

สัญญาเลขที่ R2560C032



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากของเสียและกากตะกอนของกระบวนการบดย่อย

ขวดพลาสติกกรีไซเคิล

Refuse derived fuel production from wastes and sludge of recycling of waste  
plastic containers

หัวหน้าโครงการ

ดร.อุกฤษฏ์ สัมครสมาน

คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยนเรศวร

วันลงทะเบียน 05 ส.ค. 2561

เลขทะเบียน 1034793

เลขเรียกหนังสือ 2 70

736

31 ธันวาคม 2561

2

๑๔๓๖

2561

## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากของเสียและกากตะกอนของกระบวนการบดย่อย

ขวดพลาสติกรีไซเคิล

Refuse derived fuel production from wastes and sludge of recycling of waste

plastic containers

คณะผู้วิจัย

สังกัด

ดร.อุกฤษฏ์ สัมครสมาน

คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

สนับสนุนโดย

งบประมาณรายได้มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีงบประมาณ 2560

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนและอนุเคราะห์จากหลายหน่วยงานทั้งในและนอกมหาวิทยาลัย ผู้วิจัยขอแสดงความขอบคุณในความกรุณาและอำนวยความสะดวกให้โครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีเสมอมา ขอขอบคุณ คุณพลธร พัฒนพูนทอง บริษัทพูนทองรีไซเคิล จำกัด อำเภอเขวาสินรินทร์ จังหวัดสุรินทร์ ที่อำนวยความสะดวกในการเก็บตัวอย่างและอนุเคราะห์ตัวอย่างภาคตะกอนของกระบวนการบดย่อยขวดพลาสติกสำหรับใช้ในโครงการวิจัยนี้

ขอขอบคุณ ศูนย์วิจัยพลังงานและวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่ให้ความอนุเคราะห์ เครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์ในการผลิตอัดเม็ดเชื้อเพลิงและสนับสนุนเครื่องมือในการทดสอบวิเคราะห์ตัวอย่าง

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ Material and Process Laboratory บริษัทเบลตันอินดัสเตรียล (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเครื่องไอออนโครมาโทกราฟี

ขอขอบคุณ นางสาวรัตนภรณ์ พันธุ์รัตน์ นิสิตระดับปริญญาโท สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร เป็นผู้ช่วยนักวิจัยที่กระตือรือร้นและมีความรับผิดชอบ

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณกองส่งเสริมการวิจัย มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ให้การสนับสนุนงบประมาณในการดำเนินโครงการวิจัย ภายใต้ทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณรายได้ กองทุนวิจัยมหาวิทยาลัยนเรศวร ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560

ดร.อุกฤษ สมัครสมาน

31 ธันวาคม 2561

## บทสรุปปฏิบัติการ

ข้อมูลที่ได้จากโครงการวิจัยนี้ สามารถตอบโจทย์ด้านการจัดการเศษวัสดุและของเหลือทิ้งจากร้านรับซื้อของเก่าและโรงงานบดย่อยพลาสติก เศษวัสดุและของเหลือทิ้งที่เกิดจากขั้นตอนการเตรียมพลาสติกก่อนการรีไซเคิล มีคุณสมบัติเชิงความร้อนและคุณสมบัติเชิงพลังงานเหมาะสมสำหรับใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง/เชื้อเพลิงอัดเม็ด โดยการนำเศษวัสดุและของเหลือทิ้งทั้งที่เป็นกากตะกอนและเศษพลาสติกที่ได้จากขั้นตอนการบดย่อยขวดพลาสติกชนิดเพท (PET) มาผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง/เชื้อเพลิงอัดเม็ด/เชื้อเพลิงแข็งอุตสาหกรรม (RDF/SRF/PEF) และสามารถนำข้อมูลนี้ประกอบเพื่อใช้เป็นแนวทางในการพิจารณาเทคโนโลยีซึ่งเทคโนโลยีที่เหมาะสมจะต้องมีความยืดหยุ่นและไม่เพิ่มภาระให้ผู้ประกอบการ ผู้ประกอบการกลุ่มเป้าหมาย ได้แก่ ร้านรับซื้อของเก่าและวัสดุรีไซเคิลหรือโรงงานบดย่อยพลาสติก ซึ่งเป็นผู้ประกอบการที่จะต้องได้รับการถ่ายทอดเทคโนโลยีต่อไป

การใช้เทคโนโลยีการอัดเม็ดขึ้นรูปแบบคายด์อัด (แบบต่อเนื่อง) เหมาะสมกับการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดในระดับ 0.5-1.0 ตัน/วัน ซึ่งอาจจะใช้เศษชีวมวลเป็นส่วนผสมเล็กน้อย เศษชีวมวลที่สามารถใช้เป็นส่วนผสมได้แก่ ชีลื้ออบด แกลบอบด เปลือกและซังข้าวโพดอบ เป็นต้น การที่เชื้อเพลิงอัดเม็ดมีชีวมวลเป็นส่วนผสมเล็กน้อย (ประมาณร้อยละ 10) ทำให้สามารถช่วยควบคุมคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีบางประการของเชื้อเพลิงได้ นอกจากนี้การผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดแบบคายด์อัดสามารถใช้น้ำเป็นตัวผสมได้ ซึ่งปริมาณน้ำในสัดส่วนร้อยละ 10 จะช่วยหล่อลื่นขณะอัดขึ้นรูปและลดความร้อนของหัวอัด โดยไม่ทำให้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงลดลงแต่อย่างใด อีกทั้งเชื้อเพลิงที่ผลิตได้มีคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีและคุณสมบัติเชิงพลังงานเหมาะสม สามารถใช้ได้กับภาคอุตสาหกรรมโดยเฉพาะกระบวนการทางความร้อนเคมี (thermochemical conversion) ทั้งแบบเผาไหม้โดยตรง แก๊สซิฟิเคชัน และไพโรไลซิส หรือการใช้งานร่วม (co-fuels) กับเชื้อเพลิงดั้งเดิมหรือทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิล

ทั้งนี้หากผู้ประกอบการรับซื้อของเก่าและวัสดุรีไซเคิลหรือโรงงานบดย่อยพลาสติกหรือโรงงานแปรรูปพลาสติกเพื่อการรีไซเคิล มีความประสงค์ที่จะลงทุนเพิ่มเติมสำหรับเทคโนโลยีนี้ อาจจะต้องใช้เงินลงทุนด้านการติดตั้งเครื่องจักรและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องต่างๆ ประมาณ 300,000-550,000 บาท และมีระยะเวลาในการคืนทุน ประมาณ 2.0-2.5 ปี

## บทคัดย่อ

ประเทศไทยใช้ขวดพลาสติก มากถึงปีละ 4,000 ล้านขวด หรือประมาณ 60,000 ตันต่อปี ส่วนใหญ่เป็นขวดพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต (PET) มีการใช้ขวดPETเพิ่มขึ้น 6 เท่า ในช่วง 20 ปีที่ผ่านมา และมีปริมาณการใช้งานเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ขวดPETสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ผ่านระบบการรีไซเคิล ซึ่งในระบบรีไซเคิลมีผู้ประกอบการที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการต่างๆ ตั้งแต่ผู้บริโภค ผู้รับซื้อรายย่อย ผู้ประกอบการที่เป็นโรงงานขนาดเล็กไปจนถึงโรงงานขนาดใหญ่ และมีการซื้อขายแลกเปลี่ยนและมีเครือข่ายตั้งแต่ต้นจนถึงกระบวนการนำกลับไปรีไซเคิล โดยจะมีขั้นตอนการบดย่อยขวดพลาสติกเป็นขั้นตอนขั้นกลางของระบบการรีไซเคิล ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะสำหรับพลาสติกชนิดเทอร์โมพลาสติก ขั้นตอนนี้เป็นการเตรียมและปรับปรุงคุณภาพพลาสติกให้เหมาะสมกับการรีไซเคิล โดยจะทำการบดย่อยให้เป็นเม็ดพลาสติกชนิดหยาบหรือชิ้นพลาสติก อย่างไรก็ตามกระบวนการนี้ทำให้เกิดเศษวัสดุและของเหลือทิ้ง ซึ่งจัดเป็นของเสียและกากตะกอนพลาสติกที่ไม่สามารถนำกลับไปใช้ได้อีก แนวทางในการจัดการของเสียและตะกอนจากการบดย่อยพลาสติก คือ การผลิตเป็นเชื้อเพลิง

การผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากตะกอนพลาสติก เป็นหนึ่งในวิธีที่ใช้ในการลดปริมาณขยะของโรงงานบดย่อยพลาสติกหรือโรงงานแปรรูปพลาสติกเพื่อการรีไซเคิล ซึ่งเป็นการเปลี่ยนขยะเป็นพลังงาน (waste to energy concept) กากตะกอนพลาสติกที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการบดย่อยขวดPET สามารถนำมาแปลงสภาพด้วยการอัดเม็ดให้เป็นเชื้อเพลิงขยะได้ การศึกษาที่ใช้กากตะกอนพลาสติกเป็นวัสดุหลักและใช้ชีวมวลเป็นวัสดุผสมร่วมและมีน้ำเป็นตัวผสม ซึ่งอัตราส่วนโดยมวลที่เหมาะสมของกากตะกอนพลาสติก:ชีวมวล (ซีเลื่อย) เท่ากับ 90:10 และใช้น้ำร้อยละ 10 ของน้ำหนักวัสดุ การอัดเม็ดด้วยเครื่องอัดเม็ดแบบดายนัดเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดสำหรับอัดเม็ดกากตะกอนพลาสติก

จากการศึกษาวิจัยพบว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผลิตได้มีปริมาณโลหะหนักปนเปื้อนในระดับต่ำและอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน สามารถกองเก็บกลางแจ้งได้โดยไม่มีผลกระทบจากน้ำชะละลาย และสามารถใช้เทคนิคทรีฟเฟอชั่นในการปรับปรุงคุณสมบัติของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผลิตได้ ซึ่งผลของการทรีฟเฟอชั่นเชื้อเพลิงอัดเม็ด คือ จะทำให้ค่าความชื้นลดลงและค่าดัชนีความคงทนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย กระบวนการทรีฟเฟอชั่นทำให้ปริมาณคลอไรด์ไอออนลดลงและมีค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การทรีฟเฟอชั่นยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการยึดติดด้วยลักษณะการหลอมตัวของพลาสติกและการสลายตัวของลิกนินในชีวมวล และค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผลิตได้และที่ผ่านการทรีฟเฟอชั่นแล้วอยู่ในช่วง 19 ถึง 21 MJ/kg ซึ่งเหมาะสมกับการใช้งานในเตาเผาในระดับอุตสาหกรรม ผลการทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงทั้งที่ไม่ผ่านและที่ผ่านการทรีฟเฟอชั่น มีปริมาณการปลดปล่อยมลพิษทางอากาศและปริมาณก๊าซเสียอยู่ในเกณฑ์ปกติ อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพในการเผาไหม้สูงมากกว่าร้อยละ 99 โดยมีปริมาณก๊าซเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ ได้แก่ SO<sub>2</sub> และ NO<sub>x</sub> มีค่าใกล้เคียงกับศูนย์ตลอดระยะเวลาการทดสอบ เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบทั้งสองชนิดไม่มีสารประกอบซัลเฟอร์หรือมีสารประกอบไนโตรเจนในปริมาณเล็กน้อย การทดสอบคุณสมบัติเชิงความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดภายใต้สภาวะออกซิเจนด้วยเทคนิควิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก พบว่าการที่เชื้อเพลิงอัดเม็ดมีส่วนผสมของชีวมวลจำนวนเล็กน้อยส่งผลต่อพฤติกรรมการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง ซึ่งพฤติกรรมการจุดติดไฟของชีวมวลที่ง่ายกว่ากากตะกอนพลาสติก ทำให้อุณหภูมิในการจุดติดไฟของเชื้อเพลิงอัดเม็ดลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับวัตถุดิบตั้งต้น ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผลิตได้มีคุณสมบัติเหมาะสมและสามารถนำมาเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผลิตจากชีวมวลและใช้ทดแทนกันได้

## Abstract

Thai consumer generated plastic bottles more than 4,000 million of bottles or over 60 Mtons each year. Polyethylene terephthalate (PET) is the most plastic bottle usage. In two decades, it has increased about 6 times the volume of plastic bottles and has a trend to increase the rate. Post-consumer PET can be utilized by recycling with several techniques. The mechanical process of PET recycling is considered due to unique for thermoplastics. Procedure reveals the PET recycling such as household-industrial sectors sorting, collection by seller-buyer, shredding/crushing process, and a process for cleaning until the reprocessing for goods and marketing. There are many persons, network, entrepreneurs, and factories concerned these steps. In overall, the mechanical process is subjected to prepare post-consumer PET bottle to be clean and flaked plastic prior to feed into the recycling factory. Consequently, the undesired materials rejected by shredding/crushing process in especially is a complex heterogeneous mixture of polymer components. The undesired materials were frequently found in forms of particle, dust, flake, fluff, and residue. For waste of cleaning process, it was found in form of polymer sludge. There are useless and have drawbacks to affect the environment and biota. Energy recovery of the waste of PET recycling is being highly promoted, which can reduce the landfill activities and then transitioning toward a zero-landfill future.

A processed engineered fuel (PEF) made from energy-rich material such as wastes of recyclable plastics accepted to be a challenge. It is important in terms of balance the needs of closed-loop of the existing recycling process, waste-to-energy concept. Pelletizing of the ground PET which was a waste from the shredding process of PET bottles. The use of *Tectona grandis* (teak sawdust; TS) as a partial composition in pellets and torrefaction of its were investigated. This study was to determine pellets characterization and how torrefaction influences the quality of pellets. Pelletizing of PET and TS with the ratio of 90:10. The production of pellets using of a flat-die pellets machinery is better than a single piece press machinery. The 10% of water content during pelletizing was used in order to lubricate and decreasing the effect of friction.

The results indicated that heavy metals contamination in pellets were very low and relied on the standards. Moreover, the heavy metals leachability showed less in leaching rate as well as the raw materials and pellets could stock and storage without the effects of leachability. Torrefaction of pellets was carried out at a temperature of 225 °C, 10 min of operation time, and 6 L/min of an air feeding. Characterization, properties, calorific value, and thermogravimetric (TGA) measuring for pellets and the torrefied pellets were evaluated. Torrefaction process decreased the moisture and increase the durability of pellets. In the other hands, the torrefied pellets showed a lower chloride and other ions than pellets. Torrefaction can be improved the aggregation of pellets and lignin decomposition. High heating value of pellets and the torrefied pellets were in the range of 19 to 21 MJ/kg, in which it is suitable for the industrial furnaces. For combustion tests, flue gas such as NO<sub>x</sub> and SO<sub>2</sub> showed significant low and combustion efficiency was over 99%. The results of TGA indicated that partitioning of biomass (TS) in pellets played a role in the reduction of ignition temperature. Calorific value and multiphysical-chemical properties of pellets were the influence of PET. In conclusion, pellets and the torrefied pellets can be used as PEF feedstock instead and/or replacement for conventional fossil fuels and biomass pellets.

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทสรุปปฏิบัติการ	ข
บทคัดย่อ	ค
Abstract	ง
สารบัญ	จ
สารบัญรูป	ช
สารบัญตาราง	ฉ
บทที่ 1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	3
1.3 ทฤษฎี สมมุติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย	3
บทที่ 2 เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ขวดเพทและพอลิเอสเตอร์ที่เกี่ยวข้อง	4
2.2 การซื้อขายพลาสติกเพื่อการรีไซเคิล	6
2.3 การบดย่อยขวดพลาสติกชนิดเพท	9
2.4 ขวดเพทในระบบซื้อขายวัสดุรีไซเคิล	12
2.5 การพัฒนาพลาสติกที่ได้จากการรีไซเคิล	14
2.6 การผลิตเชื้อเพลิงแข็งจากขยะและของเสีย	16
2.7 การผลิตเชื้อเพลิงแข็งด้วยการอัด	18
2.8 การปรับปรุงคุณภาพเชื้อเพลิงอัดด้วยกระบวนการทอริแฟคชั่น	20
บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย	25
3.1 การลงพื้นที่และเตรียมตัวอย่าง	25
3.2 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและเคมี	26
3.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงความร้อน	27
3.4 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันัลทางเคมีของตัวอย่าง	28
3.5 การผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด	28
3.6 การวิเคราะห์ค่าดัชนีความคงทนของเชื้อเพลิงอัดเม็ด	30
3.7 การทอริแฟคชั่นเชื้อเพลิงอัดเม็ด	30
3.8 การวิเคราะห์ปริมาณคลอไรด์และไอออน	31
3.9 การทดสอบการเผาไหม้และวิเคราะห์ก๊าซเสีย	31
3.10 การวิเคราะห์มลพิษอากาศชนิด BTEX และ PAHs	33
3.11 การวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักและการชะละลายโลหะหนัก	33
3.12 การประเมินศักยภาพและสรุปรายงานการวิจัย	34

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิจัย	35
4.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของวัตถุดิบ	35
4.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงความร้อนของวัตถุดิบด้วยเทคนิค TGA	36
4.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันน้ำตาลทางเคมีของตัวอย่างวัตถุดิบ	38
4.4 การวิเคราะห์โลหะหนักปนเปื้อนและการชะละลายโลหะหนักในวัตถุดิบ	40
4.5 การผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด	41
4.6 การปรับปรุงคุณภาพเชื้อเพลิงอัดเม็ดด้วยกระบวนการทอริแฟคชัน	44
4.7 การวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ด	45
4.8 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันน้ำตาลทางเคมีของเชื้อเพลิงอัดเม็ด	46
4.9 การวิเคราะห์โลหะหนักปนเปื้อนและการชะละลายโลหะหนักในเชื้อเพลิงอัดเม็ด	48
4.10 การวิเคราะห์ปริมาณคลอไรด์และไอออนในเชื้อเพลิงอัดเม็ด	49
4.11 การเผาไหม้และมลพิษทางอากาศ	50
4.12 การวิเคราะห์โลหะหนักปนเปื้อนและการชะละลายโลหะหนักในถ่านหิน	53
4.13 การประเมินศักยภาพการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด	54
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	56
5.1 สรุปผลการทดลอง	56
5.2 ข้อเสนอแนะ	57
เอกสารอ้างอิง	58
ภาคผนวก	62
ประวัตินักวิจัย	67



## สารบัญรูป

รูป	หน้า
1 สถานประกอบการขนาดเล็กที่มีลักษณะเป็นร้านรับซื้อและโรงงานบดย่อยขวดพลาสติก	2
2 แสดงปฏิกิริยาการสังเคราะห์เพทแบบควบแน่นชนิดที่มีน้ำและเมทานอลเป็นผลพลอยได้	5
3 สัญลักษณ์ PET-1 บรรจุภัณฑ์จากขวดเพท และการเก็บรวบรวมขวดเพท	5
4 รูปแบบของการรีไซเคิลขยะพลาสติก-โดยเฉพาะขวดเพท	6
5 บริเวณรอบโรงงานบดย่อยขวดพลาสติก	9
6 แผนผังกระบวนการบดย่อยขวดพลาสติก	10
7 ขั้นตอนการเตรียมขวดพลาสติกก่อนกระบวนการบดย่อย	11
8 เครื่องบดย่อยขวดพลาสติก และเครื่องล้างชิ้นพลาสติก	11
9 ชิ้นพลาสติกเพทและกากตะกอนพลาสติกที่เกิดจากกระบวนการบดย่อยขวดเพท	11
10 ราคาซื้อขายเม็ดพลาสติกชนิดเพทบริสุทธิ์ในประเทศไทย	13
11 แนวโน้มการส่งออกเม็ดพลาสติกและผลิตภัณฑ์พลาสติกไปยังประเทศคู่ค้า	14
12 ปริมาณกลับด้านที่เน้นเป้าหมายในการเลือกใช้พลาสติกอย่างยั่งยืน	15
13 โรงงานผลิตเชื้อเพลิงอัดจากชีวมวล	19
14 (ก) เครื่องอัดเชื้อเพลิงแบบสกรู, (ข) เครื่องอัดเชื้อเพลิงแบบกระบอกสูบ และ (ค) เครื่องอัดเชื้อเพลิงแบบกลิ้ง, (ง) เครื่องอัดเม็ดเชื้อเพลิงแบบค้ายัด	19
15 (ก) เชื้อเพลิงอัดแท่ง-อัดเม็ดผลิตจากชีวมวล และ (ข) เชื้อเพลิงอัดแท่งที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น	21
16 เชื้อเพลิงอัดแท่งจากขยะพลาสติก	21
17 การลงพื้นที่เก็บตัวอย่างกากตะกอนพลาสติกและเตรียมตัวอย่างก่อนการทดสอบ	25
18 เครื่องวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงความร้อน TG/DSC	28
19 เครื่องอัดเม็ดแบบไฮดรอลิกหรือแบบกระบอกอัด	29
20 เครื่องผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดแบบค้ายัดหรือแบบลูกกลิ้ง	29
21 เตาทอรีแฟคชั่นและแผนผังการทดลองการทอรีไฟด์เชื้อเพลิงอัดเม็ด	31
22 (ก) เตาเผาขนาดเล็กแบบเบดคงตัว (ข) เครื่องวิเคราะห์ก๊าซเสีย และ (ค) แผนผังการเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์ก๊าซเสียและมลพิษ	32
23 เครื่องวิเคราะห์ก๊าซโครมาโทกราฟีชนิดเฟลมดีเทคเตอร์	33
24 เครื่องเขย่าเพื่อจำลองการชะละลายโลหะหนักและเครื่องอะตอมมิกแอฟโฟพชั่นสเปกโทรสโคปี	34
25 (ก) เทอร์โมแกรมของน้ำหนักตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลง และ (ข) กราฟสลับแกน ของ PET, กากตะกอนพลาสติก และซีเลียมไม้สัก ซึ่งทดสอบภายใต้สภาวะ O2	37
26 (ก) เทอร์โมแกรมของน้ำหนักตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลง และ (ข) กราฟสลับแกน ของ PET, กากตะกอนพลาสติก และซีเลียมไม้สัก ซึ่งทดสอบภายใต้สภาวะ N2	37

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
27 สเปกตรัมอินฟราเรดของตัวอย่างวัตถุบ (ก) กากตะกอนพลาสติก และ (ข) ชีล้อยไม้สัก	39
28 เชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากตะกอนพลาสติกผสมชีล้อยไม้สัก	43
29 (ก) เทอร์โมแกรม TGA และ DTG ของตัวอย่างเชื้อเพลิงอัดเม็ดภายใต้ O <sub>2</sub> และ (ข) เทอร์โมแกรม TGA และ DTG ของตัวอย่างเชื้อเพลิงอัดเม็ดภายใต้ N <sub>2</sub>	46
30 (ก) เทอร์โมแกรม TGA และ DTG ของตัวอย่างเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผ่านการทอริไฟด์ภายใต้ O <sub>2</sub> และ(ข) เทอร์โมแกรม TGA และ DTG ของตัวอย่างเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผ่านการทอริไฟด์ภายใต้ N <sub>2</sub>	46
31 IR spectrum ของตัวอย่างเชื้อเพลิงอัดเม็ด (ก) ที่ไม่ผ่านการทอริไฟด์ และ (ข) ที่ผ่านการทอริไฟด์	47
32 ตัวอย่างเส้นกราฟ IC ได้จากการวิเคราะห์ตัวอย่างเชื้อเพลิงอัดเม็ด (ก) แอนไอออน และ (ข) แคทไอออน	48
33 ก๊าซเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ (ก) เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ไม่ผ่านการทอริไฟด์ และ (ข) ที่ผ่านการทอริไฟด์	51
34 BTEX ที่เกิดจากการเผาไหม้ (ก) เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ไม่ผ่านการทอริไฟด์ และ (ข) ที่ผ่านการทอริไฟด์	52
35 PAHs ที่เกิดจากการเผาไหม้ (ก) เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ไม่ผ่านการทอริไฟด์ และ (ข) ที่ผ่านการทอริไฟด์	53
36 ข้อมูลทุติยภูมิแสดงสัดส่วนขนาดของสถานประกอบการที่เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์พลาสติกในประเทศไทย	55

## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
1 การจัดประเภทและเทคโนโลยีเตาเผาที่รองรับเชื้อเพลิงขยะประเภทต่างๆ	17
2 คุณสมบัติทางกายภาพและค่าความร้อนของพลาสติกและวัสดุอื่นๆ	22
3 องค์ประกอบทางเคมีของพลาสติกและวัสดุอื่นๆ	22
4 โลหะหนักที่ปนเปื้อนอยู่ในพลาสติกและวัสดุอื่นๆ	23
5 สภาวะที่ใช้ในการทดลองผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด	30
6 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของวัตถุดิบ	35
7 ผลการศึกษาความเข้มข้นของโลหะหนักปนเปื้อนและการชะละลายโลหะหนักในวัตถุดิบ	40
8 ลักษณะกายภาพเบื้องต้นของเชื้อเพลิงอัดเม็ดผลิตจากสัดส่วนกากตะกอนพลาสติกและซีลีอียไม้สัก	41
9 ค่าดัชนีความคงทนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดเปรียบเทียบสภาวะการอัดเม็ดที่ต่างกัน	42
10 ลักษณะทางกายภาพเบื้องต้นของเชื้อเพลิงอัดเม็ดเปรียบเทียบอุณหภูมิการอัดเม็ดที่ต่างกัน	42
11 ค่าดัชนีความคงทนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผลิตด้วยเครื่องอัดเม็ดแบบตายต์อัด	44
12 สภาวะการทอริแฟคชั่นและค่าดัชนีความคงทนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผ่านการทอริแฟคชั่น	44
13 คุณสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผ่านการทอริไฟต์	45
14 ผลการศึกษาความเข้มข้นของโลหะหนักปนเปื้อนและการชะละลายโลหะหนักในเชื้อเพลิงอัดเม็ด	48
15 ผลการศึกษาปริมาณคลอไรด์และไอออนตัวอย่างเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ไม่ผ่านและผ่านการทอริไฟต์	49
16 ผลการศึกษาความเข้มข้นของโลหะหนักปนเปื้อนและการชะละลายโลหะหนักในถ้ำ	54
17 การประเมินทางเศรษฐศาสตร์เบื้องต้นของการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากตะกอนพลาสติก	55

## บทที่ 1 ที่มาและความสำคัญ

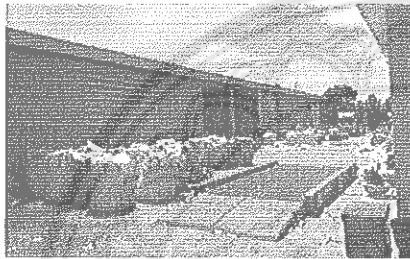
### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ปัจจุบันการใช้งานขวดพลาสติกชนิดเพท (polyethylene terephthalate; PET) มีปริมาณเพิ่มขึ้นต่อเนื่องทุกปี โดยมีอัตราการเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วงร้อยละ 17-20 โดยเฉพาะในกลุ่มประเทศพัฒนาและกำลังพัฒนา ในปี ค.ศ. 2009 ประเทศในกลุ่มสหภาพยุโรป มีปริมาณการเก็บคืนขวดเพท (PET bottle re-collection) จำนวน 1,380,000 ตัน ประเทศจีน มีปริมาณการเก็บคืนขวดเพท จำนวน 223,000 ตัน ซึ่งอาจจะกล่าวได้ว่าขวดเพทเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับวัสดุผสมมูล (ideal material) ที่สามารถนำกลับมารีไซเคิลได้เกือบจะทั้งหมด หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นแนวคิดของการใช้พลาสติกแบบรีไซเคิลขวดต่อขวด (bottle-to-bottle recycling ideal) ซึ่งการนำกลับเข้ามาใช้ซ้ำของเพทรีไซเคิลนั้น เป็นการแทรกกลับเข้ามาของพลาสติกในระบบการผลิตที่มีผลกระทบต่อพลาสติกชนิดอื่นๆ (Welle, 2011)

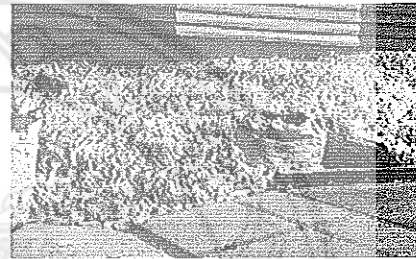
ประเทศไทยใช้ขวดพลาสติกมากถึงปีละ 4,000 ล้านขวด หรือประมาณ 60,000 ตันต่อปี ซึ่งส่วนใหญ่เป็นขวดเพท และในช่วง 20 ปีที่ผ่านมา มีการใช้ขวดเพทเพิ่มขึ้นเป็น 6 เท่าจากเดิม และมีปริมาณการใช้งานเพิ่มขึ้นในทุกๆ ปี ขวดเพทสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยผ่านระบบการรีไซเคิล ซึ่งในระบบนี้มีผู้ประกอบการที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการต่างๆ หลากหลาย ตั้งแต่ผู้บริโภค ผู้รับซื้อรายย่อย ผู้ประกอบการโรงงานขนาดเล็กไปจนถึงโรงงานขนาดใหญ่ มีการซื้อขายแลกเปลี่ยน และมีเครือข่ายตั้งแต่ต้นจนถึงกระบวนการนำกลับไปรีไซเคิล โดยจะมีขั้นตอนการบดย่อยขวดพลาสติกเป็นขั้นตอนกลาง (intermediate process) ของระบบการรีไซเคิล ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะสำหรับพลาสติกชนิดเทอร์โมพลาสติก ขั้นตอนนี้เป็นเตรียมและปรับปรุงคุณภาพพลาสติกให้เหมาะสมกับการใช้งาน โดยจะทำการบดย่อยให้เป็นเม็ดพลาสติกชนิดหยาบหรือชิ้นพลาสติก (flake) ซึ่งเป็นวิธีการที่นิยมในปัจจุบัน อย่างไรก็ตามกระบวนการคัดเลือก (selection) แยก (sorting) ตัด (cutting) บดย่อย (crushing) การล้าง (washing) และการผึ่งแห้ง (drying) จะทำให้เกิดของเสียและกากตะกอนที่ไม่สามารถนำกลับไปใช้ได้ อีกจากข้อมูลการสำรวจเบื้องต้นพบว่า ของเสียและกากตะกอนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการ ได้แก่ เศษพลาสติก (residue) ฉลาก (label) ตะกอนจากการล้าง (sludge) และผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากเครื่องจักร (cake) ซึ่งของเสียและกากตะกอนเหล่านี้ ส่วนใหญ่เป็นพลาสติกผสมจำพวก polypropylene (PP), polyvinylchloride (PVC), polystyrene (PS) และพลาสติกอื่นๆ รวมอยู่ด้วย

ปัญหาสำคัญในการจัดการของเสียและกากตะกอนจากกระบวนการรีไซเคิลขวดพลาสติก คือผู้ประกอบการส่วนใหญ่เป็นผู้ประกอบการขนาดเล็ก ยังขาดความรู้ด้านการจัดการของเสียและกากตะกอน โดยจะทิ้งร่วมกับขยะชุมชนหรือลักลอบเผา บางครั้งอาจมีการเผาพร้อมกับขยะชุมชนในพื้นที่โล่ง (open burning) การเผาทำลายร่วมกับขยะชุมชนที่ผิดวิธี ทำให้เกิดอากาศเสีย มลพิษ และฝุ่นผง รวมไปถึงโลหะและโลหะหนัก และส่งผลกระทบต่อสาธารณสุขชุมชนและสิ่งแวดล้อม โดยปริมาณของเสียและกากตะกอนจากกระบวนการ คิดเป็นร้อยละ 3-5 ของปริมาณขวดพลาสติกที่นำเข้ากระบวนการ โดยโรงงานบดย่อยขวดพลาสติกขนาดเล็กจะมีปริมาณการเกิดของเสียและกากตะกอน โดยเฉลี่ยประมาณ 7.5-9.0 ตัน/เดือน โรงงานบดย่อยขวดพลาสติกขนาดเล็กและลักษณะของสถานประกอบการ แสดงดังรูปที่ 1 ของเสียและกากตะกอนจากกระบวนการบดย่อยพลาสติกจัดอยู่ใน

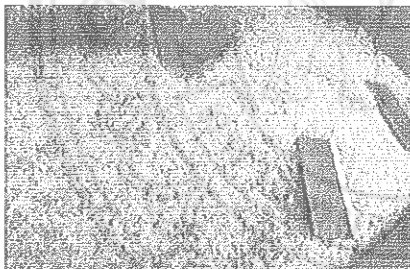
กากอุตสาหกรรม และจัดเป็นเชื้อเพลิง refused derived fuels (RDF) ประเภทที่ 4 (RDF-4) การเผาทำลายผลิตภัณฑ์ที่ถูกบดย่อยจำเป็นต้องใช้เตาเผาชนิดฟลูอิดไชด์เบด (fluidized bed incinerator) เนื่องจากมีขนาดเล็กกว่า 0.035 นิ้ว โดยประมาณ (ทิพยาวงศ์, 2558) แต่อย่างไรก็ตามปริมาณของของเสียและกากตะกอนเหล่านี้ มีไม่มากพอที่จะป้อนเข้าเตาเผาขนาดใหญ่ อีกทั้งเทคโนโลยีเตาเผาฟลูอิดไชด์เบด ยังไม่มีการสร้างหรือบรรจุอยู่ในแผนแม่บทการบริหารจัดการขยะมูลฝอยของประเทศ (พ.ศ. 2559-2564) จึงจำเป็นต้องศึกษาแนวทางที่เหมาะสมกับของเสียและกากตะกอนเหล่านั้น แนวทางในการจัดการของเสียและตะกอนจากกระบวนการบดย่อยพลาสติกกรีไซเคิลมีหลากหลาย แนวทางหนึ่งในการจัดการของเสียและกากตะกอน คือ การนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงแข็งด้วยวิธีการอัดขึ้นรูป



ขวดพลาสติกจากผู้ค้าปลีกรายย่อย



ขวดที่แคะสลากและตากแห้งลดความชื้น



ชิ้นพลาสติกเพทที่ผ่านการทำความสะอาด



การแยกสิ่งปนเปื้อนก่อนการส่งจำหน่าย

### รูปที่ 1 สถานประกอบการขนาดเล็กที่มีลักษณะเป็นร้านรับซื้อและโรงงานบดย่อยขวดพลาสติก

กระบวนการอัดขึ้นรูปเชื้อเพลิงเป็นเม็ด (pelletization) เพื่อให้เป็นขยะเชื้อเพลิง ประเภทที่ 5 (RDF-5) เป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดสำหรับของเสียและกากตะกอนจากขวดพหามากกว่าการอัดแท่ง (briquette) เนื่องจากเชื้อเพลิงจะมีขนาดใหญ่ขึ้น มีขนาดเท่ากันตลอด มีความแข็งและทนทาน มีความหนาแน่นสูงขึ้น สามารถจัดเก็บและขนส่งได้ง่าย มีค่าความร้อนคงที่ อีกทั้งในกระบวนการอัดเม็ดสามารถเติมสารเติมแต่ง เช่น มีการเติมหินปูน เพื่อดูดซับแก๊สที่เป็นกรดและลดปริมาณมลพิษทางอากาศที่เกิดจากปฏิกิริยาทางความร้อน สามารถผสมชีวมวลเพื่อควบคุมปริมาณคลอไรด์หรือโลหะหนัก เป็นต้น ในที่นี่จะใช้คำว่า “การอัดเม็ดและเชื้อเพลิงอัดเม็ด” แทนคำว่า “การอัดแท่งและเชื้อเพลิงอัดแท่ง” เพื่อให้ผู้อ่านทำความเข้าใจได้ง่ายขึ้น อย่างไรก็ตามในรายงานการวิจัยนี้อาจจะใช้คำทั้งสองควบคู่ไป

การแปลงเชื้อเพลิงขยะเป็นเชื้อเพลิงแข็งโดยการอัดแท่งหรือขึ้นรูปด้วยการอัดเม็ดหรือการทำเป็นเชื้อเพลิง RDF หรือการคัดเลือกเฉพาะวัสดุที่เผาไหม้ได้และไม่เป็นวัสดุอันตรายเพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิง อาจเรียกรวมการผลิตเป็น solid recovered fuels (SRF) นั้น กระบวนการดังกล่าวมีลักษณะคล้ายกัน คือกระบวนการแปลงเชื้อเพลิงแข็งทั่วไปให้เป็นเชื้อเพลิงแข็งที่มีคุณภาพดีขึ้น โดยการนำมาอัดให้อยู่ในรูปของก้อน เม็ด ลูกบาศก์ หรือแท่ง ซึ่งเป็นการปรับปรุงทั้งคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี สามารถเก็บรักษาได้ง่าย สะดวกต่อการขนส่ง สะดวกต่อการใช้งาน มีความเป็นเนื้อเดียวกันสูง ปริมาณการปล่อยมลพิษต่ำ มีขนาดที่สม่ำเสมอ ค่าความชื้นน้อย และค่าความร้อนมีค่าใกล้เคียงกับเชื้อเพลิงเชิงพาณิชย์ทั่วไป (Zhao และคณะ, 2015; ทิพย์วงศ์, 2558) ซึ่งประเด็นความท้าทายที่น่าสนใจเกี่ยวกับการอัดเม็ดหรือเพิ่มความหนาแน่น ได้แก่ 1) การศึกษากลไกการเกาะตัวกันของอนุภาคจากการอัด โดยพิจารณาส่วนประกอบและชนิดของตัวผสมทั้งที่มีในธรรมชาติ เช่น ลิกนิน เพคติน ไช แวกซ์ แป้ง น้ำมัน และตัวเติมอื่นๆ 2) การพัฒนาเทคโนโลยีการอัดเม็ดชีวมวลที่มีอัตราการผลิตสูงระดับอุตสาหกรรม รวมถึงการพัฒนามาตรฐานการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด 3) การผสมกันระหว่างชีวมวลอุตสาหกรรมและชีวมวลและสัดส่วนที่เหมาะสม และ 4) กระบวนการแปลงสภาพเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพเบื้องต้น ได้แก่ กระบวนการทอริแฟคชัน เป็นต้น ดังนั้นการศึกษาโครงการวิจัยนี้จะช่วยหาคำตอบในประเด็นที่ยังไม่สามารถตอบปัญหาได้ โดยศึกษาวิจัยตั้งแต่การติดต่อประสานงานกับผู้ประกอบการ เก็บตัวอย่าง การผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด การปรับปรุงคุณสมบัติเชื้อเพลิงโดยใช้กระบวนการทอริแฟคชัน การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี การทดสอบการเผาไหม้ มลพิษและเถ้า และการประเมินศักยภาพด้านการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดในเชิงอุตสาหกรรมและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ซึ่งผลงานวิจัยที่ได้จะช่วยสร้างความมั่นใจในการส่งเสริมการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากของเสียและกากตะกอนของกระบวนการบำบัดยวดยพลาสติกรีไซเคิลและนำองค์ความรู้เผยแพร่ต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการจัดการของเสียและกากตะกอนจากกระบวนการบำบัดยวดยพลาสติกรีไซเคิลด้วยการผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ด
2. การผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด การทดสอบคุณสมบัติเชิงความร้อน และศึกษาวิเคราะห์อากาศเสีย มลพิษ และฝุ่นผงรวมถึงเถ้าหนักที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงอัดเม็ด
3. ศึกษาประสิทธิภาพเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผ่านกระบวนการทอริแฟคชัน

## 1.3 ทฤษฎี สมมุติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

การศึกษาโครงการวิจัยนี้ มีกรอบแนวคิดในการจัดการขยะ ของเสีย และกากตะกอน ที่เกิดจากกระบวนการเตรียมพลาสติกก่อนกระบวนการรีไซเคิล โดยใช้การอัดขึ้นรูปเป็นเชื้อเพลิงแข็ง อีกทั้งการศึกษาสัดส่วนการผสมชีวมวลลงไปเป็นเชื้อเพลิง และกระบวนการทอริแฟคชัน โดยการศึกษาจะมุ่งเน้นการใช้องค์ความรู้ด้านวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม เพื่อลดปัญหาที่เกิดจากการทิ้งของเสียและกากตะกอนร่วมกับขยะชุมชน และลดการลักลอบเผาในพื้นที่โล่ง อีกทั้งผู้ประกอบการสามารถนำไปต่อยอดพัฒนาเชื้อเพลิงอัดเม็ดในระดับอุตสาหกรรม

## บทที่ 2 เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

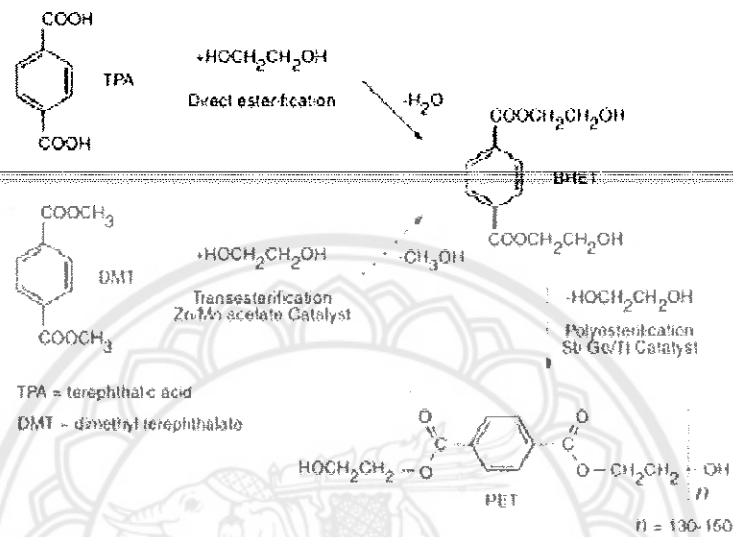
### 2.1 ขวดเพทและพอลิเอสเตอร์ที่เกี่ยวข้อง

ขวดเพท (PET bottle) เป็นพอลิเมอร์ชนิดพอลิเอสเตอร์ประเภทหนึ่งที่มีองค์ประกอบส่วนหนึ่งในสายโซ่พอลิเมอร์เป็นหมู่ของเอสเตอร์ (ester groups) เพทถูกใช้งานเป็นจำนวนมากในอุตสาหกรรมอาหาร ใช้ในการผลิตขวดสำหรับเครื่องดื่มและบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหาร นอกจากนี้ก็นิยมใช้ผลิตเป็นเส้นใยผลิตเสื้อผ้า ม่าน ผ้าห่ม และพรม แต่อย่างไรก็ตามเพทจะไม่นิยมใช้ในการบรรจุเครื่องดื่มและอาหารที่มีส่วนประกอบของสารคาร์บอนेट ในส่วนของการใช้งานเพทในด้านวิศวกรรม เช่น ผลิตเป็นโมโนฟิลาเมนต์ (monofilament) ผลิตฟิล์มบางสำหรับโซลาร์เซลล์ (thin film solar cells) และการใช้พอลิบิวทิลีนเทอเรพทาเลต (polybutylene terephthalate; PBT) ในชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น

การผลิตเพทเป็นการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบควบแน่น (condensation polymers) ซึ่งสารตั้งต้นที่ใช้ในการผลิตเพทนั้น ส่วนใหญ่ได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมีหรือโดยกระบวนการแตกตัวของไฮโดรคาร์บอนจากก๊าซธรรมชาติ สารตั้งต้นประเภทพาราไซลีน (*para*-xylene) และเอทิลีน (ethylene) เมื่อผ่านการทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน จะได้ terephthalic acid (TPA) และ dimethyl terephthalate (DMT) ตามลำดับ ในส่วนของสารตั้งต้นประเภท ethylene glycol (EG) จะได้จากปฏิกิริยาย้อนกลับของเอทิลีน รูปที่ 2 เมื่อกระบวนการผลิตเพทเริ่มขึ้น ปฏิกิริยาเอสเตอร์ฟิเคชัน (esterification) แบบควบแน่น ของสารตั้งต้นระหว่าง TPA และ EG (หรือ ethanediol) จะทำให้เกิดเพทและจะมีน้ำเป็นผลพลอยได้ นอกจากนี้ยังสามารถผลิตเพทจากมอนอเมอร์ ซึ่งได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่าง DMT และ EG จะได้เมทานอลเป็นผลพลอยได้ ซึ่งการทำปฏิกิริยาแบบควบแน่นส่วนใหญ่จะใช้โลหะหนัก (antimony; Sb, germanium; Ge, และ titanium; Ti) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการพอลิเมอเรเซชัน (ลีจากภย์, 2547)

ความบริสุทธิ์ของสารตั้งต้นเป็นสิ่งสำคัญมากและมีผลต่อคุณภาพของเพทที่สังเคราะห์ได้ เพื่อใช้เพทในการผลิตบรรจุภัณฑ์สำหรับบรรจุอาหาร เพทที่ผลิตได้จะต้องมีน้ำหนักโมเลกุลสูง จะต้องมีความเหนียว ทนทาน และมีความยืดหยุ่นต่อแรงกระแทกกระทึก นอกจากนี้เพทสามารถประยุกต์ใช้ในการผลิตเป็นแผ่นฟิล์มหรือขวดพลาสติกใส ผลิตเป็นพลาสติกขุ่นสำหรับบรรจุภัณฑ์หรือภาชนะ ซึ่งสามารถทนต่อแรงกระแทกและอุณหภูมิแตกต่างกัน นอกจากนี้ยังมีการนำเพทมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติทางกายภาพแตกต่างกัน และเติมสารเติมแต่งเพื่อเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมี เช่น การเติม isophthalic acid (IPA หรือ 1,4-cyclohexanedimethanol) ทำให้ได้แผ่นฟิล์มหรือขวดที่มีความหนาเพิ่มขึ้น ปัจจุบันสารตั้งต้นที่ใช้สำหรับการสังเคราะห์เพทนั้น สามารถผลิตจากวัตถุดิบทางธรรมชาติได้ เช่น การผลิต EG จากเอทานอล (bio-based ethanol) ที่เกิดจากหมักโมลาสจากอุตสาหกรรมน้ำตาลหรือฟืชอื่นๆ ในปี ค.ศ. 2011 บริษัท PepsiCo, Inc. ประกาศจะผลิตขวดเพทที่ทำจาก

ธรรมชาติ 100% ซึ่งสารตั้งต้นชนิด *p*-xylene จะได้มาจากวัตถุดิบทางธรรมชาติเรียกว่า bio-*p*-xylene ซึ่งได้จากกากอ้อยในอุตสาหกรรมน้ำตาล (Tolinski, 2012)



รูปที่ 2 แสดงปฏิกิริยาการสังเคราะห์เพทแบบควบแน่นชนิดที่มีน้ำและเมทานอลเป็นผลพลอยได้

ที่มา: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ

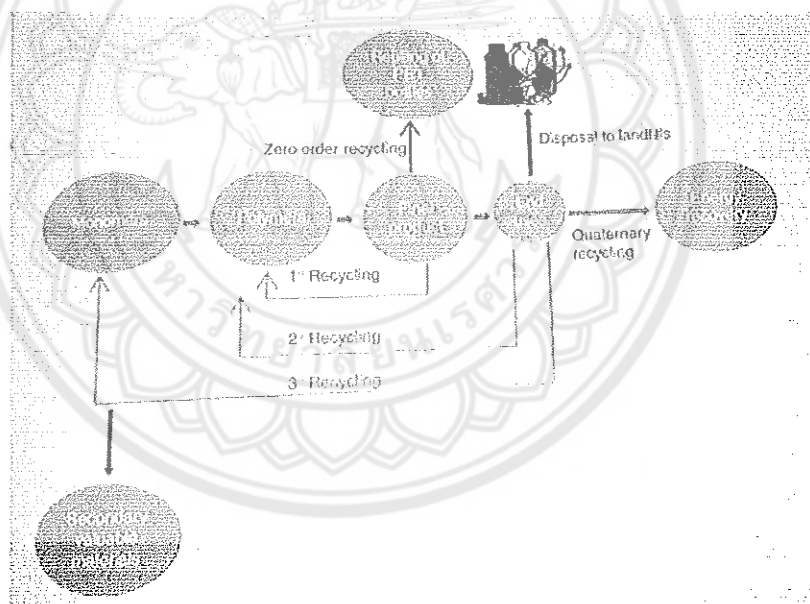


รูปที่ 3 สัญลักษณ์ PET-1 บรรจุมัณฑ์จากขวดเพท และการเก็บรวบรวมขวดเพท



## 2.2 การซื้อขายพลาสติกเพื่อการรีไซเคิล

ผู้ประกอบการรับซื้อของเก่าและวัสดุรีไซเคิล รวมไปถึงโรงงานแปรรูปพลาสติกเพื่อการรีไซเคิลเป็นหน่วยธุรกิจที่ทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการรับซื้อขายรวบรวมและขนย้ายวัสดุรีไซเคิลจากบ้านเรือน สำนักงาน ชุมชนและร้านค้า ไปยังสถานประกอบการเพื่อการรีไซเคิล และทำหน้าที่ในการเตรียมวัสดุก่อนเข้ากระบวนการรีไซเคิล รวมถึงทำหน้าที่ในการขนส่งและจำหน่าย ด้วยสถานที่ตั้งของร้านรับซื้อของเก่าและวัสดุรีไซเคิล ส่วนใหญ่จะอยู่ในเขตชุมชน ซึ่งมีคนอาศัยอยู่ค่อนข้างหนาแน่นประกอบกับลักษณะของการประกอบการต้องมีการสะสมสิ่งของ เช่น พลาสติก แก้ว กระดาษ โลหะและอื่นๆ ภายในร้านหรือคลังเก็บวัสดุของโรงงาน อย่างไรก็ตามหากการจัดการดูแลสถานประกอบการที่ไม่ถูกสุขลักษณะหรือละเลยข้อปฏิบัติ ซึ่งย่อมส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพอนามัยของผู้ประกอบการและประชาชนที่อาศัยอยู่บริเวณใกล้เคียง ตัวอย่างเช่น ปัญหากลิ่นเหม็นเน่าจากการหมักหมมของสิ่งตกค้าง น้ำเสียจากการล้าง ปัญหาแหล่งเพาะพันธุ์สัตว์นำโรค ปัญหาเสียงดังจากการดำเนินกิจกรรมของร้าน อุบัติเหตุจากสัมผัสของมีคมและอุบัติเหตุจากการสัมผัสสารเคมีวัตถุอันตรายที่มากับขยะ เป็นต้น (พริ้งสกุล, 2557)



รูปที่ 4 รูปแบบของการรีไซเคิลขยะพลาสติก-โดยเฉพาะขวดเพท ที่มา: Beena (2017)

รูปที่ 4 แสดงรูปแบบของการรีไซเคิลพลาสติกหรือพอลิเมอร์ด้วยเทคโนโลยีต่างๆ ตามขั้นตอน เริ่มจากขั้นต้นไปจนถึงขั้นการรีไซเคิลเชิงพลังงาน ซึ่งประสบผลสำเร็จอย่างเห็นได้ชัดและมีการพัฒนากระบวนการรีไซเคิลอย่างต่อเนื่องเรื่อยมา Beena (2017) นำเสนอลักษณะของการรีไซเคิลพลาสติกและพอลิเมอร์ 4 ลักษณะ ได้แก่

1. การรีไซเคิลขั้นต้น (primary recycling) เป็นการนำวัสดุหรือผลิตภัณฑ์กลับมาใช้โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเดิมของวัสดุนั้น เช่น การนำขวดแก้วหรือขวดพลาสติกบรรจุน้ำดื่มกลับมาบรรจุน้ำดื่ม เป็น

ตัน ซึ่งเป็นวิธีการที่มีราคาถูกและมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามวิธีนี้เหมาะสำหรับสินค้าที่สะอาด ไม่มีการปนเปื้อน หรือมีการใช้กับสินค้าเพียงอย่างเดียว (single-type product) และอาจมีข้อจำกัด คือ จำนวนรอบของการรีไซเคิลของวัสดุนั้น

2. การรีไซเคิลเชิงกล (mechanical recycling หรือ secondary recycling) เป็นกระบวนการส่งเสริมให้เกิดการผลิตซ้ำของวัสดุ (reprocessing of materials) โดยใช้กระบวนการเชิงกล เช่น การตัด การหั่น การเขี่ย การล้าง และอื่นๆ ซึ่งกระบวนการนี้เป็นการเตรียมพลาสติกก่อนนำกลับไปผลิตซ้ำเป็นวัตถุดิบตั้งต้น การผลิตเม็ดพลาสติกจากพลาสติกกรีไซเคิลนั้น พลาสติกจะถูกลดขนาดหลังจากคัดแยก ทำความสะอาด และทำให้แห้ง จากนั้นกระบวนการเชิงกลจะทำหน้าที่เปลี่ยนพลาสติกให้เป็นชิ้นพลาสติกขนาดเล็ก หรือ flake plastic ที่มีคุณสมบัติเหมาะสมที่จะนำเข้าสู่กระบวนการผลิตเพื่อผลิตเป็นสินค้าอื่นๆ ต่อไป กระบวนการนี้จะไม่ทำให้คุณสมบัติของพอลิเมอร์เปลี่ยนแปลงมากนัก เนื่องจากเป็นเพียงการลดขนาดหรือลดน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ด้วยการตัดสายโซ่ปฏิกิริยาเท่านั้น (chain-scission reactions) มีเพียงน้ำและกรดเล็กน้อยเท่านั้นที่เป็นผลพลอยได้ แต่กระบวนการนี้อาจจะเกิดปัญหาจากการปนเปื้อนของพลาสติกชนิดอื่นที่ปนมา (heterogeneity) การรีไซเคิลเชิงกลนี้สามารถใช้ได้กับพลาสติกชนิดเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic) เท่านั้น เนื่องจากกระบวนการถัดไปจะต้องมีการหลอมละลายและพลาสติกต้องผ่านการขึ้นรูปไปจนถึงนำไปใช้ประโยชน์ สำหรับพลาสติกชนิดเทอร์โมเซต (thermoset plastic) จะไม่สามารถหลอมละลายได้อีก พลาสติกเทอร์โมเซตส่วนใหญ่จะถูกนำไปรีไซเคิลในลำดับสุดท้าย (energy recovery) ด้วยการเผาในเตาเผาปูนซีเมนต์หรือผสมในการผลิตยางมะตอยลาดถนน ซึ่งจะกล่าวในลำดับถัดไปในหัวข้อการรีไซเคิลเชิงพลังงาน การรีไซเคิลเชิงกลมีขั้นตอนสำคัญ ได้แก่

- การเก็บรวบรวม/การคัดแยก (collection/segregation)
- การทำความสะอาดและทำให้แห้ง (cleaning and drying)
- การหั่นสับ/การคัดขนาด (chipping/sizing)
- การแยกสี/การทำให้รวมก้อน (coloring/agglomeration)
- การอัดเม็ด/การอัดขึ้นรูป (palletization/extrusion)
- การผลิตเป็นผลิตภัณฑ์และสินค้า (manufacturing of the end products)

3. การรีไซเคิลเชิงเคมี (chemical/feedstock recycling หรือ tertiary recycling) หรือการทำให้วัสดุกลับไปเป็นวัตถุดิบสารตั้งต้น (chemical and feedstock recycling) ในกรณีของพลาสติกหรือพอลิเมอร์คือการทำให้พลาสติกทำปฏิกิริยาย้อนกลับไปเป็นโมโนเมอร์ ด้วยกระบวนการดีพอลิเมอร์ไรเซชัน (depolymerization) หรือบางส่วนย้อนกลับไปด้วยกระบวนการดีพอลิเมอร์ไรเซชันบางส่วน (partial-depolymerization) ไปเป็นโอลิโกเมอร์หรือสารตั้งต้นตัวอื่นๆ กระบวนการนี้จะใช้เทคโนโลยีขั้นสูงในการเปลี่ยนพลาสติกให้กลายเป็นสารเคมีหรือพอลิเมอร์ที่มีโมเลกุลเล็กลง โดยส่วนมากจะถูกทำให้เปลี่ยนสถานะให้เป็นของเหลวหรือก๊าซ ซึ่งจะเหมาะสมในการเป็นวัตถุดิบตั้งต้นหรืออาจใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตโมโนเมอร์และโอลิโกเมอร์ หรืออาจจะใช้เป็นส่วนผสมร่วมกับสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอื่น หรือแม้กระทั่งการใช้เป็นตัวช่วยให้ความร้อนหรือเป็นสารเคมีในระบบการผลิตเม็ด

พลาสติกหรือใช้ในกระบวนการผลิตปิโตรเคมี การรีไซเคิลเชิงเคมีเพื่อผลิตสารตั้งต้นในกระบวนการผลิตพอลิเมอร์แบบควบแน่น (condensation polymer) สำหรับพลาสติกชนิดเพทและไนลอน (nylon) กระบวนการที่นิยมใช้ได้แก่ ไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ไกลโคไลซิส (glycolysis) เมทาโนไลซิส (methanolysis) อะมิโนไลซิส (aminolysis) แอมมิโนไลซิส (amminolysis) เป็นต้น

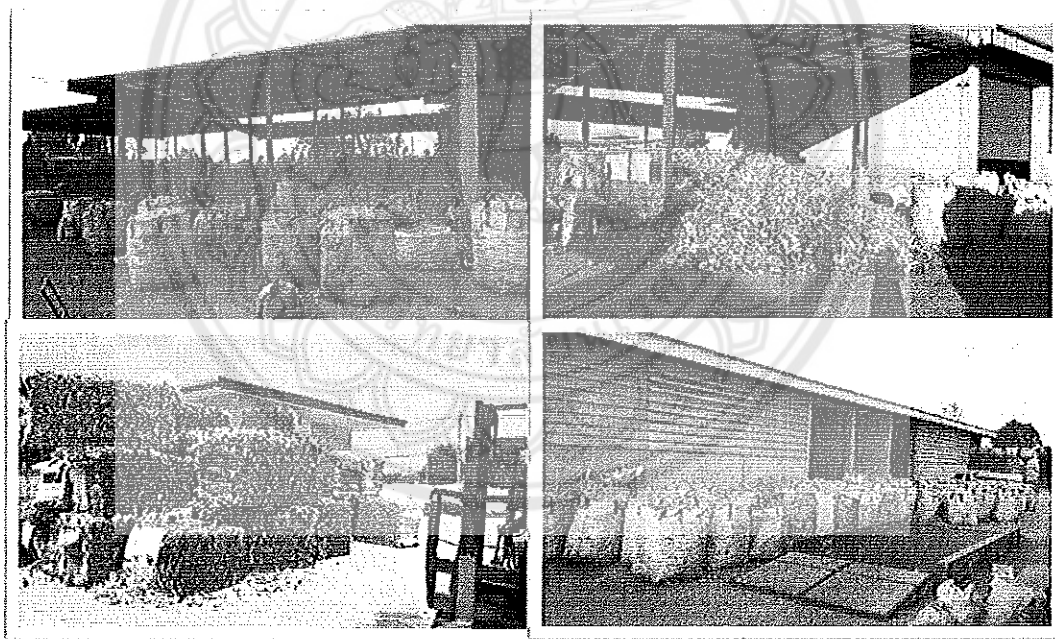
ในแง่ของการใช้ประโยชน์และผลพลอยได้ขั้นสุดท้าย (final output) จากกระบวนการรีไซเคิลเชิงเคมีนั้น กระบวนการ depolymerization ทำให้เกิดเชื้อเพลิงสังเคราะห์ (synthetic fuels) ที่มีสมบัติเชิงพลังงาน (energetic value) และสามารถใช้ในการผลิตได้ การรีไซเคิลเชิงเคมีเป็นแนวทางที่น่าสนใจ เนื่องจากสามารถใช้เป็นแหล่งพลังงาน กระบวนการที่นิยมใช้ในการรีไซเคิลเชิงเคมี ได้แก่ เทอร์โมไลซิส (thermolysis) ซึ่งเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นภายใต้อุณหภูมิสูงและปราศจากสภาวะออกซิเดชัน (non-oxidative condition) โดยผลผลิตที่ได้จากเทอร์โมไลซิส จะเป็นสารตั้งต้นที่มีมูลค่าและถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ เทอร์โมไลซิสแบ่งเป็นเทอร์โมไลซิสแบบมีและแบบไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งเทอร์โมไลซิสแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยานั้น ปฏิกิริยาสามารถเกิดภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่ำกว่า เกิดปฏิกิริยาได้รวดเร็ว และได้ผลผลิตที่ตรงตามความต้องการ นอกจากนี้ยังมีการรีไซเคิลเชิงเคมีอื่นๆ เช่น แก๊สซิฟิเคชัน (gasification) ไพโรไลซิส (pyrolysis) สามารถใช้ในเตาหลอมเหล็กหรือเตาเผาถ่านโค้ก (melting in a blast furnace/coke oven) ลิกวิดแฟคชัน (liquidfaction) ลิกวิด-แก๊สไฮโดรจีเนชัน (liquid-gas hydrogenation) การแตกตัวด้วยไอน้ำหรือตัวเร่งปฏิกิริยา (steam/catalytic cracking) เป็นต้น

#### 4. การรีไซเคิลเชิงพลังงาน (energy recovery หรือ quaternary recycling)

การรีไซเคิลเชิงพลังงาน หมายถึง การนำพลังงานจากวัสดุมาใช้ประโยชน์ (energy recovery) เป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณและปริมาณของสารประกอบอินทรีย์ของวัสดุ ที่ซึ่งสามารถถูกเผาไหม้ได้ กระบวนการเผา (incineration) เป็นวิธีการหลักในการรีไซเคิลเชิงพลังงาน การเผาสามารถปลดปล่อยพลังงานจากพลาสติกได้เป็นอย่างดี แต่ในทางกลับกันอาจจะเกิดผลกระทบต่อมลพิษทางอากาศ เช่น ฝุ่นละออง (airborne toxic substances) ไดออกซิน (dioxin) พอลิอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (polyaromatic hydrocarbons, PAHs) พอลิคลอริเนตไบฟีนิล (polychlorinated biphenyls, PCBs) โลหะหนัก (heavy metals) อนุมูลอิสระของสารออกซิไซด์ (oxygen-based free radicals) และก๊าซเรือนกระจก (greenhouse gases, GHGs) เป็นต้น เหตุผลที่ต้องนำพลาสติกไปเผาในเตาเผา ได้แก่ เหตุผลเชิงพลังงาน ที่ต้องการนำพลังงานความร้อนมาใช้ประโยชน์ และเหตุผลเชิงพื้นที่ เนื่องจากการสร้างบ่อฝังกลบต้องใช้พื้นที่ อาจไม่เพียงพอหรือไม่มีพื้นที่ที่เหมาะสมสำหรับก่อสร้าง อีกทั้งการฝังกลบพลาสติกจะต้องใช้ระยะเวลาหลายสิบปีในการย่อยสลาย ดังที่กล่าวมาข้างต้น พลาสติกชนิดเทอร์โมเซตจะไม่สามารถหลอมละลายได้อีก ดังนั้นพลาสติกเทอร์โมเซตส่วนใหญ่จะถูกนำไปรีไซเคิลด้วยการเผาในเตาเผาปูนซีเมนต์หรือผสมในการผลิตยางมะตอยราดถนน นอกจากนี้แล้วของเสียและกากตะกอนพลาสติกที่สนใจศึกษา ซึ่งจัดเป็นของเสียที่เกิดจากกระบวนการเตรียมเทอร์โมพลาสติกก่อนเข้าสู่กระบวนการรีไซเคิล สามารถนำมารีไซเคิลเชิงพลังงานได้เช่นกัน โดยจะกล่าวถึงความสำคัญของของเสียและกากตะกอนพลาสติกจากกระบวนการรีไซเคิลในหัวข้อถัดไป

### 2.3 การบดย่อยขวดพลาสติกชนิดเพท

จากการสืบค้นข้อมูลและจากการสอบถามจากผู้ประกอบการ การบดย่อยขวดพลาสติกชนิดเพทนั้น มีขั้นตอนสำหรับการเตรียมพลาสติกก่อนการจำหน่ายให้แก่โรงงานรีไซเคิล โดยหลักๆ มี 6 ขั้นตอน ได้แก่ การคัดเลือก (selection), แยก (sorting), ตัด (cutting), บดย่อย (crushing), การล้าง (washing), และการผึ่งแห้ง (drying) รูปที่ 5-9 แสดงบริเวณรอบโรงงานบดย่อยขวดเพทและกิจกรรมที่เกิดขึ้นภายในโรงงาน แผนผังของกระบวนการบดย่อยขวดพลาสติก ขั้นตอนการเตรียมขวดพลาสติกก่อนกระบวนการบดย่อย และผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากกระบวนการย่อยขวดพลาสติกชนิดเพท โดยโรงงานแห่งนี้มีพนักงานประมาณ 12 คน มีการแบ่งการทำงานตามหน้าที่ เช่น พนักงานคัดแยกขวดและพลาสติกอื่นๆ พนักงานประจำเครื่องบดย่อย พนักงานประจำเครื่องล้างและเป่าลม พนักงานคัดแยกชิ้นพลาสติก พนักงานชั่งน้ำหนักและการเงิน และพนักงานลำเลียงและขนส่งจำหน่าย เป็นต้น โดยในแต่ละวันโรงงานมีปริมาณขวดพลาสติกที่นำเข้ากระบวนการบดย่อยประมาณ 3-6 ตัน/วัน โดยมีปริมาณของเสียและกากตะกอนจากกระบวนการ คิดเป็นร้อยละ 3-5 ของปริมาณทั้งหมด จะมีปริมาณการเกิดของเสียและกากตะกอน โดยเฉลี่ยประมาณ 7.5-9.0 ตัน/เดือน

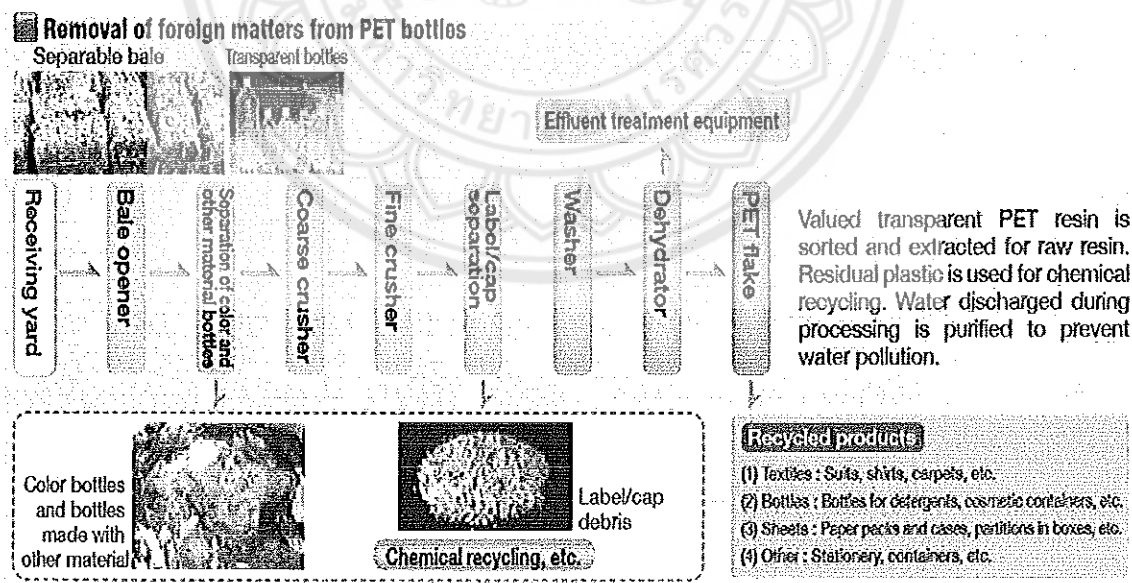


รูปที่ 5 บริเวณรอบโรงงานบดย่อยขวดพลาสติก

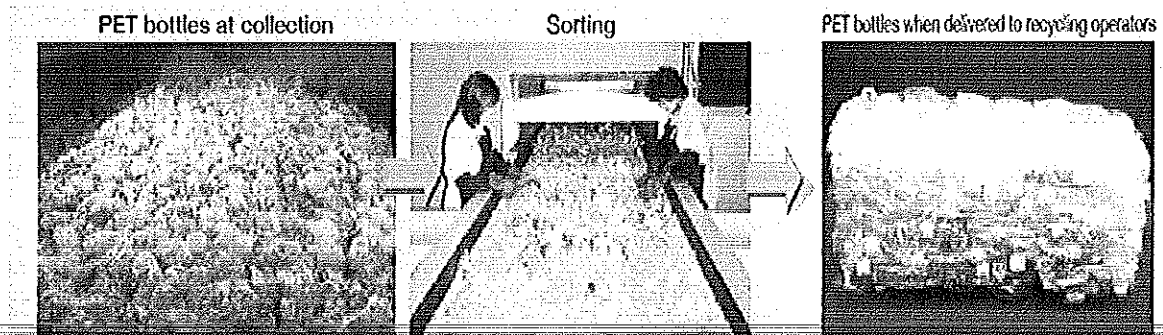
ปัญหาจากกระบวนการรีไซเคิลขวดเพทและบรรจุภัณฑ์ที่พบในประเทศสหรัฐอเมริกาและสหภาพยุโรป คือ วัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการรีไซเคิลเพทที่ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้แล้วนั้น ส่วนใหญ่จะถูกส่งไปกำจัดยังบ่อฝังกลบและเผาในเตาเผาขยะชุมชน (MSW incinerator) ถ้าหากการจัดการไม่ดีเท่าที่ควรของเสียอาจหลุดรอดลงไปตามระบบระบายน้ำ แหล่งน้ำและปนเปื้อนลงสู่ดิน (Tolinski, 2012) ซึ่งสอดคล้องกับปัญหาที่เกิดขึ้นกับ

โรงงานแห่งนี้ ปัญหาหลักคือการจัดการของเสียและกากตะกอนจากกระบวนการรีไซเคิลขวดพลาสติก อีกทั้งผู้ประกอบการขาดความรู้ด้านการจัดการของเสียและกากตะกอน โดยส่วนใหญ่จะทิ้งร่วมกับขยะชุมชนหรือลักลอบเผา บางครั้งอาจมีการเผาร่วมกับขยะชุมชนในพื้นที่โล่ง การเผาทำลายร่วมกับขยะชุมชนที่ผิดวิธีทำให้เกิดอากาศเสีย มลพิษ และฝุ่นผง รวมไปถึงโลหะและโลหะหนัก และส่งผลกระทบต่อสาธารณสุขชุมชนและสิ่งแวดล้อมได้

กากตะกอนพลาสติกจากโรงงานดังกล่าว มีคุณสมบัติทางกายภาพอยู่ตรงกลางระหว่างขยะเชื้อเพลิง RDF ประเภทที่ 3 และ 4 คือ เชื้อเพลิงมีการคัดแยกส่วนที่ไม่สามารถเผาไหม้ออกแล้ว และมีวัสดุที่สามารถเผาไหม้ได้มากกว่าร้อยละ 95 มีขนาดเล็กกว่า 5 เซนติเมตร แต่มีลักษณะเป็นฝุ่นผง (fluff-RDF) ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (non-homogeneous dust-RDF) (สมัครสมาน และคณะ, 2561) ซึ่งไม่สามารถใช้ได้กับเตาเผาแบบตะกรับ (stoker) แบบฟลูอิดไรซ์เบด (fluidized bed) หรือแบบพัลเวไรซ์ (pulverized) ถ้าหากต้องการนำกากตะกอนพลาสติกจากขั้นตอนการเตรียมพลาสติกเพื่อการรีไซเคิลมาใช้ประโยชน์ กระบวนการอัดเม็ดเชื้อเพลิงเพื่อให้เป็นขยะเชื้อเพลิง RDF ประเภทที่ 5 เป็นวิธีที่เหมาะสม เนื่องจากเชื้อเพลิงจะมีขนาดใหญ่ขึ้น มีความหนาแน่นสูงขึ้น สามารถจัดเก็บและขนส่งได้ง่าย มีค่าความร้อนคงที่ อีกทั้งในกระบวนการอัดเม็ดสามารถเติมสารเติมแต่ง เช่น มีการเติมหินปูนเพื่อดูดซับแก๊สที่เป็นกรดและลดปริมาณมลพิษทางอากาศที่เกิดจากปฏิกิริยาทางความร้อน สามารถผสมชีวมวลเพื่อควบคุมปริมาณคลอไรด์หรือโลหะหนัก เป็นต้น (ทิพยวรงค์, 2558; เกียรติศิริโรจน์ และคณะ, 2553)



รูปที่ 6 แผนผังกระบวนการบดย่อยขวดพลาสติก ที่มา: www.jesco.or.jp

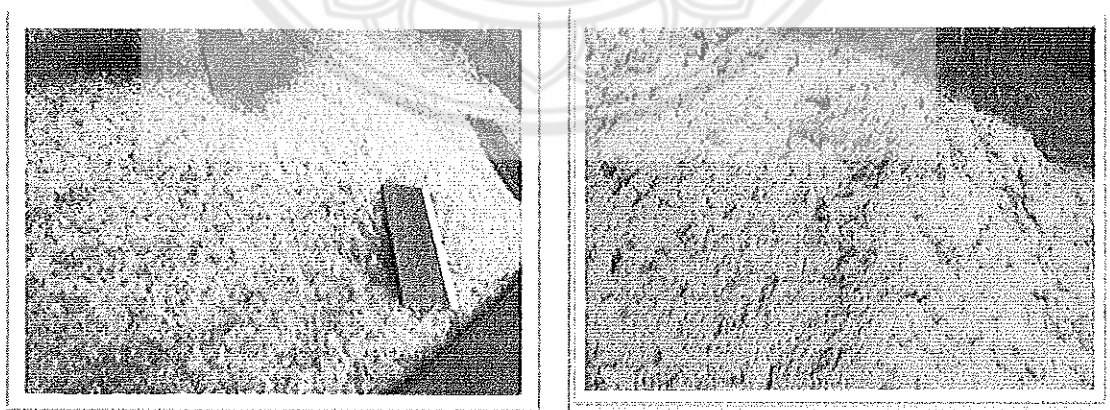


Source: The Council for PET Bottle Recycling

รูปที่ 7 ขั้นตอนการเตรียมขวดพลาสติกก่อนกระบวนการบดย่อย ที่มา: [www.jesco.or.jp](http://www.jesco.or.jp)



รูปที่ 8 เครื่องบดย่อยขวดพลาสติก และเครื่องล้างชิ้นพลาสติก



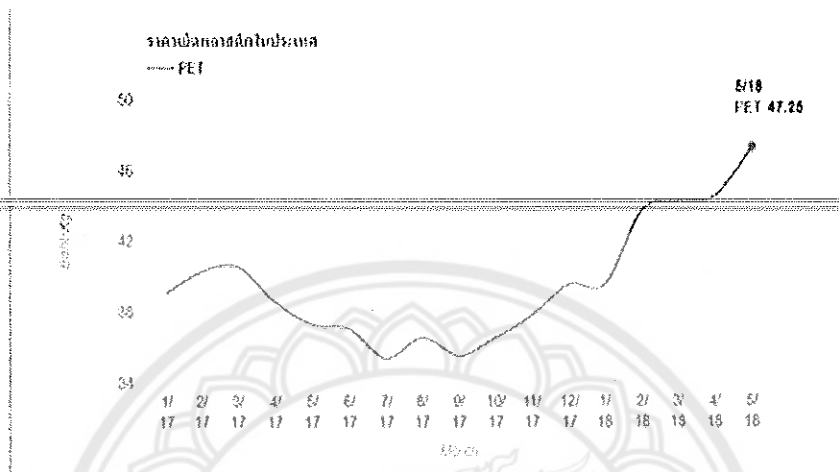
รูปที่ 9 ชิ้นพลาสติกเพทและกากตะกอนพลาสติกที่เกิดจากกระบวนการบดย่อยขวดเพท

## 2.4 ขวดเพทในระบบซื้อขายวัสดุรีไซเคิล

ขวดเพทเป็นพลาสติกที่มีการนำกลับมารีไซเคิลมากที่สุดในบรรดาพลาสติกทั้งหมด อีกทั้งยังมีระบบซื้อขายที่ชัดเจนและมีการซื้อขายแลกเปลี่ยนมาหลายสิบปี มีมูลค่าทางเศรษฐกิจอยู่ในระดับสูง สำหรับธุรกิจรีไซเคิลขวดเพทนั้น เป็นธุรกิจระดับสากลมีการซื้อขายระดับประเทศ ภูมิภาค และระดับโลก แต่สิ่งที่เป็นปัจจัยสำคัญในการเกิดการต่อรองในระดับตลาด คือ ปริมาณที่เก็บกลับคืน (collection rate) และคุณภาพของวัสดุที่เก็บกลับเข้ามา (quality of the incoming material) (Tolinski, 2012) ซึ่งเป็นความท้าทายสำคัญต่อระบบและธุรกิจการรีไซเคิลขวดเพท ดังรายละเอียดดังนี้

1. การรีไซเคิลเพท จะต้องใช้น้ำในปริมาณมาก เพื่อจะทำให้เพทหรือชิ้นส่วนที่ผ่านการบดย่อยสะอาดเพียงพอต่อการนำกลับไปใช้ใหม่ในกระบวนการรีไซเคิล
2. เนื่องจากไม่สามารถทำความสะอาดชิ้นพลาสติกเพท (flake PET) ได้สะอาดเทียบเท่ากับเพทบริสุทธิ์ (virgin PET) ส่วนใหญ่เพทจะถูกแปรสภาพและนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตสินค้าที่มีราคาหรือมูลค่าที่ต่ำกว่าเดิม เช่น เส้นใยเสื้อผ้า ผ้าผ่าน หรือพรมเช็ดเท้า บรรจุภัณฑ์ที่ไม่ใช้สำหรับบรรจุอาหาร (non-food bottles) และเทปกาว เป็นต้น ซึ่งเป็นการลดทอนคุณค่าของวัสดุรีไซเคิล (downcycling) แต่อย่างไรก็ตาม ในประเทศสหรัฐอเมริกา มีความพยายามที่จะนำเพทรีไซเคิล มาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตบรรจุภัณฑ์ที่ใช้สำหรับอาหาร (food bottles) ในปี ค.ศ. 2009 มีรายงานว่า มีการใช้เพทรีไซเคิล มาเป็นวัตถุดิบในการผลิตบรรจุภัณฑ์สำหรับเครื่องดื่มและอาหารสูงถึง 22% ของเพทที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม
3. เนื่องบรรจุภัณฑ์สำหรับเครื่องดื่มและอาหารมีการเติมแต่งสารจำพวกพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (polyvinyl alcohol) ในระหว่างการขึ้นรูปขวดหรือบรรจุภัณฑ์และการทำให้คงตัวด้วยความร้อน (injection/blow-molding and thermoforming) สารเติมแต่งเหล่านั้นอาจปนเปื้อนได้หากมีการนำกลับมาใช้บรรจุอาหารและเครื่องดื่ม
4. ปัจจัยของราคาที่ส่งผลต่อการรีไซเคิลเพท ปริมาณของซัพพลายขวดเพทที่เก็บรวบรวมได้ และถ้าหากราคาเพทรีไซเคิลใกล้เคียงกับราคาเพทบริสุทธิ์จะทำให้ธุรกิจการรีไซเคิลชะงัก เนื่องจากไม่คุ้มทุน และยังมีปัจจัยจากราคาน้ำมันดิบและก๊าซธรรมชาติที่เป็นวัตถุดิบในการผลิตสารตั้งต้นอีกด้วย
5. ปัจจัยของกฎหมาย ระเบียบข้อบังคับ และการสนับสนุนธุรกิจรีไซเคิลขวดเพท ธุรกิจการแปรรูปและการรีไซเคิลขวดเพท อาจจะเป็นธุรกิจที่ไม่เข้าข่ายลักษณะกิจการของโรงงานจัดการกากอุตสาหกรรม ที่เป็นการรับของเสียและกากอุตสาหกรรมทั้งจากโรงงานอุตสาหกรรม และจากบ้านเรือน หรือสำนักงาน มาทำการคัดแยกเป็นวัสดุประเภทต่างๆ เพื่อส่งจำหน่าย (ตามโครงการจัดระดับโรงงานจัดการกากอุตสาหกรรมประเภท 101 105 และ 106) โรงงานประเภทนี้ถือเป็นกลุ่มที่มีจำนวนมากที่สุดและกระจายอยู่ทุกภูมิภาคของประเทศไทย โดยส่วนใหญ่จะเป็นโรงงานขนาดเล็กและการประกอบกิจการจะใช้แรงงานคนในการคัดแยก มีวิธีการที่ไม่ซับซ้อนและไม่มีการแปรรูปหรือผ่านกระบวนการทางอุตสาหกรรมเป็นผลิตภัณฑ์อื่นๆ อีกทั้งของเสียที่เกิดจากกระบวนการคัดแยกมีปริมาณไม่มากและไม่ใช่ของเสียที่เป็นอันตราย (สำนักบริหารจัดการกากอุตสาหกรรมฯ, 2554) ความ

คลุมเครือของข้อกำหนดและระเบียบข้อบังคับ อาจจะทำให้เกิดปัญหาที่เกิดจากความไม่เข้าใจของเจ้าหน้าที่รัฐ และประชาชน รวมทั้งขาดการสนับสนุนทั้งทางด้านการเงินและเศรษฐกิจสังคมที่เกี่ยวข้องกับธุรกิจนี้

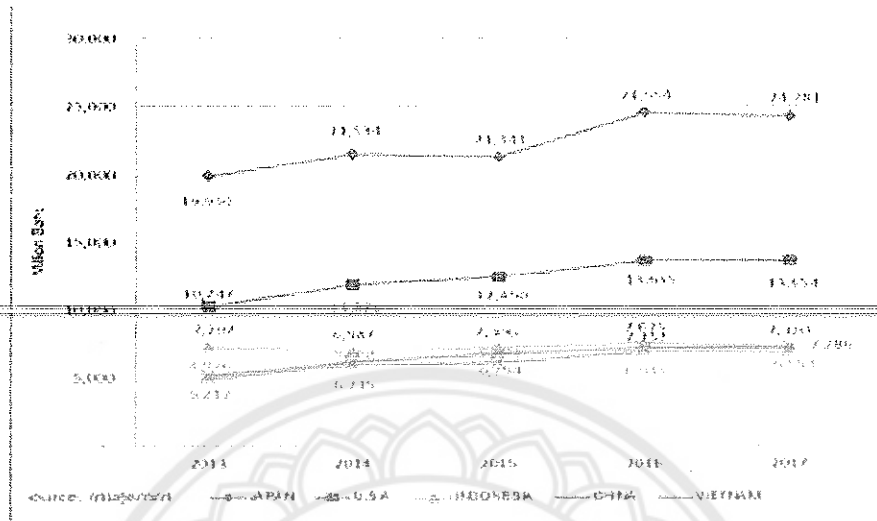


รูปที่ 10 ราคาซื้อขายเม็ดพลาสติกชนิดเพทบริสุทธีในประเทศไทย ตั้งแต่ มกราคม 2560 ถึง พฤษภาคม 2561

ที่มา: <http://plastic.oie.go.th>

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาการซื้อขายพลาสติกรีไซเคิลเกิดขึ้นอย่างแพร่หลายทั่วโลก ราคาซื้อขายพลาสติกในตลาดโลกมีการผันผวนเนื่องจากปัจจัยหลากหลายด้าน รูปที่ 10 แสดงราคาซื้อขายเม็ดพลาสติกเพทบริสุทธีในประเทศไทย ตั้งแต่เดือนมกราคม 2560 ถึงเดือนพฤษภาคม 2561 ตัวอย่างเช่นในเดือนพฤษภาคม 2561 ที่ผ่านมาราคาเม็ดพลาสติกเพทบริสุทธี ราคา 47 บาท/กิโลกรัม ทำให้ราคาซื้อขายเพทรีไซเคิลปรับตัวสูงขึ้นด้วย โดยราคารับซื้อขวดเพทและเพทรีไซเคิลของ บริษัท วงษ์พาณิชย์ จำกัด ประจำเดือนพฤษภาคม 2561 ราคารับซื้อหน้าโรงงาน ประมาณ 7-9 บาท/กิโลกรัม (วงษ์พาณิชย์, 2561) นอกจากนี้ปัจจัยของราคาซื้อขายเพทอาจจะปรับตัวตามแนวโน้มของการส่งออกเม็ดพลาสติกและผลิตภัณฑ์จากพลาสติกไปยัง 5 ประเทศคู่ค้าสำคัญ ได้แก่ ญี่ปุ่น สหรัฐอเมริกา อินโดนีเซีย จีน และเวียดนาม ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นต่อเนื่องจากปี พ.ศ. 2556 แสดงดังรูปที่ 11 ในปี พ.ศ. 2560 มีมูลค่าการส่งออกรวมกัน ประมาณ 59,500 ล้านบาท (ประมาณ 1,800 ล้านดอลลาร์สหรัฐ) ซึ่งแนวโน้มการส่งออกเม็ดพลาสติกและผลิตภัณฑ์จากพลาสติกจากประเทศไทยไปยังประเทศกำลังพัฒนา เช่น จีน เวียดนาม และอินโดนีเซีย มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (สถาบันพลาสติก, 2560) จากข้อสังเกตนี้อาจจะเป็นโอกาสทางการค้าการลงทุนที่สำหรับธุรกิจการรีไซเคิลพลาสติกและการผลิตเม็ดพลาสติกรีไซเคิล จากการสำรวจข้อมูลของกรมควบคุมมลพิษ ในปี พ.ศ. 2550 พบว่ามีร้านรับซื้อของเก่าที่จดทะเบียนถูกต้องทั่วประเทศจำนวน 10,200 ร้าน โดยแยกตามรายภูมิภาคได้ดังนี้ กรุงเทพมหานครและปริมณฑล จำนวน 3,060 ร้าน ภาคกลางและตะวันออก จำนวน 1,632 ร้าน ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จำนวน 1,836 ร้าน ภาคเหนือ จำนวน 1,632 ร้าน และภาคใต้ จำนวน 816 ร้าน นอกจากนี้ยังมีร้านที่ไม่ได้จดทะเบียนอีกเป็นจำนวนมาก (กรมควบคุมมลพิษ, 2554)



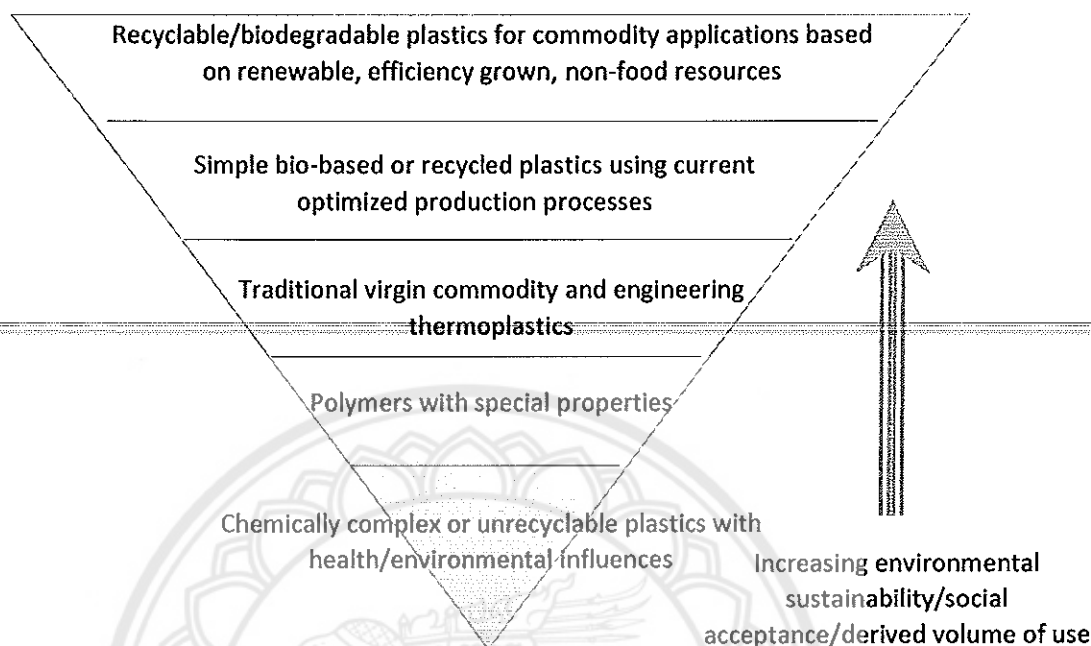


รูปที่ 11 แนวโน้มการส่งออกเม็ดพลาสติกและผลิตภัณฑ์พลาสติกไปยังประเทศคู่ค้า ปี 2556-2560

ที่มา: <http://plastic.oie.go.th>

## 2.5 การพัฒนาพลาสติกที่ได้จากการรีไซเคิล

พลาสติกชีวภาพ (bio-based plastic) และพลาสติกที่มีส่วนผสมของพลาสติกรีไซเคิล (recycled-content plastic) มีการนำไปใช้ในระดับขั้นอุตสาหกรรมและเชิงพาณิชย์มากขึ้น ได้รับการตอบรับอย่างดีและมีการใช้งานกว้างขวางขึ้น เช่น ใช้ผลิตเป็นถาดใส่สำหรับใส่ผักสด ถาดใส่ไข่ ถุงใส่ขนมขบเคี้ยว ซึ่งส่วนใหญ่บรรจุภัณฑ์เหล่านี้ ผลิตได้จากเพทและพอลิเลคติกรีไซเคิล (recycled-PET และ recycled-polyactic acid plastic; re-PLA) และยังใช้ในการผลิตบรรจุภัณฑ์ที่มีสีสั่น ขวดบรรจุน้ำมันเครื่อง ผลิตของเล่นและอุปกรณ์สนาม เต็นท์ ผ้าใบ ตาข่ายไนลอน เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการประเมินว่าการรีไซเคิลขวดเพทจะมีค่าผลรวมของการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก (a net benefit greenhouse gas emission) เท่ากับ 1.5 ตัน-CO<sub>2</sub> ต่อ 1 ตันของเพทรีไซเคิล (ton of CO<sub>2</sub>-e per ton of recycled PET) การรีไซเคิลยังสามารถลดปริมาณก๊าซจากหลุมฝังกลบ (landfill gas) และลดค่าผลรวมของการใช้พลังงานอีกด้วย (Beena, 2017) ในช่วงปี ค.ศ. 2009-2010 มีความพยายามในการนำพลาสติกชนิดอื่นๆ เช่น PVC, LDPE, และ LLDPE ที่ได้จากอุปกรณ์ในสวน फिल्मและไฟเบอร์ทางการเกษตร หรือแม้กระทั่งหลังคาเก่ามารีไซเคิลเป็นผลิตภัณฑ์ เช่น เป็นส่วนผสมในยางมะตอยคอมโพสิตที่มียางรถยนต์และพลาสติกเก่า กล่องและตะกร้าพลาสติก เป็นต้น (Tolinski, 2012) นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาพลาสติกรีไซเคิลในผลิตภัณฑ์หลากหลายรูปแบบ เช่น การพัฒนาเพทรีไซเคิลเป็นเส้นใยที่ใช้สำหรับการขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ (Logan และคณะ, 2017) และใช้เป็นสารประกอบทางเคมีในการถลุงแร่เหล็ก (Polat และคณะ, 2014)



รูปที่ 12 พีระมิดกลับด้านที่เน้นเป้าหมายในการเลือกใช้พลาสติกอย่างยั่งยืน (Tolinski, 2012)

การพัฒนาพลาสติกที่ได้จากการรีไซเคิลสอดคล้องกับเป้าหมายในการเลือกใช้พลาสติกอย่างยั่งยืนที่เสนอโดย Tolinski (2012) ดังรูปที่ 12 แสดงแนวความคิดในการเลือกใช้พลาสติกอย่างยั่งยืน โดยด้านบนสุดแสดงความต้องการใช้พลาสติกในอนาคต ซึ่งจะต้องตอบสนองความต้องการในปริมาณมากและพลาสติกต้องมีคุณลักษณะโดดเด่น เช่น ผลิตได้ในปริมาณมากและผลิตได้ง่าย วัตถุดิบได้มาจากแหล่งวัตถุดิบรีไซเคิลหรือง่ายต่อการรีไซเคิลหรือสามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ ในพีระมิดช่องถัดลงมาจะเป็นพลาสติกที่มีการพัฒนาในระดับอุตสาหกรรมและเป็นสินค้าโภคภัณฑ์ทั่วไป ซึ่งสามารถผลิตจากวัสดุรีไซเคิลได้และมีพื้นฐานของพลาสติกชีวภาพ (bio-based plastics) สามารถผลิตได้ในปริมาณมากและใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในพีระมิดช่องถัดลงมา เป็นพอลิเมอร์จากระบบการผลิตแบบดั้งเดิม (traditional engineering polymers) และพอลิเมอร์เฉพาะทาง (specialized polymers) จำเป็นต้องลดปริมาณการใช้งานหรือใช้เท่าที่จำเป็น และจะต้องมีการพัฒนาให้พอลิเมอร์เหล่านั้นเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เช่น พลาสติกบางชนิดในยานยนต์สามารถใช้ทดแทนเหล็กในโครงสร้าง ช่วยลดน้ำหนักและช่วยในด้านประหยัดพลังงาน เป็นต้น ในพีระมิดช่องสุดท้ายพลาสติกชนิดนี้จะต้องมีการใช้งานน้อยที่สุด ซึ่งเป็นพลาสติกหรือพอลิเมอร์ที่ไม่สามารถรีไซเคิลได้หรือใช้วัตถุดิบที่มีพื้นฐานจากสารเคมีที่เป็นพิษ เช่น คลอรีน สารประกอบอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน สารประกอบที่ก่อมลพิษ และเป็นวัตถุดิบที่เป็นพิษ เป็นต้น ดังที่กล่าวมาข้างต้น การพัฒนาพลาสติกที่ได้จากการรีไซเคิลจะครอบคลุมด้านต่างๆ ได้แก่ การผลิตบรรจุภัณฑ์ ใช้ในการก่อสร้าง ส่วนประกอบยานยนต์ ด้านเชื้อเพลิง รวมถึงนำไปใช้งานที่เฉพาะ (key specialized applications) ซึ่งอย่างน้อยเป็นความก้าวหน้าของการพัฒนาในปัจจุบันและต่อไปในอนาคต

## 2.6 การผลิตเชื้อเพลิงแข็งจากขยะและของเสีย

เชื้อเพลิงแข็งจากขยะ เป็นรูปแบบของการจัดการขยะโดยการปรับปรุงคุณสมบัติและแปลงสภาพของขยะมูลฝอยให้เป็นเชื้อเพลิงแข็งที่มีคุณสมบัติในด้านค่าความร้อน ความชื้น ขนาด และความหนาแน่น ที่เหมาะสมกับการใช้เป็นเชื้อเพลิง และมีองค์ประกอบทั้งทางเคมีและกายภาพที่สม่ำเสมอและเป็นเนื้อเดียวกัน ทั้งนี้ขั้นตอนการและรูปแบบของการเปลี่ยนสภาพจากขยะเป็นเชื้อเพลิงนั้นมีหลากหลาย ขึ้นอยู่กับสภาพของวัสดุและขยะที่นำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงนั้น โดยทั่วไปจะประกอบด้วย การคัดแยก การลดขนาด และการลดความชื้น ซึ่งในแต่ละขั้นตอนจะมีรายละเอียดของเทคโนโลยีที่แตกต่างกันออกไป ทั้งนี้การผลิตเป็นเชื้อเพลิงแข็งเป็นวิธีการหนึ่งที่ยิยมในการจัดการขยะชุมชน (municipal solid waste; MSW) ในปัจจุบัน โดยมีรายละเอียดที่สำคัญที่เกี่ยวข้องดังนี้

### 1. เชื้อเพลิงขยะ

โดยเริ่มจากคัดแยกขยะที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้ เช่น โลหะ เศษแก้ว เศษหินกรวด และขยะอันตราย รวมถึงขยะที่สามารถรีไซเคิลได้ จากนั้นบดเข้าเครื่องสับย่อยและลดขนาด จากนั้นบดเข้าเครื่องเป่าลมร้อนเพื่อไล่ความชื้น ซึ่งขนาดและความชื้นจะลดลงตามมาตรฐานหรือตามความต้องการใช้งาน ในลำดับขั้นต่อไป อาจจะมีการปรับเปลี่ยนรูปแบบเชื้อเพลิงขยะ เช่น การนำไปใช้โดยตรง หรือการนำไปผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง (briquette) และเชื้อเพลิงอัดเม็ด (pellets) เป็นต้น ซึ่งการอัดแท่งและอัดเม็ดนั้น เป็นกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงแข็งจากขยะให้เหมาะสมกับการขนส่ง การเก็บ และการจัดจำหน่าย อีกทั้งยังเป็นการปรับปรุงคุณภาพเชื้อเพลิงเพื่อให้สามารถใช้งานได้โดยตรงกับเตาเผาปูนซีเมนต์ (kiln) หรือเตาเผาของหม้อต้ม (boilers) อื่นๆ หรือใช้งานเป็นเชื้อเพลิงร่วม (co-fuels) ในกระบวนการเผาไหม้อื่นๆ เพื่อลดปริมาณมลพิษและเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้เชื้อเพลิงขยะ (RDF) แบ่งออกได้ 7 ชนิดตามมาตรฐาน ASTM E-75 ดังตารางที่ 1

### 2. คุณสมบัติของเชื้อเพลิงขยะ

ขยะที่จะนำไปแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงขยะนั้น ส่วนใหญ่จะเป็นขยะมูลฝอยชุมชนที่ผ่านการคัดแยกส่วนที่สามารถนำกลับไปใช้ซ้ำได้ เช่น พลาสติก โลหะ อลูมิเนียม แก้ว และคัดแยกอินทรีย์สารที่มีความชื้นสูง เช่น เศษอาหาร เศษผัก-ผลไม้ เป็นต้น ซึ่งสามารถนำไปเป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพ หรือผลิตเป็นสารปรับปรุงดิน ส่วนที่เหลือส่วนใหญ่จะประกอบด้วย กระดาษ ไม้ เศษพลาสติก และอื่นๆ ที่สามารถเผาไหม้ได้ จะถูกนำไปลดขนาดและนำไปใช้ในการเผาโดยตรง หรือนำมาผ่านกระบวนการทำให้แห้งและอัด เพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงแข็ง ทั้งนี้คุณสมบัติทั่วไปของเชื้อเพลิงขยะ มีดังนี้

- ปลอดภัยโรคจากการอบด้วยความร้อนหรือจากการทำให้แห้ง ลดความเสี่ยงต่อการสัมผัสเชื้อโรค
- ไม่มีกลิ่นรบกวน (เมื่อเทียบกับขยะชุมชนทั่วไป)
- มีขนาดเหมาะสม และสม่ำเสมอ (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15-30 มม. และยาว 30-150 มม.)
- มีความหนาแน่นสูงกว่า ส่วนใหญ่เชื้อเพลิงแข็งที่ผ่านการอัดแท่งหรืออัดเม็ดจะมีความหนาแน่นสูงกว่าขยะชุมชนทั่วไปและชีวมวล ( $450-600 \text{ kg/m}^3$ ) ทำให้สะดวกต่อการจัดเก็บและขนส่ง
- มีค่าความร้อนสูง (high heating value) สูงกว่าหรือเทียบเท่าชีวมวล ( $\sim 13-15 \text{ MJ/kg}$ )

- มีความชื้นต่ำและมีค่าการดูดซับความชื้นต่ำ
- มลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้ลดลงเมื่อเทียบกับการเผาขยะชุมชนโดยตรง มลพิษที่สำคัญได้แก่ NOx, HCl ไดออกซินและฟูราน เป็นต้น

ตารางที่ 1 การจัดประเภทและเทคโนโลยีเตาเผาที่รองรับเชื้อเพลิงขยะประเภทต่างๆ

ชนิด	กระบวนการจัดการ	ระบบการเผาไหม้
RDF : municipal solid waste (MSW)	ขยะผ่านการคัดแยกส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้ออกแล้ว แต่ยังมีขนาดใหญ่	stoker, moving-grate stoker
RDF2 : coarse RDF	ผ่านการคัดแยกส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้ออกแล้ว ขยะถูกบดย่อยหรือสับแบบหยาบ เชื้อเพลิงมีขนาด 2-5 นิ้ว	fluidized bed furnace, multiple-fuels furnace, stoker
RDF3 : fluff RDF	ผ่านการคัดแยกส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้ออกแล้ว ขยะถูกบดย่อยหรือสับ มีขนาดเล็กกว่า 2 นิ้ว	stoker
RDF4 : dust RDF	ขยะที่ถูกแปรสภาพให้มีลักษณะเป็นฝุ่นผงละเอียด หรือมีขนาดเล็กกว่า 0.035 นิ้ว	fluidized bed furnace, pulverized furnace
RDF5 : densified RDF	ขยะที่ผ่านการอัดแท่งหรืออัดเม็ด มีความหนาแน่นมากกว่า 600 kg/m <sup>3</sup>	fluidized bed furnace, multiple-fuels furnace,
RDF6 : RDF slurry	ขยะหรือของเสียที่เผาไหม้ได้ ที่อยู่ในรูปของแข็งกึ่งเหลว (slurry)	swirl burner
RDF7 : RDF syn-gas	นำขยะส่วนที่เผาได้มาผ่านกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (gasification) เพื่อผลิต syn-gas สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงแก๊สได้	gas-burner, integrated gasification-combined cycle (IGCC)

### 3. การใช้ประโยชน์จากเชื้อเพลิงขยะ

การใช้ประโยชน์จากเชื้อเพลิงขยะสามารถใช้ได้ทั้งในรูปของการผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อน โดยอาจมีการนำไปใช้ประโยชน์ในสถานที่ผลิตเชื้อเพลิงเอง (on-site) หรือขนส่งไปผลิตที่อื่นภายนอกสถานที่ (off-site) นอกจากนี้ยังสามารถใช้เชื้อเพลิงขยะร่วมกับเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ ได้แก่ ถ่านหิน น้ำมัน แก๊สธรรมชาติ หรือแม้แต่ใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมกับขยะในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ สามารถใช้เชื้อเพลิงขยะในเตาปูนซีเมนต์ได้โดยไม่ต้องปรับเปลี่ยนระบบเตาเผา อีกทั้งยังสามารถเผาพร้อมกับเชื้อเพลิงทดแทนอื่นๆ เช่น เผาพร้อมกับยางรถยนต์เก่า ถ่านหิน และน้ำมันเตา เป็นต้น การใช้ประโยชน์ในเชิงความร้อนและการผลิตไฟฟ้ามีหลายเทคโนโลยีที่นิยมในปัจจุบัน ได้แก่

การใช้เชื้อเพลิงขยะแบบภายในสถานที่ (on-site) ส่วนใหญ่โรงงานจะตั้งอยู่บริเวณบ่อฝังกลบขยะเดิม (old landfill site) จะมีระบบผลิตเชื้อเพลิงจากขยะที่ถูกรื้อ (landfill mined wastes) และขยะสด (fresh-

MSW) จะมีการติดตั้งระบบคัดแยกขยะ ระบบผลิตเชื้อเพลิงขยะ และเตาเผาขยะภายในบริเวณหรือห่างออกไปไม่ไกล สามารถจัดการได้ด้วยตัวเองโดยฝังกลบบริเวณบ่อฝังกลบเดิม แต่มีข้อด้อยคือจะต้องมีระบบบำบัดน้ำเสียภายในโครงการและส่วนใหญ่โครงการจะตั้งอยู่ภายในบ่อฝังกลบซึ่งอยู่ห่างไกลจากระบบสาธารณสุขปึกและชุมชน

การใช้เชื้อเพลิงขยะแบบภายนอกสถานที่ (off-site) ส่วนใหญ่เชื้อเพลิงขยะจะถูกนำไปใช้นอกพื้นที่ผลิตหรือสถานที่คัดแยกขยะ ซึ่งจะต้องมีการขนส่งออกนอกพื้นที่ไปยังโรงงานรับซื้อเชื้อเพลิงขยะหรือจะเป็นโรงงานรับซื้อเชื้อเพลิงแข็งจากชีวมวลหรือขยะชุมชนที่สามารถเผาไหม้ได้ และอาจจะมีขั้นตอนเพิ่มเติมเพื่อเป็นผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดและอัดแท่ง จะมีข้อดีคือสามารถตั้งอยู่ในนิคมอุตสาหกรรมหรือสถานที่ตั้งไม่ไกลจากชุมชนมากนัก สามารถใช้ระบบบำบัดน้ำเสียและบ่อฝังกลบร่วมกับนิคมอุตสาหกรรมได้ แต่ข้อด้อยคือต้องมีค่าใช้จ่ายในการขนส่ง และสามารถรับเฉพาะขยะที่ผ่านการคัดแยกแล้วเท่านั้น

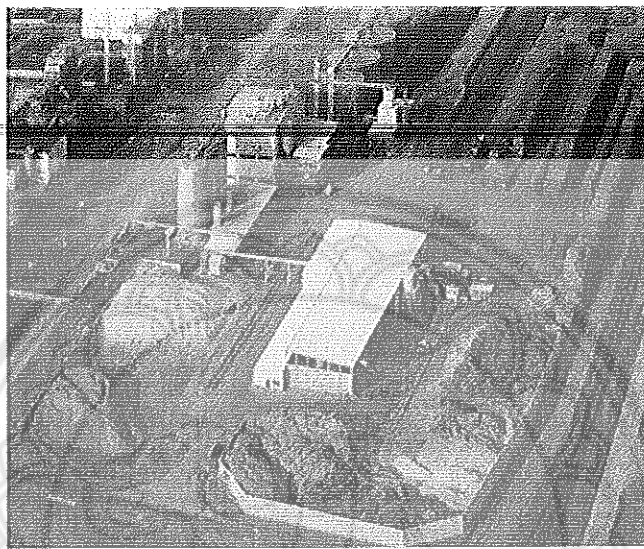
## 2.7 การผลิตเชื้อเพลิงแข็งด้วยการอัด

การผลิตเชื้อเพลิงแข็งโดยการแปลงสภาพทางกายภาพ หรือเรียกว่า การผลิตเป็นเชื้อเพลิงแข็งอัด มีการศึกษาอย่างต่อเนื่อง ตั้งแต่ก่อนปี ค.ศ.1888 จนถึงปัจจุบัน ซึ่งจะเป็นกระบวนการแปลงสภาพเชื้อเพลิงแข็งทั่วไปให้เป็นเชื้อเพลิงแข็งที่มีคุณภาพดีขึ้น โดยการนำมาอัดให้อยู่ในรูปของ ก้อน เม็ด ลูกบาศก์ หรือแท่ง ซึ่งเป็นการปรับปรุงทั้งคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี สามารถเก็บรักษาได้ง่าย สะดวกต่อการขนส่ง สะดวกต่อการใช้งาน มีความเป็นเนื้อเดียวกันสูง ปริมาณการปล่อยมลพิษต่ำ ขนาดที่สม่ำเสมอ ความชื้นน้อย และค่าความร้อนจะมีค่าใกล้เคียงกับเชื้อเพลิงเชิงพาณิชย์ทั่วไป แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการนี้ยังมีข้อด้อย เช่น ต้องใช้เงินลงทุน ต้องใช้พลังงานในการผลิต เชื้อเพลิงแท่งอาจจุดติดไฟยาก เกิดควันจากการเผาที่ไม่สมบูรณ์ อีกทั้งยังมีปัญหาเมื่ออยู่ในสภาวะอากาศที่มีความชื้นสูง เป็นต้น (Zhao และคณะ, 2015; ทิพย์วาศ์, 2558)

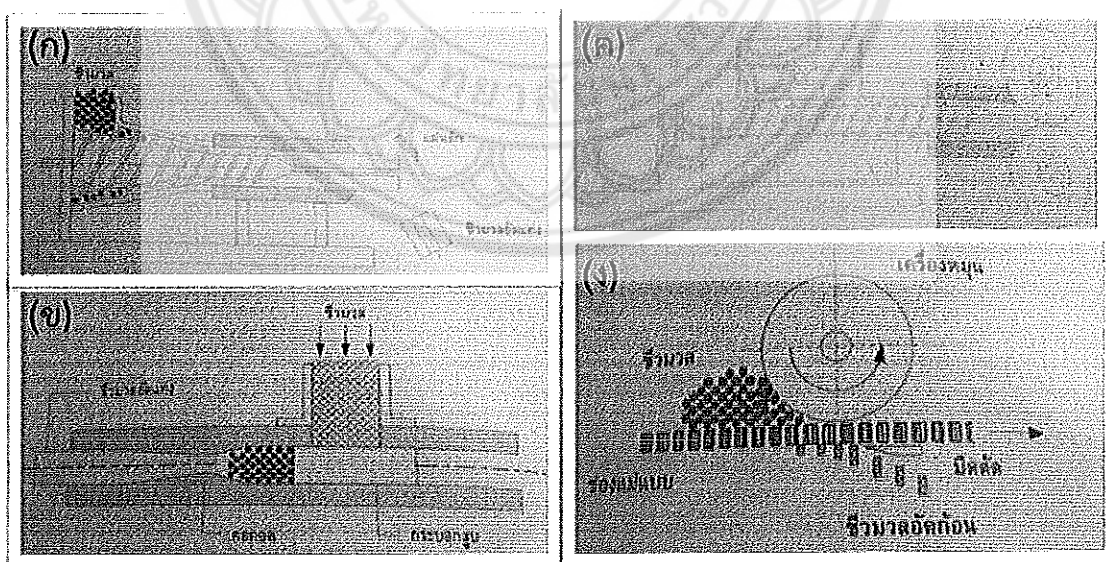
การอัด คือ การทำให้เป็นก้อน เช่น การอัดอนุภาคให้อยู่ในปริมาตรจำกัด ความแข็งแรงของวัตถุดิบอัดก้อนขึ้นอยู่กับแรงวานเดอร์วาลส์ (van de Waals force), พันธะโควาเลนต์ (covalence force), แรงไฟฟ้าสถิต (electrostatic force) หรือการเกาะลือระหว่างกัน (interlocking) ถ้าวัตถุดิบมีเนื้อสารละเอียดจะเปลี่ยนรูปภายใต้แรงอัดที่ความดันสูงโดยไม่ต้องใช้ตัวผสม (binder) วัตถุดิบบางชนิดมีคุณสมบัติในการเปลี่ยนเป็นตัวผสมภายใต้สภาวะแรงดัน ในขณะที่วัตถุดิบบางชนิดจำเป็นต้องใช้ตัวผสม เช่น ลิกนิน เพคติน ไซ แวกซ์ แป้ง น้ำมัน และตัวเติมอื่นๆ ปัจจุบันเทคโนโลยีการอัดแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ การอัดร้อนที่ความดันสูง และการอัดเย็นที่ความดันต่ำ นอกจากนี้ในทางปฏิบัติสามารถแบ่งตามวิธีการผลิต ได้แก่ การอัดแบบต่อเนื่อง และการการอัดแบบไม่ต่อเนื่อง (ทิพย์วาศ์, 2558) รูปที่ 13 แสดงบริเวณรอบโรงงานผลิตเชื้อเพลิงแข็งอัดจากชีวมวล และรูปที่ 14 (ก)-(ง) แสดงเทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงอัดจากชีวมวล

การผลิตเชื้อเพลิงแข็งอัด (solid fuels) ในระบบสากลจะนิยมเรียกว่า เชื้อเพลิงขยะ SRF หรือ RDF กล่าวโดยย่อ เชื้อเพลิง SRF เป็นการเรียกกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงแข็งอัดที่ได้จากวัสดุที่ผ่านการคัดเลือกเฉพาะวัสดุที่เผาไหม้ได้ (combustible) และเป็นวัสดุไม่อันตราย (non-hazardous) และเชื้อเพลิง RDF เป็นการเรียก

กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงแข็งที่ได้จากการใช้ขยะชุมชนทั้งแบบขยะใหม่และขยะรีไซเคิล (fresh MSW และ landfill mining) การผลิตเชื้อเพลิงทั้งสองชนิดจะมีลักษณะเหมือนกัน คือ จะมีโรงงานคัดแยกและบดสับก่อนเข้าสู่ขั้นตอนการผลิตเชื้อเพลิงแข็งอัด (Di Lonardo และคณะ, 2016) ซึ่งกระบวนการดังกล่าวมีลักษณะคล้ายกัน



รูปที่ 13 โรงงานผลิตเชื้อเพลิงอัดจากชีวมวล ที่มา: Doring และ van Renouard (2013)



รูปที่ 14 (ก) เครื่องอัดเชื้อเพลิงแบบสกรู, (ข) เครื่องอัดเชื้อเพลิงแบบกระบอกสูบ และ (ค) เครื่องอัดเชื้อเพลิงแบบกลิ้ง, (ง) เครื่องอัดเม็ดเชื้อเพลิงแบบตายต์อัด ที่มา: ทิพยาวงศ์, 2558

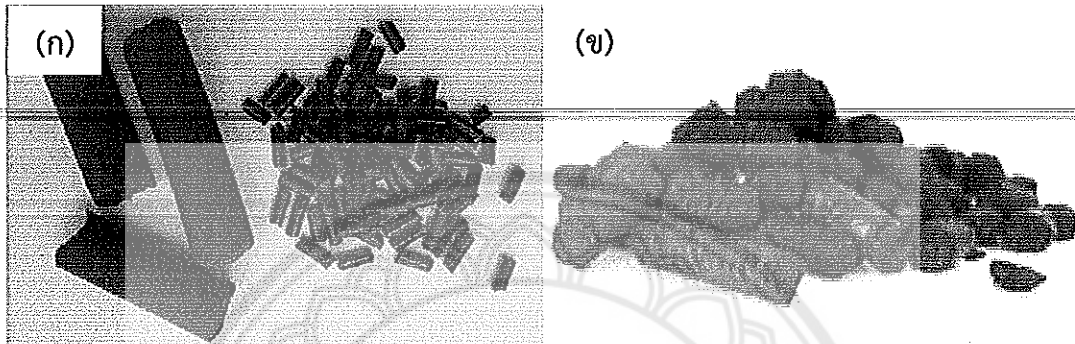
จากรายงานผลการทดลองของ Akdag และคณะ, (2016) พบว่าคุณสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากขี้เถ้ามีปริมาณเถ้า (ash content) (12-15%) น้อยกว่าถ่านหินเล็กน้อย (17.2%) ในขณะที่เดียวกัน RDF มีปริมาณสารระเหย (volatile matter) มากกว่าถ่านหิน และปริมาณคาร์บอนคงตัว (fixed carbon) น้อยกว่าถ่านหิน การทดสอบการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง RDF พบว่ามีประสิทธิภาพการเผาไหม้ (combustion efficiency) อยู่ในช่วง 94.5-96.0% เนื่องจากขณะเผาไหม้เชื้อเพลิง RDF จะเกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) อยู่ในสัดส่วนที่สูงกว่าการเผาไหม้ถ่านหิน (99.0-99.9%) แต่อย่างไรก็ตามผู้วิจัยเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้เชื้อเพลิง RDF ด้วยการเผาไหม้ร่วมกับถ่านหิน (co-combustion) จากการทดลองพบว่าการเผาไหม้ร่วมกับถ่านหินทำให้ปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO<sub>2</sub>) ลดลง เนื่องจากเชื้อเพลิง RDF มีปริมาณซัลเฟอร์น้อยกว่าถ่านหินและประสิทธิภาพการเผาไหม้เพิ่มสูงขึ้นกว่าการเผาไหม้เชื้อเพลิง RDF เพียงอย่างเดียว

## 2.8 การปรับปรุงคุณภาพเชื้อเพลิงอัดด้วยกระบวนการทอริแฟคชัน

กระบวนการปรับปรุงคุณภาพเชื้อเพลิง (pretreatment) ด้วยกระบวนการทอริแฟคชัน (torrefaction) เป็นแนวทางหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพเชื้อเพลิงแข็ง กระบวนการทอริแฟคชัน คือ กระบวนการทางความร้อนที่ต้องการแปลงสภาพวัตถุดิบหรือเชื้อเพลิง โดยใช้อุณหภูมิไม่สูงนัก ประมาณ 200-400 องศาเซลเซียส (°C) ภายใต้สภาวะที่มีหรือไม่มีออกซิเจน หรือเรียกได้ว่าเป็นกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิต่ำ (mild pyrolysis) หรือการคั่ว (roasting) โดยทั่วไปกระบวนการทอริแฟคชันนิยมใช้ในการเตรียมเชื้อเพลิงชีวมวลหรือเชื้อเพลิงจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร (Chew และคณะ, 2011) นอกจากนี้กระบวนการทอริแฟคชันสามารถเพิ่มคุณสมบัติของเชื้อเพลิงแข็งได้หลายประการ เช่น คุณสมบัติด้านพลังงาน (energetic value) เพิ่มคุณสมบัติการไม่จับความชื้น (hydrophobicity) และเพิ่มความแข็งแกร่งของเชื้อเพลิง (friability) (Chew และคณะ, 2011) ลักษณะทางกายภาพของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากชีวมวลและเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ผ่านกระบวนการทอริแฟคชัน แสดงดังรูปที่ 15 ซึ่งแท่งเชื้อเพลิงที่ได้หลังจากกระบวนการทอริแฟคชันอาจมีคุณสมบัติที่ดีกว่าถ่านหิน แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการทอริแฟคชันที่อุณหภูมิที่เหมาะสมจะช่วยลดปัญหาที่เกิดจากสารอะโรมาติก (BTEX, PAHs, etc.) สารประกอบซัลเฟอร์ (sulfur compounds) สารประกอบโลหะคลอไรด์ (metal chlorides) เป็นต้น ซึ่งการใช้เทคโนโลยีนี้เป็นการเพิ่มทางเลือกของการใช้ชีวมวลทดแทนถ่านหิน (Tsai และคณะ, 2012) ดังนั้นกระบวนการแปลงสภาพเชื้อเพลิงทั้งการอัดแท่งและการทอริแฟคชัน เป็นหัวข้อวิจัยที่น่าสนใจและจะนำมาประยุกต์ในการศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากชีวมวลอุตสาหกรรม

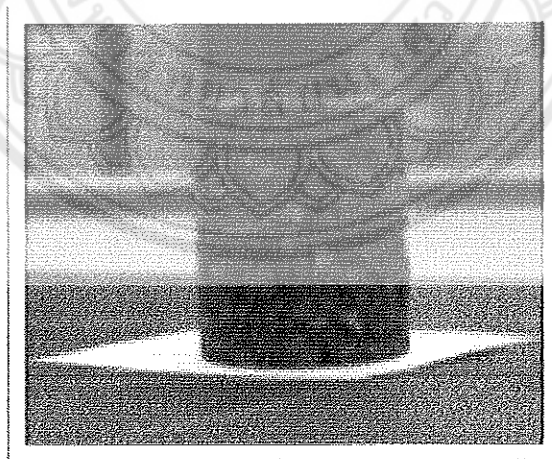
รายงานการวิจัยของ Yue และคณะ, (2017) ศึกษาเกี่ยวกับการนำชีวมวลข้าวฟ่างไปผ่านกระบวนการทอริแฟคชันเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิง พบว่า กระบวนการทอริแฟคชันที่อุณหภูมิ 100-200 °C เป็นช่วงอุณหภูมิที่น้ำระเหยออกจากชีวมวล นอกจากนี้ถ้าอุณหภูมิในการทอริแฟคชันและออกซิเจนในชีวมวลลดลง การทำปฏิกิริยาคายความร้อนของเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสบางส่วนจะส่งผลทำให้ค่าของพลังงานความร้อนลดลงที่อุณหภูมิ 300 °C และทำให้อัตราส่วนออกซิเจนต่อคาร์บอน (O/C) และอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอน (H/C) ลดลงตามไปด้วยเนื่องจากหมู่ไฮดรอกซิลในชีวมวลลดลง นอกจากนี้ในงานวิจัยยังพบว่ากระบวนการทอริแฟคชัน

สามารถทำให้ค่าความชื้นของชีวมวลข้าวฟ่างลดลง โดยการทอริแฟคชันที่อุณหภูมิ 300 °C มีค่าความชื้นลดลงร้อยละ 4.37 จากชีวมวลข้าวฟ่างที่ไม่ผ่านกระบวนการทอริแฟคชันซึ่งมีค่าความชื้นร้อยละ 9.29 และสามารถทำให้ค่าความร้อนสูงสุดของชีวมวลข้าวฟ่างเพิ่มขึ้น 26.88 เมกะจูล/กิโลกรัม (MJ/kg) จากชีวมวลข้าวฟ่างที่ไม่ผ่านกระบวนการทอริแฟคชันซึ่งมีค่าความร้อนสูงสุด 16.45 MJ/kg ซึ่งสามารถที่จะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมได้



รูปที่ 15 (ก) เชื้อเพลิงอัดแท่ง-อัดเม็ดผลิตจากชีวมวล และ (ข) เชื้อเพลิงอัดแท่งที่ผ่านกระบวนการทอริแฟคชัน

รูปที่ 16 เชื้อเพลิงอัดแท่งจากขยะพลาสติก เป็นการนำขยะที่โดยปกติแล้วเป็นปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมมาผลิตเป็นพลังงานในรูปแบบต่างๆ ถือได้ว่าเป็นการใช้ทรัพยากรอย่างมีคุณค่า เป็นการแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อมควบคู่กับการแก้ปัญหาด้านพลังงาน การผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดเพื่อใช้ทดแทนเชื้อเพลิงชีวมวล และเชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นแนวทางที่น่าสนใจในการวิจัย เนื่องจากปริมาณขยะพลาสติกเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง (Punin และคณะ, 2014)



รูปที่ 16 เชื้อเพลิงอัดแท่งจากขยะพลาสติก

ตารางที่ 2 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพและค่าความร้อน และองค์ประกอบทางเคมีของพลาสติก วัสดุเหลือทิ้งและเชื้อเพลิงขยะ พบว่าคุณสมบัติทางกายภาพโดยเฉพาะปริมาณสารระเหย (volatile matter; VM) ของพลาสติกชนิดพอลิพรอโพลีน/พอลิเอทิลีน (PP/PE), พอลิเอทิลีนเทอเรฟทาเลต (PET) และพอลิสไตรีน (PS) มีค่า



ต่างกันเล็กน้อย ในขณะที่ค่าความชื้น และปริมาณเถ้าอยู่ในเกณฑ์เดียวกัน ค่าความร้อนต่ำ (LHV) ของพลาสติกชนิด PET มีค่าต่ำกว่า PP/PE และ PS แต่สูงกว่าวัสดุอื่นๆ ได้แก่ ฝ้าย ชีวมวล ขยะจากการรีไซเคิล กระจก รวมถึงเชื้อเพลิงขยะอีกด้วย ซึ่งจะเห็นได้ว่า PET มีคุณสมบัติเชิงกายภาพและพลังงานที่เหมาะสมกับการใช้เป็นเชื้อเพลิง (Zhao และคณะ, 2015)

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกายภาพและค่าความร้อนของพลาสติกและวัสดุอื่นๆ ที่มา: Zhao และคณะ, (2015)

ตัวอย่าง	คุณสมบัติ			
	MC (%)	AC (%)	VM (%)	LHV (MJ/g)
PP/PE	0.06	0.03	99.40	43.20
PS	0.12	0.02	99.80	39.90
PET	0.50	0.10	94.60	21.90
Textile	5.40	0.90	93.60	16.60
Landfill mining materials	21.20	8.10	63.30	14.10
Paper	7.10	17.10	75.60	12.10
Biomass waste	73.80	1.10	21.40	14.10
RDF (Piao et al, 1998)	11.10	16.40	72.50	18.40

LHV คือ Low heating value (ค่าความร้อนต่ำ)

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของพลาสติกและวัสดุอื่นๆ ที่มา: Zhao และคณะ, (2015)

ตัวอย่าง	สัดส่วนธาตุ (%)				
	C	H	N	O	Cl
PP/PE	85.31	14.31	0.01	0.08	0.00
PS	92.08	7.83	0.00	0.00	0.00
PET	61.65	4.19	0.00	31.57	0.00
Textile	48.51	5.86	0.24	44.84	0.01
Landfill mining materials	57.93	5.62	2.11	36.21	0.06
Paper	37.81	5.51	0.07	44.74	0.10
Biomass waste	45.36	7.40	1.83	49.35	0.80
RDF (Piao et al, 1998)	41.70	6.00	0.75	36.30	1.00

ตารางที่ 3 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของพลาสติกชนิดพอลิพรอโพลีน/พอลิเอทิลีน (PP/PE), พอลิเอทิลีนเทอแรพทาเลต (PET) และพอลิสไตรีน (PS) พบว่าปริมาณคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ไนโตรเจน (N) และ

ออกซิเจน (O) มีค่าแตกต่างกันเนื่องจากพลาสติกแต่ละชนิดผลิตจากสารตั้งต้นต่างชนิดกัน ข้อสังเกตสัดส่วนออกซิเจนที่มีมากในพลาสติกชนิด PET เนื่องจากหมู่เอสเทอร์ของพอลิเมอร์ชนิดนี้ และยังพบว่าตัวอย่างพลาสติกทั้ง 3 ชนิด ไม่สามารถตรวจวัดปริมาณของคลอไรด์ ซึ่งวัสดุชนิดอื่นๆ เช่น ผ้า กระดาษ ชีวมวล เชื้อเพลิงขยะและขยะจากการรื้อหลุม มีปริมาณคลอไรด์อยู่ในช่วง 0.01-1.00 % โดยน้ำหนัก ซึ่งคลอไรด์ (Cl) ในเชื้อเพลิงอาจส่งผลต่อระบบการเผาไหม้หากเกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ เนื่องจากคลอไรด์อาจรวมตัวกับการประกอบอะโรมาติกกลายเป็นฟูราน ไดออกซิน หรือกลายเป็นกรดไฮโดรคลอริกได้ (Zhao และคณะ, 2015)

ตารางที่ 4 แสดงการปนเปื้อนโลหะหนักในพลาสติกและวัสดุอื่นจากผลการทดลองของ Zhao และคณะ, (2015) พบว่า โลหะหนักทั้งหมดที่ปนเปื้อนอยู่ในพลาสติกชนิด PET มีค่าต่ำที่สุด โดยตรวจไม่พบแคดเมียม (cadmium; Cd) และทองแดง (copper; Cu) ในส่วนของโครเมียม (chromium; Cr) และตะกั่ว (lead; Pb) อยู่ในระดับ 2.0 และ 3.6 ppm ตามลำดับ นอกจากนี้คุณสมบัติทางด้านพลังงานแล้ว ปริมาณมลพิษและเถ้าลอยจากการเผาไหม้ และโลหะหนักที่ปนเปื้อนในเถ้าหนักเป็นอีกหนึ่งพารามิเตอร์ที่จะต้องศึกษาและวิเคราะห์ เนื่องจากของเสียและกากตะกอนที่ได้จากกระบวนการบำบัดย่อยขวดพลาสติกมีลักษณะที่ซับซ้อนและมีพลาสติกหลายชนิดผสมกันและอาจเกิดการปนเปื้อนโลหะหนักจากขั้นตอนการผลิตได้ นอกจากนี้โลหะหนักที่มีจุดหลอมเหลวต่ำจำพวกปรอท (mercury; Hg) เป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่ต้องตรวจวัดในกรณีที่มีการผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ด (Rada และ Andreottola, 2012)

ตารางที่ 4 โลหะหนักที่ปนเปื้อนอยู่ในพลาสติกและวัสดุอื่นๆ ที่มา: Zhao และคณะ (2015)

ตัวอย่าง	โลหะหนัก (ppm)						
	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Zn	Ni
PP	0.02	1.2	0.6	0.7	3.8	ND	2.9
PET	ND	2.0	ND	0.7	3.6	ND	0.4
LDPE	5.60	3.2	8.0	6.2	19.0	96.0	4.0
HDPE	3.90	1.6	2.0	2.0	11.5	17.3	2.7
PS	ND	2.5	ND	0.7	4.9	61.0	3.0
Paper	0.10	4.0	54.0	14.0	6.1	23.0	2.3
Textile	0.10	2.5	4.5	2.6	4.2	25.0	3.7
Landfill mining material	ND	9.2	62.0	46.0	43.0	230.0	3.4
Biomass waste	0.01	0.5	1.4	7.2	2.8	24.0	0.8

ND คือ ไม่สามารถตรวจวัดได้

การศึกษาวิจัยด้านการผลิตเชื้อเพลิงขยะ จากขยะมูลฝอยชุมชนในประเทศไทยมีมาช้านานแล้ว อย่างไรก็ตามการผลิตเชื้อเพลิงอัดจากกากตะกอนพลาสติกที่เกิดจากขั้นตอนการบดย่อยขวดพลาสติกยังไม่มีรายงาน และในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากขยะและของเสียที่เกิดจากขั้นตอนการบดย่อยขวดพลาสติกโดยเฉพาะขวดเพท การอัดเม็ดเชื้อเพลิงในงานวิจัยนี้จะใช้เครื่องอัดเม็ดแบบไฮดรอลิกและแบบด้ายอัด โดยกากตะกอนพลาสติกจะถูกคัดขนาดและกำจัดสิ่งปนเปื้อน ใช้ชีวมวลจากชี้เส้อยไม้สักและมีน้ำเป็นตัวผสม รวมถึงการปรับปรุงคุณสมบัติเชื้อเพลิงโดยการทอริแฟคชั่น การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี รวมถึงคุณสมบัติเชิงความร้อนและพลังงานของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผลิตได้ การทดสอบมลพิษและสิ่งคงค้างหลังการเผาไหม้ การศึกษาและประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เบื้องต้น ซึ่งข้อมูลที่ได้สามารถนำไปใช้เป็นแหล่งอ้างอิงในการพัฒนากระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากตะกอนและของเสียที่เกิดจากระบบรีไซเคิลพลาสติก เพื่อเพิ่มมูลค่าของของเสียนั้น และใช้เป็นแนวทางในการจัดการขยะและของเสียที่เกิดจากขั้นตอนการบดย่อยขวดพลาสติกให้แก่ผู้ประกอบการ และเป็นวิธีการปิดวงจรของการรีไซเคิลพลาสติกได้อย่างเหมาะสม

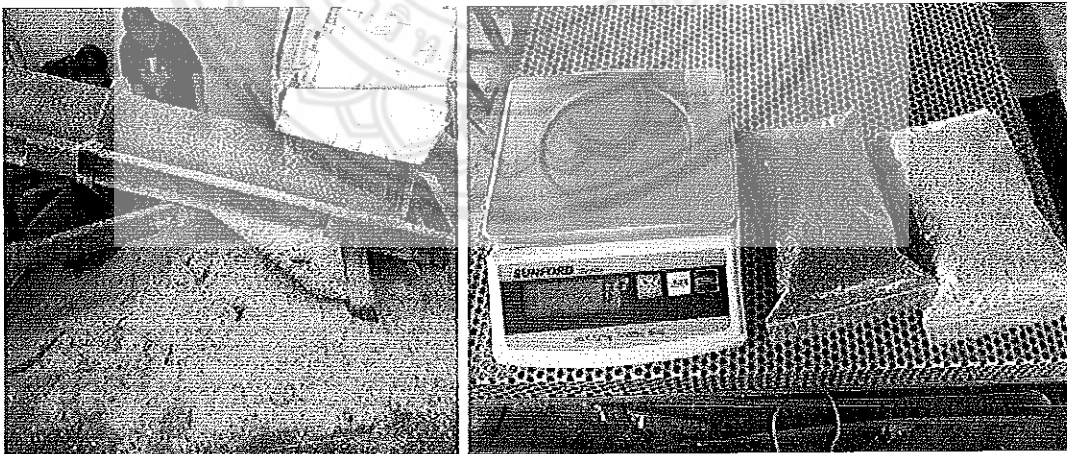




### บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย

#### 3.1 การลงพื้นที่และเตรียมตัวอย่าง

จากการลงพื้นที่เก็บข้อมูลจากโรงงานรับซื้อและบดย่อยขวดพลาสติกขนาดเล็ก อำเภอเวียงสา จังหวัดน่าน โรงงานมีกำลังการผลิตขึ้นพลาสติกจากขวดPET ประมาณ 3-6 ตัน/วัน และมีปริมาณกากตะกอนพลาสติกโดยเฉลี่ยจากตะกอนPET ประมาณ 0.2-0.4 ตัน/วัน โดยกากตะกอนพลาสติกจะมีลักษณะเป็นเกล็ด ขุย ผุ่นผง กาก ตะกอนและของเสียที่เกิดจากการขัดสีของเครื่องจักรอยู่ปะปนกัน และจากการสังเกตจะมีพลาสติกชนิดอื่นผสมอยู่บ้างเล็กน้อย เช่น PP, PVC, และ PS เป็นต้น เนื่องจากขณะบดย่อยอาจมีการปนเปื้อนของพลาสติกชนิดอื่นหรือพลาสติกที่หลงเหลือจากการคัดแยก เช่น ฝา พลาสติกซีลฝา พลาสติกห่อหุ้มขวด พลาสติกตกค้างอื่นๆ เป็นต้น โดยในที่นี้จะเรียกว่า “กากตะกอนพลาสติก” การสุ่มเก็บตัวอย่างกากตะกอนพลาสติกโดยทำการเก็บตัวอย่างจากบริเวณเครื่องบดย่อย บ่อล้าง ตะแกรงร่อนขนาด และเก็บจากบริเวณบ่อบำบัดน้ำเสีย โดยจะเก็บตัวอย่างกากตะกอนพลาสติกที่มีลักษณะแห้ง แล้วบรรจุในกระสอบและเก็บไว้ในชั้นต่อไป การเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบและสำหรับผลิตเป็นเชื้อเพลิง โดยนำกากตะกอนพลาสติกมาผึ่งและอบแห้งอีกครั้ง จากนั้นบดละเอียด ทำให้มีขนาดเท่ากันโดยการร่อนผ่านตะแกรงร่อน (ขนาด <math><1.0-2.5</math> มิลลิเมตร ; sieve no. 8-12) ซึ่งน้ำหนักและบรรจุลงในถุงพลาสติกแบบซีป ดังรูปที่ 17 และทำการเก็บตัวอย่างซีลี้อยู่ไม้สักจากบริเวณโรงเลื่อยไม้สักชุมชน อำเภอสูงเม่น จังหวัดแพร่ ซีลี้อยู่ไม้สักที่ตากแห้งแล้ว จะถูกบดละเอียดอีกครั้งและร่อนคัดขนาดให้มีขนาดเท่ากับกากตะกอนพลาสติก



รูปที่ 17 การลงพื้นที่เก็บตัวอย่างกากตะกอนพลาสติกและเตรียมตัวอย่างก่อนการทดสอบ

### 3.2 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและเคมี

#### 3.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพ (proximate analysis) ทดสอบดังนี้

ค่าความชื้น (moisture content; MC) การหาค่าปริมาณความชื้น ทำได้โดยนำกระตงฟอยล์ที่แห้งและสะอาด ไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง จากนั้นใส่ตัวอย่างลงในกระตงฟอยล์หนัก  $1 \pm 0.0005$  กรัม นำไปอบในตู้อบ (hot air oven) ที่อุณหภูมิ  $110^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำกระตงฟอยล์และตัวอย่างมาลดอุณหภูมิโดยปล่อยให้เย็นในเดสิคเคเตอร์ 2 ชั่วโมง แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก (ทำอย่างน้อย 3 ซ้ำ) และคำนวณหาปริมาณความชื้นของตัวอย่าง โดยคำนวณจากสมการ (1)

$$\text{MC (\%)} = ((B-(C-A))/B) \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ A คือ น้ำหนักของกระตงฟอยล์ก่อนการอบ (กรัม)

B คือ น้ำหนักของตัวอย่างก่อนการอบ (กรัม)

C คือ น้ำหนักรวมของกระตงฟอยล์ (กรัม) และตัวอย่างหลังการอบ (กรัม)

ปริมาณเถ้า (ash content; AC) ทำได้โดยนำครุชีเบลที่ผ่านการเผาทำความสะอาด (ที่อุณหภูมิ  $600^\circ\text{C}$  เวลา 1 ชั่วโมง แล้วเก็บไว้ในเดสิคเคเตอร์ 24 ชั่วโมง) มาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง จากนั้นใส่ตัวอย่าง  $1 \pm 0.0005$  กรัม นำไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ  $650^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นในเดสิคเคเตอร์เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำตัวอย่างมาชั่งน้ำหนัก (ทำอย่างน้อย 3 ซ้ำ) และคำนวณหาปริมาณเถ้า ดังสมการ (2)

$$\text{AC (\%)} = (D/B) \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ B คือ น้ำหนักของตัวอย่างก่อนการเผา (กรัม)

D คือ น้ำหนักของตัวอย่างหลังการเผา (กรัม)

ปริมาณสารระเหย (volatile matter; VM) ทำได้โดยนำครุชีเบลที่ผ่านการเผาทำความสะอาด (ที่อุณหภูมิ  $600^\circ\text{C}$  เวลา 1 ชั่วโมง แล้วเก็บไว้ในเดสิคเคเตอร์ 24 ชั่วโมง) มาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง จากนั้นใส่ตัวอย่าง  $1 \pm 0.0005$  กรัม จากนั้นนำไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ  $900^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 7 นาที แล้วปล่อยให้เย็นในเดสิคเคเตอร์เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำมาชั่งน้ำหนัก (ทำอย่างน้อย 3 ซ้ำ) และคำนวณปริมาณสารระเหย ดังสมการ (3)

$$\text{VM (\%)} = ((B-(C-A))/B) \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ A คือ น้ำหนักของครุชีเบลก่อนการเผา (กรัม)

B คือ น้ำหนักของตัวอย่างก่อนการเผา (กรัม)

C คือ น้ำหนักรวมของครุซิปเบล (กรัม) และตัวอย่างหลังการเผา (กรัม)

ปริมาณคาร์บอนคงตัว (fixed carbon; FC) คำนวณได้จากการนำผลต่างของค่าร้อยละของปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณเถ้า ดังสมการ (4)

$$FC = 100 - (MC + VM + AC) \quad (4)$$

### 3.2.2 คุณสมบัติทางเคมี (ultimate analysis)

ตัวอย่างวัตถุดิบและเชื้อเพลิงอัดเม็ดถูกส่งไปวิเคราะห์ที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ปริมาณธาตุพื้นฐาน (elemental analysis) ได้แก่ คาร์บอน (carbon; C) ไฮโดรเจน (hydrogen; H) ไนโตรเจน (nitrogen; N) ออกซิเจน (oxygen; O) และซัลเฟอร์ (sulfur; S) โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ธาตุแบบการเผาไหม้ตัวอย่าง (elemental analysis-combustion type, Leco instrument) เทคนิคนี้จะใช้หลักการเผาไหม้สมบูรณ์ของสารอินทรีย์และอนินทรีย์ในตัวอย่างให้กลายเป็นก๊าซและตรวจวัดความเข้มข้นเพื่อคำนวณเป็นปริมาณธาตุพื้นฐาน และจากปริมาณธาตุพื้นฐานของตัวอย่างสามารถคำนวณค่าความร้อนสูง (high heating value; HHV, MJ/kg) โดยใช้สมการของ Nhuchhen และ Afzal (2017) ดังสมการ (6)

$$HHV = 32.7934 + 0.0053C^2 - 0.5321C - 2.8769H + 0.0608CH - 0.2401N \quad (6)$$

เมื่อ C คือ สัดส่วนของธาตุคาร์บอน

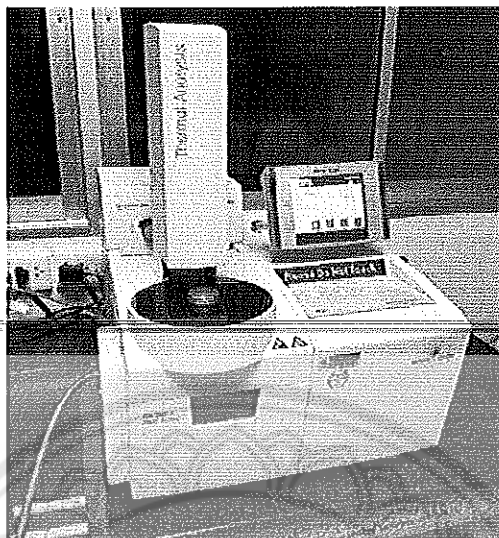
H คือ สัดส่วนของธาตุไฮโดรเจน

N คือ สัดส่วนของธาตุไนโตรเจน

ในส่วนของ การวิเคราะห์ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดและเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ ด้วยการทอริแฟกซ์ ด้วยเทคนิคบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ (bomb calorimeter, Leco instrument) โดยใช้ benzoic acid pellets เป็นสารมาตรฐานในการตรวจวัดทุกครั้งก่อนการวิเคราะห์

### 3.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงความร้อน

การวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงความร้อนโดยใช้เทคนิค thermogravimetric/differential scanning calorimeter (TG/DSC) (Mettler Toledo, TGA/DSC3) ซึ่งเป็นการทดสอบการสลายตัวของตัวอย่างที่อุณหภูมิในช่วง 60 ถึง 700 °C ที่อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิที่ 15 °C/min ภายใต้สภาวะบรรยากาศออกซิเจนและไนโตรเจน โดยใช้อัตราการไหลของก๊าซ 20 mL/min จากนั้นวิเคราะห์ผลเทอร์โมแกรมของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อไป



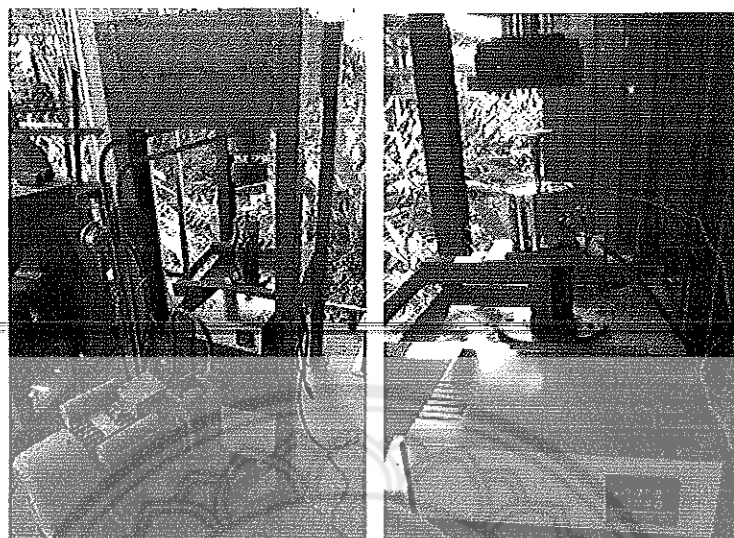
รูปที่ 18 เครื่องวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงความร้อน TG/DSC

### 3.4 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันชั้นน้ำตาลทางเคมีของตัวอย่าง

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของสารประกอบอินทรีย์ของตัวอย่างวัตถุบดและเชื้อเพลิงอัดเม็ด ด้วยเครื่อง fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) (Perkin Elmer, Spectrum GX) เทคนิคนี้เป็นวิธีการทางสเปกโทรสโกปีที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์พอลิเมอร์หรือกากตะกอนพลาสติก โดยศึกษาการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของสารในย่านความถี่ของช่วงคลื่น (wave numbers)  $4,000-400\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นช่วงที่บ่งบอกถึงหมู่ฟังก์ชันของโมเลกุล เช่น  $\text{-OH}$ ,  $\text{C=O}$ ,  $\text{N-H}$ ,  $\text{CH}_3$  เป็นต้น และช่วยในการระบุประเภทของสารประกอบภายในโครงสร้างโมเลกุลของพลาสติกและจำแนกชนิดของพอลิเมอร์ได้

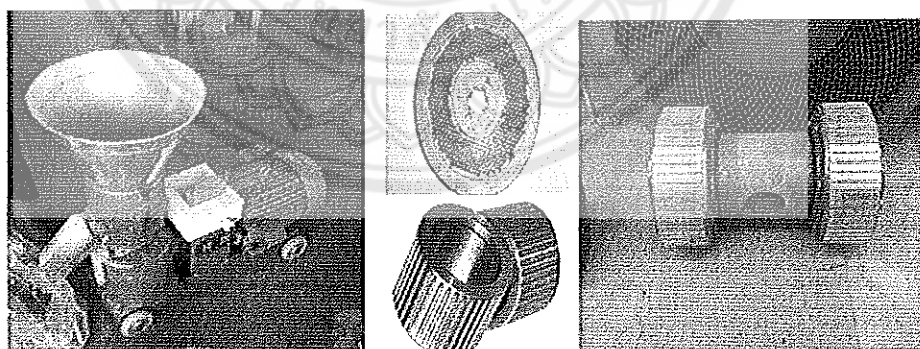
### 3.5 การผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด

รูปที่ 19 แสดงเครื่องอัดเม็ดแบบไฮดรอลิกหรือแบบกระบอกอัด ซึ่งเป็นเครื่องอัดเม็ดที่ใช้สำหรับการทดสอบสภาวะของการอัดเม็ดขึ้นรูปเชื้อเพลิง สามารถเปลี่ยนแปลงแรงดันและอุณหภูมิของหัวอัดได้ การอัดแบบไฮดรอลิกเป็นการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดแบบกะหรือผลิตได้ครั้งละ 1 เม็ด ใช้วัตถุดิบรวม 2 กรัม/ครั้ง ใช้กำลังแรงดันในการอัดเม็ดที่ 100-120 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร เวลา 0.5-2 นาที และใช้อุณหภูมิ 85-125 °C



รูปที่ 19 เครื่องอัดเม็ดแบบไฮดรอลิกหรือแบบกระบอกอัด

เครื่องอัดเม็ดเชื้อเพลิงแบบคายนัดหรือแบบลูกกลิ้ง ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าในการเป็นแหล่งต้นกำลัง ดังรูปที่ 20 การส่งถ่ายกำลังของเครื่องผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดเริ่มจากมอเตอร์ขนาด 5 hp ผ่านคัปปลิ่ง ชุดเพืองทดและชุดอัดเม็ด เชื้อเพลิงแม่พิมพ์เป็นแบบแผ่นหมุน ที่มีขนาดรูกว้าง 5 mm ความหนา 2 cm ชุดอัดใช้ลูกกลิ้งที่มีหนึ่งคู่ในการรีด และอัด วัสดุทำมาจากเหล็กผสมสังกะสีที่มีคุณภาพสูงทนต่อการสึกหรอ มีกำลังการผลิตอยู่ในช่วง 100-200 kg/h วัสดุที่นำมาอัดเป็นเม็ดเชื้อเพลิงต้องมีคุณสมบัติที่นุ่ม เช่น ชีเสื่อย เศษไม้ ทางใบปาล์ม ชังข้าวโพด ต้นข้าวโพด แกลบ ก้านดอกทานตะวัน กะลาปาล์ม และวัตถุดิบอื่น ๆ เป็นต้น



รูปที่ 20 เครื่องผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดแบบคายนัดหรือแบบลูกกลิ้ง

การผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดใช้เครื่องอัดเม็ดแบบคายนัดและแบบไฮดรอลิก แสดงสภาวะการทดลองดังตารางที่ 5 การผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง โดยผสมตามสัดส่วนของเสี้ยวและกากตะกอน ชีวมวล และตัวผสมในสัดส่วนต่างๆ ตามพารามิเตอร์และทำการทดลอง 3 ซ้ำต่อหนึ่งตัวอย่าง



### ตารางที่ 5 สภาวะที่ใช้ในการทดลองผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด

รายการ	อัดแบบค้ายัด	อัดแบบไฮดรอลิก
วัตถุดิบ	กากตะกอนพลาสติก: ซีล้อยไม้สัก	กากตะกอนพลาสติก: ซีล้อยไม้สัก
อัตราส่วน	90:10	50:50, 60:40, 75:25, 85:15, 90:10, 95:5, 100:0
ส่วนผสมอื่นๆ	น้ำ (10% by weight)	
อุณหภูมิในการอัด (°C)	60-65	80, 100, 120
เวลาในการอัด (นาที)	-	0.5, 1.0, 2.0
ปริมาณการผลิต/ครั้ง (กรัม)	1,000	1-2

### 3.6 การวิเคราะห์ค่าดัชนีความคงทนของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

การวิเคราะห์ค่าดัชนีความคงทนของเชื้อเพลิงอัดเม็ด (drop shatter index; DSI) เพื่อศึกษาคุณสมบัติความทนทานของเชื้อเพลิงอัดเม็ดเปรียบเทียบกับกรณีมีการขนส่งและกองเก็บบนลาน ซึ่งเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ดีต้องมีค่า DSI อยู่ในช่วง 0.9-1.0 (หรือ >0.95, FPI-standard) โดยการทดสอบจะทำการบรรจุเชื้อเพลิงอัดเม็ดลงไปในถุง 0.5 กิโลกรัม ปิดปากถุงให้สนิท แล้วปล่อยลงโดยอิสระที่ความสูง 1.5 เมตร ทำซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้ง แล้วใช้ตะแกรงร่อนคัดขนาด รวบรวมเฉพาะเชื้อเพลิงที่ยังคงรูปเป็นเม็ด นำไปชั่งน้ำหนักเพื่อเปรียบเทียบโดยใช้สมการ (7)

$$DSI = WPA/WPB \quad (7)$$

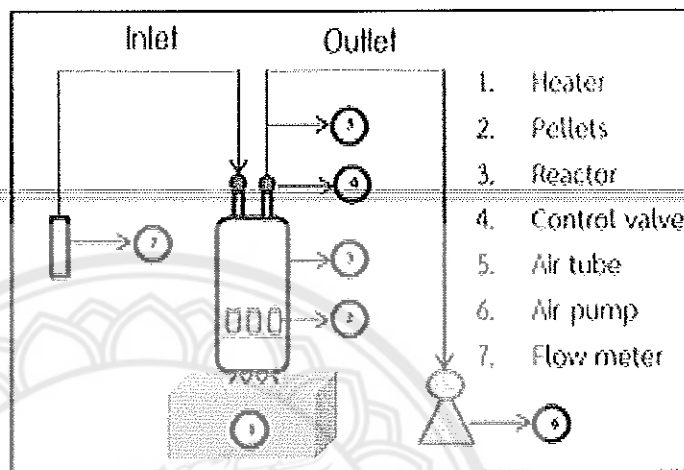
เมื่อ WPA คือ น้ำหนักเชื้อเพลิงอัดเม็ดหลังการทดสอบ

WPB คือ น้ำหนักเชื้อเพลิงอัดเม็ดก่อนการทดสอบ

### 3.7 การทอริแฟคชันเชื้อเพลิงอัดเม็ด

งานวิจัยนี้ใช้เตาทอริแฟคชันทรงกระบอกแบบจำกัดอากาศ และให้ความร้อนด้วยการเผาไหม้ชีวมวลจากด้านล่างเตา มีพัดลมปรับความเร็วลมในการปรับอุณหภูมิการเผาไหม้ แสดงตั้งรูปที่ 21 เชื้อเพลิงอัดเม็ดจะถูกทอริไฟต์ (torrefied pellets) ภายในเตาทรงกระบอกแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 เซนติเมตร สูง 12 เซนติเมตร (volume ~113 cm<sup>3</sup>) สามารถควบคุมอุณหภูมิในช่วง 180-250 °C ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิการทอริแฟคชันที่เหมาะสมสำหรับกากตะกอนพลาสติกและชีวมวล ศึกษาการเปลี่ยนแปลงช่วงอุณหภูมิของการอบแห้ง (drying), การไล่ความชื้น (dehydration) และการทอริแฟคชัน (torrefaction) โดยใช้เทอร์โมคอปเปิล (thermocouple) ชนิด K-type ในการตรวจวัดอุณหภูมิในการทอริแฟคชัน และควบคุมก๊าซเสียและมลพิษให้อยู่ในสภาวะที่เหมาะสมด้วยอุปกรณ์ดักจับฝุ่นและปรับสภาพไอเสีย งานวิจัยนี้ใช้อุณหภูมิคงที่ที่ 225 °C อัตราการไหลอากาศ 1

ลิตร/นาที เวลาในการทอริแฟคชัน 10 นาที จากนั้นนำเชื้อเพลิงที่ผ่านกระบวนการทอริแฟคชันแล้ว มาทดสอบคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ และวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงความร้อนต่อไป



รูปที่ 21 เตาทอริแฟคชันและแผนผังการทดลองการทอริไฟด์เชื้อเพลิงอัดเม็ด

### 3.8 การวิเคราะห์ปริมาณคลอไรด์และไอออน

การวิเคราะห์ปริมาณคลอไรด์เป็นมาตรฐานหนึ่งสำหรับกำหนดคุณสมบัติเชื้อเพลิงอัดเม็ดของประเทศในสหภาพยุโรป งานวิจัยนี้ใช้เทคนิคการสกัดแบบชะด้วยน้ำปราศจากไอออน (deionized water) กับตัวอย่างวัตถุดิบและเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการทอริแฟคชัน ตัวอย่างจะถูกแช่และเขย่าในน้ำปราศจากไอออนที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นกรองตัวอย่างน้ำด้วยตัวกรองชนิดเมมเบรน และวิเคราะห์ด้วยเครื่องไอออนโครมาโทกราฟี (ion chromatography; IC) เพื่อตรวจวัดปริมาณคลอไรด์และไอออนอื่นๆ ได้แก่ แอนไอออนและแคทไอออน ชนิดของแอนไอออน ได้แก่ fluoride (F<sup>-</sup>), chloride (Cl<sup>-</sup>), nitrite (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>), bromide (Br<sup>-</sup>), nitrate (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), phosphate (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>), sulfate (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) และชนิดของแคทไอออน ได้แก่ lithium (Li<sup>+</sup>), sodium (Na<sup>+</sup>), ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), potassium (K<sup>+</sup>), magnesium (Mg<sub>2</sub><sup>+</sup>) และ calcium (Ca<sub>2</sub><sup>+</sup>) ซึ่งการวิเคราะห์ในครั้งนี้ได้รับความอนุเคราะห์จากแผนกห้องปฏิบัติการ บริษัท เบลตัน อินดัสตรีล (ประเทศไทย) จำกัด จังหวัดปทุมธานี

### 3.9 การทดสอบการเผาไหม้และวิเคราะห์ก๊าซเสีย

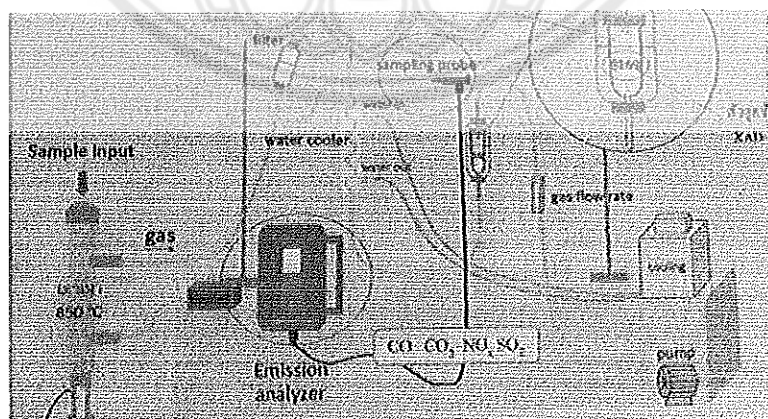
งานวิจัยนี้ใช้เตาเผาชีวมวลขนาดเล็กแบบเบดคงตัว (lab-scale fixed bed incinerator) ซึ่งทำจากสแตนเลสสตีล ชนิด AISI-310 ที่สามารถทนอุณหภูมิการเผาไหม้ได้สูงกว่า 1,000 °C ควบคุมอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิล

(thermocouple) ชนิด K-type และใช้ระบบควบคุมการจ่ายไฟเข้าเตาเผาอัตโนมัติแบบ proportional-integral-derivative (PID) การทดลองจะให้ความร้อนเตาเผาที่อุณหภูมิ 850 °C ที่สภาวะความดันบรรยากาศ (atmospheric condition) และปริมาณอากาศเพียงพอต่อการเผาไหม้ (excess air) แสดงดังรูปที่ 22 การวิเคราะห์ก๊าซเสียจากการเผาไหม้ด้วยเครื่องวิเคราะห์ก๊าซเสีย ซึ่งเป็นเทคนิคการตรวจวัดแบบต่อเนื่อง (flue-gas analyzer) ซึ่งก๊าซที่ตรวจวัดได้แก่ O<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, และ SO<sub>2</sub> นอกจากนี้สามารถคำนวณประสิทธิภาพการเผาไหม้ภายใต้สภาวะที่กล่าวมาข้างต้น โดยใช้สมการประสิทธิภาพการเผาไหม้ (combustion efficiency; Eff<sub>com</sub>) ดังสมการ (8)

$$Eff_{com}(\%) = \frac{CO_2 - CO}{CO_2} \times 100\% \quad (8)$$

เมื่อ CO<sub>2</sub> คือ ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (ppm)

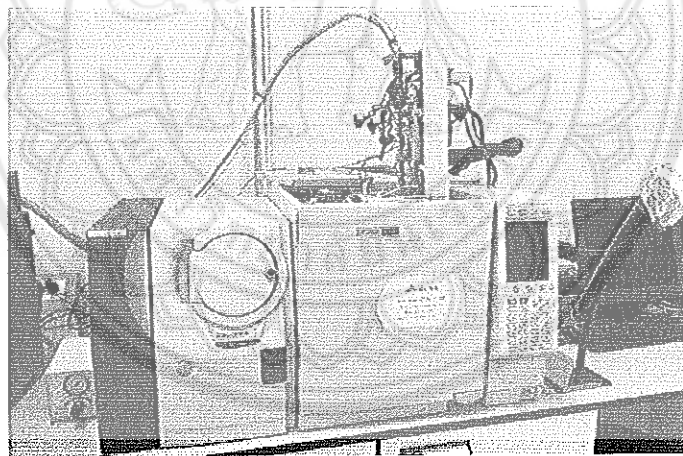
CO คือ ความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ (ppm)



รูปที่ 22 (ก) เตาเผาขนาดเล็กแบบเบดคงตัว (ข) เครื่องวิเคราะห์ก๊าซเสีย และ (ค) แผนผังการเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์ก๊าซเสียและมลพิษ

### 3.10 การวิเคราะห์มลพิษอากาศชนิด BTEX และ PAHs

การวิเคราะห์มลพิษจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงอัดเม็ด โดยทำการทดสอบการเผาไหม้ตัวอย่าง 30 นาที สารมลพิษชนิด benzene, toluene, ethylbenzene, xylene (BTEX) และ polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) ถูกดักจับด้วยตัวดูดซับชนิด XAD-4 absorber ที่บรรจุอยู่ในกระบอกที่มีสำลีทำหน้าที่เป็นตัวกรอง ภายใต้สภาวะการเก็บตัวอย่างแบบไอโซคิเนติก (iso-kinetic sampling) โดยก๊าซร้อนจะถูกดูดจากปลายปล่องเตาเผาด้วยปั๊มดูดอากาศ มีตัวควบคุมความเร็วอากาศ (air flow meter) ควบคุมให้อัตราเร็วอากาศ คงที่ที่ 2 ลิตร/นาที และมีระบบลดอุณหภูมิก๊าซร้อนด้วยน้ำเย็น ซึ่งแต่ละการทดลองจะเก็บตัวอย่างเป็นเวลา 5 นาที ใน 3 ช่วงเวลา (5-10, 15-20 และ 25-30 นาที) เมื่อเก็บตัวอย่างเสร็จแล้ว ตัวดูดซับและสำลีจะเก็บไว้ที่อุณหภูมิ  $-4^{\circ}\text{C}$  จากนั้นนำตัวอย่างมาสกัดด้วยเทคนิค soxhlet extraction โดยมีตัวทำละลายเฮกเซนและไดคลอโรมีเทน ในอัตราส่วน 1:1 ใช้เวลาในการสกัด 18 ชั่วโมง จากนั้นสารละลายจะถูกระเหยเพื่อลดปริมาตรให้เหลือ 1 มิลลิลิตร และกรองด้วยไมโครฟิลเตอร์เพื่อทำความสะอาด และเก็บไว้ในขวดไว้อัลลีซาปิดสนิทและเก็บไว้ที่อุณหภูมิ  $-4^{\circ}\text{C}$  ก่อนที่จะนำมาวิเคราะห์ ตัวอย่างจะถูกวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณสารประกอบ BTEX และ PAHs ด้วยเครื่องวิเคราะห์ก๊าซโครมาโตกราฟีแมสสเปกโตรมิเตอร์ (gas chromatography/mass spectrometer (Shimadzu, GCMS-QP2010 plus) แสดงดังรูปที่ 23

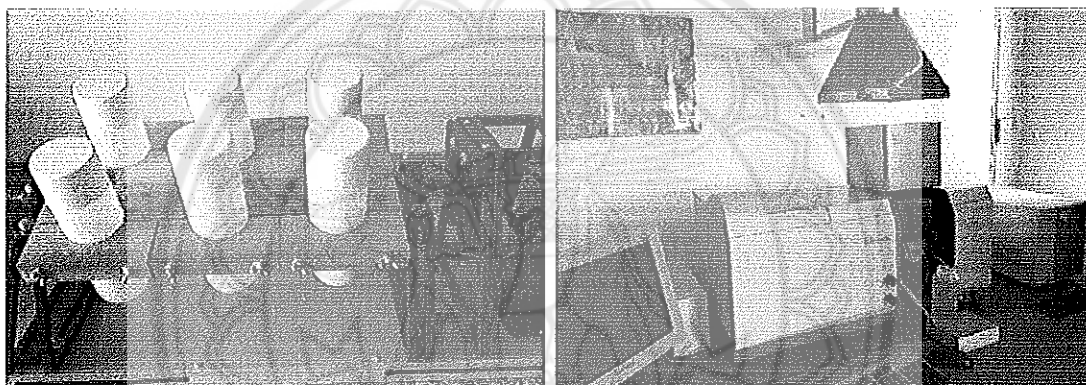


รูปที่ 23 เครื่องวิเคราะห์ก๊าซโครมาโตกราฟีชนิดเฟลมดีเทคเตอร์

### 3.11 การวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักและการชะละลายโลหะหนัก

งานวิจัยนี้แบ่งการวิเคราะห์โลหะหนักในตัวอย่าง ออกเป็น 2 ลักษณะ คือ 1) การวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักทั้งหมดในตัวอย่าง (total concentration) โลหะหนักที่ศึกษา ได้แก่ ตะกั่ว (lead; Pb) โครเมียม (chromium; Cr) สังกะสี (zinc; Zn) แคดเมียม (cadmium; Cd) และทองแดง (copper; Cu) ตัวอย่างวัตถุดิบและเชื้อเพลิงจะถูกย่อยด้วยกรดแก่ 2 ชนิด คือ กรดซัลฟูริก (sulfuric acid) และกรดไนตริก (nitric acid) อัตราส่วน 1:1 และให้ความร้อนเพื่อย่อยให้ตัวอย่างละลาย จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนและกรองด้วยกระดาษกรอง

เซลล์โลโลส และวิเคราะห์ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอฟซอพซันสเปกโทรสโคปี (atomic absorption spectroscopy; AAS) และ 2) การวิเคราะห์การชะละลายโลหะหนักของตัวอย่างวัตถุบดและเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผลิตได้และเถ้าจากการเผาไหม้ ด้วยเทคนิค toxicity characteristic leaching procedure (TCLP) แสดงดังรูปที่ 24 เทคนิค TCLP เป็นการจำลองการชะละลายของโลหะหนักโดยน้ำฝน ซึ่งการทดสอบนี้จะใช้ในกรณีที่มีการกักเก็บเชื้อเพลิงอัดเม็ดบนลานกลางแจ้ง เป็นการจำลองน้ำชะจากกองเชื้อเพลิงอัดเม็ด และจำลองการชะละลายโลหะหนักออกจากเถ้าในกรณีที่มีการนำเถ้าที่เกิดจากการเผาไหม้ไปฝังกลบ โดยใช้สารละลายกรดอะซิติก (acetic acid) ความเข้มข้น 1 นอร์มอล ในสัดส่วนสารละลายต่อตัวอย่าง เท่ากับ สารละลาย 20 มิลลิลิตรต่อตัวอย่าง 1 กรัม เหย้าที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นสารละลายจะถูกกรองด้วยกระดาษกรองเซลล์โลโลส และวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS ต่อไป



รูปที่ 24 เครื่องเย้าเพื่อจำลองการชะละลายโลหะหนักและเครื่องอะตอมมิกแอฟซอพซันสเปกโทรสโคปี

### 3.12 การประเมินศักยภาพและสรุปรายงานการวิจัย

ประเมินศักยภาพด้านการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดในเชิงอุตสาหกรรมและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ซึ่งเป็นการประเมินจากข้อมูลที่ได้จากการเก็บรวบรวมข้อมูลทฤษฎี การลงพื้นที่และสอบถามผู้ประกอบการในเบื้องต้นเท่านั้น ข้อมูลเบื้องต้น ได้แก่ ปริมาณขวดพลาสติกรับเข้า ปริมาณกากตะกอนและของเสียที่เกิดขึ้น คาดการณ์การลงทุน ปริมาณการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด ราคาซื้อขาย ต้นทุนการผลิตต่อกิโลกรัม การลงทุนและอัตราการคืนทุน

## บทที่ 4 ผลการวิจัย

ในบทนี้จะอภิปรายผลการวิจัยและข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ ได้แก่ การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี การวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงความร้อน การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันน้ำตาลของตัวอย่าง การผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด การวิเคราะห์ค่าดัชนีความคงทนของเชื้อเพลิงอัดเม็ด การทอริแฟคชันเชื้อเพลิงอัดเม็ด การวิเคราะห์ปริมาณคลอไรด์และไอออนอื่นๆ การทดสอบการเผาไหม้ การวิเคราะห์หมลพิษ การวิเคราะห์โลหะหนัก ปนเปื้อนและน้ำชะละลาย การประเมินศักยภาพของเชื้อเพลิงเม็ด และสรุปรายงานการวิจัย

### 4.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของวัตถุดิบ

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของวัตถุดิบที่ใช้ผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด แสดงดังตารางที่ 6 ตัวอย่างกากตะกอนพลาสติกและชีเลื่อยไม้สักมีค่าความชื้น (MC) เท่ากับ 1.06 และ 7.42% ตามลำดับ ส่วนปริมาณเถ้า (AC) ของกากตะกอนพลาสติกและชีเลื่อยไม้สัก มีค่าเท่ากับ 7.17 และ 3.46% ตามลำดับ ปริมาณสารระเหย (VM) จากกากตะกอนพลาสติกและชีเลื่อยไม้สักมีค่าเท่ากับ 77.82 และ 82.63% ตามลำดับ และในส่วนของปริมาณคาร์บอนคงตัว (FC) จากตัวอย่างกากตะกอนพลาสติกและชีเลื่อยไม้สักมีค่าเท่ากับ 13.95 และ 6.49% ตามลำดับ

### ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของวัตถุดิบ

การทดลอง	กากตะกอนพลาสติก	ชีเลื่อยไม้สัก
Proximate analysis (%)		
MC	1.09	7.42
AC	7.17	3.46
VM	77.82	82.63
FC	13.95	6.49
Ultimate analysis (%)		
C	38.41	47.58
H	3.02	6.32
N	0.08	0.06
O	21.54	51.56
S	ND	ND
C/H	12.7	7.52
O/C	0.56	1.08
HHV (MJ/kg)*	18.52	19.56

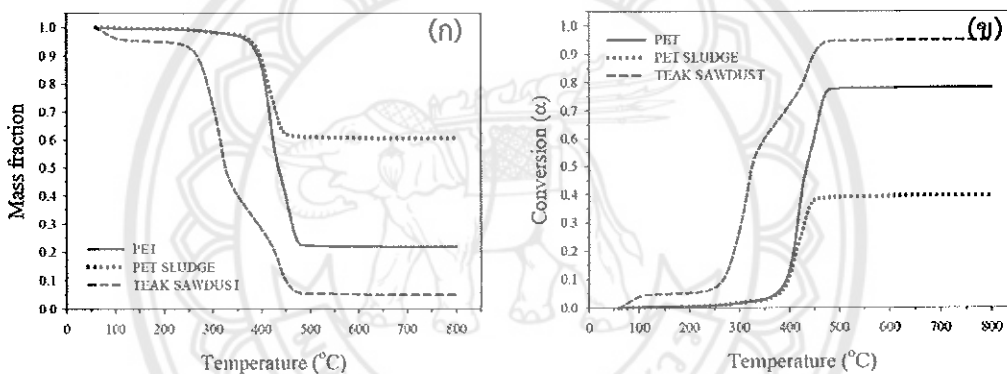
\* ค่าความร้อนสูงคำนวณจากสมการ (6)

การศึกษาของคุณสมบัติทางเคมีของวัตถุดิบด้วยเทคนิควิเคราะห์ปริมาณธาตุพื้นฐาน พบว่า ธาตุพื้นฐานของวัตถุดิบกากตะกอนพลาสติกและขี้เลื่อยไม้สัก ได้แก่คาร์บอน (C) มีค่าเท่ากับ 38.41 และ 47.58% ตามลำดับ ไฮโดรเจน (H) เท่ากับ 3.02 และ 6.32% ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีธาตุ เช่น ไนโตรเจน (N) 0.06 และ 0.08% และออกซิเจน (O) 21.54 และ 51.56% ตามลำดับ ส่วนซัลเฟอร์ (S) ในตัวอย่างทั้งสองไม่สามารถตรวจวัดได้ (ND) ดังตารางที่ 6 สอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhao และคณะ (2015) ซึ่งวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของขยะหรือของเสียในประเทศสิงคโปร์เพื่อที่จะมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ด จากการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของขยะ พบว่าธาตุพื้นฐานของพลาสติกชนิด PET มีคาร์บอน (C) เท่ากับ 61.65% และไฮโดรเจน (H) เท่ากับ 4.19% และการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของชีวมวล พบว่ามีคาร์บอน (C) เท่ากับ 45.36% และไฮโดรเจน (H) เท่ากับ 7.40% ขยะ/ของเสียหรือชีวมวลที่มีองค์ประกอบของคาร์บอนและไฮโดรเจนที่สูงจะส่งผลให้ศักยภาพด้านพลังงานของเชื้อเพลิงดีขึ้น นอกจากนี้วัตถุดิบกากตะกอนพลาสติกและขี้เลื่อยไม้สักมีส่วนคาร์บอนต่อไฮโดรเจน (C/H) 12.70 และ 7.52 และสัดส่วนออกซิเจนต่อคาร์บอน (O/C) เท่ากับ 0.56 และ 1.08 ตามลำดับ และการศึกษาของคุณสมบัติเชิงความร้อนของวัตถุดิบ โดยนำค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ธาตุมาคำนวณตามสมการ (6) พบว่าค่าความร้อนสูง (high heating value; HHV) ของตะกอนพลาสติก มีค่าเท่ากับ 18.52 เมกกะจูล/กิโลกรัม (MJ/kg) และของขี้เลื่อยไม้สัก มีค่าเท่ากับ 19.56 MJ/kg ตามลำดับ

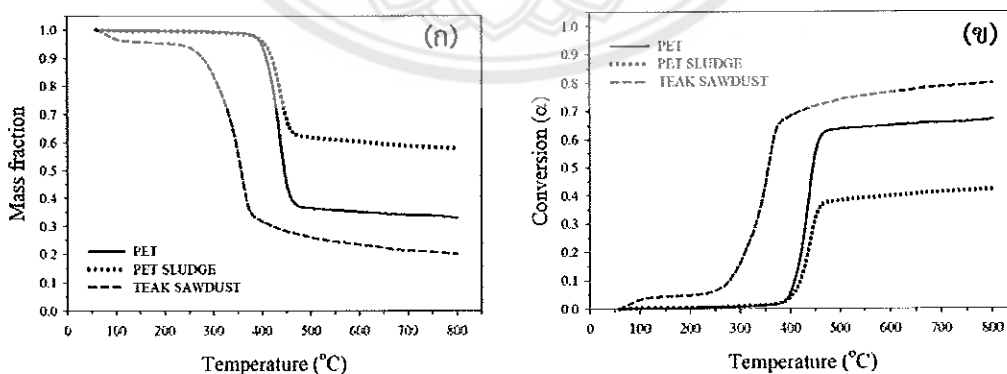
#### 4.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงความร้อนของวัตถุดิบด้วยเทคนิค TGA

การวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงความร้อนของตัวอย่างวัตถุดิบด้วยเทคนิค TGA เป็นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและน้ำหนักของตัวอย่างภายใต้อุณหภูมิและสภาวะบรรยากาศที่ต่างกัน ซึ่งจะทดสอบตัวอย่างภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วง 60-700 °C ในสภาวะบรรยากาศแบบมีออกซิเจนและไนโตรเจน (รูปที่ 25-26) จากการทดลองพบว่า กราฟเทอร์โมแกรมในช่วงอุณหภูมิ 60-150 °C ของตัวอย่างขี้เลื่อยไม้สัก (teak sawdust) แสดงการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักลดลงเล็กน้อย (~5% of weight reduction fraction, wrf) และคงที่จนถึงอุณหภูมิประมาณ 250 °C โดยมีลักษณะเช่นเดียวกันทั้งสองสภาวะบรรยากาศ (ออกซิเจนและไนโตรเจน) เนื่องจากช่วงอุณหภูมิดังกล่าวเป็นการระเหยของน้ำภายในตัวอย่าง (water evaporation) กราฟเทอร์โมแกรมเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักอย่างมากในช่วงอุณหภูมิสูงกว่า 250 °C (90% of wrf in O<sub>2</sub> และ 65% of wrf in N<sub>2</sub>) เนื่องจากการระเหยของสารระเหยในตัวอย่าง (devolatilization) รูปที่ 25 (ก และ ข) ตัวอย่างภายใต้สภาวะมีออกซิเจนเส้นกราฟจะแสดงการเปลี่ยนแปลง 2 ลักษณะ คือ ช่วงอุณหภูมิ 250-300 °C และ 300-450 °C เกิดจากกระบวนการเผาไหม้บางส่วนของสารระเหย (partial oxidation of volatile matters) และการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ (complete combustion) ตามลำดับ และเทอร์โมแกรมจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงหลังจากอุณหภูมิสูงกว่า 450 °C รูปที่ 26 (ก และ ข) ตัวอย่างขี้เลื่อยไม้สักภายใต้สภาวะไนโตรเจนเส้นกราฟจะแสดงการเปลี่ยนแปลงช่วงอุณหภูมิเดียว คือ 250-350 °C ซึ่งเกิดจากกระบวนการไพโรไลซิส ทำให้เส้นกราฟเทอร์โมแกรมจะค่อยๆ ลาดเอียงโดยน้ำหนักตัวอย่างมีการเปลี่ยนแปลงหลังจากอุณหภูมิสูงกว่า 380 °C เล็กน้อย (~10% of wrf in N<sub>2</sub>) ซึ่งเป็นลักษณะของการเกิดก่อตัวของถ่าน (char formation) (Dhyani และ Bhaskar, 2018)

เส้นกราฟเทอร์โมแกรมของตัวอย่างพลาสติกเพทบริสุทึ (PET) และกากตะกอนพลาสติก (PET sludge) ที่ช่วงอุณหภูมิ 60-400 °C มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักลดลงเล็กน้อย (~3% of wwf in O<sub>2</sub> และ ~1% of wwf in N<sub>2</sub>) ทั้งสองสภาวะบรรยากาศ (ออกซิเจนและไนโตรเจน) จากรูปที่ 25 (ก และ ข) ตัวอย่างเพทบริสุทึและกากตะกอนพลาสติก ภายใต้สภาวะบรรยากาศแบบมีออกซิเจน เส้นกราฟจะมีลักษณะเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเป็นอย่างมาก ซึ่งเกิดจากการสูญเสียโครงสร้างและน้ำหนักตัวอย่างเพทบริสุทึและกากตะกอนพลาสติกจากเผาไหม้ แสดงผลในช่วงอุณหภูมิ 390-420 °C และการเผาไหม้สิ้นสุดที่อุณหภูมิสูงกว่า 420 °C รูปที่ 26 (ก และ ข) ตัวอย่างเพทบริสุทึและกากตะกอนพลาสติกภายใต้สภาวะบรรยากาศแบบไนโตรเจน เส้นกราฟจะมีลักษณะเปลี่ยนแปลงน้ำหนักอย่างมากโดยเกิดจากการไพโรไลซิสพลาสติกในช่วงอุณหภูมิ 390-450 °C และกระบวนการไพโรไลซิสสิ้นสุดที่อุณหภูมิสูงกว่า 450 °C ซึ่งแตกต่างจากเทอร์โมแกรมของซีเลื่อยไม้สัก ในกรณีของเพทบริสุทึและกากตะกอนพลาสติกจะไม่เกิดการก่อตัวของถ่าน



รูปที่ 25 (ก) เทอร์โมแกรมของน้ำหนักตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลง และ (ข) กราฟสลับแกน ของ PET, กากตะกอนพลาสติก และซีเลื่อยไม้สัก ซึ่งทดสอบภายใต้สภาวะ O<sub>2</sub>



รูปที่ 26 (ก) เทอร์โมแกรมของน้ำหนักตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลง และ (ข) กราฟสลับแกน ของ PET, กากตะกอนพลาสติก และซีเลื่อยไม้สัก ซึ่งทดสอบภายใต้สภาวะ N<sub>2</sub>



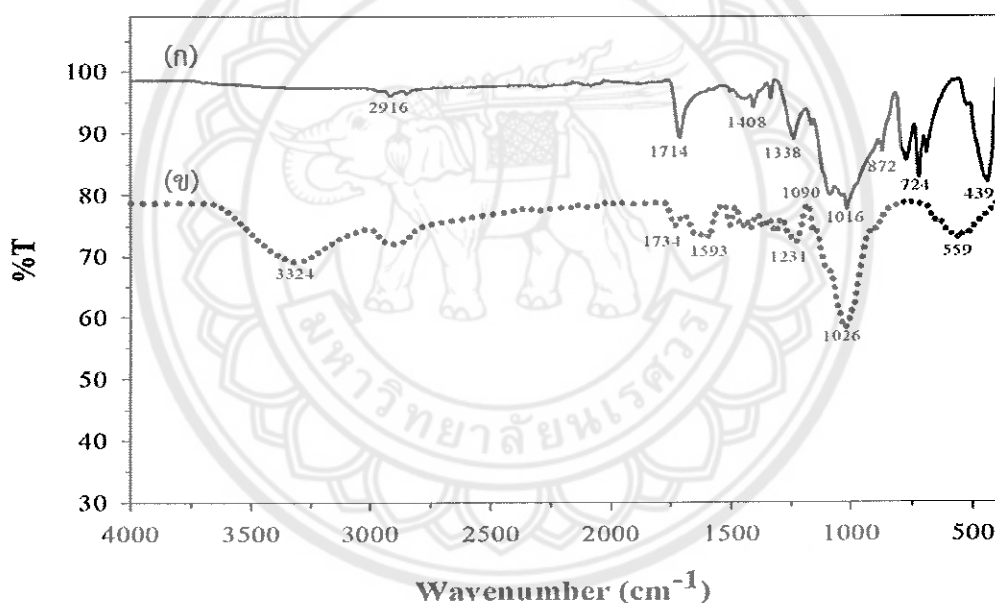
การเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงความร้อนของวัสดุทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ เพทบริสุทธิ กากตะกอนพลาสติก และซีล้อยไม้สัก การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและน้ำหนักแตกต่างกันภายใต้อุณหภูมิและสภาวะเดียวกัน โดยซีล้อยไม้สัก (ชีวมวล) มีจุดสูญเสียโครงสร้างและน้ำหนัก และมีจุดปลดปล่อยสารระเหยที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่าพลาสติก แต่จะมีช่วงของอุณหภูมิในการสลายตัว (decomposition) ช่วงเวลายาวกว่าพลาสติก เมื่อใช้วัสดุทั้งสองร่วมกันในกระบวนการเผาไหม้ร่วม (co-firing) หรือไพโรไลซิสร่วม (co-pyrolysis) จะส่งผลต่อการเผาไหม้และไพโรไลซิส ซึ่งในกรณีของการเผาไหม้จะทำให้อุณหภูมิในการจุดติดไฟลดลง (ignition temperature reduction) และจะลดอุณหภูมิของการสลายตัวในสภาวะไพโรไลซิส ในส่วนของลักษณะการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและน้ำหนักของเพทบริสุทธิและกากตะกอนพลาสติกจะมีลักษณะเสถียรที่อุณหภูมิสูงได้ดีกว่าซีล้อยไม้สัก เมื่อถึงอุณหภูมิจุดหนึ่งจะสูญเสียโครงสร้างและน้ำหนักและสลายตัวอย่างรวดเร็วและคายพลังงานในช่วงเวลาที่สั้นและไม่เกิดการก่อตัวของถ่าน ทั้งในสภาวะการเผาไหม้และไพโรไลซิส

#### 4.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันัลทางเคมีของตัวอย่างวัสดุ

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันัลทางเคมีของตัวอย่างวัสดุด้วยเทคนิค FTIR เป็นการศึกษาคุณสมบัติทางเคมีเพื่อศึกษาชนิดของโมเลกุลในกลุ่มฟังก์ชันัลที่ดูดกลืนรังสีอินฟราเรดในย่านความถี่กลาง (mid range, wave numbers 4,000–400  $\text{cm}^{-1}$ ) ผลการวิเคราะห์และแปลผลสเปกตรัมของตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 27 ตัวอย่างกากตะกอนพลาสติก รูปที่ 27 (ก) (เส้นสีดำ) ช่วงความถี่การดูดกลืนรังสีของหมู่แอลเคน (alkane) ซึ่งมีการสั่นแบบยืดของ C-H ( $\text{CH}_2$  และ CH, asymmetrical และ symmetrical stretching) แสดงแถบความถี่ในช่วง 2,855-2,916  $\text{cm}^{-1}$  ช่วงความถี่การดูดกลืนรังสีของหมู่เอสเทอร์มีการสั่นแบบยืดของ C=O แสดงแถบความถี่ที่มีความเข้มปานกลางที่ 1,714  $\text{cm}^{-1}$  และมีการสั่นแบบยืด C=C ของหมู่เอททีลีน (ethelene) แสดงแถบความถี่ที่มีความเข้มปานกลางที่ 1,436  $\text{cm}^{-1}$  และช่วงความถี่การดูดกลืนรังสีของหมู่อะโรมาติก (aromatic) มีการสั่นแบบยืดของหมู่เอสเทอร์ O=C-O แสดงแถบความถี่ที่มีความเข้มสูงที่ 1,090 และ 1,015  $\text{cm}^{-1}$  และแสดงความถี่ของการดูดกลืนรังสีของหมู่ไฮโดรเจนของวงเบนซีน (=C-H) ที่ 872  $\text{cm}^{-1}$  และแสดงความถี่ของการดูดกลืนรังสีของวงอะโรมาติกแบบเฮเทอโรไซคลิก (heterocyclic aromatic ring) ที่ 724  $\text{cm}^{-1}$  สอดคล้องกับงานวิจัยของ Cazan และคณะ, (2015) ศึกษาของหมู่ฟังก์ชันัลในยางชนิด PET-HDPE ซึ่งในการวิเคราะห์ FTIR เพื่อหาหมู่ฟังก์ชันัลทางเคมีในพลาสติกชนิด PET-HDPE พบว่า มีการสั่นแบบยืด C-H ของ  $\text{CH}_2$  แสดงแถบความถี่ที่มีความเข้มปานกลางที่ 2,960  $\text{cm}^{-1}$  มีการสั่นแบบยืด C=O ของหมู่เทอร์พทาเลต แสดงแถบความถี่ที่มีความเข้มปานกลางที่ 1,715-1,506  $\text{cm}^{-1}$  มีการสั่นแบบยืดของ C=C ของหมู่  $\text{CH}_2$  ของเอททีลีน แสดงแถบความถี่ที่มีความเข้มปานกลางที่ 1,448-1,405  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งมีการสั่นแบบยืดของหมู่เอสเทอร์ O=C-O และนอกจากนี้ยังมีกลุ่ม  $-\text{SO}_3\text{H}$  ซึ่งเป็นกลุ่มอะโรมาติก แสดงแถบความถี่ที่มีความเข้มสูงที่ 1,088-1,018  $\text{cm}^{-1}$

การวิเคราะห์ตัวอย่างซีล้อยไม้สัก รูปที่ 27 (ข) (เส้นสีน้ำเงิน) พบว่า ช่วงความถี่ของการดูดกลืนรังสีของหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) มีการสั่นแบบยืดของ O-H ช่วง 3,200-3,600  $\text{cm}^{-1}$  แสดงแถบความถี่ที่ 3,324  $\text{cm}^{-1}$  ช่วงความถี่การดูดกลืนรังสีของหมู่คาร์บอกซิลิกให้แถบความถี่ที่ 2,917  $\text{cm}^{-1}$  และมีการสั่นแบบยืดของ C=O

ของหมู่คาร์บอกซิลิกของเฮมิเซลลูโลส (hemicelluloses เช่น xyloglucan, arabino-glucuronoxylan และ galacto-glucomannan) ที่แถบความถี่ที่มีความเข้มสูงที่  $1,734\text{ cm}^{-1}$  และมีการสั่นของ C=C ของวงอะโรมาติกในช่วงความถี่ที่  $1,593\text{ cm}^{-1}$  ช่วงความถี่การดูดกลืนรังสีของอัลเคนมีการสั่นแบบงอ (C-H) ของ  $\text{CH}_3$  แสดงแถบความถี่ที่มีความเข้มปานกลางที่  $1,420\text{--}1,452\text{ cm}^{-1}$  และการสั่นแบบยืดของ C-O-C (antisymmetric stretching) ของหมู่เซลลูโลส แสดงแถบความถี่ที่มีความเข้มสูงที่  $1,027\text{--}1,160\text{ cm}^{-1}$  นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Rayung และคณะ, (2014) ศึกษาเส้นใยปาล์มน้ำมันด้วยเทคนิค FTIR เพื่อศึกษากลุ่มฟังก์ชันัลทางเคมีของปาล์มน้ำมัน พบว่า มีช่วงความถี่การดูดกลืนรังสีของหมู่ไฮดรอกซิล (O-H)  $3,600\text{--}3,200\text{ cm}^{-1}$  มีการสั่นแบบยืดของกลุ่ม C-H ที่ช่วงความถี่  $2,900\text{--}2,800\text{ cm}^{-1}$  ช่วงการสั่นแบบยืดของ C=O ของหมู่แอลดีคิโนในเฮมิเซลลูโลสและหมู่เอเทอร์ของกลุ่มคาร์บอกซิลิกในเฮมิเซลลูโลสที่ความถี่  $1,729\text{ cm}^{-1}$  และการสั่นแบบยืดของ C-O ของหมู่เซลลูโลส ที่ช่วงความถี่  $1,070\text{--}1,010\text{ cm}^{-1}$



รูปที่ 27 สเปกตรัมอินฟราเรดของตัวอย่างวัตถุขบ (ก) กากตะกอนพลาสติก และ (ข) ใยกล้วยไม้สัก

องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างวัตถุขบ สามารถพิสูจน์ได้ด้วยเทคนิค FTIR ซึ่งระบุได้ว่า ตัวอย่างกากตะกอนพลาสติกเป็นพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันัลแบบพอลิเอสเตอร์ เป็นลักษณะเด่นขององค์ประกอบทางเคมีในโครงสร้างของพอลิเมอร์ชนิดเทอเรฟทาเลต (PET) และตัวอย่างใยกล้วยไม้สัก สามารถระบุได้ว่าเป็นองค์ประกอบทางเคมีในกลุ่มสารอินทรีย์พวกเฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และเซลลูโลส ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของชีวมวล

#### 4.4 การวิเคราะห์โลหะหนักปนเปื้อนและการชะละลายโลหะหนักในวัตถุดิบ

การศึกษาค่าประกอบของโลหะหนัก (heavy metals content) ในวัตถุดิบ พบว่า ปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนัก ได้แก่ ตะกั่ว (Pb) และแคดเมียม (Cd) ในกากตะกอนพลาสติกชนิดและซีลียอไมล์กั้นนั้นไม่สามารถตรวจวัดได้ (ND) ในส่วนของปริมาณความเข้มข้นของโครเมียม (Cr) ในกากตะกอนพลาสติกและซีลียอไมล์กั้น มีค่าเท่ากับ 9.4 และ 1.6 mg/kg ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตาม ค่าปริมาณความเข้มข้นของ Cr ที่ตรวจพบมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน CEN TC 343 (EN 15411, 2011) ที่กำหนดค่าความเข้มข้นของ Cr ไม่เกิน 40 mg/kg นอกจากนี้ปริมาณความเข้มข้นของสังกะสี (Zn) ในตะกอนพลาสติกและซีลียอไมล์กั้น เท่ากับ 3.5 และ 0.7 mg/kg ตามลำดับ และปริมาณความเข้มข้นของทองแดง (Cu) ในตะกอนพลาสติกและซีลียอไมล์กั้น เท่ากับ 5.0 และ 1.4 mg/kg ตามลำดับ Zn และ Cu ที่ตรวจพบมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน CTI (CTI, 2012) โดยผลการวิเคราะห์โลหะหนักปนเปื้อนในตัวอย่างวัตถุดิบทั้งสอง แสดงดังตารางที่ 7 การควบคุมปริมาณโลหะหนักปนเปื้อนในวัตถุดิบก่อนการนำมาเป็นส่วนผสม ซึ่งจะเป็นการควบคุมปริมาณโลหะหนักปนเปื้อนในตอนต้น ทำให้เชื้อเพลิงขยะมีโลหะหนักที่ปนเปื้อนมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน นอกจากโลหะหนักทั้ง 5 ชนิด ที่กล่าวมานั้นยังมีโลหะหนักชนิดอื่นๆ ได้แก่ ปรอท (mercury, Hg), พลวง (antimony, Sb), สารหนู (arsenic, As), โคบอลต์ (cobalt, Co), แมงกานีส (manganese, Mn), นิกเกิล (nickel, Ni), ทอเลียม (thallium, Th) และวาเลเดียม (vanadium, Va) ที่จะต้องศึกษาเพิ่มเติม โดยเฉพาะโลหะหนักที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตพลาสติกเพท เช่น antimony (Sb), germanium (Ge) และ titanium (Ti) เป็นต้น

ตารางที่ 7 ผลการศึกษาความเข้มข้นของโลหะหนักปนเปื้อนและการชะละลายโลหะหนักในวัตถุดิบ

การทดสอบ	วัตถุดิบ	Pb	Cr	Zn	Cd	Cu
โลหะหนักปนเปื้อน (mg/kg)	กากตะกอนพลาสติก	ND	9.4	3.5	ND	5.0
	ซีลียอไมล์กั้น	ND	1.6	0.7	ND	1.4
	ค่ามาตรฐาน <sup>1</sup>	600	40 <sup>2</sup>	-	10	2,000
การชะละลาย (mg/L)	กากตะกอนพลาสติก	ND	ND	ND	ND	1.6
	ซีลียอไมล์กั้น	ND	ND	ND	ND	0.5
	ค่ามาตรฐาน <sup>3</sup>	5.0	10.0	25.0	0.5	15.0

ND คือ ไม่สามารถตรวจวัดได้

<sup>1</sup>CTI (2012), <sup>2</sup>EN 15411 (2011) และ <sup>3</sup>USEPA 1311 (1992) และ Chang และคณะ, (2001)

การศึกษการชะละลายโลหะหนักจากตัวอย่าง (heavy metal leachability) ด้วยเทคนิค TCLP ในตารางที่ 7 เป็นการจำลองการชะละลายของโลหะหนักโดยน้ำฝนจากกองวัตถุดิบ การทดลองพบว่า ไม่มีการชะละลายของโลหะหนัก ได้แก่ ตะกั่ว (Pb) โครเมียม (Cr) สังกะสี (Zn) และแคดเมียม (Cd) ในวัตถุดิบทั้งสองชนิด แต่พบโลหะหนักทองแดง (Cu) ในตัวอย่างตะกอนพลาสติก มีค่าเท่ากับ 1.6 mg/L และซีลียอไมล์กั้น มีค่าเท่ากับ 0.5

mg/L ซึ่งค่าที่ตรวจพบในตัวอย่างวัตถุบดอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานกำหนด ซึ่งในที่นี้ผู้วิจัยอ้างอิงมาตรฐานค่าการชะละลายโลหะหนักจากเถ้าหนัก (bottom ash) จากการเผาขยะชุมชน (MSW incinerator) เนื่องจากข้อกำหนดที่ใช้ในการควบคุมการชะละลายโลหะหนักจากวัตถุบดหรือเชื้อเพลิงอัดเม็ดยังไม่มีกำหนดแต่อย่างใด

ตารางที่ 8 ลักษณะกายภาพเบื้องต้นของเชื้อเพลิงอัดเม็ดผลิตจากสัดส่วนกากตะกอนพลาสติกและชี้เส้อยไม้สั๊ก

สัดส่วน	ความยาวของ เชื้อเพลิงอัดเม็ด (mm)	น้ำหนักต่อเม็ด (g/piece)	Bulk density (g/cm <sup>3</sup> )	Degree of fragile
50:50	20-70	0.14-0.48	1.46	0
60:40	30-100	0.34-0.74	1.48	0
75:25	60-190	0.41-1.21	1.56	*
85:15	50-200	0.44-1.46	1.76	**
90:10	50-220	0.71-1.91	1.77	***
95:5	60-200	0.78-1.99	1.81	****
100:0	60-180	0.78-1.56	2.01	***

0 แตกละเอียดง่าย, \* แตกเป็นก้อน, \*\* แตกหักได้, \*\*\* แตกหักได้แต่ยังคงรูป, \*\*\*\* คงรูปเป็นเม็ด

#### 4.5 การผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด

##### 4.5.1 การศึกษาสัดส่วน อุณหภูมิ และแรงดันที่เหมาะสมของเครื่องอัดเม็ดแบบไฮดรอลิก

การศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมระหว่างกากตะกอนพลาสติกและชี้เส้อยไม้สั๊ก โดยใช้สัดส่วน 50:50, 60:40, 75:25, 85:15, 90:10, 95:5 และ 100:0 การขึ้นรูปอัดเม็ดเชื้อเพลิงใช้เครื่องอัดเม็ดแบบไฮดรอลิก โดยกำหนดสภาวะการอัดเม็ดที่ความดันในการอัดเม็ด 120 kg/cm<sup>2</sup> เวลา 1 นาที และอัดเม็ดที่อุณหภูมิ 85 °C และศึกษาลักษณะกายภาพเบื้องต้นของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผลิตได้ ได้แก่ ขนาด น้ำหนัก ความหนาแน่นบอลล์ และด็กีการแตกร่วนของเชื้อเพลิง แสดงดังตารางที่ 8 จากการทดลองพบว่า สัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับอ้างอิงในการทดลองขั้นต่อไป คือ สัดส่วนระหว่างกากตะกอนพลาสติก:ชี้เส้อยไม้สั๊ก เท่ากับ 90:10 และ 95:5 ซึ่งเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผลิตได้จากเครื่องอัดเม็ดแบบไฮดรอลิก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ความยาวของเม็ดเชื้อเพลิงอยู่ในช่วง 180-220 มิลลิเมตร (ขนาด 50-100 มิลลิเมตร คือตัวอย่างกรณีหักครึ่งเพื่อทดสอบ) น้ำหนัก 0.71-1.99 กรัมต่อเม็ดและความหนาแน่นบอลล์ เท่ากับ 1.77-1.81 g/cm<sup>3</sup> มีความคงทนและมีระดับด็กีการร่วนอยู่ในระดับที่เหมาะสม ตารางที่ 9 แสดงค่าดัชนีความคงทน drop shatter index (DSI) โดยค่า DSI ที่ได้จากการทดสอบมีค่าสูงกว่า 0.99 ซึ่งสูงกว่ามาตรฐาน PFI standard (ที่กำหนดค่า DSI ของเชื้อเพลิงอัดเม็ด ควรมีค่า มากกว่า 0.95)

ตารางที่ 9 ค่าดัชนีความคงทนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดเปรียบเทียบสภาวะการอัดเม็ดที่ต่างกัน

สัดส่วน	อุณหภูมิ (°C)	DSI	เวลา (นาที)	DSI	แรงดัน (kg/cm <sup>2</sup> )	DSI
85:15	85	0.9984	0.5	0.9988	100	0.9986
	100	0.9986	1.0	0.9971	110	0.9958
	125	0.9958	2.0	0.9986	120	0.9983
90:10	85	0.9977	0.5	0.9989	100	0.9951
	100	0.9978	1.0	0.9967	110	0.9987
	125	0.9980	2.0	0.9951	120	0.9984
95:5	85	0.9977	0.5	0.9973	100	0.9973
	100	0.9978	1.0	0.9993	110	0.9973
	125	0.9980	2.0	0.9973	120	0.9984

กำหนดค่ามาตรฐานของค่า DSI โดยใช้ PFI standard เท่ากับ >0.95

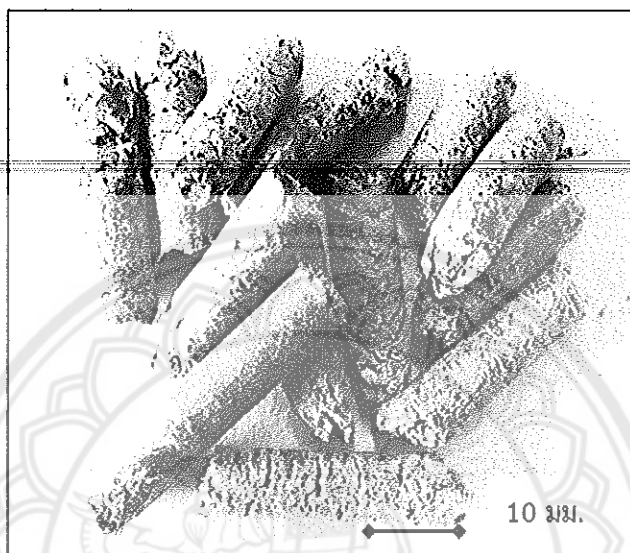
ตารางที่ 10 ลักษณะทางกายภาพเบื้องต้นของเชื้อเพลิงอัดเม็ดเปรียบเทียบอุณหภูมิการอัดเม็ดที่ต่างกัน

อุณหภูมิในการอัดเม็ด (°C)	สัดส่วน	ความยาวของ เชื้อเพลิงอัดเม็ด (mm)	น้ำหนักต่อ เม็ด(g/piece)	Bulk density (g/cm <sup>3</sup> )	Degree of fragile
85	90:10	50-220	0.71-1.91	1.77	***
	95:5	60-200	0.78-1.99	1.81	****
100	90:10	50-220	0.72-1.95	1.79	***
	95:5	60-210	0.70-1.99	1.82	****
125	90:10	50-200	0.64-1.33	1.82	***
	95:5	50-220	0.57-1.43	1.83	****

\*\*\* แตกหักได้แต่ยังคงรูป, \*\*\*\* คงรูปเป็นเม็ด

การศึกษามวลของอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปเชื้อเพลิงอัดเม็ด 85, 100 และ 125 °C พบว่าลักษณะทางกายภาพเบื้องต้นและค่า DSI ของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากการอัดด้วยเครื่องไฮดรอลิกไม่มีความแตกต่างกัน เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผลิตได้มีขนาดและความยาวของเม็ดเชื้อเพลิงอยู่ในช่วง 180-220 มิลลิเมตร (ขนาด 50-100 มิลลิเมตรคือ ตัวอย่างเชื้อเพลิงถูกหักครึ่งเพื่อทดสอบ) น้ำหนัก 0.57-1.99 กรัมต่อเม็ด และความหนาแน่นบัลค์ เท่ากับ 1.77-1.83 g/cm<sup>3</sup> มีความคงทนและมีระดับดีกรีการร่วนอยู่ในระดับที่เหมาะสม ค่า DSI ที่ได้จากการทดสอบมีค่า

สูงกว่า 0.99 นอกจากนี้ผลของแรงดันในการอัดเม็ดเชื้อเพลิงตั้งแต่ 100-120 kg/cm<sup>2</sup> ไม่ส่งผลต่อการขึ้นรูปอัดเม็ดเชื้อเพลิงแต่อย่างใด ลักษณะทางกายภาพเบื้องต้นและค่าดัชนีความคงทนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผลิตได้จากเครื่องอัดเม็ดแบบไฮดรอลิก ดังตารางที่ 9-10



รูปที่ 28 เชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากตะกอนพลาสติกผสมซีลีเยอไม้สัก

#### 4.5.2 การอัดเม็ดด้วยเครื่องตายด์อัด

การทดสอบอัดเม็ดด้วยเครื่องอัดเม็ดแบบตายด์อัด การทดสอบนี้ใช้สัดส่วนกากตะกอนพลาสติกซีลีเยอไม้สัก เท่ากับ 90:10 จากการทดลองพบว่าการอัดเม็ดกากตะกอนพลาสติกเพียงอย่างเดียว (100:0) ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเม็ดเชื้อเพลิงได้หรือขึ้นรูปเป็นเม็ดได้ยาก และยังส่งผลต่อความร้อนของหัวอัดทำให้หัวอัดมีความร้อนเพิ่มขึ้น ซึ่งในการวิจัยนี้จะใช้น้ำ 10% โดยน้ำหนัก (% by weight) ซึ่งการใช้น้ำในการอัดเม็ดแบบตายด์อัดจะเป็นตัวช่วยเพื่อระบายความร้อนที่เกิดจากการอัดเม็ด ช่วยหล่อลื่นลูกกลิ้งเพืองอัด และในขณะเดียวกันน้ำจะเป็นตัวผสมกันได้ด้วย Mišljenović (2014) และในกรณีที่ต้องการขยายกำลังการผลิตเพื่ออุตสาหกรรม การใช้สัดส่วน 90:10 และมีน้ำเป็นส่วนผสมในสัดส่วน 10% โดยน้ำหนัก คุณสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผลิตได้ มีปริมาณค่าความชื้น เท่ากับ 2.32% อาจลดลงจากการฝั่งลมและอบด้วยความร้อนหลังจากการอัดเม็ด เชื้อเพลิงอัดเม็ดมีปริมาณเถ้า เท่ากับ 14.58% ปริมาณสารระเหยมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อยจากวัตถุดิบตั้งต้น มีค่าเท่ากับ 78.26% และมีค่าคาร์บอนคงตัวลดลง เท่ากับ 6.47% และจากการวิเคราะห์ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดด้วยเทคนิคบอมบ์การอรีมิเตอร์ พบว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดมีค่าความร้อนสูง (HHV) เท่ากับ 19.43 MJ/kg ซึ่งค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผลิตได้มีค่าเทียบเท่าหรือสูงกว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากชีวมวลทั่วไป นอกจากนี้การวิเคราะห์ค่าดัชนีความคงทนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดด้วยเทคนิค DSI แสดงดังตารางที่ 11 และการทดลองนี้ชี้ให้เห็นว่าการใช้ชีวมวล (ซีลีเยอ

ไม้สักบดละเอียด) และน้ำ สามารถใช้ทดแทนตัวผสมได้ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Auprakul และคณะ, (2014) พบว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผลิตจากเปลือกและซังข้าวโพด จะมีการเกาะตัวของเม็ดเชื้อเพลิงดีขึ้นเมื่อมีการนำเอาพลาสติกมาผสมกับเปลือกและซังข้าวโพด นอกจากนี้การมีส่วนผสมของพลาสติกทำให้คุณสมบัติเชิงพลังงานของเชื้อเพลิงอัดเม็ดมีค่าสูงขึ้น

#### ตารางที่ 11 ค่าดัชนีความคงทนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผลิตด้วยเครื่องอัดเม็ดแบบตายตัวอัด

รายการ	เชื้อเพลิงอัดเม็ด
ค่าดัชนีความคงทน	0.9769
ค่ามาตรฐาน	>0.95 <sup>1</sup>

<sup>1</sup>กำหนดตามมาตรฐานของ PFI standard

#### 4.6 การปรับปรุงคุณภาพเชื้อเพลิงอัดเม็ดด้วยกระบวนการทอริแฟคชัน

งานวิจัยนี้ใช้กระบวนการทอริแฟคชันในการปรับปรุงคุณภาพเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผลิตได้ โดยสภาวะการทอริไฟด์เชื้อเพลิงอัดเม็ด ที่อุณหภูมิ 225 °C ใช้อัตราการป้อนอากาศที่ 1 ลิตร/นาที เวลา 10 นาที การทดลองพบว่าเมื่อเชื้อเพลิงอัดเม็ดผ่านการทอริไฟด์ที่สภาวะดังกล่าว ทำให้ค่า DSI ของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผ่านการทอริแฟคชันมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจากเดิมและอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน PFI-standard แสดงดังตารางที่ 12 การทอริแฟคชันเชื้อเพลิงอัดเม็ดจะทำให้พลาสติกมีการหลอมและยึดติดกับชีวมวลได้ดีขึ้น ส่งผลให้ค่า DSI เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย Ansa และคณะ, (2016) พบว่าที่อุณหภูมิ 200-240 °C พลาสติกเกิดการหลอมและรวมตัวกับชีวมวลทำให้เชื้อเพลิงมีความแข็งและเกาะตัวกันดีขึ้น นอกจากนี้การทอริแฟคชันที่อุณหภูมิ 225-300 °C มีผลต่อการสลายตัวของพันธะไฮโดรเจนและคาร์บอนในเส้นใยเฮมิเซลลูโลสและเส้นใยลิกนิน ทำให้เส้นใยเฮมิเซลลูโลสเกิดการหดตัวและเส้นใยในชีวมวลมีความหนาแน่นและยึดเกาะกันได้ดีขึ้น (Wang และคณะ, 2017)

#### ตารางที่ 12 สภาวะการทอริแฟคชันและค่าดัชนีความคงทนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผ่านการทอริแฟคชัน

สัดส่วน	อุณหภูมิทอริไฟด์ (°C)	อัตราการไหลอากาศ (l/min)	เวลา (min)	DSI
90:10	225	1	10	0.9999

สอดคล้องกับข้อมูลคุณสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผ่านการทอริไฟด์ แสดงดังตารางที่ 13 สามารถสรุปได้ว่ากระบวนการทอริไฟด์ที่เค้นทำให้ค่าความชื้นของตัวอย่างเชื้อเพลิงอัดเม็ดลดลง ซึ่งค่าความชื้นที่ลดลงส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงพลังงานของเชื้อเพลิงอัดเม็ด โดยค่าความร้อนสูงที่ได้จากการทดสอบด้วยเทคนิคบอมบ์

การออร์มิเตอร์ พบว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผ่านการทอริไฟด์มีค่าความร้อนสูง เท่ากับ 20.79 MJ/kg ซึ่งสอดคล้องกับ Yuan และคณะ, (2015) นำเสนอรายงานการวิจัยเกี่ยวกับการทอริไฟด์เชื้อเพลิงขยะสังเคราะห์ (synthesis MSW) ด้วยเตาเผาแวนอนที่มีควอตซ์เป็นตาปฏิกรณ์ ที่อุณหภูมิ 250 °C ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน โดยการทดสอบในสภาวะดังกล่าวทำให้ค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิงขยะสังเคราะห์เพิ่มขึ้นจาก 23.53 เป็น 27.72 MJ/kg นอกจากนี้คุณสมบัติเชิงพลังงานของเชื้อเพลิงขยะเพิ่มขึ้นแล้ว การทอริไฟด์ทำให้เชื้อเพลิงมีค่าความคงทนเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 13 คุณสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผ่านการทอริไฟด์

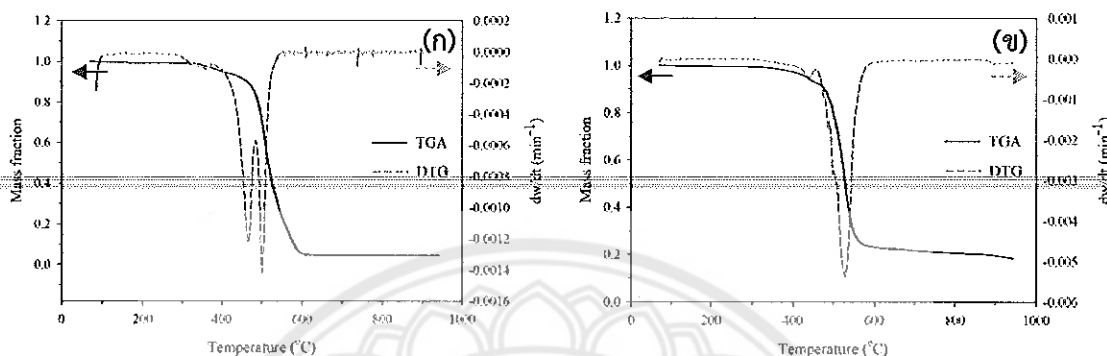
Proximate analysis (%)	เชื้อเพลิงอัดเม็ด	เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผ่านการทอริไฟด์
MC	2.32	0.29
AC	14.98	13.18
VM	78.26	81.26
FC	6.47	5.34
HHV (MJ/kg)	19.43	20.79

#### 4.7 การวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

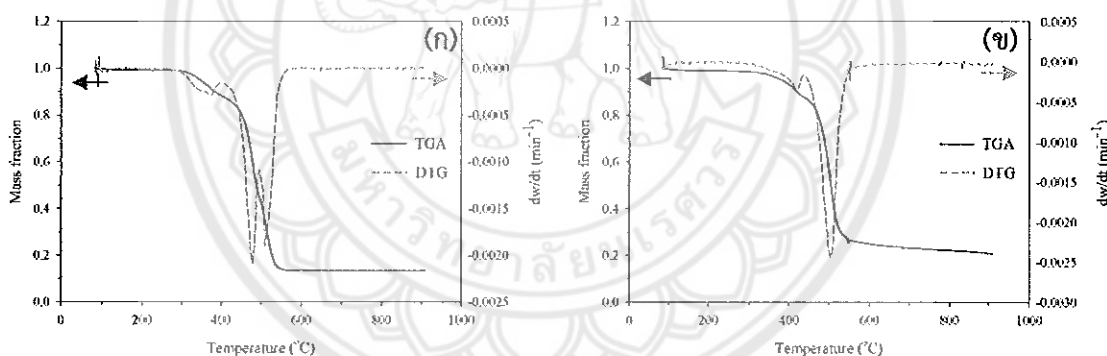
กราฟเทอร์โมแกรม TGA และ DTG ของตัวอย่างเชื้อเพลิงอัดเม็ดและเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผ่านการทอริไฟด์แสดงดังรูปที่ 29-30 ตัวอย่างเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ใช้ศึกษาเป็นส่วนประกอบของกากตะกอนพลาสติก: ขี้เลื่อยไม้สัก เท่ากับ 90:10 โดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและน้ำหนักของตัวอย่างเชื้อเพลิงอัดเม็ดภายใต้สภาวะบรรยากาศออกซิเจน ดังรูปที่ 29 (ก) และ 30 (ก) พบว่าเส้นกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลง 3 ลักษณะ คือ ช่วงอุณหภูมิ 300-350 °C และ 350-500 °C และ 550-600 °C เกิดจากกระบวนการระเหยของสารระเหยจากขี้เลื่อยไม้สัก (devolatilization of lignocellulose) เกิดการเผาไหม้บางส่วนของสารระเหย (partial oxidation of volatile matters) และการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ (complete combustion) ตามลำดับ และการศึกษาภายใต้สภาวะบรรยากาศไนโตรเจน กราฟเทอร์โมแกรม TGA และ DTG ดังรูปที่ 29 (ข) และ 30 (ข) เส้นกราฟจะแสดงการเปลี่ยนแปลง 2 ช่วงอุณหภูมิ คือ 350-450 °C และ 450-550 °C ซึ่งเป็นการแสดงผลของการระเหยของสารระเหยจากขี้เลื่อยไม้สัก และการไพโรไลซิสกากตะกอนพลาสติก ตามลำดับ และกระบวนการไพโรไลซิสสิ้นสุดที่อุณหภูมิสูงกว่า 550 °C จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า การอัดเม็ดเชื้อเพลิงให้มีความหนาแน่นขึ้นทำให้อุณหภูมิเผาไหม้และไพโรไลซิสของเชื้อเพลิงอัดเม็ดเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับวัตถุดิบ เชื้อเพลิงจะมีจุดสูญเสียโครงสร้างและน้ำหนักและมีจุดปลดปล่อยสารระเหยที่อุณหภูมิที่สูงกว่าวัตถุดิบตั้งต้น และเมื่อเปรียบเทียบเชื้อเพลิงที่ไม่ผ่านและผ่านการทอริไฟด์ พบว่าเส้นกราฟเทอร์โมแกรมจะเลื่อนอุณหภูมิขึ้น (shift-up) เล็กน้อย แต่จะมีช่วงของอุณหภูมิในการสลายตัว (decomposition) สั้นกว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ไม่ผ่านการทอริไฟด์ นอกจากนี้การที่เชื้อเพลิงอัดเม็ดมี



ส่วนผสมของชีวมวลอยู่ในปริมาณเล็กน้อย จะส่งผลต่อพฤติกรรมการเผาไหม้และทำให้อุณหภูมิในการจุดติดไฟลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุคอกะกอกพลาสติกตั้งต้น



รูปที่ 29 (ก) เทอร์โมแกรม TGA และ DTG ของตัวอย่างเชื้อเพลิงอัดเม็ดภายใต้ O<sub>2</sub> และ (ข) เทอร์โมแกรม TGA และ DTG ของตัวอย่างเชื้อเพลิงอัดเม็ดภายใต้ N<sub>2</sub>

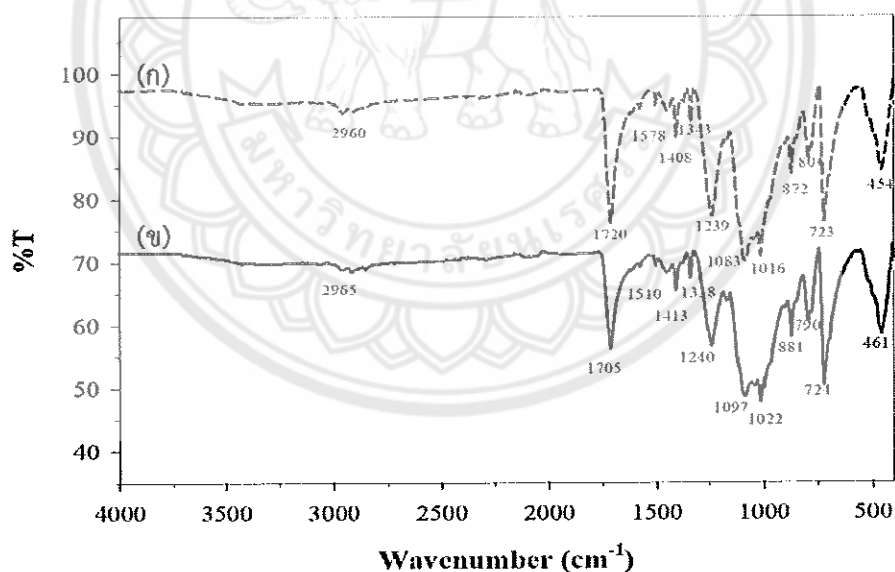


รูปที่ 30 (ก) เทอร์โมแกรม TGA และ DTG ของตัวอย่างเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผ่านการทอริไฟต์ภายใต้ O<sub>2</sub> และ (ข) เทอร์โมแกรม TGA และ DTG ของตัวอย่างเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผ่านการทอริไฟต์ภายใต้ N<sub>2</sub>

#### 4.8 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันนัลทางเคมีของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันนัลทางเคมีของตัวอย่างเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ไม่ผ่านการทอริไฟต์ รูปที่ 31 (ก) (เส้นสีแดง) พบว่า มีช่วงความถี่การดูดกลืนรังสีของหมู่แอลเคน (alkane) ซึ่งเป็นการสั่นแบบยืดของ C-H (CH<sub>2</sub> และ CH, asymmetrical และ symmetrical stretching) แสดงแถบความถี่ที่ 2,960 cm<sup>-1</sup> มีการสั่นแบบยืดของ C=O ของหมู่เอสเทอร์ของพอลิเมอร์เสริมกับหมู่คาร์บอกซิลิกของเฮมิเซลลูโลส โดยแสดงแถบความเข้มสูงที่ความถี่ 1,720

$\text{cm}^{-1}$  และมีการสั่นของ C=C ของวงอะโรมาติก แสดงแถบความเข้มเล็กน้อยที่ความถี่  $1,578 \text{ cm}^{-1}$  และมีการสั่นแบบยืด C=C ของหมู่อะโรมาติก แสดงแถบความเข้มปานกลางที่ความถี่  $1,408 \text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นลักษณะเด่นของพอลิเมอร์และผสมชีวมวล นอกจากนี้ยังมีแถบความถี่ที่มีความเข้มสูงช่วง  $1,239\text{-}1,343 \text{ cm}^{-1}$  เป็นการแสดงลักษณะการดูดกลืนรังสีของอัลเคนมีการสั่นแบบงอ (C-H) ของ  $\text{CH}_3$  ของสารประกอบกลุ่มลิคินินในชีวมวล และมีการสั่นแบบยืดของหมู่เอสเทอร์  $\text{O}=\text{C}-\text{O}$  แสดงแถบความถี่ที่มีความเข้มสูงที่  $1,083$  และ  $1,016 \text{ cm}^{-1}$  และแสดงความถี่การดูดกลืนรังสีของหมู่ไฮโดรเจนของวงเบนซีน ( $=\text{C}-\text{H}$ ) ที่  $872 \text{ cm}^{-1}$  และแสดงความถี่การดูดกลืนรังสีของวงอะโรมาติกแบบเฮเทอโรไซคลิก (heterocyclic aromatic ring) ที่  $723 \text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นลักษณะเด่นของสารประกอบกลุ่มเทอร์เฟพทาเลตในพลาสติกเพท รูปที่ 30 (ข) (เส้นสีน้ำเงิน) พบว่าตัวอย่างเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผ่านการทอริไฟด์มีช่วงความถี่ของการสั่นแบบยืดของ C=O มีแนวโน้มลดลง โดยลดลงจากความถี่  $1,720 \text{ cm}^{-1}$  เป็น  $1,705 \text{ cm}^{-1}$  เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของหมู่คาร์บอกซิลิกในเฮมิเซลลูโลส (เช่น xyloglucan, arabino-glucuronoxylan และ galacto-glucomannan) ซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากกระบวนการทอริไฟด์ขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Stelte และคณะ, (2011) ซึ่งให้เห็นว่ากระบวนการทอริไฟด์ขึ้นเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผลิตจากชีวมวลจากไม้สน ที่อุณหภูมิ 250-300 องศาเซลเซียส ทำให้สารประกอบเฮมิเซลลูโลส ลิคินิน และเซลลูโลสเกิดการสลายตัวและทำให้โอกาสในการเกาะตัวของเม็ดเชื้อเพลิงแบบ solid bridge ของคาร์โบไฮเดรตลดลง



รูปที่ 31 IR spectrum ของตัวอย่างเชื้อเพลิงอัดเม็ด (ก) ที่ไม่ผ่านการทอริไฟด์ และ (ข) ที่ผ่านการทอริไฟด์

#### 4.9 การวิเคราะห์โลหะหนักปนเปื้อนและการชะละลายโลหะหนักในเชื้อเพลิงอัดเม็ด

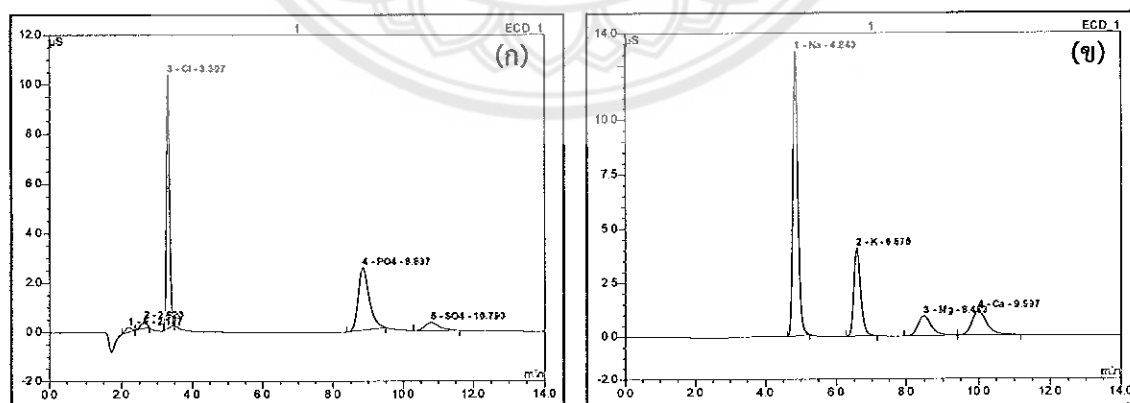
การวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก 5 ชนิด ได้แก่ Cd Cu Cr Pb และ Zn ในตัวอย่างเชื้อเพลิงอัดเม็ด พบว่าปริมาณโลหะหนักปนเปื้อนอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานกำหนด ตารางที่ 14 ปริมาณ Cd และ Cu ไม่สามารถตรวจวัดได้ ค่าโลหะหนักปนเปื้อนของ Zn Cr และ Pb มีค่าเท่ากับ 7.40, 5.26 และ 0.88 mg/kg ตามลำดับ การชะละลายโลหะหนักในเชื้อเพลิงอัดเม็ด ไม่สามารถตรวจวัดค่าการชะละลายโลหะหนัก Cd Cu และ Pb แต่ Zn มีค่าการชะละลายเล็กน้อยโดยมีค่าเท่ากับ 0.67 mg/L ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าค่าโลหะหนักปนเปื้อนและค่าการชะละลายโลหะหนักทุกตัวอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

ตารางที่ 14 ผลการศึกษาความเข้มข้นของโลหะหนักปนเปื้อนและการชะละลายโลหะหนักในเชื้อเพลิงอัดเม็ด

ตัวอย่าง	การทดสอบ	Pb	Cr	Zn	Cd	Cu
เชื้อเพลิงอัดเม็ด	โลหะหนักปนเปื้อน (mg/kg)	0.88	5.26	7.40	ND	ND
	ค่ามาตรฐาน <sup>1</sup>	600	40 <sup>2</sup>	-	10	2,000
	การชะละลาย (mg/L)	ND	ND	0.67	ND	ND
	ค่ามาตรฐาน <sup>3</sup>	5.0	10.0	25.0	0.5	15.0

ND คือ ไม่สามารถตรวจวัดได้

<sup>1</sup>CTI (2012), <sup>2</sup>EN 15411 (2011) และ <sup>3</sup>USEPA 1311 (1992) และ Chang และคณะ, (2001)



รูปที่ 32 ตัวอย่างเส้นกราฟ IC ได้จากการวิเคราะห์ตัวอย่างเชื้อเพลิงอัดเม็ด (ก) แอนไอออน และ (ข) แคทไอออน

#### 4.10 การวิเคราะห์ปริมาณคลอไรด์และไอออนในเชื้อเพลิงอัดเม็ด

การวิเคราะห์ปริมาณคลอไรด์และไอออน แสดงดังรูปที่ 32 ไอออนที่ศึกษา ได้แก่ แอนไอออนและแคทไอออน โดยแบ่งเป็นไอออนชนิดแอนไอออน ได้แก่ fluoride (F<sup>-</sup>), chloride (Cl<sup>-</sup>), nitrite (NO<sup>2-</sup>), bromide (Br<sup>-</sup>), nitrate (NO<sup>3-</sup>), phosphate (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>), sulfate (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) และชนิดแคทไอออน ได้แก่ lithium (Li<sup>+</sup>), sodium (Na<sup>+</sup>), ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), potassium (K<sup>+</sup>), magnesium (Mg<sub>2</sub><sup>+</sup>) และ calcium (Ca<sub>2</sub><sup>+</sup>) โดยทำการวิเคราะห์ตัวอย่างเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ไม่ผ่านการทอริไฟด์ และเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผ่านการทอริไฟด์ที่อุณหภูมิ 225 °C ใช้อัตราการป้อนอากาศที่ 1 ลิตร/นาที เวลา 10 นาที พบว่า ตัวอย่างเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ไม่ผ่านการทอริไฟด์มีปริมาณแอนไอออนรวมและแคทไอออนรวม เท่ากับ 212.55 และ 430.64 ppb ตามลำดับ ในส่วนของคลอไรด์ไอออน ซึ่งเป็นพารามิเตอร์สำคัญสำหรับมาตรฐานยุโรป (EN 15411) มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานเป็นอย่างมาก โดยเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผลิตได้จากกากตะกอนพลาสติกผสมซีลื้อยไม้สักมีคุณสมบัติด้านการปนเปื้อนคลอไรด์และไอออนต่างๆ อยู่ในเกณฑ์ที่ดีมาก เมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงอัดเม็ดชนิด RDF และ SRF (Rada และ Andreottola, 2012)

ตารางที่ 15 ผลการศึกษาปริมาณคลอไรด์และไอออนตัวอย่างเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ไม่ผ่านและผ่านการทอริไฟด์

แอนไอออน	ความเข้มข้น (ppb)		แคทไอออน	ความเข้มข้น (ppb)	
	เชื้อเพลิงอัดเม็ดไม่ผ่านการทอริไฟด์	เชื้อเพลิงอัดเม็ดผ่านการทอริไฟด์		เชื้อเพลิงอัดเม็ดไม่ผ่านการทอริไฟด์	เชื้อเพลิงอัดเม็ดผ่านการทอริไฟด์
fluoride (F <sup>-</sup> )	1.10	1.00	lithium (Li <sup>+</sup> )	ND	ND
chloride (Cl <sup>-</sup> )	51.03	33.28	sodium (Na <sup>+</sup> )	268.14	58.99
bromide (Br <sup>-</sup> )	ND	ND	ammonium (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	ND	0.73
nitrate (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	ND	2.81	potassium (K <sup>+</sup> )	97.86	35.91
phosphate (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	150.63	43.66	magnesium (Mg <sub>2</sub> <sup>+</sup> )	35.26	17.39
sulfate (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	9.79	5.86	calcium (Ca <sub>2</sub> <sup>+</sup> )	29.37	11.53
ผลรวมแอนไอออน	212.55	86.62	ผลรวมแคทไอออน	430.64	124.54

ND คือ ไม่สามารถตรวจวัดได้

จากตารางที่ 15 ผลของกระบวนการทอริไฟด์ทำให้ปริมาณแอนไอออนรวมและแคทไอออนรวมลดลง โดยปริมาณแอนไอออนรวมและแคทไอออนรวม เท่ากับ 86.62 และ 124.54 ppb ตามลำดับ ซึ่งการกระตุ้นเชื้อเพลิงอัดเม็ดด้วยความร้อน เวลา และการเป่าอากาศ ในกระบวนการทอริไฟด์ทำให้เชื้อเพลิงอัดเม็ดมีการปลดปล่อยแอนไอออนและแคทไอออน ซึ่งปริมาณไอออนที่ลดลงจะส่งผลต่อมลพิษอากาศที่ลดลงจากการใช้งานเชื้อเพลิงอัดเม็ดในระบบเตาเผา โดยเฉพาะแอนไอออนของ chloride (Cl<sup>-</sup>) และ sulfate (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) มีค่าลดลง 34.78

และ 40.14% ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Shoulaifar (2016) แต่อย่างไรก็ตามปริมาณไนเตรทไอออน (nitrate;  $\text{NO}_3^-$ ) และแอมโมเนียมไอออน (ammonium;  $\text{NH}_4^+$ ) มีค่าเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย โดยมีค่าเพิ่มขึ้นจากตรวจวัดไม่ได้ (ND) มีค่าเท่ากับ 2.81 และ 0.73 ppb ตามลำดับ ซึ่งข้อมูลของไนเตรทไอออนและแอมโมเนียมไอออนนี้ยังไม่มีการรายงานผลวิจัยมาก่อน อาจจะเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของสารเปปไทด์ในซีเลียไม้สักที่เป็นส่วนประกอบในเชื้อเพลิงอัดเม็ด เมื่อผ่านการทอริไฟด์สารเปปไทด์เหล่านั้นอาจเกิดการสลายตัวเป็นไอออนดังกล่าว

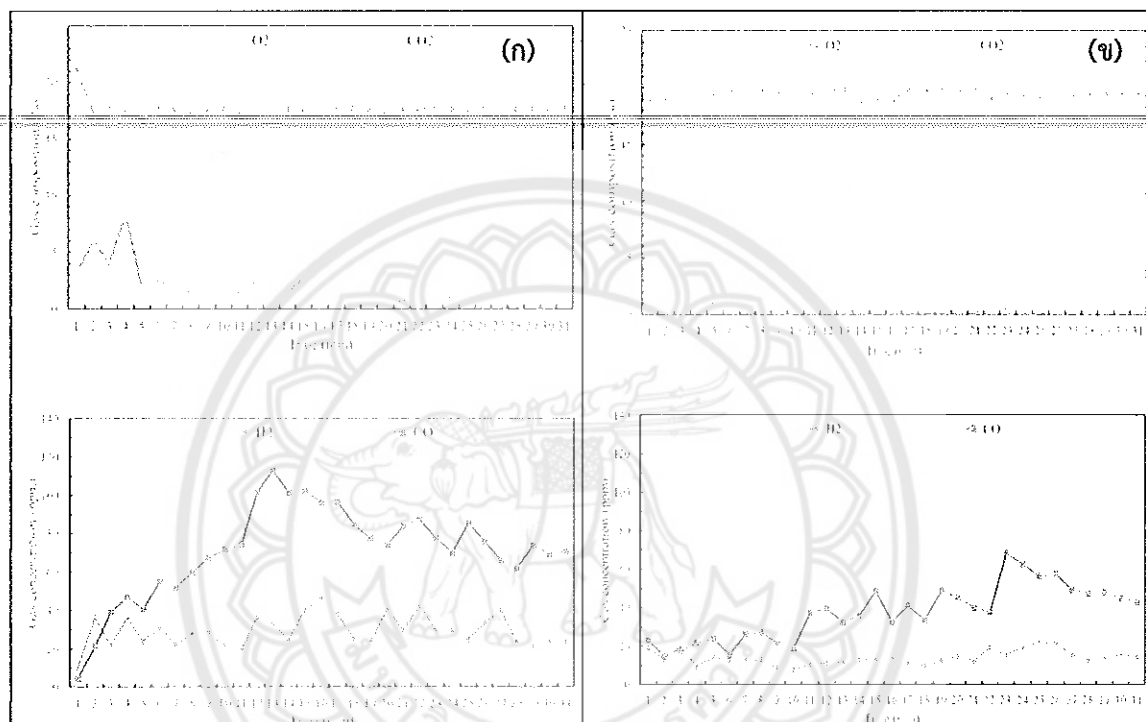
#### 4.11 การเผาไหม้และมลพิษทางอากาศ

##### 4.11.1 ก๊าซเสียที่เกิดจากการเผาไหม้และประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

การทดสอบประสิทธิภาพการเผาไหม้เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ไม่ผ่านและที่ผ่านการทอริไฟด์ โดยทดสอบการเผาไหม้ที่อุณหภูมิ  $850 \pm 40^\circ\text{C}$  ระยะเวลาการทดสอบ 30 นาที ใช้อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 1 กรัม/นาที และใช้การเติมอากาศที่มากเกินพอ ก๊าซเสียจากการเผาไหม้ที่ตรวจวัด ได้แก่  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{NO}_x$  และ  $\text{SO}_2$  ผลการทดลองพบว่า ค่าความเข้มข้นของก๊าซ  $\text{SO}_2$  ไม่สามารถตรวจวัดได้ (ND) ส่วนค่าความเข้มข้นของก๊าซ  $\text{NO}_x$  จากเชื้อเพลิงทั้งสองชนิดมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 5.50-11.54 ppm รูปที่ 33 (ก) แสดงความเข้มข้นของก๊าซเสีย ได้แก่  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ , และ  $\text{H}_2$  ที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ไม่ผ่านการทอริไฟด์ ค่าความเข้มข้นของก๊าซ  $\text{O}_2$  มีค่าเท่ากับ 16.66-21.20% ค่าความเข้มข้นของก๊าซ  $\text{CO}$  มีค่าเท่ากับ 21.40-112.90 ppm ค่าความเข้มข้นของก๊าซ  $\text{CO}_2$  มีค่าเท่ากับ 0.80-8.38% และค่าความเข้มข้นของก๊าซ  $\text{H}_2$  มีค่าเท่ากับ 19.60-46.60 ppm ซึ่งการคำนวณประสิทธิภาพการเผาไหม้ โดยการนำเอาค่าความเข้มข้นของก๊าซ  $\text{CO}_2$  มาคำนวณย้อนกลับให้อยู่ในหน่วยของ ppm โดยเทียบค่าจาก <https://www.edaphic.com.au/gas-detection-encyclopedia/how-to-convert-ppm-and/> (โดย  $\text{ppm} = \% \times 10,000$ , การตรวจวัดค่า  $\text{CO}_2$  ด้วยเซ็นเซอร์ตรวจวัดจะถูกนำเสนอด้วยค่าร้อยละ (%) แทนค่าความเข้มข้นของก๊าซในหน่วยของหน่วยต่อล้านส่วน (ppm) ซึ่งโดยทั่วไปก๊าซ  $\text{CO}_2$  10,000 ppm ที่ถูกอ่านค่าจากเซ็นเซอร์ จะมีค่าเท่ากับ 1% ฉะนั้น 1 ppm = 0.0001% ของ  $\text{CO}_2$  gas) ดังนั้นก๊าซ  $\text{CO}_2$  จะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 20,733.87 ppm และก๊าซ  $\text{CO}$  จะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 71.11 ppm สามารถคำนวณประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ไม่ผ่านการทอริไฟด์ มีค่าเท่ากับ 99.66% รูปที่ 32 (ข) แสดงความเข้มข้นของก๊าซเสีย ได้แก่  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ , และ  $\text{H}_2$  ที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผ่านการทอริไฟด์ ค่าความเข้มข้นของก๊าซ  $\text{O}_2$  มีค่าเท่ากับ 17.04-19.04% ค่าความเข้มข้นของก๊าซ  $\text{CO}$  มีค่าเท่ากับ 15.23-68.31 ppm ค่าความเข้มข้นของก๊าซ  $\text{CO}_2$  มีค่าเท่ากับ 0.20-1.78% และค่าความเข้มข้นของก๊าซ  $\text{H}_2$  มีค่าเท่ากับ 8.114-22.04 ppm ซึ่งจากการคำนวณย้อนกลับ ก๊าซ  $\text{CO}_2$  จะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 6,919.35 ppm และก๊าซ  $\text{CO}$  จะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 37.50 ppm สามารถคำนวณประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผ่านการทอริไฟด์ มีค่าเท่ากับ 99.46%

การทดสอบประสิทธิภาพการเผาไหม้เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผลิตได้ทั้งสองชนิด ในสภาวะของการเผาไหม้ที่มีการเติมอากาศมากเกินพอ มีค่าความเข้มข้นของก๊าซ  $\text{CO}$  และ  $\text{NO}_x$  อยู่ในช่วง 15.23-112.90 ppm และ 5.50-11.54 ppm ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Duan และคณะ, (2013) โดยทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิง

RDF ที่สภาวะการเติมอากาศมากเกินไป (130-150% of excess oxygen) ทำการทดสอบในเตาเผาแบบ vortexing fluidized bed combustor (VFBC) ที่อุณหภูมิ 700-800 °C ผลการทดลองพบว่า ค่าความเข้มข้นของก๊าซ CO อยู่ในช่วง 11.00-24.00 ppm และค่าความเข้มข้นของก๊าซ NO<sub>x</sub> อยู่ในช่วง 44.00-65.00 ppm



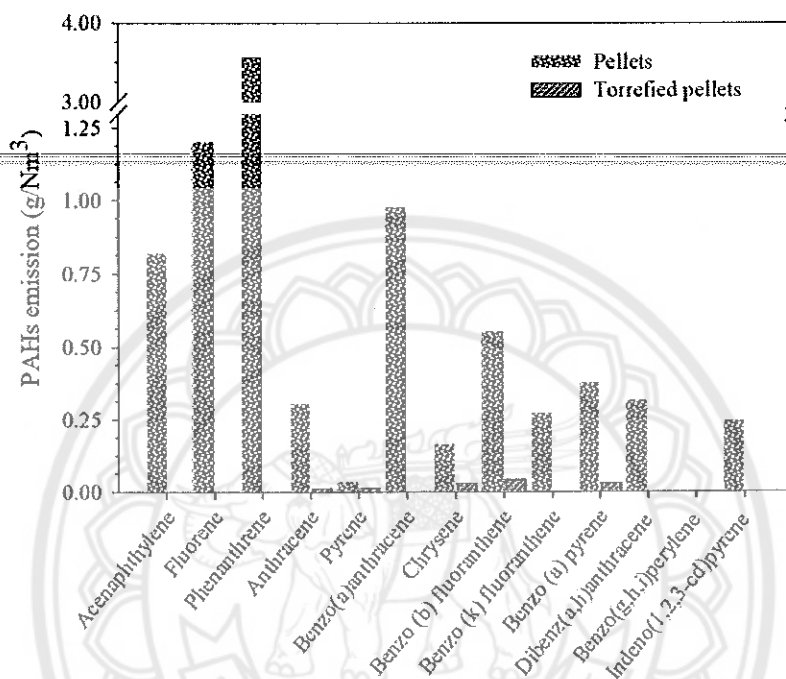
รูปที่ 33 ก๊าซเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ (ก) เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ไม่ผ่านการทอร์ไฟด์ และ (ข) ที่ผ่านการทอร์ไฟด์

#### 4.11.2 การวิเคราะห์ปริมาณมลพิษทางอากาศชนิด BTEX และ PAHs จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงอัดเม็ด

การวิเคราะห์ปริมาณมลพิษทางอากาศจำพวก BTEX และ PAHs ซึ่งสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดวงไซคลิก (mono/poly-cyclic aromatic ring) ที่มีจำนวน 1 วง และมากกว่า 1 วง ซึ่งจัดว่าเป็นมลพิษทางอากาศที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง ผลการทดลองพบว่า มลพิษทางอากาศชนิด BTEX ที่เกิดจากเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ไม่ผ่านการทอร์ไฟด์ (0.01076 g/Nm<sup>3</sup>) มีค่าผลรวมสูงกว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผ่านการทอร์ไฟด์ (0.0001 g/Nm<sup>3</sup>) ซึ่งการเผาไหม้เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ไม่ผ่านการทอร์ไฟด์สามารถตรวจวัดมลพิษทางอากาศ ได้แก่ toluene, ethylbenzene และ o-xylene ในขณะที่มลพิษทางอากาศชนิด benzene และ m, p-xylene ไม่สามารถตรวจวัดได้ และในส่วนของ การเผาไหม้เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผ่านการทอร์ไฟด์สามารถตรวจวัดมลพิษทางอากาศชนิด toluene เพียงชนิดเดียว ซึ่งผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 34 จากการสืบค้นข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยชี้ให้เห็นว่า การเผาไหม้เชื้อเพลิงขยะที่ถูกผลิตให้อยู่ในรูปของเชื้อเพลิงอัดเม็ด เชื้อเพลิงอัดแท่ง หรือเชื้อเพลิง RDF/SRF จะมีการปลดปล่อยมลพิษทางอากาศ



ตรวจพบจากการเผาไหม้ขยะชุมชนในโรงงานเตาเผาขยะเมืองเจ้อเจียง ประเทศจีน (Zhejiang province, China) ซึ่ง PAHs ที่ตรวจพบได้แก่ phenanthrene, anthracene และ fluoranthene (Shen และคณะ, 2010)



รูปที่ 35 PAHs ที่เกิดจากการเผาไหม้ (ก) เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ไม่ผ่านการทอริไฟต์ และ (ข) ที่ผ่านการทอริไฟต์

#### 4.12 การวิเคราะห์โลหะหนักปนเปื้อนและการชะละลายโลหะหนักในถ้ำหนัก

การวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก 5 ชนิด ได้แก่ Cd Cu Cr Pb และ Zn ในตัวอย่างถ้ำหนัก (ซีเมนต์) จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ไม่ผ่านและผ่านการทอริไฟต์ ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 16 ปริมาณโลหะหนักปนเปื้อน ได้แก่โลหะหนัก Pb เท่ากับ 0.011 mg/kg, Cr เท่ากับ 0.008-0.048 mg/kg และ Zn เท่ากับ 0.012-0.037 mg/kg ปริมาณโลหะหนัก Cd และ Cu ไม่สามารถตรวจวัดได้ (ND) การชะละลายโลหะหนักในเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งสองชนิด ไม่สามารถตรวจวัดค่าการชะละลายโลหะหนัก Cd Cu และ Pb แต่ Zn มีค่าการชะละลายเล็กน้อยโดยมีค่าเท่ากับ 0.001-0.003 mg/L โดยค่าโลหะหนักปนเปื้อนและค่าการชะละลายโลหะหนักทุกตัวอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน



ตารางที่ 16 ผลการศึกษาความเข้มข้นของโลหะหนักปนเปื้อนและการชะละลายโลหะหนักในถ้ำ

ตัวอย่าง	การทดสอบ	Pb	Cr	Zn	Cd	Cu
เชื้อเพลิงอัดเม็ดไม่ผ่าน การทอริไฟด์	โลหะหนักปนเปื้อน (mg/kg)	0.011	0.048	0.037	ND	ND
	การชะละลาย (mg/L)	ND	ND	0.003	ND	ND
เชื้อเพลิงอัดเม็ดผ่าน การทอริไฟด์	โลหะหนักปนเปื้อน (mg/kg)	ND	0.008	0.012	ND	ND
	การชะละลาย (mg/L)	ND	ND	0.001	ND	ND
โลหะหนักปนเปื้อน (mg/kg) <sup>1</sup>		600	40 <sup>2</sup>	-	10	2000
การชะละลาย(mg/L) <sup>3</sup>		5.0	10.0	25.0	0.5	15.0

ND คือ ไม่สามารถตรวจวัดได้

<sup>1</sup>CTI (2012), <sup>2</sup>EN 15411 (2011) และ <sup>3</sup>USEPA 1311 (1992) และ Chang และคณะ, (2001)

#### 4.13 การประเมินศักยภาพการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด

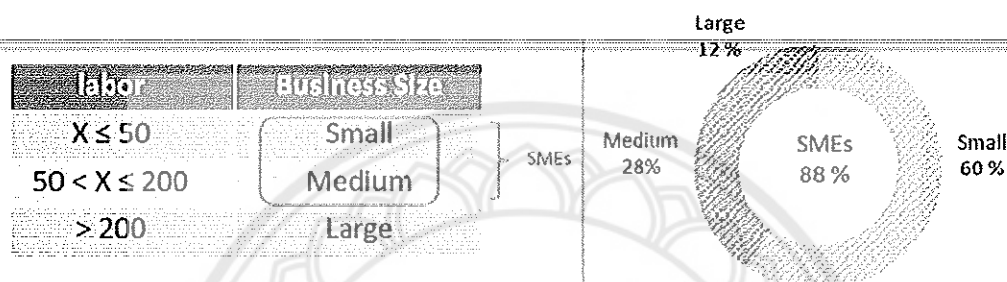
รูปที่ 36 แสดงให้เห็นสัดส่วนของผู้ประกอบการที่เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์พลาสติก หากจำแนกตามจำนวนแรงงานในสถานประกอบการขนาดเล็ก กลาง และใหญ่ ซึ่งสถานประกอบการขนาดเล็กมีจำนวนแรงงาน น้อยกว่า 50 คน ขนาดกลางมีจำนวนแรงงาน ตั้งแต่ 51 ถึง 200 คน และขนาดใหญ่ที่มีแรงงานมากกว่า 200 คน โดยสัดส่วนของสถานประกอบการที่เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์พลาสติกที่เป็นสถานประกอบการขนาดเล็ก ร้อยละ 60 สถานประกอบการขนาดกลาง ร้อยละ 28 และสถานประกอบการขนาดใหญ่ ร้อยละ 12

การประเมินศักยภาพด้านการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดในเชิงอุตสาหกรรมและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ซึ่งเป็น การประเมินจากข้อมูลที่ได้จากการเก็บรวบรวมข้อมูล การลงพื้นที่ และสอบถามผู้ประกอบการ แสดงดัง ตารางที่ 17 ผู้ให้ข้อมูลเป็นเจ้าของสถานประกอบการขนาดเล็ก มีจำนวนแรงงานน้อยกว่า 50 คน ซึ่งในแต่ละวัน จะมีปริมาณขวดพลาสติกรับเข้า ประมาณ 6 ตัน/วัน และมีปริมาณกากตะกอนและของเสียที่เกิดขึ้น ประมาณ 0.25 ตัน/วัน คาดการณ์การลงทุนการก่อสร้างโรงงานและเครื่องจักรสำหรับร่อนคัดขนาดและอัดเม็ด ที่ราคา ประมาณการณ์ เท่ากับ 550,000 บาท จะสามารถผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดได้ 1.5 ตัน/สัปดาห์ โดยจะมีต้นทุนค่าแรง และวัสดุอุปกรณ์สำหรับการผลิตต่อกิโลกรัม เท่ากับ 2.50 บาท/กิโลกรัม และใช้อ้างอิงราคาขายตามราคา ส่งออกเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด (wood pellets) อยู่ที่ ประมาณตันละ 150 เหรียญดอลลาร์สหรัฐ โดยที่ราคาขาย เท่ากับ 4.95 บาท/กิโลกรัม จะมีอัตรากำไรคืนทุน ซึ่งเป็นค่าประมาณการณ์ที่ 2.5 ปี จากข้อมูลที่ได้สามารถสรุป ได้อย่างคร่าวๆ ดังที่กล่าวมาในข้างต้น และอาจจะไม่ใช่ข้อมูลที่ถูกต้องเท่าที่ควร อย่างไรก็ตามในอนาคตหากมีการ

เก็บข้อมูลตามระเบียบวิธีวิจัยที่เหมาะสมแล้ว จะสามารถตอบโจทย์เชิงอุตสาหกรรมและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ได้อย่างครอบคลุม

ขนาดกิจการ  
แบ่งตามกำลังการผลิตของสว.

สัดส่วนผู้ผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกจำแนกตามการจ้างงาน



รูปที่ 36 ข้อมูลทุติยภูมิแสดงสัดส่วนขนาดของสถานประกอบการที่เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์พลาสติกในประเทศไทย  
ที่มา: <http://plastic.oie.go.th>

ตารางที่ 17 การประเมินทางเศรษฐศาสตร์เบื้องต้นของการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากตะกอนพลาสติก

รายการ	ค่า	หน่วย
คาดการณ์การลงทุน	550,000	บาท
ปริมาณขวดพลาสติกรับเข้า	6,000	กิโลกรัม/วัน
ปริมาณกากตะกอนและของเสียที่เกิดขึ้น	250	กิโลกรัม/วัน
ปริมาณขี้เลื่อย (ชีวมวล) ที่ใช้	10	%
ปริมาณการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด	1,500	กิโลกรัม/สัปดาห์
ราคาขาย*	4.95	บาท/กิโลกรัม
ต้นทุน (ประมาณการณ)	2.50	บาท/กิโลกรัม
อัตรากำไร (ประมาณการณ)	2.5	ปี

หมายเหตุ \*ราคาส่งออก wood pellets ที่ประมาณต้นละ 150 เหรียญดอลลาร์สหรัฐ

## บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการทดลอง

การผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากตะกอนพลาสติกเป็นหนึ่งในวิธีที่ใช้ในการลดปริมาณขยะของโรงงานบดย่อยพลาสติกหรือโรงงานแปรรูปพลาสติกเพื่อการรีไซเคิล ซึ่งเป็นการเปลี่ยนขยะเป็นพลังงาน (waste to energy concept) กากตะกอนพลาสติกที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการบดย่อยขวดพลาสติกพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (ขวดเพท) สามารถนำมาแปรงสภาพด้วยการอัดเม็ดให้เป็นเชื้อเพลิงขยะได้ การศึกษาที่ใช้กากตะกอนพลาสติกเป็นวัสดุหลักและใช้ชีวมวลเป็นวัสดุผสมร่วมและมีน้ำเป็นตัวผสม ซึ่งอัตราส่วนโดยมวลที่เหมาะสมของกากตะกอนพลาสติก:ชีวมวล (ซีลี้อย) เท่ากับ 90:10 และใช้น้ำร้อยละ 10 ของน้ำหนักวัสดุ การอัดเม็ดด้วยเครื่องอัดเม็ดแบบดายนัดเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดสำหรับอัดเม็ดกากตะกอนพลาสติก เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผลิตได้มีปริมาณโลหะหนักปนเปื้อนต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน และสามารถกึ่งกลางแข็งได้โดยไม่มีผลกระทบจากน้ำชะละลาย การใช้เทคนิคทอริแฟคชันสำหรับเชื้อเพลิงอัดเม็ดสามารถใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผลิตได้ ผลของการทอริไฟด์เชื้อเพลิงอัดเม็ดจะทำให้ค่าความชื้นลดลงและค่าดัชนีความคงทนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย นอกจากนี้การทอริไฟด์จะทำให้ปริมาณคลอไรด์ไอออนลดลงและมีค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น โดยค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผลิตได้อยู่ในช่วง 19 ถึง 21 MJ/kg ซึ่งเหมาะสมกับการใช้งานในเตาเผาในระดับอุตสาหกรรม ผลการทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงทั้งที่ไม่ผ่านและที่ผ่านการทอริไฟด์ มีปริมาณการปลดปล่อยมลพิษทางอากาศและปริมาณก๊าซเสียอยู่ในเกณฑ์ปกติ อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพในการเผาไหม้สูงมากกว่าร้อยละ 99 มีปริมาณก๊าซ SO<sub>2</sub> และ NO<sub>x</sub> ที่เกิดจากการเผาไหม้มีค่าใกล้เคียงศูนย์ สามารถนำมาเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดและใช้ทดแทนได้ จากผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดภายใต้สภาวะออกซิเจน พบว่าการที่เชื้อเพลิงอัดเม็ดมีส่วนผสมของชีวมวลจำนวนเล็กน้อยส่งผลต่อพฤติกรรมเผาไหม้ เนื่องจากพฤติกรรมการจุดติดไฟง่ายของชีวมวลและทำให้อุณหภูมิในการจุดติดไฟลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับวัตถุดิบกากตะกอนพลาสติกตั้งต้น อีกทั้งยังสามารถใช้งานเชื้อเพลิงอัดเม็ดในระบบการเผาไหม้เพื่อผลิตพลังงานในรูปแบบอื่นๆ ตัวอย่างเช่น การนำไปใช้งานกับกระบวนการไพโรไลซิสและแก๊สซิฟิเคชัน ทั้งนี้หากผู้ประกอบการรับซื้อของเก่าและวัสดุรีไซเคิล โรงงานบดย่อยพลาสติกหรือโรงงานแปรรูปพลาสติกเพื่อการรีไซเคิล มีความประสงค์ที่จะลงทุนเพิ่มเติม อาจจะต้องใช้เงินลงทุนด้านการติดตั้งเครื่องจักรและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องต่างๆ ประมาณ 550,000 บาท และมีระยะเวลาในการคืนทุน ประมาณ 2.5 ปี

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

การศึกษาวิจัยในขั้นต่อไปควรศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผลิตได้จากกากตะกอนพลาสติกผสมชีวมวลชนิดอื่นๆ ควรศึกษาในระดับไพล๊อต (pilot-scale) ก่อนการใช้งานในอุตสาหกรรม และควรศึกษากระบวนการผลิตเป็นพลังงานในรูปแบบอื่นๆ เช่น การนำไปผลิตเป็นน้ำมันไพโรไลซิส หรือก๊าซสังเคราะห์ (synthesis gas) เป็นต้น เพื่อใช้เป็นทางเลือกในการใช้งานเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากตะกอนพลาสติก นอกจากนี้การศึกษาด้านเศรษฐศาสตร์จะต้องมีการวางแผนและการเก็บข้อมูลตามระเบียบวิธีวิจัยที่เหมาะสม จึงจะสามารถตอบโจทย์เชิงอุตสาหกรรมและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ได้อย่างครบถ้วน

## เอกสารอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. (2554). รายงานผลการปฏิบัติงานโครงการร้านรับซื้อของเก่าสีเขียว ประจำปี 2552-2553. กรมควบคุมมลพิษ. ออนไลน์: [http://www.pcd.go.th/info\\_serv/waste\\_greenantiqueshop.html](http://www.pcd.go.th/info_serv/waste_greenantiqueshop.html).

ทองเกียรติ เกียรติศิริโรจน์, ไพสิฐ พาณิชกุล, เหมือนจิต แจ่มศิลป์, ณัฐวี วรรณยศ, จิตเทพ ประสิทธิ์อยู่ ศิล และ ณัฐวุฒิ ดุษฎี (2553). การสาธิตการเปลี่ยนขยะในมหาวิทยาลัยเป็นพลังงานในรูปความร้อน, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และศูนย์วิจัยพลังงาน มหาวิทยาลัยแม่โจ้, เชียงใหม่.

ธนาวดี ลี้จากภัย. (2547). ขวด PET: การผลิต และการใช้งาน. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ MTEC. ออนไลน์: [https://www2.mtec.or.th/th/e-magazine/admin/upload/216\\_31-34.pdf](https://www2.mtec.or.th/th/e-magazine/admin/upload/216_31-34.pdf).

นคร ทิพยวงศ์. (2558). เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล, สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่.

พนิตา พริงสกุล. (2557). ร้านรับซื้อของเก่าสีเขียว ศูนย์บริหารกฎหมายสาธารณสุข ออนไลน์: [http://laws.anamai.moph.go.th/download/article/article\\_sep57/%E0%B8%9A%E0%B8%97%E0%B8%84%E0%B8%A7%E0%B8%B2%E0%B8%A1%E0%B8%98%E0%B8%B8%E0%B8%A3%E0%B8%81%E0%B8%B4%E0%B8%88%E0%B8%A3%E0%B8%B1%E0%B8%9A%E0%B8%8B%E0%B8%B7%E0%B9%89%E0%B8%AD%E0%B8%82%E0%B8%AD%E0%B8%87%E0%B9%80%E0%B8%81%E0%B9%88%E0%B8%B2.pdf](http://laws.anamai.moph.go.th/download/article/article_sep57/%E0%B8%9A%E0%B8%97%E0%B8%84%E0%B8%A7%E0%B8%B2%E0%B8%A1%E0%B8%98%E0%B8%B8%E0%B8%A3%E0%B8%81%E0%B8%B4%E0%B8%88%E0%B8%A3%E0%B8%B1%E0%B8%9A%E0%B8%8B%E0%B8%B7%E0%B9%89%E0%B8%AD%E0%B8%82%E0%B8%AD%E0%B8%87%E0%B9%80%E0%B8%81%E0%B9%88%E0%B8%B2.pdf).

วงศ์พาณิชย์. (2561). ราคากลางรับซื้อขยะรีไซเคิลวันนี้ (ราคาซื้อวัสดุรีไซเคิลหน้าโรงงานวงศ์พาณิชย์ จังหวัดพิษณุโลก). ออนไลน์: <http://www.wongpanit.com/wpnnew/>.

ศิริรัตน์ จิตการคำ. (2551). จากขยะสู่น้ำมัน : เทคโนโลยีผลิตพลังงานทางเลือกที่ดูแลสิ่งแวดล้อม สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

สำนักบริหารจัดการกากอุตสาหกรรม กรมโรงงานอุตสาหกรรมกระทรวงอุตสาหกรรม. (2554). คู่มือหลักปฏิบัติที่ดีสำหรับการให้บริการบำบัดกำจัดกากอุตสาหกรรม โครงการจัดระดับโรงงานจัดการกากอุตสาหกรรมประเภท 101 105 และ 106. ออนไลน์: <http://www2.diw.go.th/iwmb/form/factory1.pdf>.

สถาบันพลาสติก. (2560). สถิติการนำเข้าและส่งออกผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรมพลาสติกของไทย (รายเดือน). สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม. ออนไลน์: [http://plastic.oie.go.th/ix\\_Product.aspx](http://plastic.oie.go.th/ix_Product.aspx).

อุกฤษ สมัครสมาน, รัตนาภรณ์ พันธุ์รัตน์, และ กิตติกร สาสุจิตต์. (2561). คุณสมบัติเชื้อเพลิงอัดเม็ดผลิตจากกากตะกอนพลาสติกผสมชีวมวล. การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 14, 13 – 15 มิถุนายน 2561 ณ โนโวเทล ระยอง หน้า 769-722.

W. Punin, S. Maneewan, C. Punlek. (2014). The feasibility of converting solid waste into refuse-derived fuel 5 via mechanical biological treatment process, *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 16, 753-762.

G. Piao, S. Aono, S. Mori, S. Deguchi, Y. Fujima, M. Kondoh, M. Yamaguchi. (1998). Combustion of refuse derived fuel in a fluidized bed, *Waste Management*, 18, 509-512.

A. Sever Akdağ, A. Atımtay, F.D. Sanin. (2016). Comparison of fuel value and combustion characteristics of two different RDF samples, *Waste Management*, 47, Part B, 217-224.

J.J. Chew, V. Doshi. (2011). Recent advances in biomass pretreatment: Torrefaction fundamentals and technology, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 4212-4222.

J.-C. Tsai, B.-L. Liao, C.-Y. Chiu, C.-S. Chen. (2012). Thermal analysis of biomass torrefaction, *The 3<sup>rd</sup> ASCON-IEEChE*, 205-208.

Ministry of the Environment, Minister's Secretariat. (unknown). Waste Management and Recycling Department, Policy Planning Division, Office of Sound Material-Cycle Society, Solid Waste Management and Recycling Technology of Japan. online source: [www.env.go.jp/recycle/circul/venous\\_industry/index.html](http://www.env.go.jp/recycle/circul/venous_industry/index.html).

L. Zhao , A. Giannis , W.-Y. Lam , S.-X. Lin , K. Yin , G.-A. Yuan , J.-Y. Wang. (2015). Characterization of Singapore RDF resources and analysis of their heating value. *Sustainable Environment Research* 16;1, 51-54.

W. Stelte, C. Clemons, J.K. Holm, A.R. Sanadi, J. Ahrenfeldt, L. Shang, U.B. Henriksen. (2011). Pelletizing properties of torrefied spruce. *Biomass and Bioenergy*, 35(11), 4690-4698. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.09.025>.

C.-S. Logan. I. Maltzer, J. Martino. (2017). Poly Pelletizer: Recycled Pet Pellets From Water Bottles. *Mechanical Engineering Senior Theses*. 70. [https://scholarcommons.scu.edu/mech\\_senior/70](https://scholarcommons.scu.edu/mech_senior/70).

G. Polat, B. Birol, M.N. Saridede. (2014). Utilization of waste polyethylene terephthalate as a reducing agent in the reduction of iron ore composite pellets. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*; 21:8, 748-754.

D.R. Nhuchhen, M.T Afzal. (2017). HHV Predicting Correlations for Torrefied Biomass Using Proximate and Ultimate Analyses. *Bioengineering*, 4:1, 7. 1-15  
<http://doi.org/10.3390/bioengineering4010007>.

F. Welle (2011). Twenty years of PET bottle to bottle recycling-An overview. *Resources, Conservation and Recycling*, 55:11, 865-875.

S. Beena (2017). Chapter 3 Methods of recycling, in *Recycling of polymers: Methods, Characterization and Applications*, editor Raju Francis, Wiley-VCH, Germany, pp.55-112.

M. Tolinski. (2011). *Plastics and Sustainability: Towards a Peaceful Coexistence between Bio-based and Fossil Fuel-based Plastics*. Wiley. ISBN: 0470938781.

R.R. Casado, J.A. Rivera, E.B. García, R.E. Cuadrado, M.F. Llorente, R.B. Sevillano, A.P. Delgado. (2015). Classification and characterisation of SRF produced from different flows of processed MSW in the Navarra region and its co-combustion performance with olive tree pruning residues. *Waste Management* 47, Part B, 206-216.

C. Cazan, M. Cosnita, A. Duta. (2017). Effect of PET functionalization in composites of rubber-PET-HDPE type. *Arabian Journal of Chemistry*. 10:3, 300-312.

V. Dhyani, T. Bhaskar. (2018). A comprehensive review on the pyrolysis of lignocellulosic biomass. *Renewable Energy*, 129, 695-716.

M. Rayung, N.A. Ibrahim, N. Zainuddin, W.Z. Saad, N.I.A. Razak, B.W. Chieng. (2014). The Effect of Fiber Bleaching Treatment on the Properties of Poly(lactic acid)/Oil Palm Empty Fruit Bunch Fiber Composites. *International Journal of Molecular Sciences*, 15:8, 14728-14742.

M.C. Di Lonardo, M. Franzese, G. Costa, R. Gavasci, F. Lombardi. (2016). The application of SRF vs. RDF classification and specifications to the material flows of two mechanical-biological treatment plants of Rome: Comparison and implications. *Waste Management*, 47, 195-205.

EN 15411:2011. (2011). Solid recovered fuels - methods for the determination of the content of trace elements (As, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mo, Mn, Ni, Pb, Sb, Se, Tl, V and Zn), European Committee for Standardization.

CTI. (2012). Raccomandazione 8: Combustibili solidi secondari (CSS) – Classificazione dei CSS e specifiche dei CSS ottenuti dal trattamento meccanico dei rifiuti non pericolosi (in Italian). Edition May 2012, CTI – Italian Thermotechnical Committee Energy and Environment.

USEPA Method 1311. (1992). Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP), Environmental Protection Agency (EPA) Methods.

E.-E. Chang, P.-C. Chiang, P.-H. Lu, Y.-W. Ko. (2001). Comparisons of metal leachability for various wastes by extraction and leaching methods. *Chemosphere*, 45:1, 91-99.

U. Auprakul, A. Promwungkwa, N. Tippayawong, S. Chailangmuang. (2014). Densified fuel from mixed plastic wastes and corn stove, paper presented in the 5th KKU International Engineering Conference, Khon Kaen, Thailand.

E. Ansah, L. Wang, A. Shahbazi. (2016). Thermogravimetric and calorimetric characteristics during co-pyrolysis of municipal solid waste components. *Waste Management*, 56, 196–206.

L. Wang, E. Barta-Rajnai, Ø. Skreiberg, R. Khalil, Z. Czégény, E. Jakab, Z. Barta, M. Grønli. (2017). Impact of Torrefaction on Woody Biomass Properties. *Energy Procedia*, 105, 1149–1154.

H. Yuan, Y. Wang, N. Kobayashi, D. Zhao, S. Xing. (2015). Study of Fuel Properties of Torrefied Municipal Solid Waste. *Energy & Fuels*, 29:8, 4976-4980.

T.K. Shoulaifar. (2016). Chemical Changes in Biomass during Torrefaction. Doctoral Thesis, Laboratory of Inorganic Chemistry, Department of Chemical Engineering, Åbo Akademi University, Finland. ISSN 2343-2535.

U. Arena, F.D. Gregorio. (2016). Fluidized bed gasification of industrial solid recovered fuels. *Waste Management*, 50, 86-92.

D.C. Aller, S. Bakshi, D.A. Laird. (2017). Modified method for proximate analysis of biochars. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 124, 335–342.

H. Cui, S. Turn. (2018). Fuel properties and steam reactivity of solid waste streams from contingency bases. *Waste Management*, 78, 16–30.

F. Duan, J. Liu, C.-S. Chyang, C.-H. Hu, J. Tso. (2013). Combustion behavior and pollutant emission characteristics of RDF (refuse derived fuel) and sawdust in a vortexing fluidized bed combustor. *Energy*, 57, 421-426. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.04.070>.

M.F. Tawfiq, M.K. Aroua, N.M.N. Sulaiman. (2015). On-line CO, CO<sub>2</sub> emissions evaluation and (benzene, toluene, xylene) determination from experimental burn of tropical biomass. *Journal of Environmental Sciences*, 33, 239-244. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2015.01.015>.

C. Shen, X. Tang, J. Yao, D. Shi, J. Fang, M.I. Khan, S.A. Cheema, Y Chen. (2010). Levels and patterns of polycyclic aromatic hydrocarbons and polychlorinated biphenyls in municipal waste incinerator bottom ash in Zhejiang province, China. *Journal of Hazardous Materials*, 179:1, 197-202. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.02.079>.

E. Rada, G. Andreottola. (2012). RDF/SRF: Which perspective for its future in the EU. *Waste Management*, 32, 1059–1060.

S. Doring, H. van Renouard. (2013). *Power from pellets: Technology and applications*. Spriger Heidelberg New York Dordrecht, London. ISBN 978-3-642-19961-5.

Y. Yue, H. Singh, B. Singh, S. Mani. (2017). Torrefaction of sorghum biomass to improve fuel properties. *Bioresource Technology*, 232, 372-379.

Mišljenović, N., Bach, Q.-V., Tran, K.-Q., Salas-Bringas, C., & Skreiberg, Ø. (2014). Torrefaction Influence on Pelletability and Pellet Quality of Norwegian Forest Residues. *Energy & Fuels*, 28(4), 2554-2561. doi: 10.1021/ef4023674





### เอกสารวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการระดับชาติ

คุณสมบัติเชิงเคมีของเม็ดพลาสติกจากกากตะกอนพลาสติกผสมชีวมวล  
Properties of Pellets Produced from Ground Plastic Wastes Mixed with Biomass

อุกกุล สนิทรมาน<sup>1</sup>, รัตนกรณ์ พันธุ์รัมย์<sup>1</sup> และ กิรฉัตร สาสุจิรัมย์<sup>2</sup>

<sup>1</sup> คณะเกษตรศาสตร์ วิทยาลัยการเกษตรและเทคโนโลยีสุรินทร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์

<sup>2</sup> วิทยาลัยบริหารการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

\*ผู้ติดต่อ: E-mail: snitraman@psu.ac.th, โทรศัพท์ 055 662754, โทรสาร 055 962750

บทคัดย่อ

RE-01-118

การผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดพลาสติกเป็นวิธีใหม่ในการลดปริมาณขยะของโรงงานบดย่อยพลาสติกขนาดเล็กและเป็นหนึ่งในขั้นตอนของการเปลี่ยนขยะเป็นพลังงาน กากตะกอนพลาสติกที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการบดย่อยพลาสติกหรือที่เรียกว่าเศษพลาสติก (ทพ) นั้นสามารถนำมาบดและผสมด้วยกากตะกอนชีวมวลให้เป็นขยะเชื้อเพลิงได้ การศึกษาที่ใช้กากตะกอนพลาสติกเป็นวัสดุหลักและใช้ชีวมวลเป็นวัสดุผสมร่วมและมีน้ำเป็นตัวประสาน ในอัตราส่วนโดยมวลของกากตะกอนพลาสติก:ชีวมวล:น้ำ เท่ากับ 10:1:1 อัดเม็ดด้วยเครื่องอัดเม็ดแบบคานาอัด 1 กิโลกรัมต่อครั้ง และการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เป็นเชื้อเพลิงช่วยถลุงวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี รวมถึงวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก ผลการทดลองพบว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดได้มีคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีเทียบเท่ากับชีวมวลอัดเม็ดทั่วไป มีค่าความชื้น 2.32% เถ้า 3.18% สลระเหย 86.50% คาร์บอนคงเหลือ 8.00% ที่ค่าความร้อนสูง เท่ากับ 19.43 MJ/kg และมีค่าดัชนีความคงทนอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดภายใต้สภาวะออกซิเจน พบว่าการที่เชื้อเพลิงอัดเม็ดมีส่วนผสมของชีวมวลจำนวนเล็กน้อยส่งผลต่อพฤติกรรมการเผาไหม้และทำให้คุณสมบัติในการทดสอบเพลิงคงเหลือเปรียบเทียบกับวัสดุบดกากตะกอนพลาสติกทั้งนี้  
คำหลัก: กากตะกอนพลาสติก, ขยะเชื้อเพลิง, พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต, จีวรพล, อัดเม็ด

Abstract

Pelletization of scrap plastics was a method for wastes reduction in a small-scale plastics crushing plant. It could be defined as one of procedures for waste-to-energy process. Ground plastic wastes from shredding of polyethylene terephthalate (PET) bottles were altered into a refuse-derived fuel by using a flat die pellets press. In this study, pelletizing of ground plastic wastes and biomass was subjected to use water as a binder. The ratio of ground plastic wastes:biomass:water was 10:1:1 (by weight). A flat die press machine conducted in a normal condition with a production rate of 1 kg per batch. Physical and chemical properties, durability test, and thermogravimetric analysis were investigated. The experimental results indicated that general properties of the pellets were similar to regular biomass pellets. Physical properties such as moisture, ash, volatile matters, fixed carbon, and high heating value were 2.32%, 3.18%, 86.50%, 8.00% and 19.43 MJ/kg, respectively. The durability of the pellets was in accordance with the PFI-standards. The results of thermogravimetric analysis under oxygen condition indicated that a small amount of biomass contents in the pellets was decreased ignition temperature and improved combustion behaviors which were compared to raw of ground plastic wastes.

Keywords: Biomass, PET, Pelletization, Ground plastic wastes, Refuse derived fuel

1. บทนำ

กระบวนการรีไซเคิลเป็นวิธีหนึ่งที่มีแนวโน้มให้กับขวดพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene terephthalate; PET) ที่ใช้แล้ว อย่างไรก็ตามก่อนที่ขวดพลาสติกจะเข้าสู่กระบวนการรีไซเคิลต้องผ่านขั้นตอนการเตรียมพลาสติก ซึ่งขั้นตอนการเตรียมพลาสติกนั้นคือผ่านโรงงานบดย่อย ขวดพลาสติกจะถูกปรับชิ้นและคัดเลือก (Sorting) และฉลาก (Label removing) บดย่อย (Crushing) ต้าง (Washing) ฝืนแห้ง (Drying) และคัดเศษปนเปื้อนในลำดับขั้นสุดท้าย (Final screening) ก่อนส่งจำหน่ายรูปที่ 1 (ก) แสดงลักษณะทางกายภาพของรีนพลาสติก (PET Flakes) ซึ่งความสะอาดของรีนพลาสติกเป็นหนึ่งในการมาตรฐานและเป็นตัวกำหนดราคาซื้อขาย ในขั้นตอนของการรีไซเคิลรีนพลาสติกนั้นจะเกิดของเสียและกากตะกอน ซึ่งไม่สามารถนำกลับไปใช้งานได้อีก [1, 2] ของเสียและกากตะกอนจากการบดย่อยที่เก็ลขึ้น

ได้แก่ เศษพลาสติก (Residue) ฉลาก (Label) ขุย (Fluff) ฝุ่นผง (Dust) กาก (Slag) และตะกอน (Sludge) และของเสียที่เกิดจากการจัดสีของเครื่องจักร (Case) จะเป็นพลาสติกผสมจำพวก พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต พอลิโพรพิลีน พอลิไวนิลคลอไรด์ และพอลิสไตรีน เป็นหลัก ในที่นี้เรียกว่า กากตะกอนพลาสติก (Ground plastic wastes) หากมีการจัดการกากตะกอนพลาสติกและของเสียที่เกิดขึ้นไม่ถูกต้อง จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยตรงเนื่องจากกากตะกอนที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นผงพลาสติกขนาดเล็กและจัดเป็นไมโครพลาสติก ชนิดปฐมภูมิ (Primary micro-plastic) หากมีการนำไปฝังกลบรวมกับขยะชุมชนหรือมีการเผาทำลายลึกลับก็อาจทำให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพของประชาชน

งานวิจัยนี้เลือกใช้กากตะกอนพลาสติกจากโรงงานบดย่อยขวดพลาสติกขนาดเล็กในชุมชน กากตะกอนพลาสติกจากโรงงานดังกล่าว มีคุณสมบัติทางกายภาพอยู่ระหว่างขยะ

**ผลของการทอริแฟคชันต่อคุณภาพเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผลิตจากกากตะกอนพลาสติกผสมชีวมวล**  
**Effect of Torrefaction on Quality of Pellets Produced from Mixture**  
**of Sludge of Crushed Plastics and Biomass**

**รัตนภรณ์ วัชรรัตน์<sup>1</sup>, สิริบุษ จินดารักษ์<sup>2</sup>, ชานยุต กฤตสุนันกุล<sup>1</sup> และ อุทิศ สมักสมาน<sup>1\*</sup>**  
**Rattanakorn Wattanasorn<sup>1</sup>, Srinuch Chindaraksa<sup>2</sup>, Chanyud Kritsunankul<sup>1</sup> and Ukrit Samaksaman<sup>1\*</sup>**

<sup>1</sup>ภาควิชาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ จังหวัดพิจิตร 65000

<sup>2</sup>ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ จังหวัดพิจิตร 65000

<sup>1</sup>Department of Natural Resources and Environment, Faculty of Agriculture Natural Resources and Environment, Naresuan University, Phitsanulok, 65000, Thailand

<sup>2</sup>Department of Physics, Faculty of Science, Naresuan University, Phitsanulok, 65000, Thailand

\*Corresponding author: ukrits@nu.ac.th

**บทคัดย่อ**

การบดอัดพลาสติกเป็นขั้นตอนสำคัญของการเตรียมพลาสติกก่อนการรีไซเคิล อย่างไรก็ตามขั้นตอนการบดอัดทำให้เกิดของเสียและกากตะกอนพลาสติกขนาดเล็กที่ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ งานวิจัยนี้นำกากตะกอนพลาสติกมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ดและมีส่วนผสมของชีวมวล ได้แก่ ชี้อ้อยไม่คั่วเมล็ด และแกนข้าวโพด โดยนำมาอัดเม็ดด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกและเชื้อเพลิงอัดเม็ดจะถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยการทอริแฟคชันที่อุณหภูมิ 170, 190 และ 225 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนอากาศ 1, 4 และ 6 ลิตร/นาที และเวลา 5, 10 และ 15 นาที จากนั้นศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ ค่าดัชนีความหนาแน่นของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผ่านและไม่ผ่านการทอริแฟคชัน และวิเคราะห์ปริมาณคลอไรด์ปนเปื้อน จากการทดลองพบว่า คุณสมบัติที่สูงสุดของการทอริแฟคชันเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่มีส่วนผสมของกากตะกอนพลาสติกและชี้อ้อยไม่คั่ว SP/TS, กากตะกอนพลาสติกและชี้อ้อยไม่คั่วเมล็ด SP/ES และกากตะกอนพลาสติกและแกนข้าวโพด SP/CC เท่ากับ 170, 190 และ 225 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยใช้อัตราการป้อนอากาศที่ 1 ลิตร/นาที สำหรับเชื้อเพลิง SP/TS และ SP/ES, และ 6 ลิตร/นาที สำหรับเชื้อเพลิง SP/CC และใช้เวลา 10 นาที ค่าดัชนีความหนาแน่นของเชื้อเพลิงอัดเม็ดก่อนการทอริแฟคชัน เท่ากับ 0.9972-0.9986 และเมื่อผ่านการทอริแฟคชันค่าดัชนีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเท่ากับ 0.9994-0.9999 การทอริแฟคชันเชื้อเพลิงอัดเม็ดส่งผลให้พลาสติกแตกและอัดตัวกับชีวมวลได้ดีขึ้นทำให้ค่าดัชนีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น และยังพบว่าค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผ่านการทอริแฟคชันเพิ่มขึ้น SP/TS เท่ากับ 20.79 SP/CC เท่ากับ 19.70 และ SP/ES เท่ากับ 35.98 เมกะจูล/กิโลกรัม ซึ่งมีค่าสูงกว่าชีวมวลและกากตะกอนพลาสติกที่เริ่มต้น การทอริแฟคชันทำให้ปริมาณคลอไรด์ปนเปื้อนลดลง เท่ากับ 23.64-37.25 ppb ซึ่งคุณภาพของเชื้อเพลิงอัดเม็ดอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานและสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนได้

**คำสำคัญ:** กากตะกอนพลาสติก, ชีวมวล, เชื้อเพลิงอัดเม็ด, ทอริแฟคชัน, อัดแบบไฮดรอลิก

**ABSTRACT**

The crushing process is an important process for plastics preparation prior feed into the recycling cycle. However, the crushing process generated waste and sludge of plastics that were useless. In this study, hydraulic press machine used for pellets production. The mixtures of the sludge of crushed plastics (SP



นเรศวรวิจัย ครั้งที่ 13: วิจัยและนวัตกรรม ขับเคลื่อนเศรษฐกิจและสังคม

สมบัติเชื้อเพลิงอัดเม็ดผลิตจากกากตะกอนพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตผสมซีลี้อยไม้สัก  
รัตนารณ์ พันธ์รัตน์ และอุกฤต สมัยธรรมาน

Characteristics of pellets produced from residues of polyethylene terephthalate plastic  
mixed with teak sawdust

Rattanaorn Punturat and Ukrit Samaksaman

ภาควิชาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร พิษณุโลก 65000  
Department of Natural Resources and Environment, Faculty of Agriculture Natural Resources and Environment, Naresuan University,  
Phitsanulok, 65000  
\*Corresponding author. E-mail: ukrit@nu.ac.th

บทคัดย่อ

กระบวนการรีไซเคิลพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตมีขั้นตอนสำคัญที่ทำให้เกิดกากตะกอนพลาสติก คือ ขั้นตอนการบดย่อย กากตะกอนพลาสติกเหล่านี้ไม่สามารถนำกลับไปใช้ประโยชน์เนื่องจากมีขนาดเล็กกว่ามาตรฐาน และมีสารปนเปื้อนของพลาสติกชนิดอื่นและฝุ่นผงจากการบดย่อย การกำจัดกากตะกอนพลาสติกอย่างปลอดภัยวิธีอาจส่งผลกระทบต่อประชาชนและสิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้ได้เสนอแนวทางในการนำกากตะกอนพลาสติกมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ดโดยผสมกับซีลี้อยไม้สักและอัดเม็ดด้วยเครื่องอัดแบบไฮดรอลิก จากนั้นศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมี และสมบัติเชิงความร้อนของวัตถุดิบและเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผลิตได้ จากการศึกษาพบว่า ธาตุพื้นฐานของวัตถุดิบกากตะกอนพลาสติกและซีลี้อยไม้สัก มีคาร์บอนร้อยละ 38.41 และ 47.58, ไฮโดรเจนร้อยละ 3.02 และ 6.32, ออกซิเจนร้อยละ 21.59 และ 51.56 ไนโตรเจนร้อยละ 0.07 และ 0.06, และไม่พบซัลเฟอร์ ตามลำดับ วัตถุดิบกากตะกอนพลาสติกและซีลี้อยไม้สัก มีสัดส่วนคาร์บอนต่อไฮโดรเจน (C:H) 12.70 และ 7.52 และสัดส่วนออกซิเจนต่อคาร์บอน (O:C) เท่ากับ 0.56 และ 1.08 ตามลำดับ จากการศึกษาค่าความร้อนสูง (high heating value, HHV) ของวัตถุดิบกากตะกอนพลาสติกและซีลี้อยไม้สัก มีค่าเท่ากับ 13.47 และ 15.92 เมกะจูลต่อกิโลกรัม (MJ/kg) ตามลำดับ เมื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ดโดยผสมวัตถุดิบในอัตราส่วนกากตะกอนพลาสติกต่อซีลี้อยไม้สัก เท่ากับ 10 ต่อ 1 พบว่า มีสัดส่วน C:H และ O:C เท่ากับ 11.48 และ 0.69 ตามลำดับ และมีค่า HHV เท่ากับ 18.06 MJ/kg จากการศึกษาวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกดิฟเฟอเรนเชียลสแกนิงแคลอริมิเตอร์ พบว่า เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผลิตได้สามารถเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ภายใต้สภาวะออกซิเดชันที่อุณหภูมิในช่วง 452-469 องศาเซลเซียส และมีเถ้าเล็กน้อย ซึ่งเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผลิตได้มีสมบัติเหมาะสมและสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนได้

คำสำคัญ: กากตะกอนพลาสติก ซีลี้อยไม้สัก เชื้อเพลิงอัดเม็ด พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต สมบัติ

