระบวนการทำความสะอาดเยื่อเป็นกระบวนการที่จะแยกสิ่งปนเปื้อนที่มีขนาดเล็ก เช่น ทราย เศษโลหะชิ้นเล็ก ๆ เม็ดพลาสติกขนาดเล็ก เป็นต้น ออกจากเยื่อกระดาษ เครื่องมือที่ใช้ในการทำความสะอาดเยื่อกระดาษมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด ในที่นี้จะกล่าวถึงเครื่องมือทำความสะอาดเยื่อที่นิยมใช้กันในประเทศไทยดังนี้ (สำนักงานเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542)

3.1 High density cleaner หรือ H.D. cleaner

H.D. cleaner เป็นเครื่องมือที่สามารถแยกสิ่งแปลกปลอมที่มีขนาดใหญ่และหนักออกจากเยื่อกระดาษโดยอาศัยแรงเหวี่ยงรอบกรวย สิ่งแปลกปลอมที่หนักกว่าเยื่อกระดาษจะถูกเหวี่ยงลงมาด้านล่างของกรวย ขณะที่เยื่อกระดาษซึ่งเบากว่าจะถูกเหวี่ยงแยกออกไปทางด้านบนของกรวย ในการเหวี่ยงต้องใช้แรงเหวี่ยงที่เหมาะสม หากใช้แรงเหวี่ยงมากเกินไปจะทำให้เยื่อกระดาษที่ได้ไม่สะอาด และหากใช้แรงเหวี่ยงที่น้อยเกินไปจะทำให้เกิดการสูญเสียเยื่อกระดาษได้มาก

3.2 Low density cleaner หรือ L.D. cleaner

L.D. cleaner เป็นเครื่องมือทำความสะอาดเยื่อกระดาษที่อาศัยหลักแรงเหวี่ยงเช่นเดียวกับ H.D. cleaner แต่ L.D. cleaner จะทำหน้าที่แยกสิ่งเจือปนที่มีขนาดเล็กและน้ำหนักเบา

เช่น ทรายละเอียด เป็นต้น ในการควบคุม L.D. cleaner ให้มีประสิทธิภาพดีและเกิดการสูญเสียเยื่อกระดาษน้อยจะต้องควบคุมความดันให้เหมาะกับแรงเหวี่ยงที่ใช้ในการแยกสิ่งเจือปนออก

3.3 Centrifugal cleaner

หลักการทำงานของเครื่องมือชนิดนี้คล้ายกับ H.D. cleaner คืออาศัยแรงเหวี่ยงโดยทำการเหวี่ยงในภาชนะทรงกรวย ทำหน้าที่ในการแยกสิ่งสกปรก เช่น โฟม พลาสติก กรวดทราย เป็นต้น ออกจากเยื่อกระดาษ

3.4 Hot dispersion system

เครื่องมือชนิดนี้ทำการแยกสิ่งเจือปนจำพวกกาว และพลาสติกที่ติดอยู่กับเศษกระดาษออกจากเยื่อกระดาษ ส่วนใหญ่เครื่องมือนี้จะถูกนำมาใช้ในกระบวนการทำความสะอาดเศษกระดาษที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตกระดาษคราฟท์ Hot dispersion system จะทำการบีบน้ำออกจากเยื่อกระดาษให้มีความเข้มข้นมากขึ้นจากนั้นจึงส่งเข้าสู่ชุดกระจายเยื่อ (disperser) ซึ่งจะทำหน้าที่กระจายเศษกาวและพลาสติกที่ติดอยู่กับเยื่อกระดาษออก โดยอาศัยการกระจายเยื่อเคล้ากับไอน้ำจนมีอุณหภูมิประมาณ 85-90 ° C

3.5 Vibration screen

ตะแกรงร่อนจะทำหน้าที่แยกสิ่งเจือปนออกจากเยื่อกระดาษโดยอาศัยแรงสั่นสะเทือนในการเขย่าน้ำเยื่อ ซึ่งจะแยกเอาสิ่งเจือปนที่มีขนาดใหญ่ รวมถึงเยื่อที่ยังไม่กระจายตัวออกทางด้านบนของตะแกรง น้ำเยื่อกระดาษที่มีการกระจายตัวดีแล้วจะลอดผ่านรูของตะแกรงและแยกออกไป

3.6 Pressure screen

เป็นอุปกรณ์ทำความสะอาดเยื่อกระดาษที่อาศัยความดันในการดันน้ำเยื่อกระดาษให้ลอดผ่านรูของตะแกรงออกไป

4. กระบวนการกำจัดหมึก (deinking)

ในการนำเยื่อกระดาษรีไซเคิลมาใช้ในการผลิตกระดาษหนังสือพิมพ์ กระดาษทิชชู หรือกระดาษพิมพ์เขียน จะต้องมีการกำจัดหมึกออกจากเยื่อกระดาษที่ผ่านการทำความสะอาดแล้วในขั้นตอนแรก ในกระบวนการกำจัดหมึกจะมีการเติมสารเคมีลงไปในน้ำเยื่อเพื่อทำปฏิกิริยาให้อนุภาคของหมึกแยกตัวออกจากเยื่อกระดาษ สารเคมีที่ใช้ในการกำจัดหมึกออกจากเยื่อกระดาษคือสารเคมีประเภทสารลดแรงตึงผิว เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โซเดียมซิลิเกต ($NaSiO_4$) สบู่หรือกรดไขมัน (soap or fatty acid) เป็นต้น ในการกำจัดหมึกควรปรับสภาพความเป็นกรดด่างของน้ำในกระบวนการแยกเยื่อเพื่อให้มีค่า pH อยู่ที่ประมาณ 9-10 เพื่อให้ประสิทธิภาพในการกำจัดหมึกสูงขึ้น การกำจัดหมึกมีวัตถุประสงค์หลักคือ เพื่อเพิ่มความขาวสว่าง (brightness) ของเยื่อกระดาษและกำจัดกาวหรือยางสนที่เจือปนอยู่ในเยื่อกระดาษ กระบวนการกำจัดหมึกสามารถทำได้2 วิธี ดังนี้

4.1 วิธีโฟลทเทชั่น (flotation)

ในกระบวนการโฟลทเทชั่น อากาศจะถูกเป่าเข้าไปในน้ำเยื่อทำให้เกิดฟองอากาศขึ้น ฟองอากาศที่เกิดขึ้นนี้จะทำหน้าที่เป็นตัวพาจุดหมึกที่ผสมอยู่ในเยื่อกระดาษกับน้ำเยื่อให้ลอยขึ้นสู่ผิวหน้าของเครื่องแยกหมึก และถูกแยกออกมาจากเยื่อกระดาษโดยการกวาดผิวหน้าของน้ำเยื่อออก ในระบบโฟลทเทชั่นอาจมีการเติมสารเคมีก่อตะกอน เช่น สารโพลิเมอร์ หรือสารอิเลคโตรไลท์ เป็นต้น ลงในระบบเพื่อทำให้เส้นใยละเอียดที่มีขนาดเล็ก และเศษขยะขนาดเล็กต่าง ๆ รวมตัวกันเป็นตะกอน ซึ่งจะทำให้สิ่งเจือปนเหล่านี้สามารถเกาะติดกับฟองอากาศได้ดี และสามารถกำจัดสิ่งเจือปนต่าง ๆ รวมทั้งอนุภาคหมึกได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ในปัจจุบันนิยมใช้กระบวนการโฟลทเทชั่นในการกำจัดหมึกจากเยื่อกระดาษเนื่องจากให้ประสิทธิภาพที่สูงและสามารถกำจัดสิ่งเจือปนอื่น ๆ ได้

4.2 วิธีล้าง (washing)

วิธีล้างใช้สำหรับการกำจัดอนุภาคหมึกขนาดเล็กกว่า 15 ไมครอนลงมา ซึ่งกำจัดด้วยวิธีโฟลทเทชั่นได้ยาก วิธีการล้างจะนำเอาน้ำเยื่อที่ผ่านการผสมสารเคมีสำหรับกำจัดหมึกแล้วมาฉีดผ่านบนตะแกรงโค้ง (deasher) น้ำและจุดหมึกจะถูกแยกทะลุตะแกรงออกไป วิธีนี้ให้เยื่อกระดาษ

ที่สะอาดมากกว่าวิธีโฟลทเทชั่น แต่จะมีการสูญเสียเยื่อกระดาษมาก โดยมากจึงนำไปใช้ในการผลิตกระดาษอนามัยจากกระดาษที่ใช้แล้ว

5. กระบวนการกระจายเยื่อ (disperser)

กระบวนการกระจายเยื่อเป็นกระบวนการที่จะช่วยเพิ่มคุณภาพให้แก่เยื่อกระดาษที่นำกลับมาใช้ใหม่และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ กระบวนการกระจายเยื่อมีหน้าที่หลักคือการแตกสิ่งเจือปนที่ปนเปื้อนอยู่ในเยื่อกระดาษ เช่น สารเคลือบผิวและสารเติมแต่งในกระดาษ ก้อนสิ่งสกปรก (stickies) ที่เกิดจากการจับตัวกันของสิ่งปนเปื้อน และเยื่อกระดาษที่มีการจับตัวเป็นก้อนเป็นต้น ให้ออกเป็นชิ้นเล็ก ๆ นอกจากนี้ยังทำหน้าที่แตกอนุภาคหมึกบางชนิด เช่น หมึกเครื่องพิมพ์เลเซอร์ (laser ink) เป็นต้น ให้เป็นอนุภาคเล็ก ๆ เพิ่มความแข็งแรงและความหนาแน่นของเยื่อกระดาษ และอาจจะมีการผสมกับสารเคมีสำหรับทำการฟอกขาวหากมีการฟอกขาวในขั้นตอนต่อไปด้วย สิ่งสกปรกที่ถูกทำให้แตกตัวในกระบวนการกระจายเยื่อจะมีขนาดเล็กลง และถูกกำจัดโดยกระบวนการโฟลทเทชั่นได้ดีขึ้น

6. กระบวนการฟอกขาว (bleaching)

กระบวนการฟอกขาวเป็นกระบวนการที่ช่วยเพิ่มคุณสมบัติด้านความขาวของเยื่อกระดาษ ทำให้กระดาษผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้มีคุณภาพสูงขึ้น ในการผลิตเยื่อกระดาษรีไซเคิล ไม่จำเป็นต้องมีกระบวนการฟอกขาวเสมอไป การนำกระบวนการฟอกขาวมาใช้ในการผลิตเยื่อกระดาษรีไซเคิลจะทำเฉพาะกรณีที่ต้องการผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูง อย่างเช่น กระดาษขาวที่ใช้ในสำนักงาน เป็นต้น สารเคมีที่ใช้ในการฟอกขาวเยื่อกระดาษมีหลายชนิด เช่น สารเคมีประเภทที่ไม่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) โซเดียมไดไทโอไนท์ ($Na_2S_2O_4$) เป็นต้น สารเคมีที่มีสารคลอรีนเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ คลอรีนไดออกไซด์ (ClO_2) โซเดียมไฮโปคลอไรด์ (NaOCl) เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการใช้ออกซิเจน (O_2) ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการฟอกขาวเยื่อกระดาษรีไซเคิลอีกด้วย

7. ขั้นตอนการจัดเก็บเยื่อกระดาษ

ก่อนการจัดเก็บเยื่อกระดาษ เยื่อกระดาษจะถูกส่งเข้ากระบวนการปรับความเข้มข้นของน้ำเยื่อให้มีความเหมาะสมกับการผลิตกระดาษ จากนั้นเยื่อกระดาษจะถูกส่งเข้าไปยังถังเก็บเยื่อ ถังเก็บน้ำเยื่อกระดาษจะมีระบบใบพัดคอยกวนเยื่อกระดาษที่เข้ามา เพื่อป้องกันไม่ให้เยื่อกระดาษลอยตัวขึ้นไปรวมกันที่ผิวหน้าของถังเก็บ หรือตกตะกอนอยู่ด้านล่างของถัง หรือจับตัวเป็นกลุ่มก้อนขึ้นมา นอกจากนี้ยังมีจุดประสงค์เพื่อทำให้เยื่อกระดาษหลายชนิดที่รวมกันอยู่ในเยื่อกระดาษเกิดการรวมตัวกันอย่างสม่ำเสมอ ในถังบดเยื่อยังมีการเติมสารเคมีที่ใช้ปรับปรุงคุณสมบัติของเยื่อกระดาษให้มีความเหมาะสมในการนำไปผลิตเป็นกระดาษผลิตภัณฑ์ต่อไป

เมื่อผ่านกระบวนการเตรียมเยื่อกระดาษรีไซเคิลแล้ว จะได้เยื่อกระดาษที่มีคุณสมบัติเหมาะสมพร้อมที่จะเข้าสู่กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ เพื่อผลิตเป็นกระดาษผลิตภัณฑ์ต่อไป

กระบวนการผลิตกระดาษ

กระบวนการผลิตกระดาษจะเริ่มจากการกำจัดสิ่งสกปรกที่ปนเปื้อนมากับเยื่อกระดาษออกโดยกระบวนการกรอง จากนั้นจึงส่งเข้าสู่เครื่องจักรผลิตกระดาษ(paper machine) เพื่อแปรรูปเยื่อกระดาษให้เป็นกระดาษผลิตภัณฑ์ กระบวนการต่างๆ ในเครื่องจักรผลิตกระดาษมีดังนี้ (ภาพที่ 3) (สำนักงานเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542)

1. ถังจ่ายเยื่อ (headbox)

ถังจ่ายเยื่อเป็นอุปกรณ์ส่วนแรกของเครื่องจักรผลิตกระดาษ ทำหน้าที่จ่ายเยื่อกระดาษที่ผ่านการทำความสะอาดจากหน่วยกรองมาแล้วใช้กระจายอย่างสม่ำเสมอบนตะแกรงลวดเดินแผ่นและยังทำหน้าที่ตีกลุ่มเยื่อกระดาษที่จับตัวกันให้แตกออกจากกันอีกด้วย

ภาพที่ 3 แผนภาพกระบวนการผลิตกระดาษโดยทั่วไป

2. ส่วนตะแกรงลวดเดินแผ่น (forming board)

ส่วนตะแกรงลวดเดินแผ่นมีหน้าที่ทำให้เยื่อกระดาษก่อตัวเป็นแผ่นขึ้น และกำจัดน้ำที่ปนมากับเยื่อกระดาษออกไปส่วนหนึ่ง เมื่อเยื่อกระดาษจากถังจ่ายเยื่อถูกส่งผ่านมายังส่วนตะแกรงลวดเดินแผ่น เยื่อกระดาษจะกระทบกับเยื่อเดินแผ่น และส่วนของแผ่นขึ้นรูปกระดาษ ความเร็วของเยื่อกระดาษจากถังจ่ายเยื่อและความเร็วของลวดเดินแผ่นเป็นปัจจัยสำคัญมากต่อการผลิตกระดาษ ความแตกต่างของความเร็วของการจ่ายเยื่อกระดาษและความเร็วของเยื่อเดินแผ่นมีผลต่อความแข็งแรง และความสม่ำเสมอของกระดาษ เยื่อกระดาษจะเรียงตัวเป็นแผ่นบนแผ่นขึ้นรูปกระดาษ มีการกำจัดน้ำ สารเติมแต่งขนาดเล็ก และเยื่อกระดาษที่มีขนาดสั้นมากบางส่วนทางช่องเล็กๆ บนแผ่นขึ้นรูปกระดาษด้วยแรงดึงดูดของโลกและแรงดึงดูดของอุปกรณ์อื่นๆ น้ำที่ถูกกำจัดออกใต้ลวดเดินผ่านนี้จะเรียกว่าน้ำขาว (white water) ซึ่งสามารถนำมาหมุนเวียนใช้ใหม่ได้ เมื่อผ่านกระบวนการนี้เส้นใยเยื่อกระดาษจะอยู่ชิดกันมากขึ้น และเกิดเป็นรูปร่างของกระดาษได้

3. ส่วนกดรีดน้ำ (pressing part)

ในขั้นตอนกดรีดน้ำนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อกำจัดน้ำออกจากเยื่อกระดาษที่ขึ้นรูปเป็นแผ่นกระดาษแล้วให้มากที่สุด ก่อนที่จะส่งต่อไปยังส่วนอบแห้งต่อไป ในการกดรีดน้ำออกจากแผ่นกระดาษจะใช้ลูกกลิ้งกดรีดน้ำหลายชุดในการรีดน้ำ โดยรูปแบบการจัดชุดรีดน้ำจะแตกต่างกันออกไปตามลักษณะของกระดาษที่ผลิต ลูกกดรีดน้ำยังทำอีกหน้าที่หนึ่งคือ ทำหน้าที่อัดเส้นใยเยื่อกระดาษให้เข้าใกล้กันมากขึ้น เป็นการเพิ่มความเรียบและความแข็งแรงให้แก่กระดาษผลิตภัณฑ์ ปริมาณน้ำที่ยังคงเหลือในแผ่นกระดาษหลังผ่านกระบวนการกดรีดน้ำจะอยู่ที่ประมาณ 60-70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

4. ส่วนอบแห้งกระดาษ (drying part)

ส่วนอบแห้งกระดาษจะทำให้ปริมาณน้ำในแผ่นกระดาษเหลืออยู่ประมาณ 5-10 เปอร์เซ็นต์ๆฟโดยน้ำหนัก โดยอาศัยความร้อนจากไอน้ำอิ่มตัวที่ถูกจ่ายเข้าไปในลูกอบแห้ง ทำให้ลูกอบแห้งร้อนขึ้น ไอน้ำจะกลั่นตัวเป็นคอนเดนเสทภายในลูกอบแห้งและก่อตัวเป็นฟิลม์ขึ้น ฟิลม์นี้มีผลต่อประสิทธิภาพในการอบแห้งกระดาษ รวมถึงค่าใช้จ่ายในการผลิตกระดาษด้วย หากฟิลม์ก่อตัวหนาเกินไปจะทำให้การถ่ายเทความร้อนระหว่างไอน้ำและผิวลูกอบแห้งไม่ดี จึงต้องควบคุมการระบายคอนเดนเสทออกจากลูกอบอย่างสม่ำเสมอ ในขั้นตอนการอบแห้งกระดาษนี้อาจมีการเคลือบสารเพิ่มความแข็งแรงให้แก่ผิวกระดาษด้วย

5. ส่วนฉาบผิวกระดาษ (surface sizing)

ในกรณีที่ผลิตกระดาษบางชนิด เช่น กระดาษพิมพ์เขียน เป็นต้น จะมีการฉาบผิวกระดาษด้วยแป้งในเครื่องฉาบผิวกระดาษด้วย โดยการฉาบแป้งจะทำการฉาบทั้ง2 ด้านของผิวกระดาษ เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้แก่กระดาษ และทำให้กระดาษมีความต้านทานน้ำมากขึ้น อาจมีการเติมสารเติมแต่งบางชนิดลงไปในน้ำแป้งที่ใช้ฉาบกระดาษด้วย

6. ส่วนเคลือบผิวกระดาษ (coating)

ในการผลิตกระดาษบางชนิด เช่น กระดาษแข็งเคลือบ กระดาษอาร์ต เป็นต้น จะมีการเคลือบผิวกระดาษให้กระดาษมีคุณสมบัติตามที่ต้องการ เช่น มีความขาวมากขึ้น สามารถสะท้อนแสงได้ดีขึ้น มีความทึบแสงสูงขึ้น สามารถพิมพ์ได้คมชัดขึ้น เป็นต้น ในการเคลือบกระดาษจะใช้สารเคมีสำหรับเคลือบกระดาษซึ่งประกอบด้วยผงสี (pigments) กาว (binder) และสารเติมแต่งอื่นๆ (additive)

7. ส่วนขัดผิวหน้ากระดาษ (calender)

ส่วนขัดผิวหน้ากระดาษเป็นส่วนที่อยู่ต่อจากส่วนอบแห้ง มีลักษณะเป็นลูกรีดทรงกระบอกผิวเรียบวางซ้อนกัน มีหน้าที่รีดกระดาษให้บางลง ทำให้ผิวหน้าของกระดาษเรียบขึ้น และทำให้กระดาษมีความสม่ำเสมอมากขึ้น ส่วนรีดผิวกระดาษเป็นขั้นตอนสุดท้ายก่อนที่จะส่งกระดาษเข้าสู่ขั้นตอนม้วน และตัดกระดาษให้ได้ความยาวตามต้องการ ก่อนส่งสู่ผู้บริโภคต่อไป

ในกระบวนการขึ้นรูปกระดาษอาจมีขั้นตอนย่อยๆ อีกหลายขั้นตอน ตามแต่ลักษณะของผลิตภัณฑ์กระดาษที่ต้องการ เช่น ขั้นตอนการฉาบผิวกระดาษ(size-press section) ที่จะทำการฉาบผิวกระดาษด้วยน้ำแป้งต้มสุก เพื่อให้กระดาษมีความแข็งแรงมากขึ้น ขั้นตอนการเคลือบผิวกระดาษ (coating) เป็นขั้นตอนที่จะเคลือบผิวกระดาษด้วยสารเคมีเคลือบผิว เพื่อให้ผิวของกระดาษเรียบขึ้น มีความสามารถในการพิมพ์บนผิวกระดาษดีขึ้น ขั้นตอนการขัดผิวกระดาษ(supercalendering) เป็นขั้นตอนที่จะทำการขัดผิวกระดาษเพื่อเพิ่มความมันวาวให้แก่ผิวกระดาษ เป็นต้น

มลพิษที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตกระดาษ

ในกระบวนการผลิตกระดาษจะมีการเกิดมลพิษขึ้นในขั้นตอนต่างๆ ของกระบวนการผลิต มลพิษที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษและกระดาษแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ น้ำเสีย (wastewater) กากของเสีย (solid waste) และมลพิษทางอากาศ (air pollution) คุณลักษณะของมลพิษต่างๆ มีดังต่อไปนี้

1. น้ำเสีย

อุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษและกระดาษ เป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่ก่อให้เกิดน้ำเสียในปริมาณมาก พารามิเตอร์คุณลักษณะที่สำคัญของน้ำเสียจากกระบวนการผลิต ได้แก่ ค่าบีโอดี ค่าซีโอดี ค่าปริมาณสารที่ละลายได้ และค่าปริมาณสารแขวนลอย คุณสมบัติของน้ำเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต จะแตกต่างกันไปตามลักษณะของกำลังการผลิต วัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิต และคุณภาพของกระดาษผลิตภัณฑ์ที่ต้องการผลิต น้ำเสียที่เกิดขึ้นส่วนหนึ่งถูกนำกลับมาใช้ใหม่ในบางส่วนของกระบวนการผลิตตามความสะอาดของน้ำเสีย น้ำเสียที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้จะต้องผ่านกระบวนการบำบัดก่อนปล่อยออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ตัวอย่างคุณสมบัติของน้ำเสียในกระบวนการผลิตกระดาษชนิดต่างๆ แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของน้ำเสียในกระบวนการผลิตกระดาษชนิดต่างๆ ของโรงงานขนาดกลาง

ชนิดของโรงงาน	ปริมาณน้ำเสีย (ลบ.ม./ตันกระดาษ)	คุณสมบัติของน้ำเสีย (มิลลิกรัม/ลิตร)			
		บีโอดี	ซีโอดี	ของแข็งแขวนลอย	ของแข็งละลายน้ำ
โรงงานผลิตกระดาษหนังสือพิมพ์	34.54	$0.8x10^3$	$3.0x10^3$	$3.5x10^3$	$2.7x10^3$
โรงงานผลิตกระดาษคราฟท์	17.00	$0.756x10^3$	$1.273x10^3$	$0.165x10^3$	$3.076x10^3$
โรงงานผลิตกระดาษแข็ง	29.40	$0.51x10^3$	$1.04x10^3$	0.825	$2.19x10^3$
โรงงานผลิตกระดาษพิมพ์เขียน	92-133	86-136	192-235	213-405	448-819
โรงงานผลิตกระดาษอนามัย	42.40	$0.63x10^3$	$2.6x10^3$	$2.4x10^3$	$2.4x10^3$

ที่มา: ดัดแปลงจากสำนักงานเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2542)

2. กากของเสีย

กากของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตกระดาษมีอยู่หลายชนิด อาทิเช่น เศษที่เหลือจากวัตถุดิบ (เช่น เศษไม้ เปลือกไม้ กรวดทราย เป็นต้น) กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย ขี้เถ้าจากการผลิตไอน้ำ สิ่งคัดทิ้ง (reject) จากกระบวนการผลิต พลาสติก และเศษโลหะ เป็นต้น กากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียทั้งทางเคมีและชีวภาพ จัดเป็นกากของเสียหลักในการผลิตกระดาษ และต้องมีการดูแลกำจัดเพื่อไม่ให้เกิดผลกระทบต่อสภาพแวดล้อม แหล่งกำเนิดกากของเสียในกระบวนการผลิตกระดาษแสดงในภาพที่ 4

Wood residues	Bark, saw dust, etc.
Stock preparation rejects	Ragger tails, drum rejects, screening rejects, Rejects of cleaner
Incineration waste	Ashes, cinders (slags), fuel ashes, gypsum, etc.
Sludges	Deinking sludges, clarifier sludges, biologicalsludges
Other waste	Chemicals, used oils, wires, felts, hazardous wastes, etc.

ภาพที่ 4 กากของเสียต่างๆ จากกระบวนการผลิตกระดาษ
ที่มา: Gottsching and Pakarinen (2000)

3. มลพิษทางอากาศ

มลพิษทางอากาศที่สำคัญในกระบวนการผลิตกระดาษได้แก่ กลิ่นจากสารประกอบของซัลเฟอร์ เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ไดเมทิลซัลไฟด์ (C_2H_6S) เป็นต้น สารระเหยสารประกอบของคลอรีนจากกระบวนการฟอกขาว สารออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) และซัลเฟอร์จากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเพื่อผลิตไอน้ำ และยังมีอนุภาคขนาดเล็กจากกระบวนการต่างๆ ในกระบวนการผลิต

มลพิษต่างๆที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษและกระดาษ นอกจากจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพอนามัยของมนุษย์แล้ว ยังเป็นการเพิ่มต้นทุนในการผลิตทางด้านค่ากำจัดมลพิษที่เกิดขึ้น ดังนั้นการนำของเสียจากกระบวนการผลิตทั้งกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย และขยะที่คัดแยกออกมาจากกระบวนการผลิต มาแปรรูปเป็นพลังงานจะเป็นการช่วยลดการต้นทุน ทั้งยังช่วยลดปัญหามลพิษที่จะถูกปลดปล่อยออกไปยังสิ่งแวดล้อมด้วย

การกำจัดกากตะกอน (ทิพย์สุภินทร์, 2551)

หลังจากกากตะกอนที่เกิดขึ้นจากการบำบัดน้ำเสียได้รับการบำบัดให้มีความคงตัว ไม่มีกลิ่นเหม็น และ มีปริมาตรลดลง เพื่อความสะดวกในการขนส่งแล้ว ในขั้นต่อมาก็คือ การนำกากตะกอนเหล่านั้นไปกำจัดทิ้งโดยวิธีการที่เหมาะสม ซึ่งวิธีการกำจัดทิ้งที่ใช้ในปัจจุบัน ได้แก่

1. การฝังกลบ (sanitary landfill)

เป็นการนำกากตะกอนมาฝังในสถานที่ที่จัดเตรียมไว้และกลบด้วยชั้นดินทับอีก เป็นวิธีที่ใช้เนื้อที่มากในการจัดการ หากการฝังกลบไม่มีประสิทธิภาพอาจทำให้เกิดการรั่วซึม ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในบริเวณใกล้เคียงพื้นที่ฝังกลบได้

2. การเผา (incineration)

เป็นการนำกากตะกอนที่จวนแห้ง (ตั้งแต่ร้อยละ 40 ของของแข็งขึ้นไป) มาเผา เพราะเนื่องจากไม่สามารถนำไปใช้ทำปุ๋ยหรือฝังกลบได้ ในการเผาไหม้ต้องใช้อุณหภูมิสูง และใช้อากาศมากเกินพอ เพื่อให้เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ วิธีนี้ต้องใช้การลงทุนสูง อีกทั้งต้องมีการควบคุมมลพิษที่เกิดขึ้นอย่างเข้มงวด โดยเฉพาะทางด้านมลพิษอากาศ

3. การนำมาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงโดยวิธีแก๊สซิฟิเคชั่น

เป็นการนำกากตะกอนมาเผาไหม้ในสภาวะจำกัดออกซิเจน เพื่อให้เกิดการสลายตัวกลายเป็นแก๊สเชื้อเพลิงซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ดังจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

ทฤษฎีกระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่น (gasification)

กระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่น (gasification) หรือกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง เป็นกระบวนการแปรสภาพเชื้อเพลิงแข็งที่มีสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เช่น ถ่านหิน ถ่านไม้ เป็นต้น ให้อยู่ในรูปเชื้อเพลิงที่เป็นแก๊ส เช่น คาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) ไฮโดรเจน (H_2) และ มีเทน (CH_4) กระบวนดังกล่าวเป็นกระบวนเปลี่ยนแปลงทางอุณหเคมี (thermochemical conversion process) เป็นการกลั่นสลายองค์ประกอบไฮโดรคาร์บอน เกิดจากปฏิกิริยาของคาร์บอนกับออกซิเจน และ/หรือไอน้ำที่อุณหภูมิสูง ภายใต้สภาวะจำกัดอากาศหรือออกซิเจน (partial oxidation) ที่ความดัน 1 บรรยากาศขึ้นไป ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีหลายขั้นตอนทั้งปฏิกิริยาดูดความร้อนและคายความร้อน แก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ เรียกว่า แก๊สเชื้อเพลิง หรือ โปรดิวเซอร์แก๊ส (producer gas) (ทิพย์สุภินทร์, 2551)

กระบวนแก๊สซิฟิเคชั่น (เบญจมาศ, 2547)

กระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ระบบ คือ

1. สตรีมแก๊สซิฟิเคชั่น (stream gasification)

เป็นการใช้ไอน้ำทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงแข็ง ปกติอุณหภูมิของเตาจะสูงมาก และใช้ความดันในเตาสูง อีกทั้งยังต้องใช้ความร้อนจากภายนอกระบบมาช่วยให้อุณหภูมิของเตาสูงเพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชั่น แก๊สสังเคราะห์ที่เกิดขึ้นจะมีองค์ประกอบของคาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน มีเทน คาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ

2. ออกซิเดทีฟแก๊สซิฟิเคชั่น (oxidative gasification)

เป็นการใช้แก๊สออกซิเจนเป็นตัวทำปฏิกิริยา แก๊สออกซิเจนมาจากการใช้อากาศผ่านเข้าสู่เตา หรืออาจใช้แก๊สออกซิเจนบริสุทธิ์ก็ได้ แก๊สสังเคราะห์ที่เกิดขึ้นจากการใช้แก๊สออกซิเจนบริสุทธิ์จะมีค่าความร้อน (heating value) ที่สูงกว่าแก๊สที่เกิดจากการใช้อากาศ เนื่องจากไม่มีแก๊สไนโตรเจน จะทำให้มีค่าความร้อนสูงขึ้น องค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ ได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน มีเทน คาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ

3. ไฮโดรแก๊สซิฟิเคชั่น (hydrogasification)

เป็นการใช้ไฮโดรเจนทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงโดยภายในเตาความร้อนสูงมาก และใช้ความดันในเตาสูงถึง 20 เมกะปาสคัล แก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตได้มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็น มีเทน

ปฏิกิริยาอุณหเคมีในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่น

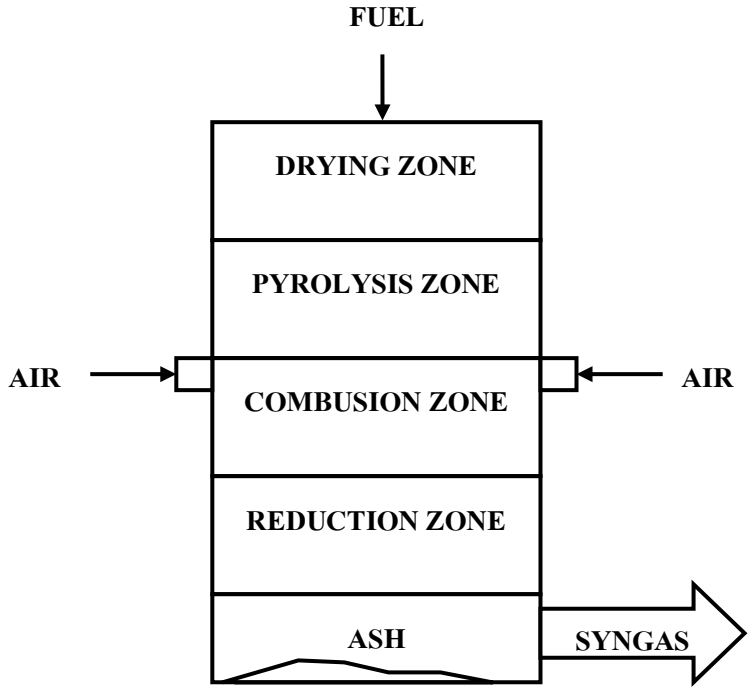
ปฏิกิริยาอุณหเคมีที่เกิดขึ้นในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่น เป็นส่วนที่ทำการเปลี่ยนเชื้อเพลิงในรูปของแข็งที่มีองค์ประกอบไฮโดรคาร์บอนให้เป็นแก๊สที่เผาไหม้ได้ สามารถประยุกต์ใช้กับเชื้อเพลิงได้กว้างขวาง เช่น เชื้อเพลิงชีวมวล ขยะมูลฝอย รวมทั้งกากตะกอนน้ำเสีย (วีรชัย และคณะ, 2551)

ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่น ในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบไหลลง สามารถแบ่งโซนการเกิดปฏิกิริยาออกเป็น 4 โซน ดังแสดงใน ภาพที่ 5 โดยโซนของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอธิบายได้ดังต่อไปนี้

1. **Drying Zone** คือช่วงที่ไอน้ำหรือความชื้นที่แทรกตัวอยู่ในเชื้อเพลิงโดนกำจัดด้วยความร้อนที่มาจากโซนเผาไหม้อุณหภูมิประมาณ 100-200 ^{o}C แต่อุณหภูมิที่เกิดขึ้นยังๆไม่สูงพอที่จะทำให้เกิดการสลายตัวของ volatile matter ในเชื้อเพลิงได้

2. **Pyrolysis** หรือ **Distillation Zone** รับความร้อนจากโซน reduction ทำให้ volatile matter ที่อยู่ในเชื้อเพลิงเกิดการสลายตัว เกิดเป็นเมทานอล กรดน้ำส้ม และทาร์ อุณหภูมิในโซนนี้จะมีค่าประมาณ 200-500 ^{o}C ของแข็งที่เหลืออยู่ภายหลังจากการผ่านกระบวนการนี้ก็คือ คาร์บอนในรูปถ่าน ซึ่งจะทำปฏิกิยาต่อในโซน reduction และ combustion ปฏิกิริยาที่ได้ในโซนนี้แสดงไว้ในสมการที่ (1)

$$\text{Dry Biomass + Heat} \longrightarrow \text{Charcoal} + CO_{(g)} + CO_2 + H_2O + CH_4 + C_2H_6 + \text{Pyroligneous Acid + Tars} \quad (1)$$



ภาพที่ 5 กระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่นในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงชนิดไหลลง

3. **Combustion** หรือ **Oxidation Zone** เป็นบริเวณที่มีการป้อนอากาศเข้าสู่เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง เมื่อถูกกระตุ้นด้วย ยความร้อน เชื้อเพลิงจะลุกไหม้ เกิดปฏิกิริยาอุณหเคมีระหว่างแก๊สออกซิเจนในอากาศกับคาร์บอนและไฮโดรเจน ซึ่งอยู่ในเชื้อเพลิง ผลของปฏิกิริยาดังกล่าวก่อให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ ดังสมการที่ (2) ถึง (3)

$$C_{(s)} + O_{2(g)} \longrightarrow CO_{2(g)} \qquad (2)$$

$$2H_{2(g)} + O_{2(g)} \longrightarrow 2H_2O_{(l)} \qquad (3)$$

โดยปฏิกิริยาใน สมการที่ (2) และ (3) เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนและความร้อนที่เกิดขึ้นนี้จะถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาดูดความร้อนในโซน reduction และโซน pyrolysis อุณหภูมิในโซน Combustion จะมีค่าระหว่าง 1,100 – 1,500 ^{o}C

4. Reduction Zone แก๊สร้อนที่ผ่านมาจาก combustion zone จะทำให้เกิดปฏิกิริยา reduction ใน zone นี้จะมีอุณหภูมิระหว่าง 500 – 900 ^{0}C ทำให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำจะไหลผ่านคาร์บอนที่กำลังลุกไหม้อยู่ ก่อให้เกิดแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ไฮโดรเจน และมีเทน ดังสมการที่ (4) ถึง (8)

$$C_{(s)} + CO_{2(g)} \longrightarrow 2CO_{(g)} \quad (4)$$

$$C_{(s)} + H_2O_{(l)} \longrightarrow CO_{(g)} + H_{2(g)} \quad (5)$$

$$C_{(s)} + 2H_2O_{(l)} \longrightarrow CO_{2(g)} + 2H_{2(g)} \quad (6)$$

$$CO_{(g)} + H_2O_{(l)} \longrightarrow CO_{2(g)} + H_{2(g)} \quad (7)$$

$$C_{(s)} + 2H_{2(g)} \longrightarrow CH_{4(g)} \quad (8)$$

ปฏิกิริยาในสมการที่ (4) เรียกว่า boundouard reduction และปฏิกิริยาในสมการที่ (5) เรียกว่า water gas reduction เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 900 ^{O}C แก๊สที่ได้จากสมการทั้งสองเป็นแก๊สที่เผาไหม้ได้ และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นแก๊สหลักที่ต้องการ ปริมาณของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในแก๊ส เชื้อเพลิง นี้จะขึ้นอยู่กับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ว่าจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนที่ร้อนได้มากน้อยเพียงใด

ในโซนของ Reduction นี้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะดีเพียงใดขึ้นกับอุณหภูมิ ความเร็วของแก๊สที่สัมผัสกับเชื้อเพลิง และพื้นที่ผิวสัมผัสของเชื้อเพลิง ดังนั้น ขนาดและปริมาณของเชื้อเพลิง ที่ใช้ จะมีผลต่อ การผลิตแก๊ส เชื้อเพลิง ซึ่งถ้าเชื้อเพลิง ขนาดใหญ่จะมีอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรต่ำ ทำให้ยากต่อการจุดเผาภายในเตาและจะทำให้เกิดปริมาณของช่องว่างระหว่างเชื้อเพลิงด้วยกันมาก เป็นผลทำให้มีออกซิเจนไหลผ่านเข้าไปในระบบมาก ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นก็จะน้อยตามไปด้วย ทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าต่ำ

แต่ถ้าขนาดของเชื้อเพลิงมีขนาดเล็ก ก็จะทำให้เกิดการสูญเสียความดันภายในเตามาก จึงต้องใช้พัดลมขนาดใหญ่ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานมากยิ่งขึ้นและแก๊สที่ผลิตได้ก็จะมีฝุ่นมากยิ่งขึ้น จากปฏิกิริยาถ้าอุณหภูมิในโซน Reduction สูงกว่า 900 °C แล้วแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 90% จะถูกเปลี่ยนเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และถ้าอุณหภูมิสูงมากกว่า 1,100 °C จะทำให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมดเปลี่ยนเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ นั่นคือประสิทธิภาพของเตาเผาจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของโซน Reduction

ในขณะที่แก๊สร้อนจากโซน combustion ไหลเข้าสู่โซน reduction จะทำให้อุณหภูมิของแก๊สลดลง เนื่องจากเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน เมื่อไอน้ำกับคาร์บอนทำปฏิกิริยากันก่อให้เกิดแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการที่ (6) ซึ่งจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 500-600 °C ปฏิกิริยานี้มีความสำคัญเพราะทำให้ส่วนผสมของแก๊สไฮโดรเจนในแก๊ส เชื้อเพลิง มีค่ามากขึ้นซึ่งมีผลทำให้แก๊สมีค่าพลังงานความร้อน แต่ถ้าในกระบวนการที่มีไอน้ำมากเกินไปไอน้ำอาจทำปฏิกิริยา กับแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ จะทำให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนดังสมการที่ (7) (ปฏิกิริยานี้เรียกว่า water shift reduction) ทำให้ค่าความร้อนของ แก๊สเชื้อเพลิง ที่ได้มีค่าลดลง ดังนั้นเชื้อเพลิงที่ใช้จะต้องมีความชื้นไม่มากจนเกินไป นอกจากนี้ในกระบวนการ Reduction แก๊สไฮโดรเจนบางส่วนจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนทำให้เกิดแก๊สมีเทนขึ้นได้ ดังสมการที่ (8) ปฏิกิริยานี้เรียกว่า methane production

ปฏิกิริยาอุณหเคมีที่ทำให้เกิดแก๊สเชื้อเพลิงดังที่ได้กล่าวข้างต้น เกิดขึ้นจากเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (gasifier) ได้หลายชนิด ซึ่งเตาแต่ละชนิดนั้นจะถูกออกแบบสำหรับการใช้งานที่แตกต่างกัน ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

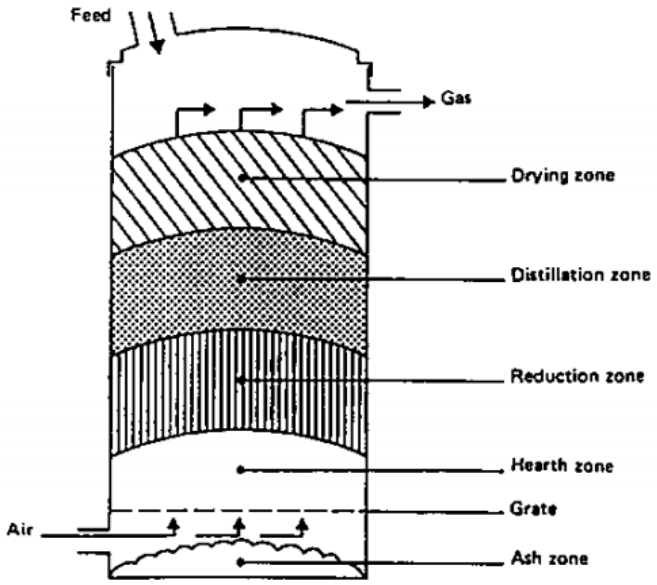
ชนิดของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง

เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 แบบ คือ แบบไหลขึ้น แบบไหลลง แบบไหลตัด และแบบฟลูอิดไดซ์เบด ซึ่งแบ่งตามความเหมาะสมในการใช้งาน วัตถุดิบที่ใช้ และคุณสมบัติของแก๊สที่ได้ การเคลื่อนตัวของวัตถุดิบ อากาศ แก๊ส การกระจายตัวของอุณหภูมิ ขนาดจำกัดของวัตถุดิบ และความชื้นของวัตถุดิบที่เหมาะสม มีส่วนเกี่ยวข้องในการเลือกชนิดของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงเหล่านี้ (FAO,1986)

1. เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบไหลขึ้น (updraft gasifier)

เตาชนิดนี้เป็นเตาที่ผลิตใช้เริ่มแรก และเป็นแบบที่ง่ายที่สุด เชื้อเพลิงจะถูกป้อนเข้าทางส่วนบนของเตา และอากาศจะถูกส่งผ่านตะแกรงเข้ามาทางด้านล่าง เหนือตะแกรงขึ้นไปจะเกิดการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงขึ้น ซึ่งเราเรียกบริเวณนี้ว่า โซนสันดาป (combustion zone) หรือ ฮาร์ทโซน (hearth zone) เมื่ออากาศผ่านเข้าไปบริเวณโซนสันดาปจะเกิดปฏิกิริยาขึ้นได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ แก๊สร้อนที่ผ่านจากโซนเผาไหม้จะมีอุณหภูมิสูงและจะถูกส่งผ่านไปยัง

โซนรีดักชัน ซึ่งเป็นบริเวณที่มีคาร์บอนมากเพียงพอที่จะเกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำ เกิดเป็นแก๊สคาร์บอนมอนออกไซด์และไฮโดรเจน หลังจากนั้นแก๊สที่ได้จะไหลเข้าสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าในชั้นของเชื้อเพลิง และกลั่นสลายในช่วงอุณหภูมิ 200-500 ^{o}C หลังจากนั้นแก๊สจะไหลเข้าสู่ชั้นของเชื้อเพลิงที่ชื้น เนื่องจากแก๊สยังคงมีอุณหภูมิสูงอยู่จึงไประเหยไอน้ำที่อยู่ในเชื้อเพลิงเหล่านี้ ทำให้แก๊สที่ออกจากเตามีอุณหภูมิต่ำลง



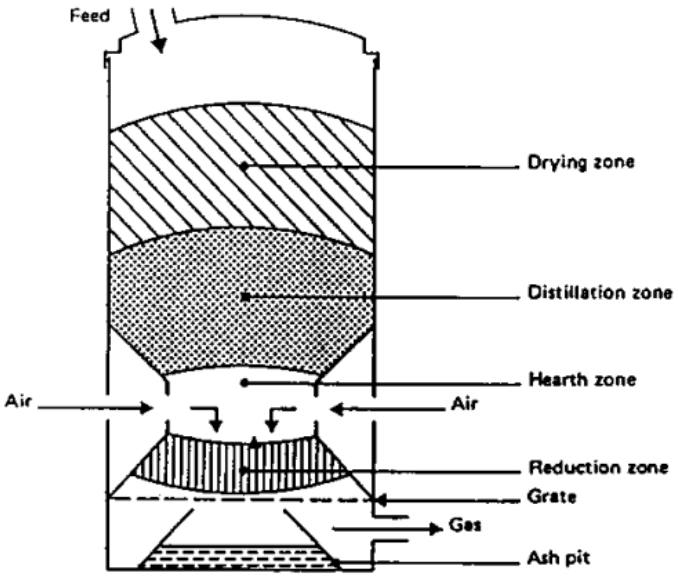
ภาพที่ 6 ลักษณะโครงสร้างของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบไหลขึ้น
ที่มา: FAO (1986)

เตาเผาประเภทนี้จะไม่ซับซ้อน มีการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงมากและแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้มีอุณหภูมิไม่สูงมากนัก แต่มีข้อจำกัด คือ แก๊สที่ผลิตได้จะมีการปนเปื้อนของสารเคมีประเภทน้ำมันและมีน้ำมันดินเกิดขึ้นเป็นจำนวนมากในโซนไพโรไรซิส (distillation zone) และจะกลั่นตัวเมื่ออยู่ในบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ดังนั้นแก๊สที่ผลิตได้จากเตาชนิดนี้จึงไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้สำหรับหม้อน้ำ หรือการอบแห้งวัสดุทางการเกษตร

2. เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบไหลลง (downdraft gasifier)

เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบนี้ถูกออกแบบขึ้นมาเพื่อที่จะขจัดน้ำมันดิน ที่มีอยู่ภายในเชื้อเพลิงแข็ง โดยเฉพาะอากาศจะถูกส่งจากด้านบนสู่ด้านล่างของเตาดังภาพที่ 7 ผ่านกลุ่มของ

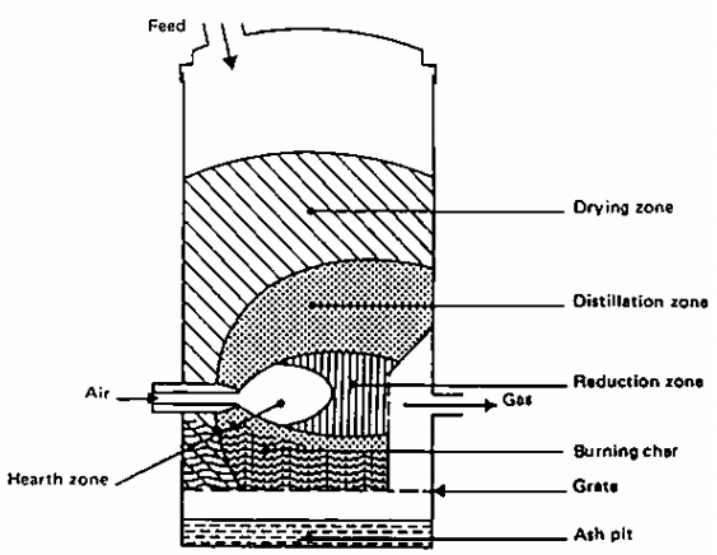
หัวฉีด ซึ่งเรียกว่า Tuyers บริเวณหัวฉีดจะเป็นบริเวณของโซนสันดาป แก๊สที่ได้จากโซนสันดาปจะถูก reduced ในขณะที่ไหลลงสู่ด้านล่างและผ่านชั้นของคาร์บอนที่ร้อนซึ่งอยู่เหนือตะแกรงเล็กน้อย ขณะเดียวกันในชั้นของเชื้อเพลิงที่อยู่ทางด้านบนของโซนสันดาป จะมีปริมาณออกซิเจนน้อยมาก ทำให้เกิดการกลั่นสลาย และไอของน้ำมันดินที่เกิดจากการกลั่นสลายจะไหลผ่านชั้นของคาร์บอนที่ร้อน ทำให้น้ำมันดินเกิดการแตกตัวเป็นแก๊ส ซึ่งการแตกตัวนี้จะเกิดที่อุณหภูมิคงที่ในช่วงระหว่าง 800-1,000 ºC ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 1,000 ºC ปฏิกิริยาดูดความร้อนจะทำให้แก๊สที่ได้มีอุณหภูมิต่ำลง แต่ถ้าต่ำกว่าช่วงอุณหภูมิดังกล่าว ปฏิกิริยาคายความร้อนจะทำให้แก๊สที่ได้มีอุณหภูมิสูงขึ้น แก๊สที่ผ่านโซนสันดาปจะมีส่วนประกอบของน้ำมันดินและน้ำมัน ซึ่งจะมีปริมาณลดลงเหลือน้อยกว่า 10% ของน้ำมันดินและน้ำมันที่ได้จากเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบไหลลง และแก๊สที่ได้จะมีความสะอาดมากกว่า ทำให้ใช้การกรองน้อยลง เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงทั้งแบบไหลขึ้นและไหลลงจะมีความเร็วของอากาศไหลผ่านต่ำ และเถ้าจะอยู่บริเวณตะแกรง ดังนั้นจึงมีปริมาณเถ้าถ่านติดออกมากับแก๊สเชื้อเพลิงน้อยมาก



ภาพที่ 7 ลักษณะโครงสร้างของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบไหลลง
ที่มา: FAO (1986)

3. เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบไหลตัดขวาง (cross-draft gasifier)

เตาแบบนี้อากาศจะถูกจ่ายผ่านหัวฉีดซึ่งอยู่ในแนวราบ ดังภาพที่ 8 โซนสันดาปจะอยู่ถัดจากหัวฉีดออกไป และถัดออกไปจะเป็นโซนรีดักชัน แล้วแก๊สเชื้อเพลิงจะออกสู่ภายนอกโดยผ่านตะแกรงซึ่งอยู่ในแนวตั้ง โดยรอบบริเวณโซนสันดาปและโซนรีดักชันจะเป็นโซนไพโรไลซิส หรือ distillation น้ำมันและน้ำมันดินที่ได้จากโซนไพโรไลซิสจะผ่านโซนรีดักชัน ก่อนที่จะออกไปสู่ภายนอกเตา ซึ่งเป็นสาเหตุให้น้ำมันและน้ำมันดินเกิดการแตกตัวเป็นแก๊สก่อนที่จะออกไปสู่ภายนอก ทำให้แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้มีปริมาณน้ำมันและน้ำมันดินต่ำ เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบนี้ได้ทำการออกแบบให้สามารถใช้กับยานพาหนะ เนื่องจากมีน้ำหนักเบาและมีผลตอบสนองเร็วต่อการเปลี่ยนแปลงของภาระที่กระทำอยู่ เชื้อเพลิงแข็งที่ควรนำมาใช้กับเตาแบบนี้ ควรเป็นถ่านไม้ที่มีคุณภาพสูง

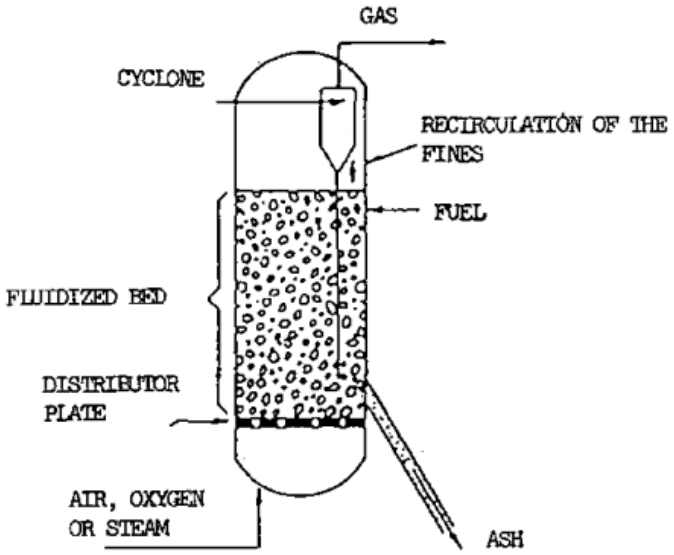


ภาพที่ 8 ลักษณะโครงสร้างของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบไหลตัดขวาง
ที่มา: FAO (1986)

4. เตาผลิตแก๊สแบบฟลูอิดไดซ์เบด (fluidized Bed Gasifier)

เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่กล่าวมาแล้วทั้งสามแบบข้างต้น การทำงานของกระบวนการในระบบขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาทางเคมีและสภาพทางฟิสิกส์ของเชื้อเพลิง โดยที่จะเกิดปัญหาทางด้าน Slag

ที่เกิดขึ้นมากเกินไป จึงทำให้เกิดการอุดตันในเตาบ่อยครั้ง เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการนำเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดมาใช้ เตาแบบนี้อากาศจะไหลผ่านชั้นของเชื้อเพลิงแข็ง เมื่อเราเพิ่มความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านสูงจนกระทั่งทำให้เชื้อเพลิงที่วางอยู่เริ่มลอยตัวขึ้นมีลักษณะคล้ายกับของไหลดังภาพที่ 9 ในขณะที่เริ่มติดไฟนั้น เบดจะเริ่มร้อนขึ้นจนอุณหภูมิถึงจุดติดไฟ หลังจากนั้นเชื้อเพลิงจึงจะถูกป้อนเข้าไปอย่างสม่ำเสมอ ภายในเตาจะใส่วัสดุเฉื่อย เช่น ทราย หรือวัสดุเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ หินปูน ซึ่งช่วยในการถ่ายเทความร้อนและช่วยในการทำความสะอาดแก๊สที่ได้จากเบด เตาแบบนี้มีข้อดีคือ การควบคุมอุณหภูมิในเตาเผาสามารถทำได้ง่าย จึงสามารถรักษาอุณหภูมิให้ต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของเถ้าได้ ทำให้ไม่เกิดการจับตัวของ slag ที่เกิดขึ้น จึงสามารถใช้กับเชื้อเพลิงที่มีเถ้ามากได้ แต่ข้อเสียของเตาเผาแบบนี้คือ แก๊สเชื้อเพลิงที่ออกจากเตาเผาจะมีปริมาณเถ้า และฝุ่นถ่านออกมาด้วย เนื่องจากความเร็วของอากาศภายในเตาสูง จึงต้องมีการนำไซโคลน (Cyclone) หรือ Baghouse มาใช้กับระบบนี้ด้วย



ภาพที่ 9 ลักษณะโครงสร้างของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบฟลูอิดไดซ์เบด
ที่มา: FAO (1986)

แก๊สเชื้อเพลิงหรือโปรดิวเซอร์แก๊ส

ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่นแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ สามารถแบ่งตามค่าความร้อนได้ 3 ประเภทคือ (ทิพย์สุภินทร์, 2550)

1. การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำ (low heating value gas) แก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จะมีค่าความร้อนประมาณ 3.3-5.6 MJ/Nm^3 เกิดจากการเผาไหม้บางส่วนของเชื้อเพลิงกับอากาศส่วนมากมักมีไอน้ำอยู่ด้วย โดยองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ คือ แก๊สคาร์บอนมอนออกไซด์และไฮโดรเจน ที่เจือจางอยู่ในแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไนโตรเจน แก๊สที่ได้จะมีอุณหภูมิเปลวไฟต่ำ (flame temperature) ในปัจจุบันได้มีการนำมาใช้อย่างกว้างขวางโดยเฉพาะการผลิตไฟฟ้าในอุตสาหกรรมขนาดเล็ก

2. การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนปานกลาง (medium heating value gas) : แก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จะมีค่าความร้อนประมาณ 9.3-20.5 MJ/Nm^3 กระบวนการนี้จะใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ที่ได้จากการแยกออกของอากาศ เพื่อให้เกิดปฏิกิริยา partial oxidation จากการไม่มีแก๊สไนโตรเจนเจือปน จะทำให้มีองค์ประกอบของแก๊สที่เผาไหม้ได้เพิ่มขึ้น และค่าความร้อนของแก๊สสูงขึ้น

3. การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนสูง (high heating value gas) : แก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จะมีค่าความร้อนสูงกว่า 20.5 MJ/Nm^3 เทียบเท่าได้กับ synthesis gas (SNG) โดยส่วนประกอบของแก๊สนี้คือ แก๊สมีเทนเกือบบริสุทธิ์

การใช้ประโยชน์จากแก๊สเชื้อเพลิง

1. พลังงานความร้อนตรงสามารถนำแก๊สเชื้อเพลิง มาใช้เป็นแหล่งพลังงานความร้อนตรง เนื่องจากแก๊สเชื้อเพลิง สามารถส่งไปตามท่อในระยะใกล้ได้ สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อไอน้ำความดันเพื่อผลิตไอน้ำ และนำไอน้ำมาใช้กับเครื่องจักรกังหันไอน้ำผลิตไฟฟ้า

2. ใช้ผลิตไฟฟ้าในเครื่องยนต์สันดาปภายใน โดยนำแก๊สเชื้อเพลิงส่งเข้าเครื่องยนต์สันดาปภายใน เช่น เครื่องยนต์ดีเซล เครื่องยนต์แก๊ส เพื่อผลิตไฟฟ้า

3. นำมาใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมเคมี นอกจากการใช้ประโยชน์ดังที่กล่าวในข้างต้น แก๊สเชื้อเพลิง สามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมเคมี เช่น เซลล์เชื้อเพลิงคาร์บอเนตเหลว (molten carbonate fuel cells) และสารตั้งต้นในการผลิตเมทานอล โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม เป็นตัวสังเคราะห์ภายใต้อุณหภูมิและความดันสูง

น้ำมันเตา

น้ำมันเตา (fuel oils (FO), heavy fuel oil (HFO) or residual fuel (RF)) คือ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากก้นหอกลั่น อันเป็นส่วนที่ตกค้างอยู่หลังจากส่วนเบาๆ และมีมูลค่าสูง เช่น distillate fuels ซึ่งได้แก่ น้ำมันก๊าด และน้ำมันดีเซล ได้ระเหยและกลั่นตัวไปจนหมดแล้ว ด้วยเหตุนี้น้ำมันเตาจึงมีชื่อว่า RF (กากกลั่น) หรือ HFO เนื่องจากเป็นส่วนที่หนักและข้นเหนียวมาก อีกทั้งไม่สะดวกในการใช้งาน มีอุณหภูมิจุดเดือดตั้งแต่ 371°C ไปจนถึง 482°C แต่ก็อาจมีส่วนที่มีจุดเดือดต่ำตั้งแต่ 211°C – 371°C ปนอยู่บ้าง ประกอบกับน้ำมันเตาที่จำหน่ายในประเทศไทยมีหลายชนิด ตั้งแต่ใสถึงข้นมาก โดยนำมาผสมกับส่วนที่เบาให้ได้ความหนืดที่เหมาะสม กระทรวงพาณิชย์ได้กำหนดคุณภาพของน้ำมันเตาไว้ 5 ชนิด ซึ่งมีความแตกต่างกันที่ความหนืดเป็นหลัก (กรมธุรกิจพลังงาน, 2547)

แม้ว่าน้ำมันเตาจะเป็นพวกกากน้ำมัน (residuals) ที่เหลือจากการกลั่นน้ำมันดิบ มีสีดำ มีสิ่งตกค้างต่างๆ ปนอยู่ และมีราคาถูกที่สุดก็ตาม น้ำมันเตาก็ยังเป็นประโยชน์มหาศาลต่อการอุตสาหกรรม การคมนาคมขนส่งทางเรือเดินสมุทร และการผลิตไฟฟ้า โดยลักษณะการใช้งานน้ำมันเตาจัดได้เป็น 3 ประเภท คือ

1. ใช้เป็นเชื้อเพลิงหม้อน้ำเพื่อผลิตไอน้ำ

หม้อน้ำขนาดใหญ่ ผลิตไอน้ำความดันสูง อุณหภูมิสูง ขับเครื่องกังหันไอน้ำเพื่อผลิตไฟฟ้าในโรงไฟฟ้า โรงงานน้ำตาล และในระบบ co-generation เป็นต้น

หม้อน้ำขนาดเล็ก ผลิตไอน้ำความดันต่ำ ที่เรียกว่า process steam ใช้ถ่ายเทความร้อนในกระบวนการผลิตต่างๆ ในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น การอบผ้า ย้อมผ้า

2. ใช้เป็นเชื้อเพลิงโดยตรงในงานอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น

การถลุงแร่ (ore smelting) เผาเตาหรือเบ้าหลอมโลหะ (firing of open hearth, rotary or crucible pot furnaces) เผาโลหะเพื่อการรีดเป็นเส้น (hot rolling operation) เพื่อการตีขึ้นรูป (metal forging) เผาโลหะเพื่อการชุบแข็ง (metal heat treatment) เผาในเตาเซรามิคและเตาเผาอิฐ การหลอมแก้ว เผาปูนซีเมนต์ ปูนขาว เป็นต้น

ตารางที่ 2 ลักษณะและคุณภาพน้ำมันเตา

รายการ	ข้อกำหนด	อัตรา	น้ำมันเตา				
		สูง/ต่ำ	ชนิดที่ 1	ชนิดที่ 2	ชนิดที่ 3	ชนิดที่ 4	ชนิดที่ 5
1	ปริมาณกำมะถัน *ร้อยละโดยน้ำหนัก* (Sulphur Content, *% wt.*)	ไม่สูงกว่า	2.0	2.0	2.0	2.0	0.5
2	ความถ่วงจำเพาะ ณ อุณหภูมิ 15.6/15.6 °ซ. (Specific Gravity at 15.6/15.6 °C)	ไม่สูงกว่า	0.985	0.990	0.995	0.995	0.995
3	ความหนืด (Viscosity, *cSt*)						
	ณ อุณหภูมิ 50 °ซ. *เซนติสโตกส์*	ไม่ต่ำกว่า	7	81	181	231	-
		ไม่สูงกว่า	80	180	230	280	-
	ณ อุณหภูมิ 100 °ซ. *เซนติสโตกส์*	ไม่ต่ำกว่า	-	-	-	-	3
		ไม่สูงกว่า	-	-	-	-	30
4	จุดวาบไฟ °ซ. (Flash Point, °C)	ไม่ต่ำกว่า	60	60	60	60	60
5	จุดไหลเท °ซ. (Pour Point, °C)	ไม่สูงกว่า	24	24	30	30	57
6	ปริมาณความร้อน *แคลอรี่/กรัม* (Gross Heat of Combustion, *cal/g*)	ไม่ต่ำกว่า	10,000	9,900	9,900	9,900	9,900
7	เถ้า *ร้อยละโดยน้ำหนัก* (Ash Content, *% wt.*)	ไม่สูงกว่า	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
8	น้ำและตะกอน *ร้อยละโดยปริมาตร* (Water and Sediment, *% vol.*)	ไม่สูงกว่า	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
9	สี (Colour)	ไม่ต่ำกว่า	8.0	-	-	-	-

ที่มา: กรมธุรกิจพลังงาน (2547)

3. ใช้เป็นเชื้อเพลิงเดินเครื่องยนต์ดีเซลขนาดใหญ่หมุนช้ามาก (slow speed diesel engines)

ในเรือเดินสมุทร และเครื่องยนต์ดีเซลหมุนปานกลาง (medium speed diesel engines) ขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ติดตั้งอยู่กับที่ในโรงงานอุตสาหกรรม และในเรือเดินสมุทรเชื้อเพลิงพวกนี้เรียกว่า bunker fuels มีหลายชนิด โดยแยกตามความหนืด

พลังงานทดแทน (renewable energy)

พลังงานทดแทน โดยทั่วไปหมายถึงพลังงานที่มีอยู่ทั่วไปตามธรรมชาติสามารถนำมาใช้แทนน้ำมันเชื้อเพลิง สามารถแบ่งตามแหล่งที่ได้มากเป็น 2 ประเภท คือ พลังงานทดแทนจากแหล่งที่ใช้แล้วหมดไป อาจเรียกว่า พลังงานสิ้นเปลือง ได้แก่ ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ นิวเคลียร์ หินน้ำมัน และทรายน้ำมัน เป็นต้น และพลังงานทดแทนอีกประเภทหนึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่ใช้แล้วสามารถหมุนเวียนมาใช้ได้อีก เรียกว่า พลังงานหมุนเวียน ได้แก่ แสงอาทิตย์ ลม ชีวมวล น้ำ และไฮโดรเจน เป็นต้น (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2550)

ประเภทของพลังงานหมุนเวียน

1. พลังงานแสงอาทิตย์

ดวงอาทิตย์ให้พลังงานจำนวนมหาศาลแก่โลกของเรา พลังงานจากดวงอาทิตย์จัดเป็นพลังงานหมุนเวียนที่สำคัญที่สุด เป็นพลังงานสะอาดไม่ทำปฏิกิริยาใดๆอันจะทำให้สิ่งแวดล้อมเป็นพิษ เซลล์แสงอาทิตย์จึงเป็นสิ่งประดิษฐ์ทางอิเล็คทรอนิคส์ชนิดหนึ่ง ที่ถูกนำมาใช้ผลิตไฟฟ้า เนื่องจากสามารถเปลี่ยนเซลล์แสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง ส่วนใหญ่เซลล์แสงอาทิตย์ทำมาจากสารกึ่งตัวนำพวกซิลิคอน มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้สูงถึงร้อยละ 22 ในส่วนของประเทศไทยซึ่งตั้งอยู่บริเวณใกล้เส้นศูนย์สูตร จึงได้รับพลังงานจากแสงอาทิตย์ในเกณฑ์สูง พลังงานโดยเฉลี่ยซึ่งรับได้ทั่วประเทศประมาณ 4 ถึง 4.5 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อตารางเมตรต่อวัน ประกอบด้วยพลังงานจากรังสีตรง (direct radiation) ประมาณร้อยละ 50 ส่วนที่เหลือเป็นพลังงานรังสีกระจาย (diffused radiation) ซึ่งเกิดจากละอองน้ำในบรรยากาศ (เมฆ) ซึ่งมีปริมาณสูงกว่าบริเวณที่ห่างจากเส้นศูนย์สูตรออกไปทั้งแนวเหนือ - ใต้

2. พลังงานอุณหภูมิ และความร้อนจากแสงอาทิตย์

พลังงานอุณหภูมิ เป็นพลังงานทดแทนใหม่ในยุคโลกร้อน พลังงานอุณหภูมิเกิดจากความร้อนของแสงอาทิตย์และภาวะเรือนกระจกที่สะสมความร้อนเอาไว้บริเวณพื้นผิวโลก ทำให้พื้นผิวโลกมีอุณหภูมิที่ร้อน ความร้อนเหล่านี้ถือได้ว่าเป็นพลังงานความร้อนชนิดหนึ่งในลักษณะชนิดอุณหภูมิต่ำ

3. พลังงานลม

เป็นพลังงานธรรมชาติที่เกิดจากความแตกต่างกันของอุณหภูมิในบริเวณนั้นซึ่งสะอาดและบริสุทธิ์ใช้แล้วไม่มีวันหมดสิ้นไปจากโลก ได้รับความสนใจนำมาพัฒนาให้เกิดประโยชน์อย่างกว้างขวาง ในขณะเดียวกัน กังหันลมก็เป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่สามารถนำพลังงานลมมาใช้ให้เป็นประโยชน์ได้ โดยเฉพาะในการผลิตกระแสไฟฟ้า และในการสูบน้ำ ซึ่งได้ใช้งานกันมาแล้วอย่างแพร่หลายพลังงานลมเกิดจากพลังงานจากดวงอาทิตย์ตกกระทบโลกทำให้อากาศร้อนและลอยตัวสูงขึ้น อากาศจากบริเวณอื่นซึ่งเย็นและหนาแน่นมากกว่าจึงเข้ามาแทนที่ การเคลื่อนที่ของอากาศเหล่านี้เป็นสาเหตุให้เกิดลม และมีอิทธิพลต่อสภาพลมฟ้าอากาศในบางพื้นที่ของประเทศไทย โดยเฉพาะอย่างยิ่งแนวฝั่งทะเลอันดามันและด้านทะเลจีน (อ่าวไทย) มีพลังงานลมที่อาจนำมาใช้ประโยชน์ในลักษณะพลังงานกล (กังหันสูบน้ำกังหันผลิตไฟฟ้า) ศักยภาพของพลังงานลมที่สามารถ นำมาใช้ประโยชน์ได้สำหรับประเทศไทย มีความเร็ว อยู่ระหว่าง 3 - 5 เมตรต่อวินาที และความเข้มพลังงานลมที่ประเมินไว้ได้อยู่ระหว่าง 20 - 50 วัตต์ต่อตารางเมตร

4. พลังงานความร้อนใต้พิภพ

น้ำร้อนที่ถูกนำไปใช้ในการผลิตไฟฟ้าแล้วนั้น แม้อุณหภูมิจะลดลงบ้าง แต่ก็ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการอบแห้ง และใช้ในห้องเย็นสำหรับเก็บรักษาพืชผลทางการเกษตรได้ นอกจากนั้น น้ำที่เหลือใช้แล้วยังสามารถนำไปใช้ในกิจการเพื่อกายภาพบำบัด และการท่องเที่ยวได้อีก ท้ายที่สุดคือ น้ำทั้งหมดซึ่งยังมีสภาพเป็นน้ำอุ่นอยู่เล็กน้อย จะถูกปล่อยลงไปผสมกับน้ำตามธรรมชาติในลำน้ำ ซึ่งนับเป็นการเพิ่มปริมาณน้ำให้กับเกษตรกรในฤดูแล้งได้อีกทางหนึ่งด้วย

5. พลังงานชีวมวล

เชื้อเพลิงที่มาจากชีวะ หรือสิ่งมีชีวิตเช่น ไม้ฟืน แกลบ กากอ้อย เศษไม้ เศษหญ้า เศษเหลือทิ้งจากการเกษตร เหล่านี้ใช้เผาให้ความร้อนได้ นอกจากนี้ยังรวมถึงมูลสัตว์และของเสียจากโรงงานแปรรูปทางการเกษตร

6. พลังงานน้ำ

พื้นผิวโลกถึงร้อยละ 70 ปกคลุมด้วยน้ำ ซึ่งมีความสำคัญยิ่งต่อสิ่งมีชีวิตทั้งหลาย น้ำเหล่านี้มีการเปลี่ยนสถานะและหมุนเวียนอยู่ตลอดเวลา ระหว่างผิวโลกและบรรยากาศอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเรียกว่า วัฏจักรของน้ำ น้ำที่กำลังเคลื่อนที่มีพลังงานสะสมอยู่มาก และมนุษย์รู้จักนำพลังงานนี้มาใช้หลายร้อยปีแล้ว เช่น ใช้หมุนกังหันน้ำ ปัจจุบันมีการนำพลังงานน้ำไปหมุนกังหันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในโรงไฟฟ้าพลังน้ำเพื่อผลิตไฟฟ้า

7. พลังงานจากขยะ

พลังงานจากขยะจากบ้านเรือนและกิจการต่างๆ เป็นแหล่งพลังงานที่มีศักยภาพสูง ขยะเหล่านี้ส่วนใหญ่เป็นมวลชีวภาพ เช่น กระดาษ เศษอาหาร และไม้ ซึ่งสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้าที่ถูกออกแบบให้ใช้ขยะเป็นเชื้อเพลิงได้

กระบวนแก๊สสิฟิเคชั่นของกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย

Midilli *et al*. (2000) ได้ทำการศึกษาการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงโดยใช้เตาผลิตแก๊สชนิดไหลลง (downdraft gasification) โดยใช้กากตะกอนเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งมีการเตรียมเป็นเชื้อเพลิงให้ได้ขนาด 350x10x5 มิลลิเมตร และมีความชื้นเท่ากับ 11.75% ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงกากตะกอนมีค่าเท่ากับ 17.14 MJ/kg จากผลการทดลองสรุปได้ว่า สัดส่วนของแก๊สที่เผาไหม้อยู่ระหว่าง 19-23% โดยอัตราการผลิตแก๊สที่เผาไหม้ได้มีดังนี้ ไฮโดรเจน (H_2) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และมีเทน (CH_4) เท่ากับ 10.79%, 2.07% และ7.02% ตามลำดับ มีทาร์ (tars) ที่เกิดจากการเผาไหม้ต่ำกว่า 0.1% ของจำนวนชีวมวลทั้งหมดที่ป้อนเข้าไปในกระบวนการเผาไหม้ และได้กล่าวว่าเพิ่มเติมว่ากากตะกอน

สามารถนำมาเป็นเชื้อเพลิงใช้ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่นได้จริง ซึ่งจะเป็นพลังงานทดแทนสำหรับอนาคตได้

Dogru *et al.* (2002) ได้ทำการศึกษาการผลิตแก๊สโดยใช้เตาผลิตแก๊สชนิดไหลลง (downdraft gasification) และใช้กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนเป็นเชื้อเพลิง โดยทดสอบกับโรงไฟฟ้าต้นแบบขนาด 5 kW เตรียมเชื้อเพลิงขนาดเท่ากับ 350x10x5 มิลลิเมตร วิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของกากตะกอน มีความหนาแน่นเท่ากับ 314.33 kg/m^3 และความหนาแน่นปกติ เท่ากับ 207.5 kg/m^3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ (proximate analysis) มีความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว และปริมาณเถ้าเท่ากับ 11.75±0.31%, 53.48±1.69%, 11.27±1.17% และ 23.51±0.33% ตามลำดับ มีค่าความร้อนเฉลี่ยเท่ากับ 17.14±0.36 MJ/kg องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (ultimate analysis) มีปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์เท่ากับ 39.48±0.30%, 6.19±0.12%, 25.46±0.50%, 3.93±0.17% และ 1.45±0.34% ตามลำดับ จากผลการศึกษาสัดส่วนของแก๊สที่เผาไหม้ได้ประกอบด้วย ไฮโดรเจน (H_2) มีเทน (CH_4) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) อะเซทิลีน (C_2H_2) และอีเทน (C_2H_6) มีค่าเท่ากับ 8.89-11.17%, 1.26-2.09%, 6.28-10.77%, 0.95% และ 0.15-0.27% ตามลำดับ แก๊สเชื้อเพลิงมีค่าความร้อนประมาณ 4 MJ/Nm^3 โดยอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่เหมาะสมของระบบนี้เท่ากับ 3.69-3.71 kg/hr ±1.43% และอัตราการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสูงสุดของระบบเท่ากับ 8.5-8.7 Nm^3/hr และพบว่าแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ สามารถผลิตไฟฟ้าโดยเครื่องยนต์สันดาปภายในได้ถึง 5 kW โดยมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงถึง 40% นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้เตาผลิตแก๊สชนิดไหลลงมีข้อดี คือ แก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้มีทาร์ปนเปื้อนน้อย ซึ่งจะเหมาะสมในการนำไปใช้งานกับเครื่องยนต์สันดาปภายในได้ดี

Petersen and Werther (2005) ได้ทำการทดลองออกแบบจำลอง circulating fluidized bed สำหรับใช้กับกากตะกอน ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ (proximate analysis) มีความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณขี้เถ้า และค่าความร้อน เท่ากับ 7.3%, 83.4%, 42.1% และ 10.0 MJ/kg ตามลำดับ องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (ultimate analysis) มีปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ เท่ากับ 50.5%, 6.6%, 34.5%, 7.1% และ 1.2% ตามลำดับ ผลการทดสอบสัดส่วนของแก๊สที่เผาไหม้ได้ประกอบด้วย ไฮโดรเจน (H_2) มีเทน (CH_4) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และเอทิลีน (C_2H_4) เท่ากับ 6.1%, 3.6%, 4.8% และ 1.5% ตามลำดับ สำหรับต้นแบบยังอยู่ในช่วงวิจัยและพัฒนา

Manya *et al*. (2006) ได้ทำการทดลองออกแบบจำลอง fluidized bed gasification สำหรับใช้กับกากตะกอนจากน้ำเสียชุมชนที่ใช้ระบบ anaerobic digestion ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของกากตะกอนแบบประมาณ (proximate analysis) พบว่า ความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณขี้เถ้า ปริมาณคาร์บอนคงตัวมีค่าเท่ากับ 8.9%, 42.3%, 42.1% และ 6.7% ตามลำดับ และมีค่าความร้อนเท่ากับ 10.26 MJ/kg องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (ultimate analysis) มีปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และ ซัลเฟอร์ เท่ากับ 55.3%, 6.7%, 28.1%, 8.2% และ 1.8% ตามลำดับ

ผลการทดสอบสัดส่วนของแก๊สที่เผาไหม้โดยใช้ micro gas chromatograph (agilent 3000A) ด้วยระบบ online ได้ประกอบด้วย ไนโตรเจน (N_2) ออกซิเจน (O_2) ไฮโดรเจน (H_2) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) มีเทน (CH_4) อะเซทิลีน (C_2H_2) เอทิลีน (C_2H_4) อีเทน (C_2H_6) และไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) สำหรับต้นแบบยังอยู่ในช่วงวิจัยและพัฒนา

Grob *et al*. (2007) ทำการศึกษาการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงและไฟฟ้าโดยใช้ fluidized bed gasification กับกากตะกอนจากน้ำเสียชุมชน กับโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม(combined heat and power: CHP) ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของกากตะกอนแบบแยกธาตุ (ultimate analysis) มีปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจนไนโตรเจน ซัลเฟอร์ คลอรีน และฟลูออรีน มีค่าเท่ากับ 21.81%, 3.66%, 18.7%, 3.94%, 0.85%, 0.057% และ 0.018% และมีค่าความร้อน เท่ากับ 14 MJ/kg จากผลการศึกษาสัดส่วนของแก๊สที่ผลิตได้ประกอบด้วย ไฮโดรเจน (H_2) มีเทน (CH_4) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ไนโตรเจน (N_2) ออกซิเจนO_2 และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) มีค่าเท่ากับ 11.0%, 2.0%, 24.0%, 9.0%, 46%, 0.7% และ 0.3% ตามลำดับ แก๊สเชื้อเพลิงมีค่าความร้อนประมาณ 4.6 MJ/Nm^3 และมีการปนเปื้อนทาร์ (tars) ประมาณ 10 mg/Nm^3 โดยมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเท่ากับ 69% ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 22%

