

การศึกษาการกำจัดกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อผลิตพลังงาน
โดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน : กรณีศึกษาจากตะกอน
จากระบบบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมฟอกย้อม

นางสาวทิพย์สุภินทร์ หินชุย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2550

**A STUDY OF SEWAGE SLUDGE DISPOSAL FOR
ENERGY PRODUCTION USING GASIFICATION
TECHNOLOGY : THE CASE STUDY OF
SEWAGE SLUDGE FROM TEXTILE INDUSTRY**

Thipsuphin Hinsui

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Environmental Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2007**

การศึกษาการกำจัดกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อผลิตพลังงานโดยใช้เทคโนโลยี
แก๊สซิฟิเคชัน : กรณีศึกษาจากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมฟอกย้อม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.สุจิตต์ กระจิต)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.วีรชัย อาจหาญ)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(รศ. ดร.สมรัฐ เกตุสุวรรณ)

กรรมการ

(ผศ. ดร.บุญชัย วิจิตรเสถียร)

กรรมการ

(ผศ. ดร.จรีษา ยี่มรัตน์บวร)

กรรมการ

(อ. ดร.ฉัตรเพชร ยศพล)

กรรมการ

(อ. ดร.พยุหศักดิ์ จุลยุเสนา)

กรรมการ

(ศ. ดร. ไพโรจน์ สัตยธรรม)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. น.อ. ดร.วราภรณ์ จำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ทิพย์สุภินทร์ หินชูย : การศึกษาการกำจัดกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อผลิตพลังงานโดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน : กรณีศึกษาจากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมฟอกย้อม (A STUDY OF SEWAGE SLUDGE DISPOSAL FOR ENERGY PRODUCTION USING GASIFICATION TECHNOLOGY : THE CASE STUDY OF SEWAGE SLUDGE FROM TEXTILE INDUSTRY)
อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรชัย อาจหาญ, 169 หน้า.

ปัจจุบันกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียได้กลายเป็นปัญหาที่สำคัญทั่วโลก เนื่องจากมีผลกระทบที่เป็นอันตรายทั้งต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) ได้รับการยอมรับว่ามีความเหมาะสมในการกำจัดของเสีย โดยการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงผลิตพลังงาน (waste to energy) ที่มีการปลดปล่อยมลพิษน้อยกว่าการกำจัดโดยใช้วิธีการอื่น ในการศึกษาครั้งนี้วัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสามารถและประเมินประสิทธิภาพการผลิตพลังงาน พร้อมกับศึกษาปริมาณและสมบัติของเสียที่เกิดขึ้นจากการผลิตพลังงานจากกากตะกอนโดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน โดยมีขั้นตอนและวิธีการศึกษาคือ นำกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียของกระบวนการฟอกย้อมมาลดความชื้นและอัดเป็นแท่งเชื้อเพลิง แล้วทดสอบกับต้นแบบโรงไฟฟ้าชีวมวลมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันชนิดไหลลง ที่มีขนาดกำลังการผลิต 100 กิโลวัตต์ โดยทำการทดสอบสถานะที่เหมาะสมในการเดินระบบ และทำการเดินระบบต่อเนื่อง 70 ชั่วโมง เพื่อประเมินประสิทธิภาพการผลิตพลังงาน ตลอดจนศึกษาปริมาณและสมบัติของเสียที่เกิดขึ้นในเตา น้ำเสีย และแก๊สไอเสีย

ผลการศึกษาพบว่ากากตะกอนสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานโดยใช้กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันได้ แก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ มีองค์ประกอบของ คาร์บอนมอนนอกไซด์ ไฮโดรเจน และมีเทน ในสัดส่วนโดยปริมาตรเฉลี่ยเท่ากับ 14.66%, 16.38% และ 2.30% ตามลำดับ มีค่าความร้อนเฉลี่ยเท่ากับ 5.03 MJ/Nm³ มีปริมาณของน้ำมันดินและฝุ่นต่ำคือ 10.45 mg/Nm³ สถานะที่เหมาะสมในการเดินระบบ ที่อัตราการไหลของแก๊ส 180 m³/hr ให้สภาวะการทำงานของเครื่องยนต์ที่กำลังการผลิตไฟฟ้า 47 kW อัตราการใช้เชื้อเพลิงกากตะกอนเท่ากับ 2.09 kg/kWh ให้ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Gasification Efficiency) ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า (Electrical Efficiency) และประสิทธิภาพเครื่องยนต์ (Engine-generator Efficiency) เท่ากับ 67.99%, 12.27% และ 18.75% ตามลำดับ มีปริมาณเถ้าเกิดขึ้น เท่ากับ 0.64 kg/kWh การกำจัดกากตะกอนโดยกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันสามารถลดปริมาณกากตะกอนก่อนฝังกลบได้สูงถึง 70% อย่างไรก็ตามจากการเดินระบบผลิตไฟฟ้าต่อเนื่อง 70 ชั่วโมง พบว่าเถ้ายังมีการปนเปื้อนของซัลเฟอร์และโลหะหนักสูง น้ำเสียที่เกิดขึ้นมีมลสารปนเปื้อนสูงเนื่องจากน้ำที่ใช้ในระบบทำความสะอาดแก๊ส

เป็นระบบน้ำหมุนเวียน จำเป็นต้องศึกษาเกี่ยวกับระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำให้มีความเหมาะสมและ
ต้องมีการบำบัดน้ำเสียก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์และออกไซด์ของ
ไนโตรเจนในแก๊สไอเสียที่ปลดปล่อยจากชุดเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้า อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน
ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับระบบกำจัด
กากตะกอนน้ำเสียของอุตสาหกรรมฟอกย้อมเพื่อผลิตพลังงานได้จริง

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ปีการศึกษา 2550

ลายมือชื่อนักศึกษา_____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา_____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม_____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม_____

THIPSUPHIN HINSUI : A STUDY OF SEWAGE SLUDGE DISPOSAL FOR
ENERGY PRODUCTION USING GASIFICATION TECHNOLOGY :
THE CASE STUDY OF SEWAGE SLUDGE FROM TEXTILE INDUSTRY
THESIS ADVISOR : ASST. PROF. WEERACHAI ARJHARN, Ph.D. 169 PP.

GASIFICATION / WASTE TO ENERGY / WASTE PRODUCTION /
SEWAGE SLUDGE / TEXTILE INDUSTRY

Presently, sewage sludge from wastewater treatment systems becomes a crucial problem in many regions all over the world because it is harmful to human being and environment. Gasification technology has been widely held as a suitable and convenient approach for converting waste to energy with high efficiency of emission reduction. The objectives of this research were to study and assess the capability and the efficiency of energy production and to investigate the quantities and properties of waste derived from gasification technology using sewage sludge as a feedstock. In this study, sewage sludge from wastewater treatment of textile dyeing process was dried and subsequently compressed into briquettes. The sewage sludge briquettes were then supplied to the small-scale biomass power plant at Suranaree University of Technology which uses downdraft gasification technology. Its maximum capacity of electrical generation is 100 kW. During the experiment, the most suitable condition of operation was determined and set up as a standard operation procedure for the whole research. A 70-hour continuous operation was performed in order to evaluate the energy production efficiency as well as investigate quantities and properties of waste from ash, wastewater and exhaust gas.

From the study, sewage sludge is capable of being utilized as a feedstock for energy production via gasification technology. The producer gas consisting of carbon monoxide, hydrogen and methane were found to be 14.66%, 16.38% and 2.30%, respectively with an average high heating value of 5.03 MJ/Nm³. The producer gas contains a relatively low value of tar and dust which is about 10.45 mg/Nm³. The suitable operating condition with a sewage sludge consumption rate of 2.09 kg/kWh and 180 m³/hr gas flow rate can generate an average electrical power output of 47 kW. The gasification efficiency, electrical efficiency and engine-generator efficiency were found to be 67.99%, 12.27%, and 18.75%, respectively. The amount of ash produced was around 0.64 kg/kWh. Moreover, the disposing sewage sludge by means of gasification process was able to reduce its volume up to 70%. However, the ash production rates after the 70-hour continuous operation still showed high contamination of sulfur and heavy metal compounds. The wastewater produced from a gas cleaning system had high contamination level because of the fact that the water source used in a gas cleaning system of the power plant was recirculated during the 70-hour operation. Thus, it is necessary for further study to improve the water treatment system and the wastewater needs treating before discharge into environment. The exhaust gas composition released from the generation engine which is SO₂ and NO_x was found to be under the emission standard. Overall, it can be concluded that gasification is a promising technology which is able to be efficiently applied with disposal of sewage sludge.

School of Environmental Engineering

Academic Year 2007

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

Co-advisor's Signature _____

Co-advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัย อันประกอบด้วยบุคคลสำคัญดังนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิรัช ออาจหาญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้โอกาสทางการศึกษา ให้คำแนะนำปรึกษาด้านวิชาการ ช่วยแก้ไขปัญหา ตลอดจนช่วยตรวจสอบ และแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย วิจิตรเสถียร และ รองศาสตราจารย์ ดร.สมรฐ์ เกิดสุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำแนะนำปรึกษาด้านวิชาการ ตลอดจนช่วยตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุจิต ทรูจิต อาจารย์ ดร.ฉัตรเพชร ยศพล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จรียา ยิมรัตนบวร อาจารย์ ดร.พวงศัคดี จุลยุเสน กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาด้านวิชาการอันเป็นประโยชน์ และอาจารย์ พรรษา ลิบลับ ที่คอยให้คำปรึกษาด้านวิชาการ ช่วยแก้ไขปัญหา และเป็นกำลังใจมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ ภารกิจโครงการและประสานงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และ สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัย

ขอขอบคุณบุคลากร หน่วยปฏิบัติการวิศวกรรมพลังงานและสิ่งแวดล้อม (เดิม) และศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ทุกท่าน ที่คอยให้กำลังใจ กำลังกาย และคำแนะนำปรึกษามาโดยตลอด

ขอขอบคุณ คุณจรียาพร ศรีวิไลลักษณ์ คุณนารี กลิ่นกลาง และคุณกรรณิกา ประเสริฐสังข์ ที่คอยให้คำแนะนำปรึกษาการจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์และคอยให้กำลังใจมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ โรงงานกลุ่มฟอกย้อมในสวนอุตสาหกรรมเครือสหพัฒน์กบินทร์บุรี บริษัทไทยกุลแซ่ จำกัด บริษัท อีสเทิร์นไทยคอนซัลติง 1992 จำกัด และศูนย์วิจัยการเผาากของเสีย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ บุคลากร ทุกท่าน ที่สนับสนุนในการทำวิจัย

ท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณครูบาอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้ที่ดีให้แก่ผู้วิจัย และสำคัญที่สุดขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวอันเป็นที่รักยิ่งที่ให้การเลี้ยงดูอบรม ส่งเสริมการศึกษา ทำให้ผู้วิจัยมีความรู้และมีหลักธรรมในการดำเนินชีวิตที่ดีตลอดมา

ทิพย์สุกินทร์ หินชุย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง	ฎ
สารบัญรูป	ฒ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ด
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
2 ปรัชญาวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 บทนำ.....	6
2.2 กระบวนการฟอกย้อม.....	6
2.2.1 การเตรียมวัตถุดิบ.....	6
2.2.2 การย้อม (dyeing)	7
2.2.3 การตกแต่ง (Textile Finishing)	8
2.3 การใช้ทรัพยากรในกระบวนการฟอกย้อม	8
2.3.1 การใช้วัตถุดิบ.....	8
2.3.2 การใช้น้ำ.....	8
2.3.3 การใช้พลังงาน	9
2.4 ลักษณะและปริมาณน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการฟอกย้อม	9

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5	การบำบัดน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการฟอกย้อม.....	12
2.5.1	การบำบัดน้ำเสียขั้นปฐมภูมิ (Primary Treatment)	12
2.5.2	การบำบัดน้ำเสียขั้นทุติยภูมิ (Secondary Treatment).....	12
2.6	การบำบัดกากตะกอนน้ำเสีย.....	17
2.6.1	การทำขึ้นตะกอน (thickener).....	18
2.6.2	การปรับเสถียร (stabilization).....	18
2.6.3	การปรับสภาพ (conditioning).....	18
2.6.4	การรีดน้ำ (Dewatering).....	19
2.7	สมบัติของกากตะกอนน้ำเสีย.....	19
2.7.1	สมบัติทางกายภาพ (Physical Properties).....	19
2.7.2	สมบัติกากตะกอนที่มาจากอุตสาหกรรมประเภทต่าง ๆ.....	21
2.7.3	สมบัติของกากตะกอนจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงชีวมวล	24
2.8	กระบวนการกำจัดกากตะกอน.....	26
2.8.1	การปล่อยทิ้งลงทะเล (Sea Disposal).....	26
2.8.2	การฝังกลบ (Sanitary Landfill)	26
2.8.3	การทำปุ๋ยหมัก (Composting).....	26
2.8.4	การเผา (Incineration).....	27
2.8.5	การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงโดยกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) และแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification).....	27
2.9	กระบวนการแก๊สซิเคชัน	27
2.9.1	ปฏิกิริยาอุณหภูมิในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน	28
2.9.2	ชนิดของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง	31
2.9.3	คำจำกัดความของทาร์ (Definition of Tar)	33
2.9.4	แก๊สเชื้อเพลิง หรือ โปรคิวเซอร์แก๊ส.....	34
2.9.5	การใช้ประโยชน์จากแก๊สเชื้อเพลิง.....	35

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.10	การใช้แก๊สเชื้อเพลิงกับเครื่องยนต์สันดาปภายใน	36
2.11	มลพิษและของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน	37
2.12	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	42
2.13	ความสำคัญของปัญหา.....	46
3	เครื่องมือและวิธีการดำเนินการวิจัย	48
3.1	อุปกรณ์และเครื่องมือ	48
3.1.1	ต้นแบบโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็ก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.....	48
3.1.2	ขั้นตอนการเดินระบบของต้นแบบโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็ก	53
3.1.3	เครื่องมือวัด/ เครื่องมือวิเคราะห์ และการติดตั้ง	55
3.1.4	กากตะกอนน้ำเสียที่ใช้	60
3.2	ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย	61
3.2.1	การรวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้น	65
3.2.2	การศึกษาสมบัติของกากตะกอน	65
3.2.3	การเตรียมกากตะกอน	68
3.2.4	การทดสอบหาสภาวะ (Condition) ในการเดินระบบ และศึกษา ความสามารถในการผลิตแก๊สจากเชื้อเพลิงกากตะกอน	70
3.2.5	การศึกษาประสิทธิภาพการผลิตพลังงานจากกากตะกอน	73
3.2.6	การศึกษาปริมาณและสมบัติของเสียที่เกิดขึ้นจากการผลิตพลังงาน.....	74
3.2.7	การประเมินอัตราการเกิดของเสีย	78
4	ผลการทดลองและการอภิปรายผล	79
4.1	ผลการวิเคราะห์สมบัติของกากตะกอน.....	79
4.1.1	สมบัติทางกายภาพของกากตะกอน (Physical Properties)	79
4.1.2	องค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate Analysis).....	80
4.1.3	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis)	82

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2	ผลการทดสอบสถานะที่เหมาะสมในการเดินระบบ.....	83
4.2.1	อัตราการดึงแก๊สออกจากเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง.....	83
4.2.2	อุณหภูมิของแก๊สเชื้อเพลิงและชั้นของอุณหภูมิภายในเตา.....	85
4.2.3	องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง.....	89
4.2.4	องค์ประกอบปนเปื้อนคาร์บอนและฝุ่น.....	92
4.2.5	การทดสอบความสามารถในการผลิตไฟฟ้าของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้.....	96
4.3	ผลการประเมินประสิทธิภาพการผลิตพลังงานของเชื้อเพลิงกากตะกอนโดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน.....	97
4.3.1	ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง.....	97
4.3.2	ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้า.....	99
4.3.3	ประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้า.....	100
4.3.3	อัตราการใช้เชื้อเพลิงจำเพาะ.....	101
4.4	การประเมินประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า ปริมาณและสมบัติของเสียที่เกิดขึ้นจากการเดินระบบ 70 ชั่วโมง.....	102
4.4.1	ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าจากการทดสอบเดินระบบ 70 ชั่วโมง.....	102
4.4.2	ปริมาณและสมบัติของเสียที่เกิดขึ้นจากการเดินระบบต่อเนื่อง 70 ชั่วโมง.....	105
4.4.3	การประเมินอัตราการเกิดของเสีย.....	112
5	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	117
5.1	สรุปผลการทดลอง.....	117
5.1.1	สมบัติและองค์ประกอบของกากตะกอน.....	117
5.1.2	การทดสอบสถานะที่เหมาะสมในการเดินระบบ.....	117
5.1.3	การประเมินประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า ปริมาณและสมบัติของเสียที่เกิดขึ้นจากการเดินระบบ 70 ชั่วโมง.....	119
5.2	การนำผลการศึกษาไปใช้ประโยชน์.....	120
5.3	ข้อเสนอแนะและงานวิจัยในอนาคต.....	121

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

รายการอ้างอิง	122
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. การวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ	129
ภาคผนวก ข. ผลการทดลอง	141
ภาคผนวก ค. ตัวอย่างการคำนวณ	163
ภาคผนวก ง. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา	167
ประวัติผู้เขียน	169

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ลักษณะของน้ำเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการฟอกย้อมฟอกย้อม 10
2.2	ปริมาณและความเข้มข้นน้ำเสียของอุตสาหกรรมฟอกย้อม 11
2.3	ลักษณะทางกายภาพของกากตะกอน 20
2.4	องค์ประกอบของกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่ง..... 22
2.5	องค์ประกอบของกากตะกอนจากโรงงานฟอกย้อมเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงชีวมวล 25
2.6	ส่วนประกอบทางเคมีของทาร์ (Tars) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ 34
2.7	ชนิดของมลสารและปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบผลิตแก๊สเชื้อเพลิง 38
2.8	ชนิดของมลสารและระบบทำความสะอาดแก๊สเชื้อเพลิง..... 39
2.9	ผลการตรวจวัดมลพิษอากาศที่ปลดปล่อยจากโรงไฟฟ้าที่ใช้เทคโนโลยี แก๊สซิฟิเคชัน 41
3.1	แสดงถึงพารามิเตอร์ เครื่องมือวัด ระบบการวัดและวิเคราะห์..... 56
4.1	ผลการศึกษามลพิษทางกายภาพของกากตะกอน 80
4.2	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณของกากตะกอน 81
4.3	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุของกากตะกอน 82
4.4	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบสารพิษแบบแยกธาตุของกากตะกอน 83
4.5	อัตราการใช้เชื้อเพลิงและอัตราการเกิดเถ้า 84
4.6	อุณหภูมิเฉลี่ยของแก๊สเชื้อเพลิงที่ระยะความสูง ตำแหน่งออกจากเตาผลิตแก๊ส และตำแหน่งก่อนเข้าเครื่องยนต์ 86
4.7	องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากเชื้อเพลิงกากตะกอน 90
4.8	การเปรียบเทียบผลการศึกษาในงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่น ๆ ในด้านคุณสมบัติ ของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ 91
4.9	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบปนเปื้อนทาร์และฝุ่น (ในหน่วย mg/Nm^3) ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง $100 \text{ m}^3/\text{hr}$ 93

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.10 ผลการวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบปนเปื้อนทาร์และฝุ่น (ในหน่วย mg/Nm ³) ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง 150 m ³ /hr	93
4.11 ผลการวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบปนเปื้อนทาร์และฝุ่น (ในหน่วย mg/Nm ³) ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง 180 m ³ /hr	94
4.12 การเปรียบเทียบผลการศึกษาในงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่น ๆ ในด้านประสิทธิภาพ การผลิตพลังงาน	98
4.13 สมบัติของแก๊สเชื้อเพลิงในการเดินระบบต่อเนื่อง 70 ชั่วโมง.....	102
4.14 ผลการวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบปนเปื้อนทาร์และฝุ่นในตำแหน่งต่าง ๆ ในการเดินระบบต่อเนื่อง 70 ชั่วโมง.....	103
4.15 การทดสอบประสิทธิภาพการผลิตพลังงานจากการเดินระบบต่อเนื่อง 70 ชั่วโมง.....	104
4.16 เปรียบเทียบสมบัติทางเคมีของเชื้อเพลิงกากตะกอนและเถ้า.....	106
4.17 เปรียบเทียบองค์ประกอบของคลอรีนและโลหะหนักในเชื้อเพลิง กากตะกอนและเถ้า	107
4.18 ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำในระหว่างการเดินระบบต่อเนื่อง 70 ชั่วโมง.....	108
4.19 ผลวิเคราะห์คุณภาพน้ำที่ผ่านการปรับสภาพน้ำด้วยสารเคมีของการใช้เชื้อเพลิง กากตะกอนที่ 70 ชั่วโมง	110
4.20 ผลการตรวจวิเคราะห์แก๊สไอเสีย	112
4.21 อัตราการเกิดของเสียจากเถ้าต่อหน่วยไฟฟ้า	113
4.22 อัตราการเกิดของเสียในน้ำเสียต่อหน่วยไฟฟ้า.....	114
4.23 อัตราการเกิดของเสียจากแก๊สไอเสียต่อหน่วยไฟฟ้า.....	115
4.24 การเปรียบเทียบ ข้อเด่น ข้อด้อย/ข้อจำกัด และแนวทางการแก้ไข ของการกำจัด กากตะกอนโดยเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันเพื่อผลิตพลังงาน	116

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ข1	ข้อมูลผลการวิเคราะห์สมบัติแบบแยกธาตุโดยเครื่อง CHNS ของกากตะกอน โรงงานกลุ่มฟอกย้อมในสวนอุตสาหกรรมเครือสหพัฒน์กบินทร์บุรี	142
ข2	ข้อมูลผลการวิเคราะห์สมบัติแบบแยกธาตุโดยเครื่อง CHNS ของกากตะกอน โรงงานฟอกย้อมบริษัทไทยกุลแซ่จำกัด	142
ข3	ข้อมูลผลการวิเคราะห์สมบัติแบบแยกธาตุโดยเครื่อง CHNS ของกากตะกอนผสม.....	142
ข4	ข้อมูลผลการวิเคราะห์สมบัติแบบแยกธาตุโดยเครื่อง EDXRF ของกากตะกอน โรงงานกลุ่มฟอกย้อมในสวนอุตสาหกรรมเครือสหพัฒน์กบินทร์บุรี	143
ข5	ข้อมูลผลการวิเคราะห์สมบัติแบบแยกธาตุโดยเครื่อง EDXRF ของกากตะกอน โรงงานฟอกย้อมบริษัทไทยกุลแซ่จำกัด	143
ข6	ข้อมูลผลการวิเคราะห์สมบัติแบบแยกธาตุโดยเครื่อง EDXRF ของกากตะกอนผสม	143
ข7	ข้อมูลผลการวิเคราะห์สมบัติแบบประมาณของกากตะกอน โรงงานฟอกย้อม.....	144
ข8	ข้อมูลผลการวิเคราะห์สมบัติแบบประมาณของเถ้า	146
ข9	ข้อมูลผลการวิเคราะห์สมบัติของเถ้าแบบแยกธาตุ (โดยเครื่อง CHNS).....	146
ข10	ข้อมูลผลการวิเคราะห์สมบัติของเถ้าแบบแยกธาตุ (โดยเครื่อง EDXRF).....	146
ข11	ตัวอย่างบันทึกการใช้เชื้อเพลิงกากตะกอน และการเอาเถ้าออก ที่ 0 kW	147
ข12	ตัวอย่างการบันทึกข้อมูลแบบต่อเนื่องด้วยระบบ Online Measuring System (อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง 100 m ³ /hr)	148
ข13	ตัวอย่างข้อมูลผลการตรวจวัดแก๊สไอเสีย (0 kW)	149
ข14	ข้อมูลผลการวิเคราะห์ค่า COD ของน้ำเสีย (การเก็บตัวอย่างครั้งที่ 1-4)	150
ข15	ข้อมูลผลการวิเคราะห์ค่า COD ของน้ำเสีย (การเก็บตัวอย่างครั้งที่ 5).....	151
ข16	ข้อมูลผลการวิเคราะห์ค่า BOD ของน้ำเสีย (การเก็บตัวอย่างน้ำเสียครั้งที่ 1)	151
ข17	ข้อมูลผลการวิเคราะห์ค่า BOD ของน้ำเสีย (การเก็บตัวอย่างน้ำเสียครั้งที่ 2)	152
ข18	ข้อมูลผลการวิเคราะห์ค่า BOD ของน้ำเสีย (การเก็บตัวอย่างน้ำเสียครั้งที่ 3)	152
ข19	ข้อมูลผลการวิเคราะห์ค่า BOD ของน้ำเสีย (การเก็บตัวอย่างน้ำเสียครั้งที่ 4)	153
ข20	ข้อมูลผลการวิเคราะห์ค่า BOD ของน้ำเสีย (การเก็บตัวอย่างน้ำเสียครั้งที่ 5)	153

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	การโคแอกกูเลชันด้วยสารเคมีเพื่อกำจัดสีที่ไม่ละลายน้ำในน้ำเสีย..... 14
2.2	การโคแอกกูเลชันด้วยสารเคมีเพื่อกำจัดสีที่ละลายน้ำในน้ำเสีย 15
2.3	การบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมฟอกย้อม โดยใช้การบำบัดน้ำเสียทางเคมี 17
2.4	ขั้นตอนการบำบัดกากตะกอนน้ำเสีย 18
2.5	ปฏิกิริยาอูณเคมีที่เกิดขึ้นในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันในเตาผลิตแก๊สชนิดไหลลง..... 28
2.6	เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ..... 32
2.7	ภาพรวมของการใช้ประโยชน์แก๊สเชื้อเพลิง 35
3.1	แผนผังกระบวนการของต้นแบบโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็ก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 49
3.2	ส่วนประกอบของต้นแบบโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็ก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี..... 51
3.3	การเริ่มต้นการทำงานของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง 54
3.4	แสดงเครื่องมือที่ใช้ในการวัด 57
3.5	แสดงตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัดและตำแหน่งการเก็บข้อมูล 59
3.6	แสดงตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิในเตา (T_1 - T_6) 60
3.7	ภาพรวมขั้นตอนการศึกษา..... 62
3.8	ขั้นตอนการหาสภาวะที่เหมาะสมและการศึกษาประสิทธิภาพการผลิตพลังงาน 63
3.9	ขั้นตอนการศึกษาปริมาณมลพิษจากของเสีย 64
3.10	เครื่องมือหลักสำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบของกากตะกอน 67
3.11	เครื่องอัดแท่งกากตะกอน..... 69
3.12	แผนผังระบบบำบัดน้ำเสียแบบปิด..... 77
4.1	ลักษณะของกากตะกอน..... 80
4.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของแก๊สต่าง ๆ กับปริมาณการใช้เชื้อเพลิงและการเกิดเถ้า 85

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3	กราฟแสดงข้อมูลเส้นอุณหภูมิเฉลี่ยที่ระยะความสูงทั้ง 6 ระยะ ที่บันทึกด้วยระบบ Online Measuring System ที่อัตราการไหลของแก๊ส 100 m ³ /hr..... 86
4.4	เส้นชั้นของอุณหภูมิภายในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Temperature Profile) ที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงระดับต่าง ๆ 87
4.5	กราฟแสดงสัดส่วนโดยปริมาตรเฉลี่ยของแก๊สเชื้อเพลิงที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงทั้ง 3 ระดับและเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ย 90
4.6	กราฟแสดงการลดลงของน้ำมันดินและฝุ่นเมื่อผ่านระบบทำความสะอาดแก๊สของอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงทั้ง 3 ระดับ 95
4.7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของแก๊สต่าง ๆ และกำลังการผลิตกระแสไฟฟ้า..... 96
4.8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้าที่กำลังการผลิตต่าง ๆ..... 99
4.9	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าที่กำลังการผลิตต่าง ๆ..... 100
4.10	กราฟแสดงแนวโน้มของอัตราการใช้เชื้อเพลิงกาคตะกอนจำเพาะ..... 101
4.11	กราฟแสดงปริมาณของน้ำมันดินและฝุ่นในการเดินระบบต่อเนื่อง 70 ชั่วโมง..... 104
4.12	ลักษณะของเถ้ากาคตะกอน 106
ก1	การเตรียมเครื่องมือสำหรับวิเคราะห์ 136
ก2	การเตรียมอุปกรณ์สำหรับใช้วิเคราะห์ความชื้นของแก๊สเชื้อเพลิง..... 137
ก3	การเตรียมอุปกรณ์สำหรับใช้วิเคราะห์ทาร์และฝุ่น 138
ก4	กระดวยกรองหลังผ่านการเก็บตัวอย่าง (ทาร์และฝุ่นรวมกัน) 138
ก5	การล้างด้วยสารเคมี Anesol เพื่อกำจัดทาร์ออกจากกระดวยกรอง 139

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

APHA	=	American Public Health Association
ASTM	=	American Society of Testing and Material
BOD	=	บีโอดี (Biological Oxygen Demand)
COD	=	ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand)
C	=	ธาตุคาร์บอน (Carbon)
Cl	=	ธาตุคลอรีน (Cholorine)
CO	=	แก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ (Carbonmonoxide)
CO ₂	=	แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide)
CV _g	=	Calorific value of producer gas
EDXRF	=	Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer
G _c	=	Gas Composition (%V)
G _{ex}	=	แก๊สไอเสีย (Exhaust Gas)
F	=	ธาตุคลอรีน Fluorine
FOG	=	Fat Oil and Grease
H	=	ธาตุไฮโดรเจน (Hydrogen)
H	=	ความสูง
HP	=	แรงม้า
HHV _{fuel}	=	High Heating Value of Fuel (MJ/kJ)
HHV _g	=	High Heating Value of gas (MJ/Nm ³)
hr	=	ชั่วโมง (hour)
Hz	=	ความถี่ (Herit)
kg	=	กิโลกรัม (Kilogram)
KVA	=	กิโลวัตต์แอมป์ (Kilovolt-amp)
kW	=	กิโลวัตต์ (Kilowatt)
kWh	=	กิโลวัตต์-ชั่วโมง (Kilowatt hour)
L	=	ความยาว

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

m_{ash}	=	Ash Production (kg/hr)
m_{bio}	=	Biomass Consumption (kg/hr)
mg	=	มิลลิกรัม (milligram)
MJ	=	เมกะจูล (Mega Joule)
mm^3	=	Cubic millimeter
N/A	=	Not Analysis
N	=	ธาตุไนโตรเจน (Nitrogen)
Nm^3	=	Normal Cubic metter
NO	=	แก๊สไนตริกออกไซด์ (Nitric oxide)
NO_2	=	แก๊สไนโตรเจน (Nitrogen dioxide)
NO_x	=	แก๊สออกไซด์ของไนโตรเจน (Nitrogen oxide)
Nm^3	=	Normal Cubic Metter
O	=	ธาตุออกซิเจน (Oxygen)
O_2	=	แก๊สออกซิเจน (Oxygen Gas)
P_e	=	Electrical Power
PPM	=	Part Per Million
T_0	=	Producer Gas Temperature (Gas Outlet
$T_1 - T_6$	=	Reactor Temperature (Inside 1-Inside 6)
TD_1	=	Impurities (Tar & Dust) After Reactor
TD_2	=	Impurities (Tar & Dust) After Scrubber
TD_3	=	Impurities (Tar & Dust) After Biomass Filter
TD_4	=	Impurities (Tar & Dust) After Fabric Filter
T_g	=	Producer Gas Temperature
TKN	=	ทีเคเอ็น (Total Kjedahl Nitrogen)
V_g	=	Gas Flow Rate
TDS	=	ของแข็งละลายน้ำ (Total Dissolve Solids)

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

TS	=	ของแข็งทั้งหมด (Total Solids)
TSS	=	ของแข็งแขวนลอย (Total Suspended Solids)
S	=	ธาตุซัลเฟอร์ (Sulphur)
SO ₂	=	แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Sulphur dioxide)
SO _x	=	แก๊สออกไซด์ของซัลเฟอร์ (Sulphur oxide)
W ₁	=	Wastewater characteristics After Scrubber
W ₂	=	Wastewater characteristics After Flocculation
W ₃	=	Wastewater characteristics Sludge
W	=	ความกว้าง
∅	=	Diameter
η_g	=	Gasification Efficiency
η_e	=	Engine-generator Efficiency
η_{el}	=	Electrical Efficiency

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันภาคตะกอนที่เกิดจากระบบบำบัดน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรมถูกนำไปใช้ประโยชน์น้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณที่เกิดขึ้น โดยส่วนใหญ่ภาคตะกอนเหล่านี้จะถูกนำไปกำจัดโดยวิธีการฝังกลบ นอกจากจะสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายแล้ว หากใช้วิธีปฏิบัติที่ไม่ได้มาตรฐานอาจเพิ่มมลภาวะทั้งต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมได้ การพิจารณาทางเลือกอื่นที่สามารถกำจัดภาคตะกอนโดยไม่ก่อให้เกิดมลพิษ และขณะเดียวกันของเสียก็ถูกนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ จึงน่าจะเป็นทางออกที่ดีและยั่งยืนในการจัดการของเสียสำหรับโรงงานอุตสาหกรรม ในการนำภาคตะกอนมาใช้ประโยชน์สามารถทำได้หลายวิธี อาทิเช่น การนำไปผลิตเป็นปุ๋ยหมัก (composting) การนำไปผสมกับคอนกรีตใช้เป็นวัสดุก่อสร้างมวลเบา หรือการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง (solid fuel) ซึ่งการนำไปใช้ประโยชน์ด้วยวิธีต่าง ๆ จะมีข้อจำกัดอยู่ที่สมบัติของภาคตะกอนและ ขึ้นอยู่กับกระบวนการบำบัดน้ำเสียของแต่ละประเภทอุตสาหกรรม การนำภาคตะกอนมาใช้เป็นเชื้อเพลิงเป็นอีกหนึ่งในหลายวิธีที่จะนำภาคตะกอนเหล่านี้มาใช้ประโยชน์เพื่อผลิตพลังงานหมุนเวียน สามารถทดแทนการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลที่ปัจจุบันเริ่มเข้าสู่สภาวะขาดแคลนและมีราคาสูงขึ้นตามภาวะเศรษฐกิจ ซึ่งปัญหาดังกล่าวส่งผลกระทบต่อภาคอุตสาหกรรม จึงทำให้อุตสาหกรรมต่าง ๆ เริ่มต้นตัวและหันมาให้ความสนใจการใช้พลังงานทดแทน ตลอดจนหาวิธีการที่จะใช้พลังงานให้คุ้มค่าและมีประสิทธิภาพมากที่สุด ขณะเดียวกันการให้ความสำคัญต่อปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นในขั้นตอนของการผลิตพลังงาน ก็ยังเป็นประเด็นหลักที่ให้ความสนใจไม่น้อยไปกว่า ดังนั้นการใช้เลือกเทคโนโลยีผลิตพลังงานแบบใหม่ ต้องมีทั้งประสิทธิภาพ และในขณะเดียวกันต้องมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมควบคู่ไปด้วย

อุตสาหกรรมฟอกย้อมเป็นอีกกลุ่มอุตสาหกรรมหนึ่งที่กระบวนการผลิตเกือบทุกขั้นตอนจะเกี่ยวข้องกับการใช้พลังงาน รวมทั้งมีอัตราการผลิตภาคตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียในปริมาณที่สูง ซึ่งปัจจุบันภาคตะกอนเหล่านี้ถูกนำไปกำจัดโดยวิธีฝังกลบ ทั้งนี้แนวโน้มค่าใช้จ่ายในการฝังกลบมีค่าเพิ่มขึ้น สวนทางกับพื้นที่ฝังกลบที่ลดน้อยลง ดังนั้นการศึกษาเพื่อประยุกต์ระหว่างกำจัดของเสียให้เกิดเป็นพลังงาน (waste to energy) โดยนำภาคตะกอนมาใช้เป็นเชื้อเพลิงผลิตเป็นพลังงานในรูปแบบแก๊สเชื้อเพลิง จึงเป็นอีกทางหนึ่งของการกำจัดของเสียเพื่อเป็นพลังงานที่น่าสนใจ

การนำกากตะกอนไปใช้เป็นพลังงานทดแทน สามารถทำได้หลายวิธี ทั้งนี้พบว่ากากตะกอนมีคุณสมบัติเป็นเชื้อเพลิงชีวมวล (Conesa et al., 1998) มีค่าความร้อนประมาณ 16 เมกะจูลต่อกิโลกรัม (MJ/kg) (อิทธิวรรณ เลิศสกุลบันลือ, 2544) ในขณะที่ฟืนและถ่านหิน มีค่าความร้อนระหว่าง 15 และ 20 MJ/kg ตามลำดับ ดังนั้นเมื่อทำการลดความชื้นกากตะกอนให้ลดลงสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้โดยตรง (Mckendry, 2002) ทั้งนี้การนำกากตะกอนมาใช้เป็นเชื้อเพลิงผลิตพลังงาน สามารถทำได้ 2 วิธี คือ

1) การเผาโดยตรง (Combustion) เป็นปฏิกิริยาอุณหเคมี ที่ใช้เชื้อเพลิง (กากตะกอน) และออกซิเจนเป็นสารตั้งต้น โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็นแก๊สไอเสียและความร้อน นำไปใช้ผลิตไอน้ำสำหรับใช้ในเครื่องจักรกังหันไอน้ำ (steam turbine) หรือนำแก๊สร้อน (flue gas) ไปใช้ เป็นพลังงานโดยตรง อย่างไรก็ตาม ข้อเสียของการเผาไหม้กากตะกอนนี้คือ มลพิษที่ปลดปล่อยจากปล่องเตาเผาในรูปแบบของแก๊สต่าง ๆ เช่น อนุภาคประกอบของซัลเฟอร์ (SO_x) ไฮโดรคลอริก (HCl) ไฮโดรเจนฟลูออไรด์ (HF) อนุภาคประกอบของไนโตรเจน (NO_x) สารประกอบอินทรีย์ระเหย (volatile organic compound) รวมทั้งออกไซด์ของโลหะหนัก ซึ่งการลดมลพิษอากาศดังกล่าวจำเป็นต้องใช้เงินลงทุนสำหรับระบบบำบัดมลพิษอากาศที่เพิ่มสูงขึ้น (สมรัฐ เกิดสุวรรณ, 2549; Medcalf et al., 1998; Klein, 2002)

2) แก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) หรือการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง เป็นเทคโนโลยีที่อาศัยกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางอุณหเคมี (Thermo-chemical Conversion Process) ภายใต้สภาวะจำกัดอากาศหรือออกซิเจน (Partial Oxidation) ซึ่งเปลี่ยนเชื้อเพลิงแข็งให้เป็นแก๊สเชื้อเพลิงที่สามารถนำไปเผาไหม้ได้ ได้แก่ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แก๊สไฮโดรเจน (H_2) และแก๊สมีเทน (CH_4) (Klein, 2002) ซึ่งในระบบผลิตแก๊สเชื้อเพลิงนี้เป็นระบบที่มีความดันต่ำ (Low Pressure) ไม่มีอันตราย แก๊สเชื้อเพลิงนี้สามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้โดยตรงโดยส่งเข้าเครื่องยนต์สันดาปภายใน (Internal Combustion Engine : ICP) เพื่อผลิตไฟฟ้า หรือป้อนแก๊สเข้าไปเผาไหม้ในหม้อไอน้ำ เพื่อผลิตไอน้ำแล้วนำไปหมุนกังหันไอน้ำผลิตไฟฟ้า หรือนำความร้อนของไอน้ำไปใช้ประโยชน์อื่น ซึ่งระบบนี้จะมีประสิทธิภาพสูงกว่าถ้าเปรียบเทียบกับระบบผลิตพลังงานจากการเผาไหม้โดยตรง (Nowell et al., 1999; Petersen et al., 2005) นอกจากนี้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันยังมีข้อดีในด้านลดการปลดปล่อยมลพิษ เช่น SO_x NO_x ออกไซด์ของโลหะหนักและสารประกอบไดออกซิน (Bridgwater, 1994a; 1994b; Medcalf et al., 1998; Quaak et al., 1999; Stiegel et al., 2001; Marrero et al., 2003; Malkow, 2003; Belgiorno et al., 2003; Pinto et al., 2007)

จากข้อดีของ เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันดังกล่าวทำให้พลังงานที่ผลิตได้สามารถนำไปใช้เป็นพลังงานทดแทนสะดวก ลดปัญหาด้านมลพิษสิ่งแวดล้อม มีการลงทุนด้านระบบบำบัดมลพิษน้อยกว่าเมื่อเทียบกับเทคโนโลยีการเผาตรง จึงเหมาะสมที่จะใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมทุกขนาด ในขณะที่เทคโนโลยีการเผาไหม้โดยตรง จะเหมาะสมในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่เท่านั้น อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดของเทคโนโลยีดังกล่าว คือ ความสามารถในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจะขึ้นอยู่กับคุณลักษณะ สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเชื้อเพลิงแต่ละชนิด ในการศึกษาในครั้งนี้ มีแนวคิดที่จะนำกากตะกอนน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม มาผลิตเป็นแก๊สเชื้อเพลิงโดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน ซึ่งเป็นทางเลือกหนึ่งในการใช้ประโยชน์กากตะกอนน้ำเสียมาผลิตเป็นพลังงาน โดยอาศัยต้นแบบโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็ก ขนาดกำลังการผลิต 100 กิโลวัตต์ (kW) ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และใช้กากตะกอนน้ำเสียจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมมาเป็นเชื้อเพลิง ถึงแม้ว่าเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน จะไม่ใช่เทคโนโลยีใหม่ และได้มีการศึกษาพัฒนาจนสามารถใช้งานได้จริง แต่ที่ผ่านมายังเน้นกับชีวมวลประเภทอื่น ๆ เช่น วัสดุคิบจากภาคเกษตรกรรม (เช่น ไม้ เศษไม้ แกลบ เป็นต้น) แต่การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีนี้กับการจัดการของเสียยังมีอยู่น้อย และกากตะกอนซึ่งเป็นของเสียจากภาคอุตสาหกรรมนั้นมีความเหมาะสมของการเป็นเชื้อเพลิงได้เทียบเท่ากับชีวมวล ซึ่งผลการศึกษาที่ได้จากงานวิจัยครั้งนี้ จะทำให้ทราบถึงความสามารถ และประสิทธิภาพของการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงกากตะกอน และทราบถึงปริมาณและสมบัติของเสียที่เกิดขึ้น จากการนำเอากากตะกอนมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน และนำไปสู่การพัฒนากระบวนการกำจัดกากตะกอนที่สามารถเป็นแหล่งของพลังงานทดแทนได้ในอนาคตและช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาความสามารถและประเมินประสิทธิภาพการผลิตพลังงานจากกากตะกอนโดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน

1.2.2 เพื่อศึกษาปริมาณและสมบัติของเสียที่เกิดขึ้นจากการผลิตพลังงานจากกากตะกอนโดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 กากตะกอนที่ใช้ศึกษาเป็นกากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมฟอกย้อมที่ใช้กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางเคมีร่วมกับกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบตะกอนเร่ง ซึ่งนำมาจาก 2 แหล่ง คือ โรงงานกลุ่มฟอกย้อมในสวนอุตสาหกรรมเครือสหพัฒน์ กบินทร์บุรี และ โรงงานฟอกย้อม บริษัทไทยกุลแซ่ จำกัด (อำเภอ กบินทร์บุรี จังหวัดปราจีนบุรี)

1.3.2 โรงไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบคือ ต้นแบบโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็ก (โรงไฟฟ้าชีวมวลเฉลิมพระเกียรติฉลองสิริราชสมบัติ ครบ 60 ปี) ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันชนิดไหลลง (Downdraft Gasification) ขนาดกำลังการผลิต 100 กิโลวัตต์ (kW)

1.3.3 ศึกษาสมบัติกากตะกอนของทั้ง 2 แหล่ง และกากตะกอนผสม (กากตะกอนที่ผสมทั้ง 2 แหล่งรวมกัน) เพื่อดูความเหมาะสมเบื้องต้นในการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน พารามิเตอร์ที่ศึกษามีดังนี้

1) สมบัติทางกายภาพ (Physical Properties) ได้แก่ ความชื้นมาตรฐานเปียก ความหนาแน่น

2) องค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate Analysis) ได้แก่ ความชื้นมาตรฐานแห้ง ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว ค่าความร้อน และองค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) ได้แก่ คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O) ไนโตรเจน (N) ซัลเฟอร์ (S) และองค์ประกอบสารพิษ ได้แก่ ทองแดง (Cu) เหล็ก (Fe) สังกะสี (Zn) แคดเมียม (Cd) ตะกั่ว (Pb) คลอรีน (Cl)

3) ทดสอบสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงเชื้อเพลิง 3 ระดับ คือ 100, 150 และ 180 m³/hr ทำการศึกษาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องได้แก่ องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง (Gas Composition) ชั้นของอุณหภูมิภายในเตา (Temperature Profile) องค์ประกอบทาร์และฝุ่น (Tar and Dust) อัตราการใช้เชื้อเพลิง (Fuel Consumption Rate) อัตราการเกิดเถ้า (Ash Production) อัตราการใช้เชื้อเพลิงจำเพาะ (Specific Fuel Consumption) อัตราการเกิดเถ้าจำเพาะ (Specific Ash Production) และประเมินประสิทธิภาพการผลิตพลังงานของระบบ (Systems Efficiency) ได้แก่ ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Gasification Efficiency) ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า (Electrical Efficiency) ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ (Engine-generator Efficiency)

4) ทดสอบเดินระบบต่อเนื่อง 70 ชั่วโมง เพื่อประเมินประสิทธิภาพการผลิตพลังงานของระบบ และศึกษาปริมาณและสมบัติของเสียที่เกิดขึ้น

1.3.4 ศึกษาปริมาณและสมบัติของเสียที่เกิดขึ้นจากการผลิตพลังงาน โดยพารามิเตอร์ที่ศึกษา มีดังนี้

1) เถ้าที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ โดยวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate Analysis) ได้แก่ ความชื้นมาตรฐานแห้ง ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว ค่าความร้อน และองค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) ได้แก่ คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O) ไนโตรเจน (N) ซัลเฟอร์ (S) และองค์ประกอบสารพิษ ได้แก่ ทองแดง (Cu) เหล็ก (Fe) สังกะสี (Zn) แคดเมียม (Cd) ตะกั่ว (Pb) คลอรีน (Cl)

2) คุณภาพน้ำเสีย (Wastewater) ที่เกิดจากระบบทำความสะอาดแก๊ส โดยการตรวจวัดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้ พีเอช (pH) อุณหภูมิ ของแข็งแขวนลอย (TSS) ของแข็งละลายน้ำ (TDS) ของแข็งทั้งหมด (TS) ค่าบีโอดี (BOD) ค่าซีโอดี (COD) ค่าทีเคเอ็น (TKN) น้ำมันและไขมัน (FOG) ไฮโดรเจนไซยาไนด์ (HCN) ฟอรั่มัลดีไฮด์ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) สารประกอบ ฟีนอล คลอรีนอิสระ และโลหะหนัก ได้แก่ ทองแดง (Cu) เหล็ก (Fe) สังกะสี (Zn) แคดเมียม (Cd) ตะกั่ว (Pb)

3) แก๊สไอเสีย (Exhaust Gas) ที่เกิดจากเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้าโดยการตรวจวัดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้ อุณหภูมิ แก๊สออกซิเจน (O_2) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) แก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) แก๊สไนโตรเจนออกไซด์ (NO) แก๊สออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x)

1.3.5 ประเมินอัตราการเกิดของเสียจากข้อมูลการผลิตไฟฟ้าและปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นจากการเดินระบบต่อเนื่อง 70 ชั่วโมง โดยเทียบเป็นของเสียที่เกิดขึ้นต่อหน่วยไฟฟ้า หรือ กรัมต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง (g/kWh)

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.4.1 ใช้เป็นข้อมูลในการเลือกภาคตะกอนจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมและอุตสาหกรรมประเภทอื่น ๆ สำหรับใช้ในการผลิตพลังงาน โดยเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน และเป็นข้อมูลเบื้องต้นเพื่อประกอบการตัดสินใจเลือกวิธีการกำจัดภาคตะกอนให้กับโรงงานอุตสาหกรรมได้

1.4.2 ข้อมูลจากการศึกษาปริมาณและสมบัติของเสียที่เกิดขึ้นจากการนำภาคตะกอนมาใช้ในการผลิตพลังงานไฟฟ้าโดยกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ซึ่งแยกตามชนิดของเสียที่เกิดขึ้น สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางการป้องกันและควบคุมปัญหามลพิษสิ่งแวดล้อมที่จะเกิดขึ้นในกรณีของการนำไปใช้งานจริงได้

บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

บทนี้กล่าวถึงกระบวนการฟอกย้อมในรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับ การใช้ทรัพยากร ลักษณะสมบัติของน้ำเสียที่เกิดขึ้น การจัดการน้ำเสียสำหรับอุตสาหกรรมฟอกย้อม ลักษณะสมบัติของกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียทั่วไปและจากกระบวนการฟอกย้อม กระบวนการบำบัดและกำจัดกากตะกอนน้ำเสียโดยทั่วไป งานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่มีส่วนคล้ายคลึงกับงานวิจัยที่กำลังศึกษา ทฤษฎีและกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันสำหรับของเสีย การใช้ประโยชน์ของแก๊สเชื้อเพลิง และมลพิษจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.2 กระบวนการฟอกย้อม

กระบวนการฟอกย้อมเป็นขั้นตอนที่สำคัญในอุตสาหกรรมสิ่งทอมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ผ้าหรือเส้นด้ายมีความสวยงาม คงทนต่อสภาวะแวดล้อม เพื่อเป็นผลิตภัณฑ์ขายตรงหรือส่งไปยังอุตสาหกรรมตัดเย็บต่อไป กระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมฟอกย้อมส่วนใหญ่เป็นกระบวนการทางเคมีที่ปรับเปลี่ยนคุณสมบัติของเส้นใยโดยการใช้สารเคมีและสีย้อมที่เหมาะสม ได้ผลิตภัณฑ์เส้นด้ายย้อมสี/ผ้าผืนย้อมสี โดยอาศัยน้ำเป็นตัวกลาง โรงงานฟอกย้อมจะใช้น้ำในปริมาณมากในกระบวนการผลิต รวมถึงการใช้พลังงานและเชื้อเพลิงสำหรับเดินเครื่องจักรและอุปกรณ์ต่าง ๆ กระบวนการฟอกย้อม แบ่งเป็นขั้นตอนหลักดังนี้ (กรมควบคุมมลพิษ, 2548)

2.2.1 การเตรียมวัตถุดิบ

เป็นขั้นตอนการนำเส้นด้ายหรือผ้ามาผ่านกระบวนการต่าง ๆ คือการทำความสะอาดเพื่อให้วัตถุดิบอยู่ในสภาพที่สามารถย้อม คุณซึมสีได้ดี ซึ่งมีกระบวนการดังต่อไปนี้

1) การเผาขน (singeing) เป็นการกำจัดขนบนผ้าโดยใช้ความร้อน เพื่อให้สีติดผ้าได้อย่างสม่ำเสมอในขั้นตอนการย้อมสีผ้า การเผาขนมีหลายวิธี เช่น เผาด้วยเปลวไฟจากแก๊ส เผาด้วยไฟฟ้า เผาด้วยแผ่นโลหะร้อน เป็นต้น

2) การลอกแป้ง (sesizing) เป็นการกำจัดสารลงแป้ง (sizing) ที่มีอยู่ในเส้นด้ายขึ้น สารเคมีที่ใช้ได้แก่ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) โซเดียมเปอร์ซัลเฟต ($Na_2S_2O_8$) โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต ($K_2S_2O_8$) หรือเอนไซม์ (สลายตัวของแป้งเป็นน้ำตาลกลูโคส ไม่ทำลายเนื้อผ้า) ที่อุณหภูมิ $90^{\circ}C$

3) การทำความสะอาด/ขจัดสิ่งเจือปนอื่น (souring) เป็นการขจัดไขมัน สารปนเปื้อน พวกเกลือ อินทรีย์/อนินทรีย์ เพื่อให้เกิดการดูดซึมน้ำ ดียสี สารเคมี อย่างสม่ำเสมอ สารเคมีที่ใช้กำจัดไขมันและสิ่งสกปรกได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$) โดยต้มผ้าที่อุณหภูมิไม่ต่ำกว่า $85^{\circ}C$

4) การฟอกขาว (bleaching) เป็นการกำจัดสารเคมีที่ติดมาตามธรรมชาติ โดยใช้ สารเคมีสารออกไซด์ ได้แก่ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) โซเดียมไฮโปคลอไรต์ ($NaOCl$) และ โซเดียมคลอไรด์ ($NaCl$) ร่วมกับความร้อนอุณหภูมิ $90-100^{\circ}C$ โดยผ่านเข้าสู่อบไอน้ำ

5) การชุปน้ำมัน (mercerization) เป็นการทำ Alkali Treatment เพื่อให้ผ้าดูดซึมน้ำ เพิ่ม ความมันเงา สัมผัสอ่อนนุ่ม ลื่นทวน โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$) เป็นสารชุบมัน และล้างโซดาไฟด้วยน้ำร้อนอุณหภูมิไม่ต่ำกว่า $90^{\circ}C$ แต่การล้างด้วยน้ำอย่างเดียวโซดาไฟอาจหลุด ออกยากจึงต้องใช้ กรดน้ำส้ม (CH_3COOH) หรือ กรดกำมะถัน (H_2SO_4)

6) การเซ็ทด้วยความร้อน (heat setting) เนื่องจากผ้าผ่านกระบวนการต่าง ๆ จะหดตัว ต้องทำการยืดผ้าด้วยการให้ความร้อนแห้ง $180-210^{\circ}C$

2.2.2 การย้อม (dyeing)

เส้นด้ายและผ้าดิบที่ผ่านการเตรียมและทำความสะอาดแล้วจะถูกนำไปย้อมสีใน เครื่องย้อม (dyeing machine) ซึ่งสารสีที่ใช้มีทั้งสีธรรมชาติ และ สีรีแอกทีฟ (reactive) โดยการย้อมให้ ย้อมให้อยู่ในรูปของสารละลายเพื่อให้สามารถถูกดูดซึม และเกาะติดผิวภายในเส้นใย การย้อมทั่วไป แบ่งออกได้ 2 ประเภท

1) การย้อมแบบกะ (batch dyeing) ใช้กับการผลิตผ้าไม่มาก ผ้าหรือวัสดุที่ถูกย้อมจะ ถูกนำมาแช่ในหม้อย้อมที่มีสารละลายสีย้อม ซึ่งจะดูดซึมเข้าไปในเนื้อผ้าหรือเส้นด้าย

2) การย้อมแบบต่อเนื่อง (continuous dyeing) เป็นการย้อมคราวละมาก ๆ วิธีนี้จะใช้ ลูกกลิ้งอัดน้ำสีเข้าไปในเนื้อผ้า โดยผ้าจะเคลื่อนผ่านอุปกรณ์ จากกลุ่มอัดสี (padding) ผนึกสี (heat fixation) และซักล้าง (washing) อย่างต่อเนื่อง

2.2.3 การตกแต่ง (textile finishing)

ขั้นตอนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุง และเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของผ้าหรือเส้นด้ายให้ตรงตามความต้องการของผู้ใช้ การตกแต่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) การพิมพ์ (printing) เป็นการทำให้สีหรือสารเคมีติดบนผ้า โดยให้สารสี หรือ พิกเมนต์ติดบนพื้นผิวตามลวดลาย
- 2) การผนึกสี (fixation) เป็นการอบผนึกสีโดยใช้ความร้อนเพื่อให้ลวดลายบนผ้ามีความคงทน จากนั้นทำการซักล้างเพื่อกำจัดสีและสารเคมีส่วนเกินออก
- 3) การอบแห้ง (drying) เมื่อทำการซักล้างเพื่อกำจัดสีและสารเคมีส่วนเกินออก ต้องทำให้ผ้าแห้ง โดยส่วนใหญ่จะใช้ลมร้อน จากนั้นจึงเติมสารตกแต่งหล่อลื่น (softener) เพื่อให้ผ้าเกิดความมันเงา นุ่ม และควบคุมการหดตัวของผ้า

2.3 การใช้ทรัพยากรในกระบวนการฟอกย้อม

ในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการฟอกย้อมจะมีการใช้น้ำ พลังงาน และสารเคมีที่แตกต่างกันทั้งชนิดและปริมาณ ขึ้นอยู่กับชนิดของผ้าและเส้นด้ายที่ใช้เป็นวัตถุดิบ ประเภทของเครื่องจักร และอุปกรณ์ที่เลือกใช้ ตลอดจนคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ การใช้ทรัพยากรในกระบวนการฟอกย้อมแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่

2.3.1 การใช้วัตถุดิบ

การใช้วัตถุดิบของกระบวนการฟอกย้อมประกอบด้วย ด้ายดิบหรือผ้าดิบ (มีทั้งเส้นใยธรรมชาติและเส้นใยสังเคราะห์) สีย้อมโดยส่วนเป็นสีย้อมในกลุ่มสารอินทรีย์ และสารเคมีช่วยย้อม การใช้สีย้อมบางชนิดต้องเติมสารเคมีช่วยย้อมเพื่อให้สีย้อมติดกับเส้นใยอย่างสม่ำเสมอ และคงทนเมื่อนำไปใช้งาน เช่น เกลือ กรดฟอร์มิก กรดฟอสฟอรัส เป็นต้น (กรมควบคุมมลพิษ, 2548)

2.3.2 การใช้น้ำ

กระบวนการฟอกย้อมเป็นการใช้สารเคมีและสีย้อมที่อาศัยน้ำเป็นตัวกลางตั้งแต่ขั้นตอนการเตรียมผ้า การย้อมสี การตกแต่ง และการชำระล้างทำความสะอาดเครื่องจักรอุปกรณ์ของแต่ละขั้นตอน นอกจากนี้ยังต้องการน้ำสำหรับใช้ในหม้อไอน้ำและน้ำหล่อเย็นด้วย อุตสาหกรรมฟอกย้อมเป็นอุตสาหกรรมที่ใช้น้ำในปริมาณมาก นอกจากการใช้น้ำในกระบวนการฟอกย้อมแล้ว ยังมีส่วนของการใช้น้ำเพื่ออุปโภคบริโภคด้วย (กรมควบคุมมลพิษ, 2548)

2.3.3 การใช้พลังงาน

ในอุตสาหกรรมฟอกย้อมแบ่งการใช้พลังงานได้เป็น 2 ส่วนคือ

- 1) การใช้เชื้อเพลิง เช่น น้ำมันเตา ถ่านหิน ไม้ และ LPG (Liquefied Petroleum Gas) เป็นต้น เพื่อเป็นแหล่งพลังงานให้กับหม้อไอน้ำสำหรับผลิตไอน้ำเพื่อใช้ในกระบวนการฟอกย้อม
- 2) การใช้ไฟฟ้า ในส่วนของการใช้ไฟฟ้าในโรงงานฟอกย้อมเกือบทั้งหมดเพื่อดำเนินการในส่วนเครื่องจักรและอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น เครื่องจักรมอเตอร์ เครื่องอบลมร้อน พัดลมดูดอากาศ เครื่องย้อม เครื่องพิมพ์ผ้า อุปกรณ์ในระบบบำบัดน้ำเสีย เป็นต้น

จากการศึกษาการใช้พลังงานในอุตสาหกรรมฟอกย้อมพบว่าต้นทุนการใช้พลังงานมีสัดส่วนประมาณ 12% ของต้นทุนการผลิต และพบว่าความร้อนเป็นพลังงานหลักที่ใช้ในโรงงานฟอกย้อม ซึ่งคิดเป็น 85-90% ของพลังงานทั้งหมด ส่วนการใช้ไฟฟ้าคิดเป็น 15-20% (วัชระ มั่งวิฑิตกุล, 2548) ข้อมูลดังกล่าวนี้ชี้ให้เห็นว่ากระบวนการฟอกย้อมนั้นจะเกี่ยวข้องกับการใช้พลังงานเกือบทุกขั้นตอน ซึ่งหากมีการจัดการพลังงานอย่างเหมาะสมจะเป็นการลดต้นทุนได้เป็นอย่างมาก

จากที่ได้กล่าวไปแล้วนั้น แต่ละขั้นตอนของกระบวนการฟอกย้อมจะมีการใช้วัตถุดิบ สารเคมี พลังงาน และ น้ำ ในกระบวนการผลิตซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดของเสียที่มีลักษณะคุณสมบัติและปริมาณที่แตกต่างกัน อาทิเช่น มลพิษอากาศ ที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตไอน้ำ และของเสียจากกระบวนการผลิต เช่น เศษด้าย เศษผ้า นอกจากนี้ยังมีน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการฟอกย้อม ซึ่งเป็นประเด็นของเสียที่จะกล่าวโดยละเอียดในหัวข้อต่อไป

2.4 ลักษณะและปริมาณน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการฟอกย้อม

ในขั้นตอนการผลิตของกระบวนการฟอกย้อมส่วนใหญ่เป็นกระบวนการทางเคมีที่ใช้การปรับเปลี่ยนคุณสมบัติของผ้า เส้นด้าย โดยการใช้สารเคมีที่เหมาะสม และอาศัยน้ำเป็นตัวกลาง น้ำใช้ในกระบวนการฟอกย้อมเกือบทั้งหมดจะกลายเป็นน้ำเสียที่แตกต่างกันทั้งในด้านปริมาณและลักษณะ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ วัตถุดิบ สี และสารเคมีที่ใช้ น้ำเสียที่เกิดขึ้นเป็นปัญหาที่สำคัญอย่างหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากมีทั้งการปนเปื้อนสารเคมีต่าง ๆ ซึ่งลักษณะของน้ำเสียและมลสารที่ปนเปื้อนในน้ำเสียในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการฟอกย้อม จากข้อมูลของกรมควบคุมมลพิษ (2548) สรุปดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ลักษณะของน้ำเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการฟอกย้อม⁽¹⁾

กระบวนการ	มลสารในน้ำเสีย	ลักษณะของน้ำเสีย
การลอกแป้ง	แป้ง กลูโคส คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ไขมัน ซีซี	ค่าบีโอดีสูง (35-50% ของกระบวนการผลิตทั้งหมด)
การทำความสะอาดสิ่งเจือปน	โซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมคาร์บอเนต ซีซี เศษใยผ้า	มีความเป็นด่างสูง มีสีเข้ม และค่าบีโอดีสูง ประมาณ 30% ของกระบวนการผลิตทั้งหมด
การฟอกขาว	ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โซเดียมไฮโปคลอไรต์ และโซเดียมคลอไรต์	มีความเป็นด่างสูง และค่าบีโอดีประมาณ 5% ของกระบวนการผลิตทั้งหมด
การชุบมัน	โซเดียมไฮดรอกไซด์ กรดน้ำส้ม กรดกำมะถัน	มีความเป็นด่างสูง ค่าบีโอดีประมาณ 1% ของกระบวนการผลิตทั้งหมด
การย้อม	สีย้อมชนิดต่าง ๆ สีธรรมชาติ สีรีแอคทีฟ สารเคมีช่วยย้อม เช่น ซัลไฟต์	มีสีเข้ม องค์กรประกอบของแข็ง ละลายน้ำสูง มีค่าบีโอดีค่อนข้างสูง เกิดฟอง และอุณหภูมิสูง
การพิมพ์	สารสี แป้งพิมพ์ กาว กรดและเกลือโลหะ	มีสีเข้ม มีค่าบีโอดีค่อนข้างสูง และมีน้ำมัน
การตกแต่ง	สารสี แป้ง	เป็นด่างเล็กน้อย บีโอดีต่ำ แต่ซีโอดีสูง

หมายเหตุ : ⁽¹⁾ จาก กรมควบคุมมลพิษ (2548)

กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2550) ได้สรุปปริมาณและความเข้มข้นของน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการฟอกย้อม จากข้อมูลการสำรวจด้วยแบบสอบถามของอุตสาหกรรมพิมพ์ผ้า โดยแบ่งลักษณะของน้ำเสียออกเป็น 2 ประเภท คือ การพิมพ์ และการพิมพ์และฟอกย้อม ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ปริมาณและความเข้มข้นน้ำเสียของอุตสาหกรรมฟอกย้อม⁽¹⁾

ประเภท	ปริมาณน้ำเสีย (ลบ.ม./วัน)	ลักษณะน้ำเสีย (มก./ล.)		
		บีโอดี	ซีโอดี	ของแข็ง แขวนลอย ทั้งหมด
การพิมพ์	49-90	120-269	286-866	13-121
การพิมพ์	140-180	369-526	1,122-3,332	202-468
การพิมพ์	250-300	220-364	347-1,714	56-273
การพิมพ์	500-700	246-340	550-1369	43-470
การพิมพ์และฟอกย้อม	400-960	228-636	1,120-1,718	82-526
การพิมพ์และฟอกย้อม	2,500	550	800	200
การพิมพ์และฟอกย้อม	4,000	69	607	22

หมายเหตุ : ⁽¹⁾ จาก กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2550)

น้ำเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมฟอกย้อม เป็นปัญหาสำคัญอย่างหนึ่ง ที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จากข้อมูลลักษณะของน้ำเสียจะเห็นได้ว่า น้ำเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการฟอกย้อม โดยส่วนใหญ่จะเป็นน้ำเสียที่ปนเปื้อนสารเคมีและสีที่ใช้ในกระบวนการผลิต ซึ่งปัญหาในการจัดการน้ำเสียของกระบวนการฟอกย้อมส่วนใหญ่คือ การกำจัดสี ที่ส่วนใหญ่มาจากกระบวนการย้อม โดยเฉพาะสีรีแอคทีฟ ซึ่งบำบัดได้ยากกว่าสีชนิดอื่น เนื่องจากมีโครงสร้างของสารอินทรีย์ที่ซับซ้อน ยากต่อการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ และมีความสามารถในการละลายน้ำได้สูง นอกจากนี้ยังมีน้ำเสียที่มาจากส่วนอื่น ได้แก่ น้ำที่ใช้ในหม้อไอน้ำที่ถูกใช้เพื่อให้ความร้อนแก่หน่วยผลิตซึ่งหากมีการปนเปื้อนระหว่างการผลิตจึงจะมีการรวบรวมเพื่อบำบัด น้ำเสียที่มีสีเจือจางแต่มีความสกปรกสูงซึ่งมาจากกระบวนการเตรียมวัตถุดิบและกระบวนการตกแต่งผ้า ดังนั้นน้ำเสียที่เกิดขึ้นต้องมีการรวบรวมเพื่อไปบำบัดอย่างเหมาะสม

2.5 การบำบัดน้ำเสียที่เกิดจากระบวนการฟอกย้อม

การบำบัดน้ำเสียเป็นวิธีการที่ถูกลำมาไว้เพื่อลดปริมาณมลพิษที่ละลายหรือแขวนลอยอยู่ในน้ำเสีย ซึ่งเป็นการปรับปรุงน้ำเสียให้ได้คุณภาพก่อนที่จะมีการปล่อยทิ้งสู่แหล่งน้ำสาธารณะ สำหรับกระบวนการบำบัดน้ำเสียสำหรับน้ำเสียอุตสาหกรรมฟอกย้อม กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2550) ได้จำแนกการบำบัดออกเป็น 2 ประเภทหลัก ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.5.1 การบำบัดน้ำเสียขั้นปฐมภูมิ (Primary Treatment)

การบำบัดน้ำเสียขั้นปฐมภูมิหรือขั้นต้น เป็นการแยกของแข็งแขวนลอยที่มีขนาดใหญ่ ออก เช่น เศษผ้า เศษด้ายออกจากน้ำเสียก่อนเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียขั้นทุติยภูมิต่อไป ระบบที่นิยมนำมาใช้ได้แก่

1) การกำจัดของแข็งแขวนลอยด้วยตะแกรง เป็นการแยกของแข็งแขวนลอยขนาดใหญ่ออกจากน้ำเสีย เช่น เศษผ้า เศษด้าย เศษแป้ง และเส้นใยต่าง ๆ ทั้งนี้เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดกับระบบ และอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น วาล์ว ท่อ เครื่องสูบน้ำ เป็นต้น โดยจะแบ่งเป็นตะแกรงชนิดหยาบ (coarse screen) ที่มีช่องว่างระหว่างช่องตะแกรงไม่น้อยกว่า 10 มิลลิเมตร และชนิดละเอียด (fine screen) ที่มีช่องเล็กมากอยู่ในช่วง 2-6 มิลลิเมตร

2) การปรับสภาพสมดุล เป็นบ่อพักน้ำเพื่อปรับคุณลักษณะ อุณหภูมิ ความเข้มข้น และอัตราการไหลของน้ำเสียให้มีความสม่ำเสมอก่อนเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียในขั้นตอนต่อไป โดยทั่วไปจะใช้ถังปรับสภาพสมดุล เนื่องจากน้ำเสียที่เกิดจากแต่ละขั้นตอนของกระบวนการฟอกย้อมมีลักษณะที่แตกต่างกันไป การมีระบบปรับสภาพสมดุลส่งผลให้ประสิทธิภาพของการบำบัดเพิ่มสูงขึ้น

3) การปรับสภาพความเป็นกรด-ด่าง ในขั้นตอนการของกระบวนการฟอกย้อม มีการเติมสารเคมีที่เป็นกรดและด่าง น้ำเสียที่ปล่อยออกมาหากมีสภาพความเป็นกรดหรือด่างที่แรงเกินไป จะส่งผลกระทบต่อเครื่องจักรและการทำงานของจุลินทรีย์ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องปรับสภาพน้ำเสียให้มีสภาวะเป็นกลาง โดยทั่วไปสำหรับการปรับสภาพให้เป็นกรดจะใช้กรดกำมะถัน สภาพด่างจะใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ และปูนขาว

2.5.2 การบำบัดน้ำเสียขั้นทุติยภูมิ (Secondary Treatment)

การบำบัดน้ำเสียขั้นทุติยภูมิหรือขั้นที่สอง เป็นระบบบำบัดที่ใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์ ของแข็งแขวนลอย ตะกอนแขวนลอยออกจากน้ำเสีย และการกำจัดสี น้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อม มีสารเคมี และสีฟิมพ์ปนเปื้อนมากมายหลายชนิด ดังนั้นวิธีการบำบัดจึงอาจใช้หนึ่งวิธี หรืออาจใช้หลายวิธีร่วมกัน ส่วนใหญ่แล้วจะใช้กระบวนการทางเคมี และระบบบำบัดทางเคมีแล้วตามด้วยระบบทางชีวภาพ รายละเอียดดังต่อไปนี้

1) การบำบัดน้ำเสียทางเคมี และการกำจัดสีในน้ำ

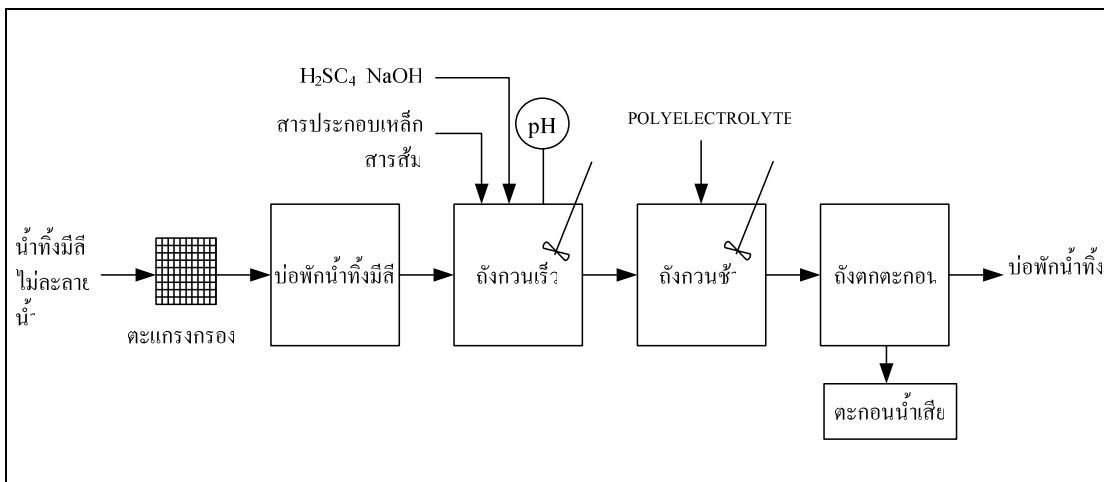
กระบวนการบำบัดทางเคมี เหมาะสำหรับน้ำเสียที่มีลักษณะ อย่างใดอย่างหนึ่ง ดังต่อไปนี้ คือ มีสภาพกรดหรือด่างสูงเกินไป มีโลหะหนักที่เป็นพิษ (เช่น สังกะสี เหล็ก ตะกั่ว) มีสารแขวนลอยขนาดเล็กที่ตกตะกอนได้ยาก มีสารประกอบอนินทรีย์ที่เป็นพิษ หรือมีสีที่ละลายน้ำ และไม่ละลายน้ำ การบำบัดทางเคมีสำหรับน้ำเสียของกระบวนการฟอกย้อม มีหลายแบบ ได้แก่ การโคแอกกูเลชันด้วยสารเคมี (coagulation) การดูดซับ (adsorption) คลอรีนชัน (chlorination) โอโซนเนชัน (ozonation) การใช้สารเคมีเฟนต์ัน (Fenton's reagent) การกรองผ่านเยื่อเมมเบรน (membrane filtration) และไฟฟ้าเคมี (electrochemical) ในที่นี้จะกล่าวถึง 3 แบบ คือ

ก. การโคแอกกูเลชันด้วยสารเคมี (coagulation) หรือที่เรียกทั่วไปว่าการสร้างตะกอนและรวมตะกอนโดยการเติมสารเคมีที่มีความสามารถในการทำให้อนุภาครวมตัวกัน ซึ่งเรียกว่า สารโคแอกกูแลนต์ (coagulant) และสารโคแอกกูแลนต์เอ็ด (coagulant aid) การทำงานจะมี 2 ขั้นตอนหลักคือ ขั้นตอนการกวนเร็ว และการกวนช้า ใช้สำหรับการกำจัดสีและสารแขวนลอยขนาดเล็กที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย

ข. การดูดซับ (adsorption) คือการสารบางชนิดที่มีความสามารถในการดึงโมเลกุล หรือคอลลอยด์ให้เคลื่อนที่ไปเกาะติดพื้นที่ผิวของสารนั้นโดยใช้กลไกการดูดซับ สารดูดซับมีหลายชนิด เช่น สารอินทรีย์โพลีเมอร์ (เช่น แมกนีเซียมออกไซด์ แอคติเวเต็ดชิลิกา) สารอินทรีย์สังเคราะห์ และแอคติเวเต็ดคาร์บอน ใช้สำหรับการกำจัดสี เนื่องจากสารดูดซับเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง ทำให้มีความสามารถในการดูดซับสูงตามไปด้วย

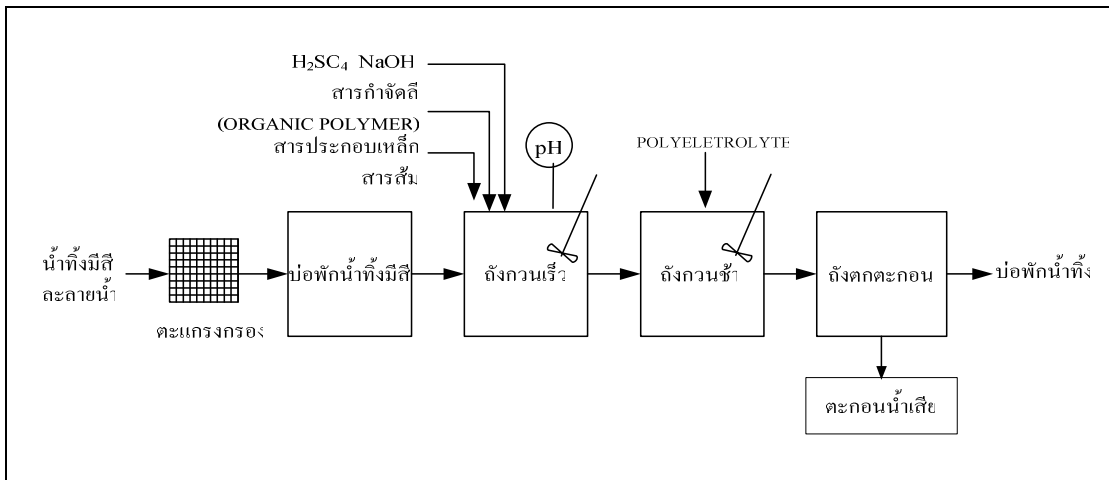
ค. คลอรีนชัน (chlorination) คือการกำจัดสีโดยใช้คลอรีนเป็นตัวออกซิไดซิง ทำปฏิกิริยากับสีที่อยู่ในน้ำเสีย ทำให้สีหายไปหรือลดความเข้มของสีลง โดยความเข้มของสีที่ลดลงจะขึ้นอยู่กับปริมาณและความเข้มของคลอรีนที่ใช้ คลอรีนที่ใช้ มีทั้งในรูปแบบแก๊สคลอรีน สารประกอบไฮโปคลอไรท์ และคลอรีนไดออกไซด์ อย่างไรก็ตามการใช้คลอรีนมากเกินไปจะทำให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมได้

จากการบำบัดทั้ง 3 แบบที่กล่าวมา ในการนำไปใช้งานในการกำจัดสีที่ไม่ละลายในน้ำเสีย เช่น สีแคว็ด สีอะโซอิก และสีเมทัลลิก จะนิยมใช้การโคแอกกูเลชันด้วยสารเคมี ซึ่งสารโคแอกกูแลนต์ (coagulant) หรือสารสร้างตะกอนที่นิยมใช้คือ เฟอริกคลอไรด์ (FeCl_3) แมกนีเซียม-คลอไรด์ไฮเดรตเบสิก ($3\text{MgCO}_3 \cdot \text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) หรือบางที่อาจใช้สารส้ม ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$) เมื่อขั้นตอนสร้างตะกอนสมบูรณ์จะเติมต่าง เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือ ปูนขาวเพื่อตกตะกอน และอาจเติมสารโพลีเมอร์ประเภทประจุลบซึ่งเป็นสารโคแอกกูแลนต์เอ็ดเพื่อช่วยให้ตะกอนมีขนาดใหญ่ขึ้น จากนั้นก็จะเป็นขั้นตอนการแยกตะกอนออกจากน้ำทิ้งในถังตกตะกอนต่อไป ลักษณะของหน่วยบำบัดน้ำเสียที่กล่าวถึง ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การโคแอกกูเลชันด้วยสารเคมีเพื่อกำจัดสิ่งที่ไม่ละลายน้ำในน้ำเสีย
ที่มา : มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ และวุฒิ วิพันธ์พงษ์ (2545)

การนำไปใช้งานกรณีของการกำจัดสีประเภทที่ละลายน้ำ เช่น สีรีแอคทีฟ โดยทั่วไปจะใช้การโคแอกกูเลชันร่วมกับการดูดติดผิว และคลอรีนชัน โดยใช้สารอินทรีย์โพลิเมอร์เป็นตัวดูดซับ หรือใช้คลอรีนเป็นตัวออกซิไดซิง เพื่อทำปฏิกิริยาให้สีที่เดิมละลายน้ำเปลี่ยนมาอยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำ และเติมสารแกแอกูแลนต์ เช่น เฟอร์ริกคลอไรด์ สารส้ม เพื่อก่อตะกอนและเติมสารโพลิเมอร์ประเภทประจุลบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัด ลักษณะของหน่วยบำบัดน้ำเสียแสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การโคแอกกูเลชันด้วยสารเคมีเพื่อกำจัดสีที่ละลายน้ำในน้ำเสีย
 ที่มา : มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ และวุฒิ วิพันธ์พงษ์ (2545)

2) การบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ

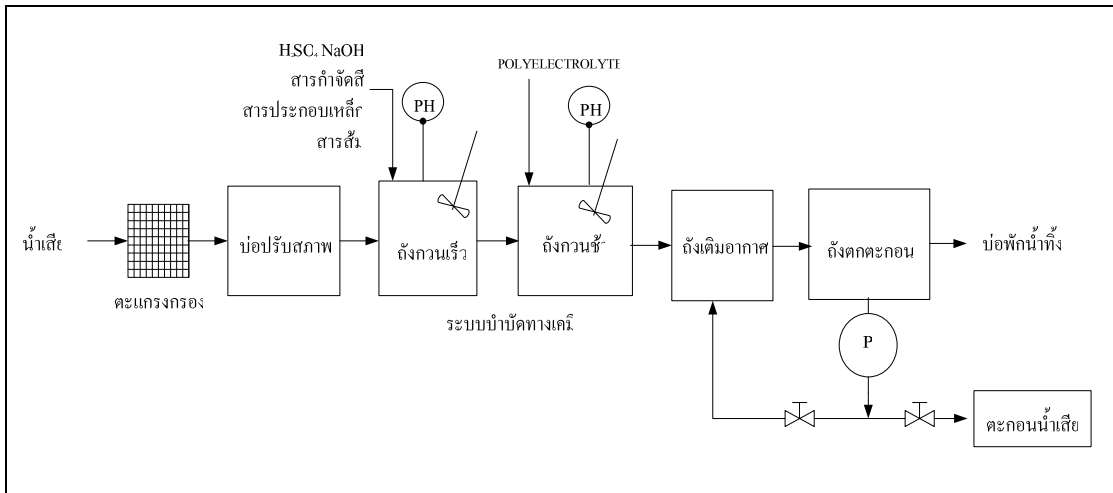
การบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพโดยหลักการแล้วสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ แบบใช้ออกซิเจน (aerobic process) และ แบบไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic process) โดยแบบใช้ออกซิเจนจะอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจนเปลี่ยนความสกปรกหรือสารอินทรีย์ ให้กลายเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และน้ำ (H₂O) ซึ่งระบบก็มีอยู่ด้วยกันหลายแบบ เช่น ระบบปรับเสถียร (stabilization pond) ระบบบ่อเติมอากาศ (aerated lagoon) ระบบตะกอนเร่ง (Activated Sludge : AS) ระบบโปรยกรอง (trickling filter) ระบบแผ่นหมุนชีวภาพ (rotating biological contactor) ส่วนแบบไม่ใช้ออกซิเจนจะอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ที่ไม่ใช้ออกซิเจนเปลี่ยนความสกปรกให้กลายเป็น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) แก๊สมีเทน (CH₄) และแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ H₂S เช่น ระบบถังกรองไร้อากาศ ระบบยูเอเอสบี เป็นต้น ทั้งนี้สำหรับการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพของกระบวนการฟอกย้อม จะกล่าวเฉพาะแบบที่นิยมใช้กันมาก ซึ่งมีอยู่ 3 แบบ ดังนี้

ก. ระบบบ่อปรับเสถียร (stabilization pond) เป็นบ่อบำบัดน้ำเสียแบบอาศัยธรรมชาติต้องใช้พื้นที่มาก จุลินทรีย์ในบ่อจะมี 2 ประเภท คือ จุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจน และจุลินทรีย์ที่ไม่ใช้ออกซิเจน โดยจุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจนที่อยู่ด้านบนของบ่อจะใช้ออกซิเจนจากการสังเคราะห์แสงของสาหร่าย เพื่อกำจัดความสกปรกในน้ำเสียและออกซิไดซ์แก๊สต่าง ๆ ที่มาจากบ่อให้กลายเป็นแก๊สที่ไม่มีกลิ่น สำหรับจุลินทรีย์ที่ไม่ใช้ออกซิเจนที่ก้นบ่อจะทำหน้าที่เปลี่ยนสารอินทรีย์ในน้ำเสียไปเป็น แก๊สมีเทน แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

ข. แบบบ่อเติมอากาศ (aerated lagoon) เป็นระบบที่มีการเติมออกซิเจนโดยใช้เครื่องจักรกลจึงใช้พื้นที่น้อยกว่าแบบระบบบ่อปรับเสถียร ระบบบ่อเติมอากาศประกอบด้วยส่วนที่สำคัญคือ บ่อเติมอากาศ (aerated lagoon) และบ่อขัดแต่งหรือบ่อบำบัดโดยวิธีธรรมชาติ (polishing pond) หลักการทำงานของบ่อเติมอากาศ คือ น้ำเสียที่ผ่านเข้าบ่อจะมีการเติมอากาศและกวนผสมพร้อมกับถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ในบ่อ หลังจากนั้นจึงไหลเข้าสู่บ่อขัดแต่งเพื่อให้เกิดการแยกตัวตกตะกอน ตะกอนจะจมลงก้นบ่อ น้ำส่วนใสก็จะไหลออกจากบ่อขัดแต่ง

ค. ระบบตะกอนเร่งหรือเอเอส (Activated Sludge : AS) ระบบนี้จะประกอบด้วยส่วนสำคัญสองส่วนคือ บ่อเติมอากาศ และบ่อตกตะกอน เป็นกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ให้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยอาศัยจุลินทรีย์จำนวนมากที่แขวนลอยอยู่ในถังเติมอากาศ ต้องมีการควบคุมความเข้มข้นของจุลินทรีย์ให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม โดยการย้อนกลับเอาตะกอนจุลินทรีย์บางส่วนที่ตกตะกอนในถังตกตะกอนกลับเข้าสู่ถังเติมอากาศ ลักษณะนี้จึงแตกต่างจากแบบบ่อเติมอากาศที่ไม่มีการย้อนกลับของตะกอนจุลินทรีย์ เป็นระบบที่สามารถควบคุมการบำบัดน้ำเสียให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ได้ตามความต้องการมากที่สุด กล่าวคือ สามารถกำหนดปริมาณสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนที่เข้าสู่บ่อเติมอากาศ ปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ในบ่อเติมอากาศ ปริมาณสารอินทรีย์ต่อปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ (F/M Ratio) ปริมาณอาหารเสริม (ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส เหล็ก และอื่น ๆ) ตลอดจนออกซิเจนละลายที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ทั้งนี้เนื่องจากระบบสามารถควบคุมตัวแปรต่าง ๆ ได้ จึงต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์เครื่องมือ เช่น ระบบปั๊มสูบลม ตะกอน เครื่องเติมอากาศ เครื่องตรวจวัดสภาพกรด-ด่าง และปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ จึงมีค่าก่อสร้างและค่าใช้จ่ายในการเดินระบบค่อนข้างสูงกว่าแบบอื่น แต่ข้อดีของระบบนี้คือ ระบบบำบัดแบบเอเอสจะมีขนาดเล็กกว่าแบบอื่น ๆ นอกจากนี้ยังมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่าแบบอื่น ๆ มาก

การนำไปใช้งานโดยทั่วไปแล้วการกำจัดน้ำเสียของกระบวนการฟอกย้อมจะต้องมีการบำบัดทางเคมีก่อนแล้วจึงต่อเนื่องด้วยระบบทางชีวภาพ เพื่อกำจัดสารพิษ และสารเคมีต่าง ๆ ที่จะมีผลกระทบต่อการทำงานของจุลินทรีย์ และการทำงานของจุลินทรีย์ และการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพที่นิยมนำมาใช้ส่วนใหญ่ คือระบบเอเอส ลักษณะของหน่วยบำบัดน้ำเสียแสดง ดังรูปที่ 2.3

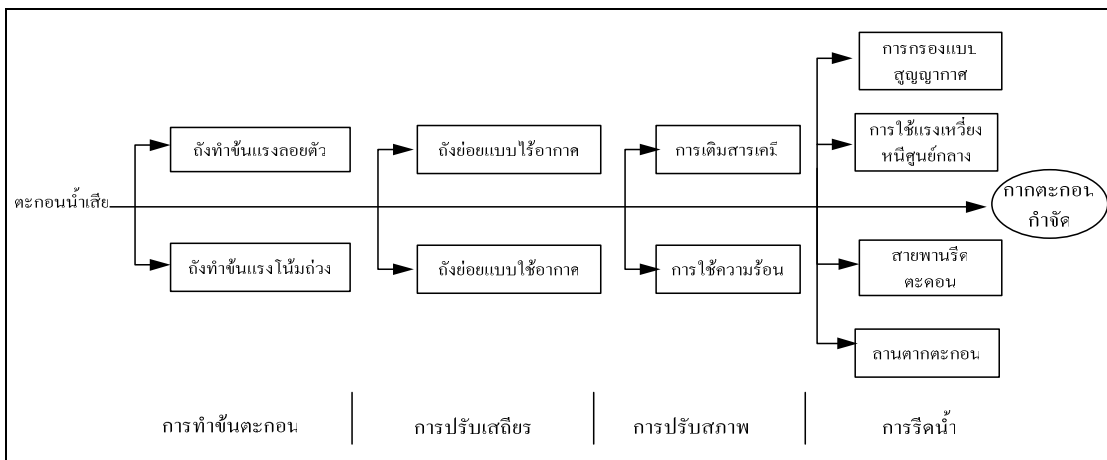


รูปที่ 2.3 การบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมฟอกย้อม โดยใช้การบำบัดน้ำเสียทางเคมี ร่วมกับระบบเอเอส ทีมา : มั่นสิน ตันกุลเวศม์ และวุฒิ วิพันธ์พงษ์ (2545)

อย่างไรก็ตามภายหลังจากการแก้ปัญหาเรื่องน้ำเสียที่เกิดขึ้น ปัญหาที่สำคัญอีกประการหนึ่ง คือ กากตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบบำบัดน้ำเสีย จำเป็นต้องมีน้ำตะกอนน้ำเสียออกจากระบบเพื่อนำไปบำบัดและกำจัดต่อไป ทั้งนี้อัตราของการเกิดตะกอนน้ำเสียนั้นก็ขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำเสีย องค์ประกอบต่าง ๆ ที่อยู่ในน้ำเสีย และกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่เลือกใช้ ทั้งนี้ค่าใช้จ่ายในการบำบัดกากตะกอนน้ำเสียให้มีสภาพคงตัว รวมถึงค่าใช้จ่ายในการกำจัดโดยวิธีการฝังกลบนั้น พบว่า จะมีมูลค่าสูงถึง 50% ของค่าจัดการน้ำเสียทั้งหมด (Winkler, 1993; Midili et al., 2000) ดังนั้นจำเป็นต้องเลือกเทคโนโลยีในการกำจัดกากตะกอนที่มีต้นทุนต่ำ ซึ่งเทคโนโลยีที่เลือกใช้ขึ้นอยู่กับลักษณะและสมบัติของกากตะกอน

2.6 การบำบัดกากตะกอนน้ำเสีย

การบำบัดตะกอนน้ำเสีย เป็นการแยกน้ำออกจากตะกอน เพื่อลดปริมาตรและให้ได้กากตะกอนมีสภาพที่คงตัวก่อนที่จะนำไปกำจัดด้วยวิธีต่าง ๆ ต่อไป การบำบัดตะกอนน้ำเสีย โดยทั่วไปมีอยู่ 4 ขั้นตอนคือ การทำชั้นตะกอน (thickener) การปรับเสถียร (stabilization) การปรับสภาพ (conditioning) และ การรีดน้ำ (dewatering) ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ขั้นตอนการบำบัดกากตะกอนน้ำเสีย

2.6.1 การทำชั้นตะกอน (thickener)

เป็นการทำให้ตะกอนน้ำเสียมีความเข้มข้นขึ้น โดยการแยกน้ำออก โดยทั่วไปจะใช้วิธีทางกายภาพ คือให้ตกตะกอนเองตามแรงโน้มถ่วง และการทำให้ลอยด้วยระบบแรงลอยตัว ในกระบวนการนี้จะทำให้กากตะกอนมีความเข้มข้นขึ้น จากตะกอนน้ำเสียที่มีเข้มข้นของแข็งประมาณ 1-2% จะเพิ่มไปเป็น 3-6% (ธนพงษ์ สุริเย, 2545)

2.6.2 การปรับเสถียร (stabilization)

ตะกอนน้ำเสีย ส่วนหนึ่งจะเป็นตะกอนชีวภาพ ที่มีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบ หากปล่อยไว้สภาพที่มีอากาศจะเกิดการย่อยสลาย สร้างปัญหาเรื่องกลิ่น และเป็นแหล่งเพาะพันธุ์เชื้อโรคได้ การปรับเสถียรจะเป็นการควบคุมการย่อยสลายสารอินทรีย์ในตะกอนน้ำเสียให้เกิดขึ้นได้อย่างเหมาะสม ลดแนวโน้มการเน่าของกากตะกอนก่อนนำไปบำบัดในขั้นตอนต่อไป โดยทั่วไปจะอยู่มี 2 แบบ คือย่อยสลายแบบไร้อากาศ โดยจุลินทรีย์ที่ไม่ใช้ออกซิเจนจะเปลี่ยนสารอินทรีย์ต่าง ๆ ไปเป็นแก๊สมีเทน คาร์บอนไดออกไซด์ และ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ แบบที่สอง การย่อยแบบใช้อากาศ ระบบนี้ต้องมีอุปกรณ์เติมอากาศเพื่อให้มีปริมาณอากาศที่เพียงพอต่อจุลินทรีย์ชนิดที่ใช้ออกซิเจน

2.6.3 การปรับสภาพ (conditioning)

เป็นกระบวนการที่ช่วยให้ น้ำออกจากตะกอนง่ายขึ้นในขั้นตอนการรีดน้ำ มีทั้งวิธีที่ใช้ความร้อน และวิธีที่ใช้สารเคมี ซึ่งวิธีที่นิยมมากที่สุดคือวิธีใช้สารเคมี ทั้งนี้สารเคมีที่ถูกเติมลงไปจะทำให้เกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมีของตะกอนให้มีสภาพที่เหมาะสมกับการรีดน้ำ สารเคมีที่นิยมใช้สารสร้างตะกอน เช่น โพลีอิเล็กโทรไลต์ (polyelectrolyte) หรือ โพลีเมอร์ (polymer)

2.6.4 การรีดน้ำ (Dewatering)

การรีดน้ำเป็นกระบวนการหลักของการบำบัดตะกอน เพราะในการนำกากตะกอนไปกำจัดต้องให้มีปริมาณน้อยที่สุด รวมทั้งให้มีความชื้นเหลือน้อยที่สุด ซึ่งจะทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการขนส่งและลดค่าดำเนินการ การแยกน้ำออกจากตะกอนมีทั้งวิธีทางกายภาพ (การซึมผ่านชั้นทรายโดยใช้ลานตากตะกอน) และวิธีใช้เครื่องจักรกล (mechanical dewatering) เช่น เครื่องสายพานรีดตะกอน (belt filter press) เครื่องกรองแบบสุญญากาศ (vacuum filter) และเครื่องหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (centrifuge)

จากกระบวนการบำบัดตะกอนน้ำเสียที่กล่าวมาข้างต้น จะได้กากตะกอนน้ำเสีย (Sewage Sludge) ที่ต้องนำไปกำจัดต่อไป กากตะกอนซึ่งโดยทั่วไปจะมีลักษณะคล้ายดินเหนียวมีสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์เป็นองค์ประกอบ ทั้งนี้องค์ประกอบของกากตะกอนย่อมต่างกันขึ้นกับประเภทของอุตสาหกรรมและกระบวนการผลิต แหล่งที่มาของน้ำเสีย คุณลักษณะของน้ำเสีย (BOD COD TSS TDS เป็นต้น) กระบวนการและขั้นตอนการบำบัดน้ำเสีย อายุของกากตะกอน เป็นต้น ดังนั้นการศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับสมบัติของกากตะกอนจะทำให้ตัดสินใจเลือกวิธีการกำจัดกากตะกอนได้อย่างเหมาะสมมากขึ้น

2.7 สมบัติของกากตะกอนน้ำเสีย

การศึกษาสมบัติของกากตะกอนน้ำเสีย จะทำให้ทราบถึงลักษณะทางกายภาพ และองค์ประกอบทางเคมีที่มีอยู่ในกากตะกอน เพื่อใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนในการเลือกวิธีการกำจัดและการนำกากตะกอนไปใช้ประโยชน์ได้อย่างเหมาะสม การศึกษาสมบัติของกากตะกอนในหัวข้อนี้ จะจำแนกออกเป็น 3 หัวข้อ คือ 1) สมบัติทางกายภาพของกากตะกอน 2) สมบัติกากตะกอนที่มาจากอุตสาหกรรมประเภทต่าง ๆ 3) สมบัติกากตะกอนจากอุตสาหกรรมฟอกล้อมเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงชีวมวล

2.7.1 สมบัติทางกายภาพของกากตะกอน (Physical Properties)

สมบัติทางกายภาพของกากตะกอนโดยทั่วไปจะกล่าวถึง ความชื้น ขนาด ความถ่วงจำเพาะและน้ำหนักแห้งของกากตะกอน

1) ความชื้น กากตะกอนที่ออกจากกระบวนการบำบัดน้ำเสีย ปกติจะมีน้ำเป็นองค์ประกอบประมาณ 99.0-99.5% (โดยน้ำหนัก) ซึ่งส่วนหนึ่งจะเป็นน้ำอิสระที่สามารถแยกออกโดยการตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วง อีกส่วนหนึ่งจะเป็นน้ำที่อยู่ระหว่างช่องว่างของกากตะกอน

สามารถแยกออกโดยใช้เครื่องจักรกล และเมื่อผ่านกระบวนการแยกน้ำออกแล้ว จะมีความชื้นเหลือประมาณ 60-85% (Tchobanoglous et al., 1991) ซึ่งความชื้นถือเป็นสมบัติพื้นฐานในการเลือกใช้เทคโนโลยีการกำจัดกากตะกอน หรือการนำกากตะกอนไปใช้ประโยชน์ เช่น กรณีที่นำไปใช้ในกระบวนการหมักทำปุ๋ยอาจไม่จำเป็นต้องมีการลดความชื้น แต่ถ้านำไปเป็นเชื้อเพลิงจะต้องมีการลดความชื้นก่อนนำไปใช้งาน เป็นต้น

2) ขนาด กากตะกอนที่ผ่านกระบวนการแยกน้ำออกจะมีลักษณะเกาะกันเป็นก้อน คล้ายดินเหนียว หรืออาจเรียกว่า Sludge Cake แต่เมื่อผ่านกระบวนการลดความชื้นหรือทำให้แห้งแล้วจะแข็งตัว มีลักษณะเป็นผงละเอียดปะปนกับก้อนขนาดเล็ก

3) ความถ่วงจำเพาะและน้ำหนักแห้งของกากตะกอน กากตะกอนที่เกิดจากจากระบบบำบัดทางชีวภาพ จะมีความถ่วงจำเพาะและมีปริมาณตะกอนแห้งต่ำกว่ากากตะกอนที่เกิดจากระบบบำบัดน้ำเสียทางเคมี ทั้งนี้ น้ำหนักแห้งของกากตะกอนจะแปรผันตรงกับปริมาณของสารเคมี (ปูนขาว) ที่ใช้ ดังแสดงในตารางที่ 2.3 เนื่องจากกากตะกอนจากระบบบำบัดทางชีวภาพองค์ประกอบส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ ซึ่งเป็นมวลจุลชีพ หรือหรือจุลินทรีย์ที่ใช้ในการกำจัดน้ำเสียที่ตกตะกอน

ตารางที่ 2.3 ลักษณะทางกายภาพของกากตะกอน⁽¹⁾

กากตะกอนจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบต่าง ๆ	ความถ่วงจำเพาะของแข็งกากตะกอน	น้ำหนักแห้งของกากตะกอน (กก./ลบ.ม)
1. ถังตกตะกอนแรก	1.40	0.10-0.17
2. ระบบทางชีวภาพแบบตะกอนเร่ง	1.25	0.07-0.10
3. ระบบทางชีวภาพระบบโปรยกรอง	1.45	0.06-0.10
4. ระบบทางชีวภาพสระเติมอากาศ	1.30	0.08-0.12
5. ระบบทางชีวภาพระบบกรองทราย	1.20	0.01-0.02
6. ระบบทางชีวภาพระบบแยกสาหร่าย	1.20	0.01-0.02
7. ระบบทางเคมีใช้ปูนขาว 350-500 มก./ล.	1.90	0.24-0.40
8. ระบบทางเคมีใช้ปูนขาว 800-1600 มก./ล.	2.20	0.60-1.33

หมายเหตุ : ⁽¹⁾ จาก ธนพงษ์ สุริเย (2545)

2.7.2 สมบัติกากตะกอนที่มาจากอุตสาหกรรมประเภทต่าง ๆ

การศึกษาสมบัติของกากตะกอนที่มาจากอุตสาหกรรมประเภทต่าง ๆ ในที่นี้จะอ้างอิงจากผลการศึกษาเรื่อง “การผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจากแอกทิเวตเต็ดสลัดจ์ด้วยกระบวนการเคมีความร้อน” ของอิทธิวรรณ เลิศสกุลบรรลือ (2544) ที่ได้ทำการศึกษาองค์ประกอบต่าง ๆ ในกากตะกอนเพื่อพิจารณาถึงการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตพลังงาน โดยมีแหล่งที่มาจาก 4 แหล่ง คือ โรงบำบัดน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมนิคมอุตสาหกรรมเครือสหพัฒน์ชลบุรี โรงบำบัดน้ำเสียส่วนกลางนิคมอุตสาหกรรมเครือสหพัฒน์ชลบุรี โรงบำบัดน้ำเสียชุมชนห้วยขวางและโรงบำบัดน้ำเสียจากโรงงานกลั่นน้ำมันโอเลฟินส์ ซึ่งทั้งหมดเป็นกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพที่ใช้ระบบเอเอส (Activated Sludge) องค์ประกอบต่าง ๆ ในกากตะกอนทั้ง 4 แหล่ง สรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 2.4 ทั้งนี้สามารถนำมาสรุปตามสมบัติของการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ดังต่อไปนี้

1) สมบัติแบบประมาณ (Proximate Value)

เป็นสมบัติพื้นฐานในการวิเคราะห์เชื้อเพลิงต่าง ๆ เนื่องจากองค์ประกอบแบบประมาณ จะทำให้ตัดสินใจได้ว่ากากตะกอนมีคุณสมบัติของการเป็นเชื้อเพลิงได้หรือไม่ ตลอดจนมีสัดส่วนที่เป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์เป็นองค์ประกอบอยู่มากน้อยเพียงใด องค์ประกอบแบบประมาณ มีดังนี้

ก. ความชื้น (Moisture Content) ในที่นี้คือความชื้นที่คงเหลืออยู่ ภายหลังจากที่กากตะกอนผ่านการอบแห้งตามมาตรฐานการวิเคราะห์ (ASTM D1762-84) ความชื้นของเชื้อเพลิงมีผลต่อค่าความร้อน โดยค่าความร้อนจะน้อยลงเมื่อเชื้อเพลิงมีความชื้นเพิ่มขึ้น (สาวิตรี คำหอม และ วีรัชย์ อัจหาญ, 2551) และเชื้อเพลิงต่ำที่มีความชื้นต่ำ ก็ส่งผลให้ปฏิกิริยาและประสิทธิภาพของการเผาไหม้สูงขึ้น

ข. ปริมาณสารระเหย (Volatile Matter) คือองค์ประกอบที่สามารถระเหยได้โดยใช้ความร้อน ซึ่งโดยส่วนใหญ่ขององค์ประกอบที่ระเหยจะเป็นสารอินทรีย์ กากตะกอนที่มีปริมาณสารระเหยสูง จะมีแนวโน้มที่มีค่าความร้อนสูง และผลิตแก๊สเชื้อเพลิงในปริมาณที่สูง

ค. ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) คือปริมาณองค์ประกอบคาร์บอนคงตัวที่อยู่ในกากตะกอน ระเหยได้ยาก แต่สามารถทำปฏิกิริยาอุณหภูมิได้ กากตะกอนที่มีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูง ก็มีแนวโน้มที่จะผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่มีองค์ประกอบ CO สูง

ง. เถ้า (Ash) คือปริมาณของแข็งอนินทรีย์ที่คงอยู่ภายหลังจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง ซึ่งปริมาณเถ้าสูงจะส่งผลให้เชื้อเพลิงกากตะกอนมีค่าความร้อนต่ำ ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันปริมาณเถ้านำมาใช้คาดคะเนความถี่ในการนำเถ้าออกจากเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงเพื่อป้องกันการหลอมของเถ้าที่อุณหภูมิสูง ซึ่งเป็นสาเหตุของการอุดตันในเตาผลิตแก๊ส (Dogru et al., 2002)

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบของกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่ง

องค์ประกอบของกากตะกอน	แหล่งที่มาของกากตะกอน			
	โรงงานฟอกย้อมนิคม	โรงบำบัดน้ำเสียส่วนกลางนิคม	โรงบำบัดน้ำเสีย	โรงกลั่นน้ำมัน
องค์ประกอบแบบประมาณ				
% ความชื้น	2.1	4.2	15.4	9.5
% สารระเหย	59.5	31.8	44.5	60.2
% คาร์บอนคงตัว	3.1	1.9	2.1	17.9
% เถ้า	35.3	62.2	38.0	12.3
องค์ประกอบแบบแยกธาตุ				
% คาร์บอน	36.5	15.2	27.1	57.3
% ไฮโดรเจน	5.2	2.7	4.7	6.5
% ไนโตรเจน	3.0	1.3	3.8	4.6
% ซัลเฟอร์	1.0	1.9	2.0	1.8
% ออกซิเจน	54.5	78.9	62.4	29.8
โลหะหนัก (mg/kg)				
ทองแดง	5280	159160	3160	520
เหล็ก	50340	121380	136860	97320
สังกะสี	7500	7540	14940	22500
แคดเมียม	2	12	8	2
ตะกั่ว	60	860	620	40
ค่าความร้อน (MJ/kg)	16.3	6.8	10.8	23.5

หมายเหตุ : สรุปข้อมูลจาก อธิววรรณ เลิศสกุลบันลือ (2544)

เมื่อพิจารณาภาพรวมองค์ประกอบแบบประมาณของกากตะกอนจากแหล่งที่มาทั้ง 4 แหล่ง จากข้อมูลในตารางที่ 2.4 แสดงให้เห็นว่า แหล่งที่มาของน้ำเสีย และชนิดของอุตสาหกรรม มีผลต่อสมบัติของกากตะกอน ซึ่งพบว่ากากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียส่วนกลางนิคมอุตสาหกรรมเครือสหพัฒน์ชลบุรี มีความเหมาะสมนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงน้อยที่สุด เนื่องจากมีปริมาณสารระเหยต่ำและมีปริมาณเถ้าสูง ส่วนกากตะกอนจากโรงกลั่นน้ำมัน โอเลฟินส์ และ โรงงานฟอกย้อม มีคุณสมบัติของการเป็นเชื้อเพลิงได้เป็นอย่างดี เนื่องจากมีปริมาณสารระเหยสูง

2) ค่าความร้อน (Calorific Value)

คือพลังงานที่ถูกปลดปล่อยออกมาขณะเผาไหม้เชื้อเพลิงต่อหน่วยน้ำหนัก มีหน่วยเป็น kJ/kg kcal/kg Btu/lb หรือ kcal/litre เป็นต้น เชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนสูงจะปลดปล่อยพลังงานออกมาสูง เมื่อพิจารณาข้อมูลในตารางที่ 2.4 กากตะกอนจากโรงกลั่นน้ำมัน โอเลฟินส์ และ โรงงานฟอกย้อม มีค่าความร้อนสูง คือ 23.5 MJ/kg และ 16.3 MJ/kg ตามลำดับ เหมาะสมที่จะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงเป็นอย่างดี ขณะที่โรงบำบัดน้ำเสียส่วนกลางนิคมอุตสาหกรรมเครือสหพัฒน์ชลบุรี และ โรงบำบัดน้ำเสียชุมชนห้วยขวางมีค่าความร้อนค่อนข้างต่ำ

3) สมบัติแบบแยกธาตุ (Ultimate Value)

องค์ประกอบแบบแยกธาตุในกากตะกอน เป็นสมบัติเพิ่มเติมในการเลือกใช้เทคโนโลยีในการกำจัดกากตะกอน โดยใช้วิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ผลการวิเคราะห์จะบอกถึงปริมาณธาตุต่าง ๆ ที่มีอยู่ในกากตะกอน ทั้งธาตุหลักได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจน รวมทั้งธาตุอื่น ๆ ที่ก่อให้เกิดมลพิษ เช่น ธาตุซัลเฟอร์ โลหะหนัก คลอรีน เป็นต้น จากข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 2.4 พบว่ากากตะกอนจากทั้ง 4 แหล่ง มีองค์ประกอบของธาตุที่แตกต่างกันค่อนข้างมาก ทั้งนี้กากตะกอนที่มาจากโรงงานฟอกย้อม และกากตะกอนที่มาจากโรงกลั่นน้ำมัน โอเลฟินส์ มีสัดส่วนของธาตุคาร์บอนและไฮโดรเจนสูง ซึ่งธาตุคาร์บอนและไฮโดรเจนถือเป็นธาตุหลักของสารอินทรีย์ ดังนั้นจึงส่งผลให้ค่าความร้อนของกากตะกอนมีค่าสูงด้วย ดังที่กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 2) ในกรณีการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน เป็นธาตุหลักที่จะถูกเปลี่ยนไปเป็นแก๊สเชื้อเพลิงโดยปฏิกิริยาอุณหภูมิ ส่วนปริมาณของธาตุซัลเฟอร์ซึ่งได้ถึงปริมาณแก๊สมลพิษที่อาจเกิดขึ้นในรูปออกไซด์ของซัลเฟอร์ (SO_x) และ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) สำหรับปริมาณโลหะหนักในกากตะกอน พบว่ากากตะกอนที่มาจากทั้ง 4 แหล่งมีโลหะหนักปนเปื้อนในปริมาณที่สูง โลหะหนักเหล่านี้เป็นอันตรายทั้งต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม การศึกษาองค์ประกอบแบบแยกธาตุของกากตะกอนมีความสำคัญเพราะจะทำให้ทราบถึงแนวโน้มมลพิษที่เกิดขึ้นและเป็นแนวทางในการเลือกใช้เทคโนโลยีในการกำจัดกากตะกอนที่เหมาะสมได้

2.7.3 สมบัติกาคะกอนจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงชีวมวล

ในหัวข้อที่ผ่านมาเมื่อเปรียบเปรียบเทียบสมบัติของกาคะกอนจากอุตสาหกรรมประเภทต่าง ๆ เห็นได้ว่ากาคะกอนของอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีคุณสมบัติของการเป็นเชื้อเพลิงได้ค่อนข้างดี แต่ทั้งนี้หากนำมาเปรียบเทียบกับชีวมวลประเภทต่าง ๆ ที่นิยมนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในปัจจุบัน จะเห็นถึงความเป็นไปได้ในการนำกาคะกอนของอุตสาหกรรมฟอกย้อมมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้มากยิ่งขึ้น

เชื้อเพลิงชีวมวล คือ มวลสารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติ และสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้ เช่น เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร หรือกากจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมการเกษตร ชีวมวลสามารถเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานได้โดยในขั้นตอนของการเจริญเติบโตนั้น พืชใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และเปลี่ยนพลังงานจากแสงอาทิตย์โดยผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสงโดยอาศัยสารคลอโรฟิลล์ (chlorophyll) ได้ผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นแป้งและน้ำตาล แล้วกักเก็บไว้ตามส่วนต่าง ๆ ของพืช ซึ่งพลังงานงานที่สะสมไว้ในพืชนั้นสามารถเปลี่ยนรูปได้ (energy conversion) ทั้งโดยกระบวนการทางชีวภาพ กระบวนการทางเคมี และกระบวนการทางอุณหภูมิ (Reed et al., 1978)

สมบัติของกาคะกอนจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมเมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงชีวมวล 3 ชนิด คือ ไม้กระถินยักษ์ แกลบ และ ชังข้าวโพด ดังแสดงในตารางที่ 2.5 แสดงให้เห็นได้ว่ากาคะกอนจากโรงงานฟอกย้อม มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับกับเชื้อเพลิงชีวมวล เพราะมีค่าความร้อนประมาณสารระเหย และปริมาณธาตุคาร์บอนค่อนข้างสูง แต่ก็ยังมีข้อด้อยคือ มีปริมาณเถ้าสูง ในกรณีนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง จำเป็นต้องนำเถ้าออกจากระบบเผาไหม้ดีกว่าการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลปกติ นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณโลหะหนักในกาคะกอนจากโรงงานฟอกย้อมมีค่าสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงชีวมวล ดังนั้นการเลือกใช้เทคโนโลยีในการกำจัดกาคะกอน หรือการนำเอากาคะกอนไปใช้ประโยชน์เพื่อเป็นเชื้อเพลิงนั้น จึงต้องเลือกเทคโนโลยีที่เหมาะสม และพิจารณาถึงผลกระทบที่อาจจะเกิดขึ้นต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมเป็นสำคัญ

ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบของกากตะกอนจากโรงงานฟอกย้อมเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงชีวมวล

องค์ประกอบของกากตะกอน	กากตะกอน จากโรงงานฟอกย้อม	เชื้อเพลิงชีวมวล					
		ไม้กระถินยักษ์		แกลบ		ซังข้าวโพด	
สมบัติแบบประมาณ							
% ความชื้น	2.1	-	0.63	-	3.53	-	2.23
% สารระเหย	59.5	85.6	81.0	81.6	63.0	85.4	81.0
% คาร์บอนคงตัว	3.1	14.4	16.6	18.4	19.5	14.6	15.4
% เถ้า	35.3	0.9	1.8	23.5	19.5	2.8	1.4
สมบัติแบบแยกธาตุ							
% คาร์บอน	36.5	48.2	47.6	38.9	37.4	47.6	48.1
% ไฮโดรเจน	5.2	5.9	6.6	5.1	4.6	5.0	7.5
% ไนโตรเจน	3.0	0.1	0.4	0.6	0.5	0.1	0.4
% ซัลเฟอร์	1.0	-	0.01	-	0.01	-	44.1
% ออกซิเจน	54.5	45.1	45.5	32.0	57.4	46.0	0.01
โลหะหนักและคลอรีน (mg/kg)							
ทองแดง	5280	-	680	-	100	-	790
เหล็ก	50340	-	8690	-	6980	-	15100
สังกะสี	7500	-	670	-	180	-	270
แคดเมียม	2	-	ไม่พบ	-	ไม่พบ	-	ไม่พบ
ตะกั่ว	60	-	60	-	70	-	70
คลอรีน	-	-	17890	-	8410	-	19240
ค่าความร้อน (MJ/kg)	16.3	19.78	15.91	15.30	12.40	15.65	15.60
อ้างอิงข้อมูลจาก	อิทธิวรรณ เลิศสกุลบันลือ (2544)	Raveendran et al. (1995)	วีรัชย์ อัจหาญ และคณะ (2551)	Raveendran et al. (1995)	วีรัชย์ อัจหาญ และคณะ (2551)	Raveendran et al. (1995)	วีรัชย์ อัจหาญ และคณะ (2551)

2.8 กระบวนการกำจัดกากตะกอน

การนำกากตะกอนไปกำจัดหรือใช้ประโยชน์ จะต้องมีการนำกากตะกอนนั้นไปบำบัดขั้นต้นก่อน ทั้งนี้เพื่อแยกองค์ประกอบของน้ำ ควบคุมการเกิดกลิ่นและควบคุมเชื้อโรค ซึ่งได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 2.6 และมีความจำเป็นที่ต้องทราบคุณสมบัติและองค์ประกอบในกากตะกอนก่อน เพื่อใช้เป็นข้อมูลในเลือกวิธีการกำจัดกากตะกอนได้อย่างเหมาะสม โดยทั่วไปการกำจัดกากตะกอนและการนำกากตะกอนไปใช้ประโยชน์สามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีมีข้อดีข้อเสียต่างกัันดังต่อไปนี้

2.8.1 การปล่อยทิ้งทะเล (Sea Disposal)

เป็นวิธีที่นำไปทิ้งในทะเลลึกโดยตรง เป็นวิธีที่ไม่ยุ่งยาก และมีค่าใช้จ่ายต่ำ แต่มีผลกระทบต่อระบบนิเวศวิทยาอย่างมาก จึงไม่นิยมปฏิบัติในปัจจุบัน

2.8.2 การฝังกลบ (Sanitary Landfill)

การฝังกลบ มีอยู่ 2 ขั้นตอน คือ ขั้นแรกต้องทำลายฤทธิ์ของกากอุตสาหกรรมเสียก่อน จากนั้นจึงทำให้กากแข็งตัว และนำไปฝังในหลุมฝังกลบที่ปูพื้นด้วยวัสดุพิเศษกันการรั่วซึม เช่น แผ่นพลาสติกโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง จากนั้นจึงทำการกลบ ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่ต้องใช้เนื้อที่มากในการจัดการ และถ้าการฝังกลบไม่มีประสิทธิภาพอาจเกิดการรั่วซึมของสารพิษออกจากบริเวณที่ฝังกลบโดยซึมลงดินหรือแม่น้ำ จึงเป็นอันตรายและมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

2.8.3 การทำปุ๋ยหมัก (Composting)

เป็นการอาศัยกระบวนการย่อยสลายกากตะกอนด้วยจุลินทรีย์ เพื่อที่ใช้จุลินทรีย์ย่อยสลายได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่คงตัว เหมาะสำหรับกากตะกอนที่มีความเข้มข้นสารอินทรีย์สูง เพราะต้องให้อัตราส่วนของคาร์บอนและไนโตรเจน (C/N ratio) เหมาะสมต่อการสร้างเซลล์ของจุลินทรีย์ และต้องไม่มีสารพิษปนเปื้อนสูง เช่น โลหะหนักต่าง ๆ เพราะจะทำให้จุลินทรีย์ตายได้ ในกรณีการนำกากตะกอนมาทำปุ๋ย อาจไม่จำเป็นต้องผ่านการปรับเสถียร เนื่องจากต้องนำมาย่อยสลายอยู่แล้ว การทำปุ๋ยหมักมีอยู่ 2 แบบคือ กระบวนการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์แบบใช้อากาศ และแบบไร้อากาศ สำหรับระบบแบบใช้อากาศจะใช้เวลาประมาณ 5-10 วัน มีการกวนทุก ๆ 2-3 วัน ต้องมีการเติมอากาศให้เพียงพอ และระบบต้องมีความชื้น 55-70% ในขณะที่เดียวกันระบบไร้อากาศ ไม่จำเป็นต้องเติมอากาศ แต่ระยะเวลาในการหมักจะนานกว่า และจะมีปัญหาเรื่องกลิ่น ซึ่งทั้ง 2 ระบบหากควบคุมกระบวนการหมักไม่ดีปุ๋ยที่ได้อาจมีคุณภาพต่ำ ขณะเดียวกันก็ต้องมีมาตรการป้องกันน้ำเสียที่ไหลออกจากพื้นที่ทำปุ๋ยหมัก

2.8.4 การเผา (Incineration)

เหมาะสมกับกากตะกอนที่มีความเข้มข้นสารอินทรีย์สูง แต่เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการลดปริมาณตะกอนและขจัดกลิ่น (ใช้อุณหภูมิอย่างต่ำ 700°C) โดยทั่วไป นิยมนำกากตะกอนที่มีค่าความชื้นต่ำกว่า 50% มาเผา มิฉะนั้น จะเสียค่าใช้จ่ายสูง การเผาต้องใช้ อุณหภูมิสูง 700-760°C ใช้อัตราส่วนอากาศผสมสูงมากเกินพอประมาณ 50-100% มากกว่าอากาศที่ ต้องการจริง และใช้แก๊สธรรมชาติหรือน้ำมันเชื้อเพลิงช่วยในการเผาไหม้ เพื่อให้เกิดการสันดาป อย่างสมบูรณ์ (Complete Combustion) สามารถนำพลังงานความร้อนส่วนเกินไปใช้ประโยชน์ต่อไป ได้ แต่ข้อเสียคือ เครื่องมือราคาสูง ต้องป้องกันมลภาวะอากาศจากเถ้า และมลพิษอากาศที่ฟุ้งกระจาย

2.8.5 การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงโดยกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) และแก๊สซิฟิเคชัน

(Gasification)

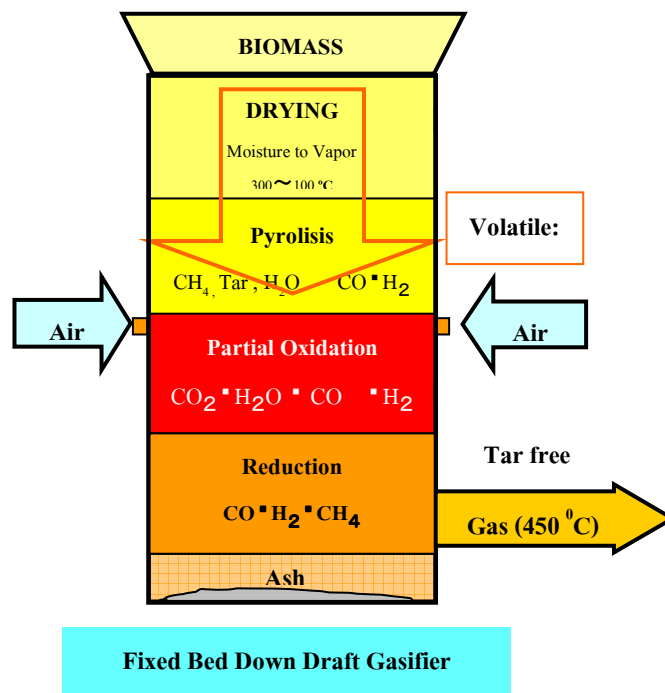
เป็นวิธีการนำเอากากตะกอนซึ่งเป็นสารอินทรีย์มาเพิ่มความร้อนที่อุณหภูมิสูง ใน สภาวะที่ปราศจากออกซิเจน หรือจำกัดออกซิเจน ทำให้สารอินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบในกาก ตะกอน สลายตัวเป็นกลุ่มแก๊สเชื้อเพลิง ซึ่งวิธีการกำจัดกากตะกอนโดยวิธีนี้ สามารถนำแก๊ส เชื้อเพลิงที่ผลิตได้มาใช้ประโยชน์เพื่อเป็นพลังงาน ซึ่งจะกล่าวละเอียดในหัวข้อต่อไป

2.9 กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

แก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) หรือกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง เป็นกระบวนการแปร สภาพเชื้อเพลิงแข็งที่มีสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ให้อยู่ในรูปเชื้อเพลิงที่เป็นแก๊ส เช่น คาร์บอน มอนนอกไซด์ (CO) ไฮโดรเจน (H₂) และ มีเทน (CH₄) กระบวนการดังกล่าวเป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลง ทางอุณหเคมี (Thermochemical Conversion Process) เป็นการกลั่นสลายของค์ประกอบ ไฮโดรคาร์บอน โดยใช้ความร้อนหรือไอน้ำที่อุณหภูมิสูง ภายใต้สภาวะจำกัดอากาศหรือออกซิเจน (Partial Oxidation) ที่ความดัน 1 บรรยากาศขึ้นไป ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีหลายขั้นตอนทั้งปฏิกิริยาดูด ความร้อนและคายความร้อน แก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ เรียกว่า แก๊สเชื้อเพลิง หรือ โพรคิวเซอร์แก๊ส (producer gas) (Alexander, 2002)

2.9.1 ปฏิริยาอุณหเคมีในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่น

ปฏิริยาอุณหเคมีที่เกิดขึ้นในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่น เป็นส่วนที่ทำการเปลี่ยนเชื้อเพลิงในรูปของแข็งที่มีองค์ประกอบไฮโดรคาร์บอนให้เป็นแก๊สที่เผาไหม้ได้ สามารถประยุกต์ใช้กับเชื้อเพลิงได้กว้างขวาง เช่น เชื้อเพลิงชีวมวล ขยะมูลฝอย รวมทั้งกากตะกอนน้ำเสีย ปฏิริยาอุณหเคมีต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่นดังแสดงใน รูปที่ 2.5

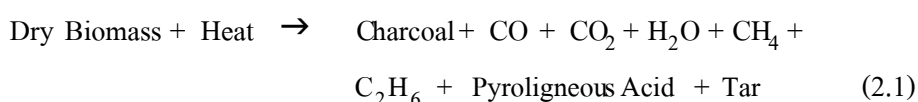


รูปที่ 2.5 ปฏิริยาอุณหเคมีที่เกิดขึ้นในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่นในเตาผลิตแก๊สชนิดไหลลง
(ที่มา : วีรัชย์ ออาจหาญ และคณะ, 2551)

วีรัชย์ ออาจหาญ และคณะ (2551) ได้อธิบายว่า ในกระบวนการเกิดแก๊สเชื้อเพลิงสามารถแบ่งโซนการเกิดปฏิริยาทางอุณหเคมี (Thermochemical Reaction) ตามความแตกต่างของอุณหภูมิจน 4 โซน ดังนี้

1) Drying Zone คือช่วงที่ไอน้ำหรือความชื้นที่แทรกตัวอยู่ในเชื้อเพลิงโดนกำจัดด้วยความร้อนที่มาจากโซนเผาไหม้อุณหภูมิ ประมาณ 100-200°C แต่อุณหภูมิที่เกิดขึ้นยังไม่สูงพอที่จะทำให้เกิดการสลายตัวของ Volatile Matter ในเชื้อเพลิงได้

2) Pyrolysis หรือ Distillation Zone ปฏิกริยาอุณหเคมีที่เกิดขึ้นในโซนนี้จะอาศัยความร้อนจากโซน Combustion ทำให้ Volatile Matter ที่อยู่ในเชื้อเพลิงเกิดการสลายตัว เกิดเป็น เมทานอล กรดน้ำส้ม และทาร์ (Tars) โดยอุณหภูมิในโซนนี้จะมีค่าประมาณ 200-500°C ของแข็งที่เหลืออยู่ภายหลังจากการผ่านกระบวนการนี้ก็คือ คาร์บอนในรูปถ่าน ซึ่งจะนำไปปฏิบัติต่อกับโซน Reduction และ Combustion ปฏิกริยาที่ได้ในโซนนี้แสดงไว้ในสมการที่ (2.1)

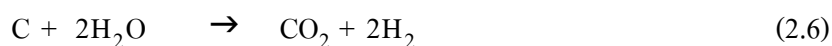
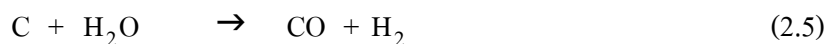


3) Combustion หรือ Oxidation Zone เป็นบริเวณที่มีการป้อนอากาศ เมื่อถูกกระตุ้นด้วยความร้อน เชื้อเพลิงจะลุกไหม้ เกิดปฏิกริยาอุณหเคมีระหว่างแก๊สออกซิเจนในอากาศกับ คาร์บอนและไฮโดรเจน ซึ่งอยู่ในเชื้อเพลิง ผลของปฏิกริยาดังกล่าวก่อให้เกิดแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ ดังสมการที่ (2.2) และ (2.3)



ปฏิกริยาในสมการที่ (2.2) และ (2.3) เป็นปฏิกริยาคายความร้อนและความร้อนที่เกิดขึ้นนี้จะถูกนำไปใช้ในปฏิกริยาคูดความร้อนในโซน Reduction และ โซน Pyrolysis อุณหภูมิในโซน Combustion จะมีค่าระหว่าง 1,100-1,500°C

4) Reduction Zone แก๊สร้อนที่ผ่านมาจาก Combustion Zone จะทำให้เกิดปฏิกริยา Reduction โดยจะมีอุณหภูมิระหว่าง 500-900°C โดยคาร์บอนที่กำลังลุกไหม้อยู่ จะทำปฏิกริยากับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ก่อให้เกิดแก๊ส คาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน และมีเทน ดังสมการที่ (2.4) ถึง (2.8)



ปฏิกิริยาในสมการที่ (2.4) เรียกว่า Boundouard Reduction และปฏิกิริยาในสมการที่ (2.5) เรียกว่า Water Gas Reduction เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 900°C แก๊สที่ได้จากสมการทั้งสองเป็นแก๊สที่เผาไหม้ได้ และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นแก๊สหลักที่ต้องการ ปริมาณของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในแก๊สเชื้อเพลิงนี้จะขึ้นอยู่กับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ว่าจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนที่ร้อนได้มากน้อยเพียงใด

ในโซนของ Reduction นี้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะดีเพียงใดขึ้นกับอุณหภูมิ และความเร็วของแก๊สที่สัมผัสกับเชื้อเพลิง และพื้นที่ ๆ ผิวสัมผัสของเชื้อเพลิง ขนาดและปริมาณของเชื้อเพลิงที่ใช้ จะมีผลต่อการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง ซึ่งเชื้อเพลิงขนาดใหญ่จะมีอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรต่ำ ทำให้ยากต่อการจุดเผาภายในเตาและจะทำให้เกิดปริมาณของช่องว่างระหว่างเชื้อเพลิงด้วยกันมาก เป็นผลทำให้มีออกซิเจนไหลผ่านเข้าไปในระบบมาก ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นก็จะน้อยตามไปด้วย ทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าต่ำ แต่ถ้าขนาดของเชื้อเพลิงมีขนาดเล็กก็จะทำให้เกิดการสูญเสียความดันภายในเตามาก จึงต้องใช้พัดลมดูดขนาดใหญ่ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานมากยิ่งขึ้นและแก๊สที่ผลิตได้ก็จะมีฝุ่นมากยิ่งขึ้น ขนาดเชื้อเพลิงแข็งที่เหมาะสมควรมีขนาด 20-60 มิลลิเมตร และควรมีขนาดที่คงตัวใกล้เคียงกัน เพราะจะทำให้การถ่ายเทความร้อน อุณหภูมิ ปฏิกิริยาอุณหเคมีในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ (Maa and Bailie, 1973)

นอกจากนี้ถ้าอุณหภูมิในโซน Reduction สูงกว่า 900 °C แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 90% จะถูกทำเปลี่ยนเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และถ้าอุณหภูมิสูงมากกว่า 1,100 °C จะทำให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมดเปลี่ยนเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ นั่นคือประสิทธิภาพของเตาเผาจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของโซน Reduction (Chen et al., 2003)

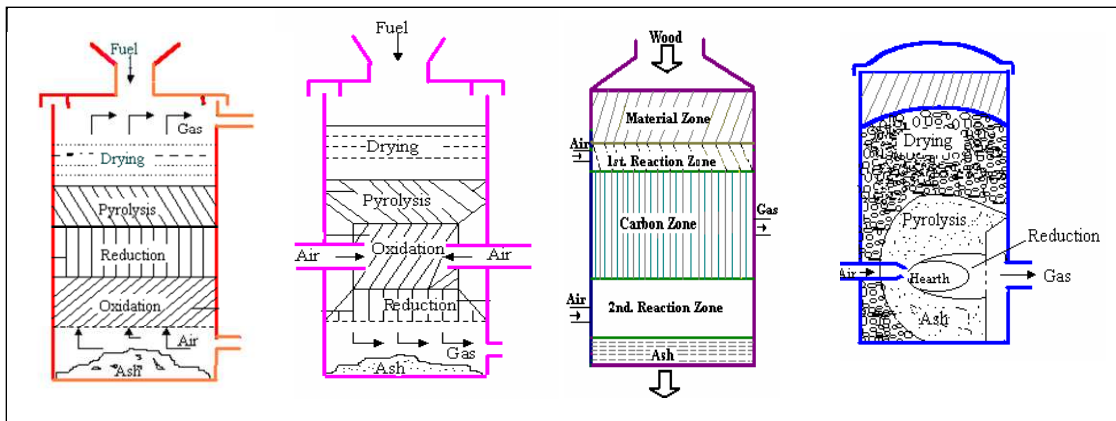
ในขณะที่แก๊สร้อนจากโซน Combustion ไหลเคลื่อนเข้าสู่โซน Reduction จะทำให้อุณหภูมิของแก๊สลดลง เนื่องจากเป็นปฏิกิริยาคูลความร้อน ดังนั้นไอน้ำกับคาร์บอนจะทำปฏิกิริยากันเพื่อก่อให้เกิดแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการที่ (2.6) ซึ่งจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิค่าประมาณ 500-600°C ปฏิกิริยานี้มีความสำคัญเพราะจะทำให้ส่วนผสมของแก๊สไฮโดรเจนในแก๊สเชื้อเพลิงมีค่ามากขึ้น (แก๊สไฮโดรเจนมีผลต่อการจุดระเบิดของเครื่องยนต์สันดาปภายใน) แต่ถ้าในกระบวนการที่มีไอน้ำมากเกินไป จะทำให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน ดังสมการที่ (2.7) ปฏิกิริยานี้เรียกว่า Water Shift Reduction ทำให้ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้มีค่าลดลง ดังนั้นเชื้อเพลิงที่ใช้จะต้องมีความชื้นไม่มากเกินไป นอกจากนี้ในกระบวนการ Reduction แก๊สไฮโดรเจนบางส่วนจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนทำให้เกิดแก๊สมีเทนขึ้น ดังสมการที่ (2.8) ปฏิกิริยานี้เรียกว่า Methane Production

ปฏิกิริยาอุณหเคมีที่ทำให้เกิดแก๊สเชื้อเพลิงดังที่ได้กล่าวข้างต้น เกิดขึ้นจากเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Gasifier) ได้หลายชนิด ซึ่งเตาแต่ละชนิดนั้นจะถูกออกแบบสำหรับการใช้งานที่แตกต่างกัน ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

2.9.2 ชนิดของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Type of Gasifier)

สำหรับชนิดของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Gasifier) แบ่งตามลักษณะการป้อนเชื้อเพลิงได้เป็น 2 แบบคือ แบบคอลัมน์ (Fixed Bed Gasifier) และแบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized Bed Gasifier) ซึ่งมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันไป ตามลักษณะของการนำไปใช้ประโยชน์ และเชื้อเพลิงที่ใช้ (Dutta, 1998) เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบคอลัมน์ เหมาะสมกับเชื้อเพลิงที่มีขนาดใหญ่ รูปร่างคงตัว สามารถใช้กับเชื้อเพลิงที่มีความชื้นสูงได้ การทำงานของระบบไม่ซับซ้อน สามารถนำแก๊สเชื้อเพลิงไปใช้ประโยชน์ได้ง่าย สำหรับเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบฟลูอิดไดซ์เบด เหมาะสำหรับเชื้อเพลิงที่มีขนาดเล็กมาก และต้องใช้ความเร็วของอากาศทำให้เชื้อเพลิงลอยตัวขึ้นมีลักษณะคล้ายของไหล ซึ่งเรียกว่า สภาวะของ Fluidization โดยจะมีสารเฉื่อย (inert material) เช่น ทราช หินปูน เป็นระบบที่ใช้ความดันสูง จึงทำให้การเดินระบบมีความยุ่งยากกว่า โดยทั่วไปจะใช้กับอุตสาหกรรมขนาดใหญ่

วีรชัย อัจหาญ และคณะ (2551) ได้อธิบายว่าเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบคอลัมน์ (Fixed Bed Gasifier) ยังสามารถจำแนกตามทิศทางการป้อนอากาศในเตาคือ ถ้าอากาศถูกป้อนจากด้านล่างขึ้นข้างบนของเตาเรียกว่า Updraft Gasifier และถ้าอากาศถูกป้อนสู่โซนเผาไหม้แล้วไหลลงด้านล่างของเตาเรียกว่า Downdraft Gasifier ส่วนการป้อนอากาศเข้า 2 ทางเรียกว่า Twin-fire และถ้าอากาศเข้าในแนวขวางเรียกว่า Crossdraft Gasifier ดังแสดงในรูปที่ 2.6



ก. Updraft

ข. Downdraft

ค. Twin-fire

ง. Crossdraft

รูปที่ 2.6 เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ (วิรัช อหาญ และคณะ, 2551)

สุวรรณ ปทุมสวัสดิ์ (2549) กล่าวว่าเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบคอลัมน์ (Fixed Bed) ที่นิยมใช้กันจะมี 2 แบบ คือ Updraft Gasifier และ Downdraft Gasifier แต่ทั้งสองแบบก็มีข้อดีข้อเสียต่างกัน

1) Updraft Gasifier : เป็นเทคโนโลยีที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไฟฟ้ากำลังสูง (500 kW ขึ้นไป) หรือใช้งานในการผลิตความร้อน เช่น การนำแก๊สเชื้อเพลิงไปเป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อไอน้ำความดันในการผลิตไอน้ำ แล้วนำไอน้ำที่ผลิตได้มาผลิตไฟฟ้าโดยใช้เครื่องจักรกังหันไอน้ำ สามารถใช้กับเชื้อเพลิงที่มีความชื้นสูง (มากกว่า 50%) ได้แก๊สเชื้อเพลิงที่อุณหภูมิต่ำ แต่มีข้อเสียคือ ปริมาณทาร์ (Tars) สูงมาก ซึ่งมีค่าอยู่ประมาณ 10-100 g/Nm³ (kaupp et al., 1981) หากต้องนำไปใช้กับเครื่องยนต์จะต้องมีระบบทำความสะอาดที่มีประสิทธิภาพ

2) Downdraft Gasifier : เป็นเทคโนโลยีที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก (ขนาดไม่เกิน 500 kW) แต่มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดทาร์ (Tars) เนื่องจากอากาศที่ถูกอัดเข้าทางด้านข้าง จะไหลลงด้านล่างของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง ทาร์ที่ถูกผลิตขึ้นในโซน Pyrolysis จะไหลลงตามอากาศและถูกกำจัดจนเกือบหมดใน โซนของ Combustion หรือ Oxidation เป็นผลให้ระบบนี้มีการเกิดขึ้นของทาร์ (Tars) น้อยกว่าระบบ Updraft Gasifier มาก โดยทั่วไปจะมีค่าประมาณ 50-500 mg/Nm³ (kaupp et al., 1981; Groeneveld et al., 1983; Reed et al., 1983) ข้อจำกัดของระบบนี้คือ เชื้อเพลิงที่ใช้ต้องมีขนาดคงตัวและมีขนาดเล็กโดยประมาณ 20-60 มิลลิเมตร เพื่อป้องกันการอุดตันของเชื้อเพลิงที่อาจไปกั้นการไหลของแก๊สที่ผลิตได้ มีผลการศึกษาของ Earp (1988) ที่ศึกษาถึงขนาดของเชื้อเพลิงที่เหมาะสมสำหรับเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงชนิดไหลลงและได้สรุปว่า ขนาดของ

เชื้อเพลิงไม่ควรเกิน 1/8 ของเส้นผ่านศูนย์กลางของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง และเชื้อเพลิงควรมีขนาดคงตัว ใกล้เคียงกัน จะช่วยให้การถ่ายเทความร้อน อุณหภูมิ และปฏิกิริยาอุณหภูมิในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ และความชื้นของเชื้อเพลิงที่นำมาใช้กับเตาผลิตชนิดนี้ ไม่ควรมีค่าเกิน 25%-30% (สุธรรม ปทุมสวัสดิ์, 2549) นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ Dogru (2000) ที่ทำการศึกษาเกี่ยวกับเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงชนิดไหลลง และได้สรุปว่าถ้าเชื้อเพลิงมีความชื้นสูงจะส่งผลให้ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงลดลง เพราะมีไอน้ำในกระบวนการมากเกินไป

วีรชัย อาหาญ และคณะ (2551) ได้ทำการศึกษาเรื่อง “โรงไฟฟ้าต้นแบบชีวมวลขนาดเล็กสำหรับชุมชนแบบครบวงจร” โดยทำการทดสอบประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของเชื้อเพลิงชีวมวล ประเภทต่าง ๆ 10 ชนิด คือ ไม้กระถินยักษ์ ไม้ยูคาลิปตัส เปลือกไม้ยูคาลิปตัส ปีกไม้ยางพารา ช้างข้าวโพด แกลบ กะลามะพร้าว ทางปาล์ม เหง้ามันสำปะหลัง และเปลือกมันสำปะหลัง โดยทดสอบกับต้นแบบโรงไฟฟ้าชีวมวล ขนาด 100 kW ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ได้สรุปว่า ขนาดและความชื้นของเชื้อเพลิงที่เหมาะสมในการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง สำหรับโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็ก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี คือ ขนาดโดยประมาณอยู่ที่ $40W \times 40L \times 60H \text{ mm}^3$ และ ความชื้นไม่เกิน 15%

2.9.3 คำจำกัดความของทาร์ (Definition of Tars)

ทาร์ (Tars) หมายถึงผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการที่เกิดจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน หรือเกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ลักษณะของทาร์เป็นของเหลวที่มีความหนืดสูง (high viscous) และมีฤทธิ์กัดกร่อน (corrosive) โดยทั่วไปมีสีน้ำตาลเข้มถึงดำ ประกอบไปด้วยสารไฮโดรคาร์บอนจำนวนมาก สมบัติของทาร์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิพบว่า อุณหภูมิในกระบวนการสูงขึ้นจะทำให้สัดส่วนของ H/C ลดลง ดังแสดงในตารางที่ 2.6 ซึ่งเป็นข้อมูลสนับสนุนว่าผลของอุณหภูมิทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบที่อยู่ในทาร์ คือ การเปลี่ยนจากรูปของ Highly Oxygenate Pyrozate เป็น Condense Aromatic นั่นคือ ในสถานะที่อุณหภูมิสูงขึ้น Complex-Phenolics Furans จะหายไปขณะที่ Aromatic ซึ่งมีความคงตัวจะเพิ่มขึ้น (อาภาณี เหลืองนฤมิตชัย, 2538)

ตารางที่ 2.6 ส่วนประกอบทางเคมีของทาร์ (Tars) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ⁽¹⁾

อุณหภูมิปกติ 400-500°C (Conventional Flash Pyrolysis)	อุณหภูมิสูง 600-650°C (Hi-Temperature Flash Pyrolysis)	อุณหภูมิปกติ 700-800°C (Conventional Gasification)	อุณหภูมิสูง 900-1000°C (Hi-Temperature Gasification)
Acid	Benzenes	Naphthalenes	Naphthalene
Aldehydes	Phenols	Acenaphthalenes	Acenaphthalene
Ketone	Catechols	Fluorenes	Phenanthrene
Furan	Naphthalene	Phenanthrenes	Fluoranthrene
Alcohols	Biphenyls	Benzaldehydes	Pyrene
Complex-Oxygenated	Phenanthrenes	Phenols	Acephenanthrylene
Phenols	Benzofurans	Naphtofurans	Benzanthracenes
Guaiacols	Benzaldehydes	Benzanthracenes	Benzopyrenes
Syringols			
Complex-Phenolics			

หมายเหตุ : ⁽¹⁾ จาก อาภาณี เหลืองนฤมิตชัย (2538)

2.9.4 แก๊สเชื้อเพลิงหรือโปรดิวเซอร์แก๊ส

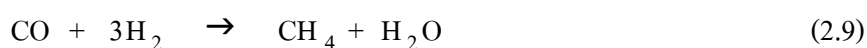
ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ สามารถแบ่งตามค่าความร้อนได้ 3 ประเภทคือ (อาภาณี เหลืองนฤมิตชัย, 2538; Nowell, 1999)

1) การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำ (Low Heating Value Gas) : แก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จะมีค่าความร้อนประมาณ 3.3-5.6 MJ/Nm³ โดยมีองค์ประกอบของแก๊สที่สามารถเผาไหม้ได้ หรือแก๊สที่จุดไฟติด (combustible gas) คือแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และแก๊สไฮโดรเจน (H₂) เป็นแก๊สหลัก และมีแก๊สมีเทน (CH₄) เล็กน้อย ซึ่งเจือจางอยู่ในแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สไนโตรเจน และแก๊สออกซิเจน ซึ่งประเภทนี้เป็นกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันทั่วไปที่ใช้อากาศเพื่อให้เกิดปฏิกิริยา Partial Oxidation

2) การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนปานกลาง (Medium Heating Value Gas) : แก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จะมีค่าความร้อนประมาณ 9.3-20.5 MJ/Nm³ กระบวนการนี้จะใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ เพื่อให้เกิดปฏิกิริยา Partial Oxidation ในสภาวะที่ปราศจากไนโตรเจน เนื่องจากการไม่มี

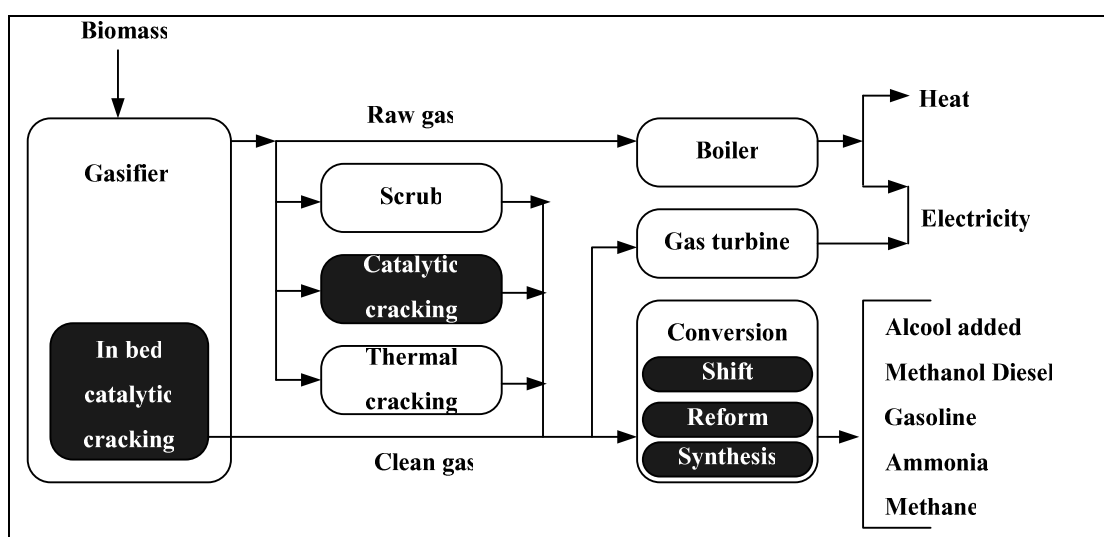
แก๊สไฮโดรเจนเจือปน จะทำให้มีองค์ประกอบของแก๊สที่เผาไหม้ได้เพิ่มขึ้น และค่าความร้อนของแก๊สสูงขึ้น

3) การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนสูง (High Heating Value Gas) : แก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จะมีค่าความร้อนสูงกว่า 20.5 MJ/Nm³ หรือเทียบเท่ากับ Synthesis Gas (SNG) โดยส่วนประกอบของแก๊สนี้คือ แก๊สมีเทนเกือบบริสุทธิ์ ซึ่งโดยทั่วไปจะนำ Medium Heating Value Gas มาเปลี่ยนเป็น High Heating Value Gas โดยใช้กระบวนการสังเคราะห์มีเทน (Methanation) โดยการทำปฏิกิริยาระหว่างแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจน เกิดเป็นแก๊สมีเทนและน้ำ โดยใช้ Catalytic ดังสมการที่ (2.9)



2.9.5 การใช้ประโยชน์จากแก๊สเชื้อเพลิง

แก๊สเชื้อเพลิง หรือ โพรคิวเซอร์แก๊ส ที่ผลิตได้สามารถนำไปใช้งานได้โดยตรง แต่ก่อนนำมาใช้งานจำเป็นต้องผ่านระบบทำความสะอาดแก๊สก่อน และขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้งาน รูปที่ 2.7 แสดงถึงภาพรวมของการใช้ประโยชน์ของแก๊สเชื้อเพลิง โดยแบ่งแนวทางการใช้ประโยชน์หลักได้ 3 ประเภท คือ



รูปที่ 2.7 ภาพรวมของการใช้ประโยชน์แก๊สเชื้อเพลิง (ที่มา : Nowell, 1999)

- 1) พลังงานความร้อนตรง สามารถนำแก๊สเชื้อเพลิง มาใช้เป็นแหล่งพลังงานความร้อนตรง เนื่องจากแก๊สเชื้อเพลิง สามารถส่งไปตามท่อในระยะไกลได้ สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อไอน้ำความดันเพื่อผลิตไอน้ำ และนำไอน้ำมาใช้กับเครื่องจักรกังหันไอน้ำผลิตไฟฟ้า
- 2) ใช้ผลิตไฟฟ้าในเครื่องยนต์สันดาปภายใน โดยนำแก๊สเชื้อเพลิงส่งเข้าเครื่องยนต์สันดาปภายใน เช่น เครื่องยนต์ดีเซล เครื่องยนต์แก๊ส เพื่อผลิตไฟฟ้า ในกรณีนี้แก๊สเชื้อเพลิงต้องมีปริมาณคาร์บอนและฝุ่นปนเปื้อนไม่เกิน 25 mg/Nm^3 (เกียรติไกร อายุวัฒน์ และคณะ, 2549) หรือ 25mg/Nm^3 (Bhattacharya et al., 2001) เพื่อไม่ให้เกิดผลกระทบต่อการใช้งานในเครื่องยนต์
- 3) นำมาใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมเคมี นอกจากการใช้ประโยชน์ดังกล่าวข้างต้น แก๊สเชื้อเพลิง สามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมเคมี เช่น เซลล์เชื้อเพลิงคาร์บอนเดเทลว (molten carbonate fuel cells) และสารตั้งต้นในการผลิตเมทานอล โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม เป็นตัวสังเคราะห์ภายใต้อุณหภูมิและความดันสูง (Jung, 1999)

2.10 การใช้แก๊สเชื้อเพลิงกับเครื่องยนต์สันดาปภายใน

การใช้แก๊สเชื้อเพลิงกับเครื่องยนต์สันดาปภายใน (Internal Combustion Engine) นั้น จะต้องปรับปรุงลักษณะบางประการของเครื่องยนต์เพื่อที่จะทำให้เครื่องยนต์นั้น เหมาะสมกับการใช้แก๊สเชื้อเพลิงเป็นเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ และสามารถทำงานได้ดีใกล้เคียงกันกับเครื่องยนต์แก๊สโซลีน โดยทั่วไปการใช้แก๊สเชื้อเพลิง กับเครื่องยนต์สันดาปภายในสามารถแบ่งออกเป็น 3 วิธี (สมบูรณ์ ศิริพรมงคลชัย, 2546)

- 1) การนำเครื่องยนต์ดีเซลมาใช้ร่วมกับแก๊สเชื้อเพลิง เป็นการใช้เชื้อเพลิงคู่ (Gas-Diesel Engine หรือ Dual-Fuel Engine) โดยใช้แก๊สเชื้อเพลิงผสมกับอากาศเป็นไอดีเข้าห้องเผาไหม้ ส่วนการจุดระเบิดยังใช้น้ำมันดีเซลฉีดเข้าห้องเผาไหม้ วิธีการแบบนี้เครื่องยนต์จะใช้น้ำมันดีเซลในการจุดระเบิดประมาณ 10%-20% ของการใช้เครื่องยนต์ดีเซลปกติ จึงทำให้ประหยัดน้ำมันดีเซลได้ 80%-90% และไม่ต้องมีการดัดแปลงลักษณะการทำงานเครื่องยนต์ดีเซลแต่อย่างใด
- 2) การนำเครื่องยนต์ดีเซลมาดัดแปลงเป็นเครื่องยนต์แก๊สโซลีน เป็นการแปลงเครื่องยนต์ดีเซลเพื่อนำไปใช้กับแก๊สเชื้อเพลิง (Gas-Otto Engine) โดยเปลี่ยนระบบการจุดระเบิดจากเดิมเป็นการจุดระเบิดโดยการอัดเปลี่ยนมาเป็นการจุดระเบิดด้วยประกายไฟจากหัวเทียน วิธีการแบบนี้เครื่องยนต์ต้องได้รับการดัดแปลงโดยการเปลี่ยนอัตราส่วนการอัด (compression ratio) ให้ได้ 10-12 และเพิ่มอุปกรณ์ผสมอากาศกับแก๊สเชื้อเพลิงหรือคาร์บูเรเตอร์ (carburetor) และหัวเทียนเข้าไป ซึ่งเป็นวิธีการที่นิยมใช้เนื่องจากมีราคาถูก

3) การนำเครื่องยนต์แก๊สโซลีนมาใช้กับแก๊สเชื้อเพลิง (Gas-Otto Engine) วิธีการแบบนี้เครื่องยนต์ต้องได้รับการออกแบบให้มีอัตราส่วนการอัดให้ได้ 10-12 และมีระบบผสมแก๊สเชื้อเพลิงกับอากาศจากโรงงานผู้ผลิตเครื่องยนต์ ซึ่งเครื่องยนต์ประเภทนี้จะมีประสิทธิภาพสูง แต่มีราคาสูงกว่าประเภทที่ 2 ประมาณ 2 เท่า

สำหรับการใช้เครื่องยนต์แก๊สเชื้อเพลิงเพื่อผลิตไฟฟ้า สามารถนำเครื่องยนต์แก๊สเชื้อเพลิงมาต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่นิยมใช้มีอยู่ 2 ชนิด คือ

1) ไดนาโม (Generator) วิธีนี้จะต้องมีอุปกรณ์หรือวงจรควบคุมความเร็วรอบของการทำงานให้คงที่ เพื่อให้แรงดันและความถี่ทางไฟฟ้าที่ผลิตออกมามีความคงที่ ซึ่งถ้าหากแรงดันและความถี่ไม่มีความคงที่ หากนำอุปกรณ์ทางไฟฟ้าต่อใช้งานจะทำให้อุปกรณ์เสียหายได้

2) มอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction Motor) วิธีนี้จะใช้หลักการที่ว่า เมื่อเครื่องยนต์หมุนด้วยความเร็วรอบมากกว่าความเร็วซิงโครนัส (synchronous speed) ของมอเตอร์ มอเตอร์จะทำหน้าที่เป็นไดนาโม ข้อดีของวิธีนี้คือ ระบบผลิตไฟฟ้าสามารถต่อพ่วงเข้ากับระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าได้ทันที โดยระบบจะผลิตเฉพาะไฟฟ้า ส่วนแรงดันและความถี่จะใช้ของการไฟฟ้าฯ ทำให้ไม่เกิดผลเปลี่ยนแปลงต่อแรงดันและความถี่ ซึ่งหากนำอุปกรณ์ทางไฟฟ้ามาต่อใช้งาน จะไม่ทำให้อุปกรณ์เสียหายแต่อย่างใด การนำมอเตอร์เหนี่ยวนำมาต่อพ่วงกับเครื่องยนต์แก๊สเชื้อเพลิง จะต้องคำนึงถึงความเหมาะสมของขนาดมอเตอร์และเครื่องยนต์ เพื่อให้ระบบผลิตไฟฟ้าสามารถทำงานได้ประสิทธิภาพสูงสุด โดยมอเตอร์จะต้องมีความเร็วรอบและแรงบิดใกล้เคียงกับแรงบิดสูงสุดของเครื่องยนต์

2.11 มลพิษและของเสียที่เกิดจากระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

การนำแก๊สเชื้อเพลิงมาใช้งานมีความจำเป็นที่จะต้องทำความสะอาดแก๊สก่อน (Pre-treatment Gas) เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นต่อระบบ และเครื่องยนต์สันดาปภายใน เนื่องจากส่วนประกอบที่อันตราย เช่น ทาร์ (Tars) และฝุ่นขนาดเล็ก (dust) การกำจัดองค์ประกอบปนเปื้อนช่วยเพิ่มค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงได้ และสามารถหลีกเลี่ยงมลพิษที่จะเกิดขึ้นต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งระบบทำความสะอาดแก๊สที่นำมาใช้จะขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีที่เลือก และวัตถุประสงค์ของการใช้ประโยชน์แก๊สเชื้อเพลิง (Bridgwater, 1994b) ในตารางที่ 2.7 แสดงชนิดของมลสารและปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบผลิตแก๊สเชื้อเพลิง

ตารางที่ 2.7 ชนิดของมลสารและปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบผลิตแก๊สเชื้อเพลิง⁽¹⁾

ชนิดมลสาร	ลักษณะที่ปรากฏ	ปัญหา
มลสารหรืออนุภาคขนาดเล็ก	ฝุ่น (dust) ขี้เถ้า (ash) เถ้าลอย (fly ash) ผงถ่าน (char) องค์กรประกอบที่ควบแน่น (condensed compound)	ทำให้เกิดการกัดกร่อนของชิ้นส่วนที่เป็นโลหะในระบบและมลภาวะทางสิ่งแวดล้อม
องค์กรประกอบอัลคาไลน์โลหะ (Alkali Metal)	องค์กรประกอบของโซเดียม (Na) และโพแทสเซียม (K) ที่เกิดในสภาวะการกลายเป็นไอน้ำกลายเป็นแอสล็ก (slag) หรือมีสภาวะกลายเป็นไอ	ทำให้เกิดการกัดกร่อนชิ้นส่วนของโลหะที่อุณหภูมิสูง เกิดการหลุดลอกของชั้นผิวเคลือบโลหะ
ออกไซด์ของไนโตรเจน	เกิดปัญหามลภาวะอากาศ โดยเกิด NO _x ระหว่างกระบวนการเผาไหม้	เกิดมลภาวะของ NO _x
ซัลเฟอร์และคลอรีน	บางส่วนคงเหลือในเถ้าหนัก (bottom ash) บางส่วนเกิดสภาวะการกลายเป็นไอ หรือ แก๊ส	ทำให้เกิดมลภาวะที่เป็นอันตรายและเกิดการกัดกร่อนโลหะ เช่น H ₂ S HCl SO _x
ทาร์ (Tars)	ของเหลวที่มีความหนืดสูง ส่วนใหญ่เป็นสารไฮโดรคาร์บอน	ทำให้วาล์วและระบบบรอกอดูดตันและกัดกร่อนชิ้นส่วนโลหะ

หมายเหตุ : ⁽¹⁾ จาก Belgiorno et al. (2003)

จากข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 2.7 พบว่าชนิดของมลสารที่เกิดขึ้น นอกจากจะเป็นปัญหาต่อระบบ ยังเป็นมลพิษที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้วย การมีระบบทำความสะอาดแก๊สจึงเป็นเรื่องสำคัญ (Quaak et al., 1999) ซึ่งระบบทำความสะอาดแก๊สเชื้อเพลิงที่นิยมใช้โดยทั่วไปเพื่อลดปัญหาดังกล่าว ดังแสดงในตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 ชนิดของมลสารและระบบทำความสะอาดแก๊สเชื้อเพลิง⁽¹⁾

ชนิดมลสาร	ระดับมลพิษ (g/Nm ³)	ระบบทำความสะอาด
มลสารหรืออนุภาค ขนาดเล็ก	3-70	ไซโคลน ระบบกรอง (filtration) ระบบสครับเบอร์ (scrubber)
องค์ประกอบอัลคาไลน์ โลหะ (Alkali Metal)	-	ระบบการควบแน่น (condensation) ระบบกรอง (filtration)
ออกไซด์ของไนโตรเจน	1.5-3.0	ระบบสครับเบอร์ (scrubber) Selective Catalytic Reduction (SCR)
ทาร์ (Tars)	10-100	การแตกตัวโดยใช้ความร้อน (thermal cracking) การแตกตัวโดยใช้สารเร่ง (catalytic cracking) ระบบการควบแน่น (condensation) ระบบสครับเบอร์ (scrubber)
ซัลเฟอร์และคลอรีน	2.5-3.5	ระบบสครับเบอร์โดยใช้โซเดียมคาร์บอเนต หรือปูน ขาว (sodium bicarbonate หรือ lime scrubbing)

หมายเหตุ : ⁽¹⁾ จาก Belgiorno et al. (2003)

Belgiorno et al. (2003) ได้อธิบายว่านอกจากการลดปัญหาการกัดกร่อน และมลพิษ
สิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นในระบบผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแล้ว ยังมีของเสียและมลพิษสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้น
จากระบบทำความสะอาดแก๊ส จำเป็นต้องมีการจัดการของเสียเหล่านี้ต่อไป

โดยสรุปมลพิษและของเสีย ที่เกิดจากระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ประกอบด้วย

1) มลพิษอากาศ (air pollution) การปลดปล่อยมลพิษทางอากาศของระบบแก๊สซิฟิเคชัน
ขึ้นอยู่กับ การติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมมลพิษ และเครื่องยนต์สันดาปภายในที่นำมาใช้ Belgiorno et al.
(2003) กล่าวว่า ในกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงโดยตรง จะเกิดออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x)
ออกไซด์ของซัลเฟอร์ (SO_x) และองค์ประกอบของไดออกซิน (PCDD/F) สูงกว่ากระบวนการแก๊ส
ซิฟิเคชัน แต่อย่างไรก็ตามในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันก็จำเป็นต้องมีระบบ Pre-treatment Gas
เพื่อกำจัดองค์ประกอบต่าง ๆ ที่อาจก่อให้เกิดมลภาวะได้

2) ของเสียในรูปของแข็ง (solid waste) ของเสียในรูปของแข็งที่เกิดจากระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ได้แก่ ถ่าน จี๊ถั่ว ซึ่งจะเกิดขึ้นประมาณ 3-20% ของเชื้อเพลิงที่ป้อนสู่เตา ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของเชื้อเพลิงแต่ละชนิด (Kirubakaran et al., 2007) ในกรณีที่เป็นเชื้อเพลิงชีวมวล เช่น แกลบ ไม้กระถินยักษ์ ไม้ยูคาลิปตัส เป็นต้น ของเสียเหล่านี้จะถูกนำไปใช้เป็นถ่านหุงต้ม หรือ ถ่านกัมมันต์ได้ เนื่องจากถ่านที่ได้มีค่าความร้อน และค่าการดูดซับไอโอดีนสูง ตลอดจนมีปริมาณสารระเหยต่ำซึ่งเป็นผลให้เป็นถ่านที่เกิดขึ้นมีสภาพไร้ควัน (ทิพย์สุภินทร์ หินชุย และคณะ, 2551) กรณีที่ใช้เชื้อเพลิงกากตะกอนจำเป็นต้องนำไปกำจัดต่อโดยการฝังกลบ เนื่องจากมีโลหะหนักคงเหลืออยู่ หรืออาจนำไปใช้ในกระบวนการอุตสาหกรรม เช่น ผงซีเมนต์ (Belgiomo et al., 2003)

3) น้ำเสียที่เกิดจากระบบทำความสะอาดแก๊ส (wastewater) เช่น น้ำที่เกิดจากระบบสครับเบอร์ (scrubber และ condense scrubber) ซึ่งน้ำเสียที่เกิดขึ้น มีทั้งมลสารที่อยู่ในรูปที่ละลายน้ำ และไม่ละลายน้ำ มลสารในรูปที่ละลายน้ำ เช่น Acetic Acid Sulphur Phenol Oxygenated organic compounds เป็นต้น สำหรับส่วนที่ไม่ละลายน้ำส่วนใหญ่คือองค์ประกอบของทาร์ (Tars) และของแข็งแขวนลอย (Suspended Solid) ดังนั้นน้ำเสียที่เกิดขึ้นจะต้องถูกนำไปบำบัดอย่างถูกวิธี (Belgiomo et al., 2003)

มีผลการศึกษาของ Wu et al., (2002) ซึ่งทำการศึกษาลึกลงไปถึงความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ในการผลิตไฟฟ้าด้วยเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน โดยใช้เชื้อเพลิงชีวมวล ได้สรุปว่ามีความเป็นไปได้ในการผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงชีวมวล แต่การศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องของ มลภาวะต่าง ๆ ที่เกิดจากระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง ก็เป็นเรื่องที่จำเป็น เพื่อป้องกันมลพิษต่าง ๆ ที่จะปลดปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม

Malkow (2003) ได้ศึกษาความก้าวหน้าของเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันและไพโรไลซิสกับการนำมาประยุกต์ใช้กับของเสีย และมีกรณีศึกษาที่น่าสนใจคือ การนำเอากระบวนการแก๊สซิฟิเคชันมาใช้กับขยะมูลฝอย โดยต้นแบบนี้มีขนาด 1 ตันต่อชั่วโมง ซึ่งเดินระบบอยู่ที่สนามบิน Budapest ประเทศฮังการี เพื่อใช้กำจัดขยะจากอุตสาหกรรม ขั้นตอนการทำงานคือขยะจะถูกป้อนผ่านไซร่อนบแห้งและผ่านเข้าสู่ไซร่อนไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 600-700°C ซึ่งออกแบบเพื่อให้เกิดการเผาไหม้สารอินทรีย์ที่ระเหยออกมา และผ่านเข้าสู่ไซร่อนเผาไหม้ ที่อุณหภูมิประมาณ 800°C จากนั้นผ่านเข้าสู่ไซร่อนเผาไหม้ที่สองอุณหภูมิประมาณ 1,100-1,200°C แก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จะถูกใช้กับเครื่องกำเนิดไอน้ำเพื่อผลิตไฟฟ้า สำหรับการควบคุมมลพิษสิ่งแวดล้อม ของเสียที่เกิดขึ้นคือถ่านและเถ้าที่มีโลหะหนักคงเหลืออยู่จะถูกนำไปกำจัดต่อไป สำหรับการควบคุมมลพิษอากาศ ไอเสียที่เกิดขึ้นจะถูกบำบัดผ่านระบบสครับเบอร์แบบแห้ง (Dry Scrubbing Process) โดยใช้โซเดียมคาร์โบเนตและปูนขาวเป็นตัวดูดซับ จากนั้นจะผ่านถุงกรองอากาศ (Bag Filter) ก่อนที่จะปลดปล่อยสู่บรรยากาศ

ซึ่งผลการตรวจวัดมลพิษอากาศที่ปลดปล่อยจากระบบพบว่ามีความน้อยมาก และอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ดังแสดงใน ตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 ผลการตรวจวัดมลพิษอากาศที่ปลดปล่อยจากโรงไฟฟ้าที่ใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน⁽¹⁾

พารามิเตอร์ที่ตรวจวัด	ค่ามาตรฐาน (European Standard) mg/Nm ³	ผลตรวจวัดเฉลี่ย mg/Nm ³
ฝุ่นขนาดเล็ก	10	4.15-5.25
แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์	50	0.6-5.6
ออกไซด์ของไนโตรเจน	200	61.3-188.7
คาร์บอนมอนนอกไซด์	50	0.5-2.5
ไฮโดรคลอริก	10	1.73-4.93
ไฮโดรเจนฟลูออไรด์	1	<0.1
ไฮโดรคาร์บอน	10	0.19-0.49
ออกไซด์ปรอท	0.05	0.0322
แคดเมียม	0.05	0.00084-0.00096
ออกไซด์โลหะ (As Se Ni Co Te)	0.5	0.0242-0.0345
ออกไซด์โลหะ (Pb Cr Cu V Sn Mn Sb)	0.5	0.0589-0.0807
องค์ประกอบของไดออกซิน	0.1 ng/Nm ³	0.002 ng/Nm ³

หมายเหตุ : ⁽¹⁾ จาก Malkow (2003)

สำหรับความก้าวหน้าของเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันในประเทศไทยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้กับการจัดการของเสีย สถานภาพยังจัดอยู่ในขั้นวิจัยและพัฒนาในห้องปฏิบัติการ

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันกับกากตะกอนน้ำเสียสรุปได้ดังต่อไปนี้

Mckendry (2002) กล่าวว่าชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่สำคัญ เนื่องจากเป็นแหล่งพลังงานที่มีอยู่มาก และชีวมวลสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้โดยตรง หรือนำมาเปลี่ยนรูปก่อนนำไปใช้ (Biomass Energy Conversion) เพื่อความสะดวกในการใช้งาน การเปลี่ยนรูปของชีวมวลให้เป็นพลังงานโดยใช้กระบวนการทางเคมีความร้อน (Thermochemical Conversion) เช่น การนำมาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Gasification Process) และการแยกสลายด้วยความร้อน (Pyrolysis Process) เป็นต้น

Conesa et al. (1998) กล่าวว่า กากตะกอนเป็นชีวมวลที่สามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานได้ โดยผ่านกระบวนการไพโรไลซิสและแก๊สซิฟิเคชัน ซึ่งเป็นกระบวนการให้ความร้อนแก่กากตะกอน ทำให้เกิดการสลายตัวทางเคมีได้ผลิตภัณฑ์เป็นถ่านชาร์ (Char) ทาร์ (Tars) และแก๊สไฮโดรคาร์บอนที่มีค่าความร้อนสูง สามารถนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญในอนาคต โดยไม่ก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม เนื่องจากกากตะกอนมีซัลเฟอร์และไนโตรเจนต่ำ ไม่เพียงแต่ช่วยในด้านเศรษฐกิจ แต่ยังสามารถช่วยลดปริมาณกากตะกอนในระบบบำบัดน้ำเสียได้ด้วย

Midilli et al. (2000) ได้ทำการศึกษาการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงโดยใช้เตาผลิตแก๊สชนิดไหลลง (Downdraft Gasification) โดยใช้กากตะกอนเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งมีการเตรียมเป็นเชื้อเพลิงให้ได้ขนาด $350 \times 10 \times 5$ มิลลิเมตร และมีความชื้นเท่ากับ 11.75% ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงกากตะกอนมีค่าเท่ากับ 17.14 MJ/kg จากผลการทดลองสรุปได้ว่า สัดส่วนของแก๊สที่เผาไหม้อยู่ระหว่าง 19-23% โดยอัตราการผลิตแก๊สที่เผาไหม้ได้มีดังนี้ H_2 CO CH_4 เท่ากับ 10.79%, 2.07%, 7.02% ตามลำดับ มีทาร์ (Tars) ที่เกิดจากการเผาไหม้ต่ำกว่า 0.1% ของจำนวนชีวมวลทั้งหมดที่ป้อนเข้าไปในกระบวนการเผาไหม้ และได้กล่าวว่าเพิ่มเติมว่ากากตะกอนสามารถนำมาเป็นเชื้อเพลิงใช้ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันได้จริง ซึ่งจะเป็นพลังงานทดแทนสำหรับอนาคตได้

Dogru et al. (2002) ได้ทำการศึกษาการผลิตแก๊สโดยใช้เตาผลิตแก๊สชนิดไหลลง (Downdraft Gasification) และใช้กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนเป็นเชื้อเพลิง โดยทดสอบกับโรงไฟฟ้าต้นแบบขนาด 5 kW เตรียมเชื้อเพลิงขนาดเท่ากับ $350 \times 10 \times 5$ มิลลิเมตร วิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของกากตะกอน มีความหนาแน่นเท่ากับ 314.33 kg/m^3 และความหนาแน่นปรกติ เท่ากับ 207.5 kg/m^3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate Analysis) มีความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว และปริมาณเถ้า เท่ากับ $11.75 \pm 0.31\%$, $53.48 \pm 1.69\%$, $11.27 \pm 1.17\%$ และ $23.51 \pm 0.33\%$ ตามลำดับ มีค่าความร้อนเฉลี่ยเท่ากับ $17.14 \pm 0.36 \text{ MJ/kg}$ องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) มีปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ เท่ากับ

39.48±0.30%, 6.19±0.12%, 25.46±0.50%, 3.93±0.17% และ 1.45±0.34% ตามลำดับ จากผลการศึกษาลักษณะของแก๊สที่เผาไหม้ได้ประกอบด้วย H_2 , CH_4 , CO , C_2H_2 และ C_2H_6 มีค่าเท่ากับ 8.89-11.17%, 1.26-2.09%, 6.28-10.77%, 0.95% และ 0.15-0.27% ตามลำดับ แก๊สเชื้อเพลิงมีค่าความร้อนประมาณ 4 MJ/Nm³ โดยอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่เหมาะสมของระบบนี้เท่ากับ 3.69-3.71 kg/hr ±1.43% และอัตราการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสูงสุดของระบบเท่ากับ 8.5-8.7 Nm³/hr และพบว่าแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้สามารถผลิตไฟฟ้าโดยเครื่องยนต์สันดาปภายในได้ถึง 5 kW โดยมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงถึง 40% นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้เตาผลิตแก๊สชนิดไหลลงมีข้อดี คือ แก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้มีคาร์บอนเป็นน้อย ซึ่งจะเหมาะสมในการนำไปใช้งานกับเครื่องยนต์สันดาปภายในได้ดี

Petersen et al. (2005) ได้ทำการทดลองออกแบบจำลอง Circulating Fluidized Bed สำหรับใช้กับกากตะกอน ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate Analysis) มีความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณขี้เถ้า และค่าความร้อน เท่ากับ 7.3%, 83.4%, 42.1% และ 10.0 MJ/kg ตามลำดับ องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) มีปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ เท่ากับ 50.5%, 6.6%, 34.5%, 7.1% และ 1.2% ตามลำดับ ผลการทดสอบลักษณะของแก๊สที่เผาไหม้ได้ประกอบด้วย H_2 , CH_4 , CO และ C_2H_4 เท่ากับ 6.1%, 3.6%, 4.8% และ 1.5% ตามลำดับ สำหรับต้นแบบยังอยู่ในช่วงวิจัยและพัฒนา

Manya et al. (2006) ได้ทำการทดลองออกแบบจำลอง Fluidized Bed Gasification สำหรับใช้กับกากตะกอนจากน้ำเสียชุมชนที่ใช้ระบบ Anaerobic Digestion ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของกากตะกอนแบบประมาณ (Proximate Analysis) พบว่า ความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณขี้เถ้า ปริมาณคาร์บอนคงตัว และค่าความร้อน มีค่าเท่ากับ 8.9%, 42.3%, 42.1%, 6.7% และ 10.26 MJ/kg ตามลำดับ องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) มีปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และ ซัลเฟอร์ เท่ากับ 55.3%, 6.7%, 28.1%, 8.2% และ 1.8% ตามลำดับ ผลการทดสอบลักษณะของแก๊สที่เผาไหม้โดยใช้ Micro Gas Chromatograph (Agilent 3000A) ด้วยระบบ Online ได้ประกอบด้วย N_2 , O_2 , H_2 , CO , CO_2 , CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6 , H_2S สำหรับต้นแบบยังอยู่ในช่วงวิจัยและพัฒนา

Groß et al. (2007) ทำการศึกษาการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงและไฟฟ้าโดยใช้ Fluidized Bed Gasification กับกากตะกอนจากน้ำเสียชุมชน กับโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม (Combined Heat and Power: CHP) ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของกากตะกอนแบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) มีปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ คลอรีน และฟลูออรีน มีค่าเท่ากับ 21.81%, 3.66%, 18.7%, 3.94%, 0.85%, 0.057% และ 0.018% และมีค่าความร้อน เท่ากับ 14 MJ/kg จากผลการศึกษาลักษณะของแก๊สที่ผลิตได้ประกอบด้วย H_2 , CH_4 , CO , CO_2 , N_2 , O_2 และ SO_2 มีค่า

เท่ากับ 11.0%, 2.0%, 24.0%, 9.0%, 46%, 0.7% และ 0.3% ตามลำดับ แก๊สเชื้อเพลิงมีค่าความร้อนประมาณ 4.6 MJ/Nm^3 และมีการปนเปื้อนทาร์ (Tars) ประมาณ 10 mg/Nm^3 โดยมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเท่ากับ 69% ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 22%

ด้านมลพิษที่เกิดจากการใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน พบว่าเทคโนโลยีนี้มีจุดดึงดูดที่น่าสนใจอยู่ที่การปล่อยมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมมีอัตราที่ต่ำมาก ถือเป็นเทคโนโลยีที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งมีงานวิจัยที่สนับสนุนดังต่อไปนี้

Helble et al. (1995) ได้ศึกษาและทดลองหาองค์ประกอบของโลหะหนักที่เกิดขึ้นจากการใช้เชื้อเพลิงถ่านหินเกรดบิทูมินัสในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ผลการศึกษาพบว่าองค์ประกอบของโลหะหนักได้แก่ Cd Cr Co Mn Ni U และ Th โดยส่วนใหญ่จะคงอยู่ในถ่านหิน (Bottom ash) ที่ออกจากเตาผลิตแก๊ส และยังคงมีบางส่วนที่เป็นถ่านหินขนาดเล็ก (Fly ash) ปนเปื้อนไปกับฝุ่น ซึ่งสามารถกำจัดได้โดยใช้ไซโคลอน แต่สำหรับ As Se Sb Pb และ Hg เมื่อถูกกระตุ้นโดยปฏิกิริยาอุณหภูมิในเตาผลิตแก๊สจะระเหยกลายเป็นสถานะไอ (vapor) ซึ่งการกำจัดต้องทำให้แก๊สถูกลดอุณหภูมิและควบแน่นอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะกลายเป็นละอองของเหลวแขวนลอย (aerosol) แล้วใช้ระบบกรองเพื่อแยกอนุภาคเหล่านี้ออกไป สำหรับกรณีที่น่ากังวลร้อนไปใช้งานโดยตรง (เช่น Turbine Combustor) แก๊สร้อนเหล่านี้จะถูกเผาไหม้โดยทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ ซึ่งมีผลให้โลหะที่อยู่ในสถานะแก๊ส ถูกเปลี่ยนเป็นสถานะของแข็งหรือที่เรียกว่าออกไซด์ของโลหะหนัก และสามารถกำจัดได้โดยใช้ระบบทำความสะอาดแก๊สไอเสียก่อนปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม

Medcalf et al. (1998) ได้ทำการศึกษาปฏิกิริยาการเผาไหม้ของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันกับอัตราการเกิดองค์ประกอบของซัลเฟอร์จากการใช้เชื้อเพลิงถ่านหินเกรดซับบิทูมินัสโดยศึกษาในโซนที่เรียกว่า Incandescent Thermal Zone (ITZ) และได้อ้างถึงทฤษฎีที่กล่าวว่าเมื่อเกิดการเผาไหม้แก๊สร้อนจากโซน Combustion ที่มีอุณหภูมิประมาณ 1500°C แก๊สจะไหลเคลื่อนเข้าสู่โซน Reduction จะทำให้อุณหภูมิของแก๊สลดลง โดยมีอุณหภูมิประมาณ 500°C ปฏิกิริยาคัดความร้อนที่เกิดขึ้นในภาวะที่มีออกซิเจนจำกัดเป็นผลให้อัตราการเกิดแก๊สพิษ (Dioxins Dibenzofurans SO_x NO_x) เกิดขึ้นได้น้อยมาก และทำการศึกษาเปรียบเทียบกับ Thermodynamic Modeling เพื่อทำนายองค์ประกอบของซัลเฟอร์ จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยการทดลองใช้ ซอฟต์แวร์เพื่อทำนายซึ่งเรียกว่า Available Software Package เมื่อนำผลการทดลองจาก Thermodynamic Modeling นำมาคำนวณโดยใช้โปรแกรมองค์ประกอบของซัลเฟอร์ที่ประกอบไปด้วย H_2S COS CS_2 S_2 S H_2S_2 พบว่ามีสัดส่วนของ H_2S COS เกิดขึ้นสูงที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการศึกษาปฏิกิริยาการเผาไหม้ของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยการเก็บแก๊สที่ผลิตได้มาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Gas Chromatograph ได้สรุปว่าองค์ประกอบของซัลเฟอร์จะอยู่ในรูปของ H_2S เป็นส่วนใหญ่ ส่วน SO_2

ตรวจไม่พบ แสดงให้เห็นว่าเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการจัดการของเสียที่มีองค์ประกอบของซัลเฟอร์สูงได้ เนื่องจากมีการปลดปล่อยแก๊สมลพิษในรูป SO_2 ที่ต่ำมากถึงตรวจไม่พบ หากเปรียบเทียบกับเทคโนโลยีการเผาไหม้โดยตรง

Marrero et al. (2004) ได้ศึกษาและทำการทดลองหาองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงและการปลดปล่อยปริมาณโลหะหนักจากการใช้เชื้อเพลิงกากตะกอนในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ผลการทดสอบองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันโดยใช้ Gas Chromatography ประกอบด้วย H_2 , CH_4 , CO และ CO_2 เท่ากับ 13.6%, 4.3%, 19.1%, 56.2% ตามลำดับ ผลการศึกษาการปลดปล่อยปริมาณโลหะหนักพบว่า โลหะหนักได้แก่ Cd Sr Cs Co As และ Cu จะคงเหลืออยู่ในรูปกากหรือเถ้าหนัก (Bottom ash) เป็นส่วนใหญ่ภายหลังปฏิกิริยาสิ้นสุดลง แต่พบว่า Hg มีสถานะเป็นไอ การกำจัดต้องลดอุณหภูมิและควมแน่นให้กลายเป็นละอองของเหลวแขวนลอย (Aerosol)

Vervaeke et al. (2006) ได้ศึกษาการปลดปล่อยปริมาณโลหะหนักจากไม้หลิวที่ถูกปลูกในพื้นที่ที่มีโลหะหนักปนเปื้อนสูง โดยทดสอบกับโรงไฟฟ้าขนาด 100 kW ที่ใช้กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันกับเตาผลิตแก๊สชนิดไหลลง (Downdraft Gasification) โดยทำการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก ใน 3 จุด คือ 1) เถ้าหนักและเถ้าหลอม (Slag) ที่ออกจากเตาผลิตแก๊ส 2) เถ้าและฝุ่นในไซโคลน 3) เถ้าลอยที่ผ่านระบบ Condense Scrubber ซึ่งผลการศึกษพบว่าปริมาณโลหะหนักได้แก่ Cd Cr Cu และ Ni โดยส่วนใหญ่จะคงอยู่ในเถ้าหนักและเถ้าหลอมที่ออกจากเตาผลิตแก๊ส แต่ยังคงมีบางส่วนที่ปนเปื้อนไปกับเถ้าและฝุ่นขนาดเล็ก จึงถูกพบในไซโคลน นอกจากนี้ยังพบว่า Zn และ Pb บางส่วนจะอยู่ในสถานะแก๊สหรือเป็นไอโลหะ แต่เมื่อแก๊สถูกลดอุณหภูมิและควมแน่นในระบบ Condense Scrubber จะทำให้ Zn และ Pb ควมแน่นกลายเป็นละอองของเหลวแขวนลอย (Aerosol)

Kwak et al. (2006) ได้ศึกษามลพิษสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากการใช้ขยะชุมชนมาเป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ทั้งนี้โรงงานต้นแบบสามารถกำจัดขยะได้เท่ากับ 3 ตันต่อวัน ในด้านการผลิตพลังงานพบว่าแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้มีค่าความร้อนสูงอยู่ในช่วง 8-10.2 MJ/Nm³ สำหรับผลการศึกษาด้านมลพิษสิ่งแวดล้อมพบว่า องค์ประกอบคลอรีน (Polychlorinated Dibenzop-dioxine/furan) จะถูกทำลายที่อุณหภูมิสูงในระหว่างเกิดปฏิกิริยาอุณหภูมิในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจะมีสถานะเป็นทั้งแก๊สและของเหลว แต่เมื่อผ่านระบบควมแน่นและลดอุณหภูมิแก๊สแล้ว องค์ประกอบเหล่านี้ก็จะถูกกำจัดออกไป สำหรับองค์ประกอบของโลหะหนักได้แก่ Cr Mn Cu As Cd และ Hg จะถูกพบในเถ้าหนักและเถ้าหลอมที่ออกจากเตาผลิตแก๊ส ส่วน Zn และ Pb ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของไอโลหะ ซึ่งถูกกำจัดในระบบ Condense Scrubber ในส่วนของแก๊สไอเสียที่ปลดปล่อยจากระบบพบว่ามีความอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานการควบคุมมลพิษอากาศ (Korean Emission

Standards) ทั้งนี้ก็วิจัยได้สนับสนุนว่า เทคโนโลยีดังกล่าวมีความเหมาะสมและเป็นทางเลือกใหม่ของการผลิตพลังงานทดแทน เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและยังมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

Pinto et al. (2007) ได้ศึกษาการปลดปล่อยปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ องค์กรประกอบคลอรีน และโลหะหนักจากการใช้เชื้อเพลิงถ่านหินร่วมกับขยะพลาสติกที่มีองค์ประกอบของธาตุกลุ่มฮาโลเจน ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ซึ่งผลการศึกษาพบว่า องค์ประกอบของธาตุในกลุ่มฮาโลเจน (Cl F) จะถูกทำลายที่อุณหภูมิสูงในระหว่างเกิดปฏิกิริยาอุณหภูมิในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง จะมีสถานะเป็นทั้งแก๊สและของเหลว แต่เมื่อผ่านระบบควบแน่นและลดอุณหภูมิแก๊สแล้ว องค์ประกอบเหล่านี้จะถูกพบในรูป HCl และ HF สำหรับโลหะหนักโดยส่วนใหญ่จะคงอยู่ในเถ้าหนักและเถ้าหลอมที่ออกจากเตาผลิตแก๊ส แต่ยังคงมีบางส่วนที่ปนเปื้อนไปกับเถ้าลอยและฝุ่นขนาดเล็ก และองค์ประกอบของซัลเฟอร์จะอยู่ในรูปของ H_2S เป็นส่วนใหญ่

2.13 ความสำคัญของปัญหา

ในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมฟอกย้อม มีการใช้ทรัพยากรหลักที่สำคัญ ได้แก่ น้ำ พลังงาน และวัตถุดิบ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ตามความต้องการ แต่ในขณะเดียวกันกระบวนการผลิตก็ก่อให้เกิดของเสียและมลพิษขึ้นเช่นเดียวกัน มลพิษทางน้ำเป็นมลพิษหลักที่ต้องมีการบำบัด ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียเมื่อสิ้นสุดกระบวนการแล้วนั้นก็ยังคงเหลือกากตะกอนน้ำเสียซึ่งต้องมีการกำจัดต่อไป ในปัจจุบันกากตะกอนเหล่านี้ถูกนำไปกำจัดโดยวิธีฝังกลบ ซึ่งนอกจากจะสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายแล้ว หากใช้วิธีปฏิบัติที่ไม่ได้มาตรฐานอาจเพิ่มมลภาวะทั้งต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมได้ อย่งไรก็ดีกากตะกอนเหล่านี้ก็สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ จากการค้นคว้างานวิจัยต่าง ๆ ทำให้ทราบว่ากากตะกอนมีสมบัติของการเป็นเชื้อเพลิงเทียบเท่ากับชีวมวลอื่น ๆ ดังนั้นการศึกษาเพื่อประยุกต์ระหว่างการจัดกากตะกอนที่เป็นของเสียให้เกิดเป็นพลังงาน (waste to energy) โดยนำกากตะกอนมาใช้เป็นเชื้อเพลิง (Solid Fuel) จึงเป็นอีกทางหนึ่งของการกำจัดของเสียเพื่อเป็นพลังงานที่น่าสนใจ

การกำจัดกากตะกอนควบคู่ไปกับการผลิตพลังงานมีหลายวิธี และเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) หรือการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง ถือเป็นอีกวิธีหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่อาศัยกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางอุณหภูมิ ภายใต้สภาวะจำกัดอากาศหรือออกซิเจน ซึ่งเปลี่ยนเชื้อเพลิงแข็งให้เป็นแก๊สเชื้อเพลิงที่สามารถนำไปเผาไหม้ได้ ประกอบด้วย แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แก๊สไฮโดรเจน (H_2) และแก๊สมีเทน (CH_4) แก๊สเชื้อเพลิงนี้สามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้โดยตรงโดยส่งเข้าเครื่องยนต์สันดาปภายใน (Internal Combustion Engine) เพื่อผลิตไฟฟ้า หรือป้อนแก๊สเข้าไปเผาไหม้ในหม้อไอน้ำ เพื่อผลิตไอน้ำแล้วนำไปหมุนกังหันไอน้ำ

ผลิตไฟฟ้า หรือนำความร้อนของไอน้ำไปใช้ประโยชน์อื่น มีประสิทธิภาพสูงกว่าถ้าเปรียบเทียบกับระบบผลิตพลังงานจากการเผาไหม้โดยตรง นอกจากนี้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันยังมีข้อดีในด้านลดการปลดปล่อยมลพิษอากาศ

ที่ผ่านมาเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน ได้มีการศึกษาพัฒนาจนสามารถใช้งานได้จริง แต่จะเห็นได้ว่ายังเน้นกับเชื้อเพลิงชีวมวลเป็นส่วนใหญ่ เช่น วัสดุคิบจากภาคเกษตรกรรม (ไม้ ชังข้าวโพด แกลบ เป็นต้น) แต่การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์เพื่อการกำจัดของเสีย และการใช้ประโยชน์จากกากของเสียยังพบน้อย งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันในการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากกากตะกอนน้ำเสียอุตสาหกรรมฟอกย้อม

บทที่ 3

เครื่องมือและวิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือ

อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย มีดังนี้

3.1.1 ต้นแบบโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็ก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ใช้เป็นโรงไฟฟ้าสำหรับการทดสอบ ซึ่งใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันชนิด Downdraft Gasification ขนาดกำลังการผลิต 100 กิโลวัตต์

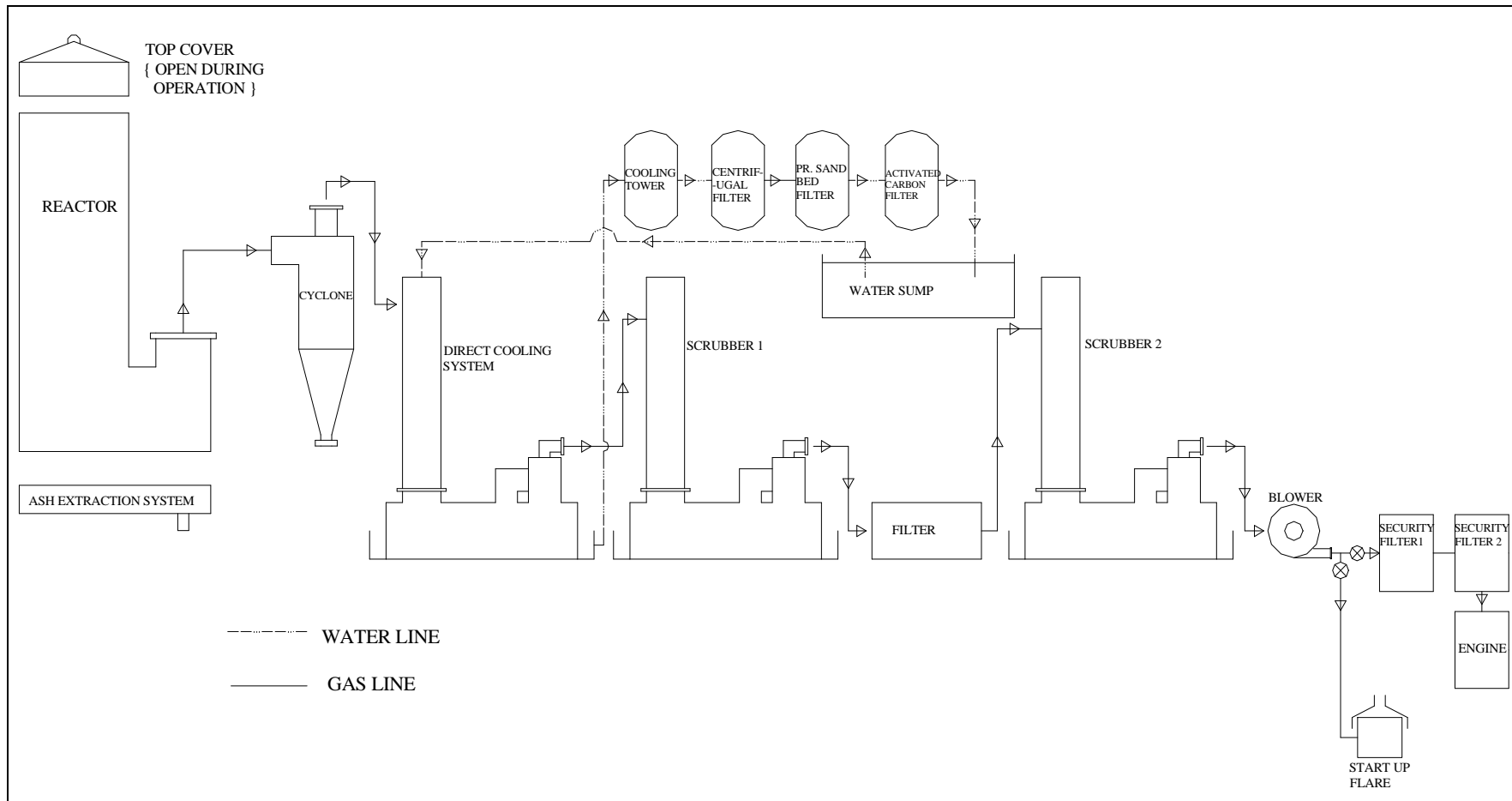
ต้นแบบโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็ก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มีส่วนประกอบหลัก 3 ส่วนคือ 1) ชุดเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง 2) ระบบทำความสะอาดแก๊ส 3) ระบบบำบัดน้ำเสีย และ 4) ชุดอุปกรณ์ผลิตไฟฟ้า โดยแผนผังกระบวนการของต้นแบบโรงไฟฟ้าชีวมวล แสดงไว้ในรูปที่ 3.1 โดยส่วนประกอบที่สำคัญของต้นแบบโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็ก มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Downdraft Gasifier)

เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงหรือเตาปฏิกรณ์ ชนิด Open-Top Downdraft Gasifier ภายนอกทำจากวัสดุโลหะม้วนกลม ภายในบุด้วยฉนวนกันความร้อนทำจากวัสดุทนความร้อนทำหน้าที่เก็บรักษาอุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้และลดการสูญเสียความร้อน ด้านบนของเตาประกอบด้วย Hopper Feeder เพื่อรับเชื้อเพลิง และมีฝาปิด มีช่องไว้ซีลน้ำ(Seal) ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้อากาศเข้า-ออกจากเตาขณะหยุดเดินระบบ ด้านข้างของเตาจะมีทางเข้าของอากาศหลายส่วนเพื่อป้อนอากาศและควบคุมอากาศเข้าสู่เตาสำหรับใช้ในการเผาไหม้ ด้านล่างของเตามีระบบลำเลียงจี้ถ่านที่ได้จากการเผาไหม้ออกจากเตาสามารถควบคุมระยะเวลาการลำเลียงจี้ถ่านออกได้ แสดงไว้ในรูปที่ 3.2 (ก)

2) ระบบทำความสะอาดแก๊ส (Gas Treatment Unit)

▪ Cyclone Collector เป็นอุปกรณ์แยกฝุ่นหรืออนุภาคขนาดใหญ่ออกจากแก๊ส ใช้หลักการดักฝุ่นด้วยแรงหนีศูนย์กลางทำให้เกิดแก๊สหมุนวน (Vortex) จากนั้นฝุ่นหรืออนุภาคจะตกลงสู่ด้านล่างของ Cyclone Collector ส่วนแก๊สจะหมุนวนสู่ด้านบนแล้วไหลตามท่อไปสู่ระบบ Water Scrubber และ Chiller Scrubber ซึ่งเป็นส่วนประกอบลำดับถัดไป แสดงไว้ใน รูปที่ 3.2 (ข)



รูปที่ 3.1 แผนผังกระบวนการของต้นแบบโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กมหาวิทยาลัยสุรนารี

- Water Scrubber และ Chiller Scrubber สำหรับ Water Scrubber เป็นอุปกรณ์ดักฝุ่นและอนุภาคขนาดเล็กออกจากแก๊สเชื้อเพลิงโดยใช้ละอองน้ำที่อุณหภูมิประมาณ 32°C ส่วน Chiller Scrubber เป็นอุปกรณ์ดักทาร์ (Tars) และฝุ่น (Dust) โดยใช้น้ำเย็นที่อุณหภูมิประมาณ 10°C ซึ่งไอระเหยของทาร์จะถูกควบแน่นลงมาพร้อมกับน้ำ ลักษณะของ Water Scrubber และ Chiller Scrubber แสดงไว้ในรูปที่ 3.2 (ค)

- Biomass Filter Unit ทำหน้าที่ดักความชื้น ฝุ่นและอนุภาคอื่นๆ โดยใช้ไม้ที่สับแล้วขนาดเล็กเป็นตัวดูดซับ เนื่องจากแก๊สเชื้อเพลิงที่ถูกทำความสะอาดจากระบบ Scrubber นั้นยังมีความชื้นสูง และมีละอองไอระเหยของทาร์เหลืออยู่ หน่วยบำบัดนี้จะช่วยยืดอายุการใช้งานของถลุงกรองใน Fabric Filter Unit ได้ ลักษณะของ Biomass Filter Unit แสดงไว้ในรูปที่ 3.2 (ง)

- Fabric Filter Unit ทำหน้าที่ดักฝุ่นอนุภาคขนาดเล็ก และความชื้นครั้งสุดท้าย หลังจากผ่านกระบวนการต่างๆ ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยฝุ่นอนุภาคขนาดเล็กที่ผ่านเข้ามาจะถูกดักจับไว้โดยถลุงกรองซึ่งสามารถกรองอนุภาคที่มีขนาดเล็กได้ถึง 100 ไมครอน เพื่อให้ได้แก๊สที่สะอาดสามารถนำไปใช้กับเครื่องยนต์สันดาปภายในได้ แสดงไว้ในรูปที่ 3.2 (จ)

2) ระบบบำบัดน้ำเสีย (Wastewater Treatment System)

ระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้เป็นระบบปิด โดยจะหมุนเวียนน้ำที่มาจาก Scrubber แล้วบำบัดโดยใช้วิธีทางเคมี (Chemical Treatment) โดยใช้หลักการโคแอกกูเลชัน (Coagulation) ในการศึกษาจะใช้สารเร่งการรวมตัวตะกอน (Coagulant) คือเฟอริกคลอไรด์ (FeCl_3) และปูนขาว (CaOH) ร่วมกับสารเคมีที่ช่วยให้อนุภาคของตะกอนมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น คือ โพลีเมอร์ประจุลบ ส่วนประกอบของระบบบำบัดน้ำเสีย มีดังนี้

- Buffer Tank ประกอบด้วยถัง 3 ใบ คือ 1) ถังรองรับน้ำที่ผ่านการบำบัดจาก Flocculation Tank 2) ถังรองรับน้ำที่ Overflow มาจากถังพักน้ำเสีย 3) ถังพักน้ำเสียซึ่งเป็นน้ำที่มาจาก Water Scrubber และ Chiller Scrubber แสดงไว้ในรูปที่ 3.2 (ฉ)

- Flocculation Tank ทำหน้าที่เป็นถังบำบัดน้ำเสีย โดยน้ำเสียจะถูกส่งมาจาก Buffer Tank เพื่อทำการบำบัดโดยใช้วิธีทางเคมี (Chemical Treatment) น้ำที่ผ่านการบำบัดจะถูกหมุนเวียนกลับไปใช้ในระบบต่อไป แสดงไว้ใน รูปที่ 3.2 (ซ)

3) ชุดอุปกรณ์ผลิตไฟฟ้า

- ชุดทดสอบการลุกไหม้ของแก๊สเชื้อเพลิง (Start Up Flare) ทำหน้าที่ทดสอบการลุกไหม้ของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ และระบายแก๊สออกจากระบบกรณีฉุกเฉิน Start Up Flare จะติดตั้งไว้ในระบบก่อนทางเข้าเครื่องยนต์ แสดงไว้ใน รูปที่ 3.2 (ซ)

■ Engine-Generator Set สำหรับต้นแบบโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กนี้ ติดตั้งชุดเครื่องยนต์สันดาปภายใน 2 แบบสำหรับใช้ในการทดสอบ คือ เครื่องยนต์ดีเซลมาใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับแก๊สเชื้อเพลิง หรือเรียกว่า ไซเชื้อเพลิงควบคู่น้ำมันดีเซลและแก๊สเชื้อเพลิง (Gas-Diesel Engine หรือ Dual-Fuel Engine) ดังแสดงไว้ใน รูปที่ 3.2 (ฉ) และ แบบเครื่องยนต์แก๊ส (Gas-Otto Engine หรือ Gas Engine) จะใช้แก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้เป็นเชื้อเพลิง 100% ดังแสดงไว้ใน รูปที่ 3.2 (ญ) โดยเครื่องยนต์ทั้ง 2 แบบต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบไดนาโม (Generator) มีวงจรควบคุมความเร็วรอบของการทำงานให้คงที่ ที่ 1500 rpm ผลิตไฟฟ้าที่ความถี่ 50 Hz

ในการศึกษานี้จะใช้ชุดเครื่องยนต์สันดาปภายในแบบเครื่องยนต์แก๊ส ยี่ห้อ CUMMINS รุ่น G855-GBC ขนาด 150 HP โดยต่อเข้ากับชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบไดนาโม (Generator) ขนาดกำลังการผลิต 115 KVA หรือ 85 kW มีระบบควบคุมความเร็วรอบในการทำงานคงที่ เท่ากับ 1500 rpm และความถี่ไฟฟ้า 50 Hz



ก. เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Downdraft Gasifier)



ข. ไซโคลนดักฝุ่น (Cyclone Collector)

รูปที่ 3.2 ส่วนประกอบของต้นแบบโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็ก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



ค. Water Scrubber and Chiller Scrubber Unit



ง. ระบบกรอง (Biomass Filter Unit)



จ. ระบบกรอง (Fabric Filter Unit)



ฉ. ถังรวบรวมน้ำเสีย (Buffer Tank)

รูปที่ 3.2 ส่วนประกอบของต้นแบบโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็ก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (ต่อ)



ช. ถังบำบัดน้ำเสีย (Flocculation Tank)



ซ. ชุดทดสอบการลุกไหม้ (Start Up Flare)



ฉ. Diesel – Engine Generator Set
(ยี่ห้อ KOMUTSU : 6 สูบ 125 KVA)



ญ. Gas – Engine Generator Set
(ยี่ห้อ CUMMINS : ขนาด 6 สูบ 115 KVA)

รูปที่ 3.2 ส่วนประกอบของต้นแบบโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็ก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (ต่อ)

3.1.2 ขั้นตอนการเดินระบบของต้นแบบโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็ก

ต้นแบบโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็ก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มีขั้นตอนการเดินระบบ แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ 1) การเริ่มต้นจุดเตาเผาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Gasifier Start-Up) 2) การป้อนแก๊สเข้าเครื่องยนต์และการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Start Engine-Generator Set) และ 3) การหยุดการทำงานของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Gasifier Shut Down)

1) การเริ่มต้นจุดเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง

▪ เปิดฝาด้านบนของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงและทำการปล่อยน้ำซึ่งทำหน้าที่ป้องกันการไหลเข้า-ออกของอากาศในช่วงที่ดับเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Water Seal) และทำการเติมเชื้อเพลิงให้อยู่ในระดับที่กำหนด ดังแสดงในรูปที่ 3.3 (ก) ทำการเปิดช่องทางเข้าของอากาศรอบตัวเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงเพื่อให้อากาศไหลเข้าสู่ภายในของตัวเตา ดังแสดงในรูปที่ 3.3 (ข)

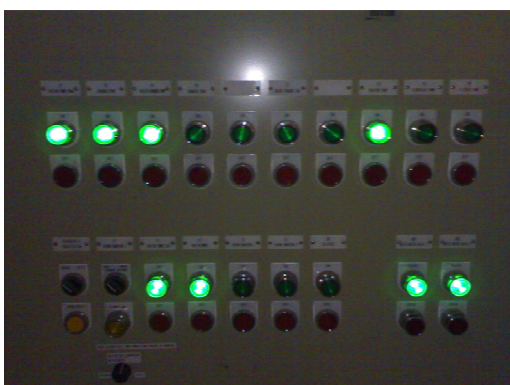
▪ กดเปิดสวิตช์เริ่มการทำงานของระบบ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 (ค) เสร็จแล้วทำการจุดเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง ดังแสดงในรูปที่ 3.3 (ง) ภายหลังจากจุดเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงประมาณ 2 ชั่วโมงทำการเปิด Flare Valve เพื่อทดสอบการลุกไหม้ของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้



ก. เปิดฝาด้านบนเพื่อเติมเชื้อเพลิง



ข. เปิดวาล์วทางเข้าของอากาศรอบตัวเตา



ค. สวิตช์ควบคุมระบบ



ง. การจุดเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง

รูปที่ 3.3 การเริ่มต้นการทำงานของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง

2) การป้อนแก๊สเข้าเครื่องยนต์และการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

การศึกษานี้ใช้เครื่องยนต์แก๊ส (Gas- Engine Generator Set) โดยทำการป้อนแก๊สเชื้อเพลิงและเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยทำการเปิด Flare Valve ที่ 25 องศา และเปิด Engine Valve ที่ 75 องศา สตาร์ทเครื่องยนต์ จากนั้นทำการปิด Flare Valve และเปิด Engine Valve ที่ 90 องศา เพื่อให้แก๊สเชื้อเพลิงไหลเข้าสู่เครื่องยนต์ ควบคุมความดันแก๊สเชื้อเพลิงบริเวณทางเข้าของเครื่องยนต์ให้อยู่ในช่วง 1.5-2 kPa โดยปรับอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง

3) การหยุดการทำงานของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Gasifier Shut Down)

- ทำการปิดช่องทางเข้าของอากาศรอบตัวเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงเพื่อไม่ให้อากาศไหลเข้าสู่ภายในของตัวเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง
- กดปิดสวิตช์ควบคุมระบบเพื่อให้หยุดการทำงานของโรงไฟฟ้าชีวมวล
- ปิดฝาด้านบนของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง และทำการปล่อยน้ำเข้าไป Seal ระหว่างฝาปิดกับเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง

3.1.3 เครื่องมือวัด/ เครื่องมือวิเคราะห์ และการติดตั้ง

ในการศึกษานี้ใช้เครื่องมือวัด และเครื่องมือวิเคราะห์หลากหลาย โดยชนิดของเครื่องมือวัด / เครื่องมือวิเคราะห์ พารามิเตอร์ที่วัด/ วิเคราะห์ แสดงรายละเอียดในตารางที่ 3.1 และแสดงในรูปที่ 3.4 ทั้งนี้ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัดและตำแหน่งการเก็บข้อมูล แสดงไว้ในรูปที่ 3.5 และ รูปที่ 3.6

ตารางที่ 3.1 แสดงถึงพารามิเตอร์ เครื่องมือวัด ระบบการวัดและวิเคราะห์

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	เครื่องมือวัด/Sensor
1. อุณหภูมิ (Temperature) 1.1 Reactor Temperature 1.2 Producer Gas Temperature - Gas Outlet ($^{\circ}\text{C}$) - Cleaned Gas ($^{\circ}\text{C}$)	T_1-T_6 T_0 T_g	Thermocouple Type K
2. อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง Gas Flow Rate (Nm^3/hr)	V_g	Gas Flow Meter - Model DIG-SIDO-O - Range 80-400 m^3/hr
3. องค์ประกอบของแก๊ส Gas Composition (%V)	G_c	Gas Chromatography (Shimazu GC-14B)
4. อัตราการใช้เชื้อเพลิง Fuel Consumption (kg/hr)	m_{Fuel}	ตาชั่งดิจิทัล 2 ตำแหน่ง
5. อัตราการเกิดเถ้า Ash Production (kg/hr)	m_{ash}	ตาชั่งดิจิทัล 2 ตำแหน่ง
6. ปริมาณทาร์และฝุ่นในแก๊สเชื้อเพลิง (Tar and Dust) - After Reactor (mg/Nm^3) - After Scrubber (mg/Nm^3) - After Biomass Filter (mg/Nm^3) - After Fabric Filter (mg/Nm^3)	TD_1 TD_2 TD_3 TD_4	ปั๊มดูด ชุดกรองและควบแน่น
7. Wastewater Characteristics - Water from scrubber - Water After Treatment - Sewage Sludge	Sample A Sample B Sample C	เครื่องมือวิเคราะห์ / สารเคมี ตามมาตรฐาน APHA
8. แก๊สไอเสีย (Exhaust Gas)	G_{ex}	Flue Gas Analyzer (Model Testo-350XL)



ก. Thermocouple Type K
(ใช้วัด T_0 , T_1 - T_6 , T_g)



ข. Gas Flow Meter
(ใช้วัด V_g)



ค. อุปกรณ์บรรจุแก๊สเชื้อเพลิง
(บรรจุแก๊สเพื่อนำไปวิเคราะห์กับเครื่อง GC)



ง. เครื่อง Gas Chromatography (GC)

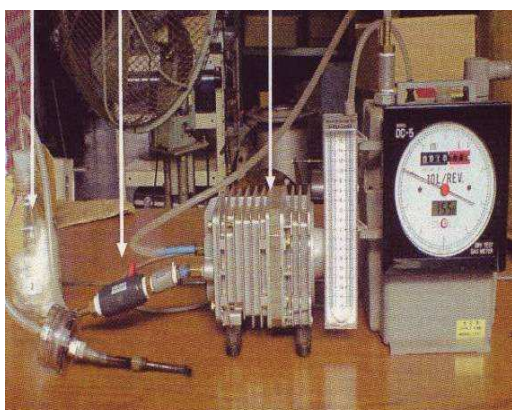
รูปที่ 3.4 แสดงอุปกรณ์ เครื่องมือที่ใช้ในการวัด



จ. ตาชั่ง

(ใช้วัด Fuel Consumption : m_{Fuel})

ฉ. ตาชั่ง

(ใช้วัด Ash Production : m_{ash})

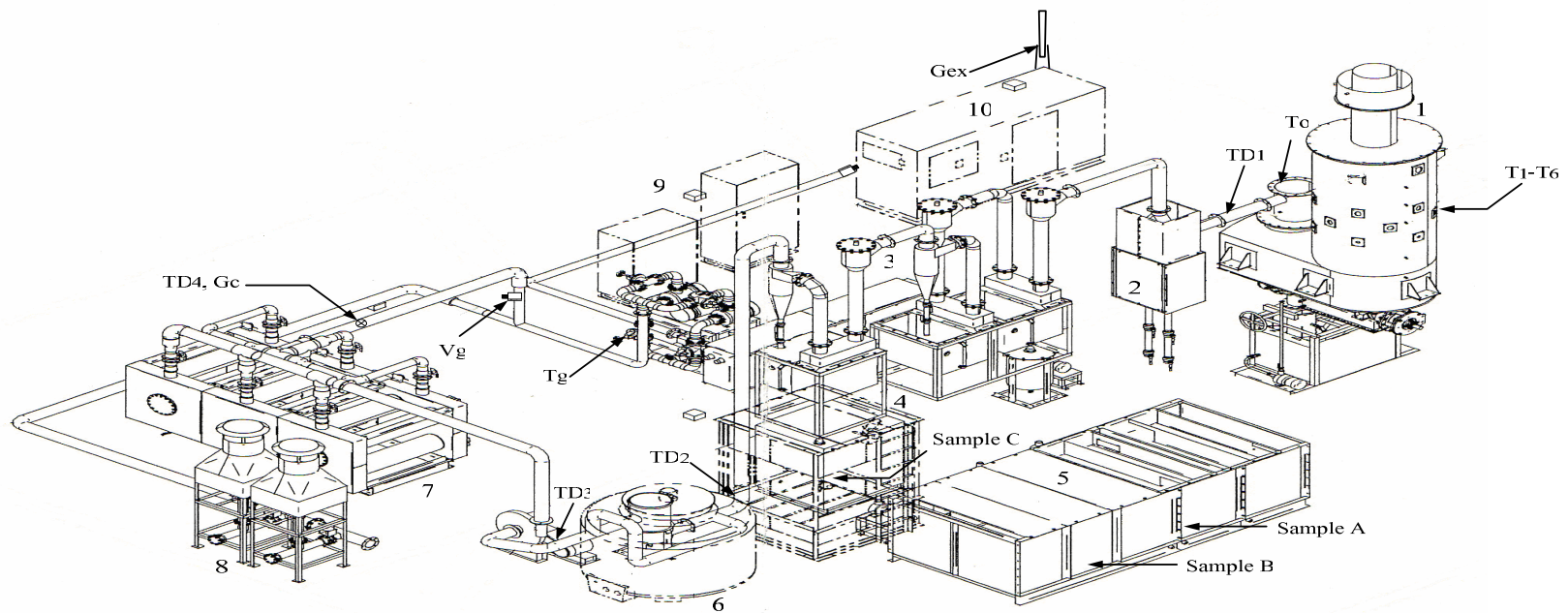
ช. ชุด Filter and Condenser

(ใช้วัด Tar and Dust : TD_1 - TD_4)

ญ. Flue Gas Analyzer

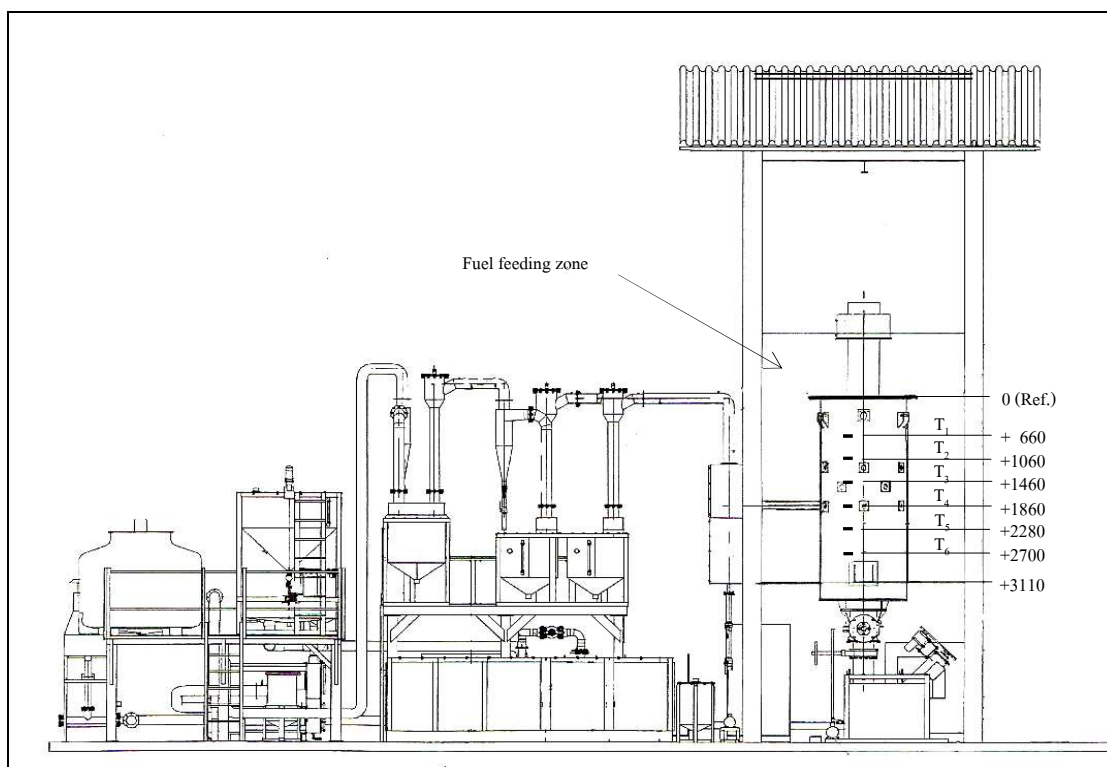
(ใช้วัด Exhaust gas : G_{ex})

รูปที่ 3.4 แสดงอุปกรณ์ เครื่องมือที่ใช้ในการวัด (ต่อ)



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

รูปที่ 3.5 แสดงการติดตั้งเครื่องมือวัดและตำแหน่งการเก็บข้อมูล



รูปที่ 3.6 แสดงตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิภายในเตา ($T_1 - T_6$)

3.1.4 กากตะกอนน้ำที่เสียที่ใช้

กากตะกอนที่ใช้ศึกษาเป็นกากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมฟอกย้อมที่ใช้กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางเคมีร่วมกับกระบวนการบำบัดทางชีวภาพแบบตะกอนเร่ง ซึ่งนำมาจาก 2 แหล่ง คือ โรงงานกลุ่มฟอกย้อมในสวนอุตสาหกรรมเครือสหพัฒน์กบินทร์บุรี และ โรงงานฟอกย้อม บริษัทไทยกุลแซ่ จำกัด (อำเภอกบินทร์บุรี จังหวัดปราจีนบุรี)

ลักษณะของตะกอนที่ออกจากระบบบำบัดน้ำเสียพบว่ามีไขมันติดด้วยน้ำ การจัดการเบื้องต้นของโรงงานฟอกย้อมทั้ง 2 แหล่ง คือทำให้กากตะกอนมีความเข้มข้น ซึ่งมีขั้นตอนคือ

- 1) รวบรวมตะกอนไว้ในถังตกตะกอน เพื่อแยกน้ำออกโดยใช้แรงโน้มถ่วง
- 2) ปรับสภาพตะกอนโดยเติมสารเคมีคือ Polymer เพื่อให้ตะกอนเข้มข้น
- 3) นำตะกอนเข้าเครื่องสายพานรีดน้ำ (Belt Filter Press) ซึ่งจะได้กากตะกอนที่มีความ

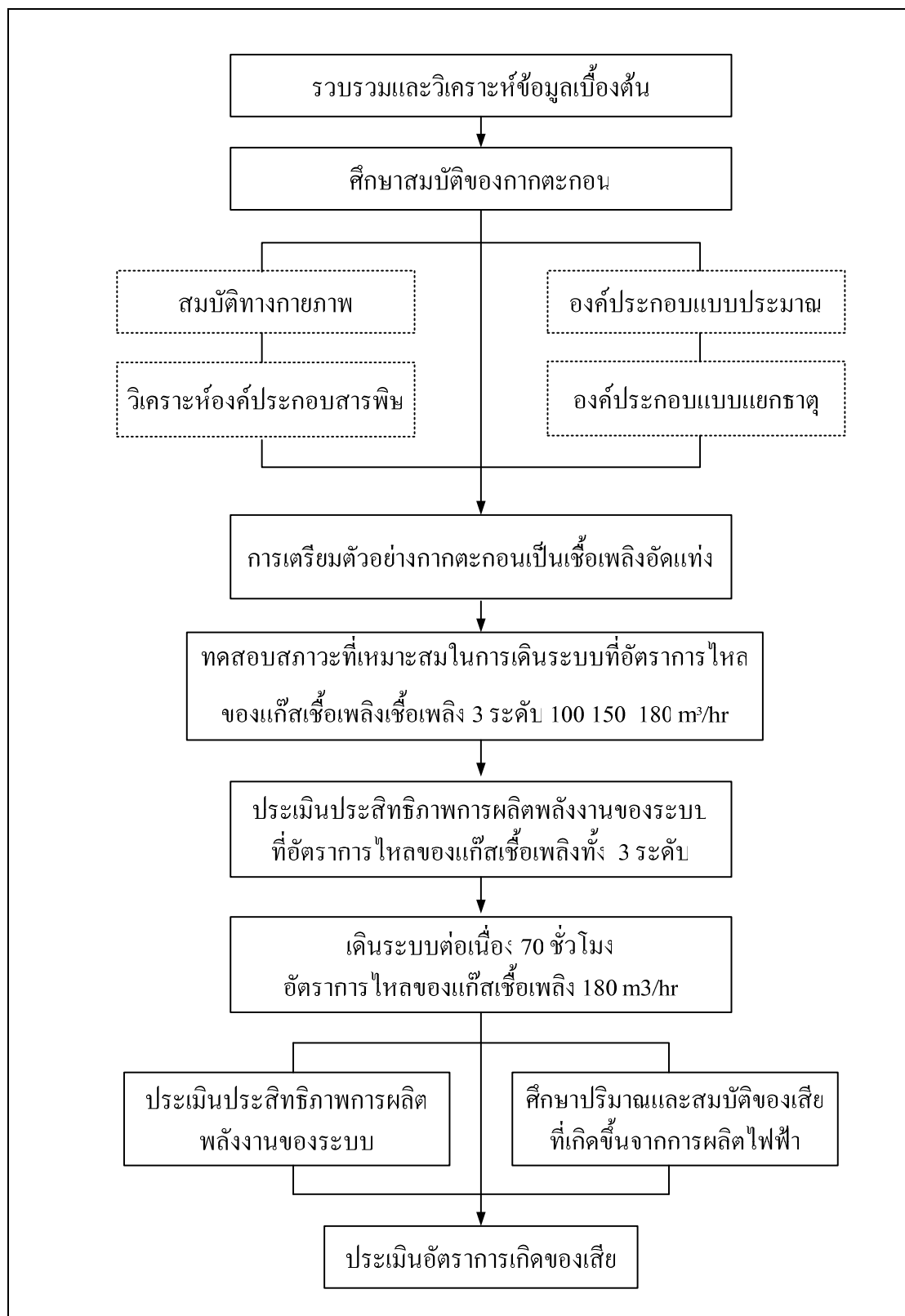
เข้มข้นประมาณ 80%

ในการศึกษาครั้งนี้จะทำการลดความชื้นของกากตะกอนโดยวิธีการตากแดด (Sun Drying) เพื่อให้สะดวกต่อการขนย้าย โดยทำการตากแดดกากตะกอนที่โรงบำบัดน้ำเสีย

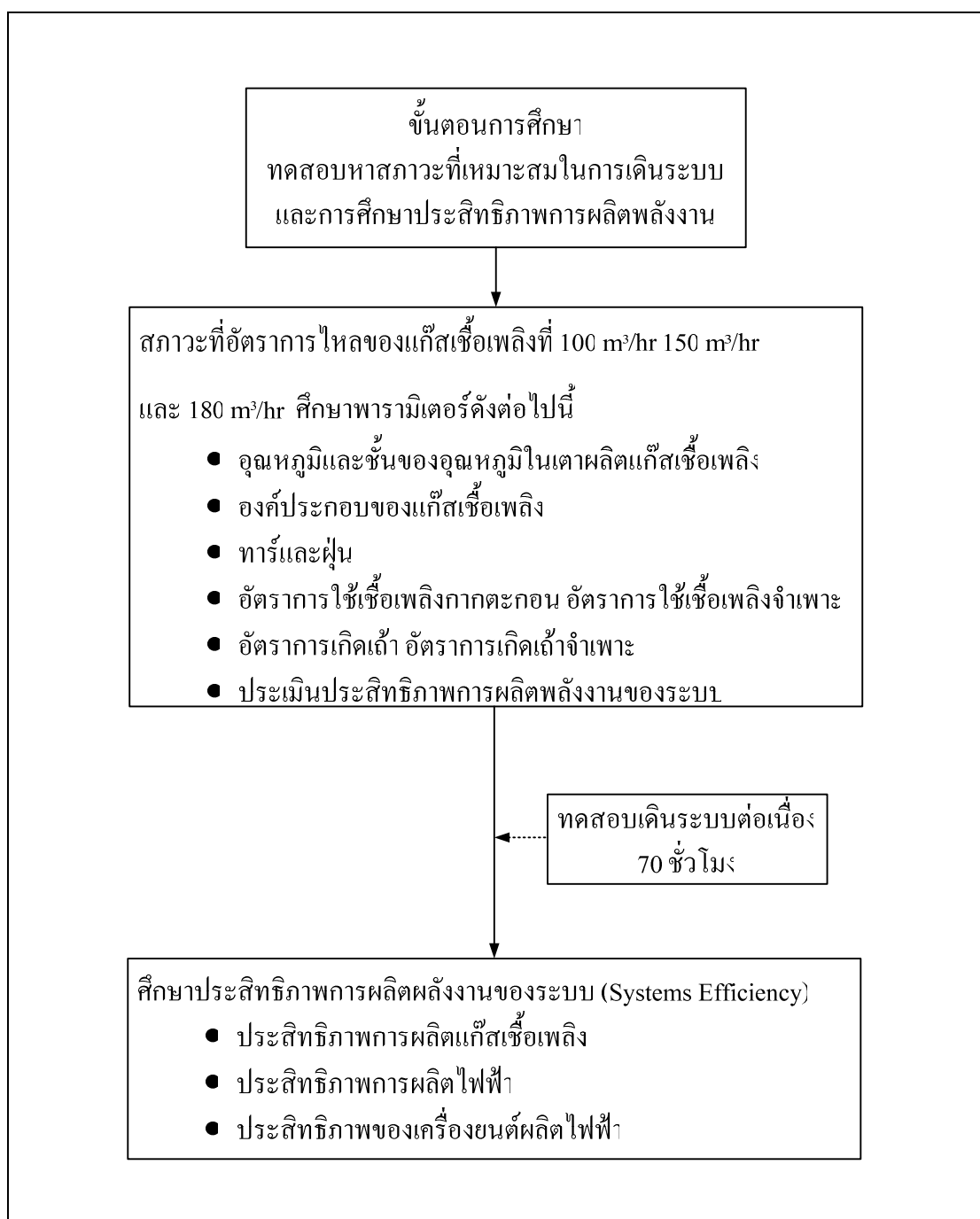
ประมาณ 4-5 วันเพื่อให้ความชื้นลดเหลือประมาณ 20% และทำการขนย้ายกากตะกอนมาที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เพื่อทำการศึกษาเป็นลำดับต่อไป

3.2 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

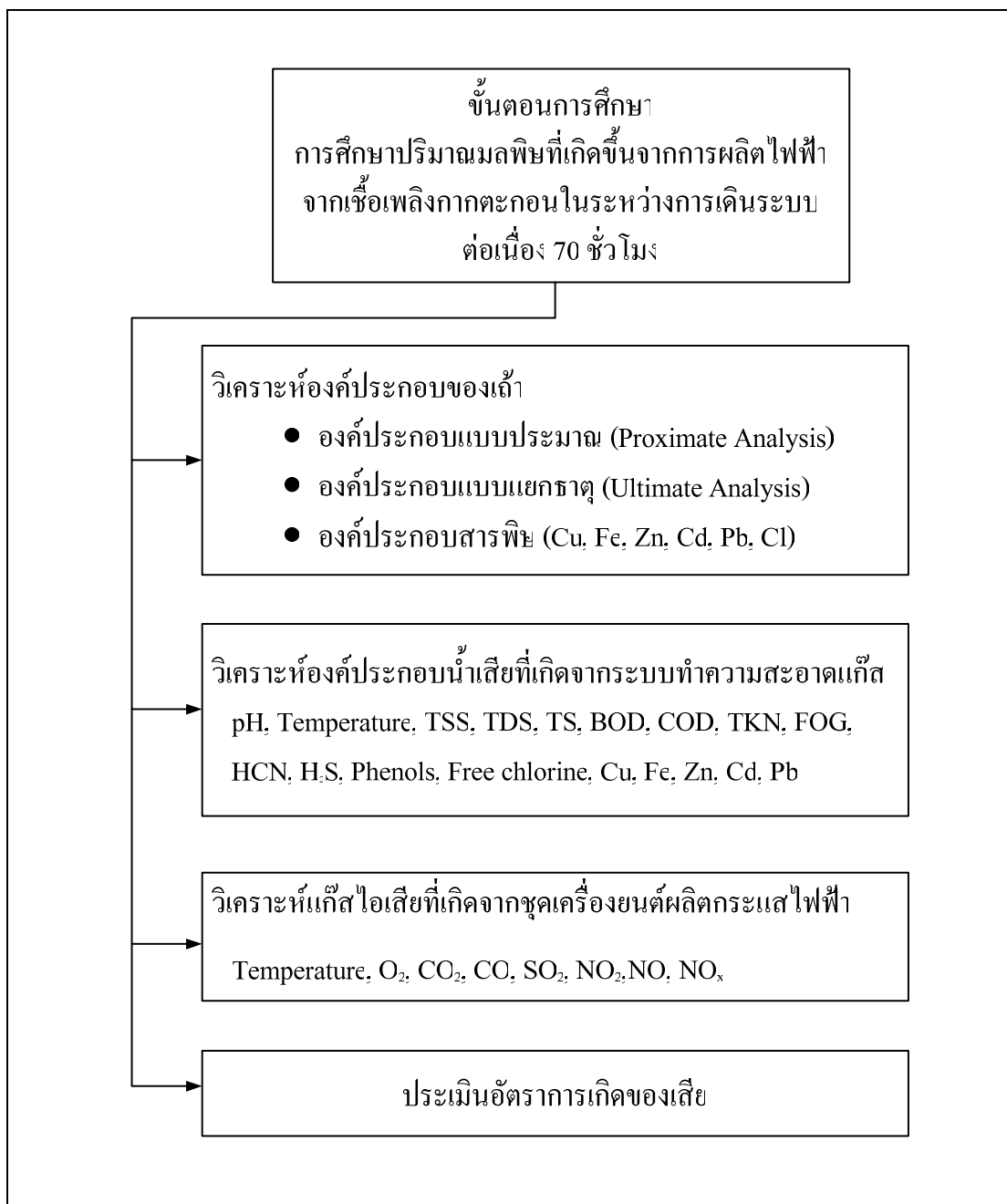
ในการดำเนินการศึกษาการกำจัดกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อผลิตพลังงานโดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน กรณีศึกษากากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมฟอกย้อม ประกอบด้วยขั้นตอนดังแสดงใน Flow chart รูปที่ 3.7 ถึง รูปที่ 3.9



รูปที่ 3.7 ภาพรวมขั้นตอนการศึกษา



รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการหาสภาวะที่เหมาะสมและการศึกษาประสิทธิภาพการผลิตพลังงาน



รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการศึกษาปริมาณมลพิษ

ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย มีรายละเอียดดังนี้

3.2.1 การรวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้น

ทำการรวบรวมข้อมูลสำคัญต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์เช่น การตรวจสอบเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมกับองค์ประกอบและสมบัติของกากตะกอน การเตรียมกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ ระบบผลิตแก๊สเชื้อเพลิงเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน และอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ ซึ่งข้อมูลต่าง ๆ ได้สรุปไว้ในบทที่ 2 นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาข้อมูลปริมาณกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่งของโรงงานกลุ่มฟอกย้อมในสวนอุตสาหกรรมเครือสหพัฒน์กบินทร์บุรี และโรงงานฟอกย้อม บริษัทไทยกุลแซ่ จำกัดเพื่อนำมาใช้วางแผนในการรวบรวมและขนส่งลำเลียงกากตะกอนให้เพียงพอต่อศึกษา

3.2.2 การศึกษาสมบัติของกากตะกอน

1) สมบัติทางกายภาพ

- ความชื้น มีความจำเป็นที่ต้องทราบ เพื่อนำมาใช้วางแผนการรวบรวมและขนส่งลำเลียงกากตะกอนว่าสามารถกระทำได้ที่ทันที หรือต้องลดความชื้นก่อน รวมทั้งใช้ประมาณการปริมาณกากตะกอนให้เพียงพอต่อการศึกษา โดยวิธีการวิเคราะห์ความชื้นจะคิดเป็นเปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก หรือ Wet Basis (ภาคผนวก ก)

- ความหนาแน่น เป็นสมบัติทางกายภาพทั่วไป ในการศึกษาจะใช้ความหนาแน่นเป็นแนวทางในการเดินระบบ ในส่วนของชั้นอุณหภูมิต่อผลผลิตแก๊สเชื้อเพลิง เทียบเคียงกับเชื้อเพลิงชนิดอื่น โดยวิเคราะห์ความหนาแน่น 2 แบบ คือ 1) ความหนาแน่นก่อนการอัดแท่ง ทำโดยการวัดค่ามวลของกากตะกอนต่อหน่วยปริมาตรที่แน่นอน และ 2) ความหนาแน่นหลังการอัดแท่ง ทำโดยการวัดค่ามวลต่อปริมาตรของกากตะกอน (ภาคผนวก ก)

2) การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate Analysis)

เพื่อหาองค์ประกอบแบบประมาณของกากตะกอนของโรงงานกลุ่มฟอกย้อมในสวนอุตสาหกรรมเครือสหพัฒน์กบินทร์บุรี และโรงงานฟอกย้อม บริษัทไทยกุลแซ่ จำกัด และกากตะกอนผสมระหว่าง 2 แหล่ง ซึ่งจะเป็นข้อมูลพื้นฐานในการพิจารณาความสามารถในการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง

- ความชื้น (Moisture) คือเปอร์เซ็นต์ของน้ำต่อน้ำหนักกากตะกอนซึ่งเป็นการวัดที่ผ่านการอบแห้งด้วยความร้อน โดยทั่วไปเรียกว่าเปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง หรือ Dry basis การวิเคราะห์โดยใช้มาตรฐาน ASTM D1762-84 (ภาคผนวก ก)

- เถ้า (Ash) คือปริมาณของแข็งอนินทรีย์ที่คงเหลืออยู่ ภายหลังจากเผาไหม้กากตะกอนที่อุณหภูมิ 750°C การวิเคราะห์ใช้มาตรฐาน ASTM D1762-84 (ภาคผนวก ก)
- ปริมาณสารระเหย (Volatile Matter) เพื่อหาค่าองค์ประกอบที่สามารถระเหยได้ โดยให้ความร้อนกับกากตะกอนการวิเคราะห์ใช้มาตรฐาน ASTM D1762-84 (ภาคผนวก ก)
- ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) คือปริมาณองค์ประกอบคาร์บอนคงตัว ที่มีอยู่ในกากตะกอน คำนวณจากร้อยละกับผลต่างระหว่าง ความชื้น เถ้า และปริมาณสารระเหย (By difference)
- ค่าความร้อน (Heating Value) คือพลังงานที่ถูกปลดปล่อยออกขณะเผาไหม้ กากตะกอนต่อหน่วยน้ำหนัก (MJ/kg) การวิเคราะห์ใช้มาตรฐาน ASTM D2015-77 (ภาคผนวก ก)

3) การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis)

เพื่อหาปริมาณธาตุ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ และออกซิเจน เนื่องจากธาตุต่าง ๆ เหล่านี้จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่จะเกิดขึ้นจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ซึ่งธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน จะเป็นธาตุหลักที่จะถูกเปลี่ยนไปเป็นแก๊สเชื้อเพลิงโดยปฏิกิริยาอุณหภูมิในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน และปริมาณของธาตุซัลเฟอร์บ่งชี้ได้ถึงปริมาณแก๊สมลพิษที่จะเกิดขึ้นในรูป SO_2 H_2S ในการวิเคราะห์ธาตุ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ จะใช้เครื่อง CHNS Element Analyzer (ยี่ห้อ LECO รุ่น CHNS-932 สามารถวิเคราะห์ปริมาณธาตุ C H N S ในตัวอย่างสารอินทรีย์ทุกชนิดในระดับปริมาณที่เกินกว่า 0.03% ขึ้นไป) สำหรับธาตุออกซิเจนใช้วิธีการคำนวณโดยหาจากผลต่างของธาตุ (ภาคผนวก ก)

1) การวิเคราะห์องค์ประกอบสารพิษ

เพื่อศึกษาองค์ประกอบของโลหะหนัก Cd Cu Pb Fe Zn และปริมาณธาตุ Cl ในตัวอย่าง เนื่องจากธาตุต่าง ๆ เหล่านี้จะถูกพิจารณาว่าเป็นแหล่งกำเนิดของมลพิษที่อาจจะเกิดขึ้นในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน การวิเคราะห์จะใช้เครื่อง Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer (EDXRF รุ่น ED 2000) สามารถวิเคราะห์ธาตุได้ครอบคลุมตั้งแต่ธาตุ Na จนถึงธาตุ U ในระดับ 0.01-100%)

สำหรับเครื่องมือหลักที่ใช้วิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ องค์ประกอบแบบแยกธาตุ และองค์ประกอบสารพิษของกากตะกอน ดังแสดงในรูปที่ 3.10



ก. เตาอบ Drying Oven
(วิเคราะห์ความชื้น)



ข. เตาเผา Muffle Furnace
(วิเคราะห์ปริมาณเถ้า และสารระเหย)



ค. เครื่อง Bomb Calorimeter
(วิเคราะห์ค่าความร้อน)



ง. เครื่อง CHNS Elemental Analyzer
(วิเคราะห์ปริมาณธาตุ C H N S)

รูปที่ 3.10 เครื่องมือหลักสำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบของกากตะกอน



จ. เครื่องเตรียมตัวอย่างกากตะกอน
สำหรับนำไปวิเคราะห์กับเครื่อง EDXRF

ฉ. เครื่อง EDXRF
(วิเคราะห์ปริมาณธาตุ Cd Cu Pb Fe Zn Cl)

รูปที่ 3.10 เครื่องมือหลักสำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบของกากตะกอน (ต่อ)

3.2.3 การเตรียมกากตะกอน

1) การลดความชื้น

กากตะกอนน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมทั้ง 2 แห่ง มีความชื้นเริ่มต้นสูง ต้องทำการลดความชื้นก่อนเข้าสู่กระบวนการอัดแท่งกากตะกอน โดยการลดความชื้นจะใช้วิธีตากแดด (Sun Drying) เพื่อเตรียมเชื้อเพลิงให้มีความชื้นไม่เกิน 15% ซึ่งเป็นค่าความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมเชื้อเพลิงแท่งที่ใช้กับโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็ก ทั้งนี้อ้างอิงจากผลการศึกษาของ วีรชัย ออาจหาญ และคณะ (2551)

2) การอัดแท่งกากตะกอน

กากตะกอนแห้งมีลักษณะเป็นผงละเอียด ยังไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้งาน ต้องทำการอัดแท่ง (Briquette) ให้เป็นก้อนเชื้อเพลิงแข็งก่อน ในกระบวนการอัดแท่งกากตะกอนทั้ง 2 แห่งจะถูกนำมาผสมรวมกัน ทั้งนี้เพื่อต้องการให้เชื้อเพลิงกากตะกอนอัดแท่งที่มีองค์ประกอบทางเคมีสม่ำเสมอ ถึงแม้กากตะกอนทั้ง 2 แห่ง เป็นกากตะกอนน้ำเสียอุตสาหกรรมฟอกย้อมเหมือนกัน แต่การใช้วัตถุดิบในกระบวนการผลิตที่แตกต่างกัน ย่อมส่งผลให้มีองค์ประกอบในน้ำเสียแตกต่างกันได้ ปัจจัยเหล่านี้ล้วนแล้วแต่มีผลให้สมบัติและองค์ประกอบของกากตะกอนแตกต่างกันไป ดังนั้นในกระบวนการอัดแท่งกากตะกอน การนำกากตะกอนมาผสมรวมกันก่อน จะช่วยให้เชื้อเพลิงกากตะกอนอัดแท่งมีคุณสมบัติและองค์ประกอบใกล้เคียงกัน ทั้งนี้จะใช้กากตะกอนของโรงงานฟอกย้อม บริษัทไทยกุลแซ่ จำกัด

และ กากตะกอนจากโรงงานกลุ่มฟอกย้อมในสวนอุตสาหกรรมเครื่องสหพัฒนภัณฑ์บุรี ในสัดส่วน โดยประมาณ คือ 1:6 สาเหตุที่เลือกผสมในสัดส่วนนี้เนื่องจาก ปริมาณการเกิดกากตะกอนต่อเดือนของ โรงงานฟอกย้อม บริษัทไทยกุลแซ่ จำกัด มีน้อยกว่าของโรงงานกลุ่มฟอกย้อมในสวนอุตสาหกรรม เครื่องสหพัฒนภัณฑ์บุรีประมาณ 6 เท่า และในการศึกษาต้องใช้กากตะกอนในปริมาณที่สูง จึงต้อง เตรียมเชื้อเพลิงกากตะกอนแบบผสม

ในการศึกษานี้จะใช้เครื่องอัดแบบสกรู (Screw Type) กำลังมอเตอร์ 22 kW ความเร็วรอบของมอเตอร์ 1460 rpm ดังแสดงในรูปที่ 3.11 ซึ่งผลิตเชื้อเพลิงกากตะกอนอัดแท่งที่มี ขนาด $\varnothing 45$ มิลลิเมตร กำลังการผลิตของเครื่องเท่ากับ 200 kg/hr ทั้งนี้ทำการเตรียมเชื้อเพลิงกาก ตะกอนอัดแท่งสำหรับการศึกษานี้จำนวน 15 ตัน



รูปที่ 3.11 เครื่องอัดแท่งกากตะกอน

3.2.4 การทดสอบหาสภาวะ (Condition) ในการเดินระบบ และศึกษาความสามารถในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากกากตะกอน

การหาสภาวะในการเดินระบบ มีจุดประสงค์เพื่อให้ทราบสภาวะต่าง ๆ ที่เหมาะสมในการเดินระบบที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงในระดับต่าง ๆ เพื่อให้ได้สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง ซึ่งจะมีผลต่อเนื่องถึงกรณีการนำแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ไปใช้งานกับเครื่องยนต์สันดาปภายในเพื่อผลิตไฟฟ้า ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1) อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง

อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงที่ใช้ในการศึกษานี้เลือกที่ 3 ระดับ คือ $100 \text{ m}^3/\text{hr}$, $150 \text{ m}^3/\text{hr}$ และ $180 \text{ m}^3/\text{hr}$ เหตุผลที่เลือกอัตราการไหลที่ระดับดังกล่าว เนื่องจากข้อมูลพื้นฐานจากการเดินระบบโดยใช้เชื้อเพลิงชีวมวลของโรงไฟฟ้าชีวมวล พบว่าอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงที่ระดับ $100 \text{ m}^3/\text{hr}$ คือที่ความจุของแก๊สเชื้อเพลิงต่ำสุดที่ชุดเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้าใช้จุดระเบิดและเดินตัวเครื่องในสภาวะที่ปราศจากโหลด และที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงเท่ากับ $180 \text{ m}^3/\text{hr}$ คือที่ปริมาณของแก๊สเชื้อเพลิงที่ชุดเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้าให้ผลิตกำลังไฟฟ้าได้ที่ 50% ของกำลังการผลิตไฟฟ้าสูงสุด (50% maximum load) และสำหรับที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง $150 \text{ m}^3/\text{hr}$ ถูกประมาณการเพื่อให้เป็นสถานะที่เป็นค่ากลางระหว่างที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงต่ำสุด และสูงสุด ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้กำหนดการเดินระบบเพื่อผลิตไฟฟ้า 50% ของกำลังการผลิตสูงสุด เนื่องจากเพื่อป้องกันปัญหาที่อาจเกิดขึ้นจากการเดินระบบต่อเนื่อง 70 ชั่วโมง ซึ่งเป็นการเดินระบบแบบต่อเนื่อง การควบคุมสภาวะและตัวแปรต่าง ๆ เป็นเรื่องยาก อีกทั้งเครื่องยนต์เดินระบบต่อเนื่องที่กำลังสูง ๆ อาจมีผลกระทบต่อเครื่องยนต์ได้ ทั้งนี้แม้ว่าโรงไฟฟ้าชีวมวลที่ใช้ทดสอบจะเป็นโรงไฟฟ้าที่มีขนาดกำลังผลิต 115 KVA หรือ 85 kW แต่เนื่องจากเป็นต้นแบบที่รองรับการทำวิจัยอื่น ด้วยเหตุผลดังที่ได้กล่าวไปแล้วนั้น การทดสอบจึงกำหนดไว้เพียงแค่ 50% ของกำลังการผลิตสูงสุด (Full Load) เท่านั้น

ซึ่งในการควบคุมอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงทั้ง 3 ระดับ จะใช้ Inverter ควบคุมความเร็วมอเตอร์ของ Blower ในการทดสอบแต่ละอัตราการไหลจะทำการเดินระบบต่อเนื่อง 24 ชั่วโมงเพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพ พร้อมทั้งทำการตรวจวัดพารามิเตอร์ต่าง ๆ และทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง และประเมินความสามารถของแก๊สเชื้อเพลิงในกรณีนำมาใช้เพื่อผลิตไฟฟ้าโดยใช้เครื่องยนต์สันดาปภายใน โดยสภาวะที่ต้องการทราบมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2) ชั้นของอุณหภูมิภายในเตา (Temperature profile)

การทำ Temperature profile ที่เกิดขึ้นในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการทราบผลของอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงต่ออุณหภูมิภายในเตา โดยทำการวัดอุณหภูมิตรงตำแหน่งความสูงต่าง ๆ ของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง จำนวน 6 ตำแหน่ง (T_1-T_6) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.6 ทั้งนี้ข้อมูลจะถูกบันทึกแบบต่อเนื่องด้วยระบบ Online Measuring System โดยมีอัตราการเก็บข้อมูล 30 วินาที/ครั้ง เครื่องมือวัด ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.4 (ก)

3) องค์ประกอบของแก๊ส (Gas Composition)

เพื่อทำการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง คือ CO H_2 CH_4 N_2 O_2 และ CO_2 ในการศึกษานี้จะทำการเก็บตัวอย่างแก๊สในตำแหน่งก่อนเข้าเครื่องยนต์ (G_c) ตำแหน่งการเก็บข้อมูล ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.5 ซึ่งเป็นแก๊สเชื้อเพลิงสะอาดเนื่องจากผ่านกระบวนการลดอุณหภูมิ ลดความชื้น และทำความสะอาดมาแล้ว พร้อมทั้งจะนำไปใช้กับเครื่องยนต์สันดาปภายใน โดยดึงตัวอย่างมาเก็บไว้ในอุปกรณ์บรรจุแก๊สเชื้อเพลิง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.4 (ค) แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณแก๊สต่าง ๆ ด้วยเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊ส (Gas Chromatograph) ยี่ห้อ SIMADSU GC-14B ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.4 (ง)

สภาวะที่ใช้ของเครื่องมือ Gas Chromatograph (SIMADSU GC-14B)

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

ซึ่งจะใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาคำนวณหาค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิง (Calorific value of producer gas) โดยใช้ความสัมพันธ์ อ้างอิงตามงานวิจัยของ Jain et al. (2002) ดังนี้

$$CV_g = \sum X_i H_i \quad (3.1)$$

เมื่อ

X_i	คือ	สัดส่วนโดยปริมาตรขององค์ประกอบแก๊สเชื้อเพลิง
H_i	คือ	ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิง (CO H_2 CH_4)

โดยที่ $\text{CO} = 13.1 \text{ MJ/Nm}^3$ $\text{H}_2 = 13.1 \text{ MJ/Nm}^3$ และ $\text{CH}_4 = 41.2 \text{ MJ/Nm}^3$

4) อัตราการใช้เชื้อเพลิง (Fuel Consumption)

การหาอัตราการใช้เชื้อเพลิงเพื่อนำไปคำนวณหาประสิทธิภาพของระบบ และคำนวณอัตราการใช้เชื้อเพลิงต่อหน่วยไฟฟ้า ซึ่งการวัดจะทำโดยชั่งน้ำหนักของเชื้อเพลิงกากตะกอนที่ถูกเติมใส่ลงไป ในเตาปฏิกรณ์โดยใช้ตาชั่ง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.4 (จ) ทำการจดบันทึกค่าแล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย ซึ่งจะได้อัตราการใช้เชื้อเพลิงในหน่วยกิโลกรัมต่อชั่วโมง (kg/hr) แล้วนำมาคำนวณอัตราการใช้เชื้อเพลิงต่อหน่วยไฟฟ้า หรือ อัตราการใช้เชื้อเพลิงจำเพาะ (Specific Fuel Consumption) ตามสมการที่ (3.2)

$$\text{Specific Fuel Consumption} = \frac{[\text{Fuel Consumption}]}{[\text{Electrical Power}]}$$

$$\text{Specific Fuel Consumption (kg/kWh)} = \frac{[m_{\text{Fuel}}/P_e]}{\quad} \quad (3.2)$$

เมื่อ

m_{Fuel} คือ อัตราการใช้เชื้อเพลิง (kg/hr)

P_e คือ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ หรือ Electric Power Output (kW)

5) อัตราการดึงเถ้าออกจากเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Ash Discharge Rate)

ในการศึกษาจะกำหนดอัตราการดึงเถ้าออกจากเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงให้ใกล้เคียงหรือเท่ากับปริมาณเถ้าที่ได้จากผลการวิเคราะห์แบบประมาณของเชื้อเพลิงกากตะกอนผสม ทั้งนี้เพื่อป้องกันปัญหาของเถ้าหลอมที่จะเกิดขึ้นกับระบบ

6) อัตราการเกิดเถ้า (Ash Production)

การหาอัตราการเกิดเถ้าเพื่อนำไปคำนวณหาประสิทธิภาพของระบบ และใช้ประเมินปริมาตรของกากตะกอนลดลงเป็นกึ่งเปอร์เซ็นต์ รวมทั้งใช้คำนวณอัตราการเกิดเถ้าต่อหน่วยไฟฟ้า ซึ่งการวัดจะทำโดยชั่งน้ำหนักของเถ้าที่ถูกนำออกจากเตาปฏิกรณ์โดยใช้ตาชั่ง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.4 (ฉ) ทำการจดบันทึกค่าแล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยซึ่งจะได้อัตราการการเกิดเถ้าในหน่วยกิโลกรัมต่อชั่วโมง (kg/hr) แล้วนำมาคำนวณอัตราการเกิดเถ้าต่อหน่วยไฟฟ้า หรืออัตราการเกิดเถ้าจำเพาะ (Specific Ash Production) ตามสมการที่ (3.3)

$$\text{Specific Ash Production} = [\text{Ash Production}]/[\text{Electrical Power}]$$

$$\text{Specific Ash Production (kg/kWh)} = [m_{\text{ash}}/P_e] \quad (3.3)$$

เมื่อ

m_{ash} คือ อัตราการเกิดเถ้า (kg/hr)

P_e คือ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ หรือ Electric Power Output (kW)

7) ทาร์และฝุ่น (Tar and Dust)

การตรวจวัดปริมาณทาร์และฝุ่น (Tars and dust) เพื่อทราบปริมาณการปนเปื้อนในแก๊สเชื้อเพลิงที่เกิดจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันในตำแหน่งต่าง ๆ ทั้ง 4 ตำแหน่ง คือ TD₁ TD₂ TD₃ TD₄ โดยตำแหน่งการเก็บตัวอย่าง ดังแสดงไว้ใน รูปที่ 3.5 เนื่องจากทาร์มีความหนืดสูง (high viscous) มีฤทธิ์กัดกร่อน (corrosive) และฝุ่น (Dust) ซึ่งเป็นอนุภาคของแข็งที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ ทั้งสองเป็นอันตรายต่อเครื่องยนต์สันดาปภายในหากมีปริมาณสูง วิธีการวิเคราะห์จะอ้างอิงตามคู่มือการเดินระบบของโรงไฟฟ้าชีวมวลสุรนารี (Technical Training Manual: Technical Support Materials on the Biomass Gasification Power Plant) วิธีวิเคราะห์แสดงในภาคผนวก ก

3.2.5 การศึกษาประสิทธิภาพการผลิตพลังงานจากกากตะกอน

การศึกษาประสิทธิภาพการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงกากตะกอน โดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน ซึ่งจะใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาคำนวณหาประสิทธิภาพโดยใช้ความสัมพันธ์อ้างอิงตามงานวิจัยของ Bhattacharya et al. (2001) ดังนี้

1) การประเมินประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Gasification Efficiency)

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

$$\text{Gasification Efficiency } (\eta_g) = \frac{[V_g \times CV_g]}{[m_{\text{Fuel}} \times HHV_{\text{Fuel}}]} \quad (3.9)$$

เมื่อ

m_{Fuel} คือ อัตราการใช้เชื้อเพลิง (kg/hr)

V_g	คือ	อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง (Nm^3/hr)
HHV_{Fuel}	คือ	ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงกาคตะกอน (MJ/kg)
CV_g	คือ	ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิง (MJ/Nm^3)

2) การประเมินประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า (Electrical Efficiency)

$$\text{Electrical Efficiency } (\eta_{el}) = \frac{[\text{Energy equivalent of electrical power}]}{[\text{Rate of energy supplied to reactor}]}$$

$$\text{Electrical Efficiency } (\eta_{el}) = \frac{[3.6 \times P_e]}{[m_{\text{Fuel}} \times \text{HHV}_{\text{Fuel}}]} \quad (3.10)$$

เมื่อ

$$P_e \quad \text{คือ} \quad \text{กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ หรือ Electric Power Output (kW)}$$

3) การประเมินประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ (Engine-generator Efficiency)

$$\text{Engine-generator Efficiency } (\eta_e) = \frac{[\text{Energy equivalent of electric power}]}{[\text{Rate of energy supplied to engine}]}$$

$$\text{Engine-generator Efficiency } (\eta_e) = \frac{[3.6 \times P_e]}{[V_g \times \text{CV}_g]} \quad (3.11)$$

3.2.6 การศึกษาปริมาณและสมบัติของเสียที่เกิดขึ้นจากการผลิตพลังงาน

เมื่อได้สภาวะการเดินระบบที่นิ่งแล้ว ทำการเลือกอัตราการไหลที่ $180 \text{ m}^3/\text{hr}$ มาใช้เดินระบบต่อเนื่อง 70 ชั่วโมง โดยทำการศึกษาประสิทธิภาพการผลิตพลังงาน และศึกษามลพิษสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการผลิตพลังงาน โดยประสิทธิภาพการผลิตพลังงานมีขั้นตอนเหมือนกับหัวข้อ 3.2.5 ส่วนการศึกษาปริมาณและสมบัติของของเสียที่เกิดขึ้นจากเดินระบบ จะศึกษาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง ดังต่อไปนี้

1) ศึกษาปริมาณและสมบัติของเถ้า (Ash)

▪ ศึกษาอัตราการเกิดเถ้า (Ash Production) และ อัตราการเกิดเถ้าจำเพาะ (Specific Ash Consumption) เพื่อนำไปการประเมินอัตราการเกิดของเสีย วิธีการศึกษาทำ

เช่นเดียวกับหัวข้อ 3.2.4 (4) โดยจะเก็บข้อมูลทุก ๆ ชั่วโมงตลอดระยะเวลาเดินระบบต่อเนื่อง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย

▪ ศึกษาสมบัติของถ้ำ โดยการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate Analysis) ได้แก่ ปริมาณสารระเหย ปริมาณถ้ำ ปริมาณคาร์บอนคงตัว และค่าความร้อน การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) ได้แก่ C H O N S และวิเคราะห์องค์ประกอบสารพิษ ได้แก่ Cu Fe Zn Cd Pb Cl โดยใช้เครื่องมือและวิธีการวิเคราะห์เช่นเดียวกับที่ใช้ศึกษาสมบัติของกากตะกอน

2) การวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสีย

การศึกษานี้ จะทำการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียที่เกิดจากระบบ Water Scrubber และ Chiller Scrubber ซึ่งเกิดขึ้นจากการเดินระบบต่อเนื่อง 70 ชั่วโมง สำหรับต้นแบบโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จะใช้ระบบหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ซ้ำหรือเรียกว่าระบบปิด (Closed-loop System) โดยจะหมุนเวียนน้ำที่ผ่านการปรับสภาพแล้วมาใช้ในระบบอย่างต่อเนื่อง กระบวนการของระบบ แสดงในรูปที่ 3.12 โดยก่อนเริ่มเดินระบบ จะเติมน้ำสะอาดเข้าไปในถังพักน้ำ (Buffer Tank) ทั้ง 3 ถัง (1, 2, 3) จนถึงระดับที่กำหนด (ปริมาตรของน้ำที่หมุนเวียนใช้ในระบบเท่ากับ 10 m^3) จากนั้นน้ำในถังที่ 1 จะถูกดึงไปใช้กับระบบทำความสะอาดแก๊ส คือ Water Scrubber และ Chiller Scrubber (Scrubber 1, 2) อย่างต่อเนื่อง และในขณะที่ระดับน้ำในถังที่ 1 เริ่มลดลง น้ำในถังที่ 2 ก็จะไหลล้น (Over flow) ไปแทนที่ ขณะเดียวกันน้ำในถังที่ 3 ก็ จะไหลล้นไปแทนที่น้ำในถังที่ 2 ตามลำดับ

ในช่วงของการเดินระบบน้ำที่ถูกใช้กับระบบทำความสะอาดแก๊สก็จะถูกรวบรวมกลับมาไว้ในถังที่ 3 ซึ่งจะกลายเป็นน้ำเสียที่มีมลสารต่าง ๆ ปนเปื้อนซึ่งจะมีทั้งส่วนที่ละลายน้ำและส่วนที่ไม่ละลาย ดังนั้นถังพักน้ำ จึงถูกออกแบบมาสำหรับในห้องประกอบในน้ำเสียส่วนที่ไม่ละลายน้ำตกตะกอนสู่ก้นถังและแยกชั้นกับน้ำส่วนบน ก่อนที่น้ำจะมีการไหลล้นออกไป แต่เมื่อเดินระบบได้ประมาณ 12 ชั่วโมง น้ำในระบบจะมีความสกปรกเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จึงต้องสูบน้ำเสียในถังที่ 2 และ 3 ไปทำการปรับสภาพหรือบำบัดเบื้องต้นใน Flocculation Tank โดยใช้การโคแอกูเลชันด้วยสารเคมี (Coagulation) สารโคแอกูแลนต์ (Coagulant) ที่ใช้คือ เฟอริกคลอไรด์ (FeCl_3) และปูนขาว (CaOH) ร่วมกับสารโคแอกูแลนต์เอ็ด (Coagulant aid) คือ โพลีเมอร์ประจุลบ (Polymer anion) โดยมีอัตราการเติมสารเคมีจากการทำจาร์เทส (FeCl_3 ที่ความเข้มข้น 46% ปริมาตร 40 ml; CaOH ที่ความเข้มข้น 5,000 mg/l ปริมาตร 1 L และ Polymer anion ที่ความเข้มข้น 1,000 mg/l ปริมาตร 1 L)

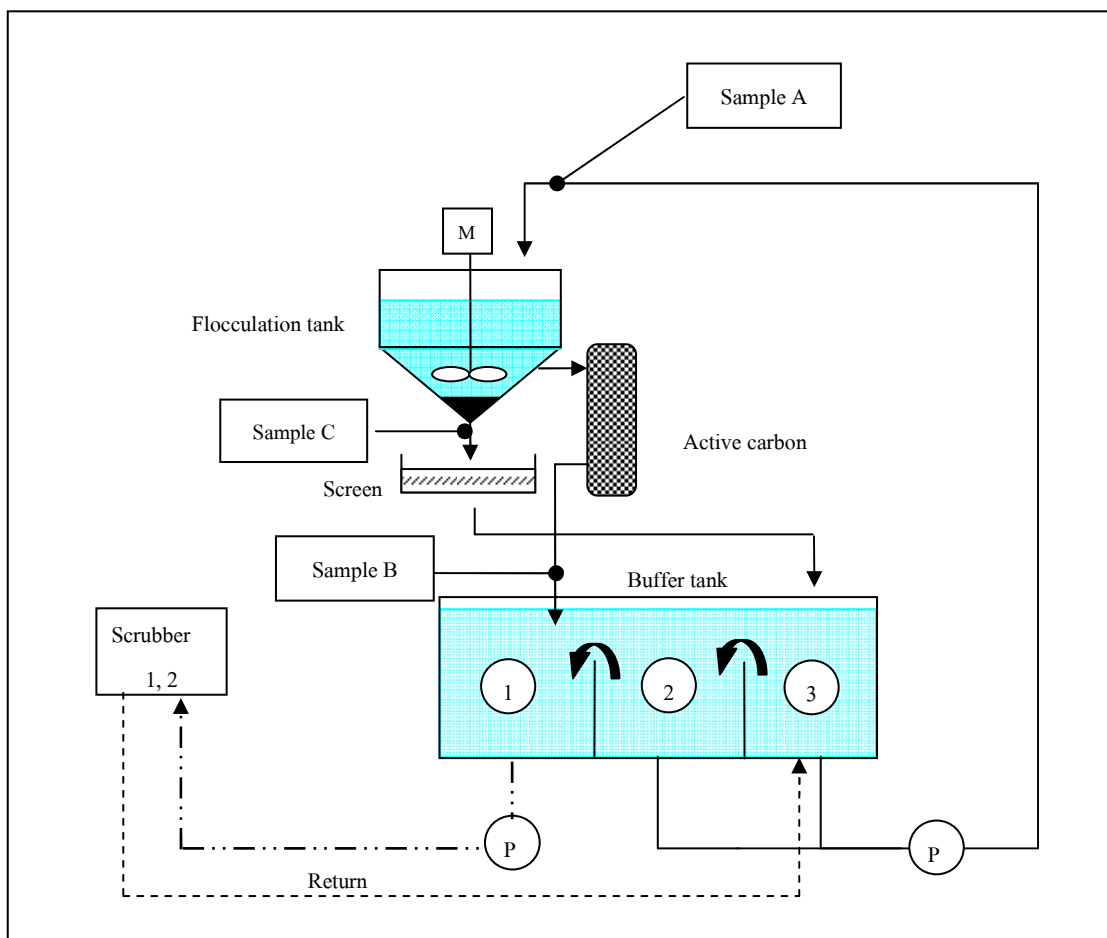
ทั้งนี้ระยะเวลาในการบำบัดคือ ทุก ๆ 6 ชั่วโมง (โดยปรกติการเดินระบบที่ใช้เชื้อเพลิงชีวมวลจะใช้ Polyaluminum Chloride และ Polymer anion เป็นสารเร่งการรวมตัวของ

ตะกอนแต่จากการทดสอบเบื้องต้นที่ใช้น้ำเสียจากการเดินระบบโดยเชื้อเพลิงกากตะกอนไปทำ
 จาร้ทดสอบว่าตะกอนไม่รวมตัวกัน) ภายหลังจากการบำบัดน้ำส่วนใสจะมีการบำบัดอีกครั้งโดยกรอง
 ผ่านถ่านกัมมันต์ (Active Carbon) ก่อนจะรวบรวมกลับมายังถังที่ 1 เพื่อหมุนเวียนใช้กับระบบทำ
 ความสะอาดแก๊สต่อไป สำหรับตะกอนน้ำเสียจะผ่านตะแกรง (Screen) เพื่อคัดเศษวัสดุหรือของแข็ง
 แขนงลอยต่าง ๆ สำหรับตะกอนน้ำเสียส่วนที่ผ่านตะแกรงจะรวบรวมไปเก็บไว้ในถังที่ 3 เพื่อนำ
 กลับไปบำบัดอีกครั้ง โดยระบบจะหมุนเวียนเช่นนี้อย่างต่อเนื่อง

ในการศึกษานี้จะทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียจาก 3 จุด ได้แก่ Sample A (น้ำเสียที่มา
 จากถังที่ 2, 3 ก่อนทำการบำบัด) Sample B (น้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว) และ Sample C (ตะกอนน้ำ
 เสีย) โดยวิธีการและขั้นตอนการวิเคราะห์อ้างอิงตามมาตรฐานของ American Public Health
 Association (APHA, 1998) ซึ่งการศึกษาปริมาณของเสียในน้ำเสีย แบ่งได้ 2 หัวข้อ คือ

- ศึกษาแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของมลสารในน้ำเสียทั้ง 3 จุด ในระหว่างการเดินระบบ
 ต่อเนื่อง 70 ชั่วโมง โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียหลังจากเดินระบบได้ 24 ชั่วโมง และหลังจาก
 นั้นจะเก็บน้ำเสียทุก ๆ 12 ชั่วโมง (เก็บตัวอย่างทั้งหมด 5 ครั้ง) โดยวิเคราะห์พารามิเตอร์ ดังต่อไปนี้
 Total Solids (TS) Total Dissolved Solids (TDS) Biological Oxygen Demand (BOD) Chemical
 Oxygen Demand (COD) Total Kjeldahl Nitrogen (TKN) Fat Oil and Grease (FOG)

- ศึกษาคุณภาพน้ำเสียหลังจากการเดินระบบต่อเนื่อง 70 ชั่วโมงสิ้นสุดลง โดย
 วิเคราะห์พารามิเตอร์ที่มีความเป็นพิษ ดังต่อไปนี้ Cyanide (HCN) Formaldehyde Sulphide (H₂S)
 Phenols Free chlorine และโลหะหนัก (Cu Fe Zn Cd Pb) เพื่อใช้เปรียบเทียบกับข้อกำหนดของ
 กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม พ.ศ.2539 เรื่อง มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำ
 หึ่งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม



รูปที่ 3.12 แผนผังระบบบำบัดน้ำเสียแบบปิด

3) การวิเคราะห์คุณภาพแก๊สไอเสีย (Exhaust Gas)

▪ ตรวจสอบแก๊สไอเสียที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงทั้ง 3 สภาวะ คือ $100 \text{ m}^3/\text{hr}$, $150 \text{ m}^3/\text{hr}$ และ $180 \text{ m}^3/\text{hr}$ โดยการวัดจะใช้เครื่องวิเคราะห์แก๊สไอเสีย (Flue Gas Analyzer) ยี่ห้อ Testo-350XL ดังแสดงไว้ใน รูปที่ 3.5 (ญ) ทั้งนี้ข้อมูลจะถูกบันทึกต่อเนื่องโดยมีอัตราการเก็บข้อมูล 30 วินาที/ครั้ง โดยในการตรวจวัดแต่ละครั้งจะใช้เวลา 30 นาที (แต่ละอัตราการไหลจะทำการตรวจวัด 3 ครั้ง) พารามิเตอร์ที่ตรวจวัดได้แก่ Temperature O_2 CO_2 CO SO_2 NO_2 และ NO

▪ ตรวจสอบปริมาณแก๊สไอเสียที่เกิดขึ้นในระหว่างการเดินระบบต่อเนื่อง 70 ชั่วโมง โดยเครื่องมือ วิธีการตรวจวัด และพารามิเตอร์ที่ตรวจวัดเช่นเดียวกับการตรวจวัดแก๊สไอเสียที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงทั้ง 3 สภาวะ แต่จะทำการตรวจวัดทุก ๆ 12 ชั่วโมง

3.2.7 การประเมินอัตราการเกิดของเสีย

นำผลการศึกษাপริมาณและสมบัติของเสียที่เกิดขึ้นจากการเดินระบบต่อเนื่อง 70 ชั่วโมง มาประเมินอัตราการเกิดของเสียต่อหน่วยไฟฟ้า โดยคำนวณจากความสัมพันธ์ ดังต่อไปนี้

1) ของเสียในรูปเถ้า

$$\text{Waste Production} = [\text{Specific Ash Production}] \times [\text{Concentration of ash}] \quad (3.12)$$

เมื่อ

Waste Production	คือ	อัตราการเกิดมลพิษ (g/kWh)
Specific Ash Production	คือ	อัตราการเกิดเถ้าจำเพาะ (kg/kWh)
Concentration of ash	คือ	ความเข้มข้นของสารพิษในเถ้า (mg/kg)

2) ของเสียในรูปน้ำเสีย

$$\text{Waste Production} = [V_{\text{ww}} \times \text{Concentration of emission}] / [T_o \times P_e] \quad (3.13)$$

เมื่อ

V_{ww}	คือ	Volume of Wastewater (10 m^3)
Concentration of wastewater	คือ	ความเข้มข้นของสารพิษในน้ำเสีย (mg/l)
T_o	คือ	Operation Time (70 ชั่วโมง)
P_e	คือ	Electric Power Output (kW)

3) ของเสียในรูปแก๊สไอเสีย

$$\text{Waste Production} = [V_{\text{ex}} \times \text{Concentration of emission}] / [P_e] \quad (3.14)$$

เมื่อ

V_{ex}	คือ	Exhaust Gas Flow Rate (m^3/hr)
Concentration of Exhaust	คือ	ความเข้มข้นสารพิษในไอเสีย (mg/m^3)

บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปรายผล

4.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติของกากตะกอน

ในการศึกษานี้ใช้ตัวอย่างกากตะกอนน้ำเสียจาก 2 แหล่งคือ โรงงานกลุ่มฟอกย้อมในสวนอุตสาหกรรมศรีอโศกพัฒนภิรินทร์บุรี และ โรงงานฟอกย้อม บริษัทไทยกุลแซ่ จำกัด และกากตะกอนผสม โดยการศึกษาสมบัติทางกายภาพ องค์ประกอบแบบประมาณ และองค์ประกอบแบบแยกธาตุ เพื่อทำการประเมินความเป็นไปได้ในการนำมาผลิตพลังงานโดยกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ซึ่งสมบัติและองค์ประกอบที่มีอยู่ในกากตะกอนนั้นจะสามารถอธิบายลักษณะหรือมลพิษสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นได้ โดยผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่ากากตะกอนจากทั้ง 2 แหล่งมีสมบัติทางกายภาพใกล้เคียงกัน แต่มีองค์ประกอบแตกต่างกันบ้าง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1.1 สมบัติทางกายภาพของกากตะกอน (Physical Properties)

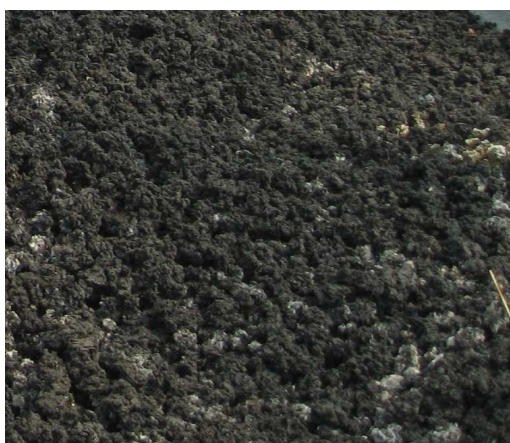
ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของกากตะกอนที่ได้รับมาจากโรงบำบัดน้ำเสียทั้ง 2 แหล่งภายหลังจากผ่านกระบวนการรีดน้ำ และลดความชื้นโดยการตากแดดใกล้เคียงกัน พบว่ามีความชื้นประมาณ 20% และมีความหนาแน่นวัดได้ 204 kg/m^3 มีสีดำ ลักษณะเป็นผงละเอียดคล้ายดินละเอียดกับก้อนขนาดเล็ก ขนาด 1-10 มิลลิเมตร หลังจากการเตรียมกากตะกอนให้พร้อมใช้โดยการอัดเป็นแท่ง พบว่าสมบัติทางกายภาพของกากตะกอนเปลี่ยนไป โดยความชื้นอยู่ในช่วง 15-18% มีลักษณะเป็นทรงกระบอกมีรูตรงกลาง $\varnothing 45$ มิลลิเมตร ความยาว 40-50 มิลลิเมตร และมีความหนาแน่น 380 kg/m^3 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1 ซึ่งกากตะกอนที่อัดแท่งดังกล่าวเหมาะที่จะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการศึกษาครั้งนี้

ตารางที่ 4.1 ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพของกากตะกอน

พารามิเตอร์	ออกจากระบบ บำบัดน้ำเสีย	ผ่านการเตรียม ครั้งที่ 1 ⁽¹⁾	หลังเตรียม ⁽²⁾
ความหนาแน่น (kg/m ³)	N/A	204	380
ความชื้น (%)	80	20	15
ขนาดเชื้อเพลิงโดยเฉลี่ย (mm x mm)	N/A	1-10	45 x 45

หมายเหตุ : ⁽¹⁾ เตรียมจากโรงงาน

⁽²⁾ เตรียมที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



ก. กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย



ข. เชื้อเพลิงกากตะกอนอัดแท่ง

รูปที่ 4.1 ลักษณะของกากตะกอน

4.1.2 องค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate Value)

ผลการศึกษาองค์ประกอบแบบประมาณของกากตะกอน ดังแสดงในตารางที่ 4.2 พบว่ากากตะกอนน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม บริษัทไทยกุลแซ่ จำกัด มีค่าความร้อน และปริมาณสารระเหย ค่อนข้างสูง คือ 17.42 MJ/kg และ 69% ตามลำดับ มีปริมาณเถ้าต่ำคือ 18.55% มีคุณสมบัติเทียบเท่ากับเชื้อเพลิงชีวมวล (สมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวลได้กล่าวไว้ในบทที่ 2) ในขณะที่กากตะกอนน้ำเสียจากโรงงานกลุ่มฟอกย้อมในสวนอุตสาหกรรมศรีอโศกพัฒนาบิรินทร์บุรี ที่มีค่าความร้อน ปริมาณสารระเหยต่ำกว่า ซึ่งมีค่าเท่ากับ 13.41 MJ/kg และ 53% ตามลำดับ และมีปริมาณเถ้าสูงกว่า คือ 34.08% ตามลำดับ ทั้งนี้ในระบบการอัดแท่ง กากตะกอนจะถูกนำมาผสมรวมกัน

และใช้กากตะกอนของโรงงานกลุ่มฟอกย้อมในสวนอุตสาหกรรมเครือสหพัฒน์กบินทร์บุรีมากกว่าประมาณ 6 เท่า จึงเป็นผลให้องค์ประกอบแบบประมาณของกากตะกอนผสม มีค่าใกล้เคียงกับกากตะกอนของโรงงานกลุ่มฟอกย้อมในสวนอุตสาหกรรมเครือสหพัฒน์กบินทร์บุรี ทั้งนี้กากตะกอนผสม มีค่าความร้อน และปริมาณสารระเหย เท่ากับ 13.55 MJ/kg และ 53% ตามลำดับ หากเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงชีวมวล จะเห็นว่ากากตะกอนมีคุณสมบัติที่สามารถจะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ เพราะมีค่าความร้อน และปริมาณสารระเหยใกล้เคียงกับเชื้อเพลิงชีวมวล ค่าความร้อนของกากตะกอน แสดงให้เห็นว่าปริมาณความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ หรือพลังงานที่ปลดปล่อยออกมาขณะเผาไหม้ จะถูกนำไปใช้เป็นแหล่งความร้อนที่สำคัญในการเกิดปฏิกิริยาอุณหภูมิในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง และทำให้องค์ประกอบที่เป็นสารระเหยได้รับความร้อนเปลี่ยนรูปไปเป็นแก๊สเชื้อเพลิง อย่างไรก็ตามเชื้อเพลิงกากตะกอนผสมยังมีข้อด้อย เนื่องจากมีปริมาณเถ้าที่สูง คือ 30.45% เมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงชีวมวล เชื้อเพลิงที่มีเถ้าสูงจะทำให้เดินระบบค่อนข้างยุ่งยาก เนื่องจากต้องทำการดึงเถ้าออกให้ทันทั่วทั้ง และบ่อยครั้งขึ้นเพราะหากไม่สามารถนำเถ้าออกจากระบบได้ทัน เถ้าที่สะสมอยู่ในเตาผลิตแก๊สจะหลอมตัวเป็นก้อนกลายเป็นสแลก (slag) เมื่อหลอมตัวกันเป็นก้อนขนาดใหญ่จะปิดช่องทางการไหลของแก๊ส หรือที่เรียกว่าระบบ ถูกบล็อก (block) ซึ่งจะไม่สามารถเดินระบบต่อไปได้

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณของกากตะกอน

พารามิเตอร์	กากตะกอน โรงงานกลุ่มฟอกย้อม ในสวนอุตสาหกรรม เครือสหพัฒน์กบินทร์บุรี	กากตะกอนโรงงาน ฟอกย้อมบริษัทไทย กุลแซ่ จำกัด	กากตะกอนผสม
% ความชื้น	5.56	1.78	5.44
% สารระเหย	53.00	69.00	56.00
% คาร์บอนคงตัว	7.36	11.00	8.11
% เถ้า	34.08	18.55	30.45
ค่าความร้อน (MJ/kg)	13.41	17.42	13.55

4.1.3 องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate Value)

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุของกากตะกอนด้วยเครื่อง CHNS Elemental Analyser ดังแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่า กากตะกอนจาก ทั้ง 2 แห่งมีองค์ประกอบแบบแยกธาตุไม่แตกต่างกันมาก โดยจะพบว่ากากตะกอนของโรงงานฟอกย้อม บริษัทไทยกุลแซ่ จำกัด มีปริมาณคาร์บอน และธาตุไฮโดรเจนสูงกว่าเล็กน้อย คือ 41.98% และ 6.69% ตามลำดับ ในขณะที่โรงงานกลุ่มฟอกย้อมในสวนอุตสาหกรรมศรีสุพัฒน์กบินทร์บุรี จะมีค่า 36.05% และ 5.49% ทั้งนี้กากตะกอนผสมมีค่าเท่ากับ 36.38% และ 5.86% ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงชีวมวลจะเห็นได้ว่า กากตะกอนทั้ง 2 แหล่ง รวมทั้งกากตะกอนผสมมีปริมาณคาร์บอน และไฮโดรเจนใกล้เคียงกับชีวมวลประเภทไม้ สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ โดยคาร์บอนและไฮโดรเจนจะเป็นธาตุหลักที่จะถูกเปลี่ยนไปเป็นแก๊สเชื้อเพลิงโดยปฏิกิริยาอุณหภูมิในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน นอกจากนี้ยังพบว่ากากตะกอนจากทั้ง 2 แหล่งมีปริมาณของธาตุซัลเฟอร์ต่ำ และในกากตะกอนผสมตรวจพบเท่ากับ 0.98% แสดงถึงแนวโน้มของการเกิดแก๊สมลพิษในรูป SO_2 และ H_2S จะมีค่าต่ำ

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุของกากตะกอน

พารามิเตอร์	กากตะกอนโรงงานกลุ่มฟอกย้อมในสวนอุตสาหกรรมศรีสุพัฒน์กบินทร์บุรี	กากตะกอนโรงงานฟอกย้อมบริษัทไทยกุลแซ่ จำกัด	กากตะกอนผสม
% คาร์บอน	36.05	36.05	36.38
% ไฮโดรเจน	5.49	6.69	5.86
% ไนโตรเจน	5.01	4.65	5.22
% ซัลเฟอร์	0.98	0.75	0.98
% ออกซิเจน	52.47	45.93	47.98

สำหรับผลการวิเคราะห์ปริมาณคลอรีนและโลหะหนักในกากตะกอน ดังแสดงในตารางที่ 4.4 พบว่ากากตะกอนทั้ง 2 แหล่ง มีปริมาณโลหะหนักปนเปื้อนค่อนข้างสูง โดยเฉพาะปริมาณเหล็ก (Fe) สาเหตุอาจเนื่องมาจากการใช้สารเคมีกลุ่มที่มีสารประกอบเหล็กในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย ทั้งนี้ในกากตะกอนผสม มีปริมาณเหล็กเท่ากับ 2.36% ซึ่งการจัดการกากตะกอนที่มีโลหะหนักปนเปื้อนสูง จำเป็นต้องมีการจัดการเป็นพิเศษ ทั้งนี้ในกระบวนการผลิตพลังงานโดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน วัฏจักรของโลหะหนักส่วนใหญ่จะอยู่ในเถ้า (Marrero et al., 2004; Vervaeke et al., 2005; Kwak et al., 2006) ซึ่งจะอธิบายผลการศึกษาลำดับต่อไป

ส่วนปริมาณคลอรีน (Cl) พบว่ากากตะกอนจากทั้ง 2 แหล่งพบการปนเปื้อนต่ำ ทั้งนี้ ปริมาณคลอรีนในกากตะกอนผสม เท่ากับ 0.74% ถือว่ามีค่าต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงชีวมวล ที่นิยมนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานในปัจจุบัน

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบสารพิษแบบแยกธาตุของกากตะกอน

พารามิเตอร์	กากตะกอนโรงงานกลุ่มฟอก ย้อมในสวนอุตสาหกรรม เครื่องสหพัฒน์กบินทร์บุรี	กากตะกอนโรงงาน ฟอกย้อมบริษัท ไทยกุลแซ่ จำกัด	กากตะกอนผสม
% คลอรีน	0.773	0.622	0.74
% ทองแดง	0.170	0.143	0.129
% เหล็ก	2.387	1.840	2.36
% สังกะสี	0.388	0.299	0.331
% เกียคเมียม	0.0013	0.0001	0.001
% ตะกั่ว	0.028	0.0027	0.026

4.2 ผลการทดสอบสถานะที่เหมาะสมในการเดินระบบ

การทดสอบสถานะที่เหมาะสมในการเดินระบบ ทำโดยการนำเชื้อเพลิงกากตะกอนไปใช้เป็นเชื้อเพลิงกับต้นแบบโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาด 100 กิโลวัตต์ ที่ใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันชนิดไหลลง โดยในการทดสอบจะหาสถานะที่จะสามารถเดินระบบที่เหมาะสม ที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง 3 ระดับ คือ 100 m³/hr, 150 m³/hr และ 180 m³/hr ผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงชั้นของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในเตา องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ การปนเปื้อนของทาร์และฝุ่น ความสามารถในการผลิตไฟฟ้า อัตราการใช้เชื้อเพลิงกากตะกอน และอัตราการเกิดเถ้า ดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.2.1 อัตราการดึงเถ้าออกจากเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Ash Discharge Rate)

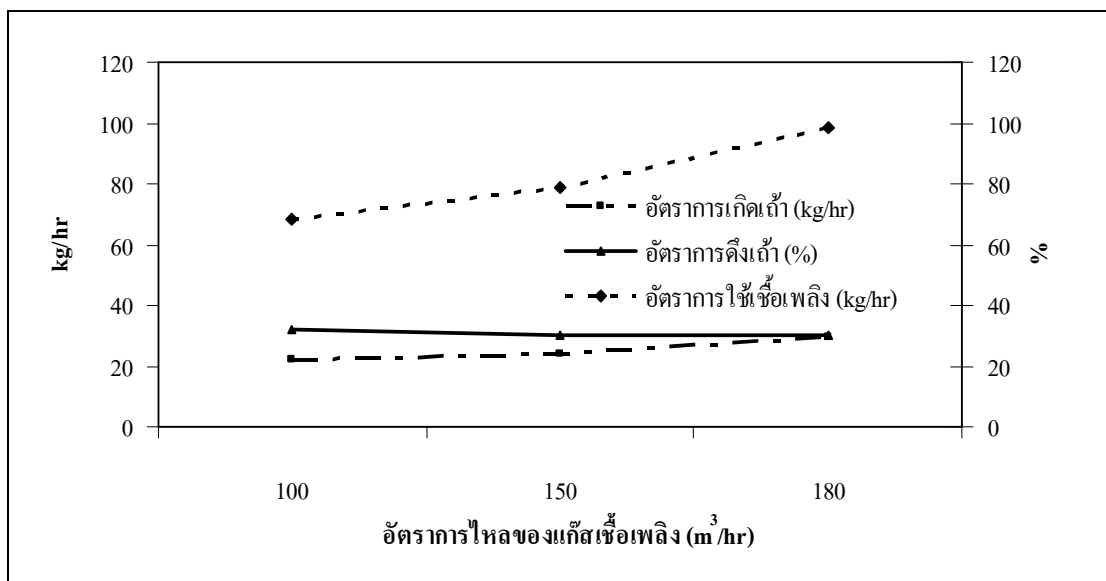
อัตราการดึงเถ้าออกจากเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง เป็นสิ่งสำคัญที่สุดในการเดินระบบผลิตพลังงานโดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน โดยทั่วไปการดึงเถ้าออกจากเตาจะสัมพันธ์กับการป้อนวัตถุดิบเชื้อเพลิง โดยปกติจะดึงเถ้าออกให้ปริมาณเท่ากับ ปริมาณเถ้าที่ได้จากผลการวิเคราะห์แบบประมาณ ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ เชื้อเพลิงกากตะกอนมีปริมาณเถ้า 30.45% ซึ่งสภาวะการทำงานที่การไหลของแก๊สเชื้อเพลิงที่ 100 m³/hr, 150 m³/hr และ 180 m³/hr ใช้เชื้อเพลิงกากตะกอนผสม (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 45 มิลลิเมตร ยาว 40-50 มิลลิเมตร และความชื้น 15%) ในอัตรา 68.23, 78.76

และ 98.26 kg/hr ตามลำดับ โดยควบคุมอัตราการดึงเข้าออกจากเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง ประมาณ 30% ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.2

อย่างไรก็ดีในการศึกษานี้ได้ทำการทดลองดึงเข้าออกในปริมาณที่น้อยกว่าและมากกว่า 30% ปรากฏว่าในกรณีที่ดึงเข้าออกน้อย เถ้าที่สะสมอยู่จะหลอมรวมตัวกัน ปิดทางเดินของแก๊สเชื้อเพลิง ในกรณีที่ดึงเข้ามากกว่า 30% โดยทดลองดึงในระดับ 40% ผลปรากฏว่า เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงดับลง เนื่องจากการดึงเข้าเร็วเกินกว่าปฏิกิริยาอุณหเคมีที่เกิดขึ้นในเตา ซึ่งชี้ให้เห็นว่าในการเดินระบบโดยใช้เชื้อเพลิงที่มีปริมาณเถ้าสูง ต้องมีการป้องกันปัญหาของเถ้าหลอม การแก้ไขปัญหาดังกล่าวทำได้โดยการควบคุมอัตราการป้อนเชื้อเพลิงและการดึงเข้าออกให้สัมพันธ์กัน ทั้งนี้ปริมาณของเถ้าที่จะต้องนำออกจากเตานั้นจะพิจารณาได้จากปริมาณของเถ้าที่ได้จากผลการวิเคราะห์สมบัติแบบประมาณ

ตารางที่ 4.5 อัตราการใช้เชื้อเพลิงและอัตราการเกิดเถ้า

อัตราการไหลของ แก๊สเชื้อเพลิง (m ³ /hr)	อัตราการใช้เชื้อเพลิง กากตะกอน (kg/hr)	อัตราการเกิดเถ้า (kg/hr)	อัตราการดึง เถ้าออก %
100	68.23	21.90	32.10
150	78.76	23.80	30.13
180	98.26	29.80	30.33



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงทั้ง 3 ระดับ กับอัตราการใช้เชื้อเพลิงกาคตะกอนและการเกิดแก๊ส

4.2.2 อุณหภูมิของแก๊สเชื้อเพลิงและชั้นของอุณหภูมิภายในเตา

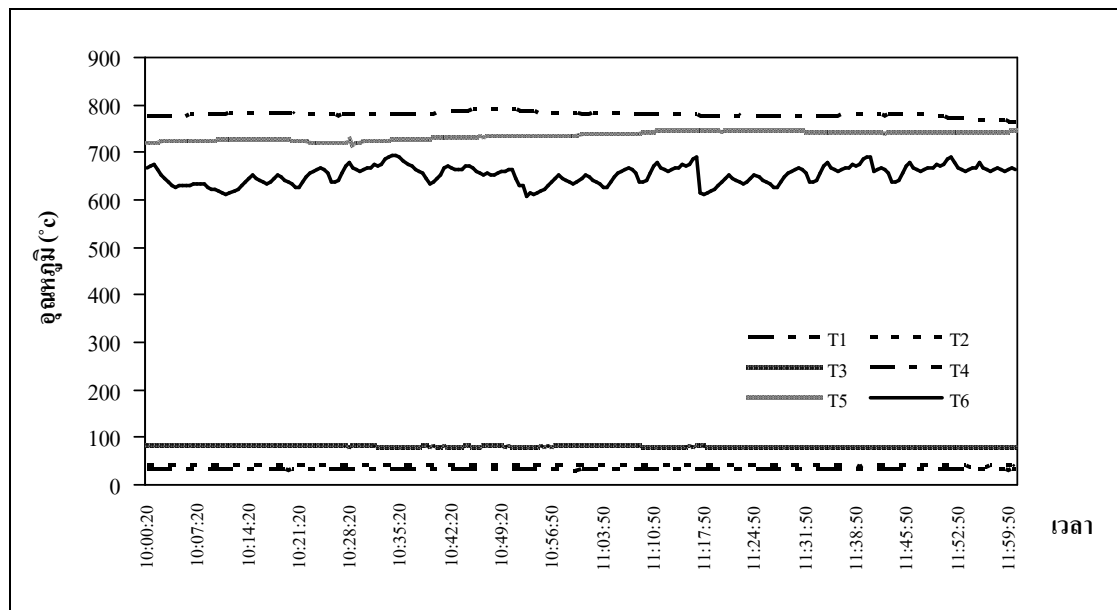
การศึกษาอุณหภูมิของแก๊สเชื้อเพลิงและชั้นของอุณหภูมิภายในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง เพื่ออธิบายปฏิกิริยาอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง ในระยะความสูงต่าง ๆ โดยวัดอุณหภูมิที่ 6 ชั้นความสูง คือ T_1 , T_2 , T_3 , T_4 , T_5 , และ T_6 ซึ่งมีความสูงจากระยะอ้างอิงเท่ากับ 660, 1060, 1460, 1860, 2280 และ 2700 มิลลิเมตร ตามลำดับ และอุณหภูมิของแก๊สในตำแหน่งออกจากเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง และตำแหน่งก่อนเข้าเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้า คือ T_0 และ T_7 ตามลำดับ ซึ่งอุณหภูมิของแก๊สเชื้อเพลิงจะถูกบันทึกแบบต่อเนื่องด้วยระบบ Online Measuring System เป็นการเก็บข้อมูลต่อเนื่องที่มีอัตราการเก็บตัวอย่าง 30 วินาที/ครั้ง ดังนั้นเพื่อให้ได้ข้อมูลที่สามารถนำมาเป็นตัวแทนที่แท้จริงได้ และเพื่อให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิได้อย่างต่อเนื่องและชัดเจนจึงใช้ข้อมูลเฉลี่ย ดังสรุปได้ตามตารางที่ 4.6 ทั้งนี้ตัวอย่างผลการวัดอุณหภูมิในตำแหน่งของความสูงทั้ง 6 ระยะ ที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง 100 m³/hr ดังแสดงในรูปที่ 4.3

ทั้งนี้เมื่อนำข้อมูล T_1 - T_6 ของอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงทั้ง 3 ระดับมาหาความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในเตาและระยะความสูง ดังแสดงในรูปที่ 4.4 พบว่าชั้นของอุณหภูมิ (Temperature Profile) ของอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงทั้ง 3 ระดับอยู่ในช่วงใกล้เคียงกัน ลักษณะชั้นของอุณหภูมิ (Pattern) มีรูปแบบที่คล้ายคลึง ทั้งนี้ Pattern ดังกล่าวเป็น Pattern ของเชื้อเพลิงที่มีความหนาแน่นสูง ซึ่งผลการศึกษานี้สอดคล้องกับ

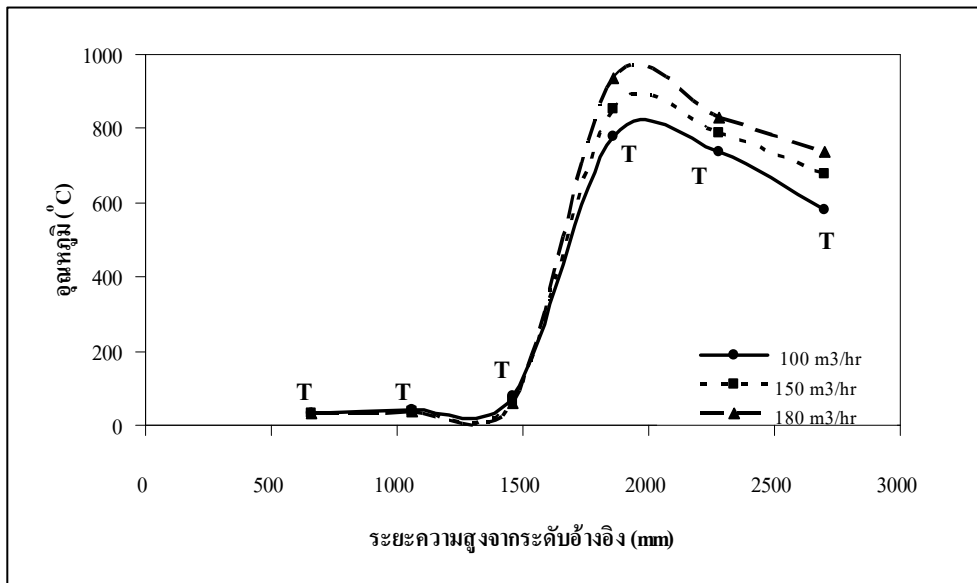
ผลงานวิจัยของ วีรชัย อัจหาญ และคณะ (2551) ที่ศึกษาเปรียบเทียบความหนาแน่นของเชื้อเพลิงชีวมวลกับลักษณะชั้นของอนุภูมิในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง และพบว่าเชื้อเพลิงที่มีความหนาแน่นสูง คือ แกลบอัดแท่งที่มีความหนาแน่นเท่ากับ 323 kg/m^3 จะมีลักษณะชั้นของอนุภูมิ

ตารางที่ 4.6 อนุภูมิเฉลี่ยของแก๊สเชื้อเพลิงที่ระยะความสูง ตำแหน่งออกจากเตาผลิตแก๊ส และตำแหน่งก่อนเข้าเครื่องยนต์

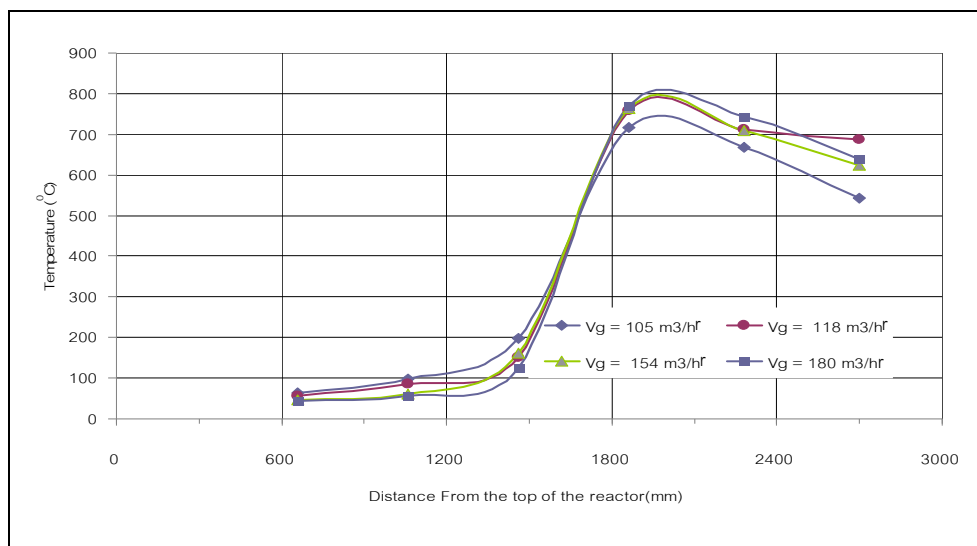
อัตราการไหลของ แก๊สเชื้อเพลิง (m^3/hr)	อนุภูมิเฉลี่ยของแก๊สเชื้อเพลิง ($^{\circ}\text{C}$)							
	ตำแหน่งความสูงจากระยะอ้างอิง						ออกจากเตา ผลิตแก๊ส (T_0)	ก่อนเข้า เครื่องยนต์ (T_g)
	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6		
100	32.3	40.4	80.3	779.7	735.3	582.1	517.85	38.63
150	31.4	36.2	63.7	851.8	789.7	679.3	586.2	26.5
180	31.0	35.4	58.8	934.6	830.0	735.5	614.0	26.3



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงข้อมูลเส้นอุณหภูมิเฉลี่ยที่ระยะความสูงทั้ง 6 ระยะ ที่บันทึกด้วยระบบ Online Measuring System ที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง $100 \text{ m}^3/\text{hr}$



ก. เชื้อเพลิงกากตะกอนที่มีความหนาแน่น 380 kg/m^3



ข. เชื้อเพลิงแกลบอัดแท่งที่มีความหนาแน่น 323 kg/m^3

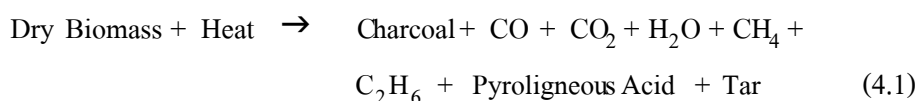
(ที่มา : วีรชัย ออาจหาญ และคณะ, 2551)

รูปที่ 4.4 เส้นชั้นของอุณหภูมิภายในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Temperature Profile) ที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงระดับต่าง ๆ

การอธิบายประเภทของปฏิกิริยาอุนเคมี ที่เกิดขึ้นภายในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากการใช้เชื้อเพลิงกากตะกอน โดยใช้ชั้นของอุนหุมิภายในเตาอธิบายได้ดังต่อไปนี้

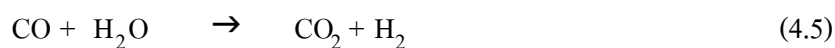
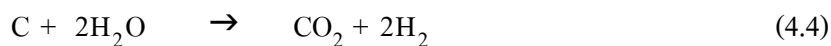
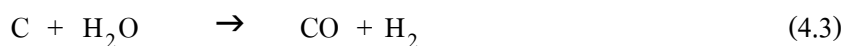
ที่ระยะความสูง T_1-T_3 ซึ่งเป็นความสูงช่วงบนของเตา อุนหุมิเฉลี่ยค่อนข้างต่ำ คือประมาณไม่เกิน 100°C กระบวนการที่เกิดขึ้นจะเป็นช่วงของ Drying Zone คือช่วงที่ความชื้นในเชื้อเพลิงถูกกำจัดออก แต่เนื่องจากเชื้อเพลิงมีความหนาแน่นสูง การพาความร้อนจากปฏิกิริยาใน Combustion Zone ทำได้ยากและช้า จึงทำให้อุนหุมิในช่วงแรกค่อนข้างต่ำ

ที่ระยะความสูงระหว่าง T_3-T_5 เป็นช่วงที่อุนหุมิสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยที่ T_4 เป็นจุดที่ป้อนอากาศเข้าสู่เตา จะมีอุนหุมิสูงที่สุด ช่วง T_4-T_5 นี้จะเป็นหัวใจ Heat Hearth ทั้งนี้ Hot Zone ที่เกิดจากกระบวนการ Combustion และถ่ายเทให้กับบริเวณรอบ ๆ ระหว่าง T_3-T_4 เป็น Zone ของปฏิกิริยา Pyrolysis หรือ Distillation ช่วงอุนหุมิ $200-500^\circ\text{C}$ (Kirubakaran et al., 2007) โดยผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นประกอบไปด้วยทั้งของแข็ง ของเหลว สารอินทรีย์ระเหยง่าย และแก๊ส ดังสมการที่ (4.1)



ที่ระยะความสูงระหว่าง T_5-T_6 จะเป็นช่วง Reduction Zone มีอุนหุมิในช่วง $500-700^\circ\text{C}$ ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจาก Zone ก่อนหน้านี้จะถูกนำมาใช้เพื่อเป็นสารตั้งต้น โดยปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในช่วง T_4-T_5 นี้คือปฏิกิริยาของ C กับ CO_2 เกิดเป็น CO ดังสมการที่ (4.2) เรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือ Boudouard Reaction และจะเกิดปฏิกิริยา Water Shift Reaction โดยเป็นปฏิกิริยาของ C กับ H_2O เกิดเป็น H_2 ดังสมการที่ (4.3) ซึ่งปฏิกิริยาทั้งสองเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อนและเป็นปฏิกิริยาหลักที่ทำให้เกิดแก๊สเชื้อเพลิงที่ต้องการ คือ CO และ H_2 สำหรับกรณีเชื้อเพลิงที่มีความชื้นสูง ปริมาณน้ำส่วนเกิน (H_2O) จะทำปฏิกิริยากับ C และ CO ต่อเนื่องทำให้ปริมาณ CO ลดลงและมีปริมาณแก๊ส CO_2 สูงขึ้น ดังสมการที่ (4.4) และ (4.5) ส่งผลให้ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้มีค่าลดลง จึงจำเป็นต้องควบคุมความชื้นของกากตะกอนให้มีค่าต่ำก่อนนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง ทั้งนี้ H_2 บางส่วนจะทำปฏิกิริยากับ C ทำให้เกิดแก๊สมีเทนซึ่งเป็นปฏิกิริยาหลักของการผลิตแก๊สมีเทน ดังสมการที่ (4.6) ปฏิกิริยานี้เรียกว่า Methane Production หรือ Methanization





4.2.3 องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง (Gas Composition)

การวิเคราะห์องค์ประกอบแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ ด้วยเครื่อง Gas Chromatography (ยี่ห้อ SIMADSU รุ่น GC-14B โดยการเก็บตัวอย่างทุก ๆ 30 นาที ณ ตำแหน่งก่อนเข้าเครื่องยนต์ ตำแหน่ง Gc แสดงไว้ในรูปที่ 3.5 บทที่ 3) องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงเฉลี่ย และค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงเฉลี่ยที่ได้จากการคำนวณ (ตัวอย่างการคำนวณ แสดงไว้ในภาคผนวก ค) ที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงทั้ง 3 ระดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.7 พบว่าองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงทั้ง 3 ระดับ มีความใกล้เคียงกัน พิจารณาได้จากข้อมูลเปรียบเทียบ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ทั้งนี้ องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้สามารถจัดเป็น 2 กลุ่ม คือ

1) กลุ่มที่จุดไฟติด (Combustible Gas) ประกอบด้วย CO , H_2 และ CH_4 ในสัดส่วนโดยปริมาตรเฉลี่ยเท่ากับ 13.83%, 16.41%, และ 2.26% ตามลำดับ โดยที่ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงคำนวณได้เฉลี่ย 4.91 MJ/Nm³ ซึ่งจัดเป็นแก๊สที่นำไปใช้เป็นพลังงาน หรือนำไปใช้เชื้อเพลิงให้กับเครื่องยนต์สันดาปภายในได้

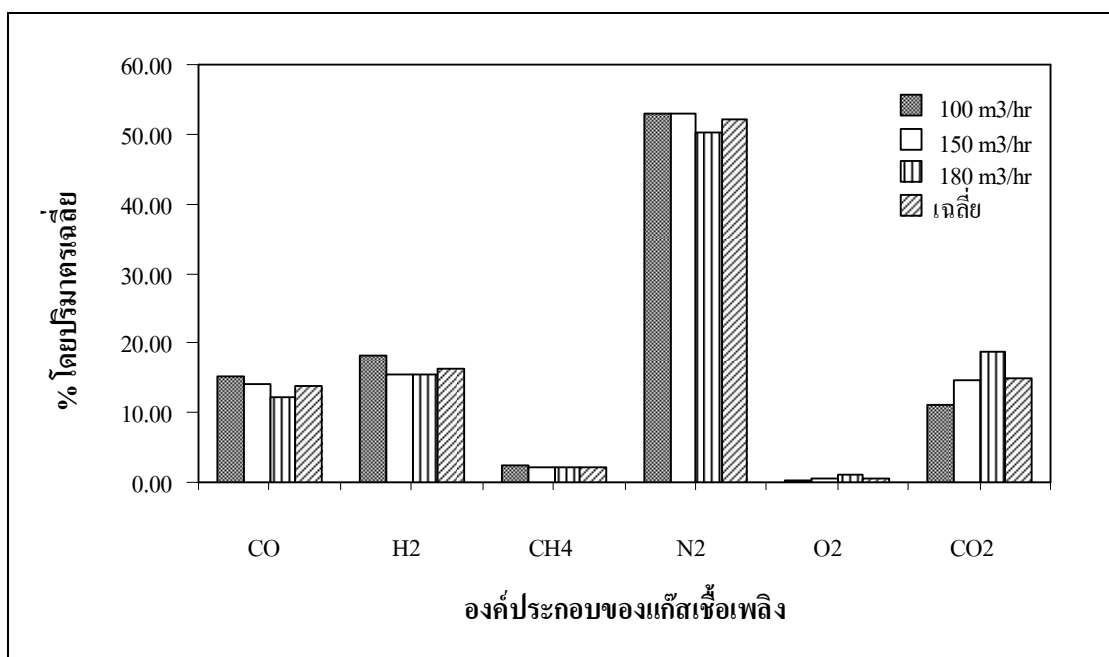
2) กลุ่มที่จุดไฟไม่ติด (Non-Combustible Gas) ประกอบด้วย N_2 , O_2 และ CO_2 ในสัดส่วนโดยปริมาตรเฉลี่ยเท่ากับ 52.05%, 0.64% และ 14.81% ตามลำดับ

อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับผลการศึกษากับงานวิจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการนำอากาศตะกอนมา และชีวมวลมาเป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน พบว่าองค์ประกอบและค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตจากผลการศึกษาที่สอดคล้องกับงานวิจัยอื่น ๆ ทั้งการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ และการทดสอบในระดับโรงไฟฟ้าต้นแบบที่นำแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ไปใช้งานจริง ดังแสดงในตารางที่ 4.8 แต่อย่างไรก็ตามการที่จะนำแก๊สเชื้อเพลิงนี้ไปใช้เพื่อเป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์สันดาปภายใน ก็จำเป็นที่จะต้องศึกษาถึงองค์ประกอบป้อนในแก๊ส

เชื้อเพลิงประกอบกันไป เพื่อพิจารณาว่าแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้นั้นมีปริมาณทาร์และฝุ่นสูงที่อาจจะทำให้เกิดความเสียหายต่อเครื่องยนต์ได้

ตารางที่ 4.7 องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตจากเชื้อเพลิงกากตะกอน

อัตราการไหล ของแก๊สเชื้อเพลิง (m ³ /hr ที่ STP)	คุณสมบัติของแก๊สเชื้อเพลิง						
	สัดส่วนโดยปริมาตรเฉลี่ย (%)						ค่าความร้อนของ แก๊สเชื้อเพลิง (MJ/Nm ³)
	CO	H ₂	CH ₄	N ₂	O ₂	CO ₂	
100	15.11	18.20	2.39	53.01	0.17	11.13	5.37
150	14.13	15.51	2.23	53.01	0.54	14.57	4.82
180	12.26	15.52	2.16	50.13	1.21	18.72	4.55
ค่าเฉลี่ย	13.83	16.41	2.26	52.05	0.64	14.81	4.91



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงสัดส่วนโดยปริมาตรเฉลี่ยของแก๊สเชื้อเพลิงที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง ทั้ง 3 ระดับและเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ย

ตารางที่ 4.8 การเปรียบเทียบผลการศึกษานางานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่น ๆ ในด้านคุณสมบัติของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้

ผลงานวิจัยของ	เชื้อเพลิงที่ใช้	อัตราการไหลของ แก๊สเชื้อเพลิง (m ³ /hr ที่ STP)	คุณสมบัติของแก๊สเชื้อเพลิง (ที่ STP)			ค่าความร้อน ⁽¹⁾ (MJ/Nm ³)	หมายเหตุ (ระดับการทดลอง)
			สัดส่วนโดยปริมาตร เฉลี่ย (%)				
			CO	H ₂	CH ₄		
ผลการศึกษานางานวิจัยนี้	กากตะกอนน้ำเสีย	100, 150, 180	13.8	16.4	2.2	4.9	ต้นแบบขนาด 100 kW*
ศุภวิทย์ ลวณะสกล (2549)	ถ่านไม้	5.4	24	15	0.5	5.3	ต้นแบบขนาด 1 kW*
วีรัชย์ อางหาญ และคณะ (2551)	ไม้กระถินยักษ์	100, 150, 180	18.9	18.4	2.3	5.8	ต้นแบบขนาด 100 kW*
สุธรรม ปทุมสวัสดิ์ และคณะ (2549)	กะลามะพร้าว	250	19	18	3	4.2	ต้นแบบขนาด 100 kW**
Dogru et al. (2002)	กากตะกอนน้ำเสีย	10	7.0	11.2	2.1	4.0	ต้นแบบขนาด 5 kW*
Marrero et al. (2004)	กากตะกอนน้ำเสีย	-	19.1	13.6	4.3	N/A	ระดับห้องทดลอง
Petersen et al. (2005)	กากตะกอนน้ำเสีย	-	4.8	6.1	3.6	3.0	ระดับห้องทดลอง
Groß et al. (2007)	กากตะกอนน้ำเสีย	-	24.0	11.0	2.0	4.6	โรงไฟฟ้าความร้อนร่วม
Vervaeke et al. (2005)	ไม้ต้นหลิว	173, 215, 218	23.0	15.0	2.5	5.4	ต้นแบบขนาด 100 kW**
Bhattacharya et al. (2007)	กะลามะพร้าว	46.75	21.3	13.5	1.5	4.86	ต้นแบบขนาด 37 kW**

หมายเหตุ : ⁽¹⁾ ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงอ้างอิงตามที่ปรากฏในผลงานวิจัยนั้น ๆ

* เครื่องยนต์แก๊สโซลีนมาใช้กับแก๊สเชื้อเพลิง (Gas-Otto Engine)

** เครื่องยนต์ดีเซลใช้ร่วมกับแก๊สเชื้อเพลิง (Dual-Fuel Engine)

4.2.4 องค์ประกอบปนเปื้อนทาร์และฝุ่น

การวิเคราะห์องค์ประกอบปนเปื้อนในแก๊สเชื้อเพลิงจะทำการวิเคราะห์ทาร์และฝุ่น (Tar and Dust) ในตำแหน่งต่าง ๆ 4 จุด (ตำแหน่ง TD₁-TD₄ รูปที่ 3.5 ในบทที่ 3) คือ (1) ออกจากเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (2) หลังจากผ่านระบบ Water Scrubber และ Chiller Scrubber (3) หลังจากระบบ Biomass Filter และ (4) หลังจากระบบ Fabric Filter โดยในการเดินระบบของแต่ละอัตราการไหลได้ทำการเก็บข้อมูล 6 ครั้ง ทุก ๆ 4 ชั่วโมง ผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 4.9 ถึง ตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบปนเปื้อนทาร์และฝุ่น (ในหน่วย mg/Nm³) ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง 100 m³/hr

ครั้งที่	ตำแหน่ง After Reactor (TD ₁)			ตำแหน่ง After Scrubber (TD ₂)			ตำแหน่ง After Biomass Filter (TD ₃)			ตำแหน่ง After Fabric Filter (TD ₄)		
	ทาร์	ฝุ่น	รวม	ทาร์	ฝุ่น	รวม	ทาร์	ฝุ่น	รวม	ทาร์	ฝุ่น	รวม
1	79.17	42.79	121.98	65.63	8.95	74.57	6.67	15.02	21.69	0	0	0.00
2	80.30	46.45	126.75	67.11	10.78	77.89	8.64	13.12	21.76	0	0.01	0.01
3	67.43	57.68	125.11	47.22	34.23	81.45	7.45	15.11	22.56	0	0.00	0.00
4	44.62	78.94	123.56	45.56	30.12	75.68	8.56	13.21	21.77	0.001	0.00	0.00
5	25.22	97.45	122.67	57.11	21.45	78.56	11.81	10.201	22.01	0	0.01	0.01
6	80.22	43.23	123.45	43.88	32.56	76.44	3.28	18.39	21.67	0	0.00	0.00
เฉลี่ย	62.83	61.09	123.92	54.42	23.01	77.43	7.74	14.17	21.91	0.00	0.00	0.00

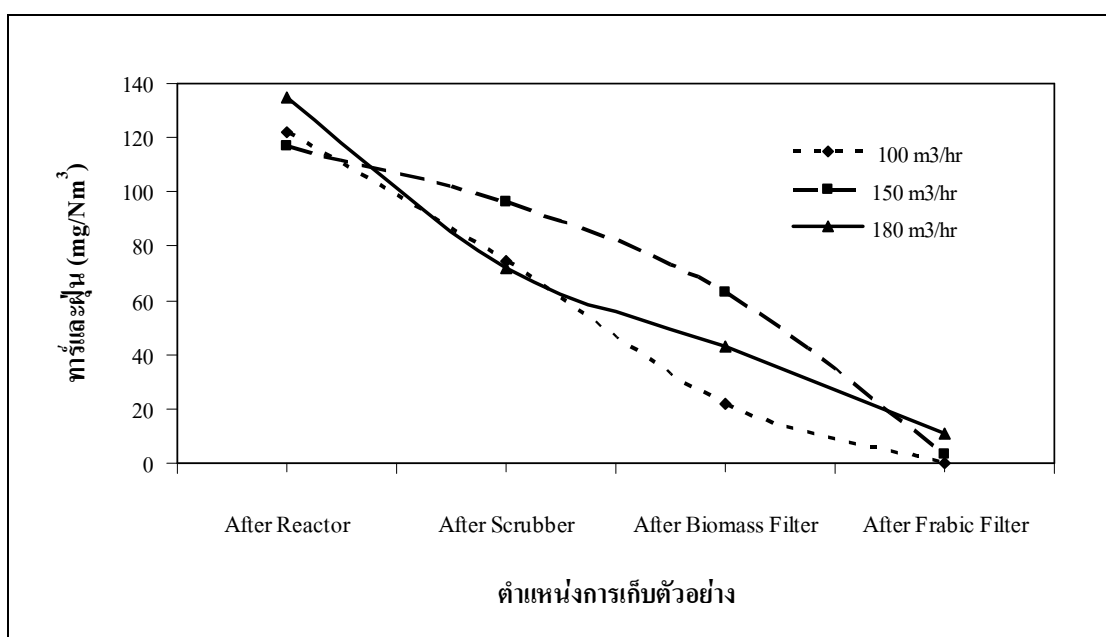
ตารางที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบปนเปื้อนทาร์และฝุ่น (ในหน่วย mg/Nm³) ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง 150 m³/hr

ครั้งที่	ตำแหน่ง After Reactor (TD ₁)			ตำแหน่ง After Scrubber (TD ₂)			ตำแหน่ง After Biomass Filter (TD ₃)			ตำแหน่ง After Fabric Filter (TD ₄)		
	ทาร์	ฝุ่น	รวม	ทาร์	ฝุ่น	รวม	ทาร์	ฝุ่น	รวม	ทาร์	ฝุ่น	รวม
1	70.42	43.93	114.35	54.03	36.74	90.77	30.47	30.47	60.94	1.91	1.26	3.16
2	73.06	45.24	118.3	29.9	63.34	93.24	32.35	28.43	60.78	3.07	0.34	3.41
3	55.92	60.31	116.23	10.91	81.23	92.14	33.90	28.23	62.13	1.1	2.11	3.21
4	72.80	45.33	118.132	69.27	32.29	101.56	36.51	31.9	68.41	1.69	1.45	3.14
5	60.01	58.98	118.99	75	25.87	100.87	21.30	42.22	63.52	2.43	0.58	3.01
6	83.36	33.12	116.48	70.67	27.89	98.56	27.08	34.15	61.23	0.7	2.32	3.02
เฉลี่ย	69.26	47.82	117.08	51.63	44.56	96.19	30.27	32.57	62.83	1.82	1.34	3.16

ตารางที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบปนเปื้อนทาร์และฝุ่น (ในหน่วย mg/Nm³) ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง 180 m³/hr

ครั้งที่	ตำแหน่ง After Reactor (TD ₁)			ตำแหน่ง After Scrubber (TD ₂)			ตำแหน่ง After Biomass Filter (TD ₃)			ตำแหน่ง After Fabric Filter (TD ₄)		
	ทาร์	ฝุ่น	รวม	ทาร์	ฝุ่น	รวม	ทาร์	ฝุ่น	รวม	ทาร์	ฝุ่น	รวม
1	80.29	48.83	129.12	35.47	37.55	73.02	14.62	28.33	42.95	5.013	6.016	11.03
2	76.11	55.12	131.23	51.98	23.34	75.32	23.80	17.76	41.56	4.00	7.23	11.23
3	81.45	42.11	123.56	22.01	43.22	65.23	17.14	23.11	40.25	5.32	5.76	11.08
4	110.78	34.45	145.23	32.11	43.54	75.65	24.31	24.21	48.52	2.99	8.21	11.2
5	68.90	87.23	156.13	34.00	32.12	66.12	13.02	32.21	45.23	3.65	7.45	11.1
6	66.14	58.22	124.36	40.47	34.11	74.58	4.93	36.3	41.23	3.58	6.98	10.56
เฉลี่ย	80.61	54.33	134.94	36.01	35.65	71.65	16.30	26.99	43.29	4.092	6.941	11.03

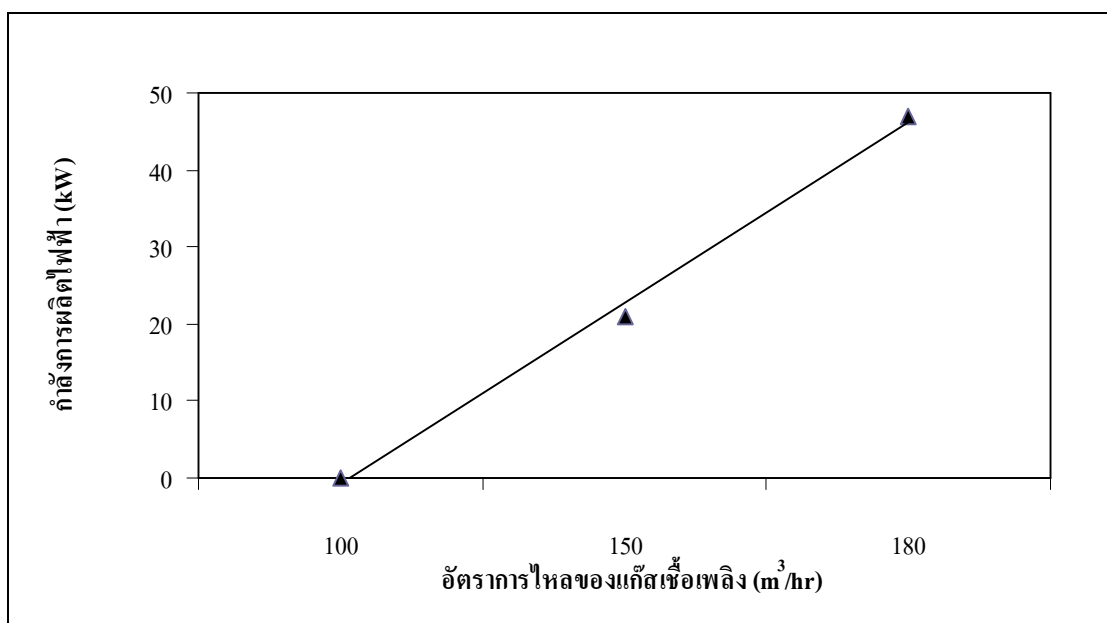
เมื่อนำข้อมูลปริมาณของทาร์และฝุ่นเฉลี่ยที่ผ่านระบบทำความสะอาดแก๊ส ตามขั้นตอนต่าง ๆ มาหาความสัมพันธ์ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.6 โดยที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง 100 m³/hr, 150 m³/hr และ 180 m³/hr มีการปนเปื้อนของทาร์และฝุ่น เท่ากับ 0, 3.16 และ 11.03 mg/Nm³ ตามลำดับ ทั้งนี้พบว่าอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงมีผลต่อการปนเปื้อนของทาร์และฝุ่น เนื่องจากความเร็วของแก๊สในท่อทำให้ดีกรีความปั่นป่วนเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการฟุ้งกระจาย อย่างไรก็ตาม ปริมาณทาร์และฝุ่นที่ผ่านกระบวนการทำความสะอาดแล้วพบว่า มีค่าไม่เกิน 25-28 mg/Nm³ ซึ่งเป็นปริมาณที่ยอมรับได้ในการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงโดยไม่เกิดผลกระทบต่อการทำงานของเครื่องยนต์สันดาปภายใน (เกียรติไกร อายุวัฒน์ และคณะ, 2549; Bhattacharya et al., 2001) และสอดคล้องกับงานวิจัยของ kaupp et al. (1981); Groeneveld et al. (1983); Reed et al. (1983) ที่ได้สรุปว่าการปนเปื้อนของทาร์และฝุ่นโดยทั่วไปของเทคโนโลยี Downdraft Gasifier จะมีค่าประมาณ 50-500 mg/ Nm³ จึงน่าจะสรุปได้ว่าคุณภาพของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ของโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็ก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ใช้กากตะกอนเป็นเชื้อเพลิง ในแง่ของการปนเปื้อนมีคุณภาพที่ดีมาก



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงการลดลงของทาร์และฝุ่นเมื่อผ่านระบบทำความสะอาดแก๊สของอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงทั้ง 3 ระดับ

4.2.5 การทดสอบความสามารถในการผลิตไฟฟ้าของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้

การทดสอบความสามารถในการผลิตไฟฟ้าของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ โดยนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงกับเครื่องยนต์สันดาปภายในสำหรับผลิตไฟฟ้า ซึ่งทดสอบกับเครื่องยนต์แก๊สดีเซล CUMMINS รุ่น G855-GBC ขนาด 150 HP โดยต่อเข้ากับชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบไดนาโม (Generator) ขนาดกำลังการผลิต 115 KVA หรือ 85 kW มีระบบควบคุมความเร็วรอบในการทำงานคงที่เท่ากับ 1500 rpm และความถี่ไฟฟ้า 50 Hz โดยทำการป้อนแก๊สเชื้อเพลิงเข้าสู่เครื่องยนต์โดยตรง และทำการใส่โหลดไฟฟ้าจำลอง เพื่อวิเคราะห์หาความสามารถในการผลิตไฟฟ้าในแต่ละอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง ซึ่งผลการทดสอบ พบว่าที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง 150 m³/hr และ 180 m³/hr เครื่องยนต์แก๊สที่ใช้ในการทดสอบสามารถผลิตไฟฟ้าได้สูงสุดเท่ากับ 21 kW และ 47 kW ที่ความถี่ 50 Hz ตามลำดับ ในขณะที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงที่ 100 m³/hr ไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้ ทั้งนี้เนื่องจากความจุของแก๊สเชื้อเพลิงนั้นสามารถใช้เดินเครื่องยนต์ในสภาวะที่ปราศจากโหลดเท่านั้น แต่ต้นกำลังหรืองานที่ได้จากเครื่องยนต์ไม่เพียงพอสำหรับไปขับ Generator เพื่อผลิตไฟฟ้าได้ ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.7 ซึ่งพบว่าที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงสูงขึ้น จะให้กำลังการผลิตไฟฟ้ามากขึ้น



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงต่าง ๆ และกำลังการผลิตไฟฟ้า

4.3 ผลการประเมินประสิทธิภาพการผลิตพลังงานของเชื้อเพลิงกากตะกอนโดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน

จากผลการทดสอบเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบในหัวข้อ 4.2 สามารถนำมาประเมินประสิทธิภาพการผลิตพลังงานได้ ดังสรุปไว้ในตารางที่ 4.12 โดยจะเปรียบเทียบและอ้างอิงกับผลการศึกษาในงานวิจัยอื่น ๆ ซึ่งจากข้อมูลที่ได้สรุป สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

4.3.1 ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง

ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงกากตะกอน แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการเปลี่ยนรูปพลังงานที่สะสมอยู่ในเชื้อเพลิงกากตะกอนไปเป็นแก๊สเชื้อเพลิง โดยกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน จากตารางที่ 4.12 จะเห็นว่าประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Gasification Efficiency) ของกากตะกอนในการเดินระบบที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง 100-180 m³/hr อยู่ในช่วง 58.03-67.51% ซึ่งประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง โดยทั่วไปขึ้นอยู่กับสมบัติและองค์ประกอบของเชื้อเพลิง อย่างไรก็ตาม เชื้อเพลิงกากตะกอนปกติ จะมีสมบัติและองค์ประกอบแปรปรวนไปบ้าง ทำให้การประเมินประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงอธิบายเป็นช่วงของประสิทธิภาพ ทั้งนี้หากเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากการใช้เชื้อเพลิงกากตะกอนกับเชื้อเพลิงชีวมวลประเภทอื่น ๆ ก็ถือว่ามีประสิทธิภาพสูงใกล้เคียงกัน สาเหตุเนื่องจากองค์ประกอบของกากตะกอน โดยเฉพาะอย่างยิ่งปริมาณธาตุคาร์บอน และไฮโดรเจน ของกากตะกอน มีความใกล้เคียงกับเชื้อเพลิงชีวมวลนั่นเอง

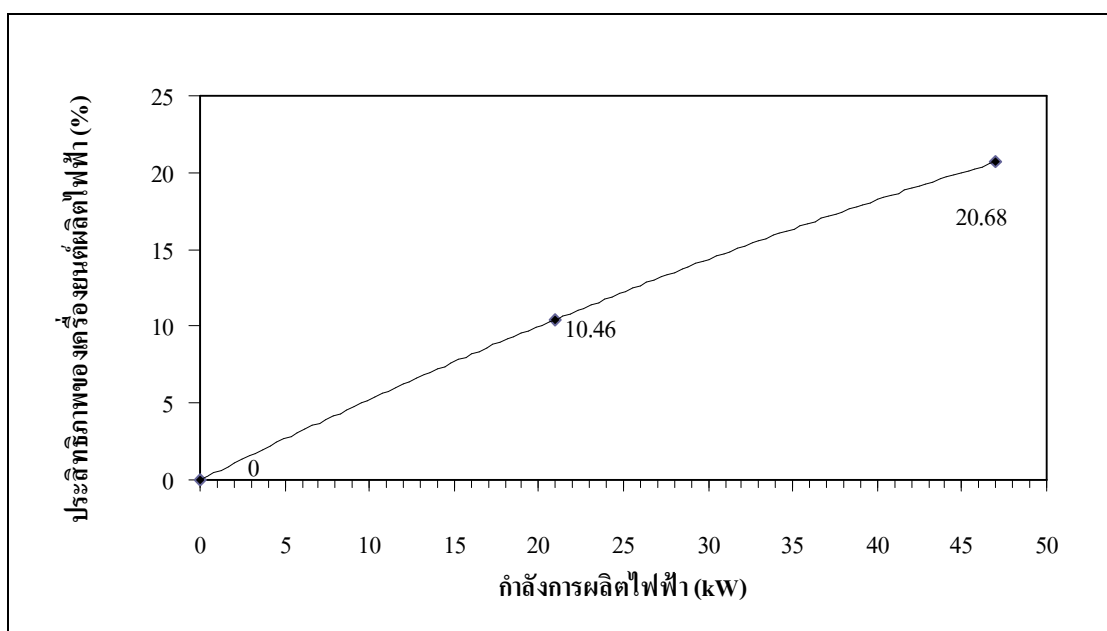
ตารางที่ 4.12 การเปรียบเทียบผลการศึกษานในงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่น ๆ ในด้านประสิทธิภาพการผลิตพลังงาน

ผลงานวิจัยของ	เชื้อเพลิงที่ใช้	อัตราการไหล ของแก๊สเชื้อเพลิง (m ³ /hr ที่ STP)	คุณภาพของแก๊สเชื้อเพลิง		กำลังการ ผลิตไฟฟ้า (kW)	ประสิทธิภาพของระบบ (%)			อัตราการใช้ เชื้อเพลิง จำเพาะ (kg/kWh)
			ค่าความ ร้อน (MJ/Nm ³)	ทาร์และ ฝุ่น (mg/Nm ³)		แก๊ส เชื้อเพลิง	เครื่องยนต์ ผลิตไฟฟ้า	การผลิต ไฟฟ้า	
ผลการศึกษาในงานวิจัยนี้*	กากตะกอนน้ำเสีย	100	5.3	0.0	0	58.0	0.0	0.0	0.0
		150	4.8	2.1	21	67.5	10.4	7.0	3.76
		180	4.5	10.4	47	61.4	20.68	12.7	2.09
วีรชัย อัจฉาญ และคณะ (2551)*	ไม้กระถินยักษ์	98.2	5.5	5.9	0	85.3	0.0	0.0	0.0
		122.5	5.1	2.2	21	75.2	13.2	8.1	2.8
		151.9	5.3	3.1	42	81.3	19.3	12.5	1.18
		176.3	5.5	8.0	63	80.5	22.1	17.7	1.28
ศุภวิทย์ ลวณะสกล (2549)	ถ่านไม้	5.4	5.3	N/A	1	N/A	N/A	10.0	3.0
Zainal et al. (2002)	เศษไม้	N/A	5.5	45 kW	46	82.5	15.5	11.15	2.0
Dogru et al. (2002)	กากตะกอนน้ำเสีย	10	4.0	1550	5	40	N/A	N/A	N/A

หมายเหตุ : * ทดสอบกับต้นแบบโรงไฟฟ้าชีวมวลสุรนารีและใช้เครื่องยนต์แก๊สสำหรับผลิตไฟฟ้า (Gas-engine Generator Set) ชุดเดียวกัน

4.3.2 ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้า (Engine-generator Efficiency)

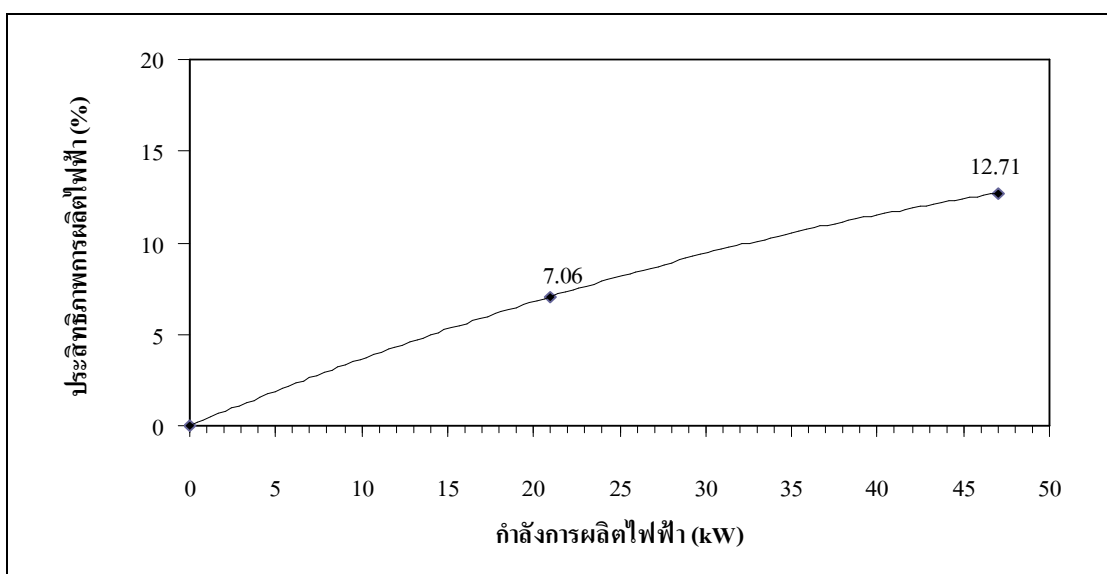
แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการเปลี่ยนรูปพลังงานที่สะสมอยู่ในแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ ไปเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยเปลี่ยนรูปจากพลังงานเคมีเป็นพลังงานกล และเป็นพลังงานไฟฟ้าตามลำดับ ผลการประเมินประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ พบว่าที่กำลังการผลิตไฟฟ้า 21 kW และ 47 kW ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์เท่ากับ 10.46% และ 20.68% ตามลำดับ ขณะที่กำลังการผลิต 0 kW ก็จะไม่สามารถประเมินประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้าได้ ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังการผลิตไฟฟ้าและประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ที่กำลังการผลิตนั้น ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ซึ่งจากข้อมูลแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพของเครื่องยนต์เพิ่มสูงขึ้นเมื่อกำลังการผลิตเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากข้อมูลในตารางที่ 4.12 จะพบว่า การทดสอบการผลิตไฟฟ้าจากแก๊สเชื้อเพลิงที่ใช้เชื้อเพลิงชีวมวลไม้กระถินยักษ์โดยใช้เครื่องยนต์แก๊สตัวเดียวกันนี้ พบว่าเมื่อทำการเพิ่มกำลังการผลิตจาก 42 kW ไปเป็น 63 kW ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์จะเพิ่มขึ้นจาก 19.3% เป็น 22.1%



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้าที่กำลังการผลิตต่าง ๆ

4.3.3 ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า (Electrical Efficiency)

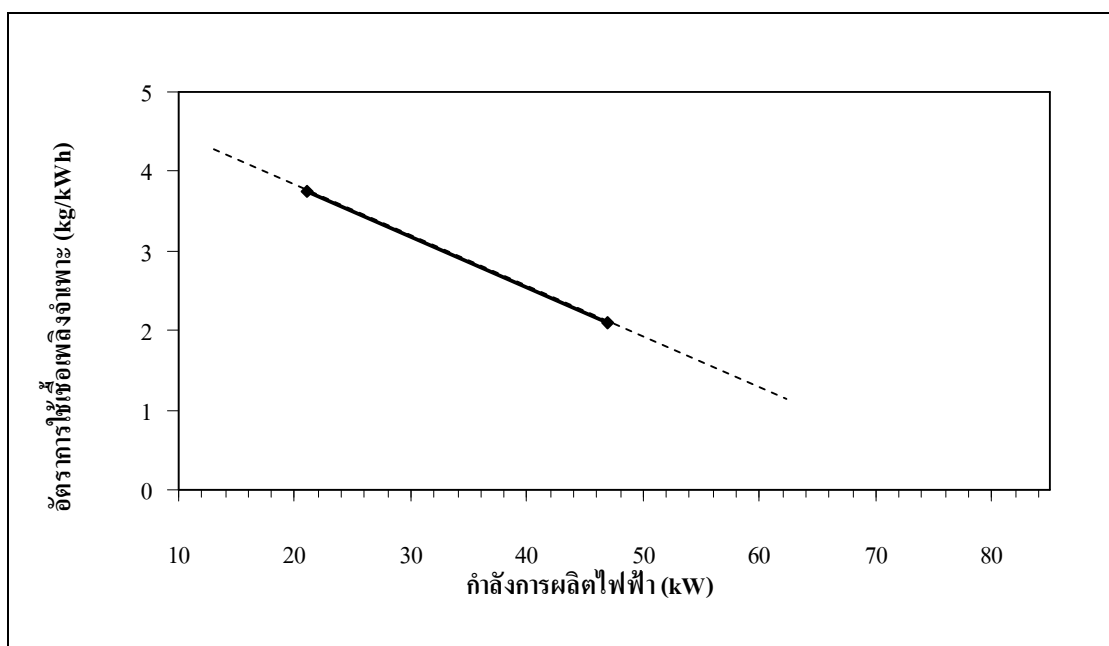
แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการเปลี่ยนรูปพลังงานที่สะสมอยู่ในเชื้อเพลิงกาทะคอนไปเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยใช้เครื่องยนต์สันดาปภายใน ซึ่งประสิทธิภาพดังกล่าวนี้จะขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงของกาทะคอน และประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้า ผลการประเมินประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า พบว่าที่กำลังการผลิตไฟฟ้า 21 kW และ 47 kW มีประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 7.06% และ 12.71% ตามลำดับ ขณะที่กำลังการผลิต 0 kW ก็จะไม่สามารถประเมินประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้าได้ ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังการผลิตไฟฟ้าและประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ก็พบว่าประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเมื่อกำลังการผลิตไฟฟ้าสูงขึ้น เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ ดังข้อมูลที่แสดงในตารางที่ 4.12 เห็นได้ว่าประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของกาทะคอนมีค่าเทียบเคียงกันกับเชื้อเพลิงชีวมวลประเภทไม้ คือ ในกรณีของการใช้เชื้อเพลิงไม้กระถินยักษ์ ที่กำลังการผลิต 42 kW มีประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 12.5% และ กรณีของการใช้เชื้อเพลิงเศษไม้ ที่กำลังการผลิต 46 kW มีประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 11.5% นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยอื่น ๆ มีผลการศึกษาสอดคล้องกับงานวิจัยนี้ คือ งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการใช้เครื่องยนต์สันดาปภายในชนิด Gas-Otto Engine เพื่อผลิตไฟฟ้าโดยใช้แก๊สชีวภาพเป็นเชื้อเพลิง ทั้งนี้แก๊สชีวภาพมีค่าความร้อนสูงถึง 22 MJ/Nm³ ก็พบว่าประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าจะอยู่ในช่วง 12-18% เช่นกัน (สมมาส แก้วล้วน และคณะ, 2549; พยุงศักดิ์ จุลยุเสน และวีรชัย อัจหาญ, 2551)



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าที่กำลังการผลิตต่าง ๆ

4.3.4 อัตราการใช้เชื้อเพลิงจำเพาะ (Specific Fuel Consumption)

แสดงให้เห็นถึงปริมาณเชื้อเพลิงกาคะกอนที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้า หรือ อัตราการใช้เชื้อเพลิงกาคะกอนต่อการผลิตไฟฟ้า 1 หน่วย (kWh) โดยอาศัยเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน ผลการศึกษาพบว่าที่กำลังการผลิตไฟฟ้า 21 kW และ 47 kW อัตราการใช้เชื้อเพลิงกาคะกอนจำเพาะมีค่าเท่ากับ 3.76 และ 2.09 kg/kWh ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการใช้เชื้อเพลิงกาคะกอนจำเพาะและกำลังการผลิตไฟฟ้า ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.10 เห็นได้ว่ามีแนวโน้มการใช้อัตราการใช้เชื้อเพลิงกาคะกอนจำเพาะจะลดลงเมื่อกำลังการผลิตเพิ่มสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่าปริมาณการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงกาคะกอนจะลดลงเมื่อเพิ่มกำลังการผลิตไฟฟ้า ทั้งนี้เมื่อพิจารณาข้อมูลในตารางที่ 4.12 เปรียบเทียบกับอัตราการใช้เชื้อเพลิงจำเพาะของเชื้อเพลิงชีวมวล พบว่าผลการศึกษาสอดคล้องกัน



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงแนวโน้มของอัตราการใช้เชื้อเพลิงกาคะกอนจำเพาะ

4.4 การประเมินประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า ปริมาณและสมบัติของเสียที่เกิดขึ้นจากการทดสอบเดินระบบ 70 ชั่วโมง

4.4.1 ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าจากการทดสอบเดินระบบ 70 ชั่วโมง

สำหรับการเดินระบบต่อเนื่อง 70 ชั่วโมงที่กำลังการผลิต 47 kW (50% ของ Full Load) พบว่าระบบสามารถเดินได้อย่างเสถียร เครื่องยนต์เดินเรียบ ผลการศึกษามีรายละเอียดดังนี้

1) สมบัติของแก๊สเชื้อเพลิง พบว่าแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้มีความสม่ำเสมอในชั่วโมงต่าง ๆ มีองค์ประกอบของแก๊ส คาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) ไฮโดรเจน (H₂) มีเทน (CH₄) ไนโตรเจน (N₂) ออกซิเจน (O₂) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ในสัดส่วนโดยปริมาตรเฉลี่ยเท่ากับ 14.66%, 16.38%, 2.30%, 51.39%, 0.26% และ 15.01% ตามลำดับ และมีค่าความร้อนเฉลี่ยเท่ากับ 5.03 MJ/Nm³ ดังแสดงในตารางที่ 4.13

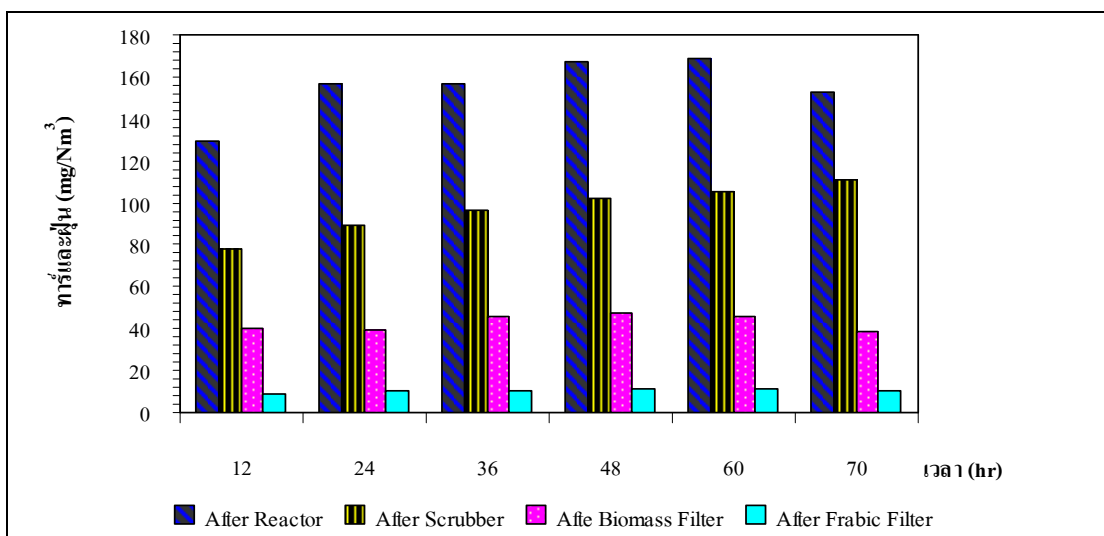
ตารางที่ 4.13 สมบัติของแก๊สเชื้อเพลิงในการเดินระบบต่อเนื่อง 70 ชั่วโมง

เวลา (ชั่วโมง)	คุณสมบัติของแก๊สเชื้อเพลิง						ค่าความร้อนของ แก๊สเชื้อเพลิง (MJ/Nm ³)
	สัดส่วนโดยปริมาตรเฉลี่ย (%)						
	CO	H ₂	CH ₄	N ₂	O ₂	CO ₂	
12	15.11	18.20	2.39	53.01	0.17	11.13	5.37
24	14.13	15.51	2.23	53.01	0.17	14.95	4.82
36	12.26	15.52	2.16	48.18	0.00	21.88	4.55
48	15.23	16.71	2.22	51.43	0.15	14.26	5.12
60	14.43	17.23	2.34	52.56	0.67	12.77	5.13
70	16.78	15.12	2.45	50.12	0.43	15.10	5.20
ค่าเฉลี่ย	14.66	16.38	2.30	51.39	0.26	15.01	5.03

2) การปนเปื้อนของทาร์และฝุ่นในแก๊สเชื้อเพลิง พบว่าปริมาณของทาร์และฝุ่นในตำแหน่งก่อนเข้าเครื่องยนต์ (After Fabric Filter) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 10.40 mg/Nm^3 ซึ่งถือได้ว่าการปนเปื้อนน้อย ดังแสดงในตารางที่ 4.14 อย่างไรก็ตามก็ดีเมื่อนำข้อมูลการปนเปื้อนของทาร์และฝุ่น ทั้งก่อนและหลังผ่านอุปกรณ์ทำความสะอาดแก๊สทั้ง 4 ตำแหน่ง มาเปรียบเทียบกับระยะเวลาชั่วโมงของการเดินระบบ พบว่าปริมาณของทาร์และฝุ่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ณ ตำแหน่ง After Scrubber ซึ่งเป็นผลมาจากน้ำที่หมุนเวียนใช้ในระบบมีความสกปรกเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดักจับทาร์และฝุ่นลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ทั้งนี้การประยุกต์ใช้งานโรงไฟฟ้าชีวมวลมาผลิตพลังงานโดยใช้กากตะกอน จำเป็นต้องพิจารณาถึงประสิทธิภาพการกำจัดทาร์และฝุ่น โดยละเอียดอีกครั้ง

ตารางที่ 4.14 ผลการวิเคราะห์ทาร์และฝุ่นในตำแหน่งต่าง ๆ ในการเดินระบบต่อเนื่อง 70 ชั่วโมง

เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณปนเปื้อน (mg/Nm^3)											
	ตำแหน่ง After Reactor (TD ₁)			ตำแหน่ง After Scrubber (TD ₂)			ตำแหน่ง After Biomass Filter (TD ₃)			ตำแหน่ง After Fabric Filter (TD ₄)		
	ทาร์	ฝุ่น	รวม	ทาร์	ฝุ่น	รวม	ทาร์	ฝุ่น	รวม	ทาร์	ฝุ่น	รวม
12	71.2	57.8	129.1	52.8	24.6	77.5	19.3	21.1	40.4	5.6	3.4	9.0
24	90.5	66.2	156.7	77.1	43.7	89.4	24.3	15.2	39.6	5.5	4.5	10.1
36	100.5	56.1	156.6	55.7	41.0	96.7	28.5	17.1	45.6	4.7	5.8	10.6
48	78.4	89.1	167.5	68.2	34.2	102.4	32.9	14.7	47.6	4.9	6.1	11.0
60	90.1	78.3	168.4	53.2	52.2	105.4	26.4	19.2	45.6	4.0	7.1	11.1
70	107.4	45.2	152.6	78.0	32.5	110.5	19.1	19.1	38.2	6.3	4.2	10.5
ค่าเฉลี่ย	89.7	65.4	155.2	64.2	38.0	97.0	25.1	17.7	42.89	5.2	5.2	10.4



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงปริมาณของทาร์และฝุ่นในการเดินระบบต่อเนื่อง 70 ชั่วโมง

3) ประสิทธิภาพการผลิตพลังงาน พบว่าการเดินระบบที่กำลังผลิตไฟฟ้า 47 kW ต่อเนื่อง 70 ชั่วโมง ผลการศึกษาที่ได้สอดคล้องกับการเดินระบบในขั้นตอนการศึกษาสถานะในการเดินระบบในหัวข้อที่ผ่านมา กล่าวคือ อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงเฉลี่ยเท่ากับ 180.36 m³/hr มีอัตราการใช้เชื้อเพลิงกากตะกอนจำเพาะเท่ากับ 2.09 kg/kWh และอัตราการเกิดเถ้าประมาณ 30% ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า มีค่าเท่ากับ 67.99%, 18.75% และ 12.27% ตามลำดับ ดังสรุปไว้ในตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.15 การทดสอบประสิทธิภาพการผลิตพลังงานจากการเดินระบบต่อเนื่อง 70 ชั่วโมง

พารามิเตอร์	ผลการศึกษา
กำลังการผลิตไฟฟ้า (kW)	47
อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงเฉลี่ย (m ³ /hr)	180.36
ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิง (MJ/Nm ³)	5.03
อัตราการใช้เชื้อเพลิงกากตะกอน (kg/hr)	98.26
อัตราการการเกิดเถ้า (kg/hr)	29.90
อัตราการใช้เชื้อเพลิงจำเพาะ (kg/kWh)	2.09
ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (%)	67.99
ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้า (%)	18.75
ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า (%)	12.71

4.4.2 ปริมาณและสมบัติของเสียที่เกิดขึ้นจากการเดินระบบต่อเนื่อง 70 ชั่วโมง

จากการทดสอบประสิทธิภาพการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงกากตะกอน โดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ โดยที่ประสิทธิภาพการผลิตพลังงานมีค่าเทียบเคียงกับเชื้อเพลิงชีวมวลอื่น ๆ อย่างไรก็ตามการที่จะนำเทคโนโลยีดังกล่าวมาใช้ในการจัดการกากตะกอนในระดับอุตสาหกรรม จำเป็นที่จะศึกษาปริมาณและสมบัติของเสียที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการผลิตพลังงานด้วยเช่นกัน ทั้งนี้เพื่อใช้เป็นแนวทางสำหรับป้องกัน และควบคุมมลพิษสิ่งแวดล้อม

1) ปริมาณและสมบัติของเสียในเถ้า (Ash)

ผลการศึกษาพบว่าปริมาณเถ้าที่เกิดขึ้นจากการใช้กากตะกอนมาเป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตไฟฟ้าโดยเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 29.90 kg/hr หรือ 0.64 kg/kWh หรือคิดเป็น 30.40% ของปริมาณเชื้อเพลิงกากตะกอนที่ใช้ในกระบวนการ เมื่อทำการวิเคราะห์สมบัติของเถ้าเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงกากตะกอน พบว่าเถ้าของกากตะกอนมีลักษณะเป็นผงละเอียดคงรูป เพราะแม้ว่าจะจับตัวกันเป็นก้อน ดังแสดงในรูปที่ 4.12 เมื่อทำการวิเคราะห์ค่าความร้อนและองค์ประกอบต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.16 และ ตารางที่ 4.17 พบว่ามีค่าความร้อนต่ำ ไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ ประกอบกับยังมีโลหะหนักปนเปื้อนอยู่ในปริมาณที่ค่อนข้างสูง เมื่อเปรียบเทียบปริมาณคลอรีนและองค์ประกอบของโลหะหนักที่คงเหลือในเถ้าหนัก (bottom ash) กับเชื้อเพลิงกากตะกอนเริ่มต้น พบว่ามีสัดส่วนที่หายไป บางส่วนที่อยู่ในรูปเถ้าลอยจะปนเปื้อนไปกับละอองของฝุ่นขนาดเล็กและถูกกักเก็บไว้ที่ Cyclone Collector และ บางส่วนที่อยู่ในสถานะละอองแก๊สไอ (vapor) และถูกบำบัดโดย Water Scrubber และ Chiller Scrubber ซึ่งอธิบายได้ว่าองค์ประกอบของคลอรีนและโลหะหนักที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงกากตะกอนเมื่อถูกกระตุ้นที่อุณหภูมิสูงจากกระบวนการอุณหภูมิในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง บางส่วนจะอยู่ในรูปเถ้าลอยเป็นละอองฝุ่นขนาดเล็ก บางส่วนอยู่ในสถานะละอองไอแก๊ส (vapor) และปนเปื้อนอยู่ในแก๊สร้อน สอดคล้องกับงานวิจัยของ Helble et al. (1995); Marrero et al. (2004); Vervaeke et al. (2005); Kwak et al. (2006); Pinto et al. (2007)

สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปริมาณและสมบัติของเสียเบื้องต้น ดังนั้นจึงไม่ได้ทำการวิเคราะห์สมบัติของเถ้าลอยที่ถูกดักไว้ใน Cyclone Collector ซึ่งมีปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับเถ้าหนัก การจัดการเถ้าหนักที่เกิดขึ้นจากการเดินระบบที่เหมาะสม สามารถทำได้โดยใช้วิธีกำจัดแบบปกติคือ การฝังกลบ ทั้งนี้การนำกากตะกอนมาผลิตพลังงาน โดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันสามารถลดปริมาณกากตะกอนในการฝังกลบได้ถึง 70%

อย่างไรก็ตามการควบคุมมลพิษที่อาจจะเกิดขึ้น สามารถทำได้ที่ต้นเหตุ นั่นคือในขั้นตอนการบำบัดน้ำเสีย ควรมีระบบแยกตะกอน โดยตะกอนที่มาจากบำบัดทางเคมีซึ่งมีสารพิษปนเปื้อนสูงให้นำไปฝังกลบ และเลือกเฉพาะกากตะกอนจากระบบบำบัดทางชีวภาพมาเป็นเชื้อเพลิง



รูปที่ 4.12 ลักษณะของเถ้ากากตะกอน

ตารางที่ 4.16 เปรียบเทียบสมบัติทางเคมีของเชื้อเพลิงกากตะกอนและเถ้า

พารามิเตอร์	เชื้อเพลิงกากตะกอน	เถ้ากากตะกอน
Proximate Analysis		
%ความชื้น	6.44	2.20
%สารระเหย	56.00	6.70
%คาร์บอนคงตัว	7.11	16.00
%เถ้า	30.45	30.45
ค่าความร้อน (MJ/kg)	13.55	2.50
Ultimate Analysis		
%คาร์บอน	36.38	42.63
%ไฮโดรเจน	5.86	0.31
%ไนโตรเจน	5.22	1.09
%ซัลเฟอร์	0.98	3.56
%ออกซิเจน	47.98	50.22

ตารางที่ 4.17 เปรียบเทียบองค์ประกอบของคลอรีนและโลหะหนักในเชื้อเพลิงกากตะกอนและถ้ำ

พารามิเตอร์	เชื้อเพลิงกากตะกอน	ถ้ำกากตะกอน
Cl (mg/kg)	7,400	970
Cu (mg/kg)	12,900	890
Fe (mg/kg)	23,600	18,340
Zn (mg/kg)	3,310	1,580
Cd (mg/kg)	10.0	1.0
Pb (mg/kg)	260	120

2) ปริมาณและสมบัติของน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากระบบทำความสะอาดแก๊ส

ในการผลิตพลังงานจากกากตะกอนโดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน จะมีน้ำเสียเกิดขึ้นจากระบบทำความสะอาดแก๊สคือ Water Scrubber และ Chiller Scrubber ทั้งนี้ น้ำที่ใช้ในระบบถูกออกแบบไว้ให้สามารถหมุนเวียนใช้ได้อย่างต่อเนื่อง แต่ในกรณีที่น้ำเริ่มมีความสกปรกจะถูกสูบไปบำบัดยังถัง Flocculation Tank เพื่อปรับสภาพน้ำก่อนที่จะหมุนเวียนกลับมาใช้อีกครั้ง

ในการศึกษานี้ทำการปรับสภาพน้ำเสียโดยใช้วิธีการโคแอกกูเลชันด้วยสารเคมี (coagulation) ซึ่งสารเคมีที่ใช้ คือ เฟอริกคลอไรด์ ($FeCl_3$) ปูนขาว ($CaOH$) และโพลีเมอร์ประจุลบ (อัตราส่วนที่ใช้ $FeCl_3$ ที่ความเข้มข้น 46% ปริมาตร 40 ml; $CaOH$ ที่ความเข้มข้น 5,000 mg/l ปริมาตร 1 L ; Polymer anion ที่ความเข้มข้น 1,000 mg/l ปริมาตร 1 L) ซึ่งในการปรับสภาพน้ำเสียจะอาศัยข้อมูลจากการเดินระบบในกรณีการใช้เชื้อเพลิงชีวมวล คือ ไม้กระถินยักษ์ ซึ่งมีการปรับสภาพน้ำเสียภายหลังจากเดินระบบได้ 24 ชั่วโมง และหลังจากนั้นก็กระทำต่อเนื่องทุก ๆ 6 ชั่วโมง และทำการ การวิเคราะห์คุณภาพน้ำ 3 จุด ได้แก่ Sample A (น้ำเสียที่มาจากถังพักน้ำ 2 และ 3 ก่อนทำการปรับสภาพน้ำ) Sample B (น้ำที่ผ่านการปรับสภาพแล้ว) และ Sample C (ตะกอนน้ำเสีย)

การวิเคราะห์คุณภาพน้ำ เพื่อศึกษาแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของมลสารในน้ำเสีย ในระหว่างการเดินระบบต่อเนื่อง 70 ชั่วโมง โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียและนำไปวิเคราะห์ ภายหลังจากเดินระบบได้ 24 ชั่วโมง และทุก ๆ 12 ชั่วโมง ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4.18

ตารางที่ 4.18 ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำในระหว่างการเดินระบบต่อเนื่อง 70 ชั่วโมง

พารามิเตอร์ (mg/l)	24 ชั่วโมง			36 ชั่วโมง			48 ชั่วโมง			60 ชั่วโมง			70 ชั่วโมง		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
COD	1371	1103	1595	1824	1810	2358	2067	1906	2518	2373	1982	2763	2858	2520	5352
BOD	161	138	300	495	427	705	600	551	735	603	637	870	780	693	1657
TKN	657	637	661	882	721	833	973	861	973	2156	2072	2338	2443	2443	2527
FOG	4.5	0.7	9.5	27	9.6	15.3	29.9	19.3	26.0	65.8	42.2	83.3	82.4	75.0	133.8
TSS	1989	1582	2389	2032	1712	2428	2574	1852	2663	2770	2045	3628	2939	2428	4157
TDS	656	267	713	766	654	940	1566	1535	1586	2076	1898	2356	2356	2242	2550
TS	2645	1849	3102	2798	2366	3368	4140	3387	4249	4846	3943	5984	5295	4670	6707

หมายเหตุ : A คือ น้ำเสีย Sample A มาจากถังพักน้ำ 2 และ 3 ก่อนทำการปรับสภาพน้ำโดยวิธีการโคแอกกูเลชันด้วยสารเคมี

B คือ น้ำเสีย Sample B หลังผ่านการปรับสภาพน้ำโดยวิธีการโคแอกกูเลชันด้วยสารเคมี

C คือ น้ำเสีย Sample C ส่วนที่เป็นตะกอนน้ำเสียจากการปรับสภาพน้ำโดยวิธีการโคแอกกูเลชันด้วยสารเคมี

ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำในระหว่างการเดินระบบต่อเนื่อง 70 ชั่วโมง พบว่าการสะสมความเข้มข้นของมลสารในรูปต่าง ๆ มีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเดินระบบ ดังแสดงในตารางที่ 4.18 ทั้งนี้พบว่าน้ำเสียที่ผ่านการปรับสภาพแล้ว คือ Sample B มีคุณภาพดีกว่า น้ำเสีย Sample A และ Sample C โดยน้ำเสีย Sample C ซึ่งเป็นตะกอนน้ำเสียมีคุณภาพต่ำที่สุด ทั้งนี้มลสารที่สะสมในน้ำหมุนเวียน ที่สังเกตเห็นได้อย่างชัดเจน คือ ซีโอดี (COD) ของแข็งแขวนลอย (TSS) และของแข็งละลายน้ำ (TDS) โดยพบว่าความเข้มข้นของมลสารดังกล่าวเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีแนวโน้มที่สัมพันธ์กัน นั่นคือในช่วงเวลาการเดินระบบทุก ๆ 12 ชั่วโมง ความสกปรกในรูป TSS และ TDS มีความเข้มข้นเพิ่มสูงขึ้นโดยเฉลี่ยเท่ากับ 781 mg/l และ 580 mg/l ตามลำดับ ซึ่งจะสัมพันธ์กับการเพิ่มสูงขึ้นของค่า COD ซึ่งมีความเข้มข้นเพิ่มสูงขึ้น โดยเฉลี่ยเท่ากับ 580 mg/l ข้อมูลดังกล่าวมีความสอดคล้องกับประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนและฝุ่นของ Scrubber ที่ลดต่ำลง ตามที่ได้อธิบายไปแล้ว ในหัวข้อที่ 4.4.1 นอกจากนี้ยังพบว่ามลสารที่มีความเป็นพิษบางพารามิเตอร์ สำหรับน้ำที่ผ่านการปรับสภาพแล้ว (Sample B) มีค่าเกินข้อกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ดังแสดงในตารางที่ 4.19

ดังนั้นในการแก้ปัญหาดังกล่าวจำเป็นต้องปรับปรุงการปรับสภาพน้ำใหม่โดยการเติมน้ำสะอาดเข้าไปในระบบน้ำหมุนเวียน และการหาอัตราการเติมน้ำสะอาดที่เหมาะสมเพื่อเจือจางความเข้มข้น (makeup water) เพราะการเดินระบบในการศึกษานี้ ไม่มีการเติมน้ำสะอาดเพื่อเจือจางคือใช้น้ำหมุนเวียนสำหรับเดินระบบต่อเนื่อง 70 ชั่วโมงเท่ากับ 10 m³ สาเหตุดังกล่าวจึงเป็นผลให้น้ำในระบบมีความเข้มข้นของมลสารสูง และในการปรับสภาพน้ำที่ใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยสารเคมีในการศึกษานี้ ยังมีประสิทธิภาพในการบำบัดที่ต่ำ จึงควรทดสอบทำจาร์เทสเพื่อหาปริมาณสารเคมีที่เหมาะสมทุกครั้งก่อนนำไปใช้งาน

นอกจากนี้ในกรณีที่มีการนำไปใช้งานจริง น้ำเสียที่เกิดขึ้นในระบบจะต้องมีการบำบัดก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม ดังนั้นการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียจึงเป็นเรื่องที่ควรนำมาพิจารณา และจากข้อมูลผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียที่เกิดขึ้นในระบบ เห็นได้ว่าคุณลักษณะของน้ำเสียมีการปนเปื้อนมลสารที่มีความเป็นพิษสูง และมีอัตราส่วนของซีโอดี ต่อ บีโอดี (COD/BOD ratio) ประมาณ 3.2 ซึ่งหมายถึงสารประกอบอินทรีย์ส่วนใหญ่ย่อยสลายได้ยากโดยแบคทีเรีย ดังนั้นการบำบัดน้ำเสียที่เหมาะสมสำหรับคุณลักษณะน้ำเสียดังกล่าว ควรเลือกใช้ระบบบำบัดทางเคมีกายภาพในขั้นต้น แล้วตามด้วยระบบบำบัดทางชีวภาพ ทั้งนี้ต้องพิจารณาทั้งประสิทธิภาพการของบำบัด และต้นทุนควบคู่กันไป นอกจากนี้ควรมีการออกแบบถังตกตะกอน และระบบแยกตะกอนน้ำเสีย เพื่อนำเอาตะกอนบางส่วนออกจากระบบ

ตารางที่ 4.19 ผลวิเคราะห์คุณภาพน้ำที่ผ่านการปรับสภาพน้ำด้วยสารเคมีของการใช้เชื้อเพลิง
กากตะกอนที่ 70 ชั่วโมง

พารามิเตอร์	ผลการวิเคราะห์ คุณภาพน้ำที่ผ่านการปรับสภาพน้ำ ด้วยสารเคมีของการใช้เชื้อเพลิงกาก ตะกอนที่ 70 ชั่วโมง	ค่ามาตรฐาน ⁽¹⁾
pH	8.8	5.5-9.0
Temperature (°C)	27.5	40 ⁰ C
Cd (mg/l)	0.188	ไม่เกิน 0.03 mg/l
Cu (mg/l)	0.074	ไม่เกิน 2.0 mg/l
Pb (mg/l)	0.042	ไม่เกิน 0.2 mg/l
Fe (mg/l)	0.809	-
Zn (mg/l)	1.452	ไม่เกิน 5.0 mg/l
HCN(mg/l)	7.5	ไม่เกิน 0.2 mg/l
Formaldehyde(mg/l)	0.04	ไม่เกิน 1.0 mg/l
H ₂ S(mg/l)	7.00	ไม่เกิน 1.0 mg/l
Phenols(mg/l)	3.13	ไม่เกิน 1.0 mg/l
Free Chlorine(mg/l)	ไม่พบ	ไม่เกิน 1.0 mg/l

หมายเหตุ :⁽¹⁾ ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 พ.ศ. 2539

1) คุณภาพแก๊สไอเสีย

แก๊สไอเสียที่เกิดจากการผลิตพลังงานจากกากตะกอนโดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน ส่วนใหญ่เป็นแก๊สที่เกิดจากการสันดาปของเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้า โดยเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าสู่เครื่องยนต์ คือแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้

ผลการวิเคราะห์แก๊สไอเสียที่ปล่อยออกมาจากท่อไอเสียของเครื่องยนต์แก๊สที่ใช้ที่ กำลังการผลิตไฟฟ้า 0 21 และ 47 kW ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.20 โดยสรุปคุณภาพแก๊สไอเสียที่ปลดปล่อยสู่บรรยากาศ สำหรับพารามิเตอร์ของ SO₂ และ NO_x มีค่าตามมาตรฐานที่กำหนด ทั้งนี้อ้างอิงมาตรฐานของประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม เรื่องกำหนดมาตรฐานควบคุมการปล่อยทิ้งอากาศเสียจากเตาเผามูลฝอยและมาตรฐานควบคุมการปล่อยทิ้งอากาศเสียจากโรงไฟฟ้า พระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 อย่างไรก็ตามในผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของกากตะกอน จะเห็นว่ากากตะกอนมีโลหะปนเปื้อนในปริมาณสูง ดังนั้นการตรวจวัดพารามิเตอร์อื่น ๆ ในแก๊สไอเสีย เช่น H₂S HCl HCN Dioxin/Furan และ ออกไซด์ของโลหะหนักต่าง ๆ ควรที่จะมีการศึกษาให้ครอบคลุมในกรณีของการนำไปใช้งานจริง เนื่องจากจำกัดด้านเครื่องมือและค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์ก่อนข้างสูง งานวิจัยนี้จึงไม่สามารถตรวจวิเคราะห์ได้ทุกพารามิเตอร์

นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณของ CO มีค่าสูง และเพิ่มสูงขึ้นตามกำลังการผลิตไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น ในกรณีที่เกิดปริมาณของ CO สูงก็มาจากสาเหตุหลายประการ คือ อัตราส่วนระหว่างอากาศ กับเชื้อเพลิงที่ไม่เหมาะสม ในกรณีที่เชื้อเพลิงมีมากกว่าอากาศ จะทำให้ไอดีมีความเข้มข้นเกินไป ซึ่งจะเกิดสถานะที่ขาดออกซิเจน เมื่อเกิดปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนกับออกซิเจน จึงมีผลให้ปริมาณ CO ในไอเสียสูงนั่นเองซึ่งเกิดขึ้นขณะติดเครื่องยนต์ และขณะเร่งเครื่องยนต์ ซึ่งมีโหลด หรือมีการเพิ่ม โหลด ในอีกกรณีหนึ่งถ้าไอดีจางเกินไป คือมีปริมาณอากาศมากกว่าเชื้อเพลิง ทำให้การผสมระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศไม่ทั่วถึง ออกซิเจนบางส่วนไม่ถูกทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิง ซึ่งบางครั้งจะทำให้มีการจุดระเบิดไม่ติด 1 วัฏจักรของการทำงาน และใน 1000 วัฏจักรจะมีผลให้เกิดคาร์บอนมอนนอกไซด์รวมทั้งไฮโดรคาร์บอนในไอเสียปริมาณถึง 1 กรัม ต่อการใช้เชื้อเพลิง 1 กิโลกรัมของเครื่องยนต์ และในกรณีของเครื่องยนต์ที่จุดระเบิดด้วยประกายไฟส่วนใหญ่จะมีปริมาณคาร์บอนมอนนอกไซด์ถูกปลดปล่อยออกมากับแก๊สไอเสียประมาณ 0.2-5.0% (Pulkrabek, 2003) ในตารางที่ 4.20 พบว่าปริมาณออกซิเจนในแก๊สไอเสียมีค่าสูง ดังนั้นในกรณีนี้ น่าจะเกิดจากสาเหตุของ ไอดีจางเกินไป และออกซิเจนบางส่วนไม่ถูกทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิง จึงมีผลให้เกิด CO ในไอเสียปริมาณที่สูงนั่นเอง ซึ่งในการแก้ไขปัญหาดังกล่าวสามารถกระทำได้โดยการปรับหรือจูนเครื่องยนต์ให้ได้อัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่เหมาะสม

อย่างไรก็ดียังพบข้อดีอีกประการหนึ่ง คือ ไอเสียที่ปลดปล่อยออกมานั้นมีอุณหภูมิสูงถึง 300°C กรณีเดินระบบที่กำลังการผลิต 47 kW ซึ่งสามารถนำความร้อนดังกล่าวกลับมาใช้ในกระบวนการผลิตได้ เช่น ใช้ลดความชื้นกากตะกอน

ตารางที่ 4.20 ผลการตรวจวิเคราะห์แก๊สไอเสีย

พารามิเตอร์	ผลการวิเคราะห์			มาตรฐาน ⁽²⁾	มาตรฐาน ⁽³⁾
	0 kW	21 kW	47 kW ⁽¹⁾		
CO (ppm)	2085.70	4038.67	4149.98	-	
SO ₂ (ppm)	191.07	93.17	5.54	ไม่เกิน 30	ไม่เกิน 640
NO (ppm)	68.85	22.00	36.00	-	
NO ₂ (ppm)	0.00	2.05	2.05	-	
NO _x (ppm)	68.85	24.05	38.05	ไม่เกิน 250	ไม่เกิน 350
CO ₂ (%)	9.55	24.17	5.35	-	
O ₂ (%)	2.90	8.36	10.93	-	
อุณหภูมิแก๊สไอเสีย (°C)	228.46	244.50	300.01	-	

หมายเหตุ : ⁽¹⁾ กำลังการผลิตที่ใช้เดินระบบต่อเนื่อง 70 ชั่วโมง

⁽²⁾ ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม เล่ม 113 ตอนที่ 9 (2539)

⁽³⁾ ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม เล่ม 114 ตอนที่ 63 (2540)

4.4.3 การประเมินอัตราการเกิดของเสีย

การประเมินอัตราการเกิดของเสียจากการผลิตพลังงานจากตะกอนน้ำเสียโดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน กระทำโดยการนำข้อมูลปริมาณมลพิษที่เกิดขึ้นจากการเดินระบบที่กำลังการผลิตไฟฟ้า 47 kW มาวิเคราะห์อัตราการเกิดของเสียต่อหน่วยไฟฟ้า จำนวนได้ดังต่อไปนี้

1) อัตราการเกิดของเสียจากเถ้า

ข้อมูลการเดินระบบต่อเนื่อง 70 ชั่วโมง ที่กำลังการผลิตไฟฟ้า 47 kW มีอัตราการใช้เชื้อเพลิงกากตะกอนจำเพาะเท่ากับ 2.09 kg/kWh มีปริมาณเถ้าที่เกิดขึ้นคิดเป็น 30.40% ของปริมาณเชื้อเพลิงกากตะกอนที่ใช้ในกระบวนการ หรือ 0.64 kg/kWh ซึ่งในเถ้ามีทั้งองค์ประกอบที่ไม่ก่อให้เกิดมลพิษ และที่อาจก่อให้เกิดมลพิษจึงจำเป็นต้องนำไปกำจัดอย่างถูกวิธี ทั้งนี้ องค์ประกอบที่คาดว่าอาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ประกอบด้วย S Cl Cu Fe Zn Cd และ

Pb โดยประเมินอัตราการเกิดของเสียต่อหน่วยไฟฟ้า ดังแสดงในตารางที่ 4.21 ซึ่งผลการวิเคราะห์พบว่าในการผลิตไฟฟ้า 1 หน่วย (kWh) จะเกิด S และ Fe อยู่ในปริมาณที่สูง คือ 22.78 g/kWh และ 11.74 g/kWh ตามลำดับ (การคำนวณ แสดงในภาคผนวก ก) นอกจากนี้ยังเกิดโลหะอันตราย 2 ชนิด คือ Cd และ Pb ในอัตราส่วนที่น้อยแต่มีอันตรายมาก ซึ่งเจ้าของโรงไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงถ่านหินจัดเป็นของเสียที่มีพิษ จำเป็นต้องกำจัดอย่างถูกวิธีที่นิยมใช้กันคือ การฝังกลบ

ตารางที่ 4.21 อัตราการเกิดของเสียจากถ่านหินต่อหน่วยไฟฟ้า

สารมลพิษ	ความเข้มข้นของสารมลพิษ ที่ตกค้างในถ่านหิน (g/kg)	อัตราการเกิดของเสีย ต่อหน่วยไฟฟ้า ⁽¹⁾ (g/kWh)
S	35.60	22.78
Cl	0.970	0.62
Cu	0.890	0.57
Fe	18.34	11.74
Zn	1.58	1.01
Cd	0.001	0.0006
Pb	0.120	0.076

หมายเหตุ : ⁽¹⁾ การคำนวณอัตราการเกิดของเสียต่อหน่วยไฟฟ้าแสดงไว้ในภาคผนวก ก

2) อัตราการเกิดของเสียจากน้ำเสีย

จากข้อมูลการเดินระบบต่อเนื่อง 70 ชั่วโมง ที่กำลังการผลิตไฟฟ้า 47 kW มีน้ำหมุนเวียนในระบบเท่ากับ 10 m³ ในการทำความสะอาดแก็สที่ผลิตได้ ซึ่งผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำที่เกิดจากการเดินระบบต่อเนื่องแสดงให้เห็นว่าน้ำเสียที่เกิดขึ้นในระบบมีความสกปรกสูง และมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทุกพารามิเตอร์ ซึ่งอาจจำแนกสารมลพิษในน้ำเสียได้ 2 กลุ่ม คือ 1) กลุ่มที่ก่อให้เกิดความสกปรกต่อแหล่งน้ำธรรมชาติ ได้แก่ TSS TDS TS BOD COD TKN FOG ซึ่งถือเป็นตัวแปรที่สำคัญ เพราะหมายถึงปริมาณสารอินทรีย์ต่าง ๆ ที่จะถูกปลดปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ สารอินทรีย์ที่เข้มข้นสูงจะส่งผลกระทบต่อปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ และสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในแหล่งน้ำ 2) กลุ่มที่มีความเป็นพิษ ได้แก่ Cd Cu Pb Fe Zn HCN Formaldehyde H₂S Phenols สามารถก่อให้เกิดความสกปรกต่อแหล่งน้ำทางธรรมชาติ เป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์ และอาจปนเปื้อนในระบบห่วงโซ่อาหาร ผลการวิเคราะห์มลพิษที่เกิดขึ้นต่อหน่วยไฟฟ้า แสดงไว้ใน

ตารางที่ 4.22 พบว่าอัตราการเกิดของเสียในน้ำเสียมีค่าสูง ข้อมูลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าในการนำไปใช้งานจริง น้ำเสียที่เกิดขึ้นต้องมีการบำบัดก่อนที่จะปลดปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม เพื่อควบคุมและป้องกันมลพิษจะเกิดขึ้นกับมนุษย์และสิ่งแวดล้อม

ตารางที่ 4.22 อัตราการเกิดของเสียที่เกิดขึ้นในน้ำเสียต่อหน่วยไฟฟ้า

สารมลพิษ	ความเข้มข้นของสารมลพิษที่ตกค้างในน้ำเสีย (g/hr)	อัตราการเกิดของเสียต่อหน่วยไฟฟ้า ⁽¹⁾ (g/kWh)
TSS	346.857	7.3799
TDS	320.286	6.8146
TS	667.143	14.195
BOD	99.000	2.1064
COD	360.000	7.6596
TKN	349.000	7.4255
FOG	10.714	0.228
Cd	0.027	0.0006
Cu	0.011	0.0002
Pb	0.006	0.0001
Fe	0.116	0.0025
Zn	0.207	0.0044
HCN	1.071	0.0228
Formaldehyde	0.006	0.0001
H ₂ S	1.000	0.0213
Phenols	0.447	0.0095
Free Chlorine	ไม่พบ	ไม่พบ

หมายเหตุ : ⁽¹⁾ การคำนวณอัตราการเกิดของเสียต่อหน่วยไฟฟ้าแสดงไว้ในภาคผนวก ค

3) อัตราการเกิดของเสียจากแก๊สไอเสีย

ผลการตรวจวิเคราะห์แก๊สไอเสียเฉลี่ยที่เกิดขึ้นจากจากเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเดินระบบต่อเนื่อง 70 ชั่วโมง ที่กำลังการผลิต 47 kW พบว่า SO₂ และ NO_x มีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน และเมื่อทำการวิเคราะห์อัตราการเกิดของเสียต่อหน่วยไฟฟ้า (g/kWh)

ดังแสดงในตารางที่ 4.23 ซึ่งพบว่าในการผลิตไฟฟ้า 1 หน่วย (kWh) จะปลดปล่อยแก๊ส CO₂eq ออกมา 534.12 g/kWh เปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (EGAT) จากการใช้เชื้อเพลิงประเภทฟอสซิล จะปลดปล่อย CO₂eq ออกมาเท่ากับ 624 g/kWh (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, ออนไลน์, 2008) นอกจากนี้ในการนำกากตะกอนมาใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตพลังงานโดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน 1 kg จะปลดปล่อยแก๊ส CO₂ ออกมาเท่ากับ 255.48 g แต่ในขณะที่การนำกากตะกอนไปฝังกลบจะปลดปล่อยแก๊ส CH₄ ซึ่งคำนวณในรูปแก๊ส CO₂ แล้วพบว่ามีค่าสูงถึง 800 g (The UNEP Project CD4CDM, 2005) ซึ่งมีปริมาณมากกว่าถึง 3 เท่า ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้สูงที่จะนำระบบการกำจัดกากตะกอนโดยเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันไปใช้กับการจัดการของเสียอีกทางเลือกหนึ่งในอนาคต เนื่องจากสามารถให้ผลตอบแทนเพิ่มเติมในส่วนของโครงการกลไกการพัฒนาที่สะอาด หรือ Clean Development Mechanism (CDM)

ตารางที่ 4.23 อัตราการเกิดของเสียจากแก๊สไอเสียต่อหน่วยไฟฟ้า

แก๊สมลพิษ	อัตราการเกิดของเสียต่อหน่วยไฟฟ้า (mg/Nm ³)	อัตราการเกิดของเสียต่อหน่วยไฟฟ้า ⁽¹⁾ (g/kWh)
CO	2,471.49	26.37
SO ₂	7.54	0.08
NO	22.97	0.25
NO ₂	2.01	0.02
CO ₂	50,068.06	534.12

หมายเหตุ: ⁽¹⁾ การคำนวณอัตราการเกิดของเสียต่อหน่วยไฟฟ้าแสดงไว้ในภาคผนวก ก

4.5 ความเป็นไปได้ของการกำจัดกากตะกอนโดยเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันเพื่อผลิตพลังงาน

จากข้อมูลผลการศึกษากำจัดกากตะกอนโดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน ตามที่ได้กล่าวมาทั้งหมด สามารถนำมาสรุปถึง ข้อเด่น ข้อด้อย/ข้อจำกัด ปัญหาและแนวทางการแก้ไข ได้ดังตารางที่ 4.24 จะเห็นได้ว่าเทคโนโลยีดังกล่าวมีความเหมาะสมที่จะถูกนำมาใช้เพื่อเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับการกำจัดกากตะกอน หรือของเสียอื่น ๆ เพื่อผลิตพลังงาน แต่ทั้งนี้การพิจารณาระบบกำจัดของเสียที่เกิดขึ้น ก็เป็นเรื่องที่ต้องดำเนินการควบคู่กันไป

ตารางที่ 4.24 การเปรียบเทียบ ข้อเด่น ข้อด้อย/ข้อจำกัด และแนวทางการแก้ไข ของการกำจัดกากตะกอน โดยเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันเพื่อผลิตพลังงาน

ลำดับ	ข้อเด่น	ข้อด้อย/ข้อจำกัด	แนวทางการแก้ไข
1.	เป็นระบบกำจัดกากตะกอนร่วมกับการผลิตพลังงาน จากข้อมูลในการศึกษาค้างนี้ ประสิทธิภาพการผลิตพลังงาน จากการใช้เชื้อเพลิงกากตะกอน มีค่าเทียบเคียงได้กับชีวมวล ประเภทไม้ แก๊สเชื้อเพลิงสามารถนำไปผลิตไฟฟ้าโดย เครื่องยนต์สันดาปภายในได้	ความสามารถในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจะ ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะ สมบัติทางกายภาพ และทางเคมี ของเชื้อเพลิงแต่ละชนิด	ต้องศึกษาถึงคุณสมบัติของกากตะกอนเบื้องต้นก่อนที่จะ นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง โดยคุณสมบัติและองค์ประกอบ ต่าง ๆ ของกากตะกอนที่จะนำมาใช้ควรใกล้เคียงกับ เชื้อเพลิงชีวมวล
2.	แก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้สามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย เช่น ใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าโดยเครื่องยนต์สันดาปภายใน ป้อน แก๊สเข้าไปเผาไหม้เพื่อผลิตไอน้ำ เป็นต้น	กรณีที่น่าไปใช้งานกับเครื่องยนต์สันดาป ภายในเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ปริมาณการ ปนเปื้อนคาร์บอนและฝุ่นไม่ควรเกิน 25-8 mg/Nm ³ (งานวิจัยนี้มีปริมาณคาร์บอนและฝุ่น 10.45 mg/Nm ³)	ใช้ระบบทำความสะอาดแก๊สเชื้อเพลิงที่มีประสิทธิภาพสูง เช่น สกรับเบอร์ ระบบกรอง กำจัดคาร์บอนโดยใช้การ ควบแน่นด้วยน้ำเย็น หรือใช้ความร้อน เป็นต้น
3.	สามารถลดปริมาณกากตะกอนได้สูง โดยจากข้อมูลใน การศึกษาค้างนี้สามารถลดปริมาณกากตะกอนที่จะนำไปฝัง กลบเริ่มต้นได้สูงถึง 70% และยังช่วยให้กากตะกอนมีสภาพที่ คงตัว ลดปัญหาเรื่องกลิ่นได้ นอกจากนี้ เถ้าที่เกิดขึ้น สามารถ นำไปใช้ทำวัสดุก่อสร้างได้ เช่น ทำผงซีเมนต์ อิฐ เป็นต้น	กากตะกอนมีความชื้นเริ่มต้นค่อนข้างสูง ยังไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง ได้โดยตรง จำเป็นต้องผ่านกระบวนการ เตรียมเพื่อเป็นเชื้อเพลิงก่อน	ต้องลดความชื้นของกากตะกอน และเตรียมเชื้อเพลิงให้มี รูปร่าง เหมาะสมที่จะนำมาใช้เพื่อเป็นเชื้อเพลิง ทั้งนี้ขึ้นกับ ระบบแก๊สซิฟิเคชันที่ใช้
4	มลพิษที่ปนเปื้อนมากับแก๊สเชื้อเพลิง สำหรับเทคโนโลยีแก๊ส ซิฟิเคชัน สามารถควบคุมได้โดยการใช้ระบบทำความสะอาด แก๊สที่มีประสิทธิภาพ	มลพิษก็จะถูกเปลี่ยน ไปอยู่ใน รูป ของเหลว นั่นคือน้ำเสียที่เกิดขึ้นจาก ระบบทำความสะอาดแก๊ส	ศึกษาระบบปรับสภาพน้ำที่เหมาะสม หาอัตราการเติมน้ำ สะอาดที่เหมาะสมเพื่อเจือจางความเข้มข้น และต้องมี ระบบบำบัดน้ำเสียรองรับ ในกรณีที่ต้องปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การศึกษาความสามารถและทดสอบประสิทธิภาพการผลิตพลังงานโดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันกับเชื้อเพลิงกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมฟอกย้อม และการศึกษาปริมาณมลพิษที่เกิดขึ้น ผลการศึกษาสรุปได้ตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ ดังต่อไปนี้

5.1.1 สมบัติและองค์ประกอบของกากตะกอน

1) กากตะกอนจากโรงงานกลุ่มฟอกย้อมในสวนอุตสาหกรรมเครือสหพัฒน์กบินทร์บุรี และโรงงานฟอกย้อม บริษัทไทยกุลแซ่ จำกัด สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันได้ เนื่องจากมีค่าความร้อน ปริมาณสารระเหย ธาตุคาร์บอน และธาตุไฮโดรเจน ค่อนข้างสูง และมีสมบัติใกล้เคียงกับเชื้อเพลิงชีวมวลประเภทไม้

2) สมบัติของกากตะกอนจากทั้ง 2 แห่งมีความแตกต่างกันบ้าง แต่สามารถนำมาใช้ร่วมกันได้ โดยต้องผ่านการลดความชื้น ให้ได้ความชื้นไม่เกิน 15% และเตรียมให้เป็นแท่งเชื้อเพลิง โดยการอัดแท่ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 45 มิลลิเมตร ความยาว 40-50 มิลลิเมตร และความหนาแน่น 380 kg/m^3 ซึ่งกากตะกอนรวมมีค่าความร้อน ปริมาณสารระเหย ธาตุคาร์บอน และธาตุไฮโดรเจน เท่ากับ 13.55 MJ/kg, 56.00 %, 36.38 % และ 5.86 % ตามลำดับ

3) โลหะหนักในกากตะกอนน้ำเสีย พบการปนเปื้อนของเหล็ก (Fe) ค่อนข้างสูงสำหรับ CI พบในปริมาณที่ต่ำ

4) การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ องค์ประกอบแบบประมาณ และองค์ประกอบแบบแยกธาตุทำให้ทราบความเหมาะสมในการนำกากตะกอนน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมไปใช้งานเบื้องต้นสำหรับเป็นเชื้อเพลิง

5.1.2 การทดสอบสถานะที่เหมาะสมในการเดินระบบ

1) ภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบ พบว่าการทำงานที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงที่ $100 \text{ m}^3/\text{hr}$, $150 \text{ m}^3/\text{hr}$ และ $180 \text{ m}^3/\text{hr}$ จะใช้เชื้อเพลิงกากตะกอนในอัตรา 68.23, 78.76 และ 98.26 kg/hr โดยควบคุมอัตราการดึงเข้าออกจากเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง ประมาณ 30% และการควบคุมอัตราการป้อนเชื้อเพลิงและการดึงเข้าออกต้องสัมพันธ์กัน ทั้งนี้ปริมาณของแก๊สที่จะต้องนำออกจากเตานั้นจะพิจารณาได้จากปริมาณของแก๊สที่ได้จากผลการวิเคราะห์สมบัติแบบประมาณ

2) ชั้นของอุณหภูมิภายในเตา (Temperature Profile) ที่การเปลี่ยนอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงทั้ง 3 ระดับ พบว่าอุณหภูมิแต่ละชั้นอยู่ในช่วงใกล้เคียงกัน และมีลักษณะชั้นของอุณหภูมิ หรือ Pattern เป็นของเชื้อเพลิงที่มีความหนาแน่นสูง

3) องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง มีความสม่ำเสมอ แม้ว่าจะมีการเปลี่ยนอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง โดยกลุ่มแก๊สที่จุดไฟติด (Combustible Gas) ประกอบด้วย CO , H_2 และ CH_4 ในสัดส่วนโดยปริมาตรเฉลี่ยเท่ากับ 13.83%, 16.41% และ 2.26% ตามลำดับ มีค่าความร้อนเฉลี่ย 4.91 MJ/Nm^3 และ กลุ่มที่จุดไฟไม่ติด (Non-Combustible Gas) ประกอบด้วย N_2 , O_2 และ CO_2 ในสัดส่วนโดยปริมาตรเฉลี่ยเท่ากับ 52.05%, 0.64% และ 14.81% ตามลำดับ เป็นแก๊สที่นำไปใช้เชื้อเพลิงให้กับเครื่องยนต์สันดาปภายในได้

4) ปริมาณทาร์และฝุ่นที่ผ่านกระบวนการทำความสะอาดแล้ว ที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง $100 \text{ m}^3/\text{hr}$, $150 \text{ m}^3/\text{hr}$ และ $180 \text{ m}^3/\text{hr}$ มีค่าเท่ากับ 0, 3.16 และ 11.03 mg/Nm^3 ตามลำดับ ถือว่ามีปริมาณต่ำสามารถนำไปใช้กับเครื่องยนต์สันดาปภายในได้ อัตราการไหลของแก๊สมีผลต่อการปนเปื้อนของทาร์และฝุ่น เนื่องจากความเร็วของแก๊สในท่อทำให้คีกริควมปั่นป่วนเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการฟุ้งกระจาย

5) ความสามารถในการผลิตไฟฟ้าในแต่ละอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง พบว่าที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง $150 \text{ m}^3/\text{hr}$, $180 \text{ m}^3/\text{hr}$ เครื่องยนต์แก๊สที่ใช้ในการทดสอบสามารถผลิตไฟฟ้าได้สูงสุดเท่ากับ 21 kW และ 47 kW ตามลำดับ ในขณะที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงที่ $100 \text{ m}^3/\text{hr}$ ไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้ ทั้งนี้เนื่องจากความจุของแก๊สเชื้อเพลิงนั้นสามารถใช้เดินเครื่องยนต์ในสภาวะที่ปราศจากโหลดเท่านั้น แต่ต้นกำลังหรืองานที่ได้จากเครื่องยนต์ไม่เพียงพอสำหรับไปขับ Generator เพื่อผลิตไฟฟ้าได้

6) ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Gasification Efficiency) ของกากตะกอนในการเดินระบบที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง $100\text{-}180 \text{ m}^3/\text{hr}$ อยู่ในช่วง 58.03-67.51% และในการเดินเครื่องยนต์เพื่อผลิตไฟฟ้า พบว่าที่กำลังการผลิตสูง จะให้ประสิทธิภาพสูงขึ้น กล่าวคือ ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ที่กำลังการผลิตไฟฟ้า 21 kW และ 47 kW มีค่าเท่ากับ 10.46 % และ 20.68 % ตามลำดับ และประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าที่กำลังการผลิตไฟฟ้า 21 kW และ 47 kW มีค่าเท่ากับ 7.06% และ 12.71% ตามลำดับ ทั้งนี้อัตราการใช้เชื้อเพลิงกากตะกอนจำเพาะจะมีค่าลดลงเมื่อกำลังการผลิตสูงขึ้น กล่าวคือ ที่กำลังการผลิต 21 kW และ 47 kW อัตราการใช้เชื้อเพลิงกากตะกอนจำเพาะมีค่าเท่ากับ 3.76 และ 2.09 kg/kWh ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับประสิทธิภาพของระบบ

5.1.3 การประเมินประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า และสมบัติของเสียที่เกิดขึ้นจากการทดสอบ เดินระบบ 70 ชั่วโมง

1) การเดินระบบต่อเนื่อง 70 ชั่วโมงที่กำลังการผลิต 47 kW (50% ของ Full Load) พบว่าระบบสามารถเดินได้อย่างเสถียร เครื่องยนต์เดินเรียบ แก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้มีความสม่ำเสมอ ในชั่วโมงต่าง ๆ มีองค์ประกอบของ คาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) ไฮโดรเจน (H₂) มีเทน (CH₄) แก๊สไนโตรเจน (N₂) แก๊สออกซิเจน (O₂) และ คาร์บอนมอนนอกไซด์ (O₂) ในสัดส่วนโดยปริมาตรเฉลี่ย เท่ากับ 14.66%, 16.38%, 2.30%, 51.39%, 0.26% และ 15.01% ตามลำดับ มีค่าความร้อนเฉลี่ยเท่ากับ 5.03 MJ/Nm³ และมีปริมาณของทาร์และฝุ่นในตำแหน่งก่อนเข้าเครื่องยนต์เฉลี่ยเท่ากับ 10.45 mg/Nm³

2) ประสิทธิภาพการผลิตพลังงาน ของการเดินระบบที่กำลังผลิตไฟฟ้า 47 kW ต่อเนื่อง 70 ชั่วโมง ใช้อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงเฉลี่ย 180.36 m³/hr มีอัตราการใช้เชื้อเพลิง กากตะกอนจำเพาะเท่ากับ 2.09 kg/kWh และอัตราการเกิดเถ้าประมาณ 30% ประสิทธิภาพการผลิต แก๊สเชื้อเพลิง (Gasification Efficiency) ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ (Engine-generator Efficiency) ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า (Electrical Efficiency) มีค่าเท่ากับ 67.99%, 18.75% และ 12.27% ตามลำดับ

3) การเดินระบบต่อเนื่อง 70 ชั่วโมง ที่กำลังการผลิตไฟฟ้า 47 kW มีปริมาณเถ้าที่เกิดขึ้นค่าเฉลี่ยเท่ากับ 29.90 kg/hr คิดเป็น 30.40% ของปริมาณเชื้อเพลิงกากตะกอนที่ใช้ใน กระบวนการ หรือ 0.64 kg/kWh การนำกากตะกอนมาผลิตพลังงานโดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน ก่อน สามารถลดปริมาณกากตะกอนในการฝังกลบได้ถึง 70%

4) เถ้ายังมีองค์ประกอบที่เป็นพิษปนเปื้อน ซึ่ง ประกอบด้วย S Cl Cu Fe Zn Cd และ Pb ที่พบในปริมาณสูงคือ เกิด S และ Fe ประเมินเป็นอัตราการเกิดมลพิษได้เท่ากับ 22.78 g/kWh และ 11.74 g/kWh ตามลำดับ จำเป็นต้องกำจัดอย่างถูกวิธี

5) น้ำเสียพบการสะสมของมลสารในรูปต่าง ๆ เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการเดิน ระบบ และเมื่อถึงจุดหนึ่งที่น้ำหมุนเวียนในระบบอึดด้วยอนุภาคต่าง ๆ และจะส่งผลให้ ประสิทธิภาพการกำจัดทาร์และฝุ่นของ Scrubber ลดลง

6) ปริมาณมลสารที่ปนเปื้อนอยู่ในระบบบำบัดน้ำเสียจากการใช้เชื้อเพลิงกากตะกอน เดินระบบ พบว่ามีปริมาณค่อนข้างสูงและเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการเดินระบบใน การศึกษาครั้งนี้ ไม่มีการเติมน้ำสะอาดเข้าไปเพิ่มเพื่อเจือจางความเข้มข้น (makeup water) และการ ปรับสภาพน้ำด้วยสารเคมียังมีประสิทธิภาพในการบำบัดที่ต่ำ เนื่องจากการใช้ปริมาณสารเคมีในการ บำบัดในอัตราส่วนที่ไม่เหมาะสม ดังนั้นควรหาอัตราส่วนสารเคมีที่เหมาะสมจากการทำจาร์เทสทุก ครั้งก่อนใช้งาน

7) คุณภาพแก๊สไอเสียที่ปลดปล่อยสู่บรรยากาศของ SO_2 และ NO_x มีค่าตามมาตรฐานที่กำหนด ตามมาตรฐานของประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการปล่อยทิ้งอากาศเสียจากเตาเผามูลฝอยและมาตรฐานควบคุมการปล่อยทิ้งอากาศเสียจากโรงไฟฟ้า

8) การนำกากตะกอนมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเพื่อผลิตไฟฟ้า 1 หน่วย (kWh) จะปลดปล่อยแก๊ส CO_2 ออกมา 534.12 g/kWh หรือ 1 kg ของกากตะกอน จะปลดปล่อยแก๊ส CO_2 ออกมาเท่ากับ 255.48 g แต่ในขณะที่การนำกากตะกอนไปฝังกลบจะปลดปล่อยแก๊ส CO_2 ออกมาสูงถึง 800 g ซึ่งมีปริมาณมากกว่าถึง 3 เท่า ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้สูงที่จะนำไปใช้กับโครงการกลไกการพัฒนาที่สะอาด หรือ Clean Development Mechanism (CDM) ในอนาคตได้

5.2 การนำผลการศึกษาไปใช้ประโยชน์

1) เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันสามารถนำมาใช้กับเชื้อเพลิงกากตะกอนจากโรงงานฟอกย้อมเพื่อผลิตพลังงานได้จริง และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับกากตะกอนจากอุตสาหกรรมประเภทอื่นได้ ทั้งนี้การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ องค์ประกอบแบบประมาณ และองค์ประกอบแบบแยกธาตุ จะทำให้ทราบความเหมาะสมในการนำกากตะกอนน้ำเสียจากอุตสาหกรรมนั้น ๆ ไปใช้งานเบื้องต้น สำหรับเป็นเชื้อเพลิง

2) ผลการศึกษานี้ทำให้ทราบว่า การหลีกเลี่ยงมลพิษที่ปนเปื้อนมากับแก๊สเชื้อเพลิง สำหรับเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน สามารถควบคุมได้โดยการใช้ระบบทำความสะอาดแก๊สที่มีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบ Water Scrubber และ Chiller Scrubber หรือ Condense Scrubber ทั้งนี้มลพิษก็จะถูกเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของเหลว นั่นคือน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากระบบทำความสะอาดแก๊ส ดังนั้นหากใช้กากตะกอน หรือกากของเสียอื่น ๆ เช่น ขยะ มาผลิตพลังงานจำเป็นต้องมีการออกแบบระบบควบคุมมลพิษด้านน้ำเสียเพิ่มเติม

3) อุตสาหกรรมฟอกย้อมที่กระบวนการผลิตเกือบทุกขั้นตอนเกี่ยวข้องกับการใช้พลังงาน หากมีการนำกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียไปผลิตพลังงาน โดยเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน จะสามารถลดต้นทุนด้านพลังงานได้มาก นอกจากนี้ยังสามารถลดปริมาณกากตะกอนก่อนนำไปฝังกลบได้ถึง 70%

5.3 ข้อเสนอแนะและงานวิจัยในอนาคต

1) จากข้อมูลผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียที่เกิดขึ้นในระบบ เห็นได้ว่าคุณลักษณะของน้ำเสียมีการปนเปื้อนมลสารที่มีความเป็นพิษสูง และมีอัตราส่วนของซีโอดี ต่อ บีโอดี (COD/BOD ratio) ประมาณ 3.2 ซึ่งหมายถึงสารประกอบอินทรีย์ส่วนใหญ่ย่อยสลายได้ยากโดยแบคทีเรีย ดังนั้นการแก้ไขปัญหาเรื่องการน้ำเสีย จึงควรศึกษาเกี่ยวกับระบบบำบัดทางเคมีกายภาพ และระบบบำบัดทางชีวภาพเพิ่มเติม

2) มลพิษอื่น ๆ ในแก๊สไอเสีย เช่น H_2S HCl HCN Dioxin/Furan และ ออกไซด์ของโลหะหนักต่าง ๆ ที่ไม่มีการตรวจวัดในการศึกษาครั้งนี้ งานวิจัยในอนาคตควรที่จะมีการศึกษาให้ครอบคลุม เพื่อยืนยันว่า เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันสามารถนำมาใช้เพื่อผลิตพลังงานได้จริงและมีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เพราะถึงแม้จะมีงานวิจัยต่าง ๆ ของต่างประเทศได้สรุปอย่างชัดเจนว่า องค์ประกอบมลพิษเหล่านี้ถูกปลดปล่อยน้อยมากจากการใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน แต่การมีข้อมูลยืนยันจะยิ่งทำให้เกิดความเชื่อมั่นในการใช้เทคโนโลยีดังกล่าว

อย่างไรก็ดีการควบคุมมลพิษที่อาจจะเกิดขึ้นในรูปแก๊สไอเสีย สามารถทำได้ที่ต้นเหตุ นั้นคือในขั้นตอนการบำบัดน้ำเสีย ควรมีการแยกตะกอนน้ำเสียที่มาระบบบำบัดทางเคมีซึ่งมีสารพิษปนเปื้อนสูงไปฝังกลบ และนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงเฉพาะในส่วนตะกอนน้ำเสียของระบบบำบัดทางชีวภาพ

3) การนำของเสียมาผลิตพลังงาน โดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน นอกจากจะได้ผลตอบแทนในรูปแบบพลังงานทดแทนแล้ว ยังสามารถส่งเสริมสู่โครงการการพัฒนาโลกที่สะอาด (Clean Development Mechanism; CDM) และการซื้อขายคาร์บอนเครดิต (Carbon Credit) ได้ซึ่งควรที่จะมีการศึกษาต่อไปในอนาคต

รายการอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ. (2548). **แนวปฏิบัติที่ดีด้านการป้องกันและลดมลพิษสำหรับอุตสาหกรรมฟอกย้อม**. คู่มือโครงการเทคโนโลยีสะอาดสำหรับอุตสาหกรรมฟอกย้อม. กรุงเทพฯ ฯ.
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2550). **คู่มือการจัดการสิ่งแวดล้อมสำหรับอุตสาหกรรมพิมพ์ผ้า**. Environmental Management Guide for Textile Printing. กรุงเทพฯ ฯ.
- การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. (2008). ค้นหาข้อมูล Clean Development Mechanism (CDM) [ออนไลน์]. ได้จาก: <http://www2.dede.go.th/dede/cdm/baseline.htm>
- เกียรติไกร आयुวัฒน์, บุญรอด สัจจกุลนุกิจ, ชันวา ใจเที่ยง และ จิรัญญา เป่าหลักแหลม. (2549). **ความก้าวหน้าของเทคโนโลยีไฟโรไลซิส / ก๊าซซีพีเคชั้นสำหรับการผลิตพลังงานจากชีวมวลและขยะมูลฝอย**. โครงการพัฒนาระบบผลิตพลังงานจากชีวมวล. การประชุมวิชาการแห่งชาติ ครั้งที่ 1. หน้า 126-130.
- ทิพย์สุกินทร์ หินชุย, ปกีส ชนะโรด และ วีรชัย อัจหาญ. (2551). **การศึกษามลพิษและของเสียจากโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กสำหรับชุมชน**. การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 9. เทคโนโลยีเพื่อการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตรที่ยั่งยืน. หน้า 188.
- ชนพงษ์ สุริเย. (2545). **การศึกษาการเผาไหม้กากตะกอนจากกระบวนการผลิตกระดาษ**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- นิวัฒน์ คงกะพี, กฤษกร รับสมบัติ และ วีรชัย อัจหาญ. (2551). **การทดสอบประสิทธิภาพโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กสำหรับชุมชน**. การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 9. เทคโนโลยีเพื่อการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตรที่ยั่งยืน. หน้า 186.
- ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 พ.ศ. 2539. เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม. ลงวันที่ 3 มกราคม 2539 ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 113 ตอนที่ 13 ลงวันที่ 13 กุมภาพันธ์ 2539.
- ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการปล่อยทิ้งอากาศเสียจากโรงไฟฟ้า ประกาศในราชกิจจานุเบกษา เล่ม 113 ตอนที่ 9 ลงวันที่ 30 มกราคม 2539.

- ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการปล่อย
 ทิ้งอากาศเสียจากเตาเผามูลฝอย ประกาศในราชกิจจานุเบกษา เล่ม 114 ตอนที่ 63 ลงวันที่
 7 สิงหาคม พ.ศ. 2540
- พวงศักดิ์ จุลยุเสน และ วีรชัย อัจหาญ. (2551). ระบบกักตุนสารในโรงเรือนปลอดโดยใช้ความร้อน
 เหลือทิ้งจากเครื่องยนต์แก๊สชีวภาพ. การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่ง
 ประเทศไทย ครั้งที่ 9. เทคโนโลยีเพื่อการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตรที่ยั่งยืน. หน้า 176.
- มันสิน ตันกุลเวศม์ และ วุฒิ วิพันธ์พงษ์. (2545). การจัดการน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อม. Colourway,
 ปีที่ 7, ฉบับที่ 38.
- วัชร มั่งวิฑิตกุล. (2548). การจัดการพลังงานในอุตสาหกรรมฟอกย้อม. Industrial Technology
 Review. ปีที่ 10, ฉบับที่ 137 หน้า 182-185.
- วีรชัย อัจหาญ, นิวัฒน์ คงกะพี, กฤษกร รับสมบัติ, ทิพย์สุกินทร์ หินชูช, ปกัศ ชนะโรค, ณัฐพงษ์
 ประภากร, สาวิตรี คำหอม, สุภัทร หนูแยม, พจนาลัย ชาวห้วยหมาก, ชัยชนะ เลิศศรีสกุล,
 ศรัลย์ ปานศรีพงษ์, ชิงชัย วิริยะบัญชา, สมิต บุญเสริมสุข และจิราวัฒน์ วงษ์มาศจันทร์
 (2551). โรงไฟฟ้าต้นแบบชีวมวลขนาดเล็กสำหรับชุมชนแบบครบวงจร. รายงานการวิจัย.
 ภารกิจโครงการและประสานงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.
- ศุภวิทย์ ลวณะสกล. (2549). ความก้าวหน้าของเทคโนโลยีไพโรไลซิส / ก๊าซซิฟิเคชันสำหรับการ
 ผลิตพลังงานจากชีวมวลและขยะมูลฝอย. เครื่องยนต์แก๊สซิฟิเคชันใช้ถ่านไม้ผลิต
 พลังงาน. การประชุมวิชาการแห่งชาติ ครั้งที่ 1. หน้า 149-152.
- สมมาส แก้วล้วน, พิชัย อัยภูมมงคล และ สุรินทร์น พิพัฒน์มโนมัย. (2549). การประเมินทางด้าน
 เทคนิคและเศรษฐศาสตร์เพื่อนำก๊าซชีวภาพจากฟาร์มเลี้ยงสัตว์ขนาดเล็กมาใช้กับเครื่องยนต์
 เพื่อการผลิตไฟฟ้า. การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 2.
- สมรัฐ เกิดสุวรรณ. (2549). ความก้าวหน้าของเทคโนโลยีไพโรไลซิส / ก๊าซซิฟิเคชันสำหรับการผลิต
 พลังงานจากชีวมวลและขยะมูลฝอย. ระบบกำเนิดก๊าซเชื้อเพลิงจากชีวมวลและขยะมูล
 ฝอยเพื่อผลิตพลังงาน. การประชุมวิชาการแห่งชาติ ครั้งที่ 1. หน้า 42-108.
- สุธรรม ปทุมสวัสดิ์. (2549). ระบบผลิตแก๊สชีวมวลขนาดเล็กเพื่อผลิตไฟฟ้า. ระบบกำเนิดก๊าซ
 เชื้อเพลิงจากชีวมวลและขยะมูลฝอยเพื่อผลิตพลังงาน. การประชุมวิชาการแห่งชาติ
 ครั้งที่ 1. หน้า 109-119.
- สุธรรม ปทุมสวัสดิ์ และ สมรัฐ เกิดสุวรรณ. (2549). ระบบผลิตแก๊สชีวมวลขนาดเล็กเพื่อผลิต
 ไฟฟ้า. ระบบกำเนิดก๊าซเชื้อเพลิงจากชีวมวลและขยะมูลฝอยเพื่อผลิตพลังงาน. การประชุม
 วิชาการแห่งชาติ ครั้งที่ 1. หน้า 120-125.

- สมบูรณ์ ศิริพรมงคลชัย. (2546). การปรับปรุงคาร์บูเรเตอร์สำหรับเครื่องยนต์สันดาปภายในที่ใช้แก๊สชีวภาพ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- สาวิตรี คำหอม และ วีรชัย อาจหาญ. (2551). การศึกษาผลกระทบของสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวลต่อค่าความร้อน. การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 9. เทคโนโลยีเพื่อการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตรที่ยั่งยืน. หน้า 192.
- อิทธิวรรณ เลิศสกุลบันลือ. (2544). การผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจากแอกทิเวตเต็ดสลัดจ์ด้วยกระบวนการเคมีความร้อน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อนุตร จำลองกุล. (2545). **พลังงานทดแทน: Renewable energy**. โรงพิมพ์ โอ.เอส. พรินติ้ง เฮาส์ กรุงเทพฯ.
- อาภาณี เหลืองนฤมิตชัย. (2538) . การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงในเบดนิ่ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- Alexander, K. (2002). Gasification: An Alternative Process for Energy Recovery and Disposal of Municipal Solid Wastes. The degree of M.S. in Earth Resources, Engineering, Department of Earth and Environmental Engineering, Columbia University.
- American Public Health Association. (1998). **Standard Method for the Examination of Water and wastewater**. 20th ed, Washington D.C., USA.
- American Society for Testing and Materials (ASTM). 1991. **Standard test methods for gross calorific value of solid fuel by the adiabatic bomb calorimeter, ASTM D2015-77**. Philadelphia, Pa, USA.
- American Society for Testing and Materials (ASTM). 1991. **Standard methods for chemical analysis of wood charcoal, ASTM D1762-84**. Philadelphia, Pa, USA.
- Belgiorno, V., Feo D. G., Rocca D. C. and Napoli R.M.A. (2003) . Energy from gasification of solid wastes. **Waste Management** 23: 1-15.
- Bhattacharya, S. C. , Hla S. S., and Pham, H. L. (2001) . A study on a multi-stage hybrid gasifier-engine system. **Biomass and Bioenergy** 21(6): 445-460.
- Boocock, D.B.G., Konar S.M., Makay A., Cheung P.T.C. and Lui J. (1992). Fuels and chemicals from sewage sludge: The production of alkanes and alkenes by the pyrolysis of triglycerides over activated alumina. **Fuel** 71: 1291-1297.

- Bridgwater, A.V. (1994a). Catalysis in thermal biomass conversion. **Applied Catalysis General** 116: 5-47.
- Bridgwater, A.V. (1994b). The technical and economic feasibility of biomass gasification for power generation. **Fuel** 74 (5): 631- 653.
- Conesa, J.A., Marcilla, A., Moral, R., Moreno-Caselles, J. and Perez, E. (1998). Evolution of gases in the primary pyrolysis of different sewage sludge” **Thermochemical Actaul;** 313:1-20.
- Chen, G., Anddries, J., Luo, Z., and Spilet, H. (2003). Biomass pyrolysis/gasification for product gas Production : the overall investigation of parametric effect. **Energy Conversion & Management** 44: 1875-1884.
- Dogru, M. (2000). Fixed Bed Gasification of Biomass” PhD thesis, University of Newcastle, UK.
- Dogru, M., Midilli, A., Howarth, C. R. (2002). Gasification of sewage sludge using a throated downdraft gasifier and uncertainty analysis. **Fuel Processing Technology** 75: 55-82.
- Dutta, A. (1998). A Study of Biomass Gassification for Engine Application. M. Eng. Thesis. Energy Program, Asian Institute of Technology (A.I.T.), Thailand.
- Earp, D.M. (1988). The Gasification of Biomass in a Downdraft Reactor” PhD Thesis, Chemical Engineering Department, Aston University, UK.
- Fytili, D., Zabaniotou, A. (2006). Utilization of sludge in EU application of old and new methods - A review. **Renewable and Sustainable Energy Review** 1-28.
- Groeneveld MJ, Gellings PE, Hos JJ. (1983). Production of a tar freegas in an annular cocurrent moving bed gasier. **Energy from biomass and wastes.**
- Groß, B., Eder, C., Grziwa, P., Horst, J. and Kimmerle, K. (2007). Energy recovery from sewage sludge by mean of fluidised bed gasification. **Waste management.**
- Helble, J. J., Mojtahedi, W., Lyranen, J., Jokiniemi, J. and Kauppinen, K. (1995) “Trace element partitioning during coal gasification. **Fuel** 75(8) :931-939.
- Jain, A.K., Sharma, S.K. and Singh, D. (2002). Development of a kinetic model for designing throat less gasifier. **Indian Chemical Engr** 44 (4): 232-240.
- Jung, P. (1999). Technical and Economic Assesment of Hydrogen and Methanol Powered Fuel Cell Vehicles. Master of Science Thesis, Goteborg University.

- Kaupp, A., Goss, JR. (1981). State of art for small scale (50 kW) to gas producer-engine systems. Final Report to the USDA USFS on Contract No. 53-319R-0-141, University of California, Davis.
- Kersten, S.R.A. (2002). Biomass Gasification in Circulating Fluidized Beds. Dissertation Twente University, Twente University Press, Enschede, Netherlands.
- Kwak, T. H., Maken S., Lee S., Park J. W., Min B., and Yoo Y. D. (2006). Environmental aspects of gasification of Korean municipalsolid waste in a pilot plant. **Fuel** 85 :2012-2017.
- Kirubakaran, V., Sivaramakrishnan, V., Nalini, R., Sekar T., Premalatha M., Subramanian, P. (2007). A review on gasification of biomass. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**.
- Klein, A. (2002). Gasification: an alternative process for energy recovery and disposal of municipal solid wastes. Dissertation Columbia University, Columbia University Press, New York, USA.
- Maa, P. S. and Bailie, R. C. (1973). Influence of particle sizes and environmental conditions on high temperature pyrolysis of cellulose material. **Combust SciTechnol** 7 :257-69.
- Malkow, T. (2003). Novel and innovative pyrolysis and gasification technologies for energy efficient and environmentally sound MSW disposal. **Waste Management** 24 :53-79.
- Manya, J. J., Sanchez, J. L., Abrego, J., Gonzalo, A., Arauzo, J. (2006). Influence of gas residence time and air ratio on the air gasification of dried sewage sludge in a bubbling fluidized bed. **Fuel** 85: 2027-2033.
- Marrero, T., McAuley, B., Sutterlin, W., Morris, S., Manahan, S. (2004). Fate of heavy metal and radioactive metals in gasification of sewage sludge. **Waste Management** 24: 193-198.
- Mckendry, P. (2002). Energy production from biomass (part 2): Conversion technologies. **Bioresource Technology** 83: 47-54.
- Medcalf, B. D., Manahan, S. E., Larsen, D. W. (1998). Gasification as an alternative method for the destruction of sulfur containing waste (ChemChar process). **Waste Management** 18: 197-201.
- Midilli, A., Dogru, M., Howarth, C. R., Ling, M. J., Ayhan, T. (2000). Combustible gas production from sewage sludge with a downdraft gasifier. **Energy Conversion & management** 42: 157-172.

- Nowell, G.P. (1999). *The Promise of Methanol Fuel Cell Vehicles*. American Methanol Institute. State University of New York at Albany.
- Petersen, I. and Werther, J. (2005). Experimental investigation and modeling of gasification of sewage sludge in the circulating fluidized bed. **Chemical Engineering and Processing** 44: 717-736.
- Pinto, F., Lopes, H., Andre R. N., Gulyurtlu, I. and cabrita, I. (2007). Effect of catalysts in the quality of syngas and by-products obtained by co-gasification of coal and wastes. 2: Heavy metals, sulphur and halogen compounds abatement. **Fuel**.
- Pulkrabek, W. W. (2003). *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine*. แปลโดย เจษฎา ตัณฑเสถียรฐิติ. งานแปลของ บริษัท เพียร์สัน เอ็ดดูเคชั่น อินโดไชน่า จำกัด. กรุงเทพฯ.
- Quaak, P., Knoef, H., Stassen, H. (1999). *Energy from Biomass*. **WorldBank technical paper** no. 422. Energy series.
- Raveendran, K., Ganesh, A., Khilar, K.C., (1995). Influence of mineral matter on biomass pyrolysis characteristics. **Fuel** 74(12):1812–22.
- Reed, T. and B. Bryant. (1978). **Densified Biomass**, A New Form of Solid Fuel . Solar Energy Research Institute, A Division of Midwest Research Institute, Golden, Colorado.
- Reed, T. and Markson M. (1983). A predictive model for stratied downdraft gasication”. In: Tillman DA, John EC, editors.**Progress in biomass conversion** 4 :217–54.
- Stiegel, G. J. and Maxwell R. C. (2001). Gasification technologies: the path to clean, affordable energy in the 21st century. **Fuel Processing Technology** 71: 79–97.
- Tchobanoglous, G. and Burton, F.L. (1991). *Wastewater Engineering; Treatment, Disposal and Reuse*. International ed. McGraw-Hill, Singapore, pp. 765-771.
- The UNEP Project CD4CDM. (2005). *Baseline Methodologies For Clean Development Mechanism Projects (Emission baseline for methane recovery)*. A GUIDEBOOK ISBN: 87-550-3483-7. UNEP Risø Center, Denmark.
- Vervaeke, P., Tack, F.M.G., Navez, F., Martin, J., Verloo, M.G. and Lust, N. (2006). Fate of heavy metals during fixed bed downdraft gasification of willow wood harvested from contaminated sites. **Biomass and Bioenergy** 30: 58–65.
- Winkler, M. (1993). Sewage sludge treatments. **Chemistry and Industry** 7: 217-23.

- Wu, C. Z., Huang, H., Zheng, S.P. and Yin, X.L. (2002). Aneconomic analysis of biomass gasification and power generation in China. **Bioresource & Technology** 83: 65-70.
- Zainal, Z.A., Rifau, A., Quadir, G.A. and Seetharamu, K. N. (2002). Experimental investigation of a downdraft biomass gasifier. **Biomass and Bioenergy** 23: 283-289.

ภาคผนวก ก

วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ

วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ

ก.1 การหาคุณสมบัติทางกายภาพของกากตะกอนและเถา

ก1.1 ความหนาแน่นก่อนการอัด

วิธีการทดลองนำกากตะกอนมาจัดเรียงให้ชิดกันที่สุดในภาชนะขนาด 50x50x50 cm³ นำไปชั่งน้ำหนักแล้วบันทึกผล คำนวณของกากตะกอนต่อหน่วยปริมาตรที่แน่นอน

ก1.2 ความหนาแน่นหลังการอัด

วิธีการทดลอง ทำการวัดค่ามวลต่อปริมาตรของกากตะกอน แล้วนำค่าที่ได้จากการทดลอง มาคำนวณตามสมการที่ (ก1)

$$\text{Density} = \frac{\text{Mass (kg)}}{\text{Volume (m}^3\text{)}} \quad (\text{ก1})$$

ก1.3 ความชื้น

คือเปอร์เซ็นต์ของน้ำต่อน้ำหนักกากตะกอน โดยหาเป็นร้อยละของความชื้นมาตรฐานเปียก (Wet basis) ซึ่งมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้

- อบถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาในเตาอบ (Drying Oven) ที่อุณหภูมิ 104-110°C เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำเข้าเดสิเคเตอร์ (Desicator) ทิ้งไว้ประมาณ 15 นาที จากนั้นนำไปชั่งและบันทึกน้ำหนัก
- ชั่งตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองประมาณ 1 กรัม ลงในถาด อลูมิเนียมพร้อมฝาที่ทราบน้ำหนัก จากนั้นบันทึกน้ำหนักตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง
- นำตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองไปเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 104-110°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงหรือจนกว่าน้ำหนักตัวอย่างของตัวอย่างคงที่
- นำถาดอลูมิเนียมมาทิ้งไว้ให้เย็นแล้วนำเข้าเดสิเคเตอร์ จากนั้นทิ้งไว้ประมาณ 1 นาที จึงทำการชั่งน้ำหนักถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาที่มีตัวอย่างที่ทำการอบแล้วอยู่ภายใน ทำการบันทึกผล จากนั้นนำผลการทดลองมาคำนวณตามสมการที่ (ก2)

$$M(wb) = 100 \times \frac{(W_1 - W_2)}{W} \quad (\text{ก2})$$

เมื่อ

M (wb)	คือ	ร้อยละของความชื้นมาตรฐานเปียก (Wet basis)
W_1	คือ	น้ำหนักของถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาพร้อมกับน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองก่อนทำการอบ (กรัม)
W_2	คือ	น้ำหนักของถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาพร้อมกับน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองหลังทำการอบ (กรัม)
W	คือ	น้ำหนักของตัวอย่างตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง (กรัม)

ก.2 การหาค่าประกอบแบบประมาณของกากตะกอนและเถ้า (Proximate Analysis)

การหาค่าประกอบประมาณ ได้แก่ ความชื้น เถ้า (Ash) ปริมาณสารระเหย (Volatile Mater) และปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) โดยใช้วิธีการตามมาตรฐานของ ASTM D1762-84 ซึ่งมีวิธีการดังนี้

ก2.1 ความชื้น

คือเปอร์เซ็นต์ของน้ำต่อน้ำหนักกากตะกอนแห้ง โดยหาเป็นร้อยละของความชื้นมาตรฐานแห้ง (dry basis) ซึ่งมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้

- อบถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาในเตาอบ (drying oven) ที่อุณหภูมิ 104-110°C เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำเข้าเดสิเคเตอร์ (desicator) ทิ้งไว้ประมาณ 15 นาที จากนั้นนำไปชั่งและบันทึกน้ำหนัก
- ชั่งตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองประมาณ 1 กรัม ลงในถาด อลูมิเนียมพร้อมฝาที่ทราบน้ำหนัก จากนั้นบันทึกน้ำหนักตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง
- นำตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองไปเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 104-110°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงหรือจนกว่าน้ำหนักตัวอย่างของตัวอย่างคงที่
- นำถาดอลูมิเนียมมาทิ้งไว้ให้เย็นแล้วนำเข้าเดสิเคเตอร์ จากนั้นทิ้งไว้ประมาณ นาที จึงทำการชั่งน้ำหนักถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาที่มีตัวอย่าง ที่ทำการอบแล้วอยู่ภายในและทำการบันทึกจากนั้นนำผลการทดลองมาคำนวณตามสมการที่ (ก3)

$$M(db) = 100 \times \frac{(W_1 - W_2)}{W_2 - W_0} \quad (ก3)$$

เมื่อ

M (db)	คือ	ร้อยละของความชื้นมาตรฐานแห้ง (Dry basis)
W_0	คือ	น้ำหนักของถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาที่ใช้ในการทดลอง (กรัม)
W_1	คือ	น้ำหนักของถาดอลูมิเนียมพร้อมฝารวมกับน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองก่อนทำการอบ (กรัม)
W_2	คือ	น้ำหนักของถาดอลูมิเนียมพร้อมฝารวมกับน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองหลังทำการอบ (กรัม)

ก2.2 เถ้า (Ash)

- เเผครุชชีเบลพอร์ซเลน (Porcelain Crucible) พร้อมฝาในเตาเผา (Muffle Furnace) ที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง จากนั้นนำออกมาทำให้เย็นในเดสิเกเตอร์แล้วทำการชั่งน้ำหนักครุชชีเบลพอร์ซเลนพร้อมฝา
- ชั่งน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองใส่ครุชชีเบลพอร์ซเลนประมาณ 1 กรัม
- นำไปเผาบนตะเกียงเบนเซน รอจนควันระเหยออกหมด
- ใส่ครุชชีเบลพอร์ซเลนพร้อมฝาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 750°C ทิ้งไว้เป็นเวลาประมาณ 2 ชั่วโมงหรือรอจนน้ำหนักถ้ำคงที่
- นำครุชชีเบลพอร์ซเลนออกจากเตาเผาแล้วนำทิ้งไว้ให้เย็นลง จากนั้นนำไปใส่ในเดสิเกเตอร์ ทำการชั่งน้ำหนักและบันทึกผล แล้วทำการคำนวณตามสมการที่ (ก4)

$$A = 100 \times \frac{(W_3 - W_4)}{W} \quad (\text{ก4})$$

เมื่อ

A	คือ	ร้อยละของเถ้า
W_3	คือ	น้ำหนักของครุชชีเบลพอร์ซเลนพร้อมฝาที่มีเถ้า (กรัม)
W_4	คือ	น้ำหนักของครุชชีเบลพอร์ซเลนพร้อมฝา (กรัม)
W	คือ	น้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง (กรัม)

ก2.3 ปริมาณสารระเหย

- เเผครุชชีเบลพร้อมฝาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 950°C ทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที จากนั้นนำออกจากเตาเผา ทิ้งไว้ให้เย็นในเดสิเกเตอร์ หลังจากนั้นทำการชั่งน้ำหนักของครุชชีเบลพร้อมฝาและทำการบันทึกผล

- ชั่งตัวอย่างตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองใส่ในครุชชีเบลประมาณ 1 กรัม
- ปิดฝาครุชชีเบลให้เรียบร้อย จากนั้นนำไปให้ความร้อนโดยให้อยู่เหนือปากเตาเผาที่อุณหภูมิประมาณ 300°C เป็นเวลาประมาณ 6 นาที
- หย่อนครุชชีเบลให้อยู่บริเวณปากเตา อุณหภูมิประมาณ 600°C ทิ้งไว้เป็นเวลาประมาณ 10 นาที
- หย่อนครุชชีเบลให้อยู่กึ่งกลางเตาเผา อุณหภูมิประมาณ 950°C เป็นเวลาประมาณ 6 นาที
- นำครุชชีเบลออกมาทิ้งไว้ให้เย็นลง จากนั้นนำไปใส่ไว้ในเคสิเกเตอร์ประมาณ 15 นาที จากนั้นจึงนำไปชั่งน้ำหนักและทำการบันทึกผล แล้วทำการคำนวณตามสมการที่ (ก5)

$$V = 100 \times \frac{(W_5 - W_6)}{W} \quad (ก5)$$

เมื่อ

V	คือ	ร้อยละของสารระเหย
W_5	คือ	น้ำหนักของครุชชีเบลพร้อมฝารวมกับน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองก่อนทำการเผา (กรัม)
W_6	คือ	น้ำหนักของครุชชีเบลพร้อมฝารวมกับน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองหลังทำการเผา (กรัม)
W	คือ	น้ำหนักของตัวอย่างตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง (กรัม)
M	คือ	ร้อยละของความชื้น

ก2.4 ปริมาณคาร์บอนคงตัว

ปริมาณคาร์บอนคงตัว สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (ก6)

$$\text{ร้อยละของคาร์บอนคงตัว} = 100 - \text{ร้อยละของความชื้น} - \text{ร้อยละของเถ้า} - \text{ร้อยละของสารระเหย} \quad (ก6)$$

ก2.5 การหาค่าความร้อนของการเผาไหม้ (Calorific Value)

การหาค่าความร้อนของการเผาไหม้ตัวอย่างโดยใช้เครื่อง Bomb Calorimeter ตามมาตรฐานของ ASTM D 2015-77 โดยนำตัวอย่างตัวอย่างแห้งบดละเอียดอัดเป็นเม็ด พันด้วยลวดเผาไหม้ (Ignition Wire) ใส่ลงในถ้วยตัวอย่าง วางในเครื่องบอมม์ปิดฝา อัดก๊าซออกซิเจนบริสุทธิ์เข้าไปด้วยความดัน 30 kg/cm^3 ประมาณ 5 นาที แล้วประกอบเข้าในถัง (Jacket) เติมน้ำ ประมาณ 1800 มิลลิตร กดปุ่มเผาไหม้ตัวอย่าง อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนกระทั่ง ความร้อนที่เกิดขึ้นจะถูกถ่ายเทให้กับน้ำ แล้วนำค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ ไปคำนวณหาค่าความร้อนของตัวอย่างตัวอย่าง โดยเทียบกับค่าความร้อนที่ได้จากการ บอมม์ Benzoic acid มาตรฐาน

ค่าทางความร้อนทางเชื้อเพลิง คือ ปริมาณความร้อนที่ต้องถ่ายเทออกจากเชื้อเพลิง เนื่องจากการสันดาปที่เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ในระบบ โดยปกติการสันดาปของเชื้อเพลิงจำพวกไฮโดรคาร์บอนเมื่อสันดาปในบรรยากาศของออกซิเจน ผลของการสันดาปจะได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ (ซึ่งอยู่ในรูปของไอน้ำ) ถ้าไอน้ำสามารถกลั่นตัวแล้วคายความร้อนแฝงออกมา ค่าความร้อนเชื้อเพลิงที่ได้จะเป็นค่าความร้อนสูงสุด แต่ถ้าไอน้ำไม่กลั่นตัว ค่าความร้อนทางเชื้อเพลิงจะเป็นค่าความร้อนต่ำ การหาค่าความร้อนทางเชื้อเพลิงโดยการนำเอาเชื้อเพลิงที่จะทำการทดสอบไปชั่งน้ำหนักให้ละเอียดมาเผาไหม้กับออกซิเจนบริสุทธิ์ ภายใต้ความดันภายใน Bomb Calorimeter ความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้จะถ่ายเทให้กับน้ำหล่อเย็นรอบตัวบอมม์แคลอรีมิเตอร์ ซึ่งสามารถวัดอุณหภูมิของน้ำได้โดยใช้เทอร์โมมิเตอร์และปริมาณความร้อนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (ก7)

$$Q = m.c.\Delta T \quad (\text{ก7})$$

เมื่อ

Q	คือ	ปริมาณความร้อน (MJ/Kg)
m	คือ	มวลของน้ำในแคลอรีมิเตอร์ (kg)
c	คือ	ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ (4.186 KJ/kg)
ΔT	คือ	อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง ($^{\circ}\text{C}$)

ก.3 การหาคุณสมบัติแบบแยกธาตุของกากตะกอนและเถ้า (Ultimate Analysis)

ก3.1 องค์ประกอบของธาตุ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และ ซัลเฟอร์

สามารถทำได้โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ C H N S Elemental Analyzer นำตัวอย่างตัวอย่างบดให้ละเอียด ซึ่งปริมาณที่แน่นอนประมาณ 1-2 mg ใส่ภาชนะ นำไปเผาที่อุณหภูมิประมาณ 925°C ภายใต้ออกซิเจนบริสุทธิ์ ผ่านเข้าไปใน Reagent CO₂ H₂O N₂ ความคุมความดัน อุณหภูมิ ปริมาตรให้คงที่

ก3.2 องค์ประกอบของธาตุออกซิเจน

ปริมาณออกซิเจนของเชื้อเพลิงกากตะกอน หาได้จากการคำนวณดังสมการที่ (ก8)

$$\text{ปริมาณออกซิเจน(\%)} = 100 - (\% \text{คาร์บอน} - \% \text{ไฮโดรเจน} - \% \text{ไนโตรเจน} - \% \text{ซัลเฟอร์}) \quad (\text{ก8})$$

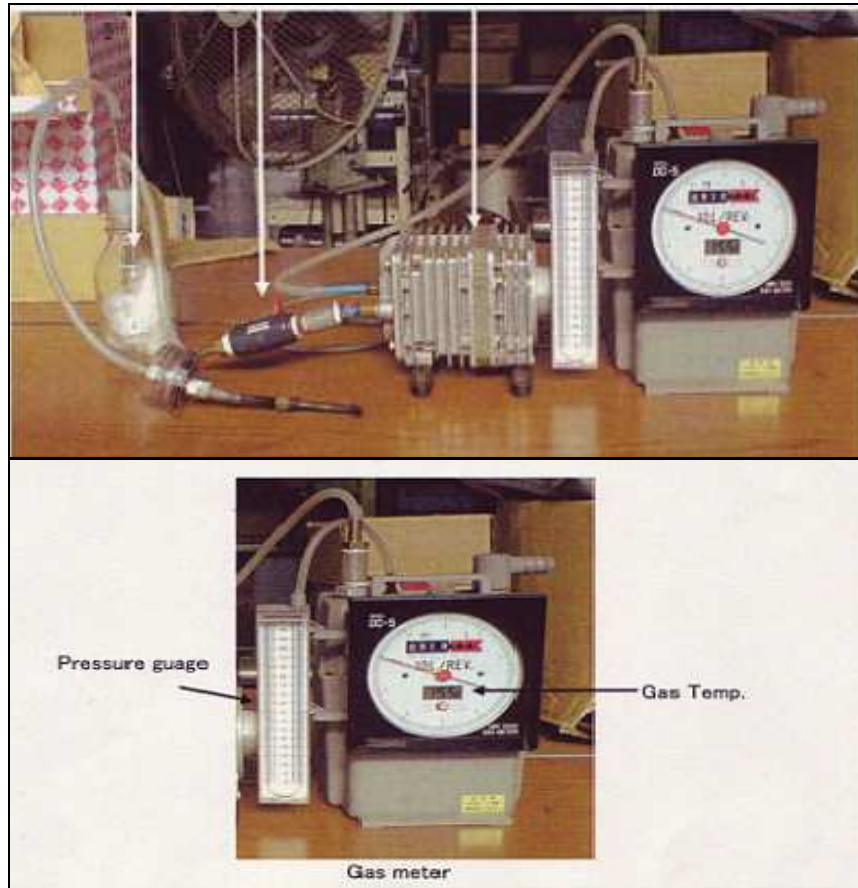
ก3.3 องค์ประกอบของธาตุโลหะหนักและคลอรีน

สามารถทำได้โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ คือ เครื่อง Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer (EDXRF รุ่น ED 2000) ที่สามารถวิเคราะห์ธาตุได้ครอบคลุมตั้งแต่ธาตุ Na จนถึงธาตุ U ในระดับ 0.01-100 (%) โดยนำตัวอย่างตัวอย่างที่บดให้ละเอียด ซึ่งปริมาณใส่ในถ้วย ซึ่งสาร แล้วนำไปอัดตัวอย่างโดยใช้เครื่องเตรียมตัวอย่าง EDXRF จากนั้นนำไปวิเคราะห์โดยเครื่องมือดังกล่าว

ก.4 การวิเคราะห์ปริมาณทาร์และฝุ่น (Tars and dust)

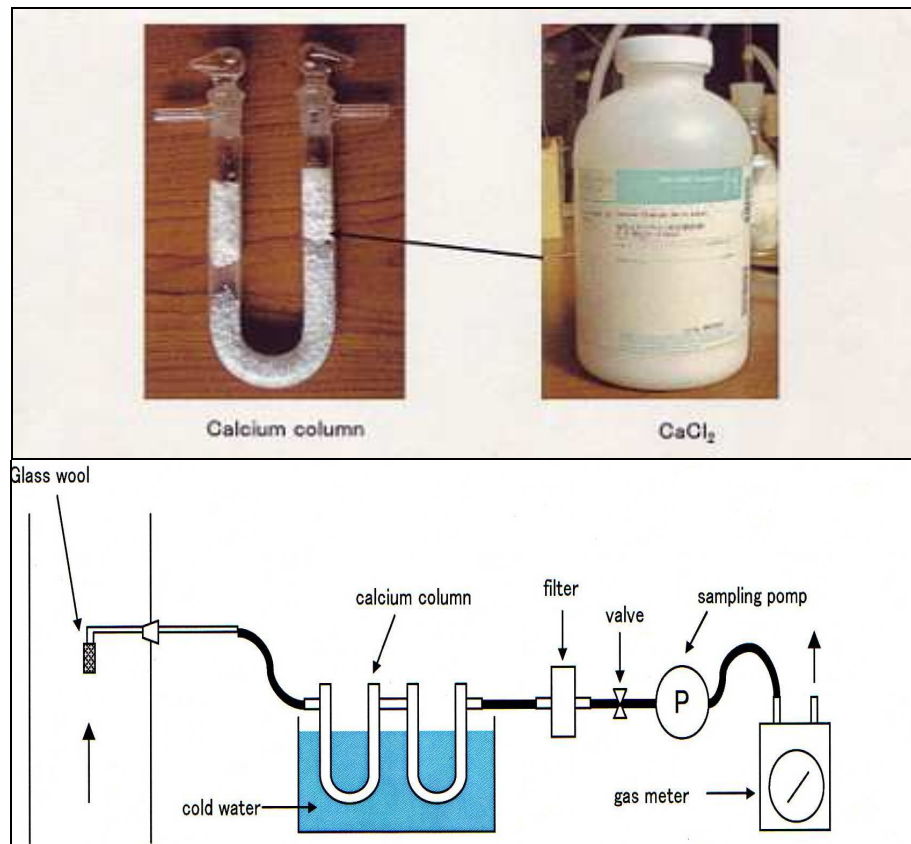
การวิเคราะห์ปริมาณการปนเปื้อนของทาร์และฝุ่น อ้างอิงตามคู่มือการเดินระบบของโรงไฟฟ้า ชีวมวลสุรนารี (Technical Training Manual : Technical Support Materials on the Biomass Gasification Power Plant) โดยวิธีการวิเคราะห์มีรายละเอียดดังนี้

1) เตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับวิเคราะห์ ดังแสดงในรูปที่ ก1 คือปั๊มที่สามารถควบคุมอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงได้ เนื่องจากการเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ทาร์และฝุ่น ต้องควบคุมปริมาตรให้ได้เท่ากันทุกครั้งที่ทำกรเก็บตัวอย่าง เพื่อลดความคลาดเคลื่อน โดยปริมาตรที่กำหนด คือ ไม่นเกิน 300 L



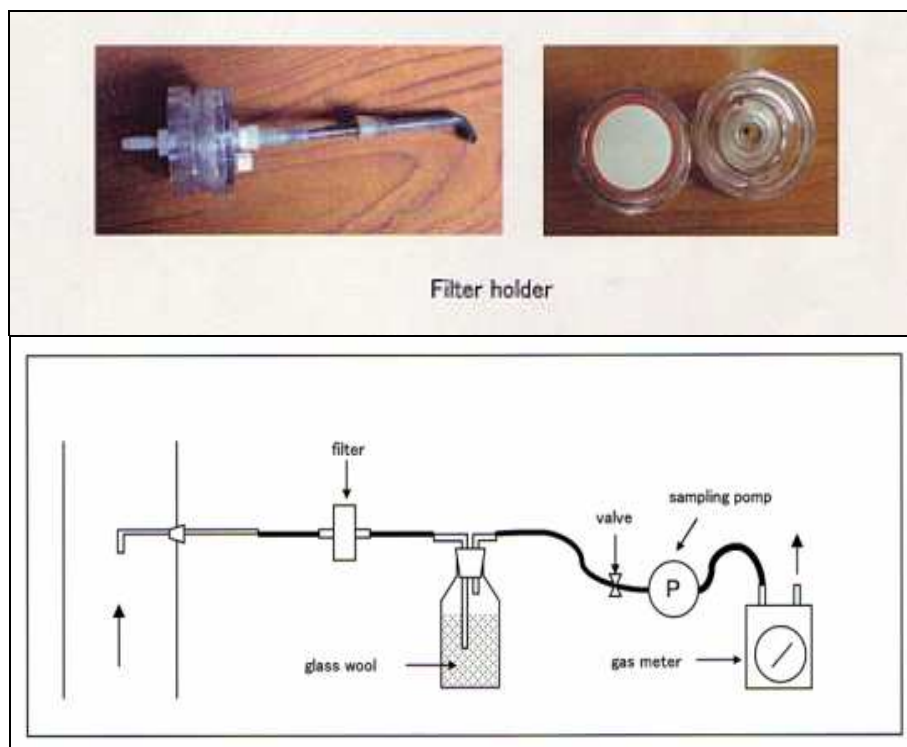
รูปที่ ก1 การเตรียมเครื่องมือสำหรับวิเคราะห์

2) เตรียมอุปกรณ์และสารเคมีสำหรับวิเคราะห์ ดังแสดงในรูปที่ ก2 คือ CaCl_2 ซึ่งทำหน้าที่ดูดความชื้นที่มีอยู่ในแก๊ส โดยทำการเติม CaCl_2 ลงไปใน Calcium ทำการทดลองดังแสดงในรูปที่ ก2 นำข้อมูลที่ได้มาทำการวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์ความชื้นของแก๊สเชื้อเพลิง (X_w) เพื่อนำมาคำนวณหาปริมาตรของแก๊สที่มีความชื้น (V_m) ก่อนที่จะคำนวณในรูป ปริมาตรของแก๊สแห้ง (V_N) หรือที่ใช้ในหน่วย Nm^3



รูปที่ ก2 การเตรียมอุปกรณ์สำหรับใช้วิเคราะห์ความขึ้นของแก๊สเชื้อเพลิง

3) จากนั้นเตรียมอุปกรณ์และสารเคมีสำหรับวิเคราะห์ทาร์และฝุ่น คือ Filter Holder สำหรับใส่กระดาษกรอง ซึ่งจะใช้กระดาษกรอง GF/B Dia. 47 mm ที่ผ่านการอบไล่ความชื้นแล้วที่ อุณหภูมิ 103-105 °C โดยทำการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ ก3



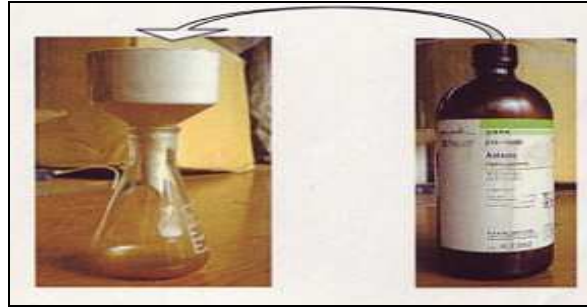
รูปที่ ก3 การเตรียมอุปกรณ์สำหรับใช้วิเคราะห์ทาร์และฝุ่น

4) ทำการเก็บตัวอย่างทาร์และฝุ่นในแก๊สเชื้อเพลิงจนได้ปริมาณที่กำหนด คือไม่เกิน 300 L จากนั้นนำกระดวยกรองไปอบไล่ความชื้นก่อน แล้วทำการชั่งน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งน้ำหนักที่ได้คือปริมาณของทาร์และฝุ่นรวมกัน ตัวอย่างกระดวยกรองหลังผ่านการเก็บตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ ก4



รูปที่ ก4 กระดวยกรองหลังผ่านการเก็บตัวอย่าง (ทาร์และฝุ่นรวมกัน)

5) ทำการล้างทาร์ออกจากกระดวยกรองโดยใช้สารละลาย Anisole ดังแสดงในรูปที่ ก5 จากนั้นนำกระดวยกรองไปอบไล่ความชื้นก่อน แล้วทำการชั่งหาน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ ก5 การล้างด้วยสารเคมี Anisol เพื่อกำจัดทาร์ออกจากกระดวยกรอง

6) จากนั้นนำข้อมูลที่ได้จากการทดลอง มาคำนวณ โดยอาศัยความสัมพันธ์ดังนี้

$$X_w = \frac{1.24m + 100}{V_m \times \left(\left(\frac{273}{273 + \theta_m} \right) \times \left(\frac{P_a + P_m}{101.3} \right) \right) + 1.24m} \quad (\text{ก9})$$

$$V_m = \frac{V_L \times \left(\left(\frac{273}{273 + \theta_m} \right) \times \left(\frac{P_a + P_m}{101.3} \right) \right)}{1000} \quad (\text{ก10})$$

เมื่อ

X_w	คือ	% ความชื้นของแก๊สเชื้อเพลิง
m	คือ	น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงของแคลเซียมคลอไรด์ (mg)
V_L	คือ	ปริมาตรของแก๊สที่มีความชื้น (L)
V_m	คือ	ปริมาตรของแก๊สที่มีความชื้น (m^3)
θ_m	คือ	อุณหภูมิที่อ่านได้จาก Gas meter ($^{\circ}\text{C}$)
P_a	คือ	ความดันบรรยากาศ (kPa)
P_m	คือ	ความดันแก๊สที่อ่านได้จาก Gas meter (kPa)

$$V_n = V_m \times \left(1 - \frac{X_w}{100} \right) \quad (ก11)$$

$$W_d = \left(\frac{m_3 - m_1}{V_N} \right) \quad (ก12)$$

$$W_t = \left(\frac{m_2 - m_3}{V_N} \right) \quad (ก13)$$

เมื่อ

V_m	คือ	ปริมาตรของแก๊สที่มีความชื้น (m^3)
V_N	คือ	ปริมาตรของแก๊สแห้ง (Nm^3)
W_t	คือ	ความเข้มข้นของทาร์ (Tar Concentration mg/Nm^3)
W_d	คือ	ความเข้มข้นของฝุ่น (Dust Concentration mg/Nm^3)
m_1	คือ	น้ำหนักกระดาษกรองเริ่มต้น (mg)
m_2	คือ	น้ำหนักหลังการกรองและอบที่อุณหภูมิ $103^\circ C$ (mg)
m_3	คือ	น้ำหนักหลังล้างทาร์ออกด้วยสารละลาย Anisole และอบที่อุณหภูมิ $130^\circ C$ (mg)

ภาคผนวก ข

ข้อมูลผลการทดลอง

ข้อมูลการทดลอง

ตารางที่ ข1 ข้อมูลผลการวิเคราะห์สมบัติแบบแยกธาตุ โดยเครื่อง CHNS ของกากตะกอน โรงงาน
กลุ่มฟอกย้อมในสวนอุตสาหกรรมศรีสพพัฒน์กบินทร์บุรี

ลำดับ	% C	% H	% N	% S	% O
1	36.05	5.49	5.01	0.98	52.47
2	36.06	5.48	5.02	0.98	52.46
3	36.07	5.49	5.01	0.97	52.46
4	36.02	5.49	5.01	0.99	52.49
เฉลี่ย	36.05	5.49	5.01	0.98	52.47

ตารางที่ ข2 ข้อมูลผลการวิเคราะห์สมบัติแบบแยกธาตุ โดยเครื่อง CHNS ของกากตะกอน โรงงาน
ฟอกย้อมบริษัทไทยกุลแช่จำกัด

ลำดับ	% C	% H	% N	% S	% O
1	41.98	6.69	4.65	0.75	45.93
2	41.99	6.69	4.66	0.75	45.91
3	41.98	6.68	4.65	0.76	45.93
4	41.98	6.69	4.65	0.75	45.93
เฉลี่ย	41.98	6.69	4.65	0.75	45.93

ตารางที่ ข3 ข้อมูลผลการวิเคราะห์สมบัติแบบแยกธาตุ โดยเครื่อง CHNS ของกากตะกอนผสม

ลำดับ	% C	% H	% N	% S	% O
1	36.38	5.86	5.22	0.98	47.90
2	36.46	5.98	5.09	1.03	47.96
3	36.37	5.98	5.45	0.9	47.69
4	36.32	5.63	5.12	0.99	48.36
เฉลี่ย	36.38	5.86	5.22	0.98	47.98

ตารางที่ ข4 ข้อมูลผลการวิเคราะห์สมบัติแบบแยกธาตุโดยเครื่อง EDXRF ของกากตะกอนโรงงาน
กลุ่มฟอกย้อมในสวนอุตสาหกรรมศรีสอพัฒน์กบินทร์บุรี

ลำดับ	%Cl	%Cu	%Fe	%Zn	%Cd	%Pb
1	0.773	0.170	2.387	0.388	0.0013	0.028
2	0.772	0.171	2.386	0.388	0.0013	0.028
3	0.773	0.170	2.388	0.389	0.0013	0.028
4	0.774	0.170	2.387	0.388	0.0013	0.028
เฉลี่ย	0.773	0.170	2.387	0.388	0.0013	0.028

ตารางที่ ข5 ข้อมูลผลการวิเคราะห์สมบัติแบบแยกธาตุโดยเครื่อง EDXRF ของกากตะกอนโรงงาน
โรงงานฟอกย้อมบริษัทไทยกุลแช่จำกัด

ลำดับ	%Cl	%Cu	%Fe	%Zn	%Cd	%Pb
1	0.622	0.143	1.840	0.299	0.0001	0.0027
2	0.622	0.143	1.841	0.299	0.0001	0.0027
3	0.622	0.143	1.840	0.298	0.0001	0.0027
4	0.622	0.142	1.840	0.299	0.0001	0.0026
เฉลี่ย	0.622	0.143	1.840	0.299	0.0001	0.0027

ตารางที่ ข6 ข้อมูลผลการวิเคราะห์สมบัติแบบแยกธาตุโดยเครื่อง EDXRF ของกากตะกอนผสม

ลำดับ	%Cl	%Cu	%Fe	%Zn	%Cd	%Pb
1	0.74	0.129	2.43	0.330	0.001	0.027
2	0.76	0.132	2.23	0.335	0.001	0.024
3	0.74	0.125	2.39	0.331	0.001	0.026
4	0.72	0.130	2.37	0.329	0.001	0.027
เฉลี่ย	0.74	0.129	2.36	0.331	0.001	0.026

ตารางที่ ข7 ข้อมูลผลการวิเคราะห์สมบัติแบบประมาณของกากตะกอนโรงงานฟอกข้อม

ลำดับ	Calorific Value (MJ/kg)			Proximate (% , Dry basis)											
				Moisture			Volatile			Ash			Fixed carbon		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
1	13.42	17.25	13.55	5.55	1.44	5.44	52.43	64.43	56.00	35.23	17.56	30.10	6.79	11.51	8.46
2	13.52	17.56	13.55	5.50	1.20	5.20	53.78	68.67	56.78	34.44	18.62	30.44	6.28	11.51	7.58
3	13.42	17.85	13.57	5.56	1.90	5.90	52.89	67.89	56.89	34.45	18.45	30.45	7.10	11.76	6.76
4	13.45	17.52	13.56	5.53	1.10	5.10	53.89	71.34	56.89	33.41	18.42	30.41	7.17	10.14	7.60
5	13.56	17.41	13.46	5.55	1.20	5.45	53.43	68.61	54.43	31.12	18.22	31.12	9.90	11.97	9.00
6	13.41	17.52	13.23	5.79	1.90	5.79	53.67	63.36	55.67	34.15	18.56	32.15	6.39	16.18	6.39
7	13.33	17.42	13.47	5.98	1.98	5.98	53.89	68.45	57.89	34.34	17.96	30.34	5.79	11.61	5.79
8	13.52	17.86	13.25	5.98	1.44	5.98	52.34	69.78	56.34	34.56	18.63	30.56	7.12	10.15	7.12
9	13.42	17.56	13.45	5.77	1.10	5.77	52.61	68.61	56.61	34.13	18.52	30.13	7.49	11.77	7.49
10	13.45	17.45	13.25	4.55	1.98	4.55	53.36	68.36	53.36	34.78	18.96	30.78	7.31	10.70	11.31
11	13.40	17.86	12.90	5.88	4.87	5.88	52.45	69.45	52.45	34.56	18.33	30.56	7.11	10.89	11.11
12	13.23	16.98	13.00	5.32	1.98	5.32	53.78	69.78	59.78	34.12	18.45	30.12	6.78	10.79	4.78
13	13.25	16.97	13.29	5.67	1.67	5.67	53.67	68.67	56.67	33.35	19.10	30.35	7.31	10.56	7.31
14	13.22	17.56	13.68	5.78	1.78	5.78	53.71	68.71	56.71	33.12	19.15	31.12	7.39	10.36	6.39
15	13.11	17.49	13.46	5.56	1.56	5.56	51.82	69.82	56.82	30.23	19.23	30.23	12.39	10.39	7.39
16	13.49	17.89	14.23	5.98	1.77	5.98	53.45	68.45	56.45	35.12	19.10	30.12	5.45	10.68	7.45
17	13.44	17.45	13.21	5.55	1.65	5.65	53.71	70.71	56.71	34.34	18.96	29.34	6.40	10.89	8.30

ตารางที่ ข7 ข้อมูลผลการวิเคราะห์สมบัติแบบประมาณของกากตะกอนโรงงานฟอกย้อม (ต่อ)

ลำดับ	ค่าความร้อน (MJ/kg)			Proximate (% , Dry basis)											
				ความชื้น			ปริมาณสารระเหย			ปริมาณเถ้า			ปริมาณคาร์บอนคงตัว		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
18	13.56	17.86	13.88	5.40	1.45	5.45	53.34	69.34	58.34	34.45	18.96	29.45	6.81	10.25	6.76
19	13.33	17.25	13.12	5.43	1.43	5.43	53.56	69.56	58.56	33.12	17.56	33.12	7.89	11.45	2.89
20	13.45	17.01	14.54	5.34	1.87	4.34	53.12	70.12	54.12	30.45	18.10	30.45	11.09	10.91	11.09
21	13.46	17.20	13.43	5.63	1.85	4.65	52.18	69.18	54.18	34.56	18.56	30.56	7.63	10.41	10.61
22	13.45	17.63	13.88	5.65	1.78	4.65	51.12	69.12	54.12	35.12	18.96	29.12	8.11	10.14	12.11
23	13.41	17.42	13.42	5.30	1.88	4.32	50.12	69.12	54.12	33.56	18.96	31.56	11.02	10.04	10.00
24	13.41	17.54	13.54	5.52	1.96	5.32	52.65	69.65	56.65	34.45	18.89	34.45	7.38	10.95	3.58
25	13.40	17.23	14.53	5.79	1.56	5.79	53.23	70.23	54.23	35.23	17.52	30.23	5.75	10.69	9.75
26	13.38	17.10	12.38	5.17	1.79	5.97	53.86	70.23	57.00	35.23	17.86	30.23	5.74	11.01	6.80
27	13.58	17.12	14.23	5.17	1.96	5.67	52.34	70.34	57.34	34.19	18.54	28.19	8.30	11.16	8.80
28	13.56	17.03	13.25	5.43	1.58	5.43	53.10	69.12	56.12	33.12	19.10	29.12	8.35	10.20	9.33
29	13.25	17.46	13.98	5.90	1.78	5.90	53.32	69.78	53.78	35.32	18.96	30.32	5.46	10.56	10.00
30	13.36	17.03	14.23	5.53	1.98	5.23	53.12	69.12	55.12	38.23	18.45	28.23	3.12	10.45	11.42
เฉลี่ย	13.41	17.42	13.55	5.56	1.78	5.44	53.00	69.00	56.00	34.08	18.55	30.45	7.36	11.00	8.11

หมายเหตุ : A คือ กากตะกอน โรงงานกลุ่มฟอกย้อมในสวนอุตสาหกรรมเครือสหพัฒน์กบินทร์บุรี

B คือ กากตะกอน โรงงานฟอกย้อมบริษัทไทยกุลแซ่ จำกัด

C คือ กากตะกอนผสม

ตารางที่ ข8 ข้อมูลผลการวิเคราะห์สมบัติแบบประมาณของถ้ำ

ลำดับ	Calorific Value (MJ/kg)	Proximate (% Dry basis)			
		Moisture	Volatile	Ash	Fixed carbon
1	2.301	2.2	6.9	30.45	15.6
2	2.503	2.3	6.5	30.46	13.0
3	2.667	2.8	6.8	30.42	16.8
4	2.589	2.0	6.8	30.45	17.3
5	2.457	1.9	6.5	30.45	17.4
เฉลี่ย	2.503	2.2	6.7	30.45	16.0

ตารางที่ ข9 ข้อมูลผลการวิเคราะห์สมบัติของถ้ำแบบแยกธาตุ (โดยเครื่อง CHNS)

ลำดับ	% C	% H	% N	% S	% O
1	42.63	0.31	1.11	3.59	50.17
2	42.64	0.32	1.14	3.43	50.28
3	43.56	0.31	1.06	3.59	49.29
4	41.67	0.31	1.05	3.61	51.17
เฉลี่ย	42.63	0.31	1.09	3.56	50.22

ตารางที่ ข10 ข้อมูลผลการวิเคราะห์สมบัติของถ้ำแบบแยกธาตุ (โดยเครื่อง EDXRF)

ลำดับ	%Cl	%Cu	%Fe	%Zn	%Cd
1	0.097	0.0895	1.8340	0.1580	0.0001
2	0.097	0.0892	1.8343	0.1586	0.0001
3	0.097	0.0891	1.8345	0.1557	0.0001
4	0.097	0.0881	1.8351	0.1597	0.0001
เฉลี่ย	0.097	0.0890	1.8340	0.1580	0.0001

ตารางที่ ข11 ตัวอย่างการบันทึกการใช้เชื้อเพลิงภาคตะกอน และการเอาเถ้าออก ที่ 0 kW

ลำดับ	Time		Engine	Biomass input		Biomass output Ash	
	Time	Operation (Hz)	kW	Unit (kg)	Total (kg)	Unit (kg)	Total (%)
1	8:00	0	0	68.89	68.89	20.9	30.33822
2	9:00	0	0	68.89	68.89	21.91	31.80433
3	10:00	0	0	68.23	68.23	21.9	32.09732
4	11:00	0	0	68.34	68.34	21.89	32.03102
5	12:00	0	0	68.89	68.89	21.89	31.77529
6	13:00	0	0	68.89	68.89	21.9	31.78981
7	14:00	0	0	65.12	65.12	21.87	33.58415
8	15:00	0	0	65.71	65.71	21.89	33.31304
9	16:00	0	0	69.12	69.12	21.94	31.7419
10	17:00	0	0	68.34	68.34	21.98	32.16272
11	18:00	0	0	68.89	68.89	21.91	31.80433
12	19:00	0	0	68.89	68.89	22.7	32.95108
13	20:00	0	0	68.23	68.23	22.4	32.83013
14	21:00	0	0	68.89	68.89	22	31.93497
15	22:00	0	0	68.89	68.89	21.45	31.13659
16	23:00	0	0	68.23	68.23	21.4	31.3645
17	00.:00	0	0	68.45	68.45	21.89	31.97955
18	1:00	0	0	67.98	67.98	21.56	31.71521
19	2:00	0	0	67.59	67.59	21.9	32.40124
20	3:00	0	0	67.23	67.23	22	32.72349
21	4:00	0	0	68.89	68.89	21.9	31.78981
22	5.00	0	0	68.45	68.45	21.78	31.81885
23	6.00	0	0	68.14	68.14	21.9	32.13971
24	7.00	0	0	68.23	68.23	22	32.24388
เฉลี่ย				68.23	68.23	21.9	32.1

ตารางที่ ข12 ตัวอย่างการบันทึกข้อมูลแบบต่อเนื่องด้วยระบบ Online Measuring System
(อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง 100 m³/hr)

Flow	100 m ³ /hr										
Time	Load (kW)	Frequency (Hz)	Gas Flow (m3/h)	Clean Gas	Reactor Inside						
					Reactor OUT Gas	Reactor Inside 1	Reactor Inside 2	Reactor Inside 3	Reactor Inside 4	Reactor Inside 5	Reactor Inside 6
10:00:20	0.00	0.00	99.2	36.7	512.9	32.2	40.2	81.9	777.3	720.0	668.9
10:00:50	0.02	0.00	99.5	36.7	512.1	32.1	40.2	81.8	777.2	720.4	672.9
10:01:20	0.01	0.00	100.2	37.3	512.1	32.4	40.8	81.4	777.4	721.0	674.6
10:01:50	0.02	0.00	101.5	36.6	512.0	32.2	40.2	81.7	777.2	721.6	665.1
10:02:20	0.01	0.00	101.5	36.8	512.0	32.1	40.1	81.4	777.5	721.9	653.7
10:02:50	0.00	0.00	101.0	36.8	512.1	32.3	40.8	81.5	777.6	722.3	645.9
10:03:20	0.00	0.00	100.0	36.5	512.0	32.5	40.8	81.7	777.3	722.0	637.2
10:03:50	0.00	0.00	100.0	36.9	511.8	32.3	40.3	81.5	777.6	723.0	631.4
10:04:20	0.00	0.00	101.2	36.7	512.1	32.5	40.7	82.0	777.7	723.3	627.2
10:04:50	0.00	0.00	99.7	36.9	511.9	32.3	41.0	81.5	777.5	723.2	630.1
10:05:20	0.02	0.00	102.0	36.7	511.6	32.4	40.0	82.0	777.8	723.8	630.1
10:05:50	0.00	0.00	102.7	36.6	511.9	32.4	39.8	81.7	778.0	723.9	629.5
10:06:20	0.00	0.00	102.5	36.6	511.7	32.6	40.0	81.5	778.2	724.5	631.8
10:06:50	0.00	0.00	102.7	36.8	511.4	32.6	40.4	81.3	778.4	724.0	633.1
10:07:20	0.00	0.00	100.7	36.7	511.5	32.5	39.7	81.4	778.3	723.9	634.3
10:07:50	0.01	0.00	100.7	36.7	511.2	32.5	40.0	82.0	778.3	724.1	634.6
10:08:20	0.00	0.00	100.0	36.6	510.9	32.4	40.0	81.8	778.6	724.8	633.4
10:08:50	0.01	0.00	100.7	36.9	511.2	32.6	40.3	81.6	778.8	724.0	625.9
10:09:20	0.00	0.00	101.0	36.5	511.7	31.9	39.8	81.3	778.3	722.9	621.2
10:09:50	0.02	0.00	102.7	36.8	511.6	32.8	39.7	81.4	778.8	724.4	620.7
10:10:20	0.00	0.00	101.5	36.6	512.7	32.1	40.0	81.6	780.2	725.7	618.1
10:10:50	0.00	0.00	101.2	36.6	513.4	32.2	39.9	81.7	781.1	726.3	614.4
10:11:20	0.00	0.00	100.2	36.4	514.2	32.1	40.5	81.8	781.7	726.8	613.1
10:11:50	0.00	0.00	100.2	36.8	514.4	32.1	40.3	82.0	782.3	727.0	614.2
10:12:20	0.00	0.00	102.2	36.7	514.5	32.2	40.8	82.9	782.7	726.8	619.0
10:12:50	0.00	0.00	101.5	36.5	514.6	32.0	40.6	82.3	782.9	727.0	622.9
10:13:20	0.00	0.00	100.2	36.6	514.7	32.0	40.1	82.4	782.9	726.9	628.6

ตารางที่ ข13 ตัวอย่างข้อมูลผลการตรวจวัดแก๊สไอเสีย (0 kW)

ลำดับ	[%] O2	[ppm] CO	[ppm] SO2	[ppm] NO	[ppm] NO2	[ppm] NOx	[%] CO2	[°C] FT
1	6.22	2376	100	43	0	43	-----	220.8
2	3.52	2794	139	61	0	61	9.16	230.6
3	3.19	2492	159	67	0	67	9.33	231.1
4	3.12	2379	169	68	0	68	9.36	231.2
5	3.16	2324	173	67	0	67	9.34	231.3
6	3.35	2298	173	64	0	64	9.25	231.4
7	3.44	2254	172	63	0	63	9.2	231.5
8	3.57	2251	168	61	0	61	9.13	231.6
9	3.64	2198	169	60	0	60	9.09	231.8
10	3.6	2179	173	60	0	60	9.11	231.9
11	3.52	2147	176	61	0	61	9.15	231.8
12	2.47	2093	194	76	0	76	9.71	231.1
13	2.12	2047	207	82	0	82	9.89	231
14	2.61	1978	202	74	0	74	9.63	231
15	2.53	1971	203	75	0	75	9.67	230.8
16	2.21	1972	208	77	0	77	9.84	229.9
17	2.34	1931	211	76	0	76	9.78	228.9
18	2.46	1874	212	73	0	73	9.71	227.8
19	2.43	1873	212	73	0	73	9.73	226.9
20	2.32	1891	216	74	0	74	9.78	226.1
21	2.58	1848	213	69	0	69	9.65	225.4
22	2.66	1860	213	68	0	68	9.61	225.5
23	2.31	1846	216	73	0	73	9.79	225
24	2.02	1865	222	78	0	78	9.94	224.2
25	2.2	1862	223	74	0	74	9.85	223.7
26	2.38	1850	219	71	0	71	9.75	223.6
27	2.36	1861	217	71	0	71	9.76	222.4
เฉลี่ย	2.90	2085.70	191.07	68.85	0.00	68.85	9.55	228.46

ตารางที่ ข14 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ค่า COD ของน้ำเสีย (การเก็บตัวอย่างครั้งที่ 1-4)

ตัวอย่างที่	ปริมาตร ตัวอย่าง (ml)	ปริมาตร FAS Titrate Sample (ml)	ปริมาตร FAS (Blank) (ml)	Normality FAS	COD (mg/l)	COD เฉลี่ย (mg/l)
A1	3	21.20	26.65	0.0957	1390.84	1371.70
	3	21.35	26.65	0.0957	1352.56	
B1	3	22.35	26.65	0.0957	1097.36	1103.74
	3	22.30	26.65	0.0957	1110.12	
C1	3	20.40	26.65	0.0957	1595	1595.00
	3	20.40	26.65	0.0957	1595	
A2	3	19.40	26.65	0.0957	1850.2	1824.68
	3	19.60	26.65	0.0957	1799.16	
B2	5	14.85	26.65	0.0957	1806.816	1810.64
	5	14.80	26.65	0.0957	1814.472	
C2	5	11.00	26.65	0.0957	2396.328	2358.05
	5	11.50	26.65	0.0957	2319.768	
A3	5	13.15	26.65	0.0957	2067.12	2067.12
	5	13.15	26.65	0.0957	2067.12	
B3	5	14.20	26.65	0.0957	1906.344	1906.34
	5	14.20	26.65	0.0957	1906.344	
C3	5	10.20	26.65	0.0957	2518.824	2518.82
	5	10.20	26.65	0.0957	2518.824	
A4	5	11.15	26.65	0.0957	2373.36	2373.36
	5	11.15	26.65	0.0957	2373.36	
B4	5	14.00	26.65	0.0957	1936.968	1982.90
	5	13.40	26.65	0.0957	2028.84	
C4	5	8.60	26.65	0.0957	2763.816	2763.82
	5	8.60	26.65	0.0957	2763.816	

หมายเหตุ : A1 หมายถึง Sample A การเก็บน้ำตัวอย่างครั้งที่ 1

B1 หมายถึง Sample B การเก็บน้ำตัวอย่างครั้งที่ 1

C1 หมายถึง Sample C การเก็บน้ำตัวอย่างครั้งที่ 1

ตารางที่ ข15 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ค่า COD ของน้ำเสีย (การเก็บตัวอย่างครั้งที่ 5)

ตัวอย่างที่	ปริมาตร ตัวอย่าง (ml)	ปริมาตร FAS Titrate Sample (ml)	ปริมาตร FAS (Blank) (ml)	Normality FAS	COD (mg/l)	COD เฉลี่ย (mg/l)
A5	3	15.35	26.65	0.0957	2883.76	2858.24
	3	15.55	26.65	0.0957	2832.72	
B5	3	16.85	26.65	0.0957	2500.96	2520.10
	3	16.70	26.65	0.0957	2539.24	
C5	3	5.35	26.65	0.0957	5435.76	5352.82
	3	6.00	26.65	0.0957	5269.88	

ตารางที่ ข16 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ค่า BOD ของน้ำเสีย (การเก็บตัวอย่างน้ำเสียครั้งที่ 1)

ตัวอย่างที่	ปริมาตร ตัวอย่าง (ml)	อัตราเจือจาง (ml)	DO (0) (ml)	DO (5) (ml)	BOD (mg/l)	BOD เฉลี่ย (mg/l)
A	5.00	60	7.40	6.85	33	161.25
A	2.00	150	8.90	7.75	172.5	
A	1.00	300	8.95	8.45	150	
B	5.00	60	7.65	6.75	54	138.75
B	2.00	150	8.70	7.75	142.5	
B	1.00	300	8.85	8.40	135	
C	2.00	150	8.55	8.05	75	300
C	1.00	300	9.15	8.15	300	
C	0.50	600	9.35	8.30	630	
Blank	300.00	1	9.60	8.90	0.7	

ตารางที่ ข17 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ค่า BOD ของน้ำเสีย (การเก็บตัวอย่างน้ำเสียครั้งที่ 2)

ตัวอย่างที่	ปริมาตร ตัวอย่าง (ml)	อัตราเจือจาง (ml)	DO (0) (ml)	DO (5) (ml)	BOD (mg/l)	BOD เฉลี่ย (mg/l)
A	2.00	150	9.20	7.45	262.5	495
A	1.00	300	9.40	8.00	420	
A	0.50	600	9.75	8.80	570	
B	2.00	150	9.10	7.00	315	427.5
B	1.00	300	9.40	7.60	540	
B	0.50	600	9.90	8.50	840	
C	2.00	150	9.10	7.20	285	705
C	1.00	300	9.40	6.90	750	
C	0.50	600	9.90	8.80	660	
Blank	300.00	1	10.00	9.30	0.7	

ตารางที่ ข18 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ค่า BOD ของน้ำเสีย (การเก็บตัวอย่างน้ำเสียครั้งที่ 3)

ตัวอย่างที่	ปริมาตร ตัวอย่าง (ml)	อัตราเจือจาง (ml)	DO (0) (ml)	DO (5) (ml)	BOD (mg/l)	BOD เฉลี่ย (mg/l)
A	2.00	150	9.05	5.90	472.5	600
A	1.00	300	9.55	7.55	600	
A	0.50	600	9.15	8.15	600	
B	2.00	150	8.85	5.70	472.5	551.25
B	1.00	300	9.00	6.90	630	
B	0.50	600	9.50	8.20	780	
C	2.00	150	8.70	5.25	517.5	735
C	1.00	300	9.30	6.70	780	
C	0.50	600	9.50	8.35	690	
Blank	300.00	1	9.70	9.10	0.6	

ตารางที่ ข19 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ค่า BOD ของน้ำเสีย (การเก็บตัวอย่างน้ำเสียครั้งที่ 4)

ตัวอย่างที่	ปริมาตร ตัวอย่าง (ml)	อัตราเจือจาง (ml)	DO (0) (ml)	DO (5) (ml)	BOD (mg/l)	BOD เฉลี่ย (mg/l)
A	2.00	150	9.05	5.70	502.5	603.75
A	1.00	300	9.80	7.45	705	
A	0.50	600	9.65	8.25	840	
B	2.00	150	9.20	5.50	555	637.5
B	1.00	300	9.80	7.40	720	
B	0.50	600	9.80	8.25	930	
C	2.00	150	8.30	5.55	412.5	870
C	1.00	300	8.80	6.40	720	
C	0.50	600	9.20	7.50	1020	
Blank	300.00	1	9.85	9.55	0.3	

ตารางที่ ข20 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ค่า BOD ของน้ำเสีย (การเก็บตัวอย่างน้ำเสียครั้งที่ 5)

ตัวอย่างที่	ปริมาตร ตัวอย่าง (ml)	อัตราเจือจาง (ml)	DO (0) (ml)	DO (5) (ml)	BOD (mg/l)	BOD เฉลี่ย (mg/l)
A	2.00	150	7.95	5.15	420	780
A	1.00	300	8.70	6.10	780	
A	0.50	600	9.10	6.50	1560	
B	2.00	150	8.50	4.85	547.5	693.75
B	1.00	300	8.35	5.55	840	
B	0.50	600	9.15	4.60	2730	
C	1.00	300	8.40	1.85	1965	1657.5
C	0.50	600	8.70	6.45	1350	
C	0.20	1500	9.20	7.45	2625	
Blank	300.00	1	9.55	8.10	1.45	

ตารางที่ ข21 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ค่า TKN ของน้ำเสีย (การเก็บตัวอย่างน้ำเสียครั้งที่ 1)

ตัวอย่างที่	ปริมาตร ตัวอย่าง (ml)	ปริมาตร H ₂ SO ₄ Titrate Sample (ml)	ปริมาตร H ₂ SO ₄ Titrate Blank (ml)	Normality H ₂ SO ₄	TKN (mg/l)	TKN (เฉลี่ย) (mg/l)
A1	50	23.45	0	0.1	656.6	657.3
	50	23.50	0	0.1	658	
B1	50	22.60	0	0.1	632.8	637.7
	50	22.95	0	0.1	642.6	
C1	50	23.75	0	0.1	665	661.5
	50	23.50	0	0.1	658	

ตารางที่ ข22 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ค่า TKN ของน้ำเสีย (การเก็บตัวอย่างน้ำเสียครั้งที่ 2)

ตัวอย่างที่	ปริมาตร ตัวอย่าง (ml)	ปริมาตร H ₂ SO ₄ Titrate Sample (ml)	ปริมาตร H ₂ SO ₄ Titrate Blank (ml)	Normality H ₂ SO ₄	TKN (mg/l)	TKN (เฉลี่ย) (mg/l)
A2	5	3.10	0	0.1	868	882
	5	3.2	0	0.1	896	
B2	5	2.60	0	0.1	728	721
	5	2.55	0	0.1	714	
C2	5	2.95	0	0.1	826	833
	5	3.00	0	0.1	840	

ตารางที่ ข23 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ค่า TKN ของน้ำเสีย (การเก็บตัวอย่างน้ำเสียครั้งที่ 3)

ตัวอย่างที่	ปริมาตร ตัวอย่าง (ml)	ปริมาตร H ₂ SO ₄ Titrate Sample (ml)	ปริมาตร H ₂ SO ₄ Titrate Blank (ml)	Normality H ₂ SO ₄	TKN (mg/l)	TKN (เฉลี่ย) (mg/l)
A3	5	3.50	0	0.1	980	973
	5	3.45	0	0.1	966	
B3	5	3.05	0	0.1	854	861
	5	3.10	0	0.1	868	
C3	5	3.45	0	0.1	966	973
	5	3.50	0	0.1	980	

ตารางที่ ข24 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ค่า TKN ของน้ำเสีย (การเก็บตัวอย่างน้ำเสียครั้งที่ 4)

ตัวอย่างที่	ปริมาตร ตัวอย่าง (ml)	ปริมาตร H ₂ SO ₄ Titrate Sample (ml)	ปริมาตร H ₂ SO ₄ Titrate Blank (ml)	Normality H ₂ SO ₄	TKN (mg/l)	TKN (เฉลี่ย) (mg/l)
A4	5	7.85	0	0.1	2198	2156
	5	7.55	0	0.1	2114	
B4	5	7.30	0	0.1	2044	2072
	5	7.50	0	0.1	2100	
C4	5	8.40	0	0.1	2352	2338
	5	8.30	0	0.1	2324	

ตารางที่ ข25 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ค่า TKN ของน้ำเสีย (การเก็บตัวอย่างน้ำเสียครั้งที่ 5)

ตัวอย่างที่	ปริมาตร ตัวอย่าง (ml)	ปริมาตร H ₂ SO ₄ Titrate Sample (ml)	ปริมาตร H ₂ SO ₄ Titrate Blank (ml)	Normality H ₂ SO ₄	TKN (mg/l)	TKN (เฉลี่ย) (mg/l)
A5	5	8.75	0	0.1	2450	2443
	5	8.70	0	0.1	2436	
B5	5	8.70	0	0.1	2436	2443
	5	8.75	0	0.1	2450	
C5	5	9.05	0	0.1	2534	2527
	5	9.00	0	0.1	2520	

ตารางที่ ข26 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ค่า FOG ของน้ำเสีย (การเก็บตัวอย่างน้ำเสียครั้งที่ 1)

ตัวอย่างที่	ปริมาตร ตัวอย่าง (ml)	น้ำหนักถ้วยหลังระเหย (g)	น้ำหนักถ้วย (g)	FOG (m/l)	FOG เฉลี่ย (m/l)
A1	500	61.6621	61.6601	4.0	4.5
	500	61.6145	61.612	5.0	
B1	500	64.0017	64.0015	0.4	0.7
	500	65.1345	65.134	1.0	
C1	500	60.6065	60.6014	10.2	9.5
	500	62.7045	62.7001	8.8	

ตารางที่ ข27 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ค่า FOG ของน้ำเสีย (การเก็บตัวอย่างน้ำเสียครั้งที่ 2)

ตัวอย่างที่	ปริมาตร ตัวอย่าง (ml)	น้ำหนักถ้วยหลังระเหย (g)	น้ำหนักถ้วย (g)	FOG (m/l)	FOG เฉลี่ย (m/l)
A2	500	61.6752	61.6611	28.2	27.8
	500	59.1372	59.1235	27.4	
B2	500	63.1293	63.1245	9.6	9.6
	500	64.0063	64.0015	9.6	
C2	500	63.5605	63.5527	15.6	15.3
	500	61.4642	61.4567	15.0	

ตารางที่ ข28 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ค่า FOG ของน้ำเสีย (การเก็บตัวอย่างน้ำเสียครั้งที่ 3)

ตัวอย่างที่	ปริมาตร ตัวอย่าง (ml)	น้ำหนักถั่วหลังระเหย (g)	น้ำหนักถั่ว (g)	FOG (m/l)	FOG เฉลี่ย (m/l)
A3	500	64.4565	64.4417	29.6	29.9
	500	62.1394	62.1243	30.2	
B3	500	64.0125	64.0025	20.0	19.3
	500	61.4669	61.4576	18.6	
C3	500	60.6153	60.6016	27.4	26.0
	500	67.3579	67.3456	24.6	

ตารางที่ ข29 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ค่า FOG ของน้ำเสีย (การเก็บตัวอย่างน้ำเสียครั้งที่ 4)

ตัวอย่างที่	ปริมาตร ตัวอย่าง (ml)	น้ำหนักถั่วหลังระเหย (g)	น้ำหนักถั่ว (g)	FOG (m/l)	FOG เฉลี่ย (m/l)
A4	500	61.6940	61.6614	65.2	65.8
	500	53.3799	53.3467	66.4	
B4	500	63.3650	63.3444	41.2	42.2
	500	60.1223	60.1007	43.2	
C4	500	60.7535	60.7123	82.4	83.3
	500	60.1655	60.1234	84.2	

ตารางที่ ข30 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ค่า FOG ของน้ำเสีย (การเก็บตัวอย่างน้ำเสียครั้งที่ 4)

ตัวอย่างที่	ปริมาตร ตัวอย่าง (ml)	น้ำหนักถั่วหลังระเหย (g)	น้ำหนักถั่ว (g)	FOG (m/l)	FOG เฉลี่ย (m/l)
A5	500	62.5535	62.5123	82.4	82.4
	500	62.1946	62.1534	82.4	
B5	500	62.8407	62.8033	74.8	75.0
	500	60.4512	60.4136	75.2	
C5	500	62.2159	62.1474	137.0	133.8
	500	60.4109	60.3456	130.6	

ตารางที่ ข31 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ค่า SS ของน้ำเสีย (การเก็บตัวอย่างน้ำเสียครั้งที่ 1)

ตัวอย่างที่	ปริมาตร ตัวอย่าง (ml)	น้ำหนักถัว + ของแข็ง (g)	น้ำหนักถัว (g)	SS (mg/l)	SS เฉลี่ย (mg/l)
A1	50	63.7643	63.6639	2008.00	
	50	68.7646	68.6661	1970.00	1989.00
B1	50	64.1791	64.0998	1586.00	
	50	68.7253	68.6464	1578.00	1582.00
C1	50	64.1053	63.9908	2290.00	
	50	63.6864	63.562	2488.00	2389.00

ตารางที่ ข32 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ค่า SS ของน้ำเสีย (การเก็บตัวอย่างน้ำเสียครั้งที่ 2)

ตัวอย่างที่	ปริมาตร ตัวอย่าง (ml)	น้ำหนักถัว + ของแข็ง (g)	น้ำหนักถัว (g)	SS (mg/l)	SS เฉลี่ย (mg/l)
A2	25	67.1914	67.1401	2052.00	
	25	63.0316	62.9813	2012.00	2032.00
B2	50	63.753	63.6629	1802.00	
	50	68.7261	68.645	1622.00	1712.00
C2	50	69.1638	69.0422	2432.00	
	50	63.8002	63.679	2424.00	2428.00

ตารางที่ ข33 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ค่า SS ของน้ำเสีย (การเก็บตัวอย่างน้ำเสียครั้งที่ 3)

ตัวอย่างที่	ปริมาตร ตัวอย่าง (ml)	น้ำหนักถัว + ของแข็ง (g)	น้ำหนักถัว (g)	SS (mg/l)	SS เฉลี่ย (mg/l)
A3	50	62.2807	62.1605	2404.00	
	50	64.5890	64.4518	2744.00	2574.00
B3	50	68.7601	68.668	1842.00	
	50	59.2068	59.1137	1862.00	1852.00
C3	50	62.9502	62.8162	2680.00	
	50	63.4880	63.3557	2646.00	2663.00

ตารางที่ ข34 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ค่า SS ของน้ำเสีย (การเก็บตัวอย่างน้ำเสียครั้งที่ 4)

ตัวอย่างที่	ปริมาตร ตัวอย่าง (ml)	น้ำหนักถัว + ของแข็ง (g)	น้ำหนักถัว (g)	SS (mg/l)	SS เฉลี่ย (mg/l)
A4	25	63.6306	63.5607	2796.00	
	25	64.0568	63.9882	2744.00	2770.00
B4	50	63.1453	63.0437	2032.00	
	50	64.0876	63.9847	2058.00	2045.00
C4	25	62.0866	61.9982	3536.00	
	25	60.0644	59.9714	3720.00	3628.00

ตารางที่ ข35 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ค่า SS ของน้ำเสีย (การเก็บตัวอย่างน้ำเสียครั้งที่ 5)

ตัวอย่างที่	ปริมาตร ตัวอย่าง (ml)	น้ำหนักถัว + ของแข็ง (g)	น้ำหนักถัว (g)	SS (mg/l)	SS เฉลี่ย (mg/l)
A5	50	67.2905	67.1437	2936.00	
	50	63.1323	62.9852	2942.00	2939.00
B5	50	69.1638	69.0422	2432.00	
	50	63.8002	63.679	2424.00	2428.00
C5	50	66.2549	66.0453	4192.00	
	50	65.9364	65.7303	4122.00	4157.00

ตารางที่ ข36 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ค่า TDS ของน้ำเสีย (การเก็บตัวอย่างน้ำเสียครั้งที่ 1)

ตัวอย่างที่	ปริมาตร ตัวอย่าง (ml)	น้ำหนักถัว + ของแข็ง (g)	น้ำหนักถัว (g)	TDS (mg/l)	TDS เฉลี่ย (mg/l)
A1	25	6.1965	6.1801	656.00	
	25	5.7832	5.7669	652.00	656.00
B1	100	5.7514	5.7249	265.00	
	100	6.0123	5.9854	269.00	267.00
C1	50	62.198	62.1634	692.00	
	50	58.499	58.4623	734.00	713.00

ตารางที่ ข37 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ค่า TDS ของน้ำเสีย (การเก็บตัวอย่างน้ำเสียครั้งที่ 2)

ตัวอย่างที่	ปริมาตร ตัวอย่าง (ml)	น้ำหนักถ้วย +ของแข็ง (g)	น้ำหนักถ้วย (g)	TDS (mg/l)	TDS เฉลี่ย (mg/l)
A2	25	5.9763	5.9571	768.00	
	25	5.7857	5.7666	764.00	766.00
B2	25	6.1965	6.1801	656.00	
	25	5.7832	5.7669	652.00	654.00
C2	10	6.1444	6.1345	990.00	
	10	6.2378	6.2289	890.00	940.00

ตารางที่ ข38 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ค่า TDS ของน้ำเสีย (การเก็บตัวอย่างน้ำเสียครั้งที่ 3)

ตัวอย่างที่	ปริมาตร ตัวอย่าง (ml)	น้ำหนักถ้วย +ของแข็ง (g)	น้ำหนักถ้วย (g)	TDS (mg/l)	TDS เฉลี่ย (mg/l)
A3	25	5.7478	5.7075	1612.00	
	10	5.9723	5.9571	1520.00	1566.00
B3	10	5.9727	5.9571	1560.00	
	10	6.1444	6.1293	1510.00	1535.00
C3	25	5.7478	5.7075	1612.00	
	10	5.9727	5.9571	1560.00	1586.00

ตารางที่ ข39 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ค่า TDS ของน้ำเสีย (การเก็บตัวอย่างน้ำเสียครั้งที่ 4)

ตัวอย่างที่	ปริมาตร ตัวอย่าง (ml)	น้ำหนักถ้วย +ของแข็ง (g)	น้ำหนักถ้วย (g)	TDS (mg/l)	TDS เฉลี่ย (mg/l)
A4	25	6.6256	6.5724	2128.00	
	25	5.6832	5.6326	2024.00	2076.00
B4	25	6.6567	6.6101	1864.00	
	25	5.7707	5.7224	1932.00	1898.00
C4	25	7.6314	7.5718	2384.00	
	25	5.7806	5.7224	2328.00	2356.00

ตารางที่ ข40 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ค่า TDS ของน้ำเสีย (การเก็บตัวอย่างน้ำเสียครั้งที่ 5)

ตัวอย่างที่	ปริมาตร ตัวอย่าง (ml)	น้ำหนักถ้วย +ของแข็ง (g)	น้ำหนักถ้วย (g)	TDS (mg/l)	TDS เฉลี่ย (mg/l)
A5	25	7.6314	7.5718	2384.00	
	25	5.7806	5.7224	2328.00	2356.00
B5	20	6.0301	5.9842	2295.00	
	20	5.847	5.8032	2190.00	2242.50
C5	10	6.0101	5.9845	2560.00	
	10	5.766	5.7406	2540.00	2550.00

ตารางที่ ข41 ข้อมูลผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำทิ้งภายหลังจากเดินระบบ 70 ชั่วโมง

พารามิเตอร์	ผลการวิเคราะห์			
	1	2	3	เฉลี่ย
pH	7.8	7.8	7.8	7.8
Temperature (°C)	27.5	27.5	27.5	27.5
Cd (mg/l)	0.186	0.1890	0.1890	0.188
Cu (mg/l)	0.074	0.0780	0.0710	0.074
Pb (mg/l)	0.044	0.0400	0.0430	0.042
Fe (mg/l)	0.814	0.8050	0.8080	0.809
Zn (mg/l)	1.45	1.4590	1.4460	1.452

ตารางที่ ข42 การวิเคราะห์พารามิเตอร์เพิ่มเติมของคุณภาพน้ำทิ้งภายหลังจากเดินระบบ 70 ชั่วโมง

พารามิเตอร์	ผลการวิเคราะห์ ⁽¹⁾
HCN(mg/l)	7.5
Formaldehyde(mg/l)	0.04
H ₂ S(mg/l)	7.00
Phenols(mg/l)	3.13
Free Chlorine(mg/l)	Not Detected

หมายเหตุ: ⁽¹⁾ ส่งวิเคราะห์ห้องปฏิบัติการกลางตรวจสอบผลิตภัณฑ์เกษตรและอาหาร จำกัด เลขที่ 117/4 หมู่ 14 ถนนมิตรภาพ ตำบลโนนเมือง อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 4000

ตารางที่ ข43 ตัวอย่างการวิเคราะห์ปริมาณน้ำมันดินและฝุ่นที่ 0 kW ในตำแหน่ง TD₁ และ TD₂

Sampling place				After Reactor			After Scrubber				
Humidity (Vol. %)	Time			2.25-2.35			2.45-2.55				
	Gas meter	Temp. $\langle\theta_m\rangle$			27.6 °C			27.4 °C			
		saturation vapour pressure $\langle P_v\rangle$			0.400kPa			0.400kPa			
		Pressure $\langle P_m\rangle$			0.60kPa			0.60kPa			
		Sampling gas Vol.	Meter	Start	194530.100L			194635.40L			
				Stop	194635.35L			194748.60L			
	Sampling gas Vol. $\langle V\rangle$			105L			113L				
	Absorption bottle	moisture weight	1	Start	9.6007g			11.5220g			
				Stop	9.8646g			11.9600g			
			2	Start							
Stop											
weight $\langle m\rangle$			0.264g			0.438g					
humidity (Vol. %) $\langle x_w\rangle$				0.35%			0.53%				
Tar and dust	Time			2.25-2.35			2.45-2.55				
	Aspiration	Sample gas	Floe rate $\langle v\rangle$	2.12m/s			2.12m/s				
			Gas Temp. $\langle\theta_s\rangle$								
			Pressure $\langle p_s\rangle$								
		Sampling pipe diameter $\langle d\rangle$			8mm			8mm			
		Sampling flow rate $\langle q_m\rangle$			7.01L/min			6.99L/min			
	Gas meter	Temp $\langle\theta_m\rangle$			27.6 °C			27.4 °C			
		Pressure $\langle P_m\rangle$			0.25kPa			0.25kPa			
		Sampling gas Vol.	meter	Start	194530.10L			194635.40L			
				Stop	194635.35L			194748.60L			
		Sampling gas Vol. $\langle V\rangle$			105L			113L			
	Dry gas Vol. $\langle V_N\rangle$			0.093m ³ N			0.101m ³ N				
	Filter paper	Grade			Whatman			Whatman			
		No.			GF/B 47mm			GF/B 47mm			
		Weight	Start			255.4000mg			252.4000mg		
			Stop			266.8000mg			259.9000mg		
			After washed			259.4mg			253.3000mg		
Tar and dust $\langle m\rangle$				Tar and dust	Dust	Tar	Tar and dust	Dust	Tar		
				11.400mg	4.000mg	7.400mg	7.500mg	0.900mg	6.600mg		
Tar and dust Conc. $\langle Nm^3\rangle$				121.983mg	42.801mg	79.182mg	74.566mg	8.948mg	65.618mg		

ภาคผนวก ค

ตัวอย่างการคำนวณ

ตัวอย่างการคำนวณ

ค1 การประเมินประสิทธิภาพของระบบ (System Efficiency)

ใช้ข้อมูลการเดินระบบต่อเนื่อง 70 hr ที่กำลังผลิตกระแสไฟฟ้า 47 kW

ค1.1 Specific Fuel Consumption

$$\begin{aligned}\text{Specific Fuel Consumption (kg/kWh)} &= [m_{\text{Fuel}}/P_e] \\ &= (98.26 \text{ kg/hr})/(47 \text{ kW}) \\ &= 2.09 \text{ kg/kWh}\end{aligned}$$

ค1.2 Specific Ash Production

$$\begin{aligned}\text{Specific Ash Production (kg/kWh)} &= [m_{\text{Ash}}/P_e] \\ &= (29.90 \text{ kg/hr})/(47 \text{ kW}) \\ &= 0.64 \text{ kg/kWh}\end{aligned}$$

ค1.3 ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิง (Calorific value of producer gas)

ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิง สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (ค1)

$$CV_g = \sum X_i H_i \quad (\text{ค1})$$

เมื่อ ค่าความร้อนของแก๊ส อ้างอิงตามงานวิจัยของ Jain et al. (2002)

$$CO = 13.1 \text{ MJ/Nm}^3,$$

$$H_2 = 13.1 \text{ MJ/Nm}^3$$

$$CH_4 = 41.2 \text{ MJ/Nm}^3$$

เมื่อ สัดส่วนโดยปริมาตรของแก๊ส CO, H₂, CH₄ เท่ากับ 14.66%, 16.38%, 2.30%

$$\begin{aligned}CV_g &= [(0.1466)(13.1 \text{ MJ/Nm}^3)]+ \\ & [(0.1638)(13.1 \text{ MJ/Nm}^3)]+ \\ & [(0.023)(41.2 \text{ MJ/Nm}^3)] \\ &= 5.01 \text{ MJ/Nm}^3\end{aligned}$$

ค1.4 ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Gasification Efficiency)

$$\begin{aligned}
 \text{Gasification Efficiency } (\eta_g) &= [V_g \times CV_g] / [m_{\text{Fuel}} \times \text{HHV}_{\text{Fuel}}] \\
 &= [(180.36 \text{ m}^3/\text{hr})(5.03 \text{ MJ/Nm}^3)] / \\
 &\quad [(98.26 \text{ kg/hr})(13.55 \text{ MJ/kg})] \\
 &= 0.6799 \times 100 \\
 &= 67.99\%
 \end{aligned}$$

ค1.5 การประเมินประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า (Electrical Efficiency)

$$\begin{aligned}
 \text{Electrical Efficiency } (\eta_{el}) &= [3.6 \times P_e] / [m_{\text{Fuel}} \times \text{HHV}_{\text{Fuel}}] \\
 &= [(3.6 \times 47 \text{ kW})] / [(98.26 \text{ kg/hr})(13.55 \text{ MJ/kg})] \\
 &= 0.127 \times 100 \\
 &= 2.71\%
 \end{aligned}$$

ค1.6 การประเมินประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ (Engine-generator Efficiency)

$$\begin{aligned}
 \text{Engine-generator Efficiency } (\eta_e) &= [3.6 \times P_e] / [V_g \times CV_g] \\
 &= [(3.6 \times 47 \text{ kW})] / [(180.36 \text{ m}^3/\text{hr})(5.03 \text{ MJ/Nm}^3)] \\
 &= 0.1875 \times 100 \\
 &= 18.75\%
 \end{aligned}$$

ค2 การประเมินการเกิดของเสีย

ค2.1 อัตราการเกิดของเสียในรูปเถ้า

- อัตราการเกิดเถ้าสุทธิ (Specific ash production) เท่ากับ 0.64 kg/kwh
- ปริมาณ Cl ในเถ้า เท่ากับ 970 mg/kg

$$\begin{aligned}
 \text{อัตราการเกิดของเสียในรูปเถ้า} &= \frac{970 \text{ mg}}{\text{kg}} \bigg| \frac{0.64 \text{ kg}}{\text{kWh}} \\
 &= 620.80 \text{ mg/kWh} \\
 &= 0.62 \text{ g/kWh}
 \end{aligned}$$

ค2.2 อัตราการเกิดของเสียในรูปน้ำเสีย

- ปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากการเดินระบบต่อเนื่อง 70 hr เท่ากับ 10 m³
- การเดินระบบต่อเนื่องที่กำลังการผลิตกระแสไฟฟ้า เท่ากับ 47 kW
- มลสารในน้ำเสียในรูป COD เท่ากับ 2520.00 mg/l

$$\begin{aligned}
 \text{อัตราการเกิดของเสียในรูปน้ำเสีย} &= \frac{2520.00 \text{ mg}}{\text{L}} \left| \frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} \right| \left| \frac{10 \text{ m}^3}{70 \text{ hr}} \right| \left| \frac{1}{47 \text{ kW}} \right| \\
 &= 7659.57 \text{ mg/kWh} \\
 &= 7.6596 \text{ g/kWh}
 \end{aligned}$$

ก2.3 อัตราการเกิดของเสียในรูปแก๊สไอเสีย

- การเดินระบบต่อเนื่องที่กำลังการผลิตกระแสไฟฟ้า เท่ากับ 47 kW
- อัตราการไหลของแก๊สไอเสีย เท่ากับ 50.39 m³/hr
- อุณหภูมิของแก๊สไอเสีย เท่ากับ 300.01 °C
- ความเข้มข้นของ CO₂ ในแก๊สไอเสีย เท่ากับ 5.35% หรือ 53,500 ppmv
(part per million by volume)

$$\text{ความเข้มข้นในหน่วย ppm}_v = \frac{\text{Mass}}{\text{Volume}} = \frac{\text{ug}}{\text{m}^3} = \frac{\text{uL}}{\text{L}}$$

ที่ STP (0 °C และ 1 atm) แก๊ส 1 โมลมีปริมาตร 22.4 L

$$\begin{aligned}
 \text{หาปริมาตรของแก๊ส 1 โมล ที่ } 300 \text{ }^\circ\text{C}; V_2 &= \frac{V_1}{P_1} \left| \frac{P_2}{T_2} \right| \left| \frac{T_1}{P_1} \right| \\
 &= \frac{22.4 \text{ L}}{1 \text{ atm}} \left| \frac{1 \text{ atm}}{273 \text{ K}} \right| \left| \frac{(273+300) \text{ K}}{1 \text{ atm}} \right| \\
 &= 47.02 \text{ L}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ความเข้มข้นของ CO}_2 \text{ ในแก๊สไอเสีย} &= \frac{53,500 \text{ uL}}{\text{L}} \left| \frac{1 \text{ u mole}}{47.02 \text{ uL}} \right| \left| \frac{44 \text{ ug}}{\text{u mole}} \right| \left| \frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} \right| \\
 \text{(MW: CO}_2 = 44 \text{ ug/u mole)} &= 50,063.80 \times 10^3 \text{ ug/m}^3 \\
 &= 50,068.06 \text{ mg/m}^3
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{อัตราการเกิดมลพิษในรูป CO}_2 &= \frac{50,068.06 \text{ mg}}{\text{m}^3} \left| \frac{501.39 \text{ m}^3}{\text{hr}} \right| \left| \frac{1}{47 \text{ kW}} \right| \\
 &= 534.12 \text{ g/kWh}
 \end{aligned}$$

ภาคผนวก ง

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

ทิพย์สุภินทร์ หินชุย, ปภัส ชนะโรค และ วิรัชย์ อัจหาญ. (2551). การศึกษามลพิษและของเสียจากโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กสำหรับชุมชน. การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 9. เทคโนโลยีเพื่อการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตรที่ยั่งยืน. หน้า 188.

ประวัติผู้เขียน

นางสาวทิพย์สุภินทร์ หินชูย เกิดเมื่อวันที่ 15 เมษายน พ.ศ. 2524 ที่อำเภอพนมไพร จังหวัดร้อยเอ็ด เป็นบุตรของ อาจารย์ชুমสิน หินชูย และคุณแม่ดวงเดือน หินชูย เริ่มศึกษาชั้นประถมศึกษาปีที่ 1-3 ที่โรงเรียนบ้านหนองคูณ ชั้นประถมศึกษาปีที่ 4-6 โรงเรียนบ้านกระจายเหล่าสูง และชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนหนองหมื่นถ่านวิทยา ตำบลหนองหมื่นถ่าน อำเภออาจสามารถ จังหวัดร้อยเอ็ด จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อระดับอุดมศึกษา ในสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา หลังจากสำเร็จการศึกษาในปี พ.ศ. 2546 ได้เข้าทำงานที่สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในตำแหน่งผู้ช่วยสอนและวิจัย

ในปี พ.ศ. 2548 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยขณะศึกษาได้รับทุนจากกองทุนสนับสนุนการวิจัยและพัฒนา และทำงานในตำแหน่งวิศวกรสิ่งแวดล้อม ประจำหน่วยปฏิบัติการวิศวกรรมพลังงานและสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และเป็นผู้ร่วมวิจัยในโครงการวิจัย เรื่อง “การจัดทำแผนปฏิบัติการด้านการซ่อมแซมบำรุงรักษาสภาพลำน้ำและคุณภาพน้ำลำตะคอง” และเป็นผู้ร่วมวิจัยในโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ 2 โครงการ คือ “การศึกษาต้นแบบโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กสำหรับชุมชน” และ “การศึกษาต้นแบบโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กสำหรับชุมชน (ระยะที่ 2)”

ผลงานวิจัยในระหว่างที่ทำการศึกษาได้เสนอบทความเข้าร่วมในการประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 9 ประจำปี พ.ศ. 2551 เรื่อง “การศึกษามลพิษและของเสียจากโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กสำหรับชุมชน”