

การตรวจเอกสาร

1. มูลฝอยพลาสติก (Plastic waste)

มูลฝอยที่นำมากำจัด โดยการเทกองกลางแจ้ง เป็นมูลฝอยรวมที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการคัดแยก มีองค์ประกอบต่างๆ แสดงดังตารางที่ 1 ซึ่งองค์ประกอบแต่ละประเภทมีอัตราการย่อยสลายแตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 2 เมื่อเวลาผ่านไป องค์ประกอบที่เหลือ จะเป็นชนิดที่ย่อยสลายยากมีทั้งชนิดเผาไหม้ได้ เช่น พลาสติก ผ้า เป็นต้น และเผาไหม้ไม่ได้ เช่น ดิน หิน เป็นต้น

ตารางที่ 1 แสดงองค์ประกอบทางกายภาพของมูลฝอย องค์การบริหารส่วนจังหวัดนนทบุรี

Type of waste	Fraction (%)
Food waste	41.46
Paper	16.58
Plastic	24.88
Cloths	1.32
Wood	13.28
Glass	0.82
Metal	1.66
Other	-
Total	100
Bulk density (ton/m ³)	0.39

ที่มา: ศูนย์ปฏิบัติการวิศวกรรมพลังงานและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (2545)

พลาสติก คือ สารประกอบไฮโดรคาร์บอน ที่มนุษย์สังเคราะห์ขึ้นโดยกรรมวิธีทางเคมีทำให้เกิดการเกาะตัวของโมเลกุลเป็นจำนวนมาก ที่เป็นพวกอินทรีย์สารเคมี มีธาตุคาร์บอนเป็นศูนย์กลางรวมการเกาะตัว โดยมีการรวมตัวของธาตุ 8 ชนิด คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน คลอรีน ฟอสฟอรัส กำมะถัน และซิลิกอน

ตารางที่ 2 แสดงระยะเวลาการย่อยสลายของมูลฝอยประเภทต่างๆ

Type of waste	Time of degradation
Paper	2-5 month
Orange shell	6 month
Coated paper dish	5 years
Cigarette filter	12 years
Leather shoes	25-40 years
Aluminum can	80-100 years
Plastic bag	450 years
Foam	not degradation

ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ (2549 ข)

1.1 แหล่งกำเนิดพลาสติก มีดังนี้

1.1.1 แหล่งผลิตผลทางการเกษตร เช่น เซลลูโลสไนเตรต (cellulose nitrate)

เซลลูโลสอะซิเตต (cellulose acetate) เอทิลเซลลูโลสเคซิน (ethyl cellulose cacin)

1.1.2 แหล่งผลิตผลทางการเกษตรและน้ำมัน มีน้อยมาก

1.1.3 แหล่งน้ำมันและถ่านหิน เป็นแหล่งที่ใช้ผลิตพลาสติกชนิดต่างๆ ได้มากที่สุด เช่น โพลิสไตรีน (polystyrene) ฟีนอล ฟอรัมาดีไฮด์ (phenol-formaldehyde) เมลามีน ฟอรัมาดีไฮด์ (melamine formaldehyde) โพลีเอทีลีน (polyethylene) ยูเรีย-ฟอรัมาดีไฮด์ (urea-formaldehyde) ไนลอน (nylon) โพลีเอสเตอร์ (polyester)

1.1.4 แหล่งน้ำมันและสินแร่ เช่น โพลีไวนิล แอลกอฮอล์ (polyvinyl alcohol) ซิลิโคน (silicone) โพลีไวนิล อะซิเตต คลอไรด์ (polyvinyl acetate-chloride) โพลีไวนิล คลอไรด์ (polyvinyl chloride)

1.1.5 สินแร่ มีน้อย เช่น แคลเซียม (calcium) อะลูมิเนียมซิลิเกต (aluminium Silicate)

1.2 ประเภทพลาสติก

เมื่อพิจารณาตามโครงสร้างและสมบัติทางความร้อน พลาสติกสามารถจำแนกออกเป็น 2 ประเภทหลัก ดังนี้

1.2.1 เทอร์โมเซต (thermosets) อาจเรียกว่า thermosetting plastic เป็นพลาสติกที่มีโครงสร้างตาย เนื่องจากมีการเชื่อมต่อกันระหว่างสายโซ่ (cross-linked structure) แข็งตัวด้วยความร้อนแบบไม่ย้อนกลับ สามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์รูปทรงต่างๆ ได้ โดยทำให้แข็งตัวด้วยความร้อนในแม่แบบ เมื่อแข็งตัวแล้ว จะมีความคงรูปสูงมาก เนื่องจากไม่สามารถหลอมเหลวได้อีก พลาสติกในกลุ่มนี้จึงจัดเป็นผลิตภัณฑ์พลาสติกประเภท รีไซเคิลไม่ได้ (non recyclables) ตัวอย่างพลาสติกในกลุ่มนี้ เช่น อีพอกซี (epoxy) เรซิน ฟีนอลิก (phenolic resin) เมลามีน (melamine) โพลีเอสเตอร์ไม่อิ่มตัว (unsaturated polyester) เป็นต้น

1.2.2 เทอร์โมพลาสติก (thermoplasts) อาจเรียกว่า thermoplastic polymer เป็นพลาสติกที่มีโครงสร้างสายโซ่ (linear/branched chain structure) หลอมตัวด้วยความร้อนและกลับแข็งตัวเมื่ออุณหภูมิลดลง พลาสติกชนิดนี้จัดเป็นวัสดุประเภท รีไซเคิลได้ (recyclables) ผลิตได้ในปริมาณมาก และราคาถูก จึงมีการใช้งานแพร่หลาย โดยมีสัดส่วนการใช้งานมากกว่า 60% ตัวอย่างพลาสติกในกลุ่มนี้ ได้แก่ โพลีโพรพิลีน (polypropylene: PP) โพลีสไตรีน (polystyrene: PS) โพลีไวนิลคลอไรด์ (polyvinyl chloride: PVC) โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง (high density polyethylene: HDPE) โพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (low density polyethylene: LDPE) เป็นต้น

ถ้าเป็นพลาสติกชนิดเดียวกัน การแปรรูปใช้ใหม่หรือรีไซเคิลเทอร์โมพลาสติก นิยมบดให้มีขนาดเล็ก แล้วนำกลับเข้าสู่กระบวนการหลอมขึ้นรูปใหม่ โดยผสมกับเม็ดพลาสติกใหม่ (virgin material) ด้วยสัดส่วนที่เหมาะสม ถ้าเป็นพลาสติกผสมหรือไม่ทราบชนิดแน่นอน นิยมบดให้มีขนาดเล็ก แล้วนำกลับเข้าสู่กระบวนการหลอม ขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดอื่น ที่มีคุณสมบัติหรือมูลค่าต่ำลง

มูลฝอยพลาสติกมีคุณสมบัติที่สำคัญสำหรับนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงโดยมูลฝอยพลาสติกชนิดโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง มีค่าความร้อน 43.5 MJ/kg (EPIC, 2003) สูงกว่าถ่านหินแอนทราไซต์ ซึ่งมีค่าความร้อน 33.7 MJ/kg (สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2544)

2. การคัดแยกมูลฝอย (solid waste separations)

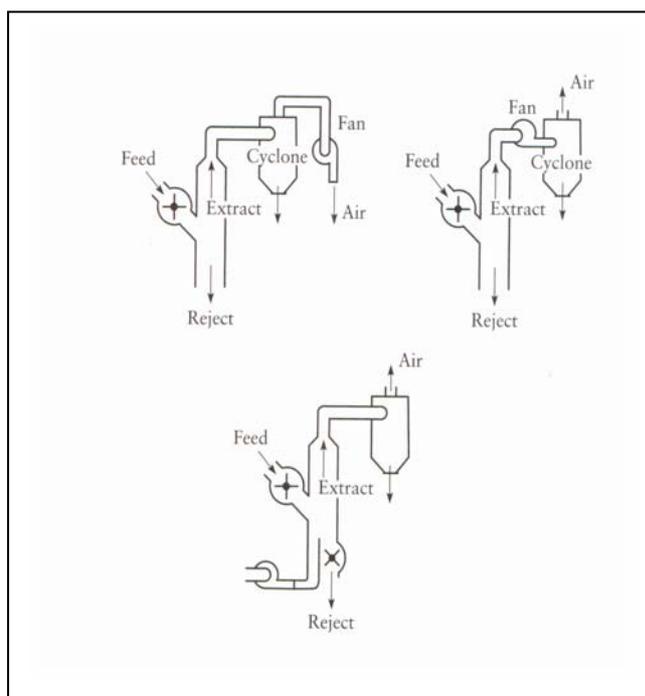
การคัดแยกมูลฝอย เป็นการแยกองค์ประกอบที่ไม่ต้องการออก เพื่อให้องค์ประกอบที่ต้องการมีความบริสุทธิ์มากยิ่งขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการนำวัสดุไปใช้

กระบวนการคัดแยกมูลฝอย โดยทั่วไป มี 3 รูปแบบ ดังนี้

2.1 การคัดแยกด้วยความหนาแน่น (density separation) เป็นวิธีที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยอาศัยคุณสมบัติความหนาแน่นและ aerodynamic ของมูลฝอย วิธีการนี้เหมาะสำหรับการคัดแยกมูลฝอยที่ผ่านการบดด้วยเครื่องบดแล้ว โดยทั่วไปสามารถแยกองค์ประกอบเบา (light fraction) เช่น กระดาษ พลาสติก และสารอินทรีย์ เป็นต้น ออกจากองค์ประกอบหนัก (heavy fraction) เช่น เหล็ก ไม้ และสารอินทรีย์อื่นๆ ที่มีความหนาแน่นสูง เครื่องมือที่ใช้ในการคัดแยก เช่น Air-classifier เป็นต้น แสดงดังภาพที่ 1

2.2 การคัดแยกด้วยสนามแม่เหล็กและไฟฟ้า (magnetic and electric field separation) โดยใช้คุณสมบัติทางแม่เหล็กและไฟฟ้าของมูลฝอย แบ่งได้ 3 ประเภท ดังนี้

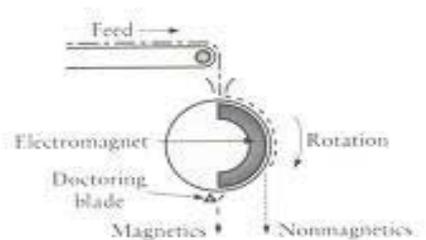
2.2.1 การคัดแยกด้วยแม่เหล็ก (magnetic separation) เป็นเทคโนโลยีที่นิยมใช้กันมาก โดยใช้ permanent magnets หรือ electromagnets เป็นองค์ประกอบหลักในเครื่องคัดแยกด้วยแม่เหล็ก (magnetic separator) ซึ่งจะคัดแยก ferrous materials ออกจากมูลฝอย เช่น โลหะ เป็นต้น



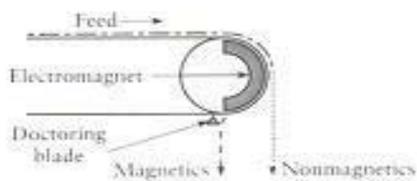
ภาพที่ 1 เครื่องคัดแยก Air classifier

ที่มา: Vesilind *et al.* (2002)

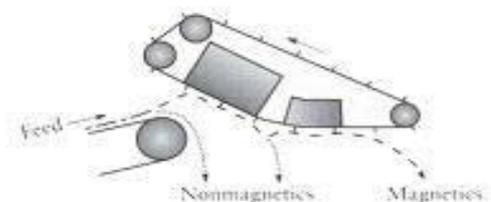
เครื่องคัดแยกด้วยแม่เหล็ก มี 3 ประเภท แสดงดังภาพที่ 2 คือ 1. drum holding magnet 2. belt holding magnet 3. suspended type magnetic โดยทั่วไปนิยมใช้ belt holding magnet เครื่องคัดแยกชนิดนี้ ประกอบด้วยแม่เหล็ก 2 ชั้น ขณะทำงานจะวางเครื่องเหนือสายพานลำเลียง ซึ่งจะทำหน้าที่ป้อนมูลฝอยเข้าสู่เครื่องคัดแยกด้วยแม่เหล็ก แม่เหล็กชั้นแรกจะดูดยึดโลหะและมูลฝอยที่มีคุณสมบัติคล้ายกับโลหะ เคลื่อนที่ด้วยสายพานของเครื่องคัดแยกเข้าสู่แม่เหล็กชั้นที่สอง ซึ่งจะดูดยึดเฉพาะโลหะ เมื่อสายพานเคลื่อนที่จนโลหะหลุดพ้นจากแรงดูดยึดจากแม่เหล็กแล้ว โลหะจะตกลงสู่ภาชนะรองรับตามแรงโน้มถ่วงของโลก (gravity force) ส่วนมูลฝอยอื่นๆ ที่ไม่ถูกดูดยึดด้วยแม่เหล็กจะแยกตัวตกลงในภาชนะรองรับ เครื่องคัดแยกชนิด belt holding magnet แสดงดังภาพที่ 3



ก.



ข.



ค.

ภาพที่ 2 เครื่องคัดแยกด้วยแม่เหล็ก ก. Drum holding magnet ข. Belt holding magnet

ค. Suspended type magnetic separator

ที่มา: Vesilind *et al.* (2002)



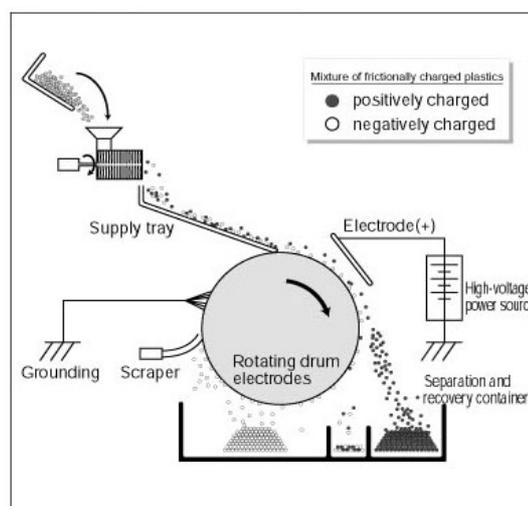
ภาพที่ 3 เครื่องคัดแยกด้วยแม่เหล็กขณะทำงาน ก. Magnetic Separator ข. Magnetic Separator

ที่มา: Master magnets LTD (2006 a)

2.2.2 การคัดแยกด้วยไฟฟ้าสถิต (electrostatic separation) อาศัยหลักความแตกต่างในการเกิดประจุของวัสดุ เมื่อป้อนมูลฝอยที่ลดขนาดแล้วเข้าเครื่องคัดแยก high-voltage electrostatic fields จะกระตุ้นการเกิดประจุในมูลฝอย ทำให้มูลฝอยแต่ละชนิดเกิดการแยกตัวระหว่างกลุ่มไม่นำไฟฟ้า (nonconductors of electricity) เช่น แก้ว พลาสติก กระดาษ เป็นต้น ออกจากกลุ่มนำไฟฟ้า (conductors of electricity) เช่น โลหะ เป็นต้น แสดงดังภาพที่ 4 นอกจากนี้ยังสามารถคัดแยกมูลฝอยแต่ละชนิดในกลุ่มไม่นำไฟฟ้าออกจากกันได้ เช่น การคัดแยกกระดาษออกจากพลาสติก การคัดแยกชนิดพลาสติก เป็นต้น โดยอาศัยหลักการ electric permittivity หรือความสามารถในการเก็บประจุไฟฟ้า (retain electric charge)



ก.



ข.

ภาพที่ 4 เครื่องคัดแยกพลาสติก

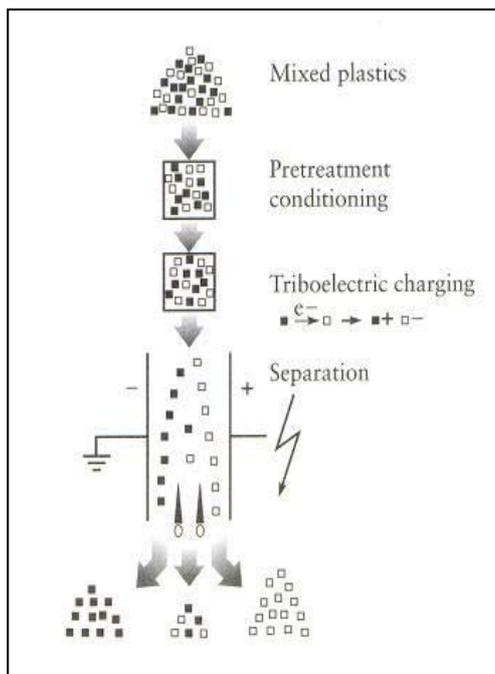
ก. เครื่องคัดแยกพลาสติก Electrostatic separation

ข. เครื่องคัดแยกพลาสติก Electrostatic separation ขณะทำงาน

ที่มา : GEC and JSIM (2006)

กระบวนการนำพลาสติกกลับมาใช้ใหม่ในรูปวัสดุ (material recycle) พบว่าการคัดแยกชนิดพลาสติกทำได้ยาก เนื่องจากพลาสติกแต่ละชนิดมีลักษณะคล้ายคลึงกันมาก แต่เมื่อพิจารณาคุณสมบัติการเกิดประจุที่แตกต่างกันของพลาสติกแต่ละชนิด ทำให้สามารถแยกชนิดของพลาสติกออกจากกันได้ เรียกว่ากระบวนการ triboelectric charging แสดงดังภาพที่ 5

ถึงแม้ว่าในปัจจุบันเทคโนโลยีประเภทนี้ยังไม่เป็นที่แพร่หลาย แต่ในอนาคต เมื่อได้มีการพัฒนาเต็มรูปแบบและการเพิ่มความสำคัญของการนำพลาสติกกลับมาใช้ใหม่ จะทำให้มีการคัดแยกด้วยไฟฟ้าสถิตมากขึ้น (Tchobanoglous *et al.*, 1993)



ภาพที่ 5 การคัดแยกพลาสติกด้วยกระบวนการ triboelectric charging
ที่มา : Vesilind *et al.* (2002)

2.2.3 Eddy current separation อาศัยหลักการ electromagnetic induction ตามกฎอิเล็กโทรลิซิสของฟาราเดย์ (Faraday's law of electrolysis) เพื่อคัดแยก nonferrous materials เช่น กระป๋องอะลูมิเนียม เป็นต้น ออกจากมูลฝอยชนิดอื่น

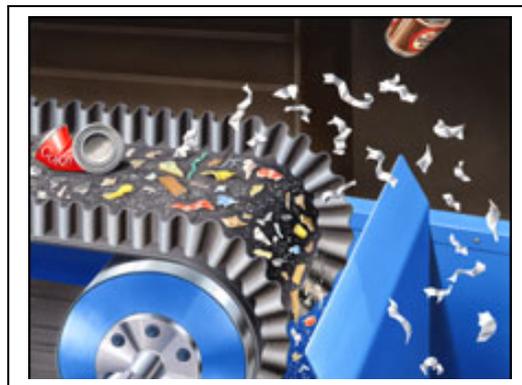
มูลฝอยที่มี nonferrous materials เป็นองค์ประกอบและผ่านการคัดแยกองค์ประกอบ ferrous magnetic เช่น กระป๋องเหล็ก เป็นต้น ป้อนเข้าสู่เครื่องที่มีสถานะสนามแม่เหล็ก ในช่วงเวลาหนึ่ง จะทำให้เกิดความต่างศักย์ขึ้นที่ nonferrous materials ซึ่งทำให้กระแสไฟฟ้าไหลภายใน nonferrous materials เรียกว่า eddy current และการเหนี่ยวนำในสนามแม่เหล็กทำให้มีขั้วต่างกัน ส่งผลให้เกิดแรงแม่เหล็ก (magnetic force) ผลัก nonferrous

materials ออกจากสนามแม่เหล็ก จึงเกิดการแยกตัวออกจากมูลฝอยชนิดอื่นซึ่งไม่ได้รับอิทธิพลจากสนามแม่เหล็ก และเคลื่อนที่ตกลงด้านล่าง แสดงดังภาพที่ 6

ในปัจจุบันบริษัทผู้ผลิตได้มีการพัฒนาศักยภาพการคัดแยก โดยสามารถทำการคัดแยกมูลฝอย 3 กลุ่ม ได้แก่ non ferrous material เช่น อะลูมิเนียม ferrous material เช่น เหล็ก และ non metallic material เช่น ไม้ พลาสติก (Master Magnetic LTD, 2006b)



ก.



ข.

ภาพที่ 6 เครื่องคัดแยก Eddy Current Separator

ก. Eddy Current Separator ข. Eddy Current Separator ขณะคัดแยก

ที่มา: Master Magnetic LTD (2006b)

2.3 การคัดแยกขนาด (size separation) หรือการร่อน (screening) ใช้ในการคัดแยกมูลฝอยที่มีขนาดแตกต่างกัน 2 ขนาดหรือมากกว่า 2 ขนาด สามารถใช้คัดแยกมูลฝอยแบบเปียกและแบบแห้งได้อย่างใดอย่างหนึ่ง การคัดแยกจะใช้คุณสมบัติการเคลื่อนที่ไป หรือไม่ไปเป็นตัวชี้วัด (as go or no-go indicators) หลักการคัดแยกขนาด ได้แก่ การกำจัดวัสดุขนาดใหญ่ การกำจัดวัสดุขนาดเล็ก การคัดแยกวัสดุเผาไหม้ได้น้ำหนักเบา (light combustibles) ออกจากวัสดุเผาไหม้ไม่ได้น้ำหนักมาก (heavy noncombustibles) การนำกระดาษ พลาสติก และวัสดุน้ำหนักเบา กลับมาใช้ใหม่จากแก้วและโลหะ การคัดแยกแก้ว กรวดและทรายจากวัสดุที่เผาไหม้ได้ การคัดแยกหินและวัสดุขนาดใหญ่ออกจากดิน เพื่อใช้ในการก่อสร้าง และการกำจัดวัสดุขนาดใหญ่ออกจากถ้ำ (Tchobanoglous *et al.*, 1993) โดยทั่วไปเครื่องคัดแยกมูลฝอย มี 3 ชนิด ดังนี้

2.3.1 เครื่องตระแกรงสั่น (vibration screens) แสดงดังภาพที่ 7 ใช้สำหรับคัดแยกมูลฝอยที่มีขนาดเล็ก มีลักษณะเป็นตระแกรงลาดเอียงในแนวระนาบ ขณะทำงานจะเคลื่อนที่ (สั่น) ในแนวนอน ซึ่งแต่ละครั้งของการเคลื่อนที่ จะทำให้มูลฝอยที่มีขนาดเล็กตกผ่านตระแกรงลงสู่ภาชนะรองรับด้านล่าง ส่วนมูลฝอยขนาดใหญ่จะเคลื่อนที่ไปด้านหน้าต่อไป

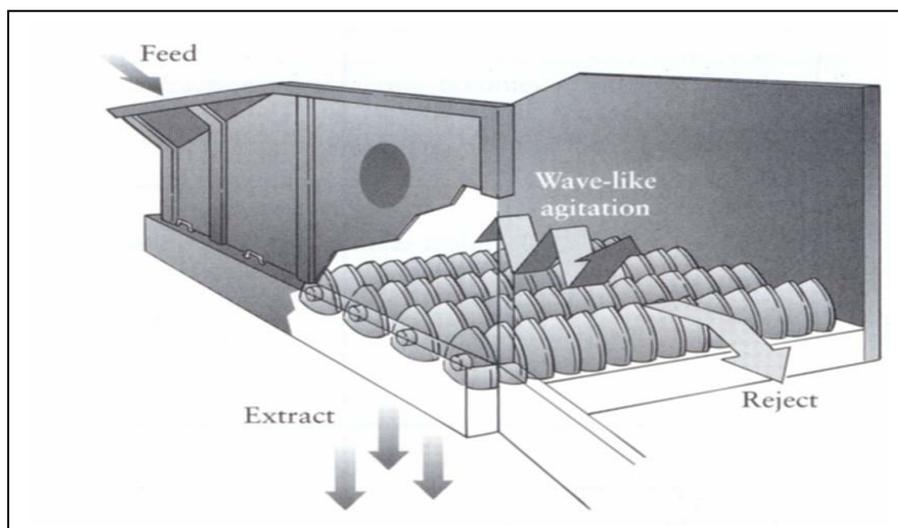
เครื่องตระแกรงสั่นนิยมใช้กันแพร่หลาย ในการคัดแยกมูลฝอยแห้ง เช่น แก้ว โลหะ เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการนำไปใช้คัดแยกเศษไม้เพื่อนำไปผลิตปุ๋ยหมัก (Tchobanoglous *et al.*, 1993)



ภาพที่ 7 เครื่องตระแกรงสั่น(vibration screen)
ที่มา: Progress Industries, inc. (2006)

2.3.2 เครื่องจานหมุนแยก (dish screen) เครื่องจานหมุนแยกประกอบด้วยจานหมุนที่มีอุปกรณ์เชื่อมต่อให้จัดเรียงขนานกันในแนวขวาง เมื่อป้อนมูลฝอยเข้าสู่เครื่อง จานจะหมุนแยกมูลฝอยที่มีขนาดเล็กตกลงภาชนะรองรับด้านล่าง ส่วนมูลฝอยขนาดใหญ่จะกระเด็นออกทางด้านบนของเครื่อง ตกลงสู่ภาชนะรองรับหรือสานพานลำเลียง แสดงดังภาพที่ 8

เครื่องจานหมุนแยกสามารถนำมาใช้ในการคัดแยกเศษแก้วออกจากมูลฝอยที่ผ่านการบดแล้ว เนื่องจากเศษแก้วจะมีขนาดเล็กกว่ามูลฝอยชนิดอื่น เช่น พลาสติก กระดาษ และ กระป๋อง เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถนำมาใช้คัดแยกมูลฝอยที่เผาไหม้ไม่ได้ (noncombustible) ในกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงแปรรูป (refuse derived fuel) (Vesilind *et al.*, 2002)



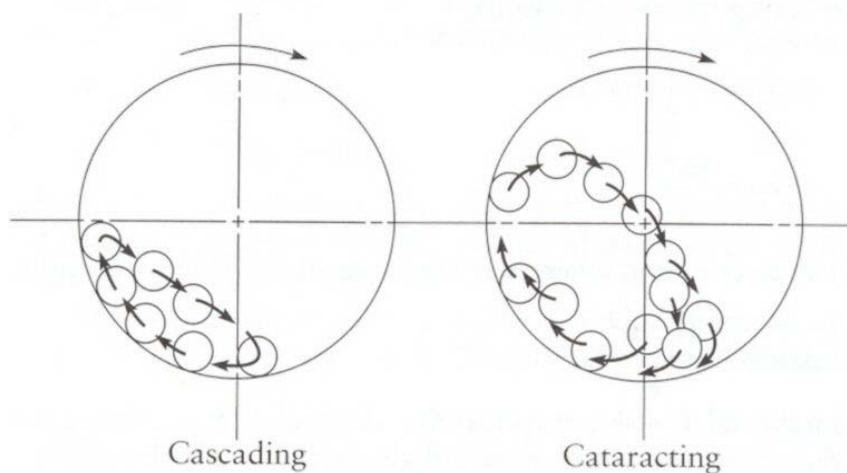
ภาพที่ 8 เครื่องงานหมุนแยกขยะคัดแยก
ที่มา: Vesilind *et al.* (2002)

2.3.3 เครื่องtrommel (trommel) เป็นเครื่องคัดแยกขนาดใหญ่ แสดงดังภาพที่ 9 นิยมใช้ในการคัดแยกมูลฝอย มีลักษณะเป็นตะแกรงทรงกระบอก ทำมุมลาดเอียงกับแนวระนาบ หมุนด้วยความเร็วต่ำ ประมาณ 10-15 รอบต่อนาที (Vesilind *et al.*, 2002)

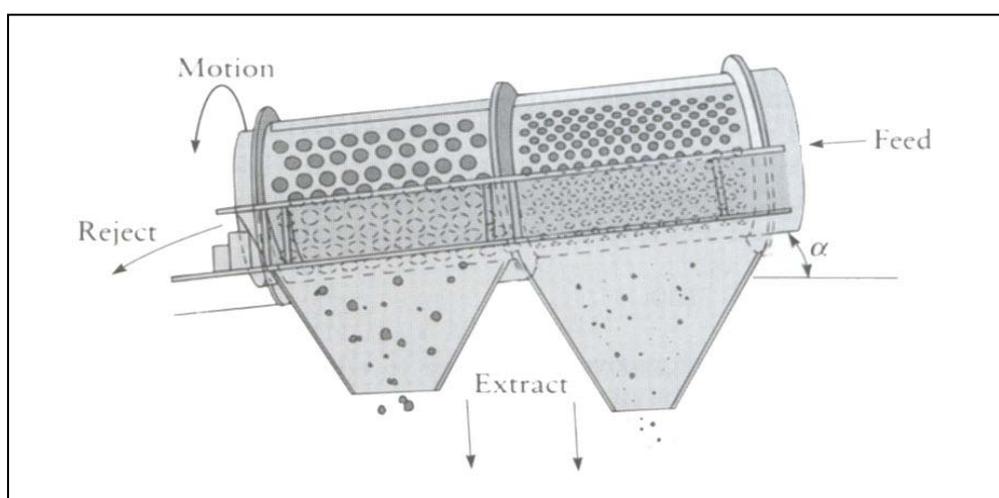


ภาพที่ 9 เครื่องtrommelขยะคัดแยกมูลฝอย

เมื่อป้อนมูลฝอยเข้าสู่เครื่องทอรวมเมล็ดขณะกำลังหมุน มูลฝอยจะเคลื่อนที่ในลักษณะ cascading และ cataracting แสดงดังภาพที่ 10 จากนั้นมูลฝอยที่มีขนาดเล็กกว่ารูตะแกรงจะลอดผ่านลงสู่ภาชนะรองรับด้านล่างตลอดความยาวของตะแกรง ส่วนมูลฝอยขนาดใหญ่กว่ารูตะแกรงจะเคลื่อนที่ที่ผ่านออกมาด้านทางออก แสดงดังภาพที่ 11



ภาพที่ 10 การเคลื่อนที่ของมูลฝอยขณะคัดแยกในเครื่องทอรวมเมล็ด
ที่มา: Vesilind *et al.* (2002)



ภาพที่ 11 ลักษณะการคัดแยกด้วยเครื่องทอรวมเมล็ด
ที่มา: Vesilind *et al.* (2002)

Lau *et al.* (2005) ศึกษาการคัดแยกเบตเตอร์ออกจากมูลฝอย โดยการใช้เครื่องทอรวมเมทที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1 m ความยาวของตระแกรง 3 m ขนาดรูตระแกรง 50 มิลลิเมตร อัตราการเร็วการคัดแยกมูลฝอย 1.5 ton/hr ความเร็วรอบ 21.4 rpm ความลาดเอียงแนวระนาบ 2 degree พบว่าประสิทธิภาพการแยกเบตเตอร์กลับคืนได้ 80% นอกจากนี้ ยังพบว่า การเปลี่ยนอัตราการเร็วการคัดแยกมูลฝอย ในช่วง 0.9-2.1 ton/hr มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการคัดแยก จากการศึกษาของ Wheeler *et al.* (1989) พบว่าประสิทธิภาพการคัดแยกของเครื่องทอรวมเมทจะลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการเร็วคัดแยกมูลฝอย

3. การลดขนาดมูลฝอย (size reduction)

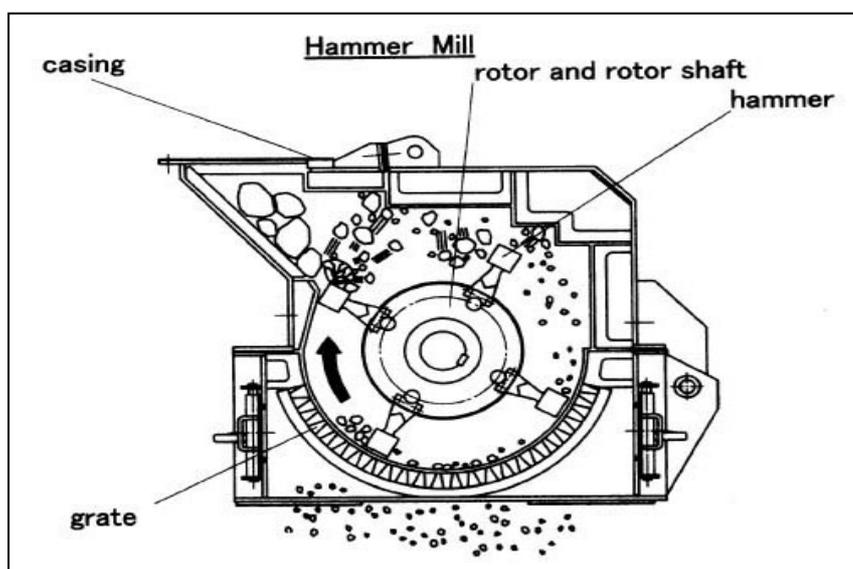
การลดขนาด มีคำศัพท์ที่ใช้เหมือนกัน ได้แก่ shredding cutting shearing grinding crushing และ milling (Tchobanoglous *et al.*, 1993) และ (Vesilind *et al.*, 2002) ในระยะเริ่มต้นการลดขนาด มีใช้กันมากในอุตสาหกรรมเหมืองแร่ หลังจากนั้นมีการนำมาปรับปรุงลักษณะการป้อนเข้าเครื่อง เพื่อให้เหมาะสมกับมูลฝอย

การลดขนาดมูลฝอยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้สะดวกต่อการกำจัด และการนำมูลฝอยบางชนิดกลับมาใช้ใหม่ ซึ่ง Robert Ham และคณะ เป็นผู้ริเริ่มนำมาใช้กับมูลฝอย พบว่ามูลที่ผ่านการลดขนาดจะมีขนาดใกล้เคียงกัน เป็นเนื้อเดียวกัน สามารถนำไปอัดแท่งได้ง่ายกว่ามูลฝอยที่ไม่ผ่านการลดขนาดและลดการใช้พื้นที่ฝังกลบที่มีจำกัดได้ เนื่องจากการจัดเรียงตัวของมูลฝอยหลังการบดอัดดีขึ้น นอกจากนี้ยังมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ในกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงแปรรูป ซึ่งจะทำให้เกิดการเผาไหม้ได้ง่ายขึ้น ความร้อนสม่ำเสมอและใช้ปริมาณอากาศน้อยลง ลดการเกิดมลพิษทางอากาศ ทำให้ลดการใช้อุปกรณ์บำบัดอากาศและลดต้นทุนการดำเนินการ ประการต่อมา การใช้เครื่องลดขนาด (shredder) ในการลดขนาดหญ้า มูลฝอยจากการก่อสร้าง กิ่งไม้ หรือวัสดุอินทรีย์อื่นๆ เพื่อนำไปใช้คลุมดินจะเกิดการย่อยสลายกลายเป็นปุ๋ยในดิน ประการสุดท้ายเพื่อนำมูลฝอยบางชนิดกลับมาใช้ใหม่ในรูปวัสดุ โดยทั่วไปมูลฝอยจะมีองค์ประกอบหลายชนิดซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการคัดแยก การลดขนาดจะทำให้มูลฝอยแต่ละชนิดมีขนาดเล็กลงแตกต่างกัน จึงทำให้สามารถคัดแยกชนิดมูลฝอยที่ต้องการได้ โดยการนำไปผ่านกระบวนการคัดแยกต่อไป

โดยทั่วไปเครื่องบดมูลฝอย มี 3 ชนิด ดังนี้

3.1 เครื่องค้อนบด (hammermill shredder)

เครื่องค้อนบดมีค้อนที่มีแกนหมุนด้วยความเร็วสูง ประมาณ 700 ถึง 1,200 rpm การบดทำได้โดยป้อนวัสดุบริเวณช่องป้อน เมื่อแกนหมุนทำงาน ค้อนจะเคลื่อนที่พร้อมกับบดมูลฝอยให้มีขนาดเล็กกลง ซึ่งจะตกลงมาสู่ภาชนะรองรับด้านล่าง ค้อนบดมี 2 ชนิด คือ แนวแกนนอน (horizontal-shaft) และ แนวแกนตั้ง (vertical-shaft) แสดงดังภาพที่ 12-15

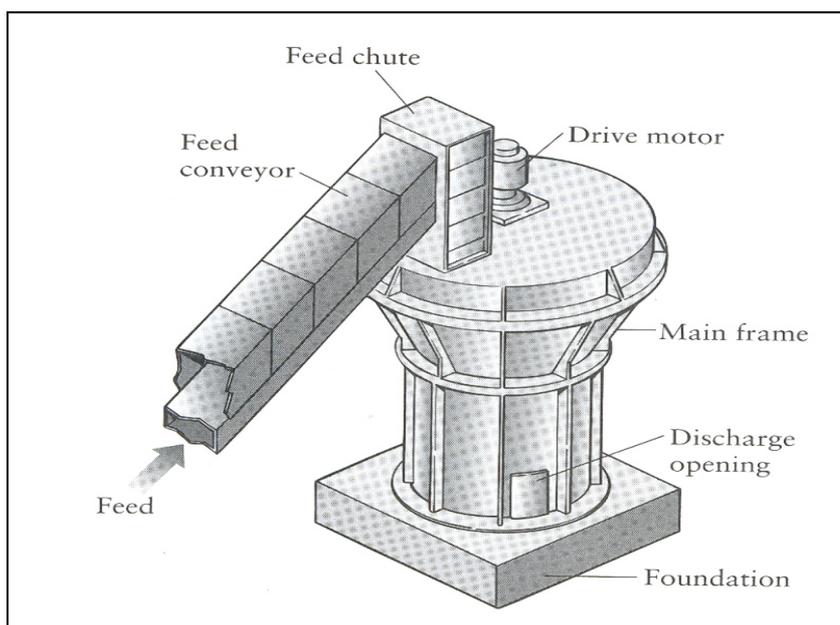


ภาพที่ 12 แสดงการทำงานของเครื่องค้อนบดชนิดแนวแกนนอน (Horizontal-shaft)

ที่มา: GEC and JSIM (2006)

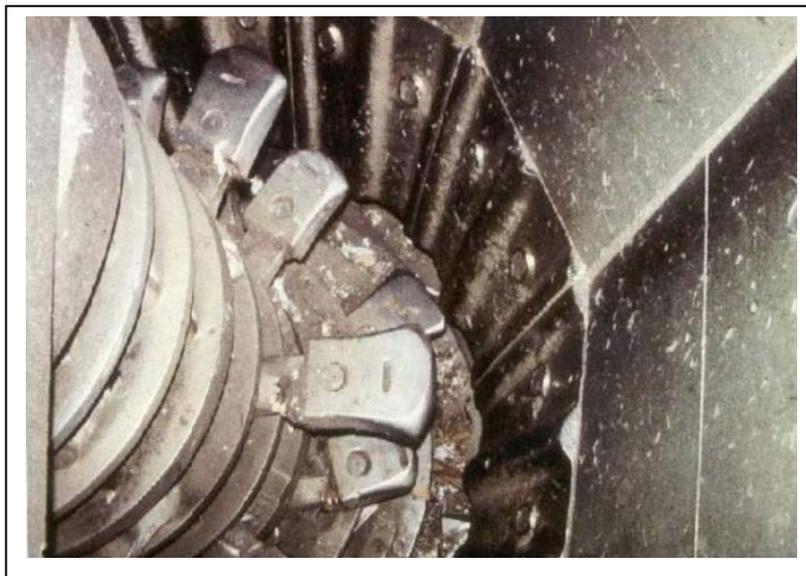


ภาพที่ 13 เครื่องก่อบดชนิดแนวนอน (Horizontal-shaft)



ภาพที่ 14 เครื่องก่อบดชนิดแนวแกนตั้ง (Vertical-shaft)

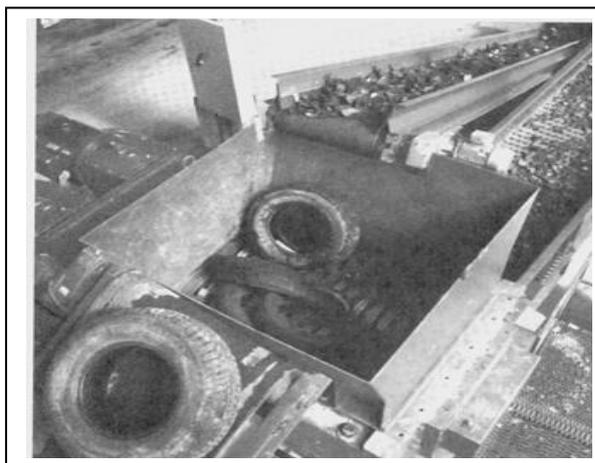
ที่มา: Vesilind *et al.* (2002)



ภาพที่ 15 สภาพภายในเครื่องค้อนชนิดแนวแกนตั้ง (Vertical-shaft)

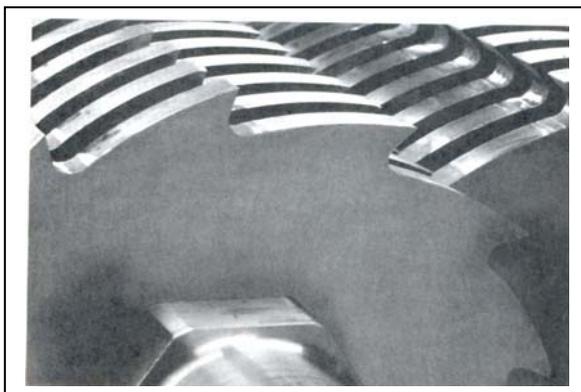
3.2 เครื่องตัด (shear shredder)

เครื่องตัด แสดงดังภาพที่ 16 มีมีดตัดคล้ายกรรไกร แสดงดังภาพที่ 17 เคลื่อนที่โดยมอเตอร์ที่อัตราความเร็วรอบต่ำ 60-190 rpm (60-190 rpm) (Tchobanoglous *et al.*, 2002) และสามารถหมุนกลับได้กรณีมูลฝอยอัดแน่นจนไม่สามารถทำงานได้



ภาพที่ 16 เครื่องตัด (Shear shredder)

ที่มา: Vesilind *et al.* (2002)



ภาพที่ 17 ลักษณะมีดภายในเครื่องตัด (Shear shredder)

ที่มา: Vesilind *et al.* (2002)

3.3 เครื่องถังบด (tub grinders)

เครื่องถังบด แสดงดังภาพที่ 18 เป็นเครื่องลดขนาดที่มีหลักการทำงานเหมือนกับเครื่องค้อนบด หรืออาจเรียกว่า เครื่องค้อนบดเคลื่อนที่ (mobile hammermill) เนื่องจากสามารถนำไปใช้งานในแหล่งกำจัดมูลฝอย หรือใช้ในพื้นที่การผลิตได้ สามารถใช้ได้กับมูลฝอยหลายชนิด เช่น ท่อนไม้ ตอไม้ ซากจากการก่อสร้าง เป็นต้น โดยทั่วไปเครื่องถังบดจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในถัง (feed throat หรือ tub) ขนาดใหญ่ ขับเคลื่อนด้วยเครื่องยนต์ดีเซล ส่วนช่องออกของมูลฝอยที่ผ่านการบดสามารถเคลื่อนที่ได้ และเครื่องบางรุ่นมีอุปกรณ์สำหรับตัดมูลฝอยเข้าเครื่องด้วย

เมื่อป้อนมูลฝอยเข้าสู่เครื่องคัดแยก ถังจะหมุนผลัดกันให้มูลฝอยเคลื่อนที่เข้าสู่ค้อนบดชนิดแนวนอน (horizontal hammermill shredder) หลังจากนั้นมูลฝอยที่ผ่านการบดจะตกลงส่วนล่าง และเคลื่อนตัวออกมาโดยผ่านช่องออก



ภาพที่ 18 เครื่องถึงบด (Tub grinders)

ที่มา: Vesilind *et al.* (2002)

4. การผลิตเชื้อเพลิงแปรรูป (refuse derived fuel: RDF)

การผลิตเชื้อเพลิงแปรรูปจากมูลฝอย ซึ่งเรียกว่า refuse derived fuel เป็นทางเลือกหนึ่งในการผลิตเชื้อเพลิงจากวัสดุเผาไหม้ได้ในมูลฝอย เช่น พลาสติก กระดาษ ไม้ ผ้า ยาง เป็นต้น

4.1 ประวัติเชื้อเพลิงแปรรูป

ในปี 1970 ประเทศสหรัฐอเมริกาเป็นหนึ่งในประเทศที่มีการตั้งโรงงานผลิตเชื้อเพลิงแปรรูปเป็นแห่งแรก (Tchobanoglous *et al.*, 1993) ต่อมาในปี 1948 กลุ่มประเทศยุโรปมีโรงงานผลิตเชื้อเพลิงแปรรูป 53 แห่ง ส่วนใหญ่ตั้งอยู่ในประเทศอังกฤษและสวีเดน (Bilitewski, 1985) แต่เนื่องจากมีปริมาณคลอรีนและโลหะหนักสูง จึงไม่สามารถนำเชื้อเพลิงแปรรูปไปใช้งานได้เพียงพอ ซึ่งโรงงานที่ตั้งในประเทศเยอรมันได้ปิดตัวลง จำนวน 10 โรงงาน ในปี 1997 เนื่องจากไม่สามารถแก้ปัญหามลพิษได้ (Rotter *et al.*, 2004)

กลุ่มประเทศยุโรปตื่นตัวในการผลิตเชื้อเพลิงแปรรูป เนื่องจาก The Court of Justice of the European Union ได้ขยายตลาดเพื่อจำหน่ายเชื้อเพลิงแปรรูปในกลุ่มประเทศสมาชิกยุโรปอื่นๆ (EU-Member States) เพื่อส่งเสริมการนำพลังงานกลับมาใช้ใหม่ (energy recovery) และการอนุรักษ์

เชื้อเพลิงฟอสซิล ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงพื้นฐาน (primary energy) (Rotter *et al.*, 2004) และ (Mastral *et al.*, 2003)

4.2 กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงแปรรูป

American Society for Testing and Materials (ASTM) ได้พัฒนาการออกแบบเชื้อเพลิงแปรรูป แสดงดังตารางที่ 3 RDF-1 เป็นมูลฝอยรวมที่นำไปเผาโดยตรง ในขณะที่ RDF-2 เป็นมูลฝอยที่ผ่านการบด ซึ่งทำให้ง่ายต่อการเผาไหม้ ส่วน RDF-3 เป็นมูลฝอยที่ผ่านกระบวนการกำจัดสารอินทรีย์จาก material recovery facility (MRF) สำหรับ RDF-4 เป็นมูลฝอยที่ผ่านกระบวนการจาก MRF หลังจากนั้นบดละเอียด (fluff) แสดงดังภาพที่ 19 ส่วน RDF-5 เป็นการนำมูลฝอยที่ผ่านกระบวนการ MRF มาอัดเป็นเม็ด (pellet) ซึ่งมีขนาดเล็กคล้ายอาหารสัตว์ แสดงดังภาพที่ 20 สำหรับ RDF-6 จะเป็นมูลฝอยอินทรีย์ที่นำไปใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงเหลว เช่น กระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) ผลิตน้ำมัน เป็นต้น และ RDF-7 เป็นมูลฝอยอินทรีย์ที่นำไปใช้ในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง เช่น กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (gasification) เป็นต้น

กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงแปรรูป มีดังนี้

4.2.1 การคัดแยก (separation) ในการผลิต RDF จำเป็นต้องผ่านกระบวนการคัดแยกสารปนเปื้อนที่มีค่าความร้อนต่ำ เช่น ดิน กระจัง เป็นต้น ออกก่อน เพื่อให้เชื้อเพลิงมีค่าความร้อนสูงสุดและลดปริมาณสารมลพิษ เช่น คลอรีนจากพลาสติก PVC โลหะหนักจากแบตเตอรี่ เป็นต้น

4.2.2 การลดขนาดมูลฝอย (size reduction) เป็นการทำให้มูลฝอยมีขนาดเล็กกลง และมีขนาดใกล้เคียงกันเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งสามารถนำไปอัดแท่งเพื่อผลิตเชื้อเพลิงแปรรูปได้ง่ายกว่ามูลฝอยที่ไม่ผ่านการลดขนาด

ตารางที่ 3 การออกแบบเชื้อเพลิงแปรรูปโดย ASTM

Name	Description
RDF-1	Unprocessed MSW (the mass burn option).
RDF-2	MSW shredded but no separation of materials.
RDF-3	Organic fraction of shredded MSW. This is usually produced in a materials recovery facility (MRF) or from source-separated organic such as newsprint.
RDF-4	Organic waste produced by a MRF that has been further shredded into a fine, almost powder, form, sometime called fluff.
RDF-5	Organic waste produced by a MRF that has been densified by a pelletizer or a similar device. These pellets can often be fired with coal in existing furnaces.
RDF-6	Organic fraction of the waste that has been further processed into a liquid fuel such as oil.
RDF-7	Organic waste processed into a gaseous fuel.

ที่มา: Vesilind *et al.* (2002)



ภาพที่ 19 RDF-4

ที่มา: Vesilind *et al.* (2002)



ภาพที่ 20 RDF-5

ที่มา: Vesilind *et al.* (2002)

4.2.3 การอัดแท่ง (densification หรือ compaction) เป็นกระบวนการเพิ่มความหนาแน่นให้กับวัสดุ โดยทั่วไปจะใช้เทคโนโลยี baling cubing และ pelleting เพื่อลดพื้นที่การจัดเก็บ ลดปริมาณการขนส่งและผลิตเชื้อเพลิงแปรรูปอัดแท่ง (densified refuse-derived fuels: dRDF)

เทคโนโลยี cubing และ pelleting สามารถผลิตเชื้อเพลิงแปรรูปอัดแท่งสำหรับใช้ในระบบการเผาไหม้ ไพโรไลซิสและแก๊สซิฟิเคชัน หลักการทำงานของกระบวนการ cubing และ pelleting คล้ายคลึงกัน โดยนำมูลฝอยที่ผ่านการบดมาอัดด้วย extrusion dies และ press wheel หมุนแล้วดัน เชื้อเพลิงแปรรูปจะถูกอัดเป็นแท่งแล้วเคลื่อนที่ออกมา ระบบการอัดแท่งที่สมบูรณ์ประกอบด้วย เครื่องบด สายพานลำเลียง และอุปกรณ์ควบคุมความชื้น ซึ่งเชื้อเพลิงแปรรูปอัดแท่งที่ได้ เกิดจากการใช้ความร้อนในการเชื่อมวัสดุติดกันจนกลายเป็นแท่ง (cubes) หรือเม็ด (pellets) โดยทั่วไปแท่งจะมีขนาดประมาณ 3 inch x 1 inch² และเม็ดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1/2 ถึง 3/4 x ความยาว 1/2 ถึง 1 inch (Tchobanoglous *et al.*, 1993)

เทคโนโลยีโดยทั่วไปสามารถผลิตเชื้อเพลิงแปรรูปอัดแท่งได้ที่มีความหนาแน่น 0.4-0.7 g/cm³ (Ohlsson *et al.*, 1991) ในกระบวนการผลิตจะนำมูลฝอยที่ผ่านการบดมาอัดเป็นแท่งซึ่งสามารถกำหนดรูปร่างของเชื้อเพลิงแปรรูปอัดแท่งให้สะดวกต่อการใช้งานกับเตาเผาและเพิ่ม

ระยะเวลาในการเผาไหม้ นอกจากนี้โดยทั่วไปการอัดแท่งในรูปเม็ดจะใช้เครื่อง rotary die pelletizers (Manser *et al.*, 1996) หลังจากนั้นได้มีการพัฒนา โดยใช้กระบวนการอัด (extrusion process) แต่เนื่องจากการใช้ความดันสูงทำได้ยาก จึงเป็นข้อจำกัดทำให้ได้ความหนาแน่น 0.7 g/cm^3 ส่วนการใช้เครื่อง Baler มักใช้ในการอัดก้อนมูลฝอยเพื่อเข้ากระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ในรูปวัสดุ โดยใช้ความดัน 0.7-1.4 MPa ในปัจจุบันใช้ที่ความดัน 24 MPa นอกจากนี้ Demirbas and Sahin (1998) ศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงแปรรูปด้วยความดันสูง จากมูลฝอยกระดาษและฟางข้าวสาลี โดยใช้ piston-and-die ประเภทกด (type press) ได้เชื้อเพลิงแปรรูป ทรงกระบอก (cylindrical briquettes) ที่ความหนาแน่นใกล้เคียง 1 g/cm^3

ในการผลิตเชื้อเพลิงแปรรูปอัดแท่งสามารถใช้ตัวประสาน (Binder) เพื่อทำหน้าที่ช่วยยึดเกาะเชื้อเพลิงให้เป็นแท่งได้ โดยทั่วไปใช้ โมลาส (molasses) และน้ำมันสารอินทรีย์จากของเสีย (oily organic wastes) เช่น จี๊เลื้อย บิทูเมน (bitumen) พืท (pith) แป้ง (starch) หินปูน (lime stone) และ โดโลไมต์ (dolomite) เป็นต้น (Yaman *et al.*, 2001) เนื่องจากชีวมวลมีโครงสร้างเป็นเส้นใย (fiber) และมีน้ำมัน (oily sticky) เป็นองค์ประกอบ มีคุณสมบัติเพิ่มความหนาแน่นได้โดยการยึดเกาะ ดังนั้น จึงสามารถนำมาเป็นตัวประสานได้ (Yaman *et al.*, 2000)

ศุภรินทร์ และคณะ (2548) ศึกษาถ่านหินอัดก้อนผสมตัวประสานชีวมวล จี๊เลื้อยและเกลบข้าว ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารเคมีที่ช่วยชีวมวล ใช้อัตราส่วนถ่านหินต่อชีวมวลคงที่เท่ากับ 50 : 50 โดยน้ำหนัก ทำการอัดก้อนเป็นรูปทรงกระบอกมีรูตรงกลาง ความสูง 6.5 cm เส้นผ่านศูนย์กลางภายในและภายนอก 2 และ 8.5 cm ตามลำดับ เครื่องกดอัดใช้ระบบไฮดรอลิกที่ความดันคงที่ เมื่อทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่าเชื้อเพลิงแปรรูปที่ใช้เกลบข้าว และจี๊เลื้อย (10,000 – 15,000 kPa) มีค่าความทนแรงอันได้สูงสุดเมื่อใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 3 และ 7 น้ำหนัก/ปริมาตร ตามลำดับ และเวลาในการย่อย 1.5 hr เท่ากัน หากเพิ่มเวลาในการย่อยจะทำให้ค่าความทนแรงอัดลดลง

สตีฟพร จันทรานนท์ และคณะ (2548) ทำการศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากต้นโสน โดยใช้เครื่องอัดแท่งแบบสกรู (Screw extrusion machine) ขนาด 5 hp ทำการเปรียบเทียบชนิดตัวประสาน พบว่าการใช้มันสำปะหลังดิบคบเป็นตัวประสาน ที่อัตราส่วนเชื้อเพลิงต่อตัวประสาน 10 ต่อ 100 ผลิตเชื้อเพลิงแปรรูปขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 mm มีความเหมาะสมที่สุด รองลงมาได้แก่ แป้งมันสำปะหลังหยาบ และโมลาส นอกจากนี้ ที่อัตราส่วนผสมเชื้อเพลิงต่อตัวประสาน 6 ต่อ 100

มีค่าความร้อน ประมาณ 27.44 MJ/kg ใกล้เคียงกับถ่านไม้ทั่วไป ซึ่งมีค่าความร้อน 28.98 MJ/kg (สำนักพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2544)

4.3 กฎหมาย

ในประเทศไทยยังไม่มีข้อกำหนดมาตรฐานคุณภาพเชื้อเพลิงแปรรูป ส่วนในต่างประเทศ European Commission-Directorate General Environment ได้กำหนดมาตรฐานคุณภาพของการนำของแข็งกลับมาใช้ใหม่ในรูปเชื้อเพลิง ในปี 2003 แสดงดังตารางที่ 4

5. ทฤษฎีแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification)

แก๊สซิฟิเคชัน นิยาม U.S. EPA คือ กระบวนการเปลี่ยนวัตถุดิบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ โดยนำวัตถุดิบผ่านกระบวนการออกซิเดชันบางส่วน ในสภาวะขาดอากาศ ซึ่งมีอุณหภูมิเพียงพอ เพื่อผลิตเป็นแก๊สเชื้อเพลิง ซึ่งสารอนินทรีย์ในวัตถุดิบ (เมื่อวัตถุดิบเป็นของแข็งหรือกิ่งของแข็ง) จะเปลี่ยนเป็น สารคงตัวที่เรียกว่า สแลก และเปลี่ยนสารฮาโลเจนเป็นกรดเฮไลด์

กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันจะผลิตแก๊สเชื้อเพลิง หรือ โพรคิวเซอร์แก๊ส (producer gas) ได้แก่ CO CH₄ และ H₂ ซึ่งยังคงคุณสมบัติเป็นเชื้อเพลิง และมีคุณค่าพลังงานความร้อนสูงพอที่จะนำไปใช้งานได้ ซึ่งกระบวนการดังกล่าวเกิดขึ้นในเครื่องแก๊สซิฟิเคชัน (gasifier)

5.1 ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นในเครื่องแก๊สซิฟิเคชัน

ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นภายในเครื่องแก๊สซิฟิเคชัน แบ่งออกเป็นชั้นที่สำคัญ 4 ชั้น แสดงดังภาพที่ 21 แต่ละชั้นอาจจะเหลื่อมล้ำ (overlap) กันได้ ปฏิกริยาที่เกิดขึ้น ดังนี้

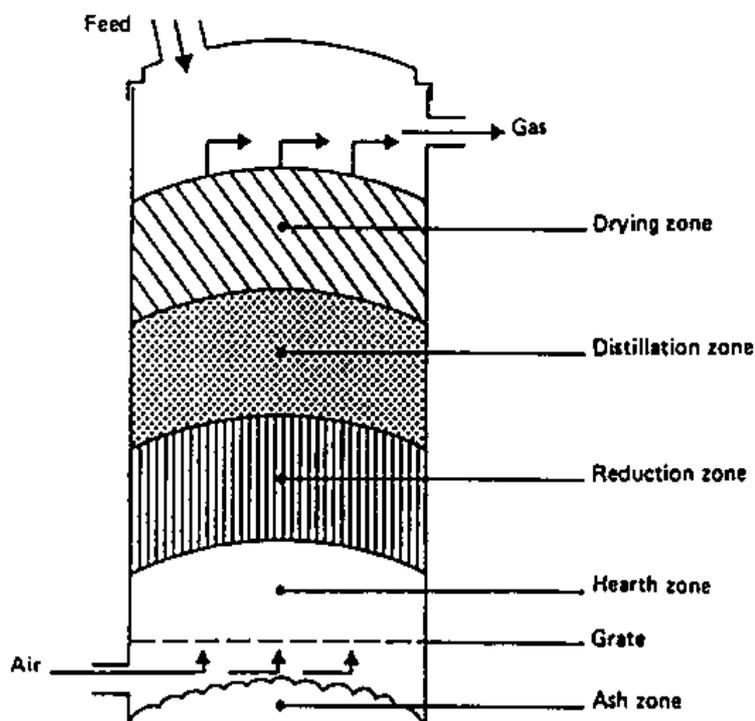
ตารางที่ 4 มาตรฐานคุณภาพของการนำของแข็งกลับมาใช้ใหม่ในรูปเชื้อเพลิง

Characteristic	Unit	Italy	Finland ¹			
			Detection limit	Level		
				I	II	III
Moisture	%	<25	-	-	-	-
Calorific value	KJ/Kg	15,000	-	-	-	-
Ash	%	20	-	-	-	-
Chlorine	%(m/m) ²	0.9	0.01	<0.15	<0.50	<1.50
Sulfur	%(m/m) ²	0.6	0.01	<0.20	<0.30	<0.50
Nitrogen	%(m/m) ²	-	0.01	<1.00	<1.50	<2.50
Potassium and sodium ³	%(m/m) ²	-	0.01	<0.20	<0.40	<0.50
Aluminium	%(m/m) ²	-	0.01	⁴	⁵	⁶
Mercury	mg/kg	-	0.1	<0.1	<0.2	<0.5
Cadmium	mg/kg	-	0.1	<1.0	<4.0	<5.0
Lead	mg/kg	200	-	-	-	-
Copper	mg/kg	300	-	-	-	-
Manganese	mg/kg	400	-	-	-	-
Chromium	mg/kg	100	-	-	-	-
Zinc	mg/kg	500	-	-	-	-
Nickel	mg/kg	40	-	-	-	-
Arsenic	mg/kg	9	-	-	-	-
Cadmium + Mercury	mg/kg	7	-	-	-	-

หมายเหตุ

- ¹ ขีดจำกัดความเข้มข้นของเชื้อเพลิง(detection limit) $\leq 1,000 \text{ m}^3$ หรือปริมาณการผลิต หรือ การขนย้ายใน 1 เดือน และควรทวนสอบอย่างน้อยที่สุดตามที่กำหนด
- ² % (m/m) เป็น ร้อยละโดยน้ำหนัก
- ³ ความเข้มข้นรวม(โพแทสเซียม+โซเดียม) ในส่วนของ water- soluble และ ion-exchangeable สำหรับวัสดุแห้ง
- ⁴ ไม่อนุญาตให้มีอะลูมิเนียม แต่ยอมรับภายใต้ขีดจำกัดความเที่ยงตรง(precision)
- ⁵ กำจัดอะลูมิเนียมที่แหล่งกำเนิดและที่กระบวนการผลิตเชื้อเพลิง
- ⁶ ยอมรับในปริมาณอะลูมิเนียมที่ผ่านการคัดแยก

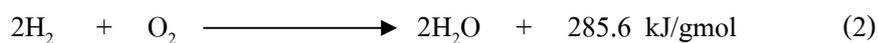
ที่มา : European Commission-Directorate General Environment (2003)



ภาพที่ 21 การเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันในเครื่องแก๊สซิฟิเคชันชนิดไหลขึ้น
ที่มา: FAO (2006)

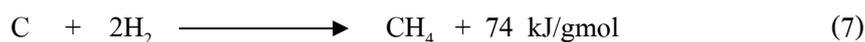
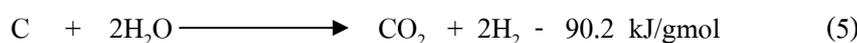
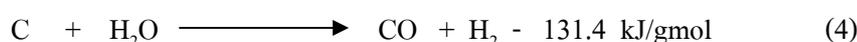
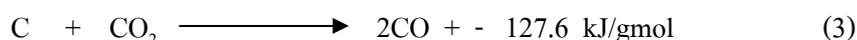
5.1.1 ชั้นเผาไหม้ (combustion zone)

สารคาร์บอนจะถูกเผาไหม้กับออกซิเจนปริมาณจำกัด (partial combustion) ได้ผลิตภัณฑ์ CO_2 และน้ำ แสดงดังสมการที่ (1) และ (2) ซึ่งปฏิกิริยาในชั้นเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน อุณหภูมิในชั้นนี้อยู่ระหว่าง $900 - 1,200\text{ }^\circ\text{C}$ ความร้อนที่เกิดขึ้นในชั้นนี้ จะถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาคูดความร้อนในชั้นรีดักชัน (reduction zone) และชั้นกลั่นสลาย (distillation zone) ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากการทำปฏิกิริยาในชั้นเผาไหม้นี้คือ ความร้อน และเถ้า



5.1.2 ชั้นรีดักชัน (reduction zone หรือ gasification zone)

แก๊ส CO₂ และไอน้ำที่ได้จากชั้นเผาไหม้จะไหลเข้าสู่ชั้นรีดักชัน ปฏิกิริยาในชั้นนี้เป็นปฏิกิริยาที่เปลี่ยนแก๊ส CO₂ และไอน้ำ ให้เป็นแก๊สเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ได้ โดยแก๊ส CO₂ จะไหลผ่านคาร์บอนร้อนและเกิด CO แสดงดังสมการที่ 3 เรียกปฏิกิริยานี้ว่า boudouard reduction reaction ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน (endothermic reaction) อุณหภูมิที่เหมาะสมในชั้นนี้อยู่ประมาณ 500–1,000 °C

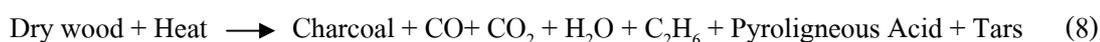


การเพิ่มปริมาณของ CO ทำได้ด้วยการฉีดไอน้ำร้อนเข้าไป ซึ่งไอน้ำจะไปทำปฏิกิริยากับคาร์บอน แสดงดังสมการที่ (4) ได้แก๊ส CO และ H₂ เพิ่มขึ้น เรียกปฏิกิริยานี้ว่า water gas reaction ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อนและเกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูงกว่า 800 °C

สำหรับปฏิกิริยาที่ (5) จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 500 – 600 °C ปฏิกิริยานี้ทำให้สัดส่วนของไฮโดรเจนในแก๊สเชื้อเพลิงมีมากขึ้น ทำให้ค่าพลังงานความร้อนของแก๊สสูงขึ้น แต่หากมีไอน้ำปริมาณมาก ไอน้ำอาจทำปฏิกิริยากับแก๊ส CO ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊ส CO₂ และ H₂ แสดงดังปฏิกิริยาที่ (6) เรียกปฏิกิริยานี้ว่า water shift reaction ทำให้ค่าความร้อนของแก๊สที่ได้ลดลง ปริมาณแก๊ส H₂ จะสูงสุดเมื่ออุณหภูมิของโซนรีดักชันอยู่ประมาณ 700 °C เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อยๆ ปริมาณไฮโดรเจนจะลดลงเรื่อยๆ แต่ปริมาณแก๊ส CO₂ จะเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ภายใต้สภาวะความดันสูง แก๊ส H₂ อาจจะไปรวมตัวกับคาร์บอนและผลิต CH₄ เรียกปฏิกิริยา methane reaction แสดงดังสมการที่ (7) โดยจะเกิดขึ้นได้ดีที่ความดันสูงและอุณหภูมิไม่สูง

5.1.3 ชั้นกลั่นสลาย (distillation zone or pyrolysis)

ในชั้นนี้เชื้อเพลิงได้รับความร้อนจากชั้นเผาไหม้ เพื่อสลายสารอินทรีย์ในเชื้อเพลิงทำให้ได้สารระเหย (volatile matter) ต่างๆ ออกมา ประกอบด้วย เมทานอล กรดน้ำส้ม น้ำมันดิบ และแก๊สเผาไหม้ได้และแก๊สเผาไหม้ไม่ได้ อุณหภูมิในชั้นนี้จะประมาณ 135-600 °C ของแข็งที่เหลืออยู่หลังกระบวนการนี้คือ คาร์บอนเสถียร (fixed carbon) แสดงดังสมการที่ (8)



5.1.4 ชั้นลดความชื้น (drying zone)

ในชั้นนี้อุณหภูมิไม่สูงพอที่จะทำให้เกิดการสลายตัวของสารระเหยต่างๆ ความร้อนที่ได้รับจากชั้นกลั่นสลายจะระเหยความชื้นที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงให้ออกมาในรูปของไอน้ำ อุณหภูมิในชั้นนี้จะอยู่ประมาณ 100 – 135 °C (วิภาวรรณ, 2544)

5.2 ประเภทเครื่องแก๊สซิไฟเออร์ (type of gasifier)

เครื่องแก๊สซิไฟเออร์สามารถแบ่งออกเป็น 4 แบบใหญ่ๆ ตามลักษณะการใช้วัตถุดิบ และขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาภายในเครื่อง (วิรัช, 2531) ดังนี้

1. Fixed bed gasifier หรือ Packed bed gasifier
2. Fluidized bed gasifier
3. Entrained flow gasifier
4. Molten media gasifier

ในการศึกษาเครื่องแก๊สซิไฟเออร์ จะกล่าวเฉพาะประเภท fixed bed gasifier เนื่องจากเกี่ยวข้องกับการศึกษาในครั้งนี้

เครื่องแก๊สซิฟิเคเตอร์ ประเภท fixed bed gasifier แบ่งตามลักษณะอากาศที่ไหลเข้าจนกระทั่งได้แก๊สเชื้อเพลิง ได้ 3 ประเภท ดังนี้

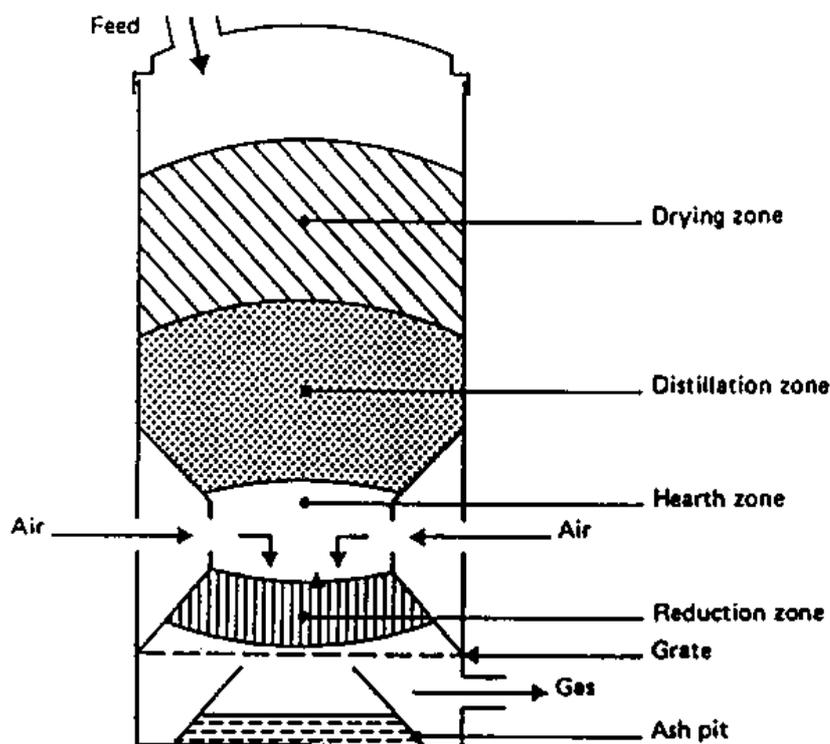
5.2.1 เครื่องแก๊สซิฟิเคเตอร์แบบไหลขึ้น (updraft gasifier)

ระบบนี้อากาศจะถูกป้อนเข้าทางด้านล่างไหลขึ้นด้านบน ในขณะที่เชื้อเพลิงจะเคลื่อนที่ลงด้านล่างลักษณะสวนทางกัน เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า counter current gasifier แสดงดังภาพที่ 21 ชั้นของปฏิกิริยาจะแบ่งเป็นลำดับ จากระดับอุณหภูมิสูงในชั้นเผาไหม้ไปสู่ระดับอุณหภูมิต่ำในชั้นอบแห้ง

แก๊สร้อนที่เกิดจากชั้นเผาไหม้ จะไหลผ่านชั้นเชื้อเพลิง ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนสัมผัส (sensible heat) ให้กับเชื้อเพลิง ก่อนไหลลงสู่ชั้นรีดักชันและชั้นกลั่นสลาย ดังนั้นเครื่องแก๊สซิฟิเคเตอร์ประเภทนี้จึงมีประสิทธิภาพทางความร้อนสูง แต่อุณหภูมิของแก๊สเชื้อเพลิงที่ไหลออกจากเครื่องจะลดลง ทำให้น้ำมันดินกลั่นตัวเป็นของเหลวในชั้นกลั่นสลายและชั้นอบแห้ง ซึ่งอยู่ห่างจากชั้นเผาไหม้ อุณหภูมิจึงไม่สูงพอที่จะทำให้โมเลกุลซับซ้อนเกิดการแตกตัว (cracking) จึงทำให้แก๊สเชื้อเพลิงมีสิ่งปนเปื้อนสูง

5.2.2 เครื่องแก๊สซิฟิเคเตอร์แบบไหลลง (downdraft gasifier)

ระบบนี้อากาศไหลลงทิศทางเดียวกับการไหลเลื่อนของเชื้อเพลิง เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า co-current gasifier มีวัตถุประสงค์ให้ผลิตภัณฑ์จากชั้นกลั่นสลาย ไหลผ่านชั้นเผาไหม้ซึ่งมีอุณหภูมิสูง จึงทำให้เกิดการแตกตัวเป็นแก๊สก่อนที่ จะไหลออกจากเครื่องแก๊สซิฟิเคเตอร์ แสดงดังภาพที่ 22 แก๊สเชื้อเพลิงจึงมีน้ำมันดินต่ำ แต่จะมีอุณหภูมิสูงประมาณ 300-500 °C จุดสำคัญของเครื่องประเภทนี้ คือ ลักษณะชั้นเผาไหม้ จะออกแบบให้เล็กลงโดยการ ลดพื้นที่หน้าตัด และปรับลักษณะการป้อนอากาศ เพื่อให้ทำให้อุณหภูมิในชั้นเผาไหม้สูงเพียงพอในการสลายน้ำมันดิน แต่ถ้าเชื้อเพลิงมีเถ้าสูงกว่า 6 % และมีค่าความชื้นสูงกว่า 20% (Reed and Das, 1988) จะไม่เหมาะกับเครื่องประเภทนี้ เนื่องจากเถ้าอาจหลอมละลายติดกับคอคอดขัดขวางการไหลของเชื้อเพลิงและแก๊ส



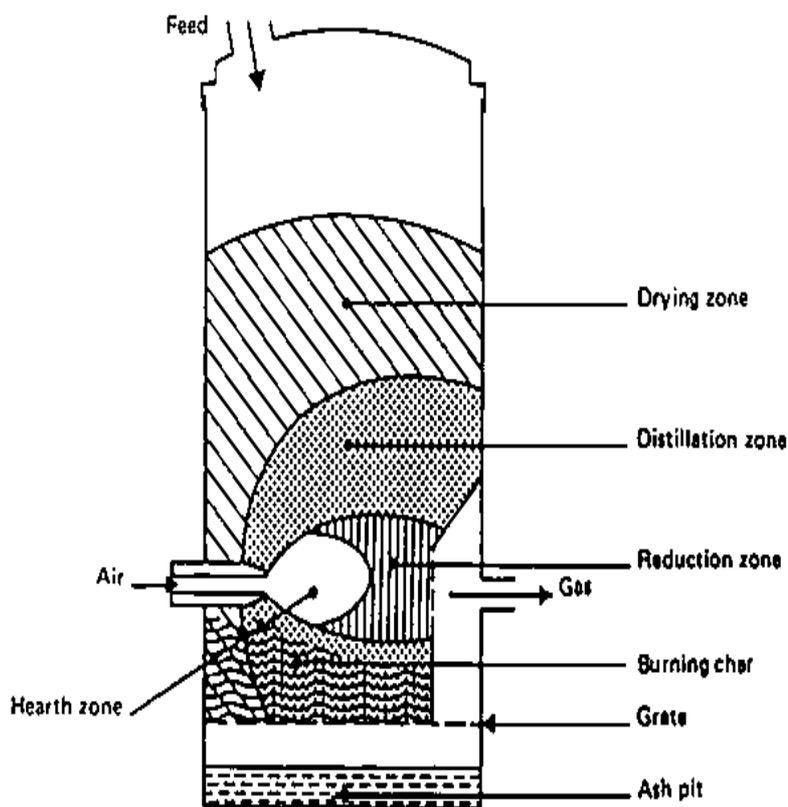
ภาพที่ 22 แสดงเครื่องแก๊สซิไฟเออร์แบบไหลลง
ที่มา: FAO (2006)

5.2.3 เครื่องแก๊สซิไฟเออร์แบบไหลขวาง (cross draft gasifier)

ระบบนี้อากาศไหลขวางกับทิศทางการไหลของเชื้อเพลิง แสดงดังภาพที่ 23 ปฏิกริยาชั้นเผาไหม้และชั้นรีดักชันจะอยู่ใกล้กันมาก ดังนั้นจึงผลิตแก๊สเชื้อเพลิงได้รวดเร็ว แต่แปรผันง่าย เนื่องจากบริเวณชั้นเผาไหม้จะอยู่กึ่งกลางของเครื่องแก๊สซิไฟเออร์ แต่ขอบเขตของการเผาไหม้อาจขยายกว้างขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วอากาศ

จุดสำคัญของเครื่องแก๊สซิไฟเออร์แบบไหลขวาง คือการควบคุมความเร็วอากาศ และขอบเขตของชั้นเผาไหม้ ปกติความเร็วอากาศจะมีค่าสูงและเกิดการเผาไหม้สูง แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จึงมีอุณหภูมิและสิ่งปนเปื้อนสูง ส่วนชั้นรีดักชันมีขนาดเล็ก จึงทำให้มี residence time สั้น การเปลี่ยนรูป CO_2 ไปเป็น CO ค่อนข้างต่ำ ดังนั้นแก๊สเชื้อเพลิงจะมีค่าความร้อนต่ำ แต่เมื่อป้อน

อากาศที่ความเร็วสูงมาก จะมีผลต่อองค์ประกอบแก๊สเชื้อเพลิง โดยอัตราการเปลี่ยน CO_2 ไปเป็น CO สูง เนื่องจากปฏิกิริยาเข้าใกล้สภาวะสมดุล



ภาพที่ 23 แสดงเครื่องแก๊สซิไฟเออร์แบบไหลขวาง
ที่มา: FAO (2006)

เมื่อเปรียบเทียบเครื่องแก๊สซิไฟเออร์แบบไหลขึ้น แบบไหลลงและแบบไหลขวาง โดยทางทฤษฎีพบว่าประสิทธิภาพของเครื่องแก๊สซิไฟเออร์แบบไหลขึ้นจะสูงที่สุด แบบไหลขวางต่ำสุด ส่วนค่าความร้อนของแก๊สที่ได้จากเครื่องแก๊สซิไฟเออร์แต่ละแบบจะไม่สามารถเปรียบเทียบได้ เพราะขึ้นอยู่กับเชื้อเพลิงและสภาวะการทำงาน

5.3 ชนิดของกระบวนการผลิตแก๊ส

กระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากเครื่องแก๊สซิฟิเคชัน แบ่งตามปฏิกิริยา ได้ 4 ประเภท ดังนี้

5.3.1 Air-blown gasification โดยใช้อากาศธรรมดาทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงในชั้นเผาไหม้ จากนั้นความร้อนและแก๊ส CO_2 ที่เกิดขึ้น จะไหลผ่านกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันในชั้นถัดไป เพื่อผลิตแก๊สเชื้อเพลิง ซึ่งมี N_2 เป็นส่วนประกอบที่สำคัญ โดยจะมีอยู่ประมาณ 50-60%

5.3.2 Oxidative gasification เป็นการใช้ออกซิเจน O_2 แทนอากาศในการเผาไหม้กับเชื้อเพลิงแข็ง มีผลให้ค่าความร้อนในแก๊สเชื้อเพลิงสูงขึ้น เพราะไม่มี N_2 ปะปนออกมา เนื่องจาก N_2 เป็นแก๊สที่ไม่ทำปฏิกิริยาในการเผาไหม้และไม่มีค่าความร้อน แต่จะทำให้ค่าพลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้มีค่าลดลง ในกระบวนการนี้จึงสามารถควบคุมปฏิกิริยาในการเผาไหม้ได้ดีกว่าแบบใช้อากาศ แต่แก๊ส O_2 มีราคาแพงเมื่อเทียบกับอากาศธรรมดา จึงไม่คุ้มทุนทางด้านเศรษฐศาสตร์ ดังนั้นกระบวนการนี้มักนำไปใช้กับเชื้อเพลิงถ่านหินเพื่อนำแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้ไปปรับปรุง (upgrade) ให้เป็นเชื้อเพลิงสังเคราะห์ (synthetic fuel)

5.3.3 Steam gasification เป็นการใช้น้ำ (steam) เข้าไปช่วยทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงแข็ง จะช่วยเพิ่มปริมาณแก๊สเชื้อเพลิง ที่สำคัญ ได้แก่ CO H_2 และ CH_4 แต่ต้องควบคุมอุณหภูมิภายในชั้นเผาไหม้ให้สูงกว่า $800\text{ }^\circ\text{C}$ เพื่อให้ปฏิกิริยาดำเนินไปได้

5.3.4 Hydro gasification เป็นกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่ความดันสูง โดยใช้ H_2 ทำปฏิกิริยาในการเผาไหม้กับเชื้อเพลิงแข็ง และไม่มีการใช้ O_2 หรืออากาศร่วมทำปฏิกิริยา โดยปกติจะทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ $750\text{ }^\circ\text{C}$ และความดันภายในเครื่องแก๊สซิฟิเคชันสูงกว่าบรรยากาศมาก ในเครื่องบางชนิดสูงถึง 20 MPa แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จะเป็น CH_4 เป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากปฏิกิริยาเคมีของคาร์บอนกับไฮโดรเจน เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน

5.4 ส่วนประกอบและค่าความร้อนของเชื้อเพลิง

ส่วนประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเชื้อเพลิง สามารถวิเคราะห์ได้ 2 วิธี ดังนี้

5.4.1 Proximate analysis เป็นการวัดค่าความชื้น (moisture) ของแข็งระเหย(volatile solid) คาร์บอนเสถียร (fixed carbon) และเถ้า (ash) ของเชื้อเพลิง แสดงดังตารางที่ 5

5.4.2 Ultimate analysis เป็นการวิเคราะห์ธาตุของเชื้อเพลิง ได้แก่ คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O) ซัลเฟอร์ (S) และไนโตรเจน (N) แสดงดังตารางที่ 5 และค่าความร้อน (calorific value) ที่มีอยู่ในเชื้อเพลิง แสดงดังตารางที่ 6

ธาตุซัลเฟอร์ในเชื้อเพลิงจะทำปฏิกิริยากับ ออกซิเจน ไฮโดรเจน และ คาร์บอน ในระหว่างการเผาไหม้ ซึ่งการศึกษาแก๊สซัลไฟเคชันของถ่านหินแอนทราไซต์ที่มีปริมาณซัลเฟอร์ 1.1 % ที่อัตราแก๊สซัลไฟเคชัน $150 \text{ kg/m}^3/\text{hr}$ พบว่าแก๊ส H_2S มีสัดส่วนสูงสุด 66.3 % ขององค์ประกอบซัลเฟอร์ทั้งหมดที่เกิดขึ้น (สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2544) และจากการศึกษาแก๊สซัลไฟเคชันของมูลฝอยพลาสติกชนิดโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง โดยเครื่องแก๊สซัลไฟเออร์ชนิด fluidized bed ไม่พบสารประกอบซัลเฟอร์ในแก๊สเชื้อเพลิง (Mastral *et al.*, 2003) นอกจากนี้ โดยปกติแก๊สซัลไฟเคชันเผาไหม้ที่ช่วงอุณหภูมิ $1,200\text{-}2,000 \text{ }^\circ\text{C}$ ที่ความดันบรรยากาศและสภาวะขาดแก๊ส O_2 เป็นการป้องกันการเกิดออกไซด์ของซัลเฟอร์ ซึ่งเป็นตัวสนับสนุนการเกิดแก๊สกรด (EPIC, 2003)

แก๊สซัลไฟเคชันเผาไหม้ที่ช่วงอุณหภูมิ $1,200\text{-}2,000 \text{ }^\circ\text{C}$ ภายใต้อุณหภูมิบรรยากาศและสภาวะขาดแก๊สออกซิเจน ธาตุไนโตรเจนในเชื้อเพลิงจะทำปฏิกิริยากับธาตุไฮโดรเจนและคาร์บอนในเชื้อเพลิง ได้แก๊สแอมโมเนีย (NH_3) และไฮโดรไซยานิก (HCN) ปะปนกับแก๊สเชื้อเพลิง ส่วนแก๊สไนโตรเจนในอากาศจะทำปฏิกิริยาช้ากว่า ดังนั้นหากเชื้อเพลิงมีไนโตรเจนน้อยก็จะเกิดแก๊สแอมโมเนียและไฮโดรไซยานิกน้อยมาก จากการศึกษาแก๊สซัลไฟเคชันของมูลฝอยพลาสติกชนิดโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง โดยเครื่องแก๊สซัลไฟเออร์ชนิด fluidized bed ไม่พบสารประกอบไนโตรเจนในแก๊สเชื้อเพลิง (Mastral *et al.*, 2003)

ตารางที่ 5 แสดงการวิเคราะห์ proximate และ ultimate analysis ในเชื้อเพลิงถ่านหินและพลาสติก

Parameter	Type of fuel				
	Anthracite ³	PE ⁴	PS ⁴	PVC ⁴	Plastic ⁵
Proximate Analysis					
Moisture (%)	5.2	-	-	-	-
Volatile solid (%)	33.1	100	99	91	-
Fixed carbon (%)	53.7	0	1	9	-
Ash (%)	8.0	0	0	1	-
Calorific value (MJ/kg)	33.7 ¹	40.5	44.5	19.2	-
Ultimate Analysis					
C (%)	84	86	92	38	60
H (%)	5.1	14	8	5	7.2
S (%)	1.1	0	0.04	0	0
N (%)	9.8 ²	0	0	0	0
O (%)	-	0	0	0	22.8

หมายเหตุ ¹ คำนวณที่ความชื้นร้อยละ 3

² ปริมาณไนโตรเจนรวมกันออกซิเจน

ที่มา: ³ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (2544)

⁴ Courtemanche and Levendis (1998)

⁵ Kreith (1993)

การวิเคราะห์ค่าความร้อนโดยใช้ bomb calorimeter ความร้อนที่คำนวณได้เป็นความร้อนสูงสุด (higher heating value: HHV) โดยทั่วไปพลังงานความร้อนที่อยู่ในแก๊สเชื้อเพลิงจะมีค่าต่ำกว่าพลังงานความร้อนจากแก๊สที่ได้จากการหมัก (biogas) เนื่องจากแก๊สที่ได้จากการหมักส่วนใหญ่เป็นแก๊ส CH₄ ซึ่งมีค่าความร้อนมากกว่า CO ซึ่งเป็นแก๊สที่มีอยู่ส่วนมากในแก๊สเชื้อเพลิง แสดงในตารางที่ 6 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงฟอสซิลและเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดต่างๆ แสดงดังตารางที่ 7 ส่วนค่าความร้อนสูงสุดของมูลฝอยพลาสติกโพลีเอทิลีนฟิล์มความหนาแน่นสูง พบว่ามีค่าความร้อน ที่น้ำหนักแห้ง 44.6 MJ/kg (Yadong *et al.*, 2001) และพลาสติกโพลีเอทิลีนความ

หนาแน่นสูง มีค่าความร้อน 43.5 MJ/kg (EPIC, 2003) ส่วนพลาสติกชนิดโพลีสไตรีน โพลีเอทีลีน โพลีโพรพิลีน และโพลีไวนิลคลอไรด์ (PVC) มีค่าความร้อน 44.5 40.5 43.4 และ 19.2 MJ/kg ตามลำดับ (Courtemanche and Levendis, 1998)

ตารางที่ 6 ค่าความร้อนของแก๊สที่กำเนิดจากแหล่งผลิตต่างๆ

Source	Type of gas	Calorific value (MJ/m ³)
Sewage water	CH ₄ , CO ₂	19-21
Anaerobic digesters	CH ₄ , CO ₂	19-23
Gasifier	H ₂ , CH ₄ , CO ₂ , CO, N ₂	4-6

ที่มา: Tanthansakun (1993)

ตารางที่ 7 แสดงปริมาณความชื้นและค่าความร้อนของเชื้อเพลิงฟอสซิลและชีวมวล

Type of fuel	Moisture (%w)	Calorific value (MJ/kg)
Lignite	45	19.7
Anthracite	3	33.7
Gasoline	-	43.6
Diesel	-	45.0
Molasses ¹	14.7	17.5
Olive refuse ¹	10.5	21.4
Pine cone ¹	11.0	18.1
Paper mill waste ¹	9.3	13.0
Cotton refuse ¹	6.0	17.5
Saw dust ¹	9.5	16.7

ที่มา: สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (2544)

¹ Yaman *et al.* (2001)

5.5 ไดออกซิน (dioxin) และฟูราน (furan)

ไดออกซิน หรือ โพลีคลอริเนตเตด ไดเบนโซ พาราไดออกซิน (polychlorinated dibenzo-para-dioxins: PCDDs) เป็นผลิตภัณฑ์ทางเคมีที่เกิดขึ้นมาโดยมิได้ตั้งใจ จากกระบวนการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ เป็นสารประกอบในกลุ่มคลอริเนตเตด อะโรมาติก (chlorinated aromatic compounds) มีออกซิเจนและคลอรีนเป็นองค์ประกอบ 1 ถึง 8 อะตอม สารในกลุ่มไดออกซินมี 75 ชนิด นอกจากนี้สารประกอบที่คล้ายคลึงกับกลุ่มไดออกซิน คือ ฟูราน หรือ โพลีคลอริเนตเตด ไดเบนโซ ฟูราน (polychlorinated dibenzo furans: PCDFs) สารกลุ่มฟูราน มี 135 ชนิด โดยทั่วไปเรียกรวมกัน ไดออกซิน/ฟูราน หรือ PCDDs/PCDFs สารทั้งสองชนิดมีคุณสมบัติความเป็นพิษและแหล่งกำเนิดคล้ายคลึงกัน

กรมควบคุมมลพิษ (2549 ค) ได้รายงานเตาเผาชนิดต่างๆ เช่น เตาเผามูลฝอยชุมชน เตาเผามูลฝอยอันตราย เป็นต้น เป็นแหล่งสำคัญที่ปลดปล่อย ไดออกซิน/ฟูราน ปริมาณมากหรือน้อยนั้น ขึ้นอยู่กับวัสดุที่นำเข้าเผาในเตา ซึ่งพบว่ามี 3 สภาวะ คือ มีสารอินทรีย์คาร์บอน มีสารคลอรีน และผลิตภัณฑ์ที่มีสารไดออกซิน/ฟูรานปะปนอยู่

การผลิตหรือปลดปล่อยไดออกซิน/ฟูรานสู่บรรยากาศนั้น ต้องมีตัวแปรหรือสภาวะที่สำคัญอีกส่วนหนึ่ง คืออุณหภูมิการเผาไหม้ ในช่วง 200-550 °C ความเข้มข้นสูงสุดของไดออกซิน/ฟูรานจะมีอยู่ในแก๊สและเถ้า ความเข้มข้นจะต่ำสุดเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 275 °C หรืออุณหภูมิสูงกว่า 420 °C แต่ก็ยังมีสารชนิดนี้ปริมาณต่ำ ในช่วง 200 – 275 °C และสูงกว่า 420-550 °C โมเลกุลของไดออกซิน/ฟูรานจะเริ่มถูกทำลาย (break down) เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 850 °C และจะถูกทำลายเกือบสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 1,100 °C เป็นเวลา 2 sec อย่างไรก็ตาม ไดออกซิน/ฟูรานจะไม่ถูกทำลายอย่างสิ้นเชิง เพราะเมื่ออุณหภูมิลดลงก็จะสร้างขึ้นใหม่อีก การสร้างหรือผลิตไดออกซิน/ฟูราน จะมีปริมาณสูงสุดในช่วงเริ่มต้นการเผาเชื้อเพลิง และถ้าเชื้อเพลิงมีปริมาณคลอรีนต่ำ ความเข้มข้นไดออกซิน/ฟูรานจะต่ำด้วย

Watanabe *et al.* (2004) ทำการศึกษาปริมาณคลอรีนในมูลฝอยรวม พบคลอรีน 3.7 g/kg เมื่อนำไปเผาไหม้พบว่า 2.7 g/kg ถูกเผาไหม้ ส่วน 1.0 g/kg ไม่ถูกเผาไหม้

EPIC (2003) ศึกษาแก๊สซิฟิเคชันของพลาสติก 2 กลุ่ม โดยกลุ่มที่ 1 เป็นพลาสติกฟิล์มอัดเม็ด และกลุ่มที่ 2 เป็นพลาสติกถนอม (ยกเว้น PET และ HDPE) พบว่ามีการปลดปล่อยสารออกสู่อากาศหลายชนิด รวมทั้งไดออกซินและฟูราน ปริมาณ 0.005 และ 0.03 (TEQ equivalent) ng/Rm³ ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานของประเทศแคนาดา (Ontario Guideline) กำหนดไว้ไม่เกิน 0.08 ng/Rm³ ที่ปริมาณออกซิเจน 11% โดยปริมาตร นอกจากนี้ยังมีการศึกษาแก๊สซิฟิเคชันของเชื้อเพลิงผสมระหว่างเชื้อเพลิงแปรรูปของ AMA (Municipal Environment Company of Rome) โดยใช้เครื่องแก๊สซิฟิเคชัน two stage ปริมาณคลอรีนในเชื้อเพลิงต่ำกว่า 0.1% หลังจากผ่านกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน พบว่าปลดปล่อยสารมลพิษ เช่น ไดออกซิน และ ออกไซด์ของไนโตรเจน ในแก๊สเชื้อเพลิง ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานประเทศอิตาลี (Italian Law Limit) (Borianni *et al.*, 2002) สารไดออกซินและฟูราน พบจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันน้อย เนื่องจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันจะกระทำที่อุณหภูมิสูง ซึ่งจะไปทำลายสารประกอบไดออกซิน/ฟูราน หรือสารตัวนำที่มาจากเชื้อเพลิง และการเกิดรีดิวซิง ทำให้ไม่ปรากฏคลอรีนอิสระ (free chlorine) เพราะคลอรีนจะอยู่ในรูป HCl (EPIC, 2003)

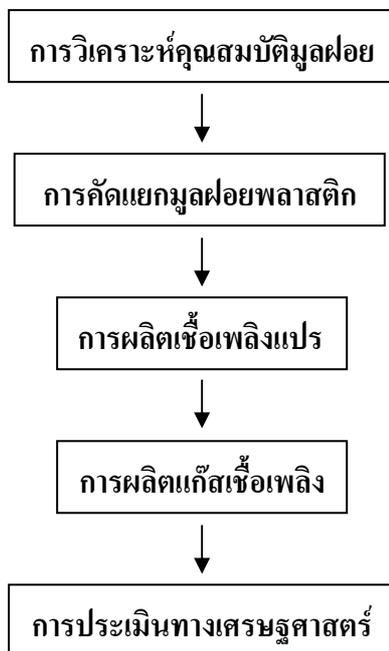
สมรัฐ และคณะ (2549) ศึกษาแก๊สซิฟิเคชันไม้แมงกริส โดยใช้เครื่องแก๊สซิฟิเคชันแบบไหลลง บรรจุเชื้อเพลิงครั้งละ 30 kg อัตราการเติมอากาศ 20-45 % ของปริมาณความต้องการทางทฤษฎี พบว่าอุณหภูมิในชั้นเผาไหม้ 800 °C แก๊สเชื้อเพลิงประกอบด้วย CO H₂ CH₄ CO₂ O₂ และ N₂ มีค่าความเข้มข้น 17-20, 12-16, 2-3, 12-14, 1-3 และ 47-53 % ตามลำดับ ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าอยู่ระหว่าง 4-6 MJ/Nm³ และ ประสิทธิภาพแก๊สเย็น มีค่าอยู่ระหว่าง 51-57%

See *et al.* (2006) ศึกษาแก๊สซิฟิเคชัน ในเครื่องแก๊สซิฟิเคชัน fixed bed ใช้มูลฝอยพลาสติกเป็นเชื้อเพลิง และใช้แก๊ส O₂ บริสุทธิ์ในการเผาไหม้ ที่อัตราส่วน เชื้อเพลิง/O₂ เท่ากับ 7 ได้แก๊สเชื้อเพลิงประกอบด้วย CO H₂ CH₄ และ CO₂ มีความเข้มข้น 33.9% 26.1% 10.7% และ 29.2% ค่าความร้อน 13 MJ/Nm³

Pinto *et al.* (2002) ศึกษาแก๊สซิฟิเคชันร่วม (co-gasification) โดยใช้เชื้อเพลิงผสมระหว่างชีวมวลกับมูลฝอยพลาสติก ทดสอบด้วยเครื่องแก๊สซิฟิเคชัน fluidized bed และใช้อากาศในการเผาไหม้ พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้เกิดแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น และเกิดไฮโดรคาร์บอน น้ำมันดินและเถ้าลดลง ที่อุณหภูมิ 885 °C สัดส่วนพลาสติก 40% ของน้ำหนักเชื้อเพลิงร่วม พบว่าเกิดเถ้าประมาณ 2 % และเกิดแก๊สเชื้อเพลิงประมาณ 90%

อุปกรณ์และวิธีการ

การศึกษาการนำมูลฝอยพลาสติกจากกองมูลฝอยกลางแจ้งกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ในรูปแบบเชื้อเพลิง มีขั้นตอนการศึกษา แสดงดังภาพที่ 24 เริ่มจากการวิเคราะห์องค์ประกอบและคุณสมบัติทางเคมีของมูลฝอย จากนั้นศึกษากระบวนการคัดแยกมูลฝอยพลาสติกแบบแห้ง ซึ่งประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ การคัดแยกด้วยพนักงาน (manual separation) เพื่อคัดแยกองค์ประกอบต่างๆ ที่ไม่ใช่พลาสติกและพลาสติกชนิดโพลีไวนิลคลอไรด์ออก เช่น ฝ้าย ไม้ แก้ว โลหะ ท่อพีวีซี เป็นต้น จากนั้นนำมูลฝอยที่ได้ไปคัดแยกด้วยเครื่องทรมเมล (trommel separation) เพื่อแยกองค์ประกอบที่มีขนาดเล็กกว่า 50 mm ออกจากมูลฝอยพลาสติกที่ต้องการ วิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของมูลฝอยพลาสติก จากนั้นนำไปลดขนาด แล้วจึงนำไปอัดเป็นเชื้อเพลิงแปรรูปโดยใช้มันสำปะหลังป่นเป็นตัวประสาน สุดท้ายนำเชื้อเพลิงแปรรูปไปผ่านกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ด้วยเครื่องแก๊สซิไฟเออร์แบบไหลลง เพื่อผลิตแก๊สเชื้อเพลิง ได้แก่ CO CH₄ และ H₂ การศึกษาครั้งนี้เป็นการทดลองระดับ pilot scale โดยมีอุปกรณ์และวิธีการดังต่อไปนี้



ภาพที่ 24 ขั้นตอนการศึกษา

อุปกรณ์

1. มูลฝอยเทกองกลางแจ้ง

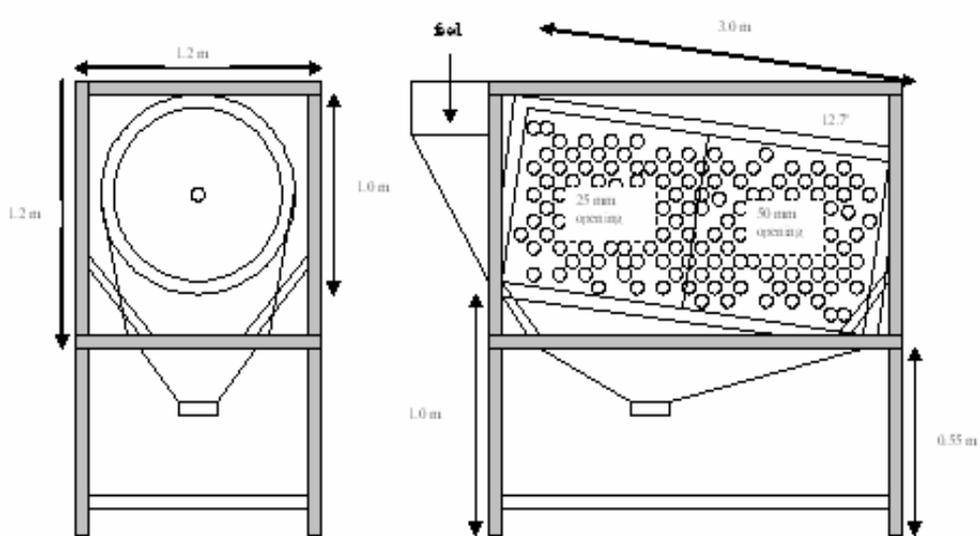
มูลฝอยเทกองกลางแจ้งที่ใช้ในการศึกษา มาจากสถานีกำจัดมูลฝอย องค์การบริหารส่วนจังหวัดนนทบุรี ซึ่งกำจัดมูลฝอยโดยวิธีเทกองกลางแจ้ง (open dumpsite) แสดงดังภาพที่ 25 โดยศึกษามูลฝอยอายุ 2 5 7 และ 10 ปี การจำแนกอายุมูลฝอยได้จากการสอบถามเจ้าหน้าที่องค์การบริหารส่วนจังหวัดนนทบุรี



ภาพที่ 25 กองมูลฝอยกลางแจ้ง

2. เครื่องทอรวมเมล (trommel)

เครื่องทอรวมเมล ขนาดกำลัง 5 hp ความลาดเอียงในแนวระนาบ 12.7 องศา อัตราเร็วในการหมุน 8 rpm ตะแกรงมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 m ความยาว 3 m รูตะแกรง แบ่งเป็น 2 ขนาด ได้แก่ 25 mm และ 25-50 mm สำหรับคัดแยกองค์ประกอบที่ไม่ใช่พลาสติก ส่วนมูลฝอยพลาสติกที่มีขนาดมากกว่า 50 mm จะเคลื่อนที่ผ่านไปยังภาชนะรองรับ แสดงดังภาพที่ 26



ภาพที่ 26 เครื่องทอแมด

3. เครื่องบดพลาสติก (shredder)

เครื่องบดพลาสติก Okane Crusher กำลัง 3 hp-pully แรงดันไฟฟ้า 380 v ขนาดเครื่อง 400 x 900 x 1,550 mm ขนาดรูตะแกรง 5 mm น้ำหนัก 10 kg และอัตราเร็ว 1,415 rpm (ทดแล้ว 249 rpm) แสดงดังภาพที่ 27



ภาพที่ 27 เครื่องบดพลาสติก

4. เครื่องอัดแท่ง (screw extrusion machine)

เครื่องอัดแท่ง ขนาดกำลัง 5 hp อัตราหมุนสกรู 200 rpm ผลิตเชื้อเพลิงแปรรูปขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 4 cm แสดงดังภาพที่ 28



ภาพที่ 28 เครื่องอัดแท่ง

5. เครื่องทดสอบแรงอัด (Stepless Compression Test Machine)

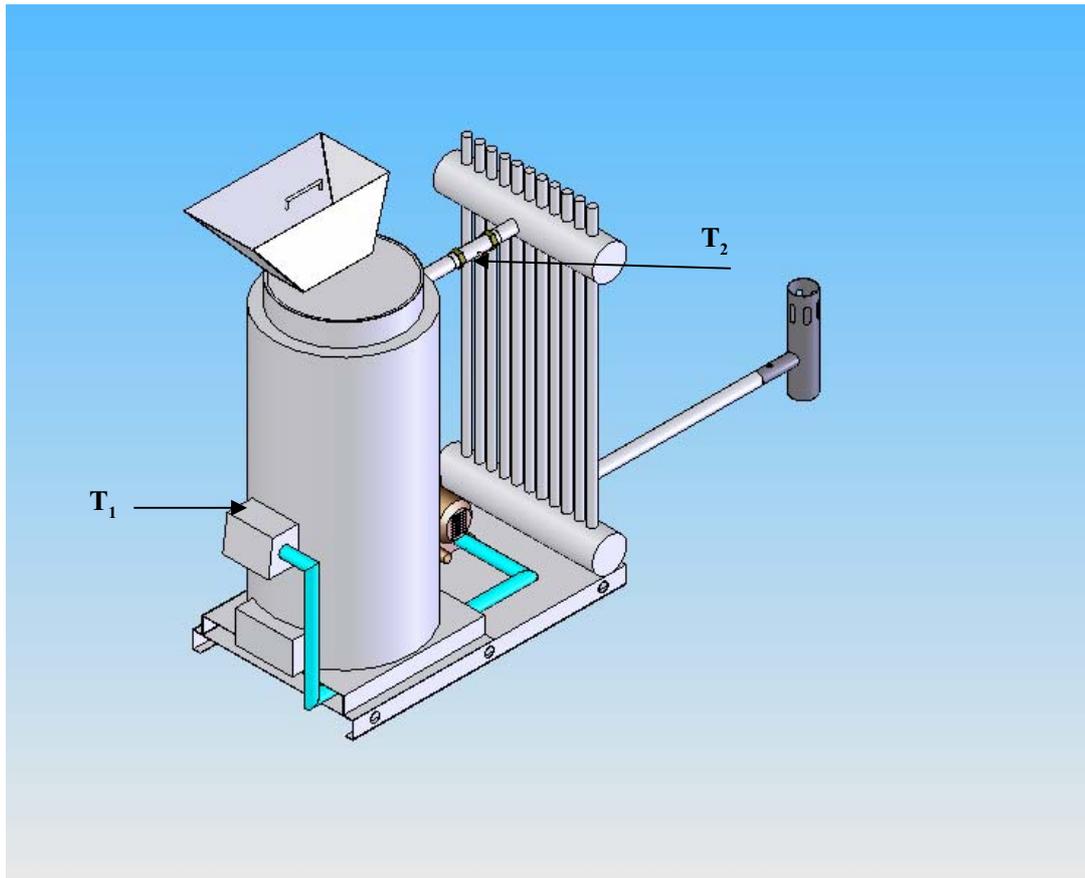
เครื่องทดสอบแรงอัด ยี่ห้อ Wykeham Farrance และ ใช้ Wykeham Farrance ring รุ่น 8790

6. เครื่องแก๊สซิฟิเคชันแบบไหลลง

เครื่องแก๊สซิฟิเคชันแบบไหลลง แสดงดังภาพที่ 29 ปริมาตรบรรจุเชื้อเพลิง 0.1862 m^3 ตัวเครื่องมีวนเป็นทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 cm มีช่องสำหรับเก็บเถ้า (ash pit) ด้านล่าง ติดตั้งเครื่องวัดอุณหภูมิ 2 ตำแหน่ง คือ ภายในบริเวณชั้นเผาไหม้ (T_1) และบริเวณท่อแก๊สเชื้อเพลิงไหลออก (T_2)

7. เครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ (Bomb calorimeter)

เครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ ยี่ห้อ Parr Instrument รุ่น 1314 แสดงดังภาพที่ 30



ภาพที่ 29 เครื่องแก๊สซีไฟเออร์แบบไหลลง



ภาพที่ 30 เครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์

8. เครื่องวัดอุณหภูมิ (Thermocouple)

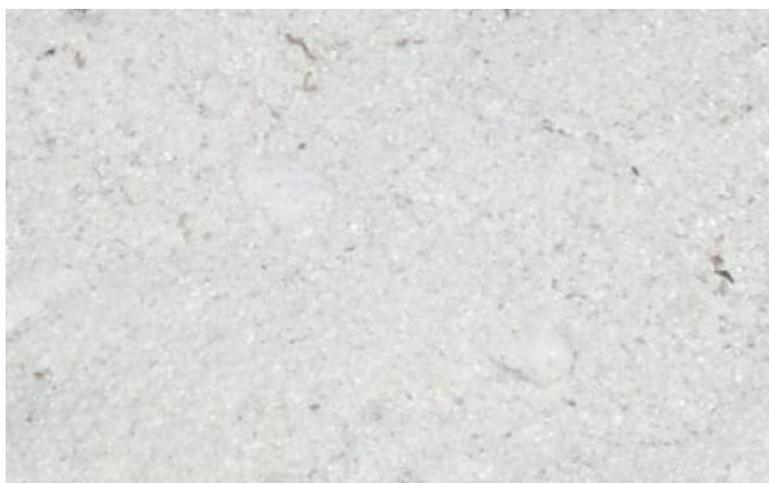
เครื่องวัดอุณหภูมิ ประเภท K (CA) รุ่น JB-35 และเครื่องอ่าน Digital meter รุ่น UN-305A ความละเอียด 0.1

9. เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatography)

เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น 14 A Detector: Thermal Conductivity Detector (TCD) Column: Pack WG-100 SUS Col.1/4inch, O.D. x 1.8 m

10. มันสำปะหลังป่น (cassava meal)

มันสำปะหลังป่น ชื้อจากโรงงานผลิตมันสำปะหลังป่น ขนาดบรรจุ 50 kg/bag ลักษณะเป็นผงหยาบ สีเทาอ่อน ความชื้นประมาณ 7% แสดงดังภาพที่ 31 ใช้สำหรับเป็นตัวประสานในการผลิตเชื้อเพลิงแปรรูปจากมูลฝอยพลาสติก



ภาพที่ 31 มันสำปะหลังป่น

11. เหง้ามันสำปะหลัง (cassava rhizome)

เหง้ามันสำปะหลังเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ได้มาจากการเก็บผลผลิตของมันสำปะหลัง ซึ่งเป็นส่วนที่อยู่ระหว่างหัวมันกับลำต้นที่อยู่เหนือดิน สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ โดยนำเหง้ามันสำปะหลังที่ผ่านการผึ่งแห้ง ความชื้นประมาณ 7% มาบดจนมีขนาดประมาณ 2 cm แสดงดังภาพ 32 และ 33 แล้วนำไปเผาด้วยกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันร่วมกับเชื้อเพลิงแปรรูป



ภาพที่ 32 การผึ่งแห้งเหง้ามันสำปะหลัง



ภาพที่ 33 เหง้ามันสำปะหลังแห้งบด

วิธีการ

1. คุณสมบัติพื้นฐานของมูลฝอย

การสุ่มตัวอย่างมูลฝอยจากกองมูลฝอยกลางแจ้ง โดยแยกตามอายุ 2 5 7 และ 10 ปี จำนวน 5 จุด เพื่อนำมาศึกษาองค์ประกอบมูลฝอย ชนิดของพลาสติก และคุณสมบัติทางเคมีของมูลฝอย ได้แก่ ความหนาแน่นรวม ความชื้น ของแข็งระเหย ปริมาณเถ้า และค่าพลังงานความร้อน

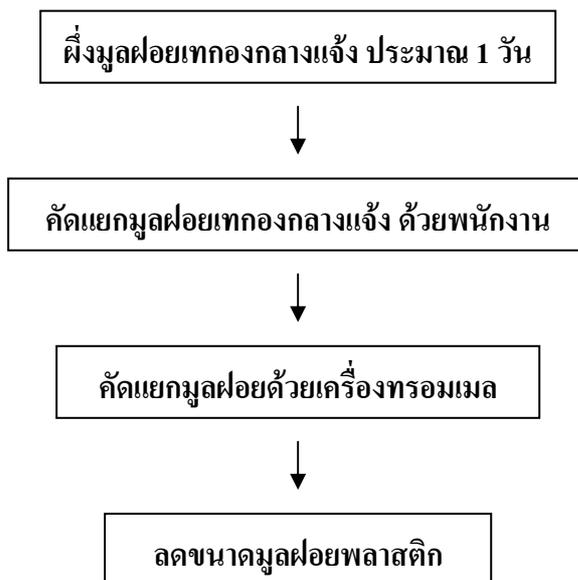
2. การคัดแยกมูลฝอยพลาสติก

การคัดแยกมูลฝอย แบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่ การคัดแยกแบบแห้ง (dry process separation) และการคัดแยกแบบเปียก (wet process separation) ซึ่งการศึกษาจะเน้นที่การคัดแยกแบบแห้ง เพราะไม่มีน้ำเสียจากกระบวนการคัดแยก โดยใช้มูลฝอยอายุ 7-10 ปี เป็นตัวแทนในการศึกษา ดังนี้

2.1 การคัดแยกมูลฝอยแบบแห้ง

ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วการคัดแยกมูลฝอยกับความบริสุทธิ์ของพลาสติก ที่ผ่านการคัดแยกด้วยเครื่องทอเมต โดยนำมูลฝอยที่ผ่านการคัดแยกด้วยพนักงาน ประมาณ 200 kg คัดแยกด้วยเครื่องทอเมตที่อัตราการเร็ว 750 1,276 และ 1,330 kg/hr จำนวน 5 ซ้ำ จากนั้นวิเคราะห์ค่าความบริสุทธิ์ของมูลฝอยพลาสติกที่ผ่านการคัดแยก เลือกอัตราการคัดแยกที่เหมาะสมเพื่อนำไปศึกษาขั้นต่อไป

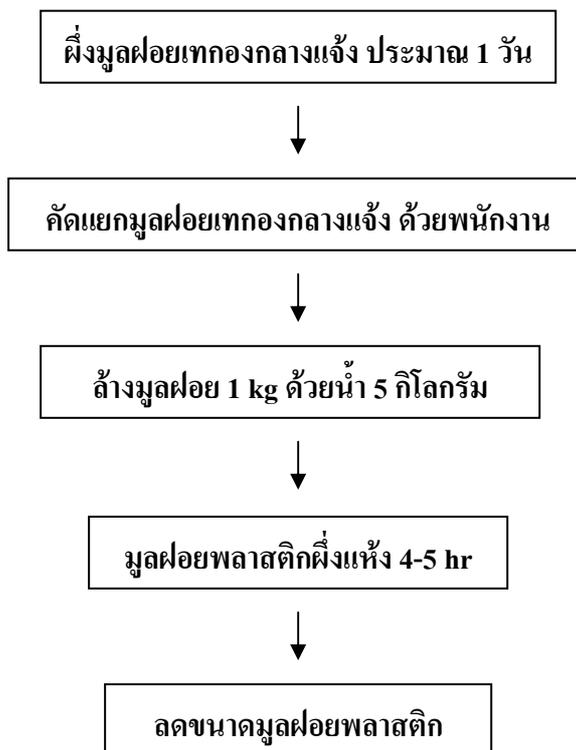
ทำการคัดแยกมูลฝอยเทกองกลางแจ้ง ประมาณ 500 kg/d จำนวน 6 ซ้ำ เพื่อวิเคราะห์ค่าความบริสุทธิ์ของมูลฝอยพลาสติก องค์ประกอบ คุณสมบัติทางเคมีและค่าความร้อน ของมูลฝอยในแต่ละขั้นตอนของการคัดแยก หลังจากนั้นทดลองเดินระบบการคัดแยก และรวบรวมข้อมูลปริมาณมูลฝอยพลาสติกที่ผ่านการคัดแยก จำนวน 21 ครั้ง พร้อมกับลดขนาดมูลฝอยด้วยการบด เพื่อนำไปผลิตเชื้อเพลิงแปรรูป ซึ่งขั้นตอนกระบวนการคัดแยกแบบแห้ง แสดงดังภาพที่ 34



ภาพที่ 34 กระบวนการตัดแยกมูลฝอยแบบแห้ง

2.2 การตัดแยกมูลฝอยแบบเปียก

ทำการศึกษาโดยนำมูลฝอยพลาสติกที่ผ่านการตัดแยกด้วยพนักงานมาล้างด้วยน้ำ อัตราส่วน มูลฝอย: น้ำ 1: 5 โดยนำมูลฝอย 4 kg ล้างด้วยน้ำ 20 kg ใช้เวลาประมาณ 10 นาที หลังจากนั้นนำมูลฝอยพลาสติกที่ล้างแล้วไปตากแดดให้แห้ง ใช้เวลาประมาณ 4-5 hr แล้วนำไปวิเคราะห์ของแข็งระเหย ได้ และค่าความร้อน ทำการทดลองจำนวน 6 ซ้ำ กระบวนการตัดมูลฝอยแยกแบบเปียก แสดงดังภาพที่ 35



ภาพที่ 35 กระบวนการคัดแยกมูลฝอยแบบเปียก

3. การผลิตเชื้อเพลิงแปรรูป

การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงแปรรูป นำมูลฝอยพลาสติกจากกระบวนการคัดแยกมูลฝอยแบบแห้ง ที่ผ่านการบดจนมีขนาดประมาณ 5 มิลลิเมตร ผสมกับมันสำปะหลังป่นและน้ำ ในอัตราส่วนต่างๆ โดยใช้อัตราส่วนของมันสำปะหลังป่นเท่ากับน้ำ คลุกเคล้าจนส่วนผสมกระจายตัว แสดงดังภาพที่ 36 แล้วนำไปอัดเป็นแท่งด้วยเครื่องอัดแท่ง ทำให้แห้งด้วยการฝั้งกลางแจ้ง จนความชื้นคงที่ แสดงดังภาพที่ 37 จากนั้นนำไปวิเคราะห์ ความหนาแน่น การทนแรงอัด (compressive strength) คุณสมบัติทางเคมี ได้แก่ proximate analysis ultimate analysis และค่าความร้อน คัดเลือกอัตราส่วนที่ดีที่สุด เพื่อนำไปศึกษาขั้นตอนต่อไป ทำการวิเคราะห์ จำนวน 3 ซ้ำ

ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการฝังแห้งกับความชื้นในเชื้อเพลิงแปรรูป เพื่อหาระยะเวลาฝังแห้งที่เหมาะสม โดยนำเชื้อเพลิงแปรรูปที่อัดเป็นแท่งในวันแรก ไปฝังกลางแจ้ง และวิเคราะห์ความชื้นของเชื้อเพลิงแปรรูปทุกวัน จนมีค่าความชื้นคงที่ ทดลอง 3 ซ้ำ จำนวน 3 ครั้ง



ภาพที่ 36 ลักษณะพลาสติก มันทำปะหลังป่นและน้ำ หลังผ่านการคลุกเคล้า



ภาพที่ 37 การฝังแห้งเชื้อเพลิงแปรรูป

4. กระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง

การทดลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันร่วมระหว่างเชื้อเพลิงแปรรูปกับเหง้ามันสำปะหลัง โดยนำเชื้อเพลิงแปรรูปที่ผ่านการผึ่งแห้งคลุกเคล้ากับเหง้ามันสำปะหลัง ที่อัตราส่วน 1: 1 น้ำหนัก รวม 20 kg ป้อนเข้าสู่เครื่องแก๊สซิฟิเคชันแบบไหลลง ทดลองผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่อัตราไหลอากาศ 30 และ 50 m³/hr เมื่อแก๊สเชื้อเพลิงจุดติดไฟ เริ่มตรวจวัดอุณหภูมิ จำนวน 2 จุด คือ อุณหภูมิชั้นเผาไหม้ และอุณหภูมิแก๊สเชื้อเพลิงไหลออก ทุกๆ 10 นาที เก็บตัวอย่างแก๊สเชื้อเพลิงเมื่ออุณหภูมิในชั้นเผาไหม้คงที่ แล้วนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบแก๊ส ได้แก่ CO H₂ CH₄ CO₂ O₂ และ N₂ ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีและคำนวณค่าความร้อน หลังจากการเผาไหม้สิ้นสุด รอจนกระทั่งอุณหภูมิในเครื่องแก๊สซิฟิเคชันเย็น เก็บตัวอย่างถ่านชาร์ เพื่อชั่งน้ำหนักและวิเคราะห์ปริมาณของแข็งระเหย คาร์บอนเสถียร และเถ้า ทดลอง 3 ชั่วโมง

5. การประเมินต้นทุนและรายได้ของระบบ

การประเมินมีวัตถุประสงค์ เพื่อหาต้นทุนการผลิตเชื้อเพลิงแปรรูปและต้นทุนการผลิตพลังงาน รายได้ และกำไร จากมูลฝอยเทศบาลเมืองแจ้ง 579 kg/d ทำงาน 8 hr/d และทำงานต่อเนื่องทุกวัน การคำนวณประกอบด้วยการทำงาน 3 ขั้นตอน ได้แก่ การคัดแยกมูลฝอยพลาสติก การผลิตเชื้อเพลิงแปรรูป และการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง ซึ่งมีรายการคำนวณ แสดงดังตารางที่ 8 โดยใช้สมมติฐานการคำนวณแสดงดังตารางที่ 9 และมีขั้นตอนการคำนวณ ดังนี้

5.1 การคำนวณต้นทุนการผลิตเชื้อเพลิงแปรรูป ประกอบด้วยการทำงาน 2 ขั้นตอน ได้แก่ การคัดแยกมูลฝอยพลาสติกและการผลิตเชื้อเพลิงแปรรูป โดยคำนวณต้นทุนการผลิตจากมูลฝอย 579 kg/d และต้นทุนต่อน้ำหนักมูลฝอย 1 kg

5.2 การคำนวณต้นทุนการผลิตพลังงาน ประกอบด้วยการทำงาน 3 ขั้นตอน ได้แก่ การคัดแยก การผลิตเชื้อเพลิงแปรรูปและการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง แบ่งการคำนวณเป็น 3 ประเภท ดังนี้

5.2.1 การคำนวณต้นทุนการผลิตพลังงานทั้งหมดต่อมูลฝอย 579 kg/d

5.2.2 การคำนวณต้นทุนการผลิตพลังงานต่อน้ำหนักเชื้อเพลิงแปรรูป 1 kg

5.2.3 การคำนวณต้นทุนการผลิตพลังงานต่อน้ำหนักมูลฝอย 1 kg

5.3 การคำนวณรายได้จากพลังงาน โดยคำนวณที่อัตราค่าพลังงาน 2.4649 baht/kWh แบ่งการคำนวณเป็น 3 ประเภท ดังนี้

5.3.1 การคำนวณรายได้จากพลังงานทั้งหมดที่ได้ต่อมูลฝอย 579 kg/d

5.3.2 การคำนวณรายได้จากพลังงานที่ได้ต่อเชื้อเพลิงแปรรูป 1 kg

5.3.3 การคำนวณรายได้จากพลังงานที่ได้ต่อมูลฝอย 1 kg

5.4 การคำนวณกำไรจากผลต่างระหว่างต้นทุนการผลิตกับรายได้จากพลังงาน แบ่งการคำนวณเป็น 3 ประเภท ดังนี้

5.4.1 การคำนวณกำไรทั้งหมด ที่ได้ต่อมูลฝอย 579 kg/d

5.4.2 การคำนวณกำไรที่ได้ต่อเชื้อเพลิงแปรรูป 1 kg

5.4.3 การคำนวณกำไรที่ได้ต่อมูลฝอย 1 kg

5.5 การเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตพลังงานที่ได้จากมูลฝอย กับการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ เช่น แก๊สธรรมชาติ น้ำมันดีเซล ถ่านหิน น้ำมันเตา เป็นต้น

ตารางที่ 8 รายการการคำนวณต้นทุนของระบบ

Description	Separation	RDF production	Gasification
Machine depreciation			
Trommel	/	-	-
Shedder	/	-	-
Compactor	-	/	-
Gasifier	-	-	/
Raw material			
Cassava meal	-	/	-
Cassava rhizome	-	-	/
Labour	/	/	/
Electricity (only machine)			
Energy	/	/	/
Energy adjustment charge (Ft)	/	/	/
Value added tax (vat)	/	/	/

ตารางที่ 9 สมมติฐานการคำนวณต้นทุนของระบบ

Description	Data
Machine cost (depreciation)	
Trommel	170,000 baht (47 baht/day/unit)
Shedder	35,000 baht (10 baht/day/unit)
Compactor	100,000 baht (27 baht/day/unit)
Gasifier	100,000 baht (27 baht/day/unit)
Machine operation	10 years
Fuel consumption of gasification	6 kg/hr
Raw material	
Cassava meal	4 baht/kg
Cassava rhizome	1 baht/kg
Labour	300 baht/person/day
Electricity ¹	
Energy	2.4649 baht/kWh
Energy adjustment charge (Ft)	0.8494 baht/kWh
Value added tax (vat)	7 %

ที่มา: ¹การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (2550)

ผลและวิจารณ์

การศึกษาการนำมูลฝอยพลาสติกจากกองมูลฝอยกลางแจ้งกลับมาใช้ใหม่ในรูปแบบเชื้อเพลิง โดยใช้กระบวนการคัดแยกแบบแห้งในการคัดแยกมูลฝอยพลาสติก เพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงแปรรูป แล้วนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันร่วมกับเหง้ำมันสำปะหลังป่น เพื่อผลิตเป็นแก๊สเชื้อเพลิง โดยมีผลการศึกษาดังต่อไปนี้

1. องค์ประกอบและคุณสมบัติทางเคมีของมูลฝอยเทกองกลางแจ้ง

การสุ่มตัวอย่างมูลฝอยเทกองกลางแจ้ง โดยแยกตามอายุ 2 5 7 และ 10 ปี คัดแยกชนิดพลาสติกตามลักษณะทางกายภาพ ซึ่งสามารถจำแนกได้ 3 ชนิด ได้แก่ ถุงหูหิ้ว ถุงอื่นๆ และพลาสติกอื่นๆ ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบ แสดงดังตารางที่ 10 พบว่าสามารถแยกองค์ประกอบหลักได้ 2 ส่วน คือ องค์ประกอบที่เผาไหม้ได้ ได้แก่ พลาสติก ไม้ กระดาษ ยาง โฟมและผ้า ซึ่งพลาสติกเป็นองค์ประกอบที่มีปริมาณสูงสุด 24.64-44.83 % โดยพลาสติกชนิดถุงหูหิ้วมีสัดส่วนมากที่สุด 11.92-23.38% เมื่อเปรียบเทียบกับพลาสติกชนิดอื่น ส่วนองค์ประกอบที่เผาไหม้ไม่ได้ ได้แก่ ดิน เซรามิก แก้ว และโลหะ มีดินเป็นองค์ประกอบที่มีสัดส่วนสูงสุด 27.86-56.59 % องค์ประกอบมูลฝอยอายุ 5 ปี มีพลาสติกต่ำที่สุด 24.64% และมีดินมากที่สุด 56.59% เนื่องจากสุ่มตัวอย่างจากมูลฝอยกลางแจ้งที่กองบนพื้นดินและเจ้าหน้าที่ของสถานีกำจัดมูลฝอยได้เคลื่อนย้ายมูลฝอยมากองเพิ่มเติม จึงทำให้มีการปนเปื้อนจากดินบริเวณโดยรอบ เมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบของพลาสติกและดินในแต่ละช่วงอายุ พบว่าสัดส่วนของทั้งสององค์ประกอบไม่แปรผันตามอายุมูลฝอย นอกจากนี้ยังพบว่ามีกระดาษเป็นองค์ประกอบเฉพาะมูลฝอยอายุ 2 ปี เท่านั้น เนื่องจากใช้ระยะเวลาย่อยสลาย 2-5 เดือน (กรมควบคุมมลพิษ, 2549) จึงทำให้ไม่พบกระดาษในช่วงอายุอื่นๆ ส่วนในมูลฝอยอายุ 10 ปี ไม่พบยางเป็นองค์ประกอบ เนื่องจากยางเป็นองค์ประกอบที่พบได้น้อยมาก เมื่อศึกษาจากมูลฝอยอายุ 2-7 ปี (0.60-1.18%) ซึ่งมีโอกาสที่จะไม่พบในมูลฝอยอายุดังกล่าว

คุณสมบัติทางเคมีขององค์ประกอบต่างๆ ในมูลฝอย แสดงดังตารางที่ 11 พลาสติกมีค่าของแจึงระเหยอยู่ในช่วง 38.40-95.49% แต่พบว่ามีเพียงพลาสติกชนิดถุงหูหิ้ว ในช่วงอายุ 10 ปี ที่มีค่าต่ำ (38.40%) เนื่องจากปนเปื้อนองค์ประกอบที่เผาไหม้ไม่ได้สูง เมื่อพิจารณาโดยรวมพบว่าคุณสมบัติของพลาสติกไม่แตกต่างกันในช่วงอายุ 2-10 ปี เนื่องจากเจ้าหน้าที่สถานีกำจัดมูลฝอยเป็น

ผู้ประมาณการจำแนกอายุ จึงอาจเกิดความคลาดเคลื่อนในความถูกต้องของอายุมูลฝอย ซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติของมูลฝอยได้

ตารางที่ 10 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบและความหนาแน่นของมูลฝอยกองกลางแจ้ง
ก่อนการคัดแยก

Solid waste types	Composition (% wet weight)			
	2 years old	5 years old	7 years old	10 years old
Combustible				
Plastic				
- carry bags	20.63	11.92	23.38	17.37
- other bags	8.91	4.53	10.54	6.59
- other plastic	7.20	8.20	10.90	11.40
Total	36.75	24.64	44.83	35.34
Wood	7.66	3.42	9.77	1.20
Paper	4.09	0.00	0.00	0.00
Rubber	0.60	0.83	1.18	0.00
Foam	1.75	0.55	0.88	0.60
Clothes	11.51	7.45	10.21	1.80
Non combustible				
Soil like material	32.90	56.59	27.86	49.10
Ceramic	1.19	0.83	0.73	2.99
Glass	1.79	4.03	1.21	4.79
Metal	1.79	1.66	3.34	4.19
Bulk Density kg/m ³	249	411	306	382

ตารางที่ 11 คุณสมบัติทางเคมีของมูลฝอยกองกลางแจ้งก่อนการคัดแยก

Type of Solid waste	2 years old			5years old			7 Years old			10 years old		
	M	VS	Ash	M	VS	Ash	M	VS	Ash	M	VS	Ash
Plastics												
- carry bags	23.07	87.32	12.68	24.96	63.93	36.07	22.07	79.16	20.84	1.36	38.40	61.60
- other bags	4.61	93.03	6.97	11.42	72.96	27.04	14.11	78.20	21.80	1.30	87.93	12.07
- other plastic	11.62	95.79	4.21	4.98	90.12	9.88	4.51	92.33	7.67	55.21	92.22	7.78
Wood	45.31	91.36	8.64	31.85	37.67	62.33	49.81	84.10	15.90	9.97	84.35	15.65
Paper	50.76	77.85	22.15	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rubber	5.12	61.78	38.22	6.33	63.40	39.66	5.80	69.33	30.67	-	-	-
Foam	53.76	87.54	12.46	41.20	76.44	23.76	9.23	72.89	27.11	0.97	78.44	21.56
Clothes	27.06	84.02	15.94	33.32	88.86	11.14	35.45	72.64	27.36	3.08	46.77	53.23
Soil	24.70	48.00	52.00	16.55	25.36	74.64	23.74	19.33	80.67	3.92	24.60	75.40
Ceramic	0.16	4.15	95.85	0.55	0.78	99.22	2.81	8.47	91.53	0.40	2.06	97.94
Glass	0.11	0.20	99.80	0.06	0.16	99.84	0.46	0.14	99.86	0.03	0.11	99.89
Metal	3.69	16.79	83.21	13.49	28.79	71.21	0.80	24.91	75.09	1.57	16.01	83.99
Excavated solid waste	38.75	38.50	61.50	50.00	57.20	42.80	48.62	36.40	63.60	34.70	40.80	59.20

หมายเหตุ ของแจ้งระเหยและเถ้า หน่วย % น้ำหนักแห้ง

เนื่องจากมูลฝอยพลาสติกชนิดถุงหิ้วมีองค์ประกอบสูงที่สุด จึงนำมาเป็นตัวแทนเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของพลาสติก โดยสุ่มตัวอย่างถุงหิ้วจากมูลฝอยเทศบาลเมืองแจ้ง จากนั้นนำมาวิเคราะห์ค่าความร้อน แสดงดังตารางที่ 12 พบว่ามีค่าความร้อนอยู่ในช่วง 32.54-38.54 MJ/kg ซึ่งมีช่วงค่าสูงกว่ามูลฝอยรวมก่อนการคัดแยก 27.50-38.00 MJ/kg ในทุกอายุ ยกเว้นอายุ 5 ปี พบว่าค่าความร้อนของมูลฝอยรวมก่อนการคัดแยกมีค่าสูงกว่ามูลฝอยพลาสติก เนื่องจากมีค่าของแข็งระเหยสูงกว่าอายุอื่น แสดงดังตารางที่ 11 เมื่อศึกษาปริมาณคลอรีนในถุงหิ้ว พบว่ามีค่า 0.65-1.26% และปริมาณซัลเฟอร์ 0.22-0.36%

ตารางที่ 12 สมบัติทางเคมีของมูลฝอยพลาสติก ชนิดถุงหิ้วก่อนการคัดแยก

Parameter	2 years old	5 years old	7 years old	10 years old
Calorific value MJ/kg dw.	28.50 ¹	38.00 ¹	27.90 ¹	27.50 ¹
	36.46	32.54	37.72	38.54
Chlorine % dw.	0.65	1.26	1.20	0.77
Sulfur % dw.	0.25	0.36	0.22	0.22

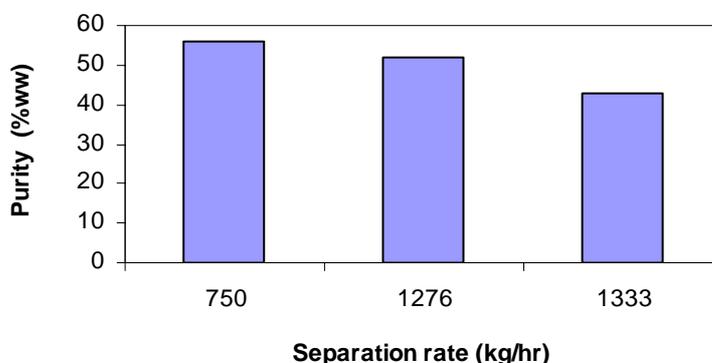
หมายเหตุ ¹ มูลฝอยรวมก่อนการคัดแยก

2. กระบวนการคัดแยก

การนำมูลฝอยพลาสติกจากกองมูลฝอยกลางแจ้งไปใช้ในกระบวนการเผาไหม้เพื่อผลิตแก๊สเชื้อเพลิง จำเป็นต้องกำจัดปริมาณองค์ประกอบที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้ เพื่อให้ได้ค่าพลังงานสูงสุด ดังนั้นจึงทำการศึกษาระบวนการคัดแยก 2 ประเภท คือ กระบวนการคัดแยกแบบเปียก และกระบวนการคัดแยกแบบแห้ง โดยในการศึกษาครั้งนี้จะมุ่งเน้นการคัดแยกแบบแห้งเป็นหลัก เนื่องจากไม่มีน้ำเสียจากกระบวนการคัดแยกที่ต้องบำบัด ดังเช่นกระบวนการคัดแยกแบบเปียก

กระบวนการคัดแยกแบบแห้งแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ คัดแยกด้วยพนักงานและคัดแยกด้วยเครื่องทรมเมด ตามลำดับ โดยศึกษาอัตราการคัดแยกที่เหมาะสมของเครื่อง ทรมเมด แสดงดังภาพที่ 38 พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการคัดแยกจาก 750 kg/hr เป็น 1,276 kg/hr และ 1,333 kg/hr ความบริสุทธิ์ของมูลฝอยพลาสติกที่ผ่านการคัดแยกโดยเฉลี่ยลดลงจาก $56 \pm 2.77\%$ (52-59%) เป็น $52 \pm 6.67\%$ (42-60%) และ 43% (29-56%) ตามลำดับ แสดงว่าการเพิ่มอัตราเร็วการคัดแยก มีผลให้

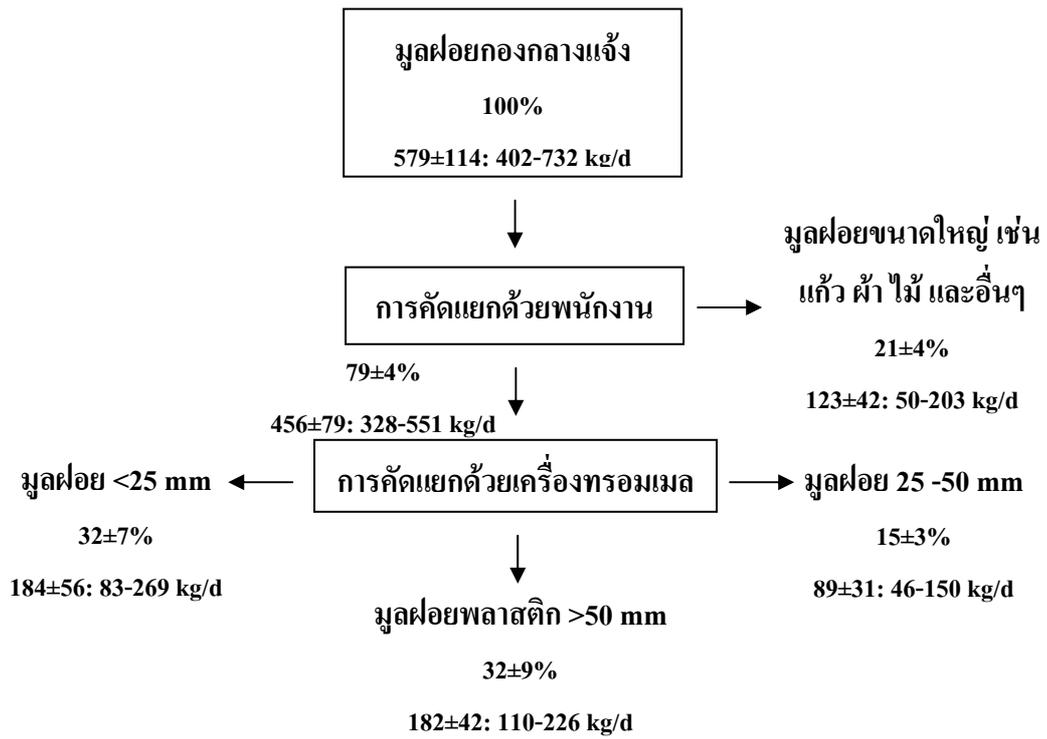
ความบริสุทธิ์ของมูลฝอยพลาสติกลดลง ดังนั้นจึงเลือกใช้อัตราการคัดแยกระหว่าง 750 – 1,276 kg/hr เพื่อใช้ในการศึกษาขั้นต่อไป



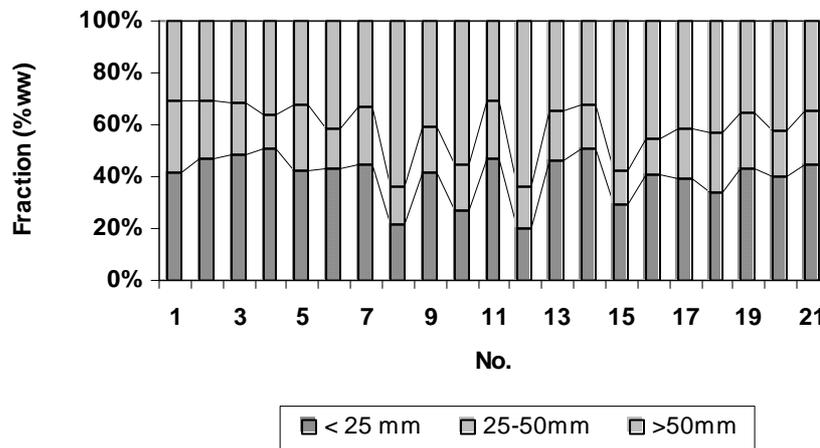
ภาพที่ 38 ความบริสุทธิ์ของพลาสติกที่ผ่านการคัดแยกด้วยเครื่องtrommel

การคัดแยกมูลฝอยเริ่มต้นด้วยการฟุ้งมูลฝอย ประมาณ 1 วัน นำมูลฝอยน้ำหนัก 579 ± 114 kg/d ($402-732$ kg/d) มาคัดแยกมูลฝอยขนาดใหญ่ออก เช่น ไม้ ฟ้าย เป็นต้น ด้วยพนักงาน หลังผ่านการคัดแยกจะได้มูลฝอยเฉลี่ย 456 ± 79 kg/d ($328-551$ kg/d) นำไปผ่านกระบวนการคัดแยกด้วยเครื่องtrommelที่อัตราเร็วเฉลี่ย 634 ± 114 kg/hr ($462-830$ kg/hr) ได้มูลฝอยพลาสติกปริมาณเฉลี่ย 182 ± 42 kg/d ($110-226$ kg/d) คิดเป็นสัดส่วน $32 \pm 9\%$ ($23-52\%$) ของปริมาณมูลฝอยทั้งหมด แสดงดังภาพที่ 39

ในขั้นตอนการคัดแยกมูลฝอยด้วยเครื่องtrommelสามารถแยกมูลฝอยได้ 3 ขนาด ได้แก่ น้อยกว่า 25 mm 25-50 mm และมากกว่า 50 mm แสดงดังภาพที่ 40 ถึง 43 พบว่ามีสัดส่วนในการคัดแยก 40 ± 9 19 ± 4 และ $41 \pm 11\%$ ของปริมาณมูลฝอยที่คัดแยกด้วยเครื่องtrommel ตามลำดับ ซึ่งขนาด 25-50 mm มีสัดส่วนในการคัดแยกต่ำสุด แต่มีเพียงขนาดมากกว่า 50 mm เท่านั้นที่เป็นมูลฝอยพลาสติกที่จะนำไปใช้



ภาพที่ 39 คุณมวลสารการคัดแยกมูลฝอยด้วยกระบวนการคัดแยกแบบแห้ง



ภาพที่ 40 สัดส่วนการคัดแยกมูลฝอยด้วยเครื่องทอรวมเมล



ภาพที่ 41 มูลฝอยที่ถูกคัดแยกด้วยเครื่องทอรวมเมด ที่ช่องคัดแยกขนาดน้อยกว่า 25 mm



ภาพที่ 42 มูลฝอยที่ถูกคัดแยกด้วยเครื่องทอรวมเมด ที่ช่องคัดแยกขนาด 25-50 mm



ภาพที่ 43 มูลฝอยที่ถูกคัดแยกด้วยเครื่องทอรวมเมด ที่มีขนาดมากกว่า 50 mm

การศึกษาคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ ในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการคัดแยกแบบแห้ง แสดงดังตารางที่ 13 พบว่าพลาสติกทั้ง 3 ชนิด มีค่าความชื้นลดลง หลังจากคัดแยกด้วยพนักงาน แต่หลังจากผ่านการคัดแยกด้วยทอรวมเมลความชื้นไม่ลดลง เนื่องจากความชื้นส่วนใหญ่สะสมอยู่ในองค์ประกอบที่ถูกคัดแยกด้วยพนักงาน เช่น ดิน และอื่นๆ เป็นต้น ส่วนของแข็งระเหยในมูลฝอยพลาสติกเพิ่มขึ้นเล็กน้อย หลังจากคัดแยกด้วยพนักงาน เมื่อนำไปคัดแยกด้วยทอรวมเมลพบว่าของแข็งระเหยมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณามูลฝอยรวม พบว่าความชื้นลดลงและของแข็งระเหยเพิ่มขึ้นในแต่ละขั้นตอน เนื่องจากองค์ประกอบที่สะสมความชื้นและเผาไหม้ไม่ได้ถูกคัดแยกออก ซึ่งพิจารณาได้จากค่าความบริสุทธิ์ของมูลฝอยพลาสติก ก่อนการคัดแยกมีค่าเฉลี่ย $25.94 \pm 5.85\%$ (17.36-32.67%) หลังผ่านการคัดแยกด้วยพนักงานมีค่าความบริสุทธิ์เฉลี่ยเพิ่มเป็น $47.28 \pm 11.40\%$ (32.43-59.18%) ซึ่งในการคัดแยกขั้นนี้ จะทำการคัดมูลฝอยที่มีขนาดใหญ่ เช่น ไม้ ผ้า เป็นต้น จึงทำให้ค่าความบริสุทธิ์ยังต่ำ จากนั้นจึงนำไปคัดแยกด้วยทอรวมเมล ที่อัตราเร็วเฉลี่ย $634 \pm 114 \text{ kg/hr}$ (462-830 kg/hr) เพื่อคัดแยกองค์ประกอบอื่นๆ ที่มีขนาดเล็กกว่า 50 mm ออกจากมูลฝอยพลาสติก พบว่ามูลฝอยพลาสติกที่ได้ มีความบริสุทธิ์เฉลี่ยสูงขึ้นเป็น $79.59 \pm 5.89\%$ (72.97-82.96%) ตรงข้ามกับความหนาแน่น มีค่าลดลงเมื่อผ่านการคัดแยกแต่ละขั้น $175 \pm 34 \text{ kg/m}^3$ (101-222 kg/m³) $144 \pm 50 \text{ kg/m}^3$ (67-213 kg/m³) และ $60 \pm 13 \text{ kg/m}^3$ (37-88 kg/m³) ตามลำดับการคัดแยก

ศึกษาการคัดแยกแบบแห้ง เปรียบเทียบกับการคัดแยกแบบเปียก แสดงดังตารางที่ 14 พิจารณาค่าความร้อนในพลาสติกแต่ละชนิด พบว่าการคัดแยกแบบเปียกมีค่าความร้อน (35.68-44.90 MJ/kg) สูงกว่าการคัดแยกแบบแห้งเล็กน้อย (33.38-40.99 MJ/kg) ในพลาสติกทุกชนิด เนื่องจากการคัดแยกแบบเปียก ใช้น้ำล้างมูลฝอยพลาสติก จึงสามารถกำจัดองค์ประกอบอื่นๆ ที่มีค่าความร้อนต่ำ ได้ดีกว่าการคัดแยกแบบแห้ง นอกจากนี้ยังพบว่าพลาสติกอื่นๆ มีปริมาณคลอรีนสูงกว่าพลาสติกชนิดอื่นๆ ทั้งการคัดแยกแบบแห้งและแบบเปียก 3.95 และ 7.32 % ตามลำดับ แต่มีของแข็งระเหยในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน 72.99-91.77% และ 86.94-89.34% ตามลำดับ ในการคัดแยกแบบแห้งมีสัดส่วนโดยเฉลี่ยของพลาสติกชนิดถุงหูหิ้ว และถุงอื่นๆ ใกล้เคียงกัน 38.12 และ 32.79% ตามลำดับ ส่วนพลาสติกอื่นๆ มีน้อยที่สุด 8.67%

ตารางที่ 13 คุณสมบัติทางเคมีของมูลฝอยในแต่ละชั้นของการคัดแยกแบบแห้ง

Type	Before separation			After manual separation			After trommel separation		
	M (%ww)	VS (%dw)	ash (%dw)	M (%ww)	VS (%dw)	ash (%dw)	M (%ww)	VS (%dw)	ash (%dw)
Plastic carry bags	5.42±3.02	69.82±7.14	30.18±7.14	1.87±1.22	77.26±9.52	22.74±9.52	3.46±2.24	72.99±10.56	27.01±10.56
Plastic bags	3.33±2.26	74.10±16.03	25.90±16.03	1.23±0.92	87.01±8.21	12.99±80.21	1.49±1.12	83.48±5.96	16.52±6.23
Other bags	3.20±2.69	90.26±10.55	9.74±10.55	0.79±0.30	95.98±0.90	4.02±0.90	0.85±0.38	91.77±6.44	8.23±7.84
Soil	16.87±5.26	14.98±1.32	85.02±1.32	17.64±4.61	23.75±23.11	76.25±23.11	16.65±6.46	16.21±5.65	83.79±5.65
Others	9.61±13.10	67.87±40.67	32.13±40.67	15.26±14.42	64.32±8.57	35.68±8.57	14.21±6.76	71.61±8.81	28.39±8.81
Total waste	5.07±1.01	39.45±15.50	60.55±15.50	2.61±0.80	59.11±12.40	40.89±12.40	0.97±0.48	82.08±3.32	17.92±3.32
Purity of plastic waste (%ww)	25.94±5.85 (17.36-32.67)			47.28±11.40(32.43-59.18)			79.59±5.89(72.97-82.96)		
Bulk density (kg/m ³)	175±34 (101-222)			144±50 (67-213)			60±13 (37-88)		

ตารางที่ 14 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของมูลฝอยพลาสติกหลังจากผ่านการคัดแยกแบบแห้งและแบบเปียก

Parameter	Dry separation process			Wet separation process		
	Plastic carry bags	Other bags	Other plastics	Plastic carry bags	Other bags	Other plastics
Calorific value MJ/kg (dw)	40.99 ±1.19	39.33±3.36	33.38±3.35	41.03±1.00	44.90±11.40	35.68±5.08
Chlorine ²	2.51±0.70	1.23±0.84	3.95±2.75	2.21±1.19	1.85±0.38	7.32±6.03
Sulfur ²	0.21±0.04	0.05±0.04	0.04±0.01	0.20±0.08	0.06±0.03	0.03±0.01
VS ²	72.99±10.56	83.48±5.96	91.77±6.44	88.63±10.8	86.94±7.37	89.34±10.9
Ash ²	27.01±10.56	16.54±6.23	8.23±7.84	11.37±10.8	13.06±7.37	13.72±10.9
Moisture (% w)	3.46±2.24	1.49±1.12	0.85±0.38	-	-	-
Composition ¹ (% ww)	38.12±4.19	32.79±4.68	8.67±2.26	-	-	-

หมายเหตุ ¹ องค์ประกอบดิน 14.55 ± 4.16 % และองค์ประกอบอื่นๆ 5.86 ± 3.82%

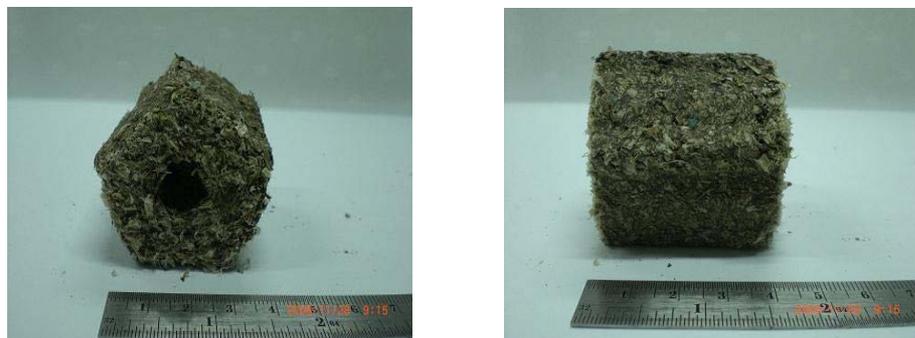
² % น้ำหนักแห้ง

3. การผลิตเชื้อเพลิงแปรรูป

มูลฝอยพลาสติกที่ผ่านการคัดแยกและลดขนาด ผลิตเป็นเชื้อเพลิงแปรรูป ทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 4 cm ความยาว 4 cm แสดงดังภาพที่ 44 โดยผสมมันสำปะหลังป่นซึ่งเป็นตัวประสานกับน้ำ (อัตราส่วนมันสำปะหลังป่นเท่ากับน้ำ) อัดด้วยเครื่องอัดแท่ง จากนั้นจึงเชื้อเพลิงแปรรูปจนแห้ง

การศึกษาอัตราส่วนระหว่างพลาสติกกับมันสำปะหลังป่น แบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 อัตราส่วน ได้แก่ 1: 0.2 1: 0.4 และ 1: 0.6 มีองค์ประกอบพลาสติก 83.33% 71.43% และ 62.50% ตามลำดับ ไม่สามารถอัดเป็นแท่งเพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงแปรรูปได้ เนื่องจากมันสำปะหลังป่นมีปริมาณไม่เพียงพอที่จะยึดเกาะพลาสติกให้เป็นแท่ง และกลุ่มที่ 2 อัตราส่วน ได้แก่ 1: 0.8 1: 1.0

1: 1.2 1:1.4 และ 1: 1.6 มีองค์ประกอบพลาสติก 55.56% 50.00% 45.45% 41.67% และ 38.46% ตามลำดับ ซึ่งเป็นกลุ่มที่สามารถอัดเป็นแท่งเพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงแปรรูปได้



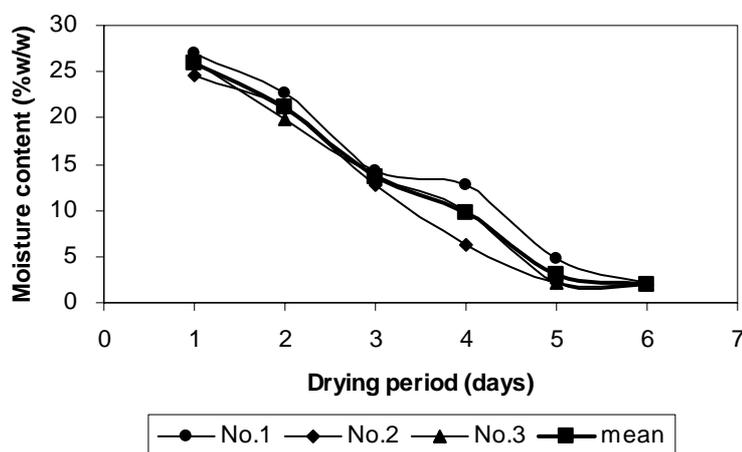
ภาพที่ 44 เชื้อเพลิงแปรรูป อัตราส่วนพลาสติก: มันป่น 1: 0.8

การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมี ได้ทำการศึกษาเชื้อเพลิงแปรรูปในกลุ่มที่ 2 เนื่องจากสามารถอัดเป็นแท่งได้ ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 15 เมื่อเปรียบเทียบ ความชื้น ปริมาณเถ้า ค่าความร้อน ปริมาณคลอรีนและปริมาณซัลเฟอร์ ซึ่งได้กำหนดไว้ในมาตรฐานคุณภาพของการนำของแข็งกลับมาใช้ใหม่ในรูปเชื้อเพลิง แสดงดังตารางที่ 4 (European Commission-Directorate General Environment, 2003) พบว่า ความชื้นในเชื้อเพลิงแปรรูป มีค่าสูงสุด 5.50 % ที่อัตราส่วน 1: 1.6 ซึ่งมีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด (ต่ำกว่า 20%) ปริมาณเถ้าในเชื้อเพลิงแปรรูป มีค่าสูงสุด (15.89%) ที่อัตราส่วน 1: 1.0 ซึ่งมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน (20%) ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงแปรรูป มีค่าสูงสุด 25.97 MJ/kg ที่อัตราส่วน 1:0.8 และมีค่าความร้อนต่ำที่สุด 21.86 ที่อัตราส่วน 1 : 1.2 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน (15,000 KJ/kg) เมื่อพิจารณาปริมาณคลอรีน พบว่าที่อัตราส่วน 1:0.8 1:1.0 และ 1:1.2 มีปริมาณคลอรีนใกล้เคียงกัน 0.85 0.99 และ 0.97% ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่า อัตราส่วน 1:1.4 และ 1:1.6 มีค่า 0.44 และ 0.61% ตามลำดับ เนื่องจากอัตราส่วนข้างต้นมีพลาสติก 55.56 50.00 และ 45.45% ตามลำดับ มากกว่าอีกอัตราส่วนซึ่งมีพลาสติก 41.67 และ 38.46% ตามลำดับ ซึ่งมีเพียง อัตราส่วน 1 : 0.8 ที่เป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด ของทั้งประเทศ อิตาลี (0.9%) และเกณฑ์ระดับ 3 จากทั้งหมด 3 ระดับ ของประเทศฟินแลนด์(1.5%) สำหรับอัตราส่วนอื่นๆ เป็นไปตามเกณฑ์ของประเทศฟินแลนด์ เมื่อพิจารณาปริมาณซัลเฟอร์ พบว่ามีปริมาณใกล้เคียงกัน โดยที่อัตราส่วน 1: 0.8 มีปริมาณสูงสุด (0.19%) ส่วนที่อัตราส่วน 1: 1.4 และ 1: 1.6 มีปริมาณต่ำสุด (0.14%) อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน (0.6%) แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจากความ

หลากหลายชนิดของพลาสติก คุณสมบัติทางกาย/เคมี การกระจายตัวไม่สม่ำเสมอของพลาสติกและสารปนเปื้อน จึงทำให้ปริมาณเก่า ค่าความร้อนและปริมาณคลอรีนที่พบนั้น มีปริมาณไม่แปรผันตามอัตราส่วนของพลาสติกในเชื้อเพลิงแปรรูป

การศึกษาค้นคว้าเลือกใช้เชื้อเพลิงแปรรูป อัตราส่วน พลาสติก: มันสำปะหลังป่น ที่ 1: 0.8 (พลาสติก 55.56%) เพื่อศึกษาการเผาไหม้ด้วยกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน เพราะมีค่าความร้อนสูงสุด มีปริมาณคลอรีนตามเกณฑ์มาตรฐานและมีปริมาณพลาสติกสูงสุดที่สามารถผลิตเป็นแก๊สเชื้อเพลิงแปรรูปได้

การเผาไหม้ในเครื่องแก๊สซิไฟเออร์แบบไหลลง ควรใช้เชื้อเพลิงที่มีความชื้นไม่เกิน 20 % (Reed, T.B. and Das, A., 1988) ดังนั้นจึงศึกษาระยะเวลาการผึ่งแห้งเชื้อเพลิงแปรรูป ที่อัตราส่วน 1: 0.8 แสดงดังภาพที่ 45 พบว่าการผึ่งเชื้อเพลิงแปรรูปจนถึงวันที่ 3 มีความชื้น 13.60% ซึ่งสามารถใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงแปรรูปได้ แต่ความชื้นยังไม่คงที่และต้องการพลังงานสูงสุด จึงผึ่งเชื้อเพลิงแปรรูปต่อจนกระทั่งความชื้นลดลงและคงที่ ในวันที่ 5 2.95% ซึ่งความชื้นเฉลี่ยแปรผันตรงกับระยะเวลาการผึ่งจนถึงวันที่ 5 ($r^2=0.993$) ในขณะที่การผึ่งต่อในวันที่ 6 ความชื้นลดลงน้อยมาก ดังนั้นจึงเลือกการผึ่ง 5 วัน



ภาพที่ 45 ระยะเวลาการผึ่งแห้งเชื้อเพลิงแปรรูป อัตราส่วนพลาสติก : มันป่น 1: 0.8

ตารางที่ 15 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของเชื้อเพลิงแปรรูป มันสำปะหลังป่น และเหง้ามันสำปะหลัง

parameter	composition (plastic : cassava meal)					cassava meal	cassava root stem
	1:0.8	1:1.0	1:1.2	1:1.4	1:1.6		
proximate analysis							
moisture (%ww)	2.95±1.50	3.46±1.63	3.54±0.50	3.92±2.94	5.50±2.57	7.30±0.14	7.30±0.11
VS (%dw)	84.38±0.43	82.21±0.30	85.19±0.20	86.00±0.29	88.80±0.48	88.44±0.48	91.90±2.08
FC (%dw)	1.16±0.10	1.90±0.27	1.22±0.12	1.35±0.15	0.91±0.16	6.08±0.41	2.47±0.91
ash (%dw)	14.46±0.34	15.89±0.28	13.59±0.28	12.65±0.43	10.29±0.38	5.49±0.08	5.63±1.31
calorific value MJ/kg (dw)	25.97±0.48	23.84±0.96	21.86±0.86	22.84±0.68	23.16±0.96	16.72±1.18	18.24±0.29
ultimate analysis							
C (% dw)	46.88±0.24	45.67±0.17	47.33±0.11	47.78±0.16	49.33±0.27	49.13±0.27	51.05±1.16
H (%dw)	5.27±0.027	5.14±0.02	5.32±0.012	5.37±0.018	5.55±0.03	5.53±0.03	5.74±0.13
O (%dw)	46.76±0.56	47.94±0.03	46.75±0.71	46.20±0.14	44.29±0.51	45.16±0.31	42.91±1.25
N (%dw)	0.052±0.09	0.11±0.018	0.062±0.02	0.076±0.01	0.084±0.02	0.081±0.02	0.14±0.042
S (%dw)	0.19±0.029	0.16±0.021	0.16±0.031	0.14±0.023	0.14±0.012	0.047±0.01	0.15±0.030
Cl (%dw)	0.85±0.41	0.99±0.14	0.97±0.62	0.44±0.31	0.61±0.40	0.048±0.01	0
density (kg/m ³)	595±62	674±56	676±40	613±32	587±40	-	-
Compressive strength (kg/cm ²)	4.03±1.12	4.86±0.96	4.14±0.65	4.27±0.56	4.58±0.69	-	-
Plastic (%)	55.56	50.00	45.45	41.67	38.46	-	-

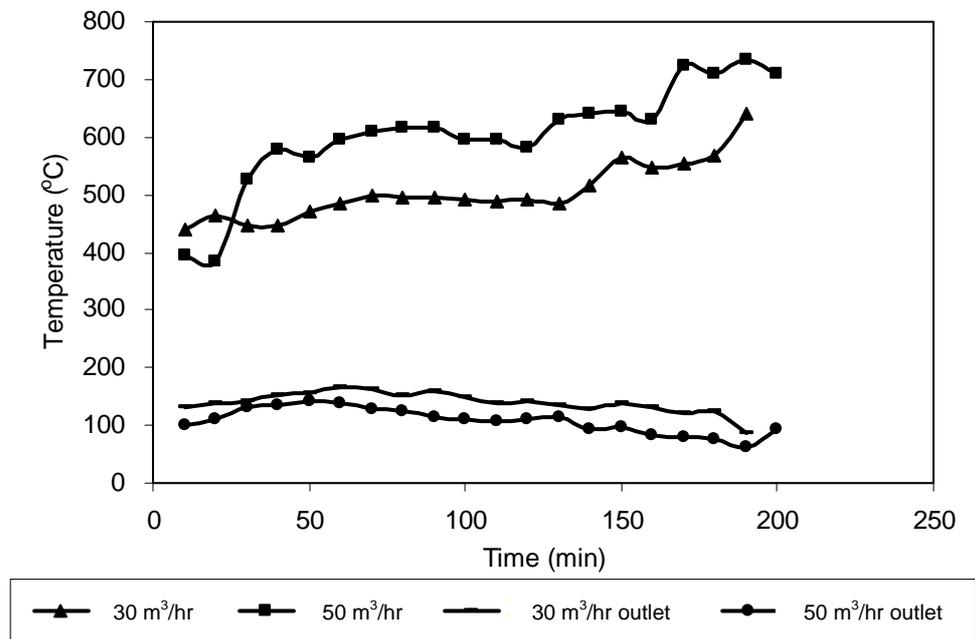
4. กระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง

การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากเครื่องแก๊สซิไฟเออร์แบบไหลลง ใช้เชื้อเพลิงแปรรูปร่วมกับเหง้ามันสำปะหลัง ที่อัตราส่วน 1: 1 ปริมาณครั้งละ 20 kg โดยทำการทดลองที่อัตราอากาศไหล 2 ระดับ คือ 30 m³/hr และ 50 m³/hr เก็บตัวอย่างแก๊สเชื้อเพลิงเมื่ออุณหภูมิการเผาไหม้คงที่ และเริ่มวัดอุณหภูมิ ขณะที่แก๊สเชื้อเพลิงสามารถจุดติดไฟ โดยวัดทุกๆ 10 นาที ตลอดระยะเวลาการทดลอง แก๊สเชื้อเพลิงจุดติดไฟได้ต่อเนื่อง เมื่อสิ้นสุดการทดลอง วิเคราะห์องค์ประกอบแก๊สเชื้อเพลิงและคุณสมบัติทางเคมีของถ่านชาร์ (char)

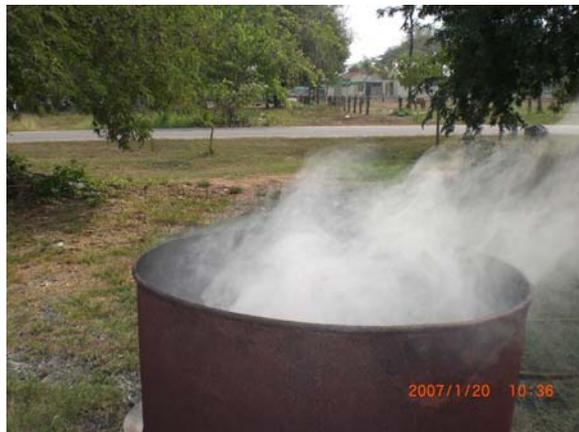
4.1 อัตราอากาศไหล 30 m³/hr

ผลการทดลอง แสดงดังภาพที่ 46 อุณหภูมิการเผาไหม้เริ่มต้นประมาณ 439 °C ที่แก๊สเชื้อเพลิงสามารถจุดไฟติดได้ แสดงดังภาพที่ 47 และ 48 หลังจากนั้นอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนสูงสุด 639 °C ที่เวลา 190 min ซึ่งเป็นช่วงสุดท้ายของการทดลอง โดยใช้เวลาเผาไหม้ทั้งสิ้น 190 min อุณหภูมิเฉลี่ยตลอดการเผาไหม้ 504±50 °C (439-639°C) ส่วนแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้มีอุณหภูมิเริ่มต้น 131 °C หลังจากนั้นอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนสูงสุด 165 °C ที่เวลา 60 min จากนั้นจึงค่อยๆ ลดลงจนกระทั่งสิ้นสุดการเผาไหม้ ซึ่งมีอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดการทดลอง 140±18 °C (85-165°C)

แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้มีองค์ประกอบแก๊สที่สามารถจุดติดไฟได้ แสดงดังตารางที่ 16 ได้แก่ CO H₂ และ CH₄ มีปริมาณ 9.86 ±0.93 % (9.27-10.94%), 0.02±0.03 % (0.00-0.05%) และ 0.96±0.20% (0.76-1.16%) ตามลำดับ โดย CO เป็นองค์ประกอบแก๊สเชื้อเพลิงหลักเนื่องจากมีปริมาณมากที่สุด มีค่าความร้อนเฉลี่ย 1.49±0.13 MJ/m³ (1.36-1.61 MJ/m³) ปริมาณแก๊สเชื้อเพลิง (gas yield) เฉลี่ย 4.7±0.5 m³/kg (4.2-5.1 m³/kg) และประสิทธิภาพแก๊สเย็น (cold gas efficiency) 32±2.6 % (29-37%)



ภาพที่ 46 อุณหภูมิชิ้นเผาไหม้ในเครื่องแก๊สซิฟิเออร์และแก๊สเชื้อเพลิง กับระยะเวลา



ภาพที่ 47 แก๊สเชื้อเพลิงก่อนจุดติดไฟ



ภาพที่ 48 เปลวไฟจากการเผาแก๊สเชื้อเพลิง

ตารางที่ 16 องค์ประกอบแก๊สเชื้อเพลิงจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

Parameter	Air flow rate			
	30 m ³ /hr		50 m ³ /hr	
	Range	Mean±SD	Range	Mean±SD
Gas composition (% vol.)				
CO	9.27-10.94	9.86±0.93	8.77-12.83	10.77±2.03
H ₂	0.00-0.05	0.02±0.03	0.04-0.10	0.07±0.03
CH ₄	0.76-1.16	0.96±0.20	1.08-1.60	1.38±0.27
CO ₂	9.73-12.28	10.74±1.36	8.37-11.01	9.29±1.49
N ₂	71.10-72.05	71.53±0.48	69.03-71.36	70.27±1.17
O ₂	6.14-7.60	6.89±0.73	5.45-10.38	8.21±2.53
HHV (MJ/m ³)	1.36-1.61	1.49±0.13	1.41-2.08	1.76±0.34
HHV (MJ/kg of fuel)	6.34-8.19	6.97±1.06	11.02-17.05	14.56±3.15
Gas yield (m ³ /kg)	4.2-5.1	4.7±0.5	7.8-8.8	8.3±0.5
Combustion rate (kg/hr dw)	5.9-7.1	6.5±0.6	5.7-6.4	6.1±0.4
Cold gas efficiency (%)	29-37	32±4.6	50-77	66±14

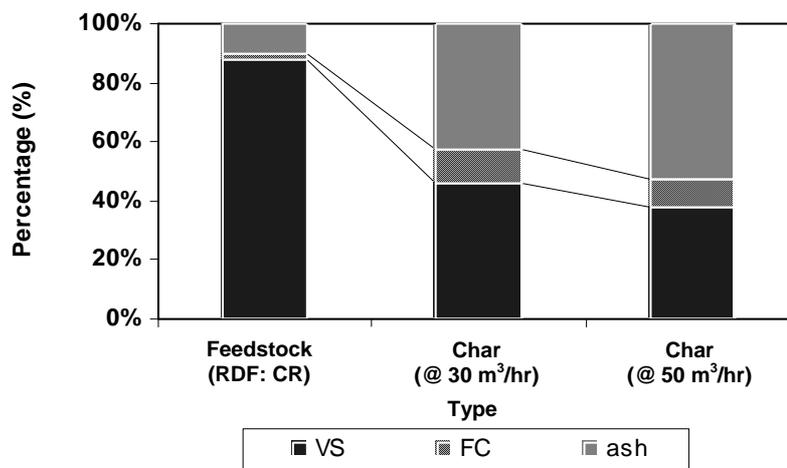
ปริมาณของแฉ่งระเหยและคาร์บอนเสถียร ตกค้างในถ่านชาร์ แสดงดังตารางที่ 17 ภาพที่ 49 และ 50 เชื้อเพลิงแปรรูป:เหง้ำมันสำปะหลัง (1: 1) มีปริมาณของแฉ่งระเหย 88.14% และปริมาณคาร์บอนเสถียร 1.82% (ตารางภาคผนวกที่ 7) นำไปเผาด้วยกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ที่อัตราอากาศไหล 30 m³/hr พบว่ามีปริมาณของแฉ่งระเหยตกค้างในถ่านชาร์ 45.90±7.48% (40.69-54.47%)หรือ 13% ของปริมาณของแฉ่งระเหยทั้งหมดในเชื้อเพลิง ส่วนปริมาณคาร์บอนเสถียรมีส่วนลดการตกค้างเพิ่มขึ้นเป็น 11.52±1.20% (10.37-12.77%) เนื่องจากของแฉ่งระเหยมีส่วนลดลงและคาร์บอนเสถียรไม่ถูกเผาไหม้เพราะอุณหภูมิในการเผาไหม้เฉลี่ย 504±50 °C (439-639°C) ซึ่งเป็นอุณหภูมิต่ำกว่าการเผาไหม้คาร์บอนเสถียร โดยมีอัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิงเฉลี่ย 6.5±0.6 kg/hr (5.9-7.1 kg/hr) และอัตราการเกิดถ่านชาร์ เฉลี่ย 0.2±0.1 kg/kg ของเชื้อเพลิง (0.2-0.3 kg/kg)

ตารางที่ 17 คุณสมบัติทางเคมีของถ่านชาร์จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

Parameter	Air flow rate			
	30 m ³ /hr		50 m ³ /hr	
	Range	Mean±SD	Range	Mean±SD
Moisture (%)	0.44-1.11	0.75±0.34	0.50-2.12	1.21±0.83
VS (%dw)	40.69-54.47	45.90±7.48	35.73-40.23	37.77±2.28
FC (%dw)	10.37-12.77	11.52±1.20	8.56-11.14	9.59±1.37
Ash (%dw)	34.12-47.10	42.59±7.34	50.70-55.72	52.65±2.69
Char yield kg/kg of fuel	0.2-0.3	0.2±0.1	0.2-0.3	0.2±0.1



ภาพที่ 49 ถ่านชาร์จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเชื้อเพลิงแปรรูปกับเหง้ำมันสำปะหลัง



ภาพที่ 50 คุณสมบัติทางเคมีของเชื้อเพลิงแปรรูป (1: 0.8) กับเหง้ำมันสำปะหลัง และถ่านชาร์จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันที่อัตราอากาศไหลต่างๆ

4.2 อัตราอากาศไหล 50 m³/hr

ผลการทดลอง แสดงดังภาพที่ 46 อุณหภูมิการเผาไหม้เริ่มต้นประมาณ 396 °C ที่แก๊สเชื้อเพลิงสามารถจุดไฟติดได้ หลังจากนั้นอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนสูงสุด 735 °C ที่เวลา 190 min โดยใช้เวลาเผาไหม้ทั้งสิ้น 200 min อุณหภูมิเฉลี่ยตลอดการเผาไหม้ 604±91 °C (384-735 °C) ส่วนแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้มีอุณหภูมิเริ่มต้น 100 °C หลังจากนั้นอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนสูงสุด 140 °C ที่เวลา 50 min จากนั้นจึงค่อยๆ ลดลงจนกระทั่งสิ้นสุดการเผาไหม้ ซึ่งมีอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดการทดลอง 108±22 °C (62-140°C)

แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้มีองค์ประกอบแก๊สที่สามารถจุดติดไฟได้ แสดงดังตารางที่ 16 ได้แก่ CO H₂ และ CH₄ มีปริมาณ 10.77 ±2.03 % (8.77-12.83%), 0.07±0.03% (0.04-0.10%) และ 1.38±0.27% (1.08-1.60%) ตามลำดับ โดย CO เป็นองค์ประกอบแก๊สเชื้อเพลิงหลักเนื่องจากมีปริมาณมากที่สุด มีค่าความร้อนเฉลี่ย 1.76±0.34 MJ/m³ (1.41-2.08MJ/m³) ปริมาณแก๊สเชื้อเพลิง (gas yield) เฉลี่ย 8.3±0.5 m³/kg (7.8-8.8 m³/kg) และประสิทธิภาพแก๊สเย็น (cold gas efficiency) 66±14 % (50-77%)

ปริมาณของแข็งระเหยและคาร์บอนเสถียร ตกค้างในถ่านชาร์ แสดงดังตารางที่ 17 และ ภาพที่ 50 เชื้อเพลิงแปรรูป: เหน้้ำมันล่าปะหลัง (1: 1) มีปริมาณของแข็งระเหย 88.14% และปริมาณคาร์บอนเสถียร 1.82% (ตารางภาคผนวกที่ 7) นำไปเผาด้วยกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ที่อัตราอากาศไหล 50 m³/hr พบว่ามีปริมาณของแข็งระเหยตกค้างในถ่านชาร์ 37.77±2.28% (35.73-40.23%) หรือ 10% ของปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมดในเชื้อเพลิง ส่วนปริมาณคาร์บอนเสถียรมีส่วนการตกค้างเพิ่มขึ้นเป็น 5.59±1.37% (8.56-11.14%) เนื่องจากของแข็งระเหยมีส่วนลดลงและคาร์บอนเสถียรไม่ถูกเผาไหม้เพราะอุณหภูมิในการเผาไหม้เฉลี่ย 604±91 °C (384-735 °C) ซึ่งเป็นอุณหภูมิต่ำกว่าการเผาไหม้คาร์บอนเสถียร โดยมีอัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิงเฉลี่ย 6.1±0.4 kg/hr (5.7-6.4 kg/hr) และอัตราการเกิดถ่านชาร์ เฉลี่ย 0.2±0.1 kg/kg (0.2-0.3 kg/kg) ของเชื้อเพลิง

4.3 การเปรียบเทียบผลการทดลองที่อัตราอากาศไหลต่างๆ

อุณหภูมิในชั้นเผาไหม้ที่อัตราอากาศไหล 30 m³/hr เฉลี่ย 504±50 °C (439-639 °C) ต่ำกว่าการเผาไหม้ที่อัตราไหลอากาศ 50 m³/hr เฉลี่ย 604±91 °C (384-735 °C) (ภาพที่ 46) ประมาณ 100 °C เนื่องจากในชั้นเผาไหม้เกิดปฏิกิริยาคายความร้อน แสดงดังสมการที่ (1) การเพิ่มปริมาณ O₂ จะทำให้อุณหภูมิ ปริมาณ CO₂ และ H₂O สูงขึ้น (ตารางที่ 16) เมื่อแก๊สทั้งสองมีอุณหภูมิสูงไหลผ่านถ่านชาร์ในชั้นแก๊สซิฟิเคชัน CO₂ จะเกิดปฏิกิริยา boudouard reduction reaction ซึ่งเกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูง 500-1,000 °C และ H₂O เกิดปฏิกิริยา water gas reaction เกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิสูงกว่า 800 °C แสดงดังสมการที่ 3 และ 4 ตามลำดับ ที่อัตราอากาศไหล 50 m³/hr มีอุณหภูมิสูง จึงมีโอกาสเกิดได้ทั้งสองปฏิกิริยา จึงทำให้เกิดแก๊สเชื้อเพลิงปริมาณสูงขึ้น ส่งผลให้ค่าความร้อนในแก๊สเชื้อเพลิง และประสิทธิภาพแก๊สเย็น ที่อัตราอากาศไหล 50 m³/hr เฉลี่ย 1.76±0.34 MJ/m³ (1.41-2.08MJ/m³) และ 66±14 % (50-77%) ตามลำดับ สูงกว่าที่อัตราอากาศไหล 30 m³/hr 1.49±0.13 MJ/m³ (1.36-1.61MJ/m³) และ 32±2.6 % (29-37%) ตามลำดับ

นอกจากนี้ยังพบว่าระดับอุณหภูมิสูงสุดในชั้นเผาไหม้เกิดขึ้นในระยะเวลาเดียวกัน คือ 190 min ซึ่งเป็นช่วงสุดท้ายในการเผาไหม้ โดยใช้เวลาเผาไหม้ 190 min และ 200 min ตามลำดับ แสดงว่าแก๊สซิฟิเคชันในครั้งนี้ ต้องใช้เวลาอย่างน้อย 190 min เพื่อทำให้ระดับอุณหภูมิในชั้นเผาไหม้เข้าใกล้ระดับแก๊สซิฟิเคชันทั่วไป 500-1,000 °C

อุณหภูมิของแก๊สเชื้อเพลิงที่ อัตราอากาศไหล 30 m³/hr เฉลี่ย 140±18 °C (85-165°C) สูงกว่าที่อัตราอากาศไหล 50 m³/hr เฉลี่ย 108±22 °C (62-140 °C) เนื่องจากที่อัตราอากาศไหล 50 m³/hr มีปริมาณ CO สูงกว่า แสดงว่าเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน แสดงดัง สมการที่ 3 ได้ดีกว่าอัตราไหล 30 m³/hr ดังนั้นจึงทำให้ความร้อนในแก๊สเชื้อเพลิงต่ำ

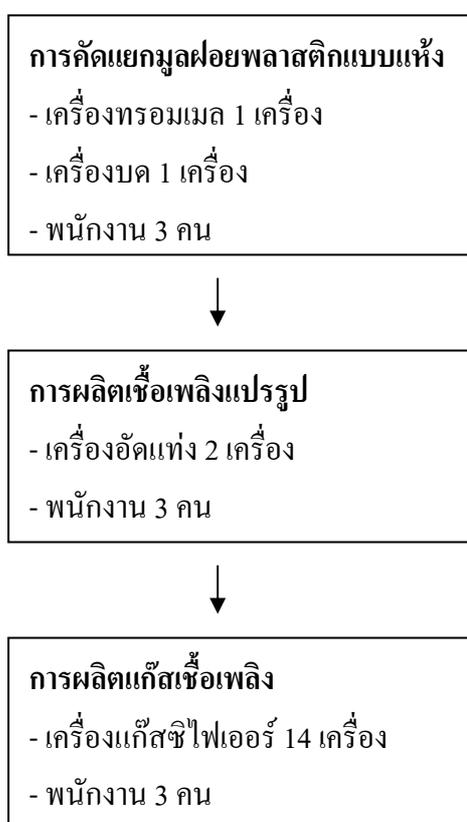
การพิจารณาองค์ประกอบแก๊สเชื้อเพลิงที่ไม่สามารถนำไปเผาไหม้ได้ แสดงดังตารางที่ 16 พบว่าที่อัตราอากาศไหล 30 m³/hr ปริมาณ CO₂ เฉลี่ย 10.74±1.36% (9.73-12.28%) มากกว่าที่ อัตราอากาศไหล 50 m³/hr เฉลี่ย 9.29±1.49% (8.37-11.01%) เนื่องจากเกิด CO ต่ำ จึงทำให้ CO₂ ตกค้างมาก ส่วนปริมาณ N₂ ใกล้เคียงกับปริมาณที่พบในอากาศ เนื่องจากใช้อากาศซึ่งมี N₂ เป็น องค์ประกอบในการเผาไหม้และในชั้นแก๊สซิฟิเคชันเกิดปฏิกิริยารีดักชัน จึงทำให้ N₂ ไม่ทำ ปฏิกิริยากับ O₂ ที่อัตราอากาศไหล 30 m³/hr ปริมาณ O₂ เฉลี่ย 6.89±0.73% (6.14-7.60%) น้อยกว่าที่ อัตราไหล 50 m³/hr เฉลี่ย 8.21±2.53% (5.45-10.38%) เนื่องจากอัตราไหลเข้าต่ำกว่า 20 m³/hr นอกจากนี้ยังแสดงว่ามี O₂ ที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาตกค้างในองค์ประกอบแก๊สเชื้อเพลิงของทั้งสองอัตรา อากาศไหล

การเปรียบเทียบค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงกับงานวิจัยอื่น พบว่าที่อัตราอากาศไหล 30 m³/hr และ 50 m³/hr มีค่าความร้อน 1.49 MJ/m³ และ 1.76 MJ/m³ ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าแก๊ส เชื้อเพลิงที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันไม้มงคล ซึ่งมีความร้อน 4-6 MJ/Nm³ ใช้อากาศ ในการเผาไหม้ (สมรัฐ และคณะ, 2549) และ กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันมูลฝอยพลาสติก ซึ่งมีความ ร้อน 13 MJ/Nm³ ใช้แก๊ส O₂ บริสุทธิ์ในการเผาไหม้ (See *et al.*, 2006)

ปริมาณของแข็งระเหย และคาร์บอนเสถียร ที่พบในถ่านชาร์ แสดงดังตารางที่ 17 และ ภาพที่ 50 พบว่าที่อัตราอากาศไหล 30 m³/hr มีค่า 45.90±7.48% (40.69-54.47%) และ 11.52±1.20% (10.37-12.77%) ตามลำดับ ตกค้างในถ่านชาร์มากกว่าที่อัตราอากาศไหล 50 m³/hr มีค่า 37.77±2.28% (35.73-40.23%) และ 9.59±1.37% (8.56-11.44%) ตามลำดับ เมื่อพิจารณาปริมาณ การตกค้างของแข็งระเหยโดยรวม พบว่ามีปริมาณ 13% และ 10% ของปริมาณของแข็งระเหย ทั้งหมดที่ให้กับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ตามลำดับ เนื่องจากที่อัตราอากาศไหล 50 m³/hr มี อุณหภูมิในการเผาไหม้สูง จึงทำให้ของแข็งระเหยตกค้างต่ำ ส่วนอัตราการเกิดถ่านชาร์ต่อปริมาณ เชื้อเพลิงที่ใช้ มีอัตราเท่ากัน คือ 0.2±0.1 (0.2-0.3)

5. การวิเคราะห์ต้นทุนและรายได้

การวิเคราะห์เพื่อหาต้นทุนการผลิตเชื้อเพลิงแปรรูป และต้นทุนการผลิตพลังงานจาก ปริมาณกองมูลฝอยกลางแจ้ง 579 kg/day และทำงาน 8 hr/day ต่อเนื่องทุกวัน ซึ่งประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ได้แก่ การคัดแยกมูลฝอยพลาสติกแบบแห้ง การผลิตเชื้อเพลิงแปรรูป และกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง แสดงดังภาพที่ 51 สามารถผลิตเชื้อเพลิงแปรรูปที่อัตราส่วน 1: 0.8 (พลาสติก: มັນสำปะหลังป่น) 328 kg/day โดยมีต้นทุนการผลิตเชื้อเพลิงแปรรูป 2,752 baht/day หรือ 8.39 baht/kg ของเชื้อเพลิงแปรรูป



ภาพที่ 51 ขั้นตอนการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง

การคำนวณต้นทุนการผลิตพลังงาน จากการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง โดยนำเชื้อเพลิงแปรรูปมา เผาด้วยกระบวนการแก๊สซิไฟเคชันร่วมกับเหง้ำมันสำปะหลัง สามารถผลิตพลังงาน 9,081 MJ/day หรือ 2,523 kWh/day โดยมีต้นทุนการผลิตพลังงาน 4,484 baht/day หรือ 13.67 baht/kg ของ เชื้อเพลิงแปรรูป หรือ 7.74 baht/kg ของมูลฝอย ซึ่งคิดเป็นรายได้ 6,219 baht/day หรือ 18.96 baht/

kg ของเชื้อเพลิงแปรรูป หรือ 10.74 baht/kg ของมูลฝอย โดยคำนวณที่อัตราค่าพลังงาน 2.4649 baht/kWh เมื่อพิจารณาผลตอบแทน พบว่ามีกำไร 1,735 baht/day หรือ 5.29 baht/kg ของเชื้อเพลิงแปรรูป หรือ 3.00 baht/kg ของมูลฝอย แสดงดังตารางที่ 18

ตารางที่ 18 การประเมินต้นทุน รายได้ และกำไร จากการผลิตพลังงาน

Description	Value (baht)
Cost	
Machine	489
Electricity	383
Raw material	912
Labour	2,700
Cost by RDF	13.67 (baht/kg of RDF)
Cost by solid waste	7.74 (baht/kg of solid waste)
Total cost	4,484
Benefit	
Benefit from RDF	18.96 baht/kg of RDF
Benefit from RDF (solid waste base)	10.74 baht/kg of solid waste
Total benefit	6,219
Profit	
Profit from RDF	5.29 baht/kg of RDF
Profit from RDF (solid waste base)	3.00 baht/kg of solid waste
Total profit	1,735

การเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตพลังงาน 2,523 kWh แสดงดังตารางที่ 19 พบว่าการผลิตพลังงานจากมูลฝอยมีต้นทุนการผลิต 4,484 baht หรือ 1.69 baht/kWh สูงกว่าการใช้ถ่านหินซึ่งมีต้นทุนการผลิต 1,262 baht หรือ 0.50 baht/kWh แต่มีต้นทุนต่ำกว่าการใช้ แก๊สธรรมชาติ น้ำมันเตา และน้ำมันดีเซล ซึ่งมีต้นทุนการผลิต 5,234 10,085 และ 20,547 baht ตามลำดับ

ตารางที่ 19 การเปรียบเทียบราคาการผลิตไฟฟ้า 2,523 kWh จากเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ

Type	Factor (unit/kWh)	Quantity (unit)	Cost		
			Total (baht)	Energy (baht/kWh)	Fuel (baht/unit)
RDF from solid waste					
- RDF base(kg)	0.13	328	4,484	1.69	13.67
- Solid waste base (kg)	0.23	579	4,484	1.69	7.74
Coal (kg)	1.00	2,523	1,262	0.50	0.50
Natural gas (scf)	8.14	21,230	5,234	2.07	0.25
Fuel oil (l)	0.24	593	10,085	4.00	17.00
Diesel (l)	0.36	896	20,547	8.14	22.93

การพิจารณาศักยภาพการผลิตพลังงานจากมูลฝอยพลาสติกในกองมูลฝอยกลางแจ้ง พบว่าสามารถนำมาทดแทนการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลได้ เนื่องจากมีต้นทุนการผลิตพลังงานต่ำกว่า แก๊สธรรมชาติ น้ำมันเตาและน้ำมันดีเซล ถึงแม้ว่าจะมีต้นทุนการผลิตสูงกว่าถ่านหิน แต่ถ่านหินที่ใช้มักมีปริมาณซัลเฟอร์สูง ทำให้มีการปลดปล่อยแก๊ส SO₂ ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาฝนกรด แต่การใช้มูลฝอยพลาสติกเป็นเชื้อเพลิงควรพิจารณาปริมาณการปลดปล่อยไดออกซิน/ฟูราน ถึงแม้จะเป็นการเผาในระดับอุณหภูมิสูง นอกจากนี้การนำมูลฝอยพลาสติกมาผลิตเป็นพลังงานยังเป็นการลดการนำเข้าเชื้อเพลิงจากต่างประเทศและลดปริมาณการกำจัดมูลฝอย อันนำมาซึ่งการลดพื้นที่กำจัดมูลฝอย

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

1. มูลฝอยเทกองกลางแจ้ง ประกอบด้วยองค์ประกอบเผาไหม้ได้และเผาไหม้ไม่ได้ โดยมีพลาสติก 35% และดิน 42% เป็นองค์ประกอบหลัก ตามลำดับ ซึ่งสามารถแบ่งพลาสติกได้ 3 ชนิด คือ ถุงหิ้ว ถุงอื่นๆ และพลาสติกอื่นๆ โดยถุงหิ้วเป็นองค์ประกอบหลัก 18% พลาสติกมีค่าของแจ้งระเหย 67% และค่าความร้อน 36 MJ/kg ปริมาณคลอรีน 0.95% ซึ่งมีคุณสมบัติไม่แปรผันตามอายุในช่วงอายุ 2-10 ปี

2. กระบวนการคัดแยกแบบแห้ง ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ การคัดแยกด้วยพนักงานและคัดแยกด้วยเครื่องtrommel ทำการคัดแยกมูลฝอย 579 kg/day ที่อัตราเร็วtrommel 634 kg/hr ได้พลาสติก 182 kg/day หรือ 32% ของปริมาณมูลฝอยทั้งหมด ซึ่งมีความบริสุทธิ์ 80% ค่าความร้อน 37 MJ/kg ของแจ้งระเหย 82% และปริมาณคลอรีน 2.59%

3. การผลิตเชื้อเพลิงแปรรูป ใช้มันสำปะหลังป่นเป็นตัวประสาน ที่อัตราส่วนพลาสติก: มันสำปะหลังป่น 1: 0.8 เป็นอัตราส่วนที่มีองค์ประกอบพลาสติกมากที่สุด (55.56%) ที่สามารถผลิตเป็นเชื้อเพลิงแปรรูปได้และใช้ระยะเวลาในการฝั่งแห้ง 5 วัน มีความชื้น 2.95 %, ค่าความร้อน 25.97 MJ/kg, ปริมาณเถ้า 14.46 %, ปริมาณคลอรีน 0.85%, ปริมาณซัลเฟอร์ 0.6% และปริมาณไนโตรเจน 0.052% ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพของการนำของแจ้งกลับมาใช้ใหม่ในรูปแบบเชื้อเพลิง ซึ่งกำหนดไว้ โดย European Commission-Directorate General Environment

4. การผลิตแก๊สเชื้อเพลิง ด้วยกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันร่วมระหว่างเชื้อเพลิงแปรรูปและเหง้ำมันสำปะหลัง อัตราส่วน 1: 1 ครั้งละ 20 kg โดยใช้เครื่องแก๊สซิไฟเออร์แบบไหลลง ที่อัตราไหลอากาศ 30 m³/hr และ 50 m³/hr ได้แก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อน 1.49 MJ/m³ และ 1.76 MJ/m³ ปริมาณแก๊สเชื้อเพลิง 4.7 m³/kg และ 8.3 m³/kg ของเชื้อเพลิง และประสิทธิภาพเย็น 32% และ 66% ตามลำดับ

5. มูลฝอยพลาสติกจากกองมูลฝอยกลางแจ้ง 579 kg/day ผลิตเป็นเชื้อเพลิงแปรรูป อัตราส่วน 1: 0.8 (พลาสติก: มันล้าปะหลังป่น) 328 kg/day มีต้นทุนการผลิตเชื้อเพลิงแปรรูป 2,752 baht/day หรือ 8.39 baht/kg ของเชื้อเพลิงแปรรูป สามารถผลิตพลังงาน 9,081 MJ/day หรือ 2,523 kWh/day โดยมีต้นทุนการผลิตพลังงาน 4,484 baht/day หรือ 13.67 baht/kg ของเชื้อเพลิงแปรรูป หรือ 7.74 baht/kg ของมูลฝอย ซึ่งคิดเป็นรายได้ 6,219 baht/day หรือ 18.96 baht/kg ของเชื้อเพลิงแปรรูป หรือ 10.74 baht/kg ของมูลฝอย โดยคำนวณที่อัตราค่าพลังงาน 2.4649 baht/kWh เมื่อพิจารณาผลตอบแทน พบว่ามีกำไร 1,735 baht/day หรือ 5.29 baht/kg ของเชื้อเพลิงแปรรูป หรือ 3.00 baht/kg ของมูลฝอย

ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาการใช้ประโยชน์ดินที่ผ่านการตัดแยกด้วยเครื่องทรมเมลเพื่อให้สามารถลดปริมาณมูลฝอยได้มากยิ่งขึ้น
2. การศึกษาอุณหภูมิทั้ง 4 ชั้นปฏิกิริยา ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของเชื้อเพลิง จะทำให้สามารถอธิบายกลไกการเกิดปฏิกิริยาได้ดียิ่งขึ้น เพื่อใช้ในการปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง
3. ควรศึกษาการปลดปล่อยปริมาณไดออกซิน/ฟูราน เนื่องจากการเผาไหม้พลาสติกด้วยกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน เพื่อหาแนวทางในการบำบัดแก๊สเชื้อเพลิงก่อนนำไปใช้ประโยชน์
4. ควรศึกษานำถ่านชาร์จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันไปใช้ประโยชน์ เพื่อลดปริมาณการกำจัดของเสีย