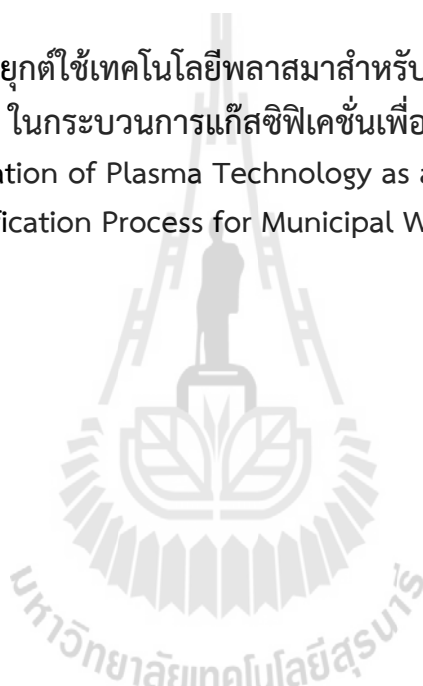


รหัสโครงการ SUT 7-716-55-12-02



## รายงานการวิจัย

การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีพลาสมาสำหรับเป็นแหล่งความร้อนเสริม  
ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเพื่อกำจัดขยะชุมชน  
An Application of Plasma Technology as an Assisted Heat Source in  
Gasification Process for Municipal Waste Disposal



ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

รหัสโครงการ SUT 7-716-55-12-02



## รายงานการวิจัย

การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีพลาสมาสำหรับเป็นแหล่งความร้อนเสริม  
 ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเพื่อกำจัดขยะชุมชน  
 An Application of Plasma Technology as an Assisted Heat Source in  
 Gasification Process for Municipal Waste Disposal

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ทองโสภณ

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ร่วมวิจัย

พรรษา ลิปลับ  
 นัยวัฒน์ สุขทั้ง  
 สุภัทร หนูแย้ม  
 ปภัส ชนะโรค  
 ณัฐพงษ์ ประภาการ

ทิพย์สุภินทร์ หินซุย  
 ศรัณญา ทองอ่อน  
 กิตติยาภรณ์ รongเมือง  
 มณัญญา สายแสงอ  
 สาวิตรี คำหอม

ศรัลย์ ปานศรีพงษ์  
 ธนัช मुखันธ์  
 กงจักร ลมวิชัย  
 เฉลิมขวัญ อริยะวงศ์  
 ธรารุช บุญน้อม

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2555

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

มีนาคม 2558

## กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2555 ทางคณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณ คณะกรรมการผู้ตรวจสอบทางวิชาการ ที่ได้คำแนะนำข้อเสนอแนะต่อคณะผู้วิจัย ด้วยดีตลอดมา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ทองโสภณ  
หัวหน้าโครงการวิจัย



## บทคัดย่อ

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนา ทดสอบสมรรถนะ และประเมินมลพิษทางสิ่งแวดล้อมของระบบการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงขยะที่ใช้เทคโนโลยีพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน โดยศึกษาการนำความร้อนจากพลาสมาอาร์คมาใช้ร่วมกับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Plasma-assisted gasification) เพื่อการกำจัดขยะมูลฝอยควบคู่กับการผลิตพลังงาน สำหรับงานวิจัยนี้ คือใช้พลาสมาอาร์ค (Plasma arc torch) ชนิด DC plasma torch ขนาด 50 กิโลวัตต์ เป็นความร้อนเสริมให้กับเตาปฏิกรณ์ชนิดไหลลง (Fixed bed downdraft gasifier)

ผลการศึกษาการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงขยะกับระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชันที่มีกำลังผลิตขนาด 20 kWe หรือ 360 kWth พบว่าแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตได้ ประกอบด้วย 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

ผลการวิเคราะห์มลพิษอากาศ พบว่า ทั้ง 2 ระบบปลดปล่อยปริมาณฝุ่นละออง (TSP), SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, Hg, Cd และ Pb ไม่เกินเกณฑ์ที่กำหนด (มาตรฐานควบคุมการปล่อยทิ้งอากาศเสียจากเตาเผามูลฝอย ประเภทกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม) และพบว่าระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชันมีประสิทธิภาพในการกักเก็บมลสารในรูปเถ้าหนักถึง 92.60%

## Abstract

This project to develop, test and evaluate the performance of environmental pollution. The production of energy from waste fuel plasma gasification technology and applications. The study of plasma-assisted gasification for MSW disposal coupled with energy production employed a DC plasma torch with a power of 50 kW. It was used to provide additional heat to prototype fixed bed downdraft gasifier.

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 ( $\eta_g$ ) 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.

An analysis result of air pollution suggested that plasma gasification system 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 plasma gasification was 92.60%.

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	3
บทคัดย่อ.....	4
Abstract .....	5
สารบัญ .....	6
สารบัญตาราง .....	7
สารบัญรูปภาพ .....	8
บทที่ 1 บทนำ .....	10
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา .....	10
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	11
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	11
บทที่ 2 ปรัชญากรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	12
2.1 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับขยะมูลฝอย .....	12
2.3 เทคโนโลยีการผลิตพลังงานจากขยะ.....	20
2.4 เทคโนโลยีการผลิตเชื้อเพลิงขยะ (Refuse-derived fuel) .....	20
2.5 เทคโนโลยีเตาเผาขยะมูลฝอย (Incineration) .....	26
2.6 เทคโนโลยีไพโรไลซิส/แก๊สซิฟิเคชัน (Pyrolysis/Gasification).....	30
2.7 เทคโนโลยีพลาสมาเชิงความร้อน .....	41
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย .....	47
3.1 วิธีการดำเนินการวิจัย .....	47
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน .....	55
4.1 ข้อมูลทั่วไปและคุณสมบัติของเชื้อเพลิงขยะ.....	55
4.2 การพัฒนาชุดพลาสมาอาร์คในระดับห้องปฏิบัติการ .....	60
บทที่ 5 สรุป ปัญหาและข้อเสนอแนะ .....	79
เอกสารอ้างอิง.....	81
ประวัตินักวิจัย .....	82

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1	ชนิดของขยะที่แบ่งตามองค์กร APWA ในสหรัฐอเมริกา.....	12
ตารางที่ 2	องค์ประกอบของขยะมูลฝอยชุมชนทั่วประเทศไทย โดยแบ่งออกเป็น 10 ประเภท.....	15
ตารางที่ 3	ค่าปริมาณความร้อนของขยะชุมชนทุกๆ ไป .....	15
ตารางที่ 4	ค่าปริมาณความร้อนของขยะชุมชนทุกๆ ไป .....	16
ตารางที่ 5	ส่วนประกอบทางเคมีของขยะชุมชนโดยทั่ว ๆ ไป.....	16
ตารางที่ 6	องค์ประกอบของขยะมูลฝอยในประเทศไทย.....	17
ตารางที่ 7	องค์ประกอบของขยะมูลฝอยในประเทศไทย.....	18
ตารางที่ 8	คุณสมบัติของขยะมูลฝอยในประเทศไทย .....	19
ตารางที่ 9	การจัดประเภทของเชื้อเพลิงขยะ (RDF) ประเภทต่าง ๆ .....	21
ตารางที่ 10	ข้อดีและข้อเสียของเตาเผาขยะแต่ละประเภท.....	28
ตารางที่ 11	ข้อดีและข้อเสียของเตาเผาขยะแต่ละประเภท (ต่อ).....	28
ตารางที่ 12	สรุปประสิทธิภาพที่ได้จากการผลิตพลังงานในรูปแบบต่าง ๆ .....	29
ตารางที่ 13	ส่วนประกอบทางเคมีของทาร์ (Tars) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ <sup>(1)</sup> .....	35
ตารางที่ 14	ชนิดของมลสารและปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบผลิตแก๊สเชื้อเพลิง <sup>(1)</sup> .....	39
ตารางที่ 15	ชนิดของมลสารและระบบทำความสะอาดแก๊สเชื้อเพลิง <sup>(1)</sup> .....	39
ตารางที่ 16	กระบวนการผลิตของโรงบำบัดทางกลและชีวภาพ .....	50
ตารางที่ 17	คุณสมบัติของขยะมูลฝอยในประเทศไทย.....	56
ตารางที่ 18	ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงขยะ .....	58
ตารางที่ 19	ผลการศึกษาสมบัติทางเคมีของเชื้อเพลิงขยะ .....	58
ตารางที่ 20	คุณลักษณะหวัพลาสมาสำหรับนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ .....	62
ตารางที่ 21	คุณลักษณะหวัพลาสมาสำหรับนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ .....	75
ตารางที่ 22	ผลการตรวจวิเคราะห์แก๊สมลพิษในแก๊สเชื้อเพลิง.....	76
ตารางที่ 23	สมมูลมวลของ ธาตุอัลคาไลน์ โลหะหนัก และคลอรีนในรูปน้ำเสีย .....	77
ตารางที่ 24	อัตราการปลดปล่อยมลพิษ (Emission factor) ในรูปน้ำเสีย.....	78

## สารบัญรูปร่างภาพ

หน้า

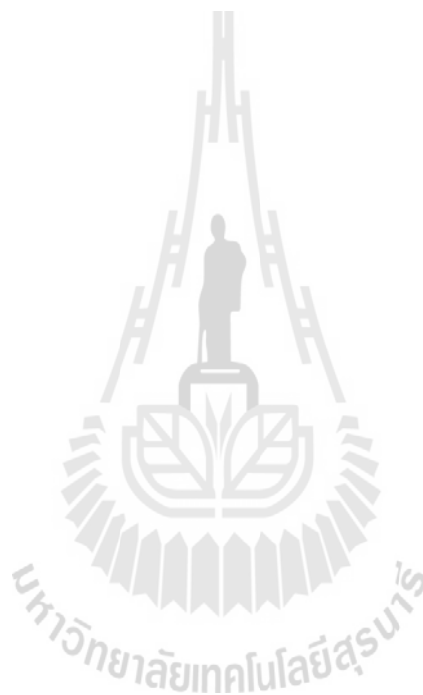
รูปที่ 1	ข้อมูลสถิติปริมาณขยะมูลฝอยของประเทศไทยจาก ปี 2551 – 2555 (ที่มา : กรมควบคุมมลพิษ, 2556).....	13
รูปที่ 2	องค์ประกอบขยะชุมชนเฉลี่ยทั่วประเทศไทย (ที่มา:กรมควบคุมมลพิษ, 2547) .....	14
รูปที่ 3	ขั้นตอนในการแปรรูปขยะเป็นเชื้อเพลิงขยะ (Diaz et al., 2006).....	21
รูปที่ 4	ผังการทำงานของกระบวนการทางกลและชีวภาพ (Mechanical and Biological .....	23
รูปที่ 5	กระบวนการกำจัดขยะมูลฝอยด้วยความร้อน.....	27
รูปที่ 6	ปฏิกิริยาอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันในเตาผลิตแก๊สชนิดไหลลง.....	31
รูปที่ 7	เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ .....	34
รูปที่ 8	ภาพรวมของการใช้ประโยชน์แก๊สเชื้อเพลิง (ที่มา : Nowell, 1999).....	37
รูปที่ 9	สถานะของพลาสมา.....	42
รูปที่ 10	นอนทรานสเฟอร์พลาสมาอาร์ค (Non-transferred plasma arc).....	44
รูปที่ 11	หัวพลาสมาจากบริษัท Europlasma.....	44
รูปที่ 12	ทรานสเฟอร์พลาสมาอาร์ค (Transferred arch torch) .....	45
รูปที่ 13	ลักษณะของ Slag melting ในเตาปฏิกรณ์พลาสมา.....	46
รูปที่ 14	ขั้นตอนการศึกษาสำหรับระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน .....	48
รูปที่ 15	ลักษณะทางกายภาพของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง (RDF-5).....	57
รูปที่ 16	Thermogravimetric Analysis (TGA) .....	59
รูปที่ 17	ลักษณะของวงจรระบบพลาสมาอาร์ค และชุด Power Supply ในระดับต้นแบบในห้องปฏิบัติการ .....	60
รูปที่ 18	อุปกรณ์ของวงจรระบบพลาสมาอาร์ค และชุดอุปกรณ์จ่ายกระแส ในระดับต้นแบบในห้องปฏิบัติการ .....	61
รูปที่ 19	แผนผังของหัวพลาสมาอาร์ค (plasma arc torch).....	63
รูปที่ 20	ชุดระบบพลาสมาอาร์คและอุปกรณ์จ่ายกระแสไฟฟ้า.....	64
รูปที่ 21	ลักษณะการทำงานของระบบพลาสมาอาร์คและอุปกรณ์จ่ายกระแสไฟฟ้า.....	64
รูปที่ 22	Plasma Jacket หรือชุดครอบหัวพลาสมา.....	65
รูปที่ 23	ลักษณะชุดครอบหัวพลาสมา (Plasma Jacket) .....	65
รูปที่ 24	แผนผังอุปกรณ์สำหรับควบคุมการทำงานของหัวพลาสมาอาร์ค .....	66
รูปที่ 25	การติดตั้งชุดอุปกรณ์เพื่อควบคุมการทำงานของหัวพลาสมาอาร์ค .....	67
รูปที่ 26	ลักษณะของเตา Gasification และPlasma-assisted gasification.....	68
รูปที่ 27	แผนผังกระบวนการของระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน.....	68
รูปที่ 28	ระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน มีกำลังการผลิตขนาด 20 kWe ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ .....	69



## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 29	ส่วนประกอบที่สำคัญของระบบแก๊สซิฟิเคชันและพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน.....	71
รูปที่ 30	อัตราส่วนสมมูล (ER) ทั้ง 4 สภาวะ.....	72
รูปที่ 31	ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ (Temperature profile).....	73
รูปที่ 32	องค์ประกอบและค่าความร้อนของแก๊สสังเคราะห์ทั้ง 4 สภาวะ .....	74



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ขยะมูลฝอยจัดเป็นของเสียที่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทั่วโลก ในปี 2557 ประเทศไทยมีปริมาณขยะมูลฝอย 22.229 ล้านตัน/ปี และมีการนำกลับมาใช้ประโยชน์ประมาณ 4.209 ล้านตันต่อปี หรือคิดเป็นร้อยละ 18.93 ของปริมาณขยะมูลฝอยทั่วประเทศ ทั้งนี้ขยะมูลฝอยที่ได้รับการกำจัดอย่างถูกต้องตามหลักวิชาการมีเพียงร้อยละ 17 เท่านั้น ปัจจุบันวิธีการกำจัดส่วนใหญ่จะใช้การฝังกลบเป็นหลัก เนื่องจากมีต้นทุนค่าใช้จ่ายที่น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่น ๆ เช่น การกำจัดด้วยกระบวนการทางเคมีความร้อนหรือกระบวนการทางชีวภาพ อย่างไรก็ตามวิธีการดังกล่าวมักประสบปัญหาเกี่ยวกับการใช้พื้นที่ในการฝังกลบ รวมทั้งการต่อต้านจากประชาชน ที่ผ่านมามีหลายฝ่ายพยายามประยุกต์ใช้เทคโนโลยีที่หลากหลายเพื่อปรับปรุงระบบการจัดการขยะมูลฝอยให้สมบูรณ์ขึ้น รวมถึงมุ่งเน้นการใช้ทรัพยากรให้คุ้มค่ามากที่สุดเพื่อให้เหลือสิ่งที่จะต้องนำไปกำจัดให้น้อยที่สุด และมีการพิจารณาการเก็บคืนพลังงานที่มีอยู่ในขยะมูลฝอยกลับมาใช้ประโยชน์อย่างสูงสุดด้วยเช่นกัน

สำหรับประเทศไทย กระทรวงพลังงานได้มีการกำหนดเป้าหมายการผลิตไฟฟ้าจากขยะให้ได้ 160 เมกกะวัตต์ ในปี พ.ศ. 2565 และในการแปลงขยะเป็นพลังงาน ที่มีการนำเสนอและมีความเป็นไปได้มีอยู่ 2 เทคโนโลยี คือ 1) สำหรับการกำจัดขยะในปริมาณ 150 - 300 ตันต่อวัน คือใช้เทคโนโลยีการแปลงขยะมูลฝอยเป็นเชื้อเพลิงขยะ (Refuse Derived Fuel : RDF) แล้วผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยโรงไฟฟ้าที่ใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน 2) สำหรับการกำจัดขยะ 500 ตันต่อวันขึ้นไป ใช้เตาเผาขยะชนิดปลอดมลพิษและผลิตกระแสไฟฟ้า

การจัดการขยะมูลฝอยด้วยกระบวนการทางความร้อนสามารถลดมวลและปริมาตรของขยะได้ร้อยละ 70-90 เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันเป็นเทคโนโลยีที่สามารถกำจัดขยะมูลฝอยโดยอาศัยกระบวนการทางความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีดังกล่าวยังมีข้อจำกัด คือ เสถียรภาพของระบบขึ้นอยู่กับความแปรปรวนของขยะมูลฝอย ดังนั้นการนำเทคโนโลยีพลาสมาเข้ามาใช้เป็นแหล่งความร้อนเสริมในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน จะสามารถแก้ปัญหาความแปรปรวนทั้งด้านคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของขยะมูลฝอยได้ เนื่องจากเทคโนโลยีพลาสมาสามารถผลิตความร้อนได้มากกว่า 1,500 องศาเซลเซียสจากการแตกตัวของโมเลกุลอากาศหรือแก๊สต่างๆ จึงทำให้ระบบแก๊สซิฟิเคชันมีเสถียรภาพ และมีประสิทธิภาพสูงในการทำลายองค์ประกอบที่เป็นพิษในขยะมูลฝอย เราเรียกว่าเทคโนโลยีพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน (Plasma Arc Gasification)

โดยเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) จะเป็นเทคโนโลยีที่อาศัยกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางอุณหเคมี (Thermo-chemical Conversion Process) โดยควบคุมเตาปฏิกรณ์ ให้เกิดการเผาไหม้แบบ Partial Oxidation ที่อุณหภูมิ ประมาณ 1,000 องศาเซลเซียส ความร้อนจะเปลี่ยนเชื้อเพลิงแข็งให้เป็นแก๊สเชื้อเพลิงที่สามารถนำไปเผาไหม้ได้ ได้แก่ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์

(CO) แก๊สไฮโดรเจน ( $H_2$ ) และแก๊สมีเทน ( $CH_4$ ) (Higman, C. and Van d. B., 2008) แก๊สเชื้อเพลิงนี้สามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้โดยตรงโดยส่งเข้าเครื่องยนต์สันดาปภายใน (Internal Combustion Engine) เพื่อผลิตไฟฟ้า หรือป้อนแก๊สเข้าไปเผาไหม้ในหม้อไอน้ำ เพื่อผลิตไอน้ำแล้วนำไปหมุนกังหันไอน้ำผลิตไฟฟ้า หรือนำความร้อนของไอน้ำไปใช้ประโยชน์อื่น สำหรับเทคโนโลยีพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน (Plasma Arc Gasification) จะอาศัยการปล่อยกระแสไฟฟ้า (the “Arc”) เพื่อให้ความร้อนกับแก๊ส เช่น ออกซิเจน หรือไนโตรเจน ที่ความร้อนสูงแก๊สร้อนนี้จะถูกนำไปใช้ทำลายขยะมูลฝอย ในขณะเดียวกัน ทั้งนี้ต้องควบคุมปริมาณของออกซิเจนให้เกิดขึ้นในสภาวะ Partial Oxidation เช่นเดียวกัน

ในการศึกษาในครั้งนี้ มีแนวคิดที่จะศึกษาวิธีการกำจัดขยะชุมชนเพื่อผลิตพลังงานโดยใช้การประยุกต์ Plasma Arc Gasification กับขยะมูลฝอยที่มีความแปรปรวนของคุณสมบัติทางกายภาพและเคมี ผลการศึกษาที่ได้จากงานวิจัยครั้งนี้ จะทำให้ได้องค์ความรู้และนวัตกรรมประเภทสิ่งประดิษฐ์ด้านเทคโนโลยีการกำจัดขยะเพื่อผลิตพลังงาน ที่ทราบถึงความเป็นไปได้ในเชิงเทคนิคจากการศึกษาสมรรถนะของระบบ (Operation Performance) และทราบปริมาณการปลดปล่อยมลพิษและของเสีย ทั้งทางน้ำ และกากขี้เถ้า จากกระบวนการพลาสมาแก๊สซิฟิเคชันโดยใช้ขยะชุมชนเป็นเชื้อเพลิง เพื่อเป็นต้นแบบของเทคโนโลยีการกำจัดขยะที่มีเสถียรภาพ และสามารถเปลี่ยนของเสียให้เป็นพลังงานได้ (Waste-to-energy)

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) เพื่อพัฒนาระบบการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงขยะที่ใช้เทคโนโลยีพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน (Plasma gasification)
- 2) เพื่อทดสอบสมรรถนะการทำงานและประเมินประสิทธิภาพการผลิตพลังงาน (Operation Performance and System Efficiency) ของระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน
- 3) เพื่อประเมินมลพิษทางสิ่งแวดล้อม (Emission Evaluation) โดยวิเคราะห์ปริมาณการปลดปล่อยมลพิษและของเสีย ในน้ำเสีย และกากขี้เถ้า จากกระบวนการพลาสมาแก๊สซิฟิเคชันโดยใช้ขยะชุมชนเป็นเชื้อเพลิง

## 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ทราบถึง เทคโนโลยีในการนำขยะมาใช้เป็นพลังงานทดแทน โดยมีผลโดยตรงคือ ลดปริมาณขยะ ลดต้นทุนในการกำจัดขยะ ได้พลังงานไฟฟ้ามาใช้ประโยชน์และผลประโยชน์ทางอ้อมสำหรับเทคโนโลยีพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน จะสามารถช่วยทำลายขยะที่มีสารพิษอันตรายไม่ให้สารตกค้างไหลออกสู่ธรรมชาติเมื่อเปรียบเทียบกับเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันแบบเดิม ส่วนความรู้และเทคโนโลยีดังกล่าวก็สามารถนำไปส่งเสริมแนะนำให้ชุมชนต่างๆได้เข้ามาเรียนรู้ จนนำไปใช้ในชุมชนเพื่อเป็นการสร้างพลังงานใช้เองและ เป็นการสร้างรายได้ให้แก่ชุมชนลดการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศได้ด้วย

## บทที่ 2

### ปรีทศวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับขยะมูลฝอย

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

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

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

ในการจำแนกประเภทของขยะในต่างประเทศ (The American Public Work Association: APWA) พบว่า ขยะมูลฝอยสามารถแบ่งออกเป็น 7 ชนิด ตามชนิดของขยะ ค่าความชื้น องค์ประกอบของวัสดุที่เผาไหม้ไม่ได้ และค่าความร้อนที่ให้ ดังแสดงในตารางที่ 1

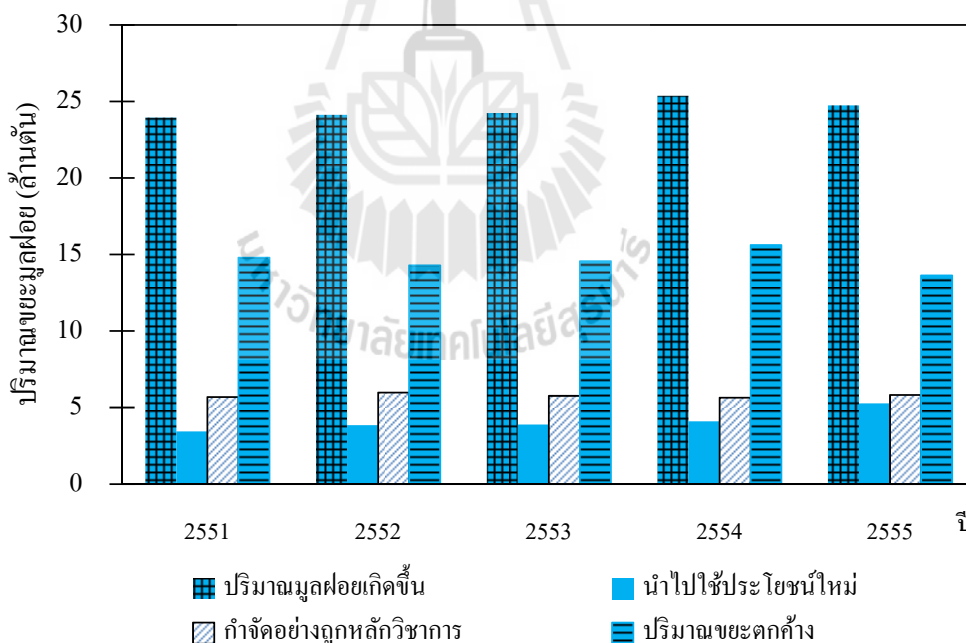
**ตารางที่ 1 ชนิดของขยะที่แบ่งตามองค์กร APWA ในสหรัฐอเมริกา**

ชนิดของขยะ	องค์ประกอบหลัก
Type 0	เป็นส่วนผสมของวัสดุที่สามารถเผาไหม้ได้ดีมาก เช่นกระดาษ กลังกระดาษ กลังไม้ จากการค้าและอุตสาหกรรม ซึ่งส่วนผสมนี้ประกอบด้วยถุงพลาสติก 10% กระดาษเคลือบกระดาษกลอง เศษผ้า เศษพลาสติกและเศษยาง
Type 1	เป็นส่วนผสมของวัสดุที่สามารถเผาไหม้ได้ดี เช่น กระดาษ กลังกระดาษ เศษไม้ ไม้กวาด จากบ้านเรือนและการค้า ซึ่งส่วนผสมนี้ประกอบด้วยเศษอาหารจากภัตตาคารถึง 20% หากแต่มีองค์ประกอบของกระดาษขาว เศษพลาสติกและเศษยางเพียงเล็กน้อย
Type 2	เป็นส่วนผสมของขยะแห้งและขยะเปียกโดยประมาณ ส่วนมากเป็นขยะที่มาจากอพาร์ทเมนต์ และที่อยู่อาศัย 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

ชนิดของขยะ	องค์ประกอบหลัก
Type 5	เป็นขยะประเภทแก๊ส และของเหลวหรือกึ่งของเหลวเช่น สี น้ำมันดิน สารทำลาย สลัดจ์ คิวจากโรงงานอุตสาหกรรมต่าง 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 ดังแสดงในรูปที่ 1



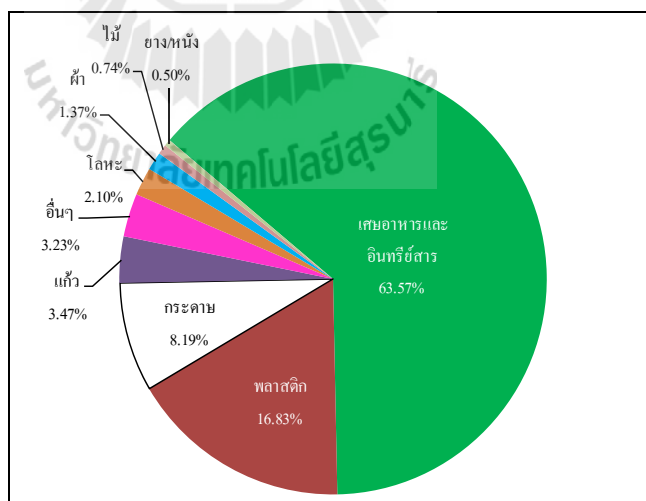
รูปที่ 1 ข้อมูลสถิติปริมาณขยะมูลฝอยของประเทศไทยจาก ปี 2551 - 2555  
(ที่มา : กรมควบคุมมลพิษ, 2556)

การจัดการขยะมูลฝอยของประเทศไทยในปัจจุบัน จะจัดการโดย 1) ใช้เตาเผาไหม้ 1% 2) ผลิตเป็นปุ๋ยอินทรีย์ 2% 3) ฝังกลบ 33% 4) กองทิ้ง/เผากลางแจ้ง 63% ข้อมูลปี 2555 มีขยะมูลฝอยตกค้างกว่า 13.62 ล้านตัน ที่ถูกทิ้ง/เผากลางแจ้ง นอกจากนี้ยังมีการลักลอบนำไปทิ้ง ในบ่อดินเก่าหรือพื้นที่รกร้าง โดยเฉพาะขยะจากองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นขนาดเล็กและในพื้นที่ห่างไกล ซึ่งยังมีระบบการเก็บรวบรวมไม่ครอบคลุมพื้นที่บริการ โดยมีองค์การบริหารส่วนตำบลเพียง 500 แห่ง ที่นำขยะไปกำจัดร่วมกับเทศบาลที่มีระบบ เห็นได้ว่าตามสภาพปัญหาในปัจจุบัน จำนวนของระบบกำจัดขยะมูลฝอยที่มีอยู่ไม่เพียงพอในการรองรับขยะมูลฝอยที่เกิดขึ้น (กรมควบคุมมลพิษ, 2556)

### 2.2.2 องค์ประกอบของขยะมูลฝอย

ขยะมูลฝอยชุมชนที่เป็นสิ่งเหลือใช้จากกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์เป็นของเสียต้องมีวิธีการกำจัดที่เหมาะสม เพื่อไม่ให้ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมรอบด้าน รวมทั้งสุขภาพของมนุษย์ การที่จะหาวิธีการ หรือเทคโนโลยีมาใช้ในการกำจัดขยะได้อย่างเหมาะสมต้องพิจารณาถึงองค์ประกอบ และคุณสมบัติของขยะ เป็นสำคัญ

ข้อมูลเฉลี่ยองค์ประกอบของขยะในประเทศไทย ปี 2547 (กรมควบคุมมลพิษ, 2547) ค่าเฉลี่ยขององค์ประกอบที่เผาไหม้ได้ (Combustible waste) สูงถึง 94.43% และเผาไหม้ไม่ได้ (Non-combustible waste) มีเพียง 5.57% ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยการจำแนกประเภทขององค์ประกอบ คุณสมบัติต่างๆ ดังแสดง ซึ่งเป็นข้อยืนยันว่าขยะชุมชนประเทศไทยยังมีพลังงานเหลืออยู่และสามารถเปลี่ยนรูปกลับมาใช้ประโยชน์ได้



รูปที่ 2 องค์ประกอบขยะชุมชนเฉลี่ยทั่วประเทศไทย (ที่มา:กรมควบคุมมลพิษ, 2547)

ตารางที่ 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 1 และ ตารางที่ 2 ก็พบว่าขยะดังกล่าว มีค่าความร้อนสูง ตลอดจนถึงองค์ประกอบของธาตุหลักของอินทรีย์สาร คือ คาร์บอน และไฮโดรเจน ค่อนข้างสูง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการผลิตพลังงานได้ ซึ่งจะเห็นว่า องค์ประกอบของขยะมูลฝอยมีคุณสมบัติเป็นชีวมวล เนื่องจากมีธาตุคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบหลัก สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงและเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานได้ (Stiegel and Maxwell, 2001; Alexander K., 2002; Malkow T., 2003; Belgiorno et al. 2003; Kwak et al., 2006)

ตารางที่ 3 ค่าปริมาณความร้อนของขยะชุมชนต่างๆ ไป

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> พลังงานจากวัสดุพวงฉลากหรือวัสดุเคลือบผิว (ที่มา : Kreit, F., P.E., 1993)

ตารางที่ 4 ค่าปริมาณความร้อนของขยะชุมชนทั่วไป

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

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

ตารางที่ 5 ส่วนประกอบทางเคมีของขยะชุมชนโดยทั่ว ๆ ไป

องค์ประกอบ	C	H	O	N	S	Ash
<b>สารอินทรีย์</b>						
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
<b>สารอนินทรีย์</b>						
แก้ว	0.5	0.1	0.4	< 0.1	-	98.9
โลหะ	4.5	0.6	4.3	< 0.1	-	90.5
ฝุ่น, เถ้า	26.3	3.0	2.0	0.5	0.2	68.0

ที่มา : Kreit, F., P.E., 1993



ทั้งนี้ องค์ประกอบและคุณสมบัติของขยะจะเปลี่ยนไปตามสภาพของภูมิอากาศ ฤดูกาล และพฤติกรรมทางเศรษฐกิจสังคม วิถีของชีวิตแต่ละชุมชน/เมือง อย่างไรก็ตามก็พิจารณาของขยะ ในจังหวัดต่าง ๆ ในประเทศไทย ยังคงมีองค์ประกอบต่างๆ และคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกัน (กระทรวง พลังงาน, 2551) ข้อมูลแสดงใน ตารางที่ 6 และ ตารางที่ 7 เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลปี 2547 พบว่า องค์ประกอบของขยะมีความแปรปรวนค่อนข้างน้อย

โดยพบว่าเมืององค์ประกอบที่สามารถเผาไหม้ได้เฉลี่ย 80.83-89.79% ค่าความร้อน เฉลี่ยสูงกว่า 16,000 MJ/kg ซึ่งแสดงให้เห็นถึงศักยภาพที่สามารถเก็บคืนพลังงานมาใช้ได้ (Waste-to-Energy) ซึ่งเป็นอีกหนึ่งวิธีของการใช้พลังงานให้เกิดประโยชน์และคุ้มค่า อย่างไรก็ตามก็พิจารณาในประเทศไทยมีความขึ้นสูงมาก โดยเฉลี่ย 50-58 %รวมทั้งมีปริมาณเถ้าสูงเช่นเดียวกัน โดย 21-28% คุณสมบัตินี้ถือเป็นจุดด้อยของการนำขยะมาใช้ประโยชน์ในรูปแบบของการผลิตพลังงานและเชื้อเพลิง ทดแทนโดยเทคโนโลยีทางความร้อน (Thermal conversion technology) การศึกษาวิธีการที่เหมาะสมสำหรับเทคโนโลยีทางความร้อนจึงเป็นประเด็นที่น่าสนใจ เพื่อให้สามารถผลิตพลังงานจาก ขยะได้อย่างคุ้มค่า รวมทั้งไม่ปลดปล่อยมลพิษออกสู่สิ่งแวดล้อมด้วย

ตารางที่ 6 องค์ประกอบของขยะมูลฝอยในประเทศไทย

พื้นที่	องค์ประกอบ (%wt)								
	เศษอาหาร	กระดาษ	พลาสติก	ยาง/หนัง	เศษผ้า	ใบ/กิ่งไม้	แก้ว/หิน	โลหะ	อื่นๆ
ภาคเหนือตอนล่าง/บน									
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
ค่าเฉลี่ยของภาค	55.88	7.78	13.20	1.49/2.57	3.43	5.46	2.2/2.05	4.07	2.00
ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ									
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
ค่าเฉลี่ยของภาค	52.96	10.37	11.09	1.98	2.81	1.62	7.35	2.51	8.82

ที่มา : กระทรวงพลังงาน, 2551

ตารางที่ 7 องค์ประกอบของขยะมูลฝอยในประเทศไทย

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 8 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
พัทธยา	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

## 2.3 เทคโนโลยีการผลิตพลังงานจากขยะ

ในอดีตการกำจัดขยะจะใช้วิธีการฝังกลบ (Landfill) เป็นส่วนใหญ่เพราะเป็นวิธีที่ง่ายและสะดวก แต่เนื่องจากในปัจจุบันแหล่งฝังกลบมีปริมาณจำกัด รวมทั้งยังทำให้เกิดปัญหาการสะสมของมลพิษ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นในการนำขยะเหล่านี้มาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดและเกิดมลพิษน้อยที่สุด โดยทั่วไปแล้วเทคโนโลยีการผลิตพลังงานจากขยะในปัจจุบันมีดังนี้

- 1) เทคโนโลยีการผลิตเชื้อเพลิงขยะ (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) ซึ่งแต่ละเทคโนโลยีก็จะมีคุณสมบัติ มีข้อดี ข้อเสียแตกต่างกันไปตามองค์ประกอบของขยะ และสภาพพื้นที่นั้นๆ ในงานวิจัยเล่มนี้ จะนำเสนอเฉพาะข้อมูลในส่วนของเทคโนโลยีการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง และ เทคโนโลยีทางความร้อนโดยมีรายละเอียด ตามหัวข้อที่จะกล่าวต่อไป

## 2.4 เทคโนโลยีการผลิตเชื้อเพลิงขยะ (Refuse-derived fuel)

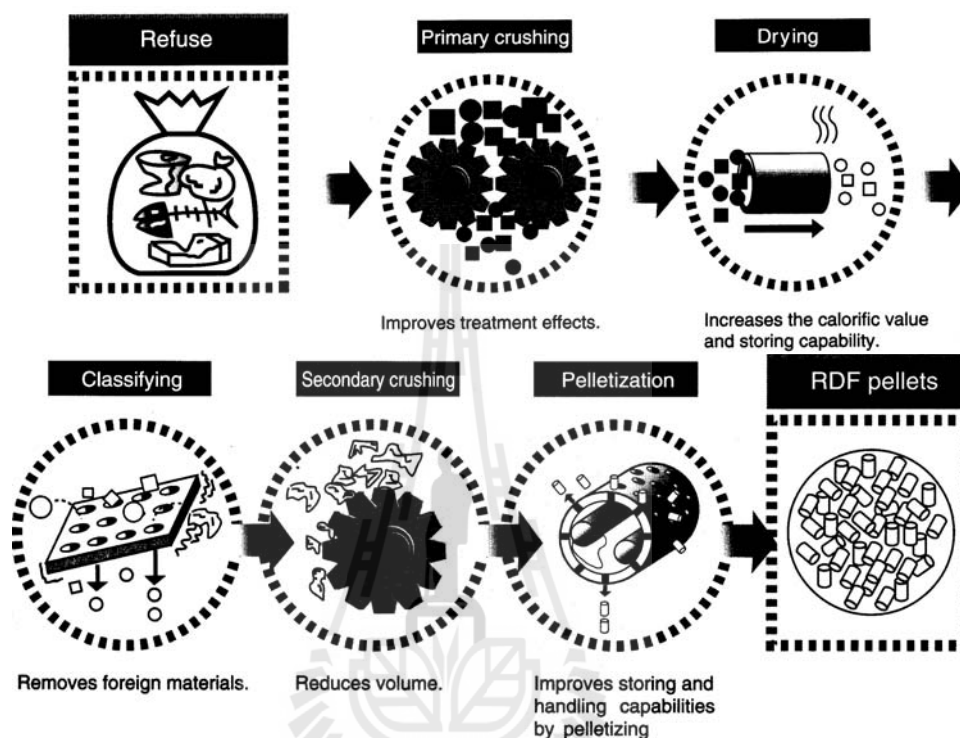
เทคโนโลยีการผลิตเชื้อเพลิงจากขยะมูลฝอยไม่ได้มีวัตถุประสงค์หลักในการกำจัดหรือทำลายขยะมูลฝอยเพื่อผลิตพลังงานโดยตรง เพียงแต่เป็นการเปลี่ยนรูปขยะมูลฝอยโดยคัดเลือกองค์ประกอบของขยะมูลฝอยที่มีพลังงานสูงมาสู่กระบวนการ โดยการคัดแยกและแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงที่สามารถนำไปใช้ในการผลิตพลังงานต่อไป เทคโนโลยีดังกล่าวมีข้อได้เปรียบเนื่องจากสามารถกระจายไปดำเนินการตามจุดต่างๆ ที่เป็นแหล่งกำเนิดขยะมูลฝอยได้โดยไม่ต้องมีการขนย้ายขยะไปสู่แหล่งกำจัดเชื้อเพลิงที่ได้สามารถเก็บรักษาและนำไปผลิตพลังงานได้เมื่อเวลาที่ต้องการ

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

เชื้อเพลิงขยะ (RDF) หมายถึง ขยะมูลฝอยที่ผ่านกระบวนการจัดการต่างๆ เช่น การคัดแยกวัสดุที่เผาไหม้ไม่ได้ ออก การฉีกหรือตัดขยะมูลฝอยออกเป็นชิ้นเล็กๆ เชื้อเพลิงขยะที่ได้ี้จะมีค่าความร้อนสูงกว่า หรือมีคุณสมบัติเป็นเชื้อเพลิงที่ดีกว่าการนำขยะมูลฝอยที่เก็บรวบรวมมาใช้โดยตรง เนื่องจากมีองค์ประกอบทั้งทางกายภาพและทางเคมีที่สม่ำเสมอ

การแปรรูปขยะมูลฝอยให้กลายเป็นเชื้อเพลิงนั้น จำเป็นต้องมีกระบวนการจัดการไม่ว่าจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเชื้อเพลิงขยะที่ต้องการ การออกแบบขั้นตอนต่างๆ ในการแปร

รูปขยะมูลฝอยให้เป็นเชื้อเพลิงนั้นขึ้นอยู่กับว่ามีการจัดการกับขยะอย่างไรบ้าง ตัวอย่างเช่น ถ้าขยะได้มีการคัดแยกส่วนที่สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ได้จากแหล่งกำเนิดก่อนอยู่แล้ว ดังนั้นในกระบวนการแปรรูปขยะเป็นเชื้อเพลิงก็อาจจะไม่จำเป็นที่จะมีขั้นตอนการคัดแยกโลหะหรือแก้วก็ได้ ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 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 ตาราง

ตารางที่ 9 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	เป็นขยะที่ผ่านกระบวนการบดจนเหลือเพียงวัสดุที่เผาไหม้	Stoker

ประเภท RDF	รูปแบบ	คุณลักษณะ	ระบบการเผาไหม้
	(f-RDF)	ได้เท่านั้นจนได้ขยะที่ 95% โดยน้ำหนักของขยะสามารถผ่านตะแกรงร่อนขนาด 50 ตารางมิลลิเมตรได้	
RDF-4	Powder	เป็นขยะจำพวกวัสดุที่เผาไหม้ได้เท่านั้น โดยที่ 95% โดยน้ำหนักของขยะสามารถผ่านตะแกรงร่อนขนาด 2.5 ตารางมิลลิเมตรได้	FBC, PF
RDF-5	Densified (d-RDF)	เป็นขยะที่ผ่านกระบวนการบดจนเหลือเพียงวัสดุที่เผาไหม้ได้ที่นำมาอัดให้อยู่ในรูปแบบของอัดเม็ด อัดแท่งหรือก้อนเท่านั้น	FBC, MFC
RDF-6	Liquid	เป็นขยะจำพวกวัสดุที่เผาไหม้ได้ในลักษณะของเชื้อเพลิงเหลวเท่านั้น	Swirl burner
RDF-7	Gas	เป็นขยะจำพวกวัสดุที่เผาไหม้ได้ในลักษณะของเชื้อเพลิงประเภทแก๊สเท่านั้น	Burner, IGCC.

ที่มา: ASTM standards E856-83 (2006)

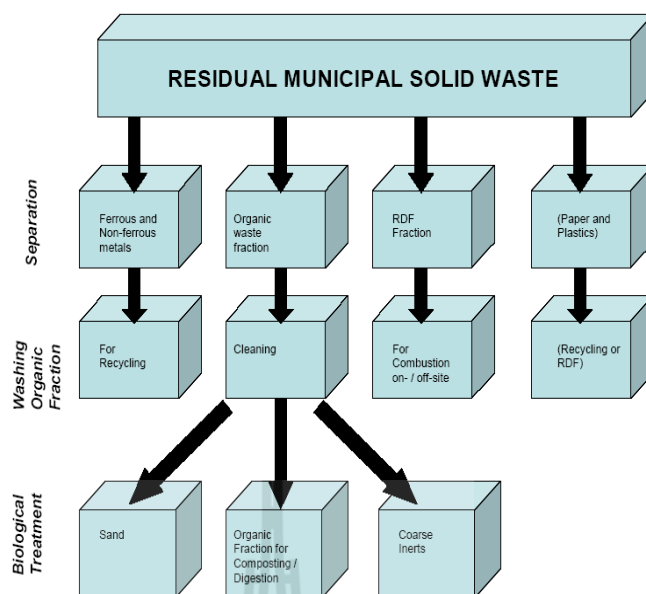
ส่วนระบบของทางกลุ่มประเทศยุโรปไม่ได้มีการแบ่งประเภทของเชื้อเพลิงขยะไว้หลายประเภทเหมือนกับระบบทางประเทศสหรัฐอเมริกาที่มีการกำหนดมาตรฐานที่ชัดเจนเอาไว้ เพียงแต่มีการเรียกประเภทของเชื้อเพลิงขยะตามลักษณะทางกายภาพ ซึ่งกล่าวได้ว่ามี 3 ประเภท ได้แก่ c-RDF (Coarse RDF), f-RDF (Fluff RDF) และ d-RDF (Densified RDF) ซึ่งถ้าจะเทียบกับระบบทางประเทศสหรัฐอเมริกา 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 4** แสดงกระบวนการดังกล่าว จะพบว่า RDF เป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการดังกล่าวซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการคัดแยกด้วยอุปกรณ์ทางกล กระดาษ พลาสติก เศษเสื้อผ้าจะนำไปทำ RDF ส่วนขยะอินทรีย์จำพวกเศษอาหารซึ่งมีขนาดเล็ก จะนำไปเข้ากระบวนการย่อยสลายซึ่งอาจเป็นแบบใช้ออกซิเจน (Composting) หรือแบบไร้ออกซิเจน (Digestion) และสุดท้ายจะได้สารปรับปรุงคุณภาพดิน (Soil amendment)



รูปที่ 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 โดยการใช้ไอน้ำอุณหภูมิและความดันสูงพ่นเข้าไปบอบขยะ ภายใต้เวลาและสภาวะที่เหมาะสมจะทำให้โลหะ อโลหะ พลาสติก และสารอินทรีย์แยกตัวออกจากกัน หลังจากนั้นไปผ่านกระบวนการคัดขนาดแล้วจะทำให้ได้ 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) และการอัด (Densification) ลำดับการต่อเข้าด้วยกันของหน่วยปฏิบัติการย่อยเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับ ส่วนประกอบของขยะมูลฝอยที่ได้และคุณภาพของ RDF ที่ต้องการ

#### 2.4.3 หน่วยปฏิบัติการในกระบวนการผลิต RDF

##### 2.4.3.1 การคัดแยกด้วยแรงงานคน

ขยะประเภท เครื่องใช้ภายในบ้าน เฟอร์นิเจอร์ และขยะอันตรายบางชนิดที่ผสมกันมาสามารถทำได้เบื้องต้นโดยอาศัยแรงงานคนก่อนที่จะส่งต่อให้เครื่องจักร ทำให้สามารถแยกขยะที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ เช่น กระดาษ แก้ว/พลาสติก ภาชนะ กระจกอลูมิเนียม ช่วงของการคัดแยกโดยอาศัยแรงงานคน

### 2.4.3.2 การลดขนาด (Size reduction)

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

- Hammer mill มีอยู่ 2 แบบด้วยกันคือ แบบแนวนอนและแบบแนวตั้ง เครื่อง Hammer mills แบบแนวนอนเป็นที่นิยมสำหรับขยะผสม โดยที่ส่วนประกอบหลักจะประกอบไปด้วย ตัวหมุน (Rotor) ตัวใบมีด (Hammer) ตะแกรง (Grate) กรอบหุ้ม (Frame) และ ล้อช่วยแรง (Fly wheel) หลักการทำงานก็คือ ใบมีดจะตีขยะจนกระทั่งได้ขนาดเล็กกว่าตะแกรง

- Shear shredder เครื่องลดขนาดชนิดนี้จะมีแรงบิดสูงและรอบต่ำ เครื่องจะประกอบไปด้วยเพลลาที่ติดใบมีดวางในแนวนอน 2 เพลลาซึ่งหมุนในทิศทางตรงกันข้าม เนื่องจากเครื่องมีแรงบิดที่สูงและมีการกระทำเป็นแรงเฉือน เครื่องจักรชนิดนี้จึงนิยมใช้ในการลดขนาดของวัสดุที่เหนียวยาก เช่น ยางรถยนต์ อลูมิเนียม และ พลาสติก

### 2.4.3.3 การร่อน (Screening)

วัตถุประสงค์ของการร่อนก็เพื่อที่จะทำการคัดแยกขนาด การร่อนนี้จะแบ่งวัสดุออกเป็นอย่างน้อย 2 ส่วน คือส่วนที่อยู่บนตะแกรงและส่วนที่ผ่านตะแกรง การร่อนสามารถแบ่งออกเป็นหลายประเภทดังนี้

- Trommel screen เครื่องร่อนแบบนี้จะมีลักษณะเป็น โรตารีและมีตะแกรงล้อมรอบ ตัวตะแกรงอาจจะเป็นลวดถักหรือแผ่นเจาะรู เครื่องนี้อาจจะใช้สำหรับผสมขยะชุมชนก่อนที่จะส่งต่อไปเครื่องลดขนาด หรือที่เรียกว่า Pre-trommeling เป็นเครื่องที่ได้รับการยอมรับว่ามีประสิทธิภาพและประสิทธิผลในการทำงานสูง

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

### 2.4.3.4 การคัดแยกโดยใช้อากาศ (Air separation)

การคัดแยกโดยใช้อากาศจะอาศัยคุณลักษณะด้านอากาศพลศาสตร์ของของเสีย โดยที่คุณลักษณะเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับ ขนาด รูปร่าง และ ความหนาแน่น กระบวนการแยกจะอาศัยความสัมพันธ์ระหว่าง การเคลื่อนที่ของอากาศ ขยะที่ผ่านการย่อย และ แรงโน้มถ่วง ส่วนของขยะที่



ลอยอยู่ในอากาศจะเรียกว่า 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 เหล็กที่สามารถคัดแยกได้น้ำหนักทั้งหมดของโลหะในขยะชุมชนจะอยู่ที่ประมาณ 80% สำหรับการคัดแยกหนึ่งครั้ง ถ้าต้องการจะแยกให้ได้มากขึ้นจะต้องผ่านเครื่องคัดแยกอีก เปรี่เซ็นต์การแยกสามารถเพิ่มขึ้นถึง 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 ความยากในการแยกขยะที่ได้มาจากชุมชนเนื่องจากไม่สามารถคาดเดาว่าขยะที่เข้าสู่โรงงานจะมีลักษณะใด ต่อมาคือ เครื่องมือในกระบวนการส่วนใหญ่จะได้อมาจากภาคอุตสาหกรรมอื่น (เช่น อุตสาหกรรมเหมืองแร่) ทำให้ยากแก่การหาจุดที่เหมาะสมสำหรับการทำ RDF สุดท้าย ขนาดกำลังการผลิตของเครื่องจักรแต่ละเครื่องจะมีมาตรฐานทำให้เป็นเรื่องยากที่เราจะนำเครื่องจักรแต่ละชนิดมาทำงานร่วมกันแล้วทำให้ได้กำลังการผลิตที่ต้องการ

### 2.4.4 การใช้ประโยชน์ RDF ไปใช้งานและการควบคุมผลกระทบสิ่งแวดล้อม

#### 2.4.4.1 การใช้ประโยชน์จาก RDF

สามารถใช้ได้ทั้งเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าและความร้อน โดยที่อาจจะมีการใช้ RDF เป็นเชื้อเพลิงภายในสถานที่ผลิต RDF หรือมีการขนส่งในกรณีที่ตั้งของโรงงานไม่ได้อยู่ในที่ที่ต้องการใช้ประโยชน์ ทางเลือกอีกทางหนึ่งก็คือ นำไปใช้เผาพร้อมกับถ่านหิน เพื่อลดปริมาณการใช้ถ่านหินลง วิธีการใช้ประโยชน์จากเชื้อเพลิงขยะในรูปของพลังงานมีดังต่อไปนี้

- ใช้ในสถานที่แปรรูปขยะเป็นเชื้อเพลิงขยะ (On-site) โดยร่วมกับอุปกรณ์ที่ใช้เปลี่ยนเป็นพลังงาน เช่น เตาเผาแบบตะกรับ หรือ เตาเผาแบบฟลูอิดไอดีเบด หรือ Gasification หรือ Pyrolysis
- ใช้ในสถานที่อื่นที่ต้องมีการขนส่ง (Off-site) โดยมีอุปกรณ์ที่ใช้เปลี่ยนเป็นพลังงาน เช่น เตาเผาแบบตะกรับ หรือ เตาเผาแบบฟลูอิด ไอดีเบด หรือ

- Gasification หรือ Pyrolysis
- เผาไหม้ร่วมกับเชื้อเพลิงอื่น เช่น ถ่านหินหรือชีวมวล
- เผาไหม้ในเตาผลิตปูนซีเมนต์
- ใช้ร่วมกับถ่านหินหรือชีวมวลในกระบวนการ Gasification

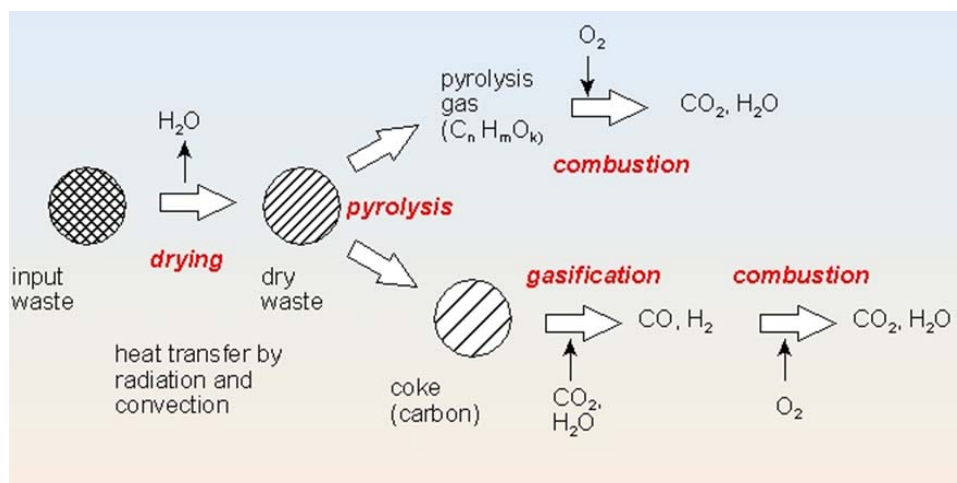
#### 2.4.4.2 การควบคุมผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

เนื่องจาก RDF ถูกพิจารณาให้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อใช้ในการเผาไหม้ ดังนั้นผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการใช้งาน RDF จึงเกิดขึ้นเนื่องจากกระบวนการเผาไหม้ ทั้งนี้อาจเกิดขึ้นทั้งผลกระทบต่อมลพิษอากาศ มลพิษน้ำเสีย และมลพิษจากเถ้า อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการใช้งาน RDF จะต้องพิจารณาเป็นกรณีเฉพาะไป เพราะมีปัจจัยที่ต้องนำมาพิจารณาหลากหลายประการ เช่น คุณภาพของ RDF องค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของ RDF เทคโนโลยีที่ใช้ในการเผาไหม้และการควบคุมมลพิษ สัดส่วนของการใช้ RDF ในการเผาไหม้ (เผาไหม้โดยตรง หรือเผาไหม้ร่วมกับเชื้อเพลิงอื่น) เป็นต้น

ในส่วนของการแปรรูป RDF นั้นขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีที่ถือว่าเป็นแบบ MBT หรือ Autoclaving อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีทั้งสองแบบใช้หลักการของคัดแยกขยะมูลฝอยในปลายทาง ซึ่งทำให้อาจมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอันเนื่องมาจากกระบวนการเกิดขึ้นในลักษณะเดียวกับที่เกิดขึ้นกับเทคโนโลยีการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน (ซึ่งต้องมีการคัดแยกของเสียอินทรีย์ออกมาจากของเสียที่ทิ้งรวมกันมา) การป้องกันผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากเทคโนโลยีจึงใช้หลักการในการพิจารณาแบบเดียวกัน นอกจากนี้สิ่งที่เหลือทิ้งจากการคัดแยกมักนำไปกำจัดโดยการฝังกลบขยะมูลฝอย ดังนั้นการป้องกันผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากสิ่งเหลือทิ้งนี้จึงมีวิธีการป้องกันลักษณะเดียวกับการฝังกลบขยะมูลฝอยแบบถูกหลักสุขาภิบาล

### 2.5 เทคโนโลยีเตาเผาขยะมูลฝอย (Incineration)

เป็นการใช้ความร้อนอุณหภูมิสูงในการทำให้ขยะมูลฝอยเกิดการแตกสลายด้วยความร้อน (Thermal cracking) ซึ่งกระบวนการดังกล่าวเป็นกระบวนการที่ต้องการความร้อนจากแหล่งให้ความร้อนภายนอกเพื่อช่วยให้ปฏิกิริยาดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง (Endothermic process) แล้วอาจเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเดเซอร์เพื่อเปลี่ยนรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ โดยกระบวนการดังกล่าวเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermal process) ทำให้สามารถนำความร้อนที่ได้ไปใช้ในการผลิตพลังงาน หรืออาจนำผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการแตกสลายด้วยความร้อนไปผ่านกระบวนการเพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงสังเคราะห์เพื่อนำไปผลิตพลังงาน หรืออาจนำไปเผาไหม้กับออกซิเดเซอร์เพื่อให้ได้ความร้อนก่อนนำไปผลิตพลังงาน การกำจัดขยะมูลฝอยด้วยกรรมวิธีทางความร้อนอาจแสดงได้ดัง รูปที่ 5



รูปที่ 5 กระบวนการกำจัดขยะมูลฝอยด้วยความร้อน (Metcalf et al., 1998)

### 2.5.1 หลักการพื้นฐานของเทคโนโลยีเตาเผาขยะมูลฝอย

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

### 2.5.2 ประเภทของเทคโนโลยีเตาเผาขยะมูลฝอย

เตาเผาขยะมูลฝอยสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทใหญ่ ๆ ได้แก่ เตาเผาแบบตะกรับเคลื่อนที่ได้ (Moving grate incinerator) เตาเผาแบบหมุน (Rotary kiln incinerator) และ เตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized-bed incinerator) เทคโนโลยีนี้ปกติจะเป็นการเผาไหม้ในเตาเผาแบบตะกรับที่เคลื่อนที่ได้ (Moving grate) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ใช้กันแพร่หลายและได้รับการทดสอบแล้ว มีสมรรถนะทางเทคนิคที่ยอมรับได้และสามารถรองรับการเผาทำลายขยะมูลฝอยที่มีองค์ประกอบและค่าความร้อนที่หลากหลาย ระบบที่ได้รับความนิยมรองลงมาคือระบบเตาเผาแบบหมุน (Rotary kiln) ข้อดีและข้อเสียของเตาเผาขยะแต่ละประเภทแสดงดังใน ตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ข้อดีและข้อเสียของเตาเผาขยะแต่ละประเภท

ประเภทเตาเผา ขยะมูลฝอย	ข้อดีเปรียบ	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>
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 11 ข้อดีและข้อเสียของเตาเผาขยะแต่ละประเภท (ต่อ)

ประเภทเตาเผา ขยะ	ข้อดีเปรียบ	ข้อเสียเปรียบ
เตาเผาแบบฟลูอิด ไดซ์เบด	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เงินลงทุนและค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาค่อนข้างต่ำเนื่องจากการออกแบบที่ค่อนข้างง่าย</li> <li>- สามารถให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนได้สูงถึง 90%</li> <li>- สามารถใช้ในการเผาทำลายเชื้อเพลิงที่หลากหลายประเภทและสามารถรองรับได้ทั้งกากของแข็งและเหลวโดยเผาทำลายร่วมกันหรือแยกจากกัน</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ณ ปัจจุบันยังจัดว่าเป็นเทคโนโลยีที่ยังต้องการการทดสอบอยู่สำหรับการเผาทำลายขยะมูลฝอยชุมชน</li> <li>- ค่อนข้างมีข้อจำกัดด้านขนาดและองค์ประกอบของขยะ โดยทั่วไปต้องมีการกระบวนการในการจัดการขยะก่อนส่งเข้าเตาเผา</li> </ul>

ที่มา : Medcalf et al., (1998)

### 2.5.3 การนำพลังงานกลับมาใช้ (Energy recovery)

ประโยชน์หลักที่ได้รับจากการเผาไหม้ขยะมูลฝอยในเตาเผาได้แก่การนำเอาพลังงานที่มีอยู่ในขยะมูลฝอยกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ โดยการเผาทำลายขยะมูลฝอยในเตาเผาสามารถลดปริมาณการปลดปล่อยแก๊สมีเทนจากหลุมฝังกลบและสามารถใช้ทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลได้นอกจากนี้ยังเป็นการลดการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกโดยรวมด้วย

แก๊สร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ในเตาเผาจะมีพลังงานที่เกิดจากการเผาไหม้อยู่ในตัวด้วย มันจะถูกทำให้เย็นตัวลงในหม้อน้ำก่อนที่จะไหลเข้าสู่อุปกรณ์ควบคุมมลพิษอากาศ ชนิดของหม้อน้ำที่ติดตั้งขึ้นอยู่กับความต้องการพลังงานในรูปของน้ำร้อนเพื่อใช้กับระบบน้ำร้อน หรือไอน้ำเพื่อใช้ในกระบวนการอุตสาหกรรม หรือเพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้า ประสิทธิภาพที่ได้จากการนำพลังงานกลับมาใช้ใหม่สำหรับการใช้พลังงานแต่ละประเภทเทียบกับความร้อนที่ใส่เข้าไป แสดงใน ตารางที่ 12

ตารางที่ 12 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

มลพิษที่เกิดขึ้นจากเตาเผาขยะมูลฝอยโดยหลักแล้วเกิดขึ้นจากกระบวนการเผาไหม้ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาไหม้จะปลดปล่อยออกออกมาในรูปมลพิษทางอากาศ มลพิษทางอากาศของแข็งและมลพิษทางน้ำ การควบคุมต้องให้มีปริมาณไม่เกินค่ามาตรฐานที่แต่ละท้องถิ่นกำหนด

#### 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

กากของแข็งที่เหลือจากการเผาไหม้ในเตาเผาขยะมูลฝอยจะแยกเป็นสองส่วน คือ ถ้ำหนัก (Bottom ash) ซึ่งพบที่บริเวณก้นเตาเผา เกิดจากจากองค์ประกอบของขยะมูลฝอยส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้ และถ้ำเบา (Fly ash) ซึ่งเกิดจากองค์ประกอบของขยะมูลฝอยส่วนที่ระเหยขึ้นไปจากขยะมูลฝอยอย่างรวดเร็วและลอยออกไปจากห้องเผาไหม้กับแก๊สไอเสียและถูกจับด้วยอุปกรณ์ควบคุมมลพิษอากาศ เช่น ไซโคลน เครื่องกรองด้วยเส้นใยถัก เครื่องดักด้วยไฟฟ้าสถิต เป็นต้น

#### 2.5.4.3 มลพิษน้ำ

น้ำเสียมาจากระบบควบคุมมลพิษอากาศและน้ำเสียที่ใช้ในการทำให้ถ้ำเย็นตัวลง น้ำเสียนี้น้ำส่วนหนึ่งจะไหลวนเพื่อกลับไปใช้ในกระบวนการของเตาเผา มีเพียงบางส่วนที่ถ่ายทิ้งเพื่อนำไปกำจัดซึ่งอาจไหลไปบำบัดรวมกับน้ำเสียจากกันหลวมเก็บขยะมูลฝอย

### 2.6 เทคโนโลยีไพโรไลซิส/แก๊สซิฟิเคชัน (Pyrolysis/Gasification)

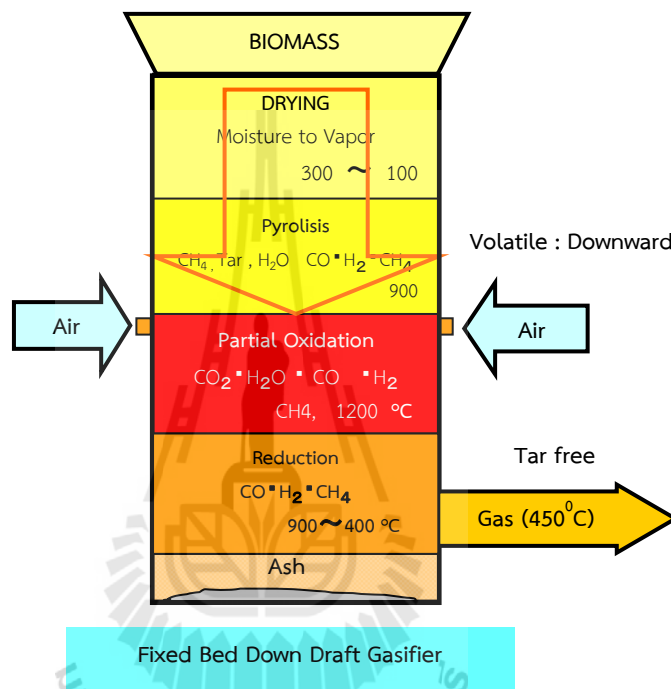
เทคโนโลยีไพโรไลซิส/แก๊สซิฟิเคชัน เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคู่ควบกัน กล่าวคือขยะเมื่อถูกทำให้แห้งโดยการระเหยความชื้นทิ้งไปแล้วจะนำความร้อนจากการเผาไหม้ก่อนหน้านี้มาทำให้ตัวเองเกิดการแตกสลายทางความร้อนและกลายเป็นแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ ขณะเดียวกัน มักมีการจ่ายออกซิไดซ์เซอร์เข้ามาบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาด้วยเพื่อช่วยให้เกิดการเผาไหม้บางส่วน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

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

นิยามของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) หรือกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง คือ กระบวนการแปรสภาพเชื้อเพลิงแข็งที่มีสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ให้อยู่ในรูปเชื้อเพลิงที่เป็นแก๊ส เช่น คาร์บอนมอนนอกไซด์ (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 ปฏิกริยาอุณหเคมีต่างๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันดังแสดงใน รูปที่ 6

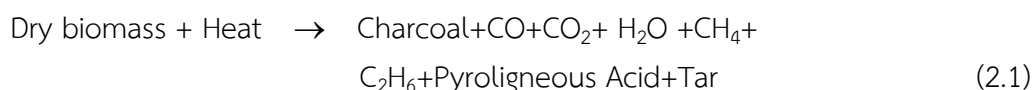


รูปที่ 6 ปฏิกริยาอุณหเคมีที่เกิดขึ้นในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันในเตาผลิตแก๊สชนิดไหลลง  
(อ้างอิงจาก : Arjham et al., 2012, 2013)

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

1) Drying zone คือช่วงที่ไอน้ำหรือความชื้นที่แทรกตัวอยู่ในเชื้อเพลิงโดนกำจัดด้วยความร้อนที่มาจากโซนเผาไหม้อุณหภูมิ ประมาณ 100-200 °C แต่อุณหภูมิที่เกิดขึ้นยังไม่สูงพอที่จะทำให้เกิดการสลายตัวของ Volatile matter ในเชื้อเพลิงได้

2) Pyrolysis หรือ Distillation zone ปฏิกริยาอุณหเคมีที่เกิดขึ้นในโซนนี้จะอาศัยความร้อนจากโซน Combustion ทำให้ Volatile matter ที่อยู่ในเชื้อเพลิงเกิดการสลายตัวเกิดเป็น เมทานอล กรดน้ำส้ม และทาร์ (Tars) โดยอุณหภูมิในโซนนี้จะมีค่าประมาณ 200-500 °C ของแข็งที่เหลืออยู่ภายหลังจากการผ่านกระบวนการนี้ก็คือ คาร์บอนในรูปถ่าน ซึ่งจะทำปฏิกริยาต่อในโซน Reduction และ Combustion ปฏิกริยาที่ได้ในโซนนี้แสดงไว้ในสมการที่ (2.1)



3) Combustion หรือ Oxidation zone เป็นบริเวณที่มีการป้อนอากาศ เมื่อถูกกระตุ้นด้วยความร้อน เชื้อเพลิงจะลุกไหม้ เกิดปฏิกิริยาอุณหภูมิระหว่างแก๊สออกซิเจนในอากาศกับคาร์บอนและไฮโดรเจน ซึ่งอยู่ในเชื้อเพลิง ผลของปฏิกิริยาดังกล่าวก่อให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ 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 เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อนเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 900°C แก๊สที่ได้จากสมการทั้งสองเป็นแก๊สที่เผาไหม้ได้ และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นแก๊สหลักที่ต้องการปริมาณของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในแก๊สเชื้อเพลิงนี้จะขึ้นอยู่กับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ว่าจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนที่ร้อนได้มากน้อยเพียงใด

ในโซนของ Reduction นี้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะดีเพียงใดขึ้นกับอุณหภูมิ และความเร็วของแก๊สที่สัมผัสกับเชื้อเพลิง และพื้นที่ ๆ ผิวสัมผัสของเชื้อเพลิง ขนาดและปริมาณของเชื้อเพลิงที่ใช้จะมีผลต่อการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง ซึ่งเชื้อเพลิงขนาดใหญ่จะมีอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรต่ำ ทำให้ยากต่อการจุดเผาภายในเตาและจะทำให้เกิดปริมาณของช่องว่างระหว่างเชื้อเพลิงด้วยกันมาก เป็นผลทำให้มีออกซิเจนไหลผ่านเข้าไปในระบบมาก ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นก็จะน้อยตามไปด้วย ทำให้



ประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าต่ำ แต่ถ้าขนาดของเชื้อเพลิงมีขนาดเล็กก็จะทำให้เกิดการสูญเสียความดันภายในเตามาก จึงต้องใช้พัดลมดูดขนาดใหญ่ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานมากยิ่งขึ้นและแก๊สที่ผลิตได้ก็จะมีฝุ่นมากยิ่งขึ้น ขนาดเชื้อเพลิงแข็งที่เหมาะสมควรมีขนาด 20-60 มิลลิเมตร และควรมีขนาดที่คงตัวใกล้เคียงกัน เพราะจะทำให้การถ่ายเทความร้อน อุณหภูมิ ปฏิกิริยาอุณหภูมิในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ (Maa and Bailie, 1973)

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

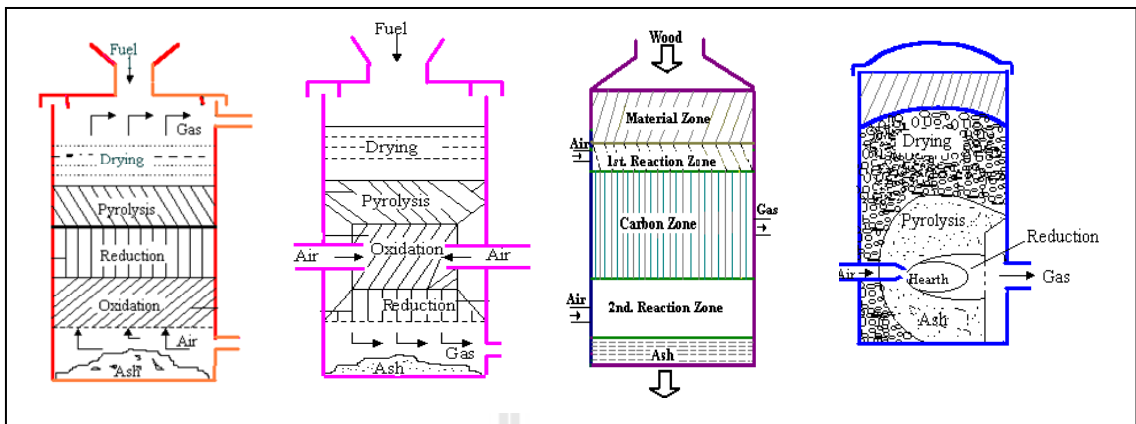
ในขณะที่แก๊สร้อนจากโซน Combustion ไหลเคลื่อนเข้าสู่โซน Reduction จะทำให้อุณหภูมิของแก๊สลดลง เนื่องจากเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน ดังนั้นไอน้ำกับคาร์บอนจะทำปฏิกิริยากันเพื่อก่อให้เกิดแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการที่ (2.6) ซึ่งจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 500-600 °C ปฏิกิริยานี้มีความสำคัญเพราะจะทำให้ส่วนผสมของแก๊สไฮโดรเจนในแก๊สเชื้อเพลิงมีค่ามากขึ้น (แก๊สไฮโดรเจนมีผลต่อการจุดระเบิดของเครื่องยนต์สันดาปภายใน) แต่ถ้าในกระบวนการที่มีไอน้ำมากเกินไป จะทำให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนดังสมการที่ (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) แบ่งตามลักษณะการป้อนเชื้อเพลิงได้เป็น 2 แบบคือ แบบคอลัมน์ (Fixed bed gasifier) และแบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized bed gasifier) ซึ่งมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันไป ตามลักษณะของการนำไปใช้ประโยชน์ และเชื้อเพลิงที่ใช้ (Dutta, 1998) เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบคอลัมน์ เหมาะสมกับเชื้อเพลิงที่มีขนาดใหญ่ รูปร่างคงตัวสามารถใช้กับเชื้อเพลิงที่มีความชื้นสูงได้ การทำงานของระบบไม่ซับซ้อน สามารถนำแก๊สเชื้อเพลิงไปใช้ประโยชน์ได้ง่าย สำหรับเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบฟลูอิดไดซ์เบด เหมาะสำหรับเชื้อเพลิงที่มีขนาดเล็กมาก และต้องใช้เวลาเร็วของอากาศทำให้เชื้อเพลิงลอยตัวขึ้นมีลักษณะคล้ายของไหล ซึ่งเรียกว่าสถานะของ Fluidization โดยจะมีสารเฉื่อย (Inert material) เช่น ทราย หินปูน เป็นระบบที่ใช้ความดันสูง จึงทำให้การเดินระบบมีความยุ่งยากกว่า โดยทั่วไปจะใช้กับอุตสาหกรรมขนาดใหญ่

วีรชัย อางหาญ และคณะ (2551) ได้อธิบายว่าเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบคอลัมน์ (Fixed bed gasifier) ยังสามารถจำแนกตามทิศทางการป้อนอากาศในเตาคือ ถ้าอากาศถูกป้อนจากด้านล่างขึ้นข้างบนของเตาเรียกว่า Updraft gasifier และถ้าอากาศถูกป้อนสู่โซนเผาไหม้แล้วไหลลงด้านล่างของเตาเรียกว่า Downdraft gasifier ส่วนการป้อนอากาศเข้า 2 ทางเรียกว่า Twin-fire และถ้าอากาศเข้าในแนวขวางเรียกว่า Crossdraft gasifier ดังแสดงใน รูปที่ 7



รูปที่ 7 เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ (วีรชัย อาหาญ และคณะ, 2551)

ก. Updraft

ข. Downdraft

ค. Twin-fire

ง. Crossdraft

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

Arjharn et al.(2012) ได้ทำการศึกษาเรื่อง “กาประเมินการผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงชีวมวลโดยใช้ต้นแบบ 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 สำหรับโรงไฟฟ้า ชีวมวลขนาดเล็ก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี คือ ขนาดโดยประมาณอยู่ที่  $40W \times 40L \times 60H \text{ mm}^3$  และความชื้นไม่เกิน 15% โดยเฉลี่ยแก๊สชีวมวลที่ผลิตได้มีองค์ประกอบ คือ  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$  และ  $\text{CH}_4$  ในสัดส่วนเฉลี่ย 13-25%, 12-18% และ 1-3% ตามลำดับ มีการปนเปื้อนของฝุ่นและน้ำมันดินต่ำ คือ 0-20  $\text{mg}/\text{Nm}^3$  มีค่าความร้อน อยู่ในช่วง 4.5-6  $\text{MJ}/\text{Nm}^3$  พบว่าประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของระบบ อยู่ในช่วง 12-16 % เมื่อระบบทำงานที่ 70% ของกำลังการผลิต ในกรณีดังกล่าวปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ อยู่ในช่วง 1.3-1.7  $\text{kg}/\text{kW}$  โดยสรุปคือระบบ Downdraft gasifier มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้กับเชื้อเพลิงชีวมวล ทั้งนี้ต้องเตรียมเชื้อเพลิงให้มีความเหมาะสมสำหรับใช้งาน

### 2.6.3 กำจำกัดความของทาร์ (Definition of tars)

ทาร์ (Tars) หมายถึงผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการที่เกิดจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน หรือเกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ลักษณะของทาร์เป็นของเหลวที่มีความหนืดสูง (High viscous) และมีฤทธิ์กัดกร่อน (Corrosive) โดยทั่วไปมีสีน้ำตาลเข้มถึงดำ ประกอบไปด้วยสารไฮโดรคาร์บอนจำนวนมาก สมบัติของทาร์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิพบว่า อุณหภูมิในกระบวนการสูงขึ้นจะทำให้สัดส่วนของ H/C ลดลง ดังแสดงใน ซึ่งเป็นข้อมูลสนับสนุนว่าผลของอุณหภูมิทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบที่อยู่ในทาร์ คือ การเปลี่ยนจากรูปของ Highly oxygenate pyrozone เป็น Condense aromatic นั่นคือ ในสภาวะที่อุณหภูมิสูงขึ้น Complex-phenolics furans จะหายไปขณะที่ Aromatic ซึ่งมีความคงตัวจะเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 13 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	Benzopyrenes

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)
Syringols Complex-Phenolics			

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

#### 2.6.4 แก๊สเชื้อเพลิงหรือโปรดิวเซอร์แก๊ส

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> โดยมีองค์ประกอบของแก๊สที่สามารถเผาไหม้ได้หรือแก๊สที่จุดไฟติด (Combustible gas) คือแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และแก๊สไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) เป็นแก๊สหลัก และมีแก๊สมีเทน (CH<sub>4</sub>) เล็กน้อย ซึ่งเจือจางอยู่ในแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สไนโตรเจน และแก๊สออกซิเจน ซึ่งประเภทนี้เป็นกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันทั่วไปที่ใช้อากาศ เพื่อให้เกิดปฏิกิริยา Partial oxidation

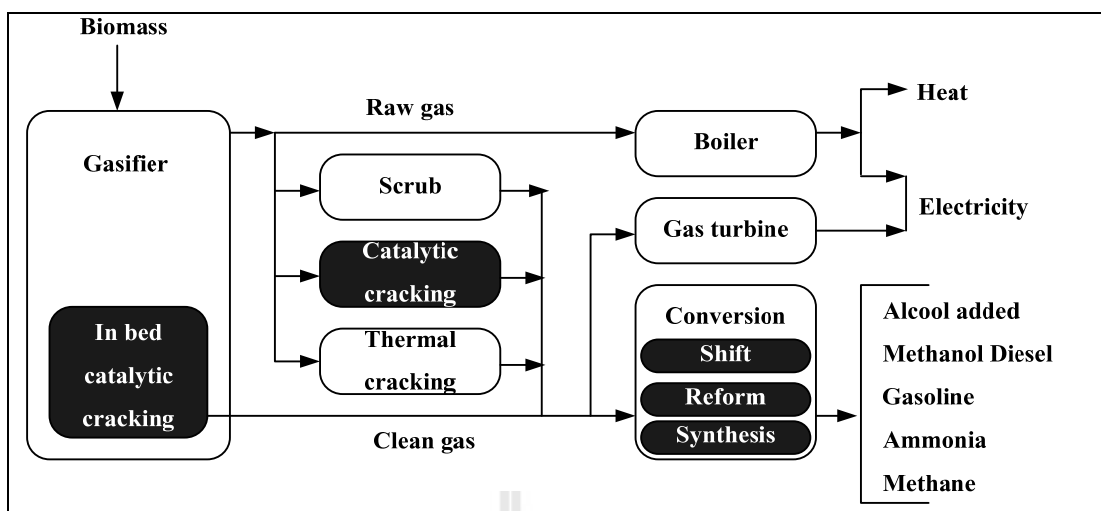
2) การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนปานกลาง (Medium heating value gas) : แก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จะมีค่าความร้อนประมาณ 9.3-20.5 MJ/Nm<sup>3</sup> กระบวนการนี้จะใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ เพื่อให้เกิดปฏิกิริยา Partial oxidation ในสภาวะที่ปราศจากไนโตรเจน เนื่องจากการไม่มีแก๊สไนโตรเจนเจือปน จะทำให้มีองค์ประกอบของแก๊สที่เผาไหม้ได้เพิ่มขึ้น 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) โดยการทำให้ปฏิกิริยาระหว่างแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจน เกิดเป็นแก๊สมีเทนและน้ำ โดยใช้ Catalytic ดังสมการที่ (2.9)



#### 2.6.5 การใช้ประโยชน์จากแก๊สเชื้อเพลิง

แก๊สเชื้อเพลิง หรือโปรดิวเซอร์แก๊ส ที่ผลิตได้สามารถนำไปใช้งานได้โดยตรง แต่ก่อนนำมาใช้งานจำเป็นต้องผ่านระบบทำความสะอาดแก๊สก่อน และขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้งาน ดังแสดงใน รูปที่ 8 แสดงถึงภาพรวมของการใช้ประโยชน์ของแก๊สเชื้อเพลิง โดยแบ่งแนวทางการใช้ประโยชน์หลักได้ 3 ประเภท คือ



รูปที่ 8 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 आयुวัฒน์ และคณะ, 2549) หรือ  $25 \text{ mg/Nm}^3$  (Bhattacharya et al., 2001) เพื่อไม่ให้เกิดผลกระทบต่อการใช้งานในเครื่องยนต์

การใช้แก๊สเชื้อเพลิงกับเครื่องยนต์สันดาปภายใน (Internal combustion engine) นั้น จะต้องปรับปรุงลักษณะบางประการของเครื่องยนต์เพื่อที่จะทำให้เครื่องยนต์นั้นเหมาะสมกับการใช้แก๊สเชื้อเพลิงเป็นเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ และสามารถทำงานได้ดีใกล้เคียงกันกับเครื่องยนต์แก๊สโซลีน โดยทั่วไปการใช้แก๊สเชื้อเพลิง กับเครื่องยนต์สันดาปภายในสามารถแบ่งออกเป็น 3 วิธี (สมบุญ สิริพรมงคชัย, 2546)

1) การนำเครื่องยนต์ดีเซลมาใช้ร่วมกับแก๊สเชื้อเพลิง เป็นการใช้เชื้อเพลิงคู่ (Gas-diesel engine หรือ Dual-fuel engine) โดยใช้แก๊สเชื้อเพลิงผสมกับอากาศเป็นไอดีเข้าห้อง

เผาไหม้ 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 ซึ่งหากนำอุปกรณ์ทางไฟฟ้ามาต่อใช้งาน จะไม่ทำให้อุปกรณ์เสียหายแต่อย่างใด 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 14 แสดงชนิดของมลสารและปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบผลิตแก๊สเชื้อเพลิง

ตารางที่ 14 ชนิดของมลสารและปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบผลิตแก๊สเชื้อเพลิง<sup>(1)</sup>

ชนิดมลสาร	ลักษณะที่ปรากฏ	ปัญหา
มลสารหรืออนุภาคขนาดเล็ก	ฝุ่น (Dust) เถ้า (Ash) เถ้าลอย (Fly ash) ผงถ่าน (Char) องค์กรประกอบที่ควบแน่น (Condensed compound)	ทำให้เกิดการกัดกร่อนของชิ้นส่วนที่เป็นโลหะในระบบและมลภาวะทางสิ่งแวดล้อม
องค์กรประกอบอัลคาไลน์โลหะ (Alkali metal)	องค์กรประกอบของโซเดียม (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 หรือแก๊ส	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 การมีระบบทำความสะอาดแก๊สจึงเป็นเรื่องสำคัญ (Quaak et al., 1999) ซึ่งระบบทำความสะอาดแก๊สเชื้อเพลิงที่นิยมใช้โดยทั่วไปเพื่อลดปัญหาดังกล่าว ดังแสดงใน ตารางที่ 15

ตารางที่ 15 ชนิดของมลสารและระบบทำความสะอาดแก๊สเชื้อเพลิง<sup>(1)</sup>

ชนิดมลสาร	ระดับมลพิษ(g/Nm <sup>3</sup> )	ระบบทำความสะอาด
มลสารหรืออนุภาคขนาดเล็ก	3-70	ไซโคลน ระบบกรอง (Filtration) ระบบสครับเบอร์(Scrubber)
องค์กรประกอบอัลคาไลน์โลหะ (Alkali Metal)	-	ระบบการควบแน่น(Condensation) ระบบกรอง (Filtration)
ออกไซด์ของไนโตรเจน	1.5-3.0	ระบบสครับเบอร์(Scrubber) Selective Catalytic Reduction (SCR)

ชนิดมลสาร	ระดับมลพิษ(g/Nm <sup>3</sup> )	ระบบทำความสะอาด
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 ที่เกิดจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน 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) สูงกว่ากระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน แต่อย่างไรก็ตามในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันก็จำเป็นต้องมีระบบ Pre-treatment Gas เพื่อกำจัดองค์ประกอบต่าง ๆ ที่อาจก่อให้เกิดมลภาวะได้

- ของเสียในรูปของแข็ง (Solid waste) ของเสียในรูปของแข็งที่เกิดจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ได้แก่ ถ่าน ถ้ำ ซึ่งจะเกิดขึ้นประมาณ 3-20% ของเชื้อเพลิงที่ป้อนสู่เตา ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของเชื้อเพลิงแต่ละชนิด (Kirubakaran et al., 2007) ในกรณีที่เป็นเชื้อเพลิงชีวมวล เช่น แกลบ ไม้กระถินยักษ์ ไม้ยูคาลิปตัส เป็นต้น ของเสียเหล่านี้จะถูกนำไปใช้เป็นถ่านหุงต้มหรือถ่านกัมมันต์ได้ เนื่องจากถ่านที่ได้มีค่าความร้อน และค่าการดูดซับไอโอดีนสูง ตลอดจนมีปริมาณสารระเหยต่ำซึ่งเป็นผลให้เป็ถ่านที่เกิดขึ้นมีสภาพไร้ควัน (ทิพย์สุภินทร์ หินชุย และคณะ, 2551) กรณีที่ใช้เชื้อเพลิงตัวอย่างจำเป็นต้องนำไปกำจัดต่อโดยการฝังกลบ เนื่องจากมีโลหะหนักคงเหลืออยู่ หรืออาจนำไปใช้ในกระบวนการอุตสาหกรรม เช่น ผงซีเมนต์ (ทิพย์สุภินทร์ หินชุย, 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) ได้ศึกษาความก้าวหน้าของเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันและ ไพโรไลซิสกับการนำมาประยุกต์ใช้กับของเสีย และมีกรณีศึกษาที่น่าสนใจคือ การนำเอากระบวนการแก๊สซิฟิเคชันมาใช้กับขยะมูลฝอย โดยต้นแบบนี้มีขนาด 1 ต้นต่อชั่วโมง ซึ่งเดินระบบอยู่ที่สนามบิน Budapest ประเทศฮังการี เพื่อใช้กำจัดขยะจากอุตสาหกรรม ขั้นตอนการทำงานคือขยะจะถูกป้อนผ่านไซนอบแห้งและผ่านเข้าสู่ไซนไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 600-700 °C ซึ่งออกแบบเพื่อให้เกิดการเผาไหม้สารอินทรีย์ที่ระเหยออกมา และผ่านเข้าสู่ไซนเผาไหม้ ที่อุณหภูมิประมาณ 800 °C จากนั้นผ่านเข้าสู่ไซนเผาไหม้ที่สองอุณหภูมิประมาณ 1,100-1,200 °C แก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จะถูกใช้กับเครื่องกำเนิดไอน้ำเพื่อผลิตไฟฟ้า สำหรับการควบคุมมลพิษสิ่งแวดล้อม ของเสียที่เกิดขึ้นคือถ่านและเถ้าที่มีโลหะหนักคงเหลืออยู่จะถูกนำไปกำจัดต่อไป สำหรับการควบคุมมลพิษอากาศ ไอเสียที่เกิดขึ้นจะถูกบำบัดผ่านระบบสครับเบอร์แบบแห้ง (Dry scrubbing process) โดยใช้โซเดียมคาร์โบเนตและปูนขาวเป็นตัวดูดซับ จากนั้นจะผ่านถุงกรองอากาศ (Bag filter) ก่อนที่จะปลดปล่อยสู่บรรยากาศ ซึ่งผลการตรวจวัดมลพิษอากาศที่ปลดปล่อยจากระบบพบว่ามีย่าน้อยมาก และอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

## 2.7 เทคโนโลยีพลาสติกเชิงความร้อน




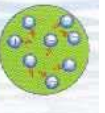
แก๊สซิฟิเคชันเป็นกระบวนการทางอุณหเคมีแรกที่มีใช้กับอุตสาหกรรม โดยเริ่มต้นในช่วงท้ายของศตวรรษที่ 19 และถูกพัฒนาในช่วงการพัฒนาอุตสาหกรรมในประเทศทางยุโรป เพื่อใช้ผลิตน้ำมันและแก๊สเพื่อเพลิงจากถ่านหิน หลังจากสงครามโลกครั้งที่สอง การใช้เตาผลิตแก๊ส (Gasifier) ก็ลดลงอย่างมาก เนื่องมาจากปริโตรเลียมหาได้ง่าย ในช่วงปี ค.ศ. 1970s-1980s ได้มีการใช้กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันอีกครั้ง เพื่อการผลิตเชื้อเพลิงสังเคราะห์ (Synthetic fuels) และในช่วงปีนั้น (ค.ศ. 1980s) ประเทศสหรัฐอเมริกา ยุโรป และญี่ปุ่น ได้ริเริ่มใช้กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันในการบำบัดของเสีย ปัจจุบัน ได้มีการใช้เตาผลิตแก๊สเชิงอุตสาหกรรมทั่วโลกมากกว่า 150 โรงงาน โดยส่วนใหญ่จะใช้ชีวมวล และถ่านหินเป็นวัตถุดิบ

ในประเทศญี่ปุ่นได้มีการใช้กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันสำหรับการจัดการขยะชุมชนอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นประเทศที่มีพื้นที่ขนาดเล็ก ไม่มีพื้นที่เพียงพอสำหรับการฝังกลบ ส่วนในประเทศทางยุโรป มีโรงงานไม่มากนักที่ใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันสำหรับการจัดการขยะ ตัวอย่างเช่นกระบวนการแบบ Thermosteact ได้ถูกสร้างในประเทศเยอรมนี แต่ก็ประสบปัญหาทางด้านเทคนิค และได้ปิดลงในที่สุด บริษัท Siemens ก็ประสบปัญหาเดียวกันในการใช้กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันสำหรับกำจัดของเสียที่โรงงานในเมือง Fürth และมีอุบัติเหตุร้ายแรงที่โรงงานนั้นเนื่องจากการอุดตันของของเสียในเตาไพโรไลซิส ซึ่งทำให้เกิดแรงดันสูงมาก และมีการปลดปล่อยแก๊สไพโรไลซิส ออกมา แม้ว่าปัญหานี้ได้มีการแก้ไขแล้ว แต่ก็ทำให้ได้รับการต่อต้านและต้องหยุดทำงานในที่สุดหลังจากนั้น

นอกเหนือจากประเทศเยอรมนี กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันสำหรับขยะได้รับการตอบรับที่ดีมากกว่าการเผาไหม้ตรงเนื่องจากมีลดการปลดปล่อยมลพิษสู่สิ่งแวดล้อมซึ่งเป็นจุดขายของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันสำหรับการจัดการขยะเมื่อเทียบกับการเผาไหม้โดยตรง

### 2.7.1 พลาสมาเชิงความร้อน (Thermal plasma)

พลาสมาเชิงความร้อน หรือ “สถานะที่ 4 ของสสาร” คือ ส่วนผสมของไอออน อิเล็กตรอน และอนุภาคที่เป็นกลาง เป็นสถานะที่สามารถกลายเป็นไอและทำลายพันธะทางเคมีได้ พลาสมาเกิดจากการแตกตัวของประจุของแก๊ส เนื่องจากอาร์คทางไฟฟ้าอย่างต่อเนื่องระหว่างขั้วบวก และขั้วลบของหัวพลาสมา หรือกล่าวอีกอย่างหนึ่ง คือ โมเลกุลของแก๊สถูกทำให้ชนกับประจุ อิเล็กตรอนและทำให้เกิดอนุภาคที่มีประจุ เมื่ออนุภาคมีประจุเพียงพอแล้ว (ทั้งขั้วบวกและลบ) แก๊สก็จะเริ่มนำไฟฟ้าได้เอง นอกจากนี้ การชนกันของอนุภาคที่มีประจุจะปลดปล่อยความร้อนและเกิดเป็น ลำแสงอาร์ค หรือเรียกว่า พลาสมา และเมื่อแก๊สที่เป็นไอออนถูกทำให้ผ่านขั้วที่ความเร็วสูงจะเกิด สนามแม่เหล็กไฟฟ้าเข้มข้นสูงและทำให้เกิด ไอพ่นพลาสมา (Plasma jet) พลังงานที่ปลดปล่อยออกมาในรูปพลาสมาจะมีอุณหภูมิสูงมากกว่า 5,000 องศาเซลเซียส ดังแสดงใน รูปที่ 9

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

รูปที่ 9 สถานะของพลาสมา

(ที่มา : The recovered energy system, Online)

ความร้อนอุณหภูมิสูงนี้เองที่นำมาใช้ในการทำให้ขยะมูลฝอยสิ้นซากไป เนื่องจากกระบวนการดังกล่าวให้ความร้อนสูงมากจึงมักใช้กับเครื่องกำเนิดแก๊สเชื้อเพลิง (Gasifier) เพื่อทำให้องค์ประกอบของสารอินทรีย์ในขยะมูลฝอยเปลี่ยนรูปกลายเป็นแก๊สเชื้อเพลิง นอกจากนี้ความร้อนที่สูงนี้ยังนำมาใช้ในการสลายเถ้าที่เหลืออยู่ในขยะมูลฝอยให้กลายเป็นผลิตภัณฑ์ (Slag หรือ Vitrification) และทำให้โลหะหนักที่ไม่ละลายกลายเป็นแก๊สแต่คงอยู่ในเถ้ากลายเป็นเนื้อเดียวกับผลิตภัณฑ์ ทำให้สามารถนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปใช้ประโยชน์ในการก่อสร้างได้โดยไม่ต้องกังวลเรื่องการรั่วไหลของโลหะพิษที่อาจปนเปื้อนอยู่ในเถ้า

การใช้ประโยชน์ของพลาสมาเชิงความร้อนในการกำจัดของเสียได้รับความสนใจจากนักวิทยาศาสตร์และวิศวกรอย่างมาก เนื่องจากความสามารถเฉพาะในด้านกรกลายเป็นไอ และการทำลายพันธะทางเคมี ข้อดีหลักของพลาสมาคือ มีความหนาแน่นและอุณหภูมิสูงมาก ซึ่งทำให้มีการถ่ายเทความร้อนและสารตั้งต้นสูง (Reactant) การติดตั้งมีขนาดเล็ก เปิดและปิดระบบได้รวดเร็วและ

งานนอกจากนั้น การใช้ไฟฟ้าเป็นตัวป้อนเข้าสู่ระบบยังมีจุดน่าสนใจอีกอย่างคือ จะแยกการเกิดความร้อนที่มาจากออกซิเจนได้ ทำให้ควบคุมระบบได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตาม การใช้ไฟฟ้าก็มีข้อเสียหลัก คือมีราคาแพง และยิ่งไปกว่านั้น ยังขาดข้อมูลเรื่องความน่าเชื่อถือซึ่งจำกัดการพัฒนาในระดับอุตสาหกรรม

เทคโนโลยีพลาสมาได้ถูกนำมาใช้ในการให้ความร้อนในอุตสาหกรรมต่างๆ โดยเป็นที่ยอมรับกัน ทั่วโลกในศตวรรษที่ 19 เทคโนโลยีพลาสมาได้ถูกพัฒนาขึ้นและใช้งานในทวีปยุโรปสำหรับอุตสาหกรรมโลหะการ ในช่วงต้นศตวรรษที่ 20 อุตสาหกรรมเคมีได้ใช้อีเตอร์พลาสมา (Plasma heater) เพื่อสกัดแก๊สอะซิโตนจาก แก๊สธรรมชาติในช่วงต้นของทศวรรษที่ 1960 องค์การบริหารการบินและอวกาศแห่งสหรัฐอเมริกา (NASA) ได้ใช้เทคโนโลยีพลาสมาในการจำลองสภาวะอุณหภูมิสูงเพื่อทดสอบยานกระสวยอวกาศขณะที่กำลังเคลื่อนเข้าสู่ บรรยากาศโลก ในช่วงปี 1980 ได้มีการสร้างและใช้งานกระบวนการอีเตอร์พลาสมาขนาดใหญ่เพื่อใช้งาน อุตสาหกรรมหลากหลายประเภท โดยเฉพาะอุตสาหกรรมโลหะและเคมี ซึ่งต่อมาได้พัฒนามาเพื่อกิจกรรมด้านสิ่งแวดล้อมและแปรรูปขยะมูลฝอยเป็นการประยุกต์ใช้งานเทคโนโลยีพลาสมาในการกำจัดขยะมูลฝอยชุมชน

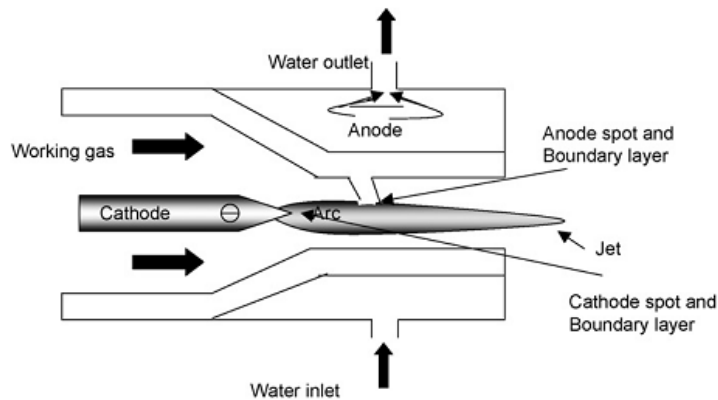
การประยุกต์ใช้ Plasma arc gasification สำหรับการจัดการกากของเสีย การปริมาณควบคุมปริมาณของออกซิเจนในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมาจำเป็นต้องควบคุมอย่างระมัดระวัง เช่นเดียวกับระบบ Gasification เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการเผาไหม้แบบสมบูรณ์ (Combustion) และให้เกิดปฏิกิริยา Gasification การทำให้เกิดความร้อนจัดในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมา และทำให้โมเลกุลของสารอินทรีย์แตกตัวออกมาเป็นโครงสร้างพื้นฐานอย่างง่ายของแก๊ส (Simple gaseous structure) เช่น CO H<sub>2</sub> และ CO<sub>2</sub>

## 2.7.2 ประเภทของหัวพลาสมาอาร์ค

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

### 2.7.2.1 Non-transferred arc

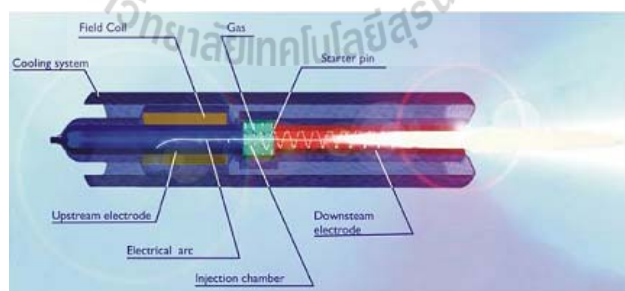
เป็นแบบที่ใช้กันทั่วไปในการบำบัดของเสีย โดยกระแสไฟฟ้าจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนจากการปลดปล่อยประจุจากขั้วบวกและขั้วลบภายใต้หัวจ่ายที่มีการหล่อเย็น ทำให้เกิดไอพ่นพลาสมาดังแสดงใน รูปที่ 10



รูปที่ 10 นอนทรานสเฟอร์พลาสมาอาร์ค (Non-transferred plasma arc)

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

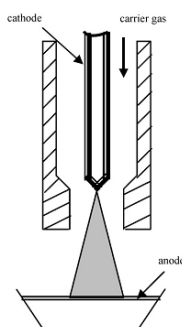
นอนทรานสเฟอร์พลาสมามี 2 แบบ คือ แบบที่ใช้ขั้วร้อน (Hot electrodes) มีอุณหภูมิพลาสมาระหว่าง 6,000 ถึง 15,000 K และแบบที่ใช้ขั้วเย็น (Cold electrodes) ซึ่งได้อุณหภูมิต่ำกว่า 7,000 K ผู้ผลิตหลักของพลาสมาแบบนี้ ได้แก่ Europlasma และ Westinghouse ตัวอย่างหัวพลาสมาจากบริษัท Europlasma แสดงดังรูปที่ รูปที่ 11



รูปที่ 11 หัวพลาสมาจากบริษัท Europlasma

### 2.7.2.2 Transferred arc

พลาสมาแบบนี้ กระแสไฟฟ้าจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนภายในผ่านช่องสำหรับผ่านแก๊ส ขั้วไฟฟ้านหนึ่งจะอยู่ภายในหัวพลาสมา ส่วนอีกอันจะอยู่ด้านนอกตัวไอพ่นพลาสมา (Plasma jet) จะถูกปลดปล่อยออกมา ตัวขั้วไฟฟ้านอกจะมีลักษณะเป็นวงกลม ศูนย์กลางร่วม (Concentric) กับไอพ่น อุปกรณ์พลาสมาแบบนี้จะมีขั้วบวกและลบค่อนข้างใหญ่แยกออกจากกัน ในระดับ 2-3 cm ถึง 1 m ดังแสดงในรูปที่ 12



รูปที่ 12 ทราสเฟอร์พลาสมาอาร์ค (Transferred arc torch)

เนื่องจากเปลวพลาสมาเกิดขึ้นภายนอกหัวกำเนิด (Torch) หัวพลาสมาแบบนี้จึงสามารถใช้ได้กับพลาสมาที่ให้ความร้อนสูงได้ หัวแบบ ทราสเฟอร์นี้จะมีประสิทธิภาพดีกว่าแบบ นอนทรานสเฟอร์ เพราะความสูญเสียเนื่องจากการหล่อเย็นน้อย ที่จริงแล้วหัวแบบนี้สามารถสร้างได้จากเหล็กที่หล่อ หรือที่ใช้กันทั่วไปก็เป็นวัสดุทนความร้อน ซึ่งอาจจะมีการสูญเสียบ้าง เนื่องจากการระเหิด ดังนั้น ความร้อนที่สูญเสียในกรณีนี้จึงน้อยมาก แต่ข้อไฟฟ้าจะต้องมีการเปลี่ยนค่อนข้างบ่อย ขั้วบวกจะทำมาจากโลหะที่สามารถนำความร้อนได้สูง และที่สำคัญ จะต้องมีการลดความร้อนให้ทัน ที่หน้าสัมผัสของขั้วบวกเพื่อป้องกันการหลอมละลาย เนื่องจากเป็นจุดที่รับความร้อนทั้งหมด

โดยสรุป แม้ว่าหัวพลาสมาแบบทราสเฟอร์จะมีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบนอนทรานสเฟอร์ แต่ในการใช้งานจริง หัวแบบนอนทรานสเฟอร์เป็นที่นิยมมากกว่า เนื่องจากให้การผสมระหว่างเปลวพลาสมากับวัสดุของเสียที่ดี และในการบำบัดของเสียจริงแล้วๆ ไม่จำเป็นต้องใช้ความร้อนสูงขนาดที่ได้จากแบบทราสเฟอร์

### 2.7.3 การนำพลังงานกลับมาใช้

ระบบพลาสมาอาร์คต้องการกำลังในการสร้างพลาสมาอาร์คเพื่อใช้ทำลายขยะมูลฝอย ในขณะเดียวกัน ระบบนี้ก็สามารถผลิตพลังงานได้เช่นกัน โดยเมื่อขยะมูลฝอยสัมผัสกับ Ionized gas สารอินทรีย์ที่อยู่ในขยะมูลฝอยจะถูกเปลี่ยนรูปไปแก๊สที่เผาไหม้ได้ (Syngas) สารอินทรีย์จะสลายตัวกลายเป็น Slag หรือเถ้าอยู่บริเวณก้นของเครื่องปฏิกรณ์ แก๊สเชื้อเพลิงหรือแก๊สสังเคราะห์ (Syngas) ที่ผลิตได้จากปฏิกรณ์ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้เช่นเดียวกับแก๊สสังเคราะห์จากระบบแก๊สซิฟิเคชัน

### 2.7.4 การควบคุมผลกระทบลิ่งแวดล้อม

#### 1) มลพิษอากาศ

ในระบบพลาสมาอาร์ค โลหะหนักต่างๆ ที่ปนอยู่ใน ขยะมูลฝอย เช่น พรอท ตะกั่ว สังกะสี และแคดเมียม อาจถูกเปลี่ยนสภาพให้กลายเป็นไอได้ ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ หากเครื่องปฏิกรณ์ มีอุณหภูมิ การทำงานต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของสารเหล่านี้โลหะหนักจะถูกเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของ Slag แต่ในกรณีที่มีอุณหภูมิในการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์สูงกว่าจุดหลอมเหลวของโลหะหนัก โลหะหนักที่ปนอยู่ในขยะมูลฝอยจะถูกเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของไอระเหยหรือในรูปของแก๊สแทน

ไดออกซิน (Dioxins) เป็นสารประกอบทางเคมีในกลุ่ม Polychlorinated dibenzodioxins (PCDDs) ไดออกซินเป็นผลิตภัณฑ์ส่วนเกินที่ได้จากการเผาไหม้สารอินทรีย์ที่มี chlorine เป็นองค์ประกอบ จะเกิดขึ้นในกระบวนการเผาไหม้ที่มีการเผาไหม้ที่อุณหภูมิต่ำ วิธีการกำจัดสารไดออกซินที่ดีที่สุดคือ การเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 850 °C โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าเป็นสารที่มีการปนเปื้อน จะต้องใช้อุณหภูมิ สูงกว่า 1,000 °C ซึ่งการนำพลาสมาเชิงความร้อนมาใช้ ให้เกิดการเผาไหม้ขยะที่อุณหภูมิสูงสามารถลดปัญหาไดออกซินได้

อย่างไรก็ดี การควบคุมมลพิษที่ปลดปล่อยออกมาทางอากาศจำเป็นต้องมีระบบบำบัด และมี การติดตามตรวจวัดคุณภาพอากาศอย่างสม่ำเสมอ

## 2) มลพิษทางอากาศของแข็ง

เทคโนโลยีพลาสมาอาร์คจะทำให้ขยะมูลฝอยเปลี่ยนสภาพเป็น slag แก้วหลอมเหลว เนื่องจากหลอมละลายของอินทรีย์สารที่อยู่ในขยะมูลฝอย ระบบกำจัดขยะมูลฝอยที่มีเถ้าหรือ slag ออกมาจากระบบจำเป็นต้องผ่านการทดสอบ Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) ที่กำหนดโดย USEPA การทดสอบ TCLP มีวัตถุประสงค์เพื่อวัดปริมาณโลหะหนัก 8 ชนิดที่อาจรั่วไหลออกมาจากตัวอย่างที่ทำการทดสอบ เนื่องจากโลหะหนักทั้งหมดจะหลอมรวมกับ Slag ที่ออกมาจากปฏิกิริยาพลาสมาอาร์ค ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าปฏิกิริยาพลาสมาอาร์คที่ใช้ในการกำจัดขยะอันตรายหรือขยะติดเชื้อจะมีค่า TCLP ที่ต่ำกว่ามาตรฐานที่ยอมให้ได้ อาจกล่าวได้ว่า เทคโนโลยีพลาสมาอาร์คใช้ความร้อนสูงในการหลอมละลายอินทรีย์สารในขยะมูลฝอยและทั้งหมดจะไม่มีโอกาสรั่วกลับคืนสู่สิ่งแวดล้อมได้อีก โดยรูปที่ 13 แสดงลักษณะของ Slag melting ในเตาปฏิกรณ์พลาสมา



รูปที่ 13 ลักษณะของ Slag melting ในเตาปฏิกรณ์พลาสมา

(ที่มา : Moustakas, 2005)

## 3) มลพิษทางน้ำ

ระบบผลิตกำลังทั้งหมดต้องการน้ำสำหรับการหล่อเย็นและการผลิตไอน้ำ อย่างไรก็ตาม น้ำนี้โดยทั่วไปไม่ต้องการการบำบัดเนื่องจากระบบสามารถนำน้ำเหล่านี้กลับไปใช้ใหม่ได้อีกและไม่นำมลพิษออกมาจากกระบวนการ ยกเว้นระบบที่ใช้แก๊สสังเคราะห์ที่ได้จากระบบเพื่อเผาไหม้ใน CTCC เนื่องจากแก๊สสังเคราะห์นี้ต้องการการทำความสะอาดก่อนนำไปใช้งานเพื่อสกัดคลอรีน ซัลเฟอร์และสารพิษอื่นๆ อุปกรณ์ที่ใช้อาจประกอบด้วยสกรับเบอร์ เครื่องกรองและระบบดูดซับ

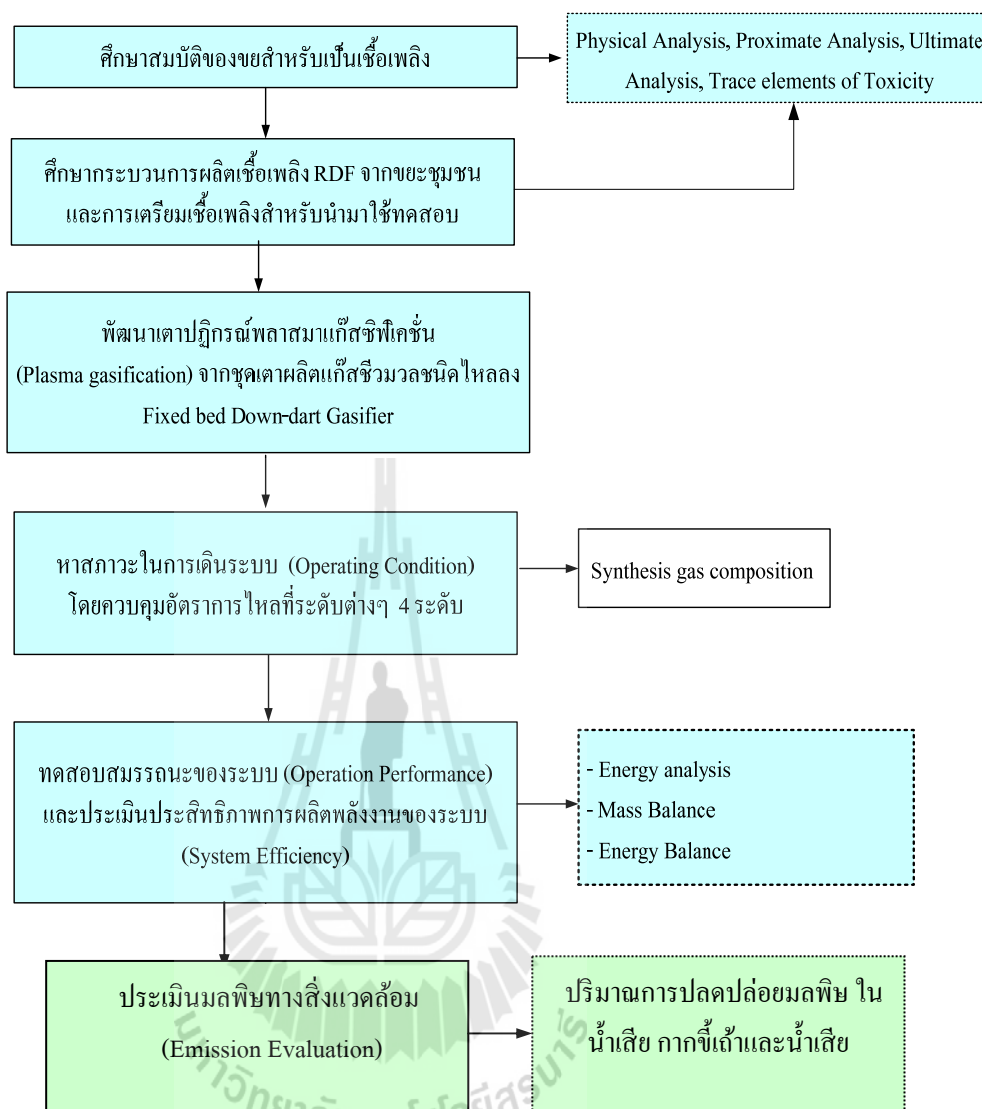
### บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในการศึกษาการกำจัดขยะชุมชนเพื่อผลิตพลังงานโดยใช้เทคโนโลยีพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน ขยะชุมชนจะถูกนำมาเตรียมให้เป็นเชื้อเพลิงขยะ (RDF) จากนั้นจะนำเชื้อเพลิงขยะมาศึกษา คือ ศึกษากระบวนการพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน โดยทดสอบในชุดเตาปฏิกรณ์พลาสมาแก๊สซิฟิเคชันที่พัฒนาขึ้นต่อยอดจากเตาผลิตแก๊สชีวมวลชนิดไหลลง (Fixed bed Down-draft Gasifier) โดย ขั้นตอนการศึกษา ดังแสดงใน รูปที่ 14 มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 3.1 การรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้น

เป็นการศึกษาข้อมูลเบื้องต้นของปริมาณ และองค์ประกอบของขยะ เพื่อนำไปเป็น ข้อมูลพิจารณาตัวแทนของขยะชุมชน ที่จะนำมาใช้ในการวิจัย จากการตรวจสอบเอกสาร สามารถสรุปได้ว่าขยะชุมชนที่เกิดขึ้นในแต่ละพื้นที่มีคุณสมบัติไม่แตกต่างกัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้ **ขยะชุมชน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มาเป็นตัวแทนของขยะชุมชนในประเทศไทย** สำหรับศึกษาการกำจัดขยะชุมชนเพื่อผลิตพลังงานโดยใช้เทคโนโลยีพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน





รูปที่ 14 ขั้นตอนการศึกษาสำหรับระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน

### 3.2 การเก็บตัวอย่างขยะชุมชนที่นำมาใช้เป็นตัวแทน

ข้อมูลทั่วไปของขยะชุมชนมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สรุปได้คือ จากข้อมูลรายงานปริมาณขยะมูลฝอยของงานประปาและสิ่งแวดล้อม สำนักงานอธิการบดี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประจำปี 2550 และ ปี 2551 พบว่าปริมาณขยะมูลฝอยเพิ่มสูงขึ้นเกือบเป็น 2 เท่า คือ จาก 654.5 ตันต่อปี เพิ่มเป็น 1,175 ตันต่อปี โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในทุกเดือน ปริมาณขยะมูลฝอยเฉลี่ยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีเกิดขึ้นประมาณ 3,767.5 กิโลกรัมต่อวัน (ข้อมูลเฉลี่ยในปี 2551) ซึ่งมีอัตราการเกิดขยะมูลฝอยตั้งแต่ 2,770-7,683 กิโลกรัมต่อวัน ทั้งนี้ในช่วงเปิดภาคการศึกษาจะมีปริมาณขยะมูลฝอยสูงกว่าในช่วงปิดภาคการศึกษา โดยจะมีอัตราการเกิดขยะมูลฝอยเฉลี่ยประมาณ 4,882 กิโลกรัมต่อวัน และ 2,736 กิโลกรัมต่อวัน ตามลำดับ ในการจัดการขยะมูลฝอยที่เกิดขึ้นใน



ปัจจุบัน คือขยะจากจุดกำเนิดต่าง ๆ จะถูกเก็บขนด้วยรถเก็บขนขยะจำนวน 2 คัน เฉลี่ยวันละ 17 เที่ยว ไปยังศูนย์จัดการขยะ ภายในมหาวิทยาลัย คือ 1) ศูนย์คัดแยกขยะ (เดิม) 2) โรงงานผลิตเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง ทั้งนี้การสุ่มเก็บตัวอย่างขยะมูลฝอยที่เก็บขนได้ในแต่ละวัน เพื่อนำไปคัดแยกหาขนาดและองค์ประกอบ และลักษณะสมบัติต่างๆของขยะมูลฝอย ซึ่งการสุ่มตัวอย่างที่จะใช้เป็นตัวแทนในการวิเคราะห์เพื่อให้ได้ตัวแทนที่ดีที่สุด

### 3.3 การเตรียมเชื้อเพลิงขยะ

ขยะมูลฝอยที่โดยตรงไม่สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ จำเป็นต้องผ่านกระบวนการเตรียมเพื่อปรับเสถียรภาพก่อน ทั้งนี้ ในงานวิจัยนี้จะใช้เชื้อเพลิง RDF จากกระบวนการบำบัดขยะมูลฝอยโดยวิธีทางกลและชีวภาพ (MBT, Mechanical and Biological Waste Treatment) แบบ Composting plant ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ ศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี พัฒนาขึ้น โดยจะใช้เทคโนโลยีที่ทำการปรับสภาพขยะโดยวิธีการหมัก (ทางชีวภาพ) ก่อนทำการคัดแยก (ทางกล) ร่วมกับการใช้เครื่องจักรในหน่วยต่างๆ ที่เหมาะสม โดยต้นแบบที่ถูกพัฒนาขึ้นสามารถรองรับปริมาณขยะมูลฝอยของมหาวิทยาลัยทั้งหมด ซึ่งมีปริมาณ 3-5 ตัน/วัน จากกระบวนการนี้ทำให้ได้ขยะที่เสถียรเนื่องจากกระบวนการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ที่ใช้ระยะเวลาเพียง 20-30 วัน ดังกล่าวช่วยลดปัญหาเรื่องกลิ่น และสามารถลดความชื้นของขยะชุมชนเหลือไม่เกิน 30% (จากเดิมความชื้นประมาณ 55-65 %) ผลผลิตที่ได้มี 2 ส่วน คือ 1) ขยะที่เผาไหม้ได้ (พลาสติก กระดาษ เศษไม้) สามารถนำไปพัฒนาเป็นเชื้อเพลิงขยะ RDF ต่อไป 2) อินทรีย์วัตถุที่เกิดจากการย่อยสลายขยะอินทรีย์สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในรูปสารปรับปรุงดินหรือปุ๋ยอินทรีย์ สำหรับกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงขยะของโรงงานต้นแบบนี้ก็สามารถผลิตเชื้อเพลิงขยะประเภทที่ 4 (RDF-4) ที่มีขนาดเล็กประมาณ 0.1-35 มิลลิเมตร และเชื้อเพลิงขยะประเภทที่ 5 หรือเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง (RDF-5) (วีรชัย อัจหาญ และคณะ, 2553) ดังแสดงใน ตาราง

ตารางที่ 16 กระบวนการผลิตของโรงบำบัดทางกลและชีวภาพ

		
MSW	HAND SORTING	PRE-SHREDDING
		
COMPOSTING	MIXED COMPOST (RDF)	SAPARATING
		
<ul style="list-style-type: none"> <li>- ร้อยละ 20 , ขนาด &lt; 6 mm</li> <li>- ความหนาแน่น 600 kg/m<sup>3</sup></li> <li>- ความชื้น 30 %wb, LHV 1200 kcal/kg</li> <li>- %OM,%N,%P,%K = 17.74, 1.07, 1.34, 1.51</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ร้อยละ 30, ขนาด 6 mm – 25 mm</li> <li>- ความหนาแน่นขยะ 400 kg/m<sup>3</sup></li> <li>- ความชื้น 30 %wb</li> <li>- LHV 2900 kcal/kg</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ร้อยละ 50, ขนาด &gt; 25 mm</li> <li>- ความหนาแน่นขยะ 50 kg/m<sup>3</sup></li> <li>- ความชื้น 30 %wb</li> <li>- LHV 5000 kcal/kg</li> </ul>
<b>PRODUCT</b>		
		
ปุ๋ยอินทรีย์	RDF-4	RDF-5

ในการเก็บตัวอย่างเชื้อเพลิงขยะ เพื่อนำมาวิเคราะห์องค์ประกอบ คุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติเคมี จะทำการสุ่มเก็บตัวอย่างจากกระบวนการผลิตเชื้อเพลิง 6 ตัวอย่าง/วัน เก็บต่อเนื่อง 1 สัปดาห์

### 3.4 วิธีการศึกษาองค์ประกอบของขยะชุมชน และเชื้อเพลิงขยะ (RDF-4)

#### 1) การศึกษาองค์ประกอบและคุณสมบัติทางกายภาพ

- การหาองค์ประกอบ (Composition) ของขยะมูลฝอย โดยการคัดเลือกขยะมูลฝอยแต่ละประเภทซึ่งได้แก่ กระดาษ พลาสติก โฟม ไม้ เศษอาหาร แก้ว กระจก โลหะ กระเบื้อง โลหะ ยาง และอื่นๆ แล้วชั่งน้ำหนักและบันทึกข้อมูล

- ขนาด (Size) ของขยะมูลฝอย คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขยะมูลฝอย โดยการจัดตะแกรง 2 ขนาดซ้อนกัน คือ ตะแกรงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่างซี่ตะแกรง 76 และ 38 มิลลิเมตร ให้อยู่ด้านบนและด้านล่างตามลำดับ ชั่งน้ำหนักรวมของตัวอย่างขยะมูลฝอย ก่อนทำการตักขยะมูลฝอยใส่ในตะแกรงบนสุด แล้วเขย่าให้ขยะมูลฝอยตกลงตามช่องตะแกรง เมื่อตักขยะมูลฝอยใส่หมดแล้ว และเขย่าจนไม่มีขยะมูลฝอยตกลงมาแล้วจะได้ขยะมูลฝอย 3 ขนาด คือ 44 ใหญ่กว่า 76 มิลลิเมตร ระหว่าง 38-76 มิลลิเมตร และ เล็กกว่า 38 มิลลิเมตร ชั่งน้ำหนักแต่ละขนาด และบันทึก

- ความหนาแน่นปกติ (Bulk Density) เป็นความหนาแน่นของขยะมูลฝอยที่บรรจุอยู่ในภาชนะทั่วไป กระทำได้ด้วยการชั่งน้ำหนักถังตวงเปล่าที่มีปริมาตร 100 ลิตร

#### 2) การศึกษาสมบัติแบบประมาณ (Proximate Analysis)

- ความชื้น (Moisture) คือเปอร์เซ็นต์ของน้ำต่อน้ำหนักวัสดุ ความชื้นมีผลโดยตรงต่อปฏิกิริยาการเผาไหม้และคุณภาพของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ เชื้อเพลิงที่มีขนาดความชื้นต่ำจะเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบผลิตแก๊สได้มากขึ้นเท่านั้น โดยวิธีการวิเคราะห์อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D3173

- เถ้า (Ash) คือปริมาณเถ้าที่มีอยู่ในชีวมวล ภายหลังจากเผาที่อุณหภูมิซึ่งปริมาณเถ้าในชีวมวลสามารถนำมาเป็นข้อมูลเพื่อคาดคะเนองค์ประกอบอื่นๆ ของเชื้อเพลิงได้ เช่น ถ้ามีปริมาณเถ้าสูง ก็มีแนวโน้มที่ชีวมวลจะมีค่าความร้อนต่ำ โดยวิธีการวิเคราะห์อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D3174

- ปริมาณสารระเหย (Volatile Matter) คือปริมาณสารระเหยที่มีอยู่ในชีวมวล ซึ่งปริมาณสารระเหยในชีวมวลสามารถนำมาเป็นข้อมูลเพื่อคาดคะเนองค์ประกอบอื่นๆ ของเชื้อเพลิงได้เช่นเดียวกัน เช่น ถ้ามีปริมาณสารระเหยสูง ก็มีแนวโน้มที่ชีวมวลจะมีค่าความร้อนสูง เกิดผลิตภัณฑ์แก๊สที่เผาไหม้ได้สูง แต่ปริมาณของคาร์บอนคงตัวจะต่ำ ตามลำดับ โดยวิธีการวิเคราะห์อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D3175

- ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) คือปริมาณองค์ประกอบคาร์บอนที่มีอยู่ในชีวมวล ซึ่งปริมาณคาร์บอนคงตัวในชีวมวลสามารถนำมาเป็นข้อมูลเพื่อคาดคะเนองค์ประกอบอื่นๆ ของเชื้อเพลิงได้เช่นกัน เช่น ถ้ามีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูง ก็มีแนวโน้มที่จะให้ผลได้ของถ่านชาร์สูง เป็นต้น โดยใช้วิธีการคำนวณจากร้อยละกับผลต่างระหว่าง ความชื้น เถ้า และ ปริมาณสารระเหย (By difference)

- ค่าความร้อน (High Heating Value) คือค่าพลังงานความร้อนของเชื้อเพลิงเมื่อเทียบต่อ 1 หน่วยน้ำหนักหรือปริมาตรของเชื้อเพลิง โดยมีหน่วยเป็น kJ/kg, kcal/kg, Btu/lb หรือ kcal/litre เป็นต้น จะเป็นค่าที่บ่งบอกว่าชีวมวลนั้นๆ มีความเหมาะสมที่จะนำมาแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงหรือไม่ โดยวิธีการวิเคราะห์อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D2015

### 3) การศึกษาสมบัติทางเคมี (Chemical composition)

- การศึกษาองค์ประกอบของปริมาณธาตุในตัวอย่าง โดยการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) เพื่อหาปริมาณธาตุ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ (CHNS Elemental Analyzer) รุ่น Analyzer CHNS-932 ซึ่งเป็นเครื่องมือวิเคราะห์แบบอัตโนมัติสำหรับหาปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์ ส่วนธาตุออกซิเจนใช้วิธีการคำนวณโดยหาจากผลต่างของธาตุ
- การศึกษาองค์ประกอบของโลหะหนัก As, Ba, B, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Se, Zn และ Hg ในตัวอย่าง โดยใช้เครื่อง Atomic Absorption (AAS)

#### 3.5 การพัฒนาชุดเตาปฏิกรณ์พลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน

ในพัฒนาเตาปฏิกรณ์พลาสมาแก๊สซิฟิเคชันสำหรับใช้ในการทดสอบ ในงานวิจัยนี้จะพัฒนาต่อยอดจากต้นแบบเตาผลิตแก๊สชีวมวลชนิดไหลลง (Fixed bed Down-draft Gasifier) โดยมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

##### 1. ข้อมูลของต้นแบบเตาผลิตแก๊สชีวมวลแบบไหลลง (Fixed bed Down- draft Gasifier)

เตาผลิตแก๊สเชื้อชีวมวลแบบไหลลง หรือ เตาปฏิกรณ์ระบบแก๊สซิฟิเคชันมีหลักการทำงานคือ เชื้อเพลิงจะถูกลำเลียงสู่ถังพักเพื่อรอที่จะเข้าสู่เตาแก๊สซิฟิเคชัน หลังจากนั้นวัตถุดิบจะถูกปล่อยลงสู่เตาและจะทำให้เกิดปฏิกิริยาขึ้น 4 โซนคือ โซนอบแห้ง (Drying zone) โซนไพโรไลซิส (Pyrolysis zone) โซนการเผาไหม้ (Combustion zone) และ โซนรีดักชัน (Reduction zone) โพรดิวเซอร์แก๊ส (Producer gas) ที่เกิดใน Reduction Zone จะไหลผ่านทางออกด้านล่าง ไปสู่ระบบทำความสะอาดแก๊ส (Gas Cleaning Unit) คือ Cyclone, Scrubber และ Hydro-Cyclone ตามลำดับ จากนั้นแก๊สเชื้อเพลิงจะผ่านห้องเผาไหม้ (Burner) เพื่อนำพลังงานความร้อนไปใช้ประโยชน์ต่อไป

##### 2. การพัฒนาชุดเตาปฏิกรณ์พลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน

แผนผังของระบบการกำจัดขยะชุมชนเพื่อผลิตพลังงานโดยใช้เทคโนโลยีพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน โดยมี Concept Design คือ เชื้อเพลิงขยะ (RDF) จะถูกป้อนเข้าของเครื่องปฏิกรณ์ทางด้านบนหรือ ส่วนภายในเครื่องปฏิกรณ์จะเกิดการยิงกระแสไฟฟ้า (Electric Current) ผ่านก๊าซ เพื่อสร้าง Plasma Arc Field โดยจะให้ได้อุณหภูมิในเตาสูงกว่า 1,500 K ขยะมูลฝอยสัมผัสกับ Ionized Gas จะสลายตัวกลายเป็น Slag หรือเถ้าในรูป ของของเหลวอยู่บริเวณก้นของเครื่องปฏิกรณ์ ส่วนที่เป็นสารอินทรีย์ที่อยู่ในขยะมูลฝอยจะถูกเปลี่ยนรูปไปก๊าซที่เผาไหม้ได้ หรือ Producer gas ไปสู่ระบบทำความสะอาดแก๊ส (Gas Cleaning Unit) คือ Cyclone, Scrubber และ

Hydro-Cyclone ตามลำดับ จากนั้นแก๊สเชื้อเพลิงจะผ่านห้องเผาไหม้ (Burner) เพื่อนำพลังงานความร้อนไปใช้ประโยชน์ต่อไปต่อไป

### 3.6 ทดสอบสมรรถนะของระบบ (Operation Performance) และ ประเมินประสิทธิภาพการผลิตพลังงานของระบบ (System Efficiency)

ในขั้นตอนนี้ จะนำสภาวะในการเดินระบบในหัวข้อที่ผ่านมาเป็นข้อมูล เพื่อออกแบบการทดลอง ทั้งนี้การดำเนินการทดลอง ก็จะกระทำในลักษณะเดียวกัน เพื่อให้ได้ข้อมูล ของผลการทดสอบสมรรถนะของระบบ (Operation Performance) และ ประเมินประสิทธิภาพการผลิตพลังงานของระบบ (System Efficiency)

#### 1) การกระจายตัวของอุณหภูมิในเตา (Temperature profile)

ข้อมูลของอุณหภูมิในเตาจะแสดงผลทางระบบ Data logger ซึ่งสามารถเก็บบันทึกข้อมูลได้ตลอดเวลา (ในที่นี้จะเก็บทุกๆ 30 นาที) ที่ตำแหน่งความสูงต่างๆ ของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจำนวน 4 ตำแหน่ง ( $T_1$ - $T_4$ ) การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Temperature profile) จะสามารถนำไปใช้อธิบายความสม่ำเสมอของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง ตลอดระยะเวลาการเดินระบบ เนื่องจากอุณหภูมิมิมีผลต่อองค์ประกอบของแก๊สชีวมวล

#### 2) การวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง

ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงในงานวิจัยนี้จะทำการเก็บตัวอย่างแก๊สในตำแหน่ง (GC) ที่ผ่านระบบทำความสะอาดแล้ว โดยเก็บตัวอย่างมาไว้ในหลอดเก็บแก๊ส แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณ แก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ออกซิเจน และมีเทน ด้วยเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สโครมาโตกราฟี (Gas Chromatograph) ยี่ห้อ SHIMADZU GC-14B

สภาวะที่ใช้ของเครื่องมือ Gas Chromatograph (SIMADZU GC 14B)

Packing Material	:	Polapacked Q	:	Molecgular Sieve
Column Temperature	:	50 องศาเซลเซียส	:	50 องศาเซลเซียส
Injector Temperature	:	80 องศาเซลเซียส	:	80 องศาเซลเซียส
Detector Temperature	:	100 องศาเซลเซียส	:	100 องศาเซลเซียส
Carrier Gas	:	ฮีเลียม (Helium)		
Carrier Gas Flow Rate	:	50 ลิตรต่อนาที: 20 ลิตรต่อนาที		

#### 3) 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 ในการนำแก๊สชีวมวลไปใช้ผลิตไฟฟ้าโดยใช้เครื่องยนต์สันดาปภายใน

สำหรับการวัดปริมาณสารและฝุ่นละออง จะทำการเก็บตัวอย่างในตำแหน่งเดียวกับที่เก็บตัวอย่างแก๊สเชื้อเพลิง เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพการกำจัดสิ่งปนเปื้อน ของระบบทำความสะอาดแก๊ส โดยใช้ปั๊มลมดูดตัวอย่าง ในปริมาณที่กำหนด โดยทำการดักสาร และ ฝุ่นละออง ด้วย Condenser และ Filter ตามลำดับ และนำไปซึ่งคำนวณหาปริมาณที่เปลี่ยนแปลงไป

#### 4) การประเมินประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิง

วัตถุประสงค์ของการศึกษาในหัวข้อนี้เพื่อ ประเมินประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวมวล ของเชื้อเพลิงขยะชุมชน โดยจะใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาคำนวณ โดยใช้ความสัมพันธ์คือ (Bhattacharya, 2001)

โดยใช้ความสัมพันธ์ของเตาปฏิกรณ์พลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน คือ Minutillo et al (2009)

$$\begin{aligned} \text{Plasma Gasification Efficiency } (\eta_{pg}) &= [\text{Rate of energy carried by producer gas}]/[\text{Rate of energy supplied to reactor}] \\ &= [V_g \times \text{HHV}_g]/[(m_{\text{Fuel}} \times \text{HHV}_{\text{Fuel}}) + (W_{\text{torch}})] \end{aligned}$$

เมื่อ

$V_g$  คือ Flow rate of producer gas ( $\text{m}^3/\text{hr}$ )  
 $\text{HHV}_g$  คือ High heating value of producer gas ( $\text{MJ}/\text{m}^3$ )  
 $m_{\text{fuel}}$  คือ Fuel (RDF) consumption ( $\text{kg}/\text{h}$ )  
 $\text{HHV}_{\text{fuel}}$  คือ High heating value of RDF ( $\text{MJ}/\text{kg}$ )  
 $W_{\text{torch}}$  คือ power consumption of the plasma torch

5) ประเมินมลพิษสิ่งแวดล้อม (น้ำเสีย, กากขี้เถ้า) Proximate ,Ultimate Analysis (%C, %H, %N, %S element) โลหะหนัก (As, Ba, B, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Se, Zn และ Hg)

### 3.7 สถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล

ศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## บทที่ 4

### ผลการดำเนินงาน

#### 4.1 ข้อมูลทั่วไปและคุณสมบัติของเชื้อเพลิงขยะ

##### 4.1.1 ข้อมูลทั่วไป

จากการศึกษาข้อมูลเบื้องต้นของปริมาณ และองค์ประกอบของขยะ เพื่อนำมาใช้เป็นข้อมูลพิจารณาตัวแทนของขยะชุมชน สรุปได้ว่าขยะชุมชนที่เกิดขึ้นในแต่ละพื้นที่ของประเทศไทยมีคุณสมบัติไม่แตกต่างกัน คือมีความชื้นสูง โดยเฉลี่ย 53.25 % มีปริมาณสารที่เผาไหม้ได้ถึง 86.96% ซึ่งความชื้นมีผลให้ค่าความร้อนของขยะมูลฝอยมีค่าลดลง ในกรณีที่ปราศจากความชื้นจะส่งผลให้ค่าความร้อนสูงของขยะมูลฝอยโดยเฉลี่ยของประเทศไทย (HHV) มีค่าเฉลี่ยประมาณ 16,895 kJ/kg ซึ่งสามารถนำไปเป็นเชื้อเพลิงได้เป็นอย่างดี ดังข้อมูลที่แสดงใน ตารางที่ 17 ดังกล่าวสิ่งที่จะต้องดำเนินการนำขยะมูลฝอยมาใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตพลังงานนั้น คือ ขยะมูลฝอยต้องได้รับการปรับเสถียรภาพก่อน เพื่อลดความชื้นให้ได้ค่าพลังงานความร้อนที่สูงขึ้น และคัดแยกเอาเฉพาะส่วนที่เผาไหม้ได้มาใช้ประโยชน์ โดยการเตรียมให้เป็นเชื้อเพลิงขยะด้วยกระบวนการต่างๆ อย่างเหมาะสม ดังกล่าวในการศึกษานี้จึงใช้ขยะมูลฝอยจากการบำบัดขยะโดยวิธีทางกลและชีวภาพ (MBT) แบบ Composting plant และโรงงานเตรียมเชื้อเพลิงขยะ ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งกระบวนการนี้จะผลิตเชื้อเพลิงขยะที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสม สำหรับนำมาใช้ในโครงการ การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีพลาสติกสำหรับเป็นแหล่งความร้อนเสริมในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเพื่อกำจัดขยะชุมชน ได้ต่อไป

ตารางที่ 17 คุณสมบัติของขยะมูลฝอยในประเทศไทย

คุณสมบัติ / พื้นที่	ความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )	ความชื้น (ร้อยละ)	ความร้อนของขยะแห้ง HHV (kJ/kg)	ปริมาณถ้ำ (ร้อยละ)	ปริมาณสารที่เผาไหม้ได้ (ร้อยละ)
<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
พัทธยา	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

การศึกษาลักษณะทางกายภาพ และองค์ประกอบทางเคมีของเชื้อเพลิง เป็นสิ่งสำคัญที่จะประเมินว่าเชื้อเพลิงมีความเหมาะสมต่อการผลิตพลังงานโดยกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันมากน้อย



เพียงใด และอีกทั้งองค์ประกอบที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงนั้นจะทำให้สามารถอธิบายลักษณะมลพิษสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นได้อย่างชัดเจนมากขึ้น

#### 4.1.2 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงขยะ

##### 4.1.2.1 ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงขยะ

จากการเตรียมเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งประเภท 5 (RDF-5) โดยนำขยะชุมชนมาผ่านกระบวนการปรับเสถียรภาพด้วย เทคโนโลยี MBT (Mechanical and Biological Treatment) หรือ เทคโนโลยีการหมักแบบ Composting Plant ร่วมกับการใช้เครื่องจักรในหน่วยต่างๆ ที่เหมาะสม จากกระบวนการนี้จะทำให้ได้ขยะที่เสถียรเนื่องจากกระบวนการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ที่ใช้อากาศ ในระยะเวลาเพียง 20-30 วัน ช่วยลดปัญหาเรื่องกลิ่น และสามารถลดความชื้นของขยะเหลือไม่เกิน 30% (จากเดิมความชื้นประมาณ 55-65 %) ผลผลิตที่ได้มี 2 ส่วน คือ 1) อินทรีย์วัตถุที่เกิดจากการย่อยสลายขยะอินทรีย์จำพวกเศษอาหาร นำไปใช้เป็นสารปรับปรุงดินได้ 2) ขยะที่เผาไหม้ได้ (พลาสติก กระดาษ) สามารถผลิตเป็นเชื้อเพลิงขยะได้อย่างมีประสิทธิภาพสำหรับระบบผลิตพลังงานแต่ละประเภท

