

การแปรรูปร่วมของถ่านหินและกะลามะพร้าวให้เป็นของเหลว



นางสาวพรรณระ เตียงพานิช

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-53-1706-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CO-LIQUEFACTION OF COAL AND COCONUTSHELL



Miss Punna Thaingpanit

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science in Chemical Technology

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2004

ISBN 974-53-1706-3

หัวข้อวิทยานิพนธ์      การแปรรูปรวมของถ่านหินและกะลามะพร้าวให้เป็นของเหลว  
โดย                              นางสาวพรรณะ เตียงพานิช  
สาขาวิชา                      เคมีเทคนิค  
อาจารย์ที่ปรึกษา              รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ งามประเสริฐสุสิทธิ์  
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม        ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ

---

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.เปี่ยมศักดิ์ เมนะเศวต)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ งามประเสริฐสุสิทธิ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ)

.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สงบทิพย์ พงษ์สถาปดี)

.....กรรมการ  
(อาจารย์ ดร.ประพันธ์ คูชลธารา)

พรรณณะ เตีย่งพานิช : การแปรรูปร่วมของถ่านหินและกะลามะพร้าวให้เป็นของเหลว (CO-LIQUEFACTION OF COAL AND COCONUTSHELL) อาจารย์ที่ปรึกษา : รศ.ดร.สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์, อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม: ศ.ดร.ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ, 96 หน้า. ISBN 974-53-1706-3.

การศึกษาการแปรรูปร่วมของถ่านหินลิกไนต์ จากอำเภอแม่เมาะ และกะลามะพร้าวให้เป็นของเหลวในตัวทำละลายเตตระลิน ในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ขนาด 250 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 375-475 องศาเซลเซียส เวลา 15-75 นาที ขนาดอนุภาค 0.25 – 1.6 มิลลิเมตร และอัตราส่วนระหว่างถ่านหินต่อกะลามะพร้าว (น้ำหนัก/น้ำหนัก) 0:1, 1:3, 1:1, 3:1 และ 1:0 ทำการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับ เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมสำหรับค่าร้อยละการเปลี่ยน และร้อยละผลได้ของเหลว พบว่าตัวแปรกระบวนการที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของเหลวอย่างมีนัยสำคัญคือ อุณหภูมิ ขนาดอนุภาค และอัตราส่วนระหว่างถ่านหินต่อกะลามะพร้าว โดยไม่มีอันตรกิริยาของทุกตัวแปร ผลของตัวแปรกระบวนการคือ การเพิ่มอุณหภูมิทำให้ร้อยละผลได้ของเหลว ค่าการเปลี่ยนรวม และผลิตภัณฑ์ของเหลวมีคุณภาพลดลง เวลาไม่มีผลต่อร้อยละผลได้ของเหลว และค่าการเปลี่ยนรวม แต่ช่วยปรับปรุงคุณภาพผลิตภัณฑ์ของเหลว อนุภาคขนาดเล็กให้ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่มีคุณภาพดี สำหรับกะลามะพร้าวช่วยเพิ่มปริมาณผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลว ค่าการเปลี่ยนรวม และช่วยปรับปรุงคุณภาพผลิตภัณฑ์ของเหลว โดยภาวะที่เหมาะสมคือ อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส และเวลา 30 นาที ขนาดอนุภาค 0.93 มิลลิเมตร และอัตราส่วนระหว่างถ่านหินต่อกะลามะพร้าวเท่ากับ 1:3 ให้ค่าการเปลี่ยนรวมร้อยละ 87 และผลได้ของเหลวร้อยละ 63 ตามลำดับ

สำหรับผลของการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา ไอร์ออน (III) ซัลไฟด์ (ปริมาณเหล็กบนถ่านหินร้อยละ 2.5 ของน้ำหนักถ่านหิน) พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยลดอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาโดยให้ค่าร้อยละการเปลี่ยน และร้อยละผลได้ของเหลวใกล้เคียงกับกรณีที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา และตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ของเหลว

ภาควิชา	เคมีเทคนิค	ลายมือชื่อ.....
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา	2547	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

## 4672344423 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD: CO-LIQUEFACTION / COAL / COCONUTSHELL

PUNNA THAINGPANIT : CO-LIQUEFACTION OF COAL AND COCONUTSHELL.

THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF. SOMKIAT NGAMPRASERTSITH, Dr. de l' INPT.,

THESIS CO-ADVISOR: PROF. PATTARAPAN PRASASSARAKICH, PhD., 96 PP. ISBN

974 – 53-1706 -3

Co-liquefaction of Mae Moh lignite coal with coconut shell – a biomass waste – in tetralin has been carried out in a Parr reactor of 250-ml capacity at a temperature range of 375-475 °C, reaction time 15-75 min, particle size range of 0.25-1.6 mm and coal: coconut shell (wt/wt) ratio of 0:1, 1:3, 1:1, 3:1 and 1:0. The two-level factorial experimental design method was used to optimize the liquefaction process carried out with respect to conversion and liquid yield. The total conversion reached 87% and liquid yield reached 63% at optimum conditions of temperature 400°C, reaction time 30 min, particle size 0.93 mm and 1:3 coal: coconut shell. The characterization of liquid product using simulated distillation gas chromatography showed that increasing time improved the quality of liquid product, but total conversion and liquid yield were decreased. Finally, using  $Fe_2S_3$  as a catalyst can reduce reaction temperature, while liquid yield and total conversion were the same as the runs without catalyst.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department Chemical Technology

Field of study Chemical Technology

Academic year 2004

Student's signature.....

Advisor's signature.....

Co-Advisor's signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ งามประเสริฐสุสิทธิ และ ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรธน์ ประศาสน์สารกิจ ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำการทำวิจัย ตลอดจนให้ความเห็นเพื่อปรับปรุงแก้ไขการทำวิจัยให้มีความสมบูรณ์ด้วยดียิ่ง รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำแนะนำ

งานวิจัยเรื่อง “การแปรรูปร่วมของถ่านหินและกะลามะพร้าวให้เป็นของเหลว” สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีโดยได้รับการสนับสนุน จากโครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านเชื้อเพลิงภายใต้โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ศูนย์ปิโตรเลียมและเทคโนโลยีปิโตรเคมี รวมถึงทุนบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สงบทิพย์ พงษ์สถาปดี อาจารย์ ดร.ประพันธ์ คุชฌารา กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ คำแนะนำ ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบคุณบุคลากรภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการและให้คำแนะนำต่างๆ ขอขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ให้ความช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจจนกระทั่งทำวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วง

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และผู้อยู่เบื้องหลังที่ได้ให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา ให้ความช่วยเหลือ และ ให้การสนับสนุนจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1    บทนำ.....	1
2    ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1    ถ่านหิน.....	3
2.2    วิธีการพัฒนาการใช้ถ่านหินในปัจจุบัน.....	12
2.3    ชีวมวล.....	20
2.4    งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	28
3    เครื่องมือและวิธีการทดลอง.....	33
3.1    เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง.....	33
3.2    สารตั้งต้นและสารเคมี.....	36
3.3    การดำเนินการวิจัย.....	37
3.4    ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	40
4    ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	44
4.1    การวิเคราะห์สมบัติของสารตั้งต้น.....	44
4.2    การออกแบบการทดลองการแปรรูปร่วมของถ่านหินและกะลา มะพร้าวให้เป็นของเหลวด้วยตัวทำละลาย.....	45
4.3    ผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแปรรูปร่วมถ่านหิน และกะลามะพร้าวให้เป็นของเหลว.....	48
4.4    การแปรรูปร่วมของถ่านหินและกะลามะพร้าวให้เป็นของเหลวโดย ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	66

## สารบัญ

	หน้า
4.5 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊ส.....	70
4.6 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของเหลวด้วย GC/MS .....	71
4.7 การเปรียบเทียบร้อยละการเปลี่ยนรวมและร้อยละผลได้ของเหลว.....	72
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	70
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	74
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	76
รายการอ้างอิง.....	77
ภาคผนวก.....	81
ภาคผนวก ก การคำนวณและข้อมูลการทดลอง.....	82
ภาคผนวก ข การวิเคราะห์สมบัติถ่านหิน.....	84
ภาคผนวก ค การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของเหลว.....	91
ภาคผนวก ง ตารางผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน.....	93
ภาคผนวก จ การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊สโดยแก๊สโครมาโทกราฟี....	94
ภาคผนวก ฉ ตารางผลการส่งเสริมกันแบบทวีคูณ.....	95
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	96

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1	มาเซอร์อลของถ่านหินและกลุ่มมาเซอร์อล..... 6
2.2	การจำแนกถ่านหินตามมาตรฐานของสหรัฐอเมริกา..... 7
2.3	กระบวนการผลิตของเหลวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา..... 18
2.4	การประเมินศักยภาพพลังงานจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร พ.ศ.2543.....22
3.1	ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษา..... 37
3.2	การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล 4 ตัวแปร.....38
4.1	ผลการวิเคราะห์สมบัติแบบประมาณของถ่านหินและกะลามะพร้าวเริ่มต้น..... 44
4.2	ผลการวิเคราะห์สมบัติถ่านหินและกะลามะพร้าวเริ่มต้นแบบแยกธาตุ..... 45
4.3	ร้อยละการเปลี่ยนรวมและร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวแบบไม่รวมความชื้น และถ้ำ (daf) สำหรับการแปรรูปร่วมของถ่านหินและกะลามะพร้าว ให้เป็นของเหลว.....46
4.4	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละผลได้ของเหลว.....47
4.5	ผลของอุณหภูมิต่อสมบัติแบบประมาณของของแข็งส่วนที่เหลือ ที่เวลา 30 นาที ขนาดอนุภาค 0.93 มิลลิเมตร อัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 1:3..... 51
4.6	ผลของอุณหภูมิต่อค่าความร้อนและร้อยละการเพิ่มของค่าความร้อนของ ของแข็งส่วนที่เหลือ ที่เวลา 30 นาที ขนาดอนุภาค 0.93 มิลลิเมตร อัตราส่วน ถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 1:3 .....52
4.7	ผลของเวลาต่อสมบัติแบบประมาณของของแข็งส่วนที่เหลือ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาค 0.93 มิลลิเมตร อัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 1:3.....55
4.8	ผลของเวลาต่อค่าความร้อนและร้อยละการเพิ่มของค่าความร้อนของของแข็ง ส่วนที่เหลือ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาค 0.93 มิลลิเมตร อัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 1:3.....56
4.9	ผลของขนาดอนุภาคต่อสมบัติแบบประมาณของของแข็งส่วนที่เหลือ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที อัตราส่วนถ่านหินต่อ กะลามะพร้าว 1:3.....60

## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
4.10 ผลของขนาดอนุภาคต่อค่าความร้อนและร้อยละการเพิ่มของค่าความร้อนของ ของแข็งส่วนที่เหลือ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที อัตราส่วน ถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 1:3.....	60
4.11 ผลของอัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าวต่อสมบัติแบบประมาณของของแข็ง ส่วนที่เหลือ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ขนาดอนุภาค 0.93 มิลลิเมตร.....	65
4.12 ผลของอัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าวต่อค่าความร้อนและร้อยละ การเพิ่มของค่าความร้อนของของแข็งส่วนที่เหลือ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ขนาดอนุภาค 0.93 มิลลิเมตร.....	65
4.13 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อสมบัติแบบประมาณของของแข็งส่วนที่เหลือ ที่เวลา 30 นาที ขนาดอนุภาค 0.93 มิลลิเมตร อัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 1:3.....	69
4.14 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อค่าความร้อนและร้อยละการเพิ่มของค่าความร้อนของ ของแข็งส่วนที่เหลือ ที่เวลา 30 นาที ขนาดอนุภาค 0.93 มิลลิเมตร อัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 1:3.....	69
4.15 การเปรียบเทียบร้อยละการเปลี่ยนรวมและร้อยละผลได้ของเหลวของ งานวิจัยอื่นกับงานวิจัยนี้.....	73
ง1 การวิเคราะห์ Factor Effect Estimate และ SS ของร้อยละผลได้ของเหลว จากการแปรปรวนร่วมของถ่านหินและกะลามะพร้าว.....	93
จ1 ข้อมูลและภาวะของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี.....	94
ฉ1 ผลการส่งเสริมกันแบบพหุคูณของร้อยละการเปลี่ยนรวม.....	95
ฉ2 ผลการส่งเสริมกันแบบพหุคูณของร้อยละผลได้ของเหลว.....	95

## สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
2.1 โมเลกุลสมมติของถ่านหิน.....	4
2.2 รูปแสดงส่วนประกอบต่าง ๆ ของถ่านหิน.....	6
2.3 ถ่านหินลิกไนต์ จาก การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย จังหวัดลำปาง.....	9
2.4 เส้นทางการสังเคราะห์ของเหลวจากถ่านหิน.....	14
2.5 กระบวนการสำหรับการสังเคราะห์ของเหลวจากถ่านหิน.....	15
2.6 การให้ไฮโดรเจนของ Tetrahydronaphthelene (Tetralin) .....	17
3.1 เครื่องปฏิกรณ์ Parr Reactor Model 4842.....	33
3.2 อ่างอัลตราโซนิก.....	34
3.3 เครื่องระเหยแบบหมุน.....	34
3.4 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี Agilent 3000A Micro GC.....	35
3.5 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น (Simulated Distillation Gas Chromatograph Varian CP-3800).....	36
4.1 Normal Probability Plot ของร้อยละผลได้ของเหลวสำหรับการแปรปรวนร่วมของ ถ่านหินและกะลามะพร้าว.....	47
4.2 ผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลง และร้อยละผลได้ของเหลว ที่เวลา 30 นาที ขนาดอนุภาค 0.93 มิลลิเมตร อัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 1:3.....	49
4.3 ผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงของแข็ง ร้อยผลได้ของเหลว และร้อยละผลได้แก๊ส ที่เวลา 30 นาที ขนาดอนุภาค 0.93 มิลลิเมตร อัตราส่วนถ่านหินต่อ กะลามะพร้าว 1:3 .....	50
4.4 ผลของอุณหภูมิต่อการกระจายตัวของสัดส่วนผลิตภัณฑ์ ที่เวลา 30 นาที ขนาดอนุภาค 0.93 มิลลิเมตร และอัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 1:3.....	50
4.5 ผลของอุณหภูมิต่อการกระจายตัวของสัดส่วนผลิตภัณฑ์ของเหลว ที่เวลา 30 นาที ขนาดอนุภาค 0.93 มิลลิเมตร และอัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 1:3.....	51
4.6 ผลของเวลาต่อการเปลี่ยนแปลง และร้อยละผลได้ของเหลว ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.93 มิลลิเมตร อัตราส่วนถ่านหินต่อ กะลามะพร้าว 1:3.....	53

## สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
4.7 ผลของเวลาต่อร้อยละผลได้ของแข็ง ร้อยผลได้ของเหลว และร้อยละผลได้แก๊ส ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.93 มิลลิเมตร อัตราส่วน ถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 1:3.....	54
4.8 ผลของเวลาต่อการแตกแรงแจกแรงของสัดส่วนผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.93 มิลลิเมตร และอัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 1:3.....	54
4.9 ผลของเวลาต่อการแตกแรงแจกแรงของสัดส่วนผลิตภัณฑ์ของเหลว ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.93 มิลลิเมตร และอัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 1:3.....	55
4.10 ผลของขนาดอนุภาคเฉลี่ยต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงรวม และร้อยละผลได้ของเหลว ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที อัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 1:3.....	58
4.11 ผลของขนาดอนุภาคเฉลี่ยต่อร้อยละผลได้ของแข็ง ร้อยผลได้ของเหลว และ ร้อยผลได้แก๊ส ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที อัตราส่วน ถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 1:3.....	58
4.12 ผลของขนาดอนุภาคเฉลี่ยต่อการแตกแรงแจกแรงของสัดส่วนผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที และอัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 1:3.....	59
4.13 ผลของขนาดอนุภาคเฉลี่ยต่อการแตกแรงแจกแรงของสัดส่วนผลิตภัณฑ์ของเหลว ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที และอัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 1:3.....	59
4.14 ผลของอัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว ต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงรวม และร้อยละผลได้ของเหลว ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.93 มิลลิเมตร.....	62
4.15 ผลของอัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าวต่อร้อยละผลได้ของแข็ง ร้อยผลได้ของเหลว และร้อยละผลได้แก๊ส ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.93 มิลลิเมตร.....	62
4.16 ผลของอัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว ต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงรวม และ ร้อยผลได้ของเหลว ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.93 มิลลิเมตร.....	63

## สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
4.17 ผลของอัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าวต่อร้อยละผลได้ของแข็ง ร้อยผลได้ของเหลว และร้อยละผลได้แก๊ส ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.93 มิลลิเมตร.....	63
4.18 ผลของอัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าวต่อการแยกแรงแจกของสัดส่วนผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที และขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.93 มิลลิเมตร.....	64
4.19 ผลของอัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าวต่อการแยกแรงแจกของสัดส่วนผลิตภัณฑ์ของเหลว ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที และขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.93 มิลลิเมตร.....	64
4.20 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละการเปลี่ยนรวม ร้อยผลได้ของของแข็งของเหลว และแก๊ส สำหรับการแปรรูปร่วมของถ่านหินและกะลามะพร้าว ที่ภาวะเวลา 30 นาที ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.93 มิลลิเมตร อัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 1:3 .....	67
4.21 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการแยกแรงแจกของสัดส่วนผลิตภัณฑ์ที่เวลา 30 นาที ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.93 มิลลิเมตร อัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 1:3.....	68
4.22 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการแยกแรงแจกของสัดส่วนผลิตภัณฑ์ของเหลว ที่เวลา 30 นาที ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.93 มิลลิเมตร อัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 1:3.....	68
4.23 การแยกแรงแจกของผลิตภัณฑ์แก๊ส ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.93 มิลลิเมตร และอัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 1:3.....	70
4.24 ตัวอย่าง GC/MS โคโรมาโทแกรมการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของเหลว.....	71
4.25 ตัวอย่าง GC/MS โคโรมาโทแกรมการวิเคราะห์น้ำมันดิบ.....	72
ค1 ตัวอย่างโครมาโทแกรมการวิเคราะห์น้ำมันดิบจาก Simulated Distillation Gas Chromatograph .....	91
ค2 ตัวอย่างกราฟแสดงการกลั่นตามจุดเดือดของน้ำมันดิบจาก Simulated Distillation Gas Chromatograph .....	92

# บทที่ 1

## บทนำ

### แนวเหตุผล และสมมติฐานของการวิจัย

ปัจจุบันมีความต้องการใช้น้ำมันปิโตรเลียมสูง ในขณะที่ปริมาณน้ำมันสำรองของโลกตลอดจนกำลังการผลิตมีจำกัด ทำให้ราคาน้ำมันสูงขึ้นส่งผลกระทบต่อประกาศผู้นำเข้าน้ำมันเป็นอย่างมาก ดังนั้นจึงมีความจำเป็นในการพัฒนาเทคโนโลยีต่าง ๆ เพื่อนำพลังงานอื่น ๆ มาทดแทนปริมาณการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงในอนาคต หรือในภาวะที่น้ำมันเชื้อเพลิงมีราคาสูงมาก ประเทศไทยมีทรัพยากรถ่านหินในปริมาณมากกล่าวคือในปี 2546 กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน แสดงปริมาณสำรองถ่านหินในประเทศเหลืออยู่ประมาณ 1,335.7 ล้านตัน และมีราคาประมาณ 500 บาทต่อตันซึ่งเป็นราคาที่ไม่แพง ดังนั้นการนำถ่านหินเหล่านี้มาแปรรูปให้เป็นเชื้อเพลิงเหลวก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่ง ซึ่งการแปรรูปถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงเหลว จะได้ผลิตภัณฑ์ที่สามารถนำไปกลั่นเป็นเชื้อเพลิงต่อไปได้ ถ่านหินลิกไนต์เป็นถ่านหินคุณภาพต่ำเมื่อนำมาแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงเหลวจะได้คุณภาพค่อนข้างต่ำจึงมีความพยายามที่จะเพิ่มปริมาณผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลว และปรับปรุงคุณภาพผลิตภัณฑ์ของเหลวให้ดียิ่งขึ้น โดยการแปรรูปถ่านหินเป็นของเหลวนั้นสามารถดำเนินการร่วมกับวัตถุดิบอื่น ๆ ที่มีสมบัติในการผลิตเป็นเชื้อเพลิงเนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมที่มีแหล่งชีวมวลเป็นจำนวนมาก ซึ่งนอกจากจะก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมแล้ว ยังเป็นแหล่งของเสียอีกด้วย ดังนั้นการนำชีวมวลมาใช้ในกระบวนการแปรรูปร่วมถ่านหินให้เป็นของเหลว จึงเป็นแนวทางที่ดีในการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือใช้โดยไม่ต้องกำจัด สามารถเพิ่มคุณค่าของวัสดุเหลือใช้โดยการเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีประโยชน์ ช่วยแก้ไขปัญหาสิ่งแวดล้อม สามารถลดต้นทุนการผลิต เพิ่มผลได้และปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์เหลวที่ผลิตจากถ่านหินได้ กะลามะพร้าวเป็นชีวมวลชนิดหนึ่งที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก ให้ค่าความร้อนสูงมีปริมาณซัลเฟอร์ต่ำ จึงเกิดแนวคิดในการนำถ่านหินมาแปรรูปร่วมกับกะลามะพร้าวให้เป็นของเหลว (Co-liquefaction of coal and coconut shell) ขึ้น กระบวนการแปรรูปถ่านหินเป็นของเหลวต้องใช้ภาวะที่เหมาะสม เช่น อุณหภูมิ ความดัน ตัวทำละลายที่มีสมบัติเป็นตัวให้ไฮโดรเจน ตัวเร่งปฏิกิริยา และอื่น ๆ ซึ่งพบว่าภายใต้ภาวะที่เหมาะสมต่อกระบวนการแปรรูปเป็นของเหลวจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงไปเป็นผลิตภัณฑ์ของเหลวได้ดีอีกทางหนึ่ง นั่นคือภาวะที่เหมาะสมทำให้เกิดอนุมูลอิสระและไฮโดรเจนมาก อนุมูลอิสระของถ่านหินจะทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระของกะลามะพร้าวได้เป็นของเหลวเพิ่มมากขึ้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้ทั้งแก๊สและของเหลวมี

สมบัติดีขึ้น ส่วนกากของแข็งยังมีค่าความร้อนสูงอยู่ สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงและสารตั้งต้นในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ต่อไป

### วัตถุประสงค์

1. ศึกษากระบวนการแปรรูปร่วมของถ่านหินและกะลามะพร้าวให้เป็นของเหลวด้วยตัวทำละลาย
2. ศึกษาผลของอัตราส่วนการผสมของถ่านหินต่อกะลามะพร้าว ขนาดอนุภาค และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัยนี้

1. ได้ภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการแปรรูปร่วมของถ่านหินและกะลามะพร้าวให้เป็นของเหลวด้วยตัวทำละลาย
2. เป็นการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือทิ้งประเภทชีวมวล มาใช้ร่วมกับกระบวนการสังเคราะห์เชื้อเพลิงเหลวจากถ่านหินเพื่อเพิ่มมูลค่าและไม่ก่อให้เกิดปัญหามลพิษต่อสิ่งแวดล้อม

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### วารสารปริทัศน์

#### 2.1 ถ่านหิน (Meyers, 1981)

ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงแข็งชนิดหนึ่งที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติมีลักษณะเป็นหินตะกอนที่เกิดจากการทับถมของซากพืชที่ตาย สิ่งมีชีวิต ชิ้นส่วนของพืช ตลอดจนดินโคลนที่มีอินทรีย์วัตถุที่ทับถมกันแล้วสะสม จนเมื่อเวลาผ่านไปเป็นร้อยล้านปี ทำให้สิ่งเหล่านี้ผุพัง แล้วเกิดการเปลี่ยนแปลงทางธรณีวิทยาของโลก เกิดความร้อนและความกดดันมากขึ้น จนตะกอนซากพืชที่ทับถมกันเหล่านั้น เกิดปฏิกิริยาทางเคมี ฟิสิกส์ และชีววิทยา จนแปรสภาพเป็นถ่านหินที่สามารถติดไฟได้จึงมีการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง

##### 2.1.1 โครงสร้างและองค์ประกอบของถ่านหิน (Meyers, 1981 ; Schlosburg, 1985)

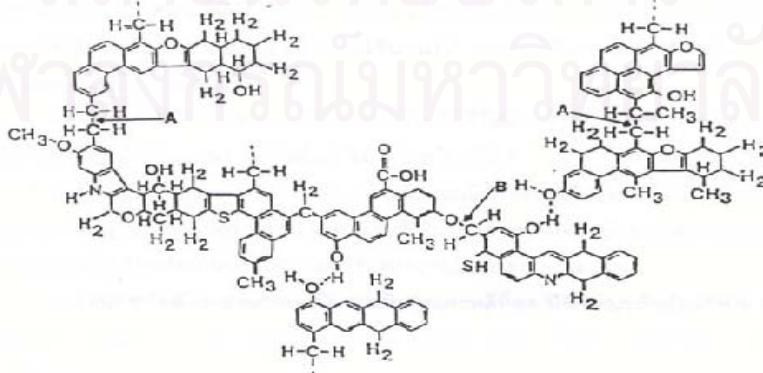
ถ่านหินโดยทั่วไปมีองค์ประกอบหลักคือ คาร์บอน เป็นธาตุที่เป็นองค์ประกอบมากที่สุด และอยู่เป็นโครงสร้างโมเลกุลของถ่านหินที่เป็นส่วนอินทรีย์ ซึ่งเป็นส่วนของถ่านหินที่ให้พลังงาน นอกจากนี้ยังมีองค์ประกอบที่เป็นไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และกำมะถัน เป็นองค์ประกอบอยู่เล็กน้อย เรียกรวมส่วนนี้ว่า Maceral Matter และยังมีธาตุอื่น ๆ ที่รวมเป็นสารประกอบอินทรีย์แทรกอยู่ในเนื้อถ่านหินหรือรวมตัวเป็นก้อนอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งเรียกรวมส่วนนี้ว่า Mineral Matter (Crystalline Inorganic Compound) อยู่กระจัดกระจายทั่วไปในเนื้อถ่านหิน เมื่อนำถ่านหินมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสารประกอบอินทรีย์จะเกิดการเผาไหม้และให้ความร้อนเกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส ส่วนที่เหลือจากการเผาไหม้คือเถ้า (Ash) ซึ่งเป็นส่วนของสารประกอบแร่ธาตุ แต่ส่วนประกอบของแร่ธาตุบางส่วนเมื่อเกิดการเผาไหม้จะไม่เกิดเป็นเถ้า เช่น ที่อุณหภูมิสูง ๆ ไฟไรต์ ถูกออกซิไดซ์ กำมะถันจะสลายตัวให้แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ คาร์บอนเนตจะสลายตัวให้แก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนเหล็กจะถูกเปลี่ยนสภาพให้อยู่ในรูปของสารประกอบออกไซด์ของเหล็ก ซึ่งเป็นส่วนประกอบของเถ้า โครงสร้างโมเลกุลของถ่านหินแบ่งออกเป็น 2 ส่วนตามสมบัติทางเคมี คือ ส่วนโครงสร้างอินทรีย์ (Organic Structure) และส่วนที่เป็นองค์ประกอบแร่ธาตุ



### โครงสร้างอินทรีย์ (Meyers, 1981 ; Schlosburg, 1985)

โครงสร้างทางเคมีของถ่านหินประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และมีปริมาณของกำมะถันและไนโตรเจนเป็นส่วนน้อย เมื่อคิดจากพื้นฐานของอัตราส่วนโดยน้ำหนักของอะตอมธาตุ (Atomic Ratio) พบว่าไฮโดรเจนเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในโครงสร้างถ่านหินซึ่งเมื่อตัดดีของถ่านหินสูงขึ้น อัตราส่วนโดยน้ำหนักของอะตอมไฮโดรเจนต่อคาร์บอนและออกซิเจนต่อคาร์บอนจะลดลง ส่วนกำมะถันและไนโตรเจนมีน้อยมากจนคิดว่าไม่มีส่วนสำคัญ

จากการศึกษาสารประกอบอินทรีย์ในโครงสร้างของถ่านหินโดยใช้ Spectroscopy Chromatography เพื่อศึกษาโครงสร้างทางเคมีของถ่านหินหรือสูตรโมเลกุลของถ่านหินนั้น ยังไม่เป็นที่ทราบแน่นอน แต่พอจะทราบว่าโครงสร้างทางเคมีของถ่านหินประกอบด้วยกลุ่มโมเลกุลวงแหวนแอโรแมติก (Aromatics) และไฮโดรแอโรแมติก (Hydroaromatics) เกาะอยู่ด้วยเป็นกลุ่ม ๆ แต่ละกลุ่มอาจเชื่อมกันอยู่ด้วยแขนของโมเลกุลอะลิฟาติก (Aliphatic) ที่อ่อนแอ ภายในกลุ่มแต่ละกลุ่มยังมีวงแหวนที่มีอะตอมของธาตุออกซิเจนหรือกำมะถันหรือไนโตรเจนประกอบอยู่กับคาร์บอน รวมทั้งกลุ่มที่ทำหน้าที่ความเป็นกรด - เบส อีเทอร์และอื่นๆ หมู่ฟังก์ชันซึ่งแทนที่ไฮโดรเจนในวงแหวน เช่น ไฮดรอกซี คาร์บอกซี อะมิโน และไทออล ดังแสดงเป็นโมเลกุลสมมติในรูปที่ 2.1 ซึ่งโครงสร้างของสารประกอบอินทรีย์ต่าง ๆ จะเชื่อมโยงด้วยพันธะเคมีเป็นพอลิเมอร์เชื่อมขวาง (Crosslinked Polymer) และมีบางส่วนที่ไม่เป็นโครงสร้างพอลิเมอร์ จากการวัดความสามารถของการเป็นผลึก (Crystallinity) ของถ่านหินโดยใช้ X-ray Scattering Technique พบว่า เมื่อตัดดีของถ่านหินสูงขึ้น วงแหวนแอโรแมติกจะเชื่อมกันมากขึ้นและผลึกมีลักษณะคล้ายแกรไฟต์ และเมื่อโมเลกุลของถ่านหินได้รับความร้อน จะเกิดการสลายตัวซึ่งปัจจัยที่สำคัญคือ จำนวนไฮโดรเจนที่มีอยู่ในโมเลกุลวงแหวนไฮโดรแอโรแมติก และแขนอะลิฟาติก ซึ่งแตกตัวออกง่ายที่สุด ทำให้กลุ่มโมเลกุลวงแหวนแตกออกจากกันเป็นกลุ่ม ๆ จำนวนมาก



รูปที่ 2.1 โมเลกุลสมมติของถ่านหิน (Schlosburg, 1985)

### ส่วนประกอบที่เป็นแร่ธาตุ

สารประกอบแร่ธาตุที่พบมากที่สุดในถ่านหินคือ ซิลิเกต นอกจากนี้ยังประกอบด้วย อะลูมิเนียม เหล็ก แคลเซียม แมกนีเซียม โซเดียม และโพแทสเซียม รวมตัวกันเป็นสารประกอบ หรือ รวมตัวกับอะตอมของธาตุอื่นๆ เกิดเป็นสารประกอบต่าง ๆ ซึ่งสามารถแบ่งเป็นกลุ่มของสารประกอบได้คือ

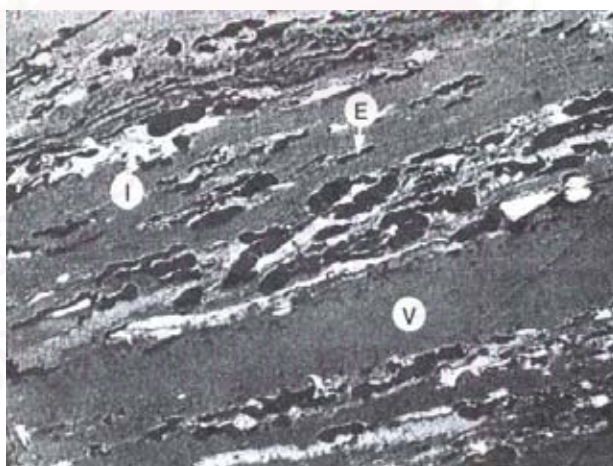
1. กลุ่มคาร์บอเนต (Carbonate) เช่น แคลไซต์ (Calcite) โดโลไมต์ (Dolomite) และแอนเกอร์ไรต์ (Ankerite) เป็นต้น
2. กลุ่มซัลไฟด์ (Sulfide) ที่พบมากคือ มาร์คาไซต์ (Marcasite) และไพไรต์ (Pyrite)
3. กลุ่มซัลเฟต (Sulfate) เป็นแร่ธาตุที่พบหลังจากการเกิดออกซิเดชันของไพไรต์ ได้แก่ ยิปซัม (Gypsum) แอนไฮไดรต์ (Anhydrite) เป็นต้น
4. กลุ่มซิลิเกต (Silicate) หรือ กลุ่มอะลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate) หรือ ดินเหนียว (Clay) ซึ่งเป็นหมู่แร่ธาตุที่มีมากที่สุดในถ่านหิน เช่น อิลไลต์ (Illite) และเคโอลิไนต์ (Kaolinite) เป็นต้น
5. แร่ธาตุอื่น ๆ เช่น ควอตซ์ (Quartz) เฟลด์สปาร์ (Feldspar) เป็นต้น

#### 2.1.2 การจำแนกถ่านหิน (ASTM D388, 1989 ; Probst and Hicks, 1982 ; ทัศนายนุญเกียรติ, 2542)

การจำแนกถ่านหินกระทำได้สองลักษณะคือ จำแนกตามชนิด (Type) และจำแนกตามศักดิ์ (Rank) การศึกษาถ่านหินทางด้านธรณีวิทยาจำแนกถ่านหินตามชนิด โดยแบ่งกลุ่มถ่านหินไปตามองค์ประกอบทางด้านศิลาพรรณนา (Petrography) เรียกว่า กลุ่มมาเซอร์ล (Maceral Groups) แบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม คือ วิทริไนต์ (Vitrinite) เอกซิไนต์ (Exinite) และอินเอร์ทีไนต์ (Inertinite) สองกลุ่มแรกเป็นเนื้อถ่านหินที่ว่องไว กลุ่มหลังถือว่าเป็นส่วนที่ไม่ว่องไว แต่ละกลุ่มมีต้นกำเนิดจากพืชและสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.1 และรูปที่ 2.2 อย่างไรก็ตามจากการศึกษาถ่านหินด้านอื่นและการนำไปใช้งานจะใช้การจำแนกตามศักดิ์มากกว่าการจำแนกตามชนิด ซึ่งบ่งถึงความเป็นถ่านหินของถ่านหินนั้น ๆ ความเป็นถ่านหิน หรือลำดับการเปลี่ยนเป็นถ่านหิน (Coalification) ขึ้นอยู่กับทั้งอายุและอัตราการเปลี่ยนแปลง จึงไม่ได้หมายความว่าเพียงอายุ หรือคุณภาพเท่านั้น

ตารางที่ 2.1 มาเซอร์รอลของถ่านหินและกลุ่มมาเซอร์รอล (Probstein and Hicks, 1982)

Maceral Group	Maceral	Composed of or Derived from
Vitrinite	Collinite	Humic gels
	“Carbonized” Tellinite	Wood, bark, and cortical tissue
Extrinite	Sporinite	Fungal and other spores
	Cutinite	Leaf cuticles
	Resinite	Resin bodies and waxes
	Alginite	Algal remains
Inertinite	Micrinite	Unspecified detrital matter, <10 $\mu\text{m}$
	Macrinite	Similar, but 10-100 $\mu\text{m}$ grains
	Semifusinite	
	Fusinite	
	Sclerotinite	Fungal sclerotia and mycelia



รูปที่ 2.2 รูปแสดงส่วนประกอบต่างๆ ของถ่านหิน : V = vitrinite, E = exinite  
I = inertinite (Courtesy of G. J. Pitt, National Coal Board, England, and  
Academic Press Inc. (London) Ltd.) ( Probstein and Hicks, 1982)



### การจำแนกถ่านหินตามมาตรฐานของสหรัฐอเมริกา (ASTM D388, 1989)

1. ลิกไนต์ (Lignite) มีรากศัพท์มาจากภาษาละติน lignum ซึ่งหมายถึงไม้ เป็นถ่านหินที่มีคุณภาพต่ำที่สุด มีสีน้ำตาล เกิดจากถ่านพีต โดยยังคงปรากฏร่องรอยของเนื้อไม้อยู่บ้าง โครงสร้างเป็นแผ่นมีความแข็งพอประมาณ มีปริมาณออกซิเจนค่อนข้างสูง มีสารระเหยและความชื้นสูง ให้ค่าความร้อนต่ำใกล้เคียงกับเซลลูโลส

2. ซับบิทูมินัส (Subbituminous) เป็นถ่านหินศักดิ์สูงถัดจากลิกไนต์ บางทีเรียกว่าลิกไนต์ดำ (Black Lignite) ซึ่งหนังสือบางเล่มระบุว่า เป็นถ่านหินอ่อนเช่นกัน แม้จะมีร้อยละคาร์บอนสูงกว่าลิกไนต์ เป็นถ่านหินลักษณะผิวหน้าเรียบ ไม่เป็นชั้น มีสีน้ำตาลคล้ายขี้ผึ้ง มีความชื้นประมาณร้อยละ 15 ถึง 30 ให้ค่าความร้อนสูงกว่าลิกไนต์ นิยมใช้เป็นเชื้อเพลิงในระบบเผาไหม้ขนาดใหญ่ และการสังเคราะห์แก๊ส

3. บิทูมินัส (Bituminous) เป็นถ่านหินคุณภาพสูง มีเนื้อแน่นแข็ง ไม่ปรากฏเป็นชั้นของเนื้อไม้และมีสีดำเป็นมันวาว จัดว่าเป็นถ่านหินที่มีคุณภาพสูง ใช้เวลาในการแปรสภาพค่อนข้างยาวนาน มีสารระเหยมาก จะเยิ้มและเกาะตัวเป็นก้อนเมื่อถูกความร้อน ให้ค่าความร้อนสูง ติดไฟง่าย ให้ควันน้อย และมีเถ้าต่ำ เหมาะสำหรับนำไปผลิตเป็นถ่านโค้กและใช้ในอุตสาหกรรมถลุงโลหะ

4. แอนทราไซต์ (Anthracite) เป็นถ่านหินที่จัดว่ามีคุณภาพดีเลิศที่สุด มีลักษณะแข็งเปราะ มีสีดำเป็นมันวาวและมีเนื้อเดียวกัน ปริมาณคาร์บอนคงตัวสูง ความชื้นและสารระเหยต่ำ ทำให้ติดไฟยากแต่เมื่อติดไฟแล้วจะให้ค่าความร้อนสูงมาก และให้เวลาในการเผาไหม้ที่ยาวนาน

#### 2.1.3 ลิกไนต์ (Lignite) (ประเสริฐ และคณะ, 2538 ; กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2546)

จัดเป็นถ่านหินคุณภาพต่ำ มีวิวัฒนาการมาจากถ่านพีตซึ่งอาจต้องใช้เวลาในการแปรสภาพถึงหลายร้อยล้านปี และบางครั้งยังมีร่องรอยของเนื้อไม้ ปรากฏให้เห็นอยู่บ้าง ลิกไนต์ที่มีคุณภาพสูงจะเป็นสีน้ำตาลหรือลิกไนต์ดำ เมื่อนำไปเผาจะให้ค่าความร้อนสูงกว่าและเกิดควันน้อยกว่าถ่านพีต ตัวอย่างถ่านหินลิกไนต์ ที่ได้จากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย แสดงดังรูปที่ 2.3

ลักษณะโครงสร้างของลิกไนต์ มีลักษณะโครงสร้างที่สำคัญ ๆ 3 ประเภท คือ

1. โครงสร้างคล้ายดินเหนียว (earthy)
2. โครงสร้างคล้ายเส้นใย (fiber)
3. โครงสร้างคล้ายเปลือกหอย (concordal)

ลักษณะทางกายภาพของลิกไนต์ ลักษณะภายนอกของลิกไนต์ที่สามารถเห็นได้จะมีลักษณะดังนี้คือ

1. สี ส่วนใหญ่จะมีสีน้ำตาล หรือสีดำ เมื่อแตกหักใหม่มีสีน้ำตาลหรือสีน้ำตาลปนแดง และจะเปลี่ยนเป็นสีดำภายในเวลา 2-3 นาที
2. ความเปราะ ถ้าแห้งจะแตกร่วนได้ง่าย
3. ความชื้น ความชื้นสูงมาก
4. การลุกติดไฟ ลุกไหม้ได้ง่ายเมื่อทิ้งไว้ในอากาศถ้ากองสูงถ่านไว้จำนวนมาก



**รูปที่ 2.3** ถ่านหินลิกไนต์ จากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย จังหวัดลำปาง

การใช้ประโยชน์ถ่านหินค่อนข้างแพร่หลายตั้งแต่อดีตหลายร้อยปีจนถึงปัจจุบัน เนื่องจากมีแหล่งกระจายอยู่ทั่วโลกและมีปริมาณค่อนข้างมาก การขุดค้นผลิตขึ้นมาใช้ประโยชน์ไม่ยุ่งยากซับซ้อน และนำมาเผาให้พลังงานที่มีราคาไม่แพง ถ่านหินจึงถูกนำมาใช้ประโยชน์เพื่อเป็นเชื้อเพลิงเป็นส่วนใหญ่ เช่น เป็นเชื้อเพลิงเพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้า การถลุงโลหะ การผลิตปูนซีเมนต์ ป๋มไบยาสูบ อุตสาหกรรมผลิตอาหาร และอุตสาหกรรมต่างๆ ที่ใช้หม้อน้ำร้อนในกระบวนการ นอกจากนี้ประโยชน์ด้านเชื้อเพลิงแล้ว ยังสามารถใช้ประโยชน์ถ่านหินในด้านอื่น ๆ ได้อีกมาก เช่น การทำถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) ซึ่งเป็นสารดูดซับใช้ในเครื่องกรองน้ำและเครื่องใช้ต่าง ๆ ที่ต้องการประโยชน์ด้านการดูดซับกลิ่น การทำคาร์บอนไฟเบอร์ (Carbon Fiber) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรง แต่มีน้ำหนักเบา เช่นการทำเครื่องร้อนการทำอุปกรณ์กีฬา เช่นด้ามไม้กอล์ฟ ไม้แบดมินตัน ไม้เทนนิส เป็นต้น การใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง นอกจากการเผาไหม้โดยตรงแล้ว ยังสามารถแปรสภาพถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงเหลว (Coal liquefaction) หรือ แปรสภาพเป็นแก๊ส (Coal Gasification) ซึ่งเป็นการใช้ถ่านหินแบบเชื้อเพลิงสะอาดเพื่อช่วยลดมลภาวะจากการใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงได้อีกทางหนึ่ง ภายใต้กระบวนการแปรสภาพถ่านหิน จะสามารถแยกเอาแก๊สที่มีฤทธิ์เป็นกรดหรือเป็น

พืชและสารพลอยได้ต่าง ๆ ที่มีอยู่ในถ่านหินนำไปใช้ประโยชน์อื่นได้อีก เช่น กำมะถันใช้ทำกรด กำมะถันและแร่ยิปซัม แอมโมเนียใช้ทำปุ๋ยเพื่อเกษตรกรรม ถ่านหินใช้ทำวัสดุก่อสร้าง เป็นต้น

ถ่านลิกไนต์มีบทบาทต่อการพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทยมาตั้งแต่ประมาณปี พ.ศ. 2498 โดยการนำมาใช้กับโรงไฟฟ้าวัดเลียบเป็นแห่งแรก และต่อมาที่แม่เมาะในปี พ.ศ. 2503 กระทั่งในปี พ.ศ.2507 เป็นลำดับ จนกระทั่งมีกำลังผลิตไฟฟ้าจากถ่านหินลิกไนต์ประมาณร้อยละ 7 ของกำลังผลิตติดตั้งทั้งหมดของประเทศเมื่อปี พ.ศ.2512 และมีบทบาทสำคัญมากขึ้นเมื่อเกิดวิกฤตการณ์น้ำมันปลายปี พ.ศ. 2516 ในปี พ.ศ. 2542 กำลังผลิตไฟฟ้าจากถ่านหินลิกไนต์ จังหวัดลำปาง คิดเป็นเป็นร้อยละ 20 ของกำลังผลิตทั้งหมดของประเทศ

การใช้ลิกไนต์ แม้ว่าจะมีปัญหายุ่งยากกว่าการใช้น้ำมันก็จริงอยู่ แต่ถ้าได้เข้าใจวิธีการและการเลือกอุปกรณ์ให้เหมาะสมกับสมบัติของลิกไนต์ก็จะช่วยแก้ปัญหาได้ ในอนาคตลิกไนต์อาจจะเข้ามาเป็นพลังงานทดแทนที่สำคัญ ถึงแม้ว่าปริมาณที่สำรวจพบแล้วยังมีไม่มากนัก แต่ก็ได้มีการสำรวจพบเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ หากดูจากปริมาณที่พบในโลกแล้ว จะเห็นได้ว่าพบในประเทศที่พัฒนาแล้วมากที่สุด เพราะประเทศที่พัฒนาได้มีการสำรวจ และนำมาใช้ก่อนประเทศอื่น ๆ สำหรับประเทศไทย จากผลการสำรวจในปี พ.ศ. 2546 มีแหล่งถ่านหินที่พบและเปิดเป็นเหมืองจำนวน 14 แห่ง คิดเป็นปริมาณถ่านหินสำรองภายในประเทศ 1,335.7 ล้านตัน มีการใช้ถ่านหินเพื่อผลิตพลังงานเท่ากับ 6,989 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ

#### 2.1.4 ปริมาณสำรองถ่านหินในประเทศไทย (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2546)

ปริมาณสำรองถ่านหิน (ลิกไนต์และถ่านหินประเภทอื่น) ทางธรณีวิทยา หรือ Geological Reserve ทั้งหมดของประเทศทั้งแหล่งที่ได้พัฒนาทำเหมืองแล้วและที่ยังไม่พัฒนา พบว่ามีปริมาณสำรองฯ ไม่น้อยกว่า 1335.7 ล้านตัน ซึ่งประมาณร้อยละ 82 ของปริมาณสำรองนี้หรือประมาณ 1184.30 ล้านตัน เป็นปริมาณสำรองของแหล่งถ่านหินลิกไนต์แม่เมาะจังหวัดลำปางซึ่งเป็นแหล่งถ่านหินลิกไนต์ที่ใหญ่ที่สุดของประเทศในปัจจุบัน

#### การผลิตถ่านหิน

แหล่งผลิตสำคัญส่วนใหญ่อยู่ทางภาคเหนือของประเทศไทย โดยเฉพาะที่เหมืองแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ซึ่งดำเนินการโดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตฯ นับเป็นแหล่งผลิตที่ใหญ่ที่สุดและสำคัญที่สุดในจำนวนเหมืองถ่านหินทั้งหมด โดยในปี 2546 มีการใช้ถ่านหินเพื่อผลิตพลังงาน คิดเป็นปริมาณเท่ากับ 6,989 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ จัดเป็นพลังงานเพื่อการผลิตความร้อน 5,493 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ และพลังงานเพื่อการผลิตไฟฟ้า 1,497 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ

### 2.1.5 การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis)

เป็นการวิเคราะห์กลุ่มองค์ประกอบในด้านหินออกเป็น ความชื้น เถ้า สารระเหย และคาร์บอนคงตัว ความชื้นและเถ้าเป็นส่วนของสารประกอบอินทรีย์ที่เจือปนมากับเนื้อถ่านหินซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์ ที่ประกอบด้วยสารระเหยและคาร์บอนคงตัว มักนิยมเรียกสองส่วนนี้รวมกันว่า ส่วนที่เผาไหม้ได้ (Combustibles)

ความชื้น (Moisture) คือน้ำหนักที่สูญเสียไปหลังจากการนำถ่านหินบดละเอียดไปอบภายใต้ภาวะที่กำหนด น้ำส่วนที่เป็นความชื้น (Inherent Moisture) จะระเหยออกมา ส่วนน้ำที่เป็นส่วนประกอบทั้งอินทรีย์และอนินทรีย์ (Coherent Moisture) ยังคงอยู่ในถ่านหิน

เถ้า (Ash) คือน้ำหนักที่คงอยู่หลังจากนำถ่านหินบดละเอียดไปเผาภายใต้ภาวะออกซิไดส์ที่กำหนดโดย เถ้าคือส่วนประกอบอินทรีย์ที่มีอยู่เดิมในถ่านหินที่ถูกออกซิไดส์จนสมบูรณ์ ดังนั้นน้ำหนักของเถ้าจึงน้อยกว่าน้ำหนักของส่วนประกอบอินทรีย์ (แร่ธาตุ) ที่มีอยู่ในถ่านหินเดิม เพราะสารประกอบประเภทคาร์บอนเนต ซัลไฟด์ และอื่น ๆ ถูกออกซิไดส์ไปเป็นสารออกไซด์ทั้งหมด

สารระเหย (Volatile Matter) เป็นน้ำหนักที่สูญเสียไปโดยหักน้ำหนักความชื้นออกแล้ว หลังจากการนำถ่านหินบดละเอียด ไปอบภายใต้ภาวะที่กำหนด เพื่อแยกสลายถ่านหินในส่วนที่ระเหยได้ออกมา

คาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) เป็นส่วนที่เหลือของโครงสร้างโมเลกุลของถ่านหินประกอบด้วยคาร์บอนเป็นส่วนใหญ่แต่ไม่ทั้งหมด

### 2.1.6 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis)

เป็นการวิเคราะห์ธาตุต่าง ๆ ที่สำคัญที่มีอยู่ในถ่านหิน คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน กำมะถัน และไนโตรเจน บางครั้งวิเคราะห์ฟอสฟอรัสและคลอรีนด้วย ส่วนออกซิเจนเป็นผลต่างระหว่างผลรวมของธาตุองค์ประกอบทั้งหมดกับความชื้นและเถ้า การวิเคราะห์ธาตุกระทำโดยการกลั่นสลายถ่านหินในภาวะออกซิไดส์อย่างรุนแรงจนกระทั่งกลายเป็นสารประกอบออกไซด์ แล้วหาปริมาณออกไซด์ที่เกิดขึ้นด้วยวิธีทางเคมี หรือทางกายภาพ



## 2.2 วิธีการพัฒนาการใช้ถ่านหินในปัจจุบัน (Speight, 1994 ; Prostein and Hicks, 1982)

### 2.2.1 การพัฒนาเทคนิคการใช้ถ่านหินโดยตรง

คือการพยายามค้นหาเทคนิคใหม่ ๆ หรือปรับปรุงเทคนิคการใช้ถ่านหินที่มีอยู่เดิมให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยสามารถนำไปใช้กับถ่านหินที่มีคุณภาพต่าง ๆ ได้ และสามารถลดมลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้ถ่านหินให้น้อยลงด้วย ซึ่งช่วยให้การนำถ่านหินมาใช้เป็นพลังงานเชื้อเพลิงเป็นไปได้อย่างกว้างขวางมากยิ่งขึ้น ปัจจุบันได้มีการทดลองนำเอาถ่านหินบดละเอียดผสมกับน้ำมันเพื่อใช้เป็นพลังงานเชื้อเพลิงสำหรับทดแทนน้ำมันในเตาเผา หรือหม้อต้มน้ำที่มีอยู่เดิมในอุตสาหกรรมต่าง ๆ โดยสามารถใช้ถ่านหินผสมได้ถึงร้อยละ 20 - 50 แต่วิธีการนี้เป็นการแก้ปัญหาในระยะสั้น ในระยะยาวแล้วการพยายามค้นคว้าเทคนิคการใช้ถ่านหินอย่างมีประสิทธิภาพเป็นเป้าหมายที่สำคัญ จากการค้นคว้าของประเทศสหรัฐอเมริกาได้มีการสร้างอุปกรณ์การเผาถ่านหินชนิดใหม่เรียกว่า ฟลูอิไดซ์เบด (Fluidize-bed combustion) ที่มีการปรับปรุงระบบการเผาถ่านหินให้มีประสิทธิภาพดีกว่าเตาเผาชนิดเดิม

### 2.2.2 การผลิตน้ำมันสังเคราะห์จากถ่านหิน

การแปรรูปถ่านหินให้เป็นของเหลวมีหลักการคือ การทำให้โมเลกุลของถ่านหินซึ่งเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่และมีความซับซ้อนเกิดการแตกตัวของพันธะต่าง ๆ ออกเป็นโมเลกุลที่มีองค์ประกอบเป็นคาร์บอนขนาดเล็ก มีโครงสร้างทางเคมีขนาดเล็ก และสามารถจับเข้ากับโมเลกุลของไฮโดรเจนทำให้สามารถได้ผลผลิตเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่อยู่ในสภาพเป็นของเหลว

โดยจุดประสงค์ทางเคมีเพื่อที่จะทำให้ถ่านหินแปรสภาพเป็นของเหลวมีดังนี้

1. ลดอิทธิพลของพันธะที่อ่อนแอ เช่น แวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals) รวมทั้งพันธะไฮโดรเจนด้วย เพื่อแยกหน่วยถ่านหินขนาดใหญ่ให้กลายเป็นหน่วยถ่านหินขนาดเล็ก
2. ทำให้เกิดการแยกสลายของสายโซ่พันธะของ แอโรแมติก-อะลิฟาติก แอโรแมติก-แอโรแมติก และคาร์บอน-เฮเทอโรอะตอม (เช่น ไนโตรเจน ออกซิเจนและกำมะถัน) ภายในถ่านหินเพื่อที่จะกลายเป็นส่วนที่มีขนาดเล็ก
3. เพิ่มอัตราส่วนอะตอมไฮโดรเจนต่อคาร์บอนเพื่อเปลี่ยนสภาพเป็นของเหลวซึ่งไฮโดรเจนที่เติมลงไปสามารถที่จะให้เป็นที่ตั้งโมเลกุลของไฮโดรเจนหรือไฮโดรเจนที่ได้จากตัวทำละลายที่มีสมบัติในการให้ไฮโดรเจน

### 2.2.3 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องในกระบวนการสังเคราะห์ของเหลวจากถ่านหิน (Nowacki, 1979 ; Schlosburg, 1985)

ปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการแปรรูปถ่านหินเป็นของเหลวคือ สมบัติของถ่านหิน ชนิดต่าง ๆ อุณหภูมิ ความดัน เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา และรวมถึงอาจต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดกระบวนการเปลี่ยนแปลงเป็นของเหลวได้รวดเร็วและมีปริมาณมากขึ้นด้วย สำหรับปัจจัยที่เกี่ยวข้องในกระบวนการแปรรูปถ่านหินให้เป็นของเหลวประกอบด้วย

1. ความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาของถ่านหิน โดยถ่านหินที่มีศักดิ์ต่างกันมีความสามารถในการแปรสภาพเป็นของเหลวได้แตกต่างกัน เช่น ลิกไนต์สามารถแปรสภาพภายใต้ความดัน อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสมได้ผลิตภัณฑ์เป็นของเหลว แต่ให้ผลผลิตต่ำ เป็นต้น

2. อัตราการให้ความร้อนกับกระบวนการสังเคราะห์ของเหลวจากถ่านหิน เลือกให้อยู่ที่ อุณหภูมิ 350 ถึง 500 องศาเซลเซียส และต้องให้อัตราการเพิ่มความร้อนอย่างรวดเร็ว เพื่อป้องกันการรวมตัวของโมเลกุลที่แตกตัวแล้วจากการให้ความร้อนกลายเป็นพอลิเมอร์ หรือสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ไม่สามารถให้ไฮโดรเจนแก่กระบวนการแปรรูปถ่านหินเป็นของเหลวได้

3. เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาต้องไม่นานมากนัก เนื่องจากจะทำให้องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้เปลี่ยนแปลงไปเป็นสารที่ระเหยได้

4. ความดันที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาอยู่ในช่วง 500 ถึง 4000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

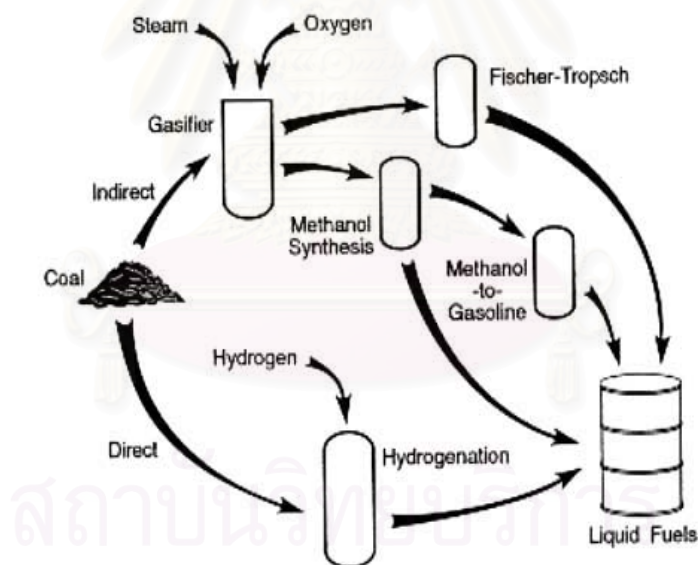
5. ตัวเร่งปฏิกิริยา โลหะหลายชนิดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการแปรรูปถ่านหินให้เป็นของเหลว และยังมีประสิทธิภาพเป็นพิเศษในช่วงอุณหภูมิที่เกิดการแปรรูปเป็นของเหลว

ในระหว่างการเกิดปฏิกิริยานี้อนุมูลอิสระของถ่านหินสามารถเกิดเสถียรภาพได้โดยการดึง ไฮโดรเจนภายในโครงสร้างถ่านหินเองเพื่อใช้ในการเกิดปฏิกิริยา เช่นการดึงไฮโดรเจนจากระบบไฮโดรแอโรแมติกภายในโครงสร้างของถ่านหินเพื่อทำให้อนุมูลอิสระที่เกิดจากการแตกตัวเสถียร เมื่อไฮโดรเจนของถ่านหินที่สามารถจะให้ได้จำกัดถูกใช้ไป อนุมูลอิสระนั้นจะรวมตัวกันเอง เกิดเป็นถ่านชาร์หรือถ่านโค้ก

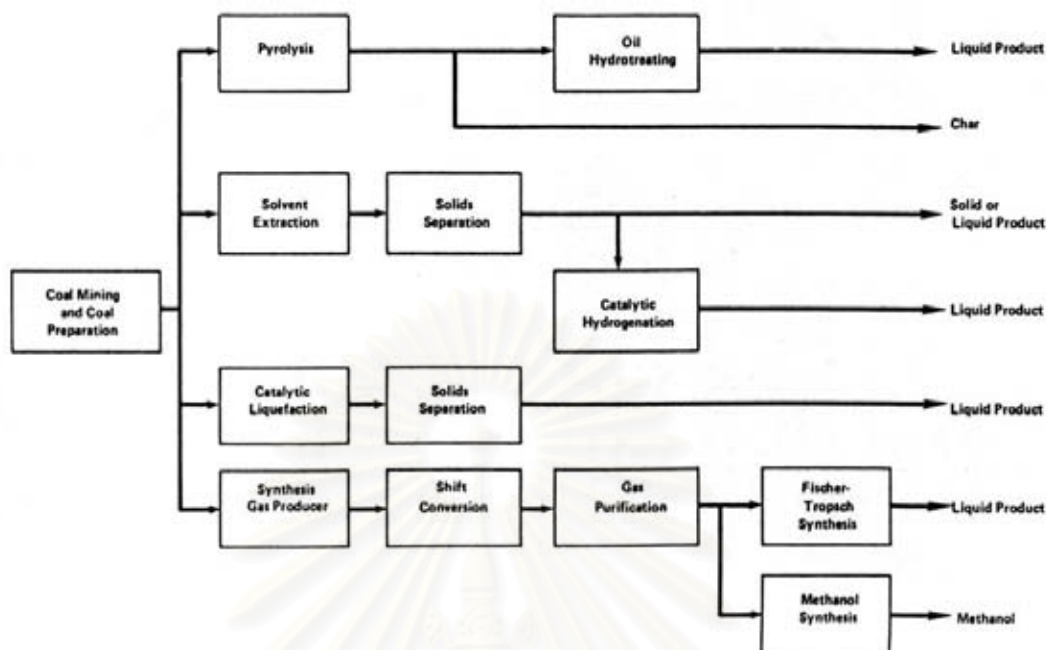
ในกรณีที่มีตัวทำละลายที่มีความสามารถในการให้ไฮโดรเจน เช่น เตตระลิน อนุมูลอิสระจากส่วนที่แตกตัวจากถ่านหินสามารถจะดึงไฮโดรเจนจากตัวทำละลายเพื่อจะทำให้เกิดเสถียรภาพ การเกิดเป็นถ่านชาร์หรือโค้กก็จะลดลง นอกจากนั้นถ้ามีไฮโดรเจนที่เป็นโมเลกุลและตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมถูกเติมลงไปในระบบ การดูดซับทางเคมี (Chemisorption) ของไฮโดรเจนบนตัวเร่งปฏิกิริยาก็สามารถจะเพิ่มประสิทธิภาพไฮโดรเจนที่สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระจากถ่านหินได้ และมีความเป็นไปได้ว่าโมเลกุลไฮโดรเจนเองยังสามารถที่จะทำให้อนุมูลอิสระจากถ่านหินเสถียรได้ถึงแม้ว่าจะไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาหรือตัวทำละลายที่มีสมบัติในการให้ไฮโดรเจนก็ตาม แต่ทว่าอัตรา

การทำปฏิกิริยานั้นจะช้ากว่ามากเมื่อเปรียบเทียบกับเกิดการเกิดปฏิกิริยาการรวมตัวของอนุโมลอิสระของถ่านหินเองกลายเป็นโค้ก การเพิ่มอุณหภูมิมีผลทำให้เกิดการแตกตัวของพันธะมากขึ้นด้วย (การแตกตัวด้วยความร้อนของพันธะที่อ่อนแอ) พันธะที่ถูกทำให้แตกออกที่ดำเนินอยู่นี้จะลดความหนืดของระบบนั่นก็คือขนาดโมเลกุลเฉลี่ยก็ลดลงด้วย แต่ก็เป็นการเพิ่มอัตราการใช้ไฮโดรเจนด้วย อาจส่งผลทำให้เกิดแก๊สผลิตภัณฑ์มากขึ้นตาม

สำหรับกระบวนการสังเคราะห์ของเหลวจากถ่านหินสามารถแบ่งออกเป็น 2 เส้นทาง ดังรูปที่ 2.4 คือ การสังเคราะห์ของเหลวจากถ่านหินโดยตรง และการสังเคราะห์ของเหลวจากถ่านหินโดยทางอ้อม ซึ่งการสังเคราะห์ของเหลวจากถ่านหินโดยตรงนั้นจะนำถ่านหินมาผ่านกระบวนการเติมไฮโดรเจน (Hydrogenation) ได้เป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวโดยตรง ในขณะที่การสังเคราะห์ของเหลวจากถ่านหินโดยทางอ้อมนั้นจะนำถ่านหินมาผ่านกระบวนการผลิตแก๊สสังเคราะห์แล้วนำแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตได้ผ่านกระบวนการต่าง ๆ เช่น การสังเคราะห์เมทานอล (Methanol Synthesis) หรือ ฟิชเชอร์-ทรอปส์ (Fischer-Tropsch) เพื่อผลิตเป็นของเหลวต่อไป



รูปที่ 2.4 เส้นทาง การสังเคราะห์ของเหลวจากถ่านหิน (Speight, 1994)



รูปที่ 2.5 กระบวนการสำหรับการสังเคราะห์ของเหลวจากถ่านหิน (Speight, 1994)

ถ้าแบ่งในแง่ของกระบวนการนั้น การแปรรูปถ่านหินสามารถแบ่งออกเป็น 4 กระบวนการใหญ่ ๆ ตามรูปที่ 2.5 ได้ดังนี้ คือ

1. กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis)
2. กระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent Extraction)
3. กระบวนการผลิตของเหลวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic Liquefaction)
4. กระบวนการผลิตของเหลวโดยทางอ้อม (Indirect Liquefaction)

#### กระบวนการไพโรไลซิส

คือการนำถ่านหินมาแยกสลายด้วยความร้อนที่อุณหภูมิสูงมากกว่า 400 องศาเซลเซียส ภายใต้ภาวะสูญญากาศ (ปราศจากอากาศหรือแก๊สออกซิเจน) ทำให้ถ่านหินสามารถเปลี่ยนไปเป็นแก๊ส น้ำมันหนัก น้ำมันเบา และชาร์ ในกรณีที่กระบวนการนี้มีการใช้ไฮโดรเจนรวมอยู่ด้วยจะเรียกว่า ไฮโดรคาร์บอนไนเซชัน (Hydrocarbonization)

องค์ประกอบและปริมาณของผลิตภัณฑ์จะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลาย ๆ อย่าง ได้แก่ อัตราการให้ความร้อน ความดัน ศักดิ์ของถ่านหิน เวลาในการทำปฏิกิริยา ขนาดของอนุภาคถ่านหิน ชนิดของเครื่องปฏิกรณ์ ข้อเสียเปรียบของกระบวนการนี้คือจะให้ปริมาณของชาร์มากแต่ปริมาณของเชื้อเพลิงเหลวน้อย ในทางกลับกันกระบวนการไพโรไลซิสและไฮโดรคาร์บอนไนเซชันจะมีความยุ่งยาก

น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการเติมไฮโดรเจนในวัฏภาคที่เป็นของเหลว (liquid-phase hydrogenation process) กระบวนการไฟโรไลซิส มักจะใช้ความดันที่ต่ำกว่า 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (690 กิโลพาสคัล) โดยส่วนมากอยู่ในช่วง 5 และ 25 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (34-172 กิโลพาสคัล) แต่กระบวนการไฮโดรคาร์บอนในเซชันต้องใช้ความดันภายใต้บรรยากาศของแก๊สไฮโดรเจน 300-1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว กระบวนการไฟโรไลซิสและไฮโดรคาร์บอนในเซชันสามารถจะดำเนินการที่อุณหภูมิสูงถึง 600 องศาเซลเซียส

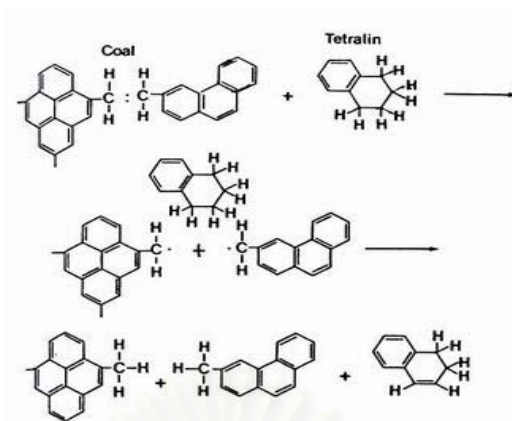
#### กระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลาย

กระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลายจะนำถ่านหินมาผสมกับตัวทำละลายที่มีสมบัติให้ไฮโดรเจน อุณหภูมิสูงถึง 500 องศาเซลเซียส และความดัน 5000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (34.5 เมกะพาสคัล) กระบวนการนี้ปกติแล้วจะใช้ของเหลว (อาจจะได้มาจากถ่านหินที่แปรสภาพเป็นของเหลวแล้ว) เป็นตัวให้ไฮโดรเจน (hydrogen donor solvent) ซึ่งตัวทำละลายนี้สามารถให้ไฮโดรเจนแก่ถ่านหินที่ภายใต้ภาวะของการเกิดปฏิกิริยา ทำให้ถ่านหินมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นไปเป็นผลิตภัณฑ์เหลวที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อย โดยทั่วไปแล้วอุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยามักจะไม่เกิน 510 องศาเซลเซียส การเติมไฮโดรเจนแก่ระบบอาจจะทำระหว่างกระบวนการ (ภายใต้ความดัน) หรือเริ่มต้นโดยกระบวนการ hydrogenation ของตัวทำละลายที่มีอยู่แล้วในระบบ ไฮโดรเจนสามารถถูกผลิตมาจากถ่านหินที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยา หรือจากผลิตภัณฑ์แก๊สข้างเคียง

กระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลายสามารถจัดได้เป็น 3 รูปแบบคือ

1. การสกัดเมื่อไม่มีไฮโดรเจนแต่มีตัวทำละลายใช้แล้ว โดยตัวทำละลายใช้แล้วถูกเติมไฮโดรเจนก่อนนำกลับมาใช้ใหม่
2. การสกัดเมื่อมีไฮโดรเจนและตัวทำละลายใช้แล้ว โดยตัวทำละลายใช้แล้วไม่ถูกเติมไฮโดรเจนก่อนนำกลับมาใช้ใหม่
3. การสกัดเมื่อมีไฮโดรเจนและตัวทำละลายใช้แล้ว โดยตัวทำละลายใช้แล้วถูกเติมไฮโดรเจนก่อนนำกลับมาใช้ใหม่

ในแต่ละรูปแบบผลิตภัณฑ์เหลวต่าง ๆ จากการกลั่นสามารถแยกตัวทำละลายเพื่อนำกลับมาหมุนเวียนใช้ใหม่ได้อย่างต่อเนื่อง การสกัดด้วยตัวทำละลายสามารถดำเนินการที่ภาวะไม่รุนแรง แต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีของแข็งไฮโดรเจนสูง หรือน้ำมันหนักที่มีส่วนประกอบเป็นน้ำมันเบาและแก๊สน้อย ถ้าภาวะของการเกิดปฏิกิริยารุนแรงมากขึ้นจะมีการขจัดกำมะถันและไฮโดรเจน และผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีน้ำหนักโมเลกุลน้อยลง ตัวทำละลายที่มีสมบัติที่ดีในการให้ไฮโดรเจน เช่น เตตระลิน แสดงดังรูปที่ 2.6

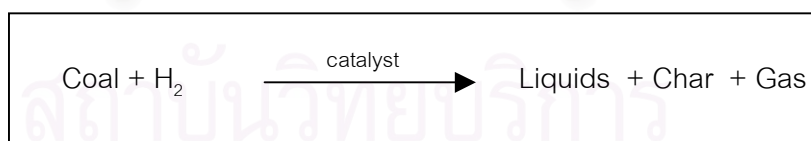


รูปที่ 2.6 การให้ไฮโดรเจนของ Tetrahydronaphthelene (Tetralin) (Whitehurst, 1980)

### กระบวนการผลิตของเหลวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

เป็นกระบวนการสังเคราะห์ของเหลวจากถ่านหิน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมเพื่อเติมไฮโดรเจนให้กับถ่านหิน โดยทั่วไปแล้วกระบวนการนี้มักจะใช้ของเหลว (Liquid Medium) เพื่อเป็นตัวกระจายตัวเร่งปฏิกิริยา หรือบางที่อาจจะใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (Fixed-bed Reactor) หรือทำการกระจายตัวเร่งปฏิกิริยาบนถ่านหินโดยตรง โดยตัวอย่างกระบวนการและตัวเร่งปฏิกิริยาได้แสดงในตารางที่ 2.3 สำหรับข้อดีในกระบวนการนี้คือไม่จำเป็นต้องใช้ตัวทำละลายที่มีสมบัติในการให้ไฮโดรเจน แต่จะต้องมีไฮโดรเจนเพียงพอจากแหล่งอื่น เช่น แก๊สไฮโดรเจน สำหรับข้อเสียโดยปกติจะพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกทำให้สูญเสียความสามารถในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเนื่องจาก mineral matter ในถ่านหิน และการเกิดโค้กขึ้นระหว่างเกิดปฏิกิริยา

สมการทั่วไปสำหรับกระบวนการผลิตของเหลวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา คือ



นอกจากผลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถช่วยทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้รวดเร็วขึ้น อันจะช่วยลดภาระค่าใช้จ่ายจากการสังเคราะห์ของเหลวจากถ่านหินแล้วก็ตาม แต่จากข้อจำกัดของกระบวนการสังเคราะห์ของเหลวที่จำเป็นต้องกระทำภายใต้บรรยากาศของแก๊สไฮโดรเจนและต้องอยู่ในภาวะที่ความดันสูง การใช้แก๊สไฮโดรเจนปริมาณมาก ๆ จะส่งผลต่อค่าใช้จ่ายในการผลิตของเหลว จึงได้มีงานวิจัยที่ศึกษาถึงการนำสารประกอบที่สามารถให้ไฮโดรเจนแก่กระบวนการสังเคราะห์ของเหลว เช่น การเติมตัวทำละลายจำพวก H-donor Solvent การใช้พลาสติกที่เป็นพอลิเมอรัของ

ไฮโดรคาร์บอน มาร่วมในปฏิกิริยาอันจะสามารถช่วยลดการใช้แก๊สไฮโดรเจนได้ หนทางหนึ่งที่มีการนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ การนำขยะพลาสติกซึ่งเป็นขยะที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นในอัตราที่สูงมากในแต่ละวัน และเป็นวัสดุที่ไม่มีคุณค่ากลับมาใช้ประโยชน์ในการเป็นแหล่งให้ไฮโดรเจนแก่กระบวนการสังเคราะห์ของเหลวจากถ่านหิน จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาถึงปฏิกิริยาระหว่างพลาสติกและถ่านหินพบว่า พลาสติกมีองค์ประกอบที่เป็นไฮโดรเจนจำนวนมากเมื่อเทียบกับองค์ประกอบของถ่านหิน ซึ่งสามารถเป็นแหล่งให้ไฮโดรเจนแก่กระบวนการแปรรูปเป็นของเหลวของถ่านหินได้เป็นอย่างดี โดยเมื่อพลาสติกได้รับความร้อนจะเกิดการแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระ (Free Radical) กับ ไฮโดรเจน และบางส่วนของอนุมูลพลาสติกทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระของถ่านหินให้เป็นผลิตภัณฑ์ของเหลวได้และสามารถนำมาหมุนเวียนใช้เป็นเชื้อเพลิงเหลวได้

ตารางที่ 2.3 กระบวนการผลิตของเหลวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Braunstein et al., 1977)

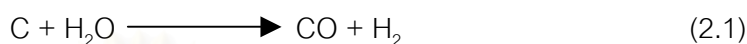
Process	Developer	Reactor	Catalyst	Temperature		Pressure (psi)
				°C	°F	
<b>(a) Catalytic Liquefaction Processes</b>						
H-coal	Hydrocarbon Research Inc.	Ebullated bed	Co-Mo/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	450	840	2250-3000
Synthoil	ERDA	Fixed bed	Co-Mo/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	450	840	2000-4000
CCL	Gulf	Fixed bed	Co-Mo/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	400	750	2000
Multistage	Lummus	Expanded bed	Co-Mo/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	400-430	750-805	1000
<b>(b) Catalytic Hydrogenation Processes</b>						
Bergius	Bergius	Plug flow	Iron oxide	480	895	3000-10,000
University of Utah	University of Utah	Entrained flow	Zinc chloride, tin chloride	500-550	930-1020	1500-2500
Schroeder	Schroeder	Entrained flow	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub>	500	930	2000
Zinc chloride	Conoco	Liquid phase	Zinc chloride	360-440	680-825	1500-3500

#### กระบวนการผลิตของเหลวโดยทางอ้อม

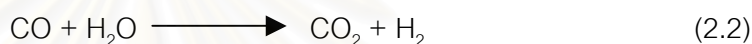
กระบวนการนี้จะดำเนินการเป็นแบบ 2 ขั้นตอน (Two-stage Conversion Operation) โดยในขั้นตอนแรกจะผลิตแก๊สผสมซึ่งได้มาจากการแตกสลายตัวถ่านหินด้วยปฏิกิริยา Steam Reforming และ/หรือ Partial Oxidation ได้แก๊สที่สำคัญคือ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจน (Syngas; Synthesis Gas) ซึ่งแก๊สเหล่านี้จะถูกทำให้บริสุทธิ์ก่อนโดยทำการขจัดเอากำมะถัน ไนโตรเจน และอนุภาคเล็ก ๆ ออกไป หลังจากนั้นขั้นตอนที่สองจึงทำการเปลี่ยนแก๊สเหล่านี้ไปเป็นของเหลวจำพวกไฮโดรคาร์บอนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา และอาจจะนำมาผลิตเป็นของเหลวอื่น ๆ เช่นแอมโมเนีย และเมทานอล

การสังเคราะห์ไฮโดรคาร์บอนจากแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจน (Fischer-Tropsch Synthesis) ซึ่งในปัจจุบันนี้สามารถขยายขนาดจนสามารถใช้ในเชิงพาณิชย์ได้ ในอเมริกาใต้ใช้กระบวนการฟิชเชอร์-ทรอปส์ ในเชิงพาณิชย์โดยเรียกกระบวนการนี้ว่า SASOL

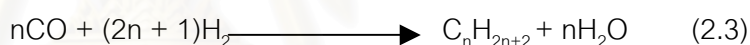
ถ่านหินจะถูกเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สนั้นจะใช้คุณหมุมิที่มากถึง 800 องศาเซลเซียส และความดันปานกลางดังสมการที่ 2.1



แก๊สไฮโดรเจนจะถูกผลิตเพิ่มเพื่อใช้ในปฏิกิริยาการสังเคราะห์ของเหลว โดยผ่านปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สชิฟต์ (Water-gas Shift) ดังสมการที่ 2.2



หลังจากนั้นแก๊สผสมต่าง ๆ จะถูกทำให้บริสุทธิ์ เช่น แก๊สที่มีสมบัติเป็นกรด และอื่น ๆ จึงสามารถเปลี่ยนไปเป็นไฮโดรคาร์บอนต่าง ๆ ได้ ดังสมการที่ 2.3



ปฏิกิริยาเหล่านี้จะส่งผลให้เกิดสารประกอบจำพวกอะลิฟาติกที่มีจุดเดือดต่ำจนถึงจุดเดือดปานกลาง โดยในทางการค้าแล้วกระบวนการนี้จะใช้ผลิตสารจำพวกโอเลฟิน (Olefin) และสารที่มีออกซิเจนอยู่ในโมเลกุล (Oxygenated Material) ด้วย

ข้อเสียของกระบวนการนี้คือ ประสิทธิภาพของกระบวนการสองขั้นตอน (การแปรรูปถ่านหินเป็นของเหลวโดยทางอ้อม) จะน้อยกว่ากระบวนการขั้นตอนเดียว (การแปรรูปถ่านหินเป็นของเหลวโดยตรง) แต่ก็มีข้อดีคือ

1. ขั้นตอนการแปรรูปเป็นแก๊ส (Gasification) สามารถทนต่อสิ่งเจือปน (เช่น Mineral Matter) ต่าง ๆ ที่มีอยู่ในถ่านหินได้ดี

2. ขั้นตอนการแปรรูปเป็นของเหลวสามารถควบคุมได้ง่ายกว่า

3. ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีการเจือปนน้อย

4. วิธีการนี้สามารถนำมาดัดแปลงใช้กับแก๊สใต้พื้นดินของถ่านหินเพื่อแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงเหลว ซึ่งผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวจะมากกว่าปริมาณถ่านหินที่ป้อนให้กับระบบ



## 2.3 ชีวมวล (ศูนย์สารสนเทศการเกษตร, 2544 ; กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน, 2544 ; กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2547)

ชีวมวล (Biomass) คือ สารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้ เช่น เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร หรือกากจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมการเกษตร เช่น แกลบ ได้จากการสีข้าวเปลือก ชานอ้อย ได้จากการผลิตน้ำตาลทราย เศษไม้ ได้จากการแปรรูปไม้ยางพาราหรือไม้ยูคาลิปตัสเป็นส่วนใหญ่ และบางส่วนได้จากสวนป่าที่ปลูกไว้ กากปาล์ม ได้จากการสกัดน้ำมันปาล์มดิบออกจากผลปาล์มสด กากมันสำปะหลัง ได้จากการผลิตแป้งมันสำปะหลัง ชังข้าวโพด ได้จากการสีข้าวโพดเพื่อนำเมล็ดออก กาบและกะลามะพร้าว ได้จากการนำมะพร้าวมาปอกเปลือกออกเพื่อนำเนื้อมะพร้าวไปผลิตกะทิ และน้ำมันมะพร้าว ส่าเหล้า ได้จากการผลิตแอลกอฮอล์เป็นต้น

### 2.3.1 ศักยภาพของพลังงานชีวมวล

#### 1. วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร

วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรหลักที่สามารถนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทน ได้แก่ แกลบและฟางข้าว ชานอ้อย กากและกะลาปาล์ม กะลามะพร้าว ฯลฯ จากการประเมินศักยภาพของวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรจากพืช 10 ชนิดที่มีศักยภาพสูง ได้แก่ อ้อย ข้าว น้ำมันปาล์ม มะพร้าว มันสำปะหลัง ข้าวโพด ถั่วลิสง ฝ้าย ถั่วเหลืองและข้าวฟ่าง ดังแสดงในตารางที่ 2.4

#### 2. มูลสัตว์

มูลสัตว์ 6 ชนิด คือ มูลโค กระบือ สุกร ไก่ เป็ดและมูลช้าง ในปี พ.ศ. 2543 มีศักยภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพได้ 560 ล้านลูกบาศก์เมตร คิดเป็นพลังงานประมาณ 11.75 เพตาจูล

#### 3. ขยะ

ในปี พ.ศ. 2543 กรมควบคุมมลพิษรายงานปริมาณขยะที่จัดเก็บได้ ประมาณ 13.9 ล้านตัน ซึ่งมีปริมาณขยะรวมทั้งในกรุงเทพมหานครและปริมณฑล, เขตเทศบาล, เมืองพัทยาและนอกเขตเทศบาลทั่วประเทศ ถ้านำขยะ 85 เปอร์เซ็นต์ของขยะทั้งหมดมาฝังกลบ จะได้แก๊สชีวภาพจากการฝังกลบ 1,184.22 ล้านลูกบาศก์เมตร เทียบเท่าพลังงาน 23.09 เพตาจูล

#### 4. น้ำเสีย

ในปี พ.ศ. 2543 น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีศักยภาพสูงในการนำมาผลิตก๊าซชีวภาพ 11 ประเภทอุตสาหกรรม เช่น โรงฆ่าสัตว์, โรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง, โรงงานผลิตน้ำมันปาล์ม เป็นต้น มีศักยภาพที่จะผลิตก๊าซชีวภาพได้ 435.33 ล้านลูกบาศก์เมตร เท่ากับพลังงาน 10.45 เพตาจูล

ชีวมวล สามารถเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานได้ เพราะในขั้นตอนของการเจริญเติบโตนั้น พืชใช้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำและเปลี่ยนพลังงานจากแสงอาทิตย์โดยผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสงได้ออกมา เป็นแป้งและน้ำตาล แล้วกักเก็บไว้ตามส่วนต่างๆ ของพืช ดังนั้นเมื่อนำพืชมาเป็นเชื้อเพลิงก็จะได้พลังงานออกมา การใช้ประโยชน์จากพลังงานชีวมวล สามารถใช้ได้ทั้งในรูปแบบของพลังงานความร้อน ไอน้ำ หรือผลิตเป็นกระแสไฟฟ้า โดยจะใช้เชื้อเพลิงชีวมวลชนิดใดชนิดหนึ่งที่กล่าวมาข้างต้น หรือหลายชนิดรวมกันก็ได้ ชีวมวลจึงเป็นแหล่งเชื้อเพลิงราคาถูก หากมีการใช้ประโยชน์ในบริเวณที่ไม่ไกลจากแหล่งเชื้อเพลิงมากนัก เพื่อลดต้นทุนในการขนส่ง

ชีวมวล มีอยู่ทั่วไปในประเทศไทย การนำชีวมวลมาใช้จึงช่วยลดการสูญเสียเงินตราต่างประเทศในการนำเข้าเชื้อเพลิงและสร้างรายได้ให้กับคนท้องถิ่น นอกจากนี้การผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวลด้วยเทคโนโลยีที่เหมาะสม จะไม่ก่อให้เกิดมลพิษและไม่สร้างภาวะเรือนกระจก เนื่องจากการปลูกทดแทนทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกิดการหมุนเวียนและไม่มีการปลดปล่อยเพิ่มเติม เรายังมุ่งหวังว่าการพัฒนาโครงการเกี่ยวกับชีวมวลจะสามารถเสริมสร้างความเข้มแข็งและการมีส่วนร่วมของชุมชนได้อีกด้วย



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.4 การประเมินศักยภาพพลังงานจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร พ.ศ.2546

ชนิด	ผลผลิต ต่อปี (10 <sup>6</sup> กก.)	วัสดุเหลือใช้	อัตราส่วน วัสดุเหลือใช้ ต่อผลผลิต	วัสดุเหลือใช้ ที่เกิดขึ้น (10 <sup>6</sup> กก.)	แฟกเตอร์ ของการใช้ เป็นพลังงาน	ปริมาณวัสดุ เหลือใช้ที่ใช้ เป็นพลังงาน (10 <sup>6</sup> กก.)	แฟกเตอร์วัสดุ เหลือใช้ที่ยัง ไม่มีการใช้	ปริมาณวัสดุ เหลือใช้ที่ยัง ไม่มีการใช้ (10 <sup>6</sup> กก.)	ค่าความร้อน (เมกะจูล/กก.)	พลังงาน (เทราจูล)
1. อ้อย	35,228	ชานอ้อย	0.291	10,251	0.793	8129	0.207	2,122	14.4	30,557
		ส่วนยอดและใบ	0.302	10,639	0	0	0.986	10,490	17.39	182,420
2. ฟางข้าว	26,179	แกลบ	0.23	6,021	0.507	3053	0.493	2,968	14.27	42,360
		ฟาง(ส่วนบน)	0.447	11,702	0	0	0.684	8,004	10.24	81,963
3. ปาล์ม น้ำมัน	12,703	ทะลายปาล์มเปล่า	0.428	5,437	0.03	163	0.584	3,175	17.86	56,708
		เส้นใยปาล์ม	0.147	1,867	0.858	1602	0.134	250	17.62	4,409
		กะลาปาล์ม	0.049	622	0.588	366	0.037	23	18.46	425
4. มะพร้าว	1,565	เปลือก	0.362	567	0.289	164	0.595	337	16.23	5,471
		กะลามะพร้าว	0.16	250	0.413	103	0.378	95	17.93	1,697
		ทะลายมะพร้าว	0.049	77	0.144	11	0.843	65	15.4	996
		ทางมะพร้าว	0.225	352	0.159	56	0.809	285	16	4,558
5. มันสำปะหลัง	1,952	ลำต้น	0.088	172	0	0	0.407	70	18.42	1,288
6. ข้าวโพด	3,429	ซังข้าวโพด	0.273	936	0.193	181	0.67	627	18.04	11,315
7. ถั่วลิสง	29	เปลือก	0.323	9	0	0	1	9	12.66	119
8. ฝ้าย	36	ลำต้น	3.232	116	0	0	1	116	14.49	1,686
9. ถั่วเหลือง	554	ลำต้น, ใบ, เปลือก	2.663	1,475	0.007	10	0.76	1,121	19.44	21,797
10. ข้าวฟ่าง	132	ใบ, ต้น	1.252	165	0.118	20	0.648	107	19.23	2,059

หมายเหตุ : อัตราส่วนวัสดุเหลือใช้ต่อผลผลิต แฟกเตอร์ของการใช้เป็นพลังงาน แฟกเตอร์วัสดุเหลือใช้ที่ยังไม่มีการใช้ ค่าความร้อน จากรายงานพลังงานของประเทศปี 2543

### 2.3.2 ประโยชน์ของพลังงานชีวมวล

1. เศรษฐกิจชุมชนจะเจริญเติบโต เนื่องจากเชื้อเพลิงชีวมวล สามารถช่วยพัฒนาอุตสาหกรรม ต่อเนื่องในท้องถิ่น จะเป็นการช่วยสร้างงาน ในพื้นที่นั้นๆ และก่อให้เกิดรายได้กับชุมชน
2. เกษตรกรจะมีรายได้เพิ่มขึ้น เนื่องจากสามารถขายได้ทั้งผลผลิตการเกษตร และเศษวัสดุการเกษตรที่เคยทิ้ง จะกลับมามีราคาขายได้
3. เป็นทางเลือกใหม่ในการผลิตกระแสไฟฟ้า ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ความมั่นคงในการผลิตกระแสไฟฟ้าของประเทศจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีโรงไฟฟ้าพลังชีวมวลขนาดเล็ก กระจายอยู่ทั่วประเทศ ปัญหาไฟตกไฟดับในพื้นที่ห่างไกลจะลดลงหากมี โรงไฟฟ้าขนาดเล็กไปอยู่ใกล้ๆ

### 2.3.3 องค์ประกอบของชีวมวล

องค์ประกอบของชีวมวลหรือสสารทั่วไปจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักคือ

#### 1. ความชื้น (Moisture)

ความชื้นหมายถึงปริมาณน้ำที่มีอยู่ ชีวมวลส่วนมากจะมีความชื้นค่อนข้างสูง เพราะเป็นผลผลิตทางการเกษตร ถ้าต้องการนำชีวมวลเป็นพลังงานโดยการเผาไหม้ ความชื้นไม่ควรเกิน 50 เปอร์เซ็นต์

#### 2. ส่วนที่เผาไหม้ได้ (Combustible substance)

ส่วนที่เผาไหม้ได้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ Volatiles matter และ Fixed Carbon Volatiles matter คือส่วนที่ลุกเผาไหม้ได้ง่าย ดังนั้นชีวมวลใดที่มีค่า Volatiles matter สูงแสดงว่าติดไฟได้ง่าย

#### 3. ส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้ คือ เถ้า (Ash)

ชีวมวลส่วนใหญ่จะมีเถ้าประมาณ 1 -3 เปอร์เซ็นต์ ยกเว้นแกลบและฟางข้าว จะมีสัดส่วนเถ้าประมาณ 10 -20 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะมีปัญหาในการเผาไหม้และกำจัดพอสมควร

ชีวมวลแต่ละชนิดมีสมบัติเฉพาะอย่าง สมบัติบางอย่างถือเป็นจุดเด่น สมบัติบางอย่างถือเป็นจุดด้อย ดังนั้น ถ้าจะนำชีวมวลมาใช้ประโยชน์ในด้านใด ต้องออกแบบเครื่องจักรให้เหมาะสมกับชีวมวลนั้นๆ เพื่อประสิทธิภาพโดยรวมที่ดีที่สุด อย่างไรก็ตาม สมบัติอย่างหนึ่งของชีวมวลที่เหมือนกันคือ มีน้ำหนักเบา เมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ โรงงานที่ต้องใช้ชีวมวลเป็นวัตถุดิบในการผลิตควรอยู่ใกล้กับแหล่งผลิตชีวมวลเพื่อลดค่าใช้จ่ายด้านการขนส่งให้มากที่สุด

### 2.3.4 การกระจายตัวของแหล่งชีวมวล

รูปแบบการกระจายตัวของแหล่งชีวมวล มี 2 ลักษณะคืออยู่รวมเป็นกลุ่ม และอยู่กระจายกระจาย ชีวมวลที่อยู่รวมเป็นกลุ่มคือเศษชีวมวลจากกระบวนการแปรรูป ณ ที่ใดที่หนึ่ง เช่น โรงสีข้าว โรงงานผลิตน้ำตาลทราย โรงงานแป้งมันสำปะหลัง โรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม และโรงงานแปรรูปไม้ยางพารา เป็นต้น ที่อยู่กระจายตามพื้นที่เพาะปลูกหรือไม่มีการรวบรวม เช่น การสีข้าวโพดโดยอาศัยอุปกรณ์สีข้าวโพดที่เคลื่อนที่ได้ และเศษไม้-ปลายไม้จากสวนปายางพารา เป็นต้น ส่วนการนำชีวมวลที่อยู่กระจายมา เป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตไฟฟ้า จะมีข้อเสียเปรียบคือ เสียค่าใช้จ่ายในการรวบรวมเพิ่มขึ้น

#### ขนาด

ขนาดของชีวมวล เป็นอีกองค์ประกอบหนึ่งที่ต้อง พิจารณา ถ้าชีวมวลมีขนาดใหญ่ เช่น เศษไม้หรือปลายไม้ จากสวนปายางพารา และปึกไม้ที่ได้จากโรงเลื่อยไม้ยางพารา เป็นต้น จะมีขนาดใหญ่เกินไปจึงไม่เหมาะที่จะนำมาเผาไหม้เป็น เชื้อเพลิงโดยตรง เพราะประสิทธิภาพการเผาไหม้จะต่ำ ดังนั้นควรจะนำมาย่อยให้เป็นชิ้นเล็กๆ จะทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ดีขึ้น แต่ก็มีค่าใช้จ่ายในการย่อยเพิ่มขึ้นเช่นกัน

#### ความชื้น

ความชื้นของชีวมวลเป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการนำมาเป็นเชื้อเพลิง ถ้าชีวมวลมีความชื้นสูงมาก เช่น กากมันสำปะหลังหรือส่าเหล้า ซึ่งมีความชื้นประมาณ 80-90% ไม่เหมาะที่จะนำมาเผาไหม้ แต่อาจจะนำมาผ่านกระบวนการบีบอัด (Dewatering) เพื่อลดความชื้นก่อนนำไปเผา หรือนำมาผ่านกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตไฟฟ้าได้ ในกรณีของเศษไม้ มีความชื้นประมาณ 50-60% ถ้านำมาเก็บไว้ล่วงหน้าระยะหนึ่ง ความชื้นจะลดลง แต่มีข้อเสียคือ เสียพื้นที่ในการจัดเก็บ และถ้าเก็บไว้นานไปไม่มีโอกาสใช้ได้

#### สิ่งเจือปน

สิ่งเจือปนในชีวมวลมีหลายอย่างเช่น เศษดิน หิน กรวดทราย และคราบน้ำมันปาล์ม เป็นต้น สิ่งเจือปนที่ต้องระมัดระวังให้มากคือ สารแอลคาไลน์ในทะลายปาล์ม เพราะเมื่อถูกความร้อนที่อุณหภูมิระดับหนึ่งจะกลายเป็นยางเหนียวเกาะติดท่อน้ำในห้องเผาไหม้ ทำให้ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำลดลง ดังนั้นในการออกแบบห้องเผาไหม้ในกรณีที่น่าชีวมวลมาใช้เป็นเชื้อเพลิงต้องพิจารณาจุดนี้เป็นพิเศษ

#### ปริมาณเถ้า

ปริมาณเถ้าของชีวมวล มีผลต่อการนำชีวมวลมาใช้ในด้านต่างๆ เช่นกัน โดยเฉพาะแกลบจะมีปริมาณเถ้า 16% โดยน้ำหนัก ดังนั้นการนำมาใช้ประโยชน์จะต้องพิจารณาถึงปริมาณเถ้าที่มีอยู่ด้วย

### 2.3.5 การวัดค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวล

มีวิธีการวัด 3 แบบคือ

1. ค่าความร้อนต่ำ หรือ Lower Heating Value (LHV) หมายถึงการนำชีวมวลหนัก 1 กิโลกรัม มาหาค่าความร้อน ค่าที่วัดได้คือ ค่าความร้อนต่ำ (LHV) ต่อกิโลกรัม

2. ค่าความร้อนสูง หรือ Higher Heating Value (HHV) หมายถึงการนำชีวมวลหนัก 1 กิโลกรัม มาลดความชื้นหรือกำจัดน้ำออกให้หมด จากนั้นนำมาหาค่าความร้อน ค่าที่วัดได้คือ ค่าความร้อนสูง (HHV) ต่อกิโลกรัมและมีความสัมพันธ์กับค่าความร้อนต่ำดังนี้

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

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

เมื่อ H เท่ากับปริมาณเปอร์เซ็นต์ของธาตุไฮโดรเจนในชีวมวล และ

เมื่อ M เท่ากับปริมาณเปอร์เซ็นต์ของความชื้นในชีวมวล

3. ค่าความร้อนแห้ง หรือ Dry Heating Value หมายถึงการนำชีวมวลจำนวนหนึ่งมาลดความชื้นหรือกำจัดน้ำออกให้หมด จากนั้นแบ่งมา 1 กิโลกรัม เพื่อนำมาหาค่าความร้อน ค่าที่วัดได้คือ ค่าความร้อนแห้งต่อกิโลกรัม และมีความสัมพันธ์กับค่าความร้อนสูงดังนี้

$$\text{Dry Heating Value} = \text{HHV} / (100 - \text{M})$$

เมื่อ M เท่ากับปริมาณเปอร์เซ็นต์ของความชื้นในชีวมวล

### 2.3.6 ข้อดีของเชื้อเพลิงชีวมวล

1. มีปริมาณกำมะถันต่ำ
2. ราคาถูกกว่าพลังงานเชิงพาณิชย์อื่นต่อหน่วยความร้อนที่เท่ากัน
3. มีแหล่งผลิตอยู่ในประเทศ
4. พลังงานจากชีวมวลจะไม่ก่อให้เกิดภาวะเรือนกระจก และแทบจะไม่ทำให้เกิดมลพิษทางอากาศหรืออากาศเป็นพิษเลยในกรณีที่มีการปลูกทดแทน

### 2.3.7 ปัญหาการใช้พลังงานจากชีวมวล

พลังงานจากชีวมวลมีข้อเสียเปรียบเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงประเภทถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ และน้ำมันเตา หลายประการ และเป็นเหตุผลที่ทำให้การผลิตไฟฟ้าโดยใช้พลังงานหมุนเวียนไม่แพร่หลายเท่าที่ควร เช่น

#### 1. ชีวมวลมีปริมาณไม่แน่นอนเนื่องจาก

- ชีวมวลแต่ละชนิดปลูกเพียงตามฤดูกาลเท่านั้น และผลผลิตที่ได้ขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศ
- เกษตรกรเปลี่ยนชนิดของผลผลิตไปตามความต้องการของตลาด
- พื้นที่การเกษตรลดลงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสภาพไปสู่เมือง
- ชีวมวลมีอยู่มากแต่อยู่อย่างกระจัดกระจาย ทำให้รวบรวมได้ยาก เช่น เศษไม้ ซังข้าวโพด และยอดอ้อยที่อยู่ตามท้องไร่ท้องนา และแถบตามโรงสีเล็กๆ

2. ปริมาณชีวมวลที่มีใช้ในโรงงาน และพื้นที่ใกล้เคียง มีไม่เพียงพอที่จะนำมาเป็นวัตถุดิบ และเมื่อต้องการหาชีวมวลประเภทอื่น หรือจากแหล่งอื่นมาเสริม ก็จะมีปัญหาในเรื่องต่างๆ ดังนี้

- ค่าขนส่งจากแหล่งชีวมวลมาสู่โรงงาน ถ้ายังอยู่ไกลพื้นที่ตั้งของโรงงานก็ยิ่งทำให้มีค่าใช้จ่ายสูง
- เทคโนโลยีที่สามารถใช้ได้กับเชื้อเพลิงชีวมวลหลายๆ ชนิดมีราคาแพง
- มีความเสี่ยงสูงในการรวบรวมชีวมวลจากแหล่งต่างๆ ให้ได้ปริมาณตามต้องการ

#### 3. โรงงานขาดความเชื่อมั่นที่จะลงทุน เนื่องจาก

- ขาดการสนับสนุนการลงทุนจากสถาบันการเงิน เนื่องจากความไม่แน่นอนของปริมาณชีวมวล
- ขาดความมั่นใจด้านเทคโนโลยี ด้วยยังขาดการสาธิตเทคโนโลยี
- ไม่มีผู้ให้คำปรึกษาทางเทคนิค
- ขาดบุคลากรที่จะเป็นผู้ดำเนินการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 2.3.8 การผลิตเชื้อเพลิงจากชีวมวล (บำรุงสุข เทียมพันธ์, 2546)

สามารถทำได้ 4 วิธีคือ

1. เจือจาง (Dilution) เป็นการผสมน้ำมันพืชกับน้ำมันดีเซลในสัดส่วนต่าง ๆ
2. ไมโครอิมัลชัน (Microemulsion) อาจเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า hybrid fuels เป็นการทำให้ของเหลว 2 ชนิดที่ไม่สามารถละลายเป็นเนื้อเดียวกันละลายเป็นเนื้อเดียวกันได้ องค์ประกอบของไมโครอิมัลชัน คือ น้ำมันพืช แอลกอฮอล์ สารลดแรงตึงผิว (surfactants) และสารปรับปรุงค่าซีเทน (cetane improver)
3. ไพโรไลซิส (pyrolysis) เป็นการแยกสลายโมเลกุลน้ำมันพืชด้วยความร้อนให้เป็นไฮโดรคาร์บอนทั้งอิมิตัว ไม่อิมิตัว และสาร oxygenate โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภท วิกวิทพันธ์ เช่น zeolite และ  $\text{Na}_2\text{CO}_3$
4. ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (Transesterification) เป็นกระบวนการเปลี่ยนไตรกลีเซอไรด์ (triglycerides) ของน้ำมันพืชเป็น mono alkyl ester ด้วยแอลกอฮอล์ และมีเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ประโยชน์ของการเปลี่ยนน้ำมันพืชให้เป็น mono alkyl ester ก็คือ mono alkyl ester มีความหนืดต่ำกว่าน้ำมันพืช เมื่อเผาไหม้แล้วจะเกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์กว่าน้ำมันดีเซล และลดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของน้ำมันดีเซลลง ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาผันกลับได้และอันดับของปฏิกิริยาขึ้นกับสัดส่วนโดยโมลระหว่างแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันพืช โดยทั่วไปนิยมใช้เมทานอลสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์ มากที่สุดด้วยเหตุผลหลายประการ ประการหนึ่งคือเมทานอลมีราคาถูกกว่าแอลกอฮอล์ชนิดอื่น ๆ ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยานั้นนอกจากเบสแล้วยังใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ด้วย แต่อัตราการเกิดปฏิกิริยาช้ากว่า การผลิตไบโอดีเซลในปัจจุบันนิยมใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเนื่องจากอุณหภูมิและความดันของการเกิดปฏิกิริยาต่ำ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Matsumura และคณะ (1999) ศึกษาการแปรรูปร่วมของถ่านหิน และชีวมวลให้เป็นของเหลวด้วยน้ำภาวะเหนือวิกฤต พบว่าการใช้น้ำแทนตัวทำละลายชนิดอื่นที่มีราคาแพงจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณออกซิเจนสูงสามารถแก้ไขโดยการเติมไฮโดรเจนเข้าไปในระบบ ในงานวิจัยนี้ใช้ชีวมวลเป็นตัวเพิ่มไฮโดรเจนให้กับถ่านหิน ได้ผลว่าสามารถเพิ่มผลได้ของของเหลว โดย  $\text{CH}_2\text{O}$  ซึ่งเป็นอนุพันธ์ของเซลลูโลสในสารชีวมวลเป็นตัวทำให้ผลได้มากขึ้น นอกจากนี้ อัตราส่วน H/C และ O/C ในผลได้จะเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนน้ำหนักของเซลลูโลส

ธารินี กิติเรืองทอง (2543) ศึกษากระบวนการสังเคราะห์ของเหลวจากลิกไนต์โดยใช้กระบวนการร่วมของพอลิพรอพิลีนกับลิกไนต์โดยใช้เหล็กบนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลาปาล์มเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งได้ศึกษาอิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ที่มีร้อยละของเหล็กเป็น 1, 5, 10 และไม่ใช่ตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิระหว่าง 350-440 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไฮโดรเจน 24 – 75 บาร์ ใช้เวลาในการทดลอง 15-90 นาทีและผลของสัดส่วนโดยน้ำหนักของพอลิพรอพิลีนกับลิกไนต์ โดยทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กระดับห้องปฏิบัติการ ภาวะที่มีแนวโน้มดีที่สุดในการให้ปริมาณของเหลวสูงสุด คือ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของพอลิพรอพิลีนกับลิกไนต์เป็น 4 ต่อ 1 ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 62 บาร์ ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที โดยให้ปริมาณของเหลวร้อยละ 53.36 แก๊สร้อยละ 18.89 และกากของแข็งร้อยละ 27.75 โดยน้ำหนักจากการวิเคราะห์โดยเครื่องวิเคราะห์ Simulated Distillation Gas Chromatography พบว่าแนวโน้มที่ดีที่สุดในการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์จำพวกเนฟทาและซีโรซีนได้สูงที่สุด คือ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของพอลิพรอพิลีนกับลิกไนต์เป็น 4 ต่อ 1 ที่อุณหภูมิ 420 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน เริ่มต้น 62 บาร์ ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที โดยที่น้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาและร้อยละของเหล็กบนถ่านกัมมันต์ให้ผลการกระจายตัวเป็นผลิตภัณฑ์ค่าใกล้เคียงกันคือให้ผลของการกระจายตัวเป็นผลิตภัณฑ์ประกอบด้วย เนฟทาร้อยละ 35.6 เคโรซีนร้อยละ 7.4 และแก๊สร้อยละ 2.75

อภิชาติ ศิริพจนาวรรณ (2545) ศึกษาการแปรรูปร่วมของถ่านหินบ้านปูและพอลิพรอพิลีนให้เป็นของเหลวด้วยตัวทำละลายโทลูอีน-เตตระลิน และโทลูอีน-เอทานอลภาวะเหนือวิกฤต ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่องขนาด 78 มิลลิลิตรที่อุณหภูมิ 400-475 องศาเซลเซียส ความดัน 5-12.2 เมกะพาสคัล และอัตราส่วนระหว่างถ่านหินกับพอลิพรอพิลีนจาก 10:0 ถึง 6:4 โดยใช้การทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับที่ส่งผลต่อร้อยละการเปลี่ยนถ่านหินและพอลิพรอพิลีน และ

ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลว ซึ่งตัวแปรกระบวนการที่ศึกษาคือ อุณหภูมิ ความดัน และอัตราส่วนระหว่างถ่านหินกับพอลิพรอพิลีน พบว่าอัตราส่วนระหว่างถ่านหินกับพอลิพรอพิลีน อุณหภูมิ และความดันส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อร้อยละการเปลี่ยนถ่านหินกับพอลิพรอพิลีน และร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวมากที่สุดตามลำดับ นอกจากนี้ยังศึกษาผลของตัวแปรกระบวนการต่อการกระจายของหมู่ไฮโดรคาร์บอน ในผลิตภัณฑ์ของเหลว พบว่าการแปรปรูปร่วมของถ่านหินและพอลิพรอพิลีน ให้เป็นของเหลวด้วยตัวทำละลายโทลูอีน-เตตระลินภาวะเหนือวิกฤตให้ผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวสูงสุดร้อยละ 69 ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ความดัน 12.2 เมกะพาสคัล และอัตราส่วนระหว่างถ่านหินกับพอลิพรอพิลีน 6:4 ส่วนการแปรปรูปร่วมของถ่านหินและพอลิพรอพิลีนให้เป็นของเหลวด้วยตัวทำละลายโทลูอีน-เฮทานอลภาวะเหนือวิกฤตให้ผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวสูงสุดร้อยละ 61 ที่อุณหภูมิ 425 องศาเซลเซียส ความดัน 10 เมกะพาสคัล และอัตราส่วนระหว่างถ่านหินกับพอลิพรอพิลีน 6:4

Karaca F. and Bolat E. (2002) ศึกษาการแปรปรูปร่วมของถ่านหินลิกไนต์ ของประเทศตุรกี และวัสดุเหลือใช้ที่มีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบให้เป็นของเหลวโดยใช้ซีลี้อย่างเป็นตัวแทนของวัสดุเหลือใช้ เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิ, ความดัน และ อัตราส่วนซีลี้อยต่อลิกไนต์ ที่มีต่อของเหลวที่ได้ พบว่าการนี้ใช้ลิกไนต์อย่างเดียวกับเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น การเปลี่ยนรวมเพิ่มขึ้นจาก 18.25% ไปเป็น 70.17% กรณีใช้ซีลี้อย่างเดียวกับที่อุณหภูมิสูงขึ้น การเปลี่ยนรวมเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยจาก 90.80% ไปเป็น 95.35% ส่วนลิกไนต์ผสมกับซีลี้อยการเปลี่ยนรวม เพิ่มขึ้นจาก 40.85% ไปเป็น 82.59% แสดงว่าการผสมถ่านหินกับซีลี้อยจะเกิดผลส่งเสริมกันแบบทวีคูณโดยอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดคือ 325 องศาเซลเซียส ความดันที่เพิ่มมากขึ้นไม่ส่งผลต่อผลได้และการเปลี่ยนรวม ความดันที่เหมาะสมคือ 40 บรรยากาศ การเพิ่มซีลี้อยในลิกไนต์จะเพิ่มผลได้และการเปลี่ยนรวม สำหรับการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่าอุณหภูมิและอัตราส่วนซีลี้อยต่อลิกไนต์มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อผลได้น้ำมัน และการเปลี่ยนรวม ส่วนความดันไม่มีผลซึ่งเป็นการสนับสนุนงานวิจัยข้างต้น

Lugang และคณะ (2002) ศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยา nickel sulfide และ ferric sulfide ที่มีต่อการแปรปรูปร่วมของถ่านหิน xinwen จากประเทศจีน และซีลี้อย ให้เป็นของเหลวภายใต้ภาวะ coal hydrogen pressure จาก 2.04 – 4.76 เมกะพาสคัล ในช่วงอุณหภูมิ 300 – 400 องศาเซลเซียส พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองชนิดสามารถเพิ่มผลได้น้ำมันของกระบวนการได้ประมาณ 15 – 25% เมื่อเปรียบเทียบกับไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้ภาวะเดียวกัน และภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการคือ อุณหภูมิ 350 – 400 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 15 – 30 นาที และ

ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3.4 เมกะพาสคัล อีกทั้งเมื่อพิจารณาถึงค่าใช้จ่ายในการดำเนินการแล้วจะนิยมใช้ iron sulfide ที่ไม่ผ่านการบ่มเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

บำรุงสุข เทียมพันธ์ (2546) ศึกษาการแปรรูปร่วมของถ่านหินลิกไนต์และน้ำมันพีชใช้แล้วให้เป็นของเหลวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ เพื่อศึกษาตัวแปรกระบวนการคือ อุณหภูมิ ความดัน และอัตราส่วนระหว่างถ่านหินกับน้ำมันพีชใช้แล้ว ทำการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับ ที่อุณหภูมิ 370-450 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 5-9 เมกะพาสคัล และอัตราส่วนระหว่างถ่านหินกับน้ำมันพีชใช้แล้ว 5:5 ถึง 7:3 ในเวลา 30 นาที พบว่าตัวแปรกระบวนการที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของเหลวอย่างมีนัยสำคัญคือ อุณหภูมิ ความดัน และอัตราส่วนระหว่างถ่านหินกับน้ำมันพีชใช้แล้ว โดยไม่มีอันตรกิริยาของทุกตัวแปร ผลของตัวแปรกระบวนการคือ การเพิ่มอุณหภูมิทำให้ผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวลดลง ค่าการเปลี่ยนของถ่านหินเพิ่มขึ้น และผลิตภัณฑ์ของเหลวมีคุณภาพดีขึ้น ความดันสูงช่วยให้ผลได้ของเหลวเพิ่มขึ้น ค่าการเปลี่ยนของถ่านหินเพิ่มขึ้น และไม่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ของเหลว สำหรับน้ำมันพีชใช้แล้วช่วยเพิ่มปริมาณผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลว ค่าการเปลี่ยนของถ่านหินลดลง และช่วยปรับปรุงคุณภาพผลิตภัณฑ์ของเหลว โดยภาวะที่เหมาะสมคือ อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส และความดัน 9 เมกะพาสคัล ให้ผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่อัตราส่วนระหว่างถ่านหินกับน้ำมันพีชใช้แล้ว 5:5 และ 7:3 เท่ากับร้อยละ 42 และ 38 ตามลำดับ จากภาวะที่เหมาะสมดังกล่าวคือ อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส และความดัน 9 เมกะพาสคัล เมื่อทำการทดลองที่อัตราส่วนระหว่างถ่านหินกับน้ำมันพีชใช้แล้ว 3:7 ผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 71 เพราะสัดส่วนน้ำมันพีชใช้แล้วที่เพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวเพิ่มขึ้นด้วย สำหรับผลของการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาได้แก่ ไอร์รอน (III) ซัลไฟด์ (ปริมาณเหล็กบนถ่านหินร้อยละ 0.8 1.67 และ 2.5 ของน้ำหนักถ่านหิน) โมลิบดีนัมเฮกซะคาร์บอนิล (ปริมาณโมลิบดีนัมร้อยละ 1.67 ของน้ำหนักถ่านหิน) และ HZSM-5 (ร้อยละ 1 ของน้ำหนักถ่านหินหรือน้ำมันพีชใช้แล้ว) พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาทุกชนิดช่วยปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ของเหลว โดยโมลิบดีนัมเฮกซะคาร์บอนิล และ HZSM-5 ไม่มีผลทำให้ค่าการเปลี่ยนของถ่านหินและผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวเพิ่มขึ้น ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยาไอร์รอน (III) ซัลไฟด์ช่วยให้ค่าการเปลี่ยนของถ่านหินและผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเหล็กบนถ่านหินเท่ากับร้อยละ 2.5 โดยให้ร้อยละผลิตภัณฑ์ของเหลวที่อัตราส่วนระหว่างถ่านหินกับน้ำมันพีชใช้แล้ว 3:7 5:5 และ 7:3 เท่ากับร้อยละ 85 52 และ 48 ตามลำดับ การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไอร์รอน (III) ซัลไฟด์ร่วมกับ HZSM-5 ทำให้ผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวลดลงเล็กน้อยแต่ช่วยปรับปรุงให้มีคุณภาพดีขึ้น

เอกสิทธิ์ แยมศรี (2546) ศึกษาการแปรรูปร่วมของถ่านหินบ้านปูและจาระบีใช้แล้วให้เป็นของเหลวภายใต้บรรยากาศของแก๊สไฮโดรเจน ในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบดท์ที่อุณหภูมิ 370-450 องศาเซลเซียส ความดัน 5-9 เมกะพาสคัล อัตราส่วนระหว่างถ่านหินกับจาระบีใช้แล้ว 1:9 ถึง 6:4 และเวลา 30 นาที โดยใช้การทดลองแบบแพททอเรียลสองระดับที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของเหลว ตัวแปรที่ได้ศึกษาคือ อุณหภูมิ ความดัน และอัตราส่วนระหว่างถ่านหินกับจาระบีใช้แล้ว พบว่าอัตราส่วนระหว่างถ่านหินกับจาระบีใช้แล้วและอุณหภูมิเป็นตัวแปรกระบวนการที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของเหลวอย่างมีนัยสำคัญ จากการศึกษาผลของอุณหภูมิยังพบอีกว่าทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ของเหลวตามจุดเดือด โดยภาวะที่เหมาะสมคือ อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส ความดัน 5 เมกะพาสคัล อัตราส่วนระหว่างถ่านหินกับจาระบีใช้แล้ว 6 ต่อ 4 ได้ร้อยละการเปลี่ยนของถ่านหินและจาระบีใช้แล้วและร้อยละผลได้ของเหลวเท่ากับ 63 และ 27 ตามลำดับ จากการศึกษาผลของการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาได้แก่ โมลิบดีนัมเฮกซะคาร์บอนิล ไอร์ออน(III)ซัลไฟด์ และซิงค์คลอไรด์ พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาไม่มีผลทำให้อัตราผลได้ของเหลวเพิ่มขึ้น ในขณะที่การแปรรูปร่วมด้วยโทลูอีน-เตตระลิน (70:30 ปริมาตรโดยปริมาตร) ภาวะเหนือวิกฤตที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียสให้อัตราผลได้ของเหลวมากที่สุดเท่ากับ 55 และร้อยละการเปลี่ยนถ่านหินและจาระบีใช้แล้วเท่ากับ 64

Qu และคณะ (2003) ศึกษาการแปรรูปเป็นของเหลวโดยตรงของ *Cunninghamia lanceolata* ในน้ำโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบ Autoclave ที่อุณหภูมิ 280 – 360 องศาเซลเซียสและเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา 10 – 30 นาที รวมทั้งตรวจสอบผลของอัตราส่วนระหว่างชีวมวลต่อน้ำ พบว่าผลได้สูงสุดของน้ำมันหนัก (heavy oil) ประมาณ 24% ที่ชีวมวลหนัก 8 กรัม น้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา 10 นาที อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส

Wang และคณะ (2003) ศึกษาการแปรรูปร่วมระหว่างถ่านหินจีนและพลาสติกให้เป็นของเหลวแบบขั้นตอนเดียว ภายใต้ภาวะการทดลองดังนี้ อุณหภูมิระหว่าง 410-450 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ความดันไฮโดรเจน 10 เมกะพาสคัล โดยเริ่มจากพลาสติกใช้แล้วแบบเฉพาะอย่างและแบบผสมกัน ผลการทดลองจากการทำเฉพาะอย่างแสดงว่า พอลิเอทิลีน ความหนาแน่นสูงยากที่จะเปลี่ยนเป็นของเหลวและถ้าต้องการให้อัตราการเปลี่ยนสูงต้องทำการทดลองที่อุณหภูมิสูงขึ้น ส่วนการแปรรูปร่วมของถ่านหินและพลาสติกผสม (ในอัตราส่วน 1 ต่อ1) ใช้ถ่านหินลิกไนต์ Xianfeng ร่วมกับถ่านหินของโมลิบดีนัมคอนเซนเทรตแคลไซน์ (FAMo) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้มีค่าสูงถึงร้อยละ 60.3-78.1 ยกเว้นการแปรรูปร่วมระหว่างลิกไนต์กับพอลิเอทิลีน ในขณะที่ร้อยละการเปลี่ยนสูงกว่าร้อยละ 95 อย่างไรก็ตาม ผลิตภัณฑ์น้ำ

มันที่ได้จากการแปรรูปร่วมระหว่างถ่านหินจีนและพลาสติกผสมก็ยังมีปริมาณสูงกว่าค่าเฉลี่ยของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการแปรรูปร่วมระหว่างถ่านหินจีนและพลาสติกเพียงอย่างเดียวประมาณร้อยละ 5.1-22.6 การใช้ไฮโดรเจนลดลงร้อยละ 7.7-17.9 แสดงถึง synergistic effect ที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาการแปรรูปร่วมระหว่างถ่านหินจีนและพลาสติกผสมใช้แล้ว



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 3

### เครื่องมือและวิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อกระบวนการแปรรูปรวมของถ่านหินและกะลามะพร้าวให้เป็นของเหลว ดำเนินการทดลองภายในห้องปฏิบัติการเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์เชื้อเพลิงเหลวโดยในระบบจะมีการเติมไฮโดรเจนจากตัวทำละลายที่สามารถให้ไฮโดรเจนได้ ทำการทดลองภายใต้บรรยากาศของแก๊สไฮโดรเจนความดันเริ่มต้น 1 บรรยากาศ (0 Psig) ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแปรรูป คือ ของเหลว แก๊ส และกากของแข็ง จากนั้นทำการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของเหลวเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมสำหรับร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลว

#### 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

1. เครื่องบดถ่านหินชนิดหยาบและชนิดละเอียด Retsch SM100
2. ตะแกรงร่อนถ่านหินและเครื่องร่อนแยก
3. เครื่องปฏิกรณ์ (Reactor) ผลิตโดย Parr Instrument Company model 4842 แสดงในรูปที่ 3.1 มีปริมาตร 250 มิลลิลิตร ทำจากเหล็กกล้าเหนียวไร้สนิม SUS 316 ประกอบไปด้วยเทอร์โมคัปเปิลพร้อมชุดควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Controller) อุปกรณ์วัดความดันซึ่งประกอบด้วย มาตรฐานวัดความดันและอุปกรณ์วัดความดันแบบดิจิตอล (Pressure Transducer) ไบกอนพร้อมอุปกรณ์กำหนดและวัดความเร็วรอบของไบกอน ทำงานที่อุณหภูมิสูงสุด 500 องศาเซลเซียส และความดันสูงสุด 34 เมกะพาสคัล



รูปที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์ Parr Reactor Model 4842

4. เครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic) Bransonic 521 สำหรับทำการสกัดของเหลวด้วยตัวทำละลายเตตระไฮโดรฟูแรน (Tetrahydrofuran) จากกากของแข็ง ด้วยเทคนิคการสกัดแบบอัลตราโซนิก



รูปที่ 3.2 อ่างอัลตราโซนิก

5. เครื่องระเหยแบบหมุน (Rotary Evaporator) Bunchi Rotavapor R-200



รูปที่ 3.3 เครื่องระเหยแบบหมุน

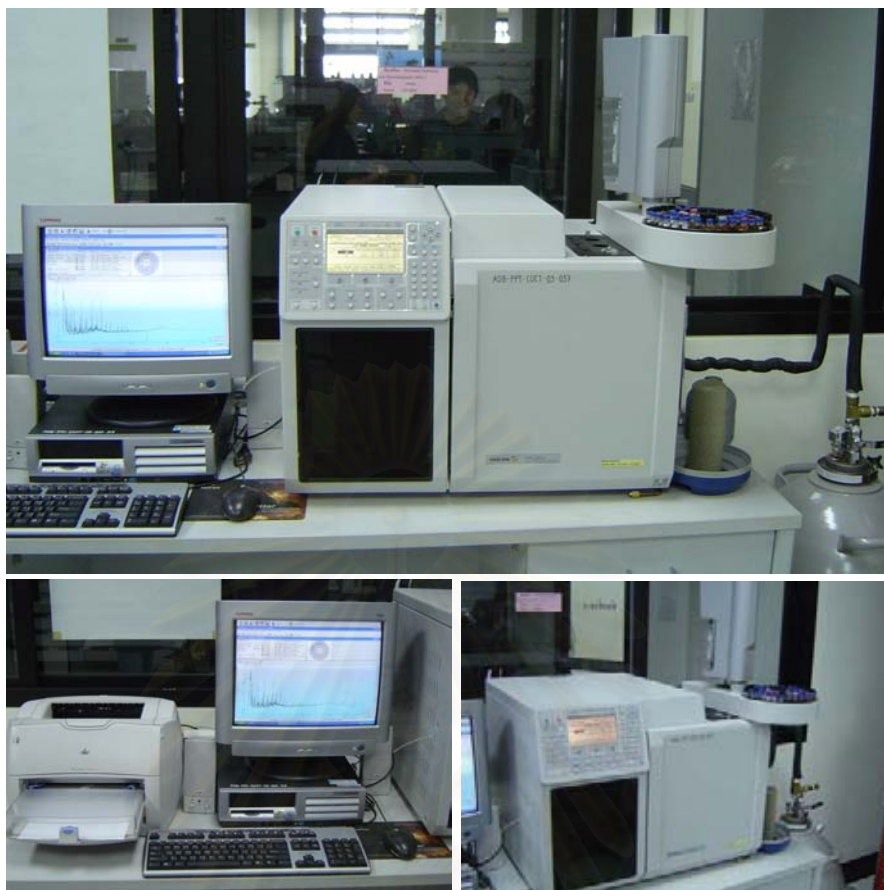
6. เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ (Gas Chromatograph) Hewlett Packard 5890 series II พร้อม ดีเทคเตอร์ (Detector) แบบ TCD และมี 3 คอลัมน์ คือ Porapak Q, Molecular sieve และ OV-1 สำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส



รูปที่ 3.4 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ  
Agilent 3000A Micro GC

7. เครื่องแคลอริมิเตอร์ (Oxygen Bomb Calorimeter) ผลิตโดยบริษัท Parr Instrument Company model 1341EE
8. เตาอบ (Oven)
9. อุปกรณ์การกรองพร้อมกระดาษกรอง Whatman glass microfibre filters (GF/C)
10. เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ (Gas Chromatograph) และซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น (Simulated Distillation) Varian CP-3800 พร้อมดีเทคเตอร์แบบ FID และคอลัมน์ CP-SIL 5 CP สำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวตามจุดเดือด ตามมาตรฐาน ASTM D2887





รูปที่ 3.5 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น (Simulated Distillation Gas Chromatograph Varian CP-3800)

### 3.2 สารตั้งต้นและสารเคมี

1. ถ่านหินลิกไนต์บดละเอียดผ่านตะแกรงร่อนขนาดตามต้องการ จากการผลิตแห่งประเทศไทย อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง
2. กะลามะพร้าวบดละเอียดผ่านตะแกรงร่อนขนาดตามต้องการ จากตลาดบางแค เขตบางแค กทม.
3. เตตระไฮโดรฟูแรน 99.99% จาก Fisher Chemicals
4. เตตระลิน 95-98% จาก Acros Organics
5. คาร์บอนไดซัลไฟด์ 99% จาก Merck
6. แก๊สมาตรฐานสำหรับวิเคราะห์แก๊สผลิตภัณฑ์ จาก Supelco
7. โซเดียมซัลไฟด์ จาก Panreac Quimica
8. ไอร์รอน (III) คลอไรด์ จาก APS

### 3.3 การดำเนินการวิจัย

#### 3.3.1 การออกแบบการทดลองของการแปรปรวมของถ่านหินและกะลามะพร้าวให้เป็นของเหลว

งานวิจัยนี้ศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อกระบวนการแปรปรวมของถ่านหินและกะลามะพร้าวให้เป็นของเหลว ในตัวทำละลายที่สามารถให้ไฮโดรเจนแก่ระบบได้และมีประสิทธิภาพในการถ่ายโอนความร้อนให้แก่สารตั้งต้นได้ดี

ตัวทำละลายที่ใช้ในการทดลอง คือ เตตระลิน มีอุณหภูมิวิกฤตเท่ากับ 447.2 องศาเซลเซียส ความดันวิกฤตเท่ากับ 3.30 เมกะพาสคัล

โดยออกแบบการทดลองเป็นแบบแฟกทอเรียล โดยแต่ละตัวแปร มี 2 ระดับ และทำการทดลองครบทุกการทดลอง ตัวแปรที่ทำการศึกษามี 4 ตัวแปร คือ อุณหภูมิ เวลา ขนาดอนุภาคเฉลี่ย และ อัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว ตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษา

ตัวแปร	ระดับต่ำ(-)	ระดับสูง(+)
1. อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส), A	400	450
2. เวลา, B	30	60
3. ขนาดอนุภาคเฉลี่ย, C	0.93	1.6
4. อัตราส่วนถ่านหิน:กะลามะพร้าว, D	1:3	3:1

เนื่องจากตัวแปรที่ทำการศึกษามี 4 ตัวแปร และแต่ละตัวแปร มี 2 ระดับ จำนวนการทดลองคือ  $2^4$  การทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 3.2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.2 การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล 4 ตัวแปร

การทดลอง	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (มิลลิเมตร)	อัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว
1	400	30	0.93	1:3
2	450	30	0.93	1:3
3	400	60	0.93	1:3
4	450	60	0.93	1:3
5	400	30	1.6	1:3
6	450	30	1.6	1:3
7	400	60	1.6	1:3
8	450	60	1.6	1:3
9	400	30	0.93	3:1
10	450	30	0.93	3:1
11	400	60	0.93	3:1
12	450	60	0.93	3:1
13	400	30	1.6	3:1
14	450	30	1.6	3:1
15	400	60	1.6	3:1
16	450	60	1.6	3:1

3.3.2 ศึกษาผลของตัวแปร อุณหภูมิ เวลา ขนาดอนุภาคเฉลี่ย และอัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว ที่มีต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้

- ศึกษาผลของ อุณหภูมิ 375-475 องศาเซลเซียส

ทำการทดลองที่ภาวะ อุณหภูมิ 375-475 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.93 มิลลิเมตร อัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 1:1 ความดันเริ่มต้น 1 บรรยากาศ อัตราส่วนถ่านหินและกะลามะพร้าวต่อตัวทำละลาย 1:1 ตัวทำละลายเตตระลิโนร้อยละ 100 โดยเริ่มนับเวลาจากอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ถึงค่าที่กำหนดไว้

- ศึกษาผลของเวลา 15-75 นาที

ทำการทดลองที่ภาวะ เวลา 15-75 นาที อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.93 มิลลิเมตร อัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 1:1 ความดันเริ่มต้น 1 บรรยากาศ อัตราส่วนถ่านหินและกะลามะพร้าวต่อตัวทำละลาย 1:1 ตัวทำละลายเตตระลิน ร้อยละ 100 โดยเริ่มนับเวลาจากอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ถึงค่าที่กำหนดไว้

- ศึกษาผลของ ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.25-1.6 มิลลิเมตร

ทำการทดลองที่ภาวะ ขนาดอนุภาคเฉลี่ยในช่วง 0.25-1.6 มิลลิเมตร อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที อัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 1:1 ความดันเริ่มต้น 1 บรรยากาศ อัตราส่วนถ่านหินและกะลามะพร้าวต่อตัวทำละลาย 1:1 ตัวทำละลายเตตระลิน ร้อยละ 100 โดยเริ่มนับเวลาจากอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ถึงค่าที่กำหนดไว้

- ศึกษาผลของ อัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 0:1-1:0

ทำการทดลองที่ภาวะ อัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 0:1-1:0 อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.93 มิลลิเมตร ความดันเริ่มต้น 1 บรรยากาศ อัตราส่วนถ่านหินและกะลามะพร้าวต่อตัวทำละลาย 1:1 ตัวทำละลายเตตระลิน ร้อยละ 100 โดยเริ่มนับเวลาจากอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ถึงค่าที่กำหนดไว้

### 3.3.3 การแปรปรู่มของถ่านหินและกะลามะพร้าวให้เป็นของเหลวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ทำการทดลองคือ ไอร์ออน (III) ซัลไฟด์บนถ่านหิน (ปริมาณเหล็กร้อยละ 2.5 ต่อกรัมถ่านหิน) (บำรุงสุข, 2546) ทำการทดลองที่ภาวะ อุณหภูมิ 350-400 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.93 มิลลิเมตร อัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 1:3 ความดันเริ่มต้น 1 บรรยากาศ อัตราส่วนถ่านหินและกะลามะพร้าวต่อตัวทำละลาย 1:1 ในตัวทำละลายเตตระลิน ร้อยละ 100 โดยเริ่มนับเวลาจากอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ถึงค่าที่กำหนดไว้

ไอร์ออน (III) ซัลไฟด์ ทำการอิมเพกเนตบนถ่านหินจากปฏิกิริยา (Liu et al, 1996)



โดยมีขั้นตอนการเตรียมดังต่อไปนี้

1. ปริมาณเหล็กบนถ่านหินร้อยละ 2.5 เตรียมสารละลาย  $\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$  เข้มข้น 0.081 โมลต่อลิตร จำนวน 100 มิลลิลิตร และสารละลาย  $\text{FeCl}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$  เข้มข้น 0.054 โมลต่อลิตร จำนวน 100 มิลลิลิตร
2. ชั่งถ่านหินบดละเอียดขนาด 1 มิลลิเมตร ที่ผ่านการอบแห้งแล้ว จำนวน 60 กรัม
3. เติมสารละลาย  $\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$  ลงในบีกเกอร์ขนาด 500 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารละลาย  $\text{FeCl}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$  ลงไป เกิดเป็นของเหลว ( $\text{Fe}_2\text{S}_3 + 6\text{NaCl} + 39\text{H}_2\text{O}$ ) คนให้เข้ากัน ถ้าหนืดข้นเกินไปให้เติมน้ำเพิ่มได้ตามต้องการ
4. หยดของเหลว ลงบนถ่านหิน จนชุ่ม พักไว้จนหมาด
5. หยดต่อจนชุ่ม พักไว้จนหมาด ทำซ้ำ ๆ จนกระทั่งของเหลวหมด ทิ้งไว้ข้ามคืนจนหมาดอบถ่านหินที่เตรียมได้เป็นเวลา 1 คืนที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ทิ้งไว้ให้เย็นเก็บไว้ในเดซิکเคเตอร์สำหรับการทดลองต่อไป

### 3.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

#### 3.4.1 การเตรียมตัวอย่างถ่านหินและกะลามะพร้าวเพื่อใช้ในการวิเคราะห์สมบัติเริ่มต้นและใช้ในการทดลอง

1. ตากถ่านหินหรือกะลามะพร้าวทิ้งไว้ในที่อุณหภูมิห้องเพื่อไล่ความชื้นอิสระจนน้ำหนักคงที่
2. บดถ่านหินหรือกะลามะพร้าวให้มีขนาดเล็กด้วยเครื่องบดหยาบและบดละเอียดตามลำดับ
3. นำถ่านหินหรือกะลามะพร้าวที่บดได้มาร้อนโดยผ่านตะแกรงเบอร์ 60 จากนั้นตากถ่านหินหรือกะลามะพร้าวจนมีความชื้นสมดุลกับอากาศประมาณ 3 วัน แล้วนำไปวิเคราะห์สมบัติเริ่มต้น
4. ถ่านหินหรือกะลามะพร้าวสำหรับการทดลองจะนำมาอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่เพื่อกำจัดความชื้น เก็บไว้ในเดซิกเคเตอร์

#### 3.4.2 การวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ของถ่านหินและกะลามะพร้าวเริ่มต้น ก่อนการแปรรูปให้เป็นของเหลว

1. การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis, ASTM D 3173-3175)
2. การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis)
3. ค่าความร้อนและปริมาณกำมะถันรวม (ASTM D 2015 และ ASTM D 3177)

### 3.4.3 การแปรรูปถ่านหินและกะลามะพร้าวให้เป็นของเหลว

1. ชั่งถ่านหินและกะลามะพร้าวผสมรวมกันตามอัตราส่วนที่กำหนด จำนวน 20 กรัมลงในเครื่องปฏิกรณ์ เติมตัวทำละลาย 20 กรัม

2. ประกอบเครื่องปฏิกรณ์พร้อมกับทดสอบรอยรั่ว ไล่อากาศภายในเครื่องปฏิกรณ์ด้วยแก๊สไฮโดรเจน ให้ภายในเครื่องปฏิกรณ์มีความดันแก๊สไฮโดรเจน 1 บรรยากาศ (0 Psig) จากนั้นตั้งค่าอุณหภูมิ โดยระบบของเครื่องควบคุมอุณหภูมิมีอัตราการให้ความร้อนประมาณ 8 องศาเซลเซียสต่อนาที ตั้งค่าความเร็วรอบของใบกวน 500 รอบต่อนาที จับเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา โดยเริ่มนับเวลาตั้งแต่อุณหภูมิถึงค่าที่กำหนด

3. เมื่อครบระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ลดอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ จนเหลือ 150 องศาเซลเซียส จากนั้นยกเครื่องปฏิกรณ์ออกจากอุปกรณ์ให้ความร้อน เป่าเครื่องปฏิกรณ์ด้วยพัดลมไฟฟ้าจนอุณหภูมิลดลงถึงอุณหภูมิห้อง

4. วิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊สด้วยเครื่องมือโครมาโทกราฟี

5. นำผลิตภัณฑ์ของเหลวและกากของแข็งใส่ในขวดสีกัด ชะล้างผลิตภัณฑ์ที่เหลืออยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ด้วยเตตระไฮโดรฟูแรน ปิดฝาขวดให้สนิทเพื่อป้องกันการระเหย

6. สกัดผลิตภัณฑ์ของเหลวออกจากของแข็งด้วยเตตระไฮโดรฟูแรน ด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

7. กรองสารละลายของเหลวออกจากกากของแข็งด้วยอุปกรณ์การกรองสุญญากาศ

8. นำสารละลายของเหลวที่ได้ไประเหยเพื่อแยกตัวทำละลายออกจากผลิตภัณฑ์ของเหลวด้วยเครื่องระเหยแบบหมุน

- แยกตัวทำละลายเตตระไฮโดรฟูแรนออกที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส ความดันสุญญากาศ 400 มิลลิบาร์ เป็นเวลา 40 นาที หลังจากนั้นลดความดันลงเป็น 200 มิลลิบาร์ 1 ชั่วโมง

- แยกตัวทำละลายเตตระลินออกที่อุณหภูมิ 195 องศาเซลเซียส ความดันสุญญากาศ 400 มิลลิบาร์ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

9. ชั่งน้ำหนักของเหลวที่แยกได้ และเก็บผลิตภัณฑ์ของเหลวไว้ในขวดเพื่อรอการวิเคราะห์ต่อไป

### 3.4.4 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีที่ใช้วิเคราะห์ คือ Agilent 3000A Micro GC ซึ่งประกอบด้วย ดีเทคเตอร์แบบ TCD และคอลัมน์แบบ packed column จำนวน 3 คอลัมน์คือ Molecular sieve, Plot-Q และ OV-1 โดยข้อมูลและภาวะของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี แสดงอยู่ในส่วนของ ภาคผนวก จ

### 3.4.5 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของเหลวด้วย Simulated Distillation Gas Chromatography (SDGC)

การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของเหลวด้วยวิธีนี้จะวิเคราะห์ตามจุดเดือดของสารดังต่อไปนี้

IBP – 200 °C	= gasoline
200 °C – 250 °C	= kerosene
250 °C – 350 °C	= light gas oil
350 °C – 370 °C	= gas oil
370 °C – F	= long residue

การวิเคราะห์เริ่มด้วยการนำผลิตภัณฑ์ของเหลวไปละลายในคาร์บอนไดซัลไฟด์ ในอัตรา 1 ส่วนใน 100 ส่วน โดยปริมาตร วิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ยี่ห้อ Varian รุ่น CP-3800 พร้อมทั้งดีเทคเตอร์แบบ FID ซอฟต์แวร์ Simulated Distillation รุ่น Star Simulated Distillation Version 5.5 คอลัมน์ที่ใช้เป็น Capillary Column มี Stationary Phase คือ CP-SIL 5CB ยาว 15 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.25 มิลลิเมตร และความหนาของฟิล์ม 0.25 ไมครอน ภาวะที่ใช้ คือ

อุณหภูมิหัวฉีด (Injector Temperature) เท่ากับ 298 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิคอลัมน์ (Column Temperature or Oven Temperature) ซึ่งจะใช้เป็นแบบ โปรแกรมอุณหภูมิ (Temperature Program) 1 ขั้นตอน และมีไนโตรเจนเหลวเป็นตัวให้ความเย็น เพื่อควบคุมอุณหภูมิด้วย คือ เริ่มต้นที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0.01 นาทีจากนั้นเพิ่ม อุณหภูมิด้วยอัตราการให้ความร้อน 20 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงอุณหภูมิต่ำสุดที่ 320 องศาเซลเซียสแล้ว คงที่ เป็นเวลา 8.50 นาที

อุณหภูมิดีเทคเตอร์ (Detector Temperature) เท่ากับ 320 องศาเซลเซียส

แก๊สตัวพา (Carrier Gas) เป็นแก๊สฮีเลียมโดยมีอัตราการไหล 1.5 มิลลิลิตรต่อนาที ด้วย Split ratio เท่ากับ 2

### 3.4.6 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของเหลวด้วย GC/MS

การวิเคราะห์เริ่มด้วยการนำผลิตภัณฑ์ของเหลวไปละลายในคาร์บอนไดออกไซด์ในอัตรา 1 ส่วนใน 100 ส่วน โดยปริมาตร วิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟียี่ห้อ Shimadzu ที่อุณหภูมิเตา 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที แล้วเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตราเร็ว 20 องศาเซลเซียสต่อนาที เป็น 320 องศาเซลเซียส คงที่ไว้ 10 นาที

### 3.4.7 การวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ของถ่านหินหลังการแปรรูปให้เป็นของเหลว ได้แก่

1. การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis, ASTM D 3173-3175)
2. ค่าความร้อนและปริมาณกำมะถันรวม (ASTM D 2015 และ ASTM D 3177)

### 3.4.8 การคำนวณผลลัพธ์จากการทดลอง

$$\text{ค่าร้อยละการเปลี่ยนรวมรวม} = 100 [(W1_{daf} - W_R) / W1_{daf}]$$

(% Total conversion)

$$\text{ค่าร้อยละผลิตภัณฑ์ของเหลว (\% Liquid yield)} = 100 [W_{Liq} / W1_{daf}]$$

$$\text{ค่าร้อยละผลิตภัณฑ์ของแข็ง (\% Solid yield)} = 100 [W_R / W1_{daf}]$$

$$\text{ค่าร้อยละผลิตภัณฑ์แก๊ส (\% Gas yield)} = 100 - \% \text{Liquid yield} - \% \text{Solid yield}$$

โดย

$W1_{daf}$  = น้ำหนักรวมของถ่านหินและกะลามะพร้าวที่ปราศจากความชื้นและเถ้า

$W2_{daf}$  = น้ำหนักถ่านหินที่ปราศจากความชื้นและเถ้า

$W_R$  = น้ำหนักกากที่ปราศจากความชื้นและเถ้าหลังจากชะล้างด้วยเตตระไฮโดรฟูแรน

$W_{Liq}$  = น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ของเหลว



## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อร้อยละการเปลี่ยนรวมและร้อยละผลได้ของเหลว ในกระบวนการแปรรูปร่วมของถ่านหินและกะลามะพร้าวให้เป็นของเหลว โดยใช้ตัวทำละลาย เตตระลิน ทำการทดลองแบบแฟกทอเรียล ตัวแปรที่ทำการศึกษามี 4 ตัวแปร คือ อุณหภูมิ เวลา ขนาดอนุภาคเฉลี่ย และอัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว ซึ่งแต่ละตัวแปรที่ทำการศึกษามี 2 ระดับ คือ ระดับสูง และระดับต่ำ งานวิจัยนี้สามารถแสดงผลกระทบของตัวแปรแต่ละตัวแปรต่อ ร้อยละผลได้ของเหลว สัดส่วนผลิตภัณฑ์ของเหลวตามจุดเดือด และองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ แก๊ส

จากนั้นศึกษาอิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของเหลว ทำการวิเคราะห์ สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ของเหลวโดยแบ่งตามจุดเดือดและองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่เกิดขึ้น ระหว่างกระบวนการแปรรูป

#### 4.1 การวิเคราะห์สมบัติของสารตั้งต้น

##### สมบัติเบื้องต้นของถ่านหินและกะลามะพร้าว

ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis) แสดงในตารางที่ 4.1 โดยวิเคราะห์ ตามมาตรฐาน ASTM ดังแสดงไว้ในภาคผนวก ข

##### ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติแบบประมาณของถ่านหินและกะลามะพร้าวเริ่มต้น

การวิเคราะห์แบบประมาณ (% wt. dry basis)	ถ่านหิน	กะลามะพร้าว
สารระเหย (Volatile Matter)	59.00	76.70
คาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon)	21.00	20.20
เถ้า (Ash)	20.00	3.10

ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) ตามมาตรฐาน ASTM D5291-96 ด้วยเครื่อง CHNS/O Analyzer (Perkin Elmer PE2400 Series II) โดยทำการวิเคราะห์เฉพาะธาตุ คาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน แสดงดังตารางที่ 4.2

#### ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติถ่านหินและกะลามะพร้าวเริ่มต้นแบบแยกธาตุ

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (% wt. daf basis)	ถ่านหิน	กะลามะพร้าว
C	67.87	45.82
H	12.25	6.61
N	2.88	0.31
S (ASTM D2015-92)	4.63	0.05
O (ผลต่าง)	12.37	47.21
ค่าความร้อน (MJ/kg)	21.30	20.97

จากตารางที่ 4.1 และ 4.2 แสดงสมบัติการวิเคราะห์เบื้องต้นของถ่านหินและกะลามะพร้าว พบว่าถ่านหินมีปริมาณคาร์บอนคงตัวร้อยละ 21 ปริมาณสารระเหยร้อยละ 59 และปริมาณเถ้าร้อยละ 20 ส่วนกะลามะพร้าวมีปริมาณคาร์บอนคงตัวร้อยละ 20.2 ปริมาณสารระเหยร้อยละ 76.7 และปริมาณเถ้าร้อยละ 3.1 ซึ่งกะลามะพร้าวมีปริมาณสารระเหยสูงกว่าถ่านหินและมีเถ้าต่ำกว่าถ่านหินมาก ซึ่งจะส่งผลดีต่อการแปรรูปรวมให้เป็นของเหลว

#### 4.2 การออกแบบการทดลองการแปรรูปรวมของถ่านหินและกะลามะพร้าวให้เป็นของเหลวด้วยตัวทำละลาย

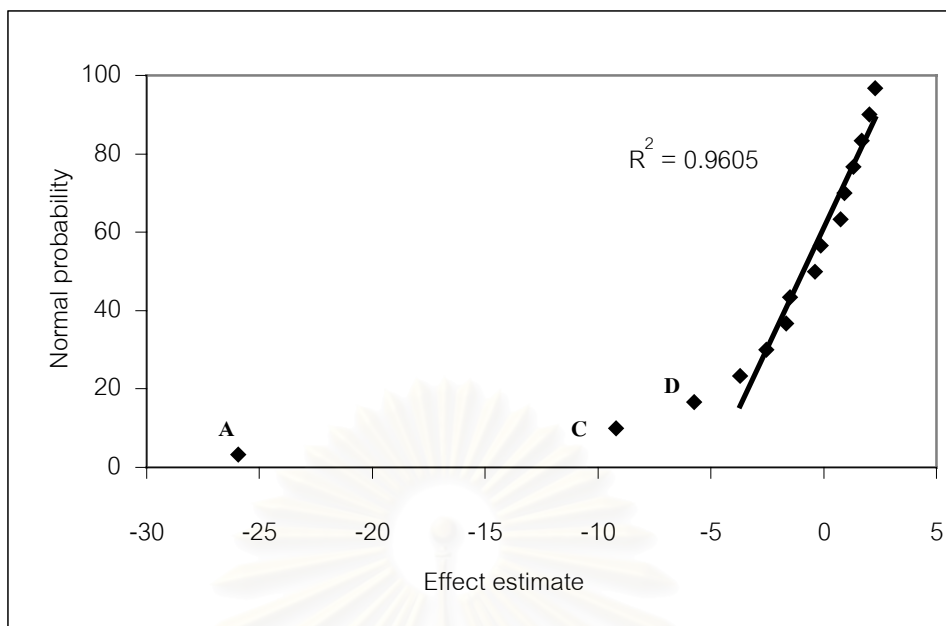
งานวิจัยนี้ศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อกระบวนการแปรรูปรวมของถ่านหินและกะลามะพร้าวให้เป็นของเหลว โดยใช้ตัวทำละลายเตตระลินซึ่งสามารถให้ไฮโดรเจนแก่ระบบได้และมีประสิทธิภาพในการถ่ายโอนความร้อนให้แก่สารตั้งต้นได้ดี

การแปรรูปรวมของถ่านหินและกะลามะพร้าวให้เป็นของเหลวนั้นได้ทำการทดลองแบบแฟกทอเรียลภายใต้บรรยากาศของแก๊สไฮโดรเจน และไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา ดังแสดงในตารางที่ 4.3 จากการทดลองพบว่าค่าผลได้ของเหลวอยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 14 - 63 ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ เวลา ขนาดอนุภาคเฉลี่ย และอัตราส่วนของถ่านหินต่อกะลามะพร้าว สำหรับการตรวจสอบอิทธิพลของตัวแปรกระบวนการแสดงดังรูปที่ 4.1 โดยนำอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ มาสร้างเป็น Normal probability plot พบว่าตัวแปรที่เบี่ยงเบนออกจากเส้นตรงมากคือ อุณหภูมิและขนาดอนุภาคเฉลี่ย ตัวแปรที่เบี่ยงเบนออกจากเส้นตรงน้อยคือ อัตราส่วนระหว่างถ่านหินต่อกะลามะพร้าว ส่วนตัวแปรที่อยู่บนเส้นตรงคือเวลา ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของเหลวคือ อุณหภูมิ ขนาดอนุภาคเฉลี่ย และอัตราส่วนของถ่านหินต่อกะลามะพร้าวตามลำดับ

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 4.4 ซึ่งแสดงถึงการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) พบเช่นเดียวกันว่าอุณหภูมิ และขนาดอนุภาคเฉลี่ย ค่า  $F_0$  ที่ได้จากการคำนวณคือ 199.16 และ 25.02 ตามลำดับ มีค่ามากกว่าค่า  $F_C$  ที่ได้จากตารางคือ 4.75 ค่อนข้างมาก สำหรับอัตราส่วนระหว่างถ่านหินต่อกะลามะพร้าวมีค่า  $F_0$  ที่ได้จากการคำนวณคือ 9.75 มีค่ามากกว่าค่า  $F_C$  ที่ได้จากตารางเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับของอุณหภูมิและขนาดอนุภาคเฉลี่ย ซึ่งเป็นการยืนยันว่า อุณหภูมิ ขนาดอนุภาคเฉลี่ย และอัตราส่วนของถ่านหินต่อกะลามะพร้าว เป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของเหลว

**ตารางที่ 4.3** ร้อยละการเปลี่ยนรวมและร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวแบบไม่รวมความชื้นและเถ้า (daf) สำหรับการแปรรูปร่วมของถ่านหินและกะลามะพร้าวให้เป็นของเหลว

ลำดับ การ ทดลอง	ตัวแปร				ร้อยละ การ เปลี่ยน รวม	ร้อยละ ผลได้ ของ เหลว
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) A	เวลา (นาที) B	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (มิลลิเมตร) C	อัตราส่วนถ่านหิน ต่อกะลามะพร้าว D		
1	400	30	0.93	1:3	87.29	62.75
2	450	30	0.93	1:3	74.96	27.21
3	400	60	0.93	1:3	83.04	49.98
4	450	60	0.93	1:3	74.53	26.38
5	400	30	1.6	1:3	87.41	51.06
6	450	30	1.6	1:3	72.43	22.7
7	400	60	1.6	1:3	86.59	45.67
8	450	60	1.6	1:3	71.62	20.19
9	400	30	0.93	3:1	75.86	52.61
10	450	30	0.93	3:1	61.50	27.31
11	400	60	0.93	3:1	74.91	48.31
12	450	60	0.93	3:1	62.50	25.22
13	400	30	1.6	3:1	79.41	38.43
14	450	30	1.6	3:1	58.66	15.67
15	400	60	1.6	3:1	75.91	37.98
16	450	60	1.6	3:1	60.12	14.47



รูปที่ 4.1 Normal Probability Plot ของร้อยละผลได้ของเหลวสำหรับการแปรปรวมของ ถ่านหินและกะลามะพร้าว

ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละผลได้ของเหลว

Source of Variation	Sum of Square	Degree of freedom	Mean Square	$F_0$	$F_c$	P - value
Temperature (A)	2694.65	1	2694.65	199.16	4.75	0.0001
Average particle size (C)	338.56	1	338.56	25.02		0.0003
coal:coconut ratio (D)	131.91	1	131.91	9.75		0.0088
Error	162.36	12	13.53			
Total	3327.47	15				

จากการออกแบบการทดลองนี้พบว่าภาวะที่ดีที่สุดสำหรับกระบวนการแปรปรวมคือ อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.93 มิลลิเมตร และอัตราส่วนระหว่างถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 1:3 ให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนรวมสูงสุดคือ 87.29 และร้อยละผลได้ของเหลวสูงสุดคือ 62.75

### 4.3 ผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแปรรูปรวมถ่านหินและกะลามะพร้าวให้เป็นของเหลว

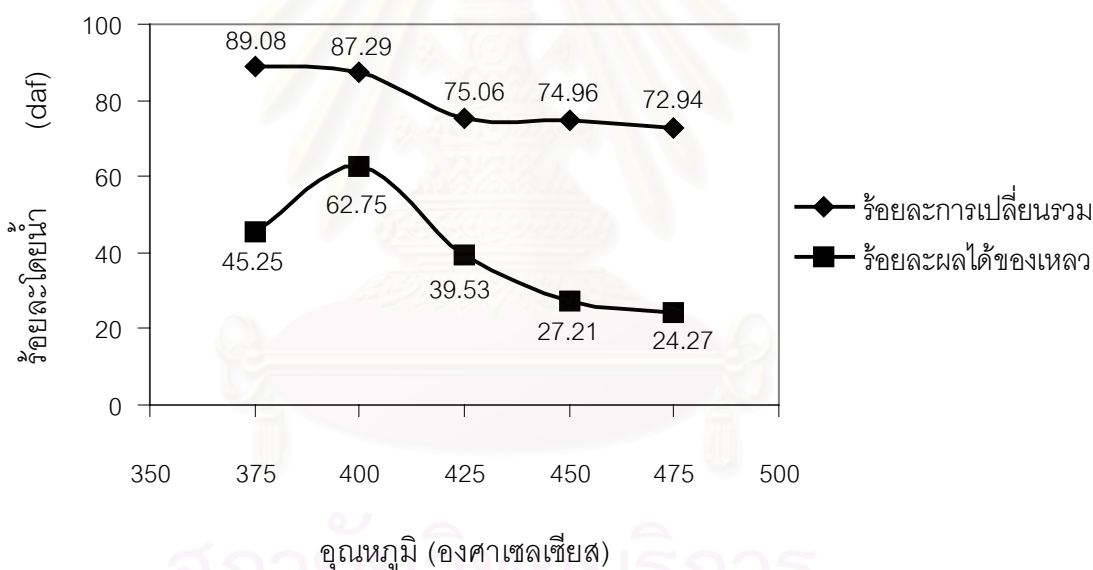
#### 4.3.1 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแปรรูปรวมถ่านหินและกะลามะพร้าวให้เป็นของเหลว

จากการออกแบบการทดลองการแปรรูปรวมถ่านหินและกะลามะพร้าวให้เป็นของเหลว พบว่าภาวะที่ให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลวมากที่สุด คือ 400 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.93 มิลลิเมตร อัตราส่วนระหว่างถ่านหินต่อกะลามะพร้าวคือ 1:3 ให้ค่าผลได้ของเหลวสูงสุดร้อยละ 62.75 และค่าการเปลี่ยนแปลงรวมร้อยละ 87.29

ดังนั้นในหัวข้อนี้ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงและร้อยละผลได้ของเหลว ที่ภาวะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.93 มิลลิเมตร อัตราส่วนระหว่างถ่านหินต่อกะลามะพร้าวคือ 1:3 อัตราส่วนของผสมถ่านหินและกะลามะพร้าวต่อตัวทำละลายเตตระลิน 1:1 ภายใต้บรรยากาศไฮโดรเจน 1 บรรยากาศ แสดงในรูปที่ 4.2 และ 4.3 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 375 องศาเซลเซียส จนถึงอุณหภูมิ 475 องศาเซลเซียส ร้อยละการเปลี่ยนแปลงลดลงจาก 89.08 เป็น 72.94 เนื่องจากถ่านหินในระบบมีความต้องการรับไฮโดรเจนเพื่อให้เกิดเสถียรภาพเป็นโมเลกุลขนาดเล็ก แต่ไฮโดรเจนในระบบไม่เพียงพอเนื่องจากทำการทดลองที่อัตราส่วนของผสมถ่านหินและกะลามะพร้าวต่อตัวทำละลายเตตระลินเท่ากับ 1:1 ดังนั้นอนุมูลอิสระที่เกิดจากการแตกตัวด้วยความร้อนของถ่านหินกลับมารวมตัวกันเองอีกครั้ง เป็นสารที่ไม่ละลายในเตตระไฮโดรฟูแรน (Repolymerization) ส่งผลให้ร้อยละการเปลี่ยนแปลงลดลง ส่วนผลได้ของเหลว เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 375 องศาเซลเซียส จนถึงอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ร้อยละผลได้ของเหลวเพิ่มขึ้นจาก 45.25 เป็น 62.75 เนื่องจากที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ถ่านหินซึ่งมีโมเลกุลขนาดใหญ่แตกตัวออกเป็นโมเลกุลขนาดเล็กมากขึ้น และทำปฏิกิริยาได้ดีกับอนุมูลอิสระของกะลามะพร้าวและโมเลกุลของไฮโดรเจนจากตัวทำละลายเตตระลิน จากนั้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 400 องศาเซลเซียส จนถึงอุณหภูมิ 475 องศาเซลเซียส ร้อยละผลได้ของเหลวลดลงจาก 62.75 เป็น 24.27 เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้การแตกตัวของของเหลวกลายเป็นอนุมูลอิสระที่มีขนาดเล็กเพิ่มมากขึ้น ซึ่งอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจะถูกเติมไฮโดรเจนทำให้มีเสถียรภาพเกิดเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ผลได้ของเหลวลดลง

สำหรับผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากกระบวนการแปรรูปรวมของถ่านหินกับกะลามะพร้าวได้นำมาวิเคราะห์การแจกแจงของสัดส่วนผลิตภัณฑ์ของเหลวตามจุดเดือด ซึ่งแบ่งเป็น แนฟทาเคโรซีน แก๊สออยล์เบา แก๊สออยล์ และกากน้ำมันหนัก เมื่อพิจารณาผลิตภัณฑ์โดยรวมได้แก๊สของแข็ง ของเหลว และแก๊ส โดยแจกแจงผลิตภัณฑ์ของเหลวดังกล่าวข้างต้นดังแสดงรูปที่ 4.4 พบว่าที่

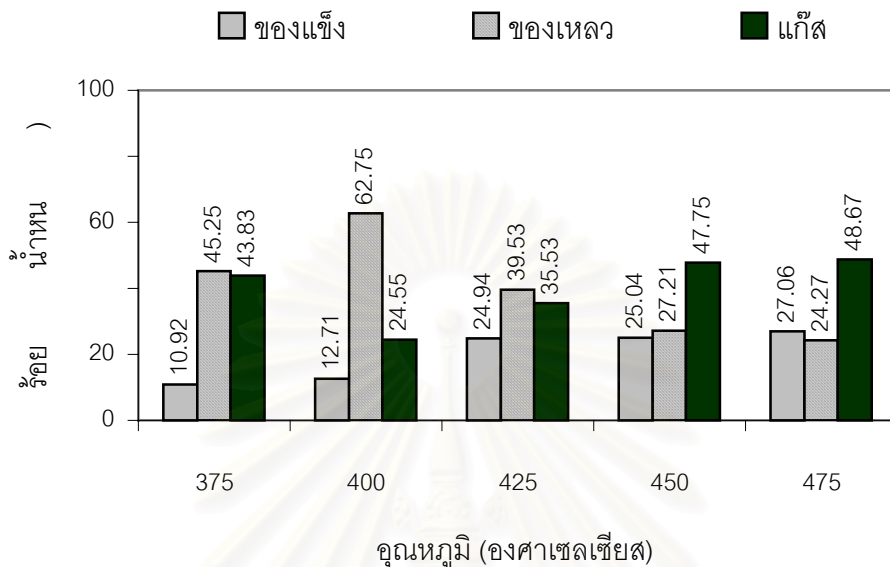
400 องศาเซลเซียส ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นเคโรซีนสูงสุดถึงร้อยละ 53.8 ของถ่านหินและกะลามะพร้าว แต่ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 400 องศาเซลเซียส เกิดของแข็งและแก๊สมากขึ้นทำให้เคโรซีนลดลงตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น ในขณะที่ 375 องศาเซลเซียสเกิดของแข็งน้อยที่สุด แต่เกิดแก๊สมากถึงร้อยละ 43.8 จึงได้ผลิตภัณฑ์เคโรซีนต่ำกว่าที่ 400 องศาเซลเซียส แต่ถ้าพิจารณาเฉพาะผลิตภัณฑ์ของเหลว แสดงการแจกแจงผลิตภัณฑ์ของเหลวในรูปที่ 4.5 จะเห็นว่าผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้มีผลรวมของผลิตภัณฑ์น้ำมันหนักสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวจะตรงข้ามกับการแตกตัวของถ่านหินอย่างเดียว และการแตกตัวของถ่านหินผสมของเสียอื่นๆ เช่น พลาสติก จารบีใช้แล้ว น้ำมันพืชใช้แล้ว เป็นต้น (บำรุงสุข, 2546 ; เอกสิทธิ์, 2546 ; นิรมล, 2547) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากที่อุณหภูมิสูงขึ้นโมเลกุลขนาดใหญ่ทุกชนิดแตกตัวเป็นขนาดเล็ก เช่นเดียวกับการทดลองอื่นๆ แต่มีการกลับไปปรวมตัวกลายเป็นของแข็ง (Repolymerization) มากขึ้น ทำให้แทนที่จะได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่มีโมเลกุลขนาดเล็กลง กลับกลายเป็นผลิตภัณฑ์ของแข็งส่วนหนึ่ง และแก๊สอีกส่วนหนึ่ง



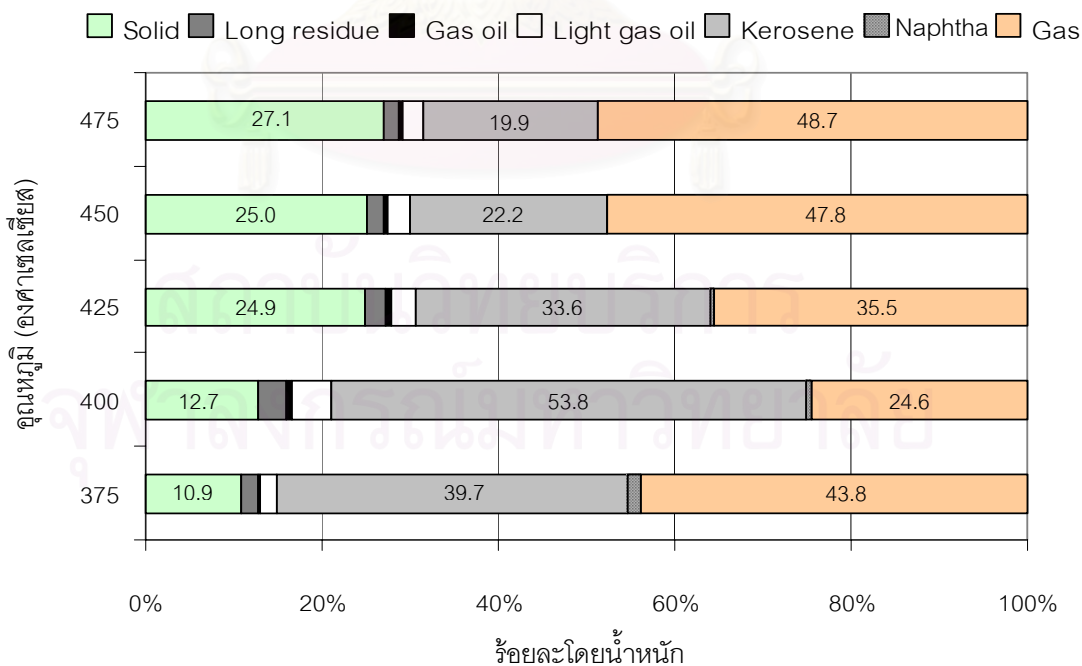
**รูปที่ 4.2** ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละการเปลี่ยนรวม และร้อยละผลได้ของเหลว ที่เวลา 30 นาที ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.93 มิลลิเมตร อัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 1:3

สำหรับของแข็งส่วนที่เหลือหลังจากการแปรรูปรวมของถ่านหินกับกะลามะพร้าวให้เป็นของเหลว ได้นำมาทำการวิเคราะห์สมบัติแบบประมาณและค่าความร้อน เพื่อหาร้อยละการเพิ่มของค่าความร้อน ดังแสดงในตารางที่ 4.5 และ 4.6 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าความร้อนและร้อยละการเพิ่มของค่าความร้อนเพิ่มขึ้นด้วย เพราะที่อุณหภูมิสูงส่วนที่เป็นสารระเหยถูกสลายออกมาจากถ่านหินด้วยความร้อนมากขึ้น โครงสร้างของถ่านหินถูกสลายด้วยความร้อนออกมาเพิ่มขึ้น

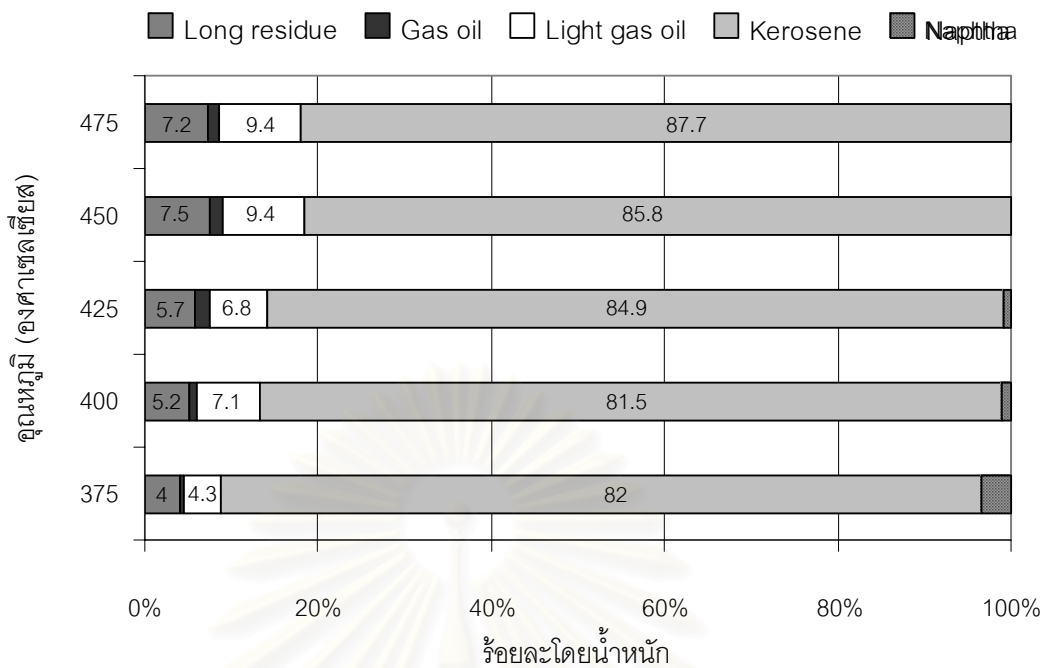
กลายเป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็ก ทำให้ภายในโครงสร้างถ่านหิน เหลือส่วนที่เป็นคาร์บอนคงตัวมากขึ้น ส่วนปริมาณร้อยละกำมะถันรวมลดลงเนื่องจากกำมะถันที่อยู่ในโครงสร้างของถ่านหินเกิดการสลายตัวเป็นแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์



รูปที่ 4.3 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของแข็ง ร้อยละผลได้ของเหลว และร้อยละผลได้แก๊ส ที่เวลา 30 นาที ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.93 มิลลิเมตร อัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 1:3



รูปที่ 4.4 ผลของอุณหภูมิต่อการแจกแจงของสัดส่วนผลิตภัณฑ์ ที่เวลา 30 นาที ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.93 มิลลิเมตร และอัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 1:3



**รูปที่ 4.5** ผลของอนุหภูมิต่อการแจกแจงของสัดส่วนผลิตภัณฑ์ของเหลว ที่เวลา 30 นาที ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.93 มิลลิเมตร และอัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 1:3

**ตารางที่ 4.5** ผลของอนุหภูมิต่อสมบัติแบบประมาณของของแข็งส่วนที่เหลือ ที่เวลา 30 นาที ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.93 มิลลิเมตร อัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 1:3

สมบัติแบบประมาณ (%dry basis)	อนุหภูมิ (องศาเซลเซียส)				
	375	400	425	450	475
สารระเหย	17.31	16.18	14.89	12.83	12.27
คาร์บอนคงตัว	62.75	62.96	62.77	63.73	63.86
เถ้า	19.94	20.86	22.34	23.44	23.87
ร้อยละกำมะถันรวม	2.79	2.04	1.84	1.78	1.71
ร้อยละการเปลี่ยนแปลงรวม	89.08	87.29	75.06	74.96	72.94



**ตารางที่ 4.6** ผลของอุณหภูมิต่อค่าความร้อนและร้อยละการเพิ่มของค่าความร้อนของของแข็ง ส่วนที่เหลือ ที่เวลา 30 นาที ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.93 มิลลิเมตร อัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 1:3

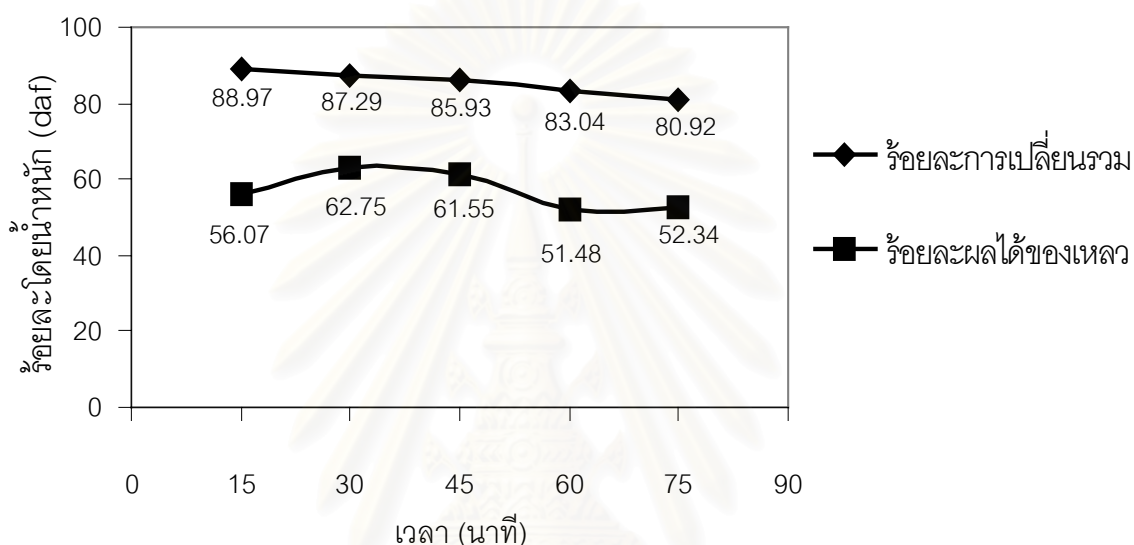
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าความร้อน (dry basis) (MJ/kg)	ค่าความร้อน (daf) (MJ/kg)	ร้อยละการเพิ่มค่า ความร้อน (daf)
375	22.8	28.5	25.7
400	25.2	31.8	40.2
425	29.1	37.5	65.2
450	29.2	38.2	68.1
475	29.4	38.7	70.4

#### 4.3.2 ผลของเวลาที่มีต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแปรรูปร่วมถ่านหินและกะลามะพร้าวให้เป็นของเหลว

จากการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล เพื่อศึกษาผลของตัวแปรกระบวนการต่อร้อยละผลได้ของเหลวสำหรับการแปรรูปร่วมของถ่านหินและกะลามะพร้าวให้เป็นของเหลว ในหัวข้อ 4.2 พบว่าเวลาไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงร้อยละผลได้ของเหลวอย่างมีนัยสำคัญ การตรวจสอบอิทธิพลของเวลาต่อร้อยละการเปลี่ยนรวมและร้อยละผลได้ของเหลวได้ทำการทดลองที่ภาวะ อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.93 มิลลิเมตร อัตราส่วนระหว่างถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 1:3 แสดงดังรูปที่ 4.6 และ 4.7

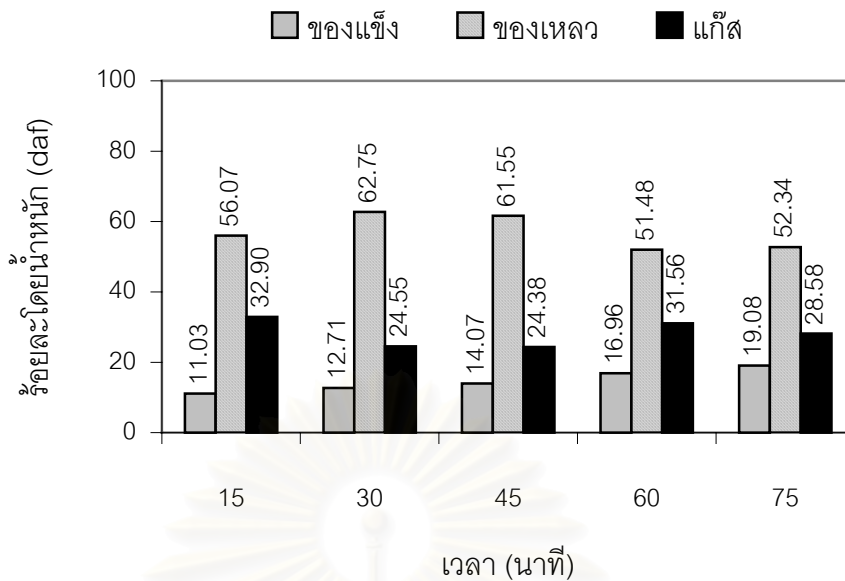
จากการทดลอง เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจาก 15 นาที เป็น 75 นาที พบว่าร้อยละการเปลี่ยนรวมลดลงจาก 88.97 เป็น 80.92 เนื่องจากเวลาที่มากขึ้นจะทำให้ถ่านหินเกิดการรวมตัวเป็นถ่านโค้กมากขึ้นทำให้ร้อยละการเปลี่ยนรวมลดลง ส่วนผลได้ของเหลวเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจาก 15 นาที เป็น 30 นาทีร้อยละผลได้ของเหลวเพิ่มขึ้นจาก 56.07 เป็น 62.75 จากนั้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจาก 30 นาที เป็น 60 นาที ร้อยละผลได้ของเหลวลดลงจาก 62.75 เป็น 51.48 และเมื่อเพิ่มเวลาต่อไปเป็น 75 นาที ร้อยละผลได้ของเหลวมีค่าคงที่ แสดงให้เห็นว่าถ่านหินและกะลามะพร้าวมีการแตกตัวเป็นของเหลวได้ดีที่เวลา 30 นาที แต่เมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ผลิตภัณฑ์ของเหลวเปลี่ยนไปเป็นแก๊สและของแข็งมากขึ้น ร้อยละผลได้ของเหลวจึงมีค่าลดลง

เมื่อพิจารณาผลิตภัณฑ์โดยรวมในรูปที่ 4.8 พบว่าได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นเคโรซีนถึงร้อยละ 54 ถ้าเวลามากขึ้นปริมาณของแข็งและแก๊สมากขึ้นทำให้ปริมาณเคโรซีนน้อยลง แสดงว่าเวลาที่ใช้มากขึ้นก่อให้เกิดการแตกตัวของผลิตภัณฑ์ต่อเนื่องกันไป และมีผลิตภัณฑ์บางส่วนกลับมารวมตัวกลายเป็นของแข็งเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับกรณีที่คุณหมุมสูงขึ้น ถ้าพิจารณาเฉพาะผลิตภัณฑ์ของเหลว ดังรูปที่ 4.9 พบว่าที่เวลามากขึ้นผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้เป็นน้ำมันที่มีโมเลกุลขนาดเล็กเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับการทดลองสำหรับวัตถุดิบอื่นๆ

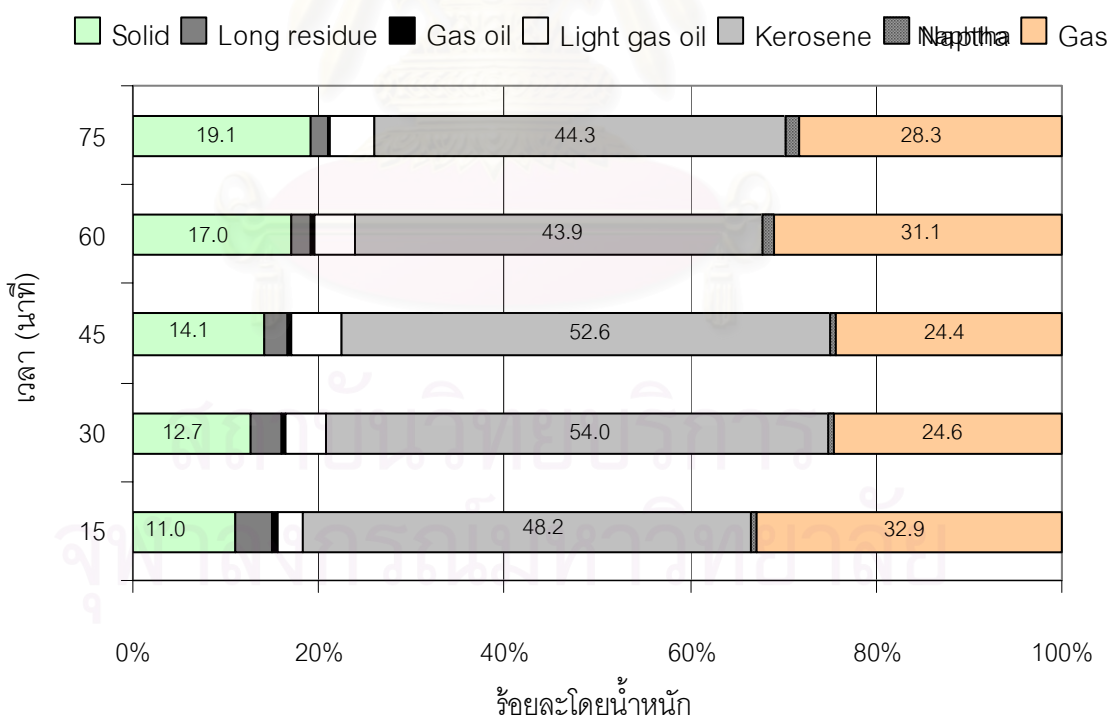


**รูปที่ 4.6** ผลของเวลาต่อร้อยละการเปลี่ยนรวม และร้อยละผลได้ของเหลว ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.93 มิลลิเมตร อัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 1:3

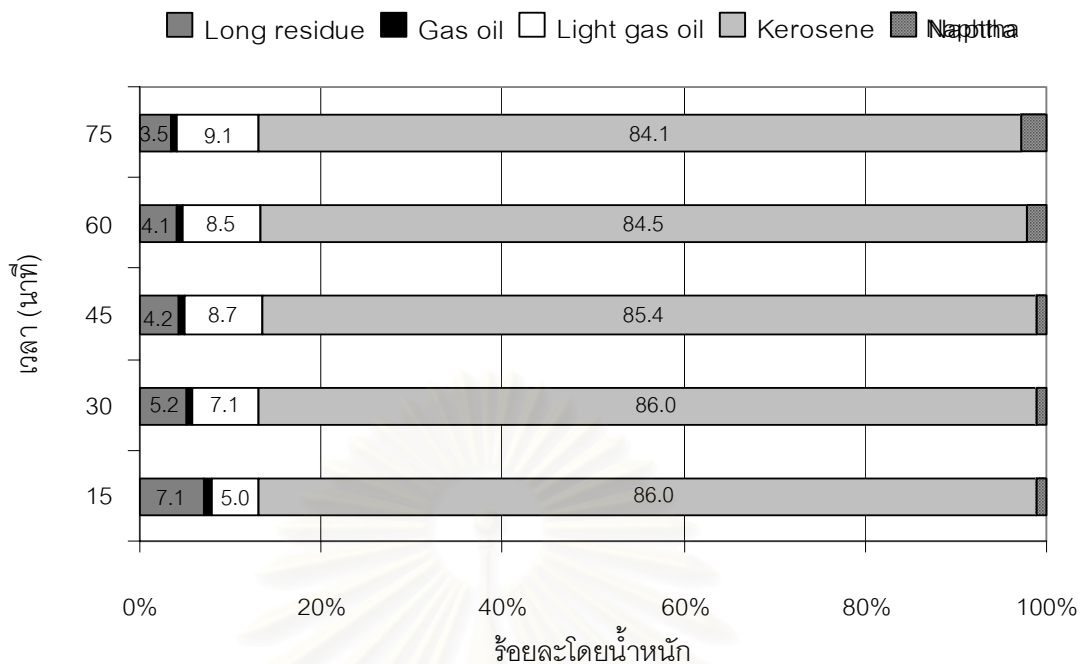
สำหรับของแข็งส่วนที่เหลือหลังจากการแปรรูปร่วมของถ่านหินกับกะลามะพร้าวให้เป็นของเหลว ได้นำมาทำการวิเคราะห์สมบัติแบบประมาณและค่าความร้อน เพื่อหาร้อยละการเพิ่มของค่าความร้อน ดังแสดงในตารางที่ 4.7 และ 4.8 พบว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นค่าความร้อนและร้อยละการเพิ่มของค่าความร้อนเพิ่มขึ้นด้วย เพราะเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นส่วนที่เป็นสารระเหยถูกสลายออกมาจากถ่านหินด้วยความร้อนมากขึ้น โครงสร้างของถ่านหินถูกสลายด้วยความร้อนออกมามากขึ้น กลายเป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็ก ทำให้ภายในโครงสร้างถ่านหิน เหลือส่วนที่เป็นคาร์บอนคงตัวมากขึ้น ส่วนปริมาณร้อยละกำมะถันรวมลดลงเนื่องจากกำมะถันที่อยู่ในโครงสร้างของถ่านหินเกิดการสลายตัวเป็นแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์



รูปที่ 4.7 ผลของเวลาต่อร้อยละผลได้ของแข็ง ร้อยผลได้ของเหลว และร้อยละผลได้แก๊ส ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.93 มิลลิเมตร อัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 1:3



รูปที่ 4.8 ผลของเวลาต่อการแจกแจงของสัดส่วนผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.93 มิลลิเมตร และอัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 1:3



**รูปที่ 4.9** ผลของเวลาต่อการแจกแจงของสัดส่วนผลิตภัณฑ์ของเหลว ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.93 มิลลิเมตร และอัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 1:3

**ตารางที่ 4.7** ผลของเวลาต่อสมบัติแบบประมาณของของแข็งส่วนที่เหลือ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.93 มิลลิเมตร อัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 1:3

สมบัติแบบประมาณ (%dry basis)	เวลา (นาที)				
	15	30	45	60	75
สารระเหย	22.78	22.18	21.54	21.12	20.01
คาร์บอนคงตัว	55.38	55.91	55.86	56.00	56.87
เถ้า	21.84	21.91	22.60	22.88	23.12
ร้อยละกำมะถันรวม	2.60	2.04	2.01	1.93	1.89
ร้อยละการเปลี่ยนรวม	88.97	87.29	85.93	83.04	80.92

**ตารางที่ 4.8** ผลของเวลาต่อค่าความร้อนและร้อยละการเพิ่มของค่าความร้อนของของแข็งส่วนที่เหลือ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.93 มิลลิเมตร อัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 1:3

เวลา (นาทีก)	ค่าความร้อน (dry basis) (MJ/kg)	ค่าความร้อน (daf) (MJ/kg)	ร้อยละการเพิ่มค่า ความร้อน (daf)
15	24.9	31.8	40.2
30	25.2	32.2	42.0
45	26.4	34.2	50.5
60	27.2	35.2	55.2
75	27.6	35.9	58.0

#### 4.3.3 ผลของขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่มีต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแปรรูปวุ้นถ่านหินและกะลามะพร้าวให้เป็นของเหลว

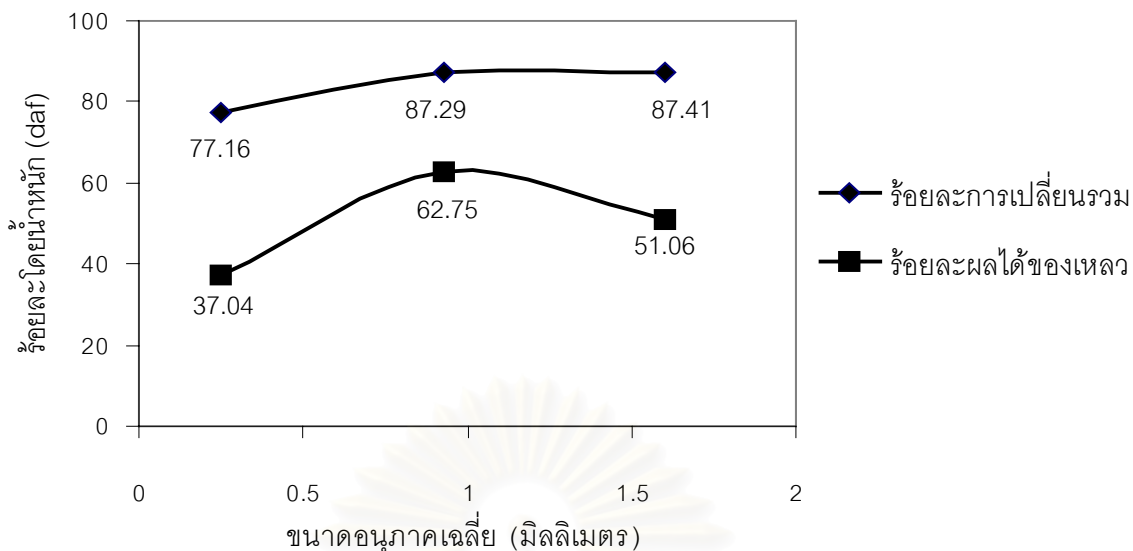
จากการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล ในหัวข้อ 4.2 พบว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยมีผลต่อการเปลี่ยนร้อยละผลได้ของเหลวอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงศึกษาผลของขนาดอนุภาคเฉลี่ยต่อร้อยละการเปลี่ยนรวมและร้อยละผลได้ของเหลวโดยทำการทดลองที่ภาวะอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที อัตราส่วนระหว่างถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 1:3 โดยปกติแล้วอนุภาคขนาดเล็กจะให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนรวมมากกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสัมผัสภายนอกที่ใช้ในการทำปฏิกิริยามาก เมื่อทำการทดลองโดยให้อัตราส่วนของสารตั้งต้นน้อยกว่าตัวทำละลาย โดยการเติมตัวทำละลายซึ่งมีสมบัติในการให้ไฮโดรเจนอะตอม สามารถทำให้ถ่านหินแตกตัวเป็นของเหลวได้มากขึ้น แต่จากการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.10 และ 4.11 เมื่อทำการทดลองที่อัตราส่วนของผสมถ่านหินและกะลามะพร้าวต่อตัวทำละลายเตตระลินเท่ากับ 1:1 พบว่าเมื่อขนาดอนุภาคเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก 0.25 เป็น 0.93 มิลลิเมตร ค่าร้อยละการเปลี่ยนรวมเพิ่มขึ้นจาก 77.16 เป็น 87.29 จากนั้นเมื่อขนาดอนุภาคเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก 0.93 เป็น 1.6 มิลลิเมตร ร้อยละการเปลี่ยนรวมมีค่าค่อนข้างคงที่ ส่วนผลได้ของเหลวมีการเพิ่มขึ้นและลดลงตามขนาดของอนุภาคเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้นโดยเมื่อขนาดอนุภาคเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก 0.25 เป็น 0.93 มิลลิเมตร ร้อยละผลได้ของเหลวเพิ่มขึ้นจาก 37.04 เป็น 62.75 เนื่องจากเมื่อขนาดอนุภาคเฉลี่ยมีขนาดเล็ก 0.25 มิลลิเมตร ทำให้เกิดการดูดซับตัวทำละลายไว้รอบอนุภาคของแข็งอย่างมาก สังเกตได้ว่าไม่มีตัวทำละลายเหลือพอที่จะทำให้ของแข็งเปียกชุ่มเหมือนการทดลองสำหรับขนาดอนุภาคเฉลี่ยใหญ่ขึ้นเป็นผลให้การถ่ายโอนความร้อนน้อยลง ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จึงมีค่าน้อยกว่าที่ขนาด

อนุภาคเฉลี่ย 0.93 มิลลิเมตร จากนั้นเมื่อขนาดอนุภาคเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก 0.93 เป็น 1.6 มิลลิเมตร ร้อยละผลได้ของเหลวลดลงจาก 62.75 เป็น 51.06 เนื่องจากที่ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1.6 มิลลิเมตร มีขนาดใหญ่เกินไป พื้นผิวสัมผัสน้อย ทำให้ตัวทำละลายไม่สามารถแทรกเข้าไปแตกพันธะของโมเลกุลภายในถ่านหินและกะลามะพร้าวได้ดีเมื่อเทียบกับที่ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.93 มิลลิเมตร ส่งผลให้ร้อยละผลได้ของเหลวลดลง

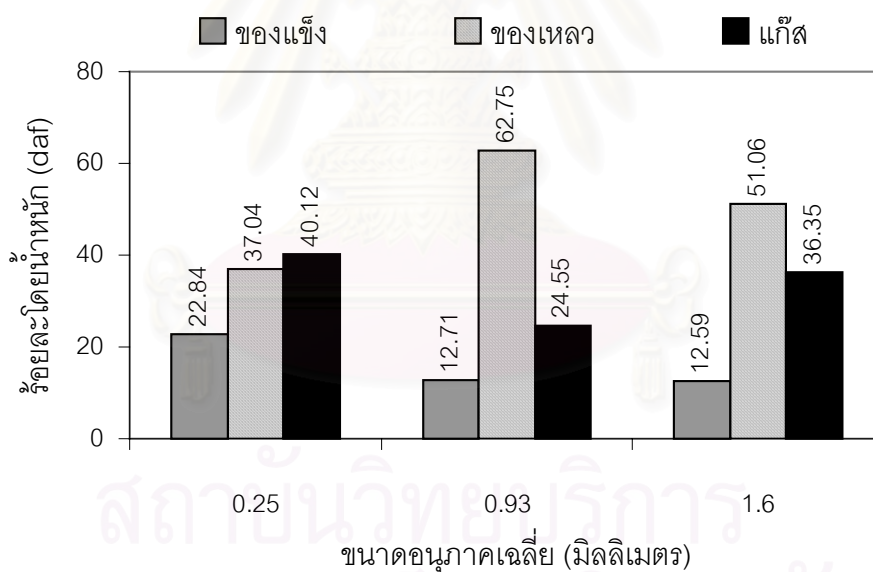
เมื่อพิจารณาผลิตภัณฑ์โดยรวมในรูปที่ 4.12 พบว่าที่ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.93 มิลลิเมตร ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นเคโรซีนสูงสุดถึงร้อยละ 53.8 แต่ถ้าขนาดอนุภาคเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเป็น 1.6 มิลลิเมตร เกิดแก๊สมากขึ้นทำให้เคโรซีนลดลง ในขณะที่ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.25 มิลลิเมตร เกิดของแข็งและแก๊สมากที่สุด จึงให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นเคโรซีนต่ำกว่าที่ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.93 มิลลิเมตร แต่ถ้าพิจารณาเฉพาะการแจกแจงผลิตภัณฑ์ของเหลวในรูปที่ 4.13 พบว่าเมื่อขนาดอนุภาคเฉลี่ยใหญ่ขึ้นผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้เป็นน้ำมันที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่มากขึ้น แสดงว่าตัวทำละลายสามารถแทรกเข้าไปแตกพันธะของอนุภาคขนาดเล็กได้ดีกว่าอนุภาคขนาดใหญ่

ของแข็งส่วนที่เหลือหลังจากการแปรรูปรวมของถ่านหินกับกะลามะพร้าวให้เป็นของเหลวได้นำมาทำการวิเคราะห์สมบัติแบบประมาณและค่าความร้อน เพื่อหาร้อยละการเพิ่มของค่าความร้อน ดังแสดงในตารางที่ 4.9 และ 4.10 พบว่าเมื่อขนาดอนุภาคเฉลี่ยใหญ่ขึ้นค่าความร้อนและร้อยละการเพิ่มของค่าความร้อนลดลง เพราะอนุภาคขนาดใหญ่ทำให้ตัวทำละลายแทรกเข้าไปแตกโครงสร้างภายในได้ยากกว่าอนุภาคขนาดเล็ก ทำให้ภายในโครงสร้างถ่านหินและกะลามะพร้าว เหลือส่วนที่เป็นคาร์บอนคงตัวน้อยลง เพราะยังมีปริมาณสารระเหยอยู่มาก ส่วนปริมาณร้อยละกำมะถันรวมสูงขึ้น เนื่องจากอนุภาคขนาดใหญ่จะมีพื้นที่ผิวสัมผัสน้อย ทำให้กำมะถันที่อยู่ในโครงสร้างของถ่านหินเกิดการสลายตัวเป็นแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้น้อยลง แต่มีปริมาณกำมะถันรวมน้อยกว่าถ่านหินผสมกะลามะพร้าวก่อนการทดลอง

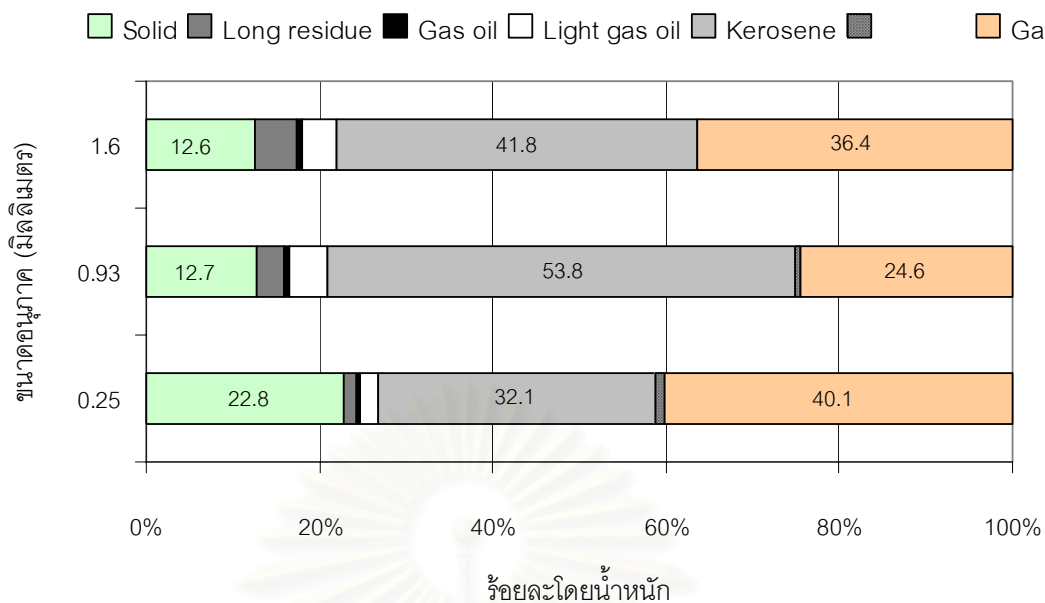
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



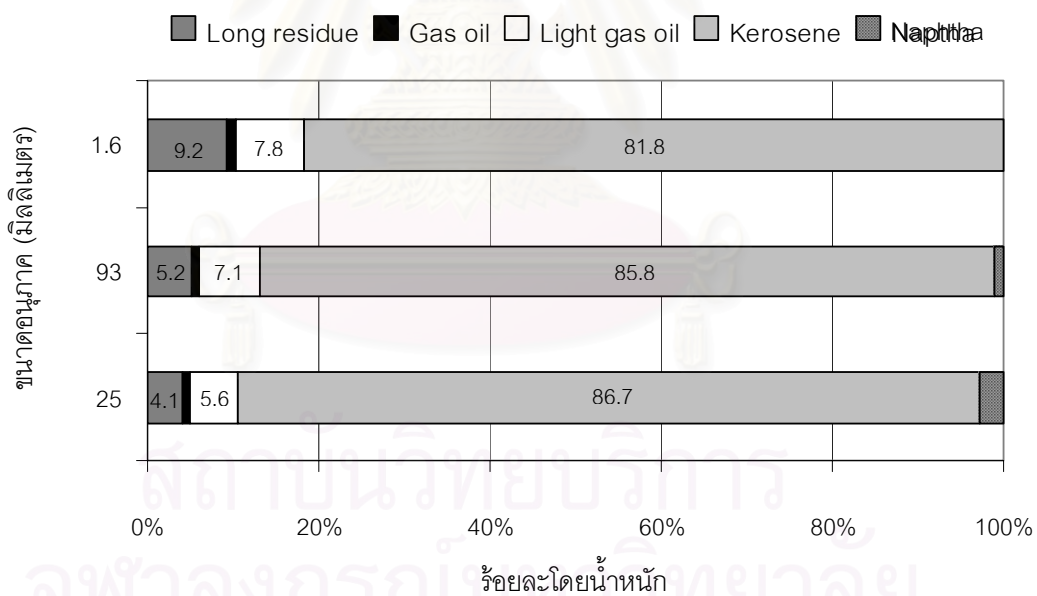
รูปที่ 4.10 ผลของขนาดอนุภาคเฉลี่ยต่อร้อยละการเปลี่ยนรวม และร้อยละผลได้ของเปลือก ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที อัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 1:3



รูปที่ 4.11 ผลของขนาดอนุภาคเฉลี่ยต่อร้อยละผลได้ของแข็ง ร้อยละผลได้ของเหลว และร้อยละผลได้แก๊ส ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที อัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 1:3



รูปที่ 4.12 ผลของขนาดอนุภาคเฉลี่ยต่อการแจกแจงของสัดส่วนผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที และอัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 1:3



รูปที่ 4.13 ผลของขนาดอนุภาคเฉลี่ยต่อการแจกแจงของสัดส่วนผลิตภัณฑ์ของเหลว ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที และอัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 1:3



**ตารางที่ 4.9** ผลของขนาดอนุภาคเฉลี่ยต่อสมบัติแบบประมาณของของแข็งส่วนที่เหลือ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที อัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 1:3

สมบัติแบบประมาณ (%dry basis)	ถ่านหิน ก่อนการ แปรรูป	กะลามะพร้าว ก่อนการ แปรรูป	ถ่านหินผสม กะลามะพร้าว ที่อัตราส่วน 1:3	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (มิลลิเมตร)		
				0.25	0.93	1.6
สารระเหย	59.00	76.70	72.28	20.71	22.18	23.59
คาร์บอนคงตัว	21.00	20.20	20.40	56.11	54.38	53.87
เถ้า	20.00	3.10	7.33	23.18	23.44	22.54
ร้อยละกำมะถันรวม (น้ำหนักกำมะถัน, กรัม)	4.63 (0.93)	0.05 (0.01)	1.20 (0.24)	1.71 (0.07)	2.04 (0.05)	3.36 (0.08)
ร้อยละการเปลี่ยนแปลงรวม				77.16	87.29	87.41

**ตารางที่ 4.10** ผลของขนาดอนุภาคเฉลี่ยต่อค่าความร้อนและร้อยละการเพิ่มของค่าความร้อนของของแข็งส่วนที่เหลือ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที อัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 1:3

ขนาดอนุภาค เฉลี่ย (มิลลิเมตร)	ค่าความร้อน (dry basis) (MJ/kg)	ค่าความร้อน (daf) (MJ/kg)	ร้อยละการเพิ่มค่า ความร้อน (daf)
0.25	26.4	34.3	51.2
0.93	25.2	32.9	44.9
1.60	23.8	30.8	35.5

**4.3.4** ผลของอัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว ต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงรวมและร้อยละผลได้ของเหลวของการแปรรูปรวมถ่านหินและกะลามะพร้าว

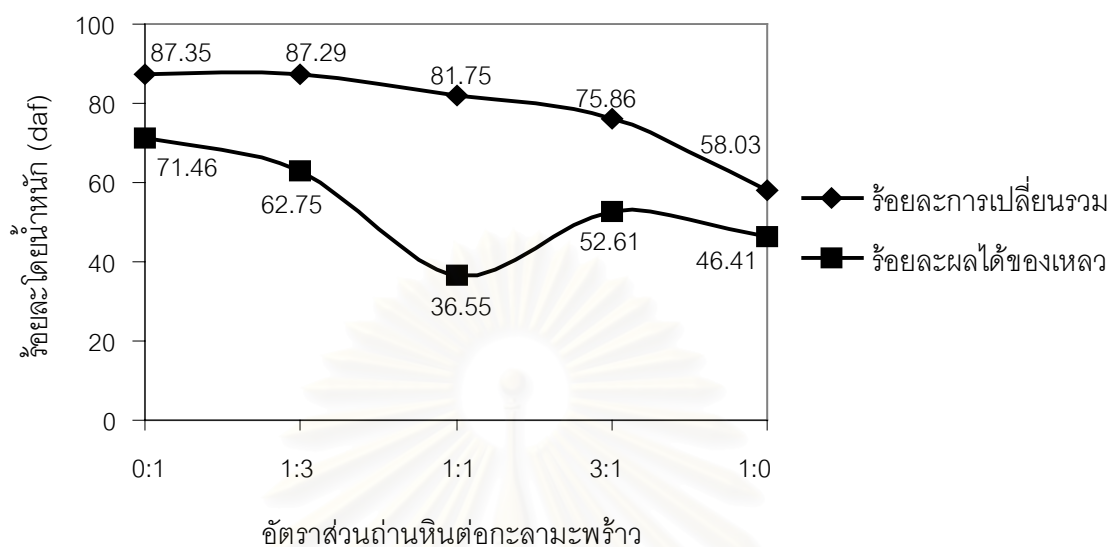
จากการศึกษาในหัวข้อ 4.2 พบว่าอัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าวมีผลต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงรวมและร้อยละผลได้ของเหลวอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นในหัวข้อนี้ศึกษาผลของอัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าวต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงรวมและร้อยละผลได้ของเหลว ได้ทำการทดลองที่ภาวะอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.93 มิลลิเมตร

แสดงดังรูปที่ 4.14 และ 4.15 จากการทดลอง เมื่อเพิ่มปริมาณกะลามะพร้าวจาก ร้อยละ 0 (1:0) เป็นร้อยละ 100 (0:1) ร้อยละการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจาก 58.03 เป็น 87.35 ในขณะที่ร้อยละผลได้ของเหลวเพิ่มขึ้นจาก 46.41 เป็น 71.46 แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มปริมาณกะลามะพร้าวในกระบวนการแปรรูปร่วมกับถ่านหินให้เป็นของเหลวจะช่วยเพิ่มร้อยละการเปลี่ยนแปลง ซึ่งเกิดผลการส่งเสริมกันแบบทวีคูณ (synergism effect) ทุกอัตราส่วนของของผสม ดังแสดงในภาคผนวก ข และช่วยเพิ่มร้อยละผลได้ของเหลว เนื่องจากกะลามะพร้าวเป็นชีวมวลที่มีโครงสร้างเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ไม่ซับซ้อนสามารถแตกตัวเป็นอนุภาคอิสระได้ง่าย มีการถ่ายโอนความร้อนที่ดี นอกจากนี้ในกะลามะพร้าวมีปริมาณสารระเหยอยู่มาก เมื่อได้รับความร้อน สารระเหยจะรวมตัวกับตัวทำละลายเตตระลินแล้วแทรกเข้าไปภายในโมเลกุลของถ่านหินเพื่อช่วยแตกพันธะของโมเลกุลถ่านหินให้มีขนาดโมเลกุลเล็กลง ส่งผลให้ร้อยละการเปลี่ยนแปลง และร้อยละผลได้ของเหลวเพิ่มขึ้น สำหรับที่อัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 1:1 ให้ร้อยละผลได้ของเหลวน้อยกว่าที่อัตราส่วนอื่น เนื่องจากเป็นอัตราส่วนที่ไม่เหมาะสมสำหรับการแปรรูปรวมให้เป็นของเหลว โดยผลิตภัณฑ์ของเหลวมีการแตกตัวเป็นแก๊สมากขึ้น ซึ่งได้ผลการทดลองสอดคล้องกับกรณีที่ทำกรทดลองที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.93 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.16 และ 4.17

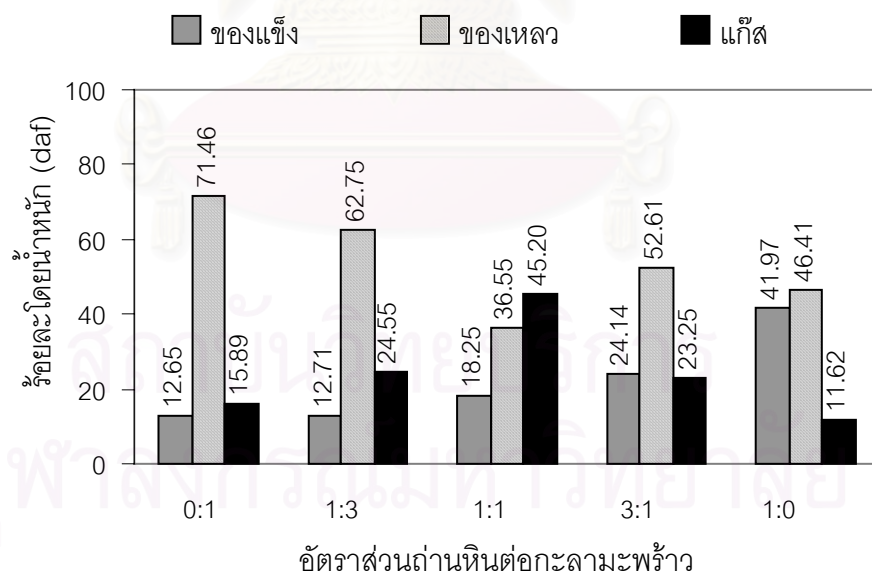
เมื่อพิจารณาผลิตภัณฑ์โดยรวมได้แก่ของแข็ง ของเหลว และแก๊ส ดังแสดงรูปที่ 4.18 พบว่าที่อัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าวเท่ากับ 0:1 ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นเคโรซีนสูงสุดถึงร้อยละ 61.3 เมื่อเพิ่มกะลามะพร้าวในสารตั้งต้นทำให้เคโรซีนเพิ่มขึ้น ยกเว้นที่อัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าวเท่ากับ 1:1 เกิดแก๊สมากถึงร้อยละ 45.2 จึงได้ผลิตภัณฑ์เคโรซีนต่ำที่สุด แต่ถ้าพิจารณาเฉพาะผลิตภัณฑ์ของเหลว แสดงการแจกแจงผลิตภัณฑ์ของเหลวในรูปที่ 4.19 จะเห็นว่าผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้มีผลรวมของผลิตภัณฑ์น้ำมันหนักลดลง เมื่อปริมาณกะลามะพร้าวมากขึ้น ยกเว้นที่อัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 1:1 เช่นเดียวกัน ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่มีผลรวมของผลิตภัณฑ์น้ำมันหนักมากที่สุด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากที่อัตราส่วนนี้เกิดการแตกตัวของผลิตภัณฑ์ของเหลวต่อเนื่องกันไปกลายเป็นแก๊สเพิ่มมากขึ้น

ของแข็งส่วนที่เหลือหลังจากการแปรรูปรวมของถ่านหินกับกะลามะพร้าวให้เป็นของเหลวได้นำมาทำการวิเคราะห์สมบัติแบบประมาณและค่าความร้อน เพื่อหาร้อยละการเพิ่มของค่าความร้อน ดังแสดงในตารางที่ 4.11 และ 4.12 พบว่าเมื่อปริมาณถ่านหินเพิ่มมากขึ้นค่าความร้อนและร้อยละการเพิ่มของค่าความร้อนลดลง เพราะถ่านหินมีปริมาณเถ้ามากกว่ากะลามะพร้าวเป็นจำนวนมาก ดังนั้นหลังจากการแปรรูปรวมให้เป็นของเหลวแล้วของแข็งส่วนที่เหลือยังมีปริมาณเถ้าอยู่มากจึงเหลือส่วนที่เป็นคาร์บอนคงตัวน้อยลง ส่วนปริมาณร้อยละ

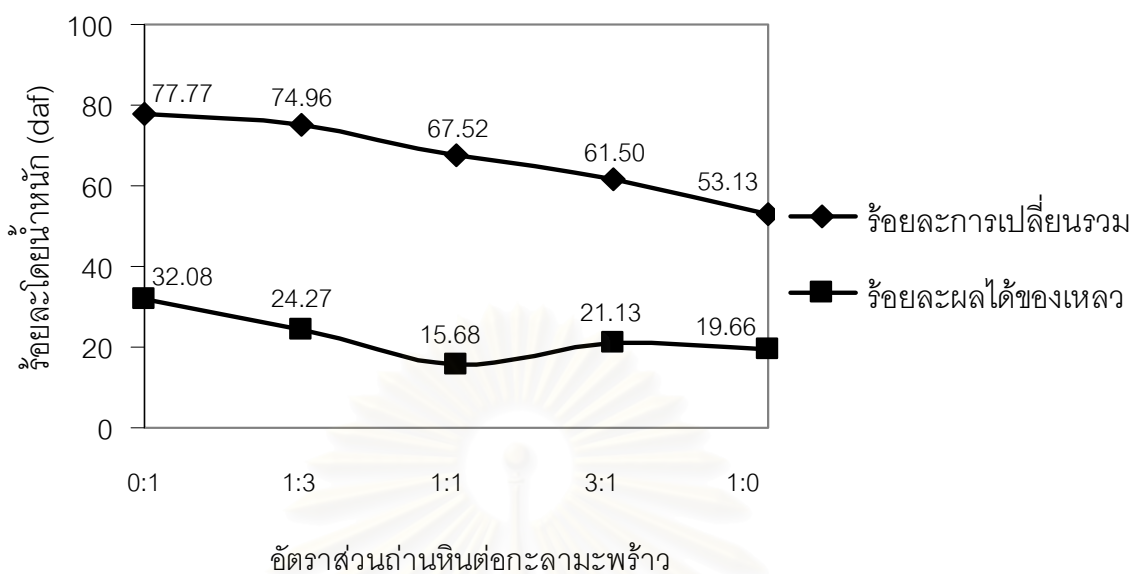
กัมมะถันรวมเพิ่มขึ้น เนื่องจากกัมมะถันที่อยู่ในโครงสร้างของถ่านหินมีมากกว่ากะลามะพร้าว ของแข็งส่วนที่เหลือจึงมีปริมาณกัมมะถันอยู่มาก



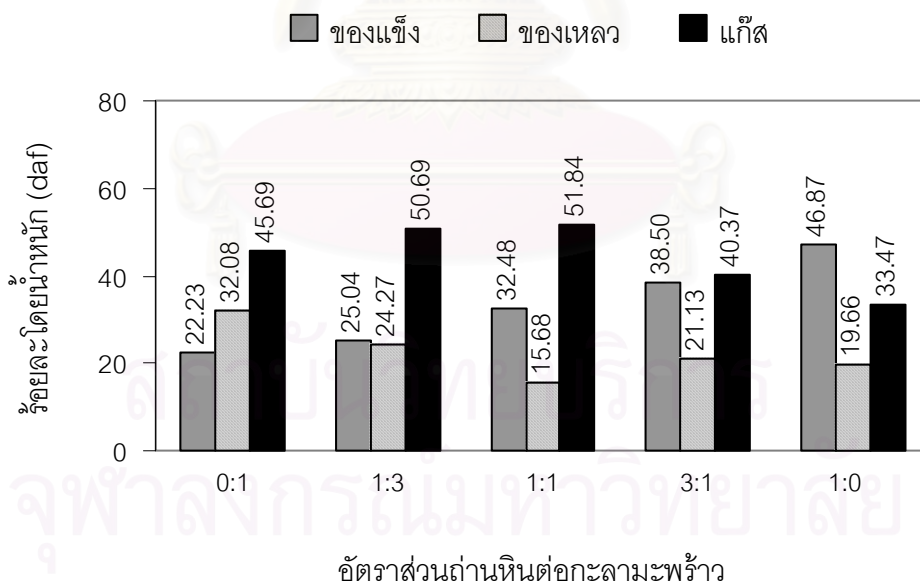
**รูปที่ 4.14** ผลของอัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว ต่อร้อยละการเปลี่ยนรวม และร้อยละผลได้ของเหลว ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.93 มิลลิเมตร



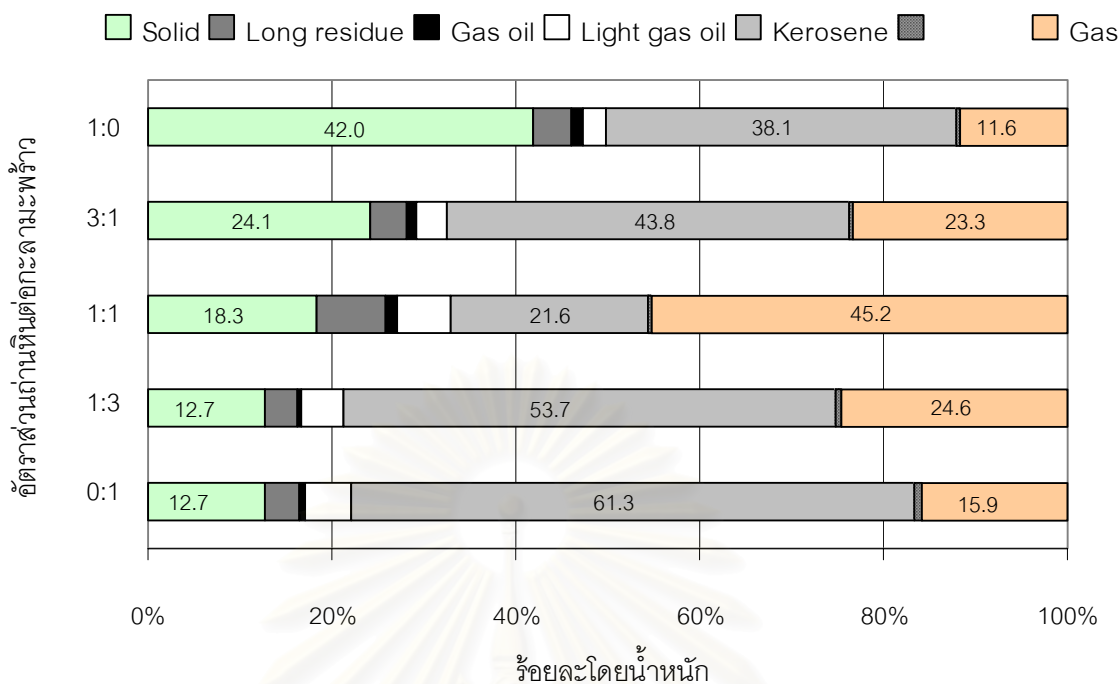
**รูปที่ 4.15** ผลของอัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าวต่อร้อยละผลได้ของแข็ง ร้อยผลได้ของเหลว และร้อยละผลได้แก๊ส ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.93 มิลลิเมตร



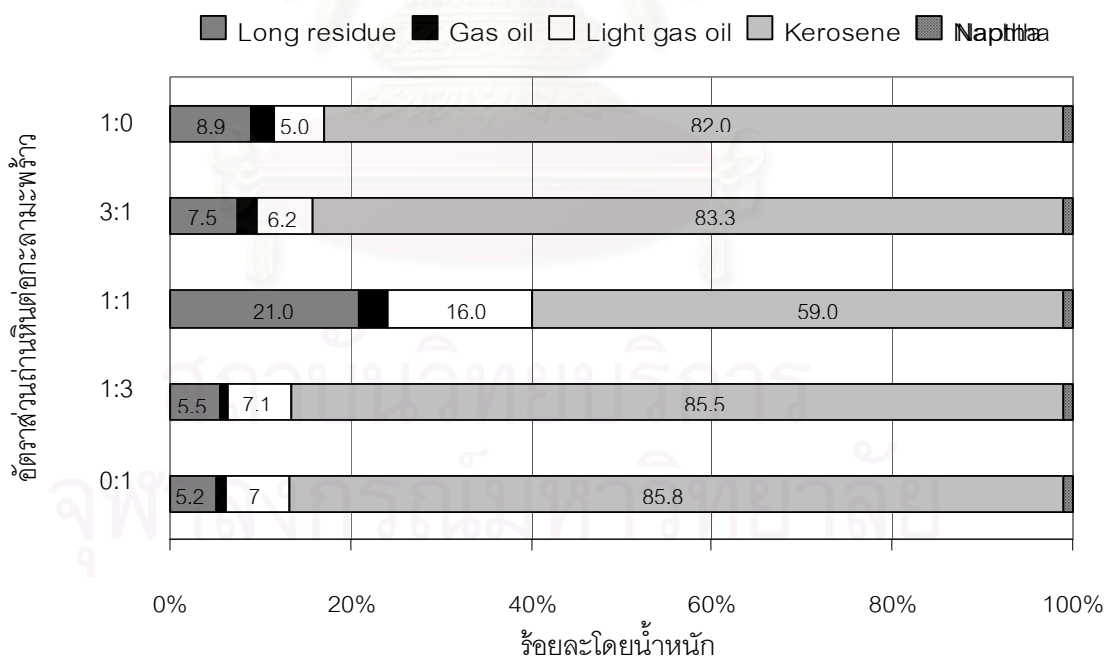
**รูปที่ 4.16** ผลของอัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว ต่อร้อยละการเปลี่ยนรวม และร้อยละผลได้ของเหลว ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.93 มิลลิเมตร



**รูปที่ 4.17** ผลของอัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าวต่อร้อยละผลได้ของแข็ง ร้อยผลได้ของเหลว และร้อยละผลได้แก๊ส ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.93 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.18 ผลของอัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าวต่อการแจกแจงของสัดส่วนผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที และขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.93 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.19 ผลของอัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าวต่อการแจกแจงของสัดส่วนผลิตภัณฑ์ของเหลว ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที และขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.93 มิลลิเมตร

**ตารางที่ 4.11** ผลของอัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าวต่อสมบัติแบบประมาณของของแข็งส่วนที่เหลือ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.93 มิลลิเมตร

สมบัติแบบประมาณ (%dry basis)	อัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว				
	0:1	1:3	1:1	3:1	1:0
สารระเหย	21.93	22.18	22.25	22.04	23.49
คาร์บอนคงตัว	71.89	54.38	53.81	50.85	48.53
เถ้า	6.18	23.44	23.94	27.11	27.98
ร้อยละกำมะถันรวม	0.28	2.04	2.01	3.02	3.29
ร้อยละการเปลี่ยนแปลงรวม	87.35	87.29	81.75	75.86	58.03

**ตารางที่ 4.12** ผลของอัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าวต่อค่าความร้อนและร้อยละการเพิ่มของค่าความร้อนของของแข็งส่วนที่เหลือ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.93 มิลลิเมตร

อัตราส่วนถ่านหิน ต่อกะลามะพร้าว	ค่าความร้อน (dry basis) (MJ/kg)	ค่าความร้อน (daf) (MJ/kg)	ร้อยละการเพิ่มค่า ความร้อน (daf)
0:1	34.6	36.8	70.3
1:3	25.2	32.9	44.9
1:1	24.8	32.6	38.4
3:1	22.9	31.5	25.1
1:0	22.4	31.2	16.9

#### 4.4 การแปรรูปร่วมของถ่านหินและกะลามะพร้าวให้เป็นของเหลวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

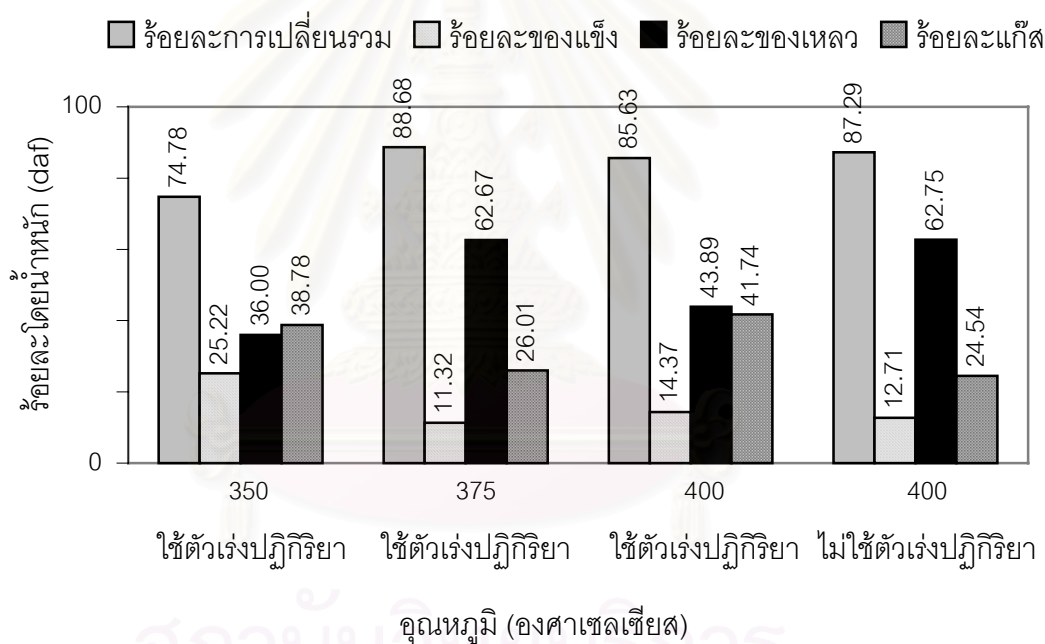
##### ผลของการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับการแปรรูปร่วมของถ่านหินและกะลามะพร้าว

การศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละการเปลี่ยนรวม และร้อยละผลได้ของเหลวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา คือ ไอร์รอน (III) ซัลไฟด์ร้อยละ 2.5 บนถ่านหิน จากการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเพื่อศึกษาการแปรรูปร่วมของถ่านหินและกะลามะพร้าวให้เป็นของเหลวโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ภาวะที่ดีที่สุดสำหรับกระบวนการแปรรูปร่วมคือ อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.93 มิลลิเมตร และอัตราส่วนระหว่างถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 1:3 เมื่อศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้ภาวะนี้ดังแสดงในรูปที่ 4.20 พบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนรวมเท่ากับ 85.63 ซึ่งใกล้เคียงกับการไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (ร้อยละการเปลี่ยนรวมเท่ากับ 87.29 แต่ให้ค่าร้อยละผลได้ของเหลวเป็น 43.89 ซึ่งน้อยกว่าการไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (ร้อยละผลได้ของเหลวเท่ากับ 62.75) แสดงว่าตัวเร่งปฏิกิริยามีผลทำให้ผลิตภัณฑ์ของเหลวแตกตัวเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สมากขึ้น ดังนั้นจึงทำการศึกษาที่ภาวะอุณหภูมิ 350 และ 375 องศาเซลเซียส โดยให้ตัวแปรอื่นมีค่าคงที่ พบว่าเมื่อลดอุณหภูมิลงจาก 400 องศาเซลเซียส เป็น 375 องศาเซลเซียส ให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนรวมเท่ากับ 88.68 ร้อยละผลได้ของเหลวเท่ากับ 62.67 ซึ่งใกล้เคียงกับการทำการทดลองโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา จากนั้นลดอุณหภูมิลงจาก 375 องศาเซลเซียส เป็น 350 องศาเซลเซียส ให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนรวมลดลงเป็น 74.78 ร้อยละผลได้ของเหลวลดลงเป็น 36.00 แสดงว่าที่อุณหภูมิ 375 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยให้ถ่านหินและกะลามะพร้าวมีการแตกตัวเป็นผลิตภัณฑ์ของเหลวได้ดี แต่ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความร้อนในกระบวนการยังไม่เพียงพอต่อการแตกตัวของถ่านหินและกะลามะพร้าวจึงส่งผลให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนรวมและร้อยละผลได้ของเหลวลดลง ดังนั้นการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถช่วยลดอุณหภูมิของกระบวนการแปรรูปร่วม ช่วยประหยัดพลังงานและลดต้นทุนของกระบวนการ

การวิเคราะห์การแจกแจงของผลิตภัณฑ์ของเหลว เมื่อใช้และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา แสดงในรูปที่ 4.21 และ 4.22 จะเห็นว่าที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ถ้าพิจารณาเฉพาะผลิตภัณฑ์ของเหลว กรณีใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ผลิตภัณฑ์ที่มีสัดส่วนของเคโรซีน หรือน้ำมันเบามากขึ้น แต่ถ้ามองปริมาณโดยรวม สำหรับภาวะที่ให้ร้อยละผลได้ของเหลวสูงพอๆ กับไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา คือ ที่อุณหภูมิ 375 องศาเซลเซียส พบว่าการแจกแจงของผลิตภัณฑ์ของเหลวใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ที่ได้เมื่อไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส แสดงว่าตัวเร่งปฏิกิริยาช่วย

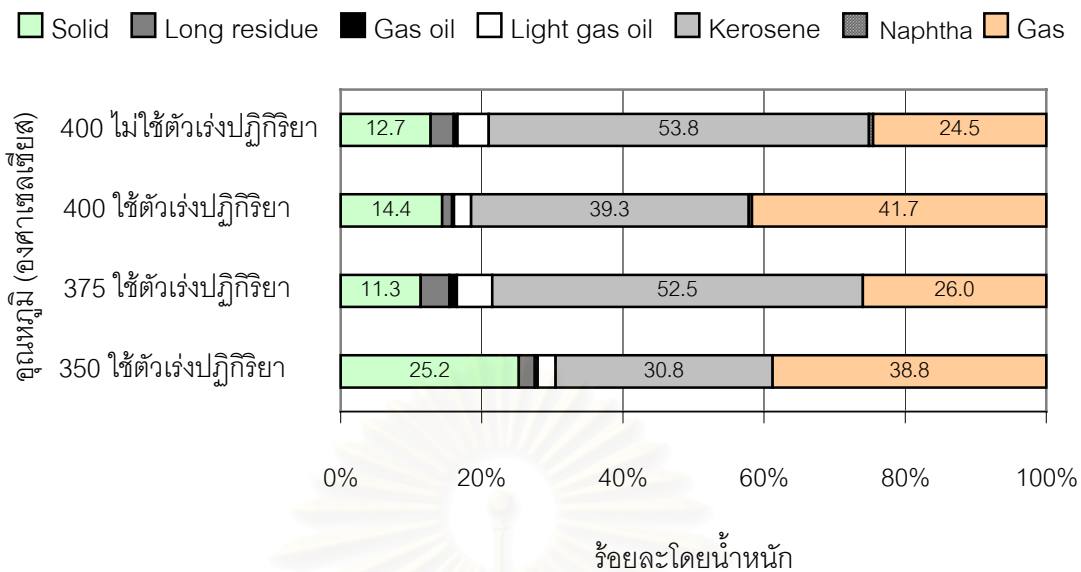
ลดอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา แต่ให้ปริมาณและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ของเหลวใกล้เคียงกับไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

สำหรับของแข็งส่วนที่เหลือหลังจากการแปรรูปร่วมของถ่านหินกับกะลามะพร้าวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่เวลา 30 นาที ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.93 มิลลิเมตร อัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 1:3 ได้นำมาทำการวิเคราะห์สมบัติแบบประมาณและค่าความร้อน เพื่อหาร้อยละการเพิ่มของค่าความร้อน ดังแสดงในตารางที่ 4.13 และ 4.14 พบว่าการเติมตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อสมบัติของของแข็งส่วนที่เหลือน้อยมาก ของแข็งส่วนที่เหลือจากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามีสมบัติใกล้เคียงกัน ยกเว้นที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่ต่ำเกินไปสำหรับการแตกตัวของถ่านหินและกะลามะพร้าวทำให้สารระเหยยังมีค่าสูงกว่าภาวะอื่นๆ

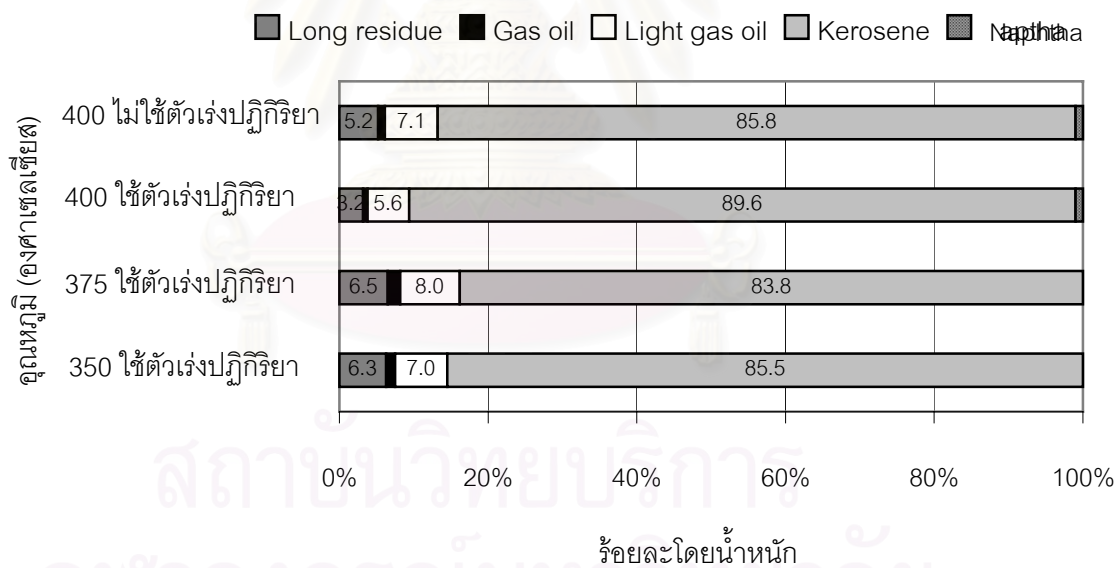


**รูปที่ 4.20** ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละการเปลี่ยนรวม ร้อยละผลได้ของของแข็ง ของเหลว และแก๊ส สำหรับการแปรรูปร่วมของถ่านหินและกะลามะพร้าว ที่ภาวะเวลา 30 นาที ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.93 มิลลิเมตร อัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 1:3





รูปที่ 4.21 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการแจกแจงของสัดส่วนผลิตภัณฑ์ที่เวลา 30 นาที ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.93 มิลลิเมตร อัตราส่วนถ่านหินต่ออะลามะพร้าว 1:3



รูปที่ 4.22 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการแจกแจงของสัดส่วนผลิตภัณฑ์ของเหลว ที่เวลา 30 นาที ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.93 มิลลิเมตร อัตราส่วนถ่านหินต่ออะลามะพร้าว 1:3

ตารางที่ 4.13 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อสมบัติแบบประมาณของของแข็งส่วนที่เหลือ ที่ เวลา 30 นาที ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.93 มิลลิเมตร อัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 1:3

สมบัติแบบประมาณ (%dry basis)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			
	350 ใช้ตัวเร่ง ปฏิกิริยา	375 ใช้ตัวเร่ง ปฏิกิริยา	400 ใช้ตัวเร่ง ปฏิกิริยา	400 ไม่ใช้ตัวเร่ง ปฏิกิริยา
สารระเหย	19.16	15.52	16.43	16.18
คาร์บอนคงตัว	58.38	63.51	62.44	62.96
เถ้า	22.46	20.97	21.13	20.86
ร้อยละกำมะถันรวม	2.16	1.93	2.01	2.04
ร้อยละการเปลี่ยนรวม	74.78	88.68	85.63	87.29

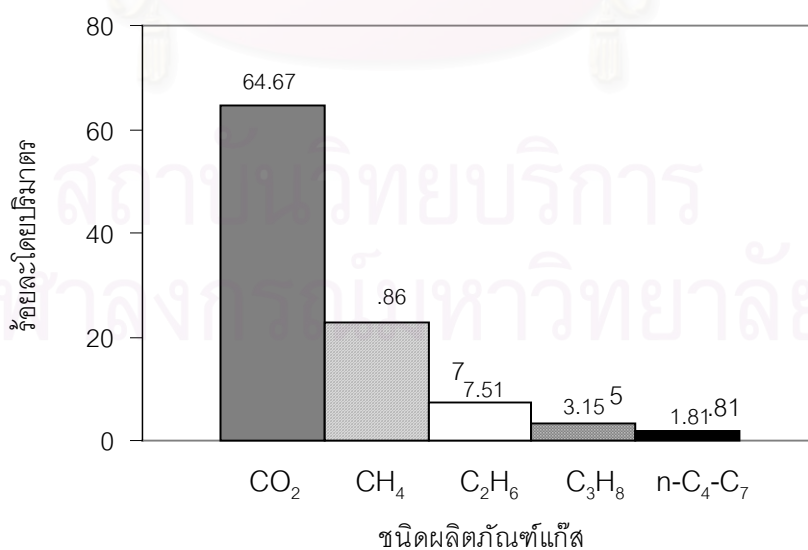
ตารางที่ 4.14 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อค่าความร้อนและร้อยละการเพิ่มของค่าความร้อนของของแข็งส่วนที่เหลือ ที่เวลา 30 นาที ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.93 มิลลิเมตร อัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 1:3

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าความร้อน (dry basis) (MJ/kg)	ค่าความร้อน (daf) (MJ/kg)	ร้อยละการเพิ่มค่า ความร้อน (daf)
350 ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา	22.2	28.6	25.8
375 ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา	25.3	32.1	41.3
400 ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา	25.3	32.0	41.2
400 ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา	25.2	31.8	40.2

#### 4.5 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊ส

การแจกแจงของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการแปรรูปร่วมของถ่านหินกับกะลามะพร้าว

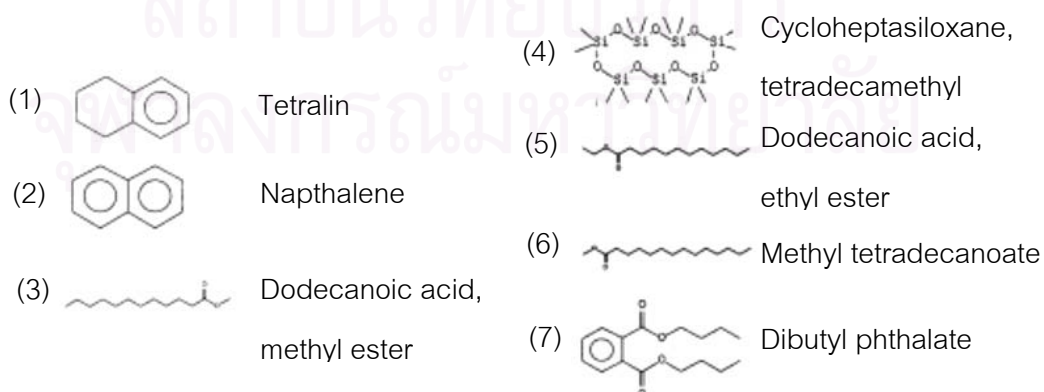
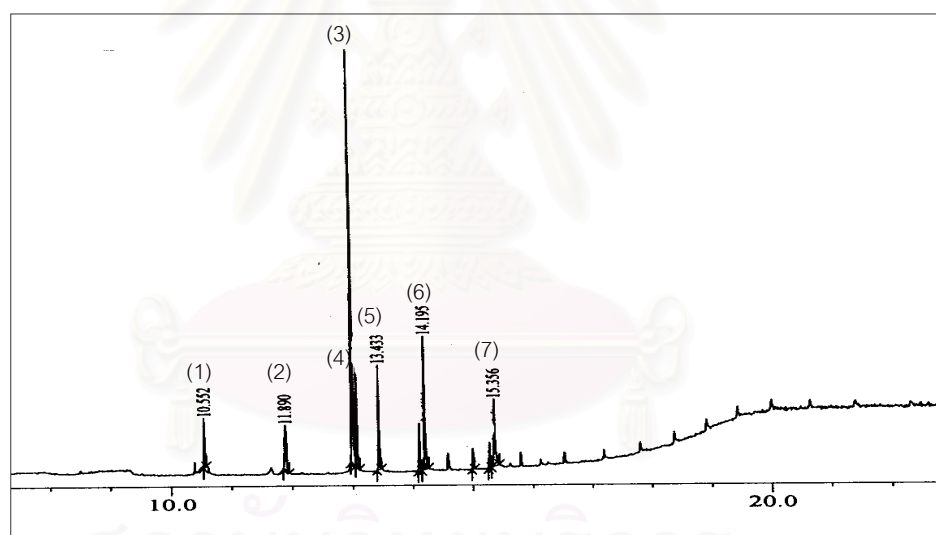
ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการแปรรูปร่วมของถ่านหินและกะลามะพร้าวให้เป็นของเหลว คือ ของเหลว แก๊ส และของแข็ง ผลิตภัณฑ์แก๊สหลักที่เกิดจากกระบวนการได้แก่ มีเทน อีเทน โพรเพน แก๊สไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลใหญ่ ( $C_4-C_7$ ) และคาร์บอนไดออกไซด์ นอกจากนี้ยังเกิดผลิตภัณฑ์แก๊สอื่น ๆ แต่มีปริมาณน้อยมาก เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรเจนซัลไฟด์ เนื่องจากผลิตภัณฑ์แก๊สที่เกิดในกระบวนการมีปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับผลรวมของผลิตภัณฑ์ของเหลวและของแข็ง อีกทั้งผลิตภัณฑ์แก๊สที่มีมูลค่าเป็นพวกแก๊สไฮโดรคาร์บอนมีปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณแก๊สทั้งหมด ดังนั้นในหัวข้อนี้จะแสดงผลการแจกแจงของผลิตภัณฑ์แก๊สที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการแปรรูปร่วมถ่านหินและกะลามะพร้าวให้เป็นของเหลวคือที่ อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.93 มิลลิเมตร และอัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 1:3 ดังแสดงในรูปที่ 4.23 จะเห็นว่าผลิตภัณฑ์หลักคือ คาร์บอนไดออกไซด์มากกว่า 60% ซึ่งเกิดจากการแตกตัวของหมู่คาร์บอกซิลภายในโครงสร้างของถ่านหินและเกิดจากสารไฮโดรคาร์บอนภายในโมเลกุลของถ่านหินเกิดการเผาไหม้กับออกซิเจนที่อยู่ในโครงสร้างของถ่านหินและกะลามะพร้าว (จากตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ ถ่านหินมีออกซิเจนร้อยละ 9.9 กะลามะพร้าวมีออกซิเจนร้อยละ 45.75) กลายเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ รองลงมาคือ มีเทนประมาณ 23% อีเทนประมาณ 7% และโพรเพนประมาณ 3% จากองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สจะเห็นว่าไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นแก๊สเชื้อเพลิง



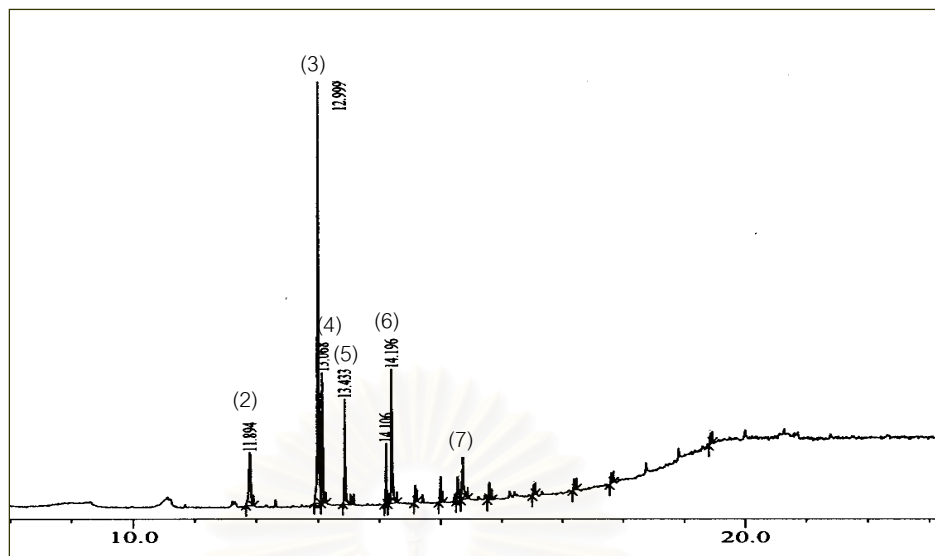
**รูปที่ 4.23** การแจกแจงของผลิตภัณฑ์แก๊ส ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.93 มิลลิเมตร และอัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 1:3

#### 4.6 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของเหลวด้วย GC/MS

นำผลิตภัณฑ์ของเหลวมาละลายในคาร์บอนไดซัลไฟด์ในอัตรา 1 ส่วนใน 100 ส่วน โดยปริมาตร แล้ววิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC/MS ที่อุณหภูมิเตา 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที แล้วเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตราเร็ว 20 องศาเซลเซียสต่อนาที เป็น 320 องศาเซลเซียส คงที่ไว้ 10 นาที จากรูปที่ 4.24 แสดงผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของเหลวของภาวะ การทดลองที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.93 มิลลิเมตร อัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 1:3 เปรียบเทียบกับน้ำมันดิบ ดังแสดงในรูปที่ 4.25 พบว่าได้องค์ประกอบหลักเหมือนกัน คือ อ Tetralin ( $C_{10}H_{12}$ ), Naphthalene ( $C_{10}H_8$ ), Cycloheptasiloxane dodecamethyl- ( $C_{12}H_{36}O_6Si_6$ ), Dodecanoic acid methyl ester ( $C_{12}H_{26}O_2$ ), Cycloheptasiloxane tetradecamethyl- ( $C_{14}H_{42}O_7Si_7$ ), Dodecanoic acid ethyl ester ( $C_{14}H_{28}O_2$ ), Methyl tetradecanoate ( $C_{15}H_{30}O_2$ ) และ Dibutyl phthalate ( $C_{16}H_{22}O_4$ ) แสดงว่าน้ำมันที่สังเคราะห์ได้นั้นมีองค์ประกอบใกล้เคียงกับน้ำมันดิบ



รูปที่ 4.24 ตัวอย่าง GC/MS โคโรมาโทแกรมการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของเหลว



รูปที่ 4.25 ตัวอย่าง GC/MS โคโรมาโทแกรมการวิเคราะห์น้ำมันดิบ

#### 4.7 การเปรียบเทียบร้อยละการเปลี่ยนรวมและร้อยละผลได้ของเหลว

จากการศึกษาการแปรรูปร่วมของถ่านหินและกะลามะพร้าวให้เป็นของเหลวด้วยตัวทำละลาย ได้เปรียบเทียบร้อยละการเปลี่ยนรวมและร้อยละผลได้ของเหลว ที่ได้จากงานวิจัยอื่นที่ศึกษาการแปรรูปร่วมของถ่านหินกับชีวมวลชนิดอื่น กับงานวิจัยนี้ แสดงดังตารางที่ 4.15 จะเห็นว่างานวิจัยของ Karaca F. and Bolat E. (2002) และ Lugang B. et al (2002) ทำการทดลองที่อัตราส่วนถ่านหินต่อชี้อยู่เท่ากับ 1:1 ให้ผลได้ของเหลวร้อยละ 31 และ 40 ตามลำดับ ส่วนงานวิจัยนี้เมื่อทำการทดลองที่ภาวะอัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าวเท่ากับ 1:3 ให้ผลได้ของเหลวสูงถึงร้อยละ 62.75 แต่เมื่อทำการทดลองที่อัตราส่วน 1:1 ดังแสดงในรูปที่ 4.14 ให้ผลได้ของเหลวร้อยละ 36.55 แสดงว่า ชีวมวลเป็นตัวร่วมที่ดีในการแปรรูปร่วมให้เป็นของเหลว การเพิ่มชีวมวลในสารตั้งต้นช่วยเพิ่มปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้

ตารางที่ 4.15 การเปรียบเทียบร้อยละการเปลี่ยนรวมและร้อยละผลได้ของเหลวของงานวิจัยอื่นกับงานวิจัยนี้

ผู้วิจัย	ภาวะในการทดลอง	ผลการทดลอง
Karaca F. and Bolat E. (2002)	อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 40 บรรยากาศ อัตราส่วนถ่านหินต่อซีลี้อย 1:1 อัตราส่วนสารตั้งต้นต่อตัวทำลายเตตระลิน 1:3 ในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์	ร้อยละการเปลี่ยนรวม 64 ร้อยละผลได้ของเหลว 31
Lugang B. et al (2002)	อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3.4 เมกะพาสคัล อัตราส่วนถ่านหินต่อซีลี้อย 1:1 อัตราส่วนสารตั้งต้นต่อตัวทำลายเตตระลิน 1:3 ตัวเร่งปฏิกิริยา ferric sulfide 2 กรัม	ร้อยละการเปลี่ยนรวม 85 ร้อยละผลได้ของเหลว 40
Qu Y. et al (2003)	อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส เวลา 10 นาที ชีวมวล ( <i>Cunninghamia lanceolata</i> ) 8 กรัม น้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์	ร้อยละผลได้ของเหลว 24
พรรณะ และ คณะ (2547)	อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.93 มิลลิเมตร อัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 1:3 อัตราส่วนสารตั้งต้นต่อตัวทำลายเตตระลิน 1:1 ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 0 Psig ในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์	ร้อยละการเปลี่ยนรวม 87 ร้อยละผลได้ของเหลว 63

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษากระบวนการแปรรูปร่วมของถ่านหินและกะลามะพร้าวให้เป็นของเหลว ในภาวะอุณหภูมิ 375-475 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 15-75 นาที ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.25-1.6 มิลลิเมตร และ อัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 0:1-1:0 โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและส่วนที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า

การแปรรูปร่วมของถ่านหินและกะลามะพร้าวให้เป็นของเหลวโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

1. จากการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล ปัจจัยที่มีลำดับความสำคัญต่อร้อยละผลได้ของเหลวจากมากไปน้อยคือ อุณหภูมิ ขนาดอนุภาคเฉลี่ย อัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว และ เวลาในการทำปฏิกิริยา โดยภาวะที่เหมาะสมคือ อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.93 มิลลิเมตร และอัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 1:3

2. การเพิ่มอุณหภูมิทำให้ร้อยละการเปลี่ยนแปลงรวมลดลง เนื่องจากถ่านหินและกะลามะพร้าวรวมตัวเป็นถ่านโค้ก และร้อยละผลได้ของเหลวน้อยลง (จากอุณหภูมิ 400 – 475 องศาเซลเซียส) เพราะอุณหภูมิสูงทำให้ผลิตภัณฑ์ของเหลวแตกตัวให้ผลิตภัณฑ์แก๊สไฮโดรคาร์บอนมากขึ้น

3. การเพิ่มเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาทำให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงรวมลดลงเล็กน้อย ในขณะที่ร้อยละผลได้ของเหลวมีค่าสูงสุดที่เวลา 30 นาที และเวลาที่มีผลไม่มากต่อสัดส่วนการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ของเหลวตามจุดเดือด

4. ขนาดของอนุภาคเฉลี่ยมีผลต่อการทดลองอย่างมีนัยสำคัญ โดยการแปรรูปร่วมระหว่างถ่านหินและกะลามะพร้าวให้เป็นของเหลวจะต้องใช้ขนาดของอนุภาคที่เหมาะสมทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณของตัวทำละลายที่เติมลงไปด้วย เพราะถ้าใช้อนุภาคขนาดเล็กเกินไปถึงแม้จะมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้นแต่ต้องใช้ปริมาณตัวทำละลายจำนวนมาก เนื่องจากตัวทำละลายจะถูกดูดซับในกะลามะพร้าวและถ่านหินทำให้ไม่สามารถแตกตัวให้ไฮโดรเจนอย่างเพียงพอในการแปรรูปร่วมให้เป็นของเหลว ส่วนอนุภาคขนาดใหญ่เกินไปจะมีพื้นที่ผิวสัมผัสน้อยทำให้แตกตัวเป็นของเหลว

ได้น้อย สำหรับสัดส่วนการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ของเหลวตามจุดเดือดจะมีผลิตภัณฑ์เบาลดลงเมื่อเพิ่มขนาดของอนุภาค

5. กะลามาะพร้าวมีประสิทธิภาพในการแตกตัวเป็นของเหลวได้ดีกว่าถ่านหินในตัวทำละลายเตตระลิน ดังนั้นการเพิ่มปริมาณกะลามาะพร้าวให้มากกว่าถ่านหินจะช่วยเพิ่มร้อยละการเปลี่ยนรวมและร้อยละผลได้ของเหลวให้สูงขึ้น สำหรับการแปรรูปร่วมระหว่างถ่านหินและกะลามาะพร้าวที่อัตราส่วน 1:1 ให้ผลการแปรรูปร่วมเป็นของเหลวได้น้อยที่สุด

6. กะลามาะพร้าวช่วยให้สัดส่วนการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ของเหลวตามจุดเดือดดีขึ้น เพราะสารระเหยในกะลามาะพร้าวจะแตกตัวรวมกับตัวทำละลายเตตระลินแทรกเข้าไปแตกโครงสร้างขนาดใหญ่ภายในถ่านหินให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีโมเลกุลขนาดเล็กมากขึ้น

7. ปัจจัยที่มีความสำคัญมากที่สุดต่อผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊สคือ อุณหภูมิ โดยที่อุณหภูมิสูงปริมาณแก๊สเพิ่มมากขึ้น เพราะอุณหภูมิสูงทำให้ผลิตภัณฑ์ของเหลวและโมเลกุลที่แตกตัวออกมาจากถ่านหินกับกะลามาะพร้าว แตกตัวเป็นโมเลกุลขนาดเล็กเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สมากขึ้น

8. ของแข็งที่เหลือจากการแปรรูปร่วมมีค่าความร้อนสูงขึ้น และมีปริมาณกำมะถันรวมลดลง ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้

#### การแปรรูปร่วมของถ่านหินและกะลามาะพร้าวให้เป็นของเหลวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

1. การเติมตัวเร่งปฏิกิริยา คือ ไอร์ออน (III) ซัลไฟด์ (ปริมาณเหล็กบนถ่านหินร้อยละ 2.5) พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยลดอุณหภูมิในการแปรรูปร่วมระหว่างถ่านหินและกะลามาะพร้าวให้เป็นของเหลว แต่ไม่มีผลทำให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนรวมและผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวเพิ่มขึ้น ในขณะที่ผลิตภัณฑ์ของเหลวมีคุณภาพใกล้เคียงกัน

2. การเติมตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยลดการใช้พลังงาน เนื่องจากทำให้อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาลดลง แต่ให้ผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ต้องการคงเดิมทั้งในแง่ปริมาณและคุณภาพ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ



1. ศึกษาการเตรียมถ่านหินก่อนการทดลอง เช่น การกำจัด mineral matter เพื่อลดการเสื่อมของตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนการทดลอง และการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาหลากหลายชนิดขึ้น
2. ศึกษาการแปรรูปถ่านหินร่วมกับผลิตภัณฑ์ที่มีองค์ประกอบหลักของไฮโดรคาร์บอนชนิดอื่นๆ มาใช้ในกระบวนการแปรรูปร่วมให้เป็นของเหลว เพื่อเป็นการลดปริมาณผลิตภัณฑ์เหลือทิ้งและปริมาณการใช้ถ่านหิน
3. ศึกษาผลของอัตราส่วนของตัวทำละลายต่อปริมาณสารตั้งต้น เพื่อให้ทราบปริมาณของตัวทำละลายที่เหมาะสม
4. ศึกษาความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์และเชิงพาณิชย์ สำหรับการผลิตเชื้อเพลิงเหลวสังเคราะห์ รวมทั้งศึกษาการนำมาใช้ได้จริง และการขยายขนาดให้ใหญ่ขึ้น



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

กรมเชื้อเพลิงธรรมชาติ. ปริมาณสำรองถ่านหินในประเทศไทย. กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2546.

กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน. รายงานพลังงานของประเทศไทย 2543. 2544.

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. รายงานพลังงานทดแทนของประเทศไทย 2546. 2547.

กัญญา บุญยเกียรติ. เชื้อเพลิงและการเผาไหม้. 2542 : 2-21 – 2-24.

นิรมล ปัญญาวงศ์. การแปรรูปร่วมของถ่านหินและพลาสติกผสมให้เป็นของเหลวด้วยตัวทำละลายภาวะเหนือวิกฤต. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.

ธารินี กิตติเรืองทอง. กระบวนการร่วมของพอลิพรอพิลีนและลิกไนต์โดยใช้เหล็กบนถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์ม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.

บำรุงสุข เทียมพันธ์. การแปรรูปร่วมของถ่านหินและน้ำมันพีซใช้แล้วให้เป็นของเหลวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.

ประเสริฐ ชุมชุม และคณะ. เทคโนโลยีการทำเหมืองถ่านหิน. กรุงเทพมหานคร, 2538

ปราโมทย์ ไชยเวช และ นุรักษ์ กฤษดานุรักษ์. ปิโตรเลียมเทคโนโลยี. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.

ศูนย์สารสนเทศการเกษตร. สถิติการเกษตรของประเทศไทย ปีเพาะปลูก 2543/2544. กรุงเทพฯ, 2544

เอกสิทธิ์ แย้มศรี. การแปรรูปร่วมของถ่านหินและจาระบีใช้แล้วให้เป็นของเหลว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ. ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.

อภิชาติ ศิริพจนาวรรณ. การแปรรูปร่วมของถ่านหินและพอลิพรอพิลีนให้เป็นของเหลวด้วยตัวทำละลายภาวะเหนือวิกฤต. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ. ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.

### ภาษาอังกฤษ

ASTM Standard, D388. Coal by rank : American Society for Testing and Materials. U.S.A., 1989.

ASTM Standard, D482-95. Standard Test Method for Ash from Petroleum Products : American Society for Testing and Materials. U.S.A., 1995.

ASTM Standard, D2015. Gross Calorific Values of Coal and Coke by the Adiabatic Bomb Calorimeter : American Standard Society for Testing and Materials. U.S.A., 1989.

ASTM Standard, D2887-93. Standard Test Method for Boiling Range Distribution of Petroleum Fractions by Gas Chromatography. U.S.A., 1993.

ASTM Standard, D3173. Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke : American Society for Testing and Materials. U.S.A., 1989.

ASTM Standard, D3174. Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke : American Society for Testing and Materials. U.S.A., 1989.

ASTM Standard, D3175. Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke : American Society for Testing and Materials. U.S.A., 1989.

ASTM Standard, D3177. Total Sulfur in the Analysis Sample of Coal and Coke : American Society for Testing and Materials. U.S.A., 1989.

ASTM Standard, D3286. Gross Calorific Values of Coal and Coke by the Isothermal Jacket Bomb Calorimeter : American Standard Society for Testing Materials. U.S.A., 1989.

Karaca, F. and Bolat, E. Coprocessing of Turkish lignite with a cellulosic waste material. 1.The effect of coprocessing on liquefaction yields at different reaction temperatures. Fuel Processing Technology 64(2000) : 47 - 55.

Karaca, F. and Bolat, E. Coprocessing of Turkish lignite with a cellulosic waste material. 2.The effect of coprocessing on liquefaction yields at different reaction pressures and sawdust/lignite ratios. Fuel Processing Technology75(2002) : 109 - 116.

Karaca, F. and Bolat, E. Coprocessing of Turkish lignite with a cellulosic waste material. 3. A statistical study on product yields and total conversion. Fuel Processing Technology75(2002) : 117 - 127.

Li W. Development of first-stage co-liquefaction of Chinese coal with waste plastics. Chemical Engineering and Processing (2003) : 1-4.

Liu, Z., Yang, J., Zondlo, J.W., Stiller, A.H. and Dadyburjor, D.B., In situ impregnated iron-based catalysts for direct coal liquefaction. Fuel 75 (1996) : 51-57

Lugang, B., Tingchen, L., Yang, w., Zhengwei, R., and Yongjie, Y. Comparison of effect of ferric sulfide catalyst and nickel sulfide on coliquefaction of coal and biomass. Fuel Processing Technology75(2002) : 165 -171.

Matsumura, Y., Nonaka, H., Tsutsumi, A. and Yoshida, K. Co - liquefaction of coal and cellulose in supercritical water. Fuel78(1999) : 1049 – 1056.

Meyers, R.A. Coal Handbook 1<sup>st</sup> Ed. New York : M. Dekker Inc., 1981.

Nowacki, P. Coal Liquefaction Process. Noyes Data Corp. USA, 1979.

Probstein, R.F. and Hicks, R.E. Synthetic Fuels. Singapore : McGraw-Hill Book, 1982.

Qu, Y., Wei, X. and Zhong, C. Experimental study on the direct liquefaction of *Cunninghamia lanceolata* in water. Energy28(2003) : 597 – 606.

Schlosburg, R.H. Chemistry of Coal Conversion. New York : Plenum Press, 1985.

Speight, J.G., The Chemistry and Technology of Coal. 2<sup>nd</sup> ed., Revised and Expanded, New York : Mercel Dekker, 1994.

Speight, J.G., The Chemistry and Technology of Petroleum. 3<sup>rd</sup> ed., Revised and Expanded, New York : Mercel Dekker, 1998.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

## การคำนวณและข้อมูลการทดลอง

## การคำนวณ

## 1. การคำนวณร้อยละการเปลี่ยนรวม

$$\begin{aligned} & \text{ร้อยละการเปลี่ยนของถ่านหินและกะลามะพร้าว หรือร้อยละการเปลี่ยนรวม (daf)} \\ & = 100 [ ( W1_{\text{daf}} - W_R ) / W1_{\text{daf}} ] \end{aligned}$$

## 2. การคำนวณร้อยละผลได้ของเหลว

$$\text{ร้อยละผลได้ของเหลว (daf)} = 100 [ W_{\text{Liq}} / W1_{\text{daf}} ]$$

## 3. การคำนวณร้อยละผลได้ของแข็ง

$$\text{ร้อยละผลได้ของแข็ง (daf)} = 100 [ W_R / W1_{\text{daf}} ]$$

## 4. การคำนวณร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊ส

$$\text{ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊ส (daf)} = 100 - \text{ร้อยละผลได้ของเหลว} - \text{ร้อยละผลได้ของแข็ง}$$

โดย

$W1_{\text{daf}}$  = น้ำหนักรวมของถ่านหินและกะลามะพร้าวที่ปราศจากความชื้นและเถ้า

$W2_{\text{daf}}$  = น้ำหนักถ่านหินที่ปราศจากความชื้นและเถ้า

$W_R$  = น้ำหนักกากที่ปราศจากความชื้นและเถ้าหลังจากชะล้างด้วยเตตระไฮโดรฟูแรน

$W_{\text{Liq}}$  = น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ของเหลว

### ตัวอย่างการคำนวณ

ภาวะของการทดลอง

อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

เวลา 30 นาที

ขนาดอนุภาค 1 มิลลิเมตร

อัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว 1:3

การคำนวณ

น้ำหนักถ่านหิน (Dry basis) = 5.0000 กรัม

น้ำหนักถ่านหิน (Dry and ash free basis) = 4.0005 กรัม

น้ำหนักกะลามะพร้าว = 15.0000 กรัม

น้ำหนักกะลามะพร้าว (Dry and ash free basis) = 14.5425 กรัม

น้ำหนักผลได้ของเหลว = 11.6348 กรัม

น้ำหนักกากของแข็ง (Dry basis) = 3.8138 กรัม

น้ำหนักกากของแข็ง (Dry and ash free basis) = 2.3568 กรัม

$$\text{ร้อยละการเปลี่ยนรวม} = \frac{100 \times [(4.0005 + 14.5425) - 2.3568]}{(4.0005 + 14.5425)} = 87.29$$

$$\text{ร้อยละผลได้ของเหลว} = 100 \times [11.6348 / (4.0005 + 14.5425)] = 62.75$$

$$\text{ร้อยละผลได้ของแข็ง} = 100 \times [2.3568 / (4.0005 + 14.5425)] = 12.71$$

$$\text{ร้อยละผลได้แก๊ส} = 100 - 62.75 - 12.71 = 24.54$$



## ภาคผนวก ข

### การวิเคราะห์สมบัติถ่านหิน

#### 1. การวิเคราะห์ถ่านหินแบบประมาณ (Proximate Analysis : ASTM D 3173-D 3175)

##### 1.1 ปริมาณความชื้นในตัวอย่างถ่านหิน (Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke : ASTM D 3173)

###### หลักการ

นำตัวอย่างถ่านหินที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 250 ไมโครเมตร มาให้ความร้อนในตู้อบ ที่อุณหภูมิ 105-110 องศาเซลเซียส เพื่อให้ไอน้ำระเหยจากถ่านหิน ค่าความชื้นคำนวณได้จากน้ำหนักของถ่านหินที่หายไป

###### เครื่องมือ

1. ตู้อบ
2. ถ้วยกระเบื้อง (Porcelain Crucible) พร้อมฝาปิด
3. เดซิกเคเตอร์ (Desiccator)

###### วิธีการทดลอง

1. อบถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาในตู้อบที่อุณหภูมิ 105-110 องศาเซลเซียส ประมาณ 30 นาที ทิ้งให้เย็นในเดซิกเคเตอร์ ประมาณ 15 นาที ชั่งน้ำหนักและบันทึกผล
2. ชั่งตัวอย่างถ่านหินประมาณ 1 กรัม ใส่ถ้วยกระเบื้องที่ทราบน้ำหนักแน่นอน ปิดฝาทันที บันทึกน้ำหนักตัวอย่างถ่านหิน
3. นำเข้าตู้อบที่อุณหภูมิประมาณ 105-110 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง (จนกระทั่งน้ำหนักของตัวอย่างถ่านหินคงที่) ทิ้งให้เย็นในเดซิกเคเตอร์
4. ชั่งน้ำหนักถ้วยกระเบื้องที่มีตัวอย่างถ่านหินที่อบแล้วพร้อมฝาปิด บันทึกผล

###### การคำนวณ

$$M = \frac{(W_1 - W_2)}{W} \times 100$$

เมื่อ  $M$  = ร้อยละของปริมาณความชื้น

$W_1$  = น้ำหนักของถาดอะลูมิเนียมพร้อมฝาปิดรวมน้ำหนักถ่านหินเริ่มต้นก่อนอบ (กรัม)

$W_2$  = น้ำหนักของถาดอะลูมิเนียมพร้อมฝาปิดรวมน้ำหนักถ่านหินเริ่มต้นก่อนอบ (กรัม)

$W$  = น้ำหนักของตัวอย่างถ่านหิน (กรัม)

## 1.2 ปริมาณเถ้าในตัวอย่างถ่านหิน (Standard Test Method for Ash in the Analysis

Sample of Coal and Coke from Coal : ASTM D 3174)

### หลักการ

นำตัวอย่างถ่านหินที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 250 ไมโครเมตร มาให้ความร้อนในเตาเผา (Muffle Furnace) ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียสจนน้ำหนักคงที่ ร้อยละปริมาณเถ้าคำนวณจากน้ำหนักที่เหลืออยู่หลังจากเผา

### เครื่องมือ

1. เตาเผา
2. ถ้วยกระเบื้องพร้อมฝา
3. เดซิกเคเตอร์

### วิธีการทดลอง

1. ปิดฝา และเผาถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง นำออกมาทำให้เย็นในเดซิกเคเตอร์ ชั่งน้ำหนัก และบันทึกผล
2. ชั่งตัวอย่างถ่านหินประมาณ 1 กรัม ใส่ในถ้วยกระเบื้องที่ทราบน้ำหนักแน่นอน ปิดฝาทันที บันทึกน้ำหนักตัวอย่างถ่านหิน (หรืออาจใช้ตัวอย่างถ่านหินที่ผ่านการอบหาความชื้นแล้ว)
3. นำถ้วยกระเบื้องที่มีตัวอย่างถ่านหินพร้อมฝา เข้าเตาเผาที่อุณหภูมิห้องโดยไม่ต้องปิดฝา ค่อย ๆ ให้ความร้อนด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่ทำให้อุณหภูมิของเตาเผาถึง 400-500 องศาเซลเซียส ภายใน 1 ชั่วโมง เมื่ออุณหภูมิถึง 750 องศาเซลเซียส เผาถ่านหินจนกระทั่งน้ำหนักคงที่
4. นำถ้วยกระเบื้องและฝาออกจากเตาเผา ทิ้งไว้ให้เย็นในเดซิกเคเตอร์

### การคำนวณ

$$A = \frac{(W_3 - W_4)}{W} \times 100$$

เมื่อ

A	=	ร้อยละของเถ้า
$W_3$	=	น้ำหนักของครุชีเปิดพร้อมฝาและเถ้า (กรัม)
$W_4$	=	น้ำหนักของครุชีเปิดพร้อมฝา (กรัม)
W	=	น้ำหนักของตัวอย่างถ่านหิน (กรัม)

### 1.3 ปริมาณสารระเหยในตัวอย่างถ่านหิน (Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke : ASTM D 3175 )

#### หลักการ

นำตัวอย่างถ่านหินที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 250 ไมโครเมตร ให้ความร้อนในเตาเผาแบบท่อ (Tubular Furnace) ปริมาณสารระเหยคำนวณได้จากน้ำหนักของตัวอย่างถ่านหินที่หายไป เครื่องมือ

1. เตาเผาแบบท่อ
2. ครุชิลเปิดทำจากนิเกิลพร้อมฝา
3. เดซิกเคเตอร์

#### วิธีการทดลอง

1. เเผาครุชิลเปิดพร้อมฝาในเตาเผาอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที
2. นำออกจากเตาเผา ทิ้งให้เย็นในเดซิกเคเตอร์ จนถึงอุณหภูมิห้อง ชั่งน้ำหนักของครุชิลเปิดพร้อมฝา บันทึกผล
3. ชั่งตัวอย่างถ่านหินประมาณ 1 กรัม ใส่ในถ้วยนิเกิลที่ทราบน้ำหนักแน่นอน ปิดฝาให้สนิทบันทึกน้ำหนักตัวอย่าง
4. นำถ้วยนิเกิลพร้อมตัวอย่างถ่านหินเผาในเตาเผาแบบท่อ ให้ความร้อนแก่ถ่านหินที่บริเวณด้านบนของเตาเผาแบบท่อนาน 3 นาที และบริเวณกลางเตาเผาอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส อีก 7 นาที ตามลำดับ
5. นำถ้วยนิเกิลออกจากเตาเผา ทิ้งให้เย็นในเดซิกเคเตอร์ ชั่งน้ำหนักของถ้วยนิเกิลพร้อมฝาและถ่านหินที่เหลือ บันทึกผล

#### การคำนวณ

$$V = \left( \left( \frac{W_5 - W_6}{W} \right) \times 100 \right) - M$$

เมื่อ	V	=	ร้อยละของสารระเหย
	M	=	ร้อยละของความชื้น
	W <sub>5</sub>	=	น้ำหนักของครุชิลเปิดพร้อมฝาและน้ำหนักของถ่านหินก่อนเผา (กรัม)
	W <sub>6</sub>	=	น้ำหนักของครุชิลเปิดพร้อมฝาและน้ำหนักของถ่านหินหลังเผา (กรัม)
	W	=	น้ำหนักตัวอย่างถ่านหินเริ่มต้น (กรัม)

## 1.4 ปริมาณคาร์บอนคงตัวในตัวอย่างถ่านหิน

### การคำนวณ

ร้อยละของคาร์บอนคงตัว = ร้อยละความชื้น – ร้อยละเถ้า – ร้อยละสารระเหย

## 2. การหาค่าความร้อนของถ่านหิน (Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke by Adiabatic Bomb Calorimeter : ASTM D2015)

### หลักการ

เผาตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ภายใต้บรรยากาศแก๊สออกซิเจน ความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ภายในบอมบ์จะถ่ายเทให้กับน้ำที่อยู่รอบ ๆ ค่าความร้อนคำนวณได้จากผลคูณของความแตกต่างของอุณหภูมิน้ำ (ก่อนและหลังจุดระเบิด) กับค่าความจุความร้อนของเครื่องแคลอริมิเตอร์ ซึ่งหาได้จากการเผากรดเบนโซอิก (Benzoic acid) ภายใต้ภาวะเดียวกัน

### เครื่องมือ

1. Oxygen Bomb Calorimeter

### สารเคมี

1. น้ำกลั่น
2. กรดเบนโซอิก ( $C_6H_5COOH$ ) ควรได้รับมาตรฐานของ National Institute of Standard and Technology
3. เมทิลออเรนจ์ (Methyl Orange) เมทิลเรด (Methyl Red) หรือเมทิลเพอเพิล (Methyl Purple)
4. แก๊สออกซิเจน ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5
5. สารละลายมาตรฐานไฮเดียมคาร์บอเนต ความเข้มข้น 0.0709 N (3.76 กรัมต่อลิตร) สารละลายนี้ปริมาตร 1 มิลลิลิตรมีค่าเท่ากับ 1 แคลอรี
6. น้ำล้างบอมบ์ ละลายสารละลายเมทิลออเรนจ์อิ่มตัว 1 มิลลิลิตรในน้ำกลั่น 1 ลิตร

### การวิเคราะห์

การหาค่าความจุความร้อนมาตรฐานของบอมบ์แคลอริมิเตอร์

1. ชั่งกรดเบนโซอิกประมาณ 1 กรัม ให้มีความละเอียดถึง 0.0001 กรัม ใส่ในถ้วยใส่ตัวอย่างของเครื่อง
2. ตัดลวด (Fuse Wire) ความยาวประมาณ 10 เซนติเมตร ผูกที่ปลายทั้งสองข้างของส่วนจุดระเบิด ให้ลวดแตะผิวตัวอย่างถ่านหินในถ้วย
3. ล้างภายในบอมบ์ให้สะอาดด้วยน้ำกลั่น และเติมน้ำกลั่นลงในบอมบ์ 1 มิลลิลิตร

4. ประกอบบอมบ์ ปิดฝาให้แน่น อัดแก๊สออกซิเจนมีความดัน 30 บรรยากาศ และต้องเท่ากันทุกครั้ง ระวังอย่าให้ตัวอย่างกระจายจากถ้วยใส่ตัวอย่าง
5. นำบอมบ์ที่อัดแก๊สออกซิเจนแล้ววางลงในถังน้ำที่ปรับอุณหภูมิ ต่อขั้วไฟฟ้าสำหรับจุดระเบิด
6. เติมน้ำกลั่นลงในถังน้ำที่ปรับอุณหภูมิปริมาณ 2000 มิลลิลิตร ปรับอุณหภูมิของน้ำโดยการกวนให้อุณหภูมิคงที่และต่ำกว่าอุณหภูมิของห้องประมาณ 1-2 องศาเซลเซียส
7. ทิ้งไว้ 5 นาที เพื่อให้อุณหภูมิคงที่
8. เมื่ออุณหภูมิคงที่ บันทึกเป็นอุณหภูมิเริ่มต้น ( $T_i$ ) กดปุ่มจุดระเบิด
9. จับเวลาทุก ๆ 1 นาทีจนกระทั่งอุณหภูมิคงที่ บันทึกเป็นอุณหภูมิสุดท้าย ( $T_f$ )
10. ปิดเครื่องและนำบอมบ์ออกจากเครื่อง ค่อย ๆ ลดความดัน ถ้าภายในมีเขม่าหรือเผาไหม้ไม่หมดให้ทำใหม่
11. ล้างภายในบอมบ์ทุกส่วนด้วยน้ำล้างบอมบ์ที่เตรียมไว้ จนหมดความเป็นกรดและมีปริมาตรประมาณ 250 มิลลิลิตร ไตเตรตน้ำล้างด้วยสารละลายมาตรฐานโซเดียมคาร์บอเนต บันทึกปริมาตรที่ใช้
12. วัดความยาวหลอดที่เหลือ บันทึกผล

#### การคำนวณ

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

เมื่อ

E = ค่าความจุความร้อนของเครื่องแคลอริมิเตอร์ (ปีทีู่้ต่อองศาเซลเซียส)

H = ความร้อนของการเผาไหม้ของกรดเบนโซอิก (ปีทีู่้ต่อปอนด์)

g = น้ำหนักกรดเบนโซอิกที่ใช้ (กรัม)

$e_1$  = ปริมาตรของสารละลายที่ใช้ไตเตรต (มิลลิลิตร) โดย 1 มิลลิลิตร เทียบเท่ากับ 10 ปีทีู่้

$e_2$  = ความยาวหลอดที่ถูเผาไหม้ (เซนติเมตร)  $\times$  ค่าความร้อนของหลอด (ปีทีู่้ต่อเซนติเมตร)

T =  $T_f - T_i$  ผลต่างอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)

ทำการทดลองเหมือนที่กล่าวมาทุกประการตั้งแต่ข้อ 1-12 โดยเปลี่ยนจากกรดเบนโซอิก เป็นถ่านหินแล้วคำนวณค่าความร้อนได้จากสมการต่อไปนี้

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

เมื่อ	$Q_v(\text{gross})$	= ค่าความร้อนของถ่านหิน (บีที่ยุต่อปอนด์)
	T	= $T_f - T_i$ (องศาเซลเซียส)
	$e_1$	= ปริมาตรของสารละลายที่ใช้ไตเตรต (มิลลิลิตร) โดย 1 มิลลิลิตร เทียบเท่ากับ 10 บีที่ยุ
	$e_2$	= ความยาวหลอดที่ถูกเผาไหม้ (เซนติเมตร) × ค่าความร้อนของหลอด (บีที่ยุต่อเซนติเมตร)
	$e_3$	= 23.7 (บีที่ยุ) × ร้อยละกำมะถัน × น้ำหนักถ่านหินที่ใช้ (กรัม)

### 3. การวิเคราะห์ปริมาณกำมะถันรวม (Standard Test Method for Total Sulfur in the Analysis Sample of Coal and Coke : ASTM D3177 : Bomb Washing Method)

#### หลักการ

กำมะถันจากน้ำที่ได้จากการล้างบอมบ์ จะถูกทำให้อยู่ในรูปตะกอนแบเรียมซัลเฟต ( $\text{BaSO}_4$ )

#### เครื่องมือ

- เตาเผา (Muffle Furnace)
- ถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาปิด
- เดซิเคเตอร์

#### สารเคมี

- น้ำกลั่น
- แอมโมเนียไฮดรอกไซด์เข้มข้น (conc.  $\text{NH}_4\text{OH}$ ) ความถ่วงจำเพาะ 0.90
- สารละลายแอมโมเนียไฮดรอกไซด์เจือจาง (1+10) โดยผสมแอมโมเนียไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 ส่วนกับน้ำกลั่น 10 ส่วนโดยปริมาตร
- กรดไฮโดรคลอริก (1+1) โดย ผสมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 ส่วนกับน้ำกลั่น 1 ส่วนโดยปริมาตร

5. สารละลายแบเรียมคลอไรด์ ( $\text{BaCl}_2$ ) ละลายแบเรียมคลอไรด์ 100 กรัมในน้ำกลั่น และเจือจางให้ได้ปริมาตร 1 ลิตร
6. สารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ( $\text{AgNO}_3$ ) ละลายซิลเวอร์ไนเตรต 0.43 กรัมในน้ำกลั่น และปรับปริมาตรสารละลายให้เป็น 100 มิลลิลิตร
7. กระดาษกรองเบอร์ 1 และเบอร์ 42

#### วิธีการทดลอง

1. นำน้ำที่ได้จากการล้างบอมบ์และไตเตรตแล้วมาปรับให้เป็นกลางด้วยสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เจือจาง (จาก pH = 5.5 เป็น pH = 7.0)
2. นำไปต้มจนเดือดแล้วกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 ล้างกระดาษกรองให้ทั่วด้วยน้ำร้อน 5-6 ครั้ง
3. เติมกรดไฮโดรคลอริกที่เตรียมไว้ 1 มิลลิลิตร นำไปต้มและเติมสารละลายแบเรียมคลอไรด์ 10 มิลลิลิตรทีละน้อยด้วยปิเปต คนให้ทั่วตลอดเวลา ต้มต่อให้เดือดอีก 15 นาที ตั้งทิ้งไว้ค้างคืนหรืออย่างน้อย 2 ชั่วโมง
4. กรองตะกอนแบเรียมซัลเฟตด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 ล้างด้วยน้ำร้อนจนหมดแบเรียมคลอไรด์ (ทดสอบได้ด้วยการหยดสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตลงในน้ำล้างตะกอน 8-10 มิลลิลิตรแล้วน้ำไม่ขุ่น)
5. นำกระดาษกรองที่มีตะกอนแบเรียมซัลเฟตใส่ถ้วยกระเบื้องที่ทราบน้ำหนักแน่นอน ห่อกระดาษหุ้ม ๆ เพื่อป้องกันตะกอนกระเด็นออกจากถ้วย
6. เตาที่อุณหภูมิ 800-850 องศาเซลเซียสจนน้ำหนักคงที่ นำออกจากเตาเผา ปิดฝาและทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์
7. ชั่งน้ำหนักและบันทึกผล

#### การคำนวณ

$$\text{ร้อยละกำมะถันรวม} = 13.738 \times (A - B)/C$$

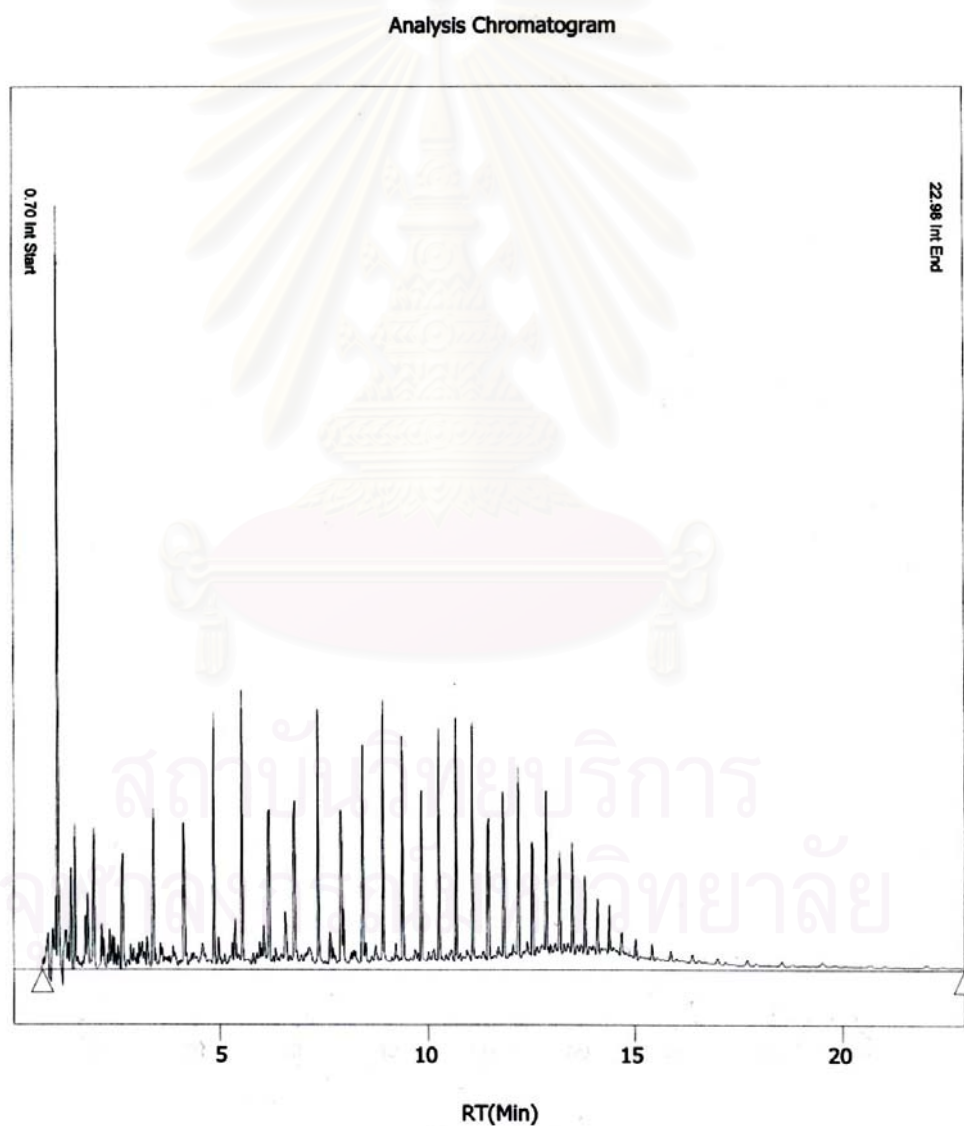
เมื่อ	A	=	น้ำหนักรวมของตะกอนแบเรียมซัลเฟต ( $\text{BaSO}_4$ ) จากตัวอย่างและครุซีเบล (กรัม)
	B	=	น้ำหนักของครุซีเบล (กรัม)
	C	=	น้ำหนักถ่านหินเริ่มต้น (กรัม)

## ภาคผนวก ค

## การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของเหลว

## 1. ตัวอย่างโครมาโทแกรมแสดงผลการแยกผลิตภัณฑ์ของเหลว

ผลิตภัณฑ์ของเหลวจะถูกนำมาละลายด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ในอัตราส่วน 1 ต่อ 100 โดยปริมาตร วิเคราะห์องค์ประกอบโดยใช้ Simulated Distillation Gas Chromatograph ตามมาตรฐาน ASTM D 2887 จะได้โครมาโทแกรมดังแสดงในรูปที่ ค1

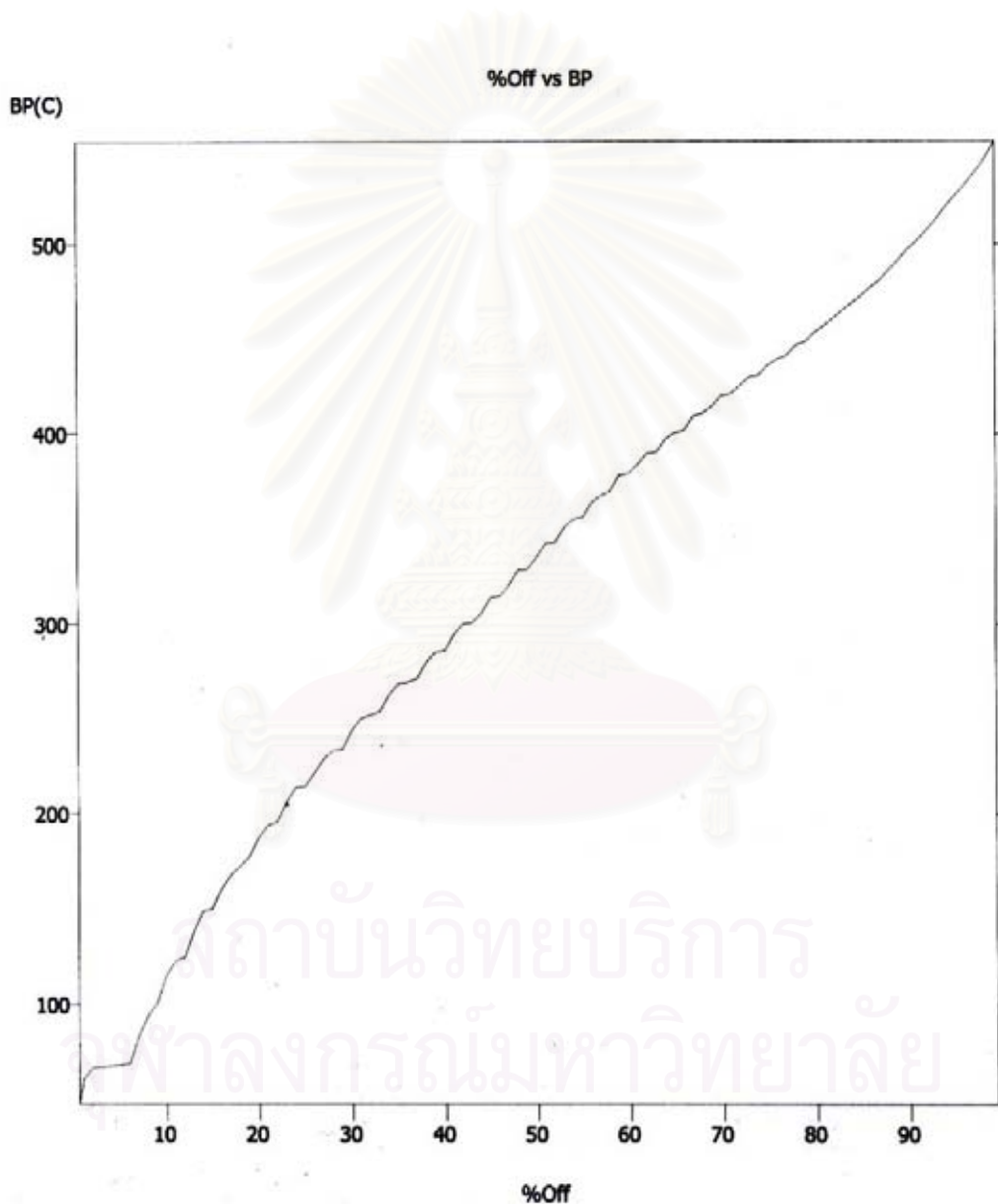


รูปที่ ค1 ตัวอย่างโครมาโทแกรมการวิเคราะห์น้ำมันดิบจาก Simulated Distillation Gas Chromatograph



## 2. ตัวอย่างกราฟแสดงการกลั่นตามจุดเดือด

โครมาโทแกรมที่ได้จากการแยกสารด้วยแก๊สโครมาโทกราฟ จะนำไปเปลี่ยนเป็นกราฟแสดงการกลั่นตามจุดเดือดด้วยโปรแกรม Simulated Distillation โดยจะทำการเทียบกับกราฟโครมาโทแกรมของสารผสมมาตรฐานตาม ASTM D2887 และโครมาโทแกรมเมื่อไม่มีการฉีดสารใด ๆ (Blank) ดังแสดงในรูปที่ ค2 จากนั้นจึงทำการแบ่งสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ของเหลวตามช่วงจุดเดือด ตามที่ได้อธิบายในบทที่ 3



รูปที่ ค2 ตัวอย่างกราฟแสดงการกลั่นตามจุดเดือดของน้ำมันดิบจาก Simulated Distillation Gas Chromatograph

## ภาคผนวก ง

## ตารางผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน

ตารางที่ ง1 การวิเคราะห์ Factor Effect Estimate และ SS ของร้อยละผลได้ของเหลวจากการแปรรูปร่วมของถ่านหินและกะลามะพร้าว

Factor	Effect Estimate	Sum of Squares	Percent Contribution
A	-25.95	2694.52	3.33
C	-9.20	338.51	10.00
D	-5.74	131.88	16.67
B	-3.69	54.52	23.33
CD	-2.53	25.52	30.00
ABD	-1.67	11.15	36.67
ABC	-1.50	9.02	43.33
ACD	-0.40	0.63	50.00
BCD	-0.12	0.06	56.67
ABCD	0.76	2.32	63.33
AC	0.93	3.44	70.00
BC	1.30	6.81	76.67
BD	1.68	11.31	83.33
AB	2.03	16.55	90.00
AD	2.29	20.96	96.67

Normal Probability Plot ของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวสำหรับการแปรรูปร่วมของถ่านหินและกะลามะพร้าว

- (A) แทน อุณหภูมิ
- (B) แทน เวลา
- (C) แทน ขนาดอนุภาคเฉลี่ย
- (D) แทน อัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว

## ภาคผนวก จ

## การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊สโดยแก๊สโครมาโทกราฟี

เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีที่ใช้วิเคราะห์ คือ Agilent 3000A Micro GC ซึ่งประกอบด้วยดีเทคเตอร์แบบ TCD และคอลัมน์แบบ packed column จำนวน 3 คอลัมน์ คือ Molecular sieve Plot-Q และ OV-1 โดยข้อมูลและภาวะของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี แสดงดังตาราง จ1

ตาราง จ1 ข้อมูลและภาวะของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

3000 Micro GC	Molecular sieve	Plot Q	OV-1
Injector Type	Backflush	Timed	Timed
Carrier Gas	Argon	Helium	Helium
Detector Type	TCD	TCD	TCD
Inlet Type	Heated	Heated	Heated
Sample Inlet Temperature (°C)	45	45	45
Injector Temperature (°C)	100	55	85
Column Temperature (°C)	110	60	90
Sampling Time (s)	10	10	10
Inject Time (ms)	10	30	30
Run Time (s)	240	240	240
Post Run Time (s)	10	30	30
Pressure Equilibration Time (s)	10	60	60
Column Pressure (psi)	40.00	20.00	25.00
Post Run Pressure (psi)	40.00	20.00	33.00
Detector Filament	Enabled	Enabled	Enabled
Detector Sensitivity	High	High	High
Detector Data Rate (Hz)	50	50	50
Backflush Time (s)	9.5	-	-

## ภาคผนวก จ

## ตารางผลการส่งเสริมกันแบบทวีคูณ

การแปรรูปร่วมของถ่านหินและกะลามะพร้าวให้เป็นของเหลว ซึ่งพิจารณาผลการส่งเสริมกันแบบทวีคูณของค่าร้อยละการเปลี่ยนรวม และร้อยละผลได้ของเหลว แสดงดังตาราง จ1 และจ2

ตาราง จ1 ผลการส่งเสริมกันแบบทวีคูณของร้อยละการเปลี่ยนรวม

อัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว	ร้อยละการเปลี่ยนรวมจากการคำนวณ	ร้อยละการเปลี่ยนรวมจากการทดลอง	ผลการส่งเสริมกันแบบทวีคูณ
0:1	-	87.35	-
1:3	80.02	87.29	เกิด
1:1	72.69	81.75	เกิด
3:1	65.36	75.86	เกิด
1:0	-	58.03	-

ตาราง จ2 ผลการส่งเสริมกันแบบทวีคูณของร้อยละผลได้ของเหลว

อัตราส่วนถ่านหินต่อกะลามะพร้าว	ร้อยละการเปลี่ยนรวมจากการคำนวณ	ร้อยละการเปลี่ยนรวมจากการทดลอง	ผลการส่งเสริมกันแบบทวีคูณ
0:1	-	71.46	-
1:3	65.20	62.75	ไม่เกิด
1:1	58.94	36.55	ไม่เกิด
3:1	52.67	52.61	ไม่เกิด
1:0	-	46.41	-

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวพรรณะ เตียงพานิช เกิดวันที่ 24 เมษายน 2524 สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค สาขาเคมีวิศวกรรม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2545 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2546



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย