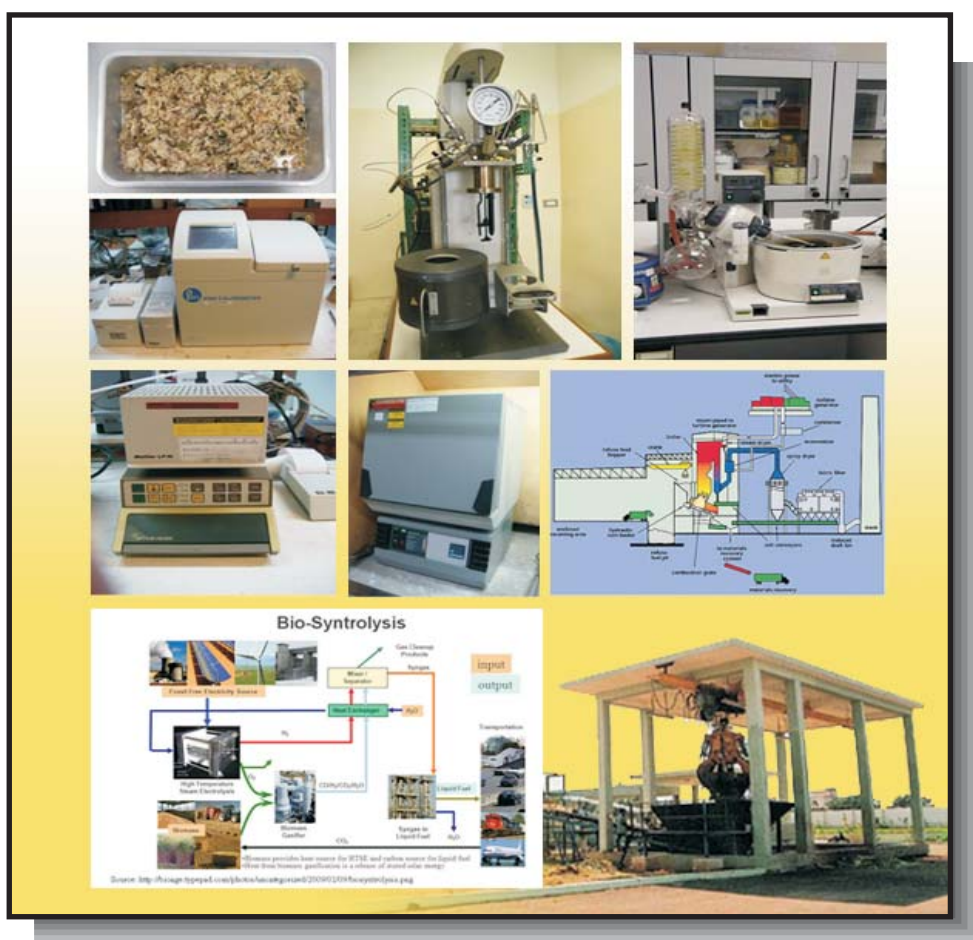


วว.

โครงการวิจัยที่ ภ. 51-06 / ย. 2 / รายงานฉบับที่ 1 (ฉบับสมบูรณ์)

การผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากขยะอินทรีย์ ภายใต้ความดันและอุณหภูมิสูง



สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย
กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

โครงการวิจัยที่ ภ. 51-06

วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตเชื้อเพลิงทางเลือกคุณภาพสูงจากขยะ

โครงการย่อยที่ 2

การผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากขยะอินทรีย์ภายใต้ความดันและอุณหภูมิสูง

รายงานฉบับที่ 1 (ฉบับสมบูรณ์)

การผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากขยะอินทรีย์ภายใต้ความดันและอุณหภูมิสูง

โดย

ชนศ อุทิศธรรม

ปฐมพร พูลสวัสดิ์

วิรัช สุนทรรังสรรค์

โสภณ พรหมสุวรรณ

มะนุ บุญแสร์

บรรณาธิการ

นฤมล รื่นไวย์

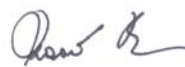
ลิขิต หาญจากสิทธิ์

บุญเรียม น้อยชุมแพ

วว., กรุงเทพฯ 2554

สงวนลิขสิทธิ์

รายงานฉบับนี้ได้รับการอนุมัติให้พิมพ์โดย
ผู้ว่าการสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย



(นางเกษมศรี หอมจีน)
ผู้ว่าการ

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอแสดงความขอบคุณ เจ้าหน้าที่เทคนิคของฝ่ายเทคโนโลยีพลังงานที่ได้ช่วยให้การดำเนินงานคล่องตัวดี และเจ้าหน้าที่ห้องสมุดของสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ที่ได้อำนวยความสะดวกต่อการสืบค้นข้อมูลการวิจัยอย่างดียิ่ง.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
สารบัญตาราง	ค
สารบัญรูป	ง
ABSTRACT	1
บทคัดย่อ	2
1. บทนำ	3
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
3. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง	20
4. ผลการทดลองและวิจารณ์	30
5. สรุปและข้อเสนอแนะ	51
6. เอกสารอ้างอิง	54

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1. คุณสมบัติของน้ำ	13
ตารางที่ 2.2. เปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของก๊าซ ของไหลเหนือวิกฤต และของเหลว (Taylor 1996)	14
ตารางที่ 3.1. ส่วนประกอบและสัดส่วนของเศษอาหารจำลอง	21
ตารางที่ 3.2. ตัวแปรการทดลองที่จำกัดอุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส	28
ตารางที่ 4.1. คุณสมบัติเชื้อเพลิงด้านปริมาณกลุ่มสารและธาตุของขยะเศษอาหาร	30
ตารางที่ 4.2. สมดุลมวลสารที่การเติมขยะเศษอาหารจำนวน 150 กรัม	45
ตารางที่ 4.3. สมดุลพลังงานที่การเติมขยะเศษอาหารจำนวน 150 กรัม	47
ตารางที่ 4.4. การเปรียบเทียบเชิงปริมาณและมูลค่า	48
ตารางที่ 4.5. ข้อกำหนดที่ใช้ในการเปรียบเทียบ	49
ตารางที่ 4.6. วิเคราะห์เชิงมูลค่ากับการป้อนพลังงานด้วยไม้ฟืน ก๊าซหุงต้ม และไฟฟ้า	50

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1. วิธีการวิจัยการผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากขยะเศษอาหาร	5
รูปที่ 2.1. กระบวนการผลิตและพัฒนาเชื้อเพลิงเหลวจากขยะอินทรีย์	7
รูปที่ 2.2. การเผาไหม้ขยะโดยตรงในหม้อไอน้ำเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้า	8
รูปที่ 2.3. การผลิตก๊าซในเตาก๊าซซิฟเฟอร์เพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้า	9
รูปที่ 2.4. การผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้า	10
รูปที่ 2.5. การผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากขยะ	10
รูปที่ 2.6. กระบวนการผลิต RDF	11
รูปที่ 2.7. เชื้อเพลิงขยะแท่ง	11
รูปที่ 2.8. โครงสร้างโมเลกุลของน้ำ	12
รูปที่ 2.9. น้ำในสภาวะวิกฤต	15
รูปที่ 3.1. เศษอาหารจำลอง	21
รูปที่ 3.2. เครื่องปฏิกรณ์สังเคราะห์น้ำมันชีวภาพ	22
รูปที่ 3.3. เครื่องอัลตราโซนิก	23
รูปที่ 3.4. เครื่องระเหยแบบหมุน	24
รูปที่ 3.5. เครื่องวัดค่าความร้อน	25
รูปที่ 3.6. เครื่องวัดความชื้น	25
รูปที่ 3.7. เครื่องวัดสารระเหยและบี๊เอ้า	26
รูปที่ 3.8. เครื่องวิเคราะห์ธาตุ	26
รูปที่ 3.9. ขั้นตอนการแยกน้ำมันชีวภาพและถ่านคาร์บอนออกจากผลผลิตที่ได้	27
รูปที่ 3.10. ขั้นตอนการทดลอง	29
รูปที่ 4.1. ผลของความดันและเวลาที่หน่วงต่อผลผลิตน้ำมันชีวภาพที่ได้	32
รูปที่ 4.2. ผลของความดันและเวลาที่หน่วงต่อผลผลิตถ่านคาร์บอนที่ได้	33
รูปที่ 4.3. ผลของความดันและเวลาที่หน่วงต่อผลผลิตของเหลวและก๊าซที่ได้	34
รูปที่ 4.4. ผลผลิตรวมที่ได้ที่สภาวะที่เหมาะสมที่สุด	35
รูปที่ 4.5. ปริมาณออกซิเจนในน้ำมันชีวภาพ	36
รูปที่ 4.6. ปริมาณไฮโดรเจนในน้ำมันชีวภาพ	37
รูปที่ 4.7. ปริมาณคาร์บอนในน้ำมันชีวภาพ	38

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 4.8. ไฮโดรเจน ออกซิเจน และคาร์บอนในน้ำมันชีวภาพภายใต้สภาวะที่เหมาะสมที่สุด	38
รูปที่ 4.9. ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพ	39
รูปที่ 4.10. ปริมาณออกซิเจนในถ่านคาร์บอน	40
รูปที่ 4.11. ปริมาณไฮโดรเจนในถ่านคาร์บอน	41
รูปที่ 4.12. ปริมาณคาร์บอนในถ่านคาร์บอน	42
รูปที่ 4.13. ไฮโดรเจน ออกซิเจน และคาร์บอนในถ่านคาร์บอนภายใต้สภาวะที่เหมาะสมที่สุด	43
รูปที่ 4.14. ค่าความร้อนของถ่านคาร์บอน	44

PRODUCING LIQUID FUEL FROM ORGANIC WASTE UNDER HIGH PRESSURE AND TEMPERATURE CONDITIONS

**Thanes Utistham, Pathomporn Pulsawad, Wirachai Soontornrangson,
Sophon Prohmsuwan and Manoo Boonsae**

ABSTRACT

An increase of municipal solid waste has significantly adversely impacted on both management and environment issues. One of the several methods is to turn the huge amount of waste into energy in order to address the problematic issues and to be gained as power source. However, the condition in which the system can function properly must be extremely low in moisture content. The system has then to apply the additional drying process which does not cause cost effective. In order to reduce the moisture content in municipal solid waste the separation of organic waste, particularly high moisture intent food waste will be another practical alternative.

In this research, food waste with over 80% moisture content was used in the reaction under super critical water conditions in 0.5 liter reactor with 4 feed rates of 100, 150, 200 and 250 g and 30, 46 and 60 retention times at 380°C. The experimental results showed that the optimal conditions of 242 bar and 30 min. retention time produced 7.91% bio oil of the 150 g food waste. Bio oil was composed of 10.30% hydrogen, 13.59% oxygen and 75.56% carbon with heating value of 38,059 kJ. Charcoal was a by-product from the process which consisted of 4.64% hydrogen, 18.48% oxygen and 76.11% carbon with heating value of 29,470 kJ. The rest from reaction product was water. Both bio oil and charcoal from the experiment could be potentially used to substitute fuel oil and other charcoal.

การผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากขยะอินทรีย์ภายใต้ความดันและอุณหภูมิสูง

ชเนศ อุทิศธรรม¹, ปฐมพร พูลสวัสดิ์², วีรชัย สุนทรรังสรรค์¹,
โสภณ พรหมสุวรรณ¹ และ มະนุ บัญแสร์¹

บทคัดย่อ

ปัญหาขยะในประเทศไทยได้ก่อผลกระทบอย่างมากต่อการบริหารจัดการและสิ่งแวดล้อมที่นับวันจะรุนแรงมากขึ้นเรื่อยๆ. แนวทางการแก้ปัญหาหนึ่งที่น่าสนใจคือ การนำขยะมาผลิตเป็นพลังงาน ซึ่งนอกจากการแก้ปัญหาแล้ว ยังเป็นการนำมาผลิตเป็นพลังงานทดแทนด้วย. อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีที่เปลี่ยนขยะเป็นพลังงานนั้นไม่สามารถทำงานได้ดีกับขยะที่มีความชื้นสูงได้ ทำให้ต้องมีระบบอบแห้งขยะก่อนการนำไปใช้งานและทำให้ไม่มีความคุ้มทุน. การคัดแยกขยะอินทรีย์โดยเฉพาะขยะเศษอาหาร ซึ่งเป็นขยะที่มีความชื้นสูงออกก่อนเป็นทางเลือกหนึ่งที่จะลดความชื้นในขยะรวม.

งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาการนำขยะเศษอาหารที่มีความชื้นมากกว่าร้อยละ 80 มาทำปฏิกิริยาภายใต้สภาวะเหนือวิกฤตน้ำในระดับห้องปฏิบัติการที่ขนาดปฏิกรณ์ 0.5 ลิตร, ที่อัตราการเติมขยะเศษอาหาร 100, 150, 200 และ 250 กรัม และเวลาที่หน่วง 30, 45 และ 60 นาที ภายหลังจากที่อุณหภูมิภายในปฏิกรณ์ถึง 380°C. ผลจากการทดลอง พบว่า ที่อัตราการเติมขยะเศษอาหาร 150 กรัม ความดันสุดท้ายในปฏิกรณ์เป็น 242 บาร์ และเวลาที่หน่วงนาน 30 นาที เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด, ได้ผลผลิตหลักเป็นน้ำมันชีวภาพ ร้อยละ 7.91 ของขยะเศษอาหารที่เติม. มีไฮโดรเจน, ออกซิเจน และคาร์บอน ร้อยละ 10.30, 13.59 และ 75.66 ตามลำดับ. มีค่าความร้อน 38,059 กิโลจูล/กก. ผลพลอยได้เป็นถ่านคาร์บอน ร้อยละ 4.27 ของขยะเศษอาหารที่เติม. มีไฮโดรเจน, ออกซิเจน และคาร์บอน ร้อยละ 4.64, 18.48 และ 76.11 ตามลำดับ, มีค่าความร้อน 29,470 กิโลจูล/กก. ส่วนที่เหลือเป็นน้ำ. ผลผลิตที่ได้ น้ำมันชีวภาพและถ่านคาร์บอนสามารถนำไปใช้ทดแทนน้ำมันเตาและถ่านทั่วไปได้เป็นอย่างดี.

¹ฝ่ายเทคโนโลยีพลังงาน, สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.)

²ฝ่ายเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมและทรัพยากร, วว.

1. บทนำ

1.1 ที่มาของโครงการ

จากข้อมูลขยะมูลฝอยที่เกิดขึ้นจากชุมชนทั่วประเทศ ในปี พ.ศ. 2550 มีประมาณ 39,225 ตัน/วัน (กรมควบคุมมลพิษ 2553). วิธีการกำจัดขยะเหล่านี้ในเมืองใหญ่ เช่น กรุงเทพมหานครและในเขตเทศบาลจังหวัดต่างๆ ยังไม่มีความถูกต้องทางสุขอนามัยมากนัก. จึงก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสังคมอย่างมาก เช่น ปัญหาน้ำเสีย, สารพิษ, กลิ่น, แมลงวัน, เป็นต้น. แม้บางท้องถิ่นจะมีการก่อสร้างระบบกำจัดขยะอย่างถูกวิธี แต่ยังคงมีปัญหาในการบริหารจัดการ เช่น ด้านงบประมาณ, การหาพื้นที่ที่เหมาะสมเพื่อกำจัด, การต่อต้านจากชุมชนใกล้เคียง เป็นต้น ปัญหาขยะจึงยังไม่ได้รับการแก้ไขเท่าที่ควร.

โดยส่วนใหญ่แล้วขยะมูลฝอยจะมีน้ำปนอยู่ประมาณร้อยละ 80 และมีส่วนประกอบของธาตุสำคัญอื่น ได้แก่ คาร์บอน, ไฮโดรเจน และออกซิเจน, ประมาณร้อยละ 30, 40 และ 20, ตามลำดับ (Matsumura 2005). วิธีการบริหารจัดการขยะเพื่อการผลิตเป็นพลังงาน สามารถดำเนินการได้หลายรูปแบบ เช่น การเผาเพื่อผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้า, การเผาในหม้อไอน้ำเพื่อผลิตไอน้ำเป็นแหล่งพลังงานในโรงงาน, เป็นต้น. วิธีการเปลี่ยนรูปขยะมูลฝอยเป็นเชื้อเพลิงเหลว (Liquid fuel) หรือน้ำมันชีวภาพ (Bio oil) โดยการนำขยะมูลฝอยไปเปลี่ยนรูปจากของแข็งให้เป็นของเหลว ภายใต้อุณหภูมิสูงเหนือจุดวิกฤตน้ำ (Super critical water) จะทำให้โครงสร้างทางเคมีของขยะมูลฝอยเปลี่ยนไปและได้ผลผลิตเป็นของเหลว ที่มีสัดส่วนของไฮโดรเจนและคาร์บอนสูงขึ้น แต่สัดส่วนของออกซิเจนลดลง. ของเหลวนี้นี้มีคุณสมบัติการเป็นเชื้อเพลิงใกล้เคียงกับน้ำมันเตาทั้งทางกายภาพและเคมี, จึงสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงงานอุตสาหกรรมได้โดยตรง หรือนำไปพัฒนาต่อเป็นน้ำมันชนิดต่างๆ. อย่างไรก็ตาม วิธีการนี้ยังอยู่ในขั้นของการวิจัยและพัฒนาเป็นส่วนใหญ่ ยังไม่มีการทำในเชิงพาณิชย์อย่างแพร่หลายนัก. แต่ด้วยสถานการณ์ด้านพลังงานที่นับวันจะทวีความรุนแรงขึ้น, ปัญหาสิ่งแวดล้อมและสังคม, ได้ทำให้วิธีการนี้มีความเป็นไปได้สูงขึ้น. นอกจากนี้ ข้อได้เปรียบของเทคโนโลยีนี้ คือ สามารถใช้กับชีวมวลที่มีความชื้นสูงมากได้ (Heyerdahl and Ruan 2010) เนื่องจากเทคโนโลยีนี้ใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย, ในขณะที่เทคโนโลยีอื่นๆ เช่น การเผาโดยตรง, แก๊สซิฟิเคชัน, ไพโรไลซิส, เป็นต้น ซึ่งสามารถใช้กับชีวมวลที่มีความชื้นไม่เกินร้อยละ 20 (Simone *et al.* 2010).

ดังนั้น ขยะมูลฝอยที่มีสารอินทรีย์เป็นส่วนประกอบหลัก เช่น เศษอาหารจากบ้านเรือน, ใบไม้, กิ่งไม้, เป็นต้น มีสัดส่วนสูงที่สุดประมาณร้อยละ 40 ของขยะทั้งหมด. ในขยะอินทรีย์ทั้งหมดนี้ ขยะจากเศษอาหารจากบ้านเรือนมีสัดส่วนสูงที่สุด, ซึ่งขยะจากเศษอาหารจากบ้านเรือนเป็นขยะที่เปียก, เมื่อรวมกับขยะมูลฝอยทั้งหมดแล้วจึงทำให้มีสภาพเปียก. การใช้เทคโนโลยีอื่นๆ ในการกำจัดหรือนำไปผลิตเป็นเชื้อเพลิง จึงมีความยุ่งยากและมีต้นทุนสูง. ดังนั้น การหาแนวทางการนำขยะเศษอาหารจากบ้านเรือนออกจากขยะมูลฝอย แล้วนำไปกำจัดหรือการผลิตเป็นพลังงานรูปแบบอื่นๆ, ขยะมูลฝอยที่เหลือจึงมีความชื้นลดลง ทำให้การจัดการง่ายและมีความคุ้มค่า. การนำขยะเศษอาหารจากบ้านเรือนไปผลิตเป็นพลังงานภายใต้ความดันและอุณหภูมิสูง จึงมีความเหมาะสมวิธีหนึ่ง.

ทางสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) ได้เล็งเห็นข้อได้เปรียบหลายประการของเทคโนโลยีนี้ จึงได้จัดทำเป็น โครงการการผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากขยะอินทรีย์ภายใต้ความดันและอุณหภูมิสูงขึ้น, ซึ่งเป็น โครงการย่อยในชุดโครงการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตเชื้อเพลิงทางเลือกคุณภาพสูงจากขยะ ซึ่งประกอบด้วย 4 โครงการย่อย คือ:

1. โครงการย่อยที่ 1 การผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากขยะอินทรีย์.
2. โครงการย่อยที่ 2 การผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากขยะที่เป็นผลิตภัณฑ์จากอนุพันธ์ของปีโตรเลียม.
3. โครงการย่อยที่ 3 การผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากขยะอินทรีย์ภายใต้ความดันและอุณหภูมิสูง.
4. โครงการย่อยที่ 4 การศึกษาด้านเศรษฐศาสตร์ในเทคโนโลยีการผลิตเชื้อเพลิงทางเลือกคุณภาพสูงจากขยะ.

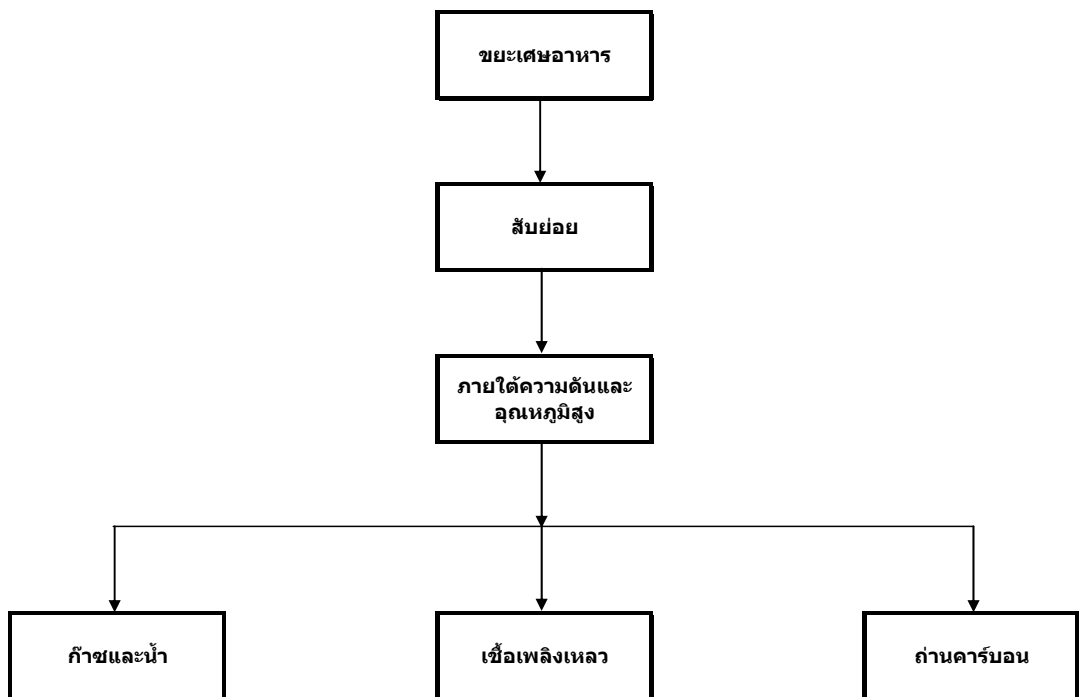
รายงานการวิจัยฉบับนี้ เป็นการจัดทำขึ้นตาม โครงการวิจัยย่อยที่ 3 โครงการการผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากขยะอินทรีย์ภายใต้ความดันและอุณหภูมิสูง ที่ได้มีการดำเนินการจนลุล่วงตามวัตถุประสงค์แล้ว.

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากขยะอินทรีย์ เพื่อทดแทนการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงประเภทฟอสซิล.

1.3 วิธีการวิจัย

นำขยะเศษอาหารมาสับย่อยเล็กน้อยและใส่ในปฏิกรณ์ เพิ่มอุณหภูมิภายในปฏิกรณ์จนถึงจุดที่กำหนด, จากนั้น จึงหน่วงเวลาไว้. ภายหลังกิ้นสุดการทดลองนำผลผลิตที่ได้มาแยกส่วนประกอบ, ได้ผลผลิตหลักเป็นน้ำมันชีวภาพ (เชื้อเพลิงเหลว) และได้ผลผลิตรองเป็นถ่านคาร์บอน, ส่วนผลผลิตอื่นๆ คือ ก๊าซและน้ำ ได้จากการนำปริมาณวัตถุดิบที่เติมลบด้วยปริมาณน้ำมันชีวภาพและถ่านคาร์บอนวิธีการวิจัย ดังแสดงในรูปที่ 1.1.



รูปที่ 1.1. วิธีการวิจัยการผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากขยะเศษอาหาร.

1.4 ขอบเขตการวิจัย

เพื่อศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากขยะอินทรีย์ในระดับห้องปฏิบัติการ.

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบตัวแปรที่มีผลต่อผลผลิตและคุณภาพของเชื้อเพลิงเหลว.
2. ลดปัญหามลภาวะจากของเหลือทิ้ง.
3. เพื่อแสวงหาแหล่งพลังงานใหม่มาทดแทนพลังงานฟอสซิล.

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ขยะ

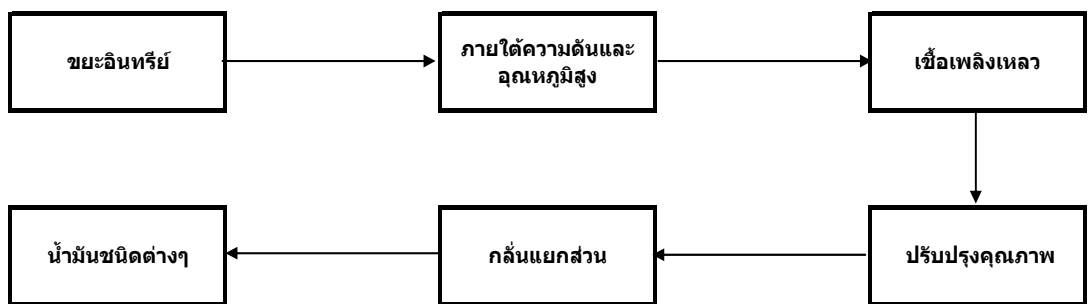
2.1.1 ศักยภาพขยะ

จากข้อมูลของกรมควบคุมมลพิษ, ในปี พ.ศ. 2550 มีขยะเกิดขึ้นประมาณ 39,225 ตัน/วัน (กรมควบคุมมลพิษ 2553) เป็นขยะจากกรุงเทพ 9,617 ตัน/วัน, ในเขตเทศบาลรวมเมืองพัทยา 11,976 ตัน/วัน และนอกเขตเทศบาล 17,632 ตัน/วัน. ขยะเหล่านี้มีองค์ประกอบแตกต่างกันมากในแต่ละท้องที่ เนื่องจากมีหลายปัจจัย เช่น สภาพความเป็นอยู่ในท้องถิ่นนั้น, ฤดูกาล, ระบบโภชนาการของชุมชน, ประเภทของอุปกรณ์ในการรวบรวมขยะ เป็นต้น. องค์ประกอบและสัดส่วนของขยะสามารถแบ่งได้เป็น 4 กลุ่มใหญ่ ดังนี้:

1. ขยะอินทรีย์ เช่น เศษอาหาร, ใบไม้, กิ่งไม้ เป็นต้น มีสัดส่วนประมาณร้อยละ 40.1.
2. ขยะที่เป็นผลิตภัณฑ์จากอนุพันธ์ของปิโตรเลียม เช่น พลาสติกทุกชนิด, เชือกไนลอน, ยางผ้าใบ เป็นต้น มีสัดส่วนประมาณร้อยละ 14.8.
3. ขยะประเภทเครื่องใช้ เช่น สิ่งทอ, กระจาด เป็นต้น มีสัดส่วนประมาณร้อยละ 27.9.
4. ขยะอื่นๆ เช่น ขยะที่ไม่คิดไปประเภท, วัสดุก่อสร้าง, เหล็ก, แก้ว เป็นต้น มีสัดส่วนประมาณร้อยละ 17.2.

ปัจจุบัน ประเทศไทยมีการกำจัดขยะอยู่ 3 วิธี คือ นำไปกองไว้กลางแจ้ง, ทำปุ๋ย และการฝังกลบ. จากข้อมูลการกำจัดขยะในปี พ.ศ. 2550 พบว่า ขยะประมาณ 39,225 ตัน/วัน, นำไปกำจัดโดยวิธีฝังกลบ 7,000 ตัน/วัน, ทำปุ๋ยหมัก 10,000 ตันต่อวัน, โดยการเผา 500 ตัน/วัน, ที่เหลือนำไปกองไว้กลางแจ้ง. จะเห็นได้ว่า ขยะส่วนหนึ่งนำไปกองไว้กลางแจ้ง ซึ่งได้ก่อปัญหาตามมาอีกมากมาย. ขยะทั้ง 4 กลุ่มดังกล่าวนี้มีเพียง 3 กลุ่มแรกเท่านั้น คือ ขยะอินทรีย์, ขยะที่เป็นผลิตภัณฑ์จากอนุพันธ์ของปิโตรเลียม และขยะประเภทเครื่องใช้ ที่มีศักยภาพในการพัฒนาเพื่อผลิตเป็นพลังงาน. วิธีที่นิยมทำกันอย่างแพร่หลาย คือ การนำไปเผา เพื่อผลิตไฟฟ้าขนาดใหญ่เท่านั้น (MMWEC 2006; BMRC 2010; JAE 2004). แต่สถานการณ์ที่เปลี่ยนไปในปัจจุบันนี้ ได้ทำให้ขยะอินทรีย์มีศักยภาพที่จะพัฒนาเป็นเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ เพื่อใช้ทดแทนน้ำมัน นอกเหนือจากการนำไปผลิตไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว. อย่างไรก็ตาม การนำขยะทั้ง 3 กลุ่มดังกล่าวมาใช้งานนั้นยังไม่สามารถกระทำได้ดีนัก เนื่องจากยังไม่มีภาคเอกชนการคัดแยก, ทำให้ต้องมีการคัดแยกในภายหลัง เพื่อให้เหมาะสมกับเทคโนโลยีแต่ละประเภท. ดังนั้น เทคโนโลยีที่สามารถใช้ได้กับขยะที่ไม่มีภาคคัดแยกหรือต้องการการคัดแยกเพียงเล็กน้อย จึงเป็นเทคโนโลยีที่มีความได้เปรียบสูงต่อการ

นำมาใช้ในการกำจัดขยะและเพื่อการผลิตพลังงาน. อีกปัญหาหนึ่งที่เกิดต่อเนื่องจากการไม่มีการคัดแยกขยะก่อนการจัดเก็บ คือ การผสมระหว่างขยะเปียกและแห้ง ทำให้ขยะรวมกลายเป็นขยะเปียก. จึงทำให้ไม่สามารถนำขยะเหล่านี้ไปใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ, โดยเฉพาะกับการเผา เนื่องจากไม่มีความคุ้มค่าต่อการเดินระบบ. เทคโนโลยีการผลิตเชื้อเพลิงจากขยะอินทรีย์ภายใต้ความดันและอุณหภูมิสูงนี้ สามารถทำงานได้ดีกับขยะที่มีข้อจำกัดดังกล่าวข้างต้นได้. หลักการทำงานของเทคโนโลยีนี้ คือ กระบวนการที่ขยะอินทรีย์ที่ถูกจำกัดอยู่ภายใต้ความดันและอุณหภูมิสูง จะเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีให้เป็นของเหลว ที่มีสัดส่วนของไฮโดรคาร์บอนสูงและมีออกซิเจนในสัดส่วนที่ต่ำ, ของเหลวดังกล่าวนี้มีคุณสมบัติเป็นเชื้อเพลิงเกรดใกล้เคียงกับน้ำมันเตา ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงงานอุตสาหกรรมได้โดยตรง และนำไปพัฒนาต่อน้ำมันชนิดต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.1.



รูปที่ 2.1. กระบวนการผลิตและพัฒนาเชื้อเพลิงเหลวจากขยะอินทรีย์.

นอกจากแนวโน้มการผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากขยะอินทรีย์ จะมีความเป็นไปได้สูงในปัจจุบัน และอนาคตแล้ว ยังมีเหตุผลสนับสนุนอื่นๆ อีกดังนี้.

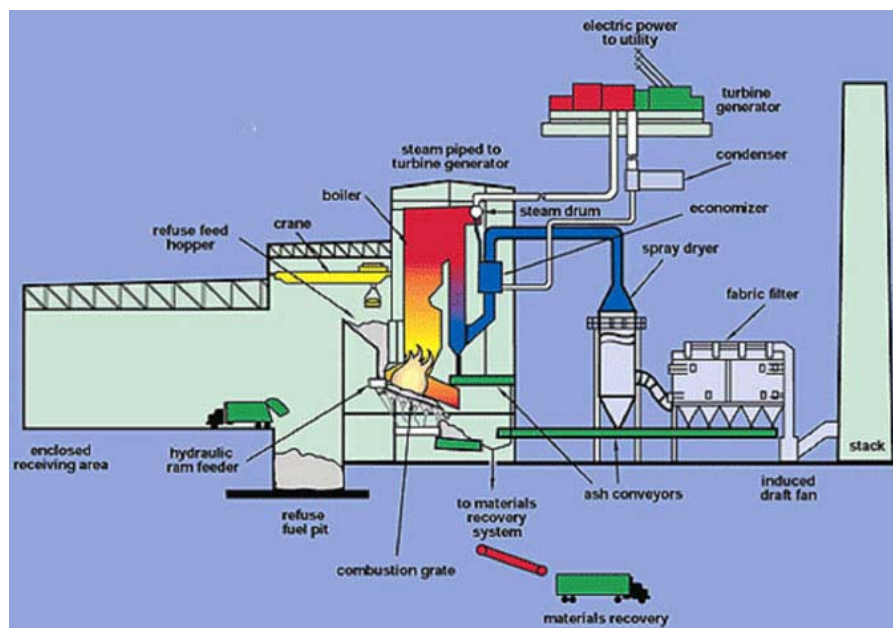
- เทคโนโลยีไม่สูงเกินไป ช่วยให้การวิจัยและพัฒนาขึ้นเองภายในประเทศอยู่ในวิสัยที่เป็นไปได้ ซึ่งรวมถึงความต้องการเงินลงทุนต่ำในเทคโนโลยีนี้.
- ราคาเชื้อเพลิงเหลวสามารถแข่งขันในตลาดได้ เนื่องจากมีเป้าหมายในการนำไปทดแทนการใช้้ำมันเตาสำหรับการเผาไหม้ในหม้อไอน้ำในโรงงานอุตสาหกรรม. เป็นที่ทราบแล้วว่า น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิงหลักที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมและต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ซึ่งมีแนวโน้มว่า ราคาจะปรับตัวสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง, ในกรณีที่ต้องการพัฒนาและสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับเชื้อเพลิงเหลวนี้อาจสามารถนำไปกลั่นแยกส่วนเพื่อได้น้ำมันดีเซลและน้ำมันอื่นๆ ออกมา.

- ผู้ใช้มีจำนวนมากและหลากหลาย โดยเฉพาะโรงงานอุตสาหกรรมที่ต้องการเชื้อเพลิงเพื่อการเผาไหม้ในหม้อไอน้ำมีการกระจายตัวอยู่ทั่วประเทศ, ทำให้การจัดการที่ง่ายทั้งในแง่จำนวนลูกค้าและค่าขนส่ง.
- ลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากขยะ ที่ปัจจุบันนี้ใช้วิธีกำจัดโดยการนำไปกองไว้กลางแจ้ง, การนำขยะส่วนนี้มาทำเป็นเชื้อเพลิงเหลวบางส่วนจึงเป็นการลดปริมาณขยะนั่นเอง.

2.1.2 การผลิตพลังงานจากขยะ

การนำขยะมาทำเป็นเชื้อเพลิง คือ การแปรรูปขยะให้อยู่ในรูปแบบต่างๆ เพื่อให้เหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน. เนื่องจากขยะมูลฝอยที่เก็บรวบรวมมานั้น มีองค์ประกอบทั้งทางเคมีและกายภาพต่างกัน จึงมีการนำไปใช้งานได้หลากหลายรูปแบบ ได้แก่:

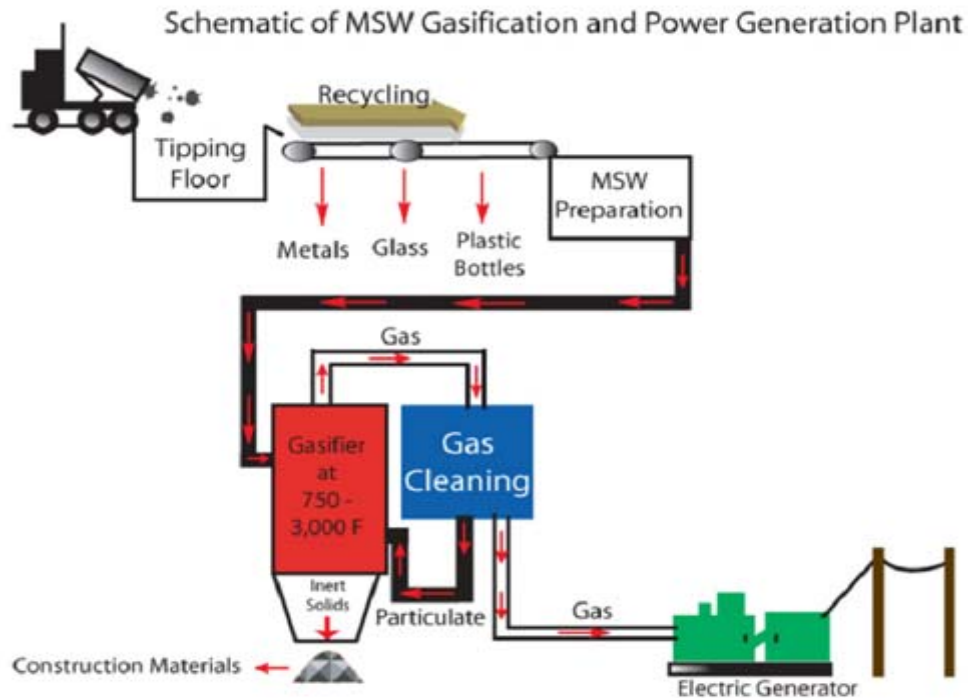
- การนำไปเผาไหม้โดยตรง (Direct combustion) เพื่อผลิตเป็นพลังงานความร้อน, โดยการนำก๊าซร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ไปผลิตไอน้ำในหม้อไอน้ำ และใช้ไอน้ำเป็นตัวขับเคลื่อนในกังหันไอน้ำ (Steam turbine) ดังแสดงในรูปที่ 2.2.



Source: http://internationalenergysolutions.com/images/e_1.jpg

รูปที่ 2.2. การเผาไหม้ขยะโดยตรงในหม้อไอน้ำเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้า.

- การนำไปผลิตก๊าซในเตาก๊าซซิฟิเออร์ (Gasifier) เพื่อเปลี่ยนรูปจากขยะของแข็งให้เป็นก๊าซเชื้อเพลิง เรียกว่า ก๊าซเชื้อเพลิงสังเคราะห์ (Synthetic gas หรือ Syngas), องค์ประกอบหลักของก๊าซเชื้อเพลิง ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และก๊าซไฮโดรเจน, ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ เช่น นำไปเป็นเชื้อเพลิงกับหม้อไอน้ำหรือเครื่องยนต์ เป็นต้น (รูปที่ 2.3).



Source: <http://www.localenergyindependence.com/wp-content/uploads/2009/01/schematic-of-msw.jpg>

รูปที่ 2.3. การผลิตก๊าซในเตาก๊าซซิฟิเออร์เพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้า.

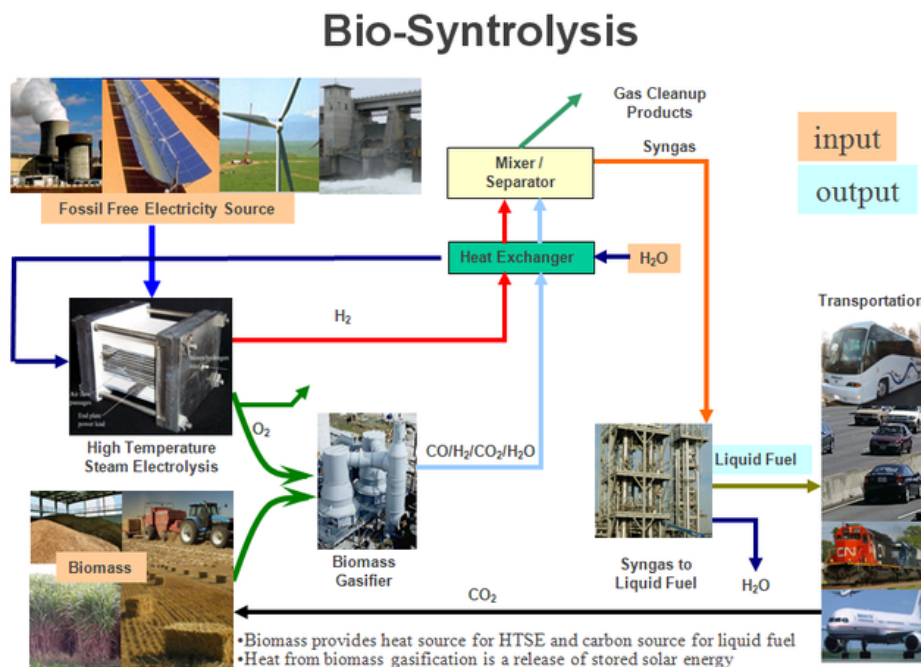
- การนำไปผลิตก๊าซชีวภาพ (Biogas) โดยนำขยะไปหมักด้วยแบคทีเรียในสภาวะไม่ใช้ออกาศ, ขยะจะถูกย่อยสลายเป็นก๊าซชีวภาพที่มีองค์ประกอบหลักเป็นก๊าซมีเทน, นิยมนำไปใช้กับหม้อไอน้ำ เครื่องยนต์ ได้เช่นเดียวกัน (รูปที่ 2.4).



Source: <http://www.projectsmonitor.com/NewsImages/Photos%2019/CMDA.jpg>

รูปที่ 2.4. การผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้า.

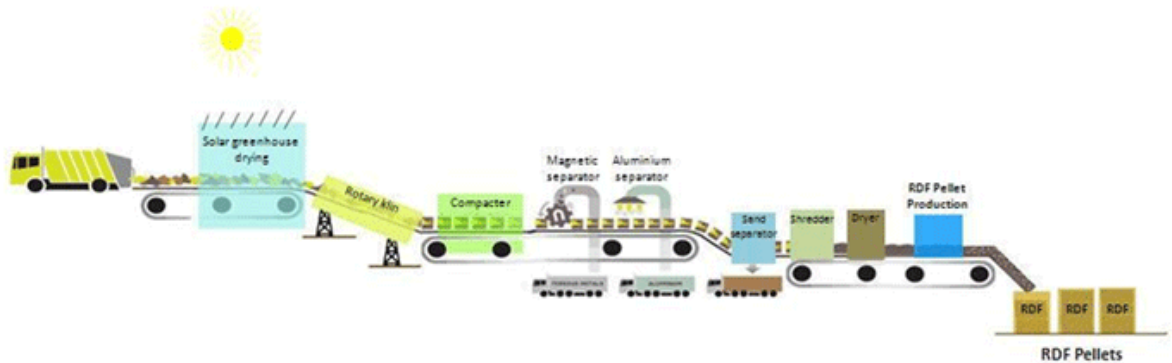
- การนำไปผลิตเชื้อเพลิงเหลว (Liquid fuel) โดยการเปลี่ยนรูปจากขยะของแข็งให้เป็นก๊าซเชื้อเพลิงสังเคราะห์ด้วยเทคโนโลยีก๊าซซิฟิเคชัน, ก่อนการนำไปผลิตเป็นเชื้อเพลิงเหลวด้วยเทคโนโลยี Fischer tropesch, หรือเปลี่ยนรูปจากขยะของแข็งให้เป็นของเหลวด้วยเทคโนโลยีไพโรไลซิส หรือ Super critical water, ก่อนการนำไปผลิตเป็นเชื้อเพลิงเหลวด้วยเทคโนโลยี Hydrodeoxygenation (รูปที่ 2.5).



Source: <http://bioage.typepad.com/photos/uncategorized/2009/01/09/biosyntrolysis.png>

รูปที่ 2.5. การผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากขยะ.

- การนำไปผลิตเชื้อเพลิงขยะแ่ง (Refuse derived fuel, RDF) เป็นการนำขยะอินทรีย์ที่สามารถเป็นเชื้อเพลิงได้มาผ่านกระบวนการคัดแยก, ถดขนาด, ผสม, อบแห้ง, อัดแท่ง เพื่อให้มีคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีเหมาะสมต่อการเป็นเชื้อเพลิง, ตามที่แสดงกระบวนการผลิตในรูปที่ 2.6 และเชื้อเพลิงขยะแ่งในรูปที่ 2.7 ซึ่งโดยทั่วไป จะมีคุณสมบัติด้านเชื้อเพลิงที่ดีกว่าขยะมูลฝอย.



รูปที่ 2.6. กระบวนการผลิต RDF.



รูปที่ 2.7. เชื้อเพลิงขยะแ่ง.

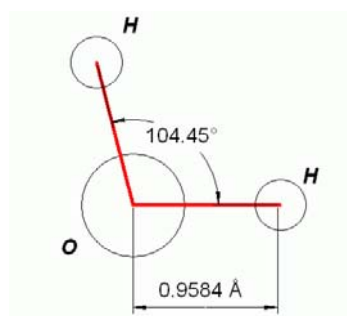
จากวิธีการต่างๆ ที่นำขยะไปผลิตเป็นพลังงานนั้น การเลือกชนิดของขยะเพื่อให้เหมาะสมกับเทคโนโลยีและผู้ใช้ในแต่ละประเภท เป็นสิ่งที่ต้องคำนึงด้วย เพื่อให้การจัดการขยะสามารถประสบความสำเร็จ ทั้งทางเทคโนโลยีและทางเศรษฐศาสตร์.

2.2 ทฤษฎีภาวะวิกฤติน้ำ

2.2.1 สถานะน้ำ

น้ำ (โมเลกุล) มีสูตรทางเคมีเป็น H_2O มีความหมายคือ น้ำหนึ่งโมเลกุลประกอบด้วยสองอะตอมของไฮโดรเจนและหนึ่งอะตอมของออกซิเจน. เมื่ออยู่ในภาวะสมดุลพลวัต (Dynamic equilibrium) ระหว่างสถานะของเหลวและของแข็งที่สภาวะมาตรฐาน (Standard temperature and pressure) น้ำภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่างกันมีสถานะเป็นของเหลว ไม่มีสี, รส และกลิ่น น้ำมี 3 สถานะคือ:

- ของแข็ง มีรูปร่างเป็นผลึกมีลักษณะใสเป็นสีฟ้าขาวใสปนอยู่ด้วย ทั้งนี้ขึ้นกับการมีสิ่งเจือปนในน้ำ. น้ำมีสถานะของแข็งเมื่อน้ำที่อยู่ในรูปของเหลวมีอุณหภูมิต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส ที่ความดันปกติ และสามารถแข็งตัวจากสถานะก๊าซโดยไม่ผ่านสถานะของเหลวได้.
- ก๊าซหรือไอน้ำ (water vapor หรือ steam) มีลักษณะใสบริสุทธิ์และไม่มีสี, ที่ความดันปกติ น้ำจะระเหยเป็นไอน้ำที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส และมีปริมาตรขยายเพิ่มประมาณ 1,600 เท่าของปริมาตรน้ำ. ไอน้ำที่ระเหยจนไม่มีหยดน้ำเหลืออยู่เรียกว่า ไอน้ำ (Superheated steam).
- ของเหลวหรือน้ำ เป็นโมเลกุลพื้นฐานของสารละลายเอควิวีส, น้ำเป็นสารเคมีที่มีสูตรเคมี H_2O หมายถึง น้ำ 1 โมเลกุลประกอบด้วยก๊าซไฮโดรเจน 2 อะตอม สร้างพันธะโคเวเลนต์รอบก๊าซออกซิเจน 1 อะตอมตามที่แสดงในรูปที่ 2.8 และมีคุณสมบัติตามตารางที่ 2.1.



รูปที่ 2.8. โครงสร้างโมเลกุลของน้ำ.

ตารางที่ 2.1. คุณสมบัติของน้ำ

รายการ	คุณสมบัติ
ชื่อเคมี	น้ำ (water)
ชื่ออื่น	Aqua, hydrogen oxide, hydrogen hydroxide, hydrate, oxidane, hydroxic acid, dihydrogen monoxide, hydronium hydroxide, hydroxyl acid, dihydrogen, oxide, hydrohydroxic acid, μ -oxidohydrogen, น้ำมวลเบา (light water)
สูตรโมเลกุล	H ₂ O
มวลโมเลกุล	18.02 g/mol
ลักษณะทั่วไป	โปร่งใสเป็นของเหลวไม่มีสีหรือมีสีน้ำเล็กน้อย
ความหนาแน่น	1 g/cm ³ , ของเหลวที่ 4 °ซ.
จุดหลอมเหลว	0.917 g/cm ³ , ของแข็ง
จุดเดือด	32 °F, 0 °C (273.15 °K)
ความจุความร้อน	212 °F, 100 °C (373.15 °K)
สภาพความเป็นกรด (pH _a)	4,186 J/(kg.K)
สภาพความเป็นเบส (pH _b)	15.74
ความหนืด	15.74
รูปร่าง	1 mPa•s at 20 °C
โครงสร้างผลึก	Non-linear bent
Dipole moment	Hexagonal
	1.85 D

2.2.2 น้ำภาวะเหนือวิกฤต (Super critical water)

น้ำในสถานะของเหลวที่สภาวะมาตรฐาน (25 °ซ. และ 0.1 เมกะพาสคัล) เป็นตัวทำละลายของสารหลายชนิดและยังเป็นสารอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) จากการที่มีค่าคงที่การนำไฟฟ้า (Dielectric constant) สูง, แต่ไม่ค่อยผสมเป็นเนื้อเดียวกับสารไฮโดรคาร์บอนและก๊าซ. อุณหภูมิและความดันมีผลอย่างมากกับคุณสมบัติของน้ำ, ขณะที่อุณหภูมิของน้ำเพิ่มขึ้น, ค่าคงที่การนำไฟฟ้ามีค่าลดลง. ความดันของการกลายเป็นไอจะสิ้นสุดที่จุดวิกฤต (Critical point) เมื่อความดันเกิน 220 บาร์และอุณหภูมิเกิน (รูปที่ 2.9). ที่ขอบเขตของสภาวะนี้ ความหนาแน่นของน้ำภาวะเหนือวิกฤตมี

ค่าหลากหลาย ซึ่งส่งผลให้น้ำมีคุณสมบัติเป็นทั้งของเหลวและก๊าซ ค่าความสัมพันธ์นี้มีค่าค่อนข้างกว้าง.

ในสถานะอุณหภูมิและความดันค่าหนึ่ง สารบริสุทธิ์ใดๆ สามารถเป็นทั้งของเหลวอิ่มตัวและไออิ่มตัว โดยเรียกสถานะนี้ว่า จุดวิกฤต (Critical point). ถ้าเพิ่มอุณหภูมิหรือความดันให้สูงกว่าจุดวิกฤตนี้ จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของของไหล และเรียกของไหลที่อยู่ในสถานะนี้ว่า ของไหลเหนือวิกฤต (Super critical fluid), ซึ่งมีองค์ประกอบที่ไม่ใช่ของเหลวหรือก๊าซ แต่เป็นของไหลกึ่งก๊าซ. ของไหลเหนือวิกฤตจึงมีคุณสมบัติคล้ายตัวทำละลายอินทรีย์ แต่สามารถแพร่ได้ดีกว่า มีความหนืดและแรงตึงผิวน้อยกว่าตามที่แสดงการเปรียบเทียบในตารางที่ 2.2. นอกจากนี้ ของไหลเหนือวิกฤตยังมีคุณสมบัติการส่งถ่ายคล้ายก๊าซ ซึ่งสามารถพาสารที่ต้องการสกัดออกจากตัวอย่างที่เป็นเมทริกซ์ได้ (แชลลี 2548).

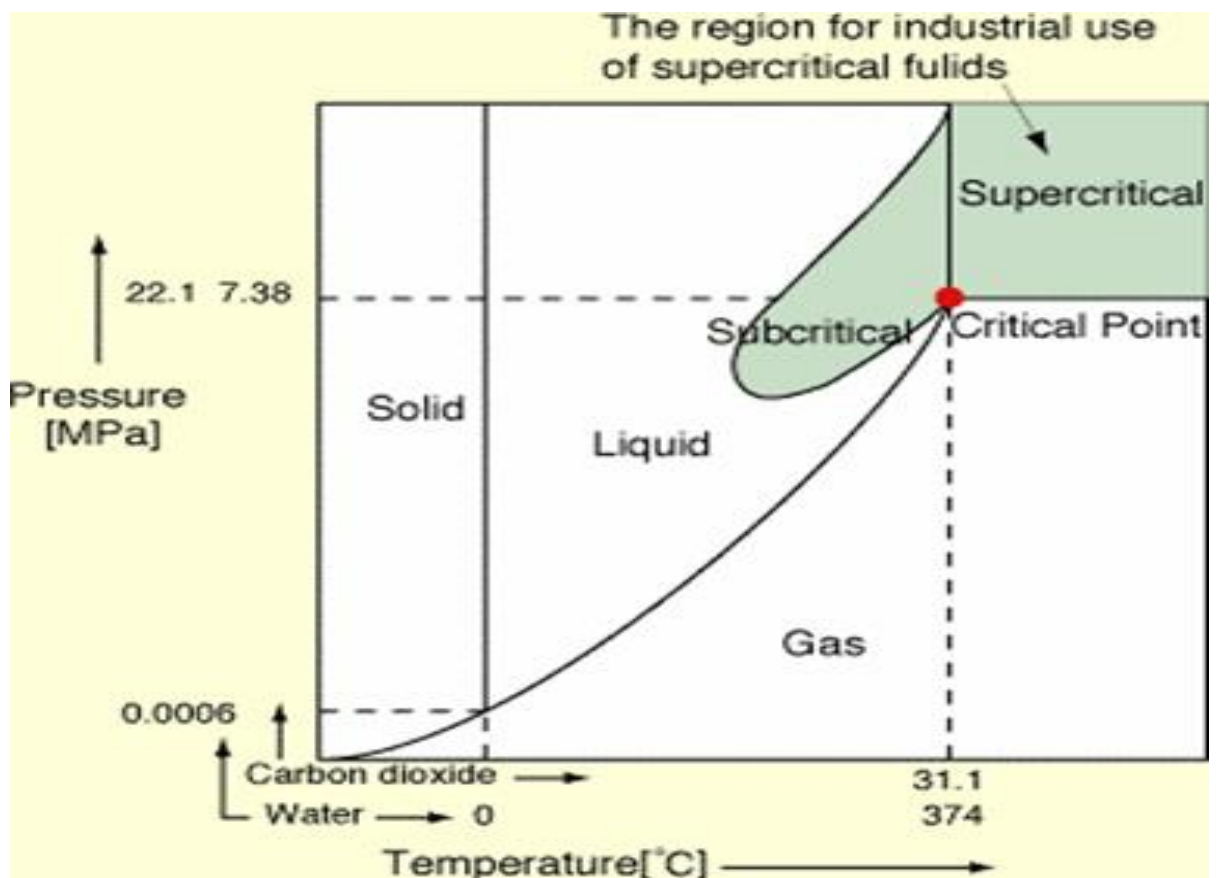
ตารางที่ 2.2. เปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของก๊าซ ของไหลเหนือวิกฤต และของเหลว (Taylor 1996)

รายการ	ความหนาแน่น (g/ml)	ความหนืดไดนามิก (g/cm-sec)	สัมประสิทธิ์การแพร่ (cm ² /sec)
ก๊าซ (อุณหภูมิห้อง)	0.0006-0.002	0.0001-0.003	0.1-0.4
ของไหลเหนือวิกฤตน้ำ	0.2-0.5	0.0001-0.0003	0.0007
ของเหลว (อุณหภูมิห้อง)	0.6-1.6	0.002-0.03	0.000002-0.00002

ความหนาแน่นของไหลเหนือวิกฤตมีค่าใกล้เคียงกับของเหลว, เมื่อนำมาใช้เป็นตัวทำละลาย โมเลกุลของสารที่ต้องการละลายจะถูกล้อมรอบด้วยโมเลกุลของของไหลเหนือวิกฤต, เกิดการทำปฏิกิริยา (Interaction) กัน ลดพลังงานเอนทาลปีเกิดการละลายได้ดี. ขณะเดียวกัน ของไหลเหนือวิกฤตมีความหนืดและการแพร่กระจายใกล้เคียงก๊าซ ทำให้สามารถแทรกเข้าไปในโครงสร้างภายในของตัวถูกละลาย (Solute matrix) ได้ดี. ด้วยคุณสมบัติเหล่านี้ จึงนำของไหลเหนือวิกฤตมาใช้เป็นตัวทำละลาย ซึ่งมีข้อดีเหนือตัวทำละลายที่เป็นของเหลว คือ มีอัตราการถ่ายโอนมวลเร็วกว่าและมีความสามารถในการทำละลาย (Solvent power) ที่ดีกว่า.

น้ำภาวะเหนือวิกฤตมีค่าคงที่การนำไฟฟ้า (Dielectric constant) ต่ำ, มีปริมาณพันธะไฮโดรเจนน้อย, ทำให้มีคุณสมบัติเป็นสารละลายไม่มีขั้ว. สารประกอบอินทรีย์โมเลกุลเล็กสามารถ

ละลายได้เพิ่มขึ้นในน้ำภาวะอุณหภูมิสูง และสามารถผสมกันได้ใต้น้ำภาวะเหนือวิกฤต. ความสามารถในการละลายของก๊าซบางชนิดในน้ำภาวะปกติจะลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ แต่มีจุดต่ำสุด. หลังจากนั้น ความสามารถในการละลายของก๊าซจะเพิ่มขึ้น เช่น ออกซิเจนมีจุดต่ำสุดประมาณ 100 องศาเซลเซียส. คุณสมบัติเหล่านี้ของน้ำภาวะเหนือวิกฤตเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิและความดัน. ดังนั้น น้ำภาวะเหนือวิกฤตจึงสามารถสนับสนุนทั้งปฏิกิริยาไอออนิก, นอนไอออนิกแบบมีขั้ว (Polar non-ionic) และปฏิกิริยานุมูลอิสระ (Free-radical reaction). น้ำภาวะเหนือวิกฤตไม่ใช่ตัวกลางที่เฉื่อย แต่มีส่วนร่วมในการเกิดปฏิกิริยา. น้ำโมเลกุลเดี่ยวสามารถมีส่วนร่วมในปฏิกิริยาเหมือนสารตั้งต้นหรือตัวเร่งปฏิกิริยา. นอกจากนี้ น้ำยังมีอิทธิพลต่อปฏิกิริยาตลอดจนพฤติกรรมวัฏภาค (Phase behaviour), การชนกันของตัวถูกละลายและตัวทำละลาย (Solute-solvent collisions), ชีดจำกัดในการแพร่ (Diffusion limitation) และ Cage effects (อ่อนศรี 2549).



ที่มา: <http://www.andrew.cmu.edu>

รูปที่ 2.9. น้ำในสถานะวิกฤต.

น้ำภาวะเหนือวิกฤตมีโครงสร้างต่างไปจากน้ำภาวะปกติ ความแตกต่างนี้ทำให้เกิดคุณสมบัติเฉพาะของน้ำที่ภาวะนี้. ค่าคงที่การแตกตัวของน้ำที่อุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิวิกฤตมีค่ามากกว่าน้ำปกติ 3 เท่า. ดังนั้น น้ำภาวะเหนือวิกฤตจึงมีความเข้มข้นของไอออน H^+ และ OH^- มากกว่าน้ำที่อุณหภูมิห้อง. น้ำภาวะเหนือวิกฤตจึงเป็นตัวกลางที่ดีต่อปฏิกิริยาที่ใช้กรดเบสในการเร่งปฏิกิริยา (Acid- and base-catalyzed reaction). ในอีกทางหนึ่ง ค่าคงที่การแตกตัวของน้ำภาวะเหนือวิกฤตที่ความหนาแน่นใกล้เคียงก๊าซ (<0.1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) มีค่าต่ำกว่าน้ำภาวะปกติถึง 10 เท่า, ปฏิกิริยาอนุมูลอิสระจึงเป็นส่วนสำคัญที่ภาวะอุณหภูมิสูงและความหนาแน่นต่ำนี้. โดยมีงานวิจัยที่เสนอกลไกไอออนิก (Ionic mechanism) เกิดได้ดีที่ $K_w > 10^{-14}$ และกลไกอนุมูลอิสระ (Free-radical mechanism) เกิดได้ดีที่ $K_w < 10^{-14}$ (ปัญญาวงศ์ 2547).

2.3 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Hu *et al.* (1998) ศึกษาการสกัดน้ำมันจากกลไกในต้นด้วยน้ำภาวะใต้และเหนือวิกฤต เพื่อวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิและความดันที่มีต่อผลผลิตที่ได้และองค์ประกอบของผลผลิต. ผลการทดลอง พบว่า อัตราการสกัดให้ผลสูงสุดอยู่ในช่วง 400-450 องศาเซลเซียส ผลผลิตที่ได้สูงขึ้นเมื่อความดันเพิ่มขึ้น, เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสุดท้ายทำให้ได้ก๊าซและน้ำมันเบามากขึ้นด้วย. องค์ประกอบหลักของผลผลิตที่ได้จากการสกัด คือ แอสฟัลทีนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.

Watanabe *et al.* (1998) ศึกษากระบวนการไพโรไลซิสของพอลิเอทิลีนและเฮกซะเดเคนสายโซ่ตรง (nC16) ในภาวะเหนือวิกฤตน้ำแบบรุ่นผลิต (batch) ที่อุณหภูมิ 673-723 องศาเซลวิน, ใช้เวลาทำปฏิกิริยา 30 นาที และความหนาแน่นของน้ำ 0-0.42 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร. อัตราการไพโรไลซิสของเฮกซะเดเคนสายโซ่ตรงในภาวะเหนือวิกฤตน้ำเกือบจะเท่ากับในความดันอาร์กอน 0.1 เมกะพาสคัล. การแจกแจงของผลผลิตของทั้งสองกรณีมีค่าใกล้เคียงกัน. ไพโรไลซิสในภาวะเหนือวิกฤตน้ำของพอลิเอทิลีนให้ผลแตกต่างกับไพโรไลซิสภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนในภาวะเหนือวิกฤตน้ำ, ซึ่งในภาวะไพโรไลซิสภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนในภาวะเหนือวิกฤตน้ำนั้น ผลที่ได้ของไฮโดรคาร์บอนสายสั้น อัตราส่วน 1-แอลคีนต่อแอลเคนสายโซ่ตรง มีค่าการเปลี่ยนที่สูงกว่า.

Rafiqul *et al.* (2000) ศึกษากระบวนการแปรรูปถ่านหินบิทูมินัสผสมกับขยะชีวมวล โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ความดันสูงขนาด 300 มิลลิลิตร, อุณหภูมิ 350-450 องศาเซลเซียส, เวลาในการทำปฏิกิริยา 15-45 นาที, ความดันไฮโดรเจนเย็น 2.04-4.76 เมกะพาสคัล. การเติมเตตราลินและขยะ

ช่วยในการแปรรูปเป็นของเหลวและภาวะที่เหมาะสมเป็นแบบแฟกทอเรียล. น้ำมันที่ได้ร้อยละ 48 ที่ 420 องศาเซลเซียส, ความดันไฮโดรเจนเย็น 3.40 เมกะพาสคัล, เวลาในการทำปฏิกิริยา 40 นาที. จากการทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบพหุนามอันดับสอง เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ของร้อยละผลที่ได้ น้ำมันกับร้อยละการเปลี่ยน, พบว่า มีความถูกต้องในช่วงการทดลองทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 5.

Cheng *et al.* (2004) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของถ่านหินในภาวะก่อนวิกฤตและเหนือวิกฤต น้ำ โดยเครื่องปฏิกรณ์แบบรุ่นผลิตที่อุณหภูมิ 350-550 องศาเซลเซียส, ความหนาแน่นของน้ำ 0-0.21 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร, เป็นเวลา 0-60 นาที, ภายใต้บรรยากาศไฮโดรเจน. ผลการทดลองแสดงอย่างชัดเจนว่า ปัจจัยหลักที่มีผลต่อการแจกแจงตัวของผลผลิต คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา, โดยที่ความหนาแน่นของน้ำและเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาไม่มีผลมากนัก เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิ. การเปลี่ยนแปลงของถ่านหินเพิ่มขึ้นเมื่อมีน้ำในระบบ.

อ่อนศรี (2549) ทำการศึกษาการแปรรูปร่วมของถ่านหินลิกไนต์และยางรถยนต์ใช้แล้วให้เป็นของเหลวในภาวะเหนือวิกฤตน้ำ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบรุ่นผลิตขนาด 250 มิลลิลิตร, เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิช่วง 380-440 องศาเซลเซียส, เวลาในการทำปฏิกิริยา 1-30 นาที, อัตราส่วนน้ำต่อสารตั้งต้นที่ 4:1-10:1 โดยน้ำหนัก และยางรถยนต์ใช้แล้วร้อยละ 0-100 โดยน้ำหนักกับผลผลิตที่ได้. สำหรับการสลายตัวของยางรถยนต์ใช้แล้ว พบว่า อุณหภูมิและอัตราส่วนของน้ำต่อยางรถยนต์ใช้แล้วมีผลต่อของเหลวที่ได้ อย่างมีนัยสำคัญ. ของเหลวที่ได้สูงสุดร้อยละ 54, ที่ 420 องศาเซลเซียส, อัตราส่วนต่อยางรถยนต์ใช้แล้ว 10:1, เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 นาที. สำหรับการศึกษาการแปรรูปร่วม พบว่า ปัจจัยทั้งสามมีผลต่อของเหลวที่ได้ แต่อุณหภูมิมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญที่สุด. โดยผลที่ได้ของเหลวสูงสุดร้อยละ 50, ที่ 400 องศาเซลเซียส, อัตราส่วนน้ำต่อสารตั้งต้น 10:1 และยางรถยนต์ใช้แล้วร้อยละ 80, เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 นาที. ผลผลิตน้ำมันที่ได้นำไปวิเคราะห์สัดส่วนตามการแจกแจงจุดเดือด โดยวิธีก๊าซโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น พบว่า องค์ประกอบของน้ำมันที่ได้เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิอย่างเห็นได้ชัด. สำหรับผลของการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาเฟอร์ริกซัลไฟด์และนิกเกิลโมลิบดีนัม, พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองช่วยลดอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาจากอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็น 390 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนของน้ำต่อสารตั้งต้นลดลงจาก 10:1 เป็น 8:1.

Shinji *et al.* (1994) ศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากกาก (sludge) น้ำเสียที่ผ่านการรีดน้ำออกแล้วที่สภาวะความดัน 100 บาร์ และอุณหภูมิสูง 300 °ซ. พบว่า สารอินทรีย์ถูกย่อยสลายเป็นน้ำมัน

หนักร้อยละ 48 และเป็นน้ำมันเบาร้อยละ 11, ค่าความร้อนของน้ำมันอยู่ในช่วง 37 – 39 เมกะจูล/กก. จากการทำสมดุลพลังงานสำหรับโรงงานขนาด 1.5 ตัน/วัน สามารถผลิตน้ำมันที่มีค่าพลังงานเพื่อใช้กับโรงงานกำจัดน้ำเสียที่มีขนาด 60 ตัน/วัน.

Tomoaki *et al.* (1995) ศึกษาการนำขยะไปผลิตเป็นน้ำมัน โดยใช้ขยะที่จำลองขึ้นจาก กระหล่ำปลี, ข้าว, ปลาซาร์ดีน, บัตเตอร์ และหอย. ขยะจำลองนี้มีความชื้นร้อยละ 90 นำไปให้ความร้อนภายใต้สภาวะไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 250, 300 และ 340 °ซ. เป็นเวลา 0.1, 0.5 และ 2.0 ชม. ที่มีและไม่มีสารเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนต (0 และ 4% ที่น้ำหนักแห้ง). ตัวแปรที่มีผลต่อผลผลิตน้ำมันเป็นอุณหภูมิและสารเร่งปฏิกิริยา ส่วนระยะเวลาที่หน่วงไม่มีผลมากนัก. ผลผลิตน้ำมันที่ได้ร้อยละ 27.6 ที่สภาวะมีสารเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 4, อุณหภูมิ 340 °ซ., ความดัน 180 บาร์, เวลาที่หน่วง 0.5 ชม., ค่าความร้อนน้ำมัน 36 เมกะจูล/กิโลกรัม, ความหนืด 53,000 เมกะพาสคัล ที่ 50°ซ. ค่าคาร์บอน, ไฮโดรเจน, ไนโตรเจน และออกซิเจน ในน้ำมันร้อยละ 73.6, 9.1, 4.6 และ 12.7 ตามลำดับ.

He *et al.* (2010) ศึกษากระบวนการทางความร้อนเคมีเพื่อการกำจัดน้ำเสียจากมูลสัตว์ที่อุณหภูมิ 275 - 350 °ซ. ความดันช่วง 55 – 180 บาร์ และใช้คาร์บอนมอนอกไซด์เป็นก๊าซในระบบ. สำหรับความดันช่วง 3.4 – 27.6 บาร์ ได้ผลผลิตน้ำมันร้อยละ 76.2 ของสารระเหยวัตถุดิบ, สัดส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอน 1.53. น้ำมันที่ได้นี้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสซึ่งมีค่าความร้อนประมาณ 34,940 กิโลจูล/กิโลกรัม ค่าซีโอดีในส่วนที่เป็นของเหลวที่ได้จากกระบวนการนี้ลดลงร้อยละ 75.4, ผลผลิตรองเป็นของแข็งร้อยละ 3.3 และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซที่เกิดมากที่สุด.

Sudong *et al.* (2010) ใช้มูลวัวเป็นวัตถุดิบเพื่อการผลิตน้ำมันจากกระบวนการทางความร้อนเคมีภายใต้สภาวะโซเดียมไฮดรอกไซด์. น้ำมันที่ได้จะขึ้นกับอุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยา, แต่ปริมาณน้ำมันที่ได้ลดลงเป็นผลจากความดันเริ่มต้นที่สูง, ระยะเวลาที่ทำปฏิกิริยานาน, สัดส่วนของมูลวัวต่อน้ำมัน. ค่าความร้อนน้ำมันสูงกว่า 35.53 เมกะจูล/กิโลกรัม น้ำมันที่ได้มีส่วนของดีเซลและเบนซินสูง.

Dragan *et al.* (2010) ศึกษากระบวนการทางความร้อนเคมีกับกลูโคส, ไม้ และน้ำมันดิน (tar) ที่ช่วงเวลาการทำปฏิกิริยา 0 - 60 นาที, อุณหภูมิ 350 °ซ. และความชื้นในวัตถุดิบร้อยละ 0-45

พบว่า (1) น้ำมัน, ถ่านคาร์บอน และก๊าซ เกิดขึ้นด้วยอัตราส่วนที่สูงในช่วง 10 นาทีแรก, หลังจากนั้นเกิดขึ้นด้วยอัตราส่วนที่ต่ำ, (2) การลดลงของออกซิเจนเกิดจากกระบวนการลดลงของน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏศุนี, กระบวนการลดลงของน้ำเกิดในช่วง 5 นาทีแรกและนำไปสู่การลดลงของสัดส่วน H/C ของน้ำมันที่ได้. ส่วนถ่านคาร์บอนนั้น แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ถ่านคาร์บอนส่วนแรกเกิดจากที่เหลือหลังจากที่สิ้นสุด และส่วนที่เกิดระหว่างกระบวนการย่อยสลาย. ถ่านคาร์บอนส่วนแรกจะเหลือน้อยลง เมื่อเวลาทำปฏิกิริยาที่นาน. สรุปได้ว่า ถ่านคาร์บอนที่เหลือสุดท้ายเกิดระหว่างกระบวนการย่อยสลาย. สารเร่งปฏิกิริยาช่วยให้ได้ถ่านคาร์บอนน้อยลง, โดยที่สารเร่งปฏิกิริยา Ru/TiO₂ จะเปลี่ยนถ่านคาร์บอนให้เป็นก๊าซมากขึ้น อุณหภูมิช่วง 180 – 220 °ซ. จะเป็นช่วงของการเกิดน้ำมันและน้ำ.

3. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ดำเนินงานในโครงการนี้ แบ่งเป็น 3 ส่วนหลัก คือ วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง, อุปกรณ์การทดลอง และเครื่องมือวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงเปลือง โดยมีรายละเอียดดังนี้.

3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

ในการดำเนินการ โครงการนี้ ได้สุ่มเลือกเศษอาหารเหลือทิ้งจากโรงอาหารสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. จากนั้น นำมาวิเคราะห์หาสัดส่วนของเศษอาหารแต่ละชนิด และนำมากำหนดสัดส่วนเป็นเศษอาหารที่จำลองขึ้นมาเพื่อใช้ในการทดลอง. ทั้งนี้ เพื่อให้มีความสะดวกและมีความถูกต้อง เศษอาหารจำลองนี้มีส่วนประกอบและสัดส่วน ดังแสดงในตารางที่ 3.1 และรูปที่ 3.1.

ตารางที่ 3.1. ส่วนประกอบและสัดส่วนของเศษอาหารจำลอง

ส่วนประกอบ	สัดส่วน (%)
น้ำปลา	1.4
น้ำมันหอย	1.9
ไข่ต้ม	2.1
ซอสมะเขือเทศ	2.6
ลูกชิ้น	2.7
ไข่เจียว	3.3
หอม, กระเทียม	3.5
แตงกวา	4.0
วุ้นเส้น	4.5
ปลาทู	5.8
ผักนึ่ง	6.3
หมู	8.1
ถั่วงอก	10.5
บะหมี่	10.6
ข้าว	32.5
รวม	100.0



รูปที่ 3.1. เศษอาหารจำลอง.

3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- เตตระไฮโดรฟูแรน จาก Ajax (Laboratory grade).
- ไดคลอโรมีเทน จาก Merck (AR grade).
- โซเดียมซัลเฟต จาก Ajax (AR grade).

3.2 อุปกรณ์การทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ทดลองแบ่งเป็น 2 ส่วนหลัก คือ อุปกรณ์การสังเคราะห์น้ำมันชีวภาพและอุปกรณ์การแยกสกัดน้ำมันชีวภาพ โดยมีรายละเอียดดังนี้.

3.2.1 อุปกรณ์การสังเคราะห์น้ำมันชีวภาพ

1. เครื่องบดตัวอย่างแบบละเอียด RETSCH ZM 200.
2. ปฏิกรณ์ (Reactor) รุ่น 4843 ผลิตโดย Parr Instrument Company ดังแสดงในรูปที่ 3.2, ปริมาตร 500 มิลลิลิตร, ทำจากเหล็กกล้าไม่เป็นสนิม SUS 316 ประกอบด้วยเทอร์โมคัปเปิลพร้อมชุดควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Controller), อุปกรณ์วัดความดันประกอบด้วย มาตรวัดความดันแบบตัวเลข, ไบควอนพร้อมอุปกรณ์วัดความเร็วรอบ, ทำงานที่อุณหภูมิสูงสุด 500 องศาเซลเซียส และความดันสูงสุด 5,000 psig.



รูปที่ 3.2. เครื่องปฏิกรณ์สังเคราะห์น้ำมันชีวภาพ.

3.2.2 อุปกรณ์การแยกสกัดน้ำมันชีวภาพ

1. เครื่องอัลตราโซนิกส์ (Ultrasonics) Elmasonic S 30 H, ดังแสดงในรูปที่ 3.3, สำหรับทำการสกัดของเหลวด้วยตัวทำละลายเตตระไฮโดรฟูแรน (Tetrahydrofuran) จากของแข็ง ด้วยเทคนิคการสกัดแบบอัลตราโซนิกส์.
2. เครื่องแก้วแยก (Separator funnel) ขนาด 500 มิลลิลิตร.
3. อุปกรณ์การกรองพร้อมกระดาษกรอง Whatman glass microfiber filters (GF/C).
4. เครื่องระเหยแบบหมุน (Rotary Evaporator) ประกอบด้วย Heating bath รุ่น Buch Heating Bath B 490, เครื่อง Rotavapor ของ Buch Rotavapor R205, เครื่อง Vacuum ของ Buch Vacuum Controller V 850, เครื่อง cooling ของ Lauda ALPHA RA 8 ดังแสดงในรูปที่ 3.4.
5. เตาอบ (Oven) Memmert.



รูปที่ 3.3. เครื่องอัลตราโซนิกส์.



รูปที่ 3.4. เครื่องระเหยแบบหมุน.

3.3 เครื่องมือวิเคราะห์คุณสมบัติเชื้อเพลิง

การวิเคราะห์คุณสมบัติเชื้อเพลิงของวัตถุดิบที่ใช้และผลผลิตที่ได้ แบ่งเป็นการวิเคราะห์คุณสมบัติเชื้อเพลิง ด้านปริมาณกลุ่มสาร (Proximate analysis) ประกอบด้วย การวัดความชื้น, สารระเหย, คาร์บอนคงที่, จี๊ถั่ว, ค่าความร้อน และปริมาณธาตุ (Ultimate analysis) ประกอบด้วย การวัดคาร์บอน, ไฮโดรเจน, ซัลเฟอร์ และไนโตรเจน โดยใช้:

- เครื่องวัดค่าความร้อน (Bomb calorimeter) ดังแสดงในรูปที่ 3.5.
- เครื่องวัดความชื้น (Infrared dryer) ดังแสดงในรูปที่ 3.6.
- เครื่องวัดสารระเหย (Volatile meter) และจี๊ถั่ว (Ash meter) ดังแสดงในรูปที่ 3.7.
- เครื่องวิเคราะห์ธาตุ (CHNS analyzer) ใช้หาค่าคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน ดังแสดงในรูปที่ 3.8.



รูปที่ 3.5. เครื่องวัดค่าความร้อน.



รูปที่ 3.6. เครื่องวัดความชื้น.



รูปที่ 3.7. เครื่องวัดสารระเหยและจับได้.

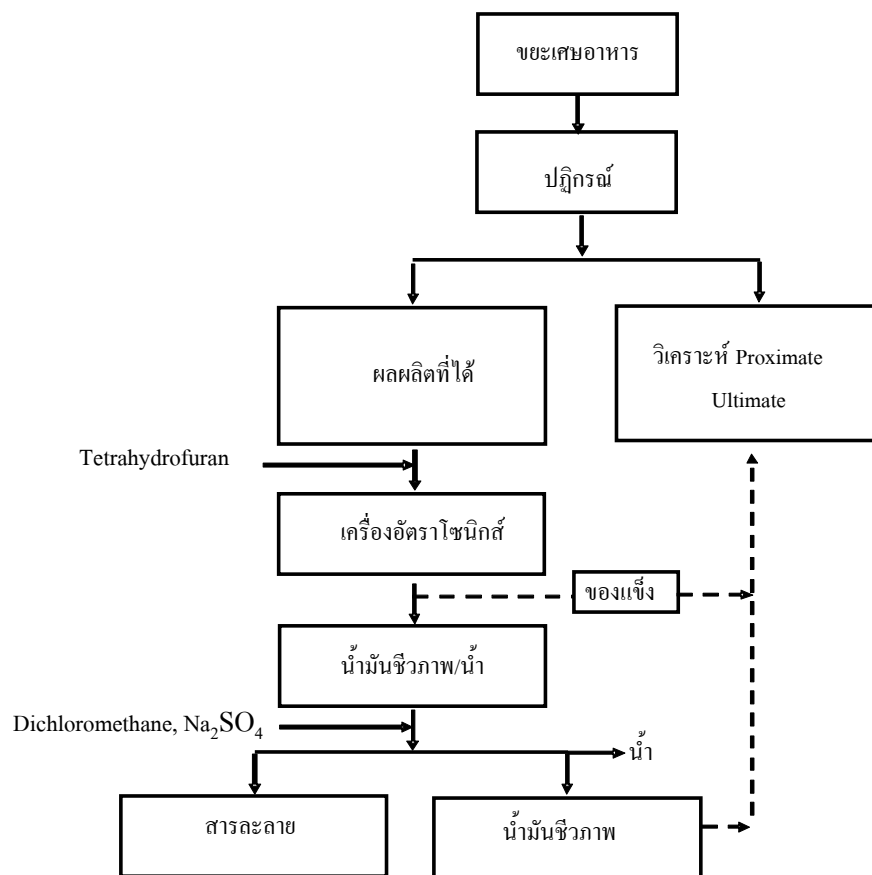


รูปที่ 3.8. เครื่องวิเคราะห์ธาตุ.

3.4 วิธีการทดลอง

3.2.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติเชื้อเพลิง

- นำตัวอย่างขยะเศษอาหารจำลองมาตากแห้ง. จากนั้น นำไปทำการวิเคราะห์คุณสมบัติเชื้อเพลิง ด้านปริมาณกลุ่มสารและปริมาณธาตุ.
- ผลผลิตที่ได้ประกอบด้วยน้ำมันชีวภาพ และถ่านคาร์บอน นำไปแยกออกจากกันตามที่แสดงในรูปที่ 3.9 และนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติเชื้อเพลิงด้านปริมาณกลุ่มสารและปริมาณธาตุ.



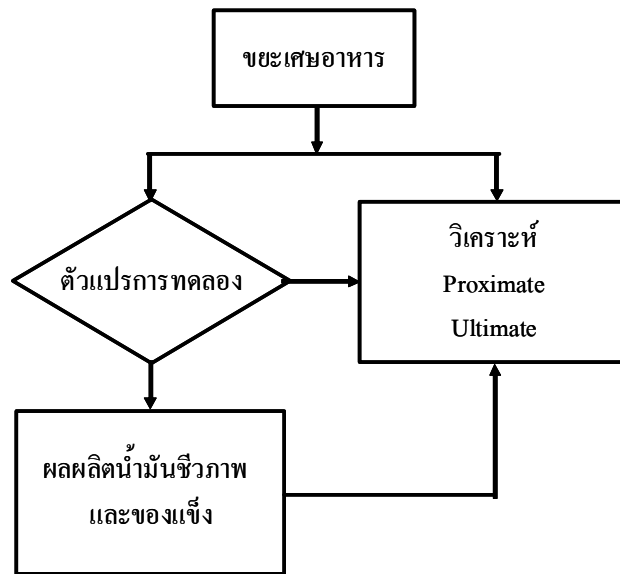
รูปที่ 3.9. ขั้นตอนการแยกน้ำมันชีวภาพและถ่านคาร์บอนออกจากผลผลิตที่ได้.

3.2.4 ขั้นตอนการทดลอง

- นำตัวอย่างขยะเศษอาหารจำลองใส่ในปฏิกรณ์จำนวน 100, 150, 200 และ 250 กรัม.
- ทำการไล่อากาศภายในปฏิกรณ์ด้วยก๊าซไนโตรเจน โดยป้อนก๊าซไนโตรเจนเข้าไปในปฏิกรณ์จนความดันถึง 7 บาร์. จากนั้น ปล่อยก๊าซไนโตรเจนออก เป็นจำนวน 3 ครั้ง.
- ป้อนก๊าซไนโตรเจนเข้าสู่ปฏิกรณ์ 7 บาร์. เปิดสวิตซ์ไฟพร้อมกับควบคุมอุณหภูมิภายในปฏิกรณ์ที่ 380°ซ.
- เมื่ออุณหภูมิภายในปฏิกรณ์ถึง 380°ซ. จะทำการหน่วงเวลาไว้ที่ 30, 45 และ 60 นาที และปิดเครื่อง.
- รอนอุณหภูมิภายในปฏิกรณ์เท่ากับอุณหภูมิห้อง นำผลผลิตออกไปแยกน้ำมันชีวภาพ และถ่านคาร์บอนออก.
- ตัวแปรการทดลองและขั้นตอนการทดลองทั้งหมด ดังแสดงในตารางที่ 3.2 และรูปที่ 3.10.

ตารางที่ 3.2. ตัวแปรการทดลองที่จำกัดอุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส

การทดลอง	น้ำหนักขยะเศษอาหาร (กรัม)	เวลาที่หน่วง (นาที)
1		30
2	100	45
3		60
4		30
5	150	45
6		60
7		30
8	200	45
9		60
10		30
11	250	45
12		60



รูปที่ 3.10. ขั้นตอนการทดลอง.

4. ผลการทดลองและวิจารณ์

วัตถุประสงค์ของโครงการนี้ เพื่อศึกษาการนำขยะเศษอาหารที่เป็นส่วนประกอบของขยะอินทรีย์ไปผลิตเป็นเชื้อเพลิงเหลวสำหรับการใช้ประโยชน์และหรือเพิ่มมูลค่า, ซึ่งจากการทดลองได้ผลิตเป็น 4 ชนิด คือ ก๊าซ, น้ำมันชีวภาพ, ถ่านคาร์บอน และน้ำ. ผลผลิตที่ได้มีการศึกษาแนวทางที่จะนำไปใช้ประโยชน์และหรือเพิ่มมูลค่าเพียง 2 ชนิด คือ น้ำมันชีวภาพและถ่านคาร์บอน เนื่องจากเป็นส่วนที่มีศักยภาพสูงที่สุด. ส่วนผลผลิตอีก 2 ชนิด คือ ก๊าซและน้ำ ยังไม่มีการศึกษาในรายละเอียดในการวิจัยนี้เนื่องจากยังมีศักยภาพต่ำและไม่มีเครื่องมือวิเคราะห์.

4.1 คุณสมบัติเชื้อเพลิงของขยะเศษอาหาร

วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการทดลองเป็นขยะจากเศษอาหาร นำไปทำการวิเคราะห์คุณสมบัติเชื้อเพลิงด้านปริมาณกลุ่มสารและธาตุ ตามวิธีวิเคราะห์ ASTM D 3172, ASTM D 3177, ASTM D 5373 และ ASTM D 5865 ดังแสดงในตารางที่ 4.1.

ตารางที่ 4.1. คุณสมบัติเชื้อเพลิงด้านปริมาณกลุ่มสารและธาตุของขยะเศษอาหาร

รายการ	ขยะเศษอาหาร	
	ตามสภาพนำส่ง	ตามสภาพแห้ง
Proximate analysis, %		
ความชื้น	86.34	0.00
สารระเหย	9.71	71.08
คาร์บอนคงตัว	2.24	16.43
เถ้า	1.71	12.49
Ultimate analysis, %		
ไฮโดรเจน	10.39	5.82
คาร์บอน	5.82	42.60
ออกซิเจน	81.38	33.91
กำมะถัน	0.00	0.00
ค่าความร้อนต่ำ (กิโลจูล/กก.)	2,180	15,940

ขยะเศษอาหารที่นำมาใช้ในการทดลองนี้จะนำไปกรองน้ำออกก่อน. การนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติเชื้อเพลิงด้านปริมาณกลุ่มสารและธาตุ พบว่า ขยะเศษอาหารตามสภาพนำส่งนั้นมีความชื้นสูงร้อยละ 86.34, มีค่าสารระเหยและคาร์บอนคงตัวเพียงร้อยละ 9.71 และ 2.24 ตามลำดับ. ดังนั้น สารไฮโดรคาร์บอนในขยะเศษอาหารตามสภาพนำส่งจึงมีค่าต่ำมาก มีค่าความร้อนต่ำเพียง 2,180 กิโลจูล/กก. เปรียบเทียบกับไม้ยูคาลิปตัสที่มีค่าความร้อนต่ำสูงถึง 17,920 กิโลจูล/กิโลกรัม ตามสภาพนำส่งที่มีความชื้นร้อยละ 6.94 (แก้วสีงาม 2553). ในการนำขยะเศษอาหารนี้ไปใช้เผาไหม้ที่น้ำหนักเท่ากับ 1 กิโลกรัม จะต้องทำขยะเปียกให้เป็นขยะแห้งก่อนโดยการลดความชื้นเพื่อเพิ่มสัดส่วนของสารไฮโดรคาร์บอน, ซึ่งขยะเศษอาหารที่ไม่มีมีความชื้นเลยมีค่าสารระเหยและคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้นมากกว่าร้อยละ 90, ค่าความร้อนต่ำของขยะเศษอาหารแห้งจึงมีค่าสูงถึง 15,940 กิโลจูล/กก. เปรียบเทียบกับไม้ยูคาลิปตัสที่มีค่าความร้อนต่ำ 19,250 กิโลจูล/กิโลกรัม (แก้วสีงาม 2553) ที่ไม่มีความชื้น. ขยะเศษอาหารจึงให้ค่าความร้อนไม่ต่างจากไม้ยูคาลิปตัสมากนัก และสามารถใช้ทดแทนกันได้.

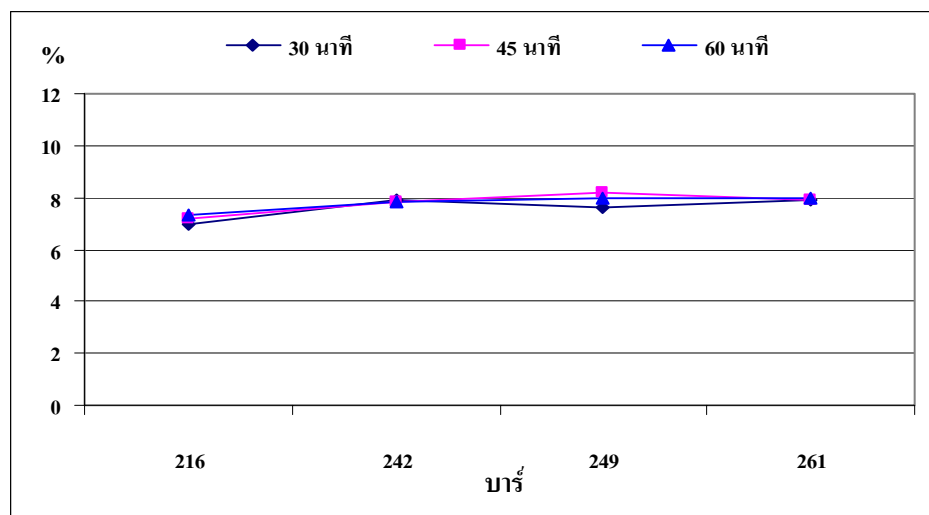
ส่วนการวิเคราะห์คุณสมบัติเชื้อเพลิงด้านธาตุในสภาพแห้งหรือไม่มีมีความชื้นเลย มีสารไฮโดรคาร์บอนประกอบด้วยไฮโดรเจนและคาร์บอนร้อยละ 5.82 และ 42.60 ตามลำดับ. เปรียบเทียบกับไม้ยูคาลิปตัสที่สภาพแห้งมีค่าไฮโดรเจนและคาร์บอนร้อยละ 6.03 และ 48.90 ตามลำดับ (แก้วสีงาม 2553). ไม้ยูคาลิปตัสมีสารไฮโดรคาร์บอนสูงกว่าขยะเศษอาหารเล็กน้อย และด้วยเหตุนี้ ค่าความร้อนของไม้ยูคาลิปตัสจึงย่อมสูงกว่าขยะเศษอาหาร.

4.2 ผลผลิตที่ได้จากการทดลอง

4.2.1 น้ำมันชีวภาพ

ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง คือ ปริมาณขยะเศษอาหารที่เติม ซึ่งจะเป็นส่วนที่ไปมีผลต่อความดันสุดท้ายในปฏิกรณ์ เนื่องจากขยะเศษอาหารมีน้ำอยู่ร้อยละ 86.34 เมื่อความร้อนในปฏิกรณ์เพิ่มสูงขึ้นจนถึง 380°C. น้ำในขยะเศษอาหารจะขยายตัวและทำปฏิกิริยาทำให้ความดันภายในปฏิกรณ์เพิ่มสูงขึ้น, จึงใช้ความดันสุดท้ายเป็นตัวแปรที่จะทำให้เกิดผลผลิตขึ้น. ดังนั้น ขยะเศษอาหารที่มีความชื้นคงที่และเติมเข้าไปในปฏิกรณ์ในปริมาณ 100, 150, 200 และ 250 กรัม จะทำให้ได้ค่าความดันภายในปฏิกรณ์คงที่ตามวัตถุประสงค์ที่เติม คือ 216, 242, 249 และ 261 บาร์ ตามลำดับ และระยะเวลาที่หน่วงภายหลังจากที่อุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ถึง 380°C. แล้ว ซึ่งได้หน่วงไว้เป็นเวลา 30, 45 และ 60 นาที. ผลการทดลองพบว่า น้ำมันชีวภาพที่ได้ในช่วงการหน่วงเวลา 30, 45 และ 60 นาที มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนจากช่วงความดัน 216-242 บาร์ (รูปที่ 4.1) และมีค่าคงที่ช่วง

ความดัน 249-261 บาร์. เปรียบเทียบปริมาณในช่วงการหน่วงเวลา 30, 45 และ 60 นาที มีค่าไม่ต่างกัน. สามารถสรุปได้ว่า ที่ความดันเหนือวิกฤตนี้ 242 บาร์ และอุณหภูมิ 380°C. ปฏิบัติการย่อยสลายขยะเศษอาหารส่วนใหญ่ได้เสร็จสิ้นแล้วที่ความดัน 242 บาร์ ในทุกช่วงเวลาที่หน่วง และสามารถเลือกช่วงเวลาที่หน่วง 30 นาที เป็นระยะเวลาที่เหมาะสมที่สุดของการทดลองนี้. ได้ผลผลิตน้ำมันชีวภาพร้อยละ 7.91 ของขยะเศษอาหารที่เดิม.

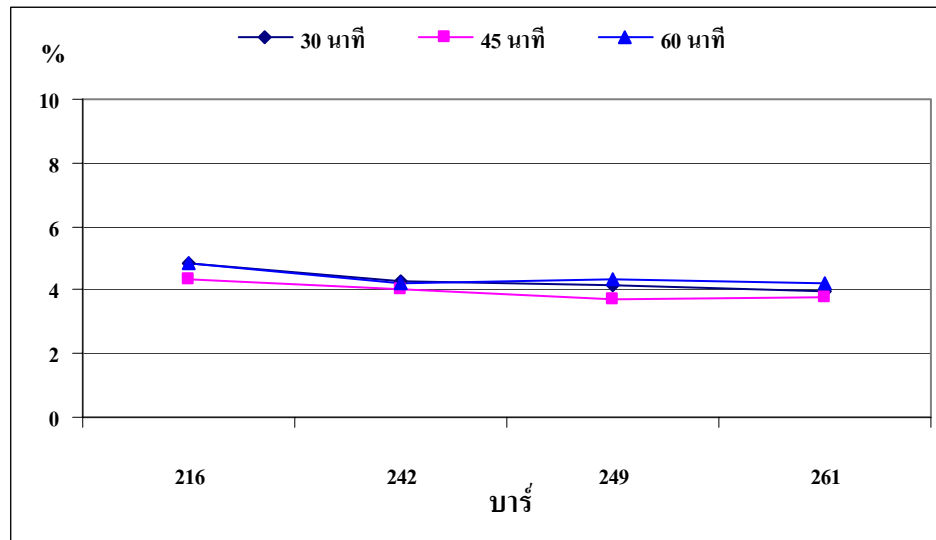


รูปที่ 4.1. ผลของความดันและเวลาที่หน่วงต่อผลผลิตน้ำมันชีวภาพที่ได้.

4.2.2 ถ่านคาร์บอน

ตามที่ได้กำหนดตัวแปรของการทดลองเป็นความดันสุดท้ายในปฏิกรณ์ และระยะเวลาที่หน่วงภายหลังจากที่อุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ถึง 380°C. แล้ว. ผลผลิตที่ได้ประกอบด้วยน้ำมันชีวภาพ, ถ่านคาร์บอน, น้ำ และก๊าซ. ปฏิบัติการย่อยสลายขยะเศษอาหารส่วนใหญ่ได้เสร็จสิ้นแล้วที่ความดัน 242 บาร์ ในทุกช่วงเวลาที่หน่วง และสามารถเลือกช่วงเวลาที่หน่วง 30 นาที เป็นระยะเวลาที่เหมาะสมที่สุดที่ให้ค่าผลผลิตถ่านคาร์บอนร้อยละ 4.27 ของขยะเศษอาหารที่เดิม (รูปที่ 4.2). อย่างไรก็ตาม เป็นที่น่าสังเกตว่า ผลผลิตของถ่านคาร์บอนที่ได้มีค่าผกผันกับปริมาณน้ำมันชีวภาพที่ได้. กล่าวคือ ปริมาณถ่านคาร์บอนที่ได้มีค่าสูงสุดร้อยละ 4.85 ของขยะเศษอาหารที่เดิม ที่ความดัน 216 บาร์ และลดต่ำลงจนเหลือร้อยละ 3.99 ของขยะเศษอาหารที่เดิม ที่ความดัน 261 บาร์. ทั้งนี้ ถ่านคาร์บอนที่ได้มีธาตุองค์ประกอบหลักเป็นคาร์บอน และเป็นส่วนที่เหลือจากการทำ

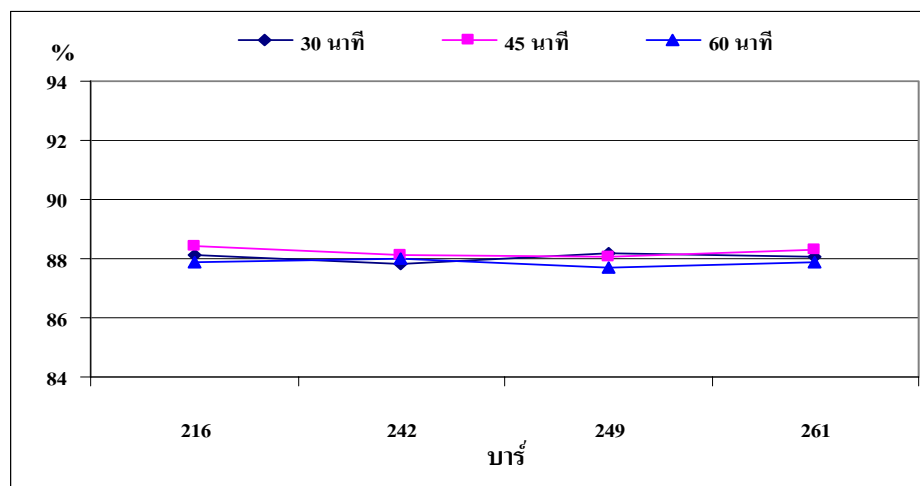
ปฏิกิริยาย่อยสลายขยะเศษอาหารในช่วงความดันที่สูงขึ้น, ซึ่งส่วนหนึ่งได้ผลผลิตเป็นน้ำมันชีวภาพที่มีปริมาณสูงในช่วงความดันที่สูงขึ้น.



รูปที่ 4.2. ผลของความดันและเวลาที่หน่วงต่อผลผลิตถ่านคาร์บอนที่ได้.

4.2.3 ของเหลวและก๊าซ

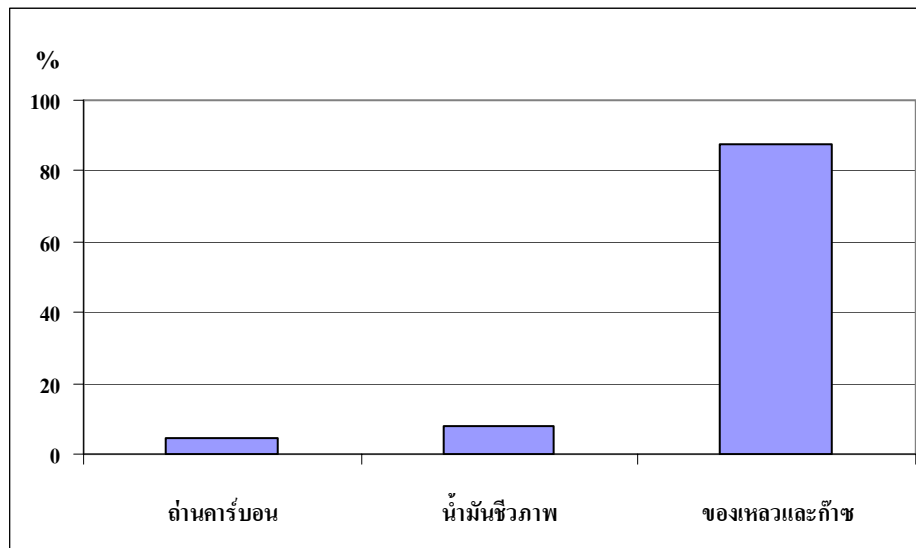
ผลผลิตหลักที่ได้จากการทดลองนี้เป็นน้ำมันชีวภาพและถ่านคาร์บอนเป็นผลผลิตรอง. ส่วนของเหลวและก๊าซเป็นผลผลิตที่ยังไม่มีความสนใจในการทดลองนี้. ของเหลวและก๊าซได้จากการนำปริมาณน้ำมันชีวภาพและถ่านคาร์บอนไปลบออกจากปริมาณขยะเศษอาหารที่เดิม. ปริมาณของเหลวและก๊าซที่ได้มีค่าไปในทิศทางเดียวกับปริมาณถ่านคาร์บอนที่ได้. ช่วงเวลาที่หน่วง 30 นาที และความดัน 242 บาร์ เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่ได้ผลผลิตของเหลวและก๊าซร้อยละ 87.82 ของขยะเศษอาหารที่เดิม (รูปที่ 4.3).



รูปที่ 4.3. ผลของความถี่และความถี่ที่หวังต่อผลผลิตของเหลวและก๊าซที่ได้.

4.2.4 ผลผลิตรวม

ผลผลิตหลักที่ต้องการจากการทดลองนี้เป็นน้ำมันชีวภาพ. สภาวะที่ได้ผลผลิตที่เหมาะสมที่สุดเป็นที่ความถี่สุดท้าย 242 บาร์ และระยะเวลาที่หวังภายหลังจากที่อุณหภูมิภายในเครื่องปฏิบัติการถึง 380°C. เป็นเวลา 30 นาที (รูปที่ 4.1). ถ้าความถี่สูงกว่านี้ ผลผลิตน้ำมันชีวภาพที่ได้ไม่ได้สูงอย่างมีนัยสำคัญมากนักในทุกๆ ช่วงความถี่และเวลาที่หวัง และยังคงมีการใช้พลังงานป้อนเข้าระบบสูง. ดังนั้น ที่สภาวะที่ได้ผลผลิตที่เหมาะสมที่สุดที่ความถี่สุดท้าย 242 บาร์ ระยะเวลาที่หวัง 30 นาที, ได้ผลผลิตถ่านคาร์บอน, น้ำมันชีวภาพ, ของเหลวและก๊าซ ร้อยละ 4.27, 7.91 และ 87.82 ของขยะเศษอาหารที่เดิม ดังแสดงในรูปที่ 4.4.



รูปที่ 4.4. ผลผลิตรวมที่ได้ที่สถานะที่เหมาะสมที่สุด.

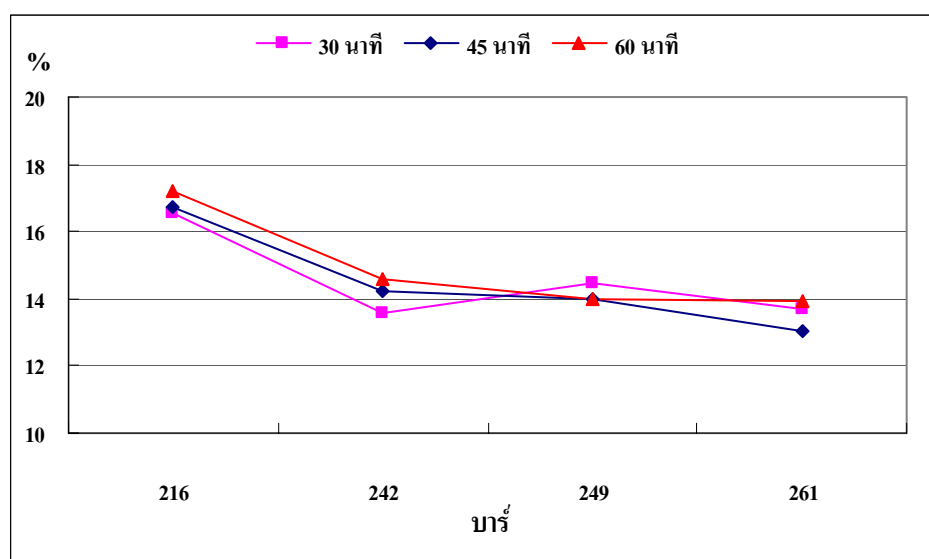
4.3 คุณสมบัติด้านเชื้อเพลิงของผลผลิตที่ได้

ภายหลังจากที่สกัดได้ผลผลิตหลัก 2 ส่วน คือ น้ำมันชีวภาพและถ่านคาร์บอนแล้ว, นำไปวิเคราะห์คุณสมบัติด้านเชื้อเพลิงที่เป็นธาตุองค์ประกอบและค่าความร้อน.

4.3.1 คุณสมบัติน้ำมันชีวภาพ

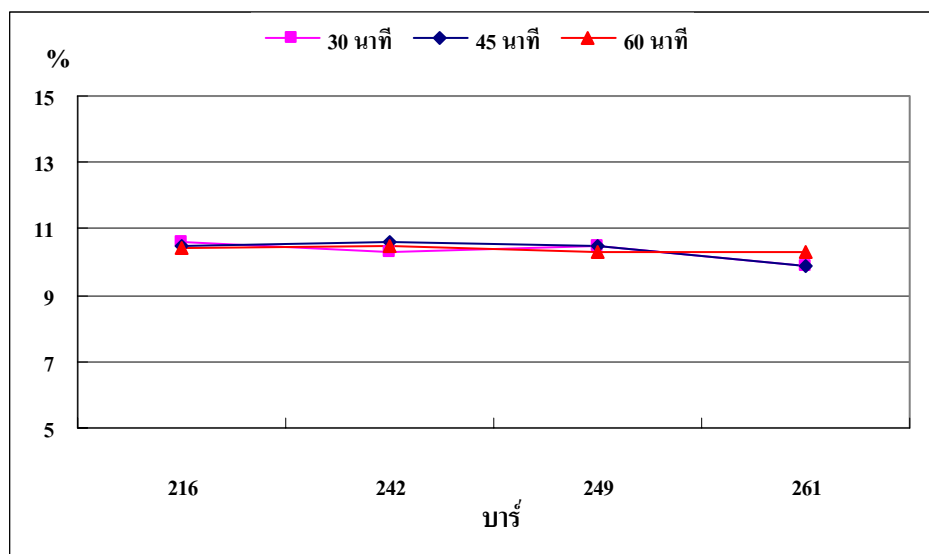
ตัวชี้วัดคุณสมบัติน้ำมันชีวภาพที่ดีคือปริมาณคาร์บอน, ไฮโดรเจน และออกซิเจน. แต่จะไม่มีการวิเคราะห์หาปริมาณของซัลเฟอร์ เนื่องจากชีวมวลเหล่านี้ไม่มีหรือมีน้อยมาก จนไม่ส่งผลกระทบต่อใดๆ. ปริมาณออกซิเจนในน้ำมันชีวภาพเป็นส่วนที่แสดงถึงความไม่เสถียร, ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่าย, ซึ่งเป็นสาเหตุให้น้ำมันเสื่อมสภาพ. ดังนั้น ถ้ายังมีปริมาณออกซิเจนมาก แสดงว่าปฏิกิริยาการย่อยสลายขยะเศษอาหารยังไม่สมบูรณ์ดี, ทำให้สัดส่วนของสารไฮโดรคาร์บอน (คาร์บอนและไฮโดรเจน) ที่มีในน้ำมันชีวภาพน้อยลงต่อ 1 หน่วยน้ำหนัก. แต่ถ้ามีปริมาณออกซิเจนน้อย แสดงว่า ปฏิกิริยาการย่อยสลายขยะเศษอาหารดี, สารไฮโดรคาร์บอนที่มีในน้ำมันชีวภาพจึงมีสัดส่วนมากขึ้นต่อ 1 หน่วยน้ำหนักที่เท่ากัน. การที่มีสารไฮโดรคาร์บอนมาก หมายถึง มีสารเชื้อเพลิงมาก, ซึ่งจะให้น้ำมันชีวภาพนั้นมีค่าความร้อนสูง และในทางกลับกัน การที่มีสารไฮโดรคาร์บอนน้อยจะให้น้ำมันชีวภาพนั้นมีค่าความร้อนต่ำ.

พิจารณาปริมาณออกซิเจนในน้ำมันชีวภาพโดยรวม พบว่า ปริมาณออกซิเจนลดลงค่อนข้างมากในช่วงความดัน 216-242 บาร์, ซึ่งออกซิเจนทำปฏิกิริยาได้ดี โดยเฉพาะกับคาร์บอนและได้ผลผลิตส่วนใหญ่เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์, สอดคล้องกับถ่านคาร์บอนที่ลดลงอย่างมากในช่วงความดันดังกล่าว (รูปที่ 4.2). แต่ที่ความดันเกิน 242 บาร์, ออกซิเจนมีการทำปฏิกิริยาลดลง, หรือกล่าวได้ว่า น้ำมันชีวภาพมีความเสถียรมากขึ้นแม้ความดันจะเพิ่มมากขึ้น. ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า ที่ความดันสุดท้าย 242 บาร์ เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด และเลือกระยะเวลาที่หน่วง 30 นาที, ซึ่งเป็นระยะเวลาที่สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำมันชีวภาพ, ถ่านคาร์บอน, และของเหลวและก๊าซ. น้ำมันชีวภาพที่ได้ที่สภาวะดังกล่าวนี้มีค่าปริมาณออกซิเจนร้อยละ 13.59 (รูปที่ 4.5).



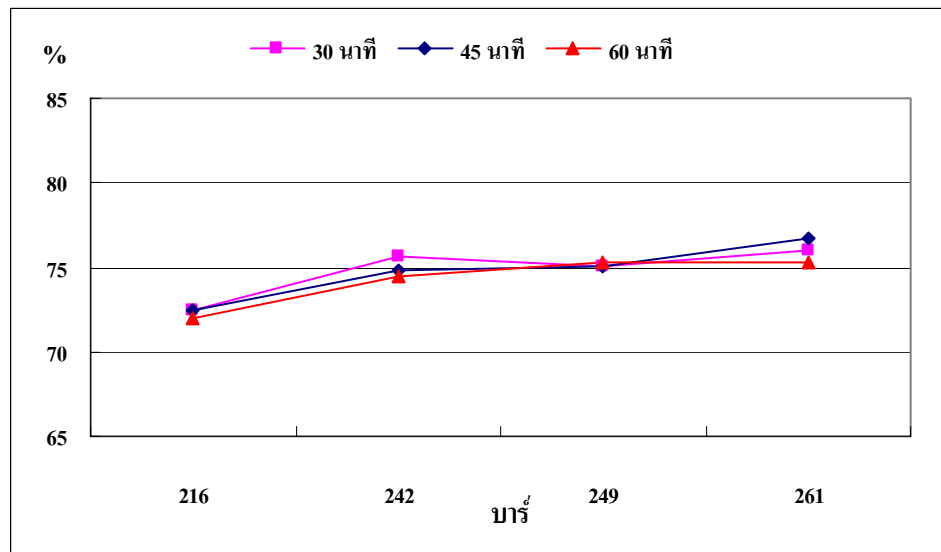
รูปที่ 4.5. ปริมาณออกซิเจนในน้ำมันชีวภาพ.

ปริมาณไฮโดรเจนในน้ำมันชีวภาพ เป็นอีกค่าหนึ่งที่มีผลอย่างมากต่อการพิจารณาคูณสมบัติด้านเชื้อเพลิง ภายใต้ตัวแปรความดันและระยะเวลาที่หน่วงในปฏิกรณ์. ค่าไฮโดรเจนที่ได้ในทุกตัวแปรค่อนข้างคงที่, แต่มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อความดันในปฏิกรณ์สูงขึ้น (รูปที่ 4.6). ทั้งนี้ เป็นผลมาจากที่ความดันในปฏิกรณ์สูงขึ้น ปฏิกิริยาการย่อยสลายขยะเศษอาหารดีขึ้น, ทำให้ปริมาณคาร์บอนและไฮโดรเจนในขยะเศษอาหารทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้มากขึ้น. ผลผลิตน้ำมันชีวภาพจึงสูงขึ้น แต่ปริมาณคาร์บอนลดลงตามที่แสดงผลในรูปที่ 4.1 และ 4.2. ค่าการย่อยสลายขยะเศษอาหารที่เหมาะสมที่สุด คือ ที่ความดัน 242 บาร์ ในระยะเวลาที่หน่วง 30 นาที, ได้ค่าปริมาณไฮโดรเจนร้อยละ 10.30.



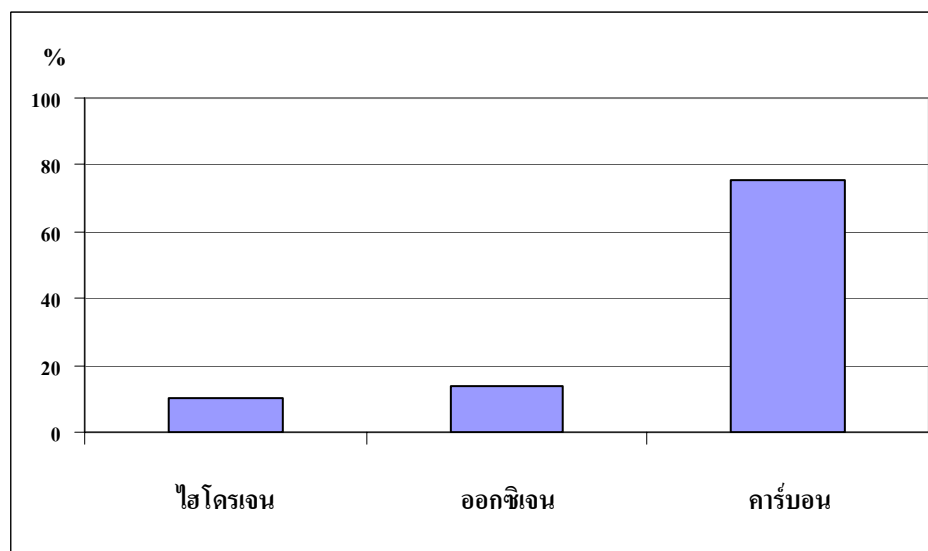
รูปที่ 4.6. ปริมาณไฮโดรเจนในน้ำมันชีวภาพ.

ปริมาณคาร์บอนในน้ำมันชีวภาพมีทิศทางเพิ่มขึ้นตามความถี่ที่สูง ซึ่งมีทิศทางตรงข้ามกับปริมาณออกซิเจนในทุกตัวแปร (รูปที่ 4.7). ปริมาณคาร์บอนเพิ่มสูงในช่วงความถี่ 216–242 บาร์. ปฏิกริยาการเกิดน้ำมันชีวภาพสมบูรณ์ที่ความถี่สูงสุด 242 บาร์. ในช่วงความถี่ดังกล่าว ออกซิเจนในน้ำมันชีวภาพสามารถยังทำปฏิกิริยากับถ่านคาร์บอน ได้ผลผลิตเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์. การลดลงของปริมาณออกซิเจนจะสอดคล้องกับการลดลงของปริมาณถ่านคาร์บอน (รูปที่ 4.2). ออกซิเจนบางส่วนยังสามารถทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนได้ผลผลิตเป็นน้ำ. ดังนั้น ที่ความถี่ 242 บาร์ ในช่วงเวลาที่หน่วง 30 นาที เป็นช่วงที่เหมาะสมที่สุดของการเกิดปฏิกิริยาและมีค่าปริมาณคาร์บอนร้อยละ 75.66.



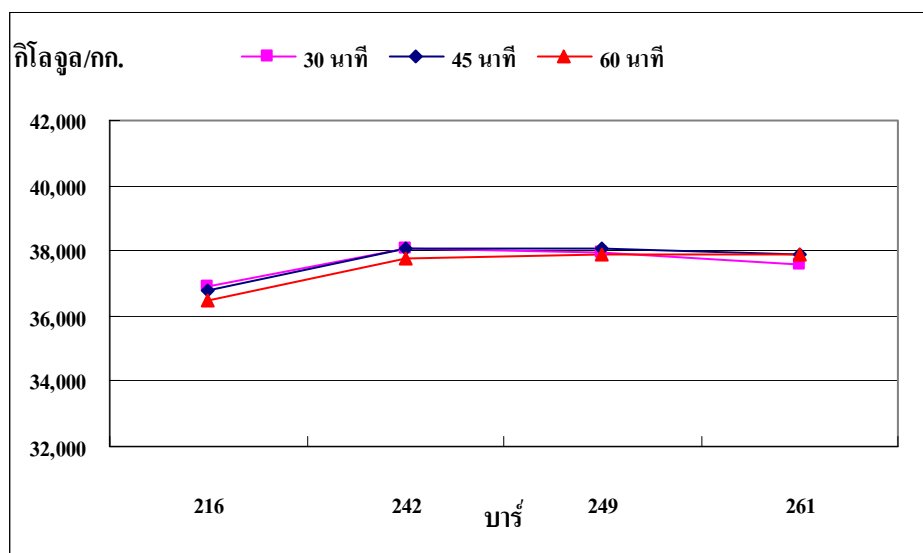
รูปที่ 4.7. ปริมาณคาร์บอนในน้ำมันชีวภาพ.

ภายใต้สภาวะความดันและเวลาหน่วงที่เหมาะสม จะทำให้ได้น้ำมันชีวภาพที่มีคุณสมบัติที่ดี คือ มีปริมาณสัดส่วนคาร์บอนและไฮโดรเจนสูง แต่มีปริมาณสัดส่วนออกซิเจนต่ำ คือ ที่ความดันสุดท้ายเป็น 242 บาร์ และระยะเวลาที่หน่วงหลังจากที่อุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ถึง 380°C. เป็นเวลา 30 นาที. ผลผลิตน้ำมันชีวภาพมีค่าไฮโดรเจน, ออกซิเจน และคาร์บอน ร้อยละ 10.30, 13.59 และ 75.66 ตามลำดับ ดังที่แสดงในรูปที่ 4.8. ภายใต้สภาวะความดันและเวลาที่หน่วงสูงกวานี้ ไม่ได้มีผลผลิตน้ำมันชีวภาพที่มีคุณสมบัติดีกว่านี้อย่างมีนัยสำคัญมากนัก.



รูปที่ 4.8. ไฮโดรเจน ออกซิเจน และคาร์บอน ในน้ำมันชีวภาพภายใต้สภาวะที่เหมาะสมที่สุด.

สัดส่วนคาร์บอน, ไฮโดรเจน และออกซิเจน ในน้ำมันชีวภาพเป็นส่วนที่บ่งชี้ถึงคุณภาพของค่าความร้อนโดยตรง. ถ้าสัดส่วนของคาร์บอนและไฮโดรเจนสูงแต่มีสัดส่วนของออกซิเจนต่ำ น้ำมันชีวภาพจะมีค่าความร้อนสูง. ในทางตรงกันข้าม ถ้าสัดส่วนของคาร์บอนและไฮโดรเจนต่ำแต่มีสัดส่วนของออกซิเจนสูง น้ำมันชีวภาพจะมีค่าความร้อนต่ำ. จากสัดส่วนคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นตามความดันที่สูงขึ้นและสัดส่วนออกซิเจนที่ต่ำลงตามความดันที่สูงขึ้น (รูปที่ 4.5 และ 4.7). ส่วนสัดส่วนไฮโดรเจนมีค่าค่อนข้างคงที่ น้ำมันชีวภาพจึงมีค่าความร้อนไปในทิศทางตามสัดส่วนคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นเมื่อความดันสูงขึ้น (รูปที่ 4.9). ที่ความดัน 242 บาร์ และหน่วงเวลาที่ 30 นาที แสดงค่าความร้อนที่เหมาะสมที่สุด 38,059 กิโลจูล/กก. ซึ่งเป็นค่าที่สูงกว่าค่าความร้อนของน้ำมันดีเซล 36,420 กิโลจูล/ลิตร (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน 2550) ซึ่งเพียงพอต่อการนำไปใช้เพื่อผลิตไฟฟ้าใหม่เพื่อผลิตพลังงานความร้อน.

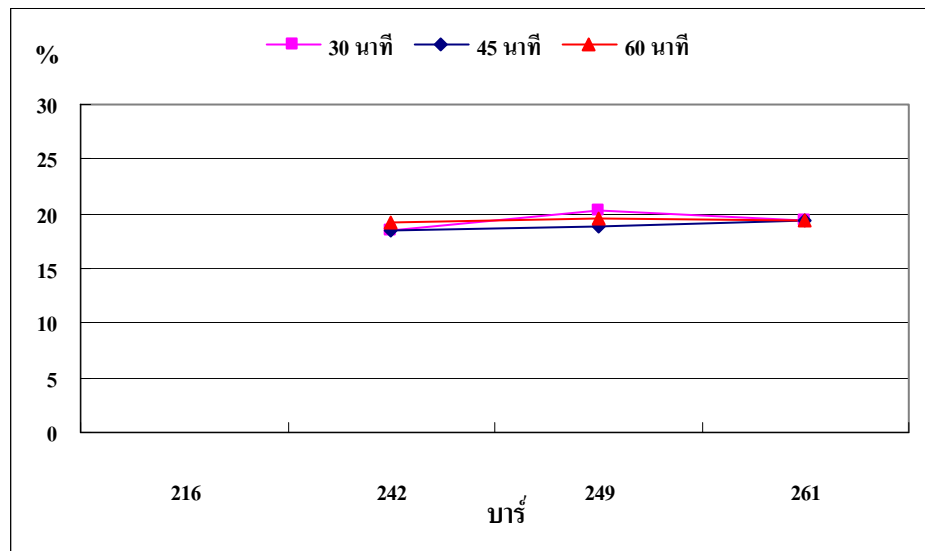


รูปที่ 4.9. ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพ.

4.3.2 คุณสมบัติถ่านคาร์บอน

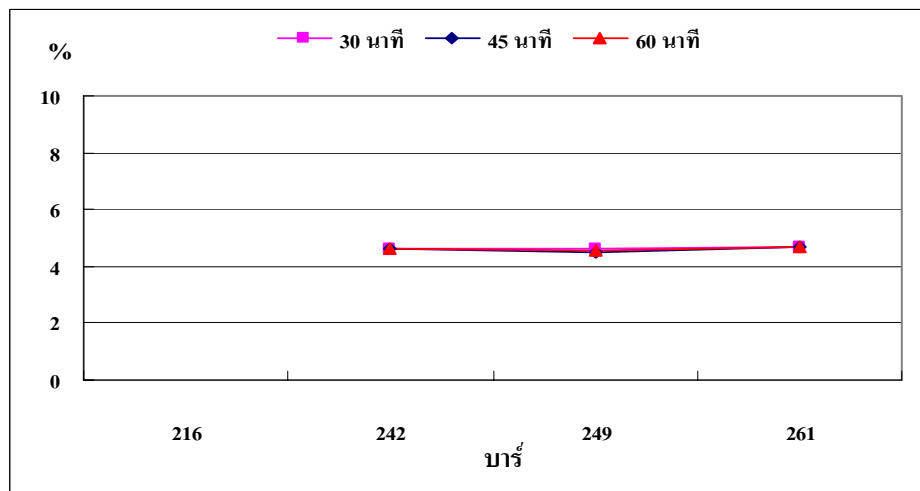
ถ่านคาร์บอนเป็นผลผลิตพลอยได้ที่เหลือจากปฏิกิริยาการย่อยสลายขยะเศษอาหาร. ภายใต้อุณหภูมิและความดันและอุณหภูมิเหนือจุดวิกฤติน้ำ, ตัวชี้วัดคุณสมบัติถ่านคาร์บอนที่ดีจะเหมือนกับตัวชี้วัดคุณสมบัติถ่านชีวภาพที่ดี คือ การวัดค่าปริมาณคาร์บอน, ไฮโดรเจน, ออกซิเจน และค่าความร้อนที่มี. ส่วนค่าอื่นๆ เช่น ปริมาณซัลเฟอร์, จะไม่มีการวิเคราะห์ เนื่องจากชีวมวลเหล่านี้ไม่มีหรือมีน้อย

มากจนไม่ส่งผลกระทบต่อมากนัก. จากการที่ ถ่านคาร์บอนเป็นผลผลิตรองและมีปริมาณไม่มากนัก, ประกอบกับผลการวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพได้แสดงผลปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการนี้ มีความสมบูรณ์ตั้งแต่ความดันที่เกิน 242 บาร์ไปแล้ว. ดังนั้น การวิเคราะห์คุณสมบัติถ่านคาร์บอนที่เป็นผลผลิตรอง จึงเริ่มที่ค่าความดันตั้งแต่ 242 บาร์ขึ้นไป ปริมาณออกซิเจนที่ยังคงเหลือในถ่านคาร์บอนเป็นค่าที่แสดงถึงคุณภาพ. ถ่านคาร์บอนที่มีคุณภาพสูงที่สุดจะต้องไม่มีปริมาณออกซิเจนเหลือค้างอยู่. จากผลการทดลองที่กำหนดตัวแปรเป็นความดันและเวลาที่หน่วงต่างๆ กัน พบว่า ปริมาณออกซิเจนในถ่านคาร์บอนมีค่าไม่แตกต่างกันในทุกช่วงการทดลอง (รูปที่ 4.10). ทั้งนี้ สามารถสรุปได้ว่า ปฏิกิริยาการย่อยสลายขยะเศษอาหารภายใต้ชุดตัวแปรดังกล่าวที่เหมาะสมที่สุด คือ ที่ความดัน 242 บาร์ ในช่วงเวลาที่หน่วง 30 นาที, ซึ่งมีค่าออกซิเจนในถ่านคาร์บอนร้อยละ 18.46.



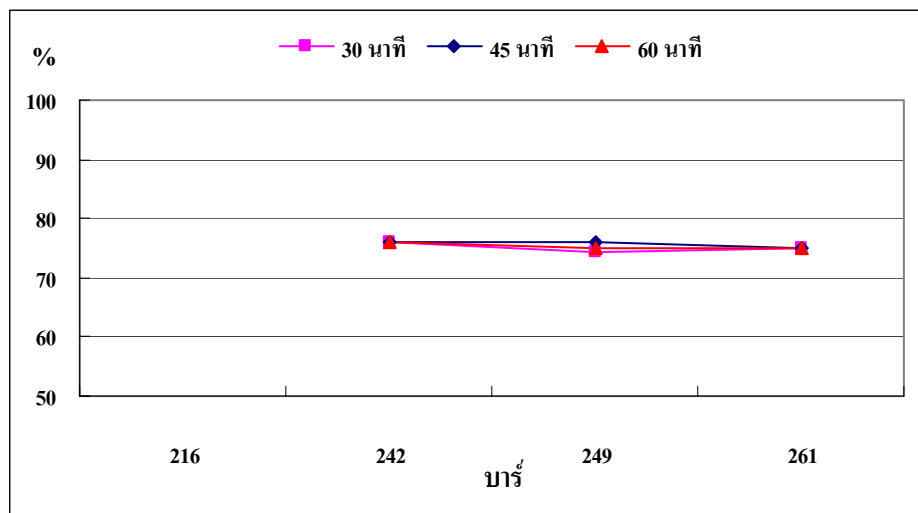
รูปที่ 4.10. ปริมาณออกซิเจนในถ่านคาร์บอน.

ปฏิกิริยาการย่อยสลายขยะเศษอาหารภายใต้ความดันและอุณหภูมิที่เหนือจุดวิกฤติน้ำ ค่าไฮโดรเจนในถ่านคาร์บอนค่อนข้างคงที่ภายใต้ชุดตัวแปรนี้ (รูปที่ 4.11) ซึ่งมีทิศทางเดียวกับค่าออกซิเจนในถ่านคาร์บอน. สามารถกล่าวสรุปได้ว่า ปฏิกิริยาการย่อยสลายขยะเศษอาหารภายใต้ชุดตัวแปรดังกล่าวที่เหมาะสมที่สุดแล้วที่ความดัน 242 บาร์ ในช่วงเวลาที่หน่วง 30 นาที มีค่าไฮโดรเจนในถ่านคาร์บอนร้อยละ 4.64.



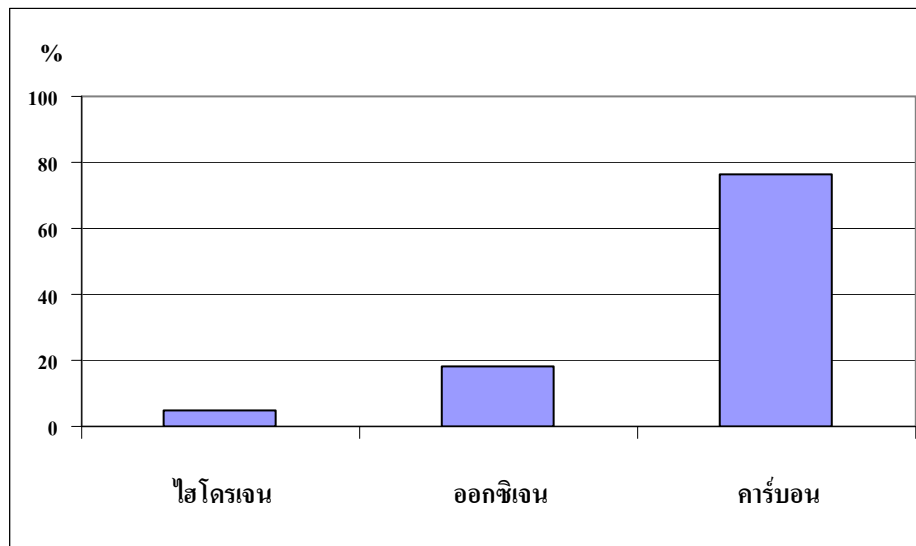
รูปที่ 4.11. ปริมาณไฮโดรเจนในถ่านคาร์บอน.

โดยทั่วไป ถ่านคาร์บอนจะมีค่าคาร์บอนค่อนข้างสูงมากกว่าค่าไฮโดรเจนและออกซิเจน. ทั้งนี้เป็นผลจากออกซิเจนทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจน ได้ผลผลิตเป็นน้ำและน้ำมันชีวภาพมากกว่าที่ออกซิเจนทำปฏิกิริยากับคาร์บอน ได้ผลผลิตเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์. การสูญเสียออกซิเจนและไฮโดรเจน จึงมีมากกว่าคาร์บอน. อีกประการหนึ่งสัดส่วนของคาร์บอนในขยะเศษอาหารมีมากกว่าสัดส่วนออกซิเจนและไฮโดรเจน. ดังนั้น การลดลงของปริมาณไฮโดรเจนและออกซิเจนจึงค่อนข้างมากกว่าปริมาณคาร์บอน. สามารถสรุปได้ว่า ปฏิกิริยาการย่อยสลายขยะเศษอาหารภายใต้ชุดตัวแปรดังกล่าวที่เหมาะสมที่สุดแล้วที่ความดัน 242 บาร์ ในช่วงเวลาที่หน่วง 30 นาที, ได้ค่าคาร์บอนในถ่านคาร์บอนร้อยละ 76.11.



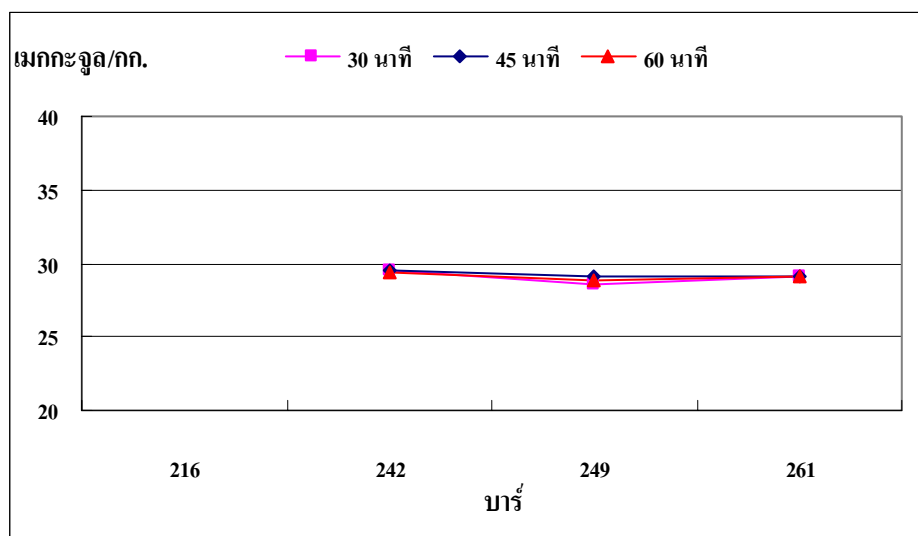
รูปที่ 4.12. ปริมาณคาร์บอนในถ่านคาร์บอน.

จากที่กำหนดให้น้ำมันชีวภาพเป็นผลผลิตหลักและถ่านคาร์บอนเป็นผลผลิตพลอยได้นั้น, สถานะความดันและเวลาที่หน่วงที่เหมาะสมที่สุดที่ได้ค่าน้ำมันชีวภาพ คือ ที่ความดันสุดท้ายเป็น 242 บาร์ และระยะเวลาที่หน่วงหลังจากที่อุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ถึง 380°ซ เป็นเวลา 30 นาที. ดังนั้น ผลผลิตถ่านคาร์บอนที่ได้ที่สถานะดังกล่าว จึงเป็นส่วนที่ถูกกำหนดไปโดยปริยาย. อย่างไรก็ตาม ผลการวิเคราะห์ในชุดตัวแปรทั้งหมด ได้ค่าไฮโดรเจน, ออกซิเจน และคาร์บอน ไปในทิศทางเดียวกับค่าที่ได้ของน้ำมันชีวภาพ. นั่นคือ ที่ความดันสุดท้ายเป็น 242 บาร์ และระยะเวลาที่หน่วงหลังจากที่อุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ถึง 380°ซ. เป็นเวลา 30 นาที เป็นสถานะที่เหมาะสมที่สุด, ได้ค่าไฮโดรเจน, ออกซิเจน และคาร์บอน ในถ่านคาร์บอนร้อยละ 4.64, 18.48 และ 76.11 ตามลำดับ ดังที่แสดงในรูปที่ 4.13.



รูปที่ 4.13. ไฮโดรเจน ออกซิเจน และคาร์บอน ในถ่านคาร์บอนภายใต้สภาวะที่เหมาะสมที่สุด.

ค่าความร้อนของถ่านคาร์บอนมาจากสัดส่วนของคาร์บอนและไฮโดรเจน, ส่วนออกซิเจนไม่มีผลต่อค่าความร้อน. ถ่านคาร์บอนที่ได้จากกระบวนการนี้ในช่วงความดัน 242–261 บาร์ ช่วงเวลาที่หน่วง 30–60 นาที, มีค่าคาร์บอน, ไฮโดรเจน และออกซิเจน ค่อนข้างคงที่, เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดสมบูรณ์แล้ว. ดังนั้น ที่ความดัน 242 บาร์และหน่วงเวลาที่ 30 นาที, ค่าความร้อนของถ่านคาร์บอนที่เหมาะสมที่สุด คือ 29,470 กิโลจูล/กก. (รูปที่ 4.14) เปรียบเทียบกับค่าความร้อนของถ่านไม้ยางพารา 32,008 กิโลจูล/กก. (ถ่านอัดแท่งเมืองไทย 2553) ซึ่งมีค่าต่ำกว่าเพียงเล็กน้อย.



รูปที่ 4.14. ค่าความร้อนของถ่านคาร์บอน.

4.4 สมดุลมวลสาร (Material balance)

ผลผลิตที่ได้จากการทดลองนี้แบ่งออกเป็น 4 ส่วน คือ น้ำมันชีวภาพ, ถ่านคาร์บอน, ของเหลว และก๊าซ. ในการทดลองนี้ ทำการตรวจวัดปริมาณน้ำมันชีวภาพและถ่านคาร์บอนเท่านั้น, ส่วนของเหลวและก๊าซจะได้รับการนำปริมาณขยะเศษอาหารที่เติมลบด้วยปริมาณน้ำมันชีวภาพและถ่านคาร์บอนที่ได้.

ปริมาณขยะเศษอาหารที่เติมในปฏิกรณ์เพื่อการทดลอง แบ่งเป็นจำนวน 100, 150, 200 และ 250 กรัม. กำหนดสภาวะการทดลองภายใต้สภาวะเหนือวิกฤติน้ำ คือ ที่ความดันสุดท้ายในปฏิกรณ์สูงกว่า 221 บาร์ และอุณหภูมิสูงกว่า 374°C. ซึ่งการทดลองนี้ กำหนดให้อุณหภูมิภายในปฏิกรณ์ 380°C. ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองนี้ เป็นความดันสุดท้ายในปฏิกรณ์และเวลาที่หน่วงในการเกิดปฏิกิริยาภายหลังจากที่อุณหภูมิภายในปฏิกรณ์ถึง 380°C. แล้ว. ภายใต้สภาวะเหนือวิกฤติน้ำนี้ ผลผลิตที่ได้ที่ให้พลังงานที่เหมาะสมที่สุดตามหัวข้อที่ 4.3.1 และ 4.3.2 นั้น คือ ที่อัตราการเติมขยะเศษอาหาร 150 กรัม, ความดันสุดท้ายในปฏิกรณ์เป็น 242 บาร์ และเวลาที่หน่วงนาน 30 นาที. ภายหลังจากที่นำผลผลิตที่ได้ไปแยกน้ำมันชีวภาพและถ่านคาร์บอนออกจากผลผลิตที่ได้ทั้งหมดแล้ว, นำปริมาณน้ำมันชีวภาพและถ่านคาร์บอนไปหักลบออกจากขยะเศษอาหารที่เติมในปฏิกรณ์ จะได้ส่วนที่เป็นของเหลวและก๊าซ. สมดุลมวลสารที่สภาวะดังกล่าว แสดงในตารางที่ 4.2.

ตารางที่ 4.2. สมดุลมวลสารที่การเติมขยะเศษอาหารจำนวน 150 กรัม

รายการ	ขยะเศษอาหารที่เติม (กรัม)	สัดส่วน (%)
ขยะเศษอาหารที่เติม	150	100.0
• น้ำ	129.51	86.34
• ขยะแห้ง	20.49	13.66
ผลผลิตที่ได้	150	100.0
• ของเหลวและก๊าซ	131.73	87.82
• น้ำมันชีวภาพ	11.86	7.91
• ถ่านคาร์บอน	6.41	4.27

ขยะเศษอาหารที่เติม 150 กรัม ประกอบด้วยน้ำ (ความชื้น) สูงถึง 129.51 กรัม คิดเป็นร้อยละ 86.34. ดังนั้น จึงมีขยะแห้งเพียงร้อยละ 13.66 เท่านั้น. ส่วนผลผลิตที่ได้ประกอบด้วยของเหลวและก๊าซสูงถึง 131.73 กรัม คิดเป็นร้อยละ 87.82, ซึ่งประกอบด้วยส่วนที่เป็นของเหลวมากกว่าส่วนที่เป็นก๊าซมาก. เนื่องจากภายใต้สภาวะเหนือวิกฤตินี้ ความดันที่สูงจะเป็นตัวกำหนดให้ปฏิกิริยาการเกิดก๊าซเป็นไปได้ยากกว่าปฏิกิริยาการเกิดของเหลว. ดังนั้น ผลผลิตของเหลวและก๊าซจึงมีสัดส่วนของของเหลวมากกว่าก๊าซมาก, ซึ่งของเหลวจะประกอบด้วยน้ำเป็นส่วนใหญ่. ในส่วนของก๊าซประกอบด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นส่วนใหญ่, ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนและออกซิเจน. ผลผลิตรองลงมาเป็นน้ำมันชีวภาพ 11.86 กรัม คิดเป็นร้อยละ 7.91 และถ่านคาร์บอน 6.41 กรัม คิดเป็นร้อยละ 4.27. สามารถสรุปได้ว่า ส่วนที่เป็นขยะแห้งทำปฏิกิริยาเป็นน้ำมันชีวภาพเป็นส่วนใหญ่, รองลงมาเป็นน้ำและก๊าซอีกเล็กน้อย. ขยะแห้งส่วนที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาเหลือเป็นถ่านคาร์บอน, ส่วนน้ำที่มีในขยะเศษอาหารเป็นส่วนช่วยในการทำปฏิกิริยาหรือเป็นตัวทำละลาย.

4.5 สมดุลพลังงาน (Energy balance)

ผลผลิตหลักที่ได้จากการทดลองนี้เป็นน้ำมันชีวภาพและได้ถ่านคาร์บอนเป็นผลพลอยได้หรือผลผลิตรอง. ผลผลิตที่เหลือเป็นของเหลวและก๊าซ ซึ่งผลผลิตเหล่านี้ได้จากการที่ป้อนพลังงานส่วนหนึ่งเข้าสู่ระบบหรือปฏิกรณ์เพื่อให้เกิดการทำปฏิกิริยา. ดังนั้น จึงต้องมีการวิเคราะห์สมดุลพลังงานทั้งหมด คือ ด้านที่เข้าระบบหรือปฏิกรณ์ ซึ่งประกอบด้วยพลังงานที่ป้อนเข้าและพลังงานที่มีในเศษขยะอาหาร (ขยะแห้ง) กับด้านที่ออกจากระบบหรือปฏิกรณ์ ซึ่งประกอบด้วยน้ำมันชีวภาพและถ่านคาร์บอน, ส่วนของเหลวและก๊าซที่ได้ไม่มีการนำมาวิเคราะห์. จากนั้น นำพลังงานจากทั้ง

สองด้านมาวิเคราะห์เป็นพลังงานด้านที่ป้อนเข้าระบบและออกจากระบบ. ภายใต้สภาวะเหนือวิกฤติ น้ำที่ให้ผลผลิตที่เหมาะสมที่สุดตามหัวข้อที่ 4.2 และ 4.3 นั้น, คือ ที่อัตราการเติมวัตถุดิบ 150 กรัม, ความดันสุดท้ายในปฏิกรณ์เป็น 242 บาร์ และเวลาที่หน่วงนาน 30 นาที, นำสิ่งที่ป้อนเข้าระบบและผลผลิตที่ได้จากระบบมาวิเคราะห์สมดุลพลังงาน.

ด้านที่ป้อนเข้าระบบประกอบด้วย พลังงานไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปในระบบเพื่อให้เกิดความร้อน ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดที่หน่วงเวลาไว้ครบ 30 นาที เป็นจำนวน 1,331 กิโลจูล คิดเป็นร้อยละ 80.27 และขยะอาหารที่เติมจำนวน 150 กรัม ซึ่งประกอบด้วยน้ำร้อยละ 86.34 และขยะแห้งร้อยละ 13.66 (20.49 กรัม). ส่วนที่เป็นขยะแห้งนี้เท่านั้นที่มีพลังงาน, ตามที่ได้มีการวิเคราะห์ขยะแห้ง 1 กิโลกรัมมีค่าความร้อน 15,940 กิโลจูล (ตารางที่ 4.1). ดังนั้น ขยะแห้งจำนวน 20.49 กรัมจึงมีค่าความร้อนจำนวน 327 กิโลจูล คิดเป็นร้อยละ 19.73 (ตารางที่ 4.3). รวมค่าพลังงานความร้อนด้านที่ป้อนเข้าระบบทั้งหมด 1,658 กิโลจูล.

ในด้านผลผลิตที่ได้มีของเหลวและก๊าซร้อยละ 87.82, น้ำมันชีวภาพร้อยละ 7.91 และถ่านคาร์บอนร้อยละ 4.27. ดังนั้น ที่การใช้ขยะอาหารจำนวน 150 กรัม จึงได้น้ำมันชีวภาพจำนวน 451 กิโลจูล จากถ่านคาร์บอนจำนวน 189 กิโลจูล. พลังงานที่ได้จากของเหลวและก๊าซได้จากการนำพลังงานรวมด้านที่ป้อนเข้าระบบหักลบด้วยพลังงานที่มีในน้ำมันชีวภาพและถ่านคาร์บอน. พลังงานที่เหลือจึงเป็นพลังงานในของเหลวและก๊าซจำนวน 1,017 กิโลจูล รวมค่าพลังงานความร้อนที่ได้ทั้งหมด 1,658 กิโลจูล. พลังงานที่ออกจากระบบในของเหลวและก๊าซ, น้ำมันชีวภาพ และถ่านคาร์บอน, คิดเป็นร้อยละ 61.37, 27.23 และ 11.40 ของพลังงานที่ได้จากระบบ.

ในการวิเคราะห์สมดุลพลังงานนี้มีข้อที่ควรพิจารณา คือ เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่การหน่วงเวลาไว้ครบ 30 นาทีแล้ว, ระบบยังมีพลังงานความร้อนเหลือค้างในของเหลวและก๊าซ, น้ำมันชีวภาพ, ถ่านคาร์บอน และในอุปกรณ์การทดลอง เช่น ในปฏิกรณ์ เป็นต้น. พลังงานความร้อนส่วนนี้ไม่มีการนำมาพิจารณา แต่จะใช้รวมพลังงานที่กล่าวนี้ในส่วนหนึ่งของเหลวและก๊าซ, ซึ่งจะทําให้สัดส่วนพลังงานในของเหลวและก๊าซสูงมากเกินความเป็นจริงบ้าง. ทั้งนี้ มีเหตุผลที่ต้องทำเช่นนี้อยู่ 2 ประการ คือ การทดลองครั้งนี้ ยังไม่มีเครื่องมือเพียงพอต่อการหาปริมาณและชนิดของก๊าซที่เกิดขึ้นได้ ทำให้ไม่สามารถหาค่าความร้อนได้ และไม่มีการนำพลังงานในของเหลวและก๊าซมาใช้วิเคราะห์หามูลค่า. ดังนั้น ค่าผิดพลาดจากการทดลองจึงรวมอยู่ในส่วนของของเหลวและก๊าซ.

ตารางที่ 4.3. สมดุลพลังงานที่การเติมขยะเศษอาหารจำนวน 150 กรัม

รายการ	พลังงาน (กิโลจูล)	สัดส่วน (%)
พลังงานที่ป้อนเข้าระบบ	1,658	100.0
• ขยะแห้ง	327	19.73
• ไฟฟ้า	1,331	80.27
พลังงานที่ออกจากระบบ	1,658	100.0
• น้ำมันชีวภาพ	451	27.23
• ถ่านคาร์บอน	189	11.40
• ของเหลวและก๊าซ	1,017	61.37

สมดุลพลังงานของระบบที่การเติมขยะเศษอาหารจำนวน 150 กรัม มีข้อที่น่าสนใจหลายประการ คือ:

- พลังงานที่มีในขยะแห้งมีเพียง 327 กิโลจูล คิดเป็นร้อยละ 19.73 น้อยกว่าพลังงานที่มีในผลผลิตหลักที่ได้ คือ ในน้ำมันชีวภาพ 451 กิโลจูล และถ่านคาร์บอน 189 กิโลจูล, รวมเป็นจำนวน 640 กิโลจูล คิดเป็นร้อยละ 38.63.
- พลังงานที่ป้อนเข้าระบบ คือ ไฟฟ้า มีมากถึงร้อยละ 80.27, ซึ่งจะต้องมีการหาแนวทางลดการใช้ลง หรือ การนำพลังงานที่เหลือกลับมาใช้ใหม่ (Heat recovery).
- พลังงานในของเหลวและก๊าซยังมีความผิดพลาดสูง.

4.6 การเปรียบเทียบเชิงปริมาณและมูลค่า

การวิเคราะห์สมดุลมวลสารบอกถึงปริมาณวัตถุดิบที่ป้อนเข้าและผลผลิตที่ได้จากระบบ มีลักษณะทางกายภาพและเคมีที่แตกต่างอย่างไร. ส่วนการวิเคราะห์สมดุลพลังงานบอกถึงพลังงานที่มีในวัตถุดิบและพลังงานจากภายนอกที่ป้อนเข้าและพลังงานที่ได้จากผลผลิตในระบบ. การนำสมดุลมวลสารและสมดุลพลังงานมาวิเคราะห์ร่วมกันกับมูลค่าของพลังงานที่ป้อนเข้าและออกมาจากระบบ ทำให้การวิเคราะห์ได้เด่นชัดขึ้นทั้งในด้านปริมาณและมูลค่า ดังแสดงในตารางที่ 4.4.

ตารางที่ 4.4. การเปรียบเทียบเชิงปริมาณและมูลค่า

รายการ	สมดุลมวลสาร (%)	สมดุลพลังงาน (%)	มูลค่า (บาท)	ค่าความร้อน (กิโลจูล/กก.)
ขยะเศษอาหารที่เดิม	100.0	100.0	1.05	
• น้ำ	86.34	-	-	
• ขยะแห้ง	13.66	19.73	0.01	15,940
• ไฟฟ้า (จากภายนอก)	-	80.27	1.04	-
ผลผลิตที่ได้	100.0	100.0	0.24	
• ของเหลวและก๊าซ	87.82	61.37	0.00	-
• น้ำมันชีวภาพ	7.91	27.23	0.19	38,059
• ถ่านคาร์บอน	4.27	11.40	0.05	29,467

ขยะเศษอาหารที่เดิมประกอบด้วยของแข็งร้อยละ 13.66 และเป็นของเหลวย้อยละ 86.34. เมื่อนำไปผ่านระบบนี้แล้ว ได้ผลผลิตเป็นของแข็งเหลือร้อยละ 4.27 และเป็นของเหลวเกือบร้อยละ 95.73. ส่วนของเหลวนี้ แบ่งย่อยออกเป็นน้ำมันชีวภาพร้อยละ 7.91 และของเหลวที่เป็นน้ำเกือบร้อยละ 87.82. ส่วนที่เป็นก๊าซมีจำนวนน้อยมากเมื่อเทียบกับส่วนที่เป็นของเหลว. เมื่อพิจารณาในทางกายภาพ พบว่ากระบวนการนี้เปลี่ยนรูปวัตถุดิบจากของแข็งไปเป็นของเหลว, ทำให้สัดส่วนของของแข็งลดลงจากร้อยละ 13.66 เหลือเพียงร้อยละ 4.27 และเพิ่มสัดส่วนของเหลวจากที่ร้อยละ 86.34 ไปเป็นประมาณร้อยละ 95.73.

พิจารณาในเชิงสมดุลพลังงาน พบว่า พลังงานในขยะแห้งมีเพียงร้อยละ 19.73 ในขณะที่พลังงานที่ป้อนเข้าระบบมาจากไฟฟ้าถึงร้อยละ 80.27, จึงสามารถทำให้ปฏิกิริยาในปฏิกิริยาเกิดได้อย่างต่อเนื่องและทำให้ขยะเศษอาหารถูกย่อยสลายเปลี่ยนรูปไปเป็นก๊าซ, น้ำมันชีวภาพ, ถ่านคาร์บอน และของเหลวที่เป็นน้ำเป็นส่วนใหญ่. พร้อมการเปลี่ยนรูปพลังงานไปอยู่ในรูปของเหลว, ของแข็ง และก๊าซ, คือ น้ำมันชีวภาพร้อยละ 27.23, ถ่านคาร์บอนร้อยละ 11.40 และของเหลวและก๊าซประมาณร้อยละ 61.37. ในการทดลองนี้ เป็นที่น่าสังเกตว่า มีการใช้ไฟฟ้าซึ่งเป็นแหล่งพลังงานจากภายนอกป้อนเข้าระบบเป็นจำนวนที่มากกว่าพลังงานที่มีในขยะเศษอาหาร.

แม้ว่าการนำสมดุลมวลสารและสมดุลพลังงานมาวิเคราะห์ร่วมกัน จะให้ผลลัพธ์การเปรียบเทียบเชิงปริมาณได้เด่นชัดขึ้น, แต่ยังไม่เพียงพอที่จะตัดสินได้ว่า ระหว่างด้านที่ป้อนเข้าและด้านที่ออกจากระบบนั้น ด้านใดให้ผลประโยชน์สูงกว่า เช่น สมดุลพลังงานแสดงค่าด้านที่ป้อนเข้าและ

ออกจากระบบเท่ากัน (ตารางที่ 4.3). เมื่อวิเคราะห์ในรายละเอียด พบว่า พลังงานด้านที่ป้อนเข้าระบบมาจากไฟฟ้าสูงสุดถึงร้อยละ 80.27, ส่วนพลังงานด้านที่ออกจากระบบมาจากของเหลวและก๊าซสูงสุดถึงร้อยละ 61.37 เป็นต้น. ดังนั้น จำเป็นต้องมีการวิเคราะห์เชิงมูลค่าของทั้งสองด้าน เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบผลลัพธ์ได้อย่างเด่นชัดขึ้นอีก. ในเบื้องต้นได้กำหนดข้อมูลทางด้านพลังงานและราคาสำหรับการเปรียบเทียบดังแสดงในตารางที่ 4.5.

ตารางที่ 4.5. ข้อกำหนดที่ใช้ในการเปรียบเทียบ

รายการ	เชื้อเพลิงที่ไปเทียบเท่า		
	ชนิด	ราคา	ค่าความร้อน
ขยะแห้ง	ไม้ฟืน	0.70 บาท/กก. ¹	3,820 กิโลแคลอรี/กก. ²
ไฟฟ้า	-	2.80 บาท/ยูนิต ³	-
ถ่านคาร์บอน	ถ่านทั่วไป	7 บาท/กก. ⁴	6,900 กิโลแคลอรี/กก. ²
น้ำมันชีวภาพ	น้ำมันเตา เกรดซี	17 บาท/ลิตร ⁴	9,500 กิโลแคลอรี/ลิตร ²

- แหล่งข้อมูล: 1. มุลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม, 2553.
 2. ฝ่ายเทคโนโลยีพลังงาน, สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, 2553.
 3. การไฟฟ้าภูมิภาค, 2553.
 4. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2553.

ค่าความร้อนและราคาใช้วิธีการกำหนดเทียบเคียงจากคุณสมบัติของผลผลิตที่ได้ ในทางกายภาพและการนำไปใช้งานที่มีความใกล้เคียงกับเชื้อเพลิงชนิดนั้นๆ มากที่สุด. ดังนั้น ขยะแห้งนำไปใช้เผาไหม้ทดแทนไม้ฟืน, น้ำมันชีวภาพนำไปใช้เผาไหม้ทดแทนน้ำมันเตาเกรดซี และถ่านคาร์บอนนำไปใช้เผาไหม้ทดแทนถ่านทั่วไป. ดังนั้น ราคาและค่าความร้อนที่ใช้จึงใช้การเทียบเคียงจากเชื้อเพลิงที่มีความใกล้เคียงดังที่กล่าวข้างต้น. ในส่วนของก๊าซที่ได้จากระบบไม่ได้มีการตรวจวัดและส่วนใหญ่เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์. ในที่นี้จึงไม่มีการนำมาวิเคราะห์ในเชิงมูลค่าหรือคิดเป็นก๊าซที่ไม่มีมูลค่า.

ผลจากการนำขยะแห้ง, น้ำมันชีวภาพ และถ่านคาร์บอน ไปใช้เพื่อทดแทนไม้ฟืน, น้ำมันเตาเกรดซี และถ่านทั่วไป ตามลำดับ พบว่า ที่การป้อนขยะเศษอาหาร 150 กรัม นั้น ด้านที่ป้อนเข้าระบบมีมูลค่ารวม 1.05 บาท คิดเป็นมูลค่าจากพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนจำนวน 1.04 บาทและจากค่าพลังงานความร้อนที่มีในขยะแห้งจำนวน 0.01 บาท. ในขณะที่ผลผลิตที่ได้มีมูลค่ารวม 0.24 บาท คิดเป็นมูลค่าจากน้ำมันชีวภาพจำนวน 0.19 บาท, ถ่านคาร์บอนจำนวน 0.05 บาท และของเหลวและก๊าซจำนวน 0.00 บาท. เมื่อพิจารณาผลของมูลค่าด้านที่ป้อนเข้าระบบและออกจากระบบ พบว่า

ระบบนี้ไม่มีความคุ้มทุน เนื่องจากมูลค่าที่ได้น้อยกว่ามูลค่าที่ป้อนเข้าระบบเป็นจำนวน 0.81 บาท. พลังงานไฟฟ้าเป็นส่วนที่มีมูลค่าสูงที่สุดและทำให้ระบบนี้ไม่มีความคุ้มทุน. การวิเคราะห์นี้ยังไม่ถูกต้องนัก เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองเป็นอุปกรณ์สำเร็จรูป จึงใช้ไฟฟ้าเป็นแหล่งพลังงาน ความร้อนป้อนเข้าระบบ เพื่อให้สะดวกต่อการทำงานและการควบคุมระบบ. แต่เมื่อมีการออกแบบเพื่อการสร้างในเชิงการค้าแล้ว พลังงานไฟฟ้าจำเป็นต้องทดแทนด้วยพลังงานอื่นๆ ที่ราคาถูกลงกว่า เช่น ใช้ก๊าซหุงต้ม, น้ำมันเตา หรือไม้ฟืนเป็นแหล่งจ่ายพลังงานความร้อนให้กับระบบ เป็นต้น. ตารางที่ 4.6 แสดงผลการวิเคราะห์โดยใช้ก๊าซหุงต้มและไม้ฟืนแทนการใช้ไฟฟ้า พบว่า ระบบมีมูลค่าที่ได้น้อยกว่ามูลค่าที่ป้อนเข้าระบบจำนวน 0.26 บาท เมื่อใช้ก๊าซหุงต้มแทนการใช้ไฟฟ้า และระบบมีมูลค่าที่ได้มากกว่ามูลค่าที่ป้อนเข้าระบบจำนวน 0.17 บาท เมื่อใช้ไม้ฟืนแทนการใช้ไฟฟ้า. การใช้เชื้อเพลิงที่พลังงานความร้อนเท่ากันเพื่อป้อนให้กับระบบ คือ ไฟฟ้า, ก๊าซหุงต้ม และไม้ฟืน, แต่ราคาเชื้อเพลิงเหล่านี้ไม่เท่ากัน เมื่อวิเคราะห์ในเชิงมูลค่าแล้ว พบว่า ระบบสามารถมีความคุ้มทุนเมื่อใช้ไม้ฟืนเป็นเชื้อเพลิง. โดยทั่วไป การออกแบบระบบขนาดใหญ่จะเป็นแบบต่อเนื่อง (Continuous type) ดังนั้น การสูญเสียความร้อนสะสมภายในปฏิกรณ์จะลดลงอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองนี้ที่เป็นรุ่นผลิต (batch). ระบบจะมีผลเปรียบเทียบกับด้านมูลค่าไปในทิศทางที่ดีกว่า ดังแสดงในตารางที่ 4.6 จึงมีความเป็นไปได้ในทางมูลค่าสูงมาก.

ตารางที่ 4.6. วิเคราะห์เชิงมูลค่ากับการป้อนพลังงานด้วยไม้ฟืน ก๊าซหุงต้ม และไฟฟ้า

รายการ	มูลค่าเทียบเท่า, บาท		
	ไม้ฟืน	ก๊าซหุงต้ม	ไฟฟ้า
มูลค่าด้านที่ป้อน	0.07	0.50	1.05
• น้ำ	-	-	-
• ขยะแห้ง	0.01	0.01	0.01
• ไฟฟ้า (จากภายนอก)	-	-	1.04
• ก๊าซหุงต้ม (จากภายนอก)	-	0.49	-
• ไม้ฟืน (จากภายนอก)	0.06	-	-
มูลค่าด้านผลผลิตที่ได้	0.24	0.24	0.24
• ของเหลวและก๊าซ	0.00	0.00	0.00
• น้ำมันชีวภาพ	0.19	0.19	0.19
• ถ่านคาร์บอน	0.05	0.05	0.05
มูลค่าด้านผลผลิตที่ได้มากกว่าด้านที่ป้อน	0.17	-0.26	-0.81

หมายเหตุ: ก๊าซหุงต้ม คิดราคา 18.13 บาท/กก. มีค่าความร้อน 11,778 กิโลแคลอรี/กก.

5. สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาแนวทางการนำขยะอินทรีย์จากเศษอาหาร มาผ่านเทคโนโลยีการย่อยสลายภายใต้ความดันและอุณหภูมิสูง เพื่อให้ได้ผลผลิตเป็นน้ำมันชีวภาพและได้ผลพลอยได้เป็นถ่านคาร์บอน.

ในการทดลองนี้ใช้ขยะเศษอาหารเป็นวัตถุดิบเติมเข้าไปในปฏิกรณ์จำนวน 100, 150, 200 และ 250 กรัม. โดยกำหนดให้การทดลองอยู่ภายใต้สภาวะเหนือวิกฤติน้ำ เพื่อหาตัวแปรที่มีต่อผลผลิตที่ได้จากระบบนี้ใน 2 ส่วน คือ ความดันสุดท้ายในปฏิกรณ์และเวลาที่หน่วงในการเกิดปฏิกิริยาภายหลังจากที่อุณหภูมิถึง 380°C. แล้ว ภายใต้สภาวะเหนือวิกฤติน้ำนี้ ผลผลิตที่ได้ที่ให้ค่าที่เหมาะสมที่สุด คือ ที่อัตราการเติมขยะเศษอาหาร 150 กรัม, ความดันสุดท้ายในปฏิกรณ์เป็น 242 บาร์ และเวลาที่หน่วงนาน 30 นาที. ภายใต้สภาวะความดันและเวลาหน่วงที่เหมาะสมที่สุดนี้ได้ผลผลิตเป็นของเหลวและก๊าซ, น้ำมันชีวภาพ และถ่านคาร์บอน ร้อยละ 87.82, 7.91 และ 4.27 ของขยะเศษอาหารที่เติม ตามลำดับ. ผลผลิตหลักของระบบนี้ที่ได้เป็นน้ำมันชีวภาพมีไฮโดรเจน, ออกซิเจน และคาร์บอน ร้อยละ 10.30, 13.59 และ 75.66 ตามลำดับ และมีค่าความร้อน 38,059 กิโลจูล/กก. ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าความร้อนของน้ำมันดีเซล (36,420 กิโลจูล/ลิตร) ซึ่งเพียงพอต่อการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงเผาไหม้ในโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อผลิตพลังงานความร้อนทดแทนน้ำมันเตาที่มีการใช้กันมากได้. ส่วนผลพลอยได้ของระบบนี้เป็นถ่าน, คาร์บอน, ไฮโดรเจน, ออกซิเจน และคาร์บอน ร้อยละ 4.64, 18.48 และ 76.11 ตามลำดับ และมีค่าความร้อน 29,470 กิโลจูล/กิโลกรัม เปรียบเทียบกับค่าความร้อนของถ่านไม้ยางพารา 32,008 กิโลจูล/กิโลกรัม จึงสามารถนำไปใช้ทดแทนกันได้เป็นอย่างดี.

ภายใต้สภาวะดังกล่าวนี้ ได้วิเคราะห์สมดุลมวลสารของระบบเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ป้อนเข้าระบบเป็นขยะเศษอาหารจำนวน 150 กรัม ประกอบด้วยน้ำจำนวน 129.51 กรัม คิดเป็นร้อยละ 86.34 และที่เหลือเป็นขยะแห้งจำนวน 20.49 กรัม คิดเป็นร้อยละ 13.66 และส่วนที่ได้ออกมาจากระบบเป็นของเหลวและก๊าซสูงถึง 131.73 กรัม คิดเป็นร้อยละ 87.82 ซึ่งส่วนนี้มีส่วนประกอบเป็นน้ำเกือบทั้งหมด, น้ำมันชีวภาพ 11.86 กรัม คิดเป็นร้อยละ 7.91 และถ่านคาร์บอน 6.41 กรัม คิดเป็นร้อยละ 4.27. สามารถกล่าวสรุปได้ว่า ส่วนที่เป็นขยะแห้งทำปฏิกิริยาเป็นน้ำมัน

ชีวภาพเป็นส่วนใหญ่, รองลงมาเป็นน้ำและก๊าซอีกเล็กน้อย. ขยะแห้งส่วนที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาเหลือเป็นถ่านคาร์บอน, ส่วนน้ำที่มีในขยะเศษอาหารเป็นส่วนช่วยในการทำปฏิกิริยาหรือเป็นตัวทำละลาย.

ในการวิเคราะห์สมดุลพลังงานของระบบภายใต้สภาวะดังกล่าวนี้ ที่การใช้วัตถุดิบเป็นขยะเศษอาหารจำนวน 150 กรัม, พลังงานที่ป้อนเข้าระบบมาจากขยะแห้งจำนวน 20.49 กรัม มีค่าพลังงานจำนวน 327 กิโลจูล คิดเป็นร้อยละ 19.73 และจากพลังงานไฟฟ้าจำนวน 1,331 กิโลจูล คิดเป็นร้อยละ 80.27, รวมค่าความร้อนที่ป้อนเข้าทั้งหมด 1,658 กิโลจูล. ส่วนพลังงานที่ได้จากผลผลิตน้ำมันชีวภาพ มีค่าความร้อนจำนวน 451 กิโลจูล คิดเป็นร้อยละ 27.23, จากถ่านคาร์บอนมีค่าความร้อนจำนวน 189 กิโลจูล คิดเป็นร้อยละ 11.40 และพลังงานที่เหลือในของเหลวและก๊าซจำนวน 1,017 กิโลจูล คิดเป็นร้อยละ 61.37. สมดุลพลังงานของระบบนี้มีข้อที่ควรนำมาพิจารณาดังต่อไปนี้.

- พลังงานที่มีในขยะแห้งมีเพียง 327 กิโลจูล คิดเป็นร้อยละ 19.73 น้อยกว่าพลังงานที่มีในผลผลิตหลักที่ได้ คือ ในน้ำมันชีวภาพ 451 กิโลจูล และถ่านคาร์บอน 189 กิโลจูล รวมเป็นจำนวน 640 กิโลจูล คิดเป็นร้อยละ 38.63.
- พลังงานที่ป้อนเข้าระบบ คือ ไฟฟ้า มีมากถึงร้อยละ 80.27 ซึ่งจะต้องมีการหาแนวทางการใช้ส่ง หรือ การนำพลังงานที่เหลือกลับมาใช้ใหม่.

การวิเคราะห์เชิงมูลค่าของระบบทั้งหมด ระหว่างด้านที่ได้ผลผลิต คือ น้ำมันชีวภาพและถ่านคาร์บอน กับด้านที่ป้อนเข้าระบบ คือ วัตถุดิบและพลังงานไฟฟ้า พบว่า ที่การป้อนขยะเศษอาหาร 150 กรัม, ด้านที่ป้อนเข้าระบบมีมูลค่ารวม 1.05 บาท มาจากพลังงานไฟฟ้าสูงสุดจำนวน 1.04 บาท และจากขยะแห้งจำนวน 0.01 บาท. ส่วนด้านที่ได้ผลผลิตมีมูลค่ารวม 0.24 บาท มาจากน้ำมันชีวภาพจำนวน 0.19 บาท และจากถ่านคาร์บอนจำนวน 0.05 บาท. มูลค่าของระบบทั้งหมดยังมีความไม่คุ้มทุน เนื่องจากด้านที่ได้ผลผลิตมีมูลค่าน้อยกว่าด้านที่ป้อนเข้าระบบเป็นจำนวน 0.81 บาท. ในการทดลองนี้ มีข้อที่น่าสังเกตที่มีการใช้ไฟฟ้าซึ่งเป็นแหล่งพลังงานจากภายนอก ป้อนเข้าระบบเป็นจำนวนที่มากกว่าพลังงานที่มีในขยะเศษอาหาร.

การนำเชื้อเพลิงประเภทอื่นที่มีราคาถูกกว่า คือ ก๊าซหุงต้มและไม้ฟืนมาทดแทนการใช้ไฟฟ้าเพื่อการเปรียบเทียบเชิงมูลค่า พบว่า ด้านที่ได้ผลผลิตมีมูลค่าน้อยกว่าด้านที่ป้อนเข้าระบบจำนวน 0.26 บาท เมื่อใช้ก๊าซหุงต้มแทนการใช้ไฟฟ้า และมีมูลค่าสูงกว่าจำนวน 0.17 บาท เมื่อใช้ไม้

พื้นที่แทนการใช้ไฟฟ้า. จะเห็นว่า เมื่อใช้เชื้อเพลิงที่มีราคาถูกลง คือ ไม้ฟืน ทดแทนเชื้อเพลิงที่มีราคาแพง คือ ไฟฟ้า จะทำให้ระบบมีความคุ้มทุนทันที. ในการออกแบบระบบขนาดใหญ่ที่เป็นแบบต่อเนื่อง, การสูญเสียความร้อนสะสมภายในปฏิกรณ์จะลดลงอย่างมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีทดลองนี้ที่เป็นแบบรุ่นผลิต. ระบบจะมีผลเปรียบเทียบด้านมูลค่าไปในทิศทางที่ดีกว่านี้อีกมาก. นอกจากนี้ ข้อที่ควรนำมาพิจารณาร่วมกับเทคโนโลยีนี้เป็นอย่างยิ่ง คือ วัตถุดิบที่ใช้เป็นขยะเศษอาหาร ซึ่งมีความชื้นสูงกว่าร้อยละ 80. การที่จะนำเทคโนโลยีอื่นๆ มาใช้ เพื่อเปลี่ยนวัตถุดิบที่มีความชื้นสูง ให้เป็นเชื้อเพลิงประเภทน้ำมัน, ก๊าซ หรือถ่านคาร์บอนนั้น มีความยุ่งยากและไม่มีค่าคุ้มทุนสูง. แต่เทคโนโลยีนี้สามารถรองรับกับวัตถุดิบที่มีความชื้นสูงได้และมีความเป็นไปได้ในทางมูลค่าสูง. ข้อที่ยังต้องคำนึงถึงอย่างมาก คือ ความเป็นไปได้ในเชิงวิศวกรรมเท่านั้น ที่ต้องทำงานภายใต้ความดันที่สูงมาก. การวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีนี้เพื่อลดความดัน ซึ่งจะนำไปสู่ความเป็นไปได้ในเชิงวิศวกรรมสูงขึ้น ยังเป็นสิ่งที่ยังต้องดำเนินการอย่างต่อเนื่องอีก.

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ขยะเศษอาหารที่นำมาใช้ทดลองได้จากการสุ่มเก็บจากโรงอาหารในแต่ละวัน จากนั้นจึงนำสัดส่วนเหล่านั้นมาจำลองเป็นขยะเศษอาหารเพื่อใช้ในการทดลอง. ดังนั้น ผลที่ได้จากการทดลองจึงยังไม่มีความถูกต้องนัก ซึ่งควรจะได้มีการปรับปรุงการทดลองเป็นการเปรียบเทียบระหว่างขยะที่สุ่มได้จริงในแต่ละวันกับขยะเศษอาหารจำลอง และศึกษาความเป็นไปได้ของแนวทางสถิติ.
2. แนวทางการพัฒนาผลผลิตที่ได้ให้มีมูลค่าสูงขึ้นอีก โดยการนำน้ำมันชีวภาพที่ได้ไปปรับปรุงคุณภาพ โดยการเพิ่มส่วนกำจัดออกซิเจนในน้ำมันชีวภาพ และระบบกลั่นแยกน้ำมัน ส่วนถ่านคาร์บอนสามารถพัฒนาต่อแยกเป็นถ่านกัมมันต์ (Activated carbon).
3. ในส่วนของน้ำมันชีวภาพที่จะนำไปพัฒนาให้มีมูลค่าสูงขึ้นอีกนั้น จำเป็นต้องมีการวิจัยและพัฒนาในส่วนของแต่ละธาตุต่างๆ ที่ยังคงค้างในเนื่อน้ำมัน เนื่องจากสามารถทำความสะอาดเครื่องจักรได้มาก เมื่อมีการใช้เป็นระยะเวลาอันยาวนาน โดยเฉพาะเครื่องยนต์. แม้แต่การนำไปใช้เผาไหม้ จำเป็นจะต้องมีการศึกษาในเรื่องเหล่านี้เช่นกัน.
4. พิจารณานำสารเร่งปฏิกิริยามาใช้ในการทดลองเพื่อลดความดัน, อุณหภูมิ และเวลาที่หน่วง. นอกจากนี้ ยังช่วยลดสัดส่วนออกซิเจนในน้ำมันชีวภาพและเพิ่มปริมาณน้ำมันชีวภาพ ซึ่งผลที่ได้จะสามารถนำไปประเมินความเหมาะสมทางวิศวกรรม เพื่อให้เกิดความเป็นไปได้ในเชิงการค้า.
5. อุตสาหกรรมที่สามารถนำผลงานไปใช้ประโยชน์ ได้แก่ อุตสาหกรรมกำจัดขยะสดหรือขยะอินทรีย์เป็นองค์ประกอบหลัก และมุ่งเน้นการใช้ประโยชน์ด้านเชื้อเพลิง.
6. นอกจากนี้ การทดลองในระดับ pilot scale ยังมีความจำเป็นในการยืนยันปัจจัยของกระบวนการผลิตก่อนส่งเสริมสู่เชิงพาณิชย์.

6. เอกสารอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ. 2553. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.thaienvimonitor.net/Download/pollu-garbage.XLS>, [เข้าถึงเมื่อวันที่ 22 กันยายน 2553].
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2550. รายงานพลังงานของประเทศไทย. กระทรวงพลังงาน, 2545 – 2549.
- แก้วสีงาม, สัญญา. 2553. การผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากขยะชุมชนเพื่อใช้กับเตาแก๊สไฟฟ้าเออร์. กรุงเทพฯ: วิทยาลัยพณิชยการมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- แช่ลี, นิตยา. 2005. เทคนิคการสกัดสารจากพืชสมุนไพร โดยอาศัยของไหลเหนือวิกฤต. *Srinakharinwirot Journal of Pharmaceutical Sciences*, 10(1), May 2005.
- ถ่านอัดแท่งเมืองไทย, 2010. [Online]. Available from : <http://www.charcoal.snmcenter.com/charcoalthai/hot.php>, [Accessed 9 October 2010].
- ปัญญาวงศ์, นิรมล. 2547. การแปรรูปร่วมของถ่านหินและพลาสติกผสมให้เป็นของเหลวด้วยตัวทำละลายภาวะเหนือวิกฤต. กรุงเทพฯ: วิทยาลัยพณิชยการมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อ่อนศรี, ขวัญฤทัย. 2549. การแปรรูปร่วมของถ่านหินและยางรถยนต์ที่ใช้แล้วให้เป็นของเหลวในน้ำภาวะเหนือวิกฤต. กรุงเทพฯ: วิทยาลัยพณิชยการมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- BMEC, Berlin Municipal Electric Company, 2010. [Online]. Available from : <http://www.oag.state.md.us/energy/>, [Accessed : 9 October 2010].
- Cheng, L., Zhang, R. and Bi, J., 2004. Pyrolysis of a low-rank coal in sub- and supercritical water, *Fuel Processing Technology*, 85, pp: 921-932.
- Dragan, K., Wim, V. S. and Sascha, K., 2010. Hydrothermal conversion of biomass II. conversion of wood, pyrolysis oil, and glucose in hot compressed water, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 49(1) pp: 104–112.
- He, B. J., Zhang, Y. H., Yin, Y., Funk, T., and Riskowski, G., 2010. Thermochemical conversion of swine manure an alternative process for waste treatment and renewable energy production. [Online]. Available from : http://www.webpages.uidaho.edu/~bhe/pdfs/TCC_1.PDF, [Accessed: 10 October 2010].

- Heyerdahl, P. H. and Ruan, R. R., 2010. [Online]. Available from : http://www.umb.no/statisk/umnumb/presentations/2006/hydrothermal_treatment_ruan.pdf, [Accessed : 9 October 2010].
- Hu, H., Guo, S. and Hedden, K., 1998. Extraction of lignite with water in sub- and supercritical states, *Fuel Processing Technology*, 53, pp: 269-277.
- JAEE, 2004. Pyrolysis Kiln, Japanese Advanced Environment Equipment. [Online]. Available from : http://nett21gee.jp/JSIM_DATA/WASTE/WASTE_3/htmi/Doc_433html, [Accessed : 20 October 2006].
- Matsumura, Y., 2005. Biomass Conversion Using Supercritical Water and Hydrothermal Treatment, Biomass Workshop.
- MMWEC, The Massachusetts Municipal Wholesale Electric Company, 2006. [Online]. Available from : <http://www.mmwec.org/>, [Accessed : 9 October 2006].
- Rafiqul, I., Lugang, B., Yan, Y. and Li, T., 2000. Study on co-liquefaction of Coal and Bagasse by Factorial Experiment Design Method, *Fuel Process Technology*, 6, pp: 1-12.
- Shinji, I., Akira, S., Tadashi, N. and Shin-ya, Y., 1994. Production of heavy oil from sewage sludge by direct thermochemical liquefaction, *Desalination*, 98(3), pp: 127-133.
- Simone, M., Biagini, E., Nicoletta, C., and Tognotti, L., 2010. [Online]. Available from : <http://www.combustioninstitute.it/proc/proc2010/papers/P2.6.pdf>, [Accessed : 9 October 2010].
- Sudong, Y., Ryan, D., Matt, H. and Zhongchao, T., 2010. Subcritical hydrothermal liquefaction of cattle manure to bio-oil: Effects of conversion parameters on bio-oil yield and characterization of bio-oil, *Bioresource Technology*, 101(10), pp: 3657-3664.
- Taylor, L. T., 1996. Supercritical Fluid Extraction. U.S.A.: John Wiley & Sons.
- Tomoaki, M., Masanori, M., Yutaka, D, Tomoko, O. and Shin-ya, Y., 1995. Oil production from garbage by thermochemical liquefaction. *Biomass and Bioenergy*, 8(2) pp: 117-120.
- Watanabe, M., Hirakoso, H., Sawamoto, S., Adschii, T. and Arai, K., 1998. Polyethylene conversion in supercritical water, *Journal of Supercritical Fluids*, 13, pp: 247-252.