โดยในการวิจัยครั้งนี้ การผลิตเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง (RDF-5) จะนำขยะในส่วนของ 2 นี้ ไปบดละเอียดโดยใช้เครื่องบดละเอียดประเภท Hammer mill จากนั้นนำไปอัดเป็นแท่ง โดยใช้เครื่อง Pellet Machine ได้ RDF-5 ขนาด  $\phi$  15 mm x L 40-60 mm ความชื้นมีค่าไม่เกิน 15 % wb ดังแสดงในดังแสดงใน รูปที่ 15 เนื่องจากความชื้นของเชื้อเพลิงมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงของระบบ เชื้อเพลิงที่มีความชื้นสูงจะส่งผลให้ประสิทธิภาพของการผลิตแก๊สลดลง (Dogru, 2000; McKendry, 2002)



รูปที่ 15 ลักษณะทางกายภาพของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง (RDF-5)

**ตารางที่ 18 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	Ø 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

**4.1.2.2 ผลการศึกษาสมบัติทางเคมีของเชื้อเพลิงขยะ**

ผลการศึกษาสมบัติทางเคมีของเชื้อเพลิงขยะ ดังแสดงในตารางที่ 17

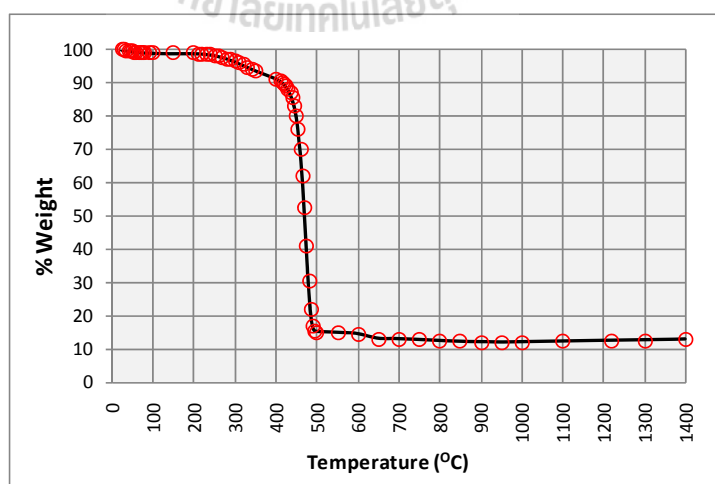
**ตารางที่ 19 ผลการศึกษาสมบัติทางเคมีของเชื้อเพลิงขยะ**

พารามิเตอร์	ผลวิเคราะห์
<b>สมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงขยะ</b>	
ขนาดเชื้อเพลิงโดยเฉลี่ย (mm x mm)	Ø 8 mm x L 30-40
Bulk density (kg/m <sup>3</sup> )	497.00
HHV (kJ/kg)	24,268
LHV (kJ/kg)	20,680
ความชื้น (%) Inherent Moisture Content	14.07
<b>สมบัติแบบประมาณของเชื้อเพลิงขยะ : Proximate analysis (%w/w)</b>	
Fixed Carbon	21.49
Volatile Content	61.36
Ash	13.08
<b>สมบัติแบบแยกธาตุของเชื้อเพลิงขยะ : Ultimate analysis (%w/w)</b>	
C	33.5
H	3.33
N	1.02
S	0.13
O	46.96
Alkali	0.58
Al	0.93
Ca	4.73
Cu	0.05
Fe	0.86
Mg	0.43
Si	2.02
Generic formula	CH <sub>2</sub> O

**หมายเหตุ :** ไม่พบการปนเปื้อนของโลหะหนักอันตราย As, Ba, Cd, Cu, Hg, Ni, Pb, Sb, Ti, V

ผลวิเคราะห์คุณสมบัติแบบประมาณและแบบแยกองค์ประกอบของธาตุ ของเชื้อเพลิง RDF-5 ดังแสดงในตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่าเชื้อเพลิงมีคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบหลัก คือ 33.5% และ 3.33 % ตามลำดับ บ่งชี้ถึงศักยภาพที่จะนำมาผลิตพลังงานได้ ปริมาณของธาตุในกลุ่มโลหะอัลคาไลน์ที่ตรวจพบอยู่ในระดับที่ต่ำ และไม่พบการปนเปื้อนของโลหะหนักอันตราย สำหรับผลวิเคราะห์อัตราการสลายตัวเมื่อได้รับความร้อน (Thermal decomposition) ของเชื้อเพลิง RDF-5 ในสภาวะบรรยากาศที่ใช้ ออกซิเจนเป็นตัวออกซิไดซ์ ด้วยเครื่อง TGA แนวโน้มของกราฟ ซึ่งพบว่าที่อุณหภูมิประมาณ 100 °C เชื้อเพลิงยังมีน้ำหนักเหลือ (%Weight) อยู่ค่อนข้างมาก (98.96%) หรือเริ่มมีการสูญเสียน้ำหนัก (%Weight loss) เล็กน้อย (1.04%) ตั้งข้อสังเกตว่าน้ำหนักที่หายไป คือการสูญเสียความชื้นที่มีอยู่ในเชื้อเพลิง RDF-5 สำหรับอุณหภูมิที่เริ่มมีการสลายตัวของเชื้อเพลิง RDF-5 คือ ที่อุณหภูมิประมาณ 400 °C โดยสังเกตได้ว่าเริ่มมีการสูญเสียน้ำหนักมากขึ้นเรื่อยๆ จนถึงที่อุณหภูมิประมาณ 500 °C จะเห็นได้ชัดเจนว่ามี %Weight ประมาณ 15.2% และมี %Weight loss เท่ากับ 84.8% ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่มีการสลายตัวสูงสุด ทั้งนี้เชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนของสารระเหยสูง สามารถเผาไหม้และสลายตัวได้สูงในช่วงอุณหภูมิประมาณ 400-500 °C จะมีพลาสติกและกระดาษเป็นองค์ประกอบหลัก [7], [8] ซึ่งเชื้อเพลิงขยะ RDF-5 ที่นำมาศึกษาในครั้งนี้มีองค์ประกอบของสารที่เผาไหม้ได้หลักคือพลาสติกและกระดาษ ผลการวิเคราะห์ Thermal decomposition ในงานวิจัยนี้จึงมีความสอดคล้องกับงานวิจัยอื่นๆ

นอกจากนี้ ในช่วงอุณหภูมิ 500-700 °C พบว่าน้ำหนักจะลดลงเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าสารอินทรีย์ในเชื้อเพลิง RDF-5 มีการสลายตัวด้วยความร้อนไปเกือบหมด และที่ระดับอุณหภูมิมากกว่า 700 °C สังเกตได้ว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก มี %Weight คงที่ประมาณ 13% ซึ่งแสดงว่าปริมาณที่เหลืออยู่นี้เป็นสารอนินทรีย์ ดังกล่าวสอดคล้องกับปริมาณ %ซีเถ้า ของเชื้อเพลิง RDF-5 (13.08%) ที่ได้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิมากกว่า 1,100 °C ค่า %Weight จะเพิ่มสูงขึ้น นั้นหมายความว่าปฏิกิริยาการเผาไหม้โดยใช้ ออกซิเจนเป็นตัวออกซิไดซ์ทำให้ได้องค์ประกอบของสารใหม่เกิดขึ้น ทั้งนี้ องค์ประกอบของซีเถ้าในเชื้อเพลิงขยะ RDF-5 จะถูกนำไปใช้เพื่อพิจารณาหาสัดส่วนการตั้งซีเถ้าออกจากเตาแก๊สซีฟเฟอร์ที่เหมาะสม เพื่อให้ไม่เกิดปัญหาซีเถ้าหลอมในเตาปฏิกรณ์



รูปที่ 16 Thermogravimetric Analysis (TGA)

## 4.2 การพัฒนาชุดพลาสมาอาร์คในระดับห้องปฏิบัติการ

ระบบพลาสมาอาร์คและชุดอุปกรณ์จ่ายกระแสในระดับห้องปฏิบัติการ ที่ได้พัฒนาขึ้น ยังไม่สามารถนำมาใช้งานเพื่อเป็นแหล่งความร้อนเสริมในเตาแก๊สซีไฟเออร์ได้ เนื่องจากยังมีข้อจำกัดด้านอุปกรณ์ และเครื่องมือในด้านอิเล็กทรอนิกส์ จากการวิจัยที่ผ่านมา ที่สามารถทำได้คือ การสร้างสถานะให้เกิดกระแสไฟฟ้าความต่างศักย์สูงและทำให้โมเลกุลแก๊สถูกกระตุ้นและเปลี่ยนแปลงเข้าสู่บริเวณที่มีพลังงานกระตุ้นสูงและปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปพลาสมา จากนั้นก็เป่าอากาศผ่าน เพื่อให้เกิดลำแก๊สไปในทิศทางที่ต้องการ ซึ่งจะมีลักษณะเหมือนกับการอาร์คในงานเชื่อมและการตัด โดยที่ความร้อนและอุณหภูมิที่เกิดขึ้นยิ่งต่ำมาก และไม่สามารถนำไปใช้งานได้จริง ลักษณะของวงจรระบบพลาสมาอาร์คและชุดอุปกรณ์จ่ายกระแสในระดับต้นแบบในห้องปฏิบัติการ ดังแสดงใน รูปที่ 17



รูปที่ 17 ลักษณะของวงจรระบบพลาสมาอาร์ค และชุด Power Supply ในระดับต้นแบบในห้องปฏิบัติการ

โดย ลักษณะการทำงานของระบบ คือ เป็นการทำงานของวงจร Half – Bridge converter เมื่อป้อนแหล่งจ่ายที่แรงดัน 150 Vdc ความถี่ 50 KHz จากวงจรตัวเก็บประจุ C1 และ C2 ต่อกันจะควบคุมทำให้แรงดันที่เก็บประจุไว้ที่ C1,C2 มีค่าเท่ากันและเป็นครึ่งหนึ่งของ  $V_{in}$  การทำงานของวงจรจะควบคุมให้ Q1 และ Q2 ผลัดกันทำงาน กล่าวคือ เมื่อให้ Q1 ทำงานจะมีกระแสไฟฟ้าไหลจาก C1 เข้า Q1 ผ่าน  $N_p$  และ C2 จะเก็บประจุไว้ เมื่อให้ Q2 ทำงานจะทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลจาก C2 เข้า  $N_p$  ผ่าน Q2 และ C1 จะเก็บประจุไว้ จากผลการทำงานดังกล่าวจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำกำลังไฟฟ้าไปยังขด  $N_{s1}$  และ  $N_{s2}$  เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ แล้วเข้าวงจรชุด Rectifier และ Filter เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงต่อไปตัวเก็บประจุ  $C_b$  (Blocking Capacitor) ต่อเข้าวงจรเพื่อชดเชยให้ได้รูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ให้มีความสมดุลระหว่างแรงดันไฟฟ้าด้านบวก และด้านลบ

ในขณะที่ด้านบนของขดลวดทุติยภูมิเป็น บวก(+) จะทำให้ไดโอด D1 ได้รับแรงดันไบแอสไปหน้า (forward bias) ไดโอด D1 จึงทำงานและมีผลให้ ตัวเก็บประจุ C1 จะเก็บ ประจุไว้มีค่าเท่ากับ  $V_m$  ในขณะที่ไดโอด D2 จะหยุดทำงาน ใน ครึ่งไซเคิลลบ (negative half-cycle) เมื่อด้านบนของขดลวดทุติยภูมิเป็น ลบ(-) จะทำให้ไดโอด D1 ได้รับ แรงดัน ไบแอสย้อนกลับ (reverse bias) ไดโอด D1 จึงหยุดทำงาน แต่ขณะนี้แรงดันไฟฟ้าที่สะสมไว้ใน ตัวเก็บประจุ C1 จะขั้วของมีค่าแรงดันไฟฟ้าต่อกันและเสริมกับ แรงดันที่เข้ามาที่ขดลวดทุติยภูมิ จึงมี ผลทำให้ไดโอด D2 ได้รับแรงดัน ไบแอสไปหน้า ไดโอด

D2 จึงทำงาน แล้วมีผลให้ตัวเก็บประจุ C2 จะ เก็บประจุไว้มีค่าเท่ากับ  $2V_m$  ซึ่งเป็นแรงดันไฟฟ้า กระแสตรง พร้อมทั้งจ่ายให้กับโหลด(Load) ต่อไป ชุดพลาสมาอาร์คในระดับห้องปฏิบัติการ ดังแสดงใน รูปที่ 18



ก. วงจร Half - Bridge Converter



ข. หม้อแปลงไฟฟ้าเอาต์พุต 110V จ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับวงจร Half – Bridge Converter



ค. CAPACITOR –TANK ทำหน้าที่เก็บประจุไฟฟ้าในการอาร์คพลาสมา



ง. วงจรบริดจ์สำเร็จรูปทำหน้าที่แปลงกระแสไฟฟ้าจาก AC ให้เป็น DC เพื่อที่จะต่อเข้ากับ Capacitor-Tank

### รูปที่ 18 อุปกรณ์ของวงจรระบบพลาสมาอาร์ค และชุดอุปกรณ์จ่ายกระแส ในระดับต้นแบบในห้องปฏิบัติการ

การพัฒนาาระบบพลาสมาอาร์ค ต้องมีส่วนประกอบหลักๆ คือ Gas Plasma Arc Torch และ Power Supply อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีระดับต้นแบบ ยังไม่สามารถผลิตได้ภายในประเทศ เนื่องจากข้อจำกัดด้านวัสดุ ที่ต้องทนอุณหภูมิได้สูงกว่า 2,000 องศาเซลเซียส และชุดอุปกรณ์ดังกล่าวมีต้นทุนที่สูงมากเนื่องจากเป็นเทคโนโลยีเฉพาะด้าน ในงานวิจัยนี้ จึงใช้ต้นแบบจึงจำเป็นต้องอาศัยผู้ประกอบการที่มีความเชี่ยวชาญทางด้านดังกล่าวโดยเฉพาะ คือ บริษัท High Temperature Technologies Corp. (HTTC) ประเทศแคนาดา ซึ่งเป็นผู้ประกอบการที่มีความเชี่ยวชาญด้านการพัฒนาระบบพลาสมาอาร์ค และมีอุปกรณ์ที่มีมาตรฐานโดยเฉพาะ ซึ่งถือเป็นระบบเตาปฏิกรณ์พลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน ซึ่งในงานวิจัยนี้

ในการทดสอบ จะใช้ระบบปฏิกรณ์พลาสมาแก๊สซิฟิเคชันในระดับต้นแบบ ของศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ดังจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

#### 4.2.1 ระบบปฏิกรณ์พลาสมาแก๊สซิฟิเคชันในระดับต้นแบบ ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้

ในงานส่วนนี้ อาศัยต้นแบบเทคโนโลยีพลาสมาอาร์ค (Plasma arc technology) ภายใต้อการพัฒนาโดย บริษัท High Temperature Technologies Corp. (HTTC) ประเทศแคนาดา เป็นบริษัทที่ดำเนินการวิจัยและพัฒนาด้านพลาสมาอาร์คกับการกำจัดของเสียอันตรายและการผลิตพลังงานทดแทน มีผู้เชี่ยวชาญด้าน Plasma technology และ Plasma physics ทั้งนี้ โดยการประสานความร่วมมือด้านงานวิจัย ระหว่าง ศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีกับสถาบัน 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

#### ตารางที่ 20 คุณลักษณะหัวพลาสมาสำหรับนำมาใช้ในงานวิจัยนี้

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

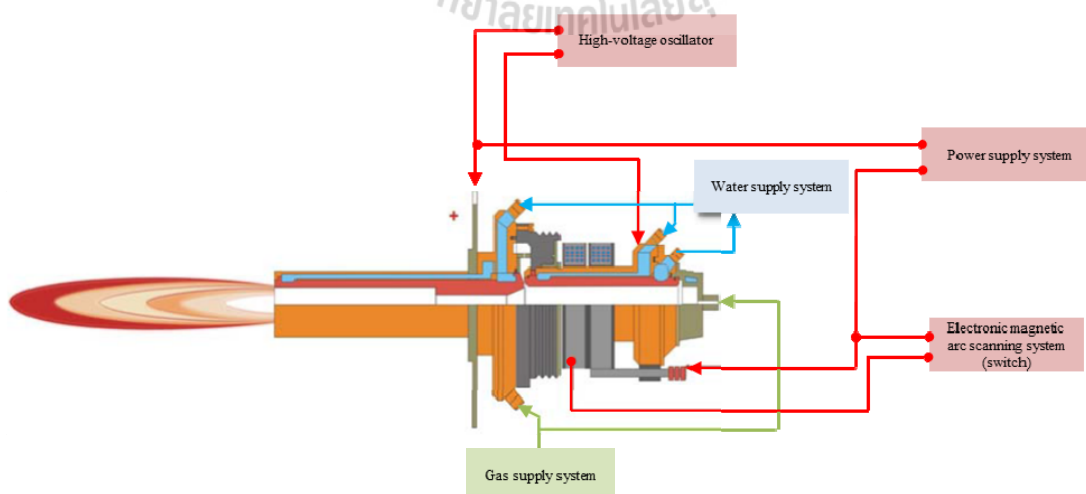
##### 1) ชุดหัวพลาสมาอาร์ค (Plasma arc torch)

- 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

- ชูตขั้วไฟฟ้า (Electrode) ทำจากวัสดุทองแดง (CU) ประกอบด้วย ขั้วบวก (+) และขั้วลบ (-) จ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด 50 kW ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุด 300 V กระแสไฟฟ้าสูงสุด 250 A โดยใช้กับระบบไฟฟ้ากระแสตรง (Direct current : DC)
- ชูตหัวฉีดแก๊ส (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 หุ้มฉนวนทั้งชูตจนถึงบริเวณทางออกของแก๊ส (Plasma gases outlet)
- ชูตจุดประกายไฟฟ้า (Spacer) มีการต่อเชื่อมชูตจุดประกายไฟฟ้าเข้ากับส่วนหัวพลาสมาและระบบขั้วไฟฟ้า (Electrode) ด้วยควบคุมระบบควบคุม (Control block และ block of ignition) โดยการทำงานจะใช้การควบคุมด้วยเจ้าหน้าที่ (Manual control mode)
- การเดินระบบของชูตหัวพลาสมาอาร์ค (Gas plasma arc torch) เป็นระบบควบคุมด้วยเจ้าหน้าที่ (Manual control system) และมีการติดตั้งอุปกรณ์ วงจรไฟฟ้า ระบบควบคุม ให้แล้วเสร็จ และสามารถใช้งานได้เป็นอย่างดี

## 2) ระบบจ่ายกระแสไฟฟ้าพร้อมระบบควบคุม

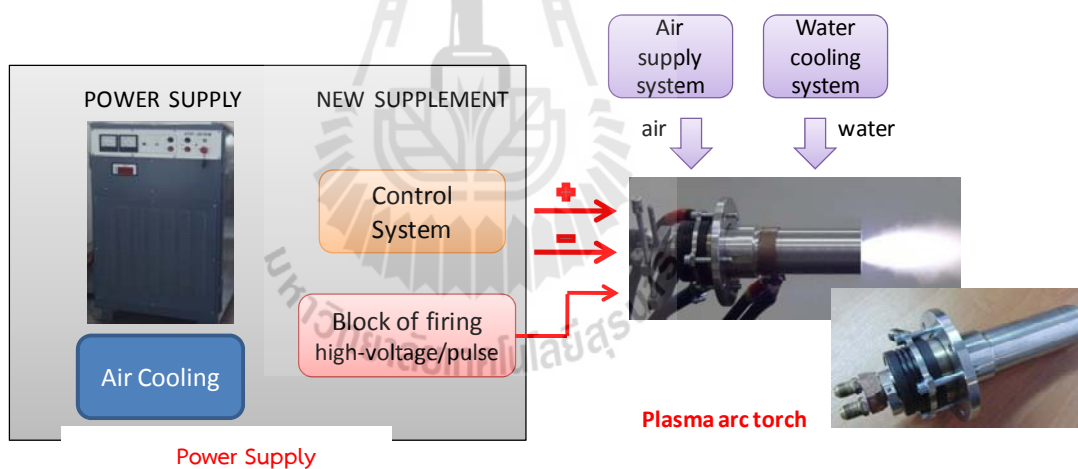
ชุดอุปกรณ์จ่ายกระแส (Power supply) สำหรับใช้กับระบบแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternative current : AC) ซึ่งเป็นระบบไฟแบบ 3 เฟส กระแสไฟฟ้า 250 A แรงดัน 380 V และความถี่ 50 Hz และพร้อมติดตั้งอุปกรณ์ตัวเก็บประจุ (Capacitor) ขนาดใหญ่ และ หม้อแปลงกระแสไฟฟ้า (Tranformer) ที่สามารถเปลี่ยนกระแสไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ให้มีความต่างศักย์สูงขนาด 40,000 V ทั้งนี้ แผนผังการทำงานของหัวพลาสมาอาร์ค (Plasma arc torch) ดังแสดงในรูปที่ 19 สำหรับชุดระบบพลาสมาอาร์คและอุปกรณ์จ่ายกระแสไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 20 และลักษณะการทำงานของระบบพลาสมาอาร์คและอุปกรณ์จ่ายกระแสไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 21



รูปที่ 19 แผนผังของหัวพลาสมาอาร์ค (plasma arc torch)



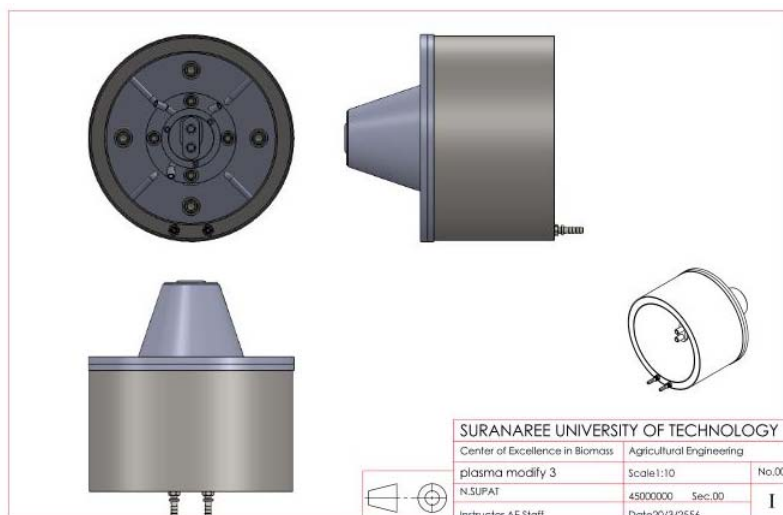
รูปที่ 20 ชุดระบบพลาสมาอาร์คและอุปกรณ์จ่ายกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 21 ลักษณะการทำงานของระบบพลาสมาอาร์คและอุปกรณ์จ่ายกระแสไฟฟ้า

หัวพลาสมาจะ จะถูกนำไปประกอบเข้ากับเตาปฏิกรณ์ แต่การติดตั้งชุดพลาสมาอาร์คในเตาปฏิกรณ์ที่มีความร้อนสูง จำเป็นต้องออกแบบระบบ Plasma jacket หรือชุดครอบหัวพลาสมา ซึ่งอุปกรณ์ป้องกันความร้อน ที่จะก่อให้เกิดความเสียหายกับ ระบบสายไฟ ท่อแก๊ส และท่อน้ำ เมื่อเรานำชุดนี้ประกอบเข้าไปในเตาปฏิกรณ์ที่มีความร้อนสูง ชุดครอบหัวพลาสมาได้ออกแบบให้สามารถระบายความร้อนที่แผ่ออกมาจากตัวเตาได้โดยใช้น้ำไหลผ่าน ดังแสดงในรูปที่ 22 และ รูปที่ 23





รูปที่ 22 Plasma Jacket หรือชุดครอบหัวพลาสมา



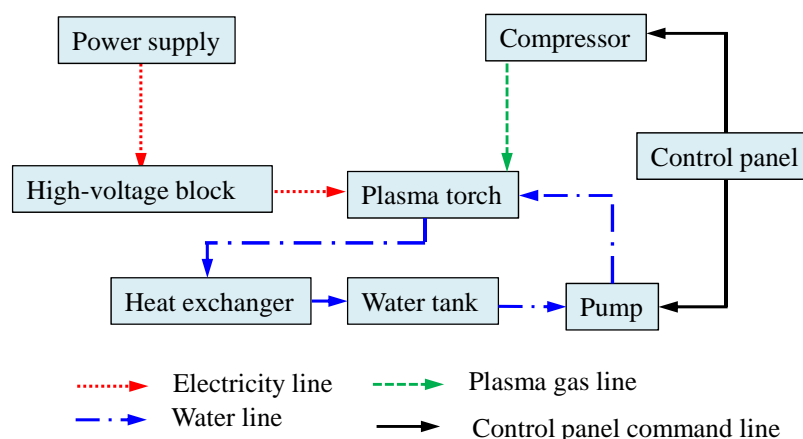
(ก) หัวพลาสมาที่ประกอบชุดครอบ

(ข) การทดสอบหัวพลาสมาแบบมีชุดครอบ

รูปที่ 23 ลักษณะชุดครอบหัวพลาสมา (Plasma Jacket)

### 3) การพัฒนาอุปกรณ์สำหรับนำหัวพลาสมาอาร์คไปใช้งานในเชิงความร้อน

ทั้งนี้ การนำหัวพลาสมาอาร์ค มาใช้งานทางความร้อนกับระบบเตาปฏิกรณ์ระบบแก๊สซิฟิเคชัน จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้อง ติดตั้งอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้สามารถใช้งานได้อย่างต่อเนื่อง โดยได้พัฒนาและติดตั้งระบบเพิ่มเติม ได้แก่ ระบบผลิตน้ำหล่อเย็นหัวพลาสมา (Cooling water) ระบบปั้มน้ำสำหรับระบบระบายความร้อนของหัวพลาสมา รายละเอียดของระบบและอุปกรณ์ต่างๆ ดังแสดงใน รูปที่ 24 และรายละเอียดมีดังต่อไปนี้



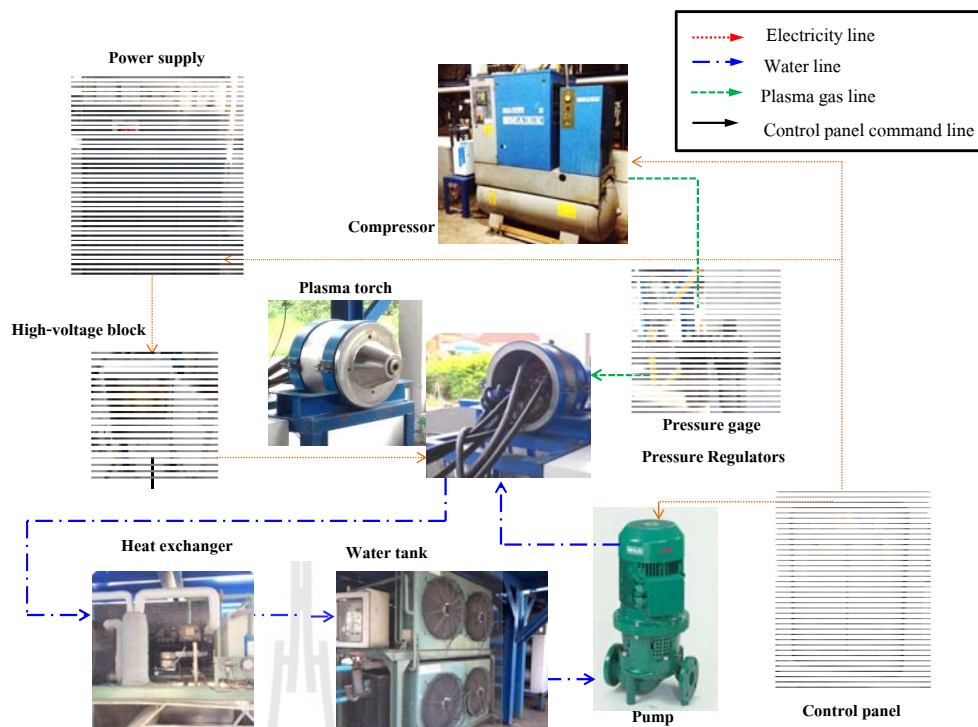
รูปที่ 24 แผนผังอุปกรณ์สำหรับควบคุมการทำงานของหัวพลาสมาอาร์ค

ถังพักน้ำ (Water tank) อุปกรณ์ผลิตน้ำหล่อเย็น (Cooling water) และ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) เพื่อใช้กับการลดอุณหภูมิของชุดหัวพลาสมาอาร์ค โดยจะติดตั้งอุปกรณ์ พร้อมระบบควบคุมและระบบแสดงอุณหภูมิ น้ำ สำหรับควบคุมอุณหภูมิของน้ำเข้า หัวพลาสมาอาร์ค (Inlet plasma arc torch) ไม่เกิน 30 °C และอุณหภูมิของน้ำออกจากระบบ (Outlet plasma arc torch) ไม่เกิน 55 °C เนื่องจากเมื่อมีการใช้งานต่อเนื่องของหัวพลาสมาจะมีความร้อนสูง การลดอุณหภูมิให้กับหัวพลาสมา อันเป็นป้องกันการความเสียหายต่อระบบสายไฟ และอุปกรณ์ภายในหัวพลาสมา

ปั้มน้ำสำหรับระบบระบายความร้อนของหัวพลาสมา (Water cooling supply system) ที่มีความดันไม่ต่ำกว่า 0.6 MPa ให้อัตราการไหลของน้ำสูงสุด 500 g-water/sec

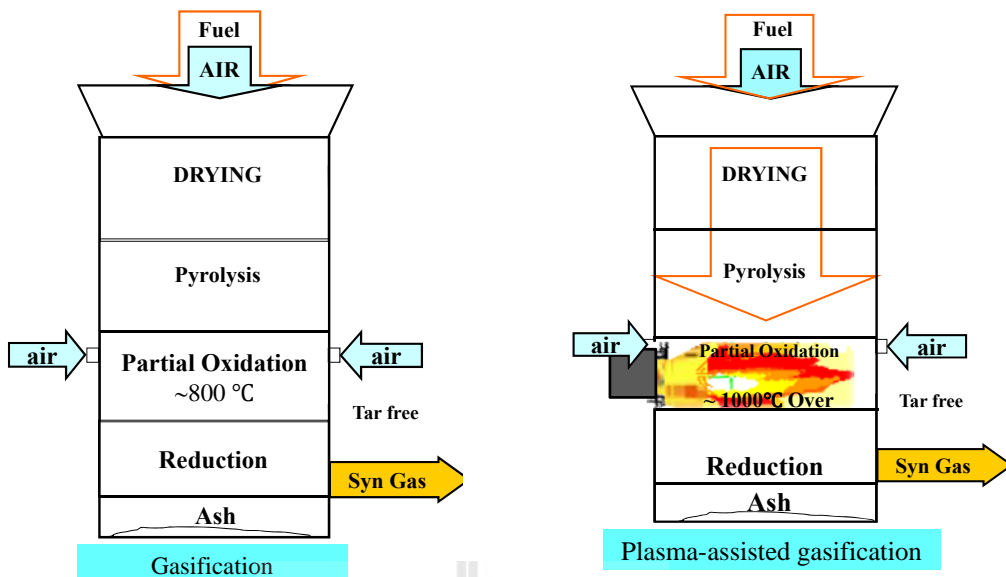
เครื่องอัดอากาศ (Air compressor) สำหรับหัวฉีดแก๊ส (Gas injector) ของชุดหัวพลาสมาอาร์ค โดยจะสามารถให้ Carrier gas ทำงานกับระบบได้ ที่แรงดันของแก๊สได้ไม่ต่ำกว่า 1 MPa (10 Bar) และให้อัตราการไหลของ Carrier gas สูงสุดที่ระดับ 8 g-carrier gas/sec

ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อควบคุมการทำงานของหัวพลาสมาอาร์ค สำหรับนำมาประยุกต์ใช้งานวิจัยนี้ ดังแสดงใน รูปที่ 25



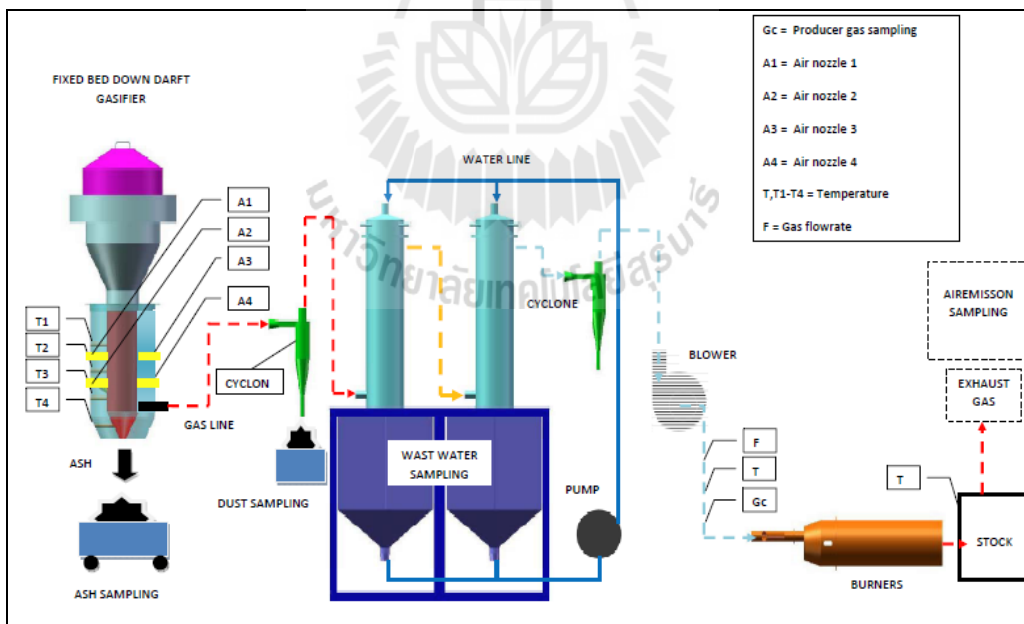
รูปที่ 25 การติดตั้งชุดอุปกรณ์เพื่อควบคุมการทำงานของหัวพลาสมาอาร์ค

ในพัฒนาเตาปฏิกรณ์พลาสมาแก๊สซิฟิเคชันสำหรับการทดสอบ ในงานวิจัยนี้ จะพัฒนาต่อยอดจากเตาแก๊สซิไฟเออร์แบบไหลลง (Fixed-bed downdraft gasifier) ของศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล มีกำลังการผลิตขนาด 20 kWe หรือ 360 kWth โครงสร้างทำจากวัสดุเหล็กเหนียวหนา 5 mm เส้นผ่านศูนย์กลาง 300 mm ภายในหล่อด้วยปูนทนไฟทนความร้อนได้ 1,500 มีอุปกรณ์ประกอบและระบบควบคุมต่างๆ โดยมีการจัดวางระบบ คือ เตาปฏิกรณ์ ชุดไซโคลอน ชุดสกรับเบอร์ ระบบกรอง และหัวเผาไหม้ แก๊สสังเคราะห์ ในส่วนของการพัฒนาระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชันในงานวิจัยนี้ จะทำการปรับปรุงเตาปฏิกรณ์ของระบบแก๊สซิฟิเคชัน โดยนำพลาสมาอาร์คช่วยในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Plasma-assisted gasification) โดยการเพิ่มช่องในเตาปฏิกรณ์เพื่อติดตั้งหัวพลาสมา ประกอบเข้าไป โดยในงานวิจัยนี้ จะทำการติดตั้งหัวพลาสมาอาร์คเข้าไปในโซนการเผาไหม้ (Combustion zone) โดยมีวัตถุประสงค์ เพื่อให้ความร้อนจากพลาสมาอาร์คเข้าไปเป็นความร้อนช่วยสำหรับกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิง และให้ความร้อนใน Combustion zone สูงขึ้น ดังแสดงใน รูปที่ 26



รูปที่ 26 ลักษณะของเตา Gasification และ Plasma-assisted gasification

ทั้งนี้ ส่วนประกอบที่สำคัญของระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน ที่นำมาใช้ในงานวิจัย นี้ มีส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน คือ 1) ชุดเตาปฏิกรณ์ 2) ระบบทำความสะอาดแก๊ส 3) ระบบบำบัดน้ำเสีย และ 4) ชุดอุปกรณ์และระบบควบคุมการนำแก๊สไปใช้ประโยชน์ โดยแผนผังกระบวนการ แสดงไว้ใน รูปที่ 27 และ รูปที่ 28



รูปที่ 27 แผนผังกระบวนการของระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน



รูปที่ 28 ระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน มีกำลังการผลิตขนาด 20 kWe ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

### 1) เตาปฏิกรณ์ (Gasifier)

เตาปฏิกรณ์ชนิด (Open-top) Fixed bed downdraft gasifier ภายนอกทำจากวัสดุโลหะม้วนกลม ภายในบุด้วยฉนวนกันความร้อนทำจากวัสดุทนความร้อนทำหน้าที่เก็บรักษาอุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้และลดการสูญเสียความร้อน ด้านบนของเตาประกอบด้วย Hopper feeder เพื่อรับเชื้อเพลิง และมีฝาปิด มีช่องไว้ซีลน้ำ (Seal) ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้อากาศเข้า-ออกจากเตาขณะ Shut down ระบบ ด้านข้างของเตาจะมีทางเข้าของอากาศหลายส่วนเพื่อป้อนอากาศและควบคุมอากาศเข้าสู่เตาสำหรับใช้ในการเผาไหม้ ด้านล่างของเตามีระบบลำเลียงถ่านที่ได้จากการเผาไหม้ออกจากเตา ระบบลำเลียงถ่านจากเตาด้วยมอเตอร์และสกรูลำเลียง

ในกรณีของการใช้งานเป็นเตาปฏิกรณ์พลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน จะติดตั้งหัวพลาสมาอาร์ค เข้าไปภายในเตาปฏิกรณ์ โดยติดตั้งในโซนการเผาไหม้ (Combustion zone) เพื่อให้ความร้อนจากพลาสมาอาร์ค เข้าไปเป็นความร้อนช่วยในโซนของการเผาไหม้

หลักการทำงานของระบบเตาปฏิกรณ์สำหรับ 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 ไสโคลนดักฝุ่น (Cyclone) ระบบสครีบบอร์ (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

2. Water scrubber และ Chiller scrubber เป็นอุปกรณ์ดักฝุ่นและอนุภาคขนาดเล็กออกจากแก๊สเชื้อเพลิงโดยใช้ละอองน้ำที่อุณหภูมิประมาณ 32 °C ส่วน Chiller scrubber เป็นอุปกรณ์ดักฝุ่นและน้ำมันดิน (Tars) โดยใช้น้ำเย็นที่อุณหภูมิประมาณ 10 °C ซึ่งไอระเหยจากยางเหนียวของน้ำมันดินจะถูกควบแน่นลงมาพร้อมกับน้ำ ลักษณะของ Water scrubber และ Chiller scrubber

3. Fabric filter unit ทำหน้าที่ดักฝุ่นอนุภาคขนาดเล็ก และความชื้นครั้งสุดท้าย หลังจากผ่านกระบวนการต่างๆ ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยฝุ่นอนุภาคขนาดเล็กที่ผ่านเข้ามาจะถูกดักจับไว้โดยถุงกรองซึ่งสามารถกรองอนุภาคที่มีขนาดเล็กได้มากถึง 100 ไมครอน เพื่อให้ได้แก๊สที่สะอาดสามารถนำไปใช้กับเครื่องยนต์สันดาปภายในได้

### 3) ถังพักน้ำและระบบบำบัดน้ำเสีย

ถังพักน้ำ หรือ ระบบ Buffer tank ถูกออกแบบสำหรับรองรับน้ำจากกระบวนการทำความสะอาดแก๊สเชื้อเพลิง Water scrubber และ Chiller scrubber ซึ่งมีความจุประมาณ 10 ลูกบาศก์เมตรในกรณีที่ต้องการบำบัดน้ำเสีย จะหมุนเวียนน้ำจาก Buffer tank แล้วบำบัดโดยใช้วิธีทางเคมี (Chemical treatment) โดยใช้หลักการโคแอกูเลชัน (Coagulation) ที่ถัง Flocculation tank

### 4) พัดลมดูด และชุดทดสอบการลุกไหม้ของแก๊สเชื้อเพลิง

พัดลมดูด (Gas blower) เป็นอุปกรณ์สำหรับดูดแก๊สเชื้อเพลิง ที่ผ่านการทำความสะอาดแล้วจาก ระบบทำความสะอาดแก๊ส เพื่อไปใช้ประโยชน์ต่อไป ในงานวิจัยนี้ จะนำแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิต ผ่านเข้าไปยังชุดทดสอบพัดลมการลุกไหม้ของแก๊สเชื้อเพลิง (Start-up flare) และทำการเผาระบายแก๊สทิ้ง



ก. ไซโคลนดักฝุ่น (Cyclone collector)



ข. Water scrubber and chiller scrubber



ค. ระบบกรอง (Fabric filter unit)



ง. ถังรวบรวมน้ำเสีย (Buffer tank)



จ. พัดลมดูด (Gas blower)



ฉ. ชุดทดสอบการลุกไหม้ (Start-up flare)

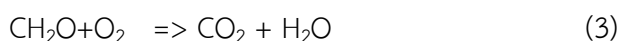
รูปที่ 29 ส่วนประกอบที่สำคัญของระบบแก๊สซิฟิเคชันและพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน

## 4.2 การทดสอบสมรรถนะของระบบและการประเมินประสิทธิภาพการผลิตพลังงานของระบบ

### 4.3.1 การศึกษาอัตราส่วนสมมูล (Equivalence Ratio: ER) ของระบบ Fixed-bed downdraft gasifier

ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification Process) การเผาไหม้ในเตาปฏิกรณ์จะมีอยู่ 4 สถานะหลักคือ Drying Zone, Pyrolysis zone, Oxidation Zone และ Reduction Zone ทั้งนี้ปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่เกิดในเตาปฏิกรณ์จะเกิดในสถานะ Partial Oxidation หรือที่เรียกว่าปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วน

ดังกล่าว จึงจำเป็นต้องควบคุมสถานะให้มีการเผาไหม้สมบูรณ์เพียงบางส่วนในเตาปฏิกรณ์ โดยที่ Stoichiometric value ของระบบ Gasification process จะมีค่าเป็น  $\frac{1}{4}$  ของ Theoretical Combustion จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางด้านเคมีของเชื้อเพลิง RDF-5 ( $\text{CH}_2\text{O}$ ) สามารถนำมาวิเคราะห์ค่า Theoretical Combustion ได้ดังสมการที่ (3)



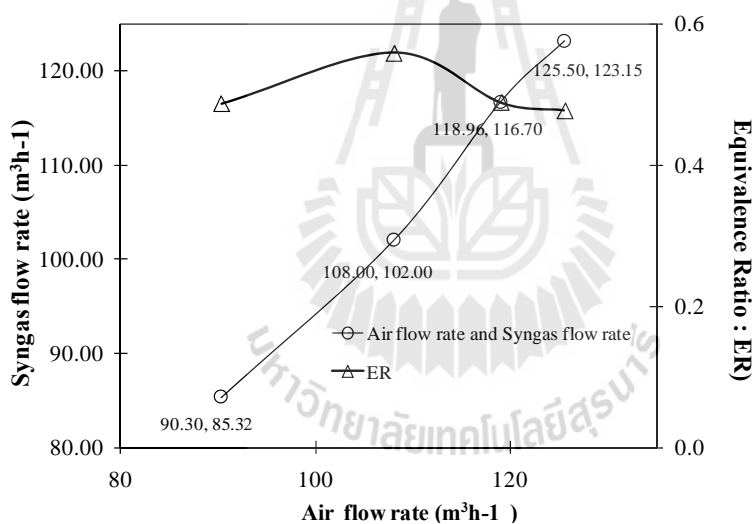
ตามสมการที่ (3) ในการเผาไหม้เชื้อเพลิง RDF-5 สมบูรณ์ต้องใช้ออกซิเจน 32 กรัม ต่อเชื้อเพลิง 30 กรัม หรือมีค่าสัดส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่เผาไหม้พอดีตามทฤษฎี (AF-ratio

stoichiometric) คือ 1.07 ดังกล่าว ถ้าพิจารณา ในทางทฤษฎี Stochiometric value ของระบบ Gasification ที่ควรจะเป็น  $\frac{1}{4}$  ของ Theoretical Combustion จะต้องมีค่าประมาณ 0.27

ทั้งนี้ ผลการศึกษาเพื่อหาอัตราส่วนสมมูล (Equivalence Ratio : ER) ของระบบ Fixed-bed downdraft gasifier ใน 4 สถานะที่ทำการทดสอบเดินระบบ ดังแสดงในรูปที่ 4 พบว่าค่า ER ใน 3 สถานะ มีค่าใกล้เคียงกัน คือ อยู่ในช่วง 0.48-0.49 ทั้งนี้ในสถานะที่ 2 จะมี ER สูงมากกว่าทุกสถานะ คือ มีค่า 0.56 ในทางทฤษฎี ค่า ER สูง จะเป็นตัวชี้วัดว่าในสถานะที่เดินระบบนั้นมีการป้อนออกซิเจนเข้าระบบมากกว่าความต้องการของการเผาไหม้สำหรับ Gasification Process ซึ่งหากมีปริมาณออกซิเจนมากเกินไปในสัดส่วนของแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตได้ จะส่งผลให้ค่าความร้อนของแก๊สสังเคราะห์ลดต่ำลง

อย่างไรก็ดี ค่า ER ก็เป็นตัวบ่งชี้ว่าเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ใน Oxidation Zone สูง โดยค่า ER ที่เพิ่มขึ้นนั้นหมายความว่าอุณหภูมิใน Oxidation Zone สูงขึ้น ซึ่งส่งผลดีคือความร้อนจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นสามารถกำจัดและลดปริมาณทาร์ (Tar) ที่เกิดมาจาก Pyrolysis zone ได้ [9] ทั้งนี้ค่า ER ต้องมีค่าไม่เกิน 1 เนื่องจากค่า ER เท่ากับ 1 คือการเผาไหม้ในสถานะ Complete combustion)

จากผลการทดลองทั้ง 4 สถานะเปรียบเทียบกับค่าในทางทฤษฎี แล้วจะเห็นได้ว่าการเดินระบบทั้ง 4 สถานะ ยังเป็นสถานะของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันที่ควบคุมให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วน (Partial Oxidation)



รูปที่ 30 อัตราส่วนสมมูล (ER) ทั้ง 4 สถานะ

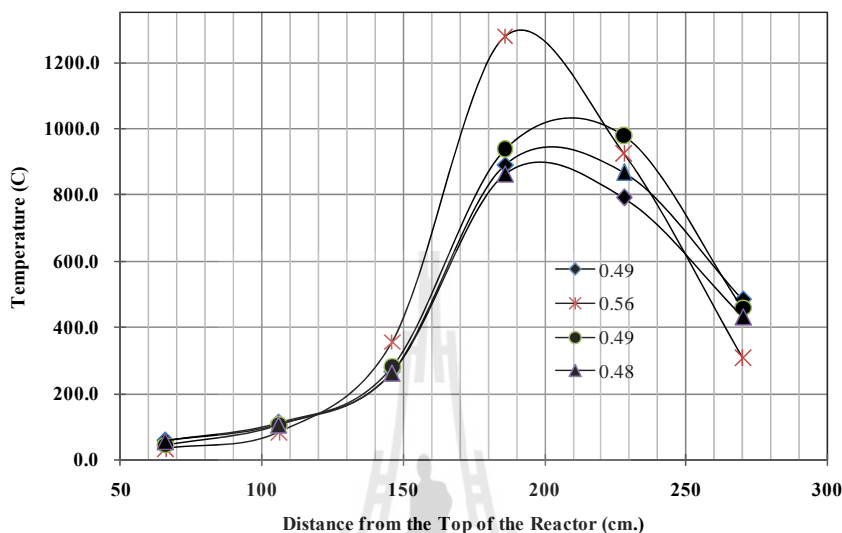
#### 4.3.2 การกระจายตัวของอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ (Temperature profile)

การศึกษาลักษณะของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในเตาปฏิกรณ์ ของการเดินระบบทั้ง 4 สถานะ ดังแสดงใน รูปที่ 5 ซึ่งสอดคล้องกับค่าอัตราส่วนสมมูล (Equivalence Ratio: ER) ของระบบ Fixed-bed downdraft gasifier คือ ที่สถานะการเดินระบบที่ 2 มีค่า ER สูงกว่าทุกสถานะ คือ 0.56 ซึ่งการเพิ่มสูงขึ้นของค่า ER มีผลให้อุณหภูมิในช่วง Oxidation zone เพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากการป้อนปริมาณออกซิเจนเพิ่มขึ้นใน Oxidation Zone นั้นเอง

นอกจากนี้ยังพบว่าสถานะที่ 2 ซึ่งอุณหภูมิที่ Oxidation Zone มีค่าสูงกว่า 1,200°C ทำให้เกิดปัญหาการหลอมตัวของซีลระหว่างเตาปฏิกรณ์ ดังกล่าวเมื่อเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์



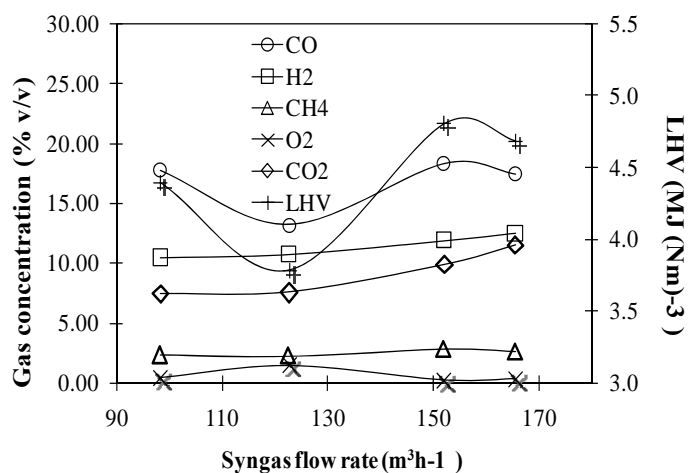
Thermal decomposition ของเชื้อเพลิง RDF-5 โดยใช้เครื่อง TGA จะพบว่าที่อุณหภูมิมากกว่า 1,100 °C ขึ้นไปสารอินทรีย์จะถูกเผาไหม้ไปทั้งหมด และพบว่า %Weight จะมีค่าเพิ่มขึ้น นั้นหมายความว่าปฏิกิริยาการเผาไหม้โดยใช้ออกซิเจนเป็นตัวออกซิไดซ์ทำให้ได้องค์ประกอบของสารใหม่เกิดขึ้น อาทิ องค์ประกอบของอัลคาไลน์โลหะ ดังกล่าวสรุปได้ว่าการเดินระบบอย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ สูงกว่า 1,000 °C จะส่งผลให้เกิดการหลอมตัวของซีเมนต์ (Slag Melting) ซึ่งเป็นปัญหาที่จำเป็นต้องทำการ Shut Down ระบบในที่สุด



รูปที่ 31 ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ (Temperature profile)

#### 4.3.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง

ในการเดินระบบทั้ง 4 สภาวะ พบองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ที่เผาไหม้ได้ (Combustible Gas) คือ  $H_2$ , CO และ  $CH_4$  ในสัดส่วนโดยปริมาตรเฉลี่ยเท่ากับ 10-12%, 27-30% และ 2.2-3.1% ดังแสดงใน รูปที่ 6 ค่าความร้อนของแก๊สสังเคราะห์มีค่าเฉลี่ยประมาณ 4.4 MJ/Nm<sup>3</sup> ซึ่งจัดเป็นแก๊สสังเคราะห์ที่สามารถนำไปใช้ผลิตพลังงานความร้อนได้ [10] ทั้งนี้ที่สภาวะทดสอบที่ 2 เห็นได้ว่ามีองค์ประกอบของ  $H_2$  และ CO ต่ำกว่าที่สภาวะอื่นๆ สาเหตุอาจเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์ใน Reduction Zone ซึ่งเป็นผลมาจากในปฏิกิริยาการเผาไหม้ใน Oxidation Zone มีการป้อนออกซิเจนสูงมีผลให้เกิดการเผาไหม้มากขึ้นและสูญเสียองค์ประกอบของ C ที่จะมาทำปฏิกิริยากับ  $CO_2$  และ  $H_2O$  ใน Reduction Zone เพื่อให้เกิด  $H_2$  และ CO จึงลดลง ทั้งนี้สอดคล้องกับ % $O_2$  ในองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ที่มีปริมาณสูง และค่าความร้อนของแก๊สสังเคราะห์ที่ได้มีค่าต่ำกว่าสภาวะอื่นๆ คือ 3.79 MJ/Nm<sup>3</sup>



รูปที่ 32 องค์ประกอบและค่าความร้อนของแก๊สสังเคราะห์ทั้ง 4 สภาวะ

#### 4.4.4 ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Gasification efficiency)

ผลการประเมินประสิทธิภาพของระบบในการทดสอบเดินระบบทั้ง 4 สภาวะ ดังแสดงในตารางที่ 4 พบว่าที่อัตราการไหลหรือที่อัตราการผลิตแก๊สสังเคราะห์ที่เพิ่มสูงขึ้นมีผลให้มีอัตราการใช้เชื้อเพลิงขยะ RDF-5 มากขึ้น แต่ที่อัตราการไหลสูงสุดคือ 123.15 m<sup>3</sup>/hr ให้ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สสังเคราะห์ ( $\eta_g$ ) ต่ำกว่าที่การเดินระบบที่ให้อัตราการไหลของแก๊สสังเคราะห์เท่ากับ 116.70 m<sup>3</sup>/hr ในการเดินระบบทั้ง 4 สภาวะ มีปริมาณของทาร์และฝุ่นในแก๊สสังเคราะห์ต่ำกรณีดังกล่าวนี้สามารถนำแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตได้ไปใช้ประโยชน์เพื่อผลิตไฟฟ้าโดยเครื่องยนต์สันดาปภายในได้ [11] ทั้งนี้เมื่อพิจารณาจากข้อมูลทั้งหมด สามารถสรุปได้ว่า ในสภาวะที่ 3 เป็นสภาวะของการเดินระบบที่เหมาะสมมากที่สุดคือ ที่ค่า ER เท่ากับ 0.49 โดยมีอัตราการใช้เชื้อเพลิง 63 kg สามารถผลิตแก๊สสังเคราะห์ได้เท่ากับ 116.7 m<sup>3</sup>/hr และคุณภาพของแก๊สสังเคราะห์มีความใกล้เคียงกับงานวิจัยอื่นๆ [3] โดยมีองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตได้ ประกอบด้วย CO, H<sub>2</sub> และ CH<sub>4</sub> ในสัดส่วนโดยปริมาตรเฉลี่ยเท่ากับ 18.37 %, 11.92 % และ 2.87% ตามลำดับ ค่าความร้อนของแก๊สสังเคราะห์มีค่าเท่ากับ 4.81 MJ/Nm<sup>3</sup> คิดเป็นประสิทธิภาพการผลิตแก๊สสังเคราะห์ได้ เท่ากับ 46.25% ประเมินเป็นค่าพลังงานความร้อนได้เท่ากับ 167.39 kWth ซึ่งแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตได้สามารถนำไปใช้ผลิตพลังงานได้ ทั้งในรูปแบบการผลิตไฟฟ้าโดยเครื่องยนต์สันดาปภายในและพลังงานความร้อน ซึ่งในกรณีของการนำแก๊สสังเคราะห์ไปใช้เพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าควรมีค่าความร้อนมากกว่า 4.2 MJ/Nm<sup>3</sup> การนำเชื้อเพลิงขยะ RDF-5 มาเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานทดแทนในรูปแบบแก๊สสังเคราะห์โดยกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน จะให้ประสิทธิภาพต่ำกว่าชีวมวลประเภทไม้โตเร็วและเศษวัสดุชีวมวลเหลือใช้ทางการเกษตรเพียงเล็กน้อย ซึ่งในกลุ่มชีวมวลประเภทดังกล่าวนี้จะมี  $\eta_g$  อยู่ในช่วง 53.8-79.3 %

ตารางที่ 21 คุณลักษณะหัวพลาสติกสำหรับนำมาใช้ในงานวิจัยนี้

Gas flow rate (m <sup>3</sup> /hr)	ER	m <sub>Fuel</sub> (kg/hr)	m <sub>Ash</sub> (kg/hr)	$\eta_g$ (%)	kwth	Tar and Dust (mg/m <sup>3</sup> )
85.32	0.49	48	6.5	40.46	111.55	30.5
102.00	0.56	50	6.5	40.41	116.07	32.1
116.70	0.49	63	8.5	46.25	167.39	40.4
123.15	0.48	68	8.5	44.21	172.69	43.5

#### 4.7 ผลการศึกษาสมรรถนะทางด้านสิ่งแวดล้อม

ในขั้นตอนของการเดินระบบเพื่อทดสอบสมรรถนะระบบ ในขณะเดียวกันได้ทำการเก็บข้อมูลด้านมลพิษสิ่งแวดล้อม ซึ่งจะถูกนำมาประเมินเปรียบเทียบข้อมูล ด้านการปลดปล่อยมลพิษ/สมรรถนะทางสิ่งแวดล้อม ซึ่งมีข้อสรุปดังต่อไปนี้

##### 4.7.1 สตาร์ในแก๊สเชื้อเพลิง

การวิเคราะห์แก๊สมลพิษในแก๊สเชื้อเพลิง จะเป็นการประเมินมลพิษเบื้องต้น ในกรณีที่น่า แก๊สเชื้อเพลิงไปใช้ประโยชน์เพื่อผลิตพลังงานต่อไป ทั้งนี้อาจจะด้วยกรณีของการนำไปใช้ประโยชน์ในทางความร้อน (นำแก๊สเชื้อเพลิงไปเผาเพื่อผลิตความร้อน) หรือ ใช้งานโดยตรงเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า โดยตรงกับเชื้อเพลิงสันดาปภายใน ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว กระบวนการใช้ประโยชน์จากแก๊สเชื้อเพลิง ต้องมีระบบบำบัดมลพิษอากาศ เพื่อทำการบำบัดแก๊สไอเสีย ก่อนที่จะปลดปล่อยสู่บรรยากาศ อย่างไรก็ตาม เพื่อเป็นข้อยืนยันสำหรับการใช้เทคโนโลยีนี้เพื่อกำจัดขยะในอนาคต 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 จากการศึกษาพบว่าปริมาณฝุ่นละออง (TSP) SO<sub>2</sub> NO<sub>x</sub> มีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด และ สำหรับโลหะหนัก 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

ซึ่งผลการศึกษาที่ได้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยอื่นๆ (Malkow, 2003; Moustakas, et al. 2005; Bert et al, 2006)

#### ตารางที่ 22 ผลการตรวจวิเคราะห์แก๊สมลพิษในแก๊สเชื้อเพลิง

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

หมายเหตุ : <sup>(1)</sup> ปริมาณฝุ่น อ้างอิงจากผลการวิเคราะห์ปริมาณสารและฝุ่น (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 ทั้งกรณีระบบแก๊สซีพีเคชั่น และ ระบบพลาสมาแก๊สซีพีเคชั่น 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

#### 4.7.2 สารมลพิษอื่นๆ ในรูปน้ำเสีย

ข้อมูลตารางที่ 25 และ 26 แสดงสารในน้ำเสีย สำหรับ COD, TKN, Phenols ซึ่งถูกประเมินให้อยู่ในรูปอัตราการปลดปล่อยมลพิษ (Emission factor) หน่วย (กรัม-สารมลพิษที่ปลดปล่อย)/(กิโลกรัมเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าระบบ) เช่นเดียวกัน ทั้งนี้ เนื่องจากว่า มลสารทั้ง 4 ชนิดนี้ ไม่มีสามารถเทียบฐานของสารเริ่มต้นได้ เพราะอยู่ในรูปของสารประกอบ อย่างไรก็ตาม โดยภาพรวมเห็นได้ว่าระบบ มีการปนเปื้อนของมลสารในรูปน้ำเสียดำ ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลที่ได้อธิบายไว้ก่อนหน้านี้ คือ มลสารส่วนใหญ่สำหรับระบบจะคงรูปในเถ้า (~92.60%) ซึ่งเห็นได้ว่าสารในน้ำ พารามิเตอร์ที่เด่นที่สุดคือ COD (Chemical oxygen demand) ซึ่งบ่งบอกถึงความสกปรกและการสะสมของสารอินทรีย์ต่างๆ ที่อยู่ในน้ำเสีย

ตารางที่ 23 สมดุลมวลของ ธาตุอัลคาไลน์ โลหะหนัก และคลอรีนในรูปน้ำเสีย

ประเภท	ความเข้มข้นสารมลพิษขาเข้า <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	3.855	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 NH<sub>3</sub> เป็นส่วนใหญ่ (ในงานวิจัยนี้ไม่ได้วิเคราะห์แยกแยะระหว่าง NH<sub>3</sub>-N กับ Organic-N) การลดการปลดปล่อยสู่บรรยากาศ การลดมลพิษ ต้องมีที่นิยมใช้คือระบบ Scrubber เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดักจับสารชนิดนี้ได้ดียิ่งขึ้น ต้องใช้ Acid scrubber (Lemmens et al., 2007) สารที่ตรวจเจออีกชนิดคือ Phenols ซึ่งประเมินได้ถึงปริมาณสารที่ถูกดักจับได้จากแก๊สเชื้อเพลิง สำหรับ H<sub>2</sub>S ตรวจไม่พบ อาจเนื่องจากว่าเชื้อเพลิงเริ่มต้นมีปริมาณซัลเฟอร์ต่ำ สำหรับการบำบัดสารในน้ำเสียที่เกิดขึ้นในระบบแก๊สซิฟิเคชัน สามารถใช้กระบวนการบำบัดขั้นต้นด้วยระบบ Chemical coagulation มีประสิทธิภาพการบำบัด 63% สำหรับ COD (ทิพย์สุภินทร์ หินชุย, 2550)

และควรเพิ่มระบบการบำบัดขั้นหลังเพื่อให้การบำบัดมลสารมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นในสารกลุ่ม Phenols และ TKN

ตารางที่ 24 อัตราการปลดปล่อยมลพิษ (Emission factor) ในรูปน้ำเสีย

สารมลพิษ	ความเข้มข้นสารมลพิษในรูปน้ำเสีย (g/kg)
COD	14.039
TKN	2.010
H <sub>2</sub> S	ND
Phenols	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)



## บทที่ 5

### สรุป ปัญหาและข้อเสนอแนะ

#### 5.1.1 การพัฒนาระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน

งานวิจัยนี้สามารถพัฒนาระบบพลาสมาในระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งเป็นระบบพลาสมาอาร์คและชุดอุปกรณ์จ่ายกระแสในระดับห้องปฏิบัติการ ขนาดแรงดัน 150 VDC ความถี่ 50 kHz แต่ยังไม่สามารถนำมาใช้งานเพื่อเป็นแหล่งความร้อนเสริมในเตาแก๊สซิฟิเคชันได้ เนื่องจากยังมีข้อจำกัดด้าน อุปกรณ์ และเครื่องมือในด้านอิเล็กทรอนิกส์

การพัฒนาระบบพลาสมาอาร์ค ต้องมีส่วนประกอบหลักๆ คือ Gas Plasma Arc Torch และ Power Supply อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีระดับต้นแบบ ยังไม่สามารถผลิตได้ภายในประเทศ เนื่องจากข้อจำกัดด้านวัสดุ ที่ต้องทนอุณหภูมิที่สูงกว่า 2,000 องศาเซลเซียส และชุดอุปกรณ์ดังกล่าวมีต้นทุนที่สูงมากเนื่องจากเป็นเทคโนโลยีเฉพาะด้าน จึงจำเป็นต้องอาศัยผู้ประกอบการที่มีความเชี่ยวชาญทางด้านดังกล่าวโดยเฉพาะ คือ บริษัท High Temperature Technologies Corp. (HTTC) ประเทศแคนาดา ซึ่งเป็นผู้ประกอบการที่มีความเชี่ยวชาญด้านการพัฒนาระบบพลาสมาอาร์คและมีอุปกรณ์ที่มีมาตรฐาน โดยเฉพาะ พลาสมาอาร์ค (Plasma Arc Torch) ชนิด DC plasma torch ขนาด 50 kW ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับ เตาปฏิกรณ์ชนิดไหลลง (Fixed bed downdraft gasifier) มีกำลังการผลิตขนาด 20 kW<sub>e</sub> หรือ 360 kW<sub>th</sub> โครงสร้างทำจากวัสดุเหล็กเหนียวหนา 5 mm เส้นผ่านศูนย์กลาง 300 mm ภายในหล่อด้วยปูนทนไฟทนความร้อนได้ 1,500 มีอุปกรณ์ประกอบและระบบควบคุมต่างๆ โดยมีการจัดวางระบบ คือ เตาปฏิกรณ์ ชุดไซโคลน ชุดสกรูเบอร์ ระบบกรอง และหัวเผาไหม้แก๊สสังเคราะห์ ได้มีการออกแบบอุปกรณ์และระบบอย่างเหมาะสมสำหรับการนำหัวพลาสมาอาร์คไปใช้งานกับเตาปฏิกรณ์ เพื่อให้สามารถเดินระบบต่อเนื่องได้ หัวพลาสมาอาร์คถูกติดตั้งในโซนการเผาไหม้ (Combustion zone) ของเตาปฏิกรณ์ เพื่อเป็นการเพิ่มอุณหภูมิให้กับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน สรุปได้ว่า ระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน โดยใช้พลาสมาอาร์คเข้ามาเป็นแหล่งความร้อนช่วย (Plasma-assisted gasification) ระดับต้นแบบนี้สามารถนำไปใช้งานได้จริงสำหรับกำจัดขยะชุมชนควบคู่กับการผลิตพลังงาน

#### 5.1.2 การศึกษาประสิทธิภาพการผลิตพลังงาน และประเมินสมรรถนะการทำงานของระบบแก๊สซิฟิเคชัน และระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงขยะ RDF-5 โดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันแบบไหลลง (Fixed-bed downdraft gasifier) เชื้อเพลิงขยะ RDF-5 มีคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบหลัก สามารถเปลี่ยนรูปเพื่อผลิตแก๊สสังเคราะห์ได้ การเดินระบบที่ Equivalence Ratio : ER เท่ากับ 0.49 โดยมีอัตราการใช้เชื้อเพลิงขยะ RDF-5 เท่ากับ 63 kg สามารถผลิตแก๊สสังเคราะห์ได้ เท่ากับ 116.7 m<sup>3</sup>/hr เป็นสภาวะที่เหมาะสมของการเดินระบบมากที่สุด โดยมีองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตได้ ประกอบด้วย CO, H<sub>2</sub> และ CH<sub>4</sub> ในสัดส่วนโดยปริมาตรเฉลี่ยเท่ากับ 18.37 %, 11.92 % และ 2.87% ตามลำดับ ค่าความร้อนของแก๊สสังเคราะห์มีค่าเท่ากับ 4.81 MJ/Nm<sup>3</sup> คิดเป็นประสิทธิภาพการผลิตแก๊สสังเคราะห์ได้ เท่ากับ 46.25% ประเมินเป็นค่าพลังงานความร้อนได้เท่ากับ 167.39 kW<sub>th</sub> มีปริมาณของทาร์และฝุ่นปนเปื้อนต่ำเท่ากับ 40.4 mg/Nm<sup>3</sup> ซึ่งแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตได้นี้

สามารถนำไปใช้ประโยชน์ทั้งในรูปของการผลิตพลังงานไฟฟ้าโดยเครื่องยนต์สันดาปภายใน และการผลิตความร้อน

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

ผลการวิเคราะห์และประเมินมลพิษที่เกิดขึ้นจากระบบ สรุปได้ดังต่อไปนี้

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

2) การวิเคราะห์และประเมินสมมูลมวลของ ธาตุอัลคาไลน์ โลหะหนัก และคลอรีน สรุปได้ว่า มลสารจะคงตัวอยู่ในรูปเถ้าหนักเป็นส่วนมาก ระบบพลาสมาแก๊สซิฟิเคชัน มีประสิทธิภาพในการกักเก็บมลสารรูปเถ้าหนักถึง 92.60%





## เอกสารอ้างอิง

- [1] 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 Manag.* 24(2), 193-198
- [2] Reed TB, Das A. Handbook of biomass downdraft gasifier engine system. Golden, CO: SERI, 1988
- [3] Martinez, J.D., Mahkamov, K., Andrade, R.V., Silva Lora, E.E., 2012. Syngas production in downdraft biomass gasifiers and its application using internal combustion engine.
- [4] Bridgwater, A. V., 1995,. The Technical and Economic Feasibility of Biomass Gasification for Power Generation. *Fuel*, Vol. 74, pp. 631-653.
- [5] Babu, B.V. and Pratik N.Sheth. 2005. Modeling & Simulation of Biomass Gasifier: Effect of Oxygen Enrichment and Steam-to-air Ratio” Proceedings of International Congress on Renewable Energy (ICORE-2005), Pune, January 20-22, , Paper No.30, pp. 194-204.
- [6] Bhattacharya, S. C., Hla, S. S., Pham, H. L., 2001. A Study on a Multistage Hybrid Gasifiers-Engine System. *Biomass and Bioenergy*, Vol. 21, pp. 445-460.
- [7] Narukawa K, Goto H, Chen Y, Mori S, Combustion characteristics of RDF. *Kagakukoguko Ronbunshu* 1996;22(3):560-5.
- [8] 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.
- [9] Phuphuakrat, T., Nipattummaku, N., Namioka, T., Kerdsuwan, S. Yoshikawa, K., 2010. Characterization of tar content in the syngas produced in a downdraft type fixedbed gasification system from dried sewage sludge. *Fuel.* 89 (2010) 2278–2284
- [10] Z.A.Zainal, Ali Rifau, G.A. Quadir, K.N. Seetharamu. .2002. Experimental investigation of a downdraft biomass gasifier. *biomass and bioenergy* 23 283-289
- [11] P. Quakk, H. Knoef and H. Stassen, Energy from biomass: a review of combustion and gasification technology. World Bank Technical Paper no. 422, (1999).
- [12] 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. *Biobase Materials and Bioenergy.* Vol 6, 1-11, 2012

## ประวัตินักวิจัย

1. ชื่อ-นามสกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชานชัย ทองโสภ
2. ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
3. หน่วยงานที่อยู่ติดต่อได้  
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
111 ถ. มหาวิทยาลัย ต. สุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา 30000  
โทรศัพท์ 0 4422 4397 โทรสาร 0 4422 4392  
E-mail: chan@sut.ac.th

### 4. การศึกษา

ปีการศึกษา	ระดับปริญญา	ชื่อปริญญา	สาขาวิชา	วิชาเอก	ชื่อสถานศึกษา	ประเทศ
2545	Doctors	D.Eng	Electrical Engineering	Telecommunication Engineering	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang	Thailand
2539	Masters	M.Eng	Electrical Engineering	Electrical and Communications	Kasetsart University	Thailand
2534	Bachelors	B.Eng (1 <sup>st</sup> class Honor)	Electronics Engineering		King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang	Thailand

### 5. ประวัติการทำงาน

พ.ศ.2543- ปัจจุบัน รองศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

### 6. ผลงานวิชาการ

- 1 M.Krairiksh, **C.Thongsopa** and A.Mearnchu, "A Steerable Active Applicator," *Proceedings of the 1998 Asia-Pacific Microwave Conference*, Yokohama, vol. 2, pp.861-864, Dec. 1998.
- 2 M.Krairiksh, **C.Thongsopa** and C.Phongcharoenpanich, "A Steerable Active Spherical Slot Array Antenna," *Proceedings of the 1999 Progress in Electromagnetics Research Symposium*, Taipei, vol. 1, p.483, Mar. 1999.
- 3 M.Krairiksh, **C.Thongsopa**, D.Srimoon and A.Mearnchu, "Analysis of Steerable Active Slot Array Applicator," *Proceedings of the 1999 Asia-Pacific Microwave Conference*, Singapore, vol. 2, pp.489-492, Dec. 1999.
- 4 M.Krairiksh, **C.Thongsopa**, C.Phongcharoenpanich, E.Khoomwong and C.Leekpai, "A steerable Spherical Slot Array Antenna," *Journal Science Asia*, vol. 25, no.4, pp.231-236, 1999.

- 5 **C.Thongsopa**, M.Krairiksh, N.Srirattana and A.Intarapanich, "A Single Patch Beam Steering Antenna," *Proceedings of the 2000 Asia-Pacific Microwave Conference*, Sydney, pp. 1510-1513, Dec. 2000.
- 6 **C.Thongsopa**, M.Krairiksh and A.Mearnchu, "Analysis and Design of a Steerable Active Array Applicator," *The First National Meeting on Biomedical Engineering*, Bangkok Thailand, Sep. 2001
- 7 **C.Thongsopa**, M.Krairiksh, A.Mearnchu and D.Srimoon, "Analysis and Design of Injection Locking Steerable Active Array Applicator," *IEICE Trans. Communications*, vol.E 85-B, no 10, pp. 2327-2337, Oct. 2002.
- 8 **C.Thongsopa**, C. Jumniensri, and J.Wongmethanukro, "Beam Steering Using Single Patch Active Antenna," *Proceedings of the 26<sup>th</sup> Electrical Engineering Conference*, Thailand, pp.1796-1800, Nov. 2003.
- 9 **C. Thongsopa**, P. Jarataku, and P. Sukpong, "Wide Band U-Shaped cross section Antenna with a strip on a U-Shaped ground plane," *IEEE Transactions on Magnetics*, Beijing, China, pp.458-461, Apr. 2005.
- 10 P Sukpong, **C. Thongsopa**, and P. Jarataku, "Injection-Locked Active Antenna Using a Dual Gate MESFET," *The 4<sup>th</sup> PSU-Engineering Conference (PEC4)*, Songkhla,Thailand, pp. 50-54, December 8-9, 2005.
- 11 **C. Thongsopa**, A. Intarapanich, and C. Saetiaiw, "Amplitude Modulation Using Injection Locking Oscillator Under Strong Envelop Variation Injection," *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, Tokyo, Japan, August 2006.
- 12 **C. Thongsopa**, "Array of A U-Shaped Element on A U-Shaped Ground Plane Wideband Antenna", *2006 Asia-Pacific Conference on Communication*, Bussan, Republic of Korea, 31 August-1 September 2006, 5D-145.
- 13 P. Jarataku, and **C. Thongsopa**, "2.45 GHz Bi- Directional Amplifier for Wireless LAN," *The 5<sup>th</sup> PSU-Engineering Conference (PEC5)*, Thailand, pp.197-201,May 10-11. 2007.
- 14 **C. Thongsopa**, D.Srimoon,and P. Jarataku, "A U-Shaped Cross Sectional Antenna on a U-Shaped Ground Plane with an offset Parabolic Reflector for WLAN," *IEEE AP-S International Symposium 2007*, Honolulu, Hawaii. USA, pp 5159-5162, Jun 10-15, 2007.
- 15 C. Saetiaiw, A. Intarapanich, and **C.Thongsopa**, "Effect of Spatial Correlation with Directional Antenna on MIMO capacity," *2007 International Symposium on Antenna and Propagation*, Niigata, Japan, pp 1334-1337, August 20-24, 2007.
- 16 A. Intarapanich, **C.Thongsopa**, and C. Saetiaiw, "Effect of Antenna Patterns on Narrowband MIMO capacity," *IEEE 2007 International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation, and EMC Technologies For Wireless Communications*, Hangzhou, China, pp 160-163, August 14-16, 2007.

- 17 **C. Thongsopa**, and A. Intarapanich, “ Double injection Locking Active Antenna,” European Conference on Antennas and Propagation, (Eucap 2007) Edinburgh, UK, pp aa-bb, November 11-16, 2007.
- 18 P. Thosdee, and **C. Thongsopa**, “Quasi-Rhomboid Antenna for Ultra Wideband Wireless Communication System,” *Proceedings of the 30<sup>th</sup> Electrical Engineering Conference*, Kanchanaburi, Thailand, pp. aa-bb, October 25-26. 2007.
- 19 C. Saetiaw, A. Intarapanich, and **C.Thongsopa**, “Relations between 3-Dimensions Antenna Pattern and Narrowband MIMO Capacity,” *Proceedings of the 2007 Asia-Pacific Microwave Conference*, Bangkok, Thailand, pp. aa-bb, December 11-14, 2007.
- 20 Patummakasorn, C. Tangwachirapan, S. and **Thongsopa, C.** “Development of inductive regional heating by energy control at frequency 2.45 GHz” Electromagnetic Compatibility and 19<sup>th</sup> International Zurich Symposium on Electromagnetnetic Compatibility 2008 APEMC 2008 Asia-Pacific Symposium ,Singapore, pp:819-822, May 19-23. 2008.
- 21 Maungrat, M., **Thongsopa,C.**, and Jarataku, P.,“Measurement of UHF Radio Wave Propagation in Parking,” *The 7<sup>th</sup> PSU-Engineering Conference (PEC7)*, Songkhla,Thailand, pp. 97-100, May. 21-22, 2009.
- 22 Tangwachirapan, S., **Thongsopa,C.**, “Numerical Simulation of Magnetic Fields Shield for Breast Cancer Hyperthermia,” *The 7<sup>th</sup> PSU-Engineering Conference (PEC7)*, Songkhla,Thailand, pp. 102-105, May. 21-22, 2009.
- 23 Patummakasorn, C., and **Thongsopa, C.**, “Analysis and Design of Applicator System for Regional Induction Heating 2.45 GHz,” *WSEAS Transactions on Communications*, Issue 9, Volume 8, September 2009.
- 24 **Thongsopa, C.**, and Thosdee, P., “Array of Quasi Rhomboid Shaped Element Bowtie Antenna with Reflector for Ultra Wideband Applications,” *in proc. The 2009 International Symposium on Antennes and Propagation (ISAP 2009)*, Thailand, October 20-23, 2009.
- 25 **Thongsopa, C.**, and Saetiaw C.,“The Effect of 3D Antenna Radiation Pattern on Narrowband MIMO Capacity: Simulation and Measurement,” *in proc. The 2009 International Symposium on Antennes and Propagation (ISAP 2009)*, Bangkok, Thailand, October 20-23, 2009.
- 26 Patummakasorn, C., and **Thongsopa, C.**, “Simulations and Experiment of Applicator System for Regional Induction Heating 2.45 GHz,” *WSEAS Conferences AIC '09, ISCGAV '09, ISTASC '09, HTE '09, FMA '09, BEBI'09* Moscow, Russia, August 20-22, 2009.

- 27 **Thongsopa, C.**, Intarapanich, A. and Maungrat, M., "Temporal Measurement of UHF Radio Wave in Presence of Vehicles" *in proc.* 2009 International Symposium on Electromagnetic Compatibility(EMC'09) Kyoto, Japan, July 20-24,2009.
- 28 **Thongsopa, C.**, Intarapanich, A. and Tangwachirapan, S., "Shielding system for breast hyperthermia inductive heating" *in proc.* The XIV<sup>th</sup> International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics Electrical and Electronic Engineering, (ISEF'09) Arras, France, Sep 10-12, 2009.
- 29 **Thongsopa, C.**, and Thosdee, P., "Development of Monocycle pulse Generator Circuit for Ultra Wideband Applications," *in proc.* 32<sup>nd</sup> Electrical Engineering Conference (EECON-32), Tawaravadee Resort Hotel, Prachinburi, Thailand, October 20-23, 2009.
- 30 Maungrat, M., and **Thongsopa, C.**, "Measurement of ASK and FSK Wave Propagation in Parking," *in proc.* 32<sup>nd</sup> Electrical Engineering Conference (EECON-32), Tawaravadee Resort Hotel, Prachinburi, Thailand, October 20-23, 2009.
- 31 Tangwachirapan, S., **Thongsopa, C.**, "Study Magnetic Fields Shield for Lossy Mediums Inductive Hyperthermia Heating," *in proc.* 32<sup>nd</sup> Electrical Engineering Conference (EECON-32), Tawaravadee Resort Hotel, Prachinburi, Thailand, October 20-23, 2009. (*The Best Paper Award in Biomedical Engineering*).
- 32 Santalunai, S., and **Thongsopa, C.**, "High Power Amplifier Design for RF Induction Heating" *in proc.* 32<sup>nd</sup> Electrical Engineering Conference (EECON-32), Tawaravadee Resort Hotel, Prachinburi, Thailand, October 20-23, 2009.
- 33 Yaemsuan, P., and **Thongsopa, C.**, "Design and Construction of Induction Heating Boiler Machine with Full-Bridge Inverter" *in proc.* 32<sup>nd</sup> Electrical Engineering Conference (EECON-32), Tawaravadee Resort Hotel, Prachinburi, Thailand, October 20-23, 2009.
- 34 Patummakasorn, C. and **Thongsopa, C.** "Effect of Position of the Pole Coils to Inductive Regional Heating" Electromagnetic Compatibility (APEMC) 2010 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility & Technical Exhibition on EMC RF/Microwave Measurement & Instrumentation, China, pp:393-396, April 12-16. 2010.
- 35 Saetiaw, C., **Thongsopa, C.**, Intarapanich, A. and Chinanupakorn, M., "Effect of Directional Antennas to Narrowband MIMO Capacity", 2010 International Workshop on Information Communication Technology ( ICT 2010) ,August 24 - 25, 2010. KMITL, Bangkok, Thailand.
- 36 **Thongsopa, C.**, Sukphongchirakul, P., Intarapanich, A. and Jarataku, P., " Measurement of UHF Radio Wave Propagation on Road Surface with Obstruct by Vehicle", International Conference on Electrical, Computer and

- Communication Engineering , Amsterdam (ICECCE 2010), Amsterdam, Netherlands. Sep 28-30, 2010.
- 37 **Thongsopa ,C.**, and Thosdee, P., “ Development and Design of Mobile Jammer Systems”,  
Conference on Application Research and Development (ECTI-CARD 2011), Bangkok, Thailand. May 4-6,2011. ***(The Best Paper Award)***.
- 38 **Thongsopa,C.**, and Thosdee, P., “Design of an UWB Quasi Rhomboid Shaped Element Bowtie Antenna for MIMO Applications”, The World Congress on Engineering 2011. (WCE 2011), London, English. July 6-8, 2011.
- 39 Thosdee, P., Chinanupakorn, M., and **Thongsopa, C.** (2011). “Design of magnetic shielding system for cancer treatment with hyperthermia inductive heating”. In 2011 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2011). 25-28 October 2011, Jeju Korea.
- 40 Montree Chinanupakone, Phairat Thosdee, and **Thongsopa C.** (2011) “*Dual Band Quasi-Rhomboid Antenna for Bio-medical Monitoring Applications*”, In 2011 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2011). 25-28 October 2011, Lotte Hotel Jeju, Jeju, Korea.
- 41 Charinsak Saetiaw, **Thongsopa C.**, and Apichart Intarapanich, (2011) “*RFID Tag Antenna Design Using Flexible Double-Layer Strip Dipole Antenna,*” In 2011 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2011). 25-28 October 2011, Lotte Hotel Jeju, Jeju, Korea.
- 42 Montree Chinanupakone, Phairat Thosdee, and **Thongsopa C.** (2011) “Design of Dual band Quasi-Rhomboid Antenna for Human On-body Applications,” The 34<sup>th</sup> Electrical Engineering Conference, November 30-December 2, Ambassador City Jomtien Pattaya, Chonburi, Thailand.