



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (เทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

เทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม

วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง ของเสีพลังงาน (Waste-to-energy) ในอุตสาหกรรมกระดาษรีไซเคิล

Waste to energy for recycle paper industry

นามผู้วิจัย นางสาวสุรีย์พรรณ วรรณสว่าง

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ตุลวิทย์ สถาปนจารุ, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วีรชัย อาจหาญ, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์จักรกฤษณ์ มหัจฉริยวงศ์, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญจนา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

ของเสียสู่พลังงาน (Waste-to-Energy) ในอุตสาหกรรมกระดาษรีไซเคิล

Waste to Energy for Recycle Paper Industry

โดย

นางสาวสุรีย์พรรณ วรรณสว่าง

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2553

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สุริย์พรรณ วรรณสว่าง 2553: ของเสียสู่พลังงาน (Waste-to-Energy) ในอุตสาหกรรม
กระดาษรีไซเคิล ปรินซ์มหาวิทยาลัยมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีและการจัดการ
สิ่งแวดล้อม) สาขาวิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิทยาศาสตร์
สิ่งแวดล้อม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศุภวิทย์ สถาปนจารุ,
Ph.D. 86 หน้า

ของเสียจากอุตสาหกรรมกระดาษรีไซเคิล เช่น กากตะกอน หรือของเสียที่ถูกปฏิเสธจาก
กระบวนการผลิต (ขยะพลาสติก) มีศักยภาพในการนำมาผลิตพลังงาน จากการทดลองเผาเชื้อเพลิง
3 ชนิด คือกากตะกอน ขยะพลาสติก และ ขยะพลาสติกผสมกากสบู่ดำ ผ่านระบบแก๊สซิฟิเคชัน
แบบไหลขึ้น ที่อัตราการไหลของโปรคิวเซอร์แก๊ส 91.3, 100.8, 108.41 และ 135.8 ลูกบาศก์เมตร
ต่อชั่วโมง พบว่า ขยะพลาสติกและขยะพลาสติกผสมกากสบู่ดำมีอัตราไหลที่เหมาะสมที่สุดคือ
108.41 และ 91.30 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมงตามลำดับ โดยให้ CO , H_2 และ CH_4 ในการเผาขยะ
พลาสติกเป็นร้อยละ 11.66, 11.42 และ 1.81 ตามลำดับ ในการเผาขยะพลาสติกผสมกากสบู่ดำเป็น
ร้อยละ 15.77, 12.67 และ 2.35 ตามลำดับ โดยมีค่าความร้อนของแก๊สเป็น 3.76 และ 4.58 เมกกะจูล
ต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ในขณะที่กากตะกอนนั้นไม่เหมาะสมในการนำมาผลิตโปรคิวเซอร์แก๊สใน
ระบบแก๊สซิฟิเคชัน แต่สามารถนำมาเผาเพื่อเอาพลังงานความร้อนผ่านระบบเผาตรงได้ สำหรับ
การวิเคราะห์โลหะหนักในเถ้าจากการเผาเชื้อเพลิงทั้งขยะพลาสติกและขยะพลาสติกผสมกากสบู่
ดำ พบว่าเถ้าจากการเผาพลาสติกมีตะกั่วเกินมาตรฐาน ส่วนขยะพลาสติกผสมกากสบู่ดำพบ
แคดเมียมและเซเลเนียม เกินค่ามาตรฐานกำหนด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของขยะพลาสติกที่
นำมาเผา การศึกษาความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์จาก มูลค่าปัจจุบันสุทธิ, อัตราผลตอบแทน
และ ระยะเวลาคืนทุน พบว่าการเผาขยะพลาสติกผสมสบู่ดำ มีความเหมาะสมเชิงเศรษฐศาสตร์
มากกว่าการเผาขยะพลาสติกเพียงอย่างเดียว ซึ่งมีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ 102.5 ล้านบาท อัตรา
ผลตอบแทนร้อยละ 38 ระยะเวลาคืนทุน 2 เดือน 18 วัน

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Sureepun Wannasawang 2010: Waste to Energy for 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. 86 pages.

The waste from recycle paper industry, for example, waste water treatment sludges and rejected material waste from the product in line (plastic waste) could be potential in process of waste to energy. Three wastes, waste water treatment sludges, plastic waste and plastic waste mixed jathropa seed cake were gasified by a small-scale up-draft gasification system. Gas flow rates at 91.3, 100.8, 108.41 and 135.8 m³/hr were studied. The results indicated that suitable flow rates for plastic waste and plastic waste mixed jathropa seed cake were 108.41 and 91.30 m³/hr, respectively. Carbon monoxide, hydrogen and methane from plastic waste gasifying were 11.66%, 11.42% and 1.81%, respectively and plastic waste mixed jathropa's shell were 15.77%, 12.67% and 2.35%, respectively. Average high heating values of both fuels were 3.76 and 4.58 MJ/m³, respectively. Sludges were not suitable for gasification system but they can be used to produce heat energy by the direct combustion system. Concentrations of heavy metals analyzed from ash were below the national standard except for lead in plastic waste and cadmium and selenium in plastic waste mixed jathropa seed cake. It is depend on the raw materials of the fuel. Economical evaluation by net present value, internal rate of return and payback period in using plastic waste and plastic waste mixed jathropa seed cake for waste to energy production were analyzed. It found that plastic waste mixed jathropa seed cake was more suitable than plastic waste for energy. Net present value was 102.5 million baht, internal rate of return was 38 % and payback period was 2 month 18 days.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์ได้โดยการอุปการะและช่วยเหลือจากผู้มีพระคุณหลายท่าน ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ตุลวิทย์ สถาปนจารุ อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิรัชอาจหาญ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมที่ให้คำปรึกษาในงานวิจัยในครั้งนี้ และคำแนะนำด้านต่าง ๆ เกี่ยวกับงานวิจัย ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศด้านชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ในการทำการทดลองในงานวิจัย และนางสาวทิพย์สุภินทร์ หินชูข ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการทดลองที่ศูนย์ความเป็นเลิศด้านชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีในครั้งนี้

ขอขอบคุณนายวรวิทย์ ปุณฺณทริภักดิ์ และ นายบุริมภัทร ปกรณ์ศิริ ที่ช่วยเหลือทางด้านข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในงานวิจัยต่างรวมถึงคำแนะนำในวิทยานิพนธ์นี้

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย มหาวิทยาลัย สกว. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สกว.- สสว.) ประจำปี 2551 (สัญญาเลขที่ MRG-WI515S018) คณะผู้วิจัยจึงขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ คณาจารย์ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ตลอดจนเพื่อน ๆ พี่ ๆ ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อมที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจให้ผู้วิจัยมาโดยตลอด และขอขอบพระคุณผู้ที่ให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้ซึ่งมิได้เอ่ยนามในที่นี้ทุก ๆ ท่าน

สุริย์พรรณ วรรณสว่าง

เมษายน 2553

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	27
อุปกรณ์	27
วิธีการ	31
ผลและวิจารณ์	39
สรุปและข้อเสนอแนะ	65
สรุป	65
ข้อเสนอแนะ	67
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	68
ภาคผนวก	72
ภาคผนวก ก ผลการทดสอบการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่อัตราการให้อากาศต่าง ๆ	73
ภาคผนวก ข ตารางเทียบอัตราการไหลเข้าของอากาศและอัตราการไหลออกของ โปรดิวเซอร์แก๊ส	76
ภาคผนวก ค ผลการทดสอบการเผาไหม้กากตะกอนในเตาทดสอบ	79
ภาคผนวก ง เกณฑ์มาตรฐานจากสารสกัด (Leachate extraction)	82
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	85

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ในแต่ละขั้นตอนของเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน	13
2	ภาวะการทำงานเบื้องต้นของเครื่องแก๊สซิฟายเออร์ทั้ง 3 แบบในส่วนของ อุณหภูมิ ขนาด อนุภาคของเชื้อเพลิง และลักษณะของเถ้าที่ได้	17
3	องค์ประกอบทางกายภาพของของเสียที่ถูกปฏิเสธจากกระบวนการผลิตกระดาษรีไซเคิล	42
4	ค่าการวิเคราะห์แบบประมาณ การวิเคราะห์แบบแยกธาตุและค่าความร้อน ของ ขยะพลาสติก กากตะกอนและสบู่น้ำ	44
5	ผลการจุดติดไฟของกากตะกอน ขยะพลาสติก และขยะพลาสติกผสมกากสบู่น้ำ	47
6	อัตราการใช้เชื้อเพลิงและอัตราการเกิดเถ้าของขยะพลาสติก	48
7	อัตราการใช้เชื้อเพลิงและอัตราการเกิดเถ้าของขยะพลาสติกผสมกากสบู่น้ำ	48
8	เปรียบเทียบองค์ประกอบและค่าความร้อนของโปรดิวเซอร์แก๊สของเชื้อเพลิง กากตะกอน ขยะพลาสติก และขยะพลาสติกผสมสบู่น้ำ	51
9	เปรียบเทียบค่าความร้อนของโปรดิวเซอร์แก๊ส อัตราการใช้เชื้อเพลิง อัตราการ ให้อากาศ ของเชื้อเพลิงต่าง ๆ	52
10	ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก Hg, Cd, Zn, Cr, Ni, As, Pb, Se ในเถ้า	53
11	โรงงานอุตสาหกรรมกระดาษในยุโรปที่ใช้กากตะกอนเป็นเชื้อเพลิง	55
12	ต้นทุน ค่าใช้จ่าย และมูลค่าที่ประหยัดได้จากการดำเนินการนำขยะพลาสติก และขยะพลาสติกผสมกากสบู่น้ำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไอน้ำผ่าน กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน	60
13	การเปรียบเทียบผลการคำนวณทางเศรษฐศาสตร์ของเชื้อเพลิงขยะพลาสติกและ ขยะ พลาสติกผสมกากสบู่น้ำ	62
14	ต้นทุน ค่าใช้จ่าย และมูลค่าที่ประหยัดได้จากการดำเนินการนำกากตะกอนมาใช้ เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไอน้ำ	63

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ก1 ผลการวิเคราะห์ห้องค้ประกอบของโปรตีนเซอร์แก๊ส จากขยะพลาสติก	73
ก2 ผลการวิเคราะห์ห้องค้ประกอบของโปรตีนเซอร์แก๊ส จากขยะพลาสติกผสม กากสนุ่นดำ	74
ข1 เทียบอัตราการไหลเข้าของอากาศที่เข้าระบบวัดที่กำลังเป่าและดูดของ blower	76
ข2 เทียบอัตราการไหลออกของแก๊สเชื้อเพลิงวัดที่กำลังเป่าและดูดของ blower	77
ค1 ผลการทดสอบการเผาไหม้กากตะกอนทรงกระบอก	79
ง1 เหน้ทัศน์คุณภาพของสารละลายจากการสกัด	82

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แผนภาพกระบวนการผลิตกระดาษจากกระดาษที่ผ่านการใช้งานแล้ว	4
2	เครื่องผลิตแก๊สแบบไหลขึ้น (updraft gas producer)	14
3	เครื่องผลิตแก๊สแบบไหลลง (downdraft gas producer)	15
4	เครื่องผลิตแก๊สแบบไหลขวาง (crossdraft gas producer)	16
5	เตาผลิตโปรคิวเซอร์แก๊ส หรือเตาปฏิกรณ์ ชนิดเตาผลิตแบบลูกผสม (ก, ข)	27
6	เตาเผาแบบเผาตรง (direct combustion)	29
7	เครื่องอัดเชื้อเพลิงของแข็ง (briquetting machine)	30
8	สมดุลมวลของอุตสาหกรรมรีไซเคิลเชื้อกระดาษ	41
9	องค์ประกอบของขยะที่ถูกปฏิเสธจากกระบวนการผลิต	42
10	ขยะที่สามารถเผาไหม้ได้ที่ถูกคัดแยกแล้วและย่อยให้มีขนาดเล็ก	45
11	เชื้อเพลิงอัดแท่งจากของเสียแต่ละประเภท	46
12	ค่าความร้อนของโปรคิวเซอร์แก๊สจากขยะพลาสติกที่อัตราไหลต่าง ๆ	49
13	ค่าความร้อนของโปรคิวเซอร์แก๊สจากขยะพลาสติกผสมกากสับดำที่อัตราไหลต่าง ๆ	50
14	ผลของอุณหภูมิการเผาไหม้ก่อนอัดผ่านระบบเผาตรง (direct combustion)	55

ของเสียสู่พลังงาน (Waste-to-Energy) ในอุตสาหกรรมกระดาษรีไซเคิล

Waste to Energy for Recycle Paper Industry

คำนำ

ปัจจุบันมีความต้องการพลังงานมากขึ้นเรื่อย ๆ เพื่อการพัฒนาเศรษฐกิจ ทั้งนี้อัตราการใช้น้ำมันดิบของโลกเพิ่มขึ้น แต่การค้นพบน้ำมันดิบกลับลดน้อยลง ซึ่งความต้องการพลังงานเชื้อเพลิงนั้นเมื่อเทียบกับปริมาณน้ำมันนั้นไม่เพียงพอต่อความต้องการน้ำมันของโลกจึงได้มีการตื่นตัวทางด้านการนำพลังงานหมุนเวียนมาใช้เพื่อแก้ปัญหาทางด้านพลังงาน ไม่ว่าจะเป็นการใช้พลังงานลมผ่านกังหันลม พลังงานจากดวงอาทิตย์ พลังงานจากของเหลวร้อนใต้พื้นพิภพ การเผาไหม้ของเชื้อเพลิง พลังงานไฟฟ้า พลังงานนิวเคลียร์ พลังงานไอน้ำในหม้อต้มน้ำและ พลังงานจากชีวมวล เป็นต้น

การเพิ่มขึ้นของการใช้พลังงานในโลกนั้นเกิดจากหลายสาเหตุหลักหลายประการ ซึ่งหนึ่งในนั้นคือการเพิ่มขึ้นของอุตสาหกรรม สำหรับอุตสาหกรรมในประเทศไทย มีแนวโน้มที่จะเติบโตขึ้นเรื่อย ๆ โรงงานอุตสาหกรรมนั้นไม่เพียงแต่เป็นแหล่งบริโภคพลังงานในปริมาณมากแต่ยังเป็นแหล่งทิ้งของเสียปริมาณมากอีกด้วย อย่างไรก็ตามของเสียเหล่านั้นบางครั้งยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อีก การนำของเสียไปใช้ประโยชน์ทางด้านพลังงาน หรือของเสียสู่พลังงาน (Waste-to-energy) เป็นแนวคิดหนึ่งในการนำพลังงานมาใช้หมุนเวียนในอุตสาหกรรมรีไซเคิลเยื่อกระดาษ โดยที่ขยะที่สามารถนำมาเปลี่ยนเป็นพลังงานได้นั้นโดยทั่วไปต้องมียิ่งค์ประกอบของคาร์บอน และ/หรือไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบ อย่างเช่น ขยะชีวมวล และขยะพลาสติก เป็นต้น (ศิริรัตน์, 2551) โดยใช้หลักการทางความร้อนในการเปลี่ยนสภาพขยะเป็นพลังงาน เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม

อุตสาหกรรมผลิตกระดาษรีไซเคิลเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีความน่าสนใจในการนำของเสียจากกระบวนการผลิตเพื่อใช้เป็นพลังงานในการให้ความร้อนกับหม้อต้มไอน้ำในอุตสาหกรรม เนื่องจากอุตสาหกรรมรีไซเคิลกระดาษนี้ เป็นอุตสาหกรรมที่เกิดของเสียจำนวนมากโดยเฉพาะกากตะกอนชีวภาพจากระบบบำบัดน้ำเสียที่มีจำนวนถึง 5,666 ตันต่อเดือน (วรวิติ, 2552) นอกจากนี้ในกระบวนการคัดวัสดุที่ไม่ใช่กระดาษทิ้งซึ่งส่วนใหญ่เป็น ขยะประเภทพลาสติก ซึ่งขยะเหล่านี้มีความเหมาะสมที่สามารถนำมาเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานได้

นอกจากนี้ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ในแต่ละปีจึงมีผลผลิตที่มาจากการเกษตรจำนวนมากไม่ว่าจะเป็นข้าว น้ำตาล ขางพารา น้ำมันปาล์ม และมันสำปะหลัง อีกทั้งในปัจจุบันมีการ

พัฒนาการใช้น้ำมันจากพืชพลังงาน อาทิเช่น สบู่ดำ เพื่อผลิตเป็นน้ำมันที่สามารถใช้ในเครื่องยนต์ได้ ผลผลิตเหล่านี้เมื่อถูกนำมาแปรรูปแล้วจะเหลือวัสดุเหลือทิ้งซึ่งเป็นกากของเสียจากการเกษตร จำนวนมาก เพื่อเป็นการหมุนเวียนพลังงานเอากลับมาใช้ใหม่ งานวิจัยนี้จึงนำกากสบู่ดำ ซึ่งมีค่าความร้อนสูง นำมาพัฒนาเป็นเชื้อเพลิงร่วมกับกากตะกอนชีวภาพ และขยะพลาสติกที่คัดทิ้งจากกระบวนการผลิต มาใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อการผลิตพลังงานหมุนเวียนภายในโรงงานอุตสาหกรรม



วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาคุณสมบัติของของเสียจากอุตสาหกรรมกระดาษรีไซเคิลในแง่คุณสมบัติการให้พลังงาน
2. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงโดยการใช้ของเสียจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมกระดาษรีไซเคิล และจากของเสียจากการเกษตร
3. เพื่อศึกษาผลในเชิงเศรษฐศาสตร์ของการนำของเสียมาใช้ในรูปเชื้อเพลิงเพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษรีไซเคิล

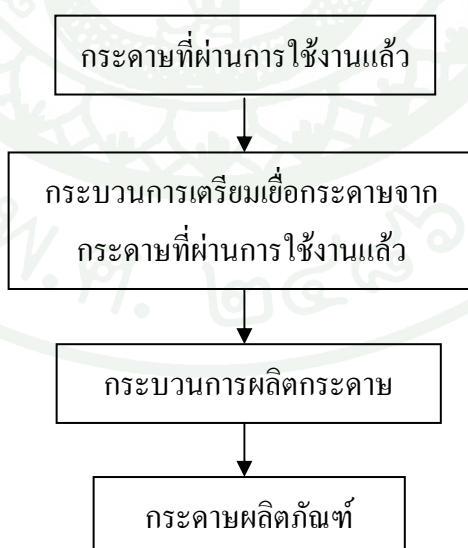
การตรวจเอกสาร

1. วัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ

ในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ สามารถใช้วัตถุดิบได้หลายชนิด สามารถแบ่งประเภทออกเป็น วัตถุดิบประเภทไม้ (wood) และวัตถุดิบที่ไม่ใช่ไม้ (non-wood) ซึ่งวัตถุดิบหลักที่ใช้ในประเทศไทยเป็นไม้ยูคาลิปตัส ส่วนวัตถุดิบที่ไม่ใช่ไม้มักใช้ ชานอ้อย ฟางข้าว ปอแก้ว เยื่อกระดาษรีไซเคิล เป็นต้น โดยเยื่อกระดาษที่ถูกผลิตขึ้นในประเทศไทยเป็นเยื่อสั้นถึงเยื่อปานกลาง

2. กระบวนการผลิตกระดาษจากกระดาษรีไซเคิล

กระบวนการผลิตกระดาษจากกระดาษรีไซเคิล จากกระดาษที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว ซึ่งมีกระบวนการหลักคือ การเตรียมเยื่อกระดาษที่ผ่านการใช้งานแล้ว (recycle fiber process) ซึ่งเป็นกระบวนการที่เปลี่ยนกระดาษที่ผ่านการใช้งานแล้วให้กลับเป็นเยื่อกระดาษ ในกระบวนการนี้จะต้องกำจัดสิ่งปนเปื้อนออกไป รวมทั้งหมึกที่มาจากการพิมพ์เขียน และอีกกระบวนการที่สำคัญคือ กระบวนการผลิตกระดาษ (paper machine) ใช้เยื่อกระดาษที่ได้จากกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษมาขึ้นรูปเป็นกระดาษผลิตภัณฑ์ต่อไป (UNEP/WHO, 1996; วรวิทย์, 2552) แผนภาพกระบวนการผลิตได้ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แผนภาพกระบวนการผลิตกระดาษจากกระดาษที่ผ่านการใช้งานแล้ว

ที่มา : วรวิทย์ (2552)

การรีไซเคิลกระดาษ สามารถทำได้สูงสุด 4-6 ครั้ง เมื่อผ่านกระบวนการรีไซเคิล เยื่อกระดาษจะสั้นลงเรื่อย ๆ ดังนั้นในการผลิตกระดาษทางโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษรีไซเคิลต้องเติมเยื่อใหม่ลงไปด้วย เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับกระดาษรีไซเคิลที่ผลิตออกมา (สถาบันการจัดการบรรจุภัณฑ์เพื่อสิ่งแวดล้อม, 2552) เยื่อกระดาษจึงถูกนำมาผสมกันในอัตราส่วนต่าง ๆ ตามความต้องการเพื่อให้ได้คุณสมบัติของกระดาษที่ต่างกันไป ซึ่งการคัดเลือกประเภทของกระดาษที่จะนำมารีไซเคิลนั้นเพื่อให้คุณสมบัติของเยื่อกระดาษที่จะนำไปรีไซเคิลต่อไป ซึ่งจะแตกต่างกันไปในแต่ละประเทศ (McKinney, 1995) การรีไซเคิลกระดาษมักผลิตประเภทของผลิตภัณฑ์เป็นสองลักษณะ คือ กระดาษสำหรับบรรจุสินค้า และ กระดาษขาวสำหรับการพิมพ์และการเขียน (Gottsching and Pakarinen, 2000) การผลิตกระดาษขาวจะใช้กระดาษหนังสือพิมพ์เก่า กระดาษจากนิตยสาร และกระดาษขาวที่ผ่านการใช้งานแล้วหรือกระดาษขาวที่ไม่ผ่านการตรวจสอบคุณภาพจากกระบวนการผลิตเป็นวัตถุดิบในการผลิต ส่วนกระดาษสำหรับบรรจุสินค้า มักใช้กระดาษที่มาจากกระดาษบรรจุภัณฑ์ที่ผ่านการใช้งานแล้ว กระดาษลูกฟูก กระดาษลัง เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิต

2.1 กระบวนการเตรียมเยื่อกระดาษรีไซเคิล

การทำเยื่อกระดาษรีไซเคิล นั้นเริ่มจากนำกระดาษที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว มาป่นเพื่อให้เยื่อกระดาษออกจากกันและมีการผ่านกระบวนการขจัดสิ่งที่ไม่ดีกระดาษมาด้วยเช่น หมึก กาว ฯลฯ เยื่อที่ได้นี้จะไม่สมบูรณ์ สั้น เส้นใยขาด จึงไม่มีความแข็งแรง การผลิตกระดาษจึงมักนำเยื่อบริสุทธิ์มาผสมเนื่องจากมีสารปนเปื้อนตกค้างไม่สามารถกำจัดได้หมด เยื่อจากกระดาษเก่ามักนำไปใช้ทำกระดาษหนา กระดาษกล่อง และมักจะมีสีคล้ำ เยื่อที่ผ่านขั้นตอนการผลิตข้างต้น หากต้องการนำไปผลิตกระดาษที่มีเนื้อสีขาว ก็จะไปผ่านกระบวนการฟอกเพื่อกำจัดสีออก เยื่อที่ได้ด้วยกรรมวิธีต่างๆ จะต้องผ่านการเตรียมน้ำเยื่อก่อนที่จะนำไปทำแผ่นกระดาษ (วรวิฑูรี, 2552)

กระบวนการเตรียมเยื่อกระดาษจากกระดาษที่ใช้แล้ว เป็นกระบวนการที่ทำให้เยื่อกระดาษรีไซเคิล อยู่ในสภาพที่พร้อมจะนำมาใช้ในกระบวนการผลิตอีกครั้ง กระบวนการผลิตจะแตกต่างกันไปตามลักษณะของกระดาษที่ต้องการผลิต มีกระบวนการเตรียมที่สำคัญดังนี้คือ

2.1.1 กระบวนการแยกเยื่อ (slushing and pulping)

กระบวนการแยกเยื่อ เป็นกระบวนการเปลี่ยนกระดาษให้กลายเป็นเส้นใยเยื่อกระดาษ โดยกระบวนการเริ่มจากการป้อนกระดาษเข้าเครื่องจักรที่ใช้ตีเยื่อกระดาษ เครื่องจักรจะทำการบดและฉีกกระดาษให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ ผสมกับน้ำในถังโดยใช้ใบพัดที่ก้นถัง ซึ่งหมุนด้วยอัตราเร็วสูง เส้นใยกระดาษจะแยกออกจากกัน หลังจากนั้นเครื่องตีเยื่อกระดาษจะทำหน้าที่แยกสิ่งเจือปนที่มีขนาดใหญ่

ออกจากเส้นใย หลังจากนั้นจึงเติมสารเคมีบางชนิด เช่น สารที่ใช้ในการกำจัดหมึก สารปรับความเป็นกรดเป็นด่าง สารฟอกย้อม ตามแต่ความต้องการของการผลิต

2.1.2 กระบวนการกรองเยื่อกระดาษ (screening)

กระบวนการกรองเยื่อกระดาษ เพื่อแยกสิ่งปนเปื้อนออกจากเยื่อกระดาษ ซึ่งแยกโดยอาศัยขนาดที่แตกต่างกันของสิ่งปนเปื้อนที่อยู่ในเยื่อกระดาษ ในกระบวนการนี้จะมีการกรองหลายชั้น โดยขนาดของตัวกรองจะแตกต่างกันไป เพื่อแยกเยื่อออกจากสิ่งปนเปื้อนได้มากที่สุด โดยเริ่มจากการกรองผ่านรูกรองขนาดใหญ่ที่สุด แล้วกรองผ่านรูกรองขนาดเล็กกรองลงมาเรื่อย ๆ และเยื่อกระดาษที่ติดอยู่บนตัวกรองจะต้องถูกกรองซ้ำเพื่อลดการสูญเสียเยื่อกระดาษให้ได้มากที่สุด

2.1.3 กระบวนการทำความสะอาดเยื่อ (cleaning)

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

High density cleaner หรือ H.C. cleaner เป็นเครื่องมือที่สามารถแยกสิ่งแปลกปลอมที่มีขนาดใหญ่และหนักออกจากเยื่อกระดาษโดยอาศัยแรงเหวี่ยงที่เหมาะสม โดยสิ่งแปลกปลอมที่มีน้ำหนักมากจะถูกเหวี่ยงลงมาข้างล่างของกรวย ในขณะที่เยื่อกระดาษที่มีน้ำหนักเบาจะถูกเหวี่ยงขึ้นข้างบน

Low density cleaner หรือ L.C. cleaner เป็นเครื่องมือทำความสะอาดเยื่อกระดาษที่อาศัยหลักแรงเหวี่ยงเช่นเดียวกับ H.C. cleaner แต่ L.C. cleaner ทำหน้าที่แยกสิ่งแปลกปลอมที่มีขนาดเล็ก เช่น ทรายละเอียด

Centrifugal cleaner เป็นเครื่องมือที่อาศัยแรงเหวี่ยงเหมือนกับ H.C. cleaner แต่ทำหน้าที่แยกสิ่งสกปรก เช่น โฟม พลาสติก กรวดทราย เป็นต้น

Hot dispersion system เป็นเครื่องมือที่แยกสิ่งปนเปื้อนจำพวก กาว และพลาสติกที่ติดอยู่กับกระดาษ ให้ออกจากเยื่อกระดาษ ซึ่งวิธีนี้จะถูกใช้ในกระบวนการทำความสะอาดเศษกระดาษที่นำมาผลิตกระดาษคราฟท์

Vibration screen เป็นการแยกสิ่งปนเปื้อนออกจากเยื่อกระดาษโดยอาศัยแรงสั่นสะเทือน โดยการเขย่าน้ำเยื่อ ผ่านตะแกรง วิธีนี้จะช่วยให้เยื่อกระดาษกระจายตัวได้ดีขึ้น เป็นการแยกสิ่งเจือปนขนาดใหญ่ รวมถึงเยื่อที่ยังไม่กระจายตัวออกจากกัน สำหรับเยื่อที่กระจายตัวแล้วจะลอดผ่านรูของตะแกรงและแยกออกไป

Pressure screen เป็นอุปกรณ์ทำความสะอาดเยื่อกระดาษที่อาศัยความดันในการดันน้ำเยื่อกระดาษให้ลอดผ่านรูของตะแกรงออกไป

2.1.4 กระบวนการกำจัดหมึก (deinking)

การกำจัดหมึกในกระบวนการรีไซเคิลเยื่อกระดาษเพื่อต้องการกำจัดหมึกจากกระดาษที่นำมารีไซเคิล อย่างเช่น กระดาษหนังสือพิมพ์ กระดาษนิตยสาร เป็นต้น ในขั้นตอนการกำจัดหมึกจะเติมสารเคมีลงไปเพื่อทำปฏิกิริยากับอนุภาคของหมึกเพื่อให้แยกออกจากกระดาษ สารเคมีที่ใช้ในการกำจัดหมึกเป็นสารประเภทด่างแรงถึงผิว เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โซเดียมซิลิเกต (NaSiO_4) สบู่หรือกรดไขมัน (soap or fatty acid) ปรับสภาพความเป็นกรดด่างให้อยู่ประมาณ 9-10 เพื่อให้ประสิทธิภาพการแยกสูงขึ้น

2.2 ขั้นตอนการเตรียมน้ำเยื่อ (stock preparation)

การเตรียมน้ำเยื่อ เป็นการทำให้เยื่อกระจายตัวและเติมส่วนผสมให้เหมาะกับการทำกระดาษประเภทที่ต้องการ การเตรียมน้ำเยื่ออาจมีการนำเยื่อไม้มากกว่า 1 ชนิดมาผสมเข้าด้วยกันเพื่อควบคุมต้นทุนให้เหมาะสมและเพิ่มสมบัติบางประการให้กับกระดาษที่จะผลิต การเตรียมน้ำเยื่อเริ่มจากการตีเยื่อให้กระจายอย่างสม่ำเสมอในน้ำเยื่อไม่จับเป็นก้อน เสร็จแล้วนำไปบดให้เส้นใยแตกเป็นขุยเพื่อช่วยการเกาะยึดระหว่างกันดีขึ้น จากนั้นก็นำสารปรับแต่งต่าง ๆ เพื่อเพิ่มสมบัติของกระดาษตามที่ต้องการ พร้อมกันนี้จะมีการปรับความเข้มข้นของน้ำเยื่อก่อนจะเข้าสู่ขั้นตอนการทำแผ่น

2.3 ขั้นตอนการทำแผ่น (sheet formation)

ขั้นตอนนี้เริ่มด้วยการนำน้ำเยื่อลงในถังจ่ายน้ำเยื่อซึ่งจะถูกปล่อยลงบนสายพานตะแกรง น้ำส่วนใหญ่จะเล็ดรอดผ่านช่องของตะแกรงเหล่านี้ เยื่อจะเริ่มเป็นรูปร่างกระดาษ สายพานตะแกรงจะพาเยื่อกระดาษเข้าสู่ส่วนที่เป็นลูกกลิ้งเพื่อรีดน้ำที่ยังค้างอยู่ออกไปให้มากที่สุดพร้อมกับกดทับให้เยื่อประสานติดกัน ต่อจากนั้นกระดาษจะถูกพาไปอบโดยผ่านลูกกลิ้งร้อนหลาย ๆ ลูกจนเหลือน้ำอยู่น้อยมาก (ประมาณร้อยละ 4 – 6 โดยน้ำหนัก)

2.4 ขั้นตอนการตกแต่งผิว (finishing)

กระดาษที่ผ่านการอบแห้งจะถูกนำมาตกแต่งผิวตามที่ต้องการเช่นการขัดผิว (calendering) การเคลือบผิวให้เรียบเงาหรือด้าน กระดาษที่แลวเสร็จจะถูกจัดเก็บเป็นม้วนเข้าโกดัง เมื่อมีการออกจำหน่ายก็จะตัดเป็นม้วนเล็กตามหน้ากว้างที่ต้องการ หรือตัดเป็นแผ่น ๆ ตามขนาดที่ต้องการ

2.5 กระบวนการผลิตกระดาษ

กระบวนการผลิตกระดาษเริ่มจากการกำจัดสิ่งสกปรกที่มาพร้อมกับเยื่อกระดาษ โดยผ่านการกรองจากนั้นจะผ่านเข้าเครื่องจักรผลิตกระดาษ (paper machine) เพื่อแปรรูปเยื่อกระดาษให้เป็นกระดาษผลิตภัณฑ์ซึ่งมีกระบวนการที่สำคัญดังนี้

2.5.1 ถังจ่ายเยื่อ (headbox)

ทำหน้าที่จ่ายเยื่อกระดาษที่ผ่านการทำความสะอาดจากหน่วยกรองมาแล้วใช้กระจายอย่างสม่ำเสมอบนตะแกรงลวดเดินแผ่น และยังทำหน้าที่ตีกลุ่มเยื่อกระดาษที่จับตัวกันให้แตกออกจากกันอีกด้วย

2.5.2 ส่วนตะแกรงลวดเดินแผ่น (wire section หรือ forming section)

มีหน้าที่ทำให้เยื่อกระดาษก่อตัวเป็นแผ่น และกำจัดน้ำที่ปนมากับเยื่อกระดาษออกไปส่วนหนึ่ง เยื่อกระดาษจากถังจ่ายเยื่อจะถูกส่งมายังส่วนตะแกรงลวดเดินแผ่น ความเร็วของเยื่อกระดาษจากถังจ่ายเยื่อและความเร็วของลวดเดินแผ่นเป็นปัจจัยสำคัญมากต่อการผลิตกระดาษ ความแตกต่างของความเร็วของการจ่ายเยื่อกระดาษและความเร็วของลวดเดินแผ่นมีผลต่อความแข็งแรง และความสม่ำเสมอของกระดาษ เยื่อกระดาษจะเรียงตัวเป็นแผ่นบนแผ่นขึ้นรูปกระดาษ

2.5.3 ส่วนกดรีดน้ำ (pressing section)

เพื่อกำจัดน้ำออกจากเยื่อกระดาษที่ขึ้นรูปเป็นแผ่นกระดาษแล้วให้มากที่สุด ก่อนที่จะส่งต่อไปยังส่วนอบแห้งต่อไป ในการกดรีดน้ำออกจากแผ่นกระดาษจะใช้ลูกกลิ้งกดรีดน้ำหลายชุด ในการรีดน้ำ ลูกกลิ้งกดรีดน้ำยังทำอีกหน้าที่หนึ่งคือ ทำหน้าที่อัดเส้นใยเยื่อกระดาษให้เข้าใกล้กันมากขึ้น เป็นการเพิ่มความเรียบและความแข็งแรงให้แก่กระดาษผลิตภัณฑ์ ปริมาณน้ำที่ยังคงเหลือในแผ่นกระดาษหลังผ่านกระบวนการกดรีดน้ำจะอยู่ที่ประมาณร้อยละ 60-70 โดยน้ำหนัก

2.5.4 ส่วนอบแห้งกระดาษ (drying section)

กระบวนการนี้อาศัยความร้อนจากไอน้ำอิ่มตัวที่ถูกจ่ายเข้าไปในลูกอบแห้ง ทำให้ลูกอบแห้งร้อนขึ้น ไอน้ำจะกลั่นตัวเป็นคอนเดนเสทภายในลูกอบแห้งและก่อตัวเป็นฟิล์มขึ้น ฟิล์มนี้มีผลต่อประสิทธิภาพในการอบแห้งกระดาษ ซึ่งจะทำให้ปริมาณน้ำในแผ่นกระดาษเหลืออยู่ประมาณร้อยละ 5-10 โดยน้ำหนัก ถ้าหากฟิล์มก่อตัวหนาเกินไปจะทำให้การถ่ายเทความร้อนระหว่างไอน้ำและผิวลูกอบแห้งไม่ดี จึงต้องควบคุมการระบายคอนเดนเสทออกจากลูกอบอย่างสม่ำเสมอ ในขั้นตอนการอบแห้งกระดาษนี้อาจมีการเคลือบสารเพิ่มความแข็งแรงให้แก่ผิวกระดาษด้วย

2.5.5 ส่วนฉาบผิวกระดาษ (size-press section)

ในกรณีที่ผลิตกระดาษบางชนิด เช่น กระดาษพิมพ์เขียน เป็นต้น จะมีการฉาบผิวกระดาษด้วยแป้งในเครื่องฉาบผิวกระดาษด้วย โดยการฉาบแป้งจะทำการฉาบทั้ง 2 ด้านของผิวกระดาษ เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้แก่กระดาษ และทำให้กระดาษมีความต้านทานน้ำมากขึ้น อาจมีการเติมสารเติมแต่งบางชนิดลงไปในส่วนแป้งที่ใช้ฉาบกระดาษด้วย

2.5.6 ส่วนรีดผิวกระดาษ (calendering section)

มีหน้าที่รีดกระดาษให้บางลง ทำให้ผิวหน้าของกระดาษเรียบขึ้น และทำให้กระดาษมีความสม่ำเสมอมากขึ้น ลักษณะเครื่องเป็นลูกรีดทรงกระบอกผิวเรียบวางซ้อนกัน ส่วนรีดผิวกระดาษเป็นขั้นตอนสุดท้ายก่อนที่จะส่งกระดาษเข้าสู่ขั้นตอนม้วน และตัดกระดาษให้ได้ความยาวตามต้องการ ก่อนส่งสู่ผู้บริโภคต่อไป

2.6 ของเสียจากกระบวนการผลิตกระดาษรีไซเคิล

กระบวนการผลิตกระดาษรีไซเคิลมีขั้นตอนการการทำหลายขั้นตอน จึงมีของเสียออกมาจำนวนมาก ไม่ว่าจะเป็นน้ำเสีย ขยะ มลพิษ

2.6.1 น้ำเสีย

ในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษเป็นกระบวนการที่ก่อให้เกิดน้ำเสียในปริมาณมาก ซึ่งต้องตรวจวัดพารามิเตอร์ของน้ำเสียในกระบวนการดังนี้ ค่าซีโอดี (chemical oxygen demand, COD) ค่าบีโอดี (biochemical oxygen demand, BOD) ค่าปริมาณของแข็งละลายน้ำ (total dissolved solids, TDS) และค่าปริมาณของแข็งแขวนลอย (total suspended solids, TSS) ซึ่งค่าเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับกำลัง

การผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมในแต่ละวัน ชนิดของกระดากที่ผลิต และคุณภาพของกระดากที่ผลิต คุณสมบัติของน้ำเสีย ซึ่งน้ำเสียจากกระบวนการผลิตจะต้องถูกนำไปบำบัดเพื่อลดปริมาณมลสารที่อยู่ในน้ำเสีย การกำจัดของแข็งแขวนลอย (TSS) สามารถกำจัดได้โดยการบำบัดน้ำเสียขั้นต้น ซึ่งสามารถลดปริมาณของแข็งแขวนลอยได้ร้อยละ 50–70 และลดค่าบีโอดี (biochemical oxygen demand, BOD) ได้ถึงร้อยละ 80 แต่น้ำเสียเหล่านี้ยังคงมีความสกปรกอยู่จึงต้องผ่านการบำบัดขั้นที่สองต่อ โดยจะเป็นการบำบัดทางชีวภาพ โดยใช้จุลินทรีย์เพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ในขั้นตอนนี้จะเกิดกากตะกอนจากกระบวนการบำบัด กากตะกอนเหล่านี้ต้องนำไปบำบัดต่อไปเพื่อไม่ให้เกิดการเน่าเสีย ซึ่งกากตะกอนที่ออกมาจากกระบวนการบำบัดนั้นจะมีความชื้นสูงมากดังนั้นจึงต้องทำการรีดน้ำ (dewatering) เพื่อลดปริมาณกากตะกอน เพื่อนำไปฝังกลบหรือนำไปใช้ประโยชน์ทางด้านอื่นเช่นการนำไปเผา

2.6.2 ขยะ

ขยะที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตกระดากมีอยู่หลายชนิด เช่น เศษที่เหลือจากวัตถุดิบ (เช่น เศษไม้ เปลือกไม้ และกรวดทราย เป็นต้น) กากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งได้จากการผลิตไอน้ำ สิ่งคัดทิ้ง (reject) จากกระบวนการผลิต เศษพลาสติก และเศษโลหะ เป็นต้น กากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียทั้งทางวิธีเคมีและวิธีชีวภาพ จัดเป็นกากของเสียหลักในการผลิตกระดาก และต้องมีการดูแลกำจัดเพื่อไม่ให้เกิดผลกระทบต่อสภาพแวดล้อม แหล่งกำเนิดกากของเสียในกระบวนการผลิตกระดาก เศษไม้ ก่อให้เกิด เปลือกไม้ ฝุ่น ขยะคัดทิ้งจากการเตรียมวัตถุดิบ ก่อให้เกิด ขยะคัดทิ้งจากการเตรียมเยื่อ ขยะคัดทิ้งจากกระบวนการกรอง ขยะจากการเผาไหม้ ก่อให้เกิดเถ้า ขี้ปี้ ขี้มัน กากตะกอน เป็นกากตะกอนหมัก และกากตะกอนชีวภาพ ขยะอื่น ๆ เช่น เศษลวด น้ำมันที่ใช้งานแล้ว ของเสียอันตราย (วรวิทย์, 2552)

2.6.3 มลพิษทางอากาศ

มลพิษทางอากาศที่สำคัญในกระบวนการผลิตกระดากได้แก่ กลิ่นจากสารประกอบของซัลเฟอร์ เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ไคเมทิลซัลไฟด์ ($\text{C}_2\text{H}_6\text{S}$) เป็นต้น สารระเหยของสารประกอบคลอรีนจากกระบวนการฟอกขาว สารออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) และซัลเฟอร์จากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเพื่อผลิตไอน้ำ และยังมีอนุภาคนาโนเล็กจากกระบวนการต่าง ๆ ในกระบวนการผลิต (วรวิทย์, 2552)

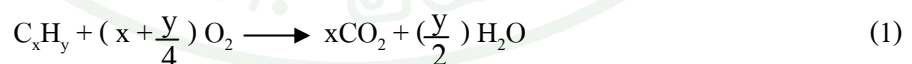
3. เทคโนโลยีการเผา

เทคโนโลยีการเปลี่ยนแปลงขยะให้เป็นพลังงาน ขยะที่ทิ้งตามบ้านเรือนเป็นแหล่งพลังงานขนาดใหญ่ที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะขยะปิโตรเคมีที่ผลิตจากบ้านเรือน และภาคอุตสาหกรรม การผลิต เช่น พลาสติก ยาง หรือกากอุตสาหกรรม ซึ่งของเสียเหล่านี้มีองค์ประกอบของไฮโดรคาร์บอนในปริมาณมาก ซึ่งวิธีการที่เปลี่ยนขยะเหล่านี้เป็นพลังงานแปรรูปที่มีค่าความร้อนที่สูงกว่าอย่างแก๊สเชื้อเพลิง หรือน้ำมัน มี 3 กระบวนการ คือ กระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (gasification) และลิกวิเฟกชัน (liquefaction) (ศิริรัตน์, 2551) โดยทั้ง 3 กระบวนการเป็นกระบวนการให้ความร้อนแก่สารเพื่อย่อยสลายโมเลกุลของสารนั้นให้มีขนาดเล็กลงในลักษณะที่ไร้ออกซิเจนหรือมีออกซิเจนน้อย ซึ่งในแต่ละกระบวนการจะให้ผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกันไป กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันจะให้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สสังเคราะห์ (syngas) กระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) ให้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สและน้ำมัน ลิกวิเฟกชัน (liquefaction) ให้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำมัน

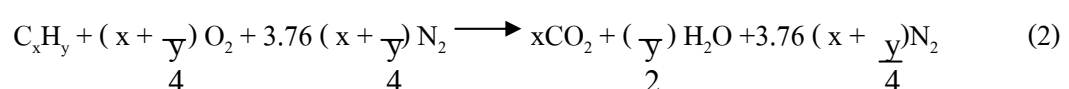
3.1 กระบวนการเผาไหม้ (combustion/incineration)

การเผาตรงเป็นวิธีการที่สามารถลดปริมาณขยะมูลฝอยได้มากและรวดเร็ว สามารถทำลายเชื้อโรคในขยะได้ ใช้พื้นที่ไม่มาก สามารถนำพลังงานที่ได้จากการเผากลับมาใช้ประโยชน์ แต่มีปัจจัยที่สำคัญต่อการทำงานของเตาเผา คือ ต้องมีอุณหภูมิการเผาไหม้ เวลาที่อยู่ในเตาเผาเพียงพอ ที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ มีภาวะการปั่นป่วนภายในเตาเพื่อให้เกิดการคลุกเคล้าและลุกติดไฟอย่างทั่วถึง มีปริมาณออกซิเจนเพียงพอสำหรับการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ (มัลลิกา, 2544)

การเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาของออกซิเจนกับเชื้อเพลิงซึ่งทำให้เกิดความร้อนออกมา และได้ผลิตภัณฑ์ร่วมเป็นน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ โดยมีของแข็งเหลืออยู่คือ เถ้า (ash) ซึ่งการเผาไหม้แบบสมบูรณ์มีปฏิกิริยาเคมีเป็นดังสมการ 1



ซึ่งในการเผาไหม้ใช้แหล่งให้ออกซิเจนเป็นอากาศ ปฏิกิริยาจะมีการปรับเปลี่ยนไปเล็กน้อยเนื่องจากในอากาศไม่ได้มีองค์ประกอบของออกซิเจนเพียงอย่างเดียวแต่อากาศยังประกอบไปด้วย ไนโตรเจนร้อยละ 78 ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของอากาศ และแก๊สออกซิเจนร้อยละ 21 แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 0.03 ปฏิกิริยาโดยทั่วไปของการเผาไหม้เมื่อใช้อากาศเป็นแหล่งออกซิเจนดังสมการที่ 2



จากปฏิกิริยาดังกล่าวเห็นได้ว่าในโตรเจนนั้น ไม่เกิดปฏิกิริยาถ้าอุณหภูมิการเผาไหม้มี อุณหภูมิไม่ถึง 1000 องศาเซลเซียส แต่สำหรับในการสันดาปเครื่องยนต์ การเผาเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า อุณหภูมิเกิน 1000 องศาเซลเซียส ในโตรเจนจะเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจน เกิดเป็นสารประกอบ ออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) ซึ่งเกิดเป็นมลพิษทางอากาศ ซึ่งอุณหภูมิในการเผาไหม้ขึ้นอยู่กับ ค่า ความร้อนของเชื้อเพลิง อัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิง ค่าความจุความร้อนของเชื้อเพลิงกับอากาศ อุณหภูมิขาเข้าของเชื้อเพลิงและอากาศ (ศิริรัตน์, 2551)

การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (incomplete combustion) นั้นเกิดจากการเผาไหม้ที่มีออกซิเจนไม่พอสำหรับการทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิง ซึ่งจะให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่ไม่พึงประสงค์หลายอย่าง เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เหมะควัน และสารพิษอื่น ๆ (ไดออกซิน ฟิวแรน)

การเผาแบบอินซินเนอเรชัน (incineration) เป็นการนำเทคโนโลยีการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงในการกำจัดของเสีย โดยการเปลี่ยนของเสียเป็นพลังงาน ไม่ว่าจะเป็นพลังงานในรูปของความร้อน พลังงานไอน้ำ หรือกระแสไฟฟ้า โดยมีระบบการจัดการมลพิษทางอากาศร่วมด้วยเพื่อกำจัดแก๊สพิษในระบบการเผาไหม้

3.2 กระบวนการเกิดแก๊สหรือแก๊สซิฟิเคชัน (gasification)

กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเป็นกระบวนการในการแปรรูปเชื้อเพลิงแข็งเป็นโปรคิวเซอร์แก๊ส อาศัยหลักการการเผาไหม้ในภาวะที่มีอากาศจำกัด โดยทั่วไปกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ประกอบด้วยปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนกับอากาศ ออกซิเจน ไอน้ำ หรือของผสมของสารดังกล่าวข้างต้น ที่อุณหภูมิสูงกว่า 700 องศาเซลเซียส ผลผลิตที่ได้เป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ซึ่งแก๊สผลิตภัณฑ์หรือแก๊สสังเคราะห์ที่สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า ความร้อน หรือเป็นสารตั้งต้นในการผลิตเคมีภัณฑ์ต่าง ๆ เชื้อเพลิงเหลว รวมทั้งโปรคิวเซอร์แก๊ส (ประพันธ์, 2551) ในแต่ละเทคโนโลยีของแก๊สซิฟิเคชันจะให้คุณลักษณะที่แตกต่างกันไปดัง ตารางที่ 1 ซึ่งกระบวนการนี้สามารถประยุกต์ใช้กับเชื้อเพลิงแข็งได้หลากหลายชนิด ปัจจุบันที่มีการนำมาใช้จริงในกระบวนการนี้ได้แก่ ถ่านหิน (coal) และชีวมวลชนิดต่าง ๆ เช่น แกลบ จี้เลื้อย เป็นต้น

ตารางที่ 1 ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ในแต่ละขั้นตอนของเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน

เทคโนโลยี	ผลิตภัณฑ์ขั้นปฐมภูมิ	ผลิตภัณฑ์ขั้นทุติยภูมิ	กากของแข็ง	ราคาของผลิตภัณฑ์ขั้นทุติยภูมิ	องค์ประกอบของของเสีย
แก๊สซิฟิเคชันแบบสมบูรณ	แก๊สสังเคราะห์	เชื้อเพลิงเหลว สารเคมี ไฟฟ้า	เถ้า โลหะ	สูงมากและหลากหลาย	สารประกอบอินทรีย์ที่มีความชื้นน้อย
แก๊สซิฟิเคชันไม่แบบสมบูรณ	แก๊สเชื้อเพลิง, แก๊สสังเคราะห์	เชื้อเพลิงเหลว สารเคมี น้ำ ไฟฟ้า	ถ่าน เถ้า โลหะ	ปานกลางและอาจต้องมีการทำให้บริสุทธิ์	สารประกอบอินทรีย์ที่มีความชื้นน้อย

ที่มา: คัดแปลงจาก ศิริรัตน์ (2551)

เมื่อเชื้อเพลิงแข็งหรือเชื้อเพลิงเหลวที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบถูกเปลี่ยนไปเป็นแก๊สสารไม่พึงประสงค์ต่าง ๆ เช่น สารประกอบซัลเฟอร์ และเถ้าจะถูกกำจัดออกจากแก๊สผลิตภัณฑ์ได้ง่ายกว่า เมื่อเทียบกับกระบวนการเผาไหม้ซึ่งมีปริมาณอากาศมากเกินพอ กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันต้องการความร้อนไปใช้ในการเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ โดยส่วนใหญ่ความร้อนส่วนนี้ได้จากการเผาไหม้บางส่วนของเชื้อเพลิงแข็งเอง โดยการป้อนอากาศหรือออกซิเจนเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ โดยปกติอากาศที่ป้อนจะไม่เกินร้อยละ 35 ของปริมาณอากาศที่ต้องการทางทฤษฎี ดังนั้นแก๊สที่ได้จึงมีความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์แก๊สจากกระบวนการสูง ซึ่งส่งผลให้กระบวนการแยกหรือทำความสะอาดแก๊สมีประสิทธิภาพสูงด้วย กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันบางกระบวนการอาจใช้แหล่งความร้อนอื่นจากภายนอกทำให้ลดการสูญเสียเชื้อเพลิงแข็งเนื่องจากการเผาไหม้ รวมทั้งสามารถเพิ่มคุณค่าทางความร้อนของผลิตภัณฑ์แก๊ส โดยการลดปริมาณไนโตรเจนจากอากาศที่ป้อน และคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากการเผาไหม้ ซึ่งแก๊สเหล่านี้ถ้าออกมาพร้อมกับผลิตภัณฑ์แก๊สในปริมาณมากแล้วจะทำให้ค่าความร้อนต่อหน่วยปริมาตรของแก๊สลดลง

4.3 ทฤษฎีแก๊สซิฟิเคชัน

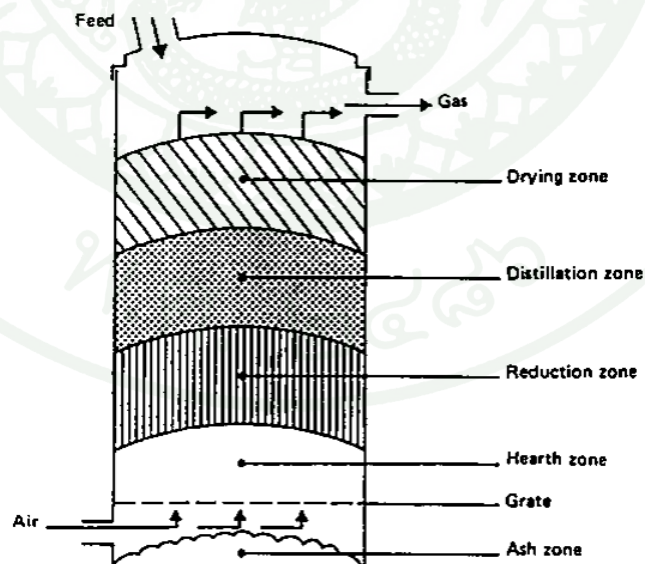
แก๊สซิฟิเคชันหรือกระบวนการผลิตโปรคิวเซอร์แก๊ส เป็นกระบวนการแปลงรูปเชื้อเพลิงแข็ง เช่น ถ่านหิน ถ่านไม้ เป็นต้น ให้อยู่ในรูปของเชื้อเพลิงที่เป็นแก๊ส ดังเช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ไฮโดรเจน (H_2) มีเทน (CH_4) ในแง่ของกระบวนการหมายถึงขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงทั้งหมดที่

รวมการไพโรไลส์ในขั้นต้นและการปรับปรุงคุณภาพแก๊สในขั้นถัดไป กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางอุณหเคมี (thermochemical conversion process) ได้จากปฏิกิริยาของคาร์บอนกับออกซิเจน และ/หรือไอน้ำที่อุณหภูมิสูง ความดันตั้งแต่ 1 บรรยากาศขึ้นไป ปฏิกิริยาเกิดขึ้นหลายขั้นตอนทั้งปฏิกิริยาคายความร้อน และปฏิกิริยาดูดความร้อน โพรดิวเซอร์แก๊ส ประกอบด้วยแก๊สผสมระหว่าง CO และ H_2 เรียกว่า โพรดิวเซอร์แก๊ส (producer gas) ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาการเผาไหม้แบบไม่สมบูรณ์ (incomplete combustion) ของคาร์บอนไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ และปฏิกิริยารีดักชัน (reduction) ของคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำ ไปเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน (เบญจมาศ, 2547)

4.4 เครื่องแก๊สซิฟิเคชัน (แบ่งตามลักษณะอากาศไหลเข้า)

4.4.1 เครื่องผลิตแก๊สแบบไหลขึ้น (updraft gas producer)

เชื้อเพลิงที่อยู่ด้านบนจะทยอยเคลื่อนลงมาในโซนเผาไหม้ ซึ่งจะสวนทิศกับอากาศที่เข้าทางด้านล่างและลอยขึ้นด้านบนของเตาเผา ซึ่งโพรดิวเซอร์แก๊ส (producer gas) ที่ถูกผลิตออกจากระบบนี้จะลอยขึ้นและไหลออกจากเครื่องผลิตทางด้านบน ดังภาพที่ 2 เครื่องผลิตแก๊สชนิดนี้จะผลิตโพรดิวเซอร์แก๊สที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุด เนื่องจากโพรดิวเซอร์แก๊ส (producer gas) ที่ลอยขึ้นจะมีการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างความร้อนของโพรดิวเซอร์แก๊ส (producer gas) กับเชื้อเพลิงในชั้นบนซึ่งเป็นการอุ่นเชื้อเพลิงก่อน แต่ระบบนี้จะมีปัญหาทางด้านน้ำมันดิน (tar) ปะปนอยู่มาก

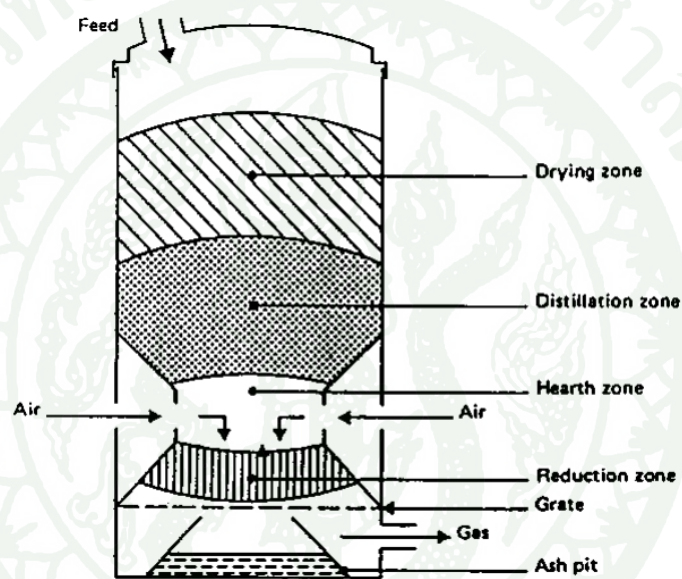


ภาพที่ 2 เครื่องผลิตแก๊สแบบไหลขึ้น (updraft gas producer)

ที่มา : Quaak, et.al (1999)

4.4.2 เครื่องผลิตแก๊สแบบไหลลง (downdraft gas producer)

เครื่องผลิตแก๊สแบบไหลลงเป็นระบบที่ให้อากาศไหลลงผ่านโซนเผาไหม้ แก๊สที่ผลิตได้จะไหลออกทางด้านล่างของเตา ดังภาพที่ 3 โดยหลักการของระบบนี้คือ น้ำมันดินจากโซนกลั่นตัวนั้นสามารถสลายที่อุณหภูมิสูงได้ ดังนั้นจึงออกแบบให้โปรคิวเซอร์แก๊ส (producer gas) ซึ่งยังมีปริมาณน้ำมันดินอยู่นั้นผ่านโซนเผาไหม้ ซึ่งเป็นโซนที่มีอุณหภูมิสูงที่สุดก่อน แล้วจึงผ่านเข้าโซนรีดักชันแล้วได้โปรคิวเซอร์แก๊ส (producer gas) ออกทางด้านล่างของระบบ แต่เครื่องผลิตแก๊สแบบไหลลงนั้นมีข้อจำกัด คือไม่เหมาะกับเชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนถ่านสูง และเชื้อเพลิงที่เกิดสแลก (slag) ได้ง่าย (สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2544)



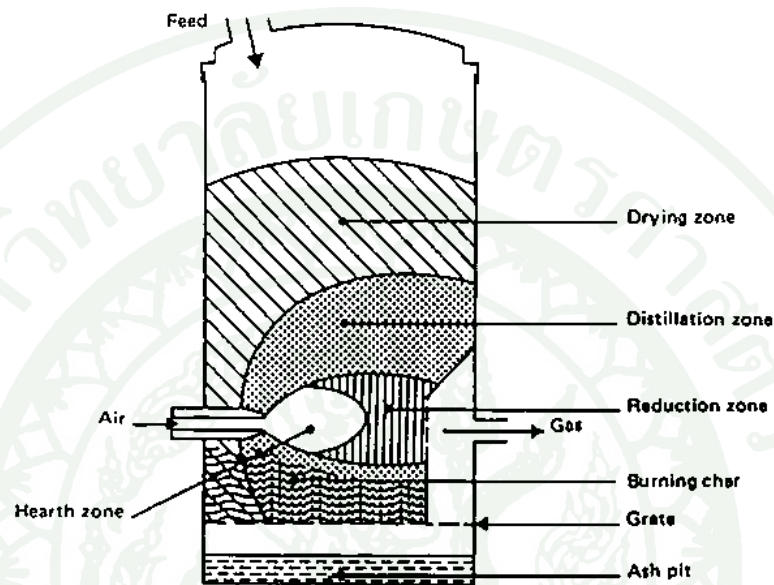
ภาพที่ 3 เครื่องผลิตแก๊สแบบไหลลง (downdraft gas producer)

ที่มา : Quaak *et.al* (1999)

4.4.3 เครื่องผลิตแก๊สแบบไหลขวาง (cross-draught gas producer)

เป็นเครื่องที่ได้รับการพัฒนาจากเครื่องผลิตแก๊สแบบไหลขึ้น (updraft gas producer) และแบบไหลลง (downdraft gas producer) เป็นระบบที่สามารถเร่งเครื่องได้ดีมาก เนื่องจากโซนเผาไหม้มีบริเวณแคบ ดังภาพที่ 4 อุณหภูมิจึงสามารถขึ้นถึง 2000 องศาเซลเซียส (สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2544) ช่วงเวลาเริ่มระบบเร็วกว่าเครื่องผลิตแก๊สแบบไหลขึ้น และเครื่องผลิตแก๊สแบบไหลลง คือใช้เวลาเพียง 5-10 นาที ซึ่งระบบนี้มีข้อด้อย คืออุณหภูมิของโปรคิว

เซอร์แก๊สสูง ช่วงเดินทางของแก๊สสั้นทำให้ต้องใช้ความเร็วสูง ทำให้โอกาสที่แก๊สจะถูกรับช่วงปฏิกิริยาน้อยลง ดังนั้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เพียงบางส่วนที่ถูกเปลี่ยนเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ในโซนรีดักชัน เปลวไฟและโซนจี้เถ้า ของเครื่องผลิตแก๊สแบบไหลขวางนั้นไม่ได้แยกขาดกันด้วยตะแกรง ดังนั้นต้องใช้เชื้อเพลิงที่มีปริมาณเถ้าต่ำเท่านั้น



ภาพที่ 4 เครื่องผลิตแก๊สแบบไหลขวาง (cross-draught gas producer)

ที่มา : FAO (1986)

เครื่องแก๊สซิฟายเออร์ ที่พบในปัจจุบันสามารถแบ่งออกได้ตามลักษณะของการไหลของสารป้อนและสารร่วมทำปฏิกิริยาหรือแก๊สในเครื่องปฏิกรณ์ (ประพันธ์, 2551) โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (fixed bed) หรือเบดเคลื่อนที่ (moving bed) เครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดाइซ์เบด (fluidized bed) และ เครื่องปฏิกรณ์แบบไหลผ่าน (entrained flow) ภาวะการทำงานเบื้องต้นของเครื่องแก๊สซิฟายเออร์ทั้ง 3 แบบในส่วนของอุณหภูมิ ขนาดอนุภาค เชื้อเพลิง และลักษณะของเถ้าที่ได้ แสดงไว้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ภาวะการทำงานเบื้องต้นของเครื่องแก๊สซิฟายเออร์ทั้ง 3 แบบในส่วนของคุณสมบัติ ขนาดอนุภาคของเชื้อเพลิง และลักษณะของเถ้าที่ได้

	Entrained flow	Fluidized bed	Moving bed
Exit gas temperature, °C	1200	920-1050	420-650
Coal feed size	< 100 MESH	< 6 mm	< 50 mm
Ash conditions	Slagging	Dry/Agglomerating	Dry/Slagging

ที่มา: ประพันธ์ (2551)

5. ขยะ

ขยะ ตามพระราชบัญญัติการสาธารณสุข พ.ศ.2535 ขยะหมายถึง เศษกระดาษ เศษผ้า เศษอาหาร เศษสินค้า ถุงพลาสติก ภาชนะบรรจุอาหาร เถ้า มูลสัตว์หรือซากสัตว์ ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย ขยะมูลฝอยมีแหล่งกำเนิดทั้งจากชุมชน เกษตรกรรม และโรงงานอุตสาหกรรม (มัลลิกา, 2544) การจำแนกขยะสามารถแยกออกตามลักษณะทางกายภาพได้ดังต่อไปนี้

ขยะเปียก (garbage) เป็นขยะส่วนที่เป็นสารอินทรีย์ มีความชื้นสูง สามารถย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ ได้แก่ เศษอาหาร เศษหนังกบ ปลาขี้ขาว เศษขานอ้อย

ขยะแห้ง (rubbish) เป็นขยะที่มีความชื้นต่ำ อยู่ในรูปสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ย่อยสลายทางกายภาพได้ยาก ซึ่งมีทั้งสามารถเผาไหม้ได้ (combustible) เศษกระดาษ เศษกิ่งไม้ เศษยาง เศษผ้า และชนิดที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้ (non-combustible) เศษแก้ว เศษโลหะ

เถ้า (ashes) คือของแข็งที่เหลือหลังจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงหรือของเสีย

เศษสิ่งก่อสร้าง (construction wastes) คือขยะที่เกิดจากสิ่งก่อสร้าง และรื้อถอนสิ่งก่อสร้างต่าง ๆ เช่น อาคาร ถนน เศษปูน อิฐ หิน ดิน ทราช

ซากพืชซากสัตว์ (agriculture wastes) มูลฝอยจากเกษตรกรรม เศษซากพืชซากสัตว์ที่ทิ้งรวม
ในขยะมูลฝอย

ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย (sludge) ส่วนที่แยกออกจากน้ำเสียด้วยระบบบำบัดทั้งทาง
กายภาพ เคมี ชีวภาพ อาจมีลักษณะเป็นของแข็งหรือสารกึ่งของแข็ง ซึ่งสามารถย่อยสลายได้และ
สามารถย่อยสลายได้

6. การจัดการของเสีย

6.1 การจัดการของเสีย

การจัดการของเสียจะไม่มุ่งเน้นวิธีใดวิธีหนึ่งโดยเฉพาะ เรียกว่าการจัดการของเสียแบบ
เบ็ดเสร็จ ซึ่งเป็นการจัดการของเสียที่อาศัยกิจกรรมหลายอย่างเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพประกอบด้วย
กิจกรรมดังต่อไปนี้

6.1.1 การลดปริมาณขยะ

6.1.2 การนำมาใช้ซ้ำ (reuse)

6.1.3 การนำกลับมาใช้ใหม่ (recycling)

6.1.4 การหมักทำปุ๋ยและวัสดุปรับปรุงดิน (composting)

6.1.5 การเผาไหม้แล้วได้พลังงานกลับคืน (incineration with energy recovery)

6.1.6 การเผาไหม้แล้วไม่ได้พลังงานกลับคืน (incineration with no energy recovery)

6.1.7 การฝังกลบ (land filling)

การจัดการในข้อที่ 6.1.1-6.1.3 เป็นการป้องกันไม่ให้เกิดขยะปริมาณมาก ข้อ 6.1.4-6.1.7
เป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนรูป (transformation) การทำลาย (destruction) หรือการเก็บ
กักแบบถาวร (permanent storage) (พัฒนา, 2549)

6.2 กระบวนการเปลี่ยนรูปทางชีวภาพ

กระบวนการเปลี่ยนรูปขยะ (transformation processes) ได้แก่ การหมักทำปุ๋ยและวัสดุ
ปรับปรุงดิน (composting) การเผาไหม้แล้วได้พลังงานกลับคืน (incineration with energy recovery)
การเผาไหม้แล้วไม่ได้พลังงานกลับคืน (incineration with no energy recovery) แบ่งกระบวนการ
เปลี่ยนรูปขยะได้เป็น กระบวนการทางชีววิทยา (biological process) กระบวนการใช้ความร้อน (thermal
process) กระบวนการทางเคมี (chemical process)

6.3 การกำจัดของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

ขยะจากโรงงานอุตสาหกรรมสามารถแบ่งได้ตามกิจกรรมในอุตสาหกรรมแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ มูลฝอยในชีวิตประจำวัน และมูลฝอยจากกระบวนการผลิต มูลฝอยในชีวิตประจำวัน เป็นมูลฝอยที่มาจากการดำรงชีวิตของมนุษย์ ส่วนขยะจากการผลิต ได้แก่ วัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้มาตรฐาน วัตถุดิบที่เหลือจากการผลิต บรรจุภัณฑ์สารเคมีและวัตถุดิบ ของเสียและผลพลอยได้จากการกระบวนการผลิต สิ้นค้าหมดอายุ ของเสียจากกระบวนการบรรจุหีบห่อ (มัลลิกา, 2544)

วิธีการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมบางชนิดจะมีของเสียออกมาอยู่ในรูปของแข็งและลักษณะของน้ำเสียที่มีสาร โลหะหนักเจือปน เช่น อุตสาหกรรมสกัดน้ำมันรำจะมีกากรำเป็นของเสียเหลืออยู่ อุตสาหกรรมชุบโลหะต่าง ๆ จะมีน้ำเสียที่มีสารโลหะหนักเจือปนออกมา เช่น สังกะสี ทองแดง โครเมียม นิเกิล เป็นต้น การกำจัดของเสียที่เป็นของแข็งส่วนใหญ่ มักจะใช้วิธีเผาหรือฝัง หรือทางอุตสาหกรรมส่งให้กับบริษัทย่อย หรือบางแห่งอาจทิ้งลงในแม่น้ำลำคลองต่าง ๆ ซึ่งเป็นสาเหตุอันหนึ่ง ที่เพิ่มความสกปรกให้แก่แม่น้ำลำคลอง ของเสียบางอย่างก็อาจจะเป็นพิษเป็นภัยต่อคนและสัตว์ โดยเฉพาะสารโลหะหนักต่าง ๆ เมื่อปล่อยลงไปในแม่น้ำลำคลอง ก็จะมีการสะสมเพิ่มขึ้นจนมีปริมาณมากเกินไป สารโลหะหนักบางชนิด เช่นปรอทจะมีผลกระทบทางด้านนิเวศวิทยาอีกด้วย มาตรการป้องกันกากของเสียที่มีสารพิษกระจายสู่สภาวะแวดล้อมที่ทั่วโลกเล็งเห็นกันอยู่ก็คือ จัดการเก็บรวบรวมสารพิษจากแหล่งกำเนิดมาทำการปรับเสถียร ด้วยการใช้สารเคมีผสมซีเมนต์ ก่อนนำไปฝังกลบ ณ จุดฝังที่เหมาะสมและถูกต้องตามหลักวิชาการ หรืออาจส่งไปกำจัดที่ศูนย์บริการกำจัดกากอุตสาหกรรม (บางขุนเทียน) หรือสถานประกอบการกิจการกำจัดของเสียเอกชนที่ได้รับความเห็นชอบจากกรมโรงงานอุตสาหกรรม

7 พลังงานทดแทน (renewable energy)

พลังงานทดแทน โดยทั่วไปหมายถึงพลังงานที่มีอยู่ทั่วไปตามธรรมชาติสามารถนำมาใช้แทนน้ำมันเชื้อเพลิง สามารถแบ่งตามแหล่งที่ได้มา เป็น 2 ประเภท คือ พลังงานทดแทนจากแหล่งที่ใช้แล้วหมดไป อาจเรียกว่า พลังงานสิ้นเปลือง ได้แก่ ถ่านหิน แก๊สธรรมชาติ นิวเคลียร์ หินน้ำมัน และทรายน้ำมัน เป็นต้น และพลังงานทดแทนอีกประเภทหนึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่ใช้แล้วสามารถหมุนเวียนมาใช้ได้อีก เรียกว่า พลังงานหมุนเวียน ได้แก่ แสงอาทิตย์ ลม ชีวมวล น้ำ และไฮโดรเจน เป็นต้น (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2552)

7.1 ประเภทของพลังงานหมุนเวียน

7.1.1 พลังงานชีวมวล

พลังงานชีวมวล คือพลังงานที่ได้จากสิ่งมีชีวิตทั้งพืชและสัตว์ รวมไปถึงซากของเสียอินทรีย์ต่าง ๆ เช่น เศษใบไม้ มูลสัตว์ ขยะชุมชน ชีวมวลจัดเป็นพลังงานทดแทนหรือพลังงานหมุนเวียน เพราะสามารถผลิตขึ้นมาใหม่ได้ รูปแบบของการใช้ประโยชน์จากชีวมวลแบ่งได้เป็น 3 แบบ (ไกรพัฒน์, 2550)

ก. ชีวมวลของแข็ง (solid biomass) เช่น เศษไม้ เศษกระดาษ รวมไปถึงเปลือกเมล็ดพืชต่าง ๆ

ข. ชีวมวลของเหลว (liquid biofuel) คือ เชื้อเพลิงเหลวที่ผลิตจากชีวมวลของแข็ง เช่น เอทานอล เมทานอล น้ำมันไบโอดีเซล

ค. แก๊สชีวมวล (biogas) เช่นเชื้อเพลิงที่มีสถานะเป็นแก๊สที่ผลิตได้จากกระบวนการที่มีการควบคุมอุณหภูมิและความดัน

7.1.2 พลังงานแสงอาทิตย์

พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นพลังงานทดแทนประเภทหมุนเวียนที่ใช้แล้วเกิดขึ้นใหม่ได้ตามธรรมชาติ เป็นพลังงานที่สะอาด ปราศจากมลพิษ และเป็นพลังงานที่มีศักยภาพสูง ในการใช้พลังงานแสงอาทิตย์สามารถจำแนกออกเป็น 2 รูปแบบคือ การใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า และการใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพื่อผลิตความร้อน โดยเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ได้แก่ ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ แบ่งออกเป็น 3 ระบบ คือ เซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ เซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่าย (ไกรพัฒน์, 2550)

ก. เซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ

เป็นระบบผลิตไฟฟ้าที่ได้รับการออกแบบสำหรับใช้งานในพื้นที่ชนบทที่ไม่มีระบบสายส่งไฟฟ้า อุปกรณ์ระบบที่สำคัญประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ อุปกรณ์ควบคุมการประจุ แบตเตอรี่ แบตเตอรี่ และอุปกรณ์เปลี่ยนระบบไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบอิสระ

ข. เซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่าย

เป็นระบบผลิตไฟฟ้าที่ถูกรอกแบบสำหรับผลิตไฟฟ้าผ่านอุปกรณ์เปลี่ยนระบบไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเข้าสู่ระบบสายส่งไฟฟ้าโดยตรง ใช้ผลิตไฟฟ้าในเขตเมือง หรือพื้นที่ที่มีระบบจำหน่ายไฟฟ้าเข้าถึง อุปกรณ์ระบบที่สำคัญประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ อุปกรณ์เปลี่ยนระบบไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับชนิดต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า เซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสาน

ค. เซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสาน

เป็นระบบผลิตไฟฟ้าที่ถูกรอกแบบสำหรับทำงานร่วมกับอุปกรณ์ผลิตไฟฟ้าอื่น ๆ เช่น ระบบเซลล์แสงอาทิตย์กับพลังงานลม และเครื่องยนต์ดีเซล ระบบเซลล์แสงอาทิตย์กับพลังงานลม และไฟฟ้าพลังน้ำ เป็นต้น โดยรูปแบบระบบจะขึ้นอยู่กับกรอกแบบตามวัตถุประสงค์โครงการเป็นกรณีเฉพาะ

7.1.3 พลังงานลม

เป็นพลังงานธรรมชาติที่เกิดจากความแตกต่างกันของอุณหภูมิในบริเวณนั้นซึ่งสะอาดและบริสุทธิ์ใช้แล้วไม่มีวันหมดสิ้นไปจากโลก ได้รับความสนใจนำมาพัฒนาให้เกิดประโยชน์อย่างกว้างขวาง ในขณะเดียวกัน กังหันลมก็เป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่สามารถนำพลังงานลมมาใช้ให้เป็นประโยชน์ได้ โดยเฉพาะในการผลิตกระแสไฟฟ้า และในการสูบน้ำ ซึ่งได้ใช้งานกันมาแล้วอย่างแพร่หลาย พลังงานลมเกิดจากพลังงานจากดวงอาทิตย์ตกกระทบโลกทำให้อากาศร้อน และลอยตัวสูงขึ้น อากาศจากบริเวณอื่นซึ่งเย็นและหนาแน่นมากกว่าจึงเข้ามาแทนที่ การเคลื่อนที่ของอากาศเหล่านี้เป็นสาเหตุให้เกิดลม และมีอิทธิพลต่อสภาพลมฟ้าอากาศในบางพื้นที่ของประเทศไทย โดยเฉพาะอย่างยิ่งแนวฝั่งทะเลอันดามันและด้านทะเลจีน (อ่าวไทย) มีพลังงานลมที่อาจนำมาใช้ประโยชน์ในลักษณะพลังงานกล (กังหันสูบน้ำกังหันผลิตไฟฟ้า) ศักยภาพของพลังงานลมที่สามารถ นำมาใช้ประโยชน์ได้สำหรับประเทศไทย มีความเร็ว อยู่ระหว่าง 3 - 5 เมตรต่อวินาที และความเข้มพลังงานลมที่ประเมินไว้ได้อยู่ระหว่าง 20 - 50 วัตต์ต่อตารางเมตร (ไกรพัฒน์, 2550)

7.1.4 พลังงานความร้อนใต้พิภพ

น้ำร้อนที่ถูกนำไปใช้ในการผลิตไฟฟ้าแล้วนั้น แม้อุณหภูมิจะลดลงบ้าง แต่ก็ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการอบแห้ง และใช้ในห้องเย็นสำหรับเก็บรักษาพืชผลทางการเกษตรได้นอกจากนั้น น้ำที่เหลือใช้แล้วยังสามารถนำไปใช้ในการเพื่อการกายภาพบำบัด และการท่องเที่ยวได้อีก

ท้ายที่สุดคือ น้ำทั้งหมดซึ่งยังมีสภาพเป็นน้ำอุ่นอยู่เล็กน้อย จะถูกปล่อยลงไปผสมกับน้ำตามธรรมชาติในลำน้ำ ซึ่งนับเป็นการเพิ่มปริมาณน้ำให้กับเกษตรกรในฤดูแล้งได้อีกทางหนึ่งด้วย

7.1.5 พลังงานน้ำ

พื้นผิวโลกถึงร้อยละ 70 ปกคลุมด้วยน้ำ ซึ่งมีความสำคัญยิ่งต่อสิ่งมีชีวิตทั้งหลาย น้ำเหล่านี้มีการเปลี่ยนสถานะและหมุนเวียนอยู่ตลอดเวลา ระหว่างผิวโลกและบรรยากาศอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเรียกว่า วัฏจักรของน้ำ น้ำที่กำลังเคลื่อนที่มีพลังงานสะสมอยู่มาก พลังงานน้ำนั้นจัดเป็นพลังงานสุริยะทางอ้อม โดยมีกระบวนการหลัก คือแหล่งน้ำจากธรรมชาติดูดซับพลังงานจากดวงอาทิตย์ หลังจากนั้นน้ำจะระเหยกลายเป็นไอ เมื่อน้ำในอากาศมีมากขึ้นและรวมตัวกันตกลงมาบนพื้นดิน เกิดการไหลบนพื้นดิน ตลอดจนบางส่วนไหลซึมลงไปได้ชั้นดินเป็นน้ำบาดาล และไหลบรรจบกันตามแหล่งน้ำธรรมชาติ จนไปถึงมหาสมุทร วัฏจักรนี้จึงไม่มีวันสิ้นสุด พลังงานน้ำจึงจัดเป็นพลังงานหมุนเวียนที่สำคัญต่อโลกของเรา มนุษย์รู้จักนำพลังงานนี้มาใช้หลายร้อยปีแล้ว เช่น ใช้หมุนกังหันน้ำ ปัจจุบันมีการนำพลังงานน้ำไปหมุนกังหันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในโรงไฟฟ้าพลังน้ำเพื่อผลิตไฟฟ้า

7.1.6 พลังงานจากขยะ

พลังงานจากขยะจากบ้านเรือนและกิจกรรมต่าง ๆ เป็นแหล่งพลังงานที่มีศักยภาพสูง ขยะเหล่านี้ส่วนใหญ่เป็นมวลชีวภาพ เช่น กระดาษ เศษอาหาร และไม้ ซึ่งสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้าที่ถูกออกแบบให้ใช้ขยะเป็นเชื้อเพลิงได้

8. สนุ่นดำ (Jatropha)

สนุ่นดำเป็นพืชน้ำมันซึ่งเป็นพืชวงศ์เดียวกับ ขางพารา พญาไร้ใบ สลัดได โป๊ยเซียน คริสต์มาส หนุ่ยยาง มันสำปะหลัง ฯลฯ มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Jatropha Curcas* Linn. ในแต่ละภาคสนุ่นดำมีชื่อเรียกแตกต่างกัน อย่างเช่นภาคเหนือ เรียก มะหุ้งฮั่ว ภาคอีสาน เรียกหมากเขา มะเข่า หรือ สีหลอด (เพราะเป็นยาถ่ายคล้ายสลอด) ในขณะที่ภาคใต้เรียกว่า หงเทศ หรือ หุ้งเทศ (ละหุ้งต่างประเทศ) เมล็ดมีลักษณะคล้ายเมล็ดมะม่วง ผลมีสีเขียว เมื่อสุกจะสีเหลือง แต่เมื่อผลแห้งจะมีสีน้ำตาลดำ (ศูนย์ส่งเสริมวิศวกรรมเกษตรที่ 1 ชัยนาท. 2552)

ปัจจุบันได้มีการนำน้ำมันจากเมล็ดสนุ่นดำไปเป็นพลังงานทดแทน เพื่อผลิตน้ำมันไบโอดีเซล ซึ่งในการสกัดน้ำมันออกจากเมล็ดสนุ่นดำจะได้น้ำมันออกมาประมาณร้อยละ 25-30 (พรชัย, 2552) ซึ่งเท่ากับว่าที่เหลือนั้นจะเป็นกากของเมล็ดสนุ่นดำ สำหรับกากสนุ่นดำนั้นมีองค์ประกอบของ ไนโตรเจนถึงร้อยละ 44 ฟอสฟอรัสร้อยละ 2.09 และโพแทสเซียมร้อยละ 1.68 จึงสามารถนำไปทำเป็นวัสดุปรับปรุง

ดินได้ เมื่อวิเคราะห์ค่าความร้อนของกากสับดูพบว่า กากสับทำให้ค่าความร้อนถึง 4,528 กิโลแคลอรี ต่อสับดู 1 กิโลกรัม (ระพีพันธุ์ และสุขสันต์, 2552) ซึ่งค่าความร้อนที่ได้นี้มากกว่าถ่านหินลิกไนต์ถึง 2 เท่า และให้พลังความร้อนเทียบเท่าถ่านหินลิกไนต์ นอกจากนี้ผลจากการเผาไหม้ยังให้ค่า ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่วัดได้เป็นศูนย์

9. การประเมินทางด้านเศรษฐศาสตร์

ทำการรวบรวมข้อมูลเงินลงทุน เงินที่ใช้ในการดำเนินการตามข้อเสนอเทคโนโลยีสะอาด และคำนวณถึงค่าใช้จ่ายในการดำเนินการผลิตผลิตภัณฑ์ที่สามารถประหยัดได้ คำนวณระยะเวลาคุ้มทุนในการดำเนินข้อเสนอเทคโนโลยีสะอาด มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (net present value, NPV) และอัตราผลตอบแทน (internal rate of return, IRR) โดยใช้วิธีของ Brigham และ Houston, 2000

9.1 ระยะเวลาคืนทุน (pay back period)

ระยะเวลาคืนทุน คือ ระยะเวลาที่กระแสเงินสดรับสุทธิสามารถชดเชยกระแสเงินสดจ่ายสุทธิตอนเริ่มโครงการได้พอดี ระยะเวลาคืนทุนสามารถบ่งบอกได้ว่าจะต้องใช้เวลานานเท่าใดจึงจะคืนทุนจากการลงทุนในตอนแรกเริ่ม ถ้าระยะเวลาคืนทุนสั้นแสดงว่าโครงการนั้นมีความน่าสนใจในการลงทุน ข้อดีของระยะเวลาคืนทุนคือสามารถคำนวณได้ง่าย และบ่งบอกถึงความเสี่ยงของโครงการได้ในเบื้องต้น อย่างไรก็ตาม ระยะเวลาคืนทุนมีข้อเสียคือ ไม่คำนึงถึงมูลค่าของเงินตามเวลา ซึ่งมูลค่าของเงินในอนาคตจะน้อยกว่ามูลค่าของเงินในปัจจุบัน อีกทั้งยังไม่คำนึงถึงผลประโยชน์หลังจากคืนทุนแล้ว ซึ่งโครงการบางโครงการอาจจะคืนทุนได้ช้าแต่มีผลประโยชน์หลังจากที่คืนทุนแล้วมากกว่า ระยะเวลาคืนทุนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน} = \frac{\text{เงินลงทุนในการดำเนินการ}}{\text{เงินรายได้สุทธิจากการดำเนินการ}} \quad (3)$$

9.2 มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (net present value, NPV)

มูลค่าปัจจุบันสุทธิ คือ ผลต่างของมูลค่าเงินได้สุทธิจากการดำเนินโครงการในแต่ละปี ตลอดอายุโครงการ กับมูลค่าปัจจุบันของเงินที่จ่ายออกไป การคำนวณหามูลค่าปัจจุบันสุทธิจะต้องทราบข้อมูลดังนี้ กระแสเงินสดจ่ายลงทุนสุทธิ กระแสเงินสดรับสุทธิตลอดอายุโครงการ ระยะเวลาของโครงการ

ในการใช้มูลค่าปัจจุบันสุทธิในการประเมินโครงการ จะพิจารณาว่าค่า NPV ที่สามารถคำนวณได้มีค่าเป็นบวกหรือลบ หากค่า NPV มีค่าเป็นบวกแสดงว่าโครงการดังกล่าวสมควรที่จะลงทุน หากค่า NPV เป็นลบแสดงว่าโครงการนั้นไม่สมควรที่จะลงทุน ในกรณีที่ค่า NPV เท่ากับ 0 หมายความว่าโครงการสามารถหาเงินมาจ่ายผลตอบแทนให้กับผู้ลงทุนได้เท่ากับความเสี่ยง และยังสามารถชำระคืนเงินลงทุนให้ผู้ลงทุนได้ทั้งหมดพอดี ค่า NPV สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4 และมูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดรับคำนวณได้จากสมการที่ 5

$$\text{มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV)} = \text{มูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดรับ} - \text{เงินลงทุนเริ่มแรก} \quad (4)$$

$$\text{โดย มูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดรับ} = \text{PMT} \times \text{PVIFA} (n,i) \quad (5)$$

เมื่อ PMT คือ เงินรายได้สุทธิต่อปีจากการดำเนินงานตามข้อเสนอ

PVIFA (n,i) คือ มูลค่าปัจจุบันของเงินรายงวดที่เท่ากันจำนวน 1 บาท

อัตราผลตอบแทนที่ต้องการร้อยละ i ระยะเวลาตลอดโครงการ n ปี

9.3 อัตราผลตอบแทนจากโครงการ (internal rate of return, IRR)

อัตราผลตอบแทนจากโครงการ หมายถึง อัตราผลตอบแทนที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันของเงินสดรับสุทธิตลอดอายุโครงการมีค่าเท่ากับเงินสดจ่ายสุทธิลงทุนเริ่มแรก ในการพิจารณาการลงทุนโดยใช้ค่า IRR ถ้าอัตราผลตอบแทนจากโครงการ (IRR) มีค่ามากกว่าอัตราผลตอบแทนที่ต้องการ (r) แสดงว่าโครงการนั้นสมควรที่จะลงทุน นั่นคือ ครอบรับโครงการลงทุนเมื่อ IRR มากกว่า r โดยทั่วไป ค่า r ที่ใช้ในการพิจารณาการลงทุนจะเท่ากับค่าอัตราผลตอบแทนที่ต้องการที่ใช้ในการคำนวณค่า NPV ค่า IRR สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 6

$$\text{เงินลงทุนในการดำเนินงานตามข้อเสนอ} = \sum \frac{\text{เงินรายได้สุทธิในปีที่ } t}{(1 + \text{IRR})^t} \quad (6)$$

10. กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันกับการนำมาจัดการของเสียเพื่อเป็นพลังงาน

Pinto *et al.* (2002) ได้ศึกษาคุณลักษณะของระบบแก๊สซิฟิเคชันแบบตัวกลางเคลื่อน (fluidized bed) ที่เพื่อผลิตไอน้ำ โดยใช้ชีวมวลและพลาสติกเป็นเชื้อเพลิงในการเผา เมื่อใส่พลาสติกเป็นส่วนผสมถึงร้อยละ 60โดยน้ำหนัก ผลจากการทดลองพบว่า เป็นการลดคาร์บอนมอนอกไซด์แต่เป็นการเพิ่ม

ปริมาณไฮโดรเจนถึงร้อยละ 50 ได้ปริมาตรแก๊สออกมาสูงสุดได้ 1.96 ลิตรต่อกรัม การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิมีผลดีต่อปริมาณของไฮโดรเจน และยังเป็นการลดสารไฮโดรคาร์บอน ปริมาณน้ำมันดิน และลดปริมาณเถ้าอีกด้วย โดยสภาวะที่เหมาะสมที่สุดคือ ที่ 885 องศาเซลเซียส สัดส่วนพลาสติกเป็นร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก เป็นสภาวะที่ให้ปริมาณเถ้าออกมาประมาณร้อยละ 2 และให้แก๊สออกมามากถึงร้อยละ 90

Na *et al.* (2003) ได้ทำการศึกษาคุณลักษณะของระบบแก๊สซิฟิเคชันแบบตัวกลางคงที่ (fixed-bed) เมื่อเผาของเสียซึ่งเป็นพลาสติกและเซลลูโลส เพื่อนำมาใช้เป็นพลังงานหมุนเวียน โดยเผาที่อุณหภูมิ 1100 – 1450 องศาเซลเซียส ได้ผลของแก๊สร้อนออกมาเป็น ไฮโดรเจนร้อยละ 30-40 คาร์บอนมอนอกไซด์ร้อยละ 15 - 30 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพจึงนำมาผสมกับถ่านโค้ก ได้ปริมาณแก๊สร้อนออกมาร้อยละ 61 ให้ค่าความร้อนออกมาในช่วง 2800 - 3200 กิโลแคลอรีต่อลูกบาศก์เมตร

Aznar *et al.* (2006) ได้ทำการทดลองกำจัดขยะพลาสติกโดยใช้ระบบการเผาแก๊สซิฟิเคชันแบบตัวกลางเคลื่อนที่ (fluidized bed) โดยใช้อากาศ และศึกษาการใช้โดโลไมต์เป็นตัวดักจับด่างน้ำมัน แก๊สซิฟิเคชันมีความสูงของตัวกลาง 1 เมตร และมีพื้นที่ว่าง 1 เมตร ของเสียที่นำมาใช้เป็นพลาสติกผสม จีเลื่อยของต้นสน และ ถ่านหิน ในอัตราส่วนการใส่ขยะ 1-4 กิโลกรัมต่อชั่วโมง หาสัดส่วนของเสียที่เหมาะสมซึ่งได้เป็น ถ่านหินร้อยละ 60 ชีวมวลร้อยละ 20 พลาสติกร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิที่ศึกษาอยู่ในช่วง 750-880 องศาเซลเซียส องค์ประกอบแก๊สที่ได้จากการเผาคือ ไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดร็อกไซด์ มีเทน ไฮโดรคาร์บอน ซึ่งปริมาณไฮโดรเจนที่ออกมามีปริมาณปานกลาง (มากกว่าร้อยละ 15) ปริมาณน้ำมันดินน้อยมาก (น้อยกว่า 0.5 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

Galvagno *et al.* (2008) ทำการศึกษากิจการของเสียโดยใช้ความร้อน ทั้งนี้เพื่อที่จะนำพลังงานมาหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ โดยใช้กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเพื่อผลิตไอน้ำ ได้นำเชื้อเพลิง 3 ประเภทมาเปรียบเทียบกัน คือ ขยะที่ทิ้งแล้ว เศษไม้ ขยะเชื้อเพลิง โดยพิจารณาผลการทดลองจากปริมาณโปรคิวเซอร์แก๊ส ที่ได้ คุณภาพของโปรคิวเซอร์แก๊ส และองค์ประกอบของโปรคิวเซอร์แก๊ส ผลการทดลอง ที่อุณหภูมิของเตา 1000 องศาเซลเซียส ขยะที่ทิ้งแล้วให้ค่าความร้อนสูงที่สุด และพลังงานรวมคิดเป็น 28.12 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม รองลงมาคือขยะเชื้อเพลิงและเศษไม้ ให้พลังงานรวมเป็น 18.33 และ 14.70 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ เมื่อพิจารณาองค์ประกอบแล้วพบว่า ขยะที่ทิ้งแล้วมีองค์ประกอบของมีเทน และไฮโดรเจนในปริมาณที่สูงกว่าของเสียประเภทอื่น ดังนั้นจึงเป็นทางเลือกที่ดีที่สุดในการนำไปพัฒนาต่อ

Sylwester *et al.* (2008) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการจัดการของเสียชีวมวลเพื่อเป็นพลังงานร่วมโดยใช้กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเพื่อผลิตแก๊สร้อน โดยนำแก๊สร้อนนี้ไปใช้ร่วมกับหม้อต้มไอน้ำ ที่เดิมใช้พลังงานจากถ่านหิน จากการทดลองเผาร่วมให้ปริมาณแก๊สร้อนทั้งหมด 230 ตันต่อชั่วโมง และเมื่อ

ทดลองเผาเพื่อหาค่าความร้อนที่ดีที่สุดของการเผาชีวมวลและถ่านหิน เป็น 8.5 เมกกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร ทดลองใช้ความร้อนรวมที่ร้อยละ 10, 20, 40 แล้วนำค่าที่ดีที่สุดไปใช้กับหม้อต้มไอน้ำ พบว่า ที่สัดส่วนร้อยละ 40 เป็นค่าที่เหมาะสมในการนำไปใช้งานที่สุด

Dalai *et al.* (2009) ทำการทดลองเผาของเสียที่ผ่านการคัดแยกแล้ว เพื่อเป็นขยะเชื้อเพลิง 2 ชนิด คือแบบอัดก้อนกับแบบไม่อัดก้อน เปรียบเทียบกัน โดยนำมาเผาใช้กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันแบบตัวกลางคงที่ (fixed bed) เพื่อพิจารณาปริมาณแก๊สสังเคราะห์ (syngas) และองค์ประกอบของแก๊ส ค่าความร้อน ที่ออกมาจากการเผา ซึ่งผลจากการทดลองพบว่า ขยะเชื้อเพลิงทั้ง 2 ชนิด ไม่มีความแตกต่างกัน เนื่องจากองค์ประกอบที่อยู่ในขยะเป็นชนิดเดียวกันจึงพบปริมาณ ไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรคาร์บอน เป็นไปในทิศทางเดียวกันโดยอุณหภูมิสูงสุดคือ 725 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่พบปริมาณของคาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรเจนสูงที่สุด

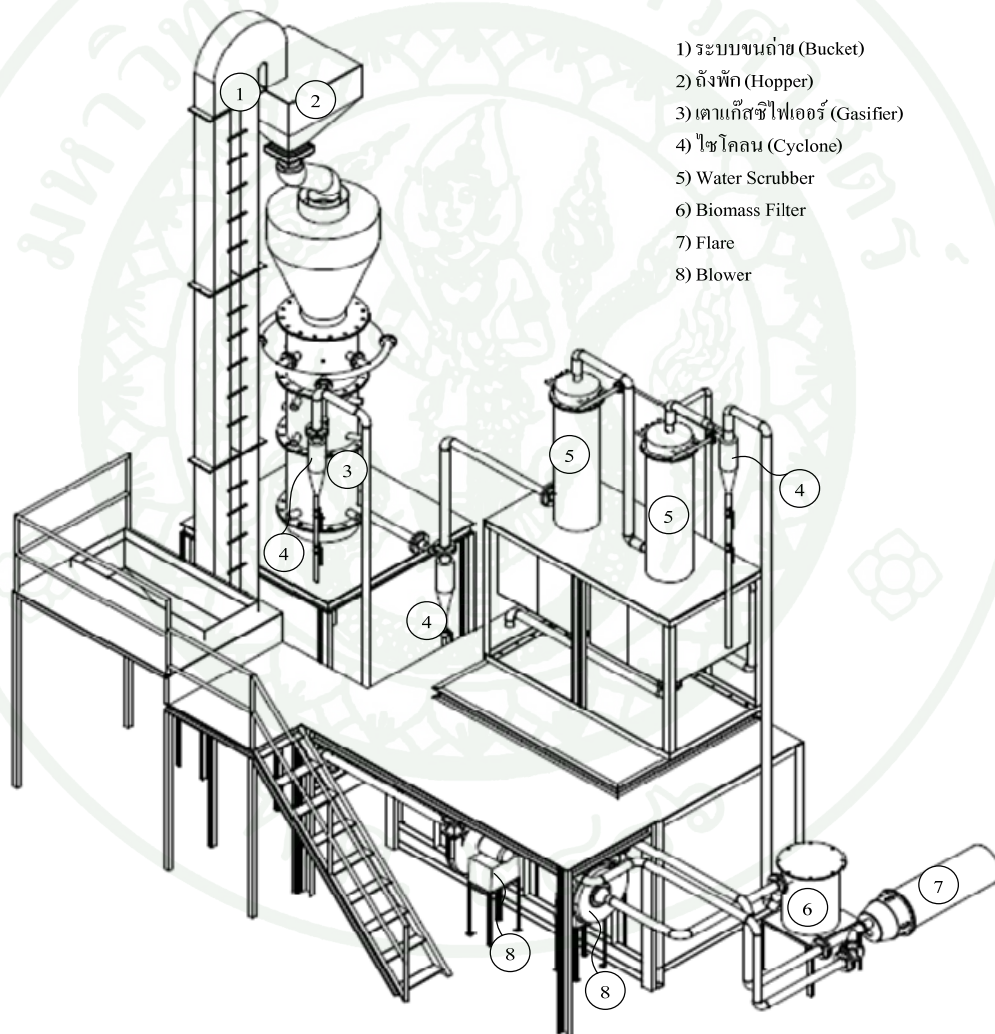
Chiemchaisri *et al.* (2010) ใช้ประโยชน์จากขยะจากสถานเทกองขยะ (dumpsite) ในประเทศไทยมีของเสียมากกว่า 800 ตันต่อวัน เพื่อมาผลิตเป็นขยะเชื้อเพลิง วิเคราะห์องค์ประกอบทางกายภาพของขยะ ความชื้น ความหนาแน่น ปริมาณสารระเหย ชัลเฟอร์ คลอรีน และค่าความร้อนแยกองค์ประกอบที่เป็นพลาสติกออกมาโดยใช้คนแยกและเครื่องทรมเมลสกรีน ย่อยให้มีขนาดเล็กกลงแล้วอัดเป็นแท่งเชื้อเพลิงร่วมกับกากมันสำปะหลัง เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการเป็นเชื้อเพลิงโดยผ่านเทคนิคแก๊สซิฟิเคชัน ระบบแก๊สไหลลง (down-draft) กระบวนการเผากำหนดสัดส่วนขยะเชื้อเพลิงกับกากมันสำปะหลังเป็น 1:0.2 0.4 0.6 0.8 1.1 1.2 1.4 และ 1.6 กำหนดขนาดของเชื้อเพลิงเป็น 40×40 มิลลิเมตร โดยให้อากาศเป็น 30 และ 50 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ตรวจวัดโปรดิวเซอร์แก๊ส ดังนั้น คาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน มีเทน คาร์บอนไดร็อกไซด์ จากการทดลองพบว่า ขยะมีองค์ประกอบของพลาสติกเป็นร้อยละ 24.6-56.6 และมีองค์ประกอบที่คล้ายดินอยู่ร้อยละ 27.9-56.6 ความหนาแน่นของขยะเป็น 249-411 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความชื้นร้อยละ 34.7-50.0 ปริมาณสารระเหย และ ปริมาณเถ้าเป็นร้อยละ 36.4-57.2, และร้อยละ 42.8-63.6 ตามลำดับ ค่าความร้อน 27.5-38.5 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. อุปกรณ์ในการทดลอง

1.1 เตาผลิตโปรคิวเซอร์แก๊ส หรือเตาปฏิกรณ์ ชนิด เตาผลิตโปรคิวเซอร์แก๊สแบบลูกผสม (hybrid gasifier) ดังภาพที่ 5 ที่ศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



(ก)



(ข)

ภาพที่ 5 เตาผลิตโปรคิวเซอร์แก๊ส หรือเตาปฏิกรณ์ ชนิดเตาผลิตโปรคิวเซอร์แก๊สแบบลูกผสม
(ก.) แบบโครงร่างเตาผลิตโปรคิวเซอร์แก๊สแบบลูกผสม (ข.) เตาผลิตโปรคิวเซอร์แก๊สแบบ
ลูกผสม

ที่มา : ศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล (2552ก)

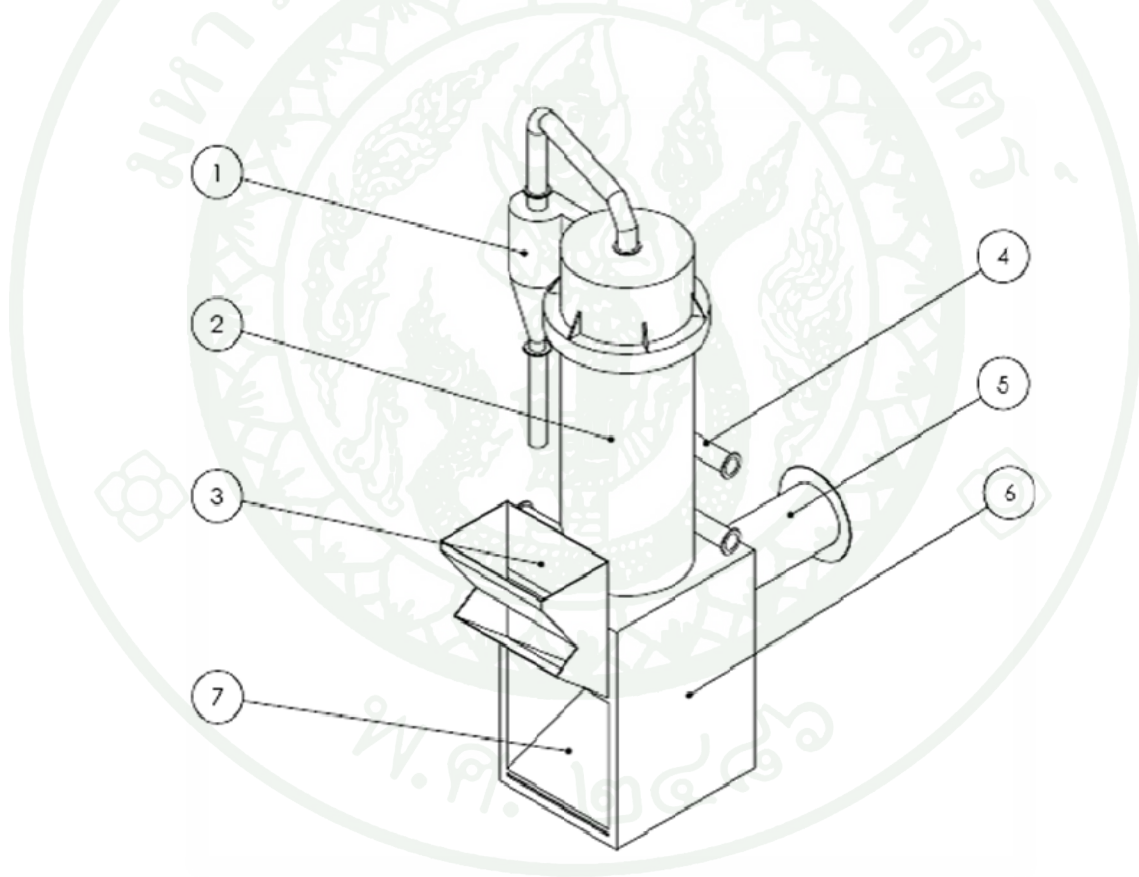
1.1.1 หลักการทำงานของต้นแบบโรงงานผลิตโปรคิวเซอร์แก๊ส โดยเทคโนโลยีแก๊สซิฟิ
เคชัน

การทำงานของระบบคือ วัตถุดิบจะถูกลำเลียงสู่ถังพักเพื่อรอที่จะเข้าสู่เตา
แก๊สซิฟิเคชัน หลังจากนั้นวัตถุดิบจะถูกปล่อยลงสู่เตาแก๊สซิฟิเคชันและจะทำให้เกิดปฏิกิริยาขึ้น 4
โซนคือ โซนอบแห้ง (drying zone) โซนไพโรไลซิส (pyrolysis zone) โซนการเผาไหม้ (combustion
zone) และ โซนรีดักชัน (reduction zone) ในเตาแบบนี้ แก๊สและทาร์ (tar) ที่เกิดขึ้นในโซนไพโรไลซิส
จะถูกดึงออกมาทางด้านบนต่างหาก (updraft) เพื่อลดปริมาณทาร์ที่จะไหลไปสู่ด้านล่าง (downdraft)
ทาร์ที่มากับ synthesis gas นี้จะถูกควบแน่นโดยปล่อยให้ไหลผ่านอุปกรณ์ควบแน่น (condenser) ส่วน
synthesis gas ที่เกิดในโซนรีดักชันจะไหลผ่านทางออกด้านล่าง ไปสู่ไซโคลน และ water scrubber เพื่อ

กำจัดฝุ่นและลดอุณหภูมิ แก๊สที่ออกทางด้านล่างนี้จะมีอากาศมากสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ได้ โดยในเบื้องต้นจะนำ synthesis gas มาใช้เผาไหม้โดยตรงในงาน thermal application โดยรูปแบบของโรงงานผลิตโปรดิวเซอร์แก๊ส โดยเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน

1.2 เตาเผาระบบเผาตรง (direct combustion)

เตาเผาที่ใช้ในการทดสอบการเผาไหม้ของกากตะกอนเป็นเตาเผาแบบไซโคลน ตัวห้องเผาไหม้มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกส่วนบนและทรงกรวยตัดส่วนล่าง ด้านบนห้องเผาไหม้เป็นห้องดักเถ้าที่เกิดจากการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ ท่อลมออกเชื่อมต่อกับชุดพัดลมดูดอากาศเพื่อดูดอากาศเข้าเตาเผาช่วยให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ความเร็วโดยเฉลี่ยของอากาศที่เข้าและออกจากเตาเผามีค่า 19 เมตรต่อวินาที ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 เตาเผาระบบเผาตรง (direct combustion)

1 ไซโคลน 2 หอไซโคลน 3 ช่องป้อนเชื้อเพลิง 4 ท่ออากาศเข้า 5 ท่ออากาศออก 6 ห้องเผาไหม้ 7 ถาดรองรับเถ้า

ที่มา: ศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล (2552 ข)

1.3 เครื่องอัดเชื้อเพลิงของแข็ง (briquetting machine) ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 เครื่องอัดเชื้อเพลิงของแข็ง (briquetting machine)

เครื่องอัดแบบสกรู (screw type) กำลังมอเตอร์ 22 กิโลวัตต์ ความเร็วรอบของมอเตอร์ 146 รอบต่อนาที ผลิตเชื้อเพลิงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 45 มิลลิเมตร กำลังการผลิต 200 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

- 1.4 เทอร์โมคัปเปิ้ล (thermocouple)
- 1.5 เครื่องวัดอัตราการไหลของแก๊ส (gas flow meter)
- 1.6 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (gas chromatography, GC) ยี่ห้อ SIMADSU GC-14B
- 1.7 เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง
- 1.8 เครื่องวิเคราะห์แก๊ส (flue gas analyzer)
- 1.9 เครื่อง CHNS/O Analysis
- 1.10 เตาเผา (muffle furnace)
- 1.11 ตู้อบแห้ง (oven)
- 1.12 เดสสิเคเตอร์ (desiccators)
- 1.13 ครุชีเบิ้ล พร้อมฝาปิด (crucible)
- 1.14 ถาดอะลูมิเนียม
- 1.15 บีกเกอร์
- 1.16 กระบอกตวง
- 1.17 กรวยกรอง

2. สารเคมี

- 2.1 แก๊สฮีเลียม ความบริสุทธิ์ 99.99%
- 2.2 แก๊สมาตรฐาน คาร์บอนไดออกไซด์
- 2.3 แก๊สมาตรฐาน คาร์บอนมอนอกไซด์
- 2.4 แก๊สมาตรฐาน มีเทน
- 2.5 แก๊สมาตรฐาน ไฮโดรเจน
- 2.6 น้ำกลั่น
- 2.7 สารละลายกรดซัลฟุริก (H_2SO_4)
- 2.8 สารละลายกรดไนตริก (HNO_3)

วิธีการ

1. การเก็บรวบรวมข้อมูล

ทำการรวบรวมข้อมูลสำคัญต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ เช่น การตรวจสอบเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมผลิตเชื้อกระดาษ ระบบการเผาตรงเพื่อการผลิตพลังงาน การผลิตโปรคิวเซอร์แก๊ส เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน และอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาข้อมูลการใช้พลังงานโดยเน้นเฉพาะกระบวนการผลิตที่ใช้พลังงานจากน้ำมันเตา รวมถึงศึกษาปริมาณของวัตถุดิบที่ไม่ผ่านการคัดเลือกของกระบวนการผลิตกระดาษรีไซเคิล ทำสมมูลมวล ในอุตสาหกรรมกระดาษรีไซเคิล

2. การเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์คุณสมบัติของเชื้อเพลิง

2.1 นำกากตะกอน และชีวมวลมาเตรียมให้อยู่ในสภาพแห้งในอากาศ (air dry) หลังจากนั้นทำการสุ่มเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบต่อไป สำหรับวัตถุดิบที่ไม่ผ่านการคัดเลือกของอุตสาหกรรมกระดาษรีไซเคิล ถูกเก็บมาเพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทางกายภาพโดย นำขยะมาคลุกผสมกัน แบ่งขยะในกองออกเป็น 4 ส่วนเท่า ๆ กัน เลือกขยะออกมา 1 ส่วน แบ่งจนกว่าจะได้น้ำหนักตามที่ต้องการ (20 กิโลกรัม) นำตัวอย่างขยะจากอุตสาหกรรมกระดาษรีไซเคิล มาเทกองรวมกัน คลุกขยะให้ผสมกันนำขยะแต่ละตัวอย่างมาแยกประเภทโดยแยกเป็น พลาสติก กระดาษ โลหะ และอื่น ๆ (ยาง เศษผ้า ไม้) จดบันทึกน้ำหนักของขยะที่แยกออกมาแต่ละประเภท เพื่อหาสัดส่วนขององค์ประกอบของขยะที่ไม่ผ่านการคัดเลือก

2.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติของกากตะกอน วัสดุคืบที่ไม่ผ่านการคัดเลือก และชีวมวลแบบประมาณ (proximate analysis) นำวัสดุคืบที่ไม่ผ่านการคัดเลือกและชีวมวลมาวิเคราะห์หาปริมาณความชื้น เถ้า สารระเหย และคาร์บอนคงตัว

2.2.1 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น (moisture analysis) ตามมาตรฐาน ASTM D3173

ก. อบถาดอะลูมิเนียมในเตาอบที่อุณหภูมิ 105-110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที นำไปไว้ในเดสสิเคเตอร์จนเย็น นำไปชั่งแล้วบันทึกข้อมูล

ข. ใส่สารตัวอย่างน้ำหนักประมาณ 1 กรัม ลงในถาดอะลูมิเนียมชั่งน้ำหนักที่แน่นอนแล้วบันทึกข้อมูล

ค. นำถาดอะลูมิเนียมพร้อมสารตัวอย่างไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 105-110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง (หรือจนกระทั่งน้ำหนักของสารตัวอย่างคงที่)

ง. นำถาดอะลูมิเนียมออกจากตู้อบ นำไปไว้ในเดสสิเคเตอร์จนเย็น นำไปชั่งน้ำหนักแล้วบันทึกข้อมูล

คำนวณตามสมการที่ 7

$$M = (W_1 - W_2) / W \times 100 \quad (7)$$

M = ปริมาณความชื้นในสารตัวอย่าง(%)

W_1 = น้ำหนักถาดอะลูมิเนียม พร้อมสารตัวอย่างก่อนอบ (กรัม)

W_2 = น้ำหนักถาดอะลูมิเนียม พร้อมสารตัวอย่างหลังอบ (กรัม)

W = น้ำหนักของสารตัวอย่าง (กรัม)

2.2.2 วิเคราะห์ปริมาณสารระเหย (volatile analysis) ตามมาตรฐาน ASTM D3175

ก. เผาครูชีเบิ้ลพร้อมฝาปิดในเตาเผาที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที นำออกจากเตาเผาแล้วนำไปไว้ในเดสสิเคเตอร์จนเย็น นำไปชั่งเพื่อบันทึกน้ำหนักครูชีเบิ้ลพร้อมฝาปิด

ข. ใส่สารตัวอย่างน้ำหนักประมาณ 1 กรัม ลงในครุชชีเบิ้ล นำไปชั่งน้ำหนักที่แน่นอนแล้วบันทึกข้อมูล

ค. ปิดฝาครุชชีเบิ้ลให้สนิท แล้วนำครุชชีเบิ้ลไปเผาในเตาเผาโดยให้ความร้อนเป็น 2 ช่วง โดยช่วงแรกเริ่มต้นให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 นาที จากนั้นจึงให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 นาที

ง. นำครุชชีเบิ้ลออกจากเตาเผาทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องแล้วจึงนำไปไว้ในเดสลิเคเตอร์ต่ออีกระยะหนึ่ง แล้วนำไปชั่งเพื่อบันทึกน้ำหนักของครุชชีเบิ้ลพร้อมฝาปิด และสารตัวอย่าง

คำนวณตามสมการที่ 8

$$V = (W_a - W_b) / W \times 100 - M \quad (8)$$

V = ปริมาณสารที่ระเหยได้ (%)

M = ปริมาณความชื้นในสารตัวอย่าง (%)

W_a = น้ำหนักครุชชีเบิ้ลพร้อมฝาปิด และสารตัวอย่างก่อนการเผา (กรัม)

W_b = น้ำหนักครุชชีเบิ้ลพร้อมฝาปิด และสารตัวอย่างหลังการเผา (กรัม)

W = น้ำหนักของสารตัวอย่าง (กรัม)

2.2.3 การวิเคราะห์ปริมาณเถ้า (ash) ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D3174

ก. เผาครุชชีเบิ้ลพร้อมฝาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 700-750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำออกจากเตาเผาแล้วนำไปไว้ในเดสลิเคเตอร์จนเย็น นำไปชั่งเพื่อบันทึกน้ำหนักครุชชีเบิ้ลพร้อมฝาปิด

ข. เผาครุชชีเบิ้ลที่บรรจุสารตัวอย่างเพื่อไล่ควันด้วยตะเกียงเบนเซน โดยใช้ไฟอ่อน ๆ ขณะเผาให้เปิดฝาทิ้งไว้จนหมดควัน แล้วจึงยกครุชชีเบิ้ลออกจากไฟแล้วปิดฝา

ก. นำครุชีเบิ้ลเข้าเตาเผาโดยเปิดฝาออก ทำการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วเพิ่มอุณหภูมิเป็น 750 องศาเซลเซียสหรือเผาจนได้น้ำหนักคงที่

ง. นำครุชีเบิ้ลออกจากเตาเผาทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องแล้วจึงนำไปไว้ในแคลซิเตอร์ต่ออีกระยะหนึ่ง แล้วนำไปชั่งเพื่อบันทึกน้ำหนักของครุชีเบิ้ลพร้อมฝาปิด และสารตัวอย่าง

คำนวณตามสมการที่ 9

$$A = (W_3 - W_4) / W \times 100 \quad (9)$$

A = ปริมาณเถ้า (%)

W_3 = น้ำหนักครุชีเบิ้ลพร้อมฝาปิด และสารตัวอย่างก่อนการเผา (กรัม)

W_4 = น้ำหนักครุชีเบิ้ลพร้อมฝาปิด และสารตัวอย่างหลังการเผา (กรัม)

W = น้ำหนักของสารตัวอย่าง (กรัม)

2.2.4 ปริมาณคาร์บอนคงตัว (fixed carbon)

สามารถคำนวณได้จากการวิเคราะห์ปริมาณร้อยละความชื้นในสารตัวอย่าง ร้อยละสารระเหยในสารตัวอย่าง และร้อยละของเถ้า โดยคำนวณตามสมการที่ 10

ร้อยละของคาร์บอนคงตัว (%) = 100 – ร้อยละความชื้นในสารตัวอย่าง – ร้อยละสารระเหยในสาร

$$\text{ตัวอย่าง} - \text{ร้อยละของเถ้า} \quad (10)$$

2.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติของกากตะกอนแบบแยกธาตุ (ultimate analysis) เป็นการวิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ ด้วยเครื่อง CHNOS analysis

2.4 การวิเคราะห์หาค่าความร้อน เพื่อวิเคราะห์หาค่า high heating value

3. การอัดแท่งเชื้อเพลิง

เนื่องจากกากตะกอนที่ผ่านออกจากระบบบำบัดและของเสียที่ถูกปฏิเสธจากระบวนการผลิตนั้น ยังคงมีความชื้นในปริมาณสูงก่อนการนำไปเตรียมเป็นแท่งเชื้อเพลิงจึงต้องลดปริมาณความชื้นก่อน โดยการนำกากตะกอนและของเสียที่ถูกปฏิเสธจากระบวนการมาตากแดดก่อน

3.1 กากตะกอน

นำกากตะกอนตากให้แห้ง นำไปอัดเป็นแท่งเป็นเชื้อเพลิง โดยใช้เครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิง
ชีวมวล

3.2 ขยะ

แยกขยะที่ไม่สามารถเผาไหม้ไม่ได้ออกไป เช่น เศษแก้ว กระจกละต่าง ๆ เป็นต้น หลังจากนั้นนำขยะที่สามารถเผาไหม้ได้มาเข้าเครื่องบดย่อยเพื่อให้ขยะมีขนาดที่เล็กลง เหมาะสมต่อการอัดเป็นก้อนเชื้อเพลิง นำขยะเข้าเครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิง

3.3 ขยะผสมกับของเสียจากการเกษตร

นำขยะที่ถูกแยกแล้ว นำส่วนที่สามารถเผาไหม้ที่ถูกย่อยแล้วผสมกับของเสียจากการเกษตร (กากสับดำ) ในอัตราส่วน 50:50 โดยปริมาตร แล้วนำเข้าเครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิง

4. ทดสอบการใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชัน ทดสอบหาสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบ และศึกษาความสามารถในการผลิตโปรดิวเซอร์แก๊ส

4.1 อัตราการไหลของแก๊สโปรดิวเซอร์

หาอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงที่สามารถผลิตแก๊สที่ให้ค่าความร้อนมากที่สุด ซึ่งในการทดลองใช้ 4 ระดับ (เทียบจากตารางในภาคผนวกที่ ข2) คือ 91.3 100.43 108.41 และ 135.80 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง จากการคำนวณกำลังของ blower 2 ตัว ที่แรงอัดอากาศเข้าสู่ระบบและแรงดูดอากาศออกจากระบบ โดยควบคุมแรงอัด - แรงดูดดังนี้ 40 – 30 30 – 40 40 – 40 และ 50 – 50 ตรวจวัดพารามิเตอร์ต่างๆเพื่อประเมินประสิทธิภาพของแก๊สโปรดิวเซอร์ (producer gas)

4.2 อัตราการใช้เชื้อเพลิง (fuel consumption)

หาอัตราการใช้เชื้อเพลิงของแต่ละอัตราการไหลของแก๊สโปรคิวเซอร์ โดยชั่งน้ำหนักของเชื้อเพลิงก่อนเข้าเตาปฏิกรณ์ในทุกชั่วโมง จดบันทึกค่าน้ำหนักเชื้อเพลิง แล้วหาค่าเฉลี่ยซึ่งจะได้อัตราการใช้เชื้อเพลิงในหน่วยกิโลกรัมต่อชั่วโมง

4.3 อัตราการเกิดเถ้า (ash production)

หาอัตราการเกิดเถ้าเพื่อนำมาคำนวณหาประสิทธิภาพของระบบ ตรวจวัดโดยการชั่งน้ำหนักของเถ้าที่ออกมาจากเตาปฏิกรณ์ จดบันทึกค่าน้ำหนักเถ้าแล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยซึ่งจะได้อัตราการเกิดเถ้าในหน่วยกิโลกรัมต่อชั่วโมง

4.4 การประเมินประสิทธิภาพของแก๊สเชื้อเพลิง (gasification efficiency)

ศึกษาประสิทธิภาพการผลิตพลังงานจากการใช้เชื้อเพลิงทั้ง 3 ชนิด คือ กากตะกอน ขยะพลาสติก และขยะพลาสติกผสมกากสับดำ ผ่านกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยใช้ความสัมพันธ์อ้างอิงตามทิพย์สุกินทร์ (2550) และ บุริมภัทร์ (2552) ตามสมการที่ 11 และ 12

$$\text{Gasification Efficiency } (\eta_g) = \frac{[\text{Rate of energy carried by produce gas}]}{[\text{Rate of energy supplied to reactor}]} \quad (11)$$

$$\text{Gasification Efficiency } (\eta_g) = \frac{[V_g \times CV_g]}{[m_{\text{Fuel}} \times HHV_{\text{Fuel}}]} \quad (12)$$

เมื่อ

m_{Fuel} คือ อัตราการใช้เชื้อเพลิง (kg/hr)

V_g คือ อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง (Nm^3/hr)

HHV_{Fuel} คือ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (MJ/kg)

CV_g คือ ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิง (MJ/kg)

5. การวิเคราะห์คุณสมบัติและหาค่าความร้อนของโปรคิวเซอร์แก๊ส

วิเคราะห์คุณสมบัติแก๊ส เพื่อหาสัดส่วนองค์ประกอบของโปรคิวเซอร์แก๊ส ที่ผลิตได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน เช่น แก๊สไฮโดรเจน (H_2) แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)

แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และแก๊สมีเทน (CH_4) โดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ (gas chromatograph, GC) ยี่ห้อ SIMADSU GC-14B

สภาวะที่ใช้ของเครื่อง Gas Chromatograph (SIMADSU GC-14B)

Packing Material	:	Polapacked Q : Molecular Sieve
Column Temperature	:	50°C : 50°C
Injector Temperature	:	80°C : 80°C
Detector Temperature	:	100°C : 100°C
Carrier Gas	:	Helium Gas
Carrier Gas Flow Rate	:	50 L/min : 20 L/min

ข้อมูลที่ได้ทำการคำนวณหาค่าความร้อนของโปรคิวเซอร์แก๊ส (calorific value of producer gas) ที่ผลิตได้จากองค์ประกอบที่แน่นอนของโปรคิวเซอร์แก๊ส ที่ผลิตได้ โดยบุริมภัทร์, 2552; ทิพย์สุกินทร์, 2550 ใช้ความสัมพันธ์ตามสมการที่ 13

$$CV_g = \sum X_i H_i \quad (13)$$

X_i คือ สัดส่วนโดยปริมาตรขององค์ประกอบโปรคิวเซอร์แก๊ส
 H_i คือ ค่าความร้อนของโปรคิวเซอร์แก๊ส

6. การวิเคราะห์โลหะหนักในเถ้าที่เหลือจากการเผา

วิเคราะห์โลหะหนักในเถ้าที่เหลือจากการเผา ของตัวอย่างที่ได้ผลดีที่สุดโดยวิธี leaching test ตามวิธีในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2546) โดยบดตัวอย่างสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว ให้เป็นผง แล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางรูกรอง 9.5 มิลลิเมตร แล้วนำตัวอย่างที่ได้จากการผ่านการร่อนหนัก 100 กรัม เติมด้วยน้ำสกัด (Leachate) หรือฝนกรดสังเคราะห์ (Synthetic acid rain extraction fluid) ซึ่งประกอบด้วยน้ำกลั่นผสมสารละลายของกรดกำมะถันและกรดไนตริก (ในสัดส่วน 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก) จนค่าความเป็นกรดต่างพีเอช (pH) ของส่วนผสม (Mixture) มีค่าคงที่เท่ากับ 5 แล้วจึงปรับปริมาตรของส่วนผสมให้อัตราส่วนปริมาตรของน้ำสกัดเป็น 20 เท่า (มิลลิลิตร) ของน้ำหนัก (กรัม) ของตัวอย่าง แล้วนำมาเขย่าบนเครื่องกวนเขย่าแบบหมุน (Rotary agitator) ที่มีอัตราการหมุน 30 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง กรองสารละลายจากการสกัด (Leachate) ด้วยแผ่นกรองที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูกรอง 0.6 ถึง 0.8 ไมครอน นำของเหลวที่ผ่านการกรองแล้วไปทำการวิเคราะห์ การวิเคราะห์หาสารอันตรายต่าง ๆ โดยใช้เครื่อง ICP Spectrometer

7. การประเมินความเป็นไปได้ในการนำไปใช้กับอุตสาหกรรมกระดาษรีไซเคิล

วิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางด้านเทคนิคในการนำไปใช้จริงกับโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษรีไซเคิล เพื่อเป็นพลังงานเสริมในการใช้ร่วมกับระบบผลิตพลังงานความร้อนเดิมของอุตสาหกรรม

8. การประเมินเทคนิคทางด้านเศรษฐศาสตร์ และ ระยะเวลาคืนทุน เน้นด้านความคุ้มค่าในการใช้งานจริง

ทำการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์โดยประเมินจากมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (net present value, NPV) อัตราผลตอบแทน (internal rate of return, IRR) และระยะเวลาคืนทุน (payback period) เพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจของผู้ประกอบการในการลงทุนติดตั้งระบบแก๊สซิฟิเคชัน

คำนวณตามสมการที่ 4 – 6

ผลและวิจารณ์

ข้อมูลเบื้องต้นอุตสาหกรรมกระดาษรีไซเคิล

กระบวนการผลิตกระดาษของอุตสาหกรรมกระดาษรีไซเคิล

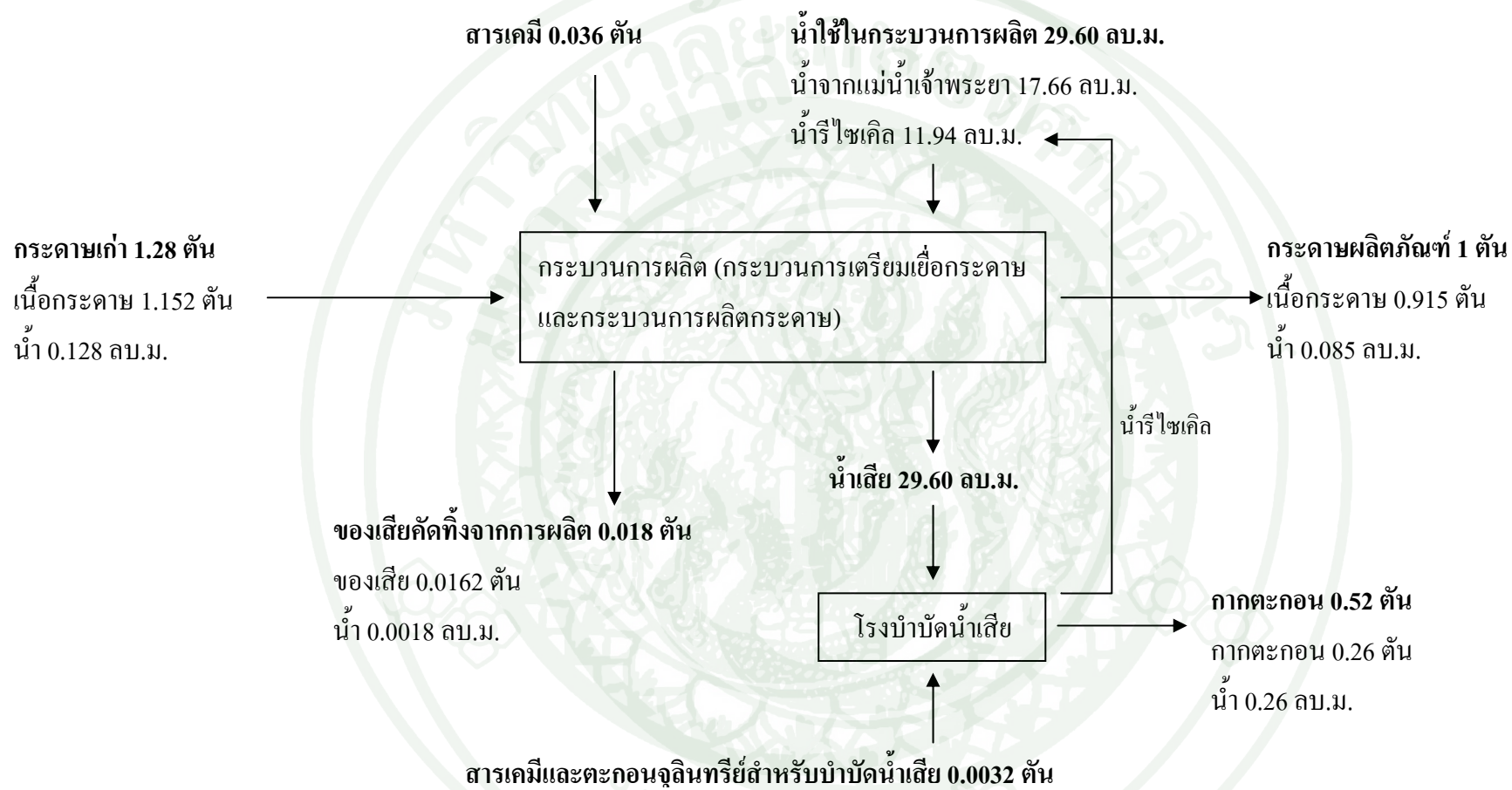
โรงงานอุตสาหกรรมตัวอย่างที่ทำการศึกษาคือโรงงานผลิตกระดาษหนังสือพิมพ์ โดยวัตถุดิบหลักที่ใช้ในการผลิตได้แก่ เศษกระดาษหนังสือพิมพ์เก่า และกระดาษนิตยสารเก่า มีกำลังการผลิตโดยเฉลี่ย 125,000 ตันต่อปี กระบวนการผลิตแบ่งเป็น 2 กระบวนการหลัก ได้แก่ กระบวนการกำจัดหมึก (deinking plant process) ซึ่งเป็นกระบวนการเตรียมเยื่อกระดาษ โดยเริ่มจากการคัดขยะพลาสติกและเศษกระดาษที่ไม่ต้องการออกจากวัตถุดิบ และป้อนวัตถุดิบเข้าสู่กระบวนการเปลี่ยนเศษกระดาษ หนังสือพิมพ์เก่าและเศษกระดาษนิตยสารให้กลายเป็นเยื่อกระดาษ แล้วทำการกำจัดหมึกออกจากเยื่อกระดาษ และเพิ่มความแข็งแรงรวมทั้งฟอกสีให้แก่เยื่อกระดาษ จากนั้นเยื่อกระดาษจะถูกส่งไปที่กระบวนการขึ้นรูปกระดาษ (paper machine process) ซึ่งเป็นกระบวนการที่จะนำเยื่อกระดาษมาขึ้นรูปเป็นม้วนกระดาษผลิตภัณฑ์ และนำไปจำหน่ายต่อไป

ในการผลิตกระดาษของโรงงานตัวอย่างใช้กระดาษหนังสือพิมพ์เก่าและกระดาษนิตยสารเก่าเป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตเฉลี่ย 1.28 ตันต่อตันผลิตภัณฑ์กระดาษ ใช้น้ำจากแม่น้ำเจ้าพระยาในกระบวนการเตรียมเยื่อกระดาษและกระบวนการผลิตกระดาษเฉลี่ย 17.66 ลูกบาศก์เมตรต่อตันผลิตภัณฑ์กระดาษ และมีการนำน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วกลับมาใช้ในกระบวนการผลิตเฉลี่ย 11.94 ลูกบาศก์เมตรต่อตันผลิตภัณฑ์กระดาษ รวมปริมาณการใช้น้ำรวมเท่ากับ 29.60 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน มีการใช้สารเคมี เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ในกระบวนการผลิตใช้สารเคมีรวมทั้งหมดประมาณ 36 กิโลกรัมต่อตันผลิตภัณฑ์กระดาษ

ทั้งนี้ของเสียจากอุตสาหกรรมกระดาษรีไซเคิลมี 2 ส่วน คือกากตะกอนและขยะที่ถูกปฏิเสธจากกระบวนการผลิต กากตะกอนชีวภาพที่เกิดขึ้นมาจากกระบวนการซึ่งปริมาณของกากตะกอน 0.52 ตันต่อตันผลิตภัณฑ์กระดาษ และมีปริมาณขยะเศษกระดาษที่เกิดขึ้นมีปริมาณ 7 กิโลกรัมต่อตันผลิตภัณฑ์กระดาษ ขยะพลาสติกที่เกิดขึ้นมีปริมาณ 17.30 กิโลกรัมต่อตันผลิตภัณฑ์กระดาษ ส่วนกากตะกอนที่เกิดขึ้นมีปริมาณ 520.00 กิโลกรัมต่อตันผลิตภัณฑ์กระดาษ ดังนั้นในแต่ละวันโรงงานอุตสาหกรรมจะมีของเสียประเภทกากตะกอนมากถึง 178.08 ตันต่อวัน ขยะพลาสติก 5.92 ตันต่อวัน และเศษกระดาษ 2.40 ตันต่อวัน จากข้อมูลข้างต้นเมื่อนำมาเขียนสมดุลมวลได้ดังภาพที่ 8

กากตะกอนที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรมกระดาษรีไซเคิล มีที่มาจาก 2 ส่วนคือ กากตะกอนจากหน่วยกำจัดหมึก ในกระบวนการเตรียมเยื่อกระดาษ และกากตะกอนจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียซึ่งแบ่งได้เป็น กากตะกอนเคมีจากการตกตะกอนสารแขวนลอยในน้ำเสียด้วยสารเคมี และกากตะกอนชีวภาพจากตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียในระบบบำบัดน้ำเสียระบบตะกอนเร่ง กากตะกอนทั้งหมดจะถูกรวบรวมไว้ที่โรงบำบัดน้ำเสีย และทำการรีดน้ำบางส่วนออกจากกากตะกอนจนกากตะกอนเหลือความชื้นประมาณร้อยละ 50 ในขณะที่ขยะพลาสติกนั้นมาจากกระบวนการเตรียมเยื่อกระดาษจากกระดาษที่ผ่านการใช้งานแล้ว ซึ่งจะถูกคัดขยะพลาสติกและเศษกระดาษที่ไม่ต้องการออกจากกระดาษวัตถุดิบ





ภาพที่ 8 สมดุลมวลของอุตสาหกรรมกระดาศรีไซเคิลต่อการผลิตกระดาศ 1 ตัน

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางกายภาพของขยะที่ถูกปฏิเสธจากกระบวนการผลิต

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางกายภาพของขยะที่ถูกปฏิเสธจากกระบวนการผลิต พบว่าสามารถแบ่งประเภทขยะออกเป็น 4 ประเภท คือ พลาสติก เศษกระดาษขนาดเล็ก โลหะ (เหล็กและอลูมิเนียม) และขยะประเภทอื่นที่ไม่สามารถจำแนกตามองค์ประกอบข้างต้น (เช่น ยาง และแก้ว) ดังตารางที่ 3 และภาพที่ 9 พลาสติกที่พบในขยะมาจาก ปกหุ้มหนังสือ สันปกหนังสือ เป็นต้น

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางกายภาพของของเสียที่ถูกปฏิเสธจากกระบวนการผลิต

องค์ประกอบของเสีย	ร้อยละ
พลาสติก	81
เศษเยื่อกระดาษ	12
โลหะ	2
อื่น ๆ	5



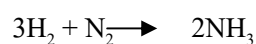
ภาพที่ 9 ขยะที่ถูกปฏิเสธจากกระบวนการผลิตที่ถูกแยกองค์ประกอบ

ผลการวิเคราะห์ค่าแบบประมาณ (proximate analysis) และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis) ของขยะและกากสับดูดำ

ของเสียที่นำมาเป็นเชื้อเพลิงถูกวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis) และหาค่าความร้อน (heat value) ผลการวิเคราะห์ดังแสดงตารางที่ 4 การวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) วิเคราะห์ความชื้น ของแข็งระเหยได้ ปริมาณถ่าน ทั้งนี้ เพื่อที่จะบ่งบอกว่าเชื้อเพลิงชนิดนั้นมีความเหมาะสมในเป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ (Sims, 2008) ซึ่งพิจารณาจากค่าสัดส่วนเชื้อเพลิง (fuel ratio) หาได้จากอัตราส่วนของคาร์บอนคงตัว (fixed carbon) ต่อของแข็งระเหย (volatile solid) พบว่าเชื้อเพลิงทั้ง 3 ชนิดคือกากตะกอน ขยะพลาสติก กากสับดูดำ มีสัดส่วน 0.01 0.08 และ 0.23 ตามลำดับ โดยที่ขยะพลาสติกผสมกากสับดูดำมีค่าสัดส่วนเชื้อเพลิงมากที่สุด ดังนั้นจึงมีความเหมาะสมในการเป็นเชื้อเพลิงมากที่สุด ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านหินบิทูมินัสมีสัดส่วนเชื้อเพลิง (fuel ratio) ในช่วง 1.5 - 2.0 (Sims, 2008) ทั้งนี้ขยะพลาสติกมีความเหมาะสมในการเป็นเชื้อเพลิงน้อยกว่าขยะพลาสติกผสมสับดูดำ เนื่องจากการผสมกากสับดูดำลงไปเป็นการเพิ่มค่าคาร์บอนคงตัว ซึ่งในกากสับดูดำเพียงอย่างเดียวมีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูง สำหรับปฏิกิริยาในการเผาไหม้ระบบแก๊สซิฟิเคชัน ในการผลิตไฮโดรเจนแก๊สในแต่ละโซนจำเป็นต้องมีคาร์บอน ในการผลิตไฮโดรเจนแก๊สทั้งนี้ค่าคาร์บอนคงตัวนั้นจะส่งผลต่อการผลิตแก๊สไฮโดรเจน

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis) เป็นการวิเคราะห์เพื่อแยกสัดส่วนของธาตุที่แน่นอนที่เป็นองค์ประกอบของเชื้อเพลิง องค์ประกอบซัลเฟอร์และไนโตรเจนในเชื้อเพลิงนั้นมีโอกาสก่อกมลพิษไม่ว่าจะเป็นแก๊สซัลเฟอร์ไดร็อกไซด์ หรือแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ ทั้งนี้เมื่อพิจารณาค่าซัลเฟอร์ (S) ของเชื้อเพลิงกากตะกอน ขยะพลาสติก และขยะผสมกากสับดูดำ มีค่าเป็นร้อยละ 0.09, 0.24 และ 0.14 ตามลำดับ ซึ่งปริมาณซัลเฟอร์ของขยะเชื้อเพลิงในการทดลองอยู่ในระดับต่ำกว่า เมื่อเทียบกับถ่านหินแอนทราไซต์ที่มีอยู่ร้อยละ 1.1 สารประกอบซัลเฟอร์นี้เป็นปัญหาค่อบรรณผลิตไฮโดรเจนแก๊สเนื่องจากมีฤทธิ์กัดกร่อนและก่อกมลพิษซึ่งอยู่ในรูปไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) เป็นแก๊สที่มีมากถึงร้อยละ 94-97 (สำนักงานวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2544)

สำหรับองค์ประกอบของไนโตรเจน (N) นั้นก่อให้เกิด แก๊สแอมโมเนีย (NH_3) โดยที่แก๊สไฮโดรเจนที่ได้จากปฏิกิริยาในการเผาทำปฏิกิริยากับไนโตรเจนจากอากาศที่ให้เข้าระบบ จึงเกิดแก๊สแอมโมเนียตามสมการ Haber process ติดไปกับไฮโดรเจนแก๊สดังแสดงในสมการที่ 14



14

แก๊สไนโตรเจนในอากาศนั้นจะเข้าทำปฏิกิริยาได้น้อยกว่าไนโตรเจนในองค์ประกอบของเชื้อเพลิง ดังนั้นหากเชื้อเพลิงมีไนโตรเจนน้อยกว่าร้อยละ 2 จะมีโอกาสที่เกิดแก๊สแอมโมเนียได้น้อยมาก

(สำนักงานวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2544) เห็นได้ว่าเชื้อเพลิงทั้ง 3 ชนิดจากการทดลองมีองค์ประกอบของไนโตรเจนน้อยกว่าร้อยละ 2 ของเชื้อเพลิง ดังนั้นโอกาสในการเกิดมลพิษที่เกิดจากสารประกอบไนโตรเจนจึงมีโอกาสน้อยมาก

ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงในงานวิจัยนี้พบว่า ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงขยะพลาสติกมีค่าความร้อนสูงสุด (HHV) เป็น 26,525.89 กิโลจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งเป็นปริมาณความร้อนของขยะพลาสติกจากการเผาไหม้ รองลงมาคือ ค่าความร้อนของกากสับด้าเป็น 20,640.00 กิโลจูลต่อกิโลกรัม เมื่อเทียบกับค่าความร้อนของกากตะกอนเพียงอย่างเดียวซึ่งมีค่าความร้อนเป็น 6,335.60 กิโลจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งให้ค่าความร้อนต่ำที่สุด ดังนั้นจะสามารถประเมินในเบื้องต้นได้ว่า ขยะพลาสติกเมื่อเผาไหม้แล้วจะได้พลังงานจากการเผาไหม้มากที่สุด

ตารางที่ 4 ค่าการวิเคราะห์แบบประมาณ การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ และค่าความร้อนของขยะพลาสติก กากตะกอนและขยะพลาสติกผสมกากสับด้า

รายการวิเคราะห์	ผลการวิเคราะห์ขยะพลาสติก	ผลการวิเคราะห์กากตะกอน	ผลการวิเคราะห์ขยะพลาสติกผสมกากสับด้า	ผลการวิเคราะห์กากสับด้า
การวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis)				
1. Moisture (%)	0.58	1.90	0.09	3.83
2. Volatile solid (%)	77.90	46.5	63.10	71.88
3. Ash (%)	5.12	51.10	22.42	5.30
4. Fixed Carbon (%)	5.89	0.50	14.39	18.99
การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis)				
1. C (%)	50.23	23.5	42.31	59.17
2. H (%)	5.65	2.10	4.16	6.52
3. O (%)	43.66	22.6	<50.97	33.93
4. N (%)	0.22	0.63	2.60	0.38
5. S (%)	0.24	0.09	0.14	0.10
ค่าความร้อน Heat value				
1. High heat value (HHV) (kJ/kg)	26,525.89	6,335.60	18,247.70	20,640.00

วัตถุดิบ (แท่งเชื้อเพลิง)

วัตถุดิบถูกอัดเป็นแท่งเชื้อเพลิงให้มีขนาดที่เหมาะสมและมีขนาดไม่แตกต่างกันมากนัก ทั้งนี้ ขนาดของเชื้อเพลิงมีผลต่อการเกิดความดันลด (pressure drop) ภายในเครื่องผลิตแก๊สถ้าเกิดความดันลดมากเกินไปจะทำให้เครื่องต้องใช้พลังงานในการนำอากาศเข้าระบบและพาแก๊สออกจากเครื่องผลิตมาก เครื่องยนต์จึงต้องมีแรงดึงดูดมากพอที่จะเอาชนะความดันลดของระบบทั้งหมด (สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2544) ถ้าเชื้อเพลิงมีขนาดเล็กเกินไปทำให้เกิดความดันลดสูง แต่ถ้าเชื้อเพลิงมีขนาดใหญ่เกินไป การเผาไหม้เชื้อเพลิงจะเกิดไม่ทั่วเพราะเกิดช่องโหว่ของการเผาไหม้อย่างรวดเร็วในบางบริเวณ และขนาดของวัตถุดิบในการเผานั้นไม่ควรแตกต่างกันเกินร้อยละ ± 10 (สำนักงานวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2544) ทั้งนี้เชื้อเพลิงที่มีขนาดใหญ่ต้องการระยะเวลาในการเผาไหม้นานกว่าเชื้อเพลิงขนาดเล็ก

ก่อนการอัดแท่งเชื้อเพลิง กากตะกอนรวมถึงขยะพลาสติกผสมกับวัตถุดิบทางการเกษตร (กากสับดำ) ถูกทำการลดความชื้นโดยการตากแดด เนื่องจากกากตะกอนที่ออกมาจากระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมนั้นจะมีความชื้นปริมาณร้อยละ 50 และขยะพลาสติกมีความชื้นร้อยละ 40 การผลิตโปรคิวเซอร์แก๊ส ที่มีประสิทธิภาพนั้น ความชื้นเป็นสิ่งที่มีความสำคัญในการเพิ่มสัดส่วนแก๊สไฮโดรเจน (H_2) ให้สูงขึ้นในโปรคิวเซอร์แก๊ส ที่ผลิตได้ แต่ในการผลิตโปรคิวเซอร์แก๊ส นั้นต้องการความชื้นเท่าที่จำเป็นเท่านั้น เนื่องจากการระเหยน้ำจะต้องสูญเสียความร้อน ซึ่งการระเหยของน้ำจะไปดึงความร้อนที่คายออกจากปฏิกิริยาเผาไหม้ (สำนักงานวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2544)

ขยะพลาสติกเมื่อแยกขยะและผ่านการตากแห้งแล้วต้องนำมาย่อยให้มีขนาดเล็กลง ดังภาพที่ 10 หลังจากนั้นวัตถุดิบที่นำมาเป็นแท่งเชื้อเพลิงทั้ง 3 ชนิด ถูกอัดผ่านเครื่องอัดชีวมวล จะได้ลักษณะเชื้อเพลิงที่มีขนาดเท่ากัน คือ 1.5×1.5 นิ้ว ดังภาพที่ 11



ภาพที่ 10 ขยะที่สามารถเผาไหม้ได้ที่ถูกคัดแยกแล้วและย่อยให้มีขนาดเล็ก



(ก.)



(ข.)



(ค.)

ภาพที่ 11 เชื้อเพลิงอัดแท่งจากของเสียแต่ละประเภท (11 ก.) แท่งเชื้อเพลิงอัดจากขยะพลาสติก (11 ข.) แท่งเชื้อเพลิงอัดจากขยะพลาสติกผสมกากสนับดำ (11 ค.) แท่งเชื้อเพลิงอัดจากกากตะกอน

กระบวนการเผาด้วยระบบแก๊สซิฟิเคชัน

ระบบแก๊สซิฟิเคชันถูกพัฒนาโดยศูนย์ความเป็นเลิศทางชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยเป็นต้นแบบโรงงานผลิตแก๊สชีวมวลใช้เตาผลิตโปรคิวเซอร์แก๊สแบบลูกผสม (hybrid gasifier) เป็นระบบที่สามารถผลิตได้ทั้งระบบแก๊สไหลขึ้น (updraft) และ ระบบแก๊สไหลลง (downdraft) ซึ่งในการทดลองนี้ใช้ระบบผลิตแก๊สแบบไหลขึ้น ระบบผลิตแก๊สไหลขึ้นสามารถผลิตแก๊สที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าการใช้ระบบผลิตแก๊สแบบไหลลง ทั้งนี้ทดสอบประสิทธิภาพของ การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผ่านระบบเตาผลิตโปรคิวเซอร์แก๊สแบบลูกผสมขนาดเล็ก โดยทดสอบการจุดติดไฟ อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง อัตราการป้อนเชื้อเพลิง การเกิดเถ้า และค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิง

ทดสอบการจุดติดไฟ

การจุดติดไฟของโปรคิวเซอร์แก๊สนั้นมาจากพลังงานเคมีที่มีอยู่ในแก๊สแต่ละชนิดในโปรคิวเซอร์แก๊ส เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ไฮโดรเจน (H_2) และแก๊สไฮโดรคาร์บอนอื่น ๆ ซึ่งการทดสอบการจุดติดไฟในเบื้องต้น เพื่อทดสอบความเป็นไปได้ในการนำเชื้อเพลิงชนิดนั้นไปใช้เพื่อเป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการต่อไป เมื่อเผาากตะกอนอัด ไม่พบการจุดไฟที่ปากปล่อง เมื่อทดสอบกับขยะพลาสติก และขยะพลาสติกผสมกากสับดูค่า พบว่าเชื้อเพลิงทั้งสองชนิดสามารถจุดติดไฟได้ดีดังแสดงในตารางที่ 5 และเมื่อเปรียบเทียบค่าความร้อนของโปรคิวเซอร์แก๊สของกากตะกอน ขยะพลาสติก และขยะพลาสติกผสมกากสับดูค่า พบว่า ค่าความร้อนของโปรคิวเซอร์แก๊สของกากตะกอนมีค่าต่ำมากและไม่สามารถตรวจพบ แก๊สไฮโดรเจนในโปรคิวเซอร์แก๊ส

ตารางที่ 5 ผลการจุดติดไฟของกากตะกอน ขยะพลาสติก และขยะพลาสติกผสมกากสับดูค่า

เชื้อเพลิง	การจุดติดไฟ
กากตะกอน	ไฟไม่ติด
ขยะพลาสติก	ไฟติดดี
ขยะพลาสติกผสมกากสับดูค่า	ไฟติดดี

อัตราการใช้เชื้อเพลิงและอัตราการเกิดเถ้า

เมื่อพิจารณาอัตราการไหลของแก๊สโปรคิวเซอร์ที่ 108.41 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ในขยะพลาสติก และที่อัตราการไหลของโปรคิวเซอร์ที่ 91.30 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมงในขยะพลาสติกผสมกากสับดูค่า ซึ่งเป็นสภาวะที่ พบการเกิดเถ้าร้อยละ 5.37 และ 6.00 ตามลำดับ ดังตารางที่ 6 และ ตารางที่ 7 ดังนั้นสามารถประมาณอัตราการดึงเถ้าออกได้เป็นร้อยละ 5.37 และ 6.00 ตามลำดับ โดยมีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงในขยะพลาสติกและขยะพลาสติกผสมกากสับดูค่าเป็น 18.95 และ 23.55 กิโลกรัมต่อชั่วโมง จะเห็นได้ว่า การเกิดเถ้าในระบบ จะมีผลต่อการทำงานของเครื่องผลิตแก๊ส ถ้าพบว่ามีเถ้าในปริมาณสูงก็จะทำให้พลังงานของแก๊สโปรคิวเซอร์ลดลง อีกทั้งเครื่องผลิตแก๊สโปรคิวเซอร์จะต้องสำรองพื้นที่ในปริมาณมากเพื่อรองรับเถ้าจากการเผา อีกทั้งถ้าเกิดสภาวะภายในเครื่องผลิตแก๊สทำให้จี้เถ้าหลอมตัวและเกิดการอุดตันซึ่งอาจทำให้เครื่องหยุดทำงานได้ (สำนักงานวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2544) ดังนั้นจึงต้องมีการดึงเถ้าออกจากระบบให้สัมพันธ์กับการป้อนเชื้อเพลิง ซึ่งสามารถประมาณการดึงเถ้าออกได้ดังนี้ เมื่อวิเคราะห์ปริมาณเถ้าเท่ากับร้อยละ 20 อัตราการดึงเถ้าออกระหว่างการเผาไหม้ก็คือร้อยละ 20 (นุริมภัทร, 2552)

ตารางที่ 6 อัตราการใช้เชื้อเพลิงและอัตราการเกิดเถ้าของขยะพลาสติก

อัตราการไหลของเชื้อเพลิง (m ³ /h)	อัตราการใช้เชื้อเพลิงของขยะ พลาสติก (kg/h)	ร้อยละของการเกิดเถ้า
91.30	21.80	6.68
100.43	17.10	5.52
108.41	18.95	5.37
135.8	16.45	4.64

ตารางที่ 7 อัตราการใช้เชื้อเพลิงและอัตราการเกิดเถ้าของขยะพลาสติกผสมกากสับุดำ

อัตราการไหลของเชื้อเพลิง (m ³ /h)	อัตราการใช้เชื้อเพลิงของขยะ พลาสติกผสมกากสับุดำ (kg/h)	ร้อยละของการเกิดเถ้า
91.30	23.55	6.00
100.43	21.62	7.39
108.41	26.28	6.24
135.8	26.45	13.28

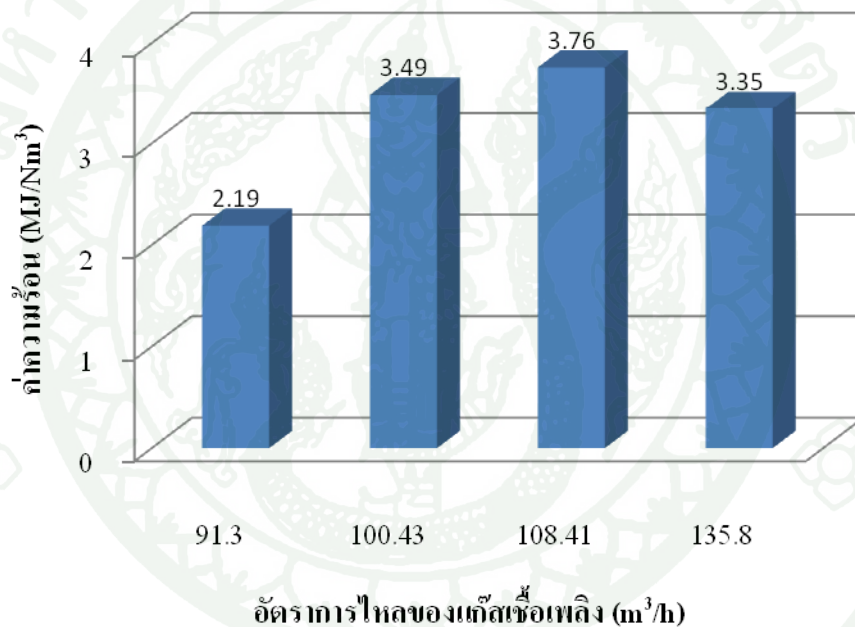
ค่าความร้อนของโปรคิวเซอร์แก๊ส

ค่าความร้อนของโปรคิวเซอร์แก๊ส คือพลังงานทั้งหมดของโปรคิวเซอร์แก๊สที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในรูปพลังงานความร้อนได้ ซึ่งมี 2 ส่วน ส่วนแรกคือ ความร้อนที่รับรู้ได้ (sensible heat) โดยแสดงค่าด้วยอุณหภูมิ และส่วนที่สองคือพลังงานเคมีในโปรคิวเซอร์แก๊สแต่ละชนิด ซึ่งมีค่าความร้อนและสามารถจุดติดไฟได้ เช่น แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แก๊สไฮโดรเจน (H₂) และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอื่น ๆ โดยวิเคราะห์จากคุณสมบัติของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันผ่านเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบแก๊ส (gas chromatograph)

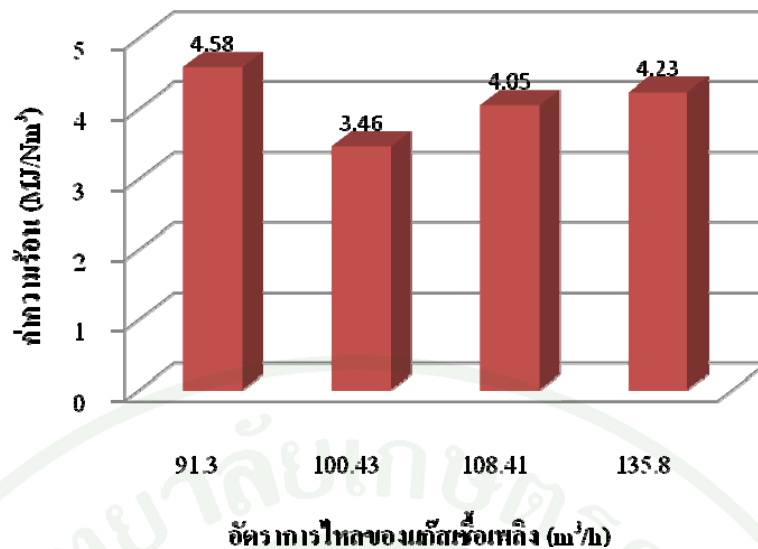
คำนวณค่าความร้อนของแก๊สโปรคิวเซอร์ได้จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ 13 โดยที่ CO = 13.1 MJ/Nm³ H₂ = 13.1 MJ/Nm³ และ CH₄ = 41.2 MJ/Nm³ สัดส่วนโดยปริมาตรของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เท่ากับร้อยละ 11.66 ไฮโดรเจนร้อยละ 11.42 มีเทนร้อยละ 1.81

$$CV_g = [(0.1166)(13.1 \text{ MJ/Nm}^3)] + [(0.1142)(13.1 \text{ MJ/Nm}^3)] + [(0.0181)(41.2 \text{ MJ/Nm}^3)] \\ = 3.76 \text{ MJ/Nm}^3$$

จากการศึกษาพบว่าอัตราไหลของโปรคิวเซอร์แก๊สของขยะพลาสติกที่เหมาะสมคือ 108.41 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ซึ่งส่งผลให้ค่าความร้อนของโปรคิวเซอร์แก๊สมีค่าสูงที่สุดที่ 3.76 เมกกะจูลต่อตารางเมตร ดังแสดงในภาพที่ 12 ส่วนอัตราการไหลของโปรคิวเซอร์แก๊สของขยะพลาสติกผสมกากสับดำที่เหมาะสมเป็น 91.30 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ส่งผลให้ค่าความร้อนของโปรคิวเซอร์แก๊สมีค่าสูงที่สุดเป็น 4.58 เมกกะจูลต่อตารางเมตร ดังแสดงในภาพที่ 13 ในขณะที่โปรคิวเซอร์แก๊สของกากตะกอนนั้นไม่สามารถจุดไฟติดได้ เมื่อวิเคราะห์ห้วงองค์ประกอบของโปรคิวเซอร์แก๊สไม่พบไฮโดรเจน ในโปรคิวเซอร์แก๊ส คาร์บอนมอนนอกไซด์ และมีเทนมีปริมาณต่ำกว่าขยะพลาสติกและพลาสติกผสมกากสับดำ ดังแสดงในตารางที่ 8 อีกทั้งการเผากากตะกอนปริมาณแก๊สที่ออกมาไม่สม่ำเสมอและไม่สามารถจุดไฟติด ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้น้อยมากในการนำกากตะกอนจากอุตสาหกรรมรีไซเคิลเยื่อกระดาษเพียงชนิดเดียว เพื่อนำมาพัฒนาใช้เป็นพลังงานทดแทนโดยใช้ระบบไฮบริดแก๊สซิฟิเคชัน



ภาพที่ 12 ค่าความร้อนของโปรคิวเซอร์แก๊สจากขยะพลาสติกที่อัตราไหลต่าง ๆ



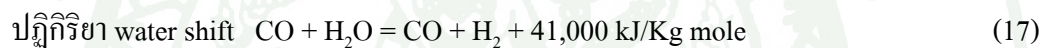
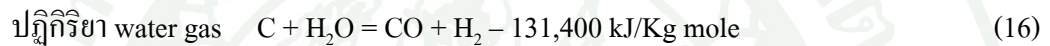
ภาพที่ 13 ค่าความร้อนของโปรคิวเซอร์แก๊สจากขยะพลาสติกผสมกากสับด้าที่อัตราไหลต่าง ๆ

ผลจากการเผาเชื้อเพลิงทั้ง 3 ชนิด กากตะกอน ขยะพลาสติก และขยะพลาสติกผสมกากสับด้า พบว่า ค่าความร้อนของโปรคิวเซอร์แก๊ส (CO , H_2 และ CH_4) จากการเผาขยะพลาสติกผสมกากสับด้า มีค่าความร้อนสูงที่สุด เนื่องจากองค์ประกอบของโปรคิวเซอร์แก๊สพบว่ามีองค์ประกอบของแก๊สติดไฟทั้ง CO , H_2 และ CH_4 มากกว่าแก๊สเชื้อเพลิงที่พบจากการเผา เชื้อเพลิงกากตะกอนและขยะพลาสติก ดังแสดงในตารางที่ 8 ทั้งนี้พลาสติกผสมกากสับด้ามีความเหมาะสมทางด้านการให้พลังงานมากกว่าขยะพลาสติกเพียงอย่างเดียว โดยพิจารณาจากการให้ค่าความร้อนของโปรคิวเซอร์แก๊สของขยะพลาสติกผสมกากสับด้ามีค่าความร้อนมากกว่าขยะพลาสติก อีกทั้งการนำกากสับด้ามาเป็นส่วนผสมในการเป็นเชื้อเพลิงนั้นเป็นการเพิ่มค่าคาร์บอนคงตัวให้กับเชื้อเพลิง ซึ่งส่งผลให้ค่าสัดส่วนเชื้อเพลิงของพลาสติกผสมกากสับด้าสูงขึ้น จากการทดลองของ Vyas and Singh (2007) ได้ระบุว่ากากสับด้ามีศักยภาพในการผลิตโปรคิวเซอร์แก๊สแบบ updraft โดยโปรคิวเซอร์แก๊สที่ผลิตได้ให้ค่าความร้อนเป็น 1105 กิโลแคลอรีต่อลูกบาศก์เมตร มีอัตราการไหลของแก๊สเป็น 5.5 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง และมีอัตราการใช้เชื้อเพลิง 2.2 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ซึ่งการใช้ของเสียจากการเกษตรมาเผาพร้อมกับพลาสติกมีความสามารถในการนำไปใช้เป็นพลังงานทดแทนได้ เช่นจากการทดลองของ Chemchaisri *et al.*, (2010) ที่นำขยะพลาสติกจากหลุมฝังกลบมาผสมกับหัวมันสำปะหลังผ่านระบบแก๊สซิฟิเคชันขนาดเล็กแบบไหลลงเพื่อนำมาเป็นพลังงานทดแทน และ Garcí'a-Bacaicoaz *et al.*, (2008) ที่นำชีวมวลเช่นไม้มาผสมกับพลาสติก HDPE (High-density polyethylene) ผ่านระบบแก๊สซิฟิเคชันขนาดเล็กแบบไหลลง เปรียบเทียบค่าความร้อนของเชื้อเพลิงจากการใช้ขยะพลาสติกผสมกับชีวมวลประเภทต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 9

สำหรับกากตะกอนจากอุตสาหกรรมกระดาษรีไซเคิล นี้ไม่สามารถนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนได้ เนื่องจากองค์ประกอบของโปรคิวเซอร์แก๊สที่ออกมา ไม่สามารถตรวจพบแก๊สไฮโดรเจนและพบมีเทนในปริมาณเพียงร้อยละ 0.17 ซึ่งน้อยกว่าขยะพลาสติก และขยะพลาสติกผสมกากสับด้าที่

พบในปริมาณ 1.81 และ 2.35 ตามลำดับ ซึ่งส่งผลให้การจุดติดไฟของกากตะกอนไม่สามารถจุดติดได้ เมื่อพิจารณาองค์ประกอบเบื้องต้นของกากตะกอนพบว่ากากตะกอนมีปริมาณคาร์บอนคงตัว ปริมาณของแข็งระเหย และค่าความร้อนสูงสุดต่ำ อีกทั้งปริมาณเถ้าที่เกิดสูง จึงทำให้ไม่เหมาะสมในการนำมาผลิตโปรดิวเซอร์แก๊ส

องค์ประกอบของโปรดิวเซอร์แก๊สที่ออกมานั้นมีคุณสมบัติในการติดไฟ ได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน และมีเทน ซึ่งแก๊สเหล่านี้มาจากปฏิกิริยาเคมีในการเผาไหม้ของระบบ แก๊สซิฟิเคชันซึ่งมักจะเกิดในโซนรีดักชันและบริเวณคาบเกี่ยวระหว่างโซนเผาไหม้และโซนรีดักชัน โดยมีปฏิกิริยาหลัก ๆ ในการเกิดแก๊สดังนี้



ในโซนกลั่นตัว (distillation zone) เนื่องจากโซนนี้เป็นโซนที่ออกซิเจนสามารถเข้าถึงได้น้อย ซึ่งเป็นโซนที่มีการเปลี่ยนแปลงของแก๊สที่ได้จากโซนรีดักชัน (ยกเว้นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์) และไอของสารไฮโดรคาร์บอนในเชื้อเพลิง จะเรียกโซนนี้ว่า โซนไพโรไลซิส (pyrolysis zone) ถือเป็นโซนที่ไม่มีออกซิเจนมาเกี่ยวข้อง ซึ่งแก๊สที่ออกมาจากโซนนี้ส่วนใหญ่ที่วัดได้เป็นแก๊สมิเทน (CH_4) ปฏิกิริยาเป็นดังนี้



ตารางที่ 8 เปรียบเทียบองค์ประกอบและค่าความร้อนของโปรคิวเซอร์แก๊สของเชื้อเพลิงกากตะกอน
ขยะพลาสติก และขยะพลาสติกผสมสับดูดำ ที่อัตราการไหลของแก๊ส 100.43 108.41 และ
91.3 ลบ.ม/ชม.ตามลำดับ

ชนิดของเชื้อเพลิง	องค์ประกอบของโปรคิวเซอร์แก๊ส					ค่าความร้อนของ โปรคิวเซอร์แก๊ส (MJ/Nm ³)
	สัดส่วนปริมาตรโดยเฉลี่ย (%)					
	N ₂ +O ₂	CO ₂	H ₂	CO	CH ₄	
กากตะกอน	71.93	24.20	0	2.64	0.17	0.21
ขยะพลาสติก	56.25	9.70	11.42	11.66	1.81	3.76
ขยะพลาสติกผสม กากสับดูดำ	48.25	14.50	12.67	15.77	2.35	4.58

ตารางที่ 9 เปรียบเทียบค่าความร้อนของโปรคิวเซอร์แก๊ส อัตราการใช้เชื้อเพลิง อัตราการให้อากาศ
ของเชื้อเพลิงต่าง ๆ

เชื้อเพลิง	ระบบการเผา	อัตราการใช้ เชื้อเพลิง (kg/h)	อัตราการให้อากาศ (m ³ /h)	ค่าความร้อน (MJ/Nm ³)
ขยะพลาสติก	updraft	18.95	102.97	3.76
ขยะพลาสติกผสมกากสับดูดำ	updraft	23.55	95.61	4.58
ขยะพลาสติกผสมหั่วมัน				
ลำปะหลัง	downdraft	6.10	50	1.76
(Chemchaisri <i>et al</i> (2010))				
พลาสติกHDPE ผสมไม้				
(Garcí'a-Bacaicoaz <i>et al.</i> (2008))	downdraft	30.9	52.5	6.90

ประสิทธิภาพของโปรตีนเซอร์แก๊ส

คำนวณประสิทธิภาพการผลิตโปรตีนเซอร์แก๊สที่อัตราการไหล 108.41 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ซึ่งเป็นสภาวะที่ส่งผลให้ค่าความร้อนของโปรตีนเซอร์แก๊สจากการเผาโดยใช้เชื้อเพลิงขยะพลาสติก โดยมีความร้อนของโปรตีนเซอร์แก๊สเป็น 3.76 เมกะจูลต่อกิโลกรัม อัตราการใช้เชื้อเพลิงเป็น 18.95 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงเป็น 26.53 เมกะจูลต่อกิโลกรัม

$$\begin{aligned} \text{ประสิทธิภาพการผลิตโปรตีนเซอร์แก๊ส } (\eta_g) &= \frac{[108.41 \times 3.76] \times 100}{[18.95 \times 26.53]} \\ \text{ของขยะพลาสติก} &= 81.52 \% \end{aligned}$$

สำหรับขยะพลาสติกผสมกากสับดูมีค่าความร้อนของโปรตีนเซอร์แก๊สเป็น 4.58 เมกะจูลต่อกิโลกรัม อัตราการใช้เชื้อเพลิงเป็น 23.55 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงเป็น 18.25 เมกะจูลต่อกิโลกรัม

$$\begin{aligned} \text{ประสิทธิภาพการผลิตโปรตีนเซอร์แก๊ส } (\eta_g) &= \frac{[91.3 \times 4.58] \times 100}{[23.55 \times 18.25]} \\ \text{ของขยะพลาสติกผสมกากสับดูมี} &= 97.29 \% \end{aligned}$$

การเผาเชื้อเพลิงขยะพลาสติกที่อัตราไหลของแก๊ส 108.41 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง มีประสิทธิภาพในการผลิตโปรตีนเซอร์แก๊สของขยะพลาสติกเป็นร้อยละ 81.5 และในการเผาเชื้อเพลิงขยะพลาสติกผสมกากสับดูมีมีประสิทธิภาพในการผลิตโปรตีนเซอร์แก๊สได้เป็นร้อยละ 97.29 ของประสิทธิภาพทั้งหมดในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง

ผลการวิเคราะห์โลหะหนักในของแข็งที่เหลือจากการเผา

ผลการวิเคราะห์โลหะหนัก (Hg, Cd, Zn, Cr, Ni, As, Pb, Se) ในของแข็งที่เหลือจากการเผา (ash) เชื้อเพลิงจากขยะพลาสติก ขยะพลาสติกผสมกากสับดูมีแสดงในตารางที่ 10 พบว่า เถ้าในขยะพลาสติก มีความเข้มข้นของโลหะหนักส่วนใหญ่มีค่าไม่เกินค่ามาตรฐานตามประกาศของกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) ยกเว้นตะกั่วพบในของแข็งที่เหลือจากการเผาของการเผาขยะพลาสติก ซึ่งมีค่าเกินค่ามาตรฐาน ในขณะที่ขยะพลาสติกผสมกากสับดูมี โลหะหนักส่วนใหญ่มีค่าไม่เกินค่ามาตรฐาน ยกเว้นโลหะแคดเมียมและซีลีเนียมที่ผลการวิเคราะห์เกินค่ามาตรฐานเล็กน้อย ทั้งนี้

เนื่องมาจากรงควัตถุสีที่ผสมในพลาสติก นั้นมีองค์ประกอบของโลหะหนัก (วัลย์พร, 2553) จึงสามารถตรวจพบโลหะหนักในการวิเคราะห์

ตารางที่ 10 ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก Hg, Cd, Zn, Cr, Ni, As, Pb, Se ในถ้ำ

ความเข้มข้นของโลหะหนักในถ้ำหลังการเผา			
ชนิดโลหะหนัก	ผ่านระบบแก๊สซิฟิเคชั่น (มก./ล)		ค่ามาตรฐาน (มก./ล)
	ขยะพลาสติก	ขยะพลาสติกผสมกาก	
		สบู่ดำ	
ปรอท (Hg)	ND.	ND.	0.2
แคดเมียม (Cd)	0.19	1.32	1
สังกะสี (Zn)	0.16	1.13	-
โครเมียม(Cr)	0.79	1.38	5
นิกเกิล (Ni)	ND.	1.29	-
สารหนู (As)	ND.	ND.	5
ตะกั่ว (Pb)	6.91	3.03	5
ซีเลเนียม (Se)	ND.	2.84	1

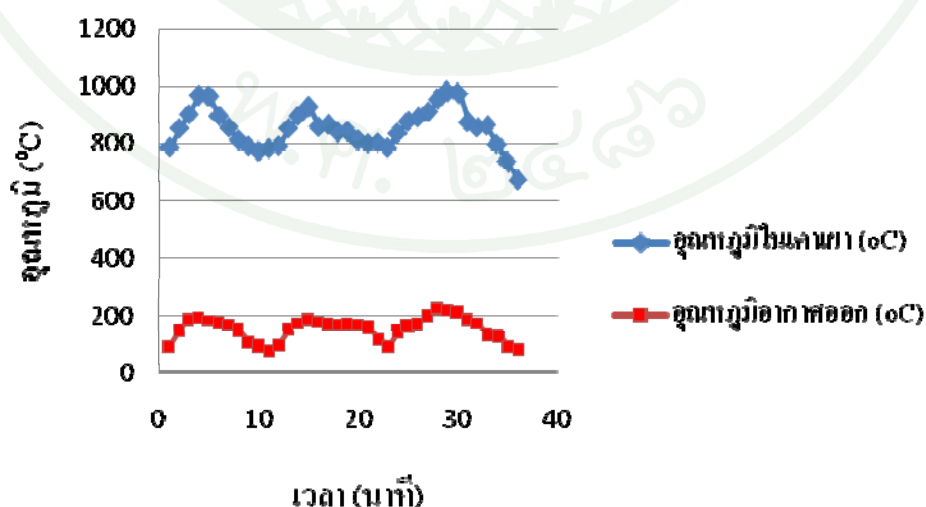
หมายเหตุ ND. = Not Detect

การเผาด้วยกระบวนการเผาตรง

ผลการเผาผ่านระบบแก๊สซีฟิเคชั่นเชื้อเพลิงกากตะกอนอัดจากอุตสาหกรรมกระดาษรีไซเคิลแห่งนี้ไม่สามารถผลิตแก๊สได้ เนื่องจากองค์ประกอบของกากตะกอนเคมี ซึ่งคาร์บอนคงตัวมีค่าต่ำ ทั้งนี้ องค์ประกอบของกากตะกอนจากการวิเคราะห์มีคุณลักษณะที่จะสามารถเป็นเชื้อเพลิงได้ ซึ่งขยะของแข็งที่มีค่าความร้อนสูงเกินกว่า 5,000 กิโลจูลต่อกิโลกรัม ความชื้นน้อยกว่าร้อยละ 50 และปริมาณเถ้าต่ำกว่าร้อยละ 60 สามารถเผาไหม้ได้โดยไม่ต้องอาศัยเชื้อเพลิงเพิ่มเติม (Rhyner *et al.*, 1995) ดังนั้น

จึงมีความเป็นไปได้ในการนำกากตะกอนอัดมาเผาผ่านระบบเผาตรง (direct combustion) ซึ่งเตาเผาที่ใช้ในการทดลองนี้เป็น เตาที่ดัดแปลงจากหอไซโคลนเพื่อทำเป็นห้องเผา (ศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล, 2552) และให้อากาศมากเกินไป (excess air) แก่ระบบ

ผลจากการทดลองของวรวิ (2552) พบว่าการใช้กากตะกอนอัดมาใช้ในการทดลอง เมื่อวัดอุณหภูมิภายในเตาเผาอุณหภูมิอยู่ในช่วง 800-1,000 องศาเซลเซียส อุณหภูมิไอเสียวัดได้อยู่ในช่วง 100-200 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 13 เพื่อให้อุณหภูมิคงที่ได้นั้นต้องเพิ่มวัตถุดิบเข้าไปในระบบอย่างต่อเนื่อง ในการทดลองนี้กากตะกอนถูกให้แก่ระบบในอัตรา 90 กิโลกรัมต่อชั่วโมง (ใส่กากตะกอนทุก 10 นาทีโดยประมาณ) ในช่วงป้อนวัตถุดิบจะทำให้อุณหภูมิในห้องเผาลดต่ำลง เนื่องจากกากตะกอนอัดแห้งยังไม่ติดไฟ แต่เมื่อเวลาผ่านไปกากตะกอนติดไฟแล้ว ส่งผลให้อุณหภูมิในห้องเผาสูงขึ้น เห็นได้ว่าการเผาโดยกระบวนการเผาตรงต้องสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงปริมาณมาก ทั้งนี้หากต้องการพลังงานในปริมาณมากก็ต้องป้อนวัตถุดิบในปริมาณมากขึ้น อีกทั้งอุณหภูมิของไอเสียที่ออกมาจากระบบการเผาตรงมีอุณหภูมิวัดได้อยู่ในช่วง 100-200 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 14 ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่อาจก่อให้เกิดไดออกซิน (dioxin) ได้ ทั้งนี้การจัดการของเสียเพื่อเอาพลังงานมาใช้นั้น วิธีการเผาโดยการเผาตรง (direct combustion) ความร้อนที่ได้ออกจากระบบจะมีประสิทธิภาพที่ต่ำลง ทั้งนี้เนื่องจากความร้อนนั้นจะสูญเสียไปจากการให้อากาศที่มากเกินไปแก่ระบบ และจากส่วนต่าง ๆ ของระบบ (Ruth, 1998) สำหรับการเผาของเสียที่มีองค์ประกอบของคลอรีน ดังนั้นการเผาขยะพลาสติกอัดแห้งจึงไม่ได้ทำการทดลองผ่านระบบเผาตรง (direct combustion) เนื่องจากในขยะพลาสติกนั้นมีองค์ประกอบของคลอรีนซึ่งอาจก่อให้เกิดไดออกซินในบรรยากาศขึ้น (Ruth, 1998) จึงต้องมีระบบบำบัดที่มีประสิทธิภาพและพิจารณาคัดเลือกของเสียที่ไม่มีองค์ประกอบของคลอรีน เพื่อลดการเกิดไดออกซิน



ภาพที่ 14 ผลของอุณหภูมิการเผาไหม้กากตะกอนอัดผ่านระบบเผาตรง (direct combustion)

ทั้งนี้การจัดการกับกากตะกอนจากอุตสาหกรรมรีไซเคิลกระดาษมีความเหมาะสมในการนำมาเป็นพลังงานทดแทน โดยผ่านกระบวนการเผาไหม้ (direct combustion) ทั้งนี้เห็นได้จากงานวิจัยของ Monte *et al.* (2008) ได้ระบุว่าอุตสาหกรรมกระดาษของยุโรปบางแห่งสามารถประยุกต์ใช้กากตะกอนเพื่อเป็นเชื้อเพลิงร่วมกับเชื้อเพลิงอื่น เช่น ขงเสียในโรงงานอุตสาหกรรม ในกระบวนการเผาตรงเพื่อการผลิตไอน้ำใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม ดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 โรงงานอุตสาหกรรมกระดาษในยุโรปที่ใช้กากตะกอนเป็นเชื้อเพลิง

Plant	Year	Fuel	Capacity
Cartiere Burgo Verzuolo, Italy	2001	Paper sludge and wood waste	27MWth 29 ton/h steam; 86 bar; 490 °C
Cartiere Burgo Mantova, Italy	1999	Production paper/deinking sludge and landfill reclaimed sludge, 43% ash, 55% moisture	13.5 MWth superheated steam to 3.2 MWc turbine/generator set
Jamsankosken Voima Oy, Finland	2002	Peat, bark, wood chips, sludge, oil	185MWth 252 ton/h steam; 107 bar; 535 °C
Katrinefors Kraftvarme, Sweden	2002	Sludge, wood residue, wood waste	36MWth 47 ton/h steam; 80 bar; 480 °C
Aanevoima Oy, Finland	2002	Bark, wood residue, sludge, peat, oil	157MWth 217 ton/h steam; 105 bar; 535 °C
Vamy Oy/Vattenfall Oy, Finland	2001	Bark, secondary sludge, natural gas, peat, wood residue	88MWth 130 ton/h steam; 11 bar; 525 °C
Modo Paper AB Husum, Sweden	2000	Bark, sludge, oil	87MWth 112 ton/h steam; 60 bar; 450 °C

ตารางที่ 11 (ต่อ)

Plant	Year	Fuel	Capacity
Elektrociepowni Ostroleka, Poland	1997	Bark, primary and secondary sludge	35MWth 47 ton/h steam; 40 bar; 450 °C
Metsa-Serla Oy Simpele, Finland	1997	Peat, bark, sludge, oil	113MWth 144 ton/h steam; 115 bar; 525 °C
Oy Metsa-Botnia Kaskinen, Finland	1997	Bark, sludge, oil	96MWth 126 ton/h steam; 85 bar; 500 °C

ที่มา : Monte *et al.*(2008)

การประเมินความเป็นไปได้ทางเทคนิค

จากการศึกษาระบบผลิตไอน้ำของอุตสาหกรรมกระดาษรีไซเคิลตัวอย่างพบว่า ขยะพลาสติกที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรมตัวอย่างมีปริมาณ 177 ตันต่อเดือน ใช้ได้เพียงร้อยละ 93 ของขยะทั้งหมด คือ ใช้ได้เพียง 164.61 ตันต่อเดือน มีความชื้นเฉลี่ยร้อยละ 40 เมื่อตากแห้งจะเหลือขยะแห้งจำนวน 98.77 ตันต่อเดือน จากการทดสอบการเผาไหม้ด้วยระบบแก๊สซิฟิเคชันพบว่าขยะพลาสติกสามารถเผาไหม้ได้โดยไม่ต้องอาศัยเชื้อเพลิงอื่นเพิ่มเติม

เนื่องจากต้องการประเมินเพื่อนำไปใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมจริง จึงประเมินเครื่องผลิตโปรคิวเซอร์แก๊สที่สามารถผลิตไฟฟ้าได้ 85 กิโลวัตต์ โดยอัตราการไหลของโปรคิวเซอร์แก๊สสูงสุดกำหนดที่ 180 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง คิดประสิทธิภาพการผลิตแก๊สของเชื้อเพลิงพลาสติกที่ร้อยละ 81.52 (จากการคำนวณแทนค่าสมการที่ 12) ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงเป็น 3.76 เมกะจูลต่อตารางเมตร ดังนั้นมีอัตราการใช้เชื้อเพลิง 49.1 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ระบบผลิตโปรคิวเซอร์แก๊สทำงานต่อเนื่อง 24 ชั่วโมง

พิจารณาการใช้ปริมาณเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติกต่อเดือน คิดเป็น 35.35 ตันต่อเดือน ซึ่งมีขยะเพียงพอต่อการใช้งานเพื่อนำพลังงานไปผลิตไอน้ำในโรงงาน

$$\begin{aligned}
 \text{ปริมาณการใช้เชื้อเพลิง} &= \text{ปริมาณเชื้อเพลิง} \times \text{จำนวนชั่วโมงการทำงาน} \\
 \text{พลาสติก (ต่อเดือน)} &= 49.1 \times 24 \times 30 \\
 &= 35.35 \text{ ตันต่อเดือน}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{พลังงานที่ได้จากแก๊สเชื้อเพลิง} &= \text{ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิง} \times \text{อัตราการไหลของ} \\
 \text{จากขยะพลาสติก} &\quad \text{แก๊สเชื้อเพลิง} \times \text{จำนวนชั่วโมงการทำงานต่อเดือน} \\
 &= 3.78 \times 180 \times (24 \times 30) \times 1000 \\
 &= 489,888,000 \text{ กิโลจูลต่อเดือน}
 \end{aligned}$$

พิจารณาอัตราการไหลของโปรคิวเซอร์แก๊สสูงสุดกำหนดที่ 180 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง คิดประสิทธิภาพการผลิตแก๊สของเชื้อเพลิงพลาสติกที่ร้อยละ 97.29 (จากการคำนวณ) ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงเป็น 4.58 เมกกะจูลต่อตารางเมตร ดังนั้นมีอัตราการใช้เชื้อเพลิง 46.42 กิโลกรัมต่อชั่วโมง (ตามสมการที่ 12) ระบบผลิตโปรคิวเซอร์แก๊สทำงานต่อเนื่อง 24 ชั่วโมง

$$\begin{aligned}
 \text{ปริมาณการใช้เชื้อเพลิง} &= \text{ปริมาณเชื้อเพลิง} \times \text{จำนวนชั่วโมงการทำงาน} \\
 \text{พลาสติกผสมกากสับดำ (ต่อเดือน)} &= 46.42 \times 24 \times 30 \\
 &= 33.42 \text{ ตันต่อเดือน}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{พลังงานที่ได้จากแก๊สเชื้อเพลิง} &= \text{ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิง} \times \text{อัตราการไหลของ} \\
 \text{จากขยะพลาสติกผสมกากสับดำ} &\quad \text{แก๊สเชื้อเพลิง} \times \text{จำนวนชั่วโมงการทำงานต่อเดือน} \\
 &= 4.58 \times 180 \times (24 \times 30) \times 1000 \\
 &= 593,568,000 \text{ กิโลจูลต่อเดือน}
 \end{aligned}$$

จากการวิเคราะห์หม้อไอน้ำ (boiler) ของโรงงานตัวอย่าง เป็นแบบท่อน้ำ (water tube boiler) มีกำลังการผลิตสูงสุด 40 ตันต่อชั่วโมง ความดันสูงสุด 10 บาร์ กำลังการผลิตจริงของโรงงานอุตสาหกรรมอยู่ที่ 30 ตันต่อชั่วโมง ความดันมีค่า 6.5 บาร์ จากข้อมูลการวิเคราะห์หม้อไอน้ำของโรงงานอุตสาหกรรม ตามงานวิจัยของบุริมภัทร (2552) ระบุว่า ไอน้ำ 18,690.33 ตัน มีพลังงาน 43,499,687,138.70 กิโลจูล ดังนั้นไอน้ำ 1 ตัน จะมีพลังงาน 2,327,390.00 กิโลจูล

การใช้แก๊สเชื้อเพลิงในการผลิตไอน้ำ คิดประสิทธิภาพในการถ่ายเทพลังงานให้แก่หม้อไอน้ำที่ใช้เชื้อเพลิงชนิดแก๊สมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 90 (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, ม.ป.ป.)

$$\begin{aligned} \text{พลังงานที่ใช้จริงในการผลิตไอน้ำ 1 ตัน} &= \frac{\text{พลังงานที่ใช้ในการผลิตไอน้ำ}}{\text{ประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ}} \\ &= \frac{2,327,390.00}{0.90} \\ &= 2,585,989.00 \text{ กิโลจูล} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณไอน้ำที่ผลิตได้จากขยะพลาสติก} &= \frac{\text{พลังงานจากเชื้อเพลิงอัดแท่ง}}{\text{พลังงานที่ใช้ในการผลิตไอน้ำ}} \\ &= \frac{489,888,000}{2,585,989} \\ &= 189.44 \text{ ตันต่อเดือน} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณไอน้ำที่ผลิตได้จากขยะพลาสติก} &= \frac{\text{พลังงานจากเชื้อเพลิงอัดแท่ง}}{\text{พลังงานที่ใช้ในการผลิตไอน้ำ}} \\ \text{ผสมกากสับดำ} &= \frac{593,568,000}{2,585,989} \\ &= 229.53 \text{ ตันต่อเดือน} \end{aligned}$$

การประเมินความเป็นไปได้ทางเทคนิคของขยะพลาสติกและขยะพลาสติกผสมกากสับดำสามารถให้ไอน้ำทดแทนเพื่อนำไปใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมได้ 229.53 ตันต่อเดือน ซึ่งมากกว่าการใช้ขยะพลาสติกเพียงอย่างเดียวที่สามารถผลิตได้ 189.44 ตันต่อเดือน ดังนั้นขยะพลาสติกผสมกากสับดำจึงมีความเหมาะสมทางด้านเทคนิคมากกว่า ขยะพลาสติกเพียงอย่างเดียว

การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

ระบบแก๊สซิฟิเคชัน

ของเสียจากอุตสาหกรรมกระดาษรีไซเคิล ถูกนำมาพิจารณาเพื่อเป็นพลังงานทดแทนในการนำมาทดแทนน้ำมันเตาคือ ขยะที่ถูกปฏิเสธจากกระบวนการผลิตซึ่งมีในส่วนที่เป็นกระดาษ และขยะพลาสติก ซึ่งโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษรีไซเคิลจะก่อให้เกิดของเสียประเภท ขยะประเภทกระดาษ 2.4 ตันต่อวัน และขยะพลาสติก 5.9 ตันต่อวัน

หม้อไอน้ำที่ใช้ในการผลิตไอน้ำเป็นหม้อไอน้ำแบบท่อน้ำ (water tube boiler) กำลังการผลิตสูงสุด 40 ตันต่อชั่วโมง ความดันใช้งานสูงสุด 10 บาร์ ความดันที่ใช้จริงในการผลิตไอน้ำของโรงงานตัวอย่างมีค่า 6.5 บาร์ กำลังการผลิตไอน้ำเฉลี่ยอยู่ที่ 30 ตันต่อชั่วโมง ในกระบวนการผลิตไอน้ำของโรงงานตัวอย่าง ใช้น้ำมันเตาเกรดซีชนิดกึ่งหนักเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไอน้ำ อัตราการผลิตไอน้ำโดยเฉลี่ย 18,690.33 ตันต่อเดือน อัตราการใช้น้ำมันเตาในการผลิตไอน้ำโดยเฉลี่ย 1,086,940 ลิตรต่อเดือน

จากข้อมูลข้างต้น เชื้อเพลิงขยะพลาสติกอัดแท่ง 35.35 ตันจะสามารถผลิตไอน้ำได้ 189.44 ตันต่อเดือน แต่โรงงานมีศักยภาพในการผลิตเชื้อเพลิง 98.77 ตันต่อเดือน ดังนั้นเชื้อเพลิง 98.77 ตันต่อเดือนสามารถผลิตไอน้ำได้ 529.31 ตันต่อเดือน ในการผลิตไอน้ำ 1 ตัน ต้องใช้น้ำมันเตา 58.16 ลิตร ดังนั้นหากนำขยะพลาสติกมาเป็นเชื้อเพลิงรวมจะสามารถประหยัดน้ำมันเตาได้ 30,784.67 ลิตรต่อเดือน เมื่อคิดราคาน้ำมันเตาที่ 19.37 บาท การใช้ขยะพลาสติกอัดเป็นเชื้อเพลิงสามารถประหยัดค่าน้ำมันเตาได้ 596,299.05 บาทต่อเดือน ในขณะที่เชื้อเพลิงขยะพลาสติกผสมกากสับดำ 33.42 ตันจะสามารถผลิตไอน้ำได้ 229.53 ตันต่อเดือน ดังนั้นเชื้อเพลิงขยะพลาสติกผสมกากสับดำ 197.54 ตันต่อเดือน (98.77 ตันขยะพลาสติก + 98.77 ตันกากสับดำ) ผลิตไอน้ำได้ 1,356.72 ตันต่อเดือน ในการผลิตไอน้ำ 1 ตัน ต้องใช้น้ำมันเตา 58.16 ลิตร ดังนั้นหากนำขยะพลาสติกมาเป็นเชื้อเพลิงรวมจะสามารถประหยัดน้ำมันเตาได้ 79,119.70 ลิตรต่อเดือน เมื่อคิดราคาน้ำมันเตาที่ 19.37 บาท การใช้ขยะพลาสติกอัดเป็นเชื้อเพลิงสามารถประหยัดค่าน้ำมันเตาได้ 1,532,548.60 บาทต่อเดือน

เมื่อคำนวณค่าอัดแท่งเชื้อเพลิงโดยคิดค่าไฟฟ้า (คิดตามอัตราค่าไฟฟ้าตามช่วงเวลาของการใช้, TOU tariff) มูลค่าหน่วยละ 2.61 บาท การอัดเชื้อเพลิง 98.77 ตัน คิดหน่วยการใช้ไฟฟ้าเท่ากับ 70.42 หน่วยต่อตัน ดังนั้นค่าอัดแท่งขยะพลาสติกเป็นเชื้อเพลิง 98.77 ตันต่อเดือนใช้ไฟ 6,955.38 หน่วยต่อตัน คิดเป็นค่าไฟฟ้าที่ต้องเสียในการอัดแท่งเชื้อเพลิงพลาสติกเป็นเงิน 18,153.55 บาทต่อเดือน ในขณะที่ขยะพลาสติกผสมกากสับดำ 197.54 ตันต่อเดือน คิดค่าไฟฟ้าในการอัดเป็น 36,307.10 บาทต่อเดือน และคิดค่าไฟฟ้าในการดำเนินระบบผลิตโปรคิวเซอร์แก๊สเป็นเงิน 38,880.00 บาทต่อเดือน โดยคิดจากเวลาในการเดินระบบ 720 ชั่วโมงต่อเดือน $\times$ ภาระไฟฟ้าที่ใช้ 18 กิโลวัตต์ $\times$ อัตราค่าไฟฟ้า 3 บาทต่อกิโลวัตต์

ในการนำเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติกและขยะพลาสติกผสมกากสับดำมาใช้ต้องลงทุนสร้างระบบผลิตโปรคิวเซอร์แก๊สทั้งนี้ จากงานวิจัยของบุรีรัมย์, 2552 ประเมินจากการลงทุนในการก่อสร้างระบบผลิตโปรคิวเซอร์แก๊สเพื่อใช้ในโรงงาน 3,000,000 บาท

กากสับดำถูกซื้อมาจากโรงงานหีบสับดำ ในจังหวัดใกล้เคียงกับโรงงานผลิตกระดาษรีไซเคิล ซึ่งต้องเสียค่าซื้อกากสับดำจากโรงหีบ ในราคา กิโลละ 3 บาท ซึ่งโรงงานต้องใช้กากสับดำมาเป็น

ส่วนผสมจำนวน 98.77 ตัน หรือ 98,770 กิโลกรัม ดังนั้นจะเสียค่าใช้จ่ายในการซื้อกากสบู่ดำเป็นจำนวนเงิน 296,310.00 บาทต่อเดือน

ตารางที่ 12 ต้นทุน ค่าใช้จ่าย และมูลค่าที่ประหยัดได้จากการดำเนินการนำขยะพลาสติกและขยะพลาสติกผสมกากสบู่ดำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไอน้ำผ่านกระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่น

รายการ	มูลค่าของ เชื้อเพลิงขยะ พลาสติก (บาท)	มูลค่าของ เชื้อเพลิงขยะ พลาสติกผสม กากสบู่ดำ (บาท)
ค่าใช้จ่าย		
ต้นทุนในการก่อสร้าง	3,000,000.00	3,000,000.00
ค่าดำเนินการอัดแท่งเชื้อเพลิง (ต่อเดือน)	18,153.55	36,307.10
ค่าไฟในการดำเนินระบบ (ต่อเดือน)	38,880.00	38,880.00
ค่าซ่อมบำรุง และควบคุมคุณภาพ (ต่อเดือน)	5,000.00	5,000.00
ค่ากากสบู่ดำ (กก.ละ 3 บาท) (ต่อเดือน)	-	296,310.00
มูลค่าที่สามารถประหยัดได้		
จำนวนเงินค่าน้ำมันเตาที่ประหยัดได้ (ต่อเดือน)	596,299.05	1,532,548.60
รวมเงินได้สุทธิต่อเดือน	573,145.50	1,156,051.50

วิเคราะห์ผ่านเครื่องมือทางเศรษฐศาสตร์ที่ใช้ในการประเมินโครงการทั่วไปคือ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (net present value, NPV) อัตราผลตอบแทน (internal rate of return, IRR) และระยะเวลาคืนทุน

คิดค่า PVIFA ที่อัตราผลตอบแทนที่ต้องการร้อยละ 10 จำนวน 15 งวด (15 ปีตามอายุการใช้งานของหม้อไอน้ำ) มีค่าเท่ากับ 7.6061 (เรงรัก, 2543; บุริมภัทร์, 2552)

$$\begin{aligned}\text{มูลค่าปัจจุบันสุทธิ} &= (573,145.50 \times 12 \times 7.6061) - 3,000,000.00 \\ &= 49,312,824.00 \text{ บาท}\end{aligned}$$

มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) คิดค่าที่คำนวณได้มีค่า 49.30 ล้านบาท ซึ่งมีค่าเป็นบวก หากมูลค่าปัจจุบันสุทธิที่คำนวณได้มีค่าเป็นบวก แสดงว่าการลงทุนในโครงการนั้น ๆ สามารถยอมรับได้ ดังนั้นการลงทุนในการดำเนินการนำกากตะกอนมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนในการผลิตไอน้ำจึงเป็นการลงทุนที่สามารถยอมรับได้

การคำนวณค่า IRR ซึ่งเป็นค่าอัตราคิดลดที่มีผลทำให้มูลค่าปัจจุบันของเงินสดที่ได้รับในอนาคตเท่ากับเงินลงทุนที่จ่ายในปัจจุบัน ในการคำนวณค่า IRR นี้คิดเงินลงทุนในการดำเนินการเป็นเงิน 3,000,000.00 บาท มีค่า IRR มีค่าเท่ากับร้อยละ 16 เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราผลตอบแทนที่ต้องการในการคำนวณมูลค่าปัจจุบันสุทธิซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 10 พบว่าค่า IRR มีค่ามากกว่า ดังนั้นการลงทุนในการดำเนินการนำขยะพลาสติกมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนในการผลิตไอน้ำจึงเป็นการลงทุนที่สามารถยอมรับได้

เมื่อพิจารณาถึงมูลค่าปัจจุบันสุทธิและอัตราผลตอบแทน จากผลการคำนวณพบว่า การดำเนินการลงทุนเพื่อนำขยะพลาสติกมาใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อทดแทนน้ำมันเตาเป็นการลงทุนที่สามารถยอมรับได้ โดยจะสามารถทำกำไรสุทธิ 573,145.50 บาทต่อเดือน มีระยะเวลาคืนทุนประมาณ 5 เดือน 18 วัน

ผลจากการคำนวณทางเศรษฐศาสตร์ของขยะพลาสติกผสมกากสบู่ดำพบว่า มีค่าปัจจุบันสุทธิเป็น 102.50 ล้านบาท ค่าอัตราผลตอบแทน (IRR) เป็นร้อยละ 38.00 เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราผลตอบแทนที่ต้องการในการคำนวณมูลค่าปัจจุบันสุทธิซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 10.00 พบว่าค่า IRR มีค่ามากกว่า ระยะเวลาคืนทุน 2 เดือน

ในการตัดสินใจเลือกโครงการใดโดยมีหลายโครงการให้เลือก นั้นต้องพิจารณาเครื่องมือทั้ง 3 ชนิดร่วมกันดังตารางที่ 13 สำหรับค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) ในงานวิจัยนี้เห็นชัดเจนว่าทั้ง 2 โครงการมีค่ามากกว่าศูนย์ และพิจารณาเลือกโครงการที่ให้ค่าปัจจุบันสุทธิสูงสุด (สมพร, 2542) ซึ่งค่าปัจจุบันสุทธิของการใช้ขยะพลาสติกผสมกากสบู่ดำมาเป็นเชื้อเพลิงมีค่ามากกว่าขยะพลาสติก ค่าอัตราผลตอบแทนในโครงการ (IRR) โครงการที่ให้ประโยชน์ในการลงทุนนั้นค่า IRR จะต้องมีความสูงกว่าอัตราดอกเบี้ย ซึ่งในงานวิจัยนี้คิดที่ร้อยละ 10 และเลือกโครงการที่มีค่า IRR สูงที่สุด (สมพร, 2542) ดังนั้นการลงทุนในการใช้เชื้อเพลิงขยะพลาสติกผสมกากสบู่ดำเพื่อผลิตโปรดิวเซอร์แก๊สผ่านกระบวนการแก๊สซิเคชันจึงให้ความคุ้มค่าในการลงทุนมากกว่าการใช้เชื้อเพลิงจากขยะพลาสติก เนื่องจากขยะพลาสติกผสมกากสบู่ดำมีค่า NPV และ IRR สูงที่สุด และมีระยะเวลาในการคืนทุนสั้นกว่าขยะพลาสติก

ตารางที่ 13 การเปรียบเทียบผลการคำนวณทางเศรษฐศาสตร์ของเชื้อเพลิงขยะพลาสติกและขยะพลาสติกผสมกากสับด้า

เชื้อเพลิง	NPV	IRR	Payback period
ขยะพลาสติก	49.30 ล้านบาท	17.00 %	5 เดือน 8 วัน
ขยะพลาสติกผสมกากสับด้า	102.50 ล้านบาท	38.00 %	2 เดือน 18 วัน

การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ของการนำเชื้อเพลิงมาเผาในระบบเผาตรง

กากตะกอนจากโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษรีไซเคิลมีปริมาณ 2,709 ตันต่อเดือน (น้ำหนักแห้ง) ซึ่งมีค่าความร้อน 6,973.88 กิโลจูลต่อกิโลกรัม กากตะกอนนี้สามารถเผาไหม้ได้โดยไม่ต้องอาศัยเชื้อเพลิงอื่นเพิ่มเติมหากนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนในการผลิตไอน้ำ ดังนั้นกากตะกอนปริมาณ 2,709 ตัน (น้ำหนักแห้ง) จะสามารถผลิตไอน้ำได้ 5,844.48 ตัน โรงงานตัวอย่างใช้น้ำมันเตาในการผลิตไอน้ำเฉลี่ย 58.16 ลิตรต่อไอน้ำ 1 ตัน ดังนั้นหากนำกากตะกอนมาใช้เป็นเชื้อเพลิงจะสามารถประหยัดน้ำมันเตาคิดเป็นปริมาณ 339,887.04 ลิตร น้ำมันเตามีราคาโดยเฉลี่ยลิตรละ 19.37 บาท ดังนั้นการใช้กากตะกอนเป็นเชื้อเพลิงทดแทนจะสามารถประหยัดค่าเชื้อเพลิงได้ 6,090,775.80 บาท ซึ่งการนำกากตะกอนอัดแท่งไปประยุกต์ใช้ในหม้อต้มไอน้ำ เพื่อเป็นแหล่งพลังงานทดแทนนั้น จะต้องใช้หม้อต้มไอน้ำชนิดใช้เชื้อเพลิงแข็ง จากการประเมินค่าใช้จ่ายจากศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวลเป็นดังตารางที่ 14 ค่าต้นทุนในการก่อสร้าง 120,000,000.00 บาท ค่าบำรุงรักษา 10,000,000.00 บาทต่อเดือน ค่ากำจัดเถ้าจากการเผา 2,907,027.90 บาทต่อเดือน ค่าอบกากตะกอน 1,000,000 บาทต่อเดือน ซึ่งจะสามารถลดค่าใช้จ่ายของน้ำมันเตาที่ใช้ในแต่ละเดือนเป็น 6,090,775.80 บาทต่อเดือน และค่าฟังกาบกากตะกอนเป็น 11,377,779.00 บาทต่อเดือน (วรวิทย์, 2552) การประเมินความคุ้มค่าจากการดำเนินการโดยประเมินผ่านเครื่องมือทางเศรษฐศาสตร์ดังนี้ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (net present value, NPV) อัตราผลตอบแทน (internal rate of return, IRR) และระยะเวลาคืนทุน พบว่าค่าของมูลค่าปัจจุบันสุทธิเป็น 142 ล้านบาท ซึ่งมีค่าเป็นบวกสามารถยอมรับได้ ค่าอัตราผลตอบแทนมีค่าเท่ากับร้อยละ 34 เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราผลตอบแทนที่ต้องการในการคำนวณมูลค่าปัจจุบันสุทธิซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 10 พบว่าค่าอัตราผลตอบแทนมีค่ามากกว่า และมีระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 2 ปี 10 เดือน

ตารางที่ 14 ต้นทุน ค่าใช้จ่าย และมูลค่าที่ประหยัดได้จากการดำเนินการนำกากตะกอนมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไอน้ำ

รายการ	มูลค่า (บาท)
ค่าใช้จ่าย	
ต้นทุนในการก่อสร้าง	120,000,000.00
ค่าดำเนินการผลิตไอน้ำและบำรุงรักษา (ต่อเดือน)	10,000,000.00
ค่าจัดการเถ้าที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ (ต่อเดือน)	2,907,027.90
ค่าดำเนินการอบกากตะกอน (ต่อเดือน)	1,000,000.00
มูลค่าที่สามารถประหยัดได้	
จำนวนเงินค่าฝังกลบกากตะกอนที่ประหยัดได้ (ต่อเดือน)	11,377,779.00
จำนวนเงินค่าน้ำมันเตาที่ประหยัดได้ (ต่อเดือน)	6,090,775.80
รวมมูลค่าที่ประหยัดได้สุทธิ (ต่อเดือน)	3,561,526.96

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

อุตสาหกรรมกระดาษรีไซเคิล เกิดของเสียที่สามารถหมุนเวียนเพื่อเป็นพลังงาน (waste-to-energy) พวกกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรม และของเสียที่ถูกปฏิเสธจากระบวนการผลิต เมื่อศึกษาองค์ประกอบและคุณสมบัติการเป็นเชื้อเพลิงของทั้งกากตะกอนและขยะพลาสติก พบว่า กากตะกอนจากอุตสาหกรรมกระดาษรีไซเคิลแห่งนี้ ไม่สามารถเป็นแหล่งเชื้อเพลิงในการผลิตโปรคิวเซอร์แก๊ส ผ่านระบบแก๊สซิฟิเคชันได้ เนื่องจากแก๊สที่ออกมาจากระบบไม่สามารถจุดติดไฟได้ เมื่อคิดสัดส่วนเชื้อเพลิงของกากตะกอน ขยะพลาสติก และขยะพลาสติกผสมกากสบู่ดำพบว่ากากตะกอนมีส่วนเชื้อเพลิงต่ำที่สุดเป็น 0.01 อีกทั้งปริมาณเถ้าของกากตะกอนนั้นมีสูงถึงร้อยละ 50 และปริมาณคาร์บอนคงตัวต่ำจึงทำให้ไม่เหมาะสมในการเป็นเชื้อเพลิง แต่ของเสียที่ถูกปฏิเสธจากระบบนั้นสามารถเป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตโปรคิวเซอร์แก๊สได้อย่างดี ทั้งนี้เนื่องจากของเสียที่ถูกปฏิเสธจากระบบมีองค์ประกอบของพลาสติกเป็นส่วนใหญ่ เมื่อทดลองผสมขยะพลาสติกกับของเสียจากผลผลิตทางการเกษตร (กากสบู่ดำ) ในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 พบว่าสามารถผลิตโปรคิวเซอร์แก๊สได้ค่าความร้อนของโปรคิวเซอร์แก๊สสูงที่สุด

การทดสอบหาสถานะที่เหมาะสมของเชื้อเพลิงโดยทดสอบกับขยะพลาสติก และขยะพลาสติกผสมกากสบู่ดำอัดแท่ง ทดสอบโดยใช้อัตราการไหลของเชื้อเพลิงที่ 91.3, 100.43, 108.41 และ 135.80 ตารางเมตรต่อชั่วโมง พบว่า การผลิตโปรคิวเซอร์แก๊สจากขยะพลาสติก ที่อัตราการไหลของโปรคิวเซอร์แก๊ส 108.41 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง เป็นสถานะที่เหมาะสมที่สุด คือมีค่าความร้อนของโปรคิวเซอร์แก๊สเป็น 3.76 เมกกะจูลต่อตารางเมตร อัตราการใช้เชื้อเพลิง 26.28 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ร้อยละของการเกิดเถ้าเป็น 6.23 คิดประสิทธิภาพการผลิตโปรคิวเซอร์แก๊สเป็นร้อยละ 58.78 และเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติกผสมกากสบู่ดำ สถานะที่เหมาะสมที่สุดที่อัตราการไหลของโปรคิวเซอร์แก๊ส 91.3 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ส่งผลให้ได้ค่าความร้อนของโปรคิวเซอร์แก๊สสูงที่สุดเป็น 4.58 เมกกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร อัตราการใช้เชื้อเพลิงเป็น 21.8 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ร้อยละของการเกิดเถ้าเป็น 6.68 คิดประสิทธิภาพการผลิตโปรคิวเซอร์แก๊สเป็นร้อยละ 92.93 ซึ่งเชื้อเพลิงทั้งสองชนิดนี้เหมาะสมที่จะนำไปผลิตโปรคิวเซอร์แก๊ส

ในขณะที่การจัดการกับกากตะกอนนั้นสามารถนำมาเป็นเชื้อเพลิงผ่านระบบเผาตรง (direct combustion) ทั้งนี้การเผากากตะกอนนั้นส่งผลให้อุณหภูมิในห้องเผาสูงถึง 800-1000 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของไอเสียอยู่ในช่วง 100-200 องศาเซลเซียส ทั้งนี้การเผาระบบนี้อาจเกิดไดออกซินได้ง่าย จึงต้องมีระบบบำบัดที่มีประสิทธิภาพ และคัดเลือกของเสียที่นำมาเป็นเชื้อเพลิง

ถ้าจากการเผาพลาสติกและพลาสติกผสมกากสับดำ ถูกโดยวิเคราะห์โลหะหนัก 8 ตัว คือ Hg, Cd, Zn, Cr, Ni, As, Pb, Se พบว่า ถ้าจากการเผาขยะพลาสติกพบโลหะหนัก 4 ตัว Cd, Zn, Cr และ Pb ซึ่งเป็นโลหะหนักตัวเดียวที่เกินค่ามาตรฐาน ในขณะที่ขยะพลาสติกผสมกากสับดำตรวจพบโลหะหนัก 5 ตัว คือ Cd, Zn, Cr, Pb และ Se ซึ่งพบว่า Cd และ Se เกินมาตรฐานที่กำหนด ทั้งนี้คาดว่า Pb น่าจะมาจากองค์ประกอบของสีในพลาสติก ส่วน Se นั้นมาจากองค์ประกอบของกากสับดำเนื่องจากตรวจพบในถ้าจากขยะพลาสติกผสมกากสับดำแต่ไม่พบในถ้าขยะพลาสติก

เมื่อวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์และความเป็นไปได้ทางเทคนิคของการใช้เชื้อเพลิงขยะพลาสติกผ่านระบบแก๊สซิฟิเคชัน พบว่า การนำเชื้อเพลิงพลาสติกผสมกากสับดำมาเป็นแหล่งพลังงานในอุตสาหกรรมนั้นมีความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์มากกว่าขยะพลาสติก ซึ่งเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติกเพียงอย่างเดียว มีศักยภาพในการเป็นเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันเตาในการผลิตไอน้ำได้น้ำมันเตาได้ 30,784.67 ลิตรต่อเดือน คิดเป็นเงิน 596,299.05 บาทต่อเดือน มีค่าปัจจุบันสุทธิ 49.3 ล้านบาท ผลตอบแทนในโครงการสุทธิร้อยละ 17 และมีระยะเวลาในการคืนทุน 5 เดือน 8 วัน ในขณะที่การใช้เชื้อเพลิงจากขยะพลาสติกผสมกากสับดำ สามารถผลิตไอน้ำได้ 1,356.72 ตันต่อเดือนสามารถทดแทนน้ำมันเตาในการผลิตไอน้ำได้คิดเป็น 79,119.70 ลิตรต่อเดือน คิดเป็นเงิน 1,532,548.60 บาทต่อเดือน มีค่าปัจจุบันสุทธิ 102.5 ล้านบาท ผลตอบแทนในโครงการสุทธิร้อยละ 38 และมีระยะเวลาในการคืนทุน 2 เดือน 18 วัน

ทั้งนี้เชื้อเพลิงจากกากตะกอนถูกนำมาให้พลังงานในกระบวนการเผาตรง เมื่อวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์และความเป็นไปได้ทางเทคนิคของการใช้เชื้อเพลิงกากตะกอนผ่านระบบเผาตรงพบว่า มีความเหมาะสมในการนำกากตะกอนมาเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งกากตะกอนสามารถผลิตไอน้ำได้ 5,844.48 ตัน พบว่า มูลค่าปัจจุบันสุทธิเป็น 142 ล้านบาท ค่าอัตราผลตอบแทนในโครงการมีค่าเท่ากับร้อยละ 34 ระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 2 ปี 10 เดือน ในขณะที่ขยะพลาสติกถึงแม้ว่าจะมีคุณสมบัติในการให้พลังงานมากกว่ากากตะกอน แต่ก็ไม่นิยมนำมาใช้ในกระบวนการเผาตรงเนื่องจากมลพิษทางอากาศที่อาจเกิดขึ้น อาทิเช่น ไดออกซินและฟูแรน ทั้งนี้พลาสติกจะนิยมนำไปใช้ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเพื่อผลิตไฮโดรเจนแก๊สมากกว่า ระบบแก๊สซิฟิเคชันนั้นถือว่าเป็นพลังงานสะอาดอีกทางหนึ่ง

การจัดการของเสียแต่ละประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษรีไซเคิล ที่มีทั้งกากตะกอนของเสียที่ถูกปฏิเสธจากระบบ ซึ่งของเสียเหล่านี้มีความเหมาะสมในการนำมาจัดการทางด้านพลังงานแตกต่างกัน โดยขยะที่เป็นพลาสติกควรนำมาผสมกับผลผลิตทางการเกษตรเพื่อเพิ่มศักยภาพในการผลิตไฮโดรเจนแก๊สผ่าน ระบบแก๊สซิฟิเคชัน ในขณะที่กากตะกอนนั้นควรจัดการโดยใช้เทคนิคของการเผาตรง ซึ่งจะส่งผลให้ศักยภาพในการผลิตเป็นพลังงานทดแทนมากกว่าการนำกากตะกอนมาผลิตไฮโดรเจนแก๊ส

ข้อเสนอแนะ

การผลิตโปรคิวเซอร์แก๊สโดยใช้เชื้อเพลิงชีวมวลผสมพลาสติกจากโรงงาน ผ่านระบบแก๊สซิฟิเคชัน ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้กากสับดูมในการเพิ่มศักยภาพในการผลิตโปรคิวเซอร์แก๊ส เนื่องจากเป็นการเพิ่มปริมาณคาร์บอนคงตัว จึงทำให้เพิ่มค่าสัดส่วนของเชื้อเพลิงด้วย ทั้งนี้จึงเสนอให้มีการวิจัยทางด้านการใช้สัดส่วนกากสับดูมที่เหมาะสมในการนำมาผลิตโปรคิวเซอร์แก๊สที่ทำให้ค่าความร้อนมากที่สุด อีกทั้งการนำมาผสมกับผลผลิตทางการเกษตรอื่น ในสัดส่วนต่าง ๆ เช่น แกลบ ฟางข้าว และซังข้าวโพด เป็นต้น ทั้งนี้เป็นการจัดการของเสียที่มีศักยภาพ และยังเพิ่มมูลค่าให้กับของเสียอีกด้วย



เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน 2552ก. พลังงานทดแทน.

แหล่งที่มา : <http://www.dede.go.th/dede/index.php?id=35>, 23 มิถุนายน 2552.

ไกรพัฒน์ จินขจร. 2550. พลังงานหมุนเวียน. พิมพ์ครั้งที่1. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ.

ทิพย์สุกินทร์ หินซุย. 2550. การศึกษาการกำจัดกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อผลิตพลังงานโดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน: กรณีศึกษาการกำจัดกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมฟอกย้อม.วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เบญจมาศ ปุยอ้อก. 2547. แก๊สซิฟิเคชันของแบล็กลิเคอร์เร่งปฏิกิริยาด้วยเหล็กบนโดโลไมต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

บุริมภัทร ปกรณ์ศิริ. 2552. การลดการใช้ น้ำมันเตาและการจัดการของเสียผ่านกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของกากตะกอนชีวภาพในอุตสาหกรรมกระดาษรีไซเคิล.วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ประพันธ์ กุศลธรา. 2551. เชื้อเพลิงสังเคราะห์จากกระบวนการเคมีความร้อน. แหล่งที่มา: <http://www.vcharkarn.com/varticle/37774>, 15 สิงหาคม 2552.

พรชัย เหลืองอาภาพงศ์, 2552. เรื่องน่าคิด.มูลค่าสบูดำครบวงจร. แหล่งที่มา : <http://www.kasetcity.com/Worldag/view.asp?id=344>, 23 ตุลาคม 2552.

พัฒนา อนุรักษ์พงษ์ธร. 2549. ขยะ, น. 6-1 - 6-26. หลักวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. ม.ป.ป. หม้อไอน้ำและระบบส่งจ่ายไอน้ำ. บทเรียนเครือข่ายอินเทอร์เน็ต เรื่อง การอนุรักษ์พลังงานในโรงงานอุตสาหกรรม. แหล่งที่มา: http://mte.kmutt.ac.th/mte_learning/Energy_Conservation_in_Industrial_Plant/index.html, 13 มกราคม 2553

มัลลิกา ปัญญาอะโป. 2544.การจัดการของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม. มหาวิทยาลัยศิลปากร, นครปฐม.

ระพีพันธุ์ ภาสบุตร และ สุขสันต์ สุทธิผลไพบูล. 2552. การใช้น้ำมันสบู่นำกับเครื่องยนต์ดีเซลในไร่นา
ตอนที่ 3. แหล่งที่มา :

http://www.biodiesel.rdi.ku.ac.th/index.php?option=com_content&task=view&id=128&Itemid=1 12 มกราคม 2553

วลัยพร มุขสุวรรณ. 2553. พลาสติกในชีวิตประจำวัน. แหล่งที่มา:

<http://www.thaibizcenter.com/KnowledgeCenter.asp?kid=4033>, 13 มกราคม 2553

ศิริรัตน์ จิตการคำ. 2551. จากขยะสู่น้ำมัน: เทคโนโลยีการผลิตพลังงานทางเลือกที่ดูแลสิ่งแวดล้อม. พิมพ์
ครั้งที่ 1. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

สถาบันการจัดการบรรจุภัณฑ์เพื่อสิ่งแวดล้อม สถาบันอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย. 2552. ความรู้เรื่องรีไซเคิล. แหล่งที่มา : www.tipmse.or.th/.../file/ความรู้เรื่องรีไซเคิล.22-24,26.doc, 23 มิถุนายน 2552.

สำนักงานเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2542. คู่มือการจัดการ
สิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ. กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวง
อุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ.

สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. 2544. ระบบเครื่องยนต์ก๊าซโปรดิวเซอร์จากชีว
มวล. ม.ป.ท., กรุงเทพฯ

สมพร อิศวิลานนท์. 2542. เศรษฐศาสตร์ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม: หลักและทฤษฎี. พิมพ์
ครั้งที่ 2. เลิศชัยการพิมพ์ 2, นนทบุรี

ศูนย์ความเป็นเลิศด้านชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 2552ก. แบบโครงสร้างเตาเผาระบบ
ไฮบริดแก๊สซิฟิเคชัน. (ไฟล์ข้อมูลคอมพิวเตอร์). ศูนย์ความเป็นเลิศด้านชีวมวล มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีสุรนารี., นครราชสีมา.

_____. 2552ข. แบบโครงสร้างเตาเผาแบบไฮโคลน. (ไฟล์ข้อมูลคอมพิวเตอร์). ศูนย์ความเป็น
เลิศด้านชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี., นครราชสีมา.

ศูนย์ส่งเสริมวิศวกรรมเกษตรที่ 1 ชัยนาท. 2552. สบู่ดำ. แหล่งที่มา : <http://aopdm01.doae.go.th/data/physicnut21.htm> , 23 มิถุนายน 2552

วรวิทย์ ปุณทริกพันธ์. 2552. การลดปัญหาสิ่งแวดล้อมในอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษภายใต้แนวคิดการผลิตที่สะอาด.วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Aznar, M.P., M. A. Caballero, J.A. Sancho and E. France's. 2006. Plastic waste elimination by co-gasification with coal and biomass in fluidized bed with air in pilot plant. **Fuel Processing Technology** 87: 409 – 420.

Brigham, E. F. and J. F. Houston. 2000. **Fundamentals of financial management**. 8th ed. The Dryden Press, Orlando, Florida.

Chiemchaisri, C., B. Charnnok. and C. Visvanathan. 2010. Recovery of plastic wastes from dumpsite as refuse-derived fuel and its utilization in small gasification system. **Bioresource Technology** 101: 1522-1527.

Dalai, A.K., N. Batta , I. Eswaramoorthi and G.J. Schoenau. 2009. Gasification of refuse derived fuel in a fixed bed reactor for syngas production. **Waste Management** 29: 252–258.

FAO (Food and Agricultural Organization of the united nation). 1986. **Wood gas as engine fuel**. Forestry paper 72 , Rome, Italy

García-Bacaicoaz, P., J.F. Mastral, J. Ceamanos, C. Berrueco and S. Serrano. 2008. Gasification of biomass/high density polyethylene mixtures in a downdraft gasifier. **Bioresource Technology** 99: 5485–549.

Galvagno, S., G. Casciaro, S. Casu, M. Martino , C. Mingazzini, A. Russo and S. Portofino 2009. Steam gasification of tyre waste, poplar, and refuse-derived fuel: A comparative analysis. **Waste Management** 29: 678–689

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

- Rhyner, C. R., L. J. Schwartz, R. B. Wenger and M. G. Khorell. 1995. **Waste management and resource recover**. Lewis Publishers, Boca Raton.
- Ruth., L. A. 1998. Energy from municipal solid waste : a comparison with coal combustion technology. **Energy combust. Science**. 24: 545-564
- McKinney, R. W. J. 1995. **Technology of paper recycling**. Blackie Academic and Professional, Glasgow.
- Monte, M.C., E. Fuente, A. Blanco, C. Negro. 2008. Waste management from from pulp and paper production in the European Union. **Waste management**. (In press)
- Na, J.I., S.J. Park, Y.K. Kim, J.G. Lee and J.H. Kim. 2003. Characteristics of oxygen-blown gasification for combustible waste in a fixed-bed gasifier. **Applied Energy** 75: 275–285
- Pinto, F., C. Franco, R.N. Andre, M. Miranda, I. Gulyurtlu and I. Cabrita . 2002. Co-gasification study of biomass mixed with plastic wastes. **Fuel** 81: 291-297.
- Quaak, P., H. Knoef., H. Stassen. 1999. **Energy from biomass: a review of combustion and gasification technologys**. The international bank for reconstruction and development/ The world bank, Washington D.C., USA.
- Sylwester, K., M. Pronobis and D. Baxter. 2008. Co-firing of biomass waste-derived syngas in coal power boiler. **Energy** 33: 1770–1778.
- Sims, R E. H. 2008. **The brilliance of bioenergy in business and in practice**. James and James (Science publishers), London.
- 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.
- Vyas D.K., R.N. Singh. 2007. Feasibility study of Jatropha seed husk as an open core gasifier feedstock. **Renewable Energy** 32: 512–517





ภาคผนวก ก
ผลการทดลองการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่อัตราการให้อากาศต่าง ๆ

ตารางผนวกที่ ก1 องค์ประกอบและความเข้มข้นของแก๊สเชื้อเพลิงที่ปริมาตรอากาศต่าง ๆ ของเชื้อเพลิง
พลาสติกอัดแท่ง

ปริมาตร อากาศ	ความเข้มข้นของแก๊สเชื้อเพลิง (vol%)					HHV MJ/Nm ³
	H ₂	N ₂ +O ₂	CO	CH ₄	CO ₂	
85.32	11.4016	58.8102	12.4847	1.2644	9.6671	3.66
	11.0878	57.7569	11.8191	0.9873	9.4853	3.42
	11.7137	57.4734	11.0829	0.9654	10.2615	3.40
เฉลี่ย	11.4010	58.0135	11.7956	1.0724	9.8046	3.49
95.61	8.2370	59.9528	8.3984	1.3082	12.1037	2.73
	8.2123	67.1779	0.0000	1.3797	12.4455	1.65
เฉลี่ย	8.2247	63.5654	4.1992	1.3440	12.2746	2.19
102.97	10.9115	57.9260	10.9406	1.2952	10.5066	3.41
	12.0451	55.8247	13.1166	1.2615	8.4048	3.83
	11.3170	55.0090	10.9117	2.8721	10.1766	4.11
เฉลี่ย	11.4245	56.2532	11.6563	1.8096	9.6960	3.78
119.15	10.1234	60.4570	8.5723	1.9692	9.1456	3.27
	10.1058	56.2346	9.0874	2.6507	12.0441	3.62
	9.4482	58.3844	8.8000	2.0410	11.4484	3.24
	9.4693	59.1235	9.0570	2.0451	11.4900	3.28
เฉลี่ย	9.7867	58.5499	8.8792	2.1765	11.0320	3.35

ตารางผนวกที่ ก2 องค์ประกอบและความเข้มข้นของแก๊สเชื้อเพลิงที่ปริมาตรอากาศต่าง ๆ ของ
เชื้อเพลิงพลาสติกผสมกากสับด้ายอัดแท่ง

ปริมาตร	ความเข้มข้นของแก๊สเชื้อเพลิง (vol%)					HHV
อากาศ (m ³ /h)	H ₂	N ₂ +O ₂	CO	CH ₄	CO ₂	MJ/Nm ³
	8.9140	55.4625	12.7895	1.7124	14.9388	3.56
85.32	9.2102	55.7713	11.5002	1.8163	15.3500	3.47
	8.3057	55.7947	12.5749	1.4896	16.5194	3.36
เฉลี่ย	8.8100	55.6762	12.2882	1.6728	15.6027	3.46
95.61	12.7080	47.2783	13.7915	2.8987	15.3125	4.68
	12.6305	49.2145	15.7673	1.8105	13.6912	4.48
เฉลี่ย	12.6693	48.2464	14.7794	2.3546	14.5019	4.58
	7.6234	56.1944	13.1549	2.0482	14.2587	3.57
102.97	9.4023	52.2412	14.8936	2.1084	15.7979	4.06
	10.3050	53.2895	14.2610	1.9491	15.3678	4.03
เฉลี่ย	9.1102	53.9084	14.1032	2.0352	15.1415	3.89
	10.1093	54.1419	10.8029	3.4718	15.9906	4.18
119.15	10.3209	52.3907	12.1395	3.2155	15.3204	4.28
	10.3332	58.0093	9.4688	1.7851	14.9279	3.34
เฉลี่ย	10.2545	54.8473	10.8037	2.8241	15.4130	3.93



ภาคผนวก ข

ตารางเทียบอัตราการไหลเข้าของอากาศและอัตราการไหลออกของโปรดีวเซอร์แก๊ส

ตารางผนวกที่ ข1 เทียบอัตราการไหลของอากาศเข้าระบบที่กำลังเป่าและดูดของ blower

อัตราการไหลเข้าของอากาศ (m/s)

in/out	0	10	20	30	40	50
0	A	A	A	A	A	A
10	A	4.3	6.3	9.9	11.9	14
20	4.2	5.4	7.3	10.3	12.9	14.3
30	7.8	6.9	8.7	10.9	13	15.5
40	11.2	8.7	10.5	11.6	14	15.6
50	14.6	10.7	13.3	13.7	14.5	16.2

อัตราการไหลเข้าของอากาศ (m³/hr)

in/out	0	10	20	30	40	50
0	A	A	A	A	A	A
10	A	31.63	46.34	72.81	87.52	102.97
20	30.89	39.72	53.69	75.75	94.14	105.17
30	57.37	50.75	63.99	80.17	95.61	114
40	82.37	63.99	77.23	85.32	102.97	114.73
50	107.38	77.23	97.82	100.76	106.64	119.15

ตารางผนวกที่ ข2 เทียบอัตราการไหลออกของแก๊สวัดที่กำลังเป่าและดูดของ blower

อัตราการไหลออกของโปรคิวเซอร์แก๊ส (m/s)

in/out	0	10	20	30	40	50
0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
10	N/A	N/A	3.9	6.1	7.9	9.7
20	N/A	4.3	4.8	6.6	8	10.2
30	5.2	4.5	6	7	8.8	10.7
40	7.6	5.6	6.6	8	9.5	11.3
50	9.7	6.6	8.1	8.8	10.6	11.9

อัตราการไหลออกของโปรคิวเซอร์แก๊ส (m³/hr)

in/out	0	10	20	30	40	50
0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
10	N/A	N/A	44.51	69.51	90.15	110.7
20	N/A	49.07	54.78	75.32	91.3	116.4
30	59.34	51.35	68.47	79.88	100.43	122.11
40	86.73	63.91	75.32	91.3	108.41	128.96
50	110.7	75.32	92.44	100.43	120.97	135.8



ตารางผนวกที่ ค1 ผลการทดสอบการเผาไหม้กากตะกอนทรงกระบอก

นาฬิกา	การป้อนกากตะกอน (กิโลกรัม)	อุณหภูมิในเตาเผา (°C)	อุณหภูมิอากาศออก (°C)
1	15	785	95
2		853	150
3		903	185
4		970	193
5		967	182
6		897	176
7		856	169
8		812	152
9	+ 15	789	111
10		772	98
11		781	82
12		790	101
13		853	153
14		897	173
15		930	185
16		858	177
17		867	170
18		839	167
19		842	171
20		812	168
21		798	161

ตารางผนวกที่ ค1 (ต่อ)

นาฬิกาที่	การป้อนกากตะกอน (กิโลกรัม)	อุณหภูมิในเตาเผา (°C)	อุณหภูมิอากาศออก (°C)
22	+15	801	120
23		783	97
24		835	147
25		878	165
26		891	171
27		912	199
28		956	225
29		983	220
30		977	213
31		876	184
32		856	173
33	+ 15	863	135
34		796	129
35		734	95
36		672	87
37		-	-
38		-	-
39		-	-
40		-	-
เฉลี่ย	รวม 45 กิโลกรัม	852.33 + 71.22	152.28 + 39.06



ภาคผนวก ง

เกณฑ์มาตรฐานจากสารสกัด (Leachate extraction)
ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (พ.ศ.2540)

ตารางผนวก ง1 เกณฑ์คุณภาพของสารละลายจากการสกัด

ลำดับ	ค่าดัชนีคุณภาพน้ำ	มาตรฐาน (mg/l)
1	อาร์ซีนิก (ทั้งหมด) (Arsenic (total))	5.0
2	แบเรียม (Barium)	100.0
3	เบนซีน (Benzene)	0.5
4	แคดเมียม (ทั้งหมด) (Cadmium (total))	1.0
5	คาร์บอนเตตระคลอไรด์ (Carbon tetrachloride)	0.5
6	คลอเดน (Chlordane)	0.03
7	คลอโรเบนซีน (Chlorobenzene)	100.0
8	คลอโรฟอร์ม (Chloroform)	6.0
9	โครเมียม (ทั้งหมด) (Chromium (total))	5.0
10	ออร์โธ-ครีซอล (ortho-Cresol)	200.0
11	เมทา-ครีซอล (meta-Cresol)	200.0
12	พารา-ครีซอล (para-Cresol)	200.0
13	ครีซอล (ทั้งหมด) (Cresol (total))	200.0
14	2-4 ดี (2-4 D)	10.0
15	1,4-ไดคลอโรเบนซีน (1,4-Dichlorobenzene)	7.5
16	1,2-ไดคลอโรอีเทน (1,2-Dichloroethane)	0.5
17	1,1-ไดคลอโรเอทิลีน (1,1-Dichloroethylene)	0.7
18	เอดริน (Endrin)	0.02
19	เฮปตาคลอร์ (Heptachlor and its epoxide)	0.008
20	เฮกซะคลอโรเบนซีน (Hexachlorobenzene)	0.13
21	เฮกซะคลอโรบิวตาไดีน (Hexachlorobutadiene)	0.5
22	เฮกซะคลอโรอีเทน (Hexachloroethane)	3.0
23	ตะกั่ว (ทั้งหมด) (Lead (total))	5.0
24	ลินเดน (Lindane)	0.4
25	ปรอท (ทั้งหมด) (Mercury (total))	0.2
26	เมทอกซีคลอร์ (Methoxychlor)	10.0
27	เมทิล เอทิล คีโตน (Methyl ethyl ketone)	200.0

ตารางผนวก ง1 (ต่อ)

ลำดับ	ค่าดัชนีคุณภาพน้ำ	มาตรฐาน (mg/l)
28	ไนโตรเบนซีน (Nitrobenzene)	2.0
29	2,4-ไนโตรโทลูอิน (2,4-Nitrotoluene)	0.13
30	เพนตาคลอโรฟีนอล (Pentachlorophenol)	100.0
31	ไพรีดีน (Pyridine)	5.0
32	ซีลีเนียม (Selenium)	1.0
33	เงิน (Silver)	5.0
34	เตตราคลอโรเอทิลีน (Tetrachloroethylene)	0.7
35	ทอกซาฟีน (Toxaphene)	0.5
36	ไตรคลอโรเอทิลีน (Trichloroethylene)	0.5
37	2,4,5-ไตรคลอโรฟีนอล (2,4,5-Trichlorophenol)	400.0
38	2,4,6-ไตรคลอโรฟีนอล (2,4,6-Trichlorophenol)	2.0
39	2,4,5-ทีพี (ซิลเว็กซ์) (2,4,5-TP (Silvex))	1.0
40	ไวนิล คลอไรด์ (Vinyl chloride)	0.2

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวสุรีย์พรรณ วรรณสว่าง
วัน เดือน ปี ที่เกิด	2 มีนาคม 2529
สถานที่เกิด	อำเภอเมือง จังหวัดนนทบุรี
ประวัติการศึกษา	วท.บ. วิทยาศาสตร์บัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	สำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย มหาวิทยาลัย สกว. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สกว.- สสว.) ประจำปี 2551 (สัญญาเลขที่ MRG-WI515S018)