

การแปรสภาพกากสบู่น้ำโดยกระบวนการไพโรไลซิสแบบขั้นเบดนิ่ง



นางสาวชนิดา มฤคทัต

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CONVERSION OF PHYSIC NUT (JATROPHA CURCAS LINN) WASTE
BY FIXED BED PYROLYSIS PROCESS




Miss Chanida Marukatat

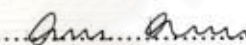
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering
Department of Environmental Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2007
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การแปรสภาพกากสูกู้ค่าโดยกระบวนการไพโรไลซิสแบบขั้นเบตนิ่ง
โดย นางสาว ชนิตา มฤคหัต
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ดร. วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล
ช่วยอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม อาจารย์ ดร. ดวงเดือน อัจจงค์

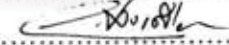
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณยศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร. วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล)


.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(อาจารย์ ดร. ดวงเดือน อัจจงค์)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. มนัสกร ราชากรกิจ)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิชญ รัชฎาวงศ์)

สถาบันวิศวกรรม
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชนิดา มฤคทัต : การแปรสภาพกากสบู่ดำโดยกระบวนการไพโรไลซิสแบบชั้นเบตนิ่ง.
 (CONVERSION OF PHYSIC NUT (JATROPHA CURCAS LINN) WASTE BY FIXED-BED
 PYROLYSIS PROCESS) อาจารย์ที่ปรึกษา: อ.ดร. วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล, อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม:
 ดร. ดวงเดือน อากองค์, 125 หน้า

งานวิจัยนี้ศึกษาการไพโรไลซิสของกากสบู่ดำ โดยใช้เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริก และการทดสอบด้วยเตาปฏิกรณ์ควอตซ์แบบชั้นเบตนิ่ง เพื่อตรวจสอบปัจจัยที่มีผลต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา เวลาในการทดลอง จากการทดลองพบว่าการสลายตัวของกากสบู่ดำอยู่ในช่วง 150-450 องศาเซลเซียส ในส่วนของการสร้างแบบจำลองจลนศาสตร์เพื่อทำนายการสลายตัวของกากสบู่ดำ พบว่าแบบจำลองการสลายตัวด้วยความร้อนแบบปฏิกิริยาคู่ขนาน (Parallel reactions) สามารถทำนายลักษณะการสลายตัวของกาก สบู่ดำได้ดี จากการคำนวณค่าตัวแปรโดยใช้แบบจำลองดังกล่าวพบว่ามีค่าพลังงานกระตุ้นขององค์ประกอบจำพวกเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน จะอยู่ในช่วง 40-60 กิโลจูลต่อโมล 185-235 กิโลจูลต่อโมล และ 90-150 กิโลจูลต่อโมล ตามลำดับ ส่วนของค่าลำดับการเกิดปฏิกิริยาจะอยู่ในช่วง 2.35-3.50 การไพโรไลซิส กากสบู่ดำภายในเตาปฏิกรณ์ พบว่าการเปลี่ยนอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์มีผลต่อองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์ กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงจำพวก ก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซมีเทน และกลุ่มไฮโดรคาร์บอนเบา จะมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น และที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส จะมีผลผลิตของก๊าซผลิตภัณฑ์มากที่สุด โดยทั่วไปการเพิ่มอุณหภูมิทำให้ปริมาณดำนชาร์ลดลงในขณะที่ปริมาณน้ำมันทาร์และก๊าซเพิ่มสูงขึ้น ทาร์จะประกอบด้วยกรดไขมันที่สำคัญ 4 ชนิด คือ ปาล์มมิติค สเตียริก โอเลอิก และไลโนเลอิก โดยจากการทดลองพบว่ามีกรดปาล์มมิติค และสเตียริกมีน้อยเพียง 10-23 % และ 5-12% ตามลำดับ ส่วนโอเลอิก และไลโนเลอิก มีค่อนข้างสูงคือ 35-42% และ 29-38% ตามลำดับ และในส่วนของผลิตภัณฑ์ชาร์พบว่าที่อุณหภูมิสูง สารระเหยและสารอินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบในกากสบู่ดำจะถูกปลดปล่อยและเกิดการสลายตัวได้ดี ทำให้ร้อยละขององค์ประกอบของชาร์เปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ร้อยละสารระเหยมีค่าลดลง ส่วนคาร์บอนคงตัวมีค่าเพิ่มขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	ลายมือชื่อนิสิต..... วิไล มฤคทัต
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา	2550	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4870579421 :MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEY WORD: JATROPHA CURCAS LINN WASTE / PYROLYSIS / THERMOGRAVIMETRIC ANALYSIS / FIXED BED REACTOR

CHANIDA MARUKATAT: CONVERSION OF PHYSIC NUT (JATROPHA CURCAS LINN) WASTE BY FIXED BED PYROLYSIS PROCESS. THESIS ADVISOR: VIBOON SRICHAROENCHAIKUL, Ph.D., THESIS COADVISOR: DUANGDUEN ATONG, Ph.D., 126 pp.

In this research, pyrolysis experiments were carried out using thermogravimetric analysis (TGA) and a fixed-bed quartz reactor. The biomass used was *Jatropha curcas linn* (Physic Nut) waste. The objective of this research is to study the effect of temperature and holding time on product distribution. It was found that the main thermal decomposition of physic nut waste generally occurred over the temperature range of 150-450°C. The parallel reaction kinetic model was applied for simulating the degradation of physic nut waste. The three parallel reaction model agreed relatively well with the experimental data. From the model, the activation energy of hemicelluloses, cellulose and lignin were in the range of 40-60 kJ/mol, 185-235 kJ/mol and 90-150 kJ/mol, respectively. Reaction orders of those fractions were in the range of 2.35-3.50. The results from a fixed-bed reactor pyrolysis process indicated that raised in temperature and holding time lead to an increase in the production of hydrogen gas, methane gas and light hydrocarbons with highest gas production measured at 900°C. Tar (liquid oil) destruction at the higher temperatures caused the decrease in the liquid yield while the gas yield and the total conversion increased. Liquid oil consisted of fatty acids such as palmetic acid, stearic acid, oleic acid and linoleic acid. Their contents were in the range of 10-23 % palmetic acid, 5-12%, stearic acid, 35-42% oleic acid 29-38% linoleic acid, respectively. The amount of char residue decreased with increasing reactor temperature and holding time. Analysis of char indicated that when temperature was raised, there was increase in fixed carbon yields and decreased in volatile matter with little change on ash content.

Department Environmental Engineering
Field of study Environmental Engineering
Academic year.....2007.....

Student's signature*Chanida Marukat*.....
Advisor's signature*Viboon*.....
Co-advisor's signature*Duangduen*.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีโดยได้รับความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา และอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร. วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ และ ดร. ดวงเดือน อางองค์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมเป็นอย่างสูงที่กรุณาให้ข้อเสนอแนะในการศึกษาวิจัย วิธีการแก้ไขปัญหาข้อบกพร่อง รวมทั้งยังให้ความกรุณาถ่ายทอดวิชาความรู้ด้านต่างๆ นอกจากนี้ทั้งให้แง่คิดในการทำงานอย่างมีประสิทธิภาพจนวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติที่มอบทุนสนับสนุนงานวิจัย รวมทั้งอำนวยความสะดวกด้านเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย และขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่มอบทุนสนับสนุนการทำวิจัยในครั้งนี้ ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ และเจ้าหน้าที่ฝ่ายธุรการ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำปรึกษา และอำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิชญ รัชฎาวงศ์ และอาจารย์ ดร. มนัสกร ราชกรกิจ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำตลอดจนข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์เพื่อการแก้ไข และปรับปรุงวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ญาติพี่น้อง ที่ให้ความช่วยเหลือ เป็นกำลังใจอย่างดีและให้การสนับสนุนจนสำเร็จการศึกษา รวมทั้งขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ วิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกคนที่ให้กำลังใจ ช่วยเหลือและให้คำแนะนำด้วยดีเสมอมา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	6
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	6
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	7
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.1 แหล่งและประเภทข้อมูล.....	8
2.2 หลักและกลไกการเกิดกระบวนการไพโรไลซิส.....	10
2.3 ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นภายในเตาไพโรไลซิส.....	20
2.4 การสลายตัวทางความร้อนโดยเทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA).....	22
2.5 ก๊าซสังเคราะห์ (Synthesis Gas).....	26
2.6 กากสบูดำ.....	27
2.7 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	34
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย.....	38
3.1 อุปกรณ์การทดลองที่ใช้ในงานวิจัย.....	38
3.2 แผนงานวิจัย.....	39
3.3 แผนขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	39
3.4 ตัวอย่างกากสบูดำที่ใช้ในงานวิจัย.....	39

บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย (ต่อ)	
3.5 ชนิดเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	40
3.6 การดำเนินการวิจัย.....	44
บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล.....	50
4.1 การวิเคราะห์สมบัติการสบูดำ.....	50
4.2 การสลายตัวทางความร้อนระหว่างการไฟโรไลซิส.....	53
4.3 ไฟโรไลซิสของกากสบูดำในเตาปฏิกรณ์ควอตซ์แบบชั้นเบดนิ่ง.....	63
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	79
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	79
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	82
รายการอ้างอิง.....	83
ภาคผนวก.....	87
ภาคผนวก ก. ขั้นตอนการวิเคราะห์สมบัติองค์ประกอบของกากสบูดำ.....	87
ภาคผนวก ข. วิธีการวิเคราะห์โดยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ.....	95
ภาคผนวก ค. ข้อมูลการวิเคราะห์องค์ประกอบกากสบูดำ	101
ภาคผนวก ง. ขั้นตอนการวิเคราะห์ที่ใช้โปรแกรม MATLAB และข้อมูลการวิเคราะห์ หาค่าตัวแปรทางจลนศาสตร์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยข้อมูลจากการ ทดลองด้วยเทคนิคเทอร์โมกราฟีเมตริก.....	103
ภาคผนวก จ. ผลการทดลองจากกระบวนการไฟโรไลซิสของเตาปฏิกรณ์ควอตซ์ แบบชั้นเบดนิ่ง.....	119
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	125

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเปลี่ยนแปลง.....4	
องค์ประกอบทางเคมีของชีวมวล.	
ตารางที่ 2.1 สูตรโครงสร้างและน้ำหนักโมเลกุลของสารประกอบคาร์โบไฮเดรตและลิกนิน.....8	
ตารางที่ 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ศึกษาตัวแปรทางจุลนศาสตร์ของการสลายตัวขององค์ประกอบ...26	
ของชีวมวล	
ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบเมล็ดสับดูดำ.....29	
ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบคุณสมบัติและค่าความร้อนของน้ำมันจากพืชชนิดต่างๆ.....30	
ตารางที่ 2.5 ตารางเปรียบเทียบต้นทุนการผลิต ปริมาณผลผลิต มูลค่าเมล็ดและน้ำมันสับดู.....31	
ตารางที่ 3.1 วิธีการวิเคราะห์แบบ Proximate Analysis.....44	
ตารางที่ 3.2 วิธีการวิเคราะห์แบบ Ultimate Analysis.....44	
ตารางที่ 3.3 ตัวแปรที่ทำการศึกษาด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก.....47	
ตารางที่ 3.4 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในกระบวนการไพโรไลซิส.....48	
ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของกากสับดูดำ.....51	
เมื่อเปรียบเทียบกับชนิดมวลชนิดต่างๆ	
ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์กากสับดูดำแบบแยกธาตุของกากสับดูดำ.....51	
เมื่อเปรียบเทียบกับชนิดมวลชนิดต่างๆ	
ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบเคมีของกากสับดูดำตามมาตรฐาน Tappi และ AOAC 2000.....52	
ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของกากสับดูดำ.....52	
ตารางที่ 4.4 ตัวแปรทางจุลนศาสตร์ (a, b, c, A ₁ , E ₁ , A ₂ , E ₂ , A ₃ , E ₃ และ n).....58	
ที่คำนวณได้จากแบบจำลองปฏิกิริยาคู่ขนาน Three-parallel	
จากแบบจำลองปฏิกิริยาการไพโรไลซิสกากสับดูดำ	
ตารางที่ 4.5 การเปรียบเทียบค่าพลังงานกระตุ้นของการเกิดปฏิกิริยาของการสลายตัว.....62	
จากกากสับดูดำกับงานวิจัยอื่นๆ	
ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองจากกระบวนการไพโรไลซิสของเตาปฏิกรณ์ควอตซ์.....64	
แบบชั้นเบตนิ่งภายใต้บรรยากาศก๊าซอาร์กอน	

ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการไพโรไลซิสชีวมวลต่างชนิดกัน...65

ตารางที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันองค์ประกอบผลิตภัณฑ์ของเหลว.....75
 ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสกากสับุดำด้วยเครื่องด้วย GC

ตารางที่ ข1 การวิเคราะห์ก๊าซโดยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี95

ตารางที่ ข2 การวิเคราะห์ของเหลวสารโดยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี..... 97

ตารางที่ ค1 การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) ของกากสับุดำ.....102

ตารางที่ ค2 การวิเคราะห์กากสับุดำแบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis)102

ตารางที่ ค3 การวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีของกากสับุดำตามมาตรฐาน.....103
 Tappi และ AOAC 2000

ตารางที่ ค4 การวิเคราะห์ทดสอบสมบัติทางความร้อนของกากสับุดำ.....103

ตารางที่ ง1 การวิเคราะห์ข้อมูลจากเทคนิคเทอร์โมกราฟีเมตริกเพื่อใช้ในการสร้างแบบ.....104
 จำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB2007a

ตารางที่ ง2 โปรแกรม MATLAB2007a.....105

ตารางที่ ง3 การวิเคราะห์หาค่าตัวแปรทางจลนศาสตร์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....108
 ด้วยข้อมูลจากการทดลองด้วยเทคนิคเทอร์โมกราฟีเมตริก ที่ 5 °C/min

ตารางที่ ง4 การวิเคราะห์หาค่าตัวแปรทางจลนศาสตร์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....111
 ด้วยข้อมูลจากการทดลองด้วยเทคนิคเทอร์โมกราฟีเมตริก ที่ 15 °C/min

ตารางที่ ง5 การวิเคราะห์หาค่าตัวแปรทางจลนศาสตร์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....114
 ด้วยข้อมูลจากการทดลองด้วยเทคนิคเทอร์โมกราฟีเมตริก ที่ 30 °C/min

ตารางที่ ง6 การวิเคราะห์หาค่าตัวแปรทางจลนศาสตร์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....117
 ด้วยข้อมูลจากการทดลองด้วยเทคนิคเทอร์โมกราฟีเมตริก ที่ 90 °C/min

ตารางที่ จ1 ผลการทดลองจากกระบวนการไพโรไลซิสของเตาปฏิกรณ์ควอดซ์.....120
 แบบชั้นเบดนิ่งภายใต้บรรยากาศก๊าซอาร์กอน

ตารางที่ จ2 ผลการวิเคราะห์หา %สารระเหยได้ (Volatile), %คาร์บอนคงตัว (Fix Carbon)120
 และ %เถ้า (Ash) ของซาร์ที่เหลือจากการไพโรไลซิสด้วยเทคนิคเทอร์โมกราฟีเมตริก

ตารางที่ จ3 การคำนวณหาค่าปริมาณผลิตภัณฑ์ก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดจากการ.....122
 ไพโรไลซิสกากสับุดำที่อุณหภูมิต่างๆ

ตารางที่ ๑.4 การคำนวณหาค่าปริมาณก๊าซผลิตภัณฑ์จำพวกสารประกอบ.....	123
ไฮโดรคาร์บอนจาก Standard Permanent Gas	
ตารางที่ ๑.5 การคำนวณหาค่าปริมาณก๊าซผลิตภัณฑ์จำพวกสารประกอบ.....	124
ไฮโดรคาร์บอน (C ₁ , C ₂ และ C ₄)	
ตารางที่ ๑.6 การคำนวณหาค่าองค์ประกอบกรดไขมันในผลิตภัณฑ์.....	125
ของเหลวทาร์ที่เกิดจากการไพโรไลซิสจากสบูดำที่อุณหภูมิต่างๆ	



สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1 ภาพรวมของกระบวนการไพโรไลซิสและกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน.....	3
รูปที่ 2.1 การเกิดไพโรไลซิสของเซลลูโลสที่อุณหภูมิต่ำ.....	13
รูปที่ 2.2 การเกิดไพโรไลซิสของลิกนิน.....	14
รูปที่ 2.3 ลักษณะเตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบต่างๆ.....	19
รูปที่ 2.4 ลักษณะกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของการสลายตัวทางความร้อน (บริษัท เมทเลอร์-โทเลโด (ประเทศไทย) จำกัด.)	22
รูปที่ 2.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{d\alpha}{dt}\right)$ กับ $1/T$ c และกราฟความสัมพันธ์ ระหว่าง $\ln[A(1-\alpha)^n]$ กับ $\ln(1-\alpha)$	25
รูปที่ 2.6 ลักษณะต้นสบูดำ.....	28
รูปที่ 2.7 ลักษณะของเมล็ดของสบูดำ.....	29
รูปที่ 2.8 กระบวนการผลิตน้ำมันสบูดำ.....	33
รูปที่ 3.1 เครื่องวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (C, H, N, Elemental Analyzer).....	40
รูปที่ 3.2 เครื่อง Thermogravimetric analysis (TGA).....	40
รูปที่ 3.3 เครื่องปฏิกรณ์ควอตซ์.....	41
รูปที่ 3.4 เตาเผาให้ความร้อนแบบท่อกลวง (Tubular Furnace).....	41
รูปที่ 3.5 เทอร์โมคัปเปิ้ลวัดอุณหภูมิและเครื่องควบคุมอุณหภูมิ.....	42
รูปที่ 3.6 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography).....	43
รูปที่ 3.7 แผนการดำเนินงานวิจัย.....	45
รูปที่ 3.8 ขั้นตอนกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราฟีเมตริก.....	46
รูปที่ 3.9 แผนผังกระบวนการไพโรไลซิสในเตาปฏิกรณ์ควอตซ์แบบชั้นเบดนิ่ง.....	48
รูปที่ 3.10 ขั้นตอนกระบวนการไพโรไลซิสในเตาปฏิกรณ์ควอตซ์แบบชั้นเบดนิ่ง.....	49
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียน้ำหนักจากการไพโรไลซิส กากสบูดำที่อุณหภูมิ 25-900 องศาเซลเซียส.....	55
รูปที่ 4.2 อัตราการสลายตัวของกากสบูดำ จากการไพโรไลซิส ที่อุณหภูมิ 25-900 องศาเซลเซียส.....	56
รูปที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของกากสบูดำ ที่ภายใต้อัตราการให้ความร้อนต่างๆ.....	57

รูปที่ 4.4 อัตราการสลายตัวของกากสับดูดำ ภายใต้อัตราการให้ความร้อนต่าง ๆ.....	57
รูปที่ 4.5 TG curve และ three parallel reaction model fitting ของการสลายตัวด้วยความร้อน ของกากสับดูดำ ที่อัตราการให้ความร้อนต่าง ๆ.....	60
รูปที่ 4.6 TG curve และ three parallel reaction model fitting ของการสลายตัวด้วยความร้อน ของกากสับดูดำที่อัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที.....	61
รูปที่ 4.7 TG curve และ three parallel reaction model fitting ของการสลายตัวด้วยความร้อน ของกากสับดูดำที่อัตราการให้ความร้อน 15 องศาเซลเซียสต่อนาที.....	61
รูปที่ 4.8 TG curve และ three parallel reaction model fitting ของการสลายตัวด้วยความร้อน ของกากสับดูดำ ที่อัตราการให้ความร้อน 30 องศาเซลเซียสต่อนาที.....	62
รูปที่ 4.9 TG curve และ three parallel reaction model fitting ของการสลายตัวด้วยความร้อน ของกากสับดูดำ ที่อัตราการให้ความร้อน 90 องศาเซลเซียสต่อนาที.....	62
รูปที่ 4.10 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการไพโรไลซิสกากสับดูดำ ที่อุณหภูมิ 500, 700 และ 900 องศาเซลเซียส.....	65
รูปที่ 4.11 ผลิตภัณฑ์ชาร์ที่เหลือจากการไพโรไลซิสกากสับดูดำที่อุณหภูมิต่างๆ และเวลาในการทดลองต่างๆ.....	67
รูปที่ 4.12 ปริมาณของสารระเหยได้ (Volatile), คาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) และเถ้า (Ash) ในกากสับดูดำที่เหลือจากการไพโรไลซิส ที่เวลาในการทดลอง 15 นาที.....	68
รูปที่ 4.13 ปริมาณไฮโดรเจนในกากสับดูดำที่เปลี่ยนเป็นก๊าซไฮโดรเจน ในการไพโรไลซิสกากสับดูดำ (1 กรัม) ที่อุณหภูมิต่างๆ ที่เวลาในการทดลองต่างๆ.....	69
รูปที่ 4.14 ปริมาณไฮโดรเจนในกากสับดูดำที่เปลี่ยนเป็นก๊าซไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นในการ ไพโรไลซิสกากสับดูดำ (1 กรัม) ที่อุณหภูมิต่างๆ ที่เวลาในการทดลอง 15 นาที.....	70
รูปที่ 4.15 ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจากการไพโรไลซิสกากสับดูดำที่อุณหภูมิ 500, 700 และ 900 องศาเซลเซียส ที่เวลาในการทดลองต่างๆ.....	70
รูปที่ 4.16 ปริมาณคาร์บอนในกากสับดูดำที่เปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทนในการไพโรไลซิสกากสับดูดำ (1 กรัม) ที่อุณหภูมิต่างๆ ที่เวลาในการทดลองต่างๆ.....	71
รูปที่ 4.17 ร้อยละปริมาณคาร์บอนในกากสับดูดำที่เปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นในการ ไพโรไลซิสกากสับดูดำ (1 กรัม) ที่อุณหภูมิต่างๆ ที่เวลาในการทดลอง 15 นาที.....	72

รูปที่ 4.18 ร้อยละปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจากการไพโรไลซิสกากสบู่ดำที่อุณหภูมิ 500, 700 และ 900 องศาเซลเซียส ที่เวลาในการทดลองต่างๆ.....	72
รูปที่ 4.19 ร้อยละปริมาณคาร์บอนในกากสบู่ดำที่เปลี่ยนเป็นกลุ่มสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (C ₁ , C ₂ และ C ₄) ที่เวลาในการทดลอง 3 นาที ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	73
รูปที่ 4.20 ร้อยละปริมาณคาร์บอนในกากสบู่ดำที่เปลี่ยนเป็นกลุ่มสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (C ₁ , C ₂ และ C ₄) ที่เวลาในการทดลอง 9 นาที ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	73
รูปที่ 4.21 ร้อยละปริมาณคาร์บอนในกากสบู่ดำที่เปลี่ยนเป็นกลุ่มสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (C ₁ , C ₂ และ C ₄) ที่เวลาในการทดลอง 15 นาที ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	74
รูปที่ 4.22 โคโรมาโทแกรมขององค์ประกอบกรดไขมันในของเหลวทาร์ ที่เกิดจากการไพโรไลซิสกากสบู่ดำ.....	77
รูปที่ 4.23 ร้อยละความเข้มข้นของปริมาณองค์ประกอบกรดไขมันในของเหลวทาร์ที่เกิดขึ้น.....	77
รูปที่ ข1 ตัวอย่างโครมาโทแกรมของ standard hydrocarbon.....	96
รูปที่ ข3 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Methyl Palmilate ต่อพื้นที่ใต้กราฟที่อ่านค่าได้จากเครื่อง GC.....	97
รูปที่ ข4 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Methyl Palmitolate ต่อพื้นที่ใต้กราฟที่อ่านค่าได้จากเครื่อง GC.....	98
รูปที่ ข5 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Methyl Stearate ต่อพื้นที่ใต้กราฟที่อ่านค่าได้จากเครื่อง GC.....	98
รูปที่ ข6 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Methyl Oleate ต่อพื้นที่ใต้กราฟที่อ่านค่าได้จากเครื่อง GC.....	99
รูปที่ ข7 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Methyl Linoleate ต่อพื้นที่ใต้กราฟที่อ่านค่าได้จากเครื่อง GC.....	99
รูปที่ ข8 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Methyl Linolenate ต่อพื้นที่ใต้กราฟที่อ่านค่าได้จากเครื่อง GC.....	100
รูปที่ ข9 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Methyl Arachidate ต่อพื้นที่ใต้กราฟที่อ่านค่าได้จากเครื่อง GC.....	100

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ

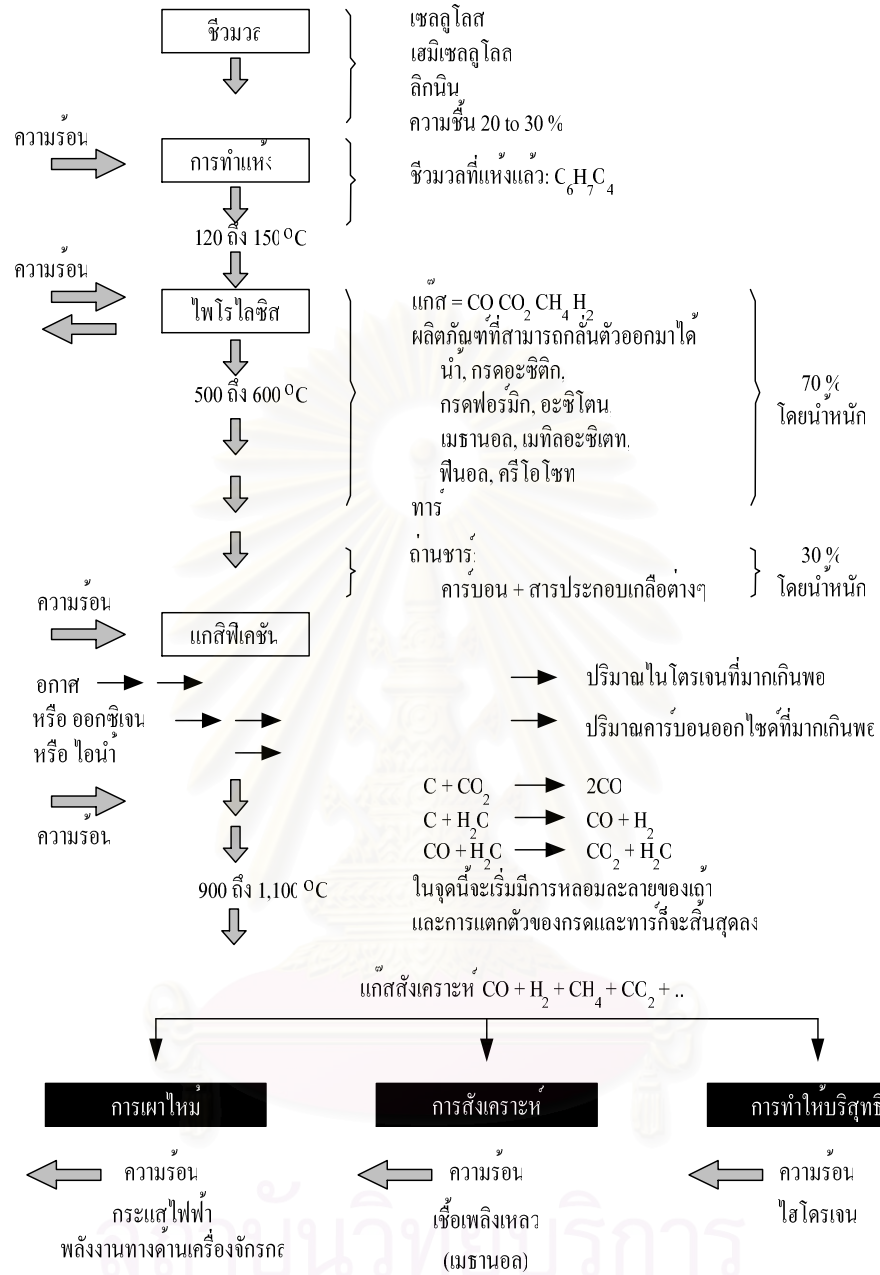
จากการที่สภาวะการณ์ด้านพลังงานของประเทศไทย ยังคงต้องพึ่งพาน้ำมันดิบที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศเป็นส่วนใหญ่ ทำให้ก่อเกิดผลกระทบด้านเศรษฐกิจเป็นอย่างมากในยามที่ราคาน้ำมันดิบสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง เช่นในปัจจุบันนี้จึงจำเป็นต้องเร่งแก้ปัญหาโดยการลดการใช้พลังงานลง และในขณะเดียวกันก็ควรมีการพัฒนาการจัดการแหล่งพลังงานเพิ่มเติม รวมถึงการให้ความสำคัญต่อการศึกษาด้านเทคโนโลยีที่เหมาะสมในการใช้ประโยชน์จากแหล่งพลังงานรูปแบบอื่นๆ ภายในประเทศ โดยแหล่งพลังงานที่มีความเป็นไปได้สำหรับประเทศ ควรจะอยู่ในรูปของแหล่งพลังงานทดแทน (Renewable energy source) ได้แก่แหล่งพลังงานจากชีวมวล

ชีวมวล (Biomass) คือสารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้ โดยที่ชีวมวลนั้นประกอบด้วยธาตุหลักๆ คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน รวมทั้งมีปริมาณของไนโตรเจนและธาตุอื่นๆ อีกเล็กน้อย ชีวมวลนั้นมีอยู่มากมายทั้งที่ได้จากสิ่งมีชีวิต (ยกเว้นที่แตกกลายเป็นเชื้อเพลิงประเภทฟอสซิล เช่น ถ่านหิน น้ำมัน และก๊าซธรรมชาติไปแล้ว) และยังรวมไปถึงสิ่งต่างๆ ที่มีธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจนเป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปชีวมวลมักจะอยู่ในรูปของของแข็งไม่ระเหิดในการนำมาใช้งานจึงมีการใช้เทคโนโลยีในการแปรรูปชีวมวลเพื่อให้อยู่ในรูปของเชื้อเพลิงที่นำไปใช้งานได้สะดวก โดยเทคโนโลยีที่ได้รับความนิยมในปัจจุบันเพื่อปรับปรุงสภาพของชีวมวลให้มีคุณค่ามากขึ้นกว่าเดิมนั้นสามารถจำแนกได้ 2 เทคโนโลยีหลักๆ คือ กระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยวิธีชีวเคมี (Biochemical Conversion Process) เช่น การหมัก และกระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้พลังงานความร้อน (Thermochemical Conversion Process) โดยที่กระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้พลังงานความร้อนยังสามารถจำแนกออกเป็นกระบวนการย่อยๆ ได้อีก 3 กระบวนการ คือกระบวนการเผาไหม้ กระบวนการไพโรไลซิส และกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ทั้งนี้ลักษณะความแตกต่างของแต่ละกระบวนการนั้นขึ้นอยู่กับสถานะที่ใช้ในการดำเนินการและวัตถุประสงค์หรือผลิตภัณฑ์หลักที่ต้องการ (ดังแสดงในตารางที่ 1)

อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่ากระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยวิธีชีวเคมีเป็นกระบวนการที่ใช้สถานะในการดำเนินงานที่รุนแรงน้อยกว่า เมื่อเทียบกับกระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้พลังงานความร้อน แต่วิธีการนี้ค่อนข้างที่จะได้ผลิตภัณฑ์ที่ไม่แน่นอน

ซึ่งจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลค่อนข้างมาก อีกทั้งในหลายกรณีจะไม่สามารถใช้วิธีการชีวเคมีในการย่อยสลายชีวมวลได้ เช่น กรณีที่ชีวมวลมีส่วนผสมของสารที่เป็นพิษต่อจุลินทรีย์ที่ใช้ย่อยสลาย และสารประกอบพวกโพลีเมอร์ก็ไม่เหมาะกับการย่อยสลายทางชีวเคมี ขณะเดียวกันวิธีการชีวเคมีต้องใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาให้สมบูรณ์ รวมทั้งใช้พื้นที่ค่อนข้างมากเหล่านี้จึงเป็นข้อจำกัดของวิธีการนี้ จึงทำให้กระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้พลังงานความร้อนมีความน่าสนใจทั้งในแง่ของปริมาณและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ โดยที่กระบวนการไพโรไลซิสและกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันนั้นมีความน่าสนใจมากกว่ากระบวนการเผาไหม้ ทั้งนี้เนื่องจากมีข้อได้เปรียบมากกว่ากระบวนการเผาไหม้อยู่หลายประการ เช่นการเผาไหม้ทำให้เกิดก๊าซออกไซด์ และไดออกซินที่เป็นอันตราย และความร้อนที่ได้ต้องนำไปใช้ทันที ไม่สามารถเก็บไว้ใช้ได้ง่าย และประสิทธิภาพโดยรวมก็ไม่สูง กระบวนการไพโรไลซิสและกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันนั้นให้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณค่ามากกว่ากระบวนการเผาไหม้ที่ได้พลังงานความร้อนเพียงอย่างเดียว

กระบวนการไพโรไลซิสและกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันนั้นมีความคล้ายคลึงกันมาก เมื่อพิจารณาแล้วกระบวนการไพโรไลซิสก็นับว่าเป็นกระบวนการเริ่มต้น ซึ่งโดยทั่วไปแล้วกระบวนการไพโรไลซิสจะเกิดได้เร็วกว่ากระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ขั้นตอนโดยรวมนั้นเริ่มจาก (ดูรูปที่ 1 ประกอบ) การทำให้ชีวมวลซึ่งเป็นวัตถุดิบที่ประกอบไปด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ที่มีความชื้นประมาณร้อยละ 20 – 30 โดยน้ำหนักนั้นปราศจากน้ำโดยอาศัยกระบวนการทำแห้งที่อุณหภูมิประมาณ 120 – 150 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นชีวมวลจะถูกให้ความร้อนจนมีอุณหภูมิประมาณ 500 – 600 องศาเซลเซียส เพื่อทำลายพันธะทางเคมีของโมเลกุลซึ่งเป็นขั้นตอนของกระบวนการไพโรไลซิสได้เป็นผลิตภัณฑ์จำพวกก๊าซต่างๆ ได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์ออกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน และไฮโดรเจน ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่สามารถกลั่นตัวได้ เช่น น้ำ กรดอะซิติก กรดฟอร์มิก อะซิโตน เมธานอล เมทิลอะซิเตท ฟีนอล เป็นต้น รวมทั้งพวกทาร์และชาร์ หลังจากนั้นเมื่อมีการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นไปอีกจนมีอุณหภูมิประมาณ 900 – 1,100 องศาเซลเซียส ประกอบกับการเติมสารออกซิไดซ์ให้แก่ระบบจะทำให้ทาร์และถ่านชาร์เกิดการแตกตัวได้เป็นผลิตภัณฑ์ก๊าซต่อไป ซึ่งขั้นตอนนี้นั้นเป็นขั้นตอนของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันนั่นเอง



รูปที่ 1 ภาพรวมของกระบวนการไพโรไลซิสและกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (นาวิน, 2540)

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของชีวมวล. (Plaz, Chartier and Hall, 1981)

		วิธีชีวมวล	วิธีการใช้พลังงานความร้อน
เชื้อเพลิง	สารเติมแต่ง	×	×
	แอลกอฮอล์	×	×
	ถ่านชาร์		×
	ดีเซล		×
	กระแสไฟฟ้า		×
	น้ำมันเตา		×
	ก๊าซ	×	×
	เบนซิน		×
	ไฮโดรเจน	×	×
สารเคมี	อะซิโตน	×	
	บิวทานอล	×	
	เอทานอล	×	×
	สารปรับปรุงดิน	×	×
	สารแต่งเติม	×	×
	ไฮโดรเจน	×	×
	มีเทน	×	×
	เรซิน		×
	สารอื่นๆที่มีลักษณะเฉพาะ		×

หมายเหตุ: × คือ ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นเมื่อผ่านกระบวนการแปรรูปที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของชีวมวล.

ในช่วง 10 ปี ที่ผ่านมานั้นได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ๆ ที่สามารถใช้ผลิตพลังงานจากชีวมวลขึ้นมากมาย รวมไปถึงมีการส่งเสริมให้มีการใช้พลังงานจากชีวมวลเพิ่มขึ้นด้วยโดยเฉพาะประเทศในแถบทวีปยุโรป ออสเตรเลีย และสหรัฐอเมริกา สำหรับประเทศไทยนั้นนับได้ว่าเป็นประเทศหนึ่งที่มีทรัพยากรชีวมวลจำนวนมากแต่มีการนำมาใช้ประโยชน์เป็นส่วนน้อย แหล่งชีวมวลที่สำคัญของประเทศไทย คือ ฟางข้าว ชานอ้อย กากสับปะหลัง ซึ่งถูกทิ้งไว้ในไร่นาหรือถูกเผาทิ้งรวมไปถึงของเสียจากภาคอุตสาหกรรมต่างๆ และจากการส่งเสริมของภาครัฐให้มีการปลูกพืชน้ำมัน เช่น ปาล์มและสบู่ดำ เพื่อใช้ในการผลิตไบโอดีเซล ทำให้เชื่อได้ว่าในอนาคตอันใกล้กากปาล์มและกากสบู่ดำจะเป็นแหล่งของชีวมวลเหลือทิ้งที่สำคัญเช่นกัน จากการประมาณการศักยภาพทางเทคนิคนั้นพบว่าประเทศไทยจะมีศักยภาพในด้านของชีวมวลมากกว่า 20 ล้านตัน

ของน้ำมันดิบซึ่งมากกว่าครึ่งหนึ่งของการใช้น้ำมันในปัจจุบัน ดังนั้นการนำชีวมวลมาแปรรูปเพื่อให้มีคุณค่าเพิ่มมากขึ้นหรือการใช้พลังงานจากชีวมวลนั้นนับว่ามีความน่าสนใจเป็นอย่างมาก

ในงานวิจัยนี้ กากของเสียชีวมวลที่จะนำมาศึกษาคือ กากสบู่ดำ สบู่ดำเป็นพีชน้ำมันชนิดหนึ่งที่มีความน่าสนใจและจัดเป็นหนึ่งในพืชพลังงานที่มีศักยภาพที่จะนำมาพัฒนาเป็นแหล่งน้ำมันไบโอดีเซลในประเทศไทยเช่นเดียวกับปาล์มน้ำมัน ในอนาคตอันใกล้ปริมาณกากสบู่ดำที่เหลือจากการสกัดน้ำมันเกิดขึ้นน่าจะมีมาก จึงได้มีการพยายามที่จะนำเอากากสบู่ดำกลับมาใช้ประโยชน์เพื่อลดปริมาณของของเสียที่เกิดขึ้น ดังนั้นการแก้ไขปัญหาจึงใช้หลักการการนำเอากากของเสียมาใช้ประโยชน์ใหม่โดยจะมีการพัฒนาวิธีการหลายอย่างเพื่อที่จะมาแปรสภาพของเสียชีวมวลมาเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ ซึ่งโดยส่วนมากจะนำไปใช้เป็นวัตถุดิบหรือใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมในกระบวนการต่างๆจะเป็นการกำจัดของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมอีกวิธีหนึ่งนอกจากการนำไปฝังกลบซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้อยู่แล้ว ในปัจจุบันได้มีความสนใจที่จะนำกากสบู่ดำที่เหลือจากอุตสาหกรรมเกษตรมาใช้ให้เกิดประโยชน์ในด้านพลังงาน ได้มีการนำเทคโนโลยีใหม่ๆ เพื่อนำมาพัฒนาใช้ในการหาแหล่งพลังงานอื่นเป็นการทดแทนการใช้น้ำมัน จึงได้มีการนำเอาเทคโนโลยีทางด้าน ไพโรไลซิสมาใช้ในการแปรสภาพของชีวมวลให้อยู่ในรูปของผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น ก๊าซ ของเหลวทาร์ และชาร์ ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการสามารที่จะนำไปใช้สำหรับเป็นเชื้อเพลิงในการสันดาปได้

โครงการวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายที่จะการแปรสภาพของชีวมวลด้วยการสลายตัวทางความร้อน โดยมุ่งที่จะสร้างแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ของการสลายตัวภายใต้ความร้อนโดยใช้ข้อมูลจากการวิเคราะห์ทางเทอร์โมกราฟีเมตริก (Thermogravimetric Analysis) และศึกษาปริมาณและองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการแปรสภาพกากสบู่ดำโดยกระบวนการไพโรไลซิส วัตถุดิบในงานวิจัยนี้ได้ใช้กากสบู่ดำ ซึ่งเป็นชีวมวลที่ได้จากอุตสาหกรรมเกษตร โดยในปัจจุบันเราใช้สบู่ดำในการสกัดน้ำมันเพื่อไปใช้ทำไบโอดีเซล และใช้กากที่เกิดขึ้นก็นำไปทำเป็นปุ๋ยทางการเกษตรและอื่นๆบางประการ เท่านั้น ดังนั้นการทำไพโรไลซิสของกากสบู่ดำ เพื่อให้ได้เป็นผลิตภัณฑ์ในด้านพลังงาน จัดได้ว่าเป็นการพัฒนาการหาแหล่งพลังงานทดแทน เมื่อพิจารณาจากสภาพการณ์ปัจจุบันการผลิตเชื้อเพลิงจากการไพโรไลซิสและแก๊สซิฟิเคชันมีศักยภาพช่วยลดปัญหาพลังงานในอนาคต รวมถึงมีความเป็นไปได้ในเชิงพาณิชย์ โดยสามารถเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่ยั่งยืนได้

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 ศึกษาลักษณะทางเคมีของกากสบู่ดำที่จะนำมาแปรสภาพ
- 1.2.2 สร้างแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ของการสลายตัวด้วยความร้อนของกากสบู่ดำ โดยใช้ข้อมูลจากการวิเคราะห์ทางเทอร์โมกราฟีเมตริก (Thermogravimetric Analysis)
- 1.2.3 ศึกษาปริมาณและองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการแปรสภาพกากสบู่ดำโดยกระบวนการไพโรไลซิสแบบขั้นเบดนิ่งที่สภาวะอุณหภูมิแตกต่างกัน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 การวิจัยในครั้งนี้กากสบู่ดำที่ใช้ในการทดลองมาจาก บริษัทผลิตน้ำมันสบู่ดำภายในประเทศ โดยจะทำการศึกษาต้นทุนการผลิตและความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ในการแปรรูปกากสบู่ดำ และการวิเคราะห์สมบัติของกากสบู่ดำโดยจะทำการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางเคมี (Proximate analysis) และวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (Ultimate analysis)
- 1.3.2 ค้นคว้ารวบรวมทฤษฎีและข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับกากสบู่ดำที่เหลือจากกระบวนการสกัดน้ำมันและกระบวนการสลายตัวด้วยความร้อน และกระบวนการไพโรไลซิส
- 1.3.3 ศึกษาขั้นตอนและภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราฟีเมตริก (Thermogravimetric Analysis) เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ของการสลายตัวภายใต้ความร้อนของกากสบู่ดำ โดยใช้โปรแกรม MATLAB 7.0 ในการคำนวณตัวแปรทางจลนพลศาสตร์
- 1.3.4 ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อปริมาณและองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบขั้นเบดนิ่ง ในช่วงอุณหภูมิ 500 700 และ 900 องศาเซลเซียส ในระดับห้องปฏิบัติการ

1.4 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย

- 1.4.1 ค้นคว้าข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ศึกษาทฤษฎีและหลักการของกระบวนการไพโรไลซิสแบบขั้นเบดนิ่ง
- 1.4.2 ออกแบบการทดลองและ วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของกากสับุดำ ได้แก่ ปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหยได้ และปริมาณคาร์บอนคงตัว
- 1.4.3 ทำการทดลองหาภาวะที่เหมาะสมในการทดลอง โดยการแปรค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ ได้แก่ อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการทดลอง
- 1.4.4 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง
- 1.4.5 เรียบเรียง ตรวจสอบ และจัดพิมพ์วิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

งานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ในด้านของการช่วยสนับสนุนและส่งเสริมให้มีการใช้พลังงานทดแทน ในรูปของพลังงานจากชีวมวลเพิ่มขึ้น โดยมีการนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและอุตสาหกรรมมาใช้ประโยชน์ในการแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงทำให้มีมูลค่าเพิ่มขึ้นในเชิงพาณิชย์ รวมถึงลดปัญหาสิ่งแวดล้อมอันเนื่องมาจากการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกออกสู่สภาวะแวดล้อม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แหล่งและประเภทชีวมวล

2.1.1 ชีวมวล

ชีวมวล หมายถึง วัสดุที่ได้จากสิ่งมีชีวิตที่สามารถเจริญเติบโตได้ขึ้นได้แก่ พืชและสัตว์ พลังงานที่อยู่ในชีวมวลจะเป็นพลังงานเคมี ซึ่งได้แก่การแปรรูปจากแหล่งพลังงานแสงอาทิตย์ โดยผ่านปฏิกิริยาทางเคมีที่ซับซ้อน ซึ่งเรียกว่า ปฏิกิริยาสังเคราะห์แสง (Photosynthesis) ซึ่งเป็นกระบวนการที่พืชใช้ในการเปลี่ยนแปลงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำให้เกิดเป็นโมเลกุลของสารอินทรีย์ต่างๆที่เผาไหม้ได้ (Probstein and Hicks, 1982)

2.1.2 องค์ประกอบสำคัญของชีวมวล

องค์ประกอบหลักที่สำคัญของชีวมวลคือ เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicelluloses) และลิกนิน (Lignin) ซึ่งโครงสร้างส่วนใหญ่จะประกอบด้วยน้ำตาลและส่วนด้านพอลิเมอร์ของน้ำตาลซึ่งเรียกว่า พอลิแซคคาไรด์ (Polysaccharides) แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สูตรโครงสร้างและน้ำหนักโมเลกุลของสารประกอบคาร์โบไฮเดรตและลิกนิน (Probstein and Hicks, 1982)

	สูตรโมเลกุล	มอนอเมอร์	น้ำหนักโมเลกุล
พอลิแซคคาไรด์		D-glucose	>100,000
เซลลูโลส	$(-C_6H_{10}O_5-)_n$	D-glucose	35,000-90,000
แป้ง	$(-C_6H_{10}O_5-)_n$	Various sugars	10,000-35,000
ไม้	-	Lignocellulose	5,000-10,000
เฮมิเซลลูโลส	$C_{36}H_{54}O_{23}$		
ลิกนิน	-	Hydroxyphenyl-propane	5,000-10,000

2.1.3 ส่วนประกอบของชีวมวล (ศูนย์ส่งเสริมพลังงานชีวมวล, 2547)

1. ความชื้น (Moisture) หมายถึง ปริมาณน้ำที่มีอยู่ชีวมวลส่วนใหญ่จะมีความชื้นค่อนข้างสูง เพราะเป็นผลผลิตทางการเกษตร ถ้าต้องการแปรรูปชีวมวลเป็นพลังงานโดยการเผาไหม้ชีวมวลควรมีความชื้นไม่เกินร้อยละ 50
2. ส่วนที่เผาไหม้ (Combustible substance) ได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ สารระเหย (Volatile matter) และคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) สารระเหย คือ ส่วนที่เผาไหม้ได้ง่ายจะสลายตัวเมื่อได้รับความร้อนในที่ที่ไม่มีอากาศ ดังนั้นชีวมวลที่มีค่าสารระเหยสูงแสดงว่าติดไฟได้ง่าย ส่วนคาร์บอนคงตัวเป็นของแข็งที่เป็นคาร์บอนที่เหลืออยู่
3. ขี้เถ้า (Ash) หมายถึง ส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้ชีวมวลส่วนใหญ่จะมีขี้เถ้าประมาณร้อยละ 1 - 3 ยกเว้น แกลบและฟางข้าวจะมีสัดส่วนขี้เถ้าประมาณร้อยละ 10 - 20 ซึ่งจะมีปัญหาการเผาไหม้และกำจัดพอสมควร

