

การศึกษาการกำจัดขยะชุมชนเพื่อผลิตพลังงานโดยใช้  
เทคโนโลยีพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน

นางสาวทิพย์สุภินทร์ หินชุย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2556

**A STUDY ON MUNICIPAL SOLID WASTE DISPOSAL  
BY PLASMA GASIFICATION TECHNOLOGY FOR  
ENERGY RECOVERY**

**Thipsuphin Hinsui**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Doctor of Philosophy Environmental Engineering  
Suranaree University of Technology  
Academic Year 2013**

การศึกษาการกำจัดขยะชุมชนเพื่อผลิตพลังงานโดยใช้เทคโนโลยี  
พลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาคุศุภบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.จรียา ยิ้มรัตน์บวร)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.วีรชัย อองหาญ)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(อ. ดร.นิตร์เพชร ยศพล)

กรรมการ

(รศ. ดร.สมรรัฐ เกิดสุวรรณ)

กรรมการ

(ผศ. ดร.สุจิต คุรุจิต)

กรรมการ

(ผศ. ดร.ชาญชัย ทองโสภากา)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิ้มปิงานงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธีร์ ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ทิพย์สุภินทร์ หินชูข : การศึกษาการกำจัดขยะชุมชนเพื่อผลิตพลังงานโดยใช้เทคโนโลยี  
พลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน (A STUDY ON MUNICIPAL SOLID WASTE DISPOSAL BY  
PLASMA GASIFICATION TECHNOLOGY FOR ENERGY RECOVERY)

อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรัชย์ อัจหาญ, 218 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเปรียบเทียบระหว่างระบบแก๊สซิฟิเคชัน (C-G) และระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน (P-G) ทั้งด้านประสิทธิภาพการผลิตงาน และด้านสิ่งแวดล้อม โดยนำพลาสมาอาร์ค (Plasma arc torch) ชนิด DC plasma torch ขนาด 50 กิโลวัตต์ มาประยุกต์ใช้กับเตาปฏิกรณ์ชนิดไหลลง (Fixed bed downdraft gasifier) ระดับต้นแบบขนาด 100 กิโลวัตต์

ผลการศึกษาโดยทดสอบกับเชื้อเพลิงผสม (เชื้อเพลิงขยะ RDF-5 ต่อเชื้อเพลิงไม้สับ 70:30 %wt) ที่อัตราการใช้เชื้อเพลิง และอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง เท่ากัน คือ 126.90 kg/hr และ 210 Nm<sup>3</sup>/hr ตามลำดับ ระบบ P-G ส่งผลให้อุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์สูงขึ้นทุกโซนการเผาไหม้ รวมถึงส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นขององค์ประกอบแก๊สเชื้อเพลิง ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง และค่าพลังงานของระบบ โดยพบว่า ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิง จาก 4.96 MJ/Nm<sup>3</sup> เพิ่มขึ้นเป็น 6.88 MJ/Nm<sup>3</sup> นอกจากนี้ ระบบ P-G สามารถกำจัดมูลฝอยเหลือทิ้ง (Waste reject) ที่มีความชื้นสูงถึง 40 %wb โดยแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าความร้อน ~4.82 MJ/Nm<sup>3</sup>

ผลการวิเคราะห์มลพิษอากาศ พบว่า ทั้ง 2 ระบบปลดปล่อยปริมาณฝุ่นละออง (TSP), SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, Hg, Cd และ Pb ไม่เกินเกณฑ์ที่กำหนด (มาตรฐานควบคุมการปล่อยทิ้งอากาศเสียจากเตาเผา มูลฝอย ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม) ระบบ P-G มีประสิทธิภาพในการกักเก็บมลสารในรูปเถ้าหนักกว่าระบบ C-G (92.60% และ 87.15% ตามลำดับ) ในกรณีนำระบบ P-G ไปใช้กำจัดขยะที่มีความชื้นสูง (40 %wb) จำเป็นต้องควบคุมมลพิษ เนื่องจากอุณหภูมิของเตาปฏิกรณ์ลดต่ำลง และประสิทธิภาพในการกักเก็บมลสารรูปเถ้าหนักมีค่าต่ำ (60.60%)

ผลการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบถดถอยพหุคูณเชิงเส้น โดยใช้ข้อมูลคุณสมบัติองค์ประกอบแบบประมาณ องค์ประกอบแบบแยกธาตุ และค่าความชื้น สามารถใช้ทำนายขององค์ประกอบแก๊สเชื้อเพลิง ค่าความร้อนแก๊สเชื้อเพลิง และประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงได้ดี โดยค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R<sup>2</sup>) อยู่ในช่วง 0.77-0.99

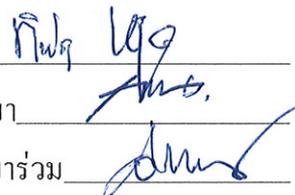
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ปีการศึกษา 2556

ลายมือชื่อนักศึกษา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม



THIPSUPHIN HINSUI : A STUDY ON MUNICIPAL SOLID WASTE  
DISPOSAL BY PLASMA GASIFICATION TECHNOLOGY FOR ENERGY  
RECOVERY. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. WEERACHAI ARJHARN,  
Ph.D., 218 PP.

PLASMA GASIFICATION / FIXED BED DOWNDRAFT GASIFIER/ ENERGY  
RECOVERY / MUNICIPAL SOLID WASTE (MSW) / REFUSE DERIVED FUEL

The objective of this research was to compare conventional gasification (C-G) and plasma-assisted gasification (P-G) in terms of energy production efficiency and environmental emissions. For P-G, a DC plasma torch with a power of 50 kW was installed to a 100-kW prototype fixed bed downdraft gasifier.

Results on gasification of mixed fuels (RDF-5 : wood chips, 70 : 30 %wt ) at feedstock consumption and syngas flow rate of 126.90 kg/hr and 210 Nm<sup>3</sup>/hr, respectively, showed that P-G system caused appreciably elevated temperature throughout the gasifier, leading to an increase in syngas concentration, cold gas efficiency and system energy production. The calorific value of syngas increased from 4.96 MJ/Nm<sup>3</sup> to 6.88 MJ/Nm<sup>3</sup>. In addition, P-G system could operate with waste reject having moisture content as high as 40% (wb), generating syngas with calorific value of ~4.82 MJ/Nm<sup>3</sup>.

An analysis result of air pollution suggested that both C-G and P-G systems caused values of total suspended particulates (TSP), SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, Hg, Cd and Pb less than those of the limits (MSW incinerator emission standards announced by the Ministry of Natural Resources and Environment). However, the efficiency of

pollutant constraint in bottom ash for P-G was higher than that of C-G (92.60% and 87.15%, respectively). In the case of using P-G with high moisture content feedstock (40 %wb), special care must be taken because the temperature in the gasifier decreased notably, causing the bottom ash constraining efficiency to be less (60.60%).

Results on mathematical model development for syngas property prediction, i.e. syngas concentration, heating value, gasification efficiency using multiple linear regression indicated that proximate and ultimate parameters and moisture content of feedstock could be used to predict such properties well with coefficient of determination ( $R^2$ ) of 0.77-0.99.

School of Environmental Engineering

Academic Year 2013

Student's Signature Hinsi. Ti

Advisor's Signature [Signature]

Co-Advisor's Signature [Signature]

THIPSUPHIN HINSUI : A STUDY ON MUNICIPAL SOLID WASTE  
DISPOSAL BY PLASMA GASIFICATION TECHNOLOGY FOR ENERGY  
RECOVERY. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. WEERACHAI ARJHARN,  
Ph.D., 218 PP.

PLASMA GASIFICATION / FIXED BED DOWNDRAFT GASIFIER/ ENERGY  
RECOVERY / MUNICIPAL SOLID WASTE (MSW) / REFUSE DERIVED FUEL

The objective of this research was to compare conventional gasification (C-G) and plasma-assisted gasification (P-G) in terms of energy production efficiency and environmental emissions. For P-G, a DC plasma torch with a power of 50 kW was installed to a 100-kW prototype fixed bed downdraft gasifier.

Results on gasification of mixed fuels (RDF-5 : wood chips, 70 : 30 %wt ) at feedstock consumption and syngas flow rate of 126.90 kg/hr and 210 Nm<sup>3</sup>/hr, respectively, showed that P-G system caused appreciably elevated temperature throughout the gasifier, leading to an increase in syngas concentration, cold gas efficiency and system energy production. The calorific value of syngas increased from 4.96 MJ/Nm<sup>3</sup> to 6.88 MJ/Nm<sup>3</sup>. In addition, P-G system could operate with waste reject having moisture content as high as 40 %wb, generating syngas with calorific value of ~4.82 MJ/Nm<sup>3</sup>.

An analysis result of air pollution suggested that both C-G and P-G systems caused values of total suspended particulates (TSP), SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, Hg, Cd and Pb less than those of the limits (MSW incinerator emission standards announced by the Ministry of Natural Resources and Environment). However, the efficiency of

pollutant constraint in bottom ash for P-G was higher than that of C-G (92.60% and 87.15%, respectively). In the case of using P-G with high moisture content feedstock (40 %wb), special care must be taken because the temperature in the gasifier decreased notably, causing the bottom ash constraining efficiency to be less (60.60%).

Results on mathematical model development for syngas property prediction, i.e. syngas concentration, heating value, gasification efficiency using multiple linear regression indicated that proximate and ultimate parameters and moisture content of feedstock could be used to predict such properties well with coefficient of determination ( $R^2$ ) of 0.77-0.99.

School of Environmental Engineering

Academic Year 2013

Student's Signature \_\_\_\_\_

Advisor's Signature \_\_\_\_\_

Co-Advisor's Signature \_\_\_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

คณาจารย์นิพนธ์ฉบับนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย ประเภท บัณฑิตศึกษา จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ปีงบประมาณ 2554 และ กองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน ปีงบประมาณ 2556 และ ความร่วมมือด้านเทคโนโลยีพลาสมาอาร์ค จาก High Temperature Technologies Corp. (HTTC) ประเทศแคนาดา ผู้วิจัยขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

คณาจารย์นิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เนื่องมาจากความเมตตาของคณาจารย์ และกำลังใจจากบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรชัย อัจหาญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ เป็นอย่างสูง ที่ท่านได้ให้โอกาสทางการศึกษา ให้คำแนะนำปรึกษาด้านวิชาการ คอยให้การช่วยเหลือ และแก้ไขปัญหาให้กับศิษย์ จนคณาจารย์นิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลงได้อย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.ฉัตรเพชร ยศพล (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ทองโสภณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จริยา ยี่มรัตบวร รองศาสตราจารย์ ดร.สมรรถ เกิดสุวรรณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุจิต กระจิต คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาด้านวิชาการอันเป็นประโยชน์ ตลอดจนช่วยตรวจสอบและแก้ไขคณาจารย์นิพนธ์เล่มนี้ให้สำเร็จลงได้โดยสมบูรณ์ และขอขอบคุณ อาจารย์ ดร. พรรษา ลิบบั๊บ ที่คอยให้คำปรึกษาด้านวิชาการ คอยช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจมาโดยตลอด ซึ่งมีส่วนสำคัญอย่างยิ่งให้คณาจารย์นิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณบุคลากร ศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล บัณฑิตศึกษา และบุคลากรสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ทุกท่าน ที่คอยช่วยเหลือ สนับสนุนให้การทําวิจัย สำเร็จลุล่วง ขอกราบระลึกถึงบุญคุณของครูบาอาจารย์ทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้กับศิษย์ และขอขอบคุณกำลังจากทุกท่านในครอบครัวอันเป็นส่วนสำคัญยิ่งให้สามารถต่อสู้และผ่านปัญหาอุปสรรคต่างๆ มาได้

สำคัญที่สุด ขอกราบขอบพระคุณบิดาและมารดา อาจารย์ชุมสิน - คุณดวงเดือน หินซุย ท่านผู้ให้กำเนิด ให้การเลี้ยงดู ส่งเสริมการศึกษา ให้การสนับสนุนในทุกๆ ด้าน อย่างดีที่สุดเสมอมา ทำให้ผู้วิจัยมีความรู้และมีหลักธรรมในการดำเนินชีวิตที่ดี และอบรมสั่งสอนให้ผู้วิจัยระลึกถึงการนำเอาความรู้ที่ร่ำเรียนมาทำประโยชน์ตอบแทนให้แก่แผ่นดิน

ทิพย์สุกินทร์ หินซุย

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) .....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ .....	จ
สารบัญตาราง .....	ฉ
สารบัญรูป .....	ณ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ .....	ด
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	5
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	5
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ .....	8
<b>2 ปรัชญาวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>9</b>
2.1 บทนำ.....	9
2.2 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับขยะมูลฝอย.....	9
2.2.1 สถิติปริมาณขยะมูลฝอยของประเทศไทย .....	11
2.2.2 องค์ประกอบของขยะมูลฝอย.....	12
2.2.3 ลักษณะสมบัติของขยะมูลฝอยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี .....	18
2.2.3.1 ความหนาแน่น .....	18
2.2.3.2 องค์ประกอบโดยน้ำหนัก .....	18
2.2.3.3 ลักษณะทางกายภาพ .....	19
2.2.3.4 ลักษณะสมบัติทางเคมี.....	19
2.2.3.5 ลักษณะสมบัติทางเคมี ค่าความร้อนของขยะมูลฝอย.....	19
2.3 เทคโนโลยีการผลิตพลังงานจากขยะ .....	19

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4	เทคโนโลยีการผลิตเชื้อเพลิงขยะ (Refuse-derived fuel).....	20
2.4.1	มาตรฐานการแบ่งประเภทของเชื้อเพลิงขยะ (RDF) .....	22
2.4.2	กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงขยะ (Refuse-derived fuel production).....	23
2.4.2.1	Mechanical Biological Treatment plant (MBT) .....	23
2.4.2.2	Autoclaving RDF Plant.....	24
2.4.3	หน่วยปฏิบัติการในกระบวนการผลิต RDF .....	24
2.4.3.1	การคัดแยกด้วยแรงงานคน .....	24
2.4.3.2	การลดขนาด (Size reduction) .....	24
2.4.3.3	การร่อน (Screening).....	25
2.4.3.4	การคัดแยกโดยใช้อากาศ (Air separation).....	26
2.4.3.5	การแยกโดยใช้แม่เหล็ก (Magnetic separation).....	26
2.4.3.6	การอบแห้งและทำให้แน่น .....	26
2.4.4	การใช้ประโยชน์ RDF ไปใช้งานและการควบคุมผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม .....	27
2.4.4.1	การใช้ประโยชน์จาก RDF.....	27
2.4.4.2	การควบคุมผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม .....	27
2.4.5	เทคโนโลยีการบำบัดขยะโดยวิธีทางกลและชีวภาพและเทคโนโลยีการผลิตเชื้อเพลิงขยะ (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี) .....	28
2.5	เทคโนโลยีเตาเผาขยะมูลฝอย (Incineration) .....	31
2.5.1	หลักการพื้นฐานของเทคโนโลยีเตาเผาขยะมูลฝอย.....	32
2.5.2	ประเภทของเทคโนโลยีเตาเผาขยะมูลฝอย.....	32
2.5.3	การนำพลังงานกลับมาใช้ (Energy Recovery).....	34
2.5.4	การควบคุมผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม .....	35
2.5.4.1	มลพิษอากาศ .....	35
2.5.4.2	มลพิษกากของแข็ง .....	35
2.5.4.3	มลพิษน้ำ.....	36

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.6	เทคโนโลยีไพโรไลซิส/แก๊สซิฟิเคชัน (Pyrolysis / Gasification) .....	36
2.6.1	ปฏิกิริยาอุณหภูมิในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน .....	37
2.6.2	ชนิดของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Type of gasifier).....	40
2.6.3	คำจำกัดความของทาร์ (Definition of Tars) .....	42
2.6.4	แก๊สเชื้อเพลิงหรือโปรคิวเซอร์แก๊ส .....	43
2.6.5	การใช้ประโยชน์จากแก๊สเชื้อเพลิง .....	43
2.6.5.1	พลังงานความร้อนตรง .....	44
2.6.5.2	วัตถุดิบในอุตสาหกรรมเคมี.....	44
2.6.5.3	การใช้แก๊สเชื้อเพลิงกับเครื่องยนต์สันดาปภายใน .....	44
2.6.6	มลพิษและของเสียที่เกิดจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน .....	46
2.6.7	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน .....	49
2.7	เทคโนโลยีพลาสมาเชิงความร้อน.....	50
2.7.1	พลาสมาเชิงความร้อน (Thermal plasma).....	51
2.7.2	ประเภทของหัวพลาสมาอาร์ค.....	53
2.7.2.1	Non-transferred arc .....	53
2.7.2.2	Transferred arc .....	55
2.7.3	การนำพลังงานกลับมาใช้.....	56
2.7.4	การควบคุมผลกระทบสิ่งแวดล้อม.....	56
2.7.5	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านเทคโนโลยีพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน .....	57
2.7.5.1	ระบบ Plasma gasification melting process .....	57
2.7.5.2	ระบบ Plasma สำหรับ External energy หรือ Allothermal .....	60
2.7.5.3	ระบบ Plasma-assisted gasification.....	60
2.7.6	ความก้าวหน้าของการพัฒนาเทคโนโลยีพลาสมาเชิงความร้อนใน ต่างประเทศ.....	61

## สารบัญ (ต่อ)

### หน้า

2.7.6.1	เทคโนโลยีพลาสมาเชิงความร้อนของบริษัท Europlasma .....	62
2.7.6.2	เทคโนโลยีพลาสมาเชิงความร้อนของบริษัท Plasco .....	63
2.7.6.3	เทคโนโลยีพลาสมาเชิงความร้อนของบริษัท Alter NRG/Westinghouse Plasma coporation .....	64
2.7.6.4	เทคโนโลยีพลาสมาเชิงความร้อนของบริษัท InEnTec .....	66
2.8	การวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์จากวิธีทางสถิติ.....	68
2.8.1	การวิเคราะห์ความถดถอย (Regression analysis) .....	68
2.8.2	การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principle Componance Analysis : PCA) .....	69
2.9	สรุปความสำคัญของปัญหำนำการวิจัย.....	71
<b>3</b>	<b>เครื่องมือและวิธีดำเนินการวิจัย.....</b>	<b>74</b>
3.1	บทนำ .....	74
3.2	ขั้นตอนการวิจัย .....	75
3.3	ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย .....	77
3.3.1	ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างและวิเคราะห์ตัวอย่างเชื้อเพลิงสำหรับงานวิจัย .....	77
3.3.1.1	การเตรียมขยะชุมชนสำหรับเป็นเชื้อเพลิงขยะในงานวิจัย .....	77
3.3.1.2	การเตรียมเชื้อเพลิงขยะแบบอัดแท่ง (RDF-5) .....	78
3.3.2	การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์คุณสมบัติของเชื้อเพลิง .....	81
3.3.2.1	การเก็บตัวอย่างเชื้อเพลิง .....	81
3.3.2.2	การศึกษาองค์ประกอบและคุณสมบัติทางกายภาพ .....	82
3.3.2.3	การศึกษาสมบัติแบบประมาณ (Proximate Analysis) .....	82
3.3.2.4	การศึกษาสมบัติทางเคมี (Chemical composition) .....	83
3.3.3	การพัฒนาระบบแก๊สซิฟิเคชันสำหรับใช้กับพลาสมาอาร์คเชิงความร้อน .....	84
3.3.3.1	พลาสมาเชิงความร้อนขนาดกำลัง 50 กิโลวัตต์ .....	84
3.3.3.2	การพัฒนาเตาปฏิกรณ์ระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน .....	90
3.3.3.3	การเดินระบบแก๊สซิฟิเคชัน และพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน .....	94
3.3.3.4	การติดตั้งอุปกรณ์เครื่องมือวัดและการวัดพารามิเตอร์ต่างๆ.....	97

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3.4 การศึกษาเสถียรภาพของการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงขยะ RDF-5 กับระบบ แก๊สซิฟิเคชัน.....	99
3.3.5 การศึกษาเสถียรภาพของการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงขยะ RDF-5 กับระบบ พลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน (P-G) .....	104
3.3.6 การศึกษาการกำจัดเศษมูลฝอยเหลือทิ้ง (Waste reject) ควบคู่กับการผลิต พลังงาน โดยระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน (P-G) .....	106
3.3.7 การประเมินสมรรถนะระบบ/ประสิทธิภาพการผลิตพลังงาน .....	107
3.3.8 ประเมินสมรรถนะทางสิ่งแวดล้อมของระบบ .....	109
3.3.8.1 การศึกษาปริมาณและสมบัติของของเสียที่เกิดขึ้นจากระบบ .....	109
3.3.8.2 การศึกษาสมรรถนะด้านสิ่งแวดล้อม .....	110
3.3.9 พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์ทางสถิติ .....	112
3.3.9.1 พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	112
3.3.9.2 พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบแก๊สซิฟิเคชัน.....	114
3.3.9.3 พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบพลาสมา แก๊สซิฟิเคชัน.....	115
3.3.9.4 การวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อประเมินมลพิษสิ่งแวดล้อมของระบบ.....	115
<b>4 ผลการทดลอง.....</b>	<b>117</b>
4.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติของเชื้อเพลิง .....	117
4.1.1 การศึกษาสมบัติของเชื้อเพลิงขยะ (RDF-5).....	117
4.1.1.1 ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงขยะ (RDF-5).....	117
4.1.1.2 ผลการศึกษาสมบัติทางเคมีของเชื้อเพลิง.....	122
4.1.2 การศึกษาสมบัติของมูลฝอยเหลือทิ้ง (Waste reject).....	126
4.1.2.1 ผลการศึกษาองค์ประกอบของมูลฝอยเหลือทิ้ง (Waste reject).....	126
4.1.2.2 การศึกษาการย่อยสลายทางความร้อน (TGA) ของ Waste reject .....	127
4.1.2.3 ผลการศึกษาคูณสมบัติทางเคมีของมูลฝอยเหลือทิ้ง (Waste reject) ....	127

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2 ผลการศึกษาเสถียรภาพของการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงขยะ RDF-5 กับระบบ แก๊สซิฟิเคชัน.....	129
4.2.1 การกระจายตัวของอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ (Temperature profile) .....	130
4.2.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง.....	133
4.2.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณทาร์และฝุ่น .....	138
4.2.4 ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Gasification efficiency).....	139
4.3 ผลการศึกษาเสถียรภาพของการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงขยะ RDF-5 กับระบบ พลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน (P-G).....	140
4.3.1 ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ (Temperature profile).....	141
4.3.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง.....	142
4.4 ผลการศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะการผลิตพลังงานระบบแก๊สซิฟิเคชัน (C-G) กับระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน (P-G).....	143
4.5 ผลการศึกษาประสิทธิภาพผลิตพลังงานของระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชันต่อการ กำจัด Waste reject ที่มีความชื้นระดับต่างๆ .....	145
4.5.1 การกระจายตัวของอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ (Temperature profile) .....	145
4.5.2 คุณสมบัติของแก๊สเชื้อเพลิง.....	147
4.5.3 การประเมินสมรรถนะของระบบ .....	148
4.5.4 ปริมาณทาร์และฝุ่น .....	149
4.6 ผลการศึกษามรรณะทางด้านสิ่งแวดล้อม .....	151
4.6.1 ผลการศึกษามรรณะทางสิ่งแวดล้อมระบบ C-G กับ ระบบ P-G.....	151
4.6.1.1 มลสารในแก๊สเชื้อเพลิง.....	151
4.6.1.2 สมดุลมวลของ ธาตุอัลคาไลน์ โลหะหนัก และคลอรีน .....	154
4.6.1.3 สารมลพิษอื่นๆ ในรูปน้ำเสีย.....	154
4.6.2 ผลการศึกษามรรณะทางสิ่งแวดล้อมของระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชันต่อ การกำจัด Waste reject ที่มีความชื้นระดับต่างๆ.....	157
4.6.2.1 มลสารในแก๊สเชื้อเพลิง.....	157

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.6.2.2	สมมูลมวลของ ธาตุอัลคาไลน์ โลหะหนัก และคลอรีน .....	159
4.6.2.3	สารมลพิษอื่นๆ ในรูปน้ำเสีย.....	161
4.6.3	วิเคราะห์ทางสถิติเพื่อประเมินมลพิษสิ่งแวดล้อม.....	162
4.6.3.1	การวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้ PCA เปรียบเทียบระบบ C-G และ P-G .....	162
4.6.3.2	การวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้ PCA สำหรับปัจจัยความชื้นเชื่อมเหล็กกับระบบ P-G .....	165
4.6.4	การทดสอบการชะละลายโลหะหนักจากถ้ำ.....	167
4.7	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการประเมินระบบ .....	168
<b>5</b>	<b>สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ .....</b>	<b>174</b>
5.1	สรุป.....	174
5.2	การนำผลการศึกษาไปใช้ประโยชน์ .....	178
5.3	ข้อเสนอแนะและงานวิจัยในอนาคต .....	180
	รายการอ้างอิง.....	182
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ .....	192
	ภาคผนวก ข บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา .....	204
	ประวัติผู้เขียน .....	218

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ชนิดของขยะที่แบ่งตามองค์กร APWA ในสหรัฐอเมริกา ..... 10
2.2	องค์ประกอบของขยะมูลฝอยชุมชนทั่วประเทศไทย โดยแบ่งออกเป็น 10 ประเภท..... 13
2.3	ค่าปริมาณความร้อนของขยะชุมชนทั่วๆ ไป ..... 13
2.4	ค่าปริมาณความร้อนของขยะชุมชนทั่วๆ ไป ..... 14
2.5	ส่วนประกอบทางเคมีของขยะชุมชนโดยทั่วๆ ไป..... 14
2.6	องค์ประกอบของขยะมูลฝอยในประเทศไทย..... 15
2.7	คุณสมบัติของขยะมูลฝอยในประเทศไทย..... 17
2.8	การจัดประเภทของเชื้อเพลิงขยะ (RDF) ประเภทต่าง ๆ..... 22
2.9	ข้อดีและข้อเสียของเตาเผาขยะแต่ละประเภท..... 33
2.10	สรุปประสิทธิภาพที่ได้จากการผลิตพลังงานในรูปแบบต่าง ๆ ..... 35
2.11	ส่วนประกอบทางเคมีของทาร์ (Tars) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ..... 42
2.12	ชนิดของมลสารและปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบผลิตแก๊สเชื้อเพลิง..... 46
2.13	ชนิดของมลสารและระบบทำความสะอาดแก๊สเชื้อเพลิง ..... 47
2.14	ระบบพลาสมาอาร์คกับระบบแบบแก๊สซิฟิเคชันเพื่อใช้ทำลายขยะอันตรายและ ขยะพิษ (Plasma gasification melting process) ..... 58
2.15	เทคโนโลยีพลาสมาเป็นความร้อนภายนอก (External energy หรือ Allothermal) สำหรับระบบทางความร้อนแบบต่างๆ ..... 60
3.1	ข้อมูลหน่วยการอัดเป็นแท่งเชื้อเพลิงแข็ง โดยใช้เครื่อง Pelleting Machine ..... 79
3.2	คุณลักษณะหัวพลาสมาสำหรับนำมาใช้ในงานวิจัยนี้..... 84
3.3	แสดงถึงพารามิเตอร์ที่ทำการทดสอบสมรรถนะของระบบ ..... 98
3.4	ชุดการทดลองการศึกษาเสถียรภาพของการผลิตพลังงานกับระบบ C-G..... 101
3.5	การกำหนดความชื้นของ Waste reject ที่นำมาใช้ในการศึกษารั้งนี้ ..... 106
3.6	พารามิเตอร์สารมลพิษในรูปแบบต่างๆ ที่ทำการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้..... 109
3.7	ข้อมูลพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบแก๊สซิฟิเคชัน ..... 114

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
3.8 ข้อมูลพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน .....	115
4.1 ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงขยะ .....	118
4.2 ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิง .....	119
4.3 ผลการศึกษาสมบัติด้านองค์ประกอบทางเคมีของเชื้อเพลิง .....	122
4.4 มาตรฐานของเชื้อเพลิงขยะประเภท 3 (RDF-3) อ้างอิงจาก SCIEco Services Co.,Ltd .....	125
4.5 องค์ประกอบต่างในมูลฝอยเหลือทิ้ง (Waste reject) .....	126
4.6 ผลการศึกษาสมบัติของมูลฝอยเหลือทิ้ง (Waste reject) .....	129
4.7 ผลของการศึกษาเสถียรภาพของการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงขยะ RDF-5 กับระบบ C-G .....	135
4.8 ผลประเมินประสิทธิภาพการผลิตพลังงานของระบบ C-G .....	140
4.9 การเปรียบเทียบสมรรถนะการผลิตพลังงานระหว่างระบบ C-G และ P-G .....	144
4.10 การประเมินสมรรถนะของระบบ P-G ในการกำจัด Waste reject .....	150
4.11 ผลการตรวจวิเคราะห์แก๊สมลพิษในแก๊สเชื้อเพลิง .....	153
4.12 สมดุลมวลของ ธาตุอัลคาไลน์ โลหะหนัก และคลอรีนในระบบ C-G .....	154
4.13 สมดุลมวลของ ธาตุอัลคาไลน์ โลหะหนัก และคลอรีนในระบบ P-G .....	155
4.14 อัตราการปลดปล่อยมลพิษ (Emission factor) ในรูปน้ำเสีย .....	157
4.15 ผลการตรวจวิเคราะห์แก๊สมลพิษในแก๊สเชื้อเพลิง .....	158
4.16 สมดุลมวลของ ธาตุอัลคาไลน์ โลหะหนักและคลอรีน (Waste reject ความชื้น 10 %,wb) .....	159
4.17 สมดุลมวลของ ธาตุอัลคาไลน์ โลหะหนักและคลอรีน (Waste reject ความชื้น 25%,wb) .....	160
4.18 สมดุลมวลของ ธาตุอัลคาไลน์ โลหะหนักและคลอรีน (Waste reject ความชื้น 40%, wb) .....	160
4.19 อัตราการปลดปล่อยมลพิษ (Emission factor) ในรูปน้ำเสีย .....	162

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.20 ปัจจัยน้ำหนัก (Factor loading) ที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวประกอบสำคัญ (PCA) ของการกระจายตัวของธาตุกลุ่มโลหะหนัก อัลคาไรด์ และคลอรีน .....	164
4.21 ปัจจัยน้ำหนัก (Factor loading) ที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวประกอบสำคัญ (PCA) ของการกระจายตัวของธาตุกลุ่มโลหะหนัก อัลคาไรด์ และคลอรีนในวัตถุดิบ Waste reject ที่ความชื้น 10, 25 และ 40% (wb) .....	165
4.22 ผลทดสอบการกระจายของเถ้า ของเชื้อเพลิง RDF-5/WC(70/30) เปรียบเทียบ ระบบ C-G และ P-G.....	167
4.23 ผลทดสอบการกระจายของเถ้า Waste reject ของ Waste reject ที่ความชื้นต่างๆ .....	168
4.24 ตัวแปรอิสระจากองค์ประกอบแบบแยกธาตุกับลักษณะการเดินระบบ ที่มี ความสัมพันธ์กับคุณภาพและประสิทธิภาพของแก๊สที่ผลิตได้ อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ ความเชื่อมั่น 95% .....	168
4.25 ตัวแปรอิสระจากองค์ประกอบแบบประมาณกับลักษณะการเดินระบบ ที่มี ความสัมพันธ์กับคุณภาพและประสิทธิภาพของแก๊สที่ผลิตได้ อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ ความเชื่อมั่น 95% .....	169
4.26 ผลการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายคุณสมบัติของแก๊สและ ประสิทธิภาพของการผลิตแก๊ส โดยใช้ค่าจากการวิเคราะห์แบบประมาณของเชื้อเพลิง RDF-5/WC (70/30) (N = 27) .....	169
4.27 ผลการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายคุณสมบัติของแก๊สและ ประสิทธิภาพของการผลิตแก๊ส โดยใช้ค่าจากการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของเชื้อเพลิง RDF-5/WC (70/30) (N = 27) .....	170
4.28 ผลการทดสอบค่าความคลาดเคลื่อนจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนาย คุณสมบัติของแก๊สและประสิทธิภาพของการผลิตแก๊สจากองค์ประกอบแบบประมาณ ของเชื้อเพลิง RDF-5/ WC (70/30) .....	172

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.29 ผลการทดสอบค่าความคลาดเคลื่อนจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนาย คุณสมบัติของแก๊สและประสิทธิภาพของการผลิตแก๊สจากองค์ประกอบแบบแยกธาตุ ของเชื้อเพลิง RDF-5/WC (70/30) .....	171
4.30 ผลการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายคุณสมบัติของแก๊สและ ประสิทธิภาพของการผลิตแก๊ส โดยใช้ค่าความชื้นของ Waste reject (N = 36).....	172
4.31 ผลการทดสอบค่าความคลาดเคลื่อนจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนาย คุณสมบัติของแก๊สและประสิทธิภาพของการผลิตแก๊สจากความชื้นของ Waste reject .....	172

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ข้อมูลสถิติปริมาณขยะมูลฝอยของประเทศไทยจาก ปี 2551 – 2555..... 11
2.2	องค์ประกอบขยะชุมชนเฉลี่ยทั่วประเทศไทย (ที่มา:กรมควบคุมมลพิษ, 2547)..... 12
2.3	ขั้นตอนในการแปรรูปขยะเป็นเชื้อเพลิงขยะ (Diaz et al., 2006)..... 21
2.4	ผังการทำงานของกระบวนการทางกลและชีวภาพ (Mechanical and Biological..... 23
2.5	ความต้องการพลังงานจำเพาะของการลดขนาดของเสียจากชุมชน..... 25
2.6	กระบวนการทำงานของ ต้นแบบเทคโนโลยีการจัดการขยะแบบครบวงจร (มทส.) ..... 30
2.7	อุปกรณ์และเครื่องจักรต้นแบบเทคโนโลยีการจัดการขยะแบบครบวงจร ..... 31
2.8	กระบวนการกำจัดขยะมูลฝอยด้วยความร้อน (Medcalf et al., 1998) ..... 32
2.9	ปฏิกิริยาอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันในเตาผลิตแก๊สชนิดไหลลง ..... 37
2.10	เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ (วีรชัย อาหาญ และคณะ, 2551)..... 40
2.11	ภาพรวมของการใช้ประโยชน์แก๊สเชื้อเพลิง (ที่มา : Nowell, 1999) ..... 44
2.12	สถานะของพลาสมา (ที่มา : The recovered energy system, Online) ..... 52
2.13	นอนทรานสเฟอร์พลาสมาอาร์ค (Non-transferred plasma arc) ..... 54
2.14	หัวพลาสมาจากบริษัท Europlasma ..... 54
2.15	ทรานสเฟอร์พลาสมาอาร์ค (Transferred arch torch) ..... 55
2.16	ลักษณะของ Slag melting ในเตาปฏิกรณ์พลาสมา (ที่มา : Moustakas, 2005)..... 57
2.17	เตาแบบ Auto-thermal gasifier (Europlasma) ..... 63
2.18	แผนผังของ Plasco conversion process ..... 64
2.19	หัวพลาสมาอาร์คแบบนอนทรานสเฟอร์ของ WPC..... 64
2.20	เตาพลาสมาแก๊สซิไฟเออร์ ของ Alter NRG ..... 65
2.21	ระบบของเตาเผาแบบ Plasma Enhanced Melter (InEnTec)..... 66
3.1	ขั้นตอนในงานวิจัย ..... 75
3.2	ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างและการวิเคราะห์เชื้อเพลิงสำหรับงานวิจัยนี้..... 77
3.3	เครื่อง Pelletizing machine สำหรับเตรียมเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง (RDF-5)..... 79
3.4	แผนผังของหัวพลาสมาอาร์ค (plasma arc torch)..... 86

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.5 ชุดระบบพลาสมาอาร์คและอุปกรณ์จ่ายกระแสไฟฟ้า.....	86
3.6 ลักษณะการทำงานของระบบพลาสมาอาร์คและอุปกรณ์จ่ายกระแสไฟฟ้า.....	87
3.7 Plasma Jacket หรือชุดครอบหัวพลาสมา .....	87
3.8 ลักษณะชุดครอบหัวพลาสมา (Plasma Jacket) .....	88
3.9 แผนผังอุปกรณ์สำหรับควบคุมการทำงานของหัวพลาสมาอาร์ค .....	88
3.10 การติดตั้งชุดอุปกรณ์เพื่อควบคุมการทำงานของหัวพลาสมาอาร์ค.....	89
3.11 ลักษณะของเตา Gasification และPlasma-assisted gasification .....	90
3.12 แผนผังกระบวนการของระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน .....	91
3.13 ส่วนประกอบที่สำคัญของระบบแก๊สซิฟิเคชันและพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน.....	93
3.14 การเดินระบบแก๊สซิฟิเคชัน และพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน.....	96
3.15 ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิภายในเตา ( $T_1 - T_6$ ) .....	97
3.16 แสดงเครื่องมือที่ใช้ในการวัด .....	99
3.17 การศึกษาเสถียรภาพของการผลิตพลังงานของระบบ C-G.....	101
3.18 การศึกษาเสถียรภาพของการผลิตพลังงานกับระบบ P-G.....	105
3.19 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ .....	113
4.1 ลักษณะทางกายภาพของเชื้อเพลิงขยะ RDF-3, RDF-4 และ RDF-5 .....	118
4.2 ลักษณะทางกายภาพของเชื้อเพลิงต่าง ๆ.....	120
4.3 ผลการวิเคราะห์ TGA ของเชื้อเพลิงไม้สับ และเชื้อเพลิงขยะ RDF-5.....	120
4.4 ลักษณะทางกายภาพของมูลฝอยเหลือทิ้ง (Waste reject) และผลวิเคราะห์ TGA.....	126
4.5 ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ (Temperature profile).....	132
4.6 องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงต่างๆ ที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง 210 Nm <sup>3</sup> /hr.....	137
4.7 ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิง ที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงที่ระดับ 210 Nm <sup>3</sup> /hr.....	137
4.8 ลักษณะของพลาสมาอาร์คและอุณหภูมิจากพลาสมาที่การเดินระบบ 36 kW .....	141
4.9 ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ (Temperature profile) .....	142
4.10 องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงต่างๆ ระหว่างระบบ C-G และระบบ P-G .....	143

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11	ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ (Temperature profile) ของ Waste reject..... 146
4.12	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (PCA) ของการกระจายตัวของธาตุกลุ่มโลหะหนัก อัลคาไรด์ และคลอรีน ..... 164
4.13	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (PCA) ของการกระจายตัวของธาตุกลุ่มโลหะหนัก อัลคาไรด์ และคลอรีนในวัตถุคิบ Waste reject ที่ความชื้น 10 25 และ 40% (wb) ..... 166

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

Al	=	ธาตุอะลูมิเนียม (Aluminum)
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)
Ca	=	ธาตุแคลเซียม (Calcium)
Cd	=	ธาตุแคดเมียม (Cadmium)
Cr	=	ธาตุโครเมียม (Chromium)
Cu	=	ธาตุทองแดง (Copper)
Cl	=	ธาตุคลอรีน (Chlorine)
CO	=	แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide)
CO <sub>2</sub>	=	แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide)
CV <sub>g</sub>	=	Calorific value of syn gas
%db	=	ร้อยละมาตรฐานแห้ง (% Dry basis)
EDXRF	=	Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer
g	=	กรัม (gram)
G <sub>C</sub>	=	Gas composition (%V)
C-G	=	ระบบแก๊สซิฟิเคชัน (Conventional gasification)
F	=	ธาตุคลอรีน Fluorine
Fe	=	ธาตุเหล็ก (Ferrous)
kg	=	กิโลกรัม (Kilogram)
H	=	ธาตุไฮโดรเจน (Hydrogen)
H	=	ความสูง
H <sub>2</sub>	=	แก๊สไฮโดรเจน
HCl	=	กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid)

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

Hg	=	ธาตุปรอท (Mercury)
HHV <sub>fuel</sub>	=	High Heating Value of fuel (MJ/kJ)
HHV <sub>g</sub>	=	High Heating Value of gas (MJ/Nm <sup>3</sup> )
hr	=	ชั่วโมง (hour)
K	=	โพแทสเซียม (Potassium)
kg	=	กิโลกรัม (Kilogram)
KVA	=	กิโลวัตต์แอมป์ (Kilovolt-amp)
kW	=	กิโลวัตต์ (Kilowatt)
L	=	ความยาว
LHV <sub>fuel</sub>	=	Low Heating Value of fuel (MJ/kJ)
LHV <sub>g</sub>	=	Low Heating Value of gas (MJ/Nm <sup>3</sup> )
LOD	=	Limited of Detection
m <sub>ash</sub>	=	Ash Production (kg/hr)
m <sub>fuel</sub>	=	Fuel Consumption (kg/hr)
MBT	=	Mechanical and Biological Treatment
Mg	=	ธาตุแมกนีเซียม (Magnesium)
mg	=	มิลลิกรัม (Milligram)
MJ	=	เมกะจูล (Mega Joule)
Nm <sup>3</sup>	=	Cubic millimeter
N/A	=	Not Analysis
N	=	ธาตุไนโตรเจน (Nitrogen)
Na	=	ธาตุโซเดียม (Sodium)
Ni	=	ธาตุนิกเกิล (Nickel)
ND	=	Not detected (ตรวจไม่พบ)
Nm <sup>3</sup>	=	Normal Cubic meter
NO	=	แก๊สไนตริกออกไซด์ (Nitric oxide)
NO <sub>2</sub>	=	แก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ (Nitrogen dioxide)
NO <sub>x</sub>	=	แก๊สออกไซด์ของไนโตรเจน (Nitrogen oxide)

### คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

O	=	ธาตุออกซิเจน (Oxygen)
O <sub>2</sub>	=	แก๊สออกซิเจน (Oxygen gas)
P	=	ธาตุฟอสฟอรัส (Phosphorus)
PCA	=	Principle Component Analysis
P <sub>e</sub>	=	Electrical power
P-G	=	ระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน (Plasma-assisted gasification)
Pb	=	ธาตุตะกั่ว (Lead)
PPM	=	Part Per Million
RDF-3	=	Refuse derived fuel -3 หรือ เชื้อเพลิงขยะประเภท 3
RDF-5	=	Refuse derived fuel -5 หรือ เชื้อเพลิงขยะประเภท 5
RDF-5/WC (50/50)	=	เชื้อเพลิงขยะ RDF-5 ผสมกับ ไม้ยูคาลิปตัสสับ สัดส่วน 50:50 %wt
RDF-5/WC (70/30)	=	เชื้อเพลิงขยะ RDF-5 ผสมกับ ไม้ยูคาลิปตัสสับ สัดส่วน 70:30 %wt
T <sub>1</sub> - T <sub>6</sub>	=	Reactor Temperature (Inside 1-Inside 6)
TD	=	Impurities (Tar & Dust)
Ti	=	ธาตุไทเทเนียม (Taitanium)
TKN	=	ทีเคเอ็น (Total Kjedahl Nitrogen)
V <sub>g</sub>	=	Gas flow rate
%wt	=	ร้อยละโดยน้ำหนัก (% By weight)
%wb	=	ร้อยละมาตรฐานเปียก (% Wet basis)
TDS	=	ของแข็งละลายน้ำ (Total Dissolve Solids)
TS	=	ของแข็งทั้งหมด (Total Solids)
TSS	=	ของแข็งแขวนลอย (Total Suspended Solids)
S	=	ธาตุซัลเฟอร์ (Sulphur)
Si	=	ธาตุซิลิคอน (Silicon)
SO <sub>2</sub>	=	แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Sulphur dioxide)

**คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)**

$SO_x$	=	แก๊สออกไซด์ของซัลเฟอร์ (Sulphur oxide)
W	=	ความกว้าง
WC	=	เชื้อเพลิงไม้ยูคาลิปตัส (Wood Chip)
$\varnothing$	=	Diameter
$\eta_{cg}$	=	Cold-gas efficiency

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

เป็นที่ทราบกันดีว่า ในปัจจุบันขณะมีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างมหาศาล เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรโลก และการพัฒนาทางเศรษฐกิจอุตสาหกรรมที่เติบโตขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้ปัญหาการจัดการขยะมูลฝอย กลายเป็นปัญหาหนักที่ทุกประเทศต้องเผชิญอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้จากการประชุมสิ่งแวดล้อมโลก หลายประเทศได้ยอมรับแผนปฏิบัติการ 21 (Agenda21) (United Nations, 1992) โดยให้ประเด็นปัญหาสิ่งแวดล้อมโลกด้านปัญหาขยะ กลายเป็นปัญหาสังคมที่ทั่วโลกให้ความสำคัญมากที่สุดอีกเรื่องหนึ่ง และมีการเสนอแนวทางในการปฏิบัติเพื่อแก้ปัญหาอย่างต่อเนื่องเรื่อยมาจนถึงปัจจุบัน โดยมุ่งเน้นการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างคุ้มค่าเพื่อลดปริมาณการเกิดขยะมูลฝอย การสนับสนุนให้มีการจัดการสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน ตลอดจนการพัฒนาเทคโนโลยีการจัดการขยะที่เหมาะสมในแต่ละประเทศของตน เนื่องด้วยวิถีการดำเนินชีวิตและมาตรฐานการบริโภคของประชากรในสังคมประเทศนั้นๆ มีผลต่อปริมาณและองค์ประกอบของขยะชุมชนอยู่ตลอดเวลา

ประเทศไทยเป็นอีกประเทศหนึ่งที่เผชิญวิกฤตขยะชุมชน ด้วยผลจากการพัฒนาทางเศรษฐกิจและสังคมที่เติบโตอย่างรวดเร็ว เป็นสาเหตุให้มีปริมาณขยะชุมชนเพิ่มขึ้นตามมา วิกฤตปัญหานี้ ทำให้ทุกฝ่ายเริ่มตื่นตัวและให้ความสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากบทเรียนที่ผ่านมาของการจัดการขยะที่ไม่ถูกต้องตามหลักวิชาการ ได้ก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมรุนแรง กรมควบคุมมลพิษ ได้ผลักดันให้ปัญหาขยะเป็นวาระแห่งชาติของประเทศไทย เนื่องจาก ช่วงเวลาสิบปีที่ผ่านมาปริมาณขยะชุมชนของประเทศไทยเพิ่มขึ้นถึง 20% ในปี 2555 มีขยะมูลฝอยเกิดขึ้นทั่วประเทศ ปริมาณ 24.73 ล้านตัน แต่กลับพบว่าขยะที่ถูกนำกลับมาใช้ประโยชน์มีเพียง 21% ถูกกำจัดตามหลักสุขาภิบาลเพียง 24% และกำจัดโดยไม่หลักสุขาภิบาลและมีขยะตกค้างที่ไม่ได้รับการกำจัดสูงถึง 55% (ชุดหลุมฝัง เภาในที่โล่ง เทกองทิ้งกลางแจ้ง) ซึ่งถือเป็นวิกฤตปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมของประเทศที่ต้องได้รับการแก้ไขอย่างเร่งด่วน (กรมควบคุมมลพิษ, 2556)

การพัฒนาเทคโนโลยีการจัดการขยะชุมชนที่เหมาะสมและสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับคุณลักษณะและคุณสมบัติขยะชุมชนของประเทศไทย จึงเป็นสิ่งที่ท้าทายมาก เทคโนโลยีจัดการขยะที่มีความเหมาะสมนั้น ต้องมุ่งเน้นการนำขยะมูลฝอยกลับมาใช้ประโยชน์ให้คุ้มค่าที่สุดที่สุด คงเหลือขยะนำไปกำจัดขั้นสุดท้ายให้น้อยที่สุด และสำคัญที่สุดคือต้องไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม สุขภาพอนามัย ทั้งนี้การพิจารณานำขยะมาผลิตเป็นพลังงานเสริมนั้นเป็นทางเลือกอีกทางหนึ่ง ซึ่งนอกจากจะได้พลังงานทดแทนเชื้อเพลิงธรรมชาติแล้ว ยังเป็นการแก้ไขปัญหาในเรื่องของการกำจัดขยะที่ได้ผลอย่างยิ่ง และเป็นวิธีที่จะช่วยลดการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลได้ ซึ่งถือเป็นการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างคุ้มค่า ทั้งนี้ด้วยขยะชุมชนของประเทศไทยมีจุดเด่น คือ มีองค์ประกอบที่เผาไหม้ได้สูงถึง 94.43% ซึ่งเป็นข้อยืนยันว่าสามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์เพื่อเป็นพลังงานทดแทนได้อย่างมีศักยภาพ (กระทรวงพลังงาน, 2551)

อย่างไรก็ดีขยะชุมชน ในประเทศไทยมีความชื้นสูงมาก โดยเฉลี่ย 50-60 % และมีปริมาณเถ้าสูงเช่นเดียวกัน โดยเฉลี่ย 21-28 % ซึ่งถือเป็นจุดด้อยของการนำขยะมาใช้ประโยชน์ในรูปพลังงาน โดยใช้เทคโนโลยีทางความร้อน (Thermal conversion technology) ยิ่งไปกว่านั้น การกำจัดด้วยกระบวนการทางความร้อนที่ไม่ถูกวิธีจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของคนในชุมชน หากปล่อยให้เกิดการเผาไหม้ขยะที่มีสารประกอบของคลอรีนและอินทรีย์คาร์บอนในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 800 °C ซึ่งก่อให้เกิดสารไดออกซินและสารฟูแรนที่เป็นอันตรายต่อชีวิตได้ อาทิ การเผาในที่โล่ง การเผาขยะสด โดยใช้เตาเผาชุมชนขนาดเล็ก เป็นต้น เทคโนโลยีการผลิตเชื้อเพลิงขยะ (กระบวนการปรับเสถียรภาพขยะโดยการลดความชื้น และการคัดแยกเฉพาะขยะที่เผาไหม้ได้) เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ถูกนำมาใช้เพื่อลดข้อจำกัดเกี่ยวกับการกำจัดโดยใช้กระบวนการทางความร้อน โดยได้เชื้อเพลิงขยะที่มีความเหมาะสมเพื่อเป็นวัตถุดิบป้อนเข้าสู่ระบบผลิตพลังงานด้วยเทคโนโลยีความร้อน ต่อไป

เทคโนโลยีความร้อน ถูกยอมรับว่าสามารถกำจัดขยะมูลฝอยและเปลี่ยนรูปของเสียเป็นพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพภายในเวลาอันรวดเร็ว ลดมวลและปริมาตรของขยะมูลฝอยได้ถึง 70-90 % โดยสามารถนำพลังงานกลับมาเพื่อการผลิตไฟฟ้าและความร้อนได้ อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพของระบบจะขึ้นอยู่กับคุณภาพของเชื้อเพลิงด้วยเช่นกัน ทั้งนี้ในปัจจุบัน เทคโนโลยีความร้อนที่เข้ามามีบทบาท แทนที่ระบบการเผาไหม้โดยตรง (Incineration process) คือ เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification process) โดยถูกยอมรับว่า เป็นระบบที่มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และปลดปล่อยมลพิษสู่สิ่งแวดล้อมน้อยมาก ( $SO_x$ ,  $NO_x$ , heavy metals, fly ash, dioxins and furans) (Larson, 1998; Stiegel, 2001 ; Malkow, 2003; Arena, 2012; Li et al.,; Seggiani et al., 2012)

เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification technology) เป็นเทคโนโลยีที่อาศัยกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางอุณหเคมี (Thermo-chemical Conversion Process) โดยควบคุมเตาปฏิกรณ์ให้เกิดการเผาไหม้แบบ Partial oxidation หรือ การเผาไหม้แบบจำกัดปริมาณออกซิเจน ให้มีอุณหภูมิประมาณ 800-1,000 °C จึงมีข้อแตกต่างจากเทคโนโลยีการเผาไหม้โดยตรงที่ต้องการอากาศหรือออกซิเจนมากเกินไปให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ ซึ่งการสันดาปของออกซิเจนจะส่งผลต่อการเกิดมลพิษอากาศในรูปออกไซด์ของซัลเฟอร์ และไนโตรเจน ทั้งนี้ กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ความร้อนจะเปลี่ยนเชื้อเพลิงแข็งให้เป็นแก๊สเชื้อเพลิง ได้แก่ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แก๊สไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) และแก๊สมีเทน (CH<sub>4</sub>) ซึ่งมีค่าความร้อนประมาณ 4-5 MJ/Nm<sup>3</sup> ซึ่งสามารถใช้ประโยชน์เพื่อเป็นผลิตพลังงานได้ (Reed, 1988; Higman, C. and Van d. B., 2008) เช่น การผลิตกระแสไฟฟ้า โดยป้อนแก๊สเชื้อเพลิงเข้าเครื่องยนต์สันดาปภายในเพื่อผลิตไฟฟ้า หรือการป้อนแก๊สเชื้อเพลิงเข้าไปในห้องเผาไหม้ในหม้อไอน้ำเพื่อผลิตไอน้ำแล้วนำไปหมุนกังหันไอน้ำผลิตไฟฟ้า ตลอดจนการผลิตความร้อนไปใช้ประโยชน์อื่นๆ (Medcalf et al., 1998) อย่างไรก็ตาม ระบบแก๊สซิฟิเคชันยังมีข้อจำกัดบางประการ คือ ในการนำมาใช้กับเชื้อเพลิงที่มีความแปรปรวนสูงด้านคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมี การเดินระบบเพื่อควบคุมอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ให้สูงและสม่ำเสมอทำได้ยาก ทำให้การเดินระบบไม่เสถียร ส่งผลให้ได้แก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำ และทำให้ประสิทธิภาพของระบบต่ำ (Rajvanshi, 1986; Arjham et al., 2012, 2013)

เทคโนโลยีพลาสมาอาร์คทางความร้อน (Thermal plasma arc technology) เป็นปรากฏการณ์ไอออไนซ์ของสสารในรูปแก๊ส (อาทิ อากาศ ออกซิเจน และไนโตรเจน) โดยเมื่อให้แก๊สผ่านสนามไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์สูง แก๊สเหล่านี้จะเปลี่ยนสถานะเป็นพลาสมาที่มีความร้อนสูง (2,200-13,900 °C) มีการวิจัยและพัฒนาด้านการนำความร้อนจากพลาสมาอาร์ค มาใช้งานด้านสิ่งแวดล้อมเพื่อกำจัดของเสียและด้านพลังงานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ อาทิ การใช้พลาสมาอาร์คทางความร้อนในระบบแก๊สซิฟิเคชันเพื่อกำจัดของเสียอันตราย กากของเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนัก การทำลายกากกัมมันตรังสี โดยคุณสมบัติของอุณหภูมิที่สูงมากนี้ สามารถทำลายองค์ประกอบหลากหลายทั้งสารอินทรีย์และอนินทรีย์ให้หลอมละลาย และคงรูปผลึกแก้ว ที่เสถียรไม่สามารถปลดปล่อยมลพิษออกสู่สิ่งแวดล้อมต่อไป (Plasma gasification melting process) (Moustakas et al., 2005, 2008; Bert et al., 2006; Huang et al. 2007; Dave et al. 2010; Ojha et al., 2012; Zhang et al., 2012; Yoon et al., 2013) ในส่วนของการนำพลาสมาอาร์คทางความร้อนมาใช้งานด้านพลังงาน อาทิ การใช้ความร้อนจากพลาสมาในรูปของแหล่งความร้อนภายนอก (External energy หรือ Allothermal) สำหรับระบบทางความร้อนแบบต่างๆ เพื่อควบคุมอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์และเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ เช่น ในระบบ Allothermal plasma gasification หรือ Allothermal

plasma pyrolysis เป็นการนำความร้อนจากพลาสมาอาร์คมาใช้ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน/ไพโรไลซิส เพื่อการแตกสลายโมเลกุลของทาร์ที่ปนเปื้อนในแก๊สเชื้อเพลิง และเพิ่มสัดส่วนของแก๊สไฮโดรเจน เพื่อให้ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงสูงขึ้น ซึ่งมีผลให้ประสิทธิภาพของระบบสูงขึ้น (Tang et al., 2003, 2007; Huang et al., 2007; Dave et al. 2010; Fabry et al., 2013)

ทั้งนี้การวิจัยและพัฒนาในด้านการนำเอาความร้อนจากพลาสมาอาร์ค มาช่วยในระบบแก๊สซิฟิเคชัน (Plasma-assisted gasification) เพื่อเป็นความร้อนเสริมให้กับโซนการเผาไหม้ (Oxidation zone) สำหรับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยศึกษาเกี่ยวกับขยะมูลฝอยที่มีความแปรปรวนและมืองค์ประกอบหลากหลายทั้งสารอินทรีย์และอนินทรีย์ในระดับต้นแบบนั้น ยังไม่มีผลการศึกษาปรากฏ ทั้งนี้การใช้ความร้อนช่วยในระบบแก๊สซิฟิเคชัน จะลดข้อจำกัด ในการใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชันกับเชื้อเพลิงที่มีความแปรปรวนสูง ด้านคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมีที่การเดินระบบเพื่อควบคุมอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ให้สูงและสม่ำเสมอทำได้ยาก ความร้อนจากพลาสมาอาร์ค จะช่วยรักษาอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ให้สูงสม่ำเสมอ ทำให้การเดินระบบเสถียร ช่วยเพิ่มปฏิกิริยาออกซิเดชันในระบบ ทำให้ได้แก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนสูง และส่งผลให้ประสิทธิภาพของระบบสูงได้ มีงานวิจัยสนับสนุน แต่ทั้งนี้ยังเป็นการวิจัยในระดับห้องปฏิบัติการ (Sforza et al. 2009; Fabry et al. 2012) การวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีในระดับต้นแบบที่จะสามารถนำไปต่อยอดใช้งานได้จริง จึงถือได้ว่าเป็นเทคโนโลยีและเป็นนวัตกรรมที่ใหม่ ที่จะทำให้อุตสาหกรรมทั้งในเชิงเทคนิค วิศวกรรม ตลอดจนข้อมูลด้านมลพิษสิ่งแวดล้อม ที่จะนำมาใช้เป็นตัวชี้วัดความเหมาะสมของการนำเทคโนโลยีนี้มาใช้กับระบบการจัดการขยะมูลฝอยได้จริงต่อไป

ดังกล่าว จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ ซึ่งมีวัตถุประสงค์หลักคือ การสร้างนวัตกรรม (Innovation) ด้านเทคโนโลยีพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน (Plasma-assisted gasification technology) สำหรับการจัดการขยะชุมชนควบคู่กับการผลิตพลังงานในระดับต้นแบบขนาด 100 กิโลวัตต์ ที่สามารถใช้งานได้จริง ซึ่งเป็นเครื่องมือหลักสำหรับการศึกษาวิจัยนี้ และทำการศึกษาเปรียบเทียบกับระบบแก๊สซิฟิเคชันขนาด 100 กิโลวัตต์ เพื่อให้ได้ข้อมูลด้านสมรรถนะการผลิตพลังงานของระบบ รวมทั้งข้อมูลการประเมินมลพิษสิ่งแวดล้อมจากระบบอย่างครอบคลุม ที่สามารถชี้วัดความเหมาะสมในการนำเทคโนโลยีนี้ไปใช้งานสำหรับการจัดการขยะชุมชนที่มองหามิติการนำขยะมาใช้ประโยชน์เพื่อผลิตเป็นพลังงาน (Waste-to-energy) อย่างมีประสิทธิภาพ และไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม พร้อมทั้งสามารถนำผลการวิจัยนี้ ไปขยายผลใช้งานได้จริงต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อพัฒนาระบบการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงขยะที่ใช้เทคโนโลยีพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน โดยใช้พลาสมาอาร์คเข้ามาเป็นแหล่งความร้อนช่วยในระบบแก๊สซิฟิเคชัน
- 2) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการผลิตพลังงาน และประเมินสมรรถนะการทำงานของระบบแก๊สซิฟิเคชัน และระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน (Plasma-assisted gasification)
- 3) เพื่อศึกษาการปลดปล่อยมลพิษและประเมินสมรรถนะทางสิ่งแวดล้อมของระบบแก๊สซิฟิเคชันและระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน
- 4) เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำนายสมรรถนะการทำงานของระบบแก๊สซิฟิเคชันและระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

โดยภาพรวมของขอบเขตการวิจัยการศึกษา สามารถสรุปได้ดังนี้

- 1.3.1 ขยะชุมชนที่ใช้ศึกษาเป็นขยะมูลฝอยที่เกิดขึ้นภายใน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ผ่านกระบวนการจัดการ คือ การคัดแยกขั้นต้น การปรับสภาพขยะมูลฝอยโดยวิธีการบำบัดทางกลและชีวภาพโดยใช้เทคโนโลยี MBT (Mechanical and Biological Treatment) และกระบวนการคัดแยกขั้นหลัง ได้เป็นเชื้อเพลิงขยะประเภท 3 (RDF-3)
- 1.3.2 เชื้อเพลิงขยะที่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้ คือ เชื้อเพลิงขยะ RDF-3 จากข้อที่ 1.3.1 มาผลิตเป็นเชื้อเพลิงขยะประเภทที่ 5 (RDF-5) หรือเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง (Densified: d-RDF)
- 1.3.3 เศษมูลฝอยเหลือทิ้ง (Waste reject) ที่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้ เป็นมูลฝอยเหลือทิ้งจากกระบวนการคัดแยกขั้นหลัง จากข้อที่ 1.3.1
- 1.3.4 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของวัตถุดิบที่นำมาเป็นเชื้อเพลิง โดยศึกษาสมบัติทางกายภาพ (Physical properties) ได้แก่ ขนาด ความชื้น และความหนาแน่น
  - 1) วิเคราะห์คุณสมบัติ ได้แก่ ศึกษาสมบัติทางกายภาพ (Physical properties)
  - 2) วิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate analysis) ค่าความร้อน ปริมาณเถ้า (%Ash) ปริมาณสารระเหย (%VM) และปริมาณคาร์บอนคงตัว (%FC)
  - 3) วิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) และองค์ประกอบที่เป็นพิษ (Toxicity analysis) ได้แก่ C, H, N, S, Cl และ โลหะหนัก ต่างๆ
- 1.3.5 ในงานวิจัยนี้ ทำการศึกษาเปรียบเทียบ ระบบแก๊สซิฟิเคชัน (Conventional gasification) ในงานวิจัยนี้ ใช้สัญลักษณ์ย่อคือ C-G และ ระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน (Plasma-

assisted gasification) ในงานวิจัยนี้ ใช้สัญลักษณ์ย่อคือ P-G) โดยศึกษาใน 2 ด้านหลัก คือ (1) ด้านสมรรถนะการผลิตพลังงานของระบบ และ (2) ด้านสมรรถนะทางสิ่งแวดล้อมโดยการประเมินมลพิษสิ่งแวดล้อมจากระบบ

- 13.6 การพัฒนาระบบการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงขยะที่ใช้เทคโนโลยีพลาสมา แก๊สซิฟิเคชัน จะพัฒนาต่อออกจาก ชุดเตาปฏิกรณ์ระบบแก๊สซิฟิเคชันชนิดไหลลง (Fixed bed downdraft gasifier) เพื่อการนำระบบพลาสมาอาร์คเข้ามาเป็นแหล่งความร้อนช่วย โดยใช้เทคโนโลยีพลาสมาทางความร้อนขนาด 50 kW ภายใต้การพัฒนาของ สถาบัน Advanced plasma solutions for waste management บริษัท High Temperature Technologies Corp. (HTTC) ประเทศแคนาดา
- 1.3.7 การศึกษาเสถียรภาพของการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงขยะ RDF-5 กับระบบแก๊สซิฟิเคชัน จะใช้เชื้อเพลิง 4 ชนิด คือ (1) เชื้อเพลิงไม้ยูคาลิปตัสสับ (Wood Chip) สัญลักษณ์ย่อคือ WC (2) เชื้อเพลิงขยะประเภท 5 สัญลักษณ์ย่อคือ RDF-5 (3) เชื้อเพลิงขยะ RDF-5 ผสมกับ ไม้ยูคาลิปตัสสับ สัดส่วน 50:50 %wt สัญลักษณ์ย่อคือ RDF-5/WC (50/50) (4) เชื้อเพลิงขยะ RDF-5 ผสมกับ ไม้ยูคาลิปตัสสับ สัดส่วน 70:30 %wt สัญลักษณ์ย่อคือ RDF-5/WC (70/30)
- 1.3.8 การศึกษาเสถียรภาพของระบบ P-G โดยการนำพลาสมาอาร์คเข้ามาเป็นแหล่งความร้อนเสริมใน ระบบ C-G โดยเลือกเชื้อเพลิงที่ดีที่สุดจากผลการทดสอบข้อ 1.3.7 ในเงื่อนไขของการเดินระบบแบบต่อเนื่องระยะยาว (Long term condition)
- 1.3.9 การศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะการทำงาน และประเมินประสิทธิภาพการผลิตพลังงานของระบบ C-G และ ระบบ P-G ทำการศึกษาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่
- 1) ศึกษาองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง (Gas composition) ชั้นของอุณหภูมิภายในเตา (Temperature profile) องค์ประกอบทาร์และฝุ่น (Tar and dust) อัตราการใช้เชื้อเพลิง (Fuel consumption rate) อัตราการเกิดเถ้า (Ash production) อัตราการใช้เชื้อเพลิงจำเพาะ (Specific fuel consumption) อัตราการเกิดเถ้าจำเพาะ (Specific ash production)
  - 2) ประเมินประสิทธิภาพการผลิตพลังงานของระบบ ได้แก่ ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Cold-gas efficiency)
  - 3) เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบ ได้แก่ การประเมินค่าพลังงานสุทธิของระบบ
- 1.3.10 การศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะทางสิ่งแวดล้อม โดยศึกษาการปลดปล่อยมลพิษของระบบ C-G และ ระบบ P-G โดยมีพารามิเตอร์ที่ศึกษา ดังนี้

- 1) วิเคราะห์องค์ประกอบในแก๊สไอเสีย (Air emission) ได้แก่  $\text{SO}_2$   $\text{NO}$   $\text{NO}_2$  และ โลหะหนักต่างๆ
  - 2) แก๊สที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ โดยวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ วิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) และองค์ประกอบที่เป็นพิษ (Toxicity analysis) ได้แก่ โลหะหนักต่างๆ และทำการทดสอบการชะละลาย (Toxicity characteristic leaching procedure : TCLP)
  - 3) วิเคราะห์องค์ประกอบในน้ำเสีย (Wastewater) ได้แก่ COD TKN Phenol HCL  $\text{H}_2\text{S}$  และ โลหะหนักต่างๆ
  - 4) ประเมินอัตราการปลดปล่อยมลพิษเสียต่อหน่วยของมลพิษที่ป้อนเข้าระบบ (Emission factor) ของเสียที่เกิดขึ้นจากการผลิตพลังงาน
- 1.3.11 ทำการศึกษาปัจจัยด้านความชื้นของเชื้อเพลิงต่อสมรรถนะการทำงานและประสิทธิภาพการผลิตงาน รวมถึงศึกษาการปลดปล่อยมลพิษของระบบ P-G ด้วยการกำจัดเศษมูลฝอยเหลือทิ้ง (Waste reject) ที่ความชื้น 3 ระดับ คือ 10% 25% และ 40% (wb) โดยศึกษาพารามิเตอร์ ตามข้อ 1.3.9 และ 1.3.10
- 1.3.12 พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อใช้ทำนายสมรรถนะการทำงานของระบบแก๊สซิฟิเคชัน และระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน ดังนี้
- 1) การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับระบบแก๊สซิฟิเคชัน และระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน เพื่อทำนาย องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง ( $\% \text{CO}$   $\% \text{CH}_4$   $\% \text{H}_2$ ) ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิง (LHV) และประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Cold-gas efficiency) ด้วยวิธีการวิเคราะห์ความถดถอย (Regression analysis) เพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปรตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป โดยโปรแกรมที่ใช้คือ โปรแกรม JMP 10 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA)
  - 2) การวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อประเมินมลพิษสิ่งแวดล้อมของระบบ จะใช้การวิเคราะห์ตัวประกอบสำคัญ (Principle Component Analysis: PCA) เพื่อศึกษาพฤติกรรมกระจายตัวของธาตุกลุ่มโลหะหนัก อัลคาไลน์ และคลอรีน ไปสู่รูปแบบต่างๆ ได้แก่ เถ้าหนัก เถ้าลอย น้ำเสีย และอื่นๆ สำหรับระบบแก๊สซิฟิเคชัน และระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน โดยถูกตรวจสอบด้วยวิธีการวิเคราะห์ตัวประกอบสำคัญ (Principle Component Analysis: PCA) ใช้โปรแกรม XLSTAT (Version 2013.3.20, Addinsoft, France)

## 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

### 1.4.1) ประโยชน์ด้านการวิจัยและการสร้างองค์ความรู้ทางวิชาการ

- 1) เกิดองค์ความรู้ที่สอดคล้องกับนโยบายและยุทธศาสตร์การวิจัยของชาติ ฉบับที่ 8 (แผนงานวิจัยที่ 9 : การวิจัยเกี่ยวกับมลพิษ การจัดการมลพิษ และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากมลพิษ รวมทั้งการบริหารจัดการสิ่งแวดล้อมของอุตสาหกรรมและของชุมชน โดยเฉพาะการบริหารจัดการขยะในเมืองและชุมชนอย่างมีประสิทธิภาพ)
- 2) เกิดองค์ความรู้ นวัตกรรมและเทคโนโลยีใหม่ด้านพลาสมาทางความร้อนกับระบบแก๊สซิฟิเคชัน สำหรับการจัดการขยะชุมชนในระดับต้นแบบ
- 3) ได้ข้อมูลผลการประเมินสมรรถนะการทำงาน ประสิทธิภาพการผลิตพลังงานของระบบแก๊สซิฟิเคชัน และระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน และสามารถชี้วัดความเหมาะสมในการเลือกใช้เทคโนโลยีสำหรับการจัดการขยะชุมชน
- 4) ข้อมูลด้านมลพิษสิ่งแวดล้อมของระบบแก๊สซิฟิเคชัน และระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน และสามารถชี้วัดความเหมาะสมในการเลือกใช้เทคโนโลยีสำหรับการจัดการขยะชุมชน

### 1.4.2) ประโยชน์ที่มีต่อการอนุรักษ์พลังงานและสิ่งแวดล้อม

- 1) สอดคล้องกับยุทธศาสตร์ชาติ โดยเชื่อมโยงกับการพัฒนาบนฐานการสร้างความรู้ของฐานทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม และการอนุรักษ์พลังงาน
- 2) เป็นการสร้างรูปแบบของระบบจัดการขยะชุมชนเพื่อผลิตพลังงานเพื่อเปลี่ยนของเสียให้เป็นพลังงาน (Waste-to-energy : WtE) ที่เน้นทั้ง การกำจัดและการนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่เพื่อผลิตพลังงานทดแทนอย่างมีประสิทธิภาพ ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม
- 3) นำไปสู่การสนับสนุนให้มีระบบการผลิตพลังงานทดแทนจากขยะชุมชนให้เกิดขึ้นอย่างกว้างขวาง และช่วยผลักดันให้แผนยุทธศาสตร์การวิจัยด้านการพัฒนาพลังงานทดแทนจากขยะตามนโยบายของประเทศสัมฤทธิ์ผล

## บทที่ 2

### ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บทนำ

ขยะมูลฝอยเป็นสิ่งเหลือใช้จากกิจกรรมในการดำเนินชีวิตของมนุษย์และจำเป็นต้องได้รับการกำจัดอย่างถูกสุขวิธี หากปล่อยทิ้งไว้โดยไม่มีการจัดการจะทำให้เกิดปัญหาตามมา คือ เป็นแหล่งเพาะพันธุ์แมลงและพาหะนำโรคต่างๆ ทำให้เกิดกลิ่นเหม็น และเป็นแหล่งแพร่กระจายสิ่งสกปรกสู่บรรยากาศ แหล่งน้ำ สิ่งแวดล้อมรอบด้าน และก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพ

ในปัจจุบันขยะมีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างมหาศาล เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรและการพัฒนาทางเศรษฐกิจอุตสาหกรรมที่เติบโตขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้เรื่องของขยะกลายเป็นปัญหาหนักที่ทุกประเทศต้องเผชิญอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ แนวทางการแก้ไขปัญหาจึงต้องมีการบริหารจัดการขยะชุมชนให้เกิดขึ้นอย่างครบวงจรและเป็นรูปธรรม ทั้ง การคัดแยก การนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้การพิจารณานำขยะมาผลิตเป็นพลังงานเสริม นั้น นอกจากจะได้มีพลังงานสำรองเอาไว้ใช้ยามที่พลังงานจากแหล่งธรรมชาติขาดแคลนแล้ว ยังเป็นการแก้ไขปัญหาในเรื่องของการกำจัดขยะที่ได้ผลอย่างยิ่ง และเป็นวิธีที่จะช่วยลดมลภาวะในทางอ้อม คือ สามารถลดการปล่อยแก๊สพิษจากการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลได้อีกด้วย ดังกล่าว โดยประเด็นที่สำคัญที่สุด ต้องมีเทคโนโลยีการผลิตพลังงานทดแทนจากขยะที่มีประสิทธิภาพสูง และขณะเดียวกันต้องมีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม สำหรับประเทศไทยการสร้างความพร้อมในการพัฒนาเทคโนโลยีผลิตพลังงานทดแทนจากขยะที่มีประสิทธิภาพได้เองในประเทศ นอกจากจะช่วยสร้างความมั่นคงในด้านพลังงานแล้ว ยังเป็นการรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมในประเทศได้อย่างยั่งยืน

#### 2.2 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับขยะมูลฝอย

ขยะมูลฝอยโดยทั่วไปจะหมายถึงเศษสิ่งของหรือวัสดุที่ไม่ต้องการทั้งที่เป็นขยะที่เผาไหม้ได้ (Combustible material) เช่น เศษอาหาร สิ่งของเครื่องใช้ที่ชำรุด เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและอุตสาหกรรม ซากพืชซากสัตว์ต่าง ๆ เสื้อผ้าเก่า พลาสติกเก่า และเศษขยะ ผสมปนไปกับขยะที่เผาไหม้ไม่ได้ (Non-combustible material) ซึ่งได้แก่ ขยะเศษแก้ว รวมทั้งโลหะต่างๆ

ดังนั้นเพื่อเป็นการลดปัญหาหมอกควันต่าง ๆ การเพิ่มมูลค่าให้กับของเสียจึงเป็นวิธีการจัดการขยะมูลฝอยที่ดี ประหยัด และง่ายที่สุด โดยทั่วไปสามารถจำแนกขยะออกเป็น 3 ประเภทใหญ่ ๆ ตามแหล่งที่จัดเก็บขยะ (กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม, 2552) คือ

- ขยะชุมชน (Municipal solid waste : MSW)
- ขยะจากโรงงานอุตสาหกรรม (Industrial waste)
- ขยะจากเกษตรกรรม (Agricultural waste)

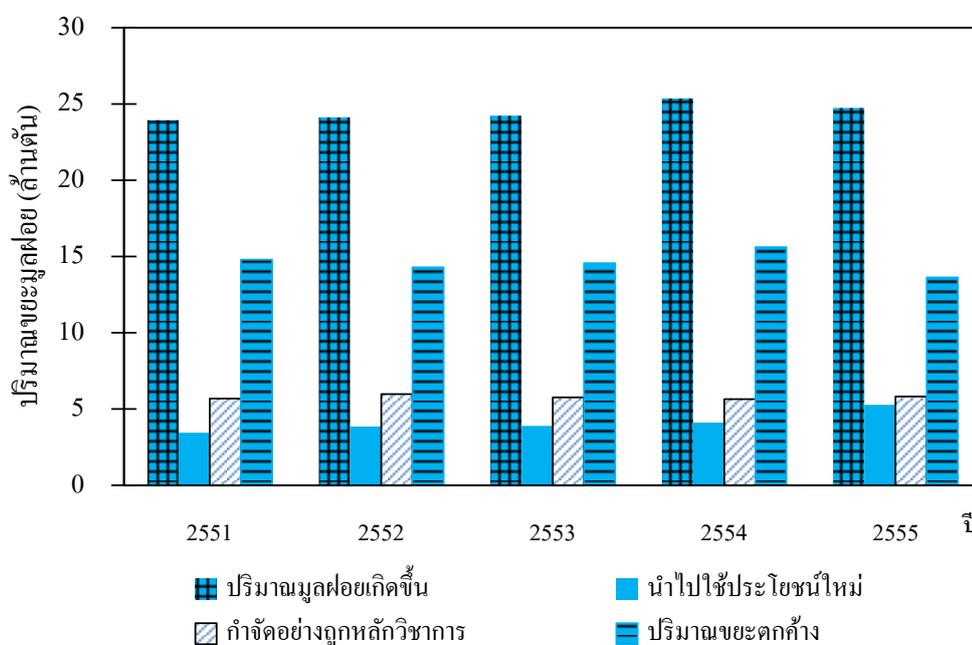
ในการจำแนกประเภทของขยะในต่างประเทศ (The American Public Work Association: APWA) พบว่า ขยะมูลฝอยสามารถแบ่งออกเป็น 7 ชนิด ตามชนิดของขยะ ค่าความชื้น องค์ประกอบของวัสดุที่เผาไหม้ไม่ได้ และค่าความร้อนที่ให้ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ชนิดของขยะที่แบ่งตามองค์กร APWA ในสหรัฐอเมริกา

ชนิดของขยะ	องค์ประกอบหลัก
Type 0	เป็นส่วนผสมของวัสดุที่สามารถเผาไหม้ได้ดีมาก เช่นกระดาษ กลังกระดาษ กลังไม้ จากการค้าและอุตสาหกรรม ซึ่งส่วนผสมนี้ประกอบด้วยถุงพลาสติก 10% กระดาษเคลือบกระดาษกลัง เศษผ้า เศษพลาสติกและเศษยาง
Type 1	เป็นส่วนผสมของวัสดุที่สามารถเผาไหม้ได้ดี เช่น กระดาษ กลังกระดาษ เศษไม้ ไม้กวาดจากบ้านเรือนและการค้า ซึ่งส่วนผสมนี้ประกอบด้วยเศษอาหารจากภัตตาคารถึง 20% หากแต่มีองค์ประกอบของกระดาษขาว เศษพลาสติกและเศษยางเพียงเล็กน้อย
Type 2	เป็นส่วนผสมของขยะแห้งและขยะเปียกโดยประมาณ ส่วนมากเป็นขยะที่มาจากอพาร์ทเมนต์และที่อยู่อาศัย ขยะประเภทนี้มีความชื้นเป็นองค์ประกอบถึง 50% มีวัสดุที่เผาไหม้ไม่ได้ 7% และให้ค่าความร้อนถึง 43,000 BTU
Type 3	เป็นขยะประเภทขยะเปียก เช่น วัสดุที่มาจากเศษอาหารสัตว์ และผักผลไม้จากโรงแรม โรงพยาบาล และสถานที่อื่น ๆ ขยะประเภทนี้มีความชื้นเป็นองค์ประกอบถึง 70% เป็นวัสดุที่เผาไหม้ไม่ได้ 5% และมีค่าความร้อนประมาณ 25,000 BTU
Type 4	เป็นขยะที่ได้มาจากของเสียจากมนุษย์และสัตว์ เช่น ซากศพและอวัยวะต่าง ๆ ซึ่งมีความชื้นเป็นองค์ประกอบถึง 85% มีวัสดุที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้ 5% และมีค่าความร้อนประมาณ 10,000 BTU
Type 5	เป็นขยะประเภทแก๊ส และของเหลวหรือกึ่งของเหลวเช่น สี น้ำมันดิน สารทำละลาย สลัดจ์ควันจากโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ ซึ่งค่าความร้อนขึ้นอยู่กับชนิดสารประกอบในขยะ
Type 6	เป็นขยะที่เป็นของเหลือใช้ประเภทของแข็ง เช่น เศษยาง พลาสติก เศษไม้จากอุตสาหกรรมต่าง ๆ ซึ่งค่าความร้อนขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่เป็นองค์ประกอบในขยะนั้น ๆ

### 2.2.1 สถิติปริมาณขยะมูลฝอยของประเทศไทย

สถานการณ์ปัญหาขยะมูลฝอยของประเทศไทย เข้าขั้นวิกฤตที่ต้องได้รับการแก้ไขเร่งด่วน นับตั้งแต่ปี 2551 มีขยะมูลฝอยตกค้างที่ไม่ได้รับการกำจัดสูงถึงปีละ 13 ล้านตัน ในปี พ.ศ. 2555 ประมาณการว่าประเทศไทยมีปริมาณขยะมูลฝอยชุมชนที่เกิดขึ้นประมาณ 24.73 ล้านตัน (เฉลี่ยประมาณ 67,577 ตัน/วัน) โดยขยะมูลฝอยที่สามารถเก็บขนและรวบรวมได้มีเพียง 15.90 ล้านตัน (เฉลี่ยประมาณ 43,561 ตัน/วัน) ในปริมาณที่เก็บขนได้ มีการกำจัดอย่างถูกต้องตามหลักวิชาการเพียง 5.83 ล้านตัน (เฉลี่ยประมาณ 15,952 ตันต่อวัน) ได้แก่ เมืองพัทยา เขตกรุงเทพมหานคร เทศบาล และ องค์การบริหารส่วนตำบล โดยมีปริมาณ 350 9,750 4,375 และ 1,477 ตัน/วัน ตามลำดับ ข้อมูลสถิติปริมาณขยะมูลฝอยของประเทศไทยจากปี 2551 – 2555 ดังแสดงในรูปที่ 2.1



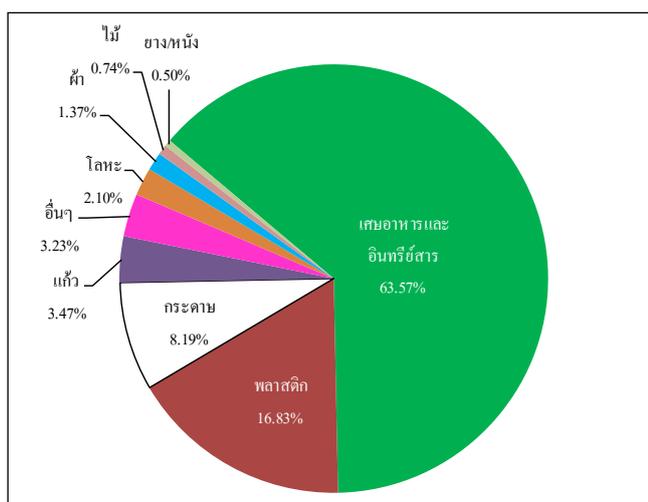
รูปที่ 2.1 ข้อมูลสถิติปริมาณขยะมูลฝอยของประเทศไทยจาก ปี 2551 – 2555  
(ที่มา : กรมควบคุมมลพิษ, 2556)

การจัดการขยะมูลฝอยของประเทศไทยในปัจจุบัน จะจัดการโดย 1) ใช้เตาเผาไหม้ 1% 2) ผลิตเป็นปุ๋ยอินทรีย์ 2% 3) ฝังกลบ 33% 4) กองทิ้ง/เผากลางแจ้ง 63% ข้อมูลปี 2555 มีขยะมูลฝอย ตกค้างกว่า 13.62 ล้านตัน ที่ถูกทิ้ง/เผากลางแจ้ง นอกจากนี้ยังมีการลักลอบนำไปทิ้ง ในบ่อดินเก่า หรือพื้นที่รกร้าง โดยเฉพาะขยะจากองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นขนาดเล็กและในพื้นที่ห่างไกล ซึ่งยังมีระบบการเก็บรวบรวมไม่ครอบคลุมพื้นที่บริการ โดยมีองค์การบริหารส่วนตำบลเพียง 500 แห่ง ที่นำขยะไปกำจัดร่วมกับเทศบาลที่มีระบบ เห็นได้ว่าตามสภาพปัญหาในปัจจุบัน จำนวนของระบบ กำจัดขยะมูลฝอยที่มีอยู่ไม่เพียงพอในการรองรับขยะมูลฝอยที่เกิดขึ้น (กรมควบคุมมลพิษ, 2556)

### 2.2.2 องค์ประกอบของขยะมูลฝอย

ขยะมูลฝอยชุมชนที่เป็นสิ่งเหลือใช้จากกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์เป็นของเสียต้องมีวิธีการกำจัดอย่างเหมาะสม เพื่อไม่ให้ส่งผลต่อสิ่งแวดล้อมรอบด้าน รวมทั้งสุขภาพของมนุษย์ การที่จะหาวิธีการ หรือเทคโนโลยีมาใช้ในการกำจัดขยะได้อย่างเหมาะสมต้องพิจารณาถึงองค์ประกอบ และคุณสมบัติของขยะ เป็นสำคัญ

ข้อมูลเฉลี่ยขององค์ประกอบของขยะในประเทศไทย ปี 2547 (กรมควบคุมมลพิษ, 2547) ค่าเฉลี่ยขององค์ประกอบที่เผาไหม้ได้ (Combustible waste) สูงถึง 94.43% และเผาไหม้ไม่ได้ (Non-combustible waste) มีเพียง 5.57% ดังแสดงใน รูปที่ 2.2 โดยการจำแนกประเภทขององค์ประกอบ คุณสมบัติต่างๆ ดังแสดงใน ตารางที่ 2.2, ตารางที่ 2.3, และตารางที่ 2.4 ซึ่งเป็นข้อยืนยันว่าขยะชุมชนประเทศไทยยังมีพลังงานเหลืออยู่และสามารถเปลี่ยนรูปกลับมาใช้ประโยชน์ได้



รูปที่ 2.2 องค์ประกอบขยะชุมชนเฉลี่ยทั่วประเทศไทย (ที่มา:กรมควบคุมมลพิษ, 2547)

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบของขยะมูลฝอยชุมชนทั่วประเทศไทย โดยแบ่งออกเป็น 10 ประเภท

Combustible wastes	Non - combustible wastes
1. ผัก ผลไม้ เศษอาหาร	7. แก้ว
2. กระดาษ	8. โลหะ
3. พลาสติก	9. หิน กระเบื้อง
4. ผ้า	10. อื่นๆ
5. ไม้	
6. ยางและหนัง	

ที่มา : กรมควบคุมมลพิษ, 2547

ทั้งนี้เมื่อพิจารณาองค์ประกอบของขยะมูลฝอยของประเทศไทย ซึ่งเป็นผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของขยะชุมชนในเทศบาลนครเชียงใหม่ ดังแสดงใน ตารางที่ 2.3 และ ตารางที่ 2.4 ก็พบว่าขยะดังกล่าว มีค่าความร้อนสูง ตลอดจนมีองค์ประกอบของธาตุหลักของอินทรีย์สาร คือ คาร์บอน และไฮโดรเจน ค่อนข้างสูง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการผลิตพลังงานได้ ซึ่งจะเห็นว่าองค์ประกอบของขยะมูลฝอยมีคุณสมบัติเป็นชีวมวล เนื่องจากมีธาตุคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบหลัก สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงและเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานได้ (Stiegel and Maxwell, 2001; Alexander K., 2002; Malkow T., 2003; Belgiorno et al. 2003; Kwak et al., 2006)

ตารางที่ 2.3 ค่าปริมาณความร้อนของขยะชุมชนทั่วไป

องค์ประกอบ	ค่าความร้อน (kJ/kg)
เศษอาหาร	16,747
กระดาษ	16,282
กล่องกระดาษ	32,564
พลาสติก	17,445
สิ่งทอ	17,445
ยาง	17,445
หนัง	6,513
เศษหญ้า, ใบไม้	18,608

หมายเหตุ : <sup>(1)</sup> พลังงานจากวัสดุพวกลอกหรือวัสดุเคลือบผิว (ที่มา : Kreit, F., P.E., 1993)

ตารางที่ 2.4 ค่าปริมาณความร้อนของขยะชุมชนต่างๆ ไป

องค์ประกอบ	ค่าความร้อน (kJ/kg)
สารอินทรีย์	
แก้ว	698 <sup>(1)</sup>
กระป๋อง	-
อะลูมิเนียม	698 <sup>(1)</sup>
โลหะอื่นๆ	6,978 <sup>(1)</sup>
ดิน, ใต๋	-
ค่าเฉลี่ยขยะชุมชนทั่วไป	11,630

หมายเหตุ : <sup>(1)</sup> พลังงานจากวัสดุพวกลากหรือวัสดุเคลือบผิว (ที่มา : Kreit, F., P.E., 1993)

ตารางที่ 2.5 ส่วนประกอบทางเคมีของขยะชุมชนโดยทั่ว ๆ ไป

องค์ประกอบ	C	H	O	N	S	Ash
สารอินทรีย์						
เศษอาหาร	5	6.4	37.6	2.6	0.4	5.0
กระดาษ	5	6.0	44.0	0.3	0.2	6.0
กล่องกระดาษ	5	5.9	44.6	0.3	0.2	5.0
พลาสติก	5	7.2	22.8	-	-	10.0
สิ่งทอ	5	6.6	31.2	4.6	0.15	2.5
ยาง	5	10.0	-	2.0	-	10.0
หนัง	5	8.0	11.6	10.0	0.4	10.0
เศษหญ้า, ใบไม้	5	6.0	38.0	3.4	0.3	4.5
ไม้	5	6.0	42.7	0.2	0.1	1.5
สารอนินทรีย์						
แก้ว	0.5	0.1	0.4	< 0.1	-	98.9
โลหะ	4.5	0.6	4.3	< 0.1	-	90.5
ฝุ่น, ใต๋	26.3	3.0	2.0	0.5	0.2	68.0

ที่มา : Kreit, F., P.E., 1993

ทั้งนี้ องค์ประกอบและคุณสมบัติของขยะจะเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพของภูมิอากาศ ฤดูกาล และพฤติกรรมทางเศรษฐกิจสังคม วิถีของชีวิตแต่ละชุมชน/เมือง อย่างไรก็ตามคุณภาพรวมของขยะในจังหวัดต่าง ๆ ในประเทศไทย ยังคงมีองค์ประกอบต่างๆ และคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกัน (กระทรวงพลังงาน, 2551) ข้อมูลแสดงใน ตารางที่ 2.5 และ ตารางที่ 2.6 เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลปี 2547 พบว่าองค์ประกอบของขยะมีความแปรปรวนค่อนข้างน้อย

โดยพบว่ามีองค์ประกอบที่สามารถเผาไหม้ได้เฉลี่ย 80.83-89.79% ค่าความร้อนเฉลี่ยสูงกว่า 16,000 MJ/kg ซึ่งแสดงให้เห็นถึงศักยภาพที่สามารถเก็บคืนพลังงานมาใช้ได้ (Waste-to-Energy) ซึ่งเป็นอีกหนึ่งวิธีของการใช้พลังงานให้เกิดประโยชน์และคุ้มค่า อย่างไรก็ตามขยะในประเทศไทยมีความชื้นสูงมาก โดยเฉลี่ย 50-58 %รวมทั้งมีปริมาณเถ้าสูงเช่นเดียวกัน โดย 21-28% คุณสมบัตินี้ถือเป็นจุดด้อยของการนำขยะมาใช้ประโยชน์ในรูปของการผลิตพลังงานและเชื้อเพลิงทดแทนโดยเทคโนโลยีทางความร้อน (Thermal conversion technology) การศึกษาวิธีการที่เหมาะสมสำหรับเทคโนโลยีทางความร้อนจึงเป็นประเด็นที่น่าสนใจ เพื่อให้สามารถผลิตพลังงานจากขยะได้อย่างคุ้มค่า รวมทั้งไม่ปลดปล่อยมลพิษออกสู่สิ่งแวดล้อมด้วย

ตารางที่ 2.6 องค์ประกอบของขยะมูลฝอยในประเทศไทย

พื้นที่	องค์ประกอบ (%wt)								
	เศษอาหาร	กระดาษ	พลาสติก	ยาง/หนัง	เศษผ้า	ใบ/กิ่งไม้	แก้ว/หิน	โลหะ	อื่นๆ
<b>ภาคเหนือตอนล่าง/บน</b>									
เชียงใหม่	59.32	10.69	11.58	0.95/3.55	1.42	2.49	3.19/0.42	5.64	0.75
พิษณุโลก	49.6	8.94	17.6	2.3/0.92	3.09	11.4	0.92/0.92	1.38	2.93
ลำปาง	53.19	7.59	9.01	1.59/2.56	2.3	5.65	2.74/5.3	8.12	1.98
นครสวรรค์	61.4	3.9	14.6	1.1/3.23	6.92	2.31	1.54/1.54	1.15	2.31
<b>ค่าเฉลี่ยของภาค</b>	<b>55.88</b>	<b>7.78</b>	<b>13.20</b>	<b>1.49/2.57</b>	<b>3.43</b>	<b>5.46</b>	<b>2.2/2.05</b>	<b>4.07</b>	<b>2.00</b>
<b>ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ</b>									
นครราชสีมา	44.6	17.2	10.66	1.6	1.28	1.26	1.05	1.05	21.31
ขอนแก่น	52.2	1.69	4.06	4.72	7.55	2.83	13.94	6.6	4.41
อุบลราชธานี	47.85	11.2	19.14	0.79	0.79	2.39	8.29	1.59	7.96
อุดรธานี	67.2	11.4	10.5	0.8	1.6	0	6.1	0.8	1.6
<b>ค่าเฉลี่ยของภาค</b>	<b>52.96</b>	<b>10.37</b>	<b>11.09</b>	<b>1.98</b>	<b>2.81</b>	<b>1.62</b>	<b>7.35</b>	<b>2.51</b>	<b>8.82</b>

ที่มา : กระทรวงพลังงาน, 2551

ตารางที่ 2.6 องค์ประกอบของขยะมูลฝอยในประเทศไทย (ต่อ)

พื้นที่	องค์ประกอบ (%wt)								
	เศษอาหาร	กระดาษ	พลาสติก	ยาง/หนัง	เศษผ้า	ใบ/กิ่งไม้	แก้ว/หิน	โลหะ	อื่นๆ
ภาคกลาง และภาคตะวันออก									
ชลบุรี	63.25	5.25	4.5	1.88/3.13	1.25	5.75	2.5/5.0	5	2.48
พัทธยา	64.3	2.8	20.85	1.1/1.66	1.1	1.14	1.1/1.2	1.47	3.27
นครปฐม	48.1	2.63	16.91	4.51/4.86	2.06	10.06	1.71/0.86	7.2	1.1
ราชบุรี	43.6	5.25	14.73	2.29/0.58	6.87	18.8	2.29/1.15	2.53	1.19
อยุธยา	49.5	3.9	11.76	1.8/2.70	3.15	10.9	2.67/2.06	5.43	6.11
ปทุมธานี	9.6	4.5	24	2/1.9	5.5	6.5	1.7/1.00	2.9	0.4
ค่าเฉลี่ยของภาค	50.06	4.06	15.46	2.26/2.47	3.32	8.86	2.00/1.88	4.09	2.55
ภาคใต้									
หาดใหญ่	56.5	5.25	14.2	1.46/1.2	0.73	11.23	2.58/0.39	3.5	3.14
นครศรีธรรมราช	39.5	14.2	18.3	3.85/2.90	1.38	5.3	4.77/1.15	6	2.65
ภูเก็ต	49.1	15.2	12	0.50/0.50	3.1	1.2	10.20/2.5	1.2	4.5
สุราษฎร์ธานี	50	13.3	13.97	0.85/0.85	1.7	8.5	5.11/1.28	2.98	1.46
ค่าเฉลี่ยของภาค	48.78	11.99	14.62	1.67/1.36	1.73	6.56	5.67/1.33	3.42	2.94

ที่มา : กระทรวงพลังงาน, 2551

ปัจจุบันศักยภาพการนำขยะมูลฝอยมาผลิตพลังงานไฟฟ้าและเชื้อเพลิงทดแทนมีเพียง 0.84 % (กรมควบคุมมลพิษ, 2551) ประเทศไทยใช้ประโยชน์ขยะในรูปการนำมาผลิตพลังงานไฟฟ้าและความร้อนเพียง 0.126 ล้านตัน จากขยะทั่วประเทศ 15.03 ล้านตัน) จะเห็นว่าขยะนั้นไม่ใช่ของเหลือทิ้งที่ไร้ค่า แต่สามารถนำกลับมาเป็นพลังงานทดแทนได้ดี โดยเฉพาะในภาวะที่ราคาน้ำมันเชื้อเพลิงสูงขึ้นเรื่อย ๆ

ตารางที่ 2.7 คุณสมบัติของขยะมูลฝอยในประเทศไทย

คุณสมบัติ / พื้นที่	ความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )	ความชื้น (%)wb	ความร้อนของขยะแห้ง HHV (kJ/kg)	ปริมาณเถ้า (%)db	ปริมาณสารที่เผาไหม้ได้ (%)db
<b>ภาคเหนือตอนล่าง/บน</b>					
เชียงใหม่	215	47	23,675.78	27.33	90
พิษณุโลก	295	68	15,661.15	32	93.85
ลำปาง	230	54	18,597.62	21.88	81.85
นครสวรรค์	285	65	17,162.85	30.67	93.46
ค่าเฉลี่ยของภาค	256.25	58.50	18,774.35	27.97	89.79
<b>ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ</b>					
นครราชสีมา	200-250	50	12,628.48	-	76.6
ขอนแก่น	176	52	19,476.05	-	73.05
อุบลราชธานี	187	50	13,619.85	-	82.16
อุดรธานี	204	50	18,568.34	-	91.5
ค่าเฉลี่ยของภาค	191.7-204.2	50.5	16,104.55	-	80.83
<b>ภาคกลาง และภาคตะวันออก</b>					
ชลบุรี	350	59	15,238.67	27.44	85.02
พัตยา	207.5	70	16,020.89	30.89	92.96
นครปฐม	281	45	16,238.41	32.77	89.13
ราชบุรี	228	64	14,222.20	30.89	92.12
อยุธยา	250	60	18,007.82	19.89	83.71
ปทุมธานี	245	49	22,291.21	18.77	94
ค่าเฉลี่ยของภาค	260.25	57.83	17,003.20	26.78	89.49
<b>ภาคใต้</b>					
หาดใหญ่	200	57	20,074.22	17.11	90.57
นครศรีธรรมราช	228	53	15,523.11	31	85.43
ภูเก็ต	260	40	17,986.90	6.33	81.6
สุราษฎร์ธานี	170	63	13,996.32	32	89.17
ค่าเฉลี่ยของภาค	214.5	53.25	16,895.14	21.61	86.69

ที่มา : กระทรวงพลังงาน, 2551

## 2.2.3 ลักษณะสมบัติของขยะมูลฝอยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ข้อมูลคุณลักษณะสมบัติของขยะมูลฝอยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ้างอิงจาก ข้อมูลรายงานการวิจัยของ วีรชัย อัจหาญ และคณะ (2553) โครงการศึกษาและพัฒนาต้นแบบการจัดการขยะชุมชนเพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทน (กรณีศึกษา : ชุมชนขนาดเล็กปริมาณขยะ 3-5 ตัน/วัน) ซึ่งมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

### 2.2.3.1 ความหนาแน่น

ความหนาแน่นของขยะมูลฝอยในขณะขนส่งเฉลี่ย 0.103 และ 0.097 กิโลกรัมต่อลิตร และมีความหนาแน่นปกติเท่ากันคือ 0.204 กิโลกรัมต่อลิตร เนื่องจากองค์ประกอบของขยะมูลฝอยในมหาวิทยาลัยเหมือนกันทุกวัน ความหนาแน่นจึงมีค่าใกล้เคียงกัน

### 2.2.3.2 องค์ประกอบโดยน้ำหนัก

องค์ประกอบขยะมูลฝอยในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยการจำแนกเป็น 1) ประเภทที่เผาไหม้ได้ (Combustible composition) มีสัดส่วนเท่ากับ 93.9% โดยน้ำหนัก 2) ประเภทที่เผาไหม้ไม่ได้ (Non-combustible composition) มีสัดส่วนเท่ากับ 6.1% โดยน้ำหนัก ดังกล่าวสามารถจำแนกองค์ประกอบในแต่ละประเภท ดังรายละเอียดต่อไปนี้

- ประเภทที่เผาไหม้ได้ (Combustible composition) องค์ประกอบโดยน้ำหนักเฉลี่ยซึ่งแบ่งตามประเภทวัสดุประกอบไปด้วย เศษอาหาร 49.6 % พลาสติก 18.7 % กระดาษ 15.9 เศษไม้และใบไม้ 6.9 % ผ้า 1.1 % โฟม 1% และหนัง/ยาง 0.7 %

- ประเภทที่เผาไหม้ไม่ได้ (Non-combustible composition) องค์ประกอบโดยน้ำหนักเฉลี่ยซึ่งแบ่งตามประเภทวัสดุประกอบไปด้วย แก้ว 3.2 % กระจก โลหะ 1.2 % โลหะ 0.5 % กระจก 0.3 % และขยะอันตราย (หลอดไฟฟ้าและแบตเตอรี่) 0.9 %

ซึ่งจะเห็นได้ว่าองค์ประกอบโดยน้ำหนักส่วนใหญ่ คือ เป็นประเภทที่เผาไหม้ได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเศษอาหาร เนื่องจากเศษอาหารมีความหนาแน่นสูง และเป็นขยะมูลฝอยที่เกิดจากชีวิตประจำวันของมนุษย์ รองลงมาคือ วัสดุจำพวกพลาสติก ซึ่งอยู่ในรูปของบรรจุภัณฑ์ และเป็นส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์ที่พบเห็นได้ทั่วไป จึงมีการผลิตขยะมูลฝอยจำพวกพลาสติกเป็นจำนวนมาก เช่นเดียวกับกับขยะมูลฝอยจำพวกกระดาษ ซึ่งเกิดจากการทิ้งบรรจุภัณฑ์ เศษสิ่งพิมพ์ และเอกสารต่างๆ ที่ไม่ได้ใช้ประโยชน์แล้ว นอกจากนั้นแล้วจากการสำรวจพบว่า ขยะอันตรายซึ่งได้จัดอยู่ในกลุ่มขยะมูลฝอยประเภทอื่นๆ นั้นจะพบเห็นในลักษณะของหลอดไฟฟ้า และแบตเตอรี่ เป็นส่วนใหญ่

### 2.2.3.3 ลักษณะทางกายภาพ

#### 1) ขนาด

เมื่อจัดประเภทของขยะมูลฝอยตามขนาด พบว่า ขยะมูลฝอยส่วนใหญ่มีขนาดใหญ่มากกว่า 76 มิลลิเมตร (43.3 %wt) รองลงมาคือขยะมูลฝอยที่มีขนาดเล็กกว่า 38 มิลลิเมตร (31.4 %wt) และขยะมูลฝอยที่อยู่ในช่วง 38-76 มิลลิเมตร มีปริมาณน้อยที่สุด (26.3 %wt) ทั้งนี้โดยส่วนใหญ่แล้ว ขยะมูลฝอยที่มีขนาดใหญ่มากกว่า 76 มิลลิเมตร คือ เศษเอกสาร สิ่งพิมพ์ บรรจุภัณฑ์ที่ไม่ใช้แล้ว และเศษอาหารบางประเภท

#### 2) ความชื้น

ขยะมูลฝอยในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มีปริมาณความชื้นเฉลี่ยสูงถึง 62.7 % (wb) ความชื้นที่พบต่ำที่สุดคือ 55 % (wb) และความชื้นสูงสุด คือ 68 % (wb) เนื่องจากค่าความชื้นส่วนใหญ่คือปริมาณน้ำในเศษอาหาร ซึ่งส่วนใหญ่เป็นขยะมูลฝอยจากอาคาร โรงอาหาร ในมหาวิทยาลัย

### 2.2.3.4 ลักษณะสมบัติทางเคมี

ลักษณะสมบัติทางเคมีของขยะมูลฝอยในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มีองค์ประกอบของคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสเฉลี่ย 16.7, 1.9, 1.7 %wt และ 4.8 มิลลิกรัม-ฟอสฟอรัส ต่อ กิโลกรัมขยะมูลฝอย แสดงให้เห็นว่าขยะมูลฝอยส่วนใหญ่ มีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบที่สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้ ควรอย่างยิ่งที่ต้องพิจารณาการกำจัดร่วมกับการใช้ของเสียให้เกิดประโยชน์ (Waste utilizations) อาทิ การผลิตแก๊สชีวภาพ การผลิตเชื้อเพลิงขยะ (RDF) หรือ ปุ๋ยอินทรีย์ เป็นต้น ทั้งนี้ต้องพิจารณาถึงเทคโนโลยีที่เหมาะสมด้วย เช่นเดียวกัน

### 2.2.3.5 ค่าความร้อนของขยะมูลฝอย

ค่าความร้อนของขยะมูลฝอย ในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มีค่าความร้อนสูง (High Heating Value: HHV) ประมาณ 18,557 กิโลจูลต่อกิโลกรัม และค่าความร้อนต่ำ (Low Heating Value) ประมาณ 5,363 กิโลจูลต่อกิโลกรัม ที่ความชื้นปกติ (55-60% (wb)) ซึ่งเป็นค่าที่สูงเพียงพอในการกำจัดด้วยความร้อน ทั้งนี้เนื่องจากขยะมูลฝอยนั้นมีองค์ประกอบที่สามารถเผาไหม้ได้ถึง 93.9%

## 2.3 เทคโนโลยีการผลิตพลังงานจากขยะ

ในอดีตการกำจัดขยะจะใช้วิธีการฝังกลบ (Landfill) เป็นส่วนใหญ่เพราะเป็นวิธีที่ง่ายและสะดวก แต่เนื่องจากในปัจจุบันแหล่งฝังกลบมีปริมาณจำกัด รวมทั้งยังทำให้เกิดปัญหาการสะสม

ของมลพิษ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นในการนำขยะเหล่านี้มาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดและเกิดมลพิษน้อยที่สุด โดยทั่วไปแล้วเทคโนโลยีการผลิตพลังงานจากขยะในปัจจุบันมีดังนี้

- 1) เทคโนโลยีการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง (Refuse-derived fuel)
- 2) เทคโนโลยีทางความร้อน อาทิ เทคโนโลยีเตาเผา (Incineration) เทคโนโลยีการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากขยะ (Gasification) เทคโนโลยีการเปลี่ยนขยะให้เป็นเชื้อเพลิงเหลว (Pyrolysis oil) เทคโนโลยีการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากขยะเตาปฏิกรณ์พลาสมา (Plasma gasification)
- 3) เทคโนโลยีทางชีวภาพ เทคโนโลยีการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic digestion, AD) เทคโนโลยีการผลิตแก๊สชีวภาพจากระบบฝังกลบ (Landfill gas to energy)

ซึ่งแต่ละเทคโนโลยีก็มีความเหมาะสม มีข้อดี ข้อเสียแตกต่างกันไปตามองค์ประกอบของขยะ และสภาพพื้นที่นั้นๆ ในงานวิจัยเล่มนี้ จะนำเสนอเฉพาะข้อมูลในส่วนของเทคโนโลยีการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง และ เทคโนโลยีทางความร้อน โดยมีรายละเอียด ตามหัวข้อที่จะกล่าวต่อไป

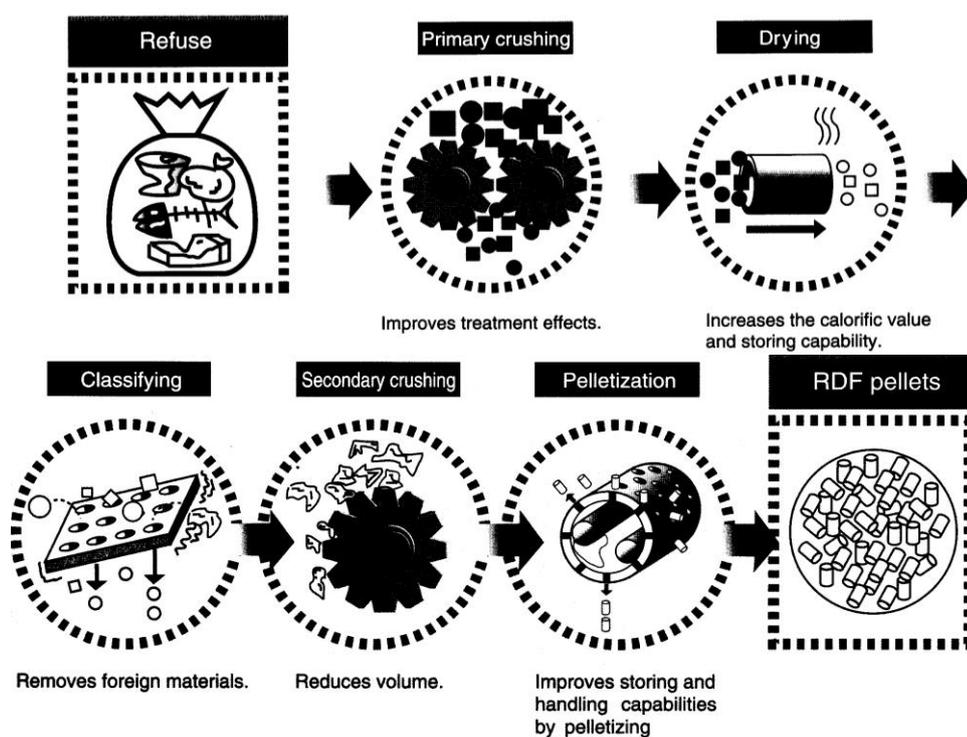
## 2.4 เทคโนโลยีการผลิตเชื้อเพลิงขยะ (Refuse-derived fuel)

เทคโนโลยีการผลิตเชื้อเพลิงจากขยะมูลฝอยไม่ได้มีวัตถุประสงค์หลักในการกำจัดหรือทำลายขยะมูลฝอยเพื่อผลิตพลังงานโดยตรง เพียงแต่เป็นการเปลี่ยนรูปขยะมูลฝอยโดยคัดเล็กรองค์ประกอบของขยะมูลฝอยที่มีพลังงานสูงมาสู่กระบวนการ โดยการคัดแยกและแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงที่สามารถนำไปใช้ในการผลิตพลังงานต่อไป เทคโนโลยีดังกล่าวมีข้อได้เปรียบเนื่องจากสามารถกระจายไปดำเนินการตามจุดต่างๆ ที่เป็นแหล่งกำเนิดขยะมูลฝอยได้โดยไม่ต้องมีการขนย้ายขยะไปสู่แหล่งกำจัด เชื้อเพลิงที่ได้สามารถเก็บรักษาและนำไปผลิตพลังงานได้เมื่อเวลาที่ต้องการ

เนื่องจากความหลากหลายในองค์ประกอบต่างๆ ที่ประกอบกันขึ้นเป็นขยะมูลฝอย ซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะชุมชนและตามฤดูกาล อีกทั้งขยะมูลฝอยเหล่านี้มีค่าความร้อนต่ำมีปริมาณเถ้าและความชื้นสูงสิ่งเหล่านี้ก่อความยุ่งยากให้กับผู้ออกแบบ โรงเผาและผู้ปฏิบัติงานและส่งผลให้การควบคุมการเกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทำได้ยาก การแปรรูปขยะมูลฝอยโดยผ่านกระบวนการจัดการต่างๆ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมีของขยะมูลฝอยเพื่อทำให้กลายเป็นเชื้อเพลิงที่ได้จากขยะมูลฝอย (Refuse-derived fuel: RDF) ซึ่งเชื้อเพลิงขยะที่ได้นั้นสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตพลังงานได้

เชื้อเพลิงขยะ (RDF) หมายถึง ขยะมูลฝอยที่ผ่านกระบวนการจัดการต่างๆ เช่น การคัดแยกวัสดุที่เผาไหม้ไม่ได้ ออก การฉีกหรือตัดขยะมูลฝอยออกเป็นชิ้นเล็กๆ เชื้อเพลิงขยะที่ได้นี้จะมีค่าความร้อนสูงกว่า หรือมีคุณสมบัติเป็นเชื้อเพลิงที่ดีกว่าการนำขยะมูลฝอยที่เก็บรวบรวมมาใช้โดยตรง เนื่องจากมีองค์ประกอบทั้งทางกายภาพและทางเคมีที่สม่ำเสมอกว่า

การแปรรูปขยะมูลฝอยให้กลายเป็นเชื้อเพลิงนั้น จำเป็นต้องมีกระบวนการจัดการไม่ว่าจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเชื้อเพลิงขยะที่ต้องการ การออกแบบขั้นตอนต่างๆ ในการแปรรูปขยะมูลฝอยให้เป็นเชื้อเพลิงนั้นขึ้นอยู่กับว่ามีการจัดการกับขยะอย่างไรบ้าง ตัวอย่างเช่น ถ้าขยะได้มีการคัดแยกส่วนที่สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ได้จากแหล่งกำเนิดก่อนอยู่แล้ว ดังนั้นในกระบวนการแปรรูปขยะเป็นเชื้อเพลิงก็อาจจะไม่จำเป็นต้องมีขั้นตอนการคัดแยกโลหะหรือแก้วก็ได้ ดังแสดงใน รูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ขั้นตอนในการแปรรูปขยะเป็นเชื้อเพลิงขยะ (Diaz et al., 2006)

### 2.4.1 มาตรฐานการแบ่งประเภทของเชื้อเพลิงขยะ (RDF)

มาตรฐานการแบ่งประเภทของเชื้อเพลิงขยะ (RDF) สามารถแบ่งออกเป็น 2 ระบบ คือ ระบบประเทศสหรัฐอเมริกา และ ระบบทางกลุ่มประเทศยุโรป ระบบทางประเทศสหรัฐอเมริกา แบ่งออกเป็น 7 ประเภท (ASTM standard) โดยแบ่งตามขนาดและลักษณะของวัสดุของเสียนั้น ความแตกต่างของ RDF ทั้ง 7 ประเภท แสดงดัง ตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 การจัดประเภทของเชื้อเพลิงขยะ (RDF) ประเภทต่าง ๆ

ประเภท RDF	รูปแบบ	คุณลักษณะ	ระบบการเผาไหม้
RDF-1	Raw (MSW)	เป็นขยะอยู่ในรูปของขยะที่ได้รับมาโดยตรงจากผู้ทิ้ง โดยไม่ผ่านกระบวนการใด ๆ	Stoker
RDF-2	Coarse (c-RDF)	เป็นขยะที่ผ่านการคัดแยกเอาโลหะเหล็กออกไป และทำให้มีขนาดลดลงแบบหยาบ ๆ	FBC, MFC
RDF-3	Fluff (f-RDF)	เป็นขยะที่ผ่านกระบวนการบดจนเหลือเพียงวัสดุที่เผาไหม้ได้เท่านั้นจนได้ขยะที่ 95% โดยน้ำหนักของขยะสามารถผ่านตะแกรงร่อนขนาด 50 ตารางมิลลิเมตรได้	Stoker
RDF-4	Powder	เป็นขยะจำพวกวัสดุที่เผาไหม้ได้เท่านั้น โดยที่ 95% โดยน้ำหนักของขยะสามารถผ่านตะแกรงร่อนขนาด 2.5 ตารางมิลลิเมตรได้	FBC, PF
RDF-5	Densified (d-RDF)	เป็นขยะที่ผ่านกระบวนการบดจนเหลือเพียงวัสดุที่เผาไหม้ได้ที่นำมาอัดให้อยู่ในรูปแบบของอัดเม็ด อัดแท่ง หรือก้อนเท่านั้น	FBC, MFC
RDF-6	Liquid	เป็นขยะจำพวกวัสดุที่เผาไหม้ได้ในลักษณะของเชื้อเพลิงเหลวเท่านั้น	Swirl burner
RDF-7	Gas	เป็นขยะจำพวกวัสดุที่เผาไหม้ได้ในลักษณะของเชื้อเพลิงประเภทแก๊สเท่านั้น	Burner, IGCC.

ที่มา: ASTM standards E856-83 (2006)

ส่วนระบบของทางกลุ่มประเทศยุโรปไม่ได้มีการแบ่งประเภทของเชื้อเพลิงขยะไว้หลายประเภทเหมือนกับระบบทางประเทศสหรัฐอเมริกาที่มีการกำหนดมาตรฐานที่ชัดเจนเอาไว้ เพียงแต่มีการเรียกประเภทของเชื้อเพลิงขยะตามลักษณะทางกายภาพ ซึ่งกล่าวได้ว่ามี 3 ประเภท ได้แก่ c-RDF (Coarse RDF), f-RDF (Fluff RDF) และ d-RDF (Densified RDF) ซึ่งถ้าจะเทียบกับระบบ

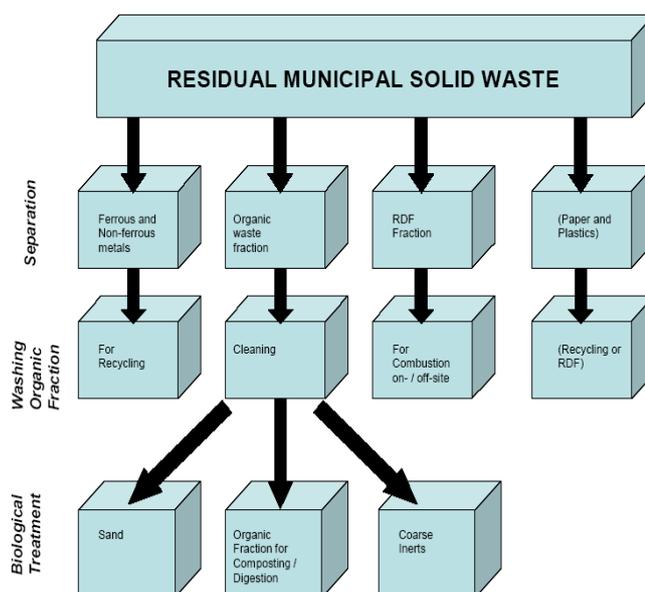
ทางประเทศสหรัฐอเมริกา ก็จะได้ว่า c-RDF เทียบได้กับ RDF-1, f-RDF เทียบได้กับ RDF-3 และ d-RDF เทียบได้กับ RDF-5

#### 2.4.2 กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงขยะ (Refuse-derived fuel production)

กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงขยะ (RDF) ประกอบด้วย 2 ระบบย่อยด้วยกัน ที่เรียกว่า การบำบัดขั้นต้น (Front-end) และ การบำบัดขั้นหลัง (Back-end) การบำบัดขั้นต้นมีจุดประสงค์เพื่อทำการแยกขยะมูลฝอยที่ได้รับออกเป็นส่วนที่สามารถเผาได้ และ ส่วนที่ไม่สามารถเผาได้ เพื่อที่จะทำเป็นวัตถุดิบสำหรับการบำบัดขั้นหลัง ส่วนการบำบัดขั้นหลังหมายถึงกระบวนการเปลี่ยนแปลง RDF ให้เป็นพลังงานซึ่งอาจจะอาศัยเทคโนโลยีทางความร้อนหรือทางชีวภาพ (UNEP, 2005) ทั้งนี้ หากแบ่งตามเทคโนโลยีการผลิต RDF สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทดังนี้

##### 2.4.2.1 Mechanical Biological Treatment plant (MBT)

เป็นกระบวนการที่ผสมผสานกันระหว่างวิธีคัดแยกทางกลและวิธีย่อยสลายทางชีวภาพ รูปที่ 2.4 แสดงกระบวนการดังกล่าว จะพบว่า RDF เป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการดังกล่าวซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการคัดแยกด้วยอุปกรณ์ทางกล กระดาษ พลาสติก เศษเสื้อผ้าจะนำไปทำ RDF ส่วนขยะอินทรีย์จำพวกเศษอาหารซึ่งมีขนาดเล็ก จะนำไปเข้ากระบวนการย่อยสลายซึ่งอาจเป็นแบบใช้ออกซิเจน (Composting) หรือแบบไร้ออกซิเจน (Digestion) และสุดท้ายจะได้สารปรับปรุงคุณภาพดิน (Soil amendment)



รูปที่ 2.4 ผังการทำงานของกระบวนการทางกลและชีวภาพ (Mechanical and Biological Treatment : MBT) (Diaz et al., 2006)

### 2.4.2.2 Autoclaving RDF Plant

ข้อจำกัดของระบบ MBT คือ ประสิทธิภาพของการคัดแยกจะเป็นตัวกำหนดคุณภาพของ RDF และด้วยข้อจำกัดของขยะมูลฝอยที่มีองค์ประกอบที่หลากหลายทำให้ประสิทธิภาพการคัดแยกต่ำ ส่งผลให้คุณภาพของ RDF ต่ำลงไปด้วย เทคโนโลยีในการผลิต RDF อีกแบบหนึ่งคือการแทนที่ระบบคัดแยกขยะมูลฝอยทางกลด้วยไอน้ำ โดยการใช้ไอน้ำอุณหภูมิและความดันสูงพ่นเข้าไปอบขยะ ภายใต้อุณหภูมิและสภาวะที่เหมาะสมจะทำให้โลหะ อโลหะ พลาสติก และสารอินทรีย์แยกตัวออกจากกัน หลังจากนั้นนำไปผ่านกระบวนการคัดขนาดแล้วจะทำให้ได้ RDF และวัสดุรีไซเคิล

อย่างไรก็ดี โดยทั่วไปการผลิต RDF จะประกอบไปด้วยหน่วยปฏิบัติการย่อย ๆ ต่อกัน เพื่อที่จะแยกส่วนที่ไม่ต้องการออกไป ทำให้ได้คุณลักษณะ RDF ที่ต้องการ หน่วยปฏิบัติการย่อยดังกล่าว คือ การร่อน (Screening) การลดขนาด (Size reduction) การคัดแยก (Separation) ทั้งส่วนที่เป็นโลหะ แก้ว รวมไปถึงวัสดุเปื่อย การอบแห้ง (Drying) และ การอัด (Densification) ลำดับการต่อเข้าด้วยกันของหน่วยปฏิบัติการย่อยเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับ ส่วนประกอบของขยะมูลฝอยที่ได้ และคุณภาพของ RDF ที่ต้องการ

## 2.4.3 หน่วยปฏิบัติการในกระบวนการผลิต RDF

### 2.4.3.1 การคัดแยกด้วยแรงงานคน

ขยะประเภท เครื่องใช้ภายในบ้าน เฟอร์นิเจอร์ และขยะอันตรายบางชนิดที่ผสมกันมาสามารถทำได้เบื้องต้น โดยอาศัยแรงงานคนก่อนที่จะส่งต่อไปให้เครื่องจักร ทำให้สามารถแยกขยะที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ เช่น กระดาษ แก้ว/พลาสติก ภาชนะ กระป๋องอลูมิเนียม ช่วงของการคัดแยกโดยอาศัยแรงงานคน

### 2.4.3.2 การลดขนาด (Size reduction)

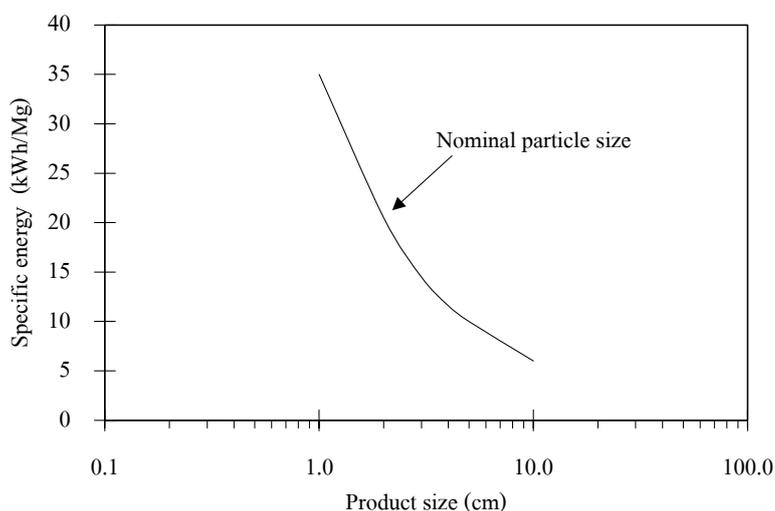
คำว่า การลดขนาด (Size reduction) ในการจัดการขยะแข็ง มีความหมายคล้ายกับ Shredding และ Grinding แต่คำว่า Shredding โดยทั่วไปจะหมายถึงการลดขนาดของขยะผสม ในขณะที่ Grinding จะหมายถึงการลดขนาดของวัสดุประเภทแก้ว การลดขนาดเป็นกระบวนการที่สำคัญอันหนึ่งในกระบวนการทางกลเนื่องจากมันจะทำให้ขยะมีขนาดสม่ำเสมอ ในบางครั้งอาจต้องมีการลดขนาดถึง 2-3 ครั้งเพื่อให้ได้ขนาดที่ต้องการสำหรับทำ RDF เครื่อง Shredder สามารถแบ่งออกเป็นหลายชนิดดังนี้

- **Hammer mill** มีอยู่ 2 แบบด้วยกันคือ แบบแนวนอนและแบบแนวตั้ง เครื่อง Hammer mills แบบแนวนอนเป็นที่นิยมสำหรับขยะผสม โดยที่ส่วนประกอบหลักจะ

ประกอบไปด้วย ตัวหมุน (Rotor) ตัวไบริด (Hammer) ตะแกรง (Grate) กรอบหุ้ม (Frame) และ ล้อช่วยแรง (Fly wheel) หลักการทำงานก็คือ ไบริดจะตีขยะจนกระทั่งได้ขนาดเล็กกว่าตะแกรง

- **Shear shredder** เครื่องลดขนาดชนิดนี้จะมีแรงบิดสูงและรอบต่ำ เครื่องจะประกอบไปด้วยเพลลาที่ติดไบริดวางในแนวนอน 2 เพลลาซึ่งหมุนในทิศตรงกันข้าม เนื่องจากเครื่องมีแรงบิดที่สูงและมีการกระทำเป็นแรงเฉือน เครื่องจักรชนิดนี้จึงนิยมใช้ในการลดขนาดของวัสดุที่เหนียวยาก เช่น ยางรถยนต์ อลูมิเนียม และ พลาสติก

การใช้พลังงานเป็นตัวแปรที่สำคัญที่ใช้ในการออกแบบอุปกรณ์ลดขนาด จากการศึกษาของ Diaz et al. (2006) แสดงให้เห็นว่า พลังงานที่ใช้ในการลดขนาดขึ้นอยู่กับขนาดที่ต้องการ ยิ่งต้องการขนาดขยะเล็กเท่าไร ก็ต้องใช้พลังงานเพิ่มขึ้นเท่านั้น ดังแสดงใน รูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ความต้องการพลังงานจำเพาะของการลดขนาดของเสียจากชุมชน  
(ที่มา : Diaz et al., 2006)

#### 2.4.3.3 การร่อน (Screening)

วัตถุประสงค์ของการร่อนก็เพื่อที่จะทำการคัดแยกขนาด การร่อนนี้จะแบ่งวัสดุขยะออกเป็นอย่างน้อย 2 ส่วน คือส่วนที่อยู่บนตะแกรงและส่วนที่ผ่านตะแกรง การร่อนสามารถแบ่งออกเป็นหลายประเภทดังนี้

- **Trommel screen** เครื่องร่อนแบบนี้จะมีลักษณะเป็น โรตารีและมีตะแกรงล้อมรอบ ตัวตะแกรงอาจจะเป็นลวดถักหรือแผ่นเจาะรู เครื่องนี้อาจจะใช้สำหรับผสมขยะ

ชุมชนก่อนที่จะส่งต่อไปเครื่องลดขนาด หรือที่เรียกว่า Pre-trommeling เป็นเครื่องที่ได้รับการยอมรับว่ามีประสิทธิภาพและประสิทธิผลในการทำงานสูง

- **Disc screen** เครื่องร่อนแบบนี้เหมาะสำหรับใช้แยกส่วนที่เป็นอินทรีย์ออกจาก RDF จากกระดาษหรือจากของเสียที่เป็นไม้ เครื่องแบบนี้จะประกอบด้วยเพลลาที่ติดแผ่น Disc หลาย ๆ แผ่นซึ่งมีช่องว่างเท่ากัน เพลลานี้จะวางตัวในแนวนอน ขยะที่มีขนาดเล็กกว่าช่องว่างนี้จะหล่นลงสู่ด้านล่าง เพลลาทุกอันจะหมุนในแนวเดียวกันทำให้วัตถุติดเคลื่อนที่จากด้านบนหนึ่งไปสู่อีกด้านหนึ่ง

#### 2.4.3.4 การคัดแยกโดยใช้อากาศ (Air separation)

การคัดแยกโดยใช้อากาศจะอาศัยคุณลักษณะด้านอากาศพลศาสตร์ของของเสีย โดยที่คุณลักษณะเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับ ขนาด รูปร่าง และ ความหนาแน่น กระบวนการแยกจะอาศัยความสัมพัทธ์ระหว่าง การเคลื่อนที่ของอากาศ ขยะที่ผ่านการย่อย และ แรงโน้มถ่วง ส่วนของขยะที่ลอยอยู่ในอากาศจะเรียกว่า ส่วนเบา (Light fraction) ขณะที่ขยะที่ตกลงสู่ด้านล่างเรียกว่า ส่วนหนัก (Heavy fraction) ในการคัดแยกของขยะชุมชน วัสดุที่เป็นกระดาษและพลาสติก จะเป็นส่วนที่เบา ส่วนโลหะและแก้วจะเป็นส่วนที่หนัก เครื่องคัดแยก

#### 2.4.3.5 การแยกโดยใช้แม่เหล็ก (Magnetic separation)

เครื่องแยกโดยใช้แม่เหล็กจะแยกวัสดุที่เป็นเหล็กออกจากขยะชุมชน โดยลักษณะของเครื่องจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ ๆ ได้แก่ Magnetic head pulley, drum และ Magnetic belt ในเรื่องของความสามารถในการคัดแยก เหล็กที่สามารถคัดแยกได้ต่อน้ำหนักทั้งหมดของโลหะในขยะชุมชนจะอยู่ที่ประมาณ 80% สำหรับการคัดแยกหนึ่งครั้ง ถ้าต้องการจะแยกให้ได้มากขึ้นจะต้องผ่านเครื่องคัดแยกอีก เพอร์เซ็นต์การแยกสามารถเพิ่มขึ้นถึง 85-90% เมื่อใช้เครื่องคัดแยกนี้หลังเครื่องคัดแยกโดยใช้อากาศ ที่เป็นเช่นนี้เพราะเศษกระดาษและเศษพลาสติกที่เป็นตัวขัดขวางการคัดแยกถูกกำจัดออกไปแล้ว

#### 2.4.3.6 การอบแห้งและทำให้แน่น

การอบและการทำให้แน่นนี้จะใช้เพื่อวัตถุประสงค์จำเพาะ เช่น การผลิต RDF และเป็นการลดปริมาตรก่อนที่จะนำไปกำจัดโดยวิธีการฝังกลบ วัตถุประสงค์ของการอบแห้งก็เพื่อที่จะปรับปรุงคุณภาพของ RDF การทำให้แน่นจะกระทำเมื่อต้องการผลิต densified-RDF ซึ่งสามารถทำได้โดย การอัดแท่ง (Briquetting) การอัดเม็ด (Pelletizing) และการทำให้อยู่ในรูปลูกเต๋า (Cube formation)

การออกแบบโรงงานผลิต RDF ที่ถูกต้องเป็นงานที่ค่อนข้างซับซ้อนเนื่องจากมีหลายปัจจัยเข้ามาเกี่ยวข้อง อย่างแรกคือ ความยากในการแยกขยะที่ได้มาจากชุมชนเนื่องจากไม่

สามารถคาดเดาว่าขยะที่เข้าสู่โรงงานจะมีลักษณะใด ต่อมาก็คือ เครื่องมือในกระบวนการส่วนใหญ่ จะได้จากภาคอุตสาหกรรมอื่น (เช่น อุตสาหกรรมเหมืองแร่) ทำให้ยากแก่การหาจุดที่เหมาะสม สำหรับการทำให้ RDF สุกทำย ขนาดกำลังการผลิตของเครื่องจักรแต่ละเครื่องจะมีมาตรฐานทำให้เป็น เรื่องยากที่เราจะนำเครื่องจักรแต่ละชนิดมาทำงานร่วมกันแล้วทำให้ได้กำลังการผลิตที่ต้องการ

## 2.4.4 การใช้ประโยชน์ RDF ไปใช้งานและการควบคุมผลกระทบสิ่งแวดล้อม

### 2.4.4.1 การใช้ประโยชน์จาก RDF

สามารถใช้ได้ทั้งเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าและความร้อน โดยที่อาจจะมีการใช้ RDF เป็นเชื้อเพลิงภายในสถานที่ผลิต RDF หรือมีการขนส่งในกรณีที่ตั้งของโรงงานไม่ได้อยู่ที่ ที่ต้องการใช้ประโยชน์ ทางเลือกอีกทางหนึ่งก็คือ นำไปใช้เผาพร้อมกับถ่านหิน เพื่อลดปริมาณการใช้ ถ่านหินลง วิธีการใช้ประโยชน์จากเชื้อเพลิงขยะในรูปของพลังงานมีดังต่อไปนี้

- ใช้ในสถานที่แปรรูปขยะเป็นเชื้อเพลิงขยะ (On-site) โดยร่วมกับอุปกรณ์ ที่ใช้เปลี่ยนเป็นพลังงาน เช่น เตาเผาแบบตะกรับ หรือ เตาเผาแบบฟลูอิด ไรซ์เบด หรือ Gasification หรือ Pyrolysis
- ใช้ในสถานที่อื่นที่ต้องมีการขนส่ง (Off-site) โดยมีอุปกรณ์ที่ใช้ เปลี่ยนเป็นพลังงาน เช่น เตาเผาแบบตะกรับ หรือ เตาเผาแบบฟลูอิด ไรซ์เบด หรือ Gasification หรือ Pyrolysis
- เผาไหม้ร่วมกับเชื้อเพลิงอื่น เช่น ถ่านหินหรือชีวมวล
- เผาไหม้ในเตาผลิตปูนซีเมนต์
- ใช้ร่วมกับถ่านหินหรือชีวมวลในกระบวนการ Gasification

### 2.4.4.2 การควบคุมผลกระทบสิ่งแวดล้อม

เนื่องจาก RDF ถูกพิจารณาให้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อใช้ในการเผาไหม้ ดังนั้น ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการใช้งาน RDF จึงเกิดขึ้นเนื่องจากกระบวนการเผาไหม้ ทั้งนี้ อาจเกิดขึ้นทั้งผลกระทบต่อมลพิษอากาศ มลพิษน้ำเสีย และมลพิษจากเถ้า อย่างไรก็ตาม การ วิเคราะห์ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการใช้งาน RDF จะต้องพิจารณาเป็นกรณีเฉพาะไป เพราะมีปัจจัยที่ต้องนำมาพิจารณาหลากหลายประการ เช่น คุณภาพของ RDF องค์ประกอบทาง กายภาพและเคมีของ RDF เทคโนโลยีที่ใช้ในการเผาไหม้และการควบคุมมลพิษ สัดส่วนของการใช้ RDF ในการเผาไหม้ (เผาไหม้โดยตรง หรือเผาไหม้ร่วมกับเชื้อเพลิงอื่น) เป็นต้น

ในส่วนของการแปรรูป RDF นั้นขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีที่ใช้ว่าเป็นแบบ MBT หรือ Autoclaving อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีทั้งสองแบบใช้หลักการของคักแยกขยะมูลฝอยใน ปลายทาง ซึ่งทำให้อาจมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอันเนื่องมาจากกระบวนการเกิดขึ้นในลักษณะ

เดียวกับที่เกิดขึ้นกับเทคโนโลยีการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน (ซึ่งต้องมีการคัดแยกของเสียอินทรีย์ออกจากของเสียที่ทิ้งรวมกันมา) การป้องกันผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากเทคโนโลยีจึงใช้หลักการในการพิจารณาแบบเดียวกัน นอกจากนี้สิ่งที่เหลือทิ้งจากการคัดแยกมักนำไปกำจัดโดยการฝังกลบขยะมูลฝอย ดังนั้นการป้องกันผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากสิ่งเหลือทิ้งนี้จึงมีวิธีการป้องกันลักษณะเดียวกับการฝังกลบขยะมูลฝอยแบบถูกหลักสุขาภิบาล

#### 2.4.5 เทคโนโลยีการบำบัดขยะโดยวิธีทางกลและชีวภาพและเทคโนโลยีการผลิตเชื้อเพลิงขยะ (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี)

ด้วยพบว่า ขยะชุมชนในประเทศไทยมีความชื้นสูงมาก โดยเฉลี่ย 50-58% และมีปริมาณเถ้าสูงเช่นเดียวกัน โดยเฉลี่ย 21-28% ซึ่งถือเป็นจุดด้อยของการนำขยะมาใช้ประโยชน์ในรูปแบบพลังงานโดยใช้เทคโนโลยีทางความร้อน (Thermal conversion technology) ดังกล่าว มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (มทส.) จึงพัฒนารูปแบบการจัดการขยะในอนาคตนั้นจะเป็นเทคโนโลยีการจัดการแบบผสมผสาน หรือเทคโนโลยีการจัดการขยะแบบครบวงจร (Integrated Solid Waste Management : ISWM) มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อกำจัดขยะและลดปริมาณขยะที่เข้าสู่ระบบกำจัดขั้นสุดท้าย (Sanitary landfill) มากที่สุด มีการผลิตพลังงานเป็นผลพลอยได้ โดยประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการผลิตพลังงานหลากหลายรูปแบบ เช่น เทคโนโลยีชีวภาพ (Biological technology) ร่วมกับเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าความร้อน (Thermal technology) โดยสามารถผลิตเชื้อเพลิงหรือวัตถุดิบที่มีความเหมาะสมเพื่อนำเข้าสู่ระบบผลิตพลังงานแต่ละประเภทได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้ รูปที่ 1 เป็นการเปรียบเทียบให้เห็นถึงรูปแบบการจัดการขยะมูลฝอยแบบเดิม กับ เทคโนโลยีการจัดการขยะมูลฝอยแบบครบวงจร (ISWM) (วีรชัย อัจหาญ และคณะ, 2553)

เทคโนโลยีการบำบัดขยะด้วยวิธีการแบบเชิงกล-ชีวภาพ (MBT, Mechanical and Biological Treatment) ซึ่งเป็นอีกเทคโนโลยีที่สามารถปรับเสถียรภาพของขยะมูลฝอยได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยอาศัยขบวนการทางชีววิทยาของแบคทีเรียในการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุที่มีอยู่ในขยะมูลฝอย ด้วยอาศัยแอโรบิกแบคทีเรีย (Aerobic bacteria) ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมในด้านความชื้น อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจน รวมทั้งสัดส่วนระหว่างคาร์บอนและไนโตรเจน ร่วมกับการพลิกกลับกองด้วยเทคนิคเชิงกล

ทั้งนี้การบำบัดขยะมูลฝอยด้วยวิธี MBT ที่พัฒนาขึ้นโดยจะทำให้สามารถลดระยะเวลาในการหมักเหลือเพียง 1 เดือน โดยอาศัยเทคโนโลยีการกลับกองขยะด้วยสกรูในแนวตั้ง (Vertical agitators) ซึ่งจะทำให้กองขยะที่อยู่ทางด้านล่างมีโอกาสสัมผัสกับอากาศได้มากขึ้น ทำให้เกิดกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพได้ดีขึ้น และยังป้องกันการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนทางด้านล่างของกองขยะที่ก่อให้เกิดกลิ่นเหม็น คุณสมบัติของขยะที่ผ่านกรรมวิธีการบำบัดโดยวิธี

MBT จะมีน้ำหนักลดลงประมาณ 65% และมีความชื้นเฉลี่ยที่ ~20-25% โดยองค์ประกอบส่วนใหญ่ที่เหลือจะเป็นขยะจำพวกพลาสติกประมาณ 80% ซึ่งมีความเหมาะสมที่จะนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงขยะ RDF และเศษที่เหลือคืออินทรียวัตถุ หรือปุ๋ยอินทรีย์ที่มีปริมาณคาร์บอนสูง สามารถนำไปใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดินได้ ซึ่งเป็นรูปแบบของการบริหารจัดการขยะชุมชนแบบครบวงจรและเป็นรูปธรรม ทั้ง การคัดแยก การกำจัด และการนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่เพื่อเป็นเชื้อเพลิงสำหรับผลิตพลังงานที่เหมาะสมอย่างมีประสิทธิภาพ และไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม หน่วยปฏิบัติการสำคัญของเทคโนโลยี MBT มีดังต่อไปนี้

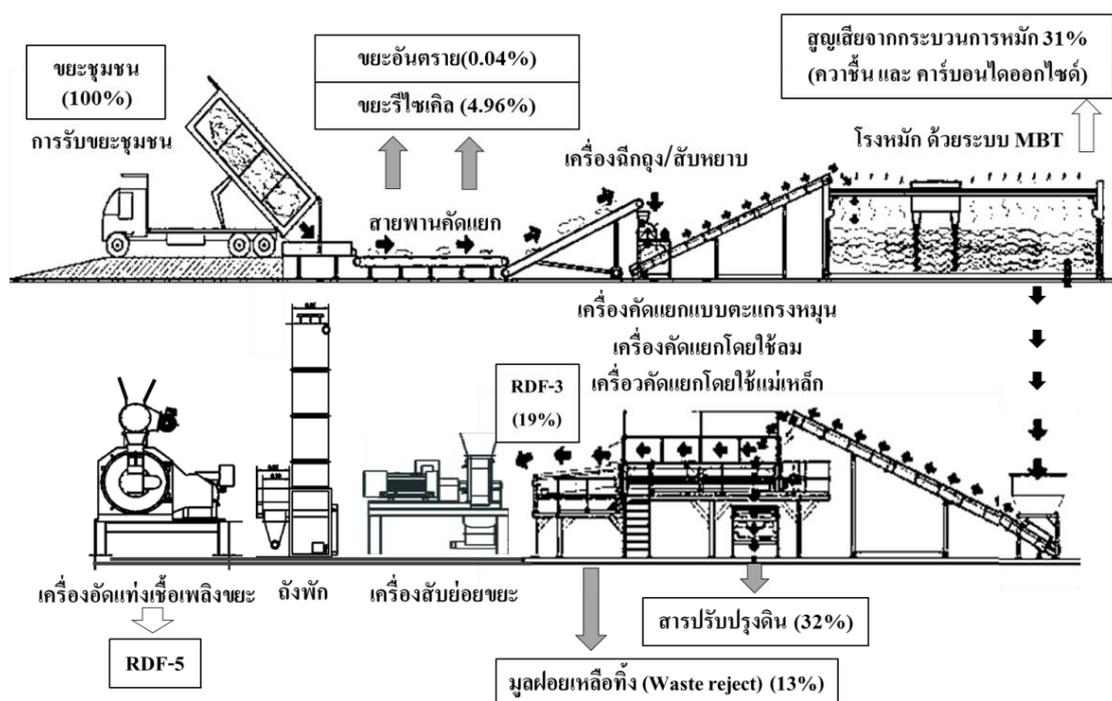
**หน่วยปฏิบัติการที่ 1 ระบบคัดแยกขั้นต้น หรือ Front-end** ประกอบไปด้วย 1) ชุดสายพานคัดแยกและสายพานลำเลียง (Belt conveyors) 2) ชุดเครื่องสับขยะ (Shredder) กระบวนการทำงานเริ่มโดยการคัดแยกขยะอันตราย (ถ่านไฟฉาย หลอดไฟ แบตเตอรี่ และอื่นๆ) และขยะรีไซเคิลได้ (กระดาษแข็ง ขวดพลาสติก ขวดแก้ว กระจังอะลูมิเนียม ถูพลาสติกสะอาด และอื่นๆ) โดยใช้แรงงานคนบนสายพานคัดแยก จากนั้นขยะจะถูกลำเลียงโดยใช้สายพาน ไปยังชุดเครื่องสับขยะเพื่อทำหน้าที่ฉีกฉีก และสับหยาบขยะมูลฝอยให้มีขนาดเล็กลง จากนั้นทั้งขยะอินทรีย์และขยะอนินทรีย์ที่ผ่านเครื่องสับหยาบจะถูกลำเลียงเข้าสู่โรงงานบำบัดทางกลและชีวภาพ หรือ โรงงาน MBT (Mechanical and biological treatment plant) ต่อไป

**หน่วยปฏิบัติการที่ 2 โรงงานบำบัดทางกลและชีวภาพ (Mechanical and Biological Treatment: MBT plant)** โดยขยะที่มาจากหน่วยปฏิบัติการที่ 1 จะถูกลำเลียงเข้าสู่โรงงาน MBT เพื่อปรับเสถียร ให้เกิดการย่อยสลายทางชีวภาพโดยจุลินทรีย์ที่ใช้อากาศ ซึ่งจะมีการติดตั้งระบบใบกวนแบบสกรูในแนวตั้ง (Vertical agitators) ที่ทำหน้าที่กวนและกลับกองขยะ โรง MBT ถูกออกแบบเป็นถังหมักสี่เหลี่ยม ซึ่งส่งผลให้การเดินระบบง่าย การลำเลียงวัตถุดิบสะดวกโดยใช้ระบบลำเลียง โครงสร้างใช้คอนกรีตเสริมเหล็ก ตลอดจนใช้ PLC ควบคุมจึงเป็นระบบที่ทำงานแบบอัตโนมัติ ระบบพลิกกลับกองขยะด้วยสกรูในแนวตั้ง จะทำให้ขยะที่อยู่ด้านล่างมีโอกาสสัมผัสอากาศได้มากขึ้น ส่งผลให้กระบวนการย่อยสลายเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ ในระยะเวลาสั้น (Retention time 30 วัน) ข้อดีของระบบ MBT นี้ พบว่าสามารถย่อยกองขยะได้อย่างชัดเจน และเมื่อควบคุมการกวนให้ทั่วถึงจะสามารถป้องกันการเกิดสภาวะการหมักแบบไร้อากาศ ที่มักก่อให้เกิดกลิ่นเน่าเหม็น (Anaerobic condition) ได้เป็นอย่างดี ซึ่งดังกล่าวจะสามารถป้องกันปัญหาเรื่องกลิ่นได้ โดยมีประสิทธิภาพการย่อยสลายสูง เมื่อการหมักสิ้นสุดลงและขยะมีเสถียรภาพปราศจากกลิ่น

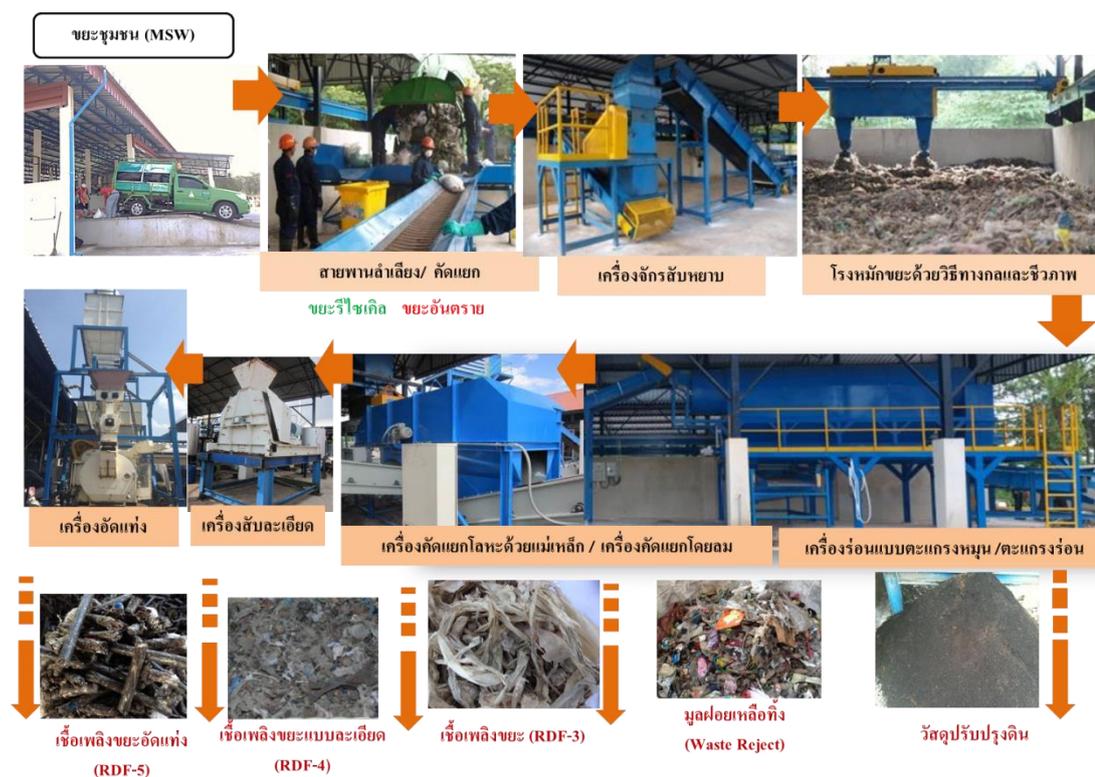
**หน่วยปฏิบัติการที่ 3 ระบบคัดแยกขั้นหลัง หรือ Back-end** ประกอบไปด้วย 1) ชุดเครื่องคัดแยกแบบตะแกรงหมุน (Trommel separator) 2) เครื่องคัดแยกโดยใช้ลม (Air classifier) 3) เครื่องคัดแยกโดยใช้แม่เหล็ก (Magnetic separator)

กระบวนการทำงานคือ ขยะชุมชนจากกระบวนการหมักในระบบ MBT จะส่งเข้าสู่เครื่องคัดแยกแบบตะแกรงหมุน ได้ส่วนประกอบ คือ 1) อินทรีย์สารผงละเอียด สามารถนำไปใช้เป็นส่วนปรับปรุงดิน 2) ขยะพลาสติก หรือเชื้อเพลิงขยะ (Refuse derived fuel :RDF) ซึ่งจัดได้เป็นเกรดเชื้อเพลิงขยะประเภทที่ 3 (RDF-3) ซึ่งมีองค์ประกอบมากกว่า 95 % เป็นพลาสติก โดยจะถูกนำไปแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงขยะแบบละเอียด (RDF-4) และ แปรรูปเป็นเชื้อเพลิงขยะแบบอัดแท่ง (RDF-5) และ 3) ขยะมูลฝอยเหลือทิ้ง (Waste reject) เป็นอินทรีย์ อนินทรีย์ ผสมกับเศษพลาสติก ซึ่งเหล่านี้ จะต้องถูกนำไปกำจัดต่อไป

โดยกระบวนการทำงานและขั้นตอนของระบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 และ รูปที่ 2.7 ซึ่งมีรายละเอียดต่อไปนี้



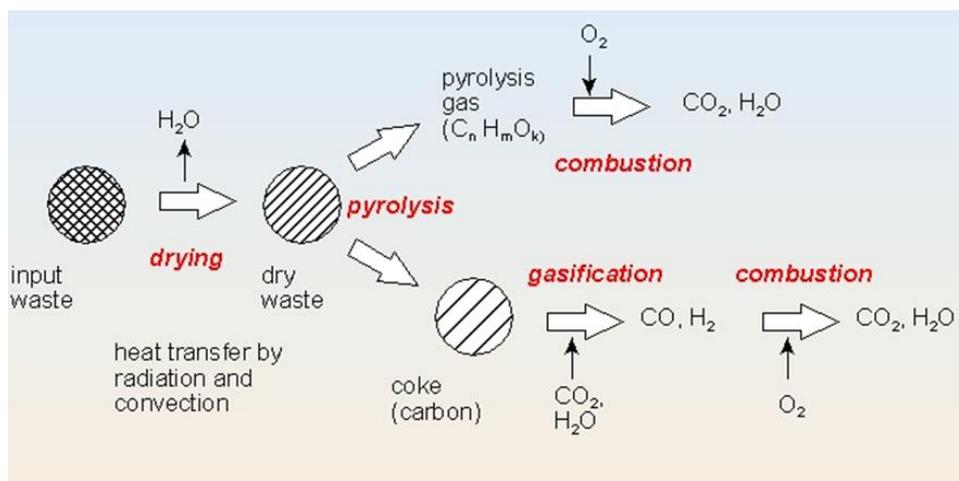
รูปที่ 2.6 กระบวนการทำงานของ ต้นแบบเทคโนโลยีการจัดการขยะแบบครบวงจร (มทส.)



รูปที่ 2.7 อุปกรณ์และเครื่องจักรต้นแบบเทคโนโลยีการจัดการขยะแบบครบวงจร

## 2.5 เทคโนโลยีเตาเผาขยะมูลฝอย (Incineration)

เป็นการใช้ความร้อนอุณหภูมิสูงในการทำให้ขยะมูลฝอยเกิดการแตกสลายด้วยความร้อน (Thermal cracking) ซึ่งกระบวนการดังกล่าวเป็นกระบวนการที่ต้องการความร้อนจากแหล่งให้ความร้อนภายนอกเพื่อช่วยให้ปฏิกิริยาดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง (Endothermic process) แล้วอาจเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิไดเซอร์เพื่อเปลี่ยนรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ โดยกระบวนการดังกล่าวเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic process) ทำให้สามารถนำความร้อนที่ได้ไปใช้ในการผลิตพลังงาน หรืออาจนำผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการแตกสลายด้วยความร้อนไปผ่านกระบวนการเพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงสังเคราะห์เพื่อนำไปผลิตพลังงาน หรืออาจนำไปเผาไหม้กับออกซิไดเซอร์เพื่อให้ได้ความร้อนก่อนนำไปผลิตพลังงาน การกำจัดขยะมูลฝอยด้วยกรรมวิธีทางความร้อนอาจแสดงได้ดัง รูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 กระบวนการกำจัดขยะมูลฝอยด้วยความร้อน (Metcalf et al., 1998)

### 2.5.1 หลักการพื้นฐานของเทคโนโลยีเตาเผาขยะมูลฝอย

เนื่องจากองค์ประกอบของขยะมูลฝอยประกอบด้วยองค์ประกอบที่มีพลังงานเคมีอยู่ในปริมาณมาก การแปรรูปพลังงานที่มีอยู่ในขยะมูลฝอยจึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการกำจัดขยะมูลฝอย และยังสามารถนำพลังงานที่อยู่ในขยะมูลฝอยกลับมาใช้ประโยชน์ได้อีกทางหนึ่ง การเผาขยะมูลฝอยด้วยความร้อนอุณหภูมิสูงจะกระทำในเตาเผาที่ได้มีการออกแบบมาเป็นพิเศษเพื่อให้เข้ากับลักษณะสมบัติของขยะ คือมีอัตราความชื้นสูง และมีค่าความร้อนที่แปรผันได้ การเผาไหม้จะต้องมีการควบคุมที่ดีเพื่อจะป้องกันไม่ให้เกิดมลพิษและการรบกวนต่อสิ่งแวดล้อม เช่น แก๊สพิษ เขม่า กลิ่น เป็นต้น แก๊สซึ่งเกิดจากการเผาไหม้จะได้รับการกำจัดเขม่าและอนุภาคตามที่กฎหมายควบคุม ก่อนที่จะส่งออกสู่บรรยากาศ เถ้าซึ่งเหลือจากการเผาไหม้ ซึ่งมีปริมาณประมาณ 10 % และน้ำหนักประมาณ 25- 30% ของขยะที่ส่งเข้าเตาเผา จะนำไปฝังกลบหรือใช้เป็นวัสดุปูพื้นสำหรับการสร้างถนน ส่วนเถ้าที่มีส่วนประกอบของโลหะอาจถูกนำกลับมาใช้ใหม่ได้ นอกจากนี้ในบางพื้นที่ที่มีปริมาณขยะอยู่มาก สามารถที่จะนำพลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาขยะมาใช้ในการผลิตไอน้ำ หรือทำน้ำร้อน หรือผลิตกระแสไฟฟ้าได้

### 2.5.2 ประเภทของเทคโนโลยีเตาเผาขยะมูลฝอย

เตาเผาขยะมูลฝอยสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทใหญ่ ๆ ได้แก่ เตาเผาแบบตะแกรงเคลื่อนที่ได้ (Moving grate incinerator) เตาเผาแบบหมุน (Rotary kiln incinerator) และ เตาเผาแบบฟลูอิดไคซ์เบด (Fluidized-bed incinerator) เทคโนโลยีนี้ปกติจะเป็นการเผาไหม้ในเตาเผาแบบตะแกรงที่เคลื่อนที่ได้ (Moving grate) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ใช้กันแพร่หลายและได้รับการทดสอบ

แล้ว มีสมรรถนะทางเทคนิคที่ยอมรับได้และสามารถรองรับการเผาทำลายขยะมูลฝอยที่มีองค์ประกอบและค่าความร้อนที่หลากหลาย ระบบที่ได้รับความนิยมรองลงมาคือระบบเตาเผาแบบหมุน (Rotary kiln) ข้อดีและข้อเสียของเตาเผาขยะแต่ละประเภทแสดงดังใน ตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 ข้อดีและข้อเสียของเตาเผาขยะแต่ละประเภท

ประเภทเตาเผา ขยะมูลฝอย	ข้อได้เปรียบ	ข้อเสียเปรียบ
เตาเผาแบบตะ กรับเคลื่อนที่ได้	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ไม่ต้องการการคัดแยกหรือบดตัดขยะมูลฝอยก่อน</li> <li>- เป็นเทคโนโลยีที่มีใช้กันอย่างแพร่หลายและได้รับการทดสอบแล้วสำหรับการเผาทำลายขยะมูลฝอยและมีสมรรถนะตรงตามวัตถุประสงค์</li> <li>- สามารถจัดการกับขยะมูลฝอยที่มีองค์ประกอบและค่าความร้อนที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลาได้เป็นอย่างดี</li> <li>- สามารถให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนได้สูงถึง 85%</li> <li>- เตาเผาแต่ละเตาสามารถก่อสร้างให้มีความสามารถในการเผาทำลายได้ถึง 1,200 ตันต่อวัน (50 ตันต่อชั่วโมง)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เงินลงทุนและบำรุงรักษาค่อนข้างสูง</li> </ul>
เตาเผาแบบตะ กรับเคลื่อนที่ได้	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ไม่ต้องการการคัดแยกหรือบดตัดขยะมูลฝอยก่อน</li> <li>- เป็นเทคโนโลยีที่มีใช้กันอย่างแพร่หลายและได้รับการทดสอบแล้วสำหรับการเผาทำลายขยะมูลฝอยและมีสมรรถนะตรงตามวัตถุประสงค์</li> <li>- สามารถจัดการกับขยะมูลฝอยที่มีองค์ประกอบและค่าความร้อนที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลาได้เป็นอย่างดี</li> <li>- สามารถให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนได้สูงถึง 85%</li> <li>- เตาเผาแต่ละเตาสามารถก่อสร้างให้มีความสามารถในการเผาทำลายได้ถึง 1,200 ตันต่อวัน (50 ตันต่อชั่วโมง)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เงินลงทุนและบำรุงรักษาค่อนข้างสูง</li> </ul>
เตาเผาแบบหมุน	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ไม่ต้องการการคัดแยกหรือบดตัดขยะมูลฝอยก่อน</li> <li>- สามารถให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนได้สูงถึง 80%</li> <li>- สามารถจัดการกับขยะมูลฝอยที่มีองค์ประกอบและค่าความร้อนที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลาได้เป็นอย่างดี</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เป็นเทคโนโลยีที่มีใช้ในการเผาทำลายขยะมูลฝอยค่อนข้างน้อย</li> <li>- เงินลงทุนและบำรุงรักษาค่อนข้างสูง</li> <li>- ความสามารถในการเผาทำลายสูงสุดต่อหนึ่งเตาประมาณ 480 ตันต่อวัน (20 ตันต่อชั่วโมง)</li> </ul>

ตารางที่ 2.9 ข้อดีและข้อเสียของเตาเผาขยะแต่ละประเภท (ต่อ)

ประเภทเตาเผา ขยะ	ข้อได้เปรียบ	ข้อเสียเปรียบ
เตาเผาแบบฟลูอิด ไดซ์เบด	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เงินลงทุนและค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาก่อนข้างต่ำ</li> <li>- เนื่องจากการออกแบบที่ค่อนข้างง่าย</li> <li>- สามารถให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนได้สูงถึง 90%</li> <li>- สามารถใช้ในการเผาทำลายเชื้อเพลิงที่หลากหลายประเภทและสามารถรองรับได้ทั้งกากของแข็งและเหลว โดยเผาทำลายร่วมกันหรือแยกจากกัน</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ณ ปัจจุบันยังจัดว่าเป็นเทคโนโลยีที่ยังต้องการการทดสอบอยู่สำหรับการเผาทำลายขยะมูลฝอยชุมชน</li> <li>- ก่อนข้างมีข้อจำกัดด้านขนาดและองค์ประกอบของขยะ โดยทั่วไปต้องมีการกระบวนการในการจัดการขยะก่อนส่งเข้าเตาเผา</li> </ul>

ที่มา : Medcalf et al., (1998)

### 2.5.3 การนำพลังงานกลับมาใช้ (Energy recovery)

ประโยชน์หลักที่ได้รับจากการเผาไหม้ขยะมูลฝอยในเตาเผาได้แก่การนำเอาพลังงานที่มีอยู่ในขยะมูลฝอยกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ โดยการเผาทำลายขยะมูลฝอยในเตาเผาสามารถลดปริมาณการปลดปล่อยแก๊สมีเทนจากหลุมฝังกลบและสามารถใช้ทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลได้ นอกจากนี้ยังเป็นการลดการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกโดยรวมด้วย

แก๊สร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ในเตาเผาจะมีพลังงานที่เกิดจากการเผาไหม้อยู่ในตัวด้วย มันจะถูกทำให้เย็นตัวลงในหม้อน้ำก่อนที่ไหลเข้าสู่อุปกรณ์ควบคุมมลพิษอากาศ ชนิดของหม้อน้ำที่ติดตั้งขึ้นอยู่กับว่าต้องการพลังงานในรูปของน้ำร้อนเพื่อใช้กับระบบน้ำร้อน หรือไอน้ำเพื่อใช้ในกระบวนการอุตสาหกรรม หรือเพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้า ประสิทธิภาพที่ได้จากการนำพลังงานกลับมาใช้ใหม่สำหรับการใช้พลังงานแต่ละประเภทเทียบกับความร้อนที่ใส่เข้าไป แสดงในตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.10 สรุปประสิทธิภาพที่ได้จากการผลิตพลังงานในรูปแบบต่าง ๆ

การใช้พลังงาน	พลังงานที่นำกลับมาได้		ประสิทธิภาพโดยรวม
ความร้อนเท่านั้น	ความร้อน	80%	80%
ไอน้ำเท่านั้น	ไอน้ำ	80%	80%
กำลังเท่านั้น	กำลัง	35%	35%
ไอน้ำและกำลังรวม	ไอน้ำ	0-75%	35-75%
	กำลัง	0-35%	
ความร้อนและกำลังรวม	ความร้อน	60-65%	85%
	กำลัง	20-25%	

ที่มา: Medcalf et al. (1998)

#### 2.5.4 การควบคุมผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

มลพิษที่เกิดขึ้นจากเตาเผาขยะมูลฝอยโดยหลักแล้วเกิดขึ้นจากกระบวนการเผาไหม้ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาไหม้จะปลดปล่อยออกออกมาในรูปแบบมลพิษทางอากาศ มลพิษทางกากของแข็งและมลพิษทางน้ำ การควบคุมต้องมีปริมาณไม่เกินค่ามาตรฐานที่แต่ละท้องถิ่นกำหนด

##### 2.5.4.1 มลพิษอากาศ

มลพิษที่ปลดปล่อยออกมาจากเตาเผาขยะมูลฝอยมีทั้งที่เป็นอนุภาคมลสาร (ฝุ่น) และแก๊ส เช่น HCl, HF และ SO<sub>2</sub> มลพิษที่มีความเป็นพิษเช่นปรอท ไดออกซินและ NO<sub>x</sub> เหล่านี้สามารถนำออกมาจากแก๊สไอเสียได้ทั้งหมดด้วยเทคโนโลยีการควบคุมมลพิษทางเคมีที่มีความก้าวหน้าและมีต้นทุนสูงการเลือกใช้ระบบควบคุมมลพิษอากาศโดยหลักแล้วขึ้นอยู่กับมาตรฐานการปลดปล่อยมลพิษของแต่ละประเทศและขึ้นอยู่กับระดับการควบคุมที่ต้องการ

##### 2.5.4.2 มลพิษกากของแข็ง

กากของแข็งที่เหลือจากการเผาไหม้ในเตาเผาขยะมูลฝอยจะแยกเป็นสองส่วนคือถ้ำหนัก (Bottom ash) ซึ่งพบที่บริเวณก้นเตาเผา เกิดจากจากองค์ประกอบของขยะมูลฝอยส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้ และถ้ำเบา (Fly ash) ซึ่งเกิดจากองค์ประกอบของขยะมูลฝอยส่วนที่ระเหยขึ้นไปจากขยะมูลฝอยอย่างรวดเร็วและลอยออกไปจากห้องเผาไหม้กับแก๊สไอเสียและถูกจับด้วยอุปกรณ์ควบคุมมลพิษอากาศ เช่นไซโคลน เครื่องกรองด้วยเส้นใยถัก เครื่องดักด้วยไฟฟ้าสถิต เป็นต้น

### 2.5.4.3 มลพิษน้ำ

น้ำเสียจากระบบควบคุมมลพิษอากาศและน้ำเสียที่ใช้ในการทำให้เฝ้าเย็นตัวลง น้ำเสียนี้ส่วนหนึ่งจะไหลวนเพื่อกลับไปใช้ในกระบวนการของเตาเผา มีเพียงบางส่วนที่ถ่ายทิ้งเพื่อนำไปกำจัดซึ่งอาจไหลไปบำบัดรวมกับน้ำเสียจากกันหลวมเก็บขยะมูลฝอย

## 2.6 เทคโนโลยีไพโรไลซิส/แก๊สซิฟิเคชัน (Pyrolysis/Gasification)

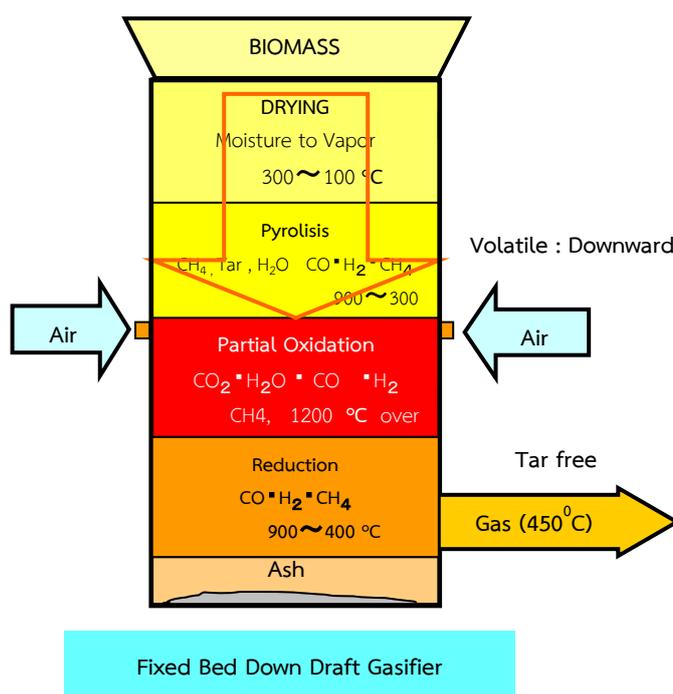
เทคโนโลยีไพโรไลซิส/แก๊สซิฟิเคชัน เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคู่ควบกัน กล่าวคือขยะเมื่อถูกทำให้แห้งโดยการระเหยความชื้นทิ้งไปแล้วจะนำความร้อนจากการเผาไหม้ก่อนหน้านี้มาทำให้ตัวเองเกิดการแตกสลายทางความร้อนและกลายเป็นแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ ขณะเดียวกัน มักมีการจ่ายออกซิไดซ์เซอร์เข้ามาบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาด้วยเพื่อช่วยให้เกิดการเผาไหม้บางส่วน (Partial oxidation) ซึ่งจะได้ความร้อนเกิดขึ้นมาจากปฏิกิริยาและนำไปใช้ในกระบวนการแตกสลายทางความร้อน ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าปฏิกิริยา Pyrolysis/Gasification มักเกิดคู่ควบกัน

อย่างไรก็ตาม ปฏิกิริยาดังกล่าวมีความแตกต่างจาก Incineration เนื่องจากวัตถุประสงค์หลักไม่ใช่การทำลายขยะมูลฝอยให้สิ้นซากไป (Destruction) แต่เป็นการเปลี่ยนรูป (Conversion) ขยะมูลฝอยซึ่งอยู่ในสภาพเชื้อเพลิงแข็งให้กลายเป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถนำไปประโยชน์ได้ต่อไป กล่าวคือเชื้อเพลิงแก๊สที่ได้สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อการเผาไหม้ในเครื่องยนต์สันดาปภายใน (Internal combustion engine) หรือเครื่องยนต์กังหันแก๊ส (Gas turbine engine) หรือเพื่อการเผาไหม้โดยตรงในเครื่องกำเนิดไอน้ำ (Burner in steam generator) หรืออาจนำไปผ่านกระบวนการต่างๆ ที่จำเป็นเพื่อสังเคราะห์เป็นเชื้อเพลิงเหลวหรือใช้ในอุตสาหกรรมเคมีต่อไป

นิยามของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) หรือกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง คือกระบวนการแปรสภาพเชื้อเพลิงแข็งที่มีสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ให้อยู่ในรูปเชื้อเพลิงที่เป็นแก๊ส เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) และ มีเทน (CH<sub>4</sub>) กระบวนการดังกล่าวเป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางอุณหเคมี (Thermochemical conversion process) เป็นการกลั่นสลายองค์ประกอบไฮโดรคาร์บอน โดยใช้ความร้อนหรือไอน้ำที่อุณหภูมิสูง ภายใต้สภาวะจำกัดอากาศหรือออกซิเจน (Partial oxidation) ที่ความดัน 1 บรรยากาศขึ้นไป ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีหลายขั้นตอนทั้งปฏิกิริยาดูดความร้อนและคายความร้อน แก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ เรียกว่า แก๊สเชื้อเพลิง (Syngas หรือ Producer gas) (Alexander, 2002)

### 2.6.1 ปฏิกริยาอุณหเคมีในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

ปฏิกริยาอุณหเคมีที่เกิดขึ้นในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน เป็นส่วนที่ทำการเปลี่ยนเชื้อเพลิงในรูปของแข็งที่มีองค์ประกอบไฮโดรคาร์บอนให้เป็นแก๊สที่เผาไหม้ได้ สามารถประยุกต์ใช้กับเชื้อเพลิงได้กว้างขวาง เช่น เชื้อเพลิงชีวมวล ขยะมูลฝอย รวมทั้งตัวอย่างน้ำเสีย ปฏิกริยาอุณหเคมีต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันดังแสดงใน รูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ปฏิกริยาอุณหเคมีที่เกิดขึ้นในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันในเตาผลิตแก๊สชนิดไหลลง

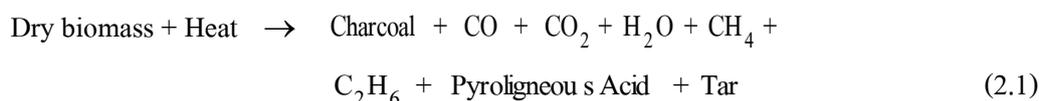
(อ้างอิงจาก : Arjham et al., 2012, 2013)

ในกระบวนการเกิดแก๊สเชื้อเพลิง สามารถแบ่งโซนการเกิดปฏิกริยาทางอุณหเคมี (Thermochemical reaction) ตามความแตกต่างของอุณหภูมิ 4 โซน ดังนี้ (วีรชัย อาจหาญ และคณะ, 2551; Higman & Van der Burgt, 2008)

1) Drying zone คือช่วงที่ไอน้ำหรือความชื้นที่แทรกตัวอยู่ในเชื้อเพลิงโดนกำจัดด้วยความร้อนที่มาจากโซนเผาไหม้ของอุณหภูมิ 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 ซึ่งจะทำปฏิกิริยาต่อในโซน Reduction และ Combustion ปฏิกิริยาที่ได้ในโซนนี้แสดงไว้ในสมการที่ (2.1)



3) Combustion หรือ Oxidation zone เป็นบริเวณที่มีการป้อนอากาศ เมื่อถูกกระตุ้นด้วยความร้อน เชื้อเพลิงจะลุกไหม้ เกิดปฏิกิริยาอุณหภูมิระหว่างแก๊สออกซิเจนในอากาศกับคาร์บอนและไฮโดรเจน ซึ่งอยู่ในเชื้อเพลิง ผลของปฏิกิริยาดังกล่าวก่อให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ ดังสมการที่ (2.2) และ (2.4)



ปฏิกิริยาในสมการที่ (2.2) และ (2.3) เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนและความร้อนที่เกิดขึ้นนี้จะถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาคูดความร้อนในโซน Reduction และโซน Pyrolysis อุณหภูมิในโซน Combustion จะมีค่าระหว่าง 1,000-1,200°C

4) Reduction zone แก๊สร้อนที่ผ่านมาจาก Combustion zone จะทำให้เกิดปฏิกิริยา Reduction โดยจะมีอุณหภูมิระหว่าง 500-900°C โดยคาร์บอนที่กำลังลุกไหม้อยู่ จะทำปฏิกิริยากับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ก่อให้เกิดแก๊ส คาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน และมีเทน ดังสมการที่ (2.4) ถึง (2.8)





ปฏิกิริยาในสมการที่ (2.5) เรียกว่า Boundouard reduction และปฏิกิริยาในสมการที่ (2.6) เรียกว่า Water gas reduction เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 900 °C แก๊สที่ได้จากสมการทั้งสองเป็นแก๊สที่เผาไหม้ได้ และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นแก๊สหลักที่ต้องการ ปริมาณของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในแก๊สเชื้อเพลิงนี้จะขึ้นอยู่กับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ว่าจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนที่ร้อนได้มากน้อยเพียงใด

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

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

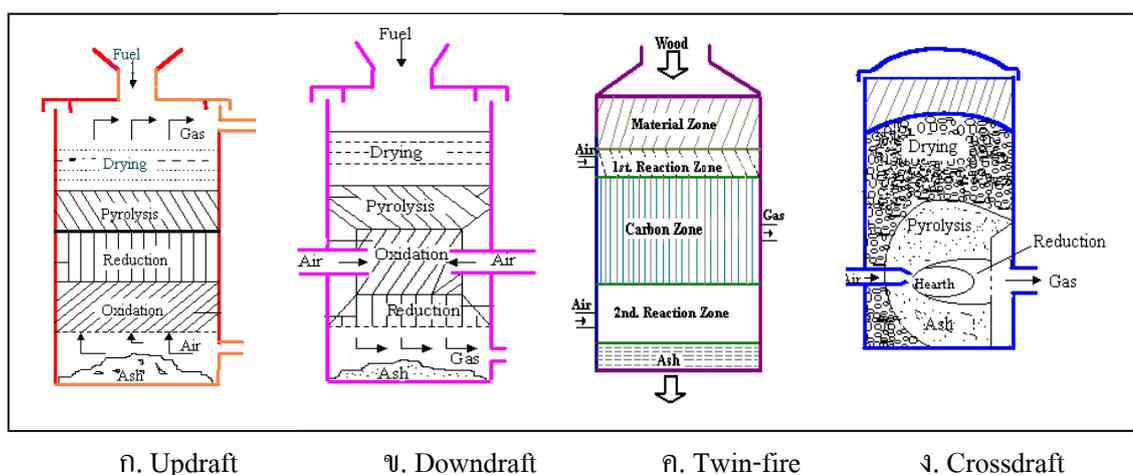
ในขณะที่แก๊สร้อนจากโซน Combustion ไหลเคลื่อนเข้าสู่โซน Reduction จะทำให้อุณหภูมิจากแก๊สลดลง เนื่องจากเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน ดังนั้นไอน้ำกับคาร์บอนจะทำปฏิกิริยากันเพื่อก่อให้เกิดแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการที่ (2.6) ซึ่งจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 500-600 °C ปฏิกิริยานี้มีความสำคัญเพราะจะทำให้ส่วนผสมของแก๊สไฮโดรเจนในแก๊สเชื้อเพลิงมีค่ามากขึ้น (แก๊สไฮโดรเจนมีผลต่อการจุดระเบิดของเครื่องยนต์สันดาปภายใน) แต่ถ้าในกระบวนการที่มีไอน้ำมากเกินไป จะทำให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน ดังสมการที่ (2.7) ปฏิกิริยานี้เรียกว่า Water shift reduction หรือ CO Shift reaction ทำให้ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้มีค่าลดลง ดังนั้นเชื้อเพลิงที่ใช้จะต้องมีความชื้นไม่มากเกินไป นอกจากนี้ในกระบวนการ Reduction แก๊สไฮโดรเจนบางส่วนจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนทำให้เกิดแก๊สมีเทนขึ้น ดังสมการที่ (2.8) ปฏิกิริยานี้เรียกว่า Methane production

ปฏิกิริยาอุณหภูมิที่ทำให้เกิดแก๊สเชื้อเพลิงดังที่ได้กล่าวข้างต้น เกิดขึ้นจากเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Gasifier) ได้หลายชนิด ซึ่งเตาแต่ละชนิดนั้นจะถูกออกแบบสำหรับการใช้งานที่แตกต่างกัน ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

## 2.6.2 ชนิดของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Type of gasifier)

สำหรับชนิดของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Gasifier) แบ่งตามลักษณะการป้อนเชื้อเพลิง ได้เป็น 2 แบบคือ แบบคอดัมน์ (Fixed bed gasifier) และแบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized bed gasifier) ซึ่งมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันไป ตามลักษณะของการนำไปใช้ประโยชน์ และเชื้อเพลิงที่ใช้ (Dutta, 1998) เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบคอดัมน์ เหมาะสมกับเชื้อเพลิงที่มีขนาดใหญ่ รูปร่างคงตัว สามารถใช้กับเชื้อเพลิงที่มีความชื้นสูงได้ การทำงานของระบบไม่ซับซ้อน สามารถนำแก๊สเชื้อเพลิงไปใช้ประโยชน์ได้ง่าย สำหรับเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบฟลูอิดไดซ์เบด เหมาะสำหรับเชื้อเพลิงที่มีขนาดเล็กมาก และต้องใช้ความเร็วของอากาศทำให้เชื้อเพลิงลอยตัวขึ้นมีลักษณะคล้ายของไหล ซึ่งเรียกว่าสถานะของ Fluidization โดยจะมีสารเฉื่อย (Inert material) เช่น ทราย หินปูน เป็นระบบที่ใช้ความดันสูง จึงทำให้การเดินระบบมีความยุ่งยากกว่า โดยทั่วไปจะใช้กับอุตสาหกรรมขนาดใหญ่

วีรชัย อหาญ และคณะ (2551) ได้อธิบายว่าเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบคอดัมน์ (Fixed bed gasifier) ยังสามารถจำแนกตามทิศทางการป้อนอากาศในเตา คือ ถ้าอากาศถูกป้อนจากด้านล่างขึ้นข้างบนของเตาเรียกว่า Updraft gasifier และถ้าอากาศถูกป้อนสู่โซนเผาไหม้แล้วไหลลงด้านล่างของเตาเรียกว่า Downdraft gasifier ส่วนการป้อนอากาศเข้า 2 ทางเรียกว่า Twin-fire และถ้าอากาศเข้าในแนวขวางเรียกว่า Crossdraft gasifier ดังแสดงใน รูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ (วีรชัย อหาญ และคณะ, 2551)

เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบคอลัมน์ (Fixed Bed) ที่นิยมใช้กันจะมี 2 แบบ คือ Updraft gasifier และ Downdraft gasifier แต่ทั้งสองแบบก็มีข้อดีข้อเสียต่างกัน

1) Updraft gasifier : เป็นเทคโนโลยีที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไฟฟ้ากำลังสูง (500 kW ขึ้นไป) หรือใช้งานในการผลิตความร้อน เช่น การนำแก๊สเชื้อเพลิงไปเป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อไอน้ำ ความดันในการผลิตไอน้ำ แล้วนำไอน้ำที่ผลิตได้มาผลิตไฟฟ้าโดยใช้เครื่องจักรกังหันไอน้ำ สามารถใช้กับเชื้อเพลิงที่มีความชื้นสูง (มากกว่า 50%) ได้แก๊สเชื้อเพลิงที่อุณหภูมิต่ำ แต่มีข้อเสียคือ ปริมาณทาร์ (Tars) สูงมาก ซึ่งมีค่าอยู่ประมาณ 10-100 g/Nm<sup>3</sup> (kaupp et al., 1981) หากต้องนำไปใช้กับเครื่องยนต์จะต้องมีระบบทำความสะอาดที่มีประสิทธิภาพ

2) Downdraft gasifier : เป็นเทคโนโลยีที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก (ขนาดไม่เกิน 500 kW) แต่มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดทาร์ (Tars) เนื่องจากอากาศที่ถูกอัดเข้าทางด้านข้าง จะไหลลงด้านล่างของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง ทาร์ที่ถูกผลิตขึ้นในโซน Pyrolysis จะไหลลงตามอากาศและถูกกำจัดจนเกือบหมดในโซนของ Combustion หรือ Oxidation เป็นผลให้ระบบนี้มีการเกิดขึ้นของทาร์ (Tars) น้อยกว่าระบบ Updraft Gasifier มาก โดยทั่วไปจะมีค่าประมาณ 50-500 mg/Nm<sup>3</sup> (kaupp et al., 1981; Groeneveld et al., 1983; Reed et al., 1983) ข้อจำกัดของระบบนี้คือ เชื้อเพลิงที่ใช้ต้องมีขนาดคงตัวและมีขนาดเล็กโดยประมาณ 20-60 มิลลิเมตร เพื่อป้องกันการอุดตันของเชื้อเพลิงที่อาจไปกั้นการไหลของแก๊สที่ผลิตได้ มีผลการศึกษาของ Earp (1988) ที่ศึกษาถึงขนาดของเชื้อเพลิงที่เหมาะสมสำหรับเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงชนิดไหลลงและได้สรุปว่า ขนาดของเชื้อเพลิงไม่ควรเกิน 1/8 ของเส้นผ่านศูนย์กลางของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง และเชื้อเพลิงควรมีขนาดคงตัว ใกล้เคียงกัน จะช่วยให้การถ่ายเทความร้อน อุณหภูมิ และปฏิกิริยาอุณหเคมีในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ และความชื้นของเชื้อเพลิงที่นำมาใช้กับเตาผลิตชนิดนี้ ไม่ควรมีค่าเกิน 25%-30% (สุธรรม ปทุมสวัสดิ์, 2549) นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ Dogru (2000) ที่ทำการศึกษาเกี่ยวกับเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงชนิดไหลลง และได้สรุปว่าถ้าเชื้อเพลิงมีความชื้นสูงจะส่งผลให้ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงลดลง เพราะมีไอน้ำในกระบวนการมากเกินไป

Arjham et al.(2012) ได้ทำการศึกษาเรื่อง “กาประเมินการผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงชีวมวล โดยใช้ต้นแบบ Downdraft gasifier ขนาด 100 kW” โดยทำการทดสอบประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของเชื้อเพลิงชีวมวล ประเภทต่างๆ 10 ชนิด คือ ไม้กระถินยักษ์ ไม้ยูคาลิปตัส เปลือกไม้ยูคาลิปตัส ปีกไม้ยางพารา ชังข้าวโพด แกลบ กะลามะพร้าว ทางปาล์ม เหง้ามันสำปะหลัง และเปลือกมันสำปะหลัง โดยทดสอบกับต้นแบบโรงไฟฟ้าชีวมวล ขนาด 100 kW ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ได้สรุปว่า ขนาดและความชื้นของเชื้อเพลิงที่เหมาะสมในการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง สำหรับโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็ก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี คือ ขนาดโดยประมาณอยู่ที่ 40W x 40L x 60H mm<sup>3</sup> และความชื้นไม่เกิน 15% โดยเฉลี่ยแก๊สชีวมวลที่ผลิตได้มีองค์ประกอบ คือ CO, H<sub>2</sub> และ CH<sub>4</sub> ในสัดส่วน

เฉลี่ย 13-25%, 12-18% และ 1-3% ตามลำดับ มีการปนเปื้อนของฝุ่นและน้ำมันดินต่ำ คือ 0-20 mg/Nm<sup>3</sup> มีค่าความร้อน อยู่ในช่วง 4.5-6 MJ/Nm<sup>3</sup> พบว่าประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของระบบ อยู่ในช่วง 12-16 % เมื่อระบบทำงานที่ 70% ของกำลังการผลิต ในกรณีดังกล่าวปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ อยู่ในช่วง 1.3-1.7 kg/kW โดยสรุปคือระบบ Downdraft gasifier มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ กับเชื้อเพลิงชีวมวล ทั้งนี้ต้องเตรียมเชื้อเพลิงให้มีความเหมาะสมสำหรับใช้งาน

### 2.6.3 คำจำกัดความของทาร์ (Definition of tars)

ทาร์ (Tars) หมายถึงผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการที่เกิดจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน หรือ เกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ลักษณะของทาร์เป็นของเหลวที่มีความหนืดสูง (High viscous) และมีฤทธิ์กัดกร่อน (Corrosive) โดยทั่วไปมีสีน้ำตาลเข้มถึงดำ ประกอบไปด้วยสารไฮโดรคาร์บอน จำนวนมาก สมบัติของทาร์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิพบว่า อุณหภูมิในกระบวนการสูงขึ้นจะทำให้สัดส่วนของ H/C ลดลง ดังแสดงใน ตารางที่ 2.11 ซึ่งเป็นข้อมูลสนับสนุนว่าผลของอุณหภูมิ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบที่อยู่ในทาร์ คือ การเปลี่ยนจากรูปของ Highly oxygenate pyrozone เป็น Condense aromatic นั่นคือ ในสภาวะที่อุณหภูมิสูงขึ้น Complex-phenolics furans จะหายไปขณะที่ Aromatic ซึ่งมีความคงตัวจะเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 2.11 ส่วนประกอบทางเคมีของทาร์ (Tars) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ <sup>(1)</sup>

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	Benzoypyrenes
Syringols			
Complex-Phenolics			

หมายเหตุ : <sup>(1)</sup> อภาณี เหลืองนฤมิตชัย (2538)

#### 2.6.4 แก๊สเชื้อเพลิงหรือโปรคิวเซอร์แก๊ส

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

1) การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำ (Low heating value gas) : แก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จะมีค่าความร้อนประมาณ 3.3-5.6 MJ/Nm<sup>3</sup> โดยมีองค์ประกอบของแก๊สที่สามารถเผาไหม้ได้ หรือแก๊สที่จุดไฟติด (Combustible gas) คือแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และแก๊สไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) เป็นแก๊สหลัก และมีแก๊สมีเทน (CH<sub>4</sub>) เล็กน้อย ซึ่งเจือจางอยู่ในแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สไนโตรเจน และแก๊สออกซิเจน ซึ่งประเภทนี้เป็นกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันทั่วไปที่ใช้อากาศ เพื่อให้เกิดปฏิกิริยา Partial oxidation

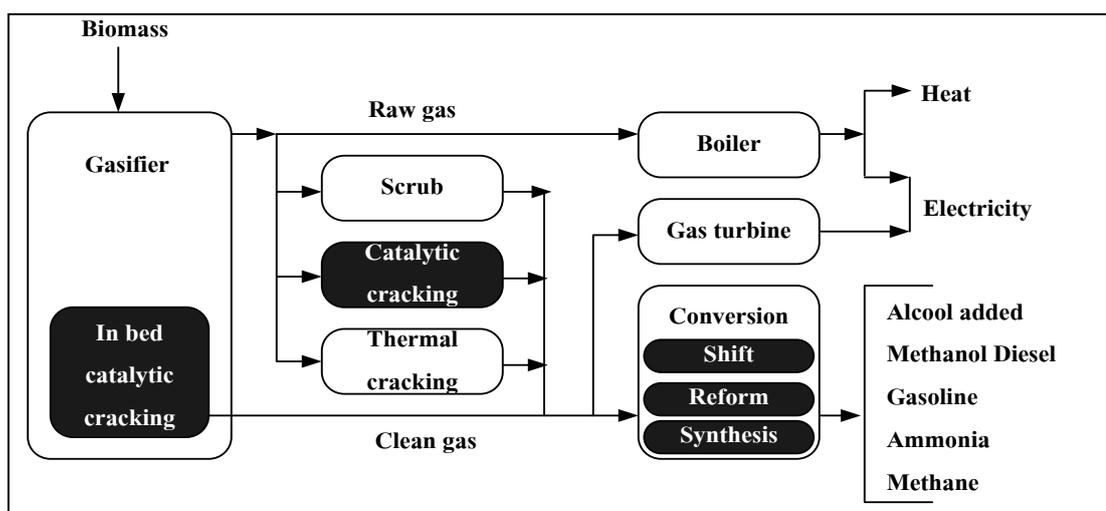
2) การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนปานกลาง (Medium heating value gas) : แก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จะมีค่าความร้อนประมาณ 9.3-20.5 MJ/Nm<sup>3</sup> กระบวนการนี้จะใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ เพื่อให้เกิดปฏิกิริยา Partial oxidation ในสภาวะที่ปราศจากไนโตรเจน เนื่องจากการไม่มีแก๊สไนโตรเจนเจือปน จะทำให้มีองค์ประกอบของแก๊สที่เผาไหม้ได้เพิ่มขึ้น และค่าความร้อนของแก๊สสูงขึ้น

3) การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนสูง (High heating value gas) : แก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จะมีค่าความร้อนสูงกว่า 20.5 MJ/Nm<sup>3</sup> 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)



#### 2.6.5 การใช้ประโยชน์จากแก๊สเชื้อเพลิง

แก๊สเชื้อเพลิง หรือโปรคิวเซอร์แก๊ส ที่ผลิตได้สามารถนำไปใช้งานได้โดยตรง แต่ก่อนนำมาใช้งานจำเป็นต้องผ่านระบบทำความสะอาดแก๊สก่อน และขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้งานดังแสดงใน รูปที่ 2.11 แสดงถึงภาพรวมของการใช้ประโยชน์ของแก๊สเชื้อเพลิง โดยแบ่งแนวทางการใช้ประโยชน์หลักได้ 3 ประเภท คือ



รูปที่ 2.11 ภาพรวมของการใช้ประโยชน์แก๊สเชื้อเพลิง (ที่มา : Nowell, 1999)

#### 2.6.5.1 พลังงานความร้อนตรง

พลังงานความร้อนตรง สามารถนำแก๊สเชื้อเพลิง มาใช้เป็นแหล่งพลังงานความร้อนตรง เนื่องจากแก๊สเชื้อเพลิง สามารถส่งไปตามท่อในระยะใกล้ได้ สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อไอน้ำความดันเพื่อผลิตไอน้ำ และนำไอน้ำมาใช้กับเครื่องจักรกังหันไอน้ำผลิตไฟฟ้า

#### 2.6.5.2 วัตถุดิบในอุตสาหกรรมเคมี

นอกจากการใช้ประโยชน์ดังที่กล่าวในข้างต้น แก๊สเชื้อเพลิง สามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมเคมี เช่น เซลล์เชื้อเพลิงคาร์บอเนตเหลว (Molten carbonate fuel cells) และสารตั้งต้นในการผลิตเมทานอล โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม เป็นตัวสังเคราะห์ภายใต้ อุณหภูมิและความดันสูง (Jung, 1999)

#### 2.6.5.3 การใช้แก๊สเชื้อเพลิงกับเครื่องยนต์สันดาปภายใน

ใช้ผลิตไฟฟ้าในเครื่องยนต์สันดาปภายใน โดยนำแก๊สเชื้อเพลิงส่งเข้าเครื่องยนต์สันดาปภายใน เช่น เครื่องยนต์ดีเซล เครื่องยนต์แก๊ส เพื่อผลิตไฟฟ้า ในกรณีนี้แก๊สเชื้อเพลิงต้องมีปริมาณคาร์บอนและฝุ่นปนเปื้อนไม่เกิน  $25 \text{ mg/Nm}^3$  (เกียรติไกร อายุวัฒน์ และคณะ, 2549) หรือ  $25 \text{ mg/Nm}^3$  (Bhattacharya et al., 2001) เพื่อไม่ให้เกิดผลกระทบต่อการใช้งานในเครื่องยนต์

การใช้แก๊สเชื้อเพลิงกับเครื่องยนต์สันดาปภายใน (Internal combustion engine) นั้น จะต้องปรับปรุงลักษณะบางประการของเครื่องยนต์เพื่อที่จะทำให้เครื่องยนต์นั้น เหมาะสมกับการใช้แก๊สเชื้อเพลิงเป็นเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ และสามารถทำงานได้ดีใกล้เคียงกันกับเครื่องยนต์

แก๊สโซลีน 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% และไม่ต้องมีการดัดแปลงลักษณะการทำงานของเครื่องยนต์ดีเซลแต่อย่างใด

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) ของมอเตอร์จะทำหน้าที่เป็นไดนาโม ข้อดีของวิธีนี้คือ ระบบผลิตไฟฟ้านี้สามารถต่อพ่วงเข้ากับระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าฯ ได้ทันที โดยระบบจะผลิตเฉพาะไฟฟ้า ส่วนแรงดันและความถี่จะใช้ของการไฟฟ้าฯ ทำให้ไม่เกิดผลเปลี่ยนแปลงต่อแรงดันและความถี่ ซึ่งหากนำอุปกรณ์ทางไฟฟ้ามาต่อใช้งานจะไม่ทำให้อุปกรณ์เสียหายแต่อย่างใด การนำมอเตอร์เหนี่ยวนำมาต่อพ่วงกับเครื่องยนต์แก๊สเชื้อเพลิง จะต้องคำนึงถึงความเหมาะสมของขนาดมอเตอร์และเครื่องยนต์ เพื่อให้ระบบผลิตไฟฟ้าสามารถทำงานได้ประสิทธิภาพสูงสุด โดยมอเตอร์จะต้องมีความเร็วรอบและแรงบิดใกล้เคียงกับแรงบิดสูงสุดของเครื่องยนต์

### 2.6.6 มลพิษและของเสียที่เกิดจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

การนำแก๊สเชื้อเพลิงมาใช้งานมีความจำเป็นที่จะต้องทำความสะอาดแก๊สก่อน (Pre-treatment gas) เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นต่อระบบ และเครื่องยนต์สันดาปภายใน เนื่องจากส่วนประกอบที่อันตราย เช่น ทาร์ (Tars) และฝุ่นขนาดเล็ก (Dust) การกำจัดองค์ประกอบปนเปื้อนช่วยเพิ่มค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงได้ และสามารถหลีกเลี่ยงมลพิษที่จะเกิดขึ้นต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งระบบทำความสะอาดแก๊สที่นำมาใช้จะขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีที่เลือก และวัตถุประสงค์ของการใช้ประโยชน์แก๊สเชื้อเพลิง (Bridgwater, 1994b) ใน ตารางที่ 2.12 แสดงชนิดของมลสารและปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบผลิตแก๊สเชื้อเพลิง

ตารางที่ 2.12 ชนิดของมลสารและปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบผลิตแก๊สเชื้อเพลิง<sup>(1)</sup>

ชนิดมลสาร	ลักษณะที่ปรากฏ	ปัญหา
มลสารหรืออนุภาคขนาดเล็ก	ฝุ่น (Dust) เถ้า (Ash) เถ้าลอย (Fly ash) ผงถ่าน (Char) องค์ประกอบที่ควบแน่น (Condensed compound)	ทำให้เกิดการกัดกร่อนของชิ้นส่วนที่เป็นโลหะในระบบและมลภาวะทางสิ่งแวดล้อม
องค์ประกอบอัลคาไลน์โลหะ (Alkali metal)	องค์ประกอบของโซเดียม (Na) และโพแทสเซียม (K) ที่เกิดในสภาวะการกลายเป็นเถ้าหลอมกลายเป็นแอสล็ก (slag) หรือมีสภาวะกลายเป็นไอ	ทำให้เกิดการกัดกร่อนชิ้นส่วนของโลหะที่อุณหภูมิสูง เกิดการหลุดลอกของชั้นผิวเคลือบโลหะ
ออกไซด์ของไนโตรเจน	เกิดปัญหามลภาวะอากาศ โดยเกิด NO <sub>x</sub> ระหว่างกระบวนการเผาไหม้	เกิดมลภาวะของ NO <sub>x</sub>
ซัลเฟอร์และคลอรีน	บางส่วนคงเหลือในเถ้าหนัก (Bottom ash) บางส่วนเกิดสภาวะการกลายเป็นไอ หรือ แก๊ส	ทำให้เกิดมลภาวะที่เป็นอันตรายและเกิดการกัดกร่อนโลหะ เช่น H <sub>2</sub> S HCl SO <sub>x</sub>
ทาร์ (Tars)	ของเหลวที่มีความหนืดสูง ส่วนใหญ่เป็นสารไฮโดรคาร์บอน	ทำให้วาล์วและระบบกรองอุดตันและกัดกร่อนชิ้นส่วนโลหะ

หมายเหตุ : <sup>(1)</sup> จาก Belgiorno et al. (2003)

จากข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 2.14 พบว่าชนิดของมลสารที่เกิดขึ้น นอกจากจะเป็นปัญหาต่อระบบ ยังเป็นมลพิษที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้วย การมีระบบทำความสะอาดแก๊สจึง

เป็นเรื่องสำคัญ (Quaak et al., 1999) ซึ่งระบบทำความสะอาดแก๊สเชื้อเพลิงที่นิยมใช้โดยทั่วไปเพื่อลดปัญหาดังกล่าว ดังแสดงใน ตารางที่ 2.13

ตารางที่ 2.13 ชนิดของมลสารและระบบทำความสะอาดแก๊สเชื้อเพลิง <sup>(1)</sup>

ชนิดมลสาร	ระดับมลพิษ(g/Nm <sup>3</sup> )	ระบบทำความสะอาด
มลสารหรืออนุภาคนขนาดเล็ก	3-70	ไซโคลน ระบบกรอง (Filtration) ระบบสครับเบอร์(Scrubber)
องค์ประกอบอัลคาไลน์โลหะ (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 หรือปูนขาว (Sodium bicarbonate หรือ Lime scrubbing)

หมายเหตุ : <sup>(1)</sup> จาก Belgiorno et al. (2003)

Belgiorno et al. (2003) ได้อธิบายว่านอกจากการลดปัญหาการกัดกร่อน และมลพิษสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นในระบบผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแล้ว ยังมีของเสียและมลพิษสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากระบบทำความสะอาดแก๊ส จำเป็นต้องมีการจัดการของเสียเหล่านี้ต่อไป

โดยสรุปมลพิษและของเสีย ที่เกิดจากระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ประกอบด้วย

- มลพิษอากาศ (Air pollution) การปลดปล่อยมลพิษทางอากาศของระบบแก๊สซิฟิเคชัน ขึ้นอยู่กับการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมมลพิษ และเครื่องยนต์สันดาปภายในที่นำมาใช้ Belgiorno et al. (2003) กล่าวว่า ในกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงโดยตรง จะเกิดออกไซด์ของไนโตรเจน (NO<sub>x</sub>) ออกไซด์ของซัลเฟอร์ (SO<sub>x</sub>) และองค์ประกอบของไดออกซิน (PCDD/F) สูง

กว่ากระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน แต่อย่างไรก็ตามในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันก็จำเป็นต้องมีระบบ Pre-treatment Gas เพื่อกำจัดองค์ประกอบต่าง ๆ ที่อาจก่อให้เกิดมลภาวะได้

- ของเสียในรูปของแข็ง (Solid waste) ของเสียในรูปของแข็งที่เกิดจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ได้แก่ ถ่าน เถ้า ซึ่งจะเกิดขึ้นประมาณ 3-20% ของเชื้อเพลิงที่ป้อนสู่เตา ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของเชื้อเพลิงแต่ละชนิด (Kirubakaran et al., 2007) ในกรณีที่เป็นเชื้อเพลิงชีวมวล เช่น แกลบ ไม้กระถินยักษ์ ไม้ยูคาลิปตัส เป็นต้น ของเสียเหล่านี้จะถูกนำไปใช้เป็นถ่านหุงต้ม หรือถ่านกัมมันต์ได้ เนื่องจากถ่านที่ได้มีค่าความร้อน และค่าการดูดซับไอโอดีนสูง ตลอดจนมีปริมาณสารระเหยต่ำซึ่งเป็นผลให้เป่าถ่านที่เกิดขึ้นมีสภาพไร้ควัน (ทิพย์สุภินทร์ หินชูย และคณะ, 2551) กรณีที่ใช้เชื้อเพลิงตัวอย่างจำเป็นต้องนำไปกำจัดต่อโดยการฝังกลบ เนื่องจากมีโลหะหนักคงเหลืออยู่ หรืออาจนำไปใช้ในกระบวนการอุตสาหกรรม เช่น ผงซีเมนต์ (ทิพย์สุภินทร์ หินชูย, 2551; Belgiorno et al., 2003)

- 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 (Belgiorno et al., 2003)

Malkow (2003) ได้ศึกษาความก้าวหน้าของเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันและไพโรไลซิสกับการนำมาประยุกต์ใช้กับของเสีย และมีกรณีศึกษาที่น่าสนใจคือ การนำเอากระบวนการแก๊สซิฟิเคชันมาใช้กับขยะมูลฝอย โดยต้นแบบนี้มีขนาด 1 ตันต่อชั่วโมง ซึ่งเดินระบบอยู่ที่สนามบิน Budapest ประเทศฮังการี เพื่อใช้กำจัดขยะจากอุตสาหกรรม ขั้นตอนการทำงานคือขยะจะถูกป้อนผ่านไซนอบแห้งและผ่านเข้าสู่ไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 600-700 °C ซึ่งออกแบบเพื่อให้เกิดการเผาไหม้สารอินทรีย์ที่ระเหยออกมา และผ่านเข้าสู่ไซนเผาไหม้ ที่อุณหภูมิประมาณ 800 °C จากนั้นผ่านเข้าสู่ไซนเผาไหม้ที่สองอุณหภูมิประมาณ 1,100-1,200 °C แก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จะถูกใช้กับเครื่องกำเนิดไอน้ำเพื่อผลิตไฟฟ้า สำหรับการควบคุมมลพิษสิ่งแวดล้อมของเสียที่เกิดขึ้นคือถ่านและเถ้าที่มีโลหะหนักคงเหลืออยู่จะถูกนำไปกำจัดต่อไป สำหรับการควบคุมมลพิษอากาศ ไอเสียที่เกิดขึ้นจะถูกบำบัดผ่านระบบสครับเบอร์แบบแห้ง (Dry scrubbing process) โดยใช้โซเดียมคาร์โบเนตและปูนขาวเป็นตัวดูดซับ จากนั้นจะผ่านถุงกรองอากาศ (Bag filter) ก่อนที่จะปลดปล่อยสู่บรรยากาศ ซึ่งผลการตรวจวัดมลพิษอากาศที่ปลดปล่อยจากระบบพบว่ามีความน้อยมากและอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

## 2.6.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันกับของเสีย และขยะ  
สรุปได้ดังต่อไปนี้

Kwak et al. (2006) ได้ศึกษามลพิษสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากการใช้ขยะชุมชนมาเป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ทั้งนี้โรงงานต้นแบบสามารถกำจัดขยะได้เท่ากับ 3 ตันต่อวัน ในด้านการผลิตพลังงานพบว่าแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้มีค่าความร้อนสูงอยู่ในช่วง 8-10.2 MJ/Nm<sup>3</sup> สำหรับผลการศึกษาด้านมลพิษสิ่งแวดล้อมพบว่า องค์ประกอบคลอรีน (Polychlorinated dibenzo-p-dioxine/furan) จะถูกทำลายที่อุณหภูมิสูงในระหว่างเกิดปฏิกิริยาอุณหภูมิในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง จะมีสถานะเป็นทั้งแก๊สและของเหลว แต่เมื่อผ่านระบบควบแน่นและลดอุณหภูมิแก๊สแล้ว องค์ประกอบเหล่านี้ก็จะถูกกำจัดออกไป สำหรับองค์ประกอบของโลหะหนักได้แก่ Cr Mn Cu As Cd และ Hg จะถูกพบในเถ้าหนักและเถ้าหลอมที่ออกจากเตาผลิตแก๊ส ส่วน Zn และ Pb ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของไอโลหะ ซึ่งถูกกำจัดในระบบ Condense scrubber ในส่วนของแก๊สไอเสียที่ปลดปล่อยจากระบบพบว่า มีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานการควบคุมมลพิษอากาศ (Korean Emission Standards) ทั้งนี้ก็วิจัยได้สนับสนุนว่า เทคโนโลยีดังกล่าวมีความเหมาะสมและเป็นทางเลือกใหม่ของการผลิตพลังงานทดแทน เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและยังมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

Pinto et al. (2007) ได้ศึกษาการปลดปล่อยปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ องค์ประกอบคลอรีน และโลหะหนักจากการใช้เชื้อเพลิงถ่านหินร่วมกับขยะพลาสติกที่มีองค์ประกอบของธาตุกลุ่มฮาโลเจนในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ซึ่งผลการศึกษาพบว่า องค์ประกอบของธาตุในกลุ่มฮาโลเจน (Cl F) จะถูกทำลายที่อุณหภูมิสูงในระหว่างเกิดปฏิกิริยาอุณหภูมิในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง จะมีสถานะเป็นทั้งแก๊สและของเหลว แต่เมื่อผ่านระบบควบแน่นและลดอุณหภูมิแก๊สแล้ว องค์ประกอบเหล่านี้จะถูกพบในรูป HCl และ HF สำหรับโลหะหนักโดยส่วนใหญ่จะคงอยู่ในเถ้าหนักและเถ้าหลอมที่ออกจากเตาผลิตแก๊ส แต่ยังคงมีบางส่วนที่ปนเปื้อนไปกับเถ้าลอยและฝุ่นขนาดเล็ก และองค์ประกอบของซัลเฟอร์จะอยู่ในรูปของ H<sub>2</sub>S เป็นส่วนใหญ่

Arjham et al. (2013) ศึกษาการนำตัวอย่างจากระบบบำบัดน้ำเสียของกระบวนการฟอกย้อมมาลดความชื้นและอัดเป็นแท่งเชื้อเพลิง แล้วทดสอบกับต้นแบบโรงไฟฟ้าชีวมวลมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันชนิดไหลลง ที่มีขนาดกำลังการผลิต 100 กิโลวัตต์ ตลอดจนศึกษาปริมาณและสมบัติของเสียที่เกิดขึ้นในเถ้า น้ำเสีย และแก๊สไอเสีย

ผลการศึกษาพบว่าตัวอย่างสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานโดยใช้กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันได้ แก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ มีองค์ประกอบของ คาร์บอนมอนนอกไซด์ ไฮโดรเจน และมีเทน ในสัดส่วนโดยปริมาตรเฉลี่ยเท่ากับ 14.66%, 16.38% และ 2.30% ตามลำดับ

มีค่าความร้อนเฉลี่ยเท่ากับ  $5.03 \text{ MJ/Nm}^3$  มีปริมาณของน้ำมันดินและฝุ่นต่ำคือ  $10.45 \text{ mg/Nm}^3$  สภาพที่เหมาะสมในการเดินระบบ ที่อัตราการไหลของแก๊ส  $180 \text{ Nm}^3/\text{hr}$  ให้สภาวะการทำงานของเครื่องยนต์ที่กำลังการผลิตไฟฟ้า  $47 \text{ kW}$  อัตราการใช้เชื้อเพลิงตัวอย่างเท่ากับ  $2.09 \text{ kg/kWh}$  ให้ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Gasification efficiency) ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า (Electrical efficiency) และประสิทธิภาพเครื่องยนต์ (Engine-generator efficiency) เท่ากับ  $67.99\%$ ,  $12.27\%$  และ  $18.75\%$  ตามลำดับ มีปริมาณเถ้าเกิดขึ้น เท่ากับ  $0.64 \text{ kg/kWh}$  การกำจัดกากตะกอนโดยกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันสามารถลดปริมาณกากตะกอนก่อนฝังกลบได้สูงถึง  $70\%$

วีรชัย อางหาญ และคณะ (2553) ได้ศึกษาการนำเอาเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง (RDF-5) มาทดสอบเดินระบบ โดยเชื้อเพลิงมี  $\varnothing 45 \text{ mm} \times 40\text{-}45$  มีความหนาแน่น  $430 \text{ kg/m}^3$  ความชื้น  $\sim 11.30 \text{ \%wb}$  โดยใช้ต้นแบบโรงไฟฟ้าชีวมวลที่ใช้ทดสอบ เป็นโรงไฟฟ้าชีวมวล ขนาดกำลังการผลิต  $100 \text{ กิโลวัตต์}$  ที่ใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน ชนิดไหลลง (Downdraft gasification) โดยเดินระบบต่อเนื่อง  $9$  ชั่วโมง ผลการศึกษา พบว่า แก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง ในช่วงแรกของการเดินระบบ (ชั่วโมงที่  $0\text{-}3$ ) มีสัดส่วนของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ที่ค่อนข้างต่ำ โดยค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าระหว่าง  $3.44\text{-}3.99 \text{ MJ/Nm}^3$  ทั้งนี้เมื่อเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงเข้าสู่สภาวะเสถียร ส่งผลให้คุณภาพของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตสูงขึ้น โดยในช่วงของชั่วโมงที่  $3\text{-}9$  ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงอยู่ในช่วง  $\sim 4.38 \text{ MJ/Nm}^3$  โดยมีองค์ประกอบของ  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$  และ  $\text{CH}_4$  ในสัดส่วนโดยปริมาตรเฉลี่ยระหว่าง  $\sim 12.6457\%$ ,  $\sim 12.4177\%$  และ  $\sim 1.0815\%$  ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ปรากฏการณ์ที่พบว่าการนำเชื้อเพลิงขยะ RDF-5 มาใช้กับระบบแก๊สซิฟิเคชัน เตาปฏิกรณ์ชนิดไหลลง (Downdraft gasification) ยังมีข้อจำกัดในการเดินระบบให้เสถียรได้ยาก เนื่องจากเชื้อเพลิงมีองค์ประกอบที่หลากหลายมาเป็นส่วนผสม อีกทั้งเชื้อเพลิงที่มีความหนาแน่นสูงจะส่งผลให้การถ่ายเทอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์เกิดขึ้นได้ช้า

## 2.7 เทคโนโลยีพลาสติกมาเชิงความร้อน

แก๊สซิฟิเคชันเป็นกระบวนการทางอุณหเคมีแรกที่มีใช้กับอุตสาหกรรม โดยเริ่มต้นในช่วงท้ายของศตวรรษที่ 19 และถูกพัฒนาในช่วงการพัฒนาอุตสาหกรรมในประเทศทางยุโรป เพื่อใช้ผลิตน้ำมันและแก๊สเพื่อเพลิงจากถ่านหิน หลังจากสงครามโลกครั้งที่สอง การใช้เตาผลิตแก๊ส (Gasifier) ก็ลดลงอย่างมาก เนื่องมาจากปิโตรเลียมหาได้ง่าย ในช่วงปี ค.ศ. 1970s-1980s ได้มีการใช้กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันอีกครั้ง เพื่อการผลิตเชื้อเพลิงสังเคราะห์ (Synthetic fuels) และในช่วงปีนั้น (ค.ศ. 1980s) ประเทศสหรัฐอเมริกา ยุโรป และญี่ปุ่น ได้ริเริ่มใช้กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

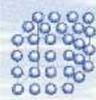
ในการบำบัดของเสีย ปัจจุบัน ได้มีการใช้เตาผลิตแก๊สไอเชิงอุตสาหกรรมทั่วโลกมากกว่า 150 โรงงาน โดยส่วนใหญ่จะใช้ชีวมวล และถ่านหินเป็นวัตถุดิบ

ในประเทศญี่ปุ่นได้มีการใช้กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันสำหรับการขยะชุมชนอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นประเทศที่มีพื้นที่ขนาดเล็ก ไม่มีพื้นที่เพียงพอสำหรับการฝังกลบ ส่วนในประเทศทางยุโรป มีโรงงานไม่มากนักที่ใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันสำหรับการขยะ ตัวอย่างเช่น กระบวนการแบบ Thermoselect ได้ถูกสร้างในประเทศเยอรมนี แต่ก็ประสบปัญหาทางด้านเทคนิค และได้ปิดลงในที่สุด บริษัท Siemens ก็ประสบปัญหาเดียวกันในการใช้กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันสำหรับกำจัดของเสียที่โรงงานในเมือง Fürth และมีอุบัติเหตุร้ายแรงที่โรงงานนั้นเนื่องจากการอุดตันของของเสียในเตาไพโรไลซิส ซึ่งทำให้เกิดแรงดันสูงมาก และมีการปลดปล่อยแก๊สไพโรไลซิสออกมา แม้ว่าปัญหานี้ได้มีการแก้ไขแล้ว แต่ก็ทำให้ได้รับการต่อต้านและต้องหยุดทำงานในที่สุด หลังจากนั้น

นอกเหนือจากประเทศเยอรมนี กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันสำหรับขยะได้รับการตอบรับที่ดีมากกว่าการเผาไหม้ตรงเนื่องจากมีลดการปลดปล่อยมลพิษสู่สิ่งแวดล้อมซึ่งเป็นจุดขายของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันสำหรับการจัดการขยะเมื่อเทียบกับการเผาไหม้โดยตรง

### 2.7.1 พลาสมาเชิงความร้อน (Thermal plasma)

พลาสมาเชิงความร้อน หรือ “สถานะที่ 4 ของสสาร” คือ ส่วนผสมของไอออน อิเล็กตรอน และอนุภาคที่เป็นกลาง เป็นสถานะที่สามารถกลายเป็นไอและทำลายพันธะทางเคมีได้ (รูปที่ 2.12) พลาสมาเกิดจากการแตกตัวของประจุของแก๊ส เนื่องจากอาร์คทางไฟฟ้าอย่างต่อเนื่องระหว่างขั้วบวกและขั้วลบของหัวพลาสมา หรือกล่าวอีกอย่างหนึ่งคือ โมเลกุลของแก๊สถูกทำให้ชนกับประจุอิเล็กตรอนและทำให้เกิดอนุภาคที่มีประจุ เมื่ออนุภาคมีประจุเพียงพอแล้ว (ทั้งขั้วบวกและลบ) แก๊สก็จะเริ่มนำไฟฟ้าได้เอง นอกจากนี้ การชนกันของอนุภาคที่มีประจุจะปลดปล่อยความร้อนและเกิดเป็นลำแสงอาร์ค หรือเรียกว่า พลาสมา และเมื่อแก๊สที่เป็นไอออนถูกทำให้ผ่านขั้วที่ความเร็วสูงจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเข้มข้นสูงและทำให้เกิด ไอพ่นพลาสมา (Plasma jet) พลังงานที่ปลดปล่อยออกมาในรูปพลาสมาจะมีอุณหภูมิสูงมากกว่า 5,000 องศาเซลเซียส

Solid	Liquid	Gas	Plasma
Example <b>Ice</b> $H_2O$	Example <b>Water</b> $H_2O$	Example <b>Steam</b> $H_2O$	Example <b>Ionized Gas</b> $H_2 \rightarrow H^+ + H^+ + 2e^-$
<b>Cold</b> $T < 0^\circ C$	<b>Warm</b> $0 < T < 100^\circ C$	<b>Hot</b> $T > 100^\circ C$	<b>Hotter</b> $T > 100,000^\circ C$ I>10 electron Velis!
			
<b>Molecules Fixed in Lattice</b>	<b>Molecules Free to Move</b>	<b>Molecules Free to Move, Large Spacing</b>	<b>Ions and Electrons Move Independently, Large Spacing</b>

รูปที่ 2.12 สภาวะของพลาสมา (ที่มา : The recovered energy system, Online)

ความร้อนอุณหภูมิสูงนี้เองที่นำมาใช้ในการทำให้ขยะมูลฝอยสิ้นซากไป เนื่องจากกระบวนการดังกล่าวให้ความร้อนสูงมากจึงมักใช้กับเครื่องกำเนิดแก๊สเชื้อเพลิง (Gasifier) เพื่อทำให้อุณหภูมิของสารอินทรีย์ในขยะมูลฝอยเปลี่ยนรูปกลายเป็นแก๊สเชื้อเพลิง นอกจากนี้ความร้อนที่สูงนี้ยังนำมาใช้ในการสลายเถ้าที่เหลืออยู่ในขยะมูลฝอยให้กลายเป็นสลิกแก้ว (Slag หรือ Vitrification) และทำให้โลหะหนักที่ไม่กลายสภาพเป็นแก๊สแต่คงอยู่ในเถ้ากลายเป็นเนื้อเดียวกับสลิกแก้ว ทำให้สามารถนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปใช้ประโยชน์ในการก่อสร้างได้โดยไม่ต้องกังวลเรื่องการรั่วไหลของโลหะพิษที่อาจปนเปื้อนอยู่ในเถ้า

การใช้ประโยชน์ของพลาสมาเชิงความร้อนในการกำจัดของเสียได้รับความสนใจจากนักวิทยาศาสตร์และวิศวกรอย่างมาก เนื่องจากความสามารถเฉพาะในด้านการกลายเป็นไอ และการทำลายพันธะทางเคมี ข้อดีหลักของพลาสมาคือ มีความหนาแน่นและอุณหภูมิสูงมาก ซึ่งทำให้มีการถ่ายเทความร้อนและสารตั้งต้นสูง (Reactant) การติดตั้งมีขนาดเล็ก เปิดและปิดระบบได้รวดเร็วและง่ายนอกจากนั้น การใช้ไฟฟ้าเป็นตัวป้อนเข้าสู่ระบบยังมีจุดน่าสนใจอีกอย่างคือ จะแยกการเกิดความร้อนที่มาจากออกซิเจนได้ ทำให้ควบคุมระบบได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตาม การใช้ไฟฟ้าก็มีข้อเสียหลัก คือมีราคาแพง และยิ่งไปกว่านั้น ยังขาดข้อมูลเรื่องความน่าเชื่อถือซึ่งจำกัดการพัฒนาในระดับอุตสาหกรรม

เทคโนโลยีพลาสมาได้ถูกนำมาใช้ในการให้ความร้อนในอุตสาหกรรมต่างๆ โดยเป็นที่ยอมรับกันทั่วโลกในศตวรรษที่ 19 เทคโนโลยีพลาสมาได้ถูกพัฒนาขึ้นและใช้งานในทวีปยุโรปสำหรับ อุตสาหกรรมโลหะการ ในช่วงต้นศตวรรษที่ 20 อุตสาหกรรมเคมีได้ใช้อีเตอร์พลาสมา

(Plasma heater) เพื่อสกัดแก๊สอะซิทีลีนจาก แก๊สธรรมชาติในช่วงต้นของทศวรรษที่ 1960 องค์การบริหารการบินและอวกาศแห่งสหรัฐอเมริกา (NASA) ได้ใช้เทคโนโลยีพลาสมาในการจำลองสถานะอุณหภูมิสูงเพื่อทดสอบยานกระสวยอวกาศขณะที่กำลังเคลื่อนเข้าสู่ บรรยากาศโลก ในช่วงปี 1980 ได้มีการสร้างและใช้งานกระบวนการสัปดาห์พลาสมาขนาดใหญ่เพื่อใช้งาน อุตสาหกรรมหลากหลายประเภท โดยเฉพาะอุตสาหกรรมโลหะและเคมี ซึ่งต่อมาได้พัฒนาเพื่อกิจกรรมด้านสิ่งแวดล้อมและแปรรูปขยะมูลฝอยเป็นการประยุกต์ใช้งานเทคโนโลยีพลาสมาในการกำจัดขยะมูลฝอยชุมชน

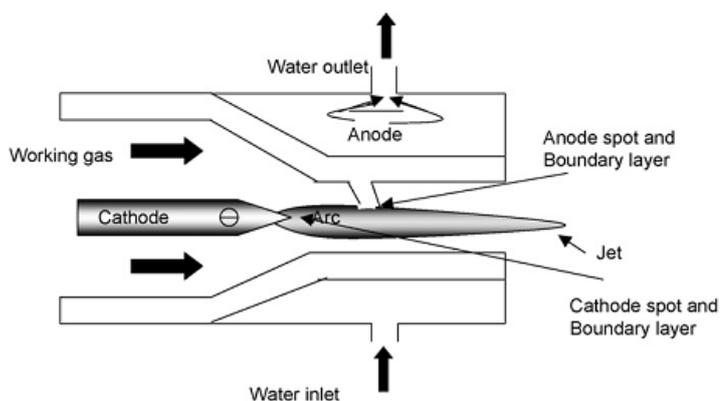
การประยุกต์ใช้ Plasma arc gasification สำหรับการจัดการกากของเสีย การปริมาณควบคุมปริมาณของออกซิเจนในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมาจำเป็นต้องควบคุมอย่างระมัดระวัง เช่นเดียวกับระบบ Gasification เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการเผาไหม้แบบสมบูรณ์ (Combustion) และให้เกิดปฏิกิริยา Gasification การทำให้เกิดความร้อนจัดในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมา และทำให้โมเลกุลของสารอินทรีย์แตกตัวออกมาเป็นโครงสร้างพื้นฐานอย่างง่ายของแก๊ส (Simple gaseous structure) เช่น  $\text{CO}$   $\text{H}_2$  และ  $\text{CO}_2$

## 2.7.2 ประเภทของหัวพลาสมาอาร์ค

พลาสมาสามารถผลิตได้ทั้งจากไฟฟ้ากระแสตรง คลื่นวิทยุ (Radio frequency: RF) และ ไมโครเวฟ (Microwave) สำหรับการบำบัดของเสียจะนิยมพลาสมาจากไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งสามารถแบ่งหัวทอร์ช (Torch) ได้เป็น 2 ประเภท คือ ทรานสเฟอร์อาร์ค (Transferred arc) และ นอนทรานสเฟอร์อาร์ค (Non-transferred arc)

### 2.7.2.1 Non-transferred arc

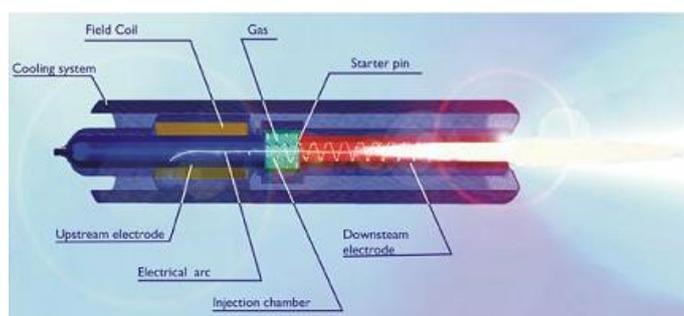
เป็นแบบที่ใช้กันทั่วไปในการบำบัดของเสีย โดยกระแสไฟฟ้าจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนจากการปลดปล่อยประจุจากขั้วบวกและขั้วลบภายใต้หัวจ่ายที่มีการหล่อเย็น ทำให้เกิดไอพ่นพลาสมาดังแสดงใน รูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 นอนทรานสเฟอร์พลาสมาอาร์ค (Non-transferred plasma arc)

อาร์คที่เกิดขึ้นจะอยู่ระหว่างขั้วลบที่วางตัวอยู่ในแนวแกน และขั้วบวกที่เป็นวงแหวน แก๊สจะถูกอัดให้ไหลผ่านชั้นขอบเขต (Boundary layer) ระหว่างช่องผ่านแก๊สและผิวด้านในของขั้วบวก ขั้วไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์หลักที่ต้องทนการกัดกร่อน และต้องถูกออกแบบให้สามารถลดอุณหภูมิโดยใช้น้ำในระยะเวลาสั้นๆ ได้ ถ้าขั้วมีประสิทธิภาพต่ำ พลังงานที่ได้จะมีค่าต่ำและอาจน้อยกว่า 50% ของพลังงานที่ป้อนเข้าไปได้ ซึ่งเป็นปัญหาหลักของผลิตพลาสมา อย่างไรก็ตาม พลาสมาแบบนี้จะให้การกระจายตัวของอุณหภูมิที่สม่ำเสมอ และสามารถลดขนาดเพื่อให้เหมาะกับการติดตั้งขนาดเล็กได้ง่าย

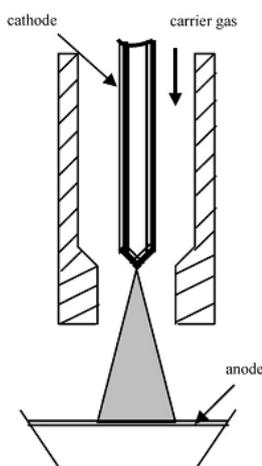
นอนทรานสเฟอร์พลาสมามี 2 แบบ คือ แบบที่ใช้ขั้วร้อน (Hot electrodes) มีอุณหภูมิพลาสมาระหว่าง 6,000 ถึง 15,000 K และแบบที่ใช้ขั้วเย็น (Cold electrodes) ซึ่งได้อุณหภูมิต่ำกว่า 7,000 K ผู้ผลิตหลักของพลาสมาแบบนี้ ได้แก่ Europlasma และ Westinghouse ตัวอย่างหัวพลาสมาจากบริษัท Europlasma แสดงดังรูปที่ รูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 หัวพลาสมาจากบริษัท Europlasma

### 2.7.2.2 Transferred arc

พลาสมาแบบที่สองนี้ กระแสไฟฟ้าจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนภายในผ่านช่องสำหรับผ่านแก๊ส ขั้วไฟฟ้าอันหนึ่งจะอยู่ภายในหัวพลาสมา ส่วนอีกอันจะอยู่ด้านนอก ตัวไอพ่นพลาสมา (Plasma jet) จะถูกปลดปล่อยออกมา ตัวขั้วไฟฟ้าด้านนอกจะมีลักษณะเป็นวงกลมศูนย์กลางร่วม (Concentric) กับไอพ่น อุปกรณ์พลาสมาแบบนี้จะมีขั้วบวกและลบค่อนข้างใหญ่แยกออกจากกัน ในระดับ 2-3 cm ถึง 1 m ดังแสดงใน รูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ทราสเฟอ์พลาสมาอาร์ค (Transferred arc torch)

เนื่องจากเปลวพลาสมาเกิดขึ้นภายนอกหัวกำเนิด (Torch) หัวพลาสมาแบบนี้จึงสามารถใช้ได้กับพลาสมาที่ให้ความร้อนสูงได้ หัวแบบ ทราสเฟอ์นี้จะมีประสิทธิภาพดีกว่าแบบนอนทราสเฟอ์ เพราะที่ความร้อนที่สูงสูญเสียเนื่องจากการหล่อเย็นน้อย ที่จริงแล้ว หัวแบบนี้สามารถสร้างได้จากเหล็กที่หล่อ หรือที่ใช้กันทั่วไปก็เป็นวัสดุทนความร้อน ซึ่งอาจจะมีการสูญเสียช้าๆ เนื่องจากการระเหิด ดังนั้น ความร้อนที่สูงสูญเสียในกรณีนี้จึงน้อยมาก แต่ขั้วไฟฟ้าจะต้องมีการเปลี่ยนค่อนข้างบ่อย ขั้วบวกจะทำมาจากโลหะที่สามารถนำความร้อนได้สูง และที่สำคัญจะต้องมีการลดความร้อนให้ทัน ที่หน้าสัมผัสของขั้วบวกเพื่อป้องกันการหลอมละลาย เนื่องจากเป็นจุดที่รับความร้อนทั้งหมด

โดยสรุป แม้ว่าหัวพลาสมาแบบทราสเฟอ์จะมีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบนอนทราสเฟอ์ แต่ในการใช้งานจริง หัวแบบนอนทราสเฟอ์เป็นที่นิยมมากกว่า เนื่องจากให้การผสมระหว่างเปลวพลาสมากับวัสดุของเสียที่ดี และในการบำบัดของเสียจริงแล้วๆ ไม่จำเป็นต้องใช้ความร้อนสูงขนาดที่ได้จากแบบทราสเฟอ์

### 2.7.3 การนำพลังงานกลับมาใช้

ระบบพลาสมาอาร์คต้องการกำลังในการสร้างพลาสมาอาร์คเพื่อใช้ทำลายขยะมูลฝอย ในขณะเดียวกัน ระบบนี้ก็สามารถผลิตพลังงานได้เช่นกัน โดยเมื่อขยะมูลฝอยสัมผัสกับ Ionized gas สารอินทรีย์ที่อยู่ในขยะมูลฝอยจะถูกเปลี่ยนรูปไปแก๊สที่เผาไหม้ได้ (Syngas) สารอนินทรีย์จะสลายตัวกลายเป็น Slag หรือเถ้าอยู่บริเวณก้นของเครื่องปฏิกรณ์ แก๊สเชื้อเพลิงหรือแก๊สสังเคราะห์ (Syngas) ที่ผลิตได้จากปฏิกรณ์ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ เช่นเดียวกับแก๊สสังเคราะห์จากระบบแก๊สซิฟิเคชัน

### 2.7.4 การควบคุมผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

#### 1) มลพิษอากาศ

ในระบบพลาสมาอาร์ค โลหะหนักต่างๆ ที่ปนอยู่ใน ขยะมูลฝอย เช่น พรอท ตะกั่ว สังกะสี และแคดเมียม อาจถูกเปลี่ยนสภาพให้กลายเป็น ไอ ได้ ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ หากเครื่องปฏิกรณ์ มีอุณหภูมิ การทำงานต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของสารเหล่านี้ โลหะหนักจะถูกเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของ Slag แต่ในกรณีที่อุณหภูมิในการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์สูงกว่าจุดหลอมเหลวของโลหะหนัก โลหะหนักที่ปนอยู่ในขยะมูลฝอยจะถูกเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของ ไอระเหยหรือในรูปของแก๊สแทน

ไดออกซิน (Dioxins) เป็นสารประกอบทางเคมีในกลุ่ม Polychlorinated dibenzodioxins (PCDDs) ไดออกซินเป็นผลิตภัณฑ์ส่วนเกินที่ได้จากการเผาสารอินทรีย์ที่มี chlorine เป็นองค์ประกอบ จะเกิดขึ้นในกระบวนการเผาขยะที่มีการเผาไหม้ที่อุณหภูมิต่ำ วิธีการกำจัดสารไดออกซินที่ดีที่สุดคือ การเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 850 °C โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าเป็นสารที่มีการปนเปื้อน จะต้องใช้อุณหภูมิ สูงกว่า 1,000 °C ซึ่งการนำพลาสมาเชิงความร้อนมาใช้ ให้เกิดการเผาไหม้ขยะที่อุณหภูมิสูง สามารถลดปัญหาไดออกซินได้

อย่างไรก็ดี การควบคุมมลพิษที่ปลดปล่อยออกมาทางอากาศจำเป็นต้องมีระบบบำบัด และมีการติดตามตรวจวัดคุณภาพอากาศอย่างสม่ำเสมอ

#### 2) มลพิษกากของแข็ง

เทคโนโลยีพลาสมาอาร์คจะทำให้ขยะมูลฝอยเปลี่ยนสภาพเป็น slag แก้วหลอมเหลว เนื่องจากหลอมละลายของอินทรีย์สารที่อยู่ในขยะมูลฝอย ระบบกำจัดขยะมูลฝอยที่มีเถ้าหรือ slag ออกมาจากระบบจำเป็นต้องผ่านการทดสอบ Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) ที่กำหนดโดย USEPA การทดสอบ TCLP มีวัตถุประสงค์เพื่อวัดปริมาณโลหะหนัก 8 ชนิดที่อาจรั่วไหลออกมาจากตัวอย่างที่ทำการทดสอบ เนื่องจากโลหะหนักทั้งหมดจะหลอมรวมกับ Slag ที่ออกมาจากปฏิกรณ์พลาสมาอาร์ค ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าปฏิกรณ์พลาสมาอาร์คที่ใช้ในการกำจัดขยะ

อันตรายหรือขยะติดเชื่อจะมีค่า TCLP ที่ต่ำกว่ามาตรฐานที่ยอมให้ได้ อาจกล่าวได้ว่า เทคโนโลยีพลาสมาอาร์คใช้ความร้อนสูงในการหลอมละลายอินทรีย์สารในขยะมูลฝอยและทั้งหมดจะไม่มีโอกาสรั่วกลับคืนสู่สิ่งแวดล้อมได้อีก โดย รูปที่ 2.16 แสดงลักษณะของ Slag melting ในเตาปฏิกรณ์พลาสมา



รูปที่ 2.16 ลักษณะของ Slag melting ในเตาปฏิกรณ์พลาสมา (ที่มา : Moustakas, 2005)

### 3) มลพิษทางน้ำ

ระบบผลิตกำลังทั้งหมดต้องการน้ำสำหรับการหล่อเย็นและการผลิตไอน้ำ อย่างไรก็ตาม น้ำนี้โดยทั่วไปไม่ต้องการการบำบัดเนื่องจากระบบสามารถนำน้ำเหล่านี้กลับไปใช้ใหม่ได้อีกและไม่นำมลพิษออกมาจากกระบวนการ ยกเว้นระบบที่ใช้แก๊สสังเคราะห์ที่ได้จากระบบเพื่อเผาไหม้ใน CTCC เนื่องจากแก๊สสังเคราะห์นี้ต้องการการทำความสะอาดก่อนนำไปใช้งานเพื่อสกัดคลอรีน ซัลเฟอร์และสารพิษอื่นๆ อุปกรณ์ที่ใช้อาจประกอบด้วยสกริปเปอร์ เครื่องกรองและระบบดูดซับ

## 2.7.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านเทคโนโลยีพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน

### 2.7.5.1 ระบบ Plasma gasification melting process

การวิจัยและพัฒนาด้านการนำความร้อนจากพลาสมาอาร์ค มาใช้งานด้านสิ่งแวดล้อม จะเป็นการใช้พลาสมาอาร์คทางความร้อนในระบบแก๊สซิฟิเคชันเพื่อกำจัดของเสียอันตราย กากของเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนัก การทำลายกากกัมมันตรังสี โดยคุณสมบัติของอุณหภูมิที่สูงมากนี้ สามารถทำลายองค์ประกอบหลากหลายทั้งสารอินทรีย์และอนินทรีย์ให้หลอมละลายและคงรูปผลึกแก้ว ที่เสถียรไม่สามารถปลดปล่อยมลพิษออกสู่สิ่งแวดล้อมต่อไป หรือเรียกว่า Plasma gasification melting process (Moustakas et al., 2005, 2008; Bert et al., 2006; Huang et al.

2007; Dave et al. 2010; Ojha et al., 2012; Zhang et al., 2012; Yoon et al., 2013) ทั้งนี้สรุปเกี่ยวกับระบบพลาสมาอาร์คกับระบบแบบแก๊สซิฟิเคชันเพื่อใช้ทำลายขยะอันตรายและขยะพิษ (Plasma gasification melting process) การดั่งแสดงใน ตารางที่ 2.14

ตารางที่ 2.14 ระบบพลาสมาอาร์คกับระบบแบบแก๊สซิฟิเคชัน เพื่อใช้ทำลายขยะอันตรายและขยะพิษ (Plasma gasification melting process)

แหล่งอ้างอิง	เชื้อเพลิง	LHV MJ/kg	พลาสมาแก๊ส	กำลัง (kW)	Syngas Yield (Nm <sup>3</sup> /kg)	H <sub>2</sub> (%vol)	CO (%Vol)	LHV Syngas (MJ/Nm <sup>3</sup> )
Tang et al. 2009	พลาสติก Polypropylene	37.33	H <sub>2</sub> O (Steam)	35.2	2.17	27.06	13.33	5.39
Carabin et al. 2005	ขยะอันตราย	-	H <sub>2</sub> O + air	-	-	28.3	18.8	6.0

Bert et al. (2006) กระบวนการ Plasma gasification เป็นเทคโนโลยีด้านพลังงานขั้นสูงคือเอาคุณสมบัติความร้อนที่สูงมากๆ ในสถานะของพลาสมา ที่เกิดจากความแตกต่างระหว่างขั้วบวกและขั้วลบของแท่งโลหะกับ Graphite electrode เมื่อเกิดการแลกเปลี่ยนประจุจึงเกิด Thermal plasma ซึ่งผลที่เกิดขึ้นจะทำให้ภายในเตาปฏิกรณ์มีอุณหภูมิสูง (15,000 °C) และสามารถแยกอะตอมของธาตุที่เป็นองค์ประกอบใน RDF ออกได้ ซึ่งเหมาะสมกับเชื้อเพลิงขยะที่มีความหลากหลายของคุณลักษณะทางเคมี โดยโมเลกุลของสารอินทรีย์จะสลายเป็น Synthesis gas ที่อุณหภูมิสูงในขณะเดียวกัน องค์ประกอบของสารอนินทรีย์ (Glass, Metals, Silicates, Heavy metals) จะกลายเป็นของเหลวที่อุณหภูมิสูง เมื่อเย็นตัวลงจะกลายเป็นเถ้าหลอม

การดำเนินการวิจัย โดยเตาปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง เป็น Reactor vessel ที่ถูกหลอมให้มีความหนา 10 cm และ Plasma torch ทำจาก Graphite ซึ่งติดตั้งส่วนบนของเตา และส่วนล่างของเตา จะใส่ Crude iron เนื่องจากความแตกต่างระหว่างขั้วบวกของแท่ง Graphite electrode และ Crude iron ที่เป็นขั้วลบ การแลกเปลี่ยนประจุดังกล่าว จะเกิด Thermal plasma ซึ่งผลที่เกิดขึ้นจะทำให้อุณหภูมิภายในเตามีค่าประมาณ 1600 °C และเชื้อเพลิง RDF ที่ถูกเตรียมให้เป็นชิ้นเล็ก จะถูกใส่เข้าไปด้านบนของ Reactor โดยใช้สกรู สำหรับการศึกษาร่องรอยของเถ้าหลอม โดยใช้เครื่อง X-ray diffraction (XRD)

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบใน RDF พบว่ามี Ba, Cr, Cu, Pb, Ni, Sn และ Fe ในปริมาณที่สูง เนื่องจากธาตุเหล่านี้เป็นองค์ประกอบในพลาสติก (PVC) สำหรับองค์ประกอบของ

แก๊สสังเคราะห์ ประกอบด้วย  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{THC}$ ,  $\text{O}_2$  มีค่าเท่ากับ 17.6, 8.1, 3.6, 2.8 และ 1.1% ตามลำดับ ผลการตรวจวัดมลพิษที่ผ่านระบบ Oxidizer reactor และระบบกรองพบว่าปริมาณของฝุ่นมีการปนเปื้อนของโลหะหนักสูง ดังนั้นในการใช้งานจริงต้องออกแบบให้ฝุ่นตกตะกอนในห้องเผาไหม้เพิ่มขึ้น การศึกษาองค์ประกอบของเถ้าหลอม พบว่าองค์ประกอบหลักเป็นโลหะ (Calcium, aluminate, Calcium silicate และ Calcium aluminium silicate) สำหรับผลการทดสอบการ Leaching ถูกยอมรับให้ผ่านมาตรฐานของเบลเยียม

การทดสอบครั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่า Plasma gasification เป็นเทคโนโลยีที่มีศักยภาพสำหรับใช้กำจัดขยะ/ของเสียที่มีค่าความร้อนสูง ให้สามารถคืนรูปพลังงานกลับมาใช้ได้ อย่างไรก็ตามการใช้กระบวนการ Plasma gasification จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมียุทธศาสตร์ในการทำความสะอาดแก๊สที่มีประสิทธิภาพ และหาระดับการปนเปื้อนที่เหมาะสมว่าจะไม่มีผลสำหรับการนำไปใช้งานกับเครื่องยนต์แก๊สหรือเทอร์โบที่ ซึ่งมลพิษหลักที่จำเป็นต้องศึกษา คือ Dust, Heavy metal, Sulfur compound, Nitrogen compound ( $\text{NH}_3$ ,  $\text{HCN}$ ), Halogen ทั้งนี้การศึกษาค่าความเป็นไปได้ยังไม่สามารถประเมินได้เนื่องจากความไม่เสถียรในการทดสอบเดินระบบ

Mountouris et al. (2006) พิจารณาว่าเทคโนโลยีพลาสมาแก๊สซิเคชัน มีความเหมาะสมกับการกำจัดขยะชุมชน ระบบมีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยงานวิจัยจะพัฒนาโมเดล Thermodynamic ของพลาสมาแก๊สซิเคชัน โมเดลนี้มีชื่อเรียกว่า GasiEq เพื่อนำไปทำนายตัวแปรต่างๆ ที่สภาวะสมดุลของระบบ ตัวแปรที่ได้จากโมเดล คือ สมการความสัมพันธ์องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงกับความชื้นของเชื้อเพลิง องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงสัดส่วนโมลของออกซิเจนต่อโมลของเชื้อเพลิง และองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงอุณหภูมิ โดยพบว่าสภาวะที่ทำให้ประสิทธิภาพสูงสุด คือ อุณหภูมิประมาณ 1273 K จะให้ค่าพลังงานของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้เท่ากับ  $1 \text{ kWh/Nm}^3$  โดยความชื้นของเชื้อเพลิงต้องต่ำกว่า 0.15 และ สัดส่วนโมลของออกซิเจนกับโมลของเชื้อเพลิง เท่ากับ 0.52 - 0.70 mol

Mountouris et al. (2008) ได้นำโมเดลที่พัฒนาขึ้นในปี 2006 มาทำนายอัตราการป้อนเชื้อเพลิงจากตะกอน โดยซึ่งพบว่าที่สภาวะเหมาะสม คือ เชื้อเพลิง 250 ตันต่อวัน และความชื้นของเชื้อเพลิง ไม่เกิน 68% โดยพลังงานสุทธิที่ผลิตได้ของระบบ คือ 2.85 MW

Minutillo et al. (2009) ได้พัฒนา Thermochemical model สำหรับโรงไฟฟ้าเทคโนโลยีพลาสมาแก๊สซิเคชันและความร้อนร่วม (Plasma gasification combine cycle (IPGCC) power plant) ที่ใช้ RDF จากขยะมาเป็นเชื้อเพลิง ระบบนี้ใช้ Air เป็น Plasma gas แต่เงื่อนไขของการสร้างโมเดลนี้ได้ทำการ Simulation โดยเปลี่ยน Plasma gas ออกเป็น 3 แบบ คือ Air,  $\text{O}_2$  40% v. -  $\text{N}_2$  60% v. และ Air + Oxygen โมเดลที่พัฒนาขึ้นนี้จะนำมาใช้ในการทำนายองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง และความต้องการพลังงานในเตาปฏิกรณ์พลาสมาแก๊ส และหาสภาวะที่เหมาะสมของการ

เดินระบบ คือ มีอัตราการใช้พลังงานจาก Plasma torch ต่ำ แต่ให้ค่าพลังงานจากความร้อนจากแก๊สเชื้อเพลิงสูง โดยพบว่า การใช้ Air + Oxygen เป็น Plasma gas ที่ให้ค่าพลังงานของระบบประมาณ 69%

N Lapa et al. (2002) ได้ศึกษาเกี่ยวกับองค์ประกอบของสารพิษที่จะปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม ของเทคโนโลยีพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน โดยทดสอบกับขยะอันตราย ผลการศึกษาสรุปว่าการปลดปล่อยขององค์ประกอบของสารพิษในเถ้าหลอมมีต่ำมากเนื่องจาก อนุภาคเหล่านั้นถูกทำลายที่อุณหภูมิสูง

### 2.7.5.2 ระบบ Plasma External energy หรือ Allothermal

ในส่วนของการนำพลาสมาอาร์คทางความร้อนมาใช้ในงานด้านพลังงาน อาทิ การใช้ความร้อนจากพลาสมาในรูปของแหล่งความร้อนภายนอก (External energy หรือ Allothermal) สำหรับระบบทางความร้อนแบบต่างๆ เพื่อควบคุมอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์และเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ เช่น ในระบบ Allothermal plasma gasification หรือ Allothermal plasma pyrolysis เป็นการนำความร้อนจากพลาสมาอาร์คมาใช้ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน/ไพโรไลซิส เพื่อการแตกสลายโมเลกุลของทาร์ที่ปนเปื้อนในแก๊สเชื้อเพลิง และเพิ่มสัดส่วนของแก๊สไฮโดรเจน เพื่อให้ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงสูงขึ้น ซึ่งมีผลให้ประสิทธิภาพของระบบสูงขึ้น (Tang et al., 2003, 2007; Huang et al., 2007; Dave et al. 2010; Fabry et al., 2013) ทั้งนี้สรุป การดั่งแสดงในตารางที่ 2.15

ตารางที่ 2.15 เทคโนโลยีพลาสมาเป็นความร้อนภายนอก (External energy หรือ Allothermal) สำหรับระบบทางความร้อนแบบต่างๆ

แหล่งอ้างอิง	เชื้อเพลิง	LHV MJ/kg (เชื้อเพลิง)	พลาสมาแก๊ส	กำลัง (kW)	Syngas Yield (Nm <sup>3</sup> /kg)	H <sub>2</sub> (%vol)	CO (%Vol)	LHV (Syngas) (MJ/Nm <sup>3</sup> )	% $\eta_{cg}$
Hrabovsky et al., 2006	ขี้เลื่อย	-	CO+O <sub>2</sub>	95	1.0	22	44	8.66	-
Carabin et al, 2005	ขยะชุมชน	-	H <sub>2</sub> O + air	-	-	8-14	20-29	4.1-5.2	-
Willis et al, 2010	ขยะชุมชน/ยางรถยนต์	13.95	O <sub>2</sub>	3.22	1.10	22.62	40.46	11.9	79

ตารางที่ 2.15 เทคโนโลยีพลาสมาเป็นความร้อนภายนอก (External energy หรือ Allothermal)  
สำหรับระบบทางความร้อนแบบต่างๆ (ต่อ)

แหล่งอ้างอิง	เชื้อเพลิง	LHV MJ/kg (เชื้อเพลิง)	พลาสมา แก๊ส	กำลัง (kW)	Syngas Yield (Nm <sup>3</sup> /kg)	H <sub>2</sub> (%vol)	CO (%Vol)	LHV (Syngas) (MJ/Nm <sup>3</sup> )	% $\eta_{cg}$
Rutberg et al., 2011	เศษไม้	13.0	Air	2.16 <sup>(2)</sup>	2.45	28	23.6	13.5	84
Tendler et al., 2005	ไม้	16	Air	3.6 <sup>(2)</sup>	2.48	24.5	31.4	6.16	78
Tendler et al., 2005	RDF <sup>(1)</sup>	15	Air	3.82 <sup>(2)</sup>	2.46	26.3	27.5	5.88	77
Tendler et al., 2005	ยางรถยนต์	33	H <sub>2</sub> O	6.66 <sup>(2)</sup>	5.03	30.6	24	5.89	75

หมายเหตุ: <sup>(1)</sup> RDF เป็นเชื้อเพลิงผสมระหว่าง ไม้สับ, กระดาษ, พลาสติก, เส้นใย, ยางหนัง

<sup>(2)</sup> กำลังงานที่ป้อนจาก Plasma arc ในหน่วย MJ ต่อเชื้อเพลิง 1 kg

### 2.7.5.3 ระบบ Plasma-assisted gasification

ทั้งนี้การวิจัยและพัฒนาในด้านการนำเอาความร้อนจากพลาสมาอาร์ค มาช่วยในระบบแก๊สซิฟิเคชัน (Plasma-assisted gasification) เพื่อเป็นความร้อนเสริมให้กับโซนการเผาไหม้ (Oxidation zone) สำหรับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ยังเป็นการวิจัยในระดับห้องปฏิบัติการ (Sforza et al. 2009; Fabry et al. 2012)

### 2.7.6 ความก้าวหน้าของการพัฒนาเทคโนโลยีพลาสมาเชิงความร้อนในต่างประเทศ

ระบบพลาสมาอาร์คกับระบบแบบแก๊สซิฟิเคชันเพื่อใช้ทำลายขยะอันตรายและขยะพิษ (Plasma gasification melting process) ที่ใช้งานในระดับเชิงพาณิชย์ในต่างประเทศ เป็นระบบที่มีการลงทุนสูง เป็นระบบขนาดใหญ่ ซึ่งส่วนใหญ่มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้อุณหภูมิที่สูงในการทำลายองค์ประกอบของขยะอันตราย สารอินทรีย์และอนินทรีย์ที่มีพิษ ให้คงรูปเป็นผลึกแก้ว เพื่อไม่ให้ปลดปล่อยมลพิษออกสู่สิ่งแวดล้อมต่อไป ซึ่งระบบถูกออกแบบใช้งานทั้งในรูปแบบ Thermal plasma combustion และ Therma plasma gasification มีขนาด 1-100 MWe ซึ่งสรุปได้ดังต่อไปนี้

### 2.7.6.1 เทคโนโลยีพลาสมาเชิงความร้อนของบริษัท Europlasma

Europlasma เป็นบริษัทในประเทศฝรั่งเศสและเป็นผู้นำในด้านเทคโนโลยีพลาสมาสำหรับบำบัดของเสีย หัวพลาสมาที่บริษัทนี้พัฒนาเป็นแบบนอนทราสเฟอร์สำหรับใช้กับเตาเผา (Incinerator) โดยที่ของเสียจะถูกให้ความร้อนโดยตรงจากไอพ่นพลาสมาและกลายเป็นผลึกแก้ว (Vitrification) นอกจากนี้ Europlasma ยังได้พัฒนากระบวนการในการบำบัด Asbestos ที่ปนเปื้อนในของเสีย

ประสิทธิภาพทางความร้อนของหัวพลาสมาแบบใช้ไฟฟ้ากระแสตรงจะหาได้จากความร้อนที่ได้จากไอพ่นพลาสมาหารด้วยพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่ระบบ ซึ่งจะมีค่าประมาณ 75-80% หัวพลาสมาจะประกอบไปด้วย แท่งทองแดงที่มีแกนร่วมสองแท่ง และแยกจากกันโดยใช้ช่องว่าง ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ป้อนแก๊สเข้าสู่ระบบ บริษัท Europlasma ได้พัฒนาหัวพลาสมาที่ใช้ในการแยกอนุภาค (crack) ของแก๊สเชื้อเพลิง (Syngas) ที่ได้มาจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ซึ่งเรียกว่า “TurboPlasma”

กระบวนการที่ Europlasma พัฒนาเป็นแบบ Auto-thermal gasification process ดังแสดงใน รูปที่ 2.17 โดยระบบได้รวม ตัวแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อนำความร้อนจากแก๊สมาใช้ใหม่ ตัวคักจับน้ำมันดิน (Tar) และ กรด (Acids) รวมไปถึงเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้า

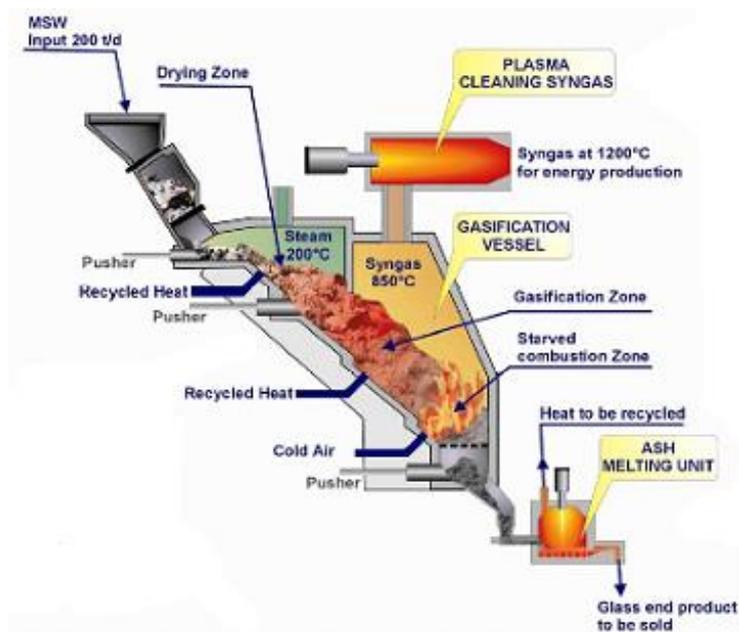
กระบวนการที่ออกแบบโดย Europlasma ไม่ได้ใช้พลาสมากับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน แต่หัวพลาสมาจะนำมาใช้กับแก๊สเชื้อเพลิงกับเตาที่ได้แทน แก๊สซิฟิเคชันในระบบนี้ประกอบไปด้วย

1) เตาแก๊สซิฟิเคชันแบบสโตเกอร์ (Stoker)

2) แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จะนำไปทำความสะอาดยุณหภูมิสูงกว่า 1,200 °C ด้วยพลาสมาเพื่อนำไปผลิตกระแสไฟฟ้า ที่สภาวะนี้ อนุมูลอิสระอินทรีย์ (Organics free radicals) ซึ่งได้แก่ Dioxins จะถูกทำลาย นอกจากนั้น การลดอุณหภูมิของแก๊สเชื้อเพลิง (Syngas) อย่างรวดเร็ว สาร Dioxins และ Furans จะไม่มีการก่อตัว

3) สุกท้าย ส่วนที่เป็น slag โลหะ และแร่ต่างๆ จะถูกนำไปหลอมละลายเป็นวัสดุเหลือ ส่วนนี้จะนำไปใช้ประโยชน์ได้อีก เช่น นำไปใช้ในงานสร้างถนน

บริษัท Europlasma ได้สร้างโรงงาน CHO-power ในฝรั่งเศสเมื่อเร็วๆ นี้ โดยในการสร้างใช้เวลา 18 เดือน มีกำลังการทำงานที่ 50,000 ตันของของเสียต่อปี ซึ่งทำให้ผลิตกระแสไฟฟ้าได้ 12 MW



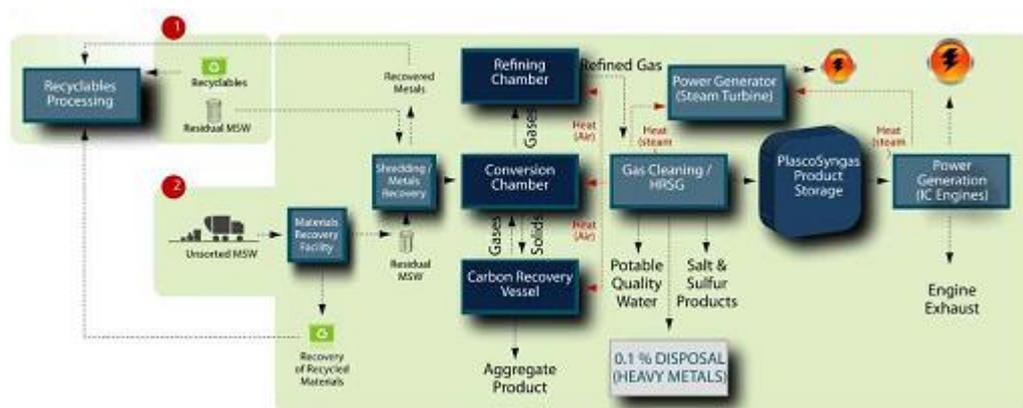
รูปที่ 2.17 เตาแบบ Auto-thermal gasifier (Europlasma)

### 2.7.6.2 เทคโนโลยีพลาสมาเชิงความร้อนของบริษัท Plasco

Plasco เป็นบริษัทเอกชนในประเทศแคนาดา ดำเนินการด้านการเปลี่ยนขยะเป็นพลังงาน ตั้งอยู่ที่เมือง Ottawa ขยะชุมชน (Municipal solid waste: MSW) จะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานโดยกระบวนการที่เรียกว่า Plasco conversion process โดยขยะที่ใช้ในระบบจะต้องมีการบำบัดก่อนนำไปใช้กับระบบ ได้แก่ การนำของเสียส่วนที่ยังมีค่าไปรีไซเคิล และการสับย่อย

ในระบบนี้ ขั้นแรก MSW จะถูกนำไปเปลี่ยนเป็นแก๊สเชื้อเพลิง (Syngas) ก่อน หลังจากนั้นก็นำแก๊สเชื้อเพลิงนี้ไปทำให้บริสุทธิ์โดยการพลาสมา แก๊สที่ได้นี้เรียกว่า PlascoSyngas และจะถูกส่งเข้าไปในระบบควบคุมเพื่อกำจัด ซัลเฟอร์ แก๊สที่เป็นกรด และโลหะหนัก ขั้นตอนต่อไปคือผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้เครื่องยนต์สันดาปภายใน ส่วนความร้อนที่เหลือจากเครื่องยนต์และระบบหล่อเย็นแก๊สเชื้อเพลิงก็จะนำกลับมาใช้ใหม่กับระบบผลิตไอน้ำ (Recovery steam generation) เพื่อผลิตไอน้ำมาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเทอร์ไบน์ หรือมาใช้ให้ความร้อนกับระบบอื่น ดังแสดงใน รูปที่ 2.18

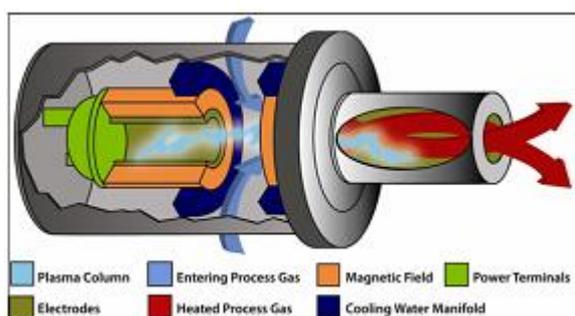
ส่วนในถังนำคาร์บอนกลับมาใช้ใหม่ (Carbon recovery vessel) จะทำหน้าที่รับเถ้าจากเตาแก๊สซิฟิเคชันเพื่อนำมาทำเป็นผลิตภัณฑ์โดยใช้ความร้อนจากพลาสมา ผลิตภัณฑ์นี้สามารถนำไปขายและใช้สำหรับก่อสร้างถนนได้ เนื่องจากผ่านมาตรฐานการปลดปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมที่กำหนดโดย Environmental Protection Agency (EPA)



รูปที่ 2.18 แผนผังของ Plasco conversion process

### 2.7.6.3 เทคโนโลยีพลาสมาเชิงความร้อนของบริษัท Alter NRG/Westinghouse Plasma Corporation

Alter NRG ได้ร่วมกับ Westinghouse Plasma Corporation (WPC) ในปี ค.ศ. 2006 และเป็นผู้นำในเทคโนโลยีพลาสมาแก๊สซีพีเคชั่นสำหรับการกำจัดขยะ หั้วพลาสมาที่ใช้เป็นแบบนอนทรานสเฟอร์ที่ประกอบไปด้วย แท่งทองแดงที่มีระบบน้ำหล่อเย็น 2 แท่ง แก๊สทำงานจะถูกอัดผ่านช่องระหว่างสองขั้วนี้ ดังแสดงใน รูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 หัวพลาสมาอาร์คแบบนอนทรานสเฟอร์ของ WPC

หัวพลาสมาแบบนี้แรกเริ่มถูกใช้สำหรับเพิ่มอุณหภูมิในการหลอมละลายโลหะ แต่การประยุกต์ใช้ที่สำคัญของหัวพลาสมาแบบนี้คือ การใช้ในการกำจัดขยะอันตราย และทำให้เถ้าที่ได้จากการเผา MSW เป็นผลึกแก้ว ในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา เทคโนโลยีนี้มีการพัฒนาเป็นอย่างมาก ในประเทศญี่ปุ่น ประสิทธิภาพทางความร้อนของหัวพลาสมาจาก WPC อยู่ในช่วง 60-75%



รูปที่ 2.20 เตาพลาสมาแก๊สซิไฟเออร์ ของ Alter NRG

กระบวนการทั้งหมดที่พัฒนาโดย Alter NRG จะประกอบไปด้วยเตาแก๊สซิไฟเออร์ทำงานร่วมกับ เตาหลอมและหัวพลาสมาจาก WPC โดยสามารถใช้ได้ทั้ง MSW ชีวมวล ถ่านโค้ก ขยะอันตราย เพื่อผลิตแก๊สเชื้อเพลิง เอทานอล หรือกระแสไฟฟ้า (รูปที่ 2.20)

ข้อแตกต่างของเทคโนโลยีจาก Alter NRG/Westinghouse กับสองบริษัทก่อนหน้านี้คือ หัวพลาสมาจะติดตั้งที่ก้นของเตาแก๊สซิไฟเออร์ แทนที่จะใช้ในการทำความสะอาดแก๊ส หัวพลาสมาที่ใช้อาจมีถึง 6 หัว เพื่อให้ความร้อนเพียงพอสำหรับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ด้านล่างของเตาจะบรรจุด้วย Metallurgical coke (Met coke) เพื่อทำหน้าที่ดูดซับและกักเก็บพลังงานความร้อน และทำหน้าที่เป็นโครงสร้างรองรับ MSW ที่ตกลงมาผ่านเตาแก๊สซิไฟเออร์และกลายเป็นแก๊สกับของเหลว (Slag) Met coke นี้จะถูกป้อนเข้าสู่เตาพร้อมกับ MSW และมีความสำคัญมากในการทำงานของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน เนื่องจากไอพ่นพลาสมามีความเร็วสูง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องหาวัสดุที่ทำหน้าที่ลดความเร็วนี้และทำหน้าที่กระจายความร้อน Met coke จึงเป็นทางเลือกที่ดีเพราะนอกจากจะมีโครงสร้างเป็นเนื้อเดียวกันแล้ว ยังทำหน้าที่รองรับของเสียที่หล่นลงมาอีก ของเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบควรมีขนาดประมาณ 10 นิ้ว โดยทิศทางการป้อนสู่เตาแก๊สซิไฟเออร์ควรเริ่มจากบนลงสู่ด้านล่าง

กระบวนการจะถูกควบคุมโดยการตรวจสอบอุณหภูมิแก๊สที่ทางออกซึ่งควรอยู่ในช่วง 1,800 ถึง 2,000 °F เพื่อป้องกันการก่อตัวของน้ำมันดิน (Tar) หรืออนุภาคขนาดเล็กที่อาจปนไปกับแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้ ดังนั้น จุดสำคัญในกระบวนการนี้คือหัวพลาสมา ความร้อนที่ต้องป้อนเข้าไปขึ้นอยู่กับว่าเราต้องการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิของแก๊สเชื้อเพลิง (Syngas)

ในระบบนี้ เนื่องจากของเสียและ Met coke ไหลลงสู่ด้านล่างเตา ของเสียจะเริ่มโคนเผา (Gasify) เป็นแก๊สเชื้อเพลิงก่อน ในขณะที่ Met coke จะยังคงสถานะของแข็ง และจะค่อยๆ โคนเผาแต่ก็ยังคงค้างอยู่ที่ก้นเตา ของเสียเมื่อไหลลงสู่ด้านล่างก็จะอยู่เหนือ Met coke ส่วนที่ออกจากเตาจะมีแค่ slag กับโลหะหลอมเหลว และจะแข็งตัวหลังจากนั้น

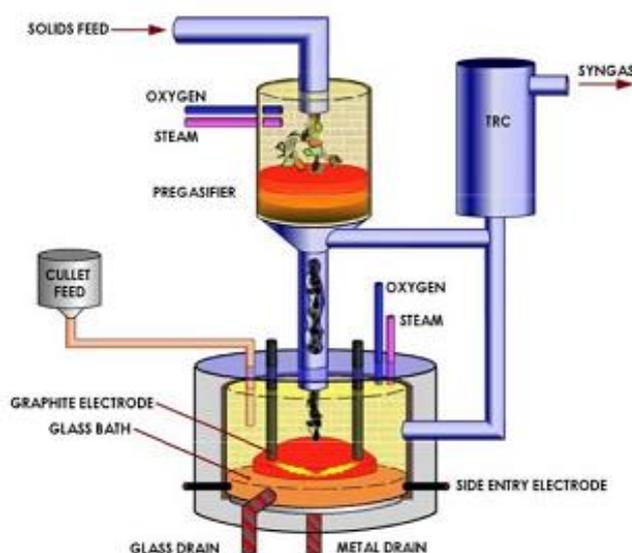
#### 2.7.6.4 เทคโนโลยีพลาสมาเชิงความร้อนของบริษัท InEnTec

InEnTech (Integrated Environmental Technology) เป็นบริษัทของประเทศอเมริกา ก่อตั้งเมื่อปี ค.ศ. 1995 โดยมุ่งเน้นทำวิจัยด้านพลาสมา และนำไปสู่การพัฒนาเครื่อง Plasma Enhanced Melter (PEM) ซึ่งเป็นการรวมเอาเทคโนโลยีพลาสมา กับเตาหลอมแก้วเข้าด้วยกัน และได้มีการจดสิทธิบัตรในปี ค.ศ. 1998

ระบบนี้ได้มีการออกแบบให้รองรับขยะหลายประเภท ตั้งแต่ MSW ถึง ขยะอันตราย แต่ใช้ได้เฉพาะของแข็ง ของเหลว ไม่รวมแก๊ส เนื่องจากต้องรักษาระดับความสูงของวัสดุรองในเตา ความสูงของวัสดุรองเตานี้จะขึ้นอยู่กับกำลังการทำงานของเตาและปริมาณออกซิเจนที่ใช้ และเวลาในการเปลี่ยนของเสียเป็นแก๊สเชื้อเพลิง

ส่วนประกอบของระบบประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลักๆ คือ (รูปที่ 2.21)

- 1) เตาแก๊สซีไฟเออร์แบบไหลลง (Downdraft pre-gasifier)
- 2) เตาพลาสมา (PEM process chamber)
- 3) ถังพักแก๊ส (Thermal residence chamber)



รูปที่ 2.21 ระบบของเตาเผาแบบ Plasma Enhanced Melter (InEnTec)

ในระบบนี้ เตาแก๊สซิไฟเออร์เป็นหน่วยหลัก หรือคิดเป็น 80% ของระบบทั้งหมด โดยใช้ไอน้ำป้อนเข้าไปในระบบ ส่วนที่เป็นอินทรีย์สารจะถูกเปลี่ยนเป็นแก๊สเชื้อเพลิงก่อน (Syngas) ในขณะที่วัสดุที่เป็นอนินทรีย์ และอนินทรีย์ที่เหลือจะถูกให้ผ่านไปที่ตะกรับที่เคลื่อนที่ได้ (ได้เตาแก๊สซิไฟเออร์) เพื่อส่งต่อไปในเตาเผาพลาสติก PEM

ในเตาพลาสติก PEM ประกอบไปด้วยระบบให้พลังงาน 2 ระบบด้วยกัน คือ

1) ไฟฟ้ากระแสตรง ใช้สำหรับสร้างพลาสมาไฟฟ้า (DC current plasma arc) ซึ่งทำหน้าที่เพิ่มอุณหภูมิเพื่อทำลายของเสียและทำให้เกิดกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน เปลวพลาสมาจะเกิดขึ้นระหว่างขั้วแกรไฟต์ โดยอาศัยหลักการทำให้อากาศเป็นตัวนำไฟฟ้า จนได้เปลวพลาสมาออกมา

2) ไฟฟ้ากระแสสลับ ใช้ในระบบทำความร้อนแบบตัวต้านทาน (Resistance heating system) ซึ่งจะทำหน้าที่รักษาอุณหภูมิภายในเตาพลาสติกให้สม่ำเสมอ และนอกจากนั้นยังทำให้พลังงานที่ใช้ในระบบพลาสมาน้อยลง ปริมาณการใช้ไฟฟ้าของการสร้างพลาสมาอยู่ที่ 74-86% ในขณะที่ระบบทำความร้อนแบบตัวต้านทาน เท่ากับ 14-21% ของพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ป้อนเข้าไป

ในเตา PEM process chamber วัสดุอินทรีย์ที่เหลือจากเตาแก๊สซิไฟเออร์จะถูกเปลี่ยนเป็นแก๊สเชื้อเพลิง (Syngas) จากการทำปฏิกิริยาของไอน้ำกับสารอินทรีย์ที่ระเหยได้ ในขณะที่สารอนินทรีย์จะกลายเป็นแก้วหลอมเหลวและกลายเป็น slag ในที่สุด

แก๊สเชื้อเพลิง (Syngas) ที่ได้ทั้งจากเตาแก๊สซิไฟเออร์และเตา PEM process chamber จะไปรวมกันที่ถังพัก (Thermal residence chamber) จุดประสงค์ของการพักแก๊สก็เพื่อที่จะทำให้แก๊สเชื้อเพลิงปราศจากสารไฮโดรคาร์บอนต่างๆ ซึ่งเวลาพักแก๊สเชื้อเพลิงคือประมาณ 2 วินาที และแก๊สที่ผ่านถังพักนี้จะต้องถูกนำไปทำความสะอาดก่อนการนำไปใช้

เทคโนโลยีที่บริษัท InEnTec ได้พัฒนาได้มีการใช้ที่เมือง Richland รัฐ Miami โดยมีกำลังการจัดการจัดการวัตถุดิบ 25 ตันต่อวัน โดยสามารถรองรับวัสดุได้หลายประเภท เช่น ชีวมวล MSW ขยะทางการแพทย์ วัสดุที่ป้อนเข้าระบบจะต้องมีการลดขนาดก่อนป้อนเข้าสู่ระบบเพื่อทำให้มีการผสมที่ดี ผลการดำเนินงานพบว่าแก๊สที่ได้มีลักษณะ มีความเป็นกรดต่ำ CO และ สารไฮโดรคาร์บอนสูง รวมถึงอนุภาคที่เป็นผง (Particulate matter) มีระดับต่ำ หรือตรวจไม่พบ โดยคุณภาพของมลพิษอากาศที่ปลดปล่อยจากระบบผ่านเกณฑ์มาตรฐาน

## 2.8 การวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์จากวิธีทางสถิติ

วิธีทางสถิติเป็นเทคนิควิธีหนึ่งที่น่ามาใช้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับการทำนายผลการทดลองต่างๆ ทั้งด้านประสิทธิภาพการเดินระบบ รวมไปถึงผลด้านมลพิษทางสิ่งแวดล้อม แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่กล่าวมานี้ มีทั้งแบบเชิงปริมาณ (เช่น การวิเคราะห์ความถดถอย) และเชิงพรรณนา (เช่น Principle Component Analysis : PCA)

### 2.8.1 การวิเคราะห์ความถดถอย (Regression analysis)

ในการแก้ปัญหาอย่างใดอย่างหนึ่ง อาจมี 1 ตัวแปรหรือมากกว่าเข้ามาเกี่ยวข้อง ทำให้มีความจำเป็นที่ต้องหาแบบจำลองและสำรวจความสัมพันธ์ของตัวแปรเหล่านั้น เช่น ในกระบวนการสังเคราะห์ทางเคมี ผลผลิตที่ได้มีความสัมพันธ์กับปัจจัยของวัตถุดิบและอุณหภูมิที่ใช้ในการผลิต

การวิเคราะห์ความถดถอย (Regression analysis) เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระกับตัวแปรตามเพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากสมการความถดถอยสำหรับทำนายค่าของตัวแปรตาม เมื่อกำหนดตัวแปรอิสระ (กัลยา วานิชย์บัญชา, 2546) โดยการวิเคราะห์ความถดถอยแบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่

1) การวิเคราะห์ความถดถอยอย่างง่าย (Simple regression analysis) เป็นการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระหนึ่งตัวกับตัวแปรตามหนึ่งตัว โดยแสดงความสัมพันธ์ในรูปของสมการเชิงเส้นดังสมการที่ 2.10

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon \quad (2.10)$$

เมื่อ

$y$  คือ ตัวแปรตาม

$x$  คือ ตัวแปรอิสระ

$\beta_0$  คือ ส่วนตัดแกน  $y$  หรือค่า เมื่อ  $x$  เท่ากับศูนย์

$\beta_1$  คือ ความชันของเส้นตรง หรือเรียกว่าสัมประสิทธิ์ความถดถอย

$\varepsilon$  คือ ความคลาดเคลื่อนอย่างสุ่ม

2) การวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุคูณ (Multiple regression analysis) เป็นการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระอย่างน้อย 2 ตัวกับตัวแปรตามหนึ่งตัว โดยแสดงความสัมพันธ์ในรูปของสมการเชิงเส้น ดังสมการที่ 2.11

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (2.11)$$

เมื่อ	
$y$	คือ ตัวแปรตาม
$x$	คือ ตัวแปรอิสระ
$\beta_0$	คือ ส่วนตัดแกน $y$ เมื่อ $x_1, x_2, \dots, x_k$ เท่ากับศูนย์
$\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$	คือ ความชันของเส้นตรง หรือเรียกว่าสัมประสิทธิ์ความถดถอย
$\varepsilon$	คือ ความคลาดเคลื่อนอย่างสุ่ม

## 2.8.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principle Component Analysis: PCA) (ชิติพัฒน์ หิรัญคำ, 2556)

การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก วิธีนี้อาศัยหลักความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างตัวแปรที่ใช้เป็นข้อมูลองค์ประกอบหลักตัวแปรคือการผสมเชิงเส้นตรง (Linear combination) ของตัวแปรที่อธิบายการผันแปรของข้อมูลใดมากที่สุด จากนั้นหาการผสมที่สองที่สามารถอธิบายการผันแปรได้มากที่สุดเป็นอันดับที่สอง โดยที่ไม่สัมพันธ์กับการผสมแรก ทำเช่นนี้เรื่อยไปจนได้องค์ประกอบหลักหรือที่เรียกว่าปัจจัย ที่สามารถอธิบายการผันแปรของทุกตัวแปรได้ครบถ้วน ซึ่งองค์ประกอบหลักจะอธิบายการผันแปรได้น้อยลงตามลำดับและทุกองค์ประกอบไม่สัมพันธ์กัน โดยมีขั้นตอนในการหาองค์ประกอบหลักดังนี้

1) การหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งหมด (Correlation matrix) โดยวิธีของ Pearson correlation ระหว่างตัวแปรที่ต้องการนำมาจัดกลุ่ม โดยมีเงื่อนไข คือ i) ถ้าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของตัวแปรคู่ใดมีค่าใกล้เคียง +1 หรือ -1 แสดงว่าตัวแปรคู่นั้นมีความสัมพันธ์กันมาก จึงจัดอยู่ในปัจจัยเดียวกัน ii) ถ้าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของตัวแปรคู่ใดมีค่าเข้าใกล้ศูนย์แสดงว่าตัวแปรคู่นั้น ไม่มีความสัมพันธ์กันหรือสัมพันธ์กันน้อยมาก จึงจัดให้กันอยู่คนละปัจจัย iii) ถ้าหากมีตัวแปรที่ไม่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรอื่น หรือว่ามีความสัมพันธ์กับตัวแปรอื่นๆ ที่เหลือน้อยมาก ควรอยู่คนละปัจจัยกับตัวแปรอื่น ๆ

2) การเลือกปัจจัย (Selecting factor) จะพิจารณาที่ค่าลักษณะเฉพาะ (Eigenvalues) ซึ่งหมายถึง ค่าความผันแปรหรือความแปรปรวนทั้งหมดในตัวแปรเดิมที่สามารถอธิบายได้โดยปัจจัย ซึ่งค่าลักษณะเฉพาะจะมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0 และสูงสุดเท่ากับจำนวนตัวแปร ซึ่งจะพิจารณาเฉพาะปัจจัยที่มีค่าลักษณะเฉพาะมากกว่า 1 และหากค่าลักษณะเฉพาะต่ำกว่า 1 แสดงว่าปัจจัยนั้นไม่สามารถอธิบายตัวแปรใดได้เลย

3) การสกัดปัจจัย (Factor extraction) อาศัยหลักการความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างตัวแปร โดยนำความสัมพันธ์ของตัวแปรแต่ละตัวที่มีเหมือนกันมาสร้างเป็นสมการเชิงเส้น การนำตัว

แปรมาผสมกันจะทำให้เกิดปัจจัยหรือ Component ซึ่งจะเกิดขึ้นมากกว่าหนึ่งปัจจัย แต่ก็จะมีไม่กี่ปัจจัยที่สามารถอธิบายแทนกลุ่มตัวแปรได้ทั้งหมด ซึ่งปัจจัยที่ได้มาไม่จำเป็นต้องใช้ทุกปัจจัย โดยมีขั้นตอนดังนี้

- ปัจจัยที่ 1 จะเป็นการผสมแรก โดยมีรายละเอียดของตัวแปรมากที่สุด ซึ่งจะมีค่าความแปรปรวนสูงสุด สามารถอธิบายความหมายของตัวแปรได้ดีที่สุด
- ปัจจัยที่ 2 เป็นการผสมในลำดับต่อมา โดยสามารถนำรายละเอียดที่เหลือจากปัจจัยที่ 1 มาใส่ในปัจจัยที่ 2 ให้มากที่สุด โดยที่ปัจจัยที่ 1 และ ปัจจัยที่ 2 จะไม่มีความสัมพันธ์กันเลย
- ปัจจัยที่ 3 ทำในลักษณะเช่นเดียวกันคือสามารถนำรายละเอียดที่เหลือจากปัจจัยที่ 1 และ 2 มาใส่ในปัจจัยที่ 3 ให้มากที่สุด และสำหรับการสร้างปัจจัยลำดับต่อไปก็ใช้หลักเกณฑ์เดียวกันกับที่ได้กล่าวมาในปัจจัยที่ 1, 2 และ 3

จากการสกัดปัจจัยนี้เราจะได้อ่านค่า Factor loading ของแต่ละตัวแปร โดยที่ค่า Factor loading หรือค่าสัมประสิทธิ์ เป็นค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ จากการที่ตัวแปรได้ถูก Standardized โดยมีค่าอยู่ระหว่าง -1 ถึง +1 ซึ่งค่า Factor loading จะใช้ในการพิจารณาว่าตัวแปรใดควรจะอยู่ในปัจจัยใด การที่ค่า Factor loading ของตัวแปรมีค่าสูง คืออยู่ใกล้ -1 หรือ +1 หากพบอยู่ในปัจจัยใดปัจจัยหนึ่ง ก็จัดได้ว่าตัวแปรนั้นอยู่ในปัจจัยดังกล่าว แต่หากค่า Factor loading ออกมาในช่วงของค่ากลางๆ ก็จะต้องมีการหมุนแกนเพื่อจัดให้อยู่ในปัจจัยที่เหมาะสม

4) การหมุนแกนปัจจัย (Factor rotation) ทำเพื่อให้ค่า Factor loading มีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงเพื่อให้ทราบว่าตัวแปรนั้นควรอยู่ในปัจจัยใด ซึ่งในกรณีที่ค่า Factor loading มีค่ากลาง ๆ การระบุปัจจัยให้กับตัวแปรอาจจะทำได้ยาก จึงต้องทำการหมุนแกนเพื่อความชัดเจนยิ่งขึ้น

5) การให้ความหมายแก่ปัจจัย (Factor meaning) เป็นขั้นตอนที่ต้องกำหนดชื่อหรือให้ความหมายกับปัจจัย โดยจะต้องพิจารณาว่าในปัจจัยนั้นประกอบไปด้วยตัวแปรอะไรบ้าง ซึ่งการให้ความหมายแก่ปัจจัยจะต้องพิจารณาไปที่ตัวแปรที่ค่า Factor loading สูงซึ่งมีความสำคัญในปัจจัยนั้นๆ สำหรับขั้นตอนการให้ความหมายแก่ปัจจัยอาจแยกได้ดังต่อไปนี้

## 2.9 สรุปความสำคัญของปัญหานำการวิจัย

ปัญหาขยะมูลฝอย กลายเป็นปัญหาหนักที่ทุกประเทศต้องเผชิญอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ จากการประชุมสิ่งแวดล้อมโลก หลายประเทศได้ยอมรับแผนปฏิบัติการ 21 (Agenda21) (United Nations, 1992) โดยให้ประเด็นปัญหาสิ่งแวดล้อมโลกด้านปัญหาขยะ กลายเป็นปัญหาสังคมที่ทั่วโลกให้ความสำคัญมากที่สุดอีกเรื่องหนึ่ง และมีการเสนอแนวทางในการปฏิบัติเพื่อแก้ปัญหาอย่างต่อเนื่องเรื่อยมาจนถึงปัจจุบัน โดยมุ่งเน้นการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างคุ้มค่าเพื่อลดปริมาณการเกิดขยะมูลฝอย การสนับสนุนให้มีการจัดการสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน ตลอดจนการพัฒนาเทคโนโลยีการจัดการขยะที่เหมาะสมในแต่ละประเทศของตน เนื่องด้วยวิธีการดำเนินชีวิตและมาตรฐานการบริโภคของประชากรในสังคมประเทศนั้นๆ มีผลต่อปริมาณและองค์ประกอบของขยะชุมชนอยู่ตลอดเวลา การพัฒนาเทคโนโลยีการจัดการขยะชุมชนที่เหมาะสม จึงเป็นสิ่งที่ทำทายนมาก เทคโนโลยีจัดการขยะที่มีความเหมาะสมนั้น ต้องมุ่งเน้นการนำขยะมูลฝอยกลับมาใช้ประโยชน์ให้คุ้มค่าที่สุดที่สุด คงเหลือขยะนำไปกำจัดขั้นสุดท้ายให้น้อยที่สุด และสำคัญที่สุดคือต้องไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และสุขภาพอนามัย

การพิจารณานำขยะมาผลิตเป็นพลังงานเสริมนั้นเป็นทางเลือกอีกทางหนึ่ง ซึ่งนอกจากจะได้พลังงานทดแทนเชื้อเพลิงธรรมชาติแล้ว ยังเป็นการแก้ไขปัญหาในเรื่องของการกำจัดขยะที่ได้ผลอย่างยิ่ง และเป็นวิธีที่จะช่วยลดการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลได้ ซึ่งขยะชุมชนที่มีองค์ประกอบที่เผาไหม้ได้สูง มีศักยภาพนำกลับมาใช้ประโยชน์เพื่อเป็นพลังงานทดแทนได้ เทคโนโลยีความร้อน (Thermal conversion technology) ถูกยอมรับว่าสามารถกำจัดขยะมูลฝอยและเปลี่ยนรูปของเสียเป็นพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพภายในเวลาอันรวดเร็ว ลดมวลและปริมาตรของขยะมูลฝอยได้ถึง 70-90 % โดยสามารถนำพลังงานกลับมาเพื่อการผลิตไฟฟ้าและความร้อนได้ อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพของระบบจะขึ้นอยู่กับคุณภาพของเชื้อเพลิงด้วยเช่นกัน โดยเฉพาะการใช้งานกับขยะชุมชนที่มีความชื้นสูง ยังถือเป็นจุดด้อยของการนำขยะมาใช้ประโยชน์ในรูปพลังงานโดยเทคโนโลยีทางความร้อน ทั้งนี้ เทคโนโลยีการผลิตเชื้อเพลิงขยะ เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ถูกนำมาใช้เพื่อลดข้อจำกัดเกี่ยวกับคุณลักษณะที่ไม่เหมาะสมของขยะชุมชน (กระบวนการปรับเสถียรภาพขยะโดยการลดความชื้น และการคัดแยกเฉพาะขยะที่เผาไหม้ได้) เชื้อเพลิงขยะมีค่าความชื้นต่ำ ค่าความร้อนสูง จึงมีความเหมาะสมเพื่อเป็นวัตถุดิบป้อนเข้าสู่ระบบผลิตพลังงานด้วยเทคโนโลยีความร้อน

ทั้งนี้ในปัจจุบัน เทคโนโลยีความร้อนที่เข้ามามีบทบาท แทนที่ระบบการเผาไหม้โดยตรง (Incineration process) คือ เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification process) โดยถูกยอมรับว่าเป็นระบบที่มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและปลดปล่อยมลพิษสู่สิ่งแวดล้อมน้อยมาก ( $SO_x$ ,  $NO_x$ , heavy metals, fly ash, dioxins and furans) (Larson, 1998; Stiegel, 2001 ; Malkow, 2003; Arena,

2012; Li et al.,; Seggiani et al., 2012) เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification technology) เป็นเทคโนโลยีที่อาศัยกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางอุณหเคมี (Thermo-chemical Conversion Process) โดยควบคุมเตาปฏิกรณ์ ให้เกิดการเผาไหม้แบบ Partial oxidation หรือ การเผาไหม้แบบจำกัด ปริมาณออกซิเจน ให้มีอุณหภูมิประมาณ 800-1,000 °C จึงมีข้อแตกต่างจากเทคโนโลยีการเผาไหม้ โดยตรงที่ต้องการอากาศหรือออกซิเจนมากเกินไปให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ ซึ่งการสันดาป ของออกซิเจนจะส่งผลต่อการเกิดมลพิษอากาศในรูปออกไซด์ของซัลเฟอร์ และไนโตรเจน

กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ความร้อนจะเปลี่ยนเชื้อเพลิงแข็งให้เป็นแก๊สเชื้อเพลิง ได้แก่ แก๊ส คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แก๊สไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) และแก๊สมีเทน (CH<sub>4</sub>) ซึ่งมีค่าความร้อนประมาณ 4-5 MJ/Nm<sup>3</sup> ซึ่งสามารถใช้ประโยชน์เพื่อเป็นผลิตพลังงานได้ (Reed, 1988; Higman, C. and Van d. B., 2008) เช่น การผลิตกระแสไฟฟ้าโดยป้อนแก๊สเชื้อเพลิงเข้าเครื่องยนต์สันดาปภายในเพื่อผลิต ไฟฟ้า ตลอดจนการผลิตความร้อนไปใช้ประโยชน์อื่นๆ (Metcalf et al., 1998) อย่างไรก็ตาม ระบบ แก๊สซิฟิเคชันยังมีข้อจำกัด บางประการ คือ ในการนำมาใช้กับเชื้อเพลิงที่มีความแปรปรวนสูง ด้าน คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมี การเดินระบบเพื่อควบคุมอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ให้ สูงและสม่ำเสมอทำได้ยาก จึงส่งผลให้ได้แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้มีค่าความร้อนต่ำ และทำให้ ประสิทธิภาพของระบบต่ำ (Rajvanshi, 1986; Arjham et al., 2012, 2013) การลดข้อจำกัดนี้คือการ ใช้ความร้อนจากแหล่งภายนอกมาเสริมในระบบแก๊สซิฟิเคชัน

เทคโนโลยีพลาสมาอาร์คทางความร้อน (Thermal plasma arc technology) เป็นปรากฏการณ์ ไอออนไนซ์ของสสารในรูปแก๊ส (อาทิ อากาศ, ออกซิเจน และไนโตรเจน) โดยเมื่อให้แก๊สผ่าน สนามไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์สูง แก๊สเหล่านี้จะเปลี่ยนสถานะเป็นพลาสมาที่มีความร้อนสูง (2,200-13,900 °C) มีการนำความร้อนจากพลาสมาอาร์ค มาใช้งานด้านสิ่งแวดล้อมเพื่อกำจัดของเสีย อาทิ การใช้พลาสมาอาร์คทางความร้อนในระบบแก๊สซิฟิเคชันเพื่อกำจัดของเสียอันตราย กากของเสียที่ ปนเปื้อนโลหะหนัก การทำลายกากกัมมันตรังสี โดยคุณสมบัติของอุณหภูมิที่สูงมากนี้ สามารถ ทำลายองค์ประกอบหลากหลายทั้งสารอินทรีย์และอนินทรีย์ให้หลอมละลาย และคงรูปผลึกแก้ว ที่ เสถียรไม่สามารถปลดปล่อยมลพิษออกสู่สิ่งแวดล้อมต่อไป (Plasma gasification melting process) (Moustakas et al., 2005, 2008; Bert et al., 2006; Huang et al. 2007; Dave et al. 2010; Ojha et al., 2012; Zhang et al., 2012; Yoon et al., 2013)

ในส่วนของการนำพลาสมาอาร์คทางความร้อนมาใช้งานด้านพลังงาน อาทิ การใช้ความ ร้อนจากพลาสมาในรูปของแหล่งความร้อนภายนอก (External energy หรือ Allothermal) สำหรับ ระบบทางความร้อนแบบต่างๆ เพื่อควบคุมอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์และเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ เช่น ในระบบ Allothermal plasma gasification หรือ Allothermal plasma pyrolysis เป็นการนำ

ความร้อนจากพลาสมาอาร์คมาใช้ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน/ไพโรไลซิส เพื่อการแตกสลายโมเลกุลของทาร์ที่ปนเปื้อนในแก๊สเชื้อเพลิง และเพิ่มสัดส่วนของแก๊สไฮโดรเจน เพื่อให้ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงสูงขึ้น ซึ่งมีผลให้ประสิทธิภาพของระบบสูงขึ้น (Tang et al., 2003, 2007; Huang et al., 2007; Dave et al. 2010; Fabry et al., 2013)

ทั้งนี้การวิจัยและพัฒนาในด้านการนำเอาความร้อนจากพลาสมาอาร์ค มาช่วยในระบบแก๊สซิฟิเคชัน (Plasma-assisted gasification) เพื่อเป็นความร้อนเสริมให้กับโซนการเผาไหม้ (Oxidation zone) สำหรับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยศึกษากับขยะมูลฝอยที่มีความแปรปรวนและมีองค์ประกอบหลากหลายทั้งสารอินทรีย์และอนินทรีย์ในระดับต้นแบบนั้น ยังไม่มีผลการศึกษารายการ ทั้งนี้การใช้ความร้อนช่วยในระบบแก๊สซิฟิเคชัน จะลดข้อจำกัด ในการใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชันกับเชื้อเพลิงที่มีความแปรปรวนสูง ที่การเดินระบบเพื่อควบคุมอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ให้สูงและสม่ำเสมอทำได้ยาก ความร้อนจากพลาสมาอาร์ค จะช่วยรักษาอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ให้สูงสม่ำเสมอ ทำให้การเดินระบบเสถียร ช่วยเพิ่มปฏิกิริยาออกเคมีในระบบ ทำให้ได้แก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนสูง และส่งผลให้ประสิทธิภาพของระบบสูงได้ มีงานวิจัยสนับสนุน แต่ทั้งนี้ยังเป็นการวิจัยในระดับห้องปฏิบัติการ (Sforza et al. 2009; Fabry et al. 2012) การวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีในระดับต้นแบบที่สามารถนำไปต่อยอดใช้งานได้จริง จึงถือได้ว่าเป็นนวัตกรรมใหม่

ดังกล่าว จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ ซึ่งมีวัตถุประสงค์หลักคือ การสร้างนวัตกรรม(Innovation) ด้านเทคโนโลยีพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน (Plasma-assisted gasification technology) สำหรับการกำจัดขยะชุมชนควบคู่กับการผลิตพลังงานในระดับต้นแบบขนาด 100 กิโลวัตต์ ที่สามารถใช้งานได้จริง ซึ่งเป็นเครื่องมือหลักสำหรับการศึกษาวิจัยนี้ และทำการศึกษาร่วมกับระบบแก๊สซิฟิเคชันขนาด 100 กิโลวัตต์ เพื่อให้ได้ข้อมูลด้านสมรรถนะการผลิตพลังงานของระบบ รวมทั้งข้อมูลการประเมินมลพิษสิ่งแวดล้อมจากระบบอย่างครอบคลุม ที่สามารถชี้วัดความเหมาะสมในการนำเทคโนโลยีนี้ไปใช้งานสำหรับการจัดการขยะชุมชนที่มองหามิติการนำขยะมาใช้ประโยชน์เพื่อผลิตเป็นพลังงาน (Waste-to-energy) อย่างมีประสิทธิภาพ และไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม พร้อมทั้งสามารถนำผลการวิจัยนี้ ไปขยายผลใช้งานได้จริงต่อไป

## บทที่ 3

### เครื่องมือและวิธีดำเนินการวิจัย

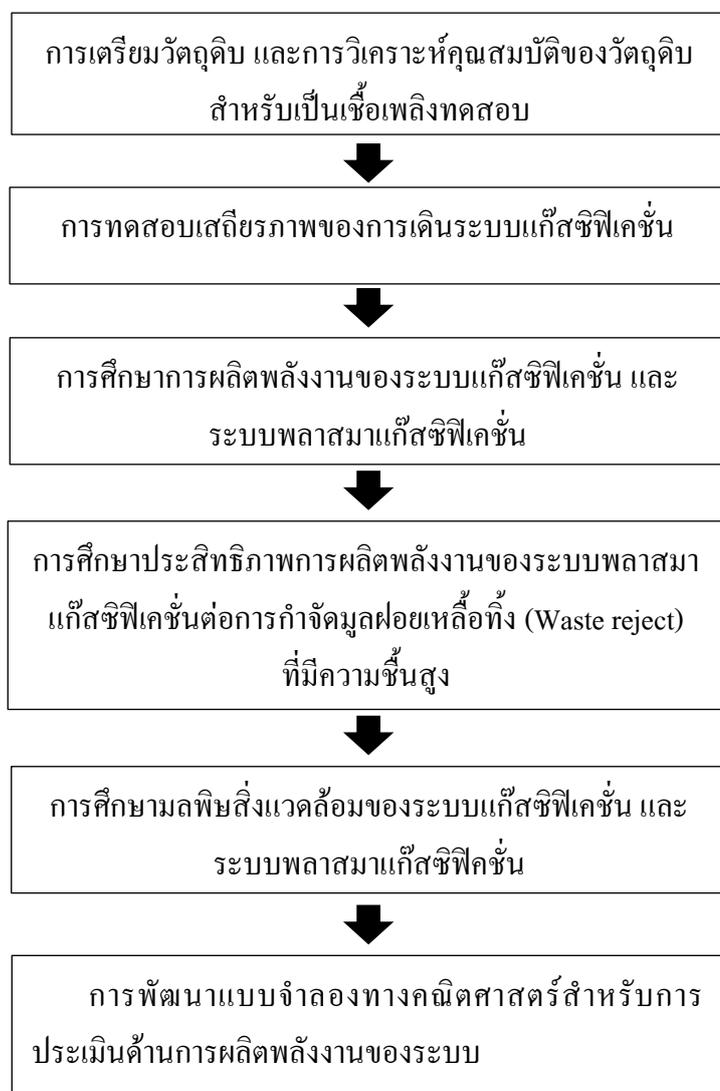
#### 3.1 บทนำ

งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาการกำจัดขยะชุมชน โดยมุ่งเน้นการใช้เทคโนโลยีทางความร้อน 2 เทคโนโลยี คือ 1) เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) สัญลักษณ์ย่อคือ ระบบ C-G 2) เทคโนโลยีพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน (Plasma-assisted gasification) สัญลักษณ์ย่อคือ ระบบ P-G โดยงานวิจัยนี้จะทำการพัฒนาระบบ P-G ในระดับต้นแบบขนาด 100 กิโลวัตต์ เพื่อเป็นเครื่องมือหลักสำหรับการศึกษาวิจัย และทำการศึกษาเปรียบเทียบกับระบบ C-G ขนาด 100 กิโลวัตต์ เพื่อให้ได้ข้อมูลเชิงเปรียบเทียบ ด้านสมรรถนะการผลิตพลังงานของระบบ รวมทั้งข้อมูลการประเมินด้านมลพิษสิ่งแวดล้อมของระบบ เนื่องจากในปัจจุบัน การวิจัยด้านเทคโนโลยีพลาสมาอาร์คทางความร้อนสำหรับการกำจัดขยะชุมชนควบคู่กับการผลิตพลังงานในระดับต้นแบบ ถือเป็นเทคโนโลยีที่ใหม่ ยังไม่ปรากฏรายละเอียดในเชิงเทคนิค และเชิงวิศวกรรม รวมถึงข้อมูลด้านมลพิษสิ่งแวดล้อมที่มีรายละเอียดครอบคลุม จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ ที่มีวัตถุประสงค์หลัก คือเพื่อสร้างนวัตกรรม (Innovation) ด้านเทคโนโลยีทางความร้อนสำหรับระบบ P-G ที่สามารถนำไปใช้งานได้จริง และมีข้อมูลมาสนับสนุนอย่างครอบคลุม อันจะเป็นประโยชน์ และสร้างทางเลือกใหม่ด้านเทคโนโลยีการกำจัดขยะชุมชนที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

งานวิจัยนี้ จะเน้นการใช้เทคโนโลยีทางความร้อน 2 เทคโนโลยี คือ ระบบ C-G และระบบ P-G ในการกำจัดขยะชุมชนที่ผ่านกระบวนการปรับเสถียรภาพแล้ว ซึ่งเป็นขยะชุมชนที่มีคุณลักษณะของการเป็นเชื้อเพลิงขยะ (RDF) โดยงานวิจัยนี้ ศึกษาในขอบเขตของ เชื้อเพลิงขยะที่ผ่านกระบวนการบำบัดด้วยระบบ MBT โดยจะแบ่งเชื้อเพลิงที่นำมาศึกษาเป็น 2 ประเภท คือ 1) ขยะชุมชนหลังผ่านกระบวนการ MBT ที่มีสมบัติเป็นเชื้อเพลิงขยะประเภทที่ 3 (RDF-3) ซึ่งในงานวิจัยนี้จะนำไปเข้ากระบวนการเตรียมให้เป็นเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง (RDF-5) 2) มูลฝอยเหลือทิ้ง (Waste reject) หลังผ่านกระบวนการ MBT ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่มีองค์ประกอบของสารที่สามารถเผาไหม้ได้สูง แต่มีคุณภาพต่ำกว่าเกณฑ์ของเชื้อเพลิงขยะ (องค์ประกอบปะปนหลายประเภท และมีความชื้น)

### 3.2 ขั้นตอนการวิจัย

สำหรับขั้นตอนในงานวิจัยนี้ โดยภาพรวมของการศึกษา ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนในงานวิจัย

1) การเตรียมตัวอย่างเชื้อเพลิงขยะสำหรับงานวิจัย อันประกอบด้วย การเตรียมเชื้อเพลิงขยะ RDF-5 และการเตรียมเชื้อเพลิงผสม โดยใช้ RDF-5 ผสมกับเชื้อเพลิงไม้ (ไม้ยูคาลิปตัสสับ) ในสัดส่วนต่างๆ (สัดส่วนโดยน้ำหนัก : %wt) โดยเป็นเชื้อเพลิง 4 ชนิด คือ (1) เชื้อเพลิงไม้ยูคาลิปตัสสับ (Wood Chip) สัญลักษณ์ย่อคือ WC (2) เชื้อเพลิงขยะประเภท 5 สัญลักษณ์ย่อคือ RDF-5 (3) เชื้อเพลิงขยะ RDF-5 ผสมกับ ไม้ยูคาลิปตัสสับ สัดส่วน 50:50 %wt

สัญลักษณ์ย่อ คือ RDF-5/WC (50/50) (4) เชื้อเพลิงขยะ RDF-5 ผสมกับ ไม้ยูคาลิปตัสสับ สัดส่วน 70:30 %wt สัญลักษณ์ย่อ คือ RDF-5/WC (70/30) สำหรับการเตรียมมูลฝอยเหลือทิ้ง (Waste reject) เตรียมที่ความชื้น 3 ระดับ คือ 10% 25% และ 40% (wt% wb)

2) การพัฒนาเทคโนโลยีพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน (Plasma Gasification) จะพัฒนาต่อออกจาก ชุดเตาปฏิกรณ์ระบบแก๊สซิฟิเคชันชนิดไหลลง (Fixed bed downdraft gasifier) เพื่อนำระบบ พลาสมาอาร์คเข้ามาเป็นแหล่งความร้อนช่วย (Plasma-assisted gasification)

3) การศึกษาเสถียรภาพของการผลิตพลังงานของระบบ C-G จะใช้เชื้อเพลิง 4 ชนิด คือ (1) WC, RDF-5, RDF-5/WC (50/50) และ RDF-5/WC (70/30)

4) การศึกษาเสถียรภาพของระบบ P-G โดยการนำพลาสมาอาร์คเข้ามาเป็นแหล่งความร้อน เสริมใน ระบบ C-G โดยเลือกเชื้อเพลิงที่ดีที่สุดจากผลการทดสอบข้อ 3) ในเงื่อนไขของการเดิน ระบบแบบต่อเนื่องระยะยาว (Long term condition)

5) การศึกษาการกำจัดเศษมูลฝอยเหลือทิ้ง (Waste reject) ควบคู่กับการผลิตพลังงานโดยใช้ ระบบ P-G โดยศึกษาเชื้อเพลิงที่ความชื้น 3 ระดับ คือ 10% 25% และ 40% (%wb) ซึ่งมี วัตถุประสงค์เพื่อ ศึกษาการนำพลาสมาอาร์คเข้ามาเป็นแหล่งความร้อนเสริมในระบบ P-G สามารถกำจัดขยะมูลฝอยที่มีความชื้นสูงควบคู่กับการผลิตพลังงานได้

6) ทดสอบเปรียบเทียบสมรรถนะการทำงาน (Operation performance) และประเมิน ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Cold gas efficiency) ของระบบ C-G และ ระบบ P-G

7) วิเคราะห์และประเมินมลพิษสิ่งแวดล้อมที่ปลดปล่อยจากระบบ และเปรียบเทียบ สมรรถนะทางสิ่งแวดล้อม (Environmental performance) ของระบบ C-G และระบบ P-G

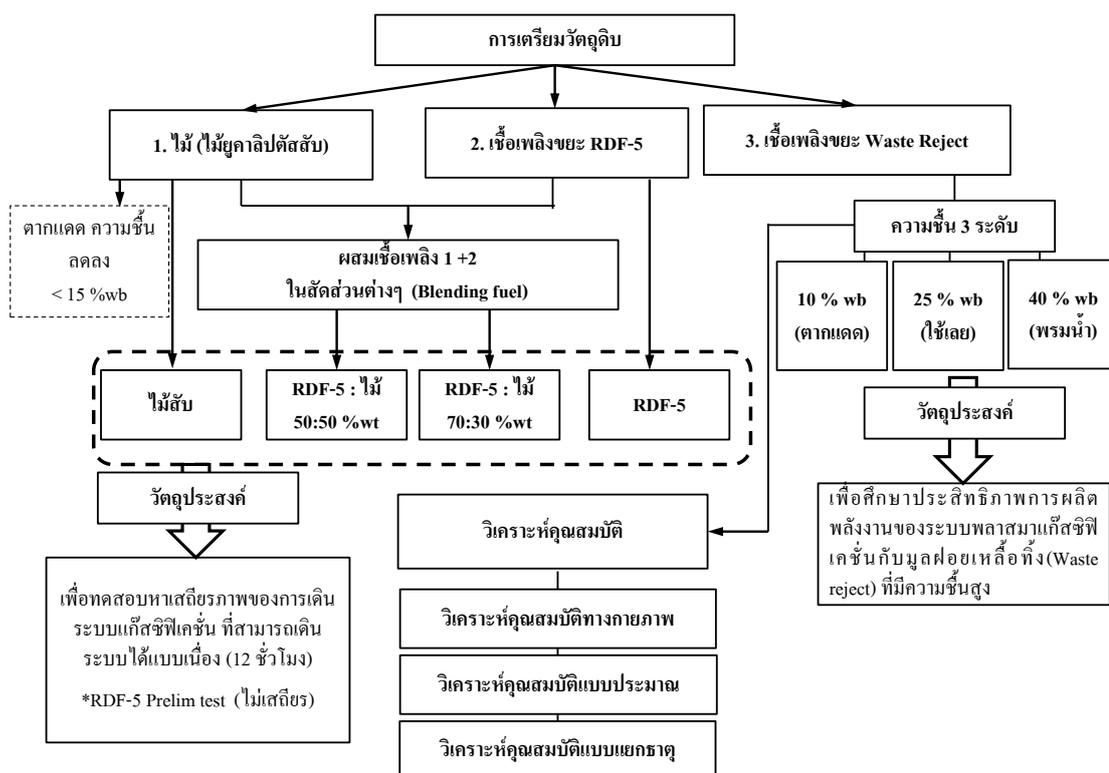
8) พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายสมรรถนะการทำงาน ของระบบ C-G และ ระบบ P-G

### 3.3 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

ทั้งนี้ขั้นตอนและวิธีการ โดยละเอียด มีดังต่อไปนี้

#### 3.3.1 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างและวิเคราะห์ตัวอย่างเชื้อเพลิงสำหรับงานวิจัย

ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างและวิเคราะห์ตัวอย่างเชื้อเพลิงสำหรับงานวิจัยนี้ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 สำหรับรายละเอียดจะกล่าวในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างและการวิเคราะห์เชื้อเพลิงสำหรับงานวิจัยนี้

##### 3.3.1.1 การเตรียมขยะชุมชนสำหรับเป็นเชื้อเพลิงขยะในงานวิจัย

งานวิจัยนี้ จะใช้ขยะชุมชนของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีเป็นตัวแทน ซึ่งจากการทบทวนเอกสารในบทที่ 2 สามารถอ้างอิงได้ว่า ขยะชุมชนในประเทศไทยมีองค์ประกอบใกล้เคียงกัน ทั้งนี้ จึงใช้ขยะชุมชนที่เกิดขึ้นภายใน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (มทส.) เป็นตัวแทนการศึกษา อย่างไรก็ตามก็ดีขยะชุมชนของประเทศไทยมีความชื้นสูง (50-60% wb) ซึ่งไม่สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้โดยตรง เนื่องจากข้อจำกัดด้านความชื้น ดังกล่าว กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงขยะ จึงถูกนำมาใช้เพื่อแก้ไขปัญหาและลดข้อจำกัดที่เกิดขึ้น รายละเอียดโดยสรุป คือ

ขยะชุมชนของ มทส. ประมาณ 7-10 ตัน/วัน จะถูกรวบรวมจากสถานที่ต่างๆ ของ มทส. ในทุกวัน เพื่อส่งมายังระบบขยะจัดการขยะแบบครบวงจร โดยกระบวนการทำงานเริ่มโดย ผ่านระบบคัดแยก ส่วนหน้า (Front end) โดยการคัดแยกขยะรีไซเคิล และขยะอันตราย ได้โดยใช้แรงงานคนบน สายพานคัดแยก ขยะที่เหลือทั้งขยะอินทรีย์และขยะอนินทรีย์ จะถูกส่งเข้าสู่เครื่องสับหยาบ เพื่อลด ปริมาณ จากนั้นจะถูกลำเลียงเข้าสู่ โรงหมักขยะด้วยวิธีการเชิงกลและชีวภาพ (Mechanical and Biological Treatment plant) หรือ โรง MBT ซึ่งเป็นระบบหมักเพื่อปรับเสถียรภาพขยะให้มีความชื้นลดลง และเพื่อย่อยสลายเศษอาหารและสารอินทรีย์ต่างๆ โดยมีระบบกวนผสมเพื่อเติม อากาศแบบใช้สกรูกลับกอง ประสิทธิภาพการย่อยสลายสูง ในระยะเวลา 1 เดือน การหมักจะสิ้นสุด ลง และขยะมีเสถียรภาพ ความชื้นลดลงเหลือไม่เกิน 30% wb

ทั้งนี้ ขยะหมักจาก โรง MBT จะถูกนำมาจัดการ โดยระบบคัดแยกขั้นหลัง (Back end) โดยส่งเข้าสู่เครื่องคัดแยกแบบตะแกรงหมุน เพื่อทำการคัดแยกส่วนต่างๆ ไปใช้ ประโยชน์ คือ 1) อินทรีย์สารผงละเอียด สามารถนำไปใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดิน 2) ขยะพลาสติก หรือเชื้อเพลิงขยะ (Refuse Derived Fuel : RDF) โดยเชื้อเพลิงที่ได้เป็น RDF-3 3) มูลฝอยเหลือทิ้ง (Waste Reject) เป็นอินทรีย์สารผสมพลาสติก ซึ่งงานวิจัยนี้จะนำขยะพลาสติก RDF-3 และมูลฝอย เหลือทิ้ง (Waste Reject) ไปเตรียมเพื่อเป็นเชื้อเพลิงสำหรับงานวิจัยนี้ต่อไป

### 3.3.1.2 การเตรียมเชื้อเพลิงขยะแบบอัดแท่ง (RDF-5)

#### 1) การเตรียมเชื้อเพลิงขยะแบบอัดแท่ง (RDF-5)

ในงานวิจัยนี้จะใช้เชื้อเพลิง RDF-5 ที่ผลิตจากโรงงานผลิตเชื้อเพลิงขยะ ของศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล โดยนำเชื้อเพลิงขยะ RDF-3 มาทำการสับย่อยให้มีขนาดเล็ก โดยใช้เครื่องจักร (Hammer mill) ให้มีขนาดประมาณ 0.1-35 มิลลิเมตร ให้เป็นเชื้อเพลิงขยะ (RDF-4) จากนั้นนำไปผลิตเป็นเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง (RDF-5) โดยใช้เครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิงแข็ง (Pelleting machine) ดังแสดงในรูปที่ 3.3 งานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมเชื้อเพลิง RDF-5 สำหรับการทดลอง ประมาณ 8 ตัน (ข้อมูลเครื่องจักร ดังแสดงใน ตารางที่ 3.1)



รูปที่ 3.3 เครื่อง Pelletizing machine สำหรับเตรียมเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง (RDF-5)

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลหน่วยการอัดเป็นแท่งเชื้อเพลิงแข็ง โดยใช้เครื่อง Pelleting Machine

พารามิเตอร์	ข้อมูล
ระบบอัดแท่ง	Pellet mill TPM 520-178
ต้นกำลัง	มอเตอร์ 3 เฟส , 200kW 380V
กำลังการผลิต	Capacity 700-980 kg/hr

## 2) การเตรียมขยะมูลฝอยเหลือทิ้ง (Waste reject) ที่ความชื้นต่างๆ

มูลฝอยเหลือทิ้ง (Waste reject) คือ เศษวัสดุของฝอย ที่ผ่านกระบวนการหมักในโรง MBT แล้ว และ ผ่านการนำมาร้อนคัดแยก เอาส่วนที่เป็นอินทรีย์วัตถุ และคัดแยกเอาเชื้อเพลิงขยะพลาสติก (RDF-3) ออกไปแล้ว ทั้งนี้ มูลฝอยเหลือทิ้งนี้ มีทั้งที่เผาไหม้ได้ และเผาไหม้ไม่ได้ (จากปริมาณขยะชุมชนเริ่มต้น 100 wt% จะเกิด Waste reject ประมาณ 13 wt% ทั้งนี้ความชื้นของ Waste reject ที่ผ่านกระบวนการร่อนคัดแยกชั้นหลัง Back-end จะมีความชื้นประมาณ 25% (wb)

เนื่องจาก ในกรณีของการกำจัดมูลฝอยโดยกระบวนการทางความร้อน (Thermal process) ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการเผาไหม้คือ ความชื้น ดังกล่าวในงานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการกำจัด Waste reject ควบคู่กับการผลิตพลังงาน โดยใช้พลาสมาเชิงความร้อนเข้ามาช่วยในกระบวนการเผาไหม้ในระบบแก๊สซิฟิเคชัน โดยศึกษาปัจจัยด้านความชื้นของมูลฝอย ซึ่งมีตัวแทนของมูลฝอย 3 ระดับคือ

- ความชื้นต่ำ ประมาณ 10% (wb) (ลักษณะของมูลฝอยแห้งแต่ต้องมีการลดความชื้นของมูลฝอยเหลือทิ้งก่อนนำไปกำจัด)
- ความชื้นกลาง ประมาณ 25% (wb) (เป็นลักษณะทั่วไปของมูลฝอยเหลือทิ้งที่ออกจากระบบโรง MBT)
- ความชื้นสูง (มูลฝอยเหลือทิ้งที่มีความชื้นสูง เป็นตัวแทนของมูลฝอย ของระบบจัดการขยะที่ใช้ในปัจจุบันของประเทศไทย อาทิ ขยะจากระบบ MBT แบบ Composting plant ของเทศบาลนครพิษณุโลก, มูลฝอยเหลือทิ้งจากกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศ เทศบาลนครราชสีมา เป็นต้น

การเตรียมตัวอย่าง โดยการนำ Waste reject ไปลดความชื้นโดยวิธีการตากแดด และสูมวัดความชื้นจนความชื้นลดลงเท่ากับระดับที่ต้อง ที่ความชื้น 10% (wb) สำหรับตัวอย่างของ Waste reject ที่ความชื้น 40% (wb) จะเตรียมโดยการพรมน้ำ และสูมเก็บตัวอย่างจนได้ความชื้นระดับที่ต้องการ (การเตรียม Waste reject ที่ความชื้น 40 % (wb) จะเตรียม ณ เวลาที่ทำการทดลองเดินระบบ เพื่อป้องกันการระเหยของน้ำที่ผิว อันจะเป็นการทำให้ความชื้นหายไป)

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียม Waste reject สำหรับการทดลองประมาณ 4 ตัน / ชนิดเชื้อเพลิง

### 3) การเตรียมเชื้อเพลิงชีวมวลไม้สับสำหรับนำมาเป็นเชื้อเพลิงผสม RDF-5

เชื้อเพลิงชีวมวลประเภทไม้สับสำหรับนำมาทำการทดลอง เพื่อเป็นเชื้อเพลิงผสม จะใช้ไม้ยูคาลิปตัสสับย่อยจากโรงงานไม้สับ (บริษัท โคราซ วี๊ด ชิพ จำกัด) โดยความชื้นเริ่มต้นของไม้สับ มีค่าประมาณ ~35% (wb) ต้องนำมาลดความชื้นโดยวิธีการตากแดด สูมเก็บตัวอย่างเชื้อเพลิงเพื่อวิเคราะห์ความชื้น จนได้ความชื้นไม่เกิน 15% (wb) ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียม ไม้ประมาณ 12 ตัน เพื่อนำไปเตรียมเป็นเชื้อเพลิงผสมต่อไป

### 4) การเตรียมเชื้อเพลิงผสม (Blending fuel)

นำเชื้อเพลิงขยะ RDF-5 มาผสมกับเชื้อเพลิงชีวมวลไม้สับ ความชื้นไม่เกิน 15% (wb) ให้ได้อัตราสัดส่วนต่างๆ (สัดส่วนโดยน้ำหนัก : %wt) (1) เชื้อเพลิงขยะ RDF-5 ผสมกับ ไม้ยูคาลิปตัสสับ สัดส่วน 50:50 %wt สัญลักษณ์ย่อ คือ RDF-5/WC (50/50) (2) เชื้อเพลิงขยะ RDF-5 ผสมกับ ไม้ยูคาลิปตัสสับ สัดส่วน 70:30 %wt สัญลักษณ์ย่อ คือ RDF-5/WC (70/30)

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียม เชื้อเพลิงผสม สำหรับการทดลองประมาณ 4 ตัน/ชนิด เชื้อเพลิง

### 3.3.2 การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์คุณสมบัติของเชื้อเพลิง

#### 3.3.2.1 การเก็บตัวอย่างเชื้อเพลิง

การเก็บตัวอย่างเชื้อเพลิง ทั้ง RDF-3 RDF-5 WC และ Waste reject เพื่อนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ จะทำการสุ่มเก็บตัวอย่างวัตถุดิบเชื้อเพลิงแต่ละชนิดในแต่ละวัน ซึ่งการสุ่มตัวอย่างจำเป็นต้องคัดเลือกเพื่อให้ได้ตัวแทนที่ดีที่สุด ทั้งนี้แบ่งการเก็บตัวอย่างเชื้อเพลิงต่างๆ ดังนี้

1) เชื้อเพลิง RDF-3 RDF-5 และ Waste Reject เนื่องจากวัตถุดิบเหล่านี้เป็นเชื้อเพลิงขยะ ซึ่งมีองค์ประกอบที่หลากหลายเป็นส่วนผสม ซึ่งการสุ่มตัวอย่างที่จะใช้เป็นตัวแทนในการวิเคราะห์ จึงดำเนินการตามขั้นตอน Quartering (Padungsirikul, 1992) ดังนี้

- ทำการคลุกเคล้าและผสมวัตถุดิบของวันนั้น และพยายามให้รวมเป็นเนื้อเดียวกันมากที่สุดเพื่อให้ลักษณะองค์ประกอบของวัตถุดิบนั้นเหมือนกันทุกส่วน
- สุ่มตัวอย่างวัตถุดิบนั้นๆ มาประมาณ 1 ลูกบาศก์เมตร แล้วนำมากองรวมกันบนพื้นผิวแข็งที่เรียบและสะอาด เพื่อป้องกันการปนเปื้อนจากวัสดุอื่น
- คลุกเคล้าให้เป็นเนื้อเดียวกัน แล้วจัดกองวัตถุดิบให้อยู่ในรูปทรงกรวยคว่ำ ใช้พลั่วกดกองให้แผ่ออกไปเป็นวงกลมที่มีความหนาเท่าๆ กันทุกๆ ด้าน
- ใช้เชือกแบ่งกองวัตถุดิบออกเป็น 4 ส่วน (Quartering) ที่มีขนาดเท่าๆ กัน แล้วเลือกวัตถุดิบ 2 ส่วนที่อยู่ด้านตรงข้ามกันนำออกไปจากพื้นที่การสุ่มตัวอย่าง
- นำกองวัตถุดิบ 2 ส่วนที่เหลืออยู่มากองคลุกเคล้าให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกันอีก ทำต่อไปหลายๆ ครั้ง จนกระทั่งเหลือวัตถุดิบประมาณ 100 ลิตร จากนั้นจึงนำตัวอย่างขยะมูลฝอยที่ได้ไปทำการวิเคราะห์ลักษณะด้านองค์ประกอบ จากนั้นทำต่อไปหลายๆ ครั้ง จนกระทั่งเหลือวัตถุดิบประมาณ 2 ลิตร เพื่อนำไปทำการวิเคราะห์ลักษณะกายภาพและทางเคมีต่อไป

โดยวัตถุดิบเชื้อเพลิง RDF-3, RDF-5 และ Waste Reject จะถูกเก็บตัวอย่างเช่นนี้ทุกวันเป็นเวลา 30 วัน ซึ่งมีจำนวนตัวอย่างทั้งหมด 30 ตัวอย่าง ต่อชนิดเชื้อเพลิง

2) เชื้อเพลิงไม้สับ Wood chip (WD) เนื่องจากเชื้อเพลิงไม่มีคุณสมบัติเป็นเชื้อเพลิงชนิดเดียว งานวิจัยนี้จึงสุ่มเก็บตัวอย่างของเชื้อเพลิงภายหลังจากการเตรียมโดยกระบวนการตากแห้งแล้ว (ความชื้นน้อยกว่า 15 % wb) เพียง จำนวน 10 ตัวอย่าง

ภายหลังจากที่สุ่มเก็บตัวอย่างเชื้อเพลิงแต่ละชนิดเรียบร้อยแล้ว ตัวอย่างจะถูกนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบ คุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติเคมี ในลำดับต่อไป

### 3.3.2.2 การศึกษาองค์ประกอบและคุณสมบัติทางกายภาพ

1) การหาองค์ประกอบ (Composition) ของขยะมูลฝอย โดยการคัดเลือกขยะมูลฝอยแต่ละประเภทซึ่งได้แก่ กระดาษ พลาสติก โฟม ผ้า ไม้ เศษอาหาร แก้ว กระจังโลหะ กระจัง โลหะ ยาง และอื่นๆ แล้วชั่งน้ำหนักและบันทึกข้อมูล

2) ขนาด (Size) ของขยะมูลฝอย คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขยะมูลฝอย โดยการจัดตะแกรง 2 ขนาดซ้อนกัน คือ ตะแกรงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่างซี่ตะแกรง 76 และ 38 มิลลิเมตร ให้อยู่ด้านบนและด้านล่างตามลำดับ ชั่งน้ำหนักรวมของตัวอย่างขยะมูลฝอยก่อนทำ การตัดขยะมูลฝอยใส่ในตะแกรงบนสุด แล้วเขย่าให้ขยะมูลฝอยตกลงตามช่องตะแกรง เมื่อตัดขยะมูลฝอยใส่หมดแล้ว และเขย่าจนไม่มีขยะมูลฝอยตกลงมาแล้วจะได้ขยะมูลฝอย 3 ขนาด คือ ใหญ่กว่า 76 มิลลิเมตร ระหว่าง 38-76 มิลลิเมตร และ เล็กกว่า 38 มิลลิเมตร ชั่งน้ำหนักแต่ละขนาด และบันทึก

3) ความหนาแน่นปกติ (Bulk density) เป็นความหนาแน่นของขยะมูลฝอยที่บรรจุอยู่ในภาชนะทั่วไป กระทำได้ด้วยการชั่งน้ำหนักถังตวงเปล่าที่มีปริมาตร 100 ลิตร

4) การทดสอบการย่อยสลายเชิงความร้อน (Thermogravimetric analysis) โดยใช้เครื่อง Simultaneous Thermal Analyzer ยี่ห้อ NETZSCH รุ่น STA 449F3 (ทดสอบโดยใช้  $N_2$  เป็น Carrier gas ให้ Heating rate 10 °C/min อุณหภูมิตั้งแต่ 25 ถึง 900 °C)

### 3.3.2.3 การศึกษาสมบัติแบบประมาณ (Proximate analysis)

1) ความชื้น (Moisture) คือเปอร์เซ็นต์ของน้ำต่อน้ำหนักวัสดุ ความชื้นมีผลโดยตรงต่อปฏิกิริยาการเผาไหม้และคุณภาพของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ เชื้อเพลิงที่มีความชื้นต่ำนี้จะเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบผลิตแก๊สได้มากขึ้นเท่านั้น โดยวิธีการวิเคราะห์อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D3173 (ภาคผนวก)

2) เถ้า (Ash) คือปริมาณเถ้าที่มีอยู่ในชีวมวล ภายหลังการเผา ซึ่งปริมาณเถ้าในชีวมวลสามารถนำมาเป็นข้อมูลเพื่อคาดคะเนองค์ประกอบอื่นๆ ของเชื้อเพลิงได้ เช่น ถ้ามีปริมาณเถ้าสูง ก็มีแนวโน้มที่ชีวมวลจะมีค่าความร้อนต่ำ โดยวิธีการวิเคราะห์อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D3174 (ภาคผนวก)

3) ปริมาณสารระเหย (Volatile matter) คือปริมาณสารระเหยที่มีอยู่ในชีวมวล ซึ่งปริมาณสารระเหยในชีวมวลสามารถนำมาเป็นข้อมูลเพื่อคาดคะเนองค์ประกอบอื่นๆ ของเชื้อเพลิงได้เช่นเดียวกัน เช่น ถ้ามีปริมาณสารระเหยสูง ก็มีแนวโน้มที่ชีวมวลจะมีค่าความร้อนสูง

เกิดผลิตภัณฑ์แก๊สที่เผาไหม้ได้สูง แต่ปริมาณของคาร์บอนคงตัวจะต่ำ ตามลำดับ โดยวิธีการวิเคราะห์อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D3175 (ภาคผนวก)

4) ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) คือปริมาณองค์ประกอบคาร์บอนที่มีอยู่ในชีวมวล ซึ่งปริมาณคาร์บอนคงตัวในชีวมวลสามารถนำมาเป็นข้อมูลเพื่อคาดคะเนองค์ประกอบอื่นๆ ของเชื้อเพลิงได้เดียวกัน เช่น ถ้ามีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูง ก็มีแนวโน้มที่จะให้ผลได้ของถ่านชาร์สูง เป็นต้น โดยใช้วิธีการคำนวณจากผลต่างระหว่าง ความชื้น เถ้า และปริมาณสารระเหย (By difference) (%db)

5) ค่าความร้อน (High Heating Value) คือ ค่าพลังงานความร้อนของเชื้อเพลิงเมื่อเทียบกับต่อ 1 หน่วยน้ำหนักหรือปริมาตรของเชื้อเพลิง โดยมีหน่วยเป็น kJ/kg, kcal/kg, Btu/lb หรือ kcal/L เป็นต้น จะเป็นค่าที่บ่งบอกว่าชีวมวลนั้นๆ มีความเหมาะสมที่จะนำมาแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงหรือไม่ โดยวิธีการวิเคราะห์อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D2015 (ภาคผนวก)

### 3.3.2.4 การศึกษาสมบัติทางเคมี (Chemical composition)

1) การศึกษาองค์ประกอบของปริมาณธาตุในตัวอย่าง โดยการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) เพื่อหาปริมาณธาตุ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ (CHNS Elemental Analyzer) รุ่น Analyzer CHNS-932 EDXRF (เครื่องมือวิเคราะห์นี้มีค่า Limit of Detection 5 ppm) ณ ห้องปฏิบัติการของอาคารศูนย์เครื่องมือ 1 (F1) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งเป็นเครื่องมือวิเคราะห์แบบอัตโนมัติสำหรับหาปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์ ส่วนธาตุออกซิเจนใช้วิธีการคำนวณโดยหาจากผลต่างของธาตุ (ภาคผนวก)

2) การศึกษาองค์ประกอบของธาตุในตัวอย่าง ได้แก่ กลุ่มฮาโลเจน (Cl) กลุ่มอัลคาไลน์ (Na, K, Mg, Ca) ธาตุอะโลหะ (P) ธาตุกึ่งโลหะ (Si) และ ธาตุโลหะหนักต่างๆ โดยใช้เครื่อง X-ray fluorescence energy dispersive spectrometer (Model XGT-5200) ณ ห้องปฏิบัติการของอาคารศูนย์เครื่องมือ 1 (F1) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี งานวิจัยนี้ เลือกใช้เทคนิค X-ray เนื่องจาก EDXRF สามารถทำการวิเคราะห์ได้ทั้งเชิงปริมาณและคุณภาพ วิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุหลายชนิดได้ในเวลาเดียวกันและรวดเร็วเนื่องจากตัวอย่างไม่ต้องผ่านการย่อยและทำให้เป็นสารละลายก่อน ตลอดจนค่าวิเคราะห์ไม่สูงมาก

### 3.3.3 การพัฒนาระบบแก๊สซิฟิเคชันสำหรับใช้กับพลาสมาอาร์คเชิงความร้อน

#### 3.3.3.1 พลาสมาเชิงความร้อนขนาดกำลัง 50 กิโลวัตต์

ในงานวิจัยนี้ อาศัยต้นแบบเทคโนโลยีพลาสมาอาร์ค (Plasma arc technology) ภายใต้การพัฒนาโดย บริษัท High Temperature Technologies Corp. (HTTC) ประเทศแคนาดา เป็นบริษัทที่ดำเนินการวิจัยและพัฒนาด้านพลาสมาอาร์คกับการกำจัดของเสียอันตรายและการผลิตพลังงานทดแทน มีผู้เชี่ยวชาญด้าน Plasma technology และ Plasma physics ทั้งนี้ โดยการประสานความร่วมมือด้านงานวิจัย ระหว่าง ศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีกับ สถาบัน Advanced plasma solutions for waste management ซึ่งเป็นฝ่ายวิจัยและพัฒนา (Research and Development : R&D) ของบริษัท High Temperature Technologies Corp. (HTTC) เพื่อทำการพัฒนาระบบพลาสมาอาร์ค (Plasma arc torch) ขนาด 50 kW สำหรับนำมาประยุกต์ใช้กับระบบแก๊สซิฟิเคชัน โดยรายละเอียดของระบบ ดังแสดงใน ตารางที่ 3.2 และมีรายละเอียดต่อไปนี

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติหัวพลาสมาสำหรับนำมาใช้ในงานวิจัยนี้

พารามิเตอร์	ข้อกำหนด
Power	50 kW
Voltage (max)	300 V
Current (max)	250 A
Air	2-10 g/s
Water (max)	500 g/s
Life time of electrodes	200 hr
Efficiency	65 %
Diameter of nozzle	25 mm
Sizes	300 x 600 mm
Weight	10 kg

#### 1) ชุดหัวพลาสมาอาร์ค (Plasma arc torch)

- หัวพลาสมา (Plasma arc torch) เป็นชนิด DC plasma torch ผลิตจากวัสดุเหล็กแข็งทนอุณหภูมิสูง สามารถสร้างอุณหภูมิเปลวแก๊สได้ในช่วง 2,200-11,000 °C มีอุปกรณ์ประกอบ คือ ชุดขั้วไฟฟ้า (Electrode) ชุดหัวฉีดแก๊ส (Gas injectors) ฉนวนทนความร้อน

(Insulator) ชุดจุดประกายไฟฟ้า (Spacer) มีอายุการใช้งานต่อเนื่องได้ไม่ต่ำกว่า 200 ชั่วโมง ประสิทธิภาพรวมของระบบ (System efficiency) ประมาณ 65% พร้อมชุดอุปกรณ์สำรอง (Spare of plasma torch) มีน้ำหนักรวมประมาณ 10 kg ขนาดโดยประมาณ 300 x 600 mm เส้นผ่านศูนย์กลางของส่วนหัว (Diameter of nozzle) โดยประมาณ 25 mm

- ชุดขั้วไฟฟ้า (Electrode) ทำจากวัสดุทองแดง (CU) ประกอบด้วย ขั้วบวก (+) และขั้วลบ (-) จ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด 50 kW ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุด 300 V กระแสไฟฟ้าสูงสุด 250 A โดยใช้กับระบบไฟฟ้ากระแสตรง (Direct current : DC)

- ชุดหัวฉีดแก๊ส (Gas injectors) ในงานวิจัยนี้เลือกใช้อากาศ (Air) เป็น Carrier gas ปรับอัตราการฉีดแก๊สได้ในช่วง 2-10 g-carrier gas/sec พร้อมทั้งติดตั้งระบบลดอุณหภูมิของเปลวแก๊ส ด้วยระบบ Water cooling supply system ที่อัตราการไหลของน้ำสูงสุด 500g-water/sec

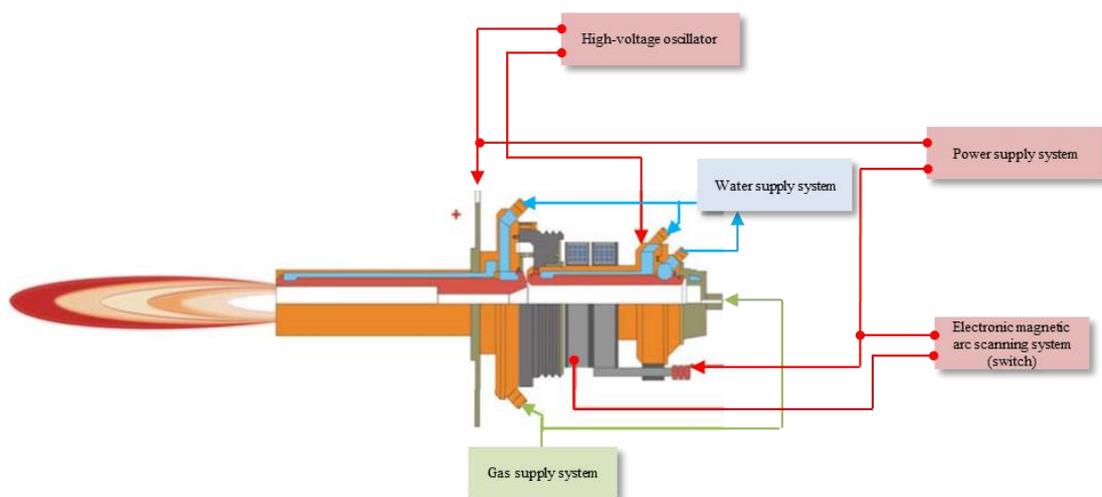
- ฉนวนทนความร้อน (Insulator) ทำจากวัสดุพิเศษทนความร้อน หุ้มฉนวนทั้งชุดจนถึงบริเวณทางออกของแก๊ส (Plasma gases outlet)

- ชุดจุดประกายไฟฟ้า (Spacer) มีการต่อเชื่อมชุดจุดประกายไฟฟ้าเข้ากับส่วนหัวพลาสมาและระบบขั้วไฟฟ้า (Electrode) ด้วยควบคุมระบบควบคุม (Control block และ block of ignition) โดยการทำงานจะใช้การควบคุมด้วยเจ้าหน้าที่ (Manual control mode)

- การเดินระบบของชุดหัวพลาสมาอาร์ค (Gas plasma arc torch) เป็นระบบควบคุมด้วยเจ้าหน้าที่ (Manual control system) และมีการติดตั้งอุปกรณ์ วงจรไฟฟ้า ระบบควบคุม ให้แล้วเสร็จ และสามารถใช้งานได้เป็นอย่างดี

## 2) ระบบจ่ายกระแสไฟฟ้าพร้อมระบบควบคุม

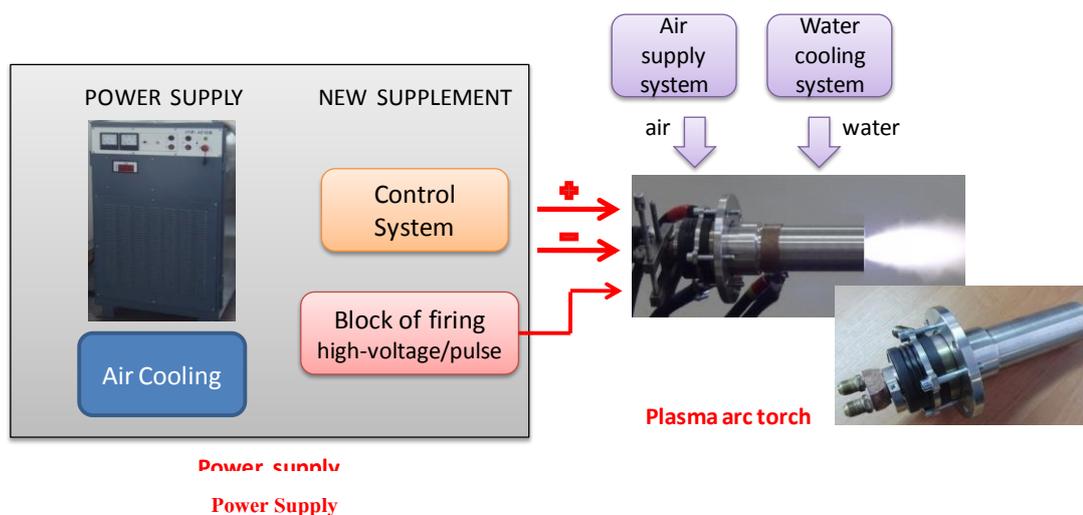
ชุดอุปกรณ์จ่ายกระแส (Power supply) สำหรับใช้กับระบบแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternative current : AC) ซึ่งเป็นระบบไฟแบบ 3 เฟส กระแสไฟฟ้า 250 A แรงดัน 380 V และความถี่ 50 Hz และพร้อมทั้งติดตั้งอุปกรณ์ตัวเก็บประจุ (Capacitor) ขนาดใหญ่ และหม้อแปลงกระแสไฟฟ้า (Tranformer) ที่สามารถเปลี่ยนกระแสไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ให้มีความต่างศักย์สูงขนาด 40,000 V ทั้งนี้แผนผังการทำงานของหัวพลาสมาอาร์ค (Plasma arc torch) ดังแสดงในรูปที่ 3.4 สำหรับชุดระบบพลาสมาอาร์คและอุปกรณ์จ่ายกระแสไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 3.5 และ ลักษณะการทำงานของระบบพลาสมาอาร์คและอุปกรณ์จ่ายกระแสไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.4 แผนผังของหัวพลาสมาอาร์ค (plasma arc torch)

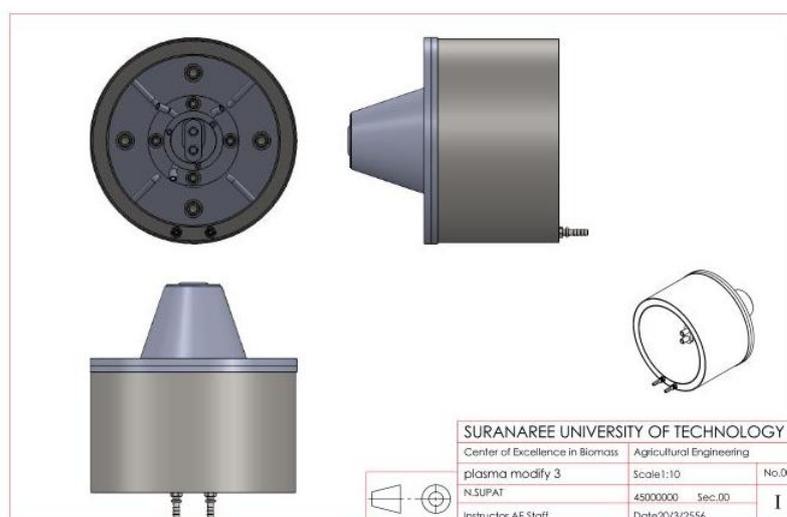


รูปที่ 3.5 ชุดระบบพลาสมาอาร์คและอุปกรณ์จ่ายกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 3.6 ลักษณะการทำงานของระบบพลาสมาอาร์คและอุปกรณ์จ่ายกระแสไฟฟ้า

หัวพลาสมาจะถูกนำไปประกอบเข้ากับเตาปฏิกรณ์ แต่การติดตั้งชุดพลาสมาอาร์คในเตาปฏิกรณ์ที่มีความร้อนสูง จำเป็นต้องออกแบบระบบ Plasma jacket หรือชุดครอบหัวพลาสมา ซึ่งอุปกรณ์ป้องกันความร้อน ที่จะก่อให้เกิดความเสียหายกับ ระบบสายไฟ ท่อแก๊ส และท่อน้ำ เมื่อนำชุดนี้ประกอบเข้าไปในเตาปฏิกรณ์ที่มีความร้อนสูง ชุดครอบหัวพลาสมา นี้ได้ออกแบบให้สามารถระบายความร้อนที่แผ่ออกมาจากตัวเตาได้โดยใช้น้ำไหลผ่าน ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 Plasma Jacket หรือชุดครอบหัวพลาสมา



(ก) หัวพลาสมาที่ประกอบชุดครอบ

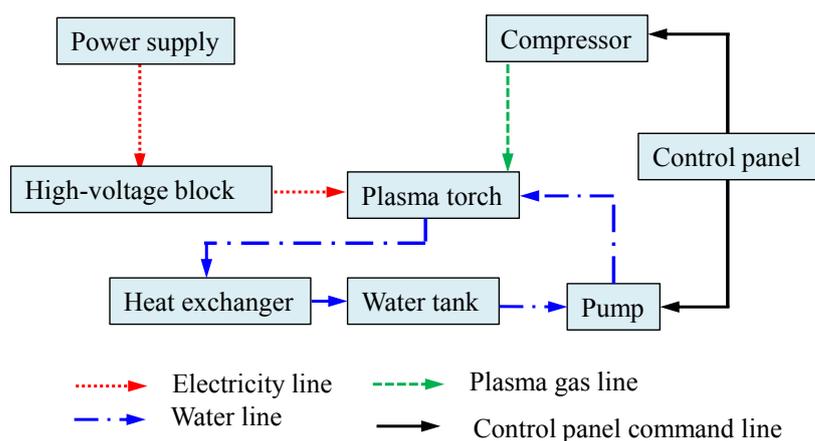


(ข) การทดสอบหัวพลาสมาแบบมีชุดครอบ

รูปที่ 3.8 ลักษณะชุดครอบหัวพลาสมา (Plasma Jacket)

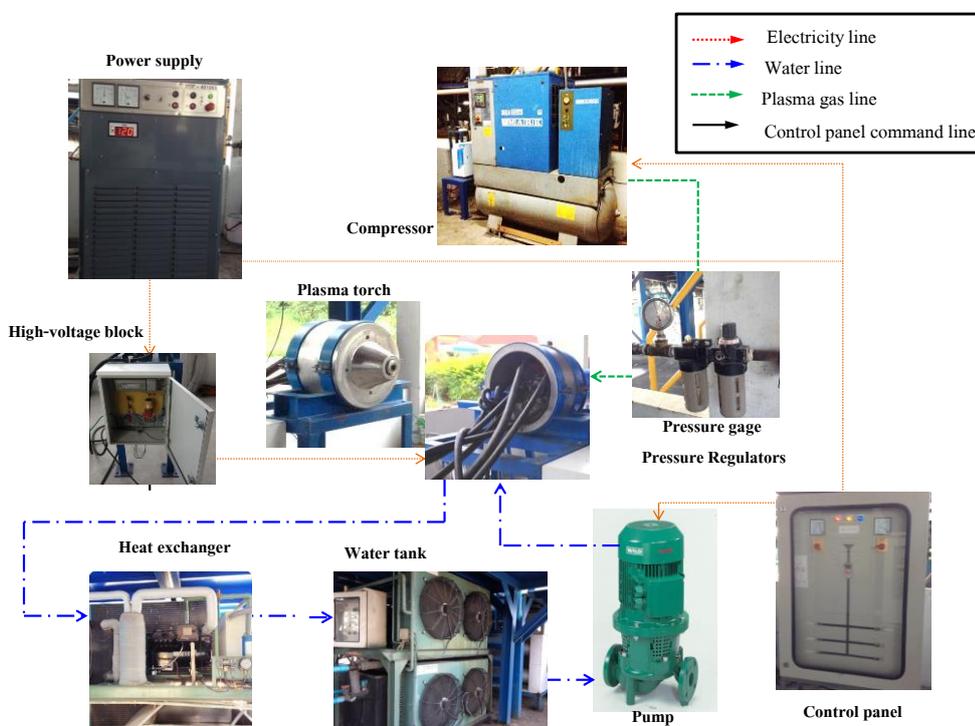
### 3) การพัฒนาอุปกรณ์สำหรับนำหัวพลาสมาอาร์คไปใช้งานในเชิงความร้อน

ทั้งนี้ การนำหัวพลาสมาอาร์ค มาใช้งานทางความร้อนกับระบบเตาปฏิกรณ์ระบบแก๊สซิฟิเคชัน จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้อง ติดตั้งอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้สามารถใช้งานได้อย่างต่อเนื่อง โดยได้พัฒนาและติดตั้งระบบเพิ่มเติม ได้แก่ ระบบผลิตน้ำหล่อเย็นหัวพลาสมา (Cooling water) ระบบปั๊มน้ำสำหรับระบบระบายความร้อนของหัวพลาสมา รายละเอียดของระบบและอุปกรณ์ ต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.9 และรายละเอียดมีดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.9 แผนผังอุปกรณ์สำหรับควบคุมการทำงานของหัวพลาสมาอาร์ค

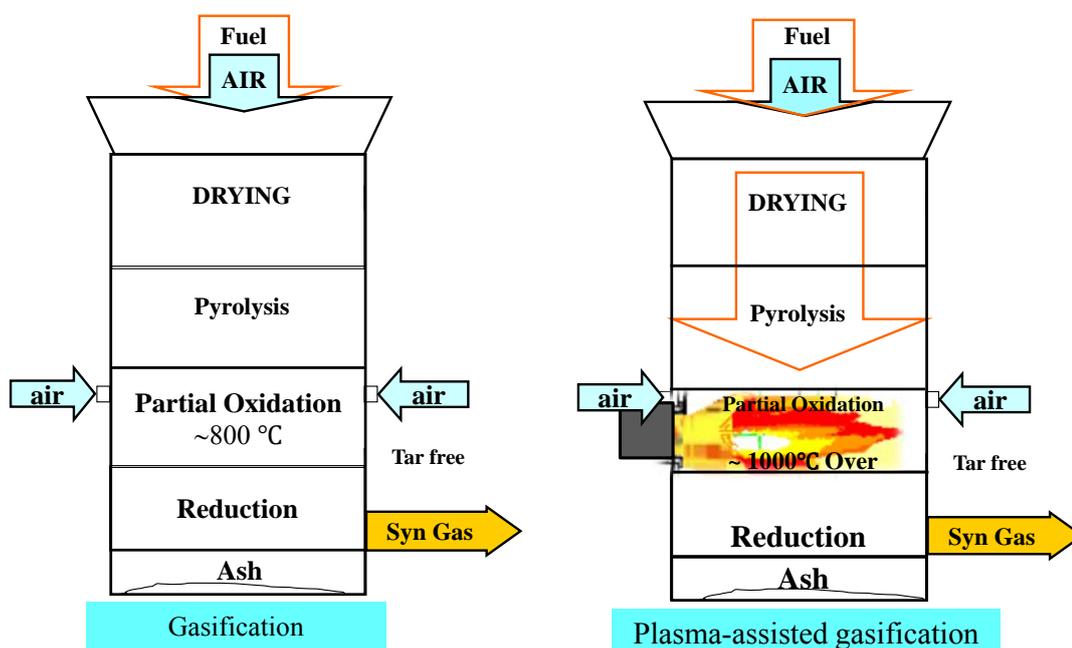
- ถังพักน้ำ (Water tank) อุปกรณ์ผลิตน้ำหล่อเย็น (Cooling water) และ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) เพื่อใช้กับการลดอุณหภูมิของชุดหัวพลาสมาอาร์ค โดยจะติดตั้งอุปกรณ์ พร้อมระบบควบคุมและระบบแสดงอุณหภูมิ น้ำ สำหรับควบคุมอุณหภูมิของน้ำเข้าหัวพลาสมาอาร์ค (Inlet plasma arc torch) ไม่เกิน 30 °C และอุณหภูมิของน้ำออกจากระบบ (Outlet plasma arc torch) ไม่เกิน 55 °C เนื่องจากเมื่อมีการใช้งานต่อเนื่องของหัวพลาสมาจะมีความร้อนสูง การลดอุณหภูมิให้กับหัวพลาสมา อันเป็นป้องกันการเสียหายต่อระบบสายไฟ และอุปกรณ์ภายในหัวพลาสมา
  - ปั้มน้ำสำหรับระบบระบายความร้อนของหัวพลาสมา (Water cooling supply system) ที่มีความดันไม่ต่ำกว่า 0.6 MPa ให้อัตราการไหลของน้ำสูงสุด 500 g-water/secs
  - เครื่องอัดอากาศ (Air compressor) สำหรับหัวฉีดแก๊ส (Gas injector) ของชุดหัวพลาสมาอาร์ค โดยจะสามารถให้ Carrier gas ทำงานกับระบบได้ ที่แรงดันของแก๊สได้ไม่ต่ำกว่า 1 MPa (10 Bar) และให้อัตราการไหลของ Carrier gas สูงสุดที่ระดับ 8 g-carrier gas/sec
- ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อควบคุมการทำงานของหัวพลาสมาอาร์ค สำหรับนำมาประยุกต์ใช้งานวิจัยนี้ ดังแสดงใน รูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 การติดตั้งชุดอุปกรณ์เพื่อควบคุมการทำงานของหัวพลาสมาอาร์ค

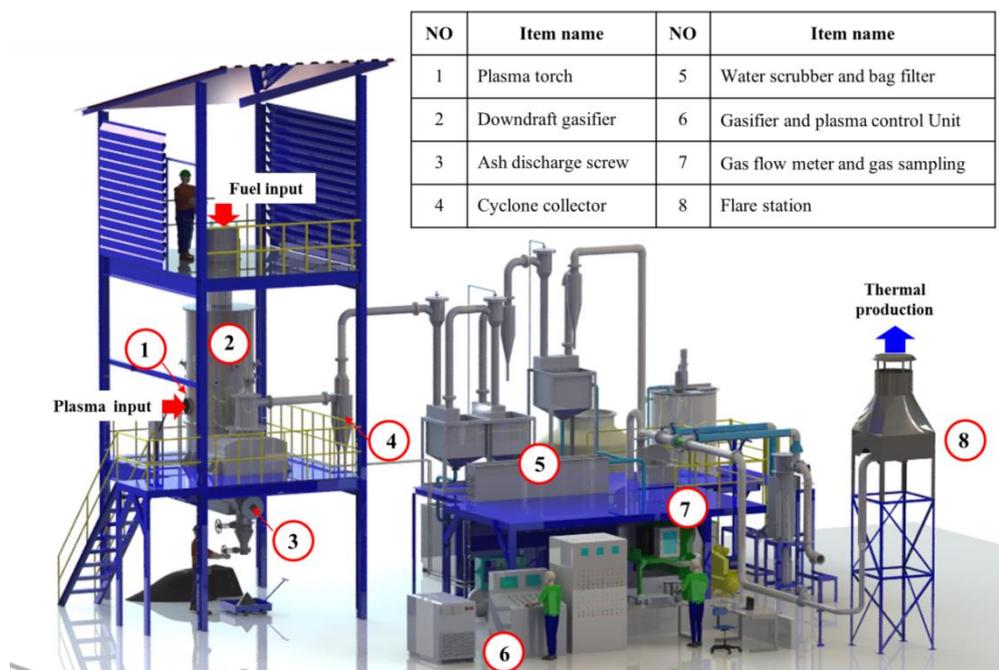
### 3.3.3.2 การพัฒนาเตาปฏิกรณ์ระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน

ในพัฒนาเตาปฏิกรณ์พลาสมาแก๊สซิฟิเคชันสำหรับการทดสอบ ในงานวิจัยนี้ จะพัฒนาต่อยอดจากต้นแบบโรงไฟฟ้าชีวมวลเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน ของศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งเป็นเตาปฏิกรณ์ชนิดไหลลง (Fixed bed downdraft gasifier) ที่ถูกออกแบบให้สามารถรองรับเชื้อเพลิงได้ไม่ต่ำกว่า 200 กิโลกรัม/ชั่วโมง (หรือ สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ 100 กิโลวัตต์) ในส่วนของการพัฒนาระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชันในงานวิจัยนี้ จะทำการปรับปรุงเตาปฏิกรณ์ของระบบแก๊สซิฟิเคชัน โดยนำพลาสมาอาร์คช่วยในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Plasma-assisted gasification) โดยการเพิ่มช่องในเตาปฏิกรณ์เพื่อติดตั้งหัวพลาสมา ประกอบเข้าไป โดยในงานวิจัยนี้ จะทำการติดตั้งหัวพลาสมาอาร์คเข้าไปในโซนการเผาไหม้ (Combustion zone) โดยมีวัตถุประสงค์ เพื่อให้ความร้อนจากพลาสมาอาร์คเข้าไปเป็นความร้อนช่วยสำหรับกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิง และให้ความร้อนใน Combustion zone สูงขึ้น ดังแสดงใน รูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ลักษณะของเตา Gasification และ Plasma-assisted gasification

ทั้งนี้ ส่วนประกอบที่สำคัญของระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน ที่นำมาใช้ใน งานวิจัยนี้ มีส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน คือ 1) ชุดเตาปฏิกรณ์ 2) ระบบทำความสะอาดแก๊ส 3) ระบบ บำบัดน้ำเสีย และ 4) ชุดอุปกรณ์และระบบควบคุมการนำแก๊สไปใช้ประโยชน์ โดยแผนผัง กระบวนการ แสดงไว้ในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 แผนผังกระบวนการของระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน

### 1) เตาปฏิกรณ์ (Gasifier)

เตาปฏิกรณ์ชนิด (Open-top) Fixed bed downdraft gasifier ภายนอกทำจาก วัสดุโลหะม้วนกลม ภายในบุด้วยฉนวนกันความร้อนทำจากวัสดุทนความร้อนทำหน้าที่เก็บรักษา อุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้และลดการสูญเสียความร้อน ด้านบนของเตาประกอบด้วย Hopper feeder เพื่อรับเชื้อเพลิง และมีฝาปิด มีช่องไว้ซีลน้ำ (Seal) ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้อากาศเข้า-ออก จากเตาขณะ Shut down ระบบ ด้านข้างของเตาจะมีทางเข้าของอากาศหลายส่วนเพื่อป้อนอากาศ และควบคุมอากาศเข้าสู่เตาสำหรับการเผาไหม้ ด้านล่างของเตามีระบบลำเลียงถ่านที่ได้จากการ เผาไหม้ออกจากเตา ระบบลำเลียงถ่านจากเตาด้วยมอเตอร์และสกรูลำเลียง ดังแสดงในรูปที่ 3.13 (ก)

ในกรณีของการใช้งานเป็นเตาปฏิกรณ์พลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน จะติดตั้ง หัวพลาสมาอาร์ค เข้าไปภายในเตาปฏิกรณ์ โดยติดตั้งในโซนการเผาไหม้ (Combustion zone)

เพื่อให้ความร้อนจากพลาสมาอาร์ค เข้าไปเป็นความร้อนช่วยในโซนของการเผาไหม้ ดังแสดงในรูปที่ 3.13 (จ), รูปที่ 3.13 (ค) และ รูปที่ 3.12 (ง)

หลักการการทำงานของระบบเตาปฏิกรณ์สำหรับ ระบบแก๊สซิฟิเคชัน และพลาสมาแก๊สซิฟิเคชันนี้ มีหลักการทำงานคือ เชื้อเพลิงจะถูกลำเลียงสู่ถังพักเพื่อรอที่จะเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ หลังจากนั้นวัตถุดิบจะถูกปล่อยลงสู่เตาและจะทำให้เกิดปฏิกิริยาขึ้น 4 โซนคือ 1) โซนอบแห้ง (Drying zone) 2) โซนไพโรไลซิส (Pyrolysis zone) 3) โซนการเผาไหม้ (Combustion zone) ซึ่งงานวิจัยนี้ จะทำการประกอบหัวพลาสมาอาร์คเข้าไปในโซนการเผาไหม้ ในกรณีของการใช้งานเป็นระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน และ 4) โซนรีดักชัน (Reduction zone) สำหรับผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Syngas) โดย แก๊สเชื้อเพลิงที่เกิดขึ้น จะไหลผ่านทางออกด้านล่าง ไปสู่ระบบทำความสะอาดแก๊ส (Gas cleaning unit) คือ ไซโคลนดักฝุ่น (Cyclone) ระบบสครับเบอร์ (Water scrubber) และ Chiller scrubber) และ ระบบถุงกรอง (Bag filter) ตามลำดับ จากนั้น แก๊สเชื้อเพลิงจะผ่านไปยังชุดทดสอบการเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงต่อไป (Flare station )

## 2) ระบบทำความสะอาดแก๊ส (Gas treatment unit)

1. Cyclone collector เป็นอุปกรณ์แยกฝุ่นหรืออนุภาคออกจากแก๊สใช้หลักการดักฝุ่นด้วยแรงหนีศูนย์กลางทำให้เกิดแก๊สหมุนวน (Vortex) จากนั้นฝุ่นหรืออนุภาคจะตกลงสู่ด้านล่างของ Cyclone collector ส่วนแก๊สจะหมุนวนอยู่ด้านบนแล้วไหลตามท่อไปสู่ระบบ Water scrubber และ Chiller scrubber ซึ่งเป็นส่วนประกอบลำดับถัดไป แสดงไว้ใน รูปที่ 3.13 (จ)

2. Water scrubber และ Chiller scrubber เป็นอุปกรณ์ดักฝุ่นและอนุภาคขนาดเล็กออกจากแก๊สเชื้อเพลิงโดยใช้ละอองน้ำที่อุณหภูมิประมาณ 32 °C ส่วน Chiller scrubber เป็นอุปกรณ์ดักฝุ่นและน้ำมันดิน (Tars) โดยใช้น้ำเย็นที่อุณหภูมิประมาณ 10 °C ซึ่งไอรระเหยจากยางเหนียวของน้ำมันดินจะถูกควบแน่นลงมาพร้อมกับน้ำ ลักษณะของ Water scrubber และ Chiller scrubber แสดงไว้ในรูปที่ 3.13 (ค)

3. Fabric filter unit ทำหน้าที่ดักฝุ่นอนุภาคขนาดเล็ก และความชื้นครั้งสุดท้ายหลังจากผ่านกระบวนการต่างๆ ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยฝุ่นอนุภาคขนาดเล็กที่ผ่านเข้ามาจะถูกดักจับไว้โดยถุงกรองซึ่งสามารถกรองอนุภาคที่มีขนาดเล็กได้มากถึง 100 ไมครอน เพื่อให้ได้แก๊สที่สะอาดสามารถนำไปใช้กับเครื่องยนต์สันดาปภายในได้ แสดงไว้ในรูปที่ 3.13 (ข)

## 3) ถังพักน้ำและระบบบำบัดน้ำเสีย

ถังพักน้ำ หรือ ระบบ Buffer tank ถูกออกแบบสำหรับรองรับน้ำจากกระบวนการทำความสะอาดแก๊สเชื้อเพลิง Water scrubber และ Chiller scrubber ซึ่งมีความจุประมาณ 10 ลูกบาศก์เมตร แสดงไว้ใน รูปที่ 3.13 (ข) ในกรณีที่ต้องการบำบัดน้ำเสีย จะหมุนเวียน

น้ำจาก Buffer tank แล้วบำบัดโดยใช้วิธีทางเคมี (Chemical treatment) โดยใช้หลักการ โคลแลกูเลชัน (Coagulation) ที่ถึง Flocculation tank

#### 4) พัดลมดูด และชุดทดสอบการลุกไหม้ของแก๊สเชื้อเพลิง

พัดลมดูด (Gas blower) เป็นอุปกรณ์สำหรับดูดแก๊สเชื้อเพลิง ที่ผ่านการทำความสะอาดแล้วจาก ระบบทำความสะอาดแก๊ส เพื่อไปใช้ประโยชน์ต่อไป ในงานวิจัยนี้ จะนำแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิต ผ่านเข้าไปยังชุดทดสอบพัดลมการลุกไหม้ของแก๊สเชื้อเพลิง (Start-up flare) และทำการเผาขยะแก๊สทิ้ง แสดงไว้ใน รูปที่ 3.13 (ฉ) และ รูปที่ 3.13 (ญ) ตามลำดับ



ก. เตาปฏิกรณ์ระบบแก๊สซิฟิเคชัน



ข. เตาปฏิกรณ์ระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน



ค. การประกอบหัวพลาสมาอาร์ค



ง. เปลวลำแสงของพลาสมาอาร์ค

รูปที่ 3.13 ส่วนประกอบที่สำคัญของระบบแก๊สซิฟิเคชันและพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน



จ. ไซโคลนดักฝุ่น (Cyclone collector)



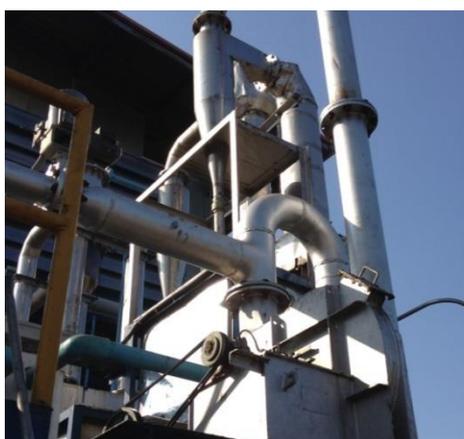
ฉ. Water scrubber and chiller scrubber



ช. ระบบกรอง (Fabric filter unit)



ซ. ถังรวบรวมน้ำเสีย (Buffer tank)



ฅ. พัดลมดูด (Gas blower)



ญ. ชุดทดสอบการลุกไหม้ (Start-up flare)

รูปที่ 3.13 ส่วนประกอบที่สำคัญของระบบแก๊สซิฟิเคชันและพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน (ต่อ)

### 3.3.3.3 การเดินระบบแก๊สซิฟิเคชัน (C-G) และพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน (P-G)

สำหรับรายละเอียดของการเดินระบบแก๊สซิฟิเคชัน และพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน ในการทดลองของงานวิจัยนี้ มีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

### 1) การเดินระบบเตาปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเคชัน

1. ทำการเปิดฝาของเตาผลิตปฏิกรณ์ และทำการปล่อยน้ำที่อยู่ด้านบนของเตาซึ่งทำหน้าที่ป้องกันการไหลเข้าออกของอากาศในช่วงที่ดับเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง สุดท้ายทำการเติมวัตถุดิบให้อยู่ในระดับที่กำหนด

2. ทำการเปิดช่องทางเข้าของอากาศรอบตัวเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงเพื่อให้อากาศไหลเข้าสู่ภายในของตัวเตา

3. กดเปิดสวิตช์ควบคุมการของระบบ และทำการจุดเตาผลิตปฏิกรณ์ในตำแหน่ง Ignition port

4. ภายหลังจากจุดเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงประมาณ 2 ชั่วโมงทำการเปิด Flare Valve เพื่อปล่อยแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ออกทาง Flare เพื่อทดสอบการลุกไหม้ของแก๊สเชื้อเพลิง

5. สำหรับการเดินระบบอย่างต่อเนื่อง ต้องทำการเติมเชื้อเพลิงพร้อมทั้งนำแก๊สออกจากเตาโดยการหมุนวาล์วนำแก๊สให้เปิดออกและเปิดสวิตช์ชุดสกรูลำเลียงแก๊ส

### 2) การเดินระบบเตาปฏิกรณ์พลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน

การเดินระบบสำหรับส่วนควบคุมการทำงานของเตาปฏิกรณ์ กระทำเช่นเดียวกัน สำหรับส่วนของระบบการทำงานของหัวพลาสมาอาร์ค มีขั้นตอนการเดินระบบดังต่อไปนี้

1. ควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับหัวพลาสมาอาร์คคงที่ 36 kW โดยควบคุมปล่อยกระแสไฟฟ้าคงที่เท่ากับ 120 A และที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 300 V

2. ปรับ Pressure gage และ Pressure regulators ของเครื่องอัดอากาศ (Air compressor) ให้ทำงานที่แรงดันของแก๊สเท่ากับ 7 bar (อัตราการไหลของมวลอากาศประมาณ 8 g-carrier gas/sec)

3. ควบคุมการทำงานของปั้มน้ำสำหรับระบบระบายความร้อนของหัวพลาสมา (Water cooling supply system) ให้มีความดันไม่ต่ำกว่า 0.6 MPa ให้อัตราการไหลของมวลน้ำไม่ต่ำกว่า 500 g-water/secs เพื่อควบคุมอุณหภูมิของน้ำเข้าหัวพลาสมาอาร์ค (Inlet plasma arc torch) ไม่เกิน 30 °C และอุณหภูมิของน้ำออกจากระบบ (Outlet plasma arc torch) ไม่เกิน 55 °C เพื่อการลดอุณหภูมิให้กับหัวพลาสมา อันเป็นป้องกันการความเสียหายต่อระบบสายไฟ และอุปกรณ์ภายในหัวพลาสมา ทั้งนี้ การเดินระบบดังแสดงใน รูปที่ 3.14



ก. Hopper Feeder ป้อนเชื้อเพลิง



ข. เปิดวาล์วทางเข้าของอากาศรอบตัวเตา



ค. สวิตช์ควบคุมระบบเตาปฏิกรณ์



ง. ระบบแสดงอุณหภูมิในเตา



จ. สวิตช์ควบคุมระบบพลาสมาอาร์ค



ฉ. ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า

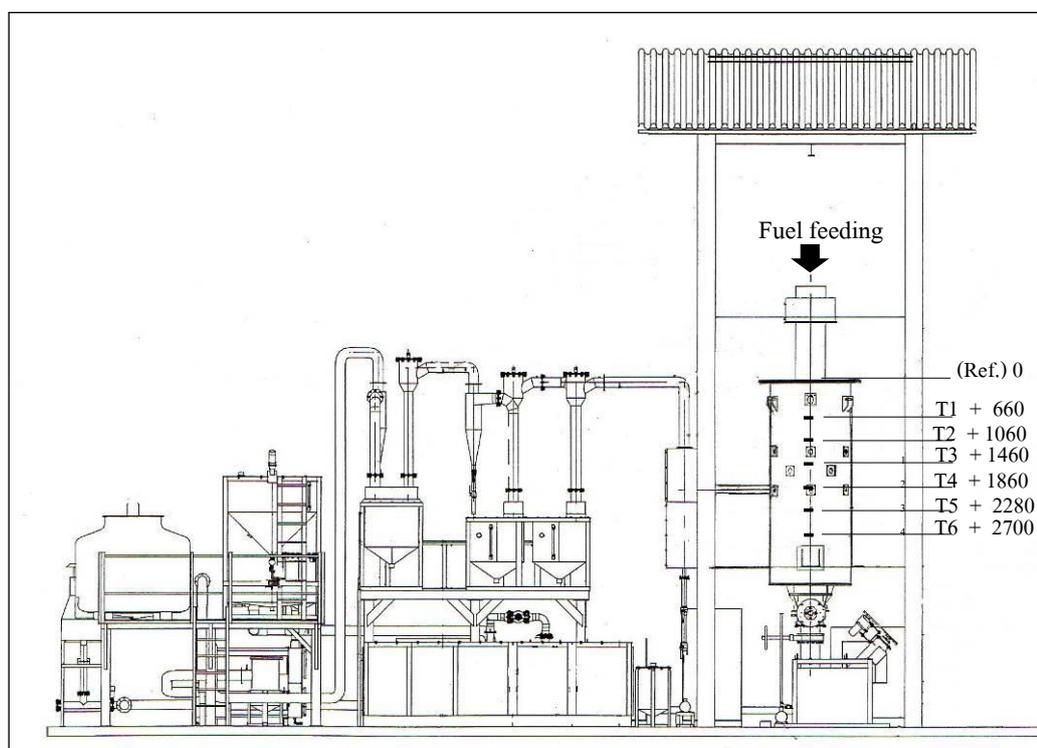
รูปที่ 3.14 การเดินระบบแก๊สซิฟิเคชั่น และพลาสมาแก๊สซิฟิเคชั่น

### 3.3.3.4 การติดตั้งอุปกรณ์เครื่องมือวัดและการวัดพารามิเตอร์ต่างๆ

การติดตั้งอุปกรณ์เครื่องมือวัดและการวัดพารามิเตอร์ต่างๆ สำหรับงานวิจัยครั้งนี้ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิภายในเตา ( $T_1 - T_6$ ) ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการอุณหภูมิที่เกิดขึ้นของโซนต่างๆ ภายในเตาปฏิกรณ์ จะแสดงตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิตามระยะความสูง 6 ตำแหน่ง ดังแสดงใน รูปที่ 3.15

2) เครื่องมือวัด อุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ได้อธิบายไว้ใน ตารางที่ 3.3 และ แสดงไว้ในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.15 ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิภายในเตา ( $T_1 - T_6$ )

ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์ที่ทำการทดสอบสมรรถนะของระบบ

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	เครื่องมือวัด/Sensor
1. Temperature 1.1 Reactor temperature	$T_1 - T_6$	Thermocouple type-K และ Type-R
2. Gas flow rate ( $\text{Nm}^3/\text{h}$ )	$V_g$	Gas flow meter (Range 5 to 40m/s: vane probes)
3. Gas composition (%V)	$G_C$	Online portable gas analyzer Gasboard-3100P series
4. Fuel consumption (kg/hr)	$m_{\text{RDF}}$	ตาชั่ง
5. Ash production (kg/hr)	$m_{\text{ash}}$	ตาชั่ง
6. Impurities (Tar & dust) - After reactor ( $\text{mg}/\text{Nm}^3$ )	$T_D$	Filter and condenser
8. แก๊สไอเสีย (Exhaust gas)	$G_{(\text{ex})}$	Flue gas analyzer (Model Testo-350XL)



ก. Gas flow meter



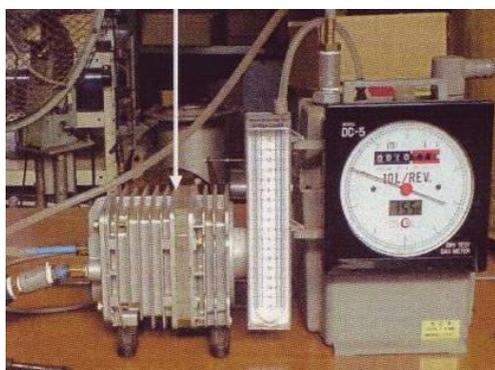
ข. Potable gas analyzer



ค. ตาชั่ง (ใช้วัด Fuel consumption)



ง. ตาชั่ง (ใช้วัด Ash production)



จ. ชุด Filter and condense



ฉ. Flue gas analyzer (ยี่ห้อ Testo-350XL)

รูปที่ 3.16 แสดงเครื่องมือที่ใช้ในการวัด

### 3.3.4 การศึกษาเสถียรภาพของการผลิตพลังงานของระบบระบบแก๊สซิฟิเคชัน (C-G)

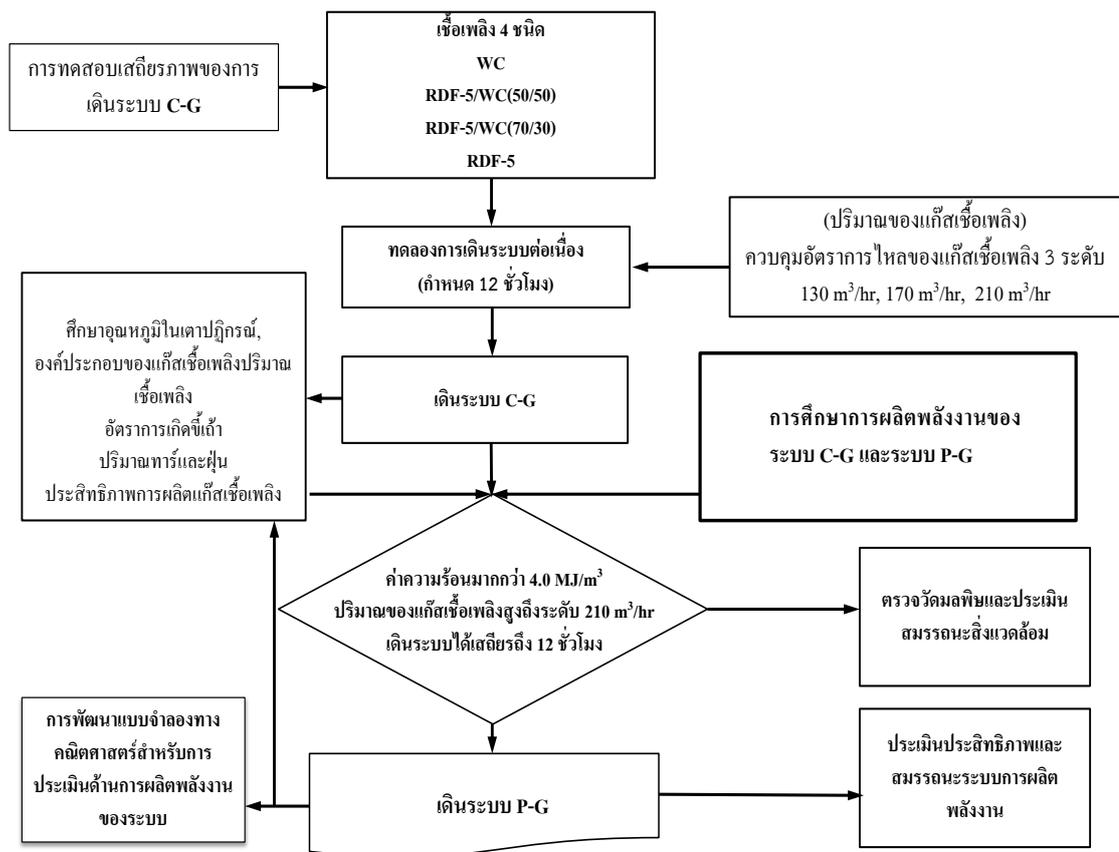
การศึกษาเสถียรภาพของการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิง RDF-5 กับระบบ C-G มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสถานะของการเดินระบบที่มีความต่อเนื่อง และสามารถเดินระบบได้ในระยะยาว (Long term condition) ตลอดจนสามารถผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้คุณภาพ โดยต้องได้ค่าพลังงานความร้อนสูง (มากกว่า  $4.0 \text{ MJ/Nm}^3$ ) นอกจากนี้จะแก๊สเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพ แล้วระบบต้อง

สามารถผลิตแก๊สเชื้อเพลิงในปริมาณสม่ำเสมอด้วย เพราะจำเป็นอย่างยิ่งหากมีการนำแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้ไปใช้ประโยชน์ได้ต่อไป

ทั้งนี้ปัจจัยที่เกี่ยวข้องของการเดินระบบ C-G ให้มีความเสถียรภาพ มีหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้อง อาทิ ชนิดเชื้อเพลิง ปริมาณการป้อนอากาศ การดึงเถ้าออก โดยปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญคือ ชนิดเชื้อเพลิง ในกรณีของการใช้เชื้อเพลิงที่มีปริมาณเถ้าสูง อาทิ กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย ที่มีปริมาณเถ้าในองค์ประกอบของเชื้อเพลิงประมาณ 30 %wt. เมื่อนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน มักจะประสบปัญหาเกี่ยวกับการก่อตัวของเถ้าในเตาปฏิกรณ์ การเดินระบบแบบต่อเนื่องจำเป็นดึงเถ้าออกจากเตาให้สม่ำเสมอและทันทั่วทั้งที่ (Arjham et al., 2013) สำหรับเชื้อเพลิง RDF-5 จะมีเถ้าประมาณ 8-10% wt. นอกจากนั้นจะส่วนผสมของพลาสติกเป็นส่วนใหญ่ ก็ถือเป็นปัญหาเช่นกันคือ เมื่อเชื้อเพลิงได้รับความร้อนจะหลอมตัวและเหนียวติดกัน ปิดช่องทางการไหลของอากาศภายในเตาปฏิกรณ์ การถ่ายเทความร้อนในเตาปฏิกรณ์ไม่ทั่วถึง จึงส่งผลให้การเดินระบบไม่มีความต่อเนื่องและต้องปิดระบบในที่สุด ยิ่งไปกว่านั้นก็จะส่งผลกระทบต่อคุณภาพและปริมาณของแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้ ที่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งไม่สามารถนำเอาแก๊สเชื้อเพลิงไปใช้ประโยชน์ได้ทั้งในทางความร้อนหรือผลิตไฟฟ้า (วีรชัย ออาจหาญ และคณะ, 2553)

ในงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษา เพื่อลดข้อจำกัดของการใช้เชื้อเพลิงขยะ RDF-5 ในระบบ C-G โดยสมมติฐานว่า การนำเชื้อเพลิงชีวมวลมาเป็นสัดส่วนผสม ในลักษณะ Blending fuel จะทำให้ระบบแก๊สซิฟิเคชัน สามารถเดินได้อย่างเสถียรภาพมากยิ่งขึ้น เนื่องจากเชื้อเพลิงชีวมวล จะช่วยทำให้เพิ่มพื้นที่และช่องว่างระหว่างเชื้อเพลิง และทำให้การการถ่ายเทความร้อน อีกทั้งชีวมวลมีสัดส่วนของคาร์บอนคงตัวสูง (Fixed carbon) ซึ่งเป็นส่วนสำคัญ คือ เมื่อเชื้อเพลิงที่มีคาร์บอนคงตัวสูง เมื่อผ่านกระบวนการเผาไหม้ แล้วจะหลงเหลือคาร์บอนที่มีคุณสมบัติเป็นถ่านชาร์ (char) ซึ่งในระบบกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันในเตาปฏิกรณ์ Fixed-bed downdraft gasifier ถ่านชาร์จะสามารถเคลื่อนตัวลงได้ง่าย จึงพบว่าการเดินระบบโดยใช้เชื้อเพลิงไม่จะสามารถเดินระบบโดยเตาปฏิกรณ์แบบนี้ได้ดี

โดยกำหนดเชื้อเพลิงเป็น 4 ประเภท และจะทำการทดสอบที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงในระดับต่าง ๆ 3 ระดับ คือ 130 Nm<sup>3</sup>/hr, 170 Nm<sup>3</sup>/hr และ 210 Nm<sup>3</sup>/hr ซึ่งในการควบคุมอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงทั้ง 3 ระดับ จะใช้ Inverter ควบคุมความเร็วมอเตอร์ของ Blower (อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง คือ ปริมาณของแก๊สที่ผลิตได้ต่อชั่วโมงในหน่วยลูกบาศก์เมตร ซึ่งเป็นตัวแปรควบคุมสำหรับแต่ละการทดลอง) และ จะทำการเดินระบบสูงสุดประมาณ 12 ชั่วโมง สรุปการกำหนดชุดการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 การศึกษาเสถียรภาพของการผลิตพลังงานของระบบ C-G

การกำหนดชุดการทดลองการศึกษาเสถียรภาพของการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงขยะ RDF-5 กับระบบแก๊สซิฟิเคชัน ดังแสดงใน ตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ชุดการทดลองการศึกษาเสถียรภาพของการผลิตพลังงานกับระบบ C-G

การทดลองที่	เชื้อเพลิง	ระดับอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงที่ทดสอบ ( $\text{Nm}^3/\text{hr}$ )
1	WC	130, 170, 210
2	RDF-5/WC (50/50)	130, 170, 210
3	RDF-5/WC (70/30)	130, 170, 210
4	RDF-5	130, 170, 210

การทดสอบเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง เพื่อที่จะหาสภาวะในการเดินระบบ และ นำไปกำหนดสภาวะของการเดินระบบเพื่อทดสอบสมรรถนะต่อไป จะพิจารณาที่ผลผลิตแก๊สเชื้อเพลิง ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$  และ  $\text{H}_2$ ) ได้สัดส่วนที่สูง เทียบกับการควบคุมปริมาณและสัดส่วนการป้อนอากาศหรือแก๊สออกซิเจน โดยการควบคุมการเปิด-ปิด วาล์วรอบตัวเตา

การศึกษ้อัตราส่วนสมมูล (Equivalence Ratio : ER) ของระบบ Fixed-bed downdraft gasifier โดยหาความสัมพันธ์ของอัตราการใช้อากาศต่ออัตราส่วนการใช้เชื้อเพลิงขยะ RDF-5 ที่สภาวะต่างๆ โดยใช้ความสัมพันธ์ตามสมการที่ (3.1) (B.V. Babu, 2004)

$$ER = [\text{AF-ratio}_{\text{measured}}] / [\text{AF-ratio}_{\text{stoichiometric}}] \quad (3.1)$$

เมื่อ

ER คือ สัดส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ได้จากการวัดจริงต่อสัดส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่เผาไหม้พอดีในทางทฤษฎี

AF-ratio<sub>measured</sub> คือ สัดส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ได้จากการวัดจริง

AF-ratio<sub>stoichiometric</sub> คือ สัดส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่เผาไหม้พอดีตามทฤษฎี

โดยในทางทฤษฎี หรือ Theoretical Combustion สัดส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่เผาไหม้พอดีสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.2)



ในที่นี้  $\text{CH}_x\text{O}_y$  คือ สูตรทางเคมี (Generic fomular) ของเชื้อเพลิง ซึ่งได้จากการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีที่มีอยู่ในตัวของเชื้อเพลิง และ m คือปริมาณของออกซิเจนที่เชื้อเพลิง ต้องการเพื่อให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ โดยที่  $m = 1 + 0.25x - 0.5y$  โดยที่การเดินระบบจะควบคุมให้ค่า ER อยู่ในช่วง  $\sim 0.1 - 0.2$  กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันที่สภาวะสมดุลจะต้องมีค่า ER อยู่ในช่วง  $0.1 - 0.3$  (Reed et al.,1983)

ในการเดินระบบ จะทำการตรวจวัดพารามิเตอร์ต่าง ๆ และทำการเปรียบเทียบประเมินคุณภาพของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ และประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง โดยจะตรวจวัดพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้

### 1) ข้อมูลอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง

การเก็บข้อมูลอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงในแต่ละสภาวะ จะใช้เครื่องมือวัดอัตราการไหล (Gas flow meter) โดยข้อมูลจะถูกบันทึกแบบต่อเนื่องด้วยระบบ Online measuring system โดยมีอัตราการเก็บข้อมูล 30 วินาที/ครั้ง ทั้งนี้เพื่อการ Monitoring ระบบ และ ป้องกันไม่ให้เกิดการคลาดเคลื่อนของอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง ที่กำหนดไว้ (เครื่องมือวัด รูปที่ 3.15 (ก))

### 2) การกระจายตัวของอุณหภูมิในเตา (Temperature profile)

ข้อมูลของอุณหภูมิในเตาจะแสดงผลทางระบบ Data logger ซึ่งสามารถเก็บบันทึกข้อมูลได้ตลอดเวลา (ในที่นี้จะเก็บทุกๆ 30 นาที) ที่ตำแหน่งความสูงต่างๆ ของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง จำนวน 6 ตำแหน่ง (T1-T6) การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Temperature profile) จะสามารถนำไปใช้อธิบายความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง ตลอดระยะเวลาการเดินระบบ เนื่องจากอุณหภูมิมีผลต่อองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง ( เครื่องมือวัด และตำแหน่งการวัด รูปที่ 3.13 (ข), รูปที่ 3.14)

### 3) การวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง

ในการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินคุณภาพของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ในแต่ละการทดลอง ในงานวิจัยนี้จะทำการเก็บตัวอย่างแก๊สในตำแหน่ง (GC) ที่ผ่านระบบทำความสะอาดแล้ว โดยใช้เครื่องมือวัดคุณภาพแก๊สเชื้อเพลิงแบบออนไลน์ (Online portable gas analyser) ซึ่งจะสามารถวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สต่างคือ CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> (เครื่องมือวัด รูปที่ 3.15 (ข))

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

$$CV_g = \sum X_i H_i \quad (3.3)$$

เมื่อ

$X_i$  = สัดส่วนโดยปริมาตรขององค์ประกอบแก๊สเชื้อเพลิง

$H_i$  = ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิง (CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>)

โดยที่ (CO = 13.1 MJ/Nm<sup>3</sup>, H<sub>2</sub> = 11.2 MJ/Nm<sup>3</sup> และ CH<sub>4</sub> = 37.1 MJ/Nm<sup>3</sup>)

#### 4) อัตราการใช้เชื้อเพลิง (Fuel consumption)

ข้อมูลอัตราการใช้เชื้อเพลิงจะนำไปคำนวณหาประสิทธิภาพของระบบ ซึ่งการวัดจะทำโดยชั่งน้ำหนักของเชื้อเพลิงที่ถูกเติมใส่ลงไป ในเตาปฏิกรณ์โดยใช้ตาชั่ง ทำการจดบันทึกค่าแล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยซึ่งจะได้อัตราการใช้เชื้อเพลิงในหน่วยกิโลกรัมต่อชั่วโมง (kg/hr) (เครื่องมือวัด รูปที่ 3.15 (ค))

#### 5) อัตราการเกิดเถ้า (Ash production)

ข้อมูลอัตราการเกิดเถ้าจะนำไปคำนวณหาประสิทธิภาพของระบบ และสามารถประเมินได้ว่าปริมาณของกากตะกอนจะลดลงเป็นที่เปอร์เซ็นต์ ซึ่งการวัดจะทำโดยชั่งน้ำหนักของเถ้าที่ถูกนำออกจากเตาปฏิกรณ์โดยใช้ตาชั่ง ทำการจดบันทึกค่าแล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยซึ่งจะได้อัตราการเกิดเถ้าในหน่วยกิโลกรัมต่อชั่วโมง (kg/hr) (เครื่องมือวัด รูปที่ 3.15 (ง))

#### 6) Tar and dust

ทาร์ (Tar) และ ฝุ่นละออง (Dust) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการที่เกิดจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ทาร์ (Crude tar) หรือน้ำมันดิน เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่ไม่สมบูรณ์ เป็นลักษณะของเหลวที่มีความหนืดสูง (High viscous) และมีฤทธิ์กัดกร่อน (Corrosive) มีสีน้ำตาลเข้มถึงดำ ประกอบด้วยสารไฮโดรคาร์บอนจำนวนมาก ส่วนฝุ่นละอองขนาดเล็ก (Dust) เป็นอนุภาคของแข็งที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ ทั้ง ทาร์ และ ฝุ่นละออง เป็นอันตรายและเป็นปัญหาหลัก ในการนำแก๊สเชื้อเพลิงไปใช้ประโยชน์ในกรณีการผลิตไฟฟ้าโดยใช้เครื่องยนต์สันดาปภายใน สำหรับการวัดปริมาณทาร์และฝุ่นละออง จะทำการเก็บตัวอย่างในตำแหน่งเดียวกับที่เก็บตัวอย่างแก๊สเชื้อเพลิง เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพการกำจัดสิ่งปนเปื้อน ของระบบทำความสะอาดแก๊ส โดยใช้ปั๊มลมดูดตัวอย่าง ในปริมาณที่กำหนด โดยทำการดักทาร์ และ ฝุ่นละออง ด้วย Condenser และ Filter ตามลำดับ และนำไปชั่งค่าน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป (เครื่องมือวัด รูปที่ 3.15 (จ))

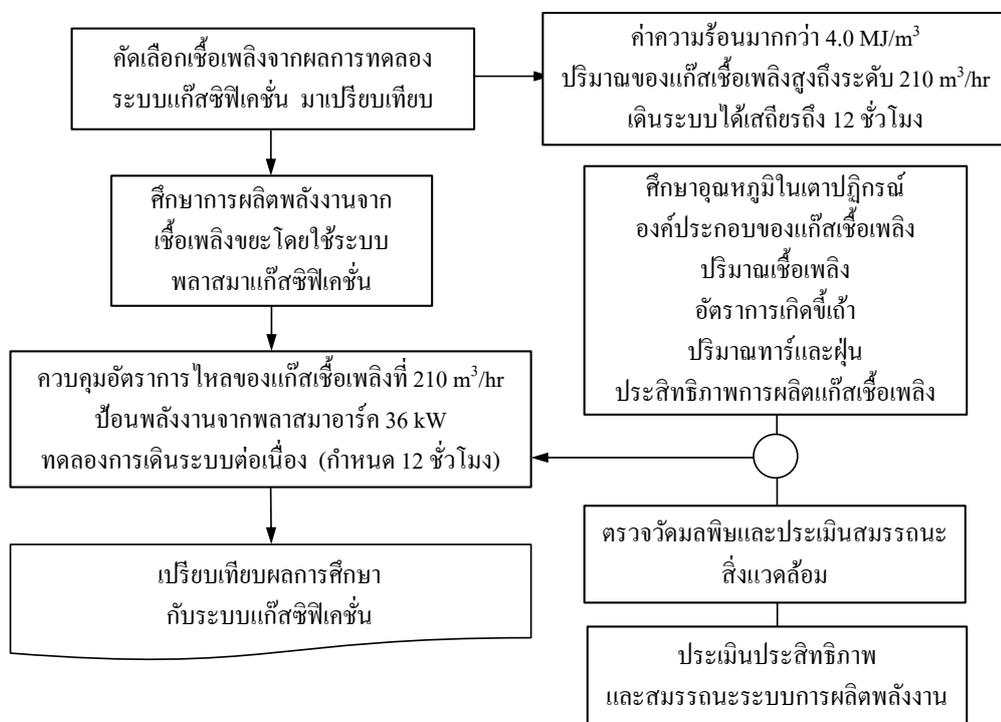
#### 7) วัดแก๊สไอเสียอื่นที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง

ทำการตรวจวัดและวิเคราะห์ปริมาณ  $SO_2$ ,  $NO_2$  และ  $NO$  ในแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ (เพื่อนำไปใช้ประเมินมลพิษจากระบบ) โดยเครื่องวิเคราะห์แก๊สไอเสีย (Flue gas analyzer) ยี่ห้อ Testo-350XL ข้อมูลจะถูกบันทึกต่อเนื่องโดยมีอัตราการเก็บข้อมูล 30 วินาที/ครั้ง (เครื่องมือวัด รูปที่ 3.15 (จ))

### 3.3.5 การศึกษาเสถียรภาพของการผลิตพลังงานกับระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน (P-G)

ในการศึกษาเสถียรภาพของการผลิตพลังงานจากขยะโดยเทคโนโลยีพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน จะทำการทดลองต่อเนื่องจากหัวข้อ 3.2.4 โดยจะคัดเลือกเชื้อเพลิงที่สามารถผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพ คือ มีค่าความร้อนมากกว่า  $4.0 \text{ MJ/m}^3$  สามารถผลิตปริมาณของแก๊สเชื้อเพลิงสูงที่สุด คืออัตราการไหลที่ระดับ  $210 \text{ Nm}^3/\text{hr}$  และสามารถเดินระบบได้เสถียรถึง 12 ชั่วโมง โดยการเดินระบบจะใช้พลังงานความร้อนจากพลาสมาอาร์ค เป็นความร้อนช่วย ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Plasma-assisted gasification) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการเพิ่มอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเคชันต่อประสิทธิภาพการผลิตพลังงาน และพลังงานสุทธิที่จะได้จากระบบ และผลของมลพิษสิ่งแวดล้อม เมื่อมีการกำจัดเชื้อเพลิงที่อุณหภูมิสูงขึ้น โดยการทดลองกำหนดพลังงานที่ป้อนเข้าระบบคงที่ที่  $36 \text{ กิโลวัตต์}$  (โดยการปล่อยกระแสไฟฟ้าเท่ากับ  $120 \text{ A}$  ที่ความต่างศักย์  $300 \text{ V}$ ) โดยมีขั้นตอนการทดลองดัง รูปที่ 3.18

ในการเดินระบบ จะทำการตรวจวัดพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่นเดียวกับหัวข้อ 3.2.4 เพื่อประเมินคุณภาพของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ และเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงต่อไป



รูปที่ 3.18 การศึกษาเสถียรภาพของการผลิตพลังงานกับระบบ P-G

### 3.3.6 การศึกษาการกำจัดเศษมูลฝอยเหลือทิ้ง (Waste reject) ควบคู่กับการผลิตพลังงานโดยระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน (P-G)

เนื่องด้วย การกำจัดมูลฝอยโดยกระบวนการทางความร้อน (Thermal process) ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการเผาไหม้คือ ความชื้น ดังกล่าวในงานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการกำจัด Waste reject ควบคู่กับการผลิตพลังงาน กับขยะมูลฝอยที่มีความชื้นสูง โดยใช้พลาสมาเชิงความร้อนเข้ามาช่วยในกระบวนการเผาไหม้ในระบบแก๊สซิฟิเคชัน ซึ่งจะศึกษาปัจจัยด้านความชื้นของมูลฝอย โดยศึกษาตัวแทนของมูลฝอย 3 ระดับคือ ความชื้นต่ำ ประมาณ 10, 25 และ 40 %wb ตามลำดับ โดยที่เหตุผลของการกำหนดค่าความชื้นในการศึกษาครั้งนี้ อ้างอิงจากข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 การกำหนดความชื้นของ Waste reject ที่นำมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้

ความชื้น	รายละเอียด <sup>(1)</sup>
10% wb	เป็นตัวแทนของขยะมูลฝอยที่มีความชื้นต่ำ (ต้องเป็นขยะที่ผ่านการลดความชื้นก่อน)
25% wb	ลักษณะทั่วไปของมูลฝอยเหลือทิ้งที่ออกจากระบบโรงงาน MBT แบบ Composting plant ( ที่ใช้ใน มทส. และ เทศบาล/อบต. ขนาดเล็ก 7 แห่ง)
40% wb	เป็นตัวแทนของมูลฝอยเหลือทิ้งที่มีความชื้นสูง อาทิ ขยะจากระบบ MBT แบบ Composting plant ของเทศบาลนครพิษณุโลก, มูลฝอยเหลือทิ้งจากระบบบำบัดแบบไร้อากาศ เทศบาลนครราชสีมา)

หมายเหตุ : <sup>(1)</sup> อ้างอิงจาก วีรัชย์ อางหาญ และคณะ (2553)

สำหรับการทดลอง คือ โดยการเดินระบบจะใช้พลังงานความร้อนจากพลาสมาอาร์ค เป็นความร้อนช่วย ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Plasma-assisted gasification) กำหนดพลังงานที่ป้อนเข้าระบบคงที่ที่ 36 กิโลวัตต์ (โดยการปล่อยกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 120 A ที่ความต่างศักย์ 300 V) โดยมีขั้นตอนการทดลอง ดังแสดง ในการเดินระบบ จะทำการตรวจวัดพารามิเตอร์ต่าง ๆ และทำการเปรียบเทียบประเมินคุณภาพของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ และประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง โดยใช้พารามิเตอร์กับหัวข้อ 3.2.5

### 3.3.7 การประเมินสมรรถนะระบบ/ประสิทธิภาพการผลิตพลังงาน

1) ประเมินประสิทธิภาพการผลิตพลังงานของระบบ ได้แก่ ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Cold gasification efficiency) ของระบบ C-G และ P-G ดังต่อไปนี้

วัตถุประสงค์ของการศึกษาในหัวข้อนี้เพื่อ ประเมินประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง โดยจะใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาคำนวณ โดยใช้ความสัมพันธ์คือ (Bhattacharya, 2001; Arjhar et al, 2012;2013)

$$\text{Cold-gas efficiency } (\eta_{cg}) = \frac{[\text{Rate of energy carried by syngas}]}{[\text{Rate of energy supplied to reactor}]}$$

$$\text{Cold-gas efficiency } (\eta_{cg}) = \frac{[V_g \times CV_g]}{[m_{\text{Fuel}} \times \text{LHV}_{\text{Fuel}}]} \quad (3.4)$$

เมื่อ

$V_g$	คือ	Flow rate of syngas ( $\text{Nm}^3/\text{hr}$ )
$CV_g$	คือ	Calorific value of syngas ( $\text{MJ}/\text{m}^3$ )
$m_{\text{fuel}}$	คือ	Fuel consumption ( $\text{kg}/\text{h}$ )
$\text{LHV}_{\text{fuel}}$	คือ	Low heating value of fuel ( $\text{MJ}/\text{kg}$ )

โดยใช้ความสัมพันธ์ของเตาปฏิกรณ์พลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน คือ Minutillo et al. (2009)

$$\begin{aligned} \text{Cold-gas efficiency-plasma } (\eta_{cg}) &= \frac{[\text{Rate of energy carried by syngas}]}{[\text{Rate of energy supplied to reactor}]} \\ &= \frac{[V_g \times CV_g]}{[(m_{\text{Fuel}} \times \text{LHV}_{\text{Fuel}}) + (W_{\text{torch}})]} \quad (3.5) \end{aligned}$$

เมื่อ

$W_{\text{torch}}$	คือ	Power consumption of the plasma torch
--------------------	-----	---------------------------------------

2) เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบ (Operation performance) ได้แก่ การประเมินค่าพลังงานสุทธิของระบบ (Net energy yield) และ พารามิเตอร์ อื่นๆ ดังต่อไปนี้

- พลังงานจากเชื้อเพลิงเข้าระบบ ( MJ/hr)

$$= [LHV_{Fuel}] \cdot [m_{Fuel}] \quad (3.6)$$

- พลังงานจาก Plasma arc เข้าระบบ ( MJ/hr)

$$P = VI \quad (3.7)$$

$$V = 300 \text{ volt}, I = 120 \text{ Amp}$$

$$P = \text{kW} (1 \text{ kWh} = 3.6 \text{ MJ})$$

- พลังงานของแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่ผลิตได้ที่สภาวะมาตรฐาน (MJ/hr)

$$= [CV_g] \cdot [Vg] \quad (3.8)$$

- อัตราส่วนปริมาตรแก๊สเชื้อเพลิง/เชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าระบบ (Syngas yield, m<sup>3</sup>N/kg)

$$= [Vg] / [m_{Fuel}] \quad (3.9)$$

- อัตราส่วนพลังงานแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์/เชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าระบบ (Energy yield, MJ/kg)

$$= [CV_g \cdot Vg] / [m_{Fuel}] \quad (3.10)$$

3) ประเมินผลผลิตคาร์บอนคงเหลือ (Yields of carbon residue) (Hakansson, 2007)

$$\text{Carbon residue} = [M \times 100] / M_0 \quad (3.11)$$

เมื่อ:

M = ปริมาณคาร์บอนคงเหลือ (g)

M<sub>0</sub> = ปริมาณคาร์บอนในตัวอย่างตอนเริ่มต้น (g)

### 3.3.8 ประเมินสมรรถนะทางสิ่งแวดล้อมของระบบ

ในขั้นตอนของการเดินระบบเพื่อทดสอบสมรรถนะระบบนั้น ในขณะเดียวกันจะทำการเก็บข้อมูลด้านมลพิษสิ่งแวดล้อม เพื่อการประเมินเปรียบเทียบ ด้านการปลดปล่อยมลพิษ/สมรรถนะทางสิ่งแวดล้อม ระหว่างระบบ C-G และระบบ P-C

#### 3.3.8.1 การศึกษาปริมาณและสมบัติของของเสียที่เกิดขึ้นจากการเดินระบบ

การศึกษาปริมาณและวิเคราะห์สารมลพิษที่เกิดขึ้นจากการเดินระบบ โดยทำศึกษาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง ดังต่อไปนี้ 1) การวิเคราะห์ห้มลสารที่สามารถปนเปื้อนในอากาศ (Air pollutants) 2) การวิเคราะห์ห้มลสารในรูปของแข็ง (Solid waste pollutants) 3) การวิเคราะห์ห้มลสารในน้ำเสีย (Wastewater pollutants) ซึ่งมีพารามเตอร์ ดังแสดงในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 พารามิเตอร์สารมลพิษในรูปแบบต่างๆ ที่ทำการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้

จำแนกประเภทมลพิษ	พารามิเตอร์	อ้างอิงมาตรฐาน / เครื่องมือวิเคราะห์
Air pollutants	วิเคราะห์องค์ประกอบแก๊สมลพิษในแก๊สเชื้อเพลิง ได้แก่ ได้แก่ SO <sub>2</sub> , NO, NO <sub>2</sub>	เครื่องวัด Flue Gas Analyzer (Model Testo-350XL) (จำนวนตัวอย่าง 12 ตัวอย่าง โดยเก็บตัวอย่าง 1 ครั้ง/ชั่วโมง ระยะเวลาเก็บตัวอย่าง 30 นาที/ครั้ง ในการเดินระบบ 12 ชั่วโมง)
	วิเคราะห์อนุภาคขนาดเล็กที่ปนเปื้อนในแก๊สเชื้อเพลิง พารามิเตอร์วิเคราะห์ เช่นเดียวกับเชื้อเพลิง (ธาตุอัลคาไลน์, ธาตุคลอรีน, ธาตุโลหะต่างๆ)	การเก็บตัวอย่างโดยใช้ปั๊มดูดแก๊สเชื้อเพลิงผ่านกระดาษกรอง ในปริมาตรที่กำหนด และนำตัวอย่างบนกระดาษกรองไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray fluorescence Energy dispersive spectrometer (Model XGT-5200) (จำนวนตัวอย่าง 12 ตัวอย่าง โดยเก็บตัวอย่าง 1 ครั้ง/ชั่วโมง ระยะเวลาเก็บตัวอย่าง 30 นาที/ครั้ง ในการเดินระบบ 12 ชั่วโมง)
Solid waste pollutants (เถ้าหนัก)	วิเคราะห์ธาตุต่างๆ เช่นเดียวกับกับวิเคราะห์เชื้อเพลิง (ธาตุอัลคาไลน์, ธาตุคลอรีน, ธาตุโลหะต่างๆ)	วิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray fluorescence Energy dispersive spectrometer (Model XGT-5200) (จำนวนตัวอย่าง 12 ตัวอย่าง โดยเก็บตัวอย่าง 1 ครั้ง/ชั่วโมง ในการเดินระบบ 12 ชั่วโมง)
	ทดสอบการชะละลายของโลหะหนักต่างๆ ตามข้อกำหนดของ USEPA พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์	(EPA Method 1311) Toxicity characteristic leaching procedure (TCLP) <sup>(1)</sup> (จำนวนตัวอย่าง 3 ตัวอย่าง)
Wastewater pollutants	COD, TKN, HF, Phenol, HCL, H <sub>2</sub> S และโลหะหนักต่างๆ	วิเคราะห์ตามมาตรฐาน <sup>(1)</sup> APHA, AWWA, WEF (2005) (จำนวนตัวอย่าง 3 ตัวอย่าง : น้ำเสียที่เกิดจากการเดินระบบต่อเนื่อง 12 ชั่วโมง หรือมลสารสะสม ตั้งแต่ชั่วโมงที่ 0 ถึง ชั่วโมงที่ 12 )

หมายเหตุ : <sup>(1)</sup> วิเคราะห์โดย บริษัท ห้องปฏิบัติการกลาง (ประเทศไทย) จำกัด

### 3.3.8.2 การศึกษาสมรรถนะด้านสิ่งแวดล้อม

นำผลการศึกษาปริมาณและสมบัติของเสียที่เกิดขึ้นจากการเดินระบบของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน และพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน มาประเมินอัตราการปลดปล่อยมลพิษต่อหน่วยของมลพิษที่ป้อนเข้าระบบ (Emission factor) ของเสียที่เกิดขึ้นจากการผลิตพลังงาน

#### 1) อัตราการปลดปล่อยมลพิษในรูปของแข็ง (ถ้ำ)

Emission factor (Solid waste)

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

เมื่อ

Emission factor	คือ	อัตราการปลดปล่อยมลพิษรูปของแข็ง (g/kg)
Specific ash production	คือ	อัตราการเกิดถ้ำจำเพาะ (kg/hr)
Time	คือ	เวลาเดินระบบ (hr)
Concentration of ash	คือ	ความเข้มข้นของสารพิษในถ้ำ (mg/kg)

#### 2) อัตราการปลดปล่อยมลพิษในน้ำเสีย

Emission factor (Wastewater)

$$= [V_{\text{ww}} \times \text{Concentration of pollutant}] / [\text{Total fuel}] \quad (3.13)$$

เมื่อ

Emission factor (Wastewater)	คือ	อัตราการปลดปล่อยมลพิษในรูปน้ำเสีย (g/
$V_{\text{ww}}$	คือ	ปริมาตรของน้ำเสียรวมในระบบที่มีการสะสมของมลสารในช่วงการเดินระบบ ( $10 \text{ m}^3$ )
Concentration of pollutant	คือ	ความเข้มข้นของสารมลพิษในน้ำเสีย (mg/l)
Total Fuel	คือ	ปริมาณของเชื้อเพลิงที่ป้อนระบบทั้งหมดในช่วงการเดินระบบ (kg)

### 3) อัตราการปลดปล่อยมลพิษในแก๊สเชื้อเพลิง

Emission factor (Syngas)

$$= [V_{\text{Syn}} \times \text{Concentration of emission}] / [\text{Fuel consumption}] \quad (3.14)$$

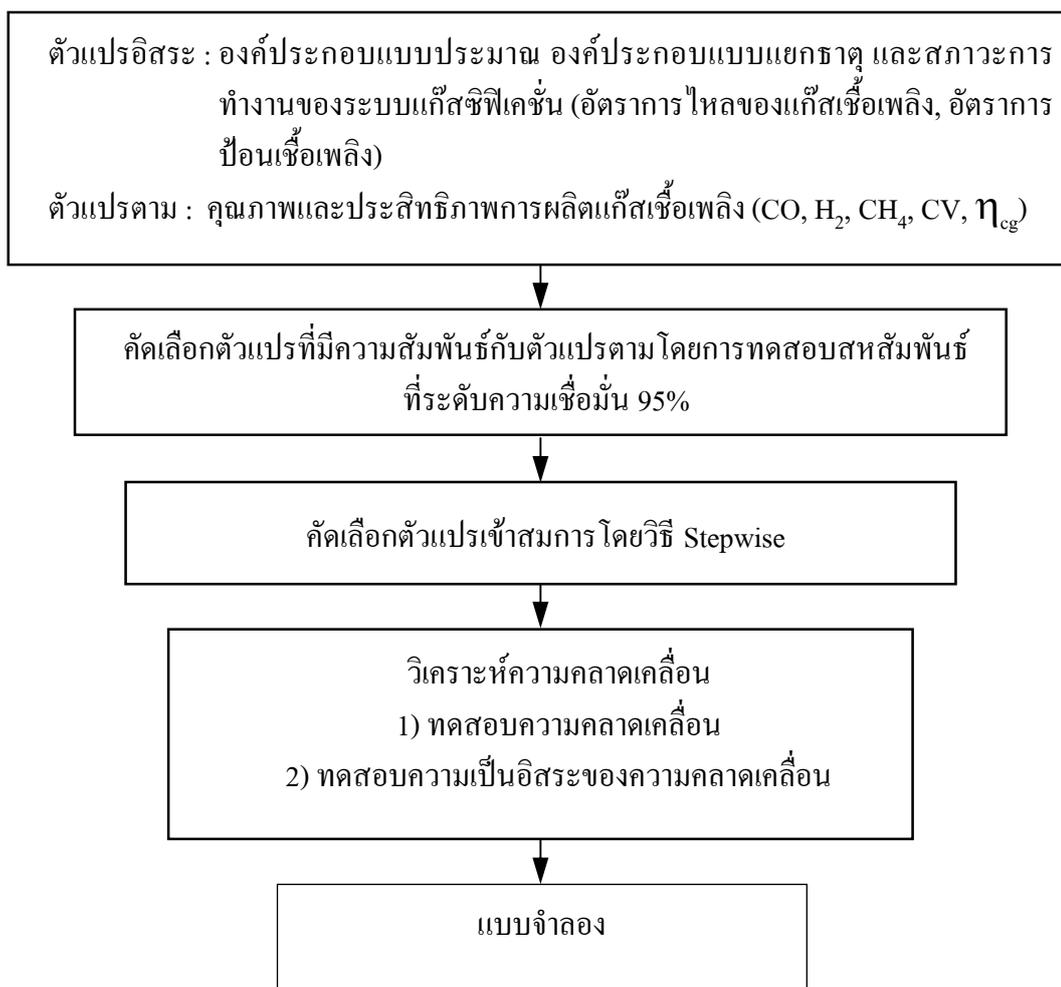
เมื่อ

Emission factor (Syngas)	คือ	อัตราการปลดปล่อยมลพิษในแก๊สเชื้อเพลิง (g/kg)
$V_{\text{Syn}}$	คือ	ปริมาตรแก๊สเชื้อเพลิงตัวอย่างที่เก็บ ( $\text{m}^3$ )
Concentration of pollutant	คือ	ความเข้มข้นสารพิษในแก๊สเชื้อเพลิง ( $\text{mg}/\text{m}^3$ )
Total Fuel	คือ	ปริมาณของเชื้อเพลิงที่ป้อนระบบทั้งหมด ในช่วงการเดินระบบ (kg)

### 3.3.9 พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์ทางสถิติ

#### 3.3.9.1 พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ มีวัตถุประสงค์เพื่อ สามารถนำเอาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้นี้ ไปใช้ประเมินผลผลิตและผลลัพธ์ที่ได้จากการเดินระบบเบื้องต้น เพื่อการทำนาย 1) องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง คือ คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ไฮโดรเจน ( $\text{H}_2$ ) มีเทน ( $\text{CH}_4$ ) 2) ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิง และ 3) ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Cold-gas efficiency) สำหรับระบบแก๊สซิฟิเคชัน และระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน ทั้งนี้การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะใช้วิธีการวิเคราะห์แบบถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (Multiple linear regression) โดยโปรแกรมที่ใช้คือ โปรแกรม JMP 10 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA) (K. ajay et al, 2009) ซึ่งมีขั้นตอนการสร้างแบบจำลองได้แก่ การคัดเลือกตัวแปรอิสระ การคัดเลือกตัวแปรเข้าสมการเพื่อสร้างแบบจำลองโดยวิธี Stepwise และการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อน ดังแสดงใน รูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ

### 1) การคัดเลือกตัวแปร

ในการคัดเลือกตัวแปรจะทำโดยการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient) ระหว่างตัวแปรอิสระต่างๆ กับคุณภาพและประสิทธิภาพแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้ เพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปรว่ามีความสัมพันธ์กันมากหรือน้อย และเป็นการทดสอบว่าตัวแปรมีความสัมพันธ์กันในรูปเชิงเส้นหรือไม่ รวมถึงการทดสอบว่าตัวแปรมีความสัมพันธ์กันในทิศทางใด โดยจะใช้สัญลักษณ์ R แทนสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ซึ่งถ้าผลการศึกษาที่ได้พบว่า R เป็นลบ แสดงว่าตัวแปรที่ศึกษาที่มีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงข้ามกัน แต่ถ้า R เป็นบวก แสดงว่าตัวแปรมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน และถ้า R มีค่าเข้าใกล้ 1 (ไม่พิจารณาที่เครื่องหมาย) แสดงว่า ตัวแปรที่ศึกษาที่มีความสัมพันธ์กันมาก และในทางกลับกันถ้า R มีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงว่าตัวแปรมีความสัมพันธ์กันน้อย แต่ถ้าหาก R มีค่าเท่ากับ 0 แสดงว่า ตัวแปรไม่มีความสัมพันธ์กันเลย

## 2) การสร้างแบบจำลอง

การวิเคราะห์แบบถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรตาม  $Y$  และตัวแปรอิสระ  $X$  หลายๆ ตัว โดยกำหนดให้คุณภาพและประสิทธิภาพแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้ เป็นตัวแปรตาม  $Y$  และตัวแปรอิสระคือ องค์ประกอบทั้งแบบประมาณ (Proximate parameters) และแบบแยกธาตุ (Ultimate parameters) และสภาวะการเดินระบบ เป็นตัวแปร  $X$  โดยวิธีการป้อนตัวแปรเหล่านี้จะใช้วิธี Stepwise selection ซึ่งจะเลือกตัวแปรที่มีสหสัมพันธ์กับตัวแปรตามมากที่สุดเข้าสมการก่อน จากนั้นจะทดสอบตัวแปรที่ไม่ได้อยู่ในสมการว่าจะมีตัวทำนายตัวใดบ้างมีสิทธิเข้ามาอยู่ในสมการด้วยวิธีการคัดเลือกแบบก้าวหน้า และในขณะเดียวกันก็ทดสอบตัวแปรที่อยู่ในสมการด้วยว่าตัวแปรใดมีโอกาสที่จะถูกขจัดออกจากสมการด้วยวิธีการคัดเลือกแบบถดถอยหลัง ซึ่งวิธีการนี้จะทำให้ได้สมการถดถอยที่มีสัมประสิทธิ์การทำนายสูงสุด

## 3) การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อน

การวิเคราะห์ค่าคลาดเคลื่อน (Residual Analysis) ในการวิเคราะห์การถดถอย สามารถพิจารณาได้หลายชนิดกรณี โดยในการศึกษานี้จะเลือกใช้การวิเคราะห์ดังนี้

- การพิจารณาค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standardized Residuals) โดยสมการถดถอยควรมีค่าเฉลี่ยของค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานใกล้เคียง 0 มากที่สุด
- การทดสอบความเป็นอิสระของค่าคลาดเคลื่อน โดยใช้สถิติทดสอบ Durbin-Watson โดยจะพิจารณาจากค่า Durbin-Watson โดยจะมีค่าอยู่ในช่วง 0-4 สำหรับค่า DW ที่ใกล้กับ 2 นั่นคือ มีค่าอยู่ในช่วง 1.5 ถึง 2.5 จะเป็นกรณีที่ความคลาดเคลื่อนเป็นอิสระกัน (กัลยา วานิชย์บัญชา, 2550)

### 3.3.9.2 พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบแก๊สซิฟิเคชัน

ข้อมูลคุณสมบัติของเชื้อเพลิง (คุณสมบัติแบบประมาณ และแบบแยกธาตุ) ของเชื้อเพลิง 3 ชนิด คือ ไม้สับ และเชื้อเพลิงผสมระหว่าง RDF - 5: ไม้สับ ที่สัดส่วน 50:50 %wt และ 70:30 %wt และข้อมูลสภาวะการทำงาน of ระบบแก๊สซิฟิเคชัน (อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง, อัตราการป้อนเชื้อเพลิง) จะถูกนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (Multiple linear regression) ซึ่งสามารถสรุปตัวแปรได้ดัง ตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 ข้อมูลพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบแก๊สซิฟิเคชัน

พารามิเตอร์ที่ใช้	พารามิเตอร์ที่ทำนาย
1) คุณสมบัติของเชื้อเพลิงด้านองค์ประกอบแบบประมาณ ทั้ง 3 เชื้อเพลิง (%Ash, %VM, %FC)	1) คุณสมบัติของแก๊สเชื้อเพลิง (CO, CH <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> )
2) คุณสมบัติของเชื้อเพลิงด้านองค์ประกอบแบบแยกธาตุ ทั้ง 3 เชื้อเพลิง (%C, %H, %N, %S)	2) ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิง (Calorific value: CV)
3) สภาวะการทำงานของระบบแก๊สซิฟิเคชันของทั้ง 3 ของเชื้อเพลิงทั้ง 3 ชนิด คือ <ul style="list-style-type: none"> <li>• อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง 3 สภาวะ 130 Nm<sup>3</sup>/hr, 170 Nm<sup>3</sup>/hr และ 210 Nm<sup>3</sup>/hr</li> <li>• อัตราการป้อนเชื้อเพลิงทั้ง 3 สภาวะ</li> </ul>	3) ประสิทธิภาพการผลิตแก๊ส (Cold gas efficiency: $\eta_{cg}$ )

### 3.3.9.3 พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน

สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน จะใช้พารามิเตอร์คุณสมบัติของวัตถุดิบ Waste reject ที่ความชื้นต่างๆ จะใช้วิธีการวิเคราะห์แบบถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple linear regression) โดยใช้โปรแกรม JMP 10 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA)

ตารางที่ 3.8 ข้อมูลพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน

พารามิเตอร์ที่ใช้	พารามิเตอร์ที่ทำนาย
1) คุณสมบัติของเชื้อเพลิง คือ ค่าความชื้น ระหว่าง 10, 25, 40 % wt (wb)	1) คุณสมบัติของแก๊สเชื้อเพลิง (CO, CH <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> ) 2) ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิง (Calorific value: CV) 3) ประสิทธิภาพการผลิตแก๊ส (Cold gas efficiency: $\eta_{cg}$ )

### 3.3.9.4 การวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อประเมินมลพิษสิ่งแวดล้อมของระบบ

ในการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อประเมินมลพิษสิ่งแวดล้อมของระบบการ จะใช้การวิเคราะห์ตัวประกอบสำคัญ (Principle Component Analysis: PCA) เพื่อศึกษาพฤติกรรมการกระจายตัวของมลสาร คือ ธาตุกลุ่มโลหะหนัก อัลคาไลน์ และคลอรีน ไปในรูปแบบต่างๆ ได้แก่ เถ้าหนัก องค์ประกอบมลสารในแก๊สเชื้อเพลิง น้ำเสีย และอื่นๆ (ส่วนที่สูญหาย) ทั้งในระบบแก๊สซิฟิเคชัน และระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน โดยวิธีการวิเคราะห์ตัวประกอบสำคัญ (Principle

Component Analysis: PCA) จะใช้โปรแกรม XLSTAT (Version 2013.3.02, Addinsoft, France) ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์ทางสถิติที่นิยมใช้ในงานด้านสิ่งแวดล้อม (Natarajan et. al, 1998; Manoli et al, 2002, Saldarriaga, 2009) โดยข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์จะแบ่งเป็น 2 ชุดด้วยกัน คือ 1) ศึกษาและวิเคราะห์พฤติกรรมการกระจายตัวของมลสารในรูปแบบต่างๆ เปรียบเทียบระหว่าง ระบบแก๊สซิฟเคชั่น กับระบบพลาสมาแก๊สซิฟเคชั่น ที่ใช้ RDF-5 และ ไม้สับ (สัดส่วนผสม 70:30 %wt) เป็นเชื้อเพลิงและ 2) ศึกษาและวิเคราะห์พฤติกรรมการกระจายตัวของมลสารในรูปแบบต่างๆ สำหรับเชื้อเพลิง Waste reject ที่มีความชื้นมาเป็นปัจจัย ในระบบพลาสมาแก๊สซิฟเคชั่น

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

#### 4.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติของเชื้อเพลิง

การศึกษาลักษณะทางกายภาพ และองค์ประกอบทางเคมีของเชื้อเพลิง เป็นสิ่งสำคัญที่จะประเมินว่าเชื้อเพลิงมีความเหมาะสมต่อการผลิตพลังงานโดยกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันมากน้อยเพียงใด และอีกทั้งองค์ประกอบที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงนั้นจะทำให้สามารถอธิบายลักษณะมลพิษสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นได้อย่างชัดเจนมากขึ้น

##### 4.1.1 การศึกษาสมบัติของเชื้อเพลิงขยะ (RDF-5)

###### 4.1.1.1 ผลการศึกษสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงขยะ (RDF-5)

เชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง (RDF-5) เป็นการนำเชื้อเพลิงขยะ RDF-3 ไปบดละเอียดโดยใช้เครื่อง Hammer mill ได้เป็นเชื้อเพลิงขยะ RDF-4 จากนั้นนำไปอัดเป็นแท่งโดยใช้เครื่อง Pelletizing machine ซึ่งจะได้เชื้อเพลิงขยะ RDF-5 ดังแสดงในรูปที่ โดยเชื้อเพลิงขยะ RDF-5 จะมีขนาดที่สม่ำเสมอ มีขนาด เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 8 mm x ยาว 30-40 mm และความชื้นมีค่าประมาณ 14.32 % (wb) มีความหนาแน่นสูงเฉลี่ย 560 kg/m<sup>3</sup> โดยเมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงขยะ RDF-3 และ RDF-4 ซึ่งมีความหนาแน่นเพียง 213 kg/m<sup>3</sup> และ 55 kg/m<sup>3</sup> ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 เห็นได้ว่าเชื้อเพลิงขยะ RDF-5 มีคุณสมบัติทางกายภาพความเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง สำหรับงานวิจัยนี้อ้างอิงจากงานวิจัยของ Arjham et al. (2012; 2013) สรุปว่า ขนาดและความชื้นของเชื้อเพลิงที่เหมาะสมสำหรับระบบแก๊สซิฟิเคชันแบบ Fixed-bed down draft gasifier (ขนาด 100 kW) เชื้อเพลิงต้องมีขนาดโดยประมาณ 40 x 40 mm และความชื้นไม่เกิน 15% (wb) เนื่องจากความชื้นของเชื้อเพลิงมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงของระบบ เชื้อเพลิงที่มีความชื้นสูงจะส่งผลให้ประสิทธิภาพของการผลิตแก๊สลดลง (Dogru, 2000; McKendry, 2002)



รูปที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของเชื้อเพลิงขยะ RDF-3, RDF-4 และ RDF-5

ตารางที่ 4.1 ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงขยะ

พารามิเตอร์	RDF-3	RDF-4	RDF-5
ความชื้น (%)	14.32 ± 1.32	14.32 ± 1.32	14.32 ± 1.32
ความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )	113 ± 2.11	55 ± 1.01	560 ± 2.67
ขนาดเชื้อเพลิงโดยเฉลี่ย (mm x mm)	60-200	10-40	∅ 8 mm x L 30-40
องค์ประกอบ (%wt)	พลาสติก 96±1.10%, กระจกและอินทรีย์สาร 4±0.50%,		

หมายเหตุ : เชื้อเพลิงขยะทั้ง RDF-3, RDF-4 และ RDF-5

ทั้งนี้หากพิจารณา คุณภาพของเชื้อเพลิงขยะ RDF-5 โดยอ้างอิงตามเกณฑ์มาตรฐานสากล (ASTM standards E856-83, 2006) พบว่าเชื้อเพลิงขยะ RDF-5 ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นไปตามมาตรฐานของเชื้อเพลิงขยะประเภทที่ 5 หรือ Densified (d-RDF) คือเป็นขยะที่นำมาผ่านกระบวนการให้อยู่ในรูปการอัดแท่ง และมีองค์ประกอบของวัสดุที่เผาไหม้มากกว่า 95%

อย่างไรก็ดี สำหรับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันนั้น คุณสมบัติทางกายภาพด้านความหนาแน่นของเชื้อเพลิงเป็นอีกปัจจัยที่มีความสำคัญ ด้วยการเกิดแก๊สเชื้อเพลิงในโซนของ Reduction นั้น ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นจะดีเพียงใดขึ้นกับอุณหภูมิ และพื้นที่ผิวสัมผัสของเชื้อเพลิงกับการรับความร้อน เชื้อเพลิงที่มีความหนาแน่นต่ำ ช่องว่างระหว่างเชื้อเพลิงมาก เป็นผลทำให้มีออกซิเจนไหลผ่านเข้าไปในระบบมากขึ้น เกิดการลุกไหม้รวดเร็วในลักษณะวาบไฟ เป็นผลให้ปฏิกริยาที่ทำให้เกิดแก๊สเชื้อเพลิงน้อยตามไปด้วย ส่งผลให้ประสิทธิภาพของระบบมีค่าต่ำ แต่ถ้าเชื้อเพลิงมีขนาดเล็ก หรือมีความหนาแน่นสูงเกินไป จะใช้เวลาในการลุกไหม้ช้า มีช่องว่างให้อากาศไหลผ่านน้อย ทำให้เกิดการสูญเสียความดันภายในเตามาก จึงต้องใช้พัดลมดูดขนาดใหญ่ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานมากยิ่งขึ้น (Earp, 1988; McKendry, 2002)

จากผลการศึกษาของ วีรชัย ออาจหาญ และคณะ (2553) การเดินระบบแก๊สซิฟิเคชันแบบ Fixed-bed down draft gasifier โดยใช้เชื้อเพลิงขยะ RDF-5 ซึ่งใช้เครื่องอัดแท่งแบบ (Briquetting machine) ซึ่งเชื้อเพลิงมีขนาด  $\varnothing$  45 mm x 45-50 mm, มีค่าความชื้น 11.30 % (wb) ความหนาแน่น 430 kg/m<sup>3</sup> พบว่าการเดินระบบไม่มีความเสถียร เนื่องด้วยการถ่ายเทความร้อนในเตาปฏิกรณ์ไม่ทั่วถึง อีกทั้งเชื้อเพลิงขยะ RDF-5 มีส่วนผสมของพลาสติกเป็นส่วนใหญ่ เมื่อได้รับความร้อนจะหลอมตัวและเหนียวติดกัน ปิดช่องทางการไหลของอากาศภายในเตาปฏิกรณ์ การเดินระบบต่อเนื่องยาก คุณภาพของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ มีค่าความร้อนต่ำ

ในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาเพื่อลดข้อจำกัดของการใช้เชื้อเพลิงขยะ RDF-5 ในระบบแก๊สซิฟิเคชัน โดยสมมติฐานว่า การนำเชื้อเพลิงไม้มาเป็นสัดส่วนผสมในลักษณะ Blending fuel จะทำให้ระบบแก๊สซิฟิเคชัน สามารถเดินได้อย่างเสถียรภาพมากยิ่งขึ้น เนื่องจากเชื้อเพลิงไม้ช่วยเพิ่มพื้นที่และช่องว่างระหว่างเชื้อเพลิง ในเตาปฏิกรณ์ ให้การถ่ายเทความร้อน และ อีกทั้งไม่มีสัดส่วนของคาร์บอนคงตัวสูง (Fixed carbon) ซึ่งเป็นส่วนสำคัญ คือ เชื้อเพลิงที่มีคาร์บอนคงตัวสูงเมื่อผ่านกระบวนการเผาไหม้ แล้วจะหลงเหลือคาร์บอนที่มีคุณสมบัติเป็นถ่านชาร์ (char) ซึ่งในระบบกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันในเตาปฏิกรณ์ Fixed-bed downdraft gasifier ถ่านชาร์จะสามารถเคลื่อนตัวลงได้ง่าย จึงพบว่าการเดินระบบโดยใช้เชื้อเพลิงไม้จะสามารถเดินระบบโดยเตาปฏิกรณ์แบบนี้ได้ดี

แสดงลักษณะทางกายภาพของเชื้อเพลิงต่างๆ ดังรูปที่ 4.2 โดยคุณสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิง RDF-5 ไม้ยูคาลิปตัสสับ (WC) เชื้อเพลิงผสม RDF5/WC (50/50) และเชื้อเพลิงผสม RDF5/WC (70/30) แสดงดังตารางที่ 4.2 ซึ่งเห็นได้ว่าการผสมเชื้อเพลิง ทำให้ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงลดลงได้

ตารางที่ 4.2 ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิง

พารามิเตอร์	ผลวิเคราะห์			
	RDF-5	WC	RDF-5/WC (50/50)	RDF5/WC(70/30)
ความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )	560 ± 1.15	225 ± 1.25	392 ± 1.35	459 ± 1.50
ขนาด (mm x mm)	$\varnothing$ 8 mm x L 30-40	25 x 30	-	-
ความชื้น (wb) ar <sup>(1)</sup>	14.32 ± 0.95	12.11 ± 1.21	13.21 ± 1.04	13.66 ± 1.17
ความชื้น (wb) ad <sup>(2)</sup>	8.21 ± 1.50	8.34 ± 1.11	8.27 ± 1.42	8.25 ± 1.48

หมายเหตุ : <sup>(1)</sup> ar (% MC as received)

<sup>(2)</sup> ad (% MC as air dry basis)

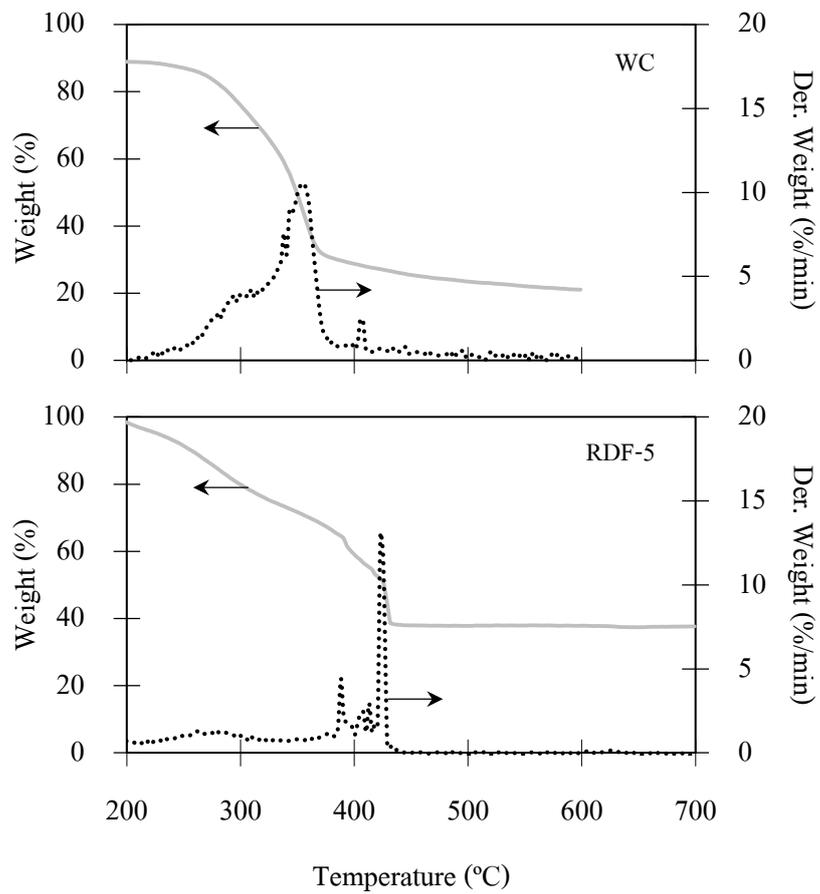


WC

RDF-5/WC (50/50)

RDF5/WC(70/30)

รูปที่ 4.2 ลักษณะทางกายภาพของเชื้อเพลิงต่างๆ



รูปที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ TGA ของเชื้อเพลิงไม้สับ และเชื้อเพลิงขยะ RDF-5

### 1) การศึกษาการย่อยสลายทางความร้อน (TGA) ของเชื้อเพลิง WC

การศึกษาการย่อยสลายทางความร้อนใช้วิธีการวิเคราะห์แบบ Thermogravimetric Analysis (TGA) เป็นการแสดงค่า การลดลงของน้ำหนัก (%Weight) และอัตราการลดน้ำหนัก (%/min) ดังแสดงใน รูปที่ 4.3 โดยเชื้อเพลิงไม้ยูคาลิปตัสสับ หรือ WC มีการแตกสลายทางความร้อน 2 ช่วง โดยช่วงที่ 1 คือที่อุณหภูมิประมาณ 200-294 °C ซึ่งเป็นการสลายตัวเมื่อได้รับความร้อนของสารกลุ่มเฮมิเซลลูโลส โดยจะมีการสูญเสียน้ำหนักประมาณ 17% และช่วงที่ 2 จะสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 385 °C โดยจะมีการสูญเสียน้ำหนักประมาณ 55 % เป็นการสลายตัวเมื่อได้รับความร้อนของสารกลุ่มเซลลูโลส สำหรับช่วงที่มีการแตกสลายทางความร้อนมากที่สุด คือ ประมาณ 70% ของน้ำหนักเริ่มต้น โดยพบที่อุณหภูมิ 410 °C ซึ่งเป็นช่วงของการสลายของสารกลุ่มลิกนินและกลายเป็นถ่าน ซึ่งเป็นลักษณะของการแตกสลายทางความร้อนของไม้ยูคาลิปตัส ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับการศึกษาที่ผ่านมา (Barneto et al., 2010, 2011) จากนั้นถึงแม้ว่าจะเพิ่มอุณหภูมิสูงถึง 500-600 °C ก็พบว่าน้ำหนักของสารไม่มีการเปลี่ยนแปลง โดยคงที่เท่ากับ 20% น้ำหนักที่หลงเหลืออยู่นี้แสดงถึงส่วนที่เป็นสารที่สลายตัวได้ยากที่อุณหภูมิสูงและสารอนินทรีย์มีอยู่ในเชื้อเพลิงไม้ (สอดคล้องกับค่า % คาร์บอนคงตัว และ % เถ้า ที่มีค่า ~ 17.19% และ ~ 2.74% ตามลำดับ แสดงไว้ในตารางที่ 4.3)

### 2) การศึกษาการย่อยสลายทางความร้อน (TGA) ของเชื้อเพลิงขยะ RDF-5

สำหรับ เชื้อเพลิงขยะ RDF-5 ก็พบว่า มีการแตกสลายทางความร้อน 2 ช่วง เช่นเดียวกัน และแยกจากกันอย่างเห็นได้ชัดเจนมาก ซึ่งแสดงถึงการผสมกันระหว่างวัสดุ 2 กลุ่มหลัก ได้แก่ 1) กลุ่มพวกที่เป็นสารเฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลส และ 2) กลุ่มพลาสติก เนื่องจากเชื้อเพลิงขยะ RDF-5 มีองค์ประกอบของพลาสติกเป็นหลัก (~ 95 %wt) และมีเศษกระดาษและอินทรีย์วัสดุขนาดเล็กเป็นองค์ประกอบรอง (~ 5 %wt) สำหรับในช่วงแรกที่อุณหภูมิต่ำ จะมีการสูญเสียน้ำหนักประมาณ 40% การแตกสลายทางความร้อนจะเริ่มขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 200 °C และถึงจุดยอดที่อุณหภูมิ 395 °C ซึ่งอุณหภูมินี้สอดคล้องกับช่วงการแตกสลายของวัสดุที่เป็นไม้ สำหรับช่วงที่สองเป็นช่วงที่มีการแตกสลายทางความร้อนมากที่สุด คือประมาณ 60% ของน้ำหนักเริ่มต้น พบที่อุณหภูมิช่วง 400-420 °C ช่วงนี้เป็นช่วงที่เป็นการย่อยสลายของพลาสติก (Dalai et al., 2009)

หลังจากนั้นพบว่า น้ำหนักจะมีค่าคงที่ประมาณ 20% แม้ว่าอุณหภูมิจะสูงถึง 600 °C แสดงถึงส่วนที่เป็นสารที่สลายตัวได้ยากที่อุณหภูมิสูงและอนินทรีย์มีอยู่ในเชื้อเพลิง RDF-5 (% คาร์บอนคงตัว และ % เถ้า ที่มีค่า ~ 8.3% และ ~ 10.15% ตามลำดับ แสดงไว้ในตารางที่ 4.3) ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับการศึกษาที่ผ่านมา (Dalai et al., 2009; Galvagno et al., 2009) ที่แสดงให้เห็นว่า RDF-5 ประกอบไปด้วยส่วนที่ย่อยสลายได้ที่อุณหภูมิต่ำและอุณหภูมิสูง

#### 4.1.1.2 ผลการศึกษาสมบัติทางเคมีของเชื้อเพลิง

การศึกษาสมบัติทางเคมีของเชื้อเพลิงขยะ RDF-5 WC RDF-5/WC (50/50) และ RDF-5/WC (70/30) ประกอบไปด้วย ค่าความร้อน องค์ประกอบแบบประมาณ และ องค์ประกอบแบบแยกปริมาณธาตุ ดังแสดงใน ตารางที่ 4.3 และอธิบายผลวิเคราะห์ได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.3 ผลการศึกษาสมบัติด้านองค์ประกอบทางเคมีของเชื้อเพลิง

รายการ	พารามิเตอร์	ผลวิเคราะห์			
		RDF-5	WC	RDF-5 /WC(50/50)	RDF-5 /WC(70/30)
องค์ประกอบแบบประมาณ (wt%, db)	ค่าความร้อน (MJ/kg) ar <sup>(1)</sup>	22.47 ± 1.12	15.53 ± 1.89	19.01 ± 1.45	20.38 ± 1.35
	ค่าความร้อนสูง (MJ/kg) ad <sup>(2)</sup>	24.91 ± 1.45	16.35 ± 1.56	20.63 ± 1.72	22.34 ± 1.85
	สารระเหย (wt%, db) <sup>(3)</sup>	81.57 ± 2.45	80.17 ± 2.57	80.87 ± 1.92	81.15 ± 1.87
	คาร์บอนคงตัว (wt%, db)	8.3 ± 1.41	17.19 ± 1.41	12.74 ± 1.41	10.96 ± 1.41
	เถ้า (wt%, db)	10.15 ± 0.01	2.74 ± 0.01	6.44 ± 0.01	7.92 ± 0.01
องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (wt%, db)	คาร์บอน (C)	55.20 ± 2.11	49.93 ± 1.41	52.57 ± 2.05	53.62 ± 2.11
	ไฮโดรเจน (H)	8.76 ± 0.12	8.05 ± 0.23	8.41 ± 0.25	8.55 ± 0.25
	ไนโตรเจน (N)	0.71 ± 0.01	0.52 ± 0.01	0.62 ± 0.02	0.66 ± 0.04
	ซัลเฟอร์ (S)	0.77 ± 0.03	0.09 ± 0.02	0.43 ± 0.02	0.57 ± 0.03
	ออกซิเจน (O)	24.41 ± 0.11	38.67 ± 0.22	31.53 ± 0.24	28.21 ± 0.27
	Generic formula	CH <sub>1.95</sub> O <sub>0.33</sub>	CH <sub>1.93</sub> O <sub>0.97</sub>	CH <sub>1.91</sub> O <sub>0.44</sub>	CH <sub>1.90</sub> O <sub>0.40</sub>
ธาตุโลหะหนัก ธาตุอัลคาไลน์ ธาตุคลอรีน (g/kg, db)	อะลูมิเนียม (Al)	5.054 ± 0.30	1.056 ± 0.02	3.055 ± 0.15	3.855 ± 0.13
	แคลเซียม (Ca)	33.335 ± 0.30	4.838 ± 0.20	19.086 ± 0.50	24.786 ± 0.50
	โพแทสเซียม (K)	3.195 ± 0.21	6.596 ± 0.01	4.896 ± 0.01	4.216 ± 0.01
	โซเดียม (Na)	ND <sup>(4)</sup>	2.170 ± 0.05	1.085 ± 0.02	0.651 ± 0.02
	แมกนีเซียม (Mg)	ND	1.210 ± 0.03	0.605 ± 0.02	0.363 ± 0.02
	ฟอสฟอรัส (P)	2.985 ± 0.12	0.959 ± 0.02	1.972 ± 0.21	2.377 ± 0.20
	ซิลิคอน (Si)	23.966 ± 1.20	7.196 ± 0.52	15.581 ± 2.25	18.935 ± 1.25
	ไทเทเนียม (Ti)	4.505 ± 0.22	1.546 ± 0.04	3.026 ± 0.11	3.618 ± 0.11
	เหล็ก (Fe)	18.708 ± 1.35	ND	9.354 ± 1.35	13.095 ± 1.43
	โครเมียม (Cr)	0.130 ± 0.02	ND	0.065 ± 0.02	0.091 ± 0.00
	ปรอท (Hg)	0.131 ± 0.03	ND	0.066 ± 0.01	0.092 ± 0.01
	นิกเกิล (Ni)	0.333 ± 0.01	ND	0.166 ± 0.05	0.233 ± 0.04
	ตะกั่ว (Pb)	0.139 ± 0.02	0.040 ± 0.01	0.089 ± 0.01	0.109 ± 0.03
	แคดเมียม (Cd)	0.003 ± 0.00	ND	0.002 ± 0.00	0.002 ± 0.00
	ทองแดง (Cu)	0.325 ± 0.01	ND	0.162 ± 0.04	0.227 ± 0.03
	แมงกานีส (Mn)	0.383 ± 0.02	0.680 ± 0.01	0.532 ± 0.05	0.472 ± 0.05
	สังกะสี (Zn)	0.753 ± 0.02	ND	0.376 ± 0.02	0.527 ± 0.03
	โบรอน (Br)	0.023 ± 0.00	ND	0.011 ± 0.00	0.016 ± 0.00
	คลอรีน (Cl)	6.915 ± 0.51	1.355 ± 0.24	4.135 ± 0.41	5.247 ± 0.45

หมายเหตุ: <sup>(1)</sup> ar (% MC as received)

<sup>(2)</sup> ad (% MC as air dry basis)

<sup>(3)</sup> db (% as dry basis)

<sup>(4)</sup> ND (Not detected) (Limit of Detection = 5 ppm or 5 mg/g)

### 1) องค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate Value)

ผลการศึกษาก่อนองค์ประกอบแบบประมาณของเชื้อเพลิงขยะ RDF-5 ดังแสดงใน ตารางที่ 4.3 พบว่าเชื้อเพลิง RDF-5 มีคุณสมบัติที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงไม้ค่านำพลังงาน โดยมีค่าความร้อน (LHV) และปริมาณสารระเหยสูงกว่า คือ 22.47 MJ/kg และ 81.57 % ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงไม้ที่มี เท่ากับ 15.53 MJ/kg และ 80.17% ตามลำดับ ทั้งนี้ ค่าความร้อนที่สูงกว่านี้ อันเนื่องมาจากเชื้อเพลิงขยะมีพลาสติกเป็นองค์ประกอบหลัก (Narukawa et al., 1996; Piao et al., 2000; Caputo et al., 2002; Diaz et al., 2006).

ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง แสดงให้เห็นว่าปริมาณความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ หรือพลังงานที่ปลดปล่อยออกมาขณะเผาไหม้ จะถูกนำไปเป็นแหล่งความร้อนที่สำคัญในการเกิดปฏิกิริยาอุณหภูมิในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง และทำให้องค์ประกอบที่เป็นสารระเหยได้รับความร้อนเปลี่ยนรูปไปเป็นแก๊สเชื้อเพลิง อย่างไรก็ตามเชื้อเพลิงขยะ RDF-5 ยังมีข้อด้อย เนื่องจากปริมาณเถ้าที่สูง (~10.15%) เมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงไม้ (~2.74%) ทั้งนี้เชื้อเพลิงที่มีเถ้าสูงจะทำให้เดินระบบค่อนข้างยุ่งยาก เนื่องจากต้องทำการดึงเถ้าออกให้ทันทั่วทั้งที่ และบ่อยครั้งขึ้นเพราะหากไม่สามารถนำเถ้าออกจากระบบได้ทัน เถ้าที่สะสมอยู่ในเตาปฏิกรณ์ จะหลอมตัวเป็นก้อนกลายเป็นเถ้าหลอม (slag) เมื่อหลอมรวมตัวกันเป็นก้อนขนาดใหญ่จะปิดช่องทางการไหลของแก๊ส หรือที่เรียกว่าระบบ ถูกบดล็อก (block) ซึ่งจะไม่สามารถเดินระบบต่อไปได้ (Arjham et al., 2013)

สำหรับเชื้อเพลิงผสมระหว่าง RDF-5 และ เชื้อเพลิงไม้สับ ที่สัดส่วนต่างๆ ดังตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่า การผสมเชื้อเพลิง (Blending fuel) จะมีส่วนช่วยลดปริมาณเถ้าลงได้ ซึ่งจะสามารถแก้ไขปัญหาค่าเถ้าสูงและข้อจำกัดเกี่ยวกับปัญหาเถ้าหลอมในการเดินระบบแก๊สซิฟิเคชันได้อีกประการหนึ่งคือ เชื้อเพลิงไม้ หรือ WC มีสัดส่วนของคาร์บอนคงตัวสูง (~ 17.19%) ซึ่งการผสมเชื้อเพลิงทั้งเป็นการเพิ่มสัดส่วนของคาร์บอนคงตัวสูง (Fixed carbon) ให้สูงขึ้นจากเดิม คือ RDF-5 (สัดส่วนคาร์บอนคงตัว ~ 8.3%), RDF-5/WC (50/50) (สัดส่วนคาร์บอนคงตัว ~ 12.74 %) และ RDF-5/WC (70/30) (สัดส่วนคาร์บอนคงตัว ~ 10.96%) เมื่อเชื้อเพลิงที่มีคาร์บอนคงตัวสูง เมื่อผ่านกระบวนการเผาไหม้ แล้วจะหลงเหลือคาร์บอนที่มีคุณสมบัติเป็นถ่านชาร์ (char) ซึ่งในระบบกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันในเตาปฏิกรณ์ Fixed-bed downdraft gasifier ถ่านชาร์จะสามารถเคลื่อนตัวลงได้ง่าย จะสามารถเดินระบบได้เสถียรมากยิ่งขึ้น

### 2) องค์ประกอบแบบแยกปริมาณธาตุ (Ultimate value)

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุของเชื้อเพลิงขยะ RDF-5 พบว่ามีปริมาณธาตุคาร์บอน และธาตุไฮโดรเจนสูงกว่า เชื้อเพลิงไม้ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ เนื่องจากว่าเชื้อเพลิงขยะมีพลาสติกเป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งพลาสติก

ส่วนใหญ่ คือสารไฮโดรคาร์บอน คาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นธาตุหลักที่จะถูกเปลี่ยนไปเป็นแก๊สเชื้อเพลิงโดยปฏิกิริยาอุณหภูมิในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Caputo et al., 2002; Diaz et al., 2006).

อย่างไรก็ดี เชื้อเพลิงขยะ RDF-5 มีธาตุซัลเฟอร์สูง กว่าเชื้อเพลิงไม้ WC แต่ถือได้ว่ามีปริมาณต่ำมาก หากเปรียบเทียบกับถ่านหินบิทูมินัส (~ 0.7 - 4.0 %wt) สำหรับผลการวิเคราะห์โลหะหนักในเชื้อเพลิงขยะ RDF-5 พบการปนเปื้อนเหล็ก (Fe) สูงที่สุด คือ 18.708 g/kg ทั้งนี้ หากอ้างอิงตามการจัดอันดับ 20 สารอันตรายตามองค์กร The Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR, 2003a, 2003b, 2003c, 2005) (อันดับที่ 1 As, อันดับที่ 2 Pb, อันดับที่ 3 Hg และอันดับที่ 7 Cd) สรุปได้ว่า เชื้อเพลิงขยะ RDF-5 มีโลหะหนักอันตราย ตามรายการ 3 ชนิดคือ คือ Pb Hg และ Cd ทั้งนี้เห็นว่าปริมาณการปนเปื้อนเพียงเล็กน้อยเท่านั้นและมีค่าน้อยกว่าค่ามาตรฐานที่ทางยุโรปกำหนดสำหรับเชื้อเพลิง RDF (ค่ามาตรฐาน RDF ของยุโรป Cr < 0.2 g/kg, Hg < 0.002 g/kg, Pb < 0.02 g/kg, Cd < 0.01 และ Cl < 50 g/kg) (Nithikul et al., 2011)

ทั้งนี้ หากเปรียบเทียบกับมาตรฐานของเชื้อเพลิงขยะของประเทศไทย โดยอ้างอิงมาตรฐานของกลุ่มโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้เชื้อเพลิงขยะเป็นเชื้อเพลิงทดแทนฟอสซิล คือ บริษัท SCIEco Services Co., Ltd ภายใต้บริษัทปูนซิเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน) (SIAM CEMENT GROUP) และบริษัท ทีพีไอ โพลีน จำกัด (TPIPL) ตารางที่ 4.4 เห็นได้ว่าเชื้อเพลิงขยะ RDF-5 เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐาน โดยพบว่าปริมาณโลหะหนักที่เป็นอันตราย และ ปริมาณธาตุคลอรีน ไม่เกินค่าที่กำหนด

ในส่วนขององค์ประกอบแบบแยกธาตุของเชื้อเพลิงผสมระหว่าง RDF-5 และ เชื้อเพลิงไม้สับ ที่สัดส่วนต่างๆ (ตารางที่ 4.3) โดยใช้วิธีคำนวณตามสัดส่วนนั้น แสดงให้เห็นได้ว่าการผสมเชื้อเพลิง (Blending fuel) โดยใช้เชื้อเพลิงไม้ ที่มีปริมาณซัลเฟอร์ คลอรีน และ โลหะหนักต่างๆ ต่ำ มาเป็นตัวผสมจะมีส่วนช่วยในการลดความเข้มข้นของสารมลพิษในเชื้อเพลิง ซึ่งถือเป็นอีกหนึ่งของวิธีการปฏิบัติ ที่นิยมใช้กันทั่วไปด้านการจัดการเชื้อเพลิงสะอาดในปัจจุบันในโรงงานอุตสาหกรรม

ตารางที่ 4.4 มาตรฐานของเชื้อเพลิงขยะประเภท 3 (RDF-3) อ้างอิงจาก SCIEco Services Co., Ltd

คุณสมบัติ	SCIEco Services Co.,Ltd	บริษัท ทีพีไอ โพลีน จำกัด (TPIPL)	RDF-3 <sup>(2)</sup> และ RDF-5 <sup>(2)</sup>
ค่าความร้อน (Kcal/kg)	> 4, 500	> 3, 500	> 5,000
ค่าความร้อน (MJ/kg)	> 18,700	> 14,500	22,470
ความชื้น (wt%, wb) ar <sup>1</sup>	< 20 %	< 35 %	14.32
คลอรีน (Cl)	< 1 %	< 0.5 %	0.691
ซัลเฟอร์ (S)	< 1%	-	0.774
ปริมาณโลหะหนัก <sup>(3)</sup>	≤ 1 %	-	0.222
% เถ้า	-	15	10.15

หมายเหตุ: <sup>(1)</sup> ar (% MC as received)

<sup>(2)</sup> ผลการศึกษาในงานวิจัยนี้

<sup>(3)</sup> ปริมาณโลหะหนัก หมายถึง ผลรวม % wt ของกลุ่มโลหะหนักที่เป็นสารอันตราย

ทั้งนี้ในกระบวนการผลิตพลังงานโดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน วัฏจักรของโลหะหนักส่วนใหญ่จะอยู่ในเถ้า (Marrero et al., 2004; Vervaeke et al., 2005; Kwak et al., 2006) วัฏจักรซัลเฟอร์จะอยู่ในรูป SO<sub>2</sub> (เล็กน้อย) และอยู่ในรูป H<sub>2</sub>S บางส่วน ส่วนของวัฏจักรของคลอรีน จะถูกเปลี่ยนแปลงประกอบในรูปของสาร HCl ทั้งนี้หากในกระบวนการเผาไหม้เกิดขึ้นอุณหภูมิต่ำจะเกิดการฟอร์มตัวเป็นสารไดออกซิน การควบคุมการเกิดไดออกซินที่ดีที่สุด คือ การเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 850 °C โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าเป็นสารที่มีการปนเปื้อน จะต้องใช้อุณหภูมิ สูงกว่า 1,000 °C (Malkow, 2003)

ซึ่งในงานวิจัยนี้ เป็นการนำพลาสมาเชิงความร้อนมาใช้ให้เกิดการเผาไหม้ขยะที่อุณหภูมิสูงร่วมกับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ซึ่งหากประเมินตามทฤษฎีและอ้างอิงตามงานวิจัยที่ผ่านมาเทคโนโลยีนี้ช่วยลดการปลดปล่อยมลพิษได้ดี จะเป็นอีกแนวทางหนึ่งของการกำจัดขยะที่ลดปัญหาการปลดปล่อยมลพิษสิ่งแวดล้อมได้น้อยลง ทั้งนี้รายงานผลการศึกษา ถูกนำเสนอในหัวข้อการประเมินมลพิษสิ่งแวดล้อมของระบบ

#### 4.1.2 การศึกษาสมบัติของมูลฝอยเหลือทิ้ง (Waste reject)

##### 4.1.2.1 ผลการศึกษาองค์ประกอบของมูลฝอยเหลือทิ้ง (Waste reject)

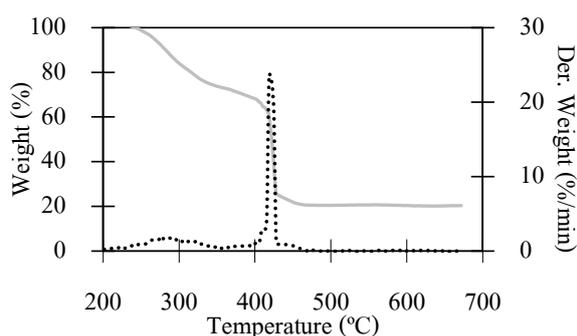
มูลฝอยเหลือทิ้ง (Waste reject) คือเศษขยะมูลฝอยจากกระบวนการคัดแยกขั้นหลังของระบบบำบัดขยะด้วยวิธีการแบบเชิงกลและชีวภาพ (MBT, Mechanical and Biological Waste Treatment) มีองค์ประกอบหลากหลาย อาทิ เศษพลาสติก เศษกระดาษ เศษผ้า ขาง/หนัง เศษโลหะ เศษอินทรีย์ ต่างๆ ตารางที่ 4.5 และดังแสดงใน รูปที่ 4.4

ตารางที่ 4.5 องค์ประกอบต่างในมูลฝอยเหลือทิ้ง (Waste reject)

องค์ประกอบ	สัดส่วน (wt%)	หมายเหตุ
เศษพลาสติก (HDPE, LDPE, PE, PET, PS)	68.76 ± 2.11	เผาไหม้ได้
เศษกระดาษ / เศษสำลี / เศษผ้าอนามัย	13.21 ± 0.15	เผาไหม้ได้
เศษผ้า	2.99 ± 0.25	เผาไหม้ได้
เศษยาง/ หนัง	2.44 ± 0.12	เผาไหม้ได้
เศษกิ่งไม้ขนาดเล็ก	2.36 ± 0.35	เผาไหม้ได้
เศษอะลูมิเนียมฟอยล์	7.32 ± 1.15	เผาไหม้ไม่ได้
เศษโลหะ (ลวด, ตังกะสี)	1.41 ± 0.24	เผาไหม้ไม่ได้
เศษดิน กรวด หิน	1.10 ± 0.12	เผาไหม้ไม่ได้
เศษแก้ว	0.41 ± 0.04	เผาไหม้ไม่ได้



ลักษณะทางกายภาพ



Thermogravimetric Analysis (TGA)

รูปที่ 4.4 ลักษณะทางกายภาพของมูลฝอยเหลือทิ้ง (Waste reject) และผลวิเคราะห์ TGA

ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบตามเกณฑ์มาตรฐานของ ASTM standards E856-83 (2006) พบว่า Waste reject ไม่จัดว่าเป็นเชื้อเพลิงขยะ (สัดส่วนที่เผาไหม้ได้ต่ำกว่า 95%wt มีองค์ประกอบหลากหลาย และมีอินทรีย์ปะปน) และไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานเชื้อเพลิงขยะในประเทศไทยในปัจจุบันเช่นกัน (อ้างอิงตาม ตารางที่ 4.4) ดังกล่าว Waste reject จึงต้องถูกนำไปกำจัดในฐานะที่เป็นขยะมูลฝอยให้ถูกต้องตามหลักวิชาการต่อไป อย่างไรก็ตามก็สังเกตเห็นได้ว่า องค์ประกอบส่วนใหญ่ของ Waste reject เป็นวัสดุที่สามารถเผาไหม้ได้ เป็นพลาสติก 69% รองลงมาคือกระดาษ 13% จึงมีแนวโน้มที่จะสามารถนำมากำจัดควบคู่กับการผลิตพลังงานได้

#### 4.1.2.2 การศึกษาการย่อยสลายทางความร้อน (TGA) ของ Waste reject

สำหรับการศึกษาการย่อยสลายทางความร้อนจะใช้วิธีการวิเคราะห์แบบ Thermogravimetric Analysis (TGA) และแสดงค่าผลของการลดน้ำหนักและอัตราการลดน้ำหนักของตัวอย่าง (ดังแสดงในรูปที่ 4.4) พบว่า มีช่วงการลดลงของน้ำหนัก 2 ช่วงด้วยกัน ซึ่งแสดงถึงการผสมกันระหว่างวัสดุ 2 กลุ่มหลัก ได้แก่ กลุ่มพวกเซลลูโลสและกลุ่มพลาสติก (มีความคล้ายกับเชื้อเพลิงขยะ RDF-5) สำหรับในช่วงแรกที่อุณหภูมิต่ำ จะมีการสูญเสียน้ำหนักประมาณ 30% การแตกสลายทางความร้อนจะเริ่มขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 200 °C และถึงจุดยอดที่อุณหภูมิ 275 °C ซึ่งอุณหภูมินี้สอดคล้องกับช่วงการแตกสลายของวัสดุที่เป็นไม้ สำหรับช่วงที่สองเป็นช่วงที่มีการแตกสลายทางความร้อนมากที่สุด คือประมาณ 50% ของน้ำหนักเริ่มต้น พบที่อุณหภูมิช่วง 350-460 °C ช่วงนี้เป็นช่วงที่เป็นการศึกษาการย่อยสลายของพลาสติก (Dalai et al., 2009) หลังจากนั้นพบว่า น้ำหนักของตัวอย่าง Waste reject มีค่าคงที่ที่ 20% แม้ว่าอุณหภูมิจะสูงถึง 600 °C ปริมาณของน้ำหนักที่หลงเหลืออยู่นี้แสดงถึงส่วนที่เป็นสารอนินทรีย์ที่มีอยู่ใน Waste reject ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับการศึกษาที่ผ่านมา (Dalai et al., 2009; Galvagno et al., 2009) ที่แสดงให้เห็นว่า RDF หรือ Waste reject ประกอบไปด้วยส่วนที่ย่อยสลายได้ที่อุณหภูมิต่ำและอุณหภูมิสูง

ผลการศึกษาคณสมบัติทางกายภาพ แบบประมาณ และแบบแยกธาตุ สรุปไว้ใน ตารางที่ 4.6 สำหรับคุณสมบัติทางกายภาพอธิบายได้ว่า Waste reject ที่มีความชื้นเพิ่มขึ้นส่งผลให้มีความหนาแน่นสูงขึ้น

#### 4.1.2.3 ผลการศึกษาคณสมบัติทางเคมีของมูลฝอยเหลือทิ้ง (Waste reject)

##### 1) องค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate Value)

เนื่องจาก องค์ประกอบส่วนใหญ่ของ Waste reject ที่ได้มาจากโรงบำบัดขยะทางกลและชีวภาพ (MBT plant) เป็นพลาสติก 69% รองลงมาคือกระดาษ 13% จึงส่งผล Waste reject มีปริมาณสารระเหยสูง (~ 89%) เมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงชีวมวลทั่วไป (Raveendran et al., 1995; Arjham et al., 2012)

ทั้งนี้ พบว่า Waste reject มีสัดส่วนของคาร์บอนคงตัวสูงกว่า (~10.87 %) เมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงขยะ RDF-5 (~ 8.3%) เนื่องจาก Waste reject มีกระดาษ และเศษชีวมวลต่างๆ เป็นองค์ประกอบ ซึ่งเป็นข้อดี เนื่องด้วย คาร์บอนคงตัว เป็นส่วนที่ช่วยให้เมื่อเชื้อเพลิงผ่านกระบวนการเผาไหม้ แล้วจะหลงเหลือคาร์บอนที่มีคุณสมบัติเป็นถ่านชาร์ (char) ซึ่งในระบบกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันในเตาปฏิกรณ์ Fixed-bed downdraft gasifier ถ่านชาร์จะสามารถเคลื่อนตัวลงได้ง่าย จะสามารถเดินระบบได้เสถียรมากยิ่งขึ้น

นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความร้อนของ Waste reject มีค่าสูง (23.93 MJ/kg) ซึ่งเป็นตัวบ่งบอกความสามารถในการเผาไหม้มีค่าสูงกว่าเชื้อเพลิงชีวมวล (<20 MJ/kg) (Arjharh et al., 2012) และ Waste reject ที่ได้จากการศึกษาอื่น (21-30 MJ/kg) (Nithikul et al., 2011) ค่าความร้อนที่สูงนี้อาจเป็นผลมาจากปริมาณของ HDPE และ LDPE ที่มีอยู่ใน Waste reject ซึ่งมีค่าความร้อนประมาณ 45 และ 40 MJ/kg ตามลำดับ (Montejo et al., 2011) อย่างไรก็ตาม พบว่าปริมาณเถ้าสูง (8 wt%) และคาร์บอนคงตัวต่ำ (3 wt%) ผลของการวิเคราะห์แบบประมาณบอกเป็นนัยว่าในระหว่างการเดินระบบจำเป็นต้องระวังเป็นพิเศษเนื่องจากใน Waste reject มีปริมาณเถ้าสูง โดยมีการศึกษาพบว่าถ้าหากปริมาณเถ้าสูงกว่า 5% จะมีโอกาสเกิดเถ้าหลอกเหลวและอุดตันในเตาได้ง่าย (McKendry, 2002; Arjharh, 2013)

## 2) องค์ประกอบแบบแยกปริมาณธาตุ (Ultimate Value)

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุแสดงให้เห็นว่า ธาตุคาร์บอน (C) เป็นธาตุหลักใน Waste reject (~ 59%) รองลงมาคือ ไฮโดรเจน (~ 11%) เนื่องจากว่า Waste reject มีพลาสติกเป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งพลาสติกส่วนใหญ่คือสารไฮโดรคาร์บอน ธาตุ 2 ธาตุ มีบทบาทสำคัญต่อการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Caputo et al., 2002; Diaz et al., 2006; Arjharh et al., 2012)

สำหรับผลการวิเคราะห์โลหะหนักใน Waste reject พบการปนเปื้อนของ Fe Cr Hg Ni และ Pb แม้ว่าใน Waste reject จะมีโลหะหนักปนเปื้อนอยู่ในระดับหนึ่ง แต่การนำมาเป็นวัตถุดิบสำหรับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันจะทำให้การปลดปล่อยของโลหะหนักเหล่านี้ลดลงอย่างมากเนื่องจากถูกกักเก็บไว้ในเถ้า (Marrero et al., 2004; Vervaeke et al., 2006) ซึ่งมีการรายงานว่าไม่เกินข้อกำหนดของทางยุโรปและอเมริกา สำหรับการฝังกลบ (Pinto et al., 2008)

ตารางที่ 4.6 ผลการศึกษาสมบัติของมูลฝอยเหลือทิ้ง (Waste reject)

รายการ	พารามิเตอร์	ผลวิเคราะห์		
คุณสมบัติ ทางกายภาพ	ความชื้น (wt%, wb)	10 ± 1.02	25 ± 1.08	40 ± 1.42
	ความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )	190.80 ± 1.44	272.17 ± 1.56	353.54 ± 1.52
	ขนาด (mm x mm)	5-110	5-110	5-110
	ความชื้น (wt%, wb) ar <sup>1</sup>	10 ± 1.22	25 ± 1.54	40 ± 1.55
	ความชื้น (wt%, wb) ad <sup>2</sup>	8.18 ± 1.20	8.18 ± 1.32	8.18 ± 0.77
	ค่าความร้อน (MJ kg <sup>-1</sup> ) ar	21.93 ± 0.24	18.27 ± 0.15	14.77 ± 0.14
องค์ประกอบ แบบประมาณ (wt%, db)	ค่าความร้อน (MJ kg <sup>-1</sup> ) ad	23.60 ± 2.14		
	สารระเหย (wt%, db)	80.80 ± 2.78		
	คาร์บอนคงตัว (wt%, db)	10.87 ± 0.15		
	เถ้า (wt%, db)	8.33 ± 0.43		
องค์ประกอบ แบบประมาณ (wt%, db)	คาร์บอน (C)	59.11 ± 0.13		
	ไฮโดรเจน (H)	10.76 ± 0.05		
	ไนโตรเจน (N)	0.73 ± 0.04		
	ซัลเฟอร์ (S)	0.10 ± 0.01		
ธาตุโลหะหนัก ธาตุอัลคาไลน์ และธาตุคลอรีน (g/kg, db)	อะลูมิเนียม (Al)	3.224 ± 0.03		
	แคลเซียม (Ca)	53.722 ± 0.01		
	โพแทสเซียม (K)	1.59 ± 0.03		
	ฟอสฟอรัส (P)	1.684 ± 0.04		
	ซิลิกอน (Si)	7.852 ± 0.06		
	ไทเทเนียม (Ti)	7.124 ± 0.04		
	เหล็ก (Fe)	1.597 ± 0.09		
	โครเมียม (Cr)	0.093 ± 0.00		
	ปรอท (Hg)	0.080 ± 0.00		
	นิกเกิล (Ni)	1.165 ± 0.02		
	ตะกั่ว (Pb)	0.069 ± 0.00		
	แคดเมียม (Cd)	ND		
	คลอรีน (Cl)	5.092 ± 0.08		

หมายเหตุ: <sup>(1)</sup> ar (% MC as received)<sup>(2)</sup> ad (% MC as air dry basis)<sup>(3)</sup> db (% as dry basis)<sup>(4)</sup> ND (Not detected) (Limit of Detection = 5 ppm or 5 mg/g)

## 4.2 ผลการศึกษาเสถียรภาพของการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงขยะ RDF-5 กับระบบแก๊สซิฟิเคชัน (C-G)

การศึกษาในหัวข้อนี้ ศึกษา การลดข้อจำกัดของการใช้เชื้อเพลิงขยะ RDF-5 ในระบบแก๊สซิฟิเคชัน (งานวิจัยนี้ใช้สัญลักษณ์ C-G) โดยสมมติฐานว่า การนำเชื้อเพลิงชีวมวลประเภทไม้มาเป็นสัดส่วนผสม ในลักษณะ Blending fuel จะทำให้ระบบแก๊สซิฟิเคชัน สามารถเดินได้อย่างเสถียรภาพมากยิ่งขึ้น เนื่องจากเชื้อเพลิงไม้ จะช่วยเพิ่มพื้นที่และช่องว่างระหว่างเชื้อเพลิง และทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อน และเกิดการเผาไหม้ในระบบได้ดียิ่งขึ้น การศึกษานี้ใช้เชื้อเพลิงเป็น 4 ประเภท ในการทดสอบ คือ WC, RDF-5/WC (50/50), RDF-5/WC (70/30) และ RDF-5 โดยทำการทดสอบที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงในระดับต่าง ๆ 3 ระดับ คือ 130 Nm<sup>3</sup>/hr, 170 Nm<sup>3</sup>/hr และ 210 Nm<sup>3</sup>/hr

ทั้งนี้ ผลการศึกษาของหัวข้อนี้ ประกอบไปด้วย 1) การกระจายตัวของอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ 2) ผลวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง 3) ผลการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนและฝุ่น 4) ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Gasification efficiency) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

### 4.2.1 การกระจายตัวของอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ (Temperature profile)

การศึกษาอุณหภูมิของแก๊สเชื้อเพลิงและชั้นของอุณหภูมิภายในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง เพื่ออธิบายปฏิกิริยาอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง ในระยะความสูงต่าง ๆ โดยวัดอุณหภูมิที่ 6 ชั้นความสูง คือ T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub>, T<sub>4</sub>, T<sub>5</sub>, และ T<sub>6</sub> ซึ่งมีความสูงจากระยะอ้างอิง (ความสูงจากด้านบนเตาลงสู่ด้านล่างเตา) เท่ากับ 660, 1060, 1460, 1860, 2280 และ 2700 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยอุณหภูมิของแก๊สเชื้อเพลิงจะถูกบันทึกแบบต่อเนื่องด้วยระบบ Online Measuring System เป็นการเก็บข้อมูลต่อเนื่องที่มีอัตราการเก็บตัวอย่าง 30 วินาที/ครั้ง

ทั้งนี้ การกระจายตัวของอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ (Temperature profile) ของระบบของเตาปฏิกรณ์แบบ Fixed bed down draft gasification ตามทฤษฎีของปฏิกิริยาอุณหภูมิของระบบแก๊สซิฟิเคชัน คือ ที่ระยะความสูง T<sub>1</sub>-T<sub>3</sub> ซึ่งเป็นความสูงช่วงบนของเตา กระบวนการที่เกิดขึ้นจะเป็นช่วงของ Drying zone อุณหภูมิเฉลี่ยค่อนข้างต่ำ คือประมาณ 100-200 °C เป็นช่วงที่ความชื้นในเชื้อเพลิงถูกกำจัดออก ที่ระยะความสูงระหว่าง ที่ระยะความสูงระหว่าง T<sub>3</sub>-T<sub>4</sub> เป็น Zone ของปฏิกิริยา Pyrolysis หรือ Distillation ช่วงอุณหภูมิ 200-500 °C ของแข็งที่เหลืออยู่ภายหลังจากการผ่านกระบวนการนี้ก็คือ คาร์บอนในรูปแบบถ่าน ซึ่งจะทำปฏิกิริยาต่อในโซน Reduction และ Combustion และ ที่ระยะความสูงระหว่าง T<sub>4</sub>-T<sub>5</sub> เป็นจุดที่ป้อนอากาศเข้าสู่เตา เป็นหัวใจ Heat Hearth หรือ Hot Zone ที่เกิดจากกระบวนการ Combustion เป็นช่วงที่อุณหภูมิสูงสุด มีค่าระหว่าง 1,100-1,500 °C

และ ที่ระยะความสูงระหว่าง T5-T6 จะเป็นช่วงของ Reduction Zone แก๊สร้อนที่ผ่านมาจาก Combustion Zone จะทำให้เกิดปฏิกิริยา Reduction โดยจะมีอุณหภูมิระหว่าง 500-900°C

อย่างไรก็ดี สำหรับเชื้อเพลิงที่มีช่องว่างของอากาศมาก หรือเชื้อเพลิงที่มีความหนาแน่นต่ำ จะเกิดการเผาไหม้รวดเร็ว จึงมักส่งผลให้อุณหภูมิของ Zone ต่างๆ สูง (เชื้อเพลิงชีวมวล ไม้สับ ไม้ท่อน) และในทางตรงกันข้าม เชื้อเพลิงที่มีความหนาแน่นสูง (เชื้อเพลิงอัดแท่ง อาทิ ทะลายปาล์มอัดแท่ง เชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง กากตะกอนอัดแท่ง) ซึ่งจะมีช่องว่างของอากาศน้อย การถ่ายเทความร้อนจะเป็นไปอย่างช้าๆ จะส่งผลให้การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิใน Zone ต่างๆ ของเตาปฏิกรณ์มีค่าต่ำ (Arjham et al., 2012, 2013)

ทั้งนี้ งานวิจัยนี้ได้นำข้อมูลอุณหภูมิเฉลี่ยจากการเดินระบบต่อเนื่อง ที่ระยะความสูงต่างๆ T<sub>1</sub>-T<sub>6</sub> ของเชื้อเพลิงทั้ง 4 ประเภท ที่การเดินระบบที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงทั้ง 3 ระดับ คือ 130 Nm<sup>3</sup>/hr, 170 Nm<sup>3</sup>/hr และ 210 Nm<sup>3</sup>/hr มาหาความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในเตา ตามระยะความสูง ดังแสดงใน รูปที่ 4.5 ซึ่งสามารถสรุปรูปแบบ (Pattern) ของ Temperature Profile ได้ดังต่อไปนี้ คือ

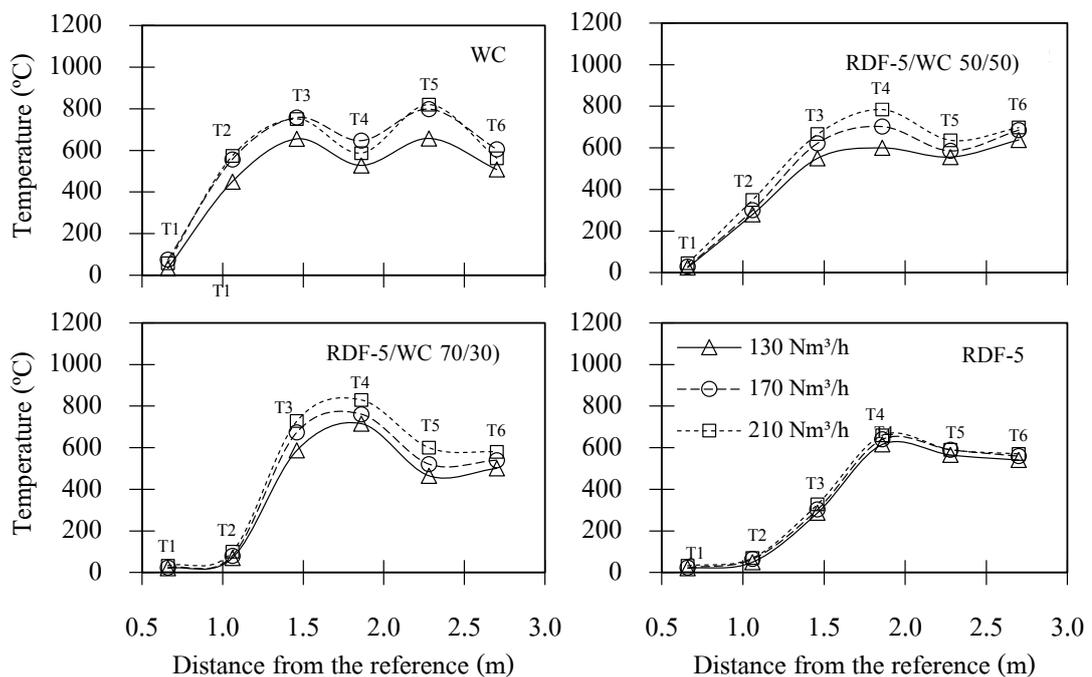
1) เชื้อเพลิง WC : เป็นเชื้อเพลิงที่มีความหนาแน่นน้อย (~225 kg/m<sup>3</sup>) มีพื้นที่และช่องว่างระหว่างเชื้อเพลิงสูง ดังนั้น ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิจึงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เห็นได้จากที่ระยะความสูง T1-T3 ( เริ่มความสูงช่วงบนสุดของเตา) จากที่ T1 มีอุณหภูมิเฉลี่ยค่อนข้างต่ำ ไม่เกิน 100 °C และเพิ่มเป็นขึ้นสูงเป็นระดับ 400 °C (T2) และเพิ่มขึ้นเป็น 800 °C (T3) ดังกล่าว สำหรับเชื้อเพลิงไม้ จึงสรุปได้ว่า มีการพาความร้อน และการถ่ายเทความร้อนในเตาปฏิกรณ์ได้ดี (Arjham et al., 2012)

2) เชื้อเพลิงขยะ RDF-5/WC (50/50) : เนื่องจากเชื้อเพลิงมีความหนาแน่นเพิ่มสูงขึ้น (~392 kg/m<sup>3</sup>) จึงส่งผลให้มีพื้นที่ผิวและช่องว่างระหว่างเชื้อเพลิงลดลง การพาความร้อน และการถ่ายเทความร้อนในเตาปฏิกรณ์ จึงเกิดขึ้นช้าลง เห็นได้จาก ที่ T1 มีอุณหภูมิเฉลี่ย ไม่เกิน 100 °C และที่ระดับ T2 มีอุณหภูมิเพียง 300 °C และเพิ่มขึ้นเป็น 600 °C (T3) และ ที่ตำแหน่ง T4 ถึงจะสูงเป็น 800 °C

3) เชื้อเพลิงขยะ RDF-5/WC (70/30) : เห็นได้ว่า ยิ่งสัดส่วนของเชื้อเพลิง RDF-5 มากขึ้น จะส่งผลให้มีความหนาแน่นเพิ่มสูงขึ้น (~459 kg/m<sup>3</sup>) ซึ่งสอดคล้องกัน คือ การพาความร้อน และการถ่ายเทความร้อนในเตาปฏิกรณ์ เกิดขึ้นช้าลงอย่างชัดเจน เห็นได้จากที่ T1-T2 อุณหภูมิเพิ่มอย่างช้าๆ (<100 °C) และที่ระดับ T3-T4 อุณหภูมิในเตาถึงจะเริ่มไประดับเพิ่มขึ้นถึงจะสูงในช่วง 600-800 °C

4) เชื้อเพลิงขยะ RDF-5 : เนื่องจากมีความหนาแน่นสูงมาก ( $\sim 560 \text{ kg/m}^3$ ) การพาความร้อนจาก Combustion Zone ทำได้ยาก จึงทำให้อุณหภูมิในช่วงแรกค่อนข้างต่ำมาก T1-T2 อุณหภูมิเพิ่มอย่างช้า ( $< 100 \text{ }^\circ\text{C}$ ) ที่ระดับ T3 เพิ่มขึ้นไม่มาก ( $\sim 300 \text{ }^\circ\text{C}$ ) และที่ระดับ T4-T5 ซึ่งเป็น Combustion Zone เป็นช่วงที่มีการป้อนอากาศ หรือ ช่วงของการเผาไหม้ พบว่าอุณหภูมิสูงสุดแค่ประมาณ  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  ซึ่งถือว่าต่ำมาก ตามทฤษฎีของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ที่ระดับนี้จะถูกเรียกว่า Hot Zone หรือ Heat Haerth โดยทั่วไปควรที่จะมีอุณหภูมิมากกว่า  $800 \text{ }^\circ\text{C}$  เนื่องจากเป็นโซนที่เกิดจากกระบวนการ Combustion เพื่อถ่ายเทให้กับบริเวณรอบๆ เตา (Higman & Van der Burgt, 2008; Arjarn et al., 2012)

นอกจากนี้ยังเห็นได้ว่าการเดินระบบ เมื่ออัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงเพิ่มสูงขึ้น มีแนวโน้มว่าให้อุณหภูมิในเตาจะเพิ่มสูงขึ้นด้วย ทั้งนี้การที่อุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์สูง และพอเหมาะจะเป็นผลดีต่อการเกิดปฏิกิริยาอุณหเคมี และการเกิดแก๊สเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ ใน Reduction zone (Arjarn et al., 2012, 2013)



รูปที่ 4.5 ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ (Temperature profile) ของเชื้อเพลิงทั้ง 4 ประเภท

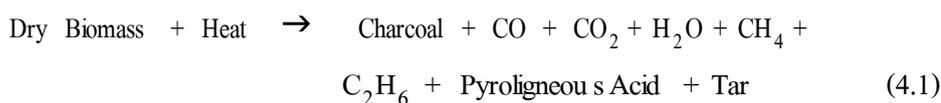
#### 4.2.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง

ด้วยการศึกษาเสถียรภาพของการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงขยะ RDF-5 กับระบบแก๊สซิฟิเคชัน มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสถานะของการเดินระบบที่มีความต่อเนื่อง และสามารถเดินระบบได้ในระยะยาว (Long term condition) ตลอดจนสามารถผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าพลังงานความร้อนของแก๊ส (Calorific value : LHV) สูงเพียงพอโดยควรจะมีค่ามากกว่า  $4.0 \text{ MJ/Nm}^3$  สำหรับใช้งานในรูปแบบความร้อน (กรณีที่จะนำไปใช้ประโยชน์ได้ ในกรณีการผลิตไฟฟ้ากับเครื่องยนต์แก๊ส ค่าความร้อนของแก๊สจำเป็นต้องสูงมากกว่า  $4.2 \text{ MJ/Nm}^3$  อ้างอิงจาก Quakk et al., 1999) ทั้งนี้ เนื่องจากต้องพิจารณาในแง่ของความเป็นไปได้ในการนำแก๊สเชื้อเพลิงไปใช้ประโยชน์ได้จริงต่อไป

ปฏิกิริยาอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง มีผลต่ออุณหภูมิและการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ ตลอดจนองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ โดยสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

Drying Zone คือช่วงที่ความชื้นในเชื้อเพลิงถูกกำจัดออก โดยเกิดที่ระยะความสูง T1-T3 ซึ่งเป็นความสูงช่วงบนของเตา ตามที่ได้กล่าวมา

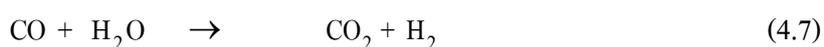
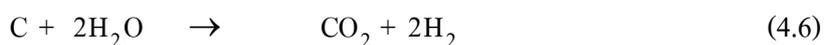
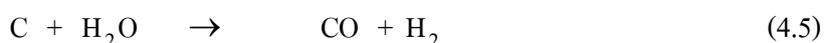
Pyrolysis Zone หรือ Distillation โดยเกิดที่ระยะความสูง T3-T4 ช่วงอุณหภูมิ  $200-500^\circ\text{C}$  ในช่วงนี้ถ้าอุณหภูมิของเตาปฏิกรณ์สูงพอเหมาะ โดยผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นประกอบไปด้วยทั้งของแข็ง ของเหลว สารอินทรีย์ระเหยง่าย และแก๊ส (Kirubakaran et al., 2007) ดังสมการที่ (4.1)



Combustion หรือ Oxidation Zone ในช่วงที่อุณหภูมิที่สุด คือจุดที่ป้อนอากาศเข้าสู่เตา โดยเกิดที่ระยะความสูง T4-T5 ช่วงนี้จะเป็นหัวใจ Heat Hearth หรือ Hot Zone ที่เกิดกระบวนการ Combustion หรือ Oxidation เมื่อเชื้อเพลิงถูกกระตุ้นด้วยความร้อนจะลุกไหม้เกิดปฏิกิริยาอุณหภูมิระหว่างแก๊สออกซิเจนในอากาศกับคาร์บอนและไฮโดรเจน ซึ่งอยู่ในเชื้อเพลิง ผลของปฏิกิริยาดังกล่าวก่อให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ ดังสมการที่ (4.2) และ (4.3)



Reduction Zone จะเกิดที่ระยะความสูงระหว่าง T5-T6 จะเป็นช่วง มีอุณหภูมิในช่วง 500-700°C ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจาก Zone ก่อนหน้านี้จะถูกนำมาใช้เพื่อเป็นสารตั้งต้น โดยปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในช่วง T4-T5 นี้คือปฏิกิริยาของ C กับ CO<sub>2</sub> เกิดเป็น CO ดังสมการที่ (4.4) เรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น คือ Boudouard Reaction และจะเกิดปฏิกิริยา Water Shift Reaction โดยเป็นปฏิกิริยาของ C กับ H<sub>2</sub>O เกิดเป็น H<sub>2</sub> ดังสมการที่ (4.5) ซึ่งปฏิกิริยาทั้งสองเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อนและเป็นปฏิกิริยาหลักที่ทำให้เกิดแก๊สเชื้อเพลิงที่ต้องการ คือ CO และ H<sub>2</sub> สำหรับกรณีเชื้อเพลิงที่มีความชื้นสูง ปริมาณน้ำส่วนเกิน (H<sub>2</sub>O) จะทำปฏิกิริยากับ C และ CO ต่อเนื่องทำให้ปริมาณ CO ลดลงและมีปริมาณแก๊ส CO<sub>2</sub> สูงขึ้น ดังสมการที่ (4.6) และ (4.7) ส่งผลให้ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้มีค่าลดลง จึงจำเป็นต้องควบคุมความชื้นของเชื้อเพลิงให้มีค่าต่ำ ทั้งนี้ H<sub>2</sub> บางส่วนจะทำปฏิกิริยากับ C ทำให้เกิดแก๊สมีเทนซึ่งเป็นปฏิกิริยาหลักของการผลิตแก๊สมีเทน ดังสมการที่ (4.8) ปฏิกิริยานี้เรียกว่า Methane Production หรือ Methanization



คุณสมบัติของแก๊สเชื้อเพลิง และค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิง จากการเดินระบบต่อเนื่อง สำหรับเชื้อเพลิงทั้ง 4 ประเภท ที่ อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงทั้ง 3 ระดับ คือ 130 Nm<sup>3</sup>/hr, 170 Nm<sup>3</sup>/hr และ 210 Nm<sup>3</sup>/hr ดังแสดงใน ตารางที่ 4.7 ซึ่งสรุปได้ดังต่อไปนี้

1) เชื้อเพลิง WC : พบว่า สามารถเดินระบบอย่างเสถียรต่อเนื่องตลอดระยะเวลา 12 ชั่วโมง ที่อัตราการไหลของแก๊สทั้ง 3 ระดับ ผลิตแก๊สเชื้อเพลิงได้คุณภาพสม่ำเสมอ โดยพบว่าที่อัตราการไหลของแก๊สที่ระดับ 210 Nm<sup>3</sup>/hr มีค่าความร้อนสูงสุด คือ 5.72 MJ/Nm<sup>3</sup> เพียงพอสำหรับนำไปใช้ประโยชน์ได้ต่อไป ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยอื่นๆ ที่ใช้ไม้เป็นเชื้อเพลิงในการเดิน

ระบบสำหรับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Zainal, 2002; Vervaeke et al., 200; Bhattacharya et al., 2007; Arjham et al., 2012)

2) เชื้อเพลิงขยะ RDF-5/WC (50/50) : พบว่า สามารถเดินระบบอย่างเสถียร ต่อเนื่องตลอดระยะเวลา 12 ชั่วโมง ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าต่ำกว่าเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงไม้สับ ที่อัตราการไหลของแก๊สทั้ง 3 ระดับ สามารถผลิตแก๊สเชื้อเพลิงได้คุณภาพสม่ำเสมอ โดยพบว่าที่อัตราการไหลที่ระดับ 210 Nm<sup>3</sup>/hr มีค่าความร้อนสูงสุดที่สุด คือ 5.27 MJ/Nm<sup>3</sup> ค่าความร้อนของแก๊สเพียงพอสำหรับนำไปใช้ประโยชน์ได้ต่อไป

3) เชื้อเพลิงขยะ RDF-5/WC (70/30) : พบว่า สามารถเดินระบบอย่างเสถียร ต่อเนื่องตลอดระยะเวลา 12 ชั่วโมง แต่ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าต่ำลดลง โดยที่ 130 Nm<sup>3</sup>/hr 170 Nm<sup>3</sup>/hr และ 210 Nm<sup>3</sup>/hr มีค่าความร้อนของแก๊สเพียง 4.17 4.46 4.96 MJ/Nm<sup>3</sup> ตามลำดับ

4) เชื้อเพลิงขยะ RDF-5: พบว่า ไม่สามารถเดินระบบต่อเนื่อง ระยะเวลาที่เดินระบบได้นานที่สุดคือ 4 ชั่วโมง และเกิดปัญหาหลักคือ อุดหนุมิในเตาปฏิกรณ์ต่ำ เนื่องจากผลของการถ่ายเทความร้อนไม่ต่อเนื่อง จึงมีผลให้ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าต่ำ 3.64 - 3.79 MJ/Nm<sup>3</sup>

กรณีเช่นนี้ อาจจะนำแก๊สไปใช้ในรูปของความร้อน อาทิ นำแก๊สเชื้อเพลิงเข้าไปเผาไหม้ในหม้อไอน้ำ เพื่อผลิตไอน้ำแล้วนำไปหมุนกังหันไอน้ำผลิตไฟฟ้า หากต้องการนำแก๊สเชื้อเพลิงนี้มาใช้ผลิตพลังงานโดยตรงโดยส่งเข้าเครื่องยนต์สันดาปภายใน เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า อาจจำเป็นต้องใช้เครื่องยนต์คู่ควบดีเซลร่วมกับแก๊สเชื้อเพลิง (Dual fuel internal combustion engine) ผลการวิจัยนี้ สอดคล้องกับ ปรัชญา กริโส และคณะ (2012) ที่ศึกษาการนำเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งมาเดินระบบกับเครื่องผลิตแก๊สเชื้อเพลิงระบบแก๊สซิฟิเคชันแบบไหลลงขนาด 50 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ซึ่งก็พบว่ามีความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิง มีค่าสูงสุดเพียง 3.12 MJ/Nm<sup>3</sup>

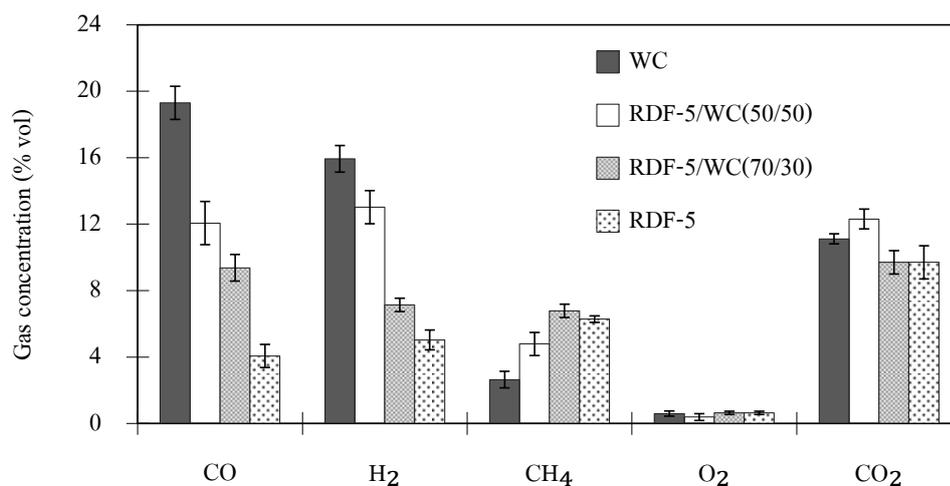
ตารางที่ 4.7 ผลของการศึกษาเสถียรภาพของการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงขยะ RDF-5 กับระบบ C-G

ประเภทเชื้อเพลิง	คุณสมบัติของแก๊สเชื้อเพลิง สัดส่วนโดยปริมาตรเฉลี่ย (%vol)						ค่าความร้อน (MJ/Nm <sup>3</sup> )	ระยะเวลาการเดินระบบได้ต่อเนื่องสูงสุด (hr)
	Flow (Nm <sup>3</sup> /hr)	CO	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>		
WC	130	15.64	12.11	1.81	1.90	13.36	4.39	12
	170	18.17	13.48	2.18	0.46	11.98	5.06	12
	210	19.31	15.93	2.64	0.60	11.12	5.72	12

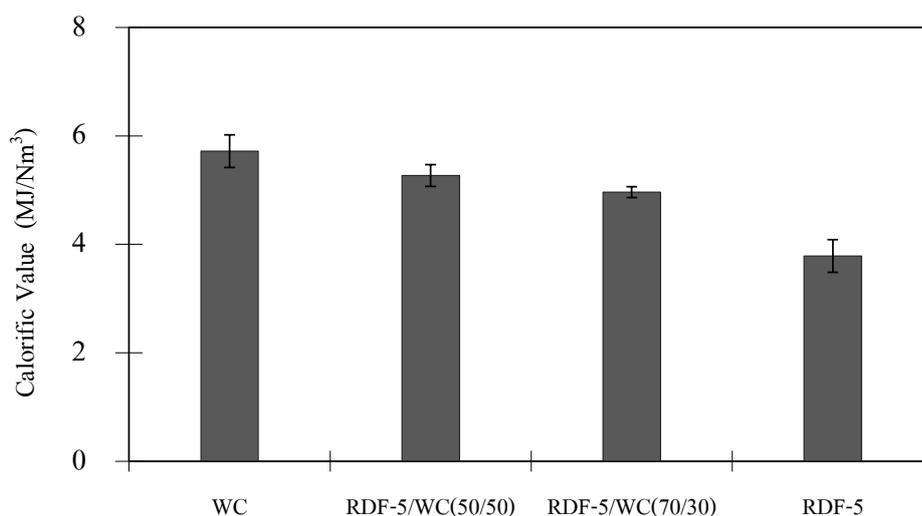
ตารางที่ 4.7 ผลของการศึกษาเสถียรภาพของการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงขยะ RDF-5 กับระบบ C-G (ต่อ)

ประเภท เชื้อเพลิง	คุณสมบัติของแก๊สเชื้อเพลิง สัดส่วนโดยปริมาตรเฉลี่ย (%vol)						ค่าความ ร้อน (MJ/Nm <sup>3</sup> )	ระยะเวลา การเดิน ระบบได้ ต่อเนื่อง สูงสุด (hr)
	Flow (Nm <sup>3</sup> /hr)	CO	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>		
RDF-5 /WC(50/50)	130	10.77	12.56	4.40	0.91	13.69	4.88	12
	170	11.19	12.98	4.44	0.62	13.06	5.01	12
	210	12.06	13.03	4.79	0.39	12.31	5.27	12
RDF-5 /WC(70/30)	130	8.13	6.87	5.34	0.92	11.07	4.17	12
	170	8.88	6.90	5.79	0.88	10.37	4.46	12
	210	9.37	7.13	6.78	0.64	9.70	4.96	12
RDF-5	130	7.87	5.53	4.56	1.44	10.58	3.64	4
	170	4.28	5.20	5.69	0.88	10.37	3.59	4
	210	4.07	5.03	6.28	0.64	9.70	3.79	4

จาก ตารางที่ 4.7 เห็นว่า ที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงที่ระดับ 210 Nm<sup>3</sup>/hr ให้แก๊สเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพสูงด้านค่าความร้อนในทุกประเภทเชื้อเพลิง จึงถือระดับการควบคุมอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงที่ระดับ 210 Nm<sup>3</sup>/hr ไปใช้ในการเดินระบบต่อเนื่อง สำหรับการเดินระบบแบบ Long term condition เพื่อเปรียบเทียบและประเมินประสิทธิภาพและสมรรถนะของระบบ C-G กับ ระบบ P-G ทั้งนี้ พิจารณา รูปที่ 4.6 และ 4.7 ซึ่งเป็นการนำเสนอข้อมูลองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง และค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิง ที่ระดับอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง 210 Nm<sup>3</sup>/hr พบว่า องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงคือ CO, H<sub>2</sub> มีแนวโน้มต่ำลงเมื่อสัดส่วนของ RDF-5 สูงขึ้น ซึ่งส่งผลให้ค่าความร้อนของแก๊สมีค่าต่ำลง อย่างไรก็ตาม เมื่อสัดส่วนของ RDF-5 เพิ่มขึ้น จะมีแนวโน้มของปริมาณของ CH<sub>4</sub> เพิ่มขึ้น ซึ่งอธิบายได้ว่า เนื่องจาก RDF-5 มีสัดส่วนของสารไฮโดรคาร์บอนเป็นองค์ประกอบสูง (Dalai et al., 2009) โดยพบว่า CH<sub>4</sub> ที่เกิดจากการใช้เชื้อเพลิงขยะ RDF-5 มีค่าประมาณ 6.28 %vol เมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงไม้ซึ่งจะมีค่าต่ำกว่า (~1.28 - 2.64 %vol) อย่างไรก็ตาม ภาพรวมเชื้อเพลิงขยะ RDF-5 เป็นเชื้อเพลิงที่ใช้เดินระบบ กับเตาแบบ Fixed-bed downdraft gasifier ได้ค่อนข้างยาก เชื้อเพลิงเคลื่อนลงสู่ด้านล่างเตา การเดินระบบไม่เสถียรส่งผลให้ ความสามารถในการผลิตองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงโดยรวมทุกตัวมีค่าต่ำกว่าค่าพลังงานที่สะสมอยู่ในเชื้อเพลิงขยะ RDF-5



รูปที่ 4.6 องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงต่างๆ ที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง 210 Nm<sup>3</sup>/hr



รูปที่ 4.7 ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิง ที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงที่ระดับ 210 Nm<sup>3</sup>/hr

โดยสรุป สำหรับเชื้อเพลิงขยะ RDF-5 นั้น เนื่องจากเกิดข้อจำกัดที่เป็นเชื้อเพลิงที่มีความหนาแน่นสูง (~560 kg/m<sup>3</sup>) การถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นช้า อุณหภูมิเตาปฏิกรณ์ต่ำมาก (600 °C) ซึ่งก็สอดคล้องกับผลคุณภาพของแก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าต่ำ จึงสรุปได้ว่าเชื้อเพลิงขยะ RDF-5 ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงกับระบบแก๊สซิฟิเคชัน มีสัดส่วนของคาร์บอนคงตัวต่ำ องค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นสารระเหย เมื่อเผาไหม้จึงคงเหลือถ่านชาร์น้อย เนื่องจากเดินระบบยากและไม่เสถียรภาพ

การคัดเลือกเชื้อเพลิง สำหรับการศึกษานี้เปรียบเทียบกับกรณีเดินระบบพลาสมา แก๊สซิฟิเคชัน (P-G) จึงมีข้อสรุปว่า เชื้อเพลิงขยะ RDF-5/WC (70/30) มีความเหมาะสมที่สุด ด้วยเหตุผล 2 ประการ คือ

1) เป็นเชื้อเพลิงผสมที่มีสัดส่วนของ เชื้อเพลิงขยะ RDF-5 มากที่สุด สามารถเดินระบบ แก๊สซิฟิเคชันได้เสถียร ต่อเนื่องได้ถึง 12 ชั่วโมง ซึ่งสำคัญอย่างยิ่งต่อการเก็บข้อมูลและการตรวจวัด พารามิเตอร์ ด้านมลพิษสิ่งแวดล้อม

2) ถึงแม้ว่าเชื้อเพลิง RDF-5/WC (70/30) สามารถเดินระบบได้เสถียรและต่อเนื่อง สำหรับระบบ C-G แต่ยังพบข้อจำกัดว่า ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ยังไม่สูงมาก และ ผลการประเมินประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงก็มีค่าต่ำ ทั้งนี้ด้วยสาเหตุสำคัญคือ เมื่อเชื้อเพลิง มีความหนาแน่นเพิ่มสูงขึ้น การพาความร้อน และการถ่ายเทความร้อนในเตาปฏิกรณ์ เกิดขึ้นช้าลง ดังนั้นการนำพลาสมาเข้ามาช่วยในระบบ C-G จึงมีส่วนช่วยให้การเพิ่มอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์สูงได้ อย่างรวดเร็ว ซึ่งส่งผลให้คุณภาพของแก๊สเชื้อเพลิง เพิ่มสูงขึ้น (จะกล่าวในลำดับต่อไป)

#### 4.2.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณทาร์และฝุ่น

การวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบปนเปื้อนในแก๊สเชื้อเพลิงจะทำการวิเคราะห์ทาร์และฝุ่น (Tar and dust) ในแก๊สเชื้อเพลิงซึ่งได้ผ่านการทำความสะอาดจาก 4 ระบบ คือ 1) Cyclone collector 2) Water scrubber 3) Chiller scrubber และ 4) Fabric filter ผลการศึกษาดังแสดงใน ตารางที่ 4.8 พบว่า มีแนวโน้มของปริมาณการปนเปื้อนของทาร์และฝุ่น ในแก๊สเชื้อเพลิงเรียงตามลำดับ คือ WC > RDF-5/WC (50/50) > RDF-5/WC (70/30) โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อัตราการไหลของแก๊สที่ ระดับสูงขึ้นไป จะยังมีแนวโน้มของปริมาณการปนเปื้อนของทาร์และฝุ่นมากขึ้น อธิบายได้ว่า เนื่องจากไม้สับมีลักษณะของเชื้อเพลิงที่มีชิ้นส่วนขนาดเล็ก มีความหนาแน่นต่ำ เมื่อปรับความเร็ว ในเส้นทางเพื่อเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สจะมีผลทำให้ดิสกรีความปั่นป่วนเพิ่มขึ้น จึงเกิดการฟุ้ง กระจายของฝุ่นและอนุภาคขนาดเล็กในเตาปฏิกรณ์มากยิ่งขึ้น

อย่างไรก็ดีปริมาณทาร์และฝุ่นที่ผ่านกระบวนการทำความสะอาดแล้วพบว่า เชื้อเพลิงทั้ง 3 ชนิด อยู่ในเกณฑ์ปริมาณที่ยอมรับได้ มีปริมาณทาร์และฝุ่น เท่ากับ (23.8, 24.61 mg/Nm<sup>3</sup>), (21.01, 21.45 mg/Nm<sup>3</sup>) และ (11.72, 21.65 mg/Nm<sup>3</sup>) ตามลำดับ และสอดคล้องกับงานวิจัยของ kaupp et al. (1981); Groeneveld et al. (1983); Reed et al. (1983) ที่ได้สรุปว่าการปนเปื้อนของทาร์และฝุ่น โดยทั่วไปของเทคโนโลยี Downdraft gasifier จะมีค่าประมาณ 50-500 mg/ Nm<sup>3</sup> จึงสรุปได้ว่า คุณภาพของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ ในแง่ของการปนเปื้อนมลพิษดี

สำหรับที่เชื้อเพลิงขยะ RDF-5 พบว่า มีปริมาณของทาร์และฝุ่นสูงมากและไม่เป็นไปตามแนวโน้มของเชื้อเพลิงอื่น อธิบายได้ว่า เนื่องจากการทดลองนี้เกิดปัญหาเชื้อเพลิงไหลลงไม่

ต่อเนื่อง ส่งผลให้การเดินระบบไม่เสถียร จึงต้องมีการดึงแก๊สออกบ่อยครั้ง เพื่อให้มีการไหลลงของ เชื้อเพลิง ซึ่งส่งผลให้เกิดการก่อควันระบบ โดยทั่วไปการดึงแก๊สออกจากเตาปฏิกรณ์ ควรให้มี ปริมาณใกล้เคียงหรือไม่น้อยกว่า สัดส่วนแก๊สที่ตามการวิเคราะห์คุณสมบัติของเชื้อเพลิงแบบ ประมาณ (แก๊ส ~10.15%) ทั้งนี้ จากผลประเมินอัตราการดึงแก๊สออก ของเชื้อเพลิง RDF-5 มีค่าเท่ากับ 22.31% 20.15% 21.46% (ดู ตารางที่ 4.8) ในอัตราการไหลของแก๊สทั้ง 3 ระดับ ตามลำดับ ซึ่งการดึงแก๊สจำนวนบ่อยครั้ง ยังส่งผลให้อุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ลดลง จึงอาจเป็นอีกสาเหตุให้มี ปริมาณฝุ่นและทาร์ในระบบสูง เนื่องจากฝุ่นและทาร์ถูกเผาไหม้ได้น้อย

#### 4.2.4 ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Gasification efficiency)

ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการเปลี่ยนรูป พลังงานที่สะสมอยู่ในเชื้อเพลิงแข็ง ไปเป็นแก๊สเชื้อเพลิงที่สามารถเผาไหม้ได้ (Combustible gas) ในระบบ C-G ตารางที่ 4.8 แสดงผลประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Cold-gas efficiency :  $\eta_{cg}$ ) ของแต่ละประเภทเชื้อเพลิง ซึ่งสรุปภาพรวมได้ว่า แนวโน้มของประสิทธิภาพการผลิตแก๊ส เชื้อเพลิงของเชื้อเพลิงทั้ง 4 ประเภท จะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลของแก๊สเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับ ผลของอุณหภูมิ ผลค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิง ในหัวข้อที่ผ่านมา ทั้งนี้สรุปรายละเอียด ได้ ดังต่อไปนี้

1) เชื้อเพลิง WC: เนื่องจากเชื้อเพลิงไม้ถือเป็นเชื้อเพลิงที่มีความเหมาะสมกับ ระบบแก๊สซิฟิเคชัน จึงส่งผลให้การเดินระบบราบเรียบ พบว่าประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง ที่ ระดับอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงที่  $210 \text{ Nm}^3/\text{hr}$  โดยพบว่า  $\eta_{cg}$  มีค่า 71.18% ซึ่งสอดคล้องกับ งานวิจัยอื่นๆ (Zainal et al. 2002; Arjharh et al, 2012)

2) เชื้อเพลิง RDF-5/WC (50/50) : พบว่าประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง ที่ ระดับอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงที่  $210 \text{ Nm}^3/\text{hr}$  ลดลงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงไม้ โดย พบว่า  $\eta_{cg}$  มีค่า 64.09%

3) เชื้อเพลิง RDF-5/WC (70/30) : พบว่าประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง ที่ ระดับอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงที่  $210 \text{ Nm}^3/\text{hr}$  ลดลงอย่างมาก ซึ่งเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงไม้ และเชื้อเพลิงผสมที่ 50:50 (%wt) โดยพบว่า  $\eta_{cg}$  มีค่า 40.30% ซึ่งก็สอดคล้องกับ ผลของ องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง และ ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิง ที่มีค่าต่ำ

การนำพลาสติกมาเข้ามาช่วยในระบบ C-G จะมีส่วนช่วยให้การเพิ่มอุณหภูมิในเตา ปฏิกรณ์สูงได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งจะส่งผลให้คุณภาพของแก๊สเชื้อเพลิง เพิ่มสูงขึ้นได้

4) เชื้อเพลิงขยะ RDF-5 เนื่องจากการเดินระบบไม่มีความเสถียร คุณภาพแก๊สเชื้อเพลิงมีต่ำมาก จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงต่ำมากเช่นกัน โดยพบว่า  $\eta_{cg}$  มีค่า 30.74 %

ตารางที่ 4.8 ผลประเมินประสิทธิภาพการผลิตพลังงานของระบบ C-G

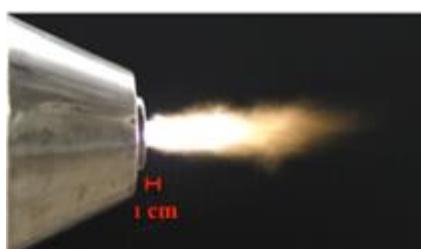
ประเภทเชื้อเพลิง	Flow (Nm <sup>3</sup> /hr)	อัตราการใช้เชื้อเพลิง (kg/hr)	อัตราการเกิดเถ้า (kg/hr)	อัตราการดึงเถ้าออก (%)	คุณภาพของแก๊ส (mg/Nm <sup>3</sup> )		ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (%) ( $\eta_{cg}$ )
					ทาร์	ฝุ่น	
WC	130	71.65	2.15	3.00	10.56	12.32	50.14 ± 0.41
	170	98.50	3.11	3.16	14.77	16.95	59.26 ± 0.62
	210	120.50	4.10	3.40	23.8	24.61	71.18 ± 0.44
RDF-5 /WC(50/50)	130	58.30	4.56	7.82	8.14	9.22	57.52 ± 0.41
	170	74.30	5.34	7.19	14.75	15.12	60.34 ± 0.37
	210	90.93	5.87	6.46	21.01	21.45	64.09 ± 0.83
RDF-5 /WC(70/30)	130	72.33	8.67	11.98	6.97	7.81	36.93 ± 0.32
	170	98.65	7.8	11.18	10.31	10.45	37.70 ± 0.17
	210	126.90	11.03	11.12	11.72	21.65	40.30 ± 0.52
RDF-5	130	80.67	14.23	22.31	20.23	21.23	26.10 ± 0.21
	170	102.05	20.56	20.15	27.2	25.12	26.61 ± 0.41
	210	115.12	24.71	21.46	31.3	28.1	30.74 ± 0.35

#### 4.3 ผลการศึกษาเสถียรภาพของการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงขยะ RDF-5 กับระบบพลาสติกสซิฟิเคชั่น (P-G)

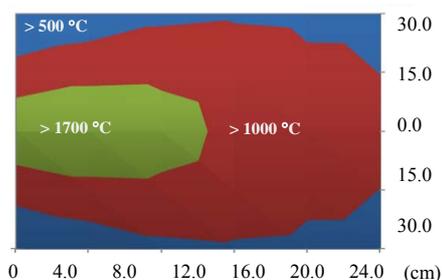
การศึกษาเสถียรภาพของการผลิตพลังงานจากขยะโดยเทคโนโลยีพลาสติกสซิฟิเคชั่น โดยทำการทดลองต่อเนื่องจากหัวข้อ 4.2 ซึ่งได้โดยจะคัดเลือกเชื้อเพลิงที่สามารถผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพ (มีค่าความร้อนมากกว่า 4.0 MJ/Nm<sup>3</sup> สามารถผลิตปริมาณของแก๊สเชื้อเพลิงสูงที่สุดที่อัตราการไหลของแก๊สที่ระดับ 210 Nm<sup>3</sup>/hr และสามารถเดินระบบได้เสถียรถึง 12 ชั่วโมง) โดยได้ข้อสรุปว่า เชื้อเพลิง RDF-5/WC (70/30) มีความเหมาะสมที่สุด

การศึกษาในหัวข้อนี้จะกำหนดปัจจัยการทดสอบเหมือนกัน คือทำการเดินระบบโดยใช้เชื้อเพลิง RDF-5/WC (70/30) ที่อัตราการใช้เชื้อเพลิงเท่ากัน ประมาณ 127 kg/hr ปรับอัตราการไหล

ของแก๊สเชื้อเพลิง เท่ากันที่ระดับ  $210 \text{ Nm}^3/\text{hr}$  แต่จะใช้พลังงานความร้อนจากพลาสมาอาร์คเป็นความร้อนช่วยในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Plasma-assisted gasification) ซึ่งในที่นี้เรียกว่าระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน (งานวิจัยนี้ใช้สัญลักษณ์ P-G) โดยการทดลองกำหนดพลังงานที่ป้อนเข้าระบบคงที่เท่ากับ 36 กิโลวัตต์ หรือ ประมาณ 70% ของกำลังสูงสุดของระบบ (50 kW) เนื่องจากการเดินระบบต่อเนื่อง ทั้งนี้เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับระบบพลาสมาอาร์คได้ ถ้าต้องเดินระบบที่กำลังสูงสุดเป็นเวลานาน การควบคุมระบบโดยการปล่อยกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 120 A ที่ความต่างศักย์ 300 V และกำหนด แรงดันของอากาศที่ 7 bar โดยได้ทำการทดลองการกระจายของอุณหภูมิของพลาสมาอาร์ค ดังแสดง ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการเพิ่มอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเคชันต่อประสิทธิภาพการผลิตพลังงาน และพลังงานสุทธิที่จะได้จากระบบ ผลการศึกษา สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้



(ก) ลักษณะของพลาสมาอาร์ค



(ข) การกระจายอุณหภูมิของพลาสมาอาร์ค

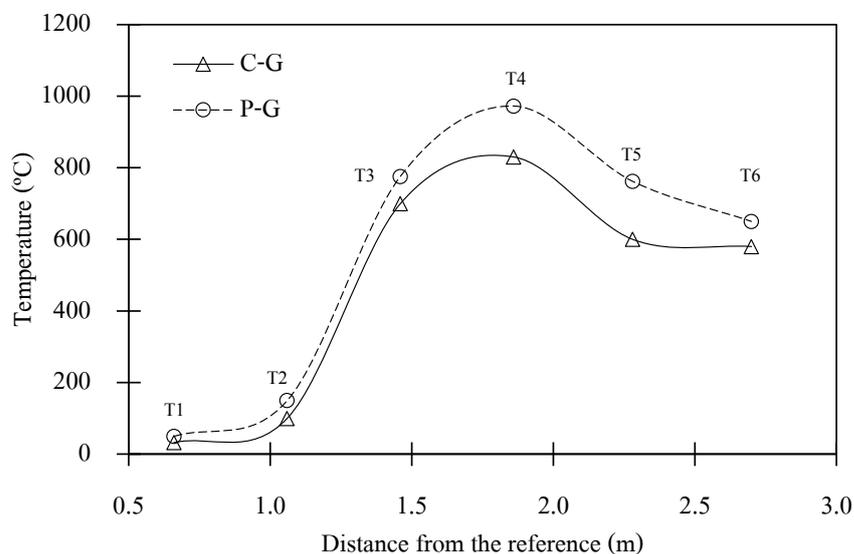
รูปที่ 4.8 ลักษณะของพลาสมาอาร์คและอุณหภูมิจากพลาสมาที่การเดินระบบ 36 kW

#### 4.3.1 ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ (Temperature profile)

การศึกษาชั้นของอุณหภูมิภายในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง เพื่ออธิบายปฏิกิริยาอุณหเคมีที่เกิดขึ้นในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง เมื่อเพิ่มพลังงานความร้อนจากพลาสมาอาร์ค เป็นความร้อนช่วยสามารถสรุปได้ว่า เชื้อเพลิง RDF-5/WC (70/30) ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงที่มีความหนาแน่นสูง ( $459 \text{ kg/m}^3$ ) ในกรณีการเดินระบบ C-G การพาความร้อนจาก Combustion zone เกิดขึ้นได้ช้า แต่เมื่อมีการเพิ่มความร้อนจากพลาสมาเข้าไปจะส่งผลให้อุณหภูมิสูงขึ้นในทุกโซนของการเผาไหม้ จากรูปที่ 4.9 เปรียบเทียบเส้นการกระจายตัวของอุณหภูมิเปรียบเทียบระหว่างระบบ C-G กับ ระบบ P-G โดยที่ T1 ยังมีอุณหภูมิใกล้เคียงกัน  $35\text{-}50 \text{ }^\circ\text{C}$  เนื่องจากเชื้อเพลิงหนาแน่นมาก ความร้อนจาก Combustion ไม่สามารถแผ่มาถึง ที่ระดับ T2 อุณหภูมิจาก  $\sim 85 \text{ }^\circ\text{C}$  (P-G) เพิ่มขึ้นเป็น  $\sim 150 \text{ }^\circ\text{C}$  (C-G) และที่ระดับ

T3 อุณหภูมิจาก ~ 700 °C (C-G) เพิ่มขึ้นเป็น ~800 °C (P-G) และที่ระดับ T4-T5 อุณหภูมิจาก ~ 800 °C (C-G) เพิ่มขึ้นเป็น ~ 1,000 °C (P-G) เห็นได้ว่าเพิ่มความร้อนให้กับระบบด้วยพลาสมา (plasma arc) ช่วยให้เกิดการพาความร้อน และการถ่ายเทความร้อนในเตาปฏิกรณ์ได้มากขึ้น

เนื่องจากตำแหน่งที่เพิ่มความร้อนจากพลาสมาอาร์ค คือ ตำแหน่ง Combustion zone ตามทฤษฎีของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ที่ระดับนี้จะถูกเรียกว่า Hot zone หรือ Heat haerth ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนและความร้อนที่เกิดขึ้นนี้จะถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาคูดความร้อนในโซน Reduction และโซน Pyrolysis ซึ่งเป็นโซนที่เกิดองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงต่างๆ อุณหภูมิที่สูงขึ้น มีผลให้เกิดองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงได้ดีขึ้น (Arjham et al., 2012)

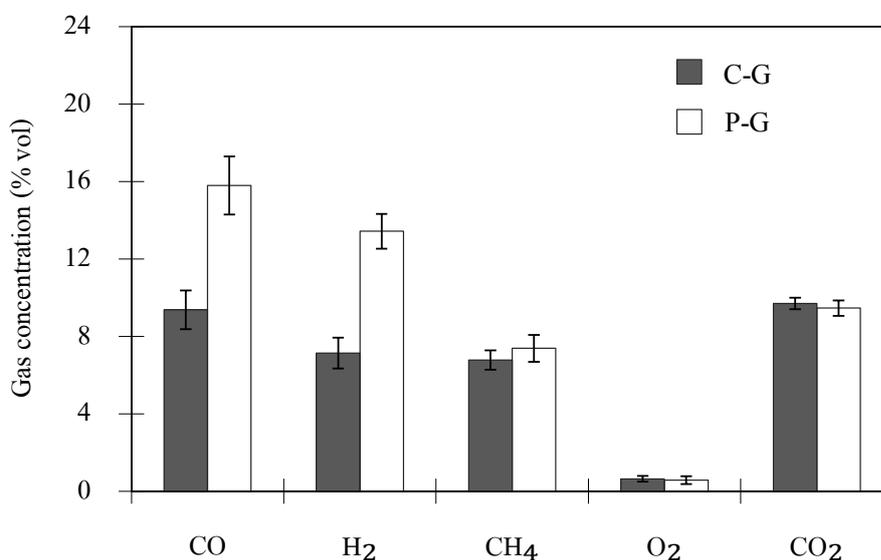


รูปที่ 4.9 ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ (Temperature profile) เปรียบเทียบระหว่างการเดินระบบ C-G กับระบบ P-G

#### 4.3.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง

องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง ระหว่างระบบ C-G และระบบ P-G ดังแสดงในรูปที่ 4.10 พบว่า มีองค์ประกอบของแก๊ส CO H<sub>2</sub> CH<sub>4</sub> เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจน เมื่อมีการเพิ่มความร้อนให้กับระบบ ซึ่งเป็นไปตามสมมติฐาน คือ เมื่อมีเพิ่มพลังงานความร้อนจากพลาสมาอาร์ค ความร้อนในเตาปฏิกรณ์สูงขึ้น สามารถเพิ่มสัดส่วนของแก๊สเชื้อเพลิงได้ โดยพบว่า องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง CO H<sub>2</sub> และ CH<sub>4</sub> จาก 9.3 7.71 และ 6.78 (%vol) เพิ่มขึ้นเป็น 15.80, 13.43 และ 7.38 (%vol) ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยอื่น ที่ได้อธิบายว่า อุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ที่สูงและพอเหมาะจะ

เป็นผลดีต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และการเกิดแก๊สเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ ใน Reduction zone (Higman & Van der Burgt, 2008; Arjhan et al., 2012, 2013)



รูปที่ 4.10 องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงต่างๆ ระหว่างระบบ C-G และระบบ P-G

#### 4.4 ผลการศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะการผลิตพลังงานระบบแก๊สซิฟิเคชัน (C-G) กับระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน (P-G)

ผลการศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะด้านการผลิตพลังงาน ระหว่างระบบ C-G กับระบบ P-G ดังแสดงใน ตารางที่ 4.9 โดยกรณีการเดินระบบ P-G มีการป้อนพลังงานเข้าระบบ คงที่เท่ากับ 36 กิโลวัตต์ (ประเมินเป็นค่าพลังงานจากพลาสมาอาร์คต่อชั่วโมงได้เท่ากับ ~129.6 MJ/hr) แต่มีการควบคุมปัจจัยอื่นเหมือนกัน คือ ป้อนเชื้อเพลิงเท่ากัน (126.90 kg/hr) และ ควบคุมอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงเท่ากัน (210 Nm<sup>3</sup>/hr) ซึ่งประเมินเป็นพลังงานจากเชื้อเพลิง เข้าระบบเท่ากัน (~ 2587.31 MJ/hr)

จากการคำนวณ อัตราส่วนเทียบเท่า (Equivalence ratio: ER) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่าง อัตราส่วน อากาศ : เชื้อเพลิง ที่ใช้จริง (actual A:F ratio) ต่อ อัตราส่วนอากาศ : เชื้อเพลิงที่ต้องการ ในการเผาไหม้สมบูรณ์ (Stoichiometric A:F ratio) ของการเดินระบบเชื้อเพลิงขยะ RDF-5 ต่อ เชื้อเพลิงไม้สับ เท่ากับ 70:30 (%wt) ทั้ง ระบบ C-G และระบบ P-G มีใกล้เคียงกันมาก คือ ER เท่ากับ 0.18 ซึ่งทำให้การศึกษการใช้ความร้อนจากพลาสมา ต่อ อุณหภูมิ คุณภาพของแก๊ส เชื้อเพลิง และประสิทธิภาพของการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง โดยไม่มีปัจจัยอื่นมารบกวน

ผลการประเมินเป็นพลังงานที่ได้จากระบบ สำหรับระบบ P-G ซึ่งสามารถผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนสูงกว่า คือ  $6.88 \text{ MJ/Nm}^3$  ซึ่งเมื่อประเมินเป็นค่าพลังงานของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ จะมีค่าเท่ากับ  $1445 \text{ MJ/hr}$  ในขณะที่ระบบ C-G ซึ่งผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนเพียง  $4.96 \text{ MJ/Nm}^3$  ซึ่งเมื่อประเมินเป็นค่าพลังงานของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ จะมีค่าเท่ากับ  $1,042 \text{ MJ/hr}$  โดยเมื่อเปรียบเทียบการใช้ความร้อนจากพลาสติกเข้ามาช่วยในระบบ สำหรับระบบ P-G เห็นได้ว่า จะส่งผลให้พลังงานของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้สูงขึ้น อัตราส่วนพลังงานจากแก๊สเชื้อเพลิงต่อเชื้อเพลิงที่เข้าระบบ สูงขึ้น จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง เพิ่มขึ้น ~13% คือ ระบบ แก๊สซิฟิเคชันมีค่า  $\eta_{cg}$  เท่ากับ 40.30% และ ระบบพลาสติกแก๊สซิฟิเคชันมีค่า  $\eta_{cg}$  เท่ากับ 53.21%

ตารางที่ 4.9 การเปรียบเทียบสมรรถนะการผลิตพลังงานระหว่างระบบ C-G และระบบ P-G

พารามิเตอร์	ระบบ C-G	ระบบ P-G
อัตราการใช้เชื้อเพลิง (kg/hr)	$126.9 \pm 1.07$	$126.9 \pm 1.12$
อัตราการเกิดเถ้า (kg/hr)	$14.23 \pm 0.35$	$14.23 \pm 0.45$
อัตราการดึงเถ้าออก (%)	$11.12 \pm 0.56$	$11.12 \pm 0.45$
ระยะเวลาการทำงาน (hr)	12	12
ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (MJ/kg)	$20.38 \pm 0.13$	$20.38 \pm 0.18$
พลังงานของเชื้อเพลิงเข้าระบบ (MJ/hr)	$2587.31 \pm 2.11$	$2587.31 \pm 2.57$
พลังงานจากพลาสติก (MJ/hr)	-	129.6
อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง ( $\text{Nm}^3/\text{hr}$ )	210	210
ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิง (LHV, $\text{MJ/Nm}^3$ )	$4.96 \pm 0.22$	$6.88 \pm 0.28$
พลังงานของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ที่สภาวะมาตรฐาน (MJ/hr)	$1042 \pm 2.89$	$1445 \pm 2.76$
อัตราส่วนปริมาตรแก๊สเชื้อเพลิง/เชื้อเพลิงที่เข้าระบบ (Volume Syngas yield, $\text{Nm}^3/\text{kg}$ )	$1.66 \pm 0.10$	$1.66 \pm 0.10$
อัตราส่วนพลังงานแก๊สเชื้อเพลิง/เชื้อเพลิงที่เข้าระบบ (Energy yield, MJ/kg)	$8.22 \pm 0.31$	$11.39 \pm 0.56$
ประสิทธิภาพของระบบ (%) (Cold-gas Efficiency) ( $\eta_{cg}$ )	$40.30 \pm 0.41$	$53.21 \pm 0.58$
องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์		
CO (%vol)	$9.37 \pm 0.40$	$15.80 \pm 0.88$
H <sub>2</sub> (%vol)	$7.13 \pm 0.31$	$13.43 \pm 0.56$
CH <sub>4</sub> (%vol)	$6.78 \pm 0.21$	$7.38 \pm 0.34$
O <sub>2</sub> (%vol)	$0.64 \pm 0.02$	$0.57 \pm 0.04$
CO <sub>2</sub> (%vol)	$9.70 \pm 0.93$	$9.46 \pm 0.95$
% คาร์บอนคงเหลือ (Yields of carbon residue)	$36.81 \pm 1.76$	$21.90 \pm 1.63$
คุณภาพของแก๊ส		
ปริมาณทาร์ ( $\text{mg/Nm}^3$ )	$10.33 \pm 1.03$	$5.6 \pm 1.12$
ปริมาณฝุ่น ( $\text{mg/Nm}^3$ )	$20.11 \pm 2.15$	$7.85 \pm 1.02$
ปริมาณทาร์และฝุ่นรวม ( $\text{mg/Nm}^3$ )	$30.44 \pm 2.98$	$13.45 \pm 1.23$

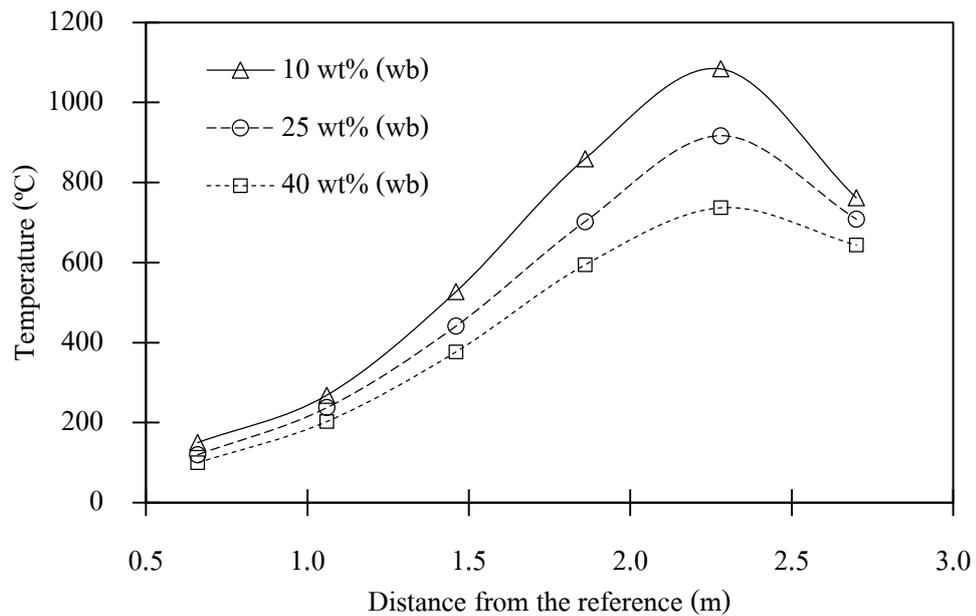
## 4.5 ผลการศึกษาประสิทธิภาพผลิตพลังงานของระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชันต่อการกำจัด Waste reject ที่มีความชื้นระดับต่างๆ

### 4.5.1 การกระจายตัวของอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ (Temperature profile)

การความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในเตาปฏิกรณ์และระยะความสูง โดยวัดอุณหภูมิที่ 6 ชั้นความสูง คือ T1 T2 T3 T4 T5 และ T6 ซึ่งมีความสูงจากระยะอ้างอิง (ความสูงจากด้านบนเตาลงสู่ด้านล่างเตา) เพื่อที่จะได้ระบุช่วงของปฏิกิริยาต่างๆ ที่เกิดขึ้นซึ่งได้แก่ โซนการอบแห้ง (Drying zone) โซนไพโรไลซิส (Pyrolysis zone) โซนการเผาไหม้ (Combustion zone) และ โซนรีดักชัน (Reduction zone)

จากการเดินระบบโดยใช้ Reject waste ที่ความชื้น 3 ระดับ (10% 25% และ 40% wb) สามารถสรุปได้ว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ ดังแสดงได้ตาม รูปที่ 4.10 โดยเมื่อมีการใช้พลาสมาช่วยในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน พบว่าลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิมิมีแนวโน้มในทางเดียวกันคือ อุณหภูมิในทุกชั้น T1-T6 จะลดลงเมื่อความชื้นของเชื้อเพลิงสูงขึ้น โดยที่อุณหภูมิจะค่อยๆ สูงขึ้นจากตำแหน่ง T1-T2 ช่วงนี้มีอุณหภูมิต่ำกว่า 200 °C ซึ่งแสดงถึงช่วงการอบแห้ง (Rajvanshi, 1986) ความชื้นที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงจะถูกความร้อนพาและระเหยออกไปในโซนนี้

หลังจากนั้นอุณหภูมิของเตาปฏิกรณ์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจากตำแหน่ง T3-T4 จะเป็นการกลั่นสลายของเชื้อเพลิงแข็ง หรือกระบวนการไพโรไลซิสในช่วงนี้ และมีการปลดปล่อยสารระเหย ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็น กลุ่มแก๊สไฮโดรคาร์บอน คาร์บอนไดออกไซด์ และทาร์ เหลือไว้เฉพาะส่วนที่เป็นถ่านแข็ง หรือ (Char) ไว้ (Rajvanshi, 1986)



รูปที่ 4.11 ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ (Temperature profile) ของ Waste reject

ทั้งนี้อุณหภูมิของเตาปฏิกรณ์จะเพิ่มขึ้นสูงสุดจากตำแหน่ง T4-T5 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีการป้อนอากาศและความร้อนจากพลาสมาอาร์ค เพิ่มเข้าไป ซึ่งเป็นโซนการเผาไหม้ หรือ Combustion zone จากนั้นช่วงสุดท้ายของเตาเป็นช่วงที่อุณหภูมิลดลงเนื่องจากปฏิกิริยาคูดความร้อน ซึ่งเป็นช่วงที่มีการทำปฏิกิริยาระหว่างแก๊สที่ผลิตจากโซนด้านบนกับถ่านที่เหลือ หรือที่เรียกว่า Reduction zone ทำให้มีการผลิตคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และ (H<sub>2</sub>) โดยทั่วไปอุณหภูมิในช่วงนี้ควรที่จะสูงกว่า 500 °C (Kirubakaran et al., 2009)

ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ (Temperature profile) ของ Waste reject พบว่า ความชื้นมีผลต่อกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเป็นอย่างมาก โดยทั่วไปสำหรับระบบแก๊สซิฟิเคชันแบบไหลลง ความชื้นของเชื้อเพลิงต้องไม่เกิน 20% (wb) (Rajvanshi, 1986) จากการพิจารณาผลของความชื้นของ Waste reject ต่อลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิ พบว่า ที่ความชื้น 10% (wb) จะให้อุณหภูมิเตาสูงสุดที่ 1,100 °C ในช่วงการเผาไหม้ ซึ่งเป็นช่วงที่มีการป้อนพลาสมาเข้าไปในเตาปฏิกรณ์ แต่เมื่อ Waste reject มีความชื้นสูงขึ้น เป็น 25% และ 40% (wb) จะทำให้อุณหภูมิลดลงประมาณ 850 °C (12%) ถึง 650 °C (26%) ตามลำดับ ในความเป็นจริง การป้อนวัตถุดิบที่มีความชื้นสูงแทบจะเป็นไปไม่ได้สำหรับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน เนื่องจากมีการสูญเสียความร้อนไปกับการระเหยน้ำมากเกินไปจนทำให้อุณหภูมิไม่สูงเพียงพอสำหรับการทำ

ปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน อย่างไรก็ตาม การใช้แหล่งความร้อนภายนอกจากพลาสมาทำให้ข้อจำกัดด้านความชื้นของวัตถุดิบลดลงได้

#### 4.5.2 คุณสมบัติของแก๊สเชื้อเพลิง

การเดินระบบในการทดลองนี้ อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงและอัตราการดึงเต้าออกถูกควบคุมที่ระดับ  $210 \text{ Nm}^3/\text{hr}$  และ 14% ตามลำดับ ทั้งนี้ พบว่า การเพิ่มขึ้นของความชื้นของวัตถุดิบจะมีผลให้อัตราการใช้วัตถุดิบเพิ่มขึ้น จากการคำนวณ อัตราส่วนเทียบเท่า (Equivalence ratio: ER) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่าง อัตราส่วน อากาศ : เชื้อเพลิงที่ใช้จริง (actual A:F ratio) ต่อ อัตราส่วนอากาศ : เชื้อเพลิงที่ต้องการในการเผาไหม้สมบูรณ์ (stoichiometric A:F ratio) ของการเดินระบบที่ Waste reject ทั้ง 3 ความชื้น (10% 25% 40% wb) มีใกล้เคียงกันมาก คือ ER เท่ากับ 0.16 0.16 0.17 ตามลำดับ ซึ่งทำให้สามารถศึกษาผลของความชื้นต่อคุณภาพแก๊สและประสิทธิภาพการผลิตแก๊สได้โดยไม่มีปัจจัยอื่นรบกวน

ผลของความชื้นใน Waste reject ต่อปริมาณของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้แสดงใน ตารางที่ 4.10 พบว่าความชื้นของวัตถุดิบมีผลอย่างมากต่อคุณภาพของแก๊สที่ได้อย่างชัดเจน ปริมาณ CO จะมีค่าลดลง ~ 31 % เมื่อความชื้นสูงขึ้นจาก 10-30% (wb) ปริมาณ CO ที่ลดลงนี้อาจเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นของวัตถุดิบ ซึ่งทำให้เกิดการลดลงของความดันภายในเตา และส่งผลให้มีปริมาณ  $\text{O}_2$  เข้าไปในเตาปฏิกรณ์น้อยลง เมื่อปริมาณ  $\text{O}_2$  น้อยลงปริมาณ CO ที่เกิดขึ้นก็น้อยลงตามไปด้วย ในทางตรงกันข้าม ปริมาณ  $\text{H}_2$  จะมีค่าผันตรงตามความชื้นของวัตถุดิบ ปรากฏการณ์นี้เป็นไปตามที่คาดไว้เนื่องจากมีน้ำมากพอสำหรับกระบวนการผลิต  $\text{H}_2$  ผลที่ได้จากการทดลองนี้สอดคล้องกับผลงานของ Zainal et al. (2001) and Sharma (2008) นอกจากนี้ยังเป็นที่น่าสนใจมากสำหรับ  $\text{CH}_4$  เนื่องจากการใช้พลาสมาร่วมกับแก๊สซิฟิเคชันทำให้ได้ปริมาณ  $\text{CH}_4$  สูงมาก (11 %vol) เมื่อเทียบกับชีวมวล (< 5 %vol) (Kim et al., 2013) อย่างไรก็ตาม ปริมาณ  $\text{CH}_4$  นี้จะลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อความชื้นสูงขึ้น โดยเฉพาะที่ 40% (wb) จะได้  $\text{CH}_4$  ประมาณ 4 % vol

แม้ว่าแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จะมีความแปรปรวนตามความชื้น แต่เมื่อคำนวณหาค่าความร้อน (Calorific value : LHV) ของแก๊สเชื้อเพลิง พบว่าจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นลดลง และ  $\text{CH}_4$  เป็นตัวแปรหลักในการกำหนดค่าความร้อนที่ได้นี้ ผลการทดลองที่ได้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (Sharma, 2008) นอกจากนั้น เมื่อทำการเปรียบเทียบที่ความชื้นเดียวกัน การใช้พลาสมาร่วมในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันสำหรับ Waste reject ให้แก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนสูงกว่าที่ได้จากเชื้อเพลิงชีวมวลหลายๆ ชนิด (Arjham et al., 2012) แม้ว่า ค่าความร้อนจะลดลงเมื่อความชื้นสูงขึ้น แต่ก็ยังสูงเพียงพอสำหรับนำไปใช้กับเครื่องยนต์แก๊ส ซึ่งต้องการค่าความร้อนอย่างน้อยประมาณ  $4.2 \text{ MJ/Nm}^3$  (Quakk et al., 1999) การเปลี่ยนแปลงของค่าความร้อนที่ได้สำหรับที่

ความชื้นต่างกัน น่าจะเป็นเหตุผลมาจากผลของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์เป็นหลัก การใช้พลาสมาทำให้อุณหภูมิภายในเตาสูง มีปริมาณอิเล็กตรอน ไอออน และ โมเลกุลที่ถูกกระตุ้น เป็นจำนวนมาก ทำให้มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงและผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพ (Janajreh et al., 2013) อย่างไรก็ตาม ปรากฏการณ์นี้จะลดลงเมื่อความชื้นของวัตถุดิบเพิ่มขึ้น

#### 4.5.3 การประเมินสมรรถนะของระบบ

ผลการประเมินสมรรถนะของระบบ ดังแสดงในตารางที่ 4.10 ซึ่งแสดงสมรรถนะของระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชันสำหรับการเดินระบบโดยใช้ Waste reject เป็นเชื้อเพลิง พบว่า ค่า Syngas yield แปรผกผันกับค่าความชื้น ยิ่งความชื้นมีค่ามากขึ้น ค่า Syngas yield ที่ได้จะมีค่าลดลง โดยมีค่าลดลงจาก 2.26 ถึง 1.47  $\text{Nm}^3/\text{kg}$  หรือลดลงประมาณ 35% เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นจาก 10% (wb) เป็น 40% (wb) การลดลงของ Syngas yield เกิดขึ้นเนื่องจากอัตราการใช้วัตถุดิบที่เพิ่มขึ้นจาก 93 kg/hr เป็น 143 kg/hr ส่วนค่า Energy yield ซึ่งคำนวณมาจากอัตราส่วนระหว่างพลังงานที่มีอยู่ในแก๊สเชื้อเพลิงต่ออัตราการใช้วัตถุดิบ พบว่ามีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน แต่ลดลงอย่างมากหรือประมาณ 62% ที่เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นจาก 10% (wb) เป็น 40% (wb)

ประสิทธิภาพของการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงซึ่งประเมินในรูปของ Cold gas efficiency ( $\eta_{cg}$ ) โดยพบว่าที่ความชื้นสูงขึ้นประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจะลดลงโดยที่ ความชื้นของ Waste reject เท่ากับ 10% (wb) มีค่า  $\eta_{cg}$  ประมาณ 80.10% เมื่อความชื้นเพิ่มสูงขึ้นที่ 40% (wb) ค่า  $\eta_{cg}$  จะลดลงเหลือประมาณ 45.20% ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Jayah (2003) ซึ่งได้สรุปว่า ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจะขึ้นอยู่กับค่าความชื้นของเชื้อเพลิง โดยเชื้อเพลิงที่ความชื้นสูงจะมีประสิทธิภาพของการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงต่ำ โดยค่าประสิทธิภาพที่ลดลงนี้ เนื่องจากความร้อนบางส่วนถูกนำไปใช้ระเหยน้ำ ดังนั้นจึงไม่มีความร้อนเพียงพอสำหรับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Arjham et al., 2013)

อย่างไรก็ตาม แม้ว่าในระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน ซึ่งจำเป็นต้องเพิ่มพลังงานเข้าไปให้กับระบบ (~129.6 MJ/hr) แต่พบว่าค่าพลังงานที่ผลิตได้สุทธิ และประสิทธิภาพการผลิตแก๊ส ไม่ได้ลดลงตามไปด้วย ทั้งนี้เนื่องจากได้แก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนเพิ่มขึ้น โดยจะมีค่าใกล้เคียงกับการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลทั่วไปที่ใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชัน (Arjham et al., 2012) ผลการทดลองนี้ได้ค่าพลังงาน และประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง ในช่วงเดียวกันกับของงานวิจัยอื่น (Zhang et al., 2012)

#### 4.5.4 ปริมาณทาร์และฝุ่น

ปริมาณทาร์และฝุ่นมีบทบาทสำคัญต่อการเดินระบบของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันและการนำแก๊สเชื้อเพลิงไปใช้ประโยชน์ หากมีการนำแก๊สเชื้อเพลิงที่มีทาร์และฝุ่นปนเปื้อนสูง จะส่งผลให้ เครื่องเทอร์ไบน์ หรือเครื่องยนต์ เสียหายได้ ทำให้ต้องมีขั้นตอนการทำความสะอาดที่ซับซ้อนเพิ่มขึ้นมา (Cao et al., 2006)

ตารางที่ 4.10 แสดงปริมาณทาร์และฝุ่นในแก๊สเชื้อเพลิงที่ความชื้นต่างกัน ที่วัดหลังจากแก๊สผ่านกระบวนการทำความสะอาดแล้ว ได้แก่ Water scrubber, Chiller scrubber และ Fabric filter (ถุงกรอง) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าปริมาณทาร์และฝุ่นจะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ประมาณ 3.7 เท่า เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นจาก 10-40 % (wb) สาเหตุที่ทำให้ทาร์เพิ่มขึ้นอาจเนื่องมาจากอุณหภูมิที่ลดลงภายในเตา โดยทั่วไปในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ทาร์และฝุ่นส่วนหนึ่งจะถูกเผาที่อุณหภูมิสูง และเหลือบางส่วนไปกับแก๊สเชื้อเพลิง อย่างไรก็ตาม เมื่ออุณหภูมิของเตาลดลง ซึ่งเป็นกรณีของ Waste reject ที่มีความชื้นสูง ปริมาณทาร์และฝุ่นจึงมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากการเผาทาร์ออกไปจากระบบน้อยลง ปริมาณทาร์และฝุ่นที่ได้หลังจากผ่าน Fabric filter มีค่าระหว่าง  $1.14 \text{ mg/Nm}^3$  และ  $5.35 \text{ mg/Nm}^3$  ที่ความชื้น 10 และ 40% (wb) ตามลำดับ โดยทั่วไปปริมาณทาร์และฝุ่นที่ได้จากระบบแก๊สซิฟิเคชันแบบไหลลงจะมีค่าเท่ากับ 50-500  $\text{mg/Nm}^3$  (Kaupp and Goss, 1981; Reed and Bryant, 1978) ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของวัตถุดิบ การออกแบบ สถานะการทำงาน และวิธีการเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์ (Devi et al., 2003) ประสิทธิภาพการกำจัดทาร์และฝุ่น ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและปริมาณของทาร์และฝุ่น และอุปกรณ์ทำความสะอาดแก๊สเชื้อเพลิงที่เลือกใช้งาน (Phuphuakrat et al., 2010) ในการทดลองครั้งนี้พบว่าระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชันที่ใช้สามารถผลิตแก๊สที่มีความสะอาดมากเพียงพอสำหรับการใช้กับเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้า (Bhattacharya et al., 2001)

ตารางที่ 4.10 การประเมินสมรรถนะของระบบพลาสติกแก๊สซิฟิเคชัน (P-G) ในการกำจัด Waste reject

พารามิเตอร์	ความชื้นของเชื้อเพลิง (wt%,wb)		
	10	25	40
Equivalence ratio (ER)	0.16	0.16	0.17
อัตราการใช้เชื้อเพลิง (kg/hr)	92.8 ± 1.01	110.50 ± 1.12	143 ± 1.29
อัตราการเกิดเถ้า (kg/hr)	12.95 ± 0.32	15.74 ± 0.34	20.23± 0.42
อัตราการดิ่งเถ้า (%wt)	13.95 ± 0.21	14.25 ± 0.24	14.15± 0.20
CO (%vol)	12.88 ± 0.11	11.82 ± 0.14	8.90 ± 0.11
H <sub>2</sub> (%vol)	13.53 ± 0.42	14.29 ± 0.48	15.18 ± 0.42
CH <sub>4</sub> (%vol)	11.61 ± 0.12	9.25 ± 0.16	4.01 ± 0.11
O <sub>2</sub> (%vol)	0.57 ± 0.08	0.67 ± 0.11	0.95 ± 0.14
CO <sub>2</sub> (%vol)	10.89 ± 0.45	13.64 ± 0.51	14.74 ± 0.45
ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิง (LHV, MJ/Nm <sup>3</sup> )	8.26 ± 0.11	7.25 ± 0.14	4.82 ± 0.12
อัตราส่วนปริมาตรแก๊สเชื้อเพลิง/เชื้อเพลิงที่ เข้าระบบ (Volume Syngas yield, Nm <sup>3</sup> /kg)	2.26 ± 0.03	1.93 ± 0.03	1.47 ± 0.03
อัตราส่วนพลังงานแก๊สเชื้อเพลิง/เชื้อเพลิงที่ เข้าระบบ (Energy yield, MJ/kg)	18.68 ± 0.44	13.96 ± 0.53	7.08 ± 0.45
พลังงานของเชื้อเพลิงเข้าระบบ (MJ/hr)	2036.29 ± 2.95	2019.03 ± 2.54	2112.61 ± 2.43
พลังงานจากพลาสติก (MJ/hr)	129.6 ± 1.52	129.6 ± 1.52	129.6 ± 1.52
พลังงานของแก๊สเชื้อเพลิงที่ ผลิตได้ที่สภาวะมาตรฐาน (MJ/hr)	1734.08 ± 1.82	1521.99 ± 1.77	1013.13 ± 1.42
ประสิทธิภาพของระบบ (Cold-gas Efficiency) ( $\eta_{cg}$ )	80.1 ± 0.21	70.90 ± 0.19	45.20 ± 0.22
% คาร์บอนคงเหลือ (Yields of carbon residue)	15.11±1.33	23.85±1.41	34.52±2.52
คุณภาพของแก๊ส			
ปริมาณทาร์ (mg/Nm <sup>3</sup> )	9.7 ± 0.01	16.6 ± 0.21	32.6 ± 0.23
ปริมาณฝุ่น (mg/Nm <sup>3</sup> )	1.8 ± 0.11	14.7 ± 0.22	20.8 ± 0.24
ปริมาณทาร์และฝุ่นรวม (mg/Nm <sup>3</sup> )	11.50 ± 0.21	31.3 ± 0.30	53.4 ± 0.31

## 4.6 ผลการศึกษาสมรรถนะทางด้านสิ่งแวดล้อม

ในขั้นตอนของการเดินระบบเพื่อทดสอบสมรรถนะระบบ ในขณะเดียวกันได้ทำการเก็บข้อมูลด้านมลพิษสิ่งแวดล้อม ซึ่งจะถูกนำมาประเมินเปรียบเทียบข้อมูล ด้านการปลดปล่อยมลพิษ/สมรรถนะทางสิ่งแวดล้อม ระหว่างระบบ C-G และระบบ P-G ซึ่งมีข้อสรุปดังต่อไปนี้

### 4.6.1 ผลการศึกษาสมรรถนะทางสิ่งแวดล้อมระบบ C-G กับระบบ P-G

จากการทดสอบประสิทธิภาพการผลิตพลังงาน โดยใช้ระบบ C-G เปรียบเทียบกับระบบ P-G แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ด้านพลังงาน โดยที่ประสิทธิภาพการผลิตพลังงานมีค่าเทียบเคียงกับเชื้อเพลิงชีวมวลอื่นๆ อย่างไรก็ตามการที่จะนำเทคโนโลยีดังกล่าวมาใช้ในการจัดการขยะ จำเป็นที่ศึกษาปริมาณและสมบัติของเสียที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการผลิตพลังงานด้วยเช่นกัน ทั้งนี้เพื่อใช้เป็นแนวทางสำหรับป้องกัน และควบคุมมลพิษสิ่งแวดล้อมต่อไป

ผลการวิเคราะห์มลพิษที่เกิดขึ้นจากระบบ C-G และระบบ P-G จากการใช้เชื้อเพลิง RDF-5/WC (70/30) ในรูปต่างๆ ดังต่อไปนี้ 1) มลสารที่สามารถปนเปื้อนในแก๊สเชื้อเพลิง (Syngas pollutants) ได้แก่ แก๊สมลพิษ สารมลพิษอนุภาคขนาดเล็กที่ปนเปื้อนในแก๊สเชื้อเพลิง 2) การวิเคราะห์มลสารในรูปของแข็ง (Solid waste pollutants) ในที่นี้คือสารมลพิษต่างๆ เถ้าหนัก และ 3) การวิเคราะห์มลสารในน้ำเสีย (Wastewater pollutants) ในที่นี้คือสารมลพิษต่างๆ ที่เกิดจากระบบ ทำความสะอาดแก๊สเชื้อเพลิง สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

#### 4.6.1.1 มลสารในแก๊สเชื้อเพลิง

การวิเคราะห์แก๊สมลพิษในแก๊สเชื้อเพลิง จะเป็นการประเมินมลพิษเบื้องต้นในกรณีที่น่าแก๊สเชื้อเพลิงไปใช้ประโยชน์เพื่อผลิตพลังงานต่อไป ทั้งนี้อาจจะด้วยกรณีของการนำไปใช้ประโยชน์ในทางความร้อน (นำแก๊สเชื้อเพลิงไปเผาเพื่อผลิตความร้อน) หรือใช้งานโดยตรงเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าโดยตรงกับเชื้อเพลิงสันดาปภายใน ซึ่งโดยทั่วไปแล้วกระบวนการใช้ประโยชน์จากแก๊สเชื้อเพลิง ต้องมีระบบบำบัดมลพิษอากาศ เพื่อทำการบำบัดแก๊สไอเสีย ก่อนที่จะปลดปล่อยสู่บรรยากาศ อย่างไรก็ตามการจะเป็นข้อยืนยันสำหรับการใช้เทคโนโลยีนี้เพื่อกำจัดขยะในอนาคต การประเมินสารมลพิษในแก๊สเชื้อเพลิง จึงเป็นเรื่องที่จำเป็น

สำหรับค่ามาตรฐานของการปนเปื้อนมลพิษในแก๊สเชื้อเพลิง ยังไม่ปรากฏมาตรฐานที่สามารถนำมาอ้างอิงได้ ในงานวิจัยนี้ จึงใช้มาตรฐานควบคุมการปล่อยทิ้งอากาศเสียจากเตาเผามูลฝอย อ่างอิงกรณี เตาเผามูลฝอยที่มีกำลังการเผาไหม้ ในการกำจัดมูลฝอยตั้งแต่ 1 ตัน แต่ไม่เกิน 50 ตันต่อวัน (เตาเผาขนาด 1 ตันเป็นขนาดเล็กที่สุดที่ปรากฏในมาตรฐาน) โดยมีสารมลพิษ 9 ชนิด ที่ถูกกำหนดไว้ตามมาตรฐาน ดังแสดงใน ตารางที่ 4.11 จากการศึกษาพบว่าปริมาณฝุ่น

ละออง (TSP) SO<sub>2</sub> NO<sub>x</sub> ทั้งกรณี ระบบ C-G และ ระบบ P-G มีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด และสำหรับโลหะหนัก 3 ชนิด ตรวจไม่พบ (Hg, Cd, Pb)

ทั้งนี้ 3 พารามิเตอร์ คือ ค่าความทึบแสง, HCl และ สารประกอบไดออกซิน ไม่ได้ทำการวิเคราะห์ (N/A) แต่สามารถอธิบายแนวโน้มได้ว่า ค่าความทึบแสงแปรผันกับปริมาณฝุ่นละอองในแก๊สเชื้อเพลิง ซึ่งเห็นว่า องค์ประกอบของฝุ่นละออง ในแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าน้อย เนื่องจากแก๊สเชื้อเพลิงได้ผ่านกระบวนการทำความสะอาดถึง 4 ขั้นตอน ได้แก่ Water scrubber Chiller scrubber และ Fabric filter ) จึงเป็นผลให้มีปริมาณฝุ่นที่ต่ำมาก ทั้งนี้ในกรณีของสารประกอบ HCL และ สารประกอบไดออกซิน ซึ่งเป็นสารผลิตภัณฑ์ที่มี Cl เป็นสารตั้งต้น ในกระบวนการ เผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 850 °C จะไม่ก่อให้เกิดสารประกอบไดออกซิน ทั้งนี้รูปของ Cl ส่วนใหญ่ถูกตรวจพบในรูป HCl ซึ่งปนเปื้อนในน้ำเสีย (ตารางที่ 4.12 4.13) ซึ่งผลการศึกษาที่ได้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยอื่นๆ (Malkow, 2003; Moustakas, et al. 2005; Bert et al, 2006)

อย่างไรก็ดี สำหรับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน การควบคุมกระบวนการเผาไหม้ให้มีอุณหภูมิสูง ไม่เพียงเป็นผลดีต่อการทำลายสารมลพิษอื่นๆ เช่น อนุภาคขนาดเล็กของโลหะหนัก แต่ยังสามารถลดโลหะที่มีผลต่อการสร้างไดออกซิน/ฟูแรน (Cu, Fe, Zn, Al, Cr, Mn) ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyze) ของการสร้างไดออกซิน/ฟูแรน (Bert et al, 2006)

สำหรับกรณีของ ความเข้มข้น SO<sub>2</sub> และ NO<sub>x</sub> ที่มีปริมาณต่ำ เนื่องด้วยกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงของระบบ C-G จำกัดปริมาณอากาศ จึงมีผลให้เกิดสารมลพิษ 2 ชนิดนี้ในปริมาณที่ต่ำมาก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยอื่นๆ (Larson, 1998; Stiegel, 2001 ; Arena, 2012; Seggiani et al., 2012)

ทั้งนี้ ในกรณีการนำแก๊สเชื้อเพลิงไปใช้ประโยชน์ อาจจะหลีกเลี่ยงไม่ได้ ที่จะควบคุมปริมาณอากาศในการเผาไหม้อย่างจำกัดได้ อย่างไรก็ดี อาจจำเป็นต้องควบคุมความเข้มของออกซิเจนส่วนเกินในบริเวณที่เกิดการเผาไหม้ให้น้อยลง เพื่อลดกลไกการเกิดสารมลพิษ 2 ชนิดนี้ (นพภาพร พานิช และคณะ, 2547) โดยกลไกการเกิด SO<sub>2</sub> และ NO<sub>x</sub> เมื่อในกระบวนการเผาไหม้ในอากาศ ดังสมการที่ (4.1) (4.2) และ (4.3)

กลไกการเกิด SO<sub>2</sub>;



กลไกการเกิด NO<sub>2</sub>;



ในกรณีของการเกิด NO<sub>x</sub> (ผลรวมของ NO และ NO<sub>2</sub>) ปัจจัยหนึ่งคือ ออกซิเจนและไนโตรเจนในอากาศบางส่วนจะรวมตัวกันเกิดเป็นไนตริกออกไซด์ (NO) และไนโตรเจนไดออกไซด์จะเกิดขึ้นในบริเวณที่อุณหภูมิสูง NO<sub>2</sub> ทั้งนี้ ในการควบคุมการเกิดสารมลพิษ NO<sub>x</sub> ในกระบวนการเผาไหม้ อาจจำเป็นต้องควบคุมอุณหภูมิเปลวไฟให้ต่ำ อุณหภูมิเปลวไฟสูงเกินกว่า 1,371 °C อาจทำให้มีความเข้มข้นของ NO สูงถึง 1,000 ppm (นพภาพร พานิช และคณะ, 2547)

ทั้งนี้ NO<sub>x</sub> บางส่วนเกิดจากปฏิกิริยาของ Plasma arc ที่ใช้ อากาศ เป็น Carrier gas การแตกตัวและฟอร์มตัวบางส่วนเกิดเป็นออกไซด์ของไนโตรเจนได้ แม้ว่าระบบ C-G และ P-G เป็นการเผาไหม้ในสภาวะการจำกัดปริมาณอากาศ แต่อย่างไรก็ตามก็ยังมีอากาศที่เหลือ พอที่จะไปทำปฏิกิริยากับ S N บางส่วนให้เกิดเป็นออกไซด์ของซัลเฟอร์ และออกไซด์ของไนโตรเจนได้ สอดคล้องกับ %O<sub>2</sub> ที่ยังถูกตรวจพบในแก๊สเชื้อเพลิง

ตารางที่ 4.11 ผลการตรวจวิเคราะห์แก๊สมลพิษในแก๊สเชื้อเพลิง

พารามิเตอร์	รายงานผลการตรวจวัด		มาตรฐาน <sup>(2)</sup>
	ระบบ C-G	ระบบ P-G	
ปริมาณฝุ่นละออง (TSP) <sup>(1)</sup> : (mg/Nm <sup>3</sup> )	2.65	0.91	ไม่เกิน 400
SO <sub>2</sub> (ppm)	35.00	12.15	ไม่เกิน 30
NO <sub>x</sub> as NO <sub>2</sub> (ppm)	12.05	24.05	ไม่เกิน 250
Hg (mg/Nm <sup>3</sup> )	ND <sup>(3)</sup>	ND	ไม่เกิน 0.05
Cd (mg/Nm <sup>3</sup> )	ND	ND	ไม่เกิน 0.5
Pb : (mg/Nm <sup>3</sup> )	ND	ND	ไม่เกิน 1.5
HCL: (ppm)	N/A <sup>(4)</sup>	N/A	ไม่เกิน 136
ค่าความทึบแสง (Opacity) (%)	N/A	N/A	ไม่เกิน 20
สารประกอบไดออกซิน (PCDD/PCDFs) : (PCDD/Fs as Toxic Equivalent ; I-TEQ)	N/A	N/A	ไม่เกิน 0.5

หมายเหตุ : <sup>(1)</sup> ปริมาณฝุ่น อ้างอิงจากผลการวิเคราะห์ปริมาณทาร์และฝุ่น (ตารางที่ 4.9)

<sup>(2)</sup> ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการปล่อยทิ้งอากาศเสียจากเตาเผามูลฝอย ประกาศในราชกิจจานุเบกษา เล่ม 127 ตอนพิเศษ 87 ง ราชกิจจานุเบกษา 16 กรกฎาคม 2553

<sup>(3)</sup> ND: Not detected (Limit of Detection = 5 ppm or 5 mg/g)

<sup>(4)</sup> N/A: Not analysis

สำหรับโลหะหนัก 3 ชนิด คือ Hg, Cd และ Pb ตรวจไม่พบในแก๊สเชื้อเพลิง ทั้งกรณี ระบบแก๊สซิฟิเคชัน และ ระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน อย่างไรก็ตาม ในการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในงานวิจัยนี้ ใช้เครื่องมือวิเคราะห์ คือ X-ray fluorescence energy dispersive spectrometer (Model XGT-5200) ซึ่งมี detection limit สูง (Limit of Detection = 5 ppm or 5 mg/g) สามารถระบุความเข้มข้นของธาตุได้ในระดับเปอร์เซ็นต์ จึงอาจเป็นสาเหตุให้ตรวจไม่พบโลหะหนักที่ปนเปื้อนในแก๊สเชื้อเพลิง อย่างไรก็ตาม โลหะหนัก 3 ชนิดนี้ พบปริมาณน้อยในเชื้อเพลิงเริ่มต้น

ทั้งนี้ เมื่อผลจากการวิเคราะห์ปริมาณสารต่างๆ ในเชื้อเพลิงเริ่มต้น และปริมาณสารต่างๆ ที่ถูกตรวจพบในถ่านหิน แก๊สเชื้อเพลิง และน้ำเสีย ทั้งระบบ C-G และระบบ P-G จะถูกนำวิเคราะห์สมดุลมวลสาร และประเมินให้อยู่ในรูปอัตราการปลดปล่อยมลพิษ (Emission factor) หน่วย (กรัม-สารมลพิษที่ปลดปล่อย)/(กิโลกรัมเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าระบบ) เพื่อให้สามารถประเมินและติดตาม พฤติกรรมของสารต่างๆ ได้

#### 4.6.1.2 สมดุลมวลของ ธาตุอัลคาไลน์ โลหะหนัก และคลอรีน

การจัดทำสมดุลมวลของ ธาตุอัลคาไลน์ โลหะหนัก และคลอรีน ในระบบ C-G ซึ่งโดยภาพรวม พบว่า มลสารต่างๆ ถูกตรวจพบในรูปถ่านหินสูงถึง 87.15% รองลงมาคือ ตรวจพบในแก๊สเชื้อเพลิง (~0.07%) ตรวจพบในน้ำเสีย (~3.02%) และมีสารที่สูญหาย (~9.68%) ข้อมูลซึ่งเป็นสมดุลมวลของ ธาตุอัลคาไลน์ โลหะหนัก และคลอรีน ในระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน ซึ่งโดยภาพรวม พบว่า มลสารต่างๆ ถูกตรวจพบในรูปถ่านหินสูงถึง 92.60% รองลงมาคือ ตรวจพบในแก๊สเชื้อเพลิง (~%0.04) ตรวจพบในน้ำเสีย (~1.27%) และ สารที่สูญหาย (~4.83%)

งานวิจัยนี้ สอดคล้องกับงานวิจัยอื่นๆ ซึ่งได้สรุปว่าในกระบวนการผลิตพลังงานโดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน วัฏจักรของโลหะหนักส่วนใหญ่จะอยู่ในถ่าน (Marrero et al., 2004; Vervaeke et al., 2005; Kwak et al., 2006) ยิ่งไปกว่านั้นยังเห็นได้ว่า ระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน สามารถคงรูปของมลสารส่วนใหญ่ให้อยู่ในรูปของถ่านหิน (Moustakas et al., 2005; Bert et al., 2006,) (Ojha et al., 2012; Yoon et al., 2013)

#### 4.6.1.3 สารมลพิษอื่นๆ ในรูปน้ำเสีย

ข้อมูลตารางที่ 4.12 ตารางที่ 4.14 แสดงสารในน้ำเสีย สำหรับ COD, TKN, Phenols ซึ่งถูกประเมินให้อยู่ในรูปอัตราการปลดปล่อยมลพิษ (Emission factor) หน่วย (กรัม-สารมลพิษที่ปลดปล่อย)/(กิโลกรัมเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าระบบ) เช่นเดียวกัน ทั้งนี้ เนื่องจากว่า มลสารทั้ง 4 ชนิดนี้ ไม่มีสามารถเทียบฐานของสารเริ่มต้นได้ เพราะอยู่ในรูปของสารประกอบ อย่างไรก็ตาม โดยภาพรวมเห็นได้ว่าระบบ P-G มีการปนเปื้อนของมลสารในรูปน้ำเสียต่ำกว่า ระบบ C-G ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลที่ได้อธิบายไว้ก่อนหน้านี้ คือ มลสารส่วนใหญ่สำหรับระบบ P-G จะคงรูปใน

ถ้ำ (~92.60%) ซึ่งเห็นได้ว่าสารในน้ำ พารามิเตอร์ที่เด่นที่สุดคือ COD (Chemical oxygen demand) ซึ่งบ่งบอกถึงความสกปรกและการสะสมของสารอินทรีย์ต่างๆ ที่อยู่ในน้ำเสีย ของระบบ C-G

ตารางที่ 4.12 สมดุลมวลของ ธาตุอัลคาไลน์ โลหะหนัก และคลอรีนในระบบ C-G

ประเภท	ความเข้มข้นสาร มลพิษขาเข้า <sup>(1)</sup> (g/kg)	ความเข้มข้นสารมลพิษขาออก หรือ อัตราการปลดปล่อยมลพิษ (Emission factor) <sup>(2)</sup>			
		ถ้ำหนัก (g/kg)	แก๊สเชื้อเพลิง (mg/kg)	น้ำเสีย (mg/kg)	สูญหาย (g/kg)
Al	3.855	2.88	9.61	3.15	0.960
Ca	24.786	23.24	14.58	84.44	1.444
K	4.216	3.16	9.74	ND	1.043
Na	0.651	0.54	0.18	ND	0.106
Mg	0.363	0.21	1.30	ND	0.151
P	2.377	2.01	0.00	ND	0.367
Si	18.935	16.97	18.91	ND	1.944
Ti	3.618	3.33	ND	ND	0.288
Fe	13.095	12.25	0.28	9.48	0.831
Cr	0.091	0.09	ND	ND	0.003
Hg	0.092	0.07	ND	ND	0.018
Ni	0.233	0.17	ND	1.30	0.057
Pb	0.109	0.09	ND	0.99	0.023
Cd	0.002	0.00	ND	0.27	0.001
Cu	0.227	0.19	ND	0.34	0.034
Mn	0.472	0.32	ND	0.77	0.148
Zn	0.527	0.39	1.14	21.05	0.114
Br	0.016	0.01	ND	ND	0.002
Cl	0.526	2.88	0.30	2,258.70	0.106
สัดส่วน (%)		87.23	0.07	3.02	9.68

หมายเหตุ: <sup>(1)</sup> มวลสารมลพิษที่สะสมในเชื้อเพลิงเริ่มต้น

<sup>(2)</sup> อัตราการปลดปล่อยมลพิษ (Emission factor) = [มวลสารมลพิษที่ปลดปล่อย] / [กิโลกรัมเชื้อเพลิงที่ ป้อนเข้าระบบ]

<sup>(3)</sup> ND: Not detected (Limit of Detection = 5 ppm or 5 mg/g)

ตารางที่ 4.13 สมดุลมวลของ ธาตุอัลคาไลน์ โลหะหนัก และคลอรีนในระบบ P-G

ประเภท	ความเข้มข้นสาร มลพิษขาเข้า <sup>(1)</sup> (g/kg)	ความเข้มข้นสารมลพิษขาออก หรือ อัตราการปลดปล่อยมลพิษ (Emission factor) <sup>(2)</sup>			
		ไถ่หนัก (g/kg)	แก๊สเชื้อเพลิง (mg/kg)	น้ำเสีย (mg/kg)	สูญหาย (g/kg)
Al	3.855	3.17	6.80	1.17	0.68
Ca	24.786	23.58	16.23	ND	1.19
K	4.216	4.02	1.68	ND	0.19
Na	0.651	0.62	ND	ND	0.03
Mg	0.363	0.33	ND	ND	0.04
P	2.377	2.09	ND	ND	0.28
Si	18.935	18.41	4.31	ND	0.52
Ti	3.618	3.59	0.00	ND	0.02
Fe	13.095	12.48	0.16	1.58	0.62
Cr	0.091	0.08	ND	ND	0.01
Hg	0.092	0.08	ND	ND	0.01
Ni	0.233	0.21	ND	ND	0.02
Pb	0.109	0.11	ND	ND	0.00
Cd	0.002	0.00	ND	0.16	0.00
Cu	0.227	0.22	ND	0.24	0.00
Mn	0.472	0.41	ND	0.32	0.06
Zn	0.527	0.42	0.71	1.83	0.10
Br	0.016	0.02	ND	ND	0.00
Cl	0.526	4.22	0.10	993.82	0.03
สัดส่วน (%)		93.87	0.04	1.27	4.83

หมายเหตุ: <sup>(1)</sup> มวลสารมลพิษที่สะสมในเชื้อเพลิงเริ่มต้น

<sup>(2)</sup> อัตราการปลดปล่อยมลพิษ (Emission factor) = [มวลสารมลพิษที่ปลดปล่อย] / [กิโลกรัมเชื้อเพลิงที่ ป้อนเข้าระบบ]

<sup>(3)</sup> ND: Not detected (Limit of Detection = 5 ppm or 5 mg/g)

สารในน้ำเสียที่พบอีกชนิด คือ TKN (Total Kjeldahl Nitrogen) หรือปริมาณไนโตรเจนในรูปของสารอินทรีย์และแอมโมเนียไนโตรเจน ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน องค์ประกอบของ N ในเชื้อเพลิงแข็งจะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปแก๊ส  $\text{NH}_3$  เป็นส่วนใหญ่ (ในงานวิจัยนี้ไม่ได้วิเคราะห์แยกแยะระหว่าง  $\text{NH}_3\text{-N}$  กับ Organic-N) การลดการปลดปล่อยสู่บรรยากาศ การลดมลพิษ ต้องมีที่นิยมใช้คือระบบ Scrubber เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดักจับสารชนิดนี้ได้ดียิ่งขึ้น ต้องใช้ Acid scrubber (Lemmens et al., 2007) สารที่ตรวจเจออีกชนิดคือ Phenols ซึ่งประเมินได้ถึงปริมาณสารที่ถูกดักจับได้จากแก๊สเชื้อเพลิง สำหรับ  $\text{H}_2\text{S}$  ตรวจไม่พบ อาจเนื่องจากว่าเชื้อเพลิงเริ่มต้นมีปริมาณซัลเฟอร์ต่ำ สำหรับการบำบัดสารในน้ำเสียที่เกิดขึ้นในระบบแก๊สซิฟิเคชัน สามารถใช้กระบวนการบำบัดขั้นต้นด้วยระบบ Chemical coagulation มีประสิทธิภาพการบำบัด 63% สำหรับ COD (ทิพย์สุภินทร์ หินชูย, 2550) และควรเพิ่มระบบการบำบัดขั้นหลังเพื่อให้การบำบัดมลสารมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นในสารกลุ่ม Phenols และ TKN

ตารางที่ 4.14 อัตราการปลดปล่อยมลพิษ (Emission factor) ในรูปน้ำเสีย

สารมลพิษ	ความเข้มข้นสารมลพิษในรูปน้ำเสีย (g/kg)	
	ระบบ C-G	ระบบ P-G
COD	23.3002	14.039
TKN	2.3206	2.010
$\text{H}_2\text{S}$	ND	ND
Phenols	1.1981	0.835

หมายเหตุ: <sup>(1)</sup> มวลสารมลพิษที่สะสมในเชื้อเพลิงเริ่มต้น

<sup>(2)</sup> อัตราการปลดปล่อยมลพิษ (Emission factor) = [มวลสารมลพิษที่ปลดปล่อย] / [กิโลกรัมเชื้อเพลิงที่ ป้อนเข้าระบบ]

<sup>(3)</sup> ND: Not detected (Limit of Detection = 0.03 ppm)

## 4.6.2 ผลการศึกษาสมรรถนะทางสิ่งแวดล้อมของระบบ P-G ต่อการกำจัด Waste reject ที่มี ความเข้มข้นระดับต่างๆ

### 4.6.2.1 มลสารในแก๊สเชื้อเพลิง

ผลการศึกษาการใช้ระบบ P-G เพื่อกำจัดมลปล่อยเหลือทิ้ง หรือ Waste reject ที่ ความเข้มข้นต่างๆ (10, 25, 40% (wb)) และทำการตรวจวัดและประเมิน มลสาร ในรูปต่าง เช่นเดียวกัน กับกรณีใช้เพลิงผสม (RDF-5 ผสม ไม้) ผลการวัดคุณภาพของแก๊สเชื้อเพลิงในมิติทางด้าน สิ่งแวดล้อม ดังแสดงใน ตารางที่ 4.15 พบว่า ปริมาณละอองฝุ่นในแก๊สเชื้อเพลิง แปรผกผันกับความชื้นในเชื้อเพลิง ซึ่งเป็นไปตามที่คาดการณ์ และพบการปนเปื้อนของโลหะหนักในแก๊ส

เชื้อเพลิงด้วยเช่นกัน คือ Hg และ Cd ( $0.038$   $0.634$   $\text{mg}/\text{Nm}^3$ ) แต่ไม่เกินที่มาตรฐานกำหนด ซึ่งสอดคล้องงานวิจัยของ Bert et al, (2006) ซึ่งได้สรุปว่า คือ การใช้ความร้อนจากพลามาช่วยในระบบ ส่งผลให้อุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์สูง และช่วยกำจัดมลสารขนาดเล็กต่างๆ (เถ้าลอย, ละอองไอของมลสาร) สามารถลดความปนเปื้อนในแก๊สเชื้อเพลิงได้

ในส่วนของแก๊ส  $\text{SO}_2$   $\text{NO}_x$  มีแนวโน้มลดลงเมื่อความชื้น ของเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น อาจเป็นไปได้ว่า เนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพของ Waste reject ที่มีความชื้นสูง จะมีความหนาแน่นสูงขึ้น จึงส่งผลให้อากาศไหลผ่านในระบบได้ยากซึ่งมี  $\text{O}_2$  ที่จะไปทำปฏิกิริยาได้น้อย

ตารางที่ 4.15 ผลการตรวจวิเคราะห์แก๊สมลพิษในแก๊สเชื้อเพลิง

พารามิเตอร์	รายงานผลการตรวจวัด (ความชื้นของเชื้อเพลิง (wt%,wb))			มาตรฐาน <sup>(2)</sup>
	10	25	40	
ปริมาณฝุ่นละออง (TSP) <sup>(1)</sup> : ( $\text{mg}/\text{Nm}^3$ )	13.47	38.40	49.71	ไม่เกิน 400
$\text{SO}_2$ (ppm)	25.12	20.35	20.11	ไม่เกิน 30
$\text{NO}_x$ as $\text{NO}_2$ (ppm)	10.12	9.45	9.45	ไม่เกิน 250
Hg ( $\text{mg}/\text{Nm}^3$ )	ND <sup>(3)</sup>	ND	0.038	ไม่เกิน 0.05
Cd ( $\text{mg}/\text{Nm}^3$ )	ND	ND	ND	ไม่เกิน 0.5
Pb : ( $\text{mg}/\text{Nm}^3$ )	ND	ND	0.634	ไม่เกิน 1.5
HCL: (ppm)	N/A <sup>(4)</sup>	N/A	N/A	ไม่เกิน 136
ค่าความทึบแสง (Opacity) (%)	N/A	N/A	N/A	ไม่เกิน 20
สารประกอบไดออกซิน (PCDD/PCDFs) : (PCDD/Fs as Toxic Equivalent ; I-TEQ)	N/A	N/A	N/A	ไม่เกิน 0.5

หมายเหตุ : <sup>(1)</sup> ปริมาณฝุ่น อ้างอิงจากผลการวิเคราะห์ปริมาณทาร์และฝุ่น (ตารางที่ 4.9)

<sup>(2)</sup> ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการปล่อยทิ้งอากาศเสียจากเตาเผามูลฝอย ประกาศในราชกิจจานุเบกษา เล่ม 127 ตอนพิเศษ 87 ง ราชกิจจานุเบกษา 16 กรกฎาคม 2553

<sup>(3)</sup> ND: Not detected (Limit of Detection = 5 ppm or 5 mg/g)

<sup>(4)</sup> N/A: Not analysis

#### 4.6.2.2 สมดุลมวลของ ชาติอัลคาไลน์ โลหะหนัก และคลอรีน

สมดุลมวลของ ชาติอัลคาไลน์ โลหะหนัก และคลอรีน ดังแสดงใน ตารางที่ 4.18 ซึ่งเป็นการใช้ระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน เพื่อกำจัดขยะที่มีความชื้นต่างๆ ซึ่งเป็นไปตามสมมติฐาน คือ สารส่วนใหญ่จะถูพบในรูปเถ้าหนัก แต่พบว่า ความชื้นของวัตถุดิบ มีผลโดยตรงกับการคงรูปของมลสารในรูปเถ้าหนัก โดยที่ Waste reject ความชื้นสูง ~40% (wb) ซึ่งพบว่า ประสิทธิภาพในการกักเก็บมลสารรูปเถ้าหนักจะมีค่าน้อยลง (60.60%) เมื่อเปรียบเทียบกับ Waste reject ที่มีความชื้นต่ำ คือ 10 % (wb) และ 25% (wb) พบการคงอยู่ของเถ้าหนักที่ระดับ 89.08, 77.06 % ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจากความชื้นในวัตถุดิบ จะส่งผลให้เกิดการสูญเสียความร้อนเพื่อไปใช้ในการระเหยน้ำ จึงทำให้อุณหภูมิต่ำลง

การใช้ระบบ Plasma-assisted gasification เพื่อกำจัดขยะที่มีความชื้นสูง (~40% (wb)) จำเป็นต้องระวัง โดยเฉพาะสารประกอบไดออกซิน เนื่องจากอุณหภูมิในโซนเผาไหม้ของเตาปฏิกรณ์ต่ำ (~700 °C) ซึ่งการสร้างสารไดออกซิน/ฟูแรน จะมีการสร้างในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 200-650 °C โดยช่วงอุณหภูมิที่มีการสร้างมาก คือ ช่วงระหว่าง 200-450 °C และมากที่สุดที่ประมาณ 300 °C โดยกลไกคือ สารอนินทรีย์ชนิดคลอไรด์ เช่น NaCl หรือ HCl โดยเกิดเป็น Cl<sub>2</sub> เมื่อมีออกซิเจน หลังจากนั้น Cl<sub>2</sub> จะรวมตัวกับตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยา เกิดเป็น Chlorinated aromatics หรือ Dioxins/furans อย่างไรก็ดี Cl ส่วนใหญ่ถูกตรวจพบในรูป HCl ซึ่งปนเปื้อนในน้ำเสียน (ตารางที่ 4.19) ซึ่งผลการศึกษาที่ได้ มีความสอดคล้องกับงานวิจัยอื่นๆ (Malkow, 2003; Moustakas, et al. 2005; Bert et al, 2006)

ตารางที่ 4.16 สมดุลมวลของ ชาติอัลคาไลน์ โลหะหนักและคลอรีน (Waste reject ความชื้น 10 %, wb)

ประเภท	ความเข้มข้นสารมลพิษขาเข้า <sup>(1)</sup> (g/kg)	ความเข้มข้นสารมลพิษขาออก หรือ อัตราการปลดปล่อยมลพิษ (Emission factor) <sup>(2)</sup>			
		เถ้าหนัก (g/kg)	แก๊สเชื้อเพลิง (mg/kg)	น้ำเสียน (mg/kg)	สูญหาย (g/kg)
Al	3.224	2.92	0.04	247.76	0.06
Ca	53.722	50.37	14.92	0.00	3.34
Cl	5.092	2.65	3.43	1,742.50	0.70
Cr	0.093	0.06	0.21	0.04	0.03
Fe	1.597	1.48	0.37	ND	0.12
Hg	0.080	0.07	ND	ND	0.01
K	1.596	1.49	0.47	ND	0.10
Ni	1.165	0.95	1.10	ND	0.22

ตารางที่ 4.16 สมดุลมวลของ ธาตุอัลคาไลน์ โลหะหนักและคลอรีน (Waste reject ความชื้น 10 %, wb)  
(ต่อ)

ประเภท	ความเข้มข้นสาร มลพิษขาเข้า <sup>(1)</sup> (g/kg)	ความเข้มข้นสารมลพิษขาออก หรือ อัตราการปลดปล่อยมลพิษ (Emission factor) <sup>(2)</sup>			
		เถ้าหนัก (g/kg)	แก๊สเชื้อเพลิง (mg/kg)	น้ำเสีย (mg/kg)	สูญหาย (g/kg)
P	1.684	1.38	2.65	ND	0.30
Pb	0.069	0.06	0.00	1.94	0.01
Si	7.852	6.97	2.31	ND	0.87
Ti	7.124	5.81	4.96	ND	1.31
สัดส่วน (%)		89.08	0.04	2.39	8.49

หมายเหตุ: <sup>(1)</sup> มวลสารมลพิษที่สะสมในเชื้อเพลิงเริ่มต้น

<sup>(2)</sup> อัตราการปลดปล่อยมลพิษ (Emission factor) = [มวลสารมลพิษที่ปลดปล่อย]/[กิโลกรัมเชื้อเพลิงที่ ป้อนเข้าระบบ]

<sup>(3)</sup> ND: Not detected (Limit of Detection = 5 ppm or 5 mg/g)

ตารางที่ 4.17 สมดุลมวลของ ธาตุอัลคาไลน์ โลหะหนักและคลอรีน (Waste reject ความชื้น 25%, wb)

ประเภท	ความเข้มข้นสาร มลพิษขาเข้า <sup>(1)</sup> (g/kg)	ความเข้มข้นสารมลพิษขาออก หรือ อัตราการปลดปล่อยมลพิษ (Emission factor) <sup>(2)</sup>			
		เถ้าหนัก (g/kg)	แก๊สเชื้อเพลิง (mg/kg)	น้ำเสีย (mg/kg)	สูญหาย (g/kg)
Al	3.224	2.8814	0.041	ND	0.343
Ca	53.722	45.8181	31.109	ND	7.873
Cl	5.092	1.4853	3.933	2,461.54	1.141
Cr	0.093	0.0465	0.371	ND	0.046
Fe	1.597	1.1889	2.325	ND	0.406
Hg	0.080	0.0598	ND	ND	0.020
K	1.596	1.3381	0.764	ND	0.257
Ni	1.165	0.6325	1.225	ND	0.532
P	1.684	1.2035	0.665	ND	0.480
Pb	0.069	0.0548	0.000	2.00	0.013
Si	7.852	5.5201	13.850	ND	2.318
Ti	7.124	3.9594	19.825	ND	3.145
สัดส่วน (%)		77.06	0.09	2.96	19.90

หมายเหตุ: <sup>(1)</sup> มวลสารมลพิษที่สะสมในเชื้อเพลิงเริ่มต้น

<sup>(2)</sup> อัตราการปลดปล่อยมลพิษ (Emission factor) = [มวลสารมลพิษที่ปลดปล่อย]/[กิโลกรัมเชื้อเพลิงที่ ป้อนเข้าระบบ]

<sup>(3)</sup> ND: Not detected (Limit of Detection = 5 ppm or 5 mg/g)

ตารางที่ 4.18 สมดุลมวลของ ชาติอัลคาไลน์ โลหะหนักและคลอรีน (Waste reject ความชื้น 40%, wb)

ประเภท	ความเข้มข้นสาร มลพิษเข้า <sup>(1)</sup> (g/kg)	ความเข้มข้นสารมลพิษออก หรือ อัตราการปลดปล่อยมลพิษ (Emission factor) <sup>(2)</sup>			
		เถ้าหนัก (g/kg)	แก๊สเชื้อเพลิง (mg/kg)	น้ำเสีย (mg/kg)	สูญหาย (g/kg)
Al	3.224	2.530	3.128	ND	0.691
Ca	53.722	37.736	1.437	ND	15.985
Cl	5.092	0.166	6.591	3,938.46	0.981
Cr	0.093	0.030	14.607	ND	0.048
Fe	1.597	1.049	7.473	ND	0.540
Hg	0.080	0.056	0.074	ND	0.017
K	1.596	0.883	4.740	ND	0.709
Ni	1.165	0.466	13.420	ND	0.686
P	1.684	0.900	3.352	ND	0.781
Pb	0.069	0.045	0.932	2.89	0.016
Si	7.852	5.337	6.947	ND	2.508
Ti	7.124	3.757	10.387	ND	3.357
สัดส่วน (%)		63.57	0.10	4.73	31.60

หมายเหตุ : <sup>(1)</sup> มวลสารมลพิษที่สะสมในเชื้อเพลิงเริ่มต้น

<sup>(2)</sup> อัตราการปลดปล่อยมลพิษ (Emission factor) = [มวลสารมลพิษที่ปลดปล่อย] / [กิโลกรัมเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าระบบ]

<sup>(3)</sup> ND: Not detected (Limit of Detection = 5 ppm or 5 mg/g)

#### 4.6.2.3 สารมลพิษอื่นๆ ในรูปน้ำเสีย

ข้อมูล ตารางที่ 4.19 แสดงสารในน้ำเสีย สำหรับ COD, TKN, Phenols ซึ่งถูกประเมินให้อยู่ในรูปอัตราการปลดปล่อยมลพิษ (Emission factor) หน่วย (กรัม-สารมลพิษที่ปลดปล่อย)/(กิโลกรัมเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าระบบ) เช่นเดียวกัน โดยภาพรวมเห็นได้ว่า พารามิเตอร์ ซึ่งบ่งบอกถึงความสกปรกในน้ำเสีย (COD) เห็นชัดเจนที่สุด โดยมีแนวโน้มมีค่าสูง เมื่อกำจัดขยะ Waste reject ที่มีความชื้นมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากการกำจัดขยะ ที่มีความชื้นสูงๆ เป็นข้อจำกัดอย่างยิ่งทำให้ไม่สามารถเพิ่มอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ให้สูงได้ ซึ่งมีผลให้มีการปนเปื้อนของอนุภาคต่างๆ ในแก๊สเชื้อเพลิงสูง จึงส่งผลให้มีการสะสมในน้ำเสียมากขึ้น

ตารางที่ 4.19 อัตราการปลดปล่อยมลพิษ (Emission factor) ในรูปน้ำเสีย

สารมลพิษ	ความเข้มข้นสารมลพิษในรูปน้ำเสีย (g/kg) (Waste reject ความชื้นต่างๆ)		
	10 wt% (wb)	25 wt% (wb)	40 wt% (wb)
COD	95.53	117.97	133.48
TKN	0.70	1.30	2.19
H <sub>2</sub> S	ND	ND	ND
Phenols	0.85	1.02	1.33

หมายเหตุ: <sup>(1)</sup> มวลสารมลพิษที่สะสมในเชื้อเพลิงเริ่มต้น

<sup>(2)</sup> อัตราการปลดปล่อยมลพิษ (Emission factor) = [มวลสารมลพิษที่ปลดปล่อย] / [ปริมาณเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าระบบ]

<sup>(3)</sup> ND: Not detected (Limit of Detection = 0.03 ppm)

### 4.6.3 การวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อประเมินมลพิษสิ่งแวดล้อม

#### 4.6.3.1 การวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้ PCA เปรียบเทียบระบบ C-G และ P-G

จากการทดสอบใช้เชื้อเพลิง RDF-5/WC (70/30) เติรระบบเปรียบเทียบระหว่างระบบ C-G และ P-G และประเมินมลพิษสิ่งแวดล้อม และทำสมดุลมวลสารในหัวข้อที่ผ่านมาเห็นถึงภาพรวมว่ามลสารส่วนใหญ่คงอยู่ในรูปของเถ้า ทั้งกรณีของระบบ C-G และระบบ P-G อย่างไรก็ดี เพื่อให้สามารถประเมินพฤติกรรมของมลสาร ได้อย่างชัดเจนมากยิ่งขึ้น จึงได้นำข้อมูลมาวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้การวิเคราะห์ตัวประกอบสำคัญ (Principle Component Analysis: PCA) เพื่อศึกษาการรวมตัวของข้อมูล ทั้งนี้อธิบายพฤติกรรมของธาตุกลุ่มโลหะหนัก อัลคาไลน์ และคลอรีน ไปสู่รูปต่างๆ ได้แก่ มลสารที่ปนเปื้อนในเถ้าหนัก ปนเปื้อนในแก๊สเชื้อเพลิง ปนเปื้อนน้ำเสีย และส่วนที่สูญหาย เปรียบในระบบแก๊สซิฟิเคชัน (C-G) และระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน (P-G) ให้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น

ผลการวิเคราะห์ PCA พบว่า พฤติกรรมของธาตุกลุ่มโลหะหนัก อัลคาไลน์ และคลอรีน ที่มีอยู่ในเชื้อเพลิง RDF-5/WC (70/30) เริ่มต้นเมื่อผ่านกระบวนการทางความร้อนทั้งระบบ C-G และ ระบบ P-G จะกระจายตัวไปอยู่ในรูปต่างๆ ได้แก่ ปนเปื้อนในเถ้าหนัก ปนเปื้อนในแก๊สเชื้อเพลิง ปนเปื้อนน้ำเสีย และมีบางส่วนสูญหาย โดยสามารถจำแนกองค์ประกอบหลักได้ 2 องค์ประกอบ คือ PC1 และ PC2 โดยองค์ประกอบหลัก 2 องค์ประกอบนี้ อธิบายความแปรปรวนได้ทั้งหมด 91.39% ดังแสดงใน รูปที่ 4.12 โดยที่ PC1 และ PC2 อธิบายความแปรปรวนได้ 66.38% และ 25.01% ตามลำดับ โดยพบว่า PC1 สัมพันธ์กับ กลุ่มของมลสารที่ปนเปื้อนในเถ้าหนัก

กลุ่มของมลสารที่ปนเปื้อนแก๊สเชื้อเพลิง และ ส่วนที่สูญหายไป ส่วนองค์ประกอบ PC2 สัมพันธ์กับกลุ่มของมลสารที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย

ทั้งนี้สรุปได้ว่า PC 2 องค์ประกอบ สามารถบอกลักษณะของข้อมูลได้เกือบทั้งหมด โดยเมื่อพิจารณา ตารางที่ 4.20 ซึ่งแสดงปัจจัยน้ำหนัก (Factor loadings) กับองค์ประกอบ เห็นได้ว่า Factor loadings ของ PC1 มีความสัมพันธ์กับ มลสารเถ้าหนัก มลสารแก๊สเชื้อเพลิง และ มลสารส่วนที่สูญหาย ซึ่งค่า Factor loadings มีค่าสูง เท่ากับ 0.806 0.901 และ 0.939 ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาจากข้อมูลสมมูลมวลสารของธาตุกลุ่มโลหะหนัก อัลคาไลน์ และคลอรีน (ตารางที่ 4.13) เห็นได้ชัดเจนว่า พฤติกรรมของธาตุโลหะหนัก อัลคาไลน์ มีพฤติกรรมที่คล้ายคลึง คือ พบในเถ้าหนัก ในแก๊สเชื้อเพลิง และบางส่วนสูญหาย ในขณะที่ PC2 มีค่า Factor loadings ของ ความสัมพันธ์กับกลุ่มมลสารในน้ำเสีย ซึ่งมีค่า Factor loadings เท่ากับ 0.989 ซึ่งอธิบายให้เห็น พฤติกรรมของธาตุในน้ำเสีย ธาตุคลอรีนส่งผลต่อ Factor loadings เป็นปัจจัยสำคัญ

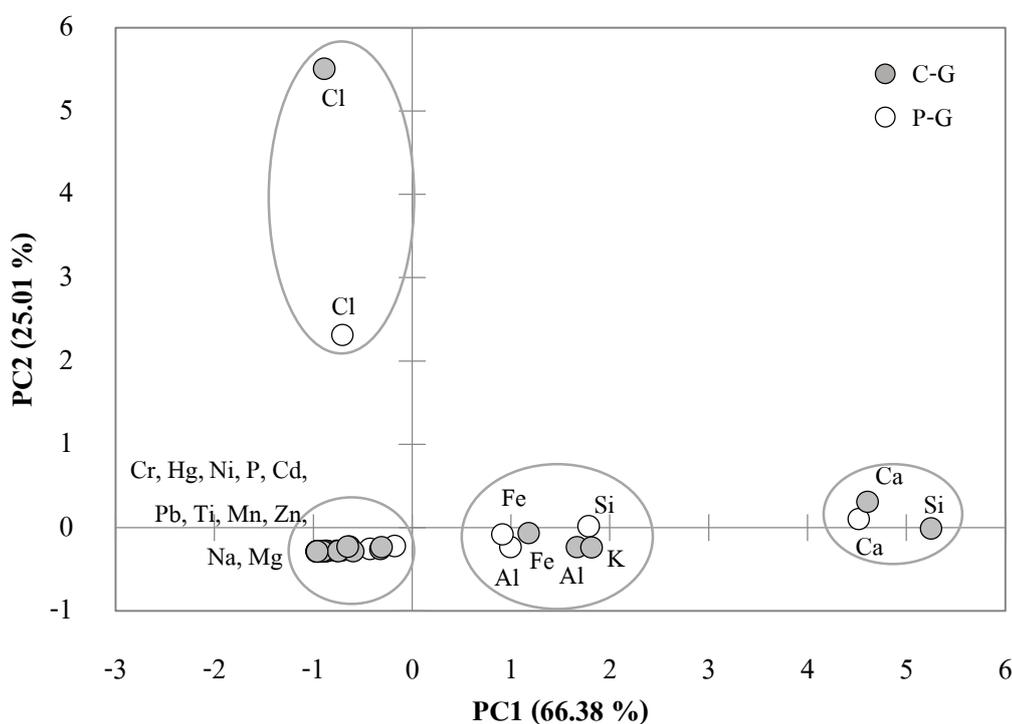
สามารถนำผลของการวิเคราะห์ทางสถิติ PCA มาอธิบายเพิ่มเติมได้ว่า องค์ประกอบโลหะหนักที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงเมื่อถูกกระตุ้นที่อุณหภูมิสูงจากกระบวนการอุณหภูมิในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง ส่วนใหญ่จะคงอยู่ในรูปของเถ้าหนัก มีบางส่วนจะอยู่ในรูปเถ้าลอยเป็นละอองฝุ่นขนาดเล็ก บางส่วนอยู่ในสถานะระเหยไอแก๊ส (vapor) และปนเปื้อนอยู่ในแก๊สร้อน สำหรับธาตุคลอรีน จะเนื่องจากเป็นธาตุในหมู่ฮาโลเจน ซึ่งเป็นสารที่ไม่เสถียร สามารถสลายตัวเมื่อเป็นไอได้รวดเร็ว ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน คลอรีน จะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของ HCl ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Helble et al. (1995); Marrero et al. (2004); Vervaeke et al. (2005); Kwak et al. (2006); Pinto et al. (2007)

ทั้งนี้ สารที่สูญหาย สามารถอธิบายได้ว่า อยู่ในรูปของเถ้าลอย ซึ่งถูกเก็บสะสมไว้ที่ระบบบำบัดคือ Cyclone Collector บางส่วนที่เป็นอนุภาคขนาดเล็กมาก อาทิ ละอองไอแก๊ส อาจถูกเก็บสะสมในระบบ Fabric filter ตลอดจนมีการสะสมในระบบ (ท่อ วาล์ว) เนื่องด้วยการเดินระบบ ไม่ได้ทำการวิเคราะห์ห้มลสารที่อาจตกสะสมใน 2 ตำแหน่งนี้ เนื่องในทางปฏิบัติมีความยุ่งยากในการเก็บตัวอย่าง ซึ่งยังถือเป็นข้อจำกัดในงานวิจัยนี้ อย่างไรก็ดี อ้างอิงงานวิจัยของ Vervaeke et al., (2006) และ Lemmens et al. (2007) ซึ่งก็ได้สรุปว่าสัดส่วนของการกระจายตัวของโลหะหนักส่วนใหญ่คืออยู่ในรูปของเถ้า สัดส่วนที่อยู่ในรูปของเถ้าหนักจะมีมากกว่า และมีบางส่วนเป็นเถ้าเบา (Fly ash) ซึ่งถูกกักเก็บไว้ใน Cyclone และ Filter

อย่างไรก็ดี ในงานวิจัยนี้โดยรวมแล้วสัดส่วนการสูญเสียเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับที่ตรวจพบ มลสารที่สูญเสีย คาดการณ์ได้ว่าตกสะสมอยู่ในระบบ ซึ่งสอดคล้องว่า มีปนเปื้อนน้อยในแก๊สเชื้อเพลิง จึงประเมินได้ว่าจะมีการรั่วไหลของสารมลพิษไปสู่สิ่งแวดล้อมได้น้อยมาก ตามที่งานวิจัยอื่นๆ ได้ยืนยันว่าระบบแก๊สซิฟิเคชันถือเป็นระบบที่มีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม มี

การปลดปล่อยมลพิษสู่สิ่งแวดล้อมในระดับที่ต่ำมาก (Larson, 1998; Stiegel, 2001 ; Malkow, 2003; Arena, 2012; Li et al., 2012; Seggiani et al., 2012)

สรุปโดยภาพรวมคือ การกำจัดขยะด้วยกระบวนการทางความร้อนส่งผลให้มีปริมาณการกระจายของธาตุไปสู่รูปที่ต่างๆ แต่โดยสรุปธาตุส่วนใหญ่ยังอยู่ในรูปของเถ้าหนัก และพบว่า การใช้ระบบ P-G สามารถคงรูปของสารในรูปเถ้าหนักได้มากกว่า ซึ่งเป็นผลดีเนื่องจากมลสารในรูปนี้ สามารถกำจัดได้ง่ายกว่ามลพิษในรูปอื่นๆ



รูปที่ 4.12 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (PCA) ของการกระจายตัวของธาตุกลุ่มโลหะหนัก อัลคาไลด์ และคลอรีน

ตารางที่ 4.20 ปัจจัยน้ำหนัก (Factor loading) ที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวประกอบสำคัญ (PCA) ของการกระจายตัวของธาตุกลุ่มโลหะหนัก อัลคาไลด์ และคลอรีน

ตำแหน่ง	PC1	PC2	PC3	PC4
เถ้าหนัก	<b>0.806</b>	0.012	0.181	0.001
แก๊สเชื้อเพลิง	<b>0.901</b>	0.000	0.070	0.029
น้ำเสีย	0.009	<b>0.989</b>	0.002	0.000
ส่วนที่สูญหาย	<b>0.939</b>	0.000	0.019	0.041

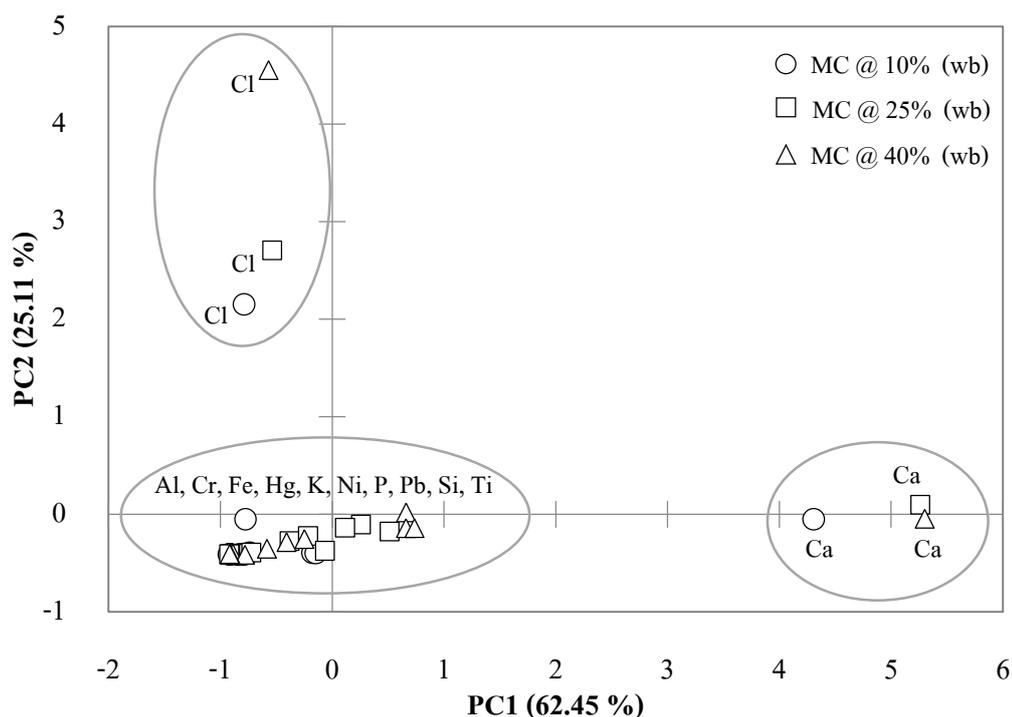
#### 4.6.3.2 การวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้ PCA สำหรับปัจจัยความชื้นเชื้อเพลิงกับระบบ P-G

จากการทดสอบใช้เชื้อเพลิง Waste reject ที่ความชื้น 10 25 40 %wb เติระบบ P-G และประเมินมลพิษสิ่งแวดล้อม และทำสมดุลมวลสารในหัวข้อที่ผ่านมา เห็นถึงภาพรวมว่า มลสารส่วนใหญ่คงอยู่ในรูปของเถ้า เช่นกัน อย่างไรก็ตาม เพื่อให้สามารถประเมินพฤติกรรมของมลสาร ได้อย่างชัดเจนมากยิ่งขึ้น จึงได้นำข้อมูลมาวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้การวิเคราะห์ตัวประกอบสำคัญ (Principle Component Analysis: PCA) เพื่อศึกษาการรวมตัวของข้อมูล ทั้งนี้อธิบายพฤติกรรมของธาตุกลุ่มโลหะหนัก อัลคาไลน์ และคลอรีน ไปสู่รูปต่างๆ ได้แก่ มลสารที่ปนเปื้อนในเถ้าหนัก ปนเปื้อนในแก๊สเชื้อเพลิง ปนเปื้อนน้ำเสีย และส่วนที่สูญหาย ให้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น

ผลการวิเคราะห์ PCA พบว่า โดยสามารถจำแนกองค์ประกอบหลักได้ 2 องค์ประกอบ คือ PC1 และ PC2 โดยองค์ประกอบหลัก 2 องค์ประกอบนี้ อธิบายความแปรปรวนได้ทั้งหมด 89.56% ดังแสดงใน รูปที่ 4.13 โดยที่ PC1 และ PC2 อธิบายความแปรปรวนได้ 62.45% และ 25.11% ตามลำดับ โดยพบว่า PC1 สัมพันธ์กับ กลุ่มของมลสารที่ปนเปื้อนในเถ้าหนัก กลุ่มของมลสารที่ปนเปื้อนแก๊สเชื้อเพลิง และ ส่วนที่สูญหายไป ส่วนองค์ประกอบ PC2 สัมพันธ์กับ กลุ่มของมลสารที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย ทั้งนี้สรุปได้ว่า PC 2 องค์ประกอบ สามารถบอกลักษณะของข้อมูลได้เกือบทั้งหมด โดยเมื่อพิจารณา ตารางที่ 4.21

ซึ่งแสดงปัจจัยน้ำหนัก (Factor loadings) กับองค์ประกอบเห็นได้ว่า Factor loadings ของ PC1 มีความสัมพันธ์กับ มลสารเถ้าหนัก มลสารแก๊สเชื้อเพลิง และมลสารส่วนที่สูญหาย ในขณะที่ PC2 มีค่า Factor loadings ของ ความสัมพันธ์กับกลุ่มมลสารในน้ำเสีย

ทั้งนี้สรุปโดยภาพรวม คือ ความชื้นของวัตถุดิบระหว่าง 10 ถึง 40% wt (wb) ไม่ส่งผลต่อพฤติกรรมกระจายตัวไปสู่รูปแบบต่างๆ แม้ว่าจะมีปริมาณที่ต่างกันก็ตาม ซึ่งโดยสรุปคือ การกำจัดขยะด้วยกระบวนการทางความร้อนส่งผลให้มีปริมาณการกระจายของธาตุไปสู่รูปที่ต่างๆ แต่โดยสรุปธาตุส่วนใหญ่ยังอยู่ในรูปของเถ้าหนัก



รูปที่ 4.13 ..... ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (PCA) ของการกระจายตัวของธาตุกลุ่มโลหะหนัก อัลคาไรด์ และคลอรีนในวัสดุคืบ Waste reject ที่ความชื้น 10 25 และ 40% (wb)

ตารางที่ 4.21 ปัจจัยน้ำหนัก (Factor loading) ที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวประกอบสำคัญ (PCA) ของการกระจายตัวของธาตุกลุ่มโลหะหนัก อัลคาไรด์ และคลอรีนใน Waste reject ที่ความชื้น 10 25 และ 40% (wb)

ตำแหน่ง	PC1	PC2	PC3	PC4
เถ้านัก	<b>0.858</b>	0.000	0.017	0.124
แก๊สเชื้อเพลิง	<b>0.531</b>	0.023	0.434	0.012
น้ำเสีย	0.013	<b>0.977</b>	0.009	0.001
สูญหาย	<b>0.733</b>	0.000	0.186	0.080

#### 4.6.4 การทดสอบการชะละลายโลหะหนักจากถ้ำ

เนื่องด้วยจากการวิเคราะห์และประเมินการกระจายตัวไปของสารมลพิษ พบว่า มลสารส่วนใหญ่จะคงตัวอยู่ในรูปของถ้ำหนัก หากพิจารณาในด้านการบำบัดมลพิษในรูปถ้ำหนักสามารถจัดการได้ง่ายกว่ารูปอื่น ยิ่งไปกว่านั้น ยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์โดยใช้ผสมกับวัสดุอื่นๆทำเป็นวัสดุก่อสร้างได้ ทั้งนี้ จึงจำเป็นต้องพิจารณาถึงโลหะหนักที่สะสมอยู่ในถ้ำ ที่สามารถถูกชะละลายไปสู่การปนเปื้อนต่อสิ่งแวดล้อม เช่น ดิน แหล่งน้ำผิวดิน หรือน้ำใต้ดินได้ง่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งโลหะหนักที่มีพิษถาวร (As, Cd, Hg, Pb) ซึ่งไม่เปลี่ยนรูปไปตามกาลเวลาแล้ว และสามารถสะสมในร่างกายมนุษย์และสัตว์น้ำได้ การวิเคราะห์การชะละลายโลหะหนักนี้ด้วยวิธีการทดสอบตามมาตรฐานของ US.EPA และทำการทดสอบการชะละลายโลหะหนักด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) ซึ่งได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.22 และตารางที่ 4.23 โดยพบว่า แนวโน้มถ้ำของเชื้อเพลิงที่เดินระบบด้วยระบบ P-G จะมีการชะละลายโลหะหนักออกมาได้น้อยกว่า นั้นอาจเป็นเพราะการคงรูปของโลหะหนัก และยังพบว่า Fe และ Zn มีแนวโน้มที่จะถูกชะละลายได้ง่ายกว่า โลหะหนักอื่นๆ (Rocca et al, 2012) อย่างไรก็ตาม ผลการทดสอบการชะละลายของโลหะหนักทุกธาตุ มีค่าไม่เกินที่มาตรฐานกำหนด

ตารางที่ 4.22 ผลทดสอบการชะละลายของถ้ำ ของเชื้อเพลิง RDF-5/WC (70/30)

##### เปรียบเทียบระบบ C-G และ P-G

ธาตุ	ระบบ C-G	ระบบ P-G	มาตรฐาน <sup>(1)</sup>
Fe	61.7	44.1	ไม่กำหนด
Cr	0.097	0.08	5
Hg	ND	ND	ไม่กำหนด
Ni	0.292	0.245	ไม่กำหนด
Pb	0.265	0.019	5
Cd	0.035	0.002	1
Cu	1.040	0.12	ไม่กำหนด
Mn	11.17	1.78	ไม่กำหนด
Zn	12.68	4.59	ไม่กำหนด

หมายเหตุ : <sup>(1)</sup> ค่ามาตรฐานตาม US.EPA : Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP)

ตารางที่ 4.23 ผลทดสอบการชะละลายของเถ้า Waste reject ของ Waste reject ที่ความชื้นต่างๆ

ธาตุ	ความเข้มข้นของโลหะหนัก (mg/l)			มาตรฐาน <sup>(1)</sup>
	MC @10 %wb	MC @25 %wb	MC @40 %wb	
Cr	0.09	0.11	0.28	5
Fe	67.80	82.34	92.00	ไม่กำหนด
Hg	ND	ND	0.12	ไม่กำหนด
Ni	0.38	0.45	0.61	ไม่กำหนด
Pb	0.36	1.32	1.74	5

หมายเหตุ : <sup>(1)</sup> ค่ามาตรฐานตาม US.EPA : Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP)

#### 4.7 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการประเมินระบบ

ในการทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการทำนายค่าคุณภาพของแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้รวมไปถึงประสิทธิภาพของการผลิตแก๊ส จะแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ 1) การทำนายโดยใช้คุณสมบัติจากการวิเคราะห์ทั้งแบบประมาณและแยกธาตุ ร่วมกับลักษณะของการเดินระบบ ซึ่งได้แก่ อัตราการป้อนวัตถุดิบ (Fuel) และอัตราการป้อนอากาศ (Flow) สำหรับการเดินระบบ C-G และ 2) การทำนายโดยใช้ค่าความชื้นของวัตถุดิบสำหรับการเดินระบบ P-G โดยกลุ่มแรกจะใช้วิธีวิเคราะห์แบบถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ และกลุ่มที่สองจะใช้วิธีวิเคราะห์แบบถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย

สำหรับการสร้างแบบจำลองแบบถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ มีขั้นตอนเริ่มต้นจากการเลือกข้อมูลตัวแปรอิสระ (องค์ประกอบแบบแยกธาตุกับลักษณะการเดินระบบ และองค์ประกอบแบบประมาณกับลักษณะการเดินระบบ) ที่มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% กับคุณภาพของแก๊สเชื้อเพลิง ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ) และประสิทธิภาพการผลิตแก๊ส ( $\eta_{\text{cg}}$ ) ผลการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ดังกล่าวนี้ แสดงในตารางที่ 4.24 และ ตารางที่ 4.25

ตารางที่ 4.24 ตัวแปรอิสระจากองค์ประกอบแบบแยกธาตุกับลักษณะการเดินระบบ ที่มีความสัมพันธ์กับคุณภาพและประสิทธิภาพของแก๊สที่ผลิตได้ อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

Predicted Parameter	Predicting Parameter (R)
CO	AC (-0.967), FC (0.967), VM (0.967), LHV (-0.967), Flow (0.218)
$\text{H}_2$	AC (-0.771), FC (0.771), VM (0.771), LHV (-0.771), Flow (0.200)
$\text{CH}_4$	AC (0.942), FC (-0.941), VM (-0.942), LHV (0.942), Flow (0.335), Fuel (0.238)
CV	AC (-0.261), FC (0.261), VM (0.261), LHV (0.261), Flow (0.851), Fuel (0.600)
$\eta_{\text{cg}}$	AC (-0.618), FC (0.618), VM (0.618), LHV (0.619), Flow (0.402)

ตารางที่ 4.25 ตัวแปรอิสระจากองค์ประกอบแบบประมาณกับลักษณะการเดินระบบ ที่มีความสัมพันธ์กับคุณภาพและประสิทธิภาพของแก๊สที่ผลิตได้ อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

Predicted Parameter	Predicting Parameter (R)
CO	Carbon (-0.967), Hydrogen (-0.967), Oxygen (0.967), LHV (-0.967), Flow (0.220)
H <sub>2</sub>	Carbon (-0.770), Hydrogen (-0.767), Oxygen (0.771), LHV (-0.771), Flow (0.220)
CH <sub>4</sub>	Carbon (0.942), Hydrogen (0.941), Oxygen (-0.942), LHV (0.942), Flow (0.335)
CV	Carbon (-0.261), Hydrogen (0.259), Oxygen (0.261), LHV (0.261), Flow (0.851), Fuel (0.600)
$\eta_{cg}$	Carbon (-0.618), Hydrogen (-0.613), Oxygen (0.619), LHV (0.619), Flow (0.402)

หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ โดยวิธี Stepwise selection และคัดเลือกตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ผลการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายคุณสมบัติของแก๊สและประสิทธิภาพของการผลิตแก๊ส โดยใช้ค่าจากการวิเคราะห์แบบประมาณและแบบแยกธาตุของเชื้อเพลิง RDF-5/WC (70/30) ดังแสดงใน ตารางที่ 4.26 และ ตารางที่ 4.27 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.26 ผลการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายคุณสมบัติของแก๊สและประสิทธิภาพของการผลิตแก๊ส โดยใช้ค่าจากการวิเคราะห์แบบประมาณของเชื้อเพลิง RDF-5/WC (70/30) (N = 27)

Parameter	Prediction model	Adj. R <sup>2</sup>	RMSE
CO	- 4.059 + 1.315 (FC) + 0.026 (Flow)	0.98	0.62
H <sub>2</sub>	- 13753.82 + 413.042 (AC) - 961.124 (Fuel)	0.88	1.13
CH <sub>4</sub>	7.401 - 0.592 (FC) + 0.028 (Fuel)	0.98	0.25
CV	9109.581 + 253.611 (FC) - 147.934 (VM) + 0.022 (Fuel)	0.77	0.22
$\eta_{cg}$	89.837 - 3.222 (LHV) + 0.455 (Flow) - 0.617 (Fuel)	0.89	3.86

ตารางที่ 4.27 ผลการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายคุณสมบัติของแก๊สและประสิทธิภาพของการผลิตแก๊ส โดยใช้ค่าจากการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของเชื้อเพลิง RDF-5/WC (70/30) (N = 27)

Parameter	Prediction model	Adj. R <sup>2</sup>	RMSE
CO	-21.187 – 0.891 (Oxygen) + 0.026 (Flow)	0.97	0.61
H <sub>2</sub>	132.767 - 15.595 (Hydrogen) - 0.163 (LHV) + 0.199 (Flow)	0.926	0.918
CH <sub>4</sub>	- 45.119 + 0.914 (Carbon) + 0.028 (Fuel)	0.98	0.25
CV	- 499.831 + 78.114 (Hydrogen) - 8.105 (LHV) + 0.011 (Flow)	0.77	0.22
$\eta_{cg}$	- 31978.87 + 4971.986 (Hydrogen) - 515.694 (LHV) + 0.136 (Flow)	0.88	4.01

เพื่อที่จะตรวจสอบสมมติฐานของการสร้างแบบจำลองแบบถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ ได้มีการทำการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อน (Residual analysis) โดยพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standardized residuals) พบว่า แบบจำลองที่ได้พัฒนาขึ้นทั้งการนำเอาองค์ประกอบแบบประมาณและแบบแยกธาตุ ร่วมกับสภาวะการเดินระบบ มีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับศูนย์ทั้งหมด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองเหล่านี้เป็นไปตามข้อตกลงเบื้องต้นสำหรับการสร้างแบบจำลองแบบถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ

ตารางที่ 4.28 ผลการทดสอบค่าความคลาดเคลื่อนจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายคุณสมบัติของแก๊สและประสิทธิภาพของการผลิตแก๊สจากองค์ประกอบแบบประมาณของเชื้อเพลิง RDF-5/ WC (70/30)

Predicted Parameter	Standardized mean residuals	Durbin-Watson
CO	0.000	1.533
H <sub>2</sub>	0.000	1.654
CH <sub>4</sub>	0.000	2.031
CV	0.000	1.368
$\eta_{cg}$	0.000	1.112

ตารางที่ 4.29 ผลการทดสอบค่าความคลาดเคลื่อนจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายคุณสมบัติของแก๊สและประสิทธิภาพของการผลิตแก๊สจากองค์ประกอบแบบแยกธาตุ ของเชื้อเพลิง RDF-5/WC (70/30)

Predicted Parameter	Standardized mean residuals	Durbin-Watson
CO	0.000	1.532
H <sub>2</sub>	0.000	1.654
CH <sub>4</sub>	0.000	1.721
CV	0.000	1.258
$\eta_{cg}$	0.000	1.444

นอกจากนี้ ได้มีการทดสอบความเป็นอิสระของค่าความคลาดเคลื่อน โดยใช้สถิติทดสอบ Durbin-Watson (DW) โดยจะพิจารณาจากค่าที่อยู่ในช่วง 0-4 สำหรับผลทดสอบที่มีค่า DW ที่ใกล้กับ 2 จะเป็นกรณีที่ความคลาดเคลื่อนไม่มีสหสัมพันธ์ ถ้าค่าน้อยกว่า 1.5 วิ่งเข้าใกล้ 0 แสดงว่าความคลาดเคลื่อนยังมีความสัมพันธ์กันมากในเชิงบวก แต่ถ้าค่ามากกว่า 2.5 และเข้าใกล้ 4 แสดงว่าความคลาดเคลื่อนยังมีความสัมพันธ์กันมากในเชิงลบ จากผลการทดสอบดังตารางที่ 4.29 พบว่า ค่า DW มีค่าใกล้เคียงกับ 1.5 แสดงว่าค่าความคลาดเคลื่อนค่อนข้างจะเป็นอิสระต่อกัน ดังนั้นแบบจำลองที่ได้จึงเป็นไปตามข้อกำหนด

ผลการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายคุณภาพของแก๊ส ซึ่งได้แก่ องค์ประกอบค่าความร้อน รวมไปถึง ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง ( $\eta_{cg}$ ) โดยใช้ค่าจากการวิเคราะห์แบบประมาณและแบบแยกธาตุของวัตถุดิบผสมระหว่าง RDF-5 และไม้สับ แสดงดัง ตารางที่ 4.26 และ ตารางที่ 4.27 ตามลำดับ พบว่า องค์ประกอบแบบประมาณและลักษณะการเดินระบบซึ่งได้แก่ อัตราการป้อนอากาศ (Flow) และอัตราการป้อนวัตถุดิบ (Fuel) ส่งผลต่อการทำนายคุณภาพแก๊สและประสิทธิภาพที่ได้ต่างกันออกไป โดยที่ค่าปริมาณคาร์บอนคงที่ (FC) ของวัตถุดิบมีความสำคัญในการทำนายค่าคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) มีเทน (CH<sub>4</sub>) และค่าความร้อนของแก๊ส (CV) ในขณะที่ปริมาณเถ้า (AC) และปริมาณสารละลาย (VM) ส่งผลต่อองค์ประกอบของไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) และ ค่าความร้อนของแก๊ส (CV) ตามลำดับ สำหรับสภาพการทำงานของระบบ อัตราการป้อนวัตถุดิบ (Fuel) ส่งผลต่อองค์ประกอบของคุณภาพและประสิทธิภาพของแก๊สที่ผลิตได้ ยกเว้นคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่ขึ้นกับอัตราการไหลของอากาศที่ป้อนเข้าสู่ระบบ

ส่วนการศึกษาคูณภาพและประสิทธิภาพการผลิตแก๊ส จากองค์ประกอบแบบแยกธาตุและลักษณะการเดินระบบ พบว่าธาตุไฮโดรเจน (H) ในวัตถุดิบเป็นตัวแปรหลักในการทำนายการผลิตแก๊สไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) เป็นตัวกำหนดค่าความร้อน (CV) และประสิทธิภาพของแก๊สที่ผลิตได้ ( $\eta_{cg}$ ) ส่วนธาตุออกซิเจน (O) และคาร์บอน (C) เป็นธาตุที่กำหนดปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และมีเทน (CH<sub>4</sub>) ตามลำดับ ในขณะที่สภาวะการเดินระบบ อัตราการไหลจะเป็นตัวแปรหลักในการทำนายคุณภาพและประสิทธิภาพของแก๊สที่ผลิตได้ ยกเว้นแก๊สมีเทน (CH<sub>4</sub>) ที่ขึ้นอยู่กับอัตราการป้อนวัตถุดิบเข้าระบบ โดยภาพรวม แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบถดถอยพหุคูณเชิงเส้นสามารถทำนายคุณสมบัติของแก๊สและประสิทธิภาพการผลิตแก๊สได้ดี เมื่อใช้คุณสมบัติที่ได้จากการวิเคราะห์แบบประมาณและแบบแยกธาตุ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) อยู่ในช่วง 0.77-0.98

เช่นเดียวกับการทำนายคุณภาพและประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากคุณค่าองค์ประกอบแบบประมาณและแบบแยกธาตุ ในส่วนของ การเดินระบบ P-G ผลของความชื้นของวัตถุดิบได้นำมาสร้างแบบจำลองถดถอยเส้นตรงอย่างง่าย โดยผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.30 และได้มีการตรวจสอบข้อตกลงเบื้องต้นในการทำแบบจำลองโดยการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนและความเป็นอิสระของค่าความคลาดเคลื่อนเช่นเดียวกับการทำแบบจำลองถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ ซึ่งผลแสดงใน ตารางที่ 4.31

ตารางที่ 4.30 ผลการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายคุณสมบัติของแก๊สและประสิทธิภาพของการผลิตแก๊สโดยใช้ค่าความชื้นของ Waste reject (N = 36)

Parameter	Prediction Model	Adj. R <sup>2</sup>	RMSE
CO	14.517 - 0.123 (MC)	0.86	0.76
H <sub>2</sub>	12.958 + 0.055 (MC)	0.99	0.05
CH <sub>4</sub>	14.623 - 0.253 (MC)	0.91	1.17
CV	9.643 - 0.115 (MC)	0.89	0.58
$\eta_{cg}$	66.188 - 0.837 (MC)	0.84	5.16

ตารางที่ 4.31 ผลการทดสอบค่าความคลาดเคลื่อนจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายคุณสมบัติของแก๊สและประสิทธิภาพของการผลิตแก๊สจากความชื้นของ Waste reject

Predicted Parameter	Standardized mean residuals	Durbin-Watson
CO	0.000	1.623
H <sub>2</sub>	0.000	1.564
CH <sub>4</sub>	0.000	1.421
CV	0.000	1.581
$\eta_{cg}$	0.000	1.344

การสร้างแบบจำลองผลของค่าความชื้นของ Waste reject เมื่อใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันร่วมกับพลาสมา (ตารางที่ 4.31) พบว่าความชื้นส่งผลโดยตรงต่อทั้งคุณภาพและประสิทธิภาพของแก๊สที่ผลิตได้ และสามารถทำนายด้วยแบบจำลองถดถอยเชิงเส้นตรงอย่างง่าย โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจปรับแก้ (Adj. R<sup>2</sup>) ที่สูง อยู่ในช่วง 0.84-0.99

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุป

สรุปผลการศึกษา ตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ มีดังต่อไปนี้

##### 5.1.1 การพัฒนาระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน (ระบบ P-G)

พลาสมาอาร์ค (Plasma Arc Torch) ชนิด DC plasma torch ขนาด 50 kW ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับ เตาปฏิกรณ์ชนิดไหลลง (Fixed bed downdraft gasifier) ซึ่งออกแบบให้สามารถรองรับเชื้อเพลิงได้ไม่ต่ำกว่า 200 กิโลกรัม/ชั่วโมง (หรือสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ 100 กิโลวัตต์) ได้มีการออกแบบอุปกรณ์และระบบอย่างเหมาะสมสำหรับการนำหัวพลาสมาอาร์คไปใช้งานกับเตาปฏิกรณ์ เพื่อให้สามารถเดินระบบต่อเนื่องได้ หัวพลาสมาอาร์คถูกติดตั้งในโซนการเผาไหม้ (Combustion zone) ของเตาปฏิกรณ์ เพื่อเป็นการเพิ่มอุณหภูมิให้กับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน สรุปได้ว่า ระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน โดยใช้พลาสมาอาร์คเข้ามาเป็นแหล่งความร้อนช่วย (Plasma-assisted gasification) ระดับต้นแบบนี้สามารถนำไปใช้งานได้จริงสำหรับกำจัดขยะชุมชน ควบคู่กับการผลิตพลังงาน

##### 5.1.2 การศึกษาประสิทธิภาพการผลิตพลังงาน และประเมินสมรรถนะการทำงานของระบบแก๊สซิฟิเคชัน และระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน

การศึกษาประสิทธิภาพการผลิตพลังงาน และประเมินสมรรถนะการทำงานของระบบแก๊สซิฟิเคชัน (C-G) และระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน (P-G) กำหนดปัจจัยการทดสอบเหมือนกัน คือทำการเดินระบบ โดยใช้ เชื้อเพลิง RDF-5 : เชื้อเพลิงไม้ (70:30%wt) สัญลักษณ์ย่อคือ RDF-5/WC(70:30) ที่อัตราการใช้เชื้อเพลิงเท่ากัน คือ 126.90 kg/hr ปรับอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง เท่ากันที่ระดับ 210 Nm<sup>3</sup>/hr แต่ในระบบ P-G จะใช้พลังงานความร้อนจากพลาสมาอาร์คเป็นความร้อนช่วย โดยมีพลังงานจากพลาสมาป้อนเข้าระบบคงที่เท่ากับ 36 กิโลวัตต์ ซึ่งสามารถสรุปผลการศึกษา ได้ดังนี้

1) ระบบ P-G ส่งผลให้อุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์สูงขึ้นในทุกโซน เมื่อเปรียบเทียบกับกรณี ระบบ C-G โดยอุณหภูมิใน Combustion zone เพิ่มขึ้นเป็น  $1000^{\circ}\text{C}$  จาก  $\sim 800^{\circ}\text{C}$  อุณหภูมิที่สูงขึ้น ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นขององค์ประกอบแก๊สเชื้อเพลิง ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง และค่าพลังงานของระบบ

2) ระบบ P-G ช่วยเพิ่มองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงได้มากขึ้น โดยองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง  $\text{CO}$   $\text{H}_2$  และ  $\text{CH}_4$  มีค่า 15.80 13.43 และ 7.38 (%vol) เพิ่มขึ้นจาก 9.3 7.71 และ 6.78 (%vol) ตามลำดับ ส่งผลให้ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงสูงขึ้น (LHV) เป็น  $6.88 \text{ MJ/Nm}^3$  จาก  $4.96 \text{ MJ/Nm}^3$

3) ระบบ P-G สามารถผลิตแก๊สที่มีความสะอาดมาก คือ มีปริมาณทาร์และฝุ่นลดลง สำหรับกรณีระบบ P-G มีปริมาณทาร์และฝุ่น ( $1.25$  และ  $0.91 \text{ mg/Nm}^3$ ) เปรียบเทียบกับระบบ C-G ที่มีปริมาณทาร์และฝุ่นสูงกว่า ( $2.72$  และ  $2.65 \text{ mg/Nm}^3$ ) แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้ทั้ง 2 ระบบมีความสะอาดมากเพียงพอสำหรับการใช้กับเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้า

4) ระบบ P-G ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง และค่าพลังงานของระบบแก๊สซิเคชันให้สูงขึ้น

กรณีระบบ P-G ประเมินค่าพลังงานจากพลาสติกเข้าระบบเท่ากับ  $129.6 \text{ MJ/hr}$  ค่าพลังงานจากเชื้อเพลิงเข้าระบบเท่ากับ  $2587.31 \text{ MJ/hr}$  พลังงานที่ออกจากระบบในรูปค่าพลังงานของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ มีค่าเท่ากับ  $1445 \text{ MJ/hr}$  ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง ( $\eta_{cg}$ ) ที่ได้มีค่าเท่ากับ 53.21 %

กรณีระบบ C-G ประเมินค่าพลังงานจากเชื้อเพลิงเข้าระบบเท่ากับ  $2587.31 \text{ MJ/hr}$  พลังงานที่ออกจากระบบในรูปค่าพลังงานของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ มีค่าเท่ากับ  $1042 \text{ MJ/hr}$  ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง ( $\eta_{cg}$ ) ที่ได้มีค่าเท่ากับ 40.30 %

### 5.1.3 ผลการศึกษาประสิทธิภาพผลิตพลังงานของระบบพลาสติกแก๊สซิเคชันต่อการ Waste reject ที่มีความชื้นระดับต่างๆ

ผลการศึกษาการใช้พลาสติกเชิงความร้อนเข้ามาช่วยในกระบวนการเผาไหม้ในระบบแก๊สซิเคชัน โดย ศึกษาตัวแทนของมูลฝอยเหลือทิ้ง (Waste reject) 3 ระดับคือ ความชื้นต่ำ ประมาณ 10 25 และ 40 (%wb) ตามลำดับ ซึ่งสรุปได้ว่า

1) Waste reject มีความชื้นสูงขึ้นจะมีผลทำให้อุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ Waste reject ที่ความชื้นต่ำ คือ ที่ความชื้น 10 25 และ 40 (% wb) ความร้อนบริเวณ Combustion zone มีค่าประมาณ  $\sim 1,100$   $850$   $650^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ ซึ่งอุณหภูมิลดลงประมาณ  $\sim 12$  ถึง 26% ตามลำดับ

2) ระบบ P-G สามารถกำจัดมูลฝอยที่มีความชื้นสูงถึง 40% (wb) โดยอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์เพียงพอสำหรับการทำปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน สามารถผลิตแก๊สเชื้อเพลิงคือ CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> ได้ประมาณ 8.90, 15.18, 4.01 (%vol) ค่าความร้อนของแก๊สมีค่า 4.82 MJ/Nm<sup>3</sup> แต่คุณภาพของแก๊สจะลดลง เมื่อความชื้นของเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น (Waste reject ความชื้น 10% wb ผลิต CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> ได้ประมาณ 12.88, 13.53, 11.61 (%vol) มีค่าความร้อน 8.26 MJ/Nm<sup>3</sup> และ Waste reject ความชื้น 25% wb ผลิต CO H<sub>2</sub> CH<sub>4</sub> ได้ประมาณ 11.82 14.29 9.25 (%vol) มีค่าความร้อน 7.25 MJ/Nm<sup>3</sup>)

3) ความชื้นของเชื้อเพลิง มีผลอย่างมากต่อคุณภาพของแก๊สที่ได้ อย่างชัดเจน เชื้อเพลิง Waste Reject ที่ความชื้นสูง จะส่งผลให้ปริมาณ CO ลดลงอย่างชัดเจน คือ ปริมาณ CO จะมีค่าลดลง ~ 31 % เมื่อความชื้นสูงขึ้นจาก 10-30% (wb) ปริมาณ CO ที่ลดลงนี้อาจเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นของวัสดุคิบ ซึ่งทำให้เกิดการลดลงของความดันภายในเตา และส่งผลให้มีปริมาณ O<sub>2</sub> เข้าไปในเตาปฏิกรณ์น้อยลง เมื่อปริมาณ O<sub>2</sub> น้อยลง ปริมาณ CO ที่เกิดขึ้นก็น้อยลงตามไป สำหรับ ปริมาณ H<sub>2</sub> จะมีค่าผันตรงตามความชื้นของเชื้อเพลิง คือ ปริมาณไฮโดรเจน เนื่องจากมีน้ำมากพอสำหรับกระบวนการผลิต H<sub>2</sub> ในส่วนของปริมาณ CH<sub>4</sub> นี้จะลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อความชื้นสูงขึ้น

4) การใช้พลาสติกมาเพื่อช่วยเพิ่มความร้อนให้กับระบบสำหรับการกำจัดมูลฝอย โดยการเพิ่มพลังงานเข้าไป ~ 129.6 MJ/hr เมื่อเทียบกับค่าพลังงานที่ได้จากระบบ ยังมีพลังงานสุทธิเป็นบวก แต่ประสิทธิภาพ และค่าพลังงานที่ได้จากระบบจะลดลงเมื่อมูลฝอยมีความชื้นสูงขึ้น

โดย Syngas yield แปรผกผันกับค่าความชื้น ยิ่งความชื้นมีค่ามากขึ้น ค่า Syngas yield ที่ได้จะมีค่าลดลง โดยมีค่าลดลงจาก 2.26 ถึง 1.47 Nm<sup>3</sup>/kg หรือลดลงประมาณ 35% เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นจาก 10 เป็น 40% (wb) สำหรับ Energy yield (อัตราส่วนระหว่างพลังงานที่มีอยู่ในแก๊สเชื้อเพลิงต่ออัตราการใช้วัสดุคิบ) พบว่าจะลดลงอย่างมากหรือประมาณ 62% ที่เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นจาก 10 เป็น 40% (wb)

ประสิทธิภาพของการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงซึ่งประเมินในรูปของ Cold gas efficiency ( $\eta_{cg}$ ) โดยพบว่าที่ความชื้นสูงขึ้น ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจะลดลง โดยที่ความชื้นของ Reject waste เท่ากับ 10% (wb) มีค่า  $\eta_{cg}$  ประมาณ 80.10% เมื่อความชื้นเพิ่มสูงขึ้นที่ 40% (wb) ค่า  $\eta_{cg}$  จะลดลงเหลือประมาณ 45.20%

5) ปริมาณทาร์และฝุ่นจะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ประมาณ 3.7 เท่าเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นจาก 10-40% (wb) สาเหตุที่ทำให้ทาร์เพิ่มขึ้นอาจเนื่องมาจากอุณหภูมิที่ลดลงภายในเตา เนื่องจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ทาร์และฝุ่นส่วนหนึ่งจะถูกเผาที่อุณหภูมิสูง (ปริมาณทาร์และ

ฝุ่นรวม มีค่าระหว่าง 11.50 31.3 และ 53.40 mg/Nm<sup>3</sup> ที่ความชื้น 10 25 และ 40% (wb) ตามลำดับ ซึ่งมีความสะอาดมากเพียงพอสำหรับการใช้กับเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้า

#### 5.1.4 การศึกษาการปลดปล่อยมลพิษและประเมินสมรรถนะทางสิ่งแวดล้อมของระบบ C-G และระบบ P-G

ผลการวิเคราะห์และประเมินมลพิษที่เกิดขึ้นจากระบบ C-G และระบบ P-G จากการใช้เชื้อเพลิง RDF-5/WC (70/30) สรุปได้ดังต่อไปนี้

1) มลพิษอากาศ เปรียบเทียบกับมาตรฐานควบคุมการปล่อยทิ้งอากาศเสียจากเตาเผามูลฝอย ตามประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ทั้ง 2 ระบบ พบว่าปริมาณฝุ่นละออง (TSP), SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, Hg, Cd และ Pb มีค่าไม่เกินเกณฑ์ที่กำหนด

2) ระบบ P-G มีส่วนช่วยให้ปริมาณฝุ่นที่ต่ำลงต่ำลง เนื่องจากความร้อนและอุณหภูมิที่สูงในเตาปฏิกรณ์ สำหรับกรณีของความเข้มข้น SO<sub>2</sub> และ NO<sub>x</sub> ที่มีปริมาณต่ำ เนื่องด้วยกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงของระบบ C-G และ ระบบ P-C กำจัดปริมาณอากาศ

3) การวิเคราะห์และประเมินสมดุลมวลของ ธาตุอัลคาไลน์ โลหะหนัก และคลอรีน สรุปได้ว่า มลสารจะคงตัวอยู่ในรูปเถ้าหนักเป็นส่วนมาก ระบบ P-G มีประสิทธิภาพในการกักเก็บมลสารรูปเถ้าหนักมากกว่าระบบ C-G คือ 92.60% และ 87.15% ตามลำดับ

5) การใช้ระบบ P-G เพื่อกำจัด Waste reject ที่มีความชื้นสูง ~40 % (wb) จำเป็นต้องระวังเป็นพิเศษ เนื่องจากอุณหภูมิในโซนเผาไหม้ของเตาปฏิกรณ์ต่ำ (~700 °C) ซึ่งพบว่าประสิทธิภาพในการกักเก็บมลสารรูปเถ้าหนักจะมีค่าน้อยลง (60.60%) มีแนวโน้มของการปลดปล่อยมลพิษสู่สิ่งแวดล้อมที่สูงกว่า กรณีของเชื้อเพลิงหรือขยะมูลฝอย ที่ความชื้นต่ำ ซึ่งความชื้นของเชื้อเพลิงประมาณ 25% (wb) ให้ผลเป็นที่น่าพึงพอใจ ทั้งในด้านการผลิตพลังงานและการควบคุมมลพิษสิ่งแวดล้อมจากระบบ

6) การประเมินและศึกษาพฤติกรรมกระจายตัวของธาตุกลุ่มโลหะหนัก อัลคาไลน์ และคลอรีน ไปสู่รูปต่างๆ โดยการวิเคราะห์ตัวประกอบสำคัญ (Principle Component Analysis: PCA) โดยการใช้องค์ประกอบ (PC) 2 องค์ประกอบลักษณะการกระจายตัวของธาตุกลุ่มโลหะหนัก อัลคาไลน์ และคลอรีน ไปสู่รูปของเสียต่างๆ สามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มหลัก โดยธาตุส่วนใหญ่จะถูกแยกโดย PC1 ยกเว้น Cl ที่ถูกแยกโดย PC2 โดยคลอรีน (Cl) จะมีการกระจายตัวไปอยู่ในน้ำเสีย เป็นหลัก ขณะที่ธาตุอื่นจะกระจายตัวไปอยู่ในรูปของเถ้าหนัก เป็นหลัก กระบวนการเผาไหม้ด้วยระบบ C-G และระบบ P-G ส่งผลให้มีปริมาณการกระจายของธาตุไปสู่รูปที่ต่างๆ แต่โดยสรุป ธาตุส่วนใหญ่ จะคงอยู่ในรูปของเถ้าหนัก

เมื่อประเมินเปรียบเทียบด้านสมรรถนะทางสิ่งแวดล้อม ระบบ P-G จะมีประสิทธิภาพสูง เนื่องจากสามารถคงรูปของสารในรูปเถ้าหนักได้มากกว่า ซึ่งเป็นผลดีเนื่องจากมลสารในรูปนี้สามารถกำจัดได้ง่ายกว่ามลพิษ ในรูปอื่นๆ ผลจากการทดสอบ TCLP สามารถเป็นข้อยืนยันและสนับสนุน เพราะแนวโน้มเถ้าของเชื้อเพลิงที่เดินระบบ P-G จะมีการชะละลายโลหะหนักน้อยมาก

ทั้งนี้สรุปได้ว่า ระบบ P-G หรือ พลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน (Plasma-assisted gasification) ระดับต้นแบบนี้สามารถนำไปใช้งานได้จริงสำหรับกำจัดขยะชุมชนควบคู่กับการผลิตพลังงาน เป็นระบบที่สามารถผลิตพลังงานจากของเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ ปลอดภัยต่อมลพิษออกสู่สิ่งแวดล้อมในระดับที่ต่ำ เป็นระบบที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

### 5.1.5 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำนายสมรรถนะการทำงานของระบบแก๊สซิฟิเคชันและระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน

ผลการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายคุณสมบัติของแก๊สเชื้อเพลิง ซึ่งได้แก่ องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง ค่าความร้อน และประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง ( $\eta_{cg}$ ) ด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบถดถอยพหุคูณเชิงเส้น โดยภาพรวม เมื่อใช้คุณสมบัติองค์ประกอบแบบประมาณมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) อยู่ในช่วง 0.69-0.98 และเมื่อใช้คุณสมบัติองค์ประกอบแบบแยกธาตุมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) อยู่ในช่วง 0.77-0.98 สำหรับสมบัติด้านความชื้น ถู้นำมาสร้างแบบจำลองถดถอยเชิงเส้นตรงอย่างง่าย โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) ที่สูง อยู่ในช่วง 0.84-0.99

## 5.2 การนำผลการศึกษาไปใช้ประโยชน์

### 1) การส่งเสริมสนับสนุนให้มีการนำระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชันเพื่อกำจัดขยะชุมชน

จากผลการศึกษาที่ปรากฏในงานวิจัยนี้ สามารถชี้ชัดได้ว่า ระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชันเป็นเทคโนโลยีที่มีความเหมาะสมสำหรับกำจัดขยะชุมชนควบคู่กับการผลิตพลังงาน (Waste-to-energy) โดยสามารถผลิตพลังงานจากของเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ และปลอดภัยต่อมลพิษออกสู่สิ่งแวดล้อมน้อยมาก ถือเป็นระบบที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

เนื่องจากปัญหาขยะมูลฝอยของประเทศเข้าขั้นวิกฤตที่ต้องได้รับการแก้ไขเร่งด่วน จากบทเรียนที่ผ่านมาของการจัดการขยะที่ไม่ถูกต้องตามหลักวิชาการ นำมาซึ่งปัญหาภัยพิบัติจากไฟไหม้บ่อขยะในหลาย ๆ พื้นที่ การสนับสนุนเทคโนโลยีการจัดการขยะชุมชนที่เหมาะสมจึงเป็นเรื่องที่ต้องให้ความสำคัญสูงสุด ด้วยปัจจุบัน องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น (อปท.) เข้ามามีบทบาทในการบริหารจัดการขยะชุมชนเป็นหลัก แต่ปัญหาที่พบคือ อปท. อบต. ขนาดเล็กและในพื้นที่ห่างไกล ซึ่งยังมีระบบการเก็บรวบรวมไม่ครอบคลุมพื้นที่บริการ มี อบต. เพียง 500 แห่ง (จาก 5,509 แห่ง) ที่

นำขยะไปกำจัดร่วมกับเทศบาลที่มีระบบกำจัด จึงเป็นเหตุผลของการเกิดสภาพปัญหาขยะล้นเมืองในปัจจุบัน

ขยะที่เกิดขึ้นในชุมชน อบต. ขนาดเล็ก ส่วนใหญ่โดยเฉลี่ย จะมีปริมาณ 5-20 ตัน/วัน ซึ่งพิจารณาตามปริมาณขยะแล้ว ระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน (Plasma-assisted gasification) สำหรับจัดการขยะชุมชนขนาดเล็ก เป็นอีกเทคโนโลยีหนึ่งที่มีความน่าสนใจ อย่างไรก็ตามก็ดูชุมชนหรือองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น (อปท.) นิยมนำเทคโนโลยีนี้ไปใช้ เนื่องจาก อปท. ขนาดเล็กส่วนใหญ่ไม่มีศักยภาพในการลงทุน เนื่องจากการก่อสร้างระบบต้องใช้งบประมาณค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับกำจัดขยะโดยการฝังกลบ ดังนั้นหน่วยงานที่ภาครัฐอาจต้องพิจารณา การสนับสนุนงบประมาณจัดสร้างระบบ หรือการสร้างแรงจูงใจให้เกิดการนำขยะมูลฝอยมาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางมากยิ่งขึ้น

ทั้งนี้ จากผลการศึกษา การกำจัดมูลฝอยเหลือทิ้ง (Waste reject) ที่มีความชื้นสูง ด้วยระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน (Plasma-assisted gasification) เห็นได้ว่า ประสิทธิภาพการผลิตพลังงานจากระบบมีค่าต่ำ อีกทั้ง มีแนวโน้มของการปลดปล่อยมลพิษสู่สิ่งแวดล้อมที่สูงกว่า ซึ่งความชื้นของเชื้อเพลิงประมาณ 25% wt (wb) ให้ผลเป็นที่น่าพึงพอใจ ทั้งในด้านการผลิตพลังงานและการควบคุมมลพิษสิ่งแวดล้อมจากระบบ

ดังนั้น ระบบกระบวนการปรับเสถียรภาพของขยะชุมชน และระบบผลิตเชื้อเพลิงขยะ จึงมีความเหมาะสมที่จะถูกนำมาใช้กับขยะมูลฝอยชุมชนของประเทศไทยที่มีความชื้นสูง (~ 55 %wt, wb) งานวิจัยนี้ใช้เชื้อเพลิงขยะ RDF และ เศษมูลฝอยเหลือทิ้ง (Waste reject) จากระบบ MBT แบบ Composting plant ต้นแบบของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งถือว่าเป็นระบบที่สามารถปรับเสถียรภาพของขยะชุมชน ให้มีความเหมาะสมทั้งด้านคุณสมบัติทางกายภาพ และเคมีเหมาะสมที่จะนำไปใช้ เป็นเชื้อเพลิง ในกระบวนการทางความร้อนได้เป็นอย่างดี

## 2) การนำเทคโนโลยีพลาสมาอาร์คไปประยุกต์ใช้ในการกำจัดขยะอันตราย และขยะติดเชื้อ

เนื่องจากในปัจจุบัน ระบบกำจัดขยะอันตรายหรือขยะติดเชื้อในประเทศไทย ยังไม่เพียงพอที่จะรองรับปริมาณขยะอันตรายและขยะติดเชื้อที่เกิดขึ้นได้ (ปัจจุบันมีเตาเผาของโรงพยาบาลที่เดินระบบอยู่ประมาณ 470 แห่ง เตาเผาขยะติดเชื้อของ อปท. 13 แห่ง และเตาเผาของเอกชนอีกจำนวน 2 แห่ง ทั่วประเทศ ตัวเลขของการกำจัดขยะเหล่านี้ประมาณ 2,287 ล้านตัน/ปี หรือคิดเป็น 97% ของปริมาณของเสียอันตรายทั้งหมด จึงยังเป็นสาเหตุให้มีการลักลอบทิ้งของเสียอันตรายอย่างต่อเนื่อง (กรมควบคุมมลพิษ, 2554)

การกำจัดโดยเทคนิคอื่น เช่น กำจัดแบบฝังกลบนิรภัย จากการประเมินในอนาคต 10 ปี ข้างหน้าหลุมฝังกลบนิรภัยอาจมีพื้นที่ไม่เพียงพอต่อการกำจัดของเสียอันตรายได้ (กรมควบคุมมลพิษ, 2554) ในขณะที่ของเสียอันตรายและขยะติดเชื้อบางประเภทสามารถกำจัดได้โดยกระบวนการทางความร้อนที่มีประสิทธิภาพได้ ทั้งนี้ การใช้ ระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน สำหรับการกำจัดของเสียอันตราย ที่อุณหภูมิสูงจะเป็นทางเลือกที่มีความเป็นไปได้มากที่สุด อย่างไรก็ตาม ใดๆ ก็ดี จำเป็นต้องใช้พลังงานจากพลาสมาเข้าไปในระบบ เพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงมากกว่า 1,400°C ควบคู่กับการมีระบบบำบัดมลพิษอากาศหลังการเผาไหม้ที่มีประสิทธิภาพ ตลอดจนต้องมีการตรวจวัดมลพิษอากาศ ตามมาตรฐานอย่างต่อเนื่องด้วยเช่นกัน

### 5.3 ข้อเสนอแนะและงานวิจัยในอนาคต

ข้อเสนอแนะและงานวิจัยในอนาคต แบ่งเป็น 4 ประเด็น หลัก ดังนี้

1) ถึงแม้ในงานวิจัยนี้ จะมีความพยายามที่จะศึกษาให้ครอบคลุม ทั้งมิติด้านการผลิตพลังงาน และ ด้านมลพิษสิ่งแวดล้อม แต่ก็ยังพบจุดด้อยในงานวิจัยชิ้นนี้ คือ ในประเด็นด้านสิ่งแวดล้อม สำหรับการตรวจติดตามสารมลพิษสารประกอบไดออกซิน ยิ่งไปกว่านั้น การตรวจวัดโลหะหนัก เลือกใช้เครื่องมือที่มีความละเอียดต่ำ (EDXRF) เนื่องจากมีข้อจำกัดของงบประมาณ งานวิจัยในอนาคตควรเลือกใช้เครื่องมือตรวจวัดมลพิษสิ่งแวดล้อมที่เหมาะสม (อาทิ ICP-MS, AAS) ตลอดจนตรวจวัดพารามิเตอร์ด้านสิ่งแวดล้อมให้ครอบคลุมตามค่ามาตรฐาน

2) งานวิจัยนี้ยังขาดการวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์ ซึ่งรวมถึงผลกระทบต่อด้านเศรษฐศาสตร์ สิ่งแวดล้อม ที่ประเมินมูลค่าได้เป็นตัวเงิน เพื่อสร้างแรงจูงใจในการลงทุนโครงการ และเชื่อมโยงกับด้านสังคมที่มุ่งสู่การเป็นสังคมคาร์บอนต่ำ (Low carbon society) ที่จะช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก ลดผลกระทบต่อสภาวะโลกร้อน จากการกำจัดขยะที่สามารถผลิตพลังงานลดการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล ซึ่งเป็นประเด็นที่ควรจะมีการศึกษาวิจัยต่อไป

3) ปัจจุบันในประเทศไทย เทคโนโลยีระดับต้นแบบพลาสมาอาร์คทางความร้อน สำหรับนำมาใช้กับระบบเผาไหม้เพื่อกำจัดของเสีย ยังไม่มีพัฒนาและผลิตใช้ได้เองภายในประเทศ เทคโนโลยีนี้ ยังถือเป็นองค์ความรู้เฉพาะ (Know-how) ของผู้พัฒนาเทคโนโลยีซึ่งมีเฉพาะในต่างประเทศ โดยส่วนใหญ่จะเน้นการขายแบบ Turn key ทั้งระบบ อาทิ Europlasma, Westinghouse Plasma Corporation และ InEnTech ซึ่งมีต้นทุนที่สูงมาก

งานวิจัยนี้ ได้อาศัยเทคโนโลยี ภายใต้การวิจัยและพัฒนาโดย บริษัท High Temperature Technologies Corp. (HTTC) ประเทศแคนาดา ซึ่งเป็นผู้ประกอบการที่มีความเชี่ยวชาญด้านการ

พัฒนาระบบพลาสมาอาร์คและมีอุปกรณ์ที่มีมาตรฐาน โดยเฉพาะ และสามารถพัฒนาหัวพลาสมาทางความร้อน ที่ตรงกับความต้องการใช้งาน ของงานวิจัยนี้ได้ ในต้นทุนที่ไม่สูงจนเกินไป

ดังนั้นควรมีการส่งเสริมสนับสนุนให้มี พัฒนานักวิจัย และนักเทคโนโลยีด้าน Plasma technology และ Plasma physics เพื่อให้ประเทศไทยสามารถพัฒนาอุปกรณ์ และเครื่องจักรดังกล่าวนี้สำหรับนำมาใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยลดการนำเข้าเทคโนโลยีจากต่างประเทศ ในอนาคต

4) ด้วยเทคโนโลยีพลาสมาทางความร้อน สำหรับนำมาประยุกต์ใช้ เพื่อกำจัดขยะควบคู่กับการผลิตพลังงาน เป็นเทคโนโลยีที่ใหม่ และหากถูกนำมาใช้ในประเทศไทยอย่างจริงจังในอนาคต ควรมีการศึกษาและจัดทำเกณฑ์มาตรฐานด้านการปลดปล่อยมลพิษสิ่งแวดล้อมจากระบบ เฉพาะสำหรับเทคโนโลยี โดยอาจศึกษาหลักกฎหมาย เกณฑ์มาตรฐานในประเทศที่มีการใช้เทคโนโลยีนี้ อย่างจริงจังเป็นต้นแบบ

## รายการอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ. (2547). รายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย พ.ศ. 2548. บริษัท รุ่งศิลป์ การพิมพ์ (1977) จำกัด กรุงเทพฯ.
- กรมควบคุมมลพิษ. (2557). สถานะการขยะมูลฝอยของประเทศไทย ปี พ.ศ. 2556. ส่วนขยะมูลฝอย และสิ่งปฏิกูล สำนักจัดการกากของเสียและสารอันตราย. สืบค้นจาก <http://www.pcd.go.th/download/waste.cfm>
- กัลยา วานิชย์บัญชา. (2546). **หลักสถิติ**. กรุงเทพมหานคร. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- กัลยา วานิชย์บัญชา. (2550). **การใช้ SPSS for windows ในการวิเคราะห์ข้อมูล**. พิมพ์ครั้งที่ 10. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพมหานคร.
- ทิพย์สุภินทร์ หินชุย (2550). การศึกษาการกำจัดกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อผลิตพลังงาน โดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน : กรณีศึกษาจากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม ฟอกย้อม. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- ทิพย์สุภินทร์ หินชุย, ปกัศ ชนะโรค และ วีรชัย อัจหาญ (2551). การศึกษามลพิษและของเสียจาก โรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กสำหรับชุมชน. **การประชุมวิชาการครั้งที่ 9 ประจำปี 2551**, สมาคม วิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย. 188-189
- ชิตพัฒน์ หิรัญคำ (2556). การวิเคราะห์โลหะหนักจากฝุ่นในพื้นที่จังหวัดนครราชสีมา. วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิชา วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- นภาพร พานิช และคณะ(2547). **ตำราระบบบำบัดมลพิษอากาศ**. กรมโรงงานอุตสาหกรรม : พิมพ์ ครั้งที่ 1. ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพมหานคร.
- ปรัชญา กริโส, สมรัฐ เกิดสุวรรณ, กรองแก้ว เลหาลิदानนท์, สมโกชน์ เชิดพงษ์.(2012). การทดสอบระบบผลิตพลังงานจากขยะมูลฝอยโดยเทคโนโลยีก๊าซซิฟิเคชันแบบต่อเนื่อง 200 ชั่วโมง. **การจัดประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ (The National Graduate Research Conference). Graduate research conference**

- วีรชัย อัจหาญ, นิวัฒน์ คงกะพี, กฤษกร รับสมบัติ, ปกัศ ชนะโรค และทิพย์สุภินทร์ หินชุย (2551). การศึกษาด้านแบบโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กสำหรับชุมชน การประเมินประสิทธิภาพและผลกระทบด้านมลพิษ. วารสารสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ. ปีที่ 40 เล่มที่ 2.
- วีรชัย อัจหาญ และคณะ. 2553. การศึกษาด้านแบบโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กสำหรับชุมชน (ระยะที่ 2. วารสารสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ด้านพลังงานฉบับพิเศษ (วช. ครอบคลุม 50 ปี)
- วีรชัย อัจหาญ และคณะ. 2553. การศึกษาแนวทางบริหารจัดการขยะชุมชนเพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทนแบบครบวงจร (ระดับชุมชน). รายงานการวิจัย. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ด้านพลังงานฉบับพิเศษ (วช. ครอบคลุม 50 ปี)
- สมรัฐ เกิดสุวรรณ. (2549). ความก้าวหน้าของเทคโนโลยีไพโรไลซิส/ก๊าซซิฟิเคชันสำหรับการผลิตพลังงานจากชีวมวลและขยะมูลฝอย. ระบบกำเนิดก๊าซเชื้อเพลิงจากชีวมวลและขยะมูลฝอยเพื่อผลิตพลังงาน. การประชุมวิชาการแห่งชาติ ครั้งที่ 1. 42-108.
- สุธรรม ปทุมสวัสดิ์. (2549). ระบบผลิตแก๊สชีวมวลขนาดเล็กเพื่อผลิตไฟฟ้า. ระบบกำเนิดก๊าซเชื้อเพลิงจากชีวมวลและขยะมูลฝอยเพื่อผลิตพลังงาน. การประชุมวิชาการแห่งชาติ ครั้งที่ 1. 109-119.
- อาภาณี เหลืองนฤมิตชัย. (2538) . การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงในเบดนิ่ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- Arjhar, W., Hinsui, T., Liplap, P., Raghavan, G.S.V. (2012). Evaluation of electricity production from different biomass feedstocks using a pilot-scale downdraft gasifier. **Journal of Biobased Materials and Bioenergy**. 6(3): 309-318.
- 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. 20<sup>th</sup> 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.
- American Society for Testing and Materials (ASTM) (2006). Standard definitions of terms and abbreviations relating to physical and chemical characteristics of refuse derived fuel, Volume 11.04 Waste Management. **Annual Book of ASTM Standards. West Conshohocken: ASTM International.**
- Arjhar, W., Hinsui, T., Liplap, P., and G. S. V. Raghavan. (2012). Evaluation of energy production from different biomass feedstock using a pilot scale downdraft gasifier. **Journal of Biobased Materials and Bioenergy**. 6(3): 309-318.
- Arjhar, W., Hinsui, T., Liplap, P., and G. S. V. Raghavan. (2013). Evaluation of an energy production system from sewage sludge using a pilot-scale downdraft gasifier. **Energy & Fuels**. 27(1):229-236.
- Agency for Toxic Substance and Disease Registry (ATSDR) (2003). Toxicological Profile for Arsenic U.S. Department of Health and Humans Services. Public Health Service. **Centres for Diseases Control**. Atlanta. GA.
- Agency for Toxic Substance and Disease Registry (ATSDR) (2003). Toxicological Profile for Cadmium U.S. Department of Health and Humans Services. Public Health Service. **Centres for Diseases Control**. Atlanta. GA.
- Agency for Toxic Substance and Disease Registry (ATSDR) (2003). Toxicological Profile for Mercury U.S. Department of Health and Humans Services, Public Health Service. **Centres for Diseases Control**. Atlanta. GA.
- Agency for Toxic Substance and Disease Registry (ATSDR) (2005). Toxicological Profile for Lead. U.S. Department of Health and Humans Services. Public Health Service. **Centres for Diseases Control**. Atlanta. GA.
- Ajay, K., Kent, E., Jones D. D., Hanna M. A., (2009). Steam–air fluidized bed gasification of distillers grains: Effects of steam to biomass ratio, equivalence ratio and gasification temperature. **Bioresource Technology**. 100:2062–2068

- Babu, B.V., Chaurasia, A.S. (2004). Pyrolysis of Biomass: Improved Models for Simultaneous Kinetics & Transport of Heat, Mass, and Momentum. **Energy Conversion and Management**. 45:1297- 1327
- Belgiorno, V., Feo D. G., Rocca D. C. and Napoli R.M.A. (2003). Energy from gasification of soild wastes. **Waste Management** 23:1-15.
- Bert, L., Helmut E., Ive V., Kurt P., Ludo D., Michel O. and Marc J. (2006). Assessment of plasma gasification of high caloric waste streams. **Waste Management**. Accepted 21 July 2006
- Barneto A.G.; Ariza J.; Martín J.E.; Sánchez R. (2010). Simulation of the thermogravimetry analysis of three non-wood pulps. **Bioresource Technology**. 101: 3220-3229
- Barneto A.G., Hernandez R. B, Berenguer J. M (2011). Thermogravimetric characterization of eucalyptud wood. Articulo Técnico, **Peer-reviewed Article**. 72: 53-56
- 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.
- Cao, Y., Wang, Y., Riley, J.T.P., W.-P. (2006). A novel biomass air gasification process for producing tar-free higher heating value fuel gas. **Fuel Processing Technology**. 87(4): 343-353.
- Chen, G., Anddries, J., Luo, Z., and Spilethoff (2003). Biomass pyrolysis/gasification for product gas Production:the overall investigation of parametric effect. **Energy Conversion & Management**. 44:1875-1884
- Caputo, A. C. & Pelagagge, P. M. (2002). RDF production plants: I Design and costs. **Applied Thermal Engineering**. 22:423-437.
- 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.
- Dalai, A.K., Batta, N., Eswaramoorthi, I., Schoenau, G.J. (2009). Gasification of refuse derived fuel in a fixed bed reactor for syngas production. **Waste Management**. 29(1): 252-258.
- Dave, P.N., Joshi, A.K. (2010). Plasma pyrolysis and gasification of plastics waste—a review. **Journal of Scientific & Industrial Research**. 69:177–179
- Devi, L., Ptasinski, K.J., Janssen, F.J.J.G. (2003). A review of the primary measures for tar elimination in biomass gasification processes. **Biomass and Bioenergy**. 24(2):125-140.

- Diaz, L. F. & Savage, G. M. (2006). **Production and Quality of Refuse Derived Fuel (RDF) in Proceeding of Biomass and Waste to Energy Symposium.**
- Dogru, M. (2000). Fixed Bed Gasification of Biomass. **PhD Thesis University of Newcastle. UK.**
- Ducharme, C. (2012). Technical and Economic Analysis of Plasma-Assisted Waste-to-Energy Processes. **Research Paper I (2010): School of Engineering and Applied Science - Columbia University.** Web. 12 Oct. 2012
- Earp, D.M. (1988). The Gasification of Biomass in a Downdraft Reactor. **PhD Thesis Chemical Engineering Department. Aston University. UK.**
- Fabry, F., Rehme, C., Rohani, V., Fulcheri, L. (2012). Waste Gasification by Thermal Plasma: A Review. **Waste Biomass Valor.** 4:421–439
- Groeneveld MJ, Gellings PE, Hos JJ. (1983). Production of a tar free gas in an annular cocurrent moving bed gasifier. **Energy from biomass and wastes.**
- George A. (2005). Plasma arc heating - an overview. **HDR Power Systems.** [Online].  
<http://www.hdrpower.com/app/1001.asp>
- Galvagno, S., Casciaro, G., Casu, S., Martino, M., Mingazzini, C., Russo, A., Portofino, S. (2009). Steam gasification of tyre waste, poplar, and refuse-derived fuel: A comparative analysis. **Waste Management.** 29:678-689.
- Hakansson, K (2007). Torrefaction and Gasification of Hydrolysis Residue. **MSc Thesis. Umea Institute of Technology.**
- Hetland J, Lynam S. (2001). Multi recovery from waste in a novel compound shaft reactor plasma mixing destruction chamber approach. **In: Proceedings of the sixth international conference on technologies and combustion for a clean environment, Porto, 10th July, 2001.**
- Higman, C., Van der Burgt, M. (2008). **Gasification (2<sup>nd</sup> ed).** Elsevier. Oxford OX2 8DP, UK.
- Hrabovsky M, Konrad M, Kopecky V, Hlina M, Kavka T. (2006). Gasification of biomass in water/gas stabilized plasma for syngas production. **Czechoslovak Journal of Physics.** 56:B1199–206.
- Hlina M, Hrabovsky M, Kopecky V, Konrad M, Kavka T. (2006). Plasma gasification of wood and production of gas with low content of tar. **Czechoslovak Journal of Physics.** 56:B1179–84.

- Huang, H., Tang, L. (2007). Treatment of organic waste using thermal plasma pyrolysis technology. **Energy Convers. Manag.** 48:1331–1337
- Janajreh, I., Raza, S.S., Valmundsson, A.S. (2013). Plasma gasification process: Modeling, simulation and comparison with conventional air gasification. **Energy Conversion and Management.** 65(0):801-809.
- Jayah, T. H., Aye, L. R., Fuller, J. and Stewart, D.F. (2003). Computer Simulation of a Downdraft Wood Gasifier for Tea Drying. **Biomass and Bioenergy.** 25:459-469.
- 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.
- Kim, S.C., Lim, M.S., Chun, Y.N. (2013). Hydrogen-rich gas production from a biomass pyrolysis gas by using a plasmatron. **International Journal of Hydrogen Energy.** 38(34): 14458-14466.
- Kirubakaran, V., Sivaramakrishnan, V., Nalini, R., Sekar, T., Premalatha, M., Subramanian, P. (2009). A review on gasification of biomass. **Renewable and Sustainable Energy/Review,** 13(1):179-186.
- Krieth, F., P. E. (1993). Solid waste management. **Paper presented under the auspices U.S. AID at the Center for Energy and Appropriate Technology in Chaing Mai.**
- 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.
- Leal-Quiros E. (2004). Plasma processing of municipal solid waste. **Brazilian Journal of Physics.** 34:1587–93.
- Lyubina LYu, Suris LA. (1999). Thermodynamic model of the plasma gasification of organic solid waste. **Chemical and Petroleum Engineering.** 35:403–6.
- Maa, P. S. and Bailie, R. C. (1973). Influence of particle sizes and environmental conditions on high temperature pyrolysis of cellulose material. **Combustion Science and Technology** 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.

- Manoli, E., Voutsas, D., and Samara, C., (2002) Chemical characterization and source identification/apportionment of fine and coarse air particles in Thessaloniki, Greece. **Atmospheric Environment**. 36(6): 949–961
- Marrero, T.W., McAuley, B.P., Sutterlin, W.R., Steven Morris, J., Manahan, S.E. (2004). Fate of heavy metals and radioactive metals in gasification of sewage sludge. **Waste Management**. 24(2): 193-198.
- McKendry, P. (2002). Energy production from biomass (part 3): gasification technologies. **Bioresource Technology**. 83: 55-63.
- 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.
- Minutillo, A., Perna, A. and Di Bona, D. (2009) . Modelling and performance analysis of an integrated plasma gasification combinrd cycle (IPGCC) power plant. **Energy conversion and management**. 50:2837-2842
- Mountouris, A., Voutsas, E. and Tassios, D (2006). Solid waste plasma gasification : Equilibrium model development and exergy analysis. **Energy conversion and management**. 47: 1723-1737.
- Montejo, C., Costa, C., Ramos, P., Márquez, M.d.C. (2011). Analysis and comparison of municipal solid waste and reject fraction as fuels for incineration plants. **Applied Thermal Engineering**. 31(13): 2135-2140.
- Moon, J.-H., Han, J.-G., and Youn J. Kim. (2004). Performance of an atmospheric plasma torch with various inlet angles. **Surface & Coatings Technology**. 193:94– 100.
- Mountouris, A., Voutsas, E. and Tassios, D (2008). Solid waste plasma gasification : Process development and energy optimization. **Energy conversion and management**. 49: 2264-2271.
- Moustakas, K., Fatta, D., Malamis, S., Haralambous, K. and Loizidou, M. (2005). Demonstration of plasma gasification/vitrification for effective hazardous waste treatment. **Journal of Hazardous Materials**. 123:120–126.
- Moustakas, K., Xydis, G., Malamis, S., Haralambous, K.J., Loizidou, M. (2008). Analysis of results from the operation of a pilot plasma gasification/vitrification unit for optimizing its performance. **Journal of Hazardous Materials**. 151: 473–480

- Minutillo, M., Pena, A. and Bona, D. (2009). Modelling and performance analysis of an integrated plasma gasification combined cycle (IPGCC) power plant. **Energy conversion and management**. 50:2837-2842.
- Natarajan, E., Öhmana, M., Gabrab, M., Nordina, A., Liliedahlc., T., Rao., A.N. (1998). Experimental determination of bed agglomeration tendencies of some common agricultural residues in fluidized bed combustion and gasification. **Biomass and Bioenergy**. 15(2):163–169
- Nowell, G.P. (1999). The Promise of Methanol Fuel Cell Vehicles. American Methanol Institute. State University of New York at Albany. The recovered energy system. **Plasma gasification process description overview**. [Online]. <http://www.recoveredenergy.com/overview.html>
- Nithikul, J., Karthikeyan, O.P., Visvanathan, C. (2011). Reject management from a Mechanical Biological Treatment plant in Bangkok, Thailand. **Resources, Conservation and Recycling**. 55(4): 417-422.
- Narukawa K, Goto H, Chen Y, Mori S (1996). Combustion characteristics of RDF. **Kagakukoguko Ronbunshu**. 22(3):560-5.
- Ojha, A., Reuben, AC., Sharma, D. (2012). Solid waste management in developing countries through plasma arc gasification- an alternative approach. ICESD 2012: 5–7 January 2012. Hong Kong. **APCBEE Procedia** 1. 193–198
- Padungsirikul, P. (1992). Sampling and analysis of waste samples [In Thai]. Unpublished Document for Training on Waste Analysis. **Environmental Research and Training Center, Department of Environmental Quality Promotion**.
- Peter McKendry. (2002). Energy production from Biomass (part3): gasification technologies. **Bioresource Technology**. 83:55-63.
- Phuphuakrat, T.; Nipattumakul, N.; Namioka, T.; Kerdsuwan, S.; Yoshikawa, K., (2010). Characterization of tar content in the syngas produced in a downdraft type fixed bed gasification system from dried sewage. **Fuel**. 89:2278-2284.
- Piao, G., Aona, S., Kondoh, M., Yamazaki, R. and Mori, S. 2000. Combustion test of refuse derived fuel in a fluidized bed. **Waste management**. 20:443-447. The Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR)

- 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**.
- Pinto, F., André, R.N., Lopes, H., Dias, M., Gulyurtlu, I., Cabrita, I. (2008). Effect of experimental conditions on gas quality and solids produced by sewage sludge cogasification. 2. sewage sludge mixed with biomass. **Energy and Fuels**. 22(4):2314-2325.
- Quakk , P., H. Knoef and H. Stassen (1999). Energy from biomass: A review of combustion and gasification technology. **World bank techpaper**. no.422.
- Rajvanshi, A.K. (1986). Biomass Gasification, In: Goswami, Y.D. (Ed.). **Alternative Energy in Agriculture**, CRC Press. 83-102.
- Raveendran, K., Ganesh, A., Khilar, K.C. (1995). Influence of mineral matter on biomass pyrolysis characteristics. **Fuel**. 74:1812-1822.
- 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.
- Rocca, S., Zomeren, A. V., Costa, G., Dijkstra, J. J., Comans, R. (2012). Characterisation of major component leaching and buffering capacity of RDF incineration and gasification bottom ash in relation to reuse or disposal scenarios. **Waste Management**. 32
- Saldarriaga, H., Hernández-Mena, L., Ramírez-Muñiz, M., Carbajal-Romero, P., Cosío-Ramírez, R., Esquivel-Hernández, B. (2009). Characterization of trace metals of risk to human health in airborne particulate matter (PM2.5) at two sites in Guadalajara, Mexico. **Journal of Environmental Monitoring**. 11(4):887-894
- Sforza, T., Charlier, C., Hrabovsky, M., Chumak, O. (2009). Thermal plasma assisted gasification of polymers. **WDS'09 Proc. Contributed pap., Part II:176-181-ISBN 978-80-7378-102-6**
- Sharma, A.K. (2008). Equilibrium modeling of global reduction reactions for a downdraft (biomass) gasifier. **Energy Conversion and Management**. 49(4):832-842.
- 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

- Tang, L., Huang, H., Zhao, Z., Wu, C.Z., Chen, Y. (2003). Pyrolysis of polypropylene in a nitrogen plasma reactor. **Industrial & Engineering Chemistry Research**. 42:1145–1150
- Tang, L., Huang, H., Hao, H., Wang, H., Wang, Y., Zhu, C., Li, Q. (2009). Waste tires disposal by thermal plasma for power generation and carbon black recovery. **Power and Energy Eng. Conf. APPEEC 2009. Asia-Pacific 27–31 March 2009:1- 4**
- Venice. United Nations Environment Programme (UNEP). (2005). **Solid Waste Management Volume I.**
- Vervaeke, P., Tack, F.M.G., Navez, F., Martin, J., Verloo, M.G., Lust, N. (2006). Fate of heavy metals during fixed bed downdraft gasification of willow wood harvested from contaminated sites. **Biomass and Bioenergy**. 30(1): 58-65.
- Zainal, Z.A., Ali, R., Lean, C.H., Seetharamu, K.N. (2001). Prediction of performance of a downdraft gasifier using equilibrium modeling for different biomass materials. **Energy Conversion and Management**. 42(12):1499-1515.
- Zainal, Z. A., Rifau, A., Quadir, G. A., and K. N. (2002). Seetharamu.2002. Experimental Investigation of a Downdraft Biomass Gasifier. **Biomass and Bioenergy**. 23:283-289.
- Zhang, Q., Dor, L., Fenigshtein, D., Yang, W., Blasiak, W. (2012). Gasification of municipal solid waste in the Plasma Gasification Melting process. **Applied Energy**. 90(1):106-112.

ภาคผนวก ก

วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ

## ก.1 การหาคุณสมบัติทางกายภาพ

### ก1.1 ความหนาแน่นก่อนการอัด

วิธีการทดลองนำมาจัดเรียงให้ชิดกันที่สุดในภาชนะขนาด 50 x 50 x 50 cm<sup>3</sup> นำไปชั่งน้ำหนักแล้วบันทึกผล คำนวณของตัวอย่างต่อหน่วยปริมาตรที่แน่นอน

### ก1.2 ความหนาแน่นหลังการอัด

วิธีการทดลอง ทำการวัดค่านวลต่อปริมาตรของตัวอย่าง แล้วนำค่าที่ได้จากการทดลองมาคำนวณตามสมการที่ (ก1)

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

### ก1.3 ความชื้น

คือเปอร์เซ็นต์ของน้ำต่อน้ำหนักตัวอย่าง โดยหาเป็นร้อยละของความชื้นมาตรฐานเปียก (Wet basis) ซึ่งมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้

- อบถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาในเตาอบ (Drying oven) ที่อุณหภูมิ 105±1°C เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำเข้าเดสิเคเตอร์ (Desicator) ทิ้งไว้ประมาณ 15 นาที จากนั้นนำไปชั่งและบันทึกน้ำหนัก
- ชั่งตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองประมาณ 1 กรัม ลงในถาด อลูมิเนียมพร้อมฝาที่ทราบน้ำหนัก จากนั้นบันทึกน้ำหนักตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง
- นำตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองไปเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 105±1°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงหรือจนกว่าน้ำหนักตัวอย่างของตัวอย่างคงที่
- นำถาดอลูมิเนียมมาทิ้งไว้ให้เย็นแล้วนำเข้าเดสิเคเตอร์ จากนั้นทิ้งไว้ประมาณ 1 นาที จึงทำการชั่งน้ำหนักถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาที่มีตัวอย่างที่ทำการอบแล้วอยู่ภายใน ทำการบันทึกผล จากนั้นนำผลการทดลองมาคำนวณตามสมการที่ (ก2)

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

เมื่อ		
M (wb)	คือ	ร้อยละของความชื้นมาตรฐานเปียก (Wet basis)
W <sub>1</sub>	คือ	น้ำหนักของถาดอลูมิเนียมพร้อมฝารวมกับน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองก่อนทำการอบ (กรัม)
W <sub>2</sub>	คือ	น้ำหนักของถาดอลูมิเนียมพร้อมฝารวมกับน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองหลังทำการอบ (กรัม)
W	คือ	น้ำหนักของตัวอย่างตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง (กรัม)

## ก.2 การหาค่าประกอบแบบประมาณ (Proximate Analysis)

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

### ก2.1 ความชื้น

คือเปอร์เซ็นต์ของน้ำต่อน้ำหนักตัวอย่างแห้ง โดยหาเป็นร้อยละของความชื้นมาตรฐานแห้ง (dry basis) ซึ่งมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้

- อบถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาในเตาอบ (Drying oven) ที่อุณหภูมิ 105±1°C เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำเข้าเดสิเคเตอร์ (Desicator) ทิ้งไว้ประมาณ 15 นาที จากนั้นนำไปชั่งและบันทึกน้ำหนัก
- ชั่งตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองประมาณ 1 กรัม ลงในถาด อลูมิเนียมพร้อมฝาที่ทราบน้ำหนัก จากนั้นบันทึกน้ำหนักตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง
- นำตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองไปเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 105±1°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หรือจนกว่าน้ำหนักตัวอย่างของตัวอย่างคงที่
- นำถาดอลูมิเนียมมาทิ้งไว้ให้เย็นแล้วนำเข้าเดสิเคเตอร์ จากนั้นทิ้งไว้ประมาณ นาที จึงทำการชั่งน้ำหนักถาดอลูมิเนียมพร้อมฝามีตัวอย่าง 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)

- เผาครุชชีเบลพอร์ซเลน (Porcelain crucible) พร้อมฝาในเตาเผา (Muffle furnace) ที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง จากนั้นนำออกมาทำให้เย็นในเคสิเทเตอร์แล้วทำการชั่งน้ำหนักครุชชีเบลพอร์ซเลนพร้อมฝา
- ชั่งน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองใส่ครุชชีเบลพอร์ซเลนประมาณ 1 กรัม
- นำไปเผาบนตะเกียงเบนเซน รอจนควันระเหยออกหมด
- ใส่ครุชชีเบลพอร์ซเลนพร้อมฝาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 750°C ทิ้งไว้เป็นเวลาประมาณ 2 ชั่วโมงหรือรอจนน้ำหนักเถ้าคงที่
- นำครุชชีเบลพอร์ซเลนออกจากเตาเผาแล้วนำทิ้งไว้ให้เย็นลง จากนั้นนำไปใส่ในเคสิเทเตอร์ 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

- เผาครูชชีเบิลพร้อมฝาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 950 °C ทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที จากนั้นนำออกจากเตาเผา ทิ้งไว้ให้เย็นในเดสิเกเตอร์ หลังจากนั้นทำการชั่งน้ำหนักของครูชชีเบิลพร้อมฝาและทำการบันทึกผล
- ชั่งตัวอย่างตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองใส่ในครูชชีเบิลประมาณ 1 กรัม
- ปิดฝาครูชชีเบิลให้เรียบร้อย จากนั้นนำไปให้ความร้อนโดยให้อยู่เหนือปากเตาเผาที่อุณหภูมิประมาณ 300 °C เป็นเวลาประมาณ 6 นาที
- หย่อนครูชชีเบิลให้อยู่บริเวณปากเตา อุณหภูมิประมาณ 600 °C ทิ้งไว้เป็นเวลาประมาณ 10 นาที
- หย่อนครูชชีเบิลให้อยู่กึ่งกลางเตาเผา อุณหภูมิประมาณ 950 °C เป็นเวลาประมาณ 6 นาที
- นำครูชชีเบิลออกมาทิ้งไว้ให้เย็นลง จากนั้นนำไปใส่ไว้ในเดสิเกเตอร์ประมาณ 15 นาที จากนั้นจึงนำไปชั่งน้ำหนักและทำการบันทึกผล แล้วทำการคำนวณตามสมการที่ (ก5)

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

เมื่อ

V	คือ	ร้อยละของสารระเหย
W <sub>5</sub>	คือ	น้ำหนักของครูชชีเบิลพร้อมฝารวมกับน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองก่อนทำการเผา (กรัม)
W <sub>6</sub>	คือ	น้ำหนักของครูชชีเบิลพร้อมฝารวมกับน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองหลังทำการเผา (กรัม)
W	คือ	น้ำหนักของตัวอย่างตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง (กรัม)
M	คือ	ร้อยละของความชื้น

### ก2.4 ปริมาณคาร์บอนคงตัว

ปริมาณคาร์บอนคงตัว สามารถคำนวณ ได้ตามสมการที่ (ก6)

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

## ก2.5 การหาค่าความร้อนของการเผาไหม้ (Calorific Value)

การหาค่าความร้อนของการเผาไหม้ตัวอย่างโดยใช้เครื่อง Bomb Calorimeter ตามมาตรฐานของ ASTM D 2015-77 โดยนำตัวอย่างตัวอย่างแห้งบดละเอียดอัดเป็นเม็ด พันด้วยลวดเผาไหม้ (Ignition Wire) ใส่ลงในถ้วยตัวอย่าง วางในเครื่องบอมบปิดฝา อัดแก๊สออกซิเจนบริสุทธิ์เข้าไปด้วยความดัน  $30 \text{ kg/cm}^3$  ประมาณ 5 นาที แล้วประกอบเข้าในถัง (Jacket) เติมน้ำ ประมาณ 1800 มิลลิตร กดปุ่มเผาไหม้ตัวอย่าง อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนกระทั่ง ความร้อนที่เกิดขึ้นจะถูกถ่ายเทให้กับน้ำ แล้วนำค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ ไปคำนวณหาค่าความร้อนของตัวอย่าง โดยเทียบกับค่าความร้อนที่ได้จากการ บอมบ Benzoic acid มาตรฐาน

ค่าความร้อนทางเชื้อเพลิง คือ ปริมาณความร้อนที่ต้องถ่ายเทออกจากเชื้อเพลิง เนื่องจากการสันดาปที่เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ในระบบ โดยปกติการสันดาปของเชื้อเพลิงจำพวกไฮโดรคาร์บอนเมื่อสันดาปในบรรยากาศของออกซิเจน ผลของการสันดาปจะได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ (ซึ่งอยู่ในรูปของไอน้ำ) ถ้าไอน้ำสามารถกลั่นตัวแล้วคายความร้อนแฝงออกมา ค่าความร้อนเชื้อเพลิงที่ได้จะเป็นค่าความร้อนสูงสุด แต่ถ้าไอน้ำไม่กลั่นตัว ค่าความร้อนทางเชื้อเพลิงจะเป็นค่าความร้อนต่ำ การหาค่าความร้อนทางเชื้อเพลิงโดยการนำเอาเชื้อเพลิงที่จะทำการทดสอบไปชั่งน้ำหนักให้ละเอียดมาเผาไหม้กับออกซิเจนบริสุทธิ์ ภายใต้ความดันภายใน Bomb Calorimeter ความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้จะถ่ายเทให้กับน้ำหล่อเย็นรอบตัวบอมบแคลอรีมิเตอร์ ซึ่งสามารถวัดอุณหภูมิของน้ำได้โดยใช้เทอร์โมมิเตอร์และปริมาณความร้อนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (ก7)

$$Q = m.c.\Delta T \quad (ก7)$$

เมื่อ

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

### ก.3 การหาคุณสมบัติแบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis)

#### ก.3.1 องค์ประกอบของธาตุ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และ ซัลเฟอร์

สามารถทำได้โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ C H N S Elemental Analyzer นำตัวอย่างบดให้ละเอียด ซึ่งปริมาณที่แน่นอนประมาณ 1-2 mg ใส่ภาชนะ นำไปเผาที่อุณหภูมิประมาณ 925 °C ภายใต้ออกซิเจนบริสุทธิ์ ผ่านเข้าไปใน Reagion CO<sub>2</sub> H<sub>2</sub>O N<sub>2</sub> ความคุมความดัน อุณหภูมิ ปริมาตรให้คงที่

#### ก.3.2 องค์ประกอบของธาตุออกซิเจน

ปริมาณออกซิเจนของเชื้อเพลิงตัวอย่าง หาได้จากการคำนวณดังสมการที่ (ก8)

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

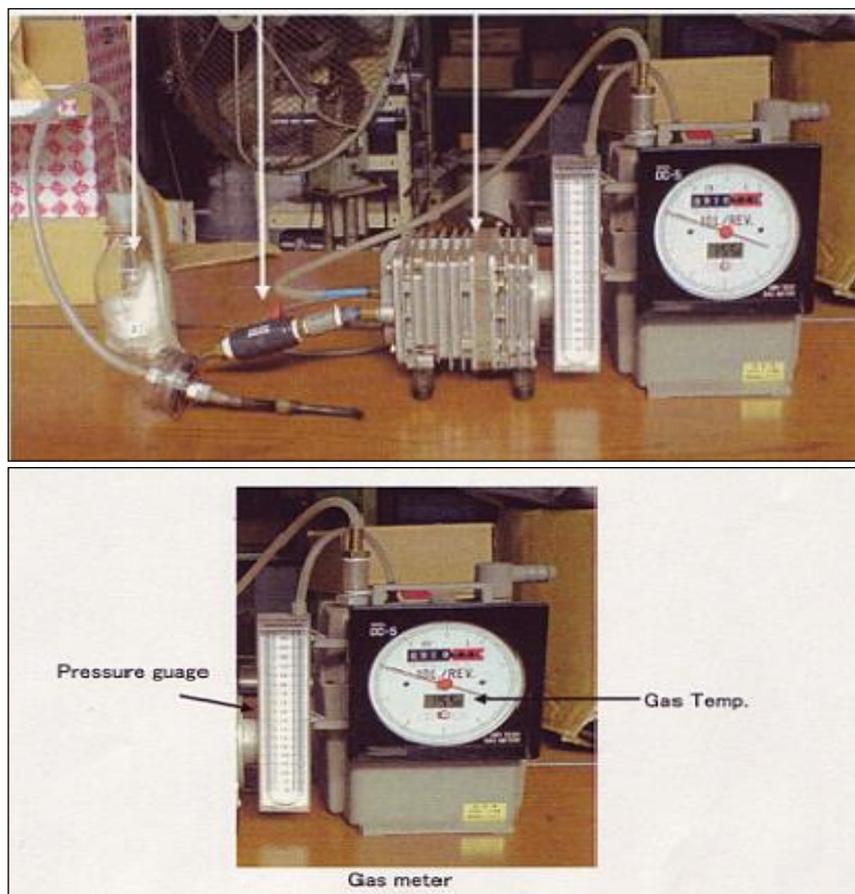
#### ก.3.3 องค์ประกอบของธาตุโลหะหนักและคลอรีน

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

### ก.4 การวิเคราะห์ปริมาณทาร์และฝุ่น (Tars and dust)

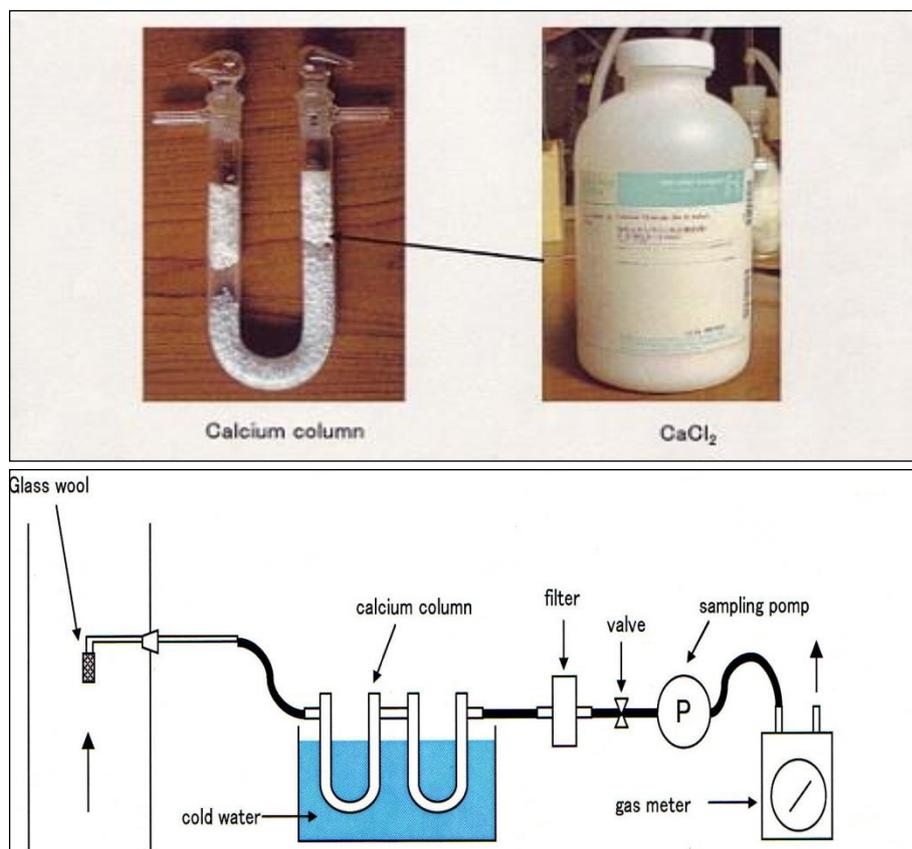
การวิเคราะห์ปริมาณการปนเปื้อนของทาร์และฝุ่น อ้างอิงตามคู่มือการเดินระบบของโรงไฟฟ้าชีวมวลสุรนารี (Technical training manual : technical support materials on the biomass gasification power plant) โดยวิธีการวิเคราะห์มีรายละเอียดดังนี้

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



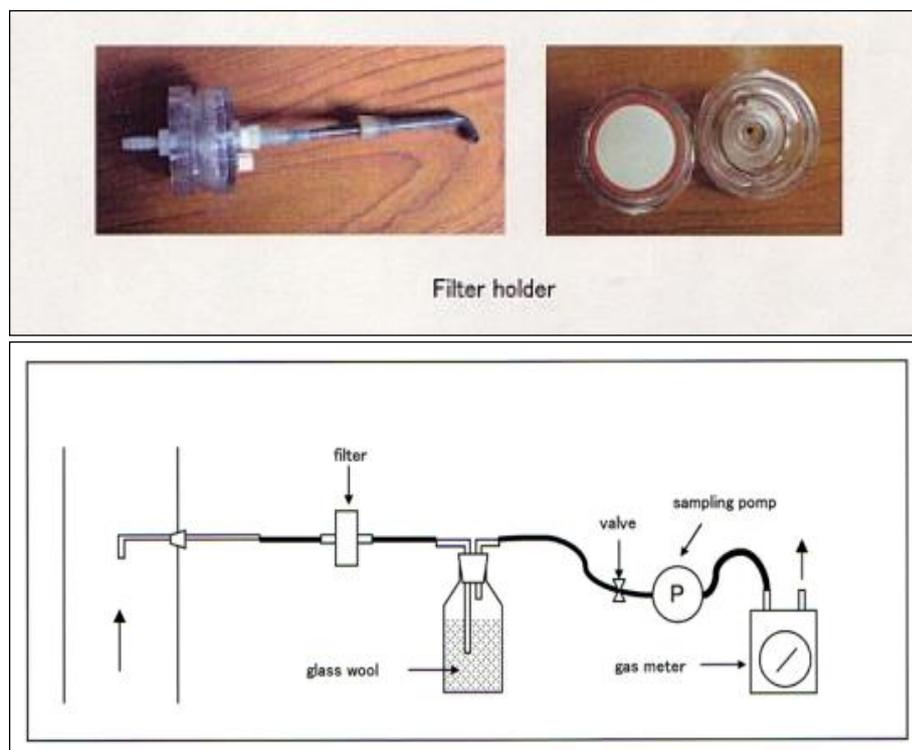
รูปที่ ก1 การเตรียมเครื่องมือสำหรับวิเคราะห์

2) เตรียมอุปกรณ์และสารเคมีสำหรับวิเคราะห์ ดังแสดงในรูปที่ ก2 คือ  $\text{CaCl}_2$  ซึ่งทำหน้าที่ดูดความชื้นที่มีอยู่ในแก๊ส โดยทำการเติม  $\text{CaCl}_2$  ลงไปใน Calcium ทำการทดลองดังแสดงในรูปที่ ก2 นำข้อมูลที่ได้มาทำการวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์ความชื้นของแก๊สเชื้อเพลิง ( $X_w$ ) เพื่อนำมาคำนวณหาปริมาตรของแก๊สที่มีความชื้น ( $V_m$ ) ก่อนที่จะคำนวณในรูป ปริมาตรของแก๊สแห้ง ( $V_N$ ) หรือที่ใช้ในหน่วย  $\text{Nm}^3$



รูปที่ ก2 การเตรียมอุปกรณ์สำหรับใช้วิเคราะห์ความขึ้นของแก๊สเชื้อเพลิง

3) จากนั้นเตรียมอุปกรณ์และสารเคมีสำหรับวิเคราะห์ทาร์และฝุ่น คือ Filter Holder สำหรับใส่กระดาษกรอง ซึ่งจะใช้กระดาษกรอง GF/B Dia. 47 mm ที่ผ่านการอบไล่ความชื้นแล้วที่อุณหภูมิ  $103-105^{\circ}\text{C}$  โดยทำการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ ก3



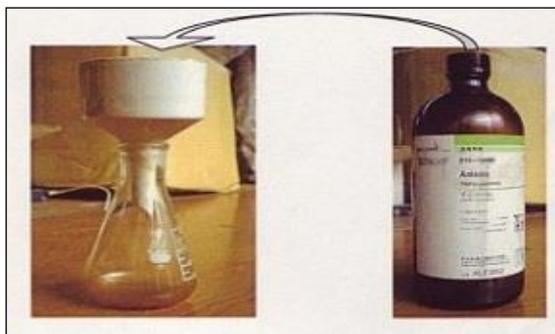
รูปที่ ก3 การเตรียมอุปกรณ์สำหรับใช้วิเคราะห์ทาร์และฝุ่น

4) ทำการเก็บตัวอย่างทาร์และฝุ่นในแก๊สเชื้อเพลิงจนได้ปริมาณที่กำหนด คือไม่เกิน 300 L จากนั้นนำกระดาษกรองไปอบไล่ความชื้นก่อน แล้วทำการชั่งน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งน้ำหนักที่ได้คือปริมาณของทาร์และฝุ่นรวมกัน ตัวอย่างกระดาษกรองหลังการเก็บตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ ก4



รูปที่ ก4 กระดาษกรองหลังการเก็บตัวอย่าง (ทาร์และฝุ่นรวมกัน)

5) ทำการล้างทาร์ออกจากกระดวยกรองโดยใช้สารละลาย Anisole ดังแสดงในรูปที่ ก5 จากนั้นนำกระดวยกรองไปอบไล่ความชื้นก่อน แล้วทำการชั่งน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป



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 ( $\text{m}^3$ )
$\theta_m$	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

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

## รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับชาติ

Hinsui, T., Arjharn, W., Liplap. (in press). **Plasma-assisted gasification of waste reject from a MBT plant for syngas production.** Suranaree Journal of Science and Technology. (Accepted 18 July 2014)

บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ

Arjharn, W., Hinsui, T., Liplap, P., and G. S. V. Raghavan. (2013). **Evaluation of an energy production system from sewage sludge using a pilot-scale downdraft gasifier.** Energy & Fuels. 27(1), 229-236

Arjharn, W., Hinsui, T., Liplap, P., and G. S. V. Raghavan. (2012). **Evaluation of energy production from different biomass feedstock using a pilot scale downdraft gasifier.** Journal of Biobased Materials and Bioenergy. 6(3), 309-318.

บทความวิจัยเต็มรูปแบบที่ได้รับการตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการระดับชาติ

ทิพย์สุภินทร์ หินซุย, กฤษกร รับสมบัติ, พรรษา ลิบลับ และ วีรชัย อาจหาญ. (2555). **การผลิตแก๊สสังเคราะห์จากเชื้อเพลิงขยะโดยเตาแก๊สซีไฟเออร์แบบไหลลง.** การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26 ณ โรงแรมดุสิต ไอส์แลนด์ รีสอร์ท จังหวัดเชียงราย. ระหว่างวันที่ 24-27 ตุลาคม 2555.



บันทึกข้อความ  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

หน่วยงาน Suranaree Journal of Science and Technology, Tel. 4756 Fax : 4750

ที่ No. 5621/1231

วันที่ 18 July 2014

เรื่อง Letter of acceptance

---

Dear Authors,

I am pleased to inform you that your article entitled "Plasma-assisted gasification of waste reject from a MBT plant for syngas production" authored Thipsuphin Hinsui, Weerachai Arjham and Pansa Liplap has been accepted to be published in Suranaree Journal of Science and Technology. The galley proof will be later sent to you for the final corrections.

Thank you for publishing with Suranaree Journal of Science and Technology.

Sincerely,

Peerapong Uthansakul, Ph.D.

Associate Professor

Editor in Chief

1 **Plasma-assisted gasification of waste reject from a MBT plant**  
2 **for syngas production**

3 **Running head: Plasma-assisted gasification of waste reject**

4 **Thipsuphin Hinsui<sup>a\*</sup> Weerachai Arjharn<sup>b</sup>, Pansa Liplap<sup>b</sup>**

5 *<sup>a</sup>School of Environmental Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of*  
6 *Technology, 111 University Avenue, Muang District, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand.*

7 *Tel: 0-4422-5007; Fax: 0-4422-4610; Email: ann\_engineer@hotmail.com*

8 *<sup>b</sup> School of Agricultural Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology,*  
9 *111 University Avenue, Muang District, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand*

10 *\* Corresponding author*

11 **Abstract**

12 **Municipal solid waste (MSW) becomes a very critical issue in many regions of the**  
13 **world. Various technologies either alone or in combination have been used to solve this**  
14 **problem. Mechanical and biological treatment (MBT) is one of the most effective**  
15 **methods for MSW management to divide MSW into different fractions, including waste**  
16 **reject which presently requires landfill disposal. Waste-to-energy process like**  
17 **gasification is an alternative to landfills but requires feedstock with homogeneous form**  
18 **and low moisture content. This work aims to study whether this waste reject can be**  
19 **used for energy production through gasification process in assistance with external heat**  
20 **source from plasma arc. Syngas characteristics and system performance were tied to**

21 the different feedstock moisture content levels ranging from 10 to 40 wt% (wb). Results  
22 showed that plasma arc could reduce limits of feedstock properties in traditional  
23 gasification. However, an increase in moisture content resulted in a reduction of  
24 temperature inside the gasifier, causing a variation in syngas characteristics. Calorific  
25 values were found to decrease proportionally from 8.26 to 4.82 MJ N<sup>-1</sup>m<sup>-3</sup> with an  
26 increase in moisture content from 10 to 40 wt% (wb). The performance evaluation of  
27 the plasma-assisted gasification system, i.e. syngas yield, energy yield and gasification  
28 efficiency, were negatively influenced by moisture content in the waste reject. Overall,  
29 waste reject can serve as a feedstock for quality syngas production using plasma-  
30 assisted gasification system.

31 **Keywords:** waste reject, mechanical and biological treatment, energy production,  
32 plasma, gasification, waste-to-energy

## Evaluation of an Energy Production System from Sewage Sludge Using a Pilot-Scale Downdraft Gasifier

Weerachai Arjhan,<sup>\*,†</sup> Thipsuphin Hinsui,<sup>‡</sup> Pansa Liplap,<sup>†,§</sup> and G. S. Vijaya Raghavan<sup>§</sup>

<sup>†</sup>School of Agricultural Engineering, and <sup>‡</sup>School of Environmental Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, 111 University Avenue, Muang District, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

<sup>§</sup>Department of Bioresource Engineering, McGill University, Sainte-Anne-de-Bellevue, Quebec H9X 3V9, Canada

**ABSTRACT:** Presently, sewage sludge from wastewater treatment systems has become a critical problem in many regions of the world because it can inflict harm on human beings and the environment. Gasification technology is widely held to be a suitable and convenient approach to convert waste materials to energy with minimal greenhouse gas emissions. In a pilot-scale experiment on sewage sludge gasification ultimately aimed at generating electricity, the reactor temperature profile, syngas characteristics, and performance of the syngas in the production of electricity were tied to the equivalence ratio (ER) and syngas flow rate (i.e., 100, 150, or 180 N m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>). An increase of the ER resulted in an increase of the temperature inside the gasifier, causing a variation in syngas characteristics and the level of tar and dust contamination. Calorific values at different syngas flow rates were found to vary from 4.20 to 4.87 MJ N<sup>-1</sup> m<sup>-3</sup>. The syngas obtained at flow rates of 150 and 180 N m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> could be used in an engine-generator set to generate 21 or 47 kW of electrical power, respectively, whereas at the flow rate of 100 N m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>, the syngas could only run the engine without electrical load. The specific sewage sludge consumption, which is the amount of feedstock required to generate electricity, decreased with an increase in the syngas flow rate. The performance evaluation of the sewage sludge gasification system, i.e., gasification efficiency, engine-generator set efficiency, and electrical efficiency, showed that these were in the range of those obtained from biomass, such as agricultural residues. Overall, sewage sludge can serve as a feedstock for electricity generation using a pilot-scale downdraft gasification system.

### 1. INTRODUCTION

Crucial energy source issues presently arising from the decline in fossil fuel supplies must be addressed immediately. Many countries have become increasingly aware of the importance of renewable energy and have placed greater emphasis on approaches to an efficient use of potential alternative energy sources. Moreover, environmental problems arising from various energy production processes are also an issue of concern to many. Given this situation, organizations responsible for dealing with these problems strive to develop innovative technologies of energy production, which are not only beneficial in terms of efficiency and economy but also environmentally sound.

Sewage sludge is the waste generated in wastewater treatment plants. With the installation of water purification systems in more locales, the quantity of such sludges has risen over the years,<sup>1</sup> and its disposal has become increasingly problematic. Currently, the most widely used management methods for sewage sludge are incineration and landfill, along with its use as an agricultural fertilizer. The disposal of sewage sludge by means of landfill has become much less acceptable in the European Union (EU). In addition, because sewage sludge contains pathogens, heavy metals, polychlorinated biphenyls, and dioxin,<sup>2</sup> strong opposition exists for its incineration and use in cultivation given environmental and health concerns. Therefore, the development of alternative methods for sewage sludge disposal is encouraged.

Gasification is an attractive high-temperature thermal process by which the hydrocarbon in the feedstock is converted into syngas consisting mainly of CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, and CH<sub>4</sub> at high

temperature with a controlled amount of air/oxygen lower than the complete combustion process. The gas produced can be used in either an internal combustion engine or direct heat applications.<sup>3</sup> Gasification is regarded as an appropriate technology for energy production because it provides an overall more efficient conversion of a given feedstock resource into electrical power than traditional combustion-based technologies.<sup>4</sup> Additionally, gasification is considered an environmentally friendly technology because it limits emissions of sulfur oxides (SO<sub>x</sub>), nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>), heavy metals, and fly ash and the potential production of dioxins and furans as a consequence of the reducing atmosphere (versus the oxidizing atmosphere typical of incineration).<sup>5</sup> However, the presence of sulfur, nitrogen, chloride, and fluoride in sewage sludge may be released as H<sub>2</sub>S, NH<sub>3</sub>, HCl, and HF because of gasification reducing conditions. These compounds lead to the formation of respective oxides during syngas use; therefore, the contents of S and N compounds in syngas need to be monitored and controlled.<sup>6</sup>

To date, a number of studies have reported the successful disposal of sewage sludge by means of gasification,<sup>1,2,5,6</sup> however, most such systems were operated at an experimental or laboratory scale. The efficacy of sewage sludge gasification at the pilot scale, which would be suitable for the amount of sewage sludge produced by a wastewater treatment plant, has been little studied. In the present study, sewage sludge was used

Received: July 29, 2012

Revised: November 26, 2012

Published: November 28, 2012

to produce electricity using a pilot-scale downdraft gasification power plant. The capability and efficiency of the gasification system are evaluated. These results will inform the future development of sewage sludge gasification systems in a concrete manner.

## 2. EXPERIMENTAL SECTION

**2.1. Sample.** Sewage sludge was supplied from activated sludge wastewater treatment plants located on the Kabinburi Industrial Estate, Prachinburi province, Thailand. The companies mostly relate to bleaching and dyeing processes. Because raw sewage sludge contained lots of water (approximately 80%), it was sun-dried on a cement floor for 4–5 days (Figure 1a) until the moisture content



Figure 1. Photographs of (a) dried sewage sludge and (b) briquetted sewage sludge.

decreased to approximately 20%. The dried sewage sludge was ground to minimize its size (<10 mm) before subsequently briquetting into cylindrical shape (45 mm in diameter and 40–50 mm in length; Figure 1b) using a conical extruder. The moisture content after briquetting was less than 15%. Characteristics of sewage sludge were determined by means of proximate analysis (ASTM D1762-84 and ASTM D2015-77 standards) and ultimate analyses [CHNS element analysis (LECO, CHNS-932) and an energy-dispersive X-ray fluorescence spectrometer (EDXRF, ED 2000)].

**2.2. Experimental Apparatus and Procedure.** A pilot-scale open top downdraft gasification system was collaboratively designed

and developed by the Suranaree University of Technology, Thailand, and Satake Corporation Co., Ltd., Japan. The gasifier was manufactured from mild steel and equipped with an inner lining of insulation and high-temperature ceramic. The gasifier height and inner diameter were 3.11 and 0.75 m, respectively. A grate was placed at the bottom of the gasifier to hold feedstock. Below the grate, a screw conveyor with a water jacket was installed for charcoal removal. Nine air nozzles with a diameter of 10 cm were installed around the combustion zone. The gas cleaning and cooling system was located next to the gasifier, including a cyclone collector, water scrubber, chilled water scrubber, biomass filter, and bag filter. To assess electricity production, an engine-generator set with a maximum power output of 85 kW was used. The various elements of the downdraft gasification power plant are shown in Figure 2.

Briquetted sewage sludge was manually loaded into the gasifier until it reached a predetermined level. All nozzle valves were opened to allow air to flow through the gasifier. The scrubber circulating pump was switched on to start up operations. The sewage sludge was then ignited through an ignition port located at the combustion zone using a pilot lighter. The heat generated in this zone evaporates moisture within the biomass in the drying zone and drives pyrolysis and gasification reactions. Once the gasification process had been completed, the syngas left the gasifier through the gas cleaning and cooling system. Contaminants, such as dust, pyrolytic product (tar), and water vapor, were initially removed by directing them through a cyclone collector, followed by water scrubbers and a chilled-water scrubber. Because tar vapor condenses at low temperatures, most of the tar was trapped by the cold water in the chilled-water scrubber. The moisture in the wet gas from the chiller scrubber was removed by passing the gas through a biomass filter containing wood chips. Finally, bag filters, which can entrap particulate matters as small as 0.1 mm, served to ensure that the gas produced would be clean enough for the gas engine.

The effects of air supply on the gasification process were investigated by varying the syngas flow rates (i.e., 100, 150, or 180  $\text{N m}^3 \text{h}^{-1}$ ) using a blower installed in the gas line. The blower speed was adjusted using an inverter. The syngas flow rates were measured using an electronic flow gas meter (model DIG-SIDO-O, Nippon Flow Cell, Japan) located between the bag filters and the engine-generator set. At the beginning of each experimental run, syngas

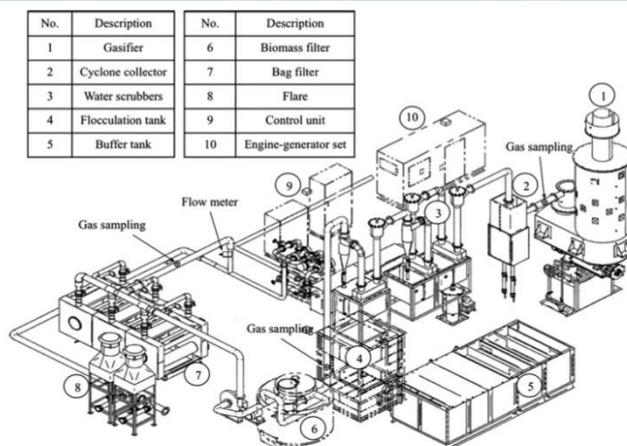


Figure 2. Schematic of the downdraft gasification system and gas sampling positions.

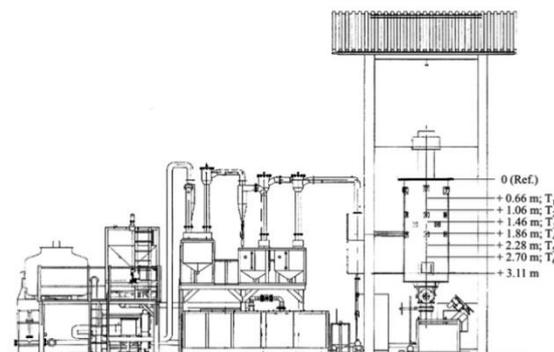


Figure 3. Position of thermocouples installed to the gasifier.

composition was examined prior to its introduction into the engine-generator set. Until a sufficiently high-quality mix was obtained, any gas produced was burned at the flare. Once the gas quality was sufficient for the engine to operate (gas calorific value  $> 4.2 \text{ MJ N}^{-1} \text{ m}^{-3}$ ),<sup>7</sup> all measurements were performed. For each operating condition, the gasification system was operated continuously for 24 h and the data (syngas composition, tar and dust contents, biomass consumption, and ash discharge) were collected every 30 min and presented on average values.

To monitor the temperature inside the gasifier, six K-type thermocouples, installed vertically 0.66, 1.06, 1.46, 1.86, 2.28, and 2.70 m downward from the top of the gasifier (Figure 3), were used to measure the temperature distribution inside the reactor. The temperatures are measured at intervals of 30 s to record the thermochemical conversion phases: drying, pyrolysis, combustion, and reduction.

To reduce the number of parameters, the equivalence ratio (ER) is used to reflect the combined effect of the air flow rate, rate of sewage sludge supply, and duration of the run. The ER is calculated by

$$\text{ER} = \frac{(\text{air flow rate}/\text{sewage sludge consumption rate})}{(\text{air flow rate}/\text{sewage sludge consumption rate})_{\text{stoichiometric}}} \quad (1)$$

The performance of the gasification system was evaluated by the following parameters:<sup>8</sup>

$$\eta_g = \frac{V_g \text{LHV}_g}{m_{\text{sludge}} \text{LHV}_{\text{sludge}}} \quad (2)$$

$$\eta_e = \frac{3.6P_e}{V_g \text{LHV}_g} \quad (3)$$

$$\eta_{\text{el}} = \frac{3.6P_e}{m_{\text{sludge}} \text{LHV}_{\text{sludge}}} \quad (4)$$

where  $\eta_g$  is the gasification efficiency (%),  $\eta_e$  is the engine-generator set efficiency (%),  $\eta_{\text{el}}$  is the electrical efficiency (%),  $m_{\text{sludge}}$  is the sewage sludge consumption rate ( $\text{kg h}^{-1}$ ),  $\text{LHV}_g$  is the calorific value of gas produced ( $\text{MJ N}^{-1} \text{ m}^{-3}$ ),  $\text{LHV}_{\text{sludge}}$  is the low heating value of sewage sludge ( $\text{MJ kg}^{-1}$ ),  $P_e$  is the electrical power output (kW), and  $V_g$  is the volume flow rate of gas produced ( $\text{N m}^3 \text{ h}^{-1}$ , dry gas).

**2.3. Gas Quality Analysis.** Gas generated from the briquetted sewage sludge was collected at the sampling port located between the bag filters and the engine-generator set (Figure 2) and analyzed by means of gas chromatography (SIMADSU, GC-14B). Calorific values

[low heating value (LHV)] were calculated from the combustible gases, using the heating value of  $13.1 \text{ MJ N}^{-1} \text{ m}^{-3}$  for CO,  $11.2 \text{ MJ N}^{-1} \text{ m}^{-3}$  for  $\text{H}_2$ , and  $37.1 \text{ MJ N}^{-1} \text{ m}^{-3}$  for  $\text{CH}_4$ .<sup>9</sup> Gas impurities in the form of tar and dust were quantified at three different positions, i.e., after gasifier, after water scrubbers, and after bag filters, by drawing the produced gas using a vacuum pump. In brief, the moisture content of the produced gas was gravimetrically measured by passing it through a U tube containing  $\text{CaCl}_2$ , which was submerged in ice. Then, approximately 300 L of syngas was passed through a filter paper (GF/B) with 47 mm in diameter. The total tar and dust was quantified by drying the filter paper in an oven at  $105^\circ \text{C}$  for about 6 h.<sup>8</sup> The dried filter was then rinsed with anisole to wash away tar from the filter. The difference in the weight of the filter after drying was used to calculate tar and dust contents with respect to the dry gas volume.

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

**3.1. Sewage Sludge Characteristics.** Physical properties along with proximate and ultimate values of sewage sludge components are presented in Table 1. Sewage sludge obtained from waste treatment plants had a moisture content of approximately 80% [wet basis (wb)]. Once sewage sludge was sun-dried for 4–5 days, its moisture content dropped to roughly 20% (wb). The dried sewage sludge formed spherical aggregates approximately 2–10 mm in diameter. Because feedstocks of a small size are not compatible with downdraft gasification technology, the dried sewage sludge was briquetted into cylinders 45 mm in diameter and 40–50 mm in length. The moisture content and bulk density after briquetting were approximately 15% (wb) and  $380 \text{ kg m}^{-3}$ , respectively. The upper limit of the moisture content for downdraft gasification is usually no more than 20% (wb) because heat loss as a result of water evaporation is considerable and can reduce the overall gasifier temperature, impairing gasification reactions.<sup>10</sup>

Proximate values of sewage sludge include moisture content, volatile matter, fixed carbon, ash content, and heating value (Table 1). The volatile matter and heating value of sewage sludge were fairly high and comparable to those of other forms of biomass.<sup>11</sup> The heating value generally indicates the potential of feedstock to generate heat during combustion, resulting in the release of important volatile components used in syngas production. However, sewage sludge was found to have a high ash content (30.45% on average). This could potentially cause difficulties in system operation because the ash produced would

**Table 1. Characteristics of Sewage Sludge Derived from Activated Sludge Wastewater Treatment Plants (Bleaching and Dyeing Processes)**

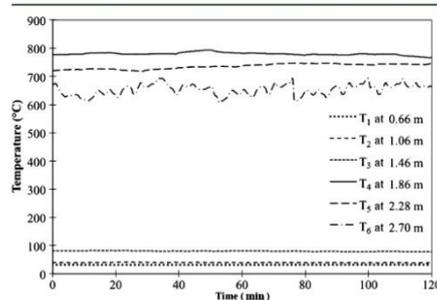
analysis	parameter	value			
		I	II	III	
physical properties	density ( $\text{kg m}^{-3}$ )	N/A	204	380	
	size (mm)	N/A	1–10	45 × 45	
	moisture content (wt %, wb)	80	20	15	
proximate analysis	moisture content (% as received)	15.00 ± 1.55			
	moisture content (% as air dry)	6.44 ± 0.50			
	volatile matter (wt %, db)	56.00 ± 2.97			
	fixed carbon (wt %, db)	7.11 ± 2.30			
	ash (wt %, db)	30.45 ± 1.24			
	net calorific value ( $\text{MJ kg}^{-1}$ ) as received	13.55 ± 0.48			
	net calorific value ( $\text{MJ kg}^{-1}$ ) as air dry	15.32 ± 0.55			
	gross calorific value ( $\text{MJ kg}^{-1}$ , db)	17.11 ± 0.45			
	ultimate analysis (wt %, db)	carbon (C)	36.38 ± 0.06		
		hydrogen (H)	5.86 ± 0.17		
nitrogen (N)		5.22 ± 0.16			
sulfur (S)		0.98 ± 0.05			
heavy metal and chlorine ( $\text{g kg}^{-1}$ , db)	oxygen (O)	47.98 ± 0.28			
	copper (Cu)	12.90 ± 0.03			
	iron (Fe)	23.60 ± 0.87			
	zinc (Zn)	3.31 ± 0.03			
	cadmium (Cd)	0.01 ± 0.00			
	lead (Pb)	0.26 ± 0.10			
	chlorine (Cl)	7.40 ± 0.16			

need to be removed from the gasifier frequently. In addition, the high ash content promotes clinker formation, which generally occurs in the combustion zone if the temperature reaches 1100 °C.<sup>12</sup> As a result, the quality of syngas is decreased. It has been suggested that the ash content above 5% is likely to cause clinkering and slagging problems.<sup>13</sup> In addition to the quantity mineral matter, its composition is also very important, because of the possibility of sintering and slagging formation.<sup>14</sup>

From the ultimate analysis, the empirical formula for sewage sludge is  $\text{CH}_{1.93}\text{O}_{0.99}$  and the stoichiometric air/fuel ratio is 5.06. The carbon and hydrogen of sewage sludge, which are the main elements in syngas production during thermochemical reactions, are similar to those of other forms of biomass.<sup>11</sup> This implies that sewage sludge could be used as a feedstock for energy production using gasification technology. The amount of sulfur contained in sewage sludge was found to be relatively high (0.98%) when compared to biomass (0.01–0.07%),<sup>15</sup> indicating its adverse effect on air pollution ( $\text{SO}_2$  and  $\text{H}_2\text{S}$  are also high). However, because gasification works at limited air supply conditions, the production of  $\text{SO}_2$  tends to be much lower than combustion.<sup>16</sup> The sulfur is mostly in the form of  $\text{H}_2\text{S}$ ;<sup>17</sup> therefore, special care must be taken while gasifying with this material. In the long run,  $\text{H}_2\text{S}$  in both liquid (scrubbing water) and gaseous (exhaust gas) phases needs to be monitored. An adjustment of experimental conditions and the use of effective sorbents are most advisable. The amount of

chlorine found was less than many types of biomass generally used in energy production.<sup>15</sup> However, sewage sludge contained a relatively high iron (Fe) content. This is attributable to the iron compound  $\text{FeCl}_3$  being used during primary wastewater treatment. Other heavy metals, such as Cu, Zn, Cd, and Pb, were found to be more in sewage sludge than in biomass.<sup>15</sup> In general, sewage sludge with a high heavy metal content requires special management. For gasification technology, even though most of the heavy metals are still retained in the product char,<sup>18,19</sup> it has been reported that their release was quite low, complying with the EU limits for landfill inert residues and also with the limit in use in the U.S.A.<sup>20</sup>

**3.2. Temperature Profile.** A typical temperature distribution showing the various phases, drying, pyrolysis, combustion, and reduction, is shown in Figure 4. In general, the temperature



**Figure 4.** Example of the temperature distribution with respect to experimental time (at  $100 \text{ N m}^3 \text{ h}^{-1}$ ).

at different locations is quite stable along the height of the gasifier. The average temperature difference between the 0.66 and 1.46 m positions was small at less than 100 °C. The main process taking place in this zone is drying. The moisture contained in the feedstock is driven off until the temperature increases up to 200 °C.<sup>10</sup> The temperature then increased rapidly from the 1.46 to 1.86 m position ( $\sim 800$  °C), where air was supplied to the gasifier. Sewage sludge was pyrolyzed in this zone at temperatures ranging from 280 to 500 °C, leaving solid char behind and releasing volatiles consisting mainly of  $\text{CO}_2$  and tar.<sup>10</sup> The highest temperature was obtained at 1.86 m, which is the heat heart of the gasifier (combustion zone). At the last stage, the temperature decreased to an average value of 500 °C because of endothermic reactions by which the product gases produced from the upper zone are reduced with carbon (charcoal), producing syngas consisting mainly of CO and  $\text{H}_2$ . In general, the temperature in this zone should be above 500 °C.<sup>21</sup> The average gas temperature at the gasifier exit was 520 °C.

In this study, the system was controlled to obtain different syngas flow rates at 100, 150, and  $180 \text{ N m}^3 \text{ h}^{-1}$  and used for generating electricity. Ultimately, changes in the syngas flow rate change the ER for the gasification process, which is a crucial parameter in the development of syngas quality. Figure 5 shows temperature profiles of the gasifier burning sewage sludge according to the ER. As expected, temperatures inside the gasifier were found to be proportional to the ER; that is, the greater the ER value, the higher the temperature profile level.

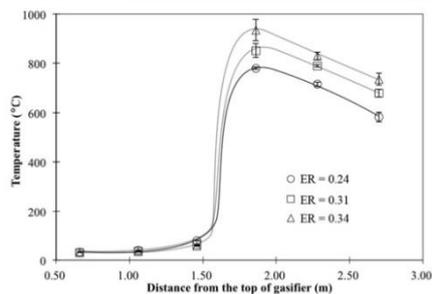


Figure 5. Temperature profiles of sewage sludge along the gasifier at different ER values.

The increase of the temperature is attributed to the increase of air available for exothermic reactions as the ER increases. The temperature profile pattern of sewage sludge in this study was similar to that of high bulk density biomass feedstocks, such as briquetted rice husk and briquetted cassava peel.<sup>15</sup> In addition to the gas flow rate, temperature profiles are dependent upon combustible characteristics, such as size, texture, bulk density, etc.<sup>13,21</sup>

**3.3. Syngas Composition.** Results show that the syngas composition obtained from sewage sludge under different ER values (Table 2) is more or less the same as that obtained from other types of biomass.<sup>22–25</sup> The syngas consisted of CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, and N<sub>2</sub>. With the increase of ER from 0.24 to 0.34, the concentration of combustible gases, i.e., CO, H<sub>2</sub>, and CH<sub>4</sub>, tended to decrease. As a result, calorific values (LHV) calculated from the combustible gases decreased from 4.87 to 4.20 MJ N<sup>-1</sup> m<sup>-3</sup>. Partial combustion of tar and syngas at higher ER values may explain the reduction in the LHV, as illustrated by the inverse relationship between combustible

gases and CO<sub>2</sub>. Moreover, the decrease of the LHV is attributable to the increase of the nitrogen dilution amount because of the increases of air supplied to the gasifier.<sup>26</sup> However, even though the increase of air flow rates causes a reduction in LHV, the LHV of the syngas obtained in this study was sufficiently high enough for its use in a gas engine with a minimum energy requirement of approximately 4.2 MJ N<sup>-1</sup> m<sup>-3</sup>.<sup>7</sup>

**3.4. Tar and Dust.** Tar and dust play an important role in the gasification process and engine operation. High tar and dust contents in the syngas cause the shutdown of gasification facilities because of blocking and fouling of downstream applications, such as turbines and engines, thus requiring post-treatment, maintenance, and complicated cleaning.<sup>27</sup> Table 3 presents tar and dust contents in the gas produced at different ERs and locations, i.e., after gasifier, after water scrubber, and after bag filter. Increasing the ER from 0.24 to 0.34 led to a small reduction in the tar content immediately after the gasifier. This reduction of tar could be explained that a part of tar was burnt with the supply air and the other part was further thermally cracked into the secondary tar in a local high-temperature zone.<sup>26</sup> However, the increase of ER slightly increased the dust content. This is probably due to the fact that the increase of the flow rate in the system causes turbulence flow, which results in more dispersion of dust in the gas line system. After the gasifier, the syngas flowed through water and chilled water scrubber units, removing 46–82% of the total tar and dust contents. Despite efficiently trapping particulates in the syngas, the water causes a great reduction of syngas temperature, especially in the chilled water scrubber. When tar aerosols contacted the water surface, the water would absorb soluble tar, while insoluble tar would condense to become liquid phase and was washed away with the water. As a result, a considerable amount of tar was removed (58–92%) from the gas stream. This result was slightly better than those reported by Phuphuakrat et al.<sup>28</sup> (47–74%), who conducted experiments without including the chilled water scrubber unit. The

Table 2. Experimental Results of the Gasification Test

parameter	unit	equivalence ratio (ER)		
		0.24	0.31	0.34
syngas flow rate (dry gas)	N m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup>	100	150	180
power output (electricity)	kW	0	21	47
A/F ratio	N m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup>	1.20	1.55	1.71
SS <sup>a</sup> consumption rate	kg h <sup>-1</sup>	68.23 ± 0.98	79.00 ± 1.02	98.26 ± 0.87
specific SS consumption	kg kW <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup>		3.76 ± 0.14	2.09 ± 0.20
ash discharge rate	kg h <sup>-1</sup>	21.90 ± 0.33	23.80 ± 0.38	29.80 ± 0.40
	%	32.10 ± 0.69	30.13 ± 0.49	30.33 ± 0.36
composition (db)				
CO	%	15.11 ± 0.40	14.13 ± 0.57	13.19 ± 0.63
H <sub>2</sub>	%	18.20 ± 0.54	15.51 ± 0.46	14.89 ± 0.56
CH <sub>4</sub>	%	2.39 ± 0.16	2.23 ± 0.26	2.14 ± 0.27
N <sub>2</sub>	%	50.01 ± 1.20	51.10 ± 1.45	53.10 ± 1.43
O <sub>2</sub>	%	0.57 ± 0.10	0.98 ± 0.13	1.11 ± 0.19
CO <sub>2</sub>	%	13.72 ± 0.57	15.98 ± 0.47	17.01 ± 0.84
LHV	MJ N <sup>-1</sup> m <sup>-3</sup>	4.87 ± 0.09	4.41 ± 0.13	4.20 ± 0.12
specific syngas yield	N m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup>	1.47 ± 0.02	1.90 ± 0.05	1.83 ± 0.03
η <sub>g</sub>	%	52.67 ± 0.23	61.65 ± 0.41	56.29 ± 0.33
η <sub>e</sub>	%		11.45 ± 0.12	22.57 ± 0.23
η <sub>d</sub>	%		7.06 ± 0.16	12.71 ± 0.09

<sup>a</sup>SS = sewage sludge.

Table 3. Tar and Dust Contents at Different ER Values and Pipeline Positions

ER	impurity ( $\text{mg N}^{-1} \text{m}^{-3}$ )								
	after gasifier			after scrubber			after bag filter		
	tar	dust	total	tar	dust	total	tar	dust	total
0.24	76.78 ± 6.25	47.54 ± 6.95	124.32 ± 2.06	6.51 ± 2.30	15.41 ± 2.19	21.92 ± 0.43	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00
0.31	74.91 ± 5.76	41.91 ± 5.89	116.82 ± 1.84	31.60 ± 3.93	31.24 ± 2.41	62.84 ± 3.72	1.84 ± 0.97	1.34 ± 0.81	3.18 ± 0.16
0.34	72.86 ± 6.50	62.35 ± 4.79	135.21 ± 3.52	14.09 ± 5.82	28.65 ± 3.99	42.74 ± 1.82	4.06 ± 0.66	6.92 ± 0.63	10.98 ± 0.29

performance of scrubber units depends upon the flow rate of syngas, the inlet tar components, and their concentrations.<sup>29</sup> Finally, most of the remaining tar and dust was trapped by the bag filters, resulting in final total tar and dust contents of less than  $11.00 \text{ mg N}^{-1} \text{m}^{-3}$ . Typical tar and dust generated from biomass in a downdraft gasification system have been reported to range between 50 and  $500 \text{ mg N}^{-1} \text{m}^{-3}$ ,<sup>30,31</sup> depending upon the raw material, gasifier design, experimental conditions, and tar collection methods.<sup>32</sup> Using sewage sludge in gasification, Dogru et al.<sup>12</sup> reported that the tar and dust collected after the gasifier were  $637\text{--}838 \text{ mg N}^{-1} \text{m}^{-3}$ , while Phuphuakrat et al.<sup>28</sup> obtained  $1300 \text{ mg N}^{-1} \text{m}^{-3}$ . This indicates that the gasification system used in this study can produce very good quality syngas, clean enough to use in a gas engine-generator set.<sup>8</sup>

**3.5. Electrical Power Output.** Clean syngas, having passed through the bag filter, was used to generate electricity using an engine-generator set, whose specifications are presented in Table 4. The power consumed was determined using an

Table 4. Specification of the Gas Engine-Generator Set

engine	engine make	Cummins
	model	G855-G-BO
	bore and stroke	mm
	compression ratio	140 × 152
	number of cylinders	10:1
	power	hp
generator	output	6
	engine speed	rpm
	voltage	160
	frequency	85
		400
	Hz	50

electrical load. The effect of the syngas flow rate on ultimate syngas power output is shown in Table 2. Syngas flow rates of 150 and  $180 \text{ N m}^3 \text{ h}^{-1}$  could be used to generate electricity, with maximum power outputs of 21 and 47 kW, respectively. However, the syngas flow rate at  $100 \text{ N m}^3 \text{ h}^{-1}$  was not able to generate electricity; the syngas energy was just enough to run the engine without an electrical load.

**3.6. Sewage Sludge Consumption Rate.** Sewage sludge consumption increased with an increase in the syngas flow rate (Table 2). The sewage sludge consumption rates at 100, 150, and  $180 \text{ N m}^3 \text{ h}^{-1}$  syngas flow rates were 68.23, 79.00, and  $98.26 \text{ kg h}^{-1}$ , respectively. The increase of sewage sludge consumption is due to the fact that, when the syngas flow rate increases, the air flow rate also increases, providing more oxygen to oxidize and a higher amount of biomass to become combusted. The biomass consumption rate increases because of not only a higher combustion rate but also an enhanced pyrolysis and drying rate.<sup>33</sup> However, when the amount of biomass required to generate electricity (specific sewage sludge consumption) was taken into account, it was found that it decreased as the syngas flow rate increased. This indicates that the sewage sludge needed for electricity generation at higher

power outputs is less than that required at lower power outputs. On average, the specific sewage sludge consumption at 150 and  $180 \text{ N m}^3 \text{ h}^{-1}$  syngas flow rates were 3.76 and  $2.09 \text{ kg kWh}^{-1}$ . In comparison to other studies, the amount of sewage sludge required to produce the same power output was similar to that of other forms of biomass.<sup>15,25</sup>

**3.7. Charcoal Removal.** Charcoal removal from the gasifier is crucial in operating the gasification system. The charcoal removal rate was dependent upon the ash content of each biomass; the higher the ash content, the higher the charcoal removal rate. The rate of charcoal removal can be calculated as follows:

$$\begin{aligned} & \text{percentage of charcoal removal} \\ &= \frac{\text{charcoal removal rate } (\text{kg h}^{-1})}{\text{sewage sludge consumption rate } (\text{kg h}^{-1})} \quad (5) \end{aligned}$$

The percentage of charcoal removed from the gasifier is usually equal to the ash content obtained from the proximate analysis. In this study, the ash content of sewage sludge was 30.45%; therefore, the percentage of charcoal removal was controlled at approximately 30%. As the feedstock consumption rate increased with an increase in the syngas flow rate, the charcoal removal rate increased proportionally (Table 2). The charcoal removal rates under the 100, 150, and  $180 \text{ N m}^3 \text{ h}^{-1}$  syngas flow rates were 21.90, 23.80, and  $29.80 \text{ kg h}^{-1}$ , respectively. In addition to a charcoal removal of 30%, the charcoal removals above or below 30% were also investigated. Charcoal accumulated inside the gasifier was melted and turned into slag, which attached itself to the gasifier wall if the percentage of charcoal removal was lower than 30%. After a period of time, this slag accumulation was sufficient to obstruct the movement of feedstock from the top and eventually shutdown the gasification system. Comparatively, operation with the charcoal removal of 40% resulted in system termination by extinguishing the flame inside the gasifier. Therefore, it is necessary to establish the percentage of charcoal removal of high ash content feedstock prior to real operation. On average, the volume of gasified sewage sludge was reduced by 70% compared to that of the initial.

**3.8. Efficiencies of the Gasification System.** The gasification system was evaluated on the basis of specific syngas yield, gasification efficiency ( $\eta_g$ ), engine-generator set efficiency ( $\eta_e$ ), and electrical efficiency ( $\eta_{el}$ ). As shown in Table 2, an increase in the ER tended to increase the specific syngas yield, with the highest value of  $1.90 \text{ N m}^3 \text{ kg}^{-1}$ . The result obtained in this study is in accordance with those reported by other researchers.<sup>6</sup> The value of  $\eta_g$  increased from 52.67% at ER = 0.24 to 61.65% at ER = 0.31 and then declined to 56.29% at ER = 0.34. The increase in  $\eta_g$  was probably attributable to the increase of the air flow rate when the ER increased. As the air flow rate increases, the oxidation reaction is enhanced by the increased oxygen feeding rate, and the greater heat in the

oxidation zone promotes more endothermic gasification reactions. As a result, the  $\eta_g$  increases with an increase in the ER.<sup>34</sup> However, as the CO<sub>2</sub> content in the syngas increases with the combustion reaction, the heating value of synthetic gas decreases, thus decreasing the  $\eta_g$ . In this study, the gasification efficiency for sewage sludge was found to be in the range of those derived from biomass feedstocks.<sup>3,34</sup>

The  $\eta_e$  was calculated as the ratio of energy equivalent of electrical power output to the rate of energy supplied to the engine. The result of the  $\eta_e$  as a function of electrical power output is shown in Table 2. The  $\eta_e$  increased with an increase in the electrical power output. At the maximum power output achieved in this study (47 kW), the engine-generator set efficiency was as high as 22.57%. Similar trends were observed for  $\eta_{el}$  as with  $\eta_e$  (Table 2). The  $\eta_{el}$  values at 21 and 47 kW were 7.06 and 12.71%, respectively. The  $\eta_e$  and  $\eta_{el}$  obtained in this study with sewage sludge are similar to those achieved with various types of biomass using the same gasification system.<sup>15</sup> This means that sewage sludge can be efficiently used as feedstock for producing electricity.

#### 4. CONCLUSION

In this study, sewage sludge was used to produce electricity using a pilot-scale downdraft gasification power plant. The effects of the ER and syngas flow rate in the system on gasification system parameters were investigated. Temperatures inside the reactor were proportional to the ER. Calorific values tended to decrease as the ER increased from 0.24 to 0.34, with values ranging from 4.20 to 4.87 MJ N<sup>-1</sup> m<sup>-3</sup>. For electricity generation, the syngas flow rates at 150 and 180 N m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> could be used in an engine-generator set to generate electricity with electrical power outputs of 21 and 47 kW, respectively, while the syngas flow rate at 100 N m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> could run the engine without electrical load. The feedstock consumption rate was found to increase with the syngas flow rate, but the specific feedstock consumption decreased as the syngas flow rate increased. An appropriate percentage of charcoal removal was approximately 30% of the biomass consumption rate, while discharge rates above or below 30% caused system termination by blocking the movement of the feedstock as a result of slag formation or extinguishing the flame inside the gasifier, respectively. Gasification efficiency was at a maximum at a syngas flow rate of 150 N m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>, whereas engine-generator set efficiency and electrical efficiency increased with an increase in the syngas flow rate or electrical power output. The results obtained in sewage sludge gasification were comparable to those obtained from biomass. Overall, sewage sludge can be used to generate electricity using a pilot-scale downdraft gasification system.

#### ■ AUTHOR INFORMATION

##### Corresponding Author

\*Telephone: 66-44224225. Fax: 66-44224610. E-mail: arjharh@g.sut.ac.th.

##### Notes

The authors declare no competing financial interest.

#### ■ ACKNOWLEDGMENTS

The authors acknowledge the financial support given by the Office of Research and Project Coordination, the Office of the National Research Council of Thailand, and the Institute of

Research and Development, Suranaree University of Technology, Thailand.

#### ■ REFERENCES

- (1) Midilli, A.; Dogru, M.; Howarth, C. R.; Ling, M. J.; Ayhan, T. *Energy Convers. Manage.* **2001**, *42*, 157–172.
- (2) Xie, L.-p.; Li, T.; Gao, J.-d.; Fei, X.-n.; Wu, X.; Jiang, Y.-g. *J. Fuel Chem. Technol.* **2010**, *38*, 615–620.
- (3) Arjharh, W.; Kongkapee, N.; Rabsombat, K.; Hinsui, T. *J. Natl. Res. Coun. Thailand* **2009**, *40*, 127–146.
- (4) Larson, E. D. Small-scale gasification-based biomass power generation. *Proceedings of the Biomass Workshop*; Changchun, Jilin Province, China, Jan 12–13, 1998.
- (5) Seggiani, M.; Vitolo, S.; Puccini, M.; Bellini, A. *Fuel* **2012**, *93*, 86–91.
- (6) Seggiani, M.; Puccini, M.; Raggio, G.; Vitolo, S. *Waste Manage.* **2012**, *32* (10), 1826–1834.
- (7) Quakk, P.; Knoef, H.; Stassen, H. *Energy from Biomass: A Review of Combustion and Gasification Technology (World Bank Technical Papers)*; World Bank Publications: Washington, D.C., 1999; 422.
- (8) Bhattacharya, S. C.; Shwe Hla, S.; Pham, H.-L. *Biomass Bioenergy* **2001**, *21*, 445–460.
- (9) Reed, T. B.; Das, A. *Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems*; The Biomass Energy Foundation Press: Golden, CO, 1988.
- (10) Rajvanshi, A. K. Biomass gasification. In *Alternative Energy in Agriculture*; Goswami, Y. D., Ed.; CRC Press: Boca Raton, FL, 1986; Vol. 2, pp 83–102.
- (11) Raveendran, K.; Ganesh, A.; Khilar, K. C. *Fuel* **1995**, *74*, 1812–1822.
- (12) Dogru, M.; Midilli, A.; Howarth, C. R. *Fuel Process. Technol.* **2002**, *75*, 55–82.
- (13) McKendry, P. *Bioresour. Technol.* **2002**, *83*, 55–63.
- (14) Teixeira, P.; Lopes, H.; Gulyurtlu, I.; Lapa, N.; Abelha, P. *Biomass Bioenergy* **2012**, *39*, 192–203.
- (15) Arjharh, W.; Hinsui, T.; Liplap, P.; Raghavan, G. S. V. *J. Biobased Mater. Bioenergy* **2012**, *6*, 309–318.
- (16) Medcalf, B. D.; Manahan, S. E.; Larsen, D. W. *Waste Manage.* **1998**, *18* (3), 197–201.
- (17) Pinto, F.; Lopes, H.; André, R. N.; Gulyurtlu, I.; Cabrita, I. *Fuel* **2008**, *87* (7), 1050–1062.
- (18) Marrero, T. W.; McAuley, B. P.; Sutterlin, W. R.; Steven Morris, J.; Manahan, S. E. *Waste Manage.* **2004**, *24*, 193–198.
- (19) Vervaeke, P.; Tack, F. M. G.; Navez, F.; Martin, J.; Verloo, M. G.; Lust, N. *Biomass Bioenergy* **2006**, *30*, 58–65.
- (20) Pinto, F.; André, R. N.; Lopes, H.; Dias, M.; Gulyurtlu, I.; Cabrita, I. *Energy Fuels* **2008**, *22* (4), 2314–2325.
- (21) Kirubakaran, V.; Sivaramakrishnan, V.; Nalini, R.; Sekar, T.; Premalatha, M.; Subramanian, P. *Renewable Sustainable Energy Rev.* **2009**, *13*, 179–186.
- (22) Martinez, J. D.; Mahkamov, K.; Andrade, R. V.; Silva Lora, E. E. *Renewable Energy* **2012**, *38*, 1–9.
- (23) Walawender, W. P.; Chern, S. M.; Fan, L. T. Wood chip gasification in a commercial downdraft gasifier. In *Fundamentals of Thermochemical Biomass Conversion*; Overend, R. P., Milne, T. A., Mudge, L. K., Eds.; Elsevier Applied Science: New York, 1985; pp 911–922.
- (24) Wander, P. R.; Altafini, C. R.; Barreto, R. M. *Biomass Bioenergy* **2004**, *27* (5), 467–476.
- (25) Zainal, Z. A.; Rifau, A.; Quadir, G. A.; Seetharamu, K. N. *Biomass Bioenergy* **2002**, *23*, 283–289.
- (26) Son, Y.-I.; Yoon, S. J.; Kim, Y. K.; Lee, J.-G. *Biomass Bioenergy* **2011**, *35*, 4215–4220.
- (27) Cao, Y.; Wang, Y.; Riley, J. T.; Pan, W.-P. *Fuel Process. Technol.* **2006**, *87*, 343–353.
- (28) Phuphuakrat, T.; Nipattummakul, N.; Namioka, T.; Kerdsuwan, S.; Yoshikawa, K. *Fuel* **2010**, *89*, 2278–2284.
- (29) Bhava, A. G.; Vyas, D. K.; Patel, J. B. *Renewable Energy* **2008**, *33* (7), 1716–1720.

**Energy & Fuels**

Article

- (30) Kaupp, A.; Goss, J. R. *State of Art for Small Scale (50 kW) to Gas Producer-Engine Systems*; United States Department of Agriculture (USDA), United States Forest Service: Washington, D.C., 1981; 53-319R-0-141.
- (31) Reed, T.; Bryant, B. *Densified Biomass, a New Form of Solid Fuel*; Solar Energy Research Institute, A Division of Midwest Research Institute: Golden, CO, 1978.
- (32) Devi, L.; Ptasiński, K. J.; Janssen, F. J. G. *Biomass Bioenergy* **2003**, *24*, 125–140.
- (33) Sheth, P. N.; Babu, B. V. *Bioresour. Technol.* **2009**, *100* (12), 3127–3133.
- (34) Yoon, S. J.; Son, Y.-I.; Kim, Y.-K.; Lee, J.-G. *Renewable Energy* **2012**, *42*, 163–167.

AEC2055

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26  
ตุลาคม 2555 จังหวัดเชียงราย

การผลิตแก๊สสังเคราะห์จากเชื้อเพลิงขยะโดยเตาแก๊สซีไฟเออร์แบบไหลลง  
The syngas production from refuse-derived fuel (RDF)  
in a fixed-bed downdraft gasifier

ทิพย์สุภินทร์ หินซุย<sup>1</sup> กฤษกร รับสมบัติ<sup>1</sup>, พรรษา ลิบลับ<sup>1</sup> และ วีรชัย อาจหาญ<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup> ศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา 30000

111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

\* E-mail: arjharh@gs.sut.ac.th, โทรศัพท์: 0-4422-5007 0-4422-5045 โทรสาร: 044-225046

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงขยะโดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซีไฟเคชั่นแบบไหลลง (Fixed-bed downdraft gasifier) โดยระบบมีกำลังผลิตขนาด 20 kWe หรือ 360 kWth ผลการศึกษาพบว่าแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตได้ประกอบด้วย CO, H<sub>2</sub> และ CH<sub>4</sub> ในสัดส่วนโดยปริมาตรเฉลี่ยเท่ากับ 18.37 %, 11.92 % และ 2.87% ตามลำดับ มีค่าความร้อนเท่ากับ 4.81 MJ/Nm<sup>3</sup> ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สสังเคราะห์ (η<sub>g</sub>) สูงสุด คือที่อัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 116.7 Nm<sup>3</sup>/hr โดยมีอัตราการใช้เชื้อเพลิงขยะเท่ากับ 63 kg/hr ให้ η<sub>g</sub> เท่ากับ 46.25% และคิดเป็นค่าพลังงานความร้อนเท่ากับ 167.39 kWth ปริมาณทาร์และฝุ่นปนเปื้อนประมาณ 40.4 mg/Nm<sup>3</sup> โดยสรุปแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตได้จากการศึกษาครั้งนี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในทางความร้อนและผลิตไฟฟ้าโดยเครื่องยนต์สันดาปภายในได้

**คำหลัก:** เตาแก๊สซีไฟเออร์แบบไหลลง, เชื้อเพลิงขยะ, แก๊สสังเคราะห์

**Abstract**

In the present study, the energy production from refuse-derived fuel (RDF) using gasification technology in fixed-bed downdraft gasifier was studied. The gasification system had a capacity of 20 kWe or 360 kWth. Results showed that syngas CO, H<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> occurred in an average concentration (v/v) of 18.37%, 11.92% and 2.87%, respectively, and the syngas calorific value was 4.81 MJ/Nm<sup>3</sup>. The maximum gasification efficiency (η<sub>g</sub>) achieved was 46.25% at the syngas flow rate of 116.7 m<sup>3</sup>/hr. The average fuel consumption was 63 kg/hr, and thermal energy production was 167.39 kWth. The total tar and dust was 40.4 mg/Nm<sup>3</sup>. Overall, the syngas obtained in this study can be used for thermal application and used to generate electricity by internal combustion engine.

**Keywords:** Fixed-bed downdraft gasifier, Refuse-derived Fuel (RDF), Syngas

## ประวัติผู้เขียน

นางสาวทิพย์สุภินทร์ หินซุย เกิดเมื่อวันที่ 15 เมษายน พ.ศ. 2524 เป็นบุตรของ อาจารย์ ชุมสิน หินซุย และคุณแม่วงเดือน หินซุย จบชั้นประถมศึกษาปีที่ 6 โรงเรียนบ้านกระจายเหล่าสูง และชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 ที่โรงเรียนหนองหมื่นถ่านวิทยา ตำบลหนองหมื่นถ่าน อำเภอกาญจนบุรี จังหวัดร้อยเอ็ด จบการศึกษาในระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรม สิ่งแวดล้อม) พ.ศ. 2547 และ ปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรม สิ่งแวดล้อม) พ.ศ. 2550 ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ในปี พ.ศ. 2551 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาเอก สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยขณะศึกษาได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย ประเภท บัณฑิตศึกษา จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ปีงบประมาณ 2554 ปัจจุบันทำงานในตำแหน่ง นักวิจัย ประจำศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ผลงานวิจัยที่เผยแพร่ในระหว่างที่ทำการศึกษา

- 1) ทิพย์สุภินทร์ หินซุย, กฤษกร รับสมบัติ, พรธมา ลิปลับ และ วีรชัย อจหาญ. (2555). การผลิตแก๊สสังเคราะห์จากเชื้อเพลิงขยะโดยเตาแก๊สซีไฟเออร์แบบไหลลง. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26 ณ โรงแรมดุสิต ไอส์แลนด์ รีสอร์ท จังหวัดเชียงราย. ระหว่างวันที่ 24-27 ตุลาคม 2555
- 2) Arjharn, W., Hinsui, T., Liplap, P., and G. S. V. Raghavan. (2012). Evaluation of energy production from different biomass feedstock using a pilot scale downdraft gasifier. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*. 6(3), 309-318.
- 3) Arjharn, W., Hinsui, T., Liplap, P., and G. S. V. Raghavan. (2013). Evaluation of an energy production system from sewage sludge using a pilot-scale downdraft gasifier. *Energy & Fuels*. 27(1), 229-236.
- 4) Hinsui, T., Arjharn, W., Liplap. (In press). Plasma-assisted gasification of waste reject from a MBT plant for syngas production. *Suranaree Journal of Science and Technology*. Accepted 18 July 2014.