

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1. มูลฝอยชุมชน

##### 2.1.1 ความหมาย

ตามพระราชบัญญัติรักษาความสะอาดและความเป็นระเบียบเรียบร้อยของบ้านเมือง พ.ศ. 2535 ออกโดยกระทรวงมหาดไทย หรือ พระราชบัญญัติการสาธารณสุข พ.ศ. 2535 ได้ให้ความหมายว่า

มูลฝอย (Solid waste) หมายถึง สิ่งของเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตและอุปโภคซึ่งเสื่อมสภาพจนใช้การไม่ได้หรือไม่ต้องการใช้แล้ว บางชนิดเป็นของแข็ง หรือกากของเสียมีผลเสียต่อสุขภาพทางกายและจิตใจ เนื่องจากความสกปรก เป็นแหล่งเพาะเชื้อโรค ทำให้เกิดมลพิษและทัศนะอุจาด หรือ เศษกระดาษ เศษผ้า เศษอาหาร เศษสินค้า ถุงพลาสติก ภาชนะที่ใส่อาหาร ถังมูลสัตว์ หรือซากสัตว์ รวมตลอดถึงสิ่งอื่นใดที่เก็บกวาดจากถนน ตลาด ที่เลี้ยงสัตว์หรือที่อื่น

มูลฝอยชุมชน (Municipal solid waste) มูลฝอยที่เกิดจากกิจกรรมต่างๆ ในชุมชน เช่น บ้านพักอาศัย ธุรกิจร้านค้า สถานประกอบการ สถานบริการ ตลาดสด สถาบันต่างๆรวมทั้งเศษวัสดุก่อสร้าง ทั้งนี้ไม่รวมของเสียอันตรายและมูลฝอยติดเชื้อ (กรมควบคุมมลพิษ, 2544)

##### 2.1.2 ลักษณะของมูลฝอย

ลักษณะของมูลฝอยสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ ลักษณะทางกายภาพ ลักษณะทางเคมี และลักษณะทางชีวภาพ ดังแสดงในภาพที่ 2.1

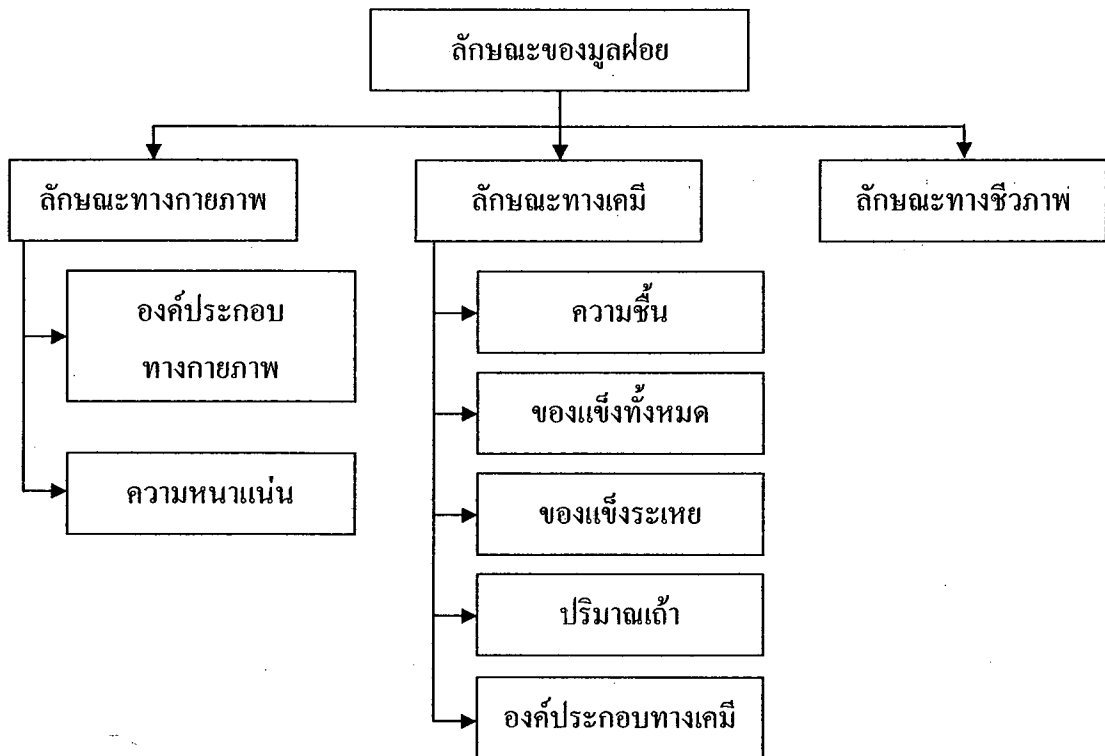
##### 2.1.2.1 ลักษณะทางกายภาพของมูลฝอย (Physical Characteristics)

(1) องค์ประกอบทางกายภาพ (Physical composition) นิยมจำแนกตามชนิดของสิ่งต่างๆที่ประกอบขึ้นมาเป็นมูลฝอยทั้งหมด (อดิศักดิ์ ทองไข่มุกต์, 2545) สามารถแบ่งออกได้เป็น 10 ประเภท ดังแสดงในตารางที่ 2.1

จากรายงานโครงการศึกษาความเหมาะสมของค่าบริการและองค์การบริหารของท้องถิ่นที่จัดให้มีระบบบำบัดน้ำเสียและระบบกำจัดมูลฝอย พ.ศ. 2542 ได้รวบรวมผลการศึกษาค้นคว้าของหน่วยงานต่างๆเกี่ยวกับองค์ประกอบของมูลฝอยทางกายภาพ ณ แหล่งกำเนิด และมูลฝอยรวม (ณ

สถานที่กำจัด) พบว่าองค์ประกอบหลักของทุกแหล่งกำเนิดเป็นเศษอาหาร ผัก ผลไม้ รองลงมา ได้แก่ กระดาษ และพลาสติก แต่จะมีสัดส่วนที่แตกต่างกันไปตามกิจกรรมของแต่ละแหล่งกำเนิด

องค์ประกอบของมูลฝอยทางกายภาพ ณ สถานที่กำจัดของกรุงเทพมหานครนั้น พบว่าเศษอาหาร ผัก ผลไม้ ยังคงเป็นองค์ประกอบหลัก รองลงมาคือพลาสติก และโฟม และอันดับสาม คือ กระดาษ ดังแสดงในตารางที่ 2.2



ภาพที่ 2.1 ลักษณะทางกายภาพ เคมี และชีวภาพของมูลฝอย

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางกายภาพของมูลฝอยชุมชน

องค์ประกอบของมูลฝอย	ตัวอย่าง
เศษอาหาร ผัก ผลไม้	เศษผัก เศษผลไม้ เศษอาหารที่เหลือจากการเตรียม การปรุง และการบริโภค (ยกเว้น เปลือกหอย กระจุก ก้างปลา ชังข้าวโพด ก้านกระถิน) เช่น ข้าวสุก เปลือกผลไม้ เนื้อสัตว์ ฯลฯ
กระดาษ	วัสดุหรือผลิตภัณฑ์ที่ทำจากเยื่อกระดาษ เช่น กระดาษหนังสือพิมพ์ การ์ด แมกกาซีน หนังสือ ใบปลิว ถุงกระดาษ กล่องกระดาษ กระดาษอัด ฯลฯ
พลาสติก	วัสดุหรือผลิตภัณฑ์ที่ทำมาจากพลาสติก เช่น ถุงพลาสติก ภาชนะพลาสติก ของเล่นเด็กที่ทำด้วยพลาสติก ผลิตภัณฑ์ไฟเบอร์กลาส ฯลฯ
ผ้า	สิ่งทอต่างๆ ที่ทำมาจากเส้นใยธรรมชาติและเส้นใยสังเคราะห์ เช่น ฝ้ายลินิน ผ้าไนลอน เช่น ด้าย เสื้อผ้า ผ้าเช็ดมือ ถุงเท้า ฯลฯ
ไม้	วัสดุหรือผลิตภัณฑ์ที่ทำจากไม้ ไม้ไผ่ ฟาง หญ้า เศษไม้ รวมทั้งดอกไม้
ยางและหนัง	วัสดุหรือผลิตภัณฑ์ที่ทำมาจากยางหรือหนัง เช่น เครื่องหนัง รองเท้า ลูกบอลหนัง กระเป๋าหนัง ฯลฯ
แก้ว	วัสดุหรือผลิตภัณฑ์ที่ทำมาจากแก้ว เช่น กระจก ขวดแก้ว หลอดไฟ เครื่องแก้ว ฯลฯ
โลหะ	วัสดุและผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่ทำจากโลหะ ตัวอย่างเช่น กระจุกโลหะ สายไฟ ภาชนะต่างๆ ตะปู ฯลฯ
หิน กระจุก กระจุกสัตว์ และเปลือกหอย	เศษหิน เศษกระจุกสัตว์ เปลือกหอย เช่น เซรามิก เปลือกหอย กุ้ง ปู กระจุกสัตว์ ก้างปลา ฯลฯ
อื่นๆ	วัสดุอื่นใดที่ไม่สามารถจัดกลุ่มเข้ากลุ่มต่างๆ ข้างต้น รวมถึง ฟุ่น ทราย เถ้า

(2) ความหนาแน่น (Density) คือค่ามวลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของมูลฝอยแบ่งได้เป็นความหนาแน่นปกติ (Bulk density) คือความหนาแน่นปกติโดยไม่มีกรอัดหรือบีบมูลฝอยให้ชิดไปจากธรรมชาติ และความหนาแน่นในขณะขนส่ง (Transported density) คือความหนาแน่นของมูลฝอยในรถยนต์เก็บขนในขณะขนส่ง ซึ่งจะมีค่ามากขึ้น เพราะมูลฝอยถูกทำให้แน่นขึ้นเนื่องจากการสั่นสะเทือน และการอัดของพนักงานเก็บขนมูลฝอย ความหนาแน่นของมูลฝอยจะขึ้นอยู่กับ

องค์ประกอบของมูลฝอยด้วย เช่น มูลฝอยที่มีพวกเศษอาหาร จะมีค่าความหนาแน่นสูงกว่ามูลฝอยที่มีพวกกระดาษ หรือพลาสติกมาก โดยทั่วไปมูลฝอยจากชุมชนในกลุ่มประเทศที่ประชากรมีรายได้สูง จะมีค่าความหนาแน่นค่อนข้างน้อย คือ ประมาณ 100-170 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และกลุ่มประเทศที่ประชากรมีรายได้ปานกลาง จะมีค่าความหนาแน่น ประมาณ 250 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และกลุ่มประเทศที่ประชากรมีรายได้ต่ำ จะมีค่าความหนาแน่นค่อนข้างสูง ประมาณ 250-500 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

ลักษณะทางกายภาพของมูลฝอยกรุงเทพมหานคร ดังแสดงในตารางที่ 2.3  
ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบมูลฝอยสดที่สถานีขนถ่ายมูลฝอยอ่อนนุช

รายการ	ร้อยละขององค์ประกอบมูลฝอยสด (ค่าเฉลี่ย)
เศษอาหาร ผัก ผลไม้	48.79
พลาสติก	26.27
กระดาษ	13.60
ไม้	4.64
ผ้า	2.35
แก้ว	1.85
ขยะอันตราย	0.69
โฟม	0.45
เศษกระดูก เปลือกหอย	0.24
หิน และกระเบื้อง	0.23
เหล็กและ โลหะอื่นๆ	0.17
หนังและยาง	0.14
อื่น ๆ	0.03
<b>รวม</b>	<b>100.00</b>

ที่มา: สำนักบริหารยุทธศาสตร์ กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม, 2552

ตารางที่ 2.3 ลักษณะทางกายภาพและเคมีของมูลฝอยกรุงเทพฯ ระหว่างปีงบประมาณ 2536-2545

ลักษณะ	2536	2537	2538	2539	2540	2541	2542	2543	2544	2545
ความหนาแน่น (kg/l)	0.35	0.35	0.35	0.35	0.32	0.42	0.34	0.38	0.34	0.40
ปริมาณความชื้น (%)	47.26	48.91	49.71	49.11	55.12	57.95	52.76	60.46	55.62	46.46
ปริมาณของแข็งระเหย (%)	36.07	33.95	38.89	39.26	34.25	32.57	38.82	33.13	39.90	-
ปริมาณเถ้า (%)	16.67	17.13	11.40	11.63	10.63	11.43	8.42	6.41	10.64	-
ค่าความร้อน (kcal/kg)	1337	1325	1452	1472	1211	1131	1430	1130	1678	1946

ที่มา : สำนักรักษาความสะอาด, 2545

#### 2.1.2.2 ลักษณะทางเคมีของมูลฝอย (Chemical Characteristics)

(1) ความชื้น (Moisture content: MC) หมายถึง ปริมาณน้ำที่อยู่ในมูลฝอยสามารถระเหยออกมาได้ หากได้รับความร้อนที่เหมาะสมเป็นเวลานาน มีหน่วยเป็นร้อยละ โดยน้ำหนัก (ทเรศ ศรีสถิตย์, 2553) โดยอยู่ในรูปของน้ำที่มีอยู่ในเนื้อของมูลฝอย (Inherent water) เช่น น้ำที่มีอยู่ในพืช ผัก ผลไม้ เศษอาหาร ซึ่งมีอยู่ประมาณ 1/2 - 1/3 ของปริมาณน้ำทั้งหมด และน้ำที่ติดอยู่ภายนอก (Attached water) เช่น น้ำฝน ซึ่งมีอยู่ประมาณ 1/3 - 1/2 ของปริมาณน้ำทั้งหมด

(2) ของแข็งรวม (Total solids: TS) หมายถึง ปริมาณของแข็งที่เป็นส่วนประกอบของมูลฝอยที่คงเหลืออยู่เมื่อไล่น้ำออกไปจนหมดแล้ว มีหน่วยเป็นร้อยละ โดยน้ำหนัก

(3) ของแข็งระเหย (Volatile solids: VS) หมายถึง องค์ประกอบของมูลฝอยที่สามารถติดไฟ หรือเผาไหม้ที่ความร้อนสูงให้หมดไป และกลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) และไอน้ำ (H<sub>2</sub>O) โดยของแข็งระเหยเป็นส่วนหนึ่งของของแข็งรวมของเนื้อมูลฝอยภายหลังที่ไล่น้ำออกไปจนหมดแล้ว ดังแสดงในภาพที่ 2.2 มีหน่วยเป็นร้อยละ โดยน้ำหนัก

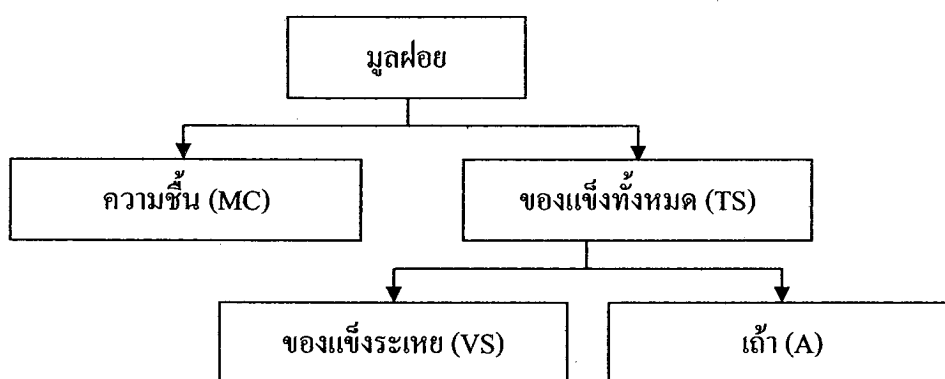
(4) ปริมาณเถ้า (Ash: A) หมายถึง องค์ประกอบของมูลฝอยที่ไม่สามารถติดไฟได้ เป็นส่วนหนึ่งของปริมาณของแข็งรวมของเนื้อมูลฝอยภายหลังที่ไล่น้ำออกไปหมดแล้ว และเหลือจากการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ มีหน่วยเป็นร้อยละ โดยน้ำหนัก

(5) องค์ประกอบทางเคมี (Chemical composition) ประกอบด้วย ปริมาณธาตุคาร์บอน (Carbon: C) ไฮโดรเจน (Hydrogen: H) ออกซิเจน (Oxygen: O) ไนโตรเจน (Nitrogen: N) และ ซัลเฟอร์ (Sulphur: S) เป็นต้น (สวัสดี โนนสูง, 2543) จากรายงานโครงการศึกษาความเหมาะสมของค่าบริการและองค์การบริหารของท้องถิ่นที่จัดให้มีระบบบำบัดน้ำเสียและระบบกำจัด

มูลฝอย (2542) ได้รวบรวมผลการศึกษาศึกษาของหน่วยงานต่างๆเกี่ยวกับองค์ประกอบของมูลฝอยทางเคมี ณ แหล่งกำเนิด และมูลฝอยรวม (ณ สถานที่กำจัด) พบว่าในแหล่งกำเนิดเดียวกันองค์ประกอบของมูลฝอยทางเคมีอาจมีความแตกต่างกัน ได้มาก ซึ่งขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ฤดูกาลที่เก็บตัวอย่าง วิธีการเก็บตัวอย่างเพื่อทำการวิเคราะห์ เป็นต้น

(6) ปริมาณความร้อน (Calorific value) หมายถึง ค่าพลังงานความร้อนที่มีอยู่ในตัวมูลฝอยเอง และเมื่อเกิดการเผาไหม้จะให้ค่าพลังงานความร้อนออกมา หาได้โดยการใช้เครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ (Bomb calorimeter) มีหน่วยเป็นกิโลแคลอรีต่อกิโลกรัมของมูลฝอย

ลักษณะทางเคมีของมูลฝอยกรุงเทพมหานคร ดังแสดงในตารางที่ 2.3



ภาพที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้น ของแข็งรวม ของแข็งระเหยและเถ้าของมูลฝอย

### 2.1.2.3 ลักษณะทางชีวภาพของมูลฝอย (Biological Characteristics)

ปริมาณและชนิดของเชื้อจุลินทรีย์ (Microorganisms) ที่ปะปนอยู่ในมูลฝอย ได้แก่ เชื้อแบคทีเรีย เชื้อรา และไวรัส ซึ่งมีทั้งชนิดที่ทำให้เกิดโรคได้ (Pathogenic) และชนิดที่ไม่ทำให้เกิดโรค (Non-pathogenic) บางชนิดเป็นตัวช่วยให้มูลฝอยเกิดการย่อยสลายได้ดี เช่น Decomposition bacteria เป็นต้น (สุณี ปิยะพันธุ์พงศ์, 2536)

จากลักษณะทางกายภาพและเคมีของมูลฝอยที่ได้กล่าวมาข้างต้น ส่งผลให้มูลฝอยมีความแตกต่างกัน เนื่องจากสถานที่ กิจกรรม และช่วงเวลาที่เกิดมูลฝอย นอกจากนี้ปริมาณน้ำในมูลฝอยเป็นตัวแปรสำคัญตัวหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงเสมอเกี่ยวกับการออกแบบหรือจัดการกับมูลฝอย เช่น ในกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ ต้องการความชื้นที่เหมาะสมต่อการดำรงชีพของจุลินทรีย์ เนื่องจากน้ำจะเป็นตัวทำลายทำให้จุลินทรีย์สามารถดูดซึมสารอาหารเข้าสู่เซลล์ได้ หรือในกระบวนการเผาไหม้มูลฝอยที่มีปริมาณความชื้นสูงจะทำให้ได้พลังงานในรูปของค่าความร้อน

น้อยกว่ามูลฝอยที่มีปริมาณความชื้นต่ำเนื่องจากต้องใช้ความร้อนส่วนหนึ่งในการระเหยน้ำที่อยู่ใน มูลฝอยเสียก่อน เป็นต้น แต่เมื่อพิจารณาวิธีการทดลองหาค่าความชื้นของมูลฝอย พบว่าค่าความชื้น ที่ได้เป็นน้ำเพียงส่วนหนึ่งเท่านั้นแต่ไม่ได้เป็นปริมาณน้ำทั้งหมดในมูลฝอย เนื่องจากยังมีน้ำใน รูปแบบอื่นๆที่ยังไม่ได้มีการค้ำึงถึงอยู่และน้ำในรูปแบบอื่นนี้อาจมีผลต่อกระบวนการการแปรรูป มูลฝอยได้ จากลักษณะของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลน้ำกับอนุภาคของแข็ง ทำให้สามารถ จำแนกน้ำออกเป็นรูปแบบต่างๆได้ 2 ประเภท (ตรี วาทกิจ, 2553) คือ

(1) น้ำอิสระ (Free water) หมายถึง น้ำอิสระที่ไม่ยึดติดกับอนุภาคของแข็ง แทรก ตัวอยู่ในช่องว่างระหว่างโมเลกุลของแข็ง (Intra molecular spaces) น้ำส่วนนี้ทำการกำจัดออกได้ ง่าย เช่น การระเหยจากการอบแห้ง การสกัดจากความร้อน ดังนั้นค่าความชื้นที่วัดได้จะเป็นค่าของ น้ำในส่วนนี้เท่านั้น

(2) น้ำเกาะติด (Bound water) หมายถึง น้ำที่ยึดติดอยู่กับโมเลกุลภายในอนุภาค ของแข็ง เชื่อมกันด้วยพันธะเคมีที่แข็งแรง คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der waals force) รวมทั้ง พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) น้ำส่วนนี้อาจเป็นองค์ประกอบสำคัญใน โครงสร้างของโมเลกุล หรือองค์ประกอบทางเคมีของโมเลกุลนั้น น้ำเกาะติดมีโครงสร้างที่ก่อพันธะมากกว่าน้ำอิสระ ทั้งยังมีโมเลกุลที่เกาะกันอย่างหนาแน่นมากกว่า จึงมีความหนาแน่นมากกว่าน้ำอิสระ การกำจัดน้ำส่วนนี้ ต้องทำลายพันธะเคมีเท่านั้น ทำให้โครงสร้างของโมเลกุลเปลี่ยนแปลงไป น้ำเกาะติดอาจแบ่งย่อย ได้เป็น

- โมโนเลเยอร์ (Monolayer or Molecular layer) เป็นน้ำที่อยู่ในโครงสร้างของ อนุภาค ยึดติดกันด้วยพันธะที่แข็งแรงมาก จนไม่สามารถกำจัดออกได้ด้วยความร้อนปกติน้ำส่วนนี้ ไม่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ ไม่ทำละลายสารอื่น ไม่เปลี่ยนสถานะเป็นของแข็ง และจุลินทรีย์ ไม่สามารถนำไปใช้ได้

- มัลติเลเยอร์ (Multilayer or Multimolecular layer) เป็นน้ำที่เกาะอยู่กับน้ำส่วน แรก (Monolayer) สามารถทำละลายสารอื่นได้ แต่จุลินทรีย์ยังคงไม่สามารถนำไปใช้ได้ การกำจัด น้ำส่วนนี้ยังคงต้องใช้พลังงานมากกว่าปกติ

- น้ำในแคพพิลลารี (Capillary water) เป็นน้ำที่เกาะติดอยู่กับน้ำในส่วนที่สอง (Multilayer) อย่างหลวมๆ จุลินทรีย์บางชนิดที่ต้องการความชื้นต่ำ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ และมีส่วนเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมีบางชนิด

### 2.1.3 แหล่งกำเนิด

แหล่งกำเนิดมูลฝอยโดยปกติจะมีความสัมพันธ์กับประเภทของพื้นที่ใช้สอยโดยตรง สามารถแบ่งออกเป็น 3 แหล่งกำเนิดหลัก คือ ชุมชน อุตสาหกรรม และเกษตรกรรม แหล่งกำเนิดและลักษณะของมูลฝอย (Tchobanoglous และคณะ, 1993) ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 แหล่งกำเนิดและลักษณะมูลฝอย

แหล่งกำเนิด	กิจกรรม ณ แหล่งกำเนิด	ประเภทของมูลฝอย
ที่อยู่อาศัย	ครอบครัว	เศษอาหาร กระดาษ พลาสติก ผ้า หนังสือ เศษใบไม้ ไม้ แก้ว กระจก อลูมิเนียม โลหะอื่นๆ เถ้า มูลฝอยชนิดพิเศษ* ของเสียอันตราย
พาณิชยกรรม	ร้านค้า ภัตตาคาร ตลาด อาคารสำนักงาน โรงแรม	เศษอาหาร พลาสติก กระดาษ แก้ว โลหะอื่นๆ มูลฝอยชนิดพิเศษ* ของเสียอันตราย
สถานที่ราชการ	โรงเรียน โรงพยาบาล เรือนจำ ศาลากลางจังหวัด	เศษอาหาร พลาสติก กระดาษ แก้ว โลหะอื่นๆ มูลฝอยชนิดพิเศษ* ของเสียอันตราย
สถานที่ก่อสร้าง	การก่อสร้างอาคาร การข่อมถนน การสร้างสะพาน การสร้างทางเดิน	ไม้ เศษเหล็ก เศษปูน ฝุ่นละออง
บริการชุมชน	การทำความสะอาดถนน ชายหาด สวนสาธารณะ	มูลฝอยชนิดพิเศษ* ฝุ่นละออง เศษกิ่งไม้ ใบไม้ ของเสียจากสวนสาธารณะ ชายหาด และสถานที่พักผ่อน
โรงงานบำบัด	โรงผลิตน้ำประปา โรงบำบัดน้ำเสีย	ของเสียจากระบบบำบัด ตะกอน
อุตสาหกรรม	อุตสาหกรรมการก่อสร้าง การผลิตขนาดเบาและขนาดหนัก โรงกลั่น อุตสาหกรรมเคมี โรงผลิตไฟฟ้า	ของเสียจากกระบวนการผลิต เศษวัสดุ เศษอาหาร เถ้า มูลฝอยชนิดพิเศษ* ของเสียอันตราย
เกษตรกรรม	การเพาะปลูก การเลี้ยงสัตว์	เศษอาหารสัตว์ ของเสียจากการเกษตร ของเสียอันตราย

หมายเหตุ มูลฝอยชนิดพิเศษ\* หมายถึง สิ่งของชิ้นใหญ่ เช่น เฟอร์นิเจอร์ ตู้เก็บเอกสาร ที่ชำรุดใช้งาน ไม่ได้แล้ว / เครื่องใช้ไฟฟ้า เช่น วิทยุ โทรทัศน์ ที่ชำรุดใช้งาน ไม่ได้แล้ว / อื่นๆ เช่น แบตเตอรี่ น้ำมัน ยางรถยนต์

### 2.1.4 ปริมาณมูลฝอยชุมชน

จากการสำรวจปริมาณมูลฝอยในประเทศไทยของกรมควบคุมมลพิษที่ผ่านมา พบว่า ปริมาณมูลฝอยได้เพิ่มขึ้น จาก 10.80 ล้านตัน (29,540 ตันต่อวัน) ใน พ.ศ. 2535 เป็น 15.03 ล้านตัน

(41,064 ตันต่อวัน) ใน พ.ศ. 2553 (ยังไม่รวมปริมาณขยะมูลฝอยก่อนนำมาทิ้งในถัง) โดยมีเพียง พ.ศ. 2548 เท่านั้นที่มีปริมาณมูลฝอยลดลงจาก พ.ศ. 2547 เนื่องจากปริมาณมูลฝอยใน กรุงเทพมหานครมีปริมาณลดลง ดังแสดงในตารางที่ 2.5

จากรายงานสรุปสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย โดยกรมควบคุมมลพิษ (2553) พบว่า มูลฝอยชุมชนที่เกิดขึ้น ใน พ.ศ. 2551 มี ประมาณ 41,064 ตันต่อวัน โดยเป็นมูลฝอยที่ได้รับการเก็บ ขน 8,780 ตันต่อวัน คิดเป็นร้อยละ 21 ของมูลฝอยที่เกิดขึ้นทั่วประเทศ มูลฝอยที่เกิดขึ้นในเขต เทศบาลเมืองและเมืองพัทยามีประมาณ 14,915 ตันต่อวัน คิดเป็นร้อยละ 36 และในเขตองค์การ บริหารส่วนตำบลมีขยะมูลฝอย 17,369 ตันต่อวัน คิดเป็นร้อยละ 43 ของปริมาณขยะมูลฝอยทั่ว ประเทศ โดยในเขตเทศบาลมีปริมาณขยะมูลฝอยเพิ่มขึ้น ในขณะที่ขยะมูลฝอยนอกเขตเทศบาล ลดลงร้อยละ 4.57 ซึ่งเป็นผลมาจากการยกฐานะขององค์การบริหารส่วนตำบลจำนวน 343 แห่งขึ้น เป็นเทศบาล ดังแสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.5 ปริมาณมูลฝอยชุมชนในประเทศไทยระหว่าง พ.ศ. 2535-2553

ปี	ปริมาณมูลฝอย (ตันต่อวัน)	ปริมาณมูลฝอยที่เพิ่มขึ้น	
		ตันต่อวัน	ร้อยละ
2535	29,540	-	-
2536	30,640	1,100	3.72
2537	33,008	2,368	7.73
2538	34,492	1,484	4.50
2539	36,029	1,537	4.46
2540	37,102	1,073	2.98
2541	37,246	144	0.39
2542	37,879	633	1.70
2543	38,170	291	0.77
2544	38,643	473	1.24
2545	39,225	582	1.51
2546	39,240	15	0.04
2547	39,956	716	1.82
2548	39,221	-735	-1.84
2549	40,012	791	2.02

ที่มา : กรมควบคุมมลพิษ, 2553.

ตารางที่ 2.5 ปริมาณมูลฝอยชุมชนในประเทศไทยระหว่าง พ.ศ. 2535-2553 (ต่อ)

ปี	ปริมาณมูลฝอย (ตันต่อวัน)	ปริมาณมูลฝอยที่เพิ่มขึ้น	
		ตันต่อวัน	ร้อยละ
2550	40,332	320	0.80
2551	41,064	732	1.81
2552	41,490	426	1.03
2553	41,532	42	0.10

ที่มา : กรมควบคุมมลพิษ, 2553.

ตารางที่ 2.6 ปริมาณมูลฝอยที่เกิดขึ้นระหว่าง พ.ศ. 2547-2553 แยกตามรายภาค

พื้นที่	ปริมาณมูลฝอยที่เกิดขึ้น (ตันต่อวัน)						
	ปี2547	ปี2548	ปี2549	ปี2550	ปี2551	ปี2552	ปี2553
1. กรุงเทพมหานคร*	9,356	8,219	8,403	8,532	8,780	8,834	8,766
2. เขตเทศบาลรวมเมืองพัทยา	12,500	12,635	12,912	13,600	14,915	16,368	16,620
2.1 ภาคกลางและภาคตะวันออก	5,440	5,499	5,619	5,780	5,258	5,830	5,918
2.2 ภาคเหนือ	2,125	2,195	2,195	2,195	2,931	3,255	3,315
2.3 ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	2,875	2,906	2,970	2,906	4,267	4,700	4,768
2.4 ภาคใต้	2,060	2,082	2,128	2,082	2,459	2,583	2,619
3. นอกเขตเทศบาล	18,100	18,295	18,697	18,200	17,369	16,208	16,146
รวม	39,956	39,221	40,012	40,332	41,064	41,490	41,532

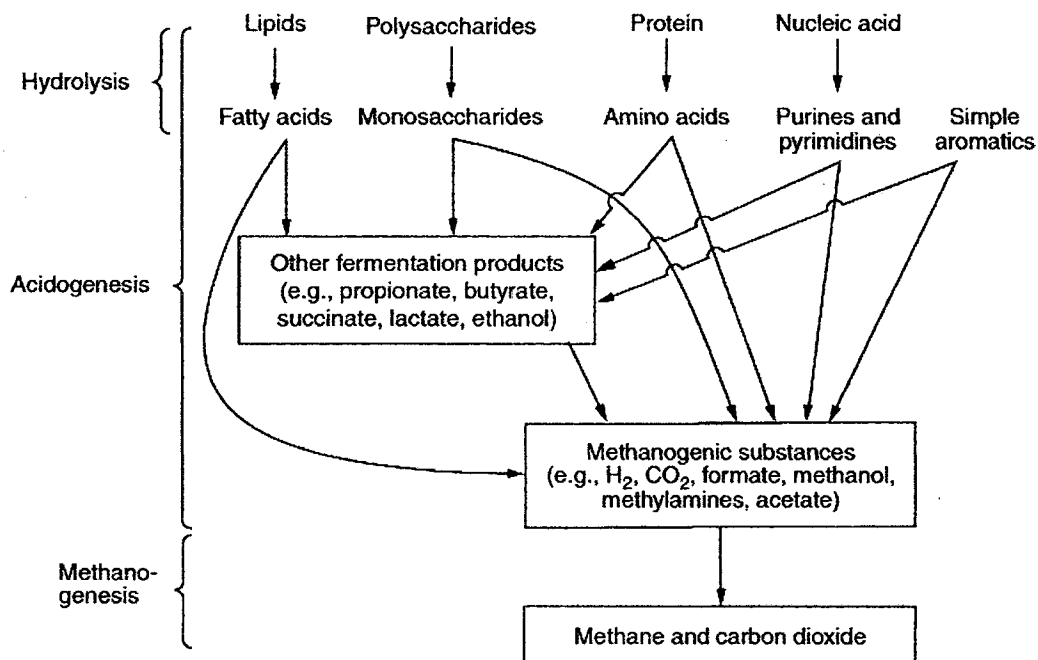
หมายเหตุ : \* ข้อมูลการเก็บขนมูลฝอยรวบรวมจากสำนักสิ่งแวดล้อม กรุงเทพมหานคร

ที่มา : กรมควบคุมมลพิษ, 2547 – 2553.

## 2.2 กระบวนการหมักแบบไร้อากาศ (Anaerobic digestion: AD)

### 2.2.1 ขั้นตอนการหมักแบบไร้อากาศ

กระบวนการหมักแบบไร้อากาศ หรือ การย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศเป็นกระบวนการทางชีววิทยาในการเปลี่ยนสารอินทรีย์ไปเป็นก๊าซชีวภาพในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจนสามารถแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ดังแสดงในภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 กระบวนการหมักแบบไร้อากาศ (Kayhanian และคณะ, 2007)

(1) การย่อยสลายสารอินทรีย์ (Hydrolysis) ขั้นตอนนี้อาจเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า กระบวนการแตกสลายโพลิเมอร์สารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อนและมีขนาดโมเลกุลใหญ่ (Polymer) ทั้งที่สามารถละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ เช่น โปรตีน คาร์โบไฮเดรต และไขมัน จะถูกย่อยสลายให้มีขนาดเล็กลง และสามารถละลายน้ำได้ โดยเอนไซม์ที่ขับออกมาสู่ภายนอกเซลล์ของจุลินทรีย์ (Extracellular enzyme) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้สารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อนเป็นโมเลกุลเดี่ยว (Monomer) ที่ละลายน้ำได้ เช่น กลูโคส กรดอะมิโน กรดไขมัน และกลีเซอรอล จุลินทรีย์ในขั้นตอนนี้สามารถอยู่ได้ทั้งในสภาพที่มีออกซิเจนหรือไม่ใช้ออกซิเจน

(2) การหมักกรดอินทรีย์ระเหยและการเปลี่ยนกรดอินทรีย์ระเหยเป็นกรดอะซิติก (Acidogenesis และ Acetogenesis) ในขั้นตอนนี้จุลินทรีย์พวกสร้างกรด (Acidogenic bacteria) ซึ่งสามารถอยู่ได้ทั้งในสภาพที่มีออกซิเจนหรือไม่ใช้ออกซิเจน ทำการดูดซึมสารอินทรีย์โมเลกุลเดี่ยวในขั้นต้นแรก และใช้เป็นแหล่งคาร์บอนและแหล่งพลังงาน ผลของปฏิกิริยาจะได้กรดอินทรีย์ระเหยที่มีคาร์บอนไม่เกิน 5 อะตอม เช่น กรดอะซิติก (Acetic acid), กรดฟอร์มิก (Formic acid) กรดบิวทริก (Butyric acid) กรดโพรพิโอนิก (Propionic acid) กรดไอโซบิวทริก (Isobutyric acid) กรดวาเลอริก (Valeric acid) และกรดไอโซวาเลอริก (Isovaleric acid) เป็นต้น รวมทั้งได้แอลกอฮอล์ (Alcohol) ก๊าซไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) อีกด้วย จากนั้นกรดอินทรีย์

ระเหยที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอมจะถูกเปลี่ยนโดยจุลินทรีย์กลุ่มอะซิโตเจนิค (Acetogenic bacteria) ให้กลายเป็นอะซิเตท (Acetate) ฟอर्मेट (Formate) ก๊าซไฮโดรเจน ( $H_2$ ) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) ซึ่งเป็นสารประกอบสำคัญในการสร้างก๊าซชีวภาพ

(3) การสร้างก๊าซมีเทน (Methanogenesis) ในขั้นตอนนี้จุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน (Methanogens หรือ Methane forming bacteria) ซึ่งเป็นชนิดที่ต้องอยู่ในสภาพที่ไร้ออกซิเจนเท่านั้น (Obligate Anaerobic Bacteria) จะย่อยสลายกรดอินทรีย์ คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน เกิดเป็นก๊าซชีวภาพซึ่งประกอบด้วยก๊าซมีเทน ( $CH_4$ ) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นองค์ประกอบหลัก

### 2.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศ

เนื่องจากในระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศประกอบการทำงานของด้วยจุลินทรีย์ 2 กลุ่ม ได้แก่ จุลินทรีย์พวกที่ไม่สร้างก๊าซมีเทน และจุลินทรีย์ที่สร้างก๊าซมีเทน สภาพที่เหมาะสมต่อการเติบโตของจุลินทรีย์ทั้ง 2 กลุ่มนี้แตกต่างกัน อีกทั้งยังมีความสามารถในการปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมที่ต่างกัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องรักษาสภาวะแวดล้อมให้มีสภาพที่เหมาะสมที่จะทำให้อุณหภูมิเหล่านี้อยู่ด้วยกันได้อย่างดี การที่จะควบคุมระบบให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพจะต้องทำให้อุณหภูมิตั้งอยู่ในสภาวะสมดุลกันซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศ

ปัจจัย	ค่าที่เหมาะสม
อุณหภูมิ (Temperature)	มีค่าระหว่าง 20 - 45 องศาเซลเซียส (Fernandez และคณะ, 2008)
ความเป็นกรด-ด่าง (pH)	มีค่าอยู่ในช่วง 6.5 - 7.6 (Rittmann และ McCarty, 2000)
กรดอินทรีย์ระเหย (Volatile Fatty Acid: VFA)	มีค่าไม่เกิน 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (สุเมธ ชวเดช, 2540)
ความเป็นด่าง (Alkalinity)	มีค่าประมาณ 1,000 - 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนต (Rittmann และ McCarty, 2000)

ตารางที่ 2.7 ปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศ (ต่อ)

ปัจจัย	ค่าที่เหมาะสม
สารอาหาร (Nutrient)	มีสารอาหารหลักและสารอาหารรองที่เหมาะสม (Weiland, 2010)
อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C:N Ratio)	มีค่าระหว่าง 20 : 1 และ 30 : 1 (Verma, 2002)
ขนาดอนุภาคสารอินทรีย์ (Particle size)	มีค่าประมาณ 10 - 30 มิลลิเมตร (Banks, 2007)

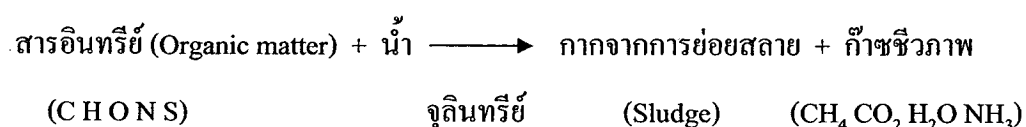
### 2.2.3 วิธีวิเคราะห์บีเอ็มพี (Biochemical Methane Potential: BMP)

การจัดการมูลฝอยโดยกระบวนการหมักแบบไร้อากาศนั้นจะต้องมีการวิเคราะห์หาความสามารถในการย่อยสลายภายใต้สภาวะการหมักแบบไร้อากาศ การวิเคราะห์บีเอ็มพีเป็นหนึ่งในวิธีที่เหมาะสมที่สุด (Lesteur และคณะ, 2010) การวิเคราะห์บีเอ็มพีเป็นการหาค่าศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนของสารอินทรีย์ ภายใต้สภาวะการหมักแบบไร้อากาศ ในรูปของปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นทั้งหมดต่อน้ำหนักของแข็งระเหยที่ใส่เข้าระบบ (วีระนุช หลาง, 2551)

การวิเคราะห์บีเอ็มพีทำได้โดยนำสารอินทรีย์ผสมกับเชื้อจุลินทรีย์ใส่ลงในขวดแล้วใส่ก๊าซออกซิเจนออกให้หมดโดยการแทนที่ด้วยก๊าซไนโตรเจน แล้วปิดขวดให้สนิท จากนั้นทำการวัดปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นจนกว่าระบบจะเข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady state) คือไม่มีก๊าซเกิดเพิ่มขึ้น วิเคราะห์สัดส่วนก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพแล้วนำปริมาณก๊าซมีเทนสะสมไปพล็อตกราฟแสดงปริมาณก๊าซมีเทนสะสมตามระยะเวลาที่ทำการทดลอง หน่วยคือลิตรของก๊าซมีเทนต่อกรัมของแข็งระเหยใส่เข้าระบบ

### 2.2.4 การคำนวณปริมาณก๊าซชีวภาพ

จากสมการพื้นฐานของการหมักแบบไร้อากาศ (Anaerobic digestion) สารอินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบจะถูกย่อยสลายโดยกระบวนการทางชีวภาพของจุลินทรีย์ ดังนี้



สำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลฝอยชุมชนที่มีปริมาณและองค์ประกอบแตกต่างกันไป ขึ้นกับปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ลักษณะของพื้นที่ สภาพภูมิอากาศ การนำกลับมาใช้ใหม่ ความถี่ของการ

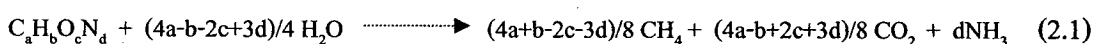
เก็บรวบรวม ฤดูกาล และวัฒนธรรมของท้องถิ่น ทำให้มูลฝอยจากแต่ละแห่งนั้นมีศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพต่างกัน ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นสามารถคำนวณได้จากสมการของ Buswell และ Mueller (1952) ดังแสดงในสมการ 2.1

เมื่อพิจารณาองค์ประกอบของวัตถุดิบ หรือ มูลฝอยชุมชน ปัจจัยที่ทำให้เกิดความแตกต่างของปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้ คือ ปริมาณของแข็งทั้งหมดซึ่งประกอบด้วยของแข็งระเหยและถาวร โดยส่วนใหญ่จะประมาณปริมาณสารอินทรีย์ด้วยของแข็งระเหย เป็นส่วนที่ย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์ และสารอนินทรีย์ด้วยถาวร เป็นส่วนที่จุลินทรีย์ไม่สามารถย่อยสลายได้ แต่ในความเป็นจริงสารอนินทรีย์บางประเภท เช่น หินปูน (จากกระบวนการการปรับค่าความเป็นกรด-ด่างโดยการเติมน้ำปูนขาว) สามารถเกิดการสลายตัวได้ระหว่างกระบวนการวิเคราะห์เพื่อหาค่าของแข็งระเหย ทำให้ปริมาณของแข็งระเหยที่ได้สูงกว่าความเป็นจริง ปริมาณก๊าซชีวภาพที่คำนวณได้จึงสูงกว่าความเป็นจริง

นอกจากนี้ในของแข็งระเหยยังสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ย่อยสลายได้ง่าย (Biodegradable volatile solids: BVS) เป็นพวกเศษอาหารที่สามารถถูกเปลี่ยนไปเป็นก๊าซชีวภาพได้ในระยะเวลาอันรวดเร็ว และกลุ่มที่ย่อยสลายได้ยาก (Refractory volatile solids: RVS) เป็นพวกที่ย่อยสลายได้ช้า ใช้เวลานาน (ธเรศ ศรีสถิตย์, 2553) การคำนวณปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดจากการหมักแบบไร้อากาศนั้น อาจต้องคิดเฉพาะส่วนที่ย่อยสลายได้ เนื่องจากระยะเวลาของมูลฝอยในระบบไม่ได้ยาวนานเพียงพอให้จุลินทรีย์ได้ทำงาน

Kayhanian (1995) ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของค่าสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ (BVS) โดยทำการทดลองด้วยวิธีการหมักแบบทีละเท (Batch fermentation) และการหมักแบบต่อเนื่อง (Continuous fermentation) พบว่ามูลฝอยชุมชนแต่ละประเภทได้แก่ กระดาษ หนังสือพิมพ์ กระดาษสำนักงาน มูลฝอยเศษอาหาร เศษหญ้าและใบไม้ และมูลฝอยชุมชน มีของแข็งระเหยกลุ่มย่อยสลายได้ง่าย (BVS) คิดเป็นร้อยละ 23, 82, 72 และ 69 ของของแข็งระเหย (VS) ตามลำดับ จากการทดลองสามารถหาปริมาณก๊าซชีวภาพจากการคำนวณปริมาณ BVS ได้

สมการของ Buswell และ Mueller (1952)



เมื่อ a, b, c และ d คือ จำนวนอะตอมของธาตุ Carbon, Hydrogen, Oxygen และ Nitrogen ตามลำดับ

## 2.3 กระบวนการเผาไหม้ (Combustion)

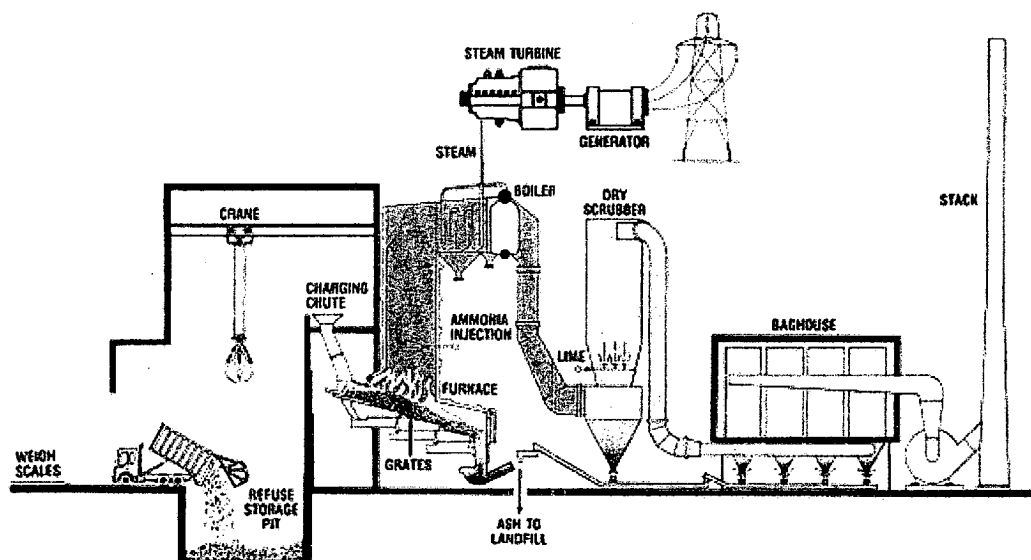
### 2.3.1 กระบวนการความร้อนสำหรับการเผาไหม้

กระบวนการความร้อนสำหรับการเผาไหม้สามารถจำแนกได้ตามปริมาณความต้องการอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ โดยปริมาณอากาศหรือออกซิเจนที่ต้องการสำหรับการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ เรียกว่า ปริมาณอากาศสมมูลของการเผาไหม้ (Stoichiometric combustion) ส่วนกระบวนการความร้อนสำหรับการเผาไหม้ที่ใช้อากาศปริมาณมากกว่าปริมาณอากาศสมมูลของการเผาไหม้เรียกว่าการเผาไหม้แบบใช้อากาศมาก (Excess air combustion) กระบวนการความร้อนสำหรับการเผาไหม้ที่ใช้อากาศน้อยกว่าปริมาณอากาศสมมูลของการเผาไหม้เรียกว่าก๊าซซิฟิเคชัน (Gasification) และกระบวนการความร้อนสำหรับการเผาไหม้ที่ไม่ใช้อากาศเรียกว่า ไพโรไลซิส (Pyrolysis)

### 2.3.2 การเผาผลาญโดยเตาเผา (Incinerator)

การกำจัดมูลฝอยโดยใช้เตาเผาจะต้องใช้ความร้อนอยู่ระหว่าง 1,300 - 1,800 องศาฟาเรนไฮต์ จึงจะทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ เป็นวิธีการกำจัดมูลฝอยวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการลดปริมาตรมูลฝอยลงได้ดีที่สุด สามารถลดปริมาตรมูลฝอยชุมชนได้ร้อยละ 70 - 90 ของปริมาณมูลฝอยทั้งหมด ปริมาณมูลฝอยที่ส่งเข้าเตาเผาเหลือเป็นขี้เถ้าไม่เกินร้อยละ 10 ของปริมาณมูลฝอยทั้งหมด ซึ่งขี้เถ้าที่ได้จะถูกนำไปฝังกลบอย่างถูกวิธีหรือใช้ผลิตเป็นวัสดุก่อสร้างต่อไป นอกจากนี้ยังสามารถนำพลังงานความร้อนที่ได้กลับมาใช้ประโยชน์ เช่น การผลิตน้ำร้อน ไอน้ำ หรือ พลังงานไฟฟ้า

รูปแบบของเตาเผาจะแตกต่างกันไปตามส่วนประกอบของมูลฝอย ถ้ามูลฝอยเผาไหม้ได้ง่ายเตาเผาที่ออกแบบเป็นเตาเผาที่ไม่ต้องใช้เชื้อเพลิงอย่างอื่น ช่วยในการเผาไหม้ แต่ถ้าส่วนประกอบของมูลฝอยมีส่วนที่เผาไหม้ได้ต่ำกว่าร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก หรือมีความชื้นมากกว่าร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก เตาเผาที่ใช้ต้องเป็นชนิดที่ต้องมี เชื้อเพลิงช่วยในการเผาไหม้ (สุทธิรักษ์ สุจริตตานนท์, 2536) ลักษณะทั่วไปของเตาเผา ดังแสดงในภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 เตาเผามูลฝอยที่ติดตั้งอุปกรณ์สำหรับใช้ประโยชน์ด้านพลังงานความร้อน  
จากการเผาไหม้ (Tchobanoglous, 1993)

### 2.3.3 องค์ประกอบพื้นฐานของการติดไฟของมูลฝอย

มูลฝอยที่ติดไฟได้ (Combustible waste) สามารถติดไฟได้ และให้พลังงานความร้อนออกมาแตกต่างกันตามองค์ประกอบพื้นฐานของมูลฝอยเอง (ชเรศ ศรีสถิตย์, 2553) ได้แก่

(1) ค่าความชื้น (Moisture content) หมายถึงปริมาณน้ำที่สะสมเป็นส่วนประกอบของมูลฝอย หรือเกาะอยู่ตามผิวของมูลฝอยที่มีผลต่อการเผา เพราะในการเผาทำลายมูลฝอยต้องไถ่น้ำออกจากมูลฝอยแล้วมูลฝอยจึงติดไฟ หรืออาจกล่าวได้ว่าต้องหาพลังงานความร้อนมาใช้ในการไถ่น้ำออกไปจากมูลฝอยก่อนจนมูลฝอยแห้งจึงทำการเผาทำลายได้หมด ดังนั้นมูลฝอยเปียกต้องใช้พลังงานความร้อนมาช่วยในการเผามากกว่ามูลฝอยแห้ง

(2) ค่าความร้อน (Calorific value) หมายถึง ค่าพลังงานความร้อนที่มีอยู่ในตัวของมูลฝอยที่ให้ออกมาเมื่อมูลฝอยติดไฟ สามารถหาได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ เช่น กระดาษให้ค่าความร้อนอยู่ในช่วง 2,800 - 4,500 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม พลาสติกมีค่าความร้อน 6,700 - 8,900 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม โดยรวมแล้วมูลฝอยมีค่าความร้อนประมาณ 2,200 - 3,300 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม ค่าความร้อนของมูลฝอยเป็นตัวช่วยในการเผาไหม้ของมูลฝอยได้เป็นอย่างดี

(3) ปริมาณเถ้า (Ash content) เป็นส่วนที่เหลือจากการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ หรือส่วนที่ไม่สามารถติดไฟได้อีกของมูลฝอยมูลฝอยต่างๆมีปริมาณเถ้าต่างกัน บางอย่างมีปริมาณเถ้าเล็กน้อยมาก เช่นพลาสติก กระดาษ แต่บางอย่างก็มีปริมาณเถ้าสูง เช่น เศษไม้ กิ่งไม้ ใบไม้ หรือเศษอาหาร โดยในการเผามูลฝอยจะเกิดเถ้า 2 ประเภท คือ

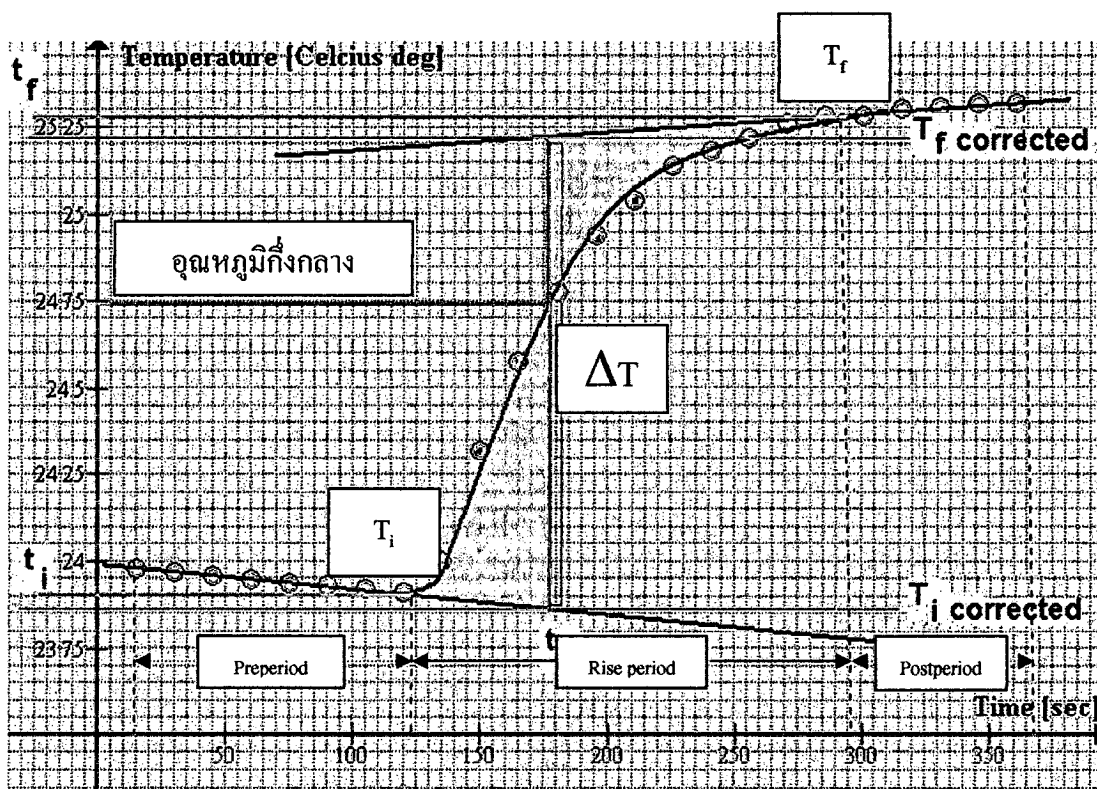
- เถ้าหนัก (Bottom ash) เป็นเถ้าที่เกิดจากการเผาไหม้ของมูลฝอย มีขนาดใหญ่ ฟุ้งกระจายได้ยาก ส่วนมากตกอยู่ที่ก้นเตา ส่วนประกอบส่วนใหญ่ของเถ้าชนิดนี้เป็นสารที่ไม่ติดไฟอีกต่อไป (Inert material) สัดส่วนของเถ้าหนักประมาณร้อยละ 80 - 90 ของปริมาณเถ้าทั้งหมด

- เถ้าลอย (Fly ash) เป็นเถ้าที่ฟุ้งกระจายตลอดออกจากห้องเผาไปได้ และถูกดักอยู่ที่อุปกรณ์ดักฝุ่น เช่น ไซโคลน ถังกรอง เป็นต้น เถ้าลอยมีขนาดเล็กมาก สามารถเป็นได้ทั้งฝุ่นขนาดใหญ่ (Total Suspended Particulate: TSP) และฝุ่นขนาดเล็ก (Particulate Matter: PM10) ส่วนประกอบของฝุ่นเป็นสารประกอบที่ไม่ติดไฟเช่นเดียวกับเถ้าหนัก แต่จะมีปริมาณโลหะหนักปะปนอยู่ด้วยในปริมาณที่มากกว่าเถ้าหนัก จึงจัดว่าเถ้าลอยเป็นของเสียอันตราย ไม่ว่าจะมาจากเตาเผามูลฝอยชุมชน หรือเตาเผามูลฝอยติดเชื้อก็ตาม

### 2.3.4 ค่าความร้อน (Calorific value)

#### 2.3.4.1 แคลอริมิทรี (Calorimetry)

แคลอริมิทรีเป็นวิธีการหาค่าปริมาณความร้อนของเชื้อเพลิงผสม (Vesilind และคณะ, 2002) หลักการ คือการใช้เครื่องวัดค่าความร้อนบอมม์แคลอริมิเตอร์ซึ่งประกอบด้วยลูกบอมม์ภายในมีพื้นที่ว่างสำหรับนำตัวอย่างที่ทราบน้ำหนักมาบรรจุ นำลวด (Fuse wire) ต่อที่ขั้วไฟฟ้าสองขั้วของเครื่อง โดยให้ลวดสัมผัสผิวหน้าของตัวอย่าง ปิดฝาให้เรียบร้อย แล้วบรรจุก๊าซออกซิเจนให้มากเกินพอลงในลูกบอมม์ หลังจากนั้นนำมาวางไว้ในถังบรรจุน้ำ 2 ลิตร จุดประกายไฟภายในลูกบอมม์ ตัวอย่างจะเกิดการเผาไหม้ ทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น บันทึกอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปทุกๆ 1 นาที ทำการพล็อตกราฟระหว่างอุณหภูมิกับเวลา เรียกว่าเทอร์โมกราฟ ดังแสดงในภาพที่ 2.5 จะเห็นว่าช่วงเริ่มต้น (Preperiod) กับช่วงสุดท้าย (Postperiod) มีความชันแตกต่างกัน (Rise period) และอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นไม่ได้เป็นเส้นตรง ดังนั้นจึงต้องหาค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง ( $\Delta T$ ) อย่างถูกต้องจากการทดลองให้ได้ วิธีที่นิยมใช้กัน คือวัดอุณหภูมิ ณ ช่วงเวลาที่อยู่กึ่งกลางของกราฟซึ่งคือเวลาที่ทำให้พื้นที่แรเงาสองส่วนในกราฟเท่ากัน จากเทอร์โมกราฟ  $T_i$  คืออุณหภูมิเริ่มต้น  $T_f$  คืออุณหภูมิสุดท้ายและส่วนต่างของสองค่านี้คืออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง ( $\Delta T$ )



ภาพที่ 2.5 เทอร์โมกราฟที่ได้จากการทดลองบอมบ์แคลอรีมิเตอร์  
(ที่มา: <http://ishigirl.tripod.com/pchem/calorimetry.html>)

น้ำที่อยู่รอบลูกบอมบ์ทำหน้าที่เป็นฉนวน โดยสมมติให้ไม่มีการถ่ายเทความร้อนออกจากระบบพลังงานทั้งหมดที่เกิดจากการเผาไหม้ตัวอย่างภายในลูกบอมบ์ถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนให้แก่ น้ำและลูกบอมบ์ 1 แคลอรี หมายถึงปริมาณพลังงานที่ทำให้ น้ำ 1 กรัม มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 องศาเซลเซียส ค่าความร้อนสามารถหาได้เมื่อทราบน้ำหนักของตัวอย่าง โดยนำมาเปรียบเทียบกับสารมาตรฐานที่ทราบค่าความร้อน คือ เบนโซอิกแอซิด (Benzoic acid) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$C_v = UM_b / \Delta T \quad (2.2)$$

เมื่อ  $C_v$  คือ ค่าความร้อน หน่วย แคลอรีต่อองศาเซลเซียส

$U$  คือ ค่าความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ของ Benzoic acid หน่วย แคลอรีต่อกรัม

$M_b$  คือ น้ำหนักของ Benzoic acid หน่วย กรัม

$\Delta T$  คือ อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงจากเทอร์โมกราฟ หน่วย องศาเซลเซียส

และเพื่อให้ได้ค่าความร้อนที่ถูกต้องจะต้องหักค่าความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ของลวดด้วย สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$C_v = [6318M_b + 1643M_w] / \Delta T \quad (2.3)$$

เมื่อ  $M_w$  คือ น้ำหนักของลวดที่ถูกใช้สำหรับการเผาไหม้ หน่วย กรัม

#### 2.3.4.2 ค่าความร้อน

ข้อมูลหลักที่มีความจำเป็นต่อการออกแบบเตาเผามูลฝอย คือ ค่าความร้อน ซึ่งหาได้จากวิธี Bomb calorimeter ในห้องทดลอง โดยสามารถแบ่งออกเป็น 4 ระดับ

ค่าความร้อนต่างๆ สามารถอธิบายได้ (ยูทรินา เรื่องเศรษฐญัตติ, 2539) ดังนี้

##### (1) ค่า Dry Solid Calorific Value (DSCV)

เป็นค่าความร้อนที่ได้จากการเผาอย่างสมบูรณ์ โดยสันดาปกับออกซิเจนบริสุทธิ์ที่จะเกิดได้เฉพาะในห้องทดลองเท่านั้น

##### (2) ค่า Higher Solid Calorific Value (HSCV)

เป็นค่าความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้สารเฉพาะส่วนที่เป็นของแข็งที่ปราศจากความชื้น หรือเรียกว่าค่าความร้อนรวม (Gross calorific value)

$$HSCV = DSCV \times \text{ค่าปริมาณของแข็งรวม} / 100 \quad (2.4)$$

##### (3) ค่า Low Solid Calorific Value (LSCV)

เป็นค่าความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้สารตามปกติหรือเป็นค่าปริมาณความร้อนสูงหักออกด้วยค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ หรือเรียกว่าค่าความร้อนสุทธิ (Net calorific value)

$$LSCV = HSCV - 600[(9 \times h) + \text{ค่าปริมาณความชื้น}] / 100 \quad (2.5)$$

##### (4) ค่า Low Waste Solid Calorific Value (LWSCV)

เป็นค่าความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้สารตามปกติรวมกับค่าปริมาณความร้อนที่สูญเสียให้กับสารที่ไม่สามารถถูกเผาไหม้ได้

### 2.3.5 การคำนวณค่าความร้อนของมูลฝอย

จากการศึกษาความเป็นไปได้การผลิตกระแสไฟฟ้าจากมูลฝอยเทศบาลจังหวัดเชียงใหม่ ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (2545) กล่าวว่าค่าความร้อนของมูลฝอยที่นำมาทำการเผา นั้นมีความสำคัญต่อการวางแผนการจัดการมูลฝอย และการออกแบบระบบเตาเผามูลฝอย ทั้งนี้สูตรการคำนวณเกี่ยวกับปริมาณค่าความร้อนนั้น มีอยู่ด้วยกันหลายสูตร ซึ่งขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่

- ลักษณะวัตถุดิบที่เข้าสู่ระบบ เช่น ชีวมวล ถ่านหิน มูลฝอยชุมชน เป็นต้น
- ค่าตัวแปรจากการวิเคราะห์ที่แทนในสูตร เช่น การวิเคราะห์ลักษณะทางเคมี

(Proximate analysis) เป็นการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้น, ปริมาณของแข็งทั้งหมด, ปริมาณของแข็งระเหยง่าย และปริมาณเถ้า กับค่าความร้อนของเชื้อเพลิง ในขณะที่การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (Ultimate analysis) จะเป็นการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ Carbon, Hydrogen, Oxygen, Nitrogen และ Sulfur กับค่าความร้อนของเชื้อเพลิง

ค่าองค์ประกอบ และปริมาณที่ต่างกันทำให้มีความพยายามในการปรับปรุงสูตรการคำนวณค่าความร้อนที่ได้เพื่อให้มีความแม่นยำมากขึ้น ตัวอย่างสูตรคำนวณค่าความร้อน ได้แก่

ก) การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (Ultimate analysis) เป็นการวิเคราะห์ธาตุพื้นฐานของมูลฝอยที่มีผลต่อค่าความร้อน (Liu, Paoda and Holsen, 1996) ตัวอย่างสูตรการคำนวณจากการวิเคราะห์แบบ Ultimate analysis

สมการ Tillman  $HHV = aC + b$  (kJ/kg)  
ศึกษากับ ชีวมวล (Channiwala และ Parikh, 2002)

สมการ Ruyter  $HHV = aC + bH + cO$  (kJ/kg)  
ศึกษากับ ชีวมวล (Zanzi, 2002)

สมการ Mott and Spooner  $HHV = aC + bH + cO + dS$  (kJ/kg)  
ศึกษากับ ถ่านหิน และ เชื้อเพลิง (Kathiravale และคณะ, 2003)

สมการ Dulong  $HHV = 81C + 342.5(H - O/8) + 22.5S$  (kcal/kg)  
ศึกษากับ ถ่านหิน และ มูลฝอยชุมชน (Wilson, 1972)

สมการ Steuer  $HHV = 81(C - 3O/8) + 1710/8 + 342.5(H - O/16) + 25S$  (kcal/kg)  
ศึกษาเกี่ยวกับ ถ่านหิน และ มูลฝอยชุมชน (Cho และคณะ, 1995)

สมการ Scheurer-Kestner  $HHV = 81(C - 3O/8) + 342.5H + 22.55S + 1710/4$  (kcal/kg)  
ศึกษาเกี่ยวกับ ถ่านหิน และ มูลฝอยชุมชน (Cho และคณะ, 1995)

ข) การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางเคมี (Proximate analysis) เป็นการวิเคราะห์ที่สมมติว่าเชื้อเพลิงประกอบด้วยสารที่เผาไหม้ได้หรือปริมาณของแข็งระเหย และคาร์บอนคงที่ (Fixed carbon) หรือปริมาณเถ้า ซึ่งมีผลต่อค่าความร้อน (Liu, Paoda and Holsen, 1996) ตัวอย่างสูตรการคำนวณจากการวิเคราะห์แบบ Proximate analysis ได้แก่

สมการ Goutal  $HHV = aV + bF$  (kJ/kg)  
ศึกษาเกี่ยวกับ ถ่านหิน และ เชื้อเพลิง (Demirbas, 1997)

สมการ Jimenez  $HHV = a(V + F) + b$  (kJ/kg)  
ศึกษาเกี่ยวกับ ชีวมวล (Cordero และคณะ, 2001)

สมการ Liu  $HHV = aV - bM$  (kJ/kg)  
ศึกษาเกี่ยวกับ เชื้อเพลิง (Kathiravale และคณะ, 2003)

สมการ Bento  $HHV = aV - bM + c$  (kJ/kg)  
ศึกษาเกี่ยวกับ เชื้อเพลิง (Kathiravale และคณะ, 2003)

เมื่อ HHV คือ Higher Heating Value

a, b, c, ..., คือ ค่าคงที่ตามที่สมการกำหนด

C คือ Carbon content (%)      H คือ Hydrogen content (%)

O คือ Oxygen content (%)      N คือ Nitrogen content (%)

S คือ Sulfur content (%)      V คือ Volatile matter (%)

F คือ Fixed carbon (%)      M คือ Moisture (%)

A คือ Ash content (%)

จากสูตรการคำนวณหาค่าความร้อนข้างต้น จะเห็นได้ว่าค่าความชื้นของวัตถุดิบที่นำมาใช้คำนวณในการวิเคราะห์แบบ Proximate analysis นั้น เป็นน้ำที่อยู่ในรูปแบบของน้ำอิสระ (Free water) เท่านั้น แต่น้ำเกาะติด (Bound water) ยังไม่ได้ถูกนำมาคำนวณด้วย ซึ่งถ้ามีน้ำเกาะติดในวัตถุดิบมีปริมาณมาก ค่าความร้อนที่ได้จะลดลงเนื่องจากต้องสูญเสียไปกับการระเหยน้ำออกจากวัตถุดิบเสียก่อน

ในปัจจุบันการใช้มูลฝอยมาแปรรูปเป็นพลังงานของบางประเทศทั้งในเอเชียและยุโรปมีการเติบโต ในบางส่วนเกิดจากการที่มีพื้นที่ว่างเหลืออยู่ รวมทั้งมีแหล่งทรัพยากรพลังงานไม่มาก ในหลายๆประเทศจึงมีการสร้างโรงงานเพื่อใช้ประโยชน์จากการเปลี่ยนรูปมูลฝอยเป็นพลังงาน โดยจำนวนโรงงานที่มีกระบวนการแปรรูปมูลฝอยเป็นพลังงานมากกว่า 600 แห่ง ใน 35 ประเทศ โดยประเทศที่มีการแปรรูปมูลฝอยโดยการเผา 5 อันดับสูงสุดคือ เดนมาร์ก สวิตเซอร์แลนด์ ฝรั่งเศส สหรัฐอเมริกา และ สเปน โดยประเทศเดนมาร์กมีการเผาเพื่อเปลี่ยนของเสียเป็นพลังงานถึงร้อยละ 54 ในขณะที่สหรัฐอเมริกามีการเผาขยะเพื่อเปลี่ยนของเสียเป็นพลังงานร้อยละ 14 (เชาวน์ นกอยู่, 2554)

## 2.4 ความถดถอยพหุคูณเชิงเส้น (Multiple linear regressions)

การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณเชิงเส้น เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป โดยส่วนใหญ่เป็นตัวแปรเชิงปริมาณ ที่มีผลต่อตัวแปรตามซึ่งจะต้องเป็นตัวแปรเชิงปริมาณเท่านั้น รูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม สามารถแทนได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้น (Linear model) (มัลลิกา บุญนาค และคณะ, 2540)

### 2.4.1 รูปแบบของสมการความถดถอยเชิงเส้นแบบพหุคูณ

สามารถอธิบายได้โดยกำหนดให้มีตัวแปรอิสระ  $k$  ตัว ( $X_1, X_2, \dots, X_k$ ) ที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม  $Y$  โดยที่ความสัมพันธ์อยู่ในรูปเชิงเส้น จะได้สมการ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $Y$  กับ  $X_1, X_2, \dots, X_k$  (กัลยา วานิชย์บัญชา, 2544) ดังนี้

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \epsilon_i$$

เมื่อ  $\beta_0$  คือ ส่วนตัดแกน  $Y$  เมื่อกำหนดให้  $X_1, X_2, \dots, X_k = 0$

$\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$  คือ สัมประสิทธิ์ความถดถอยเชิงส่วน (Partial regression coefficient) โดยที่ค่า  $\beta_1$  แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปร  $Y$  เมื่อตัวแปรอิสระ  $X_1$  เปลี่ยนไป 1 หน่วย โดยที่ค่าตัวแปรอิสระอื่นมีค่าคงที่

$\varepsilon_i$  คือ ค่าความคลาดเคลื่อน (Error term)

สมมติฐานมีดังนี้

1. ความคลาดเคลื่อน  $\varepsilon_i$  เป็นตัวแปรที่มีการแจกแจงปกติ
2. ค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนเป็นศูนย์  $E(e) = 0$
3. ค่าแปรปรวนความคลาดเคลื่อนเป็นค่าคงที่ที่ไม่ทราบค่า  $V(e) = \sigma^2$
4.  $e_i$  และ  $e_j$  เป็นอิสระต่อกัน เมื่อ  $i \neq j$  นั่นคือ covariance  $(e_i, e_j) = 0$

#### 2.4.2 ความหมายของสัมประสิทธิ์ความถดถอยเชิงส่วน

$\beta_0$  เป็นระยะตัดแกนตัดแกน  $y$  เช่นเดียวกับสมการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย แต่ในสมการถดถอยพหุคูณนี้  $\beta_0$  คือค่า  $Y$  เมื่อ  $X_1, X_2, \dots, X_k$  ต่างเท่ากับ 0

$\beta_1$  และ  $\beta_2$  เรียกว่า สัมประสิทธิ์ความถดถอยเชิงส่วน (partial or net regression coefficient)  $\beta_1$  จะวัดการเปลี่ยนแปลงของ  $Y$  เมื่อ  $X_1$  เปลี่ยนไป 1 หน่วย แต่  $X_2$  คงที่ และ  $\beta_2$  จะวัดการเปลี่ยนแปลงของ  $Y$  เมื่อ  $X_2$  เปลี่ยนไป 1 หน่วย แต่  $X_1$  คงที่

## 2.5 การใช้ประโยชน์จากมูลฝอยของประเทศไทยในปัจจุบัน

ประเทศไทยได้มีการริเริ่มโครงการนำร่องเกี่ยวกับการนำมูลฝอยมาแปรรูปเป็นพลังงานขึ้นในปีพ.ศ. 2538 โดยศูนย์ปฏิบัติการวิศวกรรมพลังงานและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ได้เริ่มดำเนินโครงการบำบัดและใช้ประโยชน์จากมูลฝอย โดยได้รับงบประมาณจากมูลนิธิชัยพัฒนาเพื่อจัดตั้งกองทุนบำบัดและใช้ประโยชน์จากมูลฝอยตามแนวพระราชดำริพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวฯ ซึ่งมีเป้าหมายในการผลิตกระแสไฟฟ้าขนาด 650 กิโลวัตต์ จากพื้นที่ประมาณ 65 ไร่ ของแหล่งฝังกลบมูลฝอยอย่างถูกหลักสุขาภิบาลกำแพงแสน และอยู่ห่างจากโรงไฟฟ้าซึ่งตั้งอยู่ภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์กำแพงแสน 1.7 กิโลเมตร ปัจจุบันอยู่ระหว่างการเริ่มต้นดำเนินโครงการระยะที่ 3 เพื่อเดินเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าเครื่องที่ 1 ขนาดกำลังผลิต 435 กิโลวัตต์ นอกจากนี้ยังมีโครงการนำก๊าซชีวภาพจากการฝังกลบมูลฝอยมาผลิตกระแสที่สถานที่ฝังกลบมูลฝอยอย่างถูกสุขลักษณะราชาทะเว ซึ่งดำเนินการโดยห้างหุ้นส่วนจำกัด ไพโรจน์สมพงษ์พาณิชย์ โดยมีขนาดกำลังผลิต 1 MW โครงการนี้ประกอบด้วย ระบบรวบรวมก๊าซ

ระบบทำความสะอาดก๊าซ และปรับปรุงคุณภาพก๊าซ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยใช้เครื่องยนต์แบบสันดาปภายใน และระบบต่อขนานกับการไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) ปัจจุบันสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าจำหน่ายให้กับการไฟฟ้านครหลวงได้ ตั้งแต่ต้นเดือนมกราคม พ.ศ. 2548

สุภภรณ์ ศิริโสภณา (2549) กล่าวว่าปัญหาและอุปสรรคในการลดปริมาณมูลฝอยของประเทศไทย คือขาดการคัดแยกมูลฝอย และการแยกทิ้งตามประเภทของมูลฝอย ซึ่งเป็นขั้นตอนสำคัญในการนำมูลฝอยไปใช้ประโยชน์ได้อีก ทั้งยังสะดวกต่อการนำไปใช้ประโยชน์ตามความต้องการ หรือขายได้ง่าย และราคาดี แต่ในประเทศไทยขั้นตอนนี้ยังไม่ค่อยได้ผล เนื่องจากประชาชนเห็นว่ารถเก็บขนมูลฝอยของเทศบาลเกือบทั้งหมดยังคงเป็นรถขนมูลฝอยแบบรวมเจ้าหน้าที่ประจำรถจะแยกเฉพาะมูลฝอยที่ขายได้ง่ายและแยกสะดวก เช่น เก็บขวดและกระดาก ก่องแยกใส่กระสอบ ฉีกถุงพลาสติกที่ชาวบ้านใช้บรรจุมูลฝอยออกแล้วรวมไว้ขายเอง ทำให้มูลฝอยที่รวมอยู่ในรถสกปรก ปะปน และปนเปื้อนกันเองจนเป็นที่น่ารังเกียจไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ทันที เพราะต้องจ้างแรงงานคัดแยก และทำความสะอาดก่อน ทำให้ไม่คุ้มค่าที่จะรีไซเคิลนั่นเอง ทำให้ปริมาณมูลฝอยที่สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้มีปริมาณน้อยกว่ามูลฝอยที่เกิดขึ้น

องค์กรพลังงานนานาชาติ (International Energy Agency: IEA) คาดการณ์ไว้ว่า ในช่วงปี 2544 - 2573 โลกต้องลงทุนในการพัฒนากิจการพลังงานถึง 16 ล้านล้านเหรียญสหรัฐ หรือ 5.5 แสนล้านเหรียญสหรัฐต่อปี และมีความต้องการพลังงานจากแหล่งต่างๆ เรียงตามลำดับดังนี้คือ น้ำมัน ร้อยละ 35 ถ่านหินร้อยละ 23 ก๊าซร้อยละ 23 พลังงานชีวมวลและและมูลฝอยร้อยละ 10 นิวเคลียร์ร้อยละ 5 พลังงานน้ำร้อยละ 2 และพลังงานอื่นที่นำมาใช้ใหม่ได้อีกร้อยละ 1 จะเห็นได้ว่า พลังงานชีวมวลและมูลฝอยเริ่มเข้ามาเป็นแหล่งพลังงานทางเลือกที่สำคัญทางหนึ่งของโลก

ในปี พ.ศ. 2549 ประเทศไทยโดยกระทรวงพลังงานได้กำหนดมาตรการและกลยุทธ์ด้านพลังงานที่สำคัญของประเทศ 3 มาตรการ โดย 2 ใน 3 มาตรการหลักมุ่งเน้น การส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนน้ำมัน และ การตั้งเป้าผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน เช่น พลังงานชีวภาพ พลังงานน้ำ พลังงานแสงอาทิตย์ และพลังงานลม ซึ่งมาตรการเหล่านี้ตั้งขึ้นเพื่อลดการพึ่งพาการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศ และส่งเสริมให้ประเทศไทยหันมาผลิตพลังงานไว้ใช้ป็นของตนเอง โดยเห็นสิ่งอื่นใดต้องอาศัยความร่วมมือของคนไทยช่วยกันประหยัดพลังงาน ทำให้ประเทศไทยมีความตื่นตัวในการหาแหล่งพลังงานทางเลือกและพลังงานหมุนเวียน เพื่อใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า หรือประโยชน์อย่างอื่น แทนการใช้พลังงานจากฟอสซิล ซึ่งเป็นพลังงานที่สร้างปัญหาให้กับสิ่งแวดล้อมอย่างมาก จากแผนอนุรักษ์พลังงาน ปีพ.ศ. 2551-2554 กระทรวงพลังงานได้เร่งผลักดันให้มีการใช้เทคโนโลยีก๊าซชีวภาพในประเทศไทยเพิ่มขึ้น เพื่อสนับสนุนการใช้

พลังงานสะอาด ซึ่งในปัจจุบันระบบการผลิตก๊าซชีวภาพสำหรับครัวเรือนครัวเรือนในประเทศไทย เริ่มแพร่หลายมากขึ้นและสามารถทำได้โดยง่าย ทั้งนี้เพราะก๊าซชีวภาพเป็นก๊าซที่เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ชนิดไม่ใช้ออกซิเจนภายใต้สภาวะที่ปราศจากออกซิเจน มีองค์ประกอบหลักเป็นก๊าซมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า ให้ความร้อน หรือใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ตลอดจนใช้เป็นก๊าซหุงต้มตามครัวเรือนได้ (กิตติมา ไกรพิรพรรณ, 2552)

รูปแบบการนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์เป็นพลังงานทดแทน มีอยู่ 3 ลักษณะ คือ

(1) การนำก๊าซชีวภาพไปใช้เป็นแหล่งเชื้อเพลิงเพื่อผลิตพลังงานความร้อน หรือ การใช้รูปของความร้อนโดยตรง จะได้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูง เช่น ใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อต้มไอน้ำในโรงงานผลิตอาหารสัตว์ ใช้เป็นเชื้อเพลิงในการอบแห้ง ใช้กับหัวกกกลูกสุกร ใช้ในครัวเรือน ฯลฯ อย่างไรก็ตาม การนำก๊าซชีวภาพไปใช้นั้น ควรคำนึงถึงวิธีการส่งลำเลียงก๊าซชีวภาพด้วย โดยปกติมีลำเลียงก๊าซชีวภาพไปตามท่อ โดยอาศัยเครื่องเป่าอากาศ (Blower) ช่วยเพิ่มแรงดันและระยะทางไม่ควรไกลจนเกินไป

(2) การใช้ก๊าซชีวภาพในการผลิตพลังงานกล/ไฟฟ้า เป็นรูปแบบการนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์ที่ได้รับความนิยมอย่างมากในฟาร์มเลี้ยงสุกร เนื่องจากพลังงานกล/ไฟฟ้าสามารถใช้งานได้ง่าย โดยเฉพาะเมื่อผลิตเป็นไฟฟ้าแล้ว สามารถนำไปใช้งานได้สะดวก

(3) การผลิตพลังงานร่วม (Cogeneration System) เป็นการผลิตพลังงานกล/ไฟฟ้า และความร้อนร่วมซึ่งเป็นระบบที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการใช้เชื้อเพลิงให้มีค่าสูงขึ้นมากกว่าการใช้ผลิตพลังงานไฟฟ้า / ความร้อนเพียงอย่างเดียว

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Vieitez และ Ghosh (1998) ศึกษากระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศ 2 ขั้นตอน โดยใช้มูลฝอยชุมชนที่สร้างขึ้น (Simulate solid waste) ใช้ถังบำบัด 2 ถัง คือถังผลิตกรดที่มีขนาด 14 ลิตร มีของแข็งร้อยละ 16 และถังผลิตมีเทน 8 ลิตร พบว่าปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส และกระบวนการผลิตกรดในถังผลิตกรดจะหยุดทำงานเมื่อมีกรดไขมัน (Volatile fatty acid) 13,000 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ ค่าพีเอชประมาณ 6 - 6.5 ทำการทดลอง 295 วัน ได้มีเทน 0.12 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย (Volatile) จากการศึกษาจะเห็นว่าของแข็งระเหยถูกเปลี่ยนเป็นมีเทนร้อยละ 30

Weiland (2000) กล่าวว่ากระบวนการหมักแบบไร้อากาศมีความเหมาะสมกับของเสียอินทรีย์จากการเกษตร และอุตสาหกรรมรวมทั้งของเสียอินทรีย์ในครัวเรือน เนื่องจากการย่อยสลาย

แบบไร้อากาศเป็นวิธีที่มีราคาถูกในการบำบัดของเสีย และสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ ส่วนที่เหลือจากการย่อยสลายสามารถนำมาทำเป็นปุ๋ยสำหรับกิจกรรมทางการเกษตร เทคโนโลยีการบำบัดแบบไร้อากาศจึงเหมาะสำหรับการบำบัดของเสียร่วมกับการผลิตพลังงานทดแทน

Zhang และคณะ (2007) ศึกษาศักยภาพของเศษอาหารในการใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ โดยทำการศึกษาความแปรปรวนของลักษณะทางเคมีของเศษอาหารเป็นเวลา 2 เดือน แล้วนำเข้าสู่ระบบหมักแบบไร้อากาศแบบที่ละเทเพื่อหาความสามารถในการย่อยสลายภายใต้สภาวะการหมักแบบไร้อากาศ (Anaerobic digestibility) รวมถึงศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทน ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส พบว่าเศษอาหารมีค่าความชื้นเฉลี่ยร้อยละ 70 และอัตราส่วนระหว่างของแข็งระเหยต่อของแข็งทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 83 ปริมาณสารอาหารที่พบในเศษอาหารมีปริมาณที่เหมาะสมต่อจุลินทรีย์กลุ่มที่ไม่ต้องการอากาศ (Anaerobic microorganism) ในวันที่ 10 และ 28 พบว่าอัตราการผลิตก๊าซมีเทนคิดเป็น 348 และ 435 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยตามลำดับ เปอร์เซ็นต์มีเทนในก๊าซชีวภาพเฉลี่ยคิดเป็นร้อยละ 73 ของแข็งระเหยที่ถูกใช้ไปคิดเป็นร้อยละ 81 เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ 28 วัน

Moody และคณะ (2010) ศึกษากระบวนการหาศักยภาพในการผลิตมีเทนหรือบีเอ็มพี เพื่อใช้เป็นข้อมูลที่บ่งบอกความสามารถของการย่อยแบบไร้อากาศที่เกิดจากสารอินทรีย์ โดยให้เหตุผลว่าการใช้กระบวนการบีเอ็มพีนั้นมีราคาที่สูงกว่าและทำซ้ำได้หลายครั้งเพื่อให้ได้ผลการทดลองการย่อยแบบไร้อากาศและการผลิตก๊าซชีวภาพมีค่าแม่นยำและถูกต้องมากขึ้น ข้อมูลที่ได้จากกระบวนการบีเอ็มพีจะมีประโยชน์ในการประเมินศักยภาพการย่อยแบบไร้อากาศของสารอินทรีย์และเพิ่มประสิทธิภาพการออกแบบและการทำงานของย่อยสลายแบบไร้อากาศ ทำการทดลองตามวิธีการของ Owen และคณะ (1979) จากผลการทดลองจะได้ค่าปริมาณของก๊าซมีเทนต่อปริมาณซีโอดีของสารอินทรีย์ และปริมาณของก๊าซชีวภาพต่อปริมาณซีโอดีของสารอินทรีย์ ซึ่งข้อมูลดังกล่าวถือเป็นข้อมูลที่เป็นประโยชน์มาก เพื่อใช้ในการประมาณการณ์มวลของซีโอดีที่จะถูกย่อยแบบไร้อากาศในถังปฏิกรณ์ตามช่วงระยะเวลาที่กำหนด นอกจากนี้ยังสามารถพิจารณาถึงการย่อยสลายร่วม (Co-digestion) ของสารอินทรีย์ต่างๆ ถึงประสิทธิภาพการย่อยสลายของสารใดที่อาจประสบความสำเร็จในการผลิตก๊าซมีเทนได้ดีเพื่อเป็นทางเลือกของแหล่งพลังงานใหม่ในอนาคต

ธเรศ ศรีถิตย์ และ จุลจามาศ บุญทวีสุข (2542) ศึกษาการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์คำนวณค่าความร้อนโดยสุ่มตัวอย่างมูลฝอยจากสถานีกำจัดมูลฝอย 3 แห่ง ของกรุงเทพมหานคร คือ โรงงานกำจัดมูลฝอยหนองแขม สถานีขนถ่ายมูลฝอยท่าแร้ง และ โรงงานกำจัดมูลฝอยอ่อนนุช โดยเก็บตัวอย่างแห้งละ 15 วัน วันละ 1 ตัวอย่าง รวมทั้งสิ้นจำนวน 45 ตัวอย่าง นำมาหาลูกประกอบทางกายภาพ ทางเคมี และค่าความร้อนของมูลฝอยในห้องปฏิบัติการ โดยพิจารณาค่าความร้อน 2

กรณี คือค่าความร้อนรวม และค่าความร้อนแยกแต่ละส่วนขององค์ประกอบที่เผาไหม้ได้ แล้วทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อนที่หาได้โดยวิธี Bomb calorimeter กับพื้นฐาน Three component องค์ประกอบทางกายภาพของมูลฝอย และคุณสมบัติทางเคมี ใช้ความถดถอยพหุคูณเชิงเส้นในการวิเคราะห์ ซึ่งกำหนดความเชื่อมั่นที่ 95% สามารถสร้างสมการค่าความร้อนได้ดังนี้

ค่าความร้อน – Three component

$$Q_{\text{รวม}} = -422.83 + 50.40V$$

$$R^2 = 0.6791$$

ค่าความร้อน – องค์ประกอบทางกายภาพของมูลฝอย

$$Q_{\text{รวม}} = 3153.14 + 16.55P_i + 12.69W_o - 42.8W$$

$$R^2 = 0.6791$$

ค่าความร้อน – คุณสมบัติทางเคมี

$$Q_{\text{รวม}} = -637.48 + 80.51C$$

$$R^2 = 0.7153$$

เมื่อ  $Q_{\text{รวม}} =$  ค่าความร้อน LHV ของตัวอย่างรวม (kcal/kg)

$V =$  ปริมาณสารที่เผาไหม้ได้ (% wet wt.)

$P_i =$  พลาสติก (% wet wt.)

$W_o =$  เศษอาหาร (% wet wt.)

$W =$  ความชื้น (% wet wt.)

$C =$  ปริมาณคาร์บอน (% wet wt.)

จากการศึกษา สรุปว่าค่าความร้อนที่คำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างจากองค์ประกอบทางเคมีของมูลฝอยสามารถนำไปคาดการณ์ค่าความร้อนได้ดีที่สุด

ชวลิต แซ่ลิ้ม (2543) ศึกษาแนวทางการใช้ประโยชน์ก๊าซชีวภาพจากการฝังกลบของเทศบาลที่มีอัตราการผลิตมูลฝอย 100 ตันต่อวัน โดยพิจารณาแนวทางการใช้ประโยชน์ 2 แนวทาง คือ การนำก๊าซไปผลิตไฟฟ้า และเผาไหม้โดยตรง พบว่าสามารถผลิตกระแสไฟฟ้า และความร้อนได้รวม  $89.36 \times 10^6$  กิโลวัตต์-ชั่วโมง และ 900,666 จิกะจูล ตามลำดับ และต้นทุนราคากระแสไฟฟ้ามี่ค่าระหว่าง 0.21-0.24 บาทต่อ กิโลวัตต์-ชั่วโมง และต้นทุนราคาก๊าซพบว่ามีค่าระหว่าง 8.25-10.26 บาทต่อจิกะจูล (คิดเฉพาะค่าใช้จ่ายระบบรวบรวมก๊าซและนำ ก๊าซไปใช้ประโยชน์)

สำนักรักษาความสะอาด (2545) ศึกษาคุณสมบัติของมูลฝอยของกรุงเทพมหานคร ตลอดปีงบประมาณ 2545 พบว่าสมบัติของมูลฝอยที่เก็บรวบรวม ณ โรงงานกำจัดมูลฝอยอ่อนนุช ดังนี้

(1) คุณสมบัติทางกายภาพ มีความหนาแน่นเฉลี่ย 0.40 กิโลกรัมต่อลิตร องค์ประกอบมูลฝอยประเภทที่เผาไหม้ได้ที่มีมากที่สุด คือ เศษอาหารคิดเป็นร้อยละ 34.16 ของมูลฝอยทั้งหมด รองลงมา คือ พลาสติกและโฟมคิดเป็นร้อยละ 20.76 ของมูลฝอยทั้งหมด กระดาษคิดเป็นร้อยละ 13.58 ของมูลฝอยทั้งหมด ไม้และใบไม้คิดเป็นร้อยละ 6.59 ของมูลฝอยทั้งหมด ผ้าและสิ่งทอคิดเป็นร้อยละ 6.58 ของมูลฝอยทั้งหมด ยางและหนังคิดเป็นร้อยละ 2.19 ของมูลฝอยทั้งหมด ส่วนประเภทที่เผาไหม้ไม่ได้ประกอบด้วยแก้วคิดเป็นร้อยละ 5.07 ของมูลฝอยทั้งหมด โลหะคิดเป็น ร้อยละ 2.18 ของมูลฝอยทั้งหมด หินและเซรามิกคิดเป็นร้อยละ 2.32 ของมูลฝอยทั้งหมดและประเภทอื่นๆ ซึ่งให้คำจำกัดความว่าเป็นมูลฝอยที่เล็กกว่า 10 มิลลิเมตร ส่วนใหญ่เป็นอินทรีย์สารคิดเป็นร้อยละ 8.57 ของมูลฝอยทั้งหมด

(2) ลักษณะสมบัติทางเคมีเป็นข้อมูลของปีงบประมาณ 2544 ประกอบไปด้วย ปริมาณความชื้นคิดเป็นร้อยละ 55.62 ปริมาณสารที่เผาไหม้ได้คิดเป็นร้อยละ 35.96 ปริมาณเถ้าคิดเป็น 10.64 และปริมาณความร้อนเท่ากับ 1,677.73 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม และมีองค์ประกอบทางเคมีประกอบด้วย คาร์บอนคิดเป็นร้อยละ 45.41 ไฮโดรเจนคิดเป็นร้อยละ 5.11 ออกซิเจนคิดเป็นร้อยละ 30.37 ซัลเฟอร์คิดเป็นร้อยละ 0.67 คลอรีนคิดเป็นร้อยละ 0.58 และประกอบด้วยโลหะหนัก นิกเกิล 0.76 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มูลฝอย แคดเมียม 1.16 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มูลฝอย พลวง 5.52 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มูลฝอย และปรอท 0.06 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มูลฝอย

โครงการการวิจัยเชิงนโยบายเพื่อสนับสนุนการพัฒนาและการใช้พลังงานหมุนเวียนและการเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้พลังงานในประเทศไทย จัดทำโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย (2550) ทำการประเมินและจัดลำดับความสำคัญของศักยภาพแหล่งพลังงานหมุนเวียนก๊าซชีวภาพ และมูลฝอย พบว่าแม้จะมีศักยภาพไม่สูงนัก (370 และ 330 เมกะวัตต์ ตามลำดับ) แต่ก็เป็ศักยภาพเชิงเศรษฐศาสตร์ที่น่าจะนำมาใช้ประโยชน์ได้จริง โดยมูลฝอยจัดเป็นพลังงานหมุนเวียนที่มีศักยภาพในการผลิตไฟฟ้าคิดเป็น 323 เมกะวัตต์ โดยรวมทั้งประเทศใน ปี 2554 และ จากการคาดการณ์ปริมาณมูลฝอยที่จะเกิดขึ้นในอนาคตในปี 2559 พบว่า มูลฝอยจะมีศักยภาพเชิงเศรษฐศาสตร์ขั้นต่ำ 384 เมกะวัตต์

รนา นาด ไตรภพ และคณะ (2551) ศึกษาวิธีการจัดการมูลฝอยชุมชนจำนวน 2 แห่ง ได้แก่ วิสาหกิจชุมชนท่าสุด ตำบลท่าสุด อำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย และเทศบาลตำบลต้นเปา อำเภอสันกำแพง จังหวัดเชียงใหม่ โดยวิสาหกิจชุมชนท่าสุด เลือกเทคโนโลยีเตาเผาแบบไม่ใช้พลังงานที่มีต้นทุนในการก่อสร้างและดำเนินการต่ำ ในการดำเนินงานสามารถเผากำจัดมูลฝอยแห้ง เช่น ถูพลาสติกและบรรจุภัณฑ์ชนิดต่างๆ ที่ไม่มีส่วนผสมของมูลฝอยเปียก เช่น เศษอาหาร ผักและผลไม้ พบว่ามีประสิทธิภาพการเผาไหม้เฉลี่ยร้อยละ 99.95 ผลิตกำลังความร้อนในรูปแบบของไอเสียได้

519.06 กิโลวัตต์ แต่สมรรถนะจะลดน้อยลงไปเมื่อมีส่วนผสมของมูลฝอยเปียกเพิ่มขึ้น ดังนั้น เพื่อให้การเผากำจัดมูลฝอยมีประสิทธิภาพ จึงควรให้มีการแยกมูลฝอยพวกเศษอาหาร ผักและผลไม้ ออกไป โดยนำไปทำปุ๋ยหมักเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการใช้ปุ๋ยเคมีของเกษตรกร ส่วนเทศบาลตำบลต้นเปา เป็นอีกหนึ่งชุมชนที่มีการณรงค์โครงการคัดแยกมูลฝอยเพื่อลดปริมาณมูลฝอย โดยมีการให้ความรู้แก่ชาวบ้านในการคัดแยกมูลฝอย มูลค่าของมูลฝอยชนิดต่างๆ การทำปุ๋ยหมักจากมูลฝอย และจัดให้มีการรับซื้อมูลฝอย โดยผู้ประกอบการค้าขยะรีไซเคิลเป็นประจำทุกๆ เดือน โดยตั้งแต่เดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2550 ถึงมกราคม พ.ศ. 2551 มีมูลค่าการซื้อขายอยู่ที่ 39,192 บาท ถึง 47,323 บาทต่อเดือน

สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงาน (2552) ศึกษาการเพิ่มศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของน้ำเสียจากฟาร์มสุกร โดยใช้การทดสอบด้วยวิธีบีเอ็มพี (เพื่อหาชนิดของของเสียที่มีศักยภาพดีที่สุดในการผลิตก๊าซชีวภาพโดยทำการทดลองกับของเสียทั้งหมด 5 ชนิด คือ เศษอาหาร กลิเซอร์ลิน หนุ้าเนเปียร์ ฟางข้าว และต้นข้าวโพด เริ่มจากการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและเคมีของของเสียทั้ง 5 ชนิด เพื่อคำนวณสัดส่วนของของเสียกับสารอาหารและสภาวะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์โดยวิธีบีเอ็มพี ดำเนินการทดลองและเก็บข้อมูลเป็นระยะเวลา 62 วัน จากการทดลองหาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนของของเสีย พบว่าของเสียทั้ง 5 ชนิด มีศักยภาพในการเพิ่มการผลิตก๊าซมีเทนสำหรับน้ำเสียฟาร์มสุกร ได้แก่ (1) เศษอาหารที่อัตราส่วนร้อยละ 60:40 ของของแข็งระเหย (2) กลิเซอร์ลินที่อัตราส่วนร้อยละ 5:95 ของของแข็งระเหย (3) หนุ้าเนเปียร์ที่อัตราส่วนร้อยละ 30:70 ของของแข็งระเหย (4) ฟางข้าวที่อัตราส่วนร้อยละ 60:40 ของของแข็งระเหย และ (5) ต้นข้าวโพดที่อัตราส่วนร้อยละ 60:40 ของของแข็งระเหย ซึ่งมีค่าอัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงกว่าการหมักย่อยเฉพาะน้ำเสียฟาร์มสุกรเพียงอย่างเดียว คือ 0.605 0.530 0.589 0.527 และ 0.477 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหยที่ใส่เข้าระบบ ตามลำดับ คิดเป็นร้อยละการเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วงร้อยละ 5 - 25 เทียบกับค่าอัตราการผลิตก๊าซมีเทนของน้ำเสียฟาร์มสุกรที่อัตราส่วนร้อยละ 100 ของของแข็งระเหยเท่ากับ 0.452 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหยที่ใส่เข้าระบบ สามารถสรุปได้ว่าการหมักน้ำเสียฟาร์มสุกรร่วมกับสารอินทรีย์อื่นๆ เป็นการส่งเสริมการเกิดปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้