2.1.4 หลักการแปรรูปชีวมวล

การนำชีวมวลมาใช้เป็นประโยชน์ในรูปของพลังงานนั้นมีหลายวิธีซึ่งสามารถจะจัดแบ่งเป็นหมวดหมู่ ตามลักษณะกรรมวิธีที่ใช้ในการแปรรูปชีวมวลเป็นพลังงานได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ การแปรรูปทางเคมีความร้อน การแปรรูปทางเครื่องจักรกล และการแปรรูปทางชีววิทยา

1. การแปรรูปทางเคมีความร้อน (Thermochemical conversion)

การแปรรูปทางเคมีความร้อน หมายถึงการเพิ่มอุณหภูมิให้ความร้อนแก่ชีวมวล เพื่อแปรรูปโครงสร้างองค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลเดิมให้กลายเป็นโครงสร้างองค์ประกอบเคมีใหม่ในรูปของของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซ ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์เป็นเชื้อเพลิงเพื่อให้พลังงาน กระบวนการโดยทั่วไปที่ใช้ในการแปรรูปทางเคมีความร้อน มีดังนี้

ก. กระบวนการเผาไหม้โดยตรง (Direct combustion) เป็นการสันดาปเผาไหม้เชื้อเพลิงเพื่อให้เกิดพลังงานความร้อน เมื่อออกซิเจนทำปฏิกิริยาทางเคมีกับองค์ประกอบคาร์บอนและไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ในส่วนของประสิทธิภาพของกระบวนการเผาไหม้โดยตรง ขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นของเชื้อเพลิง

ข. กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) เป็นกระบวนการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง โดยให้ความร้อนในการเผาไหม้ชีวมวลด้วยอากาศหรือออกซิเจน เพื่อเปลี่ยนสภาพเชื้อเพลิงแข็งให้กลายเป็นก๊าซ ที่อุณหภูมิในช่วงประมาณ 800 - 1000 องศาเซลเซียส (Probstein

and Hicks, 1982) นอกจากนี้กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันสามารถผลิตก๊าซ เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงให้แก่เครื่องยนต์สันดาปภายใน โดยการเพิ่มอุณหภูมิทำความสะอาดก๊าซ และซูดหล่อเย็น เพื่อเพิ่มความหนาแน่นให้แก่ก๊าซก่อนที่จะป้อนเข้าสู่เครื่องยนต์โดยตรง

ค. กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) เป็นกระบวนการกลั่นสลายของพวกสารประกอบอินทรีย์ของชีวมวลโดยให้ความร้อนโดยไม่มีการใช้ออกซิเจนหรือในบรรยากาศของก๊าซเฉื่อยให้กลายเป็นผลิตภัณฑ์ในรูปของของแข็ง (ถ่านชาร์) ของเหลว (น้ำมันทาร์) และก๊าซเชื้อเพลิง (คาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน มีเทน และไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ) ปริมาณของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดที่ได้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของชีวมวล อัตราการให้ความร้อน และอุณหภูมิสุดท้ายของกระบวนการไพโรไลซิส โดยอุณหภูมิในช่วงประมาณ 400 - 700 องศาเซลเซียส (Probstein and Hicks, 1982)

2. การแปรสภาพทางเครื่องจักรกล (Extraction conversion)

กระบวนการแปรสภาพที่นิยมใช้จะจำแนกได้เป็น 2 วิธีคือ การใช้เครื่องจักรกล เช่น การสกัดโดยใช้สกรู (Screw pressing) และการใช้สารละลายช่วยในการสกัด (Solvent extraction) เป้าหมายทั้งสองวิธีเพื่อการผลิตน้ำมันบริสุทธิ์จากสิ่งเจือปนให้ได้ในปริมาณที่สูง และกากที่เหลือจะใช้เพื่อเป็นอาหารสัตว์

3. กระบวนการแปรรูปชีวมวลทางชีวเคมี (Biochemical conversion)

การแปรสภาพทางชีวเคมีจะเป็นการย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์เพื่อให้ได้ก๊าซหรือผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว โดยใช้จุลินทรีย์เพื่อใช้ในกระบวนการทางชีววิทยา ได้แก่ กระบวนการหมัก (Fermentation) และกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic digestion)

2.2 หลักการและกลไกการเกิดกระบวนการไพโรไลซิส

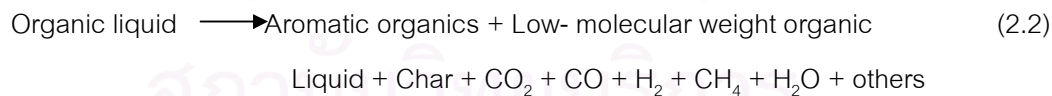
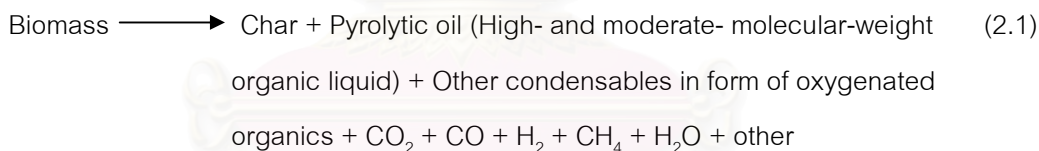
ไพโรไลซิสหรือการกลั่นสลาย (Destructive distillation) เป็นกระบวนการสลายตัวทางความร้อน (Thermal degradation) ที่ไม่สมบูรณ์ในภาวะที่ไม่มีออกซิเจน (ไม่มีการเติมน้ำ ออกซิเจน ไฮโดรเจน หรือคาร์บอนไดออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์) ที่มีการถ่ายเทความร้อนทางอ้อม ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ในรูปของแข็งคือชาร์ ของเหลวที่ควบแน่นได้คือทาร์และก๊าซ (Jones, 1978)

ปฏิกิริยาไพโรไลซิสต้องการความร้อนทั้งทางตรงจากการออกซิเดชันเพียงบางส่วนหรือจากปฏิกิริยาอื่นๆที่เกิดขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์และทางอ้อม ซึ่งในปัจจุบันการสลายตัวทางความร้อนในภาวะที่มีออกซิเจนน้อยหรือในที่มีการถ่ายเทความร้อนให้เกิดการไพโรไลซิสโดยตรง

จากการเผาไหม้บางส่วนของซาร์และก๊าซ จะเรียกได้ว่าเป็นกระบวนการไพโรไลซิส (Kohan and Barkodor, 1979)

กระบวนการแตกตัวด้วยความร้อน (Pyrolysis) ของชีวมวลเป็นกระบวนการแตกโครงสร้างโมเลกุลขนาดใหญ่ควบคู่ไปกับการแตกสลายหมู่ฟังก์ชันของชีวมวลเนื่องจากความร้อนที่ใช้ในกระบวนการทำให้เป็นก๊าซ (Gasification) การทำให้เป็นของเหลว (Liquefaction) และกระบวนการผลิตถ่านโค้ก (Coke-making process) เป็นต้น ก๊าซและของเหลวที่เป็นผลิตภัณฑ์ของกระบวนการไพโรไลซิสสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงหรือสารตั้งต้นของอุตสาหกรรมปิโตรเคมีได้ ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จะประกอบด้วยส่วนของแข็งที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบเป็นส่วนใหญ่ เรียกว่า ถ่านซาร์ ส่วนผลิตภัณฑ์อื่นๆ ได้แก่ ของเหลวและก๊าซ ปริมาณผลิตภัณฑ์ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ มากมาย ตัวอย่างเช่น อุณหภูมิ อัตราการให้ความร้อน บรรยากาศ ความดัน ขนาดของอนุภาคของชีวมวล เวลาที่ใช้และชนิดของเครื่องปฏิกรณ์ เป็นต้น ทางด้านน้ำหนักส่วนที่หายไปคือการเปลี่ยนไปเป็นก๊าซ (CH_4 , CO , CO_2 , H_2O , สารประกอบไฮโดรคาร์บอนเบาและอื่นๆ) และน้ำมันที่ระเหยซึ่งมีสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง

เมื่อชีวมวลเกิดการสลายตัวทางความร้อนจะเกิดอนุกรมของปฏิกิริยาต่างๆ ได้ก๊าซที่มีค่าความร้อนปานกลาง น้ำมันที่มีองค์ประกอบซับซ้อนและถ่านซาร์ ซึ่งปฏิกิริยาของกระบวนการไพโรไลซิสของชีวมวลแสดงได้ดังสมการที่ 2.1 และ 2.2



ไพโรไลซิสแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การไพโรไลซิสแบบช้าและเร็ว การไพโรไลซิสแบบช้าจะเกิดสมดุลในบริเวณช่วงแคบ โดยอัตราการให้ความร้อนจะช้าพอที่จะทำให้เกิดความสมดุลตามอุณหภูมิ ส่วนการไพโรไลซิสแบบรวดเร็วจะไม่คำนึงถึงปฏิกิริยาที่เกิดในช่วงการให้ความร้อน

2.2.1 กลไกการเกิดไพโรไลซิส (Pyrolysis mechanisms)

กระบวนการไพโรไลซิส สามารถแบ่งประเภทตามอัตราการให้ความร้อนชีวมวลได้ 2 กระบวนการ คือ กระบวนการไพโรไลซิสอย่างช้า (Slow pyrolysis) และกระบวนการไพโรไลซิสอย่างรวดเร็ว (Fast pyrolysis) ซึ่งกระบวนการทั้งสองมีผลต่อการแตกออกของพันธะเคมีของโครงสร้างที่ซับซ้อนของชีวมวล และมีความสัมพันธ์กับปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น

1. กระบวนการไพโรไลซิสอย่างช้า (Slow pyrolysis) เป็นกระบวนการถ่ายเทความร้อนให้แก่ชีวมวลอย่างช้าๆ ในช่วงระยะเวลามากกว่า 5 นาทีขึ้นไป ในช่วงอุณหภูมิ 400 - 600 องศาเซลเซียส และที่อัตราการให้ความร้อนไม่เกิน 10 องศาเซลเซียสต่อวินาที (Beenacker, 1993) ซึ่งอัตราการให้ความร้อนสามารถวัดได้โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ทางความร้อน (Thermal analytical instrument) เช่น ทีจีเอ (TGA, Thermal gravimetric analysis) และ ดีทีเอ (DTA, Differential Thermal analysis) เป็นต้น โดยปฏิกิริยาไพโรไลซิสที่เกิดขึ้นเมื่อให้ความร้อนแก่ชีวมวลอย่างช้าจะสามารถจำแนกได้ดังนี้

- ที่อุณหภูมิ 20 - 100 องศาเซลเซียส ชีวมวลจะดูดซับความร้อนและทำให้แห้ง โดยความชื้นในชีวมวลจะถูกทำให้กลายเป็นไอน้ำ จนกระทั่งชีวมวลถูกทำให้แห้ง
- ที่อุณหภูมิ 100 - 250 องศาเซลเซียส เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของชีวมวลให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และกรดอะซิติก
- ที่อุณหภูมิ 250 - 500 องศาเซลเซียส เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของชีวมวลให้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน และมีเทน รวมทั้งของเหลวทาร์ (Liquid tar)
- ที่อุณหภูมิสูงกว่า 500 องศาเซลเซียส เป็นปฏิกิริยาการเกิดชาร์ (Char)

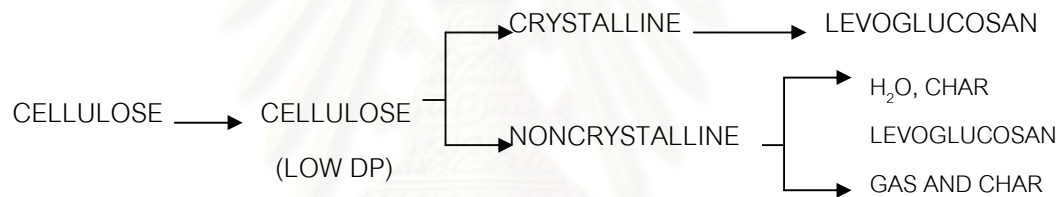
2. กระบวนการไพโรไลซิสอย่างรวดเร็ว (Fast pyrolysis) เป็นกระบวนการให้ความร้อนแก่ชีวมวลอย่างรวดเร็ว ในช่วงระยะเวลาสั้นๆ ที่อุณหภูมิ 600 - 1,000 องศาเซลเซียส และอัตราการให้ความร้อนในช่วง 10 - 100 องศาเซลเซียสต่อวินาที และก๊าซที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีจะถูกทำให้เย็นลงอย่างรวดเร็ว การเกิดไพโรไลซิสอย่างรวดเร็วมักจะทำให้ผลผลิตที่มีค่าความร้อนสูง

ไพโรไลซิสสามารถเข้าใจได้โดยศึกษาพฤติกรรมขององค์ประกอบแต่ละตัวที่มีอยู่ภายในชีวมวล ได้แก่ พอลิเมอร์ของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งแต่ละชนิดมีโครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกันทำให้ได้ปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ต่างกัน นอกจากนี้อาจศึกษาถึงสารต่างๆ ที่แยกได้จากปฏิกิริยา เช่น ไฮโดรคาร์บอน น้ำมันทาร์ ก๊าซ เป็นต้น ส่วนการกระจายของผลิตภัณฑ์ต่างๆ สามารถควบคุมได้ถ้าทราบถึงกลไกและจลนพลศาสตร์ของการ

เกิดปฏิกิริยา กลไกการเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสขององค์ประกอบต่างๆ ในชีวมวลดังกล่าว สามารถสรุปได้ดังนี้

ก. กลไกของการเกิดไพโรไลซิสของเซลลูโลส (Cellulose pyrolysis)

การเกิดไพโรไลซิสของเซลลูโลสนั้นเกิดขึ้นจะทำให้มีการแตกพันธะไกลโคซิดิก (Glycosidic) ที่บริเวณขอบเขตระหว่างโครงสร้างรูปผลึกและอสัณฐานด้วยอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับศูนย์ ทำให้อัตราการพอลิเมอไรเซชันลดลงอย่างรวดเร็วจาก 1000 หน่วย เหลือ 200 หน่วย ในโครงสร้างทั้งที่เป็นรูปผลึกและอสัณฐาน สายของพอลิเมอร์จะไม่จับตัวเข้าคู่กันซึ่งในโครงสร้างเซลลูโลสรูปผลึกจะมีการเปลี่ยนรูปไปเป็นพวกลิวโกลูโคซาน (Levoglucosan) ส่วนในโครงสร้างอสัณฐานจะมีการแตกของสายเซลลูโลสเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน ทำให้เกิดการแยกตัวของอะตอมไฮโดรเจนจากอะตอมของคาร์บอน ทำให้มีการดึงอะตอมไฮโดรเจนจากสายพอลิเมอร์ข้างเคียง ส่งผลทำให้เกิดปฏิกิริยาเชื่อมต่อระหว่างโมเลกุล (Cross link) ได้เป็นผลิตภัณฑ์จำพวกถ่านชาร์ (Char) ดังแสดงในรูปที่ 2.1



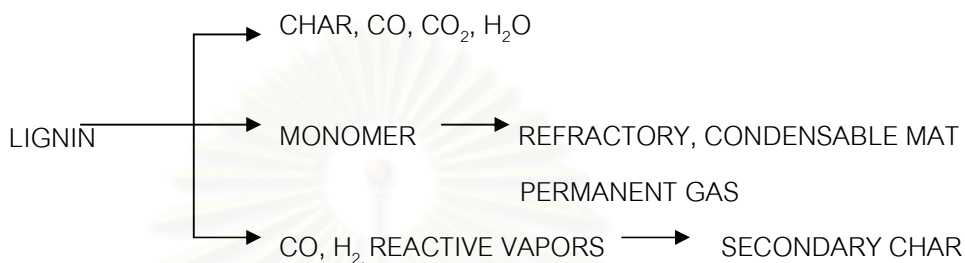
รูปที่ 2.1 การเกิดไพโรไลซิสของเซลลูโลสที่อุณหภูมิต่ำ (Antal, 1982)

ข. กลไกของการเกิดไพโรไลซิสของเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose pyrolysis)

การไพโรไลซิสเฮมิเซลลูโลสหรือพอลิเมอร์ของน้ำตาลจะได้ผลิตภัณฑ์ในรูปของก๊าซมากกว่า และน้ำมันที่น้อยกว่าเซลลูโลสในช่วงอุณหภูมิเดียวกัน เมื่อพิจารณาถึงปฏิกิริยาที่ทำให้ได้สารที่สามารถควบแน่นได้จะพบว่า มีลักษณะเช่นเดียวกับเซลลูโลส โดยกลไกของการเกิดไพโรไลซิสของเฮมิเซลลูโลสจะมีการสลายตัว 2 ขั้นตอน เริ่มจากการดีพอลิเมอไรเซชันไปเป็นพวกลิวโกลูโคซานได้ แล้วตามด้วยการสลายตัวไปเป็นสารระเหยได้ ในช่วงแรกจะมีการแตกสลายพันธะระหว่างคาร์บอนอะตอมและออกซิเจนอะตอมไปเป็นเพนโตซาน (Pentosan) ที่จะไปสู่การเกิดกรดอะซิติก ฟอรัลดีไฮด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรเจน ที่อาจมีผลกระทบต่อสารไพโรไลซิสของเซลลูโลสและลิกนิน

ค. กลไกของการเกิดไพโรไลซิสของลิกนิน (Lignin pyrolysis)

ลิกนินเป็นโมเลกุลใหญ่ที่มีโครงสร้างต่างๆ มาประกอบรวมกันจึงทำให้มีกลไกในการเกิดปฏิกิริยาได้หลายทางที่จะได้สารประกอบอินทรีย์ที่สามารถควบแน่นได้ โดยการเกิดปฏิกิริยาที่สำคัญแสดงได้ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งชนิดของชีวมวล และภาวะที่ใช้ในการทดลองจะส่งผลต่อการไพโรไลซิส



รูปที่ 2.2 การเกิดไพโรไลซิสของลิกนิน (Antal, 1982)

อิทธิพลของพันธะไฮโดรเจนจะมีผลต่อการทนความร้อนขององค์ประกอบลิกนิน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสในช่วงอุณหภูมิต่ำจะเป็นปฏิกิริยาการดึงน้ำออก (Dehydration) และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นก็จะทำให้เกิดมอนอเมอร์ขึ้น และนอกจากนี้การให้ความร้อนอัตราเร็วสูงและที่สภาวะความดันต่ำจะมีผลทำให้เกิดมอนอเมอร์เพิ่มขึ้นอีกด้วย

2.2.2 ผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ต่อการไพโรไลซิส

การไพโรไลซิสส่วนใหญ่จะสนใจถึงอัตราและปริมาณของสารระเหยที่ได้ การกระจายของผลิตภัณฑ์ต่างๆรวมถึงภาวะในการทดลอง โดยตัวแปรทางเคมีที่สำคัญคือธาตุองค์ประกอบของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ในชีวมวลที่มีสมบัติแตกต่างกันไป นอกจากนี้ตัวแปรพื้นฐานทางกายภาพที่สำคัญได้แก่ อุณหภูมิ เวลา และอัตราการให้ความร้อน ซึ่งตัวแปรเหล่านี้จะมีผลกระทบต่อไพโรไลซิสดังจะอธิบายต่อไปนี้

ก. องค์ประกอบของชีวมวล

ชีวมวลเป็นวัสดุซับซ้อนไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งจะมีโครงสร้างและองค์ประกอบแตกต่างกันไปตามส่วนต่างๆ และชนิดของพืชนั้น สารเหล่านี้แต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติทางความร้อนและก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ต่างกันไป โดยที่อุณหภูมิสูงกว่า 300 องศาเซลเซียส จะมีการแตกตัวของโพลีแซคคาไรด์ที่สายเชื่อมมัลโทสิดิก (Glucosidic linkage) ทำให้ได้น้ำมันที่ประกอบด้วย

อนุพันธ์ของแอนไฮโดรซุการ์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และซาร์จำนวนเล็กน้อย ในขณะที่ลิกนินส่วนใหญ่จะควบแน่นเป็นซาร์และสารประกอบฟีนอลบางส่วน ความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของชีวมวลจะเป็นสิ่งกีดขวางการใช้ประโยชน์ทางเคมี เนื่องจากสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากแต่ละองค์ประกอบจะได้น้อย ซึ่งจะมีผลกระทบต่อปริมาณซาร์และเชื้อเพลิงอื่นๆ ที่ได้จากการไพโรไลซิสโดยตรง

ข. อุณหภูมิในการไพโรไลซิส

ช่วงอุณหภูมิของการไพโรไลซิสจะมีผลกระทบต่อทั้งปริมาณและองค์ประกอบของสารระเหยที่ได้ โดยการไพโรไลซิสแบ่งได้เป็น 3 ชั้นคือ ชั้นแรกที่อุณหภูมิระหว่าง 200 - 300 องศาเซลเซียส จะมีการปลดปล่อยสารระเหยเล็กน้อยและก๊าซที่ได้จะประกอบด้วยออกไซด์ของคาร์บอนและน้ำเป็นส่วนใหญ่ ชั้นที่สองอุณหภูมิระหว่าง 300 - 500 องศาเซลเซียส จะมีการสลายตัวที่ปล่อยสารระเหยออกมาประมาณสามในสี่ของสารระเหยทั้งหมด ชั้นที่สาม อุณหภูมิระหว่าง 500 - 800 องศาเซลเซียส จะมีการไล่ก๊าซออกอีกเป็นครั้งที่สอง พร้อมกับมีการเปลี่ยนแปลงของซาร์ รวมไปถึงการปลดปล่อยก๊าซที่ไม่สามารถควบแน่นได้ซึ่งส่วนใหญ่เป็นพวกไฮโดรเจน

ค. อัตราการให้ความร้อน

อัตราการให้ความร้อนเป็นตัวแปรที่สำคัญ ต่อปริมาณและองค์ประกอบของสารระเหยที่ได้จากการไพโรไลซิส เช่น เมื่ออุณหภูมิของชีวมวลลดลงจะเสียดึงนำไปให้ความร้อนอย่างรวดเร็ว จะทำให้ได้ปริมาณของผลิตภัณฑ์สารระเหยได้ มีจำนวนมากกว่าผลิตภัณฑ์ในส่วนที่ระเหยไม่ได้ และการให้ความร้อนอย่างรวดเร็วจนถึงอุณหภูมิของการสลายตัวของชีวมวลจะทำให้ได้ปริมาณของเหลวทาร์มีจำนวนมากขึ้นด้วย ทั้งนี้เนื่องจากชีวมวลถูกเปลี่ยนเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเหลวได้ง่ายขึ้น

2.2.3 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส (ชูศักดิ์, 2536)

เมื่อชีวมวลผ่านกระบวนการไพโรไลซิสจะมีการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการระเหยไปของน้ำและสารระเหยรวมทั้งก๊าซต่างๆ ที่เกิดขึ้นด้วย องค์ประกอบของสารอินทรีย์และอนินทรีย์เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งด้านกายภาพและเคมี ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นผลรวมของการสลายตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน โดยองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้จะถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีและเครื่องแมสสเปกโตรมิเตอร์ ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้มี 3 ประเภทคือ

ก. ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง มีคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบหลัก เรียกว่าถ่านซาร์ สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงหรือผลิตสารเคมีอื่นได้อีก เช่น ถ่านกัมมันต์ แนฟทาลิน

แอนทราซีน และสารประกอบไฮยาโนเจน แต่ส่วนใหญ่จะนำมาใช้เป็นวัสดุเชื้อเพลิงไร้ควัน เพื่อใช้ในบ้านเรือนและอุตสาหกรรมขนาดเล็กหรือกลางได้ดี เช่น ใช้เป็นเชื้อเพลิงให้หม้อไอน้ำ การเผาอิฐ การอบแห้ง ผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร โรงงานผลิตหินปูนและซีเมนต์ หรือใช้ในโรงงานถลุงเหล็ก และทองแดงเพราะไม่ก่อให้เกิดปัญหามลภาวะต่อสภาพแวดล้อมจากกลิ่น หรือควันจากพวกสารระเหยและสารประกอบจำพวกไนโตรเจนและกำมะถัน

ข. ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว ประกอบด้วยน้ำและสารประกอบที่ละลายน้ำ อีกส่วนหนึ่งจะเป็นน้ำมันทาร์ ซึ่งองค์ประกอบของน้ำมันทาร์จัดเป็นสารประกอบที่ซับซ้อนของไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้างส่วนมากเป็นพวกวงแหวนแนฟทาลีนเชื่อมด้วยหมู่เอทิลีน โมเลกุลของน้ำมันทาร์มีองค์ประกอบของธาตุคาร์บอนตั้งแต่ C_5 - C_6 ประกอบเป็นโครงสร้างของสารเคมีต่างๆ อาจมีมากกว่า 200 ชนิด แบ่งออกได้ตามอุณหภูมิที่ใช้ในการกลั่นเป็น 5 ส่วน คือ

- น้ำมันเบา (Light oil) ช่วงอุณหภูมิน้อยกว่า 200 องศาเซลเซียส ได้แก่ เบนซีน โทลูอีน เอทิลเบนซีน และไซลีน
- น้ำมันช่วงกลาง (Middle oil) ช่วงอุณหภูมิ 200 - 250 องศาเซลเซียส ได้แก่ ฟีนอล ไพรดีน
- น้ำมันช่วงหนัก (Heavy oil) ช่วงอุณหภูมิ 250 - 300 องศาเซลเซียส ได้แก่ ไดเมทิล แนฟทาลีน
- น้ำมันแอนทราซีน (Anthracene) ช่วงอุณหภูมิ 300 - 350 องศาเซลเซียส ได้แก่ ฟลูออรีน ฟีนอล์ฟีน
- พิตช์ (Pitch) ช่วงอุณหภูมิมากกว่า 350 องศาเซลเซียส ได้แก่ น้ำมันหนัก บางประเภทจำพวกไข (Red wax)

ค. ผลิตภัณฑ์ที่เป็นก๊าซ เป็นของผสมระหว่างก๊าซอินทรีย์และอนินทรีย์ โดยก๊าซอินทรีย์ ได้แก่ คาร์บอนมอนนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน และแอมโมเนีย ส่วนก๊าซอินทรีย์ ได้แก่ มีเทน อีเทน เอทิลีน เป็นต้น โดยก๊าซส่วนใหญ่จะเป็นก๊าซไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนนอกไซด์ และมีเทน ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นก๊าซเชื้อเพลิงในกระบวนการเผาไหม้เพื่อให้ความร้อน หรือการผลิตไฟฟ้า ก๊าซที่เผาไหม้ได้คือ คาร์บอนไดออกไซด์ ไนโตรเจน ออกซิเจน และสารประกอบไฮโดรคาร์บอน นอกจากนี้ยังมีก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และแอมโมเนีย ในปริมาณน้อย

2.2.4 ประเภทของเตาผลิตก๊าซในกระบวนการไพโรไลซิส

เตาที่ใช้ในการผลิตพลังงานจากชีวมวลมีหลายประเภท ประเภทของกระบวนการไพโรไลซิสอาจแยกออกตามลักษณะการให้ความร้อนหรือชนิดของ Gasifying medium เช่นไอน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ หรือแยกออกไปตามปฏิกิริยา อุณหภูมิ คุณสมบัติก๊าซ หรือกากของแข็งที่เหลือ เตาปฏิกรณ์ที่ใช้ในการผลิตพลังงานจากชีวมวลมีหลายประเภท และถูกเรียกชื่อต่างๆ กันตามลักษณะของเตาปฏิกรณ์ที่เกิดขึ้นภายใน และวัตถุประสงค์ของการผลิตผลิตภัณฑ์เพื่อใช้เป็นพลังงาน ยกตัวอย่างเช่น เตาที่ใช้ในการผลิตก๊าซเป็นหลัก โดยทั่วไปจะถูกเรียกว่า “เตาผลิตก๊าซ” หรือ เตาแก๊สซิฟายเออร์ (Gasifier) สำหรับเตาไพโรไลซิส (Pyrolysis furnace) จะมีลักษณะคล้ายคลึงกับเตาแก๊สซิฟายเออร์ แต่แตกต่างที่วัตถุประสงค์ของการใช้งาน กล่าวคือเตาไพโรไลซิสไม่ได้มุ่งเฉพาะการผลิตก๊าซเพื่อใช้เป็นพลังงานเพียงอย่างเดียว แต่ยังมีจุดมุ่งหมายในการผลิตถ่านชาร์และน้ำมันทาร์ เพื่อนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงด้วยการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงที่ดีควรมีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนของก๊าซติดไฟได้สูง ปริมาณน้ำมันทาร์จะต้องถูกเผาไหม้ภายในเตาหรือถูกกำจัดออกมากที่สุด และสารเชื้อเพลิงแข็ง คือถ่านที่ออกมากับเถ้าและปริมาณเถ้าที่ออกมาควรมีน้อยที่สุด สามารถแบ่งประเภทของเตาผลิตก๊าซในกระบวนการไพโรไลซิสออกเป็นระบบผลิตก๊าซ 3 แบบคือ

1. ระบบผลิตก๊าซแบบเบดนิ่ง (Fixed bed)

ระบบเบดนิ่งเป็นแบบที่มีการนำมาใช้ผลิตก๊าซเชื้อเพลิงตั้งแต่สมัยแรกๆ ระบบชั้นเบดนิ่งเชื้อเพลิงภายในเบดจะเคลื่อนที่อย่างช้าๆ จากบนลงล่างมายังเมื่อใส่วัสดุดิบในส่วนของการอบแห้ง เมื่อมีการสัมผัสกับก๊าซร้อนที่ลอยขึ้น จะเกิดทำให้สารระเหยในวัสดุดิบจะระเหยออกมาแตกตัวให้ก๊าซไฮโดรเจน มีเทน และไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลหนักอื่นๆ ลอยไปปะปนกับก๊าซผลิตภัณฑ์ และเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนทั้งออกซิเดชันและรีดักชัน ส่วนที่ไม่เกิดปฏิกิริยาที่เหลือจะถูกปล่อยออกมาทางส่วนล่างของเบด ลักษณะหรือองค์ประกอบที่สำคัญของระบบนี้คือ

- การป้อนชีวมวลและก๊าซจะเป็นลักษณะสวนทางกัน (Counter Current) เป็นส่วนมาก แต่ก็มีระบบที่เป็นไหลทางเดียวกัน และไหลตามขวางบ้าง ขนาดของชีวมวลที่ป้อนเข้าสู่ระบบมีขนาดใหญ่กว่าทุกระบบคือประมาณ 1/4 นิ้วขึ้นไป ทำให้ค่าจ่ายในส่วนของการเตรียมวัสดุดิบถูกกว่าเมื่อเทียบกับแบบอื่น
- เถ้า (Ash) ออกจากระบบในลักษณะเป็นอนุภาคส่วนมากของเถ้าที่มีจะออกทางด้านล่างของตัวเครื่องปฏิกรณ์แต่ก็มีเถ้าลอย (Fly ash) บางส่วนออกทางด้านบนของเตาโดยรวมกับก๊าซที่ผลิตได้
- อุณหภูมิของก๊าซที่ออกจากระบบประมาณ 500 – 550 องศาเซลเซียส

หากแบ่งตามทิศทางการไหลของอากาศ สามารถแบ่งชนิดของเตาปฏิกรณ์ออกเป็น 3 แบบ คือ

ก. เตาแบบก๊าซไหลขึ้น (Updraft)

เตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงชนิดนี้ โดยทั่วไปแล้วจะถูกสร้างขึ้นเพื่อผลิตก๊าซเชื้อเพลิงที่เรียกว่า “ก๊าซชีวมวล” เป็นผลิตภัณฑ์หลัก ส่วนถ่านและน้ำมันทาร์ที่ได้เป็นผลิตภัณฑ์รอง หลักการทำงานของเตาแบบก๊าซไหลขึ้นจะป้อนอากาศหรือไอน้ำเข้าทางด้านล่างที่มีการสันดาป (Hearth zone) ลักษณะของเตาชนิดนี้จะควบคุมก๊าซที่ผลิตได้จากบริเวณเผาไหม้ (Combustion zone) ซึ่งจะประกอบไปด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก จะผ่านไปยังส่วนของรีดักชัน (Reduction zone) เข้าไปทำปฏิกิริยาเป็นก๊าซเชื้อเพลิง (ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน มีเทน และไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ) ก๊าซที่ผลิตได้นี้จะไหลผ่านส่วนของชั้นไฟโรไลซิส และส่วนของการอบแห้ง (Drying zone) ตามลำดับ ดังแสดงดังในรูปที่ 2.3 เพื่อกรองละอองทาร์ ผุ่น และสิ่งเจือปนออกจากก๊าซ

ข. เตาแบบก๊าซไหลลง (Downdraft)

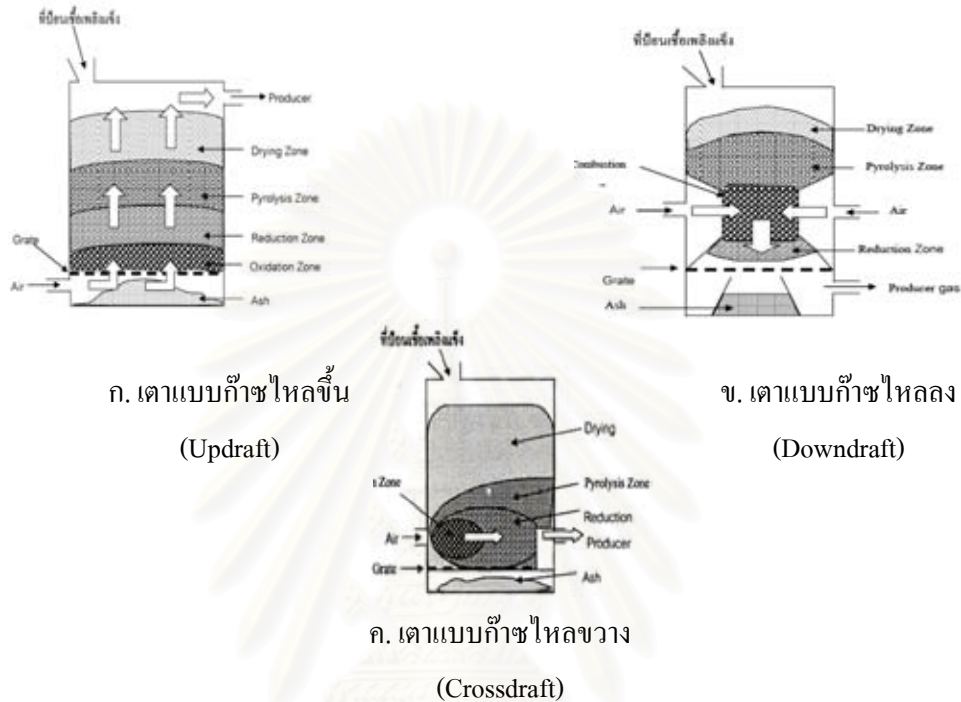
ระบบนี้ได้รับการพัฒนาโดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อเปลี่ยนทาร์ (Tar) ที่เกิดขึ้นในเตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงไปเป็นก๊าซ ซึ่งจะมีความสำคัญมาก ลักษณะการทำงานของเตาชนิดนี้ ชีวมวลจะถูกป้อนเข้าเตาทางด้านบน โดยจะไหลผ่านชั้นทำแห้งเพื่อไล่ความชื้นและลงสู่ชั้นไฟโรไลซิสเพื่อกลั่นสลายชีวมวลเป็นผลิตภัณฑ์ก๊าซ ไอสารระเหย และถ่าน จากนั้นไหลลงสู่ชั้นรีดักชันอยู่ด้านล่างแสดงดังในรูปที่ 2.3

เตาดังกล่าวทำงานมีประสิทธิภาพสูง มีรูปร่างเป็นกรวยอยู่ภายในส่วนของการสันดาปข้างล่างทางเข้าของอากาศ ส่วนคอดเข้าจะเป็นส่วนที่ช่วยเพิ่มความเร็วของอากาศและทำให้คุณสมบัติของการทำงานสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้นจึงเป็นการง่ายที่เปลี่ยนน้ำมันดินไปเป็นก๊าซทำให้ระบบเตาแบบก๊าซไหลลง ได้รับการพัฒนาสำหรับการใช้กับไม้และเศษวัสดุ ก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้มีไฮโดรเจนสูงกว่าใช้ถ่านไม้ หรือถ่านหิน ประโยชน์ที่สำคัญของระบบนี้ก็คือสามารถใช้วัสดุที่ไม่ได้ผ่านการคาร์บอนไนซ์และสามารถลดน้ำมันดินในผลิตภัณฑ์ได้ และเป็นระบบที่ให้เชื้อเพลิงก๊าซสม่ำเสมอดีกว่าระบบเตาแบบก๊าซไหลขึ้น

ค. เตาแบบก๊าซไหลขวาง (Cross draft)

ในกรณีนี้จะเป็นการไหลของเชื้อเพลิงและอากาศที่ได้จะขวางกับตัวเตา แต่ก็ไม่จำเป็นต้องขนานในแนวอนนเสมอ เตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบนี้จะทำงานที่อุณหภูมิสูงมาก มีบริเวณเผาไหม้และส่วนรีดักชันจำกัด โดยใช้ท่ออากาศตรงทางเข้าที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก อุณหภูมิจะสูงถึง 2000 องศาเซลเซียส จึงต้องมีน้ำหล่อเย็นอยู่ข้างนอก แสดงดังรูปที่ 2.3 เตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงนี้มีลักษณะพิเศษคือ โครงสร้างเบา เนื่องจากความต้องการพื้นที่ในการเผาไหม้

น้อยโดยการอัดอากาศช่วยในการเผาไหม้ บริเวณแถบกลางเตาก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้จะไหลทำปฏิกิริยาในชั้นรีดักชันและได้ก๊าซเชื้อเพลิงผ่านชั้นไพโรไลซิส ก่อนที่จะออกจากเตาช่วงบริเวณกลางเตา แสดงดังรูป 2.3



รูปที่ 2.3 ลักษณะเตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบต่างๆ (Elliot, 2001)

2. ระบบผลิตก๊าซแบบฟลูอิดไคซ์เบด (Fluidized Bed)

เทคนิคทางด้านฟลูอิดไคซ์เบดได้มีการนำมาประยุกต์ใช้กับกระบวนการต่างๆ มากมายในอุตสาหกรรมเช่น กระบวนการอบแห้ง (Drying) กระบวนการเผาไหม้(Combustion) กระบวนการดูดซับ (Absorption) เป็นต้น ทั้งนี้เพราะฟลูอิดไคซ์เบดมีข้อดีหลายประการ เมื่อใช้ทำการเปรียบเทียบกับระบบอื่น เช่น การควบคุมสามารถทำได้ในระบบอัตโนมัติได้ทั้งระบบการถ่ายเทมวลสาร และถ่ายเทความร้อนทั่วถึงสม่ำเสมอภายในเบด ทำให้การเกิดปฏิกิริยาเป็นไปอย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอ แต่ระบบการผลิตก๊าซจากชีวมวลในฟลูอิดไคซ์เบดจะมีปัญหาเรื่องการควบคุมอุณหภูมิให้เกิดบริเวณต่างๆ เพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ทำได้ยาก จึงทำให้ประสิทธิภาพของระบบที่ยังไม่มีการพัฒนายังต่ำกว่าศักยภาพที่ระบบจะสามารถทำได้ถ้าหากพัฒนาใช้เทคนิคในการออกแบบช่วย เช่น ใช้ระบบฟลูอิดไคซ์เบดหลายชั้น (Multistage) หรือหลายคอลัมน์ (Multi-column) ก็จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบได้อีกลักษณะหรือองค์ประกอบที่สำคัญของระบบนี้คือ

- การป้อนชีวมวลและก๊าซจะเป็นแบบสวนทางกัน ส่วนของการไหลของก๊าซจะต้องมีความเร็วสูงพอ หรือมากกว่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิไดซ์ ซึ่งโดยทั่วไปจะต้องมากกว่า 1.5 เท่าจึงจะทำให้ชีวมวลลอยตัวอยู่ในอุปกรณ์ได้เป็นอย่างดี
- ขนาดของอนุภาคชีวมวลจะต้องมีขนาดเล็กมากพอที่จะทำให้อัตราการป้อนก๊าซไม่มากเกินไป (ความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิไดซ์จะขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคโดยถ้าอนุภาคยิ่งเล็กความเร็วของอากาศที่จะทำให้เกิดฟลูอิไดซ์ก็จะต่ำลง) ทำให้ควบคุมการเกิดปฏิกิริยาได้ดี ระบบนี้จึงมีค่าใช้จ่ายสูงเพราะต้องทำการย่อยก่อนให้สม่่าเสมอและเล็กลง
- ถ้ำจะออกจากเครื่องปฏิกรณ์ในลักษณะมีขนาดเล็กลงเมื่อเทียบกับขนาดชีวมวลที่ป้อนเข้าบางส่วนของถ้ำที่มีขนาดเล็กมากๆจะออกทางด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์ไปพร้อมกับก๊าซ ซึ่งจะต้องทำการแยกต่อไป ส่วนถ้ำที่มีอนุภาคขนาดใหญ่จะถูกนำออกทางด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ได้
- อุณหภูมิของก๊าซที่ออกจากเครื่องปฏิกรณ์จะประมาณ 800 – 900 องศาเซลเซียส

3. ระบบผลิตก๊าซแบบ Entrained Bed

เป็นระบบที่มีการใช้กันมานานแล้วระบบหนึ่งประสิทธิภาพสูงความคุมได้ดีกว่าระบบเบตนิ่ง (Fixed Bed) ลักษณะหรือองค์ประกอบที่สำคัญของระบบนี้คือ

- การป้อนชีวมวลและก๊าซจะป้อนไปพร้อมๆกันในทิศทางเดียวกันส่วนมากจากด้านบนลงมาด้านล่างของเครื่องอุปกรณ์ ชีวมวลที่ใช้จะต้องมีขนาดเล็กเป็นผง (Powdered Form) ดังนั้นจึงทำให้ระบบนี้มีค่าใช้จ่ายในการเตรียมวัตถุดิบสูงมาก เมื่อเทียบกับแบบอื่นๆ ที่กล่าวมาแล้ว
- ถ้ำที่ออกจากระบบจะเป็นแบบถ้ำหลอมละลาย เป็นถ้ำที่มีคุณสมบัติในการนำไปใช้ประโยชน์ได้มากกว่าถ้ำระบบอื่น ด้านของอุณหภูมิของก๊าซที่ออกจากเครื่องปฏิกรณ์จะสูงประมาณ 1,260 - 1,540 องศาเซลเซียส

2.3 ปฏิริยาเคมีที่เกิดขึ้นภายในเตาไพโรไลซิส

ปฏิริยาเคมีที่เกิดขึ้นภายในเตาแบบไพโรไลซิส สามารถจำแนกออกเป็น 2 ขั้นตอนคือ

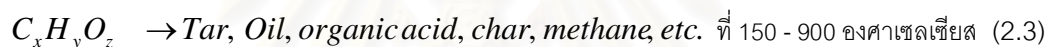
2.3.1 ปฏิริยาในชั้นอบแห้ง (Drying zone)

ชั้นอบแห้งของเตาไพโรไลซิส จะเป็นชั้นปฏิริยาทำแห้งของชีวมวลเพื่อไล่ความชื้นออก ปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อการทำแห้งคือ อุณหภูมิ ยิ่งอุณหภูมิสูงจะส่งผลให้อัตราการทำแห้งก็จะยิ่ง

เกิดเร็วขึ้น แต่อย่างไรก็ตามอุณหภูมิและความเร็วการไหลของก๊าซผ่านชีวมวลจะมีผลต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้ รวมทั้งระบบการควบคุมเตาถ้าหากใช้อุณหภูมิต่ำไป จะมีผลทำให้เกิดการควบแน่นเป็นแผ่นกั้นการไหลของก๊าซในชั้นทำแห้ง นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นๆ เช่น ความหนาของชั้นทำแห้ง คุณสมบัติของชีวมวลที่ใช้เช่น รูปทรง ขนาด และโครงสร้างองค์ประกอบทางเคมี

2.3.2 ปฏิกริยาในชั้นไพโรไลซิส (Pyrolysis zone)

หลังจากที่ผ่านชั้นทำแห้งแล้ว วัสดุจะเคลื่อนลงสู่ชั้นไพโรไลซิส และเกิดปฏิกริยาการกลั่นสลายที่อุณหภูมิมากกว่า 200 องศาเซลเซียส องค์ประกอบพวกลิกโนเซลลูโลส (Lignocelluloses) ในวัสดุจะถูกกลั่นสลายได้ก๊าซ ของเหลวทาร์ และถ่าน ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยเช่น อัตราการให้ความร้อน อุณหภูมิสุดท้าย และระยะเวลาในการทำปฏิกริยา รวมทั้งขนาดอนุภาค ความชื้น ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นในชั้นไพโรไลซิสจะแสดงดังสมการต่อไปนี้



ในการศึกษาปฏิกริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการไพโรไลซิส (Stout, 1981) ได้รวบรวมสรุปเกี่ยวกับปัจจัยการควบคุมที่มีผลต่อการเกิดผลิตภัณฑ์ถ่านชาร์ ก๊าซ และของเหลวทาร์ ได้ดังนี้

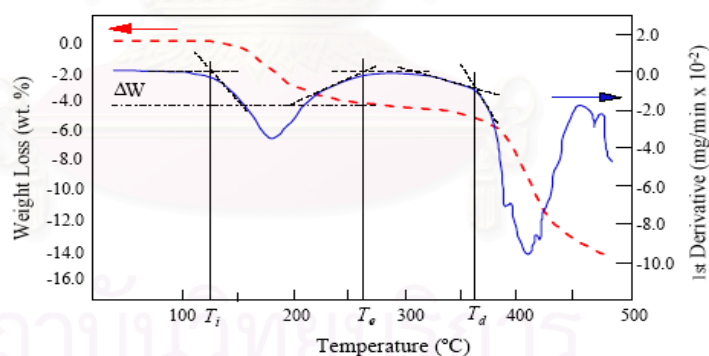
ก. ถ่านชาร์ (Char) การให้อุณหภูมิต่ำ 200 - 400 องศาเซลเซียส และที่ให้อัตราการให้ความร้อนอย่างช้าๆ จะทำให้ได้ปริมาณถ่านชาร์สูงสุด และการเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกริยาที่อุณหภูมิสูงขึ้น จะมีผลต่อการเกิดปฏิกริยาการเกิดถ่านชาร์ จะทำให้ลดทั้งปริมาณถ่านชาร์และสารระเหยในส่วนของถ่านชาร์

ข. ของเหลวทาร์ (Liquid tar) จะเกิดในช่วงอุณหภูมิ 400 - 600 องศาเซลเซียส โดยให้ความร้อนอย่างรวดเร็วและระยะเวลาการทำปฏิกริยาพอเพียงพอต่อการเกิดสารระเหย การให้อัตราความร้อนที่อุณหภูมิสูง แต่ให้ระยะเวลาในการทำปฏิกริยาจะไม่ทำให้เกิดปฏิกริยาการเปลี่ยนสารระเหยทาร์กลายเป็นก๊าซและของแข็งทาร์

ค. ก๊าซเชื้อเพลิง (Fuel gas) การให้อุณหภูมิสูงมากกว่า 600 องศาเซลเซียส จะจำเป็นต่อการเปลี่ยนคาร์บอนให้กลายเป็นผลิตภัณฑ์ก๊าซ การเพิ่มช่วงระยะเวลาในการทำปฏิกริยาจะช่วยเพิ่มการแตกตัวขององค์ประกอบทาร์ลักษณะการไหลของก๊าซในแนวขนาน (Parallel flow) อาจช่วยในการเพิ่มการเปลี่ยนแปลงคาร์บอนและลดปริมาณน้ำและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของผลิตภัณฑ์

2.4 การสลายตัวทางความร้อนโดยเทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA)

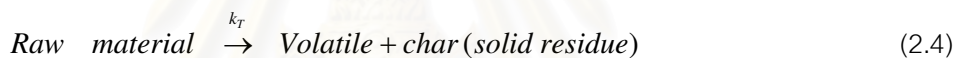
Thermogravimetric Analysis (TGA) เป็นการวิเคราะห์โดยการอาศัยหลักการสลายตัวของวัสดุที่อุณหภูมิเฉพาะของวัสดุนั้นๆ ในการวิเคราะห์จะแบ่งส่วนประกอบของชีวมวล เป็นสี่ส่วนหลัก คือส่วนแรกประกอบด้วยสารเคมีกลุ่มที่มีปริมาณสิ่งระเหยสูง ส่วนที่สองเป็นส่วนที่มีปริมาณสิ่งระเหยปานกลาง ส่วนที่สามเป็นส่วนที่ไหม้ไฟได้ และส่วนที่สี่เป็นส่วนที่ไม่สลายตัวและเหลือเป็นเถ้า ดังนั้นการให้ความร้อนแก่ตัวอย่างโดยให้ความร้อนเพิ่มขึ้นในอัตราที่คงที่ก็จะสามารถแปรผลการสลายตัวของส่วนประกอบหลักทั้งสี่ส่วนได้ โดยคำนวณเป็นอัตราส่วนร้อยละ (Weight percent, wt.%) ของน้ำหนักตัวอย่าง การวิเคราะห์น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงของชีวมวล ตัวอย่างเปรียบเทียบกับ อุณหภูมิที่มีการเพิ่มขึ้น เมื่อได้รับความร้อนวิธีนี้เหมาะสำหรับการเปลี่ยนแปลงสภาพ ที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับก๊าซ หรือระเหยของน้ำ ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลง หรือ การแตกตัวของชีวมวล (Decomposition) วิธีนี้สามารถวิเคราะห์ได้ ทั้งในสูญญากาศ และบรรยากาศต่างเช่น ออกซิเจน หรือไนโตรเจน เป็นต้น การทำงานของเครื่องมือนี้ คือ เครื่องมือนี้จะมีตาชั่งที่มีความละเอียดมากๆ และมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงสูง (สามารถต่ำถึง 1 ไมโครกรัม) เมื่อใส่สารลงไป จะมีการบันทึกค่าน้ำหนัก และเมื่อให้ความร้อนเครื่องจะบันทึกค่าส่วนการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักอย่างต่อเนื่อง และอ่านค่าที่มีการเปลี่ยนแปลงนั้นจากกราฟที่ได้ แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ลักษณะกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของการสลายตัวทางความร้อน (เมทเลอร์-โทเลโด (ประเทศไทย) บริษัทจำกัด.)

2.4.1 จลนพลศาสตร์การสลายตัวทางความร้อน (Kinetic of Thermogravimetric analysis)

การสลายตัวทางความร้อนโดยส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับอัตราการสลายตัวของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในส่วนของกลไกและจลนพลศาสตร์ของกระบวนการสลายตัวทางความร้อนโดยใช้เทคนิค TGA จะเป็นการศึกษาผลกระทบของอัตราการให้ความร้อนที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก พบว่ากระบวนการไพโรไลซิสจะประกอบไปด้วยปฏิกิริยาขนานของสารระเหยได้และชาร์ ตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ของการสลายตัวทางความร้อนจะประกอบไปด้วยพลังงานกระตุ้น (Activation energy) ลำดับการเกิดปฏิกิริยา (Reaction order) และค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา (Reaction constant rate) ซึ่งจะสามารถแสดงตามแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ (ลาวัลย์, 2535) ปัจจุบันได้มีนักวิจัยหลายคนค้นคว้าสร้างแบบจำลองขึ้นมามากมาย ซึ่งแบบจำลองเหล่านั้นเริ่มมาจากกลไกจลนพลศาสตร์ของ Kilzer – Broido ต่อมาในปี 1979 Bradbury และคณะได้ศึกษาปฏิกิริยาเริ่มต้นของแบบจำลองการสลายตัวของชีวมวลแสดงดังปฏิกิริยาต่อไปนี้



หลังจากนั้นในปี 1988 Agrawal ได้เสนอแบบจำลองของสามปฏิกิริยาเกี่ยวข้องกับการสลายตัวขององค์ประกอบของชีวมวลเปลี่ยนเป็นทาร์ ชาร์และก๊าซ ซึ่งผลิตภัณฑ์จะเกิดขึ้นในขณะเดียวกันทั้งสามปฏิกิริยา ต่อมาในปี 1989 Alves และ Figueiredo ได้ค้นพบแบบจำลองที่แตกต่างจากของ Agrawal คือ ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจะเป็นแบบลำดับการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง (First order reaction) ซึ่งเกิดต่อเนื่องกันเป็นลำดับทั้งสามปฏิกิริยา

ต่อมาในปี 1995 Conesa และคณะ ได้ทำศึกษาแบบจำลองการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งของ Agrawal เพิ่มเติม และได้เสนอแบบจำลองหลายชั้นแสดงดังปฏิกิริยาต่อไปนี้



สำหรับแบบจำลองหลายชั้นนั้น ปฏิกิริยาส่วนใหญ่จะเป็นแบบลำดับการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง (First order reaction) ในบางกรณีปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นแบบลำดับการเกิดปฏิกิริยาอันดับศูนย์ (Zero reaction) เมื่อปฏิกิริยาเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ

2.4.2 แบบจำลองทางจลนพลศาสตร์และการคำนวณโดยใช้ข้อมูลทางจลนพลศาสตร์

การหาค่าตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ซึ่งเกี่ยวข้องกับพลังงานกระตุ้น สามารถอธิบายได้หลากหลายวิธี สมการทางจลนพลศาสตร์โดยทั่วไปสามารถเขียนดังนี้

$$\frac{d\alpha}{dt} = k(T)f(\alpha) \quad (2.7)$$

$$\alpha = \frac{w_0 - w}{w_0 - w_\infty} \quad (2.8)$$

$$k = A \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) \quad (2.9)$$

- เมื่อ α คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักตัวอย่างเมื่อเวลาผ่านไป
 W คือ น้ำหนักเศษส่วนมวล ณ เวลาใดๆ,
 w_0 คือ น้ำหนักเศษส่วนมวลเริ่มต้น
 w_∞ คือน้ำหนักเศษส่วนมวลเวลาสุดท้าย
 $f(\alpha) = (1 - \alpha)$ คือ ฟังก์ชันที่ขึ้นอยู่กับกลไกการเกิดปฏิกิริยา
 $k(T)$ คือ ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ
 A คือ ค่าคงที่ของ Arrhenius หรือแฟกเตอร์ความถี่
 E คือ ค่าพลังงานกระตุ้น (กิโลจูลต่อโมล)
 R คือ ค่าคงที่ของแก๊สมีค่าเท่ากับ 8.314 (จูลต่อโมล เคลวิน)

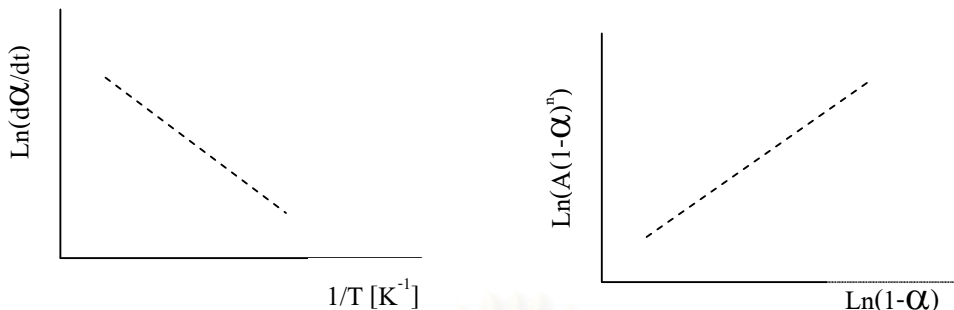
เมื่อจัดรูปสมการใหม่

$$\frac{d\alpha}{dt} = A \exp\left(\frac{-E}{RT}\right)(1 - \alpha)^n, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (2.10)$$

$$\ln\left[\frac{d\alpha}{dt}\right] = \ln[A(1 - \alpha)^n] - \frac{E}{RT} \quad (2.11)$$

จากสมการที่ 2.10 จะสามารถกำหนดค่าพลังงานกระตุ้นได้โดยจะขึ้นอยู่กับกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{d\alpha}{dt}\right)$ กับ $1/T$ (แสดงดังรูปที่ 2.5) ค่าความชันที่ได้จะมีค่าเท่ากับ $-E/R$ และจุดตัดแกนมีค่าเท่ากับ $\ln[A(1 - \alpha)^n]$ ซึ่งสามารถคำนวณหาได้จากสมการดังนี้

$$\ln[A(1 - \alpha)^n] = \ln A + n \ln(1 - \alpha) \quad (2.12)$$



รูปที่ 2.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{d\alpha}{dt}\right)$ กับ $\frac{1}{T}$ และกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln[A(1-\alpha)^n]$ กับ $\ln(1-\alpha)$

ภายใต้ non-isothermal condition จะกำหนดอัตราการให้ความร้อนมีค่าเท่ากับ $\beta = \frac{dT}{dt}$ และสามารถจัดรูปสมการได้ใหม่ดังนี้

$$\frac{d\alpha}{dt} = \beta \frac{d\alpha}{dT} = f(\alpha)k(T) = A \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) f(\alpha) \quad (2.13)$$

$$\frac{d\alpha}{f(\alpha)} = \frac{A}{\beta} \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) dT \quad (2.14)$$

$$g(\alpha) = \int_0^\alpha \frac{d\alpha}{f(\alpha)} = \frac{A}{\beta} \int_0^T \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) dT \quad (2.15)$$

จากฟังก์ชัน $f(\alpha) = (1-\alpha)^n$ เมื่อนำมาแทนค่าด้วยฟังก์ชัน $g(\alpha)$ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดปฏิกิริยาของแบบจำลองจะใช้ในการควบคุมกระบวนการทั้งหมด

$$g(\alpha) = -\ln(1-\alpha) \quad \text{เมื่อ } n=1$$

$$g(\alpha) = \left[\left(1 - \frac{(1-\alpha)^{1-n}}{(1-n)} \right) \right] \quad \text{เมื่อ } n > 1$$

เมื่อแทนค่าในสมการ 2.15

$$\ln\left[\frac{g(\alpha)}{T^2}\right] = \ln\left[\frac{AR}{\beta E} \left(1 - \frac{2RT}{E} \right) + \left(\frac{-E}{RT} \right)\right] = \ln\left(\frac{AR}{\beta E}\right) - \frac{E}{RT} \quad (2.16)$$

จากสมการที่ 2.16 จะสามารถหาค่าจลนพลศาสตร์ของการสลายตัวได้โดยทำการสร้างกราฟระหว่าง $\ln[(g(\alpha)/T^2)]$ กับ $1/T$ และค่าความชันที่ได้จากกราฟคือ $-E/R$ และจุดตัดแกนจะให้ค่า k สำหรับกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของชีวมวลจะเป็นการแตกตัวของโครงสร้างจำพวกสารลิกโนเซลลูโลส ซึ่งจะเป็นการสลายตัวของสารประกอบด้วยคาร์บอนเปลี่ยนเป็นก๊าซของเหลวทาร์ และถ่านชาร์ ซึ่งได้มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ศึกษาตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ของการสลายตัวขององค์ประกอบของชีวมวลชนิดต่างๆ

ผู้แต่ง	วัตถุดิบ	อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง (องศาเซลเซียส)	ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา (ต่อนาที)	พลังงานกระตุ้น (กิโลจูลต่อโมล)
Font และคณะ (1991)	เมล็ดแอลมอล			
	- เซลลูโลส	100 - 700	2.43×10^{18}	256.8
	- ไฮโดรเซลลูโลส	100 - 700	2.50×10^5	98.3
	- ลิกนิน	100 - 700	1.21×10^6	109.9
J.J.M.Órfão and J.L.Figueiredo (2002)	เมล็ดปาล์ม	100 - 1000	6.83×10^{16}	201
Chen และคณะ (2003)	ลิกนิน	160 - 680	4.7×10^2	25.1

2.5 ก๊าซสังเคราะห์ (Synthesis Gas หรือ Syngas)

ก๊าซสังเคราะห์ คือ ก๊าซผสมระหว่างไฮโดรเจน (Hydrogen) และคาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon Monoxide) สามารถใช้ประโยชน์ได้ทั้งในรูปของก๊าซผสม หรือแยกไปเป็นก๊าซไฮโดรเจน หรือ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์บริสุทธิ์ โดยการนำประโยชน์ในรูปของก๊าซผสมนั้นจะใช้ในกระบวนการสังเคราะห์เมทานอล (Methanol) ไดเมทิลอีเธอร์ หรือใช้เป็นก๊าซรีดิวซ์ (Reducing Gas) ในการถลุงเหล็ก ส่วนในการแยกใช้จะใช้อย่างมากในส่วนของกระบวนการการกลั่นแยกผลิตภัณฑ์เอมีน และใช้เป็นวัตถุดิบในการทำสารเคมีหลายชนิด (วสิน, 2545)

กระบวนการผลิตก๊าซสังเคราะห์โดยทั่วไปแล้วจะผลิตจากไฮโดรคาร์บอน เช่น น้ำมัน ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ และชีวมวลโดยวิธีการดังต่อไปนี้

- ก. การรีฟอร์มก๊าซธรรมชาติหรือไฮโดรคาร์บอนเบาด้วยไอน้ำ หรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ หรือทั้งไอน้ำ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
 - ข. การออกซิไดซ์บางส่วนของน้ำมันหนัก (Partial oxidation of heavy oil)
 - ค. การแก๊สซิฟิเคชันถ่านหิน หรือ ถ่านโค้ก (Gasification of coal or coke)
- วิธีการต่างๆ ข้างต้นจะให้ สัดส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์แตกต่างกัน

การนำก๊าซสังเคราะห์ไปใช้ประโยชน์ จะเป็นการใช้ในรูปแบบผลิตภัณฑ์ขั้นต้น (Primary product) ที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยาโดยใช้ก๊าซสังเคราะห์เป็นวัตถุดิบ ก๊าซสังเคราะห์เป็นวัตถุดิบที่สำคัญในการผลิตสารพวกปิโตรเคมี ในตอนต้นของทศวรรษที่ 1920 นักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมัน ได้ ค้นพบว่าก๊าซสังเคราะห์สามารถเปลี่ยนไปเป็นเมทานอลได้โดยใช้ซิงค์-โครเมียมออกไซด์ (Zinc Chromium Oxide) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและเปลี่ยนไปเป็นสารประกอบแอลเคน (Alkanes) ได้โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นโคบอลต์ที่มีเหล็กเป็นโปรโมเตอร์ และตัวรองรับปฏิกิริยาที่เปลี่ยนก๊าซสังเคราะห์ให้เป็นแอลเคนและแอลกอฮอล์เป็นที่รู้จักกันทั่วโลก คือ ปฏิกิริยาฟิตเชอร์ทรอปส์ช (Fischer-Tropsch reaction) โดยจุดประสงค์ของปฏิกิริยานี้เพื่อที่จะผลิตเชื้อเพลิงเหลว (Liquid Fuel) ซึ่งเป็นสารแอลเคนที่มีโมเลกุลสูง

นอกจากการใช้ประโยชน์ก๊าซสังเคราะห์ในลักษณะรวมแล้วนั้นยังสามารถแยกแต่ละก๊าซมาใช้ประโยชน์ จึงจำเป็นต้องพิจารณาถึงประโยชน์ของก๊าซแต่ละชนิด โดยที่ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์จะแยกออกจากก๊าซสังเคราะห์ได้โดยวิธีการดูดซับด้วยทองแดงหลอมเหลว จะนำไปใช้ในปฏิกิริยาพื้นฐานคือ คาร์บอนิลเลชัน (Carbonylation) และไฮโดรฟอร์มมิเลชัน (Hydroformylation) นอกจากนี้ยังสามารถนำก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ไปใช้ในอุตสาหกรรมอื่นๆ เช่น อุตสาหกรรมการผลิตกรดฟอร์มิก และกรดไพโรพิโนอิก ด้วยปฏิกิริยาไฮโดรฟอร์มมิเลชัน หรือในอุตสาหกรรมการผลิตอัลดีไฮด์ต่างๆ

2.6 กากสบู่ดำ

สำหรับชีวมวลที่สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตพลังงานมีหลายประเภท โดยในงานวิจัยนี้ชีวมวลที่ถูกนำมาใช้ในการทดลองคือ กากสบู่ดำ ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากระบวนการผลิตน้ำมัน กากสบู่ดำนั้นมีศักยภาพสูงเพียงพอที่จะนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทนได้

2.6.1 สบู่ดำ (*Jatropha Curcas* Linn.)

สบู่ดำมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Jatropha Curcas* Linn. จัดเป็นพืชที่อยู่ในวงศ์ไม้ยางพารา (Euphorbiaceae) เช่นเดียวกับสบู่แดง บัตตาเวีย ฝิ่นต้นหรือมะละกอฝรั่ง หนุมานั่ง แทน ปิ๊ยะเขียน มันสำปะหลัง มะยม มะขามป้อม ผักหวานบ้าน ฯลฯ ซึ่งมีความหลากหลายกันค่อนข้างมากในลักษณะต้น ใบ ช่อดอก ผล และเมล็ด สบู่ดำนั้นเป็นพืชพื้นเมืองของอเมริกาใต้ ชาวโปรตุเกสนำเข้ามาในช่วงปลายสมัยกรุงศรีอยุธยา เพื่อรับซื้อเมล็ดไปคัดบีบเอาน้ำมันสำหรับทำสบู่ ปัจจุบันสบู่ดำมีปลูกอยู่ทั่วทุกภาคของประเทศไทยมีชื่อเรียกแตกต่างกันไป เช่น ภาคเหนือเรียกว่ามะหุ้งฮั่ว ภาคตะวันออกเฉียงเหนือเรียกว่ามะเยาหรือสีหลอด และด้านทางภาคใต้เรียกว่ามาเคาะ แสดงดังรูป 2.6



รูปที่ 2.6 ลักษณะต้นสบู่ดำ (ศูนย์ส่งเสริมพลังงานชีวมวล, 2548)

สบู่ดำนั้นถือได้ว่าเป็นพืชน้ำมันชนิดหนึ่งเหมือนกับต้นปาล์มน้ำมัน เป็นไม้พุ่มขนาดกลาง สูงประมาณ 6 เมตร จัดเป็นไม้ยืนต้นได้ เพราะมีอายุไม่น้อยกว่า 20 ปี เนื้อไม้ไม่มีแก่นหักง่าย ในเนื้อไม้เมื่อหักจะมียางสีขาวหรือสีเหลืองอ่อนๆ ไหลซึมออกมา ใบกว้างเป็นใบเลี้ยงคู่ มีฐานเป็นรูปหัวใจ ขอบใบหยักคล้ายใบละหุ่ง แต่หยักน้อยกว่า ดอกออกเป็นช่อสีเหลืองอ่อน ลักษณะดอกเป็นรูปประฆัง มีกลีบเลี้ยง 5 กลีบ มีทั้งดอกตัวผู้และดอกตัวเมียอยู่ในช่อเดียวกัน ดอกตัวผู้มีมากกว่าดอกตัวเมีย ดอกตัวเมียมียอดเกสรเป็นรูปสามง่าม รังไข่มีผนังกันแบ่งออกเป็น 3 เซลล์ ผลมีสีเขียว เมื่อแก่จะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองนวล ผลในช่อเดียวกันจะสุกแก่ไม่พร้อมกันเมื่อผลแห้งแกะดูจะมีเมล็ดอยู่ภายใน 3 เมล็ด ลักษณะจะคล้ายเมล็ดละหุ่ง ส่วนของเมล็ดมีสีดำกว้างประมาณ 1 เซนติเมตร และยาวประมาณ 2 เซนติเมตร เนื้อในของเมล็ดสีขาว มีน้ำมันที่นำมาใช้ประโยชน์ได้หลายลักษณะ

น้ำมันที่สกัดได้จากเมล็ดสบู่ดำสามารถใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลที่เกษตรกรใช้ในการทำเกษตรได้โดยตรงโดยไม่ต้องใช้น้ำมันชนิดอื่นมาผสมอีกจากเมล็ด ซึ่งเป็นส่วนที่เหลือจากการบีบน้ำมันไปใช้แล้ว จะนำมาอัดเป็นก้อน ส่วนนี้จะมีเคอร์ซิน (Curcin) ซึ่งเป็นโปรตีนที่เป็นพิษ

เหมือนกับในละหุ่ง ไม่เหมาะที่จะนำมาเลี้ยงสัตว์ แต่เหมาะที่จะนำไปทำปุ๋ย หรือนำไปทำเป็นเชื้อเพลิงให้กับเครื่องกังหันไอน้ำ (Steam turbine) สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

2.6.1 ลักษณะของเมล็ดสนุ่นดำ

เมล็ดมีสีดำ ขนาดเล็กกว่าเมล็ดละหุ่งพันธุ์ลายขาวดำเล็กน้อย สีตรงปลายเมล็ดมีจุดสีขาวเล็กๆ ติดอยู่ ความยาวประมาณ 1.7 – 1.9 เซนติเมตร หนาประมาณ 0.8 – 0.9 เซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 2.7 น้ำมันเมล็ดของสนุ่นดำ ประกอบไปด้วยน้ำมันประมาณ 35 – 40 เปอร์เซ็นต์ เนื้อใน (kernels) ประมาณ 55 – 60 เปอร์เซ็นต์ เมล็ดในของสนุ่นดำมีความชื้น แก้วโปรตีน ไขมัน และเส้นใยในปริมาณที่แตกต่างกันตามแหล่งที่เก็บตัวอย่างดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบเมล็ดสนุ่นดำ

องค์ประกอบเมล็ดสนุ่นดำ	เปอร์เซ็นต์
ไขมัน	46.7 – 59.8 %
โปรตีน	20.2 – 28.4 %
เส้นใย	0.9 – 4.2 %
ความชื้น	3.8 – 7.8 %
แก้ว	3.8 – 6.4 %

ในส่วนของไขมัน มีกรดไขมันที่สำคัญ 4 ชนิด คือ ปาล์มมิติก สเตียริก โอเลอิก และไลโนเลอิก เช่นเดียวกับปาล์มน้ำมัน โดยกรดปาล์มมิติก และสเตียริกมีน้อยเพียง 15.38% และ 6.24% ตามลำดับ ส่วนโอเลอิกและไลโนเลอิก มีค่อนข้างสูงคือ 40.23% และ 36.32% ตามลำดับ ทั้งนี้ปริมาณกรดไขมันดังกล่าวอาจแตกต่างกันบ้างเล็กน้อยขึ้นอยู่กับแหล่งที่ปลูก



รูปที่ 2.7 ลักษณะของเมล็ดของสนุ่นดำ (ศูนย์ส่งเสริมพลังงานชีวมวล, 2548)

เมล็ดสับดูดำมีปริมาณน้ำมันร้อยละ 35 - 40 ของน้ำหนักเมล็ด พบว่าเมล็ดสับดูดำจำนวน 4 กิโลกรัมนำมาสกัดน้ำมันได้ 1 ลิตร และที่เหลือเป็นกากจำนวน 3 กิโลกรัม น้ำมันสับดูดำสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันดีเซลกับเครื่องจักรกลทางการเกษตรได้

2.6.2 คุณสมบัติและค่าความร้อนของน้ำมันจากพืชชนิดต่างๆ (ศูนย์ส่งเสริมและพัฒนาอาชีพการเกษตร จังหวัดชัยนาท, 2548)

ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบคุณสมบัติและค่าความร้อนของน้ำมันจากพืชชนิดต่างๆ

ชนิด	ความถ่วงจำเพาะ (กรัม/มิลลิลิตร)	ความหนืด (เซนติพอยส์)	ค่าความร้อน (กิโลจูลต่อกิโลกรัม)
ถั่วเหลือง	0.918	57.2	39,350
ทานตะวัน	0.918	60.0	39,490
มะพร้าว	0.915	51.9	37,540
ถั่วลิสง	0.914	67.1	39,470
ปาล์ม	0.898	88.6	39,550
เมล็ดในปาล์ม	0.904	66.3	39,720
เมล็ดในสับดูดำ	0.915	36.9	39,000
น้ำมันดีเซล	0.845	3.8	46,800

2.6.3 ต้นทุนการผลิตและราคาคู่มือในการปลูกสับดูดำในประเทศไทย

การผลิตเมล็ดสับดูดำจะมีต้นทุนประมาณกิโลกรัมละ 3.10 บาท จากต้นทุนรวม 2,500 บาท (ราคาเมล็ดและแรงงานปลูก) และได้ผลผลิต 800 กิโลกรัมต่อไร่ (ระยะปลูก 2x2.5 เมตร, 400 ต้นต่อไร่, น้ำมันสับดูดำดิบ 200 ลิตร) (สถาบันวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2548)

ตารางที่ 2.5 ตารางเปรียบเทียบต้นทุนการผลิต ปริมาณผลผลิต มูลค่าเมล็ดและน้ำมันสบู่ดำ

	ลงทุนต่ำ	ลงทุนกลาง	ลงทุนสูง
ต้นทุน (บาท/ไร่)	1,480.00	2,240.00	2,800.00
ผลผลิต (กก./ไร่)	1,008.00	1,600.00	2,160.00
น้ำมัน (ลิตร/ไร่)	251.25	400.00	500.00
กาก (บาท/ไร่)	900.00	1,440.00	1,800.00
	ลงทุนต่ำ	ลงทุนกลาง	ลงทุนสูง
มูลค่ารวม (บาท/ไร่)	5,490.00	8,784.00	10,980.00
กำไรขั้นต้น (บาท/ไร่)	5,010.00	8,144.00	10,180.00
ค่าใช้จ่าย (บาท/ไร่)	480.00	800.00	960.00
กำไรสุทธิ (บาท/ไร่)	4,530.00	7,344.00	9,220.00

2.6.3 กระบวนการผลิตน้ำมันสบู่ดำ

ขั้นตอนการสกัดน้ำมันจากสบู่ดำจะเริ่มจากการกระเทาะเปลือกผลสบู่ดำสดออก (Shelling) ก่อนจะนำไปหีบ (Pressing) หรือสกัด (Extraction) หลังจากนั้นจึงทำการกรองน้ำมันที่ได้ก่อนที่จะนำไปใช้งาน โดยน้ำมันจากสบู่ดำสามารถนำไปใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลรอบต่ำได้เลย หรืออาจนำไปผ่านกระบวนการ Transesterification เพื่อให้ได้เป็นน้ำมันที่สามารถนำไปผสมทำไบโอดีเซลสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลต่างๆ ได้ รายละเอียดการสกัดน้ำมันจากสบู่ดำมีดังต่อไปนี้

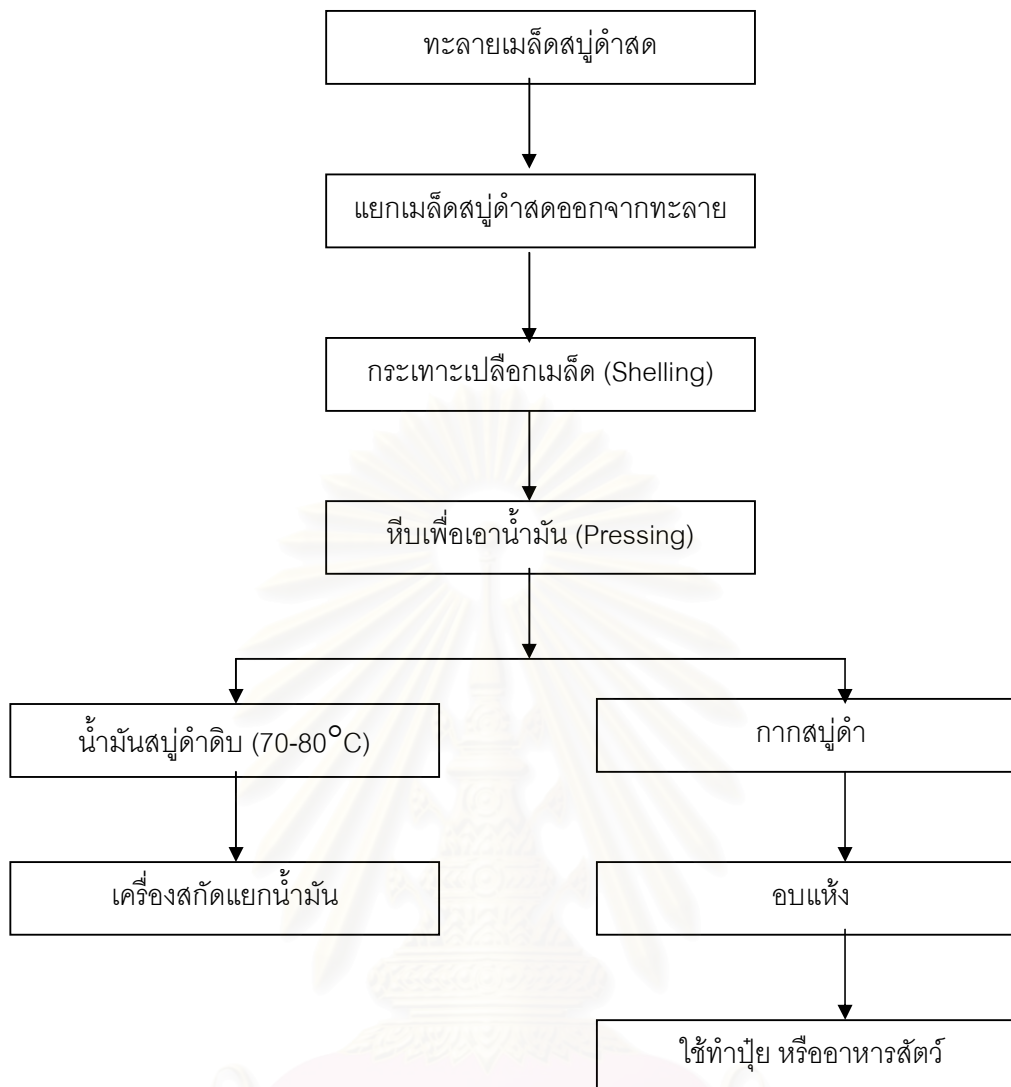
1. การแยกหรือกระเทาะเปลือกของผลสบู่ดำสด

ขั้นตอนแรกของกระบวนการคือการกระเทาะเปลือกเพื่อให้ได้เมล็ดสบู่ดำจากข้อมูลของประเทศไทย (สมบัติ ชินะวงค์, 2005) พบว่าผลสบู่ดำสด 1 กิโลกรัม เมื่อกระเทาะเปลือกออกแล้วจะได้เมล็ดสบู่ดำสดประมาณ 260 - 270 เมล็ด หลังจากนั้นจึงนำไปเก็บไว้ในอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

2. การหีบหรือสกัดน้ำมันสบู่ดำ

การนำน้ำมันออกมาจากเมล็ดหรือก้อนแป้งสบู่ดำ สามารถทำได้หลายวิธี โดยในแง่ของกระบวนการจะสามารถทำได้โดยใช้แรงกลจากอุปกรณ์ทุ่นแรง (Mechanical pressing) และการสกัดโดยใช้ตัวทำละลาย (Solvent extraction) จากข้อมูลนี้การรายงานการผลิตน้ำมันจากสบู่ดำภายในประเทศไทย พบว่าเมล็ดสบู่ดำจำนวน 4 กิโลกรัมจะให้ น้ำมันประมาณ 1 ลิตร (สมบัติ ชินะวงศ์, 2005) เมื่อได้น้ำมันสบู่ดำมาแล้วก็จะต้องนำไปผ่านการกรองเพื่อแยกเอาสารแขวนลอยและสิ่งสกปรกต่างๆ ออกจากน้ำมัน

การใช้งานน้ำมันสบู่ดำ น้ำมันสบู่ดำดิบสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับการหุงต้มอาหารหรือสำหรับการให้แสงสว่างได้ ถึงแม้ว่าสบู่ดำดิบจะมีสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันก๊าด (Kerosene) นอกจากนี้ น้ำมันสบู่ดำดิบยังสามารถนำไปใช้ได้โดยตรงกับเครื่องยนต์ดีเซลบางประเภท เช่น เครื่องยนต์แบบลิสเตอร์ (Lister type engine) ซึ่งเป็นเครื่องยนต์ที่ใช้ในโรงสีข้าว เครื่องสูบน้ำ หรือเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าขนาดเล็ก และการนำน้ำมันสบู่ดำที่สกัดได้นำไปผ่านกระบวนการทรานเอสเทอร์ฟิเคชันเพื่อผลิตเป็นน้ำมันไบโอดีเซลได้ โดยทางด้านของกระบวนการทรานเอสเทอร์ฟิเคชันเป็นกระบวนการที่นำน้ำมันพืช หรือน้ำมันที่ได้จากสัตว์มาทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์โดยแอลกอฮอล์ที่นิยมใช้ในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล คือ เมทานอลและตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) หรือ กรดกำมะถัน (H_2SO_4) อุณหภูมิที่ใช้สำหรับการเกิดปฏิกิริยาอยู่ในช่วงประมาณ 60 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะประกอบด้วยส่วนของน้ำมันไบโอดีเซลหรือเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน และกลีเซอรอล น้ำมันไบโอดีเซลที่ได้จะต้องผ่านการล้างเพื่อกำจัดตัวเร่งปฏิกิริยาและเมทานอลที่เหลืออยู่ออกก่อนที่จะนำไปใช้งาน



รูปที่ 2.8 กระบวนการผลิตน้ำมันสับดูดำ (สำนักวิจัยและส่งเสริมวิชาการเกษตร, 2548)

2.6.4 ประโยชน์ของสับดูดำ

สับดูดำสามารถปลูกได้ทั่วไปในประเทศเขตร้อน และต้องการน้ำในปริมาณน้ำไม่มาก ในการเพาะปลูก สับดูดำสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายประการเหมือนพรรณไม้ชนิดอื่นๆ และสามารถจำแนกการใช้ประโยชน์ตามลักษณะต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้

- ก. น้ำมันสับดูดำ น้ำมันที่สกัดได้จากเมล็ดของต้นสับดูดำถือได้ว่าเป็นน้ำมันที่มีค่าสaponification สูง (Saponification value) ดังนั้นจึงนิยมใช้ในการทำสบู่ในหลายประเทศ
- ข. ส่วนของต้นสับดูดำ สามารถใช้เป็นยารักษาโรคได้ ดังเช่น

- ลำต้น นำมาตัดเป็นท่อนแช่น้ำอาบแก้โรคพุง หรือนำมาตัดเป็นท่อนต้มน้ำ ให้เด็กกินแก้ซางตาลขโมย

- ยางจากก้านใบ ใช้ป้ายรักษาโรคปากนกกระจอก ห้ามเลือด และสามารถแก้ปวดฟันได้ ยางจากต้นสบู่ดำสามารถนำไปใช้เปื้อปลา และใช้กัดหูดได้

ก. ใช้ทำปุ๋ย เนื่องจากกากสบู่ดำ (เมล็ดหลังจากการหีบน้ำมัน) ใช้ทำปุ๋ย อินทรีย์ เนื่องจากพบว่ามีธาตุอาหารหลักของพืชสูง

ง. ยาฆ่าแมลง นำส่วนของเมล็ดและใบของสบู่ดำมาใช้รมเป็นยากันแมลง และสามารถที่จะสกัดเป็นยาปฏิชีวนะใช้สำหรับต้านแบคทีเรียจำพวก *Escherichia coli*. และ *Staphylococcus aureus*.

ด้านของคุณสมบัติของชีวมวลที่แตกต่างกับถ่านหินในแง่เชื้อเพลิงคือ ชีวมวลจะให้ ปริมาณของความร้อน ออกซิเจน และไฮโดรเจนสูง ส่วนปริมาณเถ้า ซัลเฟอร์ และไนโตรเจนมี ปริมาณต่ำ จะส่งผลให้ปริมาณของก๊าซและของเหลวสูง ส่วนปริมาณคาร์บอนต่ำแต่เนื่องจากมีปริมาณ ของออกซิเจนสูงจึงต้องใช้ไฮโดรเจนมากในการเกิดน้ำของชีวมวล ดังนั้นจึงไม่ให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่มี อัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอนสูงตามต้องการ แต่ข้อดีของชีวมวลคือ มีเปอร์เซ็นต์ซัลเฟอร์ต่ำ และให้ปริมาณคาร์บอนที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยา

2.7 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อาภาณี เหลืองนฤมิตชัย (2538) ทำการศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมของการผลิตก๊าซจาก ชีวมวลด้วยกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยใช้เครื่องกำเนิดก๊าซแบบเบดนิ่งโดยใช้แกลบ มีตัวแปรที่ พิจารณา คือ อุณหภูมิของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน และอัตราการไหลของอากาศ ในการทดลอง แกลบจะถูกป้อนเข้าทางด้านบนของเครื่อง เพื่อเผาไหม้แกลบให้เกิดเป็นก๊าซร้อน และผ่านคอลัมน์ เข้าทางด้านล่าง ปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน เกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 650 - 900 องศาเซลเซียส ความดัน บรรยากาศและค่าอัตราการไหลของอากาศ 0.12 ถึง 0.32 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที องค์ประกอบ ของก๊าซชีวมวลจะถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องโครมาโทกราฟี ผลการทดลองพบว่าภาวะที่เหมาะสมใน การผลิตก๊าซชีวมวลในเครื่องกำเนิดก๊าซแบบเบดนิ่ง ที่อุณหภูมิของการทดลอง 850 องศา เซลเซียส และอัตราการไหลของอากาศ 0.2 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที อัตราการป้อนแกลบ 100 - 260 กรัมต่อนาที ก๊าซชีวมวลที่ได้มีปริมาณร้อยละโดยปริมาตรของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ 8.46 ก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละโดยปริมาตร 5.12 ก๊าซไฮโดรเจนร้อยละโดยปริมาตร 7.78 และก๊าซ มีเทนร้อยละโดยปริมาตร 0.83 ค่าความร้อนของก๊าซชีวมวล 671.79 กิโลแคลอรีต่อลูกบาศก์เมตร

Michael และคณะ (1995) ทำการศึกษาการสลายตัวทางความร้อน (Pyrolysis) ของไม้ โดยขั้นแรกใช้ชั้นเบตติงเล็กๆ ลึก 2 เซนติเมตรและชั้นที่สองเป็นชั้นการแตกตัวของก๊าซจากการสลายตัวทางความร้อนของทาร์ที่ความเข้มข้นต่ำ ที่อุณหภูมิ 773 - 1,073 เคลวิน ผลิตภัณฑ์จากขั้นแรกเป็น ทาร์ ชาร์ น้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ และ คาร์บอนมอนอกไซด์ กับ มีเทนเล็กน้อย ในขั้นที่สอง คาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นจากการแตกตัวกลายเป็นไอของทาร์ แต่ทาร์ส่วนมากจะถูกเปลี่ยนกลายเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ จะเกิดมีเทน และเอทิลีนเพียง 10 เปอร์เซ็นต์ของทาร์ที่ถูกเปลี่ยนส่วนชาร์เกิดน้อยมาก

Garcia และคณะ (1997) ทำการศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ในการแคลซินเนชันและรีดักชัน ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการไพโรไลซิสของชีวมวล โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ศึกษาคือ นิกเกิล-อะลูมินา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 150 – 350 ไมโครเมตร ซึ่งเตรียมจากวิธีการตกตะกอนร่วม โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ อุณหภูมิในการแคลซินเนชัน (750 และ 850 องศาเซลเซียส) เวลาในส่วนการรีดักชัน (1, 2 และ 3 ชั่วโมง) และกำหนดอัตราการไหลของไนโตรเจนในขั้นตอนการรีดักชัน (1,740 และ 3,080 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที) ในส่วนของกระบวนการไพโรไลซิสของชีวมวลจะศึกษาในเครื่องฟลูอิดไดซ์เบด ที่มีพื้นที่หน้าตัด 4.35 ตารางเซนติเมตร ชีวมวลที่ใช้คือขี้เลื่อย โดยทำการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ ด้วยอัตราการป้อนชีวมวล 20 กรัม ต่อชั่วโมง และเบตที่ใช้ประกอบด้วยทราย 20 กรัม และตัวเร่งปฏิกิริยา 20 กรัม จากการทดลองพบว่า เมื่อมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จะลดลง ส่วนผลิตภัณฑ์ก๊าซจะเพิ่มขึ้น โดยก๊าซไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์จะเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด คาร์บอนไดออกไซด์จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ขณะที่เมเทนลดลง ผลของอุณหภูมิในการแคลซินเนชันของตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่า ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์ก๊าซไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์จะเพิ่มขึ้น แต่ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียสจะลดลงเนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดการเกาะติดกัน (Sintering) ทำให้ประสิทธิภาพลดลง และเมื่อเวลารีดักชันและอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น พบว่าผลิตภัณฑ์ก๊าซที่ได้ลดลง เนื่องจากการทำที่ภาวะรุนแรงคืออุณหภูมิและอัตราการไหลสูง จะทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดการเกาะติดกัน มีผลให้ประสิทธิภาพลดลง

Xianwen และคณะ (1999) ศึกษากระบวนการไพโรไลซิสของชีวมวลในฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนสร้างจากแอสตันเลสทนความร้อนสูง 2.9 เมตร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร และมีความจุขนาด 5 กิโลกรัมต่อชั่วโมง โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการไพโรไลซิส ได้แก่ อุณหภูมิ ขนาดของอนุภาค และเวลาในการทำปฏิกิริยา ชีวมวลที่ศึกษาคือผงไม้ขนาด 0.38 และ 0.73 มิลลิเมตร จากการทดลองพบว่า ที่อุณหภูมิสูงคือ 900 องศาเซลเซียสจะให้ผลิตภัณฑ์ก๊าซเพิ่มขึ้นและทาร์ลดลง และเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดปฏิกิริยา Char reduction, Tar

cracking และ Shift reaction ทำให้ผลิตภัณฑ์ก๊าซเพิ่มขึ้น ส่วนขนาดของอนุภาคที่เพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้อัตราการให้ความร้อนลดลงทำให้ผลิตภัณฑ์ก๊าซและทาร์ลดลง

Chen และคณะ (2003) ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการไพโรไลซิส/แก๊สซิฟิเคชันของชีวมวลในการผลิตก๊าซในเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (สูง 750 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 80 มิลลิเมตร) ชีวมวลที่ศึกษาคือฟางข้าวและขี้เลื่อยไม้สน จากการทดลองพบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น (500 - 950 องศาเซลเซียส) ผลิตภัณฑ์ก๊าซจะเพิ่มขึ้นส่วนถ่านชาร์และของเหลวทาร์ลดลง และเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาของสารระเหยเพิ่มขึ้น (ขึ้นอยู่กับความเร็วของก๊าซพา) ผลิตภัณฑ์ก๊าซจะมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ทางด้านของการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและมวลของเตาปฏิกรณ์โดยการใส่แท่งคนและการเพิ่มอัตราการให้ความร้อนจากภายนอกเตาปฏิกรณ์จะมีผลทำให้ผลิตภัณฑ์ก๊าซเพิ่มขึ้นอีกทางหนึ่ง และจากทุกการทดลองพบว่าค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ก๊าซที่ได้มีค่าอยู่ในช่วง 13 – 15 เมกกะจูลต่อลูกบาศก์เมตรนิวตัน

Órfão และ Figueiredo (2002) ศึกษากระบวนการไพโรไลซิสของชีวมวลจำพวกลิกโนเซลลูโลส (ประกอบด้วยลิกนิน เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส) ด้วยวิธีการใช้การวิเคราะห์เทอร์โมกราฟ วิเมตริก และสร้างแบบจำลองทางจลนศาสตร์เพื่อกำหนดตัวแปรจลนศาสตร์และผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการไพโรไลซิส ทำการทดลองภายใต้สภาวะความดันบรรยากาศ และมีการป้อนก๊าซไนโตรเจน 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่ออนาที และกำหนดอัตราการให้ความร้อนคงที่ 5 องศาเซลเซียสต่ออนาที และเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้องถึง 900 องศาเซลเซียส พบว่าการไพโรไลซิสชีวมวลจำพวกลิกโนเซลลูโลส สามารถสร้างแบบจำลองทางจลนศาสตร์ที่ประกอบด้วยสามปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของสามองค์ประกอบ ซึ่งองค์ประกอบที่ 1 และ 2 จะเป็นความสัมพันธ์ของเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสซึ่งจะทำปฏิกิริยาในช่วงอุณหภูมิต่ำ และองค์ประกอบที่ 3 จะเป็นส่วนของลิกนิน จากนั้นจะได้ค่าพลังงานกระตุ้น 201 กิโลจูลต่อโมล และค่าคงที่ของ Arrhenius หรือแฟกเตอร์ความถี่มีค่าเท่ากับ 6.83×10^{16} ต่ออนาที

Vlaev และคณะ (2003) ศึกษาแบบจำลองทางจลนศาสตร์ของกระบวนการสลายตัวทางความร้อนของข้าวเปลือกภายใต้สภาวะอุณหภูมิคงที่ ทำการทดลองโดยใช้เทคนิคเทอร์โมกราฟ วิเมตริกและใช้สมการทางจลนศาสตร์ของ Coat-Redfern เพื่อหาค่าตัวแปรทางจลนศาสตร์ของการสลายตัวเช่น ค่าพลังงานกระตุ้น ค่าพลังงานที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของกระบวนการไพโรไลซิส

Shiguang Li และคณะ (2004) ศึกษากระบวนการไพโรไลซิสของชีวมวล 2 ชนิด คือ ฟาง และเมล็ดแอปเปิลคอกทในเครื่องปฏิกรณ์แบบ free-fall เพื่อผลิตก๊าซไฮโดรเจน จากการทดลองแสดงได้ว่า กระบวนการไพโรไลซิสของชีวมวลที่อัตราการให้ความร้อนสูง จะได้ปริมาณสารระเหยสูงกว่าที่อัตราการให้ความร้อนต่ำ ผลผลิตและส่วนประกอบผลิตภัณฑ์ก๊าซจากกระบวนการ

ไพโรไลซิสจะสัมพันธ์กับส่วนประกอบของชีวมวล โดยเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสจะผลิตไฮโดรเจน ได้มากกว่าลิกนิน การทดลองโดยใช้อุณหภูมิขนาดเล็ก และศึกษาที่อุณหภูมิสูงจะได้ผลิตภัณฑ์ก๊าซ ที่มีไฮโดรเจนปริมาณสูง เมื่อลดขนาดของอนุภาคและเพิ่มอุณหภูมิ จะได้ผลิตภัณฑ์ก๊าซและของเหลวเพิ่มมากขึ้น ส่วนชาร์จะมีปริมาณลดลง

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสลายตัวด้วยความร้อนของชีวมวลที่ผ่านมา พบว่า การแปรรูปชีวมวลให้เป็นแหล่งพลังงานที่มีประสิทธิภาพ กระทำได้โดยใช้เทคโนโลยีการแปรรูปทางความร้อน (Thermal conversion technology) ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 กระบวนการคือ ไพโรไลซิส (Pyrolysis), แก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) และการเผาไหม้ (Combustion) กระบวนการไพโรไลซิสเป็นกระบวนการให้ความร้อนในภาวะที่ไม่มีอากาศ ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ ก๊าซเชื้อเพลิง น้ำมันชาร์ และถ่านชาร์ โดยอัตราส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้ขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อเพลิง อุณหภูมิ อัตราการให้ความร้อน เวลา และชนิดของเตาปฏิกรณ์ที่ใช้ และมีการได้ศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับกระบวนการไพโรไลซิสของชีวมวล ด้วยวิธีการใช้การวิเคราะห์เทอร์โมกราฟีเมตริก และสร้างแบบจำลองทางจลนศาสตร์แบบปฏิกิริยาคู่ขนานขององค์ประกอบเพื่อกำหนดตัวแปรจลนศาสตร์ ในกระบวนการไพโรไลซิสโดยใช้จากแบบจำลองของ Coat-Redfern ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคู่ขนานแบบสองสมการ (Two parallel reaction model) ที่อัตราการให้ความร้อน 5,10,20 และ 40 องศาเซลเซียสต่อนาที ในส่วนของงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาสลายตัวด้วยความร้อนโดยใช้วิเคราะห์เทอร์โมกราฟีเมตริก และสร้างแบบจำลองทางจลนศาสตร์แบบปฏิกิริยาคู่ขนานแบบ (Three parallel reaction model) ที่อัตราการให้ความร้อน 5,15,30 และ 90 องศาเซลเซียสต่อนาทีและศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อปริมาณและองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสในเตาปฏิกรณ์แบบชั้นเบดนิ่ง ที่ช่วงอุณหภูมิ 500 700 และ 900 องศาเซลเซียส ในระดับห้องปฏิบัติการ

บทที่ 3

เครื่องมือและวิธีการทดลอง

3.1 อุปกรณ์การทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการทดลอง เพื่อศึกษาแนวทางการแปรสภาพของกากสับุดำด้วยการสลายตัวทางความร้อน โดยมุ่งที่จะสร้างแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ของการสลายตัวภายใต้ความร้อนโดยใช้ข้อมูลจากการวิเคราะห์ทางเทอร์โมกราฟีเมตริก (Thermogravimetric Analysis) และศึกษาปริมาณและองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการแปรสภาพกากสับุดำโดยกระบวนการไพโรไลซิส และจะทำการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นโดยการใช้อุปกรณ์ในการทำการทดลองและวิเคราะห์ต่างๆ ดังนี้

- 3.1.1 เครื่องวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric Analyzer) รุ่น Mettler Toledo TGA/STDA851°
- 3.1.2 เครื่องปฏิกรณ์สำหรับปฏิกิริยาไพโรไลซิสแบบชั้นเบดนิ่ง
- 3.1.3 ชุดควบคุมอุณหภูมิสำหรับเครื่องปฏิกรณ์สำหรับปฏิกิริยาไพโรไลซิสประกอบไปด้วย
 - เตาเผาให้ความร้อนแบบท่อกลวง (Tubular Furnace)
 - เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple Type K) และขดลวดความร้อน
 - เครื่องแปลงสัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิลเพื่อแสดงผล (Recorder)
 - คอนเดนเซอร์ (Condensor)
- 3.1.4 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatograph; GC)
- 3.1.5 เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller) รุ่น AALBORG®
- 3.1.6 ถุงเก็บตัวอย่างก๊าซ (Sampling bag) ขนาด 1 ลิตร Cole-Parmer, U.S.A
- 3.1.7 เครื่องเขย่าคัดขนาด (Sieve shaker)
- 3.1.8 เครื่องชั่งน้ำหนัก (Analytical balance 4 digits)
- 3.1.9 ตู้อบ (Oven)

3.2 แผนงานวิจัย

- 3.2.1 วางแผนการศึกษาลักษณะและคุณสมบัติของกากสบู่ดำ
- 3.2.2 เตรียมวัสดุอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย
- 3.2.3 ดำเนินการวิจัย
- 3.2.4 วิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย

3.3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ได้ทำการทดลองศึกษาการนำชีวมวลคือ กากสบู่ดำเป็นวัตถุดิบในการแปรสภาพ โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 5 ส่วน

- 3.3.1 ศึกษาลักษณะทางเคมีของกากสบู่ดำ
- 3.3.2 ศึกษาทดสอบสมบัติทางความร้อนของกากสบู่ดำ
- 3.3.3 ศึกษาขั้นตอนและภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนกากสบู่ดำด้วยเทคนิคเทอร์โมกราฟีวิเมตริก (Thermogravimetric analysis; TGA) รุ่น Mettler Toledo TGA/STDA851^e
- 3.3.4 สร้างแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ของการสลายตัวภายใต้ความร้อนโดยใช้ข้อมูลจากการวิเคราะห์เทคนิคเทอร์โมกราฟีวิเมตริก (Thermogravimetric analysis; TGA)
- 3.3.5 ศึกษาปริมาณและองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการแปรสภาพกากสบู่ดำโดยกระบวนการไพโรไลซิสโดยใช้เตาปฏิกรณ์ควอตซ์แบบชั้นเบดหนึ่งด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatograph; GC)

3.4 ตัวอย่างกากสบู่ดำที่ใช้ในการทดลอง

การวิจัยครั้งนี้ชีวมวลที่จะนำมาใช้ในระบบการแปรสภาพ คือ กากสบู่ดำที่ได้มาจากบริษัทน้ำมันสบู่ดำในประเทศ ตัวอย่างที่จะนำมาวิเคราะห์จะเป็นในส่วนของกากสบู่ดำที่เหลือจากการสกัดน้ำมัน ในการศึกษาจะเก็บกากสบู่ดำมา 1 ครั้ง ปริมาณ 4 กิโลกรัมลักษณะเป็นผงสีดำ จากนั้นจะคัดขนาดโดยตะแกรงร่อนให้มีขนาดประมาณ 0.4 – 0.5 มิลลิเมตร

3.5 อุปกรณ์ในการทำการทดลอง

3.5.1 การวิเคราะห์สมบัติของกากสับุดำ

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุใช้เครื่องวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (C, H, N, Elemental Analyzer) รุ่น FISON Model NA-2000 แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 เครื่องวิเคราะห์แบบแยกธาตุ

3.5.2 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน

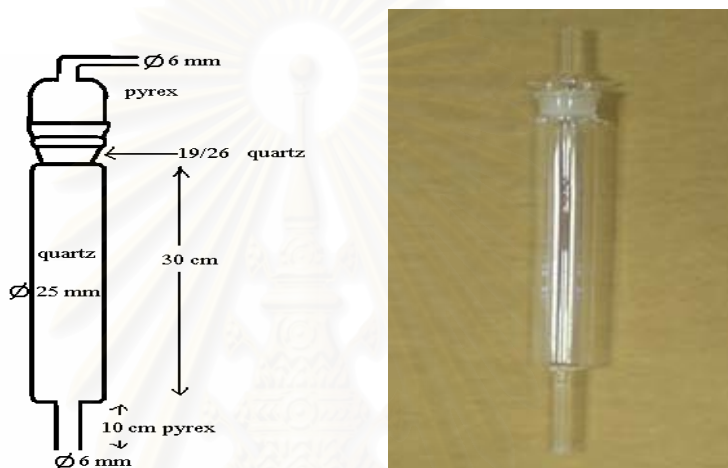
เครื่อง TG/DTA เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาการสลายตัวทางความร้อนหรือพฤติกรรมทางความร้อนของกากสับุดำ รุ่น Mettler Toledo TGA/STDA851° แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เครื่อง Thermogravimetric analysis (TGA)

3.5.3 เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบชั้นเบดนิ่ง

เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบชั้นเบดนิ่งสร้างขึ้นจากควอตซ์ โดยมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตรและมีความสูง 30 เซนติเมตร โดยมีการติดตั้งชั้นรองเพื่อรองรับสารชีวมวลไว้ภายในบริเวณส่วนล่างของเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิส ซึ่งก๊าซอาร์กอนจะเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ทางด้านล่างด้วยท่อส่ง และก๊าซผลิตภัณฑ์จะออกจากเครื่องปฏิกรณ์ทางด้านบน ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 เครื่องปฏิกรณ์ควอตซ์

3.5.4 ชุดควบคุมอุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิส ทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ให้คงที่ ประกอบไปด้วย

3.5.4.1 เตเผาให้ความร้อนแบบท่อกลม (Tubular Furnace)

ทำหน้าที่ให้ความร้อนและควบคุมอุณหภูมิภายในของเตาปฏิกรณ์ให้คงที่ตามสถานะที่ต้องการ โดยจะแปรค่าจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน



รูปที่ 3.4 เตเผาให้ความร้อนแบบท่อกลม (Tubular Furnace)

3.5.4.2 เทอร์โมคัปเปิ้ลวัดอุณหภูมิ

เทอร์โมคัปเปิ้ลวัดอุณหภูมิชนิดนี้เหมาะสำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิไม่เกิน 1,300 องศาเซลเซียส โดยอาศัยหลักการทำงานของความต่างของค่าอุณหภูมิที่วัดได้ระหว่างขั้วทั้งสอง เมื่อความแตกต่างของอุณหภูมิมากก็จะมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ส่งมาจากเทอร์โมคัปเปิ้ลจะเข้าเครื่องขยายสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งจะขยายสัญญาณได้ประมาณ 40 เท่า สัญญาณที่ถูกขยายจะถูกส่งเข้าเครื่องควบคุมอุณหภูมิ จากนั้นจะประมวลผลของสัญญาณที่ได้เป็นค่าของอุณหภูมิภายใต้ ซึ่งจะปรากฏให้เห็นบนเครื่องแปลงสัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิ้ล



รูปที่ 3.5 เทอร์โมคัปเปิ้ลวัดอุณหภูมิและเครื่องควบคุมอุณหภูมิ

3.4.3 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatograph; GC)

ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ยี่ห้อ Varian, CP-3800 รุ่น Trace Gas chromatograph (GC) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการแยกสารผสมที่ระเหยง่าย โดยสารผสมจะถูกฉีดเข้าไปในส่วนนของคอลัมน์ (Column) ที่บรรจุด้วยสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวยึดจับส่วนที่เรียกว่า Stationary phase และมีแก๊สพา (Carrier gas) เป็นส่วนของเฟสเคลื่อนที่ (Mobile phase) จะเคลื่อนที่ไปตามคอลัมน์เข้าสู่เครื่องตัวตรวจวัด (Detector) สัญญาณที่เครื่องตรวจวัดได้รับนั้นจะถูกส่งไปบันทึกเป็นโครมาโทแกรม (Chromatogram) โดยเครื่องบันทึก (Recorder) ดังรูปที่ 3.6

รายละเอียดของส่วนประกอบที่สำคัญมีดังนี้

1. ก๊าซพา

ก๊าซพาเป็นก๊าซที่ใช้สำหรับพาสารตัวอย่าง ที่ถูกทำให้เป็นไอหรือก๊าซเฟสแล้วที่ส่วนที่ฉีดสารตัวอย่างให้เข้าสู่คอลัมน์ต่อไป ก๊าซพานี้ต้องมีการควบคุมอัตราการไหล (Flow rate) ให้คงที่เสมอ โดยสามารถเลือกใช้ใช้อัตราการไหลให้เหมาะสมได้ตามต้องการ อัตราการไหลของก๊าซพามีส่วนสำคัญต่อการวิเคราะห์ทั้งเชิงคุณภาพและปริมาณ ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมให้คงที่ ก๊าซพาโดยทั่วไปมีคุณสมบัติ คือมีสมบัติเฉื่อยไม่เกิดปฏิกิริยา

กับสารตัวอย่าง มีมวลโมเลกุลต่ำและมีการแพร่กระจาย มีความบริสุทธิ์สูงและราคาไม่แพง แก๊สพาที่ใช้กันโดยทั่วไป ได้แก่ แก๊สไนโตรเจน ฮีเลียม และแก๊สไฮโดรเจน

2. คอลัมน์

คอลัมน์เป็นส่วนสำคัญของการแยกสารด้วยเทคนิคทาง GC เมื่อแก๊สหรือไอของสารผสมในสารตัวอย่างผ่านคอลัมน์ สารที่บรรจุในคอลัมน์เปล่านั้นทำหน้าที่เป็นตัวแยกแก๊สหรือไอของสารผสมเหล่านั้นออกจากกันเป็นส่วนๆ ดังนั้นโครมาโทแกรมที่ได้จะดีหรือไม่จึงขึ้นอยู่กับชนิดของคอลัมน์มาก

3. ดีเทคเตอร์

ดีเทคเตอร์คือเครื่องที่สามารถบ่งบอกว่ามีสารที่ต้องการวิเคราะห์หรือมีสารอื่นที่แตกต่างไปจากแก๊สพาออกมาจากคอลัมน์หรือไม่ ถ้ามีก็จะสามารถวัดได้ว่ามีปริมาณเท่าใดได้ด้วย ดังนั้นเครื่องตรวจวัดจึงต้องเป็นเครื่องที่มีลักษณะเฉพาะ สามารถให้สัญญาณกับสารต่างๆ ได้ ให้สภาพไวที่สูงพอมีการตอบสนองที่ดีในช่วงความเข้มข้นของสารที่กว้างพอ ลักษณะเฉพาะที่ต้องการของดีเทคเตอร์นั้น ควรจะมีลักษณะเฉพาะในการตอบสนองต่อสารเคมีที่ต้องการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

- ให้สภาพความไวสูง (High sensitivity)
- มีความเฉพาะต่อการตรวจหาสาร (Selectivity)
- ให้ผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณมีช่วงความเข้มข้นที่กว้างพอที่จะวัดได้อย่างถูกต้อง และมีเสถียรภาพ (Stability) และความเที่ยง (Reproducibility)



รูปที่ 3.6 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography / Flame Ionized Detector / Thermal Conductivity Detector , GC/FID/TCD).

ตารางที่ 3.1 ภาวะการวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซโดยเครื่องโครมาโทกราฟี

ก๊าซพา (Carrier Gas)	ก๊าซอาร์กอน (Ar)
อัตราการไหลของก๊าซพา	5 มิลลิลิตรต่อนาที
ชนิดคอลัมน์	Molecular sieve 5A (MS-5A)
อุณหภูมิการฉีด (Injector Temperature)	35 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิกอลัมน์	35 องศาเซลเซียส
ระบบตรวจวัด (Detector)	TCD, FID
อุณหภูมิระบบตรวจวัด	150 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 3.2 ภาวะการวิเคราะห์องค์ประกอบของเหลวโดยเครื่องโครมาโทกราฟี

ก๊าซพา (Carrier Gas)	ก๊าซฮีเลียม (He)
อัตราการไหลของก๊าซพา	2.5 มิลลิลิตรต่อนาที
ชนิดคอลัมน์	DB-WAX Capillary
อุณหภูมิการฉีด (Injector Temperature)	200 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิกอลัมน์	50, 250 องศาเซลเซียส
ระบบตรวจวัด (Detector)	FID
อุณหภูมิระบบตรวจวัด	150 องศาเซลเซียส

3.6 การดำเนินการวิจัย

3.6.1 ศึกษาลักษณะทางเคมีของกากสับดูดำ

การวิเคราะห์ลักษณะทางเคมีกากสับดูดำทำการวิเคราะห์ทั้งลักษณะสมบัติทางเคมี (Proximate Analysis) และวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (Ultimate Analysis) ซึ่งวิเคราะห์ตามวิธี American Standard ตามตารางที่ 3.3 และตารางที่ 3.4 (ดูภาคผนวก ก) โดยในงานวิจัยนี้ใช้ตัวอย่างที่เป็นผงแห้ง และในแต่ละครั้งการทดลองจะทำการทดลองซ้ำตัวอย่างละ 2 ครั้งในทุกการทดลอง

ตารางที่ 3.3 วิธีการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางเคมี แบบ Proximate Analysis

ลำดับที่	องค์ประกอบที่วิเคราะห์	วิธีวิเคราะห์
1.	ความชื้น (Moisture)	ASTM E871
2.	เถ้า (Ash)	ASTM D1102
3.	สารระเหย (Volatile matter)	ASTM E872
4.	คาร์บอน (Fixed carbon)	ASTM E872

ตารางที่ 3.4 วิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี แบบ Ultimate Analysis

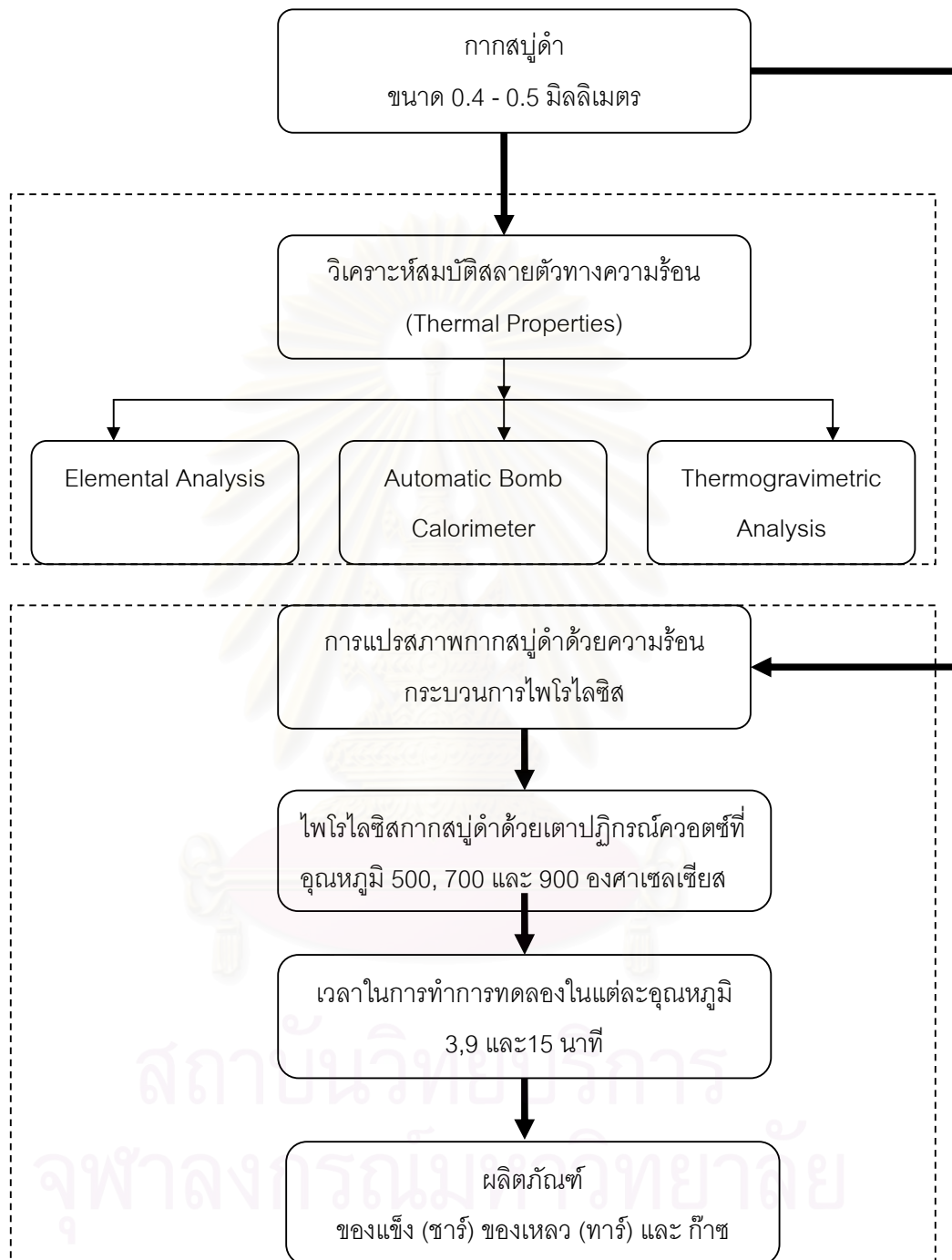
ลำดับที่	องค์ประกอบที่วิเคราะห์	วิธีวิเคราะห์
1.	คาร์บอน (Carbon)	ASTM D 5373
2.	ไฮโดรเจน (Hydrogen)	ASTM D 5373
3.	ออกซิเจน (Oxygen)	ASTM D 5373
4.	ซัลเฟอร์ (Sulfur)	ASTM D 3177
5.	ไนโตรเจน (Nitrogen)	ASTM D 5373

3.6.2 การวิเคราะห์ทดสอบสมบัติทางความร้อนของกากสับดำ

นำมาทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ค่าความร้อน (Automatic Bomb-calorimeter) รุ่น Leco model AC-350 (ดูภาคผนวก ก) โดยในงานวิจัยนี้ใช้ตัวอย่างที่เป็นผงแห้ง และในแต่ละครั้ง การทดลองจะทำการทดลองซ้ำตัวอย่างละ 2 ครั้ง

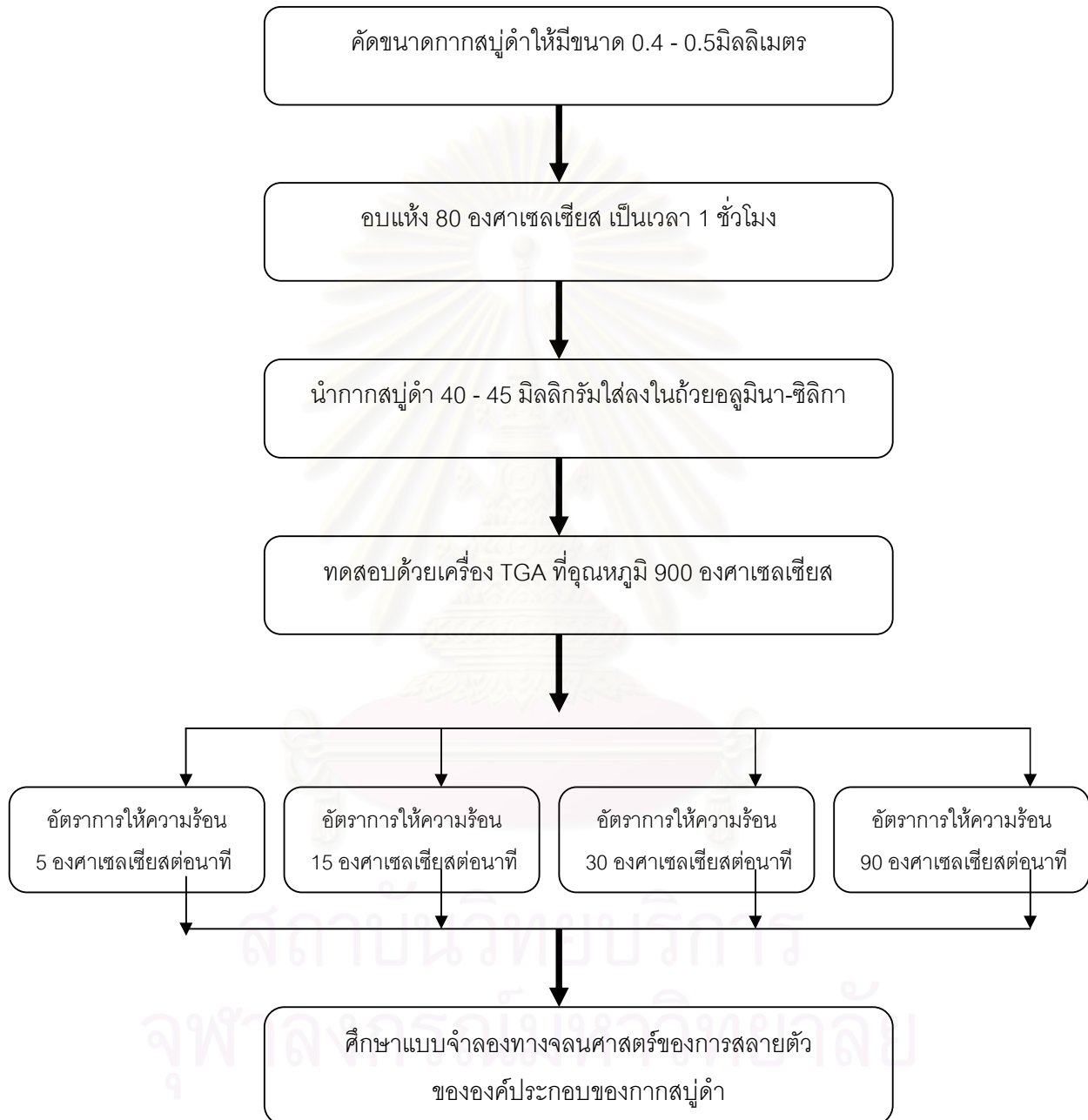
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.6.3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย



รูปที่ 3.7 แผนการดำเนินงานวิจัย

3.6.4 ขั้นตอนและภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราฟีเมตริก (Thermogravimetric analysis, TGA)



รูปที่ 3.8 ขั้นตอนกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราฟีเมตริก

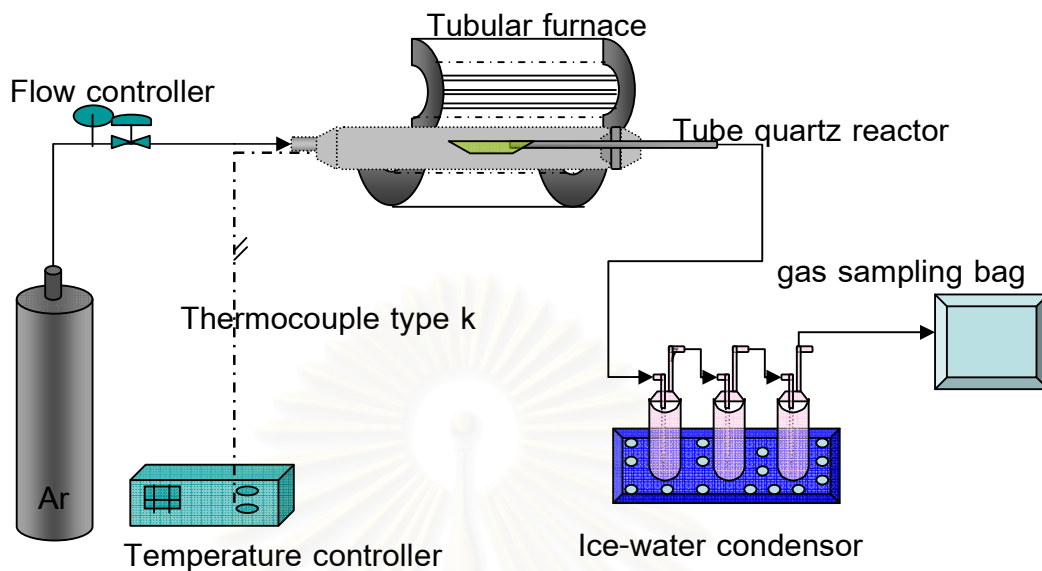
ตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ อัตราการให้ความร้อนที่แตกต่างกัน ณ อุณหภูมิคงที่ ดังแสดงในตารางที่ 3.5 และรูปที่ 3.8 ซึ่งการศึกษการสลายตัวด้วยความร้อนโดยจะวิเคราะห์หาปริมาณสารระเหยที่ได้ ปริมาณคาร์บอนคงตัว และปริมาณเถ้าในกากสับุดำ และสร้างแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ของการสลายตัวภายใต้ความร้อนโดยใช้ข้อมูลจากการวิเคราะห์ได้จากเทคนิคเทอร์โมกราฟีเมตริก

ตารางที่ 3.5 ตัวแปรที่ทำการศึกษาด้วยเทคนิคเทอร์โมกราฟีเมตริก

ตัวแปร				
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	900			
อัตราการให้ความร้อน (องศาเซลเซียสต่อนาที)	5	15	30	90

3.6.5 การทดลองของกระบวนการไพโรไลซิสภายในเตาปฏิกรณ์ควอตซ์แบบชั้นเบตหนึ่งระดับห้องปฏิบัติการ

การไพโรไลซิสของกากสับุดำโดยใช้ระบบเตาปฏิกรณ์แบบนอน (Horizontal fixed bed reactor) ในการทดลองใช้ตัวอย่างกากสับุดำ 1 กรัม ขนาดอนุภาค 0.425 – 0.5 มิลลิเมตร เป็นวัสดุดิบ ทำการสลายตัวแบบไพโรไลซิสในเตาปฏิกรณ์ควอตซ์แบบแนวนอน โดยทำปฏิกิริยาในสภาวะอุณหภูมิคงที่ (Isothermal condition) เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสแบบรวดเร็ว (Rapid pyrolysis) โดยเริ่มจากการเปิดก๊าซอาร์กอนเข้าสู่ระบบด้วยอัตราการไหล 67.5 มิลลิลิตรต่อนาที เพื่อไล่อากาศที่อยู่ภายในระบบออก พร้อมทั้งเปิดสวิทช์ขดลวดความร้อน ตั้งอุณหภูมิในเตาเผาแบบท่อกลวง (Tubular furnace) ณ ความดันบรรยากาศ เมื่ออุณหภูมิในเตาเผาถึงอุณหภูมิที่ต้องการศึกษาคือ 500, 700 และ 900 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จึงนำเตาปฏิกรณ์แก้วควอตซ์ มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 25 มิลลิเมตร ยาว 300 มิลลิเมตร ที่บรรจุด้วยกากสับุดำใส่ลงไปภายในเตาเผาแบบท่อกลวง โดยในแต่ละอุณหภูมิที่ศึกษา จะใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 3, 9, และ 15 นาที ตามลำดับ ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจะประกอบด้วย ก๊าซ ของเหลว (ในรูปของทาร์) ซึ่งควบแน่นอยู่ในชุดควบแน่นและติดอยู่ในท่อ และของแข็ง (ในรูปของชาร์) ที่เหลืออยู่ในเตาปฏิกรณ์ ทำการเก็บตัวอย่างก๊าซโดยใช้ถุงเก็บก๊าซ (Tedlar bag) ที่มีปริมาตร 300 มิลลิลิตร แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วย GC (Gas Chromatography) และของแข็ง (ในรูปของชาร์) แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TGA เพื่อหาปริมาณคาร์บอนคงตัว สารระเหยได้ และเถ้า

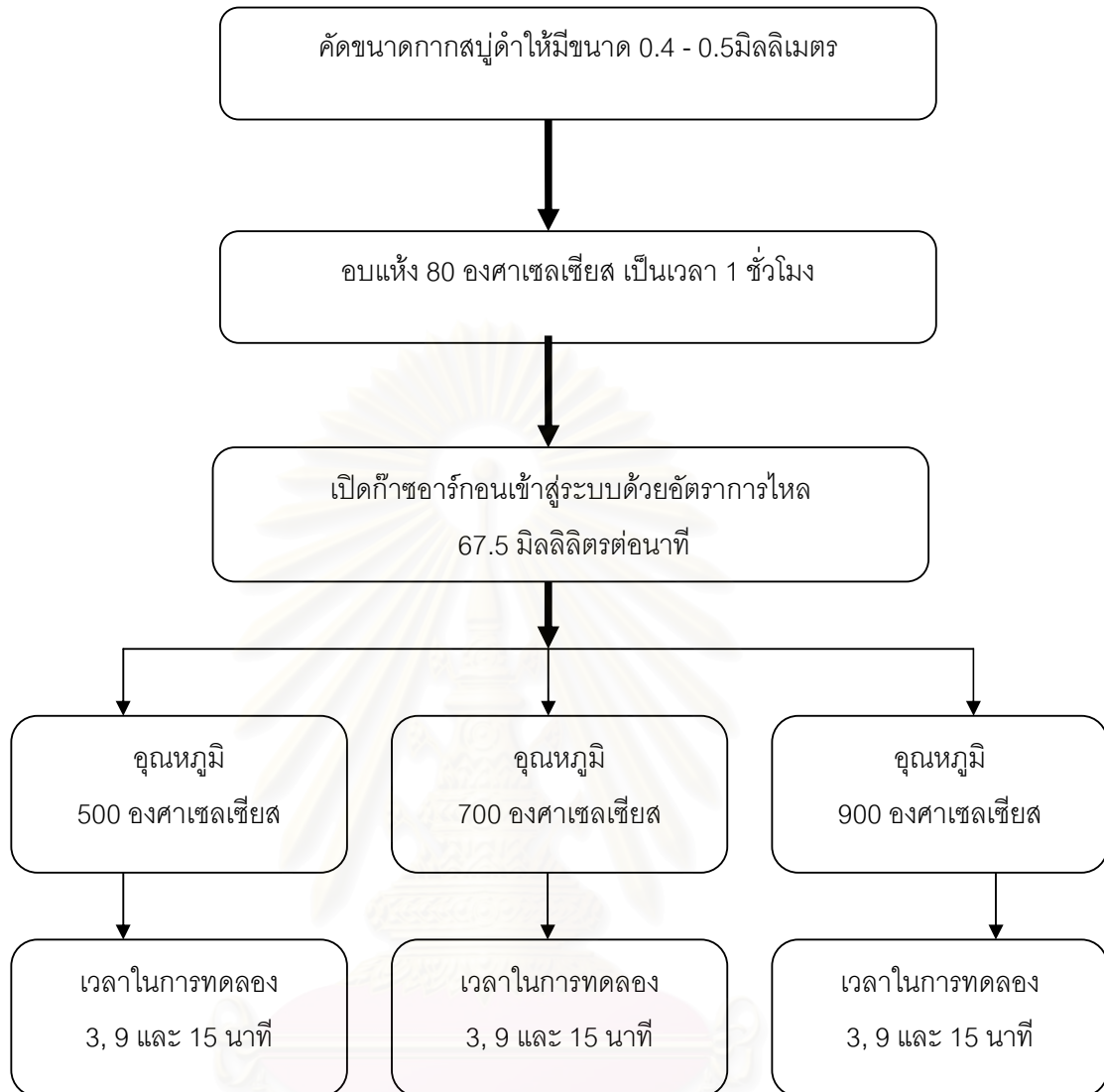


รูปที่ 3.9 กระบวนการไพโรไลซิสในเตาปฏิกรณ์ควอตซ์แบบชั้นแบนนิ่ง

ตัวแปรที่ทำการศึกษา คือ อุณหภูมิ และเวลาในการทดลอง เพื่อตรวจสอบดูอิทธิพลของตัวแปรต่อปริมาณขององค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ ได้แก่ ก๊าซสังเคราะห์ ของเหลวทาร์ และถ่านชาร์ ดังแสดงในตารางที่ 3.6 และรูปที่ 3.10

ตารางที่ 3.6 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในกระบวนการไพโรไลซิส

ตัวแปร			
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	500	700	900
เวลาในการทดลอง (นาที)	3	9	15



รูปที่ 3.10 ขั้นตอนกระบวนการโฟโวลซิสในเตาปฏิกรณ์ควอตซ์แบบชั้นเบตนิ่ง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

งานวิจัยนี้ศึกษาถึงกระบวนการไพโรไลซิสของชีวมวลในเตาปฏิกรณ์ควอตซ์แบบชั้นเบดนิ่งชีวมวลที่นำมาศึกษาคือ กากสับุดำ ซึ่งมีความเหมาะสมในการนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทนในการทดลองนี้ ได้ดำเนินการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อกระบวนการไพโรไลซิสของชีวมวลดังกล่าว ได้แก่ อุณหภูมิ และเวลาในการให้ความร้อน โดยผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองแบ่งออกเป็น 3 ส่วนด้วยกันคือ ส่วนที่ 1 ผลการวิเคราะห์สมบัติของกากสับุดำ ได้แก่ การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางเคมี (Proximate Analysis) และองค์ประกอบทางเคมี (Ultimate analysis) ส่วนที่ 2 ผลการศึกษาการสลายตัวทางความร้อนระหว่างการไพโรไลซิสของกากสับุดำ และส่วนที่ 3 ผลการศึกษาการไพโรไลซิสของชีวมวลในเตาปฏิกรณ์เบดนิ่ง ได้แก่ การวิเคราะห์ร้อยละขององค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์ และการวิเคราะห์แบบประมาณของผลิตภัณฑ์ของแข็งหรือซาร์ รวมถึงการวิเคราะห์องค์ประกอบผลิตภัณฑ์ของเหลว

4.1 การวิเคราะห์สมบัติของกากสับุดำ

การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางเคมี เป็นการวิเคราะห์เบื้องต้นเพื่อหาสมบัติของกากสับุดำ โดยวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D3173 – D3175 ได้แก่ เถ้า สารระเหย และคาร์บอนคงตัว การวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีของกากสับุดำตามมาตรฐาน Tappi และ AOAC 2000 และการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี โดยใช้เครื่องวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (C, H, N, Elemental Analyzer) แสดงผลดังตารางที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 (ภาคผนวก ก)

จากการวิเคราะห์แบบประมาณของกากสับุดำพบค่าคาร์บอนคงตัว 18.86% และสารระเหยได้ 79.20% และจากการวิเคราะห์แบบแยกธาตุมีคาร์บอน 52.30% ไฮโดรเจน และออกซิเจน 6.50% และ 36.00% ตามลำดับ แสดงถึงศักยภาพของกากสับุดำที่น่าจะสามารถให้ผลิตภัณฑ์สังเคราะห์ที่มีไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ และสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (C_1 - C_5 hydrocarbons) เป็นองค์ประกอบ

การวิเคราะห์ทดสอบสมบัติทางความร้อนของกากสับุดำ โดยการนำมาทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ค่าความร้อน (Automatic Bomb-calorimeter) รุ่น Leco model AC-35 แสดงผลดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของกากสับดูดำเมื่อเปรียบเทียบกับชนิดชีวมวลต่างๆ

รายการวิเคราะห์	ชนิดของชีวมวล			
	กากสับดูดำ (งานวิจัยนี้)	ปาล์ม Luangkiattikhun, P. และคณะ (2007)	เมล็ดข้าว Song, H. และคณะ (2007)	ชานอ้อย Puigjaner, L. และคณะ (2003)
	ร้อยละ	ร้อยละ	ร้อยละ	ร้อยละ
ความชื้น	0.66	0.10	5.68	2.20
เถ้า	1.50	3.60	14.11	4.30
สารระเหยได้	79.20	72.70	66.71	64.10
คาร์บอนคงตัว	18.86	23.60	13.50	23.40

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์กากสับดูดำแบบแยกธาตุของกากสับดูดำเมื่อเปรียบเทียบกับชนิดชีวมวลชนิดต่างๆ

รายการวิเคราะห์	ชนิดของชีวมวล			
	กากสับดูดำ (งานวิจัยนี้)	ปาล์ม Luangkiattikhun, P. และคณะ (2007)	เมล็ดข้าว Song, H. และคณะ (2007)	ชานอ้อย Puigjaner, L. และคณะ (2003)
	ร้อยละ	ร้อยละ	ร้อยละ	ร้อยละ
คาร์บอน	52.30	47.60	38.10	45.70
ไฮโดรเจน	6.50	5.38	5.25	5.80
ไนโตรเจน	5.20	0.66	0.86	0.40
ออกซิเจน	36.00	41.38	55.77	48.10

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีของกากสับุดำตามมาตรฐาน Tappi และ AOAC 2000

การวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีของกากสับุดำ มาตรฐาน Tappi	
รายการวิเคราะห์	ร้อยละ
เซลลูโลส	56.31
เฮมิเซลลูโลส	17.47
ลิกนิน	23.91
การวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีของกากสับุดำ มาตรฐาน AOAC 2000	
รายการวิเคราะห์	ร้อยละ
โปรตีน	15.21
ไขมันและน้ำมัน	26.36
เยื่อ	43.61
เถ้า	4.46
ความชื้น	7.16

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของกากสับุดำ

	ชนิดของชีวมวล			
	กากสับุดำ (งานวิจัยนี้)	ปาล์ม Luangkiattikhun, P และคณะ (2007)	เมล็ดข้าว Song, H และคณะ(2007)	ชานอ้อย Puigjaner, L. และคณะ (2003)
ค่าความร้อน (แคลอรีต่อกกรัม)	4539.9	4201.4	1713.5	2850

จากตารางที่ 4.4 ซึ่งแสดงค่าความร้อนของชีวมวล (calorific value) จะเป็นการเปรียบเทียบค่าความร้อนกับชีวมวลชนิดต่าง ๆ พบว่ากากสับุดามีค่าความร้อน 4539.9 แคลอรีต่อกกรัม มีค่าใกล้เคียงกับปาล์มซึ่งจัดเป็นพืชน้ำมันจำพวกเดียวกัน โดยค่าความร้อนเป็นคุณสมบัติของชีวมวลทุกชนิดที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพในการให้ความร้อนของเชื้อเพลิงชนิดนั้น ๆ ซึ่งเชื้อเพลิงแต่ละชนิดจะมีค่าความร้อนไม่เท่ากันและชีวมวลชนิดเดียวกันแต่มาจากแหล่งต่างกัน อาจมีค่าความร้อนต่างกัน ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงแต่ละชนิดจะขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของเชื้อเพลิงนั้นว่ามีปริมาณของธาตุคาร์บอนผสมอยู่มากน้อยเพียงใด

4.2 การสลายตัวทางความร้อนระหว่างการไพโรไลซิส

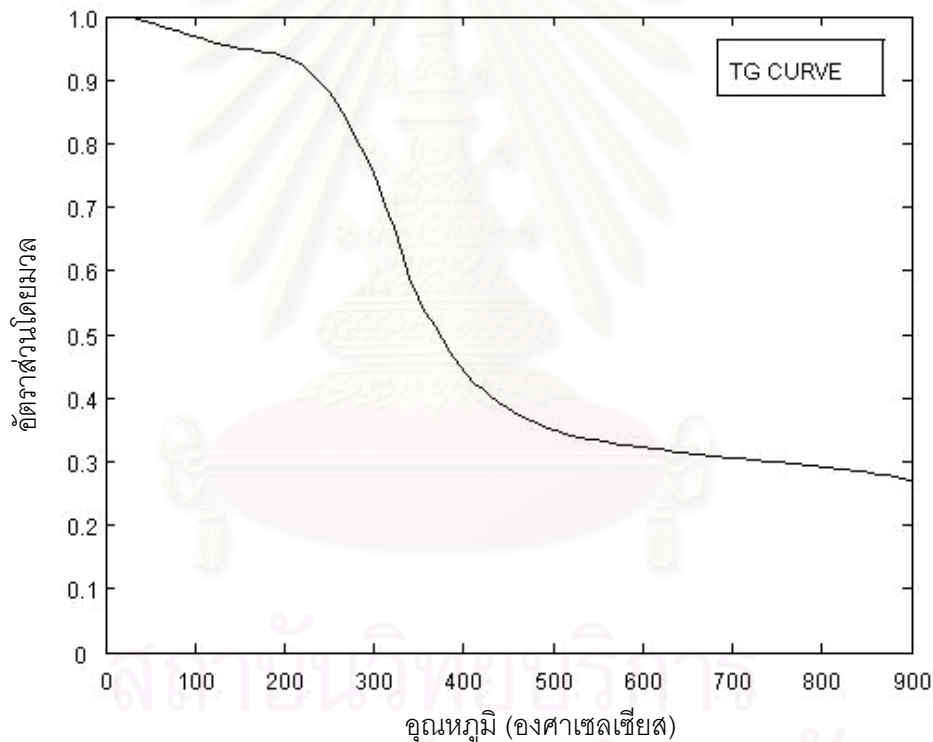
การสลายตัวทางความร้อนระหว่างการไพโรไลซิสของกากสับุดาศึกษาโดยวัดจากการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่าง เมื่อเวลา หรืออุณหภูมิ ระหว่างการไพโรไลซิสเปลี่ยนไป โดยการทดลองเริ่มต้นจากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิสุดท้ายคือ 900 องศาเซลเซียส ขนาดของอนุภาค 0.4-0.5 มิลลิเมตร อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5, 15, 30, และ 90 องศาเซลเซียสต่อนาทีตามลำดับ เพื่อศึกษาผลของอัตราการให้ความร้อนต่อพฤติกรรมการสลายตัวของเชื้อเพลิง

การสลายตัวทางความร้อนของกากสับุดาศึกษาด้วยเทคนิคเทอร์โมกราฟีเมตริก แสดงดังรูปจากรูปที่ 4.1 จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียน้ำหนักจากการไพโรไลซิสกากสับุดาเมื่ออุณหภูมิ 25-900 องศาเซลเซียส และผลการทดลองการสลายตัวของกากสับุดาจากรูปที่ 4.2 พบว่าที่อุณหภูมิประมาณ 50-150 องศาเซลเซียส เกิดพีคของการสูญเสียน้ำหนักขององค์ประกอบในกากสับุดาโดยเกิดจากการระเหยของความชื้นที่มีอยู่ภายใน ต่อมาในช่วง 200-400 องศาเซลเซียส เกิดพีคของการสูญเสียน้ำหนัก 2 พีค และในช่วงอุณหภูมิประมาณ 500 องศาเซลเซียส พบว่ามีการสูญเสียน้ำหนักอย่างช้า ๆ จนถึงอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Vamvuka D.(2003) และ Shiguang L.และคณะ.(2004) ที่ได้ทำการศึกษาการสลายตัวของชีวมวลซึ่งองค์ประกอบภายในจะประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน โดยพบว่าจะเกิดพีคของการสลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 200-450 องศาเซลเซียส โดย 2 พีคที่เกิดขึ้นจะเป็นส่วนของการสลายตัวขององค์ประกอบของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส

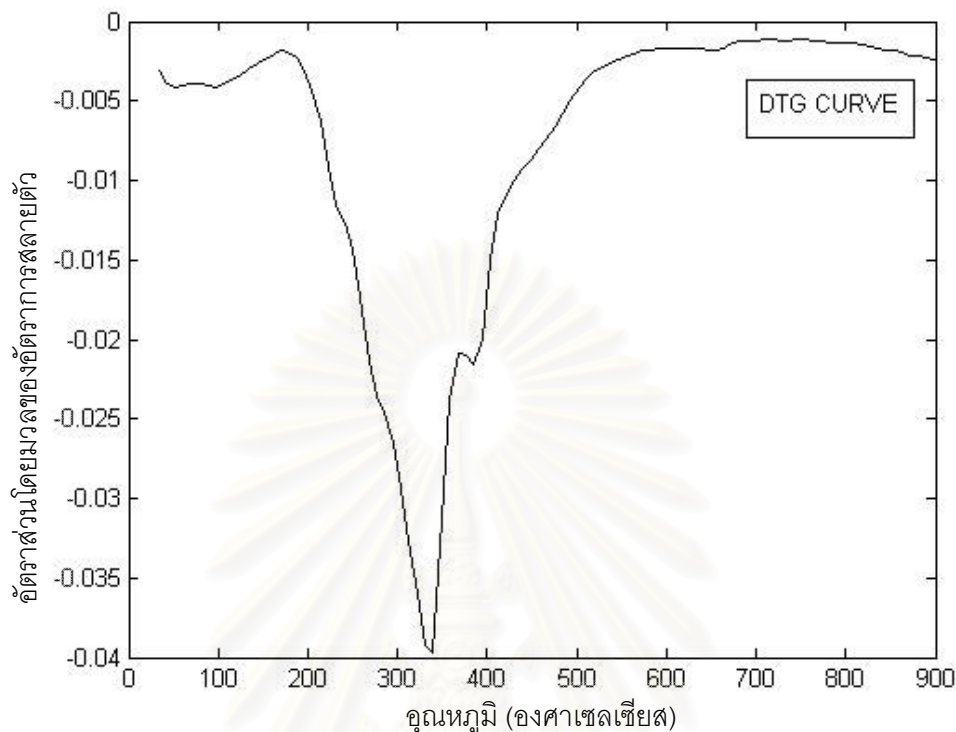
รูปแบบการสลายตัวของชีวมวลจะสัมพันธ์กับองค์ประกอบของชีวมวล ซึ่งชีวมวลทุกชนิดจะประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินเป็นองค์ประกอบสำคัญ โดยทั่วไปภายใต้อัตราการให้ความร้อนเดียวกัน เฮมิเซลลูโลสจะเกิดการสลายตัวอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 350

องศาเซลเซียส การสลายตัวของเซลลูโลสจะเกิดในช่วง 250-500 องศาเซลเซียส และการสลายตัวของลิกนินจะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ เป็นช่วงกว้าง (Font และคณะ, 1991) โดยไม่ปรากฏพีคของการสูญเสียน้ำหนักที่ชัดเจน เนื่องจากลิกนินเป็นองค์ประกอบที่เสถียรต่อความร้อนมากที่สุด

ดังนั้นจากการสลายตัวของกากสับุด้าในช่วงอุณหภูมิ 200-400 องศาเซลเซียส อาจกล่าวได้ว่าพีคแรกเป็นการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส และพีคที่สองเป็นการสลายตัวของเซลลูโลส โดยผลิตภัณฑ์ที่มีการปลดปล่อยออกมาในช่วงนี้คือ สารระเหยได้ และ ในช่วงท้ายของการสลายตัวคืออุณหภูมิตั้งแต่ 450 องศาเซลเซียสเป็นการสลายตัวอย่างช้า ๆ ของลิกนิน โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ ชาร์

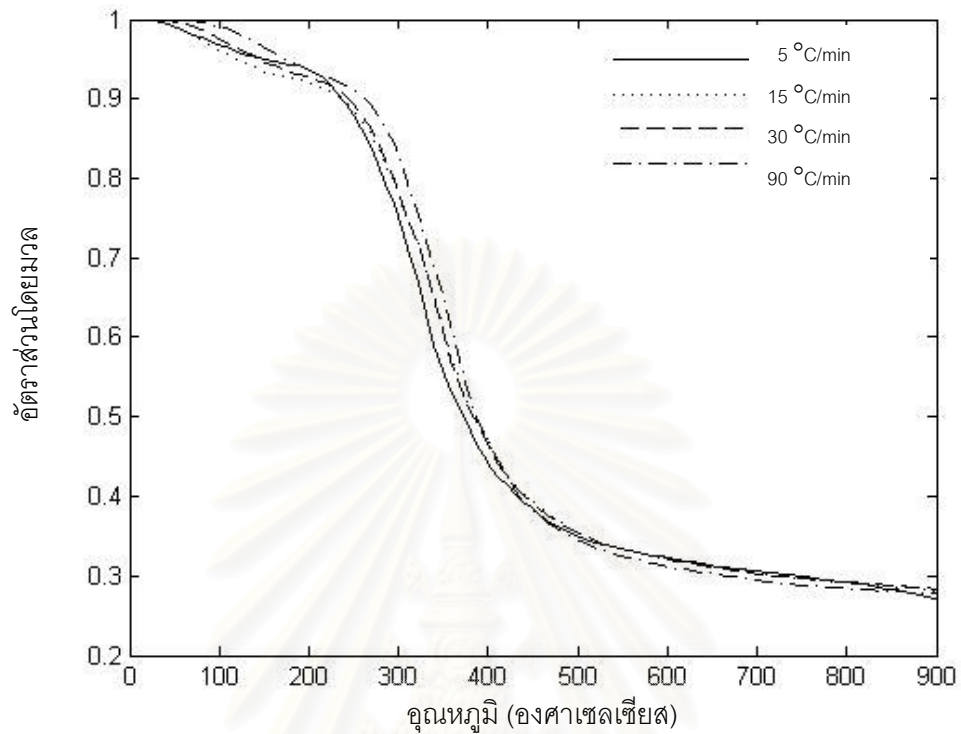


รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียน้ำหนักจากการไพโรไลซิสกากสับุด้าที่อุณหภูมิ 25-900 องศาเซลเซียส

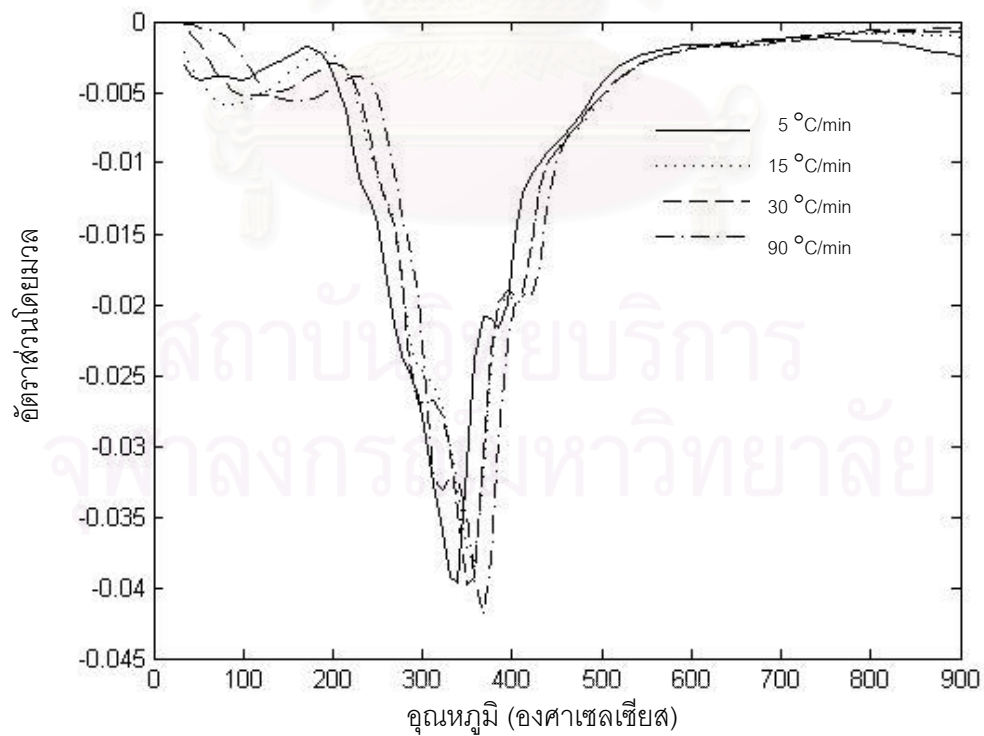


รูปที่ 4.2 อัตราการสลายตัวของกากสับดูดำจากการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 25-900 องศาเซลเซียส

ผลของอัตราการให้ความร้อนที่มีผลต่อการสลายตัวของกากสับดูดำ จากการทดลอง พบว่าการสลายตัวของกากสับดูดำเริ่มที่ประมาณ 220 องศาเซลเซียส เมื่อให้อัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที และที่ 300 องศาเซลเซียส เมื่ออัตราการให้ความร้อน 90 องศาเซลเซียสต่อนาที และยังคงมีสารตั้งต้นเหลือประมาณ 15-20% คาดว่าเป็นคาร์บอนคงตัว (fixed carbon) และขี้เถ้า (ash) สรุปได้ว่าถ้าให้อัตราความร้อนมากขึ้น จะทำให้เกิดการสลายตัวด้วยความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้นการระเหยขององค์ประกอบในกากสับดูดำ (devolatilization) ในช่วงอุณหภูมิ 150 ถึง 450 องศาเซลเซียส จะมีการซ้อนทับกันของการสลายด้วยความร้อนของหลายองค์ประกอบในลิกนินและเซลลูโลส (lignocellulose) เช่น แป้ง (starch) เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) เซลลูโลส (cellulose) และลิกนิน (lignin) อย่างไรก็ตามมีการสลายถ่านชาร์และลิกนินที่เหลืออยู่ในอุณหภูมิที่สูงขึ้น เพราะถ่านชาร์และลิกนินมีองค์ประกอบที่เสถียรและสลายตัวในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง ผลการทดลองการสลายตัวของกากสับดูดำจากข้อมูลกราฟ TG และ DTG ที่อัตราการให้ความร้อน 5 15 30 และ 90 องศาเซลเซียสต่อนาที แสดงดังรูปที่ 4.3 และ 4.4



รูปที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของกากสบูดำ ที่ภายใต้อัตราการให้ความร้อนต่างๆ



รูปที่ 4.4 อัตราการสลายตัวของกากสบูดำ ที่ภายใต้อัตราการให้ความร้อนต่างๆ

4.2.1 แบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ของการสลายตัวภายใต้ความร้อนโดยใช้ข้อมูลจากการวิเคราะห์เทคนิคเทอร์โมกราฟีเมตริก (Thermogravimetric analysis; TGA)

การสลายตัวของกากสบู้น้ำจะใช้แบบจำลองทางจลนศาสตร์เพื่ออธิบายหรือทำนายการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรทางจลนศาสตร์ ซึ่งเกี่ยวข้องกับพลังงานกระตุ้นในการเกิดปฏิกิริยาค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา และอันดับการเกิดปฏิกิริยาของการสลายตัวด้วยความร้อนของชีวมวล ซึ่งในการทดลองนี้ค่าตัวแปรจลนพลศาสตร์สามารถอธิบายได้ โดยหลักการสลายตัวด้วยความร้อนแบบปฏิกิริยาคู่ขนาน (Parallel reactions) จากในส่วนของสมการการสลายตัวที่ได้อธิบายในบทที่ 2 โดยจะนำมาใช้ในการคำนวณดังนี้

$$\frac{d\alpha}{dt} = A \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) (1-\alpha)^n \quad (2.10)$$

เมื่อจัดรูปสมการและทำการอินทิเกรตสมการ 2.10

$$\frac{d\alpha}{dt} = \left\{ \frac{(n-1)A_1}{\beta} \left(\int_T^{T_0} \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) dT \right) + 1 \right\}^{\frac{n}{1-n}} \quad (4.1)$$

โดยในงานวิจัยองค์ประกอบภายในของกากสบู้น้ำจะประกอบไปด้วยองค์ประกอบ 3 ชนิด คือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ดังนั้นจึงสามารถหาค่าตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ได้จากสมการผลรวมเชิงเส้นของแต่ละองค์ประกอบ ดังต่อไปนี้

$$\frac{d\alpha_i}{dt} = \sum_{i=1}^3 c_i \frac{d\alpha_i}{dt} \quad (4.2)$$

เมื่อ a, b, c คือ ค่าเริ่มต้นขององค์ประกอบ α_1 , α_2 , α_3 และจะเป็นตัวกำหนดค่ามวลน้ำหนักรวมเริ่มต้นขององค์ประกอบเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินที่อยู่ในกากสบู้น้ำ โดยจะใช้ค่าความสัมพันธ์จากค่า $a+b+c = 1$ จากนั้นเมื่อแทนค่าตามสมการที่ 4.4 และจัดรูปสมการอินทิเกรต จะสามารถหาค่า α_1 , α_2 , α_3 จากนั้นจะได้สมการ 4.3 ดังนี้

$$\begin{aligned} \alpha &= \left[\frac{(n-1)A_1 RT^2}{\beta E_1} \left(1 - \frac{2RT}{E_1} \right) \exp\left(\frac{-E_1}{RT}\right) + a^{(1-n)} \right]^{\frac{1}{1-n}} \\ &+ \left[\frac{(n-1)A_2 RT^2}{\beta E_2} \left(1 - \frac{2RT}{E_2} \right) \exp\left(\frac{-E_2}{RT}\right) + b^{(1-n)} \right]^{\frac{1}{1-n}} \end{aligned}$$

$$+ \left[\frac{(n-1)A_3RT^2}{\beta E_3} \left(1 - \frac{2RT}{E_3} \right) \exp\left(\frac{-E_3}{RT}\right) + c^{(1-n)} \right]^{\frac{1}{1-n}} \quad (4.3)$$

จากสมการที่ 4.3 จะใช้ในการเปรียบเทียบค่าจากผลการทดลองและใช้หาค่าตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ (a, b, c, A₁, E₁, A₂, E₂, A₃, E₃ และ n) เพื่อนำมาใช้ในเปรียบเทียบการคำนวณค่าผ่านจากแบบจำลอง โดยในการคำนวณค่าตัวแปรทางจลนพลศาสตร์นั้น จะใช้การเขียนโปรแกรม MATLAB R2007a บริษัท Mathwork ในการคำนวณ (ขั้นตอนการเขียนโปรแกรม code matlab ดูตามภาคผนวก ง) ต่อมาจึงนำข้อมูลการสลายตัวของกากสับดูดำที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาเปรียบเทียบที่อัตราการให้ความร้อนต่างๆ จะแสดงดังรูปที่ 4.5 ถึง 4.9 และส่วนของค่าตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ที่สามารถหาค่าได้จากการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกากสับดูดำจะแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ (a, b, c, A₁, E₁, A₂, E₂, A₃, E₃ และ n) ที่คำนวณได้จากปฏิกิริยาคู่ขนาน จากแบบจำลองปฏิกิริยาการไพโรไลซิสกากสับดูดำของสามปฏิกิริยาคู่ขนาน (Three parallel reaction model)

ค่าตัวแปรทางจลนศาสตร์ (Kinetic parameters)				
	อัตราการให้ความร้อน (Heating rate, °C/min)			
	5	15	30	90
a	0.342			
b	0.450			
c	0.208			
A ₁ (min ⁻¹)	5.93 x 10 ³	4.32 x 10 ³	1.76 x 10 ³	2.06 x 10 ²
E ₁ (kJ/mol)	67.95	49.26	45.73	40.90
A ₂ (min ⁻¹)	8.35 x 10 ¹⁴	2.56x 10 ¹⁴	2.78x 10 ¹⁵	1.92x 10 ¹⁵
E ₂ (kJ/mol)	235.25	227.37	218.47	186.52
A ₃ (min ⁻¹)	5.81x 10 ¹⁶	4.92x 10 ¹⁴	2.21x 10 ¹⁴	1.56x 10 ¹⁵
E ₃ (kJ/mol)	149.51	143.19	98.73	97.34
n	3.24	3.05	2.37	2.46
Max error (%)	3.90	4.14	2.62	2.74

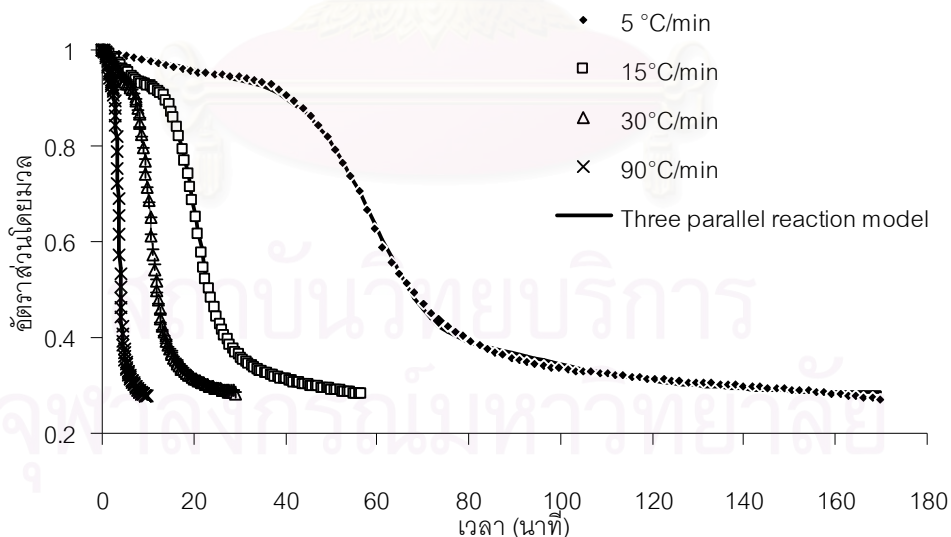
หมายเหตุ A คือ ค่าคงที่ของ Arrhenius หรือแฟกเตอร์ความถี่ (Frequency factor, min⁻¹)

E คือ ค่าพลังงานกระตุ้น (Activation energy, kJ/mol)

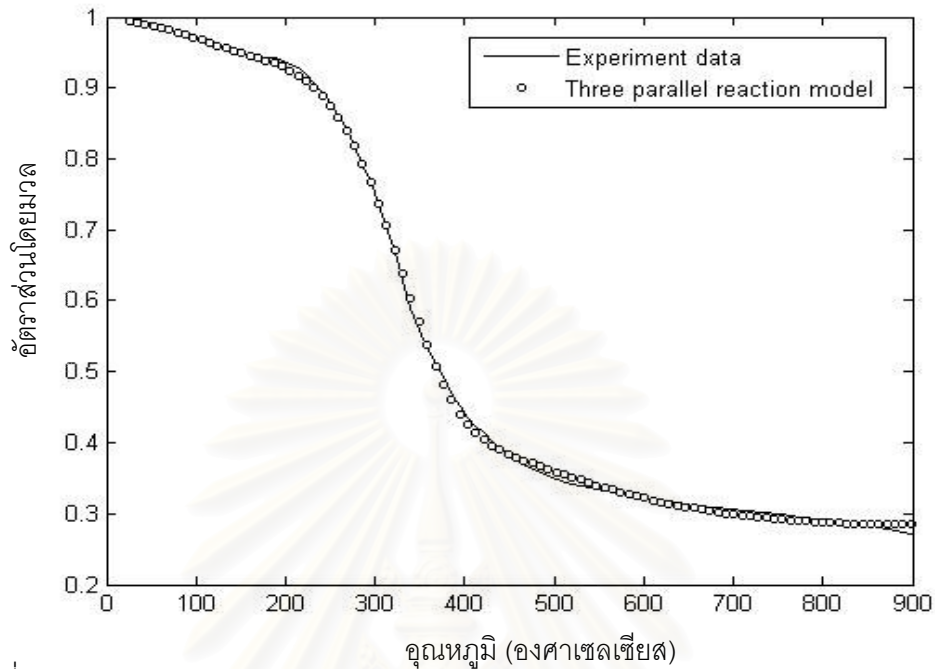
n คือ ค่าลำดับการเกิดปฏิกิริยา (Order of reaction)

a, b, c คือ องค์ประกอบเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน

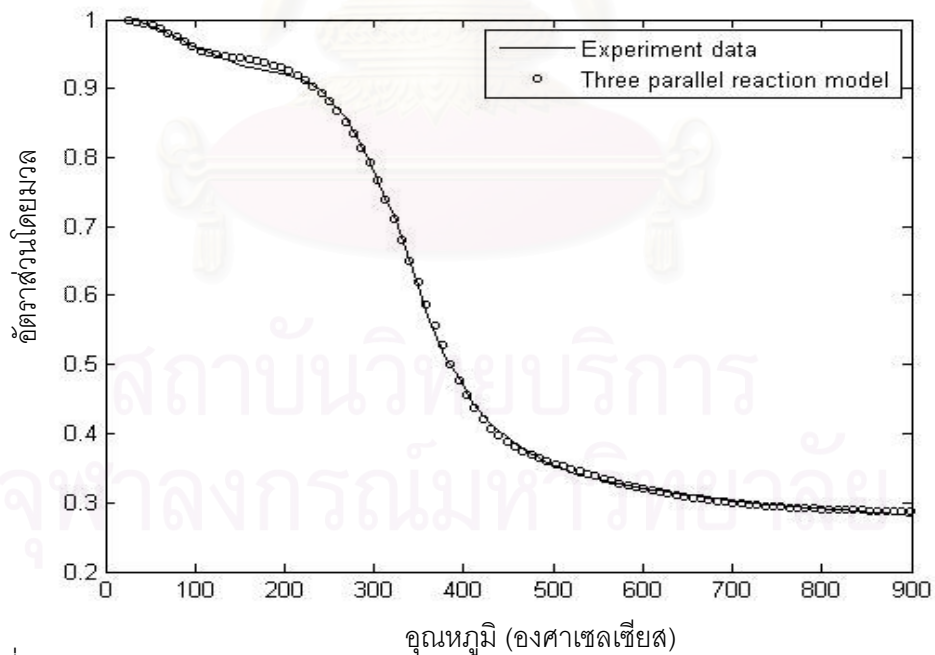
จากการคำนวณค่าตัวแปรโดยใช้จำลองทางคณิตศาสตร์พบว่าค่าพลังงานกระตุ้นขององค์ประกอบจำพวกแป้งจะอยู่ในช่วง 60-150 kJ/mol ค่าพลังงานกระตุ้นขององค์ประกอบเซลลูโลส จะอยู่ในช่วง 185-235 kJ/mol และ ค่าพลังงานกระตุ้นขององค์ประกอบลิกนินจะอยู่ในช่วง 90-150 kJ/mol และค่าลำดับการเกิดปฏิกิริยาอยู่ในช่วง 2.35-3.50 เมื่อเทียบกับค่าตัวแปรทางจลนพลศาสตร์งานวิจัยที่ผ่านมาแสดงดังตารางที่ 4.5 จากเปรียบเทียบกับพบว่า ค่าพลังงานกระตุ้นการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสจะมีค่าต่ำกว่าค่าของเซลลูโลส เนื่องจากอิทธิพลของการแตกสลายพันธะระหว่างคาร์บอนอะตอมและออกซิเจนอะตอมไปเป็นเพนโตซาน (Pentosan) ส่วนพันธะไฮโดรเจนจะมีผลต่อการทนความร้อนขององค์ประกอบเซลลูโลส จึงมีค่าพลังงานกระตุ้นสูง โดยในส่วนของค่าแฟกเตอร์ความถี่ (A) และค่าพลังงานกระตุ้น (E) จะเป็นตัวกำหนดความยากหรือง่ายในการเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิส โดยผลการทดลองค่าแฟกเตอร์ความถี่สูงและค่าพลังงานกระตุ้นมีค่าต่ำจะมีผลทำให้เกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสได้อย่างรวดเร็ว



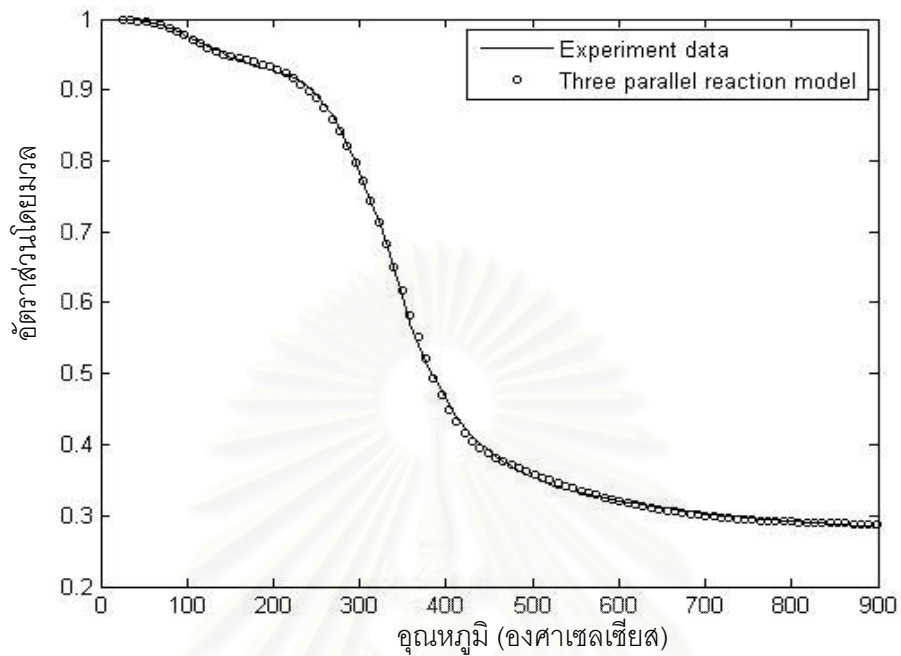
รูปที่ 4.5 TG curve และ three parallel reaction model fitting ของการสลายตัวด้วยความร้อนของกากสับดู้า ที่อัตราการให้ความร้อนต่างๆ



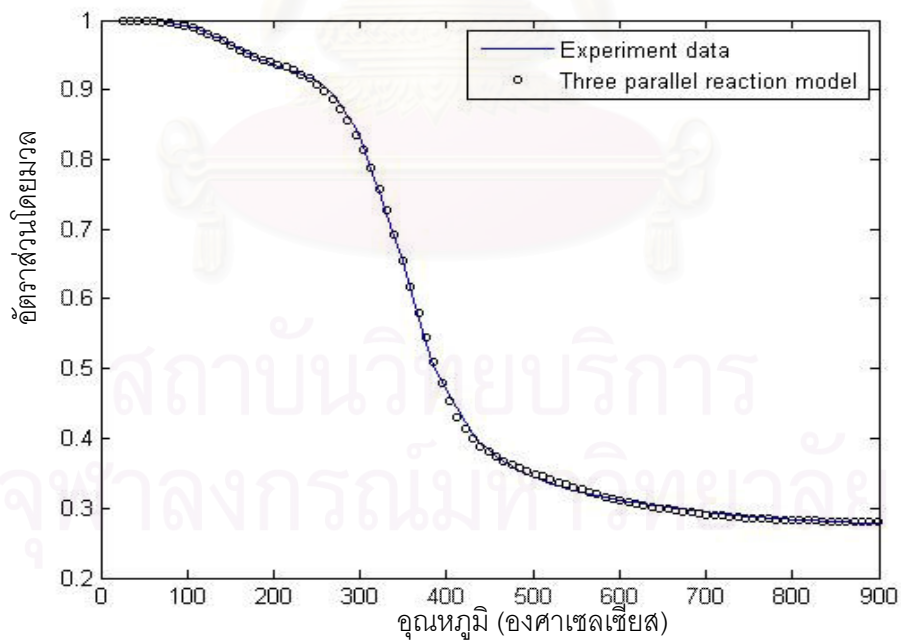
รูปที่ 4.6 TG curve และ three parallel reaction model fitting ของการสลายตัวด้วยความร้อนของกากสบู่น้ำ ที่อัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที



รูปที่ 4.7 TG curve และ three parallel reaction model fitting ของการสลายตัวด้วยความร้อนของกากสบู่น้ำ ที่อัตราการให้ความร้อน 15 องศาเซลเซียสต่อนาที



รูปที่ 4.8 TG curve และ three parallel reaction model fitting ของการสลายตัวด้วยความร้อนของกากสับุด้า ที่อัตราการให้ความร้อน 30 องศาเซลเซียสต่อนาที



รูปที่ 4.9 TG curve และ three parallel reaction model fitting ของการสลายตัวด้วยความร้อนของกากสับุด้า ที่อัตราการให้ความร้อน 90 องศาเซลเซียสต่อนาที

ตารางที่ 4.5 การเปรียบเทียบค่าพลังงานกระตุ้นของการเกิดปฏิกิริยาของการสลายตัวจากกากสบู่นำกับงานวิจัยอื่นๆ

ผู้แต่ง	วัตถุดิบ	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	องค์ประกอบ		
			เฮมิเซลลูโลส	เซลลูโลส	ลิกนิน
Font และคณะ (1991)	เมล็ดแอลมอล	100 - 700	$A = 2.5 \times 10^5$ $E = 98.3$	$A = 2.43 \times 10^{18}$ $E = 256.8 \text{ kJ}$	$A = 1.21 \times 10^6$ $E = 109.9$
L. Puigjaner และ คณะ (2003)	ชานอ้อย	25 - 1000	$A = 4.7 \times 10^{15}$ $E = 194.0$	$A = 1.0 \times 10^{18}$ $E = 243.3$	$A = 0.7$ $E = 37$
H.Song และคณะ (2007)	เมล็ดข้าว	30 - 900	$A = 9.6 \times 10^{12}$ $E = 194.0$	$A = 2.6 \times 10^{15}$ $E = 200$	$A = 8.0 \times 10^{-1}$ $E = 32$
P. luangkiattikhun และคณะ (2007)	ปาล์ม	25 - 700	$A = 9.82 \times 10^{17}$ $E = 162$	$A = 1.24 \times 10^{25}$ $E = 301.0$	- -
R. Miranda และคณะ (2007)	ฟ้าย	25 - 1000	$A = 1.5 \times 10^3$ $E = 40$	$A = 4 \times 10^{15}$ $E = 190$	$A = 9 \times 10^{13}$ $E = 168$
งานวิจัยนี้	กากสบู่นำ	25 - 900	$A = 5.93 \times 10^3$ $E = 67.95$	$A = 8.35 \times 10^{14}$ $E = 235.25$	$A = 5.81 \times 10^{16}$ $E = 149.51$

หมายเหตุ A = ค่าคงที่ของ Arrhenius หรือแฟกเตอร์ความถี่ (ต่อวินาที)

E = พลังงานกระตุ้น (กิโลจูลต่อโมล)

4.3 ไพโรไลซิสของกากสบู่ดำในเตาปฏิกรณ์ควอตซ์แบบชั้นเบดนิ่ง

การออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการไพโรไลซิสของกากสบู่ดำ โดยทำการทดลองมีตัวแปรทั้งหมด 2 ตัวแปร คือ อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการทดลอง โดยทำการทดลองทำการป้อนกากสบู่ดำ 1 กรัม อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน 67.5 มิลลิลิตรต่อนาที ทดลองที่ความดัน 1 บรรยากาศ และผลของการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.5

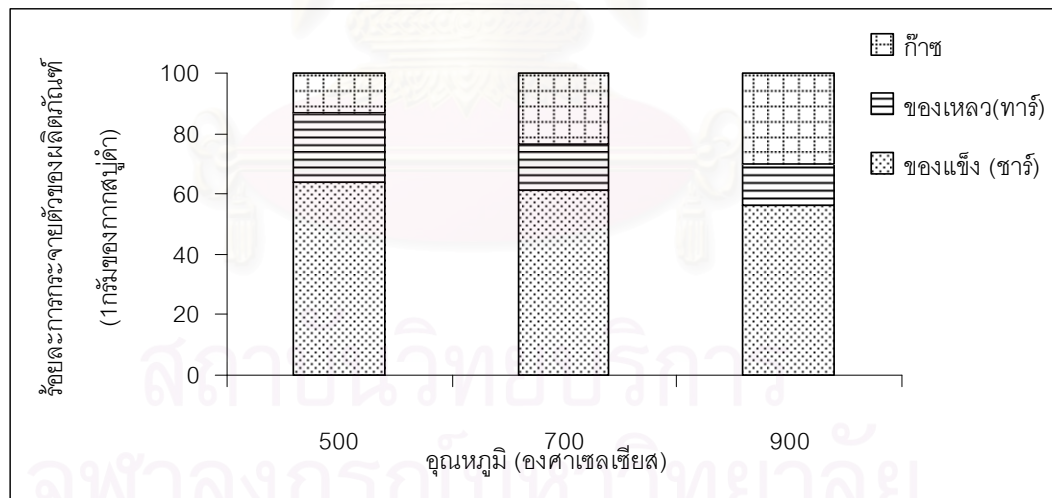
การไพโรไลซิสของกากสบู่ดำโดยใช้ระบบเตาปฏิกรณ์แบบนอน (Horizontal fixed bed reactor) ขนาด 0.425 – 0.5 มิลลิเมตรเป็นวัสดุทำ การสลายตัวแบบไพโรไลซิสในเตาปฏิกรณ์ควอตซ์แบบนอน โดยทำปฏิกิริยาในสภาวะอุณหภูมิคงที่ (Isothermal condition) เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาแบบรวดเร็ว (Rapid pyrolysis) โดยเริ่มจากการเปิดก๊าซอาร์กอนเข้าสู่ระบบเพื่อไล่อากาศที่อยู่ภายในระบบออก พร้อมทั้งเปิดสวิทช์ขดลวดความร้อน ตั้งอุณหภูมิในเตาเผาแบบท่อกลวง (Tubular Furnace) ณ ความดันบรรยากาศ เมื่ออุณหภูมิในเตาเผาถึงอุณหภูมิที่ต้องการศึกษาคือ 500, 700 และ 900 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จึงนำเตาปฏิกรณ์แก้วควอตซ์ มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 25 มิลลิเมตร ยาว 300 มิลลิเมตร ที่บรรจุด้วยกากสบู่ดำใส่ลงไปภายในเตาเผาแบบท่อกลวง โดยในแต่ละอุณหภูมิที่ศึกษาจะใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 3, 9, และ 15 นาที ตามลำดับ ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจะประกอบด้วย ก๊าซ ของเหลว (ในรูปของทาร์) ซึ่งควบแน่นอยู่ในชุดควบแน่นและติดอยู่ในท่อ และของแข็ง (ในรูปของชาร์) ที่เหลืออยู่ในเตาปฏิกรณ์ ทำการเก็บตัวอย่างก๊าซ โดยใช้ถุงเก็บก๊าซ (Tedlar bag) ที่มีปริมาตร 300 มิลลิลิตร แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วย GC (gas chromatography) และเก็บในส่วนของทาร์โดยใช้ตัวทำละลาย dichloromethane (CH_2Cl_2 ; DCM) เพื่อทำการวิเคราะห์สมบัติต่างๆต่อไป

4.3.1 การจำแนกผลิตภัณฑ์ (Product distribution)

ปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสในรูปของของแข็ง, ของเหลว (ในรูปของทาร์) และ ก๊าซ ที่อุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้ในการทดลองต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.10 โดยปริมาณของแข็งและของเหลวได้จากอัตราส่วนน้ำหนักแห้ง (dry basis) ที่ตรวจวัดได้โดยตรง เนื่องจากการวัดปริมาณก๊าซโดยตรงให้ได้ค่าที่แม่นยำเป็นไปได้ยากมาก ในที่นี้ปริมาณก๊าซจึงได้จากการทำสมดุลมวลสารของปริมาณวัตถุดิบเข้าหักลบด้วยปริมาณผลิตภัณฑ์ของแข็งและของเหลวที่วัดได้

ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองจากกระบวนการไพโรไลซิสของเตาปฏิกรณ์ควอตซ์แบบชั้นเบตนิ่ง ภายใต้บรรยากาศก๊าซอาร์กอน

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลาที่ใช้ในการทดลอง (นาท)	ปริมาณ ก๊าซ (%)	ปริมาณ ของเหลว (%)	ปริมาณ ของแข็ง (%)
500	3	7.15	25.54	67.31
	9	12.81	23.24	63.95
	15	12.88	23.26	63.86
700	3	18.75	11.24	70.01
	9	23.49	11.94	64.57
	15	23.74	15.05	61.21
900	3	14.63	15.25	70.12
	9	22.39	12.75	64.86
	15	30.15	13.32	56.53



รูปที่ 4.10 ร้อยละการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการไพโรไลซิสกากสบูดำที่อุณหภูมิ

500, 700 และ 900 องศาเซลเซียส

จากตารางที่ 4.6 สรุปได้ว่าอุณหภูมามีผลอย่างชัดเจนต่อปริมาณการสลายตัวของกากสบูดำ โดยพบว่าเมื่ออุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 500 องศาเซลเซียส เป็น 900 องศาเซลเซียส จะได้ก๊าซเป็นผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นนอกจากจะทำให้สารระเหย

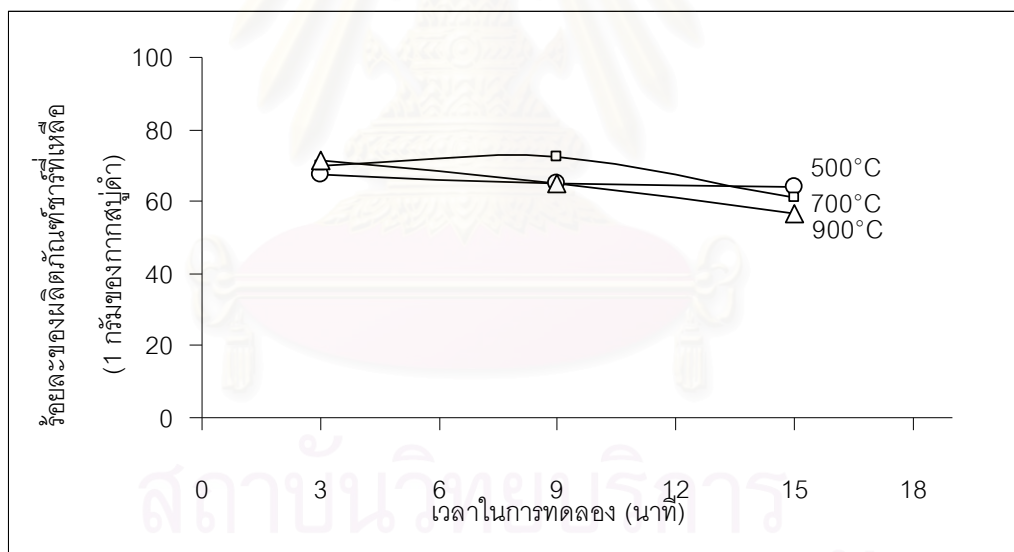
ได้สามารถระเหยออกจากเนื้อชีวมวลอย่างรวดเร็วแล้วยังทำให้มีพลังงานเพียงพอในการแตกพันธะภายในของแข็งชีวมวลเกิดเป็นของเหลวและก๊าซ โดยของเหลวที่เกิดขึ้นก็จะเปลี่ยนไปเป็นก๊าซเพิ่มขึ้นต่อไปเมื่อเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเพียงพอ ทำให้ปริมาณก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้มีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ผลิตภัณฑ์ของแข็งและของเหลวลดลง ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.7 พบว่าในส่วนของ การเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์ก๊าซที่เกิดขึ้นจากชีวมวลประเภทเปลือกเมล็ดฝ้าย (cotton cocoon shell) เปลือกเมล็ดมะกอก (olive husk) เพิ่มขึ้นจาก 36.41% เป็น 50.13% และ 32.42% เป็น 44.62% ตามลำดับ เมื่ออุณหภูมิของการไพโรไลซิสเพิ่มขึ้นจาก 500 องศาเซลเซียส เป็น 750 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องและมีแนวโน้มเป็นไปในทางเดียวกันกับผลการทดลองคือ ปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นจากการไพโรไลซิสกากสับดูดาเมื่ออุณหภูมิสูงจาก 500 องศาเซลเซียส เป็น 900 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณก๊าซเพิ่มขึ้นจาก 12.88% เป็น 30.15%

ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการไพโรไลซิสชีวมวลต่างชนิดกัน

ชนิดชีวมวล	ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น (wt.%)		
	%ปริมาณของแข็ง	%ปริมาณของเหลว	%ปริมาณก๊าซ
กากสับดูดา (Physic Nut waste)			
500 องศาเซลเซียส	63.95	23.17	12.88
700 องศาเซลเซียส	61.21	15.05	23.74
900 องศาเซลเซียส	56.53	13.32	30.15
เมล็ดฝ้าย (Cotton cocoon shell) (Bellais M. และคณะ 2003)			
500 องศาเซลเซียส	30.82	32.89	36.41
700 องศาเซลเซียส	28.77	27.14	44.22
750 องศาเซลเซียส	27.90	22.02	50.13
เมล็ดมะกอก(Olive husk) (Bellais M. และคณะ 2003)			
500 องศาเซลเซียส	29.45	38.22	32.42
700 องศาเซลเซียส	25.88	33.75	43.99
750 องศาเซลเซียส	22.81	32.67	44.62

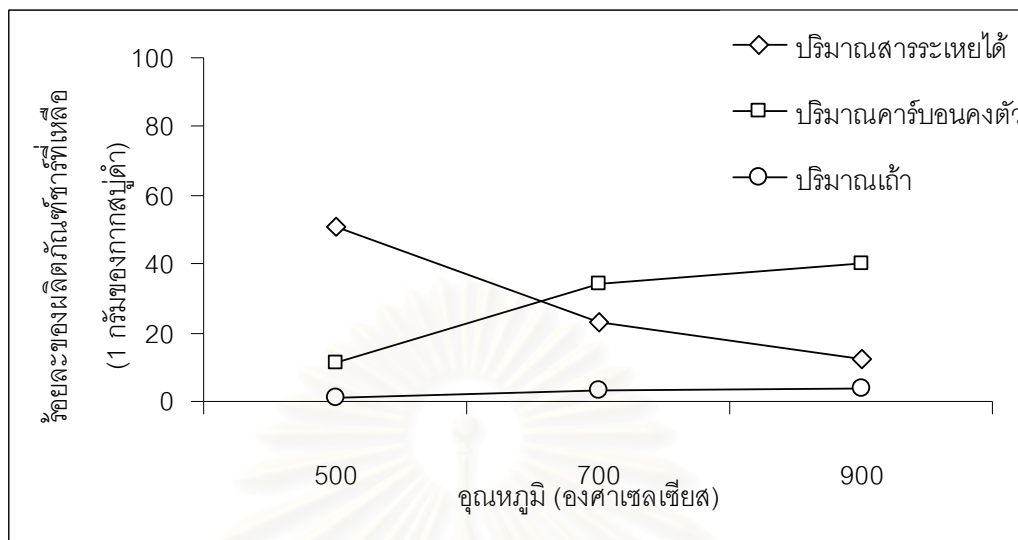
4.3.1.1 ผลผลิตภัณฑ์ของแข็งในรูปของชาร์ (Char production)

เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการสลายกากสับุดำภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน ผลผลิตภัณฑ์ที่เหลือจากกระบวนการที่อยู่ในรูปของแข็งจะเรียกว่าชาร์ (ไม้ใช้เผา ซึ่งจะใช้ในกรณีที่เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์) ผลการทดลองวัดปริมาณชาร์ที่เหลือแสดงได้ดังรูปที่ 4.10 พบว่าผลรวมของปริมาณชาร์ที่เหลือจะอยู่ในช่วง 50-70% จากน้ำหนักแห้งของกากสับุดำที่ใช้ในการทดลอง (1 กรัม) โดยทั่วไปในส่วนของผลของอุณหภูมิต่อปริมาณชาร์นั้นจะเห็นได้ว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้น ปริมาณชาร์ที่เหลือจะลดลง และในขณะเดียวกันเมื่อทำการทดลองที่เวลาเพิ่มมากขึ้น ปริมาณชาร์จะลดลงเช่นเดียวกัน ยกตัวอย่างเช่น พบว่าที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลาในการทดลอง 3, 9 และ 15 นาที ปริมาณของชาร์ที่เหลือมีค่า 70.12%, 64.86% และ 56.53% ตามลำดับ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับปริมาณชาร์ที่เหลือที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส มีค่า 67.31%, 63.95% และ 63.86% ตามลำดับ



รูปที่ 4.10 ผลผลิตภัณฑ์ชาร์ที่เหลือจากการไพโรไลซิสกากสับุดำที่อุณหภูมิต่างๆ และเวลาในการทดลองต่างๆ

ผลผลิตภัณฑ์ของแข็งในรูปของชาร์ ที่ได้หลังจากการสลายตัวแบบไพโรไลซิส จะถูกนำไปวิเคราะห์หา ปริมาณสารระเหยได้ (Volatile), คาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) และ เถ้า (Ash) ด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก (TGA)



รูปที่ 4.11 ปริมาณของสารระเหยได้ (Volatile), คาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) และเถ้า (Ash) ในกากสบูดำที่เหลือจากการไพโรไลซิส ที่เวลาในการทดลอง 15 นาที

จากผลการวิเคราะห์ในรูปที่ 4.11 ซึ่งเป็นตัวอย่างชาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิสสลายตัวที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสและเวลาในการทดลอง 15 นาที พบว่าปริมาณของสารระเหยได้ (volatile) ในชาร์ลดลงเมื่ออุณหภูมิของการสลายตัวเพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณของคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) เพิ่มขึ้นตามลำดับ จะทำให้เกิดชาร์ที่มีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงสุดคือกว่า 40% การสูญเสียน้ำหนักของกากสบูดำเกิดขึ้นเนื่องจากสารระเหยและความชื้นรวมทั้งองค์ประกอบคาร์บอนบางส่วนที่มีพันธะอ่อนแอเกิดการสลายตัวได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อนจากอุณหภูมิที่สูงขึ้น จนกระทั่งองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของแข็งเหลือเพียงคาร์บอนเป็นส่วนใหญ่ ที่อุณหภูมิสูงๆ (สูงกว่า 700 องศาเซลเซียส) ในส่วนของเถ้าพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเพียงเล็กน้อย เนื่องจากเถ้าก็คือองค์ประกอบพวกสารอัลคาไลด์ที่มีอยู่ในกากสบูดำและอุณหภูมิที่จะทำให้เกิดการระเหยของสารเหล่านี้จะมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองมาก ส่วนการเปลี่ยนแปลงปริมาณเล็กน้อยที่พบจากการวิเคราะห์เถ้า น่าจะเกิดจากวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลองที่เป็นของธรรมชาติ ดังนั้นองค์ประกอบเริ่มต้นในแต่ละตัวอย่างจะมีความแตกต่างกันเล็กน้อยเสมอ

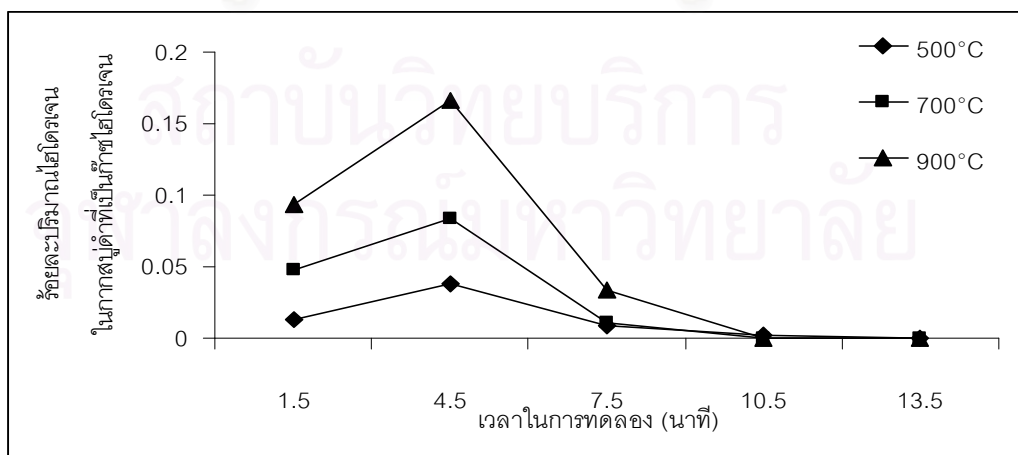
4.3.1.1 ผลิตภัณฑ์ก๊าซ (Gas production)

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการไพโรไลซิสกากสบูดำ พบว่า ปริมาณองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์เปลี่ยนแปลงตามสภาวะที่ใช้ในการทดลองดังแสดง

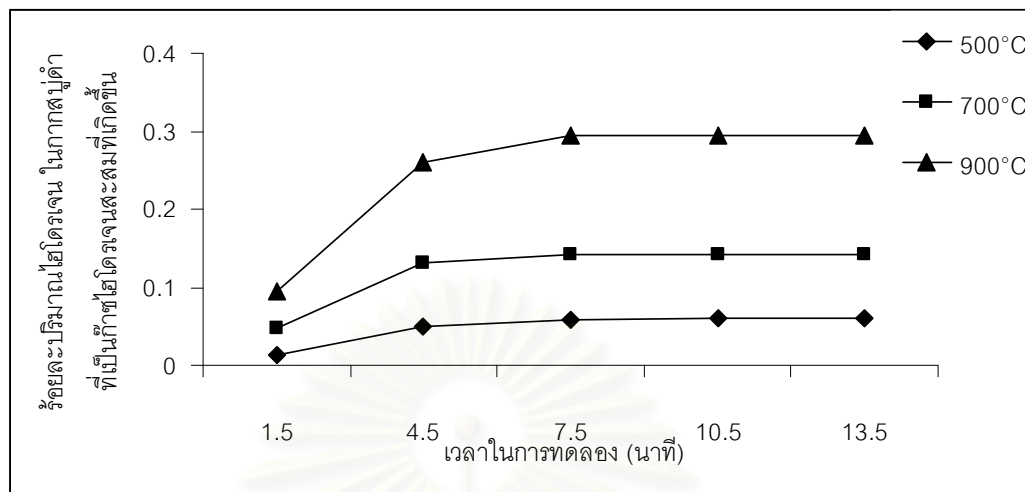
ได้ตามรูปที่ 4.12 ถึง 4.14. ซึ่งองค์ประกอบหลักของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ตรวจพบได้แก่ ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ก๊าซมีเทน (CH_4) และสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (C_1 - C_5 hydrocarbons) โดยการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (GC, Varian, CP-3800) ใช้หัววัดชนิด FID (Flame Ionization Detector) และ TCD (Thermal conductive detector) คอลัมน์ที่ใช้ชนิด Molecular sieve 5A (MS-5A) และ Porapak Q (PPQ) ตั้งค่าอุณหภูมิของ Injection Port อุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิสุดท้ายของคอลัมน์เท่ากับ 35 องศาเซลเซียส และ 150 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

ก๊าซไฮโดรเจน (Hydrogen production)

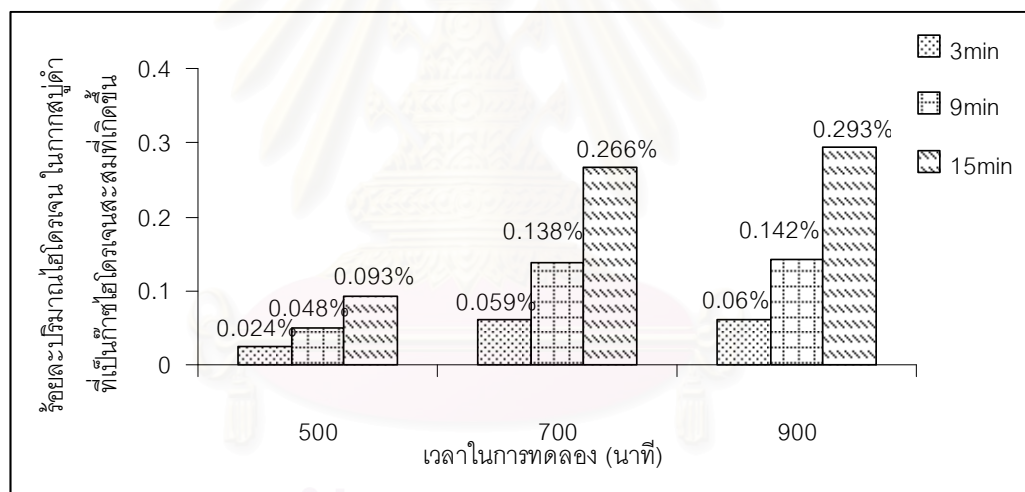
ก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจากการไพโรไลซิสจัดว่าเป็นองค์ประกอบหลักของก๊าซผลิตภัณฑ์จากผลการทดลองในรูปที่ 4.12 พบว่าเวลาและอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยามีผลต่อการแปรสภาพชีวมวลเป็นก๊าซไฮโดรเจน โดยทั่วไปเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นปริมาณก๊าซไฮโดรเจนจะมากขึ้น โดยที่อุณหภูมิต่ำ (500 องศาเซลเซียส) การเกิดก๊าซจะเริ่มจากน้อยและเพิ่มขึ้น เมื่อเวลาผ่านไปแล้วจึงมีปริมาณลดลงเมื่อเวลาในการทดลองเพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิสูงขึ้น (700 และ 900 องศาเซลเซียส) ปฏิกิริยาการเกิดก๊าซจะสูงสุดตั้งแต่ในช่วงแรก และเมื่อเวลาผ่านไป ปริมาณวัตถุดิบก็ลดลงทำให้ปริมาณก๊าซที่ได้ลดลงตามลำดับ โดยในการทดลองนี้อุณหภูมิสูงสุดที่ใช้คือ 900 องศาเซลเซียส และเวลากักเก็บที่ 15 นาที ซึ่งที่สภาวะดังกล่าว ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นคิดได้เป็น 35% ของปริมาณไฮโดรเจนที่มีอยู่ในกากสับุดำก่อนการเกิดปฏิกิริยา เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 500 เป็น 900 องศาเซลเซียส พบว่า องค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้มีการเปลี่ยนแปลง คือ ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสมมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นที่เวลาในการทดลองเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 4.12 ร้อยละปริมาณไฮโดรเจนในกากสับุดำที่เปลี่ยนเป็นก๊าซไฮโดรเจนในการไพโรไลซิสของกากสับุดำ (1 กรัม) ที่อุณหภูมิต่างๆ ที่เวลาในการทดลอง 15 นาที



รูปที่ 4.13 ร้อยละปริมาณไฮโดรเจนในกากสบูดำที่เปลี่ยนเป็นก๊าซไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นในการไพโรไลซิสกากสบูดำ (1 กรัม) ที่อุณหภูมิต่างๆ ที่เวลาในการทดลอง 15 นาที



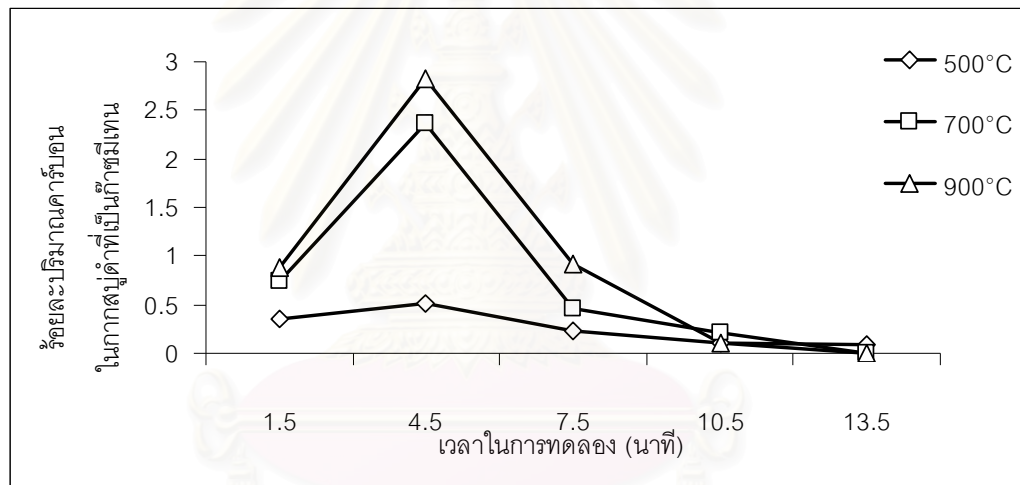
รูปที่ 4.14 ร้อยละปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นจากการไพโรไลซิสกากสบูดำที่อุณหภูมิ 500, 700 และ 900 องศาเซลเซียส ที่เวลาในการทดลองต่างๆ

จากรูปที่ 4.14 จะแสดงปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจากการไพโรไลซิสกากสบูดำที่อุณหภูมิ 500, 700 และ 900 องศาเซลเซียส ที่เวลาในการทดลอง 3, 9 และ 15 นาที จากผลการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นจากจาก 0.024%, 0.059% และ 0.060% ตามลำดับ ในส่วนการทดลองที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนจะเพิ่มขึ้นจาก 0.048%, 0.138% และ 0.142% ตามลำดับ และที่อุณหภูมิ 900 องศา

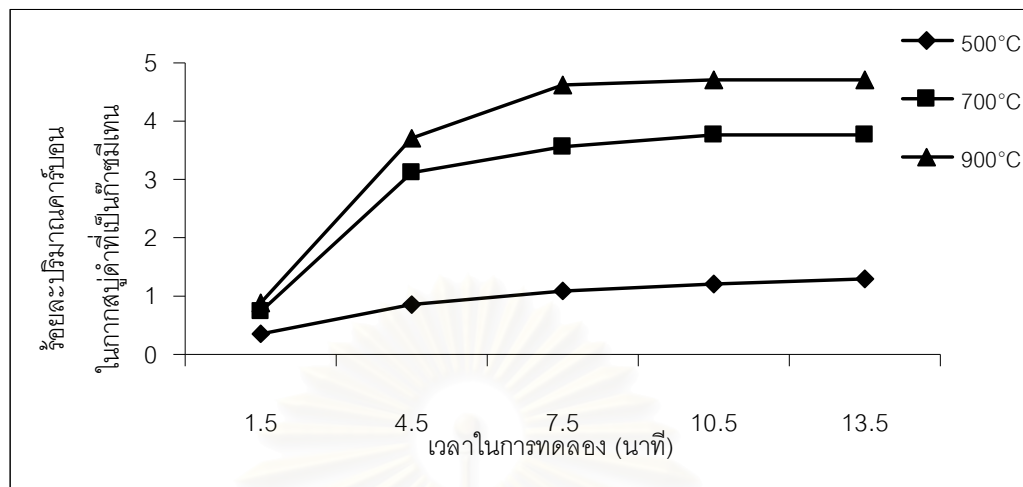
เซลเซียส ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น 0.093%, 0.266% และ 0.293% ตามลำดับ พบว่าองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงคือ ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นที่เวลาในการทดลองเพิ่มมากขึ้นและอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น

ก๊าซมีเทน (Methane production)

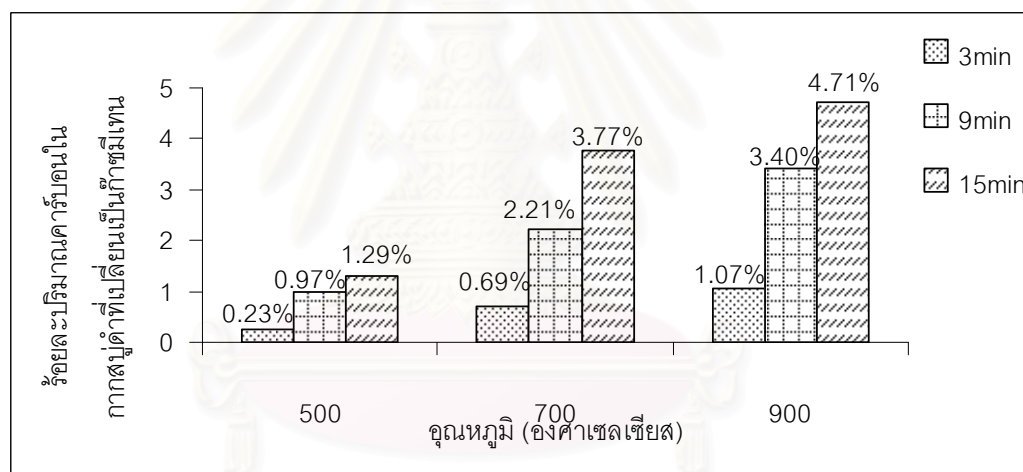
ก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นแสดงได้ดังรูปที่ 4.15 สำหรับการทดลองที่อุณหภูมิต่างๆ ที่เวลาในการทดลอง 15 นาที พบว่าปริมาณก๊าซมีเทนจะเกิดขึ้นมากในช่วงเวลา 3-6 นาที โดยที่อุณหภูมิ 500, 700 และ 900 องศาเซลเซียส มีปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้น 0.51%, 2.36 และ 2.82% ตามลำดับ และในส่วนรูปที่ 4.16 จะแสดงให้เห็นว่าปริมาณก๊าซมีเทนมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นที่เวลาในการทดลองเพิ่มมากขึ้นและอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น



รูปที่ 4.15 ร้อยละปริมาณคาร์บอนในกากสบู่อัดที่เปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทนในการไพโรไลซิสกากสบู่อัด (1 กรัม) ที่อุณหภูมิต่างๆ ที่เวลาในการทดลอง 15 นาที



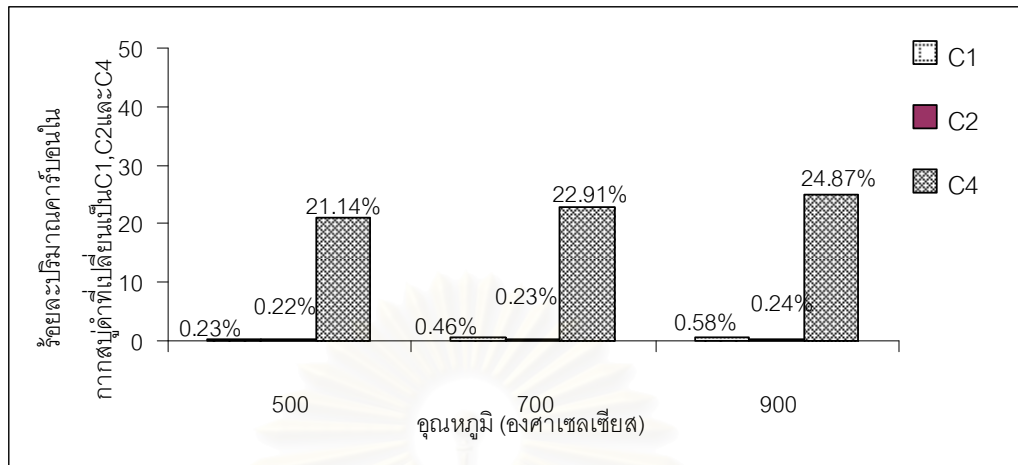
รูปที่ 4.16 ร้อยละปริมาณคาร์บอนในอากาศสูบดำที่เปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นในการไพโรไลซิสกากสูบดำ (1 กรัม) ที่อุณหภูมิต่างๆ ที่เวลาในการทดลอง 15 นาที



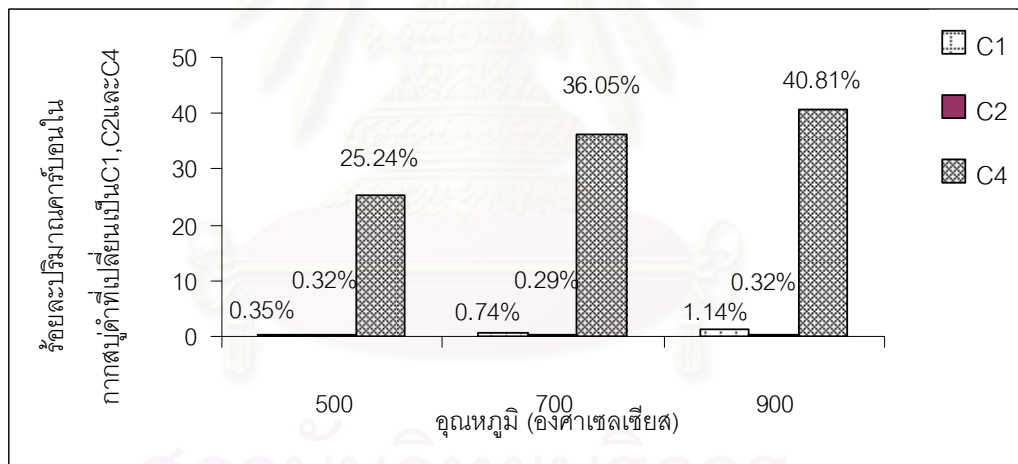
รูปที่ 4.17 ร้อยละปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการไพโรไลซิสกากสูบดำที่อุณหภูมิ 500, 700 และ 900 องศาเซลเซียส ที่เวลาในการทดลองต่างๆ

กลุ่มสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (C_1 - C_5 hydrocarbons)

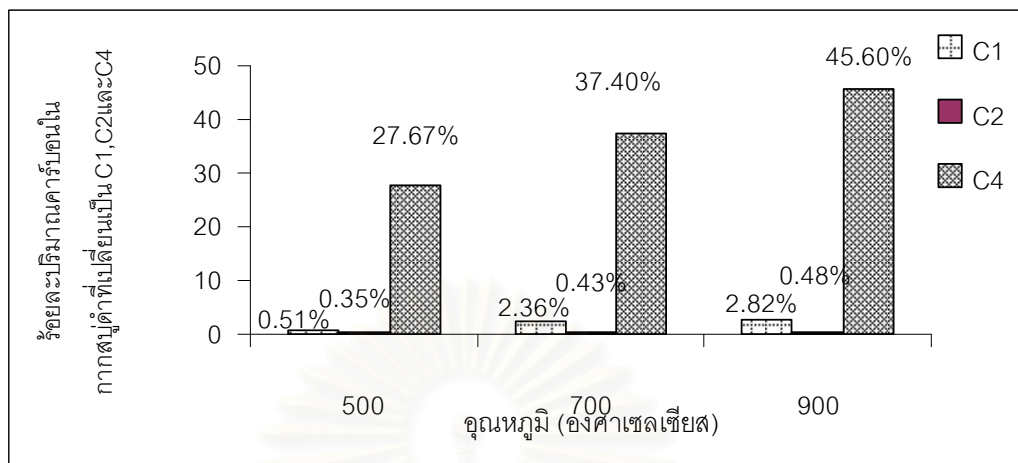
สารไฮโดรคาร์บอนที่มีจุดเดือดที่ต่ำที่สุดโดยทั่วไปจะประกอบด้วย มีเทน(methane)อีเทน(ethane) โพรเพน(propane) บิวเทน(butanes) และเพนเทน(pentane) ที่มีองค์ประกอบคาร์บอน(C) ตั้งแต่ 1-5 ตัว ปริมาณก๊าซผลิตภัณฑ์ในส่วนของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (C_1 - C_5 hydrocarbon) ที่เกิดขึ้น แสดงได้ดังรูปที่ 4.18 ถึง 4.20 โดยคำนวณเทียบจากค่าเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักคาร์บอนที่มีอยู่ในอากาศสูบดำเริ่มต้น จากผลการทดลองพบว่าปริมาณไฮโดรคาร์บอนกลุ่มของ C_4 จะมีปริมาณมากที่สุด และ C_1 , C_2 เป็นปริมาณรองลงมา



รูปที่ 4.18 ร้อยละปริมาณคาร์บอนในอากาศที่เปลี่ยนเป็นกลุ่มสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (C_1 , C_2 และ C_4) ที่เวลาในการทดลอง 3 นาที ที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 4.19 ร้อยละปริมาณคาร์บอนในอากาศที่เปลี่ยนเป็นกลุ่มสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (C_1 , C_2 และ C_4) ที่เวลาในการทดลอง 9 นาที ที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 4.20 ร้อยละปริมาณคาร์บอนในกาสหมู่ด้าที่เปลี่ยนเป็นกลุ่มสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (C_1 , C_2 และ C_4) ที่เวลาในการทดลอง 15 นาที ที่อุณหภูมิต่างๆ

การศึกษาค่าผลของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์นั้นสามารถที่จะแสดงจากรูปที่ 4.18 ถึง 4.20 จะแสดงร้อยละปริมาณคาร์บอนในกาสหมู่ด้าที่เปลี่ยนเป็นกลุ่มสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (C_1 , C_2 และ C_4) ที่เวลาในการทดลองแตกต่างกันคือ 3, 9 และ 15 นาที จากกราฟทั้งสามจะแสดงแนวโน้มเดียวกันคือปริมาณก๊าซมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นที่เวลาในการทดลองเพิ่มมากขึ้นและอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น โดยผลการทดลองที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ปริมาณสารประกอบไฮโดรคาร์บอนกลุ่ม C_1 จะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.23% เป็น 0.51%, ปริมาณสารประกอบไฮโดรคาร์บอนกลุ่ม C_2 จะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.22% เป็น 0.35% และปริมาณสารประกอบไฮโดรคาร์บอนกลุ่ม C_4 จะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 21.14% เป็น 27.67% ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ปริมาณสารประกอบไฮโดรคาร์บอนกลุ่ม C_1 จะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.46% เป็น 2.36%, ปริมาณสารประกอบไฮโดรคาร์บอนกลุ่ม C_2 จะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.23% เป็น 0.43% และปริมาณสารประกอบไฮโดรคาร์บอนกลุ่ม C_4 จะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 22.91% เป็น 37.40% และที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ปริมาณสารประกอบไฮโดรคาร์บอนกลุ่ม C_1 จะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.58% เป็น 2.82%, ปริมาณสารประกอบไฮโดรคาร์บอนกลุ่ม C_2 จะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.24% เป็น 0.48% และปริมาณสารประกอบไฮโดรคาร์บอนกลุ่ม C_4 จะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 24.87% เป็น 45.60% ตามลำดับ พบว่าเมื่ออุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นร้อยละผลได้ของก๊าซผลิตภัณฑ์มีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มสูงขึ้นด้วย ทำให้ปริมาณก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้มีค่าเพิ่มขึ้น

4.3.1.2 ผลิตรภัณฑ์ของเหลวในรูปของทาร์ (Tar production)

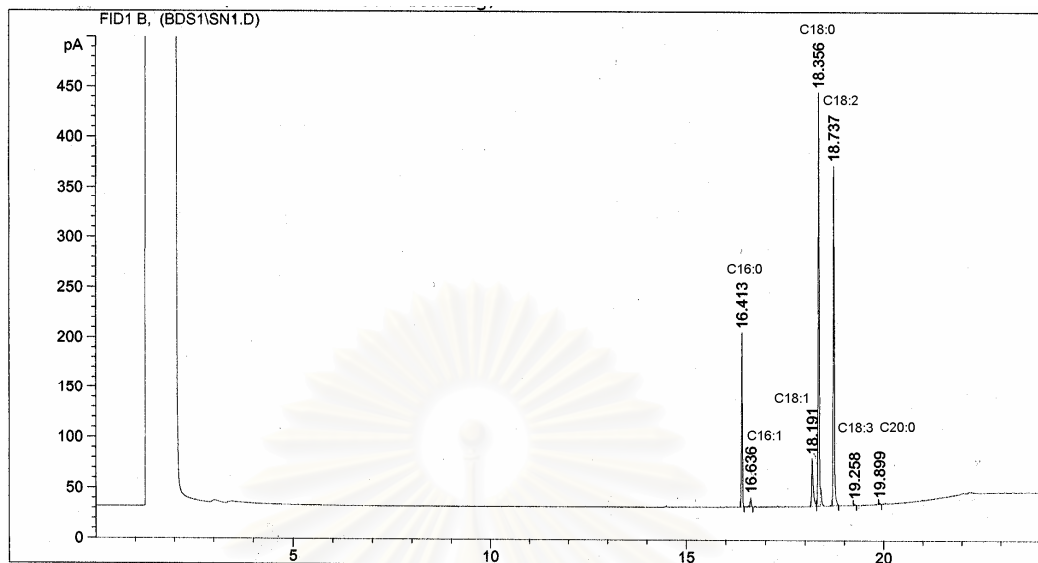
การวิเคราะห์ผลิตรภัณฑ์ในส่วนของทาร์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการไพโรไลซิสกากสับุด้า หลังจากทำปฏิกิริยาตามเวลาที่กำหนดคือ 3, 9 และ 15 นาที ลดอุณหภูมิเตาปฏิกรณ์ควอตซ์ลงมาที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นจึงเก็บผลิตรภัณฑ์ในรูปของเหลวที่เกิดขึ้นโดยใช้ตัวทำละลายไดคลอโรมีเทน (dichloromethane (CH_2Cl_2 ; DCM) เพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography) รุ่น 6890N ผลิตโดยบริษัท Agilent Technology ใช้ DB-WAX Capillary Column ตั้งค่าอุณหภูมิของ Injection Port เท่ากับ 50 องศาเซลเซียส อุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิสุดท้ายของคอลัมน์เท่ากับ 50 และ 250 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

การศึกษารูปประกอบของของเหลวทาร์ที่เกิดขึ้นหลังจากกระบวนการไพโรไลซิสกากสับุด้า จะวิเคราะห์ในส่วนขององค์ประกอบของกรดไขมันที่มีอยู่ในของเหลวทาร์ จะทำการทดสอบโดยการเตรียมระเหยนำส่วนของสารละลายไดคลอโรมีเทนออกจากรูปประกอบน้ำมันและเปลี่ยนรูปน้ำมันให้อยู่ในรูปของเมทิลเอสเทอร์ด้วยกระบวนการทรานเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิส โดยมีโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างของน้ำมันจากไตรกลีเซอไรด์ (triglyceride) ให้เป็นโมโนอัลคิลเอสเทอร์ (mono alkyl ester) ของกรดไขมันได้แก่ เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (fatty acid methyl ester :FAMES) หรือเอทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (fatty acid ethyl ester) กรดไขมันที่จะมีสายโซ่มีคาร์บอน C_{12} - C_{22} และร้อยละ 90 จะมี สายโซ่คาร์บอนระหว่าง 16-18 ซึ่งอาจจะอยู่ในรูปของกรดไขมันอิ่มตัว (saturated) หรือกรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงเดี่ยว (monounsaturated) (Shaine, 2006) จากนั้นวิเคราะห์องค์ประกอบเมทิลเอสเทอร์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

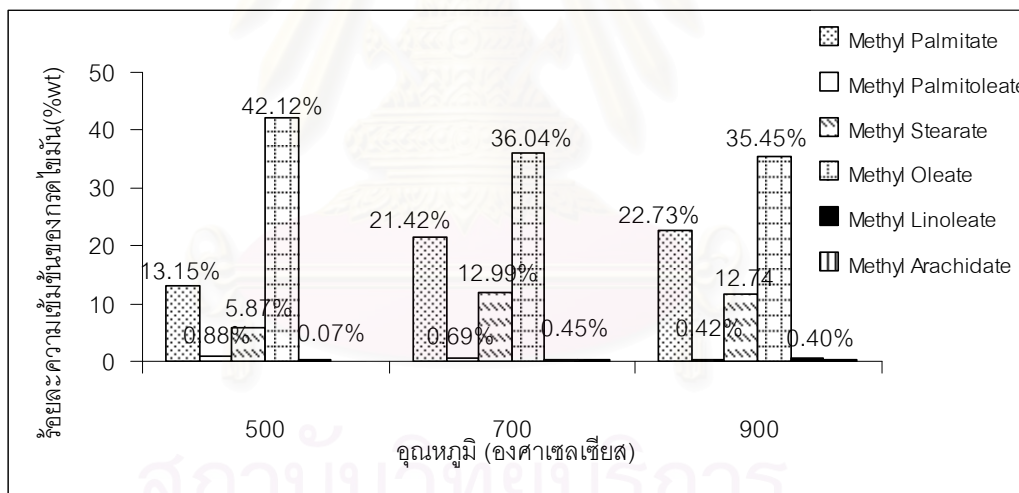
ผลการวิเคราะห์สามารถจำแนกประเภทขององค์ประกอบกรดไขมันที่พบได้ดังตารางที่ 4.8 พบว่าจากน้ำมันผสมที่ได้ประกอบด้วยกรดไขมันของน้ำมันสองชนิด คือ กรดไขมันอิ่มตัวจำพวก กรดปาล์มมิติก ($\text{C}_{16:0}$) กรดสเตียริก ($\text{C}_{18:0}$) และกรดไขมันไม่อิ่มตัวจำพวกกรดลิโนเลอิก ($\text{C}_{18:2}$) กรดโอเลอิก ($\text{C}_{18:1}$) และกรดอีลิโอสเตียริก ซึ่งได้จากการคำนวณอ่านค่าพื้นที่ได้กราฟ แล้วนำไปเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานของกรดไขมันแต่ละชนิด (ตามภาคผนวก ๑) และรูปที่ 4.18 ซึ่งจะแสดงโครมาโทแกรมของของเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสกากสับุด้า

ตารางที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันองค์ประกอบผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสกากสบู่ดำด้วยเครื่องด้วย GC

	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลาที่ใช้ในการทดลอง (นาที)	ปริมาณของกรดไขมัน (%wt)						
			Methyl palmitate (C16:0)	Methyl palmitoleate (C16:1)	Methyl stearate (C18:0)	Methyl arachidate (C20:0)	Methyl oleate (C18:1)	Methyl linoleate (C18:2)	Methyl linolenate (C18:3)
Standard Fatty acid			10.73	4.65	7.73	7.68	4.93	4.63	4.64
ของเหลวทาร์	500	3	12.93	0.96	5.76	0.07	42.52	37.64	0.13
		9	13.20	0.89	5.81	0.11	42.41	37.43	0.11
		15	13.15	0.88	5.87	0.18	42.12	37.29	0.07
	700	3	18.03	0.70	12.27	0.13	37.53	30.85	0.47
		9	20.33	0.68	12.85	0.17	36.56	29.99	0.45
		15	21.42	0.69	12.99	0.16	36.04	29.48	0.45
	900	3	18.97	0.44	12.28	0.13	37.26	30.43	0.47
		9	19.84	0.43	12.46	0.13	36.79	30.16	0.46
		15	22.73	0.42	12.74	0.15	35.45	29.05	0.40



รูปที่ 4.21 โครมาโทแกรมขององค์ประกอบกรดไขมันในของเหลวทาร์ที่เกิดจากการไพโรไลซิสจากสับุด้า



รูปที่ 4.22 ร้อยละความเข้มข้นของปริมาณองค์ประกอบกรดไขมันในของเหลวทาร์ที่เกิดขึ้น

จากตารางที่ 4.8 พบว่าปริมาณขององค์ประกอบของกรดไขมัน น้ำมันประกอบด้วยกรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงเดี่ยวเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งมีลักษณะเป็นพันธะคู่เพียงพันธะเดียว โดยมีกรดโอเลอิกเป็นหลัก มีปริมาณของคาร์บอนอยู่สูงถึง 18 คาร์บอนอะตอม ซึ่งอาจจับตัวในลักษณะพันธะเดี่ยวและพันธะคู่ เรียกว่า กรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงเดี่ยว ในการศึกษาสภาวะของอุณหภูมิที่มีปริมาณกรดไขมันโดยชนิดของกรดไขมันที่ตรวจพบในแต่ละอุณหภูมิของการไพโรไลซิส ได้แก่ C16:0, C18:0, C18:1, C18:2 และ C18:3 ซึ่งพบว่ามีส่วนของกรดไขมันที่ผลิตได้แตกต่างกันในแต่ละอุณหภูมิ

สำหรับผลของอุณหภูมิต่อการปริมาณกรดไขมันชนิดอิ่มตัว พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น การปริมาณกรดไขมันอิ่มตัวจะเพิ่มขึ้นและกรดไขมันไม่อิ่มตัวลดลง จากรูปที่ 4.22 พบว่ากรดไขมันอิ่มตัวจำพวกกรดปาล์มมิติก และกรดสเตียริกมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 13.15% เป็น 22.73% และ 5.83% เป็น 12.74% ตามลำดับ ในขณะที่กรดไขมันไม่อิ่มตัวจำพวกกรดลิโนเลอิก กรดโอเลอิก มีค่าลดลงจาก 37.29% เป็น 29.05% และ 42.12% เป็น 35.45% ตามลำดับ

สำหรับการนำน้ำมันทาร์ที่มีปริมาณกรดไขมันอิ่มตัวต่ำและปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัวค่อนข้างสูง ซึ่งเป็นผลดีต่อการไปใช้ประโยชน์โดยนำน้ำมันที่ได้มาผลิตเป็นไบโอดีเซล โดยเปลี่ยนให้อยู่ในรูปเอสเทอร์ด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน แล้วนำไปใช้กับเครื่องยนต์ ซึ่งเอสเทอร์ที่ได้จะมีคุณสมบัติที่ดีเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลคือมีค่าซีเทนสูง ทำให้มีการเผาผลาญดีกว่า มีจุดวาบไฟสูงเหมาะแก่การนำไปใช้ในการแปรรูปเป็นพลังงานทดแทนได้



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

การวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาการแปรสภาพของกากสับุดำด้วยกระบวนการการสลายตัวทางความร้อน โดยมุ่งที่จะสร้างแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ของการสลายตัวภายใต้ความร้อนโดยใช้ข้อมูลจากการวิเคราะห์ทางเทอร์โมกราฟีเมตริก (Thermogravimetric Analysis) และศึกษาปริมาณและองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการแปรสภาพกากสับุดำโดยกระบวนการไพโรไลซิส โดยสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1 ผลของการวิเคราะห์องค์ประกอบของกากสับุดำ

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกากสับุดำ พบว่ากากสับุดำที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยคาร์บอนคงตัว 18.86% และสารระเหยได้ 79.20% และจากการวิเคราะห์แบบแยกธาตุมีคาร์บอน 52.30% ไฮโดรเจน และออกซิเจน 6.50% และ 36.00% ตามลำดับ ทางด้านของค่าความร้อนของกากสับุดำจะมีค่าประมาณ 4540 แคลอรีต่อกรัม ซึ่งมีค่าความร้อนใกล้เคียงกับชีวมวลชนิดอื่น โดยค่าความร้อนที่ได้ค่อนข้างสูง เนื่องจากมีปริมาณของธาตุคาร์บอนผสมอยู่มาก แสดงถึงศักยภาพของกากสับุดำที่น่าจะสามารถนำไปใช้ในการผลิตเป็นแปรเชื้อเพลิงในรูปแบบต่างๆ เช่น การผลิตก๊าซสังเคราะห์ การนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมในการผลิตไฟฟ้าได้

5.2 การสลายตัวทางความร้อนของกากสับุดำ

ผลจากการวิเคราะห์การสลายตัวระหว่างการไพโรไลซิสของกากสับุดำพบว่า ช่วงระหว่างการไพโรไลซิสจะเกิดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักแบ่งออกเป็น 3 ช่วงคือ ช่วงที่ 1 เกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 75 องศาเซลเซียส เป็นการสูญเสียน้ำหนักของความชื้นที่มีอยู่ในกากสับุดำ ช่วงที่ 2 เกิดการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสในช่วงอุณหภูมิ 200-400 องศาเซลเซียส และช่วงที่ 3 เกิดการสลายตัวของลิกนินเป็นช่วงกว้าง ตั้งแต่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส นอกจากนี้การให้อัตราการให้ความร้อนสูงจะทำให้อุณหภูมิที่เกิดการสูญเสียน้ำหนักสูงกว่าและเกิดการสูญเสียน้ำหนักมากกว่าที่อัตราการให้ความร้อนต่ำ เนื่องจากที่อัตราการให้ความร้อนต่ำ เวลาที่ใช้ในการเพิ่มความร้อนระบบช้าเพียงพอที่ทำให้ปฏิกิริยาการสลายตัวบางส่วนเกิดสมดุลระหว่างช่วงอุณหภูมิ ทำให้อุณหภูมิที่เกิดการสูญเสียน้ำหนักต่ำกว่าและเกิดการสูญเสียน้ำหนักน้อยกว่า และในส่วนของ การสร้างแบบจำลองจลนศาสตร์เพื่อทำนายการสลายตัวของกากสับุดำ พบว่าแบบจำลองการสลายตัวด้วยความร้อนแบบปฏิกิริยาคู่ขนาน (Parallel reactions) สามารถใช้ได้ดี

จากสภาวะการทดลองที่ อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ที่อัตราการให้ความร้อน 5, 15, 30, และ 90 องศาเซลเซียสต่ออนาที จากการคำนวณค่าตัวแปรโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่า มีค่าพลังงานกระตุ้นขององค์ประกอบจำพวกเฮมิเซลลูโลสจะอยู่ในช่วง 60-150 กิโลจูลต่อโมล ค่าพลังงานกระตุ้นของเซลลูโลสจะอยู่ในช่วง 185-235 กิโลจูลต่อโมล และค่าพลังงานกระตุ้นของลิกนินจะอยู่ในช่วง 90-150 กิโลจูลต่อโมล ส่วนของค่าลำดับการเกิดปฏิกิริยาจะอยู่ในช่วง 2.35-3.50 เมื่อเทียบผลจากการคำนวณจากเครื่อง TGA และค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองการสลายตัวด้วยความร้อนแบบปฏิกิริยาคู่ขนานจะมีค่าใกล้เคียงกันโดยมีค่าเบี่ยงเบนประมาณ 2-3%

5.3 การไพโรไลซิสกากสับุดำในเตาปฏิกรณ์ควอตซ์แบบชั้นเบตนิ่ง

จากการศึกษาการแปรสภาพกากสับุดำโดยมีตัวแปรที่ศึกษาคือ อุณหภูมิ 500, 700, และ 900 องศาเซลเซียส เวลาในการทดลอง 3, 9, และ 15 นาที อัตราการไหลก๊าซอาร์กอน 67.5 ลิตรต่ออนาที สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.3.1 องค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์

จากการทดลองผลของการเปลี่ยนอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ คือ 500, 700, และ 900 องศาเซลเซียสที่มีต่อองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์ พบว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงจำพวก ก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซมีเทน และกลุ่มไฮโดรคาร์บอนเบา จะมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น และที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส จะมีผลผลิตของก๊าซผลิตภัณฑ์มากขึ้น จะมีปริมาณก๊าซไฮโดรเจน 0.29% ปริมาณก๊าซมีเทน 4.71% และปริมาณก๊าซกลุ่มไฮโดรคาร์บอนเบาที่มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นที่เวลาในการทดลองเพิ่มมากขึ้นและอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นเช่นเดียวกัน ในการทดลองพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิทำให้ปริมาณถ่านชาร์ลดลงในขณะที่ปริมาณน้ำมันทาร์และก๊าซเพิ่มสูงขึ้น

5.3.2 องค์ประกอบผลิตภัณฑ์ของเหลวในรูปของทาร์

จากการทดลองพบว่า น้ำมันทาร์ที่ได้จะมีลักษณะเป็นของเหลวข้นน้ำตาลเข้มที่อุณหภูมิ ต่ำ ในส่วนของไขมัน มีกรดไขมันที่สำคัญ 4 ชนิด คือ กรดปาล์มมิติค กรดสเตียริก กรดโอเลอิก และกรดไลโนเลอิก เช่นเดียวกับปาล์มน้ำมัน โดยจากการทดลองพบว่า มีกรดปาล์มมิติค และกรดสเตียริกมีน้อยเพียง 10-23 % และ 5-12% ตามลำดับ ส่วนกรดโอเลอิก และกรดไลโนเลอิก มีปริมาณค่อนข้างสูงคือ 35-42% และ 29-38% ตามลำดับ สัดส่วนของกรดไขมันที่ผลิตได้แตกต่างกันในแต่ละอุณหภูมิ สำหรับผลของอุณหภูมิต่อการปริมาณกรดไขมันชนิดอิ่มตัว พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ปริมาณกรดไขมันอิ่มตัวจะเพิ่มขึ้นและกรดไขมันไม่อิ่มตัวลดลง

5.3.3 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ซาร์

จากการทดลองพบว่า ซาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิสสลายตัวที่อุณหภูมิ 500, 700, และ 900 องศาเซลเซียสและเวลาในการทดลองต่างๆ พบว่าปริมาณของสารระเหยได้ในซาร์ลดลงเมื่ออุณหภูมิของการสลายตัวเพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณของคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้นตามลำดับ จะทำให้เกิดซาร์ที่มีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงสุดคือกว่า 40% ปัจจัยที่มีผลต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ซาร์คือ อุณหภูมิ พบว่าที่อุณหภูมิสูง สารระเหยและสารอินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบในกากสบูดำจะถูกปลดปล่อยและเกิดการสลายตัวได้ดี ทำให้ร้อยละขององค์ประกอบของซาร์เปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ร้อยละของสารระเหยมีค่าลดลง ส่วนคาร์บอนคงตัวมีค่าเพิ่มขึ้น

จากการทำการทดลองในการแปรรูปกากสบูดำที่เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล มาใช้ให้เกิดประโยชน์ โดยการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้พลังงานความร้อนด้วยกระบวนการไพโรไลซิสเพื่อให้อยู่ในของผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น ก๊าซเชื้อเพลิง ของเหลวทาร์ และถ่านซาร์ ซึ่งผลิตภัณฑ์ก๊าซและของเหลวที่ได้จากกระบวนการนั้นสามารถที่จะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการสันดาป หรือสารตั้งต้นของอุตสาหกรรมปิโตรเคมีได้ ส่วนผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งหรือถ่านซาร์ จะมีส่วนประกอบของคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักสูงจะสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง หรือ วัสดุดูดซับ เช่น ถ่านกัมมันต์ ได้ ดังนั้นการไพโรไลซิสกากสบูดำ เพื่อให้ได้เป็นผลิตภัณฑ์ด้านพลังงาน จะช่วยลดการเกิดมลภาวะ ไม่สร้างสภาวะเรือนกระจก และจัดได้ว่าเป็นการพัฒนาการหาแหล่งพลังงานทดแทนได้อีกทางหนึ่งด้วย

5.4 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากในงานวิจัยนี้เป็นศึกษาเกี่ยวกับการแปรสภาพชีวมวลให้อยู่ในรูปผลิตภัณฑ์ต่างๆ ด้วยกระบวนการไพโรไลซิส เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร และอีกทั้งยังเป็น การเพิ่มแหล่งเชื้อเพลิงที่เป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียน โดยจะศึกษาอิทธิพลของตัวแปรได้แก่ อุณหภูมิ เวลาในการทดลอง และอัตราการให้ความร้อนที่มีผลต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น ดังนั้นการนำงานวิจัยนี้ไปให้ประโยชน์ให้มากกว่านี้อาจจะต้องมีการศึกษาความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์และเชิงพาณิชย์สำหรับการไพโรไลซิสและรวมทั้งศึกษาการนำมาใช้ได้อีกทางหนึ่ง



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- ชูศักดิ์ โภคะนุทรานนท์. 2536. การคาร์บอนไนซ์แกลบในฟลูอิดไดซ์เบด. วิทยานิพนธ์ปริญญา
มหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- นาวิน หมื่นเข็ม. 2540. การผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากถ่านหินในฟลูอิดไดซ์เบด 2 คอลัมน์.
โครงการวิจัยปริญญาตรี ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย.
- เมทเลอร์-โทเลโด (ประเทศไทย) บริษัทจำกัด. Thermogravimetric Analyzer. [ระบบออนไลน์].
แหล่งที่มา: <http://th.mt.com/home>. วันที่ 15 มกราคม 2549
- ลาวัลย์ เขียวถาวร. 2535. รีฟอร์มมิงของก๊าซมีเทน คาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำบนตัวเร่งปฏิกิริยา
นิกเกิลลูมินาในฟลูอิดไดซ์เบด. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วสิน กาจณภู. 2545. การทำไฮโดรเจนให้บริสุทธิ์จากแก๊สสังเคราะห์โดยวอเตอร์แก๊สชิฟต์และตัว
ดูดซับทางเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์.
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สมบัติ ชินวงศ์. 2548. ขั้นตอนการสกัดน้ำมันจากเมล็ดสบู่ดำ [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา:
<http://www.kasetcity.com/Thaibioenergy/Sope/QAboard.asp> วันที่ 2 ธันวาคม 2548
- สถาบันวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. ต้นทุนการผลิตสบู่ดำกับราคาคู่มือ [ระบบ
ออนไลน์]. <http://www.doa.go.th/physicnut/eco.htm>. วันที่ 29 ตุลาคม 2548
- สถาบันวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. Economic of Jatropha Cultivation, [ระบบ
ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.jatrophaworld.org/15.html> วันที่ 29 ตุลาคม 2548
- ศูนย์ส่งเสริมพลังงานชีวมวล. ข้อมูลชีวมวล [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.efe.or.th>
วันที่ 4 กันยายน 2550
- ศูนย์ส่งเสริมและพัฒนาอาชีพการเกษตร จังหวัดชัยนาท. สบู่ดำ [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา
<http://aopdm01.doae.go.th/data/physicnut21.htm>. วันที่ 12 กันยายน 2548
- ศูนย์สารสนเทศ กรมวิชาการเกษตร. สบู่ดำพืชเศรษฐกิจ. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา:
<http://www.doa.go.th/fieldcrops/physicnut/index.htm>. วันที่ 22 กันยายน 2548
- อาภาณี เหลืองนฤมิตรชัย. 2538. การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากแกลบในเบดนิ่ง. วิทยานิพนธ์
ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาษาอังกฤษ

- Agrawal, R.K. 1988. Kinetic of reaction involved in Pyrolysis of Cellulose I: The three reactions model. Chemical Engineering. Vol. 66: 403-412.
- Alves, S.S., and Figueiredo, J.L. 1989. Pyrolysis Kinetic of Lignocellulosic materials by Multi Stage Isothermal Thermogravimetry. Journal of Analytical and Applied pyrolysis. Vol 89: 17-37.
- Antal, M.J. 1982. Biomass Pyrolysis: A Review of the Literature Part 1-Carbohydrate Pyrolysis. Part 2- Lignocellulose Pyrolysis. Advances in Solar Energy. Vol 25: 251-260.
- Association of Official Analytical Chemistry. 2002. Standard Test Method for Association of Official Analytical Chemist A.O.A.C. (2002): 1038-1041.
- Bellais, M., Davidsson, K.O., Liliedahl, T., Sjostrom, K., and Pettersson, J.B.C. 2003, Pyrolysis of large wood particle: a study of shrinkage importance in simulation. Fuel. Vol. 82:1541-1548.
- Beenackers, A.A.C.M. 1993. Biomass gasification: implementation and research in Europe, Int. Journal Solar Energy. Vol. 3:249-260.
- Bradbury, A.G.W., Sakai Y., and Shafizadeh, F. 1979. A kinetic model for pyrolysis of cellulose. Journal of Applied Polymer Science. Vol. 23: 3271-3280.
- Chen, G., Andries, J., Luo, Z. and Spliethoff, H. 2003. Biomass pyrolysis/gasification for product gas production: the overall investigation of parametric effects. Energy Conversion and Management. Vol.44: 1875-1884.
- Conesa, J.A., Caballero, J.A., Marcilla, A. and Font, R. 1995. Analysis of different kinetic model in the dynamic pyrolysis of cellulose. Thermochemica Acta. Vol. 245: 175-192.
- Cordero, T., Maroto, J.M.R., Mirasol, J.R., and Rodrigue, J.J. 1990. Thermochemica Acta. Vol 201: 135-164.
- Elliot M. A. 2001. Chemistry of Coal Utilization. Wiley-Interscience, Inc., 1603-1614, 1640-1642, 1711-1712.
- Font, R., Marcilla, A., Verdu, E. and Devesa, J. 1991. Kinetic models for thermal degradation of heterogeneous materials. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. Vol.21: 248-264.

- Garcia, L., Salvador, M. L., Bilbao, R. and Arauzo, J. 1997. Influence of Calcination and Reductions on the Catalyst Performance in the Pyrolysis Process of Biomass. Energy & Fuels, Vol.12:139-143.
- Jones J.L., 1978. Converting Solid Wastes and Residues to Fuel. Chemical Engineering. Vol17:142-148.
- Kilzer, F.J., Broido, A., 1965. Speculations on the nature of cellulose pyrolysis. Pyrodynamics. Vol.2:151-163.
- Kohan, S.M. and Barkhordor, P.M. 1979. Mission Analysis for Federal fuels from biomass program, Thermochemical Conversion of Biomass to Fuels and Chemistry. Vol. 4
- Luangkitiattikhun, P., Tangsathitkulchai, C., and Tangsathitkulchai, M., 2007. Non-isothermal thermogravimetric analysis of oil-palm solid wastes. Bioresource Technology In Press, Corrected Proof, Available online 23 April 2007.
- Miranda, R., Sosa-Blanco, C., Bustos-Martinez, D., and Vasile, C., 2007. Pyrolysis of textile wastes. Kinetics and yields. Journal of analytical and applied pyrolysis: 1-7
- Michael, L., Jack, B., John, P., and William, A., 1989. Product Yields and Kinetics from the Vapor Phase Cracking of Wood Pyrolysis Tars. Journal of AIChE. Vol.35:120-128.
- Orfão, J.J.M., Figueiredo, J.L. 2002. Pyrolysis kinetics of lignocellulosic materials-three independent reaction model, Thermochimica Acta. Vol. 390:195-211.
- Plaz W., Chartier P., and Hall, D.O.1981. Energy from Biomass. Applied Science Publisher Ltd., 98-102
- Puigjaner, L., 2003. Enhancing sugar cane process performance through optimal production scheduling. Chemical Engineering and Processing. Vol.46:198-209
- Ronald, F.P. and Hicks R.E. 1982. Synthetic Fuels, USA: McGraw-Hill., 375-432.
- Shaine, L., Wendy, L., and Bharathi A. 2006. Comparative fatty acid content of seeds of four Cucurbita species grown in a common (shared) garden. Journal of Food Composition and Analysis, Vol19 :606–611.
- Shiguang, L., Shaoping, X., Shuqin, L. and Qinghai, L., 2004. Fast pyrolysis of biomass in free-fall reactor for hydrogen-rich gas. Fuel Processing Technology, Vol.85:1201-1211.

- Song, H., Andreas, J., and Minhou X., 2007. Kinetic study of Chinese biomass slow pyrolysis: Comparison of different kinetic models. Energy & Fuels, Vol. 27:1732-1740.
- Stout, B.A., and Hiller, E.A., 1985. Biomass energy a monograph. Texas A&M University Press College Station, 1131-1142.
- Vlaev L.T., Markovska I.G., and Lyuchev L.A., 2003. Non-isothermal kinetic of pyrolysis of rice husk. Thermochimica Acta. Vol. 406:1-7.
- Xianwen, D., Chuangzhi, W., Haibin, Land Chen Y., 1999. The Fast Pyrolysis of Biomass in CFB reactor. Energy & Fuels. Vol. 14: 552-557.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

วิธีวิเคราะห์สมบัติ

1. การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางเคมี Proximate Analysis

1.1 ความชื้น (Moisture): ASTM E871

วิธีการทดลอง

1) อบถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาในเตาอบ (Drying Oven) 104-110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำเข้าโถดูดความชื้น (Desiccator) ทิ้งไว้ประมาณ 15 นาที นำไปชั่งแล้วบันทึกน้ำหนัก

2) ชั่งตัวอย่างประมาณ 1 กรัม ลงในถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาที่ทราบน้ำหนักแล้ว บันทึกน้ำหนักตัวอย่างกากสุญุดำ

3) นำไปเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 104-110 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง หรือจนน้ำหนักตัวอย่างคงที่

4) นำถาดอลูมิเนียมออกมาทิ้งไว้ให้เย็นลง แล้วนำเข้าโถดูดความชื้นประมาณ 15 นาที แล้วชั่งถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาที่มีตัวอย่างอบแล้วอยู่ภายใน บันทึกผล

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$M = 100(W_1 - W_2) / W \text{ -----(1)}$$

เมื่อ M = ร้อยละของความชื้น

W_1 = น้ำหนักของถาดอลูมิเนียมพร้อมฝารวมกับน้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้นก่อนอบ (กรัม)

W_2 = น้ำหนักของถาดอลูมิเนียมพร้อมฝารวมกับน้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้นหลังอบ (กรัม)

W = น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)

1.2 เถ้า (Ash): ASTM D1102

วิธีการทดลอง

1) เผาด้วยกระบือ (crucible) พร้อมฝาในเตาเผา (Muffle Furnace) ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำออกมาทำให้เย็นในโถดูดความชื้นชั่งน้ำหนักด้วยกระบือพร้อมฝา

2) ชั่งน้ำหนักตัวอย่างใส่ถ้วยกระเบื้อง ประมาณ 1 กรัม นำไปเผาบนตะเกียงเบนเซน จนวันระเหยหมด

3) ใส่ถ้วยกระเบื้อง พร้อมฝาในเตาเผาที่อุณหภูมิประมาณ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 2 ชั่วโมงหรือจนน้ำหนักคงที่

4) นำถ้วยกระเบื้อง ออกจากเตาเผาวางทิ้งไว้ให้เย็น แล้วนำไปใส่ใน โถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนักพร้อมบันทึกผล

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$A = 100(W_3 - W_4) / W \text{ ----- (2)}$$

เมื่อ A = ร้อยละของเถ้า

W_3 = น้ำหนักของถ้วยกระเบื้อง พร้อมฝาที่มีเถ้า (กรัม)

W_4 = น้ำหนักของถ้วยกระเบื้อง พร้อมฝา (กรัม)

W = น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)

1.3 ปริมาณสารระเหย (Volatile Matter): ASTM E872

วิธีการทดลอง

1) เมาถ้วยกระเบื้อง พร้อมฝาในเตาเผาอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ประมาณ 30 นาที นำออกจากเตาเผา ทำให้เย็นใน โถดูดความชื้นแล้วชั่งน้ำหนักถ้วยกระเบื้อง พร้อมฝา บันทึกผล

2) ชั่งตัวอย่างใส่ในถ้วยกระเบื้อง ประมาณ 1 กรัม แล้วปิดฝาให้เรียบร้อย

3) นำไปให้ความร้อนโดยอยู่เหนือปากเตาเผา (Tubular Furnace) อุณหภูมิประมาณ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที

4) หย่อนถ้วยกระเบื้อง ให้อยู่บริเวณปากเตา ที่อุณหภูมิประมาณ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที

5) หย่อนถ้วยกระเบื้อง ให้อยู่กึ่งกลางเตา อุณหภูมิประมาณ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 นาที

6) นำถ้วยกระเบื้อง ออกมาทิ้งไว้ให้เย็น แล้วนำไปใส่ใน โถดูดความชื้นประมาณ 15 นาที นำไปชั่งและบันทึกผล

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$V = [100(W_5 - W_6) / W] - M \text{ ----- (3)}$$

เมื่อ V = ร้อยละของสารระเหย M = ร้อยละของความชื้น
 W_3 = น้ำหนักของถ้วยกระเบื้อง พร้อมฝาพร้อมกับน้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา (กรัม)
 W_4 = น้ำหนักของถ้วยกระเบื้อง พร้อมฝาพร้อมกับน้ำหนักตัวอย่างหลังเผา (กรัม)
 W = น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)

1.4 ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon)

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

ร้อยละของคาร์บอนคงตัว = $100 - \text{ร้อยละของความชื้น} - \text{ร้อยละของเถ้า} - \text{ร้อยละของสารระเหย}$

2. การวิเคราะห์ทดสอบสมบัติทางความร้อน โดยการนำมาทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ค่าความร้อน (Automatic Bomb-calorimeter) รุ่น Leco model AC-350

ซึ่งกรดเบนโซอิกหนัก 0.9 ถึง 1.0 กรัม อัดเป็นเม็ดโดยใช้เครื่องอัดแล้วนำกรดเบนโซอิกอัดก้อนนี้มาชั่งน้ำหนักอีกครั้ง บันทึกผล

- ตัดลวดยาว 10 เซนติเมตร มาผูกกระหว่างปลายทั้งสองของหัวบอมบ์
- นำกรดเบนโซอิกอัดก้อนมาวางไว้ในครุชชีเบล นำครุชชีเบลไปวางในตำแหน่งด้านบนของบอมบ์ จัดให้ลวดที่ผูกไว้โค้งจนแตะผิวหน้าของเม็ดกรดเบนโซอิก เติมน้ำกลั่นลงในออกซิเจนบอมบ์ 1 มิลลิลิตร โดยใช้ปิเปต
- ประกอบหัวบอมบ์กับออกซิเจนบอมบ์เข้าด้วยกัน ชันเกลียวให้แน่นแล้วนำไปอัดแก๊สออกซิเจนให้มีความดัน 20-25 บรรยากาศ เติมน้ำลงในถังบอมบ์ 1 ลิตร นำออกซิเจนบอมบ์ที่อัดแก๊สเรียบร้อยแล้ววางในถังบอมบ์ เติมน้ำลงไปในถังอีก 1 ลิตร เสียบสายจุดระเบิด 2 เส้นกับบอมบ์ แล้วปิดฝาของเครื่อง
- เปิดสวิตซ์ให้เครื่องกวนทำงาน ทุก ๆ นาทีบันทึกค่าอุณหภูมิของน้ำ เมื่อผ่านไป 5 นาที กดปุ่มจุดระเบิดพร้อมทั้งบันทึกค่าอุณหภูมิที่จุดระเบิดนี้ อ่านค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทุก ๆ ครึ่งนาที จนกระทั่งถึงอุณหภูมิสูงสุด แล้วลดลงหรือคงที่ในที่สุด ปิดสวิตซ์ของเครื่องนำออกซิเจนบอมบ์ออกมาจากเครื่อง ปลดปล่อยแก๊สจากบอมบ์อย่างช้า ๆ ออกให้หมด

- ล้างหัวบอมบ์และออกซิเจนบอมบ์ รวมทั้งครุชเปิดด้วยน้ำกลั่นที่เติมเมทิลลอร์เรนจนหมดกรด (น้ำที่ล้างไม่เป็นสีชมพู)

- นำน้ำล้างที่ได้ไปไทเทรตกับ 0.072 N ของ Na_2CO_3 บันทึกปริมาตรของ Na_2CO_3 ที่ใช้ จากนั้นวัดความยาวของลวดที่เหลือจากการเผาไหม้

การคำนวณ

$$W = (H_g + e_1) + (e_3/t) \text{ -----(4)}$$

เมื่อ W = ค่าน้ำหนักสมมูลของเครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์, แคลอรีต่อองศาเซลเซียส

H = ค่าความร้อนของการเผาไหม้กรดเบนโซอิก = 6318 แคลอรีต่อกรัม

g = น้ำหนักของกรดเบนโซอิก, กรัม

e_1 = การแก้ค่าความร้อนของการเกิดกรดไนตริก, แคลอรี

= จำนวนมิลลิลิตรของ 0.072 N ของ Na_2CO_3 ที่ใช้ไทเทรต

e_3 = การแก้ค่าความร้อนของลวด, แคลอรี

= 2.3 x ความยาวของลวดที่ใช้, เซนติเมตร

t = อุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น, องศาเซลเซียส

3. การหาค่าประกอบเมล็ดสับดูดำ

นำกากสับดูดำวิเคราะห์ตามวิธี AOAC 2000

องค์ประกอบที่วิเคราะห์	วิธีมาตรฐาน
ปริมาณไขมัน	วิธี Ether extract AOAC, 2000
ปริมาณโปรตีน	วิธี Kjeldahl AOAC, 2000
ปริมาณเถ้า	วิธี AOAC, 2000 method 923.03
ปริมาณความชื้น	วิธี AOAC, 2000 Method 390.15
ปริมาณเยื่อ	วิธี Crude fiber methods AOAC, 2000

วิธีการทดลอง

3.1. การวิเคราะห์ปริมาณไขมันด้วยวิธี Ether extract

- ก่อนชั่งตัวอย่างให้เปิดเครื่องทำความเย็น ความคุมอุณหภูมิไม่เกิน 15 องศาเซลเซียสให้น้ำไหลเข้าเครื่อง Extraction unit: Soxtec system HT 6 และ เปิดเครื่องมืออัตโนมัติสำหรับควบคุมอุณหภูมิ : 1046 Soxtec service unit โดยตั้งอุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส

- ชั่งตัวอย่างน้ำหนักประมาณ 1 กรัมใส่ในกระดาษกรองขนาด 11ไมครอน (whatman เบอร์ 1) พับกระดาษกรองใส่ในปลอกกระดาษกรอง (thimble)

- นำปลอกกระดาษกรอง (thimble) ไปใส่ใน Extraction unit : Soxtec system HT ใส่ปิโตรเลียมอีเธอร์ 50 มิลลิลิตรลงไปในถ้วยสกัดและลูกแก้ว (extraction cup + glass bead) ที่ทราบน้ำหนักคงที่แล้ว (ทำในตู้ดูดควัน) แล้วนำไปวางบนเตาให้ความร้อนของเครื่องสกัด(เพื่อรองรับไขมันที่สกัดได้)

- เลื่อนปลอกกระดาษกรอง ลงมาจุ่มใน ถ้วยสกัดที่มีปิโตรเลียมอีเธอร์อยู่ ตั้งเวลาในการสกัด 30 นาที โดยเลื่อนปุ่ม extraction mode ไปที่ตำแหน่ง “ Boiling” เมื่อครบ 30 นาทีให้เลื่อนปุ่ม Extraction Mode ไปที่ตำแหน่ง “ Rinsing” เพื่อให้ ต่อมาเมื่อครบ 30 นาทีให้เลื่อนคันโยกไปที่ตำแหน่ง “Evaporation” เพื่อให้ปิโตรเลียม - อีเธอร์ในถ้วยสกัดระเหยออกให้หมด ใช้เวลาอย่างน้อย 30 นาที เมื่อครบ 30 นาทีให้เลื่อนคันโยกลงมา แล้วเอาถ้วยสกัดออกจากเครื่อง

- นำถ้วยสกัดไปอบที่อุณหภูมิ 93 - 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา30 นาที แล้วใส่ในโถดูดความชื้น และชั่งถ้วยสกัดจนได้น้ำหนักคงที่

การคำนวณ

$$\text{ปริมาณไขมัน(\%)} = (C - A)/B \text{ -----(5)}$$

เมื่อ

A = น้ำหนักถ้วยสกัด + ลูกแก้ว (glass bead)

B = น้ำหนักตัวอย่าง

C = น้ำหนัก ถ้วยสกัด + ลูกแก้ว (glass bead)+ ไขมัน (กรัม)

3.2. การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนด้วยวิธี Kjeldahl AOAC, 2000

ขั้นตอนการหาปริมาณไนโตรเจนด้วยวิธี Kjeldahl method มีดังนี้ คือการย่อย (Digestion) การกลั่น (Distillation) การไตเตรตและการคำนวณ (Titration and Calculation) วิธีการทดลองดังนี้

การย่อย (Digestion)

นำตัวอย่างมา 1-2 กรัม ใส่ลงในหลอดย่อย (Digestion tube) จากนั้นเติมสารเคมีเพื่อย่อยตัวอย่าง ได้แก่ กรดซัลฟูริกเข้มข้น (Conc. H_2SO_4) ประมาณ 10-15 มิลลิลิตร จากนั้นเติมเกลือโพแทสเซียมซัลเฟต (K_2SO_4) เพื่อเพิ่มอุณหภูมิของการย่อย (> 376 องศาเซลเซียส) เพื่อให้การย่อยเสร็จสมบูรณ์ แล้วเติมคะตะลิสต์ (Catalyst) เพื่อเร่งการเกิดปฏิกิริยาเคมี จากนั้นนำหลอดย่อยใส่ลงในเครื่องย่อย (Digestion block) แล้วเพิ่มอุณหภูมิให้ถึงจุดของการย่อยสลาย ประมาณ 370 - 400 องศาเซลเซียส ควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ประมาณ 1 ชั่วโมง เพื่อให้การย่อยเสร็จสมบูรณ์

การกลั่น (Distillation)

การกลั่นจะเป็นการแยกเอาไนโตรเจนออกจากของเหลวในหลอดย่อย (Digestion tube) มีวิธีคือ ปรับพีเอชของของเหลวในหลอดย่อยให้เป็นกลางด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เพื่อเปลี่ยนแอมโมเนียมไอออน (Ammonium ion, NH_4^+) ให้เป็นแอมโมเนีย (Ammonia, NH_3) จากนั้นกลั่นแยกแอมโมเนียที่ได้ออกมาแล้วจับด้วยสารละลายที่เหมาะสมในวิธีของระบบ Kjeldahl System นั้นจะใช้กรดบอริก 4% (Boric acid) เป็นตัวจับแอมโมเนียไว้โดยที่แอมโมเนียจะรวมกับกรดบอริก กลายเป็นแอมโมเนียมบอเรท

การไทเตรตและการคำนวณ (Titration and Calculation)

การไทเตรต (Titration) เป็นการหาปริมาณไนโตรเจนโดยนำเอาแอมโมเนียที่ถูกจับไว้ในกรดบอริกมาไทเตรตกับสารละลายมาตรฐาน (Standard Titrant) ที่เหมาะสม นั่นคือ 0.1 - 0.4 N กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid) โดยใช้อินดิเคเตอร์ mixed indicator (เมทิลเรด และ โบโมซีรอลกรีน) เป็นตัวบอกจุดยุติ (End point)

การคำนวณ

$$\text{เปอร์เซ็นต์ไนโตรเจน} = 14.01 \times [(A - B) \times C] \times 100 / [W \times 1000] \text{----- (6)}$$

เมื่อ A = ปริมาตรของกรดที่ไทเตรตกับตัวอย่าง

B = ปริมาตรกรดที่ไทเตรตกับ Blank

C = ความเข้มข้นเป็นนอร์มัลของกรด

W = น้ำหนักตัวอย่าง

* Blank คือ ของเหลวที่ได้จากการใส่สารทุกชนิดในขบวนการ Kjeldahl

การหาปริมาณโปรตีน การคำนวณหาปริมาณโปรตีนนั้นหาจากปริมาณไนโตรเจนที่ได้โดยปกติแล้วในตัวอย่างทั่ว ๆ ไปจะมีปริมาณไนโตรเจนอยู่ 16% คิดเป็น Factor* ของ ไนโตรเจนในโปรตีน = 6.25 (100 / 16)

$$\text{เปอร์เซ็นต์โปรตีน} = 6.25 \times \text{เปอร์เซ็นต์ไนโตรเจน} \text{ -----(7)}$$

* Factor ของไนโตรเจนในโปรตีน อาจเปลี่ยนได้ในอาหารบางชนิด เช่น นมและผลิตภัณฑ์นม มีค่า Factor = 6.38

3.3. การวิเคราะห์ปริมาณเถ้าด้วยวิธี AOAC, 2000 Method 923.03

การหาปริมาณเถ้า สามารถทำได้โดยวิธี Dry Ashing มีวิธีดังนี้ อบอุ่นกระเบื้องในเตาเผาที่อุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำมาเก็บไว้ในโถดูดความชื้น นำตัวอย่างมาประมาณ 1 กรัม นำไปเผาในเตาเผาจนได้น้ำหนักคงที่

3.4. การวิเคราะห์ปริมาณความชื้นด้วยวิธี AOAC, 2000 Method 390.15

- อบอุ่นเปล่าพร้อมฝาในตู้อบที่อุณหภูมิประมาณ 103 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที แล้วจึงนำมาทำให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนักด้วยพร้อมฝา
- ชั่งตัวอย่างประมาณ 2 กรัมใส่ในถ้วยแล้วจึงตู้อบที่อุณหภูมิประมาณ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
- เมื่อครบเวลานำออกมาทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วชั่งน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป ทำซ้ำเช่นนี้จนกว่าน้ำหนักจะคงที่ จากนั้นนำมาคำนวณค่า

การคำนวณ

$$\% \text{ ความชื้น} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ} - \text{น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ}}{\text{น้ำหนักตัวอย่าง}} \times 100 \text{ -----(8)}$$

3.5. การวิเคราะห์ปริมาณเยื่อด้วยวิธี Crude fiber methods AOAC, 2000

- ชั่งน้ำหนักตัวอย่างประมาณ 1 กรัม เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น 0.128 M แล้วนำมาต้มให้เดือดประมาณ 30 นาที เพื่อเป็นการย่อย จากนั้นกรองเอาสารละลายออก ล้างตะกอนที่ได้ด้วยน้ำกลั่นร้อน 2-3 ครั้ง
- เติมโปรแตสเซียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.233 M ต้มให้เดือดประมาณ 30 นาที จากนั้นกรองเอาสารละลายออก ล้างตะกอนที่ได้ด้วยน้ำกลั่นร้อน 2-3 ครั้ง
- นำไปอบแห้งที่ 130 องศาเซลเซียส ประมาณ 2 ชั่วโมง แล้วจึงนำมาทำให้เย็นในโถดูดความชื้น และชั่งน้ำหนัก
- จากนั้นเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ประมาณ 3 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นแล้วจึงชั่งน้ำหนัก

การคำนวณ

$$\% \text{ เยื่อ} = \frac{(\text{น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ} - \text{น้ำหนักตัวอย่างหลังเผา})}{\text{น้ำหนักตัวอย่าง}} \times 100 \text{ -----(9)}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

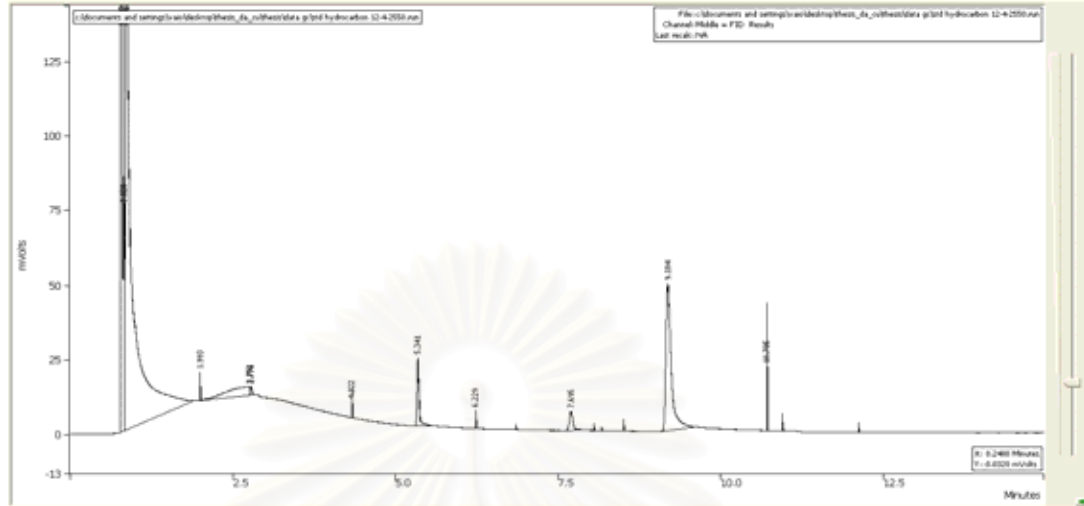
ภาคผนวก ข

วิธีการวิเคราะห์โดยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ

ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ ยี่ห้อ Varian, CP-3800 Gas chromatograph (GC) รุ่น CP-3800 ใช้หัววัดชนิด FID (Flame Ionization Detector) และ TCD (Thermal conductive detector) คอลัมน์ที่ใช้ชนิด Molecular sieve 5A (MS-5A) และ Porapak Q (PPQ) ตั้งค่าอุณหภูมิของ Injection Port อุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิสุดท้ายของคอลัมน์เท่ากับ 35 องศาเซลเซียส เพื่อใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์ และใช้เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ รุ่น 6890N ผลิตโดยบริษัท Agilent Technology ใช้ DB-WAX Capillary Column ตั้งค่าอุณหภูมิของ Injection Port อุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิสุดท้ายของคอลัมน์เท่ากับ 50 และ 250 องศาเซลเซียส ตามลำดับ รุ่น CP-3800 ใช้หัววัดชนิด FID (Flame Ionization Detector) มีก๊าซฮีเลียมเป็นตัวพาไหล เพื่อใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลว เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ เป็นเทคนิคที่ใช้ในการแยกสารผสมที่ระเหยง่าย โดยสารผสมจะถูกฉีดเข้าไปในคอลัมน์ (Column) ที่บรรจุด้วยสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวยึดจับที่เรียกว่า Stationary phase และมีก๊าซพา (Carrier gas) เป็นเฟสเคลื่อนที่ (Mobile phase) เคลื่อนที่ไปตามคอลัมน์เข้าสู่เครื่องวัด (Detector) สัญญาณที่เครื่องตรวจวัดได้รับนั้นจะถูกส่งไปบันทึกเป็นโครมาโตแกรม (Chromatogram) โดยเครื่องบันทึก (Recorder) โดยภาวะในการวิเคราะห์ก๊าซในการทดลอง แสดงดังตารางที่ ข1 และ ข2 และตัวอย่างการวิเคราะห์ก๊าซแสดงดังรูปที่ ข1

ตารางที่ ข1 ภาวะการวิเคราะห์โดยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ

ก๊าซพา (Carrier Gas)	ก๊าซอาร์กอน (Ar)
อัตราการไหลของก๊าซพา	5 มิลลิลิตรต่อนาที
ชนิดคอลัมน์	Molecular sieve 5A (MS-5A)
อุณหภูมิการฉีด (Injector Temperature)	35 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิกอลัมน์	35 องศาเซลเซียส
ระบบตรวจวัด (Detector)	TCD, FID
อุณหภูมิระบบตรวจวัด	150 องศาเซลเซียส



** LC Workstation Version 6.41 ** 03118-7690-AE7-0724 **

Run Mode : Analysis
 Peak Measurement: Peak Area
 Calculation Type: Percent

Peak No.	Peak Name	Result ()	Ret. Time (min)	Time Offset (min)	Area (counts)	Sep. Code	Width 1/2 (sec)	Status Codes
1		40.3445	0.780	0.000	1215258	BV	1.0	
2		0.2866	0.828	0.000	8632	TS	0.0	
3		44.1740	0.856	0.000	1330610	VB	2.1	
4		0.0456	1.993	0.000	1372	BV	0.0	
5		2.6005	2.753	0.000	78332	VV	0.0	
6		0.1793	2.776	0.000	5401	VB	10.0	
7		0.0673	4.322	0.000	2026	BB	0.4	
8		1.7852	5.341	0.000	53775	BB	1.9	
9		0.0381	6.229	0.000	1147	BB	0.2	
10		0.7729	7.695	0.000	23280	BB	3.2	
11		9.4200	9.184	0.000	283751	BB	4.6	
12		0.2860	10.705	0.000	8614	BB	0.4	
Totals:		100.0000		0.000	3012198			

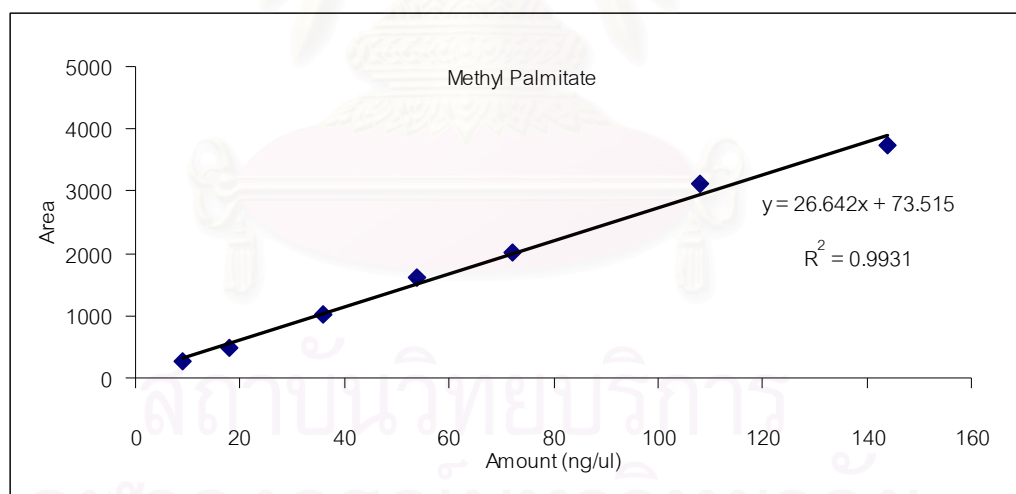
Total Unidentified Counts : 3012200 counts

รูปที่ ข1 ตัวอย่างโครมาโทแกรมของ standard hydrocarbon

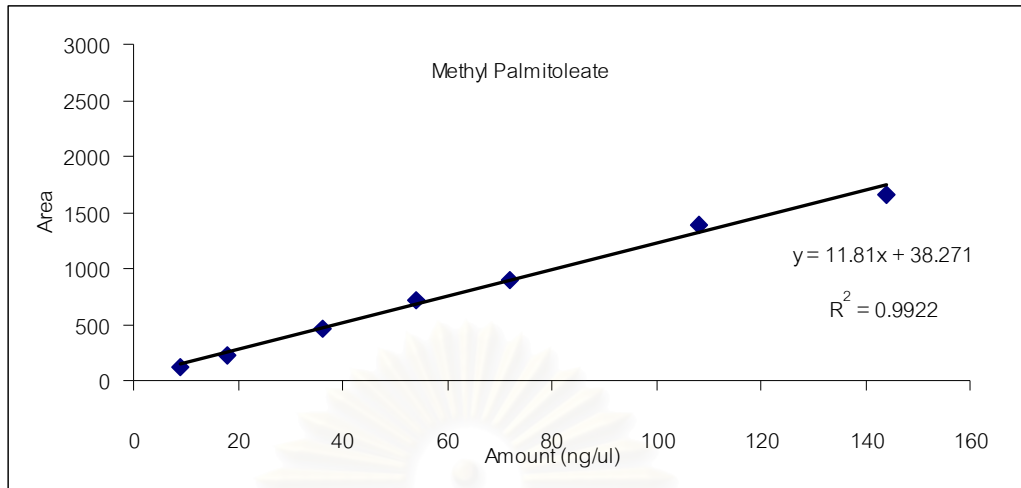
ตารางที่ ๒ ภาวะการวิเคราะห์โดยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ

ก๊าซพา (Carrier Gas)	ก๊าซฮีเลียม (He)
อัตราการไหลของก๊าซพา	2.5 มิลลิลิตรต่อนาที
ชนิดคอลัมน์	DB-WAX Capillary
อุณหภูมิการฉีด (Injector Temperature)	200 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิคอลัมน์	50,250 องศาเซลเซียส
ระบบตรวจวัด (Detector)	FID
อุณหภูมิระบบตรวจวัด	150 องศาเซลเซียส

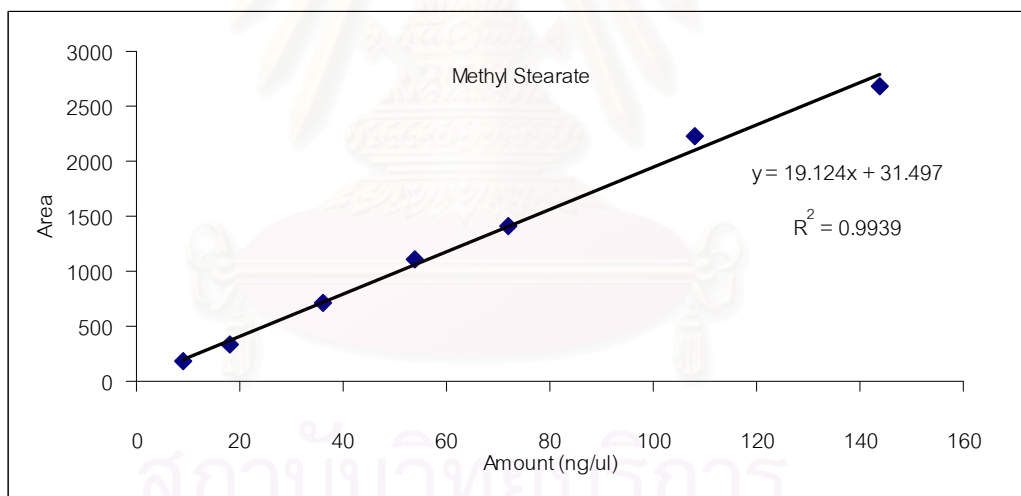
การวิเคราะห์ประกอบของกรดไขมันที่ต้องการศึกษาคือ กรดปาล์มมิติก กรดสเตียริก และกรดไขมันไม่อิ่มตัวจำพวกกรดลิโนเลอิก กรดโอเลอิก และกรดอีลีโอสเตียริก สามารถเตรียมกราฟมาตรฐานได้โดยตรงจากการเตรียมสารดังกล่าวให้มีความเข้มข้นที่ต้องการแล้วจึงนำไปฉีดในเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟอ่านค่าพื้นที่ใต้กราฟ (Peak area) แล้วนำไปสร้างกราฟมาตรฐานเพื่อเปรียบเทียบสารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองแต่ละตัว



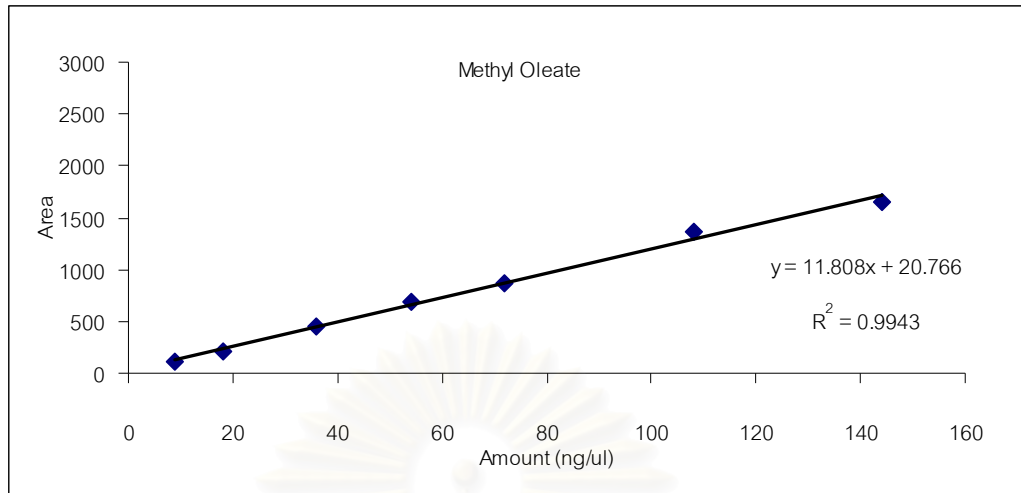
รูปที่ ๓ กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Methyl Palmitate ต่อพื้นที่ใต้กราฟที่อ่านค่าได้จากเครื่อง GC



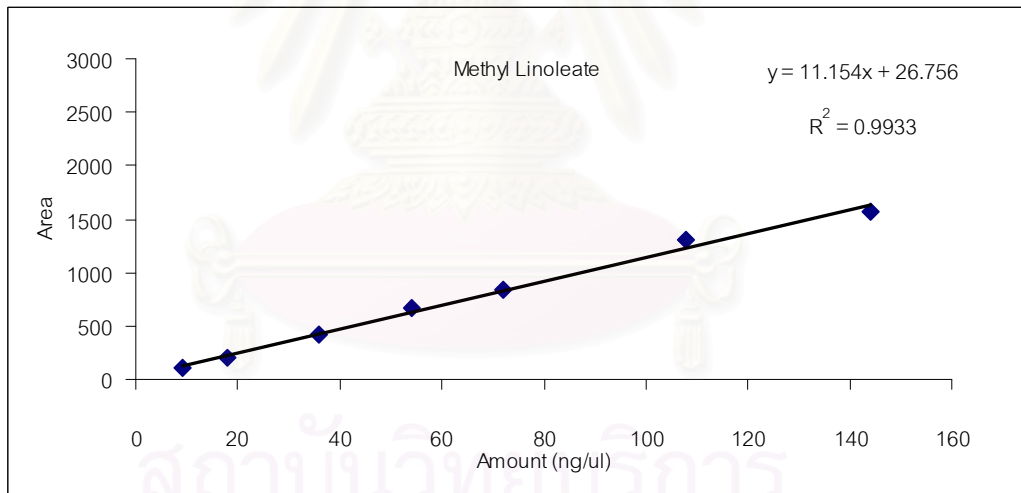
รูปที่ ข4 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Methyl Palmitoleate ต่อพื้นที่ได้กราฟที่อ่านค่าได้จากเครื่อง GC



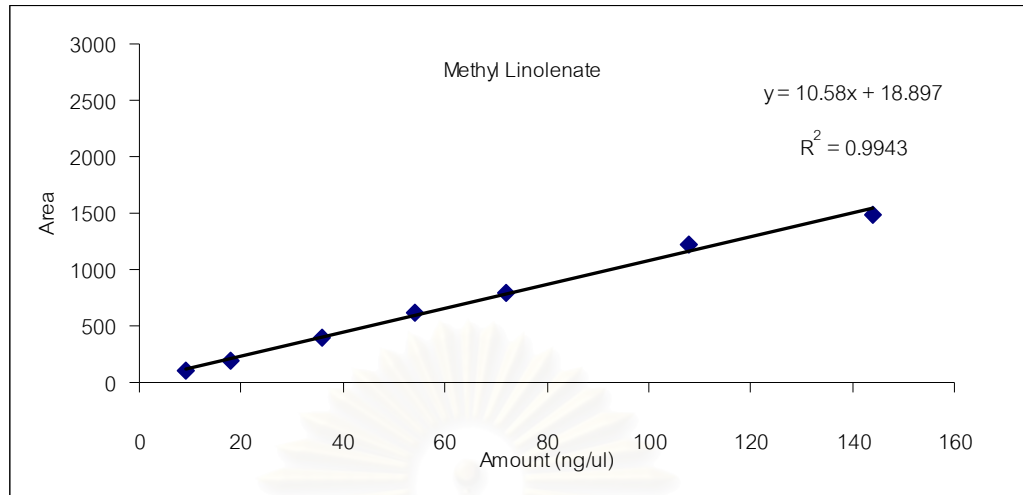
รูปที่ ข5 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Methyl Stearate ต่อพื้นที่ได้กราฟที่อ่านค่าได้จากเครื่อง GC



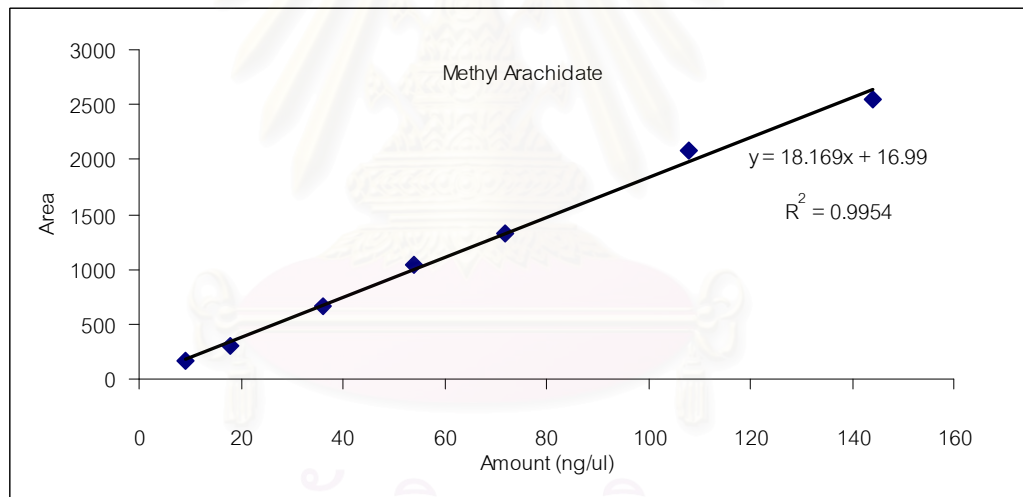
รูปที่ ข6 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Methyl Oleate ต่อพื้นที่ใต้กราฟที่อ่านค่าได้จากเครื่อง GC



รูปที่ ข7 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Methyl Linoleate ต่อพื้นที่ใต้กราฟที่อ่านค่าได้จากเครื่อง GC



รูปที่ ข8 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Methyl Linolenate ต่อพื้นที่ได้กราฟที่อ่านค่าได้จากเครื่อง GC



รูปที่ ข9 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Methyl Arachidate ต่อพื้นที่ได้กราฟที่อ่านค่าได้จากเครื่อง GC

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค
การศึกษาลักษณะพื้นฐานของวัสดุ

ตารางที่ ค.1 การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) ของกากสับดู

การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis)	
รายการวิเคราะห์	ร้อยละ
ความชื้น	0.66
เถ้า	1.50
สารระเหยได้	79.20
คาร์บอนคงตัว	18.86

ตารางที่ ค.2 การวิเคราะห์กากสับดูแบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis)

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis)	
รายการวิเคราะห์	ร้อยละ
คาร์บอน	52.30
ไฮโดรเจน	6.50
ไนโตรเจน	5.20
ออกซิเจน	36.00

ตารางที่ ค.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีของกากสับุดำตามมาตรฐาน Tappi และ AOAC 2000

การวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีของกากสับุดำ มาตรฐาน Tappi	
รายการวิเคราะห์	ร้อยละ
เซลลูโลส	56.31
เฮมิเซลลูโลส	17.47
ลิกนิน	23.91
การวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีของกากสับุดำ มาตรฐาน AOAC 2000	
รายการวิเคราะห์	ร้อยละ
โปรตีน	15.21
ไขมันและน้ำมัน	26.36
เยื่อ	43.61
เถ้า	4.46
ความชื้น	7.16

ตารางที่ ค.4 การวิเคราะห์ทดสอบสมบัติทางความร้อนของกากสับุดำ

วัตถุทดสอบ	ค่าความร้อน(แคลอรีต่อกรัม)
กากสับุดำ (ครั้งที่1)	4565.5
กากสับุดำ (ครั้งที่2)	4514.3
เฉลี่ย	4539.9

ตารางที่ ง.1 การวิเคราะห์ข้อมูลจากเทคนิคเทอร์โมกราฟีเมตริกเพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB R2007a

M-file 1

กำหนดค่าเริ่มต้นของ Initial fraction (a, b, c)

ใช้ฟังก์ชัน fminsearch(x) เพื่อหาค่า Initial fraction (a, b, c) ที่ทำให้ ฟังก์ชัน SSER มีค่าต่ำสุด

M-file 2

รับค่า Initial fraction (a, b, c) จาก **M-file 1**

กำหนดค่าเริ่มต้นของพารามิเตอร์ตัวอื่น (A1, E1, A2, E2, A3, E3 n) ของทุก Heating rate

ใช้ฟังก์ชัน fminsearch(x) เพื่อหาค่า A1, E1, A2, E2, A3, E3 n ที่ทำให้ ฟังก์ชัน SSER มีค่าต่ำสุด

ส่งค่า Initial fraction (a, b, c) และ A1, E1, A2, E2, A3, E3 n ไปยัง **M-file 3**

ส่งค่า Initial fraction (a, b, c) ที่กำหนดไว้ไปให้ **M-file 2**

M-file 3 (Two-parallel reaction model)

รับค่า Initial fraction (a, b, c) และ A1, E1, A2, E2, A3, E3 n จาก **M-file 2**

ใช้พารามิเตอร์ทั้งหมดคำนวณค่า 1

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ จากสมการใน Three-parallel reaction model

ส่งค่า α ไปยัง **M-file 4** เพื่อคำนวณ SSER

M-file 4 (SSER)

รับค่า α จาก **M-file 3**

คำนวณค่า SSER โดยเปรียบเทียบ α กับ ผลการทดลอง

ตารางที่ 1.2 Code MATLAB R2007a

```

warning off
clc
clear
load data.mat
a = 0.35;b = 0.45;c = 0.2;
% A1 = 1.3e8;A2 = 1e17;A3 = 1e2;
% E1 = 90;E2 = 200;E3 = 40;
% n = 4;
R = 8.314;
beta = 5;
[no col] = size(data);
x = [1e3 1e14 1e16 40 200 180 2.5];
fva_sum = 0;
for i = 2:1:no
    T = data(i,1);
    alpha_ex = data(i,3);
    SSRE = @(x)abs(alpha_ex-(((x(7)-1)*x(1)*R*T^2/(beta*x(4)))*(1-(2*R*T/x(4)))*exp(-x(4)/(R*T))+a^(1-x(7)))^(1/(1-x(7)))+...
        (((x(7)-1)*x(2)*R*T^2/(beta*x(5)))*(1-(2*R*T/x(5)))*exp(-x(5)/(R*T))+b^(1-x(7)))^(1/(1-x(7)))+...
        (((x(7)-1)*x(3)*R*T^2/(beta*x(6)))*(1-(2*R*T/x(6)))*exp(-x(6)/(R*T))+c^(1-x(7)))^(1/(1-x(7)))))/alpha_ex+fval_sum;

```

Code MATLAB R2007a (ต่อ)

```
[x,fval] = fminsearch(SSRE,x);
xx(i,:) = x;
fval_sum = fval+fval_sum;
alpha_cal(i,1) = (((x(7)-1)*x(1)*R*T^2/(beta*x(4)))*(1-(2*R*T/x(4)))*exp(-x(4)/(R*T))+a^(1-x(7)))^(1/(1-x(7)))+...
(((x(7)-1)*x(2)*R*T^2/(beta*x(5)))*(1-(2*R*T/x(5)))*exp(-x(5)/(R*T))+b^(1-x(7)))^(1/(1-x(7)))+...
(((x(7)-1)*x(3)*R*T^2/(beta*x(6)))*(1-(2*R*T/x(6)))*exp(-x(6)/(R*T))+c^(1-x(7)))^(1/(1-x(7)));
end
error_total(1) = inf;
for i = 3:1:no
x = xx(i,:);
error = 0;
for k = 3:1:no
T = data(k,1);
alpha_ex = data(k,3);
alpha_cal_test = (((x(1)*R*T^2/(beta*x(3)))*(1-(2*R*T/x(3)))*exp(-x(3)/(R*T))+a^(1-x(3)))^(1/(1-x(3))))+...
(((x(5)-1)*x(2)*R*T^2/(beta*x(4)))*(1-(2*R*T/x(4)))*exp(-x(4)/(R*T))+b^(1-x(5)))^(1/(1-x(5))));
error = abs((alpha_ex-alpha_cal_test)/alpha_ex+error);
end
error_total(i) = error;
end
```

```

[row col] = min(error_total);
x = xx(col,:);
for i = 3:1:no
    T = data(i,1);
    alpha_cal(i,1) = (((x(1)*R*T^2/(beta*x(3)))*(1-2*R*T/x(3)))*exp(-x(3)/(R*T))+log(a))+(((x(5)-1)*x(2)*R*T^2/(beta*x(4)))*(1-2*R*T/x(4)))*exp(-x(4)/(R*T))+b^(1-x(5)))^(1/(1-x(5)));
end
alpha_cal_abs = abs(alpha_cal);
    mi = data(1,3);
    mf = data(no,3);
    m_cal(1) = 1;
    for i = 3:1:no    m_cal(i,1) = mi-alpha_cal_abs(i)*(mi-mf);
end
figure()
plot(data(:,1),data(:,3),'red');
hold on
plot(data(:,1),alpha_cal_abs,'blue');
figure()
plot(data(:,1),data(:,3),'red');
hold on
plot(data(:,1),m_cal,'blue');
data_out = [data(:,1) xx alpha_cal_abs m_cal];
s = xlswrite('data_cal_abc.xls', data_out);

```


ตารางที่ ง.3 การวิเคราะห์หาค่าตัวแปรทางจลนศาสตร์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยข้อมูลจากการทดลองด้วยเทคนิคเทอร์โมกราฟิมेटริก ที่ 5 °C/min

อุณหภูมิ ในการ ทดลอง	A1	A2	A3	E1	E2	E3	อุณหภูมิ ในการ ทดลอง	A1	A2	A3	E1	E2	E3
298	0	0	0	0	0	0	432.95	-0.00051	-5E+10	7.12E+15	31.15055	123.7168	99.64189
306.8567	-0.00068	5.18E+15	5.26E+15	8.037796	87.62358	79.39509	441.957	-0.0005	-4.9E+10	7.28E+15	31.4921	126.2614	100.3472
315.8634	-0.00066	5.09E+15	5.37E+15	10.64246	90.20082	80.14239	450.964	-0.00049	-4.9E+10	7.41E+15	31.85664	128.915	102.0889
324.8701	-0.00065	-1.4E+11	5.5E+15	23.45391	92.77546	81.03944	459.97	-0.00048	-4.8E+10	7.54E+15	32.2792	131.5552	103.8191
333.8768	-0.00063	-1.7E+11	5.64E+15	27.16474	95.09419	82.26389	468.977	-0.00048	-4.7E+10	7.67E+15	33.03246	134.152	105.5342
342.8835	-0.00062	-7.9E+10	5.8E+15	26.61545	97.64848	84.27878	477.984	-0.00047	-4.6E+10	7.88E+15	33.83977	136.1835	106.5219
351.8901	-0.0006	-8.4E+10	5.93E+15	25.94289	100.2454	85.65684	486.99	-0.00046	-4.5E+10	8.02E+15	34.95324	138.6113	108.2051
360.8968	-0.00059	-8.3E+10	6.02E+15	26.66772	103.0245	87.51633	495.997	-0.00045	-4.4E+10	8.2E+15	36.53281	141.049	108.8427
369.9035	-0.00058	-6.2E+10	6.19E+15	27.30436	105.3581	88.58233	505.004	-0.00045	-4.3E+10	8.37E+15	38.44575	143.1476	111.0651
378.91	-0.00056	-5.8E+10	6.36E+15	28.47877	107.6304	89.66543	514.011	-0.00045	-4.3E+10	8.57E+15	40.48407	145.524	112.6102
387.917	-0.00056	-5.8E+10	6.49E+15	29.19409	110.4905	91.5115	523.017	-0.00044	-4.2E+10	8.78E+15	42.7191	147.6423	113.7666
396.924	-0.00055	-6.4E+10	6.61E+15	29.83766	113.0712	93.09254	532.024	-0.00044	-4.1E+10	8.94E+15	45.37194	149.4277	115.8186
405.93	-0.00054	-5.4E+10	6.76E+15	29.94706	116.086	94.03986	541.031	-0.00043	-4E+10	9.11E+15	48.54953	150.9999	117.8054
414.937	-0.00053	-5.2E+10	6.87E+15	30.25955	118.4707	96.27909	550.037	-0.00043	-3.9E+10	9.34E+15	52.00976	152.532	118.619
423.944	-0.00052	-5E+10	7E+15	30.73949	121.0844	97.94978	559.044	-0.00043	-3.7E+10	9.59E+15	55.59056	154.0825	119.7949

ตารางที่ ง.3 (ต่อ)

จุดทศนิยม	A1	A2	A3	E1	E2	E3	จุดทศนิยม	A1	A2	A3	E1	E2	E3
568	-0.00042	-3.6E+10	9.77E+15	59.43414	155.3269	122.5951	739.178	-0.00037	-2.6E+10	1.45E+16	126.4647	185.3507	160.4868
577.057	-0.00042	-3.5E+10	9.98E+15	63.72148	156.5773	124.3909	748.185	-0.00037	-2.6E+10	1.48E+16	126.4647	187.4497	163.2324
586.064	-0.00042	-3.4E+10	1.02E+16	68.51671	157.6537	126.773	757.191	-0.00036	-2.6E+10	1.5E+16	126.4647	189.5783	166.045
595.071	-0.00042	-3.3E+10	1.04E+16	73.88673	158.5755	129.0806	766.198	-0.00036	-2.6E+10	1.53E+16	126.4647	191.7417	168.9154
604.077	-0.00042	-3.2E+10	1.06E+16	79.8943	159.3762	131.3581	775.205	-0.00036	-2.6E+10	1.56E+16	126.4647	193.9337	171.8818
613.084	-0.00041	-3.1E+10	1.08E+16	86.12661	160.1826	133.65	784.211	-0.00035	-2.6E+10	1.59E+16	126.4647	196.149	174.8506
622.091	-0.00041	-3.1E+10	1.1E+16	91.21152	161.4949	134.5757	793.218	-0.00035	-2.6E+10	1.62E+16	126.4647	198.3864	177.8678
631.098	-0.00041	-3E+10	1.13E+16	95.16314	163.0278	135.5149	802.225	-0.00035	-2.6E+10	1.82E+16	126.4647	200.6378	152.8069
640.104	-0.00041	-3E+10	1.16E+16	98.69433	164.6794	136.4456	811.231	-0.00034	-2.6E+10	1.86E+16	126.4647	202.9016	152.3108
649.111	-0.0004	-2.9E+10	1.19E+16	102.2887	166.2608	137.5709	820.238	-0.00034	-2.6E+10	1.89E+16	126.4647	205.1758	154.9183
658.118	-0.0004	-2.9E+10	1.22E+16	106.0597	167.9511	138.9354	829.245	-0.00034	-2.6E+10	1.92E+16	126.4647	207.4509	157.632
667.124	-0.0004	-2.8E+10	1.26E+16	109.6113	169.5675	140.0884	838	-0.00033	-2.6E+10	1.96E+16	126.4647	209.6787	157.1279
676.131	-0.0004	-2.8E+10	1.28E+16	112.3897	171.3528	142.4933	847.258	-0.00033	-2.6E+10	1.99E+16	126.4647	212.0399	159.8121
685.138	-0.00039	-2.7E+10	1.3E+16	114.5229	173.2572	144.9838	856.265	-0.00033	-2.6E+10	2.04E+16	126.4647	214.579	161.0001
694.144	-0.00039	-2.6E+10	1.33E+16	116.5106	175.2147	147.4555	865.271	-0.00033	-2.6E+10	2.08E+16	126.4647	216.8902	160.4841
703.151	-0.00038	-2.6E+10	1.35E+16	118.5741	177.1956	149.9752	874.278	-0.00032	-2.6E+10	2.11E+16	126.4647	219.1845	163.2518
712.158	-0.00038	-2.5E+10	1.38E+16	120.1298	179.2005	152.5428	883.285	-0.00032	-2.6E+10	2.15E+16	126.4647	221.4953	162.7845
721.164	-0.00038	-2.6E+10	1.4E+16	122.2574	181.228	155.1541	892.292	-0.00032	-2.6E+10	2.2E+16	126.4647	223.9115	164.9664

ตารางที่ ง.3 (ต่อ)

อุณหภูมิ	A1	A2	A3	E1	E2	E3	อุณหภูมิ	A1	A2	A3	E1	E2	E3
910.305	-0.00031	-2.6E+10	2.28E+16	126.4647	228.5703	166.8227	1081.432	-0.00027	-2.6E+10	3.28E+16	126.4647	273.4515	184.5499
919.312	-0.00031	-2.6E+10	2.33E+16	126.4647	231.0856	169.275	1090.439	-0.00027	-2.6E+10	3.35E+16	126.4647	275.7396	188.0704
928.318	-0.00031	-2.6E+10	2.37E+16	126.4647	233.3297	168.9519	1099.445	-0.00027	-2.6E+10	3.41E+16	126.4647	278.017	187.1391
937.325	-0.00031	-2.6E+10	2.43E+16	126.4647	235.7386	170.308	1108	-0.00027	-2.6E+10	3.48E+16	126.4647	280.5243	189.5593
946.332	-0.0003	-2.6E+10	2.47E+16	126.4647	237.9984	170.0319	1117.459	-0.00026	-2.6E+10	3.53E+16	126.4647	282.7827	188.0305
955.338	-0.0003	-2.6E+10	2.52E+16	126.4647	240.5243	172.4321	1126.466	-0.00026	-2.6E+10	3.6E+16	126.4647	285.0138	191.3896
964.345	-0.0003	-2.6E+10	2.56E+16	126.4647	242.7874	172.1289	1135.472	-0.00026	-2.6E+10	3.66E+16	126.4647	287.4404	195.8599
973.352	-0.0003	-2.6E+10	2.63E+16	126.4647	245.2326	173.437	1144.479	-0.00026	-2.6E+10	3.72E+16	126.4647	289.8664	195.3049
982.358	-0.00029	-2.6E+10	2.64E+16	126.4647	247.5681	175.4557	1153.486	-0.00026	-2.6E+10	3.79E+16	126.4647	292.2923	194.756
991.365	-0.00029	-2.6E+10	2.71E+16	126.4647	249.9285	176.959	1162.492	-0.00026	-2.6E+10	3.88E+16	126.4647	294.8673	196.313
1000.372	-0.00029	-2.6E+10	2.76E+16	126.4647	252.1936	176.6858	1171.499	-0.00025	-2.6E+10	3.95E+16	126.4647	297.1726	195.8928
1009.379	-0.00029	-2.6E+10	2.83E+16	126.4647	254.8189	178.394	หมายเหตุ A= frequency factor, min ⁻¹ E = Activation energy (kJ/mol)						
1018.385	-0.00029	-2.6E+10	2.88E+16	126.4647	257.0898	178.1607							
1027.392	-0.00028	-2.6E+10	2.95E+16	126.4647	259.6227	179.0091							
1036.399	-0.00028	-2.6E+10	3E+16	126.4647	261.8855	178.7685							
1045.405	-0.00028	-2.6E+10	3.06E+16	126.4647	264.5773	180.437							
1054.412	-0.00028	-2.6E+10	3.1E+16	126.4647	266.7145	178.9023							
1063.419	-0.00028	-2.6E+10	3.17E+16	126.4647	269.0097	182.6987							

ตารางที่ ง.4 การวิเคราะห์หาค่าตัวแปรทางจลนศาสตร์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยข้อมูลจากการทดลองด้วยเทคนิคเทอร์โมกราฟิมेटริก ที่ 15 °C/min

อุณหภูมิ ในการ ทดลอง	A1	A2	A3	E1	E2	E3	อุณหภูมิ ในการ ทดลอง	A1	A2	A3	E1	E2	E3
298	0	0	0	0	0	0	432.95	-0.00053	-2E-07	7.59E+15	34.38051	93.14459	123.7168
306.8567	-0.0007	3.42E+14	5.26E+15	8.153732	79.39509	87.62359	441.957	-0.00052	-6.8E-08	7.77E+15	34.40198	93.80393	126.2614
315.8634	-0.00069	5.18E+14	5.37E+15	11.34053	80.14239	90.20082	450.964	-0.00051	-2.4E-08	7.91E+15	34.45774	95.432	128.915
324.8701	-0.00067	-8.5E+13	5.5E+15	24.35913	81.03944	92.77546	459.97	-0.0005	-8.3E-09	8.04E+15	34.58779	97.04939	131.5552
333.8768	-0.00065	-8.4E+13	5.64E+15	28.20718	82.26389	95.09419	468.977	-0.00049	-1.8E-09	8.18E+15	34.10751	98.6527	134.152
342.8835	-0.00064	-8.2E+13	5.8E+15	36.67423	84.27877	97.64848	477.984	-0.00048	-1.7E-09	8.41E+15	35.05209	99.57597	136.1835
351.8901	-0.00062	-6.2E+13	5.93E+15	39.01069	85.65683	100.2454	486.99	-0.00048	-1.3E-10	8.55E+15	35.06143	101.1494	138.6113
360.8968	-0.00061	-4.0E+13	6.02E+15	36.28346	87.51633	103.0245	495.997	-0.00047	-1.8E-10	8.75E+15	70.52998	101.7454	141.049
369.9035	-0.0006	-0.4 E+13	6.19E+15	33.74652	88.58233	105.3581	505.004	-0.00046	-2.1E-10	8.93E+15	88.46424	103.8229	143.1476
378.91	-0.00058	-0.4 E+13	6.36E+15	35.92777	89.66543	107.6304	514.011	-0.00046	-2E-10	9.14E+15	105.2673	100.0101	145.524
387.917	-0.00058	-0.0 E+13	6.92E+15	35.54622	85.54435	110.4905	523.017	-0.00046	-2E-10	9.37E+15	106.3483	110.6417	147.6423
396.924	-0.00057	-4.6E-05	7.05E+15	34.94814	87.0223	113.0712	532.024	-0.00045	-2E-10	9.54E+15	108.2664	121.8974	149.4277
405.93	-0.00056	-6.3E-07	7.21E+15	33.66216	87.90784	116.086	541.031	-0.00045	-2E-10	9.71E+15	110.1237	134.3103	150.9999
414.937	-0.00055	-5.3E-07	7.33E+15	33.9899	90.00107	118.4707	550.037	-0.00045	-2E-10	9.96E+15	110.8842	146.9928	152.532
423.944	-0.00054	-6.2E-07	7.46E+15	34.38108	91.56281	121.0844	559.044	-0.00044	-2E-10	1.02E+16	111.9835	159.5822	154.0825

ตารางที่ ง.4 (ต่อ)

จุดทศนิยม	A1	A2	A3	E1	E2	E3	จุดทศนิยม	A1	A2	A3	E1	E2	E3
568	-0.00044	-2E-10	1.04E+16	114.6011	172.7122	155.3269	739.178	-0.00038	5.46E-11	1.69E+16	131.1127	309.2402	185.3542
577.057	-0.00044	-1.9E-10	1.06E+16	116.2798	187.0432	156.5773	748.185	-0.00038	5.46E-11	1.72E+16	133.3557	309.2402	187.4533
586.064	-0.00043	-1.9E-10	1.09E+16	118.5066	202.9224	157.6537	757.191	-0.00038	5.46E-11	1.75E+16	135.6535	309.2402	189.5819
595.071	-0.00043	-1.9E-10	1.11E+16	120.6637	220.558	158.5755	766.198	-0.00037	5.46E-11	1.78E+16	135.2062	309.2402	191.7493
604.077	-0.00043	-1.9E-10	1.13E+16	122.7927	240.2541	159.3762	775.205	-0.00037	5.46E-11	1.82E+16	137.5419	309.2402	193.9415
613.084	-0.00043	-1.9E-10	1.15E+16	124.9351	260.8706	160.1826	784.211	-0.00037	5.46E-11	1.85E+16	139.9176	309.2402	196.1568
622.091	-0.00043	-1.9E-10	1.18E+16	125.8005	277.8537	161.4949	793.218	-0.00036	5.46E-11	1.88E+16	139.4568	309.2402	198.398
631.098	-0.00043	-1.9E-10	1.21E+16	126.6784	291.1083	163.0279	802.225	-0.00036	5.46E-11	1.92E+16	141.8465	309.2402	200.6496
640.104	-0.00042	-1.9E-10	1.24E+16	127.5485	303.0674	164.6794	811.231	-0.00036	5.46E-11	1.95E+16	144.2588	309.2402	202.912
649.111	-0.00042	-2.7E-10	1.27E+16	128.6004	309.0344	166.2608	820.238	-0.00035	5.46E-11	1.99E+16	143.8135	309.2402	205.1873
658.118	-0.00042	7.75E-11	1.3E+16	129.8759	309.0906	167.9511	829.245	-0.00035	5.46E-11	2.02E+16	146.3327	309.2402	207.4626
667.124	-0.00041	6.22E-11	1.34E+16	130.9537	309.1345	169.5675	838	-0.00035	5.46E-11	2.06E+16	145.8647	309.2402	209.6905
676.131	-0.00041	5.46E-11	1.36E+16	133.2018	309.1546	171.3528	847.258	-0.00034	5.46E-11	2.1E+16	148.3565	309.2402	212.0518
685.138	-0.00041	5.46E-11	1.39E+16	135.5299	309.2402	173.2572	856.265	-0.00034	5.46E-11	2.14E+16	149.4594	309.2402	214.591
694.144	-0.0004	5.46E-11	1.54E+16	125.4191	309.2402	175.2147	865.271	-0.00034	5.46E-11	2.18E+16	148.9804	309.2402	216.9024
703.151	-0.0004	5.46E-11	1.57E+16	127.5622	309.2402	177.1956	874.278	-0.00033	5.46E-11	2.22E+16	151.5497	309.2402	219.1969
712.158	-0.00039	5.46E-11	1.6E+16	127.1524	309.2402	179.2028	883.285	-0.00033	5.46E-11	2.26E+16	154.1448	309.2402	221.4919
721.164	-0.00039	5.46E-11	1.63E+16	129.3291	309.2402	181.2304	892.292	-0.00033	5.46E-11	2.3E+16	153.7516	309.2402	223.7994
730.171	-0.00039	5.46E-11	1.66E+16	131.5327	309.2402	183.2799	901.298	-0.00033	5.46E-11	2.35E+16	155.7845	309.2402	226.2137

ตารางที่ ๓.4 (ต่อ)

อุณหภูมิ	A1	A2	A3	E1	E2	E3	อุณหภูมิ	A1	A2	A3	E1	E2	E3
910.305	-0.00032	5.46E-11	2.39E+16	158.1086	309.2402	228.7521	1081.432	-0.00028	5.46E-11	3.48E+16	171.3206	309.2402	272.9171
919.312	-0.00032	5.46E-11	2.44E+16	157.7888	309.2402	230.9992	1090.439	-0.00028	5.46E-11	3.55E+16	174.5887	309.2402	275.2007
928.318	-0.00032	5.46E-11	2.5E+16	159.0487	309.2402	233.4034	1099.445	-0.00028	5.46E-11	3.61E+16	173.7242	309.2402	277.4736
937.325	-0.00032	5.46E-11	2.54E+16	158.7782	309.2402	235.6509	1108	-0.00027	5.46E-11	3.69E+16	175.971	309.2402	279.9761
946.332	-0.00031	5.46E-11	2.6E+16	160.0341	309.2402	238.0749	1117.459	-0.00027	5.46E-11	3.74E+16	174.5508	309.2402	282.23
955.338	-0.00031	5.46E-11	2.65E+16	159.764	309.2402	240.3362	1126.466	-0.00027	5.46E-11	3.82E+16	177.6692	309.2402	284.4567
964.345	-0.00031	5.46E-11	2.71E+16	160.8768	309.2402	242.7786	1135.472	-0.00027	5.46E-11	3.88E+16	181.819	309.2402	286.8785
973.352	-0.00031	5.46E-11	2.72E+16	162.7448	309.2402	245.1134	1144.479	-0.00027	5.46E-11	3.95E+16	181.3038	309.2402	289.2998
982.358	-0.0003	5.46E-11	2.8E+16	164.097	309.2402	247.4676	1153.486	-0.00027	5.46E-11	4.02E+16	180.7943	309.2402	291.721
991.365	-0.0003	5.46E-11	2.84E+16	163.9374	309.2402	249.7504	1162.492	-0.00026	5.46E-11	4.12E+16	182.2396	309.2402	294.291
1000.372	-0.0003	5.46E-11	2.92E+16	165.1354	309.2402	252.2063	1171.499	-0.00026	5.46E-11	4.2E+16	184.8392	309.2402	297.0575
1009.379	-0.0003	5.46E-11	2.97E+16	164.9295	309.2402	254.4739	หมายเหตุ A= frequency factor,min ⁻¹ E = Activation energy (kJ/mol)						
1018.385	-0.0003	5.46E-11	3.05E+16	309.2402	257.0548								
1027.392	-0.00029	5.46E-11	3.1E+16	166.4256	309.2402	259.3213							
1036.399	-0.00029	5.46E-11	3.18E+16	167.5818	309.2402	261.7768							
1045.405	-0.00029	5.46E-11	3.23E+16	167.3984	309.2402	264.038							
1054.412	-0.00029	5.46E-11	3.32E+16	171.2335	309.2402	266.3338							
1063.419	-0.00028	5.46E-11	3.36E+16	169.6021	309.2402	268.484							
1072.425	-0.00028	5.46E-11	3.41E+16	168.1558	309.2402	270.6257							

ตารางที่ ง.5 การวิเคราะห์หาค่าตัวแปรทางจลนศาสตร์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยข้อมูลจากการทดลองด้วยเทคนิคเทอร์โมกราฟิมेटริก ที่ 30 °C/min

อุณหภูมิ ในการ ทดลอง	A1	A2	A3	E1	E2	E3	อุณหภูมิ ในการ ทดลอง	A1	A2	A3	E1	E2	E3
298	0	0	0	0	0	0	432.95	-0.00056	1.87E+15	7.13E+15	9.615327	123.7168	99.69656
306.8567	-0.00074	9.79E+15	5.26E+15	5.942585	87.62359	79.39508	441.957	-0.00054	1.85E+15	7.29E+15	9.721283	126.2614	100.4023
315.8634	-0.00072	6.6E+15	5.37E+15	6.24412	90.20082	80.14239	450.964	-0.00054	1.84E+15	7.42E+15	9.832152	128.915	102.1449
324.8701	-0.00071	2.21E+15	5.5E+15	6.339289	92.77546	81.03944	459.97	-0.00053	1.86E+15	7.55E+15	9.95623	131.5552	103.876
333.8768	-0.00069	2.15E+15	5.64E+15	6.786149	95.09419	82.26388	468.977	-0.00052	1.84E+15	7.68E+15	10.14767	134.152	105.5921
342.8835	-0.00067	2.1E+15	5.8E+15	7.166013	97.64848	84.27877	477.984	-0.00051	1.85E+15	7.89E+15	10.39581	136.1835	106.5803
351.8901	-0.00066	2.08E+15	5.93E+15	7.514889	100.2454	85.65683	486.99	-0.0005	1.82E+15	8.02E+15	10.77418	138.6113	108.2645
360.8968	-0.00065	2.04E+15	6.02E+15	7.849068	103.0245	87.56435	495.997	-0.00049	1.8E+15	8.21E+15	11.31919	141.049	108.9024
369.9035	-0.00063	2.02E+15	6.19E+15	8.175657	105.3581	88.63094	505.004	-0.00049	1.77E+15	8.38E+15	12.00582	143.1476	111.126
378.91	-0.00062	1.99E+15	6.36E+15	8.470697	107.6304	89.71463	514.011	-0.00049	1.72E+15	8.58E+15	12.76406	145.524	112.672
387.917	-0.00061	1.9E+15	6.49E+15	8.727285	110.4905	91.56171	523.017	-0.00048	1.66E+15	8.79E+15	13.62926	147.6423	113.8291
396.924	-0.0006	1.91E+15	6.61E+15	8.951478	113.0712	93.14362	532.024	-0.00048	1.67E+15	8.95E+15	13.37638	149.4277	115.8821
405.93	-0.00059	1.89E+15	6.77E+15	9.143969	116.086	94.09145	541.031	-0.00047	1.64E+15	9.11E+15	14.57134	150.9999	117.87
414.937	-0.00058	1.88E+15	6.87E+15	9.338561	118.4707	96.33192	550.037	-0.00047	1.62E+15	9.34E+15	15.93341	152.532	118.6841
423.944	-0.00057	1.86E+15	7E+15	9.495452	121.0844	98.00352	559.044	-0.00047	1.6E+15	9.6E+15	17.45177	154.0825	119.8606

ตารางที่ ง.5 (ต่อ)

จุดทศนิยม	A1	A2	A3	E1	E2	E3	จุดทศนิยม	A1	A2	A3	E1	E2	E3
568	-0.00046	1.59E+15	9.78E+15	19.1873	155.3269	122.6624	739.178	-0.0004	-3.3E+12	1.45E+16	89.44101	185.3507	160.5749
577.057	-0.00046	-1.3E+16	9.98E+15	17.80739	156.5773	124.4592	748.185	-0.0004	-3.4E+12	1.48E+16	92.45838	187.4498	163.322
586.064	-0.00046	-7.9E+12	1.02E+16	17.99408	157.6537	126.8426	757.191	-0.0004	-3.4E+12	1.51E+16	94.76984	189.5783	166.1361
595.071	-0.00046	-5.9E+12	1.04E+16	17.44583	158.5755	129.1514	766.198	-0.00039	-3.4E+12	1.53E+16	97.13909	191.7417	169.008
604.077	-0.00045	-5.7E+12	1.06E+16	20.19646	159.3762	131.4302	775.205	-0.00039	-3.4E+12	1.56E+16	97.13909	193.9338	171.9276
613.084	-0.00045	-5.4E+12	1.08E+16	23.72418	160.1826	133.7233	784.211	-0.00038	-3.4E+12	1.59E+16	97.13909	196.149	174.8972
622.091	-0.00045	-4.8E+12	1.1E+16	26.874	161.4949	134.6495	793.218	-0.00038	-3.4E+12	1.62E+16	97.13909	198.3865	177.9152
631.098	-0.00045	-4.1E+12	1.13E+16	38.40198	163.0279	135.5892	802.225	-0.00038	-3.4E+12	1.89E+16	97.13909	200.6378	158.1138
640.104	-0.00044	-4E+12	1.16E+16	44.58682	164.6794	136.5205	811.231	-0.00037	-3.4E+12	1.93E+16	97.13909	202.9001	160.8027
649.111	-0.00044	-4E+12	1.19E+16	49.75349	166.2608	137.6464	820.238	-0.00037	-3.4E+12	1.96E+16	97.13909	205.1742	163.5556
658.118	-0.00044	-3.8E+12	1.22E+16	54.53196	167.9511	139.0116	829.245	-0.00037	-3.4E+12	2E+16	97.13909	207.4589	163.0627
667.124	-0.00043	-3.7E+12	1.26E+16	58.65498	169.5675	140.1653	838	-0.00036	-3.4E+12	2.03E+16	97.13909	209.7088	165.9143
676.131	-0.00043	-3.6E+12	1.28E+16	62.17295	171.3528	142.5715	847.258	-0.00036	-3.4E+12	2.07E+16	97.13909	212.0703	168.7486
685.138	-0.00043	-3.5E+12	1.3E+16	67.25927	173.2573	145.0634	856.265	-0.00036	-3.4E+12	2.11E+16	97.13909	214.3793	168.2145
694.144	-0.00042	-3.4E+12	1.33E+16	71.71772	175.2147	147.5364	865.271	-0.00035	-3.4E+12	2.14E+16	97.13909	216.709	171.1678
703.151	-0.00042	-3.3E+12	1.35E+16	75.80982	177.1956	150.0575	874.278	-0.00035	-3.4E+12	2.18E+16	97.13909	219.0015	174.1198
712.158	-0.00042	-3.3E+12	1.38E+16	79.58671	179.2005	152.6265	883.285	-0.00035	-3.4E+12	2.22E+16	97.13909	221.3104	173.6214
721.164	-0.00041	-3.2E+12	1.4E+16	83.10724	181.2281	155.2393	892.292	-0.00035	-3.4E+12	2.27E+16	97.13909	223.7245	175.9486
730.171	-0.00041	-3.2E+12	1.43E+16	86.38115	183.2776	157.8844	901.298	-0.00034	-3.4E+12	2.31E+16	97.13909	226.0282	175.5279

ตารางที่ 3.5 (ต่อ)

อุณหภูมิ	A1	A2	A3	E1	E2	E3	อุณหภูมิ	A1	A2	A3	E1	E2	E3
910.305	-0.00034	-3.4E+12	2.35E+16	97.13909	228.5644	178.1464	1081.432	-0.00029	-3.4E+12	3.44E+16	97.13909	272.8298	194.2469
919.312	-0.00034	-3.4E+12	2.39E+16	97.13909	230.8097	177.7861	1090.439	-0.00029	-3.4E+12	3.51E+16	97.13909	275.1128	197.9524
928.318	-0.00033	-3.4E+12	2.45E+16	97.13909	233.2119	179.2056	1099.445	-0.00029	-3.4E+12	3.58E+16	97.13909	277.385	196.9722
937.325	-0.00033	-3.4E+12	2.51E+16	97.13909	235.6196	180.6441	1108	-0.00029	-3.4E+12	3.65E+16	97.13909	279.8866	199.5196
946.332	-0.00033	-3.4E+12	2.55E+16	97.13909	237.8782	180.3513	1117.459	-0.00029	-3.4E+12	3.7E+16	97.13909	282.1398	197.909
955.338	-0.00033	-3.4E+12	2.61E+16	97.13909	240.4029	182.8972	1126.466	-0.00028	-3.4E+12	3.78E+16	97.13909	284.3658	201.4447
964.345	-0.00032	-3.4E+12	2.65E+16	97.13909	242.6648	182.5755	1135.472	-0.00028	-3.4E+12	3.85E+16	97.13909	286.6279	200.5125
973.352	-0.00032	-3.4E+12	2.72E+16	97.13909	245.1088	183.963	1144.479	-0.00028	-3.4E+12	3.92E+16	97.13909	289.2317	203.1227
982.358	-0.00032	-3.4E+12	2.73E+16	97.13909	247.4431	186.1042	1153.486	-0.00028	-3.4E+12	4E+16	97.13909	291.8381	205.7477
991.365	-0.00032	-3.4E+12	2.8E+16	97.13909	249.8023	187.6987	1162.492	-0.00028	-3.4E+12	4.07E+16	97.13909	294.2604	207.4089
1000.372	-0.00031	-3.4E+12	2.85E+16	97.13909	252.0663	187.409	1171.499	-0.00028	-3.4E+12	4.15E+16	97.13909	297.0266	210.3675
1009.379	-0.00031	-3.4E+12	2.9E+16	97.13909	254.3327	187.1753	หมายเหตุ A= frequency factor, min ⁻¹ E = Activation energy (kJ/mol)						
1018.385	-0.00031	-3.4E+12	2.98E+16	97.13909	256.9121	189.0925							
1027.392	-0.00031	-3.4E+12	3.03E+16	97.13909	259.1774	188.8732							
1036.399	-0.00031	-3.4E+12	3.11E+16	97.13909	261.6315	190.1853							
1045.405	-0.0003	-3.4E+12	3.16E+16	97.13909	263.8915	189.9772							
1054.412	-0.0003	-3.4E+12	3.24E+16	97.13909	266.186	194.3296							
1063.419	-0.0003	-3.4E+12	3.29E+16	97.13909	268.335	192.4781							
1072.425	-0.0003	-3.4E+12	3.38E+16	97.13909	270.5539	195.449							

ตารางที่ ง.6 การวิเคราะห์หาค่าตัวแปรทางจลนศาสตร์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยข้อมูลจากการทดลองด้วยเทคนิคเทอร์โมกราฟิมेटริก ที่ 90 °C/min

อุณหภูมิ ในการ ทดลอง	A1	A2	A3	E1	E2	E3	อุณหภูมิ ในการ ทดลอง	A1	A2	A3	E1	E2	E3
298	0	0	0	0	0	0	432.95	-0.00067	-1.6E+10	7.13E+15	10.64083	123.7168	99.67443
306.8567	-0.00089	-1.4E+11	5.26E+15	6.627392	87.62359	79.39507	441.957	-0.00065	-1.4E+10	7.3E+15	10.68206	126.2614	100.38
315.8634	-0.00087	-1.3E+11	5.37E+15	7.552479	90.20083	80.14237	450.964	-0.00064	-1.4E+10	7.42E+15	10.78601	128.915	102.1222
324.8701	-0.00085	-1.2E+11	5.5E+15	8.211167	92.77547	81.03942	459.97	-0.00063	-1.1E+10	7.55E+15	10.88138	131.5552	103.853
333.8768	-0.00082	-1.2E+11	5.64E+15	8.723739	95.0942	82.26386	468.977	-0.00062	-7.7E+09	7.68E+15	10.6645	134.152	105.5687
342.8835	-0.0008	-1.1E+11	5.8E+15	9.126975	97.64849	84.27875	477.984	-0.00061	-6.2E+09	7.9E+15	10.8599	136.1835	106.5567
351.8901	-0.00079	-8.1E+10	5.93E+15	9.334739	100.2454	85.65681	486.99	-0.0006	-5.5E+09	8.03E+15	10.98072	138.6113	108.2405
360.8968	-0.00077	-7.4E+10	6.03E+15	9.61984	103.0245	87.54491	495.997	-0.00059	-4.9E+09	8.21E+15	11.39603	141.049	108.8782
369.9035	-0.00076	-6.8E+10	6.19E+15	9.87595	105.3581	88.61127	505.004	-0.00059	-4.7E+09	8.38E+15	12.67894	143.1476	111.1014
378.91	-0.00074	-6.1E+10	6.37E+15	10.10341	107.6304	89.69471	514.011	-0.00058	-5E+09	8.59E+15	13.84492	145.5241	112.647
387.917	-0.00073	-4.8E+10	6.5E+15	10.31253	110.4905	91.54138	523.017	-0.00058	-6.1E+09	8.8E+15	15.41206	147.6423	113.8038
396.924	-0.00071	-3.9E+10	6.62E+15	10.51308	113.0712	93.12295	532.024	-0.00057	-1.3E+10	8.96E+15	16.91116	149.4277	115.8564
405.93	-0.00071	-3.6E+10	6.77E+15	10.56983	116.086	94.07057	541.031	-0.00057	-2E+10	9.12E+15	18.6631	150.9999	117.8439
414.937	-0.00069	-2.3E+10	6.88E+15	10.43086	118.4707	96.31054	550.037	-0.00056	2.48E+10	9.35E+15	19.86753	152.532	118.6577
423.944	-0.00068	-2E+10	7.01E+15	10.54318	121.0844	97.98177	559.044	-0.00056	-9.1E+09	9.6E+15	21.29873	154.0825	119.834

ตารางที่ ๓.6 (ต่อ)

จุดทศนิยม	A1	A2	A3	E1	E2	E3	จุดทศนิยม	A1	A2	A3	E1	E2	E3
568	-0.00055	3.84E+09	9.79E+15	23.28759	155.3269	122.6352	739.178	-0.00048	-4.7E+10	1.6E+16	308.7099	185.1882	132.752
577.057	-0.00055	3.09E+09	9.99E+15	24.94384	156.5773	124.4316	748.185	-0.00048	-3.6E+10	1.63E+16	308.2678	187.2854	135.0231
586.064	-0.00055	-5.1E+09	1.19E+16	44.57911	157.6537	113.8911	757.191	-0.00047	-4.5E+10	1.66E+16	308.3826	189.4121	137.3496
595.071	-0.00055	-1E+09	1.21E+16	92.39989	158.5755	115.9642	766.198	-0.00047	-5.4E+10	1.69E+16	309.1922	191.5776	136.8967
604.077	-0.00054	-2.1E+09	1.23E+16	137.8195	159.372	115.6331	775.205	-0.00046	-1.5E+10	1.72E+16	309.1794	193.7678	139.2616
613.084	-0.00054	-2.7E+09	1.25E+16	187.2583	160.1783	117.6506	784.211	-0.00046	-6.4E+09	1.75E+16	309.027	195.9812	141.667
622.091	-0.00054	-2.9E+09	1.29E+16	235.6728	161.4907	118.4657	793.218	-0.00046	-6.6E+09	1.78E+16	309.1971	198.2204	141.2005
631.098	-0.00054	-4.4E+09	1.31E+16	283.5431	162.9017	118.3066	802.225	-0.00045	-4.3E+09	1.81E+16	309.2122	200.4699	143.6201
640.104	-0.00053	-7.4E+09	1.34E+16	309.2547	164.552	119.1192	811.231	-0.00045	-4E+09	1.85E+16	309.1721	202.7318	143.1537
649.111	-0.00053	-1.1E+10	1.34E+16	309.1862	166.1173	120.5092	820.238	-0.00044	-8.6E+08	1.88E+16	309.1089	205.004	145.6045
658.118	-0.00052	-1.3E+10	1.38E+16	309.1444	167.8061	121.7043	829.245	-0.00044	-6.8E+07	1.91E+16	309.1223	207.2779	148.1521
667.124	-0.00052	-1.6E+10	1.38E+16	309.2383	169.408	123.1278	838	-0.00044	-6.8E+07	1.95E+16	309.2412	209.5038	147.6783
676.131	-0.00052	-2.5E+10	1.41E+16	309.2426	171.1915	125.2415	847.258	-0.00043	-6.8E+07	1.98E+16	309.2412	211.863	150.2011
685.138	-0.00051	-3.8E+10	1.44E+16	309.2438	173.1021	124.8588	856.265	-0.00043	-6.8E+07	2.03E+16	309.2412	214.4	151.3177
694.144	-0.00051	-5.7E+10	1.46E+16	309.2451	175.0578	126.9874	865.271	-0.00042	-6.8E+07	2.06E+16	309.2412	216.7093	150.8327
703.151	-0.0005	-8.4E+10	1.49E+16	309.1198	177.0369	129.1573	874.278	-0.00042	-6.8E+07	2.1E+16	309.2412	219.0017	153.434
712.158	-0.0005	-9.5E+10	1.52E+16	308.7059	179.0423	128.7423	883.285	-0.00042	-6.8E+07	2.14E+16	309.2412	221.2947	156.0614
721.164	-0.00049	-7.2E+10	1.54E+16	308.5142	181.0681	130.9462	892.292	-0.00041	-6.8E+07	2.18E+16	309.2412	223.6002	155.6633
730.171	-0.00049	-8.5E+10	1.57E+16	308.8745	183.1158	133.1774	901.298	-0.00041	-6.8E+07	2.22E+16	309.2412	226.0123	157.7215

ตารางที่ 3.6 (ต่อ)

อุณหภูมิ	A1	A2	A3	E1	E2	E3	อุณหภูมิ	A1	A2	A3	E1	E2	E3
910.305	-0.00041	-6.8E+07	2.27E+16	309.2412	228.5484	160.0744	1081.432	-0.00035	-6.8E+07	3.29E+16	309.2412	272.6737	173.4217
919.312	-0.0004	-6.8E+07	2.31E+16	309.2412	230.7936	159.7506	1090.439	-0.00035	-6.8E+07	3.36E+16	309.2412	274.9553	176.7299
928.318	-0.0004	-6.8E+07	2.35E+16	309.2412	233.0349	159.4456	1099.445	-0.00035	-6.8E+07	3.42E+16	309.2412	277.2262	175.8548
937.325	-0.0004	-6.8E+07	2.4E+16	309.2412	235.4407	160.7255	1108	-0.00035	-6.8E+07	3.49E+16	309.2412	279.7264	178.1291
946.332	-0.00039	-6.8E+07	2.46E+16	309.2412	237.8626	161.9967	1117.459	-0.00034	-6.8E+07	3.54E+16	309.2412	281.9783	176.6912
955.338	-0.00039	-6.8E+07	2.51E+16	309.2412	240.1218	161.7233	1126.466	-0.00034	-6.8E+07	3.61E+16	309.2412	284.203	179.8478
964.345	-0.00039	-6.8E+07	2.57E+16	309.2412	242.5621	162.8498	1135.472	-0.00034	-6.8E+07	3.67E+16	309.2412	286.6227	184.0485
973.352	-0.00039	-6.8E+07	2.58E+16	309.2412	244.8948	164.7406	1144.479	-0.00034	-6.8E+07	3.74E+16	309.2412	289.0418	183.527
982.358	-0.00038	-6.8E+07	2.65E+16	309.2412	247.2469	166.1095	1153.486	-0.00033	-6.8E+07	3.81E+16	309.2412	291.4609	183.0112
991.365	-0.00038	-6.8E+07	2.69E+16	309.2412	249.5277	165.9479	1162.492	-0.00033	-6.8E+07	3.9E+16	309.2412	294.0286	184.4743
1000.372	-0.00038	-6.8E+07	2.76E+16	309.2412	251.9814	167.1606	1171.499	-0.00033	-6.8E+07	3.98E+16	309.2412	296.7926	187.1058
1009.379	-0.00037	-6.8E+07	2.81E+16	309.2412	254.247	166.9522	หมายเหตุ A= frequency factor, min ⁻¹ E = Activation energy (kJ/mol)						
1018.385	-0.00037	-6.8E+07	2.88E+16	309.2412	256.8255	168.6624							
1027.392	-0.00037	-6.8E+07	2.94E+16	309.2412	259.09	168.4668							
1036.399	-0.00037	-6.8E+07	3.01E+16	309.2412	261.5433	169.6371							
1045.405	-0.00036	-6.8E+07	3.06E+16	309.2412	263.8025	169.4515							
1054.412	-0.00036	-6.8E+07	3.14E+16	309.2412	266.0962	173.3337							
1063.419	-0.00036	-6.8E+07	3.18E+16	309.2412	268.2445	171.6822							
1072.425	-0.00035	-6.8E+07	3.23E+16	309.2412	270.3844	170.218							

ตารางที่ จ.1 ผลการทดลองจากกระบวนการไพโรไลซิสของเตาปฏิกรณ์ควอตซ์แบบชั้นเบดนิ่ง ภายใต้บรรยากาศก๊าซอาร์กอน

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลาที่ใช้ในการทดลอง (นาที)	ปริมาณ ก๊าซ (%)	ปริมาณ ของเหลว (%)	ปริมาณ ของแข็ง (%)
500	3	7.19	25.54	67.31
	9	12.81	22.7	63.86
	15	12.93	23.17	63.95
700	3	18.75	11.237	70.02
	9	23.49	11.94	64.64
	15	23.74	15.047	61.3
900	3	14.7	15.25	70.12
	9	22.4	12.75	64.86
	15	30.14	13.32	56.53

ตารางที่ จ.2 ผลการวิเคราะห์หา %สารระเหยได้ (Volatile), %คาร์บอนคงตัว (Fix Carbon) และ %เถ้า (Ash) ของชาร์ที่เหลือจากการไพโรไลซิสด้วยเทคนิคเทอร์โมกราฟีเมตริก

เวลาที่ใช้ในการ การทดลอง (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ร้อยละขององค์ประกอบ			
		ความชื้น	สารระเหยได้	คาร์บอนคงตัว	เถ้า
3 นาที	500	0.64	83.21	13.51	1.12
	700	0.63	68.43	25.82	2.20
	900	0.60	53.45	43.38	2.29
9 นาที	500	0.60	67.55	27.23	4.43
	700	0.54	44.74	49.61	4.47
	900	0.49	40.71	53.23	5.88
15 นาที	500	0.61	79.82	17.66	1.91
	700	0.46	37.77	56.1	5.67
	900	0.39	21.34	71.34	6.93

ตัวอย่างการคำนวณปริมาณผลิตภัณฑ์ก๊าซที่เกิดขึ้น

ก๊าซไฮโดรเจน%H₂ by vol. ที่ได้

พื้นที่ใต้กราฟของ standard H ₂	153	count มี % H ₂ อยู่	15.1 %
ดังนั้นพื้นที่ใต้กราฟของตัวอย่าง	X	count จะได้ % H ₂ by vol.	$(X * 15.1) / 153$ %

จำนวนโมลของH₂ในแต่ละถุง

นำปริมาตรของ H₂ ที่คำนวณได้มาทำเป็นลิตร และทำเป็น โมล

ปริมาตรของ H₂ ในถุง = 5.9086755 มล.

จน. โมลของ H₂ = $(5.9086755 * 22.4) / 1000 = 0.132354331$ โมล

จำนวนกรัมของH₂ในแต่ละถุง

จน. กรัมของ H₂ = 0.132354331 โมล * 2 * นน.อะตอมไฮโดรเจน (1.00794)

= 0.266810449 กรัม = A

น้ำหนักอะตอมไฮโดรเจนในสบู่ดำ(กรัม)

นำ % H ในสบู่ดำที่วิเคราะห์ CHON มาคำนวณ โดยที่ให้ % H = Y , นน.สบู่ดำเริ่มต้น = X

ในสบู่ดำ X กรัม ถ้ามี H 100 % จะมีน. H อยู่ X กรัม

ในสบู่ดำ X กรัม ถ้ามี H Y % จะมีน. H อยู่ $(X * Y) / 100$ กรัม = Z

%การเปลี่ยนเป็นก๊าซไฮโดรเจนของอะตอมไฮโดรเจนในสบู่ดำ

นำจำนวนกรัมของH₂ในแต่ละถุง(A) หารด้วยน้ำหนักอะตอมไฮโดรเจนในสบู่ดำ(กรัม) (Z)

= $(A / Z) * 100$ %

สมมุติว่ามีน้ำหนักอะตอมไฮโดรเจนในสบู่ดำ(กรัม) (Z) = 1.0 กรัม

ถ้าอะตอมไฮโดรเจนเปลี่ยนเป็นก๊าซไฮโดรเจน(A) ทั้งหมด 0.5 กรัม นั่นแสดงว่าจะมี%การ

เปลี่ยนเป็นก๊าซไฮโดรเจนของอะตอมไฮโดรเจนในสบู่ดำเท่ากับ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๑.3 การคำนวณหาค่าปริมาณผลิตภัณฑ์ก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดจากการไฟโรไลซิสกากสบูดำที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ	เวลาในการทดลอง	พื้นที่		ปริมาตรถูกเก็บก๊าซ 300 มิลลิลิตร		จำนวนกรัมคาร์บอน	น้ำหนักสบูดำเริ่มต้น(กรัม)	น้ำหนักไฮโดรเจนเริ่มต้น ในสบูดำ	%การเปลี่ยนเป็นก๊าซไฮโดรเจนของอะตอมไฮโดรเจนในสบูดำ
		Peak area	% VOL	ปริมาตร ก๊าซ,ml	% Vol				
500	3	7603	0.743914	262.4	1.95203	0.000176	1.0008	0.72	0.024399
	9	30653	2.999237	157.8	4.732796	0.000426	1.0010	0.72	0.059156
	15	34093	3.335823	120.5	4.019667	0.000362	1.0010	0.72	0.050243
700	3	15257	78.54222	262.4	206.0948	0.018547	1.0008	0.72	2.576031
	9	61759	317.932	157.8	501.6967	0.04515	1.0010	0.72	6.270836
	15	55625	286.3545	120.5	345.0572	0.031053	1.0010	0.72	4.312958
900	3	70484	180.0932	262.4	472.5645	0.042528	1.0008	0.72	5.906705
	9	112901	288.4726	157.8	455.2097	0.040966	1.0010	0.72	5.689783
	15	73896	188.8112	120.5	227.5175	0.020475	1.0010	0.72	2.843799

ตารางที่ ๑.4 การคำนวณหาค่าปริมาณก๊าซผลิตภัณฑ์จำพวกสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจาก Standard Permanent Gas

กลุ่มสารประกอบ ไฮโดรคาร์บอน		เปอร์เซ็นต์สัดส่วน	เวลา (Retention Time, Min)	พื้นที่ (Peak area)
C ₁	Methane	5%	0.78	1215258
C ₂	Ethylene	1%	0.828	8632
	Ethane	10%	0.856	1330610
C ₃	Propylene	1%	1.993	1372
	Propane	5%	2.753	77833
	Iso-butane	10%	5.341	53775
	1-butane	10%	7.695	23280
	n-butane	5%	2.776	25401
	cis-2-butane	5%	4.322	24026
	tran-2-butane	5%	6.229	51147
C ₅	Isopentane	2%	10.705	122654
	n-pentane	1%	11.75	11147

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๑.5 การคำนวณหาค่าปริมาณก๊าซผลิตภัณฑ์จำพวกสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (C₁, C₂ และ C₄)

พื้นที่ Peak area	เวลาในการ ทดลอง % VOL	น้ำหนักสบู ดำเริ่มต้น (กรัม)	ปริมาตรถุง,ml	น้ำหนักคาร์บอน เริ่มต้น ในสบูดำ	%การเปลี่ยนเป็น C1-C5 ของอะตอมคาร์บอนในสบูดำ		
					C1	C2	C4
500	3	1.0008	262.4	0.532532	0.234288	0.216231	21.14609
	9	1.0010	157.8	0.532532	0.353522	0.325347	25.24064
	15	1.0010	120.5	0.532532	0.511342	0.359961	27.67865
700	3	1.0008	262.4	0.532532	0.461492	0.235223	22.91422
	9	1.0010	157.8	0.532532	0.745573	0.290187	36.05788
	15	1.0010	120.5	0.532532	2.360439	0.432549	37.4026
900	3	1.0008	262.4	0.532532	0.581985	0.244541	24.87943
	9	1.0010	157.8	0.532532	1.1471	0.324146	40.81644
	15	1.0010	120.5	0.532532	2.820544	0.485533	45.60868

ตารางที่ ๑.6 การคำนวณหาค่าองค์ประกอบกรดไขมันในผลิตภัณฑ์ของเหลวทาร์ที่เกิดจากการไพโรไลซิสกากสับุดำที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)	ความเข้มข้น (% wt)								
	500			700			900		
เวลาในการทดลอง (นาที)	3	9	15	3	9	15	3	9	15
ชนิดของกรดไขมัน									
Methyl Palmitate	12.92999	13.2023969	13.15615	18.034305	20.330674	21.41905	18.96542	19.84574	22.73266
Methyl Palmitoleate	0.95853	0.896832178	0.9841	0.7013631	0.6782165	0.688601	0.445844	0.438118	0.421851
Methyl Stearate	5.759331	5.806360896	5.871922	12.268354	11.849694	11.79139	12.27736	12.16141	11.74344
Methyl Oleate	42.52348	42.41196941	42.1254	37.534383	36.566621	36.04388	37.26975	36.79056	35.45182
Methyl Linoleate	37.64744	37.43350906	37.59875	30.849431	29.991867	29.48654	30.43489	30.16968	29.04957
Methyl Linolenate	0.113705	0.135888641	0.175432	0.4764904	0.4095105	0.401895	0.472523	0.467197	0.450435
Methyl Arachidate	0.067524	0.113042925	0.088256	0.1356727	0.1734169	0.168651	0.134215	0.1273	0.150216

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาว ชนิตา มฤคทัต เกิดเมื่อวันที่ 20 พฤษภาคม พ.ศ. 2526 กรุงเทพมหานคร สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปีการศึกษา 2548 เข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย เมื่อปี 2548



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย