



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)

ปริญญญา

วิศวกรรมเคมี

วิศวกรรมเคมี

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การผลิตน้ำมันชีวภาพจากขังข้าวโพด ต้นสบู่ดำ และกากผลมะนาว และปรับปรุงคุณภาพ
ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากผลิตภัณฑ์ถ่านชาร์

Production of Bio-oil by Pyrolysis of Corn Cob, Jatropha Stem, and Lime Skin
Using Ni/Activated Carbon Produced from the Char Products

นามผู้วิจัย นางสาววรดาณ์ มูลศรีแก้ว

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์อภิญา ดวงจันทร์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์อรรถศักดิ์ จารีย์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ไพศาล คงคาบุญญา, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา นีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การผลิตน้ำมันชีวภาพจากซังข้าวโพด ต้นสบู่ดำ และกากผลมะนาว และปรับปรุงคุณภาพด้วยตัวเร่ง
ปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากผลิตภัณฑ์ถ่านชาร์

Production of Bio-oil by Pyrolysis of Corn Cob, Jatropha Stem and Lime Skin Using
Ni/Activated Carbon Produced from the Char Products

โดย

นางสาววรรณ ภูศรีแก้ว

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)
พ.ศ. 2551

วรดาณั์ มูลศรีแก้ว 2551: การผลิตน้ำมันชีวภาพจากซังข้าวโพด ต้นสนุ่นดำ และกากผลมะนาว และปรับปรุงคุณภาพด้วยตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากผลิตภัณฑ์ถ่านชาร์
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี) สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์อภิญญา ดวงจันทร์, Ph.D. 93 หน้า

เชื้อเพลิงชีวภาพหรือน้ำมันชีวภาพผลิตจากชีวมวล ซังข้าวโพด กากผลมะนาว และต้นสนุ่นดำ ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า ทดลองในปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งด้วยอัตราการให้ความร้อน 1.6 องศาเซลเซียส ต่อนาที ชีวมวลมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5-2.0 มิลลิเมตร และให้ความร้อนในบรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน ผลจากการศึกษาผลกระทบบของอุณหภูมิไพโรไลซิส 300, 350, 400, 500 และ 550 องศาเซลเซียส ต่อร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพจากสนุ่นดำ พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง 400 องศาเซลเซียสร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพเพิ่มขึ้น และที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส ร้อยละผลได้ของเหลวลดลงส่วนร้อยละผลได้ของแก๊สเพิ่มขึ้น ร้อยละผลได้ของของแข็งอยู่ในช่วง 26-31 ร้อยละผลได้สูงสุดของผลิตภัณฑ์ของเหลวเรียงลำดับจากมากไปหาน้อยดังนี้ ซังข้าวโพด (48 เปอร์เซ็นต์) กากผลมะนาว (42 เปอร์เซ็นต์) และต้นสนุ่นดำ (41 เปอร์เซ็นต์) ส่วนร้อยละผลได้ของถ่านชาร์ คือ 29, 28 และ 25 และร้อยละผลได้ของแก๊ส คือ 23, 29 และ 31 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากซังข้าวโพด กากผลมะนาว และต้นสนุ่นดำ คือ 30, 27 และ 25 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของเหลวด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectrophotometry (FT-IR) พบว่าผลิตภัณฑ์มีองค์ประกอบของ แอลเคน แอลดีไฮด์ คีโตน และ แอลกอฮอล์ พื้นที่ผิวแบบบีอีที (Brunauer-Emmett-Teller, BET) ของถ่านชาร์ที่ได้จากซังข้าวโพด เปลือกผลมะนาว และต้นสนุ่นดำ คือ 52, 51 และ 28 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ เมื่อนำไปผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ โดยถ่านกัมมันต์จากซังข้าวโพด กากผลมะนาว และต้นสนุ่นดำ มีพื้นที่ผิวแบบบีอีที คือ 241, 214 และ 202 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์จากซังข้าวโพดมากที่สุด จึงนำไปใช้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันชีวภาพของซังข้าวโพดโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต่างกันสามชนิด คือ Ni(unreduced)/ถ่านกัมมันต์ Ni (reduced)/ถ่านกัมมันต์ และ ซีโอไลด์ชนิด ZSM-5 ที่ผลิตจากเถ้าลอยของถ่านหินลิกไนต์ พบว่าร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพหลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา มีค่า 86, 89 และ 92 ตามลำดับ ค่าพลังงานความร้อนเท่ากับ 25, 34 และ 32 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถปรับปรุงคุณภาพน้ำมันชีวภาพให้ค่าพลังงานความร้อนเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นถ่านที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส จึงสามารถนำมาใช้ประโยชน์ทำเป็นถ่านกัมมันต์และตัวเร่งปฏิกิริยาได้

Worada Moonsrikaew 2008: Production of Bio-oil by Pyrolysis of Corn Cob, Jatropha Stem, and Lime Skin Using Ni/Activated Carbon Produced from the Char Products. Master of Engineering (Chemical Engineering), Major Field: Chemical Engineering, Department of Chemical Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Apinya Duangchan, Ph.D. 93 pages.

Bio fuels or bio-oils were produced from corn cob, lime skin, and Jatropha stem via slow pyrolysis process which was carried out in a fixed bed reactor with a heating rate of $1.6^{\circ}\text{C min}^{-1}$ under nitrogen atmosphere. The biomass diameter was 0.5-2.0 mm. The effect of the pyrolysis temperature (300, 350, 400, 500, and 550°C) on the bio-oil yield of Jatropha stem was investigated. When the reactor temperature was raised up to 400°C , the bio-oil yield increased; from 400 to 550°C the liquid yield decreased with an increase in gas yield. The percentage of solid yields were in the range of 26-31. The liquid product yields were decreased in the order: corn cob (48%) > Jatropha stem (41%) > lime skin (42%). The percentage of char yields of corn cob, Jatropha stem and lime skin were 29, 28, and 25 and the percentage of gas yields were 23, 29 and 31, respectively. The heating values of bio-oils from corn cob, lime skin and Jatropha stem were 30, 27 and 25 MJ/kg, respectively. The analytical results of liquid product using Fourier transform infrared spectrophotometer (FT-IR) showed that the liquid product consisted of alkane, aldehyde, ketone, and alcohol. The BET surface areas of chars obtained from corn cob, lime skin, and Jatropha stem were 52, 51 and $28\text{ m}^2/\text{g}$, respectively. The BET surface areas of activated carbons produced from corn cob, Jatropha stem, and lime skin were 241, 214, and $202\text{ m}^2/\text{g}$, respectively. The activated carbon from corn cob has the highest surface area, thus it was used as a support for Ni catalyst. By using three types of catalysts which were Ni(unreduced)/activated carbon, Ni(reduced)/activated carbon and ZSM-5 zeolite from fly ash to upgrade bio-oil from pyrolysis of corn cob, the liquid yields were 86, 89, and 92, respectively. The gasoline yields were 87, 92, and 91, respectively and the heating values were 25, 34, and 32, respectively. Activated carbon from pyrolysis char was able to be used as a catalyst support to improve the bio-oil.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ รศ.ดร.อภิญา ดวงจันทร์ ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์ และขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.อรรถศักดิ์ จารีย์ ผศ.ดร.จรัญ ธีตรมานพ และ อ.ดร.ชนาธิป สามารถ ที่กรุณาใช้เวลาในการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ ดร.พิพัฒน์ พิเชษฐพงษ์ และดร.เกศินี เหมวิเชียร สังกัดกลุ่มวิจัยและพัฒนา สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ ที่กรุณาอบรมและวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ FT-IR

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ คุณชนาธิป อุทัย คุณสุพัตรา ศรีจิว คุณปริญญญา บุญทัน คุณวิเชียร กลิ่นอบ และคุณยงยุทธ อินนุรักษ์ ที่กรุณาอบรมการใช้เครื่องมือและซ่อมแซมอุปกรณ์การทำวิจัย

ขอขอบคุณทุนวิจัยจาก โครงการพัฒนานักศึกษาศึกษาและวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ภายใต้ศูนย์ความเป็นเลิศด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมีและวัสดุขั้นสูง (PPAM) สำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (KURDI) และทุนอุดหนุนการค้นคว้าและวิจัยประเภทวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ทุนในการศึกษาและวิจัย

ท้ายสุดขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อบุญมี คุณแม่คงขวัญ มูลศรีแก้ว คุณป้าสำรวย นาม ประเสริฐ คุณนพรัตน์ มูลศรีแก้วและคุณวราภรณ์ มูลศรีแก้ว ที่ให้ความรักและความห่วงใยตลอดมา รวมถึงเพื่อนๆและน้องๆ ที่ให้กำลังใจแก่ข้าพเจ้าจนสามารถทำในสิ่งที่หวังได้สำเร็จ

วรดาณ มูลศรีแก้ว

กันยายน 2551

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	4
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	33
อุปกรณ์	33
วิธีการ	36
ผลและวิจารณ์	40
สรุปและข้อเสนอแนะ	60
สรุป	60
ข้อเสนอแนะ	61
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	62
ภาคผนวก	67
ภาคผนวก ก การวิเคราะห์หาค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์	68
ภาคผนวก ข การวิเคราะห์สมบัติโดยประมาณของถ่านจากการคาร์บอนไนซ์	75
ภาคผนวก ค ปริมาณพื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์	78
ภาคผนวก ง สมบัติของถ่านกัมมันต์ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 900-2532)	81
ภาคผนวก จ ข้อมูลการวิเคราะห์พื้นที่ BET	83
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	93

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบแบบละเอียดด้วยเทคนิค elemental analysis ของชีวมวลต้นสบู่ดำ ช้างข้าวโพด และกากผลมะนาว	41
2	หมู่ฟังก์ชันน้ำตาลรูปและประเภทของสารประกอบของน้ำมันชีวภาพของเมล็ดดอกคำฝอย	48
3	คุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สในโตรเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราการให้ความร้อน 1.6 องศาเซลเซียสต่อนาที	51
4	พื้นที่ผิวจำเพาะแบบ BET ของถ่านชาร์ของช้างข้าวโพด ต้นสบู่ดำ และกากผลมะนาวที่ได้จากการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส	52
5	พื้นที่ผิวจำเพาะแบบ BET ของถ่านกัมมันต์ของช้างข้าวโพด ต้นสบู่ดำ และกากผลมะนาวที่ได้จากการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส	52
6	ค่าการดูดซับและปริมาณการดูดซับไอโอดีนต่อน้ำหนักของถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์ของช้างข้าวโพด ต้นสบู่ดำ และกากผลมะนาวที่ได้จากการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส	53
7	ร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพจากช้างข้าวโพดหลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาต่างชนิดกัน	54
8	ค่าพลังงานความร้อน (heating value) ของน้ำมันชีวภาพของช้างข้าวโพด ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาต่างชนิดกัน	57
 ตารางผนวกที่		
ก1	น้ำหนักประมาณของตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์ค่าไอโอดีน	74

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ขั้นตอนในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาคู่ด้วยวิธีการทำให้เอบซุ่ม	25
2	แผนภาพปฏิกรณ์ในกระบวนการไพโรไลซิส	34
3	ปฏิกรณ์แบบถังกวน (autoclave reactor)	35
4	เปอร์เซ็นต์น้ำหนักของต้นสนปูด้าที่เหลือจากการสลายตัวที่อุณหภูมิต่างๆ ในเครื่อง TGA อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน	42
5	เปอร์เซ็นต์น้ำหนักของซังข้าวโพดที่เหลือจากการสลายตัวที่อุณหภูมิต่างๆ ในเครื่อง TGA อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน	43
6	เปอร์เซ็นต์น้ำหนักของกากผลมะนาวที่เหลือจากการสลายตัวที่อุณหภูมิต่างๆ ในเครื่อง TGA อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน	43
7	ร้อยละผลได้ (%yield) ของต้นสนปูด้า จากการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 300, 350, 400 500, และ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราการให้ความร้อน 1.6 องศาเซลเซียสต่อนาที	44
8	ร้อยละผลได้ (%yield) ของซังข้าวโพด จากการไพโรไลซิสซังข้าวโพด	45
9	ร้อยละผลได้ (%yield) ของต้นสนปูด้า ซังข้าวโพด และกากผลมะนาว	46
10	ร้อยละผลได้ ของต้นสนปูด้า ซังข้าวโพด และกากผลมะนาว จากการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส	46
11	อินฟราเรดสเปกตรัม (FT-IR spectrum) ของน้ำมันชีวภาพจากต้นสนปูด้า	47
12	อินฟราเรดสเปกตรัม (FT-IR spectrum) ของน้ำมันชีวภาพจากซังข้าวโพด	48
13	อินฟราเรดสเปกตรัม (FT-IR spectrum) ของน้ำมันชีวภาพจากกากผลมะนาว	49
14	ปริมาณผลิตภัณฑ์ในแต่ละช่วงอุณหภูมิการกลั่นของน้ำมันชีวภาพจากซังข้าวโพดที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาต่างชนิด	56
15	อินฟราเรดสเปกตรัม (FT-IR spectrum) ของน้ำมันชีวภาพหลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา Ni(unreduced)/ถ่านกัมมันต์	58

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
16	อินฟราเรดสเปกตรัม (FT-IR spectrum) ของน้ำมันชีวภาพหลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา Ni(reduced)/ถ่านกัมมันต์	59
17	อินฟราเรดสเปกตรัม (FT-IR spectrum) ของน้ำมันชีวภาพหลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ ชนิด ZSM-5	59
ภาพผนวกที่		
จ1	ข้อมูลจากการวิเคราะห์การหาพื้นที่แบบ BET ของถ่านชาร์จากชังข้าวโพด	84
จ2	ข้อมูลจากการวิเคราะห์การหาพื้นที่แบบ BET ของถ่านชาร์จากต้นสบู่ดำ	85
จ3	ข้อมูลจากการวิเคราะห์การหาพื้นที่แบบ BET ของถ่านชาร์จากกากผลมะนาว	86
จ4	ข้อมูลจากการวิเคราะห์การหาพื้นที่แบบ BET ของถ่านกัมมันต์จากชังข้าวโพด	87
จ5	ข้อมูลจากการวิเคราะห์การหาพื้นที่แบบ BET ของถ่านกัมมันต์จากต้นสบู่ดำ	88
จ6	ข้อมูลจากการวิเคราะห์การหาพื้นที่แบบ BET ของถ่านกัมมันต์จากกากผลมะนาว	89
จ7	ไอโซเทิร์มพลอตของถ่านชาร์จากต้นสบู่ดำ ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 400 องศาเซลเซียส	90
จ8	ไอโซเทิร์มพลอตของถ่านกัมมันต์จากต้นสบู่ดำ ที่ผ่านการกระตุ้นด้วย NaOH ที่ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที	90
จ9	ไอโซเทิร์มพลอตของถ่านชาร์จากชังข้าวโพด ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 400 องศาเซลเซียส	91
จ10	ไอโซเทิร์มพลอตของถ่านกัมมันต์จากชังข้าวโพด ที่ผ่านการกระตุ้นด้วย NaOH ที่ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที	91
จ11	ไอโซเทิร์มพลอตของถ่านชาร์จากกากมะนาว ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 400 องศาเซลเซียส	92
จ12	ไอโซเทิร์มพลอตของถ่านกัมมันต์จากกากมะนาว ที่ผ่านการกระตุ้นด้วย NaOH ที่ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที	92

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ASTM	=	American Society for Testing and Materials
DTA/TGA	=	Differential Thermal Analysis/Thermogravimetric Analysis
FT-IR	=	Fourier Transform Infrared Spectroscopy
NaOH	=	Sodium Hydroxide
Na ₂ SO ₄	=	Sodium Sulfate
Ni(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	=	Nickel Nitrate

การผลิตน้ำมันชีวภาพจากซังข้าวโพด ต้นสบู่ดำ และกากผลมะนาว และปรับปรุงคุณภาพด้วยตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากผลิตภัณฑ์ถ่านชาร์

Production of Bio-oil by Pyrolysis of Corn Cob, Jatropha Stem and Lime Skin Using Ni/Activated Carbon Produced from the Char Products

คำนำ

ในปัจจุบันหลายประเทศได้มีการวิจัยการใช้ประโยชน์จากไม้ที่มีอยู่ในประเทศให้เกิดผลผลิตที่คุ้มค่ามากที่สุด โดยไม่ให้เกิดของเสียทางด้านขยะและมลพิษ และเป็นการรักษาสีงแวดล้อม การผลิตเชื้อเพลิงจากเศษไม้ซึ่งเชื้อเพลิงชนิดนี้สามารถนำไปใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลทั่วไปได้ กระบวนการทางเคมีรูปแบบใหม่สามารถลดต้นทุนการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพได้อย่างมหาศาล วิธีการเพิ่มคุณค่าชีวมวลนั้นสามารถแบ่งออกเป็น 3 กระบวนการคือ กระบวนการเผาไหม้โดยตรง กระบวนการทางอุณหภูมิ และกระบวนการทางเกษตรเคมี สำหรับกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางอุณหภูมิ มีกระบวนการหนึ่งที่มีการใช้แพร่หลายคือ กระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) หรือการแยกสลายด้วยความร้อน (thermal cracking) คือชีวมวลที่เผาในสภาพไร้ออกซิเจนหรือเผาไหม้ในที่มียอกซิเจนจำกัดที่อุณหภูมิสูง จะได้ก๊าซผสมไฮโดรคาร์บอน ของเหลวคล้ายน้ำมัน กรดอะซิติก อะซิโตน เมทานอล และของแข็งคาร์บอน ของแข็งคาร์บอนที่ได้คือถ่านชาร์ ซึ่งให้ความร้อนสูงกว่าชีวมวลเริ่มต้น และไม่มีควัน (วิษณุ, 2549) ส่วนกระบวนการเปลี่ยนวัตถุดิบไปเป็นถ่านกัมมันต์มีสองขั้นตอนคือ การไพโรไลซิสและการกระตุ้น (activation) ในการไพโรไลซิส ธาตุที่ไม่ใช่คาร์บอน เช่น ไฮโดรเจน และออกซิเจนจะถูกขจัดออกไปอยู่ในสถานะแก๊สซึ่งผลิตภัณฑ์ของแข็งหรือถ่านชาร์ที่ได้มีความสามารถในการดูดซับและนำไปผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ด้วยการกระตุ้นเพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับของผลิตภัณฑ์ถ่านชาร์ที่ได้จากขั้นตอนการไพโรไลซิส โดยการกระตุ้นมีสองกระบวนการคือทางเคมีและกายภาพ ส่วนใหญ่จะใช้วิธีการกระตุ้นทางเคมี สารที่ใช้กระตุ้นในกระบวนการไพโรไลซิสมีผลทำให้ปริมาณน้ำมันดิน (tar) และสารระเหยง่ายที่หลงเหลืออยู่สลายออกไป มีผลทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีปริมาณคาร์บอนสูงขึ้น ผลผลิตพลอยได้ทางการเกษตรจำพวก กะลามะพร้าว เมล็ดลูกท้อ เมล็ดผลพลัม เมล็ดผลมันฮ่อ และเมล็ดเชอร์รี่พบว่าเหมาะสมที่จะผลิตเป็นถ่านกัมมันต์โดยพิจารณาคุณสมบัติความเป็นรูพรุน ความหนาแน่นและความแข็ง (Heschel and Klose, 1995)

เชื้อเพลิงชีวภาพ (biofuel) เป็นเชื้อเพลิงที่ได้จากชีวมวล (biomass) หรือ เชื้อเพลิงชีวมวล ซึ่ง หมายถึง เชื้อเพลิงทั้งที่อยู่ในสถานะของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซที่ผลิตหรือแปรรูปมาจาก วัตถุดิบอินทรีย์ที่ได้โดยตรงจากสิ่งมีชีวิต เช่น พืช หรือโดยอ้อมจากของเสียที่เหลือใช้อุตสาหกรรม การเกษตร ชุมชน ฯลฯ ระบบนี้เป็นการนำเอาวัตถุดิบอินทรีย์สารซึ่งเป็นสิ่งมีชีวิตหรือผลิตผล ทางการสร้างและสลายของสิ่งมีชีวิต (metabolic byproducts) เช่น มูลวัว ใช้เป็นพลังงานทดแทน (renewable energy) ไม่เหมือนพลังงานจากแหล่งธรรมชาติอื่น เช่น ปิโตรเลียม ถ่านหิน และ เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ โดยทั่วไปเชื้อเพลิงชีวภาพหมายถึงดีเซลชีวภาพ (biodiesel) ได้แก่ น้ำมัน เชื้อเพลิงที่ได้จากการดัดแปลงน้ำมันที่สกัดมาจากพืชหรือสัตว์ โดยผ่านกระบวนการที่ทำให้เกิดหมู่ ของสาร mono-alkyl ester ให้อยู่ร่วมกับโครงสร้างของกรดไขมันจากพืชหรือไขมันสัตว์เป็น ส่วนประกอบ แหล่งของวัตถุดิบหลักที่ได้จากพืช ได้แก่ น้ำมันจากเมล็ดพืชหลายชนิด เช่น ถั่ว เหลือง ทานตะวัน มะพร้าว ข้าวโพด ฟ้าย ถั่วลิสง ปาล์ม คาโนลา ดอกคำฝอย ฟิน แกลบ พางข้าว มูลสัตว์ น้ำเสีย น้ำมันพืชที่ใช้แล้ว ขยะมูลฝอย เป็นต้น นำมาใช้เพื่อผลิตพลังงานโดยตรง หรือ เปลี่ยนให้เป็นเชื้อเพลิงในรูปอื่นๆ เช่น น้ำมันชีวภาพจากกระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) ของ เศษไม้หรือขยะ ก๊าซชีวภาพจากการหมักขยะ หรือก๊าซเชื้อเพลิงจากกระบวนการ แกสซิฟิเคชัน (gasification) การใช้พลังงานชีวมวลสาร สามารถนำมาทดแทนน้ำมันทุกประเภทได้ดีโดยลด มลภาวะในเรื่องสิ่งแวดล้อม

กระบวนการแตกสลายโมเลกุลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาได้นำเข้ามาใช้ในอุตสาหกรรมน้ำมัน ทำให้ความสำคัญของกระบวนการแตกสลายด้วยความร้อนลดลงอย่างมาก เพราะกระบวนการที่ใช้ ตัวเร่งปฏิกิริยานี้สามารถผลิตเบนซินที่มีคุณภาพสูงเป็นจำนวนมาก อันเป็นการเปลี่ยนน้ำมันหนัก ให้เป็นน้ำมันเบนซินอย่างมีประสิทธิภาพสูง กระบวนการแตกโมเลกุลด้วยความร้อน จึงนำมาใช้ เพื่อความประสงค์อื่น เช่น เพิ่มการผลิตน้ำมันดีเซล เป็นต้น (ปราโมทย์และนุรักษ์, 2543) งานวิจัยที่ ศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสสารชีวมวลและการปรับปรุง คุณภาพน้ำมันที่ได้เพื่อลดปริมาณออกซิเจนก่อนนำไปประยุกต์ใช้งาน ด้วยปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิ เจเนชันหรือกระบวนการไฮโดรโพรเซสซิงด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา Co-Mo, Ni-Mo และออกไซด์ของ โลหะเหล่านี้บนตัวรองรับอะลูมินา (Al_2O_3) กระบวนการแตกสลายโมเลกุลด้วยสารเร่งปฏิกิริยา ปฏิกิริยาอิมัลชัน กระบวนการรีฟอร์มมิงโดยใช้ไอน้ำ และกระบวนการสกัดองค์ประกอบใน ของเหลวออกโดยใช้สารเคมี (Qi *et al.*, 2007)

ต้นสับุด้าเป็นไม้สกุลใหญ่กระจายอยู่ในประเทศเขตร้อนและกึ่งร้อนมีมากถึง 175 ชนิด (species) (ทวิศักดิ์, 2548) ข้าวโพด (Indian corn หรือ Maize) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Zea mays* Linn.

(ซีเมส: *Zea mays*) ส่วนมากนิยมนำซังข้าวโพดซึ่งเป็นชีวมวลที่เหลือจากบริโภคมาใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสมากกว่า มีงานวิจัยเกี่ยวกับการไพโรไลซิสแบบเร็วของชีวมวลทางการเกษตร เช่น ซังข้าวโพด และฟางข้าวที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 องศาเซลเซียสในปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไดซ์เบด พบว่าได้ร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพ 36-41 ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวล (Yanik *et al.*, 2007) ซึ่งผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากการไพโรไลซิสแบ่งเป็น 3 ชนิดคือ ของแข็งของเหลว และแก๊ส ซึ่งสามารถนำผลิตภัณฑ์ไปประยุกต์ใช้งานได้หลายด้าน เช่น แหล่งพลังงานทดแทน สารตั้งต้นในกระบวนการผลิตสารเคมีต่างๆ (Putun *et al.*, 1999) การผสมกากอ้อยและซังข้าวโพดกับถ่านหินด้วยอัตราส่วนของน้ำหนักที่ต่างกัน แล้วศึกษาลักษณะการไพโรไลซิสด้วย thermogravimetric analyzer (TGA) อัตราการให้ความร้อน 10 เคลวินต่อนาที จากอุณหภูมิห้องถึง 900 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจน พบว่าที่อัตราส่วนของถ่านหินต่อซังข้าวโพดเท่ากับ 90:10 ให้ค่าพลังงานความร้อนสูงที่สุดคือ 4982 แคลอรีต่อกรัม (Sonobe and Worasuwanarak, 2004)

ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้นำชีวมวลที่แตกต่างกัน 3 ชนิด คือ ต้นสับปะรด ซังข้าวโพด และกากผลมะนาว ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสเพื่อผลิตน้ำมันชีวภาพและปรับปรุงคุณภาพด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/ถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสม โดยนำชีวมวลมาใช้ให้เกิดประโยชน์คุ้มค่าที่สุด

วัตถุประสงค์

1. ไพรอลิซิสชีวมวลที่แตกต่างกัน 3 ชนิดได้แก่ ชังข้าวโพด ต้นสบู่ดำ และกากผลมะนาว
2. ศึกษาความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของนิกเกิลบนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านชาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิสชีวมวลในการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันชีวภาพที่ได้

ขอบเขตการวิจัย

1. ทำการไพโรไลซิสโดยใช้ปฏิกรณ์แบบกึ่งกะ (semi-batch reactor)
2. ไพรอลิซิสชีวมวล 3 ชนิดได้แก่ ชังข้าวโพด ต้นสบู่ดำ และกากผลมะนาว ที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 500 และ 550 องศาเซลเซียส
3. การเตรียมถ่านกัมมันต์ ทำการกระตุ้นถ่านชาร์ด้วยวิธีทางเคมีโดยใช้ NaOH
4. ทดสอบความสามารถของการเร่งปฏิกิริยาของนิกเกิลบนถ่านกัมมันต์ ของถ่านกัมมันต์จากชีวมวลที่สภาวะการทดลองอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1. ได้น้ำมันชีวภาพซึ่งประกอบด้วย สารไฮโดรคาร์บอนใช้เป็นเชื้อเพลิงได้และ สารเคมีอื่นๆ
2. ใช้ประโยชน์จากถ่านที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสของชีวมวลต่างชนิดผลิตถ่านกัมมันต์เป็นการใช้ประโยชน์จากชีวมวลให้มากที่สุด

การตรวจเอกสาร

พลังงานชีวมวล

พลังงานชีวมวล (biomass) คือ สารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติ และสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้ เช่น เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร หรือกากจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมการเกษตร ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญที่หาได้ในประเทศ โดยเฉพาะประเทศไทยซึ่งเป็นประเทศเกษตรกรรมมีผลผลิตทางการเกษตรเป็นจำนวนมาก อาทิ แกลบ จากการสีข้าวเปลือก ชานอ้อยจากการผลิตน้ำตาลทราย เศษไม้จากการแปรรูปไม้ยางพาราหรือไม้ยูคาลิปตัส และบางส่วนได้จากสวนป่าที่ปลูกไว้ กากปาล์มจากการสกัดน้ำมันปาล์มดิบออกจากผลปาล์ม กากมันสำปะหลังจากการผลิตแป้งมันสำปะหลัง ชังข้าวโพดจากการกะเทาะเมล็ดข้าวโพด กะลามะพร้าวจากการปอกเปลือกเพื่อนำเนื้อมะพร้าวไปผลิตกะทิและน้ำมันมะพร้าว และส่าเหล้าที่ได้จากการผลิตแอลกอฮอล์ เป็นต้น

มนุษย์ได้รู้จักนำชีวมวลมาใช้เป็นพลังงานตั้งแต่สมัยโบราณแล้ว จนต่อมาโลกได้มีการพัฒนาเจริญมากขึ้น ใช้พลังงานเพิ่มขึ้น จึงได้นำเชื้อเพลิงจากฟอสซิลเช่นน้ำมันดิบ ถ่านหินและก๊าซธรรมชาติมาทดแทน ทำให้พลังงานจากชีวมวลมีบทบาทน้อยลงมากในปัจจุบันนี้ ชีวมวลสามารถเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานได้ เพราะในขั้นตอนของการเจริญเติบโตของพืชนั้น พืชสร้างพลังงานได้โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ และเปลี่ยนพลังงานจากแสงอาทิตย์โดยผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสงจนได้พลังงานออกมาเก็บในรูปแป้ง และน้ำตาล แล้วเก็บสะสมไว้ตามส่วนต่างๆ ของพืช ดังนั้นเมื่อนำพืชมาเป็นเชื้อเพลิงก็จะได้พลังงานออกมา โดยชีวมวลสามารถนำไปใช้เพื่อผลิตพลังงานโดยตรงหรือเปลี่ยนเป็นเชื้อเพลิงในรูปอื่นๆ เช่น น้ำมันชีวภาพจากกระบวนการไพโรไลซิส ของเศษไม้หรือขยะ ก๊าซชีวภาพจากการหมักขยะ หรือก๊าซเชื้อเพลิงจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ของวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร และสามารถนำมาเผาไหม้เพื่อนำพลังงานความร้อนที่ได้ไปใช้ในกระบวนการผลิตไฟฟ้าโดยประเทศไทยมีศักยภาพที่จะนำชีวมวลมาผลิตพลังงานเทียบเท่ากับการผลิตกระแสไฟฟ้าได้ไม่ต่ำกว่า 3,000 เมกะวัตต์ (รณรงค์, 2549)

ข้อดีของเชื้อเพลิงชีวมวล คือ เป็นพลังงานที่ไม่มีวันหมด วงจรชีวิตของพืชมีระยะสั้น ต่างจากฟอสซิลซึ่งใช้เวลาสะสมพลังงานนานหลายพันปีมีผลกระทบต่อมลภาวะน้อยกว่าเชื้อเพลิงฟอสซิล เนื่องจากพืชปล่อยก๊าซในโตรเจนออกไซด์ และก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (ซึ่งเป็นตัวก่อฝนกรดและโอโซนในระดับพื้นดิน) และไม่เพิ่มระดับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากพืชต้องดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อใช้ในการเจริญเติบโต ชีวมวลแต่ละชนิดมีคุณสมบัติแตกต่างกันไป

เช่น แกลบ จะให้ค่าความร้อนสูงเนื่องจากมีความชื้นต่ำ และไม่ต้องผ่านการบดย่อยก่อนนำไปเผาไหม้ โดยจี้เถ้าที่เกิดจากการเผาแกลบสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมผลิตเหล็กและแก้วต่อได้ ส่วนขี้เถ้าเป็นเชื้อเพลิงเผาไหม้แล้วมีปริมาณจี้เถ้าต่ำ จึงมีปัญหาในการจัดการน้อยกว่า และจี้เถ้าจากขี้เถ้าสามารถนำไปใช้ปรับปรุงสภาพดินในไร่อ้อยได้อีกด้วย ซึ่งมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อย เนื่องจากมีปริมาณกำมะถันต่ำกว่าเชื้อเพลิงประเภทอื่นมาก และไม่ก่อให้เกิดภาวะเรือนกระจก นอกจากนี้วัตถุดิบที่มีอยู่มากมายภายในประเทศ ถือเป็นการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งเกษตรกรยังมีรายได้เพิ่มจากการขายวัสดุทางการเกษตรที่เหลือใช้อีกด้วย

1. คุณสมบัติของชีวมวล

1.1 โครงสร้างทางกายภาพ

เชื้อเพลิงจะมีรูปร่างแตกต่างกันไปตามแต่ละชนิด เช่น น้ำมันดิบมีลักษณะเป็นของเหลวสีดำ และก๊าซธรรมชาติมีลักษณะเป็นก๊าซ ส่วนชีวมวลจะมีลักษณะเป็นของแข็งซึ่งอาจถือได้ว่าอยู่ในประเภทเดียวกับถ่านหิน แต่รูปร่างจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวล นอกจากนี้ความชื้นและสิ่งเจือปนถือได้ว่าเป็นเอกลักษณ์เฉพาะของชีวมวลนั้นๆ

1.2 โครงสร้างทางเคมี

การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีชีวมวล มี 2 แบบ คือ

1.2.1 การวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) คือ การวิเคราะห์หาโครงสร้างองค์ประกอบของเชื้อเพลิงประกอบด้วย

ก. ความชื้น (moisture) หรือน้ำ

ข. ส่วนที่เป็นสารระเหย (volatile matter)

ค. คาร์บอนคงตัว (fixed carbon) ส่วนให้ความร้อน ยิ่งมีค่ามาก ค่าความร้อนยิ่งสูง

ง. จี้เถ้า (ash) หรือส่วนเผาไหม้ไม่ได้ ชีวมวลส่วนใหญ่มีสัดส่วนจี้เถ้าต่ำ ยกเว้นฟางข้าวและแกลบมีปริมาณจี้เถ้าค่อนข้างสูงถึง 10-16 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

วิธีการวัด คือ เผาเชื้อเพลิงที่อุณหภูมิ 105-110 องศาเซลเซียส น้ำหนักที่หายไป คือ ความชื้นจากนั้นนำมาเผาในภาชนะปิดที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส น้ำหนักที่ลดลงคือ volatile matter เชื้อเพลิงส่วนที่เหลือถูกนำมาเผาคู่ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียสในสภาพเปิด ส่วนที่ถูกเผาไหม้ คือ fixed carbon และส่วนที่เผาไหม้ไม่หมด คือ จี๊ถ้ำ

1.2.2 การวิเคราะห์แบบละเอียด (ultimate analysis) เป็นการวิเคราะห์หาสัดส่วนของธาตุ ซึ่งประกอบด้วย 4 ธาตุหลักคือ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจน และธาตุอื่นๆ ที่มีสัดส่วนน้อยคือ กำมะถัน และคลอรีน

วิธีการเริ่มจากการหาค่าธาตุคาร์บอนและไฮโดรเจนโดยวิธีการเผา ส่วนธาตุไนโตรเจนและกำมะถันใช้กระบวนการทางเคมี นอกจากนี้ถ้ามีการตรวจหาธาตุคลอรีนถ้ามีปริมาณมากเพียงพอ ส่วนธาตุออกซิเจนไม่ทำการวิเคราะห์ แต่จะใช้ปริมาณส่วนที่เหลือจากการหาค่าธาตุอื่นๆ แล้ว

2. การวิเคราะห์ทางเคมี (chemical analysis)

การวิเคราะห์ทางเคมีของชีวมวลเป็นการวิเคราะห์ส่วนประกอบเคมีจำพวก เซลลูโลส (cellulose) เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) ลิกนิน (lignin) และเพคติน (pectin)

3. ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวล (heating value)

มีวิธีการวัด 3 แบบคือ

3.1 ค่าความร้อนต่ำ หรือ lower heating value (LHV) หมายถึง ค่าความร้อนเชื้อเพลิงค่าต่ำ เป็นค่าที่คิดไว้แล้วว่า ไอน้ำจากการเผาไหม้นั้นอยู่ในสภาพเป็นไอ และความชื้นของเชื้อเพลิงหลังการเผาไหม้ต้องอยู่ในสภาพที่เป็นไอและได้ใช้ความร้อนจำนวนเท่ากับความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอไปเรียบร้อยแล้ว ซึ่งหาค่าได้จากการนำชีวมวลหนัก 1 กิโลกรัม มาหาค่าความร้อน ค่าที่วัดได้คือ ค่าความร้อนต่ำ (LHV) ต่อกิโลกรัม

3.2 ค่าความร้อนสูง หรือ higher heating value (HHV) หมายถึง ค่าความร้อนเชื้อเพลิงค่าสูง เป็นส่วนที่มีความชื้นปนอยู่ ความชื้นเกิดจากไอน้ำที่ได้จากการรวมตัวของไฮโดรเจนและออกซิเจนในขณะที่มีการเผาไหม้ ซึ่งหาค่าได้จากการนำชีวมวลหนัก 1 กิโลกรัม มาลดความชื้นหรือ

กำจัดน้ำออกให้หมด จากนั้นนำมาหาค่าความร้อน ค่าที่วัดได้คือ ค่าความร้อนสูง (HHV) ต่อ กิโลกรัม และมีความสัมพันธ์กับค่าความร้อนต่ำดังนี้

$$\text{HHV} = \text{LHV} + 5.72(9\text{H} + \text{M}) \text{ kcal/kg หรือ}$$

$$\text{HHV} = \text{LHV} + 23.95(9\text{H} + \text{M}) \text{ kcal/kg}$$

เมื่อ H เท่ากับปริมาณเปอร์เซ็นต์ของธาตุไฮโดรเจนในชีวมวล และเมื่อ M เท่ากับปริมาณ เปอร์เซ็นต์ของความชื้นในชีวมวล

3.3 ค่าความร้อนแห้ง หรือ dry heating value หมายถึงการนำชีวมวลจำนวนหนึ่งมาลด ความชื้นหรือกำจัดน้ำออกให้หมด จากนั้นแบ่งมา 1 กิโลกรัม เพื่อนำมาหาค่าความร้อน ค่าที่วัดได้ คือ ค่าความร้อนแห้งต่อกิโลกรัม และมีความสัมพันธ์กับค่าความร้อนสูงดังนี้

$$\text{Dry heating value} = \text{HHV} / (1 - \text{M}/100)$$

เมื่อ M เท่ากับปริมาณเปอร์เซ็นต์ของความชื้นในชีวมวล (นิรนาม, 2549)

สารชีวมวลที่ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้มี 3 ชนิด ได้แก่ ชังข้าวโพด ต้นสบู่ดำ และเปลือก ผลมะนาว

1. ชังข้าวโพด

ข้าวโพด (Indian corn หรือ Maize) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Zea mays* Linn. (ซีเมส: *Zea mays*) เป็นพืชตระกูลเดียวกับหญ้าที่มีลำต้นสูง โดยเฉลี่ย 2.2 เมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ ลำต้น 0.5-2.0 นิ้ว เมล็ดจากฝักใช้เป็นอาหารคน และสัตว์

1.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

ข้าวโพดเป็นพืชจำพวกหญ้า มีลำต้นตั้งตรงแข็งแรง เนื้อภายในกล้ายพองน้ำสูง ประมาณ 1.4 เมตร ใบเป็นเส้นตรงปลายแหลมยาวประมาณ 30-100 เซนติเมตร เส้นกลางของใบจะ เห็นได้ชัดเจนขอบใบมีขนอ่อนๆ ดอกตัวผู้และดอกตัวเมียอยู่ในตัวเดียวกัน ช่อดอกตัวผู้อยู่ส่วน ยอดของลำต้นช่อดอกตัวเมียอยู่ต่ำลงมาอยู่ระหว่างกาบของใบและลำต้นฝักเกิดจากดอกตัวเมียที่

เจริญเติบโตแล้วฝักอ่อนมีสีเขียว พอแก่เป็นสีน้ำตาล มีการขุดพบซังข้าวโพดและซากของต้นข้าวโพดที่ใกล้แม่น้ำในนิวเม็กซิโก (แถบอเมริกาใต้) และปัจจุบันนิยมปลูกแพร่หลายในแถบอเมริกา แคนาดา สามารถปลูกได้ในสภาพที่ภูมิอากาศแตกต่างกันมากๆ เป็นแหล่งอาหารที่สำคัญของสัตว์ได้ทั้ง ต้น ใบ และเมล็ด

1.2 ซังข้าวโพดและลำต้น

ซังข้าวโพดได้จากการสีข้าวโพดเพื่อนำเมล็ดมาใช้งานส่วนใหญ่เป็นข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในส่วนของลำต้นจะถูกตัดหลังจากการเก็บเกี่ยวแล้ว ปัจจุบันการสีข้าวโพดจะใช้เครื่องจักรที่สามารถเคลื่อนที่ไปตามไร่ข้าวโพด ดังนั้นจะสามารถหาซังข้าวโพดและต้นข้าวโพดได้ตามไร่ข้าวโพด ซังข้าวโพดมีประโยชน์หลายอย่าง นำไปเป็นวัตถุดิบผลิตแอลกอฮอล์ เป็นเชื้อเพลิงผสมกับโมลาสเพื่อเลี้ยงสัตว์ เป็นต้น ส่วนลำต้นนำไปเลี้ยงสัตว์ได้เช่นกัน จุดเด่นของซังข้าวโพดคือ มีค่าความร้อนสูงเมื่อเทียบกับชีวมวลอื่นๆ ส่วนลำต้นข้าวโพด มีส่วนหนึ่งที่ไม่ได้นำไปใช้งาน ชาวไร่ข้าวโพดจะไถฝังกลบในไร่ จุดด้อยของซังข้าวโพดคือ มีการนำไปใช้ประโยชน์หลายอย่าง ดังนั้นต้องพิจารณาถึงแหล่งที่มีการนำไปใช้งานน้อยที่สุด เพื่อไม่ให้เกิดการแย่งกันซื้อส่วนของลำต้น ข้าวโพดจะเก็บรวบรวมลำบากต้องใช้แรงงานคนมาก

2. ต้นสบู่ดำ

ต้นสบู่ดำ (physic nut or purging nut) เป็นพืชพื้นเมืองของอเมริกากลาง ภาษาถิ่นภาคเหนือ เรียกว่าต้นมะหุ้งฮั่ว ภาคกลางเรียกว่าต้นสบู่ดำ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เรียกว่าต้นมะเข้ หมายกเข้ มักเข้ หรือสีหลอด ส่วนภาคใต้เรียกว่าต้นหอเทศ ชื่อทางวิทยาศาสตร์ *Jatropha curcas* linn. ตระกูล Euphorbiaceae

2.1 ลักษณะทั่วไป

เป็นไม้พุ่มยืนต้นขนาดกลางสูงประมาณ 2-7 เมตร อายุยืนไม่น้อยกว่า 20 ปี ลำต้นและยอดคล้ายมะหุ้งแต่ไม่มีขนลำต้นเกลี้ยงเกลาวาวอ้วนแต่อ่อน เนื้อไม้ไม่มีแก่น ทนต่อความแห้งแล้งได้ดี ขึ้นได้ในที่ดินดอนลูกธัญ ถิ่นทุรกันดาร หากปลูกในที่ลุ่มน้ำท่วมขัง ใบจะเหี่ยวและลำต้นเน่าตาย

2.1.1 ลักษณะของใบ

คล้ายใบฝ้าย หรือใบพุดตาน แต่หนากว่า ใบหยักคล้ายใบละหุ่งแต่หยักตื้นมี 4 แฉก ใบที่โตเต็มที่มียาวขนาดใบเท่าฝ่ามือ ก้านใบยาวเมื่อหักหรือเด็ดก้านใบจะมียางสีขาวไหลออกมา

2.1.2 ดอก

ต้นสมุนไพรออกดอกเป็นช่อกระจุกที่ข้อส่วนปลายของยอด ดอกมีขนาดเล็กสีเหลือง มีกลิ่นหอมอ่อนๆ

2.1.3 ผลและเมล็ด

รูปทรงของผลค่อนข้างจะเป็นรูป 6 เหลี่ยม ดอกเป็นช่อพวง ผลโตเกลี้ยงกลาผลดิบสีเขียวอ่อน และสุกจะสีเหลืองคล้ายผลลูกจันทน์ ผลหนึ่งมี 3 พู แต่ละพูจะทำหน้าที่ห่อหุ้มเมล็ดเอาไว้ เมล็ดมีสีน้ำตาลเล็กกว่าเมล็ดละหุ่ง มีลายขาวดำเล็กน้อย ตรงปลาย

2.2 ประโยชน์ทางด้านเชื้อเพลิง

เมล็ดสมุนไพรสามารถนำมาสกัดได้โดยการนำมาบีบอัด น้ำมันสมุนไพรที่บีบอัดได้มีคุณสมบัติคล้ายน้ำมันดีเซล เนื้อในเมล็ดสีขาวเรียก albumen หรือ kernel มีประมาณ 60-68% ของน้ำหนักเมล็ดให้น้ำมัน 46-58% ของน้ำหนัก kernel หรือประมาณ 30-40% ของน้ำหนักเมล็ดสามารถใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงหรือเป็นพลังงานทดแทนให้แสงสว่าง ทำน้ำมันหล่อลื่น ทำสบู่ เทียนไข และใช้ในอุตสาหกรรมทอผ้า หากเมล็ดที่สกัดเอาน้ำมันออกแล้ว มีเปอร์เซ็นต์ธาตุไนโตรเจนและฟอสฟอรัสสูง เหมาะที่จะใช้เป็นปุ๋ยได้ดี

3. มะนาว

ชื่อทางวิทยาศาสตร์ของมะนาวคือ *Citrus antifolia* swingle หรือ “*Citrus anruantifolia*” (Christm & Panz) มะนาวเป็นไม้ผลตระกูลส้มประเภทหนึ่งที่ปลูกกันอย่างแพร่หลาย โดยแหล่งปลูกที่สำคัญได้แก่ จังหวัดเพชรบุรี นครศรีธรรมราช สุราษฎร์ธานี นครสวรรค์ กาญจนบุรี สมุทรสาคร นครปฐม และเชียงใหม่ มะนาวจัดได้ว่าเป็นพืชที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจพืชหนึ่งที่

ตลาดมีความต้องการสูงตลอดทั้งปีและจากอัตราการเพิ่มของพลเมืองและการขยายตัวทางเศรษฐกิจที่มีแนวโน้มค่อนข้างสูง รวมทั้งการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรม ซึ่งมีการนำมะนาวมาใช้เป็นวัตถุดิบอีกมากมาย จึงทำให้มะนาวมีบทบาทสำคัญทางด้านการค้ามากยิ่งขึ้น

กระบวนการแปรรูปชีวมวลไปเป็นพลังงานรูปต่างๆ

1. การเผาไหม้โดยตรง (combustion)

เมื่อนำชีวมวลมาเผา จะได้รับความร้อนออกมาตามค่าความร้อนของชีวมวลนั้นๆ ความร้อนที่ได้จากการเผาสามารถนำไปใช้ในการผลิตไอน้ำที่มีอุณหภูมิและความดันสูง ไอน้ำนี้จะถูกนำไปขับเคลื่อนไอน้ำเพื่อผลิตไฟฟ้าต่อไป ตัวอย่างชีวมวลประเภทนี้คือ เศษวัสดุทางการเกษตรและเศษไม้

2. การผลิตแก๊ส (gasification)

การผลิตแก๊สเป็นกระบวนการเปลี่ยนเชื้อเพลิงแข็งหรือชีวมวลให้เป็นแก๊สเชื้อเพลิง แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้นี้เรียกว่าแก๊สชีวภาพ (biogas) มีองค์ประกอบของแก๊สมีเทน แก๊สไฮโดรเจน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สชีวภาพนี้สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับกังหันแก๊ส (gas turbine) เครื่องยนต์สำหรับผลิตไฟฟ้า รถยนต์ การหุงต้มอาหาร

3. การหมัก (fermentation)

เมื่อนำชีวมวลมาหมักด้วยแบคทีเรียในสภาวะไร้อากาศ ชีวมวลจะถูกย่อยสลายและแตกตัว เกิดเป็นแก๊สชีวภาพที่มีองค์ประกอบของแก๊สมีเทนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทนใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์สำหรับผลิตไฟฟ้า นอกจากนี้ยังสามารถใช้ขยยะอินทรีย์ชุมชน มูลสัตว์น้ำเสียจากชุมชนหรืออุตสาหกรรมเกษตรเป็นแหล่งวัตถุดิบชีวมวลก็ได้

การผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากพืช

กระบวนการที่ใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากพืช มีดังนี้

1. กระบวนการทางชีวภาพ ทำการย่อยสลายแป้ง น้ำตาล และเซลลูโลสจากพืชผลทางการเกษตร เช่น อ้อย มันสำปะหลัง ข้าวโพด ข้าวฟ่างหวาน กากน้ำตาล และเศษลำต้นอ้อย ให้เป็นเอทานอล เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงเหลวในเครื่องยนต์เบนซิน

2. กระบวนการทางฟิสิกส์และเคมี โดยสกัดน้ำมันออกจากพืชน้ำมัน จากนั้นจึงนำน้ำมันที่ได้ไปผ่านกระบวนการทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน (transesterification) เพื่อผลิตเป็นไบโอดีเซล

3. กระบวนการใช้ความร้อนสูง เช่น กระบวนการไพโรไลซิส เมื่อวัสดุทางการเกษตรได้รับความร้อนสูงในสภาพไร้ออกซิเจน จะเกิดการสลายตัว เกิดเป็นเชื้อเพลิงในรูปของเหลวและแก๊สผสมกัน

เชื้อเพลิงเหลว

เชื้อเพลิงเหลว (liquid fuels) เป็นเชื้อเพลิงที่นิยมใช้กันมากทั้งตามโรงงานอุตสาหกรรม ยานพาหนะ เพราะสะดวกในการใช้ และให้ค่าความร้อนทางเชื้อเพลิงสูง เชื้อเพลิงเหลวที่ใช้ส่วนใหญ่จะได้อาจจากผลิตภัณฑ์การกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม เช่น น้ำมันเบนซินหรือน้ำมันแก๊สโซลีน น้ำมันเชื้อเพลิงเครื่องบินไอพ่น น้ำมันก๊าด น้ำมันดีเซล น้ำมันเตา เป็นต้น ส่วนเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากกรรมวิธีการผลิตจากหินน้ำมันหรือพืชทางการเกษตร เช่น จากการผลิตแอลกอฮอล์ หรือการสกัดน้ำมันจากเมล็ดสบู่ดำ ฯลฯ ซึ่งยังอยู่ในขั้นการพัฒนานำไปใช้งานอยู่ และปริมาณที่ผลิตได้ยังไม่เพียงพอต่อการใช้ในปัจจุบัน ดังนั้นปิโตรเลียมจึงยังจัดว่าเป็นวัตถุดิบที่สำคัญมากต่อการผลิตเชื้อเพลิงเหลว

1. น้ำมันเบนซินหรือน้ำมันแก๊สโซลีน

น้ำมันเบนซินหรือน้ำมันแก๊สโซลีนเป็นน้ำมันที่ได้จากการปรุงแต่งคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกลั่นน้ำมันโดยตรง และอาจได้จากการแยกก๊าซธรรมชาติเหลวหรือแก๊สโซลีนธรรมชาติ น้ำมันเบนซินจะผสมสารเพิ่มคุณภาพเพื่อให้เหมาะกับการใช้งาน เช่น เพิ่มค่าออกเทน สารเคมีสำหรับป้องกันสนิม ป้องกันการกัดกร่อนในถังน้ำมันและท่อทางน้ำมัน รวมทั้งสารเคมีที่ช่วยทำความสะอาดคาร์บูเรเตอร์ จึงเหมาะที่จะใช้กับยานพาหนะ เช่น รถยนต์ หรือเครื่องยนต์ทั่วไป เช่น เครื่องสูบน้ำ เครื่องปั่นไฟฟ้าขนาดเล็ก รวมถึงเครื่องบินใบพัดที่เรียกว่า อะไวเอชันแก๊สโซลีน (aviation gasoline)

ช่วงจุดเดือดของน้ำมันเบนซินที่ใช้สำหรับเครื่องยนต์ทั่วไป มีช่วงจุดเดือดระหว่าง 38-214 องศาเซลเซียส และน้ำมันเบนซินสำหรับเครื่องบินใบพัดมีช่วงจุดเดือดระหว่าง 38-170 องศาเซลเซียส

2. น้ำมันเชื้อเพลิงเครื่องบิน (aviation fuels)

น้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้กับเครื่องบินตามลักษณะของเครื่องยนต์ แบ่งเป็น 2 ประเภทคือ

2.1 น้ำมันเบนซินเครื่องบินใบพัด (aviation gasoline) เครื่องยนต์ที่ใช้กับเครื่องบินใบพัดมีระบบและลักษณะคล้ายกับเครื่องยนต์แก๊สโซลีนหรือเครื่องยนต์เบนซิน ดังนั้นน้ำมันเชื้อเพลิงที่นำมาใช้กับเครื่องบินใบพัดจึงมีองค์ประกอบเหมือนกับน้ำมันเบนซินที่ใช้กับรถยนต์ แต่ต้องมีความสะอาด บริสุทธิ์เป็นพิเศษ มีค่าออกเทนสูงกว่า มีจุดไหลเทต่ำ เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้ในสภาวะที่ความดันและอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงในช่วงกว้างมาก มีช่วงจุดเดือดต่ำกว่าน้ำมันเบนซินทั่วไป (ประมาณ 38-170 องศาเซลเซียส)

2.2 น้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบินไอพ่น (aviation turbine fuels) เครื่องยนต์ไอพ่นในสมัยแรกๆ ได้ใช้น้ำมันก๊าดที่มีจำหน่ายทั่วไปเป็นเชื้อเพลิง เนื่องจากน้ำมันก๊าดมีคุณสมบัติในการระเหยตัวต่ำ (ระเหยช้า) อันเป็นคุณสมบัติสำคัญของเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบินไอพ่น หรือที่เรียกว่า เครื่องเจ็ท ในปัจจุบันเครื่องบินไอพ่นของสายการบินพาณิชย์ส่วนใหญ่ยังนิยมใช้เชื้อเพลิงที่มีช่วงจุดเดือดเช่นเดียวกับของน้ำมันก๊าด แต่จะต้องมีความสะอาด บริสุทธิ์ และมีคุณสมบัติบางอย่างดีกว่าน้ำมันก๊าดทั่วไป ส่วนเครื่องบินไอพ่นที่ใช้ในทางทหารนั้น ต้องใช้เชื้อเพลิงที่มีคุณสมบัติต่างกันออกไปเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งาน เพราะเครื่องบินต้องการความเร็วสูง จึงต้องใช้ใช้กำลังขับเคลื่อนมาก น้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบินไอพ่นที่ใช้ในทางทหารนั้นเป็นเชื้อเพลิงผสมระหว่างน้ำมันก๊าดกับเนฟธา (เนฟธาเป็นส่วนผสมของน้ำมันเบนซิน)

3. น้ำมันก๊าด (kerosene fuel)

น้ำมันก๊าดหรือที่เรียกว่า คีโรซีน (kerosene) นั้นเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดหนึ่งที่ได้จากการกลั่นปิโตรเลียม การทำอุตสาหกรรมปิโตรเลียมในสมัยก่อนนั้น ผลิตภัณฑ์หลักของผู้กลั่นน้ำมันก็คือ น้ำมันก๊าด เพราะคนส่วนใหญ่นิยมใช้น้ำมันก๊าดไปจุดตะเกียงให้แสงสว่างมากกว่าในปัจจุบัน แต่ปัจจุบันน้ำมันก๊าดได้นำไปใช้ประโยชน์อย่างอื่นอีกมากมาย เช่น นำไปเป็นเชื้อเพลิงสำหรับ

เครื่องบินใบพัด เครื่องบินไอพ่น ตู้เย็นน้ำมันก๊าด นำไปเป็นส่วนผสมในยาฆ่าแมลง น้ำมันชักเงา สีนํ้ามัน ส่วนผสมสำหรับนํ้ายาทำความสะอาด และอุตสาหกรรมเซรามิก เพราะเป็นอุตสาหกรรมชนิดที่ต้องการการเผาไหม้ที่สะอาด ทางด้านการเกษตร นำไปใช้กับรถไถ รถแทรกเตอร์ นอกจากนี้ยังใช้เป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อนในการบ่มใบยาสูบและอบพืชผลอีกด้วย

น้ำมันก๊าดที่มีคุณภาพดี ต้องให้ค่าความร้อนสูง ให้แสงสว่างมาก และมีควันสูง น้ำมันก๊าดทั่วไปมีช่วงจุดเดือดประมาณ 151-216 องศาเซลเซียส ค่าความร้อนทางเชื้อเพลิงประมาณ 2730 กิโลจูล/กิโลกรัม และจุดวาบไฟ 40 องศาเซลเซียส

น้ำมันก๊าดเป็นของผสมไฮโดรคาร์บอนที่มีจุดเดือดตั้งแต่ 150 ถึง 300 องศาเซลเซียส ซึ่งมีทั้งพาราฟิน แนฟทีน และอะโรมาติกผสมอยู่ในอัตราส่วนต่างๆ กันแล้วแต่ที่มาของน้ำมันดิบ นอกจากนี้ยังมีสิ่งสกปรกเจือปน เช่น สารประกอบของกำมะถัน ไนโตรเจน ฟีนอล และกรดอินทรีย์อื่นๆ ซึ่งทำให้คุณสมบัติของน้ำมันก๊าดเสื่อม (ปราโมทย์และนุรักษ์, 2543)

4. น้ำมันดีเซล (diesel fuel)

น้ำมันดีเซล (diesel fuel) เป็นผลิตภัณฑ์ชนิดหนึ่งที่ได้จากการกลั่นน้ำมันดิบ แต่จะมีช่วงจุดเดือดและความข้นใสสูงกว่าน้ำมันเบนซิน เนื่องจากเครื่องยนต์ดีเซลเป็นเครื่องยนต์ที่มีมูลฐานการทำงานแตกต่างจากเครื่องยนต์เบนซิน การจุดระเบิดของเครื่องยนต์ดีเซลใช้ความร้อนที่เกิดจากการอัดอากาศอย่างมากภายในกระบอกสูบ แล้วฉีดเชื้อเพลิงเข้าไปเพื่อทำการเผาไหม้ ไม่ใช่เป็นการจุดระเบิดจากหัวเทียนเหมือนในเครื่องยนต์เบนซิน เครื่องยนต์ดีเซลในสมัยแรกๆ นั้นมีขนาดใหญ่โตมาก เพราะต้องการให้ทนกับความร้อนและแรงอัดสูงๆ ได้ เครื่องยนต์ดีเซลสมัยก่อนก็นำไปใช้เป็นเครื่องต้นกำลัง เช่น ใช้เป็นต้นกำลังในการผลิตกระแสไฟฟ้า เช่น ใช้เป็นเครื่องต้นกำลังของเรือมีอุปกรณ์หลายชนิดที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจ เช่น รถไฟ รถบรรทุก รถแทรกเตอร์ เรือประมง เป็นต้น ดังนั้นจึงมีการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันดีเซลให้เหมาะสมกับเครื่องยนต์ที่ใช้กับงานนั้น ๆ

ความสามารถในการระเหยตัวของน้ำมันจะมีผลต่อจุดเดือด (boiling point) จุดวาบไฟ (flash point) และจุดติดไฟ (fire point) ของน้ำมันดีเซลด้วย ช่วงจุดเดือดของน้ำมันดีเซลทั่วไปมีค่าประมาณ 138-385 องศาเซลเซียส

5. น้ำมันเตา (residual fuels)

น้ำมันเตา คือส่วนที่หนักที่สุดของการกลั่นน้ำมันดิบเพื่อแยกเป็นเชื้อเพลิง ส่วนนี้จะไม่ระเหยเป็นไอและเหลืออยู่กันหากลั่น น้ำมันเตาเป็นผลิตภัณฑ์อีกชนิดหนึ่งที่ได้จากการกลั่นปิโตรเลียม เป็นน้ำมันหนักที่เหลือจากการกลั่นน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดอื่น เช่น น้ำมันเบนซิน น้ำมันดีเซล เป็นต้น น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิงสำหรับเตาหม้อน้ำและเตาเผา หรือเตาหลอมในโรงงานอุตสาหกรรม เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่ เครื่องยนต์เรือเดินทะเลขนาดใหญ่ และอื่นๆ ทั้งนี้เนื่องจากน้ำมันเตามีราคาถูกกว่าน้ำมันเชื้อเพลิงอย่างอื่น และให้ความร้อนทางเชื้อเพลิงได้ดีด้วย น้ำมันเตามีชื่อเรียกหลายอย่าง เช่น burner fuel oil, furnace oil, stove oil, bunker oil เป็นต้น

น้ำมันเตาที่ใช้มีอยู่หลายชนิด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความข้นใสของน้ำมันเตา โดยทั่วไปน้ำมันเตาที่มีคุณภาพจะมีความข้นใสต่ำกว่า การแบ่งประเภทของน้ำมันเตา แบ่งได้เป็น 3 ประเภทคือ

5.1 น้ำมันเตาชนิดเบา (light fuel oil) มีค่าความข้นใส (viscosity) ต่ำ ส่วนมากใช้เผาไหม้ให้ความร้อนกับหม้อน้ำขนาดเล็กทั่วไป เพื่อใช้ในการผลิตไอน้ำและนำไปใช้งานต่างๆ

5.2 น้ำมันเตาชนิดกลาง (medium fuel oil) น้ำมันชนิดนี้มีค่าความเข้มข้นใสปานกลาง ส่วนมากจะใช้เผาให้ความร้อนแก่หม้อน้ำ (boiler) เตาเผาขนาดกลาง หรือขนาดเล็กที่มีอุปกรณ์อุ่นน้ำมัน

5.3 น้ำมันเตาชนิดหนัก (heavy fuel oil) น้ำมันชนิดนี้จะมีค่าความหนืดหรือความข้นใสสูง ส่วนมากจะนำไปใช้กับเตาเผาขนาดใหญ่ในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น เตาเผาของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์ (ประเสริฐ, 2544)

กระบวนการแครกกิงโดยปฏิกิริยาเร่ง

กระบวนการแครกกิง (catalytic cracking) เป็นการแตกย่อยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักโมเลกุลสูง จนมีขนาดที่เหมาะสมสำหรับเป็นน้ำมันเชื้อเพลิง เนื่องจากขนาดและโครงสร้างที่เหมาะสมจะทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ดีภายในเครื่องยนต์เบนซิน ซึ่งการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นในกระบอกสูบของเครื่องยนต์อาจเกิดปรากฏการณ์การจุดระเบิดก่อนจังหวะของเครื่องยนต์ ซึ่งเรียกว่าการน็อก (knocking) ของเครื่องยนต์ สำหรับการแก้ไขการน็อกสามารถทำได้

โดยผสมสารป้องกันการน็อก (anti-knocking agent) ซึ่งได้แก่สารประกอบเตตระ-เอทิล-เลด (tetra-ethyl lead) หรือการผสมน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีส่วนผสมของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เหมาะสม เพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่ดี สำหรับการเผาไหม้ของน้ำมันหรือส่วนผสมของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนนั้นถูกกำหนดเป็นค่าออกเทน (octane number) โดยค่านี้ถูกกำหนดไว้ว่าการเผาไหม้ของสารประกอบนอร์มัล-เฮปเทน (n-heptane) และไอโซ-ออกเทน (isooctane) มีค่าเป็นศูนย์และร้อย ตามลำดับ

สำหรับสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าออกเทน ได้แก่ สารประกอบอะโรมาติก (aromatic) และ อะลิฟาติก-ไฮโดรคาร์บอนชนิดกิ่ง (branch aliphatic hydrocarbon) ซึ่งมีค่าออกเทนสูงกว่าสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดอะลิไซคลิก (alicyclic) หรือ อะลิฟาติกชนิดเส้นตรง (linear aliphatic hydrocarbon) ดังนั้นสัดส่วนทางเคมีของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจึงเป็นตัวบ่งชี้ถึงคุณภาพของน้ำมันเชื้อเพลิง

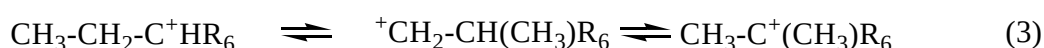
ในสมัยก่อนทำการแครกกิ่งน้ำมันดิบโดยไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นจึงต้องควบคุมอุณหภูมิของการแครกกิ่งให้อยู่ระหว่าง 490 และ 800 เคลวิน ดังนั้นจึงเรียกกระบวนการเช่นนี้ว่า กระบวนการแครกกิ่งด้วยความร้อน (thermal cracking) ซึ่งกระบวนการแครกกิ่งแบบนี้ทำให้เกิดสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดและน้ำหนักโมเลกุลที่เล็กเกินไป และยังเป็นกระบวนการที่ไม่มีประสิทธิภาพ กล่าวคืออัตราการแตกย่อยของโมเลกุลเกิดขึ้นไม่แน่นอน และผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าออกเทนต่ำ โดยมีค่าระหว่าง 70-80 ต่อมาได้มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการแครกกิ่ง โดยใช้สารประกอบเบนโทไนต์ (bentonite) และดินกรด (acid clay) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ต่อมาหลังสงครามโลกครั้งที่สองได้ใช้สารสังเคราะห์อะลูมิเนียมซิลิเกตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการแครกกิ่งทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีค่าออกเทนสูงถึง 90-95 เหตุที่ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแครกกิ่งโดยมีสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าออกเทนสูง เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนสารประกอบชนิดเส้นตรงของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนคาร์บอนเท่ากัน จนเกิดเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดกิ่ง สารประกอบอะโรมาติกชนิดไม่มีหมู่ฮัลลิล และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนไฮโดรเจนลดลง

กระบวนการเกิดปฏิกิริยาแครกกิ่งโดยตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยปฏิกิริยาระหว่างกระบวนการแครกกิ่งเกิดขึ้นจำนวนมาก ซึ่งได้แก่การเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจิเนชัน ทำให้เกิดสารประกอบอัลคีน ดังแสดงในสมการ (1) และปฏิกิริยาการเกิดคาร์โบเนียมไอออน (carbonium ion) บนตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด ดังแสดงในสมการ (2) คาร์โบเนียมไอออนที่เกิดขึ้นพบว่ามีเสถียรแตกต่างกัน กล่าวคือไอออนที่เป็นสารประกอบองศาสาม (tertiary ion) มีความ

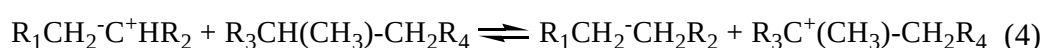
เสถียรมากกว่าไอออนองศาสอง (secondary ion) และไอออนองศาสองเสถียรกว่าคาร์โบเนียมไอออนองศาหนึ่ง (primary ion)



การเกิดปฏิกิริยาการเคลื่อนย้ายหมู่เมทิล (methyl group migration) ของคาร์โบเนียมไอออนเกิดขึ้นได้ดังสมการ (3)



และปฏิกิริยาการเคลื่อนย้ายไฮไดรด์ (hydride transfer) ก็สามารถเกิดขึ้นได้เช่นกัน ดังแสดงในสมการ (4)



สำหรับคาร์โบเนียมไอออนที่มีขนาดใหญ่สามารถเกิดปฏิกิริยาที่เรียกว่าเบตา-ซิสชัน (β-scission) เกิดเนื่องจากคาร์โบเนียมไอออนที่มีขนาดใหญ่ซึ่งมีความเสถียรน้อยกว่าคาร์โบเนียมไอออนที่มีขนาดเล็ก ดังนั้น ณ ตำแหน่งตรงพันธะคาร์บอน-คาร์บอน จึงถูกทำให้แตกหักได้ง่ายและเกิดเป็นสารประกอบอัลคีนและคาร์โบเนียมไอออนองศาหนึ่ง สำหรับปฏิกิริยาเบตา-ซิสชันได้แก่ปฏิกิริยาดังสมการ (5)



กระบวนการแตกกิ่งโดยตัวเร่งปฏิกิริยา ในทางปฏิบัติพบว่าเกิดปฏิกิริยาดิไฮโดรจีเนชันมากเกินไป จึงเป็นเหตุให้เกิดการเกาะติดของคาร์บอนบนตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นผลให้ความว่องไวปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง แต่ว่าคาร์บอนที่เกาะติดบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล่านี้มักถูกเผาไหม้ได้เกือบหมด ทำให้ความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยากลับคืนสภาพดีเช่นเดิม อย่างไรก็ตามคาร์บอนที่ถูกเผาไหม้มักทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นก๊าซที่เป็นอันตราย ดังนั้นกระบวนการแตกกิ่งจึงจำเป็นต้องใช้โลหะโนเบิลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้คาร์บอนมอนอกไซด์ถูกออกซิไดซ์ให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ (วิทยา, 2547)

กระบวนการไพโรไลซิส

กระบวนการไพโรไลซิสเป็นกระบวนการสลายตัวของสารด้วยความร้อนในสภาวะไร้อากาศหรืออับอากาศในช่วงอุณหภูมิสูง เช่น 500-800 องศาเซลเซียส ซึ่งได้ผลิตภัณฑ์หลัก 3 ชนิด ได้แก่ แก๊ส (คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สไฮโดรคาร์บอน และอื่นๆ) ของเหลว (สารละลายอินทรีย์และน้ำมันดิน (Tar)) และของแข็ง (ถ่าน) โดยสัดส่วนของผลิตภัณฑ์และสารประกอบในผลิตภัณฑ์ที่ได้ขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวลและวิธีการไพโรไลซิส (Lehmanns, 2007) ซึ่งกระบวนการนี้มีข้อดีเมื่อเทียบกับการเผาในเตาเผา เนื่องจากจะได้น้ำมันชีวภาพเกิดขึ้นจากปฏิกิริยา ซึ่งนับว่านอกจากเป็นการกำจัดของเสียแล้วยังได้พลังงานทดแทนเป็นผลพลอยได้อีกด้วย

1. หลักการของกระบวนการไพโรไลซิส

การทำให้ชีวมวลซึ่งเป็นวัตถุดิบที่ประกอบไปด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ที่มีความชื้นประมาณร้อยละ 20 – 30 โดยน้ำหนักนั้นปราศจากน้ำโดยอาศัยกระบวนการทำแห้งที่อุณหภูมิประมาณ 120 – 150 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นชีวมวลจะถูกให้ความร้อนจนมีอุณหภูมิประมาณ 500–600 องศาเซลเซียส เพื่อทำลายพันธะทางเคมีของโมเลกุลซึ่งเป็นขั้นตอนของกระบวนการไพโรไลซิสได้เป็นผลิตภัณฑ์จำพวกแก๊สต่างๆ ได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทน และแก๊สไฮโดรเจน ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่สามารถกลั่นตัวได้ เช่น น้ำ กรดอะซิติก กรดฟอร์มิก อะซิโตน เมธานอล เมทิลอะซิเตท ฟีนอล เป็นต้น รวมทั้งพวกทาร์และชาร์ หลังจากนั้นเมื่อมีการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นไปอีกจนมีอุณหภูมิประมาณ 900 – 1,100 องศาเซลเซียส ประกอบกับการเติมตัวออกซิไดส์ให้แก่ระบบจะทำให้ทาร์และถ่านชาร์เกิดการแตกตัวได้เป็นผลิตภัณฑ์แก๊สต่อไป ซึ่งขั้นตอนนี้ก็เป็นขั้นตอนของกระบวนการแกสซิฟิเคชันนั่นเอง

2. วิธีการไพโรไลซิส

วิธีการไพโรไลซิสแบ่งตามวิธีการให้ความร้อน ได้เป็น 2 ประเภทหลัก ๆ ได้แก่

2.1 การไพโรไลซิสแบบปกติ (conventional pyrolysis) หรือ slow pyrolysis คือ การไพโรไลซิสโดยให้อัตราความร้อนน้อยกว่า 10 องศาเซลเซียสต่อองศาและอุณหภูมิที่ใช้น้อยกว่า 500 องศาเซลเซียส โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้ส่วนใหญ่จะเป็นน้ำมันดิน (tar) และถ่านไม้ (charcoal) ส่วน

slow pyrolysis gasification เป็นกระบวนการแปรรูปพลังงานที่สะสมอยู่ในถ่านและน้ำมันดิน ให้อยู่ในรูปของแก๊สเชื้อเพลิง เป็นกระบวนการที่ซับซ้อน แก๊สชีวมวลที่ได้จะเป็นแก๊สที่มีพลังงานปานกลาง และมีความสะอาด วิธีการแปรรูปพลังงานอาจทำได้โดยการนำถ่านไปเผาในฟลูอิดไคส์เบด (fluidized bed) ของทราย โดยทำให้ทรายมีความร้อนสูงขึ้น และส่งทรายร้อนดังกล่าวไปยัง bed ที่สองซึ่งอยู่ถัดไป ซึ่งจะทำให้เกิดการกลั่นสลายของถ่านในเบดนี้ ถ่านส่วนหนึ่งในเบดที่สองจะถูกเผาเพื่อให้ความร้อนกับ pyrolysis gas และนำความร้อนที่ได้ในฟลูอิดไคส์เบดแรก หรือให้ความร้อนจากภายนอกด้วยการป้อนเข้าไปพร้อมกับชีวมวลเปียกที่มีความดันสูง

2.2 การไพโรไลซิสแบบเร็ว (flash หรือ fast pyrolysis) คือ การไพโรไลซิสโดยให้อัตราความร้อนอยู่ในช่วง 10-10,000 องศาเซลเซียสต่อวินาที และอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 400-1,000 องศาเซลเซียสโดยผลิตภัณฑ์ที่ได้คือแก๊สและของเหลวเป็นส่วนใหญ่ และได้มีการค้นพบว่า fast pyrolysis gasification ได้มีไอของโมเลกุลเกิดขึ้นระหว่างการกลั่นสลายนั้นสามารถที่จะแตกตัวที่อุณหภูมิสูงให้สารโอเลฟินและผลิตภัณฑ์เหล่านี้สามารถที่จะคงอยู่ได้ถ้าได้รับความร้อนก่อนที่ปฏิกิริยาต่อไปจะเกิดขึ้น สารพวกโอเลฟินเป็นสารที่สามารถนำไปสังเคราะห์เป็นสารเคมีอื่นที่เป็นประโยชน์ได้ อาทิเช่น สามารถแปรรูปอย่างง่ายให้เป็นแก๊สโซลีน สารพวกไฮโดรคาร์บอนหรือแอลกอฮอล์ (วิชญ์, 2549)

3. ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิส

3.1 ถ่านชาร์ (charcoal) เป็นผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส โดยมีค่าความร้อน 4,800 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม ในด้านสิ่งแวดล้อมถ่านชาร์ช่วยลดมลพิษจากก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ สามารถนำไปผลิตเป็นวัตถุดิบต่างๆ เช่น ตัวดูดซับน้ำมัน วัสดุก่อสร้าง ฉนวน ปูน ตัวกรอง หรือ ถ่านกัมมันต์

3.2 ก๊าซไพโรไลซิส (pyrolysis gas) ผลิตภัณฑ์ที่เป็นก๊าซซึ่งเกิดจากก๊าซที่ไม่ผ่านการควบแน่น ตัวอย่างเช่น คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทน ไฮโดรเจน และก๊าซที่มีมวลโมเลกุลต่ำ ก๊าซไพโรไลซิสมีค่าความร้อนประมาณ 1.8 กิโลแคลอรีต่อลิตร ด้วยเหตุที่ค่าความร้อนค่อนข้างต่ำ จึงนำมาใช้ในกระบวนการอบแห้ง ปั่นน้ำ และยังเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า

3.3 น้ำมันชีวภาพ (pyrolysis oil or bio-oil) ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้อาจใช้เป็นเชื้อเพลิงของเหลวหรือสกัดเป็นสารเคมี น้ำมันชีวภาพ ยังมีชื่อที่เรียกอื่นๆ อีก เช่น pyrolysis oil, biocrude

oil, bio-fuel-oil, liquid smoke, pyrolysis tar, pyroligneous acid เป็นต้น ซึ่งน้ำมันชีวภาพที่ได้มีลักษณะทางกายภาพเป็นของเหลวสีดำ น้ำตาลเข้ม หรืออาจเป็นสีน้ำตาลแดงเข้ม ขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบและวิธีการให้ความร้อน (slow หรือ fast pyrolysis) ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพ มีค่าต่ำคือประมาณ 17-19 เมกะจูลต่อกิโลกรัม เมื่อเทียบกับน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดอื่นคือประมาณ 42-44 เมกะจูลต่อกิโลกรัม (จันทร์จิรา, 2549)

4. สภาพที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ในกระบวนการไพโรไลซิส

โดยทั่วไปแล้วการไพโรไลซิสจะได้น้ำมันประมาณ 38-56 เปอร์เซ็นต์ และได้ก๊าซประมาณ 10-30 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่เหลือเป็นของแข็ง น้ำมันที่ได้ส่วนใหญ่จะประกอบด้วย น้ำมันเบนซิน น้ำมันก๊าด น้ำมันดีเซล น้ำมันเตา และน้ำมันหนักผสมรวมกัน ปริมาณและคุณภาพของน้ำมันและก๊าซที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสนั้นจะมากน้อยเพียงใด ขึ้นอยู่กับตัวแปรดังต่อไปนี้

4.1 สภาพที่ใช้ในการไพโรไลซิส เช่น อุณหภูมิ ความดัน ความเร็วในการให้ความร้อน อุณหภูมิสุดท้าย เวลาที่ใช้ในการเผา บรรยากาศในปฏิกรณ์ และระบบการป้อนสาร เป็นต้น

4.2 ชนิดของเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งมีผลต่ออัตราเร็วในการให้ความร้อนและเวลาที่ใช้ในกระบวนการ

4.3 วัตถุดิบที่ป้อนเข้า เช่น ขนาดของสาร ชนิดและส่วนผสมของสาร เป็นต้น

งานวิจัยนี้มีเป้าหมายเพื่อศึกษากระบวนการไพโรไลซิสช่วงช้าๆ โดด ต้นสบูดำ และเปลือกผลมะนาว โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสประกอบด้วยก๊าซ ของเหลวและถ่านชาร์ (wood charcoal) ซึ่งส่วนที่เป็นของเหลว จะนำไปวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพ ส่วนถ่านที่ได้จะนำไปสังเคราะห์เป็นถ่านกัมมันต์ (activated carbon) เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันที่ได้

ถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) หมายถึง ผลิตภัณฑ์ของคาร์บอนซึ่งเป็นสารดูดซับชนิดหนึ่งที่มีลักษณะเป็นของแข็งสีดำ อาจอยู่ในรูปของผงหรือเม็ดก็ได้ มีโครงสร้างรูพรุนขนาดเล็ก พื้นที่ผิวดูดซับสูง ทำให้มีสมบัติการดูดซับที่ดี ใช้ประโยชน์ในการกำจัดกลิ่น สี หรือก๊าซ โดยทั่วไป

มักจะเลือกวัสดุที่จะนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์ โดยเป็นของเหลือทิ้ง หรือมีราคาถูก มีปริมาณคาร์บอนสูง มีปริมาณสารอินทรีย์ต่ำ มีปริมาณเถ้าต่ำ และมีความสะดวกในการนำมาใช้งาน เช่น ไม้สลายตัวเมื่อเก็บไว้นานๆ โดยนำวัตถุดิบซึ่งส่วนใหญ่เป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น กะลามะพร้าว กะลาปาล์ม ทะลายปาล์ม ฯลฯ มาผ่านกระบวนการกระตุ้น (activation) ให้มีพื้นที่ผิวสูง มีปริมาณคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก มีความจุในการดูดซับสูงและรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก

สมบัติของถ่านกัมมันต์ขึ้นกับชนิดของวัสดุที่ใช้เป็นวัตถุดิบ คือ วัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำ และสารระเหยสูง เช่น ไม้ ถิกินิน ฯลฯ มักได้ถ่านกัมมันต์ที่มีปริมาตรของรูพรุน (pore volume) สูง และความหนาแน่นต่ำ ซึ่งใช้ดูดซับแก๊สได้ไม่ดี ส่วนวัสดุที่มีความหนาแน่นสูงและมีสารระเหยสูง เช่น กะลามะพร้าว ฯลฯ จะทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีปริมาตรของรูพรุนขนาดเล็ก (micropore volume) สูง สามารถใช้ดูดซับได้ทั้งในสารละลายและแก๊ส อย่างไรก็ตามสมบัติของถ่านกัมมันต์ยังขึ้นกับปัจจัยอื่นๆ อีก เช่น วิธีการผลิต ภาวะที่ใช้จริง เป็นต้น ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะระบุให้แน่นอนว่าวัสดุชนิดใดเหมาะสม

การใช้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวรองรับนั้น จะใช้กับปฏิกิริยาที่ถ่านกัมมันต์ไม่มีกระทบจากสถานะของการทดลอง ส่วนใหญ่จะไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ยกเว้นการล้างด้วยตัวทำละลายที่เหมาะสมแต่ส่วนที่เป็นสารว่องไวสามารถนำกลับคืนมาได้โดยการเผาตัวรองรับถ่านกัมมันต์ซึ่งเป็นคาร์บอนออกไป ดังนั้นถ่านกัมมันต์จึงมักใช้เป็นตัวรองรับสำหรับโลหะที่มีตระกูล หรือปฏิกิริยาที่ต้องการใช้คาร์บอนเป็นตัวดูดซับโมเลกุลของสารอินทรีย์ ถ่านกัมมันต์อาจจะมีส่วนผสมของแร่ต่างๆ ที่เป็นส่วนประกอบของวัสดุที่ใช้ผลิตถ่านโลหะต่างๆ และสารประกอบของซัลเฟอร์ สารเหล่านี้มักจะมีผลต่อประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาและส่วนใหญ่จะเป็นไปในทางที่เราไม่ต้องการให้เกิด อย่างไรก็ตามสารเหล่านี้สามารถกำจัดได้โดยการล้างด้วยสารละลายกรด

ถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมกับการใช้เป็นตัวรองรับจะต้องอยู่ในรูปของคาร์บอนที่ไม่มีโลหะเจือปนและมีพื้นที่ผิวสูง ซึ่งถ่านกัมมันต์ที่มีคุณสมบัติดังกล่าวจะมีราคาสูงกว่าถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการดูดซับเพื่อกำจัดสิ่งเจือปนหลายเท่า ถ่านกัมมันต์จากถ่านหินหรือลิกไนต์มักจะนุ่มและมีสิ่งเจือปนมากเกินไป ส่วนถ่านหินที่เผาจนหมดควัน หรือถ่านโค้ก (coke) ที่มีปิโตรเลียมเป็นองค์ประกอบหลักมักจะแข็งกว่าแต่มีกัมมันต์และเวเนเดียมและนิกเกิลปนอยู่เล็กน้อย ถ่านกัมมันต์ที่แข็ง มีความบริสุทธิ์สูง มีคุณภาพดีสามารถเตรียมได้จากกะลามะพร้าว หรือกะลาปาล์มซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้ง มีพื้นที่ผิวสูงถึง 1200-1400 ตารางเมตรต่อกรัม (จตุพรและนุรักษ์, 2547)

กลไกการทำงานที่สำคัญของถ่านกัมมันต์ คือ การดูดซับ (adsorption) แรงขับเคลื่อนในการดูดซับ คือ ความแตกต่างความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายกับความเข้มข้นของตัวถูกละลายในรูพรุนพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์จะมีแรงดึงดูดแวนเดอร์วาลส์ (van der waals forces) ซึ่งจะช่วยให้ดึงดูดอนุภาคต่างๆ ให้เข้ามาทำปฏิกิริยาที่ผิวของถ่านกัมมันต์

1. ชนิดของถ่านกัมมันต์ แบ่งตามลักษณะรูปร่าง ได้ 2 ชนิด

1.1 ชนิดผงละเอียด ซึ่งสามารถกระจายตัวในน้ำได้ดี แต่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

1.2 ชนิดเม็ดหรือเกล็ด ซึ่งจะสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 ชนิด สามารถนำมาใช้ประโยชน์ที่แตกต่างกันไปในหลายอุตสาหกรรม จำแนกได้ดังนี้

1.2.1 ชนิดที่เป็นผงละเอียด นำไปใช้ในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดน้ำหรือของเหลว ได้แก่

ก. อุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาล ใช้ในการฟอกสีและทำให้น้ำตาลบริสุทธิ์ขึ้น

ข. อุตสาหกรรมการผลิตน้ำมันพืชสำหรับการบริโภค ใช้ในการฟอกสีและทำให้น้ำมันดีขึ้น

ค. อุตสาหกรรมอาหาร ใช้ในการฟอกสีและดูดกลิ่น

ง. อุตสาหกรรมเครื่องสำอางและสกินแคร์ เช่น วิสกี ไวน์ น้ำอัดลม ใช้ในการดูดกลิ่น และทำให้รสชาติดีขึ้น อุตสาหกรรมทำน้ำให้บริสุทธิ์ เช่น น้ำดื่ม น้ำประปา

1.2.2. ชนิดที่เป็นเม็ดหรือเกล็ด ใช้ในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการทำก๊าซให้บริสุทธิ์ หรือการทำให้ตัวทำละลายที่ใช้แล้วบริสุทธิ์ขึ้นเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ เช่น

ก. อุตสาหกรรมเครื่องปรับอากาศ ใช้ในการดูดก๊าซต่างๆ ที่เป็นอันตรายต่อร่างกาย

ข. อุตสาหกรรมการทำน้ำกากป้องกันก๊าซพิษ ทั้งที่ใช้ กันโดยทั่วไปและในด้านการทหาร เพื่อการดูดซับก๊าซพิษและไอของสารพิษ

ค. อุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการนำไอระเหยของตัวทำละลายที่ใช้แล้วและนำกลับมาใช้ใหม่ เพื่อดูดซับไอระเหยเหล่านั้นที่อุณหภูมิห้อง และจะคายออกที่ความดันของไอระเหยต่ำๆ เช่น อุตสาหกรรมยาง อุตสาหกรรมโพลีเอทิลีน อุตสาหกรรมการพิมพ์ เป็นต้น

ง. อุตสาหกรรมการผลิตบุหรี่บางยี่ห้อเพื่อกรองก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และน้ำมันดิน (tar) โดยนำถ่านกัมมันต์มาไว้ที่ก้นกรอง

การผลิตถ่านกัมมันต์โดยทั่ว ๆ ไป แบ่งเป็น 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนการเผาวัตถุดิบให้เป็นถ่านโดยทั่วไปมักใช้วิธีเผาที่ไม่มีอากาศเพื่อไม่ให้วัตถุดิบกลายเป็นเถ้า ซึ่งอุณหภูมิในการเผาประมาณ 200–400 องศาเซลเซียส และขั้นตอนการนำถ่านไปเพิ่มคุณภาพด้วยเทคโนโลยีทางวิทยาศาสตร์ ที่เรียกว่าการกระตุ้น (activation) แบ่งได้เป็น 2 วิธีคือ การกระตุ้นทางเคมี และการกระตุ้นทางกายภาพ

2. กระบวนการกระตุ้น (activation process)

2.1 การกระตุ้นทางเคมี (chemical activation)

การกระตุ้นด้วยการใช้สารเคมี เช่น แคลเซียมคลอไรด์ ซิงค์คลอไรด์ กรดฟอสฟอริก เป็นต้น ซึ่งสามารถแทรกซึมได้ทั่วถึงทำให้ส่วนที่ไม่บริสุทธิ์ละลายหมดไปได้เร็วขึ้นจากนั้นนำไปเผาเป็นเวลาหลายชั่วโมง โดยใช้อุณหภูมิเผาประมาณ 600-700 องศาเซลเซียส แต่มีข้อเสียตรงที่ต้องล้างสารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้นซึ่งติดมากับถ่านกัมมันต์ออกให้หมดไม่ให้เหลือตกค้างอยู่เลย เพื่อความปลอดภัยในการนำไปใช้งาน รวมทั้งเครื่องมือที่ใช้ก็ต้องเป็นชนิดพิเศษที่สามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ เพราะสารเคมีที่ใช้เหล่านี้เป็นสารกัดกร่อน

2.2 การกระตุ้นทางกายภาพ (physical activation)

การกระตุ้นทางกายภาพ เป็นการกระตุ้นด้วยการใช้แก๊ส หรือไอน้ำ ซึ่งใช้อุณหภูมิในการเผากระตุ้นค่อนข้างสูงประมาณ 800-1000 องศาเซลเซียส เพราะไอน้ำที่ใช้จะต้องเป็นไอน้ำที่ร้อนยิ่งยวด (superheated steam) เพื่อให้สารอินทรีย์ต่างๆสลายไป ทำให้โครงสร้างภายในมีลักษณะรูพรุน (porous) อยู่ทั่วไป ขนาดของรูพรุนที่ได้จะมีขนาดเล็กกว่าการกระตุ้นทางเคมี ซึ่งถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยวิธีนี้มีข้อดีที่สามารถนำมาใช้งานได้เลยทันทีโดยไม่ต้องล้างสารที่เหลือตกค้าง

นอกจากนี้ยังอาจจะใช้ทั้งสองวิธีรวมกันก็ได้ คือ เมื่อใช้สารเคมีกระตุ้นแล้วนำไปกระตุ้นต่อโดยใช้แก๊สหรือไอน้ำที่ร้อนยิ่งยวดเพื่อการเพิ่มจำนวนรูพรุนให้มากขึ้น ถ่านกัมมันต์อาจประกอบด้วยออกซิเจนประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ โดยมวล ซึ่งอาจจะจับอยู่ที่ผิวหน้าในรูปของคีโตน

ไฮดรอกซิล หรือกรดคาร์บอกซิลิก ซึ่งสมบัติเหล่านี้จะแตกต่างไปจากถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการให้ความร้อนในบรรยากาศของแก๊สเฉื่อยในสภาวะของการรีดิวซ์ พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์อาจมีค่าสูงถึง 1200 ตารางเมตรต่อกรัม

3. ลักษณะเฉพาะของตัวเร่งปฏิกิริยา

การวัดค่าการดูดซับทางเคมีเป็นประโยชน์อย่างมากในการศึกษาทางปฏิกิริยาเร่ง สิ่งที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับทางเคมีที่สำคัญอย่างมากคือ การหาพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยา มักบอกอยู่ในเทอมอัตราเร็วของปฏิกิริยาต่อพื้นที่ผิวที่ไวต่อปฏิกิริยา ด้วยเหตุนี้พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาจึงมีความสำคัญมากเนื่องจากพื้นที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความสามารถในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (วิทยา, 2547)

พื้นที่ผิวของแข็งสามารถหาได้โดยวิธีการดูดซับทางเคมี ณ อุณหภูมิคงที่ ตามแบบแลงเมียร์-ไอโซเทอร์ม (langmuir isotherm) ในการทดลองหาพื้นที่ผิวของแข็งต้องทำการทดลองวัดการดูดซับก๊าซที่อุณหภูมิเหนือจุดกลั่นของก๊าซซึ่งเป็นจุดที่เกิดการดูดซับก๊าซเพียงชั้นเดียว

4. การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยวางองค์ประกอบกัมมันต์บนตัวรองรับ

การทำให้ออกไซด์กระจายตัวบนตัวรองรับเป็นวิธีการที่นิยมมาก สามารถทำได้ 4 วิธีคือการตกตะกอน การดูดซับ การแลกเปลี่ยนไอออน และการทำให้เอบซึม (impregnation) (จตุพรและนุรักษ์, 2547) แต่ละเทคนิคมีทั้งข้อดีและข้อเสีย ซึ่งต้องพิจารณาจากการใช้ ตัวรองรับที่ใช้อาจเป็นผงหรือเป็นก้อนเล็กๆ ในการเติมองค์ประกอบกัมมันต์ลงไปผิวหน้าด้านในของตัวรองรับอาจมีข้อจำกัดเรื่องการแพร่เข้าไปในรูพรุน

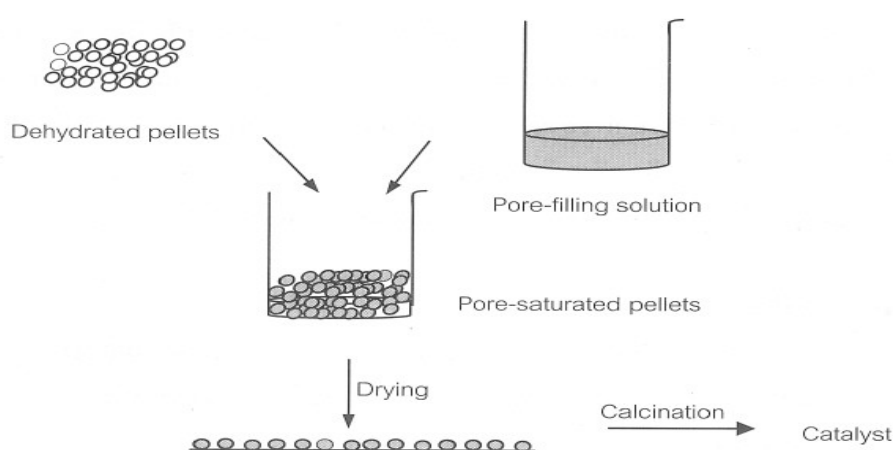
5. การทำให้เอบซึม (impregnation)

เทคนิคการทำให้เอบซึม เป็นเทคนิคที่ง่ายและสะดวกที่สุดเพราะเป็นการจับตัวรองรับโดยตรง จุดประสงค์ก็ต้องการเติมรูพรุนด้วยสารละลายเกลือของโลหะที่มีความเข้มข้นเพียงพอสำหรับค่าปริมาณโลหะที่ต้องการ สารละลายที่ใช้ต้องมีปริมาณที่จะเติมรูพรุนได้พอดี เรียกว่าค่า incipient wetness ขั้นตอนการเตรียมแสดงดังภาพที่ 1 เริ่มจากการให้ความร้อนแก่ตัวรองรับหรือนำไปดูดอากาศออกด้วยสุญญากาศเพื่อกำจัดความชื้นในรูพรุน ซึ่งจะช่วยให้การแพร่ของ

สารละลายเข้าไปในรูพรุนเกิดได้ดีขึ้น จากนั้นหยดสารละลายในปริมาณที่พอดีที่จะเติมรูพรุนและทำให้ผิวหน้าภายนอกของตัวรองรับเปียกพอดี ลงไปบนตัวรองรับ ซึ่งปริมาณดังกล่าวสามารถคำนวณได้ก่อนการเตรียมจากปริมาตรรูพรุนหรือทำการทดสอบก่อนโดยใช้ตัวทำละลายหยดลงบนตัวรองรับที่ทราบปริมาณแน่นอนแล้วทำการวัดปริมาตรที่ทำให้ตัวรองรับเปียกพอดี แล้วจึงนำปริมาตรตัวทำละลายที่ได้มาใช้ในการคำนวณความเข้มข้นของสารละลายเพื่อให้ได้ปริมาณโลหะตามต้องการ

การทำให้แห้งจะทำให้เกิดการตกผลึกของเกลือบนผิวหน้าของรูพรุน ขั้นตอนนี้ถ้าไม่ระวังอาจจะทำให้การกระจายตัวของสารในรูพรุนไม่สม่ำเสมอ ถ้าการทำให้แห้งช้าเกินไปจะทำให้สารละลายเคลื่อนลงไปอยู่ตอนล่างของรูพรุนก่อนการเกิดตะกอน ทำให้ผลึกที่ได้อยู่แต่ตอนล่างของรูพรุน ในทางตรงกันข้าม ถ้าทำให้แห้งเร็วเกินไปสารละลายจะติดอยู่เฉพาะตอนบนของรูพรุน ทำให้ผลึกเกิดขึ้นเฉพาะช่วงบนของรูพรุน การทำให้แห้งในอัตราเร็วที่พอเหมาะจะทำให้ได้ขนาดของผลึกที่เท่าๆ กัน แต่เนื่องจากความหลากหลายของขนาดและรูปร่างรูพรุน จึงเป็นการยากที่จะหาสภาพที่เหมาะสมที่สุดของรูพรุนแต่ละแบบ ต้องทำการทดลองเพื่อหาอัตราที่เหมาะสมที่สุด

การแคลไซน์เป็นขั้นตอนหนึ่งที่สำคัญ เพราะถ้าตัวเร่งปฏิกิริยาเจอกับความชื้นในอากาศ ผลึกในรูพรุนอาจจะละลายในน้ำที่เกิดจากการควบแน่นได้ การแคลไซน์เป็นการเปลี่ยนเกลือโลหะให้อยู่ในรูปของโลหะหรือออกไซด์ และจะหยุดการกระจายของสารละลายได้



ภาพที่ 1 ขั้นตอนในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการทำให้เปียกชุ่ม

ที่มา: จตุพร และนุรักษ์ (2547)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตน้ำมันชีวภาพ

Horne and Williams (1996) ไพโรไลซิสสารชีวมวลโดยการผสมเศษไม้บดบรรจุลงในปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไดซ์เบดกึ่งต่อเนื่อง (semi-continuous fluidized bed reactor) ทำจากสแตนเลสสตีลมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.5 เซนติเมตร สูง 50 เซนติเมตร ใช้แก๊สไนโตรเจนเป็นแก๊สดำพา (carrier gas) โดยใช้อุณหภูมิในช่วง 400-550 องศาเซลเซียส เวลาในการเกิดปฏิกิริยา (residence time) 2.5 วินาที ซึ่งเรียกกระบวนการดังกล่าวว่า flash pyrolysis ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ประกอบด้วย ถ่านชาร์ ของเหลว และแก๊ส พบว่าที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 550 องศาเซลเซียสได้ปริมาณของเหลวมากที่สุดคือ 67.8 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาคือ ถ่านชาร์ 16.7 เปอร์เซ็นต์และแก๊ส 15.7 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

Ji-Lu (2007) ศึกษาการนำแกลบข้าวไปผ่านกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว (fast pyrolysis) ที่ช่วงอุณหภูมิระหว่าง 420-540 องศาเซลเซียส ในฟลูอิดไดซ์เบดและได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพ (bio-oil) ออกมา จากการทดลองพบว่าได้ปริมาณน้ำมันชีวภาพสูงสุด 56 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 465 องศาเซลเซียส และเป็นสารประกอบอินทรีย์ซับซ้อนซึ่งประกอบด้วย น้ำ กรด และสาร heterocyclic แม้ว่าน้ำมันชีวภาพไม่ค่อยมีความเสถียรแต่ความเสถียรมากพอที่จะนำไปใช้ได้ การวิเคราะห์หาองค์ประกอบเคมีด้วยวิธี GC-MS และค่าความร้อน ความเสถียร ค่าการละลาย ลักษณะการกัดกร่อน ผลจากการวัดพบว่าน้ำมันชีวภาพสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในหม้อไอน้ำ (boiler) และเตาเผา (furnace) ได้โดยตรงโดยไม่ต้องมีการปรับสภาพ อีกทางเลือกหนึ่งคือ การกลั่นแล้วสามารถนำมาใช้ในยานพาหนะได้ หรือสามารถนำไปใช้งานระยะสั้นกับเครื่องยนต์ดีเซลได้โดยตรงซึ่งช่วยประหยัดค่าลงทุนในด้านเทคโนโลยี หรือนำไปกลั่นแล้วเอาไปใช้งานในยานพาหนะ การให้ความร้อนด้วยไฟฟ้า การใช้ไนโตรเจนเป็นแก๊สดำพาสามารถใช้ hot flue gas แทนได้ ซึ่งจะทำให้ ค่าใช้จ่ายลดลงอย่างมาก ในระบบไพโรไลซิส ในงานวิจัยของ Ji-Lu (2006) ใช้ two screw feeders เพื่อป้องกันการเกิด jamming ของระบบการป้อนวัตถุดิบ

Asadullah *et al.* (2007) ได้ทำการศึกษากระบวนการไพโรไลซิสของขานอ้อยเพื่อผลิตน้ำมันชีวภาพโดยใช้ปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่ช่วงของอุณหภูมิ 300 ถึง 600 องศาเซลเซียส ทำการไพโรไลซิสในเตาปฏิกรณ์ที่ทำจากสแตนเลสสตีล สูง 50 เซนติเมตรและเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร อัตราการให้ความร้อน 50 องศาเซลเซียสต่อนาที มีแก๊สไนโตรเจนเป็นแก๊สดำพาซึ่งมีอัตราการไหล 200 มิลลิลิตรต่อนาที ซึ่งนำแก๊สร้อนผ่านไปยังคอนเดนเซอร์ที่อุณหภูมิต่างกัน 2

แบบ คือ 60 องศาเซลเซียสและ -5 องศาเซลเซียสตามลำดับ ผลผลิตที่ได้จากการควบแน่นผ่านคอนเดนเซอร์แบ่งเป็นสองส่วนด้วยเช่นกัน คือ oil-1 และ oil-2 ตามลำดับ ส่วนก๊าซที่ไม่ควบแน่น คือ คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน อีเทน อีthin โพรเพน และโพรพีนถูกเก็บไว้ในถังเก็บก๊าซซึ่งนำไปวิเคราะห์ด้วยแก๊สโครมาโตกราฟี (GC) โดยใช้หัววัดแบบ flame ionization detector (FID) ซึ่งผลิตผลก๊าซและถ่านชาร์ที่ได้คือ 24.9 และ 9.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่วนผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพรวมสูงสุดคือ 66 เปอร์เซ็นต์ที่อุณหภูมิไพโรไลซิสที่ 500 องศาเซลเซียส และค่าความร้อน (heating value) คือ 17.25 และ 19.91 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ของ oil-1 และ oil-2 ตามลำดับ

Rhen *et al.* (2006) ศึกษาปริมาณผลผลิตถ่าน เวลาการเผาไหม้และอัตราการเผาไหม้ถ่านของ pellet ที่ทำจากส่วนต่างๆของต้นสนนอร์เวย์และ stem wood pellet ของ norway spruce และ scott pine ซึ่ง pellet ถูกเผาไหม้ในเตาเผาที่อุณหภูมิ การไหลของแก๊ส และระดับความเข้มข้นของออกซิเจนต่างกัน จากผลการทดลองพบว่า เวลาการเผาขึ้นกับถ่านของ pellet ขึ้นกับองค์ประกอบของวัตถุดิบอย่างมาก และขึ้นกับความหนาแน่นเพียงเล็กน้อย pellet ที่ทำจากเปลือกไม้ ใช้เวลาการเผาไหม้มากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ ของที่เผาไหม้ stem wood pellet เนื่องจากปริมาณถ่านที่แตกต่างกัน ในส่วนของ stem wood pellet ของต้นสนและ ขี้เลื่อยของ spruce พบว่ามีคุณลักษณะการเผาไหม้ที่แตกต่างกันเมื่อพิจารณาเกี่ยวกับความสัมพันธ์กับองค์ประกอบของวัตถุดิบ สรุปได้ว่า เวลาในการเผาไหม้มีส่วนสำคัญมากต่อค่า total conversion time ความหนาแน่นของ pellet สูงจะทำให้เวลาในการเผาไหม้นานขึ้น และที่ความหนาแน่นของ pellet เท่ากัน ชนิดของวัตถุดิบจะมีผลต่อการเผาไหม้ โดยส่วนของเปลือกไม้จะใช้เวลาในการเผาไหม้นานกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ ของ stem wood pellet ส่วน pellet ของกิ่งก้านจะมีอัตราการเผาไหม้สูงที่สุด คือสูงกว่า 15 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับ stem wood pellet ซึ่งดูเหมือนว่าปริมาณสารสกัดและลิกนินในวัตถุดิบสามารถอธิบายความแตกต่างของการผลิตถ่านชาร์ได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสรุปได้ว่าชนิดของวัตถุดิบมีผลต่อคุณสมบัติการเผาไหม้มากกว่าความหนาแน่นของ pellet

Asadullah *et al.* (2003) ศึกษาแบบ dual-bed gasifier ร่วมกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยา catalytic gasification ของ cedar wood (ต้นสนจำพวก cedrus) ที่อุณหภูมิต่ำ (823-973 เคลวิน) ระบบ dual-bed gasifier ประกอบด้วย ส่วนแรกคือ primary-bed section สำหรับการไพโรไลซิสสารชีวมวลและการแยกก๊าซไพโรไลซิสและทาร์ออกจากผลิตภัณฑ์ของแข็ง ส่วนที่สองคือ secondary-catalytic tar reformer ซึ่งการเพิ่มคุณภาพตัวเร่งปฏิกิริยาจะใช้ตัวเร่ง Rh/CeO₂/SiO₂ ซึ่งจะปรับคุณลักษณะให้เปลี่ยนคาร์บอนเป็นก๊าซได้มากขึ้น และได้ผลิตภัณฑ์ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

ไฮโดรเจนและมีเทน มากขึ้น และในงานนี้ได้หาสภาวะที่เหมาะสมที่สุด โดยเฉพาะที่ 250 มิลลิกรัมของชีวมวลต่อนาที่ สามารถเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ก๊าซได้โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 3 กรัมและใช้ equivalence ratio (ER) = 0.25 ของคาร์บอนทั้งหมดในชีวมวล ตัวเร่งปฏิกิริยาในงานวิจัยนี้มีประสิทธิภาพสูงกว่า steam reforming catalyst นอกจากนี้ปริมาณโค้กที่สะสมบน Rh/CeO₂/SiO₂ มีเพียงเล็กน้อย

Putun *et al.* (2007) ศึกษาและเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าและเร็วของกากใบยาสูบโดยพิจารณาแนวโน้มของผลผลิตและองค์ประกอบของสารผลิตภัณฑ์ ซึ่งในการทดลองพบว่าการไพโรไลซิสแบบช้าของกากใบยาสูบที่มีขนาดอนุภาค 0.425 และ 0.850 มิลลิเมตรในปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (fixed-bed tubular) โดยตั้งสภาวะการทดลองด้วยอัตราการให้ความร้อน 70 องศาเซลเซียสต่อนาที่ ใช้อุณหภูมิในการไพโรไลซิสหลายค่า (400, 500, 550 และ 700 องศาเซลเซียส) และอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนหลายค่าเช่นกัน (50, 100, 200 และ 400 องศาเซลเซียสต่อนาที่) ผลผลิตน้ำมันที่ได้มีค่าสูงสุด 27 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของก๊าซตัวพา 100 องศาเซลเซียสต่อนาที่ เมื่อเพิ่มอัตราการให้ความร้อนจนถึง 300 องศาเซลเซียสต่อนาที่ ทำให้ผลผลิตของเหลวเพิ่มขึ้น 10 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันใช้ fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR), gas chromatography (GC), ¹HMR และ elemental analysis พบว่าน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสแบบเร็วมีค่าการกระจายตัวของคาร์บอนต่ำกว่าการไพโรไลซิสแบบช้า

Sensoz *et al.* (2006) ศึกษากระบวนการไพโรไลซิสของกากมะกอกในปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งซึ่งในการทดลองได้ทำการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ อัตราการให้ความร้อน ขนาดของอนุภาคและอัตราการไหลของก๊าซตัวพาหรือก๊าซไนโตรเจน ซึ่งกระบวนการไพโรไลซิสเริ่มให้อุณหภูมิในช่วงระหว่าง 350 และ 550 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 และ 50 องศาเซลเซียสต่อนาที่ ตามลำดับ ขนาดของอนุภาคและอัตราการไหลของก๊าซตัวพาเปลี่ยนแปลงในช่วง 0.224-1.8 มิลลิเมตร และ 50-200 องศาเซลเซียสต่อนาที่ ตามลำดับ ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ให้ค่าร้อยละผลได้ของเหลวสูงสุด คือ 37.7 ลักษณะที่แตกต่างกันของน้ำมันชีวภาพภายใต้สภาวะการทดลองนั้นถูกจำแนกบนพื้นฐานของวิธีการทดสอบแบบมาตรฐาน ทำให้ได้สูตรอย่างง่ายของน้ำมันชีวภาพ คือ CH_{1.65}O_{0.25}N_{0.03} มีค่าความร้อน 31.8 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งชี้ให้เห็นว่ามีค่าพลังงานใกล้เคียงกับน้ำมันปิโตรเลียม ส่วนลักษณะทางเคมีของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากกากมะกอกอาจจะมีค่าความเป็นไปได้ที่จะใช้เป็นเชื้อเพลิงและสารตั้งต้นในการผลิตสารเคมีต่างๆ

Zhang *et al.* (2005) ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสที่เลือกในหน่วยปฏิบัติการแบบฟลูอิดไดซ์เบด พบว่าที่อุณหภูมิ 470 องศาเซลเซียส เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 2 วินาที ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวมีค่าสูงสุด คือ 70 ผลิตภัณฑ์ของเหลวแบ่งเป็น 2 ส่วน คือส่วนที่เป็นน้ำและส่วนน้ำมัน โดยส่วนน้ำมันนำไปปรับปรุงคุณภาพด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา CO-Mo-P บรรจุในปฏิกรณ์แบบถึงกวน (autoclave) อุณหภูมิ 360 องศาเซลเซียส เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 30 นาที และความดันแก๊สไฮโดรเจน 2 เมกะปาสคาล จากนั้นเปรียบเทียบกับน้ำมันชีวภาพก่อนและหลังปรับปรุงคุณภาพ พบว่าน้ำมันชีวภาพก่อนปรับปรุงคุณภาพสามารถละลายในเมทานอล มีค่าพลังงานความร้อนเท่ากับ 21.3 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ส่วนน้ำมันชีวภาพหลังปรับปรุงคุณภาพละลายในดีไฮดรอกซีและมีค่าพลังงานความร้อนเพิ่มขึ้นเป็น 41.4 เมกะจูลต่อกิโลกรัม

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตถ่านกัมมันต์

จักรพงศ์ และณัฐกิตติ์ (2548) ศึกษาการเตรียมสารดูดซับในรูปของถ่านกัมมันต์จากถั่วแกลบ ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการเผาไหม้แกลบเป็นเชื้อเพลิง เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์และหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนของโลหะหนักของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ ซึ่งในการทดลองได้เตรียมถ่านกัมมันต์จากถั่วแกลบโดยใช้ $ZnCl_2$ เป็นตัวกระตุ้นโดยมีตัวแปรในการทดลอง คือ อุณหภูมิในการกระตุ้นเท่ากับ 500 – 900 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อใช้ อุณหภูมิในการกระตุ้นเพิ่มขึ้นมีการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้นและทำการตรวจสอบสมบัติของถ่านกัมมันต์ โดยคุณสมบัติทางกายภาพ พบว่าถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ โดยใช้อุณหภูมิในการกระตุ้น 900°C มีพื้นที่ผิวแบบ BET (BET surface area) มากที่สุดคือ 342.50 ตารางเมตรต่อกรัม มีปริมาตรโพรงเฉลี่ยมากที่สุดคือ 0.279 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ส่วนขนาดเฉลี่ยของโพรง (average pore size) พบว่ามีขนาดใกล้เคียงกันคือเท่ากับ 32.569–34.495 อังสตรอม (Å) สำหรับการศึกษาความสามารถในการดูดซับสารละลายแคดเมียมไอออนที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 ppm ปริมาตร 25 มิลลิลิตร โดยถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับดีที่สุด เมื่อใช้เวลาในการดูดซับ 300 นาที ปริมาณถ่านกัมมันต์ 100 มิลลิลิตร และที่ pH ของสารละลายแคดเมียมไอออนเท่ากับ 9

จุฑามาส และคณะ (2548) ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์ม ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมการผลิตน้ำมันปาล์มโดยวิธีการกระตุ้นทางเคมีด้วยสารละลาย $ZnCl_2$ โดยศึกษาอิทธิพลของกระบวนการกระตุ้น เช่น ความเข้มข้นของสารละลาย $ZnCl_2$ ที่ใช้กระตุ้น จากช่วง 0 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เวลาในปฏิกิริยาการกระตุ้นช่วง 2 ถึง 6 ชั่วโมง ตามลำดับ นอกจากนี้ยัง

ได้ศึกษาอิทธิพลของกระบวนการเผา เช่น อุณหภูมิในการเผา จากช่วง 500 ถึง 800 องศาเซลเซียส และ soaking time ในการเผา จากช่วง 1 ถึง 3 ชั่วโมง ตามลำดับ ถ่านกัมมันต์ที่ได้ในแต่ละสถานะการผลิตทำการวิเคราะห์หาปริมาณร้อยละของผลิตภัณฑ์ พื้นที่ผิวโดยการหาเลขไอโอไดน์ ศึกษาธาตุองค์ประกอบและโครงสร้างโดยใช้เทคนิค X-ray diffractometry (XRD) และศึกษาจุลโครงสร้างโดยใช้ scanning electron microscope (SEM) จากผลการทดลองพบว่าสถานะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์คือ ใช้ความเข้มข้นของ ZnCl_2 35 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเวลาในปฏิกิริยาการกระตุ้น 2 ชั่วโมง ส่วนอุณหภูมิในการเผาคือ 700 องศาเซลเซียส และเวลาจุ่มแช่ (soaking) 3 ชั่วโมง ตามลำดับ ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้มีปริมาณร้อยละของผลิตภัณฑ์คือ 27.45 และมีพื้นที่ผิวโดยเลขไอโอไดน์คือ 162.1 มิลลิกรัมต่อกรัม

Naizhen *et al.* (2001) ผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านคาร์บอนที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์เปลือกไม้เนื้ออ่อนภายใต้ความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศ ความดันประมาณ 20 กิโลปาสกาล อุณหภูมิ 450-500 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบถ่านกัมมันต์จากถ่านคาร์บอนที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์เปลือกไม้เนื้ออ่อนภายใต้ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ อุณหภูมิ 450-500 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์จะได้ผลิตภัณฑ์ในรูปถ่านคาร์บอนลดลง แต่ผลิตภัณฑ์ในรูปน้ำมันและก๊าซเพิ่มขึ้น ซึ่งถ่านคาร์บอนที่ผลิตได้นี้ผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 760-850 องศาเซลเซียส จากการทดลองสรุปว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากถ่านคาร์บอนที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์เปลือกไม้เนื้ออ่อนภายใต้ความดันบรรยากาศ ให้ผลิตภัณฑ์ในรูปถ่านคาร์บอนถึง 32 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อนำถ่านคาร์บอนที่ได้มากระตุ้นด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 760-850 องศาเซลเซียส จะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวในการดูดซับถึง 1,200 ตารางเมตรต่อกรัมและมีรูพรุนขนาดเล็ก (micropore) เทียบกับถ่านกัมมันต์ที่มีขายอยู่ในท้องตลาดพบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากถ่านคาร์บอนที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์เปลือกไม้เนื้ออ่อนภายใต้ความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศมีศักยภาพในการผลิตเชิงการค้าได้

Stavropoulos *et al.* (2005) ศึกษาการนำเมล็ดมะกอกมาใช้ผลิตถ่านกัมมันต์โดยการกระตุ้นด้วย KOH โดยได้ศึกษาผลของระยะเวลาในการกระตุ้นและผลของอุณหภูมิในการกระตุ้นต่อความพรุนของถ่านกัมมันต์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้วิเคราะห์ด้วยการดูดซับแก๊สไนโตรเจน ที่ 77 เคลวิน ด้วยวิธี BET, α_s และ Dubinin-Radushkevich ขณะที่ค่า adsorption capacity จากส่วนของ liquid phase วัดด้วยวิธี isotherms ของเมทิลีนบลูเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่ขายทั่วไปในท้องตลาดกับถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะกอก พบว่าถ่านจากกากเมล็ดมะกอกมีพื้นที่ผิวมากกว่าและสามารถเรียกได้ว่าเป็น super-activated carbon รูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่ได้ในช่วงแรกของการกระตุ้นประกอบด้วย

รูปพรุนขนาดไมโครพอร์ และในช่วงท้ายของการกระตุ้นจะมีทั้งรูปพรุนขนาดไมโครพอร์และเมโซพอร์ พื้นที่ผิวและปริมาตรรูปพรุนเพิ่มขึ้นตามดัชนี burnoff เช่นระยะเวลาและอุณหภูมิในการกระตุ้น methylene blue removal capacity (190-263 มิลลิกรัมต่อลิตร) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์ที่ขายในท้องตลาด (240 มิลลิกรัมต่อลิตร) และจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระดับการกระตุ้น

El-Hendawy *et al.* (2001) ศึกษาการนำซังข้าวโพดไปบดและอบแห้ง แล้วนำไปคาร์บอนไนซ์ ที่ 500 องศาเซลเซียส จากนั้นกระตุ้นด้วยไอน้ำ (1 หรือ 2 ขั้นตอน) หรือกระตุ้นด้วย H_3PO_4 ผลึกภัณฑ์ที่ได้นำไปวิเคราะห์ด้วยการดูดซับแก๊สไนโตรเจน (N_2 adsorption) ที่ 77 เคลวิน โดยใช้ BET, α_s และ DR method ค่า adsorption capacity ทดสอบด้วยไอโอดีน phenol number และไอโซเทอรัม isotherm ของเมทิลีนบลู รวมทั้งการใช้ Pb^{2+} ในสารละลาย การกระจายตัวของความพรุนในคาร์บอนในช่วง ultra-, super-, meso- และ macropores การคาร์บอนไนซ์อย่างง่ายให้ผลึกภัณฑ์คาร์บอนที่มีความสามารถในการดูดซับน้อย ซึ่งมีความสามารถในการดูดซับเฉพาะกับไอโอดีนได้มาก ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาบนโครงสร้างที่ไม่อ้อมตัวของกาก (residual) ที่สูตรโครงสร้างอยู่ในกลุ่มของ lignocellulosic วิธีเพิ่มค่าความพรุนที่ดีที่สุดคือ การกระตุ้นด้วยเคมีหรือ steam pyrolysis ที่ 700 องศาเซลเซียส ผลึกภัณฑ์ที่ได้มีความพรุนสูง โดยส่วนใหญ่จะเป็นเมโซพอร์และสามารถดูดซับเมทิลีนบลูและ Pb^{2+} ได้มาก การดูดซับฟีนอลพบว่าขึ้นกับธรรมชาติของคุณสมบัติทางเคมีพื้นผิวของคาร์บอนมากกว่าคุณสมบัติความพรุน ซังข้าวโพดจึงมีศักยภาพที่สามารถนำมาใช้ผลิตคาร์บอนคุณภาพดูดซับดีได้โดยใช้การกระตุ้น 1 step การกำจัด Pb^{2+} จากสารละลายถูกพบว่า สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดได้โดย การออกซิไดส์ด้วยสารเคมี ซึ่งอาจช่วยเพิ่มขนาดของรูปพรุน เพิ่ม cation exchange capacity โดยกลุ่มออกซิเจนและการเพิ่ม hydrophilicity บนพื้นผิวคาร์บอน

El-Hendawy (2003) ศึกษาผลกระทบของการออกซิเดชันด้วย HNO_3 ต่อค่าความพรุน (porosity) และสมบัติการดูดซับของถ่านและถ่านกัมมันต์จากซังข้าวโพด ผลจาก N_2 adsorption ที่ 77 K แสดงให้เห็นถึงการลดลงของพื้นที่ผิวบนถ่านกัมมันต์ โดยที่ขนาดของรูปพรุนกว้างขึ้น ความเปลี่ยนแปลงของรูปพรุนพบว่าขึ้นอยู่กับวิธีการกระตุ้นถ่าน เช่น steam pyrolysis การกระตุ้นด้วย H_3PO_4 ในส่วนของการเปลี่ยนแปลงพื้นผิวเคมีทำการตรวจสอบด้วย FTIR spectroscopy ซึ่งพบว่า adsorption band แสดงถึงหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล คาร์บอซิเลต คาร์บอนิล และฟีนอลิก ซึ่งการตรวจสอบด้วย SEM พบว่า HNO_3 สามารถกัดกร่อนพื้นผิวถ่านได้โดยพบการแยกตัว (disintegration) ของเกรนคาร์บอนซึ่งทำให้โครงสร้างของรูปพรุนอาจมีโครงสร้างของมาโครพอร์ประกอบอยู่ด้วย ผลของกระบวนการออกซิเดชัน จากการวิเคราะห์ธาตุพบว่า มีธาตุออกซิเจน

ไฮโดรเจนและไนโตรเจนในปริมาณสูง และผลจาก thermogravimetric analysis (TGA) แสดงให้เห็นว่าการสูญเสียมวลจะช้าลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

Molina-Sabio *et al.* (2004) ศึกษาการกระตุ้นถ่านด้วยวิธีทางเคมีโดยใช้ KOH พบว่า อุณหภูมิความร้อนในการกระตุ้นมีผลต่อการสร้างรูพรุนบนพื้นผิวเป็นอย่างมาก ซึ่งรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วย KOH ที่ 500 ถึง 700 องศาเซลเซียส มีน้อย ขึ้นอยู่กับถ่านหรือวัสดุเริ่มต้น ขณะที่อุณหภูมิที่ 850 ถึง 900 องศาเซลเซียสจะเพิ่มรูพรุนของถ่านกัมมันต์มากขึ้น โดยมีการทำปฏิกิริยาของ KOH กับ ถ่าน สัดส่วนของ KOH ที่ใช้ในการกระตุ้นมีความสำคัญต่อการกระตุ้นรูพรุนเช่นกัน ที่อัตราส่วนต่ำๆ ทำให้ได้รูพรุนขนาดไมโครพอร์ (microporosity) ที่สม่ำเสมอและแคบ ส่วนการกระตุ้นที่อัตราส่วนสูงๆ จะได้ไมโครพอร์ที่มีขนาดกว้างขึ้น แต่ก็มีผลน้อยมากต่อเมโซพอร์ (mesoporosity) แม้ว่าจะมีรูพรุนสูงขึ้น การกระตุ้นรูพรุนให้มากขึ้น ขึ้นอยู่กับวัสดุเริ่มต้น เห็นได้ว่าวัสดุเริ่มต้นที่ไม่ได้ผ่านการคาร์บอนไนซ์จะเกิดปฏิกิริยากับสารกระตุ้นมากกว่าวัสดุที่ผ่านการคาร์บอนไนซ์แล้ว สำหรับขนาดอัตราส่วนการกระตุ้นตั้งแต่ปานกลางจนถึงสูง KOH จะไม่เข้าไปสัมผัสถึงอนุภาคถ่านภายใน จะยังคงเป็นของแข็งเกาะอยู่บนผิวภายนอก สรุปได้ว่า สารกระตุ้นจะทำปฏิกิริยาหลังจากการไพโรไลซิสของวัสดุเริ่มต้นที่อุณหภูมิสูงกว่า 700 องศาเซลเซียส ขึ้นไป และการเกิดรูพรุนของการกระตุ้นเกิดที่ศูนย์กลางของรูพรุนขนาดไมโครพอร์ โดยขนาดรูพรุนกว้างขึ้น เมื่อเพิ่มการกระตุ้น โดยทำให้สูญเสียสมบัติเชิงกล ทำให้อนุภาคกลายเป็นผง

Diaz-Teran *et al.* (2003) ศึกษาการกระตุ้นถ่านคาร์บอนด้วยสารเคมีสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ซึ่งเป็นหนึ่งในสารเคมีที่มีประสิทธิภาพสูงที่ใช้ในการกระตุ้นคาร์บอน ซึ่งถ่านกัมมันต์ผลิตจาก lignocellulosic โดยวิธีการจุ่มแช่หรือเอ็บซุ่ม (impregnation) ที่ปริมาณ KOH ต่างๆ กันกระบวนการกระตุ้นศึกษาด้วย XPS และ XRD เทคนิคเหล่านี้สามารถบอกการเกิดสารประกอบโพแทสเซียมชนิดต่างๆ บนพื้นผิวคาร์บอนได้ส่วนใหญ่เป็น K_2CO_3 และออกไซด์อื่นๆ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเกิด K_2CO_3 มีความสัมพันธ์กับการเพิ่มปริมาณพื้นที่ผิวคาร์บอนอีกด้วย

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

การไพโรไลซิส

ปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิส

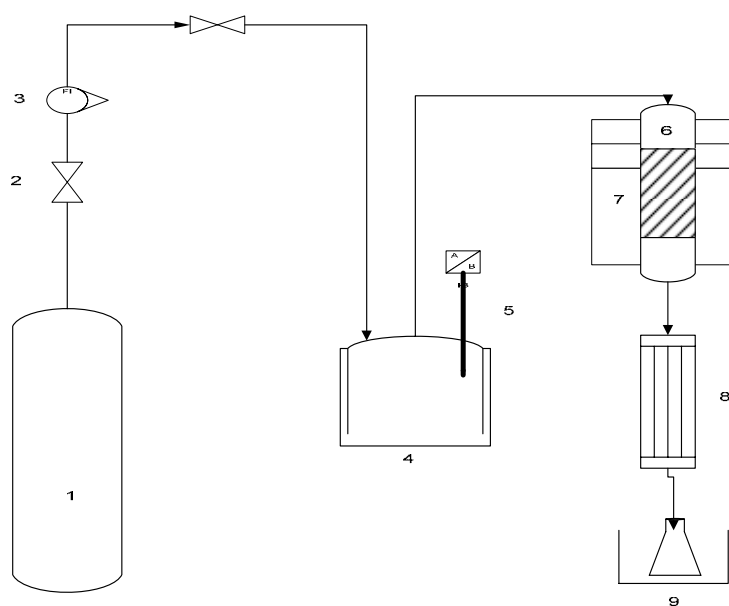
ปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิส เป็นแบบ 2 ขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกเป็นปฏิกิริยาแบบกึ่งกะ (semi-batch reactor) ประกอบด้วยสแตนเลสสตีล 316 รูปทรงกระบอกมีปริมาตร 700 มิลลิลิตร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 เซนติเมตร ความสูง 14 เซนติเมตร มีเตาเผาขดลวดไฟฟ้าให้ความร้อน โดยตัวควบคุมอุณหภูมิเป็นแบบ PID และวัดอุณหภูมิในปฏิกิริยาโดยเทอร์โมคัปเปิลชนิด K บริเวณด้านบนของปฏิกิริยามีท่อขนาด 1/4 นิ้วเพื่อนำก๊าซตัวพาเข้าและมีท่อนำก๊าซออกจากปฏิกิริยา ขั้นตอนที่สองเป็นปฏิกิริยาแบบท่อ (tubular reactor) ประกอบด้วยท่อสแตนเลสสตีล 316 ขนาด 3/8 นิ้ว อยู่ในเตาเผาซึ่งควบคุมอุณหภูมิโดยตัวควบคุมแบบ on/off และวัดอุณหภูมิในเตาเผาโดยเทอร์โมคัปเปิลชนิด K บริเวณทางปลายท่อขาออกของปฏิกิริยาดังที่สองเชื่อมต่อกับหน่วยควบแน่น (condensing unit) ดังแสดงในภาพที่ 2 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะทำการแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำที่อุณหภูมิ 12 องศาเซลเซียส และควบแน่นกลายเป็นของเหลวซึ่งบรรจุในขวดรูปชมพู่ซึ่งบรรจุน้ำแข็งผสมเกลือที่อุณหภูมิ -5 องศาเซลเซียส ส่วนไอที่ไม่สามารถควบแน่นได้นั้นไหลผ่านออกทางท่อขาออกเข้าไปในเครื่องดูดควัน (hood)

การปรับปรุงคุณภาพน้ำมันชีวภาพ

ปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการปรับปรุงน้ำมันชีวภาพ

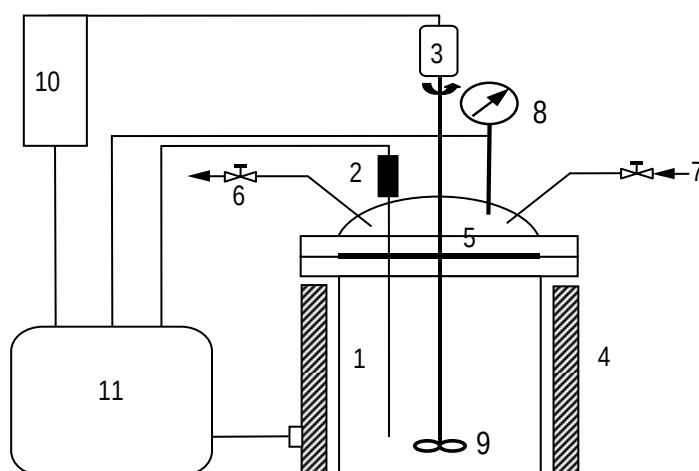
การปรับปรุงคุณภาพน้ำมันชีวภาพ (bio-oil) ที่เป็นผลิตภัณฑ์หลักจากกระบวนการไพโรไลซิส ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้ปฏิกิริยาแบบถังกวนภายใต้ความดันสูง (autoclave reactor) แสดงลักษณะและส่วนประกอบของเครื่องดังภาพที่ 3 ปฏิกิริยาเป็นภาชนะทรงกระบอกขนาด 800 มิลลิลิตร ทนความดันสูงสุด 3,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (20.68 เมกะปาสกาล) อุณหภูมิดำเนินการสูงสุดไม่เกิน 500 องศาเซลเซียสโดยการให้ความร้อนผ่านเตาไฟฟ้าที่ต่อกับเครื่องควบคุมอุณหภูมิ ใช้ใบกวนชนิด 6 ใบพัด ความเร็วรอบใบกวนสามารถปรับได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้

ความเร็วรอบใบกวน 400 รอบต่อนาที มีวาล์วเปิดปิดท่อนำก๊าซเข้าและออก วาล์วควบคุมปริมาณน้ำหล่อเย็น (cooling coil) ในภาชนะทรงกระบอกสำหรับการลดอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ และเทอร์โมคัปเปิลชนิดเค (K type thermocouple) ที่เสียบเข้าไปในท่อทรงกระบอกเพื่อวัดอุณหภูมิภายในภาชนะ



ภาพที่ 2 แผนภาพปฏิกรณ์ในระบบการไพโรไลซิส

- | | |
|--------------------------------------|------------------------|
| (1) ถังก๊าซไนโตรเจน | (2) วาล์ว |
| (3) มาตรวัดความดัน (pressure gauge) | (4) ปฏิกรณ์และเตาไฟฟ้า |
| (5) เทอร์โมคัปเปิล | (6) ปฏิกรณ์แบบท่อ |
| (7) เตาไฟฟ้าให้ความร้อนปฏิกรณ์แบบท่อ | (8) เครื่องควบแน่น |
| (9) ที่เก็บบรรจุผลิตภัณฑ์ของเหลว | |



- | | |
|-------------------------------------|--|
| 1. ตัวปฏิกรณ์ (reactor body) | 7. ท่อนำก๊าซเข้า (gas outlet) |
| 2. เทอร์โมคัปเปิล (thermocouple) | 8. มาตรวัดความดัน (pressure gauge) |
| 3. Magnetic drive | 9. ใบกวน (impeller) |
| 4. เตาให้ความร้อน (electric heater) | 10. มอเตอร์ (motor) |
| 5. ปะเก็น | 11. เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (temperature controller) |
| 6. ท่อนำก๊าซออก (gas outlet) | |

ภาพที่ 3 ปฏิกรณ์แบบถังกวน (autoclave reactor)

วัตถุดิบ

วัตถุดิบที่ใช้ประกอบด้วยชีวมวล 3 ชนิด คือ ชังข้าวโพด ต้นสบู่ดำ และเปลือกผลมะนาว

1. การเตรียมวัตถุดิบ

นำวัตถุดิบมาตากแห้งเพื่อลดปริมาณความชื้น เมื่อแห้งแล้วนำมาตัดโดยใช้เครื่องตัดไม้และย่อยให้มีขนาดเล็กลงด้วยเครื่องย่อยไม้จนได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 0.5-2.0 มิลลิเมตร นำวัตถุดิบทั้ง 3 ชนิดไปวิเคราะห์แบบละเอียด (ultimate analysis) เพื่อวิเคราะห์หาสัดส่วนของธาตุ ซึ่งประกอบด้วย 4 ธาตุหลักคือ คาร์บอน(carbon) ไฮโดรเจน(hydrogen) ไนโตรเจน(nitrogen) และออกซิเจน(oxygen) และธาตุอื่นๆ ที่มีสัดส่วนน้อยคือ กำมะถัน(sulfur) ด้วยเครื่อง elemental analyzer รุ่น CHNS 932 determinator (LECO-VTF-900 Series) และตรวจวัดค่าพลังงานความร้อนของวัตถุดิบทั้ง 3 ชนิดด้วยบอมบ์แคลอริมิเตอร์ (bomb calorimeter)

2. การศึกษาการสลายตัวด้วยเครื่อง TGA

ศึกษาการสลายตัวด้วยความร้อนด้วยเครื่อง thermogravimetric analyzer (TGA) รุ่น SDT 2960 PN 925605.001 ผลิตโดยบริษัท Perkin Elmer ประเทศสหรัฐอเมริกาโดยให้ความร้อนในบรรยากาศไนโตรเจน อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

วิธีการ

1. วิธีการไพโรไลซิส

ขั้นแรกนำชีวมวลที่ผ่านการย่อยให้มีขนาด 0.5-2.0 มิลลิเมตร บรรจุลงในปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง ตรวจสอบสภาพปะเก็นที่ทำจากแกรไฟต์ก่อนประกอบถึงปฏิกรณ์ให้สนิทจากนั้นนำถึงปฏิกรณ์ใส่ลงในเตา ขดลวดไฟฟ้าต่อท่อก๊าซไนโตรเจนเข้าและท่อออกจากปฏิกรณ์พร้อมกับเซ็นเซอร์ระหว่างรอยต่อของ ปฏิกรณ์ ใส่เทอร์โมคัปเปิลกับปฏิกรณ์เปิดวาล์วควบคุมอัตราการไหลเริ่มต้นของก๊าซไนโตรเจนที่มีความเข้มข้น 99.99 เปอร์เซ็นต์ มีความเร็วสเปซหรือความเร็วของก๊าซ (space velocity) 1.7 ต่อชั่วโมง ทำการให้ความร้อนที่เครื่องปฏิกรณ์โดยตั้งค่าอุณหภูมิตามสภาวะที่ต้องการศึกษานั้นคือในช่วง อุณหภูมิ 300-500 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน โดยตั้งอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 150 องศาเซลเซียส แล้วรอกอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิที่ตั้งค่าไว้เป็นเวลาประมาณ 15 นาที แล้วปรับเพิ่ม ค่าอุณหภูมิทีละ 50 องศาเซลเซียส ทุก 30 นาที จนกระทั่งถึงอุณหภูมิสุดท้ายที่ 400, 450, และ 500 องศาเซลเซียส และคงอุณหภูมิไว้ที่อุณหภูมิไพโรไลซิสนานเป็นเวลา 1 ชั่วโมงและปฏิกรณ์แบบท่อ แนวตั้งมีความเร็วสเปซ 3463 ต่อชั่วโมง หลังจากนั้น ลดอุณหภูมิปฏิกรณ์ลงมาที่อุณหภูมิห้อง แก๊ส และสารระเหยที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสถูกลดอุณหภูมิและควบแน่นในหน่วยควบแน่น แก๊สที่ไม่ควบแน่นไหลออกไปในตู้ดูดควัน ผลิตภัณฑ์ของเหลวและถ่านที่ได้นำมาชั่งหาน้ำหนัก และวิเคราะห์สมบัติต่อไป

การคำนวณหาค่าร้อยละผลได้ (yield) ของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิส หาได้โดยใช้สมการ ดังนี้

$$\text{ร้อยละผลได้ (\%yield)} = \frac{\text{น้ำหนักน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิส}}{\text{น้ำหนักของชีวมวลที่ใช้ในการไพโรไลซิส}} \times 100$$

2. การวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพ

วิเคราะห์คุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ได้แก่ ค่าพลังงานความร้อนด้วยเครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์จุลควาไฟ (flash point) ด้วย pensky-martens closed cup tester ASTM D 93 และค่าความหนืด (kinematic viscosity D 445) ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

3. การผลิตถ่านกัมมันต์

3.1 การกระตุ้นทางเคมีด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

การกระตุ้นถ่านคาร์บอนที่ได้จากการไพโรไลซิส โดยวิธีการเตรียมแบบเอ็บซุ่ม (impregnation) ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (50 wt% NaOH, analysis grade) (Koutcheiko, 2006) โดยนำถ่านคาร์บอนมาบดให้ละเอียดแล้วคัดขนาดด้วยตะแกรงร่อนให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 0.15-0.25 มิลลิเมตร ผสมถ่านคาร์บอนกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยอัตราส่วนโดยน้ำหนักของถ่านคาร์บอน:NaOH เท่ากับ 1:5 (Babel, 2004) ทำการกวนให้ทั่วถึงโดยใช้แท่งกวนแม่เหล็ก (magnetic bar) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นกรองสารละลายออกด้วยกระดาษกรอง แล้วล้างถ่านด้วยน้ำกลั่น นำไปอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นในเดสิคเคเตอร์ (ปรัชญา, 2548) จากนั้นชั่งถ่านคาร์บอนจำนวน 5 กรัม บรรจุลงในเครื่องปฏิกรณ์ท่อแนวตั้ง (tubular furnace) มีไนโตรเจนเป็นก๊าซตัวพาโดยควบคุมการไหลเท่ากับ 20 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที อัตราการให้ความร้อนที่ 1.6 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส แล้วปรับเพิ่มอุณหภูมิครั้งละ 50 องศาเซลเซียสทุก 30 นาที จนกระทั่งถึง 600 องศาเซลเซียสและคงไว้ที่อุณหภูมินี้เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำถ่านที่ผ่านการกระตุ้นมาลดอุณหภูมิให้เท่ากับอุณหภูมิห้อง ล้างด้วยสารละลายไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ประมาณ 3 ครั้ง ครั้งละ 100 มิลลิลิตร จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นร้อนจนกระทั่ง pH เป็นกลาง (Koutcheiko, 2006) แล้วจึงนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำถ่านกัมมันต์ที่ได้ไปวิเคราะห์

3.2 วิเคราะห์ถ่านกัมมันต์

การวิเคราะห์หาคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ คือหาพื้นที่ผิวทั้งหมดแบบ BET (Brunauer Emmett Teller surface area) ตามวิธี ASTM C 819-77 (BET method) โดยเครื่อง Autosorb ผลิตโดย Quantachrome รุ่น Autosorb-1

3.3 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Activated Carbon

การศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Activated Carbon โดยวิธีการเตรียมแบบเปียกชุ่มด้วยสารละลาย $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ เข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากนั้นหยดสารละลายในปริมาณที่พอดีที่จะเติมรูพรุนและทำให้ผิวหน้าภายนอกของถ่านกัมมันต์ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวรองรับเปือกพอดิ คงไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเวลา 24 ชั่วโมง แล้วชั่งน้ำหนักจนคงที่ จึงนำไปแคลไซน์ภายใต้ก๊าซไนโตรเจนที่ อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมงเพื่อกำจัดสิ่งเจือปนที่มาจากขั้นตอนการเตรียม (Bai *et al.*, 2007) และเก็บตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้ไว้ใช้ในกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันชีวภาพ

4. การปรับปรุงน้ำมันชีวภาพ

นำน้ำมันชีวภาพจากซังข้าวโพดที่เป็นผลิตภัณฑ์ของเหลวจากกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ปริมาตร 150 มิลลิลิตรและตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านกัมมันต์ (Ni/ถ่านกัมมันต์) 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของน้ำมันชีวภาพจากซังข้าวโพด บรรจุลงในปฏิกรณ์ทรงกระบอกชนิด autoclave reactor (Parr instrument company) ความจุปริมาตร 800 มิลลิลิตร ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ความเร็วรอบใบกวน 400 รอบต่อนาที ความดันเริ่มต้นภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนที่ 1 บรรยากาศ เมื่อครบเวลาทำการปิดเตาและลดอุณหภูมิจนถึงอุณหภูมิห้อง ทำการกรองตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านกัมมันต์ออกจากน้ำมันชีวภาพ นำน้ำมันชีวภาพที่กรองแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกแล้วเติมโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมันชีวภาพเพื่อลดความชื้น กรองน้ำมันชีวภาพออกแล้วนำไปวิเคราะห์ต่อไป

หมายเหตุ: เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้ปรับปรุงคุณภาพน้ำมันชีวภาพจากซังข้าวโพดด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาต่างชนิดกัน คือ ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni(unreduced) /ถ่านกัมมันต์ Ni(reduced) /ถ่านกัมมันต์ และซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 จากถั่วลันเตาของถ่านหินลิกไนต์ (ธีระพงศ์, 2543)

5. การวิเคราะห์หาส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์

นำผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพหลังผ่านการปรับปรุงคุณภาพมากลั่นแยกหาปริมาณของผลิตภัณฑ์ในแต่ละช่วงอุณหภูมิ ได้แก่ แก๊สโซลีน (IBP-200°C) เคโรซีน (201-250°C) แก๊สออยล์ (251°C-370°C) และกากน้ำมัน (>370°C) โดยใช้เครื่องกลั่นแยกจุดเดือดน้ำมันตามมาตรฐาน ASTM D-86 จากนั้นทดสอบด้วยบอมแคลอรีมิเตอร์เพื่อหาค่าพลังงานความร้อนแล้วจึงนำค่าที่ได้เปรียบเทียบน้ำมันชีวภาพก่อนและหลังปรับปรุงคุณภาพ

ผลและวิจารณ์

1. การวิเคราะห์แบบละเอียด (ultimate analysis)

ตารางที่ 1 แสดงค่าร้อยละองค์ประกอบของธาตุจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง elemental analyzer ของชีวมวลทั้งสามชนิดได้แก่ ต้นสบู่ดำ ช้างข้าวโพด และกากพลมะนาว ประกอบด้วย ธาตุคาร์บอน(C) ไฮโดรเจน(H) ไนโตรเจน(N) ออกซิเจน(O) และซัลเฟอร์(S) รวมถึงค่าพลังงานความร้อน และสูตรอย่างง่าย พบว่าต้นสบู่ดำมี C 44.65%, H 5.86%, N 1.14%, S 0.13% และ O 48.22% ช้างข้าวโพดพบว่ามี C 46.43%, H 6.00%, N 1.10%, S 0.11% และ O 46.38% กากพลมะนาวพบว่ามี C 46.47%, H 5.95%, N 1.91%, S 0.11% และ O 45.56% ชีวมวลทั้งสามชนิดมีปริมาณ C, H, N, S และ O ใกล้เคียงกัน โดยมีปริมาณซัลเฟอร์ค่อนข้างต่ำ (0.10-0.13%) และมีออกซิเจนสูง (45.56-48.22%) เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนของ H/C ของต้นสบู่ดำ ช้างข้าวโพดและ กากพลมะนาวพบว่ามีค่าเท่ากับ 1.58, 1.55 และ 1.54 ตามลำดับ องค์ประกอบทางเคมีโดยเฉลี่ยของสารชีวมวลทั้ง 3 ชนิด สามารถแสดงเป็นสูตรอย่างง่ายได้ดังนี้ คือ ต้นสบู่ดำ $\text{CH}_{1.50}\text{O}_{0.81}\text{N}_{0.02}$ ช้างข้าวโพด $\text{CH}_{1.55}\text{O}_{0.75}\text{N}_{0.02}$ และ กากพลมะนาว $\text{CH}_{1.54}\text{O}_{0.74}\text{N}_{0.04}$ ส่วนค่าพลังงานความร้อนของต้นสบู่ดำ ช้างข้าวโพด และกากพลมะนาว คือ 16.66, 17.47 และ 17.10 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกัน โดยช้างข้าวโพดให้ค่าพลังงานความร้อนสูงสุด จากค่า H/C เท่ากับ 1:5 โดยประมาณ ทำให้เห็นว่าชีวมวลทั้งสามสามารถนำมาผลิตน้ำมันชีวภาพได้แต่ชีวมวลทั้งสามชนิด มีปริมาณออกซิเจนสูง ซึ่งน้ำมันชีวภาพที่มีออกซิเจนสูงไม่เหมาะที่จะใช้เป็นเชื้อเพลิงในการขนส่ง ในบางงานวิจัยนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นเปลี่ยนรูปร่างด้วยไอน้ำโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (catalytic steam reforming) เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) โดยใช้วิธีการผลิตที่คล้ายกันกับการเปลี่ยนรูปร่างของแอลกอฮอล์กับสารอะโรมาติกที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ (catalytic steam reforming of alcohols and oxygenated aromatics) (Sensoz and Angin, 2008)

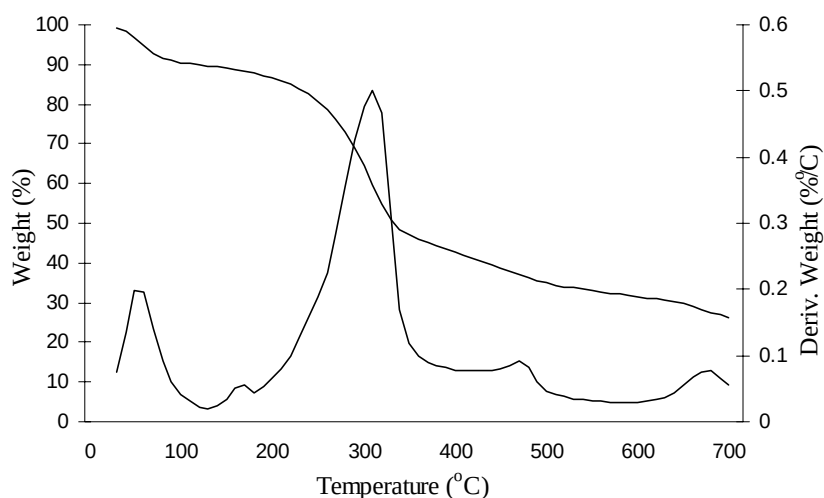
2. การสลายตัวทางความร้อนของชีวมวลโดยเครื่อง Thermogravimetric Analyzer (TGA)

ก่อนการไพโรไลซิสในเบื้องต้นจำเป็นต้องศึกษาการสลายตัวของสารด้วยความร้อนด้วยเครื่อง TGA เพื่อทราบช่วงอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุดของต้นสบู่ดำซึ่งทำให้ทราบอุณหภูมิที่เหมาะสมในการไพโรไลซิส ผลการวิเคราะห์ช่วงอุณหภูมิการสลายตัวของต้นสบู่ดำด้วยเครื่อง

TGA โดยสารชีวมวลส่วนใหญ่ที่มีเฮมิเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบเกิดการสลายที่อุณหภูมิ 220-350 องศาเซลเซียส เซลลูโลสสลายตัวที่อุณหภูมิ 325-375 องศาเซลเซียส และลิกนินสลายตัวที่อุณหภูมิ 200-700 องศาเซลเซียส (Uzun *et al*, 2007) จากภาพที่ 4 แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของต้นสับดูด้วยความร้อน ซึ่งพบว่าการสลายตัวในช่วงเริ่มต้นจากอุณหภูมิห้องถึง 100 องศาเซลเซียส เป็นการระเหยของน้ำซึ่งมีประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ หลังจากนั้นเปอร์เซ็นต์น้ำหนักต้นสับดูที่เหลือค่อยลดลงอย่างช้าจนถึงอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เปอร์เซ็นต์น้ำหนักต้นสับดูลดลงอย่างรวดเร็วจนถึงอุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส (ร้อยละน้ำหนักที่สลายตัว 41.33) ถึงอุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส โดยในช่วงอุณหภูมิ จากนั้นเปอร์เซ็นต์น้ำหนักต้นสับดูที่เหลือลดลงอย่างช้าจนถึงอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นจะไม่มี การสลายตัวอีก ซึ่งส่วนที่เหลือนี้จะเป็นส่วนของสารอนินทรีย์ที่เป็นอีกองค์ประกอบหนึ่งของต้นสับดู เหลือกากของแข็งปริมาณร้อยละ 26.22 จากข้อมูลนี้ทำให้ทราบว่าต้นสับดูมีความชื้น 5 เปอร์เซ็นต์และที่อุณหภูมิช่วง 200-370 องศาเซลเซียส มีอัตราการสลายตัวสูงสุด

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบแบบละเอียดด้วยเทคนิค elemental analysis ของชีวมวลต้นสับดู ช้างข้าวโพด และกากผลมะนาว

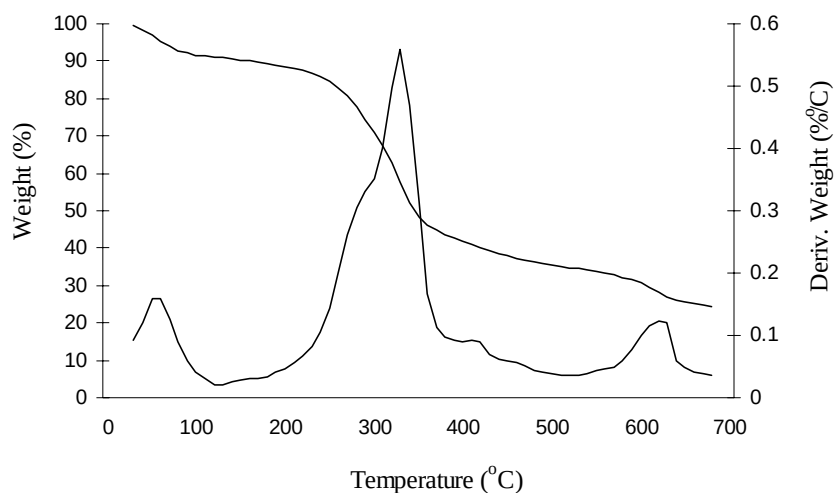
Elemental analysis	Ultimate analysis (wt%)		
	ต้นสับดู	ช้างข้าวโพด	กากผลมะนาว
C	44.65	46.43	46.47
H	5.86	6.00	5.95
N	1.14	1.10	1.91
S	0.13	0.10	0.11
O (diff.)	48.22	46.38	45.56
H/C molar ratio	1.58	1.55	1.54
O/C molar ratio	0.81	0.75	0.74
Empirical formula	$\text{CH}_{1.50}\text{O}_{0.81}\text{N}_{0.02}$	$\text{CH}_{1.55}\text{O}_{0.75}\text{N}_{0.02}$	$\text{CH}_{1.54}\text{O}_{0.74}\text{N}_{0.04}$
Heating value (MJ/kg)	16.66	17.47	17.10



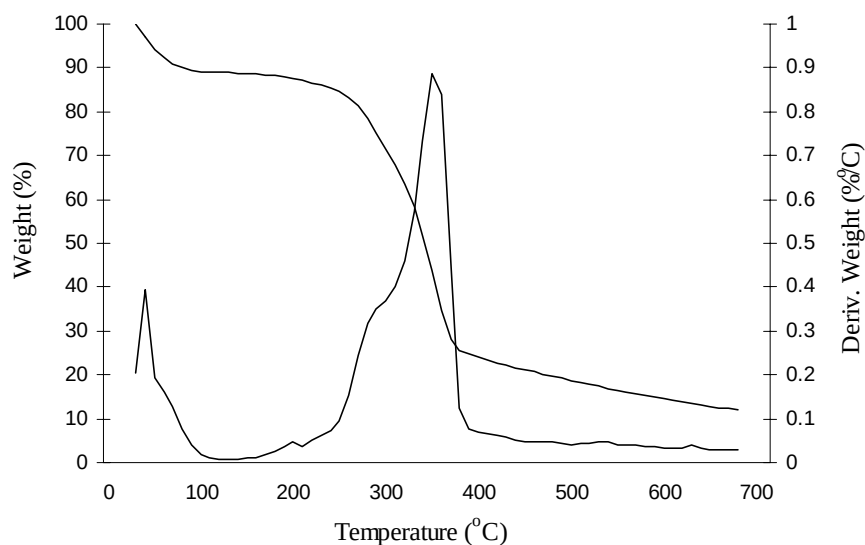
ภาพที่ 4 เปอร์เซนต์น้ำหนักของต้นสบู่ดำที่เหลือจากการสลายตัวที่อุณหภูมิต่างๆ ในเครื่อง TGA อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

ภาพที่ 5 แสดงถึงการสลายตัวของสารด้วยความร้อนด้วยเครื่อง TGA ของซังข้าวโพด ซึ่งมีแนวโน้มของช่วงอุณหภูมิการสลายตัวเป็นไปในทางเดียวกันกับต้นสบู่ดำ พบว่าการสลายตัวในช่วงเริ่มต้นจากอุณหภูมิห้องถึง 100 องศาเซลเซียส เป็นการระเหยของน้ำซึ่งบอกถึงความชื้นที่มีอยู่ในวัตถุดิบ มีค่าประมาณ 5 เปอร์เซนต์ หลังจากนั้นเปอร์เซนต์น้ำหนักที่เหลือค่อยลดลงอย่างช้าจนถึงอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส และลดลงอย่างรวดเร็วจนถึงอุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส (ร้อยละน้ำหนักที่สลายตัว 44.89) เมื่อถึงอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเปอร์เซนต์น้ำหนักที่เหลือลดลงอย่างช้าจนกระทั่งคงที่เหลือกากของแข็ง 24.46 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก

ภาพที่ 6 แสดงถึงการสลายตัวของสารด้วยความร้อนด้วยเครื่อง TGA ของกากพลมะนาว ซึ่งพบว่าการสลายตัวในช่วงเริ่มต้นจากอุณหภูมิห้องถึง 100 องศาเซลเซียส เป็นการระเหยของน้ำซึ่งบอกถึงความชื้นที่มีอยู่ในวัตถุดิบ มีค่าประมาณ 5 เปอร์เซนต์ หลังจากนั้นเปอร์เซนต์น้ำหนักที่เหลือค่อยลดลงอย่างช้าจนถึงอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส และลดลงอย่างรวดเร็วจนถึงอุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส (ร้อยละน้ำหนักที่สลายตัว 62.00) เมื่อถึงอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเปอร์เซนต์น้ำหนักที่เหลือลดลงอย่างช้าจนกระทั่งคงที่เหลือกากของแข็ง 12.03 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 5 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักของขังข้าวโพดที่เหลือจากการสลายตัวที่อุณหภูมิต่างๆ ในเครื่อง TGA อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

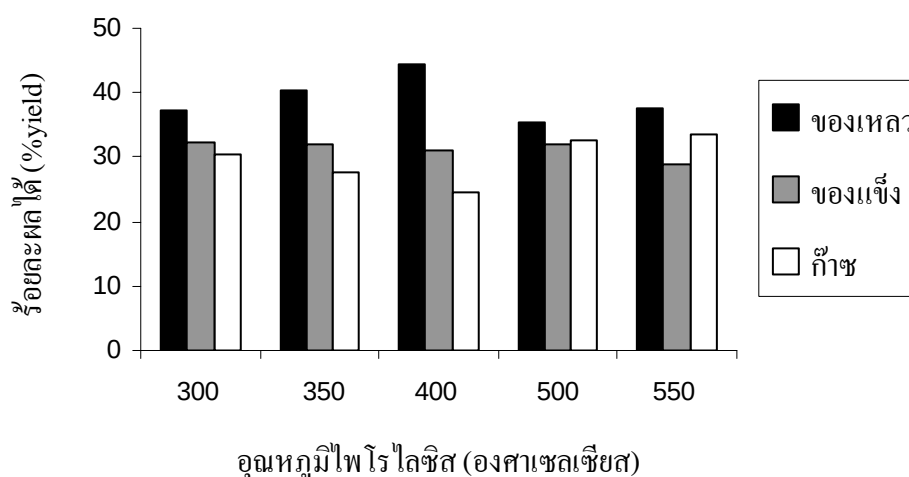


ภาพที่ 6 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักของกากผลมะนาวที่เหลือจากการสลายตัวที่อุณหภูมิต่างๆ ในเครื่อง TGA อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

จากผลการสลายชีวมวลทั้งสามชนิดทำให้ทราบว่าอุณหภูมิในการไพโรไลซิสควรสูงกว่า 200 องศาเซลเซียส โดยที่อุณหภูมิ 200-400 และ 400-700 องศาเซลเซียส ร้อยละน้ำหนักที่หายไป อยู่ในช่วง 41 ถึง 62 และ 16-19 ตามลำดับ

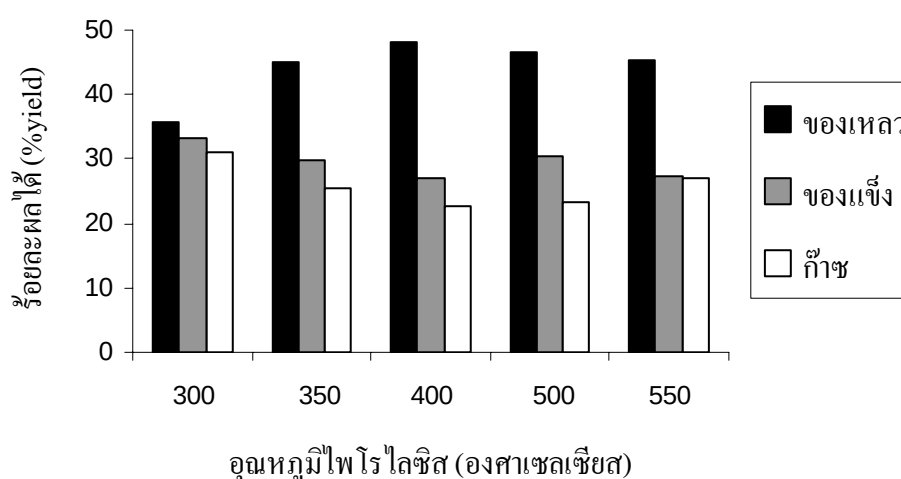
3. ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์จากการไพโรไลซิส

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการไพโรไลซิสที่มีผลต่อสัดส่วนของสารผลิตภัณฑ์ของเหลว ของแข็ง และแก๊ส ซึ่งศึกษาอุณหภูมิของการไพโรไลซิสในช่วงอุณหภูมิ 300-550 องศาเซลเซียส ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆ ของต้นสับดำ แสดงดังภาพที่ 7 พบว่าอุณหภูมิมิอิทธิพลโดยตรงต่อสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้ โดยที่อุณหภูมิต่ำจะได้ปริมาณของแข็ง (ถ่านชาร์) สูง แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นร้อยละผลได้ของแก๊สมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ส่วนผลิตภัณฑ์ของเหลวหรือน้ำมันชีวภาพที่ได้นั้นให้ร้อยละผลได้อยู่ในช่วง 38.2-41.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 300-400 องศาเซลเซียส เนื่องมาจากความร้อนในช่วงอุณหภูมินี้ทำให้สารประกอบบางส่วนที่มีอยู่ในต้นสับดำเกิดการสลายตัวเป็นไอและเกิดปฏิกิริยาปฐมภูมิ (primary reaction) และลดลงเมื่อถึงอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส แต่กลับเพิ่มขึ้นเมื่อไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส สำหรับการไพโรไลซิสต้นสับดำให้ร้อยละผลได้สูงสุดที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เท่ากับ 41.3 ส่วนผลิตภัณฑ์ของแข็งถ่านชาร์มีแนวโน้มลดลงค่อนข้างคงที่ และแก๊สมีปริมาณร้อยละผลได้เพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจาก 400-550 องศาเซลเซียส คือเพิ่มขึ้นเป็น 24.65-33.5 เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิไพโรไลซิสสูงมากขึ้นสารประกอบในต้นสับดำสามารถสลายตัวได้อีกครั้งและเกิดปฏิกิริยาทุติยภูมิ (secondary reaction) ไอสารที่เกิดขึ้นสามารถทำปฏิกิริยากันเกิดสารประกอบอะโรมาติก ปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชัน ปฏิกิริยาการควบแน่น และปฏิกิริยาการแตกตัวได้ (Uzun *et al.*, 2007)



ภาพที่ 7 ร้อยละผลได้ (%yield) ของต้นสับดำ จากการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 500 และ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สในโตรเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราการให้ความร้อน 1.6 องศาเซลเซียสต่อนาที

ภาพที่ 8 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผลได้ของสารผลิตภัณฑ์ ของเหลวของแข็ง และ แก๊สของซังข้าวโพดที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 300-550 องศาเซลเซียส พบว่ามีแนวโน้มคล้ายกันกับต้นสบู่ดำ กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิในการไพโรไลซิสเพิ่มมากขึ้นจาก 300 องศาเซลเซียส จนถึงอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 35.6-48.5 ส่วนร้อยละผลได้ของถ่านชาร์และแก๊สลดลงเป็น 33.2-29.7 และ 31.2-22.8 ตามลำดับ



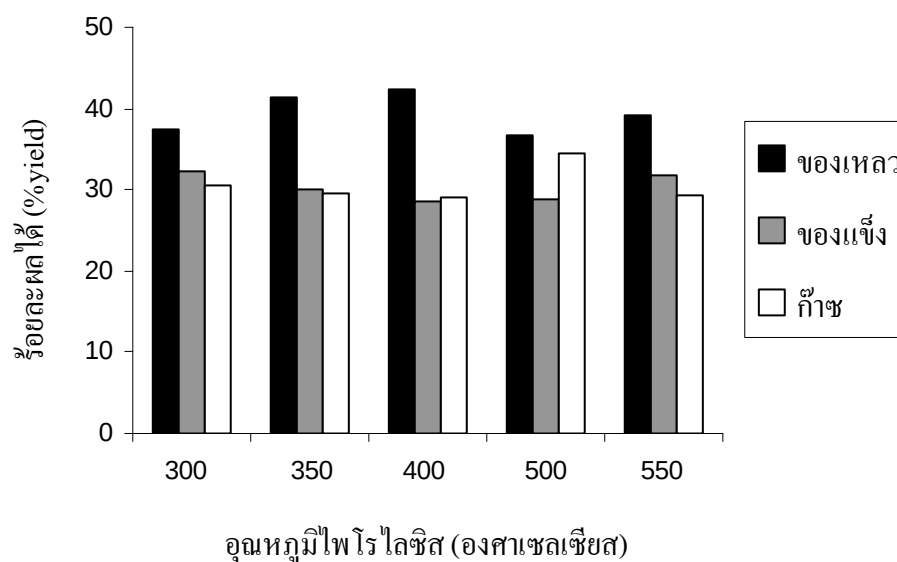
ภาพที่ 8 ร้อยละผลได้ของซังข้าวโพด จากการไพโรไลซิสซังข้าวโพดที่อุณหภูมิต่างๆ

จากภาพที่ 9 พบว่าเมื่ออุณหภูมิในการไพโรไลซิสเพิ่มขึ้นจาก 300-550 องศาเซลเซียส ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ตั้งแต่อุณหภูมิ 300 350 และ 400 องศาเซลเซียส ซึ่งที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสมีร้อยละผลได้สูงสุดคือ 42.4 ส่วนร้อยละผลได้ของถ่านลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นคือ 28.4-32.2 โดยทั่วไปแล้วคาดว่าร้อยละผลได้ของแก๊สเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่ออุณหภูมิในการไพโรไลซิสเพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 29.1-34.5

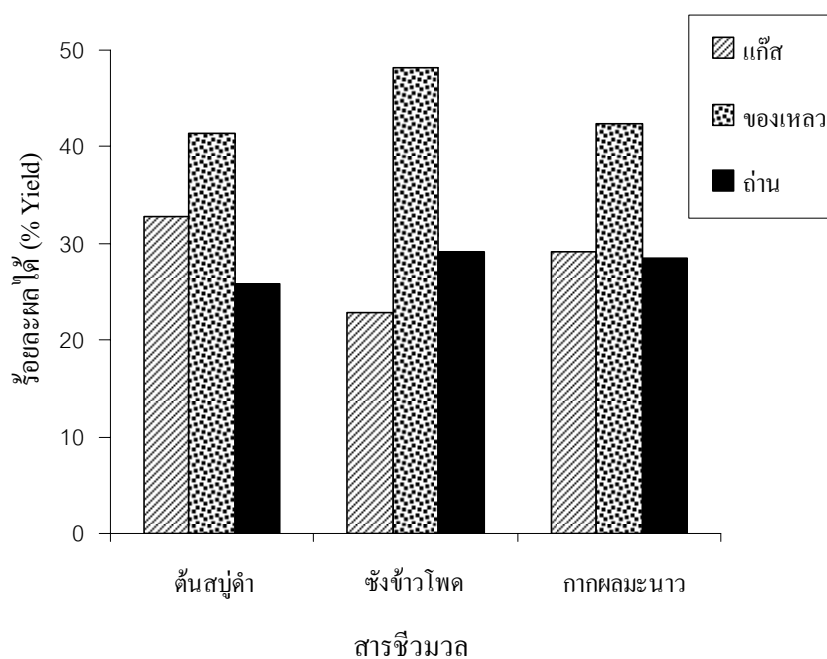
4. ร้อยละผลได้ของชีวมวลต่างชนิด

ภาพที่ 10 แสดงถึงร้อยละผลได้ของกระบวนการไพโรไลซิสชีวมวลที่แตกต่างกันสามชนิดได้แก่ ซังข้าวโพด ต้นสบู่ดำ และเปลือกผลมะนาว พบว่าซังข้าวโพดมีร้อยละผลได้ของเหลวหรือน้ำมันชีวภาพสูงที่สุดคือ 48 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพจากแกลบข้าว (Ji-lu, 2007) คือ 56 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งไพโรไลซิสแบบเร็วที่อุณหภูมิ 465 องศาเซลเซียส และมีค่ามากกว่าไพโรไลซิสแบบช้าของกากยาสูบที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าเท่ากับ 27

เปอรูเซ็นต์ (Putun *et al.*, 2007) รองลงมาคือเปลือกผลมะนาวร้อยละ 42 และต้นสับดำร้อยละ 41 ตามลำดับ ส่วนร้อยละผลได้ของถ่านชาร์ คือ 29, 28 และ 26 ตามลำดับ และร้อยละผลได้ของแก๊ส คือ 23, 29 และ 33 ตามลำดับ



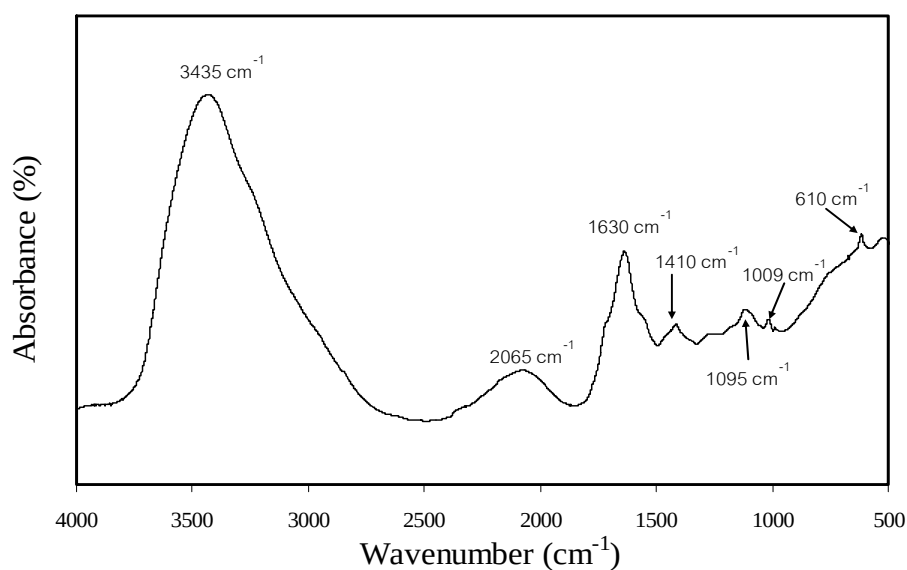
ภาพที่ 9 ร้อยละผลได้ของเปลือกผลมะนาว จากการไพโรไลซิสขังข้าวโพด



ภาพที่ 10 ร้อยละผลได้ ของต้นสับดำ ขังข้าวโพด และกากผลมะนาว จากการไพโรไลซิสอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

5. การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพที่ได้จากการทดลอง

นำผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพของต้นสบู่ดำที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสมาวเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FT-IR) พบว่าผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพที่เกิดขึ้นมีหมู่ฟังก์ชันเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจำพวกอะลิฟาติก (aliphatic compound) ที่มีโครงสร้างเป็นวงที่มีคาร์บอน 5-6 โมเลกุล และแสดงความเป็นอะโรมาติก (aromatic compound) แสดงดังภาพที่ 11 สามารถนำมาใช้วิเคราะห์สารต่างๆ ที่อยู่ในน้ำมันชีวภาพ พิกของ O-H stretching ที่ช่วงความถี่ 3435 cm^{-1} อยู่ระหว่าง $3200\text{--}3600\text{ cm}^{-1}$ (แม่น้ำและอมร, 2539) บ่งบอกว่า เป็นฟังก์ชันหลักของสารจำพวกแอลกอฮอล์และฟีนอล พิก C-H stretching 1410 cm^{-1} แสดงถึงหมู่แอลเคน ดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบน้ำมันชีวภาพของเมล็ดดอกคำฝอยกับน้ำมันชีวภาพของต้นสบู่ดำซึ่งมีช่วงความถี่ใกล้เคียงกัน (Onay, 2007) พิกของ C=C stretching ที่ความถี่ 1630 cm^{-1} แสดงถึงหมู่แอลคีน พิกที่ความถี่ 2065 cm^{-1} แสดงถึงหมู่แอลไนด์ และช่วงความถี่ที่ต่ำกว่า 1000 cm^{-1} มักเป็นสารประกอบที่ซับซ้อนเช่นสารประกอบประเภทเอสเทอร์และอีเทอร์



ภาพที่ 11 อินฟราเรดสเปกตรัม (FT-IR spectrum) ของน้ำมันชีวภาพจากต้นสบู่ดำ

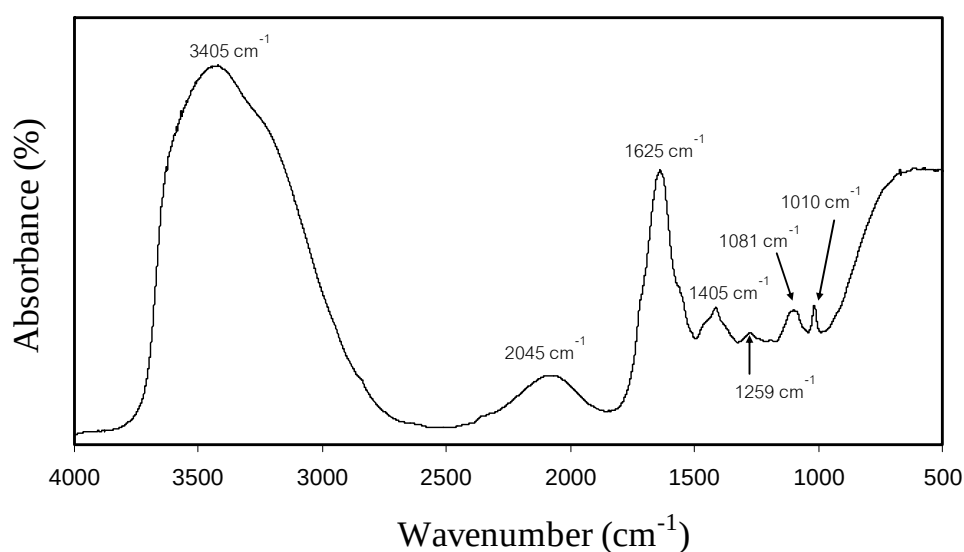
พบว่าผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพของซังข้าวโพดแสดงดังภาพที่ 12 สามารถนำมาใช้วิเคราะห์สารต่างๆ ที่อยู่ในน้ำมันชีวภาพได้ดังนี้ พิกของ O-H stretching ที่ช่วงความถี่ 3410 cm^{-1} เป็นฟังก์ชันหลักของสารจำพวกแอลกอฮอล์และฟีนอล พิก C-H stretching 1420 cm^{-1} และ

2610 cm^{-1} แสดงถึงหมู่แอลเคน พิกของ C=O stretching ที่ความถี่ 1725 cm^{-1} แสดงถึงสารประกอบคีโตน แอลดีไฮด์ และกรดคาร์บอกซิลิก พิกของ C=C stretching ที่ความถี่ 1630 cm^{-1} แสดงถึงหมู่แอลคีน พิกที่ความถี่ 2055 cm^{-1} แสดงถึงหมู่แอลไคล์ และช่วงความถี่ที่ต่ำกว่า 1000 cm^{-1} มักเป็นประกอบที่ซับซ้อนเช่นสารประกอบประเภทเอสเทอร์และอีเทอร์

ตารางที่ 2 หมู่ฟังก์ชันหลักและประเภทของสารประกอบของน้ำมันชีวภาพของเมล็ดดอกคำฝอย

ช่วงความถี่	หมู่ฟังก์ชัน	ประเภทของสารประกอบ
3650-3100	O-H stretching	Polymeric O-H, water impurities
3000-2800	C-H stretching	Alkanes
2200-1950	C $\equiv$ C stretching	Alkynes
1761-1676	C=O stretching	Ketones, aldehydes, carboxylic acids
1670-1550	C=C stretching	Alkenes
1400-1300	C-H stretching	Alkanes
1020-950	C-O stretching	Primary, secondary and tertiary alcohols,
	O-H bending	Phenol; ester, ethers

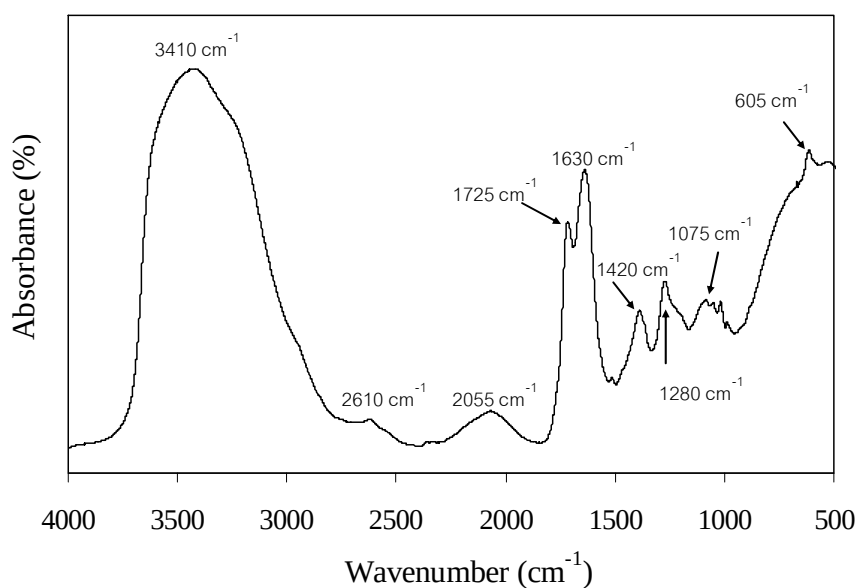
ที่มา: Onay (2007)



ภาพที่ 12 อินฟราเรดสเปกตรัม (FT-IR spectrum) ของน้ำมันชีวภาพจากชั่งข้าวโพด

หมู่ฟังก์ชันที่ปรากฏในภาพที่ 13 แสดงให้เห็นถึงหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบต่างๆ ที่มีอยู่ในน้ำมันชีวภาพจากกากผลมะนาว พีกของ O-H stretching ที่ช่วงความถี่ 3405 cm^{-1} เป็นฟังก์ชันนัลกรุปของสารจำพวกแอลกอฮอล์และฟีนอล พีก C-H stretching 1405 cm^{-1} แสดงถึงหมู่แอลเคน พีกของ C=O stretching ที่ความถี่ 1625 cm^{-1} แสดงถึงสารประกอบคีโตน แอลดีไฮด์ และกรดคาร์บอกซิลิก พีกของ C=C stretching ที่ความถี่ 1625 cm^{-1} แสดงถึงหมู่แอลคีน พีกที่ความถี่ 2045 cm^{-1} แสดงถึงหมู่แอลไคโน์ และช่วงความถี่ที่ต่ำกว่า 1000 cm^{-1} มักเป็นประกอบที่ซับซ้อน เช่น สารประกอบประเภทเอสเทอร์และอีเทอร์

จะเห็นได้ว่าน้ำมันชีวภาพจากชีวมวลทั้งสามประกอบด้วย แอลกอฮอล์ ฟีนอล แอลเคน คีโตน แอลดีไฮด์ กรดคาร์บอกซิลิก แอลคีน แอลไคโน์ เอสเทอร์ และอีเทอร์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tsai *et al.*, (2006) ที่กล่าวว่าน้ำมันชีวภาพที่ผลิตจาก ฟางข้าว ชานอ้อย และกะลามะพร้าว ประกอบด้วย คีโตน ฟีนอล กรดคาร์บอกซิลิก แอลดีไฮด์ ที่ความถี่ 1640 และ 1700 cm^{-1} ส่วนพีกที่ 1517 cm^{-1} คือ แอลคีนและอะโรมาติก ที่ความถี่ 1380 และ 1465 cm^{-1} คือ พีกของแอลเคน กลุ่มของสารประกอบแอลกอฮอล์ เอสเทอร์ อีเทอร์ พีกความถี่ คือ 1300 และ 900 cm^{-1}



ภาพที่ 13 อินฟราเรดสเปกตรัม (FT-IR spectrum) ของน้ำมันชีวภาพจากกากผลมะนาว

6. สมบัติของน้ำมันชีวภาพที่ผลิตได้

คุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสชีวมวลทั้ง 3 ชนิด คือ ชังข้าวโพดต้นสับดำ และกากผลมะนาว แสดงในตารางที่ 3 จากการศึกษาลักษณะทางกายภาพของน้ำมันชีวภาพทั้ง 3 ชนิด พบว่ามีลักษณะแตกต่างกัน น้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสกากผลมะนาวมีความหนืดต่ำสุด (0.94 เซนติสโตกส์) สูงขึ้นไปคือน้ำมันจากต้นสับดำ (1.36 เซนติสโตกส์) และหนืดที่สุดคือจากชังข้าวโพด (1.45 เซนติสโตกส์) น้ำมันชีวภาพทั้ง 3 ชนิดมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน จากคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันชีวภาพ พบว่าค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพจากชังข้าวโพดมีค่าสูงสุดคือ 29.6 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันมะกอก 31.8 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม (Sensoz *et al.*, 2006) และ มากกว่าชานอ้อยซึ่งเท่ากับ 19.91 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม (Asadullah *et al.*, 2003) น้ำมันจากกากผลมะนาวและต้นสับดำค่าพลังงานที่วัดได้คือ 26.6 และ 25.3 เมกกะจูลต่อกิโลกรัมตามลำดับ จุลวาทไฟของน้ำมันชีวภาพจากต้นสับดำ (52 องศาเซลเซียส) และกากผลมะนาว (50 องศาเซลเซียส) มีค่าใกล้เคียงกัน และต่ำกว่าของน้ำมันชีวภาพจากชังข้าวโพด (63 องศาเซลเซียส) ซึ่งมีจุลวาทไฟใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลหมุนเร็ว (มากกว่า 52 องศาเซลเซียส)

น้ำมันที่ได้จากการกลั่นน้ำมันชีวภาพเป็นของผสมเชิงซ้อนจำพวกกรดอินทรีย์ที่ระเหยได้ แอลกอฮอล์ แอลดีไฮด์ อีเทอร์ คีโตน ฟิวแรน ฟีนอล ไฮโดรคาร์บอน และองค์ประกอบอื่นที่ไม่สามารถระเหยได้ (Adjaye and Bakhshi, 1995) ผลของการกลั่นลำดับส่วนของน้ำมันชีวภาพทั้งสามชนิดตามคาบจุดเดือด พบว่าที่อุณหภูมิ IBP-200 องศาเซลเซียส น้ำมันชีวภาพจากชังข้าวโพดมีร้อยละผลได้ของปริมาณแก๊สโซลีนสูงสุด คือ 72.27 ซึ่งใกล้เคียงกับต้นสับดำ คือ 72.0 และกากผลมะนาวมีปริมาณ 68.22 ช่วงอุณหภูมิ 200-250 องศาเซลเซียส คือช่วงการกลั่นตัวของเคโรซีนหรือน้ำมันก๊าด พบว่าน้ำมันชีวภาพจากกากผลมะนาวมีปริมาณร้อยละผลได้สูงสุด คือ 6.93 รองลงมาคือ 5.22 และ 2.97 ของน้ำมันชีวภาพจากต้นสับดำและชังข้าวโพด ตามลำดับ ส่วนที่เหลือจากการกลั่นคือกากน้ำมัน (residue) คือ ของเหลวหนืดที่ไม่สามารถกลั่นไอลได้ที่อุณหภูมิสูงกว่าหรือเท่ากับ 250 องศาเซลเซียส ซึ่งเรียงลำดับร้อยละผลได้ของกากน้ำมันจากมากไปหาน้อยของต้นสับดำ ชังข้าวโพด และกากผลมะนาว มีค่าเท่ากับ 9.0, 6.03 และ 5.85 ตามลำดับ

ตารางที่ 3 คุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สในโตรเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราการให้ความร้อน 1.6 องศาเซลเซียสต่อนาที

คุณสมบัติ	น้ำมันดีเซล*	น้ำมันชีวภาพ		
		ซังข้าวโพด	ต้นสับดำ	กากผล มะนาว
ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	46.5	29.6	25.3	26.6
จุดวาบไฟ (องศาเซลเซียส)	50	63	52	50
ค่าความหนืด (เซนติสโตกส์) ที่ 40 องศาเซลเซียส	2	1.45	1.36	0.94
การกลั่นลำดับส่วน				
IBP-200°C (แก๊สโซลีน) (wt%)		72.27	72.00	68.22
200°C -250°C (น้ำมันก๊าด) (wt%)		2.97	5.22	6.93
กากน้ำมัน (residue) (wt%)		6.03	9.00	5.85
% recovery		81.27	86.22	81.00

* ที่มา: Marugan *et. al.* (2008)

7. สมบัติของถ่านชาร์ที่ผลิตได้

ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวแบบ BET ของถ่านชาร์ที่เป็นผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส แสดงในตารางที่ 4 พบว่าถ่านชาร์จากซังข้าวโพดให้ค่าพื้นที่ผิวมากที่สุด 51.9 ตารางเมตรต่อกรัม และถ่านชาร์จากกากผลมะนาวมีพื้นที่ผิวแตกต่างจากถ่านชาร์จากซังข้าวโพดเล็กน้อย คือ 51.6 ตารางเมตรต่อกรัม ส่วนถ่านชาร์จากต้นสับดำมีพื้นที่ผิวน้อยที่สุด คือ 27.9 ตารางเมตรต่อกรัม

ตารางที่ 4 พื้นที่ผิวจำเพาะแบบ BET ของถ่านชาร์ของซังข้าวโพด ต้นสบู่ดำ และกากผลมะนาวที่ได้จากการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

ถ่านชาร์	พื้นที่ผิวจำเพาะแบบ BET (ตารางเมตรต่อกรัม)
ซังข้าวโพด	51.9
ต้นสบู่ดำ	27.9
กากผลมะนาว	51.6

8. สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้

พิจารณาถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นถ่านจากการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ดังตารางที่ 5 พบว่าค่าการดูดซับของพื้นที่ผิวจำเพาะแบบ BET ของถ่านกัมมันต์จากซังข้าวโพดมีค่าสูงที่สุด คือ 240.6 ตารางเมตรต่อกรัม รองลงมา คือ กากผลมะนาว 213.5 ตารางเมตรต่อกรัม และต้นสบู่ดำมีค่าน้อยที่สุด คือ 201.8 ตารางเมตรต่อกรัม ดังนั้นถ่านกัมมันต์จากซังข้าวโพดจึงเหมาะสมที่จะผลิตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านกัมมันต์เพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำมันชีวภาพต่อไป

ตารางที่ 5 พื้นที่ผิวจำเพาะแบบ BET ของถ่านกัมมันต์ของซังข้าวโพด ต้นสบู่ดำ และกากผลมะนาวที่ได้จากการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

ถ่านกัมมันต์	พื้นที่ผิวจำเพาะแบบ BET (ตารางเมตรต่อกรัม)
ซังข้าวโพด	240.6
ต้นสบู่ดำ	201.8
กากผลมะนาว	213.5

พิจารณาค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์เพื่อเปรียบเทียบปริมาณการดูดซับไอโอดีนก่อนและหลังกระตุ้นทางเคมีด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และกระตุ้นทางกายภาพที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจน ตารางที่ 6 พบว่าค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านชาร์จากขังข้าวโพดมีค่ามากที่สุด คือ 111.4 มิลลิกรัมต่อกรัม รองลงมาคือถ่านชาร์จากกากผลมะนาว คือ 95.6 มิลลิกรัมต่อกรัม และต้นสบู่ดำมีค่าน้อยที่สุดคือ 82.2 มิลลิกรัมต่อกรัม ส่วนค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์หลังการกระตุ้นมีแนวโน้มคล้ายกับก่อนกระตุ้นซึ่งพบว่าปริมาณการดูดซับไอโอดีนของขังข้าวโพดมีค่าสูงสุดคือ 613.5 มิลลิกรัมต่อกรัม รองลงมาคือ กากผลมะนาว 572.8 มิลลิกรัมต่อกรัม และต้นสบู่ดำ 561.6 มิลลิกรัมต่อกรัม ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ส่วนใหญ่ยังมีค่าการดูดซับไอโอดีนต่ำกว่าค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมคือ ต้องมีค่าการดูดซับไอโอดีนไม่น้อยกว่า 600 มิลลิกรัมต่อกรัม

พื้นที่ผิวจำเพาะแบบ BET และค่าการดูดซับไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ดังตารางที่ 5 และ 6 ตามลำดับ พบว่าถ่านกัมมันต์จากขังข้าวโพดมีค่าพื้นที่ผิวของรูพรุนและค่าการดูดซับไอโอดีนนัมเบอร์สูงที่สุด คือ 240.6 ตารางเมตรต่อกรัม และ 613.5 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ดังนั้นจึงนำถ่านกัมมันต์จากขังข้าวโพดผลิตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านกัมมันต์ (Ni/activated carbon) เพื่อเร่งปฏิกิริยาในการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันชีวภาพจากขังข้าวโพดต่อไป

ตารางที่ 6 ค่าการดูดซับและปริมาณการดูดซับไอโอดีนต่อน้ำหนักของถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์ของขังข้าวโพด ต้นสบู่ดำ และกากผลมะนาวที่ได้จากการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

ถ่านกัมมันต์	ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านชาร์ (มิลลิกรัมต่อกรัม)	ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของ ถ่านกัมมันต์ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
ขังข้าวโพด	111.4	613.5
ต้นสบู่ดำ	82.2	561.6
กากผลมะนาว	95.6	572.8

9. การปรับปรุงคุณภาพน้ำมันชีวภาพด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาต่างชนิด

ร้อยละผลได้น้ำมันชีวภาพหลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาต่างชนิดกัน ที่ปรับปรุงคุณภาพในปฏิกรณ์แบบถังกวน แสดงในตารางที่ 7 พบว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลท์ชนิด ZSM-5 มีปริมาณร้อยละผลได้น้ำมันชีวภาพสูงที่สุด 92.0 รองลงมาคือตัวเร่งปฏิกิริยา Ni(reduced)/ถ่านกัมมันต์ 88.8 และตัวเร่งปฏิกิริยา Ni(unreduced)/ถ่านกัมมันต์ 85.5 ผลิตภัณฑ์กากน้ำมันที่เกิดขึ้นคือโค้กที่เกาะอยู่บนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่ากากน้ำมันที่เกาะบนตัวเร่งปฏิกิริยา Ni(unreduced)/ถ่านกัมมันต์ 5.0 ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยา Ni(reduced)/ถ่านกัมมันต์ และ ZSM-5 มีค่าใกล้เคียงกัน คือร้อยละ 4.7 และ 4.2 ตามลำดับ ร้อยละผลได้น้ำมันของผลิตภัณฑ์พลอยได้ (by-product) ที่เกิดขึ้น พบว่า Ni(unreduced)/ถ่านกัมมันต์ เท่ากับ 9.5 ซึ่งมีปริมาณมากที่สุด รองลงมาคือตัวเร่งปฏิกิริยา Ni(reduced)/ถ่านกัมมันต์ คือ 6.5 และตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลท์ชนิด ZSM-5 มีร้อยละ 3.3

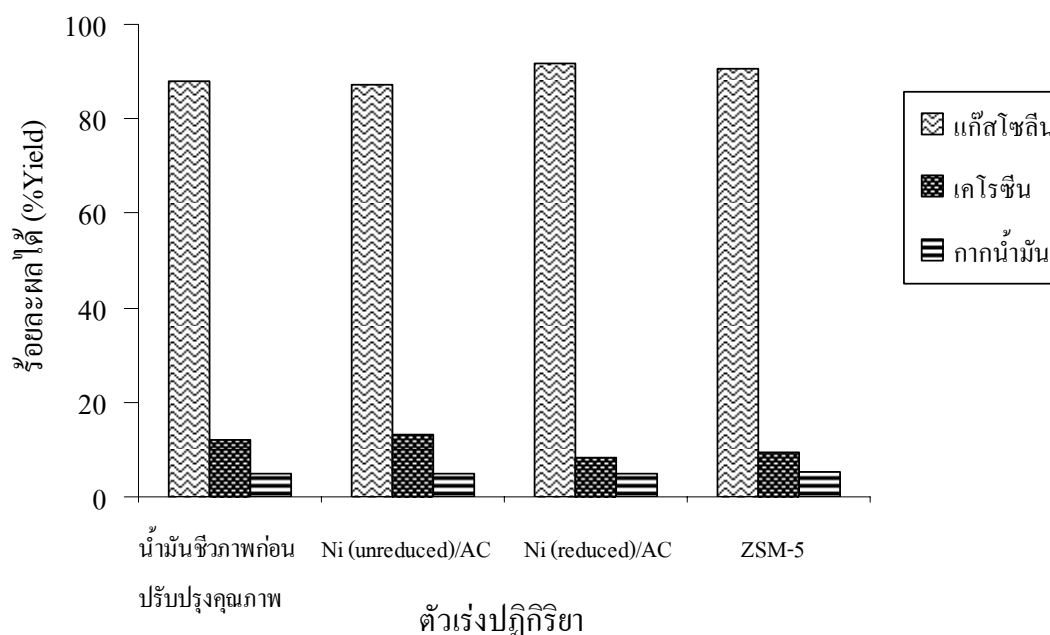
ตารางที่ 7 ร้อยละผลได้น้ำมันชีวภาพจากซังข้าวโพดหลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาต่างชนิดกัน

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	ร้อยละผลได้น้ำมัน	ร้อยละผลได้ของกากน้ำมัน	ร้อยละผลได้ของก๊าซที่เป็นผลพลอยได้*
Ni(unreduced)/ถ่านกัมมันต์	85.5	5.0	9.5
Ni(reduced)/ถ่านกัมมันต์	88.8	4.7	6.5
ZSM-5	92.0	4.2	3.8

หมายเหตุ:* คือร้อยละผลได้ของก๊าซที่เป็นผลพลอยได้ (by-product) ซึ่งเป็นค่าความต่างหลังจากหักลบร้อยละผลได้น้ำมันและกากน้ำมันออกจาก 100 ตามลำดับ

ผลิตภัณฑ์ของเหลวหรือน้ำมันชีวภาพจากชังข้าวโพดได้ทดลองนำมาปรับปรุงคุณภาพด้วยตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนถ่านกัมมันต์ โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากถ่านชาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิสชังข้าวโพด เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสูงที่สุด โดยทำการทดลองในปฏิกรณ์แบบถังกวน ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความดันเริ่มต้น 1 บรรยากาศไนโตรเจน นำน้ำมันที่ได้จากการปรับปรุงคุณภาพมาวิเคราะห์ โดยการกลั่นลำดับส่วน เพื่อเปรียบเทียบคุณภาพของน้ำมันก่อนและหลังปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยคาดว่าน้ำมันที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพมีส่วนของน้ำมันเบามากขึ้น และมีน้ำมันหนักลดลง โดยนำน้ำมันนำมากลั่นเพื่อแยกองค์ประกอบตามคาบจุดเดือด ดังนี้ ช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ IBP-200 องศาเซลเซียส คือ แนฟทาหรือแก๊สโซลีน อุณหภูมิ 200-250 องศาเซลเซียส คือ เคโรซีน อุณหภูมิ 250-370 องศาเซลเซียส คือ แก๊สออยล์ และอุณหภูมิมากกว่า 370 องศาเซลเซียส คือ กากน้ำมัน

ปริมาณผลิตภัณฑ์ในแต่ละช่วงอุณหภูมิการกลั่นแสดงดังภาพที่ 11 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/ถ่านกัมมันต์ มีร้อยละผลได้ของปริมาณแก๊สโซลีน 87.1 ใกล้เคียงกับน้ำมันชีวภาพก่อนการปรับปรุงคุณภาพที่มีร้อยละผลได้ของปริมาณแก๊สโซลีน 87.8 และมีร้อยละผลได้ของปริมาณเคโรซีนเท่ากับ 13.0 ซึ่งมากกว่าร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพก่อนการปรับปรุงคุณภาพ คือ 12.2 เล็กน้อย คุณภาพน้ำมันที่ได้ดูเหมือนไม่แตกต่างจากก่อนปรับปรุงคุณภาพจึงได้ทำการรีดิวซ์ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/ถ่านกัมมันต์ ด้วยแก๊สไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ก่อนแล้วจึงปรับปรุงคุณภาพ เมื่อใช้ตัวเร่ง Ni(reduced)/ถ่านกัมมันต์ ที่ผ่านการรีดิวซ์ด้วยแก๊สไฮโดรเจน พบว่าร้อยละผลได้ของปริมาณแก๊สโซลีน คือ 91.7 สูงกว่าก่อนรีดิวซ์และน้ำมันที่ได้มีแก๊สโซลีนสูงขึ้นร้อยละ 4.4 หลังการปรับปรุงคุณภาพ และเมื่อเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ที่มีร้อยละผลได้ของปริมาณแก๊สโซลีนเท่ากับ 90.6 ใดๆก็ดีร้อยละผลได้ของปริมาณเคโรซีนของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 คือ 9.4 มีค่ามากกว่าร้อยละผลได้ของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni(reduced)/ถ่านกัมมันต์ ที่มีค่าเท่ากับ 8.4



ภาพที่ 14 ปริมาณผลิตภัณฑ์ในแต่ละช่วงอุณหภูมิการกลั่นของน้ำมันชีวภาพจากชังข้าวโพดที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาต่างชนิด

หมายเหตุ: ที่อุณหภูมิมากกว่า 250 องศาเซลเซียสไม่ปรากฏไ้อจากการกลั่นน้ำมันชีวภาพดังนั้น กากน้ำมันคือส่วนที่ ≥ 250 องศาเซลเซียส

10. ค่าพลังงานความร้อนของน้ำมันชีวภาพที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ

พิจารณาค่าพลังงานความร้อนของน้ำมันชีวภาพจากชังข้าวโพดหลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาต่างชนิดกัน แสดงในตารางที่ 8 พบว่าค่าพลังงานความร้อนเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni(reduced)/ถ่านกัมมันต์ ที่รีดิวซ์ด้วยแก๊สไฮโดรเจนมีค่าสูงสุดคือ 34.0 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม รองลงมาคือ ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ ชนิด ZSM-5 มีค่าเท่ากับ 31.8 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม และตัวเร่งปฏิกิริยา Ni(unreduced)/ถ่านกัมมันต์ มีค่าน้อยที่สุด คือ 24.8 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม เมื่อนำค่าพลังงานความร้อนของน้ำมันชีวภาพที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน 3 ชนิดเปรียบเทียบกับน้ำมันชีวภาพก่อนการปรับปรุงคุณภาพซึ่งมีค่าเท่ากับ 29.6 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม แสดงให้เห็นถึงความสามารถของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni(reduced)/ถ่านกัมมันต์ ที่รีดิวซ์ด้วยแก๊สไฮโดรเจน ในปฏิกิริยาแครกกิงด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถทำให้ค่าพลังงานความร้อนเพิ่มมากขึ้น

ตารางที่ 8 ค่าพลังงานความร้อนของน้ำมันชีวภาพของซังข้าวโพด ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วย
ด้วยเร่งปฏิกิริยาต่างชนิดกัน

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	ค่าพลังงานความร้อน (เมกกะจูลต่อกิโลกรัม)
ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา	29.6
Ni(unreduced)/ถ่านกัมมันต์	24.8
Ni(reduced)/ถ่านกัมมันต์	34.0
ZSM-5	31.8

ดังนั้นถ่านที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสจึงสามารถนำมาใช้ประโยชน์ทำเป็น
ถ่านกัมมันต์ และตัวเร่งปฏิกิริยาได้ โดยจำเป็นต้องมีการรีดิวซ์ด้วยแก๊สไฮโดรเจนก่อนการใช้งาน

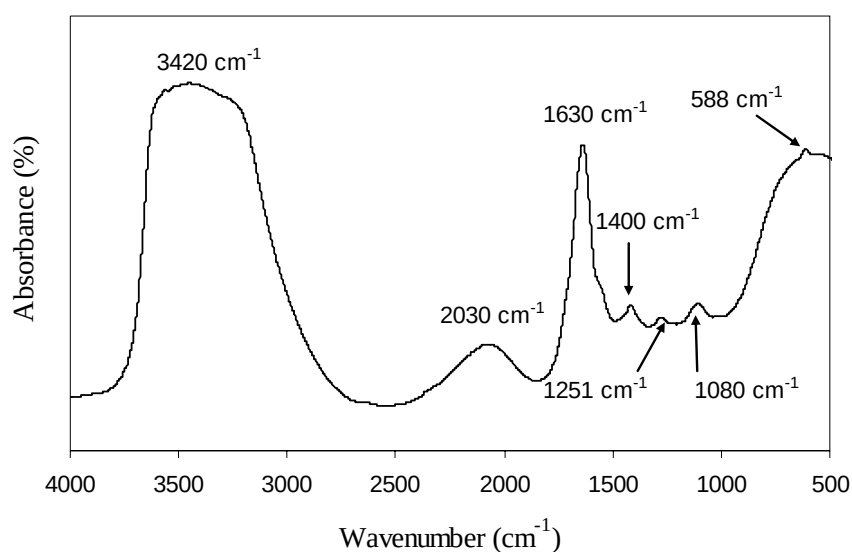
11. การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพที่ได้จากการปรับปรุงคุณภาพ

เมื่อได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพหลังจากปรับปรุงคุณภาพด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต่างกันทั้งสามชนิด
แล้ว นำน้ำมันที่ได้ไปทดสอบวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared
Spectrophotometer (FT-IR) จากภาพที่ 15 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของน้ำมันชีวภาพหลังการ
ปรับปรุงคุณภาพด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา Ni(unreduced)/ถ่านกัมมันต์ พบว่าผลิตภัณฑ์มีหมู่ฟังก์ชันเป็น
สารประกอบจำพวก แอลกอฮอล์และฟีนอล ปรากฏพีกของ O-H stretching ที่ช่วงความถี่ 3420 cm^{-1}
อยู่ระหว่าง $3200\text{--}3600\text{ cm}^{-1}$ (แมนและอมร, 2539) พีก C-H stretching แสดงถึงหมู่แอลเคน ที่เลข
คลื่น 1400 cm^{-1} การสั่นของ C=O stretching ที่เลขคลื่น 1630 cm^{-1} แสดงถึงสารประกอบคีโตน
แอลดีไฮด์ และกรดคาร์บอกซิลิก และที่เลขคลื่นยังบ่งบอกถึง C=C stretching ของหมู่แอลคีนอีกด้วย
พีกที่ปรากฏเลขคลื่น 2030 cm^{-1} แสดงถึงหมู่แอลไคน์

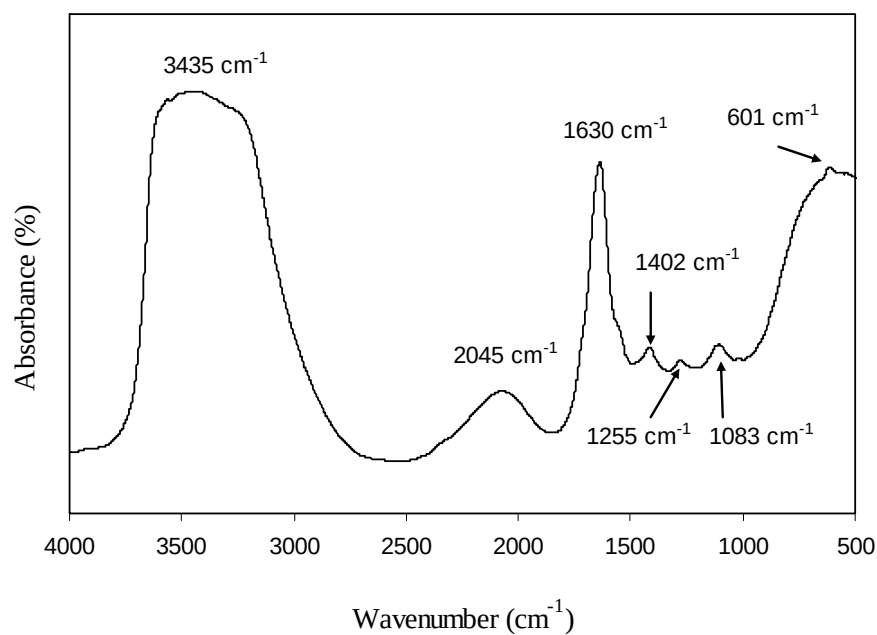
ภาพที่ 16 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัม (FT-IR spectrum) ของน้ำมันชีวภาพหลังการ
ปรับปรุงคุณภาพด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา Ni(reduced)/ถ่านกัมมันต์ พบว่าผลิตภัณฑ์มีหมู่ฟังก์ชันเป็น

สารประกอบจำพวก แอลกอฮอล์และฟีนอล ปรากฏพีกของ O-H stretching ที่ช่วงความถี่ 3435 cm^{-1} อยู่ระหว่าง $3200\text{--}3600\text{ cm}^{-1}$ (แฉกและอมร, 2539) พีก C-H stretching แสดงถึงหมู่แอลเคน ที่เลขคลื่น 1402 cm^{-1} การสั่นของ C=O stretching ที่เลขคลื่น 1630 cm^{-1} แสดงถึงสารประกอบคีโตน แอลดีไฮด์ และกรดคาร์บอกซิลิก และที่เลขคลื่นยังบ่งบอกถึง C=C stretching ของหมู่แอลคีนอีกด้วย พีกที่ปรากฏเลขคลื่น 2045 cm^{-1} แสดงถึงหมู่แอลไคโน

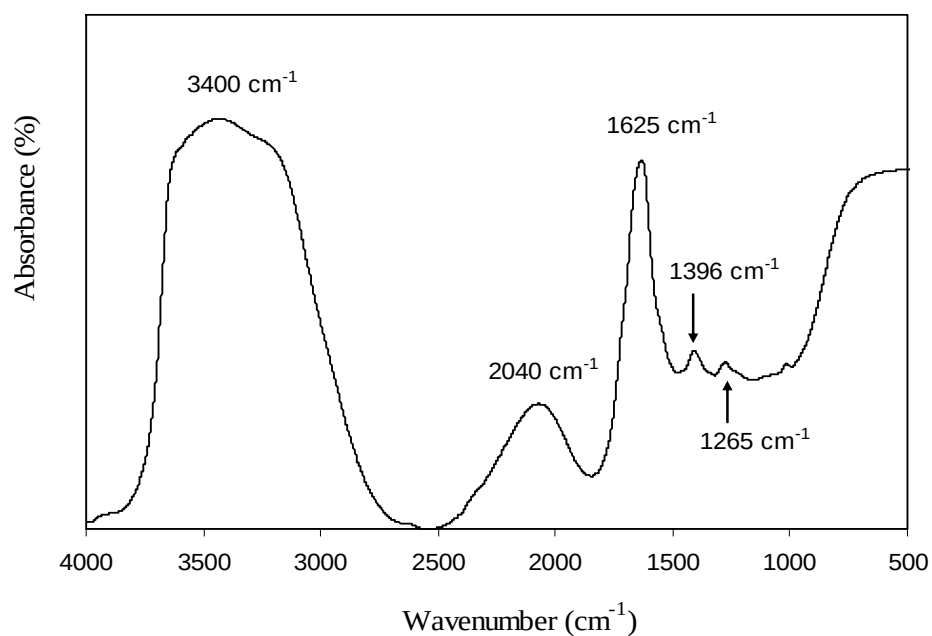
ภาพที่ 17 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัม (FT-IR spectrum) ของน้ำมันชีวภาพหลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 พบว่าผลิตภัณฑ์มีหมู่ฟังก์ชันเป็นสารประกอบจำพวก แอลกอฮอล์และฟีนอล ปรากฏพีกของ O-H stretching ที่ช่วงความถี่ 3400 cm^{-1} อยู่ระหว่าง $3200\text{--}3600\text{ cm}^{-1}$ (แฉกและอมร, 2539) พีก C-H stretching แสดงถึงหมู่แอลเคน ที่เลขคลื่น 1396 cm^{-1} การสั่นของ C=O stretching ที่เลขคลื่น 1625 cm^{-1} แสดงถึงสารประกอบคีโตน แอลดีไฮด์ และกรดคาร์บอกซิลิก และที่เลขคลื่นยังบ่งบอกถึง C=C stretching ของหมู่แอลคีนอีกด้วย พีกที่ปรากฏเลขคลื่น 2040 cm^{-1} แสดงถึงหมู่แอลไคโน



ภาพที่ 15 อินฟราเรดสเปกตรัม (FT-IR spectrum) ของน้ำมันชีวภาพหลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา Ni(unreduced)/ถ่านกัมมันต์



ภาพที่ 16 อินฟราเรดสเปกตรัม (FT-IR spectrum) ของน้ำมันชีวภาพหลังการปรับปรุงคุณภาพด้วย
ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni(reduced)/ถ่านกัมมันต์



ภาพที่ 17 อินฟราเรดสเปกตรัม (FT-IR spectrum) ของน้ำมันชีวภาพหลังการปรับปรุงคุณภาพด้วย
ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ ชนิด ZSM-5

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการผลิตน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสชีวมวลสามชนิด คือ ช้างข้าวโพด ต้นสบู่ดำ และกากพลมะนาว ซึ่งผลิตภัณฑ์หลักที่ได้ คือ แก๊ส น้ำมันชีวภาพ และ ถ่านชาร์ ซึ่งได้นำไปผลิตเป็นถ่านกัมมันต์เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันชีวภาพที่ได้ ซึ่งสามารถสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

1. ร้อยละองค์ประกอบของธาตุจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง elemental analyzer ของชีวมวลทั้งสามชนิดได้แก่ ต้นสบู่ดำ ช้างข้าวโพด และกากพลมะนาว ประกอบด้วย ธาตุคาร์บอน(C) ไฮโดรเจน(H) ไนโตรเจน(N) ออกซิเจน(O) และซัลเฟอร์(S) รวมถึงค่าพลังงานความร้อน และ สูตรอย่างง่าย องค์ประกอบทางเคมีโดยเฉลี่ยของสารชีวมวลทั้ง 3 ชนิด สามารถแสดงเป็นสูตรอย่างง่ายได้ดังนี้ คือ ต้นสบู่ดำ $\text{CH}_{1.50}\text{O}_{0.81}\text{N}_{0.02}$ ช้างข้าวโพด $\text{CH}_{1.55}\text{O}_{0.75}\text{N}_{0.02}$ และ กากพลมะนาว $\text{CH}_{1.54}\text{O}_{0.74}\text{N}_{0.04}$ ส่วนค่าพลังงานความร้อนของต้นสบู่ดำ ช้างข้าวโพด และกากพลมะนาว คือ 16.66, 17.47 และ 17.10 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

2. ศึกษาการสลายตัวของสารด้วยความร้อนด้วยเครื่อง TGA เพื่อทราบช่วงอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุดของต้นสบู่ดำซึ่งทำให้ทราบอุณหภูมิที่เหมาะสมในการไพโรไลซิส ผลการวิเคราะห์ช่วงอุณหภูมิการสลายตัวของชีวมวลทั้งสามชนิด ทำให้ทราบว่าอุณหภูมิในการไพโรไลซิสควรสูงกว่า 200 องศาเซลเซียส โดยที่อุณหภูมิ 200-400 และ 400-700 องศาเซลเซียส ร้อยละน้ำหนักที่หายไปอยู่ในช่วง 42-43 และ 16-19 ตามลำดับ

3. อุณหภูมิมีผลต่อปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจาก 300-400 องศาเซลเซียส ปริมาณน้ำมันชีวภาพและแก๊สมากขึ้น ถ่านชาร์น้อยลง และที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส ปริมาณน้ำมันชีวภาพลดลง ส่วนถ่านชาร์และแก๊สเพิ่มขึ้น แนวโน้มเป็นทางเดียวกันทั้ง ช้างข้าวโพด ต้นสบู่ดำ และกากพลมะนาว อุณหภูมิที่ได้น้ำมันชีวภาพสูงสุดคือ 400 องศาเซลเซียส โดยช้างข้าวโพดให้น้ำมันชีวภาพปริมาณสูงสุดคือร้อยละ 48.13 น้ำมันชีวภาพที่ได้มีคุณภาพใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล

4. ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพจากชีวมวลทั้งสามชนิด วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FT-IR) พบว่าผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพที่เกิดขึ้นมีหมู่ฟังก์ชันเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจำพวกอะลิฟาติก (aliphatic compound) ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันหลักรูปของ แอลกอฮอล์ ฟีนอล แอลเคน คีโตน แอลดีไฮด์ กรดคาร์บอกซิลิก แอลคีน แอลไคน์ เอสเทอร์ และอีเทอร์ เป็นต้น

5. ถ่านชาร์จากขี้ข้าวโพดให้ค่าพื้นที่ผิวมากที่สุด 51.9 ตารางเมตรต่อกรัม และไอโอดีน นัมเบอร์ คือ 111.4 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งนำไปผลิตเป็นถ่านกัมมันต์พบว่ามีค่าพื้นที่ผิวสูงที่สุด คือ 240.6 ตารางเมตรต่อกรัม และปริมาณการดูดซับไอโอดีนคือ 613.5 มิลลิกรัมต่อกรัม ดังนั้นถ่านกัมมันต์จากขี้ข้าวโพดจึงเหมาะสมที่จะผลิตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/ถ่านกัมมันต์เพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำมันชีวภาพต่อไป

6. ร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพหลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาต่างชนิดกัน พบว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ผลิตจากเถ้าลอย มีปริมาณร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพสูงที่สุด คือ 92.0 ผลการกลั่นลำดับส่วน พบว่าร้อยละผลได้ของปริมาณแก๊สโซลีนจากน้ำมันที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพโดยใช้ ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni(reduced)/ถ่านกัมมันต์ คือ 91.7 ซึ่งมีค่ามากที่สุด ค่าพลังงานความร้อนเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni(reduced)/ถ่านกัมมันต์ มีค่าสูงสุด คือ 34.0 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม เปรียบเทียบกับน้ำมันชีวภาพก่อนการปรับปรุงคุณภาพซึ่งมีค่าเท่ากับ 29.6 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม แสดงให้เห็นถึงความสามารถของตัวเร่งปฏิกิริยา Ni(reduced)/ถ่านกัมมันต์ที่รีดิวซ์ด้วยแก๊สไฮโดรเจน ในปฏิกิริยาแครกกิงด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถทำให้ค่าพลังงานความร้อนเพิ่มมากขึ้น

ข้อเสนอแนะ

1. ปรับปรุงประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีค่าความสามารถกระตุ้นที่สูงขึ้น เพื่อเพิ่มอัตราการเร่งปฏิกิริยาการแตกตัว เช่น เปลี่ยนชนิดของโลหะหรือตัวรองรับโลหะออกไซด์ เพราะมีพื้นที่ผิวที่ไวต่อปฏิกิริยาของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดต่างๆ
2. ควรทำการวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณส่วนประกอบอื่นๆ ของน้ำมันชีวภาพก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพ นอกจากการกลั่นลำดับส่วนและค่าพลังงานความร้อน โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์อื่นๆ เช่น แก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโทรเมทรี (GC-MS)

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- จักรพงษ์ ชมพูนุช และ ญัฐกิตติ์ อมรกาญจน์วัฒน์. 2548. การเตรียมถ่านกัมมันต์จากเถ้าแกลบ. มหาวิทยาลัยรังสิต, กรุงเทพฯ.
- จตุพร วิทยาคุณ และ นุรักษ์ กฤษดานุรักษ์. 2547. การเร่งปฏิกิริยา. ครั้งที่ 1. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- จุฑามาส จิตต์เจริญ ประจักษ์ จันทรตรี ใจรัก สุขเสริม และวิไลลักษณ์ ศรีสุข. 2548. การเตรียมถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มน้ำมันโดยการกระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์. คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.
- จันทร์จิรา สีนทะโยธิน. 2549. เชื้อเพลิงชีวภาพ. แหล่งที่มา: <http://www.vcharkarn.com/include/article/showarticle.php?aid=374>, 17 มกราคม 2551.
- ทวีศักดิ์ อุณจิตติกุล. 2548. สบู่ดำ พืชพลังงานสารพัดประโยชน์. ครั้งที่ 1. บริษัท วศิระ จำกัด, กรุงเทพฯ.
- ธีระพงศ์ นามโท. 2543. การผลิตซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 จากเถ้าลอยของถ่านหินลิกไนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- แมน อมรสิทธิ์ และอมร เพชรสม. 2534. หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เครื่องมือ. ครั้งที่ 1. ชวนพิมพ์, กรุงเทพฯ.
- นิรนาม. 2549. การวิเคราะห์ส่วนประกอบของชีวมวล. แหล่งที่มา: <http://www.efc.or.thT/download/Heating%20Value.pdf>, 20 สิงหาคม 2550.
- รอรอง หอมหวาน. 2459. พลังงานทางเลือก (Alternative Energy). วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ปีที่ 20 ฉบับที่ 1 หน้า 5-6.
- วิทยา เรืองพรวิสุทธิ. 2547. ปฏิกิริยาเร่ง เคมีเกี่ยวกับผิวปิโตรเลียม. ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์ ส.ส.ท., กรุงเทพฯ.

วิญญู มีอยู่. 2549. การใช้พลังงานจากชีวมวล. แหล่งที่มา: http://www.eng.mut.ac.th/upload_file/article/148.doc 16, 18 สิงหาคม 2550.

ประเสริฐ เทียนนิมิตร ขวัญชัย สันทิพย์สมบุญ และ ปานเพชร ชินินทร. 2544. เชื้อเพลิงเหลวและสารหล่อลื่น. บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด (มหาชน). กรุงเทพฯ.

ปราโมทย์ ไชยเวช และ นุรักษ์ กฤษดานุรักษ์. 2543. **ปิโตรเลียมเทคโนโลยี (Petroleum Technology)**. ครั้งที่ 1. ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

ปรัชญา แสงเงินอ่อน. 2548. การผลิตถ่านกัมมันต์จากพลาสติกและยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2543. **มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมถ่านกัมมันต์**. มอก. 900-2532.

Adjaye, J.D. and N. N. Bakhshi. 1995. Catalytic conversion of a biomass-derived oil to fuels and chemicals I: model compound studies and reaction pathways. **Biomass and Bioenergy**. 8: 139-149.

Asadullah, M., M.A. Rahman, M.M. Ali, M.S. Rahman, M.A. Motin, M.B. Sultan and M.R. Alam. 2007. Pyrolysis of bio-oil from fixed bed pyrolysis of bagasse. *Fuel*. 86: 2514-2520.

Asadullah, M., T. Miyazawa, S. Ito, K. Kunitomi, M. Yamada and K. Tomishige. 2003. Catalyst development for the gasification of biomass in the dual-bed gasifier. **Applied Catalysis A: General**. 255: 169-180.

Babel, K. and K. Jurewicz. 2004. KOH activated carbon fabrics as supercapacitor material. **Journal of physics and chemistry of solids**. 65: 275-280.

- Bai, Z., H. Chen, B. Li and W. Li. 2007. Methane decomposition over Ni loaded activated carbon for hydrogen production and the formation of filamentous carbon. **International Journal of Hydrogen Energy**. 32: 32-37.
- Diaz-Teran, J., D.M. Nevskaya, J.L.G. Fierro, A.J. Lopez-Peinado and A. Jerez. 2003. Study of chemical activation process of a lignocellulosic material with KOH by XPS and XRD. **Microporous and Mesoporous Materials**. 60: 173-181.
- El-Hendawy, A. A. 2003. Influence of HNO₃ oxidation on the structure and adsorption properties of corn-cob-based activated carbon. **Carbon**. 41: 713-722.
- El-Hendawy, A. A., S.E. Samra and B.S. Girgis. 2001. Adsorption characteristics of activated carbons obtained from corn-cobs. **Colloids and Surfaces**. 180: 209-221.
- Heschel, W. and E. Klose. 1995. On the suitability of agricultural by-products for the manufacture of granular activated carbon. **Fuel**. 74: 1786-1791.
- Horne, P.A. and P.T. Williams. 1996. Influence of temperature on the products from the flash pyrolysis of biomass. **Fuel**. 75: 1051-1059.
- Ji-lu, Z., 2007. Bio-oil from fast pyrolysis of rice husk : yields and related properties and improvement of the pyrolysis system. **Journal Analytical and Applied Pyrolysis**. 80: 30-35.
- Koutcheiko, S., C.M. Monreal, H. Kodama, T. McCracken and L. Kotlyar. 2006. Preparation and Characterization of activated carbon derived from the thermo-chemical conversion of chicken manure. **Bioresource Technology**. 98: 2459-2464.
- Lehmann, J. 2007. **Pyrolysis**. Available Source: <http://en.wikipedia.org/wiki/Pyrolysis#>, 18 August 2550.

- Marugan, S., M.C. Samaswamy and G. Nagarajin. 2008. Performance, emission and combustion studies of a DI diesel engine using Distilled Tyre pyroolysis oil-diesel blends. **Fuel Processing Technology**. 89: 152-159.
- Molina-Sabio, M., and Rodriguez-Reinoso, F. 2004. Role of Chemical Activation in the Development of Carbon Porosity. **Colloids and Surfaces: Physicochem. Eng. Aspects**. 241: 15-25.
- Nizhen, C., D. Hans and R. Christian. 2001. Activated Carbon Produced from Charcoal Obtained by Vacuum Pyrolysis of Softwood Bark Residues. **Energy and Fuel**. 15: 1263-1269.
- Onay, O. 2007. Influence of pyrolysis temperature and heating rate on the production of bio-oil and char from safflower seed by pyrolysis, using a well-swept fixed-bed reactor. **Fuel Processing Technology**. 88: 523-531.
- Putun, A.E., A. Ozcan, and E. Putun. 1999. Pyrolysis of hazelnut shells in fixed-bed tubular reactor: yields and structural analysis of bio-oil. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**. 52: 33-49.
- Putun, A.E., E. Onal, B.B. Uzun and N. Ozbay. 2007. Comparison between the “slow” and “fast” pyrolysis of tobacco residue. **Industrial Crops and Products**. 26: 307-314.
- Qi, Z., C. Jie, W. Tiejun and X. Ying. 2007. Review of biomass pyrolysis oil properties and upgrading research. **Energy Conversion and Management**. 48: 87-92.
- Rhen, C., M. Ohman, R. Gref and I. Wasterlund. 2006. Effect of raw material composition in woody biomass pellets on combustion characteristics. **Biomass and Bioenergy**. 31: 66-72.
- Sensoz, S., I. Demiral and H. Ferdi Gercel. 2006. Olive bagasse (*Olea europea* L.) pyrolysis. **Bioresource Technology**. 97: 429-436.

- Sensoz, S. and D. Angin. 2008. Pyrolysis of safflower (*Charthamus tinctorius* L.) seed press cake in fixed-bed reactor: Part 2. Structural characterization of pyrolysis bio-oils. **Bioresource Technology**. 99: 5498-5504.
- Sonobe, T. and N. Worasuwannarak. 2004. Pyrolysis Characteristics of Blends of Agricultural Residues with Lignite. 298-301. **In The Joint International Conference on “Sustainable Energy and Environment (SEE)”**. Hilton Hua Hin Resort and Spa, Prajuab Khirikhan, Thailand.
- Stavropoulos, G.G. and A.A. Zabaniotou. 2005. Production and characterization of activated carbons from olive-seed waste residue. **Microporous and Mesoporous Materials**. 82: 79-85.
- Tsai, W.T., M.K. Lee and Y.M. Chang. 2006. Fast pyrolysis of rice, sugarcane bagasse and coconut shell in an induction-heating reactor. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**. 76: 230-237.
- Uzun, B.B., A.E. Putun, and E. Putun. 2007. Composition of products obtained via fast pyrolysis of olive-oil residue: Effect of pyrolysis temperature. **Journal of Analytical and Apply Pyrolysis**. 79: 147-153.
- Yanik, J. C. Kornmayer, M. Saglam and M. Yuksel. 2007. Fast pyrolysis of agricultural wastes: Characterization of pyrolysis products. **Fuel Processing Technology**. 88: 942-947.
- Zhang, S., Y. Yan, T. Li and Z. Ren. 2005. Upgrading of liquid fuel from the pyrolysis of biomass. **Bioresource Technology**. 96: 545-550.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การวิเคราะห์หาค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์

การวิเคราะห์หาค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์

การวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับไอโอดีน ซึ่งสมมุติว่าเป็นสารพิษในน้ำตามวิธี ASTM D4607-86 มีรายละเอียดของการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

สารเคมีที่ใช้

- สารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เตรียมโดยตวงกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นจำนวน 40 มิลลิลิตร เทน้ำกลั่นให้มีปริมาตร 550 มิลลิลิตร
- น้ำแข็งเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เตรียมโดยชั่งน้ำแข็ง 1 กรัม ละลายด้วยน้ำร้อนจนมีน้ำหนักเป็น 10 กรัม น้ำแข็งที่เตรียมได้จะใช้ภายในวันที่เตรียมเท่านั้น
- สารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟตเข้มข้น 0.100 ± 0.001 นอร์มัล เตรียมโดยละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) 24.820 กรัม ในน้ำกลั่น 75 มิลลิลิตร เติมโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) 0.1 กรัม แล้วเติมน้ำกลั่นให้มีปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร ด้วยขวดวัดปริมาตร
- สารละลายไอโอดีนเข้มข้น 0.100 ± 0.001 นอร์มัล เตรียมโดยละลายไอโอดีน 12.700 กรัม และโปแตสเซียมไอโอไดด์ (KI) 19.10 กรัมด้วยน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ประมาณ 4 ชั่วโมง จนผลึกไอโอดีนละลายหมด แล้วจึงเติมน้ำกลั่นให้มีปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร ด้วยขวดวัดปริมาตร
- สารละลายโปแตสเซียมไอโอเดตเข้มข้น 0.100 นอร์มัล เตรียมโดยอบ โปแตสเซียมไอโอเดตที่ 110 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง ทำให้เย็นในเดสิเคเตอร์ แล้วชั่งน้ำหนักมา 3.5667 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น 1,000 มิลลิลิตร

กรรมวิธีเทียบมาตรฐานสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต

- ปิเปตสารละลายโปแตสเซียมไอโอเดต 25 มิลลิลิตร ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมโปแตสเซียมไอโอไดด์ (KI) 2 กรัม เขย่าให้ละลายเติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น ปริมาณ 5 มิลลิลิตร
- ไตเตรตด้วยสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต โดยใช้ น้ำแข็งเป็นอินดิเคเตอร์ จุดยุติ คือ จุดที่สารละลายไม่มีสี

คำนวณความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จาก

$$N_1 = (PXR)/S$$

โดย N_1 = ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (นอร์มัล)
 P = ปริมาตรของสารละลายโพแตสเซียมไอโอเดต (มิลลิลิตร)
 R = ความเข้มข้นของสารละลายโพแตสเซียมไอโอเดต
 S = ปริมาตรสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (มิลลิลิตร)

กรรมวิธีเทียบมาตรฐานสารละลายไอโอดีน

- ปิเปตสารละลายไอโอดีน 25 มิลลิลิตร ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ไตรเตรทด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยใช้น้ำแข็งเป็นอินดิเคเตอร์ จุดยุติ คือ จุดที่สารละลายไม่มีสี

คำนวณความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีนจาก

$$C = (S \times N_1)/I$$

โดย C = ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน (นอร์มัล)
 S = ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (มิลลิลิตร)
 N_1 = ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (นอร์มัล)
 I = ปริมาตรของสารละลายไอโอดีนที่ใช้ไตรเตรท (มิลลิลิตร)

กรรมวิธีวิเคราะห์ค่าการดูดซับไอโอดีนนัมเบอร์

ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ หมายถึง ปริมาณเป็นมิลลิกรัมของไอโอดีนที่ถูกดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์แห้ง 1 กรัม โดยความเข้มข้นของไอโอดีนในสารละลายเมื่อสิ้นสุดการดูดซับ (residual iodine concentration) มีค่าเท่ากับ 0.02 N ซึ่งการทดลองทำได้ดังนี้

1. บดตัวอย่างถ่านกัมมันต์ที่ต้องการทดสอบให้มีขนาดเล็กกว่า 45 ไมโครเมตร (325 เมช) อย่างน้อย 95 เปอร์เซ็นต์ ประมาณ 10 กรัม

2. อบไ้ความชื้นที่อุณหภูมิ 145-155 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วปล่อยไว้

เย็นในหม้อดูดความชื้น

3. ชั่งน้ำหนักถ่านกัมมันต์ 2 กรัม (มีความผิดพลาดน้อยกว่า 0.1 มิลลิกรัม) ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ปิดตกรดไฮโดรคลอริก 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก 10.0 มิลลิลิตร ใส่ลงไป ปิดปากขวดด้วยจุกยางและเชย้าเบาๆ จนกระทั่งถ่านกัมมันต์เปียกทั้งหมด

4. นำขวดไปวางบนที่ให้ความร้อนในตู้ดูดควัน เปิดจุกยางออก ต้มจนเดือดประมาณ 30 ± 2 วินาที เพื่อไล่สารประกอบซัลเฟอร์ซึ่งมีมลทินทั้งไปจากนั้นจึงยกลงและทิ้งไว้ให้เย็นจนเท่ากับอุณหภูมิห้อง

5. ปิดเตาสารละลายไอโอดีนความเข้มข้น 0.100 N 100.0 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวด ปิดด้วยจุกยาง และเชย้าแรงๆ เป็นเวลา 30 ± 1 วินาที จากนั้นรีบกรองเอาถ่านกัมมันต์ออกด้วยเครื่องกรองสุญญากาศผ่านกระดาษกรอง Whatman no. 42 หรือเทียบเท่า โดยปล่อยให้ส่วนใสไหลลงสู่บีกเกอร์

6. ปิดเตาสารละลายไอ 50.0 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ 250 มิลลิลิตร ไตเตรทด้วยสารละลายมาตรฐานโซเดียมไธโอซัลเฟต 0.100 นอร์มัล จนสารละลายเป็นสีเหลืองจางๆ จึงเติมน้ำแป้งสุกลงไป 2 มิลลิลิตร เพื่อเป็นอินดิเคเตอร์ แล้วทำการไตเตรทต่อไปจนได้สารละลายใสไม่มีสี บันทึกปริมาตรของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไธโอซัลเฟตที่ใช้ทั้งหมด

จากนั้นคำนวณความเข้มข้นสุดท้ายของสารละลายไอโอดีนหลังการดูดซับของถ่านกัมมันต์

(C) จากสูตร

$$C = (N_1 \times S) / F$$

เมื่อ N_1 คือ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไธโอซัลเฟต

F คือ ปริมาตรของสารละลายที่ใช้ไตเตรท

ค่า C ที่ได้ต้องมีค่าอยู่ในช่วง 0.008-0.040 N มิฉะนั้นต้องทำการทดลองใหม่โดยการเปลี่ยนน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ กล่าวคือถ้าค่า C น้อยก็ต้องลดปริมาณถ่านกัมมันต์ลง ถ้าค่า C มากต้องเพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์ให้มากขึ้นจนได้ค่า C ที่อยู่ในช่วงข้างต้น

ทำการทดลองตามข้อ 1 ถึง 6 อีก 2 ครั้ง โดยเปลี่ยนน้ำหนักของตัวอย่างถ่านกัมมันต์เพื่อให้ได้ค่า C อีก 2 ค่าที่อยู่ในช่วงความเข้มข้นดังกล่าว

การคำนวณ

การหาค่าไอโอดีนนมเบอร์ หาได้จากการใช้ค่าที่ได้จากการทดลอง 3 ค่าไปเขียนกราฟการดูดซับ โดยเขียนระหว่างแกนราบคือค่า C และแกนตั้งฉากคือค่า X/M บนกราฟแบบลอการิทึมแล้วประมาณเป็นเส้นตรง และค่า X/M หาได้จากสมการ

$$\begin{aligned} A &= N_2(12693) \\ B &= N_1(126.93) \\ DF &= (I + H)/F \\ X/M &= [A - (DF)(B)(S)]/M \end{aligned}$$

เมื่อ A คือ น้ำหนักทั้งหมดของไอโอดีนในสารละลายไอโอดีนเริ่มต้น (mg)

B คือ น้ำหนักทั้งหมดของไอโอดีนที่ทำปฏิกิริยาสมมูลพอดีกับสารละลายมาตรฐาน

โซเดียมไธโอซัลเฟต 1 มิลลิตร

DF คือ สัดส่วนระหว่างปริมาตรของสารละลายทั้งหมดตอนเริ่มต้นกับปริมาตรสารละลายที่นำมาไตเตรท

X/M คือ ปริมาณไอโอดีนที่ถูกดูดซับต่อกรัมของถ่านกัมมันต์ (ml)

I คือ ปริมาณของไอโอดีนที่ใส่ในตอนเริ่มต้น (mg)

N_2 คือ ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน (N)

H คือ ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริก 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่ใช้ (ml)

M คือ น้ำหนักของตัวอย่างถ่านกัมมันต์ที่ใช้ (กรัม)

F คือ ปริมาตรของสารละลายไอโอดีนที่ใช้ไตเตรท (ml)

ตัวอย่างการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การเจือจาง (Dilution factor)

ถ้าใช้สารละลาย HCl ในการต้มถ่าน (H) เท่ากับ 10 ml สารละลายไอโอดีนที่ใส่ในตอนเริ่มต้น (I) เท่ากับ 10 ml และใช้ปริมาณของสารละลายไอโอดีนที่ใช้ไตเตรท (F) 50 ml ค่า DF จะเท่ากับ

$$DF = (100-10)/50 = 2.2$$

ตัวอย่างการคำนวณค่าไอโอดีนที่ถูกดูดซับต่อกรัมของถ่านกัมมันต์ (X/M)

ถ้าใช้ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไธโอซัลเฟต (N_1) เท่ากับ 0.1N และความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน (N_2) เท่ากับ 0.1N น้ำหนักถ่านมนการดูดซับไอโอดีน (M) เท่ากับ 3.3 กรัม และใช้สารละลายมาตรฐานโซเดียมไธโอซัลเฟตทั้งหมดในการไตเตรท (S) เท่ากับ 20 ml ดังนั้น X/M จะเท่ากับ

$$\begin{aligned} X/M &= [A - (DF)(B)(S)]/M \\ X/M &= [0.1 \times 12693 - (2.2)(0.1 \times 126.93)(20)]/3.3 \\ &= (1269.3 - 558.36)/3.3 \\ &= 215.4 \text{ mg/g} \end{aligned}$$

ตัวอย่างการคำนวณค่าประมาณน้ำหนักที่ใช้ (M)

ถ้าใช้ความเข้มข้นสารละลายไอโอดีน (N_2) เท่ากับ 0.1N ความเข้มข้นสุดท้ายของสารละลายไอโอดีนหลังการดูดซับ (C) เท่ากับ 0.02 ค่าสัมประสิทธิ์การเจือจางเท่ากับ 2.2 และการดูดซับไอโอดีนของถ่านโดยประมาณ (E) เท่ากับ 300 mg/g ดังนั้น น้ำหนักถ่านที่จะต้องใช้ (M) จะเท่ากับ

$$\begin{aligned} M &= [A - (DF)(C)(126.93)(50)]/E \\ &= [0.1 \times 12693 - 2.2 \times 0.02 \times 126.93 \times 50]/300 \\ M &= [1269.3 - 279.2]/300 \\ &= 3.3 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

น้ำหนักประมาณของตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์ค่าไอโอดีนแสดงในภาคผนวกที่ ก1

ตารางผนวกที่ ก1 น้ำหนักประมาณของตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์ค่าไอโอดีน

M				M			
E	C = 0.01	C = 0.02	C = 0.03	E	C = 0.01	C = 0.02	C = 0.03
300	3.766	3.300	2.835	1550	0.729	0.639	0.549
350	3.228	2.829	2.430	1600	0.706	0.619	0.531
400	2.824	2.475	2.126	1650	0.684	0.600	0.515
450	2.510	2.200	1.890	1700	0.664	0.582	0.500
500	2.259	1.980	1.701	1750	0.645	0.566	0.486
550	2.054	1.800	1.546	1800	0.628	0.550	0.472
600	1.883	1.650	1.417	1850	0.610	0.535	0.460
650	1.738	1.523	1.308	1900	0.594	0.521	0.447
700	1.614	1.414	1.215	1950	0.579	0.508	0.436
750	1.506	1.320	1.134	2000	0.565	0.495	0.425
800	1.412	1.237	1.063	2050	0.551	0.483	0.415
850	1.329	1.164	1.000	2100	0.538	0.471	0.405
900	1.255	1.100	0.945	2150	0.525	0.460	0.396
950	1.189	1.042	0.895	2200	0.513	0.450	0.388
1000	1.130	0.990	0.850	2250	0.502	0.440	0.378
1050	1.076	0.943	0.810	2300	0.491	0.430	0.370
1100	1.027	0.900	0.773	2350	0.481	0.421	0.362
1150	0.982	0.861	0.739	2400	0.471	0.412	0.354
1200	0.941	0.825	0.709	2450	0.461	0.404	0.347
1250	0.904	0.792	0.680	2500	0.452	0.396	0.340
1300	0.869	0.761	0.654	2550	0.443	0.388	0.333
1350	0.837	0.733	0.630	2600	0.434	0.381	0.327
14000	0.807	0.707	0.607	2650	0.426	0.374	0.321
1450	0.779	0.683	0.586	2700	0.418	0.367	0.316

ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์สมบัติโดยประมาณของถ่านจากการคาร์บอนไนซ์

วิธีการวิเคราะห์สมบัติโดยประมาณของถ่านจากการคาร์บอนไนซ์

การวิเคราะห์สมบัติโดยประมาณของถ่านจากการคาร์บอนไนซ์ ตามวิธี ASTM D3172-89 ซึ่งเป็นวิธีวิเคราะห์สมบัติโดยประมาณของถ่านหิน รายละเอียดการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

การหาปริมาณความชื้น (Moisture, M) ASTM D 2867-99

- อบถาดอะลูมิเนียมพร้อมฝาที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที และทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์ (desicator) นำไปชั่งน้ำหนัก
 - ชั่งตัวอย่างถ่านประมาณ 1 กรัม ใส่ถาดอะลูมิเนียมที่ทราบน้ำหนัก ปิดฝา
 - นำไปเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
 - นำถาดอะลูมิเนียมออกจากตู้อบ ทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์ นำไปชั่งน้ำหนัก
- สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$M = (A-B)/A \times 100$$

เมื่อ M = ร้อยละของปริมาณความชื้น

A = น้ำหนักตัวอย่างที่ใช้เริ่มต้น (กรัม)

B = น้ำหนักตัวอย่างถ่านหลังการอบแห้ง (กรัม)

การหาปริมาณเถ้า (Ash, A) ASTM D 2866-94

- เฝาคูชิเบิล (crucible) พร้อมฝาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที ทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์ นำไปชั่งน้ำหนัก
- อบตัวอย่างถ่านที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
- ชั่งตัวอย่างถ่านประมาณ 0.1 กรัม ใส่คูชิเบิล ปิดฝา
- นำไปเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง นำออกจากเตาเผาทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์ และชั่งน้ำหนัก

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$A = (D/B) \times 100$$

- เมื่อ
- A = ร้อยละของปริมาณเถ้า
 - B = น้ำหนักตัวอย่างที่ใช้เริ่มต้น (กรัม)
 - D = น้ำหนักของเถ้าที่เหลือหลังการเผา (กรัม)

การหาปริมาณสารระเหย (Volatile Matter, VM) ASTM D 5832-98

- เผาครุชีเบิลพร้อมฝาที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์ นำไปชั่งน้ำหนัก
- ชั่งตัวอย่างถ่านประมาณ 1 กรัม ใส่ครุชีเบิล ปิดฝา
- นำไปเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 นาที นำออกจากเตาเผาทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์ และชั่งน้ำหนัก

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$V = [(B-C)/B \times 100] - M$$

- เมื่อ
- V = ร้อยละของสารระเหย
 - B = น้ำหนักตัวอย่างถ่านที่ใช้เริ่มต้น (กรัม)
 - C = น้ำหนักของตัวอย่างถ่านที่เหลือหลังการเผา (กรัม)
 - M = ร้อยละของปริมาณความชื้น

การหาปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon, FC)

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$FC = 100 - (M + A + VM)$$

- เมื่อ
- FC = ร้อยละของคาร์บอนคงตัว
 - M = ร้อยละของปริมาณความชื้น
 - A = ร้อยละของปริมาณเถ้า
 - VM = ร้อยละของสารระเหย

ภาคผนวก ค

ปริมาณพื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์

ภาคผนวก ค.

วิธีวิเคราะห์ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของรูพรุนทั้งหมดของถ่านกัมมันต์

การวิเคราะห์ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของรูพรุนทั้งหมดของถ่านกัมมันต์ตามวิธี ASTM C 819-77 และคู่มือการใช้เครื่องหาพื้นที่ผิวโดยเลือกการคำนวณแบบ Multipoints มีหลักการที่สำคัญของการวิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

เครื่องมือที่ใช้

1. เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวรู ASAP 2000 ของบริษัท Micromeritics
2. ชั่งและบันทึกน้ำหนักของหลอดใส่ตัวอย่าง ให้มีความละเอียดถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 4 (คือมีความละเอียด 0.1 มิลลิกรัม)
3. ใส่ถ่านกัมมันต์น้ำหนักประมาณ 0.1-0.3 กรัม ลงในหลอด
4. นำไปล้างโมเลกุลปนเปื้อนที่อยู่บนผิวถ่านกัมมันต์ (Outgas) ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง ภายใต้อากาศสูญญากาศ
5. ชั่งน้ำหนักของตัวอย่างและหลอดและน้ำหนักหลอด เพื่อให้ทราบน้ำหนักของตัวอย่าง ซึ่งนำไปใช้ในการคำนวณ

การวิเคราะห์ค่าพื้นที่ผิวของรูพรุน

1. กำหนดความดันสัมพัทธ์ที่ภาวะสมดุล (P/P_0) ทั้งหมด 10 จุด
2. ผ่านไนโตรเจนที่ปราศจากออกซิเจน ซึ่งมีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5 จนกระทั่งความดันสัมพัทธ์ที่ภาวะสมดุลเท่ากับที่กำหนด บันทึกปริมาตรของก๊าซไนโตรเจนที่ใช้

การคำนวณการหาพื้นที่ผิวจำเพาะทั้งหมด

นำค่าที่ได้จากการวิเคราะห์มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแกนราบคือความดันสัมพัทธ์ (P/P_0) และแกนตั้งฉากคือปริมาณของก๊าซไนโตรเจนที่ถูกดูดซับที่ความดันสัมพัทธ์ในเทอมของ $[W (P/P_0)-1]^{-1}$ จะได้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ s จุดตัดบนแกนตั้งฉากคือ i ซึ่งคำนวณค่าพื้นที่ผิว S_{BET} ได้ดังนี้

$$S_{\text{BET}} (\text{ตารางเมตรต่อกรัม}) = NA_{\text{CS}} / [(s+i) \times (\text{MW})]$$

โดย N คือ เลขอาโวกาโดร มีค่าเท่ากับ 6.023×10^{23} โมเลกุลต่อโมล
 ACS คือ พื้นที่หน้าตัดของโมเลกุลไนโตรเจน มีค่าเท่ากับ 16.2 ตารางอังสตรอม
 MW คือ น้ำหนักโมเลกุลของไนโตรเจน

ภาคผนวก ง

สมบัติของถ่านกัมมันต์ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 900-2532)

สมบัติของถ่านกัมมันต์ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.900-2532)
(สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2543)

1. ชนิดของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์แบ่งออกเป็น 2 ชนิด

1. ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (powdered activated carbon)

2. ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (granular activated carbon)

2. ขนาดของถ่านกัมมันต์

ขนาดของถ่านกัมมันต์แบ่งออกเป็น 2 ขนาด ซึ่งแบ่งตามชนิดของถ่านกัมมันต์

1. ถ่านกัมมันต์ชนิดผง ปริมาณที่ผ่านตะแกรงร่อน 150 ไมโครเมตร
ต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก

2. ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด ปริมาณที่ผ่านตะแกรงร่อน 150 ไมโครเมตร
ต้องไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

3. สมบัติทางฟิสิกส์และทางเคมีของถ่านกัมมันต์

1. ถ่านกัมมันต์ชนิดผง ต้องมีสมบัติดังนี้

ค่าไอโอดีนัมเบอร์ ไม่น้อยกว่า 600

ความหนาแน่นเชิงปริมาตร 0.20 ถึง 0.75 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

2. ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด ต้องมีสมบัติดังนี้

ค่าไอโอดีนัมเบอร์ ไม่น้อยกว่า 600

ความหนาแน่นเชิงปริมาตร ไม่น้อยกว่า 0.36 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

ความชื้น ไม่เกินร้อยละ 8

ความแข็ง ไม่น้อยกว่าร้อยละ 70

ภาคผนวก จ
ข้อมูลการวิเคราะห์พื้นที่ BET

AREA-VOLUME-PORE SIZE SUMMARY

SURFACE AREA DATA

Multipoint BET.....	5.186E+01	m ² /g
Single Point BET.....	4.074E+01	m ² /g
Langmuir Surface Area.....	5.134E+01	m ² /g
BJH Method Cumulative Adsorption Surface Area.....	9.801E+01	m ² /g
BJH Method Cumulative Desorption Surface Area.....	1.023E+02	m ² /g
DH Method Cumulative Adsorption Surface Area.....	1.020E+02	m ² /g
DH Method Cumulative Desorption Surface Area.....	1.130E+02	m ² /g
t-Method External Surface Area.....	5.186E+01	m ² /g
t-Method Micro Pore Surface Area.....	0.000E+00	m ² /g
DR Method Micro Pore Area.....	7.965E+00	m ² /g

PORE VOLUME DATA

Total Pore Volume for pores with Diameter less than 4357.4 Å at P/Po = 0.99559.....	2.509E-01	cc/g
BJH Method Cumulative Adsorption Pore Volume.....	2.731E-01	cc/g
BJH Method Cumulative Desorption Pore Volume.....	2.661E-01	cc/g
DH Method Cumulative Adsorption Pore Volume.....	2.659E-01	cc/g
DH Method Cumulative Desorption Pore Volume.....	2.621E-01	cc/g
t-Method Micro Pore Volume.....	0.000E+00	cc/g
DR Method Micro Pore Volume.....	2.830E-03	cc/g
HK Method Cumulative Pore Volume.....	1.299E-02	cc/g
SF Method Cumulative Pore Volume.....	1.384E-02	cc/g

PORE SIZE DATA

Average Pore Diameter.....	1.935E+02	Å
BJH Method Adsorption Pore Diameter (Mode).....	2.743E+01	Å
BJH Method Desorption Pore Diameter (Mode).....	2.734E+01	Å
DH Method Adsorption Pore Diameter (Mode).....	2.743E+01	Å
DH Method Desorption Pore Diameter (Mode).....	2.734E+01	Å
DR Method Micro Pore Width	7.561E+01	Å
DA Method Pore Diameter (Mode).....	1.920E+01	Å
HK Method Pore Width (Mode).....	1.477E+01	Å
SF Method Pore Diameter (Mode).....	2.777E+01	Å

ภาพผนวกที่ จ1 ข้อมูลจากการวิเคราะห์การหาพื้นที่แบบ BET ของถ่านชาร์จากซังข้าวโพด

AREA-VOLUME-PORE SIZE SUMMARY

SURFACE AREA DATA

Multipoint BET.....	2.786E+01	m ² /g
Single Point BET.....	2.242E+01	m ² /g
Langmuir Surface Area.....	2.660E+01	m ² /g
BJH Method Cumulative Adsorption Surface Area.....	5.190E+01	m ² /g
BJH Method Cumulative Desorption Surface Area.....	4.669E+01	m ² /g
DH Method Cumulative Adsorption Surface Area.....	5.839E+01	m ² /g
DH Method Cumulative Desorption Surface Area.....	4.995E+01	m ² /g
t-Method External Surface Area.....	2.786E+01	m ² /g
t-Method Micro Pore Surface Area.....	0.000E+00	m ² /g
DR Method Micro Pore Area.....	9.514E+00	m ² /g

PORE VOLUME DATA

Total Pore Volume for pores with Diameter less than 4255.0 Å at P/Po = 0.99548.....	7.538E-02	cc/g
BJH Method Cumulative Adsorption Pore Volume.....	8.606E-02	cc/g
BJH Method Cumulative Desorption Pore Volume.....	8.191E-02	cc/g
DH Method Cumulative Adsorption Pore Volume.....	8.482E-02	cc/g
DH Method Cumulative Desorption Pore Volume.....	8.114E-02	cc/g
t-Method Micro Pore Volume.....	0.000E+00	cc/g
DR Method Micro Pore Volume.....	3.381E-03	cc/g
HK Method Cumulative Pore Volume.....	7.220E-03	cc/g
SF Method Cumulative Pore Volume.....	7.602E-03	cc/g

PORE SIZE DATA

Average Pore Diameter.....	1.082E+02	Å
BJH Method Adsorption Pore Diameter (Mode).....	9.583E+00	Å
BJH Method Desorption Pore Diameter (Mode).....	2.180E+01	Å
DH Method Adsorption Pore Diameter (Mode).....	9.583E+00	Å
DH Method Desorption Pore Diameter (Mode).....	2.180E+01	Å
DR Method Micro Pore Width.....	6.647E+01	Å
DA Method Pore Diameter (Mode).....	1.920E+01	Å
HK Method Pore Width (Mode).....	9.725E+00	Å
SF Method Pore Diameter (Mode).....	1.781E+01	Å

ภาพผนวกที่ ๑2 ข้อมูลจากการวิเคราะห์การหาพื้นที่แบบ BET ของถ่านชาร์จากดินสับุดำ

AREA-VOLUME-PORE SIZE SUMMARY

SURFACE AREA DATA

Multipoint BET.....	5.155E+01	m ² /g
Single Point BET.....	1.843E+01	m ² /g
Langmuir Surface Area.....	2.037E+01	m ² /g
BJH Method Cumulative Adsorption Surface Area.....	4.493E+01	m ² /g
BJH Method Cumulative Desorption Surface Area.....	4.583E+01	m ² /g
DH Method Cumulative Adsorption Surface Area.....	4.773E+01	m ² /g
DH Method Cumulative Desorption Surface Area.....	4.984E+01	m ² /g
t-Method External Surface Area.....	2.172E+01	m ² /g
t-Method Micro Pore Surface Area.....	5.814E+00	m ² /g
DR Method Micro Pore Area.....	1.535E+00	m ² /g

PORE VOLUME DATA

Total Pore Volume for pores with Diameter less than 3995.9 Å at P/Po = 0.99519.....	8.164E-02	cc/g
BJH Method Cumulative Adsorption Pore Volume.....	9.285E-02	cc/g
BJH Method Cumulative Desorption Pore Volume.....	8.951E-02	cc/g
DH Method Cumulative Adsorption Pore Volume.....	9.102E-02	cc/g
DH Method Cumulative Desorption Pore Volume.....	8.895E-02	cc/g
t-Method Micro Pore Volume.....	-4.215E-03	cc/g
DR Method Micro Pore Volume.....	5.454E-04	cc/g
HK Method Cumulative Pore Volume.....	4.628E-03	cc/g
SF Method Cumulative Pore Volume.....	4.994E-03	cc/g

PORE SIZE DATA

Average Pore Diameter.....	1.186E+02	Å
BJH Method Adsorption Pore Diameter (Mode).....	1.331E+01	Å
BJH Method Desorption Pore Diameter (Mode).....	1.679E+01	Å
DH Method Adsorption Pore Diameter (Mode).....	9.603E+00	Å
DH Method Desorption Pore Diameter (Mode).....	1.679E+01	Å
DR Method Micro Pore Width	1.734E+01	Å
DA Method Pore Diameter (Mode).....	1.920E+01	Å
HK Method Pore Width (Mode).....	9.875E+00	Å
SF Method Pore Diameter (Mode).....	1.809E+01	Å

DATA REDUCTION PARAMETERS

ภาพผนวกที่ ๓3 ข้อมูลจากการวิเคราะห์การหาพื้นที่แบบ BET ของถ่านชาร์จากกากพลมะนาว

AREA-VOLUME-PORE SIZE SUMMARY

SURFACE AREA DATA

Multipoint BET.....	2.405E+02	m ² /g
BJH Method Cumulative Desorption Surface Area.....	1.990E+02	m ² /g
DH Method Cumulative Desorption Surface Area.....	2.012E+02	m ² /g
DR Method Micro Pore Area.....	2.154E+02	m ² /g

PORE VOLUME DATA

Total Pore Volume for pores with Diameter less than 31853.6 Å at P/Po = 0.99940.....	5.798E-01	cc/g
BJH Method Cumulative Desorption Pore Volume.....	6.031E-01	cc/g
BJH Interpolated Cumulative Adsorption Pore Volume for pores in the range of 5000.0 to 0.0 Å Diameter.....	0.000E+00	cc/g
BJH Interpolated Cumulative Desorption Pore Volume for pores in the range of 5000.0 to 0.0 Å Diameter.....	6.017E-01	cc/g
DH Method Cumulative Desorption Pore Volume.....	5.870E-01	cc/g
DR Method Micro Pore Volume.....	7.656E-02	cc/g
HK Method Cumulative Pore Volume.....	7.013E-02	cc/g
SF Method Cumulative Pore Volume.....	7.165E-02	cc/g

PORE SIZE DATA

Average Pore Diameter.....	1.353E+02	Å
BJH Method Desorption Pore Diameter (Mode).....	1.142E+02	Å
DH Method Desorption Pore Diameter (Mode).....	1.142E+02	Å
DR Method Micro Pore Width	9.124E+01	Å
DA Method Pore Diameter (Mode).....	1.820E+01	Å
HK Method Pore Width (Mode).....	1.217E+01	Å
SF Method Pore Diameter (Mode).....	2.270E+01	Å

DATA REDUCTION PARAMETERS

ภาพผนวกที่ ๑4 ข้อมูลจากการวิเคราะห์การหาพื้นที่แบบ BET ของถ่านกัมมันต์จากชังข้าวโพด

AREA-VOLUME-PORE SIZE SUMMARY

SURFACE AREA DATA

Multipoint BET.....	2.018E+02	m ² /g
Langmuir Surface Area.....	3.209E+02	m ² /g
BJH Method Cumulative Adsorption Surface Area.....	1.101E+02	m ² /g
BJH Method Cumulative Desorption Surface Area.....	1.120E+02	m ² /g
DH Method Cumulative Adsorption Surface Area.....	1.160E+02	m ² /g
DH Method Cumulative Desorption Surface Area.....	1.174E+02	m ² /g
t-Method External Surface Area.....	9.161E+01	m ² /g
t-Method Micro Pore Surface Area.....	1.102E+02	m ² /g
DR Method Micro Pore Area.....	3.003E+02	m ² /g

PORE VOLUME DATA

Total Pore Volume for pores with Diameter less than 5077.1 Å at P/Po = 0.99622.....	2.358E-01	cc/g
BJH Method Cumulative Adsorption Pore Volume.....	1.780E-01	cc/g
BJH Method Cumulative Desorption Pore Volume.....	1.663E-01	cc/g
DH Method Cumulative Adsorption Pore Volume.....	1.749E-01	cc/g
DH Method Cumulative Desorption Pore Volume.....	1.639E-01	cc/g
t-Method Micro Pore Volume.....	6.064E-02	cc/g
DR Method Micro Pore Volume.....	1.067E-01	cc/g
HK Method Cumulative Pore Volume.....	9.823E-02	cc/g
SF Method Cumulative Pore Volume.....	9.916E-02	cc/g

PORE SIZE DATA

Average Pore Diameter.....	4.673E+01	Å
BJH Method Adsorption Pore Diameter (Mode).....	1.425E+01	Å
BJH Method Desorption Pore Diameter (Mode).....	3.806E+01	Å
DH Method Adsorption Pore Diameter (Mode).....	1.425E+01	Å
DH Method Desorption Pore Diameter (Mode).....	3.806E+01	Å
DR Method Micro Pore Width	7.404E+01	Å
DA Method Pore Diameter (Mode).....	1.640E+01	Å
HK Method Pore Width (Mode).....	1.462E+01	Å
SF Method Pore Diameter (Mode).....	2.741E+01	Å

ภาพผนวกที่ ๖5 ข้อมูลจากการวิเคราะห์การหาพื้นที่แบบ BET ของถ่านกัมมันต์จากดินสับุดำ

AREA-VOLUME-PORE SIZE SUMMARY

SURFACE AREA DATA

Langmuir Surface Area.....	2.131E+02	m ² /g
BJH Method Cumulative Adsorption Surface Area.....	2.041E+02	m ² /g
DH Method Cumulative Adsorption Surface Area.....	2.056E+02	m ² /g
DR Method Micro Pore Area.....	1.131E+02	m ² /g

PORE VOLUME DATA

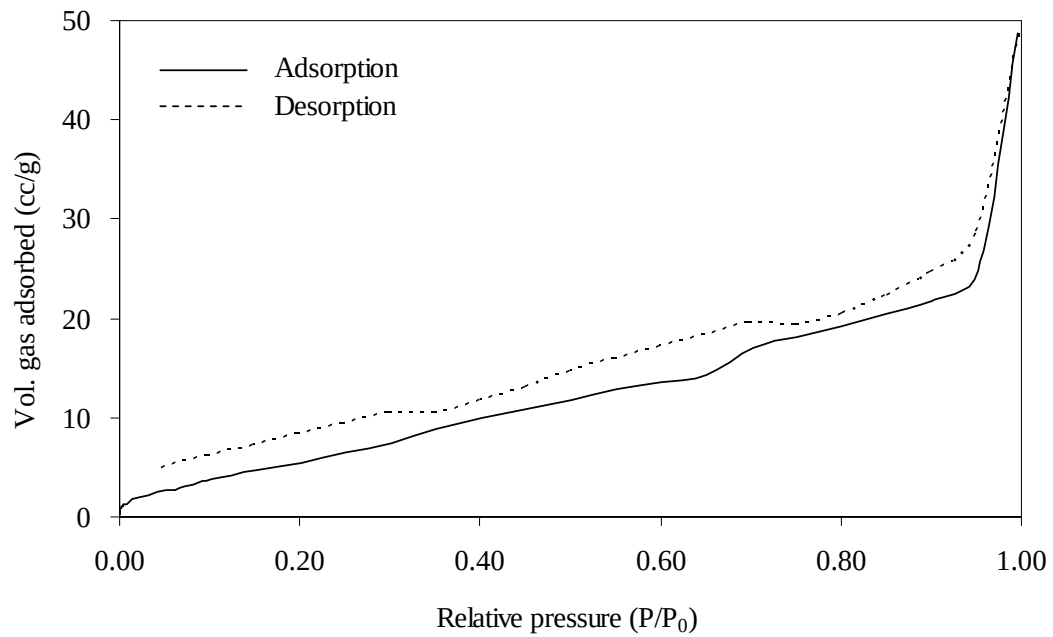
BJH Method Cumulative Adsorption Pore Volume.....	1.198E+01	cc/g
DH Method Cumulative Adsorption Pore Volume.....	1.161E+01	cc/g
DR Method Micro Pore Volume.....	4.020E+01	cc/g
HK Method Cumulative Pore Volume.....	3.769E+01	cc/g
SF Method Cumulative Pore Volume.....	3.925E+01	cc/g

PORE SIZE DATA

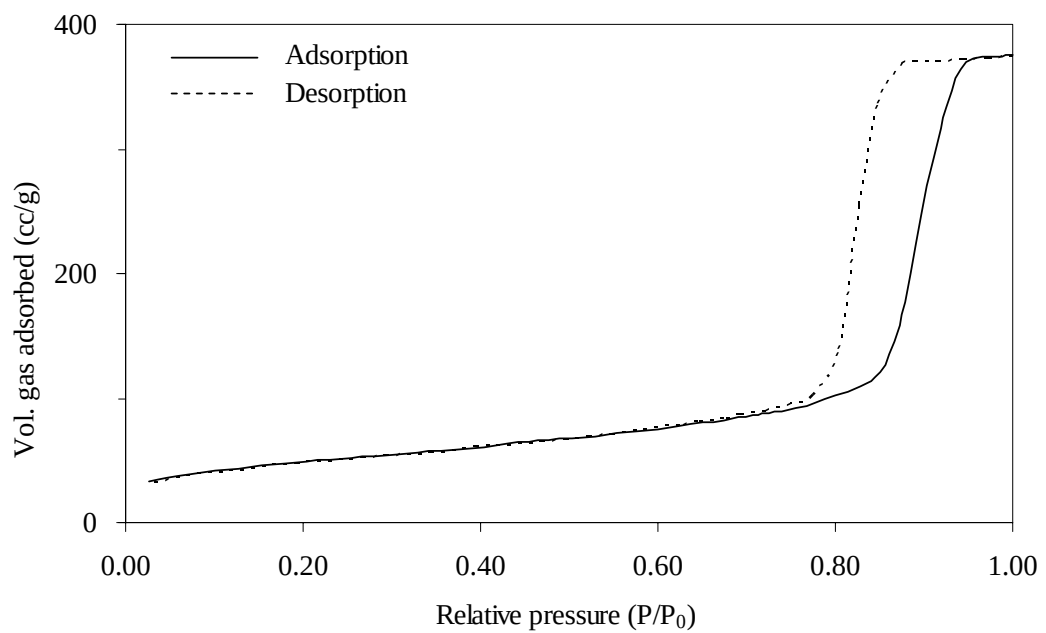
BJH Method Adsorption Pore Diameter (Mode).....	2.336E+01	Å
DH Method Adsorption Pore Diameter (Mode).....	2.336E+01	Å
DR Method Micro Pore Width	1.021E+02	Å
DA Method Pore Diameter (Mode).....	1.920E+01	Å
HK Method Pore Width (Mode).....	8.175E+00	Å
SF Method Pore Diameter (Mode).....	1.467E+01	Å

DATA REDUCTION PARAMETERS

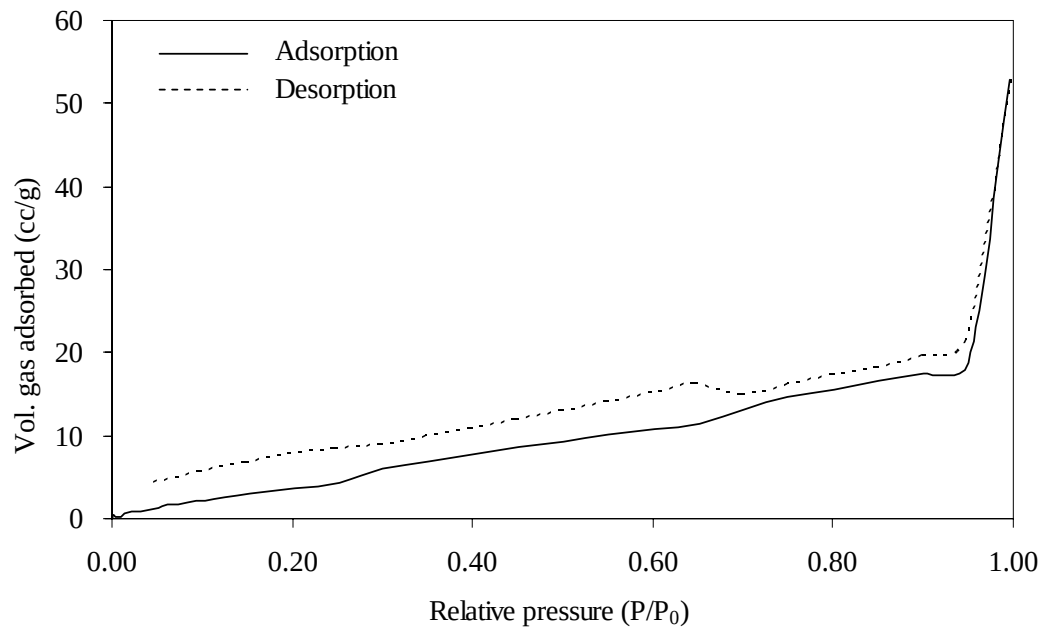
ภาพผนวกที่ ๖6 ข้อมูลจากการวิเคราะห์การหาพื้นที่แบบ B E T ของถ่านกัมมันต์จากกากพลมนาว



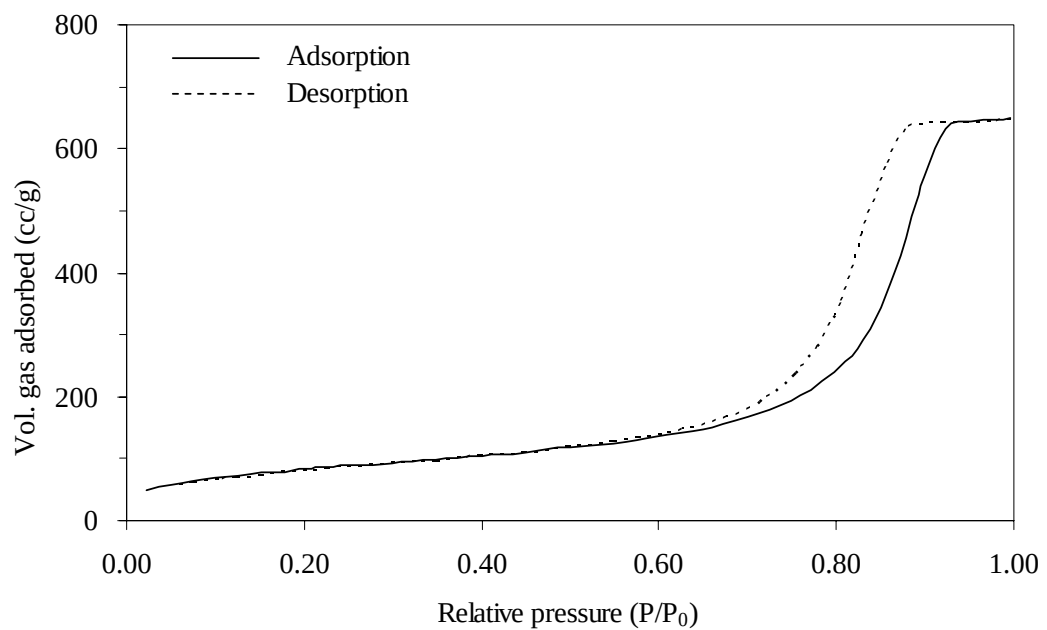
ภาพผนวกที่ จ7 ไอโซเทิร์มพลอตของถ่านชาร์จากต้นสบู่ดำ ที่อุณหภูมิไฟโรไลซิส 400 องศาเซลเซียส



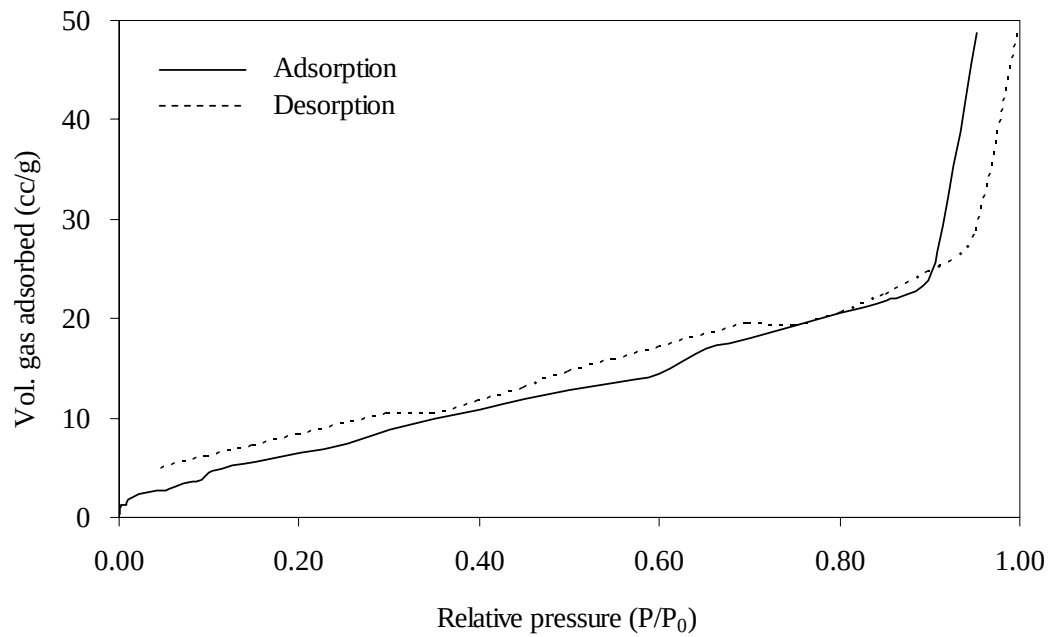
ภาพผนวกที่ จ8 ไอโซเทิร์มพลอตของถ่านกัมมันต์จากต้นสบู่ดำ ที่ผ่านการกระตุ้นด้วย NaOH ที่ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที



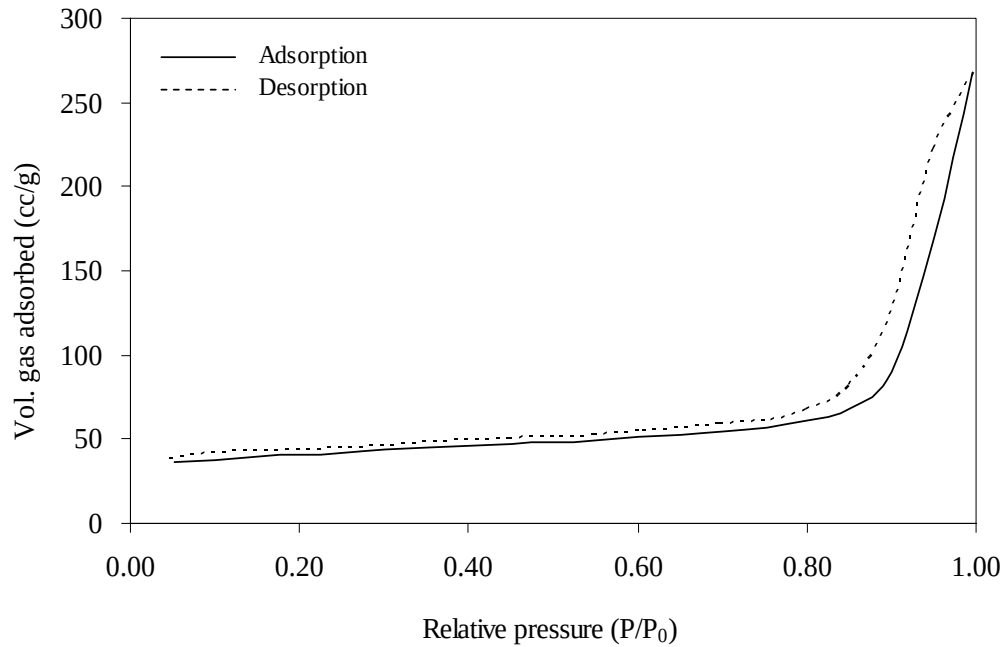
ภาพผนวกที่ จ9 ไอโซเทิร์มพลอตของถ่านชาร์จากขี้ข้าวโพด ที่อุณหภูมิไฟโรไลซิส 400 องศาเซลเซียส



ภาพผนวกที่ จ10 ไอโซเทิร์มพลอตของถ่านกัมมันต์จากขี้ข้าวโพด ที่ผ่านการกระตุ้นด้วย NaOH ที่ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที



ภาพผนวกที่ จ11 ไอโซเทิร์มพลอตของถ่านชาร์จากกากมะนาว ที่อุณหภูมิไฟโรไลซิส 400 องศาเซลเซียส



ภาพผนวกที่ จ12 ไอโซเทิร์มพลอตของถ่านกัมมันต์จากกากมะนาว ที่ผ่านการกระตุ้นด้วย NaOH ที่ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาววรรณ มูลศรีแก้ว
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 15 เมษายน 2524
สถานที่เกิด	จังหวัดร้อยเอ็ด
ประวัติการศึกษา	ระดับอุดมศึกษา วท.บ. (วิทยาศาสตร์) ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพมหานคร (พ.ศ. 2547)
ประวัติการทำงาน	บริษัทแพนเอเชียอุตสาหกรรม จำกัด นิคมอุตสาหกรรมลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร Research and Development
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนผู้ช่วยสอนจากโครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาและ วิจัยด้านวิศวกรรม ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (2549)