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. อุปกรณ์ในการทดลอง

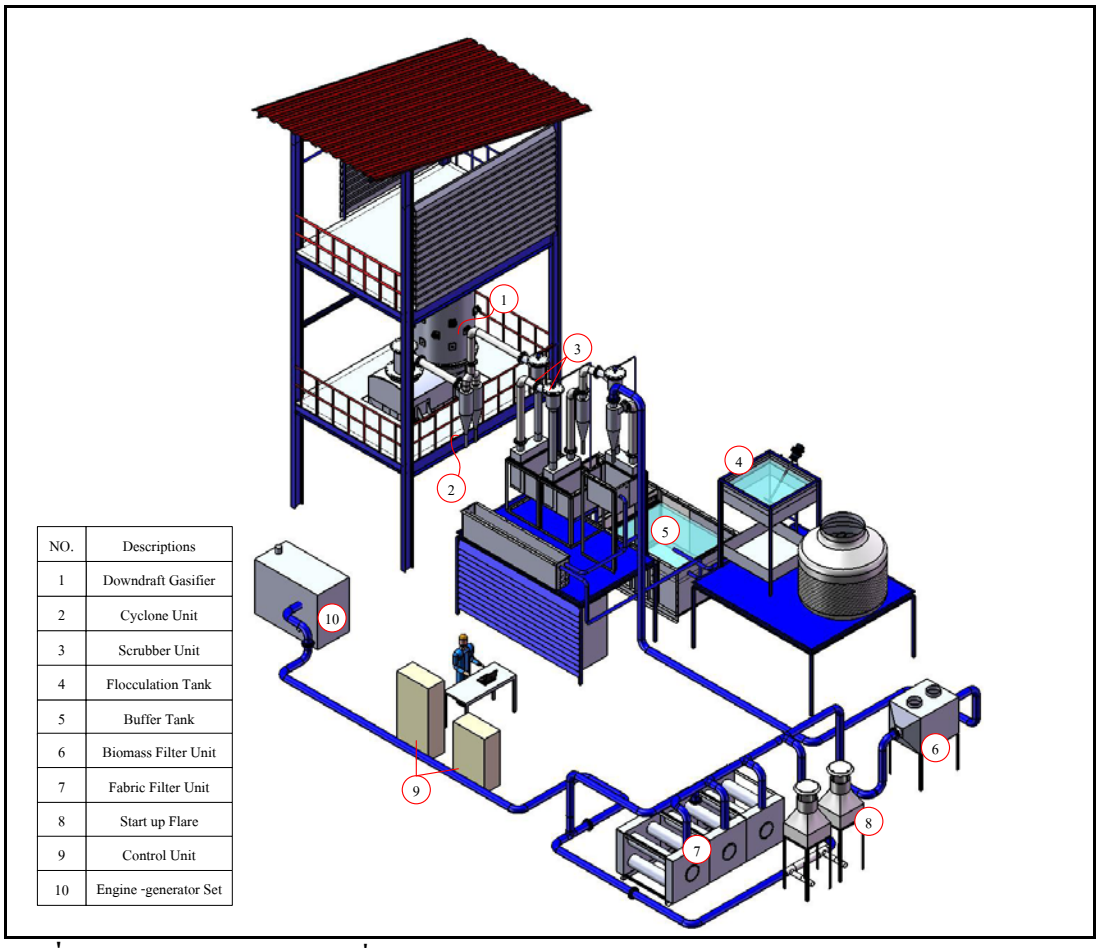
1.1 เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงหรือเตาปฏิกรณ์ ชนิด Open-Top Downdraft Gasifier
1.2 เทอร์โมคัปเปิ้ล ชนิด K (Thermocouple, type K)
1.3 เครื่องวัดอัตราการไหลของแก๊ส (Gas Flow Meter)
1.4 เครื่องแก๊สโครมาโทรกราฟี (Gas Chromatography, GC) รุ่น SIMADSU GC-14B
1.5 เครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิง
1.6 เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง
1.7 เครื่อง CHNS/O Analysis
1.8 เตาเผา (Muffle furnace)
1.9 ตู้อบแห้ง (Oven)
1.10 บีกเกอร์
1.11 กระบอกตวง
1.12 กรวยกรอง
1.13 เดสสิเคเตอร์ (Desiccators)
1.14 ครูซิเบิ้ล พร้อมฝาปิด (Crucible)
1.15 ถาดอะลูมิเนียม

1.1.1 ต้นแบบโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็ก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ใช้เป็นโรงไฟฟ้าสำหรับการทดสอบ ซึ่งใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชั่นชนิด Downdraft Gasification ขนาดกำลังการผลิต 100 กิโลวัตต์

ต้นแบบโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็ก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีแสดงดังภาพที่ 10 มีส่วนประกอบหลัก 3 ส่วนคือ 1) ชุดเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง 2) ระบบทำความสะอาดแก๊ส

3) ระบบบำบัดน้ำเสีย โดยส่วนประกอบที่สำคัญของต้นแบบโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็ก มีรายละเอียดดังต่อไปนี้



NO.	Descriptions
1	Downdraft Gasifier
2	Cyclone Unit
3	Scrubber Unit
4	Flocculation Tank
5	Buffer Tank
6	Biomass Filter Unit
7	Fabric Filter Unit
8	Start up Flare
9	Control Unit
10	Engine -generator Set

ภาพที่ 10 แผนผังส่วนประกอบที่สำคัญของต้นแบบโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กสำหรับชุมชน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.1.1.1 เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (downdraft gasifier)

เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงหรือเตาปฏิกรณ์ ชนิด Open-Top Downdraft Gasifier ภายนอกทำจากวัสดุโลหะม้วนกลม ภายในบุด้วยฉนวนกันความร้อนทำจากวัสดุทนความร้อนทำหน้าที่เก็บรักษาอุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้และลดการสูญเสียความร้อน ด้านบนของเตาประกอบด้วย hopper feeder เพื่อรับเชื้อเพลิง และมีฝาปิด มีช่องไว้ซีลน้ำ(seal) ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้อากาศเข้า-ออกจากเตาขณะหยุดเดินระบบ ด้านข้างของเตาจะมีทางเข้าของอากาศหลายส่วนเพื่อป้อนอากาศและควบคุมอากาศเข้าสู่เตาสำหรับใช้ในการเผาไหม้ ด้านล่างของเตามีระบบลำเลียงขี้เถ้าที่ได้จากการเผาไหม้ออกจากเตาสามารถควบคุมระยะเวลาการลำเลียงขี้เถ้าออกได้ แสดงดังภาพที่ 11 (ก)

1.1.1.2 ระบบทำความสะอาดแก๊ส (gas treatment unit)

cyclone collector เป็นอุปกรณ์แยกฝุ่นหรืออนุภาคขนาดใหญ่ออกจากแก๊ส ใช้หลักการดักฝุ่นด้วยแรงหนีศูนย์ถ่วงทำให้เกิดแก๊สหมุนวน (Vortex) จากนั้นฝุ่นหรืออนุภาคจะตกลงสู่ด้านล่างของ cyclone collector ส่วนแก๊สจะหมุนวนสู่ด้านบนแล้วไหลตามท่อไปสู่ระบบ water scrubber และ chiller scrubber ซึ่งเป็นส่วนประกอบลำดับถัดไป แสดงดังภาพที่ 11 (ข)

water scrubber และ chiller scrubber สำหรับ water scrubber เป็นอุปกรณ์ดักฝุ่นและอนุภาคขนาดเล็กออกจากแก๊สเชื้อเพลิงโดยใช้ละอองน้ำที่อุณหภูมิประมาณ 32 ^{0}C ส่วน chiller scrubber เป็นอุปกรณ์ดักทาร์ (tars) และฝุ่น (dust) โดยใช้น้ำเย็นที่อุณหภูมิประมาณ 10^{0}C ซึ่งไอระเหยของทาร์จะถูกควบแน่นลงมาพร้อมกับน้ำ ลักษณะของ water scrubber และ chiller scrubber แสดงดังภาพที่ 11 (ค)

biomass filter unit ทำหน้าที่ดักความชื้น ฝุ่นและอนุภาคอื่นๆ โดยใช้ไม้ที่สับแล้วขนาดเล็กเป็นตัวดูดซับ เนื่องจากแก๊สเชื้อเพลิงที่ถูกทำความสะอาดจากระบบ scrubber นั้นยังมีความชื้นสูง และมีละอองไอของทาร์เหลืออยู่ หน่วยบำบัดนี้จะช่วยยืดอายุการใช้งานของถุงกรองใน fabric filter unit ได้ ลักษณะของ biomass filter unit แสดงดังภาพที่ 11 (ง)

fabric filter unit ทำหน้าที่ดักฝุ่นอนุภาคขนาดเล็ก และความชื้นครั้งสุดท้ายหลังจากผ่านกระบวนการต่างๆ ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยฝุ่นอนุภาคขนาดเล็กที่ผ่านเข้ามาจะถูกดักจับไว้โดยถุงกรองซึ่งสามารถกรองอนุภาคที่มีขนาดเล็กได้ถึง 100 ไมครอน เพื่อให้ได้แก๊สที่สะอาดสามารถนำไปใช้กับเครื่องยนต์สันดาปภายในได้ แสดงดังภาพที่ 11 (จ)

1.1.1.3 ระบบบำบัดน้ำเสีย (wastewater treatment system)

ระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้เป็นระบบปิด โดยจะหมุนเวียนน้ำที่มาจาก Scrubber แล้วบำบัดโดยใช้วิธีทางเคมี (chemical treatment) โดยใช้หลักการโคแอกูเลชั่น (Coagulation) ในการศึกษานี้ใช้สารเร่งการรวมตัวตะกอน (Coagulant) คือเฟอริกคลอไรด์ ($FeCl_3$) และปูนขาว (CaOH) ร่วมกับสารเคมีที่ช่วยให้อนุภาคของตะกอนมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น คือโพลิเมอร์ประจุลบ ส่วนประกอบของระบบบำบัดน้ำเสีย มีดังนี้

Buffer Tank ประกอบด้วยถัง 3 ใบ คือ 1) ถังรองรับน้ำที่ผ่านการบำบัดจาก Flocculation Tank 2) ถังรองรับน้ำที่ Overflow มาจากถังพักน้ำเสีย 3) ถังพักน้ำเสียซึ่งเป็นน้ำที่มาจาก Water Scrubber และ Chiller Scrubber แสดงดังภาพที่ 11 (ฉ)

flocculation tank ทำหน้าที่เป็นถังบำบัดน้ำเสีย โดยน้ำเสียจะถูกส่งมาจาก buffer tank เพื่อทำการบำบัดโดยวิธีทางเคมี (chemical treatment) น้ำที่ผ่านการบำบัดจะถูกหมุนเวียนกลับไปใช้ในระบบต่อไป แสดงแสดงดังภาพที่ 11 (ช)

ก. เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (downdraft Gasifier)

ข. ไซโคลนดักฝุ่น (cyclone collector)

ค. water scrubber and chiller scrubber unit

ง. ระบบกรอง (biomass filter unit)

ภาพที่ 11 ส่วนประกอบของต้นแบบโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็ก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

จ. ระบบกรอง (fabric filter unit)

ฉ. ถังรวบรวมน้ำเสีย (buffer tank)

ช. ถังบำบัดน้ำเสีย (flocculation tank)

ซ. ชุดทดสอบการลุกไหม้ (start up flare)

ภาพที่ 11 (ต่อ)

2. สารเคมีในการทดลอง

2.1 แก๊สฮีเลียม ความบริสุทธ์ (Lab grade)
2.2 แก๊สมาตรฐาน คาร์บอนไดออกไซด์
2.3 แก๊สมาตรฐาน คาร์บอนมอนอกไซด์
2.4 แก๊สมาตรฐาน มีเทน
2.5 แก๊สมาตรฐานไฮโดรเจน
2.6 สารละลายกรดซัลฟูริก (H_2SO_4)
2.7 สารละลายกรดไนตริก (HNO_3)
2.8 น้ำกลั่น

วิธีการ

1. การเก็บรวบรวมข้อมูล

ทำการรวบรวมข้อมูลสำคัญต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ เช่น การตรวจสอบเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษ ระบบผลิตแก๊สเชื้อเพลิงเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชั่น และอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาข้อมูลการใช้พลังงานโดยเน้นเฉพาะกระบวนการผลิตที่ใช้พลังงานจากน้ำมันเตา รวมถึงข้อมูลของของเสียคัดทิ้งจากกระบวนการผลิต กระบวนการบัดน้ำเสียกับองค์ประกอบและสมบัติของกากตะกอนในอุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษ

2. การเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์คุณสมบัติของกากตะกอนชีวภาพ

กากตะกอนและขยะที่ใช้ในการศึกษานี้นำมาจากโรงงานตัวอย่าง ซึ่งเป็นโรงงานกระดาษรีไซเคิล โดยนำกากตะกอนและขยะดังกล่าวมาวิเคราะห์คุณสมบัติดังนี้ (วิธีการวิเคราะห์แสดดังภาคผนวก ก)

1. การวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis)

เพื่อหาปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหย และปริมาณคาร์บอนคงตัว

2. การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis)

เพื่อหาปริมาณธาตุ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ และออกซิเจน โดยธาตุต่าง ๆ เหล่านี้จะสามารถบ่งชี้ถึงผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่จะเกิดขึ้นจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่น ซึ่งธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน จะเป็นธาตุหลักที่จะถูกเปลี่ยนไปเป็นแก๊สเชื้อเพลิงโดยปฏิกิริยาอุณหเคมีในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่น

3. วิเคราะห์หาค่าความร้อน เพื่อวิเคราะห์หาค่า low heating value และ high heating value

3. การเตรียมเชื้อเพลิงอัดแท่ง

เนื่องจากกากตะกอนที่ออกจากระบบบำบัดและผ่านระบบรีดน้ำแล้วจะมีความชื้นอยู่ประมาณร้อยละ 50 จึงต้องมีการลดความชื้นก่อนด้วยการตากให้แห้ง (air dry) กากตะกอนแห้งมีลักษณะเป็นผงละเอียด ยังไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้งาน ต้องทำการอัด แท่ง (briquette) ผสมกับขยะ ให้เป็นก้อนเชื้อเพลิงแข็งก่อน โดยก่อนผสมจำเป็นต้องมีการตัดย่อยขยะให้มีขนาดเล็กลงและให้มีขนาดใกล้เคียงกับกากตะกอนมากขึ้น เนื่องจากขยะเดิมมีความแตกต่างทางด้านขนาดและชนิดของขยะมาก เพื่อให้ในเชื้อเพลิงอัดแท่งผสมกากตะกอนและขยะมีความเป็นเนื้อเดียวกันและมีคุณสมบัติเหมาะสมต่อการใช้เป็นเชื้อเพลิงมากขึ้น หลังจากนั้นจึงทำการผสมในอัตราส่วนกากตะกอน 1 ต่อ ขยะ 1 ส่วน

ในการศึกษานี้จะใช้เครื่องอัดแบบสกรู (screw type) กำลังมอเตอร์ 22 kW ความเร็วรอบของมอเตอร์ 1460 rpm ดังแสดงในภาพที่ 12 ซึ่งผลิตเชื้อเพลิงกากตะกอนอัดแท่งที่มีขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 45 มิลลิเมตร กำลังการผลิตของเครื่องเท่ากับ 200 kg/hr ทั้งนี้ทำการเตรียมเชื้อเพลิงกากตะกอนอัดแท่งสำหรับการศึกษาจำนวน 15 ตัน

ภาพที่ 12 เครื่องอัดแท่งกากตะกอน

4. การทดสอบหาสภาวะ (condition) ในการเดินระบบ และศึกษาความสามารถในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากกากตะกอนด้วยระบบแก๊สซิฟิเคชั่น

การทดสอบหาสภาวะในการเดินระบบเพื่อให้ทราบสภาวะต่างๆ ที่เหมาะสมในการเดินระบบ ได้แก่ อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง ชั้นของอุณหภูมิภายในเตา อัตราการใช้เชื้อเพลิง อัตราการเกิดเถ้า เพื่อให้ได้สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง ซึ่งจะมีผลต่อเนื่องถึงกรณีการนำแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ไปใช้งาน

4.1 การเดินระบบของต้นแบบโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กสำหรับชุมชน

4.1.1 การเริ่มต้นจุดเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง

เปิดฝาด้านบนของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงและทำการปล่อยน้ำซึ่งทำหน้าที่ป้องกันการไหลเข้า- ออกของอากาศในช่วงที่ดับเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (water seal) และทำการเติมเชื้อเพลิงให้อยู่ในระดับที่กำหนด ดังแสดงในภาพที่ 13 (ก) ทำการเปิดช่องทางเข้าของอากาศรอบตัวเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงเพื่อให้อากาศไหลเข้าสู่ภายในของตัวเตา ดังแสดงในภาพที่ 13 (ข)

กดเปิดสวิตซ์เริ่มการทำงานของระบบ ดังแสดงใน ภาพที่ 13 (ค) เสร็จแล้วทำการจุดเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง ดังแสดงในภาพที่ 13 (ง) ภายหลังจากจุดเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงประมาณ 2 ชั่วโมงทำการเปิด flare valve เพื่อทดสอบการลุกไหม้ของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้

4.1.2 การหยุดการทำงานของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (gasifier shut down)

- ทำการปิดช่องทางเข้าของอากาศรอบตัวเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงเพื่อไม่ให้อากาศไหลเข้าสู่ภายในของตัวเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง

- กดปิดสวิตซ์ควบคุมระบบเพื่อให้หยุดการทำงานของโรงไฟฟ้าชีวมวล

- ปิดฝาด้านบนของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง และทำการปล่อยน้ำเข้าไป seal ระหว่างฝาปิดกับเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง

ก. เปิดฝาด้านบนเพื่อเติมเชื้อเพลิง

ข. เปิดวาล์วทางเข้าของอากาศรอบตัวเตา

ค. สวิตซ์ควบคุมระบบ

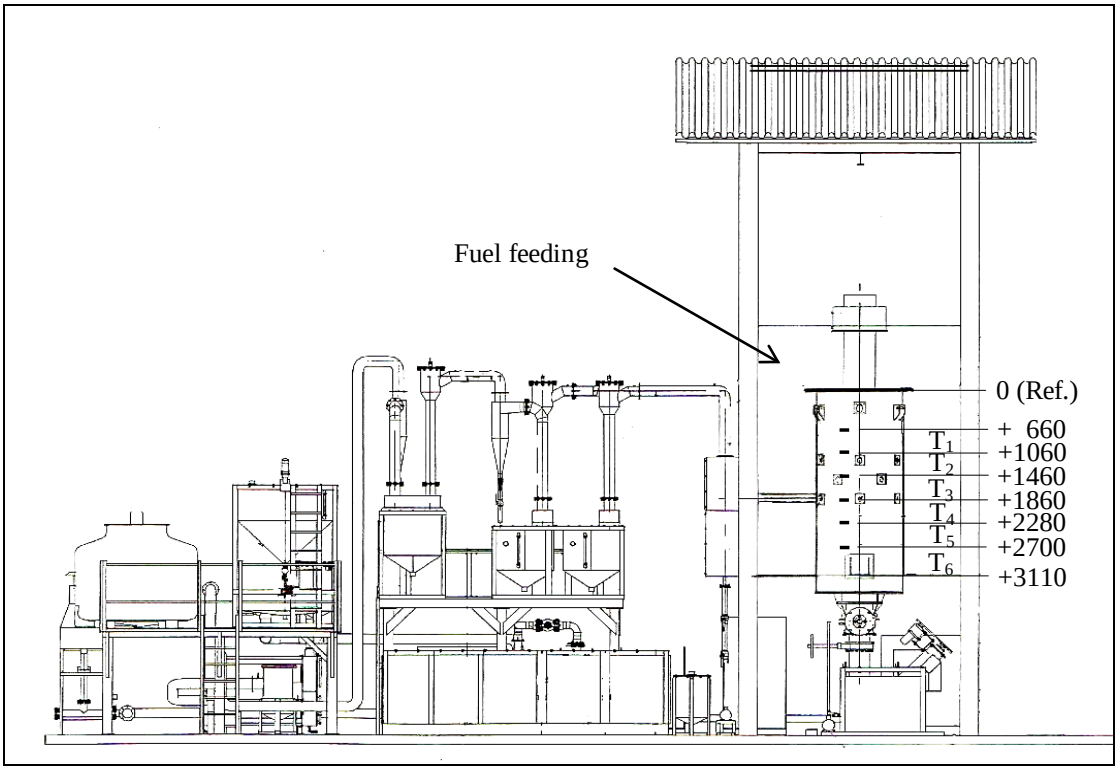
ง. การจุดเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง

ภาพที่ 13 การเริ่มต้นการทำงานของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง

4.2 การทดสอบหาสภาวะ (condition) ในการเดินระบบ และการประเมินประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง

4.2.1 อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง

อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงที่ใช้ในการศึกษานี้เลือกที่ 4 ระดับ คือ 100 m^3/hr, 120 m^3/hr, 140 m^3/h และ 180 m^3/hr โดยในการควบคุมอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงทั้ง 4 ระดับ จะใช้ inverter ควบคุมความเร็วมอเตอร์ของ blower และทำการตรวจวัดพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อประเมินประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง



ภาพที่ 14 การแสดงตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิภายในเตา(T_1 –T_6)

4.2.2 ชั้นของอุณหภูมิภายในเตา (temperature profile)

การหาชั้นอุณหภูมิภายในเตา ผลิตแก๊สเชื้อเพลิง มีวัตถุประสงค์ เพื่อต้องการทราบผลของอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงต่ออุณหภูมิภายใน เตา และระดับความสูงของเตาที่สัมพันธ์ต่อการเกิดปฏิกิริยาอุณหเคมีต่างๆ ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่น โดยทำการวัดอุณหภูมิตรงตำแหน่งความสูงต่างๆ ของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง จำนวน 6 ตำแหน่ง (T_1-T_6) ดังแสดงไว้ใน ภาพที่

14 ทั้งนี้ข้อมูลจะถูกบันทึกแบบต่อเนื่องด้วยระบบ online measuring system โดยมีอัตราการเก็บข้อมูล 30 วินาที/ครั้ง

4.2.3 อัตราการใช้เชื้อเพลิง (fuel consumption)

ทำโดยชั่งน้ำหนักของเชื้อเพลิงกากตะกอนที่ถูกเติมใส่ลงไปในเตาปฏิกรณ์โดยใช้ตาชั่ง ทำการจดบันทึกค่าแล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย ซึ่งจะได้อัตราการใช้เชื้อเพลิงในหน่วยกิโลกรัมต่อชั่วโมง (kg/hr)

4.2.4 อัตราการดึงเถ้าออกจากเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (ash discharge rate)

อัตราการดึงเถ้าออกจากเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจะพิจารณาจากปริมาณเถ้าที่วัดได้จากค่าการวิเคราะห์โดยประมาณของเชื้อเพลิง เพื่อป้องกันปัญหาของเถ้าหลอมที่จะเกิดขึ้นกับระบบ

4.2.5 อัตราการเกิดเถ้า (ash production)

การหาอัตราการเกิดเถ้าเพื่อนำไปคำนวณหาประสิทธิภาพของระบบ และใช้ประเมินปริมาตรของกากตะกอนลดลงเป็นกี่เปอร์เซ็นต์ ซึ่งการวัดจะทำโดยชั่งน้ำหนักของเถ้าที่ถูกนำออกจากเตาปฏิกรณ์โดยใช้ตาชั่ง ทำการจดบันทึกค่าแล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยซึ่งจะได้อัตราการการเกิดเถ้าในหน่วยกิโลกรัมต่อชั่วโมง (kg/hr)

4.2.6 การประเมินประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Gasification Efficiency)

การศึกษาประสิทธิภาพก ารผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงกากตะกอนโดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชั่น ซึ่งจะใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาคำนวณหาประสิทธิภาพโดยใช้ความสัมพันธ์ อ้างอิงตามงทิพย์สุภินทร์ (2550) ดังนี้

$$\text{Gasification Efficiency } (\eta g) = \frac{\text{[Rate of energy carried by producer gas]}}{\text{[Rate of energy supplied to reactor]}}$$

$$\text{Gasification Efficiency } (\eta g) = [V_g \times CV_g]/[m_{Fuel} \times HHV_{Fuel}]$$

เมื่อ

m_{Fuel} คือ อัตราการใช้เชื้อเพลิง (kg/hr)

V_g คือ อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง (Nm^3/hr)

HHV_{Fuel} คือ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงกากตะกอน (MJ/kg)

CV_g คือ ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิง (MJ/Nm^3)

5. การวิเคราะห์คุณสมบัติและหาค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิง

วิเคราะห์คุณสมบัติแก๊ส เพื่อหาสัดส่วนองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่น เช่น แก๊สไฮโดรเจน (H_2) แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และแก๊สมีเทน (CH_4) ในการศึกษานี้จะทำการเก็บตัวอย่างแก๊สหลังจากผ่านกระบวนการลดอุณหภูมิ ลดความชื้น และทำความสะอาด โดยดึงตัวอย่างมาเก็บไว้ในอุปกรณ์บรรจุแก๊สเชื้อเพลิง แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณแก๊สต่าง ๆ ด้วยเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊ส (Gas Chromatograph) ยี่ห้อ SIMADSU GC-14B

สภาวะที่ใช้ของเครื่องมือ Gas Chromatograph (SIMADSU GC-14B)

Packing Material	:	Polapacked Q : Molecgular Sieve
Column Temperature	:	50^0C : 50^0C
Injector Temperature	:	80^0C : 80^0C
Detector Temperature	:	100^0C : 100^0C
Carrier Gas	:	Helium Gas
Carrier Gas Flow Rate	:	50 l/min : 20 l/min

ซึ่งจะใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาคำนวณหาค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิง (Calorific value of producer gas) โดยใช้ความสัมพันธ์ อ้างอิงตามงานวิจัยทิพย์สุภินทร์ (2550) ดังนี้

$$CV_g = \sum X_i H_i$$

เมื่อ

Xi คือ สัดส่วนโดยปริมาตรขององค์ประกอบแก๊สเชื้อเพลิง

Hi คือ ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิง (CO H_2 CH_4)

โดยที่ $CO = 13.1 MJ/Nm^3$ $H_2 = 13.1\ MJ/Nm^3$ และ $CH_4 = 41.2\ MJ/Nm^3$

6. การประเมิน ประสิทธิภาพการผลิตพลังงานจากการใช้กากตะกอนและขยะเป็นเชื้อเพลิง

ทำการวิเคราะห์และประเมินการปลดปล่อยมลพิษจากการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากระบบแก๊สซิฟิเคชั่น โดยคำนวณจากการใช้ค่า emission factor และทำการประเมินประสิทธิภาพการผลิตพลังงานการจากใช้กากตะกอนชีวภาพเป็นเชื้อเพลิง โดยพิจารณาจาก

6.1 ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (gasification efficiency)

6.2 อัตราการเกิดเถ้า (ash production)

6.3 อัตราการใช้เชื้อเพลิง (specific fuel consumption)

7. การประเมินความเป็นไปได้ในด้านเทคนิคในการเชื่อมต่อระบบแก๊สซิฟิเคชั่นกับระบบการเผาไหม้น้ำมันเตาที่มีอยู่เดิม

ทำการวิเคราะห์ประเมินความเป็นไปได้ในการเชื่อมต่อระบบแก๊สซิฟิเคชั่น จากการทดลองกับระบบการเผาไหม้น้ำมันเตาที่มีอยู่เดิม พร้อมทั้งพิจารณาทางเลือกอื่นๆ สำหรับการนำระบบแก๊สซิฟิเคชั่น มาใช้ร่วมกับระบบผลิตพลังงานความร้อนเดิมของทางโรงงาน

8. การประเมินเศรษฐศาสตร์โดยใช้เทคนิค cost benefit analysis และ pay back period เน้นด้านความคุ้มทุน ในการใช้งานจริง

ทำการรวบรวมเงินลงทุน และคำนวณค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการดำเนินการ ระยะเวลาคืนทุน (payback period) มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (net present value, NPV) และอัตราผลตอบแทน (internal rate of return, IRR) จากการติดตั้งระบบแก๊สซิฟิเคชั่นเพื่อลดปริมาณการใช้น้ำมันเตา

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน} = \frac{\text{เงินลงทุนในการดำเนินการ}}{\text{เงินรายได้สุทธิจากการดำเนินการ}}$$

มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) = มูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดรับ – เงินลงทุนเริ่มแรก

โดย มูลค่าปัจจุบันกระแสเงินสดรับ = PMT x PVIFA (n,i)

PMT คือ เงินรายได้สุทธิต่อปีจากการดำเนินการ

PVIFA (n,i) คือ มูลค่าปัจจุบันของเงินรายงวดที่เท่ากันกับจำนวน 1 บาท อัตราผลตอบแทนที่ต้องการร้อยละ i ระยะเวลาตลอดโครงการ n ปี

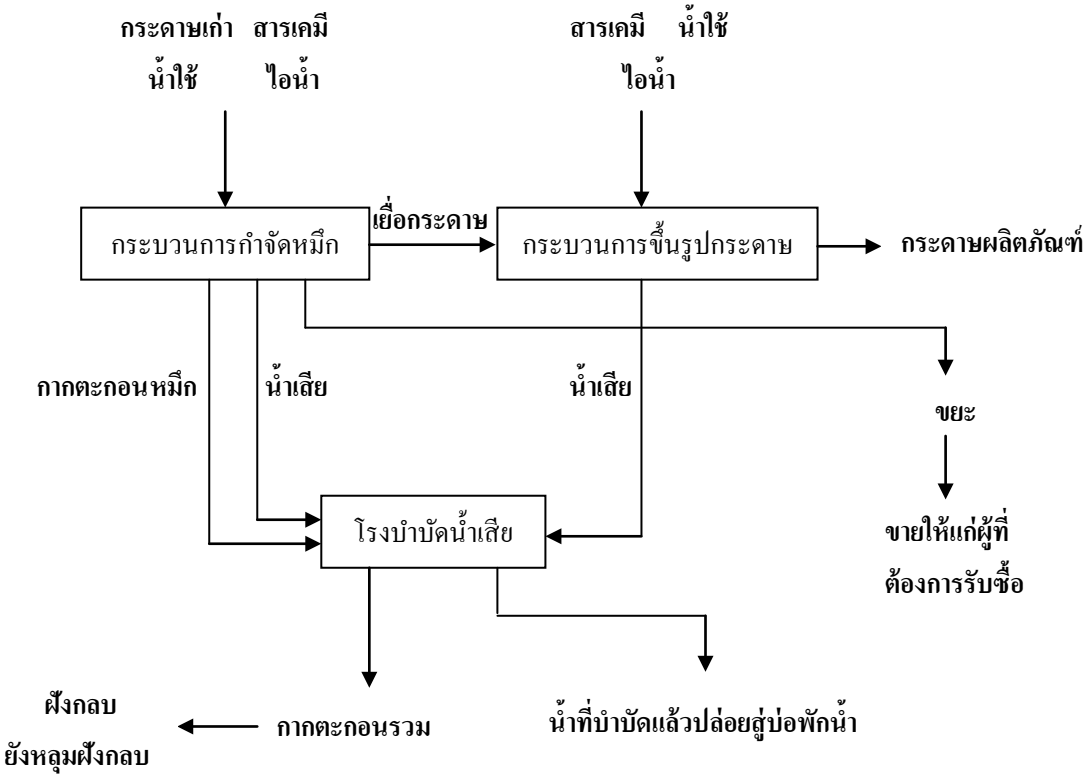
ค่าอัตราผลตอบแทน (IRR) คำนวณได้จากสมการ

$$\text{เงินลงทุนในการดำเนินตามข้อเสนอ} = \sum_{t=1}^{n} \frac{\text{เงินรายได้สุทธิในปีที่ t}}{(1+IRR)^{t}}$$

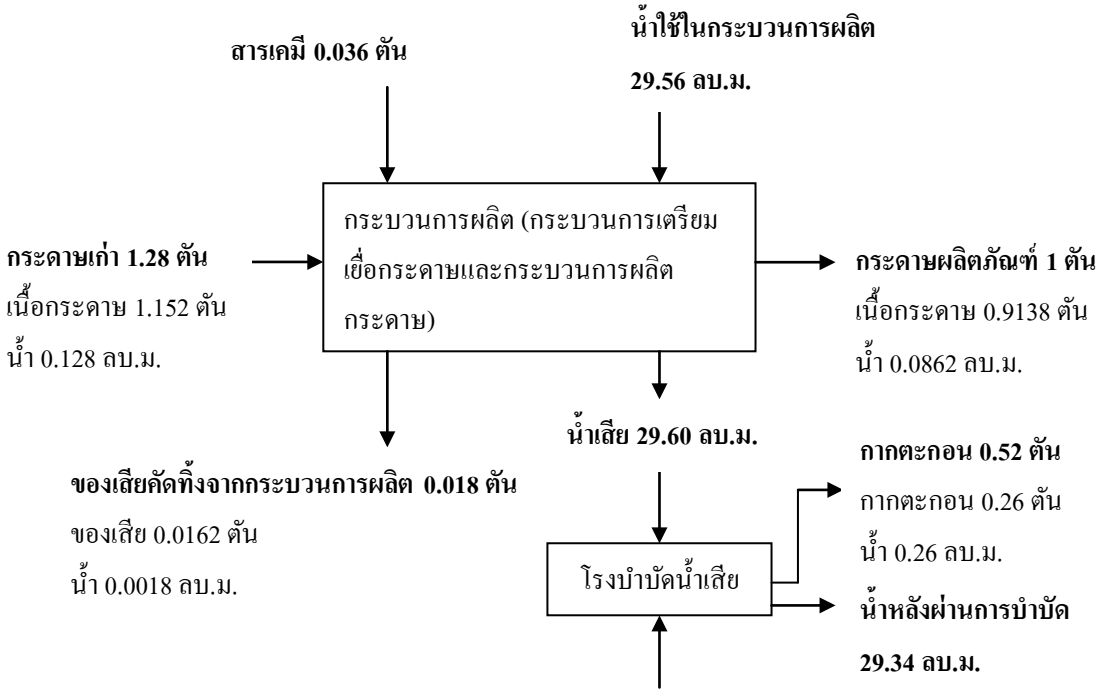
ผลการวิจัยและวิจารณ์

ข้อมูลการเกิดของเสียในกระบวนการผลิตของโรงงานกระดาษรีไซเคิลตัวอย่าง

ในการผลิตกระดาษรีไซเคิลของโรงงานตัวอย่าง มีของเสียที่เกิดขึ้นแบ่งเป็น 2 ส่วนหลัก ได้แก่ ขยะและน้ำเสียแสดงดังภาพที่ 15 โดยขยะที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต ได้แก่ ขยะเศษกระดาษและขยะที่ถูกคัดทิ้งออกจากกระบวนการผลิต และกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงาน โดยพบว่า ขยะขยะที่เกิดขึ้นมีปริมาณ 17.3 กิโลกรัมต่อตันผลิตภัณฑ์กระดาษ ส่วนกากตะกอนที่เกิดขึ้นมีปริมาณ 520 กิโลกรัมต่อตันผลิตภัณฑ์กระดาษเมื่อโรงงานตัวอย่างมีกำลังการผลิตเท่ากับ 10,419.2 ตันต่อเดือน โดยสมดุลมวลสารของกระบวนการผลิตในโรงงานตัวอย่างแสดงดังภาพที่ 16



ภาพที่ 15 การเกิดและการจัดการของเสียในโรงงานผลิตเยื่อกระดาษและกระดาษตัวอย่าง



ภาพที่ 16 สมดุลมวลสารของกระบวนการผลิตของโรงงานผลิตเยื่อกระดาษและกระดาษตัวอย่าง

ขยะขยะที่ถูกคัดทิ้งจากกระบวนการผลิตมาจากการปะปนของขยะในก้อนกระดาษที่ผ่านการใช้งานแล้วที่เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมกระดาษรีไซเคิล ซึ่งการจัดการในปัจจุบัน คือ การเก็บรวบรวมไว้และนำไปขายให้แก่ผู้ที่ต้องการรับซื้อต่อไป โดยลักษณะทางกายภาพของขยะที่เกิดขึ้นในโรงงานตัวอย่างแสดงดังภาพที่ 17 (ข) ส่วนกากตะกอนที่เกิดขึ้นในโรงงานตัวอย่าง ได้แก่ กากตะกอนหมึก และกากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสีย โดยกากตะกอนทั้งหมดนี้จะถูกนำไปรีดน้ำออกส่วนหนึ่ง กากตะกอนที่ถูกรีดน้ำออกไปแล้วจะมีความชื้นเหลืออยู่ประมาณร้อยละ 40-50 และจะถูกนำไปฝังกลบยังหลุมฝังกลบต่อไป โดยในปัจจุบันโรงงานตัวอย่างเสียค่ากำจัดกากตะกอนถึงเดือนละ 11,377,779 บาท ซึ่งลักษณะทางกายภาพของกากตะกอนที่เกิดขึ้นในโรงงานตัวอย่างแสดงดังภาพที่ 17 (ก)

จากปริมาณของเสียกากตะกอนและขยะที่มีปริมาณรวมกันมากถึง 5,650.99 ตันต่อเดือน ทำให้มีแนวคิดในการนำของเสียเหล่านี้กลับมาใช้ในรูปของเชื้อเพลิงเพื่อใช้เป็นพลังงานหมุนเวียนในโรงงาน จากการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของกากตะกอนที่เกิดขึ้นในโรงงานตัวอย่างดังตารางที่ 3 พบว่ากากตะกอนของโรงงานมีค่าความร้อนสูงอยู่ที่ 6,973.9 กิโลจูลต่อกิโลกรัม

ความชื้นหลังตากแดดแล้วอยู่ที่ร้อยละ 1.9 ปริมาณเถ้าของกากตะกอนร้อยละ 51.1 ผลของการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเชื้อเพลิงสอดคล้องกับ Rhyner (1995) ซึ่งกล่าวไว้ว่าขยะของแข็งที่มีค่าความร้อนสูงเกินกว่า 5,000 กิโลจูลต่อกิโลกรัม ความชื้นน้อยกว่าร้อยละ 50 และปริมาณเถ้าน้อยกว่าร้อยละ 60 สามารถทำการเผาไหม้ได้โดยไม่ต้องอาศัยเชื้อเพลิงเพิ่มเติม จากผลดังกล่าวจึงพบว่ากากตะกอนที่เกิดขึ้นจากโรงงานตัวอย่างมีแนวโน้มที่จะสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้

อย่างไรก็ตามคุณสมบัติของกากตะกอนจะมีค่าคาร์บอนและคาร์บอนคงตัวที่ต่ำอยู่ที่ร้อยละ 23.5 และร้อยละ 0.5 ตามลำดับ จึงอาจไม่เหมาะสมต่อการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงเนื่องจากจะส่งผลให้การเกิดปฏิกิริยาทางอุณหเคมีในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่นเกิดได้น้อย ส่งผลให้ได้แก๊สเชื้อเพลิงที่มีองคประกอบแก๊สที่เผาไหม้ได้น้อย และมีความร้อนต่ำ จึงมีการนำขยะมาผสมเนื่องจากมีปริมาณคาร์บอนและคาร์บอนคงตัวที่สูงดังตารางที่ 4 โดยจะทำการผสมกากตะกอนและขยะในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 และทำการอัดแท่งเชื้อเพลิงเพื่อให้มีคุณสมบัติเหมาะสมต่อการใช้เป็นเชื้อเพลิงมากยิ่งขึ้น ลักษณะทางกายภาพของเชื้อเพลิงหลังผ่านกระบวนการอัดแท่งจะแสดงดังภาพที่ 18

ตารางที่ 3 การวิเคราะห์แบบประมาณและแยกธาตุของกากตะกอน (dry basis)

การวิเคราะห์แบบประมาณ		การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ	
ความชื้น (%)	1.9	คาร์บอน (%)	23.5
คาร์บอนคงตัว (%)	0.5	ไฮโดรเจน (%)	2.1
เถ้า (%)	51.1	ออกซิเจน (%)	22.6
สารระเหย (%)	46.5	ไนโตรเจน (%)	0.6
ค่าความร้อนสูง (kJ/kg)	6,973.9		

ตารางที่ 4 การวิเคราะห์แบบประมาณและแยกธาตุของขยะ (dry basis)

การวิเคราะห์แบบประมาณ		การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ	
ความชื้น (%)	-	คาร์บอน (%)	50.23
คาร์บอนคงตัว (%)	5.75	ไฮโดรเจน (%)	5.65
เถ้า (%)	3.84	ออกซิเจน (%)	43.66
สารระเหย (%)	90.41	ไนโตรเจน (%)	0.22

(ก)

(ข)

ภาพที่ 17 ลักษณะทางกายภาพของ (ก) กากตะกอน (ข) ขยะ ที่ใช้ในการทดลอง

ภาพที่ 18 ลักษณะทางกายภาพของเชื้อเพลิงหลังผ่านกระบวนการอัดแท่ง

ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่น

การเกิดปฏิกิริยาอุณหเคมีในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสามารถแบ่งได้เป็น 4 โซน โดยแต่ละโซนแบ่งแยกได้ตามอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในเตา ซึ่งจะเป็นตัวบ่งบอกถึงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในเตา ผลการศึกษาช่วงอุณหภูมิที่วัดได้ภายในเตาที่ตำแหน่งอ้างอิงต่างๆ แสดงดังดังตารางที่ 5 และจากผลที่ได้ทำให้สามารถแบ่งชั้นของโซนการเกิดปฏิกิริยาอุณหเคมีได้ดังนี้

- ที่ระยะ T_1-T_2 ซึ่งเป็นส่วนบนของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจะมีอุณหภูมิต่ำกว่า 100 ^{o}C เป็นบริเวณ Drying zone เป็นช่วงที่ความชื้นของเชื้อเพลิงถูกกำจัดออกไป

- ที่ระยะ T_3-T_5 เป็นบริเวณที่อุณหภูมิสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากบริเวณ T_4 เป็นบริเวณที่มี

การป้อนอากาศเข้า ทำให้เกิดปฏิกิริยา Combustion ในบริเวณนี้ ดังจะสังเกตได้จากอุณหภูมิที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับบริเวณอื่น และในบริเวณส่วนบนของ T_3 จะเกิดปฏิกิริยา Pyrolysis โดยได้รับความร้อนจากบริเวณ T_4 ที่เกิดปฏิกิริยา Combustion ได้ผลิตภัณฑ์หลายชนิดดังสมการที่ 1

$$\text{Dry biomass} + \text{Heat} \longrightarrow \text{Charcoal} + CO + CO_2 + H_2O + CH_4 + C_2H_6 + \text{Pyroligneous acid} + \text{Tar} \quad (1)$$

- ที่ระยะ T_6 เป็นบริเวณ Reduction Zone ซึ่งมีปฏิกิริยาเกิดขึ้นหลายปฏิกิริยาทั้งคายความร้อนและดูดความร้อนเป็นบริเวณที่สำคัญต่อการเกิดแก๊ส CO , H_2 และ CH_4 ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ โดยเกิดขึ้นโดยปฏิกิริยาต่างๆ ดังสมการที่ 2 ถึงสมการที่ 6

$$C + CO_2 \longrightarrow 2CO \quad (2)$$

$$C + H_2O \longrightarrow CO + H_2 \quad (3)$$

$$C + 2H_2O \longrightarrow CO_2 + 2H_2 \quad (4)$$

$$CO + H_2O \longrightarrow CO_2 + H_2 \quad (5)$$

$$C + 2H_2 \longrightarrow CH_4 \quad (6)$$

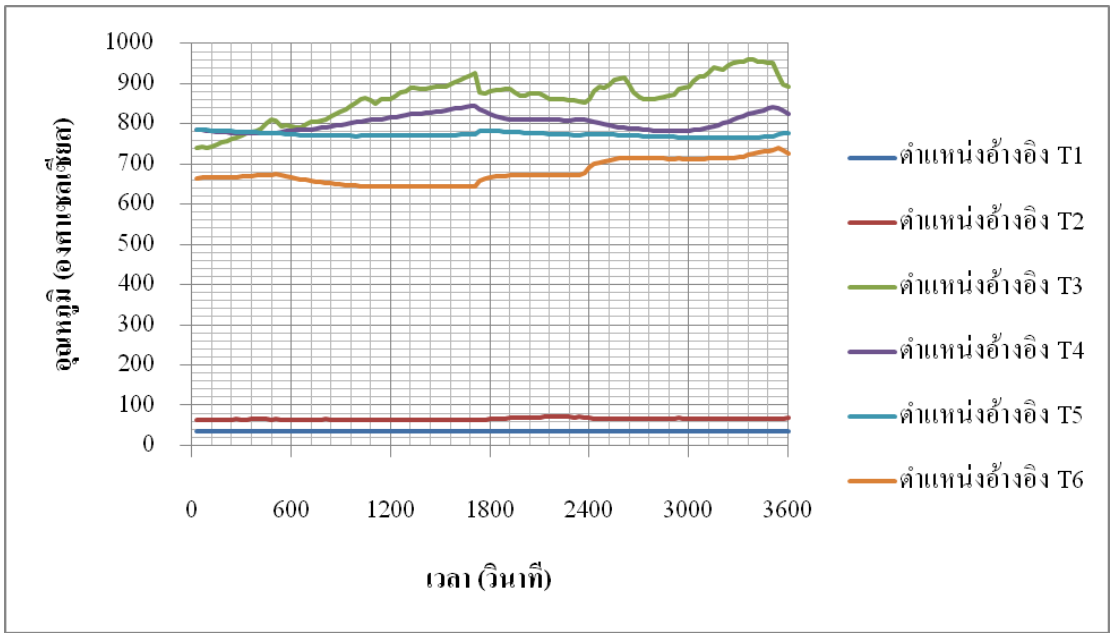
อย่างไรก็ตามโซนการเกิดปฏิกิริยาทางอุณหเคมีที่เกิดขึ้นไม่สามารถกำหนดตำแหน่งได้ชัดเจน เนื่องจากการเลื่อนขึ้นเลื่อนลงของเชื้อเพลิงที่ไม่ต่อเนื่องเท่ากันทุกครั้ง ซึ่งเป็นผลให้โซนการเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนแปลงตำแหน่งตลอดเวลา

ภาพที่ 19 ถึงภาพที่ 22 จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในเตาและระยะเวลา เมื่อใช้อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงที่ 100, 120, 140 และ 180 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าชั้นของอุณหภูมิ (temperature profile) ที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงทั้ง 4 ระดับมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน ลักษณะของชั้นอุณหภูมิมีรูปแบบที่คล้ายกัน ซึ่งสอดคล้องตามงานวิจัยของทิพย์สุภินทร์ (2550) ที่ทำการศึกษาการผลิตพลังงานจากตะกอนน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมด้วย

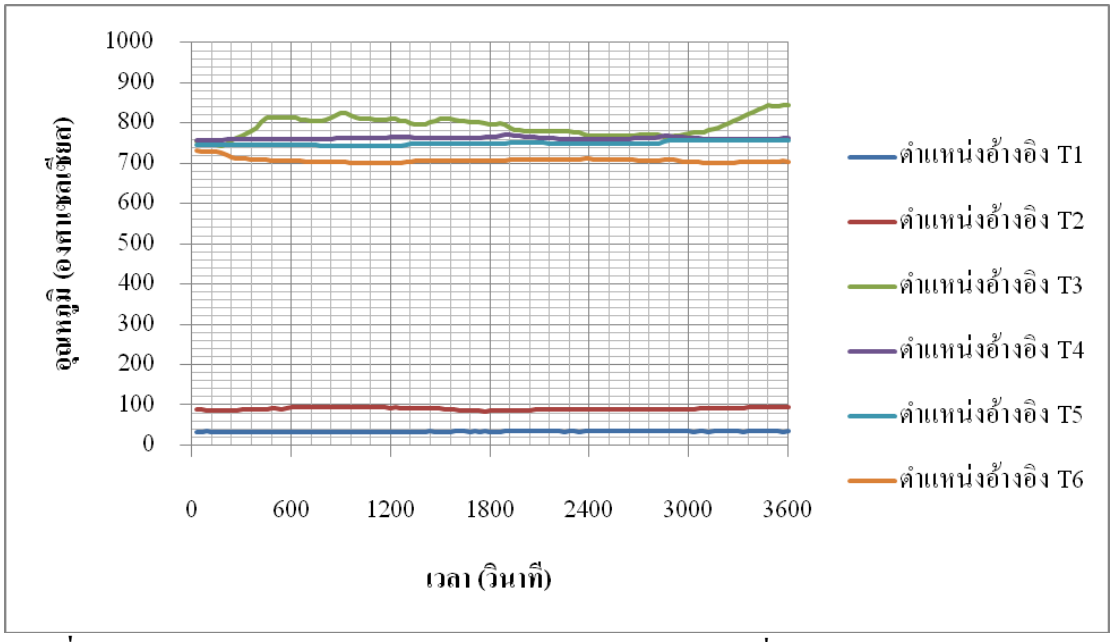
กระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่น ซึ่งกล่าวไว้ว่าชั้นอุณหภูมิที่มีรูปแบบคล้ายกัน เป็นรูปแบบของการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีความหนาแน่นสูง

ตารางที่ 5 อุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง และอุณหภูมิแก๊สเชื้อเพลิงหลังจากออกจากเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงและหลังจากออกจากระบบทำความสะอาดแก๊ส

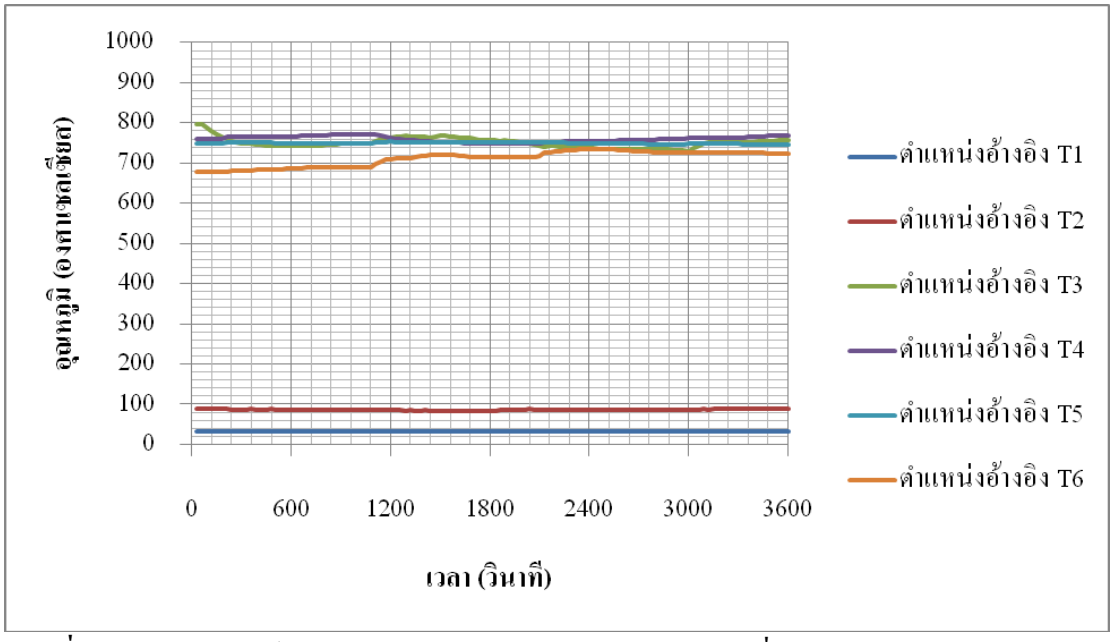
อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง (m^3/hr)	อุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่ตำแหน่งความสูงอ้างอิงต่างๆ (^oC)						อุณหภูมิเฉลี่ยของแก๊สเชื้อเพลิง (^oC)	
	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	ออกจากเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง	ออกจากระบบทำความสะอาดแก๊ส
100	35.18	76.83	759.12	781.34	754.68	698.02	516.68	26.9
120	33.50	89.19	757.71	770.44	751.44	712.90	529.10	25.0
140	32.50	85.59	759.54	781.76	754.27	713.58	545.84	24.2
180	31.49	84.67	838.55	880.57	821.60	775.96	586.98	24.2



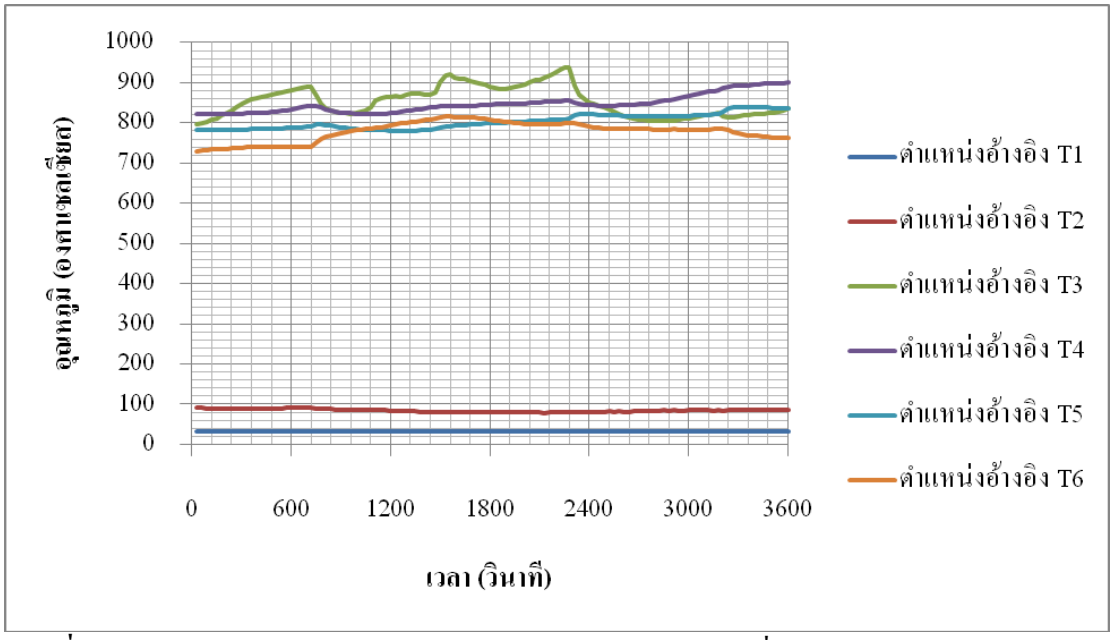
ภาพที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในเตาและระยะเวลา เมื่อใช้อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง 100 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง



ภาพที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในเตาและระยะเวลา เมื่อใช้อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง 120 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง



ภาพที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในเตาและระยะเวลา เมื่อใช้อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง 140 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง



ภาพที่ 22 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในเตาและระยะเวลา เมื่อใช้อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง 180 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

อัตราการใช้เชื้อเพลิง อัตราการเกิดเถ้าและอัตราการดึงเถ้าออก

การใช้เชื้อเพลิงและอัตราการดึงเถ้าออกของการทดลองนี้แสดงดังตารางที่ 6 ซึ่งอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงที่ 100, 120, 140 และ 180 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง มีอัตราการใช้เชื้อเพลิงอยู่ในช่วง 80.10 – 97.00 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อัตราการเกิดเถ้าอยู่ในช่วง 43.47 – 47.67 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และอัตราการดึงเถ้าออกที่เหมาะสมมีค่าประมาณร้อยละ 50 โดยสังเกตได้ว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงให้มากขึ้น กล่าวคือ มีอากาศเข้าสู่ระบบมากขึ้น อัตราการใช้เชื้อเพลิงจะเพิ่มมากขึ้นสัมพันธ์กับอัตราการเกิดเถ้าที่ลดน้อยลงเนื่องจากเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์มากขึ้นนั่นเอง และอัตราการดึงเถ้าออกเป็นส่วนสำคัญของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่น ถ้าดึงเถ้าออกมากเกินไปอาจทำให้การเดินระบบหยุดลงเนื่องจากดึงเถ้าออกจากระบบเร็วเกินกว่าการเกิดปฏิกิริยาอุณหเคมีภายในเตา แต่ถ้าดึงเถ้าออกน้อยหรือไม่เพียงพอ อาจทำให้เกิดการอุดตันของเถ้าในระบบ อาจเกิดการหลอมของเถ้าติดตามบริเวณเตา (ทิพย์สุภินทร์, 2550) โดยจะสามารถประมาณการอัตราการดึงเถ้าออกได้จากค่าการวิเคราะห์เถ้าจากการวิเคราะห์แบบประมาณของเชื้อเพลิงที่ใช้ดังนั้นต้องมีการควบคุมอัตราการป้อนเชื้อเพลิงและอัตราการดึงเถ้าออกให้สัมพันธ์กัน อาทิเช่น ผลการวิเคราะห์แบบประมาณพบว่าเชื้อเพลิงมีปริมาณเถ้าเท่ากับร้อยละ 20 อัตราการดึงเถ้าออกระหว่างการเผาไหม้

ก็คือร้อยละ 20 นั่นเอง อย่างไรก็ตามอัตราการดึงเถ้าออกอาจแปรผันไปตามประสิทธิภาพของเตาเผาได้อีกด้วย

ตารางที่ 6 อัตราการใช้เชื้อเพลิง อัตราการเกิดเถ้าและอัตราการดึงเถ้าออก

อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง (m^3/hr)	อัตราการใช้เชื้อเพลิงกากตะกอนผสมขยะ (kg/hr)	อัตราการเกิดเถ้า (kg/hr)	อัตราการดึงเถ้าออก (%)
100	80.10	43.75	55.60
120	89.17	47.67	53.42
140	87.9	41.87	49.42
180	97.00	43.47	44.93

คุณสมบัติของแก๊สเชื้อเพลิง

องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงจะสามารถหาได้จากการเก็บตัวอย่างของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ในแต่ละช่วงอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง แล้วนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สจากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบจะสามารถแบ่งประเภทแก๊สเชื้อเพลิงได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

1. กลุ่มที่จุดไฟติด (Combustible gases) จะประกอบด้วย CO, H_2 และ CH_4 ซึ่งเป็นกลุ่มแก๊สที่สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานได้ เนื่องจากเมื่อจุดติดไฟและเผาไหม้แล้วจะมีการปลดปล่อยพลังงานออกมา ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้

2. กลุ่มที่จุดไฟไม่ติด (Non-combusible gases) จะประกอบด้วย N_2, O_2 และ CO_2 ปริมาณของแก๊สในกลุ่มนี้จะไม่ส่งผลต่อค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่ผลิตได้

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแก๊สเชื้อเพลิงของทุกช่วงอัตราการไหลจะแสดงดังตารางที่ 7 ซึ่งจะเห็นแก๊สคาร์บอนมอนออกไซด์สามารถตรวจพบได้เฉพาะที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง 140 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง เนื่องจากองค์ประกอบของกากตะกอนและขยะที่นำมาใช้ในการทดลองในแต่ละช่วงอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงมีความแตกต่างกัน และจากข้อมูลที่แสดงดัง

ตารางที่ 7 พบว่าสัดส่วนปริมาณอากาศในแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ที่อัตราการไหล 100, 120 และ 180 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมงมีค่าสูง ดังนั้นที่ช่วงอัตราการดังกล่าวจึงเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์มากกว่าเมื่อเทียบกับที่อัตราการไหล 140 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง จึงส่งผลให้ไม่สามารถตรวจพบปริมาณของแก๊สคาร์บอนมอนออกไซด์ได้

ตารางที่ 7 ร้อยละโดยปริมาตรของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากเชื้อเพลิงกากตะกอนผสมเศษขยะ

อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง (m^3/hr)	องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง					
	สัดส่วนโดยปริมาตรเฉลี่ย (%)					ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิง (MJ/Nm^3)
	CO	H_2	CH_4	Air (N_2+O_2)	CO_2	
100	Not detected	9.32	1.46	66.01	17.4	1.83
120	Not detected	11.27	1.7	63.27	18.23	2.19
140	10.07	11.76	1.63	53.02	19.63	3.54
180	Not detected	10.16	1.1	64.72	20.02	1.79

ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิง

ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงมีผลมาจากองค์ประกอบของแก๊สที่สามารถเผาไหม้ได้ ได้แก่ แก๊สคาร์บอนมอนออกไซด์ แก๊สไฮโดรเจน และแก๊สมีเทน โดยสามารถหาได้จากการคำนวณโดยใช้ความสัมพันธ์ดังสมการ

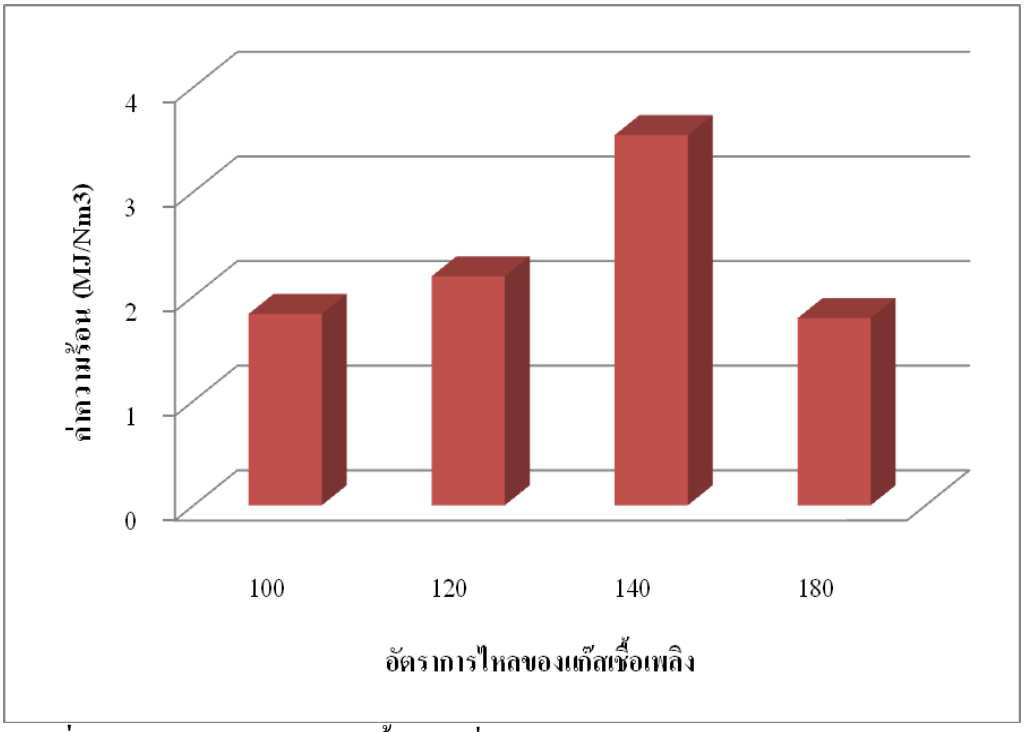
$$CV_g = \sum X_i H_i$$

โดยผลการคำนวณค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ที่อัตราการไหลต่างๆ จะแสดงดังภาพที่ 23 ซึ่งพบว่าที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง 140 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมงแก๊สเชื้อเพลิงจะมีค่าความร้อนมากที่สุด คือ 3.54 เมกกะจูลต่อลูกบาศก์เมตรที่ STP

ตัวอย่างการคำนวณค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงที่อัตราการไหล 140 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

จากสมการ $CV_g = \sum X_i H_i$ เมื่อค่าความร้อนของ CO = 13.1MJ/Nm^3 H_2 = 13.1 MJ/Nm^3 และ CH_4 = 41.2 MJ/Nm^3 และสัดส่วนโดยปริมาตรของแก๊ส CO = 10.07 % H_2 = 11.76% และ CH_4 = 1.63%

$$CV_g = [(0.1007)(13.\ 1MJ/Nm^3)] + [(0.1176)(\ 13.1\ MJ/Nm^3)]$$
$$+ [(0.0163)(\ 41.2\ MJ/Nm^3\ )]$$
$$= \ 3.54\ MJ/Nm^3$$



ภาพที่ 23 ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงที่อัตราการไหลต่างๆ

การประเมินประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Gasification Efficiency)

ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานที่สะสมอยู่ในรูปเชื้อเพลิงอัดแท่งกากตะกอนผสมขยะไปเป็นแก๊สเชื้อเพลิง โดยผล ของการประเมินประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแสดงดังตารางที่ 8 โดยพบว่าประสิทธิภาพของการ

ผลิตแก๊สเชื้อเพลิงของเชื้อเพลิงอัดแท่งกากตะกอนผสม ขยะมีค่าอยู่ในช่วง 10.93 – 26.98 โดยมีค่าสูงสุดเมื่อใช้อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง เท่ากับ 140 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ซึ่งโดยทั่วไปประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติและองค์ประกอบของเชื้อเพลิง โดยกากตะกอนที่ใช้ในการทดลองนี้มีปริมาณเถ้าสูงมากกว่าร้อยละ 50 ทำให้ปริมาณองค์ประกอบที่จะแปรสภาพไปเป็นแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ไป อีก ทั้งลักษณะของเถ้าที่ได้จากการทดลองมีจะลักษณะยึดติดกับก้อนเชื้อเพลิงไม่ร่อนหลุดออก ทำให้เชื้อเพลิงดังกล่าวไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาเผาไหม้ต่อได้ ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าลดลง

ตัวอย่างการคำนวณประสิท ธิภาพในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงเมื่อใช้อัตราการไหลที่ 140 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

Gasification Efficiency (ηg) = [Rate of energy carried by producer gas] / [Rate of energy supplied to reactor]

Gasification Efficiency (ηg) = $[V_g \times CV_g]/[m_{Fuel} \times HHV_{Fuel}]$

= [140x3.54]/[87.9 x 20.895] x 100

= 26.98 %

ตารางที่ 8 ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง

อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง (m^3/hr)	ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง **(%)**
100	10.93
120	14.1
140	26.98
180	15.89

จากการเปรียบเทียบผลการศึกษาจากการทดลองนี้กับผลการทดลองอื่นๆ ที่ใช้กากตะกอนในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงพบว่าสัดส่วนของแก๊สที่ผลิตได้จะแตกต่างกันไป เนื่องจากกากตะกอนที่มาจากแต่ละแหล่งจะมีคุณสมบัติค่อนข้างแตกต่างกันไปตามชนิดและวัตถุดิบของโรงงาน รวมถึงประเภทของระบบบำบัดน้ำเสีย ซึ่งจะส่งผลโดยตรงกับปริมาณขององค์ประกอบแก๊สต่างๆ ที่ผลิต

ได้ รวมถึงชนิดของเตาเผาที่แตกต่างกัน และเตาเผาในแต่ละที่จะมีประสิทธิภาพในการเผาไหม้ที่แตกต่างกันไป อย่างไรก็ตามจากผลการศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับการเผากากตะกอนในตารางที่ 8 แสดงให้เห็นว่าการใช้กากตะกอนน้ำเสียร่วมกับขยะในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่นมีศักยภาพที่จะสามารถผลิตแก๊สเชื้อเพลิงเพื่อนำมาใช้ประโยชน์ในการผลิตพลังงานได้

ตารางที่ 9 การเปรียบเทียบผลการศึกษาในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากกากตะกอน

ผลงานวิจัยของ	เชื้อเพลิง	คุณสมบัติของแก๊สเชื้อเพลิง				ชนิดของเตาเผา Gasifier
		สัดส่วนโดยเฉลี่ย (%)			ค่าความร้อน (MJ/Nm^3)	
		CO	H_2	CH_4		
งานวิจัยนี้	กากตะกอนน้ำเสียผสมขยะ	10.07	11.77	1.63	3.54	Downdraft
ทิพย์สุภินทร์ หินซุย (2550)	กากตะกอนน้ำเสีย	13.80	16.40	2.20	4.88	Downdraft
Midilli *et al*. (2000)	กากตะกอนน้ำเสีย	2.00	10.80	7.00	4.59	Downdraft
Dogru *et al*. (2002)	กากตะกอนน้ำเสีย	7.00	11.20	2.10	3.26	Downdraft
Grob *et al*. (2008)	กากตะกอนน้ำเสีย	24.00	11.00	2.00	5.40	Fluidized bed

การประเมินความเป็นไปได้ทางเทคนิค

จากการสำรวจระบบผลิตไอน้ำของโรงงานตัวอย่างพบว่าเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตไอน้ำ คือ น้ำมันเตาเกรดซีชนิดกำมะถันต่ำ อัตราการผลิตไอน้ำโดยเฉลี่ย 18,690.33 ตันต่อเดือน อัตราการใช้น้ำมันเตาในการผลิตไอน้ำโดยเฉลี่ย 1,086,940.00 ลิตรต่อเดือน

หม้อน้ำที่ใช้ในการผลิตไอน้ำเป็นหม้อไอน้ำแบบท่อน้ำ (water tube boiler) กำลังการผลิตสูงสุด 40 ตันต่อชั่วโมง ความดันใช้งานสูงสุด 10 บาร์ โดยกำลังการผลิตจริงของโรงงานตัวอย่างเฉลี่ยอยู่ที่ 30 ตันต่อชั่วโมงและความดันมีค่า 6.5 บาร์ จากข้อมูลการวิเคราะห์หม้อไอน้ำ ของโรงงานตัวอย่าง (ภาคผนวก ค) ไอน้ำ 18,690.33 ตัน มีพลังงาน 43,499,687,138.70 กิโลจูล ดังนั้น

ไอน้ำปริมาณ 1 ตันจะมีพลังงาน 2,327,390.00 กิโลจูล หมายความว่าในการผลิตไอน้ำในโรงงานตัวอย่าง 1 ตันจะต้องใช้พลังงาน 2,327,390.00 กิโลจูล

กากตะกอนที่เกิดขึ้นในโรงงานตัวอย่างมีปริมาณ 5,417.99 ตันต่อเดือน (ความชื้นร้อยละ 50) หากทำให้แห้งจะได้กากตะกอนปริมาณ 2,709.00 ตัน และขยะที่เกิดขึ้นมีปริมาณ 173.00 ตันต่อเดือน ดังนั้นในการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งกากตะกอนผสมขยะในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 จะได้เชื้อเพลิง 346.00 ตันต่อเดือน จากข้อมูลการทดลองการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง 140 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง จะได้แก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อน 3.54 เมกกะจูลต่อลูกบาศก์เมตรที่ STP และมีอัตราการใช้เชื้อเพลิง 87.90 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ถ้ากำหนดให้โรงงานมีชั่วโมงการทำงานต่อวันเท่ากับ 16 ชั่วโมง และทำงาน 30 วันต่อเดือน จะได้พลังงานจากแก๊สเชื้อเพลิงและมีอัตราการใช้เชื้อเพลิงต่อเดือนเท่ากับ

พลังงานที่ได้รับจากแก๊สเชื้อเพลิง = ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิง x อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง x จำนวนชั่วโมงการทำงาน (ต่อเดือน)

= 3.54 x 140 x 16 x 30 x 1000

= 237,888,000.00 กิโลจูลต่อเดือน

การใช้เชื้อเพลิง (ต่อเดือน) = ปริมาณเชื้อเพลิง x จำนวนชั่วโมงการทำงาน (ต่อเดือน)

= 87.90 x 16 x 30

= 42.20 ตันต่อเดือน

การใช้แก๊สเชื้อเพลิงเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไอน้ำ ประสิทธิภาพในการถ่ายเทพลังงานให้แก่หม้อไอน้ำที่ใช้เชื้อเพลิงชนิดแก๊สมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 90 (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, ม.ป.ป.)

พลังงานที่ใช้จริงในการผลิตไอน้ำ 1 ตัน = พลังงานที่ใช้ในการผลิตไอน้ำ/ประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ

= 2,327,390.00 / 0.90

= 2,585,989.00 กิโลจูล

ปริมาณไอน้ำที่ผลิตได้ = พลังงานที่ได้จากเชื้อเพลิงอัดแท่ง / พลังงานที่ใช้ในการผลิตไอน้ำ

= 237,888,000.00 / 2,585,989.00

= 92.00 ตันต่อเดือน

การประเมินทางด้านเศรษฐศาสตร์

จากข้อมูลทางด้านเทคนิคเชื้อเพลิงอัดแท่ง 42.20 ตัน จะสามารถผลิตไอน้ำได้ 92.00 ตันต่อเดือน โรงงานตัวอย่างใช้น้ำมันเตาในการผลิตไอน้ำเฉลี่ย 58.16 ลิตรต่อไอน้ำ 1 ตัน ดังนั้นหากนำเชื้อเพลิงอัดแท่งมาใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมจะสามารถประหยัดน้ำมันเตาคิดเป็นปริมาณ 5,350.72 ลิตรต่อเดือน จากผลการสำรวจราคาน้ำมันเตาเกรดซีชนิดซัลเฟอร์ต่ำพบว่าน้ำมันเตามีราคาเฉลี่ยลิตรละ 19.37 บาท ดังนั้นการใช้เชื้อเพลิงอัดแท่งเป็นเชื้อเพลิงทดแทนจะสามารถประหยัดค่าน้ำมันเตาได้ 103,643.45 บาทต่อเดือน

การนำเชื้อเพลิงกากตะกอนผสมขยะอัดแท่งมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันเตาในการผลิตไอน้ำในโรงงานตัวอย่าง ต้องมีการลงทุนก่อสร้างระบบเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงและอุปกรณ์เชื่อมต่อกับระบบเผาไหม้เดิม จากราคาที่ประเมินโดยศูนย์ความเป็นเลิศทางชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มีมูลค่าการก่อสร้างรวม 3 ล้านบาท อีกทั้งการอัดแท่งเชื้อเพลิง 42.20 ตัน จะต้องใช้ค่าไฟฟ้าในการดำเนินการโดยใช้ค่าไฟฟ้าเท่ากับ 70.42 หน่วยต่อตัน จากการสำรวจค่าไฟฟ้าจากการไฟฟ้านครหลวงพบว่าค่าไฟฟ้าที่คิดตามอัตราค่าไฟฟ้าตามช่วงเวลาของการใช้(time of use tariff, TOU tariff) มีมูลค่าหน่วยละ 2.61 บาท ดังนั้นในการอัดแท่งเชื้อเพลิง 42.20 ตัน เพื่อนำไปเผาไหม้ในระบบแก๊สซิฟิเคชั่นต้องเสียค่าไฟฟ้า 7,766.90 บาท

การสรุปรวมค่าใช้จ่าย ได้แก่ ต้นทุนการก่อสร้างและการดำเนินการ มูลค่าที่ประหยัดได้และมูลค่าเงินได้สุทธิจากการนำเชื้อเพลิงกากตะกอนและขยะอัดแท่งมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ต้นทุน ค่าใช้จ่าย และมูลค่าที่ประหยัดได้จากการนำเชื้อเพลิงกากตะกอนและเศษขยะอัดแท่งมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทน

รายการ	จำนวนเงิน (บาท)
ค่าใช้จ่าย	
ต้นทุนในการก่อสร้าง	3,000,000.00
ค่าโสหุ้ยการผลิต (ต่อเดือน)	30,920.00
ค่าดำเนินการอัดแท่งเชื้อเพลิง (ต่อเดือน)	7,766.90
มูลค่าที่ประหยัดได้	
จำนวนเงินค่าน้ำมันเตาที่ประหยัดได้ (ต่อเดือน)	103,643.50
รวมเงินได้สุทธิต่อเดือน	64,956.60

*ต้นทุนในการก่อสร้างคิดเฉพาะส่วนเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง
*ค่าโสหุ้ยการผลิตแสดงการคำนวณไว้ในภาคผนวก ง

การประเมินความคุ้มทุนสามารถวิเคราะห์ได้จากมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (net present value, NPV) อัตราผลตอบแทน (internal rate of return, IRR) และระยะเวลาคุ้มทุน โดยทำการคำนวณดังนี้

มูลค่าปัจจุบันสุทธิ = มูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสด – เงินลงทุนเริ่มแรก

มูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสด = PMT x PVIFA (n,i)

n คือ ระยะเวลาที่ดำเนินโครงการ ในที่นี้เท่ากับอายุการใช้งานของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (กำหนดให้เท่ากับ 15 ปี)

I คือ อัตราผลตอบแทนที่ต้องการ ในที่นี้กำหนดให้เท่ากับร้อยละ 10 ตามการพิจารณาร่วมกับโรงงานตัวอย่าง

ค่า PVIFA ที่อัตราผลตอบแทนที่ต้องการร้อยละ 10 จำนวน 15 งวด (15 ปีตามอายุการใช้งาน) มีค่าเท่ากับ 7.6061 (เริงรัก, 2543)

มูลค่าปัจจุบันสุทธิ = (64,956.6 x 12 x 7.6061) – 3,000,000

= 2,928,794.74 บาท

มูลค่าปัจจุบันสุทธิที่คำนวณได้มีค่า 2.9 ล้านบาท ซึ่งมีค่าเป็นบวก หากมูลค่าปัจจุบันสุทธิที่คำนวณได้เป็นบวก แสดงว่าการลงทุนในโครงการนั้นๆ สามารถยอมรับได้ (เริงรัก, 2543) ดังนั้น การลงทุนในการดำเนินการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากเชื้อเพลิงอัดแท่งผสมขยะจึงเป็นการลงทุนที่สามารถยอมรับได้

การคำนวณค่า IRR ซึ่งเป็นอัตราคิดลดที่มีผลทำให้มูลค่าปัจจุบันของเงินสดที่ได้รับในอนาคตเท่ากับเงินลงทุนที่จ่ายในปัจจุบัน ซึ่งหลังจากจากการคำนวณพบว่าค่าIRR มีค่าเท่ากับร้อยละ 25 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราผลตอบแทนที่ต้องการในการคำนวณมูลค่าปัจจุบันสุทธิซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 10 พบว่าค่า IRR มีค่ามากกว่า ดังนั้นการลงทุนในการดำเนินการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากเชื้อเพลิงอัดแท่งผสมขยะจึงเป็นการลงทุนที่สามารถยอมรับได้

ระยะเวลาคืนทุน = เงินลงทุนในการดำเนินการ / เงินรายได้สุทธิจากการดำเนินการ

= 3,000,000.00 / 64,956.60

= 46.18 เดือน

= 3 ปี 10 เดือน 6 วัน

เมื่อพิจารณาทั้งมูลค่าปัจจุบันสุทธิและอัตราผลตอบแทน พบว่าการดำเนินการลงทุนดำเนินการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากเชื้อเพลิงอัดแท่งผสมขยะจึงเป็นการลงทุนที่สามารถยอมรับได้ และในการดำเนินการจะสามารถทำกำไรสุทธิได้ 64,956.60 บาทต่อเดือน และมีระยะเวลาคืนทุนประมาณ 3 ปี 10 เดือน 6 วัน

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

กากตะกอนและขยะในโรงงานตัวอย่าง เป็นของเสียที่ต้องมีค่าใช้จ่ายในการกำจัด เมื่อศึกษาถึงองค์ประกอบและคุณสมบัติในการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง พบว่ามีความเหมาะสมมีศักยภาพเพียงพอที่จะนำมามาผลิตพลังงาน แต่เนื่องจากถ้าใช้กากตะกอนเพียงอย่างเดียวในการใช้เป็นเชื้อเพลิงอาจไม่เหมาะสมเนื่องจากมีปริมาณเถ้าสูง (ร้อยละ 51.1) และมีปริมาณคาร์บอนคงตัวที่ต่ำ (ร้อยละ 0.5) จึงทำการทดลองผสมกากตะกอนและขยะในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 และทำการอัดแท่งเป็นเชื้อเพลิงเพื่อให้มีคุณสมบัติเหมาะสมต่อการเป็นเชื้อเพลิงเพิ่มมากขึ้น

การทดสอบหาสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบสำหรับการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงโดยกระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่นของเชื้อเพลิงกากตะกอนผสมขยะอัดแท่งเมื่อทำการทดสอบโดยใช้อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงที่ 100, 120, 140 และ 180 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง พบว่า

- ชั้นของอุณหภูมิภายในเตาในทุกช่วงอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงในแต่ละชั้นมีค่าใกล้เคียงกัน และมีรูปแบบคล้ายคลึงกันซึ่งเป็นรูปแบบของเชื้อเพลิงที่มีความหนาแน่นสูง

- อัตราการใช้เชื้อเพลิงที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงที่ 100, 120, 140 และ 180 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง มีอัตราการใช้เชื้อเพลิงอยู่ในช่วง 80.10 - 97 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อัตราการเกิดเถ้าอยู่ในช่วง 43.47 – 47.67 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และอัตราการดึงเถ้าออกที่เหมาะสมมีค่าประมาณร้อยละ 50

- คุณสมบัติของแก๊สเชื้อเพลิง จะมีองค์ประกอบของแก๊สที่เผาไหม้ได้ คือ CO, H_2 และ CH_4 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 10.06 (ตรวจพบเฉพาะที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงเท่ากับ 140 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง), 10.63 และ 1.47 ตามลำดับ โดยมีค่าความร้อนเฉลี่ยเท่ากับ 2.34 เมกกะจูลต่อลูกบาศก์เมตรที่ STP

- ประสิทธิภาพของการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงของเชื้อเพลิงอัดแท่งกากตะกอนผสมขยะมีค่าอยู่ในช่วง 10.93 – 26.98 โดยมีค่าสูงสุดเมื่อใช้อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงเท่ากับ 140 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

จากผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าการใช้เชื้อเพลิงกากตะกอนผสมขยะสามารถนำมาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงโดยใช้กระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่นได้ แต่แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้มีค่าความร้อนต่ำไม่สามารถนำไปเดินเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้าได้แต่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในรูปของพลังงานความร้อนได้

การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางเทคนิคและทางเศรษฐศาสตร์พบว่า การนำแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่นโดยใช้เชื้อเพลิงอัดแท่งกากตะกอนผสมขยะ พบว่ามีศักยภาพในการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันเตาในการผลิตไอน้ำได้ ซึ่งจะสามารถผลิตไอน้ำได้ 92 ตันต่อเดือน ทดแทนการใช้น้ำมันเตาได้ 5,350.72 ลิตรต่อเดือน เมื่อคิดเป็นรายได้สุทธิโรงงานตัวอย่างจะสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายได้ 64,956.60 บาทต่อเดือน โดยถ้ามีการลงทุนโครงการจะมีระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 3 ปี 10 เดือน 6 วัน แต่เมื่อคิดความเป็นไปได้ในการลงทุนพบว่าไม่เหมาะสมต่อการลงทุนเนื่องจากมีอัตราผลตอบแทนการลงทุนร้อยละ 25 ซึ่งมีค่ามากกว่าอัตราผลตอบแทนที่ต้องการซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 10 และมูลค่าปัจจุบันสุทธิเท่ากับ 2.92 ล้านบาท

ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการทดลองโดยใช้เชื้อเพลิงอัดแท่งที่มีส่วนผสมของกากตะกอนและขยะในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงข้อมูลการเกิดของเสียพบว่าปริมาณกากตะกอนที่เกิดขึ้นในโรงงานตัวอย่างสูงกว่าปริมาณขยะที่เกิดขึ้นมาก จึงควรมีการศึกษาวิจัย การผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งกากตะกอนผสมขยะในอัตราส่วนอื่นๆที่ใช้ปริมาณของกากตะกอนเพิ่มมากขึ้น อาทิเช่น กากตะกอน 70 ส่วนต่อขยะ 30 ส่วน เป็นต้น เพื่อลดปริมาณกากตะกอนที่จะถูกส่งไปฝังกลบต่อไป

2. เนื่องจากกากเชื้อเพลิงอัดแท่งสามารถผลิตได้ในปริมาณ 346 ตันต่อเดือน ดังนั้นจึงเพียงพอสำหรับการใช้งานในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง 8 เตาต่อเดือน ดังนั้นถ้ามีการสร้างเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงเพิ่มเป็นจำนวน 8 เตาจะสามารถผลิตไอน้ำได้มากขึ้นเป็น 736 ตันต่อเดือน หรือมีการศึกษาเพิ่มเติมในการเพิ่มขนาดกำลังการผลิตของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงเพื่อให้รองรับปริมาณเชื้อเพลิงที่มากขึ้นได้ ซึ่งทั้งการเพิ่มปริมาณเตาหรือขนาดกำลังการผลิตจะสามารถช่วยลดปริมาณการใช้น้ำมันเตาของโรงงานตัวอย่างได้มากขึ้น

3. การนำของเสียมาผลิตเป็นพลังงานโดยกระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่น สามารถส่งเสริมเข้าสู่โครงการพัฒนากลไกที่สะอาด (clean development mechanism, CDM) และการซื้อขายคาร์บอนเครดิต (carbon credit) ได้ ซึ่งเป็นอีกแนวทางหนึ่งจะสามารถช่วยลดต้นทุนในการผลิตให้กับโรงงานตัวอย่างได้ จึงควรมีการพัฒนาและศึกษาต่อไปในอนาคต

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมธุรกิจพลังงาน กระทรวงพลังงาน 2547. **ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน เรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันเตา (ฉบับที่ 2).** แหล่งที่มา : http://hq-web-s01.pttplc.com/backup/th/document/pdf/Energy/ps_pr_fu_bu-01_01.pdf, 13 กันยายน 2551.

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน 2550. **พลังงานทดแทน.** แหล่งที่มา : http://www.dede.go.th/dede/index.php?id=35, 23 ตุลาคม 2551.

กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม 2542. **คู่มือจัดการสิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ.** แหล่งที่มา : http://www.diw.go.th/EMS%20for%20SMEs%20Website/page%203_files/text/env/pulp-paper/thai/chap3.pdf, 15 สิงหาคม 2551.

ทิพย์สุภินทร์ หินซุย. 2550. **การศึกษาการกำจัดกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อผลิตพลังงานโดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชั่น : กรณีศึกษากากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมฟอกย้อม.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เบญจมาศ ปุยอ๊อก. 2547. **แกซิฟิเคชันของแบล็กลิเคอร์เร่งปฏิกิริยาด้วยเหล็กบนโดโลไมต์** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. ม.ป..ป. **หม้อไอน้ำและระบบส่งจ่ายไอน้ำ.** บทเรียนเครือข่ายอินเตอร์เน็ท เรื่อง การอนุรักษ์พลังงานในโรงงานอุตสาหกรรม. แหล่งที่มา: http://mte.kmutt.ac.th/mte_learning/Energy_Conservation_in_Industrial_Plant/index.html, 2 กันยายน 2552

วีรชัย อาจหาญ, นิวัฒน์ คงกะพี้, กฤษกร รับสมบัติ, ทิพย์สุภินทร์ หินซุย, ปภัส ชนะโรค, ณัฐพงษ์ ประภาการ, สาวิตรี คำหอม, สุภัทร หนูแย้ม, พจนาลัย ชาวห้วยหมาก, ชัยชนะ เลิศศรีสกุล, ศรัลย์ ปานศรีพงษ์, ชิงชัย วิริยะบัญชา, สมิต บุญเสริมสุข และจิราวัฒน์ วงษ์มาศจันทร์. 2551. **โรงไฟฟ้าต้นแบบชีวมวลขนาดเล็กสำหรับชุมชนแบบครบวงจร.** รายงานการวิจัย ภารกิจโครงการและประสานงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

วรวุฒิ ปุณฑริกพันธ์. 2552. **การลดปัญหาสิ่งแวดล้อมในอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษภายใต้แนวคิดการผลิตที่สะอาด.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เริงรัก จำปาเงิน. 2543. **การจัดการการเงิน.** บริษัท บุ๊คเน็ท จำกัด, กรุงเทพฯ. แปลจาก E. F. Brigham และ J. F. Houston. **Fundamentals of financecial management.** 8th ed. The Dryden Press, Orlando, Florida.

สำนักงานเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2542. **คู่มือการจัดการสิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ.** กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ.

สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม. 2550. **สรุปภาวะเศรษฐกิจอุตสาหกรรมไทยไตรมาสที่ 3 ปี 2550 : อุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ กระดาษ สิ่งพิมพ์.** แหล่งที่มา : http://www.oie.go.th/industrystatus21_th.asp?ind=07, 26 พฤษภาคม 2551.

Dogru, M., A. Midilli and C.R. Howarth. 2002. Gasification of sewage sludge using a throated downdraft gasifier and uncertainly analysis. **Fuel Processing Technology** 75: 55-82.

FAO Corporate document respository. 1986. Wood gas as engine fuel, **FAO Forestry paper-72.** www.fao.org/DOCREP/T0512E/Contents

Gottsching, L. and H. Pakarinen, eds. 2000. **Recycled Fiber and Deinking.** Gummerus Printing, Jyvaskyla, Finland.

Grob, B., C. Eder, P. Grziwa, J. Horst and K. Kimmerle. 2008. Energy recovery from sewage sludge by means of fluidized bed gasification. **Waste Management** 28: 1819-1826.

Manya, J.J., J.L. Sanchez, J. Abrego, A. Gonzalo and J. Arauzo. 2006. Influence of gas residence time and air ratio on the air gasification of dried sewage sludge in a bubbling fluidized bed. **Fuel** 85: 2027-2033.

Mckinney, R. W. J. 1995. **Technology of paper recycling**. Blackie Academiic and Professional, Glasgow, UK.

Midilli, A., M. Dogru, C.R. Howarth, M.J. Ling and T. Ayhan. 2000. Combustible gas production from sewage sludge with a downdraft gasifier. **Energy Conversion and Management** 42: 157-172.

Pertersen, I. and J. Werther. 2005. Experimental investigation and modeling of gasification of sewage sludge in the circulating fluidized bed. **Chemical Engineering and Processing** 44: 717-736.

Rhyner, C.R., L.J. Schwartz, R.B. Wenger and M.G. Kohrell. 1995. **Waste Management and Resource Recovery.** Lewis Publishers, USA.

United Nations Environment Programme Industry and Environment. 1996**. Cleaner production at pulp and paper mills : a guidance manual.** United Nations Environment Programme Industry and Environment, Paris, France.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

วิธีการวิเคราะห์คุณสมบัติด้านเชื้อเพลิงของกากตะกอนและขยะจากโรงงานตัวอย่าง

ภาคผนวก ก

วิธีวิเคราะห์คุณสมบัติด้านเชื้อเพลิงของกากตะกอนและขยะจากโรงงานตัวอย่าง

ในการวิเคราะห์คุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของกากตะกอนและขยะจากโรงงานตัวอย่างจะทำการวิเคราะห์ตามวิธีการวิเคราะห์คุณสมบัติของถ่านหิน โดยมีวิธีการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

การวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis)

การวิเคราะห์คุณสมบัติของกากตะกอนและขยะแบบประมาณ นำมาวิเคราะห์หาปริมาณความชื้น เถ้า สารระเหย และคาร์บอนคงตัว โดยมีวิธีการวิเคราะห์ดังนี้

การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น (moisture analysis) :ASTM D 3173

- อบถาดอะลูมิเนียมในเตาอบที่อุณหภูมิ 105-110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที นำไปไว้ในเดสสิเคเตอร์จนเย็น นำไปชั่งแล้วบันทึกข้อมูล
- ใส่สารตัวอย่างน้ำหนักประมาณ 1 กรัม ลงในถาดอลูมิเนียมชั่งน้ำหนักที่แน่นอนแล้วบันทึกข้อมูล
- นำถาดอลูมิเนียมพร้อมสารตัวอย่างไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 105-110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง (หรือจนกระทั่งน้ำหนักของสารตัวอย่างคงที่)
- นำถาดอลูมิเนียมออกจากตู้อบ นำไปไว้ในเดสสิเคเตอร์จนเย็น นำไปชั่งน้ำหนักแล้วบันทึกข้อมูล

สูตรที่ใช้คำนวณ

$M = (W_1-W_2)/W\times100$

M = ปริมาณความชื้นในสารตัวอย่าง(%)

W_1 = น้ำหนักถาดอลูมิเนียม พร้อมสารตัวอย่างก่อนอบ (กรัม)

W_2 = น้ำหนักถาดอลูมิเนียม พร้อมสารตัวอย่างหลังอบ (กรัม)

W = น้ำหนักของสารตัวอย่าง (กรัม)

การวิเคราะห์ปริมาณเถ้า (Ash) :ASTM D 3174

- เผาครูซิเบิ้ลพร้อมฝาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 700-750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำออกจากเตาเผาแล้วนำไปไว้ในเดสสิเคเตอร์จนเย็น นำไปชั่งเพื่อบันทึกน้ำหนักครูซิเบิ้ลพร้อมฝาปิด
- เผาครูซิเบิ้ลที่บรรจุสารตัวอย่างเพื่อไล่ควันด้วยตะเกียงบุนเซน โดยใช้ไฟอ่อนๆ ขณะเผาให้เปิดฝาทิ้งไว้จนหมดควัน แล้วจึงยกครูซิเบิ้ลออกจากไฟแล้วปิดฝา
- นำครูซิเบิ้ลเข้าเตาเผาโดยเปิดฝาออก ทำการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วเพิ่มอุณหภูมิเป็น 750 องศาเซลเซียสหรือเผาจนได้น้ำหนักคงที่
- นำครูซิเบิ้ลออกจากเตาเผาทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องแล้วจึงนำไปไว้ในเดสสิเคเตอร์ต่ออีกระยะหนึ่ง แล้วนำไปชั่งเพื่อบันทึกน้ำหนักของครูซิเบิ้ลพร้อมฝาปิดและสารตัวอย่าง

สูตรที่ใช้คำนวณ

$A = (W_3-W_4)/W\times100$

A = ปริมาณเถ้า(%)

W_3 = น้ำหนักครูซิเบิ้ลพร้อมฝาปิด และสารตัวอย่างก่อนการเผา (กรัม)

W_4 = น้ำหนักครูซิเบิ้ลพร้อมฝาปิด และสารตัวอย่างหลังการเผา (กรัม)

W = น้ำหนักของสารตัวอย่าง (กรัม)

การวิเคราะห์ปริมาณสารระเหย (Volatile analysis) :ASTM D 3175

- เผาครูซิเบิ้ลพร้อมฝาปิดในเตาเผาที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที นำออกจากเตาเผาแล้วนำไปไว้ในเดสสิเคเตอร์จนเย็น นำไปชั่งเพื่อบันทึกน้ำหนักครูซิเบิ้ลพร้อมฝาปิด
- ใส่สารตัวอย่างน้ำหนักประมาณ 1 กรัม ลงในครูซิเบิ้ล นำไปชั่งน้ำหนักที่แน่นอนแล้วบันทึกข้อมูล
- ปิดฝาครูซิเบิ้ลให้สนิท แล้วนำครูซิเบิ้ลไปเผาในเตาเผาโดยให้ความร้อนเป็น 2 ช่วง โดยช่วงแรกเริ่มต้นให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3

นาทีจากนั้นจึงให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 นาที

- นำครูซิเบิ้ลออกจากเตาเผาทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องแล้วจึงนำไปไว้ในเดสสิเคเตอร์ต่ออีกระยะหนึ่ง แล้วนำไปชั่งเพื่อบันทึกน้ำหนักของครูซิเบิ้ลพร้อมฝาปิดและสารตัวอย่าง

สูตรที่ใช้คำนวณ

$V = (W_a - W_b)/W \times 100 - M$

V = ปริมาณสารที่ระเหยได้ (%)

M = ปริมาณความชื้นในสารตัวอย่าง(%)

W_a = น้ำหนักครูซิเบิ้ลพร้อมฝาปิด และสารตัวอย่างก่อนการเผา (กรัม)

W_b = น้ำหนักครูซิเบิ้ลพร้อมฝาปิด และสารตัวอย่างหลังการเผา (กรัม)

W = น้ำหนักของสารตัวอย่าง (กรัม)

ปริมาณคาร์บอนคงตัว (fixed carbon) : ASTM D 3172

สามารถคำนวณได้จากการวิเคราะห์ปริมาณร้อยละความชื้นในสารตัวอย่าง ร้อยละสารระเหยในสารตัวอย่าง และร้อยละของเถ้า โดยใช้สูตรในการคำนวณคือ

ร้อยละของคาร์บอนคงตัว(%) = 100 – ร้อยละความชื้นในสารตัวอย่าง – ร้อยละสารระเหยในสารตัวอย่าง – ร้อยละของเถ้า

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis)

การวิเคราะห์คุณสมบัติของกากตะกอนและขยะแบบแยกธาตุ (ultimate analysis) เป็นการวิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ โดยมีวิธีวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

คาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน (ASTM D 5373)

วิเคราะห์ด้วยเครื่อง CHN analyzer ตาม ASTM D 5373 โดยการเผาถ่านหินในบรรยากาศ

ของออกซิเจน ซึ่งจะได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) แก๊สไนโตรเจนออกไซด์ (NO_2) และน้ำ โดยที่แก๊สไนโตรเจนออกไซด์จะถูกรีดิวส์เป็นแก๊สไนโตรเจน (N_2) จากนั้นปริมาณของแก๊สคารีบอนไดออกไซด์และไอน้ำจะถูกคำนวณเป็นปริมาณของคาร์บอนและไฮโดรเจน โดยมี IR (infrared) cells เป็น detector สำหรับแก๊สไนโตรเจนจะถูกตรวจสอบโดย TC (thermal conductivity) cell แล้วคำนวณเป็นปริมาตรไนโตรเจน

กำมะถัน (ASTM D 3177)

การหาปริมาณกำมะถันสามารถทำได้โดยวิธี ASTM D 3177 ซึ่งมี 2 แบบ คือ Eschka method โดยนำส่วนผสมของตัวอย่างที่ต้องการตรวจวัดและ Eschka's mixture ไปเผาให้หลอม ละลายแล้วนำไปต้มให้ละลาย กรอง นำสารที่ได้ไปตกตะกอนเป็น Barium sulphate กรองตะกอนที่ได้ เผา ชั่งน้ำหนักแล้วคำนวณเป็นร้อยละของกำมะถันที่ได้ อีกวิธีได้แก่ วิธี Bomb washing method ทำโดยนำสารละลายที่ได้จาก oxygen bomb calorimeter ไปตกตะกอนเป็น Barium sulphate เช่นเดียวกับวิธีแรก ในการวิเคราะห์กำมะถันของตัวอย่างจากโรงงานตัวอย่างใช้วิธีที่สองในการวิเคราะห์

ออกซิเจน

ปริมาณของออกซิเจนคำนวณได้จากการนำค่าคาร์บอน ไฮโดรเจน กำมะถัน ไนโตรเจน และเถ้าลบออกจาก 100 จะได้ปริมาณร้อยละของออกซิเจน

ค่าความร้อนสูง (gross calorific value) : ASTM D 1989

การหาค่าความร้อนตามวิธี ASTM D 1989 เป็นการหาค่าปริมาณความร้อนของตัวอย่าง โดยการเผาไหม้ตัวอย่างปริมาณ 1 หน่วยที่ปริมาตรคงที่ใน oxygen bomb calorimeter ภายใต้ control condition (Isoperibol calorimeter) ซึ่งคำนวณพลังงานที่ได้เป็นกิโลแคลอรีต่อกิโลกรัมหรือจูลต่อกรัมได้

ภาคผนวก ข

ข้อมูลผลการทดลอง

ภาคผนวก ข

ข้อมูลผลการทดลอง

ค่าการวิเคราะห์องค์ประกอบแก๊สเชื้อเพลิง

ตารางผนวกที่ ข1 ค่าการวิเคราะห์องค์ประกอบแก๊สเชื้อเพลิงเมื่อใช้อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง 100 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

ตัวอย่างที่	องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง (%)				
	CO	H_2	CH_4	Air (N_2+O_2)	CO_2
1	Not detected	8.79	0.62	65.7	20.86
2	Not detected	10.55	1.79	65.84	16.85
3	Not detected	9.77	1.48	65.07	17.68
4	Not detected	8.17	1.96	67.42	14.24
เฉลี่ย	Not detected	9.32	1.46	66.01	17.4

ตารางผนวกที่ ข2 ค่าการวิเคราะห์องค์ประกอบแก๊สเชื้อเพลิงเมื่อใช้อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง 120 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

ตัวอย่างที่	องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง (%)				
	CO	H_2	CH_4	Air (N_2+O_2)	CO_2
1	Not detected	10.03	1.09	65.28	18.1
2	Not detected	11.35	1.73	62.54	18.87
3	Not detected	12.44	2.29	62.01	17.71
เฉลี่ย	Not detected	11.27	1.7	63.27	18.23

ตารางผนวกที่ ข3 ค่าการวิเคราะห์องค์ประกอบแก๊สเชื้อเพลิงเมื่อใช้อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง 140 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

ตัวอย่างที่	องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง (%)				
	CO	H_2	CH_4	Air (N_2+O_2)	CO_2
1	9.79	10.1	1.12	53.49	21.57
2	10.9	12.19	1.28	52.81	19.12
3	9.52	13	2.53	52.75	18.2
เฉลี่ย	10.07	11.76	1.63	53.02	19.63

ตารางผนวกที่ ข4 ค่าการวิเคราะห์องค์ประกอบแก๊สเชื้อเพลิงเมื่อใช้อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง 180 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

ตัวอย่างที่	องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง (%)				
	CO	H_2	CH_4	Air (N_2+O_2)	CO_2
1	Not detected	9.11	0.77	64.14	21.33
2	Not detected	10.44	1.09	65.39	19.46
3	Not detected	10.92	1.43	64.64	19.27
เฉลี่ย	Not detected	10.16	1.1	64.72	20.02

ตารางผนวกที่ ข5 ตัวอย่างการบันทึกข้อมูลแบบต่อเนื่องด้วยระบบ online measuring system (อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงที่ 100 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง)

Time	Gas Flow (m^3/h)	Clean Gas	Reactor out Gas	Reactor Inside 1	Reactor Inside 2	Reactor Inside 3	Reactor Inside 4	Reactor Inside 5	Reactor Inside 6
17:25:03	104.7	29.9	537.5	35.1	68.0	670.7	841.7	798.3	667.5
17:25:33	99.5	29.9	535.9	35.0	66.9	670.1	842.0	797.7	667.0
17:26:03	104.0	29.8	535.8	34.9	67.5	669.7	842.1	797.5	667.1
17:26:33	103.5	29.8	535.2	34.9	67.5	670.0	842.6	797.4	667.0
17:27:03	103.7	29.9	534.7	35.0	67.4	670.7	842.8	797.2	667.3
17:27:33	102.5	29.7	534.5	34.8	68.2	670.9	843.4	797.0	667.5
17:28:03	102.7	29.8	533.7	34.9	67.3	670.8	844.3	796.7	667.0
17:28:33	103.5	29.8	533.2	35.1	68.1	670.8	844.8	796.7	666.2
17:29:03	103.2	29.8	533.2	35.0	67.5	670.7	845.2	796.5	665.3
17:29:33	103.7	29.8	532.7	34.9	67.7	671.1	845.5	796.4	665.1
17:30:03	103.7	29.7	532.7	35.0	68.3	671.2	846.0	796.3	664.5
17:30:33	103.5	29.6	532.2	35.0	67.4	673.3	846.0	797.4	665.0
17:31:03	103.0	29.7	534.0	34.9	65.0	684.0	842.4	800.5	664.1
17:31:33	103.0	29.8	534.3	34.9	63.1	685.3	835.9	801.0	663.9
17:32:03	102.7	29.7	535.3	35.3	62.8	690.8	831.5	801.0	663.7
17:32:33	102.7	29.7	535.8	35.3	62.6	695.7	828.4	800.1	662.6
17:33:03	103.0	29.6	536.1	35.2	62.0	700.1	825.7	799.4	661.6
17:33:33	102.5	29.6	536.2	35.4	62.0	705.2	823.1	798.6	660.8
17:34:03	101.7	29.6	536.0	35.4	62.7	710.6	821.1	797.9	659.9
17:34:33	102.0	29.7	535.8	35.2	61.7	715.0	819.6	796.8	659.2

ภาคผนวก ค

การวิเคราะห์หม้อไอน้ำ

ภาคผนวก ค

การวิเคราะห์หม้อไอน้ำ

การคำนวณเพื่อวิเคราะห์สมดุลพลังงานของหม้อไอน้ำของโรงงานตัวอย่างได้ทำการคำนวณตามวิธีการคำนวณของวรวุฒิ (2552) โดยการคำนวณมีดังต่อไปนี้

การวิเคราะห์หม้อไอน้ำ

1. ปริมาณอากาศโดยทฤษฎี (A0, ลูกบาศก์เมตร (ลบ.ม.)/กิโลกรัม (กก.) เชื้อเพลิง)

$$A_0 = 8.89C + 26.7(H - O/8) + 3.33S$$

เมื่อ C คือ ส่วนประกอบของคาร์บอนในน้ำมันเตาโดยน้ำหนัก = 0.8560
เมื่อ H คือ ส่วนประกอบของไฮโดรเจนในน้ำมันเตาโดยน้ำหนัก = 0.1090
เมื่อ O คือ ส่วนประกอบของออกซิเจนในน้ำมันเตาโดยน้ำหนัก = 0.0129
เมื่อ S คือ ส่วนประกอบของซัลเฟอร์ในน้ำมันเตาโดยน้ำหนัก = 0.0196

$$A_0 = 8.89(0.8560) + 26.7(0.1090 - 0.0129/8) + 3.33(0.0196)$$
$$= 10.54 \text{ ลบ.ม./กก. เชื้อเพลิง}$$

2. ปริมาณแก๊สไอเสียแห้งโดยทฤษฎี (G'_0, ลบ.ม./กก. เชื้อเพลิง)

$$G_0 = (1 - 0.21)A_0 + 1.678C + 11.2H + 0.7S + 1.244W + 0.8N$$
$$G'_0 = G_0 - (11.2H + 1.244W)$$

เมื่อ W คือ ส่วนประกอบของน้ำในน้ำมันเตาโดยน้ำหนัก
N คือ ส่วนประกอบของไนโตรเจนในน้ำมันเตาโดยน้ำหนัก = 0.0025

ดังนั้น

$G'_0 = (1 - 0.21)(10.54) + 1.678(0.8560) + 0.7(0.0196) + 0.8(0.0025)$

$= 9.94$ ลบ.ม./กก. เชื้อเพลิง

3. อัตราส่วนอากาศ (M)

$M = 21(21 - \text{ร้อยละออกซิเจนในไอเสีย})$

$= 21(21\text{-}1.65)$

$= 1.09$

4. ปริมาณอากาศที่ใช้จริง (A, ลบ.ม./กก. เชื้อเพลิง)

$A = M \times A_0$

$= 1.09 \times 10.54$

$= 11.44$ ลบ.ม./กก. เชื้อเพลิง

5. ปริมาณแก๊สไอเสียแห้งที่ได้จริง (G', ลบ.ม./กก. เชื้อเพลิง)

$G' = G'_0 + (M - 1)A_0$

$= 9.94 + (1.09 - 1)10.54$

$= 10.58$ ลบ.ม./กก. เชื้อเพลิง

6. ปริมาณอากาศส่วนเกิน (m_{ex}, ลบ.ม./กก. เชื้อเพลิง)

$m_{ex} = (M - 1)A_0$

$= (1.09 - 1)10.54$

$= 0.95$ ลบ.ม./กก. เชื้อเพลิง

7. ร้อยละอากาศส่วนเกิน

$$\text{ร้อยละอากาศส่วนเกิน} = \frac{\text{ปริมาณอากาศที่ใช้จริง} - \text{ปริมาณอากาศตามทฤษฎี}}{\text{ปริมาณอากาศตามทฤษฎี}} \times 100$$

$$\text{ร้อยละอากาศส่วนเกิน} = \frac{11.44 - 10.54}{10.54} \times 100$$

ร้อยละอากาศส่วนเกิน = 8.53

การคำนวณข้างต้นเป็นการคำนวณเพื่อนำผลที่ได้มาใช้ในการคำนวณการวิเคราะห์สมดุลพลังงานหม้อไอน้ำของโรงงานตัวอย่างต่อไป

ดุลพลังงานหม้อไอน้ำ

พลังงานที่หม้อไอน้ำได้รับ

พลังงานจากการสันดาปเชื้อเพลิง = ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง x ปริมาณเชื้อเพลิง
= 43,737.68 x 1,043,462.40
= 45,638,624,543.23 กิโลจูลต่อเดือน

พลังงานที่ออกจากหม้อไอน้ำ

1. พลังงานที่ไอน้ำได้รับ

พลังงานที่ไอน้ำได้รับ = ปริมาณไอน้ำที่ผลิตได้ x $(h_s - h_0)$

เมื่อ h_s คือ พลังงานความร้อนแฝงของการเป็นไอของน้ำ = 2,766.90 กิโลจูล/กิโลกรัม
เมื่อ h_0 คือ พลังงานน้ำเข้าหม้อไอน้ำ = 439.11 กิโลจูล/กิโลกรัม

พลังงานที่ไอน้ำได้รับ = 18,690.33 x 1,000 x (2,766.50 – 439.11)
= 43,499,687,138.70 กิโลจูลต่อเดือน

2. พลังงานที่สูญเสียไปกับน้ำระบาย

พลังงานที่สูญเสียไปกับน้ำระบาย = ปริมาณน้ำระบายที่เกิดขึ้น x (h_d x h_0)

เมื่อ h_d คือ พลังงานน้ำอิ่มตัว ณ ความดันใช้งาน = 709.70 กิโลจูลต่อกิโลกรัม
เมื่อ h_0 คือ พลังงานน้ำเข้าหม้อไอน้ำ = 439.11 กิโลจูลต่อกิโลกรัม

พลังงานที่สูญเสียไปกับน้ำระบาย = 809.23 x 1,000 x (709.70 -439.11)
= 218,969,546.70 กิโลจูลต่อเดือน

3. พลังงานที่สูญเสียไปกับแก๊สไอเสียแห้ง

พลังงานที่สูญเสียไปกับแก๊สไอเสียแห้ง = มวลแก๊สไอเสียแห้ง x C_p x (T_{out} - T_{in})

เมื่อ Cp คือ ค่าความจุความร้อนของอากาศ = 1.035 กิโลจูล/กก. ^{o}C
Tout คือ อุณหภูมิแก๊สไอเสียที่ออกจากหม้อไอน้ำ = 260^{o}C
Tin คือ อุณหภูมิอากาศที่เข้าหม้อไอน้ำ = 105^{o}C
ความหนาแน่นของอากาศที่อุณหภูมิ 260^{o}C มีค่าเท่ากับ 0.6629 กก./ลบ.ม.

พลังงานที่สูญเสียไปกับแก๊สไอเสียแห้ง = (10.58 x 0.6629) x 1,043,462.40 x 1.035 x
(260 – 105)
= 1,203,034,065.55 กิโลจูลต่อเดือน

4. พลังงานที่สูญเสียไปกับอากาศส่วนเกิน

พลังงานที่สูญเสียไปกับอากาศส่วนเกิน = ปริมาณอากาศส่วนเกิน x C_p x (T_{out} - T_{in})

= (0.95 x 0.6629) x 1,043,462.40 x 1.035 x
(260-105)
= 189,376,817.93 กิโลจูลต่อเดือน

5. พลังงานสูญเสียอื่นๆ

พลังงานสูญเสียอื่นๆ = พลังงานที่หม้อไอน้ำได้รับ – (พลังงานที่ไอน้ำได้รับ +
พลังงานที่สูญเสียไปกับน้ำระบาย +
พลังงานที่สูญเสียไปกับแก๊สไอเสียแห้ง +
พลังงานที่สูญเสียไปกับอากาศส่วนเกิน)

พลังงานที่สูญเสียอื่นๆ = 527,556,975.35 กิโลจูลต่อเดือน

จากผลการคำนวณ สามารถสรุปผลการวิเคราะห์พลังงานในหม้อไอน้ำได้ดังตารางผนวกที่ ค1

ตารางผนวกที่ ค1 ปริมาณพลังงานและสัดส่วนในหม้อไอน้ำต่อเดือนของโรงงานตัวอย่าง

รายการ	**ปริมาณพลังงาน (กิโลจูล)**	**ร้อยละ**
พลังงานเข้าหม้อไอน้ำ		
1. พลังงานจากการสันดาปเชื้อเพลิง	43,638,624,543.23	100
พลังงานออกจากหม้อไอน้ำ		
1. พลังงานที่ไอน้ำได้รับ	43,499,687,138.70	95.31
2. พลังงานที่สูญเสียไปกับน้ำระบาย	218,969,545.70	0.48
3. พลังงานที่สูญเสียไปกับแก๊สไอเสียแห้ง	1,203,034,065.55	2.64
4. พลังงานที่สูญเสียไปกับอากาศส่วนเกิน	189,376,817.93	0.41
5. พลังงานที่สูญเสียอื่นๆ	527,556,975.35	1.16

ภาคผนวก ง

การคำนวณค่าโสหุ้ยการผลิต

ภาคผนวก ง

การคำนวณค่าโสหุ้ยการผลิต

ค่าโสหุ้ยการผลิต คือ ค่าดูแลบำรุงรักษา (ประเมินโดยศูนย์ความเป็นเลิศทางชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีและกำหนดให้โรงงานตัวอย่างใน 1 เดือนมีชั่วโมงการทำงานเท่ากับ 480 ชั่วโมง) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ค่าจ้างเหมาซ่อมบำรุงและควบคุมคุณภาพ 5,000 บาทต่อเดือน

2. ค่าไฟฟ้า 25,920 บาทต่อเดือน
   (เดินระบบ 480 ชั่วโมง x ภาระไฟฟ้าที่ใช้ 18 kW x อัตราค่าไฟฟ้า 3 บาท/kWh)

รวมต้องจ่ายค่าโสหุ้ยการผลิตเท่ากับ 30,920 บาทต่อการเดินระบบ 480 ชั่วโมงต่อเดือน

ภาคผนวก จ

ทฤษฎีการประเมินความคุ้มทุนในการลงทุน

ภาคผนวก จ

ทฤษฎีการประเมินความคุ้มทุนในการลงทุน

ในการประเมินความเหมาะสมในการลงทุนโครงการจะทำการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์เพื่อประเมินว่าโครงการนั้นๆ มีศักยภาพและความน่าสนใจที่จะลงทุนเพียงใด วิธีวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ที่นิยมใช้ทั่วไป ได้แก่ (ปาริฉัตร, 2453, เริงรัก, 2543)

1. ระยะเวลาคืนทุน (pay back period)

ระยะเวลาคืนทุน คือ ระยะเวลาที่กระแสเงินสดรับสุทธิสามารถชดชเยกระแสเงินสดจ่ายสุทธิตอนเริ่มโครงการได้พอดี ระยะเวลาคืนทุนสามารถบ่งบอกได้ว่าจะต้องใช้เวลานานเท่าใดจึงจะคืนทุนจากการลงทุนในตอนแรกเริ่ม ถ้าระยะเวลาคืนทุนสั้นแสดงว่าโครงการนั้นมีความน่าสนใจในการลงทุน ข้อดีของระยะเวลาคืนทุนคือสามารถคำนวณได้ง่าย และบ่งบอกถึงความเสี่ยงของโครงการได้ในเบื้องต้น อย่างไรก็ตาม ระยะเวลาคืนทุนมีข้อเสียคือ ไม่คำนึงถึงมูลค่าของเงินตามเวลา ซึ่งมูลค่าของเงินในอนาคตอาจน้อยกว่ามูลค่าของเงินในปัจจุบัน อีกทั้งยังไม่คำนึงถึงผลประโยชน์หลังจากคืนทุนแล้ว ซึ่งโครงการบางโครงการอาจจะคืนทุนได้ช้าแต่มีผลประโยชน์หลังจากที่คืนทุนแล้วมากกว่า ระยะเวลาคืนทุนสามารถคำนวณได้จากสูตร

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน} = \frac{\text{เงินลงทุนในการดำเนินการโครงการ}}{\text{เงินรายได้สุทธิจากการดำเนินการโครงการ}}$$

2. มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (net present value, NPV)

มูลค่าปัจจุบันสุทธิ คือ ผลต่างของมูลค่าเงินได้สุทธิจากการดำเนินโครงการในแต่ละปีตลอดอายุโครงการ กับมูลค่าปัจจุบันของเงินที่จ่ายออกไป การคำนวณหามูลค่าปัจจุบันสุทธิจะต้องทราบข้อมูลดังนี้

2.1 กระแสเงินสดจ่ายลงทุนสุทธิ

2.2 กระแสเงินสดรับสุทธิตลอดอายุโครงการ

2.3 ระยะเวลาของโครงการ

ในการใช้มูลค่าปัจจุบันสุทธิในการประเมินโครงการ จะพิจารณาว่าค่าNPV ที่สามารถคำนวณได้มีค่าเป็นบวกหรือลบ หากค่า NPV มีค่าเป็นบวกแสดงว่าโครงการดังกล่าวสมควรที่จะลงทุน หากค่า NPV เป็นลบแสดงว่าโครงการนั้นไม่สมควรที่จะลงทุน ในกรณีที่ค่า NPV เท่ากับ 0 หมายความถึงโครงการสามารถหาเงินมาจ่ายผลตอบแทนให้กับผู้ลงทุนได้เท่ากับความคาดหวังและยังสามารถชำระคืนเงินลงทุนให้แก่ผู้ลงทุนทั้งหมดได้พอดี ค่า NPV สามารถคำนวณได้จากสูตร

มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) = มูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดรับ – เงินลงทุนเริ่มแรก

โดย มูลค่าปัจจุบันกระแสเงินสดรับ = PMT x PVIFA (n,i)

เมื่อ PMT คือ เงินรายได้สุทธิต่อปีจากการดำเนินการ

PVIFA (n,i) คือ มูลค่าปัจจุบันของเงินรายงวดที่เท่ากันกับจำนวน 1 บาท อัตราผลตอบแทนที่ต้องการร้อยละ i ระยะเวลาตลอดโครงการ n ปี

3. อัตราผลตอบแทนจากโครงการ (internal rate of return, IRR)

อัตราผลตอบแทนจากโครงการ หมายถึง อัตราผลตอบแทนที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันของเงินสดรับสุทธิตลอดอายุโครงการมีค่าเท่ากับเงินสดจ่ายสุทธิลงทุนเริ่มแรก ในการพิจารณาการลงทุนโดยใช้ค่า IRR ถ้าอัตราผลตอบแทนจากโครงการ (IRR) มีค่ามากกว่าอัตราผลตอบแทนที่ต้องการ (r) แสดงว่าโครงการนั้นสมควรที่จะลงทุน นั่นคือ ตอบรับโครงการลงทุนเมื่อIRR มากกว่า r โดยทั่วไปค่า r ที่ใช้ในการพิจารณาการลงทุนจะเท่ากับอัตราผลตอบแทนที่ต้องการที่ใช้ในการคำนวณค่า NPV โดยค่า IRR สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$\text{เงินลงทุนในการดำเนินตามข้อเสนอ} = \sum_{t=1}^{n} \frac{\text{เงินรายได้สุทธิในปีที่ t}}{(1+IRR)^{t}}$$

ภาคผนวก ฉ

ผลของการสกัด TiO_2 จากกากตะกอนน้ำเสียอุตสาหกรรมที่ตกตะกอนโดย $TiCl_4$

ภาคผนวก ฉ

ผลของการสกัด TiO_2 จากกากตะกอนน้ำเสียอุตสาหกรรมที่ตกตะกอนโดย $TiCl_4$

ขั้นตอนการตกตะกอน

1. นำน้ำเสียอุตสาหกรรมมาใส่ลงในบีกเกอร์ให้ได้ขนาด 1 ลิตร
2. เติม 1M H_2SO_4 8 ml และ $TiCl_4$ 4 ml
3. กวนเร็ว (100rpm) เป็นเวลา 1 นาที หลังจากนั้นกวนช้า (30rpm) เป็นเวลา 20 นาที
4. ทำการปรับ pH โดยใช้สารละลาย 1M NH_4OH จน pH เป็น 7.2
5. ทำซ้ำดังข้อที่ 3 หลังจากนั้นทิ้งไว้ให้ตกตะกอนเป็นเวลา 30 นาที
6. ดึงส่วนที่เป็นน้ำใสออก หลังจากนั้นนำไปอบให้แห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง
7. นำกากตะกอนที่แห้งสนิทแล้วมาบดให้เป็นผงละเอียด

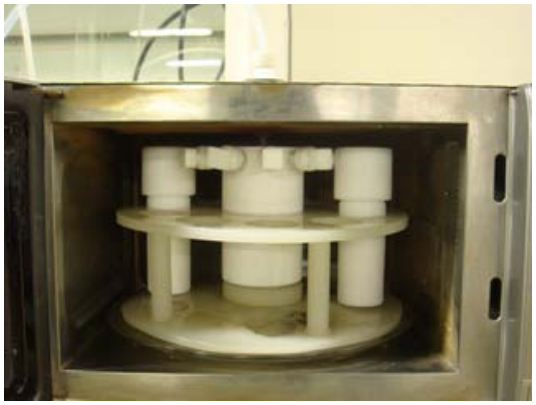
การทดลองเปรียบเทียบคุณสมบัติของ TiO_2 ที่ได้จากการสกัดด้วยความร้อนด้วยเทคนิคที่แตกต่างกัน โดยในการทดลองนี้จำทำการทดลองสกัดด้วย3 วิธี ได้แก่

1. ใช้ไมโครเวฟ
2. tube heating furnace (ใช้อากาศเป็นตัวกลาง)
3. tube heating furnace (ใช้ไนโตรเจนเป็นตัวกลาง)

การทดสอบการให้ความร้อนโดยวิธีไมโครเวฟ

1. ทดสอบที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ที่เวลา 0, 1, 2 และ 3 ชั่วโมง
2. นำไปวิเคราะห์ด้วย high temperature XRD ที่อุณหภูมิ 30, 400, 500, 600, 700 และ 800 องศาเซลเซียส

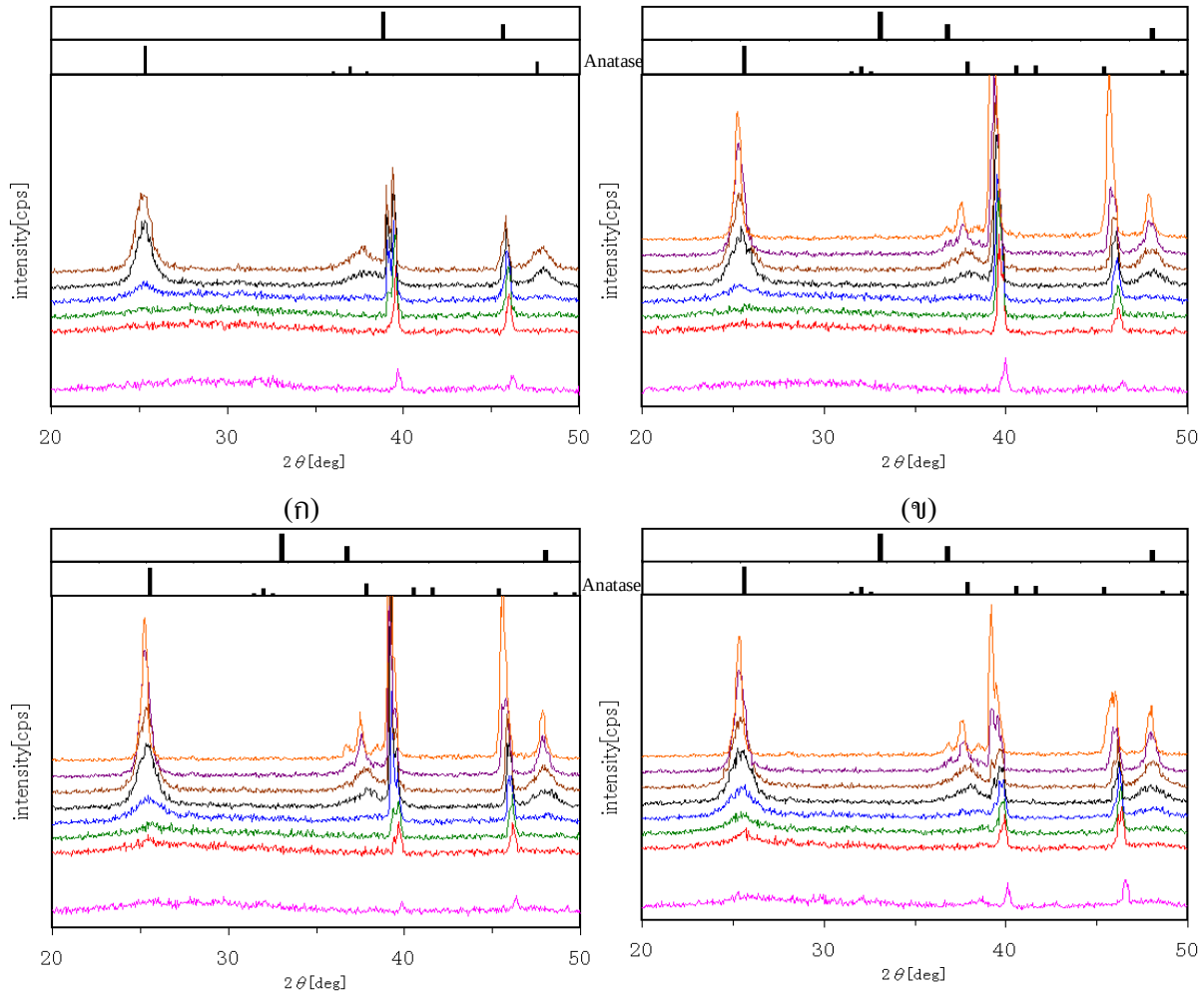
(ก)



(ข)

ภาพผนวกที่ ฉ1 (ก) ภาชนะบรรจุอะคริลิกที่ใช้ร่วมกับเตาไมโครเวฟ (ข) เตาไมโครเวฟ

จากภาพผนวกที่ ฉ2 จะเห็นได้ว่าการให้ความร้อนแก่กากตะกอนน้ำเสียด้วยวิธีไมโครเวฟก่อนนำไปวิเคราะห์ด้วยวิธี high temperature XRD ที่ระยะเวลาต่างๆ ไม่มีผลทำให้การเกิดผลึก TiO_2 (anatase) เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเทียบกับกากตะกอนน้ำเสียที่ไม่ได้ผ่านการให้ความร้อนโดยวิธีไมโครเวฟ (ภาพผนวกที่ ฉ2 (ก))



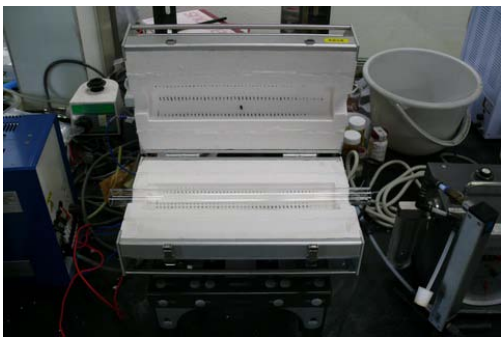
ภาพผนวกที่ ฉ2 ผลการวิเคราะห์ด้วย High Temperature X-ray Diffraction ของกากตะกอนน้ำเสียที่ตกตะกอนด้วย $TiCl_4$ หลังจากผ่านการให้ความร้อนด้วยวิธีไมโครเวฟที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสที่เวลา (ก) 0 ชั่วโมง (ข) 1 ชั่วโมง (ค) 2 ชั่วโมง และ (ง) 3 ชั่วโมง

หมายเหตุ เส้น intensity นับจากด้านล่างไปด้านบน คือ อุณหภูมิ 30, 400, 500, 600, 700, 800, 900 และ 1,000 องศาเซลเซียสตามลำดับ

การทดสอบการให้ความร้อนโดยวิธี tube heating furnace (ใช้อากาศเป็นตัวกลาง)

1. นำกากตะกอนปริมาณ 0.4 กรัม ใส่ลงในภาชนะอะลูมิน่า
2. นำภาชนะบรรจุพร้อมตัวอย่างใส่ลงไปในหลอดแก้วใน tube furnace โดยจัดให้อยู่ในบริเวณกึ่งกลาง
3. เปิดปลายทั้ง 2 ด้านของหลอดแก้วเพื่อให้อากาศสามารถไฟลผ่านได้
4. ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 200, 400, 600, 800 และ 1000 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
5. ควบคุมอัตราการให้ความร้อนที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที
6. หลังจากให้ความร้อนเสร็จนำภาชนะบรรจุพร้อมตัวอย่างออกมาใส่ในเดซิเคเตอร์จนเย็นแล้วจึงนำไปชั่งน้ำหนัก
7. นำไปวิเคราะห์หาผลึก anatase โดยเครื่อง X-ray Diffractrometer

(ก)



(ข)

ภาพผนวกที่ ฉ3 (ก) ภาชนะอะลูมิน่า (ข) Tube Furnace

ตารางผนวกที่ ฉ1 น้ำหนักตัวอย่างก่อนและหลังผ่านการให้ความร้อนโดยวิธี tube heating furnace (ใช้อากาศเป็นตัวกลาง)

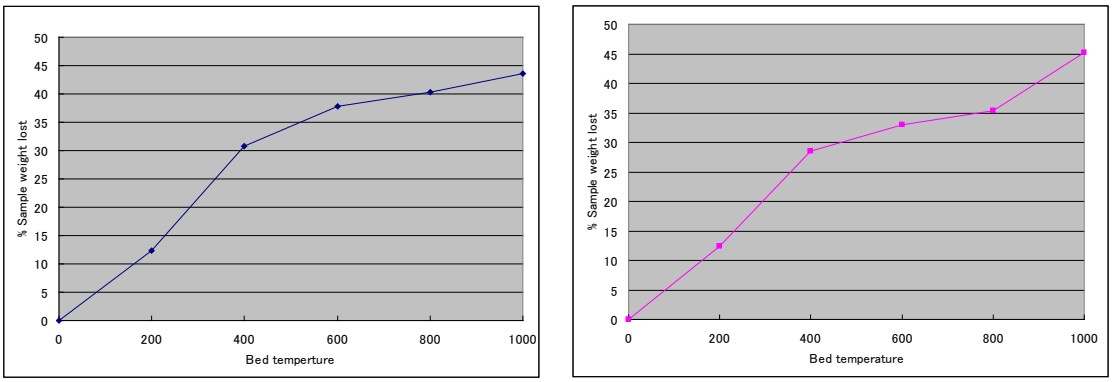
Sample	Temp (degree celcius)	Boat weight	Sample weight (before heating)	Boat+sample weight (after heating)	Sample weight (after heating)	Weight lost	%Lost
1	200	18.1472	0.4023	18.5001	0.3529	0.0494	12.2794
2	400	18.1468	0.4009	18.4243	0.2775	0.1234	30.7801
3	600	18.1471	0.402	18.397	0.2499	0.1521	37.8358
4	800	18.1465	0.4011	18.386	0.2395	0.1616	40.2892
5	1000	18.1474	0.4011	18.3765	0.2291	0.172	42.882

การทดสอบการให้ความร้อนโดยวิธี tube heating furnace (ใช้ไนโตรเจนเป็นตัวกลาง)

ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างในการทดสอบนี้จะทำเหมือนกับการทดสอบการให้ความร้อนโดยวิธี tube heating furnace (ใช้อากาศเป็นตัวกลาง) ยกเว้นปลายด้านหนึ่งของหลอดแก้วจะปิดด้วยจุกค็อกซึ่งมีท่อส่งแก๊สไนโตรเจนอยู่ โดยจะใช้อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที

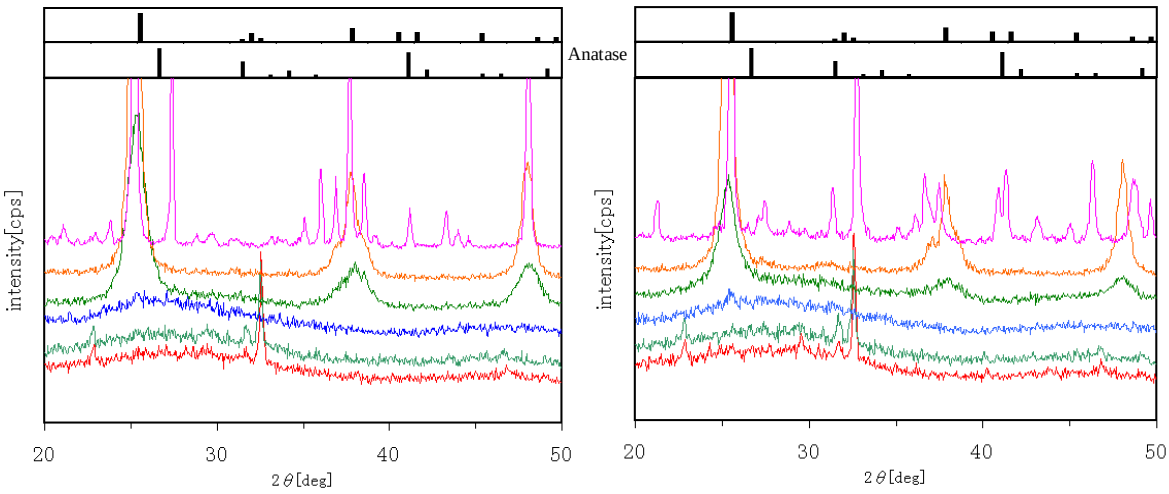
ตารางผนวกที่ ฉ2 น้ำหนักตัวอย่างก่อนและหลังผ่านการให้ความร้อนโดยวิธี tube heating furnace (ใช้ไนโตรเจนเป็นตัวกลาง)

Sample	Temp (degree celcius)	Boat weight	Sample weight (before heating)	Boat+sample weight (after heating)	Sample weight (after heating)	Weight lost	%Lost
1	200	18.1471	0.4037	18.5008	0.3537	0.05	12.3854
2	400	18.1469	0.4027	18.4349	0.288	0.1147	28.4827
3	600	18.1479	0.4011	18.4166	0.2687	0.1324	33.0092
4	800	18.1473	0.4013	18.4068	0.2595	0.1418	35.3351
5	1000	18.1470	0.4004	18.3666	0.2196	0.1808	45.1548



(ก) (ข)

ภาพผนวกที่ ฉ4 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่หายไปของตัวอย่างกับอุณหภูมิของ Tube Furnace (ก) เมื่อใช้อากาศเป็นตัวกลาง (ข) เมื่อใช้ไนโตรเจนเป็นตัวกลาง



(ก) (ข)

ภาพผนวกที่ ฉ5 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี X-ray Diffraction ของกากตะกอนน้ำเสียที่ผ่านการให้ความร้อนโดยวิธี Tube Heating Furnace (ก) ใช้อากาศเป็นตัวกลาง (ข) ใช้ไนโตรเจนเป็นตัวกลาง

หมายเหตุ เส้น intensity นับจากด้านล่างไปด้านบน คือ อุณหภูมิ 100, 200, 400, 600, 800 และ 1,000 องศาเซลเซียสตามลำดับ

จากภาพผนวกที่ ฉ4 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่หายไปของตัวอย่างกับอุณหภูมิของ tube furnace จะเห็นได้ว่าน้ำหนักของตัวอย่างเมื่อใช้อากาศเป็นตัวกลางจะมีลดลงมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเมื่อใช้ไนโตรเจนเป็นตัวกลางเนื่องจากแก๊สไนโตรเจนเป็นแก๊สเฉื่อยทำให้การเกิดปฏิกิริยาระหว่างตัวอย่างกับความร้อนเกิดขึ้นน้อยลง

จากภาพผนวกที่ ฉ5 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี X-ray Diffraction ของกากตะกอนน้ำเสียที่ผ่านการให้ความร้อนโดยวิธี tube heating furnace จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้อากาศเป็นตัวกลางจะทำให้สามารถก่อรูปผลึก anatase ได้มากกว่าเมื่อเทียบกับใช้ไนโตรเจน เนื่องจากถ้าใช้ไนโตรเจน Ti ในกากตะกอนจะสามารถทำปฏิกิริยาได้เฉพาะกับออกซิเจนที่มีในกากตะกอนเท่านั้น แต่ถ้าใช้อากาศในปฏิกิริยาจะสามารถดึงเอาออกซิเจนในอากาศมาใช้ร่วมได้ จึงทำให้มีโอกาสการเกิดผลึก anatase มากกว่า

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นายบุริมภัทร ปกรณ์ศิริ
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 8 พฤษภาคม 2528
สถานที่เกิด	เขตปทุมวัน จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วท.บ. วิทยาศาสตรบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม)
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	สำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย มหาบัณฑิต สกว. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สกว.-สสว.) ประจำปี 2551