

การแปรรูปร่วมของถ่านหินและพลาสติกผสมให้เป็นของเหลวด้วยตัวทำละลายภาวะเหนือวิกฤต



นางสาวนิรมล ปัญญาวงศ์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

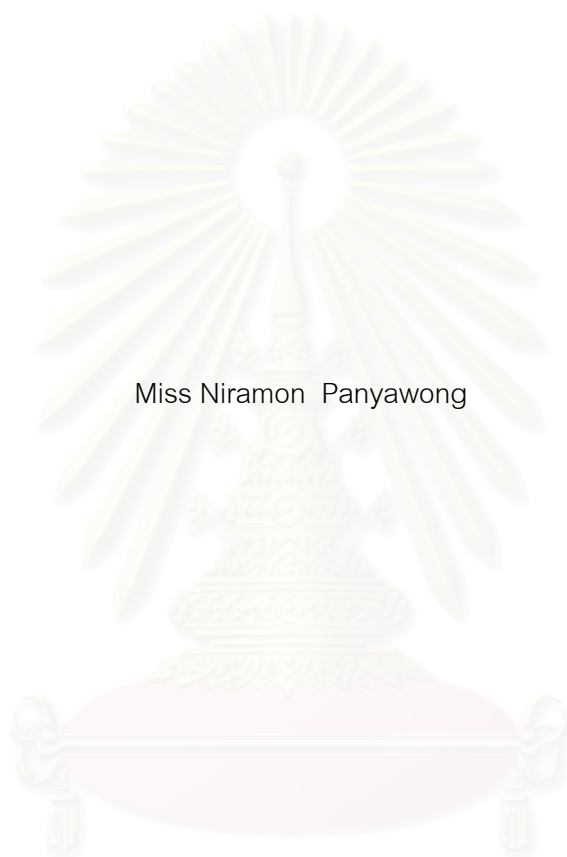
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-17-6175-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CO-LIQUEFACTION OF COAL AND PLASTIC MIXTURES IN SUPERCRITICAL SOLVENT



Miss Niramon Panyawong

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 974-17-6175-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์      การแปรรูปรวมของถ่านหินและพลาสติกผสมให้เป็นของเหลวด้วยตัวทำ  
ละลายภาวะเหนือวิกฤต  
โดย                              นางสาวนิรมล ปัญญาวงศ์  
สาขาวิชา                      เคมีเทคนิค  
อาจารย์ที่ปรึกษา              รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ งามประเสริฐสุสิทธิ์  
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม        ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ

---

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.เปี่ยมศักดิ์ เมณะเศวต)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

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

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

.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.เลอสรวง เมฆสุต)

.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เก็จวดี พฤกษาทร)

นิรมล ปัญญาวงศ์ : การแปรรูปร่วมของถ่านหินและพลาสติกผสมให้เป็นของเหลวในตัวทำละลาย  
 ภาวะเหนือวิกฤต (CO-LIQUFACTION OF COAL AND PLASTIC MIXTURES IN  
 SUPERCRITICAL SOLVENT) อาจารย์ที่ปรึกษา: รศ.ดร.สมเกียรติ งามประเสริฐสุทธิ, อาจารย์ที่  
 ปรึกษาร่วม: ศ.ดร.ภัทรพรณ ประศาสน์สารกิจ, จำนวน 114 หน้า. ISBN 974-17-6175-9

งานวิจัยนี้เน้นที่จะศึกษากระบวนการแปรรูปถ่านหินลิกไนต์ จากแหล่งแม่เมาะ ร่วมกับพลาสติก  
 ผสม ประกอบด้วย พอลิเอทิลีน ความหนาแน่นสูง พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ พอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีน  
 และขยะพลาสติก ให้เป็นของเหลวด้วยตัวทำละลายเตตระลินผสมโทลูอินที่ภาวะเหนือวิกฤต ในเครื่อง  
 ปฏิกรณ์ทนอุณหภูมิและความดันสูงแบบแบตช์ ขนาดความจุ 250 มิลลิลิตร โดยออกแบบการทดลองเป็น  
 แบบแฟกทอเรียล 2 ระดับที่ส่งผลกระทบต่อร้อยละการเปลี่ยนถ่านหินและพลาสติก และร้อยละผลได้ของเหลว โดย  
 ทดลองเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรต่อไปนี้คือ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 430-460 องศาเซลเซียส ร้อยละโดย  
 น้ำหนักของพลาสติกผสม 40-70 อัตราส่วนถ่านหินและพลาสติกผสมต่อตัวทำละลาย 3:2 –1:1(wt./wt.)  
 และร้อยละโดยปริมาตรของเตตระลินในตัวทำละลายผสม 80-100 จากการทดลอง ได้ภาวะที่เหมาะสม คือ  
 อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส อัตราส่วนถ่านหินและพลาสติกผสมต่อตัวทำละลาย 1:1 ร้อยละพลาสติกผสม  
 70 และทำการทดลองในตัวทำละลายเตตระลินร้อยละ 100 ให้ร้อยละการเปลี่ยนถ่านหินและพลาสติก  
 89.43 และร้อยละผลได้ของเหลว 63.42

จากการวิเคราะห์ผลผลิตที่เกิดขึ้นโดยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี พร้อมด้วยซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นและเพิ่มถ่านหินในสารตั้งต้นช่วยปรับปรุงคุณภาพผลผลิตที่เกิดขึ้นของเหลว แต่ร้อยละการเปลี่ยนและผลได้ของเหลวลดลง

เมื่อนำขยะพลาสติกมาทำการทดลองพบว่าร้อยละการเปลี่ยนผลผลิตที่เกิดขึ้นของเหลวลดลง แต่ร้อยละ  
 ผลได้ของเหลวมีค่าใกล้เคียงกับเม็ดพลาสติก และเมื่อมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 3 ชนิด คือ ไอร์ออน(III)ซัลไฟด์  
 เหล็กร้อยละ 2.5 บนถ่านหิน ไอร์ออน(III)ออกไซด์ เหล็กร้อยละ 2.5 บนถ่านหิน และ เหล็กร้อยละ 5 บนถ่าน  
 กัมมันต์ ปริมาณ 0.75 กรัม ช่วยเพิ่มร้อยละการเปลี่ยนเล็กน้อย แต่ร้อยละผลได้ผลผลิตที่เกิดขึ้น  
 อย่างมีนัยสำคัญ

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

## 4572347223 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD: CO-LIQUEFACTION / LIGNITE / PLASTIC MIXTURES / WASTE PLASTIC

NIRAMON PANYAWONG : CO-LIQUEFACTION OF COAL AND PLASTIC MIXTURES IN SUPERCRITICAL SOLVENT. THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF. SOMKIAT NGAMPRASERTSITH, Dr. de l' INPT., THESIS CO-ADVISOR: PROF. PATTARAPAN PRASASSARAKICH, PhD., 114 PP. ISBN 974 – 17-6175 -9

The aim of this research was to study the direct co-liquefaction experiment of Maemoh lignite and plastic mixtures containing high-density polyethylene (HDPE), low-density polyethylene (LDPE), polypropylene (PP), polystyrene (PS) and Waste Plastic in supercritical toluene-tetralin (v/v). This study was conducted in a 250-ml high pressure and high temperature batch reactor. The two-level factorial experimental designed method was used to optimize the liquefaction process carried out with respect to conversion and liquid yield. The process variables are temperature range of 430-460 °C, plastic mixtures 40 to 70% (wt./wt.), feed stock: solvent ratio 3:2 and 1:1 (w/w), tetralin 80-100% (v/v) as solvent. The optimum condition was temperature at 430°C in tetralin 100%, feed stock: solvent ratio 1:1 obtaining 89.43% of total conversion and 63.42% of liquid yield at plastic mixtures 70% (wt./wt.), respectively.

The characterization of liquid product by simulated distillation gas chromatography showed that increasing temperature and lignite portion in feed improved the quality of liquid product but total conversion and liquid yield decreased.

The quantity of liquid yield from liquefaction of lignite and waste plastic was similar to that obtained from lignite and plastic mixtures. Finally, using Iron-base catalysts such as  $Fe_2S_3$ ,  $Fe_2O_3$  and Fe/AC can slightly increase conversion but significantly increase liquid yield.

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 งามประเสริฐสิทธิ์ และ ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรหม ประศาสน์สารกิจ ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำการทำวิจัย ตลอดจนให้ความเห็นเพื่อปรับปรุงแก้ไขการทำวิจัยให้มีความสมบูรณ์ด้วยดียิ่ง รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำแนะนำ

งานวิจัยเรื่อง “การแปรรูปร่วมของถ่านหินและพลาสติกผสมให้เป็นของเหลวในตัวทำละลายภาวะเหนือวิกฤต” สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีโดยได้รับการสนับสนุน จากโครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านเชื้อเพลิงภายใต้โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ศูนย์ปิโตรเลียมและเทคโนโลยีปิโตรเคมี รวมถึงทุนบัณฑิตวิทยาลัย ซึ่งผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.เลอสรวง เมษสุต และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เก็จวดี พฤษาทร กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ คำแนะนำ ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบคุณ บริษัท ทีพีไอ โพลีน จำกัด มหาชน ที่กรุณาอนุเคราะห์ตัวอย่างเม็ดพลาสติกเพื่อใช้ในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ และเจ้าหน้าที่ในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ และอำนวยความสะดวกตลอดงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วง

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ได้ ให้การสนับสนุนและกำลังใจจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1    บทนำ.....	1
2    วารสารปริทัศน์.....	3
2.1  ถ่านหิน.....	3
2.2  วิธีการพัฒนาการใช้ถ่านหิน.....	9
2.3  พลาสติก.....	15
2.4  ของไหลภาวะเหนือวิกฤต.....	25
2.5  งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	30
3    เครื่องมือและวิธีการทดลอง.....	34
3.1  รูปแบบการศึกษา.....	34
3.2  เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง.....	34
3.3  สารตั้งต้นและสารเคมี.....	34
3.4  การดำเนินการวิจัย.....	36
3.5  ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	41
4    ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	46
4.1  สมบัติสารตั้งต้น.....	46
4.2  การแปรรูปร่วมของถ่านหินและพลาสติกผสมให้เป็นของเหลว ด้วยตัวทำละลายเตตระลิทราเวเหนือวิกฤต.....	48
4.3  ผลของตัวแปรต่างๆที่มีต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแปรรูปร่วม ของถ่านหินและพลาสติกผสม.....	55

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4 การแปรรูปถ่านหินและพลาสติกผสมให้เป็นของเหลว ในตัวทำละลายใช้แล้ว.....	69
4.5 การแปรรูปร่วมของถ่านหินและพลาสติกผสมหรือขยะพลาสติก ในตัวทำละลายเตตระลิน.....	73
4.6 การเปรียบเทียบร้อยละการเปลี่ยนและร้อยละผลได้ของเหลว.....	80
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	81
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	81
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	84
รายการอ้างอิง.....	85
ภาคผนวก.....	89
ภาคผนวก ก การคำนวณและข้อมูลการทดลอง.....	90
ภาคผนวก ข การวิเคราะห์สมบัติถ่านหิน.....	92
ภาคผนวก ค การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของเหลวด้วย SDGC.....	99
ภาคผนวก ง การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของเหลวด้วย GC/MS.....	101
ภาคผนวก จ ตารางผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน.....	103
ภาคผนวก ฉ สภาวะในการทดลอง.....	106
ภาคผนวก ช ตารางผลการทดลอง.....	108
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	114



## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1	สมบัติทางกลและสมบัติทางความร้อนของพอลิพรอพิลีน ..... 23
2.2	การเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของแก๊ส ของไหลภาวะเหนือวิกฤต และของเหลว ..... 27
3.1	ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษา..... 37
3.2	การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล 4 ตัวแปร..... 38
3.3	ข้อมูลและภาวะของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี..... 44
4.1	ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหินและพลาสติกผสม..... 47
4.2	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของถ่านหิน..... 47
4.3	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของเม็ดพลาสติก..... 47
4.4	การแปรรูปพร้อมของถ่านหินและพลาสติกผสมให้เป็นของเหลวในตัวทำละลาย โทลูอีนและเตตระลิโนภาวะเหนือวิกฤต..... 49
4.5	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละผลได้ของเหลว..... 50
4.6	ผลการแปรรูปพลาสติก 6 ชนิด คือ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) พอลิเอทิลีน ความหนาแน่นต่ำ (LDPE) พอลิพรอพิลีน (PP) พอลิสไตรีน (PS) พลาสติก ผสม และขยะพลาสติกเป็นของเหลว ที่ ภาวะ อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนถ่านหินและพลาสติกผสมต่อตัวทำละลาย 3:2 ในตัวทำละลาย 2 ชนิด คือ เตตระลิโนร้อยละ 80 และเตตระลิโนร้อยละ 100..... 52
4.7ก	ผลของอุณหภูมิต่อสมบัติแบบประมาณของของแข็งส่วนที่เหลือ..... 60
4.7ข	ผลของอุณหภูมิต่อค่าความร้อนและร้อยละการเพิ่มของค่าความร้อนของของแข็ง ส่วนที่เหลือ ..... 60
4.8ก	ผลของร้อยละเตตระลิโนในตัวทำละลายผสมต่อสมบัติแบบประมาณ ของของแข็งส่วนที่เหลือ..... 64
4.8ข	ผลของร้อยละเตตระลิโนในตัวทำละลายผสมต่อค่าความร้อนและ ร้อยละการเพิ่มของค่าความร้อนของของแข็งส่วนที่เหลือ..... 64
4.9ก	ผลของร้อยละโดยน้ำหนักพลาสติกผสมต่อสมบัติแบบประมาณ ของของแข็งส่วนที่เหลือ..... 68

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง		หน้า
4.9ข	ผลของร้อยละโดยน้ำหนักพลาสติกผสมต่อค่าความร้อนและร้อยละการเพิ่มของค่าความร้อนของของแข็งส่วนที่เหลือ .....	68
4.10ก	แสดงการเปรียบเทียบสมบัติแบบประมาณของของแข็งส่วนที่เหลือจากการแปรสภาพระหว่างถ่านหินและพลาสติกผสมในตัวทำละลายเตตระลินและตัวทำละลายใช้แล้ว.....	72
4.10ข	ผลของตัวทำละลายต่อค่าความร้อนและร้อยละการเพิ่มของค่าความร้อนของของแข็งส่วนที่เหลือ ทำการทดลองในตัวทำละลายเตตระลินร้อยละ 100 และตัวทำละลายใช้แล้ว .....	72
4.11ก	ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อสมบัติแบบประมาณของของแข็งส่วนที่เหลือ.....	77
4.11ข	ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อค่าความร้อนและร้อยละการเพิ่มของค่าความร้อนของของแข็งส่วนที่เหลือ .....	78
4.12	การเปรียบเทียบร้อยละการเปลี่ยนและร้อยละผลได้ของเหลวของงานวิจัยนี้กับงานวิจัยนี้.....	80
๑1	การวิเคราะห์ Factor Effect Estimate และ SS ของร้อยละผลได้ของเหลวจากการแปรสภาพของถ่านหินและพลาสติกผสมให้เป็นของเหลวด้วยตัวทำละลายภาวะเหนือวิกฤต.....	101
๑2	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละการเปลี่ยนรวมจากการแปรสภาพของถ่านหินและพลาสติกผสมให้เป็นของเหลวด้วยตัวทำละลายภาวะเหนือวิกฤต.....	104
๑3	การวิเคราะห์ Factor Effect Estimate และ SS ของร้อยละการเปลี่ยนรวม.....	105
๑๑	ภาวะในการทดลอง.....	106
๑๑	ผลของอุณหภูมิ ที่มีต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแปรสภาพถ่านหินและพลาสติกผสมให้เป็นของเหลว.....	108
๑๒	ผลของร้อยละโดยปริมาตรของเตตระลิน ที่มีต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแปรสภาพถ่านหินและพลาสติกผสมให้เป็นของเหลว.....	109
๑๒	ผลของร้อยละโดยน้ำหนักของพลาสติกผสม ที่มีต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแปรสภาพถ่านหินและพลาสติกผสมให้เป็นของเหลว.....	110
๑๔	ผลของตัวทำละลาย ที่มีต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแปรสภาพถ่านหินและพลาสติกผสมให้เป็นของเหลว.....	111

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
ช5 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยา ที่มีต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแปรรูปถ่านหินและพลาสติกผสม ให้เป็นของเหลว.....	112
ช6 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยา ที่มีต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแปรรูปถ่านหินและขยะพลาสติก ให้เป็นของเหลว.....	113



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
2.1 โมเลกุลสมมติของถ่านหิน.....	4
2.2 ถ่านหินลิกไนต์.....	7
2.3 แสดงการให้ไฮโดรเจนของ Tetrahydro naphthalene (Tetralin).....	13
2.4 ข้อมูลและการคาดการณ์การบริโภคผลิตภัณฑ์พลาสติกภายในประเทศตั้งแต่ ปี ค.ศ. 1999 ถึง ค.ศ.2008.....	16
2.5 เฟสไดอะแกรมของของไหลภาวะเหนือวิกฤต .....	26
2.6 เส้นทางการเข้าสู่ภาวะเหนือวิกฤต (จุด C) จากของเหลว (จุด A) และจากแก๊ส (จุด B) .....	27
2.7 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิและความดันต่าง ๆ.....	29
3.1 เครื่องปฏิกรณ์ Parr Reactor Model 4842.....	35
4.1 Normal Probability Plot ของร้อยละผลได้ของเหลวสำหรับการแปรรูปร่วมของถ่านหินและพลาสติกผสม.....	50
4.2ก ผลของชนิดพลาสติกที่ใช้ที่มีต่อ ร้อยละการเปลี่ยนแปลงและร้อยละผลได้ของเหลว.....	54
4.2ข แสดงผลของชนิดพลาสติกที่มีต่อการแจกแจงของผลิตภัณฑ์.....	54
4.3ก ผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงรวมและร้อยละผลได้ของเหลว .....	58
4.3ข ผลของอุณหภูมิต่อการแจกแจงของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแปรรูปร่วมระหว่าง ถ่านหินและพลาสติกผสม .....	58
4.3ค ผลของอุณหภูมิต่อการแจกแจงของผลิตภัณฑ์ของเหลว.....	58
4.3ง ผลของอุณหภูมิต่อการแจกแจงของผลิตภัณฑ์แก๊ส.....	59
4.4ก ผลของร้อยละของเตตระลินในตัวทำละลายผสม ต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงและร้อยละผลได้ของเหลว .....	62
4.4ข ผลของร้อยละของเตตระลินในตัวทำละลายผสมต่อการแจกแจงของผลิตภัณฑ์ .....	62
4.4ค ผลของร้อยละของเตตระลินในตัวทำละลายผสมต่อการแจกแจงของผลิตภัณฑ์ของเหลว.....	63

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4.4ง ผลของร้อยละของเตตระลินในตัวทำละลายผสมต่อการแจกแจงของผลิตภัณฑ์ แก๊ส.....	63
4.5ก ผลของร้อยละโดยน้ำหนักของพลาสติกผสม ต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงและ ร้อยละผลได้ของเหลว .....	66
4.5ข ผลของร้อยละโดยน้ำหนักของพลาสติกผสม ต่อการแจกแจงของผลิตภัณฑ์ .....	66
4.5ค ผลของร้อยละโดยน้ำหนักของพลาสติกผสม ต่อการแจกแจงของผลิตภัณฑ์ ของเหลว.....	67
4.5ง ผลของร้อยละโดยน้ำหนักของพลาสติกผสม ต่อการแจกแจงของผลิตภัณฑ์แก๊ส.....	67
4.6ก การเปรียบเทียบผลร้อยละการเปลี่ยนแปลง และร้อยละผลได้ของเหลว ในการแปรรูปร่วมของถ่านหินและพลาสติกผสม โดยใช้ ตัวทำละลาย เตตระลิน และตัวทำละลายใช้แล้ว.....	70
4.6ข การแจกแจงผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการแปรรูปร่วมของถ่านหินและ พลาสติกผสมในตัวทำละลายใช้แล้วเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองใน ตัวทำละลายเตตระลิน ร้อยละ100.....	70
4.6ค การแจกแจงผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการแปรรูปร่วมของถ่านหิน และ พลาสติกผสม ทำการทดลองในตัวทำละลายใช้แล้วเทียบกับผลที่ได้จาก การทดลองในตัวทำละลายเตตระลิน ร้อยละ 100.....	71
4.7ก การเปรียบเทียบผลร้อยละการเปลี่ยนแปลงและร้อยละผลได้ของเหลวในการแปรรูปร่วม ของถ่านหินและพลาสติกผสม โดยใช้ เม็ดพลาสติกผสม และขยะพลาสติก.....	73
4.7ข การเปรียบเทียบผลการแจกแจงผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแปรรูปร่วมของถ่านหินและ พลาสติกผสม โดยใช้ เม็ดพลาสติกผสมและขยะพลาสติกผสม.....	74
4.7ค ผลการแจกแจงผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการแปรรูปร่วมของถ่านหินและ พลาสติกผสม เปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์แก๊สจากขยะพลาสติกผสม.....	74
4.8ก ผลของใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 3 ชนิดที่มีต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงและร้อยละผลได้ของเหลว จากการแปรรูปร่วมถ่านหินและพลาสติกผสมให้เป็นของเหลว เทียบกับไม่ใช้ ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	76
4.8ข ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการแจกแจงผลิตภัณฑ์.....	76
4.8ค ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการแจกแจงผลิตภัณฑ์แก๊ส.....	77

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4.9 ผลของการแปรปรูปร่วมถ่านหินและขยะพลาสติกให้เป็นของเหลวในตัวทำละลาย โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 3 ชนิดเทียบกับไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส อัตราส่วนถ่านหินและพลาสติกผสมต่อตัวทำละลาย 3:2 ร้อยละพลาสติกผสม 70 และทำการทดลองในตัวทำละลายเตตระลิน ร้อยละ 100.....	79
ค1 ตัวอย่างโครมาโทแกรมการวิเคราะห์น้ำมันดิบจาก Simulated Distillation Gas Chromatograph.....	99
ค2 ตัวอย่างกราฟแสดงการกลั่นตามจุดเดือดของน้ำมันดิบจาก Simulated Distillation Gas Chromatograph.....	100
ง1 ตัวอย่างโครมาโทแกรมการวิเคราะห์ตัวทำละลายใช้แล้วจากเครื่อง GC/MS .....	101
ง2 ตัวอย่างโครมาโทแกรมการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของเหลวจากเครื่อง GC/MS .....	101
ง3 ตัวอย่างโครมาโทแกรมการวิเคราะห์น้ำมันดิบจากเครื่อง GC/MS .....	102
จ1 Normal Probability Plot ของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวสำหรับการแปรปรูปร่วมของถ่านหิน และพลาสติกผสม.....	105

## บทที่ 1

### บทนำ

#### แนวเหตุผล และสมมติฐานของการวิจัย

ประเทศไทยมีทรัพยากรถ่านหินปริมาณมาก กล่าวคือในปีงบประมาณ 2546 กรมทรัพยากรธรณี แสดงปริมาณสำรองถ่านหินในประเทศเหลืออยู่ประมาณ 1335.7 ล้านตันใน 34 แหล่ง ซึ่งประมาณร้อยละ 82 ของปริมาณสำรองนี้หรือประมาณ 1184.30 ล้านตัน เป็นปริมาณสำรองของแหล่งถ่านหินลิกไนต์แม่เมาะ จังหวัดลำปางซึ่งเป็นแหล่งถ่านหินลิกไนต์ที่ใหญ่ที่สุดของประเทศ ลิกไนต์เป็นถ่านหินคุณภาพต่ำ การแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงเหลวได้คุณภาพค่อนข้างต่ำ ดังนั้นการนำพลาสติกมาใช้เพื่อเป็นแหล่งให้ไฮโดรเจนในกระบวนการแปรรูปร่วมถ่านหินให้เป็นของเหลว จึงเป็นแนวทางที่ดีในการปรับปรุงคุณภาพเชื้อเพลิงเหลวที่ได้ อีกทั้งยังเป็นการแก้ไขปัญหาสิ่งแวดล้อมจากขยะพลาสติกเนื่องจากปัจจุบันการบริโภคพลาสติกในประเทศ มีแนวโน้มสูงขึ้นทุก ๆ ปี ปีละกว่า 2.0 ล้านตัน ทำให้มีขยะพลาสติกเกิดขึ้นในแต่ละวันเป็นจำนวนมาก นอกจากนี้แล้วผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ใช้กันอยู่ในชีวิตประจำวันนั้นเกือบทุกประเภทจะมีพลาสติกหลายชนิดเป็นส่วนประกอบแต่เชื่อมกันอยู่ได้ด้วยสารเติมแต่งบางอย่างเช่น ขวดพลาสติกบรรจุน้ำอัดลมจะระบุให้ทราบว่า เป็นพอลิเอทิลีนเทอแรพทาเลต (PET) แต่ความจริงแล้วส่วนฐานของขวดพลาสติกทำด้วยพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) นอกจากนี้ขวดพลาสติกยังมีส่วนประกอบอื่นอีก ได้แก่ ป้ายกระดาษ และกาว ซึ่งทำมาจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์จำนวนเล็กน้อย รวมถึงฝาปิดขวดที่อาจเป็นอะลูมิเนียมหรือพลาสติกและมีพอลิพรอพิลีนเป็นชั้นใน ทำให้ขยะพลาสติกประกอบด้วยพลาสติกหลายชนิด การแยกขยะพลาสติกเป็นแต่ละชนิดโดยเฉพาะ จะต้องเสียค่าใช้จ่าย และมีความยุ่งยากพอสมควร

งานวิจัยนี้จึงได้นำกระบวนการร่วม (coprocess) ระหว่างลิกไนต์กับพลาสติกผสมมาใช้เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงเหลวเนื่องจากพลาสติกเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนซึ่งมีปริมาณไฮโดรเจนสูงเมื่อเทียบกับถ่านหิน จึงเป็นแหล่งให้ไฮโดรเจนที่ดี เมื่อพลาสติกได้รับความร้อนจะเกิดการแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระกับไฮโดรเจน และทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระของถ่านหิน ซึ่งจะเป็นผลดีต่อการเปลี่ยนแปลงไปเป็นผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ยังศึกษาถึงการนำสารประกอบที่สามารถให้ไฮโดรเจนแก่กระบวนการสังเคราะห์ของเหลว โดยเป็นของเหลวภาวะเหนือวิกฤต ซึ่งของไหลภาวะเหนือวิกฤตมีสมบัติอยู่ระหว่างแก๊สและของเหลว ความหนาแน่นของของไหลภาวะเหนือวิกฤตมีค่าใกล้เคียงกับของเหลว เมื่อนำมาใช้เป็นตัวทำละลาย โมเลกุลของสารที่ต้องการละลายจะถูกล้อมรอบด้วยโมเลกุลของของไหลภาวะเหนือวิกฤต เกิดอันตรกิริยากัน ลดพลังงาน

เอนทาลปี เกิดการละลายได้ดี ขณะเดียวกันของไหลภาวะเหนือวิกฤตก็มีความหนืดและการแพร่กระจายใกล้เคียงกับแก๊ส ทำให้สามารถแทรกเข้าไปในโครงสร้างภายในของตัวถูกละลาย (Solute Matrix) ได้ดี ด้วยสมบัติเหล่านี้ของไหลภาวะเหนือวิกฤต มาใช้เป็นตัวทำละลายซึ่งมีข้อดีเหนือตัวทำละลายที่เป็นของเหลวคือ มีอัตราของการถ่ายโอนมวล เร็วกว่า และมีความสามารถในการทำละลาย (Solvent Power) ที่ดีกว่าส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงไปเป็นผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวเมื่อเกิดปฏิกิริยาระหว่างถ่านหินและพลาสติก ผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้จะมีน้ำหนักโมเลกุลลดลงเป็น แก๊ส ของเหลวและกากของแข็งซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

### วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษากระบวนการแปรรูปร่วมของถ่านหินและพลาสติกผสมให้เป็นของเหลวด้วยตัวทำละลายภาวะเหนือวิกฤต
2. ศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อกระบวนการแปรรูปร่วมให้เป็นของเหลว รวมทั้งหาภาวะที่เหมาะสมในการแปรรูปถ่านหินและพลาสติกผสมให้เป็นของเหลว

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัยนี้

1. ได้ภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการแปรรูปร่วมของถ่านหินและพลาสติกผสมให้เป็นของเหลวด้วยตัวทำละลายภาวะเหนือวิกฤต
2. เป็นการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือทิ้งประเภทพลาสติกมาเข้าร่วมกับกระบวนการสังเคราะห์เชื้อเพลิงเหลวจากถ่านหินเพื่อเพิ่มมูลค่าและไม่ก่อให้เกิดปัญหามลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## บทที่ 2

### วารสารปริทัศน์

#### 2.1 ถ่านหิน (Meyers, 1981)

ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงแข็งชนิดหนึ่งที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติมีลักษณะเป็นหินตะกอนที่เกิดจากการทับถมของซากพืชที่ตาย สิ่งมีชีวิต ชั้นส่วนของพืช ตลอดจนถึงดินโคลนที่มีอินทรีย์วัตถุที่ทับถมกันแล้วสะสม จนเมื่อเวลาผ่านไปเป็นร้อยล้านปี ทำให้สิ่งเหล่านี้ยุบแน่น แล้วเกิดการเปลี่ยนแปลงทางธรณีวิทยาของโลก เกิดความร้อนและความกดดันมากขึ้น จนตะกอนซากพืชที่ทับถมกันเหล่านั้นเกิดปฏิกิริยาทางเคมี ฟิสิกส์ และชีววิทยา จนแปรสภาพเป็นถ่านหินที่สามารถติดไฟได้ จึงมีการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง

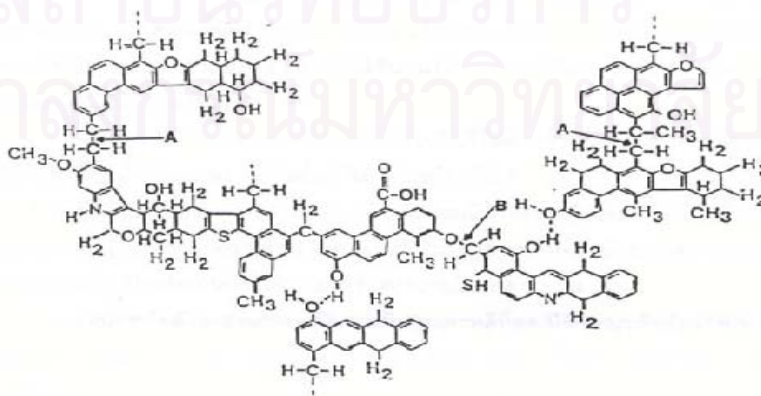
##### 2.1.1 โครงสร้างและองค์ประกอบของถ่านหิน (Meyers, 1981 and Schlosburg, 1985)

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 ไพไรต์ ถูกออกซิไดซ์ กำมะถันจะสลายตัวให้แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ คาร์บอนเนตจะสลายตัวให้แก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนเหล็กจะถูกเปลี่ยนสภาพให้อยู่ในรูปของสารประกอบออกไซด์ของเหล็ก ซึ่งเป็นส่วนประกอบของเถ้า โครงสร้างโมเลกุลของถ่านหินแบ่งออกเป็น 2 ส่วนตามสมบัติทางเคมี คือ ส่วนโครงสร้างอินทรีย์ (Organic Structure) และส่วนที่เป็นองค์ประกอบแร่ธาตุ

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

โครงสร้างทางเคมีของถ่านหินประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และมีปริมาณของกำมะถันและไนโตรเจนเป็นส่วนน้อย เมื่อคิดจากพื้นฐานของอัตราส่วนโดยน้ำหนักของอะตอมธาตุ (Atomic Ratio) พบว่าไฮโดรเจนเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในโครงสร้างถ่านหินซึ่งเมื่อศักดิ์ของถ่านหินสูงขึ้น 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 และไทอลด ดังแสดงเป็นโมเลกุลสมมติในรูปที่ 2.1 ซึ่งโครงสร้างของสารประกอบอินทรีย์ต่าง ๆ จะเชื่อมโยงด้วยพันธะเคมีเป็นพอลิเมอร์เชื่อมขวาง (Crosslinked Polymer) และมีบางส่วนที่ไม่เป็นโครงสร้างพอลิเมอร์ จากการวัดความสามารถของการเป็นผลึก (Crystallinity) ของถ่านหินโดยใช้ X-ray Scattering Technique พบว่า เมื่อศักดิ์ของถ่านหินสูงขึ้น วงแหวนแอโรแมติกจะเชื่อมกันมากขึ้นและผลึกมีลักษณะคล้ายแกรไฟต์ และเมื่อโมเลกุลของถ่านหินได้รับความร้อน จะเกิดการสลายตัวซึ่งปัจจัยที่สำคัญคือ จำนวนไฮโดรเจนที่มีอยู่ในโมเลกุลวงแหวนไฮโดรแอโรแมติก และแขนอะลิฟาติก ซึ่งแตกตัวออกง่ายที่สุด ทำให้กลุ่มโมเลกุลวงแหวนแตกออกจากกันเป็นกลุ่ม ๆ จำนวนมาก



รูปที่ 2.1 โมเลกุลสมมติของถ่านหิน (Schlosburg, 1985)

## ส่วนประกอบที่เป็นแร่ธาตุ

สารประกอบแร่ธาตุที่พบบ่อยที่สุดในถ่านหินคือ ซิลิเกต นอกจากนี้ยังประกอบด้วย อะลูมิเนียม เหล็ก แคลเซียม แมกนีเซียม โซเดียม และโพแทสเซียม รวมตัวกันเป็นสารประกอบ หรือ รวมตัวกับอะตอมของธาตุอื่นๆ เกิดเป็นสารประกอบต่าง ๆ ซึ่งสามารถแบ่งเป็นกลุ่มของสารประกอบเช่น กลุ่มคาร์บอเนต (Carbonate), กลุ่มซัลไฟด์ (Sulfide), กลุ่มซัลเฟต (Sulphate), กลุ่มซิลิเกต (Silicate) และแร่ธาตุอื่น ๆ เช่น ควอตซ์ (Quartz) เฟลด์สปาร์ (Feldspar) เป็นต้น

**2.1.2 การจำแนกถ่านหิน** (ASTM D388, 1994 ; Probststein and Hicks, 1982 ; กัญญา บุญเกียรติ, 2542)

การจำแนกถ่านหินกระทำได้สองลักษณะคือ จำแนกตามชนิด (Type) และจำแนกตามศักดิ์ (Rank) การศึกษาถ่านหินทางด้านธรณีวิทยาจำแนกถ่านหินตามชนิด โดยแบ่งกลุ่มถ่านหินไปตามองค์ประกอบทางด้านซิลิโควิทยา (Petrography) เรียกว่า กลุ่มมาเซอรัล (Maceral Groups) แบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม คือ วิทริไนต์ (Vitrinite) เอกซิไนต์ (Exinite) และอินเนอร์ทีไนต์ (Inertinite) สองกลุ่มแรกเป็นเนื้อถ่านหินที่อ่อนไหว กลุ่มหลังถือว่าเป็นส่วนที่ไม่อ่อนไหว แต่ละกลุ่มมีต้นกำเนิดจากพืชและสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กต่างกัน อย่างไรก็ตามจากการศึกษาถ่านหินด้านอื่นและการนำไปใช้งานจะใช้การจำแนกตามศักดิ์มากกว่าการจำแนกตามชนิด ซึ่งบ่งถึงความเป็นถ่านหินของถ่านหินนั้น ๆ ความเป็นถ่านหิน หรือลำดับการเปลี่ยนเป็นถ่านหิน (Coalification) ขึ้นอยู่กับทั้งอายุและอัตราการเปลี่ยนแปลง จึงไม่ได้หมายความว่าถึงเพียงอายุ หรือคุณภาพเท่านั้น

การกำหนดศักดิ์ของถ่านหินมีความจำเป็นและมีความสำคัญมากโดยเฉพาะในแง่การซื้อขายและการอ้างอิง ดังนั้นประเทศต่าง ๆ จึงกำหนดมาตรฐานการกำหนดศักดิ์ของถ่านหินขึ้นซึ่งแตกต่างกันไป แต่ในที่นี้ขออ้างอิงมาตรฐานของสหรัฐอเมริกาซึ่งนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย นั่นคือ ASTM D388

การจำแนกศักดิ์ถ่านหิน และการระบุคุณภาพของถ่านหินเกี่ยวกับการเผาไหม้และการให้ความร้อนอาศัยผลการวิเคราะห์สมบัติพื้นฐานต่าง ๆ ของถ่านหินได้แก่ การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis) การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) และค่าความร้อน ระบบมาตรฐานอเมริกา (American Societies for Testing and Materials : ASTM) เป็นระบบที่ใช้จำแนกถ่านหินในปัจจุบัน โดยจัดให้ถ่านหินมี 4 ลำดับ คือ ลิกไนต์ ซับบิทูมินัส บิทูมินัส และแอนทราไซต์

## การจำแนกถ่านหินตามมาตรฐานของสหรัฐอเมริกา (ASTM D388, 1992)

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

2. ซับบิทูมินัส (Subbituminous) เป็นถ่านหินศักดิ์สูงถัดจากลิกไนต์ บางที่เรียกว่าลิกไนต์ดำ (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)

จัดเป็นถ่านหินคุณภาพต่ำ มีวิวัฒนาการมาจากถ่านพีตซึ่งอาจต้องใช้เวลาในการแปรสภาพถึงหลายร้อยล้านปี และบางครั้งยังมีร่องรอยของเนื้อไม้ ปรากฏให้เห็นอยู่บ้าง ลิกไนต์ที่มีคุณภาพสูงจะเป็นสีน้ำตาลหรือลิกไนต์ดำ เมื่อนำไปเผาจะให้ค่าความร้อนสูงกว่าและเกิดควันน้อยกว่าถ่านพีต ตัวอย่างถ่านหินลิกไนต์ ที่ได้จากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย แสดงดังรูปที่ 2.2

ลักษณะโครงสร้างของลิกไนต์ มีลักษณะโครงสร้างที่สำคัญ ๆ 3 ประเภท คือ

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

ลักษณะทางกายภาพของลิกไนต์ ลักษณะภายนอกของลิกไนต์ที่สามารถเห็นได้จะมีลักษณะดังนี้คือ

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



รูปที่ 2.2 ถ่านหินลิกไนต์ จาก การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย จังหวัดลำปาง

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

กัมมะถันใช้ทำการตกกัมมะถันและแร่ยิปซัม แอมโมเนียใช้ทำปุ๋ยเพื่อเกษตรกรรม แก้วถ่านหินใช้ทำวัสดุก่อสร้าง เป็นต้น

ถ่านลิกไนต์มีบทบาทต่อการพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทยมาตั้งแต่ประมาณปี พ.ศ. 2498 โดยการนำมาใช้กับโรงไฟฟ้าวัดเลียบเป็นแห่งแรก และต่อมาที่แม่เมาะในปี พ.ศ. 2503 กระบี่ในปี พ.ศ.2507 เป็นลำดับจนกระทั่งมีกำลังผลิตไฟฟ้าจากถ่านหินลิกไนต์ประมาณร้อยละ 7 ของกำลังผลิตติดตั้งทั้งหมดของประเทศเมื่อปี พ.ศ.2512 และมีบทบาทสำคัญมากขึ้นเมื่อเกิดวิกฤติการณ์น้ำมันปลายปี พ.ศ. 2516 ในปี พ.ศ. 2528 กำลังผลิตไฟฟ้าจากถ่านหินลิกไนต์เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 14 ของกำลังผลิตทั้งหมดของประเทศ

การใช้ลิกไนต์ แม้ว่าจะมีปัญหายากกว่าการใช้น้ำมันก็จริงอยู่ แต่ถ้าได้เข้าใจวิธีการและการเลือกอุปกรณ์ให้เหมาะสมกับสมบัติของลิกไนต์ก็จะช่วยแก้ปัญหาได้ ในอนาคตลิกไนต์อาจจะเข้ามาเป็นพลังงานทดแทนที่สำคัญ ถึงแม้ว่าปริมาณที่สำรวจพบแล้วจะยังมีไม่มากนัก แต่ก็ได้มีการสำรวจพบเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ หากดูจากปริมาณที่พบในโลกแล้ว จะเห็นได้ว่าพบในประเทศที่พัฒนาแล้วมากที่สุด เพราะประเทศที่พัฒนาได้มีการสำรวจ และนำมาใช้ก่อนประเทศอื่น ๆ สำหรับประเทศไทยพบแล้ว 20 แหล่ง แต่ได้ทำการสำรวจ ทราบปริมาณเบื้องต้นเพียงไม่กี่แหล่งเท่านั้น แหล่งที่ยังไม่ได้สำรวจปริมาณยังมีอีกมาก

#### 2.1.4 ปริมาณสำรองถ่านหินในประเทศไทย (กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน, 2544)

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

#### การผลิตถ่านหิน

แหล่งผลิตสำคัญส่วนใหญ่อยู่ทางภาคเหนือของประเทศ โดยเฉพาะที่เหมืองแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ซึ่งดำเนินการโดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตฯ นับเป็นแหล่งผลิตที่ใหญ่ที่สุดและสำคัญที่สุดในจำนวนเหมืองถ่านหินทั้งหมด โดยในปี 2528 สามารถผลิตได้รวม 4.24 ล้านตัน หรือประมาณร้อยละ 82 ของประมาณผลผลิตรวมทั่วประเทศ ปัจจุบันมีเหมืองถ่านหินทั้งหมด 12 เหมือง ดำเนินกิจการโดยรัฐบาล 3 เหมือง อีก 9 เหมืองดำเนินการโดยเอกชน

## 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 จากการค้นคว้าของประเทศสหรัฐอเมริกาได้มีการสร้างอุปกรณ์การเผาถ่านหินชนิดใหม่ เรียกว่า ฟลูอิดไคซ์เบด (Fluidize-bed combustion) ที่มีการปรับปรุงระบบการเผาถ่านหินให้มีประสิทธิภาพดีกว่าเตาเผาชนิดเดิม

### 2.2.2 การผลิตน้ำมันสังเคราะห์จากถ่านหิน

การแปรรูปถ่านหินให้เป็นของเหลวมีหลักการคือ การทำให้โมเลกุลของถ่านหินซึ่งเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่และมีความซับซ้อนเกิดการแตกตัวของพันธะต่าง ๆ ออกเป็นโมเลกุลที่มีองค์ประกอบเป็นคาร์บอนขนาดเล็ก มีโครงสร้างทางเคมีขนาดเล็ก และสามารถจับเข้ากับโมเลกุลของไฮโดรเจนทำให้สามารถได้ผลผลิตเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่อยู่ในสภาพเป็นของเหลว

โดยจุดประสงค์ทางเคมีเพื่อที่จะทำให้ถ่านหินแปรสภาพเป็นของเหลวมีดังนี้

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

## 2.2.3 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องในกระบวนการสังเคราะห์ของเหลวจากถ่านหิน

(Nowacki, 1979 ; Schlosburg, 1985)

ปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการแปรรูปถ่านหินเป็นของเหลวคือ สมบัติของถ่านหินชนิดต่าง ๆ อุณหภูมิ ความดัน เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา และรวมถึงอาจต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดกระบวนการเปลี่ยนแปลงเป็นของเหลวได้รวดเร็วและมีปริมาณมากขึ้นด้วย สำหรับปัจจัยที่เกี่ยวข้องในกระบวนการแปรรูปถ่านหินให้เป็นของเหลวประกอบด้วย

1. ความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาของถ่านหิน โดยถ่านหินที่มีศักดิ์ต่างกันมีความสามารถในการแปรสภาพเป็นของเหลวได้แตกต่างกัน เช่น ลิกไนต์สามารถแปรสภาพภายใต้ความดัน อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสมได้ผลิตภัณฑ์เป็นของเหลว แต่ให้ผลผลิตต่ำ เป็นต้น

2. อัตราการให้ความร้อนกับกระบวนการสังเคราะห์ของเหลวจากถ่านหิน เลือกให้อยู่ที่อุณหภูมิ 350 ถึง 500 องศาเซลเซียส และต้องให้อัตราการเพิ่มความร้อนอย่างรวดเร็ว เพื่อป้องกันการรวมตัวของโมเลกุลที่แตกตัวแล้วจากการให้ความร้อนกลายเป็นพอลิเมอร์ หรือสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ไม่สามารถให้ไฮโดรเจนแก่กระบวนการแปรรูปถ่านหินเป็นของเหลวได้

3. เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาต้องไม่นานมากนัก เนื่องจากจะทำให้องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้เปลี่ยนแปลงไปเป็นสารที่ระเหยได้

4. ความดันที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาอยู่ในช่วง 500 ถึง 4000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

5. ตัวเร่งปฏิกิริยา โลหะหลายชนิดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการแปรรูปถ่านหินให้เป็นของเหลว และยังมีประสิทธิภาพเป็นพิเศษในช่วงอุณหภูมิที่เกิดการแปรรูปเป็นของเหลว

ในระหว่างการเกิดปฏิกิริยานั้นอนุมูลอิสระของถ่านหินสามารถเกิดเสถียรภาพได้โดยการดึง ไฮโดรเจนภายในโครงสร้างถ่านหินเองเพื่อใช้ในการเกิดปฏิกิริยา เช่นการดึงไฮโดรเจนจากระบบไฮโดรแอโรแมติกภายในโครงสร้างของถ่านหินเพื่อทำให้อนุมูลอิสระที่เกิดจากการแตกตัวเสถียร เมื่อไฮโดรเจนของถ่านหินที่สามารถจะให้ได้จำกัดถูกใช้ไป อนุมูลอิสระนั้นจะรวมตัวกันเองเกิดเป็นถ่านชาร์หรือถ่านโค้ก

ในกรณีที่มีตัวทำละลายที่มีความสามารถในการให้ไฮโดรเจน เช่น เตตระลิน อนุมูลอิสระจากส่วนที่แตกตัวจากถ่านหินสามารถจะดึงไฮโดรเจนจากตัวทำละลายเพื่อจะทำให้เกิดเสถียรภาพ การเกิดเป็นถ่านชาร์หรือโค้กก็จะลดลง นอกจากนั้นถ้ามีไฮโดรเจนที่เป็นโมเลกุลและตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมถูกเติมลงไปในระบบ การดูดซับทางเคมี (Chemisorption) ของไฮโดรเจนบนตัวเร่งปฏิกิริยาก็สามารถจะเพิ่มป้อนไฮโดรเจนที่สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระจากถ่านหินได้ และมีความเป็นไปได้ว่าโมเลกุลไฮโดรเจนเองยังสามารถที่จะทำให้อนุมูลอิสระจากถ่านหิน



เสถียรได้ถึงแม้ว่าจะไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาหรือตัวทำละลายที่มีสมบัติในการให้ไฮโดรเจนก็ตาม แต่ทว่าอัตราการทำปฏิกิริยานั้นจะช้ากว่ามากเมื่อเปรียบเทียบกับที่เกิดปฏิกิริยาการรวมตัวของอนุมูลอิสระของถ่านหินเองกลายเป็นโค้ก การเพิ่มอุณหภูมิมีผลทำให้เกิดการแตกตัวของพันธะมากขึ้นด้วย (การแตกตัวด้วยความร้อนของพันธะที่อ่อนแอ) พันธะที่ถูกทำให้แตกออกที่ดำเนินอยู่นี้จะลดความหนืดของระบบนั้นก็คือขนาดโมเลกุลเฉลี่ยก็ลดลงด้วย แต่ก็เป็นการเพิ่มอัตราการให้ไฮโดรเจนด้วยอาจส่งผลทำให้เกิดแก๊สผลิตภัณฑ์มากขึ้นตาม

ถ้าแบ่งในแง่ของกระบวนการนั้น การแปรรูปถ่านหินสามารถแบ่งออกเป็น 4 กระบวนการใหญ่ ๆ ได้ดังนี้ คือ

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

### กระบวนการไพโรไลซิส

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

องค์ประกอบและปริมาณของผลิตภัณฑ์จะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลาย ๆ อย่าง ได้แก่ อัตราการให้ความร้อน ความดัน ศักดิ์ของถ่านหิน เวลาในการทำปฏิกิริยา ขนาดของอนุภาคถ่านหิน ชนิดของเครื่องปฏิกรณ์ ข้อเสียเปรียบของกระบวนการนี้คือจะให้ปริมาณของชาร์มากแต่ปริมาณของเชื้อเพลิงเหลวน้อย ในทางกลับกันกระบวนการไพโรไลซิสและไฮโดรคาร์บอนไนเซชันจะมีความยุ่งยากน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการเติมไฮโดรเจนในวัฏภาคที่เป็นของเหลว (liquid-phase hydrogenation process) กระบวนการไพโรไลซิส มักจะใช้ความดันที่ต่ำกว่า 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (690 กิโลพาสคัล) โดยส่วนมากอยู่ในช่วง 5 และ 25 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (34-172 กิโลพาสคัล) แต่กระบวนการไฮโดรคาร์บอนไนเซชันต้องใช้ความดันภายใต้บรรยากาศของแก๊สไฮโดรเจน 300-1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว กระบวนการไพโรไลซิสและไฮโดรคาร์บอนไนเซชันสามารถจะดำเนินการที่อุณหภูมิสูงถึง 600 องศาเซลเซียส

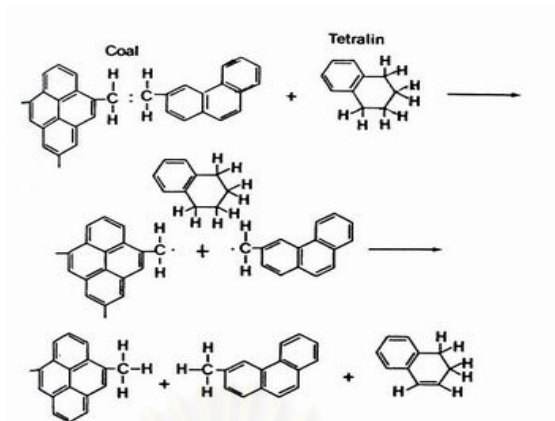
## กระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลาย

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. การสกัดเมื่อไม่มีไฮโดรเจนแต่มีตัวทำละลายที่ใช้แล้ว โดยตัวทำละลายที่ใช้แล้วถูกเติมไฮโดรเจนก่อนนำกลับมาใช้ใหม่
2. การสกัดเมื่อมีไฮโดรเจนและตัวทำละลายที่ใช้แล้ว โดยตัวทำละลายที่ใช้แล้วไม่ถูกเติมไฮโดรเจนก่อนนำกลับมาใช้ใหม่
3. การสกัดเมื่อมีไฮโดรเจนและตัวทำละลายที่ใช้แล้ว โดยตัวทำละลายที่ใช้แล้วถูกเติมไฮโดรเจนก่อนนำกลับมาใช้ใหม่

ในแต่ละรูปแบบผลิตภัณฑ์เหลวต่าง ๆ จากการกลั่นสามารถแยกตัวทำละลายเพื่อนำกลับมาหมุนเวียนใช้ใหม่ได้อย่างต่อเนื่อง การสกัดด้วยตัวทำละลายสามารถดำเนินการที่ภาวะไม่รุนแรงแต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีของแข็งไฮโดรเจนสูง หรือน้ำมันหนักที่มีส่วนประกอบเป็นน้ำมันเบาและแก๊สน้อย ถ้าภาวะของการเกิดปฏิกิริยารุนแรงมากขึ้นจะมีการขจัดกำมะถันและไฮโดรเจน และผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีน้ำหนักโมเลกุลน้อยลง ตัวทำละลายที่มีสมบัติที่ดีในการให้ไฮโดรเจน เช่น เตตระลิน แสดงดังรูปที่ 2.3

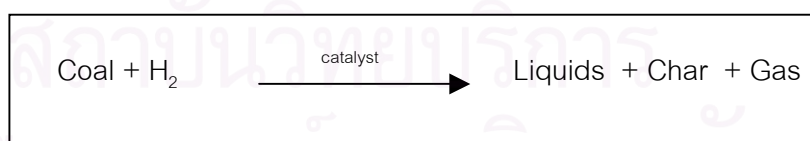


รูปที่ 2.3 การให้ไฮโดรเจนของ Tetrahydronaphthelene (Tetralin) (Whitehurst, 1980)

### กระบวนการผลิตของเหลวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

เป็นกระบวนการสังเคราะห์ของเหลวจากถ่านหิน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมเพื่อเติมไฮโดรเจนให้กับถ่านหิน โดยทั่วไปแล้วกระบวนการนี้มักจะใช้ของเหลว (Liquid Medium) เป็นตัวกระจายตัวเร่งปฏิกิริยา หรือบางที่อาจจะใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (Fixed-bed Reactor) หรือทำการกระจายตัวเร่งปฏิกิริยาบนถ่านหินโดยตรง สำหรับข้อดีในกระบวนการนี้ก็คือไม่จำเป็นต้องใช้ตัวทำละลายที่มีสมบัติในการให้ไฮโดรเจน แต่จะต้องมีไฮโดรเจนเพียงพอจากแหล่งอื่น เช่น แก๊สไฮโดรเจน สำหรับข้อเสียโดยปกติจะพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกทำให้สูญเสียความสามารถในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเนื่องจาก mineral matter ในถ่านหิน และการเกิดโค้กขึ้นระหว่างเกิดปฏิกิริยา

สมการทั่วไปสำหรับกระบวนการผลิตของเหลวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา คือ



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

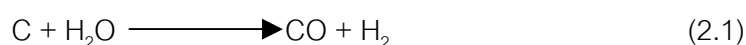
ไฮโดรคาร์บอน มาร่วมในปฏิกิริยาอันจะสามารถช่วยลดการใช้แก๊สไฮโดรเจนได้ หนทางหนึ่งที่มีการนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ การนำขยะพลาสติกซึ่งเป็นขยะที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นในอัตราที่สูงมากในแต่ละวัน และเป็นวัสดุที่ไม่มีคุณค่ากลับมาใช้ประโยชน์ในการเป็นแหล่งให้ไฮโดรเจนแก่กระบวนการสังเคราะห์ของเหลวจากถ่านหิน จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาถึงปฏิกิริยาระหว่างพลาสติกและถ่านหิ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

### กระบวนการผลิตของเหลวโดยทางอ้อม

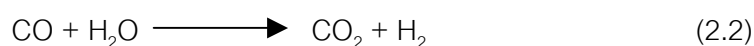
กระบวนการนี้จะดำเนินการเป็นแบบ 2 ขั้นตอน (Two-stage Conversion Operation) โดยในขั้นตอนแรกจะผลิตแก๊สผสมซึ่งได้มาจากการแตกสลายตัวถ่านหินด้วยปฏิกิริยา Steam Reforming และ/หรือ Partial Oxidation ได้แก๊สที่สำคัญคือ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจน (Syngas; Synthesis Gas) ซึ่งแก๊สเหล่านี้จะถูกทำให้บริสุทธิ์ก่อนโดยทำการขจัดเอากำมะถัน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

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

ถ่านหินจะถูกเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สนั้นจะใช้คุณสมบัติที่มากถึง 800 องศาเซลเซียสและความดันปานกลางดังสมการที่ 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 (การแปรรูปถ่านหินเป็นของเหลวโดยทางตรง) แต่ก็มีข้อดีคือ

1. ขั้นตอนการแปรรูปเป็นแก๊ส (Gasification) สามารถทนต่อสิ่งเจือปน (เช่น Mineral Matter) ต่าง ๆ ที่มีอยู่ในถ่านหินได้ดี
2. ขั้นตอนการแปรรูปเป็นของเหลวสามารถควบคุมได้ง่ายกว่า
3. ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีการเจือปนน้อย
4. วิธีการนี้สามารถนำมาดัดแปลงใช้กับแก๊สใต้พื้นดินของถ่านหินเพื่อแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงเหลว ซึ่งผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวจะมากกว่าปริมาณถ่านหินที่ป้อนให้กับระบบ

## 2.3 พลาสติก (รังสรรค์, 2536)

ในปัจจุบัน พลาสติกได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในชีวิตประจำวันของคนเรา ไม่ว่าจะเป็นเครื่องครัว ถ้วยชาม อุปกรณ์ไฟฟ้า เครื่องประดับ เพอร์นิเจอร์ ฯลฯ ล้วนแต่เป็นผลิตภัณฑ์ที่ผลิตมาจากพลาสติกแทบทั้งสิ้น พลาสติกหรือที่เรียกว่า "พอลิเมอร์" (Polymer) เป็นสารสังเคราะห์ขึ้นมาตามกระบวนการที่เรียกว่า "พอลิเมอไรเซชัน" (Polymerization) ซึ่งเป็นการก่อให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี ทำให้หน่วยเล็ก ๆ ที่เรียกว่า "มอนอเมอร์" (Monomer) เกิดการรวมตัวเชื่อมกัน ทำให้โมเลกุลมีขนาดใหญ่ขึ้นและแปรลักษณะทางกายภาพจากเดิมที่อาจจะอยู่ในรูปของแก๊สหรือของเหลว กลายเป็นของแข็งซึ่งจะมีสมบัติที่เหมาะสมในการนำไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์อื่น ๆ มนุษย์ค้นพบสารประกอบพอลิเมอร์ครั้งแรกเมื่อปี พ.ศ. 2313 ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติในรูปของยาง

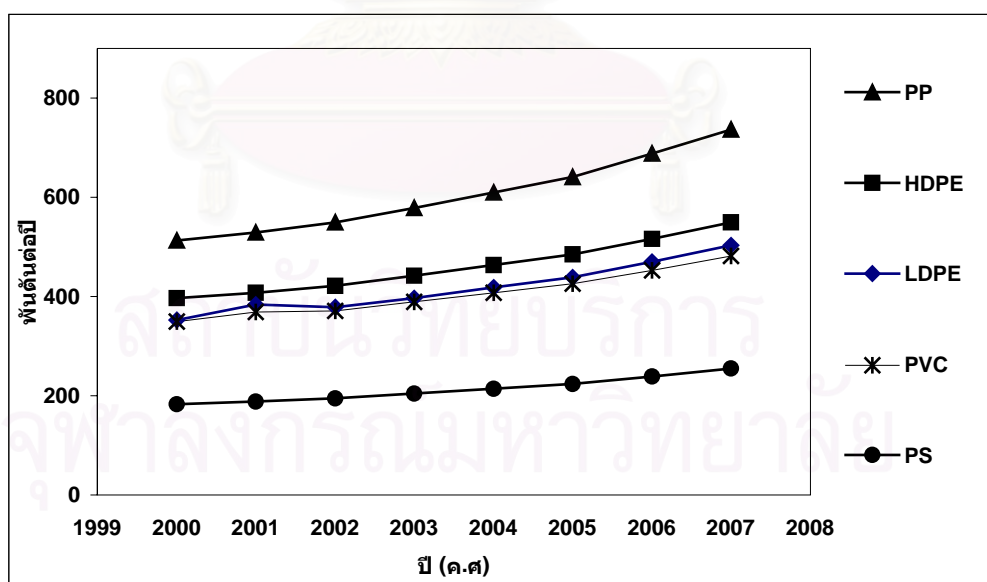
การผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกนั้น จะนำวัตถุดิบมาแปรรูป โดยวิธีการต่าง ๆ เช่น ทำเป็นแผ่นฟิล์ม ทำเป็นเส้นใย ทำเป็นแผ่นเทป ทำให้เป็นรูปแบบตามแบบพิมพ์โดยการฉีดขึ้นรูป หรือเป่าตาม

แบบ เป็นต้น ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์พลาสติกต่าง ๆ เช่น ถุงพลาสติกชนิดถุงร้อนและถุงเย็น ของเด็กเล่น เครื่องใช้ในครัวเรือน เส้นใย ฯลฯ อุตสาหกรรมการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกนี้เริ่มขึ้นในประเทศไทยตั้งแต่ปี 2493 ในปัจจุบัน อุตสาหกรรมการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกได้เจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้เนื่องจากพลาสติกเป็นวัสดุที่มีสมบัติพิเศษ และเด่นกว่าวัสดุชนิดอื่น และสามารถใช้แทนแก้วไม้ หรือกระดาษได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านความแข็งแรง เหนียว ทนต่อกรดและด่างได้ดี อีกทั้งยังสามารถเป็นฉนวนไฟฟ้าได้ดี มีน้ำหนักเบา

จากสมบัติข้างต้น ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตมาจากพลาสติกเป็นที่ยอมรับจนสามารถสร้างตลาดได้ดีและเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ขณะเดียวกันก็ได้มีการพัฒนารูปแบบพลาสติกต่างๆ สีสันพร้อมกับคุณภาพที่สูงขึ้น

### 2.3.1 การบริโภคเม็ดพลาสติก (กรมส่งเสริมการส่งออก, 2541)

ผลผลิตเม็ดพลาสติกมีสัดส่วนร้อยละ 9.0 ของผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม หรือร้อยละ 2.5 ของ GDP ผลผลิตครึ่งหนึ่งส่งออกไปจำหน่ายต่างประเทศ ยอดการใช้เม็ดพลาสติกในประเทศปีละประมาณ 2.4 ล้านตัน ผลิตในประเทศ 1.7 ล้านตัน และนำเข้า 0.7 ล้านตัน โดยแบ่งเป็นพลาสติก 5 ประเภท คือ โพลีเอทิลีน โพลีพรอพิลีน พอลิสไตรีน และพอลิไวนิลคลอไรด์ ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ข้อมูลและการคาดการณ์การบริโภคผลิตภัณฑ์พลาสติกภายในประเทศตั้งแต่ ปี ค.ศ. 1999 ถึง ค.ศ.2008 (สำนักนโยบายอุตสาหกรรมรายสาขา1 กระทรวงอุตสาหกรรม, 2546)

## 2.3.2 เม็ดพลาสติก

### 2.3.2.1 พอลิเอทิลีน (ศุภวรรณ, 2542)

พอลิเอทิลีนเป็นอนุพันธ์ที่ได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของเอทิลีน สมบัติทั่วไปของ พอลิเอทิลีน คือ เหนียว ดูดซับความชื้นได้น้อยมาก เป็นฉนวนไฟฟ้าได้ดี มีสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำ และสามารถนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ได้ง่าย พอลิเอทิลีนจะรองรับน้ำหนักได้ไม่ตึงทนต่อการกด และต่างที่อุณหภูมิห้องได้ดี สามารถเกิดการเชื่อมขวางเป็นเทอร์โมเซตซึ่งไม่หลอมเหลว มีความทนทานต่อความร้อนได้สูงมาก และไม่แตกง่าย

$[-\text{CH}_2-\text{CH}_2-]_n$ โครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีน, PE	
ลักษณะการใช้งาน	เทอร์โมพลาสติก เส้นใย
มอนอเมอร์	เอทิลีน
ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน	Free radical chain polymerization Ziegler-Natta polymerization Metallocene catalysis polymerization
โครงสร้างสัณฐานวิทยา(Morphology):	ความเป็นอสัณฐานสูง(branched), ความเป็นผลึกสูง(linear)
อุณหภูมิหลอมเหลว (Melting temperature) :	137 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิคล้ายแก้ว(Glass transition temperature):	-130-80 องศาเซลเซียส

**พอลิเอทิลีน** มีอยู่ 3 ชนิด

1. **พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ** (Low density polyethylene) หรือ เรียกย่อว่า แอลดีพีอี (LDPE)

เป็นพอลิเอทิลีนชนิดแรกซึ่งค้นพบโดยบริษัทไอซีไอ ประเทศอังกฤษ เมื่อปี พ.ศ. 1933 และเริ่มผลิตในทางการค้าเมื่อปี พ.ศ. 1938 มีลักษณะอ่อนนิ่ม และโค้งงอได้มาก ความเป็นผลึก

ปานกลาง ลักษณะโปร่งแสง เกือบใส และขุ่นขึ้นเมื่อความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ทนทานต่อกรดและเบสเป็นอย่างดี ทนแรงกระแทกสูง แต่ทนทานต่อความร้อนต่ำ โดยทั่วไปแล้วจะใช้งานได้ที่อุณหภูมิไม่สูงกว่า 60-80 องศาเซลเซียส

ผลิตด้วยกระบวนการที่ใช้ความดันสูงมากประมาณ 100-3000 บรรยากาศ ซึ่งเป็นความดันของแก๊สเอทิลีน ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 300-800 องศาเซลเซียส เพื่อบังคับให้เอทิลีนเข้าไปทำปฏิกิริยากันจนได้น้ำหนักโมเลกุลสูง การจับต่อกันของโมเลกุลของเอทิลีนในกรณีนี้เป็นไปอย่างอิสระ (Free radical polymerization) แทนที่เอทิลีนจะจับต่อกันอย่างเป็นระเบียบจากโมเลกุลหนึ่งไปสู่มอเลกุลหนึ่งเป็นสายโซ่ตรง กลับมีการต่อกันของเอทิลีนแตกแขนงออกมาจากสายโซ่หลักด้วย ซึ่งสามารถเกิดขึ้น ณ ตำแหน่งใดของสายโซ่ก็ได้ และเกิดได้หลายตำแหน่งในแต่ละสายโซ่ ลักษณะของโมเลกุลของพอลิเอทิลีนแบบนี้ทำให้โมเลกุลซ้อนกันไม่สนิท ต้องจัดตัวอยู่กันอย่างระเกะระกะ ความหนาแน่นจึงต่ำ

#### การใช้ประโยชน์ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

แอลดีพีเอินามาใช้งานเป็นลักษณะแผ่นฟิล์มมากที่สุด คิดเป็นประมาณ 60-70 ร้อยละของผลผลิตทั้งหมด โดยเฉพาะฟิล์มพลาสติกสำหรับบรรจุอาหาร ที่รองรับสินค้า และฟิล์มหดรัด ฟิล์มห่อของ กระสอบและถุงบรรจุของหนัก นอกจากนี้ยังผลิตแผ่นฟิล์มสำหรับห่อหุ้มเพื่อใช้ในครัวเรือน เช่น ถุงขยะ แผ่นบุถัง ถุงใส่ของ แผ่นซีต ฟิล์มที่ใช้ในการเกษตร และแผ่นรองด้านนอกผ้าอ้อมสำเร็จรูป แอลดีพีเอีประมาณร้อยละ 14 ใช้ในงานอัดรีดโดยใช้เคลือบผิวกระดาษและแผ่นบอร์ดเพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์สำหรับบรรจุของเหลวเช่น นม น้ำผลไม้ และเครื่องดื่ม และใช้สำหรับงานด้านป้องกันความชื้นร้อยละ 8 ของแอลดีพีเอีใช้งานฉีด ได้แก่ ใช้ผลิตของเล่นเด็กเล่น เครื่องใช้ภายในบ้าน ฝาปิดภาชนะชนิดต่าง ๆ นอกจากนี้ยังใช้ผลิตปลอกหุ้มสายไฟ สายเคเบิลสื่อสาร และชิ้นงานที่ทำโดยวิธีการเป่าในแม่พิมพ์ แต่หลังจากการค้นพบพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นหรือแอลแอลดีพีเอีแล้ว ปรากฏว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นถูกนำไปใช้งานแทนพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำในงานหลายอย่างได้ดี

#### 2. พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High density polyethylene) หรือเรียกย่อว่า เอ็ชดีพีเอี (HDPE)

การผลิตเอ็ชดีพีเอีใช้เทคโนโลยีที่ต่างจากแอลดีพีเอี เรียกเทคนิคนี้ว่า โคออร์ดิเนชันพอลิเมอไรเซชัน (Co-ordination polymerization) ซึ่งต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ในระยะแรกใช้สารประกอบ



เชิงซ้อนที่เกิดจากไตรเอทิลอะลูมิเนียม (triethyl aluminium) และไทเทเนียมเตตระคลอไรด์ (Titanium tetrachloride) ทำให้พอลิเมอไรเซชันของเอทิลีนเกิดขึ้นได้ที่ความดันปานกลาง และที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 100 องศาเซลเซียส

กลไกของการโคออร์ดิเนชันพอลิเมอไรเซชันค่อนข้างซับซ้อน พอลิเมอไรเซชันจะเกิดขึ้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเท่านั้น โดยโมเลกุลของเอทิลีนจะแทรกตัวเข้ามาระหว่างผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยากับสายโซ่พอลิเมอไรท์ที่กำลังก่อตัวขึ้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้ได้โมเลกุลของพอลิเมอไรท์ที่เป็นระเบียบ มีลักษณะเป็นสายโซ่ตรง ไม่เกิดปฏิกิริยาการถ่ายโอนสายโซ่ จึงไม่มีกิ่งแตกแขนงออกจากสายโซ่หลัก ลักษณะเช่นนี้ทำให้โมเลกุลของพอลิเมอไรท์สามารถซ้อนกันได้ดี ความหนาแน่นจึงสูงและมีสมบัติแข็งเหนียว ซึ่งแตกต่างจากพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

### การใช้ประโยชน์ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง

พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ประเภทบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในครัวเรือน และบรรจุสารเคมีในอุตสาหกรรม ผลิตโดยการเป่าเข้าแบบ ได้แก่ ลังปลา ลังผลไม้ ของใช้ในบ้านเรือนต่าง ๆ ภาชนะที่รองกันกันการกระทบกัน ดึงเป็นท่อ หลอด ฉนวนหุ้มสายไฟ เป่าเป็นฟิล์มใช้ห่อหุ้มสิ่งของ ภาชนะที่ผลิตโดยการหมุนเข้าแบบ ได้แก่ ของเด็กเล่น และเครื่องกีฬา พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง คืออยู่ในช่วง 200,000-500,000 จัดว่าเป็นพอลิเอทิลีนชนิดพิเศษ หากจะขึ้นรูป พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่มีน้ำหนักโมเลกุลช่วง 500,000 จะต้องควบคุมการกระจายตัวให้แคบ การใช้ประโยชน์ของพอลิเอทิลีนประเภทนี้ คือเป่าเป็นฟิล์มใช้ห่อหุ้ม ดึงท่อ ทนความดันสูง ตู้ขนส่งสินค้าขนาดใหญ่ แผ่นพลาสติก และแผ่นปูกันบ่อ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงที่สุด คือประมาณ 3 ล้านโดยเฉลี่ย ถึงแม้จะทำให้หลอมแล้วก็ยังไม่ไหล มักขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ด้วยวิธีอัดเข้าแบบเป็นแผ่น เนื่องจากมีความแข็งแรงสูง ทนทานต่อสารเคมีได้ดีและสิ้น จึงใช้ทำเกียร์ ไม้สกี ลูกกลิ้ง ลูกรอก ลูกไม้ และชิ้นส่วนใช้ในอุตสาหกรรม ใช้ทำข้อต่อสะโพกเทียม นอกจากนี้ยังมีการใช้งานในลักษณะเป็นเส้นใยด้วยเนื่องจากมีความเป็นผลึกสูง ซึ่งเป็นโครงสร้างเสริมแรงได้ดี สามารถใช้ถักทอ เป็นผืนผ้า น้ำหนักเบาแต่มีความแข็งแรงเป็นพิเศษ

3. **พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น** (Linear low density polyethylene) หรือ เรียกย่อว่า แอลแอลดีพีอี (LLDPE)

การค้นพบปฏิกิริยาโคออร์ดิเนชันพอลิเมอไรเซชัน ทำให้สามารถทำพอลิเมอไรเซชันของเอทิลีนได้ที่มีความดันไม่สูงมากนัก แต่ได้เอชดีพีอีซึ่งมีสมบัติแข็งและเหนียวแตกต่างจากสมบัติของแอลดีพีอี จึงได้คิดค้นการผลิตพอลิเอทิลีนอีกชนิดหนึ่งให้ได้ลักษณะสมบัติเช่นเดียวกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ แต่ใช้กระบวนการที่มีความดันไม่สูงมากนัก คือ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear low density polyethylene) หรือเรียกย่อว่า แอลแอลดีพีอี (LLDPE) ค้นพบเมื่อปี ค.ศ. 1977 โดยใช้กระบวนการผลิตเดียวกันกับของเอชดีพีอี แต่เติมโคมอนอเมอร์เข้าไปในกระบวนการผลิตให้มากขึ้นเพื่อทำให้มีการแตกกิ่งจากสายโซ่หลักอย่างเป็นระเบียบ และเป็นสายโซ่สั้น ๆ โดยทั่วไปมักใช้ 1- บิวทีน (1-butene)

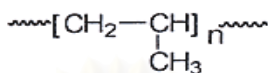
#### การใช้ประโยชน์ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น

พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นมีความยืดหยุ่นสูงกว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ มีความต้านทานแรงฉีกขาด แรงดึง และแรงกระแทกสูงกว่า มีความทนทานต่อการแตกเนื่องจากความกดดันจากสภาวะแวดล้อมได้ดีกว่า ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น ได้แก่ ถุงข้าวสาร ถุงน้ำแข็ง ถุงใส่เอกสารส่งทางไปรษณีย์ ถึงขนาดใหญ่ และใช้ในงานเคลือบสายไฟแบบสายเคเบิล

#### 2.3.2.2 พอลิพรอพิลีน

พอลิพรอพิลีนเป็นพลาสติกจำพวกเทอร์โมพลาสติก ที่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน มีสมบัติเฉพาะตัวคือ ความถ่วงจำเพาะต่ำ ความแข็งเปราะสูง อุณหภูมิบิดตัวสูง ทนทานต่อสารเคมีได้ดี มีสมบัติต้านไฟฟ้าได้ดี จึงมีการนำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ หลายชนิด เช่น อุปกรณ์ในครัวเรือน ภาชนะบรรจุภัณฑ์ ของเด็กเล่น พอลิพรอพิลีนเป็นไฮโดรคาร์บอนพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเป็นเส้นตรงและประกอบด้วยโครงสร้างที่ไม่อ้อมตัวน้อยมาก หรือ ไม่มีเลย การสลับที่ของหมู่เมทิล ไปตามคาร์บอนอะตอมบนสายโซ่โมเลกุลทำให้สมบัติของพอลิเมอร์แตกต่างกันได้มากมาย โดยหมู่เมทิลเป็นตัวกำหนดโครงสร้างแทกติกซิตี (Tacticity) ของพอลิเมอร์ได้ โดยแบ่งเป็นแบบต่าง ๆ กันดังนี้

1. แบบ Isotactic เมื่อหมู่เมทิลทั้งหมดอยู่ด้านเดียวกันของสายโซ่โพลิเมอร์
2. แบบ Syndiotactic เมื่อหมู่เมทิลทั้งหมดอยู่สลับกันบนสายโซ่โพลิเมอร์
3. แบบ Atactic เมื่อหมู่เมทิลไม่อยู่กันเป็นระเบียบบนสายโซ่โพลิเมอร์

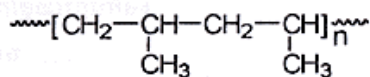


#### โครงสร้างทางเคมีของพอลิพรอพิลีน

ลักษณะการใช้งาน	เทอร์โมพลาสติก เส้นใย เทอร์โมพลาสติกยืดหยุ่น (thermoplastic elastomers)
มอนอเมอร์	พรอพิลีน
ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน	Ziegler-Natta polymerization, Metallocene catalysis polymerization
โครงสร้างสัณฐานวิทยา(Morphology) :	ความเป็นอสัณฐานสูง (atactic), ความเป็นผลึกสูง(isotactic)
อุณหภูมิหลอมเหลว (Melting temperature) :	270 องศาเซลเซียส(100% isotactic)
อุณหภูมิคล้ายแก้ว(Glass transition temperature):	-17 องศาเซลเซียส

ในปี ค.ศ.1954 แนพตาได้นำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ซีเกอร์ค้นพบมาใช้ในการเตรียมพอลิพรอพิลีน โดยปรับปรุงรูปแบบของตัวเร่งปฏิกิริยา และได้พอลิพรอพิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกันไป ซึ่งผลทำให้สมบัติแตกต่างกันออกไป เช่น ไอโซแทกติกพอลิพรอพิลีนที่มีความหนาแน่นสูงเหมือนพอลิเอทิลีน แต่มีจุดอ่อนตัวสูงกว่า และแข็งแรงกว่า โครงสร้างทางเคมีส่วนใหญ่ของพอลิพรอพิลีนจะมีหมู่เมทิล (Methyl group) เกาะบนโซ่หลักของโพลิเมอร์ (Main chain) พอลิพรอพิลีนสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ตามลักษณะการเกาะของหมู่เมทิลบนสายโซ่โพลิเมอร์หลัก ได้แก่

1) ไอโซแทกติกพอลิพรอพิลีน (Isotactic polypropylene) โครงสร้างแบบนี้มีลักษณะการเกาะของหมู่เมทิลด้านเดียวกันบนโซ่โพลิเมอร์หลัก ลักษณะเช่นนี้โครงสร้างโพลิเมอร์มีความเป็นระเบียบสูงส่งผลทำให้การตกผลึกดีที่สุดสังเคราะห์ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ Heterogenous ของ Titanium(III) chloride กับตัวเร่งร่วมกับสารประกอบ Organoaluminium เช่น Diethylaluminium chloride

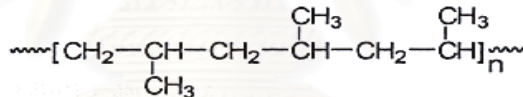


โครงสร้างของไอโซแทกติกพอลิพรอพิลีน

### สมบัติของไอโซแทกติกพอลิพรอพิลีน

สมบัติทางกลและสมบัติทางความร้อนของพอลิพรอพิลีนนอกจากขึ้นอยู่กับโครงสร้างที่เป็นแบบไอโซแทกติกแล้ว ยังขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ด้วย ตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติต่าง ๆ ของพอลิพรอพิลีนทางการค้า ซึ่งทำการผลิตจากแหล่งเดียวกัน ทดสอบวิธีเดียวกัน และมีปริมาณโครงสร้างไอโซแทกติกใกล้เคียงกันมาก แต่น้ำหนักโมเลกุลต่างกัน ปรากฏว่าเมื่อน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้น คือเมื่อตรวจหาค่าการไหล (Melt Flow Index) ลดลง พลาสติกจะมีความต้านทานแรงดึงขาด ความแข็งดึง ความแข็ง และ อุณหภูมิจุดเปราะต่ำลง ในขณะที่ความต้านทานแรงกระแทกสูงขึ้น

### II) อะแทกติกพอลิพรอพิลีน



โครงสร้างของอะแทกติกพอลิพรอพิลีน

อะแทกติกพอลิพรอพิลีน (Atactic polypropylene) โครงสร้างแบบนี้มีลักษณะการเกาะของหมู่เมทิลบนโซ่พอลิเมอร์หลักอย่างไม่เป็นระเบียบลักษณะเช่นนี้ทำให้มีการตกผลึกน้อยที่สุด สันเคราะห์จากกรดลิวอิส และสารประกอบ Organometallic เกิดเป็นโครงสร้างของอะแทกติกพอลิพรอพิลีน

อะแทกติกพอลิพรอพิลีน สามารถทำการผลิตได้โดยตรง หรือเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิต ตามปกติพอลิพรอพิลีน ชนิดอะแทกติกอย่างสมบูรณ์ จะมีโครงสร้างออสถฐาน แต่ในทางการค้ายังมีส่วนที่เป็นผลึกหลงเหลืออยู่บ้าง น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย 20,000 – 80,000 และมีความถ่วงจำเพาะประมาณ 0.86 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร อะแทกติกพอลิพรอพิลีนมีลักษณะอยู่กึ่งกลางระหว่างไอโซแทกติกและซินดิโอแทกติก สามารถทำปฏิกิริยาระหว่างออกซิเจนได้เช่นเดียวกับไอโซแทกติกพอลิพรอพิลีน แต่อะแทกติกพอลิพรอพิลีนจะเกิดการบวมอย่างมากในสารไฮโดรคาร์บอนทั้งประเภทอิ่มตัวและไม่อิ่มตัว และรวมตัวได้ดีกับตัวเติมจำพวกแรบิโทมินัส และเรซินต่างๆ

ในอดีตอะแทกติกพอลิพรอพิลีนเป็นผลพลอยได้ที่ไม่เป็นที่ปรารถนาในการผลิต แต่ในปัจจุบันเริ่มมีการนำมาใช้งานมากขึ้น ในยุโรปใช้ผสมกับบิพูมินัส เพื่อใช้ทำรอยต่อต่างๆ การผสมพลาสติคชนิดนี้จะช่วยให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสมบัติทนทานต่อสภาพแวดล้อมได้ดีขึ้น

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกลและสมบัติทางความร้อนของพอลิพรอพิลีน (นงเยาว์, 2533)

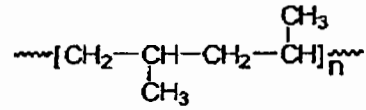
สมบัติ	วิธีการทดสอบ	โพลิเมอร์		
		โพลิพรอพิลีน	โพลิพรอพิลีน/บิพูมินัส	โพลิพรอพิลีน/บิพูมินัส/บิพูมินัส
ครวชน้การไหล	(ก)	3	0.7	0.2
ความต้านทานแรงดึงขาด (ปอนด์/ตารางนิ้ว) (เมกะพาสคัล)	(ข)	5000	4400	4200
ร้อยละการยืดตัวเมื่อขาด	(ข)	34	30	29
มอดูลัสการบิดโค้ง (ปอนด์/ตารางนิ้ว)(* 10 <sup>5</sup> ) (เมกะพาสคัล)	-	350	115	175
อุณหภูมิเปราะตัว (°C)	ici/ASTM D.476	1.9	1.7	1.6
จุดอ่อนตัวไวแคท (°C)	BS 2782	1310	1170	1100
ความแข็งตามสเกลรีคเวลด (สเกล อาร์)	-	15	0	0
ความต้านทานแรงกระแทก (ฟุต-ปอนด์) (จูล)	(ค)	145-150	148	148
		95	90	90
		10	25	34
		13.5	34	46

(ก) ใช้พอลิเอทิลีนเกรดมาตรฐาน ขึ้นรูปครั้งละ 2.16 กิโลกรัม อุณหภูมิการขึ้นรูป 230 °C

(ข) อัตราเร็วในการดึง (Straining Rate) 18 นิ้ว/นาที

(ค) ทดสอบโดยใช้ตุ้มน้ำหนักมาตรฐาน ขนาดศูนย์กลาง 14 นิ้ว ทดสอบ ณ อุณหภูมิ 20 °C

III ) ซินดิโอแทกติกพอลิพรอพิลีน (Syndiotactic polypropylene) โครงสร้างแบบนี้มีลักษณะการเกาะของหมู่เมทิล (Methyl group) สลับกันบนโซ่โมเลกุลหลักอย่างเป็นระเบียบ ทำให้โครงสร้างมีความเป็นระเบียบลดลงมีผลทำให้การตกผลึกลดลงด้วย

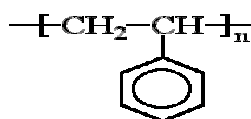


แสดงโครงสร้างของซินดิโอแทกติกพอลิพรอพิลีน

### 2.3.2.3 พอลิสไตรีน

พอลิสไตรีนเริ่มผลิตเมื่อปี ค.ศ. 1925 สมบัติของพอลิสไตรีน คือ โปร่งใส ขึ้นรูปง่าย ราคาถูกผสมได้ง่าย และเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี แต่พอลิสไตรีนมีข้อเสียคือทนแรงกระแทกได้น้อย (Low impact strength) จึงทำให้มีการพัฒนาสมบัติทางด้านนี้ โดยการเติมบิวทาไดอีน เพราะจะทำให้มีสมบัติ ทนแรงกระแทกได้มากขึ้น รวมทั้งเพิ่มความมันเงาและสมบัติการทนต่อสารเคมีมากขึ้นด้วย ซึ่งเรียก พอลิเมอร์ชนิดนี้ว่า พอลิสไตรีนชนิดทนแรงกระแทกสูงหรือฮิปส์ (high impact polystyrene, HIPS) แต่มีข้อเสียคือจะมีความใสลดลง นอกจากนี้แล้วยังสามารถนำพอลิสไตรีนไปผลิตเป็นพอลิสไตรีนชนิดพองตัว (Expanded polystyrene, EPS) ได้อีก วิธีนี้ทำได้จากการเติมสารพองตัว (expanding agent) ลงไป ซึ่งจะทำให้สมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีรวมทั้งมีความมันเงาด้วย

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ลักษณะโครงสร้างของพอลิสไตรีน, PS

ลักษณะการใช้งาน	เทอร์โมพลาสติก
มอนอเมอร์	สไตรีน
ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (atactic),	Free radical chain polymerization
(syndiotactic)	Ziegler-Natta polymerization
โครงสร้างสัณฐานวิทยา(Morphology):	ความเป็นอสัณฐานสูง (atactic), ความเป็นผลึกสูง (syndiotactic)
อุณหภูมิหลอมเหลว (Melting temperature) :	270 องศาเซลเซียส(syndiotactic)
อุณหภูมิคล้ายแก้ว(Glass transition temperature):	100 องศาเซลเซียส

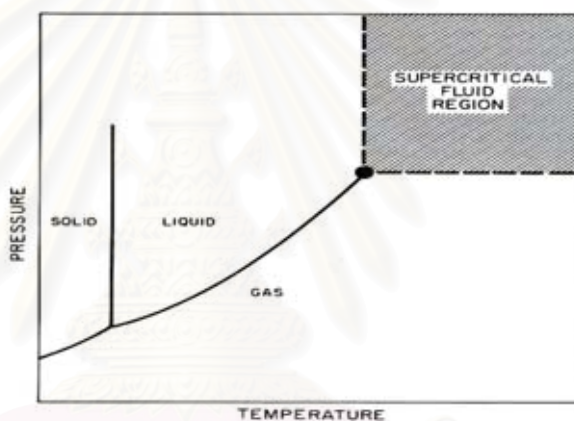
### ประโยชน์ของพอลิสไตรีน

ประมาณร้อยละ 45 ของพอลิสไตรีนใช้ในงานบรรจุภัณฑ์ เช่นกล่องบรรจุอาหาร ภาชนะต่าง ๆ ถ้วยโยเกิร์ต ตะกร้า ถาดวางไข่ และบรรจุภัณฑ์ประเภทอาหารจานด่วน ประมาณร้อยละ 20 ใช้ในการผลิตอุปกรณ์เครื่องใช้ในบ้าน เช่น ตู้เย็น เครื่องทำความเย็น เครื่องใช้ไฟฟ้าขนาดเล็ก อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โดยเฉพาะโครงวิทยุ และทีวี อีกร้อยละ 8 ใช้ในอุตสาหกรรมของเด็กเล่น และร้อยละ 4 ใช้ผลิตเฟอร์นิเจอร์ ประมาณ 2 ใน 3 ของพอลิสไตรีนชนิดพองตัว ใช้ในงานก่อสร้างและงานฉนวน ส่วนที่เหลือเป็นงานบรรจุภัณฑ์

### 2.4 ของไหลภาวะเหนือวิกฤต (อุทัย ไสธนะพันธ์ และรพีพล ภาโวาท, 2536)

ของไหลภาวะเหนือวิกฤต (Supercritical Fluids, SCF) หมายถึง สารใด ๆ ในภาวะซึ่งจำแนกไม่ได้ว่าเป็นแก๊สหรือของเหลว ภาวะเช่นนี้สามารถอธิบายได้จากแผนภูมิวัฏภาคความดัน-อุณหภูมิ (Pressure-temperature Phase Diagram) ของสารบริสุทธิ์ใด ๆ เช่นตามรูปที่ 2.5 จะแสดงบริเวณที่สารอยู่ในสถานะของแข็ง ของเหลว และแก๊ส โดยมีเส้นการระเหิด (Sublimation

Line) อยู่ระหว่างบริเวณที่สารอยู่ในสถานะของแข็งกับแก๊ส เส้นการหลอมละลาย (Fusion Line) อยู่ระหว่างของแข็งกับของเหลว และ เส้นความดันไอ (Vapor Pressure Line) อยู่ระหว่างแก๊สกับของเหลว จุดที่อยู่ระหว่างทั้ง 3 สถานะเรียกว่า Triple Point (TP) และเมื่อพิจารณาถึงแก๊สที่สามารถเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวได้ซึ่งมี 2 วิธีโดยการเพิ่มความดัน หรือลดอุณหภูมิเพื่อลดพลังงานจลน์ ทำให้ระยะทางระหว่างโมเลกุลลดลงเกิดแรงดึงดูดระหว่างกันควบแน่นเป็นของเหลว แต่ที่อุณหภูมิสูงกว่าจุด านี้ โมเลกุลของแก๊สจะมีพลังงานจลน์มากแม้จะให้ความดันเท่าใดก็ไม่สามารถทำให้แก๊สเกิดการควบแน่น เป็นของเหลวได้ อุณหภูมิสูงสุดที่แก๊สยังสามารถควบแน่นเป็นของเหลวได้เรียกว่า อุณหภูมิวิกฤต (Critical Temperature,  $T_c$ ) และความดันที่จุดนี้จะเรียกว่า ความดันวิกฤต (Critical Pressure,  $P_c$ ) จุดที่มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิวิกฤต และความดันเท่ากับความดันวิกฤตเรียกว่าจุดวิกฤต (Critical Point, CP)



รูปที่ 2.5 เฟสไดอะแกรมของของไหลภาวะเหนือวิกฤต (McHugh, 1994)

ที่อุณหภูมิมากกว่า อุณหภูมิวิกฤต และความดันมากกว่า ความดันวิกฤต สารจะอยู่ในภาวะที่มีสมบัติจำแนกไม่ได้ว่าเป็นแก๊สหรือของเหลว เรียกสารที่อยู่ในภาวะนี้ว่า ของไหลภาวะเหนือวิกฤต ของไหลภาวะเหนือวิกฤตมีสมบัติอยู่ระหว่างแก๊สกับของเหลว ดังแสดงในตารางที่ 2.2

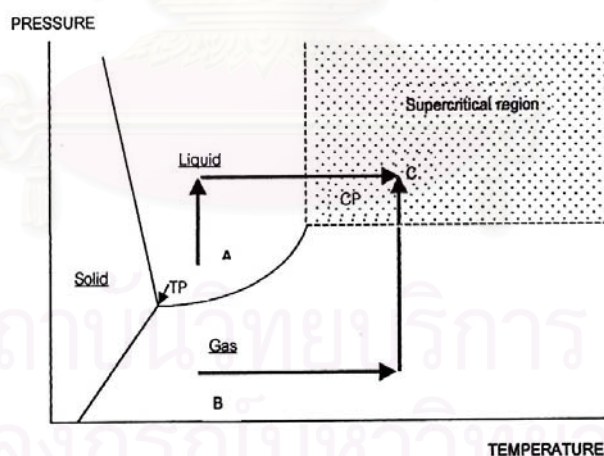
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของแก๊ส ของไหลภาวะเหนือวิกฤต และของเหลว (Taylor, 1996)

	Density (g/mL)	Dynamic Viscosity (g/cm-sec)	Diffusion Coefficient (cm <sup>2</sup> /sec)
Gas (ambient)	0.0006-0.002	0.0001-0.003	0.1-0.4
Supercritical fluid(T <sub>c</sub> ,P <sub>c</sub> )	0.2-0.5	0.0001-0.0003	0.0007
Liquid (ambient)	0.6-1.6	0.002-0.03	0.000002-0.00002

ความหนาแน่นของของไหลภาวะเหนือวิกฤตมีค่าใกล้เคียงกับของเหลว เมื่อนำมาใช้เป็นตัวทำละลาย โมเลกุลของสารที่ต้องการละลายจะถูกล้อมรอบด้วยโมเลกุลของของไหลภาวะเหนือวิกฤต เกิดอันตรกิริยา (Interaction) กัน ลดพลังงานเอนทาลปี เกิดการละลายได้ดี และขณะเดียวกันของไหลภาวะเหนือวิกฤตก็มีความหนืดและการแพร่กระจายใกล้เคียงกับแก๊ส ทำให้สามารถแทรกเข้าไปในโครงสร้างภายในของตัวถูกละลาย (Solute Matrix) ได้ดี ด้วยสมบัติเหล่านี้จึงนำของไหลภาวะเหนือวิกฤตมาใช้เป็นตัวทำละลายซึ่งมีข้อดีเหนือตัวทำละลายที่เป็นของเหลวคือ มีอัตราการถ่ายโอนมวลเร็วกว่าและมีความสามารถในการทำละลาย (Solvent Power) ที่ดีกว่า



รูปที่ 2.6 เส้นทางการเข้าสู่ภาวะเหนือวิกฤต (จุด C) จากของเหลว (จุด A) และจากแก๊ส (จุด B) (Lugue de Castro et al., 1994)

มีเส้นทางที่แตกต่างกัน 2 เส้นทาง ตามรูปที่ 2.6 ในการทำให้เป็นของไหลภาวะเหนือวิกฤตตามที่ต้องการ เส้นทางแรกคือ เริ่มต้นที่จุด A สารอยู่ในสถานะของเหลว เพิ่มความดันให้สูงกว่าความดันวิกฤตของสารนั้นที่อุณหภูมิคงที่ ต่อมาเพิ่มอุณหภูมิให้สูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตของสาร

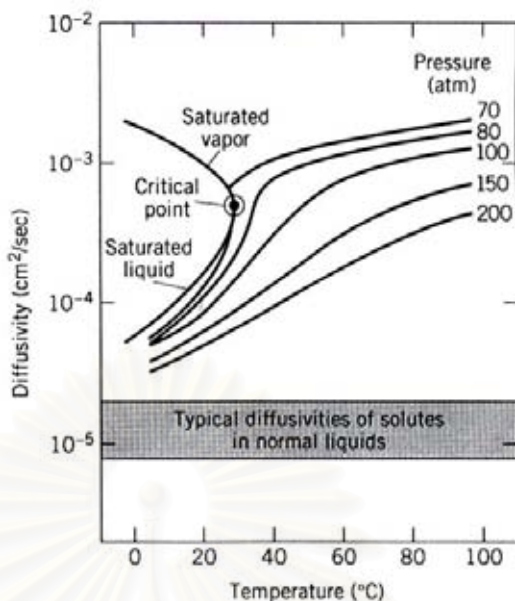
นั้นที่ความดันคงที่จนกระทั่งสารนั้นเข้าสู่ภาวะเหนือวิกฤตที่จุด C เส้นทางที่สองคือ เริ่มต้นที่จุด B สารนั้นอยู่ในสถานะแก๊ส ให้ความร้อนแก่สารนั้นจนกระทั่งสารนั้นมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตที่ความดันคงที่ ต่อมาเพิ่มความดันให้สูงกว่าความดันวิกฤตของสารนั้นที่อุณหภูมิคงที่

การใช้ประโยชน์จากของไหลภาวะเหนือวิกฤตเริ่มต้นในราวทศวรรษ 1930 ซึ่งในระยะแรก จะมุ่งเน้นที่การนำมาใช้เป็นตัวทำละลายในงานสกัด (Supercritical Fluid Extraction, SFE) โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม และอุตสาหกรรมอาหาร และถูกนำมาใช้เป็นเฟสเคลื่อนที่ (Mobile Phase) ในงานวิเคราะห์ (Supercritical Fluid Chromatography, SFC) ครั้งแรกในปี 1962

### 2.4.1 สมบัติของของไหลภาวะเหนือวิกฤต

#### สมบัติการถ่ายโอน (Transport Properties)

จากการที่ของไหลภาวะเหนือวิกฤตมีความหนืดต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับของเหลวแล้ว ดังตารางที่ 2.2 และยังมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่สูง ดังรูปที่ 2.7 ทำให้ของไหลภาวะเหนือวิกฤตมีความสามารถกระจายตัวได้อย่างทั่วถึง สามารถแทรกซึมเข้าไปในโครงสร้างภายในของตัวถูกละลายได้ดี ทำให้ตัวถูกละลายที่ละลายเข้าไปในของไหลภาวะเหนือวิกฤตกระจายออกจากบริเวณที่เกิดการสกัดไปบริเวณอื่นได้ง่าย คือมีอัตราการถ่ายโอนมวลดี ส่งผลให้ของไหลภาวะเหนือวิกฤตเป็นตัวทำละลายที่ดี อย่างไรก็ตาม ความหนืดและสัมประสิทธิ์การแพร่ของของไหลภาวะเหนือวิกฤตมีความสัมพันธ์กับปัจจัยหลายประการเช่น อุณหภูมิ ความดัน และชนิดของของไหลภาวะเหนือวิกฤต จึงต้องมีการปรับภาวะให้เหมาะสมเพื่อให้สกัดสารที่ต้องการได้ดีที่สุดและมีสารที่ไม่ต้องการปนมาน้อยที่สุด อัตราเร็วของการถ่ายโอนมวลนอกจากเป็นผลโดยตรงจากความหนืดและความสามารถในการแพร่ของของไหลภาวะเหนือวิกฤตแล้ว ยังขึ้นกับระยะทางการแพร่และขอบเขตการแพร่ซึ่งเป็นปัจจัยจากโครงสร้างภายในของตัวถูกละลาย



รูปที่ 2.7 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิและความดันต่าง ๆ  
(Taylor, 1996)

#### ความสามารถในการทำละลาย (Solvent Power)

เป็นสมบัติเด่นประการหนึ่งของของไหลภาวะเหนือวิกฤตที่เหนือกว่าตัวทำละลายที่เป็นของเหลวทั่วไปเนื่องจากสามารถปรับให้มีค่ามากหรือน้อยได้ง่ายกว่า โดยการปรับภาวะของของไหลภาวะเหนือวิกฤต ประการแรกคือ อุณหภูมิ โดยทั่ว ๆ ไปการเพิ่มอุณหภูมิให้กับตัวทำละลายที่เป็นของเหลว จะทำให้มีการละลายเพิ่มขึ้น แต่ในของไหลภาวะเหนือวิกฤต การเพิ่มอุณหภูมิจะก่อให้เกิดผล 2 ประการที่ขัดแย้งกัน

1. เพิ่มการละลายของตัวถูกละลาย
2. ลดความหนาแน่น ทำให้โมเลกุลของของไหลภาวะเหนือวิกฤตกับตัวถูกละลายอยู่ห่าง

กัน การละลายของตัวถูกละลายจึงลดลง

ผลรวมของผลที่ขัดแย้งกัน 2 ประการนี้คือ ความสามารถในการทำละลายของของไหลภาวะเหนือวิกฤตเพิ่มขึ้น ซึ่งข้อขัดแย้งประการที่สอง สามารถแก้ไขได้โดยการเพิ่มความดันให้กับของไหลภาวะเหนือวิกฤตเพื่อคงสภาพความหนาแน่นให้ใกล้เคียงกับภาวะเดิมก่อนที่จะมีการเพิ่มอุณหภูมิ กล่าวโดยสรุปคือ ตัวแปรที่มีผลโดยตรงต่อความสามารถในการละลาย คือ อุณหภูมิ และความหนาแน่น และความดันมีผลทางอ้อมโดยส่งผ่านความหนาแน่น

นอกจากนี้ยังมีการใช้สารช่วยปรับปรุง(Modifiers) คือ ตัวทำละลายที่สอง (Secondary Solvent) ได้แก่ ตัวทำละลายทั่วไปชนิดต่าง ๆ ซึ่งสามารถละลายเป็นเนื้อเดียวกันกับของไหลปฐมภูมิ (Primary Fluid) ได้อย่างสมบูรณ์ มีผลให้เพิ่มความสามารถในการทำละลายของของไหลภาวะเหนือวิกฤต

อย่างไรก็ตามการเติมสารช่วยปรับปรุงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเฟสไดอะแกรม การทำนายพฤติกรรมของตัวทำละลายจึงเป็นไปได้ยาก เนื่องจากความรู้ทางด้านนี้ยังมีข้อจำกัด ผลของสารช่วยปรับปรุงจึงต้องใช้ในการทดลองเป็นเครื่องตัดสิน

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Feng et al.(1996) ศึกษาปฏิกิริยาการทำให้เป็นของเหลวโดยตรงสำหรับพลาสติกเหลือทิ้งจำพวกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและความหนาแน่นปานกลาง พอลิพรอพิลีน และถ่านหินผสมกับพลาสติก พบว่าตัวทำละลาย Waste oil มีส่วนช่วยให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวทั้งหมดมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับระบบที่มีการใช้ตัวทำละลายพวกเตตระลินและพบว่าพอลิพรอพิลีนจะให้ผลิตภัณฑ์ที่ดีที่อุณหภูมิ 420 องศาเซลเซียส ส่วนพลาสติกผสมจะให้ผลิตภัณฑ์ที่สูงในช่วงอุณหภูมิสูง 445–460 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณน้ำมันและผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวทั้งหมดที่ได้จากพอลิเอทิลีน และพลาสติกผสมนั้นจะลดลงเล็กน้อยเมื่อความดันของไฮโดรเจนลดลงโดยในงานวิจัยนี้ได้นำเอาพลาสติกพอลิเอทิลีน พอลิพรอพิลีน และพลาสติกผสมมาใช้ร่วมกับถ่านหินในอัตราส่วน 50 : 50 โดยในการทดลองนี้จะให้ผลดีที่สุดเมื่อมีการเติมตัวทำละลายเตตระลิน หรือ เตตระลินผสม Waste oil ส่วนในการเติม Waste oil เพียงอย่างเดียว หรือไม่เติมตัวทำละลายเลยนั้น จะเกิดผลิตภัณฑ์ต่ำ โดยพบว่าปริมาณน้ำมันและผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวทั้งหมดจะเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 10 เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 หรือ  $Al_2O_3-SiO_2$  Feridrite ที่อุณหภูมิ 460 องศาเซลเซียส และพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากพอลิพรอพิลีนผสมกับถ่านหินจะมากกว่าพอลิพรอพิลีนผสมกับถ่านหินที่ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา

Mingsheng et al.(1996) ศึกษาภาวะในการทำปฏิกิริยาและ ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อการแปรปรวมของพลาสติกเหลือทิ้งกับถ่านหินให้เป็นของเหลว โดยแบ่งเป็นพลาสติกเพียงชนิดเดียวและพลาสติกผสม ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 400-440 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจน 5.6 เมกะพาสคัล ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ HZSM-5-Zeolite และ Fluid catalytic cracking พลาสติกผสมประกอบด้วยร้อยละ 50พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงร้อยละ 30พอลิพรอพิลีนเตตระพทาเลต ร้อยละ 20พอลิสไตรีน และตัวทำละลายจำพวก แอโรแมติก ไฮโดรแอโรแมติก ไฮโคลอัลเคนและ

อะลิฟาติก กับพลาสติกผสม จากการทดลองพบว่าตัวทำละลายอะลิฟาติกสายโซ่ตรงมีประสิทธิภาพสูงสุดในกระบวนการแตกตัวของพอลิเมอร์และค่าการเปลี่ยนสูงที่สุด เมื่อทำการทดลองเป็นเวลาสั้น ๆ 30 และ 60 นาที สำหรับกระบวนการร่วมระหว่างพลาสติกผสมกับถ่านหินจะมีค่าการเปลี่ยนแปลงสูงที่สุดที่ ความดันต่ำและทำปฏิกิริยาแบบไม่ใช้ตัวทำละลาย ส่วนในการทำกระบวนการร่วมระหว่างพลาสติกเพียงอย่างเดียวกับถ่านหินจะมีค่าการเปลี่ยนที่สูงกว่าใช้พลาสติกผสม

Yuan et al.(1998) ศึกษาการสกัด Leping coal ด้วยตัวทำละลายภาวะเหนือวิกฤต โดยตัวทำละลายที่ใช้คือ ไทลูอินและตัวทำละลายผสมที่อุณหภูมิ 355–425 องศาเซลเซียส ความดันของไฮโดรเจน 4.5–10 เมกะพาสคัล ในเครื่องปฏิกรณ์กึ่งต่อเนื่อง ผลการทดลองแสดงว่าภาวะในการทดลองมีผลต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ ลักษณะสมบัติทางความร้อนและการกระจายของหมู่ไฮโดรคาร์บอนในผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลอง โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้เมื่อทำการสกัดด้วยตัวทำละลายไทลูอินที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียสมีร้อยละการเปลี่ยนถ่านหินเป็น 64 โดยมีผลิตภัณฑ์เป็นน้ำมันร้อยละ 31 ซึ่งประกอบด้วย อะลิฟาติกร้อยละ 22 แอโรแมติกร้อยละ 20 และสารประกอบมีขั้วร้อยละ 39 มีอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อถ่านหิน 1.38

ธารินี กิติเรืองทอง (2543) ศึกษากระบวนการสังเคราะห์ของเหลวจากลิกไนต์โดยใช้กระบวนการร่วมของพอลิพรอพิลีนกับลิกไนต์โดยใช้เหล็กบนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลาปาล์มเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งได้ศึกษาอิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ที่มีร้อยละของเหล็กเป็น 1, 5, 10 และไม่ใช่ตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิระหว่าง 350-440 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไฮโดรเจน 247 –75 บาร์ ใช้เวลาในการทดลอง 15-90 นาทีและผลของสัดส่วนโดยน้ำหนักของพอลิพรอพิลีนกับลิกไนต์ โดยทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กระดับห้องปฏิบัติการ ภาวะที่มีแนวโน้มดีที่สุดในการให้ปริมาณของเหลวสูงสุด คือ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของพอลิพรอพิลีนกับลิกไนต์เป็น 4 ต่อ 1 ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน เริ่มต้น 62 บาร์ ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที โดยให้ปริมาณของเหลวร้อยละ 53.36 แก๊สร้อยละ 18.89 และกากของแข็งร้อยละ 27.75 โดยนำหนักจากการวิเคราะห์โดยเครื่องวิเคราะห์ Simulated Distillation Gas Chromatography พบว่าแนวโน้มที่ดีที่สุดในการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์จำพวกเนฟทาและคีโรซีนได้สูงที่สุด คือ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของพอลิพรอพิลีนกับลิกไนต์เป็น 4 ต่อ 1 ที่อุณหภูมิ 420 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน เริ่มต้น 62 บาร์ ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที โดยที่น้ำหนัก ตัวเร่งปฏิกิริยาและร้อยละของเหล็กบนถ่านกัมมันต์ให้ผลการกระจายตัวเป็นผลิตภัณฑ์ค่าใกล้เคียงกันคือให้ผลของการกระจายตัวเป็นผลิตภัณฑ์ประกอบด้วย เนฟทาร้อยละ 35.6 คีโรซีนร้อยละ 7.4 และแก๊สร้อยละ 2.75

อภิชาติ ศิริพจนาวรรณ (2545) ศึกษาการแปรรูปร่วมของถ่านหินบ้านปูและพอลิพรอพิลีนให้เป็นของเหลวด้วยตัวทำละลายโทลูอิน-เตตระลิน และโทลูอิน-เอทานอลภาวะเหนือวิกฤต ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่องขนาด 78 มิลลิลิตรที่อุณหภูมิ 400-475 องศาเซลเซียส ความดัน 5-12.2 เมกะพาสคัล และอัตราส่วนระหว่างถ่านหินกับพอลิพรอพิลีนจาก 10:0 ถึง 6:4 โดยทำการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับที่ส่งผลกระทบต่อร้อยละการเปลี่ยนถ่านหินและพอลิพรอพิลีน และร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลว ซึ่งตัวแปรกระบวนการที่ศึกษาคือ อุณหภูมิ ความดัน และอัตราส่วนระหว่างถ่านหินกับพอลิพรอพิลีน พบว่าอัตราส่วนระหว่างถ่านหินกับพอลิพรอพิลีน อุณหภูมิและความดันส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อร้อยละการเปลี่ยนถ่านหินกับพอลิพรอพิลีน และร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวมากที่สุดตามลำดับ นอกจากนี้ยังศึกษาผลของตัวแปรกระบวนการต่อการกระจายของหมู่ไฮโดรคาร์บอน ในผลิตภัณฑ์ของเหลว พบว่าการแปรรูปร่วมของถ่านหินและพอลิพรอพิลีน ให้เป็นของเหลวด้วยตัวทำละลายโทลูอิน-เตตระลินภาวะเหนือวิกฤตให้ผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวสูงสุดร้อยละ 69 ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ความดัน 12.2 เมกะพาสคัล และอัตราส่วนระหว่างถ่านหินกับพอลิพรอพิลีน 6:4 ส่วนการแปรรูปร่วมของถ่านหินและพอลิพรอพิลีน ให้เป็นของเหลวด้วยตัวทำละลายโทลูอิน-เอทานอลภาวะเหนือวิกฤตให้ผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวสูงสุดร้อยละ 61 ที่อุณหภูมิ 425 องศาเซลเซียส ความดัน 10 เมกะพาสคัล และอัตราส่วนระหว่างถ่านหินกับพอลิพรอพิลีน 6:4

Bhaskar et al. (2003) ศึกษาการแปรรูปพลาสติกผสมซึ่งประกอบไปด้วย พอลิไวนิลคลอไรด์ พอลิพรอพิลีน พอลิเอทิลีน และพอลิสไตรีน ผสมกันอยู่ในอัตราส่วน 1/3/3/3 ให้เป็นของเหลวที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศ ในเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบกึ่งต่อเนื่อง และมีการเติมสารประกอบคาร์บอนเช่น แคลเซียมคาร์บอเนต เป็นตัวดูดซับ ไฮโดรเจนคลอไรด์และสารประกอบคลอรีน ไฮโดรคาร์บอนที่จะเกิดขึ้น จากผลการทดลองได้ผลิตภัณฑ์เป็น ของเหลวร้อยละ 70 แก๊สร้อยละ 20 และกากของแข็งร้อยละ 10 และตัวดูดซับมีประสิทธิภาพในการดูดซับสารประกอบคลอรีนในผลิตภัณฑ์ของเหลวได้ถึงร้อยละ 107

Wang et al. (2003) ศึกษาการแปรรูปร่วมระหว่างถ่านหินจีนและพลาสติกให้เป็นของเหลวแบบขั้นตอนเดียว ภายใต้ภาวะการทดลองดังนี้ อุณหภูมิระหว่าง 410-450 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ความดันไฮโดรเจน 10 เมกะพาสคัล โดยเริ่มจากพลาสติกใช้แล้วแบบเฉพาะอย่างและแบบผสมกัน ผลการทดลองจากการทำเฉพาะอย่างแสดงว่า พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงยากที่จะเปลี่ยนเป็นของเหลวและถ้าต้องการให้ร้อยละการเปลี่ยนแปลงสูงต้องทำการทดลองที่อุณหภูมิสูงขึ้น ส่วนการแปรรูปร่วมของถ่านหินและพลาสติกผสม (ในอัตราส่วน 1 ต่อ

1) ใช้ถ่านหินลิกไนต์ Xianfeng ร่วมกับถ้ำลอยของโมลิปดีนัมคอนเซนเทรตแคลไซต์ (FAMo) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้มีค่าสูงถึงร้อยละ 60.3-78.1 ยกเว้นการแปรรูปร่วมระหว่างลิกไนต์กับพอลิเอทิลีน ในขณะที่ร้อยละการเปลี่ยนสูงกว่าร้อยละ 95 อย่างไรก็ตาม ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการแปรรูปร่วมระหว่างถ่านหินจีนและพลาสติกผสมก็ยังมีปริมาณสูงกว่าค่าเฉลี่ยของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการแปรรูปร่วมระหว่างถ่านหินจีนและพลาสติกเพียงอย่างเดียวมีประมาณร้อยละ 5.1-22.6 การใช้ไฮโดรเจนลดลงร้อยละ 7.7-17.9 แสดงถึง synergistic effect ที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาการแปรรูปร่วมระหว่างถ่านหินจีนและพลาสติกผสมใช้แล้ว



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 3

### เครื่องมือและวิธีการทดลอง

#### 3.1 รูปแบบการศึกษา

เป็นการวิจัยที่ทดลองในห้องปฏิบัติการเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ของเหลวจากถ่านหินและพลาสติกผสมในตัวทำละลายภาวะเหนือวิกฤต ในระบบจะมีการเติมไฮโดรเจนจากตัวทำละลายที่สามารถให้ไฮโดรเจนได้ ทำการทดลองที่ความดันเริ่มต้น 1 บรรยากาศ การทดลองแบ่งออกเป็น 4 ส่วนคือ

1. การแปรปรูปร่วมของถ่านหินและพลาสติกผสมให้เป็นของเหลวด้วยตัวทำละลายภาวะเหนือวิกฤต
  - 1.1 การออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละการเปลี่ยนและร้อยละผลได้ของเหลวจากการแปรปรูปร่วมของถ่านหินและพลาสติกผสมให้เป็นของเหลวด้วยตัวทำละลายเตตระลินภาวะเหนือวิกฤต
  - 1.2 การแปรรูปพลาสติกให้เป็นของเหลวด้วยตัวทำละลายผสมเตตระลิน-โทลูอิน
  - 1.3 การแปรปรูปร่วมของถ่านหินและเม็ดพลาสติก 4 ชนิดให้เป็นของเหลวด้วยตัวทำละลายภาวะเหนือวิกฤต
2. ศึกษาผลของตัวแปร อุณหภูมิ ร้อยละโดยปริมาตรของเตตระลิน และร้อยละโดยน้ำหนักพลาสติกผสม ที่มีต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้
3. การแปรปรูปร่วมของถ่านหินและพลาสติกผสมให้เป็นของเหลวด้วยตัวทำละลายใช้แล้ว
4. การแปรปรูปร่วมของถ่านหินและพลาสติกผสมหรือขยะพลาสติกให้เป็นของเหลว โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

และทำการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของเหลวเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมสำหรับร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลว

#### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

1. เครื่องปฏิกรณ์ (Reactor) ผลิตโดย Parr Instrument Company model 4842 แสดงในรูปที่ 3.1 มีปริมาตร 250 มิลลิลิตร ทำจากเหล็กกล้าเหนียวไร้สนิม SUS 316 ประกอบไปด้วย เทอร์โมคัปเปิลพร้อมชุดควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Controller) อุปกรณ์วัดความดันซึ่งประกอบ



ด้วย มาตรฐานวัดความดันและอุปกรณ์วัดความดันแบบดิจิตอล (Pressure Transducer) ไบควอน พร้อมอุปกรณ์ กำหนดและวัดความเร็วรอบของไบควอน ทำงานที่อุณหภูมิสูงสุด 500 องศาเซลเซียส และความดันสูงสุด 34 เมกะพาสคัล



รูปที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์ Parr Reactor Model 4842

2. เครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic) Bransonic 521 สำหรับทำการสกัดของเหลวด้วยตัวทำละลายเตตระไฮโดรฟูแรน (Tetrahydrofuran) จากกากของแข็ง ด้วยเทคนิคการสกัดแบบอัลตราโซนิก (เอกสิทธิ์, 2546)

3. เครื่องระเหยแบบหมุน (Rotary Evaporator) Bunchi Rotavapor R-200 (เอกสิทธิ์, 2546)

4. เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatograph) Hewlett Packard 5890 series II พร้อม ดีเทคเตอร์ (Detector) แบบ TCD และมี 3 คอลัมน์ คือ Porapak Q, Molecular sieve และ OV-1 สำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส (เอกสิทธิ์, 2546)

5. เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatograph) และซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น (Simulated Distillation) Varian CP-3800 พร้อมดีเทคเตอร์แบบ FID และคอลัมน์ CP-SIL 5 CP สำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวตามจุดเดือด ตามมาตรฐาน ASTM D2887 (บำรุงสุข, 2546)

6. เครื่องแคลอริมิเตอร์ (Oxygen Bomb Calorimeter) ผลิตโดยบริษัท Parr Instrument Company model 1341EE

7. เตาอบ (Oven)

8. อุปกรณ์การกรองพร้อมกระดาษกรอง Whatman glass microfibre filters (GF/C)
9. เครื่องบดผ่านหินชนิดหยาบและชนิดละเอียด
10. ตะแกรงร่อนถ่านหินและเครื่องร่อนแยกขนาด 250 ไมครอน (เบอร์ 60)

### 3.3 สารตั้งต้นและสารเคมี

1. ถ่านหินลิกไนต์บดละเอียดผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 60 จาก การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย อำเภอมะเมาะ จังหวัดลำปาง
2. เม็ดพลาสติก 4 ชนิด คือ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ พอลิพรอพิลีน และพอลิสไตรีน จากบริษัท ทีพีไอ โพลีน จำกัด มหาชน และพลาสติกผสมของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง/พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ/พอลิพรอพิลีน/พอลิสไตรีน ในอัตราส่วน 27/25/35/13 (สำนักนโยบายอุตสาหกรรมรายสาขา 1, 2546) และขยะพลาสติก ประกอบไปด้วย ขวดบรรจุน้ำแบบขุ่น (พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง) ถังหิ้ว (พอลิเอทิลีน ความหนาแน่นต่ำ) ถังใส (พอลิพรอพิลีน) และกล่องโฟม (พอลิสไตรีน)
3. เตตระไฮโดรฟูแรน 99.99% จาก Fisher Chemicals
4. โทลูอีน 99% จาก Fisher Chemicals
5. เตตระลิน 95-98% จาก Acros Organics
6. คาร์บอนไดซัลไฟด์ 99% จาก Merck
7. แก๊สมาตรฐานสำหรับวิเคราะห์แก๊สผลิตภัณฑ์ จาก Supelco
8. โซเดียมซัลไฟด์ จาก Panreac Quimica
9. ไฮรอน (III) คลอไรด์ จาก APS

### 3.4 การดำเนินการวิจัย

#### 3.4.1 การออกแบบการทดลองของการแปรรูปรวมของถ่านหินและเม็ดพลาสติกผสมให้เป็นของเหลว ด้วยตัวทำละลายภาวะเหนือวิกฤต

งานวิจัยนี้ศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อกระบวนการแปรรูปรวมของถ่านหินและพลาสติกผสมให้เป็นของเหลว ในตัวทำละลายภาวะเหนือวิกฤตที่สามารถให้ไฮโดรเจนแก่ระบบได้และมีประสิทธิภาพในการถ่ายโอนความร้อนให้แก่สารตั้งต้นได้ดี และมีการเติมพลาสติกเพื่อให้

ไฮโดรเจนและทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระของถ่านหิน ทำให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลวเพิ่มมากขึ้น (Speight, 1980)

ตัวทำละลายภาวะเหนือวิกฤตที่ใช้ในการทดลอง มี 2 ชนิด คือ เตตระลิน และเตตระลิน ร้อยละ 80 ผสมโทลูอีนร้อยละ 20 โดยปริมาตร ซึ่งโทลูอีนมีอุณหภูมิวิกฤตเท่ากับ 318.7 องศาเซลเซียส ความดันวิกฤตเท่ากับ 4.11 เมกะพาสคัล และเตตระลินมีอุณหภูมิวิกฤตเท่ากับ 447.2 องศาเซลเซียส ความดันวิกฤตเท่ากับ 3.30 เมกะพาสคัล

การคำนวณสมบัติวิกฤตของตัวทำละลายโทลูอีน-เตตระลินนั้นได้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการคำนวณคือ HYSYS ver.2.4.1 ของบริษัท Hyprotech สำหรับการคำนวณใช้สมการสถานะของ Peng-Robinson ในการหา อุณหภูมิวิกฤต และความดันวิกฤต ดังนี้ ที่เตตระลินร้อยละ 80 ผสมในโทลูอีน ร้อยละ 20 โดยปริมาตร มี อุณหภูมิวิกฤตเท่ากับ 422.60 องศาเซลเซียส และความดันวิกฤตเท่ากับ 3.81 เมกะพาสคัล

โดยออกแบบการทดลองเป็นแบบแฟกทอเรียล โดยแต่ละตัวแปร มี 2 ระดับ และทำการทดลองครบทุกการทดลอง ตัวแปรที่ทำการศึกษามี 4 ตัวแปร คือ อุณหภูมิ อัตราส่วนถ่านหินต่อพลาสติกผสม อัตราส่วนถ่านหินและพลาสติกผสมต่อตัวทำละลาย และร้อยละของเตตระลิน ตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษา

ตัวแปร	ระดับต่ำ(-)	ระดับสูง(+)
1. อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส), A	430	460
2. ร้อยละของพลาสติกผสม, B	40	70
3. อัตราส่วนถ่านหินและพลาสติกผสมต่อตัวทำละลาย, C	3:2	1:1
4. ร้อยละโดยปริมาตรของเตตระลิน, D	80	100

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

ตารางที่ 3.2 การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล 4 ตัวแปร

การทดลอง	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ร้อยละของพลาสติกผสมในสารตั้งต้น	อัตราส่วนถ่านหินและพลาสติกผสมต่อตัวทำละลาย	ร้อยละของเตตระลินในตัวทำละลายผสม
1	430	40	3:2	80
2	460	40	3:2	80
3	430	60	3:2	80
4	460	60	3:2	80
5	430	40	1:1	80
6	460	40	1:1	80
7	430	60	1:1	80
8	460	60	1:1	80
9	430	40	3:2	100
10	460	40	3:2	100
11	430	60	3:2	100
12	460	60	3:2	100
13	430	40	1:1	100
14	460	40	1:1	100
15	430	60	1:1	100
16	460	60	1:1	100

#### 3.4.1.1 การแปรรูปพลาสติกให้เป็นของเหลวด้วยตัวทำละลายภาวะเหนือวิกฤต

การทดลองนี้ใช้พลาสติก 4 ชนิดคือ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำพอลิพรอพิลีน และพอลิสไตรีน ตามลำดับ ทำการทดลองที่ภาวะ อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ความดันเริ่มต้น 1 บรรยากาศ อัตราส่วนพลาสติกต่อตัวทำละลาย 3:2 ในตัวทำละลายเตตระลินร้อยละ 80 และร้อยละ 100 เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที โดยเริ่มนับจากอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ถึงค่าที่กำหนดไว้

### 3.4.1.2 การแปรรูปร่วมของถ่านหินและเม็ดพลาสติกแต่ละชนิดให้เป็นของเหลว

ทำการแปรรูปร่วมของถ่านหินและเม็ดพลาสติก 4 ชนิดคือ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ พอลิพรอพิลีน และพอลิสไตรีน ทำการทดลองที่ภาวะ อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ความดันเริ่มต้น 1 บรรยากาศ อัตราส่วนถ่านหินและพลาสติกแต่ละชนิดต่อตัวทำละลาย 3:2 ในตัวทำละลายเตตระลิน ร้อยละ 100 เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที โดยเริ่มนับจากอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ถึงค่าที่กำหนดไว้

### 3.4.2 ศึกษาผลของตัวแปร อุณหภูมิ ร้อยละโดยปริมาตรของเตตระลิน และร้อยละโดยน้ำหนักของพลาสติกผสม ที่มีต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้

- ศึกษาผลของ อุณหภูมิ 430-460 องศาเซลเซียส  
ทำการทดลองที่ภาวะ อุณหภูมิ 430-460 องศาเซลเซียส ความดันเริ่มต้น 1 บรรยากาศ ร้อยละพลาสติก 70 อัตราส่วนถ่านหินและพลาสติกผสมต่อตัวทำละลาย 3:2 ตัวทำละลายเตตระลิน ร้อยละ 100 เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที โดยเริ่มนับจากอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ถึงค่าที่กำหนดไว้
- ศึกษาผลของ ร้อยละโดยปริมาตรของเตตระลินในตัวทำละลายผสม 10-100  
ทำการทดลองที่ภาวะ อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ความดันเริ่มต้น 1 บรรยากาศ ร้อยละพลาสติก 70 อัตราส่วนถ่านหินและพลาสติกผสมต่อตัวทำละลาย 3:2 ตัวทำละลายเตตระลินผสมโทลูอีน ร้อยละ 10-100 เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที โดยเริ่มนับจากอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ถึงค่าที่กำหนดไว้
- ศึกษาผลของ ร้อยละพลาสติกผสม 40-100  
ทำการทดลองที่ภาวะ อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ความดันเริ่มต้น 1 บรรยากาศ ร้อยละพลาสติกผสม 40-100 อัตราส่วนถ่านหินและพลาสติกผสมต่อตัวทำละลาย 1:1 ตัวทำละลายเตตระลิน ร้อยละ 100 เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที โดยเริ่มนับจากอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ถึงค่าที่กำหนดไว้

### 3.4.3 การแปรรูปร่วมของถ่านหินและเม็ดพลาสติกผสมให้เป็นของเหลวด้วยตัวทำละลายที่ ใช้แล้ว

ทำการทดลองที่ภาวะ อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ความดันเริ่มต้น 1 บรรยากาศ ร้อยละพลาสติก 70 อัตราส่วนถ่านหินและพลาสติกผสมต่อตัวทำละลายที่ใช้แล้ว 3:2 เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที โดยเริ่มนับจากอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ถึงค่าที่กำหนดไว้

### 3.4.4 การแปรรูปร่วมของถ่านหินและเม็ดพลาสติกผสมหรือขยะพลาสติกให้เป็นของเหลว โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

ทำการทดลองที่ภาวะ อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ความดันเริ่มต้น 1 บรรยากาศ ร้อยละพลาสติกผสมหรือขยะพลาสติก 70 อัตราส่วนถ่านหินและพลาสติกผสมหรือขยะพลาสติกต่อตัวทำละลาย 3:2 ในตัวทำละลายเตตระลิน ร้อยละ 100 เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาทีโดยเริ่มนับจากอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ถึงค่าที่กำหนดไว้

สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ทำการทดลองคือ เหล็กร้อยละ 5 บนถ่านกัมมันต์ (วิซชากร, 2543) ไอร์ออน (III) ออกไซด์บนถ่านหิน (ปริมาณเหล็กร้อยละ 2.5 ต่อกรัมถ่านหิน) และ ไอร์ออน (III) ซัลไฟด์บนถ่านหิน (ปริมาณเหล็กร้อยละ 2.5 ต่อกรัมถ่านหิน) (บำรุงสุข, 2546) ที่ภาวะ อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ความดันเริ่มต้น 1 บรรยากาศ ร้อยละพลาสติกผสม 70 อัตราส่วนถ่านหินและพลาสติกผสมต่อตัวทำละลาย 3:2 ในตัวทำละลายเตตระลินร้อยละ 100 เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาทีโดยเริ่มนับจากอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ถึงค่าที่กำหนดไว้

สำหรับ เหล็กบนถ่านกัมมันต์ที่ใช้ทดลองมีลักษณะเป็นผงของแข็งโดยการผสมลงไป  
ในเครื่องปฏิกรณ์พร้อมกับถ่านหิน โดยเติมลงไป 0.75 กรัม

สำหรับไอร์ออน (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 มิลลิลิตรจากนั้นเติมสารละลาย  $\text{FeCl}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$  ลงไป เกิดเป็นของเหลวสีขาวขุ่น คล้ายนม ( $\text{Fe}_2\text{S}_3 + 6\text{NaCl} + 39\text{H}_2\text{O}$ ) คนให้เข้ากัน ถ้าหนืดข้นเกินไป ให้เติมน้ำเพิ่มได้ตามต้องการ
4. หยดของเหลวสีขาวขุ่น ลงบนถ่านหิน จนชุ่ม พักไว้จนหมาด
5. หยดต่อจนชุ่ม พักไว้จนหมาด ทำซ้ำ ๆ จนกระทั่งของเหลวหมด ทั้งไว้ข้ามคืนจนหมาด
6. อบถ่านหินที่เตรียมได้เป็นเวลา 1 คืนที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ทิ้งไว้ให้เย็น
7. บดถ่านหิน จนมีขนาด 250 มิลลิเมตรแล้วเก็บไว้ในเดสซิกเคเตอร์สำหรับการทดลองต่อไป ส่วนการอิมเพกเนตไอร์ออน(III) ออกไซด์บนถ่านหิน (ปริมาณเหล็กร้อยละ 2.5 ต่อกรัมถ่านหิน) ใช้วิธีเดียวกันกับทำการอิมเพกเนตไอร์ออน (III) ซัลไฟด์ บนถ่านหิน

### 3.5 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

#### 3.5.1 การเตรียมตัวอย่างถ่านหินเพื่อใช้ในการวิเคราะห์สมบัติเริ่มต้นและใช้ในการทดลอง

1. ตากถ่านหินทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเพื่อไล่ความชื้นอิสระจนน้ำหนักคงที่
2. บดถ่านหินให้มีขนาดเล็กด้วยเครื่องบดหยาบและบดละเอียดตามลำดับ
3. นำถ่านหินที่บดได้มาร่อนโดยผ่านตะแกรงเบอร์ 60 จากนั้นตากถ่านหินจนมีความชื้นสมดุลกับอากาศประมาณ 3 วัน
4. ถ่านหินสำหรับการทดลองจะนำมาอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสจนน้ำหนักคงที่เพื่อกำจัดความชื้น

#### 3.5.2 การเตรียมพลาสติกผสมและขยะพลาสติกในการทดลอง

1. อบเม็ดพลาสติกที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 คืนเพื่อไล่ความชื้นที่มีอยู่
2. เก็บเม็ดพลาสติกแต่ละชนิดที่ผ่านการอบไว้ในเดสซิกเคเตอร์ ทิ้งไว้ให้เย็น
3. ผสมเม็ดพลาสติกตามอัตราส่วนที่ต้องการ เก็บไว้ในเดสซิกเคเตอร์ เพื่อนำไปทดลองต่อไป

### 3.5.3 การวิเคราะห์สมบัติต่างๆของถ่านหินและพลาสติกเริ่มต้น ก่อนการแปรรูปให้เป็นของเหลว

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

### 3.5.4 การแปรรูปถ่านหินและพลาสติกผสมให้เป็นของเหลว

1. ชั่งถ่านหินและเม็ดพลาสติกผสมรวมกันตามอัตราส่วนที่กำหนด จำนวน 30 กรัม ลงในเครื่องปฏิกรณ์ เติมตัวทำละลายตามอัตราส่วนที่ต้องการ และเติมตัวเร่งปฏิกิริยาในกรณีใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา
2. ใส่อากาศภายในเครื่องปฏิกรณ์ด้วยแก๊สไฮโดรเจน
3. ประกอบเครื่องปฏิกรณ์พร้อมกับทดสอบรอยรั่ว จากนั้นตั้งค่าอุณหภูมิ โดยระบบของเครื่องควบคุมอุณหภูมิมีอัตราการให้ความร้อนประมาณ 6 องศาเซลเซียสต่อ นาที ตั้งค่าความเร็วรอบของใบกวน 550 รอบต่อนาที ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา เป็นเวลา 30 นาที โดยเริ่มนับเวลาตั้งแต่อุณหภูมิถึงค่าที่กำหนด
4. เมื่อครบระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ลดอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ จนเหลือ 150 องศาเซลเซียส จากนั้นยกเครื่องปฏิกรณ์ออกจากอุปกรณ์ให้ความร้อน เป่าเครื่องปฏิกรณ์ด้วยพัดลมไฟฟ้าจนอุณหภูมิลดลงถึงอุณหภูมิต่ำ
5. วิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊สด้วยเครื่องไมโครแก๊สโครมาโทกราฟี
6. นำผลิตภัณฑ์ของเหลวและกากของแข็งใส่ในขวดสกัด ชะล้างผลิตภัณฑ์ที่เหลือ อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ด้วยเตตระไฮโดรฟูแรนปริมาตร 150 มิลลิลิตรจนหมดพร้อมทั้งเทเตตระไฮโดรฟูแรนที่ใช้ล้างเครื่องปฏิกรณ์ผสมลงไปกับผลิตภัณฑ์ที่ใส่ในขวดสกัด
7. สกัดผลิตภัณฑ์ของเหลวออกจากของแข็งด้วยเตตระไฮโดรฟูแรน ด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
8. กรองสารละลายของเหลวออกจากกากของแข็งด้วยอุปกรณ์กรองของสุญญากาศ
9. นำสารละลายของเหลวที่ได้ไประเหยเพื่อแยกตัวทำละลายออกจากผลิตภัณฑ์ของเหลวด้วยเครื่องระเหยแบบหมุน



- แยกตัวทำละลายเตตระไฮโดรฟูแลนออกที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส ความดันสุญญากาศ 400 มิลลิบาร์ เป็นเวลา 40 นาที หลังจากนั้นลดความดันลงเป็น 200 มิลลิบาร์ 1 ชั่วโมง
  - ชั่งน้ำหนักของเหลวที่ได้ หักลบปริมาณตัวทำละลายที่เติม ได้เป็นปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลว เพื่อนำไปคำนวณร้อยละผลได้ของเหลว
  - แยกตัวทำละลายโทลูอีนออก (ในกรณีเป็นตัวทำละลายผสมโทลูอีน-เตตระลิน) ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ความดันสุญญากาศ 400 มิลลิบาร์ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
  - แยกตัวทำละลายเตตระลินออกที่อุณหภูมิ 195 องศาเซลเซียส ความดันสุญญากาศ 400 มิลลิบาร์ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
10. ชั่งน้ำหนักของเหลวที่แยกได้ และเก็บผลิตภัณฑ์ของเหลวไว้ในขวดเพื่อรอการวิเคราะห์ต่อไป

### 3.5.5 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ

เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟที่ใช้วิเคราะห์ คือ Agilent 3000A Micro GC ซึ่งประกอบด้วยดีเทคเตอร์แบบ TCD และคอลัมน์แบบ packed column จำนวน 3 คอลัมน์คือ Molecular sieve, Plot-Q และ OV-1 โดยข้อมูลและภาวะของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ แสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ข้อมูลและภาวะของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

3000 Micro GC	<u>Molecular sieve</u>	<u>Plot Q</u>	<u>OV-1</u>
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	-	-

### 3.5.6 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

การวิเคราะห์เริ่มด้วยการนำผลิตภัณฑ์ของเหลวไปละลายในคาร์บอนไดซัลไฟด์ในอัตรา 1 ส่วนใน 100 ส่วน โดยปริมาตร วิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟียี่ห้อ 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 ภาวะที่ใช้คือ

อุณหภูมิหัวฉีด (Injector Temperature) เท่ากับ 298 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิคอลัมน์ (Column Temperature or Oven Temperature) ซึ่งจะใช้เป็นแบบโปรแกรมอุณหภูมิ (Temperature Program) 1 ขั้นตอน และมีไนโตรเจนเหลวเป็นตัวให้ความเย็นเพื่อควบคุมอุณหภูมิด้วย คือ เริ่มต้นที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 0.01 นาทีจากนั้นเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตราการให้ความร้อน 20 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงอุณหภูมิสุดท้ายที่ 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

### 3.5.7 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของเหลวด้วย GC/MS

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

### 3.5.8 การวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ของถ่านหินหลังการแปรรูปให้เป็นของเหลว ได้แก่

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

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในการศึกษากระบวนการแปรรูปร่วมของถ่านหินและพลาสติกผสมให้เป็นของเหลวด้วยตัวทำละลายภาวะเหนือวิกฤตได้ศึกษาผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการแปรรูปร่วมเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ ทำการทดลองแบบแฟกทอเรียล โดยมีตัวแปรทั้งหมด 4 ตัวแปร คือ อุณหภูมิ อัตราส่วนโดยน้ำหนักถ่านหินและพลาสติกผสมต่อตัวทำละลาย ร้อยละโดยน้ำหนักของพลาสติกผสม และร้อยละโดยปริมาตรของเตตระลินในตัวทำละลายผสม โดยตัวแปรทั้งหมดแบ่งเป็น 2 ระดับ และทำการทดลองครบทุกการทดลอง (Montgomery, 1997) เพื่อศึกษาว่าตัวแปรใดบ้างในช่วงที่ทำการศึกษามีผลต่อ ร้อยละการเปลี่ยนถ่านหินและพลาสติกผสมและร้อยละผลได้ของเหลวตลอดจนผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ จากนั้นศึกษาค่าการแจกแจงหมู่ไฮโดรคาร์บอน และองค์ประกอบทางเคมี โดยศึกษาผลของอุณหภูมิร้อยละพลาสติกผสม โดยใช้ตัวทำละลายเตตระลินผสมโทลูอีนเนื่องจากการเติมเตตระลิน ทำให้ร้อยละการเปลี่ยนถ่านหินและร้อยละผลได้ของเหลวเพิ่มขึ้น (Shishido et al., 1991) นอกจากนี้ได้ทำการศึกษาผลของตัวทำละลายที่ใช้แล้ว นำกลับมาใช้ใหม่ และการทดลองเปรียบเทียบของการแปรรูปร่วมของถ่านหินและพลาสติกผสม กับขยะพลาสติกที่ใช้แล้ว

#### 4.1 สมบัติของสารตั้งต้น

##### 4.1.1 สมบัติเบื้องต้นของถ่านหินและพลาสติกผสม

ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis) ของถ่านหิน และพลาสติกผสม โดยพลาสติก ประกอบด้วย พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ พอลิพรอพิลีน และพอลิสไตรีน ในอัตราส่วน 27/25/35/13 (สำนักนโยบายอุตสาหกรรมรายสาขา 1, 2546) แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหินและพลาสติกผสม

การวิเคราะห์แบบประมาณ (dry basis)		ถ่านหิน	พลาสติกผสม
ปริมาณเถ้า (Ash)	ร้อยละ	19.41	0.5
ปริมาณสารระเหยได้ (Volatile Matter)	ร้อยละ	59.81	98.5
ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon)	ร้อยละ	20.78	1.0

#### 4.1.2 องค์ประกอบธาตุของถ่านหินและเม็ดพลาสติก

ทำการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) เฉพาะธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง CHN/O Analyser (Perkin Elmer PE2400 series II) ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.2 และ 4.3

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ที่องค์ประกอบธาตุของถ่านหิน

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (% wt. dry basis)	
คาร์บอน ร้อยละ	57.38
ไฮโดรเจน ร้อยละ	8.85
ไนโตรเจน ร้อยละ	2.07
ซัลเฟอร์ (ASTM D2015-92) ร้อยละ	3.68
ออกซิเจน ร้อยละ	8.60
ค่าความร้อน (Kcal/kg)	5496.34

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ที่องค์ประกอบธาตุของเม็ดพลาสติก

	การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (% wt. dry basis)			
wt%	PP	LDPE	HDPE	PS
C	84.78	85.42	86.47	91.87
H	15.22	14.58	13.53	8.13
C:H	5.56	5.86	6.39	11.32

จากตารางที่ 4.1-4.2 แสดงสมบัติการวิเคราะห์เบื้องต้นของถ่านหินที่นำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในงานวิจัยนี้มีปริมาณคาร์บอนร้อยละ 57.38 และมีปริมาณสารระเหยได้สูงถึงร้อยละ 59.81 ส่วนพลาสติกมีสารระเหยสูงถึงร้อยละ 98.5 ส่วนการวิเคราะห์หาองค์ประกอบธาตุของพลาสติกแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่าเม็ดพลาสติกแต่ละชนิดมีองค์ประกอบเป็นคาร์บอนและไฮโดรเจนเท่านั้น เมื่อเทียบองค์ประกอบของเม็ดพลาสติกและถ่านหินพบว่าถ่านหินมีองค์ประกอบที่เป็นคาร์บอนและไฮโดรเจนน้อยกว่า แต่มีไนโตรเจนและกำมะถันสูงกว่าเล็กน้อย รวมถึงการมีออกซิเจนที่มีอยู่มากถึงร้อยละ 8.6 ซึ่งเป็นข้อแตกต่างที่เห็นได้ชัดระหว่างพลาสติกและถ่านหินทั่วไป

#### 4.2 การแปรรูปร่วมของถ่านหินและพลาสติกผสมให้เป็นของเหลวด้วยตัวทำละลายเตตระลิเนนภาวะเหนือวิกฤต

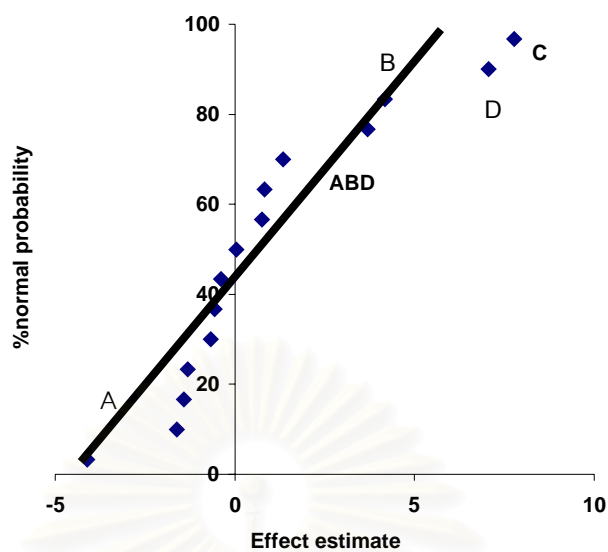
4.2.1 การออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละการเปลี่ยนและร้อยละผลได้ของเหลวจากการแปรรูปร่วมของถ่านหินและพลาสติกผสมให้เป็นของเหลวด้วยตัวทำละลายเตตระลิเนนภาวะเหนือวิกฤต

ปัจจัยที่ศึกษาแบ่งเป็น 4 ปัจจัย คือ อุณหภูมิ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของถ่านหินและพลาสติกผสมต่อตัวทำละลาย ร้อยละโดยน้ำหนักพลาสติกผสม และร้อยละโดยปริมาตรของเตตระลิเนนในตัวทำละลายผสม ซึ่งผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.4

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.4 การแปรปรูปร่วมของถ่านหินและพลาสติกผสมให้เป็นของเหลวในตัวทำละลายผสม  
โทลูอีนและเตตระลินภาวะเหนือวิกฤต โดยมีภาวะในการทดลองและผลการทดลอง  
ดังนี้

การทดลอง	ตัวแปร				ร้อยละการ เปลี่ยนถ่าน หินกับ พลาสติก	ร้อยละ ผลได้ ของ เหลว
	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส) (A)	สารตั้งต้น ต่อตัวทำ ละลาย (B)	ร้อยละ พลาสติก ผสม (C)	ร้อยละ เตตระ ลิน (D)		
1	430	3:2	40	80	63.83	44.43
2	460	3:2	40	80	60.65	41.48
3	430	1:1	40	80	70.43	47.92
4	460	1:1	40	80	65.23	44.27
5	430	3:2	70	80	83.14	45.56
6	460	3:2	70	80	77.09	43.20
7	430	1:1	70	80	85.72	56.66
8	460	1:1	70	80	85.55	49.03
9	430	3:2	40	100	67.15	47.56
10	460	3:2	40	100	63.20	45.70
11	430	1:1	40	100	69.16	50.32
12	460	1:1	40	100	68.89	48.01
13	430	3:2	70	100	85.32	61.37
14	460	3:2	70	100	84.34	54.78
15	430	1:1	70	100	89.43	63.42
16	460	1:1	70	100	89.41	57.88



รูปที่ 4.1 Normal Probability Plot ของร้อยละผลได้ของเหลวสำหรับการแปรรูปร่วมของถ่านหินและพลาสติกผสม

ตาราง ที่ 4.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละผลได้ของเหลว

ตัวแปร	SS	DF	MS	$F_o$	P-value	$F_c$
A	67.61	1	67.61	4.02	0.0729	4.96
B	69.85	1	69.85	4.15	0.0690	
C	241.88	1	241.88	14.37	0.0035	
D	199.45	1	199.45	11.85	0.0063	
ABD	54.43	1	54.43	3.23	0.1024	
Error	168.37	10	16.84			
Total	801.59	15				

ใช้ค่า  $F_{0.05,1,10} = 4.96$  ถ้า  $F_o > F_c$  แสดงว่า ปัจจัยนั้นมีผลต่อ ร้อยละผลได้ของเหลว ที่ช่วงความเชื่อมั่นร้อยละ 95

จากรูปที่ 4.1 แสดงผลของตัวแปรหลักและผลของปฏิกริยาสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ต่อร้อยละการเปลี่ยนถ่านหินและพลาสติกผสม ร้อยละผลได้ของเหลวตัวแปรที่เบี่ยงเบนออกจากแนว



เส้นตรง เป็นตัวแปรที่มีความสำคัญคือ ร้อยละโดยน้ำหนักของพลาสติกผสม (C) และร้อยละโดยปริมาตรของเตตระลิน (D) ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 4.6 เมื่อพิจารณา  $F_0$  ของตัวแปรที่มากกว่า 4.96 ( $F_0$ ) พบว่าตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของเหลวมากที่สุด คือ ร้อยละของพลาสติกผสม (C) และร้อยละตัวทำละลายเตตระลิน (D) ดังนั้นการปรับตัวแปรเหล่านี้ให้เหมาะสมในช่วงที่ศึกษาทำให้โมเลกุลที่ซับซ้อนของถ่านหินเกิดการแตกตัวออกเป็นโมเลกุลที่เล็กลงได้มากขึ้นและเกิดเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันจากโมเลกุลของถ่านหินกับไฮโดรเจน ค่าร้อยละการเปลี่ยนถ่านหินและพลาสติกผสมจึงมากขึ้น ภาวะที่ดีที่สุดคือ ร้อยละพลาสติกผสม 70 อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียสอัตราส่วนถ่านหินและพลาสติกต่อตัวทำละลาย 1:1 และตัวทำละลายเตตระลิน ร้อยละ 100 ให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนถ่านหินและพลาสติกผสมสูงสุดคือ 89.43 และค่าร้อยละผลได้ของเหลวสูงสุดคือ 63.42

#### 4.2.2 การแปรรูปพลาสติกเป็นของเหลวด้วยตัวทำละลายภาวะเหนือวิกฤต

พลาสติกมีความต้องการไฮโดรเจนเพื่อผลิตของเหลวที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ น้อยกว่าถ่านหิน ยิ่งไปกว่านั้นพลาสติกทั่วไปไม่ใช่ไฮโดรเจนเพื่อจับ Heteroatom เหมือนกับที่ต้องการในการแปรรูปถ่านหินเป็นของเหลว Rothenberger (1997) ดังนั้น การแปรรูปพลาสติกเป็นของเหลวด้วยตัวทำละลายภาวะเหนือวิกฤตจึงใช้อัตราส่วนพลาสติกผสมต่อตัวทำละลายลดลงจาก 1:1 เป็น 3:2

ตารางที่ 4.6 ผลการแปรรูปพลาสติก 6 ชนิด คือ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) พอลิพรอพิลีน (PP) พอลิสไตรีน (PS) พลาสติกผสม และขยะพลาสติกเป็นของเหลว ที่ ภาวะ อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส และ อัตราส่วนพลาสติกต่อตัวทำละลาย 3:2 ในตัวทำละลาย 2 ชนิด คือ เตตระลินร้อยละ 80 และเตตระลินร้อยละ 100

ชนิดพลาสติก	เตตระลินร้อยละ 80			เตตระลินร้อยละ 100		
	ร้อยละการเปลี่ยนแปลง	ร้อยละของเหลว	ร้อยละตัวทำละลายนำกลับ	ร้อยละการเปลี่ยนแปลง	ร้อยละของเหลว	ร้อยละตัวทำละลายนำกลับ
HDPE	99.72	80.01*	60.29	99.62	82.45*	66.56
LDPE	99.77	85.84*	70.02	98.95	82.63*	73.30
PP	99.57	81.68*	89.80	99.69	83.00*	88.95
PS	99.91	94.07*	64.20	98.89	92.93*	69.71
พลาสติกผสม	99.49	84.00*	66.35	99.39	83.90*	69.15
ขยะพลาสติก	-	-	-	99.01	79.44	71.25

\*ร้อยละผลได้ของเหลว คำนวณจาก น้ำหนักของเหลวที่ซึ่งได้ หักลบด้วยปริมาณเตตระลินที่เติม

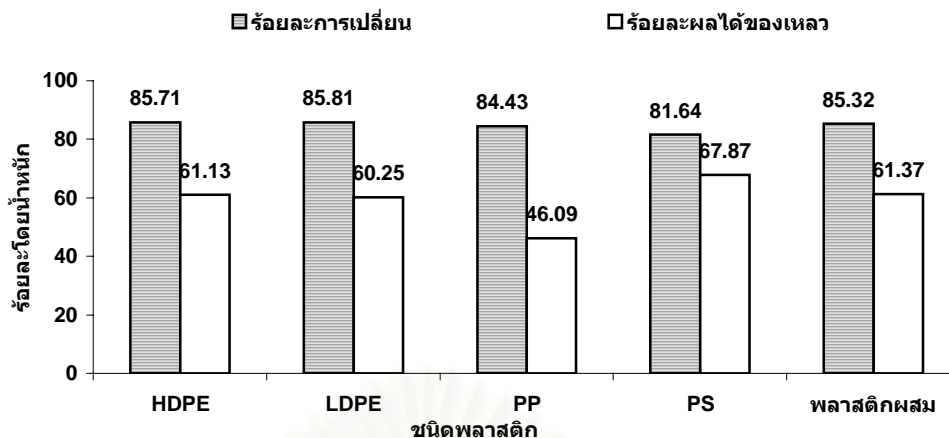
จากตารางที่ 4.6 จะเห็นว่า เม็ดพลาสติกแต่ละชนิดมีร้อยละการเปลี่ยนแปลง และร้อยละผลได้ของเหลวที่สูงมาก เนื่องจากพอลิเมอร์พลาสติกเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีปริมาณไฮโดรเจนสูงเมื่อเทียบกับถ่านหิน และมีโครงสร้างที่เกาะกันอย่างหลวม ๆ จึงเกิดการแตกตัวได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อน เช่น ธรรมชาติของคาร์บอนอะตอมในสายโซ่พอลิเมอร์พอลิพรอพิลีนต่อกันเป็นลักษณะตติยภูมิ (tertiary) ในขณะที่ พอลิเอทิลีน มีคาร์บอนอะตอมต่อกันแบบทุติยภูมิ (secondary) ด้วยเหตุผลนี้ พันธะ C-C ในสายโซ่พอลิพรอพิลีนจึงอ่อนแอกว่าในพอลิเอทิลีน หลักฐานที่สนับสนุนเหตุผลนี้คือการศึกษาด้านจลนพลศาสตร์ของการแตกตัวด้วยความร้อน (thermal degradation) ของพอลิเอทิลีน ซึ่งพบว่าพลังงานการกระตุ้นของ พอลิพรอพิลีน และพอลิเอทิลีนเป็น 58 และ 72 kcal/mol ตามลำดับ (Wall et al., 1954) จึงเห็นว่าการแปรรูปพอลิ

พอลิเอทิลีนเป็นของเหลวที่ได้นั้น ได้ผลิตภัณท์ของเหลวค่อนข้างต่ำ เนื่องจากเกิดการแตกตัวเป็นผลิตภัณท์แก๊สได้สูง ส่วนการแปรรูปพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ได้ร้อยละการเปลี่ยนสูงเนื่องจากเป็นการทดลองที่อุณหภูมิสูง แต่ผลิตภัณท์ของเหลวต่ำเนื่องจากโครงสร้างค่อนข้างแข็งแรงเมื่อเทียบกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่ให้ผลิตภัณท์ของเหลวสูงกว่า และร้อยละผลได้ของเหลวที่ได้จากการแปรรูปพลาสติกเป็นของเหลวด้วยตัวทำละลายเตตระลิน ที่ 80-100 ไม่มีความแตกต่างกันเนื่องจากพลาสติกมีความต้องการไฮโดรเจนเพื่อผลิตของเหลวที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ น้อยกว่าถ่านหิน ยิ่งไปกว่านั้นพลาสติกทั่วไปไม่ใช่ไฮโดรเจนเพื่อจับ Heteroatom เหมือนกับที่ต้องการในการแปรรูปถ่านหินเป็นของเหลว Rothenberger (1997) ดังนั้น ปริมาณเตตระลินจึงมีผลต่อร้อยละการเปลี่ยนและร้อยละผลได้ของเหลวน้อยมาก

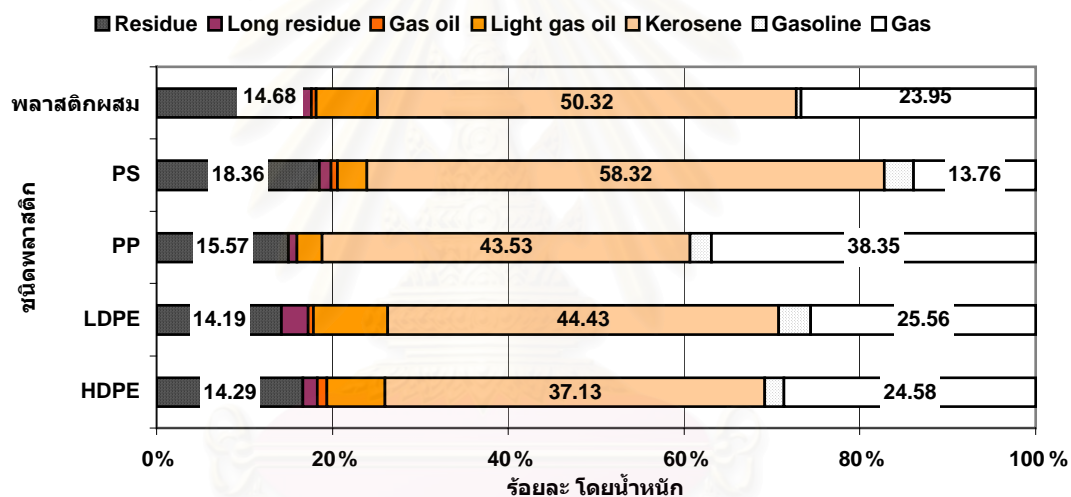
#### 4.2.3 การแปรรูปร่วมของถ่านหินและพลาสติก 4 ชนิดให้เป็นของเหลวด้วยตัวทำละลายภาวะเหนือวิกฤต

การทดลองนี้เพื่อศึกษาการแปรรูปร่วมของถ่านหินกับพลาสติกให้เป็นของเหลว โดยเปรียบเทียบระหว่างพลาสติก 4 ชนิด คือ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) พอลิพโรพิลีน (PP) พอลิสไตรีน (PS) และพลาสติกผสม ที่ภาวะในการทดลองเช่นเดียวกับการแปรรูปพลาสติกเป็นของเหลว คือ อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส อัตราส่วนถ่านหินและพลาสติกผสมต่อตัวทำละลาย 3:2 ร้อยละพลาสติกผสม 70 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที

จากรูปที่ 4.2ก พบว่าการแปรรูปร่วมของถ่านหินและพอลิสไตรีนให้ผลิตภัณท์ของเหลวสูงที่สุด เนื่องจากลักษณะของโมเลกุลพอลิสไตรีนมีหมู่เบนซีนเกาะอยู่บนสายโซ่หลัก ซึ่งมีเสถียรภาพสูง เมื่อพอลิสไตรีนได้รับความร้อนและแตกตัว จึงเกิดผลิตภัณท์แก๊สน้อย ส่วนการแปรรูปร่วมของถ่านหินและพอลิพโรพิลีน มีร้อยละผลได้ของเหลวไม่สูงนัก แต่กลับได้ผลิตภัณท์เป็นแก๊สสูงถึงร้อยละ 38.35 ดังรูปที่ 4.2ข เนื่องจากพอลิพโรพิลีนมีโครงสร้างเป็นแบบ Isotactic ที่มีหมู่ เมทิลเกาะอยู่บนสายโซ่หลักจะเกิดการแตกตัวของพันธะคาร์บอน-ไฮโดรเจนจากการให้ความร้อนเป็นอนุมูลอิสระซึ่งอนุมูลอิสระดังกล่าวจะไปดึงไฮโดรเจนอะตอมที่บริเวณ Tertiary Hydrogen บนสายโซ่หลักของพอลิพโรพิลีน ทำให้เกิดเป็นอนุมูลอิสระของไฮโดรเจน (Hydrogen Free Radical) ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาถูกโซ่ต่อเนื่องกันไปจนได้ผลิตภัณท์ที่มีจำนวนคาร์บอนขนาดเล็กลงได้เป็นสายโซ่โมเลกุลของไฮโดรคาร์บอนขนาดกลาง ผลิตภัณท์ที่เป็นของแก๊สจึงมากขึ้น และการแตกตัวของพอลิพโรพิลีนสามารถทำได้ง่ายกว่าเนื่องจากมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนและเกาะตัวกันอย่างหลวม ๆ จึงสามารถแตกตัวไปเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กได้ง่ายกว่า (อภิชาติ, 2545)



รูปที่ 4.2ก ผลของชนิดพลาสติกที่ใช้ที่มีต่อ ร้อยละการเปลี่ยนและร้อยละผลได้ของเหลว



รูปที่ 4.2ข ผลของชนิดพลาสติกที่ใช้ ที่มีต่อการแจกแจงของผลิตภัณฑ์

รูปที่ 4.2(ก-ข) ผลของชนิดพลาสติกที่ใช้ที่มีต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแปรรูปรวมถ่านหินและพลาสติกผสมให้เป็นของเหลว ที่ อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ร้อยละพลาสติก 70 และอัตราส่วนถ่านหินและพลาสติกต่อตัวทำละลาย 3:2 และทำการทดลองในตัวทำละลายเตตระลินร้อยละ 100

#### 4.3 ผลของตัวแปรต่างๆที่มีต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแปรรูปร่วมถ่านหินและพลาสติกผสมให้เป็นของเหลวด้วยตัวทำละลายภาวะเหนือวิกฤต (เตตระลินมี อุณหภูมิวิกฤต 447 องศาเซลเซียส ความดันวิกฤต 3.30 เมกะพาสคัล)

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาและหาภาวะที่เหมาะสมในการเกิดผลิตภัณฑ์ของเหลวจากกระบวนการแปรรูปร่วมของถ่านหินและพลาสติกผสมด้วยตัวทำละลายภาวะเหนือวิกฤตในภาวะของตัวแปรต่างๆ กัน และศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้ทั้งในเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ โดยสามารถหาลักษณะการเปลี่ยนถ่านหินและพลาสติกผสม ร้อยละผลได้ของเหลว แล้วนำผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ระเหยเอาตัวทำละลายออกแล้วไปทำการวิเคราะห์ค่าการแจกแจงผลิตภัณฑ์ของเหลวโดย เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatograph) และซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น (Simulated Distillation) Varian CP-3800 พร้อมดีเทคเตอร์แบบ FID และคอลัมน์ CP-SIL 5 CP สำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวตามจุดเดือด ตามมาตรฐาน ASTM D2887

จากผลการออกแบบการทดลอง ซึ่งพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของเหลว คือ ร้อยละพลาสติกผสม และ ร้อยละโดยปริมาตรของเตตระลิน ส่วนอุณหภูมิ และ อัตราส่วนถ่านหินและพลาสติกผสมต่อตัวทำละลาย ไม่มีผล (ในช่วงความเข้มข้นร้อยละ 95) และงานวิจัยของ Rothenberger (1997) กล่าวว่าพลาสติกมีความต้องการไฮโดรเจนเพื่อผลิตของเหลวที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่าถ่านหิน ยิ่งไปกว่านั้นพลาสติกทั่วไปไม่ใช่ไฮโดรเจนเพื่อจับ Heteroatom เหมือนกับที่ต้องการในการแปรรูปถ่านหินเป็นของเหลว นอกจากนี้พลาสติกสามารถทำหน้าที่เป็นตัวทำละลายที่ให้ไฮโดรเจนได้ (Wang, 2003) เมื่อมีพลาสติกผสมในระบบมากถึงร้อยละ 70 จึงใช้อัตราส่วนถ่านหินและพลาสติกผสมต่อตัวทำละลายลดลงจาก 1:1 เป็น 3:2

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ที่ภาวะการทดลองดังนี้ ที่ อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ร้อยละพลาสติกผสม 70 อัตราส่วนถ่านหินและพลาสติกผสมต่อตัวทำละลาย 3:2 และทำการทดลองในตัวทำละลายเตตระลินร้อยละ 100

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4.3.1 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแปรรูปวุ้นถ่านหินและพลาสติกผสมเป็นของเหลว

ทำการทดลอง ที่ภาวะอุณหภูมิ 430-460 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที

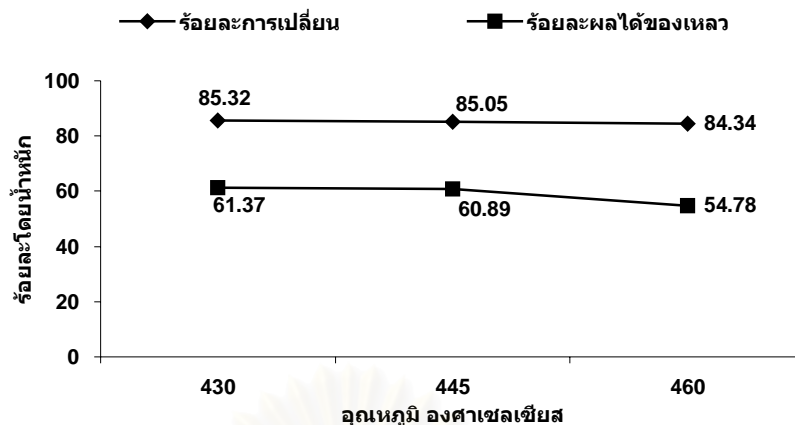
จากรูปที่ 4.3ก พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 430 องศาเซลเซียสจนถึงอุณหภูมิ 460 องศาเซลเซียส ร้อยละผลได้ของเหลวลดลงจาก 61.37 เป็น 54.78 สอดคล้องกับงานวิจัยของ Rocha (1997) ซึ่งศึกษาผลของอุณหภูมิและความหนาแน่นต่อการสกัดโดยของไหลภาวะเหนือวิกฤตของถ่านหินบราซิลที่มีค่าสูง พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิมีผลต่อการเพิ่มขึ้นขององค์ประกอบเบา และการใช้อุณหภูมิสูงเกินไปทำให้ร้อยละผลได้ของเหลวลดลง ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิสูงขึ้นทำให้การแตกตัวของของเหลวกลายเป็นอนุภาคนิวเคลียสที่มีขนาดเล็กเพิ่มมากขึ้น เมื่อได้รับอะตอมไฮโดรเจนทำให้มีเสถียรภาพเกิดเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ผลได้ของเหลวลดลง

จากรูปที่ 4.3ข จะเห็นได้ว่า เมื่ออุณหภูมิสูงมากจะได้ผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ในขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น ร้อยละการเปลี่ยนแปลงลดลงเล็กน้อยเนื่องจากการทดลองนี้ใช้ถ่านหินเพียงร้อยละ 30 การแตกตัวของถ่านหินจึงไม่มีผลต่อผลผลิตรวมมากนัก แต่จากตารางที่ 4.4 อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจาก 430-460 องศาเซลเซียส ทำให้ร้อยละการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญในหลายการทดลองโดยเฉพาะเมื่อพิจารณาในการทดลองที่มีร้อยละพลาสติก 40 และร้อยละถ่านหินและพลาสติกผสมต่อตัวทำละลาย 3:2 ทำให้ในระบบมีถ่านหินมากซึ่งถ่านหินนี้มีความต้องการรับไฮโดรเจนเพื่อให้เกิดเสถียรภาพเป็นโมเลกุลขนาดเล็ก และไฮโดรเจนในระบบมีไม่เพียงพอ ดังนั้นอนุภาคนิวเคลียสที่เกิดจากการแตกตัวด้วยความร้อนของถ่านหินกลับมารวมตัวกันเองอีกครั้ง เป็นสารที่ไม่ละลายในเตตระไฮโดรฟูแลน (Repolymerization) (อภิชาติ, 2545)

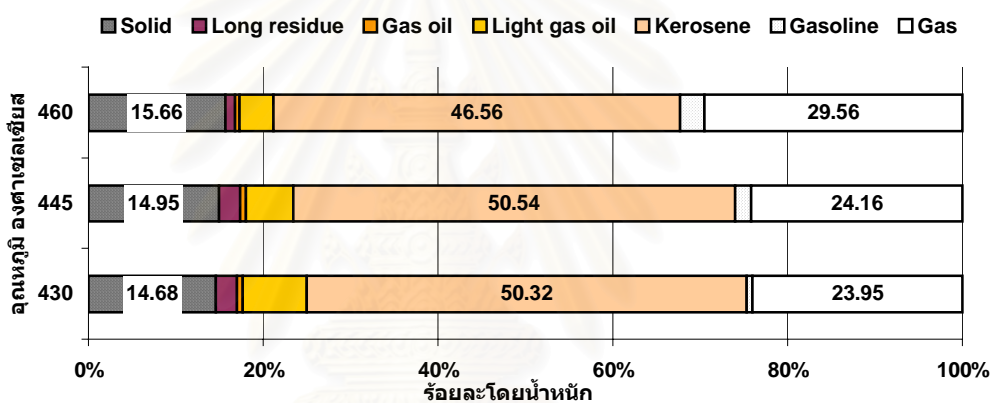
จากรูปที่ 4.3ข-ค พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นจาก 430 องศาเซลเซียส เป็น 460 องศาเซลเซียส การแจกแจงสัดส่วนผลิตภัณฑ์ของเหลวที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก คือผลรวมสัดส่วนของแก๊สโซลีนและคีโรซีน เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Zeng et al.(1996) ซึ่งได้ศึกษาผลของอุณหภูมิ และตัวเร่งปฏิกิริยากรด ของถ่านหินซับบิทูมินัส พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น ให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันเบาเพิ่มขึ้น เพราะอุณหภูมิสูงมีส่วนช่วยในการทำให้โมเลกุลของถ่านหินและพลาสติกเกิดการแตกตัวให้อนุภาคนิวเคลียสที่มีขนาดโมเลกุลเล็กลง อีกทั้งอุณหภูมิสูงช่วยในการทำให้โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนของผลิตภัณฑ์ของเหลวคือ กากน้ำมันหนักซึ่งมีโมเลกุลขนาดใหญ่แตกตัวเป็นผลิตภัณฑ์ของเหลวที่มีขนาดโมเลกุลเล็กลงด้วย ดังจะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิสูงจะได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากหรือกากน้ำมันหนักน้อยกว่าที่อุณหภูมิต่ำ โดยที่สัดส่วนของกากน้ำมันหนักที่น้อยลงแสดงถึงคุณภาพผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ดีขึ้น

จากรูปที่ 4.3 พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น สัดส่วนของแก๊สไฮโดรคาร์บอนเพิ่มมากขึ้น โดยมีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง เพราะอุณหภูมิสูงมีส่วนช่วยในการทำให้โมเลกุลของถ่านหินและพลาสติกผสมเกิดการแตกตัวเป็นโมเลกุลของไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กลง อีกทั้งช่วยในการทำให้โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนของผลิตภัณฑ์ของเหลวแตกตัวเป็นโมเลกุลที่เล็กลงซึ่งก็คือแก๊สนั่นเอง แต่การทดลองนี้เห็นความแตกต่างไม่ชัดเจน เนื่องจากอุณหภูมิไม่ต่างกันมากนัก

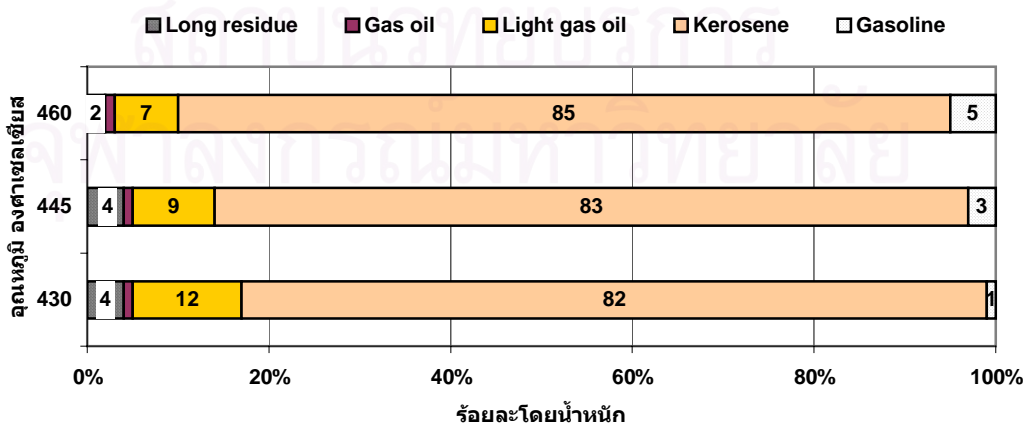
จากตารางที่ 4.7(ก-ข) พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าความร้อนและร้อยละการเพิ่มของค่าความร้อนของแข็งส่วนที่เหลือเพิ่มขึ้นเล็กน้อย สอดคล้องกับงานวิจัยของ Cui et al. (2003) ซึ่งได้ศึกษาผลของอุณหภูมิ และตัวเร่งปฏิกิริยา ที่มีต่อของแข็งส่วนที่เหลือจากการแปรรูปถ่านหินเป็นของเหลว พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ร้อยละการเปลี่ยนของถ่านหินเพิ่มขึ้น ส่วนที่เป็นสารระเหยถูกสลายออกจากถ่านหินด้วยความร้อนมากขึ้น และส่วนที่เป็นสายโซ่อะลิฟาติกภายในโครงสร้างของถ่านหินถูกสลายด้วยความร้อนออกมามากขึ้นกลายเป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็ก (Speight, 1994) ทำให้ภายในโครงสร้างถ่านหิน เหลือส่วนที่เป็นคาร์บอนคงตัวมากขึ้น ส่วนปริมาณกำมะถันรวม มีค่าลดลงเนื่องจาก อุณหภูมิที่สูงขึ้น ทำให้กำมะถันที่อยู่ในถ่านหินแตกตัวอยู่ในรูปแก๊ส และของเหลว



รูปที่ 4.3ก ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงและร้อยละผลได้ของเหลว

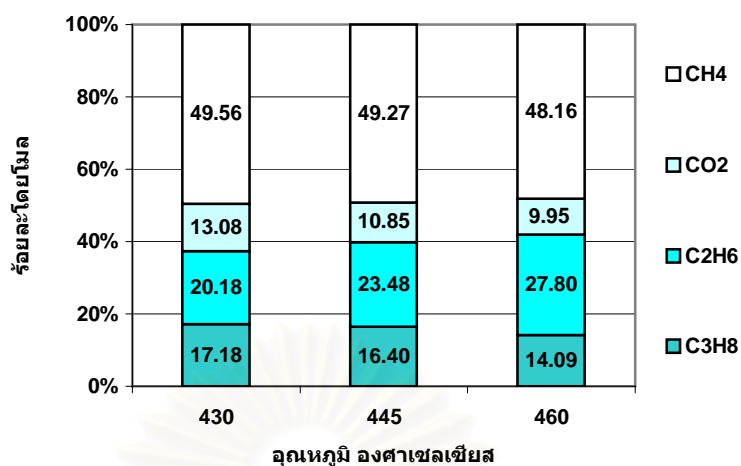


รูปที่ 4.3ข ผลของอุณหภูมิต่อการแจกแจงผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแปรรูปร่วมของถ่านหินและพลาสติกผสม



รูปที่ 4.3ค ผลของอุณหภูมิต่อการแจกแจงผลิตภัณฑ์ของเหลว





รูปที่ 4.3ง ผลของอุณหภูมิต่อการแจกแจงผลิตภัณฑ์แก๊ส

รูปที่ 4.3(ก-ง) ผลของอุณหภูมิที่มีต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแปรรูปร่วมถ่านหินและพลาสติกผสม ให้เป็นของเหลว ที่ภาวะการทดลอง อุณหภูมิ 430-460 องศาเซลเซียส ร้อยละ พลาสติกผสม 70 อัตราส่วนถ่านหินและพลาสติกผสมต่อตัวทำละลาย 3:2 และทำการทดลองในตัวทำละลายเตตระลิनร้อยละ 100

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.7(ก-ข) ผลของอุณหภูมิที่มีต่อสมบัติของของแข็งส่วนที่เหลือจากการแปรรูปรวมถ่านหิน และพลาสติกผสมให้เป็นของเหลว ที่ อุณหภูมิ 430-460 องศาเซลเซียส ร้อยละ พลาสติกผสม 70 อัตราส่วนถ่านหินและพลาสติกผสมต่อตัวทำละลาย 3:2 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที

ตารางที่ 4.7ก ผลของอุณหภูมิต่อสมบัติแบบประมาณของของแข็งส่วนที่เหลือ

สมบัติโดยประมาณ (dry basis)	อุณหภูมิ องศาเซลเซียส		
	430	445	460
สารระเหย	16.30	17.26	17.98
คาร์บอนคงตัว	45.86	45.59	46.61
เถ้า	37.84	38.15	38.41
ร้อยละกำมะถันรวม	3.38	3.26	2.96
ร้อยละการเปลี่ยน	85.32	85.05	84.34

ตารางที่ 4.7ข ผลของอุณหภูมิต่อค่าความร้อนและร้อยละการเพิ่มของค่าความร้อนของของแข็งส่วนที่เหลือ

ค่าความร้อนของถ่านหิน 5496.34 kcal/kg.(air dry basis),6563.163 kcal/kg.(daf)

อุณหภูมิ องศาเซลเซียส	ค่าความร้อน (dry basis)	ค่าความร้อน (daf)	ร้อยละการเพิ่มค่าความร้อน (daf)
430	5485.77	7561.59	15.21
445	5500.95	7599.56	15.79
460	5554.31	7687.72	17.13

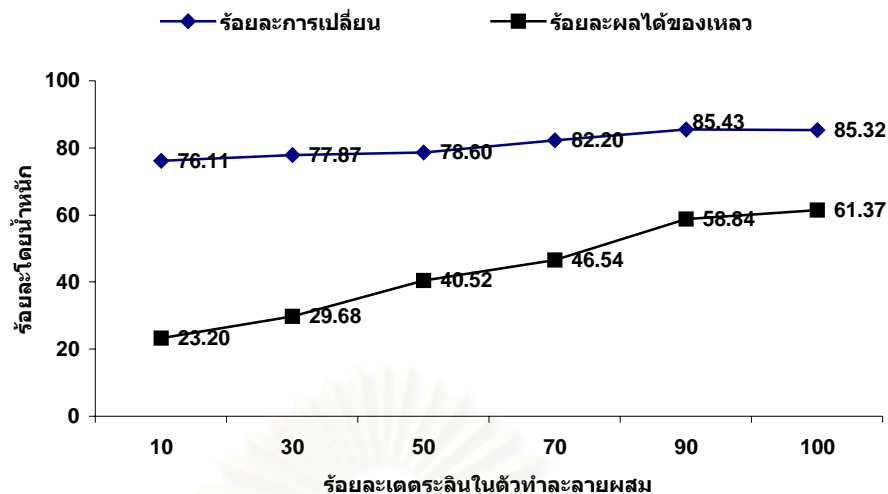
#### 4.3.2 ผลของร้อยละโดยปริมาตรของเตตระลินในตัวทำละลายผสม ต่อร้อยละการเปลี่ยนและร้อยละผลได้ของเหลวจากการแปรรูปรวมของถ่านหินและพลาสติกผสม

จากรูปที่ 4.4ก-ข ผลของการเพิ่มปริมาณเตตระลินในตัวทำละลายผสมจากร้อยละ 10-100 ทำให้ร้อยละผลได้ของของเหลวเพิ่มขึ้นจาก 23.20 เป็น 61.37 และร้อยละผลได้ของคีโรซีนเพิ่มขึ้นจาก 13.69- 43.87 ของสารตั้งต้นซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Huffman et al. (1995) ซึ่งทดลองเติมตัวทำละลายเตตระลินลงในกระบวนการทำให้พลาสติกเป็นของเหลว โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่าง ๆ พบว่า ให้ร้อยละผลได้ของเหลวที่สูงกว่าแบบไม่เติมเตตระลิน และในการทดลองนี้มีแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นที่ 1 บรรยากาศ ดังนั้นการเติมตัวทำละลายซึ่งมีสมบัติในการให้ไฮโดรเจนอะตอมอิสระแก่ถ่านหินได้จึงมีความสำคัญ ซึ่งกล่าวว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเตตระลินมากขึ้น จึงช่วยให้ถ่านหินและพลาสติกแตกตัวเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กลง และเป็นของเหลวมากขึ้น

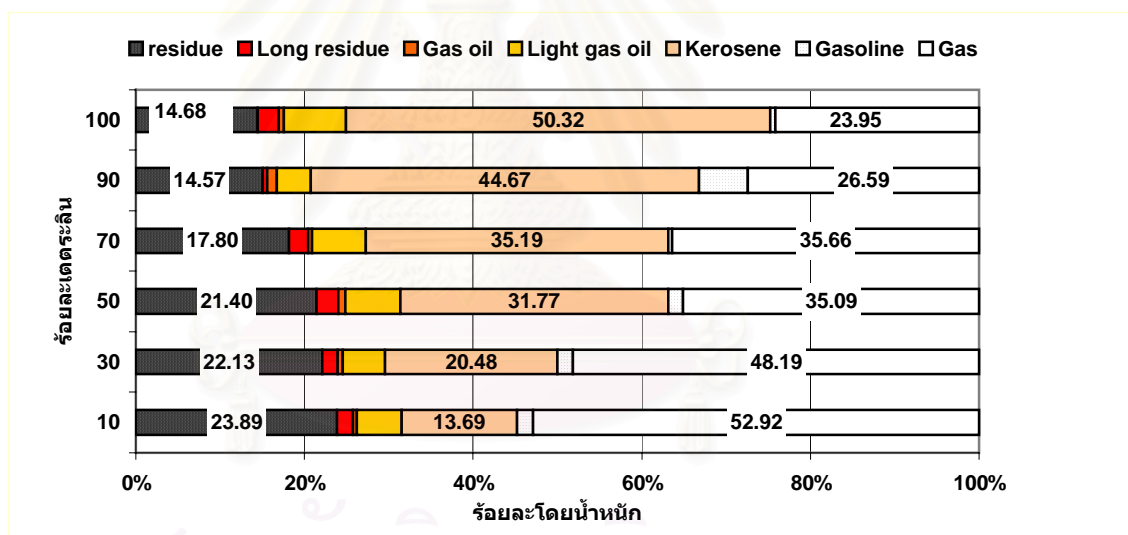
จากรูปที่ 4.4ค เมื่อเพิ่มร้อยละเตตระลิน จาก 10 เป็น 90 พบว่าการแจกแจงผลิตภัณฑ์ของเหลวดีขึ้น คือ มี Long residue ลดลงจากร้อยละ 8 เป็น 1 และ คีโรซีนสูงถึงร้อยละ 80 เนื่องจากเตตระลินมีสมบัติเป็นตัวทำละลายที่ให้ไฮโดรเจนแก่ระบบได้ ดังนั้นการเพิ่มปริมาณเตตระลินมากขึ้น จึงทำให้มีไฮโดรเจนในระบบมากขึ้นช่วยให้ถ่านหินและพลาสติกผสมซึ่งแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระรับไฮโดรเจน เกิดสารประกอบไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กลง

ผลของการเพิ่มร้อยละเตตระลิน ต่อการแจกแจงผลิตภัณฑ์แก๊ส แสดงในรูปที่ 4.4ง ในการทดลองนี้แก๊สไฮโดรเจน เริ่มต้น 1 บรรยากาศ ดังนั้นการเติมตัวทำละลายซึ่งมีสมบัติในการให้ไฮโดรเจนอะตอมอิสระแก่ถ่านหินได้จึงมีความสำคัญ และเมื่อเพิ่มปริมาณเตตระลินมากขึ้น จึงช่วยให้ถ่านหินและพลาสติกแตกตัวเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กลง ได้แก๊สไฮโดรคาร์บอนในสัดส่วนเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด

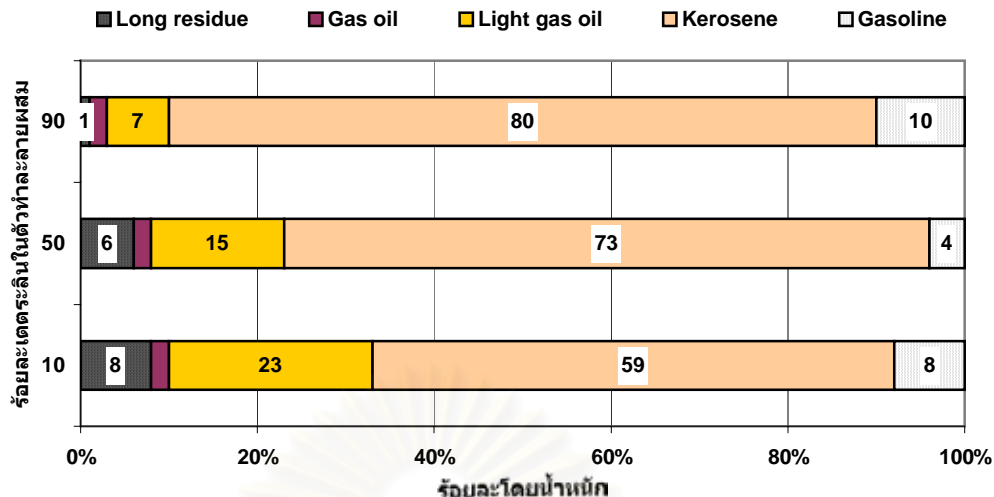
จากตารางที่ 4.8(ก-ข) พบว่า เมื่อร้อยละเตตระลินเพิ่มขึ้น ค่าความร้อนและร้อยละการเพิ่มของค่าความร้อน ขึ้นกับร้อยละการเปลี่ยนของถ่านหินและพลาสติกผสม เนื่องจากปริมาณเตตระลิน มีผลต่อร้อยละการเปลี่ยนไม่มากนัก คือ 76.11-85.32 เมื่อร้อยละการเปลี่ยนเพิ่มขึ้น ส่วนที่เป็นสารระเหยแตกตัวออกมาจากถ่านหินมากขึ้นเล็กน้อย ทำให้ภายในโครงสร้างถ่านหินเหลือส่วนที่เป็นคาร์บอนคงตัวมีค่าใกล้เคียงกัน มีผลให้ค่าความร้อนสูงขึ้นเพียงเล็กน้อย



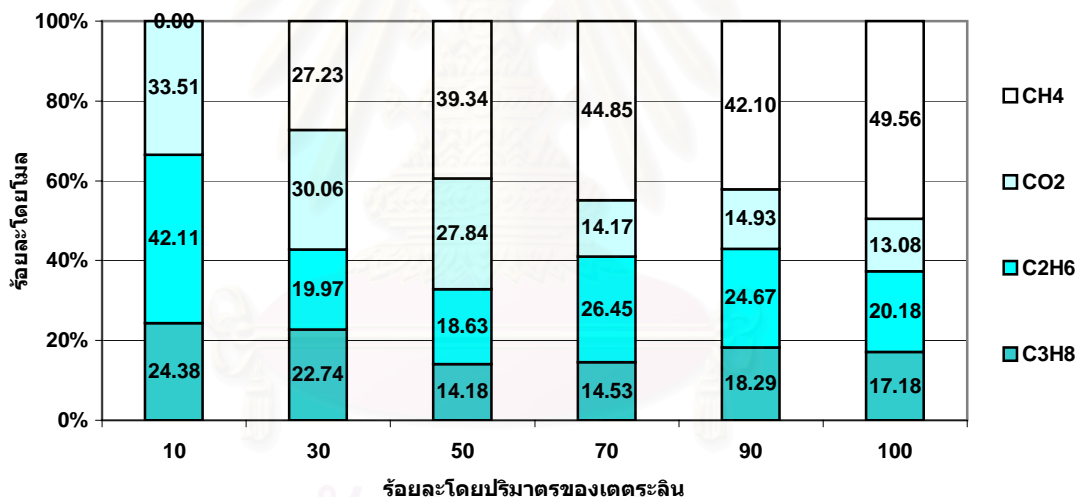
รูปที่ 4.4ก ผลของร้อยละโดยปริมาตรของเตตระลินในตัวทำลายผสม ต่อร้อยละการเปลี่ยนและร้อยละผลได้ของเหลว



รูปที่ 4.4ข ผลของร้อยละโดยปริมาตรเตตระลินในตัวทำลายผสม ต่อการแจกแจงผลิตภัณฑ์



รูปที่ 4.4ค ผลของร้อยละโดยปริมาตรเตตระลินในตัวทำละลายผสม ต่อการแจกแจงผลิตภัณฑ์ของเหลว



รูปที่ 4.4ง ผลของร้อยละโดยปริมาตรของเตตระลินต่อการแจกแจงผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น

รูปที่ 4.4(ก-ง) ผลของร้อยละโดยปริมาตรของเตตระลินที่มีต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแปรรูปร่วม ถ่านหินและพลาสติกผสมให้เป็นของเหลว ที่ อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ร้อยละ พลาสติกผสม 70 อัตราส่วนถ่านหินและพลาสติกผสมต่อตัวทำละลาย 3:2 และ ร้อยละโดยปริมาตรของตัวทำละลายเตตระลินร้อยละ 10-100

ตารางที่ 4.8(ก-ข) ผลของร้อยละโดยปริมาตรของเตตระลินที่มีต่อผลิตภัณฑ์ของแข็งส่วนที่เหลือ ที่ได้จากการแปรรูปร่วมถ่านหินและพลาสติกให้เป็นของเหลว ที่ อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส อัตราส่วนถ่านหินและพลาสติกผสมต่อตัวทำละลาย 3:2 ร้อยละพลาสติกผสม 70 เป็นเวลา 30 นาที

ตารางที่ 4.8ก ผลของร้อยละเตตระลินในตัวทำละลายผสมต่อสมบัติแบบประมาณของของแข็งส่วนที่เหลือ

สมบัติโดยประมาณ (dry basis)	ร้อยละโดยปริมาตรของเตตระลินในตัวทำละลายผสม			
	30	50	70	100
สารระเหย	17.04	16.65	17.13	16.30
คาร์บอนคงตัว	46.72	47.31	45.66	45.98
เถ้า	36.24	36.04	37.21	37.72
ร้อยละการเปลี่ยน	77.87	78.60	83.20	85.32

ตารางที่ 4.8ข ผลของร้อยละเตตระลินในตัวทำละลายผสมต่อค่าความร้อนและร้อยละการเพิ่มของค่าความร้อนของของแข็งส่วนที่เหลือ

ค่าความร้อนของถ่านหิน 5496.34 kcal/kg.(air dry basis),6563.163 kcal/kg.(daf)

ร้อยละเตตระลิน ในตัวทำละลายผสม	ค่าความร้อน (dry basis)	ค่าความร้อน (daf)	ร้อยละการเพิ่ม ค่าความร้อน (daf)
30	5338.57	7273.33	10.82
50	5500.32	7482.85	14.01
70	5431.01	7451.88	13.54
100	5485.77	7561.59	15.21

#### 4.3.3 ผลของร้อยละโดยน้ำหนักของพลาสติกผสมในสารตั้งต้นถ่านหินและพลาสติกผสมต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงและร้อยละผลได้ของเหลวจากการแปรรูปร่วมของถ่านหินและพลาสติกผสม

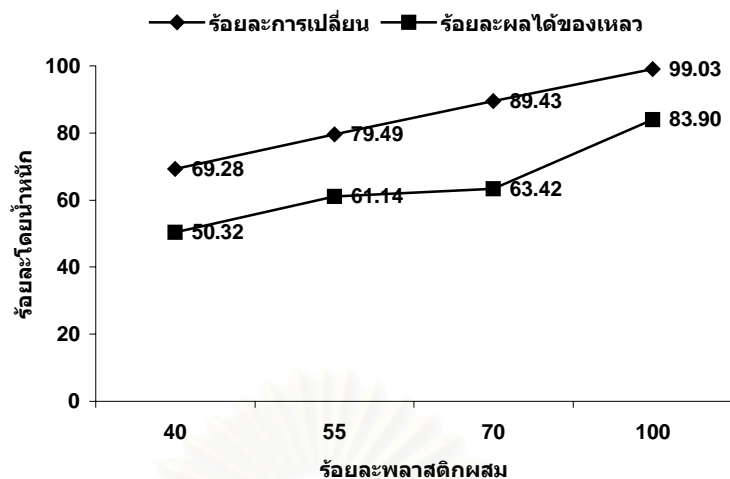
การศึกษาผลของร้อยละโดยน้ำหนักของพลาสติกผสมในสารตั้งต้น 40-100 ที่มีต่อผลิตภัณฑ์จากการแปรรูปร่วมของถ่านหินและพลาสติกผสมในตัวทำละลายเตตระลิน การที่มีถ่านหินในระบบมาก และเหตุผลที่ได้กล่าวในหัวข้อ 4.3 ดังนั้นจึงเพิ่มอัตราส่วนถ่านหินและพลาสติกผสมต่อตัวทำละลายจาก 3:2 เป็น 1:1 และทำการทดลอง ที่ อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ร้อยละโดยน้ำหนักของพลาสติกผสมในสารตั้งต้น 40-100 ในตัวทำละลายเตตระลินร้อยละ 100

จากรูปที่ 4.5ก-ข พบว่าการเพิ่มร้อยละพลาสติกผสมจาก 40-100 ทำให้ร้อยละการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจาก 69.28 เป็น 99.03 และร้อยละผลได้ของเหลว เพิ่มขึ้นจาก 50.32 เป็น 83.90 โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ร้อยละพลาสติกผสม 55 พบว่าให้ร้อยละผลได้ของเหลวที่สูงถึง 61.14 ใกล้เคียงกับร้อยละผลได้ของเหลวที่ร้อยละพลาสติกผสม 70 แสดงถึงปริมาณพลาสติกที่เหมาะสมกับถ่านหิน ซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยากันเป็นปฏิกิริยาเสริมกันให้สารตั้งต้นส่วนใหญ่เป็นของเหลว เกิดแก๊สน้อยและเมื่อพิจารณาจากการแจกแจงผลิตภัณฑ์ดีซัน ปริมาณกากของแข็ง ลดลง ได้ผลิตภัณฑ์แก๊สโซลีน คีโรซีน สูงขึ้นเนื่องจากพอลิเมอร์พลาสติกเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีปริมาณไฮโดรเจนสูงเมื่อเทียบกับถ่านหิน และมีโครงสร้างที่เกาะกันอย่างหลวม ๆ จึงเกิดการแตกตัวเมื่อให้ความร้อนได้ง่าย ที่อุณหภูมิเดียวกัน จึงสามารถเป็นแหล่งให้ไฮโดรเจนแก่กระบวนการแปรรูปร่วมของถ่านหินและพลาสติกผสมได้

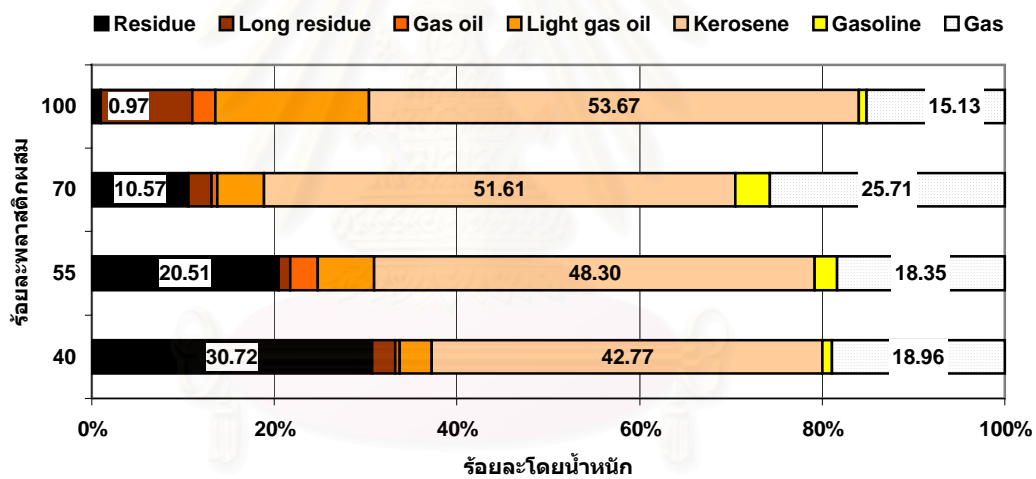
จากรูปที่ 4.5ค พบว่าเมื่อเพิ่มร้อยละพลาสติกผสม เป็น 100 การแจกแจงผลิตภัณฑ์ของเหลวไม่ดีนัก คือ มี Long residue มากถึงร้อยละ 25 และมี คีโรซีน เพียงร้อยละ 46 แต่เมื่อเติมถ่านหินลงในระบบ พบว่าการแจกแจงผลิตภัณฑ์ของเหลวดีซัน เนื่องจาก ถ่านหินให้น้ำมันที่เป็นพาราฟินจำนวนมากซึ่งสามารถเปลี่ยนรูปเป็นน้ำมันเบา(แนฟทา)ได้ง่าย จึงทำให้ปริมาณ แก๊สโซลีน และคีโรซีนมากขึ้น (ธารินี, 2543)

จากรูปที่ 4.5ง พบว่าปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงเมื่อปริมาณพลาสติกเพิ่มขึ้น เนื่องจากในโมเลกุลของพลาสติกมีเพียง คาร์บอนและไฮโดรเจนอะตอมเท่านั้น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจึงมาจากถ่านหินเท่านั้น

ตารางที่ 4.9 (ก-ข) แสดงให้เห็นว่าร้อยละพลาสติกผสม มีผลต่อสมบัติของของแข็งที่เหลือเพียงเล็กน้อย ซึ่งคาร์บอนคงตัว และค่าความร้อนเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย

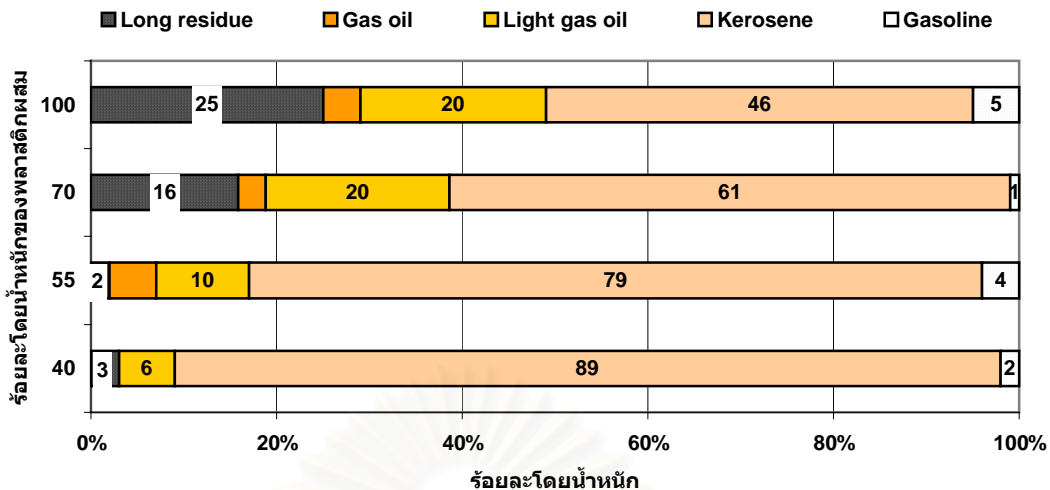


รูปที่ 4.5ก ผลของร้อยละโดยน้ำหนักของพลาสติกผสม ต่อร้อยละการเปลี่ยนและร้อยละผลได้ของเหลว

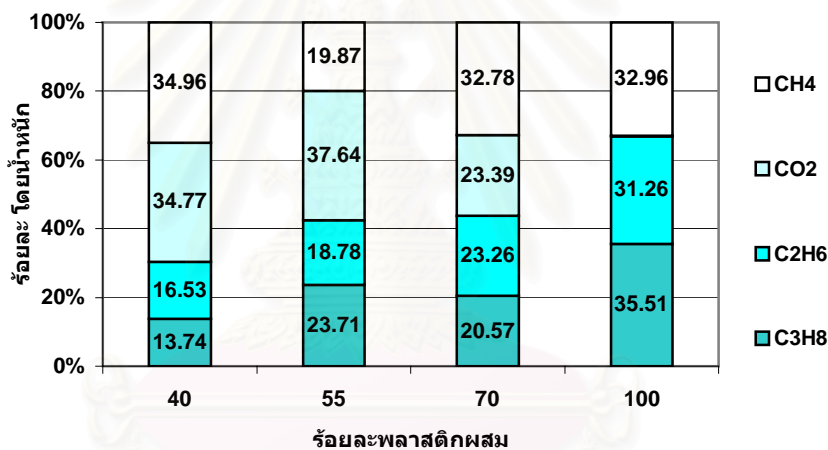


รูปที่ 4.5ข ผลของร้อยละโดยน้ำหนักของพลาสติกผสมต่อการแจกแจงผลิตภัณฑ์





รูปที่ 4.5ค ผลของร้อยละโดยน้ำหนักของพลาสติกผสม ต่อการแจกแจงผลิตภัณฑ์ของเหลว



รูปที่ 4.5ง ผลของร้อยละพลาสติกผสม ต่อการแจกแจงผลิตภัณฑ์แก๊ส

รูปที่ 4.5(ก-ง) ผลของร้อยละพลาสติกผสมที่มีต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแปรรูปร่วมถ่านหินและพลาสติกผสมให้เป็นของเหลว ที่ อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ร้อยละพลาสติกผสม 70 อัตราส่วนถ่านหินและพลาสติกผสมต่อตัวทำละลาย 1:1 และทำการทดลองในตัวทำละลายเตตระลิน ร้อยละ 100

ตารางที่ 4.9 (ก-ข) ผลของร้อยละพลาสติกผสมที่มีต่อผลิตภัณฑ์ของแข็งส่วนที่เหลือที่ได้จากการแปรรูปร่วมถ่านหินและพลาสติกให้เป็นของเหลว ที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส อัตราส่วนถ่านหินและพลาสติกผสมต่อตัวทำละลาย 1:1 และเวลา 30 นาที

ตารางที่ 4.9ก ผลของร้อยละพลาสติกผสมต่อสมบัติแบบประมาณของของแข็งส่วนที่เหลือ

สมบัติโดยประมาณ (dry basis)	ร้อยละโดยน้ำหนักของพลาสติกผสม			
	0	30	50	70
สารระเหย	22.97	21.60	19.88	16.30
คาร์บอนคงตัว	39.18	37.44	42.39	45.98
เถ้า	37.85	40.96	37.73	37.72
ร้อยละกำมะถันรวม	3.40	4.18	4.44	4.43
ร้อยละการเปลี่ยนแปลง	42.33	61.37	71.50	89.43

ตารางที่ 4.9ข ผลของร้อยละโดยน้ำหนักพลาสติกผสมต่อค่าความร้อนและร้อยละการเพิ่มของค่าความร้อนของของแข็งส่วนที่เหลือ

ค่าความร้อนของถ่านหิน 5496.34 kcal/kg.(air dry basis),6563.163 kcal/kg.(daf)

ร้อยละพลาสติกผสม	ค่าความร้อน (dry basis)	ค่าความร้อน (daf)	ร้อยละการเพิ่มค่าความร้อน (daf)
0	5204.75	7174.75	9.32
30	5154.95	7266.42	10.72
50	5255.21	7238.00	10.28
70	5485.77	7571.46	15.36

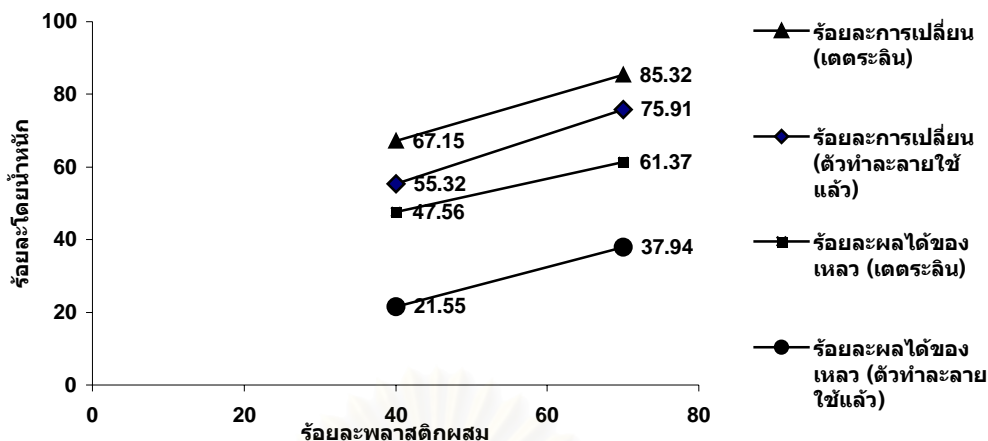
#### 4.4 การแปรรูปถ่านหินและพลาสติกผสมให้เป็นของเหลวในตัวทำละลายใช้แล้ว

การทดลองนี้ศึกษาผลจากตัวทำละลายเตตระลินที่ผ่านกระบวนการแปรรูปร่วมของถ่านหินและพลาสติกผสม โดยทำการรวบรวมตัวทำละลายใช้แล้วจากการทดลองในตัวทำละลายเตตระลิน ร้อยละ 100 ที่ภาวะการทดลองต่าง ๆ จึงทดลองนำตัวทำละลายนี้กลับมาใช้อีก โดยทำการทดลองที่ อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส อัตราส่วนถ่านหินและพลาสติกผสมต่อตัวทำละลาย 3:2 ร้อยละพลาสติกผสม 40 และ 70 จากรูปที่ 4.6k จะเห็นว่า ตัวทำละลายเตตระลินที่ใช้แล้ว ให้ร้อยละการเปลี่ยนแปลง และร้อยละผลได้ของเหลวน้อยกว่า เนื่องจากเมื่อตัวทำละลายเตตระลินให้ไฮโดรเจนอะตอมอิสระแก่ถ่านหินและพลาสติก แล้วจะเปลี่ยนเป็นแนฟทาลิน ตัวทำละลายใช้แล้ว จึงมีปริมาณเตตระลินลดลง ส่งผลต่อปริมาณไฮโดรเจนในระบบลดลง ประสิทธิภาพของตัวทำละลายใช้แล้วจึงด้อยกว่าตัวทำละลายใหม่ ดังจะเห็นได้จากผล GC/MS ( รูปที่ ง1 ภาคผนวก ง) ที่แสดงว่าในตัวทำละลายใช้แล้ว มี ผลิตภัณฑ์หลัก คือ Tetralin ( $C_{10}H_{12}$ ) Naphthalene( $C_{10}H_8$ ), Dodecanoic acid ethyl ester ( $C_{14}H_{28}O_2$ ), Dodecanoic acid ethyl ester ( $C_{14}H_{28}O_2$ ) และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอื่น ๆ

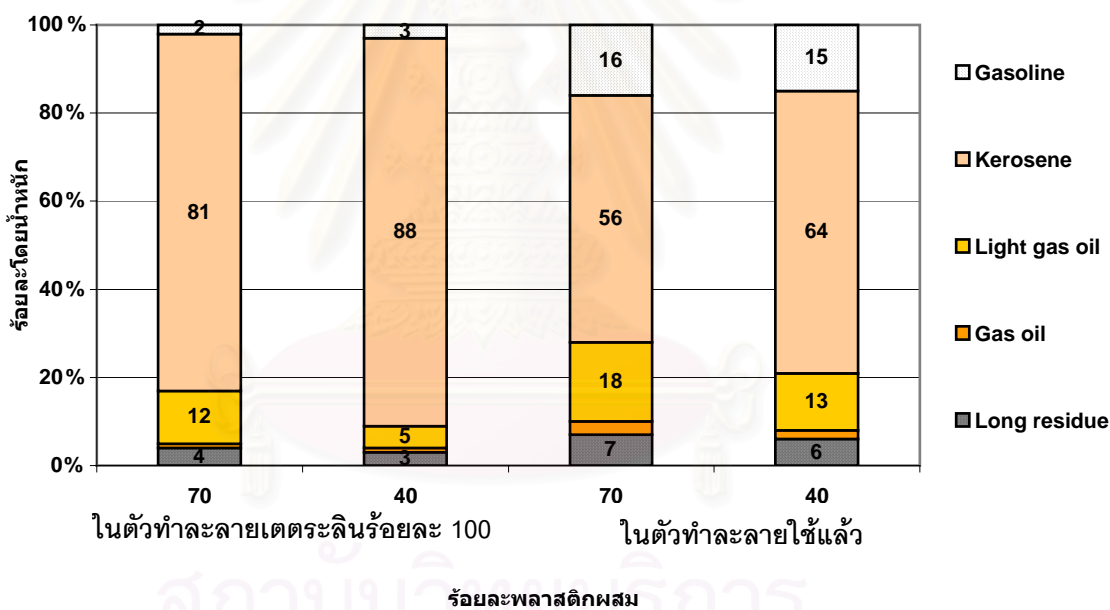
จากรูปที่ 4.6ข พบว่าในการทดลองที่มีการใช้ตัวทำละลายใช้แล้วการแจกแจงของผลิตภัณฑ์ของเหลว ได้กาน้ำมันหนัก มากกว่าในการทดลองที่มีการใช้ตัวทำละลายเตตระลิน

จากรูปที่ 4.6ค การแจกแจงของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลองในตัวทำละลายเตตระลินส่วนใหญ่เป็นแก๊สมีเทน

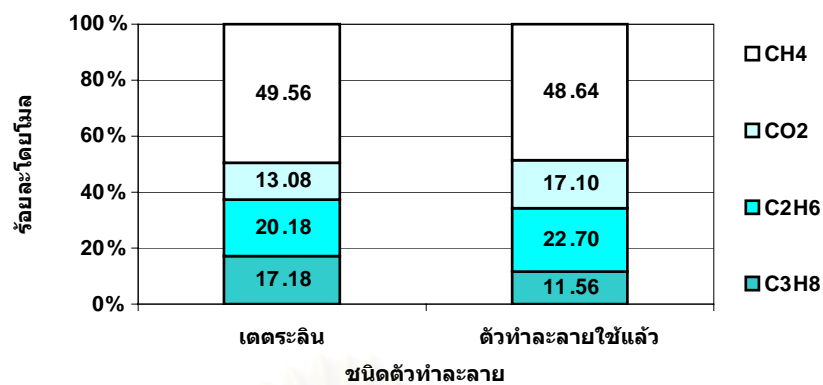
ตารางที่ 4.10(ก-ข) พบว่า กากที่เหลือจากการทดลองในตัวทำละลายใช้แล้ว มีสารระเหยมากกว่า คาร์บอนคงตัวที่น้อยกว่าและร้อยละการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า เนื่องจากตัวทำละลายใช้แล้ว มีปริมาณเตตระลินลดลงและมีแนฟทาลินตลอดจน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองผสมอยู่ ดังนั้นในระบบขณะทดลองจึงมีความดันสูงมากและไฮโดรเจนไม่เพียงพอ ทำให้อนุมูลอิสระของถ่านหินและพลาสติกจับกันเองเป็นสารที่ไม่ละลายในตัวทำละลายเตตระไฮโดรฟูแลน ทำให้ค่าความร้อนเพิ่มสูงขึ้น สอดคล้องกับที่ Rothenberger (1997) และ Shishido (1991) ได้กล่าวว่าเตตระลินช่วยถ่ายโอนไฮโดรเจนไปยังการรวมกันของอนุมูลอิสระของถ่านหิน และยับยั้งการเสื่อมของสารสกัด ดังนั้นการที่มีเตตระลินในระบบลดลง สารระเหยในถ่านหินจึงแตกตัวออกมาน้อยลง



รูปที่ 4.6ก การเปรียบเทียบผลร้อยละการเปลี่ยน และร้อยละผลได้ของเหลว จากการแปรรูปพร้อมของถ่านหินและพลาสติกผสม โดยใช้ ตัวทำละลายเตตระลิน และตัวทำละลายใช้แล้ว



รูปที่ 4.6ข การแจกแจงผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการแปรรูปพร้อมของถ่านหินและพลาสติกผสม ในตัวทำละลายใช้แล้วเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองในตัวทำละลายเตตระลินร้อยละ



รูปที่ 4.6ค การแจกแจงผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการแปรรูปร่วมของถ่านหิน และพลาสติกผสม ทำการทดลองในตัวทำละลายใช้แล้วเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองในตัวทำละลายเตตระลินร้อยละ 100

รูปที่ 4.6(ก-ค) ผลของตัวทำละลายที่มีต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแปรรูปร่วมถ่านหินและพลาสติกผสมให้เป็นของเหลวที่ อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส อัตราส่วนถ่านหินและพลาสติกผสมต่อตัวทำละลาย 3:2 ร้อยละพลาสติกผสม 70 ทำการทดลองในตัวทำละลายใช้แล้วเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองในตัวทำละลายเตตระลินร้อยละ 100

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.10(ก-ข) การเปรียบเทียบสมบัติของของแข็งส่วนที่เหลือ จากการแปรรูปร่วมของถ่านหิน และพลาสติกผสมในตัวทำละลายเตตระลินและตัวทำละลายใช้แล้ว ที่ อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส อัตราส่วนถ่านหินและพลาสติกผสมต่อตัวทำละลาย 3:2 ร้อยละพลาสติกผสม 70 และเวลา 30 นาที

ตารางที่ 4.10ก การเปรียบเทียบสมบัติแบบประมาณของของแข็งส่วนที่เหลือ จากการแปรรูปร่วมของถ่านหินและพลาสติกผสมในตัวทำละลายเตตระลินและตัวทำละลายใช้แล้ว

สมบัติโดยประมาณ (dry basis)	ชนิดตัวทำละลาย	
	ตัวทำละลายใช้แล้ว	ตัวทำละลายเตตระลิน
สารระเหย	25.28	16.30
คาร์บอนคงตัว	40.0	45.98
เถ้า	34.72	37.72
ร้อยละกำมะถันรวม	2.808	3.38
ร้อยละการเปลี่ยน	73.087	85.32

ตารางที่ 4.10ข ผลของตัวทำละลายต่อค่าความร้อนและร้อยละการเพิ่มของค่าความร้อนของของแข็งส่วนที่เหลือ ทำการทดลองในตัวทำละลายเตตระลินร้อยละ 100 และตัวทำละลายใช้แล้ว

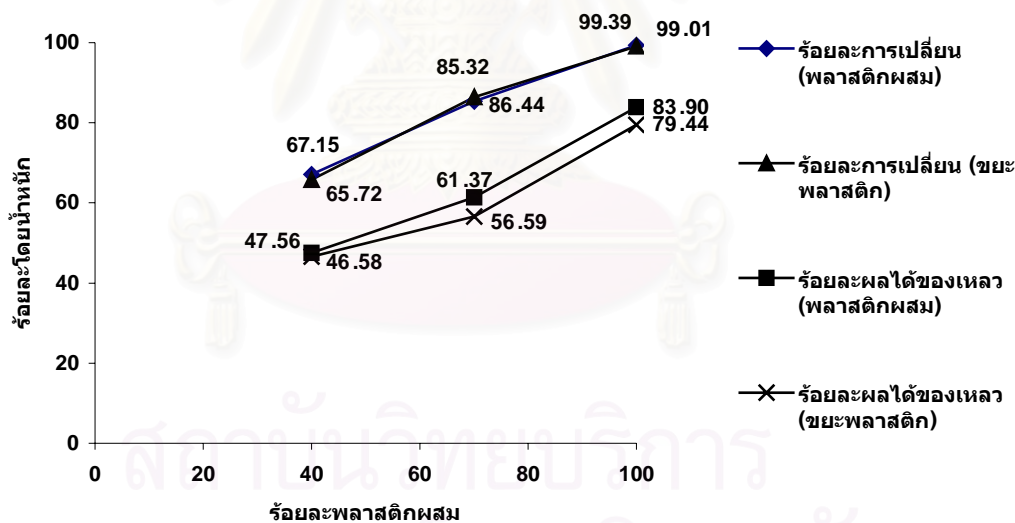
ค่าความร้อนของถ่านหิน 5496.34 kcal/kg.(air dry basis),6563.163 kcal/kg.(daf)

ชนิดตัวทำละลาย	ค่าความร้อน (dry basis)	ค่าความร้อน (daf)	ร้อยละการเพิ่มค่าความร้อน (daf)
ตัวทำละลายเตตระลิน	5485.77	7561.89	15.22
ตัวทำละลายใช้แล้ว	6309.39	10413.02	58.66

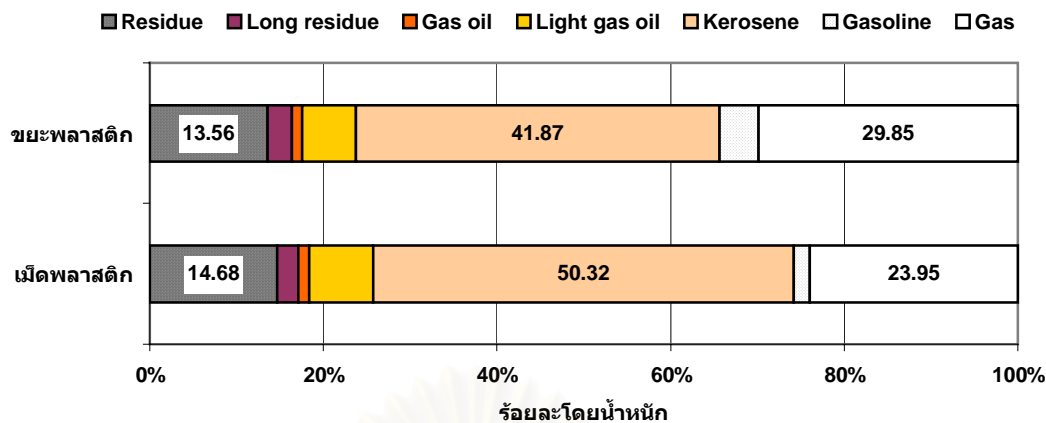
#### 4.5 การแปรรูปร่วมของถ่านหินและพลาสติกผสมหรือขยะพลาสติกให้เป็นของเหลวด้วยตัวทำละลายเตตระลิน

ในการทดลองนี้ได้ศึกษาผลจากการนำขยะพลาสติกเช่น ขวดบรรจุน้ำ ถุงบรรจุอาหารร้อน ถุงพลาสติก แทนเม็ดพลาสติกผสมในการแปรรูปร่วมของถ่านหินและเม็ดพลาสติกผสม เพื่อเปรียบเทียบผลร้อยละการเปลี่ยน และร้อยละผลได้ของเหลว ภายใต้ภาวะการทดลอง ที่ อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส อัตราส่วนถ่านหินและพลาสติกผสมต่อตัวทำละลายเตตระลิน 3:2 ร้อยละพลาสติกผสม 70 และทำการทดลองในตัวทำละลายเตตระลินร้อยละ 100

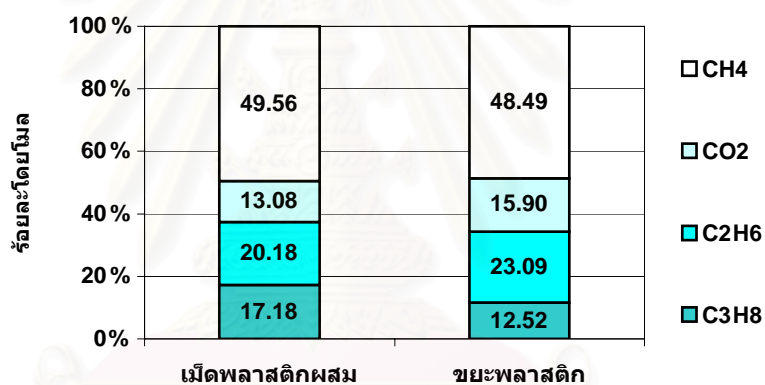
จากรูปที่ 4.7ก-ค พบว่า ขยะพลาสติกให้ร้อยละการเปลี่ยน ร้อยละผลได้ของเหลว การแจกแจงผลิตภัณฑ์ของเหลวและแก๊สจากขยะพลาสติกมีความใกล้เคียงกันกับผลิตภัณฑ์จากเม็ดพลาสติกผสม เนื่องจากพลาสติกที่ทำปฏิกริยามีความคล้ายคลึงกันและในอัตราส่วนเดียวกัน แต่เนื่องจากขยะพลาสติกได้ผ่านการขึ้นรูปและใช้งานแล้ว มีสารเติมแต่ง สี หมึกพิมพ์ ตลอดจนอาจมีพลาสติกหลายชนิดปะปนกันในขยะชิ้นเดียว (เกริกชัย, 2542) ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เบี่ยงเบนจากเม็ดพลาสติกเล็กน้อย



รูปที่ 4.7ก การเปรียบเทียบผลร้อยละการเปลี่ยนและร้อยละผลได้ของเหลวในการแปรรูปร่วมของ ถ่านหินและพลาสติกผสม โดยใช้ เม็ดพลาสติกผสม และขยะพลาสติก



รูปที่ 4.7ข การเปรียบเทียบผลการแจกแจงผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแปรรูปร่วมของถ่านหินและพลาสติกผสม โดยใช้ เม็ดพลาสติกผสมและขยะพลาสติกผสม



รูปที่ 4.7ค ผลการแจกแจงผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการแปรรูปร่วมของถ่านหินและพลาสติกผสม เปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์แก๊สจากขยะพลาสติกผสม

รูปที่ 4.7(ก-ค) ผลการแจกแจงผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแปรรูปร่วมของถ่านหินและพลาสติกผสม เปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์จากขยะพลาสติกผสม ที่ อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส อัตราส่วนถ่านหินและพลาสติกผสมต่อตัวทำละลายเตตระลิน 3:2 ร้อยละพลาสติกผสม 70 และทำการทดลองในตัวทำละลายเตตระลินร้อยละ 100



#### 4.5.1 การแปรรูปถ่านหินและพลาสติกผสมให้เป็นของเหลวในตัวทำละลายภาวะเหนือวิกฤตโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

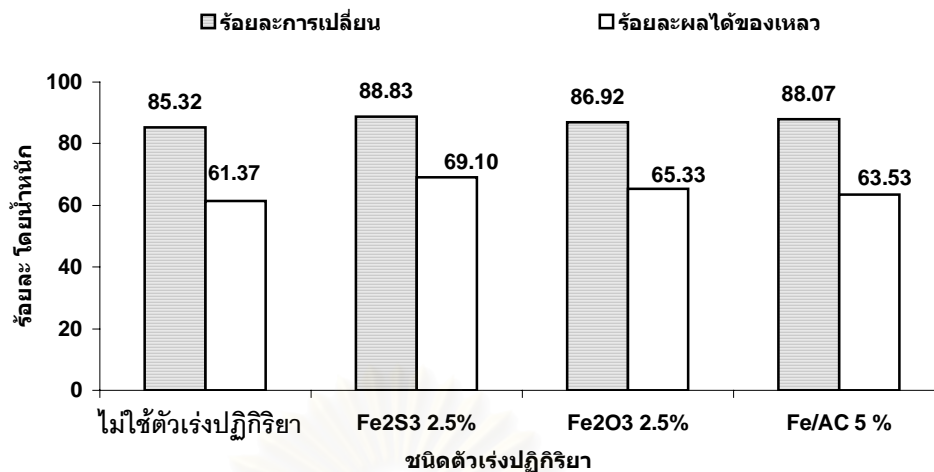
การทดลองนี้ได้ศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยา ที่มีต่อร้อยละการเปลี่ยนและร้อยละผลได้ของเหลวภายใต้ภาวะการทดลอง ที่ เติตระลินเป็นตัวทำละลาย อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส อัตราส่วนถ่านหินและพลาสติกผสมต่อตัวทำละลาย 3:2 ร้อยละพลาสติกผสม 70 ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ คือ ไอร์รอน (III) ซัลไฟด์ร้อยละ 2.5 บนถ่านหิน ไอร์รอน (III) ออกไซด์ร้อยละ 2.5 บนถ่านหิน และเหล็กบนถ่านกัมมันต์ร้อยละ 5 ปริมาณ 0.75 กรัม

จากรูปที่ 4.8ก พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 3 ชนิด ช่วยเพิ่มร้อยละผลได้ของเหลวมากขึ้น เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยาไอร์รอน (III) ซัลไฟด์ร้อยละ 2.5 บนถ่านหินช่วยเพิ่มร้อยละการเปลี่ยนจาก 85.32 เป็น 88.83 และร้อยละผลได้ของเหลวจาก 61.37 เป็น 69.10 เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยให้อนุมูลอิสระของถ่านหินและพลาสติก รับไฮโดรเจนได้ดี

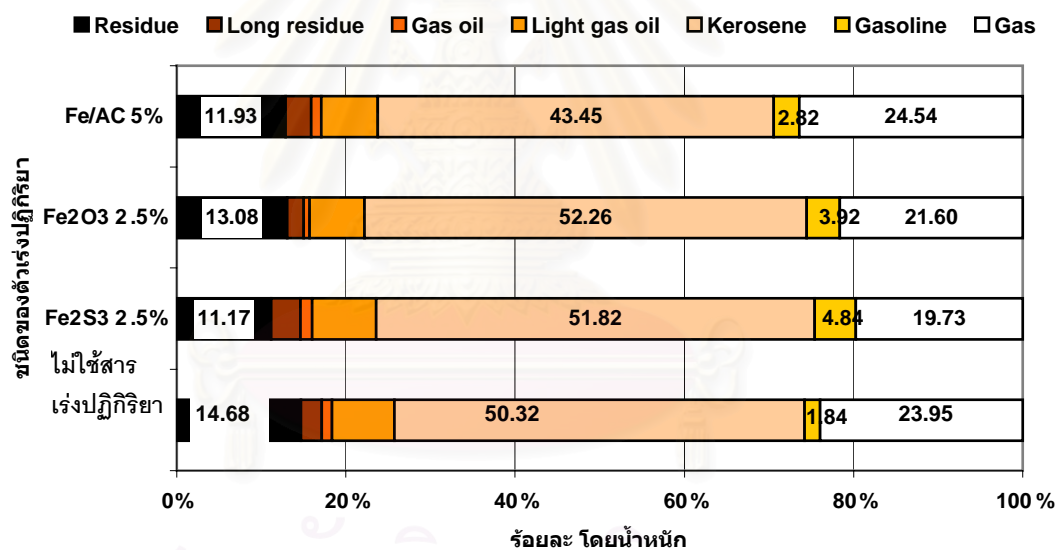
จากรูปที่ 4.8ข จากการแจกแจงของผลิตภัณฑ์ของเหลวจากการทดลองที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าของเหลวมีกาน้ำมันน้อยลง

จากรูปที่ 4.8ค จากการแจกแจงของผลิตภัณฑ์แก๊สจากการทดลองที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งมี แก๊สโพรเพน มากขึ้น และแก๊สมีเทนลดลงซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Liu et al. (1996) โดยทำการอิมเพกเนตไอร์รอน (III) ซัลไฟด์บนถ่านหิน พบว่าค่าร้อยละการเปลี่ยน และร้อยละผลได้ของเหลวกับแก๊สเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเชื่อว่า ไอร์รอน (III) ซัลไฟด์ เมื่ออยู่รวมกับถ่านหินที่ประกอบด้วยซัลเฟอร์ภายใต้ภาวะอุณหภูมิและความดันสูง สามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความว่องไวสูง คือ ไพโรไทต์ ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมสำหรับการแปรรูปถ่านหินให้เป็นของเหลว

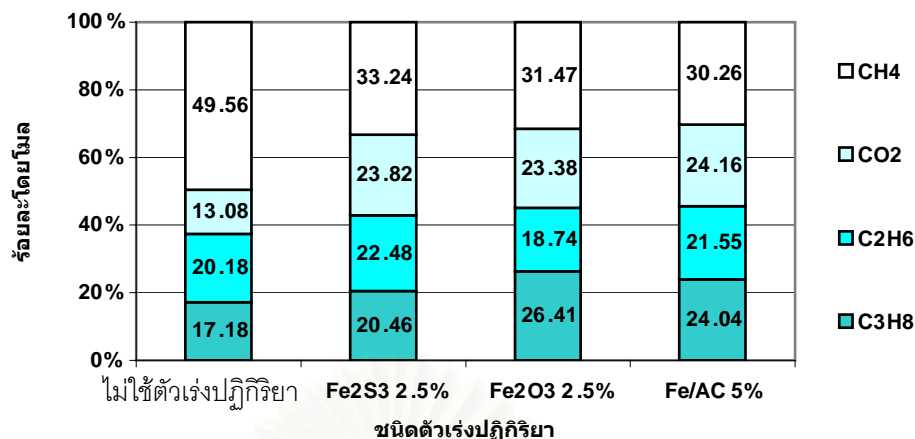
จากตารางที่ 4.11(ก-ข) พบว่า เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 3 ชนิด จะช่วยให้ร้อยละการเปลี่ยนสูงขึ้น แต่มีผลต่อสมบัติของของแข็งส่วนที่เหลือน้อยมาก สอดคล้องกับงานวิจัยของ Cui et al. (2003) ซึ่งศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อสมบัติของของแข็งส่วนที่เหลือ จากการแปรรูปถ่านหินเป็นของเหลวพบว่า เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อสมบัติของของแข็งส่วนที่เหลือเพียงเล็กน้อย โดยช่วยให้สารระเหยและคาร์บอนคงตัว แยกตัวออกมาทำปฏิกิริยาเป็นผลิตภัณฑ์ของเหลวได้ดี



รูปที่ 4.8ก ผลของใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 3 ชนิดที่มีต่อร้อยละการเปลี่ยนและร้อยละผลได้ของเหลวจากการแปรรูปร่วมถ่านหินและพลาสติกผสมให้เป็นของเหลว เทียบกับไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา



รูปที่ 4.8ข ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการแจกแจงผลิตภัณฑ์



รูปที่ 4.8ค ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการแจกแจงผลิตภัณฑ์แก๊ส

รูปที่ 4.8(ก-ค) ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแปรรูปร่วมของถ่านหินและพลาสติกผสมที่ อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส อัตราส่วนถ่านหินและพลาสติกผสมต่อตัวทำละลาย 3:2 ร้อยละพลาสติกผสม 70 และทำการทดลองในตัวทำละลายเตตระลินร้อยละ 100

ตารางที่ 4.11(ก-ข) ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อสมบัติของของแข็งส่วนที่เหลือ ที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส อัตราส่วนถ่านหินและพลาสติกผสมต่อตัวทำละลาย 3:2 ร้อยละพลาสติกผสม 70 และทำการทดลองในตัวทำละลายเตตระลิน ร้อยละ 100

ตารางที่ 4.11ก ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อสมบัติแบบประมาณของของแข็งส่วนที่เหลือ

สมบัติโดยประมาณ (dry basis)	ชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา			
	ไม่มี	Fe <sub>2</sub> S <sub>3</sub> 2.5%	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 2.5%	Fe/AC 5%
สารระเหย	16.30	22.45	24.32	20.22
คาร์บอนคงตัว	45.98	37.53	37.06	40.24
เถ้า	37.72	40.02	38.62	39.54
ร้อยละกำมะถันรวม	3.68	4.756	3.825	3.4016
ร้อยละการเปลี่ยน	85.32	88.83	86.92	88.07

ตารางที่ 4.11(ข) ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อค่าความร้อนและร้อยละการเพิ่มของค่าความร้อนของของแข็งส่วนที่เหลือ

ค่าความร้อนของถ่านหิน 5496.34 kcal/kg.(air dry basis),6563.163 kcal/kg.(daf)

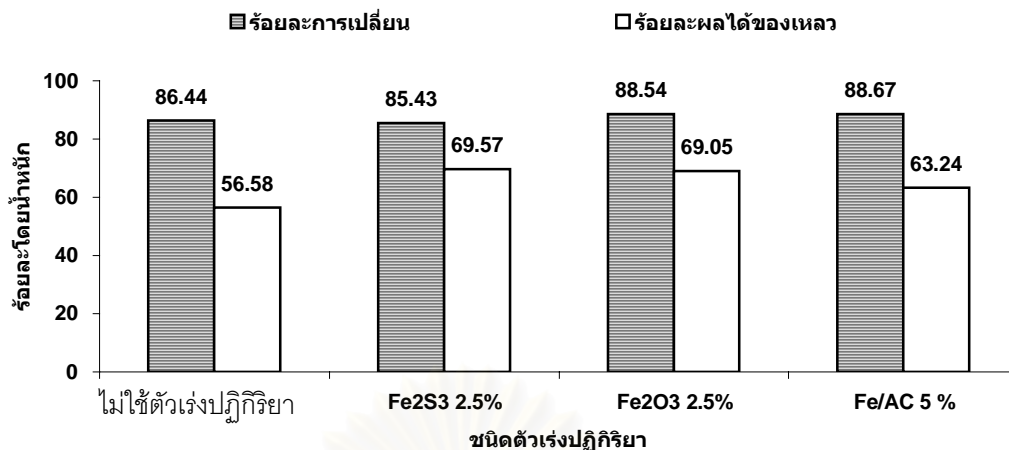
ชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา	ค่าความร้อน(dry basis)	ค่าความร้อน (daf)	ร้อยละการเพิ่มค่าความร้อน (daf)
ไม่มี	5485.77	7561.89	15.22
Fe <sub>2</sub> S <sub>3</sub> 2.5%	5399.65	8911.58	35.78
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 2.5%	4900.78	7962.79	21.33
Fe/AC 5%	5551.27	8995.28	37.06

4.5.2 การแปรรูปถ่านหินและขยะพลาสติกให้เป็นของเหลวในตัวทำละลายภาวะเหนือวิกฤต โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

การทดลองนี้ ทำการศึกษาเหมือนหัวข้อ 4.5.1 แต่เปลี่ยนจากพลาสติกผสม เป็นขยะพลาสติกผสม

จากรูปที่ 4.9 พบว่า ร้อยละการเปลี่ยนไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก แต่เพิ่มร้อยละผลได้ของเหลว จาก 56.59 เป็น 69.57 (ตัวเร่งปฏิกิริยาไอร์ออน (III) ซัลไฟด์ร้อยละ 2.5 บนถ่านหิน) ซึ่งเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับผลการทดลองโดยใช้พลาสติกผสมที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไอร์ออน (III) ซัลไฟด์ร้อยละ 2.5 บนถ่านหินเช่นเดียวกัน พบว่าให้ร้อยละผลได้ของเหลวที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน คือ 69.10 และ 69.57 เมื่อใช้ พลาสติกผสม และ ขยะพลาสติก ตามลำดับ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.9 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 ชนิด ที่มีต่อร้อยละการเปลี่ยนและร้อยละผลได้ของเหลวจากการแปรรูปร่วมถ่านหินและขยะพลาสติกให้เป็นของเหลวในตัวทำละลายภาวะเหนือวิกฤตเทียบกับไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส อัตราส่วนถ่านหินและพลาสติกผสมต่อตัวทำละลาย 3:2 ร้อยละพลาสติกผสม 70 และทำการทดลองในตัวทำละลายเตตระลิनร้อยละ 100

#### 4.6 การเปรียบเทียบร้อยละการเปลี่ยนและร้อยละผลได้ของเหลว

จากการศึกษาแปรรูปร่วมของถ่านหินและพลาสติกผสมด้วยตัวทำละลายภาวะเหนือวิกฤต ได้เปรียบเทียบร้อยละการเปลี่ยนและร้อยละผลได้ของเหลว ที่ได้จากงานวิจัยอื่น กับงานวิจัยนี้ แสดงดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 การเปรียบเทียบร้อยละการเปลี่ยนและร้อยละผลได้ของเหลวของงานวิจัยอื่นกับงานวิจัยนี้

ผู้วิจัย	ภาวะในการทดลอง	ผลการทดลอง
ธารินี และคณะ (2543)	อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส อัตราส่วนถ่านหินต่อพอลิพรอพิลีน 1:4 ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 6.2 เมกะพาสคัล เวลา 30 นาทีในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์	ร้อยละการเปลี่ยน 73.25 ร้อยละผลได้ของเหลว 53.36
อภิชาติ และ คณะ (2545)	อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส อัตราส่วนถ่านหินต่อพอลิพรอพิลีน 6:4 ความดันของระบบ 12.2 เมกะพาสคัล เวลา 30 นาทีในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่อง	ร้อยละผลได้ของเหลว 69
Wang et al. (2003)	อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส อัตราส่วนถ่านหินต่อพลาสติกผสม 1:1 ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 เมกะพาสคัล อัตราส่วนสารตั้งต้นต่อเตตระลิน 2:3 ตัวเร่งปฏิกิริยา คือ FAMo ร้อยละ 1.0 เวลา 60 นาที ในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์	ร้อยละผลได้ของเหลว 70
งานวิจัยนี้ (2547)	อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส อัตราส่วนถ่านหินต่อพลาสติกผสม 3:7 ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 0 Psig. อัตราส่วนสารตั้งต้นต่อเตตระลิน 3:2 เวลา 30 นาทีในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์	ร้อยละการเปลี่ยน 89.43 ร้อยละผลได้ของเหลว 63.42

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษากระบวนการแปรรูปร่วมของถ่านหินและพลาสติกผสมให้เป็นของเหลว ในช่วงอุณหภูมิ 430-460 องศาเซลเซียส อัตราส่วนถ่านหินและพลาสติกผสมต่อตัวทำละลาย 3:2-1:1 ร้อยละพลาสติกผสมในสารตั้งต้น 40-100 ร้อยละเตตระลินในตัวทำละลายผสม 80-100 และทำการทดลองเป็นเวลา 30 นาที โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 4 ส่วน คือ

1. การแปรรูปร่วมของถ่านหินและพลาสติกผสมให้เป็นของเหลวด้วยตัวทำละลายภาวะเหนือวิกฤต
  - 1.1 การออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละการเปลี่ยนและร้อยละผลได้ของเหลวจากการแปรรูปร่วมของถ่านหินและพลาสติกผสมให้เป็นของเหลวด้วยตัวทำละลายเตตระลินภาวะเหนือวิกฤต
  - 1.2 การแปรรูปพลาสติกให้เป็นของเหลวด้วยตัวทำละลายผสมเตตระลิน-โทลูอีน
  - 1.3 การแปรรูปร่วมของถ่านหินและเม็ดพลาสติก 4 ชนิดให้เป็นของเหลวด้วยตัวทำละลายภาวะเหนือวิกฤต
2. ศึกษาผลของตัวแปร อุณหภูมิ ร้อยละโดยปริมาตรของเตตระลิน และร้อยละโดยน้ำหนักพลาสติกผสม ที่มีต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้
3. การแปรรูปร่วมของถ่านหินและพลาสติกผสมให้เป็นของเหลวด้วยตัวทำละลายใช้แล้ว
4. การแปรรูปร่วมของถ่านหินและพลาสติกผสมหรือขยะพลาสติกให้เป็นของเหลว โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

#### 1. การแปรรูปร่วมของถ่านหินและพลาสติกผสมให้เป็นของเหลวด้วยตัวทำละลายภาวะเหนือวิกฤต

1.1 การออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละการเปลี่ยนและร้อยละผลได้ของเหลวจากการแปรรูปร่วมของถ่านหินและพลาสติกผสมให้เป็นของเหลวด้วยตัวทำละลายเตตระลินภาวะเหนือวิกฤต

ปัจจัยที่มีลำดับความสำคัญต่อร้อยละผลได้ของเหลวจากมากไปน้อยคือ ร้อยละโดยน้ำหนักของพลาสติกผสม และร้อยละเตตระลินในตัวทำละลายผสม โดยภาวะที่เหมาะสมคือ ร้อยละ

โดยน้ำหนักของพลาสติกผสม 70 ในตัวทำละลายเตตระลินร้อยละ 100 อัตราส่วนถ่านหินและพลาสติกผสมต่อตัวทำละลาย 1:1 และอุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ให้ร้อยละการเปลี่ยนรวม 89.43 และร้อยละผลได้ของเหลว 63.42

### 1.2 การแปรรูปพลาสติกให้เป็นของเหลวด้วยตัวทำละลายผสมเตตระลิน-โทลูอีน

2. การทดลองในตัวทำละลายเตตระลิน ให้ร้อยละการเปลี่ยนสูงมากเกือบร้อยละ 100 และร้อยละผลิตภัณฑ์ของเหลว มีค่าสูงมากกว่าร้อยละ 80 ในพลาสติกทุกชนิด และขยะพลาสติก
3. เมื่อปริมาณตัวทำละลายเตตระลินในตัวทำละลายผสมลดลง ทำให้ร้อยละการเปลี่ยนและร้อยละผลิตภัณฑ์ของเหลวลดลง

### 1.3 การแปรรูปร่วมของถ่านหินและเม็ดพลาสติก 4 ชนิดให้เป็นของเหลวด้วยตัวทำละลายภาวะเหนือวิกฤต

การแปรรูปร่วมระหว่างถ่านหินและพอลิสไตรีน ให้ร้อยละผลได้ของเหลวสูงสุด ส่วนการแปรรูปร่วมระหว่างถ่านหินและพอลิพรอพิลีน ให้ร้อยละผลได้ของเหลวต่ำสุด

## 2. ศึกษาผลของตัวแปร อุณหภูมิ ร้อยละโดยปริมาณของเตตระลิน และร้อยละพลาสติกผสม ที่มีต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้

1. การเพิ่มอุณหภูมิทำให้ค่าการเปลี่ยนของถ่านหินเพิ่มขึ้น แต่ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวน้อยลง เพราะอุณหภูมิสูงทำให้ผลิตภัณฑ์ของเหลวแตกตัวให้ผลิตภัณฑ์แก๊สไฮโดรคาร์บอนมากขึ้น ผลที่ตามมาคือสัดส่วนการแจกแจงของผลิตภัณฑ์ของเหลวตามจุดเดือดดีขึ้น
2. พลาสติกผสมช่วยให้ค่าการเปลี่ยนของถ่านหินและร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวเพิ่มขึ้น แต่สัดส่วนการแจกแจงตัวของผลิตภัณฑ์ของเหลวตามจุดเดือด คือมีกาน้ำมันหนักมากขึ้น
3. ร้อยละของเตตระลินในตัวทำละลายผสมช่วยให้ร้อยละการเปลี่ยนถ่านหินและพลาสติกและร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวเพิ่มขึ้นและช่วยปรับปรุงคุณภาพผลิตภัณฑ์น้ำมันให้ดีขึ้น
4. ปัจจัยที่มีความสำคัญมากที่สุดต่อสัดส่วนการแจกแจงตัวของผลิตภัณฑ์ของเหลวตามจุดเดือดคือ ปริมาณถ่านหินที่มีในสารตั้งต้น เพราะถ่านหินให้น้ำมันที่เป็นพาราฟินจำนวนมากซึ่งสามารถเปลี่ยนรูปเป็นแก๊สโซลีน และคีโรซีนได้ง่าย จึงทำให้ปริมาณผลิตภัณฑ์น้ำมันเบามากขึ้น



รองลงมาคือ อุณหภูมิ เพราะที่ภาวะอุณหภูมิสูงผลิตภัณฑ์ของเหลวโมเลกุลใหญ่แตกตัวให้ผลิตภัณฑ์ของเหลวโมเลกุลเล็กได้มากขึ้น ดังนั้นที่อุณหภูมิสูงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ของเหลวจึงมีคุณภาพดีกว่าที่อุณหภูมิต่ำ แต่ผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวน้อยลง

5. ปัจจัยที่มีผลมากต่อผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊สคือ อุณหภูมิ โดยที่อุณหภูมิสูงปริมาณแก๊สไฮโดรคาร์บอนเพิ่มมากขึ้นและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง เพราะอุณหภูมิสูงทำให้ผลิตภัณฑ์ของเหลวและโมเลกุลที่แตกตัวออกมาจากถ่านหินกับ แยกตัวเป็นโมเลกุลขนาดเล็กเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สมากขึ้น

6. ของแข็งที่เหลือจากกระบวนการแปรรูปร่วมมีค่าความร้อนสูงขึ้น (เมื่อพิจารณา โดยไม่คิดถ่าน) ซึ่งเมื่อผ่านกระบวนการแล้ว พบว่าค่าความร้อนเพิ่มขึ้น จากร้อยละ 19.64 เป็น 40.36 และก่อนนำไปใช้ประโยชน์ควรผ่านกระบวนการขจัดถ่านเสียก่อน

### 3. การแปรรูปร่วมของถ่านหินและพลาสติกผสม ให้เป็นของเหลวด้วยตัวทำละลายใช้แล้ว

1. ปริมาณของตัวทำละลายเตตระลินในตัวทำละลายใช้แล้วลดลง เนื่องจากบางส่วนของตัวทำละลายเตตระลินให้ไฮโดรเจนแก่อนุมูลอิสระแก่ถ่านหินและพลาสติก แล้วกลายเป็นแนฟทาลีน แล้วไม่มีการรับไฮโดรเจนกลับมาเป็นเตตระลินดั้งเดิม เนื่องจากไฮโดรเจนในระบบไม่เพียงพอ จึงทำให้ในตัวทำละลายใช้แล้ว เมื่อวิเคราะห์ด้วย GC/MS มีส่วนประกอบทั้ง เตตระลิน แนฟทาลีน และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ได้จากการแปรรูปร่วม ดังนั้น ร้อยละการเปลี่ยนและร้อยละผลได้ของเหลวจึงลดลงด้วย

2. การทดลองในตัวทำละลายใช้แล้ว ร้อยละการเปลี่ยนถ่านหินและพลาสติกผสม ตลอดจนร้อยละผลิตภัณฑ์ของเหลวลดลง และเกิดผลิตภัณฑ์แก๊สมากขึ้น โดยส่วนใหญ่ กว่าร้อยละ 50 เป็นแก๊สมีเทน

### 4. การแปรรูปร่วมของถ่านหินและพลาสติกผสมหรือขยะพลาสติกให้เป็นของเหลวในตัวทำละลายภาวะเหนือวิกฤติโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

1. การแปรรูปร่วมของถ่านหินและขยะพลาสติกให้ค่าการเปลี่ยนของถ่านหินและพลาสติกลดลงเล็กน้อย เนื่องจากในขยะพลาสติกมีสารเจือปนอื่น ๆ เช่น สี หมึกพิมพ์ ร้อยละการแตกแยกผลิตภัณฑ์แก๊สและของเหลวมีความคล้ายคลึงกับผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเม็ดพลาสติก และ ผลได้ผลิต

ภัณฑ์ของเหลวใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการแปรรูปร่วมของถ่านหินและพลาสติกผสมโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

2. ตัวเร่งปฏิกิริยาไอร์ออน (III) ซัลไฟด์ ตัวเร่งปฏิกิริยาไอร์ออน(III)ออกไซด์ ช่วยให้ค่าการเปลี่ยนของถ่านหินและพลาสติกผสมเพียงเล็กน้อยแต่ผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวเพิ่มอย่างมีนัยสำคัญ เพราะตัวเร่งปฏิกิริยาไอร์ออน (III) ซัลไฟด์เปลี่ยนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาไพโรไทต์ซึ่งมีความว่องไวสูง ซึ่งจากการทดลองด้วยขยะพลาสติก ก็ได้ผลเช่นเดียวกัน ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ มีผลต่อร้อยละการเปลี่ยนและร้อยละผลได้ของเหลวเพียงเล็กน้อย

3. ของแข็งที่เหลือจากกระบวนการแปรรูปร่วมโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าความร้อนสูงขึ้น (เมื่อพิจารณาโดยไม่คิดถ่าน)

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาการแปรรูปร่วมของถ่านหินและขยะพลาสติกในตัวทำละลายเตตระลิเนอวาระเหนือวิกฤต ที่อัตราส่วนถ่านหินต่อขยะพลาสติก 1:1 เพื่อหาภาวะที่ให้ผลิตภัณฑ์ของเหลวสูงสุด เนื่องจากถ่านหินช่วยปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ของเหลว ส่วนขยะพลาสติก ช่วยปรับปรุงปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลว

2. ศึกษาการเตรียมถ่านหินก่อนการทดลอง เช่น การขจัดถ่าน การขจัด mineral matter เพื่อลดการเสื่อมของตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนการทดลอง ศึกษาการบวมตัวของถ่านหิน และการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาหลากหลายชนิดขึ้น

3. การแปรรูปถ่านหินเป็นของเหลวสามารถดำเนินการร่วมกับผลิตภัณฑ์ที่มีองค์ประกอบหลักของไฮโดรคาร์บอน ดังนั้นควรนำผลิตภัณฑ์เหลือทิ้งต่าง ๆ ที่มีองค์ประกอบของไฮโดรคาร์บอน มาใช้ในกระบวนการแปรรูปร่วมให้เป็นของเหลว เพื่อเป็นการลดปริมาณผลิตภัณฑ์เหลือทิ้งและปริมาณการใช้ถ่านหิน

4. ศึกษาความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์และเชิงพาณิชย์ สำหรับการผลิตเชื้อเพลิงเหลวสังเคราะห์ รวมทั้งศึกษานำมาใช้ได้จริง และการขยายขนาดให้ใหญ่ขึ้น

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

กัญญา บุญยเกียรติ. เชื้อเพลิงและการเผาไหม้. 2542.: 2.21-2.24

กรมส่งเสริมการส่งออก. ข้อมูลอุตสาหกรรมพลาสติก. กระทรวงอุตสาหกรรม, 2541

เกริกชัย สุภาภรณ์จทิ, เม็ดพลาสติกเก่าจากการรีไซเคิล. จุฬารัตน์ ปีที่ 18 ฉบับที่ 7 (กรกฎาคม 2542) :25-26

นงเยาว์ ชูติวณิชกุล. อิทธิพลของทัณฑ์และไมกาที่มีต่อสมบัติของพอลิพรอพิลีน. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2533.

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

พัฒนาและส่งเสริมพลังงาน, กรม. รายงานพลังงานของประเทศไทย. กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม, 2544

บำรุงสุข เทียมพันธ์ การแปรรูปร่วมของถ่านหินและน้ำมันพีชใช้แล้ว วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต. ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546

ประเสริฐ ชุ่มรุ่ม และคณะ. เทคโนโลยีการทำเหมืองถ่านหิน. กรุงเทพมหานคร, 2538

รังสรรค์ ปิ่นทอง. ประโยชน์และโทษของมูลฝอย. กรมควบคุมมลพิษ, กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม., 2536

วิซชากร จารุศิริ กระบวนการร่วมของพอลิพรอพิลีนและแอนทราไซต์ โดยใช้เหล็กบนถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์ม วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต. ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543

สำนักนโยบายอุตสาหกรรมรายสาขา1. ข้อมูลและการคาดการณ์การบริโภคผลิตภัณฑ์พลาสติกภายในประเทศ กระทรวงอุตสาหกรรม, 2546

ศุภวรรณ ตันตยานนท์. ปีเตอร์เคมี 2542.: 6-1 - 6-11, 7-1 – 7-5, 9-5 – 9-8

อภิชาติ ศิริพจนวรรณ. การแปรรูปร่วมของถ่านหินและพอลิพรอพิลีนให้เป็นของเหลวด้วยตัวทำละลายภาวะเหนือวิกฤต. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต. ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.

เอกสิทธิ์ แย้มศรี การแปรรูปร่วมของถ่านหินและจาระบีใช้แล้ว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต  
 ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546  
 อุทัย ไสธนะพันธ์ และ รพีพล ภโววาท. Supercritical fluids ตอนที่ 1 : หลักการเบื้องต้น. วารสาร  
 ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 3 (มิถุนายน 2536) : 37-50.

#### ภาษาอังกฤษ

ASTM Standard, D 388. Coal by rank : American Society for Testing Materials. U.S.A.,  
 1989.

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, D 3173. Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke : American  
 Society for Testing Materials. U.S.A., 1989.

ASTM Standard, D 3174. Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke : American  
 Society for Testing Materials. U.S.A., 1989.

ASTM Standard, D 3175. Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke :  
 American Society for Testing Materials. U.S.A., 1989.

ASTM Standard, D 3177. Total Sulfur in the Analysis Sample of Coal and Coke :  
 American Society for Testing Materials. U.S.A., 1989.

ASTM Standard, D 3286. Gross Calorific Values of Coal and Coke by the Isothermal  
 Jacket Bomb Calorimeter : American Standard Society for Testing 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

Feng, Z., Zhao, J., Rockwell, J., Bailey, D. and Huffman, G. Direct Liquefaction of Waste  
 Plastics and Co-liquefaction of Coal-plastic Mixtures. Fuel Processing  
 Technology 49 (1996) : 17.

- Gimouhpoolos, K., Pooulia, D. and Ssides, A.V. Organic solvent effects on waste plastics-lignite coliquefaction. Resource Conservation and Recycling 23 (1998) : 47-56.
- Hong Cui, Characteristics of residues from thermal and catalytic coal Hydro-liquefaction. Fuel 82 (2003) : 1549–1556
- Huffman, G.P., Feng, Z., Huggins, F.E. and Mahajan, V. Direct Liquefaction of Waste Plastics and Co-liquefaction of Waste Plastics with Coal. Int. Conf Coal Science. (1995) : 1519-1522
- 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
- Li W., Development of first-stage co-liquefaction of Chinese coal with wastePlastics, Chemical Engineering and Processing 00 (2003) :1-4
- Li W., Mechanism study of iron-based catalyst in co-liquefaction of coal with waste Plastics, Fuel 81(2002) : 811-815
- Lugue de Castro, M.D., Valcarcel M. and Tena M.T. Analytical Supercritical Fluid Extraction. Germany : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1994.
- McHugh, M.A. and Krukoni V.J. Supercritical Fluid Extraction. 2<sup>nd</sup> ed. U.S.A. : Butterworth-Heinemann, 1994.
- Mingsheng Luo, Christine W., Curtis Two stage co-processing of coal with model and commingled waste plastics mixtures. Fuel Processing Technology 1999 (59) :163–187
- Montgomery, D.C. Design and Analysis of Experiments. 5<sup>th</sup> ed. New York : John Wiley & Sons, 1997.
- Nowacki, P. Coal liquefaction Process. New York ,1979
- Probst, R.F. and Hicks, R.E. Synthetic Fuels. Singapore : McGraw-Hill Book, 1982.
- Rothenberger, K., Cugini, A. Investigation of First-Stage Liquefaction of coal with Model Plastic Waste Mixtures. Energy&Fuels 1997(11):849-855
- Rocha, S.R.P., Oliveira, J.V., Avila, S.G., Pereirat, D.M. and Lancast, F.M. The Effects of Temperature and Density on the Characteristics of the Extracts from SCFE of a High-ash Brazilian Coal. Fuel 76 (1997) : 93.

Shishido, M., Mashiko, T. and Arai K. Co-solvent effect of tetralin or ethanol on supercritical toluene extraction of coal. Fuel 70(1991) : 545-549.

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

Speight, J.G. The Chemistry and Technology of Petroleum. 3<sup>rd</sup> ed., Revised and Expanded, New York : Marcel Dekker, 1980.

Taylor, L.T. Supercritical Fluid Extraction. U.S.A. : John Wiley & Sons, 1996.

Thallada B. Liquefaction of mixed plastics containing PVC and dechlorination by calcium-based sorbant, Energy&Fuels 2003(17):75-80



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

## การคำนวณและข้อมูลการทดลอง

## การคำนวณ

## 1. การคำนวณร้อยละการเปลี่ยนรวม

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

## 2. การคำนวณร้อยละการเปลี่ยนของถ่านหิน

$$\text{ร้อยละการเปลี่ยนของถ่านหิน (daf)} = 100 [ ( W2_{\text{daf}} - W_R ) / W2_{\text{daf}} ]$$

## 3. การคำนวณร้อยละผลได้ของเหลว

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

## 4. การคำนวณร้อยละผลได้ของแข็ง

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

## 5. การคำนวณร้อยละผลได้แก๊สผลิตภัณฑ์

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

โดย

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

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

$W_R$  = น้ำหนักกากที่ปราศจากความชื้นและเถ้าหลังจากชะล้างด้วยเตตระไฮโดรฟูแรน

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



### ตัวอย่างการคำนวณ

ภาวะของการทดลอง

ร้อยละการเติมพลาสติกในถ่านหิน 70

อัตราส่วนสารตั้งต้นต่อตัวทำละลายเตตระลิน 3:2

อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส

การคำนวณ

น้ำหนักถ่านหิน (Dry basis) = 9.00 กรัม

น้ำหนักถ่านหิน (Dry and ash free basis) = 7.25 กรัม

น้ำหนักพลาสติกผสม = 21 กรัม

น้ำหนักพลาสติกผสม (Dry and ash free basis) = 19.95 กรัม

น้ำหนักผลได้ของเหลว = 16.692 กรัม

น้ำหนักกากของแข็ง (Dry basis) = 6.792 กรัม

น้ำหนักกากของแข็ง (Dry and ash free basis) = 3.992 กรัม

$$\text{ร้อยละการเปลี่ยนรวม} = \frac{100 \times [(7.25 + 19.95) - 3.992]}{(7.25 + 19.95)} = 85.32$$

$$\text{ร้อยละการเปลี่ยนของถ่านหิน} = \frac{100 \times [7.25 - 3.992]}{7.25} = 44.94$$

$$\text{ร้อยละผลได้ของเหลว} = 100 \times [16.692 / (7.25 + 19.95)] = 61.37$$

$$\text{ร้อยละผลได้ของแข็ง} = 100 \times [3.992 / (7.25 + 19.95)] = 14.67$$

$$\text{ร้อยละผลได้แก๊ส} = 100 - 61.37 - 14.67 = 23.96$$

## 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 องศาเซลเซียสนาน 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. ครุชีเบลทำจากนิเกิลพร้อมฝา
3. เดสติกเคเตอร์

#### วิธีการทดลอง

1. เเผาครุชีเบลพร้อมฝาในเตาเผาอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที
2. นำออกจากเตาเผา ทิ้งให้เย็นในเดสติกเคเตอร์ จนถึงอุณหภูมิห้อง ซึ่งน้ำหนักของครุชีเบลพร้อมฝา บันทึกผล
3. ชั่งตัวอย่างถ่านหินประมาณ 1 กรัม ใส่ในถ้วยนิเกิลที่ทราบน้ำหนักแน่นอน ปิดฝาให้สนิทบันทึกน้ำหนักตัวอย่าง
4. นำถ้วยนิเกิลพร้อมตัวอย่างถ่านหินเผาในเตาเผาแบบท่อ ให้ความร้อนแก่ถ่านหินที่บริเวณด้านบนของเตาเผาแบบท่อนาน 3 นาที และบริเวณกลางเตาเผาอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส อีก 7 นาที ตามลำดับ
5. นำถ้วยนิเกิลออกจากเตาเผา ทิ้งให้เย็นในเดสติกเคเตอร์ ซึ่งน้ำหนักของถ้วยนิเกิลพร้อมฝาและถ่านหินที่เหลือ 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>	=	น้ำหนักของครุชีเบลพร้อมฝาและน้ำหนักของถ่านหินก่อนเผา (กรัม)
	W <sub>6</sub>	=	น้ำหนักของครุชีเบลพร้อมฝาและน้ำหนักของถ่านหินหลังเผา (กรัม)
	W	=	น้ำหนักตัวอย่างถ่านหินเริ่มต้น (กรัม)

## 1.4 ปริมาณคาร์บอนคงตัวในตัวอย่างถ่านหิน

### การคำนวณ

$$\text{ร้อยละของคาร์บอนคงตัว} = \text{ร้อยละความชื้น} - \text{ร้อยละเถ้า} - \text{ร้อยละสารระเหย}$$

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

### หลักการ

เผาตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ภายใต้บรรยากาศแก๊สออกซิเจน ความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ภายในบอมบ์จะถ่ายเทให้กับน้ำที่อยู่รอบ ๆ ค่าความร้อนคำนวณได้จากผลคูณของความแตกต่างของอุณหภูมิ (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
- $e_2$  = ความยาวหลอดที่ถูกเผาไหม้ (เซนติเมตร)  $\times$  ค่าความร้อนของหลอด (ปีทีู่้ต่อเซนติเมตร)
- T =  $T_f - T_i$  ผลต่างอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)

ทำการทดลองเหมือนที่กล่าวมาทุกประการตั้งแต่ข้อ 1-12 โดยเปลี่ยนจากกรดเบนโซอิก เป็นถ่านหิน แล้วคำนวณค่าความร้อนได้จากสมการต่อไปนี้

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

- เมื่อ  $Q_v(\text{gross})$  = ค่าความร้อนของถ่านหิน (บีที่ยูต่อปอนด์)
- $T$  =  $T_f - T_i$  (องศาเซลเซียส)
- $e_1$  = ปริมาตรของสารละลายที่ใช้ไตเตรต (มิลลิลิตร) โดย 1 มิลลิลิตร เทียบเท่ากับ 10 บีที่ยู
- $e_2$  = ความยาวหลอดที่ถูกเผาไหม้ (เซนติเมตร)  $\times$  ค่าความร้อนของหลอด (บีที่ยูต่อเซนติเมตร)
- $e_3$  = 23.7 (บีที่ยู)  $\times$  ร้อยละกำมะถัน  $\times$  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 กรัมในน้ำกลั่นและเจือจางให้ได้ปริมาตร 1 ลิตร
6. สารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ( $\text{AgNO}_3$ ) ละลายซิลเวอร์ไนเตรต 0.43 กรัมในน้ำกลั่น และปรับปริมาตรสารละลายให้เป็น 100 มิลลิลิตร
7. กระจกกรองเบอร์ 1 และเบอร์ 42

### วิธีการทดลอง

1. นำน้ำที่ได้จากการล้างบอมบ์และไตเตรตแล้วมาปรับให้เป็นกลางด้วยสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เจือจาง (จาก pH = 5.5 เป็น pH = 7.0)
2. นำไปต้มจนเดือดแล้วกรองด้วยกระจกกรองเบอร์ 1 ล้างกระจกกรองให้ทั่วด้วยน้ำร้อน 5-6 ครั้ง
3. เติมกรดไฮโดรคลอริกที่เตรียมไว้ 1 มิลลิลิตร นำไปต้มและเติมสารละลายแบเรียมคลอไรด์ 10 มิลลิลิตรที่ละลายด้วยปิเปต คนให้ทั่วตลอดเวลา ต้มต่อให้เดือดอีก 15 นาที ตั้งทิ้งไว้ค้างคืนหรืออย่างน้อย 2 ชั่วโมง
4. กรองตะกอนแบเรียมซัลเฟตด้วยกระจกกรองเบอร์ 42 ล้างด้วยน้ำร้อนจนหมดแบเรียมคลอไรด์ (ทดสอบได้ด้วยการหยดสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตลงในน้ำล้างตะกอน 8-10 มิลลิลิตรแล้วน้ำไม่ขุ่น)
5. นำกระจกกรองที่มีตะกอนแบเรียมซัลเฟตใส่ถ้วยกระเบื้องที่ทราบน้ำหนักแน่นอน ห่อกระจกหลวม ๆ เพื่อป้องกันตะกอนกระเด็นออกจากถ้วย
6. เเผาที่อุณหภูมิ 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)

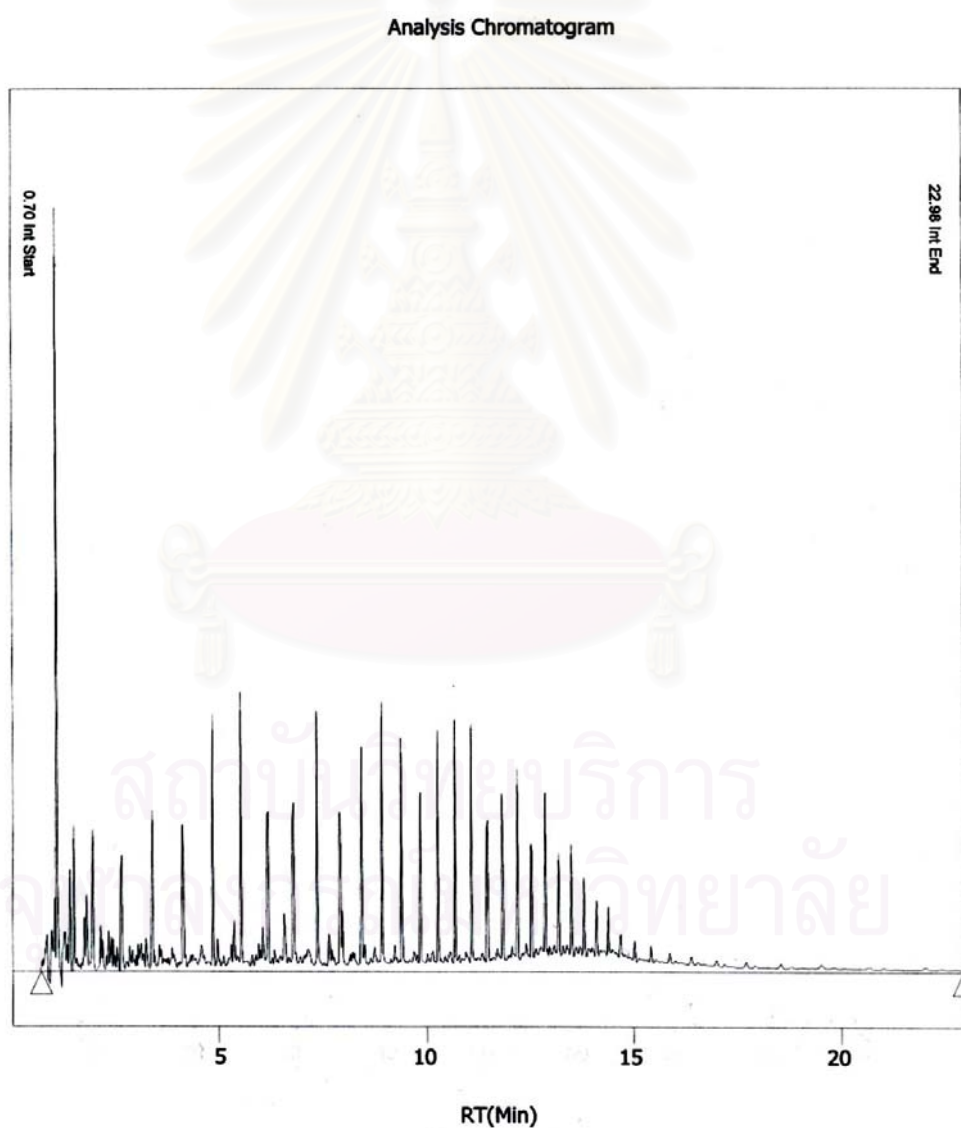


## ภาคผนวก ค

## การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของเหลวด้วย SDGC

## 1. ตัวอย่างโครมาโทแกรมแสดงผลการแยกผลิตภัณฑ์ของเหลว

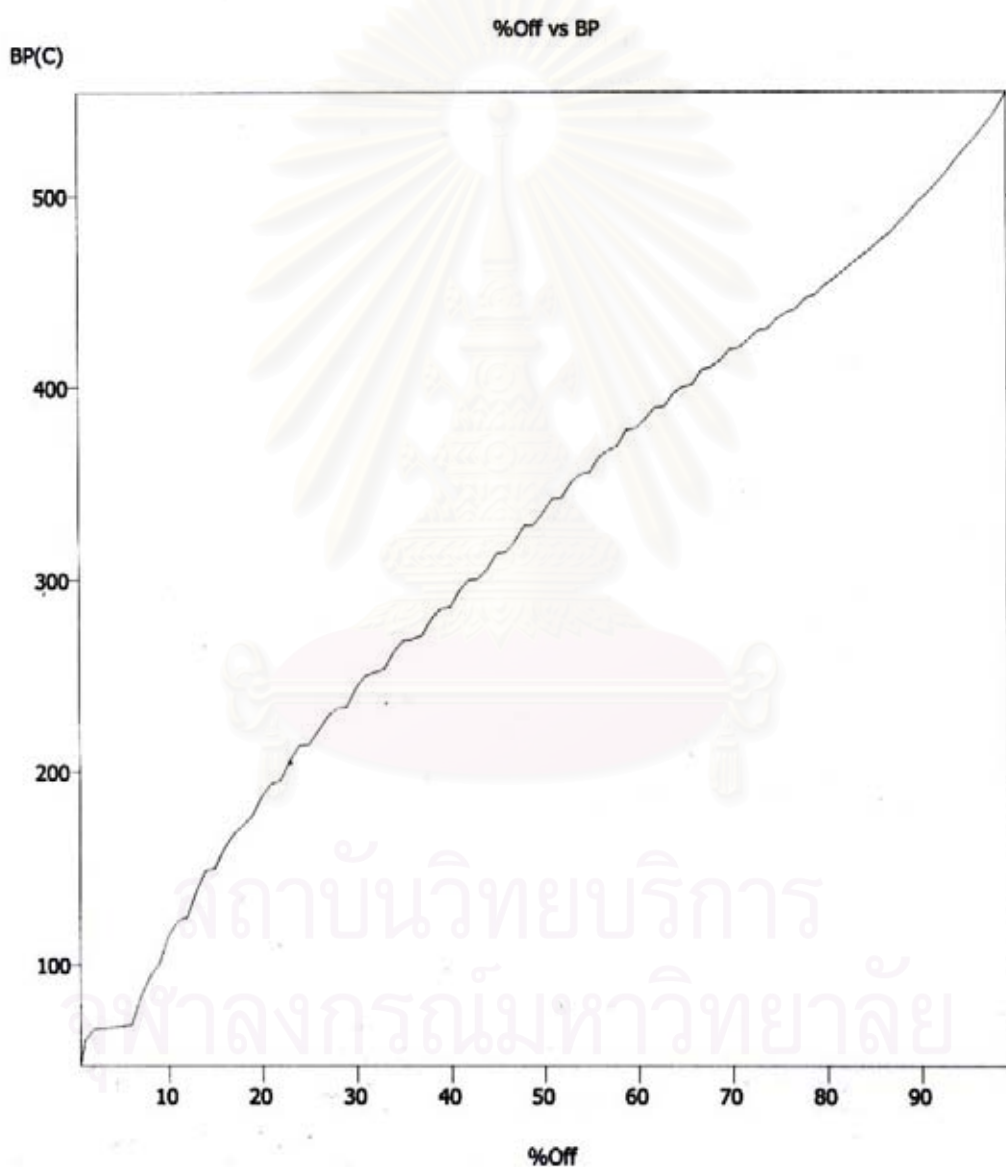
ผลิตภัณฑ์ของเหลวจะถูกนำมาละลายด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ในอัตราส่วน 1 ต่อ 100 โดยปริมาตร วิเคราะห์องค์ประกอบโดยใช้ Simulated Distillation Gas Chromatograph (SDGC) ตามมาตรฐาน ASTM D 2887 จะได้โครมาโทแกรมดังแสดงในรูปที่ ๑1



รูปที่ ๑1 ตัวอย่างโครมาโทแกรมการวิเคราะห์น้ำมันดิบจาก Simulated Distillation Gas Chromatograph

## 2. ตัวอย่างกราฟแสดงการกลั่นตามจุดเดือด

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

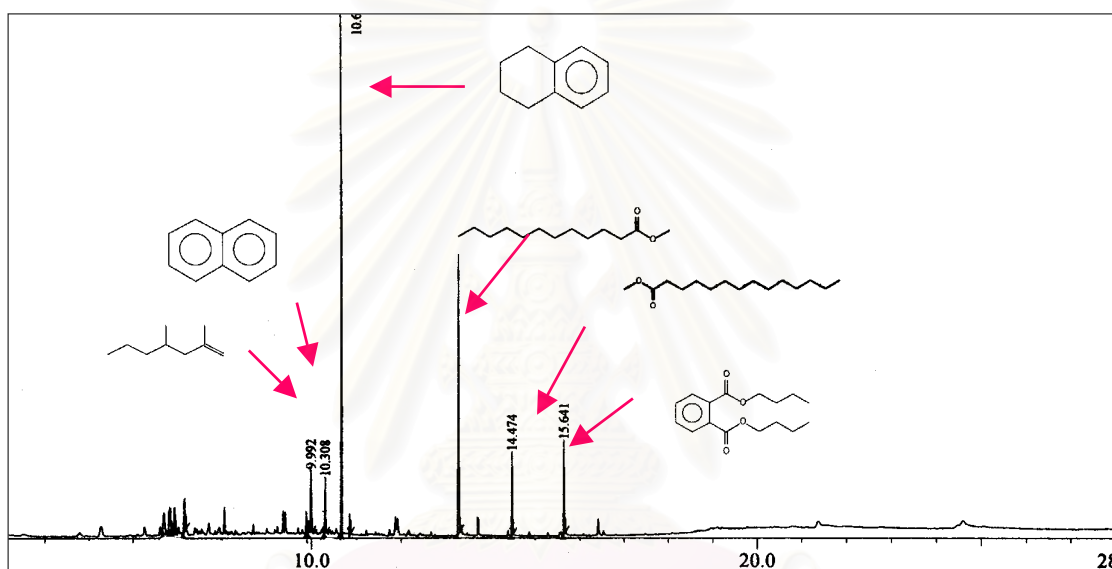


รูปที่ ค2 ตัวอย่างกราฟแสดงการกลั่นตามจุดเดือดของน้ำมันดิบจาก Simulated Distillation Gas Chromatograph

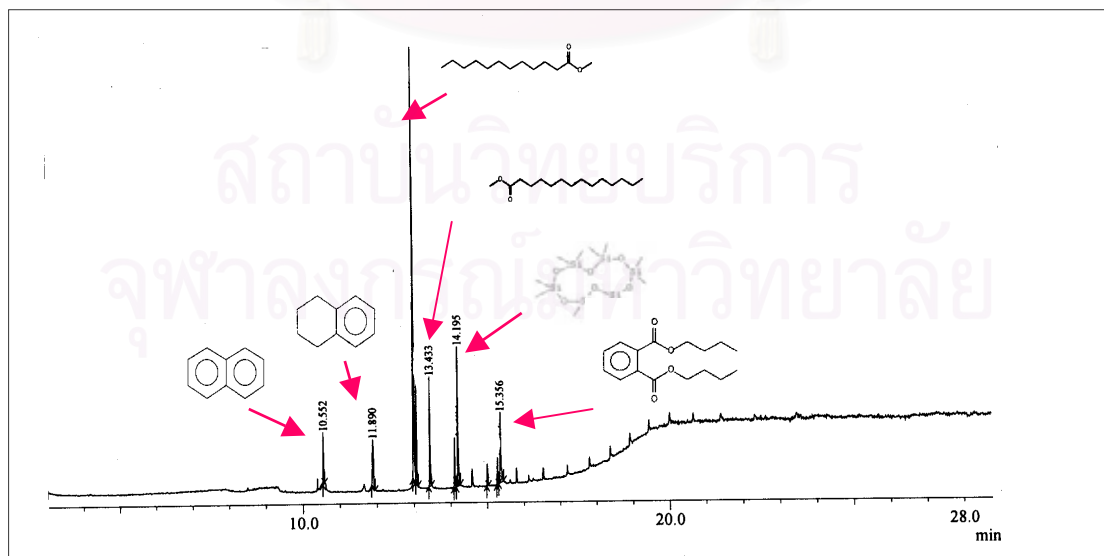
## ภาคผนวก ง

## การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของเหลวด้วย GC/MS

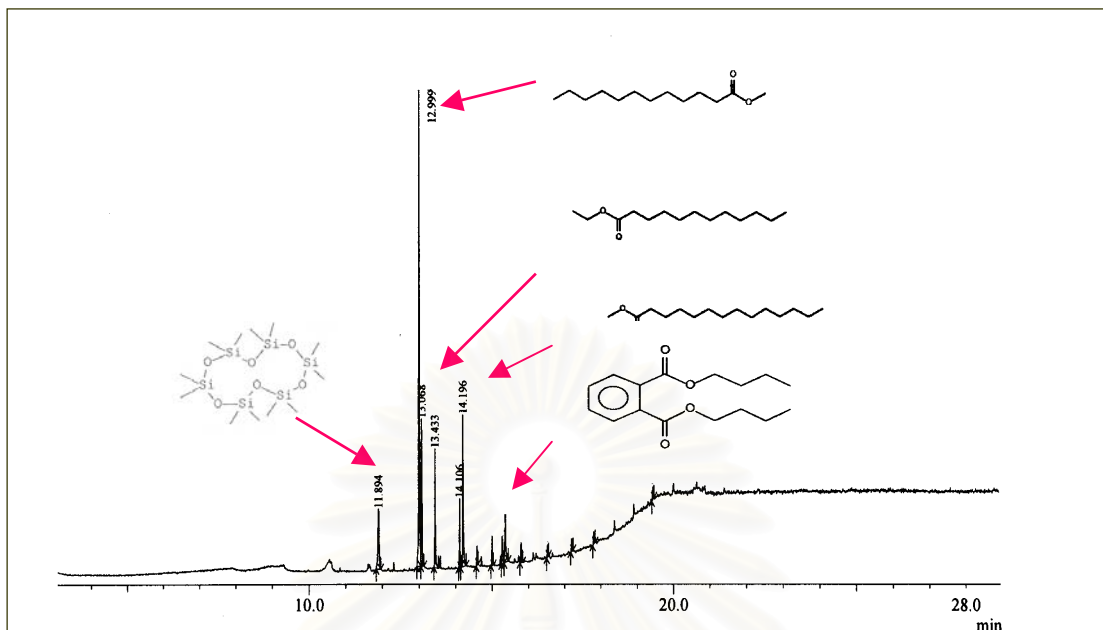
ตัวทำละลายใช้แล้วและผลิตภัณฑ์ของเหลวจะถูกนำมาละลายในคาร์บอนไดซัลไฟด์ในอัตรา 1 ส่วนใน 100 ส่วน โดยปริมาตร แล้ววิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟียี่ห้อ Shimadzu ที่อุณหภูมิเตา 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที แล้วเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตราเร็ว 20 องศาเซลเซียสต่อนาที เป็น 320 องศาเซลเซียส คงที่ไว้ 10 นาที



รูปที่ 1 ตัวอย่าง GC/MS โครมาโทแกรมการวิเคราะห์ตัวทำละลายเตตระลินที่ใช้แล้ว



รูปที่ 2 ตัวอย่าง GC/MS โครมาโทแกรมการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของเหลว



รูปที่ 3 ตัวอย่าง GC/MS โครมาโทแกรมการวิเคราะห์น้ำมันดิบ

รูปที่ 1-3 ตัวอย่าง GC/MS โครมาโทแกรมขององค์ประกอบต่างๆ ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแปรรูปถ่านหินและพลาสติกผสมให้เป็นของเหลว ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ร้อยละพลาสติกผสม 70 อัตราส่วนถ่านหินและพลาสติกผสมต่อตัวทำละลาย 3:2 ทำการทดลองในตัวทำละลายเตตระลิน ร้อยละ 100 เวลาในการทดลอง 30 นาที

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก จ

## ตารางผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน

ตาราง จ.1 การวิเคราะห์ Factor Effect Estimate และ SS ของร้อยละผลได้ของเหลวจากการแปรรูป  
ร่วมของถ่านหินและพลาสติกผสมจากการแปรรูปร่วมของถ่านหินและพลาสติกผสมให้เป็น  
ของเหลวด้วยตัวทำละลายภาวะเหนือวิกฤต

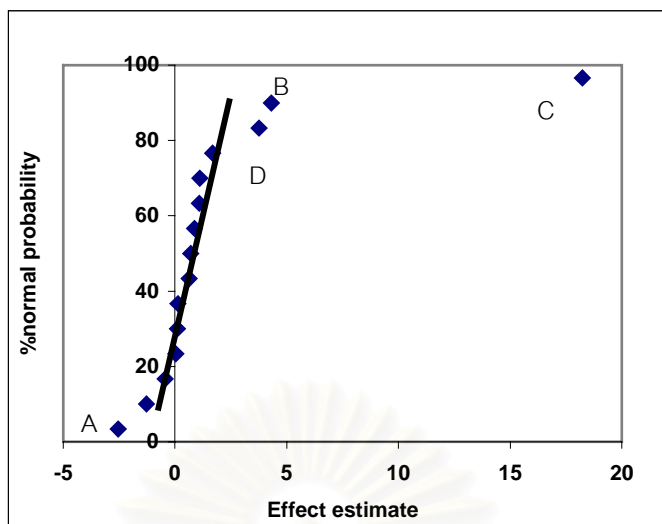
ตัวแปร	contrast	Effect Estimate	SS	%contribute
a	-35.8551	-4.482	80.349	0.111
b	17.3538	2.169	18.822	0.026
ab	-8.3429	-1.043	4.350	0.006
c	46.1358	5.767	133.032	0.183
ac	-14.3249	-1.791	12.825	0.018
bc	-5.3338	-0.667	1.778	0.002
abc	-6.0371	-0.755	2.278	0.003
d	72.5642	9.071	329.097	0.453
ad	3.2649	0.408	0.666	0.001
bd	3.0738	0.384	0.591	0.001
cd	9.5371	1.192	5.685	0.008
abd	45.5758	5.697	129.822	0.179
acd	-1.6049	-0.201	0.161	0.000
bcd	5.5062	0.688	1.895	0.003
abcd	9.0429	1.130	5.111	0.007

Normal Probability Plot ของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวสำหรับการแปรรูปร่วมของถ่านหิน และ  
พลาสติกผสม แสดงใน รูปที่ 4.1 (บทที่ 4)

- (A) แทน คุณหมุมิ
- (B) แทน อัตราส่วนถ่านหินและพลาสติกผสมต่อตัวทำละลาย
- (C) แทน ร้อยละพลาสติกผสม
- (D) แทน ร้อยละเตตระลิน

ตาราง ๑.2 การวิเคราะห์ Factor Effect Estimate และ SS ของร้อยละการเปลี่ยนแปลงรวมจากการแปรรูป  
 ร่วมของถ่านหินและพลาสติกผสมให้เป็นของเหลว ด้วยตัวทำละลายภาวะเหนือวิกฤต

ตัวแปร	contrast	Effect Estimate	SS	%contribute
a	-20.3150	-2.539	25.794	0.017
b	34.4350	4.304	74.111	0.049
ab	8.7650	1.096	4.802	0.003
c	145.8050	18.226	1328.694	0.874
ac	5.1150	0.639	1.635	0.001
bc	-3.5550	-0.444	0.790	0.001
abc	5.6750	0.709	2.013	0.001
d	30.1550	3.769	56.833	0.037
ad	8.8850	1.111	4.934	0.003
bd	0.3150	0.039	0.006	0.000
cd	1.0450	0.131	0.068	0.000
abd	13.4050	1.676	11.231	0.007
acd	0.7950	0.099	0.040	0.000
bcd	7.0450	0.881	3.102	0.002
abcd	-10.1250	-1.266	6.407	0.004



รูปที่ ๑1 Normal Probability Plot ของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวสำหรับการแปรรูปร่วมของ ถ่านหิน และพลาสติกผสม

ตาราง ที่ ๑.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละการเปลี่ยนถ่านหินและพลาสติกผสมจากการแปรรูปร่วมของถ่านหินและพลาสติกผสมให้เป็นของเหลว ด้วยตัวทำละลายภาวะเหนือวิกฤต

ปัจจัย	SS	DF	MS	FO	P-value	Fc
a	25.794	1	25.79	8.10	0.0159	4.84
b	74.111	1	74.11	23.27	0.0005	
c	1328.69	1	1328.69	417.26	0.0000	
d	56.83	1	56.83	17.85	0.0014	
Error	35.03	11	3.18			
Total	1520.46	15				

$F_{0.05,1,16} = 8.68$  ที่ช่วงความเชื่อมั่น ร้อยละ 95

จากตารางที่ ๑3 เมื่อพิจารณา  $F_o$  ของตัวแปรที่มากกว่า 4.84 ( $F_c$ ) พบว่าตัวแปรทุกตัวมีผลต่อร้อยละการเปลี่ยนรวม

## ภาคผนวก จ

## สภาวะในการทดลอง

ตาราง จ1 แสดงสภาวะในการทดลองการแปรรูปถ่านหินและพลาสติกผสมให้เป็นของเหลวด้วยตัวทำ

ละลายภาวะเหนือวิกฤต

ตัวทำละลายที่ใช้คือ เตตระลิน และตัวทำละลายผสมระหว่างเตตระลินร้อยละ 80 กับโทลูอีนร้อยละ 20

การทดลอง	ตัวแปร				ความดัน เมื่อ เวลาเริ่มต้น Psig.	ความดัน เมื่อ 30 นาที Psig.
	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส) (A)	สารตั้งต้น ต่อตัวทำ ละลาย (B)	ร้อยละ พลาสติก ผสม (C)	ร้อยละ เตตระ ลิน (D)		
1	430	3:2	40	80	1050	1890
2	460	3:2	40	80	1240	1580
3	430	1:1	40	80	1060	1790
4	460	1:1	40	80	2410	2580
5	430	3:2	70	80	870	1290
6	460	3:2	70	80	1820	2050
7	430	1:1	70	80	870	1150
8	460	1:1	70	80	1870	2140
9	430	3:2	40	100	1490	1870
10	460	3:2	40	100	2160	2300
11	430	1:1	40	100	1470	1850
12	460	1:1	40	100	1960	2870
13	430	3:2	70	100	790	1320
14	460	3:2	70	100	1930	2120
15	430	1:1	70	100	1190	1380
16	460	1:1	70	100	1290	1830



โทลูอีน มีอุณหภูมิวิกฤตเท่ากับ 318.7 องศาเซลเซียส ความดันวิกฤตเท่ากับ 4.11 เมกะพาสคัล (618.87 Psig.) เติตระลิน มี อุณหภูมิวิกฤตเท่ากับ 447.2 องศาเซลเซียส ความดันวิกฤตเท่ากับ 3.30 เมกะพาสคัล (499.8 Psig.)

การคำนวณสมบัติวิกฤตของตัวทำละลายผสมของโทลูอีน-เติตระลินนั้นได้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการคำนวณคือ HYSYS ver.2.4.1 ของบริษัท Hyprotech สำหรับการคำนวณใช้สมการสถานะของ Peng-Robinson ในการหา อุณหภูมิวิกฤต และความดันวิกฤต

พบว่า ตัวทำละลายเติตระลินร้อยละ 80 ผสมโทลูอีนร้อยละ 20 โดยปริมาตร มี อุณหภูมิวิกฤตเท่ากับ 422.60 องศาเซลเซียส และความดันวิกฤตเท่ากับ 3.81 เมกะพาสคัล (574.77 Psig.)



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ช

## ตารางผลการทดลอง

ตารางที่ ช1 ผลของอุณหภูมิ ที่มีต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแปรรูปถ่านหินและพลาสติกผสมให้เป็นของเหลว ทำการทดลอง ที่ อุณหภูมิ 430-460 องศาเซลเซียส ร้อยละพลาสติกผสม 70 อัตราส่วนถ่านหินและพลาสติกผสมต่อตัวทำละลาย 3:2 และทำการทดลองในตัวทำละลายเตตระลิน ร้อยละ 100

	อุณหภูมิ องศาเซลเซียส		
	430	445	460
<u>ร้อยละการเปลี่ยน</u>	85.32	85.05	84.34
<u>องค์ประกอบผลิตภัณฑ์ (ร้อยละ)</u>			
แก๊ส	23.95	24.16	29.56
ของเหลว	61.37	60.89	54.78
ของแข็ง	14.68	14.95	15.66
<u>องค์ประกอบของเหลว (ร้อยละ)</u>			
แก๊สโซลีน	1.00	3.00	5.00
คีโรซีน	82.00	83.00	85.00
แก๊สออยล์เบา	12.00	9.00	7.00
แก๊สออยล์	1.00	1.00	1.00
กากน้ำมัน	4.00	4.00	2.00
<u>องค์ประกอบแก๊ส (ร้อยละ)</u>			
CH <sub>4</sub>	49.56	49.27	48.16
CO <sub>2</sub>	13.08	10.85	9.95
Ethane	20.18	23.48	27.80
Propane	17.18	16.40	14.09

ตารางที่ ข2 ผลของร้อยละโดยปริมาตรของเตตระลิน ที่มีต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแปรรูปถ่านหิน และพลาสติกผสมให้เป็นของเหลว ทำการทดลอง ที่ อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ร้อย ละพลาสติกผสม 70 อัตราส่วนถ่านหินและพลาสติกผสมต่อตัวทำละลาย 3:2 และทำ การทดลองในตัวทำละลายเตตระลิน ร้อยละ 10-100

	ร้อยละโดยปริมาตรของเตตระลิน					
	10	30	50	70	90	100
<u>ร้อยละการเปลี่ยน</u>	76.11	77.87	78.60	82.20	85.43	85.32
<u>องค์ประกอบผลิตภัณฑ์ (ร้อยละ)</u>						
แก๊ส	52.91	48.19	38.08	35.66	26.59	23.95
ของเหลว	23.20	29.68	40.52	46.54	58.84	61.37
ของแข็ง	23.89	22.13	21.40	17.80	14.57	14.68
<u>องค์ประกอบของเหลว (ร้อยละ)</u>						
แก๊สโซลีน	8.00	6.00	4.00	1.00	10.00	1.00
คีโรซีน	59.00	69.00	73.00	79.00	80.00	82.00
แก๊สออยล์เบา	23.00	17.00	15.00	14.00	7.00	12.00
แก๊สออยล์	2.00	2.00	2.00	1.00	2.00	1.00
กากน้ำมัน	8.00	6.00	6.00	5.00	1.00	4.00
<u>องค์ประกอบแก๊ส (ร้อยละ)</u>						
CH <sub>4</sub>	0.00	27.23	39.34	44.85	42.10	49.56
CO <sub>2</sub>	33.51	30.06	27.84	14.17	14.93	13.08
Ethane	42.11	19.97	18.63	26.45	24.67	20.18
Propane	24.38	22.74	14.18	14.53	18.28	17.18

ตารางที่ ๓3 ผลของร้อยละโดยน้ำหนักของพลาสติกผสม ที่มีต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแปรรูปถ่านหินและพลาสติกผสมให้เป็นของเหลว ทำการทดลอง ที่ อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ร้อยละพลาสติกผสม 40-70 อัตราส่วนถ่านหินและพลาสติกผสมต่อตัวทำละลาย 1:1 และทำการทดลองในตัวทำละลายเตตระลิน ร้อยละ 100

	ร้อยละโดยปริมาตรพลาสติกผสม			
	40	55	70	100
<u>ร้อยละการเปลี่ยน</u>	69.28	79.49	89.43	99.03
<u>องค์ประกอบผลิตภัณฑ์ (ร้อยละ)</u>				
แก๊ส	18.96	18.35	26.01	15.13
ของเหลว	50.32	61.14	63.42	83.90
ของแข็ง	30.72	20.51	10.57	0.97
<u>องค์ประกอบของเหลว (ร้อยละ)</u>				
แก๊สโซลีน	2.00	4.00	1.00	5.00
คีโรซีน	89.00	79.00	61.00	46.00
แก๊สออยล์เบา	6.00	10.00	20.00	20.00
แก๊สออยล์	0.00	5.00	2.00	4.00
กากน้ำมัน	3.00	2.00	16.00	25.00
<u>องค์ประกอบแก๊ส (ร้อยละ)</u>				
CH <sub>4</sub>	34.96	19.87	32.78	32.96
CO <sub>2</sub>	34.77	37.64	23.39	0.27
Ethane	16.53	18.78	23.26	31.26
Propane	13.74	23.71	20.57	35.51

ตารางที่ ๗4 ผลของตัวทำละลายที่มีต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแปรรูปถ่านหินและพลาสติกผสมให้เป็นของเหลว ทำการทดลอง ที่ อุณหภูมิ 430-460 องศาเซลเซียส ร้อยละพลาสติกผสม 40 และ 70 อัตราส่วนถ่านหินและพลาสติกผสมต่อตัวทำละลาย 3:2 และทำการทดลองในตัวทำละลายเตตระลิน ร้อยละ 100

	ตัวทำละลาย			
	ตัวทำละลายเตตระลิน		ตัวทำละลายใช้แล้ว	
	40	70	40	70
ร้อยละพลาสติกผสม				
ร้อยละการเปลี่ยน	67.15	85.32	55.32	75.91
<u>องค์ประกอบผลิตภัณฑ์ (ร้อยละ)</u>				
แก๊ส	19.59	23.95	33.77	37.97
ของเหลว	47.56	61.37	21.55	37.94
ของแข็ง	32.85	14.68	44.68	24.09
<u>องค์ประกอบของเหลว (ร้อยละ)</u>				
แก๊สโซลีน	3.00	1.00	15.00	16.00
ดีโรซีน	88.00	82.00	64.00	56.00
แก๊สออกยล์เบา	5.00	12.00	13.00	18.00
แก๊สออกยล์	1.00	1.00	2.00	3.00
กากน้ำมัน	3.00	4.00	6.00	7.00
<u>องค์ประกอบแก๊ส (ร้อยละ)</u>				
CH <sub>4</sub>	38.33	49.56	38.01	48.64
CO <sub>2</sub>	27.32	13.08	31.56	17.10
Ethane	20.81	20.18	22.63	22.70
Propane	13.54	17.18	7.80	11.56

ตารางที่ ๗5 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแปรรูปถ่านหินและพลาสติกผสมให้เป็นของเหลว

	ตัวเร่งปฏิกิริยา(พลาสติกผสม)			
	ไม่มี	Fe <sub>2</sub> S <sub>3</sub> 2.5%	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 2.5%	Fe/AC 5%
<u>ร้อยละพลาสติกผสม</u>				
<u>ร้อยละการเปลี่ยน</u>	85.32	88.83	86.92	88.07
<u>องค์ประกอบผลิตภัณฑ์ (ร้อยละ)</u>				
แก๊ส	23.95	19.82	21.59	24.54
ของเหลว	61.37	69.01	65.33	63.53
ของแข็ง	14.68	11.17	13.08	11.93
<u>องค์ประกอบของเหลว (ร้อยละ)</u>				
แก๊สโซลีน	1.00	7.00	6.00	5.00
คีโรซีน	82.00	75.00	80.00	77.00
แก๊สออยล์เบา	12.00	11.00	10.00	11.00
แก๊สออยล์	1.00	2.00	1.00	2.00
กากน้ำมัน	4.00	5.00	3.00	5.00
<u>องค์ประกอบแก๊ส (ร้อยละ)</u>				
CH <sub>4</sub>	49.56	33.24	31.47	30.26
CO <sub>2</sub>	13.08	23.82	23.38	24.16
Ethane	20.18	22.48	18.74	21.55
Propane	17.18	20.46	26.41	24.03

ตารางที่ ข6 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแปรรูปถ่านหินและขยะพลาสติกให้เป็นของเหลว

	ตัวเร่งปฏิกิริยา(ขยะพลาสติก)			
	ไม่มี	Fe2S3 2.5%	Fe2O3 2.5%	Fe/AC 5%
ร้อยละพลาสติกผสม				
<u>ร้อยละการเปลี่ยน</u>	86.44	85.43	88.54	88.67
<u>องค์ประกอบผลิตภัณฑ์ (ร้อยละ)</u>				
แก๊ส	29.85	15.86	19.49	25.63
ของเหลว	56.59	69.57	69.05	63.04
ของแข็ง	13.56	14.57	11.46	11.33
<u>องค์ประกอบของเหลว (ร้อยละ)</u>				
แก๊สโซลีน	8.00	*	*	*
คีโรซีน	74.00	*	*	*
แก๊สออยล์เบา	11.00	*	*	*
แก๊สออยล์	2.00	*	*	*
กากน้ำมัน	5.00	*	*	*
		*	*	*
<u>องค์ประกอบแก๊ส (ร้อยละ)</u>				
CH <sub>4</sub>	48.49	*	*	*
CO <sub>2</sub>	15.90	*	*	*
Ethane	23.09	*	*	*
Propane	12.52	*	*	*

ตารางที่ ข(5-6) ทำการทดลอง ที่ อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ร้อยละพลาสติกผสม 70 อัตราส่วนถ่านหินและพลาสติกผสมต่อตัวทำละลาย 3:2 และทำการทดลองในตัวทำละลายเตตระลิน ร้อยละ 100

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวนิรมล ปัญญาวงศ์ เกิดวันที่ 2 ธันวาคม พ.ศ.2522 ที่จังหวัดลำปาง สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีการศึกษา 2544 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2545



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย