

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

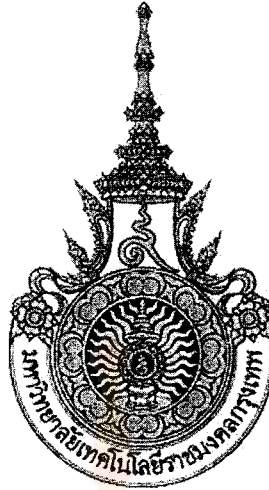
การผลิตน้ำมันชีวภาพจากเปลือกและกากเมล็ดยางพาราด้วยกระบวนการไพโรไลซิส

Bio-oil production from Rubber seed and shell wastes by pyrolysis process

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ไชยยันต์ ไชยยะ

ทุนวิจัยงบประมาณแผ่นดินปี พ.ศ.๒๕๕๔

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชภัฏกรุงเทพ



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การผลิตน้ำมันชีวภาพจากเปลือกและกากเมล็ดยางพาราด้วยกระบวนการไพโรไลซิส

Bio-oil production from Rubber seed and shell wastes by pyrolysis process

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ไชยยันต์ ไชยยะ

ทุนวิจัยงบประมาณแผ่นดินปี พ.ศ.๒๕๕๔

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

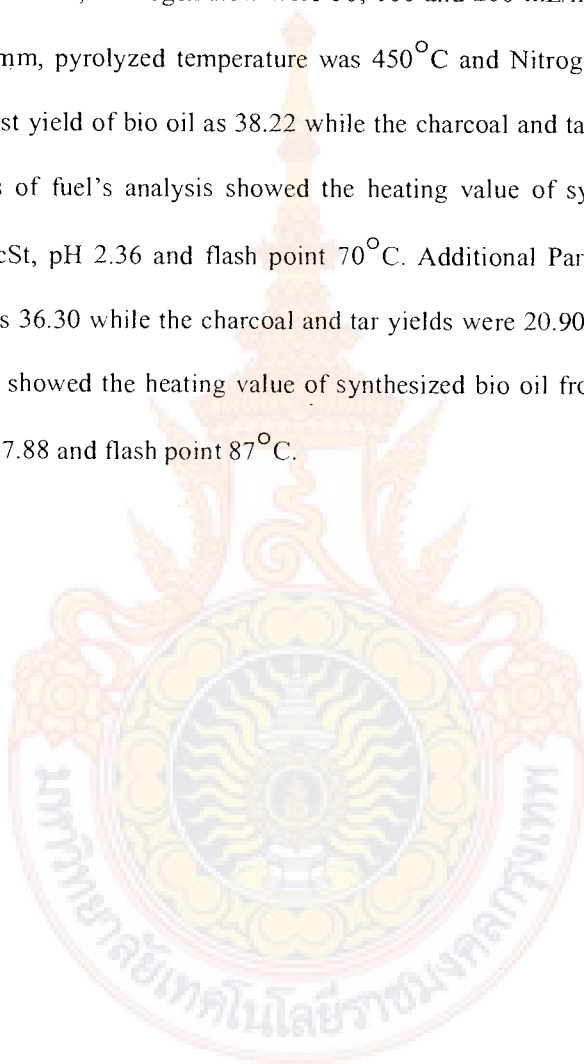
บทคัดย่อ

เปลือกและกากเมล็ดยางพาราถูกนำมาแปรรูปเป็นน้ำมันชีวภาพโดยกระบวนการแยกสลายทางความร้อน โดยตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ ขนาดของอนุภาคเปลือกยางพารา 2 ขนาดคือ 2.18 mm และ 1.13 mm อุณหภูมิในการสลายตัวได้แก่ 300, 350, 400 และ 450°C อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนได้แก่ 50, 100 และ 200 mL/min ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้อนุภาคในช่วงขนาด 2.18 mm อุณหภูมิสลายตัวที่ 450°C และ อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่ 50 mL/min จะให้ร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพสูงสุดที่ 38.22 ได้ถ่านร้อยละ 18.93 และน้ำมันหนักร้อยละ 6.59 ซึ่งผลจากการวิเคราะห์สมบัติทางเชื้อเพลิงพบว่าน้ำมันชีวภาพที่ผลิตได้จากส่วนเปลือกนี้ มีค่าความร้อนเท่ากับ 22.11 MJ/kg ค่าความหนืดมีค่าเท่ากับ 2.071 cSt ค่า pH เท่ากับ 2.36 และจุดวาบไฟมีค่าเท่ากับ 70°C ในขณะที่กากเมล็ดยางพาราจะให้ร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพสูงสุดที่ 36.30 ได้ถ่านร้อยละ 20.90 และน้ำมันหนักร้อยละ 18.15 ซึ่งผลจากการวิเคราะห์สมบัติทางเชื้อเพลิงพบว่าน้ำมันชีวภาพที่ผลิตได้จากส่วนกากนี้ มีค่าความร้อนเท่ากับ 37.76 MJ/kg ค่าความหนืดมีค่าเท่ากับ 23.175 cSt ค่า pH เท่ากับ 7.88 และจุดวาบไฟมีค่าเท่ากับ 87°C



ABSTRACT

Para rubber seed shell and residue were derived to be bio oil by pyrolysis process. There are studied parameters, seed shell particle were varied 2 ranges as 2.18 mm and 1.13 mm, pyrolyzed temperature were 300, 350, 400 and 450°C, Nitrogen flow were 50, 100 and 200 mL/min. At the conditions of seed shell particle was 2.18 mm, pyrolyzed temperature was 450°C and Nitrogen flow was 50 mL/min, the results showed the highest yield of bio oil as 38.22 while the charcoal and tar yields were 18.93 and 6.59, respectively. The results of fuel's analysis showed the heating value of synthesized bio oil was 22.11 MJ/kg, viscosity 2.071 cSt, pH 2.36 and flash point 70°C. Additional Para rubber residue showed the highest yield of bio oil as 36.30 while the charcoal and tar yields were 20.90 and 18.15, respectively. The results of fuel's analysis showed the heating value of synthesized bio oil from residue was 37.76 MJ/kg, viscosity 23.175 cSt, pH 7.88 and flash point 87°C.



กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัยขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ในการดำเนินงานและ
ประสานงานเพื่ออำนวยความสะดวกในการทำวิจัย ให้กับคณะวิจัยด้วยดีเสมอมา

คณะวิจัย

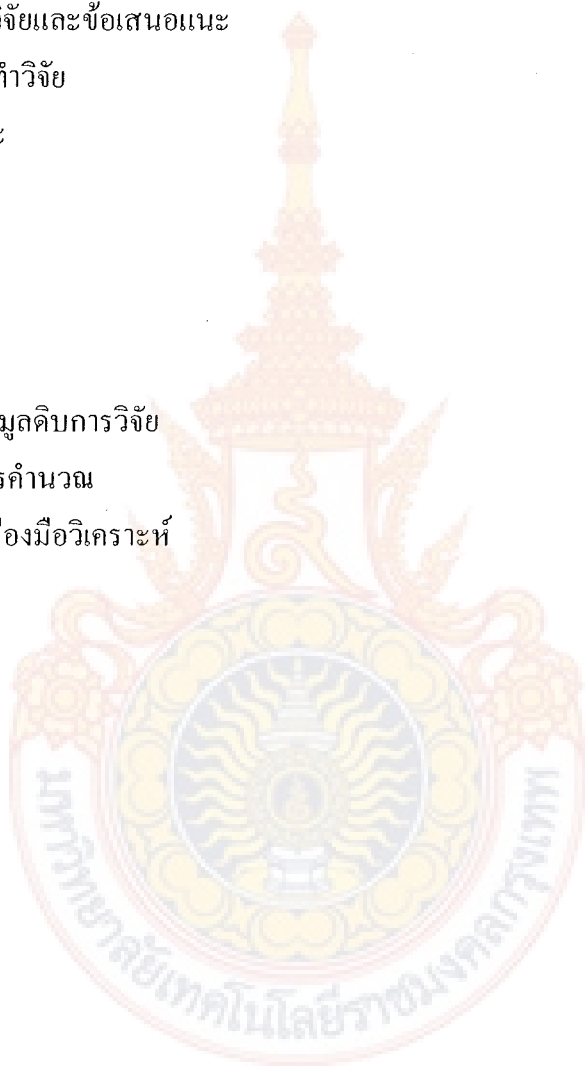


สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
ABSTRACT	ข
กิตติกรรมประกาศ	ฅ
สารบัญ	ค
สารบัญรูป	จ
สารบัญตาราง	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 วารสารปริทัศน์	
2.1 ทฤษฎี	3
2.2 ชีวมวล	6
2.3 การประยุกต์ใช้น้ำมันชีวภาพ	11
2.4 กระบวนการย่อยสลายด้วยความร้อน (Pyrolysis)	12
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	20
บทที่ 3 วิธีการทำวิจัย	
3.1 วัสดุและอุปกรณ์	23
3.2 วิธีการทดลอง	26
3.3 การวิเคราะห์ผลการทดลอง	27
บทที่ 4 ผลการวิจัย	
4.1 การศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของเปลือกและกากเมล็ดยางพาราด้วยเครื่อง TGA	28
4.2 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อปริมาณน้ำมันชีวภาพ	29
4.3 ผลของขนาดอนุภาคที่มีต่อปริมาณน้ำมันชีวภาพ	31
4.4 ผลอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่มีต่อปริมาณน้ำมันชีวภาพ	32

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.5 สมบัติทางเชื้อเพลิงและธาตุองค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพ	34
บทที่ 5 สรุปผลการทำวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทำวิจัย	37
5.2 ข้อเสนอแนะ	37
บรรณานุกรม	38
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ข้อมูลดิบการวิจัย	41
ภาคผนวก ข การคำนวณ	44
ภาคผนวก ค เครื่องมือวิเคราะห์	47



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ธาตุองค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพ	3
2.2 สมบัติทางเคมีของน้ำมันชีวภาพ	4
2.3 สมบัติทางกายภาพของน้ำมันชีวภาพ	5
2.4 องค์ประกอบของแก๊สที่สภาวะต่างๆ	13
2.5 ประเภทการสลายตัวด้วยความร้อนแบบต่าง ๆ	14
4.1 สมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันชีวภาพ	35
4.2 ธาตุองค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพจากชีวมวลที่ต่างชนิดกัน	35
ก.1 อัตราการไหลของแก๊สในโตรเจนที่ 50 mL/min และขนาดอนุภาค 2.18 mm	41
ก.2 อัตราการไหลของแก๊สในโตรเจนที่ 100 mL/min และขนาดอนุภาค 2.18 mm	41
ก.3 อัตราการไหลของแก๊สในโตรเจนที่ 200 mL/min และขนาดอนุภาค 2.18 mm	41
ก.4 ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพที่ขนาดอนุภาค 2.18 mm อัตราการไหล ของแก๊สในโตรเจนที่ 50 mL/min	42
ก.5 อัตราการไหลของแก๊สในโตรเจนที่ 50 mL/min	42
ก.6 อัตราการไหลของแก๊สในโตรเจนที่ 100 mL/min	42
ก.7 อัตราการไหลของแก๊สในโตรเจนที่ 200 mL/min	43
ก.8 ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพ ที่อัตราการไหลของแก๊สในโตรเจนที่ 50mL/min	43
ข.1 การคำนวณสูตรโมเลกุลอย่างง่ายของน้ำมันชีวภาพจากเปลือกเมล็ดยางพารา	45
ข.2 Molar ration ขององค์ประกอบในน้ำมันชีวภาพจากเปลือกเมล็ดยางพารา	46
ข.3 การคำนวณสูตร โมเลกุลอย่างง่ายของน้ำมันชีวภาพจากกากเมล็ดยางพารา	46
ข.4 Molar ration ขององค์ประกอบในน้ำมันชีวภาพจากกากเมล็ดยางพารา	46

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 เมล็ดยางพารา	10
2.2 กระบวนการแปรรูปทางความร้อน	11
3.1 ชุดทดลองการแยกสลายด้วยความร้อน	23
3.2 Thermo gravimetric Analysis	24
3.3 Elemental Analyzer	24
3.4 เครื่องวิเคราะห์จุลควาไฟฟ้า	25
3.5 เครื่องวิเคราะห์ค่าความร้อน	25
4.1 การสลายตัวของเปลือกเมล็ดยางพารา	28
4.2 การสลายตัวของกากเมล็ดยางพารา	29
4.3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อร้อยละผลได้น้ำมันชีวภาพจากเปลือกเมล็ดยางพารา	30
4.4 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อร้อยละผลได้น้ำมันชีวภาพจากกากเมล็ดยางพารา	31
4.5 ผลของขนาดอนุภาคที่มีต่อร้อยละผลได้น้ำมันชีวภาพ	32
4.6 ผลของอัตราการไหลแก๊สไนโตรเจนที่มีต่อร้อยละผลได้น้ำมันชีวภาพจากเปลือกเมล็ดยางพารา	33
4.7 ผลของอัตราการไหลแก๊สไนโตรเจนที่มีต่อร้อยละผลได้น้ำมันชีวภาพจากกากเมล็ดยางพารา	33

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ด้วยเหตุที่ประเทศไทยเป็นประเทศที่ทำการเกษตรเป็นหลัก ทำให้แนวทางการพัฒนาเทคโนโลยีและองค์ความรู้ต่างๆ ของประเทศไทยถูกสร้างขึ้นบนพื้นฐานของความเข้มแข็งเชิงเกษตรกรรมเป็นสำคัญ และด้วยความหลากหลายของผลิตผลทางเกษตรที่สามารถผลิตได้เองภายในประเทศทำให้เกิดเป็นโอกาสที่จะนำองค์ความรู้เหล่านั้นมาตอบสนองต่อความต้องการทางสังคมในด้านต่างๆ เช่น การหาพลังงานทดแทน การกำจัดขยะเพื่อดูแลสิ่งแวดล้อม เป็นต้น ดังนั้นการให้ความสนใจต่อผลิตผลทางเกษตรที่ยังมีโอกาที่จะพัฒนาในด้านต่างๆ บนพื้นฐานของการวิจัยแบบครบวงจร อันจะเป็นการสร้างองค์ความรู้ที่พัฒนาต่อไปได้ หนึ่งในผลิตผลทางเกษตรที่น่าสนใจ คือ เมล็ดยางพารา ซึ่งจากข้อมูลของสมาคมยางพาราไทย ได้รายงานว่าตั้งแต่ปี พ.ศ. 2534 เป็นต้นมาประเทศไทยเป็นผู้ผลิตยางพาราเป็นอันดับ 1 ของโลก โดยมีรายได้เฉลี่ยจากการส่งออกไปจำหน่ายในต่างประเทศปีละประมาณ 200,000 ล้านบาท โดยเฉพาะอย่างยิ่งตั้งแต่ปี พ.ศ. 2544 ราคาของพาราเริ่มที่จะเพิ่มสูงขึ้นตามลำดับ ปัจจุบันมีเกษตรกรที่ปลูกยางพาราในประเทศไทยประมาณ 6,000,000 คน คิดเป็นพื้นที่การเพาะปลูก 13 ล้านไร่ โดยพื้นที่เพาะปลูกร้อยละ 84 อยู่ในเขตภาคใต้ ด้วยปริมาณการปลูกยางพาราที่สูงดังข้อมูลดังกล่าวส่งผลให้มีปริมาณเมล็ดยางพาราสูงขึ้นด้วย โดยปกติแล้วต้นยางพาราในประเทศไทยจะให้ปริมาณผลผลิตลูกยางประมาณ 109,000,000 กิโลกรัมต่อปี ซึ่งจะมีเพียงบางส่วนเท่านั้นที่ถูกนำมาเพาะเป็นกล้ายางต่อไป ข้อมูลเบื้องต้นดังกล่าวได้แสดงให้เห็นว่าในแต่ละปีจะมีเมล็ดยางพาราเหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก

ในเมล็ดยางพาราสามารถแยกส่วนประกอบได้ 2 ส่วน คือ เปลือกและเนื้อ ซึ่งจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ทำมาก่อนทำให้ทราบว่าเนื้อของเมล็ดยางพาราสามารถสกัดน้ำมันได้ประมาณ 40% ทำให้เหลือส่วนกากประมาณ 60% ซึ่งน้ำมันที่ได้จากส่วนเนื้อนี้จะถูกแปรรูปต่อไปเป็นไบโอดีเซล ดังนั้นส่วนของเมล็ดยางพารานี้จะเหลือส่วนกากและเปลือกที่จะกลายเป็นวัสดุเหลือทิ้งต่อไป เพื่อเป็นการใช้ประโยชน์และเพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุที่เหลือทิ้งเหล่านี้ และด้วยสมมุติฐานเบื้องต้นว่าทั้งกากและเปลือกเมล็ดยางพาราดังกล่าวน่าจะอุดมไปด้วยธาตุคาร์บอน ซึ่งอาจจะอยู่ในรูปของสารประกอบเซลล์ลูโลสหรือลิกนิน จึงเป็นที่มาของแนวคิดในการวิจัยในครั้งนี้ที่จะเปลี่ยนสภาพกากและเปลือกเมล็ดยางพาราให้กลายเป็นของเหลวที่อุดมไปด้วยคาร์บอนหรือที่เรียกว่าน้ำมันชีวภาพ (Bio-Oil) โดยการนำมาผ่านกระบวนการไพโรไลซิส โดยคาดหวังว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จะสามารถถูกนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงหรือเป็นสารตั้งต้นในการผลิตเป็นเชื้อเพลิงบริสุทธิ์ในขั้นสูงต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อวิจัยและพัฒนาการผลิตน้ำมันชีวภาพจากกากและเปลือกเมล็ดยางพารา
- 1.2.2 เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันชีวภาพ เช่น อุณหภูมิและเวลาการให้ความร้อน ขนาดอนุภาคของวัตถุดิบ และอัตราการไหลของแก๊สพา
- 1.2.3 เพื่อหาองค์ประกอบและสมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันชีวภาพที่ผลิตได้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันชีวภาพจากกากและเปลือกเมล็ดยางพาราด้วยกระบวนการไพโรไลซิส
- 1.3.2 ทดสอบผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อปริมาณการเกิดน้ำมันชีวภาพทั้งจากกากและเปลือกเมล็ดยางพารา โดยมีตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ อุณหภูมิและเวลาการให้ความร้อน ขนาดอนุภาคของวัตถุดิบ และอัตราการไหลของแก๊สพา
- 1.3.3 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและทางเชื้อเพลิงของน้ำมันชีวภาพที่ผลิตได้เพื่อหาความเป็นไปได้ในการนำไปใช้จริงต่อไป

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ได้น้ำมันชีวภาพจากกากและเปลือกเมล็ดยางพารา
- 1.4.2 เป็นการเพิ่มมูลค่าให้แก่วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

วารสารปริทัศน์

2.1 ทฤษฎี

น้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) เป็นของเหลวอินทรีย์สีน้ำตาลดำมีสารประกอบที่มีออกซิเจนอยู่ด้วยเป็นจำนวนมาก อาจมีชื่อเรียกอื่น ๆ เช่น น้ำมันไพโรไลซิส ของเหลวไพโรลิกเนียส กรดไพโรลิกเนียส น้ำส้มควันไม้ ของเหลวควันไม้ ซึ่งของเหลวสีน้ำตาลดำที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบจะมีสารอินทรีย์หลายชนิด ได้แก่ แอลกอฮอล์ (Alcohols) อัลดีไฮด์ (Aldehydes) แอนไฮดรัสซูการ์ (Anhydrosugars) ฟิวแรน (Furans) คีโตน (Ketones) และกรดอะซิติก (Acetic acid) (Boateng, Jung and Adler, 2006) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสลายด้วยความร้อนโดยการแตกสลายโซ่โพลิเมอร์ (Depolymerizing) ของเซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน (Lignin) ที่อุณหภูมิสูงได้เป็นแก๊สและผ่านการควบแน่นเป็นของเหลวเป็นน้ำมันเบา (Light oil) และน้ำมันหนัก (Heavy oil) น้ำมันชีวภาพเกิดขึ้นจากการแตกตัวทางความร้อนและการลดระดับเชิงพอลิเมอร์อย่างรวดเร็วของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ตามด้วยการทำให้เย็นอย่างรวดเร็วเพื่อแช่แข็งปฏิกิริยาขั้นกลางให้ได้สารประกอบที่เกิดขึ้นระหว่างนี้ โดยไม่ให้เกิดปฏิกิริยาแตกตัวต่อหากมีเวลามากขึ้น น้ำมันดิบชีวภาพจึงมีสารเคมีที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาสูงเป็นองค์ประกอบมากมายทำให้มีสมบัติที่โดดเด่นและไม่ธรรมดา ส่วนประกอบทางเคมีของน้ำมันดิบชีวภาพขึ้นอยู่กับภาวะของกระบวนการย่อยสลายด้วยความร้อน โดยทั่วไปแล้วน้ำมันชีวภาพเป็นสารผสมละลายน้ำได้ มีสารอินทรีย์ประกอบอยู่ประมาณร้อยละ 75-80 โดยมวล และอีกร้อยละ 20-25 เป็นน้ำ (ดังตารางที่ 2.1) น้ำมันชีวภาพมีออกซิเจนประมาณร้อยละ 45-50 โดยมวล ซึ่งอยู่ในสารประกอบมากกว่า 300 ชนิดที่พบในน้ำมันดิบชีวภาพ

ตารางที่ 2.1 ธาตุองค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพ

ส่วนประกอบ	ร้อยละโดยมวล
น้ำ	20-30
C	44-47
H	6-7
O	46-48
N	0-0.2
S	<0.01
เศษเถ้า	0.1

ในเชิงเคมีน้ำมันชีวภาพเป็นส่วนผสมที่ซับซ้อนระหว่างน้ำ ภูเขาอาคอล (Guaiacols) คาเทคอล (Catecols) ไชริงกอล (Syringols) วานิลลิน (Vanillins) ฟูรานคาร์บอกซัลดีไฮด์ (Furancarboxaldehydes) ไอโซยูจีนอล (Isoeugenol) ไพโรนส์ (Pyrones) กรดแอซิดิก กรดฟอร์มิค และกรดคาร์บอกซิลิกอื่น ๆ และสารประกอบกลุ่มหลัก ๆ เช่น ไฮดรอกซีแอลดีไฮด์ ไฮดรอกซีคีโตน น้ำตาล และสารประกอบฟีนอลิก น้ำมันชีวภาพอาจถือว่าเป็นสารประกอบแขวนลอย (Microemulsion) โดยมีสารประกอบโมเลกุลใหญ่เป็นผลิตภัณฑ์จากกลินิน ลอยอยู่ในสารละลายซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากการแตกตัวของกลุ่มไฮโด-เซตูลอส สารผสมแขวนลอยรักษาความเสถียรได้ด้วยพันธะไฮโดรเจน และการเกิดนาโนมิเซล (Nanomicelle) และไมโครมิเซล (Micromicelle) ในเชิงกายภาพน้ำมันชีวภาพมีผงถ่านขนาดเล็กแขวนลอยอยู่และมีกลุ่มโลหะแอลคาไลน์เป็นส่วนประกอบ

น้ำมันชีวภาพเป็นสารผสมละลายได้ในน้ำ เมทานอล และเอทานอล แต่ไม่ละลายในน้ำมันไฮโดคาร์บอน น้ำมันชีวภาพสามารถกักเก็บได้ ปั่นส่งได้ และสามารถใช้ในการเผาไหม้ได้คล้ายกับน้ำมันปิโตรเลียม โดยสมบัติพื้นฐานของน้ำมันชีวภาพแสดงดังตารางที่ 2.2 โดยน้ำมันชีวภาพไม่สามารถระเหยเป็นไอได้หมดในการกลั่น ที่อุณหภูมิ 100°C จะเกิดการทำปฏิกิริยาในตัวเอง ได้กากของแข็งออกมาเป็นจำนวนมาก อาจถึงร้อยละ 50 โดยมวลของน้ำมันตั้งต้น และเป็นสารเคมีที่ไม่เสถียร มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติตามเวลา เช่น ค่าความหนืดเพิ่มขึ้น อาจจะมีการแยกชั้น ความสามารถในการระเหยน้อยลง และมีการฝังตัวของยางเหนียว ความไม่เสถียรจะเพิ่มสูงขึ้นที่อุณหภูมิสูง ในการใช้งานจึงต้องกักเก็บที่อุณหภูมิต่ำ (กิริติณญ์ รัตนกิจธรรม-กุล. 2553)

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางเคมีของน้ำมันชีวภาพ

สมบัติ	น้ำมันชีวภาพ	น้ำมันดีเซล	น้ำมันเตา
Heat of combustion			
BTU/lb	7,100	22,000	18,200
MJ/L	19.5	42	39.4
Viscosity(centistokes)			
At 50°C	7	5	50
At 80°C	4	3	41
Ash content (wt %)	< 0.02	< 0.02	0.03
Sulfur content (wt %)	Trace	< 0.2	0.5-3
Nitrogen content (wt %)	Trace	Trace	0.3
Pour point ($^{\circ}\text{C}$)	-33	30	-18

สมบัติ	น้ำมันชีวภาพ	น้ำมันดีเซล	น้ำมันเตา
Turbine emission			
NOx	< 0.7	< 0.7	NA
SOx	0	0.2	NA

ที่มา : วารสาร Power Engineering International. 2008

ตารางที่ 2.3 สมบัติทางกายภาพของน้ำมันชีวภาพ

สมบัติ	น้ำมันชีวภาพ	น้ำมันหนัก
ปริมาณความชื้น(% wt)	15-30	0.1
ค่ากรด-เบส	2.5	-
ความถ่วงจำเพาะ	1.2	0.94
องค์ประกอบของธาตุ(% wt)		
คาร์บอน	54-58	85
ไฮโดรเจน	5.5-7.0	11
ออกซิเจน	35-40	1.0
ไนโตรเจน	0-0.2	0.3
เถ้า	0-0.2	0.1
ค่าความร้อน (MJ/kg)	16-19	40
ค่าความหนืด (ที่ 50 °C) (cSt)	40-100	180
ของแข็ง (% wt)	0.2-1	1
กากของแข็งจากการกลั่น (% wt)	สูงกว่า 50	1

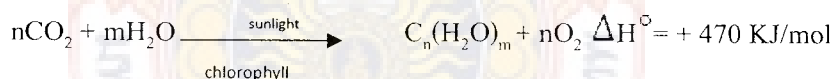
ที่มา : สุพจน์ แหวนเพชร. 2552

นักวิจัยจากสถาบันวิจัยเทคโนโลยีเวอร์จิเนียได้ทำการวิจัยเพื่อพัฒนาเสถียรภาพของน้ำมันชีวภาพให้เหมาะสมต่อการใช้กับยานพาหนะต่าง ๆ มากขึ้น ซึ่งทางนักวิจัยได้นำเอาหลักการทางวิทยาศาสตร์มาปรับปรุงชีวมวลของส่วนผสมหลักที่จะมารวมกันเป็นน้ำมันชีวภาพ ซึ่งงานพัฒนานี้ถือเป็นครั้งแรกของการผลิตน้ำมันชีวภาพที่มีเสถียรภาพและสามารถนำมาใช้เป็นพลังงานในการขับเคลื่อนยานพาหนะ โดยปกติแล้วส่วนผสมชีวมวลเหล่านี้จะมาจากซากสิ่งมีชีวิต ไม้ หรือสิ่งที่เป็นขยะชีวภาพ แต่ในส่วนของการวิจัยได้นำเอาไม้สนและไม้พันธุ์สูงอย่างพวกมิจิว มาเป็นส่วนประกอบไปการผลิตน้ำมันชีวภาพ

ซึ่งผลที่ได้จะเป็นน้ำมันที่ไม่มีความเสถียรและมีสภาพที่เป็นกรด ซึ่งไม่สามารถเอาน้ำมันที่ได้ไปใช้งาน เป็นเชื้อเพลิงของยานพาหนะได้โดยในส่วนกระบวนการกลั่นและการผลิตน้ำมันชีวภาพยังคงใช้ กระบวนการและเทคโนโลยีแบบที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในปัจจุบัน ปัญหาของน้ำมันชีวภาพแบบดั้งเดิม ก็คือ น้ำมันชีวภาพเหล่านี้จะแปรสภาพและมีความหนืดมากขึ้นในระหว่างการเก็บหรือวางทิ้งไว้ ซึ่งจะทำให้ กลายเป็นถ่านเมื่อสัมผัสกับความร้อนที่เหมาะสม ดังนั้นน้ำมันเหล่านี้เมื่อผลิตแล้วจะไม่สามารถใช้งาน ได้ถ้าเก็บไว้เป็นเวลานาน

2.2 ชีวมวล

ชีวมวลคือสารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาผลิตพลังงานได้ เช่น เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร หรือกากจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมการเกษตร เช่น แกลบ ชานอ้อย ชังข้าวโพด เป็นต้น ชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานประเภทหนึ่งคือพลังงานทางเคมีเกี่ยวกับ อะตอมของคาร์บอนและไฮโดรเจนที่ประกอบกันเป็นโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่ถูกออกซิไดซ์ได้สะสม อยู่ภายในแหล่งกำเนิดของคาร์บอนและไฮโดรเจนมาจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ การสังเคราะห์ด้วยแสงของพืชจะเปลี่ยนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำไปเป็นสารอินทรีย์ต่าง ๆ ที่ สามารถเผาไหม้ได้ องค์ประกอบที่จำเป็นสำหรับกระบวนการนี้คือ คลอโรฟิลล์และแสงอาทิตย์ โดย คลอโรฟิลล์ที่มีอยู่ในพืชสีเขียวจะดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อทำให้เกิดการสังเคราะห์ด้วยแสงขึ้น ปฏิกริยาต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องแสดงได้ดังสมการที่ (Probstein and Hicks, 1982)



$\text{C}_n(\text{H}_2\text{O})_m$ แสดงถึงสารประกอบอินทรีย์จำพวกคาร์โบไฮเดรตและสารอื่นๆที่สังเคราะห์ขึ้นจาก ปฏิกริยาคาร์โบไฮเดรตประมาณหนึ่งในสี่จากการสังเคราะห์แสง จะถูกออกซิไดซ์ต่อด้วยกระบวนการ ผ่นกลับได้ของการหายใจในพืชเพื่อให้พลังงานสำหรับการเจริญเติบโต โดยส่วนที่เหลือจะสะสมไว้ ชีวมวลสามารถเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานได้เพราะขั้นตอนของการเจริญเติบโตของพืชนั้นพืชใช้ คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำโดยเปลี่ยนพลังงานจากแสงอาทิตย์ผ่านกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง จะ ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ในรูปแป้งและน้ำตาลแล้วกักเก็บส่วนต่างๆ ของพืช ดังนั้นเมื่อนำพืชมาเป็นเชื้อเพลิง ก็ได้พลังงานออกมา (อุสาคะ บุญบำรุง, 2546)

เชื้อเพลิงชีวมวลสามารถแยกออกได้ 4 ประเภท ตามแหล่งที่มาดังนี้

1. พืชผลทางการเกษตร (Agriculture crops) เช่น อ้อย มันสำปะหลัง ข้าวโพด ข้าวฟ่าง ที่เป็นแหล่งพลังงานของคาร์โบไฮเดรต แป้ง และน้ำตาล รวมถึงพืชน้ำมันต่าง ๆ ที่สามารถนำมาเป็นพลังงานได้
2. วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร (Agriculture residues) เช่น ฟางข้าว เศษลำต้นข้าวโพด ชังข้าวโพด เหง้ามันสำปะหลัง รวมถึงพืชที่แพร่ระบาดในการเกษตรกรรมเช่น หญ้าคา ผักตบชวา
3. ไม้และเศษไม้ (Wood and Wood residues) เช่น ยูคาลิปตัส กระถินณรงค์ กระถินเทพา เศษไม้จากโรงงานผลิตเครื่องเรือน และโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ
4. ของเหลือจากอุตสาหกรรมและชุมชน (Waste stream) เช่น กากน้ำตาล กากกาแฟ และขานอ้อยจากโรงงานน้ำตาล แกลบ ขี้เลื่อย เส้นใยปาล์มและกะลาปาล์ม

ชีวมวลในประเทศไทยมีหลายชนิด ซึ่งในการใช้ประโยชน์ต้องคำนึงถึงความเหมาะสมและจุดเด่นจุดด้อยที่แตกต่างกันไป บางชนิดไม่เหมาะที่จะนำมาใช้เผาไหม้โดยตรงเพื่อผลิตไฟฟ้าเช่น กากมันสำปะหลัง ผักตบชวา เพราะมีความชื้นสูงร้อยละ 80-90 บางชนิดต้องผ่านการบดย่อย เช่น เศษไม้ โดยศูนย์ส่งเสริมพลังงานชีวมวล มุทนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อมได้ระบุถึงคุณสมบัติของชีวมวลและการนำมาใช้ประโยชน์ ดังนี้

แกลบข้าว (Rice Husk) เป็นผลผลิตที่ได้จากการสีข้าว เป็นเปลือกข้าวสารส่วนที่เหลือใช้จากการผลิตข้าวสารเมล็ดมีลักษณะเป็นรูปทรงรี เม็ดยาวสีเหลืองอมน้ำตาล หรือเหลืองนวลแล้วแต่ภูมิประเทศที่มีการปลูกข้าว ปัจจุบันประเทศมีการส่งออกแกลบข้าวรายใหญ่ของโลกนอกจากการนำแกลบข้าวไปใช้เป็นเชื้อเพลิงต่าง ๆ เช่น ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน อัลดเป็นเชื้อเพลิงก้อนแกลบมีจุดเด่นตรงที่มีความชื้นต่ำและมีขนาดเล็กเหมาะสำหรับทำเชื้อเพลิง นอกจากนี้ยังสามารถนำไปผสมกับวัสดุอื่นๆ ทำเป็นวัสดุก่อสร้างแล้วแกลบข้าวยังถูกนำไปผลิตเป็นขี้เถ้าแกลบ (Rice Husk Ash) เพื่อนำขี้เถ้าแกลบไปใช้ประโยชน์อีกมาก ซึ่งส่วนประกอบหลักของขี้เถ้าแกลบ คือ ซิลิกา (SiO_2) มากกว่าร้อยละ 90 สามารถนำไปทำให้บริสุทธิ์ด้วยกระบวนการทางเคมี และการเผาที่อุณหภูมิสูงซิลิกาในขี้เถ้าแกลบมีทั้งที่เป็นซิลิกาผลึก (Crystalline Silica) ซิลิกาผลึกสามารถแบ่งย่อยเป็นหลายชนิดตามความแตกต่างของรูปร่างลักษณะผลึกและความหนาแน่นของซิลิการูปร่างของผลึกมีหลายแบบเช่น สามเหลี่ยม สี่เหลี่ยม หกเหลี่ยมลูกบาศก์และเส้นยาว ซิลิกาอสัณฐาน (Amorphous Silica) ซึ่งเป็นซิลิกาที่มีรูปร่างไม่เป็นผลึก (Non-Crystalline Silica)

แกลบมีจุดด้อย คือมีปริมาณขี้เถ้าในสัดส่วนที่สูงร้อยละ 16-18 โดยน้ำหนักถือว่าค่อนข้างสูง ดังนั้นเมื่อเผาไหม้ให้ขี้เถ้าสูงอีกทั้งแกลบมีน้ำหนักเบา (1 m^3 หนัก 123 kg) ทำให้การขนส่งได้ไม่มากนัก

ฟางข้าว (Rice straw) เป็นผลผลิตที่เหลือจากการเก็บเกี่ยวข้าวจากปริมาณการปลูกข้าวกว่า 70 ล้านไร่ และสามารถผลิตข้าวปีละไม่ต่ำกว่า 21-25 ล้านตัน และมีวัสดุเหลือที่เรียกว่าฟางข้าวและตอซังข้าวประมาณ 3 เท่าของเมล็ดข้าว เมื่อคิดแล้วจะได้ฟางข้าวและตอซังถึง 50-70 ล้านตัน จากจำนวนข้าวที่ผลิตได้ดังกล่าวสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย (คิดเป็นมูลค่าไม่ต่ำกว่า 30,000 ล้านบาท) มีค่าความร้อนเทียบเท่าน้ำมันเตา 3,900 กิโลแคลอรี

ขานอ้อย (Bagasse) หมายถึง ส่วนของลำต้นอ้อยที่หีบเอาน้ำอ้อยหรือน้ำตาลออก แล้วมีส่วนประกอบอย่างหยาบ ๆ คิดเป็นร้อยละโดยน้ำหนักของขานอ้อยเปียก (ความชื้นร้อยละ 48) คือขานอ้อยหรือไฟเบอร์ (Fiber) ร้อยละ 48.5 น้ำร้อยละ 48.0 น้ำตาลร้อยละ 3.0 และส่วนประกอบอื่นๆ นอกจากนี้ก็ถั่วแล้ว 0.5 % ขานอ้อยใช้ประโยชน์ได้หลายอย่าง ใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับผลิตไอน้ำและกระแสไฟฟ้าสำหรับใช้ภายในโรงงานน้ำตาลนั่นเอง ขานอ้อยสามารถใช้แทนน้ำมันเชื้อเพลิง (Fuel oil) ได้ดี ขานอ้อยที่มีความชื้นร้อยละ 50หนัก 3 ตัน เมื่อเผาจะให้พลังงานใกล้เคียงกับน้ำมันเชื้อเพลิงหนัก 1 ตัน และยังใช้ผลิตวัสดุก่อสร้างโดยอาศัยกาบ เช่น อัดเป็นแผ่น (Particle board) ไม้อัดผิวเส้นใย (Fiber-overlaid plywood) และอัดแผ่นกันความร้อน (Insulating board) ใช้ผลิตเยื่อกระดาษ (pulp) และกระดาษชนิดต่าง ๆ ขานอ้อยส่วนใหญ่ประกอบด้วยลิกนินและมีเซลลูโลสอยู่บ้างเล็กน้อย

กากตะกอนหรือชีตะกอน หมายถึง สิ่งเจือปนที่เป็นของแข็งที่ไม่ละลายน้ำ อยู่ในน้ำอ้อยสิ่งเจือปนเหล่านี้จะถูกขจัดออกไปจากน้ำอ้อยในขบวนการทำใส (Clarification) กากตะกอนโดยทั่วไปมีลักษณะเป็นชิ้นเล็ก ๆ สีเทาเข้มส่วนประกอบของกากตะกอนไม่ค่อยแน่นอนทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณภาพและความสะอาดของอ้อย ตลอดจนกรรมวิธีการผลิตของโรงงานนั้นด้วยกากตะกอนส่วนใหญ่มีน้ำประมาณร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก ในส่วนที่เป็นของแข็งเป็นพวกสารอินทรีย์ที่ได้จากอ้อยและดินรวมทั้งมีไขมันอยู่ด้วย นอกจากนี้ก็มีน้ำตาลละลายอยู่บ้างการใช้ประโยชน์ของกากตะกอนมีดังนี้ ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตไข่ประมาณครึ่งหนึ่งของไข่ที่มีอยู่บนต้นอ้อยจะปะปนอยู่ในกากตะกอนประมาณกันว่าทุก ๆ ตันของอ้อยที่เข้าหีบจะให้ไข่ประมาณ 450 g ตัวเลขดังกล่าวแตกต่างกันไปตามพันธุ์อ้อยและบริเวณที่ปลูกไข่ที่ได้จากอ้อยสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมหลายอย่าง เช่น อุตสาหกรรมผลิตสารขัดเงา ผลิตหมึกสำหรับกระดาษคาร์บอนและผลิตพลาสติกเป็นต้น

กากน้ำตาล (Sugar residual) คือของเหลวมีลักษณะเป็นน้ำเชื่อมสีน้ำตาลเข้มของเหลวนี้จะถูกแยกออกจากเมล็ดน้ำตาลโดยวิธีปั่น (Centrifuge) ส่วนประกอบของกากน้ำตาลแตกต่างกันไปตามโรงงาน อย่างไรก็ตามส่วนประกอบโดยประมาณคิดเป็นร้อยละตามน้ำหนักของกากน้ำตาลมีดังนี้คือน้ำร้อยละ 17-25 น้ำตาลซูโครสร้อยละ 30-40 น้ำตาลกลูโคสร้อยละ 4-9 น้ำตาลฟรักโทสร้อยละ 5-12 นอกจากนั้นยังมีสารประกอบคาร์โบไฮเดรตอื่น ๆ สารประกอบไนโตรเจน กรดต่าง ๆ วิตามิน ไขมัน และแร่ธาตุต่าง ๆ อีก

เป็นจำนวนมาก ประโยชน์ที่ได้จากกากน้ำตาลมีมากมายเช่น ใช้ทำปุ๋ย ใช้เลี้ยงสัตว์ ใช้ผลิตแอลกอฮอล์ ใช้ในอุตสาหกรรมยีสต์ ใช้ทำผงชูรส และใช้ทำกรดน้ำส้ม

เศษไม้ (Wood residual) สามารถนำไปใช้ร่วมกับเชื้อเพลิงชนิดอื่น ๆ ได้ หรือนำมาใช้ทดแทนน้ำมันเตา เช่น ปลายไม้ ปีกไม้ และขี้เลื่อยของไม้ยางพาราโดยใช้ไม้ยางพารา 1 ไร่ จะประกอบไปด้วยไม้ท่อน 30 ต้น ปลายไม้ 12 ต้น และรากกิ่งไม้ 5 ต้น โดยเศษเหลือใช้จากไม้ท่อนได้แก่ ปีกไม้และขี้เลื่อย ปีกไม้คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 40-45 ของท่อนไม้ ขี้เลื่อยคิดเป็นร้อยละ 7-10 และจะแปรผกผันกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไม้ จุดค้อยของเศษไม้มีความชื้นสูงประมาณร้อยละ 50 จึงต้องนำไปผ่านกระบวนการอบ การย่อยเพื่อให้ความชื้นลดลงก่อนนำไปเผา

เศษวัสดุเหลือใช้จากปาล์มน้ำมัน (Palm oil residual) เศษวัสดุเหลือใช้จากปาล์มน้ำมันเป็นเชื้อเพลิงอีกชนิดหนึ่งที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีเศษวัสดุเหลือใช้จำนวนมากได้แก่ ทะลายปาล์ม ใบปาล์ม กะลาปาล์ม ลำต้น โดยสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมหรือทดแทนน้ำมันเตา โดยเฉพาะกะลาปาล์มมีคาร์บอนที่สูง ค่าความร้อนที่สูงทำให้ราคาสูงตามไปด้วย กากปาล์มเป็นเศษเหลือจากการสกัดน้ำมันปาล์มดิบจากทะลายปาล์มสด มี 3 แบบคือ ไฟเบอร์มีลักษณะเป็นขุย กะลามีสลักษณะคล้ายกะลามะพร้าว แต่มีขนาดเล็กกว่ามาก โดยประมาณ 1-2 cm และทะลายปาล์มเปล่าจะได้จากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบมาตรฐาน ไฟเบอร์นำมาเป็นเชื้อเพลิงในขบวนการผลิตน้ำมันปาล์มดิบจึงมีเหลือไม่มาก

กะลาปาล์มมีค่าความร้อนสูงสุดเหมาะนำมาเป็นเชื้อเพลิงแต่ต้องระวังเศษน้ำมันที่ตกค้างอยู่ ส่วนทะลายปาล์มเปล่ามีเหลืออีกมากที่ยังไม่ได้นำมาใช้ถ้านำมาเผาจะได้ขี้เถ้าที่มีแร่ธาตุโพตัสเซียมสูงมาก การที่จะนำทะลายปาล์มเปล่ามาเป็นเชื้อเพลิงต้องนำมาผ่านขบวนการย่อยหรือตัดก่อนเพราะมีขนาดใหญ่ นอกจากนี้ยังมีสารประกอบอัลคาไลน์สูงจะทำให้ท่อน้ำในหม้อน้ำมีขี้เถ้าเหนียวเกาะติดได้ง่าย

ซังข้าวโพด (Corn cobs) ได้จากการสีข้าวโพดเพื่อนำเมล็ดมาใช้งาน ส่วนใหญ่ซังที่เหลือนำมาเป็นเชื้อเพลิงร่วมในหม้อไอน้ำหรือเป็นวัตถุดิบในการผลิตแอลกอฮอล์ โดยให้ค่าความร้อนที่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับชีวมวลตัวอื่น ๆ

เศษวัสดุเหลือใช้จากมันสำปะหลัง (Cassava residual) การเก็บเกี่ยวหัวมันสำปะหลังสดนั้นพบว่ามีส่วนของลำต้นที่ติดกับส่วนของหัวมันสด หรือส่วนที่เรียกว่าเหง้ามันสำปะหลังเป็นส่วนที่แข็งของต้นมันสำปะหลัง ทำให้เกษตรกรต้องตัดทิ้งเป็นจำนวนมากเนื่องจากเหง้ามันสำปะหลังดังกล่าวไม่สามารถใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์จากมันสำปะหลังได้ จากวิเคราะห์ค่าความร้อนของมันสำปะหลังแห้ง พบว่ามีความร้อนสูงถึง 3,500-4,058 cal/g พอจะเทียบได้จากค่าความร้อนของไม้ฟืน หรือหากจะเทียบกับค่าความร้อนของน้ำมันเตาประมาณ 9,500 cal/L (ศูนย์ค้นคว้าและพัฒนาวิชาการอาหารสัตว์ สถาบันสุวรรณจากสถิติฯ. 2550)

ผักตบชวา (Water hyacinth) เป็นพืชที่เจริญอยู่บนผิวน้ำจัดเป็นประเภทลอยน้ำ (Floating plant) โดยปกติรากจะไม่ยึดติดกับพื้นดินจึงถูกระแสมหรือน้ำพัดพาไปได้ไกล ๆ แต่ถ้าน้ำตื้นแล้วรากจะหยั่งติดกับพื้นดินได้ กำลังผลิตของผักตบชวาเป็นพืชที่มีความสามารถพิเศษในการสร้างโครงสร้างของมันคือยิ่งกว่าพืชอื่นๆทุกชนิดที่มีอยู่ในโลกนี้ องค์ประกอบในผักตบชวาประกอบด้วยเซลลูโลส ลิกนิน และแร่ธาตุอื่น ๆ น้ำหนักแห้งโดยประมาณเฉลี่ยของผักตบชวาคิดเป็นร้อยละ 5 ของน้ำหนักทั้งหมด

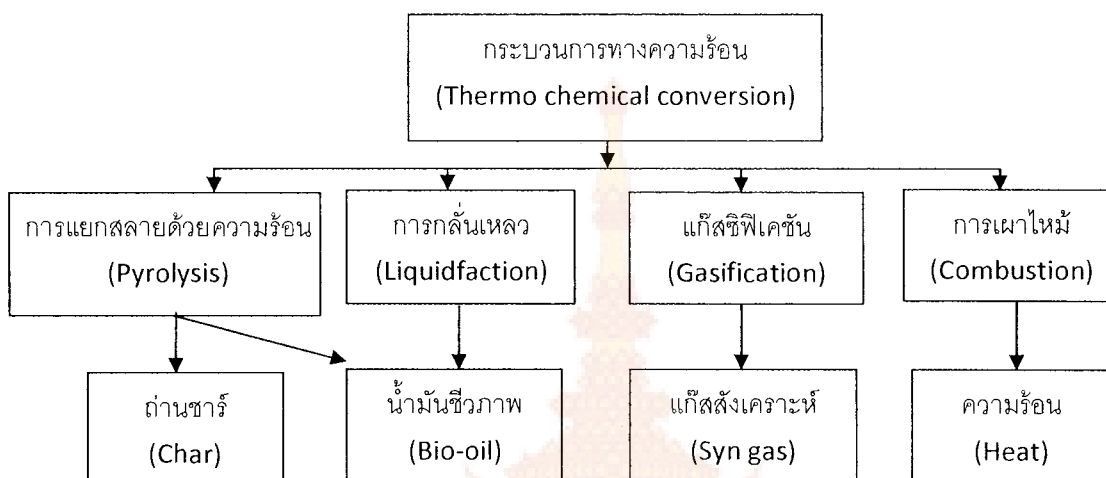
เมล็ดยางพาราใช้ระยะเวลาตั้งแต่ผสมเกสรจนเป็นเมล็ดแก่ประมาณ 5 เดือน ตามฤดูกาลร่วงของเมล็ดยางพาราแล้ว เมล็ดยางจะร่วงในช่วงเวลาแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ตามสภาพภูมิประเทศที่ปลูกต้นยาง เช่น พื้นที่ปลูกยางในภาคต่าง ๆ ของประเทศไทย เมล็ดยางจะร่วงอยู่ระหว่างเดือนมิถุนายนถึงเดือนกันยายนแต่ในทุภาคของประเทศไทย ต้นยางพาราอาจมีการร่วงของเมล็ดนอกฤดูกาลได้ คือในช่วงเดือน กุมภาพันธ์ถึงมีนาคม ในฤดูกาลที่เมล็ดยางพาราร่วงนั้น จะพบว่าเมล็ดยางพารายังสดอยู่ หากนำมาเพาะขยายพันธุ์ ต้นยางมีโอกาสงอกถึงร้อยละ 90 แต่สำหรับเมล็ดยางพาราซึ่งร่วงนอกฤดูกาลนั้น ต้นยางอาจงอกเพียงร้อยละ 40-60 เท่านั้น โดยทั่วไปแล้วสวนยางพาราพื้นที่ 1 ไร่ สามารถรวบรวมเมล็ดได้ 4,000-5,000 เมล็ด (เสาวนีย์ ก่อวุฒิภักดิ์, 2540) เมล็ดยางพาราประกอบไปด้วยเปลือกของเมล็ดแข็ง (Seed coat) มีสีน้ำตาลอ่อน สีเทา มีจุดน้ำตาลเข้ม ประปราย ด้านท้องของเมล็ดตรงปลายสุดด้านหนึ่งจะเป็นที่ตั้งของขั้วเมล็ด (Hilum) และ Micropyle ซึ่งเป็นทางอกของรากอ่อน ถัดมาเป็นรอยที่ Funiculus อ้อมมาติดกับเมล็ดตรงขั้วเรียกว่า Raphe รูปร่างของเมล็ดขึ้นอยู่กับการกดของผลซึ่งมีเมล็ดบรรจุอยู่ภายใน ภายในเมล็ดมีอาหารสะสมเป็นพวกไขมันและมันสีขาวเมื่อมีชีวิตอยู่ และเปลี่ยนเป็นสีเหลืองเมื่อเมล็ดแก่ ส่วนของอาหารสะสมสามารถนำมาสกัดน้ำมันใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้ กากที่เหลือนำมาใช้เป็นอาหารสัตว์หรือทำปุ๋ยชั้นของอาหารสะสมดังกล่าวล้อมรอบแกนต้นอ่อนซึ่งประกอบด้วย ยอดอ่อน รากอ่อน และใบเลี้ยง เมื่อได้รับสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมจะงอกเป็นต้นใหม่ได้น้ำหนักของเมล็ดโดยเฉลี่ย 2-4 กรัม/เมล็ด ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 เมล็ดยางพารา

2.3 การประยุกต์ใช้น้ำมันชีวภาพ

น้ำมันชีวภาพเป็นผลิตภัณฑ์ส่วนหนึ่งที่ได้จากกระบวนการทางความร้อน ดังรูปที่ 2.2 แต่ถือว่าเป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถถูกนำไปใช้ได้หลายๆ กระบวนการดังที่จะกล่าวต่อไปนี้



รูปที่ 2.2 กระบวนการแปรรูปทางความร้อน

2.3.1 การผลิตพลังงานความร้อน ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพต่ำกว่าเชื้อเพลิงฟอสซิล เพราะมีสารประกอบที่มีหมู่ออกซิเจนและส่วนของน้ำ น้ำมันชีวภาพคล้ายกับน้ำมันเบาในด้านสมบัติการเผาไหม้ ถึงแม้ว่าจะมีความแตกต่างกันในด้านความหนืด ความเสถียรภาพ ค่าความเป็นกรดเบส และระบบการปลดปล่อยแก๊สพิษ เป็นต้น การควบคุมส่วนของแก๊สที่ได้จากการย่อยสลายด้วยความร้อนชีวมวลสามารถช่วยกำจัดน้ำได้และทำให้ค่าความร้อนน้ำมันชีวภาพเพิ่มขึ้น

2.3.2 การผลิตแก๊สสังเคราะห์ชีวมวลและน้ำมันชีวภาพสามารถผ่านกระบวนการแปรรูปผลิตเป็นไฮโดรคาร์บอนสะอาดได้ เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างการใช้ชีวมวลแห้งและการใช้น้ำมันชีวภาพเป็นสารป้อนสำหรับการผลิตแก๊สสังเคราะห์ พบว่าหากต้องการผลิตแก๊สสังเคราะห์ในปริมาณมากจากชีวมวลบางชนิดในรูปของแข็งจะพบปัญหาของปริมาณเถ้าสูง แต่เมื่อใช้น้ำมันชีวภาพเป็นสารป้อนซึ่งมีปริมาณเถ้าต่ำจะช่วยลดปัญหาดังกล่าวได้และการขนส่งน้ำมันชีวภาพก็สามารถใช้อุปกรณ์และพาหนะที่ใช้ขนส่งน้ำมันปิโตรเลียมได้ซึ่งประหยัดค่าใช้จ่ายมากกว่า กรณีการขนส่งชีวมวลในรูปของแข็ง การแก๊สซิฟิเคชันของน้ำมันชีวภาพโดยใช้ออกซิเจนร่วมทำปฏิกิริยาสามารถเพิ่มปริมาณแก๊สสังเคราะห์สำหรับกระบวนการฟิชเชอร์โทรปได้

2.3.3 น้ำมันชีวภาพยังมีศักยภาพในการผลิตแก๊สสังเคราะห์หรือแก๊สเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพดีเมื่อเทียบกับการใช้ชีวมวลแข็ง โดยน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการย่อยสลายด้วยความร้อนชีวมวลที่อุณหภูมิต่างๆ ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กที่ความดันบรรยากาศ อัตราการป้อน 4.5-5.5 g/h ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนที่อัตราการไหล 30 mL/min ที่อุณหภูมิ 800°C สามารถแปรรูปเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สได้ถึงร้อยละ 83 โดยน้ำหนัก ซึ่งผลิตภัณฑ์แก๊สดังกล่าวประกอบด้วยแก๊สสังเคราะห์ร้อยละ 16-36 โดยโมล มีเทนร้อยละ 19-27 โดยโมล และอีเทนร้อยละ 21-31 โดยโมล และมีค่าความร้อนรวมเท่ากับ 1,300-1,700 Btu/ft³ ซึ่งมีค่าสูงกว่าแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากการใช้ชีวมวลแข็งโดยตรง

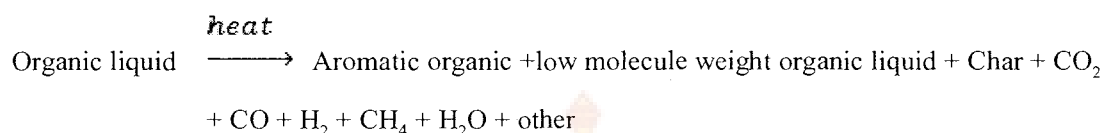
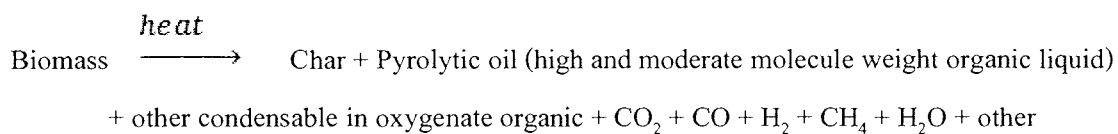
2.3.4 การผลิตกระแสไฟฟ้า น้ำมันชีวภาพมีข้อจำกัดในการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์โดยตรง เพราะน้ำมันชีวภาพมีความเป็นกรดสูงทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับระบบปั๊มและระบบหัวฉีดภายในเครื่องยนต์ อย่างไรก็ตามจากรายงานที่ผ่านมาพบว่าสามารถใช้ น้ำมันชีวภาพกับเครื่องยนต์ที่ใช้แก๊สเชื้อเพลิงได้ ดังนั้นการนำน้ำมันชีวภาพไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าจึงมีความเหมาะสมมากกว่าการนำไปใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลซึ่งต้องมีการปรับแต่งเครื่องยนต์ หรือต้องปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันชีวภาพให้มีสมบัติใกล้เคียงกันกับน้ำมันดีเซล

2.4 กระบวนการย่อยสลายด้วยความร้อน (Pyrolysis)

กระบวนการย่อยสลายด้วยความร้อน หมายถึงการทำปฏิกิริยาของสารใดสารหนึ่งกับความร้อน ในความเป็นจริงกระบวนการย่อยสลายด้วยความร้อน (Pyrolysis process) หรือการกลั่น (Destructive distillation) เป็นกระบวนการที่สารจะถูกสลายตัวส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ได้ถูกย่อยสลายทางเคมีด้วยความร้อน ณ อุณหภูมิสูง ๆ ในที่ที่อ็อกซิเจนปราศจากออกซิเจน หรือในที่ที่มีการจำกัดและควบคุมปริมาณออกซิเจนให้เหลือน้อยที่สุด ทำให้เกิดการสลายของเนื้อวัสดุออกไปเป็นวัสดุย่อยๆ ชนิดต่างๆ หรือองค์ประกอบที่มีขนาดเล็กกว่าเดิม

2.4.1 ทฤษฎี

กระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนหรือคาร์บอนในเซชัน (Carbonization) เป็นการสลายตัวทางความร้อน (Thermal degradation) โดยไม่ใช้ออกซิเจนหรือออกซิเจนร่วมในปฏิกิริยา (ไม่ใช่ไอน้ำ ไฮโดรเจนหรือคาร์บอนไดออกไซด์) ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้คือของเหลว (ทาร์) ถ่านชาร์ และแก๊ส เมื่อชีวมวลเกิดการสลายตัวด้วยความร้อนจะเกิดปฏิกิริยาต่างๆ เพิ่มมากขึ้นได้แก่ ปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน (Dehydration) การแตกตัวด้วยความร้อน (Thermal cracking) ไอโซเมอไรเซชัน (Isomerization) ดีไฮโดรจิเนชัน (Dehydrogenation) คอนเดนเซชัน (Condensation) ได้ผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น น้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ ถ่านชาร์ สารประกอบออร์แกนิก (Organic compound) แสดงดังสมการต่อไปนี้



กระบวนการย่อยสลายด้วยความร้อนจะเปลี่ยนแปลงทางเคมีแบบย้อนกลับไม่ได้ได้ผลิตภัณฑ์ส่วนที่เป็นของแก๊ส ของเหลว และของแข็งออกมา เมื่ออุณหภูมิลดลงสารที่ระเหยง่ายจะกลั่นตัวเป็นของเหลวที่เรียกว่า “น้ำมันชีวภาพ” ส่วนแก๊สที่คงเหลืออยู่ที่ไม่สามารถกลั่นตัวเป็นของเหลวได้ (non-condensable gas) และผลผลิตที่ได้จะต้องทำให้เย็นลงในทันทีเพื่อป้องกันการแตกตัวของน้ำมันชีวภาพ

ของแข็งที่ได้จากกระบวนการย่อยสลายด้วยความร้อน เรียกว่า ถ่านชาร์ (Charcoal) ซึ่งมีส่วนประกอบของวัสดุ จะมีถ่านเป็นหลักและเถ้าอินทรีย์ผสมอยู่ด้วย ของเหลวที่ควบแน่นได้ที่อุณหภูมิห้องเรียกว่า ของเหลวไพโรลิกเนียส (Pyroligneous liquid) หรือกรดไพโรลิกเนียส (Pyroligneous acids) หรือน้ำมันไพโรไลซิส (Pyrolysis oil) ซึ่งมีลักษณะเป็นของเหลวสีน้ำตาลดำคล้ายน้ำมันดิบ บางครั้งเรียกว่าน้ำมันดิบชีวภาพ (Bio-crude liquid) กระบวนการย่อยสลายด้วยความร้อนสามารถควบคุมให้เกิดผลิตภัณฑ์สถานะหนึ่งมากที่สุดได้ โดยการควบคุมปัจจัยต่าง ๆ ของกระบวนการ เช่น อัตราการให้ความร้อน อุณหภูมิ เวลาในการทำปฏิกิริยา เป็นต้น

โดยปริมาณการเกิดแก๊สและสารระเหยต่างๆจะแปรผันตามช่วงอุณหภูมิ โดยในช่วง 155-200°C จะเป็นการระเหยของน้ำ ช่วงอุณหภูมิ 200-380°C จะเป็นช่วงเริ่มการระเหยตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน แสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบของแก๊สที่สภาวะต่างๆ

กระบวนการ	อุณหภูมิ (°C)	H ₂ (mol %)	CO (mol %)	CO ₂ (mol %)	HCs (mol %)
Elimination of water	155-200	0	30.5	68.0	2.0
Evolution carbon oxides	200-280	0.2	30.5	66.5	3.3
Start hydrocarbon evolution	280-380	5.5	20.5	35.5	36.6
Evolution of hydrocarbon	380-500	7.5	12.3	31.5	48.7
Dissociation	500-700	48.7	24.5	12.2	20.4
Evolution of hydrocarbon	700-900	80.7	9.6	0.4	8.7

ที่มา : Nikitin. 1962

การสลายตัวด้วยความร้อนแบ่งได้เป็นสองกระบวนการหลักคือ การสลายตัวด้วยความร้อนแบบช้า (Slow pyrolysis) และการสลายตัวด้วยความร้อนแบบเร็ว (Fast pyrolysis) โดยมีตัวแปรที่ต้องควบคุมดังนี้

(1) การสลายตัวด้วยความร้อนแบบช้าเป็นการให้ความร้อนด้วยอัตรา $3-10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ผลผลิตหลักที่ได้เป็นเชื้อเพลิงแข็ง (Char) น้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) และแก๊สได้ในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน

(2) การสลายตัวด้วยความร้อนแบบเร็วเป็นการให้ความร้อนสูงในระยะเวลาอันรวดเร็วโดยไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งอาจเรียกเทคโนโลยีนี้ให้ถูกต้องยิ่งขึ้นว่า “Thermolysis” กระบวนการนี้เป็นการทำให้วัสดุชีวมวลซึ่งมีขนาดอนุภาคน้อยกว่า 3 mm ความชื้นน้อยกว่าร้อยละ 10 เกิดความร้อนอย่างรวดเร็วโดยอัตราการให้ความร้อนอยู่ที่ $10-50^{\circ}\text{C}/\text{min}$ และเวลาที่ชีวมวลสัมผัสกับความร้อน (Resident time) น้อยมากในช่วง 0.5-2.0 s และเกิดการแยกตัวออกเป็นถ่าน แก๊ส ไฮโดรคาร์บอนเหลวในอากาศ เมื่ออุณหภูมิลดลงสารที่ระเหยง่ายจะกลั่นเป็นของเหลวที่เรียกว่า “น้ำมันชีวภาพ” ส่วนแก๊สที่ยังคงเหลืออยู่เป็นแก๊สที่ไม่สามารถกลั่นตัวเป็นของเหลวได้ (Non condensable gas) และมีค่าความร้อนปานกลาง ปริมาณผลผลิตหลักที่ได้ น้ำมันชีวภาพร้อยละ 60-70 ถ่านชาร์ร้อยละ 12-15 และแก๊สร้อยละ 13-25 นอกจากนี้ยังแบ่งกระบวนการสลายตัวด้วยความร้อนแบบต่างๆ ได้อีก ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ประเภทการสลายตัวด้วยความร้อนแบบต่างๆ

Technology	Residence time	Heating rate	Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Main product
Carbonization	Hour-days	Very low	300-500	Char
Pressurized carbonization	15 min-2 h	Medium	450	Char
Conventional pyrolysis	Hours	Low	400-600	Char, Liquids, Gas
Conventional pyrolysis	5-30 min	Medium	700-900	Char, Gas
Flash pyrolysis	0.1-2 s	High	400-650	Liquids
Flash pyrolysis	< 1 s	High	650-900	Liquids, Gas
Flash pyrolysis	< 1 s	Very high	1,000-3,000	Gases
Vacuum pyrolysis	2-30 s	Medium	350-450	Liquids
Hydropyrolysis	< 10 s	High	< 500	Liquids

ที่มา : Bridgewater and Bridge. 1991

2.4.2 ตัวแปรที่มีผลต่อการสลายตัวด้วยความร้อน

ในการสลายตัวด้วยความร้อน ส่วนใหญ่จะสนใจถึงอัตราและปริมาณของสารระเหยที่ได้ การกระจายของผลิตภัณฑ์ต่างๆ รวมถึงภาวะในการทดลอง โดยตัวแปรทางเคมีที่สำคัญคือธาตุองค์ประกอบของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ในชีวมวลที่มีสมบัติแตกต่างกันไป นอกจากนี้ตัวแปรพื้นฐานทางกายภาพที่สำคัญ ได้แก่ อุณหภูมิ เวลา อัตราการให้ความร้อน ซึ่งตัวแปรเหล่านี้จะมีผลกระทบต่อการสลายตัวด้วยความร้อนดังจะอธิบายต่อไป (ชูศักดิ์ โกะนุทรานนท์, 2536)

2.4.2.1 อุณหภูมิในการสลายตัวด้วยความร้อน (Pyrolysis temperature)

ช่วงอุณหภูมิของการสลายตัวด้วยความร้อนจะมีผลกระทบต่อปริมาณและองค์ประกอบของสารระเหยที่ได้ โดยการสลายตัวด้วยความร้อนแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอน คือขั้นแรกที่อุณหภูมิระหว่าง $200-300^{\circ}\text{C}$ จะมีการปลดปล่อยสารระเหยเล็กน้อยและแก๊สที่ประกอบด้วยออกไซด์ของคาร์บอน และน้ำเป็นส่วนใหญ่ ขั้นที่สองอุณหภูมิระหว่าง $300-500^{\circ}\text{C}$ จะมีการสลายที่ปล่อยสารระเหยออกมาประมาณสามในสี่ของสารระเหยทั้งหมด ขั้นที่สามอุณหภูมิระหว่าง $500-800^{\circ}\text{C}$ จะมีการไล่แก๊สออกอีกเป็นครั้งที่สองพร้อมกับการเปลี่ยนแปลงของชาร์รวมไปถึงการปลดปล่อยแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ซึ่งส่วนใหญ่เป็นพวกไฮโดรเจน

ในการศึกษาการสลายตัวด้วยความร้อนของไม้ พบว่าเริ่มเกิดการสลายตัวด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 400°C ที่อุณหภูมิ 600°C เกิดการระเหยของสารระเหยต่าง ๆ ร้อยละ 75 และเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 80 ที่อุณหภูมิ 900°C โดยอุณหภูมิที่มีผลต่อปฏิกิริยาการสลายตัวด้วยความร้อนทั้งในด้านปริมาณและองค์ประกอบสารระเหยได้คือเมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้น น้ำหนักที่หายไปเพิ่มมากขึ้น ปริมาณถ่านชาร์ลดลงและปริมาณแก๊สมากขึ้น (Maniatis, 1988)

นอกจากนี้การศึกษการสลายตัวด้วยความร้อนที่อุณหภูมิเพิ่มมากขึ้นได้แก๊สเพิ่มมากขึ้นคุณสมบัติของน้ำมันทาร์จะมีโครงสร้างเปลี่ยนไปด้วย เพราะการเพิ่มของอุณหภูมิเป็นการเพิ่มพลังงานเพื่อทำลายพันธะภายในโครงสร้างของวัตถุดิบนั้นด้วยเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวของทาร์จากปฏิกิริยาการแตกตัวขั้นที่สองเพิ่มมากขึ้นเกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทน และไฮโดรเจนในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น ส่วนไฮโดรคาร์บอนชนิดอื่นจะลดลง ทำให้ปริมาณทาร์ และชาร์ที่ได้ลดลงและมีการสะสมของคาร์บอนโดยการแตกตัวของสารระเหยบนพื้นผิวถ่านชาร์ที่ร้อนโดยปริมาณชาร์ไม่เกิดขึ้นมากในปฏิกิริยาขั้นต้นและแก๊สที่ไม่สามารถกลั่นตัวได้ (Non-condensable gas) มาจากการหลอมเหลวในขั้นแรกโดยมาผ่านถ่านชาร์ (Xianwen, 2000) นอกจากนี้สารระเหยที่ได้ออกมามีปริมาณที่ไม่มากนักและแก๊สที่ได้ส่วนใหญ่เป็นน้ำและสารประกอบออกไซด์ของคาร์บอน หลังจากนั้นขั้นที่สองที่เกิดขึ้นเป็นแก๊สซิฟิเคชัน ปล่อยแก๊สที่ไม่ควบแน่นโดยส่วนใหญ่เป็นแก๊สไฮโดรเจน ที่มีผลต่อการเปลี่ยนรูปถ่านชาร์ต่อไป

2.4.2.2 อัตราการให้ความร้อน (Heating rate)

ผลกระทบของอัตราการให้ความร้อนเป็นตัวแปรที่สำคัญต่อปริมาณและองค์ประกอบของสารระเหยที่ได้จากการสลายตัวด้วยความร้อน แต่เดิมสภาวะในการให้ความร้อนถูกแบ่งได้ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิประมาณ 20°C/s ซึ่งเป็นช่วงที่ทำให้เกิดการปลดปล่อยสารระเหยออกอย่างรวดเร็ว ดังนั้นอัตราการให้ความร้อนต่ำจะถูกนิยามให้มีผลต่างของอุณหภูมิเท่ากับหรือน้อยกว่าค่าที่กำหนดและโดยทั่ว ๆ ไปอัตราการให้ความร้อนอย่างรวดเร็วจะมีผลต่างของอุณหภูมิมากกว่า $103-105^{\circ}\text{C/s}$ การสลายตัวด้วยความร้อนที่อัตราการให้ความร้อนต่ำจะได้ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เป็นชาร์ ส่วนการสลายตัวด้วยความร้อนที่อัตราการให้ความร้อนสูง เซลลูโลสจะเปลี่ยนไปเป็นแก๊สที่มีสัดส่วนของพวกไฮโดรคาร์บอนสูงเป็นส่วนใหญ่ และได้ชาร์จำนวนน้อยมาก

การสลายตัวด้วยความร้อนถ้าอัตราการให้ความร้อนเร็วเกินไปทำให้ได้ปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ระเหยได้มีมาก ถ่านชาร์น้อย และการให้ความร้อนอย่างรวดเร็วจนถึงอุณหภูมิการสลายตัวของชีวมวลได้ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สมากขึ้นและของเหลวมากกว่าการให้ความร้อนด้วยอัตราการให้ความร้อนที่ช้า เนื่องจากชีวมวลถูกเปลี่ยนไปเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเหลวได้ง่ายขึ้น (Zenzi, 1996) และโมเลกุลของน้ำมันที่ที่อยู่ในสภาวะแก๊สช่วงเวลาที่ได้รับความร้อนสั้นมากด้วย ผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงเกิดปฏิกิริยาน้อย เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะเกิดที่อุณหภูมิสุดท้ายไม่ขึ้นกับปฏิกิริยาก่อนหน้านั้น กล่าวคือ ไม่เกิดปฏิกิริยาขั้นทุติยภูมิและเวลาในการสลายตัวของทาร์น้อยทำให้ไม่ต้องสูญเสียปริมาณและคุณสมบัติของน้ำมันทาร์ จึงได้ทาร์ มีเทนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มาก แต่ไฮโดรคาร์บอนและไฮโดรเจนลดลง โดยอัตราเร็วในการเกิดแก๊สแต่ละชนิดไม่แตกต่างกัน เมื่อเปลี่ยนอัตราการให้ความร้อนเนื่องมาจากข้อจำกัดในการถ่ายโอนความร้อนในระบบทดลอง (Tanaka et al. 1997)

นอกจากนี้อัตราการให้ความร้อนมีผลอย่างมากต่อการสลายตัวด้วยความร้อนในการเกิดถ่านชาร์ของชีวมวลมากกว่าถ่านหินเนื่องจากชีวมวลมีปริมาณเซลลูโลสสูง โดยเกิดปฏิกิริยาคีไฮโดรชันของเซลลูโลสและเกิดการดีพอลิเมอร์ไลเซชันของเซลลูโลส โดยเปลี่ยนไปเป็นแอนไฮโดรเซลลูโลสที่มีความอยู่ตัวมากขึ้น และได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นถ่านชาร์มากขึ้น แต่ถ้าเวลาในการเกิดปฏิกิริยาน้อยอัตราการให้ความร้อนก็จะมีผลต่อปฏิกิริยาน้อยเพราะเวลาในการทำปฏิกิริยาน้อยมาก

2.4.2.3 ขนาดของอนุภาค (Particle size)

ขนาดของอนุภาคมีผลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้ เนื่องจากขนาดอนุภาคมีคามสัมพันธ์กับอัตราการถ่ายโอนความร้อน (Heat transfer) คือขนาดอนุภาคขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวที่สูง (Surface area) ทำให้เกิดการถ่ายโอนความร้อนได้ดีกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ แต่ขนาดอนุภาคที่เล็กเกินไปเมื่อเกิดการ

สลายตัวชั้นแรกจะสลายตัวต่อไปยังชั้นที่สอง (Secondary cracking) ได้รวดเร็วมากทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สมากขึ้น แต่โดยทั่วไปผลิตภัณฑ์จากอนุภาคนขนาดเล็กจะให้ผลมากกว่าจากอนุภาคนขนาดใหญ่

2.4.2.4 ความดัน (Pressure)

ความดันเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลอย่างมากต่อปริมาณผลิตภัณฑ์สารระเหยได้ เนื่องจากเมื่อให้ความดันเพิ่มมากขึ้นทำให้สารผลิตภัณฑ์ที่ได้มีปริมาณลดน้อยลง ในทางกลับกันถ้าให้ความดันต่ำจะทำให้ผลิตภัณฑ์สารระเหยเพิ่มมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามปฏิกิริยาการแตกตัว (Cracking) จะเกิดได้ดีที่ความดันสูง ทำให้เกิดแก๊สที่มีองค์ประกอบไฮโดรคาร์บอนได้เพิ่มมากขึ้นในขณะที่ให้ความดันต่ำปฏิกิริยาการแตกตัวเป็นแก๊สลดลง ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เหลว น้ำมันทาร์ และถ่านชาร์เพิ่มมากขึ้น

2.4.2.5 สภาพบรรยากาศ (Atmosphere)

ภาวะบรรยากาศของปฏิกิริยาการสลายตัวด้วยความร้อนที่แตกต่างกันส่งผลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น ตัวอย่างเช่น ปฏิกิริยาไพโรไลซิสในบรรยากาศที่มีไฮโดรเจนหรือที่เรียกว่าไฮโดรไพโรไลซิส (Hydropyrolysis) สามารถเพิ่มปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารระเหยได้ และช่วยเพิ่มปริมาณสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำได้

2.4.2.6 เวลาที่ชีวมวลสัมผัสกับความร้อน (Resident time)

เวลาที่ชีวมวลสัมผัสกับความร้อนมีผลต่อปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์กล่าวคือ ถ้าเวลาที่ชีวมวลสัมผัสความร้อนน้อยเกินไปการสลายตัวก็จะเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ และถ้าเวลาที่ชีวมวลสัมผัสความร้อนมากเกินไปจะทำให้ได้ปริมาณของแก๊สเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากสารระเหยต่าง ๆ จะเกิดการแตกตัวชั้นที่สองต่อไปอีก และปริมาณถ่านชาร์จะมีแนวโน้มของร้อยละคาร์บอนในองค์ประกอบลดลงเนื่องจากสารระเหยมีปริมาณลดน้อยลงนั่นเอง

2.4.2.7 อัตราการไหลของแก๊สตัวพา (Flow rate of carrier gas)

อัตราการไหลของแก๊สตัวพามีผลต่อปริมาณผลได้ผลิตภัณฑ์กล่าวคือ ถ้าอัตราการไหลของแก๊สตัวพามีค่าสูงจะทำให้แก๊สตัวพาจัดสารระเหยต่าง ๆ ออกจากห้องเผาไหม้ได้เร็วขึ้น การเกิดปฏิกิริยาอาจไม่สมบูรณ์ทำให้ได้ปริมาณที่เป็นทาร์ลดน้อยลง และถ้าอัตราการไหลของแก๊สตัวพาต่ำเกินไปทำให้สารระเหยต่าง ๆ อยู่ในห้องไหม้นานขึ้น การแตกตัวชั้นที่สองเกิดนานได้สารประกอบที่เป็นแก๊สเพิ่มมากขึ้น ทาร์และถ่านชาร์ลดน้อยลง

2.4.2.8 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการสลายตัวด้วยความร้อน

เมื่อชีวมวลผ่านกระบวนการสลายตัวด้วยความร้อน จะมีการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการระเหยไประเหียงน้ำและสารระเหยรวมทั้งแก๊สต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นด้วยองค์ประกอบของสารอินทรีย์ และอนินทรีย์เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งด้านกายภาพและเคมี ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นผลรวมของการสลายตัวเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน โดยองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้จะถูกระบุไว้ด้วยเครื่องแก๊ส

โครมาโทกราฟีและเครื่องแมสสเปกโทมิเตอร์ ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้มี 3 ประเภทคือ (ฉัตรชัย ธนศรีสุข. 2541)

1. ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง

มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักเรียกว่า ถ่านชาร์ สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับผลิตสารเคมีอื่นได้อีก เช่น ถ่านกัมมันต์ แนฟทาลิน แอนทราซีน และสารประกอบไฮยาโนเจน แต่ส่วนใหญ่จะนำมาใช้เป็นวัสดุเชื้อเพลิงไร้ควัน เพื่อใช้ในบ้านเรือนและอุตสาหกรรมขนาดเล็กหรือกลางได้ดี เช่น เป็นเชื้อเพลิงในหม้อไอน้ำ การเผาอิฐ การอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร โรงงานหินปูนและซีเมนต์ หรือใช้ในโรงงานถลุงเหล็กและทองแดง เพราะไม่ก่อให้เกิดปัญหามลภาวะต่อสภาพแวดล้อมจากกลิ่นหรือควันจากพวกสารระเหยและสารประกอบพวกไนโตรเจนและกำมะถัน

2. ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว

ประกอบด้วยน้ำและสารประกอบที่ละลายน้ำ อีกส่วนหนึ่งจะเป็นน้ำมันาร์ องค์ประกอบของน้ำมันาร์เป็นสารประกอบที่ซับซ้อนของไฮโดรคาร์บอน ที่มีโครงสร้างส่วนมากเป็นพวกวงแหวนแนฟทาลินเชื่อมด้วยหมู่เอทิลีน โมเลกุลของน้ำมันาร์มีองค์ประกอบของธาตุคาร์บอนตั้งแต่ C_5 - C_6 ประกอบเป็นโครงสร้างของสารเคมีต่าง ๆ อาจมีมากกว่า 200 ชนิด แบ่งออกได้ตามอุณหภูมิที่ใช้ในการกลั่นเป็น 5 ส่วน คือ

- น้ำมันเบา (Light oil) ช่วงอุณหภูมิ $< 200^{\circ}\text{C}$ ได้แก่ เบนซีน เบนโซลดิบ โทลูอิน เอทิลเบนซีน
- น้ำมันช่วงกลาง (Middle oil) ช่วงอุณหภูมิ $200-250^{\circ}\text{C}$ ได้แก่ ฟีนอล ไพรดีน
- น้ำมันช่วงหนัก (Heavy oil) ช่วงอุณหภูมิ $250-300^{\circ}\text{C}$ ได้แก่ ไดเมทิล แนฟทาลิน
- น้ำมันแอนทราซีน (Anthracence) ช่วงอุณหภูมิ $300-350^{\circ}\text{C}$ ได้แก่ ฟลูออรีน ฟีนานทีน
- พิตช์ (Pitch) ช่วงอุณหภูมิ $> 350^{\circ}\text{C}$ ได้แก่ น้ำมันหนักบางประเภทพวกไข (Red wax) ซึ่งเป็นส่วนที่เหลือจากการกลั่น

3. ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส

เป็นของผสมระหว่างแก๊สอินทรีย์และอนินทรีย์ โดยแก๊สอินทรีย์ ได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจนและแอมโมเนีย ส่วนแก๊สอินทรีย์ ได้แก่ มีเทน อีเทน เอทิลีน เป็นต้น โดยแก๊สส่วนใหญ่จะเป็นแก๊สไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ และมีเทน ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นแก๊สเชื้อเพลิงในกระบวนการเผาไหม้เพื่อให้ความร้อน หรือการผลิตไฟฟ้า แก๊สที่เผาไหม้ได้ ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ ไนโตรเจน ออกซิเจน และสารประกอบไฮโดรคาร์บอน นอกจากนี้ยังมีแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์และแอมโมเนียในปริมาณเล็กน้อย

2.4.3 ประเภทของเครื่องปฏิกรณ์การสลายตัวด้วยความร้อน (Olofsson, 2005)

2.4.3.1 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบฟองอากาศ (Bubbling fluidized-bed reactor) เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่ป้อนอากาศจากทางด้านล่างของเบด ความเร็วของอากาศจะช่วยดันให้เบดขยายตัวขึ้น จนกระทั่งอนุภาคอยู่ในภาวะแขวนลอยและหมุนวนอยู่ในกระแสน้ำอย่างสม่ำเสมอแต่มีอีกส่วนหนึ่งรวมตัวกันแล้วก่อตัวเป็นฟองแก๊สขึ้นแล้วแทรกตัวขึ้นมายังบนผิวหน้าของเบดและแตกตัวในที่สุด ซึ่งขณะที่ฟองแก๊สลอยขึ้นมานี้จะทำให้เม็ดของแข็งลอยติดตามฟองแก๊สขึ้นมามีด้วย

2.4.3.2 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเหวี่ยงและแบบถ่ายโอน (Circulating fluidized beds and transported bed) เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่มีอนุภาคอยู่ในภาวะแขวนลอยและหมุนวนอยู่ในกระแสน้ำที่สูงขึ้นจนเบดบางส่วนหลุดออกไป ดังนั้นจึงต้องติดตั้งไซโคลนเพื่อนำอนุภาคกลับมาในขณะที่แก๊สไหลผ่านไซโคลนออกไปทางด้านบนและกลับมาป้อนทางด้านล่างเบดอีกครั้ง

2.4.3.3 เครื่องปฏิกรณ์การสลายตัวด้วยความร้อนแบบสุญญากาศ (Vacuum pyrolysis reactor) เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่มีการให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนในการเกิดปฏิกิริยาที่ใช้ในการสลายตัวของชีวมวลภายใต้การลดความดันและใช้เวลาในเครื่องปฏิกรณ์นาน ซึ่งไม่เหมือนกับการสลายตัวด้วยความร้อนแบบเร็ว อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับเวลาในการเกิดปฏิกิริยาสลายตัวเป็นไอน้ำกับกรณีของการสลายตัวด้วยความร้อนแบบเร็วแล้วจะเกิดได้เร็วเหมือนกัน โดยความดันที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์เท่ากับ 15 kPa

2.4.3.4 เครื่องปฏิกรณ์การสลายตัวด้วยความร้อนแบบแอบลาทีฟ (Ablative pyrolysis reactor) เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่อาศัยการถ่ายโอนความร้อนที่เกิดขึ้นในขณะที่อนุภาคชีวมวลกระทบหรือเคลื่อนที่ไปชนกับของแข็งซึ่งเป็นแหล่งให้ความร้อน แอบลาทีฟไพโรไลซิสแตกต่างกับการสลายตัวด้วยความร้อนแบบเร็วด้วยวิธีอื่นๆ โดยมีข้อจำกัดอัตราการถ่ายโอนความร้อนของการเกิดปฏิกิริยาซึ่งต้องใช้อนุภาคที่มีขนาดเล็ก วิธีการเกิดปฏิกิริยาของแบบแอบลาทีฟไพโรไลซิสคล้ายกับการหลอมเหลวในกระทะ โดยการเคลื่อนที่ของเนยบนพื้นผิวของกระทะที่ร้อนสามารถเพิ่มอัตราการหลอมเหลวของเนยได้ การถ่ายโอนความร้อนอย่างรวดเร็วนี้เกี่ยวข้องกับการสัมผัสพื้นผิวที่ให้ความร้อน ซึ่งจะส่งผลต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อน โดยจุดเด่นของกระบวนการแอบลาทีฟไพโรไลซิส คือการให้ความดันสูงในการป้อนอนุภาคชีวมวลบนผนังเครื่องปฏิกรณ์ที่ร้อนซึ่งจะทำให้เกิดแรงเหวี่ยงหรือแรงเหวี่ยงกล อนุภาคชีวมวลจะเคลื่อนที่ชนกับผนังเครื่องปฏิกรณ์ซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่า 600°C จึงเกิดการถ่ายโอนความร้อนได้ดี

2.4.3.5 เครื่องปฏิกรณ์แบบสว่าน (Auger reactor) เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่ไม่ใช้แก๊สเป็นตัวพา และใช้อุณหภูมิต่ำกว่า 400°C ทำงานแบบต่อเนื่อง ผลิตภัณฑ์ไอน้ำที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์จะถูกควบแน่นกลายเป็นน้ำมันชีวภาพ

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปิยรัตน์ วีระชาญชัย ศึกษาเบื้องต้นถึงลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการสลายตัวด้วยความร้อนมวลชีวภาพชนิดต่าง ๆ และศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิของการแยกสลายด้วยความร้อนต่อสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ทั้งสามสถานะที่ได้ (แก๊ส, น้ำมันชีวภาพและถ่านไม้) ชีวมวลที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่ กากมันสำปะหลัง กะลาปาล์มและเนื้อในเมล็ดปาล์มที่บีบน้ำมันออกมาแล้ว ชีวมวลเหล่านี้ถูกนำมาให้ความร้อนในบรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง ในช่วงอุณหภูมิ 300-800°C ที่อัตราการให้ความร้อน 20°C/min ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะถูกนำมาคำนวณหาร้อยละผลผลิต ส่วนน้ำมันชีวภาพที่จะถูกนำมาแยกน้ำออกและนำตัวอย่างน้ำมันชีวภาพทั้งสองแบบมาวิเคราะห์คุณสมบัติทางเชื้อเพลิงและวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) จากการศึกษาพบว่าร้อยละผลผลิตสูงสุดของน้ำมันชีวภาพจากชีวมวลชนิดต่างๆ ที่ได้จากไพโรไลซิสที่อุณหภูมิประมาณ 700°C โดยน้ำมันชีวภาพจากการสลายตัวด้วยความร้อนของเนื้อในเมล็ดปาล์มที่บีบน้ำมันออกแล้วให้ร้อยละผลผลิตสูงสุดถึง 54.34 โดยน้ำหนัก และคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการสลายตัวด้วยความร้อนของชีวมวลชนิดต่างๆ มีค่าดังนี้ ค่าความหนาแน่นประมาณ 1 g/cm³ ความหนืดที่อุณหภูมิ 40°C 1.46-1.75 cSt ค่า pH อยู่ในช่วง 2-3 ค่าความร้อนขึ้นกับชนิดของมวลชีวภาพ อยู่ในช่วง 14.92-40.00 MJ/kg และหลังการแยกน้ำพบว่าน้ำมันชีวภาพที่ได้มีค่าความหนืด ปริมาณการคาร์บอนและปริมาณเถ้าสูงขึ้น และให้ค่าความร้อนและช่วงอุณหภูมิของการกลั่นใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าหมู่ฟังก์ชันของน้ำมันชีวภาพชนิดต่าง ๆ มีองค์ประกอบของสารประกอบของหมู่ออกซิเจน (Oxygen-containing compounds) และกลุ่มไฮโดรคาร์บอน ซึ่งได้แก่ แอลกอฮอล์ แอลดีไฮด์ คีโตน อะโรมาติก แอลเคน เป็นต้น

รุ่งระวี เพียรมูล ศึกษากระบวนการสลายตัวด้วยความร้อนแบบเร็วของผักตบชวาในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องโดยศึกษาถึงตัวแปรที่ผลต่อร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพ องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของน้ำมันชีวภาพ โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาได้แก่ อุณหภูมิ ขนาดอนุภาค อัตราการป้อน อัตราการไหลของแก๊สดำพา ศึกษาในช่วงอุณหภูมิ 400, 425, 450, 475 และ 500°C ขนาดของอนุภาคต่างกัน 3 ช่วง ได้แก่อนุภาคน้อยกว่า 425 μm , 425-600 μm และ 600 μm 1 mm อัตราการป้อนสาร 1.29, 1.4, 1.6 และ 1.8 kg/h และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 0, 50, 100, 150, 200 และ 400 mL/min พบว่าที่อุณหภูมิ 450°C ขนาดอนุภาคที่ 425-600 μm อัตราการป้อนที่ 1.4 kg/h และอัตราการไหลของไนโตรเจน 200 mL/min เป็นสภาวะที่เหมาะสมต่อการแยกสลายด้วยความร้อนแบบเร็ว ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถแบ่งออกเป็นสามส่วน คือ ส่วนที่เป็นผลิตภัณฑ์ของเหลวร้อยละ 38.23 แก๊สร้อยละ 43.36 และถ่านชาร์ร้อยละ 21.10 โดยส่วนที่เป็นผลิตภัณฑ์ของเหลวแบ่งได้เป็นสองส่วน คือ น้ำมันเบา (ร้อยละ 22.98) และน้ำมันหนัก (ร้อยละ 15.25) ซึ่งค่าความร้อนของน้ำมันเบาและน้ำมันหนักมีค่า 41.05 และ

31.00 MJ/kg ตามลำดับ สมบัติทางเคมีของน้ำมันชีวภาพพบปริมาณคาร์บอนและไฮโดรเจนในน้ำมันมากกว่าน้ำมันหนัก โดยที่น้ำมันทั้งสองมีสภาพเป็นกรดและมีขี้ที่สามารละลายในอะซีโตน และไฮโดร-ฟูแรนได้ดี การกักกรองแผ่นทองแดงน้ำมันเบาและหนักอยู่ในระดับเล็กน้อย วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดพบหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกไซด์ อัลคีน คีโตน คาร์บอกซิลิก และอะโรเมติก และวิเคราะห์หาองค์ประกอบด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี-แมสสเปกโตรสโกปี พบองค์ประกอบหลักในน้ำมันเบาได้แก่ 1,3-ไซโคลเพนเทนไดโอน 2-เพนทานอล, 4-ไฮดรอกซิล 4-โคเมทิล และ 4-ไพเพอริไดโอน 2,2,6,6-เตตระเมทิล และในน้ำมันหนักพบ 2-เพนทานอน, 4-ไฮดรอกซีเมทิล 2-เพนทานอน, 4-ไฮดรอกซีและฟีนอล

Basak Burcu Uzun ศึกษาการแยกสลายด้วยความร้อนของกากชา โดยศึกษาคุณลักษณะและปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวและของแข็ง ตัวแปรที่ศึกษา คือ อุณหภูมิ 673-973 K อัตราการให้ความร้อน 5-700 K/min และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 200-800 cm³/min ผลได้ของน้ำมันและถ่านชาร์มากที่สุดคือร้อยละ 33.4 (773 K) และร้อยละ 43.3 (673 K) ตามลำดับ คุณลักษณะของของเหลวและสารประเภทไฮโดรคาร์บอนใช้การ วิเคราะห์ธาตุ FT-IR, H NMR และ GC-MS คุณลักษณะเฉพาะของถ่านชาร์ วิเคราะห์โดย วิเคราะห์ธาตุ SEM, BET และ เทคนิค FT-IR น้ำมันชีวภาพจะมีสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ส่วนใหญ่คือ อัลคีน และอัลคีน ดังนั้น จากผลการทดลองผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงเหลว ในขณะที่ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งน่าจะจะไม่เหมาะสมสำหรับวัตถุประสงค์ในการดูซับเนื่องจากมีพื้นที่ผิวดำ

M. Asadullah และคณะ ได้ทดลองผลิตเชื้อเพลิงเหลวชีวภาพทดแทน (น้ำมันชีวภาพ) จากขานอ้อยผ่านกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อน โดยการป้อนสารแบบกะในระบบเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง โดยศึกษาอุณหภูมิที่ต่างกันในช่วง 300 ถึง 600°C น้ำมันชีวภาพที่เก็บได้จากคอนเดนเซอร์สองส่วนที่อุณหภูมิแตกต่างกัน เรียกว่า น้ำมัน-1 และน้ำมัน-2 ปริมาณของน้ำมันชีวภาพที่สูงที่สุดที่ได้ร้อยละ 66 โดยน้ำหนัก แก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้จะประกอบไปด้วย คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน อีเทน อีทีน โพรเพน และโพรพีน ความหนาแน่นและความหนืดของน้ำมัน -1 มีค่า 1130 kg/cm³ และ 19.32 cSp และสำหรับน้ำมัน-2 คือ 1,050 kg/cm³ และ 4.25 cSp สำหรับค่าความร้อนสูงสุดของน้ำมัน-1 คือ 17.25 MJ/kg และ น้ำมัน-2 คือ 19.91 MJ/kg ค่า pH ของน้ำมันชีวภาพของน้ำมัน-1 คือ 3.5 และน้ำมัน-2 คือ 4.5 ปริมาณน้ำ ของแข็ง และถ่านของน้ำมัน-1 คือร้อยละ 15, 0.02 และ 0.03 โดยน้ำหนักตามลำดับ และน้ำมัน-2 คือร้อยละ 11, 0.01 และ 0.02 โดยน้ำหนักตามลำดับ

Sevgi sensoz ได้ทดลองผลิตน้ำมันชีวภาพด้วยการไพโรไลซิส กากเมล็ดดอกคำฝอย (SPC) โดยใช้การวิเคราะห์ธาตุและค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพ ส่วนสารประกอบทางเคมีของน้ำมันชีวภาพ จะตรวจโดยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี-แมสสเปกโตรสโกปี, NMR, FTIR และ GC สมบัติทางเชื้อเพลิง

ของน้ำมันชีวภาพได้แก่ ความหนืด จูควาไฟฟ้า ความหนาแน่น ปริมาณน้ำและค่าการระเหย ผลจากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางเชื้อเพลิงพบว่า น้ำมันชีวภาพที่ได้จากกากเมล็ดดอกคำฝอย มีความสะอาดและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เหมาะสำหรับการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงต่อไป



บทที่ 3

วิธีการทำวิจัย

3.1 วัสดุและอุปกรณ์

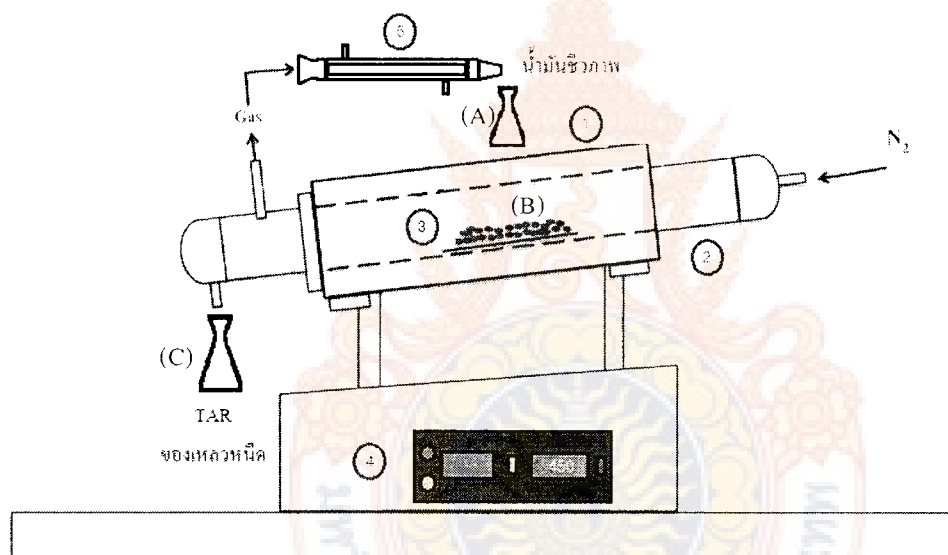
3.1.1 เมล็ดยางพาราจาก จังหวัดเลย

3.1.2 เตาอบ ยี่ห้อ Memmert

3.1.3 ตะแกรง ยี่ห้อ Retsch ASTM E11 เบอร์ 8, 10, 14 และ 20

3.1.4 เครื่องชั่งยี่ห้อ Pioneer รุ่น OHAUS

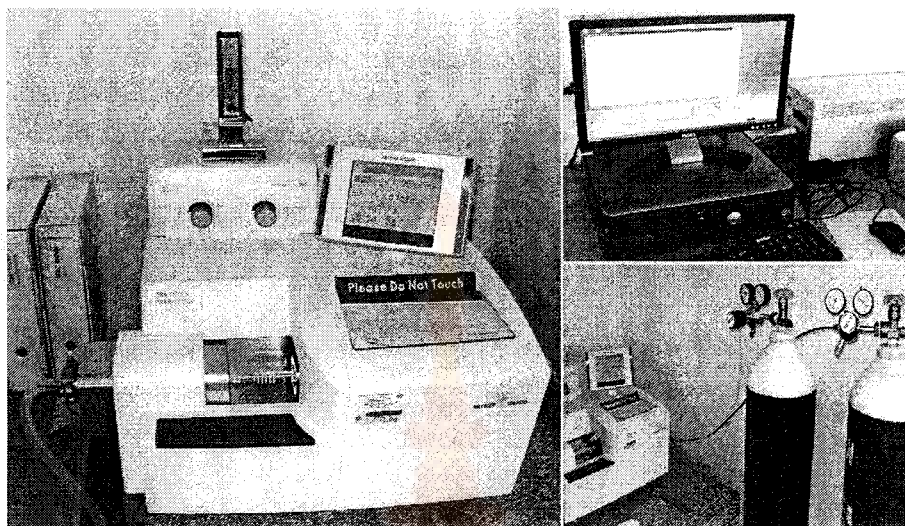
3.1.5 ชุดทดลองกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนดังรูป ที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ชุดทดลองการแยกสลายด้วยความร้อน

1. เตาเผา (Tube furnace)
2. ท่อเผา
3. เปลือกหรือกากเมล็ดยางพารา
4. เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Controller)
5. ตัวควบแน่นสาร (Condenser)

3.1.6 เครื่อง Thermo gravimetric Analysis, TGA ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น TGA/DSC1 ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 Thermo gravimetric Analysis

3.1.7 เครื่อง Elemental Analyzer (EA) (CHNS/O Analyzer) ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น PE2400 Series II



รูปที่ 3.3 Elemental Analyzer

3.1.8 เครื่องวิเคราะห์จุดความไฟ (Flash point tester)



รูปที่ 3.4 เครื่องวิเคราะห์จุดความไฟ

3.1.9 เครื่องวิเคราะห์ค่าความร้อน (Calorimeter) ยี่ห้อ Parr รุ่น 6200



รูปที่ 3.5 เครื่องวิเคราะห์ค่าความร้อน

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 การเตรียมวัตถุดิบ

3.2.1.1 อบเปลือกและกากเมล็ดยางพารา 1 ชั่วโมง อุณหภูมิ 110°C ในตู้อบ ให้มีความชื้นน้อยกว่าร้อยละ 5

3.2.1.2 นำเปลือกเมล็ดยางพาราที่ผ่านการอบแล้วไปทำการย่อยขนาดด้วยเครื่อง Cutting Machine

3.2.1.3 คัดขนาดเปลือกเมล็ดยางพาราโดยใช้ตะแกรง ยี่ห้อ Retsch ASTM E11 เบอร์ 8, 10, 14 และ 20

3.2.1.4 นำเปลือกและกากเมล็ดยางพาราไปวิเคราะห์หาค่าการสลายตัวทางความร้อนด้วยเครื่อง Thermo gravimetric Analysis

3.2.2 การย่อยสลายด้วยความร้อน

3.2.2.1 นำเปลือกเมล็ดยางพาราขนาด 2.18 mm ใส่ในชุดทดลอง จำนวน 100 กรัม

3.2.2.2 ประกอบชุดทดลอง

3.2.2.3 เปิดแก๊สไนโตรเจนด้วยอัตราการไหลที่ 50 mL/min

3.2.2.4 เปิดเตาเผาที่อุณหภูมิ 300°C

3.2.2.5 หลังจาก 1 ชั่วโมงให้เก็บตัวอย่างน้ำมัน ทาร์ และชาร์ ใส่ในขวดสีชา

3.2.2.6 คำนวณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์และบันทึกผลการทดลอง

3.2.2.7 ทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 3.2.2.1-3.2.2.6 โดยเปลี่ยนขนาดเปลือกเมล็ดยางพาราเป็น 1.13 mm เปลี่ยนอัตราการไหลของไนโตรเจนเป็น 100 และ 200 mL/min และเปลี่ยนอุณหภูมิเตาเผาเป็น 350, 400 และ 450°C

3.2.2.8 ทดลองซ้ำกับกากของเมล็ดยางพาราตั้งแต่ข้อ 3.2.2.1-3.2.2.6 โดยมีตัวแปรที่ศึกษาคือ อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่ 50, 100 และ 200 mL/min และอุณหภูมิเตาเผาเป็น 300, 350, 400 และ 450°C

3.2.3 การเก็บตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้จากการทดลอง

จากรูปที่ 3.1 สารตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้มี 3 ส่วน คือ

(1) น้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) เป็นของเหลวที่ได้จากการควบแน่น ณ ตำแหน่ง (A)

(2) ชาร์ (Char) เป็นของแข็งที่อยู่ภายในเตาเผา ณ ตำแหน่ง (B)

(3) น้ำมันหนัก (Tar) เป็นของเหลวที่มีความหนืด เก็บได้จากปลายท่อด้านล่างของเตาเผา ณ ตำแหน่ง (C)

3.3 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

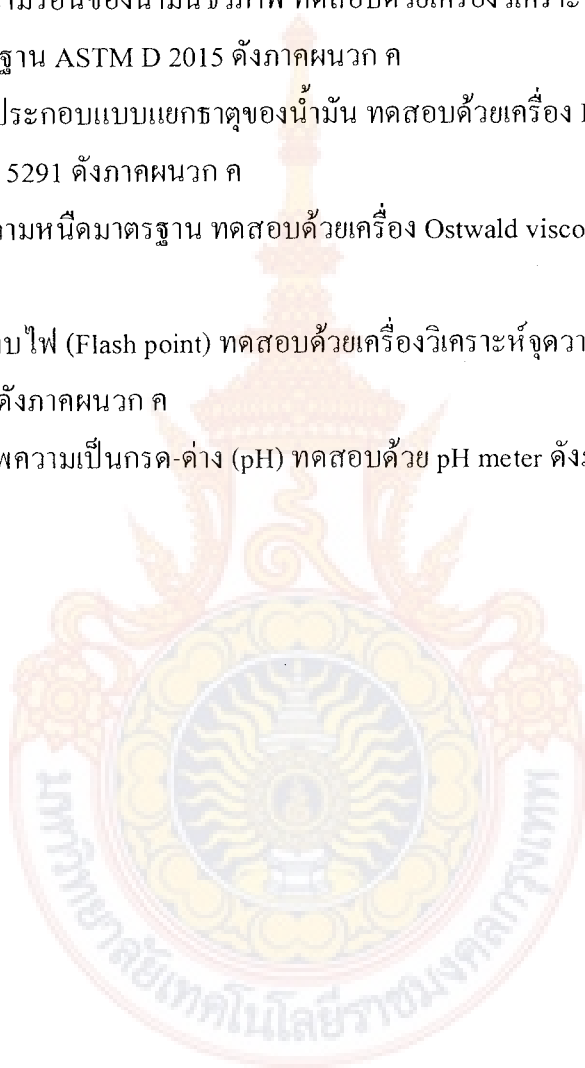
3.3.1 วิเคราะห์ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพ ทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ค่าความร้อน (Calorimeter) ตามมาตรฐาน ASTM D 2015 ดังภาคผนวก ค

3.3.2 วิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุของน้ำมัน ทดสอบด้วยเครื่อง Elemental Analyzer (EA) ตามมาตรฐาน ASTM D 5291 ดังภาคผนวก ค

3.3.3 วิเคราะห์ค่าความหนืดมาตรฐาน ทดสอบด้วยเครื่อง Ostwald viscometer ตามมาตรฐาน ASTM D 445 ดังภาคผนวก ค

3.3.4 วิเคราะห์จุดวาบไฟ (Flash point) ทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์จุดวาบไฟ (Flash point tester) มาตรฐาน ASTM D 92 ดังภาคผนวก ค

3.3.5 วิเคราะห์สภาพความเป็นกรด-ด่าง (pH) ทดสอบด้วย pH meter ดังภาคผนวก ค

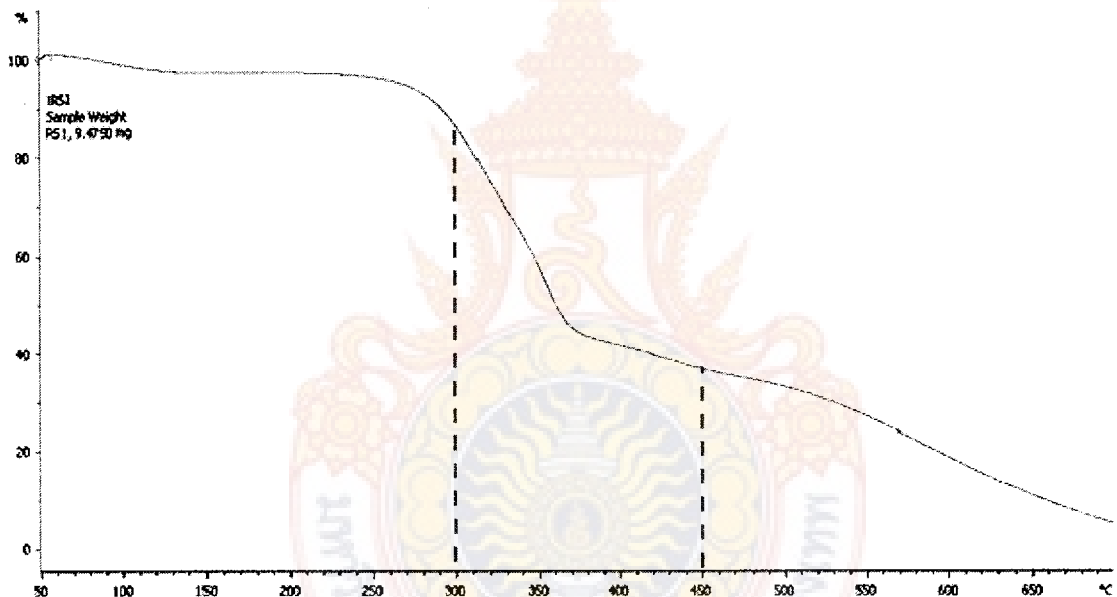


บทที่ 4

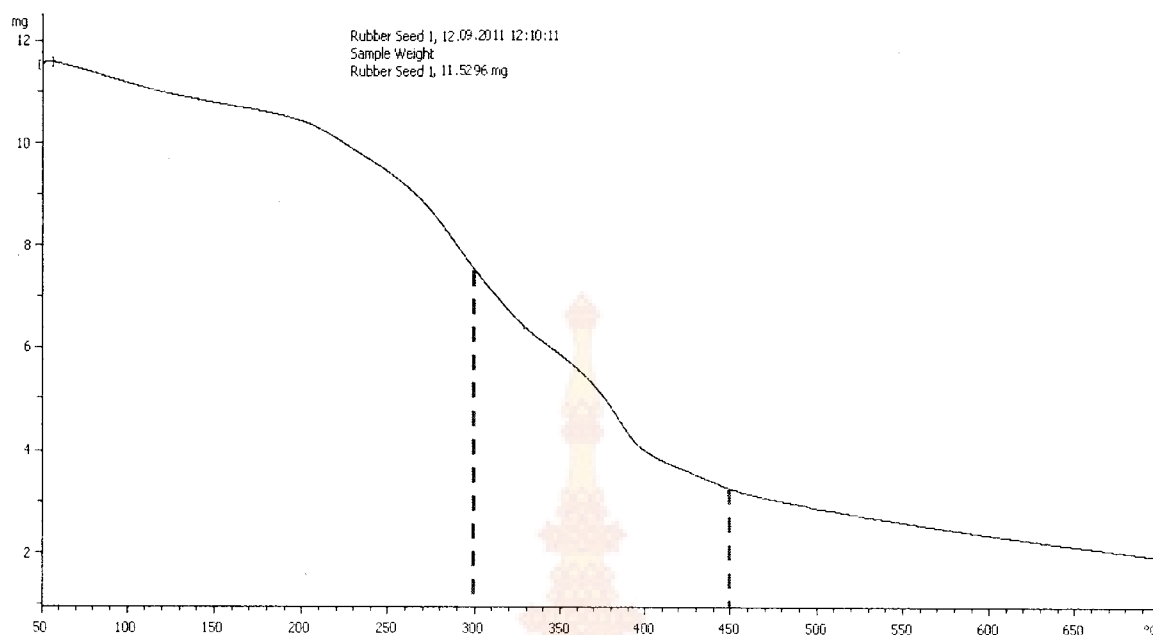
ผลการวิจัย

4.1 การศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของเปลือกและกากเมล็ดยางพาราด้วยเครื่อง TGA

เมื่อนำเปลือกและกากจากเมล็ดยางพารามาวิเคราะห์การสลายตัวของสารด้วยความร้อนโดยเครื่อง TGA (Thermo gravimetric analysis) ภายใต้ความดันบรรยากาศไนโตรเจน อัตราการให้ความร้อน $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ พบว่าเปลือกเมล็ดยางพาราเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิ 300°C และสลายตัวอย่างรวดเร็วจนถึงอุณหภูมิ 350°C ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ส่วนกากของเมล็ดยางพาราพบว่าเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิ 300°C และสลายตัวอย่างรวดเร็วจนถึงอุณหภูมิ 450°C ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 การสลายตัวของเปลือกเมล็ดยางพารา

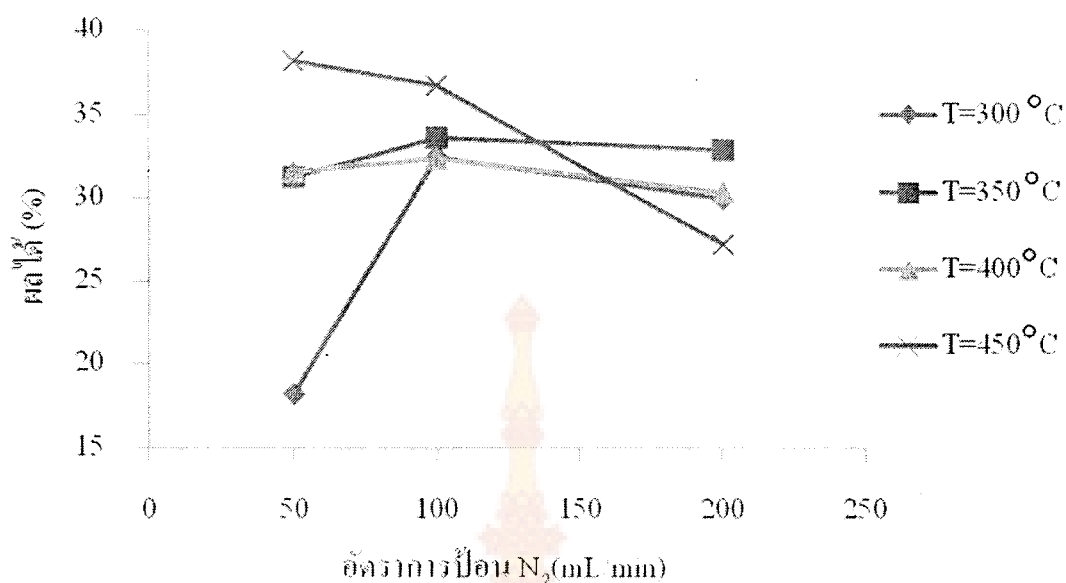


รูปที่ 4.2 การสลายตัวของกากเมล็ดยางพารา

จากข้อมูลของ TGA ทำให้เห็นว่าการสลายตัวของเปลือกและกากของเมล็ดยางพาราจะมีความชัดเจนที่อุณหภูมิ 300 - 450°C และที่อุณหภูมิดังกล่าวเป็นอุณหภูมิขั้นทุติยภูมิเป็นอุณหภูมิที่ชีวมวลสลายตัวเป็นสารระเหยที่อุณหภูมิในช่วงนี้มาก ดังนั้นในการทดลองต่อไปจึงเลือกช่วงอุณหภูมิดังกล่าวนี้เพื่อศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อปริมาณน้ำมันชีวภาพที่ผลิตได้

4.2 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อปริมาณน้ำมันชีวภาพ

จากการศึกษาอุณหภูมิที่มีผลต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ จากการไพโรไลซิสเปลือกเมล็ดยางพาราที่มีขนาดอนุภาค 2.18 mm จะได้รับร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ดังรูปที่ 4.3

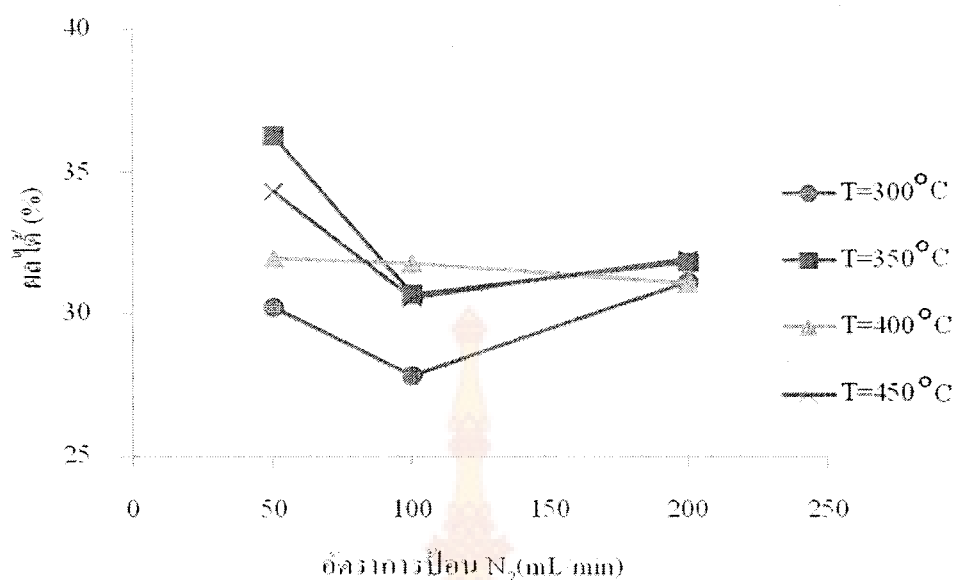


รูปที่ 4.3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพจากเปลือกเมล็ดยางพารา

จากรูปที่ 4.3 ผลจากกระบวนการไพโรไลซิส ในช่วง 300 - 450°C แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหล N₂ ส่งผลให้เกิดผลได้ของผลิตภัณฑ์หรือน้ำมันชีวภาพน้อยลงอันเนื่องมาจากการเข้าไปรบกวนการถ่ายเทความร้อนภายในปฏิกรณ์มากเกินไป โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 300°C ความร้อนที่ให้แก่ระบบยังไม่เพียงพอต่อการสลายตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ที่อยู่ในรูปของสารระเหยทำให้เกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ปริมาณของถ่านจึงเหลือมาก เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 450°C พบว่าผลิตภัณฑ์เพิ่มมากขึ้น แต่ปริมาณถ่านลดลงเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้เกิดการแตกตัวของสารระเหยจากเปลือกเมล็ดยางพาราเกิดขึ้นได้ดี ส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดไปข้างหน้า ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวเพิ่มขึ้น (กิริติณัฐ ธนกิจธรรมกุล, 2553)

ที่อุณหภูมิ 450°C เป็นอุณหภูมิที่ให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์สูงสุดที่ 38.22 จึงเลือกใช้อุณหภูมินี้ในการไพโรไลซิสต่อไป

จากการศึกษาอุณหภูมิที่มีผลต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ จากการไพโรไลซิสกากของเมล็ดยางพารา จะได้อัตราผลได้ของผลิตภัณฑ์ดังรูปที่ 4.4

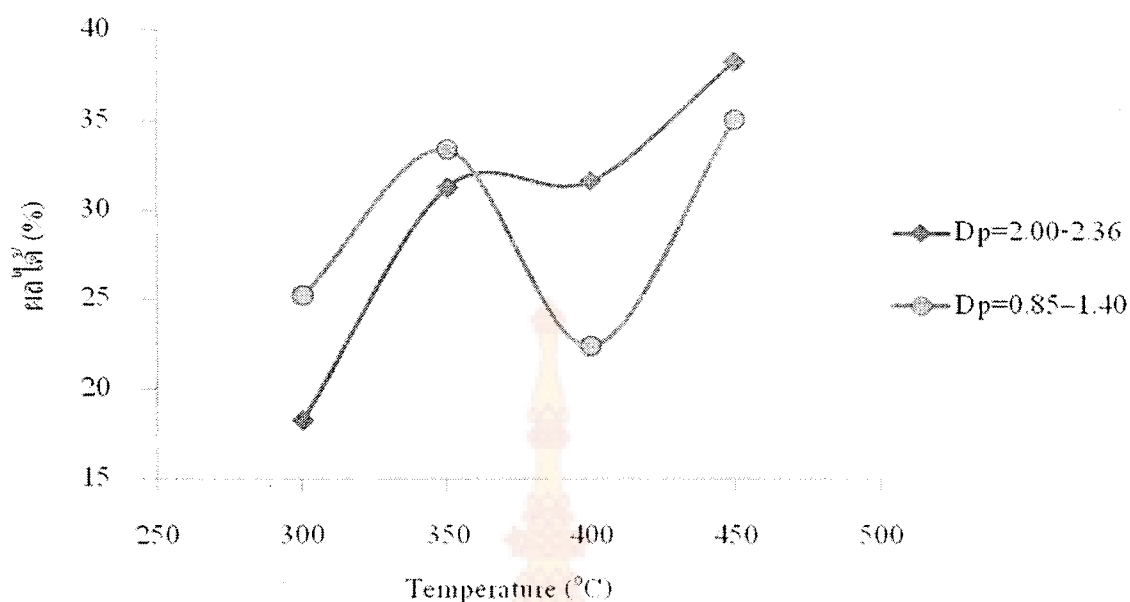


รูปที่ 4.4 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อร้อยละผลได้น้ำมันชีวภาพจากกากเมล็ดยางพารา

จากรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าการไพโรไลซิสกากเมล็ดยางพาราคืออุณหภูมิที่ 350°C อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 mL/min จะทำให้เกิดน้ำมันชีวภาพปริมาณมากที่สุดคือร้อยละ 36.30 มีถ่านร้อยละ 20.90 และน้ำมันหนักร้อยละ 18.15 ซึ่งอุณหภูมิที่เหมาะสมของกากนี้จะต่ำกว่าของส่วนเปลือกด้วยเหตุผลของความแข็งแรงพื้นฐานของวัสดุ ทำให้ในส่วนกากไม่มีความจำเป็นต้องใช้อุณหภูมิสูงเท่ากับส่วนเปลือก อย่างไรก็ตามทั้งสองส่วนยังคงต้องใช้อัตราการไหลของไนโตรเจนที่เท่ากันคือ 50 mL/min ที่ดูเหมือนว่า ณ อัตราการไหลนี้จะทำให้ระบบการย่อยสลายคงที่และเป็นผลดีต่อการเกิดผลิตภัณฑ์

4.3 ผลของขนาดอนุภาคที่มีต่อปริมาณน้ำมันชีวภาพ

จากการศึกษาผลของขนาดอนุภาคที่มีผลต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์โดยศึกษาที่อุณหภูมิ 300, 350, 400 และ 450°C อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 L/min ได้ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ โดยในการทดลองส่วนนี้จะมีผลเฉพาะในส่วนเปลือกยางพาราเท่านั้น เนื่องจากในส่วนกากนั้นมีลักษณะอ่อนนุ่มเนื่องจากผ่านกระบวนการบีบน้ำมันไปก่อนหน้านี้แล้วจึงไม่สามารถแยกขนาดได้ ดังรูปที่ 4.5

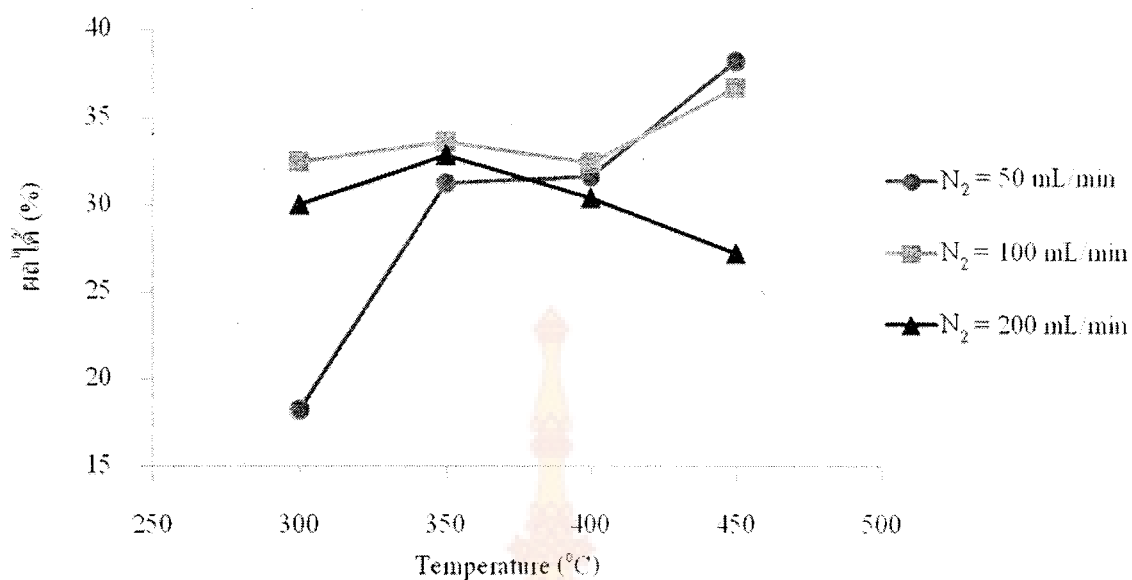


รูปที่ 4.5 ผลของขนาดอนุภาคที่มีต่อร้อยละผลได้น้ำมันชีวภาพ

จากรูปที่ 4.5 เป็นผลการศึกษาขนาดอนุภาคที่เหมาะสมที่ให้ร้อยละผลได้น้ำมันสูงสุด พบว่าขนาดอนุภาคขนาด 1.13 mm (0.85 – 1.40 mm) ที่อุณหภูมิ 450 °C ได้ปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ 35.03 เมื่อใช้ขนาดอนุภาค 2.18 mm (2.00 - 2.36 mm) จะได้ปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กกว่า จะมี Thermal resistance น้อยกว่า และเมื่อให้ความร้อนจนถึงขั้นทุติยภูมิ (Secondary cracking) จะทำให้ได้ปริมาณแก๊สสูงขึ้น แต่อาจจะเป็น Uncondensable gas ซึ่งทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ของเหลวน้อยกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ (สุพจน์ แหวนเพชร, 2552) ขนาดอนุภาค 2.18 mm เป็นขนาดอนุภาคที่ให้น้ำมันชีวภาพสูงสุดที่ร้อยละ 38.22 จึงเป็นขนาดอนุภาคที่เหมาะสมในระบบการไพโรไลซิสนี้

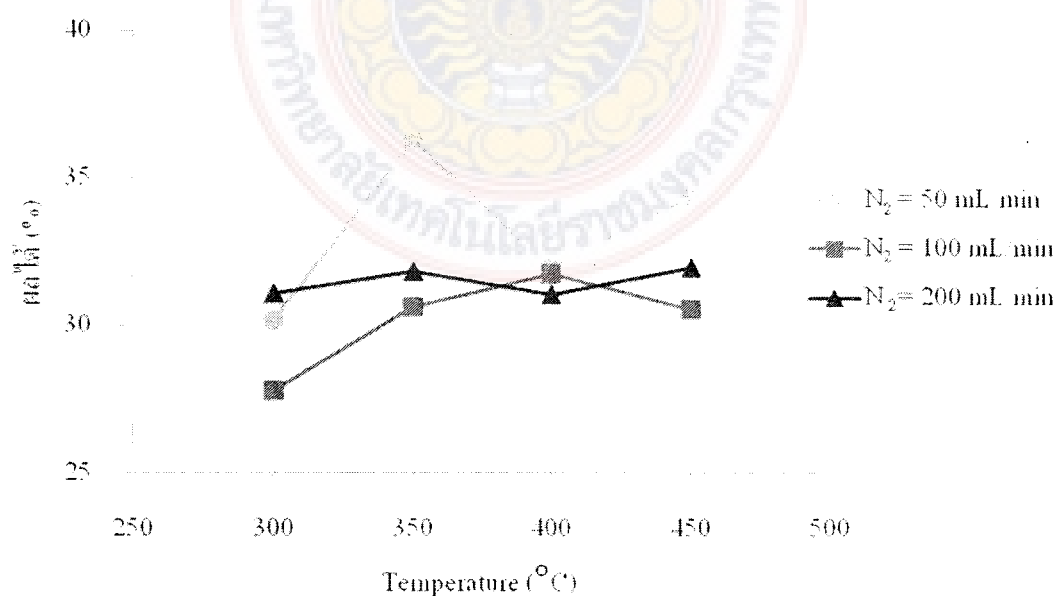
4.4 ผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่มีต่อปริมาณน้ำมันชีวภาพ

จากการศึกษาอัตราการไหลแก๊สไนโตรเจนที่มีผลต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์โดยการศึกษาที่อุณหภูมิ 300, 350, 400 และ 450 °C ขนาดอนุภาคเปลือกเมล็ดยางพาราในช่วง 2.18 mm จะได้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่มีต่อร้อยละผลได้น้ำมันชีวภาพจากเปลือกเมล็ดยางพารา

จากรูปที่ 4.6 พบว่าอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่สูงจะขจัดสารระเหยที่อยู่ในรูปของแก๊สที่ควบแน่น (Condense gases) ต่าง ๆ ออกจากระบบได้เร็วทำให้สารระเหยสลายตัวยังไม่สมบูรณ์ ทำให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพลดน้อยลง ขณะเดียวกันที่อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนต่ำจะขจัดสารระเหยแก๊สออกจากระบบได้ช้าทำให้เกิดปฏิกิริยาการแตกตัวขั้นทุติยภูมิได้อีกทำให้ได้แก๊สมากขึ้น อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่ 50 mL/min ให้ร้อยละของน้ำมันชีวภาพสูงสุดที่ 38.22 ที่อุณหภูมิ 450 °C จึงเป็นอัตราการไหลที่เหมาะสมในระบบการไพโรไลซิสนี้



รูปที่ 4.7 ผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่มีต่อร้อยละผลได้น้ำมันชีวภาพจากกากเมล็ดยางพารา

จากการไพโรไลซิสเปลือกเมล็ดยางพาราโดยทำการศึกษาภาวะที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ช่วงอุณหภูมิ ขนาดของอนุภาค และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน เห็นว่าภาวะที่เหมาะสมคือ อุณหภูมิที่ 450°C อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 mL/min และขนาดอนุภาคในช่วง $2.00 - 2.36\text{ mm}$ ให้ปริมาณน้ำมันชีวภาพร้อยละ 38.22 ถ่านร้อยละ 18.93 และ น้ำมันหนักร้อยละ 6.59

และจากรูปที่ 4.7 ภาวะที่เหมาะสมในการไพโรไลซิสกากเมล็ดยางพาราที่อุณหภูมิที่ 350°C อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 mL/min จะได้ปริมาณน้ำมันชีวภาพร้อยละ 36.30 ถ่านร้อยละ 20.90 และ น้ำมันหนักร้อยละ 18.15

4.5 สมบัติทางเชื้อเพลิงและองค์ประกอบธาตุของน้ำมันชีวภาพ

น้ำมันชีวภาพจากเปลือกเมล็ดยางพาราที่เตรียมได้จากภาวะอุณหภูมิที่ 450°C อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 mL/min และขนาดอนุภาคในช่วง 2.18 mm ถูกนำไปวิเคราะห์หาค่าความร้อน พบว่าน้ำมันชีวภาพที่ได้จากเปลือกเมล็ดยางพารามีค่าความร้อน 22.11 MJ/kg ซึ่งใกล้เคียงกับน้ำมันชีวภาพในงานวิจัยอื่นแต่มีค่าความร้อนที่ต่างจากน้ำมันดีเซล อาจเป็นเพราะว่ามีน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่ในปริมาณมาก จึงต้องผ่านการกลั่นการแยกน้ำออกที่อุณหภูมิ 200°C ก่อน ส่วนน้ำมันชีวภาพจากกากของเมล็ดยางพาราที่เตรียมได้จากอุณหภูมิ 350°C อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 mL/min นำไปวิเคราะห์หาค่าความร้อนพบว่าน้ำมันชีวภาพจากเปลือกเมล็ดยางพารามีค่าความร้อน 37.76 MJ/kg ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับน้ำมันชีวภาพและน้ำมันไบโอดีเซล ค่าความหนืด (Viscosity) มีค่าที่แตกต่างจากน้ำมันดีเซลแต่มีค่าใกล้เคียงกับน้ำมันชีวภาพที่ได้จากงานวิจัยอื่น ส่วนค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำมันชีวภาพจากเปลือกเมล็ดยางพาราอยู่ที่ 2.36 และน้ำมันชีวภาพจากกากเมล็ดยางพาราอยู่ที่ 7.88 ขณะที่น้ำมันชีวภาพจากงานวิจัยอื่นมีค่าความเป็นกรดอยู่ที่ 3-4 จะเห็นได้ว่าน้ำมันที่ได้นี้อยู่ในภาวะที่เป็นกรดแต่ในส่วนของเนื้ออยู่ในภาวะที่เป็นด่าง โดยทั่วไปจุดควบไฟของน้ำมันชีวภาพจะอยู่ในช่วง $40-70^{\circ}\text{C}$ (Lu Quiang, 2005: 191-198) ซึ่งน้ำมันชีวภาพจากเปลือกเมล็ดยางพาราที่สังเคราะห์ได้มีจุดควบไฟที่ 70°C ส่วนของน้ำมันชีวภาพจากกากเมล็ดยางพารามีจุดควบไฟที่ 87°C ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันชีวภาพ

คุณสมบัติทางเชื้อเพลิง	น้ำมันชีวภาพ							น้ำมันไบโอดีเซล	น้ำมันดีเซล
	เปลือกเมล็ด ยางพารา	กากเมล็ด ยางพารา	Rapeseed [1]	Soybean [2]	ผักตบชวา [3]	ฟางข้าว [4]	กากกาแฟ [5]	[6]	[3]
ค่าความหนืดที่ 40°C (cts)	2.071	23.175	36	72.38	0.73	0.81	29	3.5-5.0	5
pH	2.36	7.88	3.2	-	3-4	3.34	4.22	-	-
จุดวาบไฟ (°C)	70	87	75	63	76	72	127	> 120	50
ค่าความร้อน (MJ/kg)	22.11	37.76	37.9	33.6	31	28.20	33.14	38.55-39.94	45

ที่มา : [1] O. Onay. 2006: 1921-1928

[2] S. Sensoz. 2006: 99-105

[3] สุพจน์ แหวนเพชร. 2552

[4] กิรติณัฐ ชนกิจธรรมกุล. 2553

[5] จุฑารัตน์ กปิตถัย และ ต้องตา เกตุแก้ว. 2553

[6] W.F.Fassinou et all. 2010: 4949-4954

ตารางที่ 4.2 ธาตุองค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพจากชีวมวลที่ต่างชนิดกัน

ธาตุ	เปลือกเมล็ด ยางพารา	กากเมล็ด ยางพารา	Rapeseed [25]	Soybean [30]	ผักตบชวา [12]	ฟางข้าว [2]
C (wt%)	55.14	76.96	72.80	67.89	78.00	62.02
H (wt%)	6.74	10.76	10.80	7.77	8.00	8.66
N (wt%)	0.24	4.24	3.30	10.84	0.32	0.33

หมายเหตุ ที่มาเช่นเดียวกับตารางที่ 4.1

จากตารางที่ 4.2 พบว่าอัตราส่วนของคาร์บอนและไฮโดรเจนของน้ำมันชีวภาพจากเปลือกและกากของเมล็ดยางพารามีค่าที่แตกต่างกับน้ำมันชีวภาพที่ได้จากงานวิจัยอื่น ทำให้ค่าความร้อนที่ได้แตกต่างกัน จากการที่นำน้ำมันชีวภาพไปวิเคราะห์ธาตุทำให้สามารถหาสูตรอย่างง่ายโดยการคำนวณในที่ไม่ได้หาค่าออกซิเจน (ดังภาคผนวก ข) แต่จากการศึกษาจากงานวิจัยของ Ozlem Onay และ O.Mete Kockar ที่ทำการผลิตน้ำมันชีวภาพจาก Rapeseed ผลรวมของธาตุ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ในไตรเจน มีค่าเท่ากับร้อยละ 100 โดยน้ำหนัก ดังนั้นค่าออกซิเจนที่ไม่ได้ทำการตรวจมา จึงได้มาจากการนำผลรวมของธาตุ คาร์บอน ไฮโดรเจน ในไตรเจน ไปลบกับร้อยละ 100 โดยน้ำหนัก ทำให้ได้ค่าออกซิเจน เท่ากับร้อยละ 37.88 โดยน้ำหนัก จึงสามารถทำให้หาสูตรอย่างง่ายของน้ำมันชีวภาพจากเปลือกและกากของเมล็ดยางพารา ตามลำดับได้ดังนี้ $\text{CH}_{1.467} \text{N}_{0.004} \text{O}_{0.515}$ และ $\text{CH}_{1.678} \text{N}_{0.047} \text{O}_{0.078}$ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Ozlem Onay และ O.Mete Kockar พบว่าสูตรอย่างง่ายของน้ำมันชีวภาพจะมีสูตร ดังนี้ $\text{CH}_{1.82} \text{N}_{0.07} \text{O}_{0.16}$

นอกจากนี้คณะวิจัยยังได้ทดลองนำน้ำมันชีวภาพทั้งสองชนิดที่ผลิตได้จากการทดลองนี้ไปทดสอบการเผาไหม้พบว่าน้ำมันทั้งสองชนิดสามารถถูกไหม้เป็นเปลวไฟได้พร้อมทั้งมีการคายความร้อนออกมา อย่างไรก็ตามการสังเกตเบื้องต้นพบว่าขณะที่มีการเผาไหม้น้ำมันทั้งสองชนิดจะมีปริมาณเขม่าเกิดขึ้นปานกลาง ซึ่งทำให้อาจต้องมีขั้นตอนการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันก่อนการนำไปใช้งานด้านอื่นๆ ต่อไป



บทที่ 5

สรุปผลการทำวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทำวิจัย

5.1.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TGA แสดงให้เห็นว่าเปลือกและกากของเมล็ดยางพาราจะมีการสลายโครงสร้างของแข็งอย่างชัดเจนในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ $300 - 350^{\circ}\text{C}$ และ $300 - 450^{\circ}\text{C}$ ตามลำดับ

5.1.2 สภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดน้ำมันชีวภาพจากเปลือกเมล็ดยางพาราได้แก่สภาวะที่ อุณหภูมิการไพโรไลซิสที่ 450°C ขนาดอนุภาคเท่ากับ 2.18 mm และอัตราการไหลในโตรเจนเท่ากับ 50 mL/min โดย ณ สภาวะนี้จะได้ปริมาณน้ำมันชีวภาพมากที่สุดที่ร้อยละ 38.22 เนื่องจากเป็นสภาวะที่ส่งเสริมการแตกตัวของสารระเหยได้ดี ทำให้ปฏิกิริยาเกิดไปข้างหน้าและได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวเพิ่มขึ้น

5.1.3 สภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดน้ำมันชีวภาพจากกากเมล็ดยางพาราได้แก่สภาวะที่อุณหภูมิการไพโรไลซิสที่ 350°C และอัตราการไหลในโตรเจนเท่ากับ 50 mL/min โดย ณ สภาวะนี้จะได้ปริมาณน้ำมันชีวภาพมากที่สุดที่ร้อยละ 36.30 ด้วยเหตุผลเช่นเดียวกับในส่วนเปลือกของเมล็ดยางพารา

5.1.4 จากการวิเคราะห์สมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันชีวภาพจากเปลือกเมล็ดยางพาราที่ผลิตได้พบว่ามีความร้อนเท่ากับ 22.11 MJ/kg ค่าความหนืดมีค่าเท่ากับ 2.071 cSt ค่าความเป็นกรด (pH) เท่ากับ 2.36 และจุดวาบไฟมีค่าเท่ากับ 70°C ส่วนสมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันชีวภาพจากกากเมล็ดยางพารามีค่าความร้อนเท่ากับ 37.76 MJ/kg ค่าความหนืดมีค่าเท่ากับ 23.175 cSt ความเป็นกรด (pH) เท่ากับ 7.88 และจุดวาบไฟมีค่าเท่ากับ 87°C ซึ่งใกล้เคียงกับน้ำมันชีวภาพจากวัสดุธรรมชาติชนิดอื่น

5.1.5 จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ พบว่าน้ำมันชีวภาพจากเปลือกเมล็ดยางพาราประกอบด้วยสัดส่วนโดยน้ำหนักของคาร์บอนร้อยละ 55.14 ไฮโดรเจนร้อยละ 6.74 ไนโตรเจนร้อยละ 0.24 ส่วนน้ำมันชีวภาพจากกากเมล็ดยางพาราประกอบด้วยสัดส่วนโดยน้ำหนักของคาร์บอนร้อยละ 76.96 ไฮโดรเจนร้อยละ 10.76 และไนโตรเจนร้อยละ 4.24

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 น้ำมันชีวภาพที่ผลิตได้ สามารถเผาไหม้ได้แต่มีปริมาณเขม่าเกิดขึ้นระดับปานกลาง ซึ่งอาจต้องเพิ่มขั้นตอนปรับปรุงคุณภาพก่อนการนำไปใช้โดยตรง

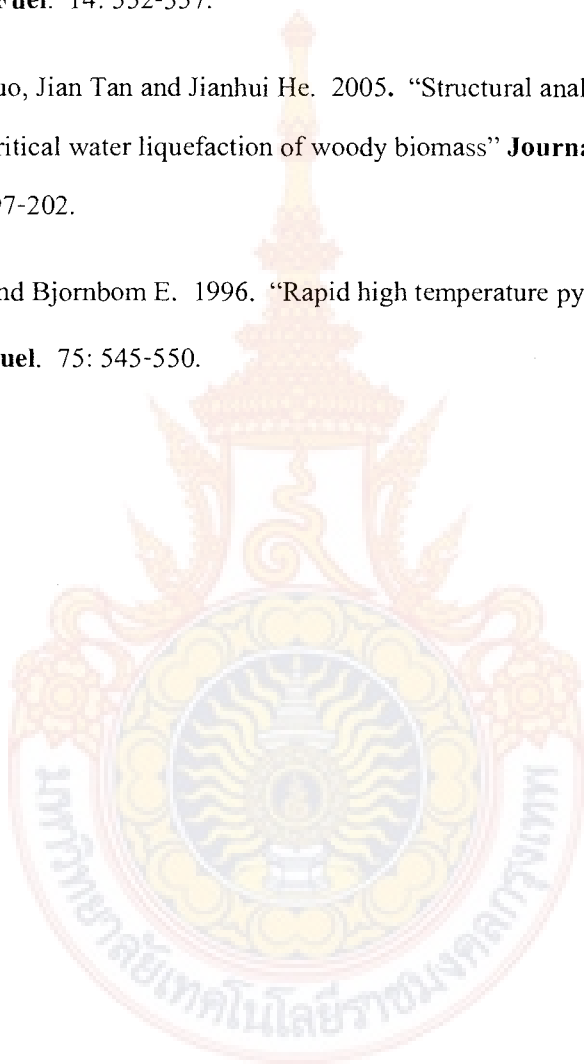
5.2.2 นอกจากน้ำมันชีวภาพที่ผลิตได้แล้ว ในกระบวนการยังได้ถ่าน (Charcoal) และน้ำมันหนัก (TAR) เป็นผลิตภัณฑ์อีกด้วย จึงควรทำการวิจัยเพิ่มเติมกับวัสดุทั้งสองชนิดดังกล่าวต่อไป

บรรณานุกรม

- กীরติณัฐ ชนกิจธรรมกุล. 2553. การผลิตน้ำมันชีวภาพจากฟางข้าวโดยไพโรไลซิส. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- จุฑารัตน์ กปิตถัย และ ต้องตา เกตุแก้ว. 2553. การผลิตน้ำมันชีวภาพจากกากกาแฟโดยใช้กระบวนการแยกสลายด้วยความร้อน. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ.
- รุ่งรวี เพียรสุผล และ ขนิษฐา จงเกษมวงศ์. 2552. การผลิตน้ำมันชีวภาพจากผักตบชวาโดยกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วรรณรัตน์ ชาญนุกูล. 2552. นโยบายพลังงาน. กรุงเทพมหานคร: กระทรวงพลังงาน.
- ศูนย์ค้นคว้าและพัฒนาวิชาการอาหารสัตว์. 2550. “หมักมันสำปะหลัง” สถาบันสุวรรณจากกลกิจ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สุพจน์ แหวนเพชร. 2552. การผลิตไบโอดีเซลจากผักตบชวาโดยการไพโรไลซิสแบบเร็ว. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อุสาค์ บุญบำรุง. 2546. พลังงานชีวมวล: แหล่งพลังงาน. สำนักงานงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย.
- Basak Burcu Uzun, Esin Apaydin-Varol, Funda Ates, Nurgul Ozbay and Ayse Eyse Eern Putun. 2009. “Synthetic fuel production from tea waste: Characterization of bio-oil and bio-char” **Journal of Fuel**. (September): 176-184.
- Boateng A.A., Jung H.G. and Adler P.R. 2006. “Pyrolysis of energy crops including alfalfa stems, reed canarygrass” **Journal of Fuel**. 85: 2450-2457.
- Bridgewater, A.V. and Bridge, S.A. 1991. “In Biomass Pyrolysis Liquids Upgrading and Utilization” **Elsevier Applied Science**. 11.
- Hyun Ju Park, Jong-In Dong, Jong-Ki Jeon, Young-Kwon Park, Kyung-Seun Yoo, Seung-Soo Kimd, Jinsoo Kime and Seungdo Kimf. 2007. “Effects of the operating parameters on the production of bio-oil in the fast pyrolysis of Japanese larch” **Journal of Chemical Engineering**. (December): 124-132.

- M. Asadullah, M.A. Rahman, M.M. Ali, M.S. Rahman, M.A. Motin, M.B. Sultan, M.R. Alam. 2007. "Production of bio-oil from fixed bed pyrolysis of bagasse" **Fuel**. (March): 2514-2520.
- Maniatis K. and A. Buekens. 1998. "Fast pyrolysis of biomass" **Great Britain Science**. 179-189.
- Mohan D., Pittman C. and Steele P.H. 2006. "Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: a critical review" **Energy and Fuel**. 20: 848-889.
- Murat Ertas and M. Hakkı Alma. 2010. "Pyrolysis of laurel (*Laurus nobilis* L.) Extraction residues in a fixed-bed reactor: Characterization of bio-oil and bio-char" **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**. (February): 22-29.
- Olofsson I., Nordia A. and Soderlind U. 2005. "Initial review and evaluation of process technologies and systems suitable for cost-efficient medium-scale gasification for biomass to liquids fuels" **ETPC Report**.
- Ozlem Onay and O. Mete Kockar. 2006. "Pyrolysis of rapeseed in a free fall reactor for production of bio-oil" **Journal of Fuel**. (April): 1921-1928.
- Ronghai He, X. Philip Ye, Burton C. English and Justinus A. Satrio. 2009. "Influence of pyrolysis condition on switch grass bio-oil yield and physicochemical properties" **Journal of Bioresource Technology**. (June): 5305-5311.
- Sevgi Sensoz and Dilek Angin. 2007. "Pyrolysis of safflower (*Charthamus tinctorius* L.) Seed press cake in a fixed-bed reactor: Part 2. Structural characterization of pyrolysis bio-oils" **Journal of Bioresource Technology**. (December): 5488-5504.
- Sevgi Sensoz and Ilke Kaynar. 2005. "Bio-oil production from soybean (*Glycine max* L.); fuel properties of Bio-oil" **Journal of Industrial Crops and Products**. (April): 99-105.
- Tanaka H., Putalum W., Tsuzuki C., Shoyama Y., Seebauer V., Pctek J. and Staudinger G. 1997. "Effect of particles size, heating rate and pressure on measurement of pyrolysis kinetic by thermo gravimetric analysis" **Fuel**. 20: 1277-1282.

- Wanignon Ferdinand Fassinou, Aboubakar Sako, Alhassane Fofana, Kamenan Blaise and Koua a, Siaka Toure. "Fatty acids composition as a means to estimate the high heating value (HHV) of vegetable oils and biodiesel fuels" **Journal of Energy**. (September): 4949-4954.
- Xianwen D., Chuangzhi W., Haibin Li. and Yong C. 2000. "The Fast pyrolysis of biomass in CFB reactor" **Energy Fuel**. 14: 552-557.
- Yejian Qian, Chengji Zuo, Jian Tan and Jianhui He. 2005. "Structural analysis of bio-oils from sub-and supercritical water liquefaction of woody biomass" **Journal of Energy**. (December): 197-202.
- Zanzi R., Sjostrom K. and Bjornbom E. 1996. "Rapid high temperature pyrolysis of biomass in a free fall" **Fuel**. 75: 545-550.



ภาคผนวก ก

ข้อมูลดิบการวิจัย

การศึกษาสภาวะในการผลิตน้ำมันชีวภาพจากเปลือกเมล็ดยางพารา

ตารางที่ ก.1 อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่ 50 mL/min และขนาดอนุภาค 2.18 mm

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหลของ ไนโตรเจน (mL/min)	น้ำมันชนิด (wt %)	น้ำมันชีวภาพ (wt %)	ถ่าน (wt %)
300	50	17.34	18.22	30.62
350	50	15.93	31.26	24.26
400	50	11.22	31.58	25.24
450	50	6.59	38.22	18.93

ตารางที่ ก.2 อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่ 100 mL/min และขนาดอนุภาค 2.18 mm

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหลของ ไนโตรเจน (mL/min)	น้ำมันชนิด (wt %)	น้ำมันชีวภาพ (wt %)	ถ่าน (wt %)
300	100	10.07	32.51	29.97
350	100	10.28	33.60	28.55
400	100	10.75	32.42	22.97
450	100	10.83	36.69	25.93

ตารางที่ ก.3 อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่ 200 mL/min และขนาดอนุภาค 2.18 mm

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหลของ ไนโตรเจน (mL/min)	น้ำมันชนิด (wt %)	น้ำมันชีวภาพ (wt %)	ถ่าน (wt %)
300	200	11.67	30.00	31.81
350	200	13.38	32.87	28.93
400	200	11.17	30.41	26.75
450	200	11.35	27.23	25.76

ตารางที่ ก.4 ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพที่ขนาดอนุภาค 2.18 mm อัตราการไหลของแก๊สใน ไตรเจนที่ 50 mL/min

อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	ค่าความร้อน (MJ/kg)
300	20.07
350	30.70
400	25.88
450	22.11

การศึกษาสภาวะในการผลิตน้ำมันชีวภาพจากกากเมล็ดยางพารา

ตารางที่ ก.5 อัตราการไหลของแก๊สใน ไตรเจนที่ 50 mL/min

อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	อัตราการไหลของ ไนโตรเจน (mL/min)	น้ำมันหนืด (wt %)	น้ำมันชีวภาพ (wt %)	ถ่าน (wt %)
300	50	17.47	30.21	23.46
350	50	18.15	36.3	20.90
400	50	16.4	31.95	19.57
450	50	17.48	34.35	20.14

ตารางที่ ก.6 อัตราการไหลของแก๊สใน ไตรเจนที่ 100 mL/min

อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	อัตราการไหลของ ไนโตรเจน (mL/min)	น้ำมันหนืด (wt %)	น้ำมันชีวภาพ (wt %)	ถ่าน (wt %)
300	100	20.69	27.80	22.08
350	100	20.43	30.66	21.45
400	100	16.9	31.78	20.33
450	100	14.15	30.56	20.07

ตารางที่ ก.7 อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่ 200 mL/min

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหลของ ไนโตรเจน (mL/min)	น้ำมันหนืด (wt %)	น้ำมันชีวภาพ (wt %)	ถ่าน (wt %)
300	200	19.81	31.11	22.69
350	200	16.05	31.84	21.02
400	200	16.02	31.07	20.41
450	200	16.74	31.98	20.27

ตารางที่ ก.8 ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพ ที่อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่ 50mL/min

อุณหภูมิ (°C)	ค่าความร้อน (MJ/kg)
300	38.33
350	37.76
400	36.79
450	37.88

ภาคผนวก ข

การคำนวณ

การคำนวณความหนืดตามมาตรฐาน ASTM D 445

สมการการหาความหนืด

$$\eta = D k t_{\text{average}} \quad (\text{ข.1})$$

- เมื่อ η = ความหนืดของสาร หน่วย N.s.m^{-2}
 k = ค่าคงที่ของอุปกรณ์การวัดมีค่า $8 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
 t_{average} = เวลาเฉลี่ยที่สารใช้ในการเคลื่อนที่ เท่ากับ 263 sec
 D = ความหนาแน่นของสาร หน่วย $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ หาค่าได้จาก $D = \frac{M}{V}$
 M = มวลของสาร หาได้จากนำสารปริมาตร 1mL ชั่งด้วยเครื่องชั่ง 4
ตำแหน่ง หน่วย kg
 V = ปริมาตรของสารที่นำไปชั่ง หน่วย m^3

ตัวอย่างการคำนวณ

น้ำหนักของน้ำมันชีวภาพที่ชั่งได้ในปริมาตร 1 mL คือ 0.0011585 kg

หาความหนาแน่นของน้ำมันชีวภาพ จากสูตร $D = \frac{M}{V}$

$$D = \frac{0.0011585 \text{ kg}}{10^{-6} \text{ m}^3} = 1158.5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

นำค่า D ที่ได้ไปแทนในสมการ ข.1

$$\eta = 1158.5 \times 8 \times 10^{-9} \times 263$$

$$= 0.0024 \frac{\text{kg}}{\text{m.s}}$$

$$= 0.0024 \frac{\text{N.s}}{\text{m}^2}$$

แปลงหน่วยเป็น Centistokes

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (\text{ข.2})$$

แทนค่า

$$\nu = \frac{0.0024}{1158.5} = 2.071 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$1 \text{ cSt} = 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} \nu &= 2.071 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \\ &= 2.071 \text{ cSt} \end{aligned}$$

การคำนวณสูตรโมเลกุลอย่างง่ายของน้ำมันชีวภาพจากเปลือกเมล็ดยางพารา

ตารางที่ ข.1 การคำนวณสูตรโมเลกุลอย่างง่ายของน้ำมันชีวภาพจากเปลือกเมล็ดยางพารา

ธาตุ	(wt %)	มวลโมเลกุล(MW)	โมล (molar)
C	55.14	12	4.595
H	6.74	1	6.740
N	0.24	14	0.017
O*	37.88	16	2.367

*เนื่องจากค่า O ไม่ได้ทำการวิเคราะห์หาค่า O ที่ได้มาจากการคำนวณ ดังนี้ คือนำค่า wt% ของธาตุ C H N มารวมกัน จะได้ 62.12 wt% นำผลรวมของธาตุ C H N ที่ได้ไปลบกับ 100 wt% ดังนั้นค่า O ที่ได้คือ 37.88 ยกตัวอย่างในการหาโมลของ C (โมลของ C = $55.14/12$ ดังนั้นโมลของ C จะมีค่าเท่ากับ 4.595 molar)

ตารางที่ ข.2 Molar ration ขององค์ประกอบในน้ำมันชีวภาพจากเปลือกเมล็ดยางพารา

สัดส่วนของธาตุ	molar ration
H/C	1.467
O/C	0.515
N/C	0.004

การหาค่า Molar ration ทำได้โดยนำโมลของ H หารด้วยโมลของ C (6.740/4.595) จะทำให้ได้ค่า 1.467 สัดส่วนของ O/C และ N/C หาเช่นเดียวกับค่า H/C ดังนั้นสูตรโมเลกุลอย่างง่ายของน้ำมันชีวภาพคือ $\text{CH}_{1.467}\text{N}_{0.004}\text{O}_{0.515}$

การหาสูตรโมเลกุลอย่างง่ายของน้ำมันชีวภาพจากกากเมล็ดยางพารา

ตารางที่ ข.3 การคำนวณสูตร โมเลกุลอย่างง่ายของน้ำมันชีวภาพจากกากเมล็ดยางพารา

ธาตุ	(wt %)	มวลโมเลกุล (MW)	โมล (molar)
C	76.96	12	6.413
H	10.76	1	10.760
N	4.24	14	0.303
O*	8.04	16	0.503

ตารางที่ ข.4 Molar ration ขององค์ประกอบในน้ำมันชีวภาพจากกากเมล็ดยางพารา

สัดส่วนของธาตุ	Molar ration
H/C	1.678
O/C	0.078
N/C	0.047

การหาค่า Molar ration ทำได้โดยนำโมลของ H หารด้วยโมลของ C (10.760/6.413) จะทำให้ได้ค่า 1.678 สัดส่วนของ O/C และ N/C หาเช่นเดียวกับค่า H/C ดังนั้นสูตรโมเลกุลอย่างง่ายของน้ำมันชีวภาพคือ $\text{CH}_{1.678}\text{N}_{0.047}\text{O}_{0.078}$

ภาคผนวก ค

เครื่องมือวิเคราะห์

ค.1 การวิเคราะห์ความหนืดของน้ำมัน ตามมาตรฐาน ASTM D 445

ความหนืดคือ การแสดงถึงความยากหรือง่ายในการที่ของเหลวอย่างหนึ่งจะสามารถไหลไปได้โดยตัวของมันเอง เช่น มีของเหลวอยู่สองชนิดที่มีอุณหภูมิเท่ากัน ชนิดหนึ่งไหลไปได้อย่างง่ายดายหรือเร็ว ในขณะที่อีกชนิดหนึ่งไหลไปได้อย่างเชื่องช้า เราจะพูดว่าของเหลวชนิดแรกมีความหนืดต่ำหรือน้อย ส่วนชนิดที่สองมีความหนืดสูง ดังนั้นจึงอาจให้คำจำกัดความอย่างง่าย ๆ ได้ว่า ความหนืด คือความสามารถในการต้านทานการไหลของเหลวใดที่มีความหนืดมากจะมีความสามารถในการต้านทานการไหลสูง ของเหลวใดที่มีความหนืดน้อยจะมีความสามารถในการต้านทานการไหลต่ำ วิธีหาความหนืดของน้ำมันใช้เครื่องมือที่เรียกว่า “Viscometer” ซึ่งเป็นการจับเวลาที่ของเหลวจำนวนหนึ่ง (น้ำมัน) ไหลผ่านรูมาตรฐานที่กำหนดไว้ ณ อุณหภูมิที่กำหนด Viscometer ที่ใช้ในการหาความหนืดมีอยู่หลายระบบด้วยกัน เช่น

- Saybolt Universal Viscometer มีหน่วยเป็น “SUS” ซึ่งย่อมาจาก Saybolt Universal Second หรือ Saybolt Furol Viscometer มีหน่วยเป็น “SFS” ย่อมาจาก Saybolt Furol Second นิยมใช้ในสหรัฐอเมริกา
- Redwood Viscometer มีหน่วยเป็น “Rw” นิยมใช้ในสหราชอาณาจักร
- Engler Viscometer มีหน่วยเป็น “E” นิยมใช้ในญี่ปุ่นและยุโรป
- Kinematic Viscometer มีหน่วยเป็น “cSt” เป็นระบบสากล

ปัจจุบันทั่วโลกได้ตกลงใช้ระบบเดียวกันคือ Kinematic Viscometer (cSt) แต่อย่างไรก็ตาม แม้ว่าหน่วยจะต่างกันและวัดที่อุณหภูมิต่างกัน ก็สามารถเทียบกลับมายังหน่วยและอุณหภูมิที่ต้องการได้ โดยอาศัยกราฟน้ำมัน ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอุณหภูมิ

วิธีการทดลอง

นำน้ำมันตัวอย่างใส่ใน Viscometer ด้วยปริมาตรที่แน่นอนตามขนาดและชนิดของ Viscometer ที่ใช้ นำไปแช่ใน Viscometer Bath ซึ่งโดยปกติใช้เวลาประมาณ 30 min แล้วปล่อยให้ น้ำมันตัวอย่างไหลอย่างอิสระภายใต้แรงดึงดูดของโลกผ่านหลอดแก้วเล็กๆ โดยเริ่มจับเวลาเมื่อส่วนบน (Head Level) ของน้ำมันตัวอย่างไหลถึงจุดจับเวลาจุดแรก (Start Mark) และหยุดเมื่อถึง จุดจับเวลาจุดที่สอง (Stop Mark) นำเวลาที่ได้อ่านด้วยค่าคงที่ของ Viscometer (Viscometer constant) ค่าที่ได้คือ Kinematic Viscometer ซึ่งมีหน่วยเป็นเซนติสโตก (cSt)

อุปกรณ์การทดลอง

1. Viscometers ซึ่งเป็นหลอดแก้วเล็ก ๆ ที่ตรวจสอบความถูกต้องแล้ว (Calibrated Glass Capillary) และสามารถให้ความแม่นยำได้ตามที่กำหนด
2. Viscometer Holder ที่สามารถจับ Viscometer ให้อยู่ในแนวตั้งและอยู่ในลักษณะเหมือนกับตอนที่ทำการ Calibrate
3. Viscometer Thermostat and Bath ใช้ของเหลวที่สามารถมองผ่านได้และให้มีปริมาตรที่สามารถจุ่ม Viscometer ในส่วนที่ใส่น้ำมันตัวอย่างอยู่ให้ลึกอย่างน้อย 20 mm จากผิวบนของของเหลว และสูงอย่างน้อย 20mm จากก้นของ Bath และต้องควบคุมอุณหภูมิให้ได้โดยผิดพลาดไม่เกิน 0.02°C (0.04°F)
4. นาฬิกาจับเวลา ซึ่งให้ความถูกต้องในการจับเวลาไม่ต่ำกว่าร้อยละ 0.07 หลังจากเวลาผ่านไป 15 min

ค.2 การวิเคราะห์จุดวาบไฟ มาตรฐาน ASTM D 92

วิธีการทดลอง

1. เทตัวอย่างลงใน ถ้วยทองเหลืองให้พอดีขีด
 2. วางถ้วยทองเหลืองให้อยู่ตรงกลางแผ่นให้ความร้อน
 3. อุณหภูมิของถ้วยทองเหลือง และตัวอย่างน้ำมันต้องอยู่ที่ 56°C ต่ำกว่าจุดคาดหวังของจุดวาบไฟ
 4. ในกรณีตัวอย่างกลิ่นถ้วยทองเหลืองให้เทตัวอย่างทิ้งทำความสะอาดและเทตัวอย่างใส่ลงในถ้วยทองเหลืองใหม่
 5. ใส่ฟองอากาศหรือฟองตัวอย่างที่ผิวหน้าตัวอย่างด้วยปลายมีดหรืออย่างอื่นที่เหมาะสม
 6. ในกรณีที่มิชของแข็งผสมอยู่ต้องทำให้ละลายเป็นเนื้อเดียวกันก่อนเทลงไปถ้วยทองเหลือง และอุณหภูมิไม่ควรเกิน 56°C ต่ำกว่าจุดคาดหวังจุดวาบไฟ
 7. เปลวไฟ ปรับขนาด 3.2 ถึง 4.8 mm ข้อควรระวัง อย่าให้เปลวไฟดับระหว่างการทดสอบ
- เปิดสวิตช์ Heating regulator
8. ปรับเพิ่มอัตราความร้อนให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น $14-17^{\circ}\text{C}/\text{min}$ เริ่มตั้งแต่อุณหภูมิของตัวอย่างที่ 56°C ต่ำกว่าจุดคาดหวัง
 9. เริ่มให้เปลวไฟทุกๆ 1°C ใช้ความกว้างในการผ่านถ้วยเมื่อโยกเปลวไฟ 6.00 ± 0.039 นิ้วและเปลวไฟอยู่สูงจากถ้วยทองเหลือง 2 mm ใช้เวลาในการโยก เปลวไฟ 1 ± 0.1 วินาที
 10. ณ อุณหภูมิ 28°C ก่อนถึงจุดคาดหวังจุดวาบไฟให้ระวัง ใช้น้ำมันกระเด็นไปโดนถ้วยทองเหลือง
 11. กรณีเกิดฟองของถ้วยทองเหลืองก่อนถึงจุดวาบไฟให้ยกเลิกการทดสอบ
 12. ขนาดของเปลวไฟ ต้องได้ตามมาตรฐาน ASTM กำหนดเพราะจะมีผลทำให้ผลของอุณหภูมิไม่ตรงตามความต้องการ

13. ลักษณะของประกายไฟที่เกิดจุกวบไฟ จะเป็น Blue halo ซึ่งเกิดขึ้นที่จุดใดก็ตามที่ผิวตัวอย่างให้บันทึกอุณหภูมิที่อ่านได้จากเทอร์โมมิเตอร์ ณ เวลาที่สังเกตพบจุกวบไฟ

14. หลังจากเสร็จแล้วให้ปิด main switch และปิด gas supply เพื่อความปลอดภัย รอให้อุณหภูมิในถ้วยทองเหลืองลดต่ำกว่า 60°C ก่อนทำการปิดเครื่อง หลัวนำถ้วยทองเหลืองไปทำความสะอาด

ค.3 เครื่องวิเคราะห์ค่าความร้อน (Calorimeter) มาตรฐาน ASTM D 2015

หลักการทำงาน

เผาตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ภายใต้บรรยากาศแก๊สออกซิเจน ความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ภายในบอมบ์ จะถ่ายเทให้กับน้ำที่อยู่รอบๆ ค่าความร้อนคำนวณได้จากผลคูณของความแตกต่างของอุณหภูมิ (ก่อนและหลังจุกวบไฟ) กับค่าความจุความร้อนของเครื่องแคลอริมิเตอร์ซึ่งหาได้จากการเผากรดเบนโซอิก (Benzoic acid)

สารเคมี

1. น้ำกลั่น
2. กรดเบนโซอิก ($\text{C}_6\text{H}_5\text{COOH}$)
3. เมทิลออเรนจ์ (Methyl Orange) เมทิลเรด (Methyl Red) หรือเมทิลเพอเพิล (Methyl Purple)
4. แก๊สออกซิเจน ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5
5. สารละลายมาตรฐานโซเดียมคาร์บอเนต ความเข้มข้น 0.0709 นอร์มัล (3.76 กรัมต่อลิตร)
6. น้ำล้างบอมบ์ละลายสารละลายเมทิลออเรนจ์อิ่มตัว 1 มิลลิลิตรในน้ำกลั่น 1 ลิตร

การทดลอง

1. ชั่งกรดเบนโซอิกประมาณ 1 กรัม ให้มีความละเอียดถึง 0.0001 กรัม ใส่ในถ้วยตัวอย่างของเครื่อง
2. ตัดลวด (Fuse Wire) ความยาวประมาณ 10 เซนติเมตร ผูกปลายทั้งสองข้างของส่วนจุกวบไฟให้ลวดและผิวตัวอย่างในถ้วย
3. ล้างภายในบอมบ์ให้สะอาดด้วยน้ำกลั่น และเติมน้ำกลั่นลงในบอมบ์ 1 มิลลิลิตร
4. ประกอบบอมบ์ ปิดฝาให้แน่น อัดแก๊สออกซิเจนมีความดัน 30 บรรยากาศ และต้องทำกันทุกครั้งระวังอย่าให้ตัวอย่างกระจายจากถ้วยใส่ตัวอย่าง
5. นำบอมบ์ที่อัดแก๊สออกซิเจนแล้ววางลงในถังน้ำปรับอุณหภูมิ ต่อจู่ไฟฟ้าสำหรับจุกวบไฟ
6. เติมน้ำกลั่นลงในถังน้ำที่ปรับอุณหภูมิประมาณ 2000 มิลลิลิตร ปรับอุณหภูมิของน้ำโดยการกวนให้อุณหภูมิคงที่และต่ำกว่าอุณหภูมิห้องประมาณ 1-2 องศาเซลเซียส
7. ทิ้งไว้ 5 นาที เพื่อให้อุณหภูมิคงที่
8. เมื่ออุณหภูมิคงที่ บันทึกเป็นอุณหภูมิเริ่มต้น (T_1) กดปุ่มระเบิด

9. จับเวลาทุกๆ 1 นาที จนกระทั่งอุณหภูมิคงที่ บันทึกเป็นอุณหภูมิสุดท้าย (T_f)
10. ปิดเครื่องและนำบอมบ์ออกจากเครื่อง ค่อยๆ ลดความดัน ถ้าภายในมีเขม่าหรือเผาไหม้ไม่หมดให้ทำใหม่
11. ล้างภายในบอมบ์ทุกส่วนด้วยน้ำล้างบอมบ์ที่เตรียมไว้ จนหมดความเป็นกรดและมีปริมาตรประมาณ 250 มิลลิลิตร ไตเตรตน้ำล้างด้วยสารละลายมาตรฐาน โซเดียมคาร์บอเนต บันทึกปริมาตรที่ใช้
12. วัดความยาวหลอดที่เหลือ บันทึกผล

การคำนวณ

$$E = \frac{[(Hg) + e_1 + e_2]}{T}$$

เมื่อ

E = ค่าความจุความร้อนของเครื่องแคลอริมิเตอร์ (จุลต่อองศาเซลเซียส)

H = ความร้อนของการเผาไหม้ของกรดเบนโซอิก (จุลต่อกรัม)

g = น้ำหนักกรดเบนโซอิกที่ใช้ (กรัม)

e_1 = ปริมาตรสารละลายที่ใช้ไตเตรต (มิลลิลิตร) โดย 1 มิลลิลิตรเทียบกับ 10 บีทียู

e_2 = ความยาวหลอดที่ถูกเผาไหม้ (เซนติเมตร) x ค่าความร้อนของหลอด (บีทียูต่อเซนติเมตร)

$T = T_f - T_i$ ผลต่างอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)

ทำการทดลองเหมือนที่กล่าวมาทุกประการตั้งแต่ข้อ 1-12 โดยเปลี่ยนจากกรดเบนโซอิกเป็นตัวอย่างเชื้อเพลิงแล้วคำนวณค่าความร้อนได้จากสมการต่อไปนี้

$$Q_v(\text{gross}) = \frac{[(TE) - e_1 - e_2 - e_3]}{g}$$

เมื่อ

$Q_v(\text{gross})$ = ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (จุลต่อกรัม)

$T = T_f - T_i$ (องศาเซลเซียส)

e_1 = ปริมาตรสารละลายที่ใช้ไตเตรต (มิลลิลิตร) โดย 1 มิลลิลิตรเทียบกับ 10 บีทียู

e_2 = ความยาวหลอดที่ถูกเผาไหม้ (เซนติเมตร) x ค่าความร้อนของหลอด (บีทียูต่อเซนติเมตร)

$e_3 = 25 \times 10^3$ (จุล) x ร้อยละกำมะถัน x น้ำหนักเชื้อเพลิงที่ใช้ (กรัม)

ค.4 เครื่องวิเคราะห์ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน (Elemental Analyzer) มาตรฐาน ASTM D 5291

ทฤษฎี

การวิเคราะห์คาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน ในเชื้อเพลิงแข็งด้วย Elemental Analyzer เป็นการวิเคราะห์ทาง ultimate analysis วิธีหนึ่ง ซึ่งเป็นหลักการวิเคราะห์แบบ gravimetric combustion analysis โดยการเผาไหม้สารเชื้อเพลิงแข็งตัวอย่างที่รู้ค่าน้ำหนักด้วยความร้อนสูงเพื่อให้สารสลายตัวเป็นแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ และแก๊สไนโตรเจน (ซึ่งจัดชุดเฟอร์ไรด์-ออกไซด์ที่เกิดขึ้น และออกซิเจนที่เหลือออกไปในการเผาและการรีดิวซ์) ก่อนการปรับสภาพแก๊สเฟสให้มีปริมาตร ความดัน และอุณหภูมิที่มาตรฐานเดียวกันในภาชนะควบคุมการผสมแก๊ส แล้วจึงแยกแก๊สตาม selective retention time เป็นลำดับขั้นของไนโตรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำตามลำดับ ด้วยคอลัมน์แยกทางโครมาโทกราฟีและหาปริมาณสารโดยสมบัติของการนำความร้อนด้วยเครื่องตรวจวัดแบบ TCD (thermal conductivity detector) ซึ่งสามารถแสดงค่าได้ตรงกับขนาดหรือปริมาณที่ได้ทำการสอบเทียบมาตรฐาน

การทดลอง

ในการวิเคราะห์ตัวอย่างปริมาณประมาณ 2 มิลลิกรัมจะถูกบรรจุในแคปซูลดีบุกและนำไปวางในระบบสุ่มตัวอย่างอัตโนมัติ จากนั้นจะถูกนำไปวางลงใน reaction chamber ที่มีออกซิเจนมากเกินไปที่อุณหภูมิประมาณ 990 °C ซึ่งอาจจะเกิดแก๊สต่าง ๆ รวมทั้งเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ขึ้นบ้างแม้จะมีออกซิเจนมากเกินไปและจะเกิดออกซิเดชันโดยสมบูรณ์เมื่อผ่านไปยังคอลัมน์ที่บรรจุทั้งสเตนไดรอกไซด์ ซึ่งใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งจะให้แก๊สผสม CO₂, H₂O และ NO_x รวมทั้ง O₂ ที่เกินพอเป็นผลิตภัณฑ์ ซึ่งจะไหลผ่าน silica tube ที่บรรจุด้วยผงโลหะทองแดง (copper granules) ซึ่งบริเวณนี้จะมีอุณหภูมิ 500 °C ซึ่ง O₂ ที่เหลือเข้ามาจะถูกจับไว้ และ NO_x จะถูกเปลี่ยนไปเป็น N₂ จากนั้นอาจมีคอลัมน์สำหรับจับ SO₂ และแก๊สเฮไลด์ ก่อนที่แก๊สผสมจะถูกพาโดยแก๊สฮีเลียมไปยัง chamber ที่ควบคุมปริมาตรและความดัน และจะถูกนำไปผ่านการแยกด้วยระบบ zone chromatography ซึ่งจะให้สัญญาณออกมาในรูปขั้นบันได (staircase) ความสูงของขั้นบันไดจะแปรผันโดยตรงกับปริมาณของแก๊สต่าง ๆ ที่ถูกแยกออกมา จึงสามารถหาปริมาณได้โดยเทียบกับสารมาตรฐาน โดยมี detection limit สำหรับกรณีใช้สารตัวอย่าง 2-3 มิลลิกรัม อยู่ที่ประมาณ 0.05 w% (~500 ppm) โดยมีความคลาดเคลื่อนประมาณ ±0.02 w%

ค.5 Thermo gravimetric Analysis (TGA)

TGA เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุโดยเฉพาะพอลิเมอร์เมื่อได้รับความร้อนโดยการวัดน้ำหนักของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงอุณหภูมิด้วยเครื่องชั่งที่มีความไวสูง เทคนิคนี้เหมาะสำหรับการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสภาพของวัสดุที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับแก๊สหรือระเหยของน้ำ การตกผลึก

(crystallization) อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนเฟส การแตกตัวของวัสดุ (decomposition) ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน หรือ ปริมาณสารสัมพันธ์ (stoichiometry) ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง ตัวอย่างจะถูกวางบนจานขนาดเล็ก ซึ่งเชื่อมต่อกับเครื่องชั่งละเอียดที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงสูง โดยที่ทั้งหมดจะอยู่ในเตาที่สามารถควบคุมอุณหภูมิและบรรยากาศได้ บรรยากาศภายในอาจจะเป็นแก๊สเฉื่อย เช่น ไนโตรเจน หรือแก๊สที่มีความว่องไว เช่น อากาศ หรือ ออกซิเจน โดยน้ำหนักของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิเฉพาะของสารแต่ละชนิด โดยน้ำหนักที่หายไปนั้นเกิดมาจากการระเหย การย่อยสลาย หรือการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ

