

การปรับปรุงคุณภาพเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากตะกอนพลาสติกผสมชีวมวล
โดยใช้การทอริแฟคชัน



วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
หลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
พฤษภาคม 2562
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนครสวรรค์

วิทยานิพนธ์ เรื่อง "การปรับปรุงคุณภาพเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากตะกอนพลาสติกผสมชีวมวล
โดยใช้การทอริแฟคชัน"

ของ นางสาว รัตนาภรณ์ พันธุ์รัตน์

ได้รับการพิจารณาให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
(ดร.คณิต มานะธุระ)

.....ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ดร.อุกฤษฏ์ สมัครสมาน)

.....กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิรินุช จินดารักษ์)

.....กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ดร.ชาญยุทธ กฤตสุนันท์กุล)

.....กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนินทร์ อัมพรสถิร)

อนุมัติ

.....
(ศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล มณีใสว่าง)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

23 พค 2562

ประกาศคุณูปการ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงในความกรุณาของ ดร.อุกฤษฏ์ สมัครสถาน ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลาอันมีค่ามาเป็นທີ່ปรึกษา พร้อมทั้งให้คำแนะนำตลอดระยะเวลาในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการวิทยานิพนธ์อันประกอบไปด้วย ผู้ช่วยศาสตราจารย์.ดร.ศิริสุข จินดารักษ์ และ ดร.ชาญยุทธ กฤตสุนันท์กุล กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.คณิต มานะธวัช ประธานกรรมการ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนินทร์ อัมพรสถิร กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ด้วยความเอาใจใส่ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์และทรงคุณค่า

กราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กิตติกร สาสุจิตต์ และ ศูนย์วิจัยพลังงานและวิทยาลัยพลังงานทดแทนมหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่ที่อนุเคราะห์เครื่องมือและอุปกรณ์ในการอัดเม็ดเชื้อเพลิง บริษัท เบลตัน อินดัสเตรียล (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์วิเคราะห์ข้อมูลการปนเปื้อนคลอไรด์ในเชื้อเพลิงอัดเม็ด การสนับสนุนจากงบประมาณการวิจัยทุนอุดหนุนการวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยนเรศวร ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2561 และได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน ประจำปีงบประมาณ 2561 สำหรับการทำการวิจัยในครั้งนี้

เหนือสิ่งอื่นใดขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดาและครอบครัว ของผู้วิจัยที่ให้กำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกๆ ด้านอย่างดีที่สุดเสมอมา

คุณค่าและคุณประโยชน์อันพึงจะมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอบและอุทิศแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่า งานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาเชื้อเพลิงอัดเม็ดเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนในประเทศและผู้ที่เกี่ยวข้องบ้างไม่มากก็น้อย

รัตนภรณ์ พันธุ์รัตน์

ชื่อเรื่อง	การปรับปรุงคุณภาพเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากตะกอนพลาสติกผสม ชีวมวลโดยใช้การทอรีแฟคชัน
ผู้วิจัย	รัตนภรณ์ พันธุ์รัตน์
สถานที่ปรึกษา	ดร.อุกฤษฏ์ สมัครสมาน
กรรมการที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริรุช จินดารักษ์ ดร.ชาญยุทธ กฤตสุนันท์กุล
ประเภทสารนิพนธ์	วิทยานิพนธ์ วท.ม. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2561
คำสำคัญ	ทอรีแฟคชัน ตะกอนพลาสติก ชีวมวล เชื้อเพลิงอัดเม็ด

บทคัดย่อ

ปัจจุบันขยะจากขวดพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีปริมาณการใช้เพิ่มขึ้นทุกวัน ถึงแม้จะมีภาวรีไซเคิลโดยผ่านกระบวนการเชิงกลก็ยังมีปริมาณของเสียจากตะกอนพลาสติกที่ไม่สามารถนำกลับไปใช้ได้ อีก การกำจัดแบบผิดวิธีโดยทิ้งรวมกับขยะชุมชนหรือลักลอบเผารวมกับขยะชุมชนอาจจะก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ ฝุ่นผง และโลหะหนัก และส่งผลกระทบต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของวัตถุดิบที่เกิดจากการบดย่อยขวดพลาสติกและชีวมวลทางการเกษตร และเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผลิตได้ เพื่อศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของวัตถุดิบในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดและสภาวะที่เหมาะสมในการทอรีแฟคชันเชื้อเพลิงอัดเม็ด และเพื่อศึกษาสมบัติเชิงความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันและการทดสอบค่ามลพิษที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ โดยนำของเสียจากตะกอนพลาสติกชนิด PET ผสมชีวมวล ได้แก่ ชีวเสี้ยนไม้สัก (TS) ชีวเสี้ยนไม้ยูคาลิปตัส (ES) และขังข้าวโพด (CS) มาขึ้นรูปเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ดโดยใช้เครื่องอัดแบบไฮดรอลิก และนำมาปรับปรุงคุณภาพโดยการทอรีแฟคชัน วัตถุดิบตั้งต้น (PET, TS, ES และ CC) จะถูกวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี และค่าความร้อน จากนั้นนำมาผสมกันตามสัดส่วนที่กำหนดและอัดเม็ดด้วยเครื่องไฮดรอลิก เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ได้นำไปทดสอบค่าดัชนีความคงทน (DSI) เพื่อเลือกสภาวะการอัดเชื้อเพลิงที่เหมาะสมและนำไปผ่านการทอรีแฟคชันเพื่อเลือกสภาวะการทอรีแฟคชันที่เหมาะสมโดยมีค่า DSI ดีที่สุด ซึ่งกำหนดสภาวะในการทอรีแฟคชันที่อุณหภูมิ 170 190 225 °C อัตราการไหลของอากาศ 1 4 6 L/min

เวลา 5 10 15 นาที จากนั้นนำเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งก่อนและหลังการทอริแฟคชันไปทดสอบหาคุณสมบัติทางกายภาพ ความร้อน ค่าการปนเปื้อนปรอทและคลอไรด์ และทดสอบการเผาไหม้มลพิษ

จากการศึกษาพบว่าสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงอัดเม็ดหลังการทอริแฟคชันมีปริมาณความชื้นลดลงเฉลี่ยร้อยละ 0.07-0.17 และมีปริมาณสารระเหยลดลงเฉลี่ยร้อยละ 97.66-98.07 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งก่อนและหลังการทอริแฟคชันมีค่าความร้อนสูงกว่าวัตถุดิบตั้งต้นประมาณ 21-22 MJ/kg ค่า DSI ของเชื้อเพลิงอัดเม็ดหลังการทอริแฟคชันมีค่ามากกว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดก่อนการทอริแฟคชัน ค่าการปนเปื้อนคลอไรด์ของเชื้อเพลิงอัดเม็ดหลังการทอริแฟคชันมีปริมาณลดลง 23.64-33.28 $\mu\text{g/l}$ หรือ 1.09-1.72 $\mu\text{g/MJ}$ ซึ่งการทอริแฟคชันสามารถกำจัดคลอไรด์ออกจากเชื้อเพลิงอัดเม็ดได้ถึงร้อยละ 26.50-74.23 ค่าการปนเปื้อนปรอทในเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งก่อนและหลังการทอริแฟคชันไม่สามารถตรวจพบ การวิเคราะห์ปริมาณก๊าซเสียของเชื้อเพลิงอัดเม็ดหลังการทอริแฟคชันมี CO_2 ลดลง มี CO และ NO_x เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ทั้งนี้ตรวจไม่พบ SO_2 ส่วนปริมาณก๊าซมลพิษจำพวก 13PAHs และ BTEX การทดสอบในเชื้อเพลิงอัดเม็ด PET/TS และ PET/ES หลังการทอริแฟคชันมีปริมาณความเข้มข้นรวมของ 13PAHs ลดลงเฉลี่ย 0.07 และ 0.03 g/m^3 ตามลำดับ ปริมาณความเข้มข้นรวมของ BTEX ตรวจไม่พบ ส่วนเชื้อเพลิงอัดเม็ด PET/CC หลังการทอริแฟคชันมีปริมาณความเข้มข้นรวมของ 13PAHs ไม่เปลี่ยนแปลง มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 6.45 g/m^3 และปริมาณความเข้มข้นรวมของ BTEX มีปริมาณที่ลดลงเฉลี่ย 0.01 g/m^3 เชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งก่อนและหลังการทอริแฟคชันมีผลการวิเคราะห์เป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด สามารถเป็นตัวเลือกที่จะใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนได้

Title	Pellets Improvement from Crushing Sludge Plastics mixed with Biomass by Torrefaction
Author	Rattanaorn Punturat
Advisor	Ukrit Samaksaman, Ph.D
Co-Advisor	Assistant Professor Sirinuch Chindaraksa, Ph.D. Chanyud Kritsunankul, Ph.D
Academic Paper	Thesis M.S. Environmental Science, Naresuan University, 2018
Keywords	Pellets, Crushing Sludge Plastics, Biomass, Torrefaction

ABSTRACT

Increasing of polyethylene terephthalate (PET) bottle usage is represented by the daily amount of PET waste contained in municipal solid waste generation. Although PET bottles have been taken into the recycling system by the mechanical process. It still has some problems in term of byproducts because PET waste is the secondary waste generated by the manufacturer. The sludge of crushed plastic PET cannot be used and recycled. Moreover, the lack of knowledge about waste management and disposal of the sludge which was affected to the environment and human health. The objectives of this study were to determine the physical and chemical properties of raw materials such as sludge of crushed plastics PET, biomass, and fuel pellets. Other objectives were to investigate the optimal ratio of materials which used to produce the pellets, also to study the operating conditions of torrefaction process, and thermal properties of non-torrefied and torrefied pellets and pollution from combustion of pellet fuel. The experimental procedure followed by the sludge of crushed plastics PET (PET), Teak sawdust (TS), Eucalyptus sawdust (ES), and Corncob (CC) used as materials were determined the physical and chemical properties tests. Proximate and ultimate analysis and heating values were analyzed before produced as pellets. On one hand, the pellets production using hydraulic press machine with ratios of different materials. The value of drop shatter index (DSI) was a key to pellets quality measurement. The best value of DSI was the optimal ratio for pellets production. On the other hand, torrefaction process used for

quality improvement of pellets that the condition of torrefaction have defined temperature at 170 190 and 225 °C air flow rate 1 4 and 6 L/min time 5 10 and 15 min. Then after, the fuel pellets of non-torrefied and torrefied pellets were also analyzed properties analysis, heating values, mercury and chloride contamination, and behavior during fuel combustion.

The experimental results indicated that moisture content of pellets samples after torrefaction reduced in the average of 0.073-0.16 % and volatile matter content also reduced in the average of 97.67-98.08 %. Heating value of pellets from both before and after torrefaction showed higher than raw materials with in the range of 21 to 22 MJ/kg. The torrefied pellets showed the value of DSI higher than non-torrefied pellets. Moreover, the results of chloride contamination in pellets represented in the number of reduction after torrefaction process that were in the range of 23.64-33.28 ppb (46.51-92.41 ppb of non-torrefied pellets) or 1.09-1.72 µg/MJ. By mean, torrefaction process could remove the chloride content in pellets with the removal of 26.50-74.23 %. Mercury (Hg) contaminant had not detect of both before and after torrefied pellets. For combustion tests, the results of flue gas analysis showed the reduction of CO₂, CO and NO_x in the torrefied pellets. In overall test of pellets combustion could not be detected SO₂ due to all of materials had no sulfur content. Gas emissions from pellets combustion such as 13PAHs and BTEX were determined by gas chromatography-mass spectrometer. The experimental results indicated that the torrefaction of PET/TS pellets and PET/ES pellets reduced emission of total 13PAHs with the values about 0.07 g/m³ and 0.03 g/m³, respectively. Emission of BTEX could not be detected. Moreover, the torrefied PET/CC pellets had no trend of the change of 13PAHs with in the average value of 6.45 g/m³ and emission of BTEX reduced in the average value of 0.01 g/m³. In conclusion, pellets production and quality improvement by torrefaction process showed the good experimental results and almost data complied with the important parameters of pellets standards. Fuel pellets from sludge of crushed plastic PET mixed with biomass and torrefied pellets can be selected to use as alternative solid fuels.

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
ขอบเขตของการวิจัย.....	3
นิยามศัพท์เฉพาะ	4
สมมติฐานของการวิจัย.....	4
ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
ประวัติของการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด	6
หลักการจำแนกประเภทของเชื้อเพลิงขยะ.....	7
องค์ประกอบและคุณสมบัติของเชื้อเพลิงอัดเม็ด	9
กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด	11
เทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด	15
การนำเชื้อเพลิงอัดเม็ดไปใช้ประโยชน์.....	18
การใช้เศษพลาสติกในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด.....	19
การใช้ชีวมวลเป็นส่วนผสมในเชื้อเพลิงอัดเม็ด.....	24
กระบวนการทอรีแฟคชัน.....	25
การปนเปื้อนโลหะหนักของเชื้อเพลิงอัดเม็ด.....	27
ทฤษฎีการเผาไหม้.....	30
มลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง.....	33
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	37
วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด.....	39

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของวัตถุดิบตั้งต้นและเชื้อเพลิงอัดเม็ด ทั้งก่อนและหลังการทอริแฟคชัน.....	40
การทดสอบคุณสมบัติค่าความร้อนด้วยเครื่อง Bomb Calorimeter.....	44
การผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด.....	45
การทอริแฟคชันเชื้อเพลิงอัดเม็ด.....	46
การทดสอบคุณสมบัติค่าดัชนีความคงทนของเชื้อเพลิงอัดเม็ด	48
การวิเคราะห์หาค่าปรอทในเชื้อเพลิงอัดเม็ด	48
การวิเคราะห์หาค่าคลอไรด์ในเชื้อเพลิงอัดเม็ด	49
การทดสอบการเผาไหม้.....	50
การวิเคราะห์ก๊าซเสียจากการเผาไหม้.....	52
การวิเคราะห์ปริมาณมลพิษ 13PAHs และ BTEX.....	52
4 ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	55
สมบัติทางกายภาพและเคมี ค่าความร้อนของวัตถุดิบตั้งต้นและเชื้อเพลิงอัดเม็ด ทั้งก่อนและหลังการทอริแฟคชัน.....	55
คุณสมบัติเชิงพลังงานความร้อน (Heating value).....	59
ค่าดัชนีความคงทน (Drop shatter index; DSI) ของเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งก่อนและ หลังการทอริแฟคชัน.....	61
ผลของสภาวะการทอริแฟคชันเชื้อเพลิงอัดเม็ด.....	68
ปริมาณการปนเปื้อนคลอไรด์และปรอทของเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งก่อนและหลัง การทอริแฟคชัน.....	70
ปริมาณก๊าซเสีย (Flue gas) ที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งก่อน และหลังการทอริแฟคชัน.....	72
ปริมาณ 13PAHs และ BTEX ที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งก่อน และหลังการทอริแฟคชัน.....	75

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	80
สรุปผลการวิจัย.....	80
ข้อเสนอแนะ.....	81
บรรณานุกรม.....	83
ภาคผนวก.....	97
ประวัติผู้วิจัย.....	127



สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
1	คุณลักษณะของเชื้อเพลิงอัดเม็ดตามข้อกำหนดของ EN 15359:2011.....	8
2	คุณสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงอัดเม็ด.....	10
3	คุณสมบัติทางเคมีของเชื้อเพลิงอัดเม็ด	11
4	คุณสมบัติทางกายภาพและค่าความร้อนของพลาสติกและวัสดุเหลือทิ้ง.....	21
5	องค์ประกอบทางเคมีของพลาสติกและวัสดุเหลือทิ้ง.....	21
6	โลหะหนักที่ปนเปื้อนอยู่ในพลาสติกและวัสดุเหลือทิ้ง.....	22
7	ปริมาณโลหะหนักที่ตรวจพบในเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากการวิจัยที่ผ่านมา.....	29
8	16PAHs ที่อาจก่อให้เกิดมะเร็งต่อคนตามมาตรฐาน US.EPA 1993 กำหนด	36
9	ศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมสำหรับวัตถุดิบชนิดต่างๆ.....	46
10	สมบัติทางกายภาพและค่าความร้อนของวัตถุดิบตั้งต้น.....	55
11	สมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งก่อนและหลังการทอริแฟคชัน.....	56
12	สมบัติทางเคมีของวัตถุดิบตั้งต้น.....	59
13	ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งก่อนและหลังการทอริแฟคชัน.....	61
14	ค่าดัชนีความคงทนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งก่อนการทอริแฟคชัน.....	66
15	ค่าดัชนีความคงทนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดหลังการทอริแฟคชัน.....	67
16	ค่าการปนเปื้อนปรอทของเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งก่อนและหลังการทอริแฟคชัน	72
17	ปริมาณก๊าซเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งก่อนและหลัง การทอริแฟคชัน.....	74
18	ผลการทดลองและการคำนวณค่าความชื้น (Moisture content) เชื้อเพลิงอัดเม็ด ผลิตจากตะกอนพลาสติกชนิด PETและซีลี้อยไม้สักหลังการทอริแฟคชัน หรือ ตัวอย่างที่ 18.....	98
19	ผลการทดลองและการคำนวณเถ้า (Ash content) เชื้อเพลิงอัดเม็ดผลิตจาก ตะกอนพลาสติกชนิด PET และซีลี้อยไม้สักหลังการทอริแฟคชัน หรือ ตัวอย่างที่ 18.....	98

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง		หน้า
20	ผลการทดลองและการคำนวณปริมาณสารระเหย (Volatile matter) เชื้อเพลิงอัดเม็ดผลิตจากตะกอนพลาสติกชนิด PET และที่เลื่อยไม้สักหลัง การทอริแฟคชัน หรือ ตัวอย่างที่ 18.....	99
21	การคำนวณปริมาณมลพิษอากาศชนิด 13PAHs จากเชื้อเพลิงอัดเม็ด PET/TS ก่อนการทอริแฟคชัน.....	100
22	การคำนวณปริมาณมลพิษอากาศชนิด 13PAHs จากเชื้อเพลิงอัดเม็ด PET/ES ก่อนการทอริแฟคชัน.....	101
23	การคำนวณปริมาณมลพิษอากาศชนิด 13PAHs จากเชื้อเพลิงอัดเม็ด PET/CC ก่อนการทอริแฟคชัน.....	102
24	การคำนวณปริมาณมลพิษอากาศชนิด 13PAHs จากเชื้อเพลิงอัดเม็ด PET/TS หลังการทอริแฟคชัน.....	103
25	การคำนวณปริมาณมลพิษอากาศชนิด 13PAHs จากเชื้อเพลิงอัดเม็ด PET/ES หลังการทอริแฟคชัน.....	104
26	การคำนวณปริมาณมลพิษอากาศชนิด 13PAHs จากเชื้อเพลิงอัดเม็ด PET/CC หลังการทอริแฟคชัน.....	105
27	การคำนวณปริมาณมลพิษอากาศชนิด BTEX จากเชื้อเพลิงอัดเม็ด PET/TS, PET/ES และ PET/CC ก่อนการทอริแฟคชัน.....	106
28	การคำนวณปริมาณมลพิษอากาศชนิด BTEX จากเชื้อเพลิงอัดเม็ด PET/TS, PET/ES และ PET/CC หลังการทอริแฟคชัน.....	107
29	สถานะของเครื่อง GC/MS ที่ใช้ในการวิเคราะห์ของ 13PAHs จากการเผาไหม้ เชื้อเพลิงอัดเม็ด.....	108
30	สถานะของเครื่อง GC/MS ที่ใช้ในการวิเคราะห์ของ BTEX จากการเผาไหม้ เชื้อเพลิงอัดเม็ด.....	109

สารบัญญภาพ

ภาพ	หน้า
1 เชื้อเพลิงอัดเม็ดของแต่ละประเทศ	7
2 ลักษณะของเชื้อเพลิงแข็ง RDF/SRF.....	9
3 กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดโดยทั่วไป.....	12
4 กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดโดยมีการการแยกเศษดินและหินออกจาก วัตถุดิบตั้งต้น.....	13
5 กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดในประเทศไทย	14
6 เครื่องอัดเม็ดแบบไฮดรอลิค.....	17
7 กระบวนการผลิตพลาสติกชนิดเอทิลีน เทเรฟทาเลต (Polyethylene terephthalate; PET).....	20
8 กระบวนการรีไซเคิลขวดพลาสติก.....	23
9 ตะกอนพลาสติกจากกระบวนการบดย่อยขวดพลาสติกและเชื้อเพลิงอัดเม็ด.....	24
10 กระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง	31
11 การแปลงสภาพทางเคมีความร้อน (Thermochemical conversion) ของเชื้อเพลิง.....	32
12 แผนผังดำเนินการวิจัย.....	38
13 วัตถุดิบตั้งต้น.....	39
14 การเตรียมวัตถุดิบตั้งต้นเพื่อหาปริมาณความชื้น.....	41
15 เตรียมตัวอย่างเพื่อหาปริมาณถ้ำและปริมาณสารระเหยและเตาเผาความร้อนสูง Muffle Furnace.....	42
16 การเตรียมตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ค่าความร้อนและเครื่องวิเคราะห์ค่าความร้อน Bomb Calorimeter (LECO, AC-500).....	44
17 เครื่องอัดแบบไฮดรอลิค เครื่องฮีทเตอร์ให้ความร้อน, เชื้อเพลิงอัดเม็ด, เครื่องมือ และอุปกรณ์การทอริแฟคชัน.....	45
18 การทอริแฟคชันเชื้อเพลิงอัดเม็ด.....	47
19 เครื่องวิเคราะห์ค่าการแตก่วน.....	48

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
20	เตรียมตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ค่าการปนเปื้อนปรอทในเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งก่อนและ หลังการทอริแฟคชัน.....
21	เตรียมตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ค่าการปนเปื้อนคลอไรด์ในเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งก่อน และหลังการทอริแฟคชัน.....
22	การทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งก่อนและหลังการทอริแฟคชัน.....
23	อุปกรณ์และเครื่องมือในการเก็บตัวอย่างมลพิษจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงอัดเม็ด เตาเผาอุณหภูมิ 850 °C, เครื่อง Flue gas analyzer, Testo 350H และ เครื่องวิเคราะห์ก๊าซโครมาโตกราฟี/แมสสเปกโตรมิเตอร์ (Gas chromatography/Mass Spectrometer).....
24	ผลการทดสอบ Shatter index ของสภาวะอุณหภูมิในการอัดเชื้อเพลิงอัดเม็ด.....
25	ผลการทดสอบ Shatter index ของเวลาในการอัดเชื้อเพลิงอัดเม็ด.....
26	ผลการทดสอบ Shatter index ของแรงดันในการอัดเชื้อเพลิงอัดเม็ด.....
27	เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่มีค่า DSI ดีที่สุด.....
28	เชื้อเพลิงอัดเม็ดภายใต้สภาวะการทอริแฟคชันต่างๆ.....
29	ค่าการปนเปื้อนคลอไรด์ในเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งก่อนและหลังการทอริแฟคชันและ ค่าร้อยละการกำจัดคลอไรด์ปนเปื้อนออกจากเชื้อเพลิงอัดเม็ด PET/TS (ตะกอนพลาสติกชนิด PET/ซีเลียมไม้สัก) PET/ES (ตะกอนพลาสติกชนิด PET/ซีเลียมไม้ยูคาลิปตัส) และ PET/CC (ตะกอนพลาสติกชนิด PET/ซังข้าวโพด) หลังการทอริแฟคชัน.....
30	ความเข้มข้นรวมของ 13PAHs ในเชื้อเพลิงอัดเม็ดก่อนและหลังการทอริแฟคชัน.....
31	สัดส่วนของ Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) แต่ละชนิดใน เชื้อเพลิงอัดเม็ดก่อนและหลังการทอริแฟคชัน.....
32	ความเข้มข้นรวมของ BTEX ในเชื้อเพลิงอัดเม็ดก่อนและหลังการทอริแฟคชัน.....
33	สัดส่วนของ BTEX ในเชื้อเพลิงอัดเม็ดก่อนและหลังการทอริแฟคชัน.....

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
34 เอกสารผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี (Ultimate analysis) ของวัตถุดิบตั้งต้น ที่ส่งวิเคราะห์ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.....	110
35 เอกสารผลการวิเคราะห์การปนเปื้อนคลอไรด์ในเชื้อเพลิงอัดเม็ดก่อน การทอรีแฟคชัน ส่งวิเคราะห์ที่บริษัท เบลต์ล อินดัสเตรียล (ประเทศไทย) จำกัด...	111
36 เอกสารผลการวิเคราะห์การปนเปื้อนคลอไรด์ในเชื้อเพลิงอัดเม็ดหลัง การทอรีแฟคชัน ส่งวิเคราะห์ที่บริษัท เบลต์ล อินดัสเตรียล (ประเทศไทย) จำกัด...	111
37 เอกสารผลการวิเคราะห์การปนเปื้อนปรอทในเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งก่อนหลัง การทอรีแฟคชัน ส่งวิเคราะห์ที่บริษัท ห้องปฏิบัติการกลาง (ประเทศไทย) จำกัด...	112
38 กราฟความเข้มข้นของสารมาตรฐาน 13PAHs ความเข้มข้นที่ 30 90 120 mg/l.....	113
39 กราฟความเข้มข้นของสารมาตรฐาน BTEX ความเข้มข้นที่ 5 20 30 40 mg/l.....	118
40 ผลการวิเคราะห์ค่า 13PAHs ในเชื้อเพลิงอัดเม็ดผลิตจากตะกอนพลาสติก และซีลื้อยไม้สักทั้งก่อนและหลังการทอรีแฟคชันจากเครื่อง GC/MS.....	120
41 ผลการวิเคราะห์ค่า 13PAHs ในเชื้อเพลิงอัดเม็ดผลิตจากตะกอนพลาสติก และซีลื้อยไม้ยูคาลิปตัสทั้งก่อนและหลังการทอรีแฟคชันจากเครื่อง GC/MS.....	120
42 ผลการวิเคราะห์ค่า 13PAHs ในเชื้อเพลิงอัดเม็ดผลิตจากตะกอนพลาสติก และซีลื้อยไม้สักทั้งก่อนและหลังการทอรีแฟคชันจากเครื่อง GC/MS.....	121
43 ผลการวิเคราะห์ค่า BTEX ในเชื้อเพลิงอัดเม็ดผลิตจากตะกอนพลาสติก และซีลื้อยไม้สักทั้งก่อนและหลังการทอรีแฟคชันจากเครื่อง GC/MS.....	121
44 ผลการวิเคราะห์ค่า BTEX ในเชื้อเพลิงอัดเม็ดผลิตจากตะกอนพลาสติก และซีลื้อยไม้ยูคาลิปตัสทั้งก่อนและหลังการทอรีแฟคชันจากเครื่อง GC/MS.....	122
45 ผลการวิเคราะห์ค่า BTEX ในเชื้อเพลิงอัดเม็ดผลิตจากตะกอนพลาสติก และซีลื้อยไม้สักทั้งก่อนและหลังการทอรีแฟคชันจากเครื่อง GC/MS.....	122

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
46 ชุดสกัดหาปริมาณ 13PAHs และ BTEX ในเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งก่อนและหลัง การทอริแฟคชัน.....	123
47 เครื่องกลั่นระเหยแบบหมุนภายใต้สุญญากาศ (Rotary evaporator, BUCHI Rotavapor, R-200)	123
48 แก้วของตะกอนพลาสติกชนิด PET ที่เคลือบไม้สัก ที่เคลือบไม้ยูคาลิปตัส ชั่งข้าวโพด และเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งก่อนและหลังการทอริแฟคชันเผาที่อุณหภูมิ 750 °C 3 ชั่วโมง.....	124
49 แก้วจากการวิเคราะห์ปริมาณสารระเหยของตะกอนพลาสติกชนิด PET ที่เคลือบไม้สัก ที่เคลือบไม้ยูคาลิปตัส ชั่งข้าวโพด และเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งก่อนและ หลังการทอริแฟคชันเผาที่อุณหภูมิ 900 °C เวลา 7 นาที.....	124
50 ตัวอย่างเตรียมทดสอบค่าดัชนีความคงทนด้วยเครื่องวิเคราะห์ค่าการแตกร่วนและ ตัวอย่างหลังทดสอบค่าดัชนีความคงทนด้วยเครื่องวิเคราะห์ค่าการแตกร่วน.....	125
51 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	126

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ขวดพลาสติกเป็นสิ่งที่เราใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันและผู้ประกอบการนิยมใช้เป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับสินค้าต่างๆเนื่องจากสะดวกต่อการใช้งาน การเก็บและการขนส่ง ซึ่งหลังจากการใช้งานแล้วนั้นขวดพลาสติกเหล่านี้ก็จะกลายเป็นขยะโดยในปีค.ศ.2015 ที่ผ่านมามีปริมาณขยะขวดพลาสติกเพิ่มขึ้น 300 ล้านตันต่อปี แต่สามารถนำกลับไปใช้ใหม่ได้เพียงร้อยละ 10 ซึ่งในปีค.ศ. 2050 มีแนวโน้มของขยะขวดพลาสติกเพิ่มขึ้นในหลุมฝังกลบขยะและตามธรรมชาติ ประมาณ 12 พันล้านตัน (Liu et al., 2018) แนวทางที่จะช่วยลดปัญหาโดยการนำขวดพลาสติกเหล่านี้มาทำการรีไซเคิลเพื่อนำกลับไปใช้ประโยชน์ได้ใหม่ อาทิเช่น การผลิตขวดพลาสติกชนิดหยาบจากขวดพลาสติกรีไซเคิล โดยเฉพาะขวดพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene terephthalate; PET) เป็นวิธีที่นิยมกันในปัจจุบันเนื่องจากต้องการลดต้นทุนการผลิตขวดพลาสติกและส่งเสริมกระบวนการรีไซเคิล ซึ่งเม็ดพลาสติกที่มาจากขวดพลาสติกชนิด PET สามารถนำกลับไปใช้ทำบรรจุภัณฑ์อาหารในรูปของ จาน ชาม และใช้บรรจุน้ำอัดลม สุรา ยา เครื่องสำอาง น้ำมันพืช เป็นต้น

อย่างไรก็ตามการนำขวดพลาสติกมารีไซเคิลเพื่อนำไปแปรรูปเป็นเม็ดพลาสติก ซึ่งในกระบวนการเตรียมขวดพลาสติกเพื่อรีไซเคิลจะต้องผ่านกระบวนการคัดเลือก (Selection) แยก (Sorting) ตัด (Cutting) บดย่อย (Crushing) ล้าง (Washing) และการผึ่งแห้ง (Drying) ก็ยังมีปริมาณของเสียที่เป็นตะกอนพลาสติก ซึ่งไม่สามารถนำกลับไปใช้ได้อีกเพิ่มมากขึ้น เป็นสาเหตุนำไปสู่การเกิดมลพิษของขยะจำพวกไมโครพลาสติกที่มีขนาดเล็กกว่า 5 mm และไม่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ เมื่อปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำรวมถึงสุขภาพของมนุษย์ เนื่องจากเมื่อสิ่งมีชีวิตในน้ำได้กินไมโครพลาสติกเข้าไปจะทำให้เกิดการสะสมสารเคมีในร่างกายของสิ่งมีชีวิตซึ่งเป็นอาหารมนุษย์ส่งผลกระทบต่อสารเคมีในร่างกายมนุษย์เช่นกัน เมื่อบริโภคสิ่งมีชีวิตเหล่านั้น (Pegadoa et al., 2018)

ในด้านการจัดการตะกอนพลาสติกผู้ประกอบการส่วนใหญ่ยังขาดความรู้ โดยนำไปทิ้งรวมกับขยะชุมชนหรือลักลอบเผารวมกับขยะชุมชน ซึ่งการเผาทำลายรวมกับขยะชุมชนที่ผิดวิธีทำให้เกิดมลพิษทางอากาศ ฝุ่นผง และโลหะหนักต่างๆโดยเฉพาะถ้าตะกอนพลาสติกนั้นมี

การปนเปื้อนของตะกอนของพลาสติกชนิด พอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinylchloride; PVC) ที่ผลิตมาจากส่วนผสมของสารพอลิเมอร์คลอรีเนต (Chlorinated polymers) เมื่อมีการเผาแบบผิดวิธี ก็จะมีการปลดปล่อยก๊าซพิษที่เป็นกรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid) ออกมาจากตะกอนพลาสติก PVC นอกจากนี้ยังมีสารประกอบไดออกซิน (Dioxin) ฟิวแรน (Furans) โพลีคลอรีเนตเต็ดไบฟีนิล (Polychlorinated Biphenyls: PCBs) พอลิโบรมิเนตเต็ดไบฟีนิล (PBBs) พอลิโบรมิเนตเต็ดไตรฟีนิลอีเทอร์ (PBDEs) ซึ่งส่งผลกระทบต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อมโดยรวม (Bonifazi et al., 2015)

ปัจจุบันได้มีแนวทางในการนำขยะหรือของเสียมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงทดแทนโดยผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ด ซึ่งผลิตจากขยะที่ไม่อันตรายและขยะที่ไม่สามารถนำกลับไปใช้ใหม่ได้ ขยะเหล่านั้นจะถูกอัดและขึ้นรูปเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ดโดยทั่วไปจะประกอบไปด้วย กระดาษร้อยละ 30 ไม้ร้อยละ 20 พลาสติกร้อยละ 35 และเส้นใยผ้าร้อยละ 15 ในด้านคุณสมบัติและคุณลักษณะของเชื้อเพลิงอัดเม็ดมีค่าความร้อน 0.016-0.018 MJ/kg การแปรรูปเชื้อเพลิงขยะเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ด เป็นการแปรรูปเชื้อเพลิงให้มีคุณภาพดีขึ้น โดยการนำมาอัดให้อยู่ในรูปที่เป็นก้อน เม็ด ลูกบาศก์ และแท่ง ซึ่งเป็นการปรับปรุงทั้งคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี ทำให้มีค่าความชื้นต่ำ ค่าความร้อนใกล้เคียงกับเชื้อเพลิงฟอสซิลทั่วไป มีความเป็นเนื้อเดียวกันสูง ปริมาณการปลดปล่อยมลพิษต่ำ (Conesa et al., 2011) ซึ่งเชื้อเพลิงอัดเม็ดนอกจากจะมีค่าความร้อนปริมาณที่สูงแล้ว ยังมีปริมาณขององค์ประกอบของคลอไรด์และปรอทต่ำ มีการปลดปล่อยโลหะหนักที่ต่ำและมีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการนำไปเป็นเชื้อเพลิงในอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์ โรงไฟฟ้า และอุตสาหกรรมเกี่ยวกับหม้อต้มไอน้ำ เป็นต้น (Wagland et al., 2011)

การเพิ่มประสิทธิภาพของเชื้อเพลิงนั้นจะนำไปผ่านกระบวนการทอริแฟคชัน (Torrefaction) ซึ่งเป็นกระบวนการทางความร้อนที่ต้องแปลงสภาพของเชื้อเพลิงโดยใช้อุณหภูมิไม่สูงนัก ประมาณ 200-400 °C ภายใต้สภาวะที่ปราศจากออกซิเจน หรือเป็นกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิต่ำ (Mild pyrolysis) ซึ่งกระบวนการทอริแฟคชันที่อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสม สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการแตกตัว (Grindability) ของพลาสติกชนิด PET เพิ่มการหลอมรวมระหว่าง ชีวมวลจากไม้ กับ พลาสติกชนิด PET (Ansah et al., 2016) ข้อดีของกระบวนการทอริแฟคชันนอกจากเพิ่มประสิทธิภาพทางด้านความร้อนแล้วยังสามารถเพิ่มคุณสมบัติของเชื้อเพลิงอัดเม็ดได้หลายประการ เช่น เพิ่มคุณสมบัติการไม่ชื้นความชื้น เพิ่มความแข็งแรงของเชื้อเพลิงและในอุณหภูมิที่เหมาะสมยังสามารถช่วยลดปัญหาที่เกิดจากสารอะโรมาติก สารประกอบซัลเฟอร์ สารประกอบโลหะคลอไรด์ เป็นต้น (Recari et al., 2017)

ในส่วนของข้อเสียนั้นจะมีคุณสมบัติค่าความร้อน (Calorific value) น้อยกว่าถ่านหิน (Conesa et al., 2011) แต่อย่างไรก็ตามการใช้เทคโนโลยีนี้เป็นการเพิ่มทางเลือกของการใช้เชื้อเพลิงอัดเม็ดจากตะกอนพลาสติกผสมชีวมวลแทนถ่านหินที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน ซึ่งเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่นำไปปรับปรุงคุณภาพโดยผ่านการทอริแฟคชัน สามารถลดความชื้นและทำให้เชื้อเพลิงอัดเม็ดมีค่าความร้อนเพิ่มสูงขึ้นถึง 24 MJ/kg เพิ่มความคงทนหรือความแข็งแรงให้กับเชื้อเพลิงอัดเม็ดซึ่งส่งผลทำให้ง่ายต่อการขนส่งและจัดเก็บเนื่องจากเชื้อเพลิงอัดเม็ดไม่เกิดการแตกร่วนและยังคงรูปเดิม อีกทั้งสามารถลดการปลดปล่อยก๊าซเสียเช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และมีเทน ในระหว่างการเผาไหม้เชื้อเพลิงทำให้เกิดมลพิษที่ส่งผลต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพ (Manouchehrinejad et al., 2018)

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาวิจัยอย่างครบวงจรตั้งแต่การติดต่อประสานงานกับโรงงานบดขูดพลาสติก เก็บตัวอย่าง การผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด การใช้กระบวนการทอริแฟคชัน การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี การทดสอบค่าความคงทน (Drop shatter index; DSI) การทดสอบค่าความร้อน การทดสอบการปนเปื้อนปรอทและคลอไรด์ รวมถึงทดสอบการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งก่อนและหลังการทอริแฟคชัน ดังนั้นการศึกษางานวิจัยนี้สามารถเป็นแนวทางในการจัดการขยะขวดพลาสติกและตะกอนพลาสติกที่ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อีกมาแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่มีคุณภาพเทียบเท่ากับเชื้อเพลิงถ่านหินที่ยังใช้กันอยู่ในปัจจุบัน

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของวัตถุดิบที่เกิดจากการบดย่อยขวดพลาสติกและชีวมวลทางการเกษตร และเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผลิตได้
2. ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของวัตถุดิบในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดและสภาวะที่เหมาะสมในการทอริแฟคชันเชื้อเพลิงอัดเม็ด
3. ศึกษาสมบัติเชิงความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผ่านกระบวนการทอริแฟคชันและการทดสอบค่ามลพิษที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้

ขอบเขตของการวิจัย

ศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากตะกอนพลาสติกผสมกับชีวมวลทางการเกษตร ได้แก่ ขี้เลื่อยไม้สัก ขี้เลื่อยไม้ยูคาลิปตัส และขี้ข้าวโพด และศึกษาผลของการทอริแฟคชันต่อคุณภาพเชื้อเพลิงอัดเม็ด สภาวะของการทดลอง ได้แก่ อุณหภูมิ อัตราการป้อนอากาศ และระยะเวลาในการทอริแฟคชัน การทดสอบคุณสมบัติต่างๆ เช่น คุณสมบัติทางกายภาพ

และเคมี (Proximate and Ultimate analysis) การทดสอบค่าดัชนีความคงทน (Drop shatter index; DSI) ค่าความร้อน (Heating value) ค่าการปนเปื้อนปรอทและคลอไรด์ (Mercury and Chloride contamination) และการวิเคราะห์มลพิษจากการเผาไหม้ (Pollutant emission analysis)

นิยามศัพท์เฉพาะ

กระบวนการทอริแฟคชัน หมายถึง กระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิต่ำโดยมีอุณหภูมิไม่สูงนักประมาณ 200-400 °C ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนอยู่น้อยประมาณ 0.3 L/min และใช้เวลา 15-30 นาทีในการทอริแฟคชัน (Zhang et al., 2018) และเป็นกระบวนการทางความร้อนที่แปลงสภาพของเชื้อเพลิงให้มีคุณภาพด้านพลังงาน เพิ่มประสิทธิภาพด้านคุณสมบัติทางกายภาพและเคมี รวมถึงลดปริมาณก๊าซเสียในระหว่างการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง (Araújo et al., 2016)

ตะกอนพลาสติก หมายถึง ขยะหรือของเสียที่เป็นไมโครพลาสติกซึ่งมีขนาดเล็กกว่า 5 mm ไม่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ (Pegadoa et al., 2018) และเป็นพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) ซึ่งสามารถให้ความร้อนได้ถึง 21.90 MJ/kg (Zhao et al., 2016)

ชีวมวล หมายถึง สารอินทรีย์ที่สามารถนำไปผลิตเป็นเชื้อเพลิงแทนถ่านหินได้ เนื่องจากมีองค์ประกอบคาร์บอนในเส้นใยลิกนินที่สามารถให้ความร้อนได้ดี และมีองค์ประกอบไฮโดรเจนซึ่งสามารถทำให้ชีวมวลผลิตแก๊สชีวภาพ (Biogas) เพื่อผลิตเป็นพลังงานทดแทนได้ (Archer et al., 2018)

เชื้อเพลิงอัดเม็ด หมายถึง เชื้อเพลิงที่ผลิตจากของเสียหรือขยะที่ไม่อันตรายและไม่สามารถนำกลับไปใช้ใหม่ได้ โดยจะนำมาอัดให้อยู่ในรูปที่เป็นก้อน เม็ด ลูกบาศก์ และแท่ง ซึ่งให้ความร้อน 0.016-0.018 MJ/kg มีความชื้นและการปลดปล่อยมลพิษต่ำ สามารถนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงทดแทนได้ (Conesa et al., 2011)

สมมติฐานของการวิจัย

ตะกอนพลาสติกที่เกิดจากกระบวนการบดย่อยขวดพลาสติกในระบบรีไซเคิล สามารถผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ดได้ และการทอริแฟคชันเชื้อเพลิงอัดเม็ดส่งผลดีต่อคุณสมบัติบางประการของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของวัตถุดิบที่เกิดจากการบดย่อยขวดพลาสติกและชีวมวลทางการเกษตร และเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผลิตได้
2. ทราบถึงอัตราส่วนที่เหมาะสมของวัตถุดิบในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดและสภาวะที่เหมาะสมในการทอริแฟคชัน รวมถึงมลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงอัดเม็ด
3. ได้เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผลิตได้มีคุณสมบัติผ่านเกณฑ์มาตรฐาน สามารถนำไปเผยแพร่ให้เกิดการใช้งานได้จริงในอนาคต และลดปัญหาที่เกิดจากการกำจัดตะกอนพลาสติก รวมถึงลดปัญหาทางด้านมลพิษสิ่งแวดล้อม



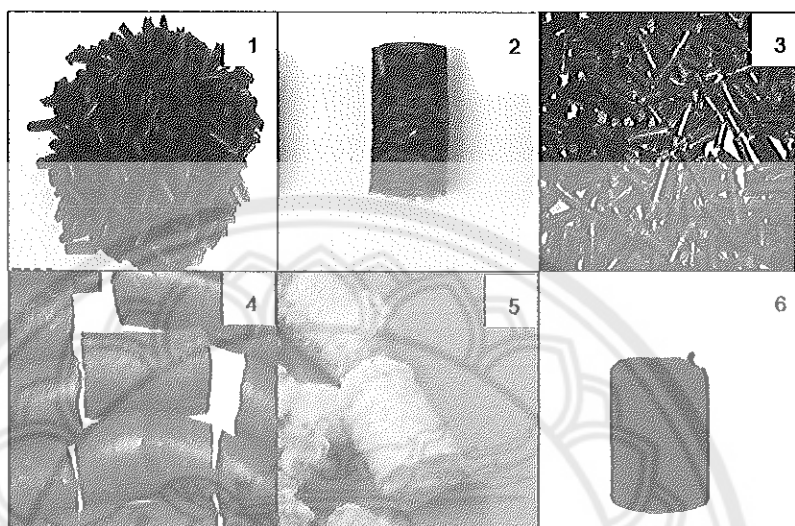
บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. ประวัติของการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด

การเปลี่ยนขยะเป็นพลังงานเชื้อเพลิง (Waste to energy) เป็นอีกแนวทางหนึ่งช่วยลดปัญหาของการเพิ่มปริมาณขยะในปัจจุบัน โดยเฉพาะขยะที่ไม่สามารถนำกลับไปใช้ประโยชน์ได้ ซึ่งขยะเหล่านี้ในประเทศไทยส่วนมากจะนำไปกำจัดโดยวิธีฝังกลบ เมื่อมีปริมาณขยะเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลทำให้เกิดการชะของน้ำขยะที่อาจปนเปื้อนโลหะหนักลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ส่งผลทำให้เกิดค่าซีไอดี (Chemical Oxygen Demand; COD) และค่าอินทรีย์คาร์บอนรวม (Total Organic Carbon; TOC) มีปริมาณที่เพิ่มขึ้น รวมถึงมีการปลดปล่อยก๊าซเสีย ได้แก่ สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile organic compound; VOC) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide; CO₂) ก๊าซมีเทน (Methane; CH₄) เป็นต้น ซึ่งการเกิดมลพิษเหล่านี้มาจากการย่อยสลายของจุลินทรีย์ (Microbiological activity) ในหลุมฝังกลบขยะ (Landfill) (Casado et al., 2016) ทางยุโรปได้เริ่มนำขยะชุมชนเมือง (Municipal solid waste; MSW) โดยผ่านการบำบัดด้วยวิธีเชิงกลและชีวภาพ (Mechanical and biological treatment; MBT) เป็นกระบวนการที่ใช้แอโรบิกแบคทีเรีย (Aerobic bacteria) ย่อยสลายสารอินทรีย์ในขยะมูลฝอยซึ่งทำให้ค่าความชื้นของขยะลดลง และนำขยะชุมชนเมืองเหล่านี้มาผลิตเป็นเชื้อเพลิงแข็ง (Passamani et al., 2016) ในประเทศอิตาลีและสเปนได้นำขยะชุมชนเมืองในหลุมฝังกลบที่ผ่านกระบวนการบำบัดด้วยวิธี MBT มาผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ดซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นขยะที่ไม่อันตราย ได้แก่ พลาสติก กระดาษ เศษไม้ เศษอาหาร เส้นใยผ้า และเศษแก้ว เป็นต้น (Casado et al., 2016; Arena et al., 2016) นอกจากนี้ยังมีอีกหลายประเทศที่ได้นำขยะมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงและนำไปเป็นเชื้อเพลิงร่วม อาทิเช่น สหรัฐอเมริกา ประเทศแคนาดา ประเทศอิตาลี ประเทศอินเดีย และประเทศจีน ได้นำเศษชีวมวลมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ดซึ่งมีลักษณะเป็นเม็ดทรงกระบอก (Cylinder shape) มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 6 mm ยาว 12 mm แสดงดังภาพที่ 1 เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผลิตได้มีค่าความชื้นลดลงและมีค่าความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับวัตถุดิบตั้งต้น ดังในงานวิจัยของ Bialowiec et al. (2017) ศึกษาเกี่ยวกับผลของการทอริแฟคชันของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผลิตจากขยะชุมชนเมืองจากการศึกษาพบว่า เมื่อนำวัตถุดิบตั้งต้นมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ดค่าความชื้นลดลงร้อยละ 22.9 จากร้อยละ 55.8 และมีค่าความร้อนเพิ่มขึ้น 25.3 MJ/kg จาก 19 MJ/kg อีกทั้ง

เชื้อเพลิงอัดเม็ดประมาณ 74,472.04 ton/year สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ 3.4×10^4 GJ/ton (Gisi et al., 2017)



ภาพ 1 เชื้อเพลิงอัดเม็ดของแต่ละประเทศ อาทิเช่น

- (1) สหรัฐอเมริกา (Manouchehrinejad et al., 2018)
- (2) ประเทศแคนาดา (Hosseinizand et al., 2018)
- (3) สาธารณรัฐประชาชนจีน (Xiao et al., 2015)
- (4) ประเทศอินเดีย (Pradhan et al., 2017)
- (5) ประเทศอิตาลี (Arena et al., 2016)
- (6) ประเทศนอร์เวย์ (Surup et al., 2018)

2. หลักการจำแนกประเภทของเชื้อเพลิงขยะ

เชื้อเพลิงขยะ (Refuse Derive Fuel; RDF หรือ Solid Recovered Fuel; SRF) เป็นเชื้อเพลิงที่ผลิตจากขยะที่ไม่อันตรายเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทน (Energy recovery fuel) และเชื้อเพลิงร่วมในเตาเผา (Co-incinerator plants) ในการผลิตเชื้อเพลิงขยะ (RDF/SRF) ให้มีประสิทธิภาพทั้งทางด้านพลังงานและไม่ก่อให้เกิดมลพิษ ทางยุโรปได้กำหนดกฎหมายของสหภาพยุโรป (European union legislation) โดยกำหนดมาตรฐานเกี่ยวกับเชื้อเพลิงขยะ (RDF/SRF) ขึ้น ซึ่งมาตรฐานนี้เป็นตัวกำหนดความแตกต่างของเชื้อเพลิงขยะ RDF และเชื้อเพลิงขยะ SRF เนื่องจากประเทศอิตาลีได้ใช้มาตรฐาน UNI 9903-1 (2004) ซึ่งเป็นตัวกำหนดชนิดของเชื้อเพลิงขยะ RDF โดยจะแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ เชื้อเพลิงขยะ RDF

และ เชื้อเพลิงขยะ RDF-Q (RDF of high quality) โดยกำหนดให้มีค่าความร้อน (RDF > 15 MJ/kg, RDF-Q > 20 MJ/kg) ค่าความชื้น (RDF < ร้อยละ 25, RDF-Q < ร้อยละ 18) เถ้า (RDF < ร้อยละ 20, RDF-Q = ร้อยละ 15) หลังจากนั้นทางยุโรปได้พัฒนามาตรฐานเกี่ยวกับเชื้อเพลิงขยะ SRF ขึ้น และได้ยกเลิกการใช้มาตรฐาน UNI 9903-1 (2004) และนำมาตราฐาน UNI EN 15359 (2011) ซึ่งกำหนดโดยมาตรฐาน CEN/TC 343 (European committee for standardization) เป็นมาตรฐานของยุโรปเกี่ยวกับเชื้อเพลิงขยะ SRF (Casado et al., 2016) ซึ่งมาตรฐานนี้ได้กำหนดเกี่ยวกับค่าความร้อน (Net calorific value; NCV) องค์ประกอบคลอไรด์ (Chlorine content) และองค์ประกอบปรอท (Mercury content) แสดงดังตาราง 1 โดยจะใช้ตัวดัชนีเหล่านี้ในการกำหนดคุณภาพของเชื้อเพลิงขยะ SRF และมาตรฐานนี้จะช่วยสนับสนุนการค้าแบบเสรีของเชื้อเพลิงขยะ SRF ในตลาดสากลซึ่งจะสร้างความเชื่อมั่นในเชิงธุรกิจ (Lonardo et al., 2016)

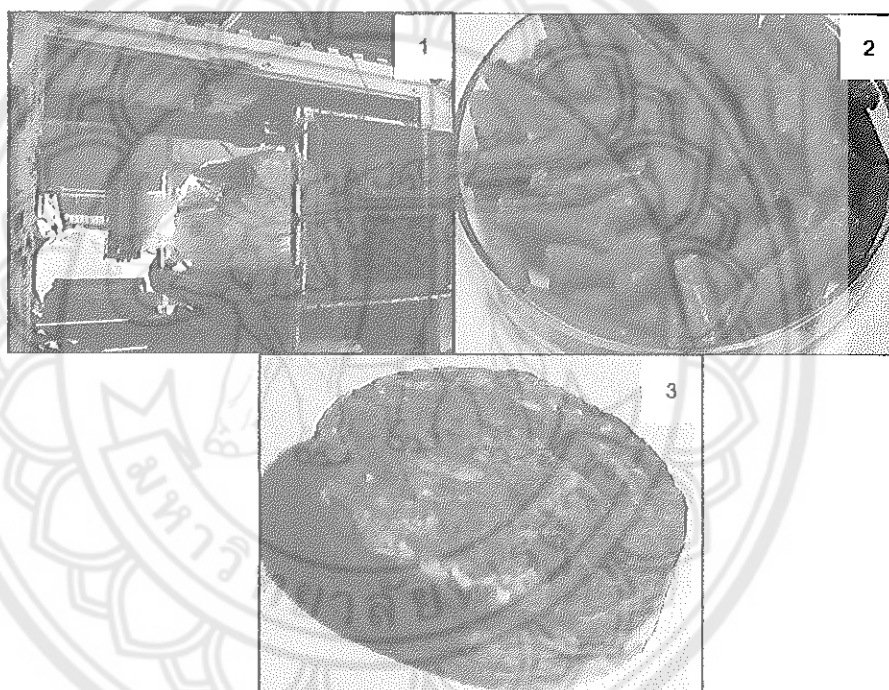
ตาราง 1 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงอัดเม็ดตามข้อกำหนดของ EN 15359:2011

คุณสมบัติ	ค่าทางสถิติ	หน่วย	ชนิดของเชื้อเพลิงอัดเม็ด				
			1	2	3	4	5
ค่าความร้อนสุทธิ	Mean	MJ/kg	≥25.00	≥20.00	≥15.00	≥10.00	≥3.00
คลอไรด์	Mean	%	≤0.20	≤0.60	≤1.00	≤1.50	≤3.00
	Median	mg/MJ	≤0.02	≤0.03	≤0.08	≤0.15	≤0.50
ปรอท	80th	mg/MJ	≤0.04	≤0.06	≤0.16	≤0.30	≤1.00
	percentile						

ที่มา: Lonardo et al., 2016

นอกจากนี้เชื้อเพลิงขยะ SRF ที่ผลิตในปัจจุบันมีลักษณะรูปทรงที่หลากหลายเพื่อสะดวกต่อการขนส่งและการจัดเก็บ โดยมีลักษณะเป็นก้อนทรงกระบอก (Bale) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและสูงเฉลี่ยประมาณ 1.2 m หนักประมาณ 0.00261 ตัน (Passamani et al., 2016) แสดงดังภาพ 2 (1) ลักษณะเป็นเม็ดทรงกระบอก (Pellet Fuels) มีความยาวประมาณ 12 mm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 6 mm (Azócar et al., 2019) แสดงดังภาพ 2 (2) และลักษณะเป็นแบบก้อน (Briquette fuels) ซึ่งมีลักษณะที่ใหญ่กว่าลักษณะเม็ดทรงกระบอกโดย

มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3.8 cm (Gug et al., 2015) แสดงดังภาพ 2 (3) แนวโน้มราคาซื้อขายพลังงาน (Energy cost) ของเชื้อเพลิงอัดเม็ดในยุโรปมีแนวโน้มหันมาใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงอัดเม็ดเพิ่มขึ้น เพื่อลดการซื้อเชื้อเพลิงน้ำมันเนื่องจากราคาของเชื้อเพลิงอัดเม็ดในประเทศเยอรมัน อิตาลีและกรีซ มีราคาประมาณ 2.59 2.48 และ 2.70 THB/kWh และราคาเชื้อเพลิงน้ำมันของแต่ละประเทศอยู่ที่ 2.73 4.74 และ 4.28 THB/kWh ตามลำดับ ซึ่งราคาเชื้อเพลิงน้ำมันมีราคาที่แพงกว่า ทางยุโรปจึงมีแนวโน้มที่จะหันมาเลือกซื้อเชื้อเพลิงพลังงานจากเชื้อเพลิงแข็งมากกว่า (Sandro et al., 2018)



ภาพ 2 ลักษณะของเชื้อเพลิงแข็ง RDF/SRF อาทิเช่น

- (1) เชื้อเพลิงแข็งแบบก้อนทรงกระบอก (Bale) (Passamani et al., 2016)
- (2) เชื้อเพลิงอัดเม็ดทรงกระบอก (Pellet Fuels) (Azócara et al., 2019)
- (3) เชื้อเพลิงอัดเม็ดแบบก้อน (Briquette fuels) (Gug et al., 2015)

3. องค์ประกอบและคุณสมบัติของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

เชื้อเพลิงอัดเม็ดเป็นเชื้อเพลิงที่ผลิตจากขยะที่ไม่เป็นอันตรายและขยะที่ไม่สามารถนำกลับไปใช้ใหม่ได้ ซึ่งในงานวิจัยของ Casado et al. (2016) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาประเภทและคุณสมบัติของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผลิตจากขยะชุมชนในพื้นที่นาวารรา ประเทศสเปนและ

เผาพร้อมกับเศษไม้มะกอก โดยเชื้อเพลิงอัดเม็ดจะประกอบด้วยกระดาษร้อยละ 30 ไม้ร้อยละ 20 พลาสติกร้อยละ 35 และเส้นใยผ้าร้อยละ 15 เป็นต้น ในด้านคุณสมบัติของเชื้อเพลิงอัดเม็ดมีค่าความร้อนประมาณ 16-18 kJ/g ส่วนใหญ่เชื้อเพลิงอัดเม็ดมีขนาดความยาวไม่เกิน 4 cm แสดงดังภาพ 1 นอกจากนี้เชื้อเพลิงอัดเม็ดจะมีค่าความร้อนที่เหมาะสมที่จะนำไปเป็นเชื้อเพลิงทดแทน อีกทั้งยังมีปริมาณคลอไรด์น้อยกว่าร้อยละ 0.5 และมีปริมาณปรอทน้อยกว่า 10 mg/kg ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน EN 15359 (2011) ยังมีการปลดปล่อยโลหะที่ต่ำในระหว่างการเผาไหม้ สะดวกต่อการขนส่งและการจัดเก็บ มีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการนำไปเป็นเชื้อเพลิงในอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์ โรงไฟฟ้า และอุตสาหกรรมเกี่ยวกับหม้อต้มไอน้ำ (Wagland et al., 2011) นอกจากนี้เชื้อเพลิงอัดเม็ดยังมีคุณสมบัติที่สามารถนำไปพิจารณาเกี่ยวกับการให้พลังงาน ได้แก่ คุณสมบัติทางกายภาพ (Proximate analysis) ได้แก่ ความชื้น (Moisture) ปริมาณเถ้า (Ash) ปริมาณสารระเหย (Volatile matter) และปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) เป็นต้น คุณสมบัติทางเคมี (Ultimate analysis) ประกอบด้วยธาตุคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ไนโตรเจน (N) และกำมะถัน (S) เป็นต้น ซึ่งผลในการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีและค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ด แสดงดังตาราง 2 และ 3

ตาราง 2 คุณสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

สมบัติทางกายภาพ	หน่วย	(1)	(2)	(3)
ความชื้น	%	8.80	8.39	9.21
เถ้า	%	21.10	13.24	21.41
ปริมาณสารระเหย	%	75.50	72.58	82.29
ปริมาณคาร์บอนคงตัว	%	3.40	5.78	17.71
ค่าความร้อน	MJ/kg	21.92	23.29	13.46

ที่มา: (1) Casado et al., 2016; (2) Recari et al., 2017; (3) Xiao et al., 2015

ตาราง 3 คุณสมบัติทางเคมีของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

องค์ประกอบ	สัดส่วนทางเคมี (%)		
	(1)	(2)	(3)
คาร์บอน	51.70	46.03	38.52
ไฮโดรเจน	7.00	7.49	4.84
ออกซิเจน	17.94	31.71	55.08
ไนโตรเจน	1.20	0.66	1.01
ซัลเฟอร์	0.30	0.26	0.31
คลอไรด์	0.76	0.59	0.2

ที่มา: (1) Casado et al., 2016; (2) Recari et al., 2017; (3) Xiao et al., 2015

4. กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด

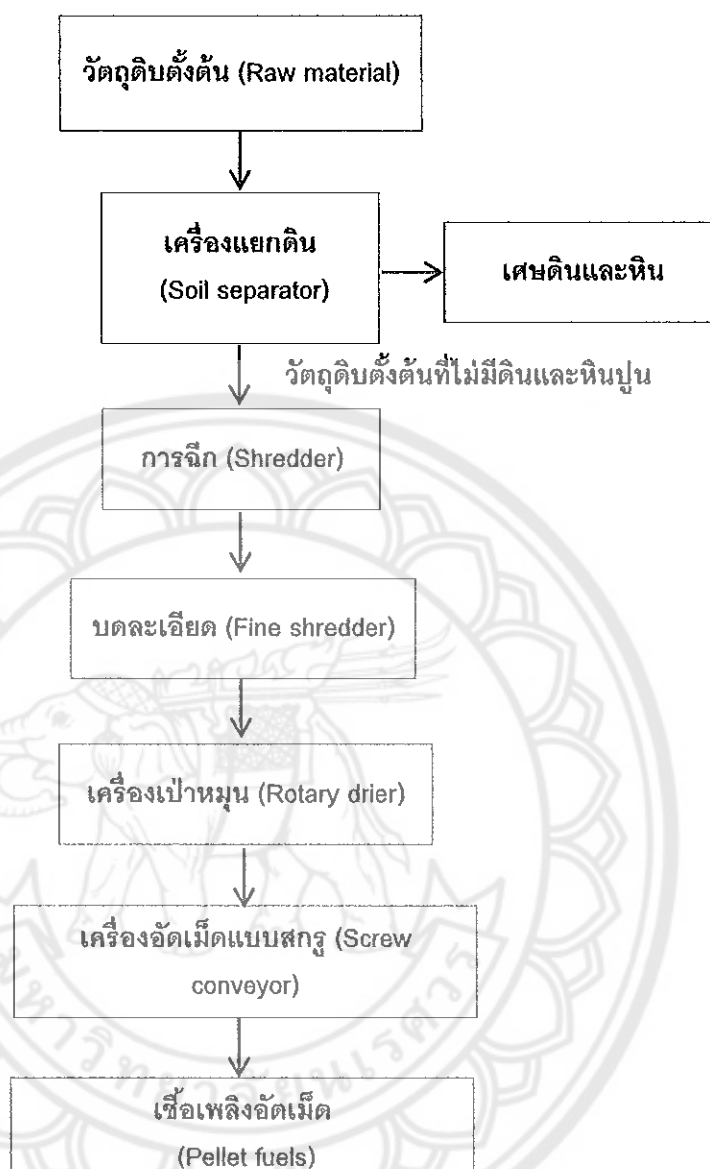
ในกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจะเริ่มตั้งแต่การเตรียมตัวอย่างที่มีคุณสมบัติเหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิง โดยจะต้องมีความชื้นต่ำและให้ค่าความร้อนที่สูงเพื่อเตรียมผสมและอัดขึ้นรูปเป็นเม็ด ได้แก่ ตะกอนพลาสติก ซีล้อยไม้ กระดาษ เส้นใย เป็นต้น ซึ่งขึ้นอยู่กับว่าในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดยุคนั้นผู้วิจัยจะนำตัวอย่างประเภทไหนมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ด โดยส่วนมากกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจะเริ่มตั้งแต่นำตัวอย่างมาบด (Grinder) ให้ละเอียดและทำการร่อน (Sieve) ด้วยตะแกรง เพื่อแยกขนาดของตัวอย่างให้เท่ากันประมาณ 2-5 mm (Azócar et al., 2019) จากนั้นนำตัวอย่างที่มีขนาดเท่ากันมาผสมกันและนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 °C เพื่อไล่ความชื้นเนื่องจากเมื่อมีองค์ประกอบความชื้นต่ำจะทำให้มีประสิทธิภาพด้านพลังงานสูง และนำวัตถุดิบทั้งหมดไปขึ้นรูปเป็นเม็ดโดยเครื่องอัดเม็ด (Pelletizer machine) โดยใช้แรงดัน อุณหภูมิ และเวลาที่เหมาะสมในการอัด (Hosseinzand et al., 2018) กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดโดยทั่วไป แสดงดังภาพ 3



ภาพ 3 กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดโดยทั่วไป

ที่มา: Hosseinizand et al., 2018; Azócara et al., 2019

นอกจากนี้ในการเตรียมตัวอย่างจะมีขั้นตอนในการแยกดินและหินออกจากตัวอย่าง ก่อนที่จะนำตัวอย่างมาบด ดังในงานวิจัยของ Pradhan et al. (2017) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการประเมินคุณสมบัติของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผลิตจากชีวมวลจากสวน โดยได้นำเศษชีวมวลในสวน ได้แก่ ใบมะม่วง ใบขนุน ใบจามจุรี หญ้า และเศษเปลือกไม้ มาเป็นวัตถุดิบในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด ซึ่งก่อนจะนำไปผลิตเป็นเชื้อเพลิงจะนำตัวอย่างไปเข้าสู่กระบวนการแยกดินและหินออกจากตัวอย่างโดยใช้เครื่องแยกดิน (Soil separator) จากนั้นจะเข้าสู่กระบวนการฉีก (Shredder) ให้มีขนาดเล็กลงประมาณ 25.4 mm จากนั้นจะนำไปบดละเอียด (Fine shredder) เพื่อให้มีขนาดเล็กลงมากกว่าเดิมประมาณ 6.35 mm และจะลดความชื้นในตัวอย่างด้วยเครื่องเป่าหมุน (Rotary drier) จากนั้นจะนำตัวอย่างเข้าสู่กระบวนการอัดเม็ดโดยใช้เครื่องอัดเม็ดแบบสกรู (Screw conveyor) แสดงดังภาพ 4

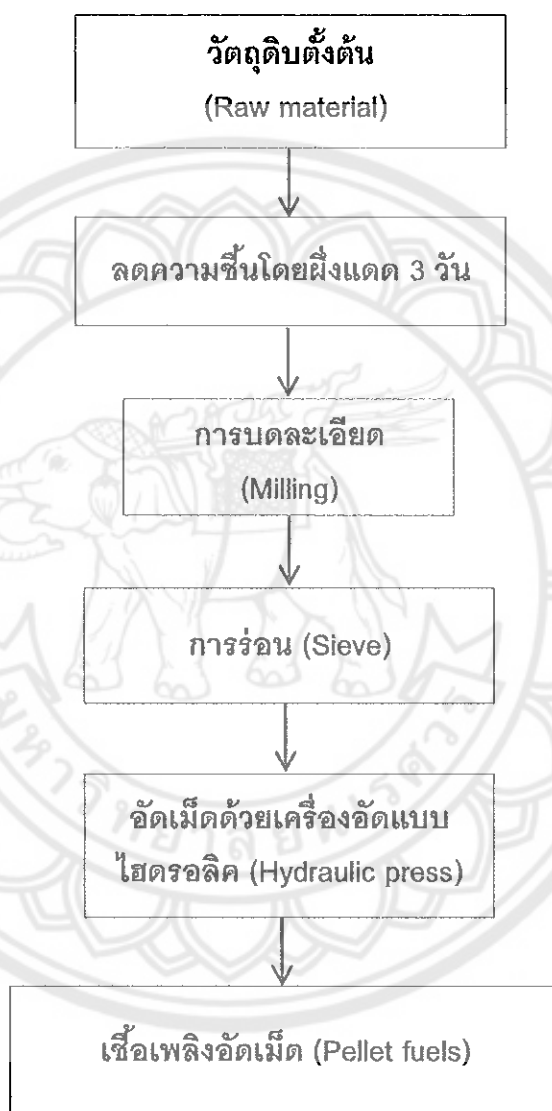


ภาพ 4 กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดโดยมีการแยกเศษดินและหินออกจากวัตถุดิบตั้งต้น

ที่มา: Pradhan et al., 2017

ในกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดของประเทศไทยดังในงานวิจัย Unpinitt et al. (2015) ซึ่งทำการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผลิตจากชีวมวลภายใต้การอัดที่สภาวะต่างๆ โดยได้นำชีวมวล ได้แก่ ชี้อ้อยไม่ไฟ ชี้อ้อยไม่ยูคาลิปตัส ชังข้าวโพด ชี้อ้อยไม่ยางพารา เล็นโยปาล์ม และเศษหญ้า ในพื้นที่จังหวัดขอนแก่น โดยมีขั้นตอนดังนี้ นำวัตถุดิบตั้งต้นมาผึ่งแดด

ประมาณ 3 วัน เพื่อลดความชื้น จากนั้นนำตัวอย่างไปบดละเอียด (Milling) ด้วยเครื่องบดแบบค้อนเหวี่ยง (Hammer mill) ให้มีขนาดเล็กลงประมาณ 2 mm และนำไปร่อน (Sieve) เพื่อคัดขนาดให้เท่ากัน จากนั้นนำตัวอย่างที่ได้ไปทำการอัดด้วยเครื่องอัดแบบไฮดรอลิก (Hydraulic press) แสดงดังภาพ 5



ภาพ 5 กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดในประเทศไทย

ที่มา: Unpinit et al., 2015

สัดส่วนของตัวอย่างที่เหมาะสมเพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ดต้องมีปริมาณของพลาสติกมากกว่าชีวมวล จะทำให้มีการเผาไหม้ที่ดีเพราะมีปริมาณความชื้นต่ำ ส่งผลทำให้มีค่าความร้อนสูงกว่าเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่มีอัตราส่วนผสมของตะกอนพลาสติกน้อยกว่าชีวมวล ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ansah et al. (2016) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับลักษณะการสูญเสียน้ำหนักโดยใช้ความร้อนและปริมาณความร้อนระหว่างไพโรไลซิสร่วมขององค์ประกอบขยะชุมชนเมืองซึ่งจากการวิจัยพบว่า เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่มีอัตราส่วนผสมของพลาสติก PET มากกว่าไม้ (ร้อยละ 70 ต่อ ร้อยละ 30) มีค่าความร้อนประมาณ 4,365 J/g หรือ 4.365 MJ/kg ซึ่งมี ค่าความร้อนสูงกว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่มีอัตราส่วนผสมของไม้เท่ากับพลาสติก PET (ร้อยละ 50 ต่อ ร้อยละ 50) ซึ่งมีค่าความร้อนประมาณ 1,138 J/g หรือ 1.138 MJ/kg

การอัดเป็นการเพิ่มความแข็งแรงภายในวัตถุดิบหรือตัวอย่างจนกระทั่งเป็นก้อน โดยใช้แรงอัดที่สูงถ้าวัตถุดิบนั้นมีเนื้อที่ละเอียดจะเปลี่ยนรูปทรงภายใต้แรงอัดที่มีความดันสูงโดยไม่ต้องใช้ตัวผสม แต่วัตถุดิบบางชนิดจำเป็นต้องใช้ตัวผสมเข้าช่วยเพื่อเพิ่มการจับตัวกันให้เป็นก้อน ซึ่งการอัดมีผลต่อความหนาแน่นของเชื้อเพลิงสามารถทำให้เชื้อเพลิงที่ผ่านการอัดมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ดังในงานวิจัยของ Gug et al. (2015) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการผลิตและการศึกษาสมบัติของเชื้อเพลิงแข็งที่ผลิตจากขยะชุมชนเมืองและพลาสติกที่ไร้เคิลพบว่า ความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น ร้อยละ 7-10 โดยการเพิ่มอุณหภูมิแรงกดจาก 125-150 °C ซึ่งการเพิ่มแรงกดที่อุณหภูมิ 150 °C ในขั้นแรกจะทำให้อากาศระเหยออกไปส่งผลทำให้ความหนาแน่นของพลาสติก PET เพิ่มขึ้นร้อยละ 8 และพลาสติก HDPE เพิ่มขึ้นร้อยละ 11 นอกจากนี้ในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดเมื่อนำไปอัดในช่วงอุณหภูมิ 75-100 °C มีผลต่อการอ่อนตัวและการสร้างพันธะที่แข็งแกร่ง (Solid bridge formation) ของเส้นใยลิกนินและโปรตีนในชีวมวลทำให้เกิดการยึดเกาะตัวกันต่ำและเกิดการสลายตัว สามารถเพิ่มแรงอัดได้และทำให้เชื้อเพลิงมีความหนาแน่นและยึดเกาะกันเป็นรูปทรงได้ดี (Nguyen et al., 2014) รวมทั้งมีผลทำให้พลาสติกเริ่มเกิดการหลอมตัว (Glass transition) เล็กน้อย โดยเปลี่ยนจากสถานะของแข็งคล้ายแก้วกลายเป็นลักษณะเหนียวคล้ายยางหลอมรวมกับชีวมวลในเชื้อเพลิง (Ansah et al., 2016)

5. เทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด

ในการผลิตเชื้อเพลิงเพื่อให้เชื้อเพลิงคงรูปสะดวกต่อการขนส่งและการจัดเก็บ ซึ่งปัจจุบันมีการผลิตเชื้อเพลิงออกมาหลากหลายรูปแบบ อาทิเช่น ลักษณะเม็ด แท่ง ลูกบาศก์ ซึ่งขึ้นอยู่กับความเหมาะสมและวัตถุดิบที่นำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งเครื่องอัดที่จะนำมาขึ้นรูปเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ดจะแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้

เครื่องอัดประเภทที่ 1 เครื่องอัดแบบลูกสูบ (Piston Press) สามารถอัดได้ประมาณ 40-1,000 kg/h ซึ่งมีหลักการทำงานโดยลูกสูบจะอัดตัวอย่างเข้าสู่กระบอกลูกสูบที่มีลักษณะเป็นเกลียว ทำหน้าที่ด้านการเคลื่อนตัวของตัวอย่างจะได้เชื้อเพลิงที่มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกลูกสูบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 50-100 mm

เครื่องอัดประเภทที่ 2 เครื่องอัดแบบเกลียว (Screw Press) แบ่งออกเป็น 3 แบบ ได้แก่

แบบที่ 1 แบบเกลียวรูปกรวย (Conical screw press) อัดได้ประมาณ 500-1,000 kg/h มีหลักการทำงานโดยเกลียวรูปกรวยจะดันตัวอย่างเคลื่อนไปข้างหน้า ซึ่งในระหว่างที่มีการดันตัวอย่างอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นประมาณ 100-200 °C ทำให้ตัวอย่างที่เป็นชีวมวลมีลักษณะหลอมละลายเป็นตัวอย่างประสานเชื้อเพลิงและจำได้เชื้อเพลิงอัดแท่งออกมา

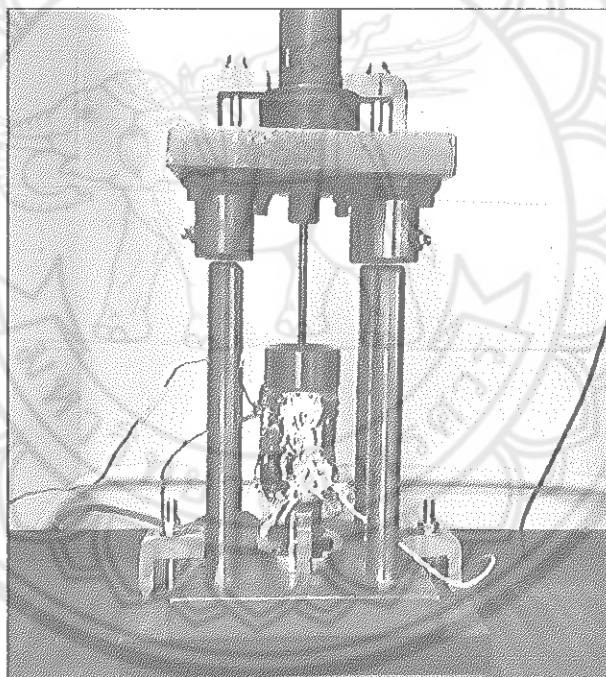
แบบที่ 2 แบบเกลียวคู่ (Twin screw press) สามารถอัดได้ประมาณ 2,800-3,600 kg/h โดยมีเกลียวอัด 2 อันต่อเข้ากับเพลลาที่สวมกับเกลียวสามารถหมุนเร็วได้ โดยตัวอย่างที่จะนำมาผลิตเชื้อเพลิงต้องมีค่าความชื้นร้อยละ 25 จึงจะอัดได้

แบบที่ 3 แบบเกลียวพร้อมชุดลวดร้อน (Screw press with heated die) โดยชุดลวดจะมีความร้อนประมาณ 350 °C ซึ่งมีหลักการทำงานตัวอย่างจะถูกดันโดยเกลียวผ่านเข้ากระบอกลูกสูบที่มีชุดลวดความร้อน ซึ่งจะช่วยให้ตัวอย่างเกิดการยึดเกาะกันเป็นแท่งได้ดี และแท่งเชื้อเพลิงนี้จะมีรูกลวงตรงกลางเพื่อเป็นรูระบายควันและก๊าซในระหว่างการอัดแท่งเชื้อเพลิงออกมา และเครื่องอัดนี้สามารถอัดได้ประมาณ 50-500 kg/h ส่วนตัวอย่างที่จะนำมาผลิตต้องมีค่าความชื้นร้อยละ 8-12 จึงจะสามารถอัดขึ้นรูปได้ เป็นต้น

เครื่องอัดประเภทที่ 3 เป็นเครื่องอัดแบบลูกกลิ้ง (Roll press) เป็นเครื่องอัดที่ต้องใช้ตัวอย่างขนาดเล็ก โดยเชื้อเพลิงที่ได้จะมีความหนาแน่นที่น้อยกว่าเชื้อเพลิงที่ได้จากการอัดแบบอื่น จึงต้องใช้ตัวประสานเข้ามาช่วย เพื่อให้เชื้อเพลิงมีการยึดเกาะกันและมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น โดยเครื่องอัดแบบลูกกลิ้ง มีหลักการทำงานโดยจะอัดตัวอย่างให้ตกลงระหว่างลูกกลิ้งที่หมุนตรงข้ามกัน ทำให้ตัวอย่างถูกอัดเข้าสู่เครื่องรองรับแท่งอัด นอกจากนี้ยังมีเครื่องอัดเม็ด (Pelletizing press) ซึ่งจะได้เชื้อเพลิงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5-15 cm ยาวประมาณ 30 mm โดยเครื่องอัดนี้จะประกอบไปด้วยฟิมพ์ (Matrix) และลูกกลิ้ง (Roller) โดยจะอัดตัวอย่างระหว่างแรงอัดของฟิมพ์และลูกกลิ้งทำให้เกิดความร้อนจากการเสียดสี และอัดตัวอย่างผ่านฟิมพ์จะได้เชื้อเพลิงอัดเม็ดออกมา (เดช วัฒนชัยยิ่งเจริญ, 2555)

นอกจากนี้ยังมีการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดโดยใช้เครื่องอัดเม็ดแบบไฮดรอลิค แสดงดังภาพ 6 ซึ่งจะกำหนดทั้งอุณหภูมิและแรงดันในการอัดโดยเครื่องอัดจะประกอบไปด้วยลูกสูบ (Piston)

มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 6.35 mm ยาวประมาณ 120 mm และมีกระบอกอัดที่มีรูตรงกลางไว้สำหรับใส่ตัวอย่าง โดยรูมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 6.35 mm ยาวประมาณ 90 mm โดยตัวกระบอกอัดจะให้ความร้อนขณะอัดตัวอย่างโดยมีอุณหภูมิประมาณ 50-100 °C แรงดันในการอัดประมาณ 79.73-111.62 kg/cm² โดยหลักการทำงานนั้นลูกสูบจะถูกดันด้วยแรงดันที่กำหนดซึ่งจะอัดตัวอย่างที่อยู่ในกระบอกอัดที่ให้ความร้อนในระหว่างการอัด ตรงส่วนด้านล่างของกระบอกอัดจะมีตัวบล็อก (Block) ที่สามารถถอดออกได้หลังจากอัดเสร็จตัวลูกสูบจะดันเชื้อเพลิงออกจากกระบอกอัดทางด้านล่างทั้งนี้เครื่องอัดนี้สามารถอัดเชื้อเพลิงได้ที่ละเม็ด ซึ่งเชื้อเพลิงที่ได้จะมีลักษณะเป็นเม็ดทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 6 mm ยาวประมาณ 12 mm (Hosseinizand et al., 2018)



ภาพ 6 เครื่องอัดเม็ดแบบไฮดรอลิค

ที่มา: Hosseinizand et al., 2018

6. การนำเชื้อเพลิงอัดเม็ดไปใช้ประโยชน์

ในปัจจุบันเชื้อเพลิงอัดเม็ดเป็นเชื้อเพลิงที่ทั่วโลกต่างให้ความสนใจ ซึ่งนำไปใช้ประโยชน์ในด้านเชื้อเพลิงทดแทนแทนการใช้เชื้อเพลิงถ่านหินในอุตสาหกรรม อาทิเช่น ประเทศทางฝั่งอเมริกา ได้แก่ ประเทศแคนาดาได้นำเชื้อเพลิงอัดเม็ดไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า แทนการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล ซึ่งเชื้อเพลิงอัดเม็ดผลิตจากเศษไม้สามารถลดต้นทุนในการผลิตกระแสไฟฟ้าได้ประมาณ 4.45 THB/kWh เมื่อเทียบกับราคาในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงฟอสซิล (McKechnie et al., 2016) ในประเทศฝั่งยุโรป ได้แก่ ประเทศนอร์เวย์ได้นำเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผลิตจากชีเลื่อยไม้สนนอร์เวย์สปรูซและชีเลื่อยไม้โอ๊ก มาผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ด ซึ่งนำไปใช้ในอุตสาหกรรมเหมืองแร่ (Ferroalloy industries) เพื่อลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Surup et al., 2018) ส่วนประเทศในฝั่งเอเชีย ได้แก่ ประเทศเกาหลีใต้ได้นำเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผลิตจากชีวมวล เศษอาหาร พลาสติก และยางมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ด แทนการใช้ถ่านหินปีทูมินัสในอุตสาหกรรมเตาเผาผลิตซีเมนต์ (Cement industry) ซึ่งสามารถลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลงประมาณ 10,773.81 ktCO₂eq จาก 12,358.04 ktCO₂eq (Huh et al., 2018) ในประเทศไต้หวันได้นำเชื้อเพลิงอัดเม็ดมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงในอุตสาหกรรมเตาหลอมเหล็กด้วยไฟฟ้า (Electric Arc furnace steel industry) ซึ่งเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ได้ผลิตจากเศษไม้และ ชีเลื่อยสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ถึง 1,000 MWh/yr ซึ่งเห็นว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดสามารถนำมาเป็นเชื้อเพลิงทดแทนเชื้อเพลิงถ่านหินที่ใช้ในอุตสาหกรรมได้ (Lin et al., 2016) ส่วนในประเทศไทยได้นำเชื้อเพลิงอัดเม็ดไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในเตาเผาผลิตซีเมนต์ในจังหวัดลำปาง สระบุรี และนครศรีธรรมราช โดยนำเชื้อเพลิงอัดเม็ดไปใช้แทนเชื้อเพลิงถ่านหินเนื่องจากมีราคาที่ถูกกว่า ถึงแม้ว่าจะมีค่าความร้อนที่ต่ำกว่าประมาณ 20 MJ/kg แต่ก็สามารถทำให้มลพิษลดลงจากเดิมและอุปกรณ์ของระบบบำบัดมลพิษอากาศ ได้แก่ ถุงกรอง (Bag house) เครื่องดักฝุ่นแบบไฟฟ้าสถิต (Electrostatic precipitator) และระบบบำบัดอากาศเสีย (Scrubber) สามารถดูแลได้ง่ายและมีประสิทธิภาพการทำงานได้ดี และในอุตสาหกรรมผลิตพลังงาน (Power industry) ได้นำเชื้อเพลิงอัดเม็ดไปใช้ในจังหวัดชลบุรีโดยนำไปเป็นเชื้อเพลิงร่วมกับเชื้อเพลิงถ่านหินปีทูมินัส และแกลบ รวมถึงได้นำเชื้อเพลิงอัดเม็ดไปใช้ในเชื้อเพลิงอุตสาหกรรมหม้อไอน้ำ (Industrial boilers) ซึ่งหม้อไอน้ำในประเทศไทยจะใช้ในอุตสาหกรรมผลิตอาหาร เครื่องดื่ม สิ่งทอ ไม้และเฟอร์นิเจอร์ กระดาษ รวมถึงอุตสาหกรรมผลิตโลหะและสารเคมี เป็นต้น ซึ่งเชื้อเพลิงหลักที่ใช้ส่วนใหญ่จะเป็นเชื้อเพลิงถ่านหินลิกไนต์ ปีโตรเลียม ก๊าซธรรมชาติและชีวมวล เป็นต้น (Nithikul et al., 2010) ข้อดีของการใช้เชื้อเพลิงอัดเม็ดสามารถลดค่าใช้จ่ายและลดการใช้

เชื้อเพลิงถ่านหินได้อีกทางหนึ่ง นอกจากนี้ยังลดปริมาณการปลดปล่อยคาร์บอนและเพิ่มประสิทธิภาพของการใช้พลังงานที่ยั่งยืน ลดการเกิดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมโดยมีการปลดปล่อยมลพิษที่ต่ำ ณ แหล่งกำเนิด เช่น โรงผลิตปูนซีเมนต์ รวมถึงการให้ค่าความร้อนที่สูง (1 ตัน ของถ่านหินเท่ากับ 1 หรือ $\frac{1}{2}$ ตันของเชื้อเพลิงอัดเม็ด) เป็นต้น เชื้อเพลิงอัดเม็ดสามารถนำไปใช้ประโยชน์เป็นเชื้อเพลิงร่วมได้โดยการเผาไหม้ร่วมกับเชื้อเพลิงอื่น เช่น ถ่านหินหรือชีวมวล ใช้ร่วมกับถ่านหินหรือชีวมวลในกระบวนการ แก๊สซิฟิเคชัน และยังสามารถนำไปเป็นเชื้อเพลิงเผาไหม้ในเตาผลิตปูนซีเมนต์ เป็นต้น (Fyffe et al., 2012)

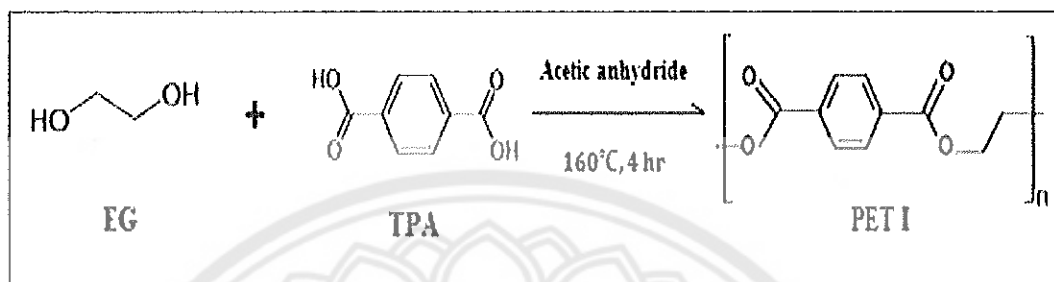
7. การใช้เศษพลาสติกในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด

ปัจจุบันพลาสติกที่ใช้กันมีอยู่หลายประเภท ส่วนใหญ่จะเป็นพลาสติกที่สามารถนำมารีไซเคิลเพื่อกลับมาใช้ใหม่ ได้แก่ พลาสติก พอลิเอทรีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene Terephthalate; PET) พลาสติกพอลิเอทรีนความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene; HDPE) พลาสติกพอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinylchloride; PVC) พลาสติกพอลิเอทรีนความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene; LDPE) และพลาสติกพอลิโพรพิลีน (Polypropylene; PP) พลาสติกพอลิสไตรีน (Polystyrene; PS) เป็นต้น (Porshnov et al., 2018) ซึ่งพลาสติกเหล่านี้ผลิตมาจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม ทำให้มีความยืดหยุ่น ทนทาน และมีน้ำหนักเบา รวมถึงต้นทุนในการผลิตต่ำ

ทั้งนี้ในยุโรปและประเทศอังกฤษพบว่า มีปริมาณขยะชุมชนเมืองประมาณร้อยละ 10-13 ซึ่งมีปริมาณขยะพลาสติกชนิด PET อยู่ประมาณ 1.7 ล้านตัน การที่พบปริมาณพลาสติกชนิด PET เป็นจำนวนมากเนื่องจากเป็นพลาสติกที่นิยมนำไปผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ใส่อาหาร ภาชนะเครื่องใช้ในครัวเรือน ขวดพลาสติก และบรรจุภัณฑ์ต่างๆมากมาย เป็นต้น (Diaz-Silvarrey et al., 2018) ส่วนพลาสติกในประเทศไทยที่นำมาใช้จะเป็นพลาสติก PET PP PS PVC และ HDPE โดยมีพลาสติก PVC มีปริมาณมากที่สุดประมาณร้อยละ 83 ส่วนใหญ่จะใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง รองลงมาจะเป็นพลาสติก PP ร้อยละ 54 PS ร้อยละ 33 PET ร้อยละ 15 และ HDPE ร้อยละ 9.9 (สถาบันพลาสติกแห่งประเทศไทย, 2556)

พลาสติกชนิด PET เป็นพลาสติกกึ่งผลึก (Semi-crystalline) และเป็นเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) ที่มีความแข็งแรงและเป็นพลาสติกเมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการอ่อนตัวจึงสามารถที่จะนำมาหลอมขึ้นรูปใหม่ได้ จึงนิยมนำพลาสติกชนิดมารีไซเคิลเพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ได้ ทั้งนี้พลาสติกชนิด PET ผลิตมาจากกรดเทเรพทาสิกบริสุทธิ์ (Pure terephthalic acid; TPA) และเอทิลีนไกลคอล (Ethylene glycol; EG) ซึ่งมาจากน้ำมันดิบเมื่อนำสารเคมีทั้ง 2 ชนิด

ได้รับความร้อนจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นมอนอเมอร์ BHET (Bis-hydroxyethyl terephthalate) ผสมพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำชนิดโอลิโกเมอร์ (Oligomer) และจะมีการกลั่นเอทิลีนไกลคอล ซึ่งเป็นสารส่วนเกินออกและจะได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็นพลาสติกชนิด PET แสดงดังภาพ 7



ภาพ 7 กระบวนการผลิตพลาสติกชนิดเอทิลีน เทเรฟทาเลต (Polyethylene terephthalate; PET)

ที่มา: Chen et al., 2018

ในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดวัตถุดิบตั้งต้นที่จะนำมาผลิตต้องให้ค่าความร้อนสูง ความชื้นต่ำ ปริมาณการปนเปื้อนโลหะหนักและคลอไรด์ต่ำ เพื่อให้เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผลิตได้มีประสิทธิภาพการให้พลังงานสูงและการเกิดมลพิษต่ำ ซึ่งพลาสติกชนิด PET เป็นวัตถุดิบตั้งต้นที่เหมาะสมที่จะการนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ดเนื่องจากมีค่าความชื้นต่ำประมาณร้อยละ 0.50 ค่าความร้อนสูงประมาณ 21.90 MJ/kg แสดงดังตาราง 4 และไม่มีการปนเปื้อนคลอไรด์ (Zhao et al., 2016) แสดงดังตาราง 5 อีกทั้งพลาสติก PET สามารถที่จะใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเชื้อเพลิงทดแทน หรือผลิตเป็นเชื้อเพลิงร่วมแทนเชื้อเพลิงฟอสซิล (Fossil fuel) หรือเชื้อเพลิงถ่านหิน (Coal) ได้ (Bonifazi et al., 2015) ทั้งนี้ในกระบวนการเผาไหม้แบบไพโรไลซิสพลาสติก PET มีค่าความร้อนสำหรับไพโรไลซิส (Heat consumption) ที่สูงกว่าพวกเชื้อเพลิงชีวมวล แสดงว่าความร้อนสำหรับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิพลาสติก PET และความร้อนของการทำปฏิกิริยาจะสูง (Ansah et al., 2016)

ตาราง 4 คุณสมบัติทางกายภาพและค่าความร้อนของพลาสติกและวัสดุเหลือทิ้ง

ตัวอย่าง	ค่าความชื้น	ปริมาณเถ้า	ปริมาณสารระเหย	ค่าความร้อนต่ำสุด
	(%)	(%)	(%)	(MJ/kg)
PP/PE	0.06	0.03	99.40	43.20
PS	0.12	0.020	99.80	39.90
PET	0.50	0.10	94.60	21.90
เส้นใย	5.40	0.90	93.60	16.60
กระดาษ	7.10	17.10	75.60	12.10
ชีวมวล	73.80	1.10	21.40	4.10

ที่มา: Zhao et al., 2016

ตาราง 5 องค์ประกอบทางเคมีของพลาสติกและวัสดุเหลือทิ้ง

ตัวอย่าง	องค์ประกอบเคมี (%)				
	C	H	N	O	Cl
PP/PE	85.31	14.31	0.01	0.08	0.00
PS	61.65	4.19	0.00	31.57	0.00
PET	92.08	7.83	0.00	0.00	0.00
เส้นใย	37.81	5.51	0.07	44.74	0.10
กระดาษ	57.93	5.62	2.11	36.21	0.06
ชีวมวล	45.36	7.40	1.83	49.35	0.80

ที่มา: Zhao et al., 2016

ส่วนการปนเปื้อนโลหะหนักพลาสติกชนิด PET มีค่าการปนเปื้อนของโลหะหนักต่ำที่สุด ซึ่งไม่พบแคดเมียม (Cd) ทองแดง (Cu) และสังกะสี (Zn) ส่วนโครเมียม (Cr) และตะกั่ว (Pb) มีปริมาณ 2.0 และ 3.6 mg/l ตามลำดับ แสดงดังตาราง 6

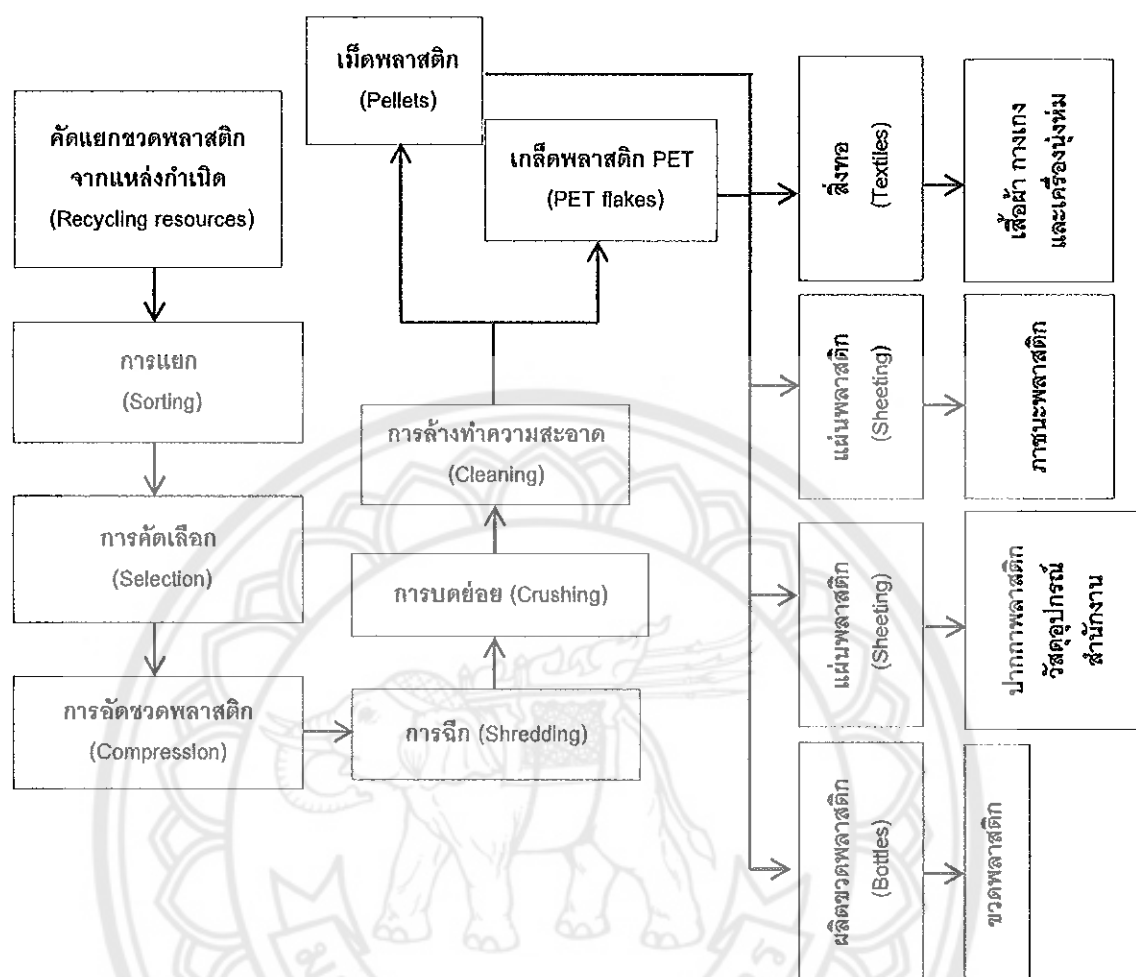
ตาราง 6 โลหะหนักที่ปนเปื้อนอยู่ในพลาสติกและวัสดุเหลือทิ้ง

ตัวอย่าง	ความเข้มข้นโลหะหนัก (ppm)						
	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Zn	Ni
PP	0.02	1.20	0.60	0.70	3.80	N.D.	2.90
PET	N.D.	2.00	N.D.	0.70	3.60	N.D.	0.40
LDPE	5.60	3.20	8.00	6.20	19.00	96.00	4.00
HDPE	3.90	1.60	2.00	2.00	11.50	17.30	2.70
PS	N.D.	2.50	N.D.	0.70	4.90	61.00	3.00
กระดาษ	0.10	4.00	54.00	14.00	6.10	23.00	2.30
เส้นใย	0.10	2.50	4.50	2.60	4.20	25.00	3.70
ชีวมวล	0.01	0.50	1.40	7.20	4.90	24.00	0.80

หมายเหตุ: N.D.(Not Detected)=ตรวจไม่พบ

ที่มา: Zhao et al., 2016

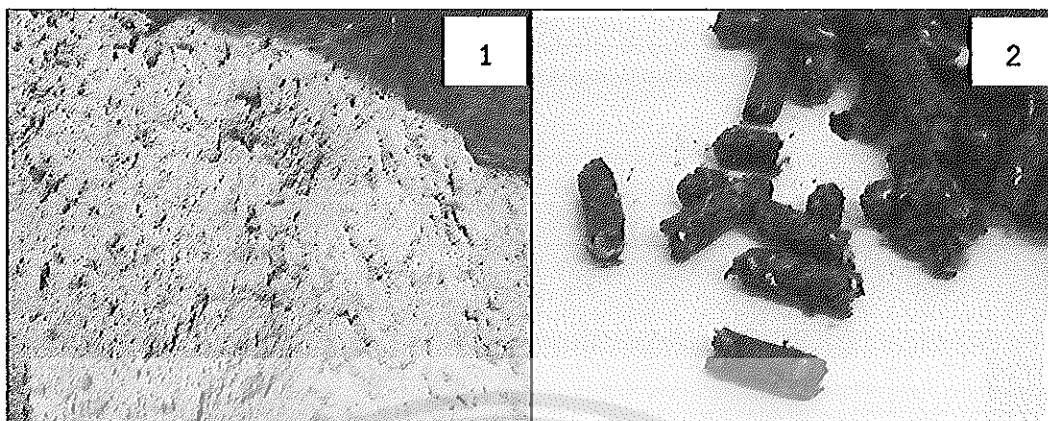
ทั้งนี้ในปัจจุบันมีกระบวนการและเทคโนโลยีต่างๆที่นำมาลดการเกิดปัญหาของการเพิ่มปริมาณขยะขวดพลาสติก ซึ่งหนึ่งในกระบวนการนั้นคือ การนำขวดพลาสติกมารีไซเคิล แสดงดังภาพ 8 กระบวนการรีไซเคิลขวดพลาสติกของสมาชิกรีไซเคิลขวดพลาสติกของประเทศญี่ปุ่น (Council for pet bottle recycling) ซึ่งมี 6 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ การแยก (Sorting) การคัดเลือก (Selection) การตัด (Cutting) การบดย่อย (Crushing) การล้าง (Washing) และการผึ่งแห้ง (Drying) เป็นต้น ทั้งนี้ในกระบวนการเหล่านี้มีกากตะกอนพลาสติกขนาดเล็ก ซึ่งมีขนาดเล็กกว่า 5 mm ไม่สามารถย่อยสลายเองได้ตามธรรมชาติและไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์อย่างอื่นได้ เมื่อกำจัดแบบผิดวิธีสามารถส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพ (Pegadoa et al., 2018) โดยเฉพาะถ้าตะกอนพลาสติกนั้นมีการปนเปื้อนของตะกอนของพลาสติกชนิด PVC เมื่อมีการเผาแบบผิดวิธี จะมีการปลดปล่อยก๊าซพิษที่เป็นกรดไฮโดรคลอไรด์ สารประกอบไดออกซิน ฟิวแรน รวมถึงสารประกอบอินทรีย์จำพวก PCBs PBBs และPBDEs ซึ่งส่งผลกระทบต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อมโดยรอบ (Bonifazi et al., 2015)



ภาพ 8 กระบวนการรีไซเคิลขวดพลาสติก

ที่มา: Plastic Waste Management Institute, 2009

อย่างไรก็ตามในขั้นตอนการบดย่อยขวดพลาสติกก็ยังมี การเกิดของเสียจากกระบวนการ ซึ่งของเสียที่เกิดขึ้นนั้นก็คือน้ำพลาสติก แสดงดังภาพ 9 (1) ซึ่งตะกอนเหล่านี้จะถูกนำไปทิ้งร่วมกับขยะอื่นๆ เพื่อนำไปกำจัดลงในหลุมฝังกลบหรือเผาทิ้ง อย่างไรก็ตามพลาสติกมีคุณสมบัติที่เหมาะสมดังที่กล่าวมาในข้างต้นที่จะนำไปเป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์ โรงไฟฟ้า รวมถึงอุตสาหกรรมหม้อต้มไอน้ำ ซึ่งจะนำไปทำเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ด แสดงดังภาพ 9 (2) ที่มีคุณสมบัติเหมาะสมในการนำไปเป็นเชื้อเพลิงและเชื้อเพลิงร่วมในการเผาไหม้ได้



ภาพ 9 ตะกอนพลาสติกจากกระบวนการบดย่อยขวดพลาสติกและเชื้อเพลิงอัดเม็ด

(1) ตะกอนพลาสติกจากกระบวนการบดย่อยขวดพลาสติก

(2) เชื้อเพลิงอัดเม็ด (Casado et al., 2016)

8. การใช้ชีวมวลเป็นส่วนผสมในเชื้อเพลิงอัดเม็ด

คุณสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวลที่จะนำมาเป็นส่วนผสมของเชื้อเพลิงอัดเม็ดยังนั้นจะต้องมีค่าความร้อนไม่ต่ำกว่า 12.55 MJ/kg ค่าคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 15 เถ้า (Ash) ไม่มากกว่าร้อยละ 20 และกำมะถันรวม (Total Sulfur) ไม่เกินร้อยละ 2 (คู่มือแนวทางและเกณฑ์คุณสมบัติของเสียเพื่อการแปรรูปเป็นแท่งเชื้อเพลิงและบล็อกประสาน, 2560) จากงานวิจัยของ Balogun et al. (2014) ได้ทำงานวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์ไพโรไลซิสของไม้สักจากการวิจัยพบว่า คุณสมบัติของไม้สักมีค่าความชื้น (Moisture Content) ร้อยละ 15 ปริมาณเถ้า ร้อยละ 0.7 ปริมาณสารระเหย (Volatile matter) ร้อยละ 67.3 คาร์บอนคงตัว ร้อยละ 3.8 ค่าความร้อนสูงสุด 19.8 MJ/kg นอกจากนี้ยังมีการศึกษาเกี่ยวกับองค์ประกอบของถ่านไม้สักพบว่า องค์ประกอบทางเคมีของถ่านไม้สัก ได้แก่ คาร์บอนคงตัวมีค่าร้อยละ 75.9 ซึ่งคาร์บอนคงตัวจะแปรผันตรงกับอุณหภูมิ นั่นคือ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นถ่านไม้มีแนวโน้มที่จะให้ร้อยละของคาร์บอนคงตัวสูงขึ้นด้วย ในทางกลับกันปริมาณสารระเหยที่ได้จะมีแนวโน้มลดลงเมื่อเผาถ่านที่อุณหภูมิสูงขึ้น นอกจากนี้ถ่านไม้มีค่าร้อยละของความชื้นสูงขึ้นจะมีผลทำให้จุดติดไฟยากขึ้นด้วย (แผนงานวิจัย การวิจัยและพัฒนาการเพิ่มมูลค่าไม้สักตัดสางขยายระยะจากสวนป่า โครงการการให้ประโยชน์ถ่านและน้ำส้มควันไม้จากเศษไม้ ปลายไม้ของไม้สักเพื่อสร้างมูลค่าเพิ่ม, 2560) ซึ่งปริมาณที่เลื่อยไม้สักมีประมาณ 268.8 ลบ.ม./ปี (อรรถพร ปานขาว และคณะ, 2557) นอกจากนี้สามารถใช้ไม้ยูคาลิปตัสมาเป็นเชื้อเพลิงผสมของเชื้อเพลิงอัดเม็ดได้เช่นกัน เนื่องจากมีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการนำมาเป็นวัตถุดิบตั้งต้นผลิตเชื้อเพลิง จากงานวิจัยของ Araújo et al. (2016)

ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับผลจากการทำทอริแฟคชันเพื่อผลิตก้อนไม้ยูคาลิปตัสภายใต้แรงดันที่แตกต่างกันจากการวิเคราะห์คุณสมบัติของไม้ยูคาลิปตัสพบว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นประมาณ 220°C ค่าความชื้นลดลงร้อยละ 11.42 ปริมาณเถ้าร้อยละ 0.86 ปริมาณสารระเหยเพิ่มขึ้นร้อยละ 90.34 คาร์บอนคงตัวร้อยละ 8.81 และมีค่าความร้อน 20.44 MJ/kg ทั้งนี้การที่มีค่าความชื้นลดลงสามารถที่จะให้ความร้อนในเตาเผาได้ดี และการที่มีค่าสารระเหยเพิ่มขึ้นทั้งนี้เนื่องมาจากเชื้อเพลิงสามารถเปลี่ยนเป็นแก๊สได้เร็วและให้ค่าความร้อนได้ดีเช่นกัน (Montané et al., 2013) ซึ่งไม้ยูคาลิปตัสในประเทศไทยมีประมาณ 6.8 ล้านตัน/ปี (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2556) ทั้งนี้ซังข้าวโพดสามารถนำมาผสมเพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ดได้ ดังในงานวิจัยของ Yao et al. (2016) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการเปรียบเทียบคุณสมบัติและการใช้ประโยชน์เถ้าของซังข้าวโพด จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันและกระบวนการเผาไหม้จากการวิเคราะห์คุณสมบัติของ ซังข้าวโพดพบว่า มีค่าความชื้นร้อยละ 0.87 ปริมาณเถ้าร้อยละ 2.24 ปริมาณสารระเหยร้อยละ 79.25 คาร์บอนคงตัวร้อยละ 17.64 และจากงานวิจัยของ Liu et al. (2015) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการเผาไหม้ของซังข้าวโพดต่อถ่านหินบิทูมินัส และไม้เนื้อแข็งต่อถ่านหินบิทูมินัสจากการวิเคราะห์ค่าความร้อนของซังข้าวโพดพบว่า มีค่าความร้อนสูงสุดเท่ากับ 17.36 MJ/kg ซึ่งในประเทศไทยมีปริมาณซังข้าวโพดประมาณ 120,997.14 ตัน/ปี (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2556)

9. กระบวนการทอริแฟคชัน

เป็นกระบวนการทางความร้อนที่ต้องการแปลงสภาพวัตถุดิบหรือเชื้อเพลิง โดยใช้อุณหภูมิไม่สูงนักประมาณ $200-400^{\circ}\text{C}$ ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนหรือเรียกว่าเป็นกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งกระบวนการทอริแฟคชันที่ $200-220^{\circ}\text{C}$ เป็นการเพิ่มศักยภาพด้านพลังงานและเพิ่มประสิทธิภาพด้านคุณสมบัติของเชื้อเพลิงอัดเม็ด เช่น เพิ่มความแข็งแรงเพิ่มคุณสมบัติการไม่จับความชื้น (Araújo et al., 2016) นอกจากนี้ในงานวิจัยของ Recari et al. (2017) ได้ทำงานวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาการทอริแฟคชันของเชื้อเพลิงอัดเม็ดเพื่อพัฒนาคุณสมบัติของเชื้อเพลิงสำหรับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันจากงานวิจัยพบว่า กระบวนการทอริแฟคชันที่อุณหภูมิที่เหมาะสมประมาณ $290-320^{\circ}\text{C}$ จะช่วยลดปัญหาที่เกิดจากสารอะโรมาติก สารประกอบซัลเฟอร์ สารประกอบโลหะคลอไรด์จากเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผลิตมาจากขยะพลาสติก ซึ่งสารเหล่านี้ถ้าปนเปื้อนอยู่กับเชื้อเพลิงอัดเม็ดแล้วนำเข้าสู่กระบวนการเผาสามารถทำให้เกิดการกัดกร่อนของเตาเผาได้ นอกจากนี้กระบวนการทอริแฟคชันสามารถทำให้

เชื้อเพลิงอัดเม็ดมีค่าความร้อนเพิ่มขึ้นโดยเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผ่านกระบวนการทอริแฟคชันที่อุณหภูมิ 290 °C มีค่าความร้อนต่ำสุดเพิ่มขึ้น 25.44 MJ/kg จากเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทอริแฟคชันมีค่าความร้อนต่ำสุด 23.29 MJ/kg ในงานวิจัยของ Yue et al. (2017) ได้ทำงานวิจัยเกี่ยวกับการนำชีวมวลข้าวฟ่างไปผ่านกระบวนการทอริแฟคชันเพื่อพัฒนาคุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงจากงานวิจัยพบว่า กระบวนการทอริแฟคชันที่อุณหภูมิ 100-200 °C ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่น้ำระเหยออกจาก ชีวมวล นอกจากนี้ถ้าอุณหภูมิในการทอริแฟคชันและออกซิเจนในชีวมวลลดลง การทำปฏิกิริยาคายความร้อนของเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสบางส่วนจะส่งผลทำให้ค่าของพลังงานความร้อนลดลง ในส่วนของอุณหภูมิที่ 300 °C จะส่งผลให้อัตราส่วนออกซิเจน/คาร์บอน (O/C) และอัตราส่วนไฮโดรเจน/คาร์บอน (H/C) ลดลงตามไปด้วย เนื่องจากหมู่ไฮดรอกซิลในชีวมวลลดลง นอกจากนี้ในงานวิจัยยังพบว่า กระบวนการทอริแฟคชันสามารถทำให้ค่าความชื้นของชีวมวล ข้าวฟ่างลดลง โดยการทอริแฟคชันที่อุณหภูมิ 300 °C ทำให้ค่าความชื้นลดลงร้อยละ 4.37 จาก ชีวมวลข้าวฟ่างที่ไม่ผ่านกระบวนการทอริแฟคชัน ซึ่งมีค่าความชื้นร้อยละ 9.29 และสามารถทำให้ค่าความร้อนสูงสุดของชีวมวลข้าวฟ่างเพิ่มขึ้น 26.88 MJ/kg จากชีวมวลข้าวฟ่างที่ไม่ผ่านกระบวนการทอริแฟคชันซึ่งมีค่าความร้อนสูงสุด 16.45 MJ/kg ซึ่งกระบวนการทอริแฟคชันสามารถเพิ่มศักยภาพทางด้านพลังงานความร้อน ลดความชื้นและปริมาณคลอไรด์ให้กับเชื้อเพลิงได้

ในด้านเทคโนโลยีที่นำมาใช้ในการทอริแฟคชันนั้นมีหลากหลายเทคโนโลยี ดังเช่นในงานวิจัยของ Lee et al. (2016) ได้ใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดคงที่ (Fixed bed reactor system) ในการทอริแฟคชัน โดยใช้อุณหภูมิที่ 250 °C 1 ชั่วโมง อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน 50 ml/min ในการทอริแฟคชัน เครื่องปฏิกรณ์นี้จะประกอบไปด้วยเตาเผาความร้อนสูง ตัวควบคุมก๊าซไนโตรเจนและอุณหภูมิ ระบบหล่อเย็นผลิตของเหลว และส่วนเก็บก๊าซ โดยผลิตภัณฑ์ที่ปล่อยออกมาจากเครื่องปฏิกรณ์ระหว่างกระบวนการทอริแฟคชันจะผ่านไปยังระบบหล่อเย็นที่ผลิตของเหลว ที่อุณหภูมิ -21 °C ส่วนก๊าซจะถูกเก็บด้วยถุงก๊าซเทฟลอนเชื่อมกับตัวเก็บของเหลว ในงานวิจัยของ Recari et al. (2017) ได้ใช้เครื่องปฏิกรณ์ Pilot auger (Pilot auger reactor) มาทำการทอริแฟคชันโดยใช้อุณหภูมิ 290-320 °C เวลา 15 นาที อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน 8 NL/min ในการทอริแฟคชัน ซึ่งเครื่องปฏิกรณ์นี้จะประกอบไปด้วย ระบบป้อนตัวอย่าง เครื่องอบแห้ง เครื่องปฏิกรณ์ทอริแฟคชัน สกรูระบายความร้อน เครื่องสำหรับเก็บรวบรวมของแข็งและระบบควบแน่น โดยเครื่องอบแห้ง เครื่องปฏิกรณ์ทอริแฟคชันและสกรูระบายความร้อนจะประกอบกันเป็นท่อแนวนอน โดยจะมีระบบไฟฟ้าที่ให้ความร้อนเป็นตัวควบคุมอุณหภูมิ ส่วน

ความเย็นจะถูกควบคุมด้วยวอเตอร์แจ็คเก็ต (Water jacket) ในการดำเนินการทอรีแฟคชันจะใส่เชื้อเพลิงเข้าไปในระบบป้อนตัวอย่าง จากนั้นเชื้อเพลิงจะผ่านเข้าสู่เครื่องอบแห้งและไหลเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ทอรีแฟคชัน หลังจากนั้นเชื้อเพลิงที่ได้จะถูกเก็บด้วยเครื่องเก็บรวบรวมของแข็ง ส่วนก๊าซที่ได้จะถูกเก็บไว้ที่ระบบไซโคลนเพื่อกำจัดอนุภาคนาโนขนาดเล็ก และถูกส่งไปยังระบบควบแน่นเพื่อควบแน่นก๊าซให้กลายเป็นของเหลว และในงานวิจัยของ Manouchehrinejad et al. (2018) ใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ (Batch reactor) ในการทอรีแฟคชันโดยเครื่องปฏิกรณ์ทำจากโลหะซึ่งภายในจะประกอบด้วยเตาเผาความร้อนไฟฟ้า และเครื่องปฏิกรณ์นี้จะปิดด้วยปะเก็นโลหะ (Steel gasket) เพื่อป้องกันไม่ให้ก๊าซพิษระหว่างการทอรีแฟคชันออกจากระบบ และใช้เครื่องเทอร์โมคัปเปิลเป็นตัววัดอุณหภูมิในการทอรีแฟคชัน โดยก๊าซหรือปริมาณสารระเหยของเชื้อเพลิงที่เกิดจากการทอรีแฟคชันจะถูกเก็บในรูปของ Torgas และจะถูกส่งไปยังระบบควบแน่นเพื่อเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลว ในการดำเนินการทอรีแฟคชันจะเริ่มดำเนินการใส่เชื้อเพลิงลงไปในเครื่องปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิห้อง และหลังจากนั้นให้ความร้อนในการทอรีแฟคชันที่อุณหภูมิ 230 250 290 °C เวลา 30 นาที อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน 2 L/min หลังจากการทอรีแฟคชันเครื่องปฏิกรณ์จะมีพัดลมเป็นตัวช่วยลดความร้อนจนกระทั่งตัวอย่างมีความร้อนลดลงที่อุณหภูมิห้อง และเก็บเชื้อเพลิงที่ผ่านการทอรีแฟคชันเพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป

10. การปนเปื้อนโลหะหนักของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

การผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากขยะถึงแม้จะทำให้ปริมาณของขยะลดลงแต่ก็ยังมีปัญหาของโลหะหนักปนเปื้อนอยู่ในเถ้าของเชื้อเพลิง เนื่องจากในระหว่างการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงก็ไม่สามารถทำให้โลหะหนักบางชนิดสลายตัวได้ ส่วนมากจะพบในเถ้าลอย (Fly ash) และตะกั่ว (Slag) จึงต้องมีการตรวจสอบและตรวจวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักปนเปื้อนซึ่งผลการวิเคราะห์ของโลหะหนักในเชื้อเพลิงอัดเม็ด แสดงดังตาราง 7 โลหะหนักที่พบในเถ้าส่วนใหญ่ ได้แก่ ตะกั่ว (Pb) สังกะสี (Zn) ทองแดง (Cu) โครเมียม (Cr) แคดเมียม (Cd) สารหนู (As) และปรอท (Hg) เป็นต้น (Xiao et al., 2015)

ในประเทศจีนได้กำหนดให้มีการปลดปล่อยโลหะหนักจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงขยะที่ผลิตจากขยะชุมชนเมือง โดยองค์การบริหารการคุ้มครองสิ่งแวดล้อมของประเทศจีน (The State Environmental Protection Administration of China) ได้กำหนดให้ Cd ไม่เกิน 0.1 mg/m³ และ As Pb Cr Cu ไม่เกิน 1 mg/m³ เนื่องจากโลหะหนักเหล่านี้ไม่เพียงแต่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้แก่ ชั้นบรรยากาศถูกทำลาย มลพิษทางน้ำ มลพิษทางดินจากการสะสมของปริมาณโลหะหนัก

และห่วงโซ่อาหารทางระบบนิเวศถูกทำลาย ยังส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์โดยมีผลต่อระบบทางเดินหายใจและหลอดเลือด (Respiratory and cardiovascular disease) รวมถึงสามารถทำให้เกิดโรคปอดได้ (Pulmonary disease) เป็นต้น (Ke et al., 2019) การที่พบปริมาณโลหะหนักในถ่านและตะกอนของเชื้อเพลิงอัดเม็ด เนื่องจากวัตถุดิบที่นำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ดมีการปนเปื้อนของโลหะหนัก ซึ่งถ้าพบโลหะหนักจำพวก Hg Zn Cr จะมีส่วนผสมของขยะประเภทพลาสติก ขีวมวล โฟม เส้นใยผ้า และหนัง ส่วนโลหะหนักจำพวก Pb Cu Zn และ Cd ส่วนใหญ่มาจากขยะประเภทกระดาษและพลาสติก เป็นต้น โลหะหนักที่ควรระวังไม่ให้เกิดการปนเปื้อนในเชื้อเพลิงอัดเม็ด ได้แก่ As Cd Hg และ Pb เนื่องจากโลหะหนักเหล่านี้จะระเหยกกลายเป็นไอที่อุณหภูมิ 800-900 °C ซึ่งจะปนเปื้อนไปกับถ่านล่อย ซึ่งโลหะหนัก Hg และ As จะระเหยกกลายเป็นก๊าซเสียออกสู่บรรยากาศ ส่วนโลหะหนัก Cd Cr Cu Pb และ Zn ประมาณร้อยละ 75-98 จะยังคงอยู่ในถ่าน ซึ่งส่วนมาก Hg จะระเหยกเป็นก๊าซเสียออกสู่บรรยากาศได้มากกว่าโลหะหนักชนิดอื่น (Wagland et al., 2011) ในส่วนของสำนักงานปกป้องสิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกา (Environmental Protection Agency; USEPA) ได้กำหนดให้ Hg เป็นสารระเหยอันตรายที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์และสิ่งแวดล้อม โดยกำหนดให้มีการปลดปล่อย Hg จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงไม่เกิน 0.1 µg/g (Hu et al., 2018) ในระหว่างการเผาไหม้เชื้อเพลิง Hg จะพบใน 3 รูปแบบ ได้แก่ อนุภาคของปรอท (Particle-bound; Hg_p) ก๊าซ (Gaseous elemental mercury; Hg⁰) ที่อุณหภูมิสูงกว่า 500 °C และ เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Gaseous mercuric oxide) เป็น Hg²⁺ เป็นต้น ทั้งการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงกว่า 800 °C Hg จะระเหยกกลายเป็นก๊าซเมอร์คิวรีคลอไรด์ (Mercury II chloride; HgCl₂) และสามารถควบแน่นกลายเป็นกรดได้ โดยส่วนมาก Hg จะระเหยกกลายเป็นก๊าซเสียมากกว่าร้อยละ 30 และปนเปื้อนอยู่ในถ่านน้อยกว่าร้อยละ 6 (Contrerasa et al., 2018) ก๊าซเสียเมอร์คิวรี(I) คลอไรด์ (HgCl₂) สามารถส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์เมื่อได้รับสัมผัสทางระบบทางเดินหายใจ (Inhalation system) โดยก่อให้เกิดโรคโลหิตจาง (Anemia) เนื้อเยื่อไตถูกทำลาย (Renal histopathology) ส่งผลทำให้เนื้อเยื่อของไตตาย (Necrosis) รวมถึงทำให้เกิดภาวะเลือดคั่งของเส้นเลือดฝอยที่ไต (Hyperemia of glomerular capillaries) และทำลายระบบประสาท (Erythropoietin) เป็นต้น (Tan et al., 2018) นอกจากนี้เมื่อได้รับสัมผัสโลหะหนัก Cd และ Pb มากกว่า 5 µg/g และ Cr Cu Zn As ได้รับสัมผัสมากกว่า 3-5 µg/g ซึ่งเมื่อได้รับสัมผัสโลหะ Pb เป็นระยะเวลาานจะทำให้เกิดโรคโลหิตจาง (Anemia) ไตวาย (Renal damage) และเสียชีวิตได้ โลหะหนัก Cd และ Cr สามารถทำลายเนื้อเยื่อตับและเกิดโรคอิไตอิไต (Itai-Itai disease) ส่วนโลหะหนัก Cu และ Zn ทำลายเนื้อเยื่อปอด

(Pulmonary granuloma) ทำให้ความดันโลหิตสูง (Hypertension) และส่งผลทำให้เกิดโรคหัวใจ (Heart disease) เป็นต้น (Li et al., 2019) นอกจากนี้เมื่อได้รับสัมผัสโลหะหนัก As และ Cd ทางระบบทางเดินหายใจในปริมาณที่มากกว่า 1×10^{-4} mg/kg/day มีภาวะเสี่ยงก่อให้เกิดโรคมะเร็งได้ (Carcinogenic risk) (Jiang et al., 2017)

ตาราง 7 ปริมาณโลหะหนักที่ตรวจพบในเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากงานวิจัยที่ผ่านมา

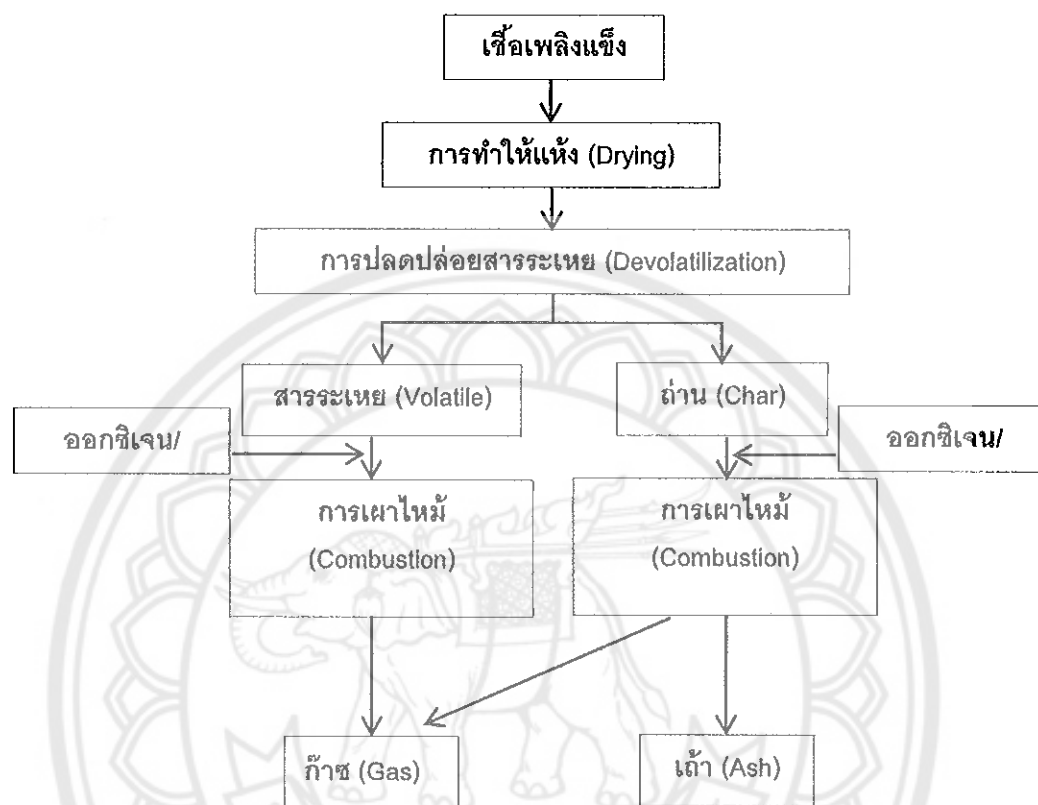
โลหะหนัก	ปริมาณการปนเปื้อน (mg/kg)			
	(1)	(2)	(3)	(4)
สารหนู (As)	25.00	6.15	<0.50	0.01
แคดเมียม (Cd)	2.00	0.43	-	0.05
โคบอลต์ (Co)	4.00	-	-	-
โครเมียม (Cr)	78.00	277.11	21.60	4.50
ทองแดง (Cu)	240.00	502.89	5.30	6.40
ปรอท (Hg)	0.20	0.07	<0.50	0.07
แมงกานีส (Mn)	354.00	-	140.00	39.60
ไนโตรเจน (N)	1.07	1.01	1.40	0.03
สังกะสี (Zn)	658.00	449.41	-	10.80
นิกเกิล (Ni)	52.00	55.62	16.00	-
ตะกั่ว (Pb)	235.00	36.64	28.30	1.00
กำมะถัน (S)	0.15	0.31	0.16	0.07
พลวง (Sb)	32.00	-	-	-
ดีบุก (Sn)	18.00	-	-	-
เทลลูเรียม (Te)	2.00	-	-	-
ไทเทเนียม (Ti)	4.00	-	-	<0.10
วานาเดียม (V)	15.00	-	-	-

ที่มา: (1) Conesa et al., 2011; (2) Xiao et al., 2015; (3) Gisi et al., 2017;
(4) Wagland et al., 2011

11. ทฤษฎีการเผาไหม้

การเผาไหม้ (Combustion) เป็นกระบวนการที่สารประกอบอินทรีย์ ได้แก่ คาร์บอน และ ไฮโดรเจน ทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) กับออกซิเจนได้พลังงานความร้อนออกมา ซึ่งการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิงต้องมีปริมาณออกซิเจนที่เพียงพอ (ธनिया เกาศล, 2561) ส่วนการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์เกิดจากปริมาณของออกซิเจนไม่เพียงพอที่จะทำให้คาร์บอนทั้งหมดเผาไหม้ได้ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยจะเกิดเป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (เดช วัฒนชัยยิ่งเจริญ, 2555) ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงจะประกอบไปด้วย 4 กระบวนการ ได้แก่ กระบวนการที่ 1 การทำให้แห้ง (Drying) เป็นกระบวนการที่ระเหยความชื้นออกจากเชื้อเพลิงหลังจากได้รับความร้อนที่อุณหภูมิในช่วง 100-250 °C กระบวนการที่ 2 การปลดปล่อยสารระเหย (Devolatilization) เป็นกระบวนการที่เกิดการระเหยของสารระเหยประกอบด้วยสารระเหยที่ควบแน่นไม่ได้ (Non-Condensable volatile) หรือก๊าซและสารระเหยที่ควบแน่นได้ (Condensable volatile) หรือทาร์ (Tar) โดยเกิดที่อุณหภูมิในช่วง 250-500 °C และเกิดเป็นถ่าน (Char) กระบวนการที่ 3 เป็นกระบวนการเผาไหม้ของสารระเหย (Volatile combustion) เป็นกระบวนการที่สารระเหยถูกปลดปล่อยออกมาทำปฏิกิริยากับออกซิเจน เกิดการเผาไหม้แบบเปลวไฟ (Flame combustion) และเกิดความร้อนซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นจะนำไปใช้ในกระบวนการทำให้แห้งและกระบวนการปลดปล่อยสารระเหย ส่วนกระบวนการที่ 4 การเผาไหม้ของถ่าน (Char combustion) เป็นกระบวนการที่ถ่านได้ปลดปล่อยสารระเหยแล้ว โดยส่วนใหญ่จะประกอบด้วยคาร์บอนจึงทำให้มีค่าความร้อนจากการเผาไหม้สูงกว่าการเผาไหม้สารระเหย แต่อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะช้ากว่าเนื่องจากเป็นปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous reaction) ระหว่างถ่านกับออกซิเจนโดยมีการแพร่ของออกซิเจนไปที่พื้นผิวของของแข็งก่อนการเกิดปฏิกิริยาซึ่งจะเป็นตัวกำหนดอัตราการเกิดปฏิกิริยา กระบวนการเผาไหม้แสดงดังภาพ 10 (ประพันธ์ คูชลธารา และ ศศิธร สรรพอดำ, 2558) ทั้งนี้กระบวนการที่ทำให้เกิด NO_x จากการเผาไหม้มีอยู่ 3 กระบวนการดังนี้ กระบวนการแรก คือ กลไกการเกิด Thermal NO_x เป็นกระบวนการที่ออกซิเจนและไนโตรเจนในอากาศบางส่วนรวมตัวกันเกิดเป็น NO และ NO₂ ซึ่งเกิดขึ้นในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงในขณะเผาไหม้เชื้อเพลิงในอากาศ กระบวนการที่สอง คือ กลไกการเกิด Flue NO_x เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ โดยจะทำให้เกิด NO และ NO₂ และกระบวนการสุดท้าย คือ กลไกการเกิด Prompt NO_x เป็นกลไกที่ NO_x จากการเผาไหม้จากปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลของไนโตรเจนกับอนุมูลอิสระของสารไฮโดรเจนไซยาไนด์ (HCN) และไนโตรเจน (N) ที่มีอยู่ในเปลวไฟซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะไม่ขึ้นกับอุณหภูมิของก๊าซขณะเผาไหม้ เป็นต้น ปัจจัยที่สำคัญที่ทำให้เกิด NO_x ได้แก่

อุณหภูมิ เวลาการเผาไหม้ และปริมาณของออกซิเจนที่อยู่ในบริเวณที่เกิดการเผาไหม้ เป็นต้น (นพภาพร พานิช, 2547)

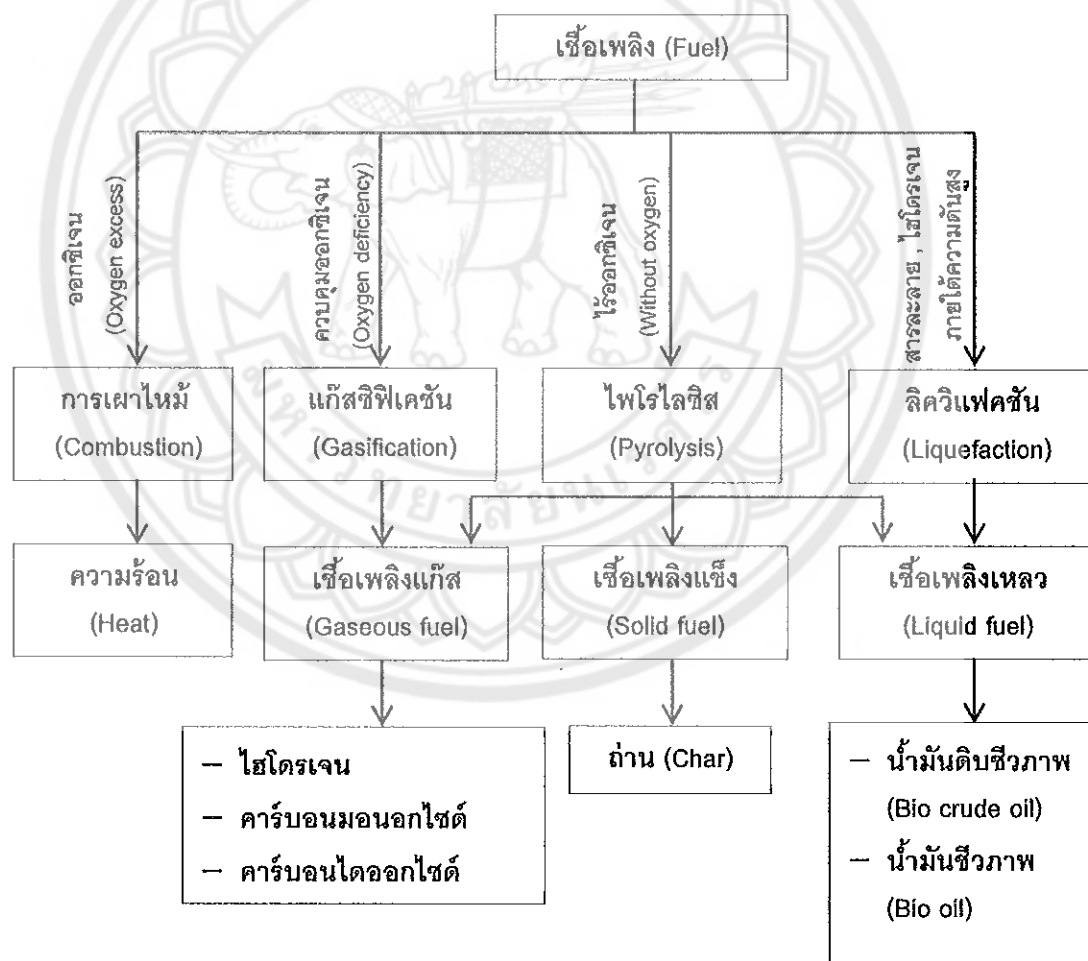


ภาพ 10 กระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง

ที่มา: ประพันธ์ คูชดหารา ,และศศิธร สรรพอด้า, 2558

ในการแปลงสภาพทางเคมีด้วยความร้อน (Thermochemical conversion) ของเชื้อเพลิงเป็นกระบวนการที่เกิดปฏิกิริยาเคมีที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง โดยจะประกอบด้วยการเผาไหม้ (Combustion) ไพโรไลซิส (Pyrolysis) แก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) และลิกวิแฟคชัน (Liquefaction) ซึ่งการเผาไหม้จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ความร้อน (Heat) การไพโรไลซิสเป็นกระบวนการทางความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 250-700°C ในสภาวะที่ไร้ออกซิเจน (Without oxygen) สามารถสลายพันธะทางเคมีและทำให้เกิดการสูญเสียน้ำหนักของโมเลกุลของสารประกอบอินทรีย์ในชีวมวล เนื่องจากการระเหยความชื้นและสารระเหยออกจากเชื้อเพลิงซึ่งผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้จากการไพโรไลซิสจะเป็นเชื้อเพลิงแข็ง (Solid fuel) หรือถ่าน (Char) และก๊าซไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และจะได้น้ำมันดิบชีวภาพ (Bio crude oil) เป็นผลิตภัณฑ์ใน

สถานะของเหลวออกมาด้วย ส่วนแก๊สซิฟิเคชันเป็นกระบวนการทางเคมีที่เปลี่ยนเชื้อเพลิงแข็งเป็นเชื้อเพลิงก๊าซ (Syngas) โดยจะมีก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งเชื้อเพลิงก๊าซที่เกิดขึ้นสามารถนำไปผลิตเป็นเชื้อเพลิงสังเคราะห์ได้ (Synthetic fuel) เช่น เชื้อเพลิงก๊าซชีวภาพ (Biofuel) (Nicodème et al., 2018) การแปลงสภาพทางเคมีความร้อนแบบลิควิแฟคชันของเชื้อเพลิง เป็นกระบวนการที่เปลี่ยนเชื้อเพลิงจากสถานะก๊าซและของแข็งไปเป็นเชื้อเพลิงเหลว (Liquid fuel) ที่อุณหภูมิ 280-370 °C ภายใต้ความดัน 5-21 kg/cm² จะได้เชื้อเพลิงเหลว ได้แก่ น้ำมันดิบชีวภาพ (Bio-crude) และน้ำมันชีวภาพ (Bio oil) ซึ่งเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากกระบวนการนี้จะมีออกซิเจนและน้ำอยู่น้อย (Han et al., 2019) การแปลงสภาพทางเคมีความร้อนของเชื้อเพลิง แสดงดังภาพ 11



ภาพ 11 การแปลงสภาพทางเคมีความร้อน (Thermochemical conversion) ของเชื้อเพลิง

ที่มา: Goffe et al., 2018; ประพันธ์ คูขจราร, และศศิธร สรรพอด้า, 2558

12. มลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง

การเผาไหม้เชื้อเพลิงไม่ว่าจะเป็นเชื้อเพลิงจากถ่านหิน ชีวมวล หรือเชื้อเพลิงที่ผลิตจากขยะหรือของเสียที่ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มาผลิตเป็นเชื้อเพลิงทดแทน เป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่สามารถก่อให้เกิดสารมลพิษจากการเผาไหม้ อาทิเช่น ก๊าซเสีย (Flue gas) และสารประกอบอะโรมาติกต่างๆ ซึ่งสามารถส่งผลกระทบต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อมได้ ทั้งนี้ก๊าซเสียเกิดจากกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงซึ่งส่วนใหญ่จะก่อให้เกิดสารมลพิษต่างๆ ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ออกซิเจน (O_2) ออกไซด์ของไนโตรเจน (NOx) และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) เป็นต้น CO เกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ซึ่งเป็นอันตรายต่อสุขภาพเนื่องจากเมื่อเข้าสู่ร่างกายแล้วสามารถทำปฏิกิริยากับเม็ดเลือดแดงแล้วเกิดเป็นคาร์บอกซีโมโกลบิน (Carboxy-haemoglobin; COHb) ทำให้ออกซิเจนไปเลี้ยงส่วนต่างๆของร่างกายไม่เพียงพอส่งผลทำให้เกิดอาการวิงเวียน (Dizziness) คลื่นไส้อาเจียน (Nausea) ปวดหัว (Headache) ถ้าได้รับในปริมาณมากสามารถทำให้หมดสติและเสียชีวิตได้ (Mabahwi et al., 2014) นอกจากนี้ CO_2 เป็นก๊าซที่อยู่ในชั้นบรรยากาศร้อยละ 0.033 โดยปริมาตรหรือมีความเข้มข้น 387 ppm ซึ่ง ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) ได้กำหนดให้ความเข้มข้นของ CO_2 ภายในอาคารต้องไม่เกิน 1,000 ppm (อิสรฯ กาญจนากะจ่าง และ ภารดี ชวบน้ำรุ่ง, 2560) ทั้งนี้ถ้ามีการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเพิ่มมากขึ้นส่งผลทำให้มีปริมาณของ CO_2 ในชั้นบรรยากาศเพิ่มสูงขึ้น และทำให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก (Greenhouse effect) ตามมา (สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, 2558) นอกจากนี้ยังมี SO_2 ที่เป็นก๊าซเสียซึ่งเกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง ก๊าซชนิดนี้มีส่วนประกอบของกำมะถันซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดฝนกรด (ธนิยา เกาศล, 2561) อีกทั้งยังส่งผลกระทบต่อสุขภาพเมื่อได้รับสัมผัสทางระบบทางเดินหายใจเข้าสู่ร่างกายจะทำให้เป็นโรคหืดหอบ (Asthma) หายใจถี่ (Shortness of breath) และทำให้เกิดโรคหัวใจและหลอดเลือด (Cardiovascular disease) (Khaniabadi et al., 2016) ส่วน NOx เกิดจากการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงซึ่งออกไซด์ของไนโตรเจน ได้แก่ ไนตรัสออกไซด์ (N_2O) ไนตริกออกไซด์ (NO) ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) และไนโตรเจนไตรออกไซด์ (N_2O_3) เป็นต้น ทั้งนี้ NO เป็นก๊าซที่ไม่มีกลิ่น ไม่มีสี เมื่อทำปฏิกิริยากับออกซิเจนจะเปลี่ยนเป็น NO_2 ซึ่งก๊าซชนิดนี้มีกลิ่นฉุน ละลายน้ำได้ดี และเป็นสาเหตุทำให้เกิดฝนกรดได้ (ธนิยา เกาศล, 2561) เมื่อได้รับสัมผัสเข้าสู่ร่างกายส่งผลทำให้ระบบทางเดินหายใจติดเชื้อ (Respiratory infection) เกิดอาการไอ เจ็บคอ คัดจมูก และเป็นไข้ นอกจากนี้ทำให้เกิดหลอดลมอักเสบ (Bronchitis) และปอดบวม (Pneumonia) (Mabahwi et al.,

2014) นอกจากนี้ยังมีฝุ่นละอองขนาดเล็กที่เกิดจากการเผาไหม้ของฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน $2.5\ \mu\text{m}$ หรือ $\text{PM}_{2.5}$ และฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน $10\ \mu\text{m}$ หรือ PM_{10} นอกจากจะบดบังทัศนวิสัยแล้วสามารถส่งผลต่อสุขภาพได้ เนื่องจากทำให้ระบบทางเดินหายใจติดเชื้อ (Respiratory infection) ปอดอักเสบ (Lung inflammation) และสามารถทำให้เกิดโรคหัวใจได้ (Cardiopulmonary disease) (Mabahwi et al., 2014) ด้านค่ามาตรฐานในการกำหนดของปริมาณ CO ตามประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการปล่อยทิ้งอากาศเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมได้กำหนดให้ CO มีความเข้มข้นไม่เกิน 690 ppm ปริมาณ NO_x มีความเข้มข้นไม่เกิน 200 ppm และ SO_2 มีความเข้มข้นไม่เกิน 60 ppm (นพภาพร พานิช, 2550) องค์การอนามัยโลก (World Health Organization; WHO) ได้กำหนดค่ามาตรฐานของ $\text{PM}_{2.5}$ ไม่เกิน $10\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ และ PM_{10} ต้องไม่เกิน $20\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ NO_2 ไม่เกิน $40\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ SO_2 ไม่เกิน $20\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ CO ไม่เกิน $60\ \text{mg}/\text{m}^3$ (WHO, 2006)

ในส่วนของมลพิษประเภทสารประกอบอะโรมาติก (Aromatic compounds) ที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง ซึ่งสำนักงานปกป้องสิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกา (US Environmental Protection Agency; US.EPA) ให้ความสำคัญ ได้แก่ โพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons; PAHs) 16 ชนิด และ สารกลุ่ม BTEX เนื่องจากสามารถก่อให้เกิดมะเร็งในมนุษย์เมื่อได้รับสัมผัส

ทั้งนี้สารประกอบ 16PAHs เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ประกอบด้วยวงเบนซีนตั้งแต่ 2 วงขึ้นไป ซึ่งมีจุดเดือดระหว่าง $150\text{--}325\ ^\circ\text{C}$ และมีจุดหลอมเหลวระหว่าง $101\text{--}438\ ^\circ\text{C}$ US.EPA พบว่า 16PAHs จัดอยู่ในสารก่อมะเร็งที่เกิดจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (ศูนย์วิจัยและฝึกอบรมด้านสิ่งแวดล้อม กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2560) นอกจากนี้ 16PAHs สามารถเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติ เช่น ภูเขาไฟระเบิด ไฟป่า เป็นต้น และยังเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ ได้แก่ การเผาขยะ การคมนาคม การเผาเชื้อเพลิง รวมถึงเกิดจากการเผาที่มาจากอุตสาหกรรมและเกษตรกรรม เป็นต้น ทั้งนี้ US.EPA 1993 ได้กำหนด PAHs ออกเป็น 16 ชนิด ให้เป็นสารพิษอันตรายที่จะต้องให้ความสำคัญ ได้แก่ อะซีแนปทิลีน (Acenaphthylene; AcPy) อะซีแนฟทีน (Acenaphthene; AcP) แอนทราซีน (Anthracene; AnT) เบนโซเอแอนทราซีน (Benzo (a)anthracene; B(a)A) เบนโซเอไพรีน (Benzo (a)pyrene; B(a)P) เบนโซฟลูออแรนทีน (Benzo (b)fluoranthene; B(b)F) เบนโซเคฟลูออแรนทีน (Benzo (k)fluoranthene; B(k)F) เบนโซจีเอชไอไพรีน (Benzo (g,h,i)-perylene; B(ghi)P) ไครซีน (Chrysene; Chr) ไดเบนโซเอเอชแอนทราซีน (Dibenz (a,h)-

anthracene; DbA) ฟลูออรีน (Fluorene; Flu) ฟลูออแรนทรีน (Fluoranthene; FluA) อินดีโน(1,2,3-ซีดี)ไพรีน (Indene (1,2,3-cd)pyrene; InP) แนปทาซีน (Naphthalene; NaP) ฟีนแอนทรีน (Phenanthrene; PhA) ไพรีน (Pyrene; Pyr) เป็นต้น และได้กำหนด 16PAHs ต้องไม่เกิน 1 ng/m^3 (Standards Air Quality Environment European Commission, 2017) นอกจากนี้ได้กำหนด 16PAHs ที่อาจก่อให้เกิดมะเร็งต่อคน และได้กำหนดความเสี่ยงในการก่อมะเร็งของ 16PAHs แต่ละชนิดดังตาราง 8

สารกลุ่ม BTEX เป็นสารอินทรีย์ระเหยง่ายในกลุ่มของสารไฮโดรคาร์บอน ได้แก่ เบนซีน (Benzene; Ben) โทลูอีน (Toluene; Tol) เอทิลเบนซีน (Ethylbenzene; EtB) และไซลีน (Xylene; Xy) เป็นต้น ซึ่งสารเหล่านี้มีอยู่ในน้ำมันเชื้อเพลิง พลาสติกและโฟลิมเมอร์ เป็นต้น สารเหล่านี้มีผลกระทบต่อระบบประสาท นอกจากนี้องค์การวิจัยโรคมะเร็งนานาชาติ (International Agency for Research on Cancer ; IARC) ได้จัดให้สารเบนซีนเป็นสารก่อมะเร็งซึ่งส่งผลทำให้เกิดมะเร็งเม็ดเลือดขาว (Leukemia) และสารเอทิลเบนซีนเป็นสารที่อาจก่อให้เกิดมะเร็งในมนุษย์ (Ruangtrakul et al., 2013) ทั้งนี้ US.EPA ได้กำหนดให้ค่าความเสี่ยงที่ก่อให้เกิดมะเร็งของ BTEX ต้องต่ำกว่า $1 \times 10^{-6} \text{ } \mu\text{g/m}^3$ (Dehghani et al., 2018)

ตาราง 8 16PAHs ที่อาจก่อให้เกิดมะเร็งต่อคนตามมาตรฐาน US.EPA 1993 กำหนด

มลพิษชนิด PAHs	ความเข้มข้น (ng/m ³)	US.EPA
อะซีแนปทิลีน	-	D
อะซีแนปทีน	-	D
แอนทราซีน	-	D
เบนโซเอแอนทราซีน	0.0140	B2
เบนโซเอไพรีน	1.0000	B2
เบนโซบีฟลูออแรนทีน	0.1670	B2
เบนโซเคฟลูออแรนทีน	0.0200	B2
เบนโซจีเอไพรีน	-	D
โครซีน	0.0044	B2
ไดเบนโซเอเอแอนทราซีน	1.1100	B2
ฟลูออรีน	-	D
ฟลูออแรนทีน	-	D
อินดีโน (1,2,3-ซิดี)ไพรีน	0.0550	B2
แนปทาซีน (Naphthalene)	-	D
พีแนนทีน	-	D
ไพรีน	-	D

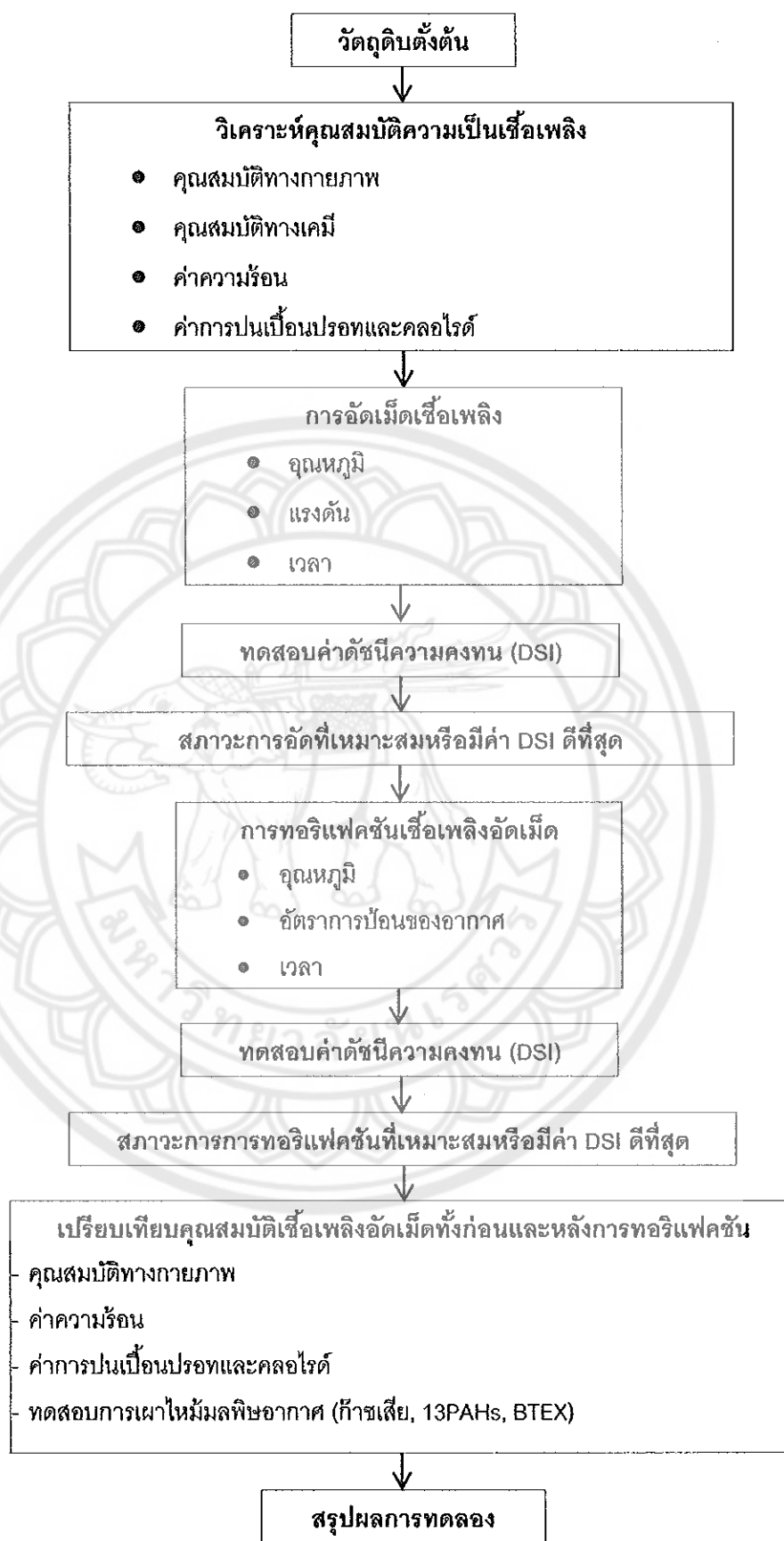
หมายเหตุ: D ไม่สามารถจัดกลุ่มได้สำหรับคนและสัตว์, B2 กลุ่มที่อาจจะก่อมะเร็งต่อคน

ที่มา: Ambient Air Pollution by Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAH),
2001; จิตรลดา มุประสิทธิ์, 2553

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

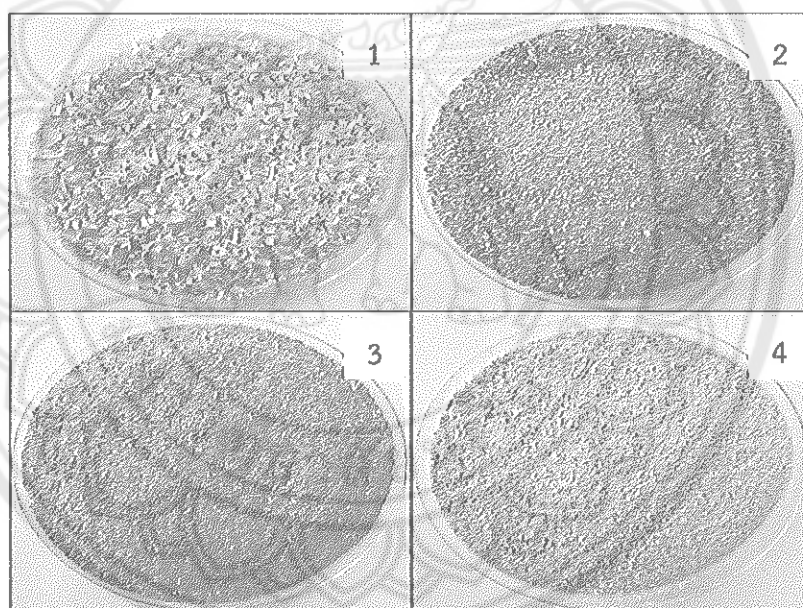
งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงคุณภาพ เชื้อเพลิงอัดเม็ดจากตะกอนพลาสติกชนิด PET ผสมชีวมวลโดยใช้การทอริแฟค เริ่มดำเนินการโดย นำวัตถุดิบตั้งต้น ได้แก่ ตะกอนพลาสติกชนิด PET ชี้อย่อยไม้สัก ชี้อย่อยไม้ยูคาลิปตัส และ ช้างข้าวโพด มาวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี ค่าความร้อน จากนั้นนำมาผสมกันตาม สัดส่วนที่กำหนดดังตาราง 9 และนำมาอัดด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิค ซึ่งกำหนดอุณหภูมิ 85 100 และ 125 °C แรงดัน 100 110 และ 120 kg/cm² เวลา 0.5 1 และ 2 นาทีในการอัด จากนั้นนำ เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ได้ แสดงดังภาพ 17 (3) ไปทดสอบค่าดัชนีความคงทน (Drop shatter index; DSI) เพื่อเลือกสภาวะการอัดเชื้อเพลิงที่เหมาะสมโดยค่า DSI ของเชื้อเพลิงอัดเม็ดต้องมีค่า มากกว่า 0.95 (Tembe et al., 2014) จากนั้นนำเชื้อเพลิงที่มีสภาวะการอัดที่เหมาะสมโดย มีค่า DSI ดีที่สุดไปผ่านการทอริแฟคชันกำหนดสภาวะอุณหภูมิ 170 190 และ 225 °C อัตราการ บ้อนอากาศ 1 4 และ 6 L/min เวลา 5 10 และ 15 นาทีในการทอริแฟคชัน จากนั้นนำเชื้อเพลิง อัดเม็ดหลังทอริแฟคชันไปทดสอบค่า DSI เพื่อเลือกสภาวะการทอริแฟคชันที่เหมาะสมโดย มีค่า DSI ดีที่สุด จากนั้นนำเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งก่อนและหลังการทอริแฟคชันไปทดสอบหา คุณสมบัติทางกายภาพ ความร้อน ค่าการปนเปื้อนปรอทและคลอไรด์ และทดสอบประสิทธิภาพ เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผลิตได้ทั้งก่อนและหลังการทอริแฟคชัน โดยการนำไปทดสอบการเผาไหม้ที่ อุณหภูมิ 850 °C เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณก๊าซเสียและมลพิษอากาศ ก๊าซเสีย (Flue gas) ได้แก่ CO₂ CO NOx และมลพิษอากาศที่เกิดจากการเผาไหม้ ได้แก่ โมโนไซคลิกอะโรมาติก ไฮโดรคาร์บอน หรือ BTEX เช่น เบนซีน โทลูอีน เอธิลเบนซีน ไซลีน เป็นต้น และ พอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Polycyclic-aromatic hydrocarbons; PAHs) 13 ชนิด ได้แก่ อะซีแนปทิลลีน ฟลูออรีน พีแนนทรีน แอนทราซีน ไพรีน เบนโซเอไพรีน ไครซีน เบนโซปีฟลูออแรนทีน เบนโซเคฟลูออแรนทีน เบนโซเอไพรีน ไดเบนเอเอสแอนทราซีน เบนโซจีเอส ไอไพรีน และอินดีโน (1,2,3-ซีดี) ไพรีน จากนั้นทำการสรุปผลการวิจัย ทั้งนี้ทุกการทดลองจะทำ อย่างน้อย 3 ซ้ำเพื่อความถูกต้องและแม่นยำของผลการทดลองที่ได้ซึ่งผลการทดลองจะถูกรายงาน ในรูปของค่าเฉลี่ย โดยขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัยสามารถสรุปได้ แสดงดังภาพ 12



ภาพ 12 แผนผังดำเนินการวิจัย

1. วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด

ในขั้นตอนการดำเนินการทดสอบคุณสมบัติเชื้อเพลิงอัดเม็ดผลิตจากชีวมวล (ขี้เลื่อยไม้สัก ขี้เลื่อยไม้ยูคาลิปตัส และขังข้าวโพด) ผสมตะกอนพลาสติกชนิด PET จากการกระบวนการบดย่อยขวดพลาสติกเป็นการวิจัยเชิงทดลองและได้เริ่มดำเนินการวิจัย โดยติดต่อประสานงานกับโรงงานบดขวดพลาสติกเพื่อทำการเก็บตัวอย่างตะกอนพลาสติกชนิด PET และเตรียมตัวอย่างวัตถุดิบตั้งต้นที่จะผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด ได้แก่ ตะกอนพลาสติกชนิด PET จากการบดย่อยขวดพลาสติก ชีวมวล (ขี้เลื่อยไม้สัก ขี้เลื่อยไม้ยูคาลิปตัส และขังข้าวโพด) โดยจะนำวัตถุดิบตั้งต้นมาร้อนผ่านตะแกรงกรองขนาด 2 mm เพื่อแยกเศษดินและหินออกจากวัตถุดิบตั้งต้น รวมทั้งเพื่อคัดขนาดของวัตถุดิบให้มีขนาดเท่ากัน จากนั้นนำวัตถุดิบตั้งต้นที่ผ่านการร่อนไปบดย่อยให้มีขนาดประมาณ 0.5-1 mm แสดงดังภาพ 13



ภาพ 13 วัตถุดิบตั้งต้น;

- (1) ตะกอนพลาสติกชนิด PET
- (2) ขี้เลื่อยไม้สัก
- (3) ขี้เลื่อยไม้ยูคาลิปตัส
- (4) ขังข้าวโพด

2. การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของวัตถุดิบตั้งต้นและเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งก่อนและหลังการทอริแฟคชัน

นำวัตถุดิบตั้งต้นที่จะผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ด ไปทดสอบคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ รวมถึงวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงความร้อน เพื่อเป็นข้อมูลขั้นต้นในการยืนยันคุณสมบัติของวัตถุดิบตั้งต้นในการนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ดต่อไป รวมถึงการนำเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งก่อนและหลังการทอริแฟคชันมาทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพเพื่อทราบถึงคุณสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิง

2.1 ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและเคมี ดังนี้

2.1.1 ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ (Proximate analysis) เช่น ค่าความชื้น (Moisture) ค่าสารระเหย (Volatile) ค่าคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) และ เถ้า (Ash) จะใช้วิธีวิเคราะห์ตามมาตรฐานโดยอ้างอิงจาก (Aller et al., 2017) ดังนี้

1) ค่าความชื้น (Moisture content) ความชื้นนี้มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ถ้าเชื้อเพลิงที่มีปริมาณความชื้นต่ำจะมีประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่ดี ตามมาตรฐาน EN 15414-3:2011 (European Committee for Standardization, 2011) เป็นการวิเคราะห์จากร้อยละของน้ำต่อน้ำหนักวัตถุดิบ การหาค่าปริมาณความชื้นทำได้โดยนำกระดาษฟอยล์ไปชั่งน้ำหนัก แล้วใส่ตัวอย่างลงในกระดาษฟอยล์ประมาณ 5 ± 0.0005 กรัม(g) แสดงดังภาพ 14 จากนั้นนำไปอบในตู้อบลมร้อน (Hot air oven) (Memmert) ที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำกระดาษฟอยล์ออกมาทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น (Desiccator) ประมาณ 2 ชั่วโมง แล้วนำไปชั่งน้ำหนักและคำนวณหาปริมาณความชื้นของตัวอย่างโดยคำนวณดังสมการ (1)

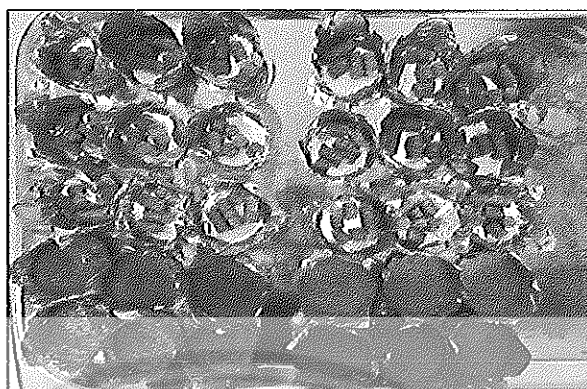
$$\text{ค่าความชื้น (\%)} = \frac{B-(C-A)}{B} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ A คือ น้ำหนักของกระดาษฟอยล์ก่อนอบ (g)

B คือ น้ำหนักของตัวอย่างก่อนอบ (g)

C คือ น้ำหนักของกระดาษฟอยล์ (g) รวมกับน้ำหนักก่อนอบของตัวอย่าง

(g) หลังอบที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



ภาพ 14 การเตรียมวัตถุดิบตั้งต้นเพื่อหาปริมาณความชื้น

2) เถ้า (Ash content) เป็นปริมาณของเถ้าในชีวมวลหลังการเผา ซึ่งปริมาณเถ้านี้สามารถบ่งบอกถึงค่าความร้อนของชีวมวลได้ เนื่องจากถ้ามีปริมาณเถ้าสูงแสดงว่าชีวมวลนั้นมีแนวโน้มที่จะมีค่าความร้อนต่ำ ตามมาตรฐาน EN 15403:2011 ใช้วิเคราะห์ปริมาณเถ้า (European Committee for Standardization 15403, 2011) โดยนำครุชีเบล (Crucible) ใส่เข้าไปในเตาเผาความร้อนสูง (Muffle Furnace) (ยี่ห้อ Chavachote รุ่น L9/12p) ที่อุณหภูมิ 600 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อทำความสะอาดครุชีเบล จากนั้นนำครุชีเบลออกมาทิ้งไว้ในเย็นในโถดูดความชื้น 24 ชั่วโมง ซึ่งน้ำหนักครุชีเบลหลังเผาแล้วนำไปใส่ตัวอย่าง อย่างละ 2 g แสดงดังภาพ 15 (1) จากนั้นนำครุชีเบลที่ใส่ตัวอย่างไปเผาที่เตาเผาความร้อนสูง แสดงดังภาพ 15 (2) ที่อุณหภูมิ 750 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักเพื่อหาปริมาณเถ้า โดยคำนวณหาปริมาณเถ้าดังสมการ (2)

$$\text{เถ้า (\%)} = \frac{D}{B} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ B คือ น้ำหนักของตัวอย่างก่อนเผา (g)

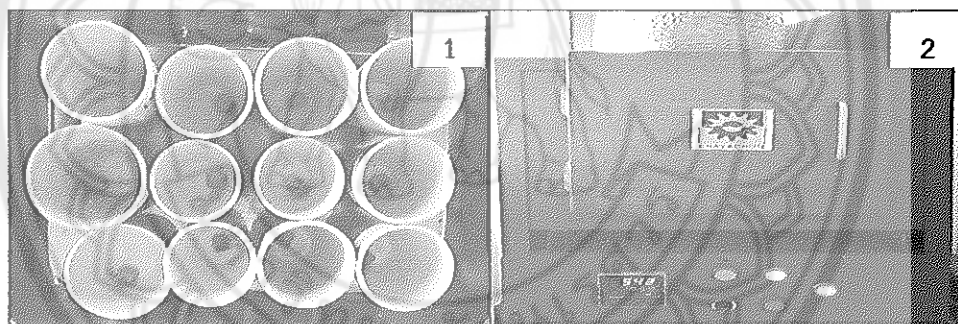
D คือ น้ำหนักของตัวอย่างหลังเผา (g) ที่อุณหภูมิ 750 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

3) ปริมาณสารระเหย (Volatile matter) เป็นปริมาณสารระเหยที่มีอยู่ในชีวมวล สามารถนำมาคาดคะเนปริมาณค่าความร้อนได้เช่นกัน ถ้ามีปริมาณสารระเหยสูงก็มีแนวโน้มที่ชีวมวลนั้นจะมีค่าความร้อนสูงแต่ก็จะบ่งบอกถึงการมีปริมาณของคาร์บอนคงตัวต่ำ ตามมาตรฐาน EN 15402:2011 ใช้วิเคราะห์ปริมาณสารระเหย (European Committee for

Standardization 15402, 2011) นำครุชีเบิลไปอบที่ตู้อบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 85 °C เป็นเวลา 15 นาที แล้วนำออกมาทิ้งไว้เย็นในโถดูดความชื้น 1 ชั่วโมง จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักโดยใช้ตัวอย่างอย่างละ 0.5 ± 0.0005 g ลงในครุชีเบิลแล้วนำไปเผาในเตาเผาความร้อนสูงที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 7 นาที แล้วนำไปพักให้เย็นในโถดูดความชื้น 24 ชั่วโมง แล้วนำไปชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณหาปริมาณสารระเหย โดยคำนวณดังสมการ (3)

$$\text{ปริมาณสารระเหย (\%)} = \left(\frac{B-(C-A)}{B} \times 100 \right) - \text{ค่าความชื้น} \quad (3)$$

เมื่อ A คือ น้ำหนักของครุชีเบิลก่อนเผา (g)
 B คือ น้ำหนักของตัวอย่างก่อนเผา (g)
 C คือ น้ำหนักของครุชีเบิล (g) รวมกับน้ำหนักของตัวอย่าง (g) หลังเผาที่ อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 7 นาที



ภาพ 15 (1) การเตรียมตัวอย่างเพื่อหาปริมาณเถ้าและปริมาณสารระเหย
 (2) เตาเผาความร้อนสูง Muffle Furnace (Chavachote, L9/12p)

4) ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) การหาปริมาณคาร์บอนคงตัว เป็นการนำผลต่างของค่าร้อยละของปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณเถ้ามาคำนวณหา โดยคำนวณดังสมการ (4)

$$\text{คาร์บอนคงตัว} = 100 - \text{ค่าความชื้น\%} - \text{ปริมาณสารระเหย\%} - \text{ปริมาณเถ้า\%} \quad (4)$$

2.1.2 การทดสอบคุณสมบัติทางเคมีหรือสัดส่วนของธาตุ (Ultimat analysis) (European Committee for Standardization 15407, 2011) (European Committee for Standardization 15408, 2011) เป็นการวิเคราะห์หาสัดส่วนของธาตุในตัวอย่าง ได้แก่ ร้อยละคาร์บอน (C) ร้อยละไฮโดรเจน (H) ร้อยละไนโตรเจน (N) ร้อยละออกซิเจน (O) และ ร้อยละซัลเฟอร์ (S) โดยใช้เครื่อง Element analyzer (ยี่ห้อ CHN628 รุ่น Truspec Micro) ดำเนินการส่งวิเคราะห์ตัวอย่าง ได้แก่ ตะกอนพลาสติกชนิด PET ขี้เลื่อยไม้สัก ขี้เลื่อยไม้ยูคาลิปตัส และขี้ข้าวโพดไปยังศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.1.3 การคำนวณหาค่าความร้อน (Heating value) จากสัดส่วนธาตุองค์ประกอบ โดยคำนวณจากสัดส่วนของธาตุต่างๆ ค่าความร้อนจะแยกออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ค่าความร้อนสูงสุด (Higher heating value) เป็นค่าที่นำตัวอย่างมาลดความชื้นโดยการเผาไหม้ สมบูรณ์ซึ่งน้ำที่อยู่ในตัวอย่างจะกลายเป็นไอน้ำโดยค่าที่ได้เป็นค่าความร้อนสูงสุดต่อน้ำหนัก โดยใช้สมการ (5) ซึ่งเรียกสมการนี้ว่า Dulong model (Garcés et al., 2016) คำนวณดังนี้

$$\text{Higher heating value (HHV)} = 80.8C + 344.9(H - O/8) + 22.5S \text{ kcal/kg} \quad (5)$$

เมื่อ C คือ เปอร์เซ็นต์คาร์บอน
H คือ เปอร์เซ็นต์ไฮโดรเจน
O คือ เปอร์เซ็นต์ออกซิเจน
S คือ เปอร์เซ็นต์กำมะถัน

ค่าความร้อนอีกประเภทหนึ่งคือค่าความร้อนต่ำสุด (Lower heating value) (European Committee for Standardization 15400, 2011) เป็นค่าความร้อนที่ออกมาหลังจากการเผาไหม้ สมบูรณ์ โดยน้ำที่อยู่ในเชื้อเพลิงเมื่อมีการเผาไหม้จะอยู่ในรูปของไอน้ำซึ่งค่าที่วัดได้เป็น ค่าความร้อนต่ำสุดของน้ำหนัก โดยใช้สมการที่ (6) คำนวณดังนี้

$$\text{Lower heating value (LHV)} = \text{HHV} - 23.95(9H + M) \text{ kJ/kg} \quad (6)$$

เมื่อ HHV คือ ค่าความร้อนสูงสุด (Higher heating value)

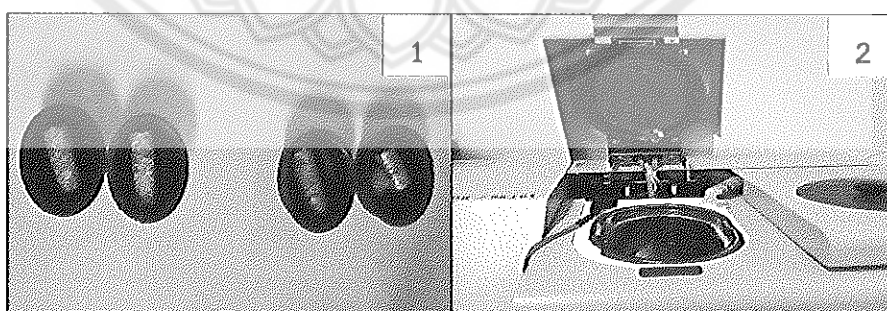
H คือ เปอร์เซ็นต์ไฮโดรเจน

M คือ เปอร์เซ็นต์ความชื้น

3. การทดสอบคุณสมบัติค่าความร้อนด้วยเครื่อง Bomb Calorimeter

ในกรณีที่เป็นการเชื้อเพลิงแข็งสามารถหาค่าความร้อนด้วยเครื่อง Bomb Calorimeter (ยี่ห้อ LEC รุ่น AC-500) โดยเริ่มจากใส่ตัวอย่างลงไปในตัวบรรจุเชื้อเพลิง (Ignition Cup) อย่างละ 1 g แสดงดังภาพ 16 (1) จากนั้นวางตัวบรรจุเชื้อเพลิงในหัวบอมบ์ (Bomb head) และใส่ลวดจุดระเบิด (Fuse Wire) เข้ากับเข้ากับ Eyelet โดยจะอยู่เหนือตัวอย่างและลวดจุดระเบิดจะต้องไม่สัมผัสกับตัวอย่าง จากนั้นเติมน้ำกลั่นลงในออกซิเจนบอมบ์ (Oxygen Bomb) ประมาณ 1 ml แล้วนำหัวบอมบ์ใส่ลงไปในตัวออกซิเจนบอมบ์ แล้วทำการปิดฝาให้สนิท และเติมออกซิเจนลงในหัวบอมบ์โดยกำหนดแรงดันของออกซิเจนประมาณ 450 kg/cm^2 จากนั้นเติมน้ำกลั่นลงในกระบอกสแตนเลส (Bucket) ประมาณ 2 L แล้วนำเข้าเครื่องบอมบ์และกดสตาร์ท (Start) แสดงดังภาพ 16 (2) เครื่องจะเริ่มดำเนินการวิเคราะห์ค่าความร้อนของตัวอย่างและบันทึกผลค่าความร้อน (วรวิทย์ ฤทธิทรัพย์, 2553) โดยเครื่อง Bomb Calorimeter ที่ใช้วิเคราะห์ค่าความร้อนในงานวิจัยนี้จะแปลงค่าความร้อนออกมาในหน่วย (cal/g) และนำมาแปลงหน่วยเป็น MJ/kg ดังสมการ (7)

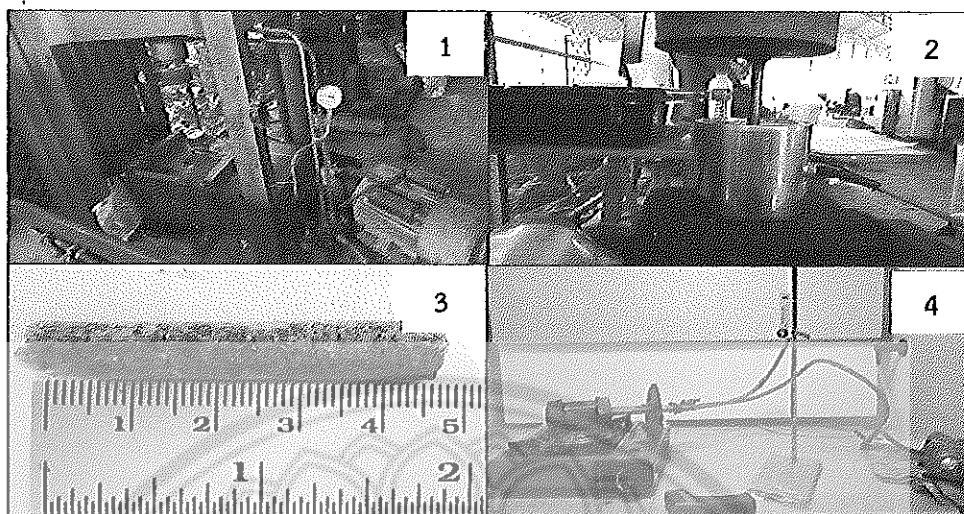
$$\begin{aligned} \text{ค่าความร้อน} &= \frac{(\text{ค่าความร้อนของตัวอย่างจากเครื่อง Bomb Calorimeter (cal/g)})(4.184 \text{ MJ})}{1,000 \text{ (kcal)}} \quad (7) \\ \text{(MJ/kg)} & \end{aligned}$$



ภาพ 16 การเตรียมตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ค่าความร้อนและเครื่องวิเคราะห์ค่าความร้อน Bomb Calorimeter

(1) การเตรียมตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ค่าความร้อน

(2) เครื่องวิเคราะห์ค่าความร้อน Bomb Calorimeter



ภาพ 17 เครื่องอัดแบบไฮดรอลิค, เครื่องฮีตเตอร์ให้ความร้อน, เชื้อเพลิงอัดเม็ด, เครื่องมือและอุปกรณ์การทอรีแฟคชัน

- (1) เครื่องอัดแบบไฮดรอลิค
- (2) เครื่องฮีตเตอร์ให้ความร้อน
- (3) เชื้อเพลิงอัดเม็ด
- (4) เครื่องมือและอุปกรณ์การทอรีแฟคชัน

4. การผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด

การผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดเริ่มดำเนินการโดยนำวัตถุดิบตั้งต้น ได้แก่ ตะกอนพลาสติกชนิด PET ซีลี้อยไม้สัก ซีลี้อยไม้ยูคาลิปตัส และขี้ข้าวโพด ที่ผ่านการร่อนและบดย่อยให้มีขนาดประมาณ 0.5-1 mm มาผสมกันตามสัดส่วนที่กำหนดแสดงดังตาราง 9 และนำมาอัดด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิค แสดงดังภาพ 17 (1) ซึ่งกำหนดอุณหภูมิ 85 100 และ 125 °C โดยใช้ฮีตเตอร์รัดท่อออกน้อด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 76.2 mm สูง 88.9 mm กำลังไฟฟ้าขนาด 600 วัตต์ 200 โวลต์ (Scma) แสดงดังภาพ 17 (2) เป็นตัวให้ความร้อน แรงดัน 100 110 และ 120 kg/cm² เวลา 0.5 1 และ 2 นาทีในการอัด

ตาราง 9 ศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมสำหรับวัตถุดิบชนิดต่างๆ

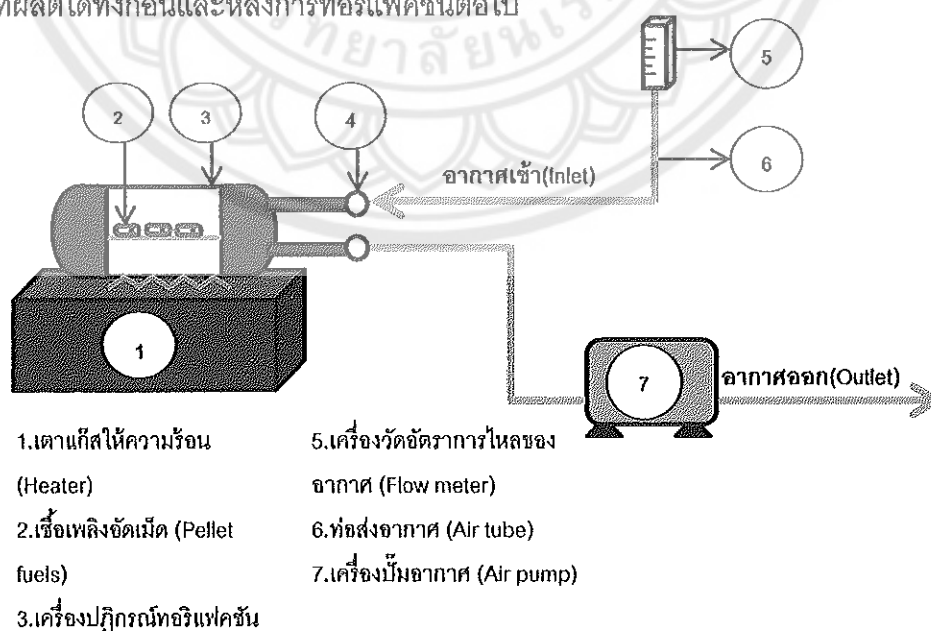
ตัวอย่าง	สัดส่วนของวัตถุดิบ(%)			
	PET	ซีล้อยไม้สัก	ซีล้อยไม้ยูคาลิปตัส	ซังข้าวโพด
1	95	5	-	-
2	90	10	-	-
3	85	15	-	-
4	95	-	5	-
5	90	-	10	-
6	85	-	15	-
7	95	-	-	5
8	90	-	-	10
9	85	-	-	15

5. การทอรีแฟคชันเชื้อเพลิงอัดเม็ด

การทอรีแฟคชันเชื้อเพลิงอัดเม็ดกำหนดสภาวะอุณหภูมิ 170 190 และ 225 °C อัตราการป้อนอากาศ 1 4 และ 6 L/min เวลา 5 10 และ 15 นาทีในการทอรีแฟคชัน ทั้งนี้อุณหภูมิสูงสุดในการทอรีแฟคชันเชื้อเพลิงอัดเม็ดต้องไม่เกิน 250 °C เนื่องจาก ตะกอนพลาสติกชนิด PET เมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Thermogravimetric Analysis (TGA) เกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิช่วง 300-357 °C ซีล้อยไม้สักเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิช่วง 250-280 °C (Punturat et al., 2017) ซีล้อยไม้ยูคาลิปตัสเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิช่วง 294-328 °C (Barneto et al., 2011) และ ซังข้าวโพดเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิช่วง 200-450 °C (Siterzov et al., 2017) ดังนั้นในงานวิจัยจึงได้กำหนดอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทอรีแฟคชันที่ 170 190 และ 225 °C ส่วนระยะเวลาในการทอรีแฟคชันกำหนดอยู่ในช่วง 5 10 และ 15 นาทีโดยในงานวิจัยใส่เชื้อเพลิงอัดเม็ดใน

เครื่องปฏิกรณ์ทอริแฟคชันครั้งละ 3 เม็ด รวมน้ำหนัก 6 g โดยสอดคล้องกับงานวิจัยของ Onsree et al. (2019) ได้ใส่เชื้อเพลิงในการทอริแฟคชันครั้งละ 6 เม็ด รวมน้ำหนัก 9.0 ± 0.3 g ใช้เวลาในการทอริแฟคชัน 10 20 และ 30 นาที โดยเทียบบัญญัติไตรยางศ์ผลของเวลาที่ได้ในงานวิจัยเมื่อเทียบกับงานวิจัยของ Onsree et al. (2019) จึงใช้เวลาในการทอริแฟคชันในช่วง 5 10 และ 15 นาที

โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการทอริแฟคชันแสดงดังภาพ 17 (4) ซึ่งการทอริแฟคชันแสดงดังภาพ 18 เริ่มดำเนินการโดยก่อนทำการทอริแฟคชันจะต้องให้อากาศไหลอยู่ในระบบประมาณ 15-30 นาที โดยใช้เครื่องปั๊มอากาศ (Air pump) เป็นตัวให้อากาศและดูดอากาศออกจากระบบ ท่อส่งอากาศ (Air tube) ทั้งนี้เพื่อให้สภาวะอากาศในระบบบริสุทธิ์ หลังจากนั้นจะนำเชื้อเพลิงอัดเม็ดใส่เข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ทอริแฟคชัน (Torrefaction reactor) แล้วปรับอัตราการไหลของอากาศด้วยเครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศ (Flow meter) (ยี่ห้อ Shijie รุ่น LZM-6) โดยใช้เครื่องปั๊มอากาศเป็นตัวให้อากาศเข้าระบบและดูดอากาศออกจากระบบ ซึ่งควบคุมปริมาณอากาศเข้าและออกจากระบบโดยวาล์วควบคุมปริมาณอากาศ (Control valve) และเพิ่มความร้อนด้วยเตาแก๊สให้ความร้อน (Heater) ใช้เครื่องวัดอุณหภูมิอินฟราเรดเทอร์โมมิเตอร์ (ยี่ห้อ Aropak รุ่น AIT-42R) ซึ่งเป็นระบบเลเซอร์วัดอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ทอริแฟคชันให้อยู่ในสภาวะอุณหภูมิที่กำหนด จากนั้นนำเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งก่อนและหลังการทอริแฟคชันไปทดสอบหาคุณสมบัติทางกายภาพ ความร้อน ค่าการปนเปื้อนปรอทและคลอไรด์ และทดสอบประสิทธิภาพเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผลิตได้ทั้งก่อนและหลังการทอริแฟคชันต่อไป

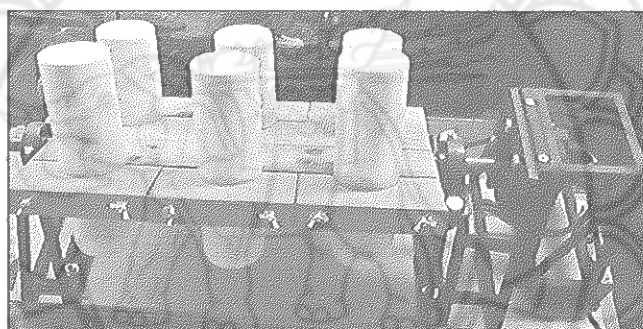


ภาพ 18 การทอริแฟคชันเชื้อเพลิงอัดเม็ด

6. การทดสอบคุณสมบัติค่าดัชนีความคงทนของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

ค่าดัชนีความคงทน (Drop shatter index; DSI) ในการทดสอบค่า DSI งานวิจัยนี้ได้ดัดแปลงรูปแบบการทดสอบโดยนำเชื้อเพลิงตัวอย่างประมาณ 1 ± 0.0005 g ใส่ลงในหลอดพลาสติกปิดฝาให้แน่น แล้วใส่เข้าไปในขวดกระบอกพลาสติกพร้อมทั้งปิดฝาให้แน่นนำไปเขย่าด้วยเครื่องวิเคราะห์ค่าการแตกร่วน แสดงดังภาพ 19 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักเพื่อหาค่า DSI โดยทำการทดสอบซ้ำ 3 ครั้งเพื่อนำค่าที่ได้มาเฉลี่ยและนำมาคำนวณหาค่า DSI โดยใช้สมการดังนี้

$$\text{ค่าดัชนีความคงทน (Drop shatter index; DSI)} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างหลังการทดสอบ shattering}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนทำการทดสอบ shattering}} \quad (8)$$



ภาพ 19 เครื่องวิเคราะห์ค่าการแตกร่วน

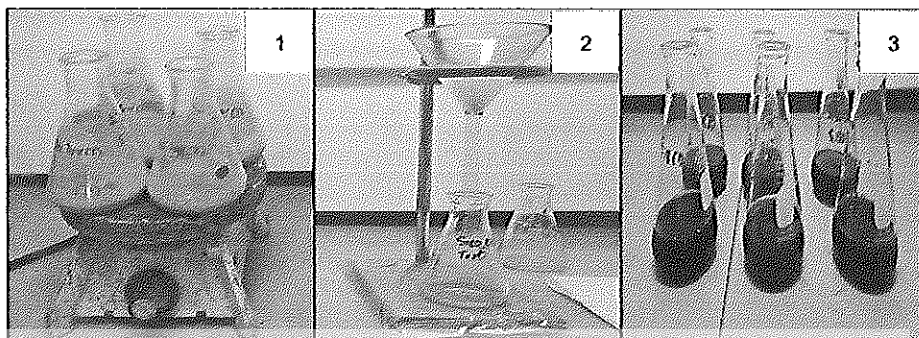
7. การวิเคราะห์หาค่าปรอทในเชื้อเพลิงอัดเม็ด

การวิเคราะห์หาองค์ประกอบโลหะหนักตามมาตรฐาน EN 15359:2011 ได้แก่ ปรอท (Hg) และคลอไรด์ (Cl) เป็นต้น ในการวิเคราะห์หาสารปรอทตามมาตรฐาน EPA 7471A (Joint group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection, 2017) จะดำเนินการวิเคราะห์หาโดยการนำตัวอย่างไปย่อยสลาย (Digestion) ซึ่งจะเตรียมตัวอย่าง 1 g (1.0001 g) ผสมกรดไนตริก (HNO_3) (ร้อยละ 65 โดยปริมาตร) (ยี่ห้อ RCI Labscan, ประเทศไทย) ปริมาณ 7 ml และกรดไฮโดรคลอริก (HCl) (ร้อยละ 37 โดยปริมาตร) (ยี่ห้อ RCI Labscan, ประเทศไทย) ปริมาณ 21 ml ลงไปในขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask) ขนาด 250 ml แล้วนำไปตั้งทิ้งไว้ในตู้ดูดไอสารเคมี (Fume Hood) (ยี่ห้อ Flexlab รุ่น SH 150 DC) ประมาณ 2 ชั่วโมง นำไปย่อยที่เครื่องให้ความร้อน (Hot Plate) ที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 150 นาที และตั้งทิ้งไว้เพื่อปรับอุณหภูมิลงเหลืออุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปกรองผ่าน

กระดาษกรอง (ยี่ห้อ Whatman) จากนั้นนำสารละลายที่ได้ปรับปริมาตร 200 ml ด้วยน้ำกลั่นในขวดปรับปริมาตรขนาด 200 ml แล้วนำมาใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 ml เติมกรดซัลฟริก (H_2SO_4) (ยี่ห้อ RCI Labscan, ประเทศไทย) ปริมาณ 2 ml และ โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (KMnO_4 50 g/l) (ยี่ห้อ Emsure, สหรัฐอเมริกา) ปริมาณ 4 ml แล้วตั้งทิ้งไว้ 15 นาที เมื่อสีจางหายไปให้เติมโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (KMnO_4) ที่ละนิด แล้วปล่อยทิ้งไว้ 15 นาที แล้วเติมโพแทสเซียมเพอร์ซัลเฟต ($\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 50 g/l) (ยี่ห้อ PanReac Applichem, ประเทศเยอรมันนี) ปริมาณ 2 ml จากนั้นนำไปตั้งบนอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath) (ยี่ห้อ Scipro รุ่น DH-45-110) 95°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วตั้งทิ้งไว้ให้เย็นแล้วเติมไฮดรอกซิลามีนไฮโดรคลอไรด์ ($\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ 100 g/l) (ยี่ห้อ Univar, ประเทศออสเตรเลีย) ปริมาณ 1.6 ml แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนมีปริมาตร 50 ml ในขวดปรับปริมาตรขนาด 250 ml จากนั้นนำมาใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 ml แล้วเติมสแตนนัส(II)คลอไรด์ (SnCl_2 10 g/l) (ยี่ห้อ Univar, ประเทศออสเตรเลีย) ปริมาณ 0.4 ml แล้วนำไปทดสอบเครื่อง Inductively Couple Plasma Optical Emission Spectrometer หรือ ICP-OES เพื่อวิเคราะห์หาองค์ประกอบโลหะหนักปรอท (USDA Food Safety and Inspection Service, 2017) (กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2550) แสดงดังภาพ 20

8. การวิเคราะห์หาค่าคลอไรด์ในเชื้อเพลิงอัดเม็ด

ส่วนในการวิเคราะห์หา Cl ตามมาตรฐาน EN- 15408:2011 (Recari et al., 2017) จะดำเนินการวิเคราะห์โดยนำเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งก่อนและหลังการทอริแฟคชัน 1 ± 0.0005 g ใส่ลงไปในหลอดเซนติฟิวก์พลาสติก (Centrifuge tube) ขนาด 15 ml แล้วเติมน้ำ DI (Deionized water) (ยี่ห้อ RCI Labscan, ประเทศไทย) ปริมาณ 10 ml จากนั้นนำหลอดเซนติฟิวก์พลาสติกที่มีเชื้อเพลิงอัดเม็ดผสมน้ำ DI ไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องเขย่าควบคุมอุณหภูมิ (ยี่ห้อ JSR รุ่น Jssi-300C) เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำมารองด้วยกระดาษกรองประมาณ 3 ครั้งแล้วนำสารละลายตัวอย่างที่ได้ใส่ลงไปในหลอดเซนติฟิวก์พลาสติกปิดฝาจากนั้นนำไปทดสอบในเครื่อง Ionic chromatography เพื่อวิเคราะห์หาค่าคลอไรด์ แสดงดังภาพ 21



ภาพ 20 เตรียมตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ค่าการปนเปื้อนปรอทใน
เชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งก่อนและหลังการทอริแฟคชัน

- (1) การย่อยสลายตัวอย่างด้วย เครื่องให้ความร้อน
- (2) การกรองตัวอย่าง
- (3) ตัวอย่างเตรียมนำไปตั้งบนอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ



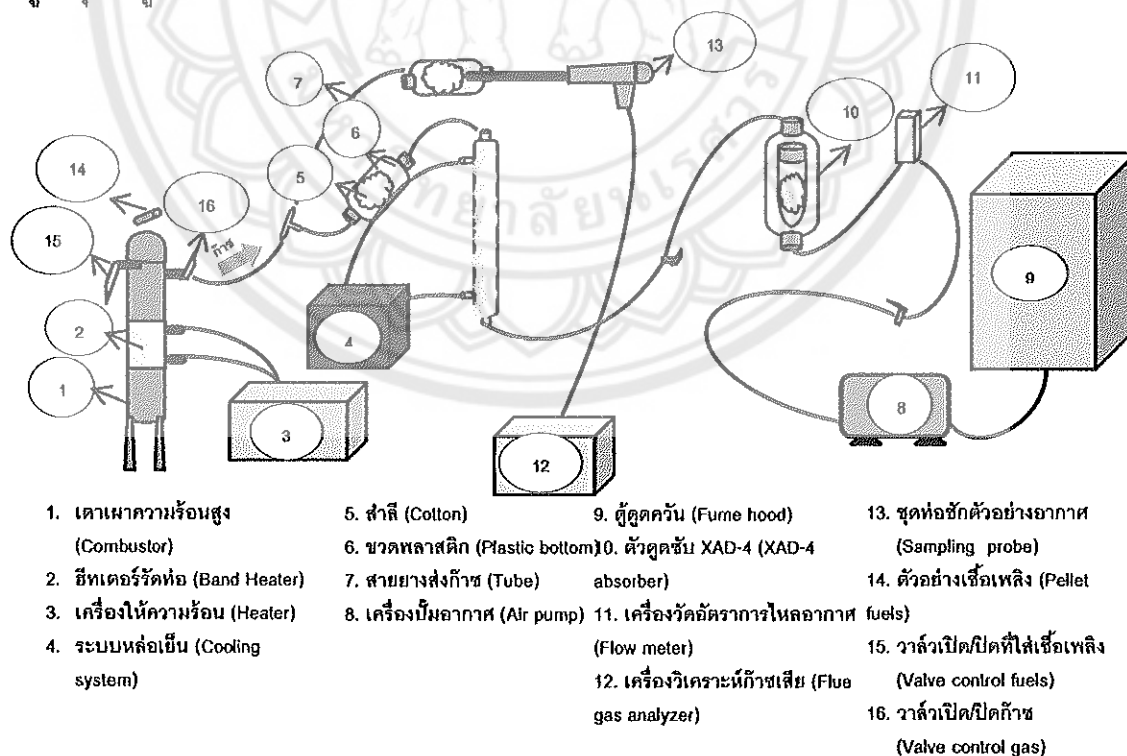
ภาพ 21 เตรียมตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ค่าการปนเปื้อนคลอไรด์ใน
เชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งก่อนและหลังการทอริแฟคชัน

- (1) การกรองตัวอย่าง
- (2) ตัวอย่างเตรียมนำไปทดสอบในเครื่อง Ionic chromatography เพื่อวิเคราะห์ค่าคลอไรด์

9. การทดสอบการเผาไหม้

การวิเคราะห์หามลพิษจากการเผาไหม้ซึ่งจะวิเคราะห์หาปริมาณ O_2 , CO_2 , CO , NOx , H_2 , SO_2 , BTEX และ 13PAHs เป็นต้น ซึ่งในการดำเนินการเผาไหม้ แสดงดังภาพ 22 จะเริ่มดำเนินการทดสอบการเผาไหม้โดยติดตั้งเตาเผาความร้อนสูง $850^\circ C$ และติดตั้งระบบหล่อเย็น (Cooling system) และมีตัวกรอง (Filter) โดยใช้สำลีใส่เข้าไปในขวดพลาสติกและเจาะรูหัวท้ายขวด

พลาสติกเพื่อใส่สลายยางขนาด $\frac{1}{4}$ นิ้ว เพื่อส่งก๊าซจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงอัดเม็ดเข้าระบบและใช้เครื่องปั๊มอากาศเป็นตัวดูดก๊าซเข้าระบบแล้วปล่อยก๊าซเข้าสู่ตู้ดูดควัน (Fume hood) ซึ่งการติดตั้งอุปกรณ์ในการเก็บตัวอย่างก๊าซจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงอัดเม็ด จะให้หลอดเซนติฟิวก์พลาสติกขนาด 50 ml นำมาเจาะรูที่ฝาและท้ายหลอดเพื่อใส่สลายยางเข้าไป ซึ่งในหลอดเซนติฟิวก์พลาสติกจะใช้ตัวดูดซับ XAD-4 (ยี่ห้อ Sigma-aldrich; สหรัฐอเมริกา) เพื่อดูดซับ 13PAHs และ BTEX จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงอัดเม็ดโดยจะวางไว้ระหว่างชั้นสำลีในหลอดเซนติฟิวก์พลาสติกที่ปิดฝาและใส่สลายยาง โดยในการวัดอัตราการไหลของอากาศจะใช้เครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศกำหนดอัตราการไหลของอากาศในระบบ 2 L/min ส่วนชุดท่อชักตัวอย่างอากาศ (Sampling probe) ของเครื่องวิเคราะห์ก๊าซเสีย Flue gas analyzer (ยี่ห้อ Testo รุ่น 350H) แสดงดังภาพ 23 (3) โดยชุดท่อชักตัวอย่างอากาศจะต่อเข้ากับระบบ โดยเสียบเข้ากับขวดพลาสติกซึ่งมีสำลีอยู่ข้างใน ซึ่งขวดพลาสติกจะเจาะรูหัวและท้ายขวดเพื่อใส่สลายยางเชื่อมกับท่อสลายยางที่ต่อตรงมาจากเตาเผา ความร้อนสูง 850°C เมื่อทำการติดตั้งระบบเก็บตัวอย่างเสร็จจะเริ่มดำเนินการติดตั้งเตาเผาความร้อนสูงแสดงดังภาพ 23 (2) โดยตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 850°C ซึ่งในระหว่างการติดตั้งจะมีการเปิดเครื่องปั๊มอากาศ เพื่อดูมลพิษที่ตกค้างอยู่ในระบบใช้เวลาประมาณ 10-15 นาที เมื่อเตาเผาความร้อนสูงมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง 850°C จะเริ่มดำเนินการเดินระบบ



ภาพ 22 การทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งก่อนและหลังการทอริแฟลคชัน

10. การวิเคราะห์ก๊าซเสียจากการเผาไหม้

การเก็บตัวอย่างก๊าซเสีย (Flues gas) ได้แก่ ปริมาณ O_2 , CO_2 , CO , NO_x , H_2 และ SO_2 เป็นต้น จะดำเนินการโดยหยอดตัวอย่างลงในเตาเผาอุณหภูมิสูง ช่วงเวลาละ 3 นาที โดยใช้เวลาหยอดตัวอย่างทั้งหมด 30 นาที และตรวจวัดตัวอย่างก๊าซช่วงละ 5 นาที จนถึง 30 นาที โดยใช้เครื่อง Flue gas analyzer ตรวจวัดและทำการบันทึกผล ส่วนการเก็บตัวอย่าง 13PAHs และ BTEX เมื่อเตาเผามีความร้อนถึง $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ จะทำการปิดการไหลอากาศในระบบด้วยวาล์วควบคุมการไหลของอากาศ แล้วใส่หลอดเซนต์ปีฟักพลาสติกที่เจาะรูมีสายยางเสียบหัวท้ายและมีตัวดูดซับ XAD-4 อยู่ข้างในเข้าไปในระบบ จากนั้นทำการเปิดวาล์วและควบคุมอัตราการไหลของอากาศในระบบ 2 L/min และทำการหยอดตัวอย่างลงในเตาเผาที่อุณหภูมิ $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ ช่วงเวลาละ 3 นาที โดยใช้เวลาหยอดตัวอย่างทั้งหมด 30 นาที และจะเก็บตัวอย่าง 13 PAHs และ BTEX ช่วงเวลาละ 5 นาที จนถึง 30 นาที เช่นเดียวกับการเก็บตัวอย่างวิเคราะห์การเกิดก๊าซเสีย

11. การวิเคราะห์ปริมาณมลพิษ 13PAHs และ BTEX

เมื่อเก็บตัวอย่างเสร็จจะนำไปใส่ถุงซิปลาสติกเพื่อเตรียมนำไปสกัดหาปริมาณ 13PAHs และ BTEX แสดงดังภาพ 46 ภาคผนวก ข โดยในขั้นตอนการสกัดจะเริ่มดำเนินการโดยนำตัวอย่างที่เป็นตัวดูดซับ XAD-4 พร้อมสำลีใส่เข้าไปใน Extraction thimbles cellulose (ยี่ห้อ Whatman) ใส่ลงไปในชุดสกัด Soxhlet extractor ใส่เฮกเซน (Hexane) (ยี่ห้อ Emsure, ประเทศเยอรมนี) และใส่ไดคลอโรมีเทน (Dichloromethane) (ยี่ห้อ Emsure, ประเทศเยอรมนี) อย่างละ 150 ml หรือ 1:1 ใส่ลงไปในขวดก้นกลม (Round bottom flask) ขนาด 500 ml สกัดที่อุณหภูมิ $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ เวลา 18 ชั่วโมง จากนั้นนำสารละลายตัวอย่างไประเหยโดยใช้เครื่องกลั่นระเหยแบบหมุนภายใต้สุญญากาศ (Rotary evaporator) (ยี่ห้อ BUCHI Rotavapor รุ่น R-200) แสดงดังภาพ 47 ภาคผนวก ข โดยใช้อุณหภูมิในการระเหย $40\text{--}50\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยให้เหลือสารละลายตัวอย่าง 1-2 ml จากนั้นดูดสารละลายตัวอย่างที่ได้ประมาณ 1 ml ด้วยหลอดฉีดยาขนาด 5 ml โดยปลายหลอดจะใส่ Cellulose Acetate Syringe filter (ยี่ห้อ Filtrix) ใส่ลงไปในขวดแก้ว Screw Thread vial (ยี่ห้อ Alwsci) ปิดฝาขวด vial Screw cap (ยี่ห้อ Alwsci) จากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ก๊าซโครมาโตกราฟี/แมสสเปคโตรมิเตอร์ (Gas chromatography/Mass Spectrometer; GC/MS) (ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น QP2010 Plus) แสดงดังภาพ 23 (4)

การกำหนดสภาวะของเครื่อง GC/MS ที่ใช้ในการวิเคราะห์ของ 13PAHs แสดงดังตาราง 29 และ BTEX แสดงดังตาราง 30 ภาคผนวก ค ส่วนการเตรียมสารละลายมาตรฐานของ 13PAHs ทั้งนี้สารละลายมาตรฐาน PAHs (ยี่ห้อ Sigma-aldrich; สหรัฐอเมริกา) ที่ได้นำมาสารละลาย

มาตรฐาน 13PAHs ได้แก่ อะซีแนปทิลลีน ฟลูออรีน พีแนนทรีน แอนทราซีน ไพรีน เบนโซเอไพรีน ไครซีน เบนโซปีฟลูออแรนทีน เบนโซเคฟลูออแรนทีน เบนโซเอไพรีนไดเบนเอเอสแอนทราซีน เบนโซจีเอสไอไพรีน และอินดีโน(1,2,3-ซีดี)ไพรีน เป็นต้น ซึ่งสารละลายมาตรฐาน 13PAHs จะให้ความเข้มข้นที่ 30 90 120 mg/l แล้วนำไปวิเคราะห์ที่เครื่อง GC/MS เพื่อนำพื้นที่ (Area) มาแปรผลเป็นกราฟสารละลายมาตรฐาน แสดงดังภาพ 38 ภาคผนวก จ ซึ่งจะได้สมการ

$$y = mx + b \quad (9)$$

จากนั้นนำสมการที่ได้ไปคำนวณหาความเข้มข้น 13PAHs ในเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งก่อนและหลังการทอริแฟคชันโดยใช้สมการ

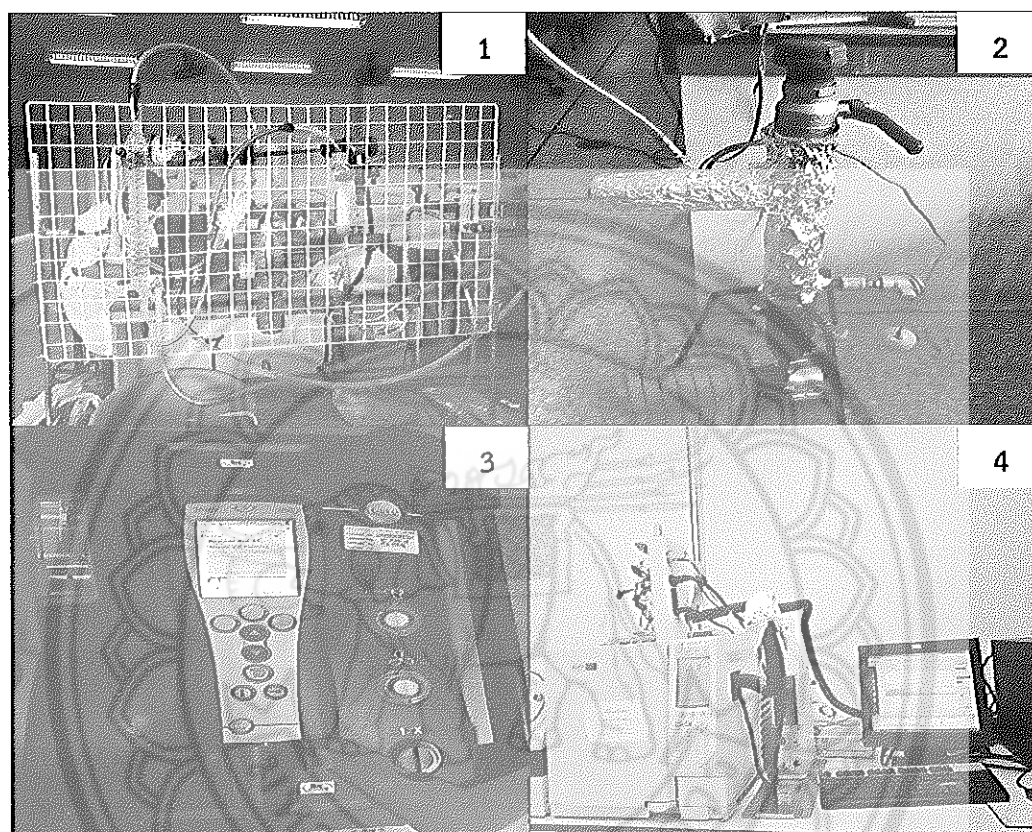
$$\text{mg/m}^3 = \frac{(\text{ppmv})(12.187)(\text{MW})}{(273.15 + ^\circ\text{C})} \quad (10)$$

เมื่อ	mg/m ³	คือ	มิลลิกรัมของก๊าซมลพิษ/ลูกบาศก์เมตรของอากาศโดยรอบ
	ppmv	คือ	หนึ่งในล้านส่วนโดยปริมาตร(ปริมาตรของก๊าซมลพิษต่อปริมาตร 10 ⁶ ของอากาศโดยรอบ)
	MW	คือ	มวลโมเลกุลของก๊าซมลพิษ
	°C	คือ	อุณหภูมิห้อง 25 °C

โดยในการหา 13PAHs ในเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งก่อนและหลังการทอริแฟคชันจะนำพื้นที่จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC/MS มาคำนวณหาความเข้มข้นของ 13PAHs มีหน่วยเป็น g/Nm³ ในเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งก่อนและหลังการทอริแฟคชัน แสดงดังตาราง 21-26 ภาคผนวก ข และนำมาสรุปผลเป็นแผนภูมิแท่ง แสดงดังภาพ 30 และ 31

ส่วนการเตรียมสารละลายมาตรฐาน BTEX (ยี่ห้อ Sigma-aldrich; สหรัฐอเมริกา) ซึ่งจะเตรียมความเข้มข้นที่ 5 20 30 40 mg/l แล้วนำไปวิเคราะห์ที่เครื่อง GC/MS เพื่อนำพื้นที่ (Area) มาแปรผลเป็นกราฟสารละลายมาตรฐาน แสดงดังภาพ 39 ภาคผนวก จ ซึ่งจะได้สมการ (9) จากนั้นนำสมการที่ได้ไปคำนวณหาความเข้มข้น BTEX ในเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งก่อนและหลังการทอริแฟคชันโดยใช้สมการ (10) โดยในการหา BTEX ในเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งก่อนและหลังการทอริแฟคชันจะนำพื้นที่ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC/MS มาคำนวณหาความเข้มข้น

ของ BTEX มีหน่วยเป็น g/Nm^3 ในเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งก่อนและหลังการทอริแฟคชัน แสดงดังตาราง 27-28 ภาคผนวก ข และนำมาสรุปผลเป็นแผนภูมิแท่ง แสดงดังภาพ 32 และ 33



ภาพ 23 อุปกรณ์และเครื่องมือในการเก็บตัวอย่างมลพิษจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงอัดเม็ด, เตาเผาอุณหภูมิ $850\text{ }^{\circ}\text{C}$, เครื่อง Flue gas analyzer, เครื่องวิเคราะห์ก๊าซโครมาโตกราฟี/แมสสเปคโตรมิเตอร์ (Gas chromatography/Mass Spectrometer)

- (1) อุปกรณ์และเครื่องมือในการเก็บตัวอย่างมลพิษจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงอัดเม็ด
- (2) เตาเผาอุณหภูมิ $850\text{ }^{\circ}\text{C}$
- (3) เครื่อง Flue gas analyzer
- (4) เครื่องวิเคราะห์ก๊าซโครมาโตกราฟี/แมสสเปคโตรมิเตอร์ (Gas chromatography/Mass Spectrometer)

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

1. สมบัติทางกายภาพและเคมี ค่าความร้อนของวัตถุดิบตั้งต้นและเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งก่อนและหลังการทอริแฟคชัน

1.1 สมบัติทางกายภาพ

จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพของวัตถุดิบตั้งต้นพบว่า ตะกอนพลาสติกชนิด PET ที่เลื่อยไม้สัก ที่เลื่อยไม้ยูคาลิปตัส ชังข้าวโพด มีปริมาณความชื้นอยู่ในช่วงเฉลี่ยร้อยละ 0.19 ± 0.04 - 8.93 ± 0.07 ถ้าอยู่ในช่วงเฉลี่ยร้อยละ 1.16 ± 0.54 - 3.11 ± 0.04 ปริมาณสารระเหยอยู่ในช่วงเฉลี่ยร้อยละ 88.31 ± 0.09 - 98.65 ± 0.13 แสดงดังตาราง 10

ตาราง 10 สมบัติทางกายภาพและค่าความร้อนของวัตถุดิบตั้งต้น

สมบัติ	PET	ที่เลื่อยไม้สัก	ที่เลื่อยไม้ยูคาลิปตัส	ชังข้าวโพด
สมบัติทางกายภาพ (Proximate analysis)				
ปริมาณความชื้น(%)	0.19 ± 0.04	8.59 ± 0.09	8.93 ± 0.07	5.90 ± 0.03
เถ้า (%)	1.16 ± 0.54	3.11 ± 0.04	1.47 ± 0.35	2.22 ± 0.06
ปริมาณสารระเหย (%)	98.65 ± 0.13	88.31 ± 0.09	89.60 ± 0.27	91.89 ± 0.07
ค่าความร้อน (Heating value)				
HHV (MJ/kg)	22.56 ± 0.09	17.35 ± 0.21	18.00 ± 0.04	16.95 ± 0.06
LHV (MJ/kg)	21.90	15.80	16.45	15.44

จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงอัดเม็ดก่อนการทอริแฟคชันพบว่า เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผสมตะกอนพลาสติกชนิด PET กับที่เลื่อยไม้สัก ตะกอนพลาสติกชนิด PET กับที่เลื่อยไม้ยูคาลิปตัส และตะกอนพลาสติกชนิด PET กับชังข้าวโพด มีปริมาณความชื้นอยู่ในช่วงเฉลี่ยร้อยละ 0.29 ± 0.02 - 0.52 ± 0.09 ถ้าอยู่ในช่วงเฉลี่ยร้อยละ 1.32 ± 0.84 - 1.71 ± 0.05 ปริมาณสารระเหยอยู่ในช่วงเฉลี่ยร้อยละ 97.80 ± 0.10 - 98.16 ± 1.08

จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงอัดเม็ดหลังการทอริแฟคชัน พบว่ามีปริมาณความชื้นอยู่ในช่วงเฉลี่ยร้อยละ 0.07 ± 0.01 - 0.17 ± 0.02 ถ้าอยู่ในช่วงเฉลี่ยร้อยละ

1.76±0.13-2.19±0.11 และมีปริมาณสารระเหยอยู่ในช่วงเฉลี่ยร้อยละ 97.66±0.39-98.07±0.85 แสดงดังตาราง 11

ตาราง 11 สมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งก่อนและหลังการทอริแฟคชัน

สมบัติทาง กายภาพ	ก่อนทอริแฟคชัน			หลังทอริแฟคชัน		
	S.18	S.94	S.180	S.18	S.94	S.180
ปริมาณ						
ความชื้น (%)	0.50±0.04	0.29±0.02	0.52±0.09	0.17±0.02	0.07±0.01	0.16±0.05
เถ้า (%)	1.71±0.05	1.59±0.14	1.32±0.84	1.76±0.13	1.90±0.05	2.19±0.11
ปริมาณสาร						
ระเหย(%)	97.80±0.10	98.12±0.72	98.16±1.08	98.07±0.85	98.03±0.04	97.66±0.39

หมายเหตุ : S.18 คือ ตะกอนพลาสติกชนิด PET: ซีล้อยไม้สัก ในอัตราส่วน 85:15 สภาวะการอัดที่อุณหภูมิ 100 °C แรงดัน 100 kg/cm² เวลา 2 นาที สภาวะการทอริแฟคชันที่อุณหภูมิ 225 °C อัตราการป้อนอากาศ 1 L/min เวลา 10 นาที

S.94 คือ ตะกอนพลาสติกชนิด PET: ซีล้อยไม้ยูคาลิปตัส ในอัตราส่วน 95:5 สภาวะการอัดที่อุณหภูมิ 100 °C แรงดัน 100 kg/cm² เวลา 1 นาที สภาวะการทอริแฟคชันที่อุณหภูมิ 190 °C อัตราการป้อนอากาศ 6 L/min เวลา 10 นาที

S.180 คือ ตะกอนพลาสติกชนิด PET: แกนข้าวโพด ในอัตราส่วน 85:15 สภาวะการอัดที่อุณหภูมิ 100 °C แรงดัน 100 kg/cm² เวลา 2 นาที สภาวะการทอริแฟคชันที่อุณหภูมิ 170 °C อัตราการป้อนอากาศ 1 L/min เวลา 10 นาที

จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงอัดเม็ดหลังการทอริแฟคชันพบว่า มีปริมาณความชื้นและปริมาณสารระเหยลดลงเมื่อเทียบกับวัตถุดิบตั้งต้นและเชื้อเพลิงอัดเม็ดก่อนการทอริแฟคชัน ซึ่งให้เห็นว่าการทอริแฟคชันมีผลต่อค่าความชื้นและปริมาณสารระเหยของเชื้อเพลิงอัดเม็ด เนื่องจากสามารถระเหยและน้ำที่อยู่ในเชื้อเพลิงอัดเม็ดโดยเฉพาะเส้นใยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในชีวมวล ส่งผลทำให้เชื้อเพลิงอัดเม็ดหลังการทอริแฟคชันมีน้ำหนักลดลงสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chen et al. (2014) ศึกษาเกี่ยวกับผลของการทอริแฟคชันต่อเส้นใยเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนินในชีวมวลจากการศึกษาพบว่า ที่อุณหภูมิ 210-300 °C ในการทอริแฟคชันมีผลทำให้ปริมาณออกซิเจนในเส้นใยเฮมิเซลลูโลสลดลง โดยการระเหยสารระเหยที่มีออกซิเจน ได้แก่ น้ำ สารประกอบอินทรีย์ที่มี O₂ CO₂ และ CO ซึ่งออกซิเจนและสารระเหยที่มีออกซิเจนเหล่านี้จะเปลี่ยนไปเป็นก๊าซ น้ำมันดินหรือทาร์ และน้ำ นอกจากนี้ปริมาณออกซิเจนจะระเหยออกจากเส้นใยเซลลูโลส และ เส้นใยลิกนิน โดยจะเปลี่ยนไปเป็น CO₂ CO และน้ำ ระเหยออกจากเส้นใยชีวมวลส่งผลทำให้มีน้ำหนักของโมเลกุลในเชื้อเพลิงลดลงร้อยละ 4.19-24.85 จาก

ร้อยละ 7.73-23.61 หลังการทอริแฟคชัน นอกจากนี้ที่อุณหภูมิ 185-325 °C ในการทอริแฟคชัน มีผลต่อการสลายตัวของเส้นใยเฮมิเซลลูโลสในชีวมวล ส่งผลทำให้น้ำหนักของเชื้อเพลิงลดลง ใน ส่วนของปริมาณเถ้าของเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งก่อนและหลังการทอริแฟคชันพบว่า มีเถ้าสูงกว่า วัตถุดิบตั้งต้น เนื่องจากเถ้าของเชื้อเพลิงอัดเม็ดมีทั้งปริมาณเถ้าของตะกอนพลาสติกชนิด PET และชีวมวล (ขี้เลื่อยไม้สัก ขี้เลื่อยไม้ยูคาลิปตัส และขี้ข้าวโพด) จึงมีปริมาณเถ้าที่สูงกว่าวัตถุดิบตั้ง ต้นสอดคล้องกับงานวิจัยของ Vonk et al. (2018) ศึกษาเกี่ยวกับการวิเคราะห์เปรียบเทียบไม้และ เชื้อเพลิงแข็งที่ผ่านกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบไหลลงจากการศึกษา พบว่า ปริมาณเถ้าของเชื้อเพลิงแข็งที่ผลิตจากไม้ผสมหนัวยาง พลาสติก และตะกอน น้ำเสีย มีปริมาณเถ้ามากกว่าวัตถุดิบตั้งต้นที่เป็นไม้ซึ่งมีปริมาณเถ้าประมาณร้อยละ 5.4-41.6 แต่ ไม้มีปริมาณเถ้าเพียงร้อยละ 4.5-8.9 ซึ่งให้เห็นว่าเชื้อเพลิงแข็งที่ผลิตได้มีเถ้าของไม้ หนัวยาง พลาสติก และตะกอนน้ำเสียรวมอยู่จึงมีปริมาณเถ้ามากกว่าวัตถุดิบตั้งต้น ทั้งนี้งานวิจัยพบว่า ปริมาณเถ้าของเชื้อเพลิงอัดเม็ดหลังการทอริแฟคชันมีค่ามากกว่าปริมาณเถ้าก่อนการทอริแฟคชัน แสดงดังตาราง 11 เป็นผลมาจากในระหว่างการทอริแฟคชันองค์ประกอบโซเดียม (Na) โพแทสเซียม (K) และคลอไรด์ (Cl) อยู่ในวัตถุดิบตั้งต้นของเชื้อเพลิงอัดเม็ดไม่สามารถระเหย ออกมาในสถานะก๊าซ แต่ทำปฏิกิริยากันเปลี่ยนเป็น โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และ โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ซึ่งจัดเป็นสารประกอบยูเทคติก (Eutectic compound) ที่มี จุดหลอมเหลวต่ำ (700-900 °C) ซึ่งต่ำกว่าอุณหภูมิการทำงานของเตาเผาเถ้า แต่จะเกิดการ หลอมตัวเมื่อมีอุณหภูมิสูงกว่า 900 °C (Recari et al., 2017) เมื่อนำไปเผาจึงทำให้เถ้ามีปริมาณ ของ NaCl และ KCl ยังคงอยู่ในเถ้าเป็นผลทำให้เชื้อเพลิงอัดเม็ดหลังการทอริแฟคชันมีปริมาณเถ้า มากกว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดก่อนการทอริแฟคชัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Recari et al. (2017) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการทอริแฟคชันเชื้อเพลิงแข็งเพื่อพัฒนาคุณสมบัติของเชื้อเพลิงสำหรับ กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันจากการศึกษาพบว่า การทอริแฟคชันมีผลต่อเถ้าของเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น ซึ่ง ในงานวิจัยได้ตรวจพบองค์ประกอบ อะลูมิเนียม (Al) แคลเซียม (Ca) ฟอสฟอรัส (P) โพแทสเซียม (K) และโซเดียม (Na) อยู่ในเถ้าของเชื้อเพลิงหลังการทอริแฟคชัน ทั้งนี้เชื้อเพลิงมีส่วนผสมของ ชีวมวลและพลาสติก ซึ่งในชีวมวลมี Na และ K เป็นองค์ประกอบที่มาจากแร่ธาตุในดินและปุ๋ยที่ใช้ เป็นธาตุอาหารของพืช และพลาสติกมี Cl เป็นองค์ประกอบ ซึ่งในระหว่างการทอริแฟคชัน Na และ K ทำปฏิกิริยากับ Cl เปลี่ยนเป็น NaCl และ KCl ซึ่งตรวจพบอยู่ในเถ้าของเชื้อเพลิงหลัง การทอริแฟคชันส่งผลทำให้มีปริมาณเถ้ามากกว่าเชื้อเพลิงก่อนการทอริแฟคชัน

1.2 สมบัติทางเคมี

การศึกษาสมบัติทางเคมีซึ่งจะทำการวิเคราะห์หาธาตุพื้นฐานของวัตถุดิบตั้งต้น โดยใช้เครื่อง Element analyzer ซึ่งส่งตรวจที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีพบว่า ตะกอนพลาสติกชนิด PET ที่ีเลื่อยไม้สัก ที่ีเลื่อยไม้ยูคาลิปตัส และซังข้าวโพด มี C ในช่วงเฉลี่ยร้อยละ 38.41-47.58H ในช่วงเฉลี่ยร้อยละ 3.02-6.39 N ในช่วงเฉลี่ยร้อยละ 0.06-0.27 O ในช่วงเฉลี่ยร้อยละ 21.54-51.56 และตรวจไม่พบ S ในวัตถุดิบตั้งต้นซึ่งแสดงดังตาราง 12 ทั้งนี้สมบัติทางเคมีของตะกอนพลาสติกชนิด PET มีปริมาณองค์ประกอบธาตุ CHNO เท่ากับร้อยละ 38.41 3.02 0.08 และ 21.54 ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับพลาสติกชนิด PET ที่เป็นวัตถุดิบตั้งต้นที่จะนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงแข็ง ในงานวิจัยของ Cui et al. (2017) ศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของเชื้อเพลิงและการเกิดปฏิกิริยาไอน้ำของขยะพบว่า มีองค์ประกอบธาตุ CHN เท่ากับร้อยละ 61.3 4.2 และ 0.1 ตามลำดับ ทั้งนี้องค์ประกอบธาตุ CHN มีค่าน้อยกว่างานวิจัยของ Cui et al. (2017) เนื่องจากการปนเปื้อนของฝุ่นผง และดินที่ติดมากับตะกอนพลาสติกชนิด PET ส่วนองค์ประกอบธาตุ CHNO ของที่ีเลื่อยไม้สักเท่ากับร้อยละ 47.58 6.32 0.06 และ 51.56 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับองค์ประกอบธาตุ CHNO ของที่ีเลื่อยไม้สักในงานวิจัยของ Balogun et al. (2014) ทำการศึกษาเกี่ยวกับการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของไม้สักหลังการไพโรไลซิสพบว่า มีองค์ประกอบธาตุ CHNO เท่ากับร้อยละ 49.6 6.3 0.4 และ 43.7 ตามลำดับ ตรวจไม่พบองค์ประกอบธาตุ S เช่นเดียวกับงานวิจัยซึ่งตรวจไม่พบองค์ประกอบธาตุ S ในที่ีเลื่อยไม้สัก องค์ประกอบธาตุ CHNO ของที่ีเลื่อยไม้ยูคาลิปตัสพบว่า มีค่าเท่ากับร้อยละ 44.22 6.28 0.16 และ 49.34 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับองค์ประกอบธาตุ CHNO ของสมบัติทางเคมีของไม้ยูคาลิปตัสในงานวิจัยของ Arteaga-Pérez et al. (2017) ศึกษาเกี่ยวกับการทอริแฟกชันของไม้ยูคาลิปตัสเพื่อผลิตเป็นถ่านเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากการศึกษาพบว่า องค์ประกอบธาตุ CHNO มีค่าเท่ากับร้อยละ 47.2 6.2 0.2 และ 46.34 ตามลำดับ ส่วนองค์ประกอบธาตุ CHNO ของซังข้าวโพด จากผลการศึกษาพบว่า มีค่าเท่ากับ 42.91 6.39 0.27 และ 50.41 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับองค์ประกอบธาตุ CHNO ของซังข้าวโพดในงานวิจัยของ Chen et al. (2014) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการไพโรไลซิสของซังข้าวโพดและของเสียจากการทำอาหารที่มีน้ำมันในระบบฟลักซ์เบดจากการศึกษาพบว่า ซังข้าวโพดที่จะนำมาเป็นวัตถุดิบตั้งต้นมีองค์ประกอบธาตุ CHNO เท่ากับร้อยละ 42.03 5.51 0.61 และ 51.79 ตามลำดับ

นอกจากนี้สามารถนำมาหาค่าความร้อนสูงสุดเบื้องต้นให้เป็นไปตามที่มาตรฐาน EN 15359 ได้กำหนด โดยใช้สมการ Dulong ในการหาค่าความร้อน (HHV) ซึ่งจากการคำนวณ

พบว่า ตะกอนพลาสติกชนิด PET ขี้เลื่อยไม้สัก ขี้เลื่อยไม้ยูคาลิปตัส และซังข้าวโพด มีค่าความร้อนอยู่ในช่วง 13.46-15.90 MJ/kg ตามที่มาตรฐานกำหนด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Garcés et al. (2016) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการประเมินศักยภาพของค่าความร้อนจากของเสียเพื่อนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงแข็ง โดยได้คาดการณ์องค์ประกอบธาตุ CHNOS จากวัตถุดิบตั้งต้น (พลาสติก เศษไม้ กระดาษ และสิ่งทอ) ที่จะนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ดโดยสมการ Dulong ซึ่งจากการคำนวณพบว่า มีค่าความร้อนประมาณ 28.15 MJ/kg ซึ่งสามารถบ่งชี้ว่าวัตถุดิบตั้งต้นจัดอยู่ในประเภทของเสียที่จะนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงแข็งประเภทที่ 1 เนื่องจากมีความร้อนมากกว่า 25 MJ/kg ตามที่มาตรฐาน EN 15359 กำหนดซึ่งมีคุณสมบัติที่เหมาะสมที่จะนำมาเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตเชื้อเพลิงแข็ง

ตาราง 12 สมบัติทางเคมีของวัตถุดิบตั้งต้น

สมบัติ	PET	ขี้เลื่อยไม้สัก	ขี้เลื่อยไม้ยูคาลิปตัส	ซังข้าวโพด
C (%)	38.41	47.58	44.22	42.91
H (%)	3.02	6.32	6.28	6.39
N (%)	0.076	0.06	0.16	0.27
S (%)	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
O (%)	21.54	51.56	49.34	50.41

หมายเหตุ: N.D.(Not Detected)=ตรวจไม่พบ

2. คุณสมบัติเชิงพลังงานความร้อน (Heating value)

จากการวิเคราะห์ค่าความร้อนของวัตถุดิบตั้งต้นโดยใช้เครื่อง Bomb calorimeter พบว่า ตะกอนพลาสติกชนิด PET ขี้เลื่อยไม้สัก ขี้เลื่อยไม้ยูคาลิปตัส และซังข้าวโพด มีค่าความร้อนอยู่ในช่วงเฉลี่ย 16.95 ± 0.06 - 22.56 ± 0.09 MJ/kg แสดงดังตาราง 10

จากการวิเคราะห์ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดก่อนการทอรีแฟคชันโดยใช้เครื่อง Bomb calorimeter พบว่า เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผสมตะกอนพลาสติกชนิด PET กับขี้เลื่อยไม้สัก ตะกอนพลาสติกชนิด PET กับขี้เลื่อยไม้ยูคาลิปตัส และตะกอนพลาสติกชนิด PET กับซังข้าวโพด โดยมีอัตราส่วนอย่างละ 85:15 มีค่าความร้อนอยู่ในช่วงเฉลี่ยร้อยละ 21.84 ± 0.53 - 22.38 ± 0.11 MJ/kg และจากการวิเคราะห์ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดหลัง

การทอริแฟคชันโดยใช้เครื่อง Bomb calorimeter พบว่า มีค่าความร้อนอยู่ในช่วงเฉลี่ยร้อยละ 21.60 ± 0.10 - 21.86 ± 0.14 MJ/kg แสดงดังตาราง 13

จากผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดหลังการทอริแฟคชันมีค่าความร้อนสูงกว่าเมื่อเทียบกับค่าความร้อนของวัตถุดิบตั้งต้น (ตะกอนพลาสติกชนิด PET ที่เสียบไม้สักร์ ที่เสียบไม้ยูคาลิปตัส และซังข้าวโพด) เนื่องจากกระบวนการทอริแฟคชันที่อุณหภูมิ 170 - 225 °C มีการระเหยความชื้นและปริมาณสารระเหย (ปริมาณออกซิเจนและไฮโดรเจน) ออกจากชีวมวล รวมถึงมีการระเหยของก๊าซต่างๆ (H_2O CO CO_2 และสารอินทรีย์ระเหยง่ายอื่นๆ) ทำให้ปริมาณออกซิเจนไฮโดรเจน ลดลงในชีวมวลระหว่างกระบวนการทอริแฟคชัน (Poudel et al., 2014) ทำให้เชื้อเพลิงอัดเม็ดหลังการทอริแฟคชันมีค่าความร้อนสูงกว่าชีวมวล สอดคล้องกับงานวิจัยของ Pahla et al. (2017) ศึกษาเกี่ยวกับผลของการทอริแฟคชัน เศษอาหาร เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมกับชีวมวลพบว่า อุณหภูมิในการทอริแฟคชันระหว่าง 200 - 275 °C ทำให้มวลน้ำหนักของเศษอาหารลดลง เนื่องจากเกิดการสูญเสียความชื้น และเกิดการสลายตัวของสารประกอบแอลิแฟติก (Aliphatic compound) และสารประกอบอะโรมาติก (Aromatic compound) ในโครงสร้างคาร์โบไฮเดรตและโปรตีน รวมถึงเกิดการสลายตัวของเส้นใยเฮมิเซลลูโลสและเส้นใยเซลลูโลส ซึ่งจะสูญเสียหรือมีการระเหย H_2O CO_2 และ CO ออกไปทำให้พันธะคาร์บอนมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้มีค่าความร้อนสูงขึ้น 26 MJ/kg จาก 19.76 MJ/kg

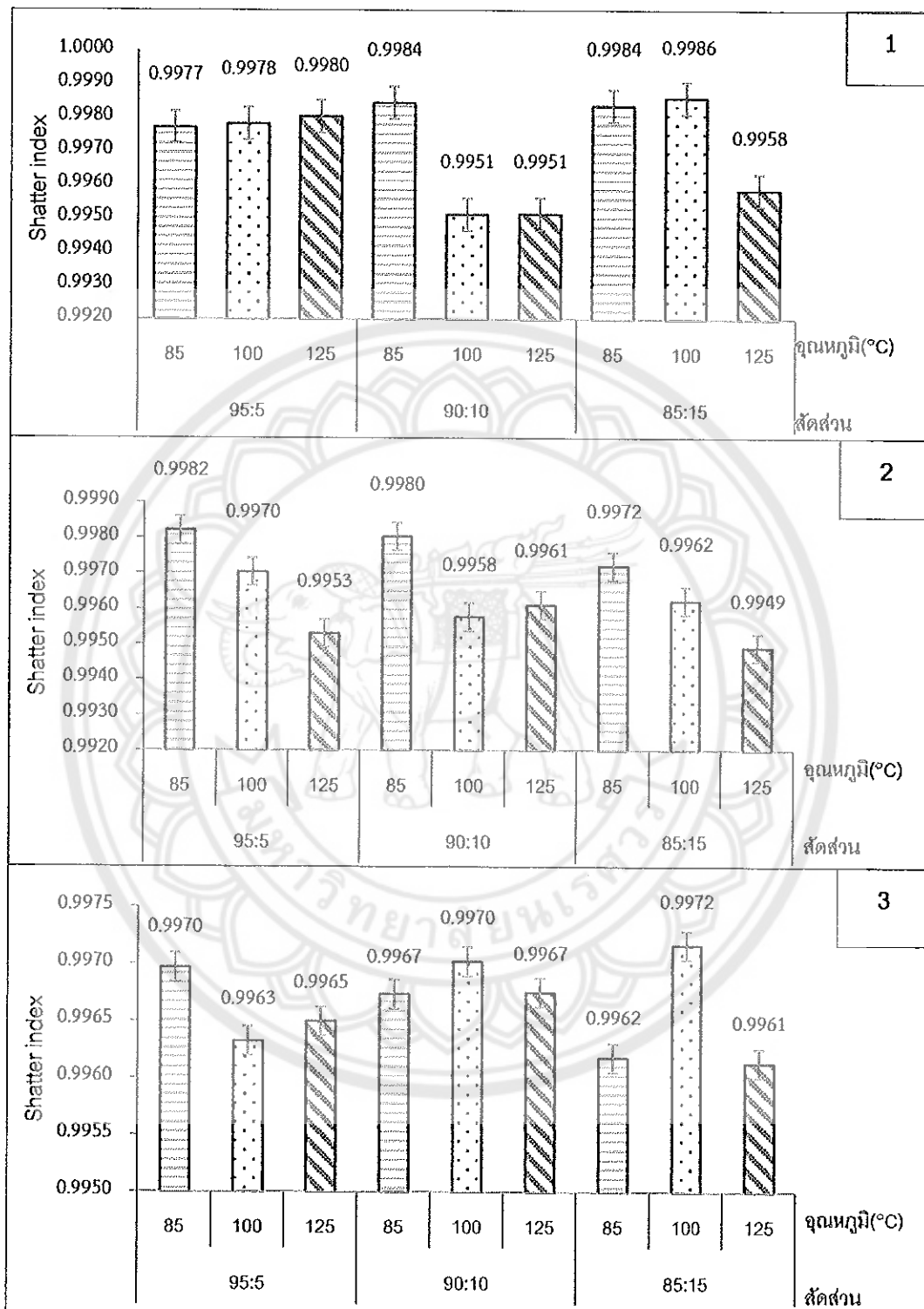
ทั้งนี้จากการวิเคราะห์ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดหลังการทอริแฟคชันมีค่าต่ำกว่าค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดก่อนการทอริแฟคชัน แสดงดังตาราง 13 อาจเป็นผลมาจากการเพิ่มอุณหภูมิของการทอริแฟคชันที่สูงและเริ่มเข้าสู่สภาวะของอุณหภูมิการไพโรไลซิส ทำให้ค่าความร้อนหลังการทอริแฟคชันของเชื้อเพลิงอัดเม็ดมีค่าลดลงสอดคล้องกับงานวิจัยของ Poudel et al. (2014) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลของการทอริแฟคชันต่อเศษอาหารจากการศึกษาพบว่า ค่าความร้อนของตัวอย่างเริ่มลดลงที่อุณหภูมิ 250 °C ในการทอริแฟคชันและค่าความร้อนเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิ 300 °C จนถึง 400 °C ในการทอริแฟคชันซึ่งหลังจาก 400 °C ค่าความร้อนเริ่มลดลงเนื่องจากเริ่มเข้าสู่สภาวะของการไพโรไลซิส ซึ่งเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงจึงทำให้ค่าความร้อน (HHV) นั้นลดลงหลังจากอุณหภูมิ 400 °C จึงเป็นเหตุผลที่ว่า การใช้อุณหภูมิสูงไม่เอื้อต่อการทอริแฟคชัน อย่างไรก็ตามค่าความร้อน (HHV) ของเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งก่อนและหลังการทอริแฟคชันมีค่าความร้อนที่มากกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 15 MJ/kg เป็นไปตามที่มาตรฐาน EN 15359:2011 กำหนด จึงมีความเหมาะสมที่จะนำไปเป็นเชื้อเพลิงทดแทนได้

ตาราง 13 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งก่อนและหลังการทอริแฟคชัน

สมบัติ	อัตราส่วน	ค่าความร้อน HHV (MJ/kg)
ก่อนทอริแฟคชัน		
ตะกอนพลาสติกชนิด PET:ซีลี้อยไม้สัก	85:15	22.38±0.11
ตะกอนพลาสติกชนิด PET:ซีลี้อยไม้ยูคาลิปตัส	85:15	22.20±0.08
ตะกอนพลาสติกชนิด PET:ซีงข้าวโพด	85:15	21.84±0.53
หลังทอริแฟคชัน		
ตะกอนพลาสติกชนิด PET:ซีลี้อยไม้สัก	85:15	21.86±0.14
ตะกอนพลาสติกชนิด PET:ซีลี้อยไม้ยูคาลิปตัส	85:15	21.60±0.10
ตะกอนพลาสติกชนิด PET:ซีงข้าวโพด	85:15	21.68±0.25

3. ค่าดัชนีความคงทน (DSI) ของเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งก่อนและหลังการทอริแฟคชัน

การทดสอบค่าดัชนีความคงทนเป็นการทดสอบ เพื่อหาค่าความคงทนของเชื้อเพลิงอัดเม็ด ซึ่งมีความสำคัญต่อการขนส่งและการเก็บรักษาในระหว่างการขนส่งนั้นเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่มีค่า DSI ดีที่สุดจะไม่แตกร่วนง่ายและมีความสมบูรณ์ของเม็ด งานวิจัยนี้ได้ศึกษาค่า DSI ของเชื้อเพลิงอัดเม็ดก่อนการทอริแฟคชัน ซึ่งจะศึกษาสภาวะของการอัดที่ดีที่สุดโดยแบ่งออกเป็น การศึกษาสภาวะอุณหภูมิในการอัด แรงดันในการอัด และเวลาในการอัด จากการศึกษาพบว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผสมตะกอนพลาสติกชนิด PET กับซีลี้อยไม้สักที่มีค่า DSI ดีที่สุด ได้แก่ S. 18 ซึ่งมีค่า DSI ของอุณหภูมิในการอัดเหมาะสมที่สุด แสดงดังภาพ 24 (1) โดยมีอัตราส่วนตะกอนพลาสติกชนิด PET: ซีลี้อยไม้สัก 85:15 สภาวะการอัดที่อุณหภูมิ 100 °C แรงดัน 100 kg/cm² เวลา 2 นาที S. 13 ซึ่งมีค่า DSI ของเวลาในการอัดเหมาะสมที่สุด แสดงดังภาพ 25 (1) โดยมีอัตราส่วนตะกอนพลาสติกชนิด PET: ซีลี้อยไม้สัก 95:5 สภาวะการอัดที่อุณหภูมิ 100 °C แรงดัน 100 kg/cm² เวลา 1 นาที S. 44 ซึ่งมีค่า DSI ของแรงดันในการอัดเหมาะสมที่สุด แสดงดังภาพ 26 (1) โดยมีอัตราส่วนตะกอนพลาสติกชนิด PET: ซีลี้อยไม้สัก 90:10 สภาวะการอัดที่อุณหภูมิ 100 °C แรงดัน 110 kg/cm² เวลา 2 นาที ซึ่งมีค่า DSI อยู่ในช่วง 0.9986-0.9993 แสดงดังตาราง 14

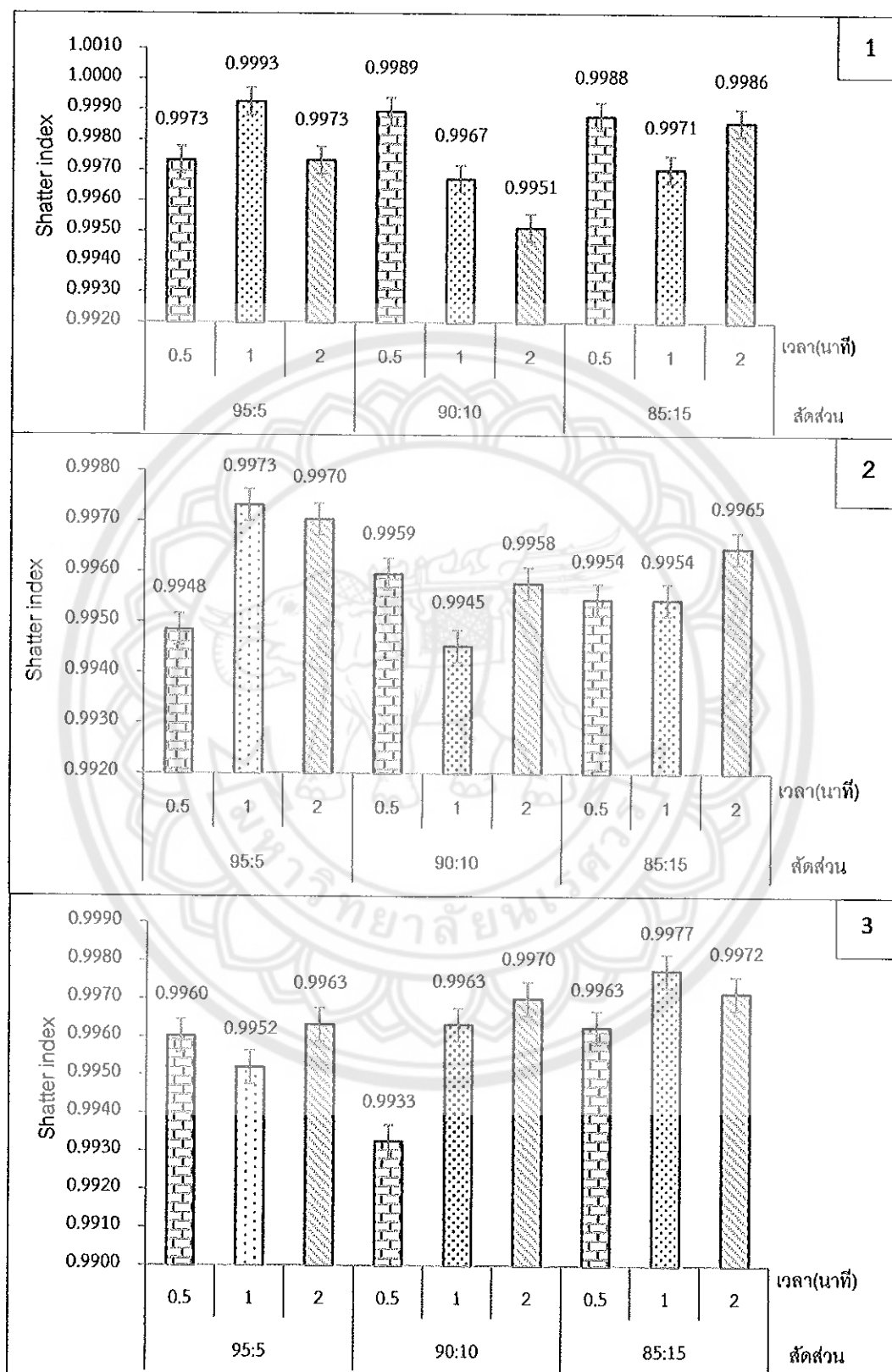


ภาพ 24 ผลการทดสอบ Shatter index ของสภาวะอุณหภูมิในการอัด
เชื้อเพลิงอัดเม็ด

- (1) ผสมตะกอนพลาสติกชนิด PET: ขี้เลื่อยไม้สัก
- (2) ผสมตะกอนพลาสติกชนิด PET: ขี้เลื่อยไม้ยูคาลิปตัส
- (3) ผสมตะกอนพลาสติกชนิด PET: ขี้เลื่อยไม้ไผ่

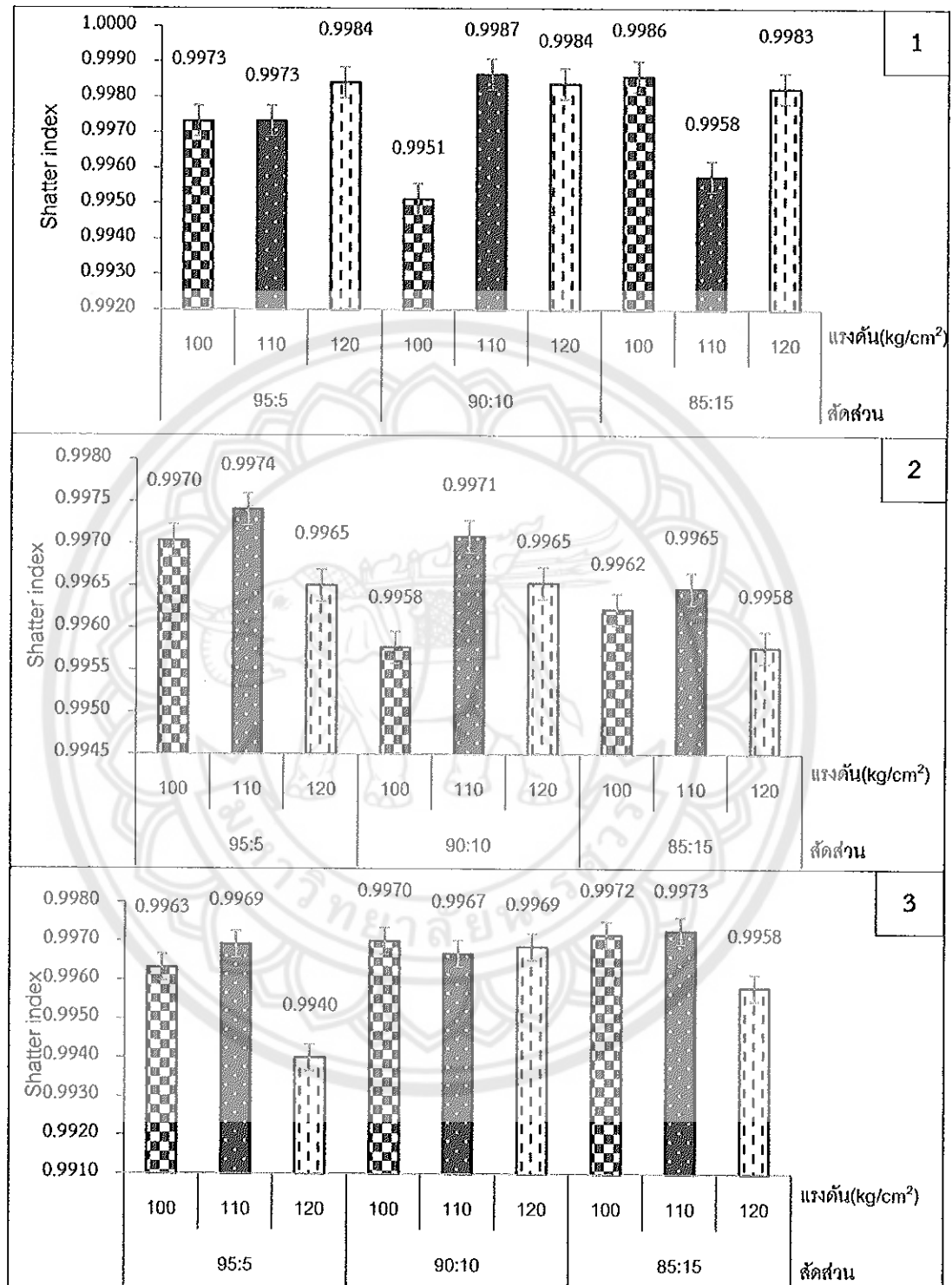
เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผสมตะกอนพลาสติกชนิด PET กับซีลี้อยู่ในรูปแคลิปต์ส ที่มีค่า DSI ดีที่สุด ได้แก่ S. 88 ซึ่งมีค่า DSI ของอุณหภูมิในการอัดเหมาะสมที่สุด แสดงดังภาพ 24 (2) โดยมีอัตราส่วนตะกอนพลาสติกชนิด PET: ซีลี้อยู่ในรูปแคลิปต์ส 95:5 สภาวะการอัดที่อุณหภูมิ 85 °C แรงดัน 100 kg/cm² เวลา 2 นาที S. 94 ซึ่งมีค่า DSI ของเวลาในการอัดเหมาะสมที่สุด แสดงดังภาพ 25 (2) โดยมีอัตราส่วนตะกอนพลาสติกชนิด PET: ซีลี้อยู่ในรูปแคลิปต์ส 95:5 สภาวะการอัดที่อุณหภูมิ 100 °C แรงดัน 100 kg/cm² เวลา 1 นาที S. 124 ซึ่งมีค่า DSI ของแรงดันในการอัดเหมาะสมที่สุด แสดงดังภาพ 26 (2) โดยมีอัตราส่วนตะกอนพลาสติกชนิด PET: ซีลี้อยู่ในรูปแคลิปต์ส 95:5 สภาวะการอัดที่อุณหภูมิ 100 °C แรงดัน 110 kg/cm² เวลา 2 นาที ซึ่งมีค่า DSI อยู่ในช่วง 0.9973-0.9982 แสดงดังตาราง 14

เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผสมตะกอนพลาสติกชนิด PET กับขี้ข้าวโพดที่มีค่า DSI ดีที่สุด ได้แก่ S. 180 ซึ่งมีค่า DSI ของอุณหภูมิในการอัดเหมาะสมที่สุด แสดงดังภาพ 24 (3) โดยมีอัตราส่วนตะกอนพลาสติกชนิด PET: ขี้ข้าวโพด 85:15 สภาวะการอัดที่อุณหภูมิ 100 °C แรงดัน 100 kg/cm² เวลา 2 นาที S. 177 ซึ่งมีค่า DSI ของเวลาในการอัดเหมาะสมที่สุด แสดงดังภาพ 25 (3) โดยมีอัตราส่วนตะกอนพลาสติกชนิด PET: ขี้ข้าวโพด 85:15 สภาวะการอัดที่อุณหภูมิ 100 °C แรงดัน 100 kg/cm² เวลา 1 นาที S. 207 ซึ่งมีค่า DSI ของแรงดันในการอัดเหมาะสมที่สุด แสดงดังภาพ 26 (3) โดยมีอัตราส่วนตะกอนพลาสติกชนิด PET: ขี้ข้าวโพด 85:15 สภาวะการอัดที่อุณหภูมิ 100 °C แรงดัน 110 kg/cm² เวลา 2 นาที ซึ่งมีค่า DSI อยู่ในช่วง 0.9972-0.9977 แสดงดังตาราง 14 ซึ่งเห็นว่าสภาวะการอัดมีผลต่อความคงทนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดโดยที่อุณหภูมิในช่วง 75-100 °C ในการอัดเม็ดมีผลทำให้ค่าความชื้นของเชื้อเพลิงอัดเม็ดลดลง ทั้งนี้ในระหว่างการอัดเม็ดในช่วงอุณหภูมิดังกล่าว มีผลทำให้เส้นใยลิกนินและโปรตีนในชีวมวลเกิดการอ่อนตัวและสร้างพันธะที่แข็งแกร่ง (Solid bridge formation) ระหว่างพันธะในชีวมวลทำให้เส้นใยลิกนินในชีวมวลเกิดการยึดเกาะตัวกันต่ำเกิดการสูญเสียโครงสร้างในชีวมวลทำให้มีการสลายตัว สามารถเพิ่มแรงอัดในการอัดเม็ดได้ทำให้เชื้อเพลิงมีการอัดแน่นและยึดเกาะกันเป็นเม็ดได้ดี (Nguyen et al., 2014) นอกจากนี้ถ้ามีค่าความชื้นสูงส่งผลทำให้พลาสติกเกิดการหลอมตัวต่ำ (Glass transition) ไม่เกิดการหลอมรวมและยึดเกาะกับชีวมวลทำให้เชื้อเพลิงอัดเม็ดมีค่าความคงทนต่ำและแตกหักได้ง่าย (Arnavat et al., 2015)



ภาพ 25 ผลการทดสอบ Shatter index ของเวลาในการอัดเชื้อเพลิงอัดเม็ด

- (1) ผสมตะกอนพลาสติกชนิด PET: ที่เสี้ยนไม้สัก
- (2) ตะกอนพลาสติกชนิด PET: ที่เสี้ยนไม้ยูคาลิปตัส
- (3) ผสมตะกอนพลาสติกชนิด PET: ซึ่งข้าวโพด



ภาพ 26 ผลการทดสอบ Shatter index ของแรงดันในการอัดเชื้อเพลิงอัดเม็ด

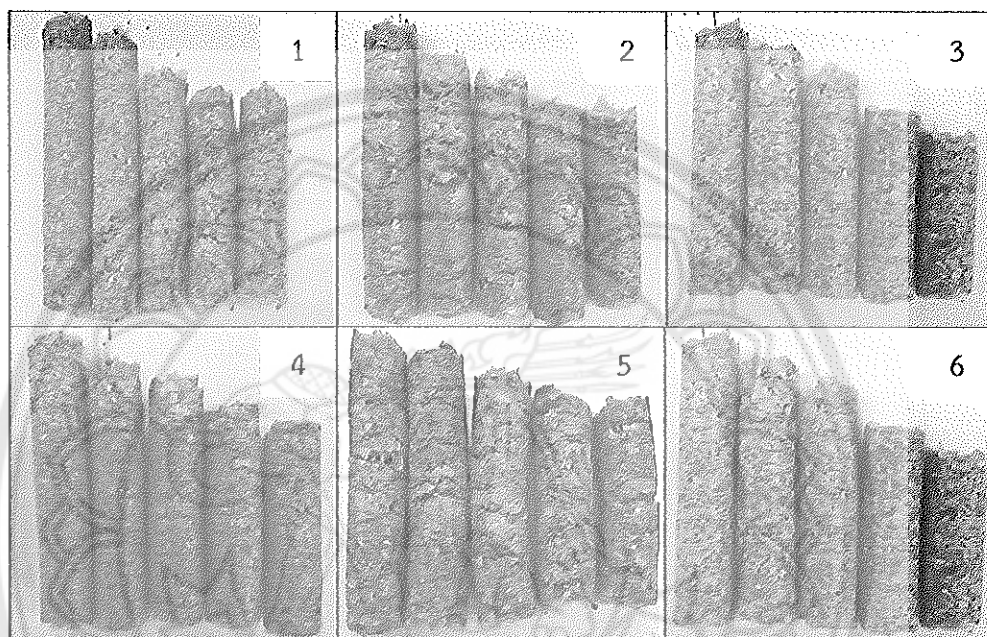
- (1) ผสมตะกอนพลาสติกชนิด PET: ไม้สับ
- (2) ตะกอนพลาสติกชนิด PET: ไม้ยูคาลิปตัส
- (3) ผสมตะกอนพลาสติกชนิด PET: ขี้ข้าวโพด

ตาราง 15 ค่าดัชนีความคงทนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดหลังการทอริแฟคชัน

ตัวอย่าง	ตะกอนพลาสติกชนิด PET:ซีเลื่อยไม้สัก	ตะกอนพลาสติกชนิด PET:ซีเลื่อยไม้ยูคาลิปตัส	ตะกอนพลาสติกชนิด PET:ซังข้าวโพด
เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่มีสภาวะการทอริแฟคชันดีที่สุด			
ชนิดตัวอย่าง	S.18	S.94	S.180
อัตราส่วน	85:15	95:5	85:15
อุณหภูมิ (°C)	225	190	170
อัตราการป้อน	1	6	1
อากาศ (L/min)	1	6	1
เวลา (นาที่)	10	10	10
DSI	0.9999 ±0.0001	0.9994±0.0003	0.9997±0.0004

เมื่อนำเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่มีสภาวะการอัดดีที่สุดซึ่งมีค่า DSI ดีที่สุด มาผ่านการทอริแฟคชันพบว่า สภาวะการทอริแฟคชันที่อุณหภูมิ 225 °C อัตราการป้อนอากาศ 1 L/min เวลา 10 นาที ของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผสมตะกอนพลาสติกชนิด PET และซีเลื่อยไม้สักเป็น S. 18 มีค่า DSI ดีที่สุดเท่ากับ 0.9999 ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิม 0.9986 สภาวะการทอริแฟคชันที่อุณหภูมิ 190 °C อัตราการป้อนอากาศ 6 L/min เวลา 10 นาที ของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผสมตะกอนพลาสติกชนิด PET และซีเลื่อยไม้ยูคาลิปตัส เป็น S. 94 มีค่า DSI ดีที่สุดเท่ากับ 0.9994 ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิม 0.9973 ส่วนสภาวะการทอริแฟคชันที่อุณหภูมิ 170 °C อัตราการป้อนอากาศ 1 L/min เวลา 10 นาที ของเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผสมตะกอนพลาสติกชนิด PET และซังข้าวโพด เป็น S. 180 มีค่า DSI ดีที่สุดเท่ากับ 0.9997 ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิม 0.9972 แสดงดังตาราง 15 ซึ่งให้เห็นว่า สภาวะในการทอริแฟคชันมีผลต่อตะกอนพลาสติกชนิด PET เกิดการหลอมตัว (Glass transition) จากสถานะแข็งเปราะกลายเป็นสถานะที่มีลักษณะคล้ายยางที่เหนียว และหลอมรวมยึดเกาะกับชีวมวลในเชื้อเพลิงอัดเม็ด สอดคล้องกับงานวิจัยของ Ansah et al. (2016) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากขยะชุมชนเมืองหลังการไพโรไลซิส จากการศึกษาพบว่าอุณหภูมิในการทอริแฟคชัน 200-240 °C หรือ สูงกว่า 240 °C มีผลต่อการสลายตัวของเส้นใยลิกนิน เส้นใยเฮมิเซลลูโลส และเส้นใยเซลลูโลสในชีวมวล ในระหว่างการทอริแฟคชันและพลาสติกชนิด PET เกิดการหลอมตัว (Glass transition) ในลักษณะที่เหนียวและหลอมรวมกับ

ชีวมวล ทำให้เชื้อเพลิงที่ได้มีการยึดเกาะกันได้ดีและแตกร่วนน้อยลง ซึ่งเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งก่อนและหลังการทอริแฟคชันที่ได้มีค่า DSI เป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนดโดยมีค่ามากกว่า 0.95 (Tembe et al., 2014) เชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งก่อนและหลังการทอริแฟคชันที่มีค่า DSI ดีที่สุดแสดงดังภาพ 27



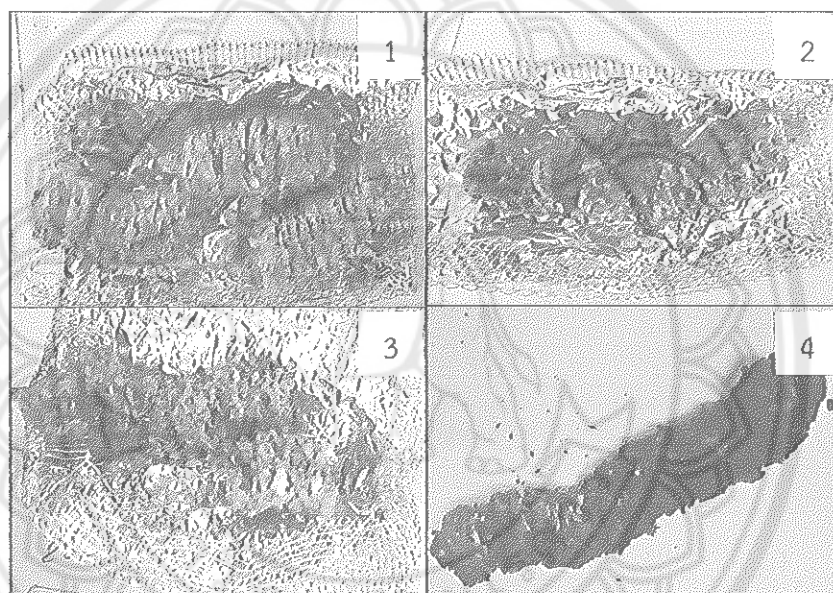
ภาพ 27 เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่มีค่า DSI ดีที่สุด

- (1) เชื้อเพลิงอัดเม็ด S.18 ก่อนการทอริแฟคชัน
- (2) เชื้อเพลิงอัดเม็ด S.94 ก่อนการทอริแฟคชัน
- (3) เชื้อเพลิงอัดเม็ด S.180 ก่อนการทอริแฟคชัน
- (4) เชื้อเพลิงอัดเม็ด S.18 หลังการทอริแฟคชัน
- (5) เชื้อเพลิงอัดเม็ด S.94 หลังการทอริแฟคชัน
- (6) เชื้อเพลิงอัดเม็ด S.180 หลังการทอริแฟคชัน

4. ผลของสภาวะการทอริแฟคชันเชื้อเพลิงอัดเม็ด

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาสภาวะของการทอริแฟคชันเชื้อเพลิงอัดเม็ดโดยศึกษาสภาวะของอุณหภูมิ อัตราการป้อนอากาศ และเวลาในการทอริแฟคชัน แสดงดังภาพ 28 เชื้อเพลิงอัดเม็ดภายใต้สภาวะการทอริแฟคชันต่างๆ จากการทดลองพบว่า สภาวะของอุณหภูมิ อัตราการป้อนอากาศ และเวลามีผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะของเชื้อเพลิงอัดเม็ด โดยอุณหภูมิตั้งแต่ 250 °C

เชื้อเพลิงอัดเม็ดมีลักษณะการแตกร่วน ตะกอนพลาสติกเริ่มขยายตัวและเกิดการหลอมละลายจึงทำให้เชื้อเพลิงอัดเม็ดไม่จับตัวกันเป็นก้อน แสดงดังภาพ 28 (2) และที่อุณหภูมิ 300 °C เชื้อเพลิงอัดเม็ดเกิดการไหม้และแตกร่วนไม่จับตัวกันเป็นก้อน แสดงดังภาพ 28 (4) ส่วนผลของระยะเวลาการทอริแฟคชันพบว่า เมื่อใช้ระยะเวลาในการทอริแฟคชันนานถึง 30 นาที มีผลทำให้เชื้อเพลิงอัดเม็ดเกิดการแตกร่วนมากขึ้นและไม่จับตัวกันเป็นก้อน แสดงดังภาพ 28 (3) นอกจากนี้เมื่อไม่มีอัตราการป้อนอากาศเข้าไปในระบบการทอริแฟคชันมีผลทำให้เชื้อเพลิงอัดเม็ดเกิดการแตกร่วนและไม่จับตัวกันเป็นก้อน แสดงดังภาพ 28 (1)



ภาพ 28 เชื้อเพลิงอัดเม็ดภายใต้สภาวะการทอริแฟคชันต่างๆ

- (1) เชื้อเพลิงอัดเม็ดในสภาวะการทอริแฟคชันอุณหภูมิ 150 °C อัตราการป้อนอากาศ 0 L/min เวลา 15 นาที
- (2) เชื้อเพลิงอัดเม็ดในสภาวะการทอริแฟคชันอุณหภูมิ 250 °C อัตราการป้อนอากาศ 4 L/min เวลา 15 นาที
- (3) เชื้อเพลิงอัดเม็ดในสภาวะการทอริแฟคชันอุณหภูมิ 250 °C อัตราการป้อนอากาศ 4 L/min เวลา 30 นาที
- (4) เชื้อเพลิงอัดเม็ดในสภาวะการทอริแฟคชันอุณหภูมิ 300 °C อัตราการป้อนอากาศ 4 L/min เวลา 15 นาที

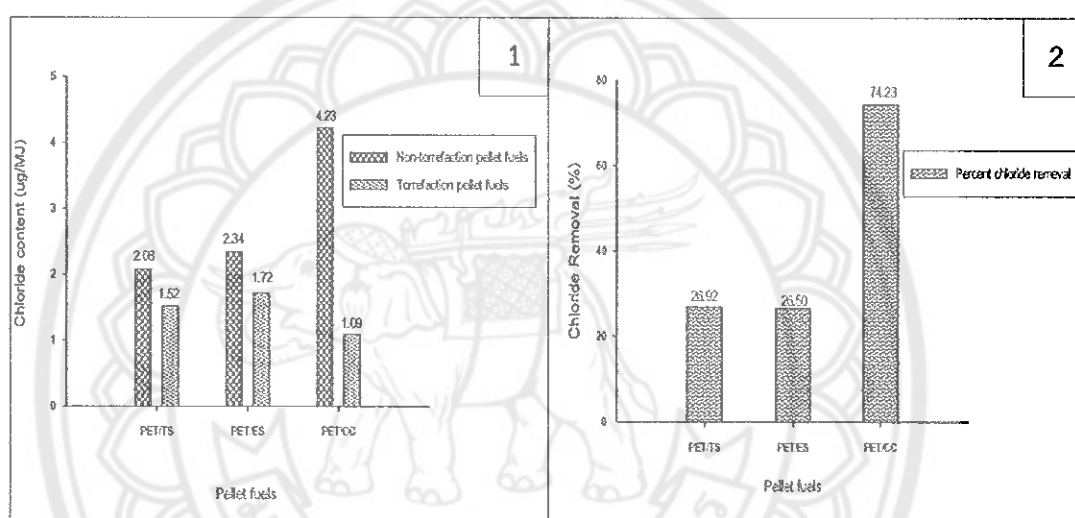
5. ปริมาณการปนเปื้อนคลอไรด์และปรอทของเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งก่อนและหลังการทอริแฟคชัน

ปริมาณคลอไรด์ที่ปนเปื้อนอยู่ในเชื้อเพลิงอัดเม็ดสามารถเปลี่ยนรูปไปเป็นไฮดรอกไซด์จำพวกกรดไฮโดรคลอริก และสารประกอบออร์กาโนคลอรีน (Organochlorine compound) ที่อยู่ในยาฆ่าแมลง ส่งผลทำให้เกิดการกักตัวของเตาเผาเชื้อเพลิงทำให้ชำรุดและเกิดการระเบิดของเตาเผาได้ (Casado et al., 2016) ในงานวิจัยจึงได้วิเคราะห์ค่าการปนเปื้อนคลอไรด์ในเชื้อเพลิงอัดเม็ด ทั้งก่อนและหลังการทอริแฟคชัน เพื่อให้ได้เชื้อเพลิงที่มีคุณภาพตามที่มาตรฐาน EN 15359:2011 กำหนด โดยการปนเปื้อนคลอไรด์ต้องมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 1.00 จากการศึกษาพบว่า เชื้อเพลิงอัดเม็ดก่อนการทอริแฟคชันมีค่าการปนเปื้อนคลอไรด์ในช่วง 46.52-92.41 $\mu\text{g/l}$ และเชื้อเพลิงอัดเม็ดหลังการทอริแฟคชันมีการปนเปื้อนคลอไรด์ในช่วง 23.64-33.28 $\mu\text{g/l}$ ทั้งนี้เชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งก่อนและหลังการทอริแฟคชันมีค่าร้อยละการปนเปื้อนคลอไรด์น้อยมาก ผู้วิจัยจึงเลือกใช้หน่วย $\mu\text{g/MJ}$ โดยเชื้อเพลิงอัดเม็ดก่อนทอริแฟคชันที่ผสมตะกอนพลาสติกชนิด PET กับซีลี้อยู่ไม้สก็มีค่าการปนเปื้อนคลอไรด์เท่ากับ 46.51 $\mu\text{g/l}$ หรือ 2.08 $\mu\text{g/MJ}$ เมื่อนำไปผ่านการทอริแฟคชันมีค่าคลอไรด์ปนเปื้อนลดลงเท่ากับ 33.28 $\mu\text{g/l}$ หรือ 1.52 $\mu\text{g/MJ}$ ซึ่งหลังการทอริแฟคชันมีการกำจัดคลอไรด์เท่ากับร้อยละ 26.92 เชื้อเพลิงอัดเม็ดก่อนทอริแฟคชันที่ผสมตะกอนพลาสติกชนิด PET กับซีลี้อยู่ไม้ยูคาลิปตัสมีค่าการปนเปื้อนคลอไรด์เท่ากับ 51.96 $\mu\text{g/l}$ หรือ 2.34 $\mu\text{g/MJ}$ เมื่อนำไปผ่านการทอริแฟคชันมีค่าคลอไรด์ปนเปื้อนลดลงเท่ากับ 37.25 $\mu\text{g/l}$ หรือ 1.72 $\mu\text{g/MJ}$ ซึ่งหลังการทอริแฟคชันมีการกำจัดคลอไรด์เท่ากับร้อยละ 26.50 ส่วนเชื้อเพลิงอัดเม็ดก่อนทอริแฟคชันที่ผสมตะกอนพลาสติกชนิด PET กับซังข้าวโพดมีค่าการปนเปื้อนคลอไรด์เท่ากับ 92.41 $\mu\text{g/l}$ หรือ 4.23 $\mu\text{g/MJ}$ เมื่อนำไปผ่านการทอริแฟคชันมีค่าคลอไรด์ปนเปื้อนลดลงเท่ากับ 23.64 $\mu\text{g/l}$ หรือ 1.09 $\mu\text{g/MJ}$ ซึ่งหลังการทอริแฟคชันมีการกำจัดคลอไรด์เท่ากับร้อยละ 74.23 แสดงดังภาพ 29 แสดงให้เห็นว่าการทอริแฟคชันสามารถระเหยคลอไรด์ออกจากเชื้อเพลิงอัดเม็ดได้ และค่าคลอไรด์ปนเปื้อนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งก่อนและหลังการทอริแฟคชันที่วิเคราะห์เป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด

ชี้ให้เห็นว่าการทอริแฟคชันมีผลต่อการกำจัดปริมาณคลอไรด์ในเชื้อเพลิงอัดเม็ด ซึ่งสามารถระเหยคลอไรด์ออกจากเชื้อเพลิงอัดเม็ด หรือ ทำให้องค์ประกอบคลอไรด์ที่อยู่ในตะกอนพลาสติกชนิด PET จับตัวกับ Na และ K ที่อยู่ในชีวมวลเปลี่ยนไปเป็นองค์ประกอบอื่น เช่น สารประกอบแอลคาไรด์ (KCl) และ เกลือคลอไรด์ (NaCl) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Wang et al. (2018) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับองค์ประกอบคลอไรด์ที่อยู่ในเศษอาหารหลังการทอริแฟคชันจากการศึกษาพบว่า อุณหภูมิ 250-350 $^{\circ}\text{C}$ ในการทอริแฟคชันมีผลทำให้ปริมาณ

คลอไรด์ในตัวอย่างลดลง เนื่องจากองค์ประกอบคลอไรด์ได้เปลี่ยนรูปไปเป็น NaCl และ KCl ในเชื้อเพลิงอัดเม็ด และ NaCl สามารถทำปฏิกิริยากับกลุ่มคาร์บอกซิล และมีการระเหยของคลอไรด์ และ คลอไรด์สามารถไปจับตัวกับองค์ประกอบคาร์บอนในชีวมวลที่อยู่ในเชื้อเพลิงอัดเม็ด หลังจากนั้นเปลี่ยนรูปเป็น C-Cl เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่เห็นว่าการทอริแฟคชันสามารถลดปริมาณคลอไรด์ในเชื้อเพลิงอัดเม็ดได้

การทดสอบปริมาณปรอทด้วยเทคนิคไอออนโครมาโทกราฟีพบว่า ไม่สามารถตรวจพบค่าการปนเปื้อนปรอทของเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งก่อนและหลังการทอริแฟคชัน แสดงดังตาราง 16



ภาพ 29 ค่าการปนเปื้อนคลอไรด์ในเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งก่อนและหลังการทอริแฟคชันและค่าร้อยละการกำจัดคลอไรด์ปนเปื้อนออกจากเชื้อเพลิงอัดเม็ด PET/TS (ตะกอนพลาสติกชนิด PET/ซีลื้อยไม้สัก) PET/ES (ตะกอนพลาสติกชนิด PET/ซีลื้อยไม้ยูคาลิปตัส) (1) ค่าการปนเปื้อนคลอไรด์ในเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งก่อนและหลังการทอริแฟคชัน (2) ค่าร้อยละการกำจัดคลอไรด์ปนเปื้อนออกจากเชื้อเพลิงอัดเม็ด PET/TS (ตะกอนพลาสติกชนิด PET/ซีลื้อยไม้สัก) PET/ES (ตะกอนพลาสติกชนิด PET/ซีลื้อยไม้ยูคาลิปตัส) และ PET/CC (ตะกอนพลาสติกชนิด PET/ซังข้าวโพด) หลังการทอริแฟคชัน

ตาราง 16 ค่าการปนเปื้อนปรอทของเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งก่อนและหลังการทอริแฟคชัน

เชื้อเพลิงอัดเม็ด	ตัวอย่าง		
	PET:ซีเลื่อยไม้สัก	PET:ซีเลื่อยไม้ยูคาลิปตัส	PET:ซังข้าวโพด
ก่อนทอริแฟคชัน	N.D.	N.D.	N.D.
หลังทอริแฟคชัน	N.D.	N.D.	N.D.

หมายเหตุ: N.D.(Not Detected)=ตรวจไม่พบ

6. ปริมาณก๊าซเสีย (Flue gas) ที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งก่อนและหลังการทอริแฟคชัน

ในการเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์การเกิดก๊าซเสียได้แก่ O_2 , CO_2 , CO , NOx , H_2 และ SO_2 เป็นต้น ซึ่งจะดำเนินการโดยหยอดตัวอย่างลงในเตาเผาที่อุณหภูมิ $850^\circ C$ ช่วงเวลาละ 3 นาที โดยใช้เวลาหยอดตัวอย่างทั้งหมด 30 นาที และตรวจวัดตัวอย่างก๊าซช่วงละ 5 นาทีจนถึง 30 นาที โดยใช้เครื่อง Flue gas analyzer ในการตรวจวัด จากการศึกษพบว่า เชื้อเพลิงอัดเม็ดผสมตะกอนพลาสติกชนิด PET กับซีเลื่อยไม้สักหรือ S. 18 ก่อนการทอริแฟคชันในช่วงเวลา 5-30 นาที มีปริมาณ O_2 อยู่ในช่วงเฉลี่ยร้อยละ $6.47 \pm 0.12 - 9.90 \pm 0.26$ CO_2 อยู่ในช่วงเฉลี่ยร้อยละ $2.54 \pm 0.27 - 5.50 \pm 0.15$ CO อยู่ในช่วงเฉลี่ย $1,435.80 \pm 220.99 - 4,771.80 \pm 176.15$ ppm NOx รวม อยู่ในช่วงเฉลี่ย $106.54 \pm 9.37 - 289.82 \pm 93.29$ ppm H_2 อยู่ในช่วงเฉลี่ย $816.00 \pm 75.25 - 2,882.00 \pm 35.05$ ppm และตรวจไม่พบปริมาณ SO_2 เชื้อเพลิงอัดเม็ดผสมตะกอนพลาสติกชนิด PET กับซีเลื่อยไม้ยูคาลิปตัสหรือ S. 94 ก่อนการทอริแฟคชันในช่วงเวลา 5-30 นาที มีปริมาณ O_2 อยู่ในช่วงเฉลี่ยร้อยละ $5.61 \pm 1.92 - 11.06 \pm 0.75$ CO_2 อยู่ในช่วงเฉลี่ยร้อยละ $1.92 \pm 0.61 - 8.09 \pm 0.43$ CO อยู่ในช่วงเฉลี่ย $1,134.60 \pm 230.20 - 5,410.20 \pm 1,835.55$ ppm NOx รวม อยู่ในช่วงเฉลี่ย $47.18 \pm 7.86 - 108.08 \pm 3.97$ ppm H_2 อยู่ในช่วงเฉลี่ย $324.20 \pm 87.71 - 525.60 \pm 27.31$ ppm และตรวจไม่พบปริมาณ SO_2 เชื้อเพลิงอัดเม็ดผสมตะกอนพลาสติกชนิด PET กับซังข้าวโพดหรือ S. 180 ก่อนการทอริแฟคชันในช่วงเวลา 5-30 นาที มีปริมาณ O_2 อยู่ในช่วงเฉลี่ยร้อยละ $4.71 \pm 1.2 - 7.50 \pm 0.30$ CO_2 อยู่ในช่วงเฉลี่ยร้อยละ $2.76 \pm 0.06 - 9.91 \pm 0.06$ CO อยู่ในช่วงเฉลี่ย $1,500.60 \pm 79.77 - 15,361.40 \pm 3982.98$ ppm NOx รวม อยู่ในช่วงเฉลี่ย $47.14 \pm 10.26 - 133.30 \pm 5.55$ ppm H_2 อยู่ในช่วงเฉลี่ย $1,119.40 \pm 104.52 - 18,603.60 \pm 1,527.22$ ppm และตรวจไม่พบปริมาณ SO_2 ดังแสดงในตาราง

ปริมาณก๊าซเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงอัดเม็ดหลังการทอริแฟคชันพบว่า เชื้อเพลิงอัดเม็ดผสมตะกอนพลาสติกชนิด PET กับขี้เลื่อยไม้สักหรือ S. 18 หลังการทอริแฟคชันในช่วงเวลา 5-30 นาที มีปริมาณ O_2 อยู่ในช่วงเฉลี่ยร้อยละ 8.14 ± 0.08 - 11.85 ± 0.02 CO_2 อยู่ในช่วงเฉลี่ยร้อยละ 2.25 ± 0.41 - 3.87 ± 0.34 CO อยู่ในช่วงเฉลี่ย $6,661.40 \pm 888.05$ - $12,220.40 \pm 2,761.97$ ppm NO_x รวม อยู่ในช่วงเฉลี่ย 81.38 ± 45.72 - 152.24 ± 24.43 ppm H_2 อยู่ในช่วงเฉลี่ย $9,311.00 \pm 585.32$ - $26,326.20 \pm 607.71$ ppm และตรวจไม่พบปริมาณ SO_2 เชื้อเพลิงอัดเม็ดผสมตะกอนพลาสติกชนิด PET กับขี้เลื่อยไม้ยูคาลิปตัสหรือ S. 94 หลังการทอริแฟคชันในช่วงเวลา 5-30 นาที มีปริมาณ O_2 อยู่ในช่วงเฉลี่ยร้อยละ 10.14 ± 0.71 - 10.90 ± 0.34 CO_2 อยู่ในช่วงเฉลี่ยร้อยละ 2.32 ± 0.74 - 4.09 ± 1.09 CO อยู่ในช่วงเฉลี่ย $11,312.20 \pm 3,499.77$ - $14,111.40 \pm 5,240.36$ ppm NO_x รวม อยู่ในช่วงเฉลี่ย 65.74 ± 12.31 - 147.64 ± 14.03 ppm H_2 อยู่ในช่วงเฉลี่ย $16,734.00 \pm 4,658.54$ - $23,012.40 \pm 964.35$ ppm และตรวจไม่พบปริมาณ SO_2 เชื้อเพลิงอัดเม็ดผสมตะกอนพลาสติกชนิด PET กับขี้ข้าวโพดหรือ S. 180 หลังการทอริแฟคชันในช่วงเวลา 5-30 นาที มีปริมาณ O_2 อยู่ในช่วงเฉลี่ยร้อยละ 11.00 ± 0.39 - 11.59 ± 0.31 CO_2 อยู่ในช่วงเฉลี่ยร้อยละ 0.91 ± 0.04 - 3.98 ± 1.02 CO อยู่ในช่วงเฉลี่ย $1,175.60 \pm 135.90$ - $1,502.20 \pm 113.93$ ppm NO_x รวม อยู่ในช่วงเฉลี่ย 56.42 ± 5.13 - 70.08 ± 7.94 ppm H_2 อยู่ในช่วงเฉลี่ย 601.60 ± 3.10 - $15,076.60 \pm 575.30$ ppm และตรวจไม่พบปริมาณ SO_2 แสดงดังตาราง 17

ตาราง 17 ปริมาณก๊าซเสียที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งก่อนและหลังการทอริแฟคชัน

ตัวอย่าง	ช่วงเวลา(นาที)	O ₂ (%)	CO ₂ (%)	CO(ppm)	NOx(ppm)	H ₂ (ppm)	SO ₂ (ppm)
เชื้อเพลิงอัดเม็ดก่อนการทอริแฟคชัน							
PET:	5-10	9.36±0.44	3.55±0.19	2,613.60±262.01	289.82±93.29	1,271.60±274.84	N.D.
ขี้เลื่อยไม้สัก	15-20	9.90±0.26	2.54±0.27	4,771.80±176.15	106.54±9.37	2,882.00±35.05	N.D.
	25-30	6.47±0.12	5.50±0.15	1,435.80±220.99	220.24±2.76	816.00±75.25	N.D.
PET:	5-10	11.06±0.75	1.92±0.61	1,134.60±230.20	68.66±11.25	324.20±67.71	N.D.
ขี้เลื่อยไม้ยูคาลิปตัส	15-20	5.61±1.92	8.09±0.43	14,579.60±959.72	47.18±7.86	1,232.60±260.12	N.D.
	25-30	9.11±0.58	4.66±1.90	5,410.20±1,835.55	108.08±3.97	525.60±27.31	N.D.
PET:	5-10	4.71±1.2	9.91±0.06	10,603.00±3,483.41	75.64±2.78	18,603.60±1,527.22	N.D.
ขี้ข้าวโพด	15-20	7.35±1.05	2.76±0.06	15,361.40±3982.98	47.14±10.26	10,064.60±1,256.41	N.D.
	25-30	7.50±0.30	6.60±0.62	1,500.60±79.77	133.30±5.55	1,119.40±104.52	N.D.
เชื้อเพลิงอัดเม็ดหลังการทอริแฟคชัน							
PET:	5-10	10.39±0.44	2.25±0.41	6,661.40±888.05	152.24±24.43	26,326.20±607.71	N.D.
ขี้เลื่อยไม้สัก	15-20	11.85±0.02	2.34±0.90	12,220.40±2,761.97	143.56±15.56	21,238.80±1,129.57	N.D.
	25-30	8.14±0.08	3.87±0.34	10,364.80±1,676.40	81.38±45.72	9,311.00±585.32	N.D.
PET:	5-10	10.61±0.29	4.09±1.09	11,587.60±5,772.49	147.64±14.03	23,012.40±964.35	N.D.
ขี้เลื่อยไม้ยูคาลิปตัส	15-20	10.14±0.71	2.32±0.74	11,312.20±3,499.77	141.30±4.02	16,734.00±4,658.54	N.D.
	25-30	10.90±0.34	3.46±0.72	14,111.40±5,240.36	65.74±12.31	19,644.20±2,876.023	N.D.
PET:	5-10	11.59±0.31	1.19±0.15	1,175.60±135.90	56.42±5.13	601.60±3.10	N.D.
ขี้ข้าวโพด	15-20	11.00±0.39	3.98±1.02	12,813.80±1,826.60	70.08±7.94	15,076.60±575.30	N.D.
	25-30	11.55±0.01	0.91±0.04	1,502.20±113.93	60.76±1.7	1,038.20±65.06	N.D.

หมายเหตุ: N.D.(Not Detected)=ตรวจไม่พบ

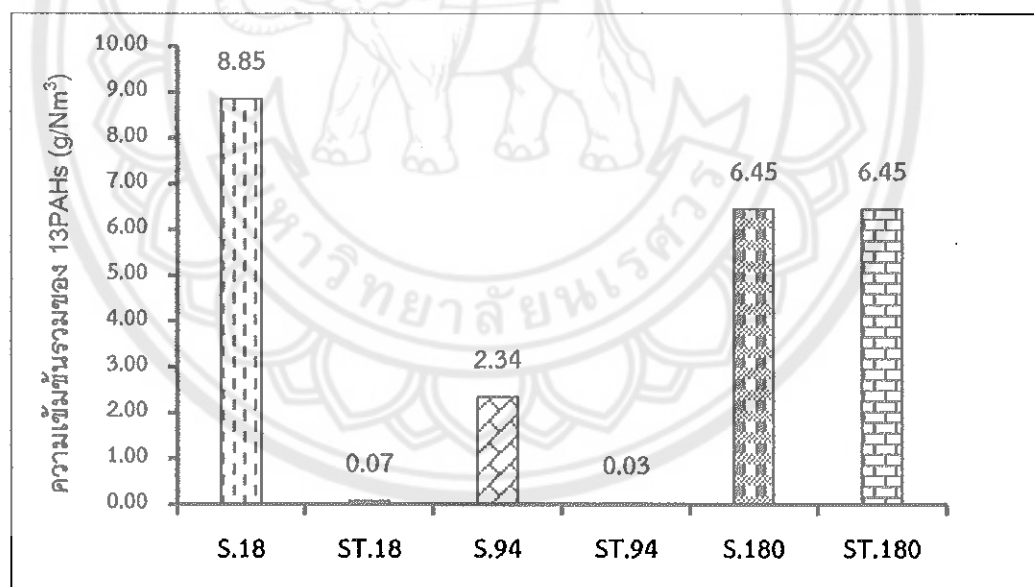
ทั้งนี้การที่ปริมาณ CO และ H₂ จากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงอัดเม็ดหลังการทอริแฟคชัน S. 18 และ S. 94 เพิ่มขึ้นเนื่องจากมีองค์ประกอบของ O/C และ H/C ต่ำกว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดก่อนการทอริแฟคชัน S. 18 และ S. 94 หรือเกิดจากปริมาณออกซิเจนมีส่วนทำให้เกิดการออกซิเดชันของ CO แล้วผลิตเป็น H₂ และ CO₂ ส่วนปริมาณ CO₂ ที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงอัดเม็ดหลังการทอริแฟคชัน S. 18, S. 94 และ S. 180 มีปริมาณ CO₂ ลดลง และ ปริมาณ O₂ และ H₂ เพิ่มขึ้นเนื่องจาก O₂ และ H₂ เผาไหม้ไม่หมด จึงทำให้มีปริมาณของ CO₂ ลดลง (Ibeto et al., 2017) ทั้งนี้ปริมาณ CO ที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงอัดเม็ดหลังการทอริแฟคชัน S. 180 มีปริมาณที่ลดลง เป็นผลมาจากปริมาณของออกซิเจนในตัวอย่าง หรือเกิดการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการเผาไหม้และก๊าซเสียหรืออาจเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณสารระเหยที่ออกมาจากชีวมวล (Myläri et al., 2016) ปริมาณ NO_x จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงอัดเม็ดหลังการทอริแฟคชัน S. 94 มีปริมาณที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากปริมาณไนโตรเจนของวัตถุดิบตั้งต้น (ตะกอนพลาสติกชนิด PET และ ซีล้อยไม้ยูคาลิปตัส) มีอยู่มาก (Xiao et al., 2015) และในระหว่างการทอริแฟคชันระยะเวลา 10 นาที อาจยังไม่สามารถระเหยไนโตรเจน ออกจากเชื้อเพลิงอัดเม็ดจนหมดและอาจเป็นเพราะเกิดการสูญเสียของปริมาณสารระเหยในเชื้อเพลิงอัดเม็ด จึงทำให้มีปริมาณของไนโตรเจนเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ในระหว่างการเผาไหม้เกิด NO_x เพิ่มขึ้น (Lasek et al., 2017) ส่วนปริมาณ O₂ ที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงอัดเม็ดหลังการทอริแฟคชัน S. 18, S. 94 และ S. 180 มีปริมาณเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วงร้อยละ 8-11 ซึ่งมีปริมาณ O₂ จากการเผาไหม้น้อยกว่าร้อยละ 30 มีผลต่อการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง เนื่องจากถ้ามี O₂ มากเกินไปอาจทำให้อุณหภูมิในการเผาไหม้ลดลง ทำให้มีค่าความชื้นสูงจึงทำให้เกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์จากการที่มี O₂ มากเกินไป (Sung et al., 2018)

7. ปริมาณ 13PAHs และ BTEX ที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งก่อนและหลังการทอริแฟคชัน

ในการเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณ 13PAHs และ BTEX จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งก่อนและหลังการทอริแฟคชัน จะดำเนินการหยอดตัวอย่างลงในเตาเผาที่อุณหภูมิ 850 °C ช่วงเวลาละ 3 นาที โดยใช้เวลาหยอดตัวอย่างทั้งหมด 30 นาที และจะเก็บตัวอย่าง 13PAHs และ BTEX ช่วงเวลาละ 5 นาที จนถึง 30 นาที เช่นเดียวกับการเก็บตัวอย่างวิเคราะห์การเกิดก๊าซเสีย จากการศึกษาพบว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดผสมตะกอนพลาสติกชนิด PET กับซีล้อยไม้สักหรือ S. 18 ก่อนการทอริแฟคชันมีปริมาณความเข้มข้นรวมของ 13PAHs เฉลี่ย 8.85 g/Nm³ หลังการทอริแฟคชันพบว่า มีปริมาณความเข้มข้นรวมของ 13PAHs ลดลงเฉลี่ย 0.07 g/Nm³ เชื้อเพลิงอัดเม็ดผสมตะกอนพลาสติกชนิด PET กับซีล้อยไม้ยูคาลิปตัสหรือ S. 94

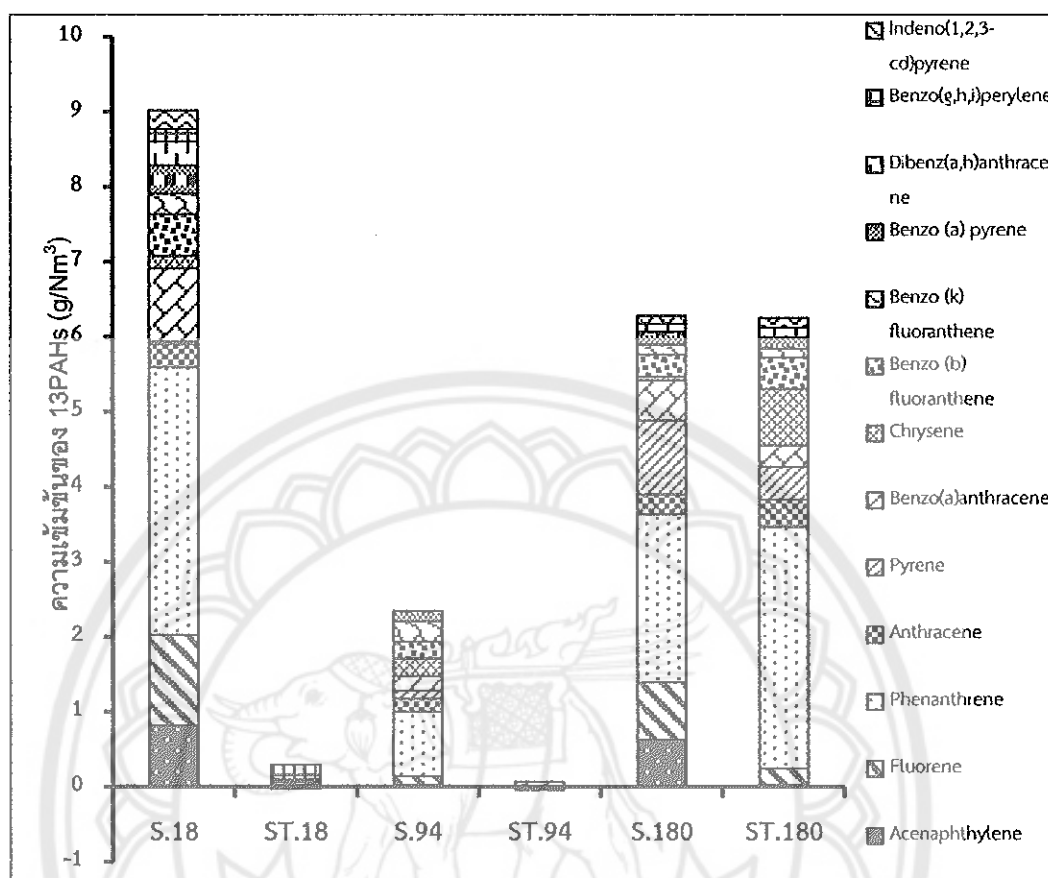
ก่อนการทอริแฟคชันมีปริมาณความเข้มข้นรวมของ 13PAHs เฉลี่ย 2.34 g/Nm^3 หลังการทอริแฟคชันพบว่า มีปริมาณความเข้มข้นรวมของ 13PAHs ลดลงเฉลี่ย 0.03 g/Nm^3 ส่วนเชื้อเพลิงอัดเม็ดผสมตะกอนพลาสติกกับขี้ข้าวโพดหรือ S. 180 ทั้งก่อนและหลังการทอริแฟคชันมีปริมาณความเข้มข้นรวมของ 13PAHs ไม่เปลี่ยนแปลงเฉลี่ย 6.45 g/Nm^3 แสดงดังภาพ 30

ทั้งนี้เชื้อเพลิงอัดเม็ดหลังการทอริแฟคชันมีปริมาณ 13PAHs ลดลงชี้ให้เห็นว่าการทอริแฟคชันมีผลต่อการลดปริมาณ 13PAHs เนื่องจากสภาวะของการทอริแฟคชันมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างพันธะอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนของตะกอนพลาสติกชนิด PET และเส้นใยเซลลูโลสโดยการสลายโครงสร้างของพันธะอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนในชีวมวล จะทำให้สารประกอบแอลิแฟติกในเซลลูโลสเกิดการสลายพันธะเปลี่ยนเป็นสารประกอบเฟอร์ฟูรัล (Lee et al., 2016) นอกจากนี้การทอริแฟคชันสามารถทำให้สารประกอบพวก แนพทาซีน อะซีแนปทิลีน และ ฟีนานทรีน ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของ 13PAHs ลดลง (Recari et al., 2017)



ภาพ 30 ความเข้มข้นรวมของ 13PAHs ในเชื้อเพลิงอัดเม็ดก่อนและหลังการทอริแฟคชัน

S.18; PET:ชี้อยไม้สัก ก่อนการทอริแฟคชัน S.94; PET:ชี้อยไม้ยูคาลิปตัส ก่อนการทอริแฟคชัน S.180; PET:ขี้ข้าวโพด ก่อนการทอริแฟคชัน ST.18; PET:ชี้อยไม้สัก หลังการทอริแฟคชัน ST.94; PET:ชี้อยไม้ยูคาลิปตัส หลังการทอริแฟคชัน และ ST.180; PET:ขี้ข้าวโพด หลังการทอริแฟคชัน

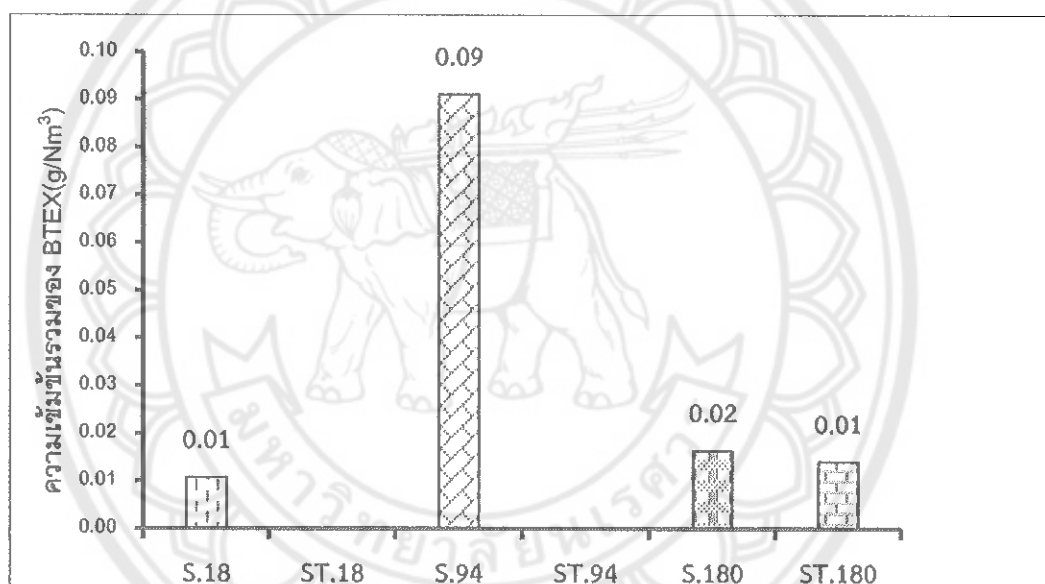


ภาพ 31 สัดส่วนของ Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) แต่ละชนิดในเชื้อเพลิงอัดเม็ดก่อนและหลังการทอรีแฟคชัน

S.18; PET:ซีเลื่อยไม้สัก ก่อนการทอรีแฟคชัน S.94; PET:ซีเลื่อยไม้ยูคาลิปตัส ก่อนการทอรีแฟคชัน S.180; PET:ซีเลื่อยไม้ยูคาลิปตัส ก่อนการทอรีแฟคชัน ST.18; PET:ซีเลื่อยไม้สัก หลังการทอรีแฟคชัน ST.94; PET:ซีเลื่อยไม้ยูคาลิปตัส หลังการทอรีแฟคชัน และ ST.180; PET:ซีเลื่อยไม้ยูคาลิปตัส หลังการทอรีแฟคชัน

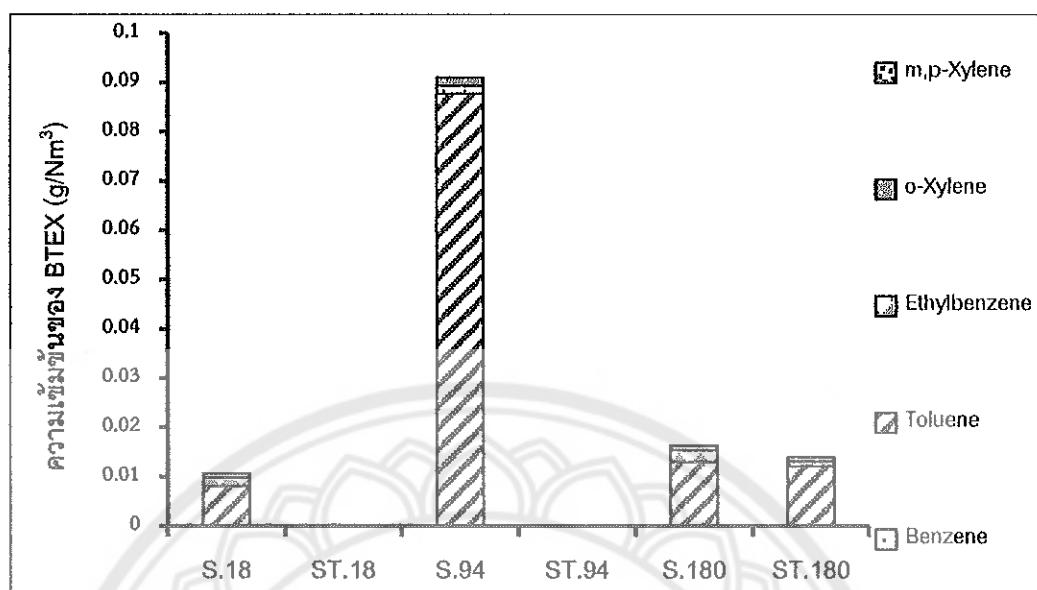
ปริมาณ BTEX จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งก่อนและหลังการทอรีแฟคชันพบว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดผสมตะกอนพลาสติกชนิด PET กับซีเลื่อยไม้สักหรือ S. 18 ก่อนการทอรีแฟคชันมีปริมาณความเข้มข้นรวมของ BTEX เฉลี่ย 0.01 g/Nm^3 หลังการทอรีแฟคชันตรวจไม่พบปริมาณความเข้มข้นรวมของ BTEX เชื้อเพลิงอัดเม็ดผสมตะกอนพลาสติกชนิด PET กับซีเลื่อยไม้ยูคาลิปตัสหรือ S. 94 ก่อนการทอรีแฟคชันมีปริมาณความเข้มข้นรวมของ BTEX เฉลี่ย 0.09 g/Nm^3 หลังการทอรีแฟคชันตรวจไม่พบปริมาณความเข้มข้นรวมของ BTEX ส่วนเชื้อเพลิงอัดเม็ดผสมตะกอนพลาสติกกับซีเลื่อยไม้ยูคาลิปตัสหรือ S. 180 ก่อนการทอรีแฟคชันมีปริมาณความเข้มข้นรวมของ BTEX เฉลี่ย 0.02 g/Nm^3 หลังการทอรีแฟคชันมีปริมาณความเข้มข้นรวมของ

BTEX ลดลงเฉลี่ย 0.01 g/Nm^3 แสดงดังภาพ 32 ซึ่งให้เห็นว่าอุณหภูมิในการทอริแฟคชัน $210\text{-}270^\circ\text{C}$ มีผลต่อการสลายตัวของสารองค์ประกอบ ฟีนอลิก (Phenolic) ของเส้นใยลิกนินในชีวมวล สามารถระเหยกลายเป็น BTEX มีผลทำให้เกิดการสลายตัวของโครงสร้างพันธะเคมีในเส้นใยลิกนิน (Cleavage of ether linkages and demethoxylation) โดยเกิดการสลายตัวของกลุ่มเมทิล (Methyl group; CH_3) ออกจากโมเลกุลในเส้นใยลิกนินซึ่งจะสูญเสียองค์ประกอบคาร์บอน 1 อะตอม และไฮโดรเจน 2 อะตอมเหลือไฮโดรเจน 1 อะตอม เมื่อใช้อุณหภูมิในการทอริแฟคชันไปเผาที่อุณหภูมิ 850°C จึงตรวจพบ BTEX มีปริมาณลดลง (Zhanga et al., 2018)



ภาพ 32 ความเข้มข้นรวมของ BTEX ในเชื้อเพลิงอัดเม็ดก่อนและหลังการทอริแฟคชัน

S.18; PET:ซีเลื่อยไม้สัก ก่อนการทอริแฟคชัน S.94; PET:ซีเลื่อยไม้ยูคาลิปตัส ก่อนการทอริแฟคชัน S.180; PET:รังข้าวโพด ก่อนการทอริแฟคชัน ST.18; PET:ซีเลื่อยไม้สัก หลังการทอริแฟคชัน ST.94; PET:ซีเลื่อยไม้ยูคาลิปตัส หลังการทอริแฟคชัน และ ST.180; PET:รังข้าวโพด หลังการทอริแฟคชัน



ภาพ 33 สัดส่วนของ BTEX ในเชื้อเพลิงอัดเม็ดก่อนและหลังการทอริแฟคชัน

S.18; PET:ซีล้อยไม้สัก ก่อนการทอริแฟคชัน S.94; PET:ซีล้อยไม้ยูคาลิปตัส ก่อนการทอริแฟคชัน S.180; PET:ซังข้าวโพด ก่อนการทอริแฟคชัน ST.18; PET:ซีล้อยไม้สัก หลังการทอริแฟคชัน ST.94; PET:ซีล้อยไม้ยูคาลิปตัส หลังการทอริแฟคชัน และ ST.180; PET:ซังข้าวโพดหลังการทอริแฟคชัน

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

1. สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งก่อนและหลังการทอริแฟคชัน เพื่อหาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมี คุณสมบัติเชิงพลังงานความร้อน ปริมาณการปนเปื้อนปรอทและคลอไรด์ และทดสอบการเผาไหม้มลพิษอากาศ จากการศึกษาพบว่า สมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงอัดเม็ดเมื่อนำไปผ่านการทอริแฟคชัน มีปริมาณความชื้นลดลงอยู่ในช่วงเฉลี่ยร้อยละ 0.07-0.17 และมีปริมาณสารระเหยลดลงอยู่ในช่วงเฉลี่ยร้อยละ 97.66-98.07 แสดงให้เห็นว่าการทอริแฟคชันสามารถระเหยความชื้นและปริมาณสารระเหยออกจากเชื้อเพลิงอัดเม็ดได้ ในการวิเคราะห์ค่าความร้อนด้วยเครื่อง Bomb calorimeter พบว่า เชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งก่อนและหลังการทอริแฟคชันมีค่าความร้อนสูงกว่าวัตถุดิบตั้งต้น (ตะกอนพลาสติกชนิด PET ชี้อย่อยไม้สัก ชี้อย่อยไม้ยูคาลิปตัส และขี้ข้าวโพด) ประมาณ 21-22 MJ/kg ซึ่งมีค่าความร้อนเป็นไปตามที่มาตรฐาน EN 15359:2011 กำหนด ทั้งนี้ในการให้ค่าพลังงานความร้อนเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผลิตจากตะกอนพลาสติกชนิด PET กับชี้อย่อยไม้สักในอัตราส่วน 85:15 สามารถให้ค่าความร้อนได้มากกว่าเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผลิตจากตะกอนพลาสติกชนิด PET กับชี้อย่อยไม้ยูคาลิปตัสและขี้ข้าวโพด ประมาณ 21.38-22.38 MJ/kg และอัตราส่วนผสมของวัตถุดิบตั้งต้นที่นำมาผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดต้องมีปริมาณของตะกอนพลาสติกชนิด PET มากกว่าชีวมวล (ชี้อย่อยไม้สัก ชี้อย่อยไม้ยูคาลิปตัส และขี้ข้าวโพด) ถ้าหากชีวมวลมีปริมาณที่มากกว่าจะทำให้เชื้อเพลิงอัดเม็ดมีค่าความชื้นสูงขึ้น และส่งผลทำให้ค่าพลังงานความร้อนต่ำ

นอกจากนี้สภาวะการทอริแฟคชันเชื้อเพลิงอัดเม็ด ในกรณีที่คุณณหภูมิมากกว่า 300 °C มีผลทำให้เชื้อเพลิงเกิดการไหม้ ถ้าหากไม่มีการป้อนอากาศเข้าระบบและใช้เวลาในการทอริแฟคชันนานมากกว่า 30 นาที มีผลทำให้เชื้อเพลิงอัดเม็ดเกิดการแตก่วนและไม่จับตัวกันเป็นก้อน งานวิจัยนี้จึงได้กำหนดสภาวะการทอริแฟคชันที่คุณณหภูมิ 170 190 และ 225 °C อัตราการป้อนอากาศ 1 4 และ 6 L/min เวลา 5 10 และ 15 นาที ในการทอริแฟคชัน เมื่อนำเชื้อเพลิงอัดเม็ดไปทดสอบค่าดัชนีความคงทน (DSI) พบว่า เชื้อเพลิงอัดเม็ดหลังการทอริแฟคชันในสภาวะที่เหมาะสม คือ คุณณหภูมิช่วง 170-225 °C อัตราการป้อนอากาศ 1-6 L/min เวลา 10 นาที โดยจะมีค่า DSI ดีที่สุดในช่วง 0.9994-0.9999 ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.95 เป็นไปตามที่มาตรฐาน

กำหนดในการวิเคราะห์ค่าการปนเปื้อนปรอทและคลอไรด์ พบว่า เชื้อเพลิงอัดเม็ดหลังการทอริแฟคชัน มีค่าการปนเปื้อนคลอไรด์ลดลง 23.64-33.28 $\mu\text{g/l}$ หรือ 1.09-1.72 $\mu\text{g/MJ}$ จากเดิมมีปริมาณคลอไรด์ปนเปื้อน 46.51-92.41 $\mu\text{g/l}$ หรือ 23.64-37.25 $\mu\text{g/MJ}$ ซึ่งการทอริแฟคชันสามารถกำจัดคลอไรด์ออกจากเชื้อเพลิงอัดเม็ดได้ถึงร้อยละ 26.50-74.23 และค่าคลอไรด์ของเชื้อเพลิงอัดเม็ดหลังการทอริแฟคชันที่วิเคราะห์ได้เป็นไปตามที่มาตรฐาน EN 15359:2011 กำหนด และตรวจไม่พบค่าการปนเปื้อนปรอทในเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งก่อนและหลังการทอริแฟคชัน

ในส่วนของการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซเสีย พบว่า เชื้อเพลิงอัดเม็ดหลังการทอริแฟคชันมี CO_2 ลดลง และมี CO จากการเผาไหม้ อาจเป็นผลมาจากมีปริมาณออกาศน้อย ทำให้เกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ในระหว่างเผาไหม้ และเตาเผาที่ใช้เป็นเตาเผาขนาดเล็ก ทำให้ระยะเวลาคงอยู่ของเชื้อเพลิงสั้นเกินไป (Residence time) อาจทำให้เกิด CO ได้เร็วและเครื่องตรวจวัดได้ง่ายขึ้น อย่างไรก็ตามเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผลิตได้ไม่ก่อให้เกิด SO_2 จากการเผาไหม้ เนื่องจากในเชื้อเพลิงอัดเม็ดไม่มีส่วนผสมของซัลเฟอร์ และจากผลการวิเคราะห์ปริมาณ 13PAHs และ BTEX ในเชื้อเพลิงอัดเม็ดผสมตะกอนพลาสติกชนิด PET กับชีเลื่อยไม้สักและตะกอนพลาสติกชนิด PET กับชีเลื่อยไม้ยูคาลิปตัสหลังการทอริแฟคชัน มีปริมาณความเข้มข้นรวมของ 13PAHs ลดลง และตรวจไม่พบปริมาณความเข้มข้นรวมของ BTEX และในส่วนของเชื้อเพลิงอัดเม็ดผสมตะกอนพลาสติกชนิด PET กับขี้ข้าวโพดหลังการทอริแฟคชัน พบว่า ปริมาณความเข้มข้นรวมของ 13PAHs ไม่เปลี่ยนแปลงและปริมาณความเข้มข้นรวมของ BTEX มีปริมาณที่ลดลง ซึ่งเห็นว่าการทอริแฟคชันสามารถปรับปรุงคุณภาพเชื้อเพลิงอัดเม็ดให้มีคุณสมบัติทั้งทางด้านการให้พลังงานความร้อน การปลดปล่อยมลพิษที่เป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนดซึ่งสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนได้

2. ข้อเสนอแนะ

2.1 ควรมีการศึกษาค่าการดูดซับความชื้นของเชื้อเพลิงหลังการทอริแฟคชัน และศึกษาเกี่ยวกับ Fluoride ในก๊าซเสีย และ ฝุ่น PM 10 PM 2.5 จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งก่อนและหลังการทอริแฟคชัน

2.2 ควรศึกษาเกี่ยวกับพารามิเตอร์ Mass yield และ Energy efficiency และเปรียบเทียบ unit ของพลังงานของกระบวนการต่อเชื้อเพลิงที่ได้และสัดส่วนของพลังงานที่สูญเสียไป (Mass balance)

2.3 ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการใช้พลังงานด้านกระแสไฟฟ้า และการ
ปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของเชื้อเพลิงอัดเม็ดเพื่อนำไปสู่การพัฒนาในระดับอุตสาหกรรม

2.4 ควรมีการรวบรวมข้อมูลและประเมินเศรษฐศาสตร์เบื้องต้นในการผลิต
เชื้อเพลิงอัดเม็ด





บรรณานุกรม

- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2556). ศักยภาพ
ชีวมวลในประเทศไทย. สืบค้น 19 เมษายน 2562, จาก
<http://biomass.dede.go.th>
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. (2550). ตำราระบบการจัดการมลพิษจาก
อุตสาหกรรม (ครั้งที่ 2). นนทบุรี: สำนักพิมพ์สถาบันสิ่งแวดล้อมไทย.
คู่มือแนวทางและเกณฑ์คุณสมบัติของเสียเพื่อการแปรรูปเป็นแท่งเชื้อเพลิงและบดอัด
ประสาน. (2560). สืบค้น 5 เมษายน 2560, จาก <https://books.google.co.th>
- จิตรลดา มุประสิทธิ์. (2553). องค์ประกอบและสัดส่วนของโพลีไซคลิกอะโรมาติก
ไฮโดรคาร์บอน (PAHs) ใน PM10 จากแหล่งปลดปล่อยต่างประเภทในจังหวัด
สงขลา. สืบค้น 24 กันยายน 2560, จาก <http://kb.psu.ac.th>
- เดช วัฒนชัยยิ่งเจริญ. (2555). โครงการศึกษาการผลิตแท่งเชื้อเพลิงชีวจากใบยางพารา
(รายงานการวิจัย). พิษณุโลก: มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- ธนิยา เกาศล. (2561). การเปลี่ยน-แปรรูปชีวมวลและสารอินทรีย์เพื่อเป็นพลังงาน
หมุนเวียน. กรุงเทพฯ: หน่วยผลิตเอกสารและตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- นพภาพร พาณิช. (2550). ตำราระบบบำบัดมลพิษอากาศ (ครั้งที่ 2). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์
ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ประพันธ์ คูชดารา, และศศิธร สรรพอด้า. (2558). พลังงานจากชีวมวลและวัสดุเหลือใช้.
กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- แผนงานวิจัย การวิจัยและพัฒนาการเพิ่มมูลค่าไม้สักตัดสางขยายระยะจากสวนป่า
โครงการการใช้ประโยชน์ถ่านและน้ำส้มควันไม้จากเศษไม้ ปลายไม้ของไม้สักเพื่อ
สร้างมูลค่าเพิ่ม. (2560). NRCT Research Information Repository. สืบค้น
3 มีนาคม 2560, จาก <http://rir.nrct.go.th>
- วรฤดี ฤงทรัพย์. (2553). การศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงชีวอัดแท่งจากลำต้นข้าวโพด
(วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ): พิษณุโลก, มหาวิทยาลัยนเรศวร.

ศูนย์วิจัยและฝึกอบรมด้านสิ่งแวดล้อม กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม กระทรวง

ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. (2560). *โครงการศึกษาสารโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (PAHs) ในบรรยากาศอันเนื่องมาจากปัญหามลพิษ และผลกระทบต่อสุขภาพของประชาชน* (น. 1-47). สืบค้น 3 มีนาคม 2560, จาก <http://doi.nrct.go.th>

สถาบันพลาสติกแห่งประเทศไทย.(2556). *Asean plastic end-user market trend*. สืบค้น 19 เมษายน 2562, จาก www.ftiplastic.com

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. (2558). *คาร์บอนไดออกไซด์ (carbon dioxide) ฝ่ายวิศวกรรม*. สืบค้น 26 กันยายน 2560, จาก <http://www.tistr.or.th>

อรรถพร บานขาว, และสันติ สุขสะอาด. (2557). การผลิตและการตลาดของผลิตภัณฑ์ไม้สักในตำบลน้ำชำ อำเภอสูงเม่น จังหวัดแพร่. *วารสารวนศาสตร์*, 1, 28-35.

อริสา กาญจนกระจ่าง, และภาวดี ช่วยบำรุง. (2560). การตรวจวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพการระบายอากาศภายในห้องเรียน. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, ฉบับที่ 6, 960-974.

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

Ambient Air Pollution by Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAH). (2001). *European Union - European Commission*. Retrieved September 24, 2017, from https://europa.eu/european-union/index_en

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

Araújo, S., Boas, M.A.V., Neiva, D.M., Carneiro, A.C., Vital, B., Breguez, M., & Pereira, H. (2016). Effect of a mild torrefaction for production of eucalypt wood briquettes under different compression pressures. *Biomass and Bioenergy*, 90, 181-186.

Archer, S.A., & Wilckens, R.S. (2018). Systematic analysis of biomass derived fuels for fuel cells. *International of hydrogen energy*, 43, 23178-23192.

- Arena, U., & Gregorio, F.D. (2016). Fluidized bed gasification of industrial solid recovered fuels. *Waste Management*, 50, 86-92.
- Arnavat, M.P., Shang, L., Sárossy, Z., Ahrenfeldt, J., & Henriksen, U.B. (2015). From a single pellet press to a bench scale pellet mill – Pelletizing six different biomass feedstocks. *Fuel Processing Technology*, 142, 27-33.
- Arteaga-Pérez, L.E., Grandón, H., Flores, M., Segura, C., & Kelley, S.S. (2017). Steam torrefaction of Eucalyptus globulus for producing black pellets: A pilot-scale experience. *Bioresource Technology*, 238, 194-204.
- Azócara, L., Hermosillab, N., Gayb, A., Rochac, S., Díazd, J., & Jarae, P. (2019). Brown pellet production using wheat straw from southern cities in Chile. *Fuel*, 237, 823-832.
- Balogun, A.O., Lasode, O.A., & McDonald, A.G. (2014). Devolatilisation kinetics and pyrolytic analyses of Tectona grandis (teak). *Bio Resource Technology*, 156, 57-62.
- Barneto, A.G., Hernández, R.B., & Berenguer, J.M. (2011). Thermogravimetric characterization of eucalyptus wood. *Peer-reviewed Article*, 72, 53-56.
- Białowiec, A., Pulka, J., Stepień, P., Manczarski, P., & Golaszewski, J. (2017). The RDF/SRF torrefaction: An effect of temperature on characterization of the product – Carbonized Refuse Derived Fuel. *Waste Management*, 70, 91-100.
- Bonifazi, G., Serranti, S., Potenza, F., Luciani, V., & Maio, D.F. (2015). Standardization of Solid Recovered Fuels through Gravity Separation and Chemical Based Imaging Techniques. *Energy Procedia*, 82, 328-334.
- Casado, R.R., Rivera, J.A., García, E.B., Cuadrado, R.E., Llorente, M.F., Sevillano, R.B., & Delgado, A. P. (2016). Classification and characterization 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, 206-216.

- Chen, D., Gao, A., Cen, K., Zhang, J., Cao, X., & Ma, Z. (2017). Investigation of biomass torrefaction based on three major components: Hemicellulose, cellulose, and lignin. *Energy Conversion and Management*, 169, 228-237.
- Chen, G., Liu, C., Ma, W., Zhang, X., Li, Y., Yan, B., & Zhou, W. (2014). Co-pyrolysis of corn cob and waste cooking oil in a fixed bed. *Bioresource Technology*, 166, 500-507.
- Chen, M.H., Lai, C.C., Chen, H.L., Lin, C.H., Hsiao, H.T., Liu, L.C., & Chen, C.M. (2018). Preparation of long-chain branched polyethylene terephthalates (PETs), and crystallization behaviors, thermal characteristics, and hydrolysis resistance of their biaxially stretching films. *Physics and chemistry of solids*, 129, 354-367.
- Conesa, J.A., Rey, L., Egea, S., & Rey M.D. (2011). Pollutant Formation and Emissions from Cement Kiln Stack Using a Solid Recovered Fuel from Municipal Solid Waste. *Environmental Science and Technology*, 45(13), 5878-5884.
- Contrerasa, M.L., Ganeshb, N., Rodillaa, I., & Bahillo, A. (2018). Assess of biomass co-firing under oxy-fuel conditions on Hg speciation and ash deposit formation. *Fuel*, 215, 395-405.
- Cui, H., & Turn, S. (2017). Fuel properties and steam reactivity of solid waste streams from contingency bases. *Waste Management*, 78, 16-30.
- Dehghani, M., Fazlzadeh, M., Sorooshian, A., Tabatabaee, H.R., Miri, M., Baghani, A.N., Delikhoon, M., Mahvi, A.H., & Rashidi, M. (2018). Characteristics and health effects of BTEX in a hot spot for urban pollution. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 155, 133-143.
- Diaz-Silvarrey, L.S., McMahon, A., & Phan, A.N. (2018). Benzoic acid recovery via waste poly (ethylene terephthalate) (PET) catalytic pyrolysis using sulphated zirconia catalyst. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 134, 621-631.

Domazetovska, S., Strezov, V., Filkoski, R.V., & Kan, T. (2017). Assessment of thermal processing behaviour of corn cob, vine rod and sunflower. *18th Symposium on Thermal Science and Engineering of Serbia: proceedings*, 262-271.

EN 15400:2011, *Solid recovered fuels - determination of calorific value*, European Committee for Standardization. (2011). Retrieved August 23, 2017, from <https://www.en.aenor.es>

EN 15402:2011, *Solid recovered fuels - determination of the content of volatile matter*, European Committee for Standardization. (2011). Retrieved August 23, 2017, from <https://www.en.aenor.es>

EN 15403:2011, *Solid recovered fuels - determination of ash content*, European Committee for Standardization. (2011). Retrieved August 23, 2017, from <https://www.en.aenor.es>

EN 15407:2011, *Solid recovered fuels — methods for the determination of carbon (C), hydrogen (H) and nitrogen (N) content*, European Committee for Standardization. (2011). Retrieved August 23, 2017, from <https://www.en.aenor.es>

EN 15408:2011, *Solid recovered fuels - methods for the determination of sulphur (S), chlorine (Cl), fluorine (F) and bromine (Br) content*, European Committee for Standardization. (2011). Retrieved August 23, 2017, from <https://www.en.aenor.es>

EN 15414-3:2011 *Solid recovered fuels - determination of moisture content using the oven dry method - Part 3: Moisture in general analysis sample*, European Committee for Standardization. (2011). Retrieved August 23, 2017, from <https://www.en.aenor.es>

European Committee for Standardization. (2017). *Standards.cen.eu*. Retrieved January 2, 2017, from <http://standards.cen.eu>

- Fyffe, J.R., Breckel, A.C., Townsend, A.K., & Webber, M.E. (2012). *Residue-Derived Solid Recovered Fuel for Use in Cement Kilns*.
Plastics.americanchemistry.com. Retrieved August 8, 2017, from
<https://plastics.americanchemistry.com>
- Garcés, D., Díaz, E., Sastre, H., Ordóñez, S., & González-LaFuente, J.M. (2016). Evaluation of the potential of different high calorific waste fractions for the preparation of solid recovered fuels. *Waste Management*, 47, 164-173.
- Gisi, S.D., Chiarelli, A., Tagliente, L., & Notarnicola, M. (2017). Energy, environmental and operation aspects of a SRF-fired fluidized bed waste-to-energy plant. *Waste Management*, 73, 271-286.
- Goffe, J., & Ferrasse, J.H. (2018). Stoichiometry impact on the optimum efficiency of biomass. *Energy*, 170, 438-458.
- Gug, J., Cacciola, D., & Sobkowicz, M.J. (2015). Processing and properties of a solid energy fuel from municipal solid waste (MSW) and recycled plastics. *Waste Management*, 35, 283-292.
- Han, Y., Hoekman, S.K., Cui, Z., Jena, U., & Dasc, P. (2019). Hydrothermal liquefaction of marine microalgae biomass using co-solvents. *Algal Research*, 38, 101421.
- Hosseinizand, H., Sokhansanj, S., & Lim, C.J. (2018). Co-pelletization of microalgae *Chlorella vulgaris* and pine sawdust to produce solid fuels. *Fuel Processing Technology*, 177, 129-139.
- Hu, G., Liu, G., Wu, D., & Fu, B. (2018). Geochemical behavior of hazardous volatile elements in coals with different geological origin during combustion. *Fuel*, 233, 361-376.
- Huh, S.Y., Lee, H., Shin, J., Lee, D., & Jang, J. (2018). Inter-fuel substitution path analysis of the Korea cement industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 4091-4099.

- Ibeto, C.N., Enoch, P., & Alum, O.L. (2017). Impact of torrefaction on fuel emission and properties of lignite and their blends with biowastes. *J. Chem. Soc. Nigeria*, 42, 15-21. Innovation-base University, 72
- Jiang, N., Yin, S., Guo, Y., Li, J., Kang, P., Zhang, R., & Tang, X. (2017). Characteristics of mass concentration, chemical composition, source apportionment of PM_{2.5} and PM₁₀ and health risk assessment in the emerging megacity in China. *Atmospheric Pollution Research*, 9, 309-321.
- Joint group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection. (2017). Retrieved September 5, 2017, from <http://www.gesamp.org>
- Ke, C., Ma, X., Tang, Y., Tang, F., & Zheng, W. (2019). Effects of natural and modified calcium-based sorbents on heavy metals of food waste under oxy-fuel combustion. *Bioresource Technology*, 271, 251-257.
- Khaniabadi, Y.O., Polosa, R., Chuturkova, R.Z., Daryanoosh, M., Goudarzi, G., Borgini, A., Tittarelli, A., Basiri, H., Armin, H., Nourmoradi, H., Babaei, A.A., & Naserian, P. (2016). Human health risk assessment due to ambient PM₁₀ and SO₂ by an air quality modeling technique. *Process Safety and Environmental Protection*, 111, 346-354.
- Lasek, J.A., Kopczynski, M., Janusz, M., Iluk, A., & Zuwała, J. (2017). Combustion properties of torrefied biomass obtained from flue gas-enhanced reactor. *Energy*, 119, 362-368.
- Lee, H.W., Kim, Y.M., Jae, J., Jeon, J.K., Jung, S.C., Kim, S.C., & Park, Y.K. (2016). Production of aromatic hydrocarbons via catalytic co-pyrolysis of torrefied cellulose and polypropylene. *Energy Conversion and Management*, 129, 81-88.

- Li, P.H., Yu, J., Bi, C.L., Yuec, J.J., Li, Q.Q., Wang, L., Liu J., Xiao, Z., Guo, L., & Huang, B.J. (2019). Health risk assessment for highway toll station workers exposed to PM_{2.5}-bound heavy metals. *Atmospheric Pollution Research*, 1309-1042.
- Lin, Y.P., Wang, W.H., Pan, S.Y., Ho, C.C., Hou, C.J., & Chiang, P.C. (2016). Environmental impacts and benefits of organic Rankine cycle power generation technology and wood pellet fuel exemplified by electric arc furnace steel industry. *Applied Energy*, 183, 369-379.
- Liu, F.F., Liu, G.Z., Zhu, Z.L., Wang, S.C., & Zhao, F.F. (2018). Interactions between microplastics and phthalate esters as affected by microplastics characteristics and solution chemistry. *Chemosphere*, 214, 688-694.
- Liu, X., Chen, M., & Wei, Y. (2015). Combustion behavior of corncob/bituminous coal and hardwood/bituminous coal. *Renewable Energy*, 81, 355-365.
- Lonardo, M.C.D., Franzese, M., Costa, G., Gavasci, R., & Lombardi, F. (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.
- Mabahwi, N.A.B., Leh, O.L.H., & Omar, D. (2014). Human Health and Wellbeing: Human health effect of air pollution. *Procedia Social and Behavioral Sciences*, 153, 221-229.
- Manouchehrinejad, M., & Mani, S. (2018). Torrefaction after pelletization (TAP): Analysis of torrefied pellet quality and co-products. *Biomass and Bioenergy*, 118, 93-104.
- McKechnie, J., Saville, B., & MacLean, H.L. (2016). Steam-treated wood pellets: Environmental and financial implications relative to fossil fuels and conventional pellets for electricity generation. *Applied Energy*, 180, 637-649.

- Montané, D., Abelló, S., Farriol, X., & Berrueco, C. (2013). Volatilization characteristics of solid recovered fuels (SRFs). *Fuel Processing Technology, 113*, 90-96.
- Mylläri, F., Karjalainen, P., Taipale, R., Aalto, P., Häyrynen, A., Rautiainen, J., Pirjola, L., Hillamo, R., Keskinen, J., & Rönkkö, T. (2016). Physical and chemical characteristics of flue-gas particles in a large pulverized fuel-fired power plant boiler during co-combustion of coal and wood pellets. *Combustion and Flame, 176*, 544-566.
- Nguyen, Q.N., Cloutier, A., Achim, A., & Stevanovic, T. (2014). Effect of process parameters and raw material characteristics on physical and mechanical properties of wood pellets made from sugar maple particles. *Biomass and Bioenergy, 80*, 388-349.
- Nicodème, T., Berchem, T., Jacquet, N., & Richel, A. (2018). Thermochemical conversion of sugar industry by-products to biofuels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 88*, 151-159.
- Nithikul, J., Karthikeyan, O.P., & Visvanathan, C. (2010). Reject management from a Mechanical Biological Treatment plant in Bangkok, Thailand. *Resources, Conservation and Recycling, 55*, 417-422.
- Onsree, T., Tippayawong, N., Williams, T., McCullough, K., Barrow, E., Pogaku, R., & Lauterbach, J. (2019). Torrefaction of pelletized corn residues with wet flue gas. *Bioresource Technology, 285*, 121330.
- Pahla, G., Ntuli, F., & Muzenda, E. (2017). Torrefaction of landfill food waste for possible application in biomass co-firing. *Waste Management, 71*, 512-520.
- Passamani, G., Ragazzi, M., & Torretta, V. (2016). Potential SRF generation from a closed landfill in northern Italy. *Waste Management, 47*, 157-163.

Pegadoa, T.S.S., Schmida, K., Winemillerb, K.O., Chelazzic, D., Cincinellic, A.C., Deic, L., & Giarrizzoa, T. (2018). First evidence of microplastic ingestion by fishes from the Amazon Riverestuary. *Marine Pollution Bulletin*, 133, 814-821.

Plastic Waste Management Institute. (2009). *An Introduction to Plastic Recycling*. Pwmi.or.jp. Retrieved May 10, 2017, from <http://www.pwmi.or.jp>.

Porshnov, D., Ozols, V., Bertina, L.A., Burlakovs, J., & Klavins, M. (2018). The 15th International Symposium on District Heating and Cooling Assessing the feasibility of using the heat. *Energy Procedia*, 147, 48-53.

Poudel, J., Ohm, T.I., & Oh, S.C. (2014). A study on torrefaction of food waste. *Fuel*, 140, 275-281.

Pradhan, P., Arora, A., & Mahajani, S.M. (2017). Pilot scale evaluation of fuel pellets production from garden waste biomass. *Energy for Sustainable Development*, 43, 1-14.

Punturat, R., & Samaksaman, U. (2017). Characteristics of pellets produced from residues of polyethylene terephthalate plastic mixed with teak sawdust. *Research and Innovation-base University: proceedings*, 72-73.

Recari, J., Berrueco, C., Puy, N., Alier, S., Bartrolí, J., & Farriol, X. (2017). Torrefaction of a solid recovered fuel (SRF) to improve the fuel properties for gasification processes. *Applied Energy*, 203, 177-188.

Ruangtrakul, S., Prueaksasit, T., & Morknoy, D. (2013). Health Risk Assessment of Tollway Station Workers Exposed to BTEX via Inhalation in Bangkok Faculty of Science. (1st ed). Chulalongkorn University: *Journal of Environmental Managemen*, 9, 1-22.

Sandro, N., Agis, P., Gojmir, R., Vlasta, Z., & Müslüm, A. (2018). Using pellet fuels for residential heating: A field study on its efficiency and the users' satisfaction. *Energy and Buildings*, 184, 193-204.

Standards-Air Quality-Environment-European Commission. (2017). *Ec.europa.eu*.

Retrieved September 25, 2017, from

<http://ec.europa.eu/environment/air/quality/standards.htm>

Sung, J.H., Back, S.K., Jeong, B.M., Kim, J.H., Choi, H.S., Jang, H.N., & Seo, Y.C.

(2018). Oxy-fuel co-combustion of sewage sludge and wood pellets with flue gas recirculation in a circulating fluidized bed. *Fuel Processing Technology*, 172, 79-85.

Surup, G., Vehus, T., Eidem, P.A., Trubetskaya, A., & Nielsen, H.K. (2018).

Characterization of renewable reductants and charcoal-based pellets for the use in ferroalloy industries. *Energy*, 167, 337-345.

Tan, X., Li, B., Lu, J., Li, S., Baiyun, R., Lv, Y., Lu, Q., & Zhanga, Z. (2018). Dietary

luteolin protects against HgCl₂-induced renal injury via activation of Nrf2-mediated signaling in rat. *Journal of Inorganic Biochemistry*, 179, 24-31.

Tembe, E.T., Otache, P.O., & Ekhuemelo, D.O. (2014). Density, Shatter index, and

Combustion properties of briquettes produced from groundnut shells, rice husks and saw dust of *Daniellia oliveri*. *J.Appl.Biosci*, 82, 7372-7378.

Unpinit, T., Poblarp, T., Sailoon, N., Wongwicha, P., & Thabuot, M. (2015). Fuel

Properties of Bio-Pellets Produced from Selected Materials under Various Compacting Pressure. *Energy Procedia*, 79, 657-662.

USDA Food Safety and Inspection Service. (2017). *Fsis.usda.gov*. Retrieved

September 5, 2017, from <https://www.fsis.usda.gov>

Vonk, G., Piriou, B., Santos, P.F.D., Wolbert, D., & Vařtilingom, G. (2018).

Comparative analysis of wood and solid recovered fuels gasification in a downdraft fixed bed reactor. *Waste Management*, 85, 106-120.

Wagland, S.T., Kilgallon, P., Coveney, R., Garg, A., Smith, R., Longhurst, P.J.,

Pollard S.J.T., Simms, N., & . (2011). Comparison of coal/solid recovered fuel (SRF) with coal/refuse derived fuel (RDF) in a fluidised bed reactor.

Waste Management, 31, 1176-1183.

- Wang, Y., Hu, S., Li, W., Gu, J., Yuan, H., Ling, X., & Chen, Y. (2018). Chlorine migration mechanisms during torrefaction of fermentation residue from food waste. *Bioresource Technology*, 271, 9-15.
- WHO (2006). *WHO global air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide-Global update 2005: Summary of risk assessment*. Geneva, World Health Organization .Retrieved February 10, 2019, from http://whqlibdoc.who.int/hq/2006/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_eng.pdf
- Xiao, Z., Yuan, X., Jiang, L., Chen, X., Li, H., Zeng, G., Leng, L., Wang, H., & Huang, H. (2015). Energy recovery and secondary pollutant emission from the combustion of co-pelletized fuel from municipal sewage sludge and wood sawdust. *Energy*, 91, 441-450.
- Xiao, Z., Yuan, X., Li, H., Jiang, L., Leng, L., Chen, X., Zeng, G., Li, F., & Cao, L. (2015). Chemical speciation, mobility and phyto-accessibility of heavy metals in fly ash and slag from combustion of pelletized municipal sewage sludge. *Science of the Total Environment*, 536, 774-783.
- Yao, X., & Xu, K. (2016). Comparative study of characterization and utilization of corncob ashes from gasification process and combustion process. *Construction and Building Materials*, 119, 215-222.
- Yue, Y., Singh, H., Singh, B., & Mani, S. (2017). Torrefaction of sorghum biomass to improve fuel properties. *Bioresource Technology*, 232, 372-379.
- Zhang, C., Ho, S.H., Chen, W.H., Xie, Y., Liu, Z., & Chang, J.S. (2018). Torrefaction performance and energy usage of biomass wastes and their correlations with torrefaction severity index. *Applied Energy*, 220, 598-604.
- Zhang, S., Zhua, S., Zhanga, H., Chenb, T., & Xiongb, Y. (2018). Catalytic fast pyrolysis of rice husk: Effect of coupling leaching with torrefaction pretreatment. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 133, 91-96.

Zhao, L., Giannis, A., Lam, W.Y., Lin, S.X., Yin, K., Yuan, G.A., & Wang, J.Y. (2016).
Characterization of Singapore RDF resources and analysis of their
heating value. *Sustainable Environment Research*, 26, 51-54.





ภาคผนวก

ภาคผนวก ก ผลการทดลองและการคำนวณคุณสมบัติทางกายภาพ (Proximate analysis)
ของวัตถุดิบตั้งต้นและเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งก่อนและหลังการทอรีแฟคชัน

ตาราง 18 ผลการทดลองและการคำนวณค่าความชื้น (Moisture content) เชื้อเพลิงอัดเม็ด
ผลิตจากตะกอนพลาสติกชนิด PET และซีลี้อยไม้สักหลังการทอรีแฟคชัน
หรือ ตัวอย่างที่ 18

ก่อนอบ		หลังอบ	
น้ำหนักฟอยล์	น้ำหนักตัวอย่างที่ 18	น้ำหนักฟอยล์+น้ำหนัก ตัวอย่างที่ 18	น้ำหนักตัวอย่างที่ 18
0.3701	5.1982	5.558	5.1879
0.3507	5.1116	5.4541	5.1034
0.3711	5.1554	5.5182	5.1471
ค่าเฉลี่ย 0.364	5.1551	5.5101	5.1461
ค่าความชื้น = 0.17±0.02 %			

ค่าความชื้น (%)

$$= \frac{5.1551 - 5.1461}{5.1551} \times 100$$

$$= 0.1733 \%$$

ตาราง 19 ผลการทดลองและการคำนวณเถ้า (Ash content) เชื้อเพลิงอัดเม็ดผลิตจาก
ตะกอนพลาสติกชนิด PET และซีลี้อยไม้สักหลังการทอรีแฟคชัน หรือ
ตัวอย่างที่ 18

ก่อนเผา		หลังเผา	
น้ำหนักครุชีเบล	น้ำหนักตัวอย่างที่ 18	น้ำหนักครุชีเบล+น้ำหนัก ตัวอย่างที่ 18	น้ำหนักตัวอย่างที่ 18
37.0558	0.5232	37.0645	0.0087
37.5439	0.5358	37.5538	0.0099
ค่าเฉลี่ย 37.2999	0.5295	37.3092	0.0093
เถ้า = 1.76±0.13 %			

เก่า (%)

$$= \frac{0.0093}{0.5295} \times 100$$

$$= 1.7564 \%$$

ตาราง 20 ผลการทดลองและการคำนวณปริมาณสารระเหย (Volatile matter) เชื้อเพลิงอัดเม็ดผลิตจากตะกอนพลาสติกชนิด PET และขี้เลื่อยไม้สักหลังการทอรีแฟคชัน หรือ ตัวอย่างที่ 18

ก่อนเผา		หลังเผา	
น้ำหนักครุชีเบล	น้ำหนักตัวอย่างที่ 18	น้ำหนักครุชีเบล+น้ำหนักตัวอย่างที่ 18	น้ำหนักตัวอย่างที่ 18
37.544	0.5228	37.5492	0.0052
39.4225	0.5051	39.4336	0.0111
ค่าเฉลี่ย 38.4833	0.5140	38.4914	0.0082
ปริมาณสารระเหย = 98.07±0.85 %			

ปริมาณสารระเหย (%)

$$= \left(\frac{0.5140 - 0.0082}{0.5140} \times 100 \right) - 0.1733$$

$$= 98.2409 \%$$

ทั้งนี้เมื่อได้คำนวณหาปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) มีค่าติดลบจึงนำมารวมกับปริมาณสารระเหยเพื่อให้ได้ค่ารวมทั้งหมดเป็น 100 เปอร์เซนต์ดังนั้นค่าปริมาณสารระเหยเท่ากับ 98.0703 %

$$98.2409 - 0.1706 = 98.0703 \%$$

ปริมาณคาร์บอนคงตัวมีค่าติดลบเนื่องจากในเชื้อเพลิงอัดเม็ดมีปริมาณของตะกอนพลาสติก PET มากกว่าชีวมวล เนื่องจากตะกอนพลาสติก PET ไม่สามารถวิเคราะห์ค่าคาร์บอนคงตัวได้ซึ่งสอดคล้องในงานวิจัยของ Zhao et al. (2016) ที่ไม่มีค่าการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนคงตัวของพลาสติกชนิด PET ดังนั้นปริมาณคาร์บอนคงตัวในงานวิจัยนี้จึงได้นำไปรวมกับปริมาณสารระเหยเพื่อให้ได้ค่ารวมทั้งหมดเป็น 100 เปอร์เซนต์

ภาคผนวก ข ตารางการคำนวณค่า 13PAHs และ BTEX ในเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งก่อนและหลังการทอริแฟคชัน

ตาราง 21 การคำนวณปริมาณมลพิษอากาศชนิด 13PAHs จากเชื้อเพลิงอัดเม็ด PET/TS ก่อนการทอริแฟคชัน

ตะกอนพลาคิกชนิด PET : ซึ่งเสียไม่ได้ก่อนทอริแฟคชัน									
13PAHs	$y=mx+b$	Area	X (ng/ μ L)	ppmv	MW (g/mol)	mg/ m^3 (at ambient)	mg/ Nm^3 (at STP)	g/Nm^3	
Acenaphthylene	$y = 4903.4x + 277830$	7354278	1443.172	144.317	152.2	897.83	822.55	0.8225	
Fluorene	$y = 5627.4 x + 273607$	11168968	1936.127	193.613	166.22	1315.46	1205.16	1.2052	
Phenanthrene	$y = 6957.3 x + 236480$	37432276.5	5346.298	534.630	178.23	3894.90	3568.31	3.5683	
Anthracene	$y = 8032.8 x + 184587$	3864091.5	458.048	45.805	176.23	333.70	305.72	0.3057	
Pyrene	$y = 10891x + 197415$	697902	45.954	4.595	202.25	37.99	34.81	0.0348	
Benzo(a)anthracene	$y = 12960 x + 54429$	14906177	1145.968	114.597	228.29	1059.35	979.69	0.9797	
Chrysene	$y = 14630 x + 92955$	2932469	194.086	19.409	228.29	181.11	165.93	0.1659	
Benzo(b)fluoranthene	$y = 19100 x + 124930$	11348926.5	587.844	58.764	252.31	606.05	555.24	0.5552	
Benzo(k) fluoranthene	$y = 20930 x + 89661$	6163099.5	290.179	29.018	252.32	299.28	274.19	0.2742	
Benzo(a)pyrene	$y = 22771 x + 38230$	9161675.5	400.661	40.066	252.31	413.21	378.56	0.3786	
Dibenz(a,h)anthracene	$y = 48412 x - 11447$	14773090	304.917	30.492	278.35	346.92	317.83	0.3178	
Benzo(g,h,i)perylene	$y = 9891.6 x + 237385$	N.D.	N.D.	N.D.	276.33	N.D.	N.D.	N.D.	
Indeno(1,2,3-cd)pyrene	$y = 23150 x + 122338$	5643455.5	238.493	23.849	276.33	269.38	246.79	0.2468	

หมายเหตุ: N.D.(Not Detected)=ตรวจไม่พบ

ตาราง 22 การคำนวณปริมาณมลพิษอากาศชนิด 13PAHs จากเชื้อเพลิงอัดเม็ด PET/ES ก่อนการทอดรีเฟคชัน

ตะกอนพลาลดิกชนิด PET : ที่เลือกไม่อยู่คลิปลดัสก่อนการทอดรีเฟคชัน									
13PAHs	$y = mx + b$	Area	X (ng/ μ L)	ppmv	MW (g/mol)	mg/ m^3 (at ambient)	mg/ Nm^3 (at STP)	g/ Nm^3	
Acenaphthylene	$y = 4903.4x + 277830$	494713	44.231	4.423	152.2	27.52	25.21	0.0252	
Fluorene	$y = 5627.4x + 273607$	1307616	183.745	18.375	166.22	124.84	114.37	0.1144	
Phenanthrene	$y = 6957.3x + 236480$	9264233	1297.594	129.759	178.23	945.33	866.06	0.8661	
Anthracene	$y = 8032.8x + 184687$	2271969	259.845	25.984	178.23	189.30	173.43	0.1734	
Pyrene	$y = 10891x + 197415$	1690223	137.068	13.707	202.25	113.31	103.81	0.1038	
Benzo(a)anthracene	$y = 12960x + 54429$	2991635	226.636	22.664	228.29	211.48	193.75	0.1938	
Chrysene	$y = 14630x + 92955$	4079689	272.504	27.250	228.29	254.29	232.96	0.233	
Benzo(b)fluoranthene	$y = 19100x + 124930$	4605021	234.560	23.456	252.31	241.91	221.62	0.2216	
Benzo(k)fluoranthene	$y = 20930x + 89661$	6199352	291.911	29.191	252.32	301.07	275.82	0.2758	
Benzo(a)pyrene	$y = 22771x + 38230$	3293768	142.969	14.297	252.31	147.45	135.08	0.1351	
Dibenz(a,h)anthracene	$y = 48412x + 11447$	N.D.	N.D.	N.D.	278.35	N.D.	N.D.	N.D.	
Benzo(g,h,i)perylene	$y = 9891.6x + 237385$	N.D.	N.D.	N.D.	276.33	N.D.	N.D.	N.D.	
Indeno(1,2,3-cd)pyrene	$y = 23150x + 122338$	N.D.	N.D.	N.D.	276.33	N.D.	N.D.	N.D.	

หมายเหตุ: N.D.(Not Detected)=ตรวจไม่พบ

ตาราง 23 การคำนวณปริมาณมลพิษอากาศชนิด 13PAHs จากเชื้อเพลิงขี้เถ้าเม็ด PET/CC ก่อนการทอรีแฟคชัน

ตะกอนพลาสติกชนิด PET : ซังข้าวโพดก่อนการทอรีแฟคชัน									
13PAHs	y=mx+b	Area	X (ng/ μ L)	ppmv	MW (g/mol)	mg/m ³ (at ambient)	mg/Nm ³ (at STP)	g/Nm ³	
Acenaphthylene	y = 4903.4x + 277930	5683316	1102.395	110.240	152.2	685.83	628.32	0.6283	
Fluorene	y = 5627.4 x + 273607	7183930	1227.978	122.798	166.22	834.33	764.37	0.7644	
Phenanthrene	y = 6957.3 x + 236480	23619838	3360.982	336.098	178.23	2448.55	2243.24	2.2432	
Anthracene	y = 8032.8 x + 184687	3388435	398.833	39.883	178.23	290.56	266.20	0.2662	
Pyrene	y = 10891x + 197415	14307918	1295.611	129.561	202.25	1071.09	981.28	0.9813	
Benzo(a)anthracene	y = 12960 x + 54429	8192068	627.904	62.790	228.29	585.93	536.80	0.5368	
Chrysene	y = 14630 x + 92955	972034	60.087	6.009	228.29	56.07	51.37	0.0514	
Benzo(b)fluoranthene	y = 19100 x + 124930	6103335	313.005	31.301	252.31	322.81	295.74	0.2957	
Benzo(k) fluoranthene	y = 20930 x + 89661	2954899	136.896	13.690	252.32	141.19	129.35	0.1294	
Benzo(a)pyrene	y = 22771 x + 38230	4226955	183.950	18.395	252.31	189.71	173.81	0.1738	
Dibenz(a,h)anthracene	y = 48412 x - 11447	4881236	100.591	10.059	278.35	114.45	104.85	0.1049	
Benzo(g,h,i)perylene	y = 9891.6 x + 237385	1805019	158.481	15.848	276.33	179.01	164.00	0.164	
Indeno(1,2,3-cd)pyrene	y = 23150 x + 122338	2496845	102.570	10.257	276.33	115.85	106.14	0.1061	

ตาราง 24 การคำนวณปริมาณมลพิษอากาศชนิด 13PAHs จากเชื้อเพลิงอัดเม็ด PETTS หลังการทอรีแฟคชั่น

ตะกอนพลาสดิกชนิด PET : ซึ่งได้โดยไม่ผ่านการทอรีแฟคชั่น							
13PAHs	y=mx+b	Area	X (ng/ μ L)	ppmv	MW (g/mol)	mg/m ³ (at ambient)	mg/Nm ³ (at STP)
Acenaphthylene	y = 4903.4x + 277830	N.D.	N.D.	N.D.	152.2	N.D	N.D
Fluorene	y = 5627.4 x + 273607	N.D.	N.D.	N.D.	166.22	N.D	N.D
Phenanthrene	y = 6957.3 x + 236480	N.D.	N.D.	N.D.	178.23	N.D	N.D
Anthracene	y = 8032.8 x + 184687	34895.5	-18.647	-1.865	178.23	-13.59	-0.012
Pyrene	y = 10891x + 197415	20615.5	-16.234	-1.623	202.25	-13.42	-0.012
Benzo(a)anthracene	y = 12960 x + 54429	N.D.	N.D.	N.D.	228.29	N.D	N.D
Chrysene	y = 14630 x + 92955	572683.5	32.791	3.279	228.29	30.60	0.028
Benzo(b)fluoranthene	y = 19100 x + 124930	936248	42.477	4.248	252.31	43.81	0.0401
Benzo(k) fluoranthene	y = 20930 x + 89661	N.D.	N.D.	N.D.	252.32	N.D	N.D
Benzo(a)pyrene	y = 22771 x + 38230	752376	31.362	3.136	252.31	32.34	0.0296
Dibenz(a,h)anthracene	y = 48412 x - 11447	N.D.	N.D.	N.D.	278.35	N.D	N.D
Benzo(g,h,i)perylene	y = 9891.6 x + 237385	N.D.	N.D.	N.D.	276.33	N.D.	N.D.
Indeno(1,2,3-cd)pyrene	y = 23150 x + 122338	N.D.	N.D.	N.D.	276.33	N.D	N.D

หมายเหตุ: N.D.(Not Detected)=ตรวจไม่พบ

ตาราง 25 การคำนวณปริมาณพิษอากาศชนิด 13PAHs จากเชื้อเพลิงอัดเม็ด PET/ES หลังการทอรีนเฟคชั่น

ตะกอนพลสดิกชนิด PET : ซีล้อยู่ภายใต้สภาวะการทอรีนเฟคชั่น							
13PAHs	y=mx+b	Area	X (ng/μL)	ppmv	MW (g/mol)	mg/m ³ (at ambient)	mg/Nm ³ (at STP)
Acenaphthylene	y = 4903.4x + 277830	N.D.	N.D.	N.D.	152.2	N.D.	N.D.
Fluorene	y = 5627.4 x + 273607	N.D.	N.D.	N.D.	166.22	N.D.	N.D.
Phenanthrene	y = 6957.3 x + 236480	94098	-20.465	-2.047	178.23	-14.91	-0.014
Anthracene	y = 8032.8 x + 184687	33336	-18.842	-1.884	178.23	-13.73	-0.013
Pyrene	y = 10891x + 197415	9166.5	-17.265	-1.728	202.26	-14.29	-0.013
Benzo(a)anthracene	y = 12960 x + 54429	285550.5	17.853	1.783	228.29	16.64	0.0152
Chrysene	y = 14630 x + 92955	N.D.	N.D.	N.D.	228.29	N.D.	N.D.
Benzo(b)fluoranthene	y = 19100 x + 124930	N.D.	N.D.	N.D.	252.31	N.D.	N.D.
Benzo(k) fluoranthene	y = 20930 x + 89661	1217322	53.878	5.388	252.32	55.57	0.0509
Benzo(a)pyrene	y = 22771 x + 38230	N.D.	N.D.	N.D.	252.31	N.D.	N.D.
Dibenz(a,h)anthracene	y = 48412 x - 11447	N.D.	N.D.	N.D.	278.35	N.D.	N.D.
Benzo(g,h,i)perylene	y = 9891.6 x + 237385	N.D.	N.D.	N.D.	276.33	N.D.	N.D.
Indeno(1,2,3-cd)pyrene	y = 23150 x + 122338	N.D.	N.D.	N.D.	276.33	N.D.	N.D.

หมายเหตุ: N.D (Not Detected)=ตรวจไม่พบ

ตาราง 26 การคำนวณปริมาณมลพิษอากาศชนิด 13PAHs จากเชื้อเพลิงชนิด PET/CC หลังการทอริแฟคชัน

ตะกอนพลาสดิกชนิด PET : ชั่งน้ำหนักเพื่อหลังการทอริแฟคชัน							
13PAHs	y=mx+b	Area	X (ng/ μ L)	ppmv	MW (g/mol)	mg/m ³ (at ambient)	mg/Nm ³ (at STP)
Acenaphthylene	y = 4903.4x + 277830	551237.5	55.759	5.576	152.2	34.69	0.0318
Fluorene	y = 5627.4 x + 273607	2217357	345.408	34.541	166.22	234.68	0.215
Phenanthrene	y = 6957.3 x + 236480	33812399	4825.998	482.600	178.23	3515.85	3.221
Anthracene	y = 8032.8 x + 184687	4578156	546.941	54.694	178.23	398.46	0.365
Pyrene	y = 10891x + 197415	6456508	574.703	57.470	202.25	475.11	0.4353
Benzo(a)anthracene	y = 12960 x + 54429	4372216	333.163	33.316	228.29	310.89	0.2848
Chrysene	y = 14630 x + 92955	12998306	882.116	88.212	228.29	823.14	0.7541
Benzo(b)fluoranthene	y = 19100 x + 124930	8600510	443.748	44.375	252.31	457.65	0.4193
Benzo(k) fluoranthene	y = 20930 x + 89661	2661946	122.899	12.290	252.32	126.75	0.1161
Benzo(a)pyrene	y = 22771 x + 38230	3624883	157.510	15.751	252.31	162.44	0.1488
Dibenz(a,h)anthracene	y = 48412 x - 11447	6161879	127.044	12.704	276.35	144.55	0.1324
Benzo(g,h,i)perylene	y = 9891.6 x + 237385	2101817	188.486	18.849	276.33	212.90	0.195
Indeno(1,2,3-cd)pyrene	y = 23150 x + 122338	3026262	125.439	12.544	276.33	141.69	0.1298

ตาราง 27 การคำนวณปริมาณมลพิษจากอากาศชนิด BTEX จากเชื้อเพลิงอัดเม็ด PET/TS,PET/ES และ PET/CC
ก่อนการทอรีแฟคชั่น

ตะกอนพลาสติกชนิด PET : ซีลียไม่ใส่ก่อนการทอรีแฟคชั่น									
BTEX	y=mx+b	Area	X (ng/ μ L)	ppmv	MW (g/mol)	mg/m ³ (at ambient)	mg/Nm ³ (at STP)	g/Nm ³	
Benzene	y = 7650.4x + 264406	N.D.	N.D.	N.D.	78.11	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Toluene	y = 19258x - 125350	330036.5	23.647	2.365	92.14	8.91	8.16	0.0082	
Ethylbenzene	y = 91761x - 225172	177896	4.393	0.439	106.17	1.91	1.75	0.0017	
o-Xylene	y = 160717x - 309642	36228.5	2.152	0.215	106.16	0.93	0.86	0.0009	
m,p-Xylene	y = 110748x - 381401	N.D.	N.D.	N.D.	106.16	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
กากตะกอนพลาสติก:ซีลียไม่ใส่ได้ก่อนการทอรีแฟคชั่น									
Benzene	y = 7650.4x + 264406	N.D.	N.D.	N.D.	78.11	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Toluene	y = 19258x - 125350	4775158	254.466	25.447	92.14	95.84	87.80	0.0878	
Ethylbenzene	y = 91761x - 225172	162831	4.228	0.423	106.17	1.84	1.68	0.0017	
o-Xylene	y = 160717x - 309642	343475	4.084	0.406	106.16	1.76	1.62	0.0016	
m,p-Xylene	y = 110748x - 381401	N.D.	N.D.	N.D.	106.16	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
ตะกอนพลาสติกชนิด PET : ซังข้าวโพดก่อนการทอรีแฟคชั่น									
Benzene	y = 7650.4x + 264406	N.D.	N.D.	N.D.	78.11	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Toluene	y = 19258x - 125350	604934	37.921	3.792	92.14	14.28	13.08	0.0131	
Ethylbenzene	y = 91761x - 225172	327505	6.023	0.602	106.17	2.61	2.39	0.0024	
o-Xylene	y = 160717x - 309642	62720	2.317	0.232	106.16	1.01	0.92	0.0009	
m,p-Xylene	y = 110748x - 381401	N.D.	N.D.	N.D.	106.16	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.

หมายเหตุ: N.D.(Not Detected)=ตรวจไม่พบ

ตาราง 28 การคำนวณปริมาณมลพิษอากาศชนิด BTEX จากเชื้อเพลิงอัดเม็ด PET/TS,PET/ES และ PET/CC
หลังการทอรีแฟคชัน

ตะกอนพลาสติกชนิด PET : ซึ่งเลือกไม่สุกหลังการทอรีแฟคชัน									
BTEX	y=nx+b	Area	X (ng/ μ L)	ppmv	MW (g/mol)	mg/m ³ (at ambient)	mg/Nm ³ (at STP)	g/Nm ³	
Benzene	y = 7650.4x + 264406	N.D.	N.D.	N.D.	78.11	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Toluene	y = 19258x - 125350	N.D.	N.D.	N.D.	92.14	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Ethylbenzene	y = 91761x - 225172	N.D.	N.D.	N.D.	106.17	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
o-Xylene	y = 160717x - 309642	N.D.	N.D.	N.D.	106.16	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
m,p-Xylene	y = 110748x - 381401	N.D.	N.D.	N.D.	106.16	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
ตะกอนพลาสติกชนิด PET : ซึ่งเลือกไม่สุกตามขั้นตอนหลังการทอรีแฟคชัน									
Benzene	y = 7650.4x + 264406	N.D.	N.D.	N.D.	78.11	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Toluene	y = 19258x - 125350	N.D.	N.D.	N.D.	92.14	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Ethylbenzene	y = 91761x - 225172	N.D.	N.D.	N.D.	106.17	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
o-Xylene	y = 160717x - 309642	N.D.	N.D.	N.D.	106.16	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
m,p-Xylene	y = 110748x - 381401	N.D.	N.D.	N.D.	106.16	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
ตะกอนพลาสติกชนิด PET : ซึ่งเข้าโพลหลังการทอรีแฟคชัน									
Benzene	y = 7650.4x + 264406	N.D.	N.D.	N.D.	78.11	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Toluene	y = 19258x - 125350	555224	35.340	3.534	92.14	13.31	12.19	0.0122	0.0122
Ethylbenzene	y = 91761x - 225172	16764	2.637	0.264	106.17	1.14	1.05	0.001	0.001
o-Xylene	y = 160717x - 309642	20992.5	2.057	0.206	106.16	0.89	0.82	0.0008	0.0008
m,p-Xylene	y = 110748x - 381401	N.D.	N.D.	N.D.	106.16	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.

หมายเหตุ: N.D.(Not Detected)=ตรวจไม่พบ

ภาคผนวก ค สภาวะของเครื่อง GC/MS ที่ใช้ในการวิเคราะห์ของ 13PAHs และ BTEX จาก
การเผาไหม้เชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งก่อนและหลังการทอรีแฟคชัน

ตาราง 29 สภาวะของเครื่อง GC/MS ที่ใช้ในการวิเคราะห์ของ 13PAHs จากการเผาไหม้
เชื้อเพลิงอัดเม็ด

Item	Value		
Oven			
Initial temp (°C)	60		
Maximum temp (°C)	300		
Initial time (min)	3.6		
Equilibration time (min)	2		
Ramps	Rate (°C/min)	Final temp (°C)	Final time (min)
1	25	180	0
2	12	240	0
3	20	320	15
Post temp(°C)	50		
Run time (min)	30.3		
Inlet			
Mode	Split		
Initial temp (°C)	300		
Pressure (kPa)	93.1		
Split ratio	10.6		
Split flow (mL/min)	1.5		
Total flow (mL/min)	20.4		
Gas type	Helium gas		
Column			
Type	Capillary column		
Model	DB-5MS (30 m x 0.25 mm x 0.25 µm)		
Max temp (°C)	320		
Mode	Linear velocity		
Pressure (kPa)	93.1		
Detector			
Temp (°C)	300		
Hydrogen flow (mL/min)	45		
Air flow (°C)	450		
Mode	Linear velocity flow		
Thermal aux			
Initial temp (°C)	150		
Injector	Syringe Injector		

ตาราง 30 สภาวะของเครื่อง GC/MS ที่ใช้ในการวิเคราะห์ของ BTEX จากการเผาไหม้
เชื้อเพลิงอัดเม็ด

Item	Value		
Oven			
Initial temp (°C)	40		
Maximum temp (°C)	200		
Initial time (min)	2.5		
Equilibration time (min)	1		
Ramps	Rate (°C/min)	Final temp (°C)	Final time (min)
1	15	250	1
Post temp(°C)	50		
Run time (min)	17		
Inlet			
Mode	Split		
Initial temp (°C)	200		
Pressure (kPa)	24.2		
Split ratio	60		
Split flow (mL/min)	0.69		
Total flow (mL/min)	45.2		
Gas type	Helium gas		
Column			
Type	Capillary column		
Model	DB-5MS (30 m x 0.25 mm x 0.25µm)		
Max temp (°C)	200		
Mode	Linear velocity		
Pressure (kPa)	24.2		
Detector			
Temp (°C)	200		
Hydrogen flow (mL/min)	40		
Air flow (°C)	450		
Mode	Linear velocity flow		
Thermal aux			
Initial temp (°C)	200		
Injector	Syringe Injector		

**ภาคผนวก ง เอกสารผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี (Ultimate analysis) ของ
วัตถุดิบตั้งต้น ผลการวิเคราะห์การปนเปื้อนคลอไรด์และปรอทใน
เชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งก่อนและหลังการทอรีแฟคชัน**



ปี no. 5632/VRep.1247

11 กรกฎาคม 2561

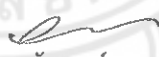
เรียน นางสาววันนารถ ทัศนวิวัฒน์
คณะเทคโนโลยีวิศวกรรมโลหการและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
สุรนารี 99 หมู่ที่ 9 ตำบลท่าโพธิ์ อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

รายงานผลการทดสอบ
ห้องปฏิบัติการ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

หมายเลขใบขอรับบริการ นวคท1242/61 รายงานผลการทดสอบลำดับที่ Rcp:นวคท611242
วันที่รับตัวอย่างทดสอบ 11 กรกฎาคม 2561 วันที่โอนบิลที่ทำการทดสอบ 11-16 กรกฎาคม 2561

รายการ ที่	รายการทดสอบ	ผลการทดสอบ		วิธีการเครื่องมือ ที่ใช้ทดสอบ
		ชื่อตัวอย่าง : 1. ซีเมนต์ ไลต์แคลิเบต	ชื่อตัวอย่าง : 2. ซีเมนต์ ขาวโท	
		หมายเลขตัวอย่าง : นวคท54985/61	หมายเลขตัวอย่าง : นวคท54986/61	
		ลักษณะหรือสภาพ ตัวอย่าง : ของแข็ง	ลักษณะหรือสภาพ ตัวอย่าง : ของแข็ง	
1	Carbon	44.219 %Wt	42.929 %Wt	CHNSO Analysis / CHN628,628S Truspec Micro O
2	Hydrogen	6.282 %Wt	6.393 %Wt	
3	Nitrogen	0.156 %Wt	0.265 %Wt	
4	Sulfur	N.D.	N.D.	
5	Oxygen	49.343 %Wt	50.413 %Wt	

N.D. = Not detected


 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นายสัตวแพทย์ ดร. ภคินจ คุปพิทยาหัตถ์)
 รองผู้อำนวยการศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
 ปฏิบัติการแทนผู้อำนวยการศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
 ผู้รับรอรายงานผลการทดสอบ

- รายงานได้รับรองเฉพาะตัวอย่างที่ทำการทดสอบตามที่ระบุไว้ข้างต้นเท่านั้น
- ห้ามคัด ทำนถ่ายสำเนาในรายงานผลการทดสอบแต่เพียงบางส่วนยกเว้นทำทั้งฉบับโดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากห้องปฏิบัติการ

End of Report

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 111 ถนนมหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000 Tel.0-4422-3000 Fax.0-4422-4070
Suranaree University of Technology 111 University Avenue, Sub District Suranaree, Muang District, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

**ภาพ 34 เอกสารผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี (Ultimate analysis)
ของวัตถุดิบตั้งต้นที่ส่งวิเคราะห์ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี**

Ionic Contamination		No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9	No.10	Specification
(ppb)	Chloride (Cl ⁻)	46.51	51.03	32.53	60.89	51.96	39.39	92.67	92.41	96.75	39.90	N/A

ภาพ 35 เอกสารผลการวิเคราะห์การปนเปื้อนคลอไรด์ในเชื้อเพลิงอัดเม็ดก่อนการ
ทอรีแฟคชัน ส่งวิเคราะห์ที่บริษัท เบลดัล อินดัสเตรียล (ประเทศไทย)
จำกัด

Ionic Contamination		No.1	No.2	No.3	Specification
Anions (ppb)	Chloride (Cl ⁻)	33.28	37.25	23.64	N/A

ภาพ 36 เอกสารผลการวิเคราะห์การปนเปื้อนคลอไรด์ในเชื้อเพลิงอัดเม็ดหลังการ
ทอรีแฟคชันส่งวิเคราะห์ที่บริษัท เบลดัล อินดัสเตรียล (ประเทศไทย)
จำกัด



บริษัท ห้างหุ้นส่วนจำกัด (ประเทศไทย) จำกัด

เลขที่ 101 ถนนสุขุมวิท แขวงคลองเตย เขตคลองเตย กรุงเทพมหานคร 10110
โทรศัพท์ 02-2555-1111 โทรสาร 02-2555-1112
เว็บไซต์ www.nist.go.th

เอกสารนี้เป็นเอกสารของบริษัท ห้างหุ้นส่วนจำกัด (ประเทศไทย) จำกัด และถือเป็นทรัพย์สินของบริษัท ห้างหุ้นส่วนจำกัด (ประเทศไทย) จำกัด

Central Lab

วันที่ออก : 25 กันยายน 2561

เลขที่รายงาน : TRCM61/19181

หน้า : 1/1

ใบรายงานผลการทดสอบ

ชื่อ-นามสกุลผู้ส่ง	คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เลขที่ 99 ม. 9 ม. 10 ม. 11 ม. 12 ม. 13 ม. 14 ม. 15 ม. 16 ม. 17 ม. 18 ม. 19 ม. 20 ม. 21 ม. 22 ม. 23 ม. 24 ม. 25 ม. 26 ม. 27 ม. 28 ม. 29 ม. 30 ม. 31 ม. 32 ม. 33 ม. 34 ม. 35 ม. 36 ม. 37 ม. 38 ม. 39 ม. 40 ม. 41 ม. 42 ม. 43 ม. 44 ม. 45 ม. 46 ม. 47 ม. 48 ม. 49 ม. 50 ม. 51 ม. 52 ม. 53 ม. 54 ม. 55 ม. 56 ม. 57 ม. 58 ม. 59 ม. 60 ม. 61 ม. 62 ม. 63 ม. 64 ม. 65 ม. 66 ม. 67 ม. 68 ม. 69 ม. 70 ม. 71 ม. 72 ม. 73 ม. 74 ม. 75 ม. 76 ม. 77 ม. 78 ม. 79 ม. 80 ม. 81 ม. 82 ม. 83 ม. 84 ม. 85 ม. 86 ม. 87 ม. 88 ม. 89 ม. 90 ม. 91 ม. 92 ม. 93 ม. 94 ม. 95 ม. 96 ม. 97 ม. 98 ม. 99 ม. 100
รายละเอียดตัวอย่าง	1
รหัสตัวอย่าง	CM61-07958-001
ลักษณะและสภาพตัวอย่าง	ประเภทตัวอย่าง : สารสกัด ลักษณะบรรจุ : หลอดพลาสติก, จำนวน : 1 หลอด, น้ำหนัก ปริมาตร : 50 มิลลิกรัม คุณสมบัติของรับ : คุณสมบัติของรับ, สภาพแวดล้อมปกติ
วันที่รับตัวอย่าง	20 กันยายน 2561
วันที่ทดสอบ	20 กันยายน 2561 - 25 กันยายน 2561

ผลการทดสอบ

รายการทดสอบ	ผลการทดสอบ	หน่วย	LOD	วิธีทดสอบอ้างอิง
Mercury (Hg)	Not Detected	ppm	0.13	Detected by ICP-OES

อนุมัติโดย

(นางสาวสุวิมล นาคน้อย)
กรรมการบริหารฝ่ายปฏิบัติการ
ศูนย์วิจัยและพัฒนา
CERTIFIED

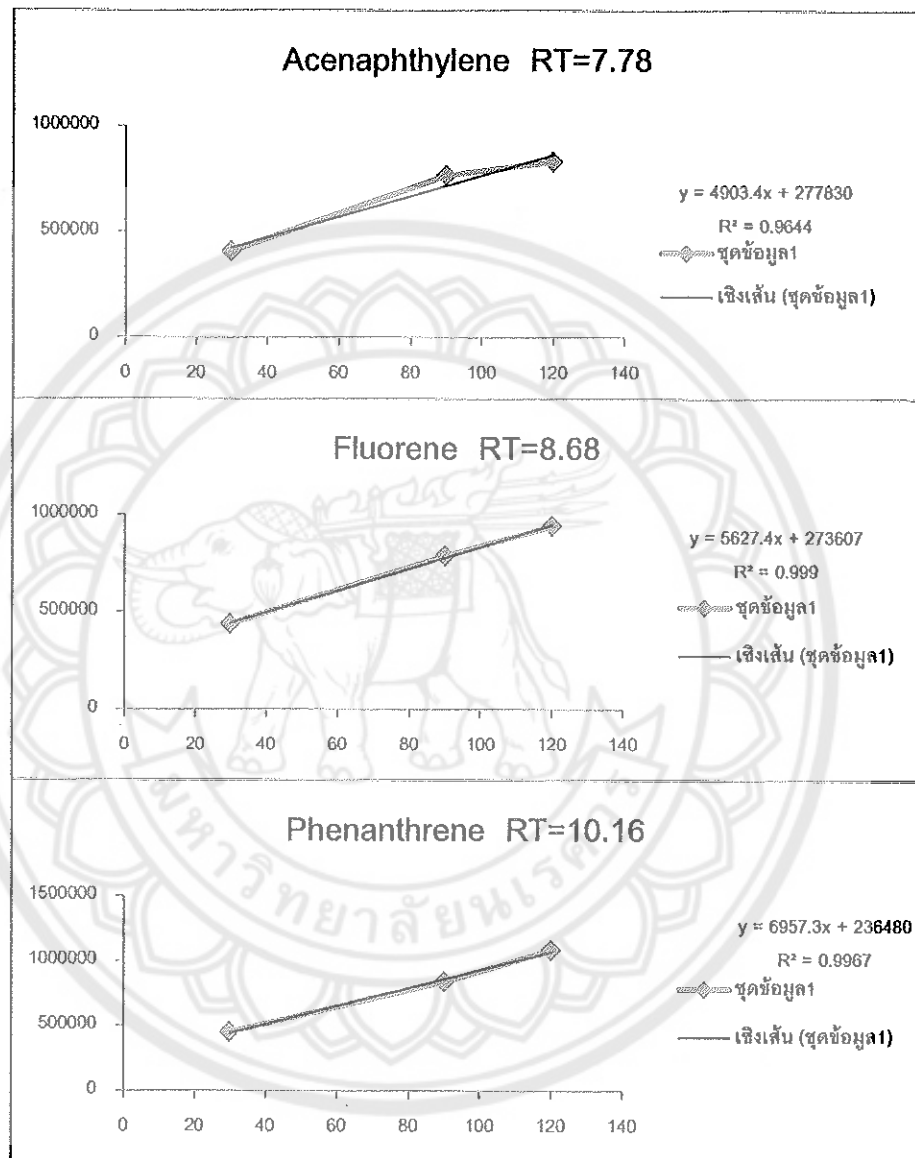
รายงานฉบับนี้จะมีผลเฉพาะตัวอย่างที่ส่งมาทดสอบเท่านั้น

รายงานผลการทดสอบนี้จัดทำขึ้นเพื่อเป็นเอกสารอ้างอิงเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้ในการอื่นได้
ISM-QS-21/01-001-R03(14/07/52/01/1) - CM

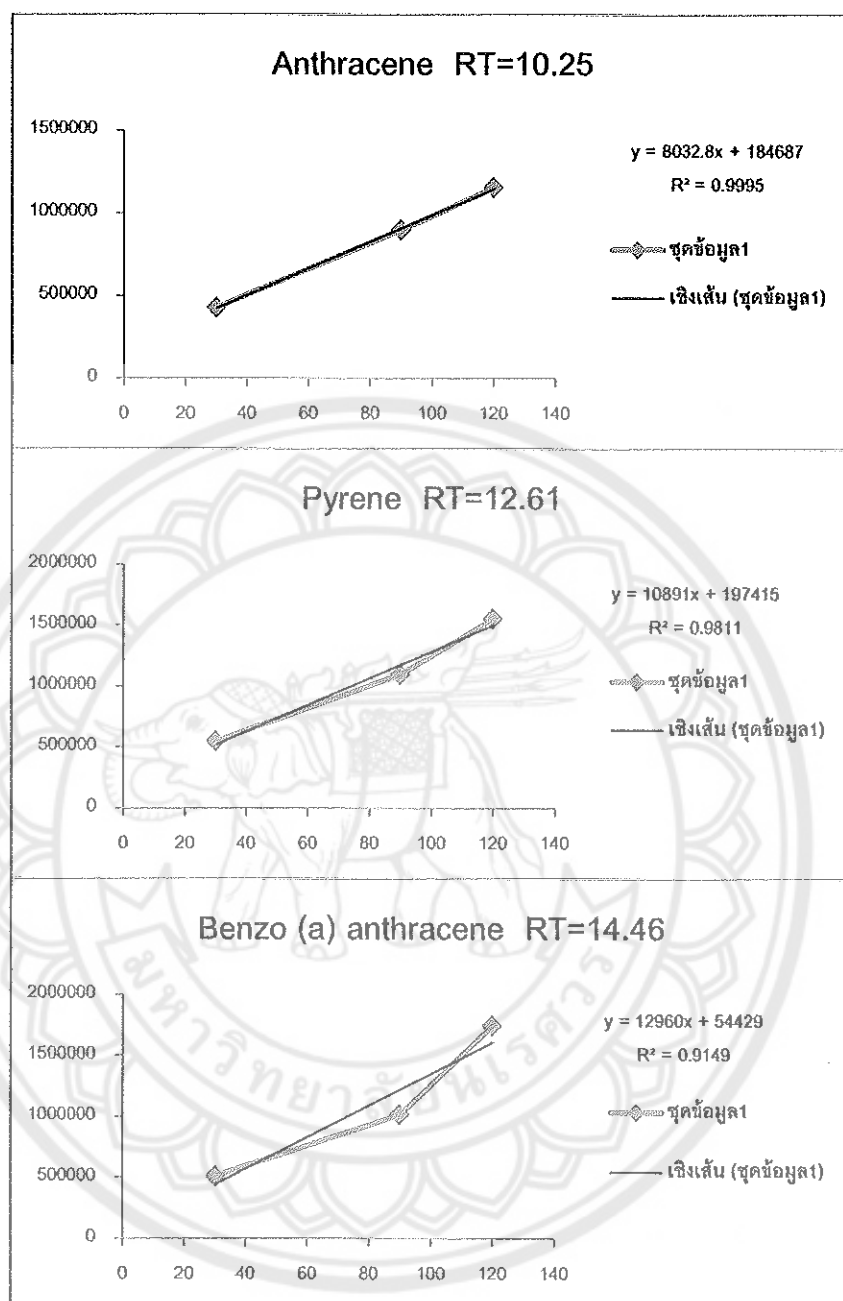


ภาพ 37 เอกสารผลการวิเคราะห์การปนเปื้อนปรอทในเชื้อเพลิงอัดเม็ด
ทั้งก่อนหลังการทอดรีแฟคชั่น ส่งวิเคราะห์ที่บริษัท
ห้องปฏิบัติการกลาง (ประเทศไทย) จำกัด

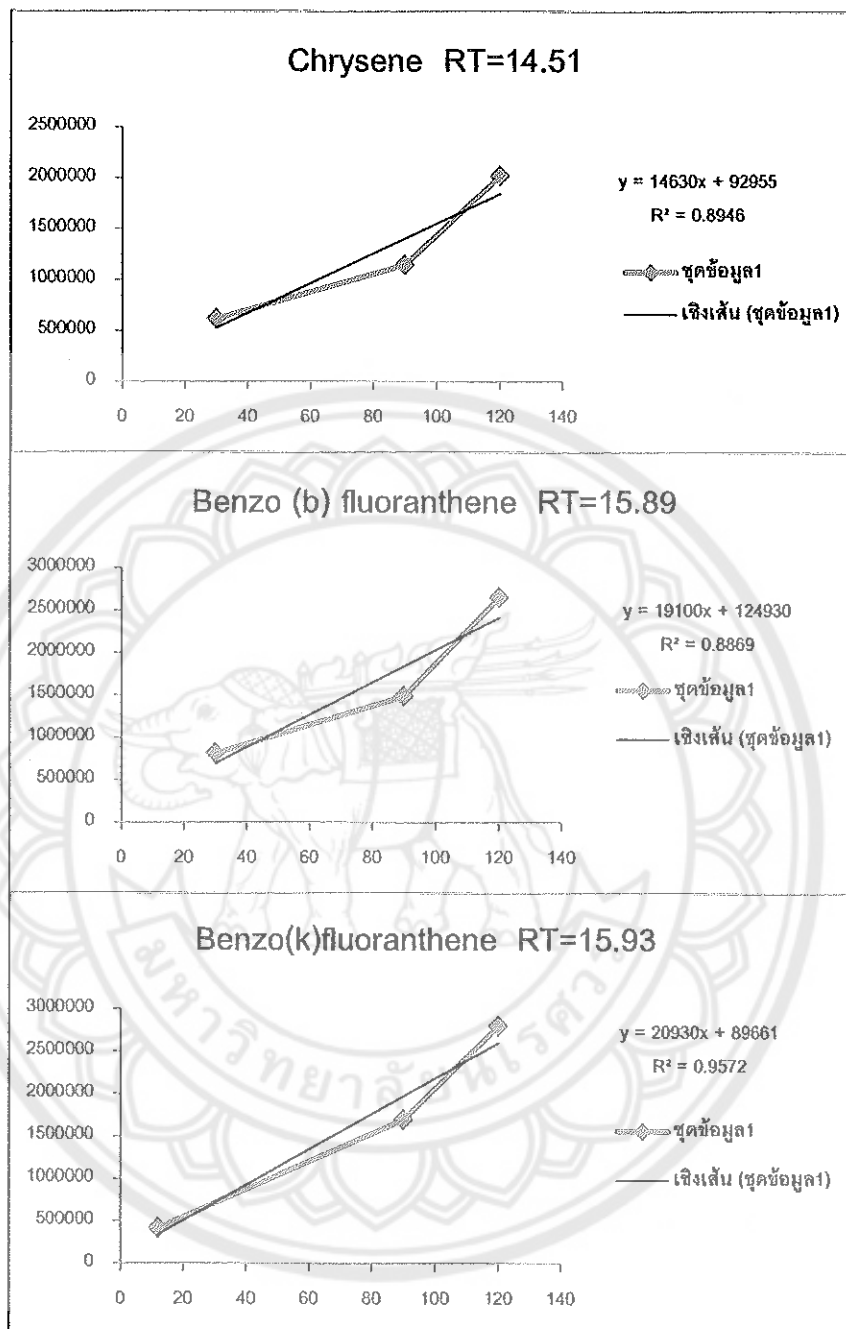
ภาคผนวก จ กราฟมาตรฐานแสดงความเข้มข้นของตัวอย่างสารละลายมาตรฐาน
13PAHs และ BTEX ที่ใช้อ้างอิงในการคำนวณ



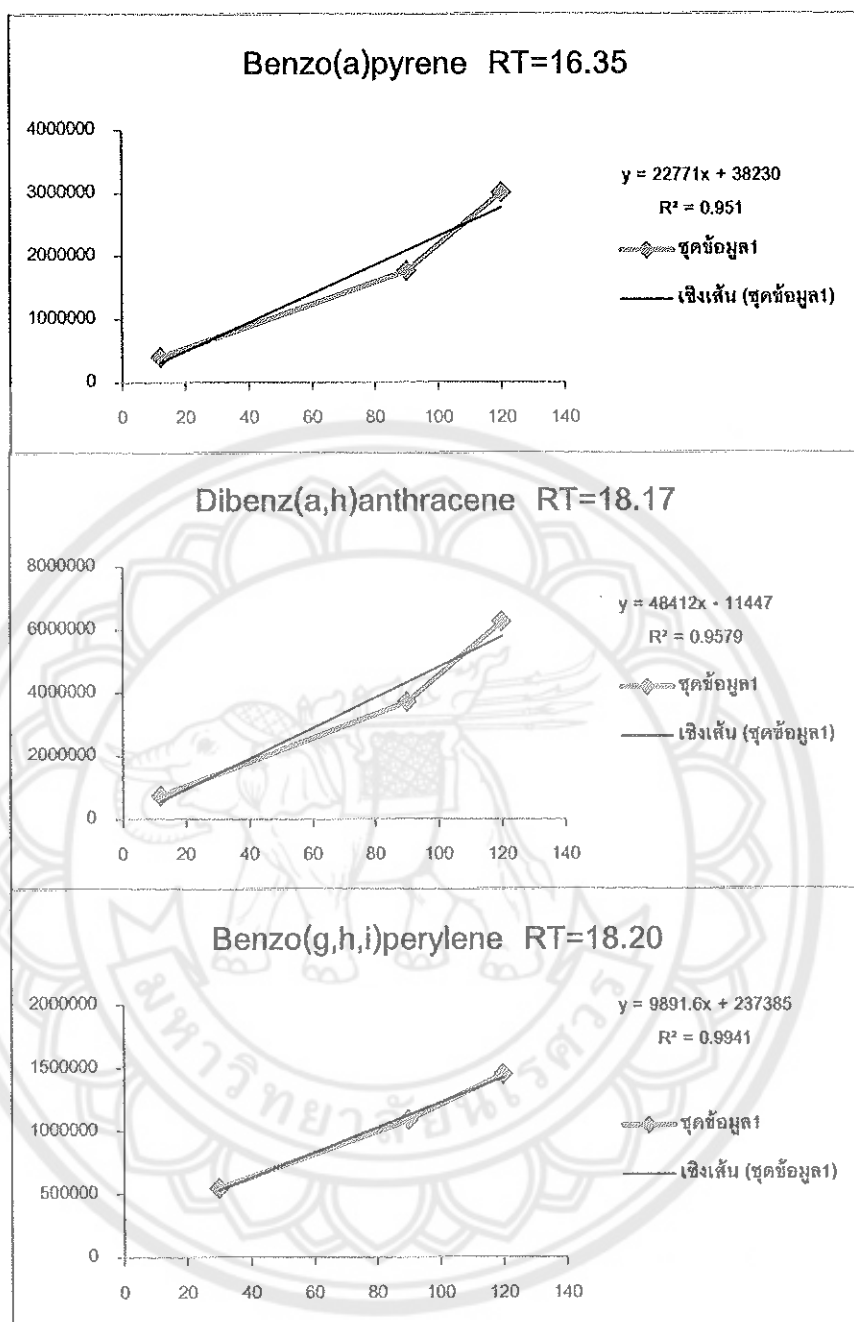
ภาพ 38 กราฟมาตรฐานของสารละลาย PAHs 13 ชนิด
ที่ความเข้มข้น 30 90 และ 120 mg/l



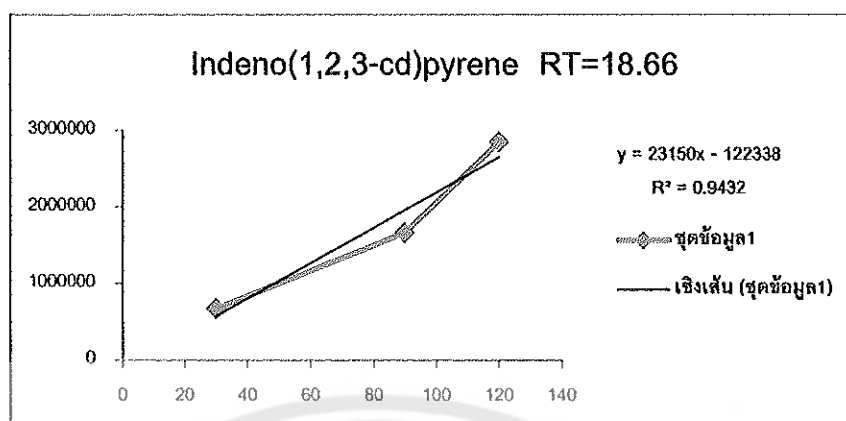
ภาพ 38 (ต่อ)



ภาพ 38 (ต่อ)

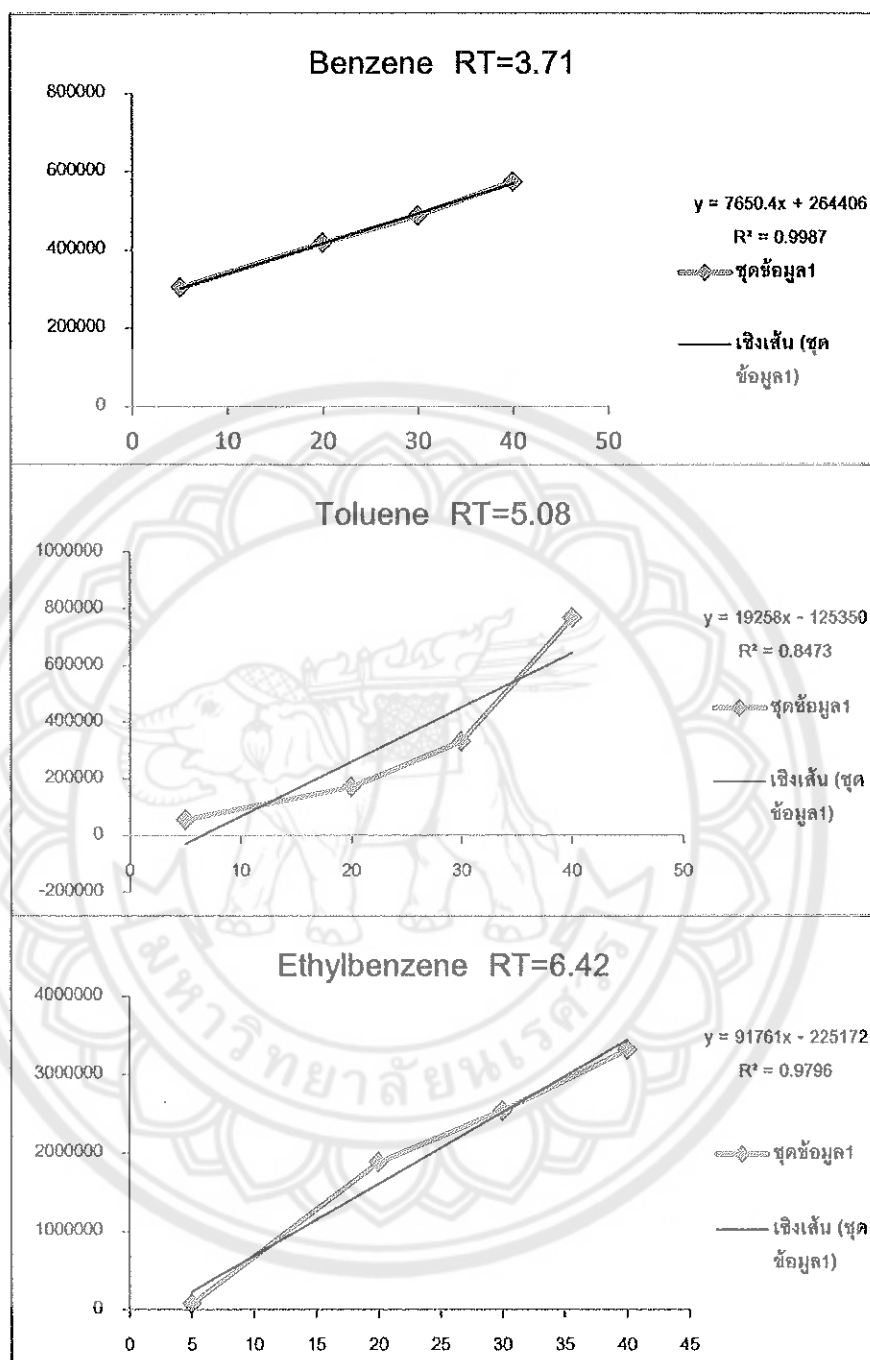


ภาพ 38 (ต่อ)



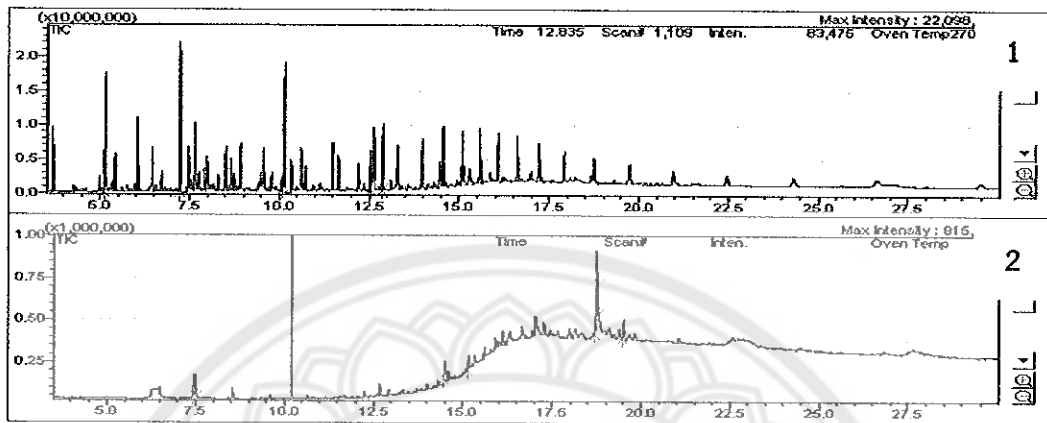
ภาพ 38 (ต่อ)





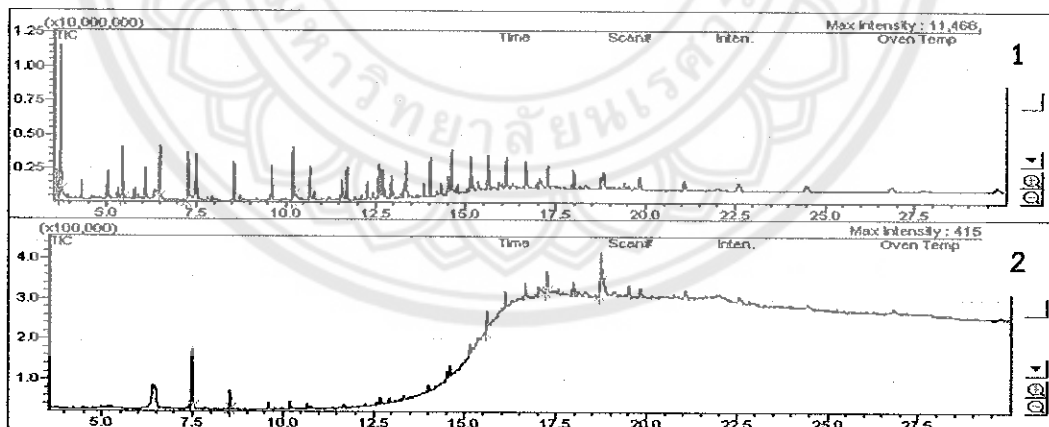
ภาพ 39 กราฟมาตรฐานของสารละลาย BTEX
ที่ความเข้มข้น 5 20 30 และ 40 mg/l

ภาคผนวก จ ผลการวิเคราะห์ค่า 13PAHs และ BTEX ในเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งก่อนและ
หลังการทอริแฟคชันจากเครื่อง GC/MS



ภาพ 40 (1) ผลการวิเคราะห์ค่า 13PAHs ในเชื้อเพลิงอัดเม็ดผลิตจากตะกอน
พลาสติกชนิด PET และซีลี้อยไม้สักก่อนการทอริแฟคชันจาก
เครื่อง GC/MS

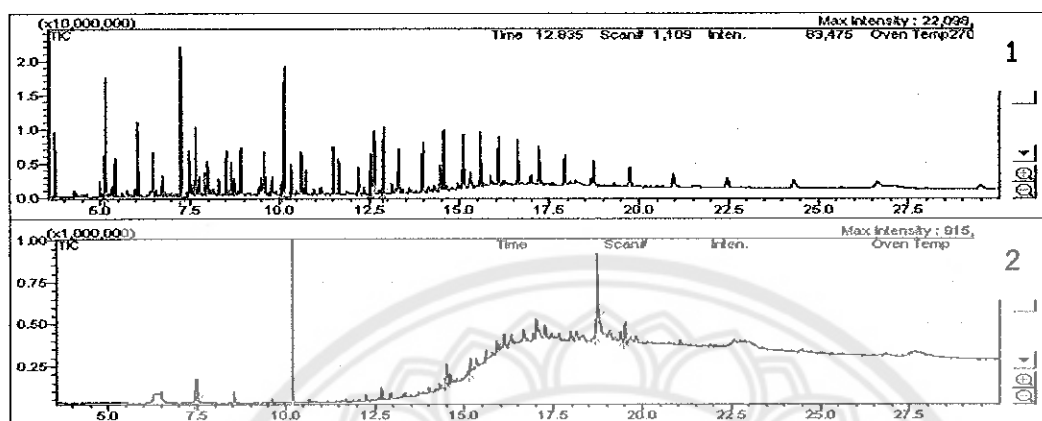
(2) ผลการวิเคราะห์ค่า 13PAHs ในเชื้อเพลิงอัดเม็ดผลิตจากตะกอน
พลาสติกชนิด PET และซีลี้อยไม้สักหลังการทอริแฟคชันจาก
เครื่อง GC/MS



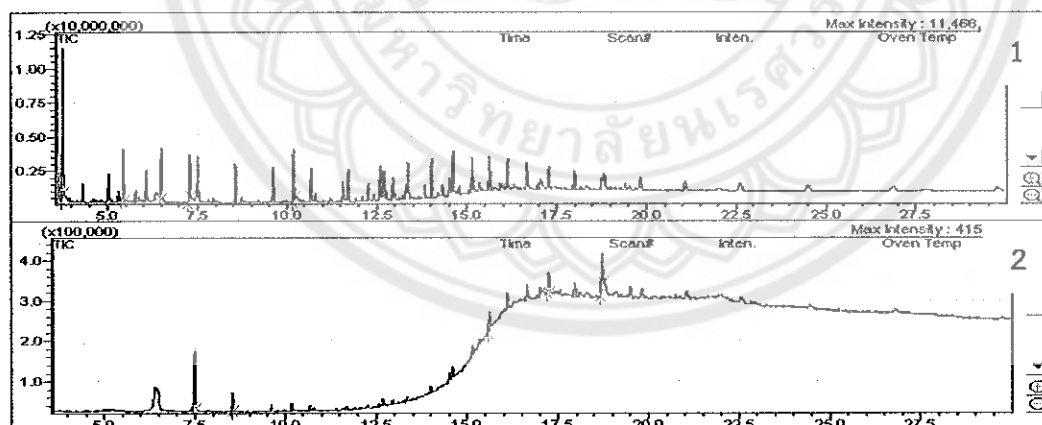
ภาพ 41 (1) ผลการวิเคราะห์ค่า 13PAHs ในเชื้อเพลิงอัดเม็ดผลิตจากตะกอน
พลาสติกชนิด PET และซีลี้อยไม้ยูคาลิปตัสก่อนการทอริแฟคชัน
จากเครื่อง GC/MS

(2) ผลการวิเคราะห์ค่า 13PAHs ในเชื้อเพลิงอัดเม็ดผลิตจากตะกอน
พลาสติกชนิด PET และซีลี้อยไม้ยูคาลิปตัสหลังการทอริแฟคชัน
จากเครื่อง GC/MS

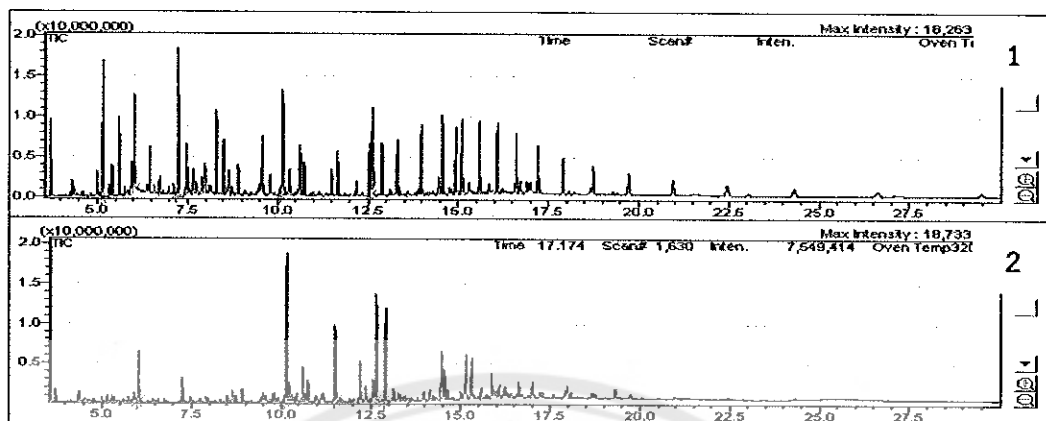
ภาคผนวก จ ผลการวิเคราะห์ค่า 13PAHs และ BTEX ในเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งก่อนและ
หลังการทอริแฟคชันจากเครื่อง GC/MS



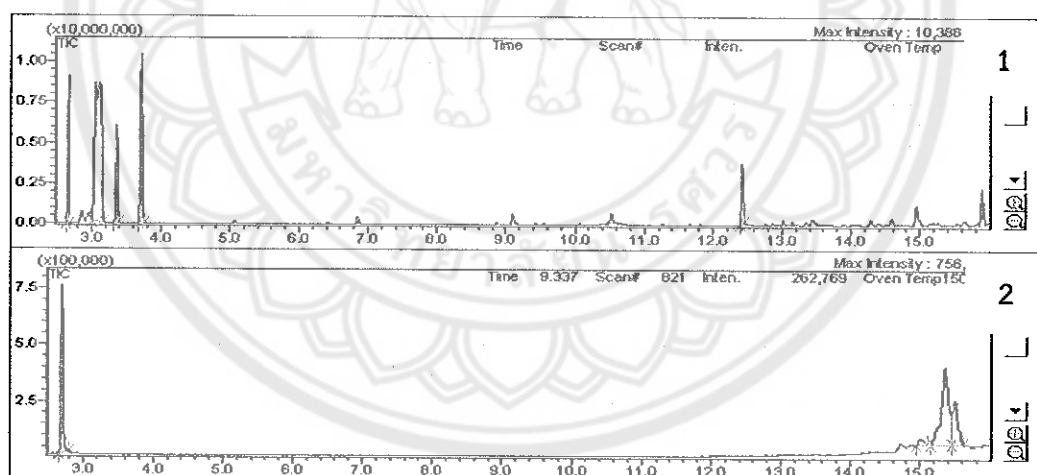
ภาพ 40 (1) ผลการวิเคราะห์ค่า 13PAHs ในเชื้อเพลิงอัดเม็ดผลิตจากตะกอน
พลาสติกชนิด PET และขี้เลื่อยไม้สักก่อนการทอริแฟคชันจาก
เครื่อง GC/MS
(2) ผลการวิเคราะห์ค่า 13PAHs ในเชื้อเพลิงอัดเม็ดผลิตจากตะกอน
พลาสติกชนิด PET และขี้เลื่อยไม้สักหลังการทอริแฟคชันจาก
เครื่อง GC/MS



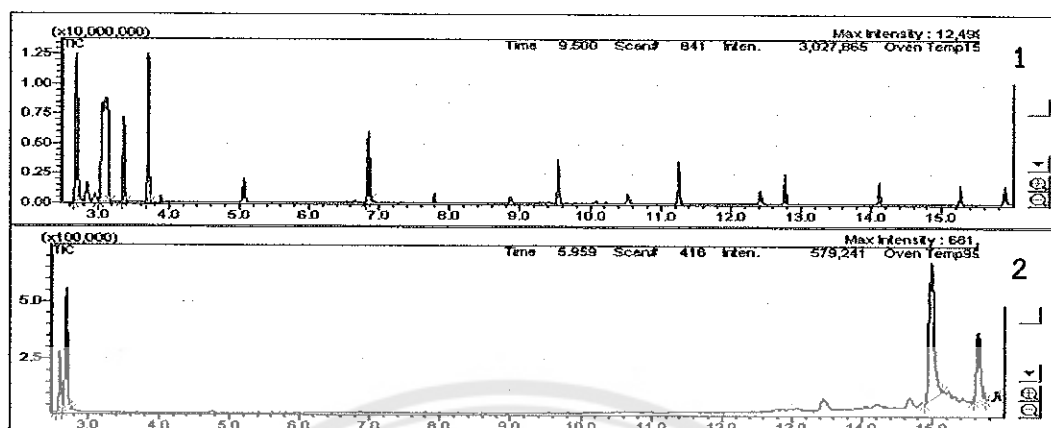
ภาพ 41 (1) ผลการวิเคราะห์ค่า 13PAHs ในเชื้อเพลิงอัดเม็ดผลิตจากตะกอน
พลาสติกชนิด PET และขี้เลื่อยไม้ยูคาลิปตัสก่อนการทอริแฟคชัน
จากเครื่อง GC/MS
(2) ผลการวิเคราะห์ค่า 13PAHs ในเชื้อเพลิงอัดเม็ดผลิตจากตะกอน
พลาสติกชนิด PET และขี้เลื่อยไม้ยูคาลิปตัสหลังการทอริแฟคชัน
จากเครื่อง GC/MS



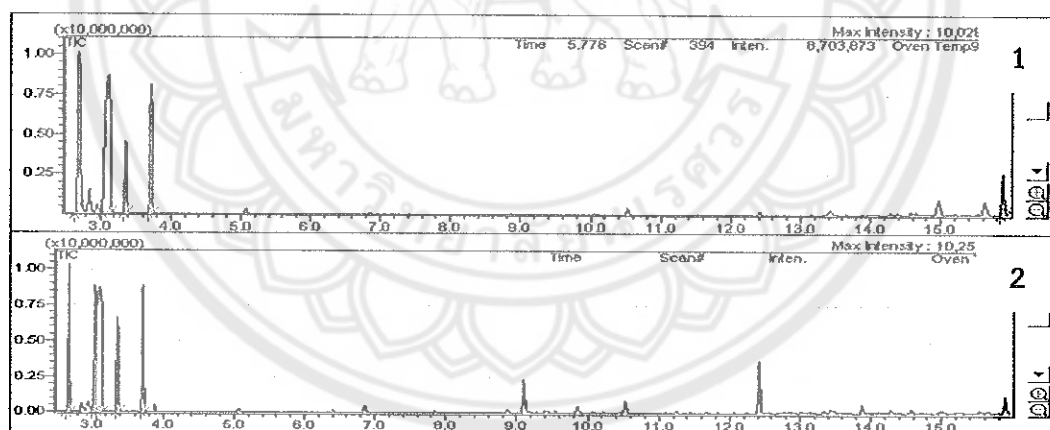
ภาพ 42 (1) ผลการวิเคราะห์ค่า 13PAHs ในเชื้อเพลิงอัดเม็ดผลิตจากตะกอน
พลาสติกชนิด PET และขี้ข้าวโพดก่อนการทอริแฟคชันจาก
เครื่อง GC/MS
(2) ผลการวิเคราะห์ค่า 13PAHs ในเชื้อเพลิงอัดเม็ดผลิตจากตะกอน
พลาสติกชนิด PET และขี้ข้าวโพดหลังการทอริแฟคชันจาก
เครื่อง GC/MS



ภาพ 43 (1) ผลการวิเคราะห์ค่า BTEX ในเชื้อเพลิงอัดเม็ดผลิตจากตะกอน
พลาสติกชนิด PET และขี้เลื่อยไม้สีก่อนการทอริแฟคชันจาก
เครื่อง GC/MS
(2) ผลการวิเคราะห์ค่า BTEX ในเชื้อเพลิงอัดเม็ดผลิตจากตะกอน
พลาสติกชนิด PET และขี้เลื่อยไม้สีกหลังการทอริแฟคชันจาก
เครื่อง GC/MS

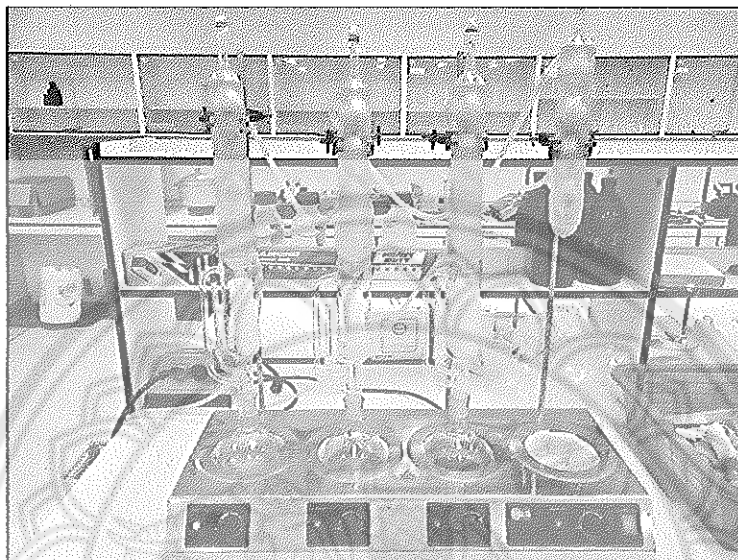


ภาพ 44 (1) ผลการวิเคราะห์ค่า BTEX ในเชื้อเพลิงอัดเม็ดผลิตจากตะกอน
พลาสติกชนิด PET และซีล้อยไม้ยูคาลิปตัสก่อนการทอรีแฟคชัน
จากเครื่อง GC/MS
(2) ผลการวิเคราะห์ค่า BTEX ในเชื้อเพลิงอัดเม็ดผลิตจากตะกอน
พลาสติกชนิด PET และซีล้อยไม้ยูคาลิปตัสการทอรีแฟคชัน
จากเครื่อง GC/MS

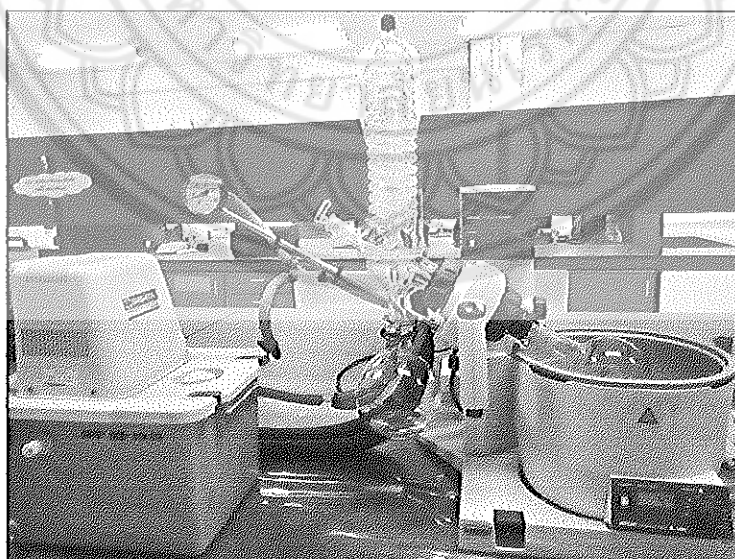


ภาพ 45 (1) ผลการวิเคราะห์ค่า BTEX ในเชื้อเพลิงอัดเม็ดผลิตจากตะกอน
พลาสติกชนิด PET และขี้ข้าวโพดก่อนการทอรีแฟคชันจากเครื่อง
GC/MS
(2) ผลการวิเคราะห์ค่า BTEX ในเชื้อเพลิงอัดเม็ดผลิตจากตะกอน
พลาสติกชนิด PET และขี้ข้าวโพดหลังการทอรีแฟคชันจากเครื่อง
GC/MS

ภาคผนวก ข การสกัดหาปริมาณ 13PAHs และ BTEX ในเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งก่อนและ
หลังการทอริแฟคชัน

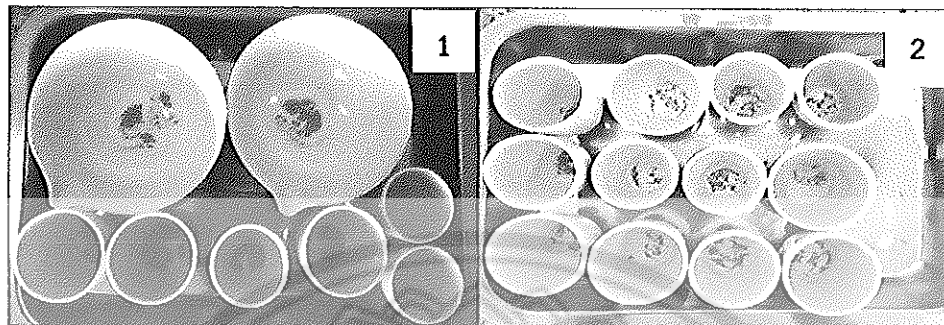


ภาพ 46 ชุดสกัดหาปริมาณ 13PAHs และ BTEX ในเชื้อเพลิง
อัดเม็ดทั้งก่อนและหลังการทอริแฟคชัน



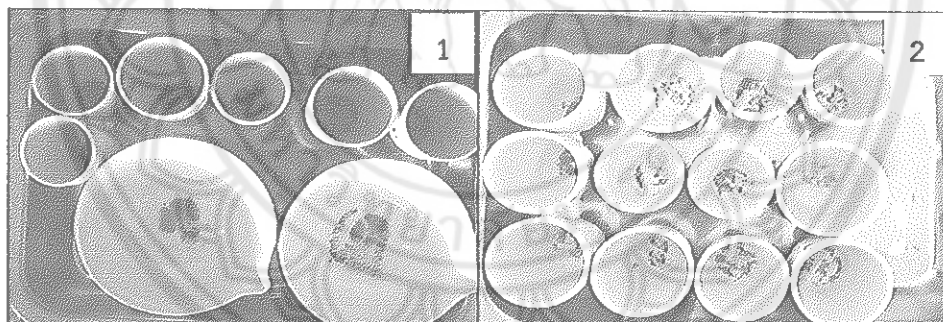
ภาพ 47 เครื่องกลั่นระเหยแบบหมุนภายใต้
สุญญากาศ(Rotary evaporator (BUCHI
Rotavapor, R-200)

ภาคผนวก ข เถ้าและปริมาณเถ้าจากการวิเคราะห์ปริมาณสารระเหยของวัตถุดิบตั้งต้นและเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งก่อนและหลังการทอริแฟคชัน



ภาพ 48 (1) เถ้าของตะกอนพลาสติกชนิด PET ที่ละลายไม้สีก ที่ละลายไม้ยูคาลิปตัส และ ชั่งข้าวโพด เผาที่อุณหภูมิ 750 °C เวลา 3 ชั่วโมง

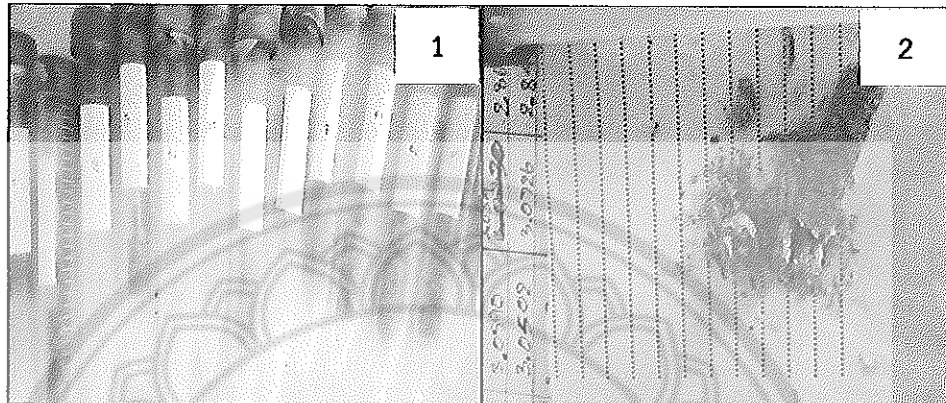
(2) เถ้าของเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งก่อนและหลังการทอริแฟคชัน เผาที่อุณหภูมิ 750 °C เวลา 3 ชั่วโมง



ภาพ 49 (1) เถ้าจากการวิเคราะห์ปริมาณสารระเหยของตะกอนพลาสติกชนิด PET ที่ละลายไม้สีก ที่ละลายไม้ยูคาลิปตัส และ ชั่งข้าวโพด เผาที่อุณหภูมิ 900 °C เวลา 7 นาที

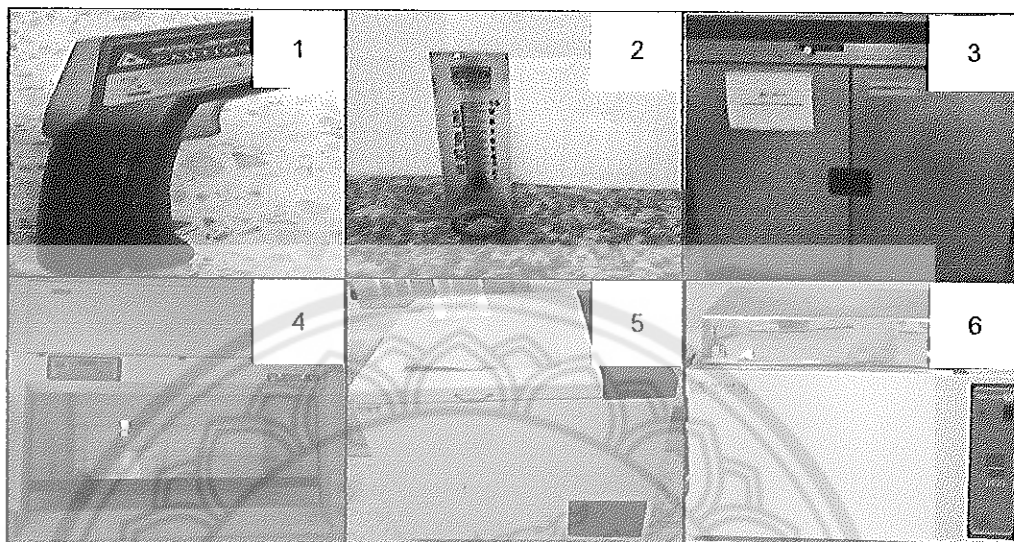
(2) เถ้าจากการวิเคราะห์ปริมาณสารระเหยของเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งก่อนและหลังการทอริแฟคชัน เผาที่อุณหภูมิ 900 °C เวลา 7 นาที

ภาคผนวก ฅ การเตรียมเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั้งก่อนและหลังการทอริแฟคชันเพื่อทดสอบค่า
ดัชนีความคงทน และเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ได้จากการอัดด้วยเครื่อง
อัดไฮดรอลิค



ภาพ 50 (1) ตัวอย่างเตรียมทดสอบค่าดัชนีความคงทนด้วยเครื่อง
วิเคราะห์ค่าการแตก่วน
(2) ตัวอย่างหลังทดสอบค่าดัชนีความคงทนด้วยเครื่อง
วิเคราะห์ค่าการแตก่วน

ภาคผนวก ญ ภาพแสดงเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง



ภาพ 51 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- (1) เครื่องวัดอุณหภูมิอินฟราเรดเทอร์โมมิเตอร์ (Aropak, AIT-42R)
- (2) เครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศ (Flow meter) (SHLLJ, LZM-6)
- (3) ตู้อบลมร้อน(Hot air oven) (Memmert)
- (4) ตู้ดูดไอสารเคมี (Fume Hood) (Flexlab, SH 150 DC)
- (5) เครื่องเขย่าควบคุมอุณหภูมิ(JSR, JSSI-300C)
- (6) อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath) (Scipro, DH-45-110)